건설기술혁신사업 최종보고서

R&D /
04핵심기술A02-05

친환경 4S

(Safety, Silence, aeSthetic and user Satisfaction guaranteed)

포장시스템 개발 연구

2007. 8. 19.

주관연구기관 / 중앙대학교
위탁연구기관 / 한국도로공사
홍익대학교
참 여 기 업 / 다사건설(주)

건 설 교 통 부
한국건설교통기술평가원

Construction & Transportation R&D Report

제 출 문

건설교통부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 “친환경 4S(Safety, Silent, aeSthetic, and user Satisfaction guaranteed) 포장시스템 개발 연구”의 최종보고서로 제출합니다.

2007. 8. 19.

주관연구기관 : 중앙대학교
대표 조 윤 호
위탁연구기관 : 한국도로공사
홍익대학교
참여기업 : 다사건설(주)
대표 김 정 환

■ 총 괄 연 구 책 임 자	/ 수석연구원	조 윤 호	담 당 업 무	
■ 주관연구기관 참여연구원	/ 선임연구원	오 재 일	/ 연구보조원	성 병 민
	/ 선임연구원	김 경 주	/ 연구보조원	이 명 찬
	/ 선임연구원	김 인 태	/ 연구보조원	임 수 혁
	/ 선임연구원	김 지 원	/ 연구보조원	심 재 필
	/ 선임연구원	곽 호 영	/ 연구보조원	정 길 수
	/ 선임연구원	이 승 우	/ 연구보조원	차 경 재
	/ 선임연구원	장 승 환	/ 연구보조원	박 미 영
	/ 연구보조원	류 성 우	/ 연구보조원	이 상 미
	/ 연구보조원	오 승 환	/ 연구보조원	변 기 택
	/ 연구보조원	지 승 협	/ 연구보조원	박 상 우
	/ 연구보조원	김 석	/ 연구보조원	정 지 규
	/ 연구보조원	우 창 완	/ 연구보조원	한 승 훈
	/ 연구보조원	황 은 식	/ 연구보조원	정 대 권
	/ 연구보조원	김 효 성	/ 연구보조원	이 현 호
■ 협동연구기관 참여연구원	/ 선임연구원	한 승 환	/ 연 구 원	홍 승 호
(한국도로공사)	/ 연 구 원	문 성 호	/ 연 구 원	손 덕 수
	/ 연 구 원	서 영 국	/ 연 구 원	강 민 수
	/ 연 구 원	정 철		
■ 협동연구기관 참여연구원	/ 선임연구원	박 종 원	/ 연구보조원	강 승 민
(흥익대학교)	/ 선임연구원	양 성 철	/ 연구보조원	황 인 규

요 약 문

Ⅰ. 제 목

친환경 4S(Safety, silent, aeSthetic, and user Satisfaction guaranteed) 포장 시스템 개발 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

기존의 포장시스템은 도로 주행 시 발생되는 소음, 우천 시의 주행 안전성 미비 및 주변 경관과 어울리지 못하는 점 등의 문제점을 지니고 있다. 환경부 발표에 따르면 소음문제가 전체 민원의 88.3%였으며, 도로 교통안전관리공단에서는 빗길 미끄러짐에 의한 교통사고가 도로 사고 원인 중 약 30%를 차지하고 있다. 본 연구에서는 경험에 의존한 기존 포장의 문제점을 해결하기 위해 새로운 재료의 개발 및 시공시 품질관리 기준을 제시한다. 새로운 형태의 배수성 및 투수성 포장 시스템을 개발하여 국내 포장의 수준을 한 단계 발전시켜 전반적인 도로환경을 개선한다. 이를 통해 저소음의 도로를 제공하여 이용자의 편의를 높이고, 교통사고 발생을 억제하여 사회적 비용을 줄이는 것을 목적으로 한다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

문헌 조사를 통하여 다양한 국·내외 친환경적인 포장과 관련된 연구 사례를 검토하고 장·단점을 분석하여 각 형식별 배합설계, 시공사례, 설계법 등을 고찰한다. 이를 통해 신포장 시스템을 선정하고 적용 가능한 재료를 개발 또는 도입하여 기본적인 실내 물성실험을 실시한다. 유한요소해석을 통해 신포장 공법의 구조적 거동을 해석하여 다양한 하중에서 포장이 갖는 역학적인 특성 추정능력을 향상시킨다. 실내 파손 촉진 실험에서는 재료특성을 검증하고 단면의 특성에 따라 공용성

을 예측하고자 한다. 실내외 실험을 통해 현장 시험시공을 진행하고 공법의 기술적 타당성을 검토한다. 환경하중의 모사가 가능한 HES(HEART Environment Simulation) 시험기와 시험시공 시 소음측정에 활용될 CPX(Closed-Proximity Method) 트레일러를 설계하여 보다 정확한 포장의 공용성, 환경 유해성 등을 평가한다.

시험 시공에서는 시공 단면설계, 시공 기법 및 장비의 선정, 시공 중 교통 통제 처리 방안 제시 등을 실시하고, 현장 공용성 평가를 위하여, 투수성(현장 투수성 측정 장비), 소음(도로소음 측정 장비), 안정성(SN), 지지력(FWD), 환경 유해성 평가(비점오염 평가)를 실시한다. 신공법의 유지관리 방안을 선정하여 투수기능의 확보 방안을 연구한다.

설계 아키텍처 기본 설계를 위하여 경험적 설계 프로세스 제안, ME(Mechanistic & Empirical)설계법 기본 흐름도를 제안하고 생애주기 및 유지보수시기를 고려한 평가 모델을 개발하여 친환경 4S 포장 시스템의 경제성을 분석한다.

Ⅳ. 연구개발결과

친환경 4S 포장 시스템의 개발을 위한 3년간의 연구 수행 결과는 다음과 같다.

■ 시멘트(7%)+플라이 애쉬(25%)+팽창재(10%)를 혼합한 재료배합을 통해 저수축 불투수 CTB를 개발하였고, 굵은 골재 최대치수 25mm, 단위 시멘트량 7%, 잔골재율 10~15%, 물/시멘트비 45~55%를 혼합하여 투수성을 만족하는 저수축 투수 CTB를 개발하였다. 압축강도는 두 가지 경우 기존 시방을 충족하였고, 건조수축 실험결과, 저수축 투수 CTB가 우수한 결과를 보였으며 동결융해 저항성도 양호한 것으로 확인되었다. 비용측면에서 불투수/투수 CTB가 일반린 보다 각각 20%정도 증가하였다.

■ 개질바인더의 작업성 개선을 위해 두 가지 종류의 Wax를 사용하여 물리적 특성을 평가하였고, 여기서 작업성 개선과 더불어 고온특성도 향상시켜주는 Wax type Ⅰ을 선정하였다. 선정된 Wax type Ⅰ에 SBS, SBR, 폐타이어가루(CRM 120

mesh)를 혼입한 개질바인더를 제조하여 물리적 특성을 평가한 결과, CRM이 우수하여 2차, 3차 시험시공의 4S 용 재료로 사용하였다.

■ 접근성 도로를 위해 영국 기준(BS7533)을 참고하여 블록의 기본시방(안)을 제시하였으며 다양한 배합 조건에서 강도 시험을 실시하여 재료 및 혼화제 종류에 따른 블록의 물리적 거동을 살펴보았다.

■ 정확한 해석을 위해 3차원 유한요소를 이용하였으며 구조해석 결과 고속국도는 투수 AP 10cm, 저수축 CTB 15cm, 일반국도는 투수 AP 5cm, 투수 CTB 10cm를 최적 단면으로 제안하였다. 그리고 선형 FEM 해석을 바탕으로 FWD결과와 비교하여 각층의 물성치를 추정하였으며, 처짐의 민감도를 분석한 결과 FWD 테스트에 영향을 가장 많이 미치는 것은 노상의 탄성계수였다.

■ 도로의 비점오염원에 대하여 문헌 조사 결과, 국내의 각 오염물질별 연간 발생부하량이 외국에 비해 높게 나타났으며 4S 포장의 투수 시스템의 우수 투수 결과 포장층의 자연정화에 의한 오염물질의 농도 및 질량의 감소의 가능성을 확인할 수 있었다.

■ 휠트래킹 시험장비인 HWLS를 이용하여 투·배수성 포장을 제작하고 공용성을 평가하였으며 반복·정적 하중재하 실험결과를 통하여 강도감소계수 및 H계수, R_D 값을 제안하였다. 결과적으로 30℃에서 Porous AP 표층과 BB, Porous AP 표층과 저수축 투수 CTB 가 공용성이 우수하였다. 60℃에서 가장 좋은 공용성을 나타낸 것은 Porous AP 표층과 저수축 불투수 CTB로 구성된 단면이었다.

■ 한국도로공사의 포장가속기를 이용하여 4S 포장을 시험한 결과, 일반 밀입도 아스팔트 포장보다 배수성 아스팔트 포장의 러팅 저항성이 더 우수하였고, 배수성 아스팔트 포장에 포장가속시험시설을 60,000회 이상을 공용했을 시에도 투수성에 문제가 없었다.

■ 문헌 조사를 통해 4S 포장에 적합한 환경하중모사시험기(HES)를 개발하였다.

윤하중, 온도하중, 항온항습 및 강우 모사를 할 수 있도록 되어 있으며 검증 실험을 통해 4S 포장의 성능을 평가할 수 있는 것임을 확인하였다.

■ HEART CPX 트레일러를 실시 설계 및 제작하였고 이를 기존의 실험 장비를 통한 측정값들과 비교・검증함으로써 보정하는 작업을 수행하였다. 장비의 검증 이후 투・배수성 포장을 대상으로 한 측정 계획을 수립한 후 실제 측정을 통해 자료를 수집하였다.

■ 역학적 경험적 설계법에 사용되는 세부 모듈들에 대하여 살펴보았고 이를 바탕으로 4S 포장의 설계 방법의 카달로그 단면을 제안하였다.

■ 경제성 평가로 많이 사용되는 생애주기비용 분석 결과 4S포장은 일반 아스팔트 포장과 같이 10년 주기로 덧씌우기를 생애주기 비용을 토대로 최소 공용성을 10년 주기 덧씌우기와 20년째 CTB 교체 시 일반 아스팔트 포장과 비교하여 경제성이 있는 것으로 판단되었다.

■ 제 1차 현장시험시공을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

FWD 실험을 통해 세 단면 중앙부에서의 처짐량을 비교해 보았을 때 투수AP/불투수CTB 단면의 처짐량이 가장 적게 발생하였고 예상과 달리 투수AP/투수CTB 단면의 처짐량이 일반아스팔트 단면보다 더 큰 처짐량을 보였다. 이는 실험시기가 겨울철이라는 특성과, 일부 투수CTB 구간에서 발생한 탈리 현상이 원인으로 판단된다. 국・내외 현재 공용중인 일반도로의 처짐량을 비교해본 결과 본 연구진이 제안하고 실측한 친환경 4S 포장의 처짐량이 교통량이 적은 지방도나 시가지 도로에 적용되지 못할 정도로 큰 값이 아님을 알 수 있었다. 또한, 노상부분(지오폰 7번 위치)의 처짐량을 살펴보았을 때는 일반아스팔트 단면에 비해 노상 중량함수비가 3~4% 높음에도 불구하고 더 적은 처짐량을 나타냈다.

- 코아 채취를 통하여 단면별 부착정도를 육안으로 판단하였다. 일반아스팔트 단면을 제외하고는 부착이 되어있지 않았다. 특히 투수CTB의 경우에는 일부 공시체가 파쇄 되는 경우도 발생하였다.
- 현장투수시험기를 이용하여 단면별 투수실험을 실시하여 투수AP/투수CTB 단면

및 투수AP/불투수CTB 단면에서 기준에 합당한 결과를 나타내었다. 또한 배수형태 및 방향측정을 통해서 각 단면별 배수특성을 육안으로 확인할 있었다.
- BPT 장비를 이용하여 각 단면별 미끄럼저항성을 측정하였다, 측정 결과 투수AP 단면이 일반아스팔트 단면보다 습윤 시와 건조 시의 초기 미끄럼저항성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

■ 제 2차 현장시험시공을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.
- 시험 시공 전 예비실험을 통하여 비닐 양생이 저수축 투수/불투수CTB 내구성 향상에 기여함을 알 수 있었다. OTC(Optimum Tack coating Content) 실험을 통해 저수축 투수CTB의 투수능력과 부착강도를 조정함으로써, 연구하여 적정한 수준의 투수능력과 부착강도를 얻을 수 있었다.
- 현장투수시험기를 이용한 실험에서, 양호한 투수성능을 검증하였고, 호스를 이용한 강우모사 실험을 통해 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB 배수 능력을 평가한 결과, 포장층의 Water Capacity를 초과할 경우 표면수가 급격히 증가함을 알 수 있었다.
- TDR를 이용한 노상 중량함수비 측정 결과, 투수AP/투수CTB 구간에서 강우모사 실험 이후 함수비가 증가하는 모습을 관측할 수 있었다.
- FWD 측정 결과, 배수시설을 통한 배수가 포장체의 구조적 지지력에 기여하는 것으로 판단되며 본 연구에서 제시하고 있는 포장 시스템이 상대적으로 높은 처짐량에도 불구하고 안전한 포장 형식으로 자리 잡을 수 있음을 보여주었다.
- 미끄럼저항성 측정 결과, 투수AP/투수CTB 단면의 미끄럼저항성이 일반아스팔트 단면보다 약 10정도 BPN이 적게 측정되었다. 아스팔트 혼합물의 작업성능 향상을 위해 사용된 WAX가 주원인으로 판단되며, 향후 보완 연구가 필요한 것으로 판단된다.
- 공용 8개월 지속 후에 평가를 실시하였다. 실시결과 일반구간과 비교하여 처짐저항성과 투수성 모두 우수함을 확인하였다.

■ 제 3차 현장시험시공을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.
- 1차 2차 시험시공 결과의 중 비닐양생법의 우수성, TDR, FWD, 미끄럼 저항의 각 단면별 경향을 재확인하였다.

- 살수시험기를 이용한 강우모사 실험을 통해 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB 배수 방향과 능력을 평가하여 Water Capacity를 초과할 경우 표면수가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 초기 표면수 발생 강우강도는 50mm/hr 으로 기록적 폭우를 제외하고는 거의 대부분의 경우에 수막현상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구의 성과로 제시될 친환경 4S 포장 시스템의 아름답고 안전한 포장(4S-Ⅲ)은 접근성이 강조되는 도로, 공원이나 주택단지 내의 포장, 항만 하역장이나 공항 포장으로 활용이 가능하다. 조용하고 안전한 포장인 4S-Ⅰ&Ⅱ는 고속국도와 일반국도의 본선구간 또는 도심부 대규모 주택단지 및 인접도로 포장으로 활용 가능하다. 또한 기능성, 친환경성, 내구성을 고려한 포장 공법으로써 도로의 등급에 따른 최적 포장 형식 결정을 가능케 해준다.

SUMMARY

I. Title

Development of the eco-friendly 4S(Safe, Silent, aeSthetic, and user Satisfaction guaranteed) pavement system

Ⅱ. Background and research purpose

There have been a few issues raised to improve current highway and road pavement systems in Korea. Those issues are (1) driving noise from pavement, (2) driving safety against hydroplaning, (3) frequent maintenance, and (4) scenically inharmonic pavement with surrounding environment. According to the announcement of the Department of Environment, 88.3% of petition submitted to the Department is related to the driving noise from highway and local road. According to the traffic accident statistics, 30% of traffic accidents are caused by the hydroplaning during the rainy day. We are interested in developing new pavement systems and new materials to accommodate aforementioned issues. Our research goal is to make porous and/or permeable pavement system for safe and silent highway and to upgrade block pavement (paver) for aesthetic and safe road. Those pavement systems will eventually escalate the satisfaction of pavement users. Our research will also develop QC/QA guidelines for new pavement systems that are suitable to the specific circumstance in Korea. Our effort will improve road conditions, will optimize budget expenditures, will minimize traffic accidents, and will eventually reduce social cost for domestic road and highway systems.

Ⅲ. Scope of the Study

First, we will focus on the literature review to gather foreign research experience related to eco-friendly pavement systems. We will investigate foreign outcomes - including the mix design, construction issues, and design guide - to learn their pavement systems. Afterward, we will define the best possible new pavement systems and suitable material. New pavement system and its material will be evaluated with laboratory test and structural analysis, including accelerated pavement testing and finite element analysis. These research evaluations help us to predict material characteristics and performance of new pavement system.

The environmental simulator (applicable both environmental and wheel loads to scaled pavement samples) and the driving noise testing equipment (trailer type noise measuring system using closed-proximity method) will be developed to validate the performance of new pavement system and material.

Before the execution of the experimental field construction, a cross-section design, a selection of construction techniques and equipments, and a proposal of traffic control plans were performed. For the field performance evaluation, permeability, noise, stability, bearing capacity and environmental harmfulness were tested. A new technique was selected and then a permeability maintaining plan should be studied.

Also, the catalogue cross-section for construction, which is based on ME Design concept, will be suggested. It is necessary to perform an economic analysis of the environmentally friendly 4S pavement system considering life cycle and maintenance timings.

Finally, through a couple of experimental field constructions and to put data obtained from many experiments, a construction specific will be established.

Ⅳ. Conclusions

Our outcomes through research for three years are summarized as followings;

■ Low shrinkage permeable and impermeable CTB development using fly ash and expanding agent. These new pavement materials demonstrated good performance in terms of existing QC/QA requirement, including compressive strength, dry shrinkage test, and freeze/thaw test. The cost of new material is only 20% more expensive than existing lean concrete base material.

■ New polymer modified asphalt binder for porous asphalt mix using SBS, SBR, and wax. Specially, the wax made binder performance better than existing one in terms of stability, viscosity, and workability. This material was applied to 2nd, 3rd field construction.

■ New block pavement (paver) design and construction guideline was suggested based on the British standard. We also conducted uni-directional compression test of the paver block with respect to various mix design to set up quality control process.

■ New pavement systems are defined for high traffic volume highways using 10cm porous asphalt with new binder and low shrinkage impermeable CTB and for medium traffic volume highways using 5cm porous asphalt with new binder and low shrinkage permeable CTB. The thickness design was determined by 3D finite element methods. By comparison between linear FEM analyses and FWD results, the properties of each layer were backcalulated. The modulus of subgrade was the most critical factor affecting FWD tests.

■ According to the literature survey on roadside non-point pollution source, levels of each pollutant measured in Korea are higher than those in advanced

countries. From the laboratory test, our new pavement system can reduce the level of pollutant dissolved in rain by natural purification process through the permeable pavement material

■ New pavement systems is evaluated by HWLS and suggested the coefficients of stiffness decreasing, H, RD. And the pavement system controlled seriously as same as in the field was reconstructed at the KALES and tested with a pavement accelerator in order to evaluate the structural resistance and its functionality. It was revealed that the rutting resistance of the porous asphalt pavement excelled that of the regular asphalt pavement and 60,000 applications of the pavement accelerator had no impact on the permeability of the porous pavement

■ Environmental simulator through literature survey and design was developed. Continuously, this equipment will be tested and validated.

■ According to the research results of the previous year, the HEART CPX trailer was developed and evaluated properly. It will be widely utilized to measure noise from various pavement surface types.

■ The modules used in ME design was investigated in detail and based on this investigation, the relationship with the 4S design procedure was studied. The input values included material propertied, environmental loading, and traffic loading. Catalogue cross-section for case by case was suggested.

■ The result of LCCA used frequently for economic evaluation shows that the 4S pavement is economical when the maintenance plan of every 10-year overlay is applied as regular asphalt pavements does or when the maintenance plan of CTB replacement after 20 years is applied. The LCCA result illustrates that user costs decreased due to the reduction of accidents and noise.

■ The results of the first experimental field construction:

- It was found that overall deflections of the regular asphalt pavement were bigger than those of the other two pavement sections, even though its saturation rate was the lowest among three sections. It depicts that the modulus of subgrade itself could be low due to high moisture contents, however, by employing high-stiffness layers to protect weak subgrade, more stable and strong pavement systems can be successfully established.

- The characteristics of drainage pattern and direction were observed for the cross sections of permeable AP/impermeable CTB, permeable AP/permeable CTB, and regular asphalt pavement. About 6 liters of water was poured at the location of 0.3m away from the road side. The drainage pattern and direction for permeable AP surface/impermeable CTB base layer were that water passing through permeable AP surface layer could not go through impermeable CTB base layer and exhibited its direction change to drain to the side. The same tests were carried out at the cross sections of permeable AP surface/permeable CTB base and regular asphalt pavement. The cross section of permeable AP surface/permeable CTB base had no water draining to the side. This shows that water passed through the permeable CTB base layer directly. Lastly, the cross section of regular asphalt was observed by a visual inspection to have the water not permeating through the inside but draining along the transverse slope.

- The evaluation of permeability found that both cross sections of permeable AP surface/permeable CTB base and permeable AP surface/impermeable CTB base satisfied the standard for the coefficient of permeability

- Through BPT, the friction resistances are two test sections of 4S higher than HMA section. The thicknesses of test sections satisfied the construction guide. Bonding condition is bad at the 4S sections.

■ The results of the second experimental field construction:

- A vinyl curing for permeable CTB, impermeable CTB is good for durability. Through OTC test, it was founded that the amounts of tack-coating is related to permeability and bonding strength. Therefore, we used proper amounts of tack-coating and got good performance.
- By the portable equipment for permeability test, permeability of 4S test sections was good. it was evaluated the drainage pattern and direction for permeable AP/impermeable CTB and permeable AP/permeable CTB by hose test to make a tracing of rain. If the water is over water capacity of 4S, Surface water will be increasing so fast.
- Through water contents test of subgrade by TDR, water contents was increasing at permeable AP/permeable CTB section after that test. Therefore, we could calculate time which water arrived to subgrade.
- Despite of relatively higher deformation at 4S section, FWD test result indirectly showed that drainage system helped structural support and it was safe from a point of structure.
- The friction resistance was that BPN at permeable AP/permeable CTB was 10 BPN lower than that at HMA.
- We found that performance went faster bad than expected. Especially, permeable AP/permeable CTB didn't stand against high traffic volume.

■ The results of the third experimental field construction:

- We confirmed again facts such as good performance of vinyl curing, trends of TDR, FWD and friction resistance.
- The drainage pattern and direction for permeable AP/impermeable CTB and permeable AP/permeable CTB was evaluated by hose similar to a squirt of water. Also, if the water is over water capacity of 4S, which is equivalent to 50 mm/hr rainfall intensity, surface water will be increasing so fast to cause hydroplaning.

Ⅴ. Application plan for research results

Research results from eco-friendly 4S pavement system can be applied to various levels of road and highway. Aesthetic and safe block pavement is applicable to local roads - including residential road, parking lot, port depot yard, and airport taxiway - where access is more important. Silent and safe porous/permeable pavement system is applicable to expressway, highway and major city road where traffic flow is more important. For superhighway research proposal which is on going project, our 4S concepts were applied with a little modification such as porous asphalt on CRCP(continuously reinforced concrete pavement). After completion of our research, we can provide selection criteria of pavement system to the pavement engineers, in addition to conventional asphalt and Portland cement concrete pavement. Our research makes pavement engineers to choose best possible pavement system suitable to the user demands, with respect to function, ecology, economy and easy maintenance.

<제목 차례>

제 1 장 서 론 ····· 1

1절. 연구개발 목표 및 내용 ····· 1
1. 연구 배경 및 목표 ····· 1
2. 연구 내용 ····· 4

2절. 연차별 연구개발 목표 및 내용 ····· 8
1. 1차년도 연구개발 목표 ····· 8
2. 2차년도 연구개발 목표 ····· 10
3. 3차년도 연구개발 목표 ····· 12

제 2 장 국내외 기술개발 현황 ····· 15

1절. 국내 관련 연구 현황 ····· 16
1. 배수성 포장 ····· 16
2. 시멘트 안정처리 기층(Cement Treated Base ; 이하 CTB) ····· 28
3. 투수 콘크리트 ····· 31
4. 페이버 포장 ····· 36
5. 저소음 포장 ····· 41
6. 물에 의한 노상의 거동 특성에 관한 연구 ····· 50
7. 요약 ····· 55

2절. 국외 관련 연구 현황 ····· 57
1. 투·배수성 포장 ····· 57
2. 시멘트 안정처리 기층 ····· 85
3. 투수 콘크리트 ····· 89
4. 페이버 ····· 101
5. 저소음 포장 ····· 107

6. 물에 의한 노상의 거동 특성에 관한 연구 ····· 117
7. 요약 ····· 138

제 3 장 연구수행 내용 및 결과 ····· 141

1절. 연구개발 추진전략 및 방법 ····· 141

2절. 재료개발 ····· 145
1. 저수축 CTB 재료개발 ····· 146
2. 배수성 아스팔트 재료 개발 ····· 194
3. 페이버 포장 ····· 253

3절. 유한요소해석 ····· 303
1. 유한요소법(FEM)을 통한 포장해석 배경 ····· 303
2. 유한요소 모형의 종류에 따른 포장 해석 ····· 304
3. 4S 포장의 구조해석 모형 개발 ····· 311
4. 4S 포장의 최적 단면 제안 ····· 329
5. 온도 및 하중에 의한 반사균열 확인 ····· 337
6. FWD 데이터와의 비교 분석 ····· 344
7. 요약 ····· 359

4절. 실내 파손촉진 장비를 이용한 4S 포장의 공용성 평가 ····· 361
1. HWLS를 이용한 공용성 평가 ····· 361
2. 포장가속시험기를 이용한 공용성 평가 ····· 405

5절. 4S 포장의 환경가치 평가 ····· 441
1. 국내의 비점오염원 ····· 441
2. 도로 발생 비점오염원 특성 및 기존의 처리 방안 ····· 444
3. 도로발생 비점오염원 측정 및 특성 분석 ····· 446
4. 4S 포장 시스템의 환경 가치 평가 ····· 449

5. 요약 ····· 450

6절. 친환경 4S 포장 공용성 평가를 위한 시작품 제작 ····· 451
1. 환경모사시험기(HEART Environmental Simulator) 제작 ····· 451
2. HEART CPX(Close-Proximity Method) 트레일러 제작 ····· 500
3. 요약 ····· 555

7절. 현장 시험 시공 및 유지보수공법 ····· 557
1. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 제1차 현장 시험시공 ····· 557
2. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 제2차 현장 시험시공 ····· 615
3. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 3차 현장 시험시공 ····· 658
4. 투·배수성 포장의 유지보수공법 선정 및 타당성 검토 ····· 693
5. 요약 ····· 704

8절. 설계 아키텍처 제안 ····· 707
1. 설계 프로세스 제안 ····· 707
2. 역학적-경험적 설계 ····· 723
3. 구조 해석 ····· 724
4. 공용성 예측 모형 ····· 724
5. 공용성 평가 및 생애주기비용 분석 ····· 727
6. 4S 포장의 카달로그 설계 ····· 730
7. 요약 ····· 741

9 절 경제성 평가 ····· 743
1. 상황의 설정 ····· 744
2. 분석기간 및 포장 설계 대안의 수립 ····· 745
3. 기관 비용 및 사용자 비용의 산정 ····· 750
4. 현재가치 환산법 ····· 770
5. 현재가치 환산법을 적용한 생애주기 비용 계산 ····· 772
6. 4S포장의 유지보수 대안별 비교 ····· 773
7. 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 경제성 비교 ····· 775
8. 요약 ····· 776

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도 ····· 777

1절. 연구개발 목표의 달성도 ····· 777
1. 연구개발 목표의 달성도 ····· 777
2. 계획대비 수행실적 ····· 780

2절. 연구개발 대외기여도 ····· 782
1. 기술발전 기여도 ····· 782
2. 기대효과 ····· 783
3. 관련 후속 연구개발의 전망 ····· 784

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획 ····· 785

1절. 연구결과의 활용 방안 ····· 785
1. 활용 방안 ····· 785
2. 신공법 적용의 법적·제도적 장치 마련 및 활성화 ····· 786

<참고문헌> ····· 789

<그림 차례>

<그림 1.1.1> 국내 교통 환경 변화(2004, 통계청 자료) ····· 1
<그림 1.1.2> 도로 포장 건설의 인식 변화 ····· 2
<그림 1.1.3> 안전하고 조용하며 아름다운 포장의 개발 필요성 ····· 3
<그림 1.1.4> 연구 개발의 기대효과 ····· 4
<그림 1.1.5> 기존 아스팔트 포장 단면(좌)과 최근 적용되는 포장 단면(우) ····· 5
<그림 1.1.6> 4S 포장 시스템의 기본 개념도 ····· 6
<그림 1.1.7> 4S 포장 시스템 개발 흐름도 ····· 6
<그림 1.1.8> 4S 포장 시스템 개발 연구 내용 ····· 7
<그림 1.2.1> 전체적인 연구 추진 계획 ····· 8
<그림 1.2.2> 1차년도 연구 내용 및 업무 분장 ····· 9
<그림 1.2.3> 포장환경 모사 시험기(HES) 개념도 ····· 10
<그림 1.2.4> 국외 CPX 트레일러 예 ····· 10
<그림 1.2.5> 2차년도 연구 내용 및 업무 분장 ····· 11
<그림 1.2.6> 개발된 CPX Trailer ····· 12
<그림 1.2.7> 3차년도 연구내용 및 업무 분장 ····· 14
<그림 2.1> 4S 포장 요소 기술 ····· 15
<그림 2.1.1> 배수성 포장의 기본 구조 ····· 17
<그림 2.1.2> 포장표면온도의 시간변화 ····· 20
<그림 2.1.3> 시간 경과에 따른 투수 계수 변화 ····· 26
<그림 2.1.4> 국내 배수성 덧씌우기 포장 단면 예 ····· 27
<그림 2.1.5> 국외 배수성 포장 단면 예 ····· 27
<그림 2.1.6> CTB의 도입배경 ····· 28
<그림 2.1.7> 일반 콘크리트와 투수 콘크리트 구조(최상흘, 1997) ····· 32
<그림 2.1.8> 공극률과 투수계수, 압축강도의 관계 ····· 32
<그림 2.1.9> 도로 기능과 교통 특성과의 관계 ····· 36
<그림 2.1.10> 고로 시멘트 페이버와 콘크리트 시멘트 페이버의 비교 ····· 38
<그림 2.1.11> 주차장 페이버 포장의 파손부 전경 ····· 40
<그림 2.1.12> 아파트 단지의 페이버 포장(천안) ····· 41
<그림 2.1.13> 부천시 중동대로 구간의 시간에 따른 소음도 변화 추이 ····· 46
<그림 2.1.14> 노원구 하계동 대진고 앞 구간의 시간에 따른 소음도 변화 추이 ····· 48
<그림 2.1.15> 국내 배수성포장과 일본 배수성 포장의 소음도 변화 추이 비교 ····· 49
<그림 2.1.16> 구속응력과 함수비에 따른 최대전단탄성계수 변화 ····· 51
<그림 2.1.17> 함수비 변화에 따른 정규화 전단탄성계수 변화 ····· 51
<그림 2.1.18> 함수비-최대전단탄성계수 관계 ····· 52
<그림 2.1.19> 시험방법에 따른 함수비 변화와 탄성계수 ····· 53
<그림 2.1.20> 노상 탄성계수에 따른 아스팔트 하단 및 노상 상단의 변형률(권기철, 2006) ····· 53
<그림 2.1.21> 구속응력 및 축차 응력에 따른 국내 노상토의 회복탄성계수 변화(임유진, 2003) ··· 54

<그림 2.2.1> 일본의 배수성 포장 단면 ····· 58
<그림 2.2.2> 배수성 포장의 시공실적(일본) ····· 58
<그림 2.2.3> 일본 한냉지역 배수성 포장 칸타브로 시험 결과 ····· 60
<그림 2.2.4> 포장주행실험장과 하중차량 ····· 61
<그림 2.2.5> PWRI의 포장 주행 실험장 제원 ····· 62
<그림 2.2.6> PWRI의 포장 주행 실험장 단면구성 예 ····· 62
<그림 2.2.7> 토목연구소내 투·배수성 시험포장 단면(중앙대학교, 2005) ····· 63
<그림 2.2.8> PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0341공구, A공구) ····· 63
<그림 2.2.9> PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0342공구, B공구) ····· 63
<그림 2.2.10> PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0343공구, C공구) ····· 63
<그림 2.2.11> PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0344공구, D공구) ····· 64
<그림 2.2.12> 투수 측정 장비(지름 5cm)(중앙대학교, 2005) ····· 65
<그림 2.2.13> 물과 공기의 활용 방식(a)과 물의 활용 방식(b)(중앙대학교, 2005) ····· 65
<그림 2.2.14> 흡수된 물과 이물질이 분리되는 과정(중앙대학교, 2005) ····· 66
<그림 2.2.15> 공기의 사용 유무에 따른 작업속도별 이물질 수거율(중앙대학교, 2005) ····· 66
<그림 2.2.16> 포장의 경과 시간별 물의 사용 유무에 대한 청소 효과 비교(중앙대학교, 2005) ····· 67
<그림 2.2.17> 기능 회복 작업과 유지 보수 작업과의 포장 기능성 비교 ····· 67
<그림 2.2.18> OGFC 개념도(Mohammad Faghri, 2002) ····· 71
<그림 2.2.19> OGFC 사용 현황(Prithvi S. Kandhal, 1998) ····· 71
<그림 2.2.20> 실내시험에 사용된 입도분포 곡선(Rajib B. Mallick, 2000) ····· 74
<그림 2.2.21> 시험 시공구간 OGFC의 입도 분포 곡선(NCAT, 2000) ····· 77
<그림 2.2.22> 포장의 담수효과(NAPA, 2005) ····· 83
<그림 2.2.23> 강변 주차장의 보수성포장(NAPA, 2005) ····· 83
<그림 2.2.24> Porous Asphalt의 소음저감효과(NAPA, 2005) ····· 84
<그림 2.2.25> 투수성 포장 설계 지침(NAPA, 2005) ····· 84
<그림 2.2.26> 국가별 CTB를 적용한 다양한 포장 단면 ····· 86
<그림 2.2.27> 벨기에 투수 콘크리트 포장 시공예 (벨기에 Herne 근처 N255 국도) ····· 90
<그림 2.2.28> 투수 콘크리트 포장 시공 전·후 비교 ····· 91
<그림 2.2.29> 조지아주 시공사례(포르쉐 주차장) ····· 93
<그림 2.2.30> 일본 포러스 콘크리트포장의 단면(Sakagkwa, 2001) ····· 96
<그림 2.2.31> 포장 구성단면 (Sakiguchi Osamu, 2001) ····· 98
<그림 2.2.32> 외국의 블록 포장 적용 사례 ····· 102
<그림 2.2.33> 국외 페이버 포장 기술 개요 ····· 102
<그림 2.2.34> 유지 방법에 따른 기존의 투수성 포장 페이버와 새로운 페이버의 투수성 비교 105
<그림 2.2.35> 재활용 타이어를 활용한 페이버 ····· 105
<그림 2.2.36> 무처리 및 그루빙 처리아스팔트 표면의 소음 비교(Meiarashi, 2000) ····· 109
<그림 2.2.37> 시간 경과에 따른 소음도 변화(Takeshi Koshiba, 2003) ····· 113
<그림 2.2.38> 시간 경과에 따른 소음도 변화-주파수 변화(Takeshi Koshiba, 2003) ····· 113
<그림 2.2.39> 2층식 배수성 포장 ····· 114
<그림 2.2.40> 2층식 배수성 포장의 소음저감 효과 ····· 114

<그림 2.2.41> 배수성 포장의 소음저감 효과 ····· 114
<그림 2.2.42> 다공질 탄성포장의 소음감소 효과(승용차) ····· 115
<그림 2.2.43> 다공질 탄성포장의 소음감소 효과(대형차) ····· 116
<그림 2.2.44> 포장형식에 따른 소음감소 효과 ····· 116
<그림 2.2.45> 투수성 포장의 단면 예 (D교통, 설계 CBR 6, 20년 설계) ····· 118
<그림 2.2.46> 옥외 지지력 시험의 구조 (Nakanishi Hiromitsu, 2001) ····· 120
<그림 2.2.47> 빗물침투에 의한 지지력의 변화 (Nakanishi Hiromitsu, 2001) ····· 120
<그림 2.2.48> 일본국도 155호선의 포장단면(cm)(Nemoto Nobuyuki, 2001) ····· 121
<그림 2.2.49> 투수성 포장의 시험 포장 단면 <Endo Katsura, 2002) ····· 123
<그림 2.2.50> 노상토의 함수비 변화와 일강우량 ····· 123
<그림 2.2.51> 시험포장에 따른 포장 단면의 변화 ····· 124
<그림 2.2.52> 포화도에 따른 회복탄성계수 변화 ····· 130
<그림 2.2.53> 융해기에 노상과 기층의 기온,함수비 변화추이 ····· 131
<그림 2.2.54> Dickey Lake의 함수비 변화에 따른 노상의 탄성계수의 역해석값과 계산값 ····· 131
<그림 2.2.55> 함수비 변화에 따른 기층과 노상의 Dynaflect계수의 변화 ····· 131
<그림 2.2.56> 함수비 변화에 따른 기층과 노상의 FWD계수의 변화 ····· 132
<그림 2.2.57> 지진파를 이용한 함수비에 따른 탄성계수의 변화 측정 ····· 133
<그림 2.2.58> 함수비의 변화에 따른 유전율과 탄성계수의 변화 ····· 133
<그림 2.2.59> 건조측과 습윤측의 탄성계수의 변화 ····· 134
<그림 2.2.60> Mn/ROAD 시험구간 12 골재기층에서 시간에 따른 강수량과 포화도 ····· 134
<그림 2.2.61> Mn/ROAD 시험구간 10 골재기층에서 시간에 따른 강수량과 포화도 ····· 135
<그림 2.2.62> 기간 별 포장의 깊이에 따른 함수비 ····· 136
<그림 2.2.63> Moscow와 Weiser에서 시간에 따른 깊이별 함수율 ····· 138
<그림 2.2.64> 두 지역의 시간에 따른 강수량과 노상함수비 변화 ····· 138
<그림 3.1.1> 4S 포장시스템 연구추진 전략 ····· 142
<그림 3.1.2> 4S 포장시스템 연구추진 단계 ····· 144
<그림 3.2.1> 교통량에 따른 포장 시스템 ····· 146
<그림 3.2.2> 실내 투수 시험기 ····· 148
<그림 3.2.3> 투수계수 측정 ····· 148
<그림 3.2.4> 탄성계수 측정 ····· 148
<그림 3.2.5> 비파괴탄성계수 측정 ····· 148
<그림 3.2.6> 콘택트 게이지 측정방법 ····· 150
<그림 3.2.7> 다이얼 게이지 측정 ····· 150
<그림 3.2.8> 변형률 게이지 방법의 개념도 ····· 150
<그림 3.2.9> 동결융해 저항성 실험 ····· 151
<그림 3.2.10> 중량측정 및 초음파 속도 측정 ····· 152
<그림 3.2.11> 불투수 CTB 실내실험 ····· 153
<그림 3.2.12> 불투수 CTB 골재의 입도분포 ····· 155
<그림 3.2.13> 불투수 CTB의 팽창재, 수축저감재 첨가 시 강도 ····· 156
<그림 3.2.14> 불투수 CTB의 FA 연화에 따른 강도 ····· 157

<그림 3.2.15> 불투수 CTB의 혼화제 사용에 따른 수분증발율 ····· 158
<그림 3.2.16> 불투수 CTB의 FA 사용에 따른 수분증발율 ····· 158
<그림 3.2.17> 불투수 CTB의 건조수축 실험실 실내온도 ····· 159
<그림 3.2.18> 불투수 CTB의 양생에 따른 건조수축 ····· 159
<그림 3.2.19> 혼화재에 대한 영향-팽창재 ····· 160
<그림 3.2.20> 혼화재에 대한 영향-수축저감재 ····· 160
<그림 3.2.21> 플라이 애쉬에 첨가량에 대한 영향 ····· 162
<그림 3.2.22> 시멘트 양과 플라이 애쉬에 대한 압축강도 변화 ····· 163
<그림 3.2.23> 시멘트 5%일 때 플라이 애쉬 혼화재의 영향 ····· 164
<그림 3.2.24> 시멘트 7%일 때 플라이 애쉬 혼화재의 영향 ····· 164
<그림 3.2.25> 불투수 CTB의 비파괴탄성계수와 압축강도와의 관계 ····· 168
<그림 3.2.26> 불투수 CTB의 비파괴탄성계수와 탄성계수와의 관계 ····· 168
<그림 3.2.27> 혼화재별 불투수 CTB의 건조수축 - 시멘트 5% ····· 169
<그림 3.2.28> 플라이 애쉬와 혼화재에 따른 건조수축 - 시멘트 5% ····· 170
<그림 3.2.29> 불투수 CTB의 배합종류별 수축저감률 비교 - 시멘트 5% ····· 170
<그림 3.2.30> 혼화재별 불투수 CTB의 건조수축 - 시멘트 7% ····· 171
<그림 3.2.31> 플라이 애쉬와 혼화재에 따른 건조수축 - 시멘트 5% ····· 171
<그림 3.2.32> 불투수 CTB의 배합종류별 수축저감률 비교 - 시멘트 5% ····· 172
<그림 3.2.33> 불투수 CTB 실험 배합의 시멘트 양에 따른 건조수축 ····· 172
<그림 3.2.34> 불투수 CTB 현장실험 구간 평면도 ····· 173
<그림 3.2.35> 불투수 CTB 현장 압축강도 ····· 173
<그림 3.2.36> 불투수 CTB 현장시공의 간접인장강도 ····· 173
<그림 3.2.37> 현장 시험시공 구간의 균열 사진(현장시공 4일후) ····· 174
<그림 3.2.38> 시공 50일 후 시험구간에 따른 균열관측 ····· 175
<그림 3.2.39> 불투수 CTB 현장 시험시공 구간의 균열현황 ····· 175
<그림 3.2.40> 불투수 CTB 실험에서의 재료비용 분석(1m3) ····· 176
<그림 3.2.41> 저수축 투수 CTB 실내실험 계획 ····· 177
<그림 3.2.42> 저수축 투수용 CTB 입도분포 ····· 178
<그림 3.2.43> 시멘트량 변화에 따른 강도실험 결과(잔골재율 0%) ····· 180
<그림 3.2.44> 시멘트량 변화에 따른 강도실험 결과(잔골재율 5%) ····· 180
<그림 3.2.45> 시멘트량 변화에 따른 강도실험 결과(잔골재율 10%) ····· 181
<그림 3.2.46> 시멘트량 변화에 따른 연속공극률 측정결과(잔골재율 0%) ····· 182
<그림 3.2.47> 시멘트량 변화에 따른 연속공극률 측정결과(잔골재율 5%) ····· 182
<그림 3.2.48> 시멘트량 변화에 따른 연속공극률 측정결과(잔골재율 10%) ····· 183
<그림 3.2.49> 시멘트량 변화에 따른 투수계수 측정결과(잔골재율 0%) ····· 184
<그림 3.2.50> 시멘트량 변화에 따른 투수계수 측정결과(잔골재율 5%) ····· 184
<그림 3.2.51> 시멘트량 변화에 따른 투수계수 측정결과(잔골재율 10%) ····· 185
<그림 3.2.52> 잔골재율에 따른 압축강도 변화 ····· 187
<그림 3.2.53> 잔골재율에 따른 연속공극률 변화 ····· 188
<그림 3.2.54> 투수계수와 압축강도와의 관계 ····· 189

<그림 3.2.55> 연속공극률과 압축강도와의 관계 ····· 189
<그림 3.2.56> 건조수축 실험결과 ····· 191
<그림 3.2.57> 동결융해 주기에 따른 중량손실률 ····· 192
<그림 3.2.58> 동결융해 주기에 따른 초음파 속도변화 ····· 192
<그림 3.2.59> 재료비용 분석결과(1㎥당) ····· 193
<그림 3.2.60> SBR Latex ····· 202
<그림 3.2.61> Activator의 반응도 ····· 205
<그림 3.2.62> 기능성포장으로서 필요한 조건 ····· 207
<그림 3.2.63> 실용적인 혼합물 특성을 얻기 위한 조건 ····· 208
<그림 3.1.64> 아스팔트 바인더개발 시험개요 ····· 210
<그림 3.2.65> 회전점도기의 개략도 ····· 211
<그림 3.2.66> 점도측정방법 ····· 212
<그림 3.2.67> DSR 시험의 개략도 ····· 213
<그림 3.2.68> δ의 물리적 의미 ····· 214
<그림 3.2.69> DSR 시험에서 δ의 측정방법 ····· 214
<그림 3.2.70> BBR 시험의 개략도 ····· 216
<그림 3.2.71> 절대 점도 시험기 ····· 217
<그림 3.2.72> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 DSR(Original) 시험결과 ····· 218
<그림 3.2.73> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 DSR(RTFO) 시험결과 ····· 218
<그림 3.2.74> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 BBR 시험결과(온도 : -12℃) ····· 219
<그림 3.2.75> Wax 혼입율 변화에 따른 고온・저온 특성 비교 ····· 222
<그림 3.2.76> 폐타이어 혼입율 변화에 따른 고온・저온 특성 비교 ····· 223
<그림 3.2.77> 기존 배수성 바인더의 침입도 시험결과 ····· 224
<그림 3.2.78> SBS・SBR・폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 침입도 시험결과 ····· 225
<그림 3.2.79> 기존 배수성 바인더의 동점도 시험결과 ····· 226
<그림 3.2.80> SBS, SBR과 Wax를 첨가한 바인더의 동점도 시험결과 ····· 226
<그림 3.2.81> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 동점도 시험결과 ····· 227
<그림 3.2.82> SBS, SBR과 Wax를 첨가한 바인더의 절대점도 시험결과 ····· 227
<그림 3.2.83> 마샬안정도 시험 모습 ····· 229
<그림 3.2.84> 흐름 시험 전・후 모습 ····· 229
<그림 3.2.85> L.A.마모시험기와 칸타브로 시험 후 공시체 ····· 230
<그림 3.2.86> 휠트래킹 시험 모습 ····· 231
<그림 3.2.87> DIT 장비 전경 ····· 233
<그림 3.2.88> 2.5㎜ 통과 질량 백분율-공극률 곡선(예) ····· 235
<그림 3.2.89> 최적 아스팔트 함량의 결정 방법 ····· 236
<그림 3.2.90> 골재입도 분포표 ····· 238
<그림 3.2.91> 아스팔트 혼합물별 흐름 손실률 ····· 238
<그림 3.2.92> 칸타브로 시험 결과 ····· 239
<그림 3.2.93> 휠트래킹 시험 결과 ····· 240
<그림 3.2.94> 휠트래킹 시험후 공시체 모습 ····· 241

<그림 3.2.95> 간접인장강도 시험 결과 ····· 242
<그림 3.2.96> 수정 Lottman 시험 후 인장강도비(TSR) 결과 ····· 243
<그림 3.2.97> 마샬안정도 시험 결과 ····· 244
<그림 3.2.98> 수침 시험 후 잔류 피막율 ····· 246
<그림 3.2.99> 아스팔트 종류별 박리의 육안 평가 ····· 246
<그림 3.2.100> 13mm 골재 입도 그래프 ····· 249
<그림 3.2.101> AP 함량에 따른 흐름손실률 ····· 251
<그림 3.2.102> 인터로킹 블록의 종류 ····· 254
<그림 3.2.103> 페이버의 하중 분산 형태 ····· 254
<그림 3.2.104> 페이버의 다양한 배치 현황 ····· 255
<그림 3.2.105> 세 가지 대표적 인터로킹의 형태 ····· 256
<그림 3.2.106> 미국 페이버 포장 현황 ····· 257
<그림 3.2.107> 페이버 포장의 횡단면도 ····· 260
<그림 3.2.108> 호주 콘크리트 협회(ACCA)와 영국 표준(BT 6717)의 받침층 기준 ····· 263
<그림 3.2.109> 보편화 된 페이버의 형태 ····· 264
<그림 3.2.110> 일반적인 페이버 포장의 시공형태 ····· 265
<그림 3.2.111> 페이버 포장의 모서리 처리 형태 ····· 266
<그림 3.2.112> 홍콩 국제공항에 시공된 배수 처리시설 (ICPI, 2004) ····· 268
<그림 3.2.113> B의 회전으로 인한 인근 페이버의 거동 ····· 269
<그림 3.2.114> 직사각형 페이버의 회전에 의한 영향 ····· 270
<그림 3.2.115> 모양이 있는 페이버에서의 영향 ····· 270
<그림 3.2.116> 오늬무늬식에서 B회전으로 인한 거동 ····· 270
<그림 3.2.117> 일정한 모양을 가진 오늬무늬식의 거동 ····· 270
<그림 3.2.118> 경고를 나타내는 페이버 ····· 272
<그림 3.2.119> 이동방향을 나타내는 페이버 ····· 272
<그림 3.2.120> 식생 페이버의 모습 ····· 272
<그림 3.2.121> 식생 페이버가 주차장에 설치된 모습 ····· 272
<그림 3.2.122> 1988년에 시공된 미시간주의 제설 페이버 ····· 273
<그림 3.2.123> 일반적인 제설 페이버의 설계 ····· 273
<그림 3.2.124> 광촉매 페이버의 원리(정석진, 2002) ····· 274
<그림 3.2.125> 영국에 설치된 투수성 페이버의 예 ····· 275
<그림 3.2.126> 개발된 돌기형 블록 ····· 276
<그림 3.2.127> 실내 시험용 블록 제작 ····· 277
<그림 3.2.128> 차량하중을 모델링한 장치 ····· 278
<그림 3.2.129> 인터로킹 실험을 위한 차량모사 장치 ····· 279
<그림 3.2.130> 블록 성능 검증을 위한 반복하중 실험모습 ····· 280
<그림 3.2.131> 반복하중 실험 후 돌기형 블록(좌)과 U형 블록(우) 모습 ····· 280
<그림 3.2.132> 반복하중 실험 후 돌기형 블록(좌)과 I형 블록(우) 모습 ····· 280
<그림 3.2.133> 블록의 재료 및 형태에 대한 투수계수 측정장치 ····· 281
<그림 3.2.134> 블록의 형태에 대한 투수계수 측정모습 ····· 281

<그림 3.2.135> 줄눈모래 입도에 따른 투수계수 측정장치 ····· 282
<그림 3.2.136> 줄눈모래 입도에 따른 투수계수 측정모습 ····· 282
<그림 3.2.137> 인터로킹 블록의 투수 계수 (개구부가 없는 경우) ····· 282
<그림 3.2.138> 줄눈 모래의 입도에 따른 투수 계수 ····· 282
<그림 3.2.139> 투수성 실험에 사용된 블록 ····· 283
<그림 3.2.140> 인터로킹 블록 생산공정 ····· 284
<그림 3.2.141> 기계적 생산공정이 가능하면서 동시에 돌기 형상을 갖는 블록 ····· 285
<그림 3.2.142> 새로운 돌기형 인터로킹 블록 ····· 286
<그림 3.2.143> 돌기형 블록 형상 ····· 288
<그림 3.2.144> 돌기형 블록 시험체 ····· 288
<그림 3.2.145> 줄눈부 모래채움 실험에 사용된 고정틀 ····· 289
<그림 3.2.146> 줄눈부 모래채움 실험순서 ····· 289
<그림 3.2.147> 돌기형 블록의 몰드 제작 ····· 294
<그림 3.2.148> 돌기형 블록의 제조 ····· 295
<그림 3.2.149> 물시멘트비가 25%인 경우 ····· 300
<그림 3.2.150> 물시멘트비가 28%인 경우 ····· 300
<그림 3.2.151> 물시멘트비가 30%인 경우 ····· 300
<그림 3.3.1> 2차원 축대칭 모형(조윤호, 2001년) ····· 305
<그림 3.3.2> 2차원 판 요소 모형(조윤호, 2001년) ····· 306
<그림 3.3.3> 판 요소의 자유도(조윤호, 2001년) ····· 306
<그림 3.3.4> 쉘 요소의 자유도(조윤호, 2001년) ····· 307
<그림 3.3.5> 2차원 평면 변형률 모형(조윤호, 2001년) ····· 308
<그림 3.3.6> 2D solid element의 자유도(조윤호, 2001년) ····· 309
<그림 3.3.7> 3-D 포장구조체 모델링(건교부, 2002년) ····· 310
<그림 3.3.8> Winkler foundation과 Solid foundation의 거동 비교(건교부, 2002년) ····· 311
<그림 3.3.9> 유한요소 모형 정립과정(조윤호, 2001년) ····· 312
<그림 3.3.10> 2차원 평면 변형율 모형을 이용한 요소망 분할 ····· 313
<그림 3.3.11> 요소 크기에 따른 2차원 평면 변형률 모형 분석결과 (400Kg) ····· 314
<그림 3.3.12> 요소 크기에 따른 2차원 평면 변형률 모형 분석결과(조윤호, 2001년) ····· 315
<그림 3.3.13> 수직/수평방향 해석 범위에 따른 거동(조윤호, 2001년) ····· 316
<그림 3.3.14> 경계 조건에 따른 기층 하부 응력(조윤호, 2001년) ····· 316
<그림 3.3.15> 3차원 구조해석 모형(조윤호, 2003년) ····· 317
<그림 3.3.16> 3차원 모형의 해석모형의 응력 비교(조윤호, 2003년) ····· 318
<그림 3.3.17> 4S 포장의 해석 범위 및 두께 변화에 따른 경우의 수 ····· 320
<그림 3.3.18> 평면 및 측면에서 본 요소망의 형태 ····· 320
<그림 3.3.19> 4S 구조해석 모형의 전체 요소망 형태 ····· 321
<그림 3.3.20> 4S 구조해석 모형 결과(CTB 하부) ····· 322
<그림 3.3.21> 4S 구조해석 모형 결과(AP 하부) ····· 322
<그림 3.3.22> 민감도 분석 결과(기준하중) ····· 324
<그림 3.3.23> 투수 아스팔트 및 투수 CTB 두께 변화에 따른 투수 CTB 하부 인장응력 ···· 325

<그림 3.3.24> 축하중 변화에 따른 투수 CTB 하부 인장응력 변화 ····· 326
<그림 3.3.25> 해석 결과와 회귀식 결과의 비교 ····· 328
<그림 3.3.26> 108 단면 FEM 구조해석 결과 ····· 332
<그림 3.3.27> 피로모형을 통한 설계수명 한계 인장응력 ····· 334
<그림 3.3.28> 투수 포장 설계수명 추정 ····· 335
<그림 3.3.29> 실내 포장 가속 시험(KALES) 구간 단면 배치도 ····· 337
<그림 3.3.30> 반사균열 발생 모식도 ····· 340
<그림 3.3.31> 반사균열 발생 원인(종방향 거리에 따른 응력분포) ····· 341
<그림 3.3.32> 온도 변화를 고려한 4S 반사균열 모형의 해석 결과 (변형률) ····· 341
<그림 3.3.33> 온도 변화를 고려한 4S 반사균열 모형의 해석 결과 (응력) ····· 342
<그림 3.3.34> 탄성계수 감소를 고려한 4S 반사균열 해석 결과 (투수 AP 변형률) ····· 342
<그림 3.3.35> 탄성계수 감소를 고려한 4S 반사균열 해석 결과 (투수 AP 응력) ····· 343
<그림 3.3.36> 탄성계수 감소 따른 거동 원인 ····· 343
<그림 3.3.37> 탄성계수 감소를 고려한 4S 반사균열 해석 결과 (투수 CTB 응력) ····· 344
<그림 3.3.38> 노상 및 보조기층의 탄성계수에 따른 6번 센서 지점의 처짐 변화 ····· 346
<그림 3.3.39> 노상 탄성계수변화에 따른 처짐 ····· 347
<그림 3.3.40> 보조기층 탄성계수변화에 따른 처짐 ····· 347
<그림 3.3.41> 노상과 보조기층의 탄성계수의 변화에 따른 처짐값 비교 ····· 347
<그림 3.3.42> 기층의 탄성계수의 변화에 따른 처짐 ····· 348
<그림 3.3.43> 기층의 탄성계수에 따른 하중 재하지점 처짐값의 변화 ····· 349
<그림 3.3.44> 표층의 탄성계수의 변화에 따른 처짐 ····· 350
<그림 3.3.45> 표층의 탄성계수에 따른 하중 재하지점 처짐값의 변화 ····· 350
<그림 3.3.46> 구조해석 처짐 결과와 회귀식 처짐 결과의 비교 ····· 353
<그림 3.3.47> 물성치 추정을 위한 1차 시험시공에서의 FWD 측정 지점 ····· 353
<그림 3.3.48> 각 단면별 하중지점부터의 거리별 처짐량 ····· 355
<그림 3.3.49> 일반AP+일반BB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과 ····· 358
<그림 3.3.50> 투수AP+투수CTB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과 ····· 358
<그림 3.3.51> 투수AP+불투수CTB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과 ····· 359
<그림 3.4.1> HWLS의 개념도 ····· 362
<그림 3.4.2> 바닥판과 측면판 유한요소 해석 결과 ····· 362
<그림 3.4.3> HWLS의 다짐 개념도와 다짐 모습 ····· 363
<그림 3.4.4> 하부구조 실험 개념도와 실험 후 하부구조 단면 ····· 363
<그림 3.4.5> HWLS에 사용되는 단륜 및 복륜의 모습 ····· 365
<그림 3.4.6> 원더링 기능 이용한 차륜위치 빈도수 및 누가 빈도수 ····· 366
<그림 3.4.7> 원더링 기능을 적용한 후 파손 예상 모습 ····· 366
<그림 3.4.8> H계수 및 RD 값 ····· 367
<그림 3.4.9> H계수 산정 절차 ····· 368
<그림 3.4.10> 공용기간동안에 표층과 기층의 응력변화 ····· 371
<그림 3.4.11> 전형적인 강성비와 하중재하 회수 관계 ····· 372
<그림 3.4.12> 아스팔트 혼합물의 강성 감소 곡선 ····· 372

<그림 3.4.13> 강도감소계수 및 러팅 발생량 예측식 개발 흐름도 ····· 374
<그림 3.4.14> HWLS에서의 실험을 위한 기본 단면 결정 ····· 374
<그림 3.4.15> HWLS 시료 완성 ····· 375
<그림 3.4.16a> 재하 위치에 따른 정적하중재하실험 ····· 375
<그림 3.4.16b> 정적하중 결과를 이용한 관계 검토 ····· 375
<그림 3.4.17a>반복하중재하 실험수행 ····· 376
<그림 3.4.17b> 일정 회수에 따른 러팅량 측정 ····· 376
<그림 3.4.18> 실험 종료 후 전체 반복하중재하 결과 ····· 376
<그림 3.4.19> HWLS 실험의 구조해석을 통한 위치별 변형률 계산 ····· 377
<그림 3.4.20> 최소 자승법으로 근사해 추정 ····· 377
<그림 3.4.21> 하중재하회수에 따른 각층의 탄성계수값 산정 ····· 378
<그림 3.4.22> 상도강도계수 곡선 계산 ····· 378
<그림 3.4.23> HWLS 공용성 평가를 위한 단면 구성 ····· 380
<그림 3.4.24> HWLS에서의 공용성 평가 실험 모습 ····· 382
<그림 3.4.25> 각 단면별 러팅 측정 결과 ····· 383
<그림 3.4.26> 각 단면의 표층 및 기층의 모습 ····· 384
<그림 3.4.27> 실험에 사용한 TDR의 모습 ····· 385
<그림 3.4.28> 함수비와 TDR 주기값과의 관계 ····· 386
<그림 3.4.29> 시간에 따른 온도변화 ····· 388
<그림 3.4.30> 시간에 따른 노상의 함수비 변화 ····· 388
<그림 3.4.31> 반복하중 재하 회수에 따른 LVDT 변형량 ····· 389
<그림 3.4.32> 본 실험에서의 각 단면별 러팅 측정 결과 ····· 390
<그림 3.4.33> 밀입도 AP 표층, BB 단면에서의 정적 하중재하 실험 결과 ····· 393
<그림 3.4.34> Poruos AP 표층, 저수축 불투수 CTB 단면에서의 정적하중재하 실험 결과 393
<그림 3.4.35> Poruos AP 표층, BB 단면에서의 정적 하중재하 실험 결과 ····· 393
<그림 3.4.36> 러팅 발생해석을 위한 모형 ····· 394
<그림 3.4.37> HWLS를 이용한 블록 실험 계획 ····· 396
<그림 3.4.38> I 형 블록과 쐐기형 블록 형상 ····· 397
<그림 3.4.39> 4S 블록 형상 ····· 397
<그림 3.4.40> 받침 모래 입도 분포 곡선 ····· 399
<그림 3.3.41> 줄눈 채움 모래 입도 분포 곡선 ····· 400
<그림 3.4.42> HWLS용 일반 블록 시공 ····· 400
<그림 3.4.43> HWLS에서의 하중 재하 후 블록 파손 ····· 401
<그림 3.4.44> 받침 모래 및 보조기층의 처짐 ····· 402
<그림 3.4.45> 포장가속시험시설의 카트 ····· 405
<그림 3.4.46> 카트의 주행에 따른 축하중 변화 ····· 406
<그림 3.4.47> 환경모사를 위한 온도 챔버 ····· 407
<그림 3.4.48> 지반동결조건의 모사를 위한 냉각 파이프 ····· 407
<그림 3.4.49> 포장가속시험시설의 활용 분야 ····· 408
<그림 3.4.50> 포장가속시험시설의 시험운용을 위한 포장 단면 ····· 409

<그림 3.4.51> 예비실험에서 노상 포설 전경 ····· 410
<그림 3.4.52> 예비실험에서 밀입도 아스팔트 포장 포설 전경 ····· 410
<그림 3.4.53> 토압계를 보조기층 상단에 설치하는 전경 ····· 412
<그림 3.4.54> 변형율계를 표층 내부에 설치하는 전경 ····· 412
<그림 3.4.55> 응답측정을 위한 정적, 동적 데이터 로거 ····· 412
<그림 3.4.56> 제어실 계측용 서버 ····· 413
<그림 3.4.57> 카트 속력 에서 계측기로부터 얻어지는 응답 데이터 ····· 414
<그림 3.4.58> 포장가속 실험기 실험 피트 폭과 길이 ····· 417
<그림 3.4.59> 포장가속 실험기 실험 단면(A, B 동일) ····· 417
<그림 3.4.60> 포장가속 실험기 계측 개요도 ····· 418
<그림 3.4.61> 포장가속 실험 계측기 매설 평면도 ····· 418
<그림 3.4.62> 포장가속 실험 계측기 매설 측면도 ····· 419
<그림 3.4.63> 피트내 노상 설치 전경 ····· 419
<그림 3.4.64> 진동롤러에 의한 노상의 다짐 ····· 420
<그림 3.4.65> 노상 레벨 설정 및 검측 ····· 420
<그림 3.4.66> 소형 컴팩터에 의한 모서리부와 단부의 추가 다짐 ····· 421
<그림 3.4.67> 보조기층 재료의 덤핑과 그레이딩 ····· 421
<그림 3.4.68> 보조기층면의 진동롤러에 의한 다짐 ····· 422
<그림 3.4.69> 온도측정 게이지 매설 ····· 422
<그림 3.4.70> 토압계 매설 ····· 422
<그림 3.4.71> 투수 CTB 포설장면 ····· 422
<그림 3.4.72> 진동롤러 다짐 모습 ····· 422
<그림 3.4.73> 타이어 롤러 다짐 모습 ····· 423
<그림 3.4.74> 다짐 이후의 투수 CTB ····· 423
<그림 3.4.75> 투수 CTB에 매설된 함체 ····· 423
<그림 3.4.76> 매설된 함체제거 ····· 423
<그림 3.4.77> 변위측정 게이지 매설 모습 ····· 424
<그림 3.4.78> 소형진동 롤러를 이용한 다짐 ····· 424
<그림 3.4.79> 변형률 측정 게이지의 위치 선정 ····· 424
<그림 3.4.80> 표층 AP 타설 모습 ····· 424
<그림 3.4.81> 게이지 매설 위치 선정 ····· 425
<그림 3.4.82> 게이지 매설 모습 ····· 425
<그림 3.4.83> 진동 롤러를 이용한 다짐 ····· 425
<그림 3.4.84> 마카댐 롤러를 이용한 다짐 ····· 425
<그림 3.4.85> 최대건조밀도 측정과 노상 포설 후 다짐도 측정을 위한 노상토의 채취 ··· 426
<그림 3.4.86> 평판재하시험에 의한 노상 지지력 측정 ····· 427
<그림 3.4.87> 동적지지력 측정 장비에 의한 노상 지지력 측정 ····· 427
<그림 3.4.88> 노상의 동탄성 계수 측정 위치 ····· 427
<그림 3.3.89> 함수비의 변화에 따른 보조기층의 밀도 ····· 430
<그림 3.4.90> 운용횟수 별 일반 밀입도 포장의 변형율(횡방향) ····· 431

<그림 3.4.91> 운용횟수 별 일반 밀입도 포장의 변형율(종방향) ····· 432
<그림 3.4.92> 운용횟수 별 CTB10 배수성포장의 변형율(횡방향) ····· 432
<그림 3.4.93> 운용횟수 별 CTB10 배수성포장의 변형율(종방향) ····· 433
<그림 3.4.94> 운용횟수 별 CTB5 배수성포장의 변형율(횡방향) ····· 433
<그림 3.4.95> 운용횟수 별 CTB5 배수성포장의 변형율(종방향) ····· 434
<그림 3.3.96> 운용횟수 별 투수AP 5cm 배수성포장의 러팅 ····· 435
<그림 3.3.97> 운용횟수 별 투수AP 10cm 배수성포장의 러팅 ····· 435
<그림 3.3.98> 운용횟수 별 일반 밀입도포장의 러팅 ····· 436
<그림 3.3.99> 포장별 러팅 비교(100,000회) ····· 436
<그림 3.4.100> 투수능력 측정을 위한 현장투수실험기 ····· 437
<그림 3.4.101> 포장가속실험 후 투수실험결과 ····· 437
<그림 3.4.102> A-site 현장투수실험 배치도 ····· 437
<그림 3.4.103> B-site 현장투수실험 배치도 ····· 438
<그림 3.4.104> 운용횟수에 따른 투수시간의 변화(단면중앙) ····· 438
<그림 3.4.105> 포장가속실험 후 각 단면별FWD실험 위치 ····· 439
<그림 3.5.1> 4대강 유역의 점오염원 및 비점오염원 기여율 (환경부,1995) ····· 442
<그림 3.6.1> 한국건설기술연구원 휠 트래킹 장비 ····· 454
<그림 3.6.2> HWLS의 기본 설계 ····· 455
<그림 3.6.3> Hamburg Wheel Tracking Device ····· 458
<그림 3.6.4> GLWT의 모습 ····· 458
<그림 3.6.5> HES 개발의 의의 ····· 460
<그림 3.6.6> HVS 아래 포장에서의 VRSPTA ····· 463
<그림 3.6.7> 물에 의한 포장체의 변형 특성 ····· 465
<그림 3.6.8> 함수비와 하중조건에 따른 사암 기층의 탄성계수 변화 ····· 465
<그림 3.6.9> 다양한 차종의 분포(차도폭 : 3.5m) ····· 467
<그림 3.6.10> HES wandering 모사도 ····· 468
<그림 3.6.11> 토조의 포화 계통도 ····· 469
<그림 3.6.12> 파이프라인(토조 상부 정면도) ····· 469
<그림 3.6.13> 매설 초기 TDR의 함수비 변화량 ····· 471
<그림 3.6.14> 매설 초・중기 TDR의 함수비 변화량 ····· 471
<그림 3.6.15> 전기간 TDR의 함수비 변화량 ····· 472
<그림 3.6.16> 매설 초기 TDR의 함수비 변화량 ····· 473
<그림 3.6.17> 3회 물투입 후 TDR의 함수비 변화량 ····· 473
<그림 3.6.18> TDR의 전기간 함수비 변화량 ····· 474
<그림 3.6.19> HWLS를 이용한 예비 실험의 개요도 ····· 475
<그림 3.6.20> HWLS를 이용한 단면 두께의 선정 ····· 476
<그림 3.6.21> HWLS를 이용한 실험 과정 ····· 476
<그림 3.6.22> 투수 CTB 입도 곡선 ····· 477
<그림 3.6.23> 최적함수비 상태에서의 시간에 따른 층별 함수비 ····· 480
<그림 3.6.24> 포화 상태에서의 시간에 따른 층별 함수비 ····· 481

<그림 3.6.25> 반복하중재하에 따른 표층 러팅 발생량 비교 ····· 481
<그림 3.6.26> HES 건설과정 흐름도 ····· 482
<그림 3.6.27> HES 시공 단면 계획 ····· 483
<그림 3.6.28> 노상토 입도분포 곡선 ····· 484
<그림 3.6.29> HES에서의 노상 시공 순서 ····· 486
<그림 3.6.30> HES에서의 보조기층 시공 순서 ····· 487
<그림 3.6.31> HES에서의 투수 AP 표층 시공 ····· 488
<그림 3.6.32> HES에서의 다이얼 게이지 설치 모습 ····· 489
<그림 3.6.33> HES BPT 실험장면 ····· 490
<그림 3.6.34> HES 러팅 실험 장면 ····· 492
<그림 3.6.35> 60 ℃로 HES 온도 세팅시 변화 폭 ····· 492
<그림 3.6.36> 토조 위치 및 재하 회수에 따른 러팅 깊이 ····· 493
<그림 3.6.37> 토조 위치별 러팅 깊이 ····· 493
<그림 3.6.38> 실제 러팅 깊이 측정 ····· 494
<그림 3.6.39> LVDT 러팅 깊이 VS 실제 러팅 깊이 ····· 495
<그림 3.6.40> 휠패스 주변의 측면 융기 ····· 495
<그림 3.6.41> 층별 러팅 발생 검토 ····· 496
<그림 3.6.42> HES에서의 투수 시험 결과 ····· 497
<그림 3.6.43> HES 해체 작업 ····· 498
<그림 3.6.44> 소음원 증가에 따른 소음도 변화(Hanson, 2004 참조) ····· 501
<그림 3.6.45> 거리에 따른 소음도 영향(Hanson, 2004 참조) ····· 501
<그림 3.6.46> 바람의 방향에 따른 음의 전파 경로(강대준, 2001) ····· 503
<그림 3.6.47> 낮과 밤에 대한 음의 전파 경로(좌 : 낮, 우 : 밤)(강대준, 2001) ····· 503
<그림 3.6.48> 타이어와 포장에서 발생하는 소음의 세부구조 ····· 504
<그림 3.6.49> SPB 소음 측정 조건-1 (ISO 11819-1, 1997) ····· 507
<그림 3.6.50> SPB 소음 측정 조건-2 (ISO 11819-1, 1997) ····· 507
<그림 3.6.51> SPB 소음 측정 조건 (FHWA, 1996) ····· 508
<그림 3.6.52> 위스콘신의 단독차량 pass-by method 시험 조건 ····· 509
<그림 3.6.53> 단독차량 pass-by method(ISO) ····· 510
<그림 3.6.54> 가속주행소음 시험장(한국, 일본, 유럽)(ISO 362 Working Draft, 2001) ··· 510
<그림 3.6.55> 근접 소음 측정 트레일러 ····· 512
<그림 3.6.56> 근접 소음 측정법 마이크로폰 위치(ISO) ····· 513
<그림 3.6.57> 트레일러를 이용한 소음 측정(McNerney, 1998) ····· 513
<그림 3.6.58> 텍사스 도로국의 근접 소음 측정 마이크로폰 위치(McNerney, 1998) ····· 514
<그림 3.6.59> 음의 세기 측정용 탐침기의 탑재 모습 ····· 515
<그림 3.6.60> 임피던스 튜브를 이용한 포장 흡음율 측정 ····· 516
<그림 3.6.61> 흡음률 측정 원리(Garai, 1998) ····· 516
<그림 3.6.62> 실내 소음 측정 모습 ····· 517
<그림 3.6.63> 승용차 주행시 발생 소음원(Pass-by 측정(74dB(A))(Affenzeller, 2003) ···· 519
<그림 3.6.64> 타이어/포장 소음의 기여도 변화(Affenzeller, 2003) ····· 520

<그림 3.6.65> 네덜란드의 CPX 트레일러 ····· 521
<그림 3.6.66> 스웨덴의 CPX 트레일러 ····· 521
<그림 3.6.67> 핀란드의 CPX 트레일러 ····· 521
<그림 3.6.68> 미국의 CPX 트레일러(아리조나) ····· 521
<그림 3.6.69> 영국의 CPX 장비(TRL) ····· 521
<그림 3.6.70> 스웨덴의 CPX 장비(TUG) ····· 521
<그림 3.6.71> CPX 측정 방식(좌(a) : 주행 차량 직접 측정, 우(b) : 트레일러) ····· 522
<그림 3.6.72> 마이크로폰이 설치된 측정용 타이어의 무향실 처리 모습 ····· 522
<그림 3.6.73> HEART CPX Trailer의 설계도 ····· 524
<그림 3.6.74> HEART CPX Trailer 및 견인차량 ····· 524
<그림 3.6.75> HEART CPX의 측정용 바퀴 및 하중재하용 추 ····· 525
<그림 3.6.76> HEART CPX Trailer와 견인차량의 연결부 ····· 526
<그림 3.6.77> HEART CPX Trailer 장비 반무향실에서의 적용한 마이크로폰 5점 배치 ····· 531
<그림 3.6.78> Noise Generator 및 앰프 ····· 532
<그림 3.6.79> 마이크로폰 및 소음분석기 ····· 532
<그림 3.6.80> 마이크로폰 이동에 따른 측정 ····· 532
<그림 3.6.81> 반무향실 검증 시험 모습 ····· 532
<그림 3.6.82> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(①번 방향 (위쪽 방향)) ··· 534
<그림 3.6.83> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(②번 방향 (전방 55cm 높이 방향)) ·· 535
<그림 3.6.84> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(③번 방향 (전방 0cm 높이 방향)) · 535
<그림 3.6.85> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(④번 방향 (30° 대각선 방향)) ··· 535
<그림 3.6.86> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(⑤번 방향 (60° 대각선 방향)) ····· 536
<그림 3.6.87> 한국도로공사의 시험도로 단면 구성도 ····· 538
<그림 3.6.88> 승용차 실외소음 측정 개요 및 소음기 위치도 ····· 542
<그림 3.6.89> 측정용 타이어 하중 조건의 Setting ····· 544
<그림 3.6.90> CPX Trailer 장비를 이용한 소음 측정 장면 ····· 544
<그림 3.6.91> CPX Trailer 장비를 이용한 소음 측정 장면 ····· 544
<그림 3.6.92> 표면처리별 CPB 측정법에 따른 소음 측정 결과(좌:교통 개방 전, 우:교통 개방 후) · 549
<그림 3.6.93> 표면처리별 측정법에 따른 소음 측정 결과(좌:CPB 측정법(교통 개방 전), 우:HEART CPX Trailer(교통 개방 후)) ·· 549
<그림 3.6.94> 표면처리별 바퀴하중에 따른 소음 측정 결과(엔진 가동 시, 좌:420kgf 재하, 우:520kgf 재하) ····· 550
<그림 3.6.95> 표면처리별 바퀴하중에 따른 소음 측정 결과(엔진 정지 시, 좌:420kgf 재하, 우:520kgf 재하) ····· 550
<그림 3.6.96> 마이크로폰 위치에 따른 소음 측정 결과(420kgf, 좌:엔진 가동 시, 우:엔진 정지 시) ··· 551
<그림 3.6.97> 마이크로폰 위치에 따른 소음 측정 결과(420kgf, 좌:엔진 정지 시, 우:엔진 정지 시) ··· 551
<그림 3.7.1> 1차 시험시공 단면도 및 계측기 매립 현황 ····· 559
<그림 3.7.2> TDR에서의 분극현상 모식도 ····· 560
<그림 3.7.3> i-Button (온도측정게이지) ····· 562
<그림 3.7.4> 1차 현장 시험시공 위치 (경북김천) ····· 564
<그림 3.7.5> 1차 시험시공 흐름도 ····· 564
<그림 3.7.6> DCP, 평판재하실험 위치도 ····· 566
<그림 3.7.7> 현장 노상 입도 분포곡선 ····· 567

<그림 3.7.8> 1차 시험시공 DCP 실험 모습 ····· 569
<그림 3.7.9> 1차 시험시공 평판재하실험 모습 ····· 569
<그림 3.7.10> DCP 제원(권수안, 2004) ····· 570
<그림 3.7.11> 불투수CTB 현장입도분포(32mm) ····· 573
<그림 3.7.12> 투수CTB 현장입도분포(25mm) ····· 573
<그림 3.7.13> CTB 포설 두께 측정 ····· 574
<그림 3.7.14> 인력을 이용한 측면 처리(투수AP) ····· 574
<그림 3.7.15> 현장 투수CTB 체분석 ····· 576
<그림 3.7.16> 현장 불투수CTB 체분석 ····· 576
<그림 3.7.17> 투수 아스팔트 입도 분포(19mm, 13mm, 8mm) 합성 입도 ····· 577
<그림 3.7.18> 투수성 표층 칸타브로 실험 ····· 577
<그림 3.7.19> 1차 시험시공 FWD측정 위치도 ····· 581
<그림 3.7.20> 1차 시험시공 FWD 처짐량 비교 - 재하위치별 ····· 582
<그림 3.7.21> U시 일반국도와 친환경 4S 투·배수성 포장시스템과의 처짐량 비교 ····· 583
<그림 3.7.22> 텍사스 지방도 아스팔트 도로(FM655)의 처짐 곡선 ····· 584
<그림 3.7.23> 정적 하중 재하 실험을 위한 차축 형태 모식도 ····· 585
<그림 3.7.24> 축중계를 이용한 접지압 측정 ····· 585
<그림 3.7.25> 측정 위치에 정적하중 재하 ····· 585
<그림 3.7.26> 정적 하중 재하 실험의 위치 및 지점 ····· 586
<그림 3.7.27> 투수AP/투수CTB구간의 정적하중데이터 ····· 586
<그림 3.7.28> 투수AP/불투수CTB구간의 정적하중데이터 ····· 587
<그림 3.7.35> 1차 시험시공 현장 코어링을 통해 채취한 시료 모습 ····· 588
<그림 3.7.30> 1차 시험시공 투수CTB의 탈리 현상 예 ····· 589
<그림 3.7.31> 1차 시험시공 투수CTB 탈리MAP ····· 589
<그림 3.7.32> 1차 시험시공 투수CTB 탈리 단계 ····· 590
<그림 3.7.33> 투수AP 표층 육안 관측 결과 ····· 590
<그림 3.7.34> 강우이후의 포장 표층 상태 ····· 591
<그림 3.7.35> 1차 시험시공 현장투수시험 측정 위치도 ····· 592
<그림 3.7.36> 1차 시험시공 배수형태 및 방향측정 ····· 593
<그림 3.7.37> 강우량에 따른 노상 중량함수비의 변화 ····· 595
<그림 3.7.38> 강우량에 따른 단면별 노상 중량함수비 변화 추이 ····· 596
<그림 3.7.39> 1차 시험시공 소음측정 장소 주변현황 ····· 597
<그림 3.7.40> 단독차량 Pass-by 소음 측정 장면 ····· 597
<그림 3.7.41> 속도에 따른 단면별 측정소음값 ····· 598
<그림 3.7.42> 1차 시험시공 BPT 시험 측정 위치도 ····· 600
<그림 3.7.43> 대기온도와 CTB 온도 비교 ····· 601
<그림 3.7.44> CTB의 상하부 온도비교 ····· 601
<그림 3.7.45> 다른 조건하에서의 응력과 변형률(Nam, 2006) ····· 603
<그림 3.7.46> 반형 실린더 모식도 ····· 604
<그림 3.7.47> 반형 실린더 매설 전 ····· 604

<그림 3.7.48> 반형 실린더 매설 후 ····· 604
<그림 3.7.49> 스몰 몰드를 이용한 SIS 측정 ····· 605
<그림 3.7.50> 불투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 전) ····· 606
<그림 3.7.51> 투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 전) ····· 606
<그림 3.7.52> 불투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 후) ····· 608
<그림 3.7.53> 투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 후) ····· 608
<그림 3.7.54> 20개월 공용 후 현장투수시험 ····· 610
<그림 3.7.55> 20개월 공용 후 BPT (British Pendulum Tester) ····· 611
<그림 3.7.56> 20개월 공용 후 공극막힘현상 ····· 612
<그림 3.7.57> 20개월 공용 후 부분적 탈리 발생 ····· 612
<그림 3.7.58> 20개월 공용 후 강우시 투수능력 유지 ····· 612
<그림 3.7.59> 2차 현장 시험 시공 목적 ····· 616
<그림 3.7.60> 2차 시험 시공 단면도 ····· 617
<그림 3.7.61> 내구성 평가를 위한 실험적용 양생 방법 종류 ····· 620
<그림 3.7.62> 내구성 평가 CTB 다짐 모습 ····· 620
<그림 3.7.63> 내구성 평가 비닐 및 택코팅 양생 ····· 620
<그림 3.7.64> 내구성 평가 코어링 모습 ····· 621
<그림 3.7.65> 내구성 평가 LA마모 실험 ····· 621
<그림 3.7.66> 양생법에 따른 칸타브로 손실율 평가 ····· 622
<그림 3.7.67> 하이크로크론(DS1923)을 이용한 상대습도 측정 ····· 622
<그림 3.7.68> HFT(Heart Portable Fresh concrete Test) 검증 실험 ····· 624
<그림 3.7.69> W/C에 따른 잔골재 무게 변화 ····· 624
<그림 3.7.70> OTC (Optimum Tack coating Content) 실험 개요도 ····· 626
<그림 3.7.71> 택코팅비율에 따른 부착강도 ····· 626
<그림 3.7.72> 경남 사천 현장 시험 시공 위치 ····· 627
<그림 3.7.73> 2차 시험 시공 흐름도 ····· 628
<그림 3.7.74> 저수축 투수CTB의 현장입도분포 ····· 629
<그림 3.7.75> 저수축 불투수CTB의 현장입도분포 ····· 630
<그림 3.7.76> 현장 품질관리를 위한 HFT Test 결과 ····· 631
<그림 3.7.77> 2차 시험시공 비닐 양생 모습 ····· 632
<그림 3.7.78> 2차 시험시공 CTB 구간의 전경 ····· 633
<그림 3.7.79> Hair Crack 및 골재 탈리(불투수CTB) ····· 633
<그림 3.7.80> 계측기로 인한 횡방향 균열 ····· 634
<그림 3.7.81> 골재 탈리(투수CTB) ····· 634
<그림 3.7.82> 2차 시험시공 아스팔트 합성 입도 ····· 634
<그림 3.7.83> 2차 시험시공 현장투수시험 모습(KSF 2394) ····· 636
<그림 3.7.84> 2차 시험시공 현장투수실험 측정 위치 ····· 637
<그림 3.7.85> 강우의 세부 정의 ····· 638
<그림 3.7.86> 투수AP/저수축 불투수CTB 단면 배수계획 ····· 639
<그림 3.7.87> 투수AP/저수축 투수CTB 단면 배수계획 ····· 640

<그림 3.7.88> 2차 시험시공 맹암거 및 유공관 설치 모습 ····· 640
<그림 3.7.89> 유량 측정용 표면 아크릴 부착 ····· 641
<그림 3.7.90> 2차 시험시공 표면수 측정 장치 ····· 641
<그림 3.7.91> 살수차를 이용한 강우 모사 ····· 641
<그림 3.7.92> 호스를 이용한 강우 모사 모습 ····· 641
<그림 3.7.93> 실험 후 표면수 발생 모습 ····· 643
<그림 3.7.94> 실험 후 침투수 발생 모습 ····· 643
<그림 3.7.95> 표면수, 침투수, 잔류수 및 손실수의 변화 ····· 644
<그림 3.7.96> 표면수, 잔류수 및 손실수의 변화 ····· 645
<그림 3.7.97> 2차 시험시공 단면별 노상 중량 함수비 변화 ····· 646
<그림 3.7.98> 2차 시험시공 강우모사 전·후의 노상 중량함수비 변화 ····· 646
<그림 3.7.99> 2차 시험시공 FWD 측정 장소 ····· 647
<그림 3.7.100> FWD 실험 후 단면별 처짐량 비교 ····· 648
<그림 3.7.101> 저수축 불투수CTB 코아 공시체 ····· 648
<그림 3.7.102> 저수축 투수CTB 코아 공시체 ····· 648
<그림 3.7.103> 투수AP/불투수CTB 코아 공시체 모습 ····· 649
<그림 3.7.104> 투수AP/투수CTB 코아 공시체 모습 ····· 649
<그림 3.7.105> 먼지 및 탈리된 골재 제거 ····· 650
<그림 3.7.106> 롤러를 이용한 택코팅 실시 ····· 650
<그림 3.7.107> 시공 후 불투수CTB 표면 모습 ····· 650
<그림 3.7.108> 시공 후 투수CTB 표면 모습 ····· 650
<그림 3.7.109> 2차 시험시공 현장투수실험 모습 ····· 651
<그림 3.7.110> 2차 시험시공 표면 배수 모습 ····· 651
<그림 3.7.111> 부착강도 실험 모습 ····· 652
<그림 3.7.112> 부착강도 실험 절단면 모습 ····· 652
<그림 3.7.113> 2차 시험시공 BPT 실험 단면도 ····· 653
<그림 3.7.114> 8개월 공용후 수막현상 발생 및 러팅발생 모습 ····· 654
<그림 3.7.115> 8개월 공용 후 표면수의 투수 ····· 655
<그림 3.7.116> 8개월 공용 후 현장 투수실험(길어깨 부근) ····· 656
<그림 3.7.117> 8개월 공용 후 현장 투수실험(중앙부) ····· 656
<그림 3.7.118> 3차 시험시공의 목적 ····· 660
<그림 3.7.119> 3차 시험시공 단면계획 ····· 661
<그림 3.7.120> 3차 시험시공 배치계획 ····· 662
<그림 3.7.121> 3차 시험시공 계측기 매설계획 ····· 663
<그림 3.7.122> 3차 시험시공 배수시설 계획 (투수성 포장) ····· 663
<그림 3.7.123> 3차 시험시공 배수시설 계획 (배수성 포장) ····· 664
<그림 3.7.124> 3차 시험시공 단면 넓이 계산 ····· 665
<그림 3.7.125> 3차 시험시공 강우량 모사 계획 ····· 667
<그림 3.7.126> 3차 시험시공 초기 공용성 평가의 연구 흐름도 ····· 669
<그림 3.7.127> 3차 시험시공 위치도 ····· 670

<그림 3.7.128> 3차 시험시공 CTB 타설 ····· 670
<그림 3.7.129> 3차 시험시공 CTB 양생 ····· 670
<그림 3.7.130> 3차 시험시공 택코팅 실시 ····· 671
<그림 3.7.131> 표층 다짐에 투입된 시공 장비 ····· 673
<그림 3.7.132> 아스팔트 다짐도 실험을 위한 단면선정 ····· 673
<그림 3.7.133> 3차 시험시공 배수시설 맹암거 처리 ····· 674
<그림 3.7.134> 표면수 측정용 차단막 설치 ····· 675
<그림 3.7.135> 표면수 측정용 차단막 코팅 ····· 675
<그림 3.7.136> 3차 시험시공 인공강우실험 ····· 675
<그림 3.7.137> 강우실험용 유량계 설치 ····· 675
<그림 3.7.138> 투수성 포장 8ton/hr 살수 결과 ····· 676
<그림 3.7.139> 78mm/h 살수시 경과시간에 따른 투입대비 누적 표면수(%) ····· 677
<그림 3.7.140> 살수차를 이용한 실험 ····· 677
<그림 3.7.141> 살수실험에 의한 유량 측정 ····· 677
<그림 3.7.142> 150mm/h 살수시 경과시간에 따른 투입대비 누적 표면수(%) ····· 678
<그림 3.7.143> 3차 시험시공 현장 공용 후 현장 투수시험과 공극막힘 현상 ····· 682
<그림 3.7.144> 3차 시험시공 미끄럼저항성 측정 ····· 683
<그림 3.7.145> 3차 시험시공 AP 단면 구분 ····· 684
<그림 3.7.146> 3차 시험시공 코어링을 통한 시공성 평가 ····· 685
<그림 3.7.147> 3차 시험시공 FWD 측정 위치 ····· 686
<그림 3.7.148> 3차 시험시공 살수 전후 FWD 타격 ····· 687
<그림 3.7.149> 투수 AP / 투수 CTB 처짐량 비교 ····· 688
<그림 3.7.150> 투수 AP / 불투수 CTB 처짐량 비교 ····· 689
<그림 3.7.151> 3차 시험시공 TDR 매설 ····· 690
<그림 3.7.152> Weather Station 설치 ····· 690
<그림 3.7.153> 3차 시험시공 TDR 측정 결과 ····· 691
<그림 3.7.154> 유지보수 후의 기능성 향상 실패사례 ····· 693
<그림 3.7.155> 물, 공기가 노즐에서 분사되는 형식 ····· 695
<그림 3.7.156> 공기 분사 노즐(좌)과 물 분사 노즐(우) ····· 695
<그림 3.7.157> 공극 청소 장비의 기본 구조 ····· 695
<그림 3.7.158> 일본의 배수성 포장 공극 청소 장비 ····· 697
<그림 3.7.159> 공기만을 이용한 표면 청소 모습 ····· 698
<그림 3.7.160> 공기를 이용한 청소 이후의 표면 ····· 698
<그림 3.7.161> 공극 청소전의 배수성 포장 표면상태 ····· 698
<그림 3.7.162> 공극 청소 모습 ····· 699
<그림 3.7.163> 공극 청소 후의 표면 상태 ····· 699
<그림 3.7.164> 공극 청소 후 걸러진 이물질 (1) ····· 699
<그림 3.7.165> 공극 청소 후 걸러진 이물질 (2) ····· 699
<그림 3.7.166> 공극청소장비의 노즐에 의한 청소결과 ····· 700
<그림 3.7.167> 공극청소장비 노즐의 청소 범위 비교 ····· 700

<그림 3.7.168> 공극 청소 방법에 따른 청소 효과 비교 ····· 700
<그림 3.7.169> 공기 사용 유무에 따른 작업 속도별 이물질 수거율 ····· 702
<그림 3.8.1> 한국형 포장 설계법의 설계 프로세스 ····· 709
<그림 3.8.2> 누적 손상 개념에 의한 시간별 손상도 계산 ····· 711
<그림 3.8.3> 누적 손상 개념에 의한 1일 손상도 계산 ····· 712
<그림 3.8.4> 전체 누적 손상도 계산 ····· 712
<그림 3.8.5> 4S 포장의 설계 흐름도 ····· 713
<그림 3.8.6> 4S 포장 설계에 있어 입력 모듈의 역할 ····· 714
<그림 3.8.7> 마스터 곡선 (화강암 밀입도 13mm + PG 58-22) ····· 716
<그림 3.8.8> 저수축 불투수 CTB의 비파괴탄성계수와 압축강도, 탄성계수와의 관계 ····· 717
<그림 3.8.9> CTB 재료의 건조수축 실험 결과 (2005 4S 1차년도 보고서) ····· 718
<그림 3.8.10> 계절별 함수비 변화 및 동결 발생 가능성 ····· 721
<그림 3.8.11> 구조해석 모형의 역할 ····· 723
<그림 3.8.12> 콘크리트 피로 균열 수명(2002 AASHTO DG) ····· 724
<그림 3.8.13> 러팅률과 하중재하 회수의 전형적 관계 ····· 725
<그림 3.8.14> 러팅 모형의 개념 ····· 726
<그림 3.8.15> 노상 탄성계수 변화에 따른 표층 처짐량 ····· 736
<그림 3.8.16> AP 탄성계수 변화에 따른 표층 처짐량 ····· 736
<그림 3.8.17> 하부 재료의 탄성계수에 따른 구조해석 결과 ····· 738
<그림 3.9.1> LCC(Life Cycle Cost)의 개념(Kaan Ozbay, 2003) ····· 743
<그림 3.9.2> 아스팔트 포장과 4S포장 단면 상세도 ····· 746
<그림 3.9.3> 배수성 포장 전후의 사고율의 변화 ····· 769
<그림 5.1.1> 4S 포장 시스템 활성화 추진 체계 ····· 788

<표 차례>

<표 1.2.1> 3차년도 제안서 상의 연구 분야 ····· 13
<표 2.1.1> 배수성 포장 골재의 입도(건설교통부, 1997) ····· 18
<표 2.1.2> 30℃ 초과 시간의 변화 ····· 20
<표 2.1.3> 배수성 포장의 다양한 입도분포와 첨가제 예 ····· 22
<표 2.1.4> 배수성 포장 바인더 품질기준 예 ····· 23
<표 2.1.5> 배수성 포장의 혼합물 품질기준 예 ····· 23
<표 2.1.6> 국내 배수성 포장 구간별 현장투수시험 결과 ····· 25
<표 2.1.7> CTB의 장·단점 ····· 29
<표 2.1.8> 국내 투수 콘크리트 특허현황 ····· 35
<표 2.1.9> 페이버와 기존 포장의 비교 ····· 37
<표 2.1.10> 저소음 포장 시험 시공 조사 지점 개요(도로교통기술원, 2002) ····· 42
<표 2.1.11> 배수성 아스팔트 포장 구간 측정 소음도(dB(A))(도로교통기술원, 2002) ··· 42
<표 2.1.12> 종방향 그루빙 포장 구간 측정 소음도(dB(A))(도로교통기술원, 2002) ····· 43
<표 2.1.13> 충북 영동 저소음 포장 등가 소음도 측정(환경부, 2000) ····· 43
<표 2.1.14> 충북 영동 저소음 포장시 최대 소음도(환경부, 2000) ····· 43
<표 2.1.15> 국내 배수성 아스팔트 시공현장 소음도 측정 결과(도로교통기술원, 2002) · 44
<표 2.1.16> 배수성 아스팔트와 일반 밀입도 아스팔트 포장노면의 등가 소음도[dB(A)] 46
<표 2.1.17> 중동대로 구간의 등가소음도[dB(A)] ····· 46
<표 2.1.18> 배수성 아스팔트 포장 시공 전·후의 등가 소음도 [dB(A)] ····· 47
<표 2.1.19> 배수성 아스팔트 포장 구간의 등가 소음도[dB(A)] ····· 47
<표 2.1.20> 의정부시 장암지구 배수성포장 구간의 등가 소음도[dB(A)] ····· 49
<표 2.1.21> 성형-응력 조건별 시험의 구성 ····· 52
<표 2.2.1> 일본 에폭시 아스팔트의 개발 목표치 ····· 60
<표 2.2.2> 일본의 배수성 포장의 연구현황 ····· 68
<표 2.2.3> 일본의 배수성 포장의 기술 현황 ····· 69
<표 2.2.4> 포장 시스템의 기능적 평가 현황 ····· 70
<표 2.2.5> 미국 각 주의 OGFC에 적용한 바인더 현황(Prithvi S. Kandhal, 1998) ····· 72
<표 2.2.6> 미국 각 주의 OGFC 입도 분포 현황(Prithvi S. Kandhal, 1998) ····· 73
<표 2.2.7> NCA의 OGFC 입도분포(NCAT, 2000) ····· 75
<표 2.2.8> 아스팔트 체적 범위(NCAT, 2000) ····· 75
<표 2.2.9> 시험 시공구간의 테스트 결과((NCAT, 2000) ····· 77
<표 2.2.10> OGFC 입도분포 범위(FDOT, 1994)) ····· 78
<표 2.2.11> 현장 입도 기준(조지아 교통국) ····· 78
<표 2.2.12> 조지아 도로국 OGFC 골재 품질기준 ····· 79
<표 2.2.13> 알라바마 도로국의 OGFC 입도기준 ····· 79
<표 2.2.14> 미국 각 주의 입도분포와 사용한 첨가제 종류 ····· 81
<표 2.2.15> 국내·외 CTB 품질 기준 ····· 85

<표 2.2.16> 중국 동,남부 지역의 포장 형식 ····· 88
<표 2.2.17> 유럽 차도용 투수 콘크리트의 배합과 특성(건설도서, 2001) ····· 90
<표 2.2.18> 일본의 투수콘크리트 관련 특허(산업자원부, 2000) ····· 95
<표 2.2.19> 차도용 포러스 콘크리트의 배합 예(Noda Etsuro, 2001) ····· 97
<표 2.2.20> 포러스 콘크리트의 포장구조에의 적용 개념(일본 시멘트 협회) ····· 97
<표 2.2.21> PMcon의 적용 예 (Sakiguchi Osamu, 2001) ····· 98
<표 2.2.22> H-PMcon의 품질, 완성품 시험 일람 (Sakiguchi Osamu, 2001) ····· 99
<표 2.2.23> 개발항목과 포장요소 (Kagata Mamoru, 2001) ····· 100
<표 2.2.24> 표준적인 배합 (Sugiura Hiroyuki, 2002) ····· 101
<표 2.2.25> ICPI 받침모래 입도(ICPI) ····· 106
<표 2.2.26> ICPI 줄눈채움모래입도(ICPI) ····· 106
<표 2.2.27> 외국 고무아스팔트 소음저감 효과 ····· 109
<표 2.2.28> 스웨덴의 저소음 포장 연수와 소음 관계 ····· 111
<표 2.2.29> 다공성 포장 골재의 크기와 공극률에 따른 소음 감소 ····· 111
<표 2.2.30> 차도 투수성 포장용 아스팔트 혼합물 성상 예 ····· 119
<표 2.2.31> 노상 및 보조기층의 지지력계수(Nemoto Nobuyuki, 2001) ····· 121
<표 2.2.32> 투수성포장의 2000년도 시험포장의 단면 (Gotou Atusushi, 2003) ····· 125
<표 2.2.33> 투수성포장의 2001년도 시험포장의 단면 (Gotou Atusushi, 2003) ····· 126
<표 2.2.34> 투수성포장에 사용한 기층, 보조기층재의 성상(2000년도) ····· 127
<표 2.2.35> 일본문헌고찰 내용 요약 ····· 128
<표 2.2.36> Rockcap의 골재분포범위 ····· 137
<표 3.2.1> 불투수 CTB에 고려된 혼화재 ····· 154
<표 3.2.2> 불투수 CTB용 시멘트, 잔골재, 플라이 애쉬 비중 ····· 154
<표 3.2.3> 불투수 CTB용 골재 물리적 특성 ····· 154
<표 3.2.4> 불투수 CTB 실험용 배합설계 ····· 155
<표 3.2.5> 불투수 CTB 예비 실험계획표 ····· 162
<표 3.2.6> 불투수 CTB 시험 배합의 강도 - 시멘트 7%일 때 ····· 165
<표 3.2.7> 압축강도, 탄성계수, 비파괴탄성계수와의 상관관계(시멘트 7%) ····· 166
<표 3.2.8> 불투수 CTB 시험 배합의 강도 - 시멘트 5% ····· 166
<표 3.2.9> 압축강도, 비파괴탄성계수와의 상관관계(시멘트 5%) ····· 167
<표 3.2.10> 불투수 CTB 시험 시공 배합 ····· 173
<표 3.2.11> 저수축 투수용 CTB 실험 배합 ····· 179
<표 3.2.12> 투수 CTB 재료개발을 위한 본실험 실험계획표 ····· 185
<표 3.2.13> 배합에 따른 실험결과 ····· 186
<표 3.2.14> 본실험 결과에 따른 최적 배합표 ····· 189
<표 3.2.15> 일반린, 저수축 CTB, 저수축 투수 CTB에 대한 물성값 ····· 190
<표 3.2.16> 유럽 국가별 배수성 포장 비율(1990년) ····· 194
<표 3.2.17> 배수성 포장용 굵은 골재의 품질기준 ····· 195
<표 3.2.18> 배수성 포장용 아스팔트의 품질기준 ····· 196
<표 3.2.19> 배수성 포장용 아스팔트 혼합물의 품질기준 ····· 197

<표 3.2.20> Superphalt 배수성 아스팔트 물성 ····· 199
<표 3.2.21> 국내 배수성 아스팔트 혼합물 단가 ····· 199
<표 3.2.22> 아스팔트 첨가제 및 개질재의 일반적인 분류 ····· 200
<표 3.2.23> Wax와 폐타이어 첨가율에 따른 바인더 특성 비교(1) ····· 219
<표 3.2.24> Wax와 폐타이어 첨가율에 따른 바인더 특성 비교(2) ····· 220
<표 3.2.25> Wax와 폐타이어 첨가율에 따른 바인더 특성 비교(3) ····· 221
<표 3.2.26> PG 등급 시험결과 총괄표 ····· 223
<표 3.2.27> 골재치수별 계수 ····· 234
<표 3.2.28> 바인더 혼합물 ····· 237
<표 3.2.29> 골재의 물리적 특성 ····· 237
<표 3.2.30> 아스팔트 바인더 종류별 박리율 ····· 245
<표 3.2.31> 시험시공과 실내시험에서 첨가된 개질재 ····· 247
<표 3.2.32> PE Wax의 기본 물성값 ····· 250
<표 3.2.33> 아스팔트 배합설계 결과 ····· 251
<표 3.2.34> 콘크리트 포장의 장·단점 ····· 258
<표 3.2.35> 콘크리트 페이버 포장의 특징 ····· 259
<표 3.2.36> 미국 및 캐나다의 줄눈부 채움 모래 기준 ····· 266
<표 3.2.37> 페이버의 형상 비교 ····· 271
<표 3.2.38> 각형 돌기의 실험결과 ····· 290
<표 3.2.39> 줄눈부 모래채움이 중지된 상황 ····· 291
<표 3.2.40> 반원형 돌기의 실험결과 ····· 292
<표 3.2.41> 낮은 원형 돌기의 실험결과 ····· 293
<표 3.2.42> 돌기형상에 따른 블록의 줄눈부 모래채움 시 고무망치 타격횟수 ····· 294
<표 3.2.43> I형 블록의 압축 및 휨강도 실험결과 ····· 296
<표 3.2.44> U형 블록의 압축 및 휨강도 실험결과 ····· 297
<표 3.2.45> 블록의 배합 설계 ····· 298
<표 3.2.46> 골재의 표준입도 (KS F 2526) ····· 298
<표 3.2.47> 잔골재의 물리적 성질 ····· 298
<표 3.2.48> 시멘트의 물리적 성질 ····· 298
<표 3.2.49> 고성능 AE 감수제의 물리적 성질 ····· 298
<표 3.2.50> 흡수율 및 압축강도 실험결과 ····· 301
<표 3.3.1> 2차원 요소의 특정 (ABAQUS User Manual 2) ····· 314
<표 3.3.2> 구조해석 모형간의 해석 결과(조윤호, 2003년) ····· 318
<표 3.3.3> 4S 포장의 기본모형(안) 제시 ····· 319
<표 3.3.4> 기초 모형 분석을 위한 해석 단면의 물성값 ····· 321
<표 3.3.5> 민감도 분석을 위한 인자 선정 ····· 324
<표 3.3.6> 입력 변수에 따른 구조해석결과와 회귀식 결과 ····· 327
<표 3.3.7> 우리나라 포장 대표 층 두께 및 물성 ····· 330
<표 3.3.8> FEM 해석 단면계획 ····· 330
<표 3.3.9> 투수 CTB 기층 휨강도 기준 ····· 331

<표 3.3.10> FEM 해석결과 값 ····· 332
<표 3.3.11> 고속도로 및 일반국도의 설계 누적 등가 축 하중 교통량 ····· 334
<표 3.3.12> 4S 포장 실험 단면 제안 ····· 336
<표 3.3.14> 4S 포장의 반사균열 모형에 사용된 표층 및 기층의 온도차 ····· 340
<표 3.3.15> 4S 포장의 반사균열 모형에 사용된 표층 및 기층의 탄성계수 변화 ····· 340
<표 3.3.16> 분석시 사용된 각 층의 물성 중간값 ····· 345
<표 3.3.17> 하부구조의 민감도 분석을 위한 탄성계수 적용값(단위 : MPa) ····· 346
<표 3.3.18> 탄성계수에 대한 하중재하지점 구조해석 처짐값 ····· 351
<표 3.3.19> 회귀식 다중 상관계수의 비교 ····· 352
<표 3.3.20> 각 단면별 FWD 시험결과 종합 ····· 354
<표 3.3.21> 포장 형식별 FEM해석에 적용한 탄성계수 ····· 357
<표 3.4.1> 아스팔트층에 사용된 골재의 비중 ····· 380
<표 3.4.2> 아스팔트층의 입도 분포 ····· 380
<표 3.4.3> HWLS에서의 층별 다짐 조건(백우현, 2001) ····· 381
<표 3.4.4> 예비실험에서의 H계수 및 R_D 값 산정 결과 ····· 384
<표 3.4.5> 본실험에서의 H계수, RD 값 산정 결과 및 비교 ····· 391
<표 3.4.6> 반복하중재하 회수에 따른 지점별 변형률 ····· 395
<표 3.4.7> 변형률에 따른 해석 결과 ····· 395
<표 3.4.8> 기존 I 형 블록 크기 및 물성 ····· 398
<표 3.4.9> 기존 쐐기형 블록 크기 및 물성 ····· 398
<표 3.4.10> 노상 및 보조기층의 기초 물성 ····· 398
<표 3.4.11> 노상 및 보조기층 다짐 ····· 399
<표 3.4.12> HWLS 주행 시험 방법 세팅 ····· 403
<표 3.4.13> 시험체 제작 시 기본물성실험 ····· 415
<표 3.4.14> KALES 운용횟수에 따른 실험항목 ····· 415
<표 3.4.15> 포장가속 실험 시 측정변수 ····· 416
<표 3.4.16> 포장가속 실험에 대한 세부연구 목적 및 평가항목 ····· 417
<표 3.4.17> 노상의 현장 다짐 최대 건조 밀도 ····· 426
<표 3.4.18> 포장가속 실험기 노상의 평판재하 시험결과 ····· 428
<표 3.4.19> 포장가속 실험기 노상면의 동탄성 계수 측정결과 ····· 429
<표 3.4.20> 시험체 타설 현장의 다짐 밀도 측정 결과 ····· 430
<표 3.4.21> 포장가속 실험 후 위치별 FWD 실험결과(60,000회) ····· 439
<표 3.5.1> 강우시 도로상에 발생하는 비점오염물질 부하량 (서울시, 2002) ····· 442
<표 3.5.2> 각 부처별 비점오염원관리 대책 방안(국무총리실 등, 2003) ····· 443
<표 3.5.3> 도로상 발생 비점오염물질 배출 농도 ····· 444
<표 3.5.4> 도로상 발생하는 비점오염물질의 종류, 발생원 및 환경 영향 ····· 445
<표 3.5.5> 측정 지역의 유량 평균 가중 농도 (단위 : mg/L) ····· 447
<표 3.5.6> 다른 지역(외국)의 유량 평균 가중 농도 (단위 : mg/L) ····· 448
<표 3.5.7> 연간 발생 부하량 추정치 (단위 :kg/ha/yr)(최영화, 2004) ····· 448
<표 3.6.1> 한양대학교 포장가속시험기의 기본 사양 ····· 453

<표 3.6.2> HVS 기본사양 ····· 456
<표 3.6.3> TxMLS 기본사양 ····· 457
<표 3.6.4> 온도 제어 장치를 가진 포장가속시험기의 특징 ····· 464
<표 3.6.5> HWLS 실험용 노상 및 보조기층의 물성 ····· 477
<표 3.6.6> HWLS 실험에 사용된 재료의 물리적 특성 ····· 477
<표 3.6.7> 투수 CTB 배합설계 ····· 477
<표 3.6.8> 실험에 적용한 투수 AP의 입도 분포 ····· 478
<표 3.6.9> HWLS에서의 층별 다짐 조건 ····· 479
<표 3.6.10> 입경별 노상토 분류 ····· 485
<표 3.6.11> HES 히빙량 측정 ····· 490
<표 3.6.12> HES 온도에 따른 BPN 값 ····· 491
<표 3.6.13> 각 국가별 소음측정시험방법 ····· 511
<표 3.6.14> 소음한도의 측정방법 - 도로소음(환경부, 2000) ····· 518
<표 3.6.15> 이론적 역제곱 법칙에 대한 측정 음압레벨의 최대 허용 편차 ····· 530
<표 3.6.16> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(①번 방향 (위쪽 방향)) 533
<표 3.6.17> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(②번 방향 (전방 55cm 높이 방향)) 533
<표 3.6.18> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(③번 방향 (전방 0cm 높이 방향)) 533
<표 3.6.19> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(④번 방향 (30° 대각선 방향)) 538
<표 3.6.20> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(⑤번 방향 (60° 대각선 방향)) 534
<표 3.6.21> 시험도로 단면별 표면처리 ····· 538
<표 3.6.22> 속도에 따른 반복측정 시험 결과 ····· 540
<표 3.6.23> 각 속도별 측정값으로부터 얻은 통계량 ····· 541
<표 3.6.24> 표면에 따른 속도별 단독차량 CPB 소음 측정 결과 ····· 542
<표 3.6.25> 표면에 따른 속도별 단독차량 CPB 소음 측정 결과(엔진 정지) ····· 543
<표 3.6.26> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (420kgf) ····· 545
<표 3.6.27> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (엔진 정지 420kgf) ····· 546
<표 3.6.28> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (520kgf) ····· 547
<표 3.6.29> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (520kgf) ····· 548
<표 3.6.30> 마이크로폰 위치별 암소음 측정 결과 ····· 553
<표 3.6.31> 마이크로폰 위치별 최소 주행소음 측정값 및 △L값 ····· 553
<표 3.7.1> 1차 시험시공 일정 및 실험목적, 항목 ····· 558
<표 3.7.2> 1차 시험시공 시기별 공용성 실험 항목 ····· 563
<표 3.7.3> 1차 시험시공 현장 노상 입도분포표 ····· 568
<표 3.7.4> 1차 시험시공 노상 성분 함유율 ····· 568
<표 3.7.5> 1차 시험시공 현장 노상의 기초물성실험 결과 ····· 569
<표 3.7.6> 1차 시험시공 DCP 실험 결과 ····· 571
<표 3.7.7> 1차 시험시공 평판재하실험 실험 결과(노상) ····· 571
<표 3.7.8> 1차 시험시공 평판재하실험 실험 결과(보조기층) ····· 571
<표 3.7.9> 고속도로 포장형식에 따른 평판재하 시험기준 ····· 572
<표 3.7.10> 1차 시험시공 저수축 투수/불투수CTB 배합표 ····· 572

<표 3.4.11> 1차 시험시공 투수CTB 현장투수실험 결과 ····· 575
<표 3.7.12> 1차 시험시공 현장 품질 평가 항목 실험 결과 ····· 576
<표 3.7.13> 1차 시험시공 공시체 제작 실험 결과 ····· 578
<표 3.7.14> 아스팔트 혼합물의 혼합 및 다짐 시 온도(건교부, 2005) ····· 579
<표 3.7.15> 1차 시험시공 현장 품질평가 항목 실험 결과 ····· 580
<표 3.7.16> 텍사스 지방도 아스팔트 도로(FM655)의 평균 처짐량(mils, 각센서당) ···· 584
<표 3.7.14> 차륜 하중 제원 ····· 585
<표 3.7.18> 1차 시험시공 현장투수시험 결과 ····· 592
<표 3.7.19> 1차 시험시공 단면별 소음측정결과 ····· 599
<표 3.7.20> 1차 시험시공 BPT 시험 결과 ····· 600
<표 3.7.21> 20개월 공용 후 현장투수시험 결과 ····· 610
<표 3.7.22> 20개월 공용 후 BPT 결과 ····· 611
<표 3.7.23> 시기별 공용성 실험 항목 ····· 618
<표 3.7.24> 다양한 작업성에 따른 Test 방법(BS 1881, 1983) ····· 623
<표 3.7.25> 2차 시험시공 저수축 투수/불투수CTB 배합표 ····· 630
<표 3.7.26> 2차 시험시공 현장 품질 평가 항목 실험 결과 ····· 632
<표 3.7.27> 2차 시험시공 현장투수시험 결과 ····· 637
<표 3.7.28> 강우의 세분적인 분류와 정의 ····· 638
<표 3.7.29> 살수차를 이용한 강우모사에 따른 표면수, 잔류수 및 손실수 ····· 642
<표 3.7.30> 실험 횟수에 따른 표면수, 침투수, 잔류수 및 손실수 ····· 643
<표 3.7.31> 실험 횟수에 따른 표면수, 잔류수 및 손실수 ····· 644
<표 3.7.32> Bonding stress 측정 결과 ····· 652
<표 3.7.33> 2차 시험시공 BPT 실험 결과 ····· 653
<표 3.7.34> 8개월 공용 후 현장투수시험 ····· 655
<표 3.7.35> 현장투수시험 측정값 비교 ····· 656
<표 3.7.36> 4S 3차 시험시공 포장 실험 단면 결정 ····· 660
<표 3.7.37> 3차 시험시공 공정개요 ····· 663
<표 3.7.38> 3차 시험시공 CTB 시공계획 및 평가기준 ····· 664
<표 3.2.39> 3차 시험시공 AP 시공계획 및 평가기준 ····· 664
<표 3.7.40> 3차 시험시공 강우량 모사 실험계획 ····· 666
<표 3.7.41> 3차 시험시공 공용성 평가 계획 ····· 668
<표 3.7.42> 시간에 따른 유량측정 ····· 678
<표 3.7.43> 3차 시험시공 2차 살수실험 ····· 680
<표 3.7.44> 3차 시험시공 3차 강우시험계획 ····· 681
<표 3.7.45> 3차 시험시공 현장투수시험 결과 ····· 682
<표 3.7.46> 3차 시험시공 BPT 시험 결과 ····· 683
<표 3.7.47> 3차 시험시공 코어링을 통한 시공성 평가 ····· 685
<표 3.7.48> 배수성 포장 청소 장비 제원 ····· 701
<표 3.7.49> 개선된 장비에 대한 제원 ····· 701
<표 3.8.1> 표층용 화강암 13mm + AP-3 (PG 58-22) (2006 한국형 포장 설계법) ·· 715

<표 3.8.2> 각 측정 물성에 따른 시험법 ····· 716
<표 3.8.3> 일반린, 저수축 CTB, 저수축 투수 CTB에 대한 물성값(2005 4S 1차년도 보고서) 717
<표 3.8.4> 예측식을 위한 각 시험항목의 상수값 (2003 한국형 포장 설계법) ····· 718
<표 3.8.5> 콘크리트의 열팽창계수 ····· 719
<표 3.8.6> 탄성계수 범위값(2003 권기철) ····· 720
<표 3.8.7> 4S포장 1km/lane 비용(폭 3.5m) ····· 729
<표 3.8.8> 온도 변화에 따른 AP 표층 재료의 동탄성계수 변화 ····· 735
<표 3.8.9> 함수비 변화에 따른 노상의 탄성계수변화 ····· 735
<표 3.8.10> 포장 권역별 가중치 ····· 737
<표 3.8.11> 4S 포장의 권역 구분 ····· 737
<표 3.8.12> 하부 물성에 따른 해석 조건 ····· 738
<표 3.8.13> 하부 재료의 물성 구분 ····· 739
<표 3.8.14> 하부층의 카타고리 제안 ····· 739
<표 3.8.15> 2005 도로 교통량 통계 연보(건교부) ····· 740
<표 3.8.16> 교통 조건에 따른 4S 포장의 두께 및 조합 ····· 740
<표 3.8.17> 4S 포장의 카달로그 단면 설계 예시 ····· 742
<표 3.9.1> 생애주기를 고려한 비용 구성 ····· 744
<표 3.9.2> 공사구간의 시간에 따른 교통량 % (한국도로공사 고속도로 통계) ····· 745
<표 3.9.3> 미국 각 주에서 예상하는 아스팔트 수명 ····· 745
<표 3.9.4> 아스팔트 1km/lane 비용(폭 3.5m) ····· 747
<표 3.9.5> 4S포장 1km/lane 비용(폭 3.5m) ····· 747
<표 3.9.6> 한국도로공사에서 제시하는 배합표와 새로 개발된 저수축린의 배합(1m3기준) ··· 747
<표 3.9.7> 일반 린과 불투수 CTB 기층의 1km/lane 재료비 ····· 747
<표 3.9.8> 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 보수 가격 산정 ····· 748
<표 3.9.9> 2005년 7월 29일 기준 해체비용 및 폐기 처분비용 (자료 : 폐기물처리 공제조합) · 748
<표 3.9.10> 1km/lane 일반 아스팔트 포장과 4S 포장 해체비용 ····· 749
<표 3.9.11> 각 대안별 공사 세부사항 ····· 749
<표 3.9.12> 서비스 수준별 교통량(도로용량 편람, 건설교통부) ····· 750
<표 3.9.13> 고속도로 기본 구간의 차로폭 및 측방여유폭 보정계수 ····· 751
<표 3.9.14> 일반지형에서 중차량의 승용차 환산계수(도로 용량 편람) ····· 751
<표 3.9.15> 공사시 평균 차선 용량 (James Walls III, 1998) ····· 752
<표 3.9.16> 일반 아스팔트 포장의 기관비용 계산 ····· 752
<표 3.9.17> 임금율법에 의한 업무통행의 시간가치 산출결과(2005년, 2004년 기준) ··· 754
<표 3.9.18> 승용차와 버스의 통행 시간가치 ····· 755
<표 3.9.19> 일반 아스팔트 포장 20년째 보수시점의 시간당 교통량 정리 ····· 756
<표 3.9.20> 공사 중 공사구간 통과 차량의 사용자 비용 ····· 758
<표 3.9.21> 유류비 세전 공장도 가격(2006. 6월 현재) (대한석유협회, 2006) ····· 759
<표 3.9.22> 승용차의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km) ····· 760
<표 3.9.23> 대형버스의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km) ····· 760
<표 3.9.24> 중형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km) ····· 761

<표 3.9.25> VOC 회귀식의 차종별 계수 값 ····· 761
<표 3.9.26> 정체구간의 계산 결과 ····· 762
<표 3.9.27> 정체시 속도 감소로 인한 승용차 금액 계산 (예) ····· 763
<표 3.9.28> 20년째의 보수공사로 인한 사용자 추가 비용 계산 결과 ····· 765
<표 3.9.29> 일반 아스팔트 포장의 사용자 비용 종합 ····· 766
<표 3.9.30> 일반 아스팔트 포장의 생애주기 비용 ····· 766
<표 3.9.31> 4S 포장의 생애주기 비용 ····· 767
<표 3.9.32> 교통소음에 대한 사용자 비용의 정량화 (건설교통부, 2004) ····· 767
<표 3.9.33> 도로 유형별 교통사로로 인한 사망자 및 부상자수 ····· 768
<표 3.9.34> 교통사고 사망자 1인당 교통사고 비용(교통개발연구원, 2002) ····· 768
<표 3.9.35> 2001년도 기상별 교통사고 현황(도로교통공단, http://www.rtsa.or.kr) ···· 769
<표 3.9.36> 도로 유형별 교통사로로 인한 사망자 및 부상자수(단위 : 1억대·km당) ··· 770
<표 3.9.37> 소비자 물가상승율 및 은행 시중금리(1996~2005) (한국은행 경제 통계 시스템) · 772
<표 3.9.38> 일반 아스팔트 포장의 생애주기 비용 ····· 773
<표 3.9.39> 4S 포장의 생애주기 비용 ····· 773
<표 3.9.40> 10년 주기 덧씌우기 계산 ····· 774
<표 3.9.41> 10년 주기 덧씌우기 계산(20년째는 CTB 교체) ····· 774
<표 3.9.42> 10년 주기 CTB 교체 ····· 775
<표 3.9.43> 일반 아스팔트 포장의 생애주기 비용 ····· 775
<표 4.1.1> 4S 포장시스템 개발 연구수행 내용 ····· 781
<표 4.1.2> 4S 포장시스템 개발 계획 대비 수행실적 ····· 782
<표 4.2.1> 4S 포장시스템 연구 기대효과 ····· 784
<표 5.1.1> 4S 포장시스템 연도별 활용 계획 ····· 787

<Contents>

Chapter 1. Introduction ····· 1

1. Objective and Scope ····· 1
1. Background and Objectives ····· 1
2. Research Scopes ····· 4

2. Objective and scope ····· 8
1. Objectives and Scope in First year ····· 8
2. Objectives and Scope in Second Year ····· 10
3. Objectives and Scope in Third Year ····· 12

Chapter 2. Current Research Trend ····· 15

1. Domestic Research Works ····· 16
1. Porous Pavement ····· 16
2. Cement Treated Base ····· 28
3. Porous Concrete Pavement ····· 31
4. Paver ····· 36
5. Low-Noise Pavement ····· 41
6. Study of Subgrade Control by Water ····· 50
7. Summary ····· 55

2. Research Trend of Foreign Countries ····· 57
1. Porous and Permeable Pavement ····· 85
2. Cement Treated Base ····· 89
3. Porous Concrete Pavement ····· 89

4. Paver Pavement ····· 101
5. Low-Noise Pavement ····· 107
6. Study of Subgrade Control by Water ····· 107
7. Summary ····· 138

Chapter 3. Research Procedure and Its Result ····· 141

1. Research Strategy and Its Process ····· 141

2. Material Development ····· 145
1. Suggestion of CTB Material ····· 146
2. Development of Permeable Asphalt Binder ····· 194
3. Paver ····· 253

3. FEM Analysis ····· 303
1. Background ····· 303
2. Pavement analysis on elements selection ····· 304
3. Development Analysis Model of 4S Pavement ····· 311
4. Suggestion the Optimum Thicknesses of 4S Pavement ····· 329
5. Analysis of Reflection Crack due to Temperature & Traffic 337
6. Survey and characteristic analysis with FWD ····· 344
7. Summary ····· 359

4. Performance Evaluation of 4S Pavement System with APT ····· 361
1. Performance Evaluation of 4S Pavement System with HWLS 361
2. Performance Evaluation of 4S Pavement System with KALES 405

5. Control of Non-Point Pollution Source at 4S Pavement ····· 441
1. Domestic Non-Point Pollution Source ····· 441
2. Characteristic and Treatment Method of Non-Point Pollution Source from Road 444
3. Survey and Characteristic Analysis of Non-Point pollution Source from Road446

4. Evaluation of Environmental Value of 4S Pavement System 449
5. Summary ····· 450

6. Design of HES and CPX Trailer ····· 451
1. HES(Heart Environment Simulator) Production ····· 451
2. CPX(Close-Proximity Method) Trailer Production ····· 500
3. Summary ····· 555

7. Field Construction ····· 557
1. The 1st Field Construction of 4S Pavement System ····· 557
2. The 2nd Field Construction of 4S Pavement System ····· 615
3. The 3rd Field Construction of 4S Pavement System ····· 658
4. Selection & Estimation of Maintenance & Rehabilitation for 4S Pavement System 693
5. Summary ····· 704

8. Suggestion of Design Architecture ····· 707

1. Suggestion of design prosess ····· 707
2. M-E design ····· 723
3. FEM analysis ····· 724
4. Performance model ····· 724
5. Performance estimation and LCCA ····· 727
6. Catalogue design of 4S ····· 730
7. Summary ····· 741

9. Economic Analysis ····· 743

1. Basic Assumptions ····· 744
2 Analysis period and Establish alternatives ····· 745
3. Establish the agency cost and user cost ····· 750
4. Net Present Value Method ····· 770

5. Calculation of the LCC by NPV ····· 772
6. Comparison between Alternatives for 4S Pavement System 773
7. Comparison between 4S & HMA Pavement ····· 775
8. Summary ····· 776

Chapter 4. Research Results and Expectation of 4S Pavement ····· 777

1. Research Summary and Its Conclusion ····· 777
1. Research Results ····· 777
2. Research Accomplishments by Schedule ····· 780

2. Contribution ····· 782
1. Technical Contributions ····· 782
2. Socio-Economic Contributions ····· 783
3. Further Research Directions ····· 784

Chapter 5. Implementation ····· 785

1. Implementation plan ····· 785
1. Schedule of Implementation ····· 785
2. Fast Implementation of 4S Construction by Providing Technological Know-How into Specification ····· 786

Chapter 6. Reference ····· 789

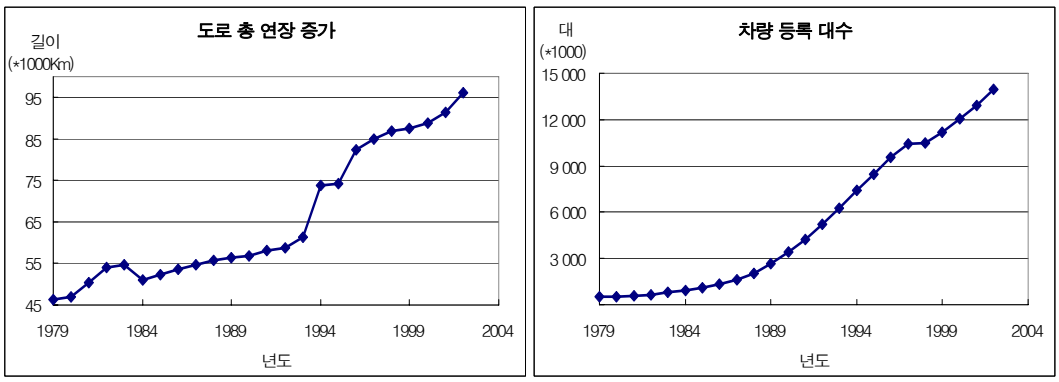
제 1 장 서 론

1절. 연구개발 목표 및 내용

1. 연구 배경 및 목표

1992년 브라질에서 개최된 유엔 환경 개발 회의에서는 “환경적으로 건전하고 지속 가능한 개발(ESSD : Environmently Sound and Sustainable Development)” 이라는 대전제를 수립하였다. 이에 따라 산업화와 경제성장을 최우선으로 삼았던 세계 각국은 환경 문제의 심각성을 인식하게 되었다. 그러나 국내 경제는 국가 산업의 발달로 인해 지속적으로 성장하였고 이를 뒷받침하기 위한 도로의 신규 및 확장사업이 시행되고 있다. 도로 연장의 증가와 함께 차량 대수도 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다. <그림 1.1.1>에서 보인 바와 같이 2003년 12월 현재 총 도로 연장은 약 97,252 km에 달하고 있으며, 국내 차량 등록대수는 1,400만대를 넘어섰다. 즉, 국가적으로 환경과 도로건설이 병립해야 하는 인식이 구체화된 시점은 비교적 최근이다.

국가 경제가 성장함에 따라 국민 소득 역시 증가하여 개개인의 생활수준이 향상되고 있다. 삶의 질(Well-Being)에 관심이 커짐에 따라 정온하고 안전한 생활에 대한 국민의 욕구는 점점 상승되고 있다. 이러한 사회·경제적 패러다임의 변화는 도로 분야에도 적용되고 있다. 과거의 도로는 이동하기 위한 수단이라는 1차원적인

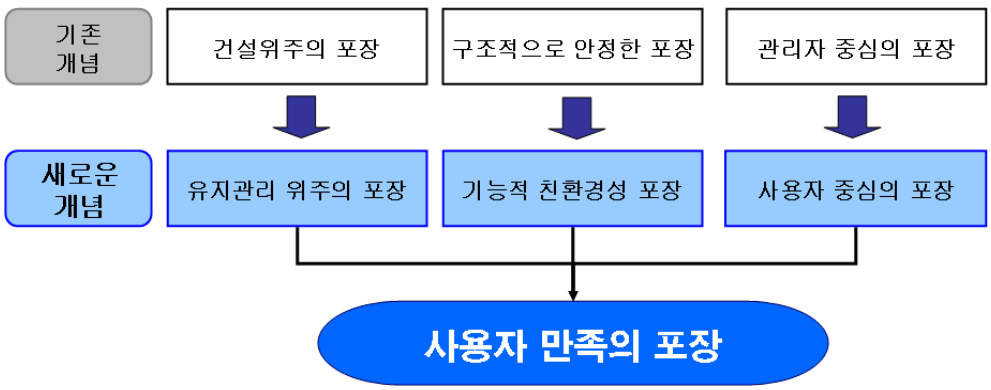


<그림 1.1.1> 국내 교통 환경 변화(2004, 통계청 자료)

의미를 가졌지만, 현재의 도로는 인간이 삶을 영위하고 활동하기 위한 공간 개념으로 변화되고 있다. 즉, 도로에 대한 관점도 기존의 이동성 확보, 경제성, 관리자 중심에서 조용하고 안전하며 아름다운 인간중심의 도로로 변화하고 있다. 이러한 생각의 전환은 도로 포장 분야에도 그대로 적용되고 있다.

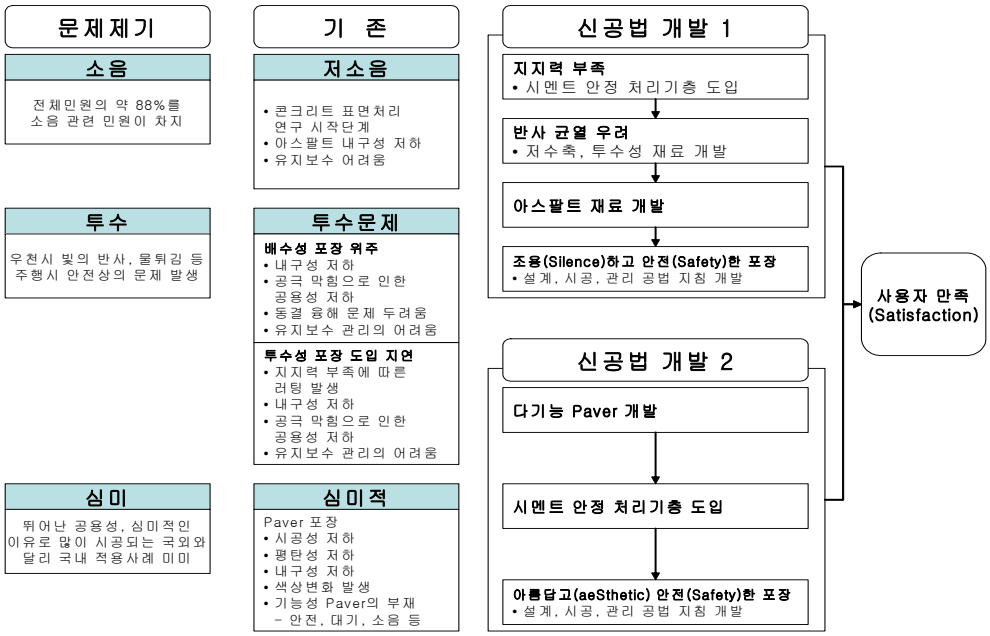
향후 도로 포장은 <그림 1.1.2>에서 보인 것과 같이 건설 위주에서 유지관리로, 구조적 포장에서 친환경적인 포장으로, 그리고 관리자 중심의 획일적 포장형식에서 사용자가 선호하는 포장이 다수를 이루될 것으로 예측하고 있다. 이때에는 고속국도 등의 도로 건설이 전후 복구 사업처럼 일어났던 것은 아마도 아련한 추억이 될 것이며 기존 도로의 유지보수만이 앞으로 도로 사업의 대부분을 차지할 것이다. 내구적인 재료 개발과 두께 및 간격 설정을 통한 구조적이고 안전성 위주의 포장 기술은 보편화되었다. 이제는 구조적으로 안정적이면서 우수한 기능성을 갖춘 환경친화적인 포장 재료 개발의 시대가 도래 할 것이다.

기술의 발달이 결여된 상태로 획일적인 포장 형식의 적용이 지속됨에 따라, 현 포장은 도로 주행시 발생되는 소음, 우천시 주행 안전성 결여, 주변 경관과 어울리지 못하는 점 등의 문제가 있다. 환경부 발표 자료에 따르면 소음문제가 전체 민원의 88.3%, 분쟁 조정 사례의 78% 등을 차지하고 있다. 저소음 콘크리트 표면 처리 연구는 아직 시작단계에 있고 아스팔트 포장은 내구성 저하, 유지보수의 어려움 등의 문제가 있다. 또한 도로 교통안전관리공단에서는 전체 교통사고 중 빗길 미끄러짐에 의한 교통사고가 전체 사고 중 약 30%를 차지하고 있다고 밝혔다.

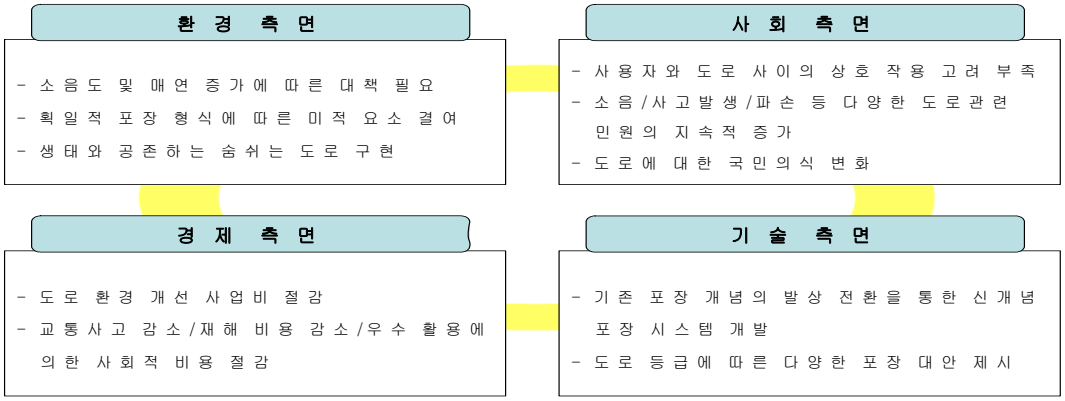


<그림 1.1.2> 도로 포장 건설의 인식 변화

인식의 변화에 따라, 일본에서 보편화된 배수성 포장을 국내에 적용하였으나 체계적인 연구 미비로 조기 파손, 공극 막힘에 의한 배수 불량 등의 문제가 발생하고 있다. 국외에서는 접근성이 강조되는 이면도로, 광장포장, 공항 등에 Paver 포장을 적용하여 뛰어난 공용성과 심미적 아름다움을 제공하고 있다. 그러나 국내에서는 시공성 및 평탄성, 내구성 등의 문제 등으로 오히려 부정적인 측면이 부각되고 있는 상황이다. 따라서 이와 같은 문제를 해결할 수 있는 신재료 및 신공법의 개발을 통해 사용자가 만족할 수 있는 포장 기술 개발이 절실한 상황이다. <그림 1.1.3>에서는 안전하고 조용하며 아름다운 포장 공법 개발의 필요성을 강조하고 있다. 본 연구는 도로 사용자 중심의 안전하고(Safe), 조용하며(Silence), 아름다운(aeSthetic) 포장을 개발함으로써 사용자에게 만족(user Satisfaction)을 주는 것을 목적으로 한다.



<그림 1.1.3> 안전하고 조용하며 아름다운 포장의 개발 필요성



<그림 1.1.4> 연구 개발의 기대효과

<그림 1.1.4>에 나타난 바와 같이 사용자 중심의 안전하고, 조용하며, 아름다운 포장 개발은 국내 자동차수 증가에 따른 소음 발생 및 생활환경 개선을 위한 환경적 측면과 생활수준이 질적으로 향상됨에 따라 도로 이용자들의 다양한 요구를 수렴하기 위한 사회적 측면에서 반드시 필요한 것이다. 또한 도로 환경 개선 및 기타 사회적 비용을 절감하기 위한 경제적 측면, 그리고 다양한 국내 도로 조건에 적용할 수 있는 포장 기술 개발 측면에서 중요하다고 판단된다. 본 연구에서는 경험에 의존한 재료 개발로 유발된 포장 파손의 문제점을 해결하기 위해 새로운 재료의 품질관리 기준을 제시하고, 국내 환경에 적합한 신재료 개발 연구를 수행한다. 전반적인 도로환경을 개선함으로써 국가 예산의 효율화를 도모하고, 교통사고 발생을 억제하여 사회적 비용을 줄이는 것을 목적으로 한다.

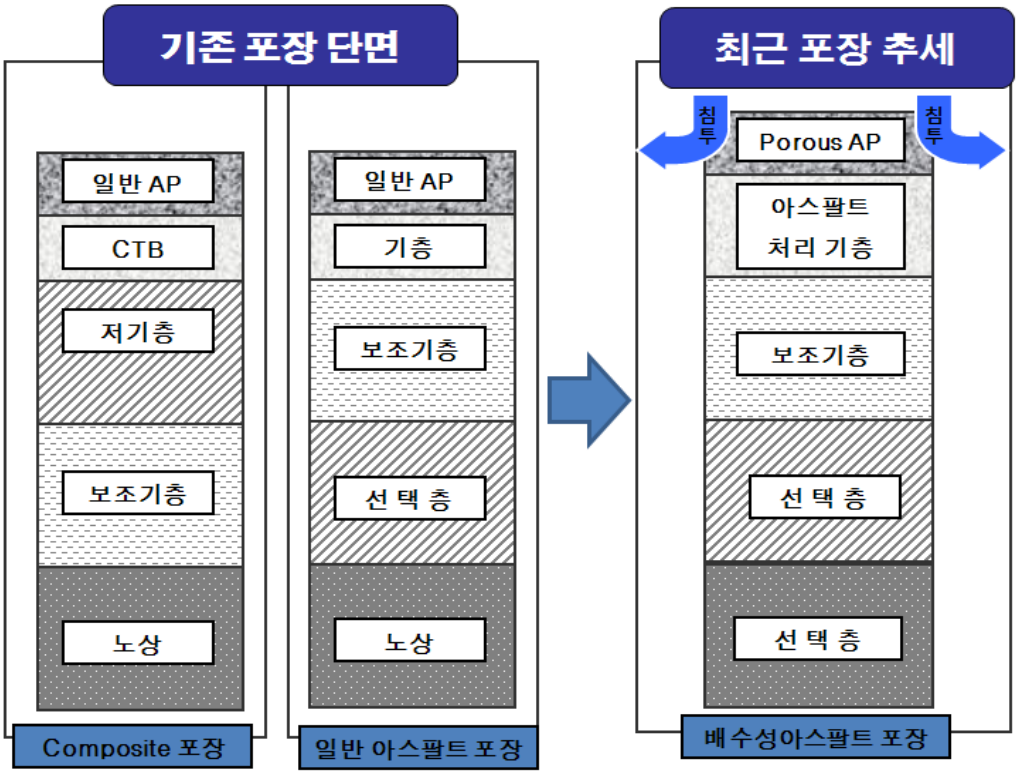
2. 연구 내용

<그림 1.1.5>는 기존 아스팔트 포장 단면과 최근 국내외에 적용되고 있는 포장 단면을 나타내고 있다. 아스팔트 포장은 밀입도 표층, 기층, 골재 보조 기층 등으로 구성된 포장 단면 구조를 가지고 있다. 국외의 경우 포장의 기층으로는 아스팔트 안정처리 기층, 시멘트 안정처리 기층, 골재 기층이 각각 같은 비율로 적용되고 있는 실정이다. 하지만 최근에는 투·배수의 개념을 포장에 도입함으로써 기존의 포장이 가진 여러 문제점, 예를 들어, 소음과 사고 등을 해결하려는 연구가 국내·외에서 활발히 진행 중이다. 포러스 아스팔트를 표층에 적용하고 아스팔트 안정처리

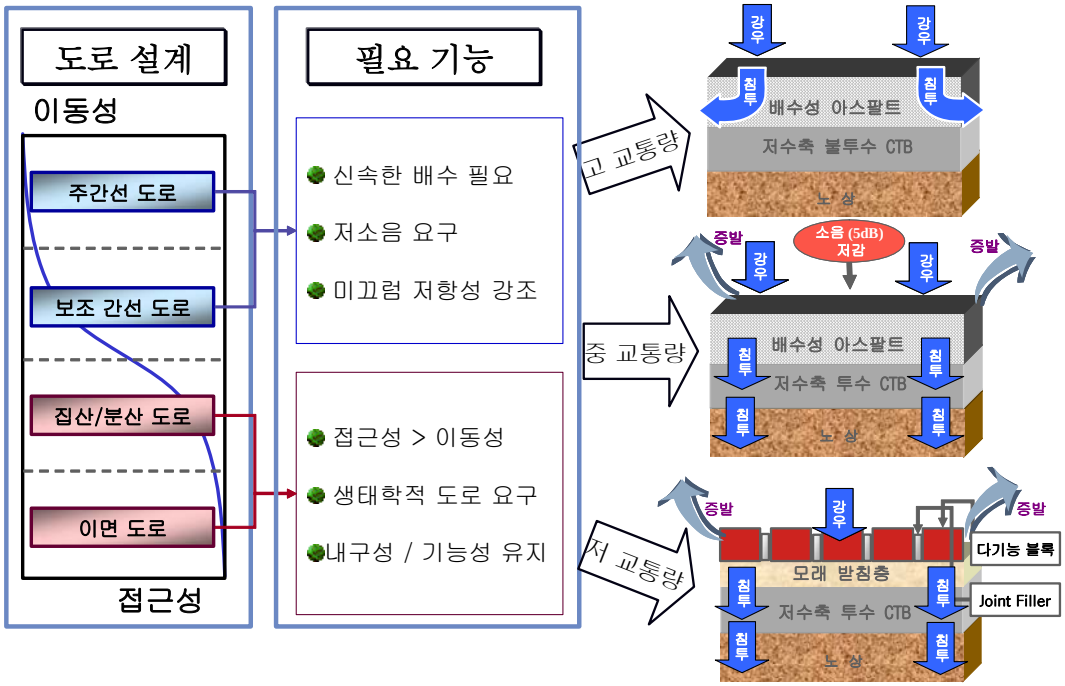
기층(불투수)을 기층에 적용함으로써 배수성 포장을 개발하였고, 포러스 아스팔트를 표층 및 기층에 모두 적용함으로써 투수성 포장을 개발하였다.

일본에서는 다양한 투·배수성 포장을 시험 포장하여 그 공용성을 평가하고 있으나 투수성 포장의 경우 하부층의 투수 문제로 러팅 등의 많은 문제점이 발생하는 것으로 나타나 차도 적용에는 새로운 개념이 필요할 것으로 보고되고 있다.

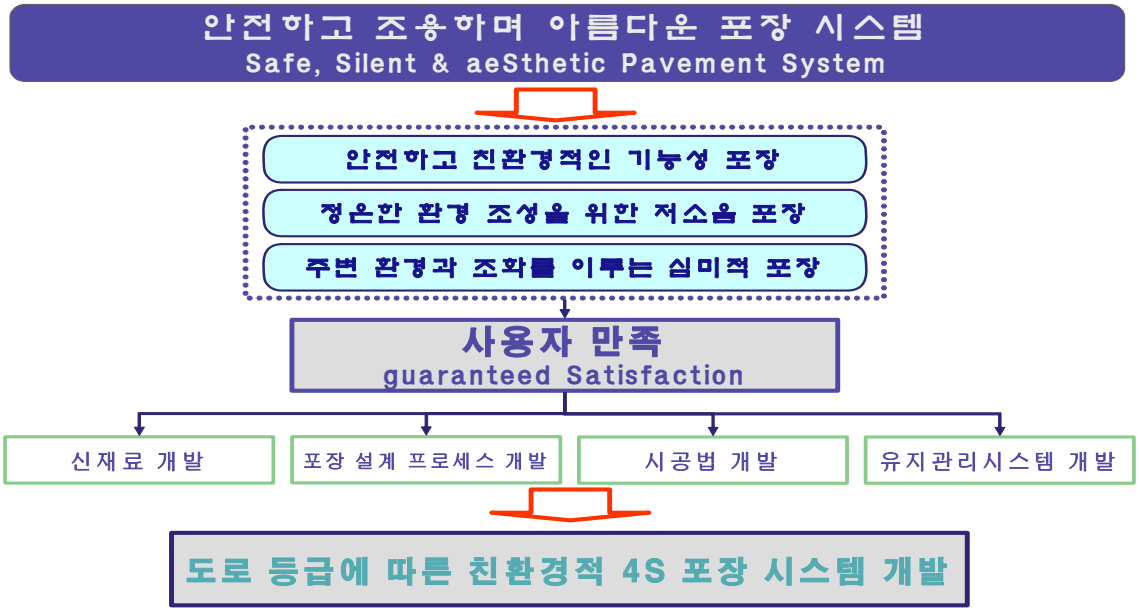
이에 따라 본 연구에서는 투·배수성 포장을 도로 등급에 맞추어 개발하려고 한다. 이동성이 높은 주간선 도로 및 보조간선 도로는 배수성/투수성 포장을 적용하여 소음을 저감시키고 빠른 배수를 통하여 빗길 안전성을 향상시킨다. 기존의 시멘트 안정처리 기층을 개선하여 저수축 투수 시멘트 안정처리 기층을 개발함으로써 투수성 포장이 가진 내구성 및 강도 특성을 이용하는 한편 반사균열 문제를 해결하고자 한다. 또한 다기능 Paver의 재료, 형상 등을 개발하여 접근성이 높은 집분산 도로 또는 이면 도로에 적용함으로써 사용자에게 아름다운 도로를 제공한다. <그림 1.1.6>은 기존 포장의 문제점을 극복하기 위해 본 연구에서 제안하는 포장 시스템의 개념을 나타내고 있다.



<그림 1.1.5> 기존 아스팔트 포장 단면(좌)과 최근 적용되는 포장 단면(우)



<그림 1.1.6> 4S 포장 시스템의 기본 개념도

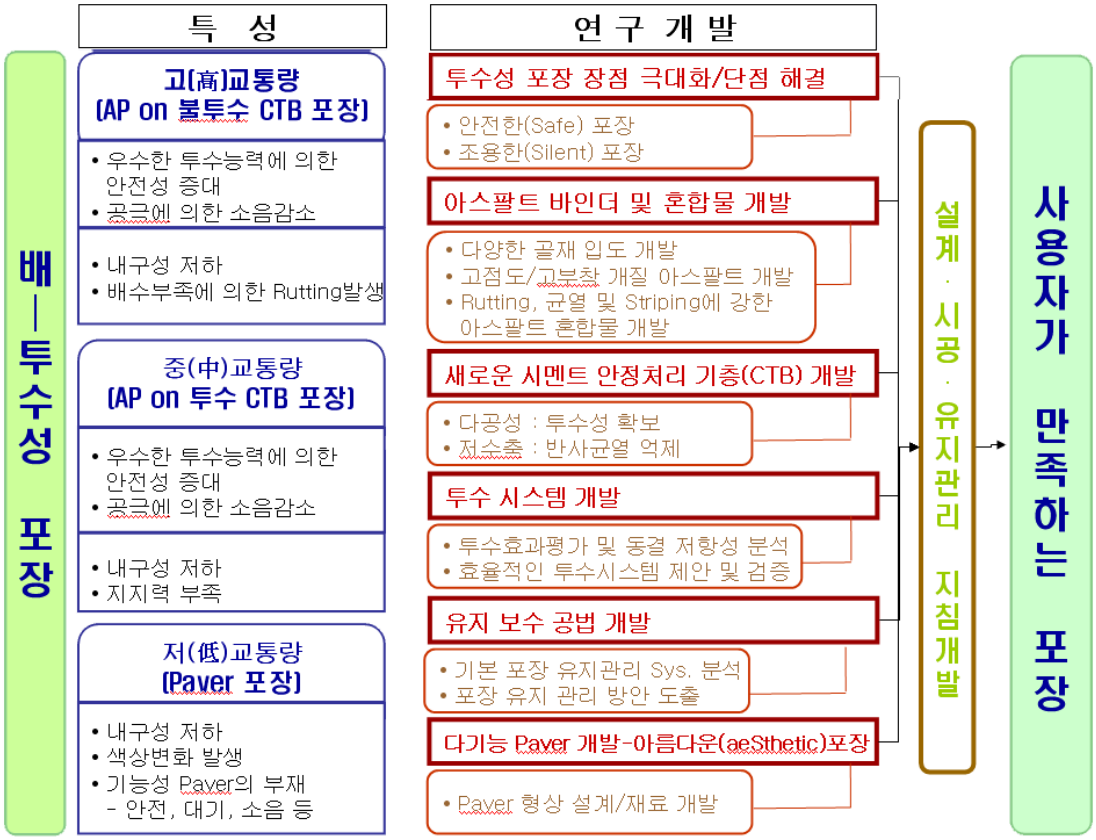


<그림 1.1.7> 4S 포장 시스템 개발 흐름도

<그림 1.1.7>은 새로운 포장 시스템에 대한 개념을 나타내고 있다. 안전하고 조용하며 아름다운 포장을 제시하는 본 연구는 신포장 재료, 신시공 장비, 유지보수

관련 지침을 개발하여 사용자가 만족하는 도로를 제공하려고 한다.

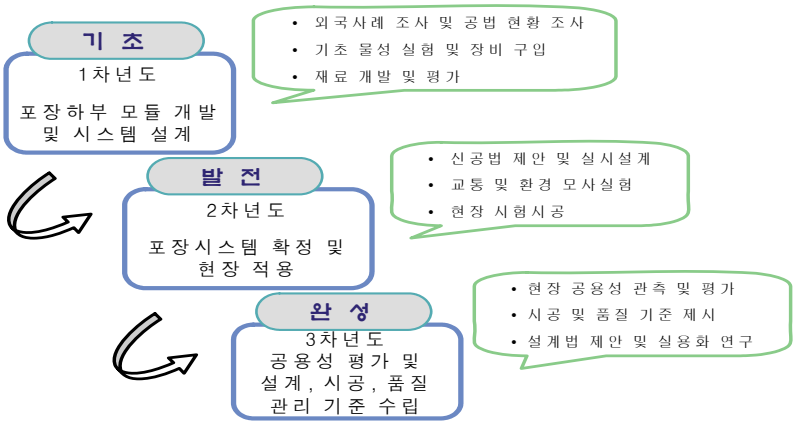
신재료 개발은 문헌 고찰 및 다양한 실험을 통해 기층용으로 저수축 투수 시멘트 안정처리 기층을, 표층용으로 내구성을 지닌 투수 아스팔트 혼합물 개발을 포함한다. 이러한 포장 재료는 친환경적이고 안전하며 사용자 중심의 도로 건설에 적합함에도 불구하고 포장의 장기공용성 및 내구성에 대한 의심과 과학적이지 않은 막연한 두려움 등이 복합적으로 작용하여 시공 실적이 미미한 실정이다. 따라서 내구성이 높은 재료 개발과 투수 기능을 갖춘 기층을 개발하여 새로운 포장 시스템을 제안하고자 한다. 이를 위해 골재 배합 비율과 입도 개선, 아스팔트 바인더 및 혼화제 배합, 관련 시공법 개발을 통해 포장 표면의 탈리 현상을 방지하는 신재료를 개발한다. 또한 공극 막힘 현상 등에 대한 관리방안을 도출하고 실용화하는 기술을 제안하여 장래 배수성 포장 공법의 상용(賞用)화에 대비하고자 한다. 또한 심미적인 효과가 우수하고 내구성을 갖춘 페이버 포장을 개발하여 이면도로 등에서 활용할 수 있는 방안을 마련한다. <그림 1.1.8>에서는 본 연구 내용을 요약하고 있다.



<그림 1.1.8> 4S 포장시스템 개발 연구 내용

2절. 연차별 연구개발 목표 및 내용

본 연구의 전체적인 연구 추진 계획은 <그림 1.2.1>과 같다. 1차년도에는 기초적인 문헌조사를 통해 여러 가지 포장에 대한 검토 및 선정 작업을 거쳤다. 기본 실내 실험을 통해 재료의 물성을 규명하고 재료 및 배합설계를 실시했다. 이를 통해 상사 모형 시험 및 APT 시험을 실시하여 재료 및 배합설계를 검증했고, ABAQUS 구조 해석을 통해 단면을 제시하여 시험 시공 적용 계획을 수립했다. 2,3차년도에서는 “안전하고, 조용하며, 아름다운 포장”에 대한 현장 시험 시공이 이루어졌고 현장 공용성 평가는 3차년도에 걸쳐 이루어졌으며, 현장과 실내 실험 자료를 근거로 각종 시방서와 지침 등 실무에 적용 가능한 구체적인 결과물을 생산하였다.



<그림 1.2.1> 전체적인 연구 추진 계획

1. 1차년도 연구개발 목표

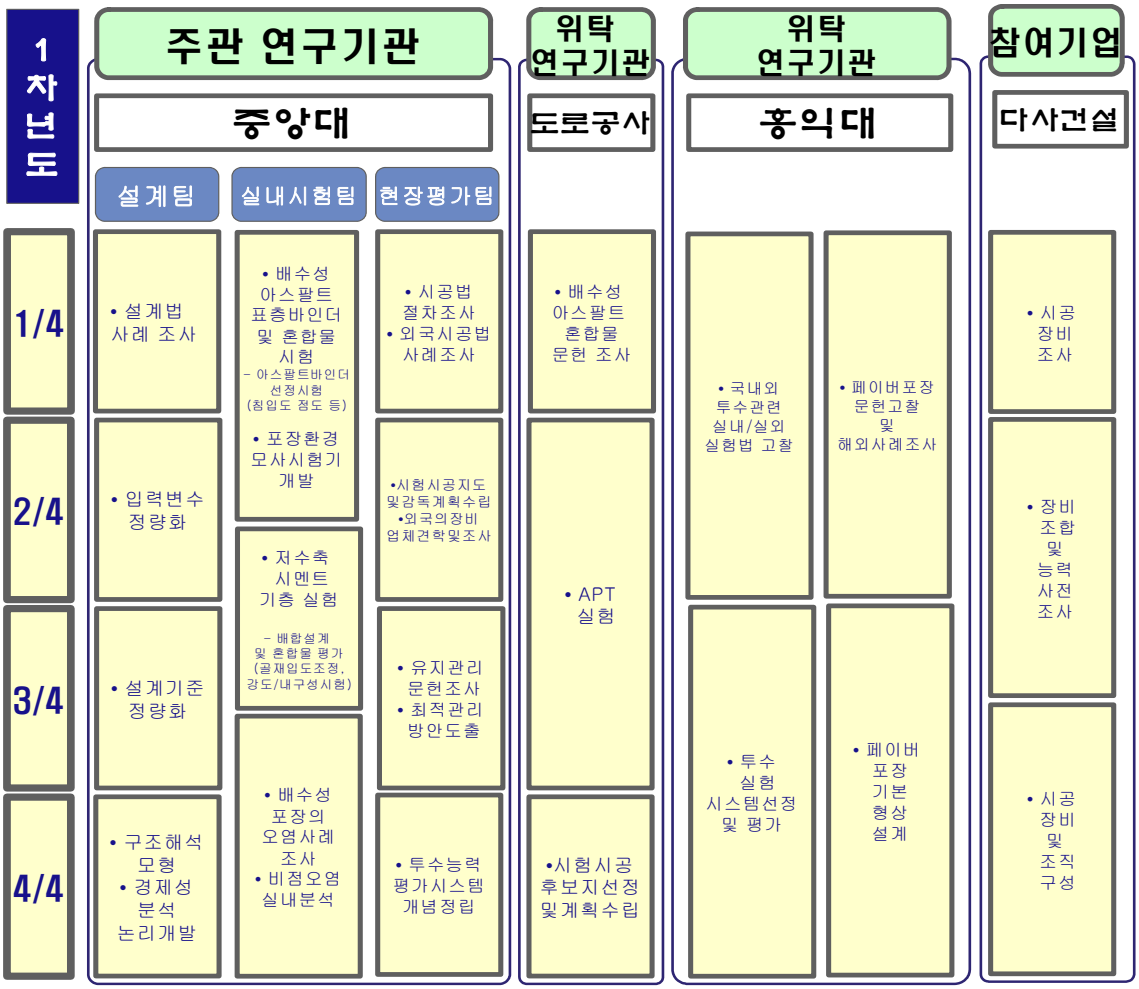
가. 연구목표

1차년도에서는 안전하고, 조용하며, 아름다운 포장의 개념을 정립하고 이에 부합하는 신재료를 개발한다. 또한 제시된 포장의 역학적 기본 거동을 살펴보고 실내 실험을 통해 이를 검증하고자 한다. <그림 1.2.2>에서는 당해연도의 중점 연구 내용을 도식화하고 있다.

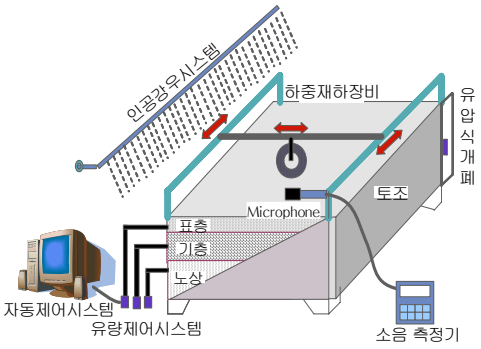
나. 연구내용 및 범위

문헌 조사를 통하여 다양한 국내외 연구 사례를 검토하고 장·단점을 분석하여 각 형식별 배합설계, 시공사례, 설계법 등을 고찰한다. 이를 바탕으로 신포장 시스템을 선정하고 적용 가능한 재료를 개발 또는 도입하여 기본적인 실내 물성실험을 실시한다.

또한 유한요소해석을 통해 신포장 공법의 구조적 거동을 해석하여 다양한 하중에서 포장이 갖는 역학적인 특성을 파악하고 포장가속시험 결과와의 비교 및 검증을 통해 현장에서의 역학적인 특성 추정능력을 향상시킨다.



<그림 1.2.2> 1차년도 연구 내용 및 업무 분장



<그림 1.2.3> 포장환경 모사 시험기(HES) 개념도



<그림 1.2.4> 국외 CPX 트레일러 예

실내 파손촉진 실험에서는 재료특성을 검증하고 피로식을 제안할 뿐만 아니라 단면의 특성에 따라 공용성을 예측하고자 한다. 이를 통해 현장 시험시공 공법을 제시하고 공법의 타당성을 검토한다. <그림 1.2.3>과 <그림 1.2.4>에 제시한 바와 같이 단순한 상사 모형이 아닌 환경 하중의 모사가 가능한 HES(HEART Environment Simulation, 포장환경 모사 시험기)와 시험시공시 소음측정에 활용될 CPX(Close-Proximity Method) 트레일러를 설계하여 보다 정확한 포장의 공용성, 환경 유해성 등을 평가하고자 한다.

2. 2차년도 연구개발 목표

가. 연구목표

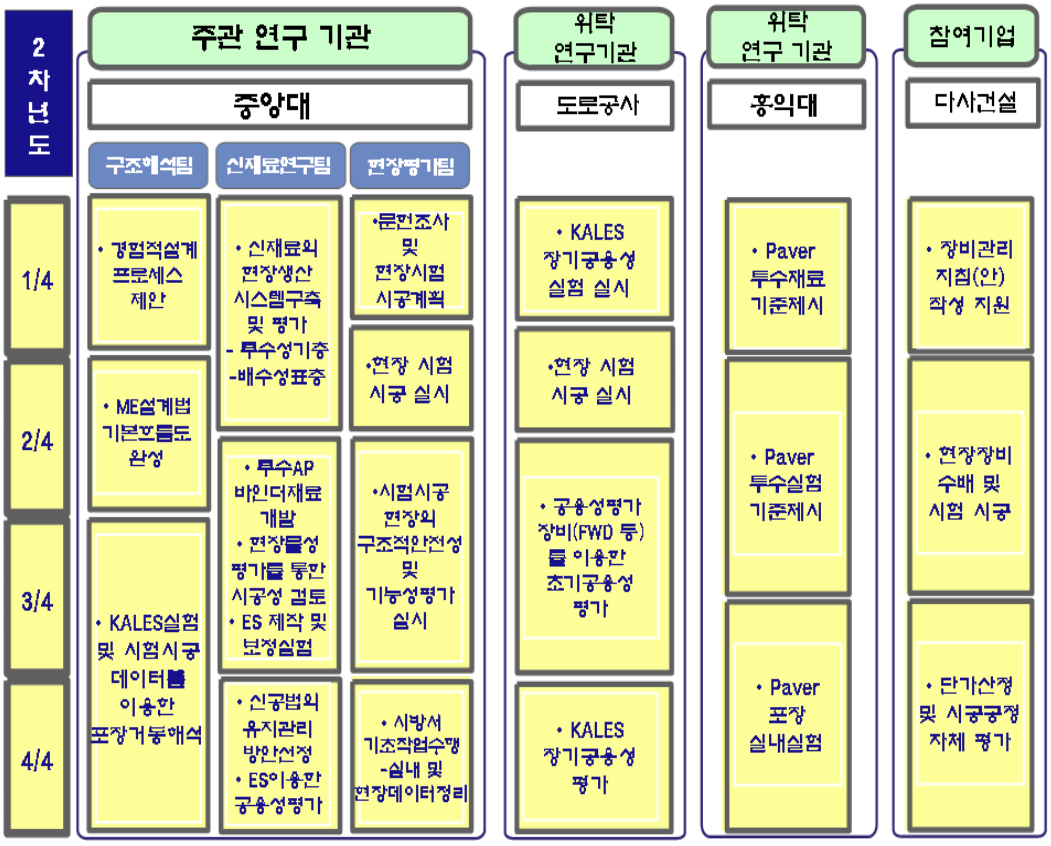
2차년도에서는 1차년도의 연구 결과를 보안하고 추가적인 연구를 수행하여 대안을 제시하며 시방 지침을 마련하기 위한 기초 작업을 수행한다. 이를 위해 신공법을 제안하고 교통 및 환경 모사실험을 실시하여 현장 시험시공을 통한 새로운 포장 시스템의 초기 공용성을 평가하고 Heart CPX 소음 측정 장비를 제작하여 4S포장의 기능적인 평가 및 기준을 제시한다. <그림 1.2.5>에서는 당해연도의 중점 연구 내용을 도식화하고 있다.

나. 연구내용 및 범위

문헌 조사를 통하여 다양한 국내외 연구 사례를 검토하고 장·단점을 분석하여

각 형식별 배합설계, 시공사례, 설계법 등을 고찰한다. 이를 바탕으로 신포장 시스템을 선정하고 적용 가능한 재료를 개발 또는 도입하여 기본적인 실내 물성실험을 실시한다.

또한 유한요소해석을 통해 신포장 공법의 구조적 거동을 해석하여 다양한 하중에서 포장이 갖는 역학적인 특성을 파악하고 포장가속시험 결과와의 비교 및 검증을 통해 현장에서의 역학적인 특성 추정능력을 향상시킨다. 실내 파손촉진 실험에서는 재료특성을 검증하고 피로식을 제안할 뿐만 아니라 단면의 특성에 따라 공용성을 예측하고자 한다. 이를 통해 현장 시험시공 공법을 제시하고 공법의 타당성을 검토한다. HES(HEART Environment Simulation, 포장환경 모사 시험기)와 시험시공 시 소음측정에 활용될 CPX(Close-Proximity Method) 트레일러를 제작하여 보다 정확한 포장의 공용성, 환경 유해성 등을 평가하고자 한다.



<그림 1.2.5> 2차년도 연구 내용 및 업무 분장



<그림 1.2.6> 개발된 CPX Trailer

3. 3차년도 연구개발 목표

가. 연구목표

연구 결과를 종합하여 최적 대안을 제시하며 각 분야의 지침을 개발한다. 설계법을 개발하고 본 연구 결과의 활성화 방안을 모색한다. 따라서 3차년도에는 신공법 장단기 공용성 평가, 설계프로세스 개발, 각종 지침서 작성을 목표로 한다.

나. 연구내용 및 범위

현장 시험시공의 공용성을 지속적으로 관찰하여 단기 공용성 평가를 진행하고 APT 및 HES의 실험결과를 반영하여 설계 프로그램을 개발한다. 시공 시방 지침을 보완 및 완성하고 다양한 분야로의 활용 방안을 강구한다.

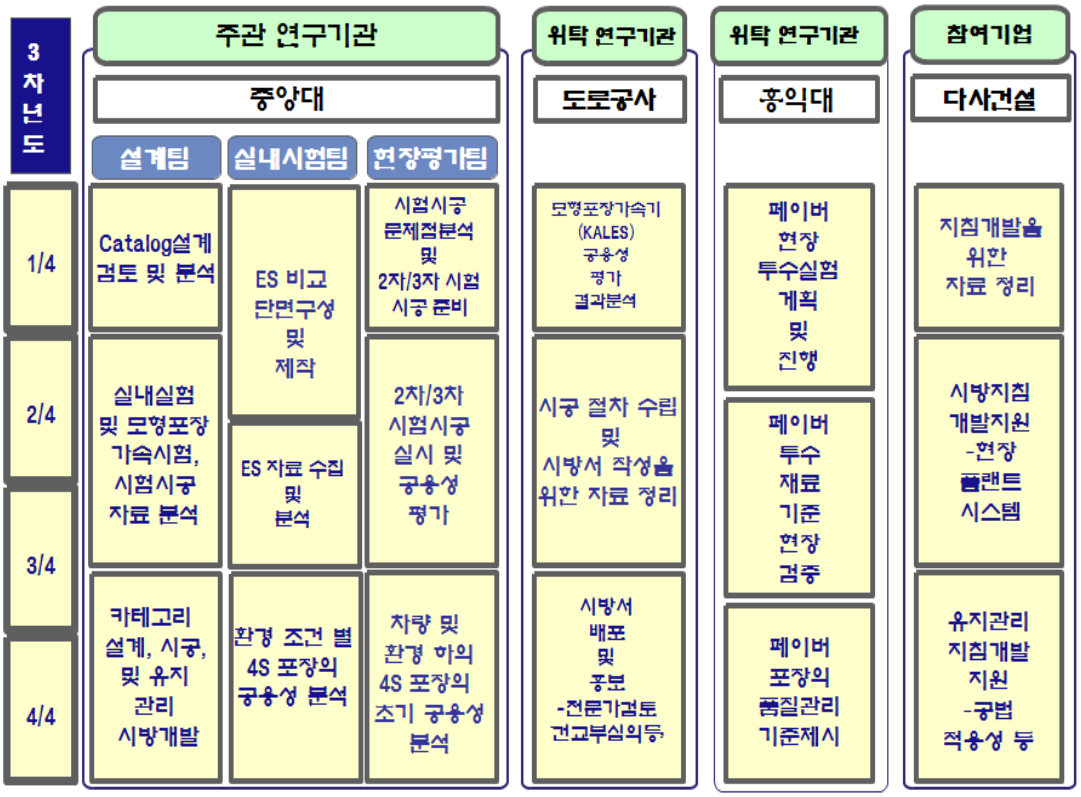
또한 단기 공용성 평가를 위하여 공용성 평가 세부항목별 기준 및 최종평가 방법을 제시하고 자동화 측정 장비를 이용하여 현장 공용성을 측정한다. 여기에 재료 품질관리 기법, 시공 시방지침 제시, 유지 관리 기준 개발을 통하여 결과물의 현실성을 부여한다.

설계 프로세스 개발을 위해 설계 흐름도 작성, 경험적 모형 제시 그리고 역학적 모형을 이용하여 경험적 역학적 설계 흐름도를 작성하고 설계표준도를 완성한다. 실용화 및 활성화 방안을 연구하고 2차, 3차 현장시험시공을 추진, 1차 시험시공의 보완, 현장자료 축적 및 분석을 3차년도 연구내용으로 한다. 이를 바탕으로 <표 1.2.1>은 본 연구진의 연구 계획서 상에 포함된 연구항목과 연구기간을 나타낸 것

이며 <그림 1.2.7>은 각 업무를 기관별로 분장한 것이다.

<표 1.2.1> 3차년도 제안서 상의 연구 분야

세부연구분야	월 단위 추진계획											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
문헌조사 /기초조사												
단기공용성 평가												
장기공용성 예측 및 문제점 보완												
2차 시험시공												
시험시공 후 초기공용성 평가												
설계 프로세스 개발												
재료 품질관리 기법 개발												
시공 지침 제시												
유지관리기준제시												
실용화 및 활성화 방안연구												
페이버 현장투수 실험 계획 및 진행												
페이버 포장 기본물성 제시												
보고서 작성												

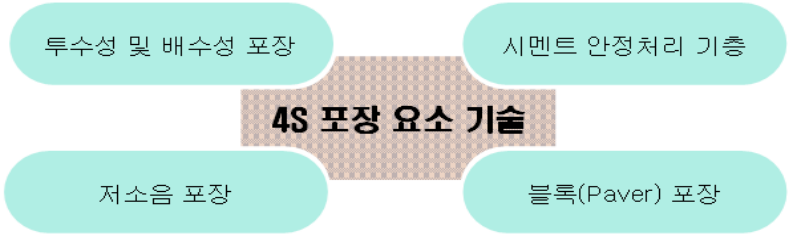


<그림 1.2.7> 3차년도 연구내용 및 업무 분장

제 2 장 국내외 기술개발 현황

환경에 많은 관심을 보이고 있는 사회·경제적 여건 속에서 포장 관련 기술 분야에서도 환경 파괴를 최소화하며 사용자들에게 만족을 줄 수 있는 기술 개발을 필요로 한다. 이러한 사회적 흐름에 부합하기 위한 4S 포장을 개발하는 본 연구의 주요 기술은 <그림 2.1>과 같이 투수성 및 배수성 포장, 시멘트 안정처리 기층, 저소음 포장, 페이버 포장 등을 들 수 있다.

투수성 포장은 포장체의 공극을 통하여 우수를 노상까지 직접 침투시키되 지지력을 잃지 않도록 한다. 배수성 포장은 포장 표면의 공극을 통하여 우수를 일부층까지 통과시키되 측구로 배수시킨다. 이러한 포장은 소음을 감소시키고 미끄럼이 우수한 것으로 알려져 있다. 시멘트 안정처리 기층(CTB : Cement Treated Base)은 고속도로, 공항, 활주로, 승강장 등의 포장에 널리 적용되고 있다. 국외에서 CTB를 사용하는 주된 이유는 경제성이 우수하고 중차량의 증가로 인해 발생하는 러팅에 대한 저항성이 크기 때문이다. 저소음 포장의 경우 재료의 배합 및 표면 처리를 통하여 타이어와 포장표면 사이에서 발생하는 소음을 저감시켜줌으로써 도로변 환경 소음 문제 해결의 대안이 될 수 있다. 페이버(Paver) 포장은 보도 또는 이면도로에 적용할 수 있는 포장 형식이다. 표층에 콘크리트 블록을 시공하여 주변 환경과 조화를 이룰 수 있는 심미적인 효과를 기대할 수 있다. 또한 주거 지역, 학교앞 등의 이면도로에서 차량의 속도를 줄여줌으로써 도로 이용자 및 보행자들의 안전성을 높일 수 있다. 본 장에서는 국내외 환경 친화적이고 다기능성의 도로 기술 개발을 위한 요소기술을 조사하여 국내 실정에 적합한 공법 및 시스템 개발에 대한 토대를 구축하고자 한다.



<그림 2.1> 4S 포장 요소 기술

1절. 국내 관련 연구 현황

우리나라의 도로는 1970년대 경부 고속도로 건설 이후 질적, 양적 팽창을 이루어 경제 발전의 중추적인 역할을 수행해 왔다. 이러한 과정에서 도로는 구조적 안전성과 내구성, 경제성 등에만 초점을 맞추어 설계·시공되어 왔다. 따라서 환경 친화적이고 사용자 중심의 포장 기술은 아직 걸음마 단계에 불과하다. 본 절에서는 각 요소기술에 대한 기본적인 개념과 국내 연구 및 적용 사례에 대해 살펴본다.

1. 배수성 포장

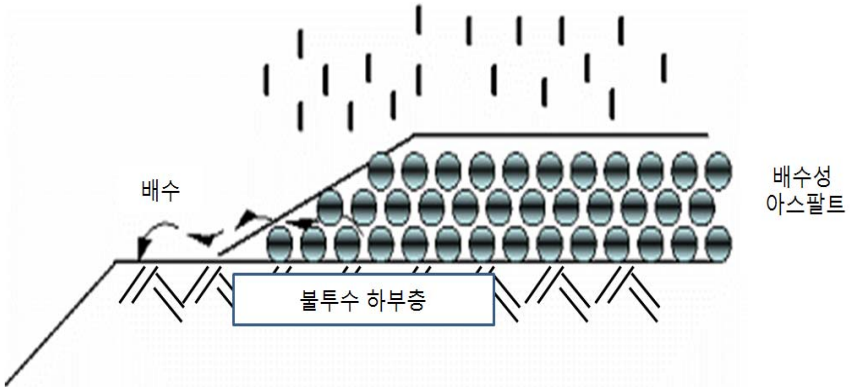
가. 개요

배수성 포장은 1950년대 중반 비행장 활주로의 수막현상을 방지하기 위하여 영국의 공항에서 처음으로 시공되었다.(손종철, 2004) 그러나 포장의 내구성 문제로 인해 본격적인 적용이 미루어지다가 1980년대에 접어들면서 아스팔트의 특성을 개선한 고점도 개질 아스팔트의 개발로 내구성 문제가 해결되면서 적용이 확대되고 있으며 시공면적도 넓어지고 있다.

우리나라에서는 1990년대 초 배수성 포장에 대한 연구가 시작되었으며 1996년에 경부 고속도로에 시험시공을 실시하였다. 1999년 일반국도에 시험포장이 실시된 이후 적용 구간이 증가하고 그 기능과 성능이 평가되면서 국도 이외의 기타 지방시도에 적용이 확대되고 있다.

나. 국내 기술 동향

배수성 포장은 형성된 공극을 통하여 포장체 내부로 물을 흘려서 배수시키는 기능성 포장으로 수막현상의 방지, 마찰저항의 증진, 물 튀김의 최소화 등이 가능하다. <그림 2.1.1>에서와 같이 배수성 포장의 기본 구조는 불투수층을 통하여 우수를 하부 불투수층 면에서 수평으로 배수하는 것이다.



<그림 2.1.1> 배수성 포장의 기본 구조

이광호 등은 국내 최초로 배수성 포장의 결합재에 대한 실험을 실시하였다. 배수성 혼합물의 안전성 및 내구성 저하방지를 위해 사용되는 결합재에는 일반아스팔트, 일반아스팔트+식물성 섬유, 개질 아스팔트, 개질 아스팔트+식물성 섬유, 일반아스팔트+천연아스팔트, 식물성 섬유, 고점도 특수 개질 아스팔트 등이 있다. 식물성 섬유는 혼합물 내 모르타르의 흘러내림 방지와 결합재량을 증가시켜 골재의 피막두께를 두껍게 하여 노화를 방지하고 내구성을 향상시키기 위해 사용한다. 고점도 특수 개질 아스팔트는 혼합물 제조 시 높은 점성으로 결합재 피막두께를 증가시켜 내구성을 확보하고 고온에서 혼합물의 안전성 확보 등을 목적으로 사용한다. 결합재의 성능을 비교한 결과, 동일 공극률에서 식물성 섬유를 첨가한 것이 투수계수와 안정도가 작게 나타났지만 흐름치와 포화도는 크게 나타났다. 결합재에 따른 안정도는 고점도 특수개질 아스팔트, 개질 아스팔트, 일반 아스팔트 순으로 높게 나타났다. 고온에서는 고점도 특수 개질 아스팔트가 우수한 성능을 보였으나 고점도 특수 개질 아스팔트는 공극률에 의존하는 성향을 보이고 있어 사용 시 배합에 주의를 기울여야 한다. 공극률 유지 능력은 고점도 특수 개질 아스팔트에서 크게 나타났다. 배수성 아스팔트 혼합물의 기능성 확보를 위해서는 초기의 공극률을 크게 하고 고점도 개질 아스팔트를 사용하는 것이 효과적인 것으로 주장하였다.(이광호, 1995)

배수성 포장은 굵은 골재의 역할이 중요하여 건설교통부에서는 1997년에 <표 2.1.1>과 같은 배수성 포장 골재의 입도를 제시하였다. 일반적으로 배수성 포장 쇄석골재의 품질은 표건 비중 2.5 이상, 흡수율 20% 이하, 마모감량 30% 이하(KS F 2503)를 기준으로 한다.(건설교통부, 1997)

<표 2.1.1> 배수성 포장 골재의 입도(건설교통부, 1997)

체크기	통과중량백분율 (%)	
	골재 최대입경 13mm	골재 최대입경 19mm
26.5mm	-	100
19mm	100	95~100
13.2mm	92~100	53~78
9.5mm	62~81	35~62
4.75mm (No.4)	10~31	
2.36mm (No.8)	10~21	
300㎛ (No.50)	3~12	
75㎛ (No.200)	2~7	
아스팔트 함량	4.5% 이상	

이재진 등은 역학적 강도 시험을 통하여 밀입도, 슈퍼페이브입도, SMA, 배수성 포장 입도 등의 강도값을 비교하였다. 마샬 안정도는 각 혼합물에 따라 다소의 차이를 보이나 모두 시방규정을 만족하는 것으로 나타났고 흐름값은 배수성 입도를 따른 혼합물이 다른 입도의 혼합물보다 높은 것으로 나타났다. 따라서 동절기 취성파괴에 대한 저항력이 클 것으로 판단된다. 압축강도 시험과 휠트랙킹 시험을 통하여 러팅에 대한 저항성을 살펴본 결과, 배수성 혼합물이 밀입도 19mm 혼합물에 비하여 압축강도 및 동적 안정도 값이 매우 크게 나타났고 변형률은 매우 작게 측정되었다. 각종 실험을 근거로 배수성 포장이 공용초기에 발생하는 러팅에 대한 저항성이 우수한 것으로 주장하였다. 한편 배수성 포장 혼합물의 투수계수는 평균 2.88×10^{-1}㎝/sec로 일본 기준(1.0×10^{-2}㎝/sec이상)과 비교해 보면 2배 이상의 높은 투수성을 보이고 있다. 뛰어난 배수능력은 우천시 수막현상(hydroplaning)과 물튀김현상을 방지할 수 있고 야간 노면 반사 완화 및 노면 표시의 시인성을 향상시킬 수 있다.(이재진 외, 2003)

유인균은 미끄럼 개선과 주행환경의 개선에 큰 영향을 주는 우천시 시인성 향상이 배수성 포장의 큰 기능이라 주장하였다. 또한 배수성 포장 형식은 포장의 온도를 조절하여 서울과 같은 대도시의 온난화, 열대야 그리고 열섬현상을 낮출 수 있다고 주장하였으며 저열 아스팔트(보수성 아스팔트) 포장개념을 보고하였다.(유인

균, 2005)

손종철은 사용자가 도로 주행 시 빗길 수막현상(hydroplaning)방지와 야간 시인성 증진 효과를 배수성 포장의 장점으로 보고하였다. 그는 배수성포장 기법으로 아스팔트 개질 첨가제(다마)와 에코팔트, PMA 배수성 포장, SBS 슈퍼팔트 등을 선정하여 자체 시방서와 건교부 기준과의 차이를 조사하였는데 골재의 문제점을 발견하였다. 즉, 내부 공극률의 확보를 위해 일반 밀입도 아스팔트 혼합물보다 양질의 골재 품질이 요구되어야 한다고 결론지었다. 해결책으로는 채석장에서의 생산체계 개선과 플랜트에서의 생산체계 개선, 마지막으로 품질관리 기준의 개선 등이 필요하다고 밝히고 있다.(손종철, 2004)

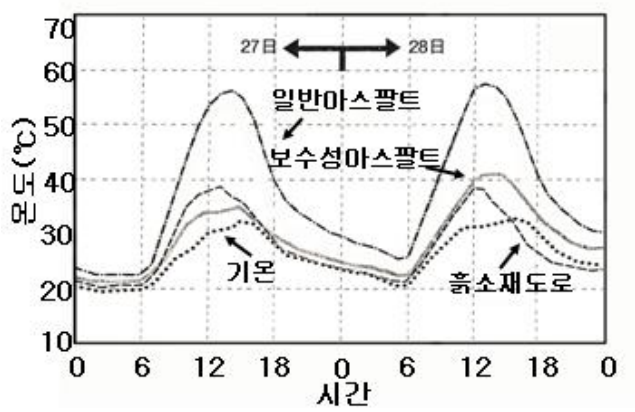
김주원은 배수성 포장은 배수기능을 이용하여 여름철 노면 온도 상승을 억제하고 유출 계수의 저감과 반사광으로 인한 시인성 향상을 갖춘 기능성 포장이라 밝히고 있다. 배수성 포장에서 혼합물의 골재와 배합설계 시 문제점으로는 배수성 혼합물의 다짐방법과 동결융해 저항성, 공극막힘 등을 지적하였다. 배수성 포장은 재료의 선택, 배합설계 방법 및 시공 방법에 따라 성능이 크게 좌우되기 때문에 철저한 품질관리를 요구하였다. 또한 시공 직후 6~12개월 동안은 미끄럼 저항성이 탁월하지만 그 이후에 정기적인 유지보수가 필요하며 시공초기부터 유지보수에 소요되는 비용을 예산으로 편성해야 한다고 주장하였다.(김주원, 2000)

장수명 친환경 도로포장 재료 및 설계 시공기술 개발 연구단은 도심지 열섬완화를 위한 도로포장 시스템 개발에서 보수성 포장의 열섬효과 저감을 서술하고 있다. 현행 밀입도 위주의 포장기술은 도심지 열섬 현상을 초래하여 환경문제가 대두되므로, 열섬완화 방안이 필요하다는 점을 강조하였다. 열섬현상의 원인으로 도시화가 가속되면서 도시의 많은 공간이 인공포장으로 도포됨에 따라 열섬현상을 발생시킨다고 하고 있다. 따라서 보수재로 시공한 보수성 포장의 열섬효과 감소효과에 대하여 활발한 연구를 진행중이다. (장수명 친환경 도로포장 연구단, 2007)

김해동은 신도로포장재의 환경친화성 평가연구에서 열섬현상의 심각성을 인지, 열섬저감 포장을 개발해야 한다는 것을 주장하고 있다. 열섬현상이 가속화 되어 일 최고기온이 31℃를 넘어가면 열사병 환자수가 급증하고, 일 최고 기온이 33℃를 넘어가면 사망률이 기하급수적으로 증가하며, 열대야 현상은 시민들의 생활 쾌적성을 악화시킨다고 주장하였다. <표 2.1.2>는 일본에서 30℃를 초과한 총시간의 증가를 과거 20년 전후로 비교한 것이다.

<표 2.1.2> 30℃ 초과 시간의 변화

지역	총시간수	
	1980년	2000년
센다이	31	90
도쿄	168	357
나고야	227	434



<그림 2.1.2> 포장표면온도의 시간변화

토지 피복도에서 수면, 녹지, 농경지 등의 비율이 30% 이상인 도시에서는 도시와 교외간에 최대 기온의 차이가 나타나지 않으며 이에 따라 보수성 포장재는 열적으로 자연의 흙과 같은 성질을 나타낸다는 것을 강조하고 있다. <그림 2.1.2>는 시간에 따른 보수성포장의 열섬저감 효과를 증명하고 있다.

이광호 등은 도로 이용자를 대상으로 서비스 제공의 측면에서 볼 때 고급포장의 하나로 배수성 포장을 들 수 있으며 현장 적용으로 미끄럼 사고의 방지, 수막현상 및 물 튀김 현상 방지, 야간 시인성 향상 등을 기대할 수 있다고 기술하였다. 그러나 기존 포장과 비교할 때 구조적 안정성, 보수의 용이성 등이 확보되어야 한다는 점을 전제로 하였다. 배수성 포장의 재료 품질 기준으로 골재 입도, 공극률, 아스팔트 함량, 시공두께를 제시하고 투수계수(1.0×10^{-2}㎝/sec) 역시 제시하였다. 이들은 1996년 3월 경부 고속도로 양산~구포간 4차로 각 200m 구간에 시험포장을 실시하고, 세 차례의 현장 추적조사를 실시하였다. 시험포장에 사용된 아스팔트는 고점도(60℃ 점도 20만 poise이상) 아스팔트로서, 일본 니찌레끼사의 제품을 사용했다. 조

사 결과 배수성 혼합물에서 변형 또는 균열이 발생하지 않아 구조성능에 문제가 없을 것으로 판단되었다. 그러나 공극 막힘 현상 등에 따른 배수 능력 및 기능적 특성이 감소하므로 관리 대책의 필요성을 강조하였다. 한편 극한 지역과 열대기후 특성을 동시에 경험하는 국내 도로 특성상 다양한 온도에 적용할 수 있는 배수포장용 아스팔트 결합재 개발의 필요성을 주장하고 있다.(이광호 외 3명, 1998) 한편 한국도로공사 연구진은 2001년 남해 고속도로 200m 구간에 배수성 포장을 시험 적용하여 초기 공용성을 살펴보고 장기 관측중이다.

일반국도에서는 1999년 충북 영동 국도 19호선 500m 구간에 시험포장이 시작된 이후 꾸준히 적용되고 있다. 소음저하, 미끄럼 저항성 증대 등의 효과가 입증됨에 따라 배수성 포장의 적용이 확대되었다. 2000년, 2001년에는 시가지 구간에 소음방지를 목적으로 약 15㎞(2차로 환산), 34㎞(2차로 환산)를 시공하였으며, 2002년에는 미끄럼 사고 방지를 위하여 사고발생이 많았던 구간에 약 23㎞를 시공하였다. 2003년과 2004년에는 각각 55㎞(2차로 환산), 82㎞(2차로 환산) 구간에 확대 시공하였고 점차 특별·광역시 및 지방시의 시가지 구간에서도 시공이 확대되고 있다.(이석근, 2003)

최근에는 국내에서 배수성 포장이 확대됨에 따라 민간업체 등에서도 배수성 아스팔트 혼합물을 개발하고 그에 따른 아스팔트 규격, 입도 분포와 사용한 첨가제 종류, 아스팔트 혼합물의 품질 등에 대한 기준을 제시하고 있다.

D사는 약 20%의 공극을 갖는 개립도 아스팔트 혼합물을 개발하였는데 이는 아스팔트 첨가재를 사용하여 하절기 소성 변형을 억제하고 동절기 취성 파괴를 감소시켜 포장의 내구성을 향상시킨 국내 배수성 포장의 하나이다. 이 혼합물은 첨가재로 폐타이어 고무가루(CRM) 등을 사용하므로 폐자원 재활용 효과도 있다.

S사는 일반 아스팔트와 고무계열의 고분자 개질재인 SBS(Styrene – Butadiene – Styrene Block Copolymer)를 반응시켜 생산한 배수성 포장용 분자결합형 SBS 개질아스팔트를 개발하였다.

H사는 아스팔트 개질제인 TPS를 첨가한 고점도 개질아스팔트를 사용하여 국내 배수성 포장을 만들었다. TPS는 열가소성 Elastmer을 주성분으로 한 플랜트 혼합방식으로 배수성 포장용 고점도 바인더로 개질할 수 있는 아스팔트 개질재이다.

이를 일본의 배수성 아스팔트 혼합물의 기준과 비교하여 표로 정리하면 다음 <표 2.1.3>~<표 2.1.5>와 같다.

<표 2.1.3> 배수성 포장의 다양한 입도분포와 첨가제 예

입 도 분 포											아스팔트 바인더 및 첨가제	실 험 법	결과 및 비고
통과백분율(%)													
	25	19	13.2	9.5	4.75 (No.4)	2.36 (No.8)	600㎛ (No.30)	300㎛ (No.50)	150㎛ (No.100)	75㎛ (No.200)			
건설교통부 (1997)	-	100	95-100	53-78	35-62	10-31	-	10-21	-	3-12	개질재 바인더	아스팔트 함량 4.5%	러팅의 저항성과 공극 막힘의 최소화
	-	-	100	92-100	62-81								
한국도로공사 (1995)	100	95-100	53-78	35-62	10-31	10-21	4-17	3-12	3-8	2-7	배수성 포장용 개질 아스팔트	-	구조설계 AASHTO에 따른다.
	-	100	92-100	62-81									
에코팔트 (D사)	100	95-100	53-78	35-62	10-31	10-21	-	3-12	-	2-7	개립도 아스팔트& 첨가재 (DAMA)	아스팔트 함량 3.5-5.5	소성변형억제와 취성파괴감소
	-	100	92-100	62-81									
슈퍼팔트 포러스 (S사)	100	95-100	53-78	35-62	10-31	10-21	4-17	3-12	3-8	2-7	분자 결합형 SBS 개질 아스팔트	-	소성문제와 균열문제 해결
	100	100	92-100	62-81									
에스팔트 (H사)	-	100	95-100	-	11-30	8-25	5-17	4-14	3-10	2-7	아스팔트 개질재 TPS를 첨가한 고점도 개질 아스팔트	아스팔트 함량 4.5-5.5	-
일본	-	100	85-100	-	0-15	-	-	-	-	-	고점도 개질 아스팔트	아스팔트 함량 5%	소음 저감
					100	25-55	25-55	15-40	7-28	0-20			

* (건설교통부, 배수성 포장(안), 1997) (한국도로공사, 배수성 포장 연구, 1995) (D사, 에코팔트 포장(배수성/저소음) 공사 특별 시방서, 2003) (S사, 슈퍼팔트 혼합물의 생산 및 시공에 관한 특별 시방서, 2003) (H사, 세종대 장수명 교면포장 배수 시스템 개발 연구, 2005) (일본도로협회, 배수성 포장 기술 지침(안), 1998)

<표 2.1.4> 배수성 포장 바인더 품질기준 예

	침입도 (25℃) 1/10mm	연화점 (℃)	신도 (15℃)	박막가열중 량변화율 (%)	박막가열 침입도 잔유율 (%)	터프니스 (kg・cm)	테너시스 (kg・cm)	60℃ 점도 (poise)
건설 교통부 (1997)	40이상	80이상	50이상	0.6이하	65이상	200이상	150이상	200,000이상
한국 도로공사 (1995)	40이내	70이내	50이내	0.6이하	65이상	200이상	150이상	200,000이상
에코팔트 (D사)	40이상	80이상	50이상	0.6이하	65이상	200이상	150이상	200,000이상
슈퍼팔트 포러스 (S사)	40이상	70이상	50이상	0.6이하	65이상	200이상	150이상	200,000이상
에스팔트 (H사)	-	-	-	-	-	-	-	-
일본	40이상	80이상	50이상	0.6이상	65이상	200이상	150이상	200,000이상

* (건설교통부, 배수성 포장(안), 1997) (한국도로공사, 배수성 포장 연구, 1995) (D사, 에코팔트 포장(배수성/저소음) 공사 특별 시방서, 2003) (S사, 슈퍼팔트 혼합물의 생산 및 시공에 관한 특별 시방서, 2003) (H사, 세종대 장수명 교면포장 배수 시스템 개발 연구, 2005) (일본도로협회, 배수성 포장 기술 지침(안), 1998)

<표 2.1.5> 배수성 포장의 혼합물 품질기준 예

		다짐횟수 (회,한면당)	공극률 (%)	마샬안정도 (kg)	흐름치 (1/100cm)	잔류안정도 (%)	투수계수 (cm/sec)	동적 안정도 (회/cm)
건설교통부 (1997)		50	20이상	500이상	20~40	75이상	약 20%	3,000이상
한국도로공사 (1995)		-	20이상	500이상	20~40	75이상	10이내	-
에코 팔트 (D사)	13mm	50	15~25	500이상	20~40	75이상	1×10^{-2}	3,000이상
	19mm	50	15~25	300이상	20~40	75이상	1×10^{-2}	3,000이상
슈퍼팔트 포러스 (S사)		50	20이상	500이상	-	75이상	1×10^{-2}	-
에스팔트(H사)		50	20이상	500이상	20~40	75이상	1×10^{-2}	3,000이상
일본		50	20정도	350이상	-	-	1×10^{-2}	1,500이상

* (건설교통부, 배수성 포장(안), 1997) (한국도로공사, 배수성 포장 연구, 1995) (D사, 에코팔트 포장(배수성/저소음) 공사 특별 시방서, 2003) (S사, 슈퍼팔트 혼합물의 생산 및 시공에 관한 특별 시방서, 2003) (H사, 세종대 장수명 교면포장 배수 시스템 개발 연구, 2005) (일본도로협회, 배수성 포장 기술 지침(안), 1998)

우리나라의 배수성 포장에 대한 연구는 최근에 비교적 활발하게 진행되고 있는 실정이다. 그러나 재료, 배합에 대한 정량화 및 장기 공용성에 대한 평가가 미비하며 유지 관리에 대한 어려움 등으로 현장 적용에 어려움이 있다. 또한 공극의 막힘으로 인해 빗물이 지하로 유입되지 못하고 포장체 하부에 머물러 포장체를 약화시킬 가능성이 있다.

다. 기존 배수성 포장의 실태 및 문제점

본 연구진은 국내에 시험 시공된 배수성 아스팔트 포장 구간과 실제 공용 중에 있는 배수성 포장 구간에서 현장투수시험을 실시하여 시간 경과에 따른 공용성을 평가하였다. 이를 근거로 국내 배수성 포장의 실태 및 문제점을 분석, 파악함으로서 투수성능의 저하에 따른 유지보수 관련 연구의 필요성을 제기하고자 한다.

(1) 기존 배수성 포장 시공사례 및 대상구간 선정

본 연구에서는 국내 배수성 포장의 실태 및 문제점 분석을 위해 실험 장소를 크게 시험시공 구간과 일반 시공 구간으로 분류・선정하였다.

선정된 투・배수성 포장의 시험시공 구간은 D사에서 시공한 것으로, 서울시에서 지정한 4개 구간에 덧씌우기의 포장 형태로 시공되어 있다. 서울시 내의 각 구간은 비탈길, 지하차도 및 많은 중차량이 통행하는 지역에 위치하고 있다. 서부사업소 구간의 경우 증가로에 위치한 왕복 2차선도로(1개 차도 폭이 약 5m)의 비탈길 구간에 연장 약 120m를 시공하였으며, 남부사업소 구간의 경우 가리봉 오거리에 위치한 고가도로 구간의 김포공항 방면 2개 차선에 연장 958m를 시공하였다. 북부사업소 구간의 경우 상계 지하차도에 위치한 왕복 4차선 도로에 연장 약 330m를 시공하였으며, 서울시 지하철 건설본부 구간의 경우 올림픽로와 풍납로의 4차선에 4구간을 각각 약 50m로 시공하였다. 각 구간의 시험시공은 대부분 1999년 11월에 실시되었으며, 기존의 아스팔트 포장을 걷어낸 후 5cm의 아스팔트를 1회 덧씌우기 하였다.

(2) 현장투수시험 결과 및 문제점 분석

본 연구에서는 현장투수시험을 위해 KS F 2394 규격에 준하여 현장투수시험기를 제작하였다. 스탠드 파이프에 시험수 400㎖를 담은 후 밸브를 한 번에 열고, 주입된 시험수가 내려가는 경과시간(sec)을 스톱워치로 측정하였다. 그러나 국내에는 배수성 포장체에 대한 투수성능을 평가할 수 있는 기준이 정립되어 있지 않은 실정이다. 이에 동일한 규격의 시험기를 사용하는 일본 규정(1×10^{-2}cm/sec = 400㎖를 15초 이내에 투수)을 배수성 포장의 유지보수 결정 기준으로 적용하였다.

<표 2.1.6>은 선정된 배수성 포장 구간에 대한 현장투수시험 측정 결과를 나타낸 것이다.

실제 시공 후 공용 중에 있는 3개 일반 구간에 대한 현장투수시험을 수행한 결과 일본이 설정한 기준은 모두 통과하는 것으로 나타났다. 그러나 '부천시 중동대로 구간'과 '의정부시 장암지구 구간'의 경우, 비슷한 시기에 시공되었음에도 불구하고 '의정부시 장암지구 구간'이 2배 이상 투수성능이 떨어짐을 관측할 수 있었다. 향후 장기간에 걸친 추적조사를 통한 시간경과에 따른 공용성 평가를 수행할 계획이다.

4개의 시험시공 구간 중 비탈면에 시공된 '남가좌동 증가로' 구간의 경우, 배수성 아스팔트가 이미 일반 밀입도 아스팔트로 덧씌우기 되어 있었으며 상당수의 균열을 발견할 수 있었다. 이는 경사면 배수성 포장의 시공불량에 따른 급작스러운 포장 파손에 의해 설계수명을 다하지 못하고 유지보수된 것으로 판단된다.

<표 2.1.6> 국내 배수성 포장 구간별 현장투수시험 결과

구간	측정 횟수			평균
	1회	2회	3회	
부천시 중동대로	4.66	4.22	4.86	4.58
의정부시 장암지구	12.83	8.82	7.46	9.70
하계동 대진고 앞	4.75	4.59	4.47	4.60

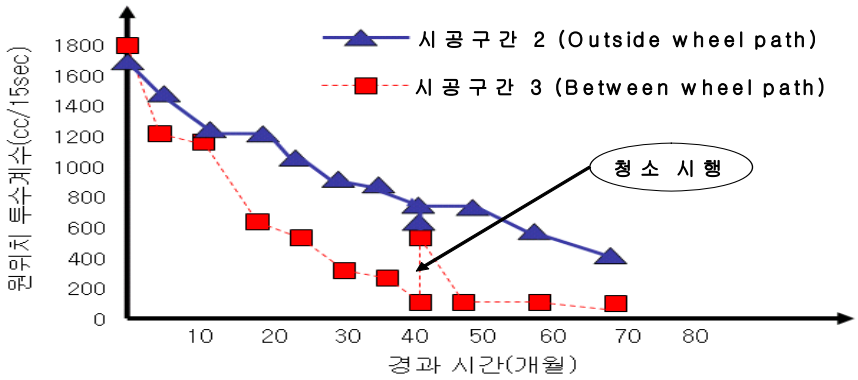
(3) 국내 배수성 포장의 개선방안

(가) 포장 공용 후 시간 경과에 따른 투·배수 능력의 감소

현재 시공되고 있는 모든 포장체는 시간의 경과에 따라 투수성의 저하 현상을 보인다. <그림 2.1.3>에서 보이는 바와 같이, 일본 세기공업의 실외시험 현장에 시험시공된 결과를 보더라도 시간 경과에 따른 투·배수 능력이 저감되는 현상은 확실하다. 그림에서 확인할 수 있는 사실은 유지관리 기법 및 적용 횟수에 따라 낮은 투수계수가 회복될 수 있다는 점이다. 선진국의 경우, 배수성 아스팔트 포장에 대한 투·배수성에 대한 장기적인 관점에서 체계적으로 연구가 수행되고 있는 반면, 국내의 경우는 그렇지 못한 것이 현실이다. 즉, 배수성 포장의 공용 후 시간의 경과에 따른 투·배수 효과의 추적 조사 및 연구가 미비한 실정이며, 의사결정을 내릴 수 있는 판단기준조차 정립되지 않고 있다.

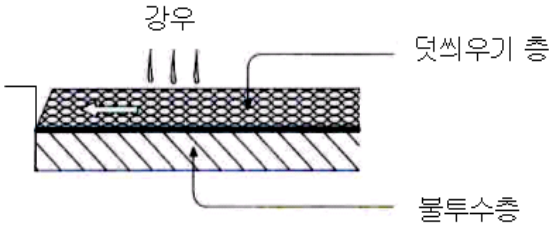
(나) 배수성 포장의 설계 및 단면 문제

배수성 포장의 경우, 일반적으로 도심부에 덧씌우기용으로 활용되는 예가 대부분이다. 그러나 배수성 포장의 단면 설계의 미흡과 배수시설의 미고려로 인한 우수의 작용으로 내구성이 저하되고 조기파손 문제가 발생하고 있다.

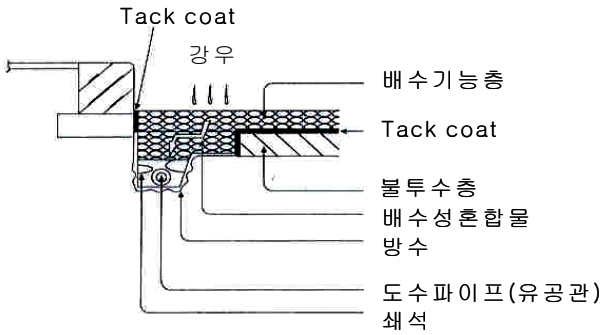


* 중앙대학교, 2005년 일본출장보고서

<그림 2.1.3> 시간 경과에 따른 투수 계수 변화



<그림 2.1.4> 국내 배수성 덧씌우기 포장 단면 예



<그림 2.1.5> 국외 배수성 포장 단면 예

<그림 2.1.4>는 국내의 배수성 덧씌우기 포장 단면을 보여주고 있으며, <그림 2.1.5>는 배수시설이 고려된 일본의 배수성 포장단면을 나타내고 있다. 즉, 국내 일부 구간의 경우 배수가 원활하지 않음으로 인해 잔존하게 되는 물과 아스팔트 바인더의 상호작용으로 내구성이 저하되고 이는 곧 포장의 수명저하를 야기하고 있다.

(다) 동절기 배수성 포장 관리에 대한 개선

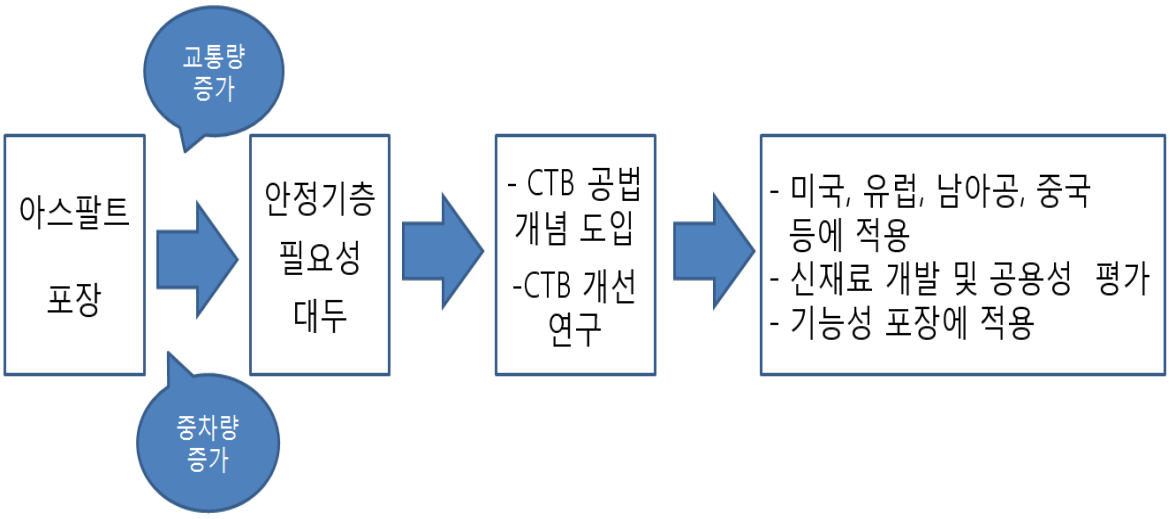
배수성 아스팔트의 경우 일반 밀입도 아스팔트 포장에 비해 많은 공극이 존재하며 이로 인해 표면 온도가 낮아 열섬현상을 완화시켜주는 역할을 수행한다. 그러나 동절기 다설 지역의 경우, 낮은 표면 온도로 인한 적설시간이 길고 제설효과가 떨어지게 되어 다량의 제설제 살포에 따른 공극 막힘 현상과 제설효과에 대한 우려가 제기되고 있다.

2. 시멘트 안정처리 기층(Cement Treated Base ; 이하 CTB)

가. 개요

국내에서는 표층에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있으며 다양한 성과를 얻고 있다. 그러나 기층재료에 대한 연구는 이제 걸음마 단계와 마찬가지이다. 미국이나 남아공의 경우 시멘트, 석회석 및 기타 신소재를 활용한 안정처리 기층에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며 현장 적용 결과 우수한 공용성을 보여주고 있다.

CTB는 입상 골재, 시멘트, 물 등을 혼합하여 다진 강성 기층을 말한다. CTB가 도입된 주된 이유는 중차량 증가로 인해 아스팔트 포장의 러팅 등의 파손이 발생하기 때문이다. CTB는 강성기층이기 때문에 아스팔트처리기층(PMBB : Plant Mix Bituminous Base)과 같은 연성기층이 표층과 같이 변형함으로써 생기는 러팅을 현저히 감소시킨다. 또한 강성기초는 전단과 인장변형을 감소시켜 피로균열(fatigue cracking)도 줄일 수 있다. CTB는 PMBB와의 공용성 비교평가에서 대등하거나 더 좋은 결과를 보여주고 있으며, 초기공사비가 적기 때문에 경제적인 면에서도 PMBB보다 우수하다고 보고되고 있다.



<그림 2.1.6> CTB의 도입배경

<표 2.1.7> CTB의 장·단점

장 점	단 점
- 얇은 두께로도 충분한 강도 지님 - 보조기층으로의 하중전달을 감소 - 아스팔트 기층에 비해 초기 공사 비용이 적음 - 플라이 애쉬, 석회석 등을 첨가하여 친환경적인 요소 가미	- 반사균열 발생으로 인한 구조적 파손 야기

그러나 CTB는 건조수축 및 온도변화 등으로 인한 체적변화로 내부적으로 인장응력을 받아 균열이 발생할 수 있다. 이 초기 내부 균열은 응력집중으로 인해 아스팔트 표층까지 균열이 진전되는데 이것을 반사균열이라고 한다. 반사균열이 발생할 경우 도로의 미관을 해치며 심할 경우 평탄성 저하로 이어지며 궁극적으로는 포장의 수명 저하를 가져온다.

나. 국내 기술 동향

국내의 도로 포장 기층재료에 대한 연구는 학계보다, 기업체에서 신기술 개발 등의 목적으로 추진되어 왔으며, 환경적 요인과 자원의 재활용 관점에서 주로 연구되어왔다. 혼화제를 사용한 도로 기층의 기술 동향을 살펴보면 다음과 같다.

Soil-Cement 포장에서 발생하는 균열 및 내구성 저하 등의 원인을 규명하는 연구에서는 시멘트 6%에서도 동결융해에 따른 문제가 없었으며, 시멘트와 함께 첨가제를 사용할 경우 건조수축을 줄일 수 있음을 알 수 있었다.(천병식 외, 1992)

석분(screenings) 및 시멘트 안정처리 기층에 관한 연구에서는 시멘트(150kg/㎥)+석분(2,031kg/㎥)+물(170kg/㎥:함수비 7.8%)로 이루어진 배합을 사용하여 실험한 결과, 압축강도가 기준(50kg/㎠)을 초과한 53kg/㎠로 나타났다. 현장 실험 결과에서도 목표 기준강도 대비 26%의 증가를 확인할 수 있었다.((주)용마, 1994 신기술 신청)

시멘트계 고화제(시멘트+혼화제)를 사용한 도로 노체 처리 공법에서는 연약지반

의 안정화, 건조수축 저감, 내구성 향상 등에 효과가 있었음을 보고하고 있다.(고준영 외, 1995)

안정처리 강화제는 조기의 효과적인 강도발현 및 건조수축으로 인한 균열발생을 억제하는 동시에 지반의 투수성을 저하시켜 습윤건조 및 동결융해의 반복에 대한 내구성을 향상시키는 것으로 나타났다. 환경적으로도 유해성이 없고 안정처리토로 제작한 공시체는 7일 양생으로 30 kg/㎠ 이상의 강도증가를 보였다. 따라서 안정처리토를 D다짐기준으로 시공할 경우 구조적 안정성과 작업성을 확보하여 도로 기층의 기능을 충분히 발휘할 것으로 나타났다.(이송 외, 2001)

한국도로공사 도로교통기술원에서는 고속도로 폐콘크리트의 현장파쇄 재생골재를 도로의 린 콘크리트 기층재로 재활용하기 위한 현장성능을 평가하였다. 천연골재와 재생골재에 대한 압축강도 결과, 린 콘크리트의 압축강도가 75 kg/㎠ 이상으로 현장적용이 가능하였다.(김진철, 2003)

조규성은 제강과정에서 발생되는 산업부산물인 제강 슬래그를 린 콘크리트 기층에 적용하기 위한 시험시공을 하였다. 품질관리 측면과 사용성 측면에서 특이한 점은 없었으며, 강도측정결과 고속도로공사 전문시방서에서 규정하고 있는 재령 7일 50 kg/㎠ 이상의 강도를 발현하여 빈배합 콘크리트에 대한 적용이 가능하다고 판단하였다.(조규성, 2004)

이승우는 흙의 특성에 맞는 시멘트와 저수축 혼화제의 적절한 배합을 통하여 시멘트 안정처리 기층의 건조수축을 최소화하는 기층 재료를 연구하였다. 우수한 강도와 탄성계수를 유지하면서 일반 시멘트 안정처리 기층의 건조수축을 80 %이상 저감시킬 수 있는 기층재료 개발이 가능함을 확인하였다.(이승우, 2004)

이와 같이 CTB를 개발하기 위해 다양한 첨가제를 사용한 새로운 안정기층에 대한 연구가 진행되었다. 도로공사 표준시방서에는 7일 압축강도 50 kg/㎠ 이상만 되면 기층 적용이 가능하다고 판단하고 있으나 실제 개발된 다양한 기층재료가 도로기층에 적용한 사례는 미비하다.

3. 투수 콘크리트

가. 개요

투수성 콘크리트 포장이란 빗물 등을 콘크리트 표층 및 기층을 통하여 길바탕흙으로 침투시켜 지반으로 환원시키는 기능을 가지는 포장체를 말한다.(신토목재료의 발전, 1995) 따라서 지하수의 고갈을 방지하고 포장체 밑의 토양에 수분과 산소를 공급함으로써 미생물의 서식이 가능한 환경 친화적인 효과를 얻을 수 있다.(玉井元治 外, 1993)

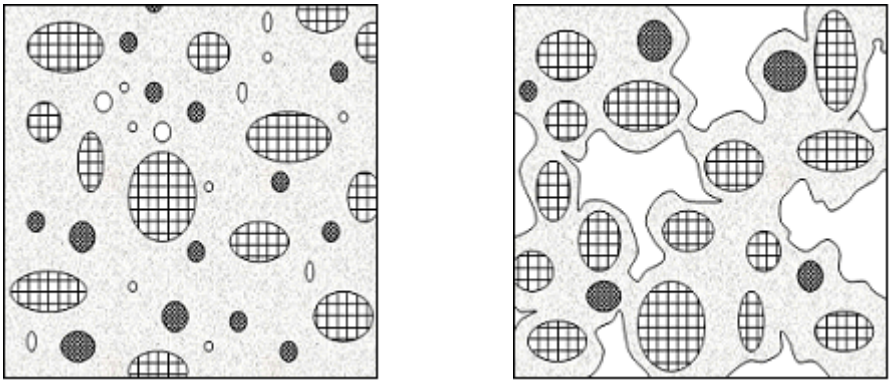
일반포장은 우수가 포장 표면을 흘러 배수구로 빠져나가거나 배수구가 없는 경우에는 범람할 가능성이 있다. 투수성 포장은 연속된 공극을 통해 우수가 지하로 유입되어 우수 유출량을 줄일 수 있다. 또한 표면수를 빠른 시간에 포장체를 통하여 투수시킴으로써 수막현상으로 인한 미끄러짐을 방지하여 안전성을 확보할 수 있다.(玉井元治 外, 1993)

콘크리트 내부에 연속공극을 형성시키는 방법은 기포제를 사용하여 콘크리트 중에 다량의 기포를 발생시켜 연속한 공극을 형성하는 방법과 콘크리트 배합시 잔골재율을 적게하여 골재와 골재사이의 공극을 형성하는 방법으로 나눌 수 있다.(문한영 외, 1998)

투수 콘크리트의 구조를 살펴보면 <그림 2.1.7>과 같다. 일반 콘크리트는 굵은 골재 사이의 공극을 시멘트, 물, 잔골재로 혼합된 페이스트가 채우고 있는 구조로 되어 있다. 반면 투수 콘크리트는 굵은 골재 주변을 시멘트 페이스트가 둘러싸서 골재를 접착시키는 구조로 되어 있다.

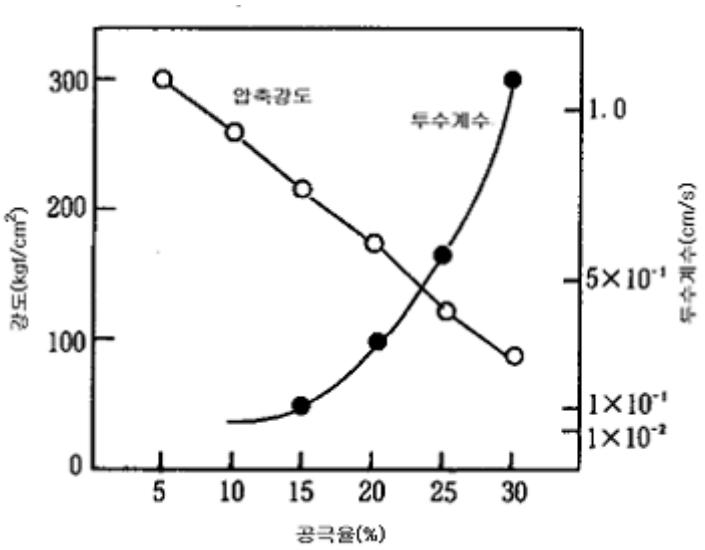
투수 콘크리트는 많은 수의 공극을 형성하면 콘크리트 압축강도 및 내구성이 저하된다. 따라서, 기술의 핵심은 콘크리트 구조체의 물성을 만족하면서 동시에 투수성을 확보하는 것이다. 투수 콘크리트의 강도는 시멘트 페이스트의 양, 공극율 및 물-시멘트 비 등의 배합조건, 다짐의 시공 조건 등에 의해 결정되는데 이중 공극율의 영향이 가장 크다. 투수성 확보를 위한 공극율은 20~30%가 적절하기 때문에 공극율 증가에 따른 강도의 저하 및 단위 시멘트량 증가에 따른 공극율 감소를 배합 측면에서 고려하여야 한다.

<그림 2.1.8>은 공극율과 투수계수, 강도와의 관계를 도식화한 것이다. 콘크리트



(a) 일반 콘크리트 (b) 투수 콘크리트

<그림 2.1.7> 일반 콘크리트와 투수 콘크리트 구조(최상흘, 1997)



* 최신 콘크리트 재료공법, 1985

<그림 2.1.8> 공극률과 투수계수, 압축강도의 관계

강도는 공극율이 증가함에 따라 선형으로 감소하며 투수성은 공극율이 크고 물/시멘트비가 작을수록 증가된다. 공극율은 굵은 골재의 입도분포, 물/시멘트비 및 다짐 방법의 영향에 크게 영향을 받기 때문에 적절한 수준의 투수성과 강도를 보유한 투수 콘크리트를 개발하는 연구가 다양하게 진행되고 있다.

나. 국내 기술 동향

국내 대부분의 도로에서는 불투수성 아스팔트 포장과 콘크리트 포장을 건설하고

있으나, 선진국에서는 투수 및 저소음을 위한 기능성 포장이 많은 연구가 진행되고 있으며 기능성 포장의 구조적 취약점을 극복하고, 수명연장과 기능향상에 모아지고 있다. 국내에서도 투수성 재료에 대한 연구가 진행중이다.

문한영은 골재의 최대치수와 잔골재율을 변화시켜 투수콘크리트의 공극률, 연속공극률 및 투수계수에 대하여 검토한 결과, 골재최대치수 13mm 범위에서는 최대치수가 클수록 투수계수가 큰 반면 강도는 골재최대치수 10mm이하에서 최대값을 보여 휨강도가 40㎏/㎠까지도 얻을 수 있었다. 잔골재율과 투수계수 및 강도와의 관계에서는 잔골재율 20%까지는 투수계수의 목표값 1×10^{-1} cm/sec이상이었으나, 목표 휨강도 및 압축강도를 만족하기 위해서는 잔골재율이 10% 이상이어야 함을 알 수 있었다.(문한영, 1997)

김무한은 투수기능을 만족하는 범위에서 보다 고강도를 얻기 위한 기초적 실험결과, 잔골재 대체율의 경우 5~10%, 단위 시멘트량의 경우 350~400 kg/m^3 으로 나타났으며, 경제성을 고려할 경우 잔골재의 대체가 단위 시멘트의 증가보다 유리할 것으로 판단하였다.(김무한, 1999)

투수콘크리트의 실용화를 현장에서 사용되는 폴리머 혼화재의 경우 어느 정도의 강도 개선효과는 있었으나 개선폭은 크지 않았다. 휨강도는 현장적용에 문제가 없는 것으로 나타났으나 압축강도는 기준에 미치지 못하는 결과를 보여주었다.(채창우, 2000)

박승범은 성능이 우수한 투수콘크리트를 제조하기 위해 강섬유와 폴리프로필렌섬유를 혼입한 섬유보강 투수콘크리트를 제안하였는데 강섬유는 0.5 vol% 이내, 폴리프로필렌 섬유는 0.2 vol%로 이내로 혼입하는 것이 바람직하며, 섬유보강 투수콘크리트의 투수계수는 섬유혼입량과 페이스트골재비에 영향을 받는 것으로 주장하였다.(박승범, 2000)

김무한은 이론공극율, 골재입도 및 양생방법이 투수 콘크리트의 강도 및 투수성능에 미치는 영향을 살펴본 결과, 골재입도가 작거나 이론 공극율이 감소할수록 압축강도는 증가하고 투수성능은 감소하는 것으로 나타났다. 압축강도, 공극율 및 투수계수는 골재입도 및 이론공극율에 의해 큰 영향을 받으며 양생방법의 영향은 작은 것으로 나타났다.(김무한, 2000)

김무한은 현장타설 투수콘크리트의 품질관리방안을 제시하기 위해 굳지 않은 상태와 경화 상태의 공극율을 비교・검토한 결과 유사한 값으로 나타났다. 굳지 않은

투수 콘크리트의 공극량을 측정함으로서 품질을 사전에 관리 및 평가하는 것이 가능할 것이다.(김무한 2002)

박승범은 투수 콘크리트의 다공성을 이용하여 흡음특성을 분석하였다. 시료의 두께가 두꺼울수록 저음의 영역에서 흡음률이 크게 나타났으며, 투수콘크리트를 사용한 흡음벽이 현행 흡음벽의 설계 기준을 만족하기 위해서는 설계공극률이 30% 이상, 사용골재의 입도 범위가 5~10mm 인 골재를 사용하는 것이 바람직하다고 판단하였다.(박승범, 2003)

박승범은 표면진동 다짐기를 이용하여 결합재 및 다짐에너지 변화에 따른 투수콘크리트의 위치별 공극률과 압축강도 특성을 살펴보았다. 현장 실험 결과, 결합재 및 다짐에너지가 투수콘크리트의 공극형성 및 강도 발현에 큰 영향을 미치고 있음을 확인하였다.(박승범, 2004)

이와 같이 투수 콘크리트를 개발하기 위해 굵은 골재 최대치수, 잔골재율, 입도분포, 시멘트의 종류와 양, 혼화재 및 섬유를 사용하여 기초적인 연구를 수행해왔다. 그러나 투수 콘크리트는 골재와 골재의 결합력이 약하기 때문에 압축강도, 휨강도, 동결융해 저항성 및 내구성이 크게 저하되는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 개선하기 위한 노력의 일환으로 <표 2.1.8>와 같이 다양한 투수 콘크리트의 특허가 제시되고 있다.

지금까지의 국내의 투수 콘크리트는 강도면에서 많은 제약 때문에 보도 및 주차장 및 건물 주변시설과 같은 비교적 하중이 가벼운 용도에 그치고 있다. 그러나 높은 공극율을 가지면서도 일반적인 도로 포장용 콘크리트와 거의 동등한 강도를 갖는 투수 콘크리트의 차도 포장에의 적용은 미비한 실정이다.

<표 2.1.8> 국내 투수 콘크리트 특허현황

구 분	시멘트 (kg/㎥)	굵은 골재 (kg/㎥)	잔 골재 (kg/㎥)	물/시멘트비 (%)	사용재료
표면투수 콘크리트 박층 포장방법	250~500	1500~2000	0~500	25~40	-
고성능 유광 투수 콘크리트	270~349	1536~1920		-	안료 15kg/㎥, 특수제 8kg/㎥
고내구성 투수 콘크리트 포장방법	150~400	1250~1600	50~600	-	시멘트 사용량의 5% 이내인 감수제를 혼합한 몰탈
밀입도 투수 콘크리트의 박층 포장방법	200~400	5~40mm의 쇄석골재	-	-	분쇄 폐콘크리트, 슬래그
광물질 미분말이 함유된 고성능 투수 콘크리트 및 그 제조방법	250~350	1.2~13mm인 쇄석골재	-	-	고성능 AE 감수제, 광물질 미분말
고로슬래그를 사용한 투수성 콘크리트 조성물		10~13mm, 1400~1650	-	25~35	고성능 감수제, 고로슬래그, 착색제
섬유보강 칼라 투수 콘크리트	270~340	6~10mm의 단입도, 1530~1920	-	-	폴리프로필렌 섬유, 고유동화제, 안료 14~20kg/㎥
높은 강도와 내구성을 지니는 투수성 다공질 콘크리트 조성물	-	1500~1750	-	25~35	고성능 AE 감수제, 고로슬래그,
제강슬래그를 이용한 투수성 콘크리트 조성물	-	1500~1700	-	25~35	고성능 AE 감수제, 착색재, 제강슬래그
투수성 콘크리트	고강도 조강시멘트 45~150	1500~1800	-	-	수지계 에멀젼, 감수제, 폴라이 애쉬 또는 고로수쇄슬래그
고성능 투-배수 콘크리트 포장	270~350	3~10mm, 1690~1850	-	-	플라이 애쉬와 유기첨가재 (수용성고분자 폴리머, 라텍스)
다공성 유색 투수 콘크리트 및 그 포장구조	280~350	2.36~9.5mm, 1520~2280	-	-	안료 10~22kg/㎥
배수성 콘크리트의 도로 포장공법	340	5~25mm, 1492	-	30.9	콘크리트 감수제, 혼합용 폴리머

4. 페이버 포장

가. 개요

도로의 기능은 <그림 2.1.9>와 같이 이동성과 접근성으로 구분된다.

이동 기능이 중요한 고속도로에서는 접근 기능을 제한하여 교통류의 원활한 흐름을 우선시 하며 반대로, 주거지역 내의 국지도로에서는 이동 속도를 제한함으로서 접근성 및 안전성을 확보한다. 도로 등급에 따라 도로 설계시 도로 폭 횡단 구성요소, 평면 및 종단 설계 요소가 다양하게 변화하게 된다. 고속도로에 사용되는 곡선반경과 지방도 및 시군도에 사용하는 것과는 많은 차이를 가지게 된다. 그러므로 도로 기능의 효율성을 최대화하기 위해서는 도로 기능에 부합되는 포장 설계를 실시해야 한다. 하지만, 현재 국내에서는 도로의 기능을 고려하지 않고 획일적인 포장 설계를 실시하고 있다. 이는 경제적으로 비효율적일뿐 아니라 사용자의 안전성을 저하시켜 궁극적으로 사회 간접 자본이 지니는 공익성을 저하시키게 된다.

접근성이 강조되는 이면도로, 광장포장, 공항 등에는 페이버 포장을 제안한다. 페이버 포장은 저속도로에 한하여 설치하는 것으로 일반적으로 70km/h까지의 교통속도에 적당하며 기존포장과의 차이점은 <표 2.1.9>에 나타나 있다.

도로기능	도로 교통 특성				
	교통량	통행길이	교통속도	교통수단	교통목적
이동가능	많음	길다	빠름	자동차	직업적 통근업무
	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓	↑↓
접근기능	적음	짧다	늦음	자전거, 도보	통학, 사교 산보, 가정적

<그림 2.1.9> 도로 기능과 교통 특성과의 관계

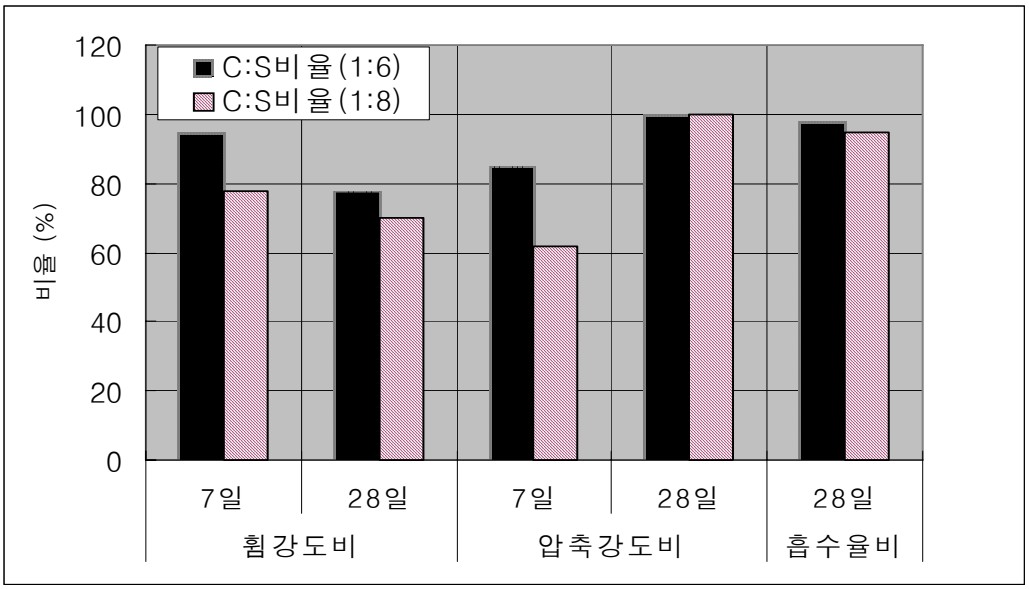
<표 2.1.9> 페이버와 기존 포장의 비교

구 분	페이버 포장	아스콘포장, 투수콘 포장
구조적 특성	• 완제품의 블록각각이 맞물려 역학적으로 안전	• 반제품으로 생산과 운반 및 포설 등의 단계에서 변동이 있을 수 있음
시공후관리	• 기후 및 하중의 영향으로 균열이 생기지 않음 • 유지비가 저렴함(수리비, 청소비)	• 포장재료 수거 후 재사용 어려움 • 과하중으로 인한 균열발생 • 유지비가 고가
하자보수	• 재포장시 공사비 최소 • 하자보수시 부분 교체 보수 가능 • 보수 후 노면상태가 양호	• 재포장시 공사비가 과다
재활용측면	• 지하 매설물 설치 및 보수시 포장의 블록 수거후 재포장시 사용가능함	• 부분 재포장시 포장부분의 색상차로 인한 미관 불량 및 재사용 불가
내구성	• 수명이 반영구적임 • 고강도로 제조하면 비행장 활주로 활용 가능	• 품질의 변동성으로 인한 내구성 저하 가능성
품질관리	• 공장에서 직접 생산된 제품을 사용함으로 품질이 균일	• 품질이 균일하지 못함
시공성	• 대형건설장비의 불필요 • 동절기 시공이 가능	• 포설기 등 집약적인 기술장비가 필요 • 동절기 시공이 불가능
미관성	• 다양한 색상으로 미관 및 조경효과 양호	• 안료가격의 고가로 다양한 색상 표현 불가 • 단색으로 인한 미관효과 없음.

나. 페이버의 국내 기술 동향

국내 페이버 기술은 전반적으로 낙후된 상태로 페이버의 품질 관리에 대한 엄격한 기준이 없이 시공되고 있는 실정이다. 공용성을 좌우하는 줄눈부 채움모래와 받침층 모래에 관한 논문이나 연구결과는 미비하다. 페이버 자체의 재료 특성에 관한 연구는 크게 재료 자체를 변화시킴으로써 변화를 얻는 연구와 플라이 애쉬를 사용한 페이버, 식생 페이버의 연구로 나눌 수 있다.

한천구는 고로 시멘트 페이버와 일반 포틀랜드 시멘트로 만든 페이버를 모르타르 첨가량을 두가지로 놓고 비교·분석하였다. <그림 2.1.10>은 결과를 나타낸다. C:S는 콘크리트와 모르타르 비율이며 재령 7일과 28일에 각각 항목에 따른 고로 슬래그 시멘트와 일반 포틀랜드 시멘트로 만든 페이버의 비율을 나타내고 있다. 휨강도비가 떨어지는 문제를 해결한다면 충분히 실용적으로 쓰일 수 있다는 것을 보여준다.(한천구, 1997)



<그림 2.1.10> 고로 시멘트 페이버와 콘크리트 시멘트 페이버의 비교

골재를 변화시켜 강도 변화를 살펴본 결과 차이가 있었다. 강모래와 석분 두가지 종류를 사용, 조립율을 변화시켜 휨강도, 압축강도, 흡수율을 측정한 결과 휨강도와 압축강도는 조립율이 클수록 커지는 것으로 나타났다. 석분보다 모래를 사용한 경우가 휨강도는 19%, 압축강도는 11%가 더 크게 나타났다.(한천구, 1998)

물시멘트비와 화학혼화제의 연구도 진행되었다. KS F 4419 규정에는 물 시멘트비는 25% 이하이고 혼화재료를 권장하지 않고 있지만, 연구의 결과는 이와 다르게 모든 경우에서 물 시멘트비가 35%~55%일 때 가장 큰 강도를 나타냈으며 흡수율은 AE제를 첨가했을 때 가장 낮았다.(한천구, 1998)

골재 파쇄시 부산물로써 생성되는 미립분에 따른 페이버 거동연구를 살펴보면, 미립분을 첨가할수록 단위중량이 감소하게 되며, 휨강도와 압축강도는 미립분 혼합율 10%까지는 증가하다 15%에서는 유사한 강도치를 나타냈다. 그리고 흡수율과 휨강도는 미립분 혼합율 15%일 때 KS F 4419를 만족하는 것으로 나타났다.(한천구, 1999)

플라이 애쉬의 재활용을 위한 연구로 한천구는 플라이애쉬에 따른 페이버의 특성 변화를 관찰한 결과 휨강도와 압축강도는 플라이 애쉬를 치환했을 때 7일 재령에는 크게 저하되었고, 28일 재령은 비슷하였으며 91일 재령에서는 플라이 애쉬 치환율 15%일 때 휨강도는 15%, 압축강도는 6% 더 크게 측정되었다. 또한 흡수율과

동결융해 저항성은 플라이애쉬 치환율이 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며 결과적으로 플라이 애쉬를 15% 치환하고, AE 감수제를 0.30% 첨가하면 좋은 배합이라 제시하였다.(한천구, 1998) 진치섭은 플라이 애쉬 20% 치환이 가장 좋은 강도를 가진다고 제안하였으며(진치섭, 2001) 소양섭은 플라이 애쉬 비율이 10~20%일 때 기준을 만족시키는 결론을 얻었다.(소양섭, 2003)

환경 친화적인 페이버를 위해 식생을 위한 연구로 한천구는 재생골재를 이용하여 중량 및 기초적 물성과 생육 특성등을 확인하였다.(한천구, 2002) 김영익은 볏짚재를 이용하여 다공성 콘크리트 연구를 실시한 결과 잔디, 참싸리, 비수리를 성장시킨 결과 식물의 정착이 효과적이었다는 결과를 얻었다.(김영익, 2004)

다. 국내의 페이버 포장상태

국내에는 주변 경관과 어울리는 포장을 위해 단지 내 도로, 보행자 도로, 휴게소 등에 블록 포장을 적용하였다.

휴게소의 경우는 2003년 도로공사 발표 자료에 따르면 고속도로 노선상의 119개 휴게소 중 70%인 82개 휴게소에 블록포장을 시공하였으나 휴게소 이용차량의 대형화 및 인력식 시공의 한계 등에 의해 <그림 2.1.11>과 같은 단차, 부분침하 등의 파손이 발생하여 오히려 주변 경관을 저해하는 요인이 되었다.

주거단지의 경우는 최근에 웰빙(Well-Being)의 유행과 더불어 쾌적한 주거 환경 및 공간을 생각하는 사람들이 늘어남에 따라 아파트 단지를 중심으로 친환경적인 도로 포장이 확산되고 있다.

<그림 2.1.12>는 2004년에 완공된 충남 천안의 한 아파트 단지 내에 조성된 페이버 포장의 예를 보여준다. 일반적인 아파트와는 차별화되어 단지 내에 아스팔트나 콘크리트 포장이 전혀 없고 자동차도로는 물론 인도 및 산책로에도 오직 페이버로만 설계되어 접근성과 안전성을 확보함과 동시에 부수적으로 미적인 효과까지 얻을 수 있는 훌륭한 사례라고 평가된다.



(a)



(b)



(C) 단차



(d) 침하 및 파손



(e) 부분 침하



(f) 표면 탈색

<그림 2.1.11> 주차장 페이버 포장의 파손부 전경



<그림 2.1.12> 아파트 단지의 페이버 포장(천안)

5. 저소음 포장

가. 개요

과거 수십년간 급격한 산업발달과 도시화로 인하여 파생된 환경 공해의 문제는 오늘날 큰 장애요소로 등장하게 되었다. 소음 공해는 다분히 감각적인 성격을 지니며, 국민의 생활 및 의식 수준이 향상됨에 따라 보다 나은 삶의 질을 추구하는 현실을 감안한다면 심도있게 다루어야 할 문제 중 하나이다.

선진국에서는 저소음 포장도로에 관한 활발한 연구를 바탕으로 이를 실제 적용 및 활성화하고 있다. 최근 국내에서도 이에 발맞춰 저소음 포장에 대한 관심을 갖게 되었고, 일부 관련업체에서 연구 및 시험포장을 실시하고 있다.

나. 국내 기술 동향

한국도로공사 도로교통기술원에서는 배수성 아스팔트 포장과 종방향 그루빙 시험시공 구간에 대한 소음 측정 및 소음 개선 효과에 대한 검토 보고서를 발표했다. <표 2.1.10>는 조사 지점을 나타내고 있는데 실제 고속도로에서 측정하였기 때문에 시험차량으로 소음을 측정하기는 어려웠다. 따라서 서로 다른 포장 구간을 일정한 속도로 주행하였을 때의 타이어 근접 소음을 동일한 시간 동안 측정하여 상대적인 비교 실험을 실시하였다. 마이크로폰은 자동차의 엔진 소음을 최소화하기 위해 머플러 반대쪽의 뒷바퀴 인접 부분에 설치하였고 주행 속도는 80km/h로 각 3회

<표 2.1.10> 저소음 포장 시험 시공 조사 지점 개요(도로교통기술원, 2002)

구분	노선	이정	차선수	비고
배수성(저소음)포장	경부선	384.32~385.72	편도 4차로	왕복 8차로 중 1개 차로만 배수성 포장 시공
종방향 그루빙 시공	영동선	29.8~30.1	편도 3차로	기존 포장 구간에 종방향 그루빙 시공

씩 측정하였다.(도로교통기술원, 2002)

<표 2.1.11>과 <표 2.1.12>는 각각 배수성 아스팔트 포장 구간과 일반 아스팔트 구간, 종방향 그루빙 구간과 일반 아스팔트 구간에 대한 소음 측정 결과이다. 상대적인 측정이지만 배수성 아스팔트 포장에서 약 3.9dB(A)정도 소음 저감 효과가 있는 것으로 나타났다. 그러나 종방향 그루빙 구간은 소음 저감 효과가 0.4dB(A)로써 효과는 거의 없는 것으로 판단되었다. 따라서 포장 형상에 무리를 주면서 이 공법을 적용하는 것은 힘들 것으로 판단된다.

2002년에는 경부고속도로 부산 방향 384.32 km~385.72 km에서 일반 아스팔트 포장 구간과 배수성 아스팔트 포장 구간에서 소음도를 측정하였다.(도로교통기술원, 2002) 총 3회에 걸쳐 측정한 결과, 배수성 아스팔트 포장 구간이 2.6dB(A) 낮게 측정되었다.

<표 2.1.11> 배수성 아스팔트 포장 구간 측정 소음도(dB(A))(도로교통기술원, 2002)

구 분	배수성 포장 구간	일반 아스팔트 포장 구간	소음도 차이 (배수성-일반)
1차	101.2	105.0	-3.8
2차	100.2	104.3	-4.1
3차	101.3	105.2	-3.9
평균	100.9	104.8	-3.9

<표 2.1.12> 종방향 그루빙 포장 구간 측정 소음도(dB(A))(도로교통기술원, 2002)

구 분	종방향 그루빙 시공 구간	일반 아스팔트 포장 구간	소음도 차이(종방향 그루빙-일반)
1차	107.5	108.0	-0.5
2차	108.1	108.1	0
3차	107.5	108.3	-0.8
평균	107.7	108.1	-0.4

<표 2.1.13> 충북 영동 저소음 포장 등가 소음도 측정(환경부, 2000)

구 분		99.9.27 측정			00.4.28 측정		
		다공성포장	일반포장	소음도차	다공성포장	일반포장	소음도차
도로단 1m	Leq 5min	64.1	68.4	4.3	70.1	72.4	2.3
	Leq 10min	66.6	70.7	4.1	72.7	73.8	1.1
	Leq 30min	67.9	71.3	3.4	72.3	73.3	1.0
	Leq 1hr	68.1	71.6	3.5	71.8	73.4	1.6
도로단 7.5m	Leq 5min	61.8	66.1	4.3	63.9	68.2	4.3
	Leq 10min	60.7	65.0	4.3	65.1	67.9	2.8
	Leq 30min	63.8	65.3	1.5	64.7	67.5	2.8
	Leq 1hr	62.5	65.2	2.7	64.5	67.6	3.1

<표 2.1.14> 충북 영동 저소음 포장시 최대 소음도(환경부, 2000)

구 분		99.9.27 측정			00.4.28 측정		
		다공성포장	일반포장	소음도차	다공성포장	일반포장	소음도차
도로단 1m	Lmax	69.8~90.2	72.6·93.5	3.3	71.6~95.2	74.0~95.6	1.8
	샘플수	13대			27대		
도로단 7.5m	Lmax	62.5~79.8	66.3~82.4	3.3	62.2~83.9	66.1~89.9	3.7
	샘플수	25대			27대		

<표 2.1.15> 국내 배수성 아스팔트 시공현장 소음도 측정 결과(도로교통기술원, 2002)

측정기관	장소	소음감소	측정 회수	비고
환경부	충북 영동 국도 19호선	3.5 2.4 2.2	8 8 21	1999. 9 2000. 4 2003. 2
대명환경	서울 남부순환도로	3.7 4.5	8 8	1999. 12
경기도	부천시 중동대로	3	1	2002. 6
신흥대	의정부 장암지구	5.2	4	2002. 12
한국도로공사	경부고속도로 385Km	2.6	3	2002. 12
환경부	부천시중동대로	2.4 3.9	6 2	2003. 2 2003. 2
	옥천읍	3.1 3.2 3.2 3.2 2.9 3	15 6 2 14 6 2	2003. 2 2003. 2 2003. 2 2003. 2 2003. 2 2003. 2

국립 환경 연구원에서는 1999년, 2000년에 2회에 걸쳐, 충북 영동군 국도 19호선에 시험 시공된 배수성 아스팔트 포장 구간의 등가 소음도와 최대 소음도를 측정하였다. 측정 결과는 <표 2.1.13>~<표 2.1.14>와 같다. 시험 포장 초기(99.9.27)와 포장 후 약 7개월 경과 후(00.4.28)의 측정 소음도를 비교하였다. 소음원 근접거리인 도로단 1m에서는 배수성 포장도로의 소음 저감 효과가 포장 초기에 비하여 많이 감소되었으나, 도로단 7.5m에서는 비슷한 소음 저감 효과를 유지하고 있음을 확인할 수 있었다. 측정위치가 소음원으로부터 7.5m이상 이격되어 있는 경우에는 배수성 아스팔트 포장이 일반 아스팔트 포장에 비하여 약 3dB(A) 정도의 소음저감 효과가 있는 것으로 측정되었다.

각 연구기관에서 측정한 국내 배수성 아스팔트 시공 현장의 소음도를 일반 아스팔트 포장의 소음도와 비교하면 <표 2.1.15>과 같다.

다. 국내 기존 저소음 포장의 실태 및 문제점

본 연구진은 저소음 포장이 시공된 일부 구간을 선정하고, 일반 아스팔트 도로에서의 소음을 측정하여 시간 경과에 따른 공용성을 평가하였다. 이를 근거로 국내 저소음 포장의 실태 및 문제점을 분석, 파악함으로서 쾌적한 환경을 위한 소음 저감 대책의 기초 자료 및 효과 감소에 따른 유지보수 관련 연구의 필요성을 제기하고자 한다.

기존 저소음 포장의 문제점을 분석하기 위해, 서울시 배수성 포장 시공구간 중 <표 2.1.6>에서 전술하였던 4개의 시험시공 구간 및 3개의 일반 시공 구간 중 부천시 중동대로 구간, 의정부시 장암지구 구간 및 노원구 하계동 대진고교 앞 구간을 소음측정 대상구간으로 선정하였다. 소음도는 IEC(International Electrotechnical Commission, 국제 공인규격) A-type의 소음측정기(Model No. NA-24 IEC 651 type-2)를 사용하였으며, 측정 구간별 결과 및 분석 내용은 다음과 같다.

2002년 5월에 배수성 아스팔트로 시공된 부천시 중동대로 구간의 경우, 경기도 보건환경연구원에서 5월 27일(배수성 포장 시공 전)과 6월 3일(시공 후)에 각각 소음 측정을 실시하였다. 그 결과 약 3dB (시공 전 : 72dB, 시공 후 : 69dB)의 소음 저감 효과를 나타냈었다. 9개월 공용 후 동일 지점에서 국립환경연구원에서 소음 측정을 실시하였으며, 그 결과는 <표 2.1.16>과 같았다. 편도 5차로의 중동대로는 교통량이 많고 신호 교차로와의 간격이 250~350m로, 도로단에서 1~2m 이격지점의 측정은 의미가 없어 도로단에서 7.5m 이격된 지점에서 10min, 30mim, 1hr 등가 소음도를 측정하였다. 이 측정은 10차로 중 한쪽 방향 5차로만 배수성 포장이 시공되어 있으나, 전반적인 교통흐름이 일반 밀입도 포장구간과 배수성 포장구간이 거의 유사하고, 중앙분리대가 있어 계략적으로 비교 측정할 수 있다는 가정을 전제로 한 것이다.

본 연구진은 2005년 3월에 등가 소음도를 측정하였으며, 그 결과는 다음 <표 2.1.17>과 같았다. <그림 2.1.13>은 수집한 자료를 바탕으로 배수성 포장의 시간에 따른 소음도의 변화를 나타낸 것이며, 배수성 포장구간과 일반 아스팔트 포장 구간을 비교하였다. 시공 직후~2001년 3월 동안의 소음 감소 현상은 측정기관의 상이함으로 인한 측정 오차로 판단되며, 이후 소음저감 효과의 감소현상은 일반 아스팔트 포장에 비해 배수성 포장의 감소율이 큼을 확인할 수 있었다. 이는 배수성(저소

음) 포장의 유지관리 측면의 중요성을 반증하는 현상으로 판단된다.

<표 2.1.16> 배수성 아스팔트와 일반 밀입도 아스팔트 포장노면의 등가 소음도[dB(A)]

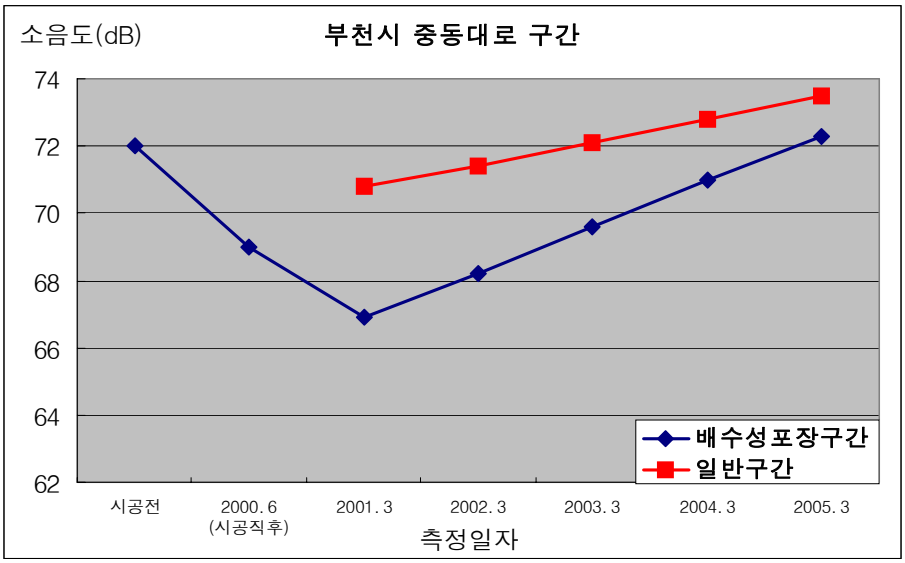
(중동대로, 국립 환경 연구원, 2002)

구분	배수성 아스팔트 포장	일반 밀입도 아스팔트 포장
Leq, 10mim	66.8	70.8
Leq, 30mim	66.9	70.8
Leq, 1hr	66.9	70.8

(국립환경연구원 '다공성 노면포장도로 소음실태조사 결과' 참조)

<표 2.1.17> 중동대로 구간의 등가소음도[dB(A)]

측정 횟수	배수성 아스팔트 포장	일반 밀입도 아스팔트 포장
1회	72.5	73.5
2회	72.3	73.5
3회	72.0	73.0
4회	72.4	73.9
평균	72.3	73.5



<그림 2.1.13> 부천시 중동대로 구간의 시간에 따른 소음도 변화 추이

서울시 노원구 하계동 대진고 앞 사거리(선경삼익아파트) ~ 우방아파트 구간의 경우, D사에서 배수성 포장 시공 전(2004년 12월 01일)과 시공 후(2004년 12월 10일)의 2차에 걸쳐 등가 소음도(L_{eq}, 5min)를 측정하였다. 그 결과는 다음 <표 2.1.18>과 같다.

본 연구진이 2005년 5월에 등가 소음도를 측정 결과는 다음 <표 2.1.19>과 같다.

<표 2.1.18> 배수성 아스팔트 포장 시공 전·후의 등가 소음도 [dB(A)]

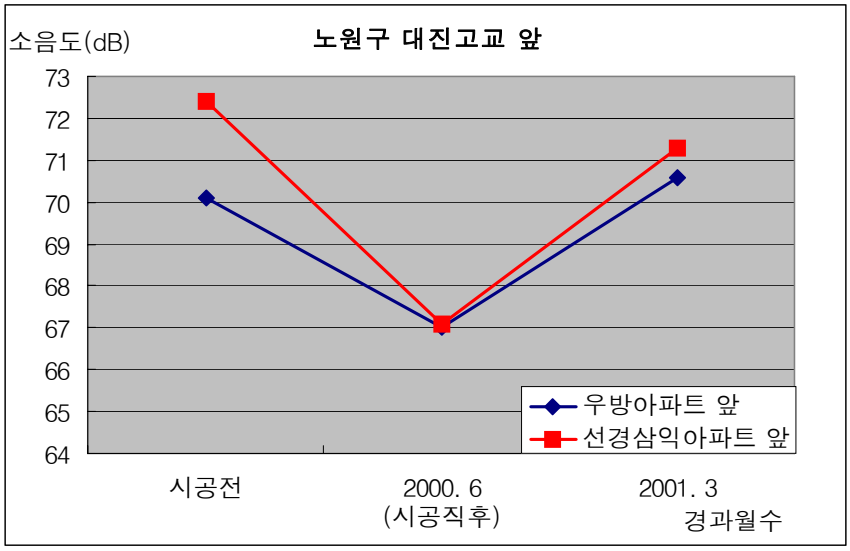
구분	측정 횟수	측정시기	
		시공 전	시공 후
우방아파트 앞	1회	68.6	67.2
	2회	72.2	67.6
	3회	71.8	61.9
	4회	67.6	71.2
	평균	70.1	67.0
선경삼익아파트 앞	1회	71.0	63.3
	2회	68.3	72.1
	3회	74.7	68.3
	4회	75.7	64.6
	평균	72.4	67.1

* 노원구 하계동 대진 고교 앞, D사 시험자료

<표 2.1.19> 배수성 아스팔트 포장 구간의 등가 소음도[dB(A)]

구분	측정 횟수	측정시기 (공용 5개월 후) [dB(A)]
우방아파트 앞	1회	70.9
	2회	71.4
	3회	69.7
	4회	70.5
	평균	70.6
선경삼익아파트 앞	1회	71.7
	2회	70.6
	3회	72.1
	4회	70.8
	평균	71.3

* 노원구 하계동 대진 고교 앞, D사 시험자료



<그림 2.1.14> 노원구 하계동 대진고 앞 구간의 시간에 따른 소음도 변화 추이

<그림 2.1.14>는 배수성 포장 구간의 두 개 측정 지점에서의 시공 전·후 및 5개월 경과 후 소음측정 결과의 변화추이를 나타낸 것이다. 두 지점이 다소 소음저감 효과의 감소율에 미세한 차이를 보이지만 전 구간에 비해 급격하게 성능이 저하되고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 시공불량과 이후의 유지관리의 허술함이 복합적으로 작용함으로서 발생한 것으로 판단된다.

의정부 장암지구의 배수성 아스팔트는 다소 경사가 있는 구간에 위치해 있었으며, 2002년 10월에 시공되었다. 경사를 고려하여 엔진소음을 배제하기 위해 내리막길에서 교통소음을 측정하였다. 기존 소음측정 자료의 미비로 배수성 아스팔트 포장과 교통흐름 특성이 유사하고 주변 소음을 최소화할 수 있는 구역의 일반 밀입도 아스팔트 구간을 선정하여 교통소음을 비교하였는데 <표 2.1.20>는 결과를 보여주고 있다. 29 개월이 지났음에도 불구하고 좋은 상태로 유지되었다.

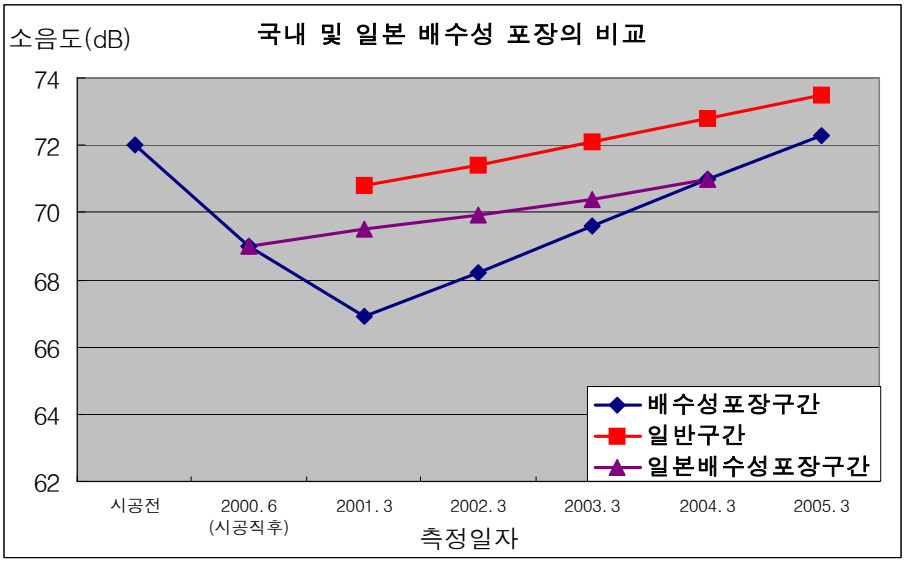
저소음 포장의 소음 저감 기능은 시간의 경과에 따라 그 공용성 저하 현상을 보인다. 이는 국내·외의 다양한 연구사례를 통해서도 확인되는 사실이며, 실제 측정을 통해서도 알 수 있는 사실이다. 그러나 시공 후 5~6년이 경과하면 소음저감 효과가 거의 없어지는 경우(스웨덴)가 있는 반면, 4dB정도의 소음 저감효과가 지속되는 경우(미국)도 있다. <그림 2.1.15>는 국내의 부천시 중동대로의 배수성포장 구간과 일반포장 구간을 일본 배수성포장구간의 자료와 비교한 것이다.(중앙대학교, 2005년 일본출장보고서) 일본 배수성포장의 경우 국내 배수성포장에 비해 소음저감

효과가 감소하는 비율이 상대적으로 매우 작음을 볼 수 있다. 오히려 국내 일반 아스팔트 포장 구간보다도 공용성이 우수하게 나타나고 있다.

이에 국내에서도 장기적인 배수성 포장에 대한 연구 계획정립이 필요하고 주기적인 소음 측정을 통한 신뢰성 자료수집 및 이론 정립이 필요하다. 특히, 배수성 포장과 같은 다공성포장체의 경우에는 공극 막힘 현상으로 인한 급격한 공용성 저하를 보이므로 주기적으로 기능을 회복시키기 위한 유지관리 및 보수가 필요하다.

<표 2.1.20> 의정부시 장암지구 배수성포장 구간의 등가 소음도[dB(A)]

측정 구간	시공 후 2개월 경과					시공 후 29개월 경과				
	1회	2회	3회	4회	평균	1회	2회	3회	4회	평균
배수성포장 구간	69.2	68.8	69.1	67.7	68.7	70.2	68.8	70.5	69.9	69.9
밀입도 아스팔트 포장 구간	72.2	74.2	73.1	76.2	73.9	75.5	75.5	75.0	75.9	75.5



<그림 2.1.15> 국내 배수성포장과 일본 배수성 포장의 소음도 변화 추이 비교

6. 물에 의한 노상의 거동 특성에 관한 연구

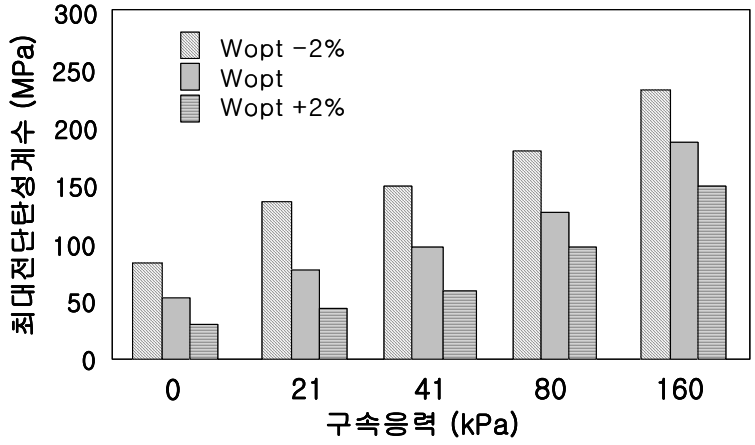
가. 개요

본 연구에서는 노상의 물이 투수성 포장의 거동에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 여기에서는 노상의 함수비에 따른 포장의 거동 특성에 대한 국내 기존 문헌을 고찰하여 노상 거동 특성과 관련된 사전 지식을 습득하였다.

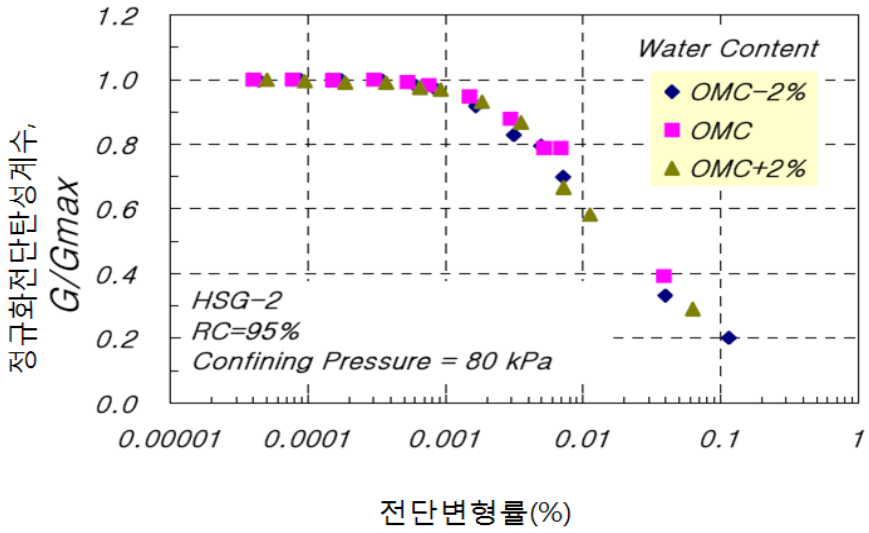
나. 국내 기술 동향

포장은 공용 중에 다양한 환경변화를 겪게 되며 각 포장층의 설계요소는 이러한 환경요소에 영향을 받게 된다. 그 중 노상토의 경우는 지하수위 등의 영향으로 인한 함수비 변화가 주된 영향 요소이며 이는 노상의 탄성계수 변화를 유발한다. 따라서 현장의 실제 노상이 경험하게 되는 함수비 변화에 따른 회복탄성계수 변화를 예측하는 것은 포장의 거동 특성을 규명하기 위해 필수적이다.

권기철은 국내 노상토 시료의 함수비에 따른 동적물성치 변화에 관해 연구하였다.(권기철, 1999) 그는 공진주/비틂 전단 시험을 통해 동일한 건조단위중량으로 성형된 시료의 최적함수비와 최적함수비 ±2% 함수비에서의 구속압력에 따른 최대전단탄성계수 변화를 알아보았다. 그 결과는 다음 <그림 2.1.16>과 같으며 최대전단탄성계수는 구속응력이 증가하고 함수비가 감소할수록 증가하는 경향을 보인다. 또한 여러 종류의 시료에 대해 동일한 구속응력에서 함수비의 영향에 따른 정규화 탄성계수 감소곡선을 구하였다. <그림 2.1.17>에서도 보듯이 정규화 전단탄성계수 감소곡선은 함수비에 영향을 적게 받고 있음을 알 수 있었다.



<그림 2.1.16> 구속응력과 함수비에 따른 최대전단탄성계수 변화



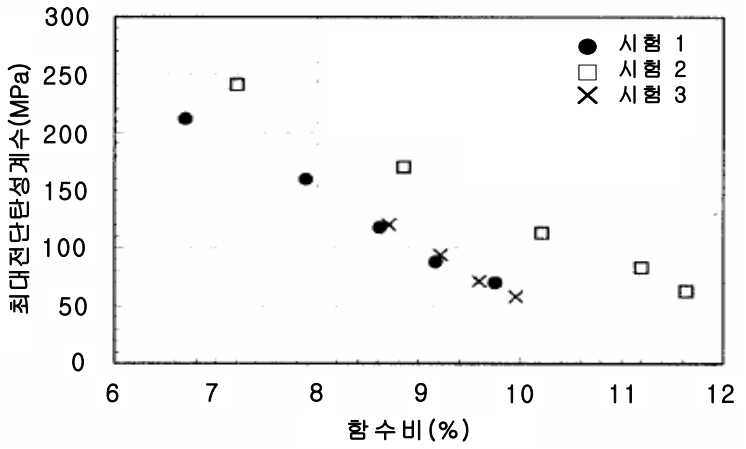
<그림 2.1.17> 함수비 변화에 따른 정규화 전단탄성계수 변화

김동수 등은 모관흡수력 및 함수비에 따른 노상토의 동적변형 특성에 대하여 연구하였다.(김동수, 2002) 기존의 동적물성치에 대한 다짐함수비의 영향에 대한 연구와는 달리 일정한 다짐함수비로 성형된 시료에 대해 모관흡수력을 조절하는 방법을 이용하여 함수비를 변화시켰다. 이 때 기존의 공진주/비틂 전단시험 시스템을 개량하여 동적물성치의 변화를 평가하고 이를 현장에서 실시한 크로스홀 시험 결과와 비교하여 타당성을 검증하였다.

시료는 한국도로공사에서 관리하는 시험도로 구간의 노상에서 교란상태로 채취하였으며 통일분류법에 의해 SW로 분류되었다. 시험의 구성은 다음 <표 2.1.21>와

<표 2.1.21> 성형-응력 조건별 시험의 구성

시험번호	성형 조건			응력 조건	
	다짐함수비(%)	건조단위중량(t/m^3)	간극비	유효구속압(kPa)	모관흡수력 단계(kPa)
시험 1	9.8(OMC)	1.91	0.39	41	5/20/50/100/200
시험 2	13.2	1.91	0.39	41	5/20/50/100/200
시험 3	9.7(OMC)	1.86	0.43	41	5/20/50/100/200

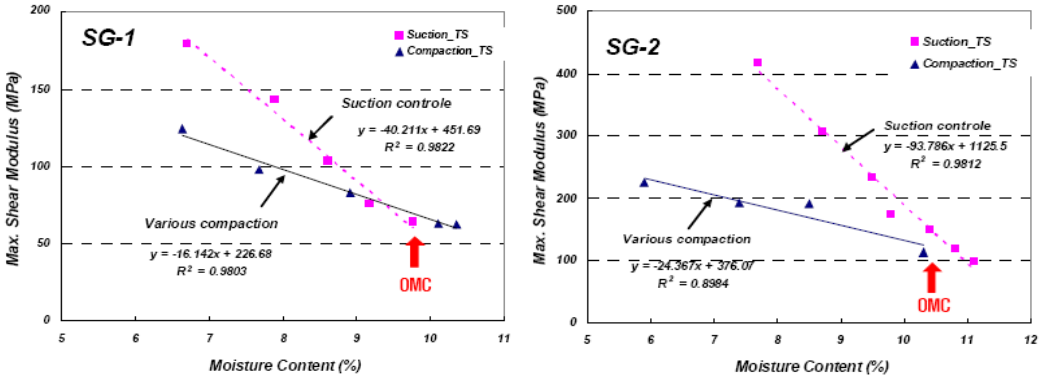


<그림 2.1.18> 함수비-최대전단탄성계수 관계

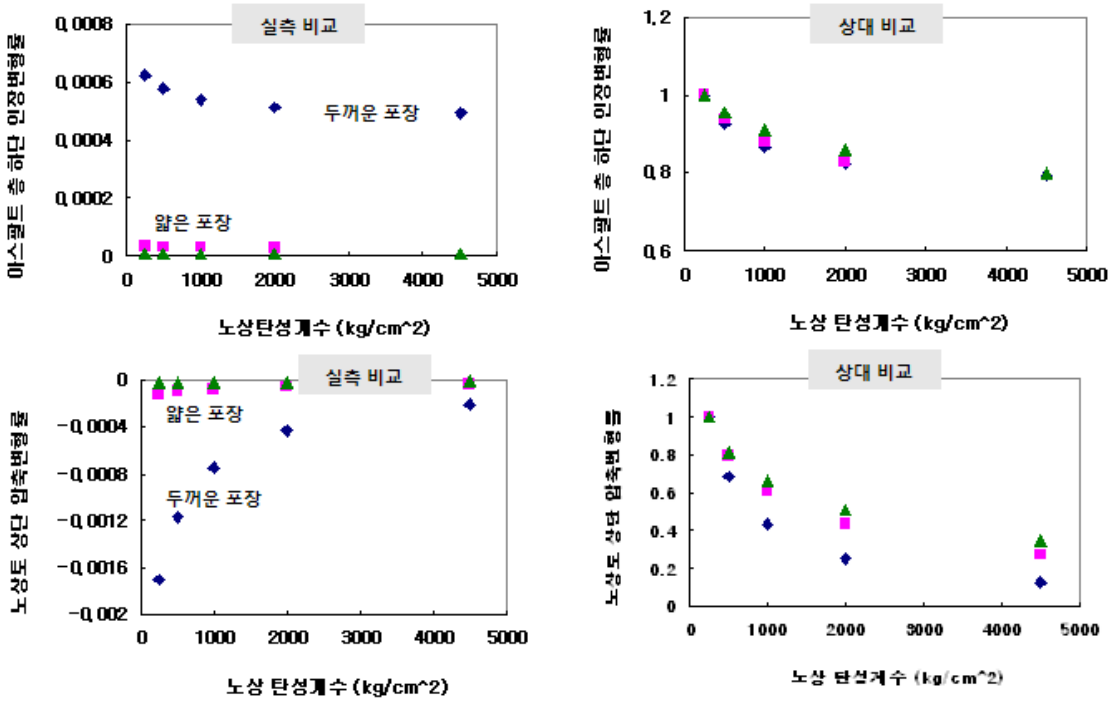
같다. 시험결과를 살펴보면 다짐함수비가 동일한 시험 1과 시험 3의 경우 함수비가 증가할수록 거의 비슷한 영역에서 최대전단탄성계수가 감소하는 반면 습윤다짐으로 성형한 후 시험을 수행한 시험 2의 경우 이보다 약간 떨어진 영역에서 최대전단 탄성계수가 감소하는 것을 볼 수 있었다. 전체적으로 시험 1, 시험 2, 시험 3 모두 함수비가 증가할수록 최대전단탄성계수가 감소하는 경향을 나타내고 있다.

서원석 등은 모관흡수력 조절을 이용한 함수비 변화에 따른 노상토의 구성모델 평가 연구를 수행하였다.(서원석, 2005) 3가지 종류의 노상토에 대해 모관흡수력을 조절하여 함수비를 변화시키고 이에 따른 탄성계수의 변화를 살펴보았다. 또한 기존의 연구들과 같이 다짐함수비를 변화시킨 방법을 동시에 실시하여 모관흡수력 조절 시험결과와 비교하였다. 본 실험 결과 <그림 2.1.19>과 같이 최적함수비의 건

조측에서 기존의 다짐함수비를 변화시킨 시험결과와 모관흡수력 조절을 이용한 함수비 변화에 따른 시험결과 사이에 큰 차이가 발생하였다. 기존의 다짐함수비 조절 방법으로 현장의 함수비 변화에 따른 탄성계수를 예측하였을 경우 실제와 많은 차이가 날 것임을 알 수 있다. 그러나 함수비가 증가할수록 노상의 탄성계수가 떨어지는 경향은 기존의 연구결과와 동일하게 나타났으며 습윤측에서는 두 가지 방법에 따라 탄성계수의 차이가 크지 않음을 알 수 있다.



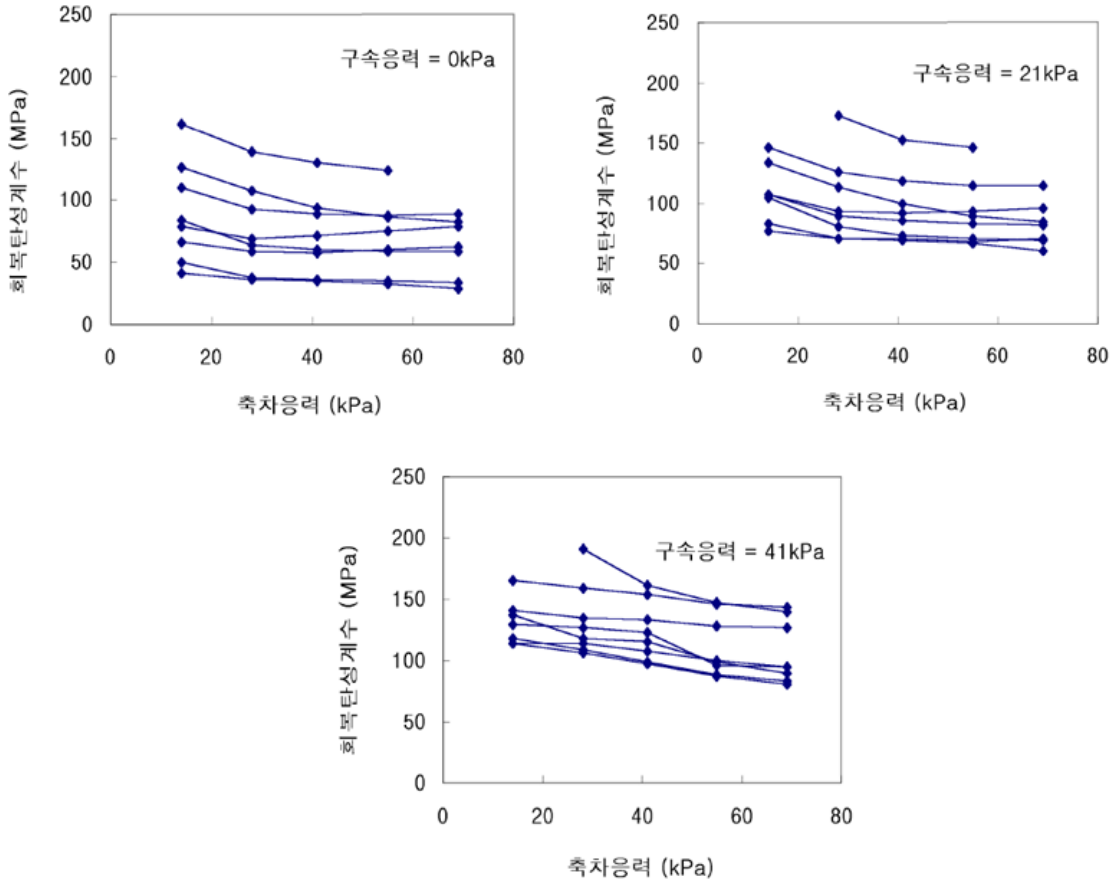
<그림 2.1.19> 시험방법에 따른 함수비 변화와 탄성계수



<그림 2.1.20> 노상 탄성계수에 따른 아스팔트 하단 및 노상 상단의 변형률(권기철, 2006)

권기철은 구조해석을 수행하여 함수비에 의해 영향을 받는 노상의 탄성계수에 따른 포장체의 거동을 살펴보았다. <그림 2.1.20>에서와 같이 두꺼운 포장 층일수록 노상토 탄성계수 변화에 따른 변형률 변화의 절대값은 급격히 감소하는 경향을 나타내었다. 그리고 포장층의 구성에 무관하게, 노상토의 탄성계수 변화에 따른 상대적인 변화는 일정한 경향을 나타낸다. 따라서 4S 포장의 경우를 고려한다면 상부층에 보조기층, CTB, 포러스 AP 가 시공되기 때문에 노상의 탄성계수에 따른 영향은 미미할 것으로 판단된다.(권기철, 2006)

임유진은 노상의 지중응력상태에 따라 노상의 회복탄성계수를 살펴보았다. 그 결과, 노상의 구속응력이 증가할수록 회복탄성계수는 증가하였으나 축차응력이 커질수록 회복탄성계수는 커지며 그 변화폭은 점점 작아지는 것을 알 수 있었다. 따라서 노상위에 소정의 두께로 포장층이 시공되어 일정 크기 이상의 축차응력 유지된다면 노상의 탄성계수는 큰 영향을 받지 않을 것으로 판단된다.(임유진, 2003)



<그림 2.1.21> 구속응력 및 축차 응력에 따른 국내 노상토의 회복탄성계수 변화(임유진, 2003)

7. 요약

국내에서 이루어진 기존의 연구 결과를 문헌 조사를 통해 살펴보았다. 각 분야별 국내의 연구는 기초적인 단계에 머물고 있는 것을 확인하였으며 세부 내용 요약은 다음과 같다.

■ 국내 배수성 포장은 90년대 후반에 경부 고속도로 구간에서의 시험시공을 시작으로 시작되었고 배수성 개질 아스팔트의 개발로 고속도로 및 지방국도, 국지도로에 시험시공 되는 등 보급화 단계로 접어들고 있다. 하지만 배수성 포장의 기능성을 유지하기 위한 장기적인 포장 유지·관리 대책은 아직 미비한 상태이다.

■ 최근에는 국내에서도 보수성 포장의 열섬저감을 목적으로 연구가 진행중이다.

■ 국내에서는 다양한 첨가제를 사용한 새로운 안정 기층에 대한 연구가 진행되고 있다. 도로공사 표준시방서에는 7일 압축강도 50kg/㎠ 이상만 되면 기층 적용이 가능하다고 제시하고 있다. 다양한 연구를 통해 기층재료가 개발되었지만 도로 기층에 적용한 사례는 미비한 실정이다.

■ 국내의 투수 콘크리트는 기초적인 재료 물성 연구에 국한되어 있고, 주로 보도, 주차장 및 건물 주변시설과 같은 경교통 지역에 적용되고 있다. 개발된 일부 투수 콘크리트는 일반 도로 포장용 콘크리트와 거의 동등한 강도 및 내구성을 나타내고 있지만, 차도에는 아직 적용되지 못하고 있다.

■ 국내에서는 페이버의 재료 배합등 기초적인 재료 물성값 연구가 실행되었다. 그러나 페이버 포장의 공용성을 좌우하는 포장 시스템 연구 및 줄눈부 채움모래와 받침층 모래, 줄눈간격 등에 관련된 연구결과는 미비한 실정이다.

■ 국내의 저소음 포장은 다양한 연구 및 시험시공을 통해 최근 적용 단계에 있다. 고속도로에서의 타이어 근접소음 측정을 통해 일반 포장과의 비교실험을 실시

하였으며, 시간 경과에 따른 소음저감효과의 초기적인 자료 수집이 이어져 왔다. 그 결과 저소음 포장의 소음저감 효과를 확인할 수 있었으나, 급격하게 소음저감효과가 저하되는 등의 문제가 있음을 알 수 있었다. 배수성 포장과 같은 다공성 포장체의 경우, 공극 막힘 현상으로 인한 급격한 성능 저하가 우려되므로 주기적인 유지관리 및 대책이 필요한 것으로 판단된다.

■ 노상토 내 함수비가 증가함에 따라 노상의 탄성계수는 감소하지만 변형율의 크기에는 크게 영향을 미치지 않았다. 모관흡수력을 조절하여 함수비를 변화시킨 경우에도 전체적으로 함수비가 증가함에 따라 최대전단탄성계수 값은 감소함을 알 수 있다. 포장 두께가 클수록 노상에 대한 영향이 적었으며 축차응력의 크기가 클수록 회복탄성계수는 작아지는 것을 확인하였다. 따라서, 노상 상부에 필요 두께 이상이 시공된다면 노상층의 함수비 변화에 따른 영향을 크지 않을 것으로 판단된다.

2절. 국외 관련 연구 현황

투·배수성 포장은 유럽과 일본 등에서 널리 사용되고 있으며 골재, 바인더, 혼합물 등의 실험에 대한 연구가 활발하게 진행되어 공극률, 강도, 내구성을 만족시키는 재료가 개발되고 있다. 또한 현장 시공법 및 유지관리에 대한 연구가 진행 중에 있다. 미국, 남아공, 중국 등에서는 시멘트 안정처리 기층에 다양한 혼화제를 첨가하여 포장의 장기 공용성 향상과 비용 절감에 대한 많은 연구를 수행해 오고 있다. 저소음 포장 역시 선진국에서는 30여년 전부터 연구를 진행하고 있다. 블록 포장의 경우 유럽 등에서 보도 및 차도에 널리 적용되고 있는 실정이다.

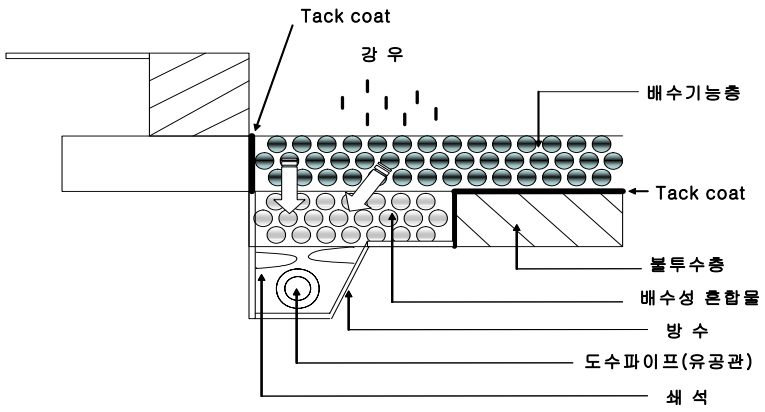
1. 투·배수성 포장

배수성 포장은 1980년대 초 벨기에를 중심으로 유럽에 알려지기 시작했고 일본에서는 1993년에 시공하기 시작하였다. 일본은 기후와 지형적인 특성을 감안하여 건설청, 일본도로공단 등에서 배수성포장의 시험시공을 활발히 진행시켜 현재는 이에 대한 기술과 노하우가 많이 축적된 상황이다.

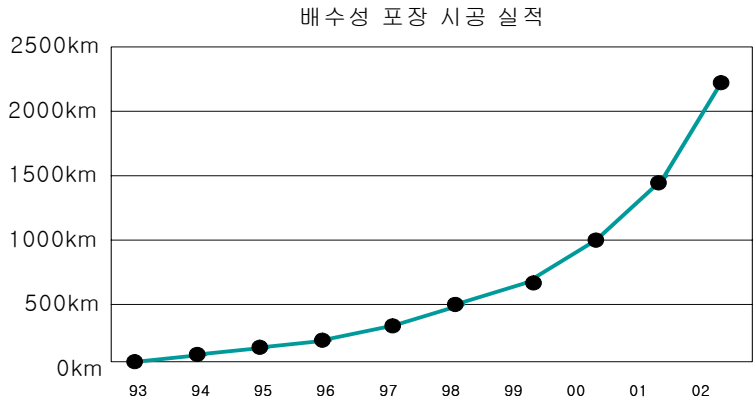
유럽에서는 Porous Asphalt 또는 Drain Asphalt라고 부르고 특히 영국은 투수성 머캐덤(Pervious Macadam)이라고도 칭하고 있다. 또한 미국에서는 개립도 아스팔트 마찰층(Open-Graded Asphalt Friction Course)의 약자로 OGFC라 부르고 있다.

가. 일본

일본에서의 배수성 포장은 1993년부터 보급되었으며, 현재는 밀입도 포장과 배수성 포장이 거의 동등한 비율로 시공되고 있다. 배수성 포장의 도입은 소음저감 효과와 차량주행 시 시야확보, 미끄럼 현상 방지에 따른 안전성을 확보할 수 있는 장점 등으로 인해 이루어졌다. 일본의 배수성 포장의 배수처리 단면의 일례는 <그림 2.2.1>과 같으며 불투수층은 기존 도로를 그대로 사용하고 표층에 Porous 아스팔트를 덮어씌우는 경우도 있다.



<그림 2.2.1> 일본의 배수성 포장 단면



<그림 2.2.2> 배수성 포장의 시공실적(일본)

<그림 2.2.2>는 배수성 포장의 시공실적을 나타낸 것으로 1993년부터 시공실적이 계속 증가하고 있음을 보여준다. 특히, 국토교통성에서 1998년도 이후 노면 소음치를 성능 목표치로 하는 「고기능 포장」 표준 공종으로 채택한 후, 시공량이 급속히 늘고 있다.

이와 같은 일본의 투·배수성 포장 연구는 크게 골재, 아스팔트 혼합물, 최적 두께 연구로 구분된다.

먼저 골재 관련 연구는 기존 연구를 통해 배수성 포장의 투수 성능과 흡음 성능을 개선하는데 연속된 공극의 확보가 효과적이라고 판단하여 입경을 균일하게 한 단입도 굵은 골재를 사용할 것을 제안하였다.

1992~1993년 건설성은 직할국도에서의 시험 시공을 위해 조골재의 최대 입경에 대해 연구하여 2.5~5mm의 골재 최대 입경이 소음을 저감시킨다고 발표하였다.

1994년 건설성 토목연구소에서는 주행실험을 실시하여 5~10mm의 단립화 조골재가 투수성능 및 흡음 성능을 향상시킨다고 보고하였으며 소음 저감을 위해 1999년 오오모리 혼쵸오에 시공하였다.

1996년 주행 실험 결과를 토대로 소음 저하 효과를 증진하고 효과를 지속하기 위해서는 가는 입자의 굵은 골재를 사용하는 것이 효과적이라고 보고하였다. 실제 시공은 1999년 시나가와구에 실시되었으며 소음 규정이하의 소음도를 확보하기 위해 표층 상부 2cm에 5~8mm 골재를 사용하였다.

혼합물에서 세골재가 미치는 영향에 관한 연구가 1996년 시행되었다. 조골재의 양을 일정하게 하고 세골재 입도의 변화를 주면서 칸타브로 시험을 실시한 결과 세골재의 입도에 따라 공극률의 차이가 발생함을 발견하였으며 2003년 실내시험을 통해 세골제가 저온에서 칸타브로 손실률에 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

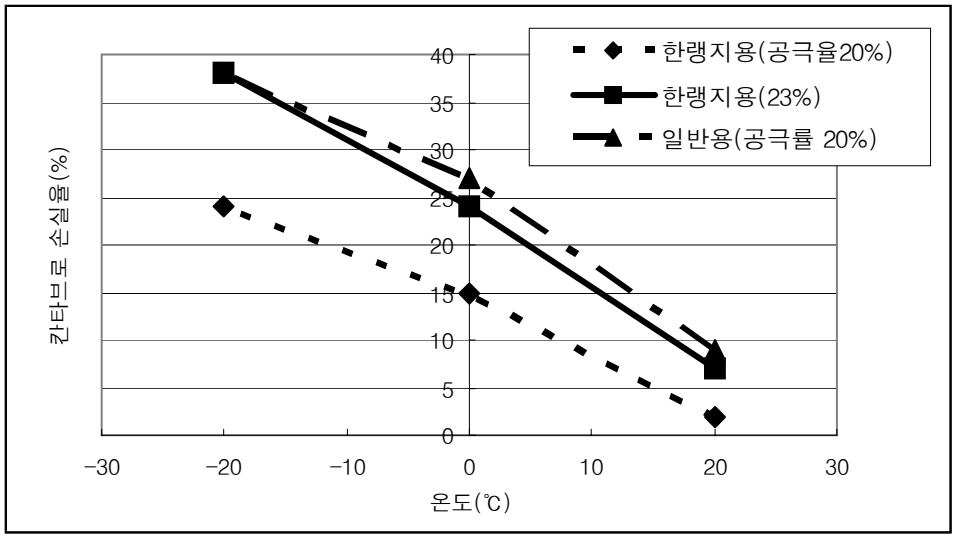
일본의 아스팔트 바인더 및 혼합물에 관한 연구는 다음과 같다.

배수성 포장은 골재와 골재 사이의 접촉하는 면적이 작고, 층의 내부에서도 공기나 물과 접촉하기 때문에 일반 아스팔트와 달리 피막이 두껍고, 골재 파악력이 크며, 잘 열화되지 않은 아스팔트가 요구되어 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 배수성 포장의 시행 초기 단계에는 배합 설계법이 확립되어 있지 않아 목표 공극률 결정이 가장 난해한 사항 중 하나였다. 이때 공극률을 각각 10.8~15.6%, 15%로 정한 후 마셜 안정도, 동적 안정도 등의 목표치를 결정하여 시험시공을 실시하였다. 1987년 환상 7호선에 식물 섬유를 첨가한 스트레이트 아스팔트를 1989년 토오호쿠 자동차도에 개질 아스팔트 Ⅱ형을 각각 사용하였으나 공극 막힘현상이 발생하여 공용성이 저하되었다. 이러한 배수성 혼합물의 특성을 고려하여 고점도 개질 아스팔트가 1989년 호쿠리쿠 자동차도로에 시공하였다. 이후 유럽의 경험을 통해 공용성이 양호한 배수성 포장의 공극률이 20% 이상이라는 사실을 발견하였으며 이후 배수성 포장의 목표 공극률을 20%로 결정하였다. 이후 '표준적인 아스팔트'에 채택되어 2000년에는 출하량이 12만톤을 넘어섰으며 현재 시공되고 있는 배수성 포장의 대부분을 차지하고 있다.

1992년 아스팔트협회 기술위원회 재료개발분과회와 바인더 제조업체가 배수성 포장을 중교통 노선에 적용하기 위해 공동으로 연구하여 1997년 '배수성 포장용 에폭시 아스팔트 혼합물 시공 지침(안)'을 발간하였다. <표 2.2.1>은 일본 에폭시 아스팔트의 개발 목표치를 나타내고 있다.

<표 2.2.1> 일본 에폭시 아스팔트의 개발 목표치

항목	목표치	비고
사용 가능 시간(min)	90정도	혼합 시 온도
마샬안정도[kN(kgf)]	4.9(500)이상	촉진 경화 140℃ 24시간 양생 후 측정
동적안정도 (회/mm)	6000이상	촉진 경화 140℃ 24시간 양생 후 측정
공극률(%)	20정도	촉진 경화 140℃ 24시간 양생 후 측정
투수계수(cm/sec)	1×10^{-2}	촉진 경화 140℃ 24시간 양생 후 측정



<그림 2.2.3> 일본 한냉지역 배수성 포장 칸타브로 시험 결과

1995년 건설성 토목연구소는 배수성 혼합물이 고가도로에 적용한 결과 휨 시험의 파단 변형 기준치인 6×10^{-3} 이하임을 발견하였고 이를 해결하고자 1997년 강상판용 고점도 개질 아스팔트를 개발하였다. 이는 1997년 5월에 야마구치현 사모사키에 시공되었으며 현재 수도고속도로공단의 표준 성상으로 사용되고 있다. 또한 저온 지역의 골재 떨어짐에 대한 저항성이나 내마모성 등의 향상을 위해 1999년 적설 한랭지용 고점도 아스팔트가 개발되었으며 1999년 6월 고속도로에 처음 시공된 이후 사용 실적을 늘리고 있는데 <그림 2.2.3>은 일본 한랭지역 배수성 포장 칸타브로 시험 결과를 보여주고 있다. 저온에서는 매우 높은 값을 보여주어 내구성에 문제가 있음을 보여주고 있다.

배수성 혼합물의 골재 형태와 혼합물 외에도 배수성 혼합물층의 층을 변화에 대

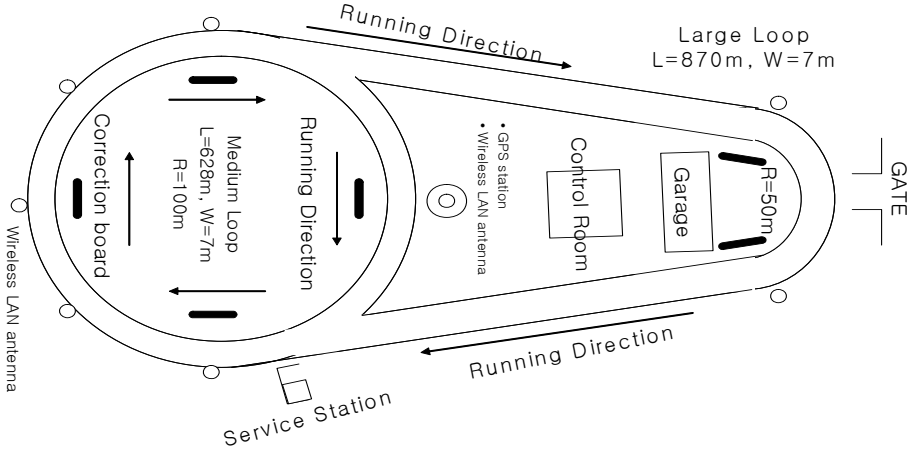
한 연구도 진행하였다. 1993년 재료비 절감을 목적으로 배수성 혼합물 층의 두께를 25~30mm로 박층화하여 시험 시공을 실시하였다. 시험 시공 결과, 박층화를 통해 30%의 재료비 절감을 얻을 수 있었으나 기존 배수성 포장에 비해 배수 기능이나 흡음기능이 저하됨을 알 수 있었다.

1996년 건설성 토목연구소는 배수성 혼합물층 두께 3cm, 5cm, 8cm에서 각각 주행 시험을 실시하였으며 실험 결과 포장 두께 차이에 따른 소음 파워 레벨이 발견되지 않아 배수성 혼합물 층의 두께를 3~5cm로 제시하였다. 또한, 1996~1998년에는 배수성 혼합물 층을 상하로 구분하고, 상부에는 골재 최대치수가 5~8mm의 가는 입자 골재를 적용하는 '2층식 배수성 포장'을 연구하였다. 연구결과 상부에 가는 입자의 배수성 혼합물을 이용하면 뚜렷한 소음 저하 효과를 기대할 수 있었으며 층 전체의 가는 입자 배수성 혼합물을 이용한 경우에 비해 내유동성의 향상을 기대할 수 있다는 특징을 발견하였다. 초기 시공 단계에서는 상부와 하부가 각각 포설되었으나 '2층 동시 포설용 아스팔트 피니셔'의 개발로 상부와 하부를 동시 시공하는 사례가 늘고 있다.

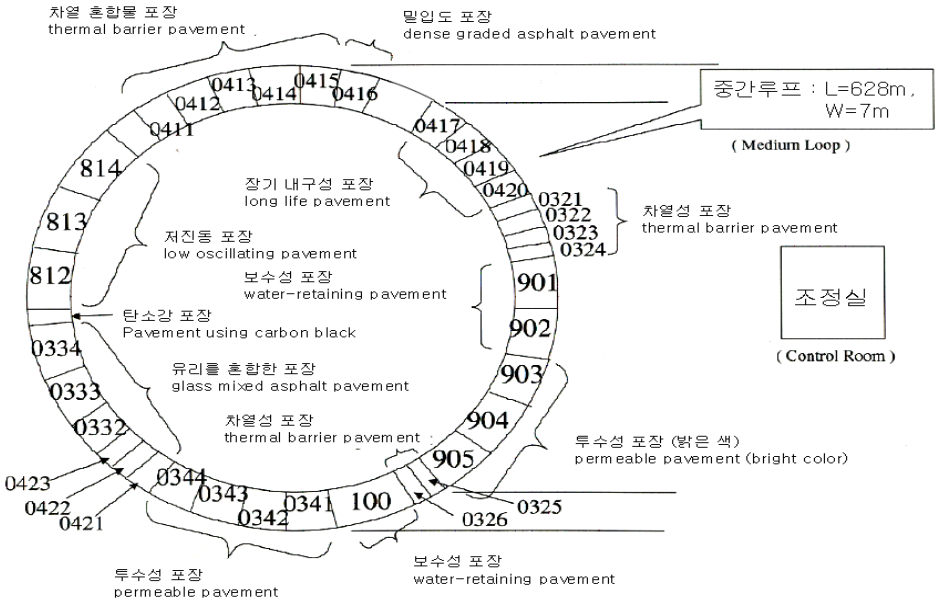
PWRI(Public Works Research Institute)에서는 환경에 노출된 상황에서 반복되는 교통하중을 재하하여 포장의 공용성을 평가하기 위해 <그림 2.2.4>와 같은 하중차량을 개발하였다. 새롭게 개발된 재료와 구조를 가진 포장의 내구성을 평가하기 위해 실제 크기로 건설하였다. 포장 주행 실험은 대형차 4대가 자동으로 매일 10시간을 운행하며 일반도로에서 포장계획교통량 1000~3000대 미만에 해당하는 C 교통량이 10년간 재하되는 하중을 2000시간(200일간)으로 정의하였다. <그림 2.2.5>는 포장 주행 실험장의 제원을 나타낸 것이다.



<그림 2.2.4> 포장주행실험장과 하중차량

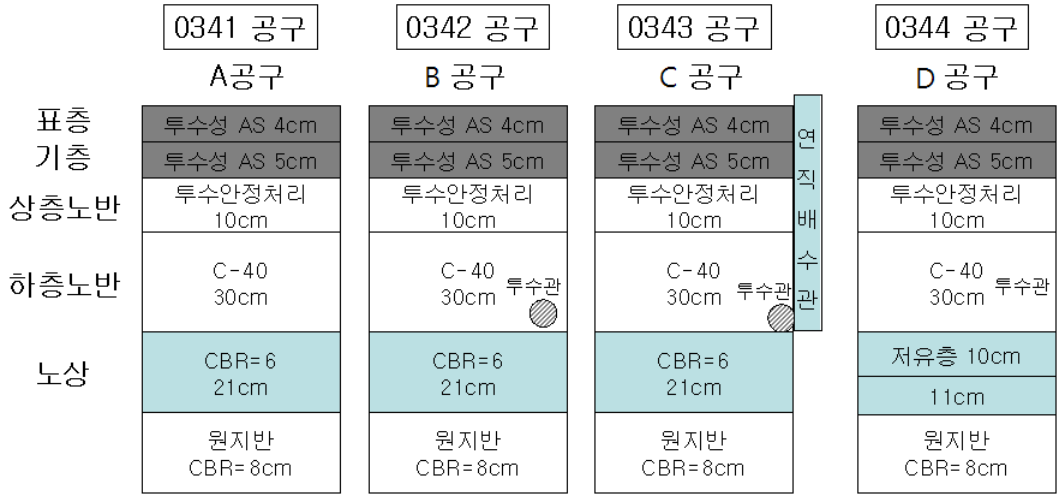


<그림 2.2.5> PWRI의 포장 주행 실험장 제원



<그림 2.2.6> PWRI의 포장 주행 실험장 단면 구성 예

차량 주행 실험장의 중간 루프에는 <그림 2.2.6>과 같이 새롭게 개발된 신재료와 구조에 대한 다양한 포장의 내구성 평가를 실시하였다. 일본에서 현재 시험중인 투·배수성 포장의 단면을 <그림 2.2.7>에 나타낸 것이다. 15m×5m의 제 1공구 구간으로 2003년 12월에 시공되었다. 투수성 고점도 아스팔트를 사용하였고 투수안정처리층은 개질 Ⅱ형 아스팔트로, 공극률은 모두 20%로 설계하였다.



<그림 2.2.7> 토목연구소내 투·배수성 시험포장 단면(중앙대학교, 2005)



<그림 2.2.8> PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0341공구, A공구)



<그림 2.2.9>PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0342공구, B공구)



<그림 2.2.10>PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0343공구, C공구)



<그림 2.2.11> PWRI 투수성 포장 공용성 평가(0344공구, D공구)

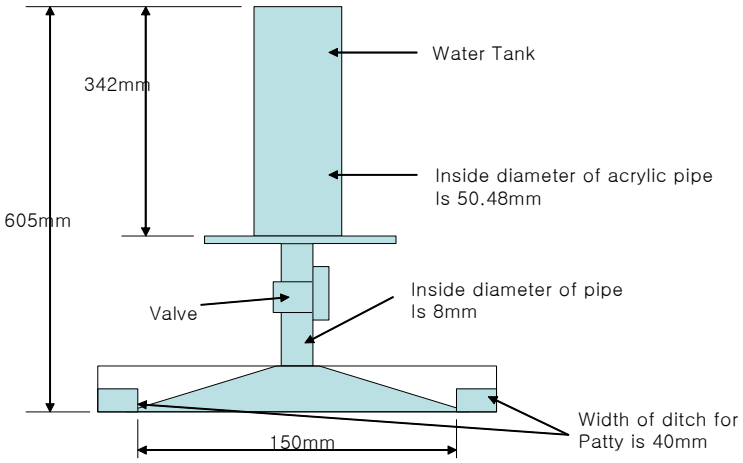
<그림 2.2.8>~<그림 2.2.11>은 PWRI에서 투·배수성 포장의 공용성 평가과정에서 표면 및 러팅 진전 상황을 보여주고 있다. 0341공구는 표층부터 노상까지 투수시킨 단면으로 내구성 평가결과 <그림 2.2.8>과 같이 심한 러팅을 볼 수 있었다. <그림 2.2.9>과 <그림 2.2.10>은 0342공구로 노상 위에 투수관을 이용하여 배수시킨 구조로 내구성 평가결과 양호한 포장상태를 나타냈다.

<그림 2.2.11>은 노상에 저유층을 두어 투수시킨 구조로 내구성 평가결과 0342, 0343공구보다 러팅이 심하게 발생하였다. 따라서 물의 투수처리가 매우 중요함을 알 수 있었다.

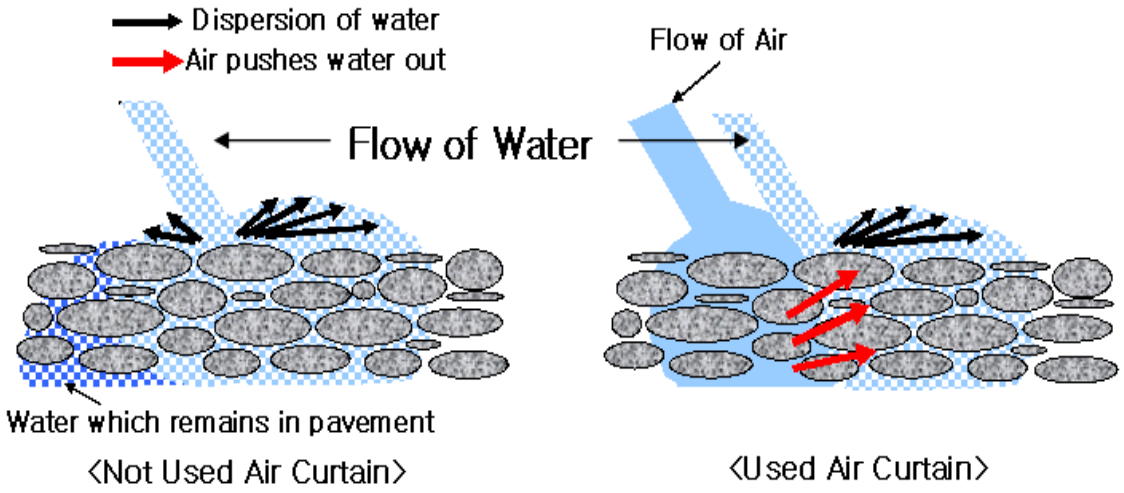
투수성 포장의 러팅 특성 뿐만 아니라 기능성 평가를 실시하였는데, 포장 거칠기, 소음, 투수성 등이 실시되고 있다. 먼저, 레이저를 이용하는 표면 평가 장비인 MPD(Mean Profile Depth)로 표면을 측정함으로써 표면 거칠기를 평가할 수 있으며 측정 범위는 10×100cm 이다. 표면 거칠기는 마찰력과 관계가 있기 때문에 배수성 아스팔트의 안전성을 평가할 수 있는 지표가 된다.

<그림 2.2.12>에 제시된 장비는 일본에서 규격화된 투수 측정 장비로 지름이 5cm, 관길이가 30cm 정도가 된다. 본 장비를 표면에 고정한 후 시험관에 물을 가득 채우고 눈금이 500g에서 100g으로 내려가는 동안의 시간을 측정함으로써 투수성을 측정한다.

현재 배수성 포장의 문제점은 공용 후 시간이 경과함에 따라 공극이 막힘으로써 투수성이 상실되는 것이다. 일본에서는 이러한 기능 상실의 문제점을 해결하기 위해 여러 가지 방법을 연구하고 있다.



<그림 2.2.12> 투수 측정 장비(지름 5cm)(중앙대학교, 2005)

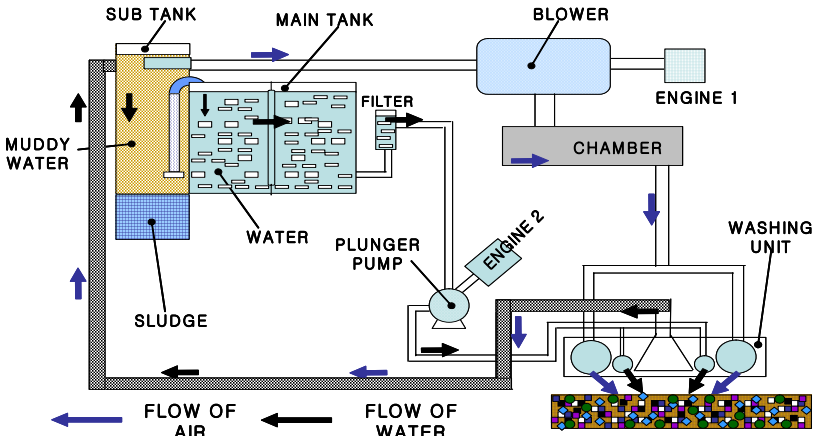


(a) (b)

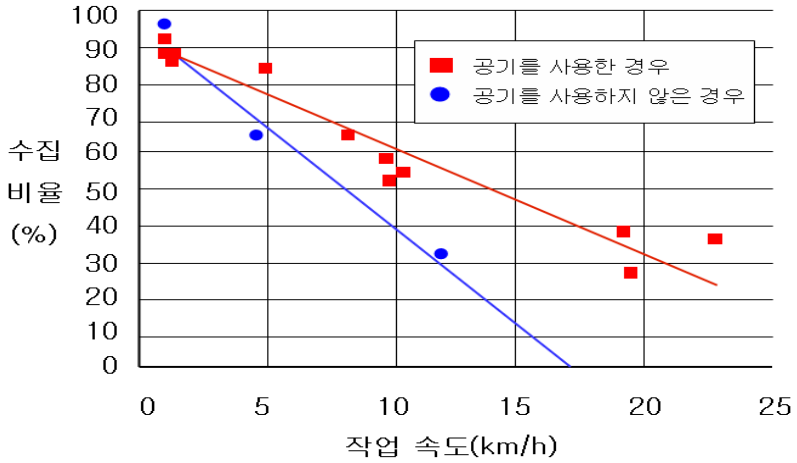
<그림 2.2.13> 물과 공기의 활용 방식(a)과 물의 활용 방식(b)(중앙대학교, 2005)

초기 공극 청소 장비는 <그림 2.2.13.a>와 같이 물만을 사용하여 높은 압력을 이용한 살수 방식을 이용하였다. 그러나 작업 속도가 느려 교통 흐름에 방해가 될 뿐만 아니라 청소에 사용된 물의 일부가 주위로 스며들어 물속의 이물질이 다시 공극을 채우고 비점오염의 원인이 되어왔다.

이런 문제점을 개선하고자 <그림 2.2.13.b>와 같이 공기를 이용함으로써 청소에 쓰인 물의 유출을 방지하여 비점오염의 발생을 최소화하는 장비를 개발하였다. 청소 장비에서 사용된 물은 다시 청소 장비로 흡수되어 이물질을 제거한 후 재활용된다. 청소 장비에서 물의 재활용원리는 <그림 2.2.14>과 같다.



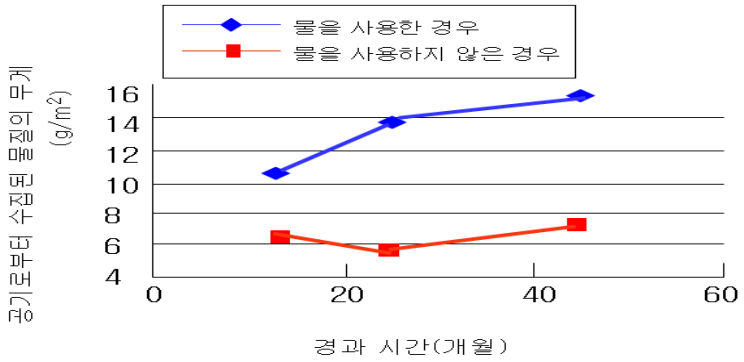
<그림 2.2.14> 흡수된 물과 이물질이 분리되는 과정(중앙대학교, 2005)



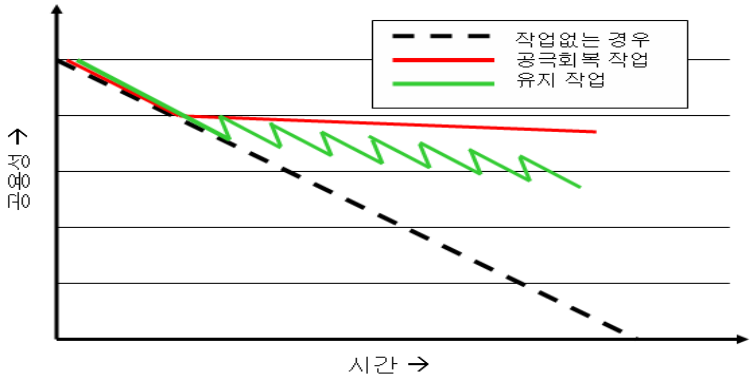
<그림 2.2.15> 공기의 사용 유무에 따른 작업속도별 이물질 수거율(중앙대학교, 2005)

<그림 2.2.15>는 청소 작업 시 작업속도 및 공기 사용 여부에 따른 이물질 수거율을 측정한 것이다. 물에 공기를 함께 사용한 것이 이물질 효율이 더 좋은 것을 알 수 있다.

<그림 2.2.16>은 포장의 경과 시간별 공기와 함께 물의 사용 여부에 대한 청소 효과를 비교한 그림이다. 이 그림에서 물을 함께 사용한 청소 방법이 물을 사용하지 않았을 때보다 많은 이물질을 수거한 것을 알 수 있다. 물을 쓰지 않고 공기만을 사용할 경우 시공 후 빠른 시간 이내에 작업하는 것이 효과적일 것이다. 총비용에서도 공기만을 사용할 경우 단가가 가장 낮기 때문에 횟수를 늘리는 방법으로 효과를 거둘 수 있을 것이다.



<그림 2.2.16> 포장의 경과 시간별 물의 사용 유무에 대한 청소 효과 비교(중앙대학교, 2005)



<그림 2.2.17> 기능 회복 작업과 유지 보수 작업과의 포장 기능성 비교

<그림 2.2.17>에서는 배수성 포장에 대해서 보수를 하지 않았을 경우와 기능 회복 작업을 실시한 경우, 그리고 유지보수 작업을 실시했을 경우에 대해서 배수성 포장에 대한 기능을 비교하였다. 아무런 작업을 하지 않은 포장은 일정하게 기능을 상실하고 있다. 주기적인 기능 회복 작업을 실시하면 어느 정도 포장의 기능을 유지해 주지만 기능이 떨어지기 전에 미리 유지보수 작업을 해주는 경우보다 효과가 떨어지는 것을 알 수 있다.

일본의 배수성 포장은 미끄럼 방지 및 소음 저감 등의 목적으로 연구 개발되어 왔고 실제 도로에 폭넓게 적용되고 있다. 최근에는 유지 보수를 위한 장비 개발 및 적용을 통해 배수성 포장의 공용성을 향상시키는 연구를 수행하고 있다. <표 2.2.2>는 앞서 제시했던 일본의 배수성 포장에 대한 연구 현황을 나타내고 있고 <표 2.2.3>~<표 2.2.4>에서는 각각 일본 배수성 포장에 대한 현재 기술 현황 및 평가 방법을 제시하고 있다.

<표 2.2.2> 일본의 배수성 포장의 연구현황

구 분		연구내용 및 연구 실적
연구현황	일본도로건설업협회(1996)	· 배수성 포장 기술지침(안) 발간으로 아스팔트(바인더)와 골재, 혼합물 규정(1996)
	일본도로건설업협회(1998)	· 배수성 포장의 성능 규정(1998)
	건설성(1998)	· 품질의 확보와 비요절감을 위한 공공공사의 품질확보등을 위한 행동지침을 책정(1998)
	일본도로건설업협회(2004)	· 배수성 포장의 목표공극률 20%(1989) · 호쿠리쿠 자동차로에 고점도 개질아스팔트사용으로 공극막힘현상과 공용성 최소화(1989) · 최대입경(2.5~5mm)사용으로 소음저감 효과(1992,1993) · 혼합물층 두께를 25~30mm 박층화로 30%의 재료비 절감이 있으나 배수기능이나 흡음기능은 저하(1993) · 굵은 골재 85%일 때 잔골재 입도에 따라 공극률에 영향(1996) · 야마구치현 사모사키에 강상판용 고점도 개질 아스팔트 사용으로 휨변형 최소화(1997) · 배수성 포장용 에폭시 아스팔트 혼합물 시공 지침(안)발간(1997) · 혼합물 층의 두께변화인 “2층식 배수성 포장“연구로 높은 소음저감과 내유동성 향상(1996~1998) · 시나가와구에 표층 상부 5~8mm사용으로 소음저감(1999) · 오모모리 혼쵸오에 5~10mm 단입도 골재가 투수성능 및 흡음 성능 향상(1999) · 저온지역의 골재 저항성 및 내마모성 등의 향상 목적으로 한랭지용 고점도 아스팔트 개발(1999)

<표 2.2.3> 일본의 배수성 포장의 기술 현황

구 분		연구내용 및 연구 실적
기술 현황	공용성 평가를 위한 시험주로 PWRI (Public Works Research Instiute)	· 새롭게 개발된 재료와 구조를 가진 포장의 내구성을 평가함 · 투수성 AS는 고점도 AS를 투수안정처리층은 개질Ⅱ형 AS를 사용하여 공극률 20%로 설계하여 평가 · 표층부터 노상까지 투수시킨 단면(0341공구)는 내구성 평가로 심한 러팅을 확인 · 노상위에 투수관을 이용하여 배수시킨 구조(0342공구)는 내구성 평가로 양호함을 확인 · 노상에 저유층을 두어 투수시킨 구조(0343공구)가 0342공구보다 내구성면에서 러팅의 발생이 적음. · 0344공구 > 0341공구 > 0342공구 > 0343공구 순으로 러팅의 정도가 심함 · 투수관의 설치와 함께 연직배수관의 유무로 내구성의 중요도가 평가 됨
	유지관리	· 기능성 포장의 가장 큰 문제점을 유지관리하는 공극청소용 장비 개발과 실용화 · 공극 청소용 장비로 인해 투수성, 저소음 등의 기능성 회복 · 물과 공기를 혼용하여 실용화하여 기능성의 장기화를 가져오고 청소시의 분진 발생 저감으로 효율성을 극대화 함 · 표면의 골재가 부분적으로 파손되는 것을 최소화하기 위해 노즐의 압력 조절과 공기만으로 공극 청소하는 장비의 개발 중에 있음

<표 2.2.4> 포장 시스템의 기능적 평가 현황

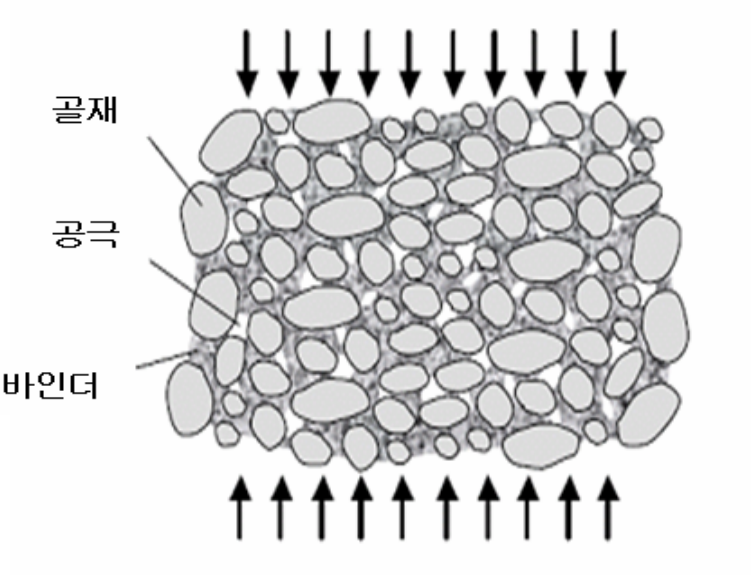
구 분		연구내용 및 연구 실적
기능적 평가현황	평탄성 측정	· 표면 평가 장치를 이용하여 MPD(Mean Profile Depth)을 측정하여 표면 거칠기를 평가 · 표면 거칠기는 마찰력과 관계로 안전성 평가의 척도
	소음 평가	· 흡음관과 데이터용 노트북으로 구성되어 표면 공극에 의한 흡음성능을 평가 · 포장 표면에 소리를 발생시킨 후 반사되는 음의 정도를 평가하여 소음 저감 흡음성 판단 · 밀입도 아스팔트 기준 100%로 평가
	투수평가	· 현장투수시험를 이용하여 눈금 100g에서 500g으로 내려가는 동안의 시간을 측정 · 투수계수로 환산하여 투수성을 평가 · 기준치 1×10^{-2}로 투수율을 평가

나. 미국

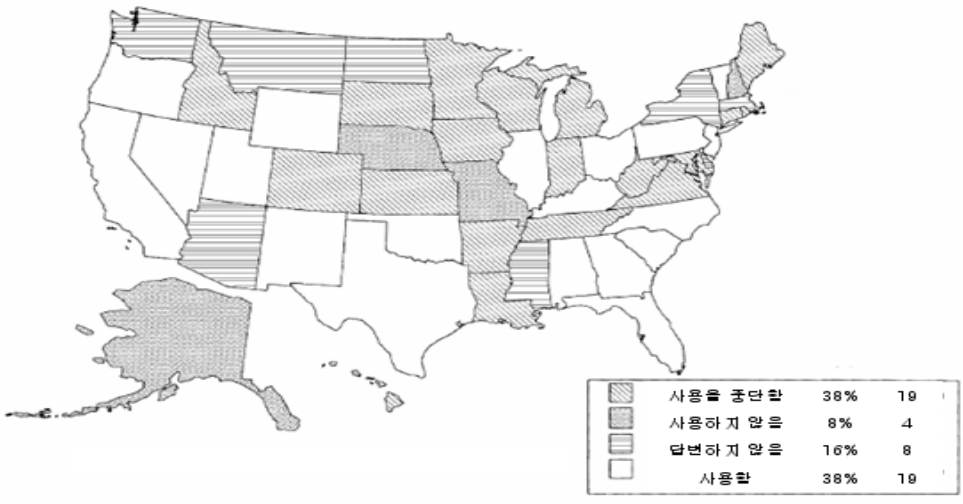
OGFC(Open-Graded Friction Course)는 1950년대부터 아스팔트 포장의 미끄럼저항성 향상을 위하여 미국에서 사용되고 있다. OGFC는 일반 밀입도 아스팔트 포장이 편구배를 이용하여 배수하는 것과 달리 포장표면의 공극을 통해 수직과 수평으로 배수가 가능하여 우천 시 빗물을 신속하게 배수할 수 있다. 포장표면의 공극을 통한 배수는 수막현상을 방지하며, 차량 뒤쪽에서 발생하는 물안개, 물튀김 현상을 개선하여 우천 시 미끄럼저항성 유지 및 운전자의 시야확보를 가능하게 하고 교통소음 저감에도 큰 효과를 보이고 있다. <그림 2.2.18>은 OGFC의 개념을 보여주고 있다.

1998년 NCAT(National Cement for Asphalt Technology)에서 행한 설문조사 결과에 따르면 OGFC는 내구성과 미끄럼저항성 등의 문제로 미국의 몇몇 주에서 사용을 중단한 것으로 보고되었으며 주요 원인으로는 라벨링과 골재이탈 등으로 나타났다. 또한 공극막힘 현상으로 인하여 침투성도 저하 되었다. 이에 따라 미국의 많은 주에서는 바인더 및 첨가제 종류의 변화를 시도하고 있으며 입도 분포도 굵은 골재의 비율을 높임으로써 OGFC의 단점을 보완하고자 하였다.(Prithvi S. Kandhal, 1998) 또한 초기 OGFC의 사용기간은 5~7년이었으나 현재의 미연방도로

국(FHWA)규정은 7~10년을 책정하고 있다.(FHWA, 1990) <그림 2.2.19>는 설문조사 결과에 따른 OGFC 사용 현황을 나타내고 있으며 <표 2.2.5>와 <표 2.2.6>은 각각 미국의 각 주에서 OGFC에 적용한 바인더 종류와 입도 분포를 보여준다.



<그림 2.2.18> OGFC 개념도(Mohammad Faghri, 2002)



<그림 2.2.19> OGFC 사용 현황(Prithvi S. Kandhal, 1998)

<표 2.2.5> 미국 각 주의 OGFC에 적용한 바인더 현황(Prithvi S. Kandhal, 1998)

주 명	사용한 아스팔트 바인더
알라바마	PG 76-22
캘리포니아	AR 2000, 4000, 8000
콜로라도	AC 20R
플로리다	AC 30
조지아나	PG 76-22
하와이	AR 80
아이다호	-
일리아노	AC 10
켄터키	PG 64-22
루지아나	PG 70-22
메릴랜드	AC 20
미시건	-
네바다	AC 20P, AC 30
뉴저지	AC 20
뉴멕시코	-
노스 케롤라인	AC 20P
오하이오	AC 20
오레곤	PBA 5, PBA 6
펜실베니아	AC 20
로드 아일랜드	AC 20
사우스 케롤라인	PG 64-22
텍사스	AC 20, AC 10
유타	PG 64-34
버몬트	AC 20
와이오밍	AC 20, AC 10

<표 2.2.6> 미국 각 주의 OGFC 입도 분포 현황(Prithvi S. Kandhal, 1998)

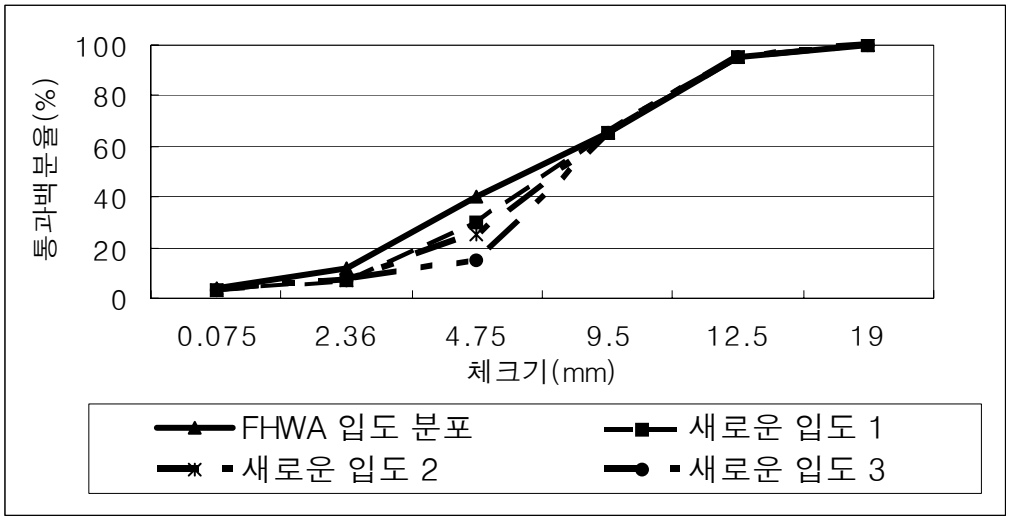
주 명	통 과 백 분 률 (%)												
	25mm	19mm	12.5mm	9.5mm	6.3mm	4.75mm	2.36mm	2mm	1.18mm	0.6mm	0.3mm	0.15mm	0.075mm
알라바마			100	90-100		30-50	5-7						3-6
		100	90-100	40-70		5-30	4-12						3-6
캘리포니아				78-89		28-37	7-18						
콜로라도			100	90-100		35-57	12-33				3-15		2-8
			100	90-100		40-60	20-47				4-18		2-9
플로리다			100	85-100		10-40	4-12						2-5
조지아나		100	85-100	55-75		15-25	5-10						2-4
하와이				100		30-50	5-15						2-5
아이다호		100	95-100	30-80		35-46				8-15			2-5
일리아노		100	90-100	30-50		10-18							2-5
켄터키			100	90-100		25-50	5-15						2-5
루지아나		100	90-100	30-50		10-30		5-20					2-6
				90-100		20-50	5-15						2-6
메릴랜드			100	90-100		20-40	5-15						0-5
미시건			100	90-100		30-50	8-15						2-5
네바다			100	90-100		35-55			5-18				0-3
				95-100		40-65			12-22				0-4
뉴저지			100	80-100		30-50	5-15						2-5
뉴멕시코			100	90-100		25-55	0-12						0-4
노스 캐롤라인			100	75-100		25-50	5-15						1-3
		100	85-100	55-75		15-25	5-10						2-4
오하이오			100	85-96		28-45	9-17						2-5
오르건			99-100	90-98		25-40		2-12					1-5
	99-100	85-96	55-71		15-30		5-15						1-6
펜실베니아				100		30-50	5-15						0-5
로드 아일랜드		90-100				20-50	5-15						2-5
사우스 캐롤라인			100	98-100		40-70	2-20						0-2
텍사스		100	95-100	50-80		0-8	0-4						
유타			100	92-100		36-44	14-20						2-4
버몬트			100	95-100		30-50	5-15						2-5
와이오밍			100	97-100		25-45	10-25						2-7
			100	97-100		20-40	10-20						2-7

OGFC의 초기 적용방안은 Thelen, Howe 등에 의해 제시되었으나 주차장이나 저속도로에 한정되었다.(Thelen, 1978) Gemayel, Mamlouk는 연구를 통해 OGFC가

일반 밀입도 아스팔트에 비하여 인장강도와 회복탄성계수가 약 절반에 해당하며 온도에 민감하다는 사실을 발견하였다. 온도가 높아질수록 회복탄성계수와 안정성은 급속히 낮아졌다.(Gemayel, C.A., 1988) 또한 Qi는 아스팔트 바인더에 개립도 폴리머를 사용하여 내구성이 증진되었다 보고하였다.(Qi, 1995)

2000년 NCAT(National Center for Asphalt Technology)에서는 라벨링, 아스팔트 골재 탈리 현상 등 OGFC의 문제점을 해결하고자 입도 분포, 첨가제 종류에 따른 실내시험, 시험시공 및 평가를 실시하였다. 실내시험을 통해 기존 미연방도로국(FHWA) 입도 분포와 새로운 입도 분포를 평가하였으며. 실내시험에서 사용된 입도분포곡선은 <그림 2.2.20>에 나타나 있다.

실내시험을 통해 VCA(Voids in Coarse Aggregate), Draindown, 침투성, 마모저항성, 노화, 러팅, 친수성 등을 평가하였으며 모든 실험 샘플들은 SGC(Superpave gyratory compactor)를 이용하여 선회다짐(gyration)을 100회 실시하였다. 결과적으로 4.75mm 체통과율이 20%를 넘지 않는 경우, 골재간의 결합력을 유지하면서 적절한 침투성을 나타냈으며 4.75mm 체통과량이 15%일 경우에는 바인더의 draindown이 크게 발생하였다. 과도한 draindown은 안정제나 섬유질의 첨가로 방지할 수 있었으며 노화로 인해 발생하는 마모량은 개질재의 첨가로 감소시킬 수 있었다. 또한 개질재 바인더를 첨가한 경우가 그렇지 않은 경우보다 더 낮은 마모



<그림 2.2.20> 실내시험에 사용된 입도분포 곡선(Rajib B. Mallick, 2000)

현상을 나타내었다. 폴리머 개질재 바인더와 섬유질을 동시에 사용할 경우 마모 현상을 최소화하면서 OGFC의 내구성을 증진시켰다. 러팅의 경우도 마찬가지로 개질재 바인더 및 PG 바인더를 첨가한 경우 더 낮은 러팅을 보여주었다. 또한 섬유질과 함께 첨가한 폴리머 개질재 바인더도 좋은 효과를 나타내었다. 친수성(Moisture susceptibility)의 경우 개질재 바인더를 첨가한 경우가 더 낮은 친수성을 보여 더 높은 강도를 나타내었다. 특히 낮은 기후에서는 폴리머 개질재 바인더와 섬유질을 동시에 사용하는 것이 효과적이었다. NCAT는 실내실험 및 조지아나주에서의 결과를 이용하여 <표 2.2.7>과 같은 입도분포를 제시하였다.

<표 2.2.8>에서는 아스팔트 배합 시의 체적범위를 보여주고 있다. 공기 공극의 경우는 바인더 체적을 통해 결정할 수 있으며 만약 공기 공극이 너무 낮다면 아스팔트 바인더 양을 줄임으로써 해결할 수 있었다. 노화되지 않은 시편의 경우 마모량이 20%를 초과한다면 바인더 첨가가 필요하였으며 산화된 시편이 30%를 초과할 경우에는 바인더의 양을 증가하거나 바인더 첨가제를 대체하는 것으로 해결하였다. 또한, Draindown이 0.3%를 넘을 시에는 바인더의 양과 종류의 조절이 필요하며 섬유질 안정제의 경우 전체 배합의 0.2~0.5%를 첨가한다.

<표 2.2.7> NCA의 OGFC 입도분포(NCAT, 2000)

체크기	통과백분율
19mm	100
12.5mm	85-100
9.5mm	55-75
4.75mm	10-25
2.36mm	5-10
0.075mm	2-4

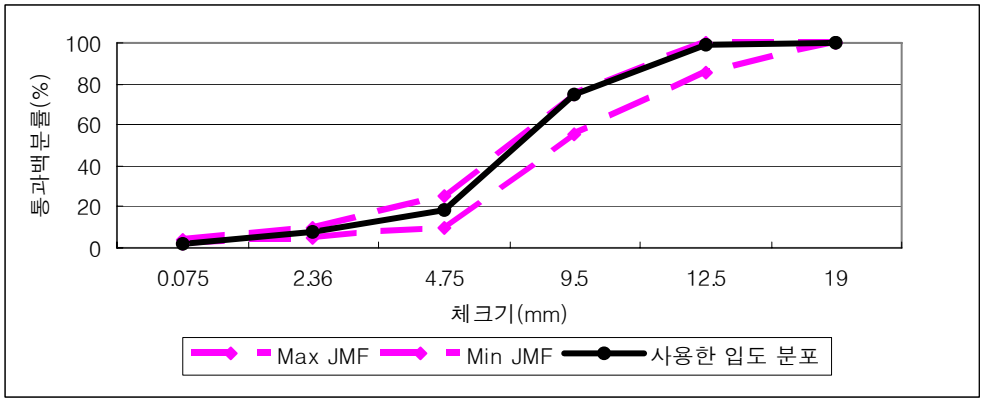
<표 2.2.8> 아스팔트 체적 범위(NCAT, 2000)

항 목	범 위
공기 공극(Air Voids)	18% 이하
산화되지 않은 시편의 마모량	20% 이하
산화된 시편의 마모량	30% 이하
draindown	전체 질량의 0.3%이하
친수성	80%이상

이러한 실내실험 결과를 바탕으로 1992년 조지아주(GDOT, Georgia Department of Transportation) 에서는 OGFC의 공용성평가를 위해 시험시공을 실시하였다. 시공장소는 조지아나주 아틀랜타 남쪽 주간고속도로 구간에 위치하였으며 입도 분포와 첨가제의 종류에 따라 총 6개구간을 시공하였다. 6개구간에는 좁은 입도의 OGFC(D), 16% 크롬로버를 함유한 좁은 입도의 OGFC(D16R), 셀룰로오스 섬유질을 포함한 좁은 입도의 OGFC(DC), 미네랄 섬유질을 포함한 좁은 입도의 OGFC(DM), SB 폴리머를 포함한 좁은 입도의 OGFC(DP) 그리고 SB 폴리머와 셀룰로오스 섬유질을 포함한 좁은 입도의 OGFC(DCP)이 시공되었으며 각 구역의 JMF(Job-mix-formula)는 <그림 2.2.19>에 나타나 있다. <표 2.2.9>는 6개 시험 시공 이전의 실내시험 결과를 보여주고 있다. 6개 구간은 같은 입도 분포를 가지고 있으며 아스팔트 양이 조금씩 다르게 나타나고 있다. 칸타브로 실험결과에서 마모량은 모두 기준이내인 20%이하를 나타내었고 특히, 바인더 첨가제를 포함한 경우에는 9%이하를 나타내었다.

시험 시공이후 6년이 지난 1998년에 NCAT는 테스트 구간에서 포장표면 상태, 러팅, 균열, 라벨링에 대한 육안조사를 실시하고 코어를 추출하여 침투성을 평가하였다. 포장표면의 경우 모든 구역에서 굵은 골재 떨어짐 현상이 발생하였다. 특히, D16R 구역이 가장 많이 발생했으며 DC, DM, DP 구역은 발생량이 적었다. 러팅을 평가한 결과 심각하게 변형된 구간은 발견되지 않았으며 범위는 0.0mm(DP)에서 4.1mm(DC)사이였다. 각 구역의 균열은 포틀랜드 시멘트 콘크리트 포장에 의한 반사균열이 주요 균열로 나타났다. 섬유질 포함한 DM, DC 구역은 균열에 관해 낮은 수치를 보였지만 D16R 구역은 높은 수치를 보였다. NCAT는 조지아나주에서의 시험 시공 구간의 연구결과를 통해 새로운 OGFC 배합을 제안한다. 4.75mm 체를 통과한 통과백분율이 약15%일 경우가 가장 좋은 공용성을 나타내었으며 개질재, 폴리머, 섬유질 등도 공용성을 향상시킴을 알 수 있었다.(Rajib B. Mallock,2000)

추가 연구를 통해 셀룰로오스 섬유질이 우천 시 물을 흡수하며 초기 균열을 발생시킨다는 기존의 연구결과와 달리 실내실험 및 현장실험을 통해 물을 흡수하지 않는다고 알려진 미네랄 섬유질과 비슷한 역할을 수행하고 있음을 발견했다.(L. Allen Cooley, Jr., 2000)



<그림 2.2.21> 시험 시공구간 OGFC의 입도 분포 곡선(NCAT, 2000)

<표 2.2.9> 시험 시공구간의 테스트 결과((NCAT, 2000)

체크기	D	D16R	DM	DC	DP	DCP
19mm	100	100	100	100	100	100
12.5mm	99	99	99	99	99	99
9.5mm	75	75	75	75	75	75
4.75mm	18	18	18	18	18	18
2.36mm	8	8	8	8	8	8
0.075mm	2	2	2	2	2	2
%AC	6.0	6.6	6.3	6.4	6.2	6.4
칸타브로(%)	13.5	8.6	5.7	5.8	8.6	8.2
Drain - down	0.37	0.05	0.06	0.06	0.34	0.04

주) D:굵은 입도의 OGFC, D16R:16%의 크롬버를 함유한 굵은 입도의 OGFC

DM:미네랄 섬유질을 포함한 굵은입도의 OGFC, DC:셀룰로오스를 포함한 굵은입도의 OGFC

DP:SB폴리머를 함유한 굵은입도의 OGFC, DCP:SB폴리머와 셀룰로오스 섬유질을 포함한 굵은입도의 OGFC

1994년 플로리다 교통국(Florida DOT)는 OGFC의 문제점을 보완하고자 배합 시 GTR(Ground Tire Rubber)을 첨가하였다. 이러한 변화는 높은 아스팔트 바인더 체적에도 불구하고 시공 시 draindown을 감소시켰으며, 바인더 체적의 증가는 내구성을 증진시키고 골재의 코팅두께 또한 증가시켰다. <표 2.2.10>은 FDOT에서 제시한 입도분포 범위이다.(Bouzid Choubane, 1999)

<표 2.2.10> OGFC 입도분포 범위(FDOT, 1994))

체크기	통과백분율(%)
12.5mm	100
9.5mm	85 - 60
4.75mm	10 - 40
2.0mm	4 - 12
75㎛	2 - 5

조지아 교통국(GDOT)에서는 운전자 안전 확보를 위해 OGFC를 비롯한 다양한 포장형태를 사용하고 있다. 1950년대와 1960년대 연구를 통해 GDOT는 주간 고속도로에 얇은 OGFC를 시공하였다. 과거 GDOT는 AC draindown, 급속한 노화, 라벨링 등의 OGFC의 문제점이 발생하여 1982년 사용을 중지하였다. 그러나 계속적인 연구를 통해 수산화물 석회(Hydrated lime)가 OGFC의 탈리 현상을 방지함을 발견하였고 섬유질은 AC draindown을 방지하며 개질재 폴리머 바인더는 노화와 라벨링을 방지하여 내구성을 증진시킨다고 보고하였다. 또한 입도 분포의 굵은 골재 비율이 높아지고 층이 두꺼워질수록 침투성이 향상되었다. 현재 GDOT는 수정·보완된 OGFC를 하루 교통량이 25,000대 이상이며 속도 감속 구간이 아닌 주내의 모든 도로에 대한 포장형태로 활용하고 있다. <표 2.2.11>과 <표 2.2.12>는 조지아 교통국에서 제시한 현장 입도 기준과 OGFC에 사용된 골재 특성을 보여주고 있다.(GDOT, 2001)

<표 2.2.11> 현장 입도 기준(조지아 교통국)

오차 범위	체크기	9.5mm OGFC	12.5mm OGFC
		통과백분률(%)	
±0.0	19mm	-	100
±6.1	12.5mm	100	85-100
±5.6	9.5mm	85-100	55-75
±5.7	4.75mm	20-40	15-25
±4.6	2.36mm	5-10	5-10
±2.0	75㎛	2-4	2-4
±0.4	AC	6.0 - 7.25	

<표 2.2.12> 조지아 도로국 OGFC 골재 품질기준

기 준	요 구 도
LA 마모시험 (loss)	50% 이하
안정성 (loss)	15% 이하
편장석율 허용치 (5:1 ratio)	10% 이하
점판암 허용치	10% 이하

<표 2.2.13> 알라바마 도로국의 OGFC 입도기준

체크기	통과백분율(%)
19.0mm	100
12.5mm	85 - 100
9.5mm	55 - 65
4.75mm	10 - 25
2.36mm	5 - 10
75㎛	2 - 4

알리바마 도로국(Alabama DOT)은 2003년 1월 1일부터 <표 2.2.13>에서 보듯이 개질재 폴리머 OGFC의 입도 분포를 제시하였으며 75㎛(No.200) 골재의 추가적인 첨가가 필요할 경우 미네랄 필터와 석회석 사용을 제안하였다.(Alabama DOT, 2002)

2004년 루지아나주(Louisiana)에서는, 아스팔트 바인더가 노화된 부분에서 라벨링 현상을 발견하였다. 연구결과, 주요원인은 습도와 온도로 판단되었으며 온도문제의 경우 배합 및 기후와 관련이 있었으며 습도 문제는 골재 종류와 관련이 있었다. 골

재의 최대흡수율, 시공 기간의 제한(5월~9월), 그리고 시공 시 최소공기온도 등의 설계 변경을 통해 단점을 극복하였다. 또한 폴리머 아스팔트와 섬유질을 함께 사용하여 골재 코팅두께를 증가 통해 현상을 저감시켰다.(Samuel B. Cooper, Jr., P.E., 2004)

OGFC는 일반 밀입도 아스팔트에 비해 많은 공극을 지니고 있어 우천 시 배수효과가 높지만 포장표면 재료로 적용하기에는 낮은 강도와 내구성을 지니고 있다. 이에 따라 2002년 URITC(University of Rhode Island Transportation Research Center)는 OGFC의 침투성과 강도특성에 관하여 연구하였다. 이 연구에서는 개질재 섬유질, 폴리머 바인더를 사용하였으며 아리조나주(Arizona), 조지아주(Georgia)의 입도분포와 URITC주에서 개발한 입도 분포를 비교 연구하였다. 시험시편은 개질재를 함유하지 않았고 실험을 통해 시편 내 공기량, 침투성(falling-head test), 강도(간접인장 실험) 등을 평가하였다. 결과적으로 개질재 섬유질은 강도면에서 거의 영향이 없었으며 침투성은 감소하였다. 개질재 폴리머를 사용한 경우에는 강도를 거의 두 배로 증가시키면서 시편 내 공기량도 증가하였다. 그러나 개질재 섬유질과 개질재 폴리머를 동시에 첨가할 경우에는 강도는 증가하였으나 개질재 폴리머를 단독으로 사용한 경우에 비해 침투성의 증가는 일어나지 않았다. 실험결과 개질재 폴리머를 단독적으로 사용하였을 때 최적의 강도와 침투성의 관계를 이끌어 낼 수 있었다. (Mohammad Faghri, 2002)

각 주의 OGFC 특성을 요약하면 <표 2.2.14>와 같다.

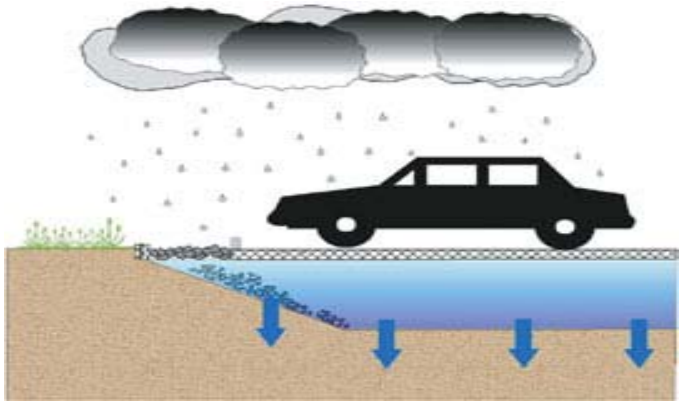
<표 2.2.14> 미국 각 주의 입도분포와 사용한 첨가제 종류

입 도 분 포 통과백분율(%)													아스팔트 바인더 및 첨가제	실 험 법	결과 및 비고
체크기 (mm)	25	19	12.5	9.5	6.3	4.75	2.36	2	1.18	0.6	0.3	0.075	폴리머 개질재 바인더, 섬유질 등	VCA, Draindown, 침투성, 러팅 등	실내시험 및 시험시공 실시 후 양호한 결과 얻음
기 관 명															
NCAT	-	100	85-100	55-75	55-75	10-25	5-10	-	-	-	-	2-4			
플로리다	-	-	100	85-60	-	10-40	-	4-12	-	-	-	2-5	GTR	Draindown 러팅 등	Draindown 감소 및 내구성 증진
조지아나	-	100	85-100	55-75	-	10-25	5-10	-	-	-	-	2-4	수산화물 석회, 섬유질	Draindown 러팅 등	노화 및 라벨링 방지
	-	100	85-100	55-75	-	10-25	5-10	-	-	-	-	2-4			
알라바마	-	100	85-100	55-75	-	10-25	5-10	-	-	-	-	2-4	폴리머 개질재 바인더	-	-
캘리포니아	-	-	-	78-89	-	28-37	7-18	-	-	-	-	-	-	-	-
콜로라도	-	-	100	90-100		35-57	12-33	-	-	-	3-15	2-8	AC 20R	-	-
	-	-	100	90-100		40-60	12-33	-	-	-	3-15	2-8			
하와이	-	-	-	100		15-25	5-15	-	-	-	-	2-4	AR 80	-	-
아이다호	-	100	95-100	30-80	-	35-46	-	-		8-15	-	2-5	-	-	-
일리아노	-	100	90-100	30-50	-	10-18	-	-	-	-	-	2-5	AC10	-	-
켄터키	-	-	100	90-100	-	25-50	5-15	-	-	-	-	2-5	PG 64-22	-	-
루지아나	-	100	90-100	30-50	-	10-30	-	5-20	-	-	-	2-5	PG 70-22	-	-
	-		-	90-100	-	20-50	-	5-15	-	-	-	2-6			
메릴랜드	-	-	100	90-100	-	25-40	5-15	-	-	-	-	0-5	AC 20	-	-

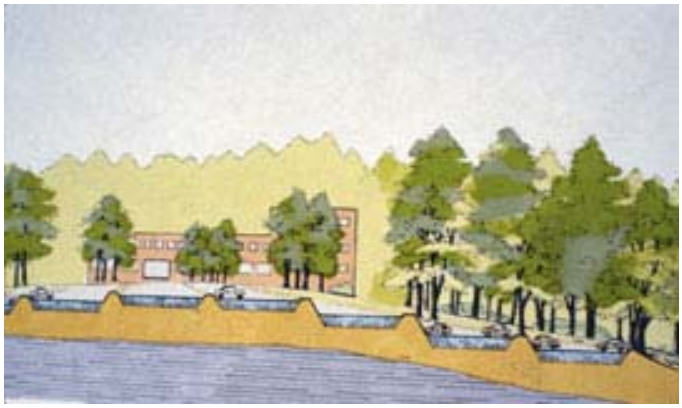
입 도 분 포													아스팔트 바인더 및 첨가제	실 험 법	결과 및 비고
통과백분율(%)															
체크기 (mm)	25	19	12.5	9.5	6.3	4.75	2.36	2	1.18	0.6	0.3	0.075	–	–	–
기 관 명 미시건	-	-	100	90-100	-	30-50	8-15	-	-	-	-	2-5			
네바다	-	-	100	90-100	-	35-55	-	-	5-18	-	-	0-3	AC 20P, AC 30	–	–
	-	-	-	95-100	-	40-65	-		12-22	-	-	0-4			
뉴저지	-	-	100	90-100	-	30-50	5-15	-	-	-	-	2-5	–	–	–
뉴멕시코	-	-	100	90-100	-	30-50	5-15	-	-	-	-	2-5	–	–	–
노스 켈롤라인	-	-	100	0	-	25-55	0-12	-	-	-	-	0-4	AC 20P	–	–
	-	100	85-100	55-75	-	15-25	5-10	-	-	-	-	2-4			
오하이오	-	100	-	85-96	-	28-45	9-17	-	-	-	-	2-5	AC 20	–	–
오르건	-	-	-	99-100	-	90-98	25-40	2-12	-	-	-	1-5	PBA 5, PBA 6	–	–
	100	85-96	55-71	-	15-30	-	5-15	-	-	-	-	1-6			
펜실베니아	-	-	-	100	-	30-50	-	5-15	-	-	-	0-5	AC 20	–	–
로드 아일랜드	-	100	-	-	-	20-50	5-15	-	-	-	-	2-5	AC 20,	–	–
사우스 케롤라인	-	100	-	98-100	-	40-70	-	-		2-20	-	0-2	PG 64-22	–	–
텍사스	-	100	95-100	50-80	-	0-8	0-4	-	-	-	-	-	AC 20, AC 10	–	–
유타	-	-	100	92-100	-	36-44	14-20	-	-	-	-	2-4	PG 64-34	–	–
버몬트	-	-	100	95-100	-	30-50	5-15	-	-	-	-	2-5	AC 20	–	–
와이오밍	-	-	100	97-100	-	25-45	10-25	-	-	-	-	2-7	AC 20, AC 10	–	–
	-	-	100	97-100	-	20-40	10-20	-	-	-	-	0-7			

캔사스주(Kansas)의 Lenexa에서 열린 NAPA의 교육 세미나에서는 500여 명이 넘는 엔지니어들이 포러스 아스팔트에 관한 교육에 참가하였다. 특히 주차장의 포러스 아스팔트 포장을 통하여 뛰어난 담수 및 저수 효과를 보여줄 수 있다는 것이 주목을 끌었다. 15개의 주차공간을 통해 35-에이크의 저수지의 효과를 낼수 있다고 발표했다. O'Donnell & Sons의 부사장인 Larry O'Donnell은 현재 포러스 포장은 약간 미흡하기도 하지만 이른 시간 내에 폭우에서도 그 기능을 완벽하게 소화할 수 있는 포러스 포장이 완성될 것이라고 주장하였다.

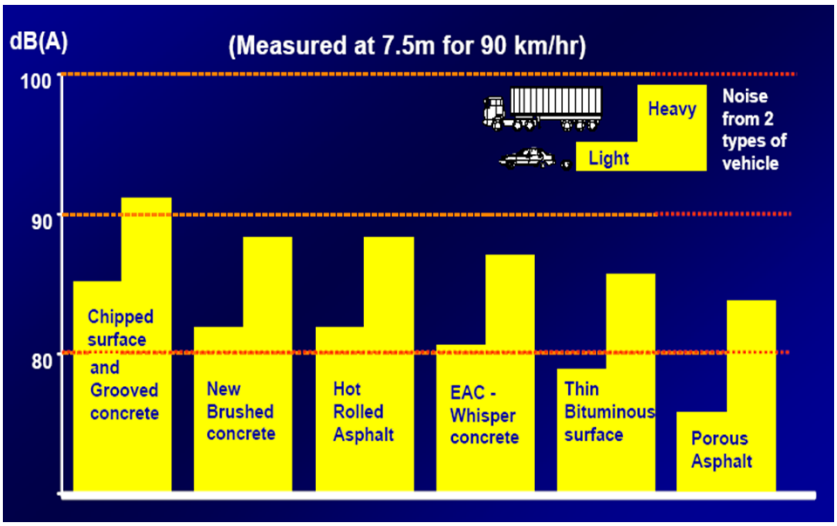
Michele C. Adams는 Stormwater에서 흙의 상태와 디자인에 따른 투수능력에 대하여 이야기하면서 적절한 시공 및 관리를 통하여 그 수명과 기능성을 극대화 할 수 있다고 설명하고 있다. 그는 투수성포장의 담수능력으로 인하여 재해를 방지할 수 있고 그 기능성 및 안정성은 20년 이상 지속될 수 있다고 주장하고 있다.



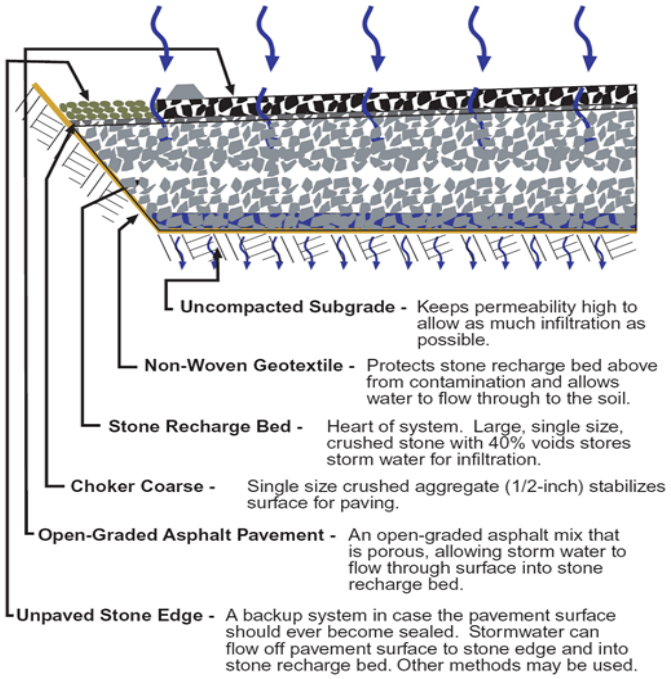
<그림 2.2.22> 포장의 담수효과(NAPA, 2005)



<그림 2.2.23> 강변 주차장의 보수성포장(NAPA, 2005)



<그림 2.2.24> Porous Asphalt의 소음저감효과(NAPA, 2005)



<그림 2.2.25> 투수성 포장 설계 지침(NAPA, 2005)

Quiet Asphalt 2005에서는 포러스 아스팔트의 소음 저감 효과를 설명하면서 차량이 90km/hr로 주행하였을 때에 포러스 아스팔트가 콘크리트 포장에 비하여 5dB 이상의 소음 저감 효과가 있다고 설명하고 있다.

NAPA에서는 투수성포장의 경우 투수에 의한 담수능력에 그 초점을 맞추고 있으

며 포장의 담수능력에 의하여 각종 재해예방 및 환경친화적인 작용을 하고 있다고 설명하고, 투수성 포장을 장려하고 있다.

NCAT에서는 각 주별 OGFC 사용현황을 다음과 같이 설명하고 있다. 설명에 의하면 기존에 사용하다가 사용하지 않는 주가 전체의 38%이며 현재사용하고 있는 주도 38%라고 전하고 있다. 이는 OGFC를 제대로 적용하여 사용할 경우 충분히 시공성 및 안정성을 가지고 있다는 것을 보여주고 있다.

2. 시멘트 안정처리 기층

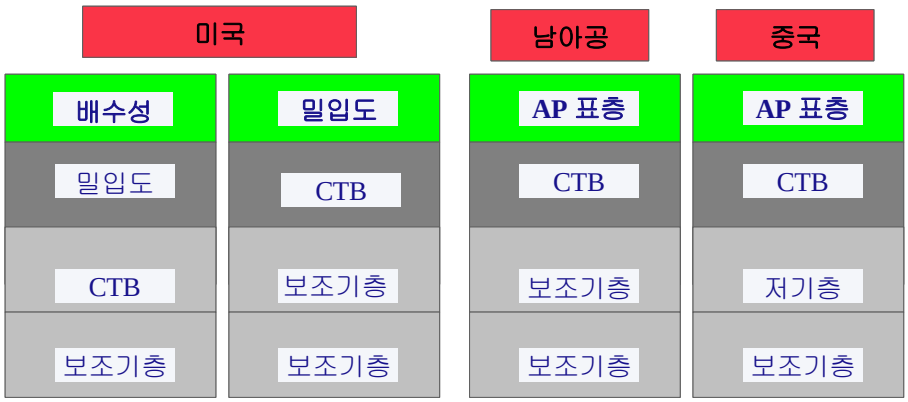
미국, 유럽 등의 포장 선진 국가나 중국, 남아프리카 공화국 등에서는 이미 오래 전부터 기층 안정화 공법에 대한 연구를 활발하게 진행하여 실무에서 폭넓게 활용하고 있는 실정이다.

<표 2.2.15>는 다양한 국외 시방 기준을 보여주고 있으며, <그림 2.2.26>은 외국에서 적용하고 있는 CTB(Cement Treated Base) 단면을 나타내고 있다.

<표 2.2.15> 국내・외 CTB 품질 기준

국내・외 사례	최대골재 치수(mm)	7일 압축강도 (kg/cm^2)	시멘트양	#200 체 통과율
국내	40	50	7%	12
와이오밍 도로국	25, 37.5	105	8%	20
캘리포니아 도로국	37.5	70	5%	-
택사스 도로국	37.5	35	6~8%	7
FHWA	37.5	14-50	-	10
애리조나 도로국	37.5	35	-	15
노스 캐롤라이나 도로국	37.5	35-50	-	13
독일	32, 45	70	-	15

* 시멘트 양(%) = (시멘트 / 골재)×100



<그림 2.2.26> 국가별 CTB를 적용한 다양한 포장 단면

가. 미국

미국 각 주의 도로국에서는 시멘트 안정처리기층을 이용한 포장기층 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 미국에서 장기 공용성 평가를 위해 다년간 실시하고 있는 LTPP 구간의 경우 안정처리 기층사용률은 약 25%정도로 비교적 높은 비율을 나타내고 있다. 실제 포장에 적용 결과, 플라이 애쉬를 포장 재료에 사용하여 기층의 성능향상을 가져왔으며 환경적인 측면에서도 높은 평가를 받게 되었다.(David J. White and Kenneth L. Bergeson, 2001).

특히 캘리포니아, 와이오밍, 텍사스에서는 기층재료 중 시멘트 안정처리 기층의 비율이 높게 나타났다. 텍사스 도로국은 압축강도와 내구성을 고려하여 시멘트양과 압축강도를 기존 시방 기준보다 2~3% 낮게 적용하였는데, 압축강도의 경우 기존 35kg/cm^{2}에서 25kg/cm^{2}로 낮추었다. 미국에서는 1915년 이후 시멘트와 골재에 슬래그나 플라이 애쉬 등 다양한 재료를 혼합한 포장 기층 안정화 연구가 진행되었다.(Dallas N. Little and Eric. Males, 2000)

2001년 와이오밍 대학에서는 CTB와 아스팔트 처리기층과의 공용성 평가를 목적으로 세 개의 도로를 선정하여 54개구간에는 CTB층을, 38개구간에 아스팔트 처리기층을 적용하였다. CTB 구간에서 비록 반사균열이 발생하였으나 CTB와 아스팔트 처리기층이 유사한 공용성을 보이고 있다고 평가하였다.(K. Ksaibati, P.E and Melinda. M. Bowen, 2001)

2001년 텍사스 도로국에서는 중하중 교통으로 인한 포장 파손을 개선하려는 노

력을 진행하였다. 시험도로 25개의 구간에 25cm 높이로 석회 안정처리기층(LSB)과 시멘트 안정처리 기층(CSB)를 적용하여 공용성을 평가하였다. 연구 결과 대부분의 구간에서 하중에 대하여 높은 저항성을 나타냈으며 환경에 대한 포장의 피해도 줄일 수 있다고 보고하였다.(Imran M.Syed and Tom Scullion, 2001)

나. 남아프리카 공화국

오래전부터 남아프리카 공화국에서는 시멘트를 이용한 기층이 사용되었고, 1970년 이후로 시멘트 안정화기층 뿐만 아니라 포장 전체의 공용성 향상을 위해 모델식 개발과 실내 및 현장시험을 통해 포장 장기 공용성을 연구하고 있다.(H L Theyse, 1996) Dr. K M Muthen은 남아프리카 공화국의 경우안정처리 적용 시 아스팔트 기층을 사용하지 않고 CTB 만을 사용한다고 발표하였다.(한국형 포장설계법, 2002)

다. 중국

중국의 동부, 남부 지역에서는 대부분의 도로에서 반강성 포장 위에 아스팔트 포장을 시공한다. 이들 지역의 교통 특성은 북부와 서부에 비하여 주행 속도가 빠르며 교통량 및 교통 구성도 다르다. 고속도로의 교통량은 일반적으로 3~5 만대에 달한다. 대도시 부근의 교통량은 심한 곳은 약 12 만대 이상인 곳도 있다. 또한 차량 특성상 중형 화물트럭, 대형화물트럭, 트레일러, 대형 여객차량이 약 46.63%를 차지한다. 따라서 이러한 환경적 특성 때문에 <표 2.2.16>와 같은 단면을 도로포장을 건설하고 있다. 시공 후 추적조사결과 반사균열과 같은 특별한 문제는 많이 발생하지 않는 것으로 보고되고 있다. 은 중국 동, 남부 지역의 포장형식을 보여준다.

이와 같이 다양한 혼화제를 첨가하여 포장의 장기 공용성 향상과 비용 절감에 관한 많은 연구가 수행되고 있다. 반사균열로 인한 문제점을 억제할 수 있는 공법 및 재료 개발도 연구 중에 있다.

<표 2.2.16> 중국 동,남부 지역의 포장 형식

구분			두께	재료
고속도로 및 일급 도로	반강성 기층 아스팔트 포장	표층	아스팔트 콘크리트	12~18 cm (2층 혹은 3층)
		기층	반강성재료 기층	34~40 cm
		저기층	반강성재료 저기층	15~20 cm
		보조기층	합성입도쇄석	15~20 cm
	조합식 기층 아스팔트 포장	표층	아스팔트 콘크리트	10~12 cm (2층)
		기층	아스팔트 안정처리 쇄석기층	8~18 cm (1층 혹은 2층)
		저기층	반강성재료 저기층	5~20 cm (1층 혹은 2층)
		보조기층	합성입도쇄석	15~20 cm
	빈콘크리트 기층 아스팔트 포장	표층	아스팔트 콘크리트	10~16 cm (2층 혹은 3층)
		기층	빈콘크리트 기층	18~24 cm
		저기층	반강성재료 저기층	5~20 cm (1층 혹은 2층)
		보조기층	합성입도쇄석	15~20 cm
2급, 3급 도로	표층		아스팔트 콘크리트	3~10 cm (2층 혹은 3층)
	기층		반콘크리트 기층	20~36 cm
	저기층		반강성재료 저기층	15~20 cm
	보조기층		합성입도쇄석	15~20 cm

○ 표준축하중은 이륜조 단축 100kN 하중, 타이어 접지압은 0.7MPa.

○ 설계 휨처짐과 아스팔트층 하부 인장응력에 대한 다양한 축하중을 표준축하중의 통과 횟수(등가축하중 통과횟수)로 환산.

○ 반강성재료 구조층과 린콘크리트층 사용시 수정 환산법을 적용.

○ 표준축하중으로 환산된 통과횟수를 이용하여 교통량등급 분류.

- 총 5등급 분류 체계 (저교통, 경교통, 중간교통, 중교통, 특중교통)

이상 국외 CTB 연구현황을 요약하면 다양한 재료를 혼합한 포장 기층 안정화 연구가 진행 중이며 압축강도와 내구성을 고려하고, 반사균열을 저감하면서 환경에 대한 포장 피해도 줄이는 연구가 병행 중에 있다.

3. 투수 콘크리트

1980년대부터 국외에서는 투수성 아스팔트를 개발하여 보도, 도로, 광장 및 주차장 등의 포장에 사용하고 있다. 그러나 투수성 아스팔트 포장은 여름철 고온과 차량의 정지하중에 의해 영구변형이 발생하고 공용연수 증가에 따라 공극 막힘 현상이 발생하여 투수 기능이 상실되는 문제점이 발생하였다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 투수 콘크리트 포장에 관한 연구가 수행되고 있다.

미국의 경우 미연방도로국(FHWA)의 방침에 의해 투수 콘크리트 재료를 고속도로의 기층에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 유럽 EC 국가에서는 1970년대 후반부터 투수 콘크리트 포장을 개발하기 시작하여 현재는 주차장, 콘크리트 포장의 노견 등에 적용하고 있다. 또한 차량이 주행하는 도로 등에 시험 포장을 실시하고 있으며 근시일 내에 고속도로에도 적용될 예정이다. 일본의 경우에도 투수 콘크리트의 실용화를 위한 다양한 연구가 진행되고 있으며 시멘트협회 포장기술전문위원회에서 투수 콘크리트를 도로에 적용하기 위하여 노력하고 있다.

가. 유럽

유럽에서는 차도용 투수 콘크리트 포장의 연구가 가장 활발하게 진행되고 있다. <표 2.2.17>은 1998년 포루투갈에서 개최된 콘크리트 포장에 관한 국제회의에서 발표된 각국의 차도용 투수 콘크리트의 배합과 특성을 정리한 것이다. 모든 배합에서 15% 이상의 공극을 가지고 있으며 4.4MPa 이상의 휨강도를 제시하고 있다.

<표 2.2.17> 유럽 차도용 투수 콘크리트의 배합과 특성(건설도서, 2001)

구 분	논문저자, 국가					
	Caestecker (벨지움)	Riffel (독일)	Witoszek (스페인)	梶尾 (일본)	Solis Villa (스페인)	Sallenave (프랑스)
골재최대치수(mm)	7	8	18	13	12	10
단위시멘트량(kg/m)	320	300~350			360	
물/시멘트비		0.25~ 0.27	0.35		0.25~0.32	
혼화제(ℓ /m^3)	64	45~70		폴리머 無	폴리머 無	
연속공극률(%)	17.3	25	15	15~30	20 이상	25이상
층두께(cm)	4.4	8~15	12+12		20	16
압축강도(MPa)	26.0 (28일)	20 이상 (28일)				17.9 (28일)
휨강도(MPa)	4.4 (28일)			4.5 이상	4.5 이상	
소음(저감)SPB법 [dB(A)]	72.2 70km/h	3.5~4.3dB 소음저감 120km/h	78이상	8.0dB 소음저감	78이상	4.4dB 소음저감



<그림 2.2.27> 벨기에 투수 콘크리트 포장 시공예
(벨기에 Herne 근처 N255 국도)

벨기에는 콘크리트에 대한 기술이 상당히 발달되어 있는 나라로 기능성 포장이 일부분 실용화되어 있다. 1996년부터 노면 배수를 해결하기 위해 투수 콘크리트의 실용화 방안에 대한 연구를 시작하였다. 2개 층의 포설을 통해 하부는 CRC 포장으로 하고 상부에 4시간 내에 최대 7mm 골재로 배합한 투수 콘크리트를 시공하는

습식-습식 공법을 적용하였다. 또한 이 시기에 다양한 형태의 투수 포장을 시험시공을 통해 국도에 적용하였고 그 중 200mm CRC 포장 상부에 습식-습식 공법으로 40mm의 투수 콘크리트 포장을 약 800m에 실시하였다. <그림 2.2.27>은 실제 이 구간에 적용된 투수 콘크리트 포장면을 보여준다. 하부 CRC 포장으로부터 반사균열이 올라왔으나 아직까지는 큰 문제가 되지 않고 노면 배수 성능은 상당히 우수한 것으로 평가되고 있다.(한국도로학회, 2004)

나. 미국

미국에서는 배수 문제를 해결하기 위해서 초기에는 포틀랜드 시멘트 포장에 개립도가 사용되었으나 중차량의 교통에 견디기 위해 1960년대부터 1970년대에는 밀입도 포장이 사용되어 결과적으로 투수성 포장의 재료가 감소되었다.(Crovetti, 1993) 그러나 지난 20년 동안 도로 포장 시공을 위해 투수 재료가 사용되면서 새로운 관심을 갖게 되었으며 <그림 2.2.28>과 같이 주변 환경과 어울리는 투수 콘크리트 포장을 적용하고 있다.

(1) 표층(www.concreteparking.org)

1993 년 뉴멕시코 주(New Mexico)의 밀리간 드라이브웨이(Milligan Driveway)에 두께 10~15 cm 로 시공하였다. 비교적 강수량이 적은 지역으로 11년 동안 구조적인 유지보수를 하지 않을 정도로 양호하였지만 강우시 인근의 흙으로 인해 공극이 메워지는 문제가 있었다.



(a) 투수 콘크리트 시공 전 (b) 투수 콘크리트 시공 후

<그림 2.2.28> 투수 콘크리트 포장 시공 전·후 비교

1999년 펜실베니아 주(Pennsylvania)의 센트리 카운티(Centre County)에서는 약 91 m 길이의 보도로 사용되는 곳을 플로리다 콘크리트 시방에 근거한 배합 설계를 이용하여 10 cm 포러스 콘크리트로 시공하였다. 이때 하부의 다짐은 거의 하지 않았다. 이 지역은 교통량이 많은 지역으로써 영하의 날씨가 90일 이상 연속되는 경우도 있으며 겨울에도 강우 및 강수가 있는 곳이다. 시공 결과 유지보수는 거의 하지 않았으며 공용성이 좋은 것으로 평가되었다.

2002 년 노스캐롤라이나 주(North Carolina)에서는 150대가 주차할 수 있는 주차장을 12.5 cm 투수 콘크리트를 시공하였으며 노상 다짐은 하지 않았다. 이곳은 영하 이하의 온도로 내려가는 날 수가 적었으며 겨울에는 일정 기간 동안 비가 오는 날이 있었다. 시공 후 2년의 겨울을 지냈지만 공용성 상태는 양호하여 유지보수가 불필요 하였다.

2002년 조지아 주(Georgia)에서 2,043 m^2 의 의료 관련 주차지역에 골재를 10~17.5 cm 포설하고 그 위에 15 cm 투수 콘크리트를 시공하였다. 온도는 영하로 잘 내려가지 않으며 분류상으로 Wet-Freezing 지역으로 구분된다. 이 포장은 진공청소를 4회 실시하였으며 현재의 상태는 양호한 것으로 나타났다. 2003년도에는 1,114 m^2 의 포르쉐 딜러 주차장에 10cm 골재 위에 지오텍스타일을 시공하고 약 12.5 cm 의 투수 콘크리트를 시공하였다. 이곳의 상태 역시 양호하였고 유지보수는 실시하지 않았다.

2003년 테네쎄 주(Tennessee)에서도 주차장에 12.55 cm 의 골재 기층위에 12.5 cm 의 투수 콘크리트를 550 m 연장으로 시공하였다. 동절기 동안 영하로 내려가는 일수가 적은 곳이다. 이곳의 포장은 큰 비가 와서 진흙이 도로에 많이 쌓일 때 진공청소를 실시하였다. 현 상태는 양호하며 클로깅이나 라벨링 같은 파손은 발견되지 않고 있다. 1997년에는 인근 축구 경기장 주변의 주차장에 골재 기층을 깔고 지오텍스타일을 씌운 후 약 10 cm 투수 콘크리트를 시공하였다. 특이한 것은 하부에 구멍난 PVC 관을 매설하여 배수를 시켰다. 이 구간 또한 유지보수를 하지 않았으며 미미한 클로깅이나 라벨링 등이 발생했을 뿐 상태는 양호하였다.



<그림 2.2.29> 조지아주 시공사례(포르쉐 주차장)

(2) 기층

1988년에 미연방도로국(FHWA)에서 10개의 주에 포설된 투수 기층을 관측하였다.(Munn, 1990). 캘리포니아 주의 투수 기층 포장은 28년간 균열을 보이지 않았지만 불투수 포장은 18%의 부식과 47%의 균열을 나타내었다. 미시간에서는 1975년에 투수기층 구간을 시공하였으나 어떠한 균열과 단차도 발생하지 않았고 역청재료 기층의 밀입도 구간과 비교한 결과 D-Cracking도 적게 발생하였다. 펜실베니아 주에서는 1970~80년까지 투수 기층의 공용성을 평가한 결과 밀입도 구간보다 양호하였다. 위스콘신 주(Hall, M., 1990)에서는 투수 CTB를 적용한 결과 콘크리트 포장의 수명이 25% 이상 증가됨을 확인하였다. 아이오와(Brown, 1996)에서는 최근 비파괴 실험결과, 투수 기층을 적용한 포장이 양호한 공용성 결과를 나타내었다. 뉴저지 주(Mathis, 1989)에서는 1979~1980년 포장을 얇게 시공한 구간이나, 두껍게 시공한 구간의 큰 차이가 없었다. 처짐량은 적게 발생하였고 단차나 펌핑 현상은 없었으며 동결현상도 감소하였다.

또한 투수 콘크리트는 다량의 연속된 공극이 존재하므로 공극내로 수분이 쉽게 유입되어 동결 융해함으로써 일반 콘크리트에 비해 동결 융해 저항성이 낮은 것으로 알려져 있다. 하지만 골재 크기가 비교적 큰 쇄석을 사용한 투수 콘크리트는 공극이 물로 가득 차 있지 않은 경우 실내에서 200회의 동결융해를 반복해도 상대동탄성계수는 감소하지 않는 것으로 보고되었다.(R. C. Meininger., 1988). 또한 Malhotra는 AE제를 첨가하면 투수 콘크리트의 동결융해 저항성을 향상시킬 수 있다는 연구 결과를 발표하였다.(Malhotra, V. M., 1976) 한편, 투수 콘크리트는 단위시멘트량이 적기 때문에 일반 콘크리트에 비해 60% 정도의 건조 수축이 발생하며

그 속도도 완만한 것으로 나타났다.(Addison, 1983)

1990년대에는 투수 기층을 적용한 포장이 9개의 다른 주에서 표준화되기 시작하였으며(Kozeliski, 1992) 투수 기층의 사용은 미국 전역으로 빠르게 증가하였다.

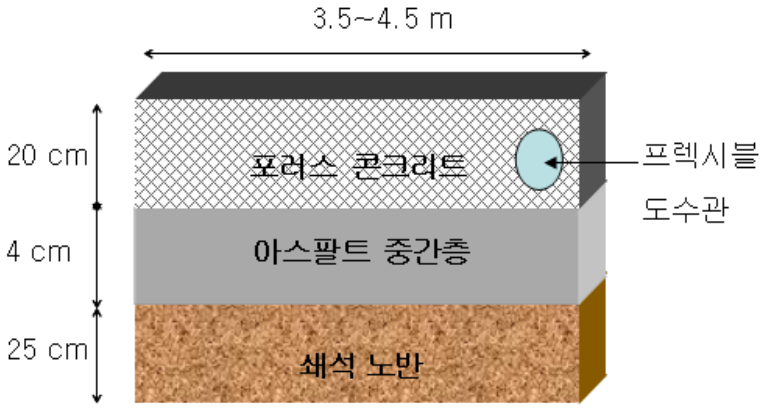
다. 일본

일본에서는 1974년 투수성 아스팔트 포장의 실시 이후, 투수성 콘크리트 블록, 투수성 타일 등의 제품이 출시되었다. 또한 그 동안 여러 차례의 실험과 연구개발을 거쳐 1985년에는 투수콘크리트 포장을 차도에도 적용하게 되었다. <표 2.2.18>은 일본의 투수콘크리트 관련 특허를 나타낸 것이다.

후쿠이현과 시멘트협회에서는 시험포장을 실시하여 공용 후 반년 및 1년이 경과한 시점에서의 조사를 실시하였다. 조사 결과 포러스 콘크리트를 차도용도에 충분히 적용 가능함을 확인하였다. 이 시험포장에 사용한 포러스 콘크리트는 <그림 2.2.29>에 제시한 것과 같다. 기본적으로 시멘트 콘크리트포장요강에 적합한 구조로 하였고 포장 단부의 아스팔트 중간층 위에 플렉시블 유도관을 설치하여 배수를 원활하게 하였다. 시험포장에 대한 조사항목은 휨강도, 평탄성, 미끄럼저항, 현장투수량, 소음, 온도측정, 노면적설상황 등으로 공용 후 5년까지 시행하는 것으로 하였다. 시험포장을 포설한 후 공용 1년이 경과하였지만, 지금까지 공용에 심하게 장해를 줄만한 열화는 보이지 않고 저소음성과 배수성 등의 기능성을 유지하고 있는 것으로 조사되었다.(Sakagkwa, 2001)

<표 2.2.18> 일본의 투수콘크리트 관련 특허(산업자원부, 2000)

	① 투수성 시멘트 콘크리트 포장 (일본공개특허 昭59-150806)	② 투수성 시멘트 콘크리트 구축물 제조법 (일본공개특허 昭60-215565)	③ 높은 투수성을 갖는 시멘트 콘크리트 구축물 제조법 (일본공개특허 平7-99002)	비 고
출원일	83. 2. 14	83. 05. 10	84. 04. 06	
공개일	84. 8. 29	84. 11. 22	85. 10. 28	
공고일	확인불가	95. 10. 25	93. 05. 21	
시멘트	300~400kg/m^3	300~400kg/m^3	300~400kg/m^3	
굵은골재	2000kg/m^3	1261~1701kg/m^3	1552~1776kg/m^3	중량 2192kg/m^3 기준
잔골재	0~500kg/m^3	63~340kg/m^3	1552~1776kg/m^3	
물	90~200kg/m^3	90-180kg/m^3	105~1180kg/m^3	
안료	-	9~20kg/m^3	9~20kg/m^3	현재 14kg 사용
혼화재	10~20kg/m^3	2.4~16kg/m^3	1.5~40kg/m^3	
잔골재율	0~25%	5~20%	-	③은 공시체로분류
물/시멘트비	30~50%	30~45%	35~45%	
압축강도	200~300kgf/m^2	200~300kgf/m^2	190~320kgf/m^2	
휨강도	20~30kgf/m^2	(20~30kgf/m^2)	19~32kgf/m^2	압축강도 1/10적용
투수성	10^{-1}~10^{-4}cm/sec	10^{-1}~10^{-4}cm/sec	10^{-1}~10^{0}cm/sec	
굵은골재 최대치수	13mm 이하	13mm 이하	13mm 이하	



<그림 2.2.30> 일본 포러스 콘크리트포장의 단면(Sakagkwa, 2001)

일본도로(주) 기술연구소에서는 15~20%로 높은 공극률을 가지면서도 일반 포장용 콘크리트와 거의 동등한 휨강도(4.5MPa)를 갖는 포러스 콘크리트에 대한 연구를 실시하였다. 이 연구에서는 차도포장 적용에 관한 개념 및 시공방법 등에 대해 주로 정리하였다. <표 2.2.19>는 차도용 포러스 콘크리트의 배합에 대한 예를 나타내고 있다.

휨강도는 공극률과 재료에 따라 차이가 있지만 대부분 전체 공극률 20% 이하에서 4.5MPa의 휨강도를 확보할 수 있었으며, 투수계수가 1×10^{-2} cm/sec 이상이 되기 위해서는 공극률 15% 이상이 바람직한 것으로 조사되었다. 또한 건조수축의 경우, 노출 직후 초기 2주까지의 건조수축 변화가 큰 것으로 나타났다. 많은 공극으로 인해 굵은 골재 주위의 모르타르가 외부에 노출되면서 급속하게 경화하기 때문이다. 이러한 현상은 굵은 골재끼리의 결합을 방해 할뿐만 아니라 수분이 증발하는 현상을 유발하기 때문에 타설 직후의 수분 이탈방지, 방풍처리가 필요하다.

<표 2.2.19> 차도용 포러스 콘크리트의 배합 예(Noda Etsuro, 2001)

P/S	W/P (%)	m/g (%)	배합 공극률 (%)	단위량(kg/m^3)				
				물	시멘트	혼화재	잔골재	굵은 골재
				W	C	RMS	S	G
2	18	48	18	68	324	56	190	1,457
주) P : C+RMS, P/S : 결합재/잔골재 질량비, W/P : 물/결합재 질량비 m/g : 모르터/굵은골재 체적비								

<표 2.2.20> 포러스 콘크리트의 포장구조에의 적용 개념(일본 시멘트 협회)

	전단면형	부분 단면형
개요	포러스 콘크리트층을 콘크리트포장으로 거동시킨다. 판두께는 15cm이상으로 하고, 그 아래 아스팔트 중간층을 두며, 노반·노상에 빗물의 침투에 로션을 방지한다.	구조적인 지지력은 하층의 연속철근 콘크리트 포장판이나 보통 콘크리트 포장판에 의하고, 4~5cm의 포러스 콘크리트층을 부착시킨 구조, 신설 또는 기존 콘크리트 포장의 보수에 이용한다.
시공 실적	5곳	6곳

포러스 콘크리트는 많은 공극으로 인해 슬래브가 포화되는 경우가 발생할 수 있으나 이전의 연구에 의하면 내구성 측면에서 일반 콘크리트와 같거나 그 이상이라고 보고되어 있다.(일본시멘트협회) <표 2.2.20>에서는 포장구조별 적용개념과 시공실적을 정리하였다.

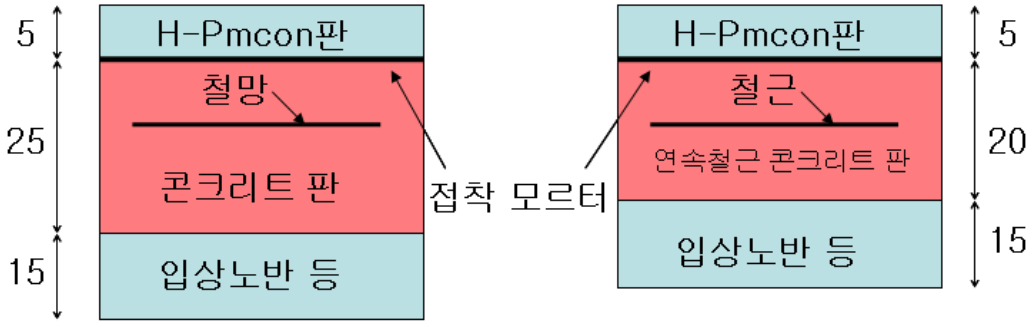
(주) 佐藤道路 기술연구소에서는 경교통을 대상으로 한 PMcon의 보도 적용과 최근 개발한 H-PMcon의 차도(고속도로 요금소)에 PMcon의 다공질 구조를 이용하여 <표 2.2.21>과 같이 많은 구조물에 적용되고 있다. 그러나 강도 등의 문제로 인해 고속도로를 비롯한 간선도로에는 적용되지 않았다. H-PMcon은 중교통 도로를 포함한 차도 적용을 고려하여 휨강도 4.5N/㎟ 이상, 공극률 15~20%, 투수계수 0.01cm/s 이상을 목표로 한다. <그림 2.2.30>는 H-PMcon의 포장 구성 단면을 나타낸 것으로 벨기에의 투수 콘크리트 적용과 비슷하다. 포장용 콘크리트판 위에

H-PMcon 판을 설치하는 경우는 복합판의 구조해석이 가능하지만 마모층으로 구분하였다. H-PMconc의 품질 기준은 다음 <표 2.2.22>와 같다. 워커빌리티, 휨강도와 함께 충분히 목표치를 만족함을 알 수 있다. 칸타브로 손실률은 배수성 아스팔트 혼합물에 비해 크지만, 16.8% 이하의 값은 타당한 것으로 판단된다. H-PMcon의 차도 적용에 관해서는 시공 후 6개월에서 1년정도 경과하였으나 양호한 공용성을 유지하고 있고 충분히 적용 가능하다고 판단된다.(Sakiguchi, 2001)

청수(淸水)건설(주) 기술연구소에서는 자연과의 조화를 목적으로 녹화 콘크리트를 하천개수에 적용하였다. 녹화 콘크리트는 포러스 콘크리트의 연속공극을 활용하여, 콘크리트 내부에 식물을 직접 키우는 공법이다. 하천이나 비탈면에서 강우 또는 홍수 등이 발생할 경우에 식물이 유실될 수 있으나, 녹화 콘크리트는 식물의 뿌리가 내부에 자라고 있으므로 이와 같은 문제를 막을 수 있다.

<표 2.2.21> PMcon의 적용 예 (Sakiguchi Osamu, 2001)

공 종	적용 장소
포 장	보도, 차도, 주차장, 광장, 운동장, 테니스 코트 등
눌음 콘크리트	중앙분리대, 건물옥상, 조정지 바닥, 철탑 아래
소형 구조물	벤치, 중력식 옹벽, 식수대, 플런다
하 천	용수로 하상, 비탈면



a) 콘크리트 판 (단위:cm)　　(b) 연속철근 콘크리트판 (단위:cm)

<그림 2.2.31>포장 구성단면 (Sakiguchi Osamu, 2001)

<표 2.2.22> H-PMcon의 품질, 완성품 시험 일람 (Sakiguchi Osamu, 2001)

항목	워커빌리티 시험			휨시험	현장측정 및 현장채취 코어 측정				
	공극률 (%)	투수계수 (cm/s)	칸타브로 손실률(%)	4주휨강도 (N/mm^2)	현장투수 (s/400cc)	BPN	μ DF테스터 80km/h	접착강도 (N/mm^2)	공극률 (%)
현장 평균 범위	16.2 ~ 16.9	0.089 ~ 0.225	13.2 ~ 16.8	4.72 ~ 5.53	4.58 ~ 6.05	80~84	0.55 ~ 0.59	1.78 ~ 2.57	16.1 ~ 18.4
목표치	15 ~20	0.01이상	20이하	4.5 이상	10 이하	60 이상	0.35 이상	1.0 이상	15~20

녹화 콘크리트의 경우 식물의 뿌리가 자라기 위한 공간의 확보를 위해 공극률이 대략 18~30%의 범위로 정해진다. 식생을 고려하면 공극률이 큰 것이 효과적이나 압축강도의 저하를 고려하면 공극률을 적절하게 규정할 필요가 있다. 시공 후 18개월까지 추적조사한 결과 하천 상류로부터의 유출토사가 퇴적함으로써 식물이 자라고, 홍수시에도 유실되지 않았으며, 녹화면적도 시일이 지남에 따라 늘어나가는 것을 확인하였다.(Tanaka Hirokasu, 2001)

태평양 시멘트(주) 중앙연구소에서는 포러스 콘크리트 포장의 표면온도 상승억제 효과를 검증하기 위한 실험을 실시하였다. 콘크리트 포장과 아스팔트 포장에 대하여 각각 불투수성 및 투수·배수성의 시험포장 구간을 만들고, 여름철에 포장표면의 온도상승 억제효과를 높이기 위해 포러스 콘크리트의 공극 중에 물을 저장할 수 있는 저수성 포장을 제안하였다.(Shirai Kazuyosi, 2001)

실험 결과 포러스 콘크리트 포장은 보통 콘크리트 포장보다 햇볕 흡수율이 높기 때문에 포러스 콘크리트 포장면의 온도 및 포장면으로부터 대기에 방출되는 열은 아스팔트 포장보다 적지만 보통 콘크리트 포장보다는 큰 것으로 나타났다. 그러나 저수성 포장의 경우, 포장면의 온도가 저하하여 방열량에 차지하는 열의 비율이 작게 되고 기온상승 억제 효과가 있으며 포장 위의 방사환경도 보통 콘크리트 포장이나 아스팔트 포장보다도 완화되었다. 저수성 포장의 실용면에서는 더 많은 검토가 필요하다.

(주) 鹿島道路 토목기술부에서는 하이브리드형 침투성 콘크리트 포장을 일본국도 155호선 시험시공에 적용하였다. 하이브리드형 침투성 콘크리트 포장이란 교통

<표 2.2.23> 개발항목과 포장요소 (Kagata Mamoru, 2001)

기대 효과	포장 요소
① 노면의 고온현상의 억제	침투성 콘크리트포장(포러스포장)
② 교통소음의 저감	포러스포장(배수성 포장)
③ 산업폐기물 발생의 억제, 이용	리사이클재 활용형포장 전압 콘크리트포장형(보강철근의 생략)
④ 물 순환의 보전	침투성포장
⑤ 건설, 관리에 소요되는 에너지의 억제	내구성이 있는 포장(콘크리트계 포장)

량이 많은 도로에 적용하기 위해 강도와 투수계수가 다른 포러스 콘크리트를 습식-습식방식으로 이층에 걸쳐 일체화시킨 콘크리트 포장을 말한다. 하이브리드형 침투성 콘크리트 포장에 대한 요구 성능은 <표 2.2.23>과 같다. 실험결과 구조, 주행 안전성, 환경 보전성의 면에서 만족하는 결과를 얻었다. 또한 습도측정 결과는 어느 깊이에서나 거의 100%에 가까운 값을 얻었으며, 포장 공극 내에서는 충분한 습기를 가지고 있는 점에서 열섬현상 억제효과가 있을 것으로 판단된다.(Kagata, 2001)

(주) 前田建設 기술연구소 개발연구실에서는 차도용 포러스 콘크리트 포장의 보급을 위해 컨시스텐시 평가방법을 이용한 새로운 배합설계 방법과 강도특성에 대하여 제안하였다. 포장재료의 컨시스텐시와 배합설계는 밀접한 관계가 있고, 배합설계의 방법은 시공방법을 충분히 고려하여 결정될 수 있다. <표 2.2.24>에서는 표준적인 차도용 포러스 콘크리트 배합을 나타냈다.

차도용 포러스 콘크리트의 배합설계는 시공시 다짐에너지를 파악하는 것이 중요하며, 포설 후의 공극률을 설계와 같이 확보하기 위해서는 적절한 배합비율을 찾을 필요가 있다. 또한, 차도용 포러스 콘크리트의 강도는 휨강도, 압축강도, 쪼갬인장강도 중 어느 것이나 지표로 하여 관리할 수 있으며, 소정의 양생기간을 확보함으로써 고로 시멘트 B종이나 에코시멘트를 사용할 수 있다. 위와 같은 배합설계를 적용하여 시공한 여러 곳의 현장은 설계 공극률과 같이 포설할 수 있어 1년이 경과한 이후에도 양호한 것으로 나타났다.(Sugiura, 2002)

토목연구소 기초도로기술연구 그룹에서는 포러스 콘크리트 포장의 내구성과 기능성에 대한 평가를 위해 포장주행실험장에서 하중차를 주행시켜 시험하였다.

<표 2.2.24> 표준적인 배합 (Sugiura Hiroyuki, 2002)

공극률 (%)	물시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위굵은골재용적	단위량(kg/m^3)				
				물	시멘트	6호쇄석	잔모래	혼화재
18	26	10	0.98	83	318	1,526	160	30
단위용적질량 (이론치) : 2.583 t/m^3 질량법 공극률 : 목표치 22.0%, 측정치 22.3% 형상구분 : C 구분								

*C 구분 : 용기의 형태를 유지하고 골재의 표면에 윤기가 있음.

49kN으로 75만 회 주행시킨 결과, 러팅, 평탄성, 균열 등에서 배수성 아스팔트 포장에 비하여 포러스 콘크리트 포장이 양호한 공용성을 나타냈다. 특히 6호 쇄석을 사용한 공구에서는 균열의 발생이 보이지 않는 등 양호한 공용성을 보였다. 미끄럼에 대해서는 배수성 아스팔트 포장에 비하여 포러스 콘크리트 포장의 마찰계수가 작게 측정되었으나 기준값은 만족하였다.(Taniguchi, 2001)

이상을 요약하면 다음과 같다. 유럽에서는 습식-습식 공법으로 투수콘크리트를 시공하여 상당히 우수하게 평가를 받았다. 미국에서는 투수기층 포장에 균열이 보이지 않았으며, 균열과 단차도 발생하지 않았고 투수 기층을 적용한 포장이 양호한 공용성을 보였다. 일본에서는 저소음성과 배수성 등의 기능성을 유지하고 있는 것으로 조사되었으며, 자연과의 조화를 목적으로 녹화 콘크리트를 적용하는 등 친환경적인 평가를 받고 있다.

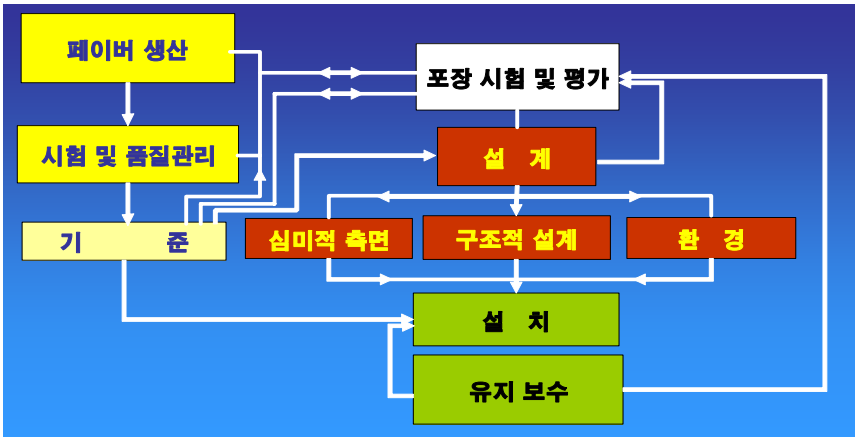
4. 페이버

국외에서는 접근성이 강조되는 이면도로, 광장포장, 공항 등에는 <그림 2.2.32>과 같이 블록 포장을 적용하여 사용자에게 심미적 아름다움을 제공하고 있다.

국외 페이버 기술의 개요는 <그림 2.2.33>로 나타낼 수 있다. 이 흐름도에 나타나듯이 페이버 포장 기술은 페이버 제조, 페이버 포장 평가, 페이버 포장의 설계, 페이버 포장의 시공 및 유지 관리로 분류할 수 있다.



<그림 2.2.32> 외국의 블록 포장 적용 사례



<그림 2.2.33> 국외 페이버 포장 기술 개요

페이버의 제조에 있어서는 심미성 및 친환경적인 요소가 반영된다. 미국과 유럽의 경우 풍부한 경험과 우수한 장비를 이용하여 재료 선정 및 시험을 통해 페이버를 제조하고 있으며 포장의 구조적인 면까지 고려하여 설계되고 있다.

페이버 포장의 평가는 실험 및 사례 조사를 통해 이루어진다. 남아프리카와 호주의 경우 200번 이상의 시공 사례 및 그에 따른 여러 시험을 거쳐 Pavers, Bedding and Jointing Sands, Base course and Sub-base, Subgrade 등 네가지 조건 및 그에 따른 기준을 정하여 페이버포장 평가에 이용하고 있다. 시공 및 유지관리면에서 인력시공에 의존하는 우리나라와는 달리 기계식 시공 및 첨단 장비를 도입하고 있다. (B Shackel, 2003)

가. 영국의 페이버포장

영국에서는 페이버의 강도, 줄눈부 채움모래(filler) 및 받침층 모래(bedding sand) 등의 기준을 영국표준시방 BS 6717에서 제시하고 있다. 포장 하부층의 설계 시 모든 층의 두께에 대한 결정은 CBR 실험을 통해 이루어지며 페이버 받침층의 경우에만 모래 다짐 후 25 mm 이상으로 규정되어 있다. 포장 시공은 대부분 기계식 시공으로 이루어지며 대표적인 시공 사례로서 루톤 국제공항의 활주로, 도시들의 주요 도로망, KENT의 A26과 A275구간 등을 들 수 있다.

Paul Lamparter는 페이버 포장에서 페이버 자체의 성능보다 페이버가 파손되었을 때 보수용으로 쓰이는 충전제의 영향과 개발에 대해 연구하였다. 또한 환경친화적인 충전제를 사용함으로써 구조적은 물론 환경적으로도 여러 가지 장점이 있음을 입증하였다.(Paul Lamparter, 2000)

Allan J. Dowson은 받침층 모래가 함유하고 있는 공기량과 자유수의 양이 페이버 포장의 구조적인 성능에 미치는 영향에 대해 연구하였다. 5가지 종류의 조립률이 다른 모래를 사용하여 각각 공기량과 자유수의 양을 변화시켜 모래의 다짐 정도에 따라 페이버 포장의 구조적 성능을 측정하였고 상관관계를 도출하였다.(Allan J. Dowson, 2003)

M Lazar는 기존의 페이버 포장의 염료를 섞거나 페인트칠을 하였을 때 색깔이 탈색되거나 흐릿해지는 것을 방지하는 개념으로써 재료 자체에 유리를 혼합하여 만든 용액을 사용하여 빛에 반사되는 페이버 및 연석을 개발하였다. 빛의 반사로 인해 눈의 피로가 우려되어 설문 조사한 결과 부정적인 영향은 없는 것으로 나타났다.(Lazar. M, 2003)

나. 일본의 페이버 포장

일본에서는 영국과 유사하게 페이버의 휨강도, 미끄럼 저항 및 투수시험 기준을 제시하고 있다. 페이버 포장의 두께는 CBR을 근거로 설계되며 인력 및 기계식 시공이 이루어지고 있다. 유지관리 작업은 파손정도에 따라 체계적으로 수행하고 있다. 대표적인 적용 사례로서 삿뽀로시의 중앙로, 콤뮤니티 도로 등을 들 수 있다.

Akihiko Karasawa는 페이버의 수직 변위와 줄눈의 폭과 페이버의 갈라짐

(chipping)과 어떤 관계가 있는지를 실험적으로 규명하였다. 사용된 페이버의 형태는 현재 가장 많이 사용되는 N-N형과 S형이고 줄눈의 폭, 그리고 교통하중을 모사한 반복하중을 각각 변화시켜 수직 변위와 줄눈의 폭과 페이버의 갈라짐의 관계를 도출하였다. 실험 결과 페이버의 돌출된 모서리와 끝부분이 반복하중이 가해질 때 갈라짐이 가장 많이 발생함을 알 수 있었고, 이에 대한 새로운 형태의 페이버에 대해 제안하였다. (Akihiko Karasawa, 2000)

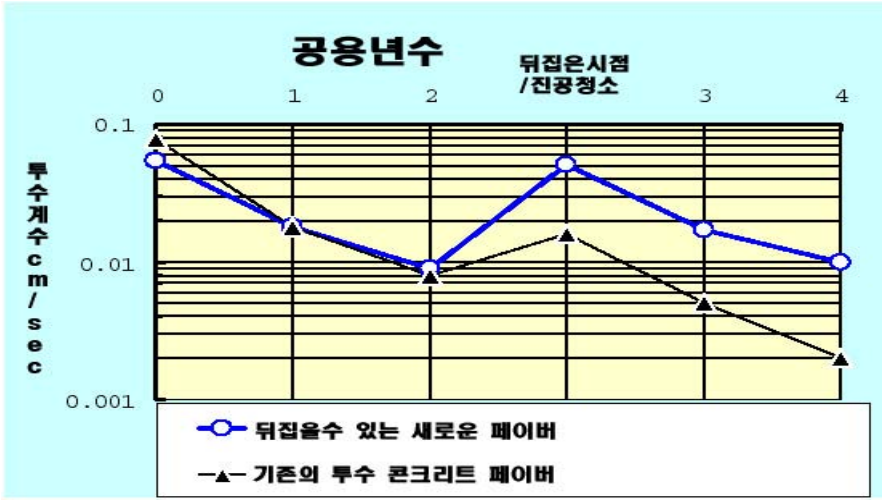
Tatsuo Nishizawa는 콘크리트 페이버의 스폴링(spalling)의 과정을 규명하기 위해 각 페이버와 받침층 모래의 변위를 광탄성(photo-elastic) 시험과 유한요소해석을 이용해 분석하여 고찰하였다. 광탄성 시험을 통해 각 페이버와 받침층 모래의 전단응력 분포가 도식화되었고 이를 컴퓨터를 이용한 유한요소해석을 통해 검증함으로서 콘크리트 페이버의 스폴링 과정을 설명할 수 있었다. 이 시험을 통해 교통하중의 수직하중은 압축력을, 수평하중은 전단력을 페이버에 전달시켜 결국에는 스폴링을 발생시키는 것으로 고찰되었다.(Tatsuo Nishizawa, 2000)

Mamoru Kagata는 페이버의 치수(폭 또는 두께)가 페이버 포장의 구조 성능에 미치는 영향에 대해 실험과 유한요소해석을 통해 고찰하였다. 이 연구를 통해 페이버 포장의 구조 성능을 높이기 위해 페이버의 치수를 증가시키는 것보다 받침층의 K 값을 증가시키는 것이 더욱 효과적임을 알 수 있었다.(Mamoru Kagata, 2000)

Hata M은 기존의 투수성 콘크리트 페이버에 투수성을 유지할 수 있는 “뒤집을 수 있는 새로운 페이버”를 개발하였다. <그림 2.2.34>은 이 포장이 기존의 진공청소 유지법보다 투수계수를 회복시키는데 더 우수하다는 것을 보여준다. 휨강도 6Mpa이상 투수계수 1×10-2cm/sec를 만족시키기 위한 배합으로 골재의 범위는 1.2mm～13mm, 시멘트의 단위중량은 550kg/m3이라는 결과를 얻었다.(M Hata, 2003)

M Inuzuka는 페이버에 타이어를 붙이는 형태에 대해 연구하였다. 기존의 타이어를 이용하여 고무로 활용하는 방법은 타이어의 고결과 분해과정을 거치므로 경제성이 떨어졌다. 하지만 <그림 2.2.35>에서 볼 수 있듯이 이 방법은 폐타이어의 평탄한 부분만을 오려 아스팔트를 혼합한 접착제를 이용하여 블록에 완전히 붙게 만들었다.

전반적으로 일본의 페이버 포장에 대한 연구는 페이버의 형태나 치수를 변화시켜 새로운 개념의 페이버를 개발하는 방향으로 진행되었다.



<그림 2.2.34> 유지 방법에 따른 기존의 투수성 포장 페이버와 새로운 페이버의 투수성 비교



<그림 2.2.35> 재활용 타이어를 활용한 페이버

다. 미국의 페이버 포장

미국에서도 페이버의 압축강도를 ASTM C 936에서 제시하고 있는데, 미 인터록킹 콘크리트 포장협회(ICPI)가 있어 페이버 포장의 기술개발 및 시장 형성에 밑바탕이 되고 있다. 미국의 페이버 포장은 매년 약 20% 이상씩 그 포설 양이 증가하고 있으며 초기 공항 및 항만 그리고 도로 등의 공공사업 위주에서 이제는 주거지역으로 그 영역을 확대해 나가고 있다. 대표적인 시공 사례로서 달라스 포트워스 공항 활주로, 캘리포니아 항만, 워싱턴 위트포드 비치단지의 차도 등이 있다.

미국 ICPI와 Lockpave 회사와 함께 가이드라인을 제안하였으며 내용은 다음과 같다. 페이버는 ICPI에서 인증하는 여러 회사들에서 다양한 크기와 두께로 만들어

내는 것을 추천하고 있다. 노상은 밀도가 높은 노상을 사용하여 교통하중을 지지할 수 있도록 제안하였으며 약하거나 포화된 노상일 경우 안정처리하거나 보조기층을 설치할 것을 권고한다. 기층은 일반적으로 아스팔트 포장에 사용되는 골재 기층이며 다짐밀도는 보도용과 차도용이 다르다. 다짐은 10cm 를 초과하지 않는 범위에서 포설하여 수행한다.

받침 모래는 일반적으로 25 mm로 포설하며 40 mm 를 넘지 않도록한다. 받침 모래와 줄눈 채움 모래는 콘크리트 모래(Concrete Sand)라는 것이 받침 모래로 많이 사용되며 자갈 모래(Stone Sand)적정 입도 분포곡선을 만족하는지를 검토해야 한다. 스크리닝 석회석이나 골재 먼지는 사용되지 않는다. 받침 모래는 줄눈 채움 모래로 사용가능하며 페이버를 시공시 일정한 다짐을 해야한다. 하지만 줄눈 채움 모래는 받침 모래로 사용될 수 없으며 그 입도는 다음과 같다.

<표 2.2.25> ICPI 받침모래 입도(ICPI)

통과백분율(%)	체번호
100	# 3/8
95~100	# 4
85~100	# 8
50~85	# 16
25~60	# 30
10~30	# 50
2~10	# 100

<표 2.2.26> ICPI 줄눈채움모래입도(ICPI)

통과백분율(%)		체번호
자연사	입도를 만든 모래	
100	100	# 4
95~100	95~100	# 8
70~100	70~100	# 16
40~75	40~100	# 30
10~35	20~40	# 50
2~15	10~25	# 100
0	0~10	# 200

페이버간의 줄눈 거리는 약 2~5 mm 로 시공하도록 하며 다짐은 최소 4,000 ~5,000 lb 의 하중으로 실시하며 페이버가 파손되지 않도록 한다. 시공 후 포장 표면의 높이차기 약 3~6 mm 이내로 들어올 수 있도록 한다.

라. 독일의 페이버 포장

Adolph Veit는 페이버 포장의 구조적 성능에 대한 고찰보다는 콘크리트 페이버의 색상이나 재료적인 성능을 향상시키기 위한 콘크리트의 배합설계에 대해 연구하였다. 또한 페이버 포장의 받침층 두께, 줄눈채움 모래 및 다짐방법 등에 대해서도 고찰하였고, 시험결과 페이버의 품질을 향상시키기 위한 방법을 제안하였다.(Adolph Veit, 2000)

Gerald Buechner도 다른 독일 연구자와 마찬가지로 콘크리트 페이버의 품질을 향상시키기 위해 색소의 개발 및 첨가방법 등을 연구하였고 또한 콘크리트 페이버의 재료와 제조 과정을 개발하여 새로운 제안을 내놓았다.(Gerald Buechner, 2000)

전체적으로 독일에서는 페이버의 형태나 구조적인 성능보다 재료나 색채 및 제조 과정에 초점을 맞춰 연구하고 있다.

마. 유럽 및 기타지역

유럽의 경우 저속의 과적 차량을 지지하는 능력, 포장의 유지보수 및 시공 후의 상태 점검의 용이함, 아름다운 외관, 횡단보도와 안내표시의 이용상 편리함 등의 페이버 포장의 장점을 이유로 여러 나라에서 도심부 도로의 건설에 활발하게 적용되고 있다. 페이버 포장의 사용빈도가 높아지고 자동차 전용도로의 이용 가능성에 대한 인식이 증가함에 따라, 콘크리트 페이버 포장은 고속의 시외 도로와 자동차 전용도로를 제외한 모든 형태의 도로에 적용되었다. 네덜란드의 경우 1950년 대 이후, 낮은 시공비용과 치수의 정확도 증가로 인해 콘크리트 포장은 점토 벽돌로 대체되었다. 오스트레일리아와 뉴질랜드에서도 최근 콘크리트 페이버 포장이 주택가 도로 포장에 좀 더 효과적인 것으로 평가받고 있으며, 여러 가지 색과 형태를 적용함으로서 친환경적인 도로 건설이라는 페이버 포장의 장점을 살리고 있다.

5. 저소음 포장

가. 미국

캘리포니아주(California)의 오렌지카운티(County of Orange)에서 수행된 연구에서는 밀입도(dense grade) 아스팔트, 갭입도(gap graded) 고무아스팔트, 개립도(open graded) 고무아스팔트, 개립도(with latex) 아스팔트의 4가지 도로 포장이 각기 다른 소음 레벨을 나타내고 있음을 보고하고 있다. 이 연구 결과에서는 개립도(open graded) 고무아스팔트가 밀입도 아스팔트보다 소음도가 3.9dB(A) 낮다는 결론을 내렸다.(www.rubberpavements.org)

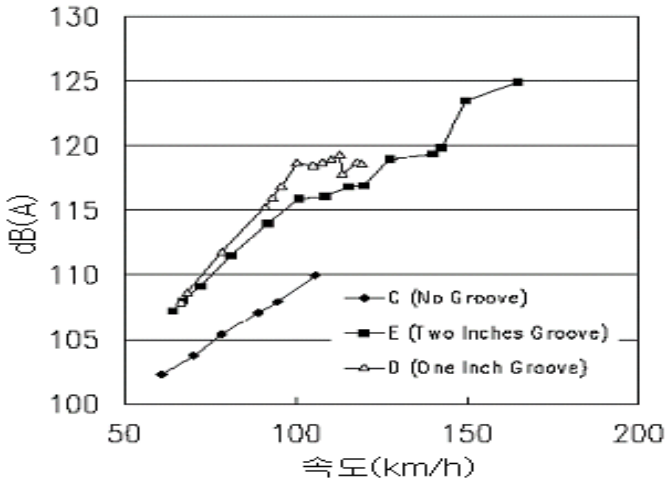
캘리포니아 주에서 수행된 소음 연구에서는 재포장 시공 구간의 차량 소음 레벨을 측정한 결과 일반 도로보다 소음이 감소되는 것을 알 수 있었다. 도로상태가 나쁜 기존 도로에 적용함으로써 소음이 현저하게 줄어들고 있다. 6개 도시에서 시험한 결과, 차량 종류 및 속도에 따라 3~7dB(A) 정도의 소음 감소가 나타났으며 이는 일반 신설 아스팔트와 비교할 때 고무 아스팔트가 2~5dB(A) 감소의 효과를 얻었다.(www.rubberpavements.org)

애리조나 주(Arizona)의 피닉스시에서는 1984년에 설치된 일반 칩실 아스팔트(chip seal asphalt)와 1989년에 설치된 고무 아스팔트에서 소음을 비교하였다. 연구 결과 칩실 아스팔트에 비해 고무 아스팔트가 대략 10dB(A) 정도의 소음 감소가 있었다. 애리조나 주 투산시의 연구에서는 고무 아스팔트 콘크리트가 일반 콘크리트 포장에 비해 6.7dB(A) 소음 감소 효과를 나타냈다.(www.rubberpavements.org)

뉴저지 교통국(New Jersey DOT)은 I-287 도로의 약 33Km 구간에 걸쳐 소음분석 장비인 STAMINA를 이용하여 고속도로의 소음을 예측하는 연구를 수행하였다. 본 조사는 아스팔트 포장과 횡방향 그루빙과 종방향 그루빙 공법이 적용된 콘크리트 포장에서 발생된 소음을 비교 및 분석하였다. 아스팔트 포장과 횡방향 그루빙 공법이 적용된 콘크리트 포장의 소음 분석 결과 전반적으로 아스팔트 포장에서 소음 발생량이 더 적고 특히 약 1223Hz(차량속도: 약112km/h)에서 두 포장의 소음차가 7dB(A) 정도를 보이고 있다.(Marsella, 1997)

Turner Fairbank 도로 연구소는 미항공우주국(NASA)에서 제공하는 소음측정 장비인 Wallops Flight Facility(WFF)를 이용하여 승용차를 대상으로 도로에서 발

생되는 소음을 측정하였다.(Meiarashi, 2000) <그림 2.2.36>는 아스팔트 구간에서 횡방향 그루빙 공법의 종류 및 승용차의 주행 속도에 따라 분석한 그래프이다. 2.5cm 횡방향 그루빙을 적용하였을 경우 도로 표면 처리를 전혀 하지 않은 경우보다 더 큰 소음이 발생하였다. 그러나 약 5cm를 적용하였을 경우, 2.5cm에 비해 소음 감소 효과는 있다는 사실을 알 수 있었다.



<그림 2.2.36> 무처리 및 그루빙 처리아스팔트 표면의 소음 비교(Meiarashi, 2000)

<표 2.2.27> 외국 고무아스팔트 소음저감 효과

국가		년도	보고된 소음 감소 수준
미국	캘리포니아	1992~1999	밀입도 아스팔트에 비해 3.9dB(A) 감소, 아스팔트 재포장에 비해 3~7dB(A) 감소
	아리조나	1990,1997	칩실 아스팔트에 비해 10dB(A) 감소, 일반콘크리트 포장에 비해 6.7dB(A) 감소.
벨기에		1981,1988	일반 아스팔트에 비해 2.1~3.5dB(A) 감소
프랑스		1984,1994	일반 아스팔트에 비해 2~3 dB(A) 감소
독일		1980,1988	일반 아스팔트에 비해 3~6 dB(A) 감소
오스트리아		1988	일반 아스팔트에 비해 3~5.5 dB(A) 감소
네덜란드		1988	일반 아스팔트에 비해 2.5 dB(A) 감소

* Sacramento County Public Works Agency-Transportation Division, 1999

나. 유럽

벨기에에서는 1981년에 개립도 아스팔트 포장이 콘크리트 포장에 비해 8~10dB(A)의 소음 감소가 있음을 보고하였고, 1988년 Dordrecht 시험도로에서 120km/h주행시 고무 아스팔트 포장(6cm)이 일반 밀입도 아스콘 포장도로에 비해 3.5dB(A), 콘크리트 포장도로에 비해 9dB(A)의 소음 감소 효과가 있다는 연구 결과를 발표하였다. 그밖에도 <표 2.2.25>와 같이 프랑스, 독일, 오스트리아, 네덜란드 등에서 고무 아스팔트의 소음 저감 효과를 증명했다.

스웨덴에서는 초기 공극율이 20~30% 최대 칩 크기(chipping size)의 12mm 다공성 표면을 3가지 다른 두께(50, 80, 110kg/m^2)로 시험 시공하여 4년간 살펴보았다. 이 실험에서 사용한 표면의 총 수명은 약 5년이고, 2시간 평균 레벨과 peak pass-by 레벨(모든 통과 차량의 소음 최대치의 평균)을 측정하였다. 측정 위치는 길 중심으로부터 10m 떨어진 곳이며 속도는 60~100km/h 범위에서 일정하였다. 실험결과는 다음 <표 2.2.28>과 같다. 본 연구결과를 요약하면 시간이 지날수록 소음 감소 효과가 적다는 점이다. 초기에 약 6dB(A)이던 소음감소량이 1.5dB(A)로 저감되었으며, 평균감소량은 약 3dB(A)정도임을 알 수 있다. Peak pass-by 레벨보다 평균레벨이 더 큰 감소 효과를 보이는데, 이것은 소음이 반 흡음성(semi - absorbent)인 도로 표면을 따라 장거리를 전파해 오면서 생기는 추가적인 감소로 설명될 수 있다. 도로 표면의 두께는 노후도가 적을수록 표면의 소음 감소에 영향이 있으나 노후도가 클수록 그 영향이 적으며 내구성 등을 고려해 볼 때 초기 공기 함유율이 최소한 20% 이상이야 한다. <표 2.2.29>은 골재의 크기와 공극률에 따른 소음 감소효과를 보여주고 있다.

덴마크에서 실시한 연구에 의하면 처음 1년 동안 기준 아스팔트에 대해 소음 감소량이 조금 증가하는 결과를 얻었다. 대상도로는 고속도로이며 소형차와 대형차가 혼합된 상태로 속도는 약 80km/h 정도이다.

<표 2.2.28> 스웨덴의 저소음 포장 연수와 소음 관계

도로 표면의 노후도	소음 감소량	
	평균 레벨	Peak pass-by 레벨
0 년	5~7 dB(A)	6~7 dB(A)
2 년	4~5 dB(A)	2~3 dB(A)
4 년	1~2 dB(A)	0~1 dB(A)

* Sacramento County Public Works Agency-Transportation Division, 1999

<표 2.2.29> 다공성 포장 골재의 크기와 공극률에 따른 소음 감소

골재의 크기와 공극률 (최대 chipping size, 공기 함유율)	기준 표면에 대한 소음 감소 레벨(평균, dB(A))	
	새 표면	1년 후의 표면
다공성 아스팔트(8mm, 18~22%)	4.0	4.5
다공성 아스팔트(8mm, 22%이상)	3.6	4.5
다공성 아스팔트(12mm, 22%이상)	2.0	3.9
기준 고밀도 아스팔트(12mm)	0.4	0.0

* Sacramento County Public Works Agency-Transportation Division, 1999

다. 일본

일본에서는 다공성 표면의 소음감소 인자와 강우량이 소음 감소에 미치는 영향에 대하여 장기간 연구해 오고 있다. 연구 내용을 살펴보면, 밀입도 아스팔트(공극률 5%, 두께 5cm)를 기준으로 다양한 다공성 표면(공극률 15, 20, 25%, 두께 5, 10cm)에 대해 승용차, 소형트럭, 대형트럭 등 3개의 차종에 대하여 주행시의 소음을 측정하였다. 실험에서는 실외 소음 측정법(pass-by method)(ISO10844)을 사용하였으며, 측정 위치는 주행 중앙선에서 7.5m, 지상에서 1.2m 떨어진 지점에서 3번씩 측정하여 평균하였다. 실험결과에 따르면 표면 두께의 영향은 트럭에 대해서만 1~2dB(A)의 차이가 있었다. 그리고 공극률이 20% 미만일 때 공극률에 따른 소음 감소량은 현저한 차이를 보이나, 20% 이상일 때는 그 차이가 거의 없는 것으로 나타

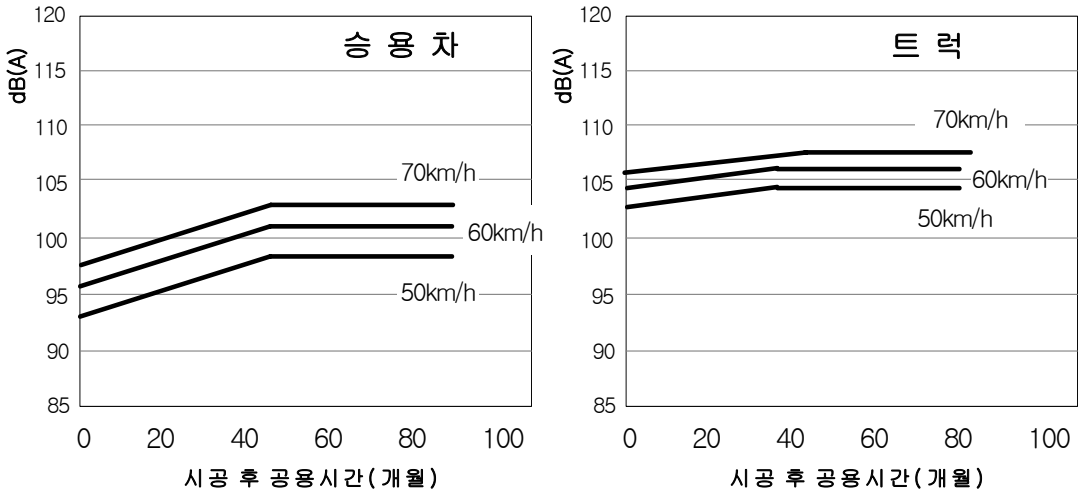
났다. 따라서 공극률을 20%를 유지하는 것이 매우 중요함을 알 수 있다. 강우시 소음감소량은 전체적으로 약 6dB(A) 정도이고, 젖은 상태에서의 소음 감소량은 그보다 더 큰 것으로 나타났다. 다공성 표면 내의 물의 양이 증가하면 최대 흡음 계수가 되는 주파수가 낮아지고 최대 흡음 계수도 낮아진다. 특히 물의 양이 1mm를 초과했을 때는, 그 변화가 급격히 일어난다.

일본 국토 교통성에서는 배수성 아스팔트 포장에서 승용차와 대형 트럭에 대해서 속도 및 시공 후 경과 시간에 대해서 소음 발생의 차이점을 연구하였다. <그림 2.2.37>에서는 차량의 속도와 시공 후 경과 시간에 대해서 승용차와 트럭에 대한 소음도를 나타내고 있다.

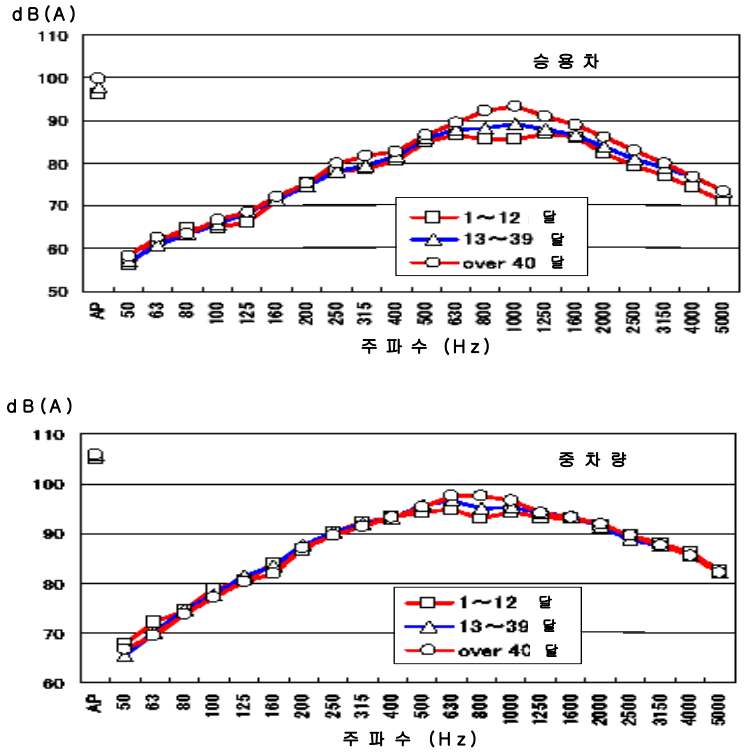
승용차의 경우 시공 후 40개월까지 1.6~1.7dB/year의 비율로 소음이 증가하는 것으로 나타났다. 배수성 포장의 표면 공극이 점차 막히면서 공기 펌핑에 의한 소음도가 증가했기 때문이다. 트럭은 0.6~0.7dB/year의 비율로 소음이 증가했는데 주된 이유는 표면 공극의 막힘으로 인한 그루브 공기 공명 효과의 증가로 결론 내렸다. 시공 후 시간이 지남에 따라 승용차는 트럭에 비해서 소음 저감 효과가 떨어졌다. 트럭의 주행 소음은 엔진 소음이 비교적 큰 비중을 차지하기 때문에 공극 막힘으로 인한 소음도의 변화는 적은 것으로 나타났다. 승용차의 경우 시공 후 30개월을 전후하여 소음 저감 효과가 거의 없어진 반면에 트럭은 40개월이 지나면서도 소음 저감 효과를 보였다. 포장 표면의 거칠기에 따른 타이어의 진동에 의한 소음이 승용차의 타이어에서 발생하는 진동 소음보다 작기 때문이다.

<그림 2.2.38>은 48~52km/h의 속도에서 측정한 소음에 대한 주파수 분석을 나타낸 그림이다. 승용차의 경우 시간이 지남에 따라 630Hz~1kHz에서 소음도가 증가하고 있다. 포장 공극이 점차 막힘에 따라 공기 펌핑과 그루브 공기 공명으로 인한 소음 발생이 증가하는 것으로 판단된다. 트럭의 경우 같은 주파수 대역에서 소음도의 증가폭이 적은 것을 볼 수 있다. 트럭의 경우 엔진 소음이 큰 비중을 차지하고 있기 때문인 것으로 보인다.

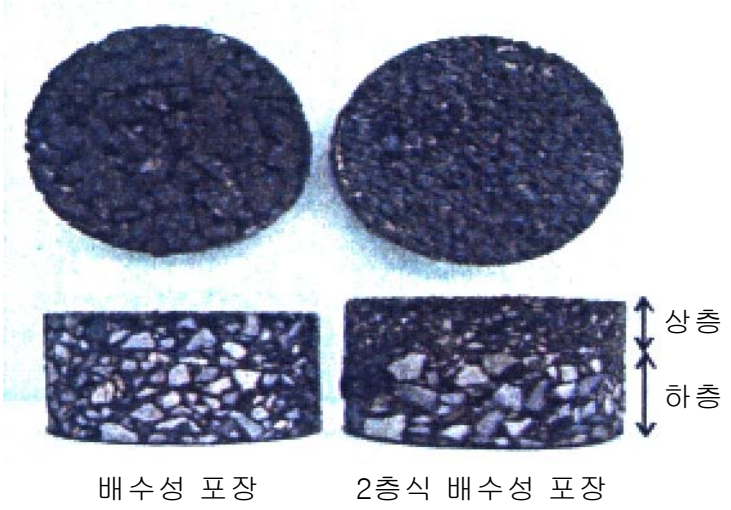
일본의 2층식 배수성 포장은 저소음 포장의 종류로 <그림 2.2.39>을 보면 일반 배수성포장과는 달리 2개의 층으로 구분된다. 상층에는 골재최대치수가 5~8mm의 가는 입자이며, 2~3cm 두께로 시공하고 있다. 따라서 평탄성이 양호해짐에 따라 타이어 진동음을 감소시켜 소음저감 효과를 기대할 수 있다. 하층에는 내구성 향상을 목적으로 13mm 골재를 사용하였다.



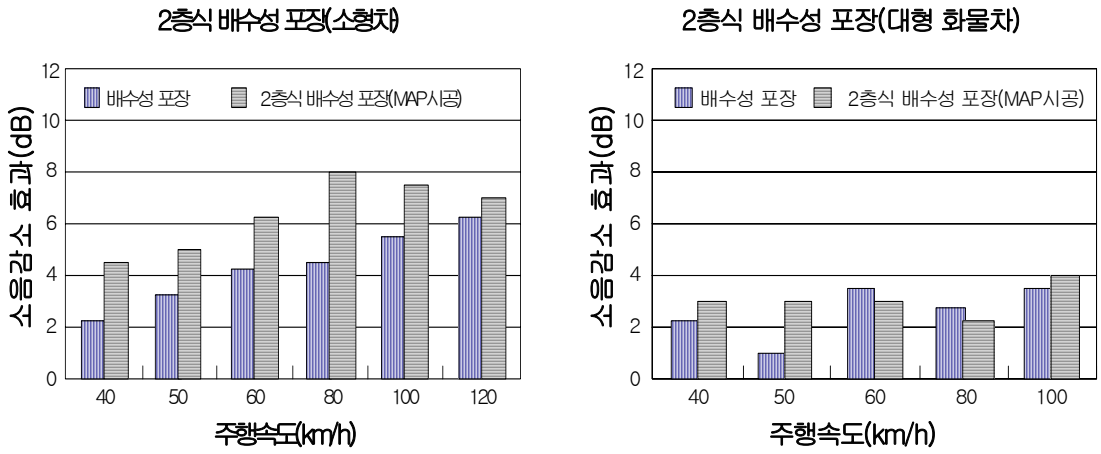
<그림 2.2.37> 시간 경과에 따른 소음도 변화(Takeshi Koshiba, 2003)



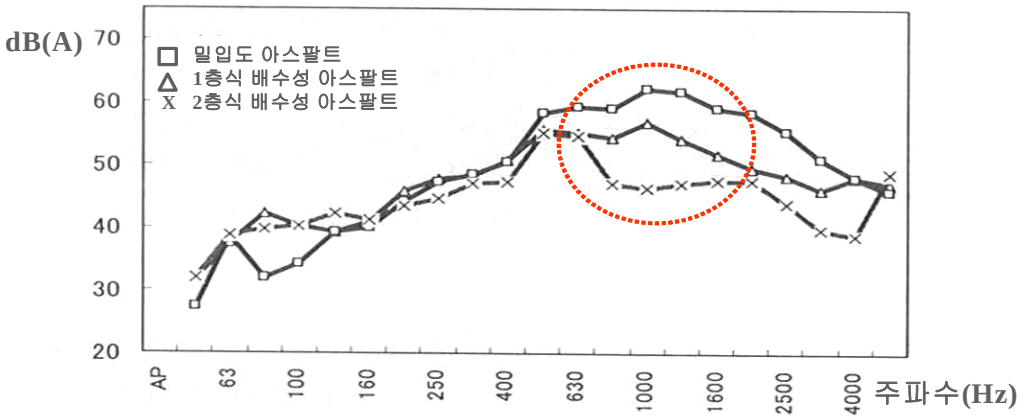
<그림 2.2.38> 시간 경과에 따른 소음도 변화-주파수 변화(Takeshi Koshiba, 2003)



<그림 2.2.39> 2층식 배수성 포장



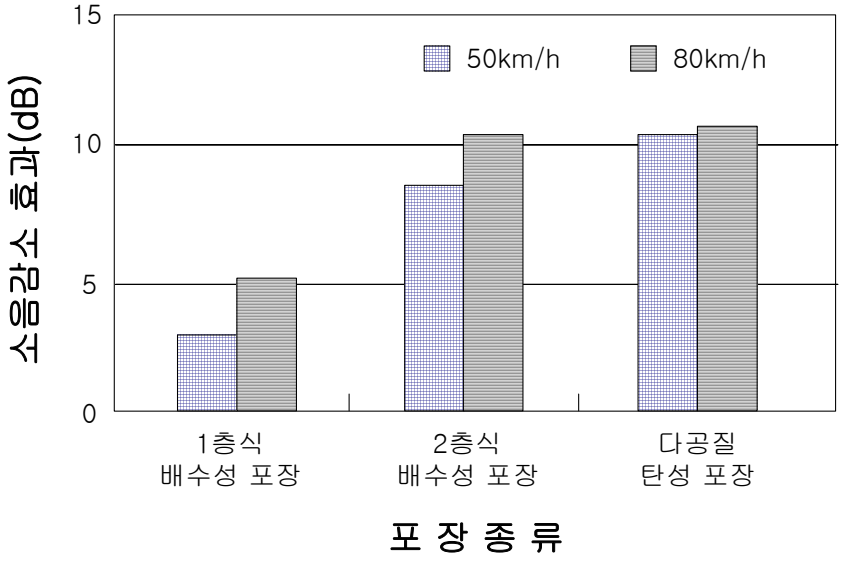
<그림 2.2.40> 2층식 배수성 포장의 소음저감 효과



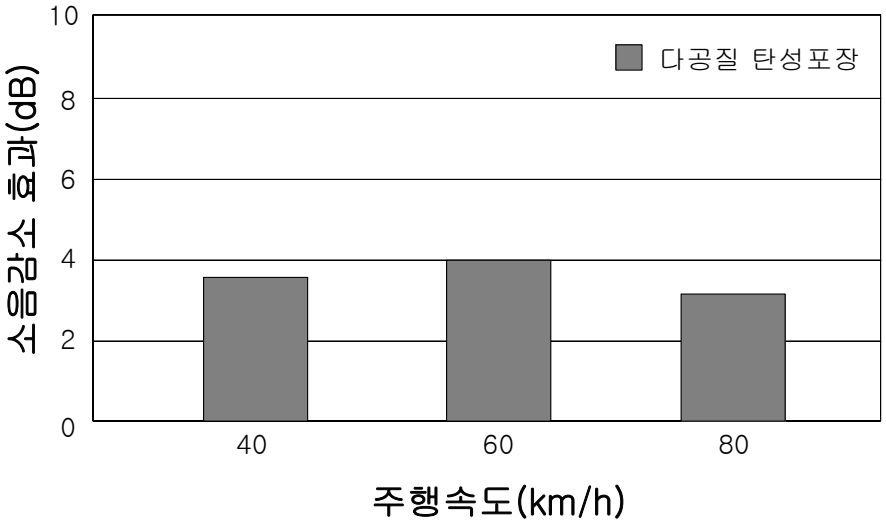
<그림 2.2.41> 배수성 포장의 소음저감 효과

2층식 배수성 포장과 일반 배수성 포장의 소음감소 효과를 <그림 2.2.40>에 나타내었다. 승용차 소음저감 효과를 비교한 결과 2층식 배수성 포장이 일반 배수성포장에 비해 속도에 관계없이 소음저감효과가 컸다. 대형화물차 소음저감 효과를 비교한 결과 속도 50km/h 이하에서는 2층식 배수성 포장이 소음저감 효과가 컸으며, 60~80km/h에서는 일반 배수성 포장이 소음저감 효과가 컸다. <그림 2.2.41>은 밀입도 아스팔트, 일반 배수성 아스팔트, 2층식 아스팔트 소음저감 효과를 비교한 것이다. 소음저감 효과는 고주파 영역에서 2층식 배수성 아스팔트 〉 일반 배수성 아스팔트 〉 밀입도 아스팔트 순으로 나타났다.

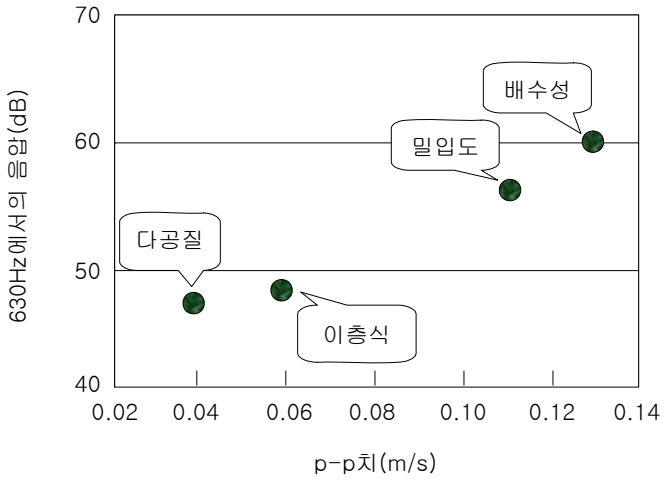
다공질 탄성포장은 25%~35%의 높은 공극을 가지고 있으며 폐타이어를 100% 사용한 포장으로 주행시 차량 타이어 진동음을 감소시켜 소음저감 효과가 매우 크다. 다공질 탄성포장의 소음효과는 <그림 2.2.42>과 같이 승용차의 주행속도가 높아짐에 따라 다공질 탄성포장 〉 2층식 배수성 포장 〉 일반 배수성 포장 순으로 나타났다. <그림 2.2.43>는 대형차의 주행속도가 높아짐에 따라 다공질 탄성포장의 소음저감효과를 나타낸 것으로 주행속도 60km/h에서 가장 높은 4dB의 소음저감 효과를 나타냈다. <그림 2.2.43>은 다공질 탄성포장의 차량 타이어 진동음 감소를 나타낸 것이다. 600Hz 주파수 영역대에서 다공질 탄성포장의 소음이 작게 발생하였는데 이러한 원인은 차량 타이어 진동음이 작게 나타났기 때문이다.

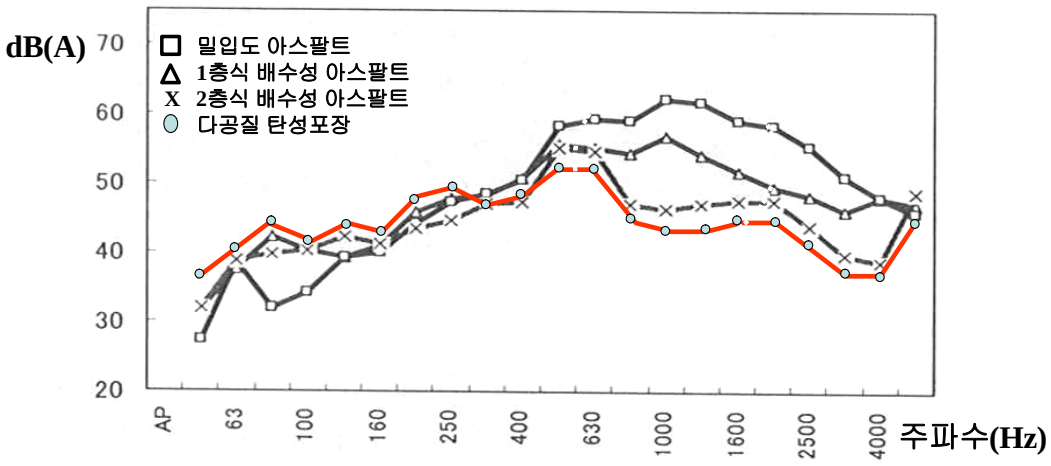


<그림 2.2.42> 다공질 탄성포장의 소음감소 효과(승용차)



<그림 2.2.43> 다공질 탄성포장의 소음감소 효과(대형차)





<그림 2.2.44> 포장형식에 따른 소음감소 효과

각 국의 문헌조사 내용을 요약하면 다음과 같다.

미국의 캘리포니아 주에서는 6개 도시를 대상으로 재포장에 따른 소음저감 효과를 측정, 차량종류 및 속도에 따라 3~7dB(A) 정도의 효과를 얻었다. 애리조나 주의 피닉스에서는 일반 칩실 아스팔트에 비해 고무 아스팔트가 약 10dB(A)정도의 낮은 소음도를 나타냄을 확인했다.

벨기에에서는 1981년 브뤼셀에서 개립도 아스팔트 포장이 콘크리트 포장보다 8~10dB(A)의 소음 감소가 있음을 보고하였으며, 1988년 Dordrecht 시험도로에서 고무아스팔트 포장이 일반 아스팔트포장에 비해 3.5dB(A), 콘크리트 포장에 비해서는 9dB(A)의 소음 감소 효과가 있음을 발표하였다.

스웨덴에서는 초기 공극률이 20~30%이며 최대 칩 크기가 12mm인 다공성 표면을 시험 시공한 결과, 초기 6dB(A)의 소음저감효과가 시간이 지남에 따라 1.5dB(A)로 감소됨을 확인할 수 있었다.

일본의 국토 교통성에서는 배수성 포장에서 승용차 및 대형트럭에 대해 속도 및 경과 시간별 소음 변화추이를 연구하였다. 승용차의 경우 1.6dB~1.7dB(A)/년, 대형트럭의 경우 0.6~0.7dB(A)/년의 비율로 소음이 증가하였다. 표면두께에 따른 영향은 트럭에 대해서만 1~2dB(A)의 차이가 발생하였으며, 공극률이 20% 미만일 때 공극률에 따른 소음 감소량이 발생함을 확인하였다.

일본의 2층식 배수성 포장의 경우, 일반 배수성 아스팔트와 밀입도 아스팔트와 비교한 결과 더 우수한 소음저감 효과를 얻을 수 있었다.

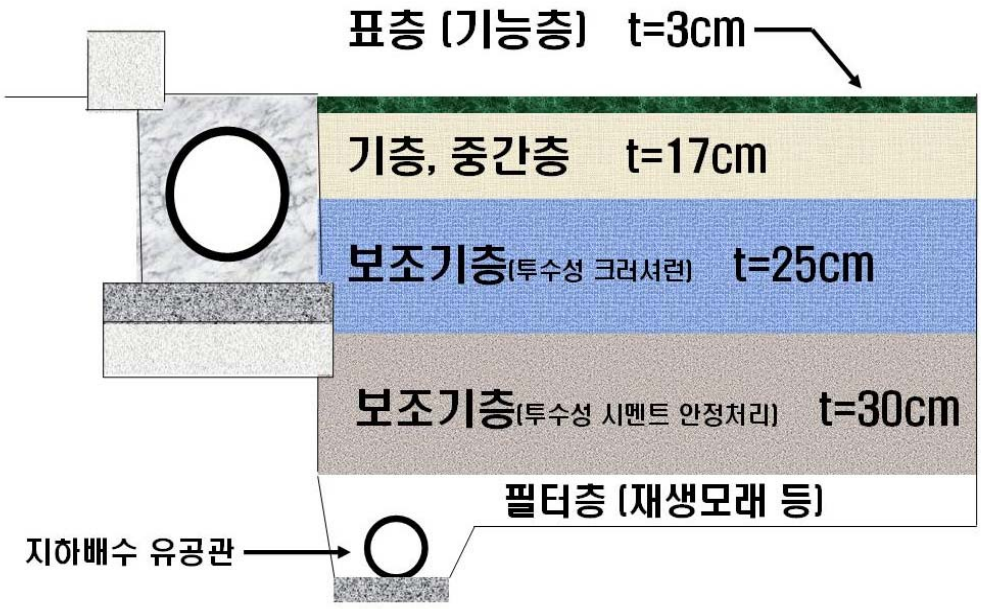
6. 물에 의한 노상의 거동 특성에 관한 연구

가. 일본

대유건설(주)에서는 '환경을 고려한 차도형 투수성 포장에 대한 연구에서, 공장 진입로에 W=4m, L=30m의 소규모 시험시공을 실시하였다. 표층은 두께 3cm를 표준으로 하여, 굵은 골재 최대입경과 공극률을 선정한 후 중간층 이하로 침투되는 이물질을 여과하는 필터의 기능을 할 수 있도록 설계하였고, 중간층에서는 최대입경 20mm 고점도 개질아스팔트를 사용한 개립도 아스팔트 혼합물을 사용하였다.

기층에서는 시멘트 콘크리트 파쇄재를 주재료로 한 투수성 시멘트 안정처리 기층으로 설계하였고 투수계수는 1×10^{-4} cm/s 이상, 7일 후의 일축압축강도는 29.572kgf/㎠로 하였다. 보조기층을 시멘트 콘크리트 파쇄재를 주재료로 한 투수성재생 크러셔런(crusher-run)으로, 투수계수는 1×10^{-4} cm/s 이상, 수정CBR은 60% 이상으로 하였다. 노상과 보조기층과의 사이에 두는 필터 층은 모래, 도기부스러기와 같은 필터재에 가로수 등의 가지치기 폐재를 특수기술로 탄화시켜 만든 활성탄을 혼합하고, 이것을 지오텍스타일 포대에 넣은 구조이다.

이 시험시공에서는 크게 두 개의 결과를 산출하였다. 첫 번째로는 필터 층의 배수유공관 단부에 집수구를 설치하고, 노상에 침투되지 않은 빗물을 계측한 결과, 일 강우량 40mm정도까지의 관측에서는 배수관에서 배수된 빗물은 강우량의 5.5%에 지나지 않고, 현장에서도 9할 이상의 빗물이 지하로 침투되는 것을 확인하였다. 두 번째로 특정차량에 대한 소음측정의 결과 최대치수 13mm의 표층재에서 약 3dB, 최대치수 8mm의 표층재에서 약 5dB의 소음이 저감되었고, 나아가 이 표층재에 다공질 탄성모르터 처리를 시행함으로서 약 8dB의 저감이 가능하다는 결과가 산출되었다.

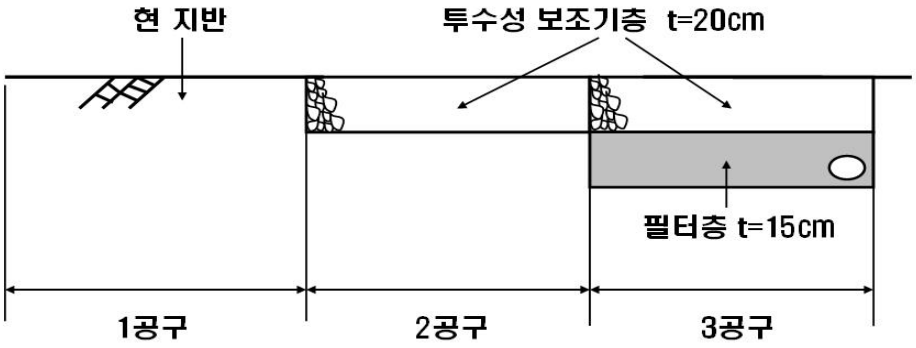


<그림 2.2.45> 투수성 포장의 단면 예 (D교통, 설계 CBR 6, 20년 설계)
(Nakanishi Hiromitsu, 2001)

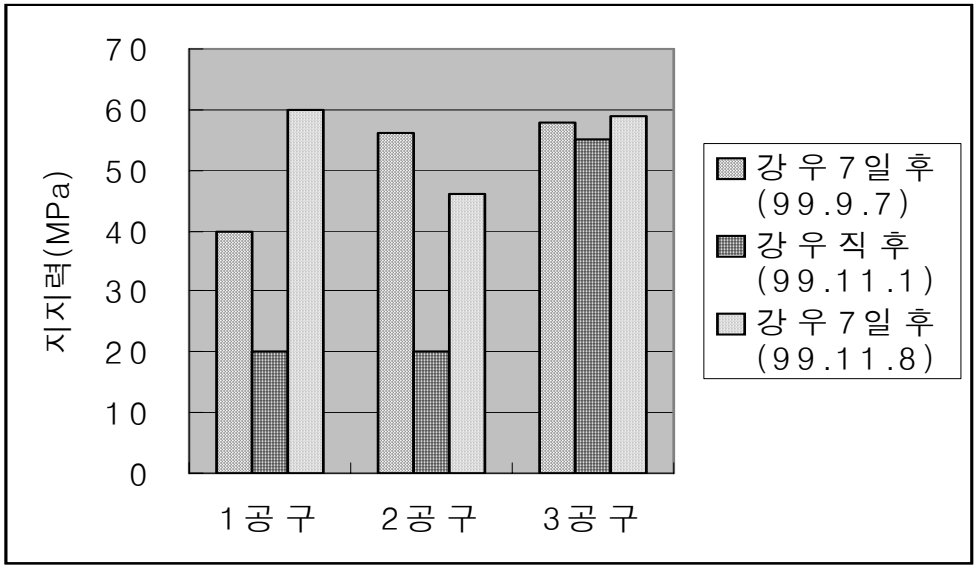
<표 2.2.30> 차도 투수성 포장용 아스팔트 혼합물 성상 예

혼합물 명칭	표층용 혼합물		중간층용 혼합물		비교용 혼합물	
	소입경 개립도 AP	명색 개립도 AP	중간층용 개립도(20)	중간층용 개립도(20)	소입경 개립도 AP	명색 개립도 AP
굵은 골재의 종류와 최대치수(mm)	경질사암	챠트 70% 백색인공골재 30%	경질사암	경질사암 (재생골재* 2:30%)	경질사암	챠트 70% 백색인공골재 30%
	8mm	13mm	20mm	20mm	8mm	13mm
바인더 종류	고내구성 고점도 바인더	고내구성칼라 고점도 바인더	고점도 바인더	재생고점도 바인더	일반고점도 바인더	일반칼라고점도 바인더
바인더 량(%)	5.5	5.0	4.5	4.2	5.5	5.0
공극률(%)	22.8	20.2	20.3	20.1	23.0	20.1
투수계수(cm/s)	9.0×10^{-2}	1.50×10^{-1}	1.43×10^{-2}	1.38×10^{-1}	8.4×10^{-2}	1.41×10^{-1}
동적안정도(회/mm)	5250	5250	6360	7000	3150	2740
칸타브로 손실률(5℃,%)	12.4	22.8	14.7	14.8	21.4	31.8
수침WT박리율(%)	0.0	0.0	0.93	0.98	0.0	0.0
주) *1 60℃, 윤하중 70kgf, 수위표면, 6시간주행 *2 재생골재는 13~5mm						

노상에서의 침투수에 의한 지지력 시험은 공구마다 반복평판재하시험을 하여 강우 직후와 강우로부터 7일 후에 시행하였다. 노상과 보조기층만의 공구에서는, 강우 7일 후 지지력이 절반정도로 떨어졌으나, 필터층과 배수유공관을 가진 공구에서는 지지력의 저하가 거의 보이지 않았다. 이것은 노상에 침투되지 않는 침투수가 보조기층 이상의 층안에 체류하는 포장구조의 경우, 보조기층이나 노상이 약해져서 포장체 강도를 심하게 떨어뜨릴 위험성이 있다는 것으로 판단하였다. 반면에 보조기층의 하부에 필터층을 둔 경우는, 노상에 침투되지 않은 침투수를 배수시키는 동시에 강우 직후에는 필터층이 지지층으로서 기능한 결과라고 생각하였다. (Nakanishi Hiromitsu, 2001) 표장층 없이 수행된 이 실험 자체는 큰 의미가 없지만 골재하부층에 대한 물의 영향을 보여주고 있다.



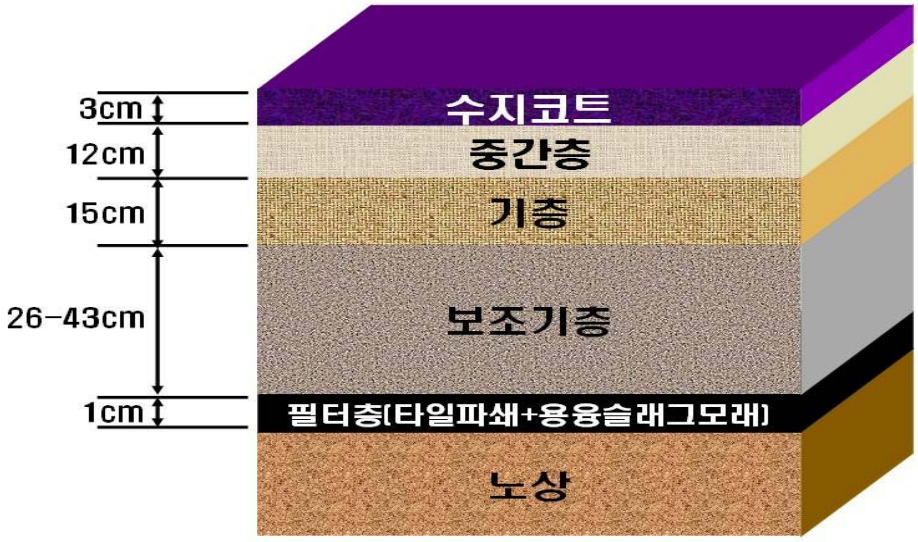
<그림 2.2.46> 옥외 지지력 시험의 구조 (Nakanishi Hiromitsu, 2001)



<그림 2.2.47> 빗물침투에 의한 지지력의 변화 (Nakanishi Hiromitsu, 2001)

일본 국토교통성 중부지방정비국과 아이찌현이 추진하고 있는 '빗물침투형 도로 구조의 개발'에서는 1999년 11월 국도 155호선에 360㎥규모(폭 4m × 연장 90m)의 시험시공을 실시하였다. 표층(수지코트) 3cm, 중간층 10cm, 기층 15cm, 보조기층 16cm의 포장구성으로 하고, 노상 위에 필터 층을 1cm 두었다. 각 층간의 택코트 및 프라임코트는 투수성능에의 영향을 고려하여 살포하지 않았다. (개립 As 간의 부착강도는 택코트를 하지 않은 경우 0.4N/㎟정도). 그리하여, 표층의 포설 후에 수지코트를 시공하였다. 노상 및 보조기층의 시공단계와 주행시험 후(개착면)에서, 동적평판시험기로 지지력을 측정한 결과 이들로부터 살수주행 후의 지지력은 시공단계와 거의 같고, 특별한 변화를 볼 수 없다고 한다. 시험시공을 통해 미끄럼 저항

성이나 평탄성과 같은 노면성상에 관해서는 특별한 문제가 없었다. 또한, 빗물의 침투기능에 대해서는, 현장 투수량이 1,383㎖/15s이며, 개립도 아스팔트 각 층의 절취 공시체의 공극률이 20% 이상인 점에서 충분히 확보되어 있는 것으로 판단되었으며 포장체중의 습도가 거의 100%여서 노면 열섬 저하 현상의 억제는 기대할 수 있다. 소음 저감 효과는 밀입도 아스팔트를 사용한 공구와 비교하여 보면 낮은 측청치를 얻었고 포장체 중에 침투한 빗물을 채취하여 실시한 용출수의 시험 결과로부터, 각종 산업폐기물, 부산물의 사용은 문제가 없는 것으로 판단되었다.
(Nemeto Nobuyuki, 2001)

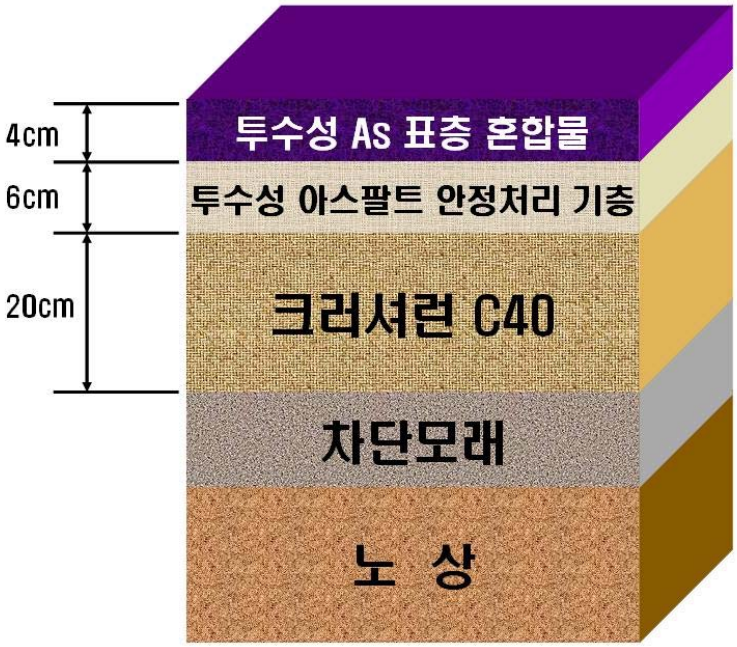


<그림 2.2.48> 일본국도 155호선의 포장단면(cm)(Nemoto Nobuyuki, 2001)

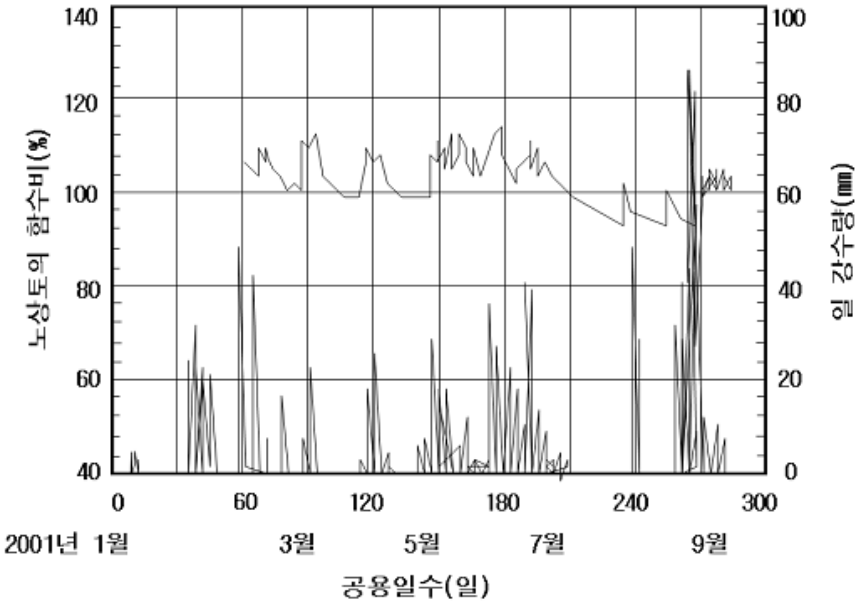
<표 2.2.31> 노상 및 보조기층의 지지력계수(Nemoto Nobuyuki, 2001)

	지지력계수(K_{75}, MN/㎥)			
	시공단계		살수주행 후 (개착조사)	
	각각	평균	각각	평균
노상	69	82	66	82
	94		98	
보조기층	120	137	116	151
	154		185	

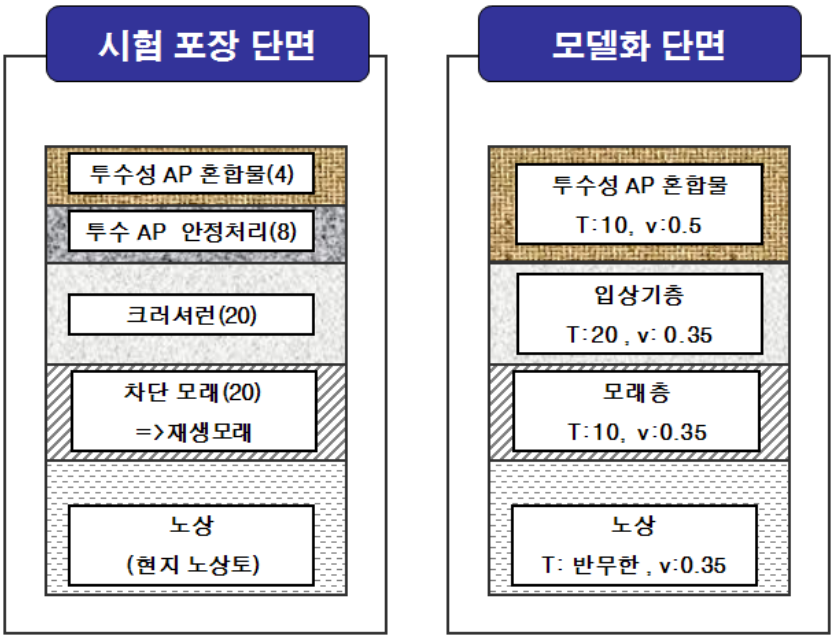
일본도로(주) 기술연구소에서는 시험포장에 의한 차도용 투수성 포장에 대한 연구에서 노상토의 실내실험과 현장과의 경향성을 확인하기위한 시험포장을 시행하였다. 시험포장은 2000년 12월에 도쿄 농업대학 캠퍼스구내에 시공하였으며 폭 3.3-3.7m 연장은 34m로 하였다. 시공에서는 기존의 아스팔트 포장을 굴착하여 현지 노상까지 파내고, 그 위에 차단모래, 크리셔런 20cm , 최대치수 30mm의 투수성 아스팔트 안정처리기층 6cm, 그리고 최대치수 13mm의 투수성 아스팔트 표층 혼합물4cm를 시공하였다. 본 연구의 시험 항목은 노상 위, 크리셔런 기층 그리고 표층 위에서 소형 FWD를 이용하여 처짐량을 측정하고 노상토를 채취하여 함수비를 측정하는 동시에 1면전단시험, 반복3축시험을 실시하여 노상토 성상을 파악하였다. 소형 FWD의 처짐량 측정 결과는 보면 노상의 처짐량은 구간중앙부분에서 약간 크게 되어있으나 기층이나 표층 시공후에는 거의 균일한 처짐량을 나타내었다. 또한 강우에 의해 노상의 함수비가 올라가고, 잠시 맑은 날씨 또는 구름이 계속되면, 거의 일정한 함수비로 떨어지거나, 단기간에 다시 강우가 있으면 함수비는 다시 올라가는 것을 알 수 있었다. 여기서 주목할만한 사항은 8월 후반에 태풍에 의한 집중호우가 2일간 있었으나, 노상토의 함수비가 10%정도 밖에 오르지 않았다는 것이다. 이것은 이 시험포장 단면에서 강우에 의한 노상토 함수비의 급격한 상승의 한계점이라고 추측할 수 있다. 또한 8월 후반 이후의 강수에 의한 노상토 함수비의 변화가 작은 것은, 표층의 공극 막힘 때문에 투수량이 감소한 것에 따른 것이다. 지지력의 관점에서 보면 강우 후에 노상토의 함수비가 증가한 시점에서 FWD의 처짐량이 약간 크게 되었으나, FWD 처짐량으로부터 추정한 노상의 탄성계수에 거의 변화는 보이지 않는다. 그러나, 실내 실험에서는 노상의 함수비가 올라가면 노상토의 회복탄성계수(Resilient modulus)가 떨어지고, 재하에 의한 공시체의 영구변형이 크게 되는 등 결과를 얻었다. (Endo Katsura, 2002)



<그림 2.2.49> 투수성 포장의 시험 포장 단면 <Endo Katsura, 2002)



<그림 2.2.50> 노상토의 함수비 변화와 일강우량



<그림 2.2.51> 시험포장에 따른 포장 단면의 변화

나고야시에서는 재활용재를 필터재나 보조기층재로서 효과적으로 이용한 투수성 포장을 생활도로에 적용하는 것을 목표로 하여, 2000년도와 2001년도에 투수성 포장의 시험포장을 실시하였다. 토오까이 지방에서는 2000년 한 시간에 97.0cm, 전체 강수량 566.5cm 라는 기록적인 폭우가 내리고 이에 따른 피해가 많아짐에 따라 이에 대한 연구를 실시하게 되었다. 시험 시공은 2000년과 2001년, 총 2회 시공하였다.

2000년 시험시공에서는 4개 공구를 정하여 폭 8m 가운데 한쪽 폭 4m, 각 공구연장 30m로 실시하였다. 시공장소는 주간에는 승용차와 소형화물차의 통행이 비교적 많은 노선으로, 포장계획교통량은 100대 미만/일-방향, 설계 CBR=4로서 목표 T_A를 14.0cm로 하였다. 포장의 단면은 다음 <표 2.2.32>와 같다. 2000년 시험시공의 결과를 정리해 보면 다음과 같다.

<표 2.2.32> 투수성포장의 2000년도 시험포장의 단면 (Gotou Atusushi, 2003)

공구	00-Ⅰ	00-Ⅱ	00-Ⅲ	00-Ⅳ	표준포장
표층	개립도 13 (개질 Ⅱ 형 As t=5cm, ai=1.0			개립도 13 (고점도 As) t=5cm, ai=1.0	재생밀입도 13 (stAs 60/80) t=5cm, ai=1.0
기층	-	개립도 As 안정처리 20 (개질 Ⅱ형 As) t=5cm, ai=0.8			재생As 안정20 t=5cm, ai=0.8
보조기층	개량쇄석(KC40) +재생골재 t=20cm, ai=0.35		기존보조기층 C-30 t=20cm, ai=0.25	재생보조기층 RC-40 t=15cm, ai=0.25	기존보조기층 C-30 t=20cm, ai=0.35
필터층	재생골재(5-0) t=5cm		없음 배수유공관 있음	재생골재 (5-0) t=5cm	-
잠정T_A	12.0	14.3	14.0	12.8	14.0
포장두께 : cm (필터층 포함)	25(30)	30	30	25(30)	30
저수량의 계산값 (강우환산, mm)	21.2	28.8	21.8	34.8	-

* ai : TA 설계법에서 사용되는 단면 환산계수

노면조사의 결과 노면의 높이가 가장 낮은 아스콘층은 도로이외에 유입하는 빗물이 모이기 쉽고, 가로수의 낙엽과 같은 쓰레기에 의해 길어깨 가까이에는 구멍막힘이 일어났다. 평판재하시험(K_{30})결과, 노상 위 (필터층의 아래 면)의 지지력계수(K_{30})는 각공구 모두 0.11N/㎣정도로 이며 이들로부터 보조기층의 지지력 효과는 보조기층과 노상의 지지력비로 보아 2.4-2.8정로를 가지고 있다. FWD 측정결과, 보조기층의 배수가 빠르면 그 아래의 노상에 대해서는 추정한 탄성계수의 저하가 보이지 않는 점에서 빗물의 영향은 보조기층에 그치고 있는 것으로 판단된다. 소음조사의 결과 투수성포장은 밀입포장보다 소음이 적은 것으로 나타났다.

2001년 시험시공은 2000년도의 시험시공과 동일한 노선에서 장단점 약간 바꾸어 계획하였다. 2001년도는 1차년도와는 다르게 배합하였으며, 결과정리에 있어서도 2000년도의 연구와는 전혀 다른 내용이다. 포장의 단면은 다음 <표 2.2.33>에 나타나있다. (Gotou Atusushi, 2003)

<표 2.2.33> 투수성포장의 2001년도 시험포장의 단면 (Gotou Atusushi, 2003)

공구	Ⅰ-1	Ⅰ-2	Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅱ-
표층	개립도13 (개질Ⅱ형As) t=7cm ai=1.0	재생,밀입도13 (stAs60/80) t=5cm ai=1.0	개립도 13 (고점도 As) t=5cm, ai=1.0		재생,밀입도 13 (stAs 60/80) t=5cm ai=1.0
기층	-	-	개립도 As안정20 (개질Ⅱ형 As) t=5cm, ai=0.8		재생As 안정20 t=5cm ai=0.8
보조기층	개량쇄석(KC40)+재생골재 t=35cm ai=0.35	개량쇄석(KC40) t=35cm ai=0.35	개량쇄석(KC40) 재생골재 t=35cm ai=0.35	개량쇄석(KC40) 재생골재 t=25cm ai=0.35	개량쇄석(KC40) 재생골재 t=15cm ai=0.35
필터층	재생골재(5-0) t=5cm	-	재생골재(5-0) t=5cm	재생골재(5-0) t=5cm	-
잠정T_A	12.3	10.3	14.3	17.8	14.3
포장두께 : cm (필터층 포함)	22(77)	20	25(30)	35(40)	25
저수량의 계산값 (강우환산, mm)	244.4	-	28.8	13.8	-

* ai : TA 설계법에서 사용되는 단면 환산계수

<표 2.2.34> 투수성포장에 사용한 기층, 보조기층재의 성상(2000년도)

		개량쇄석(KC40)+재생골재(40-0)	재생보조기층 (RC-40)	기존보조기층 (C-30)	재생골재 (5-0)
통과중량백분율(%)	53.0mm	100	100	100	-
	37.5	98.6	97.1	100	-
	31.5	90.0	88.8	96.0	-
	26.5	81.2	79.3	88.9	-
	19.0	67.5	65.4	77.9	-
	13.2	55.1	52.2	67.7	100
	4.75	34.8	27.5	37.9	83.9
	2.36	23.9	16.7	25.2	51.1
	1.18	16.9	12.3	17.1	32.7
	0.425	9.1	7.5	11.4	13.8
	0.075	5.7	2.4	7.5	3.6
소성지수(PI)		NP	NP	3.0	NP
최대건조밀도(g/㎤)		2.185	1.922	2.236	2.815
최적함수비(%)		7.1	10.2	5.5	15.2
투수계수 (cm/s)	3층92회 다짐	4.83×10^{-4}	6.70×10^{-3}	1.45×10^{-4}	$(1.36\times10^{-3)}$
	3층41회 다짐	3.15×10^{-3}	1.12×10^{-2}	7.11×10^{-4}	-
	현장 밀도일 경우	1.15×10^{-3}	8.17×10^{-3}	1.61×10^{-4}	-
수정CBR(%)		22.1	89.9	76.0	(18.7)
주) ( )안은, 물다짐으로 제작한 공시체의 결과					

<표 2.2.35> 일본문헌고찰 내용 요약

		Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ
범위	연구기관	대유건설(주) 중앙연구소	일본도로(주)	일본도로(주)	나고야시
	발표	'포장'2001,2월	'포장'2001,2월	'포장'2002,2월	'포장'2003,8월
	시공시기	2001	2000.8	2000.12	1회 : 2000 2회 : 2001
	시공위치	공장진입로	국도 155호	캠퍼스구내	일반 노선
	시공면적	4m×30m	4m×90m	3.3-3.7m×34m	8m×120m
	특이사항	-	수지코트형	-	2회 시험시공
단면	단면	표층	수지코트	표층	표층
		중간층	표층	기층	기층
		기층	중간층	보조기층	보조기층
		보조기층	기층	차단모래	필터층
		필터층	보조기층	노상	노상
		노상	필터층		
			노상		
측정	지지력측정	반복평판 재하시험	FWD처짐량	소형 FWD	FWD처짐량
			토압	FWD처짐량	
	소음측정	특정차량 소음측정 후륜후방19cm	표준밀도 공구와의 차		특정차량 소음측정 후륜후방19cm
	투수측정	지하 유공관 배수량 계측	현장 투수량	노상토 함수비 (토양수분계)	현장투수시험
			절취 시공체 공극률		유공관 배수량
	온도측정	온도센서	온도센서	-	온도센서
	환경평가	-	용출수 시험	-	-
	노면성상	-	일반	프로파일러	육안
				육안	

하부층의 물과 관련된 일본의 배수성 아스팔트 연구 결과를 요약하면 <표 2.2.35>와 같다. 최근 들어 연구가 시작되었으며 문헌 조사를 통해 4 곳의 시공 사례를 살펴보았다. 첫 번째 사례를 통해 상당량의 빗물이 노상에 침투하며 중간에 배수층이 있을 경우 지지력 감소는 크지 않으며 소음의 저감효과를 확인하였다. 두 번째에서는 초기 공용성 평가를 통해 적용가능성을 확인하였으며 열섬억제효과, 소음저감 및 부산물의 사용성이 가능하다는 것을 확인하였다. 세 번째에서는 장마철 많은 강수에도 불구하고 함수비는 약 10% 정도 증가하였으며 현장의 노상탄성계수는 많은 변화를 보이지 않은 것을 확인하였다. 네 번째에서는 강우가 보조기층까지만 영향을 주고 노상에는 많은 영향을 주지 않는 것으로 나타났으며 소음이 적게 발생한 것을 확인하였다.

나. 미국

Drumm(1997)은 노상토의 포화도에 따라 흙의 회복탄성계수를 수정하는 방법에 대해 제안하였다. 대부분의 흙은 포화도가 증가함에 따라 회복탄성계수의 감소를 나타내지만 회복탄성계수의 감소 정도는 흙의 종류에 따라 다르고 최적의 조건에서 회복탄성계수 값이 가장 큰 흙이 포화에 따라 가장 많이 감소한다. 다짐시 함수비는 흙 입자의 조직에 영향을 주기 때문에 흙의 강도나 강성에 영향을 준다. 그러므로 노상토가 계절적인 함수비 변화에 어떻게 반응하는지를 정확하게 예측하기 위해서는 공시체가 현장의 다짐 조건을 유사하게 모사할 수 있게 제작해야 한다. 또한 최적함수비와 최대건조밀도에서 다져진 노상은 계절에 따른 함수비의 변화를 겪게 되고 대부분의 노상은 함수비가 증가함에 따라 탄성계수가 감소하고 처짐이 증가하게 된다.

포화된 시편은 다음과 같은 방법을 이용하여 제작하였다. 먼저 다짐을 실시한 후 2일 정도 지난 시편을 이용하여 삼축 셀에서 포화시킨다. 수압은 시편의 하부에서부터 적용하고 시편의 상부는 대기압으로 두면 시편을 통해서 물이 흐르도록 압력분포가 형성된다. 노상토의 포화가 되는 정도에 따라 back pressure를 다양하게 가해야 한다.

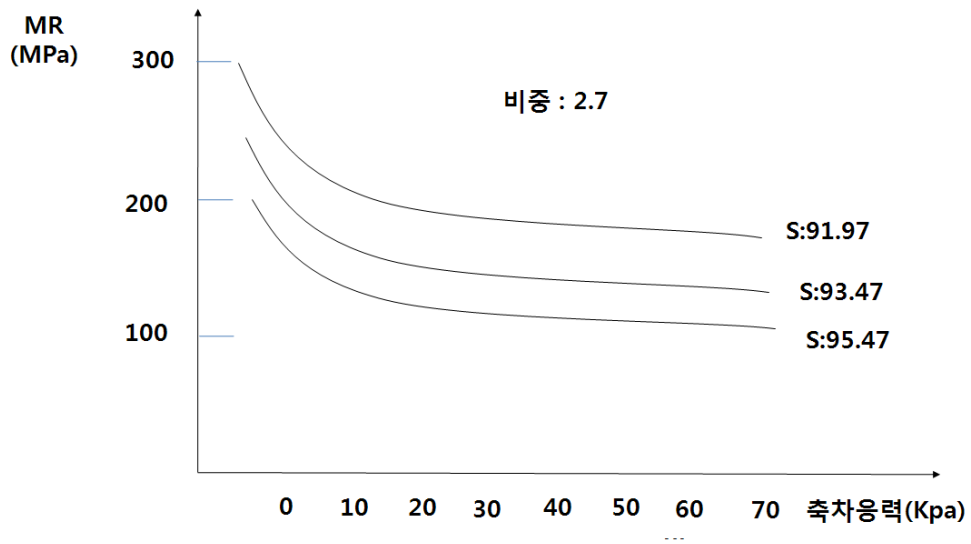
또한 <그림 2.2.52>에서 보듯이 포화도가 증가함에 따라 회복탄성계수 값이 감소함을 보여준다. 제일 위의 곡선이 최적함수비 29.4% 일 때 포화도 91.9%인 곡선이

다. 이 그래프는 실험에 사용된 11개의 시료 모두에서 비슷한 경향으로 나타난다.

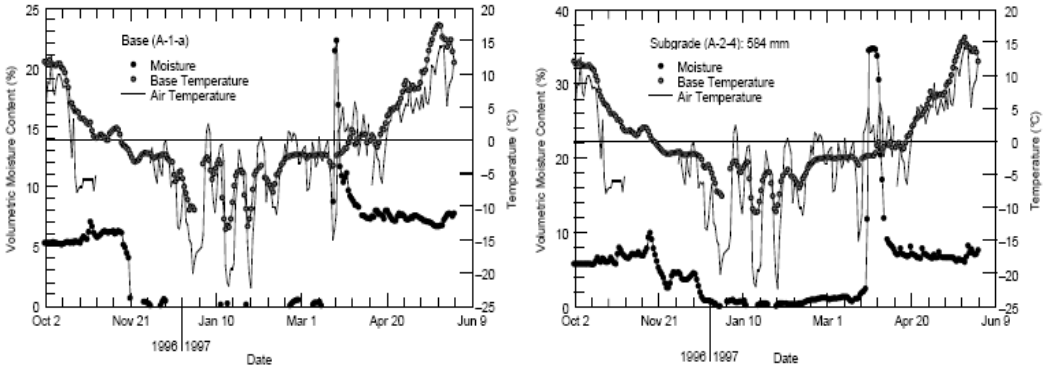
그러나 중요한 것은 축차응력의 크기이다. 축차 응력이 작을 경우, 즉 10 KPa 의 경우 함수비 변화에 따라 탄성계수는 급속하게 변하나 그 이상에서는 변화가 일정함을 알 수 있다. 축차응력이 포장 두께의 함수임을 감안할 때 두께가 일정한 경우는 문제가 없을 것으로 판단된다.

미국 몬타나주에서는 1995년부터 계절의 변화에 따라 도로의 강성이 감소하는 현상에 대해 연구하기 시작하였다.(Vincent Janoo, 2000) 지역을 대표하는 10개의 시험 섹션에서 온도와 함수비를 측정하였다. 함수비를 측정하기 위해서 VITEL Hydra soil probe를 사용하였고 계절적 함수비의 변화에 따른 포장의 처짐을 관측하기 위해서 MDT Road Rater를 이용하였다. 역해석을 위한 프로그램은 WESDEF를 이용하였다. 이러한 연구를 바탕으로 MDT(Montana Department of Transportation)에서는 <그림 2.2.53>와 같이 함수비가 갑자기 증가하는 융해기간에 교통하중과 양을 제한해야 한다고 제안을 하였다.

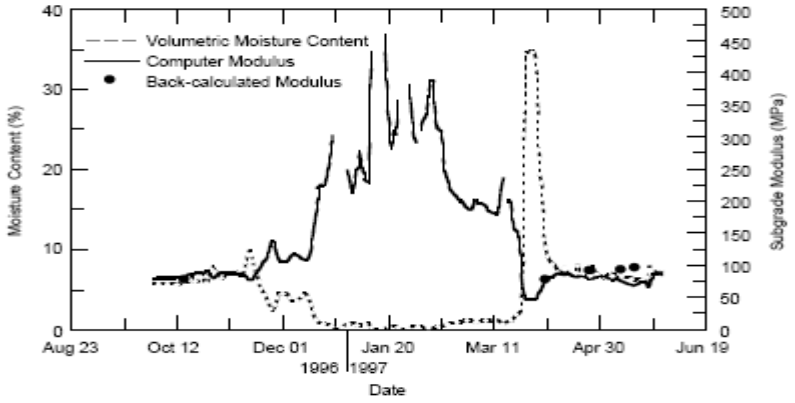
<그림 2.2.54>은 Dickey Lake의 노상토 함수비 변화를 1년간 관찰하고 융해기의 탄성계수를 MDT Road Rater를 이용하여 데이터를 측정하여 역해석한 결과이다. 컴퓨터를 이용한 탄성계수의 계산값이 실측값과 거의 비슷함을 알 수 있다. 또한 함수비가 증가함에 따라 탄성계수값이 감소한다는 것을 알 수 있다.



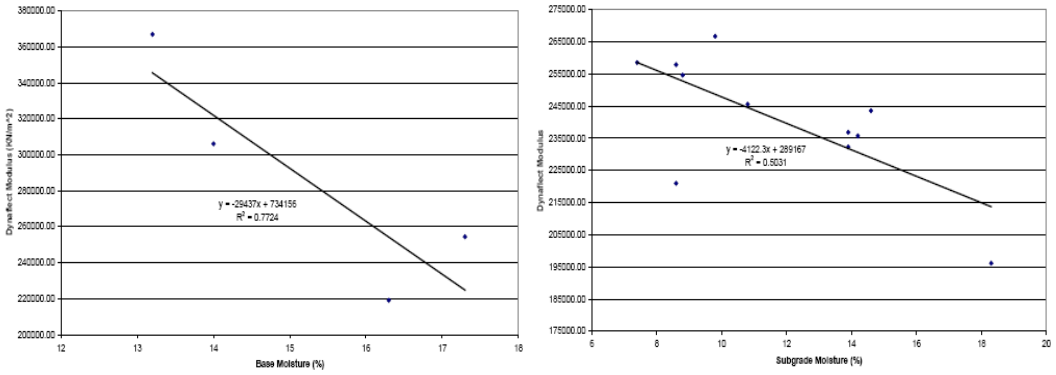
<그림 2.2.52> 포화도에 따른 회복탄성계수 변화



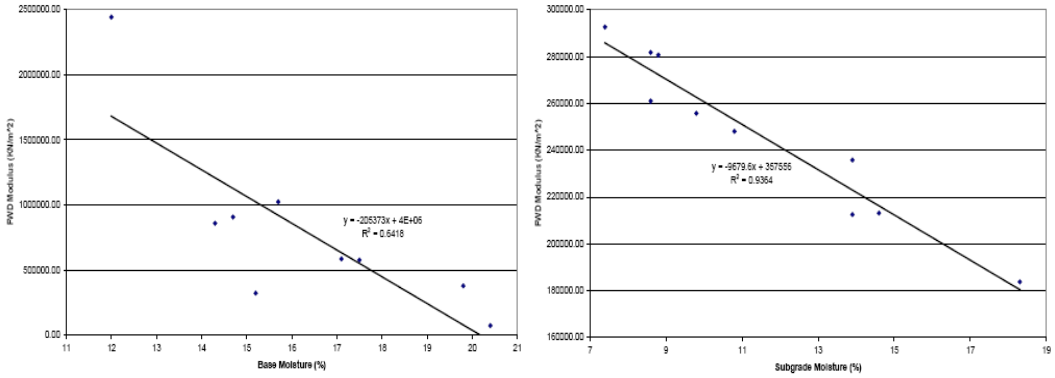
<그림 2.2.53> 융해기에 노상과 기층의 기온,함수비 변화추이



<그림 2.2.54> Dickey Lake의 함수비 변화에 따른 노상의 탄성계수의 역해석값과 계산값



<그림 2.2.55> 함수비 변화에 따른 기층과 노상의 Dynaflect계수의 변화



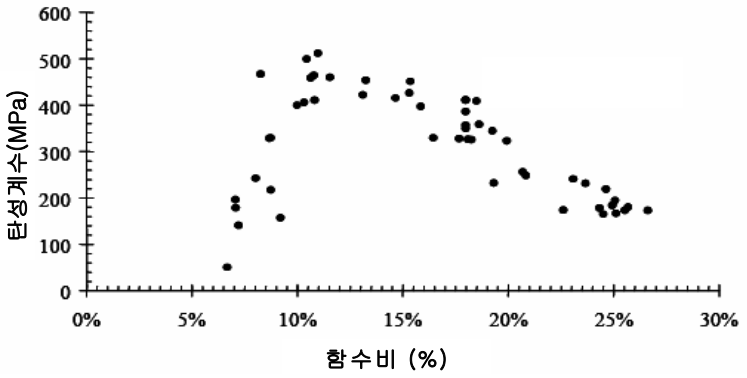
<그림 2.2.56> 함수비 변화에 따른 기층과 노상의 FWD계수의 변화

미국의 플로리다에서는 총 5개의 도로를 대상으로 지하수층의 근접이 기층과 노상의 강도 감소에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다.(Khaled Ksaibati, 2000) Troxler nuclear depth 게이지를 이용하여 다양한 포장층의 함수비와 밀도를 측정하였다. 지하수층의 깊이를 알기 위해서 Dynaflect와 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 측정하였으며 EVERCALE를 통해 역해석을 하였다.

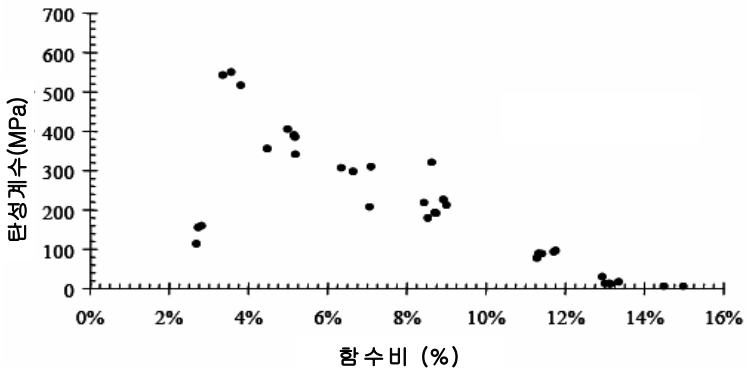
<그림 2.2.54>~<그림 2.2.56>에서 알 수 있듯이 함수비가 높아질수록 Dynaflect 계수와 FWD계수가 감소됨을 알 수 있다. 함수비가 1%증가되면 Dynaflect계수는 8.54% FWD계수는 29.41%가 감소된다.

Yuan(2003)은 함수량의 변화에 따른 기층과 노상의 탄성계수 변화를 지진파를 이용한 비파괴 실험을 통해 측정하였다. 실험은 잔골재와 굵은 골재를 대상으로 했는데 각각의 최적함수비는 18%, 8%였다. <그림 2.2.57>에서 보듯이 잔골재는 함수비가 13%일 때, 굵은 골재는 3%일 때 탄성계수 값이 최대로 나왔다. 두 재료 모두 탄성계수 값은 최대값이 나온 이후 함수비가 증가할수록 떨어지는 것을 알 수 있다.

또한 시료를 건조시키거나 물을 침투시키면서 함수비를 변화시켜가며 탄성계수와 유전율의 변화를 측정하였다. <그림 2.2.58>를 보면 유전율과 함수비가 비슷한 경향으로 변하는 것을 알 수 있다. 이 그래프에서도 함수비가 증가함에 따라 탄성계수는 감소함을 알 수 있다. 하지만 <그림 2.2.59>에서 알 수 있듯이 건조측과 습윤측의 탄성계수의 변화는 다름을 알 수 있다. 단일입도 굵은 골재를 제외한 모든 골재에서 건조측과 습윤측의 탄성계수의 변화 경향은 대부분 다르다고 한다.

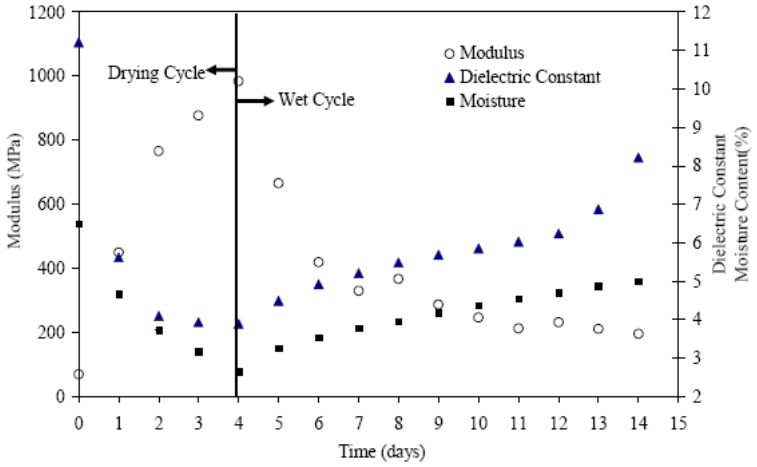


(a) 잔골재

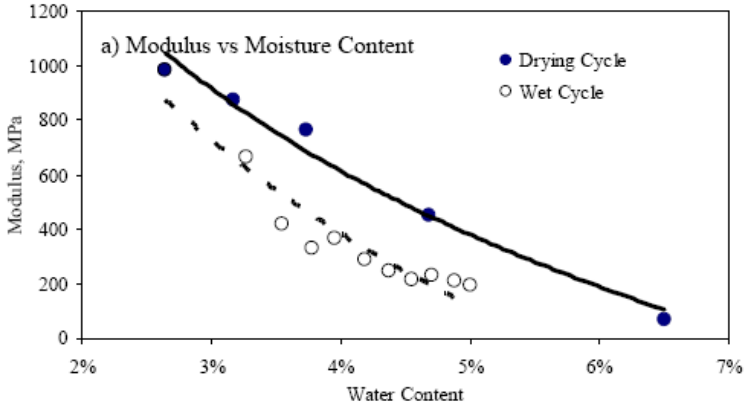


(b) 굵은골재

<그림 2.2.57> 지진파를 이용한 함수비에 따른 탄성계수의 변화 측정

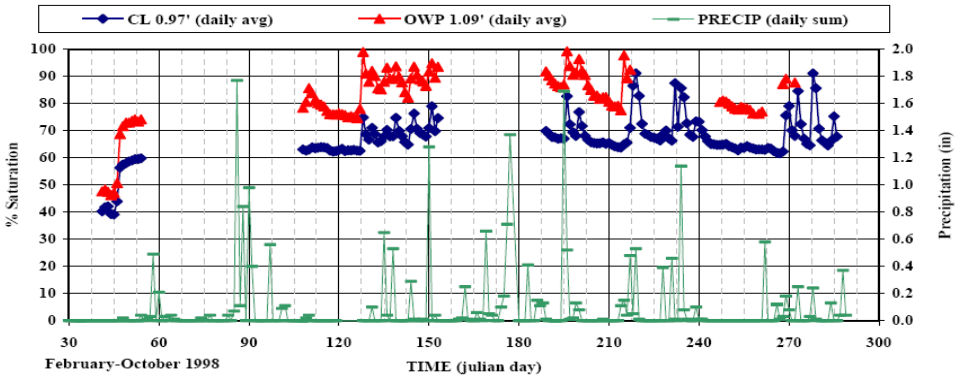


<그림 2.2.58> 함수비의 변화에 따른 유전율과 탄성계수의 변화

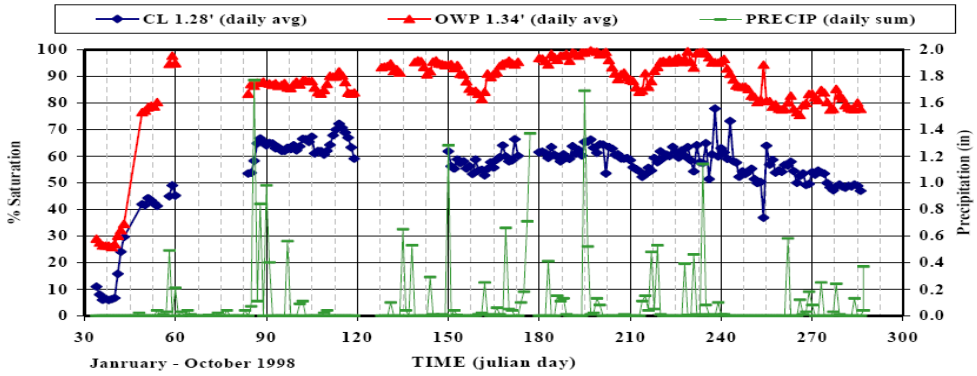


<그림 2.2.59> 건조측과 습윤측의 탄성계수의 변화

Mn/DOT에서 Roberson(2002)은 포장은 재료의 함수비나 밀도 등에 관한 특성에 따라 파괴된다고 하였다. 그렇기 때문에 기층이나 보조기층의 파손의 원인이 되는 재료의 함수비 특성을 잘 알아야 한다고 하였다. Mn/ROAD 연구에서 포장골재 기층. 보조기층 노상에서 함수비 상태가 계절변화 뿐만 아니라 단순한 강수에 따라서도 변화한다고 한다. 이러한 변화를 포장 aggregate base, granular subbase and subgrade에서 측정했다. 다음 <그림 2.2.60>에서 보면 5″의 배수성 골재 기층 위에 9” JPC로 구성된 Mn/ROAD 시험구간 12 골재기층에서 시간에 따른 강수량과 포화도를 나타낸 것으로 도로중심(CL)보다는 휠패스 바깥부분(OWP)이 더 계절적으로나 비가 온 후에나 더 높은 함수비 상태에 머무르고 있음을 보여준다.



<그림 2.2.60> Mn/ROAD 시험구간 12 골재기층에서 시간에 따른 강수량과 포화도



<그림 2.2.61> Mn/ROAD 시험구간 10 골재기층에서 시간에 따른 강수량과 포화도

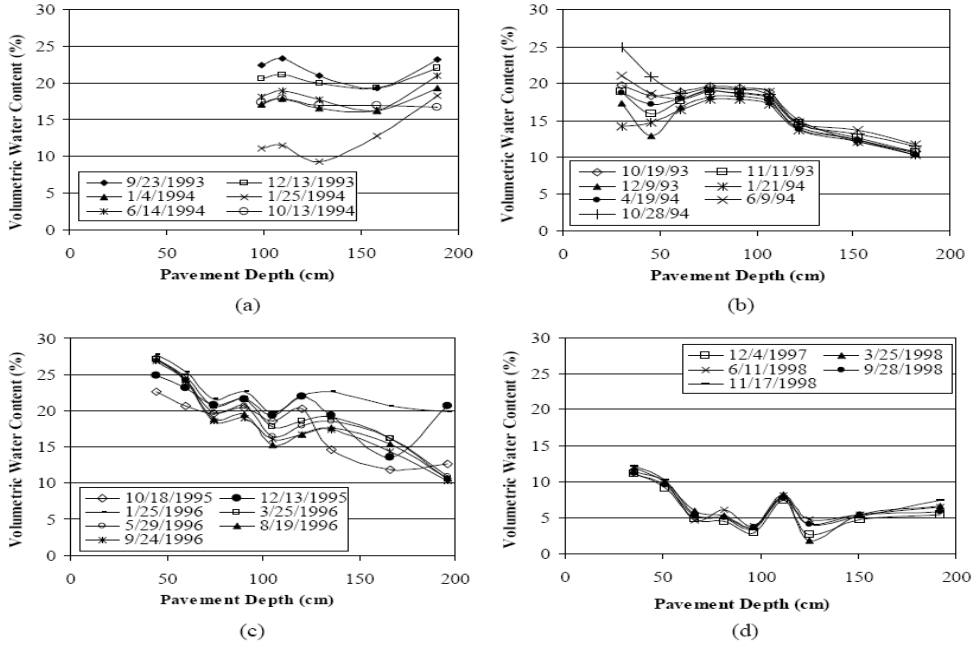
<그림 2.2.61>은 4inch 투수아스팔트 안정처리기층(PASB)과 3inch Class 4 Special 층과 분리된 보조기층 위에 9inch JPC로 구성된 배수성 콘크리트포장 구간에서 수집한 데이터를 보여주며 시험구간 12와 비슷하게 휠패스 바깥부분(OWP)보다는 도로중심(CL)이 더 계절적으로나 비가 온 후에나 더 건조한 상태에 머무르고 있음을 보여준다. <그림 2.2.60>에서 비가 온 후 기층에서 갑작스런 변화는 <그림 2.2.61>의 시험구간 10에서는 보이지 않는다. 이것은 길어깨 조인트부분으로 스며든 물이 안정처리기층 아래로는 들어갈 수 없기 때문에 배수상태를 의미한다. 길어깨로 물이 스며들기 때문에 휠패스 바깥쪽 부분이 도로 중심보다 높은 포화도를 유지한다.

함수 변화 특성을 통해 투수, 강도, 계수 변화와 같은 특성을 결정하기 위하여 다른 포장 재료와 흙의 종류에 대해 함수량 특성 곡선(Soil Water Charateristic Curve)을 측정하고 판단하는 게 필요하다고 하였다. 그리고 재료 및 도로 연구 기관(The Office of Materials and Road Research)은 현재 배수설계를 평가하고 향상시키기 위하여 수분의 이동 시뮬레이션을 위해 유한요소해석을 사용하고 있으며 경험적 기계적 구조 설계를 위해 강성과 강도 특성의 계절적 변화를 예견하기 위하여 재료의 함수량을 사용하고 있다고 하였다.

2006년 Abraham은 노상의 수분이 종단면의 평탄성에 미치는 영향을 관찰하였다. 이 연구는 LTPP 프로그램으로 계절적 변동 요인(Seasonal Monitoring Program (SMP))관점에서 43 개의 아스팔트 포장에 대해 조사하였으며 노상의 수분이 포장 구조적인 면에 미치는 영향보다는 평탄성에 미치는 영향을 주 관점으로 연구하였다. 그리고 노상이 동결되는 곳과 동결되지 않는 곳에서 관찰하였다. 그 결과 통계

적인 방법으로 분석했을 때 동결되지 않는 곳에서 수분의 변화와 함수량이 증가할수록 평탄성 변화도 증가한다고 하였으며 동결되지 않는 곳에서는 노상의 두께가 두꺼워질수록 평탄성이 나빠지는 것이 지연된다 하였다. 동결되는 곳에서 수분의 변화는 평탄성 저하를 가속화 시킨다고 하였다. 수분 변화와 함수량에 더불어 0.002mm 흙크기의 통과 백분율과 노상 상부에서 깊이, 동결점은 동결되지 않는 곳에서 평탄성 변화를 가속시키는 중대한 요인이라고 하였다.

<그림 2.2.62>는 4가지 지역에서 기간 별 포장의 깊이에 따른 함수비를 나타내고 있다. (a)는 온타리온의 습하고 동결되는 단면, (b)는 야오밍의 건조하고 동결되는 단면 (c)는 조지아의 습하고 동결되지 않는 단면, (d)는 애리조나의 건조하고 동결되지 않는 단면이다. (a)와 (d)를 비교하면 건조하고 얼지 않는 단면의 함수비는 계절에 상관없이 깊이에 따라 일정한 것을 알 수 있었다. 즉, 기후적인 차이로 인해 하부층의 함수비가 변화하는 것이다. 상대적으로 (b)에서는 상부에서만 함수비가 변화한 반면 깊이 방향으로 내려갈수록 변화폭이 작았다. (c) 의 경우에는 습한 기후로 인해 포장 깊이별로 계절에 따라 그 변화폭이 상대적으로 (b)에 비해 큰 것을 알 수 있다.

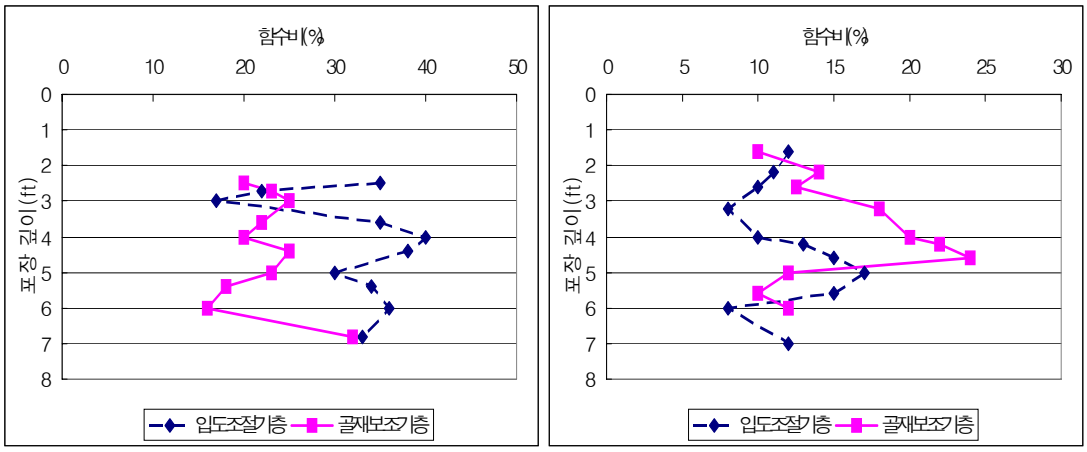


(a)는 온타리온의 습하고 어는 단면 (b)는 야오밍의 건조하고 어는 단면
(c)는 조지아의 습하고 얼지 않는 단면 (d)는 애리조나의 건조하고 얼지 않는 단면
<그림 2.2.62> 기간 별 포장의 깊이에 따른 함수비

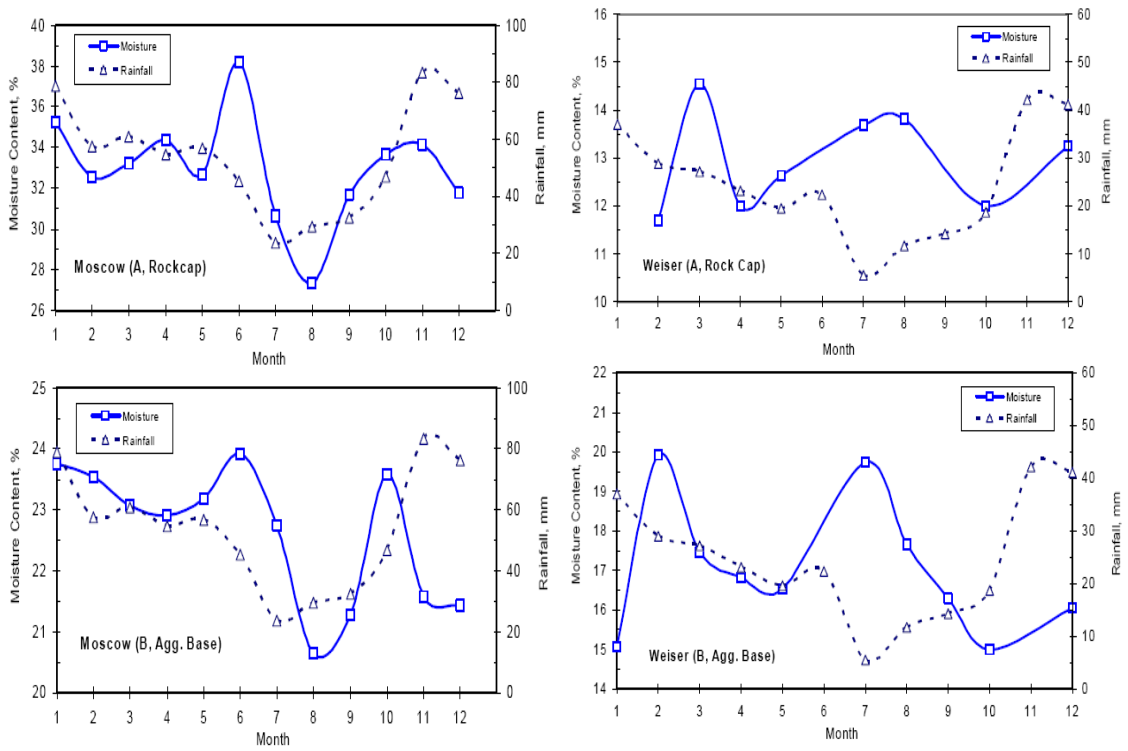
Hassan M. Salem(2006)은 포장 공용성과 노상 수분 상태에 대해 입도조절기층(이하 Rockcap-입도조절을 위해 사용되는 개립도의 부순 골재기층)의 영향을 평가하였다. <표 2.2.36>를 보면 입도조절기층은 공칭최대치수 2.5인치인 골재이고 주로 아이다호 주의 아스팔트 포장에 사용하였다. 아이다호 주의 북쪽지역과 남쪽지역을 선정하였고 각각의 지역마다 비슷한 포장 단면에 TDR장치를 설치하였다. 두 곳 사이에 다른 점은 밀입도 최대 골재기층과 입도조절기층을 사용한 것이다. <그림 2.2.63>에서 보듯이 4년 동안 데이터를 수집한 결과 수로 배수 시스템(Weiser지역)의 입도조절기층은 노상함수비 감소에 도움을 주지만 연속적이지 않은 모서리 배수시스템(Moscow지역)의 입도조절기층의 단면은 노상함수비가 하였다. 입도조절기층이 골재기층보다 높은 배수특성을 지녔기 때문에 배수시스템이 있을 경우 노상으로 수분이 들어가지 않고 배수되지만 배수시스템이 없을 경우 노상층으로 수분이 들어가기 때문이다. 공용성 분석은 입도조절기층이 있는 곳이 항상 높은 공용성을 보여 주고 있었다. 추정된 러팅 수명도 5배 정도 뛰어나다고 하였다. <그림 2.2.64 >은 두 지역의 시간에 따른 강수량·과 노상함수비 변화를 보여주고 있다.

<표 2.2.36> Rockcap의 골재분포범위

Sieve size	% Passing
2.5″(63 mm)	100
1.5″(37.5mm)	65-80
¾″(19mm)	15-30
½″(12.5mm)	5-15
no.4(4.75mm)	0-5



<그림 2.2.63> Moscow와 Weiser에서 시간에 따른 깊이별 함수율



<그림 2.2.64> 두 지역의 시간에 따른 강수량과 노상함수비 변화

7. 요약

국외에서는 투·배수성 포장, CTB, 페이버 및 저소음 포장에 대한 연구가 오랜 기간 동안 활발하게 진행되어 왔다. 국외의 다양한 연구문헌을 조사한 결과 각 포장 형식별

시공 및 공용성 평가가 진행되고 있음을 알 수 있었다.

■ 일본은 80년대 후반 배수성 포장의 목표 공극률을 20%로 규정함에 따라 기능성 포장이 널리 보급되었다. 또한 유지관리의 중요성을 인식하여 공극 청소장비에 대한 연구 개발이 지속적으로 실시되고 있다. 미국의 배수성 포장은 1950년대부터 우천시 아스팔트 포장의 미끄럼저항성 향상에 탁월한 효과가 있는 OGFC를 표층재료로 사용하였다. 그러나 일반밀입도 아스팔트와 달리 OGFC는 라벨링, Draindown 등 공용성에 심각한 문제가 발생하였다. 현재는 다양한 연구를 통하여 적절한 골재 결합력을 얻을 수 있는 입도 분포 연구와 폴리머 아스팔트 바인더, 섬유질 첨가제 등을 이용하여, 기존 OGFC의 단점을 보완하고 기능을 더욱 향상시켰다.

■ 강도와 내구성을 유지하면서 반사균열을 저감할 수 있는 CTB 재료 개발에 대한 연구가 전세계적으로 다양하게 진행 중에 있다. 미국의 경우 석회안정화 처리를 적용하여 하중에 대해 높은 저항성을 나타내는 재료를 개발하였고 남아공에서는 안정처리 적용 시 아스팔트 기층을 사용하지 않고 CTB만을 사용하고 있다. 중국의 경우 대부분의 도로에서 CTB 기층 위에 아스팔트 포장을 시공하고 있다.

■ 벨기에는 습식-습식 공법으로 투수콘크리트를 국도에 적용하였으며, 기능성 포장이 실용화 단계에 있다. 미국에서는 충분한 양의 우수를 배수시키기 위해 개립도의 투수 기층을 사용하였으며, 공용성 평가결과 밀입도 구간보다 양호한 결과를 보였다. 일본의 투수콘크리트는 저소음과 배수성 등의 기능성을 유지하고 있는 것으로 조사되었고, 자연과의 조화를 목적으로 녹화 콘크리트를 적용하는 등 친환경적인 포장으로 적용되고 있다.

■ 페이버의 국외 기술을 살펴본 결과, 대부분 페이버를 시공하는 국가에서 줄눈부 채움모래, 받침층 모래 등에 대해 시방서에서 그 기준을 제시하고 있으며, 페이버 형상설계, 페이버 포장 시스템의 거동 분석, 페어버의 유지보수 방법 등 다양한 분야에서 연구가 진행되고 있었다. 또한 페이버 포장이 공항, 항만, 산

업단지, 공원 등 여러 곳에 시공되어 좋은 공용성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

■ 국외의 저소음 포장 연구는 미국, 유럽, 일본 등지에서 활발하게 이루어지고 있다. 미국은 각 주별로 개립도 고무아스팔트 포장 등에 대한 연구를 통해 소음 저감효과를 확인하였으며, 벨기에와 스웨덴 등은 저소음 포장과 일반 포장을 다양한 소음 분석 기법을 통하여 비교·분석함으로써 재료개발, 시공 및 장비, 유지보수 기법 등을 개발하고 있다. 또한 일본은 차종별, 속도별, 시간별 소음저감 효과의 변화추이를 분석하여 그에 따른 다양한 배수성 포장재료를 개발, 실제 포장에 적용하고 있다.

■ 국외 문헌에서는 미국의 여러 주에서 연구되고 있는 계절의 변화에 따른 기층별 함수비 변화와 그 변화로 인한 기층 및 노상의 탄성계수 변화에 대해 살펴보았다. 기층 종류와 배수시설의 유무에 따라 다른 함수비 변화를 보였으며 흙의 종류에 따라 회복탄성계수의 감소 정도가 다르게 나타났다. 대부분의 실내실험 결과에서 보듯이 함수비가 증가함에 따라 노상의 탄성계수 값이 감소함을 알 수 있었다.

■ 일본에서는 기존의 인도나 주차장에서만 사용하던 투·배수성 포장을 차도에 적용하는 방법을 연구하는 등 투·배수성 포장의 활용을 위하여 노력하고 있다. 실내실험을 통해 단면을 결정하고, 시험시공을 통해 시공성을 검증하였으며 FWD를 이용한 지지력 측정, 소음측정, 투수측정, 환경평가 등을 하며 공용성을 평가하여 투·배수성 포장의 기술적 우수성을 발견할 수 있었다.

■ 함수비의 증가에 따라 설계입력 변수인 회복 탄성 계수의 감소는 불가피하였으나 적절한 배수시스템 단면의 설계를 통해 극복할 수 있음을 알 수 있었다.

제 3 장 연구수행 내용 및 결과

1절. 연구개발 추진전략 및 방법

4S 포장 시스템 개발을 위해서 본 연구진은 통합, 검증, 진화, 개방이라는 비젼을 수립하고 체계적으로 연구해왔다.

첫째, 통합은 연구의 목표를 달성하기 위해 기존연구 결과를 검토하고 다양한 비판과 의견을 수렴 하는 과정이다. 기존 포장 시스템의 장·단점을 고려하여 4S 포장에 적합한 통합 시스템을 도출 하였다. 토질 및 도로관련 국내외 연구진들간의 긴밀한 협조를 통해 체계적이고 원만한 연구를 진행하였다.

둘째, 검증의 작업은 새로운 4S 포장에 대한 정확한 평가를 위해 기존의 재료 및 포장 시스템과 비교하였을 때 효과가 있는지 정량적으로 제시하기 위함이다. 새로 개발하는 4S 포장 재료, 시스템, 장비 등에 대하여 공용성, 효율성, 기능성, 환경 영향성 등에 대하여 공학적 평가를 진행하였다.

셋째, 진화란 키워드는 기존의 것과 본 연구를 통해 얻어진 결과물이 차별성을 갖도록 하기 위함이다. 연구 프로포잘에 언급한 내용 이외에 포장시스템의 원활한 적용을 위해 맹암거등의 배수 시스템 개발, 택코팅 재료의 평가 및 채택, CTB 양생의 방법 및 시기개발 등의 연구가 추가 되어있다. 새로운 재료, 포장 시스템, 평가 방법, 장비 등에 지속적인 개선을 통하여 빠른 정착을 목표로 하였다.

넷째, 개방의 범주는 본 연구 결과를 극대화시키고 이용자로 하여금 4S 포장에 대한 인식을 전환시키기 위함이다. 연구 결과물을 모든 이들에게는 개방하여 연구자, 관리자, 실무자들 등의 관련 종사자들에게 홍보 및 교육의 기회를 제공하여 의무 4S 포장을 체험할 수 있는 기회를 마련하도록 한다.



<그림 3.1.1> 4S 포장시스템 연구추진 전략

위와 같은 체계적인 추진 전략 하에 다음과 같은 연차별 연구 방법을 수행하여 4S 포장 시스템을 완성하도록 한다.

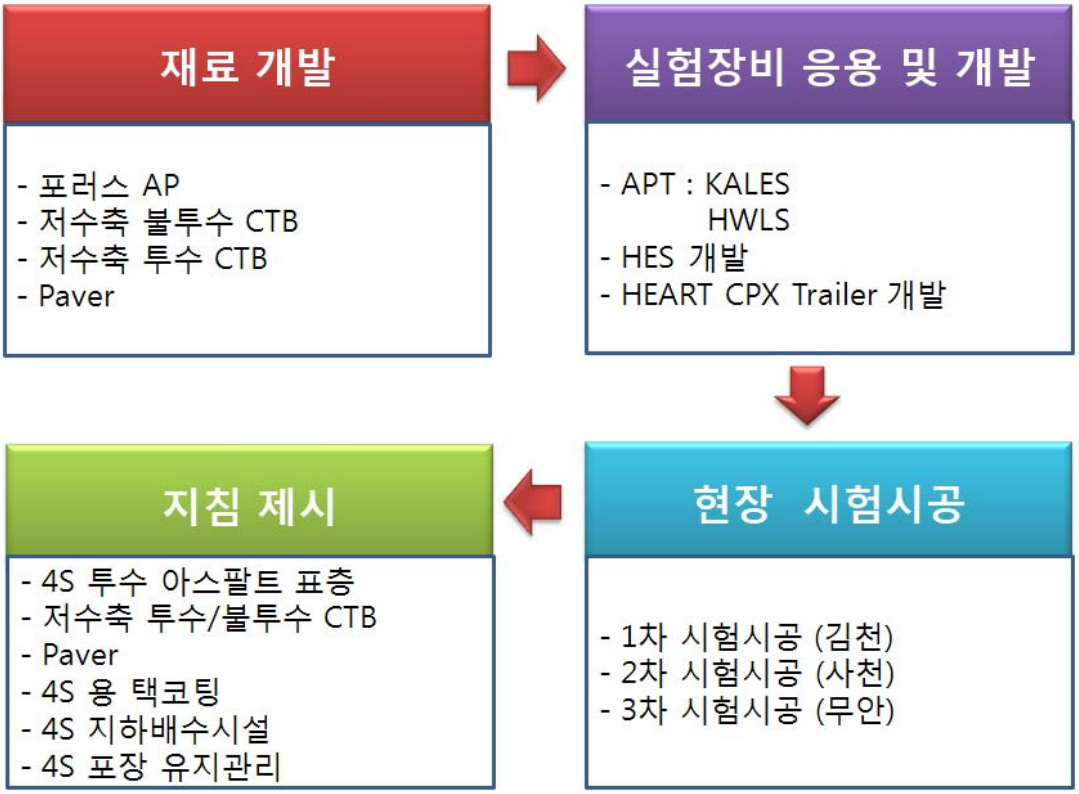
<그림 3.1.2>는 본 연구의 추진단계를 보여주는 그림이다. 4S 포장에 적합한 재료를 개발하고 이를 평가할 수 있는 장비를 응용 및 개발한다. 그리고 현장 시험시공을 통해 4S 포장 시스템을 평가하고 이에 근거하여 시공 지침서를 개발한다. 이러한 일련의 과정을 통해 4S 포장 시스템을 완성할 수 있을 것이다. 이에 따라 연차별로 다음과 같은 연구를 추진한다.

1차년도에는 기초적인 문헌조사를 통해 여러 가지 포장들에 대한 검토와 선정이 이루어졌고 "안전하고 조용하며 아름다운 포장"에 대한 이론적 정착을 완성하였다. 또한 기본 실내 실험을 통해 재료의 물성을 제시하고 재료 및 배합설계를 개발하

여 상사 모형 시험과 APT(HWLS, KALES) 실험을 실시하였다. 또한 ABAQUS 구조해석을 통해 구조적으로 안전한 포장시스템을 제시하여 시험시공 계획을 수립하였다.

2차년도에는 4S의 현장 시험 시공을 진행하였으며, 시공 후 초기 공용성을 평가하였다. APT 실험을 통해 규명된 실내 추정 수명 해석결과를 검증하기 위하여 현장 시험 시공을 실시하였다. 또한 새로이 개발한 장비 및 평가 방법을 통해서 현장 시험시공 단면의 단기 공용성을 평가하고 최적의 친환경 4S 포장 시스템을 제안하였다.

3차년도에는 “안전하고 조용하며 아름다운 포장”에 대한 추가적인 현장 시험 시공과 그 결과 및 실내 추가실험을 통해 본 연구과제의 결과물을 완성하게 된다. 결과물은 관련 연구자들과 함께 논문 및 국제 학회 등의 참석을 통해 홍보하였다.



<그림 3.1.2> 4S 포장 시스템 연구 추진 단계

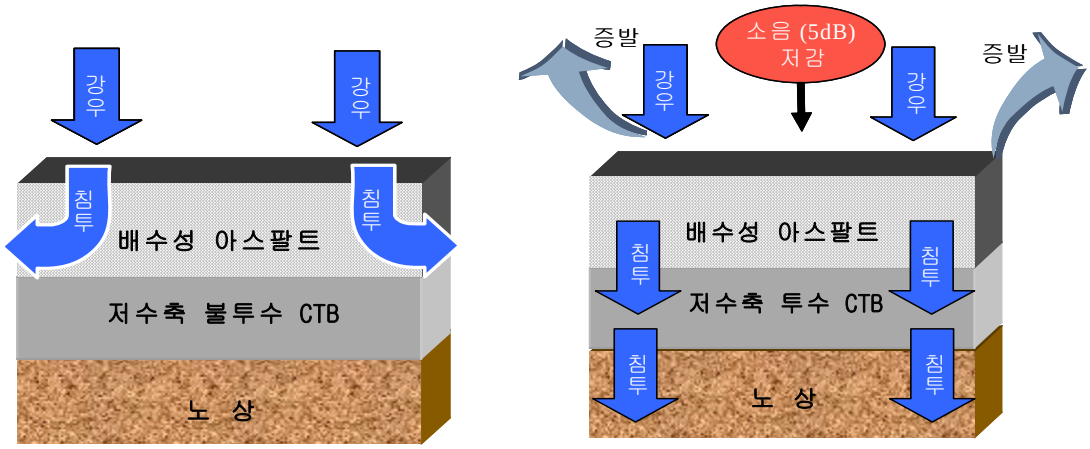
2절. 재료개발

본 절에는 안전하고 조용하며 아름다운 포장의 개념에 적합한 포장 재료를 개발하여 사용자 만족의 포장 시스템을 개발하기 위한 재료 개발과정을 설명하였다.

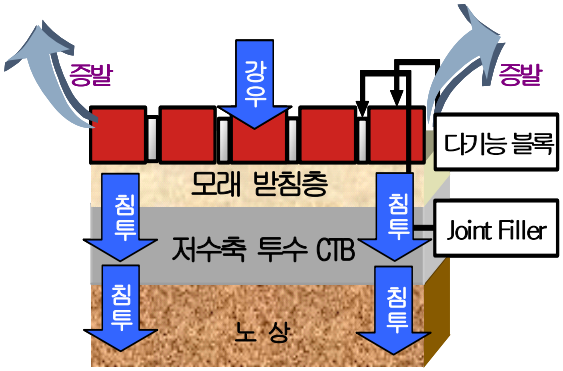
안전하고 조용한 포장에서는 <그림 3.2.1>의 (a)에 나타낸 것과 표층용으로 내구성을 지닌 투수 아스팔트 혼합물과, 기층용으로는 저수축 불투수 CTB, 저수축 투수 CTB를 개발해야 한다.

아름답고 안전한 포장에서는 <그림 3.2.1>의 (b)와 같이 저수축 투수 시멘트 안정처리 기층을 사용한다. 내구성이 강하고 심미성이 강조되며 저소음 및 대기오염 감소 효과를 통합한 다기능 페이버를 개발하여 저 교통량에 적용될 포장 시스템을 개발한다.

본 절에서는 연구의 최종 목표를 달성하기 위해 내구성이 높은 고강도, 저수축의 CTB와 아스팔트 혼합물, 그리고 도로용 블록 개발을 다루었다.



(a) 안전하고 조용한 포장(좌 ; 고 교통량, 우 ; 중 교통량에 적용)



(b) 아름답고 안전한 포장(저 교통량에 적용)

<그림 3.2.1> 교통량에 따른 포장 시스템

1. 저수축 CTB 재료개발

가. 실내 실험방법 소개

2장에서 살펴본 바와 같이 국내외 CTB의 시공 사례 및 적용 기술 조사와 국내외 관련 규격 및 실내 실험방법을 조사하여 다음과 같은 실내실험을 수행하였다.

(1) 압축강도 측정방법

15×30cm의 원주형 몰드에 콘크리트를 채우고 중량 5kg의 다짐봉으로 30cm 높이에서 3층 25회씩 총 75회 다진다. 24시간 후 탈형하여 20℃에서 6일동안 수중양생 시킨다. KS F 2405 시험방법에 의하여 압축강도를 측정하였다.

(2) 공극률 측정방법

에코 콘크리트 연구위원회의 투수 콘크리트의 공극률 시험 방법(안), 일본콘크리트공학협회에서 제시한 방법에 따라 공극률을 측정하였다.

(가) 전체 공극률

전체 공극률이란 콘크리트 내부의 독립공극과 연속공극을 합친 공극률을 의미한다. 전체 공극률은 1일 탈형 후 6일간 수침시킨 공시체의 수중 무게를 측정(W_1)한 다음 공시체의 물기를 빼고 절대건조 상태의 공시체 무게(W_2)를 측정하고 <식 3.2.1>를 이용하여 구한다.

$$\text{전체 공극률}(\%) = (1 - \frac{(W_2 - W_1)}{V} \times 100) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots <\text{식 } 3.2.1>$$

여기서, W_1 : 공시체의 수중 무게

W_2 : 절대건조 상태의 공시체 무게

V : 공시체의 부피

(나) 연속 공극률

연속 공극률이란 물이 통과할 수 있는 공극을 의미한다. 1일 탈형후 6일간 수침시킨 공시체의 수중 무게(W_1)를 측정한다. 공시체의 표면건조 포화상태의 공시체 무게(W_3)를 측정하여 <식 3.2.2>와 같이 구한다.

$$\text{연속 공극률}(\%) = (1 - \frac{(W_3 - W_1)}{V} \times 100) \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots <\text{식 } 3.2.2>$$

W_3에서 W_1을 뺀 무게는 콘크리트의 내부 공극을 포함하되 외부의 공극을 뺀 부피를 나타내므로 전체 체적 1에서 이 부분을 빼면 연속공극이 차지하는 부피로 생각할 수 있다.

(3) 투수계수 측정방법

투수성 콘크리트의 투수계수는 일반 콘크리트의 투수계수보다 10^5배 이상 크기 때문에 일반콘크리트용 투수시험기로 측정이 불가능하다. 따라서 투수성 콘크리트의 투수계수 시험은 KS F 2322에 규정된 흙의 정수위 투수시험 방법에 준하여 <그림 3.2.2>와 같은 시험장치를 제작하여 공시체의 재령 7일 후에 <그림 3.2.3>과

같이 측정하였다. 투수계수는 Darcy 법칙(Darcy's Law)에 의하여 <식 3.2.3>과 같이 계산하였다.



<그림 3.2.2> 실내 투수 시험기



<그림 3.2.3> 투수계수 측정

$$k = \frac{l}{h} \times \frac{Q}{A(t_1 - t_2)} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots <식\ 3.2.3>$$

여기서, k : 투수계수(cm/sec)

l : 공시체의 길이(cm)

h : 수두차(cm)

Q : 유출수량(cm^3)

A : 공시체의 단면적(cm^2)

$t_2 - t_1$: 측정시간(sec)



<그림 3.2.4> 탄성계수 측정



<그림 3.2.5> 비파괴탄성계수 측정

(4) 탄성계수 및 비파괴 탄성계수 측정방법

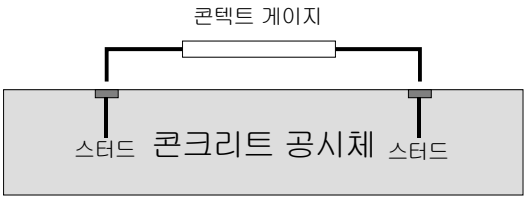
탄성계수 실험은 KS F 2438-1992 “콘크리트 원주 공시체의 정탄성 계수 및 포와송비 시험 방법”에 준하여 컴프레서미터 방법을 사용하였다. 시편은 압축강도와 마찬가지로 3개의 15×30cm의 실린더 시편을 이용하여 압축강도의 40～50%까지 재하하여 수행하였다. 다이얼 게이지를 통해 측정한 변형은 탄성계수를 추정하는데 사용하였다. 또한 비파괴탄성 실험을 통하여 강도 및 탄성계수 값을 추정하는데 사용하였다. 사용된 비파괴 시험은 “Impact-Echo” 방법으로 시험체에 가해진 물리적 충격으로 인하여 생긴 표면파가 매질이 다른 물체를 만나면 반사되어 돌아오는 성질을 이용하여 파의 속도 및 탄성 계수를 구하는 방법이다. <그림 3.2.4>～<그림 3.2.5>는 시멘트 양에 따른 공시체 형상과 탄성계수 측정 및 비파괴탄성계수 측정 모습을 보여주고 있다.

(5) 건조수축 측정방법

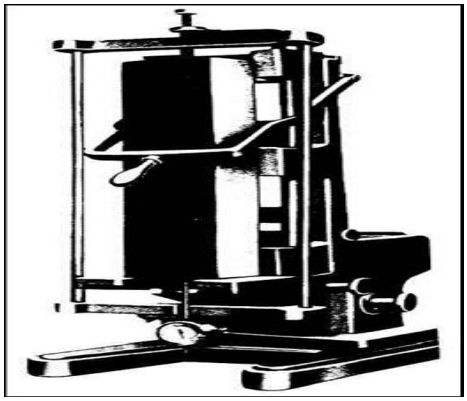
한국산업규격 KS F 2424에 제시된 시험방법으로서 모르타르 공시체 또는 콘크리트 공시체의 길이 변화를 콘택트 게이지 방법 또는 다이얼 게이지 방법에 대하여 규정하고 있다. 최근에는 변형률 게이지를 혼합물에 넣어 측정하는 경우도 있는데, 저수축 불투수 CTB 실험에 적용하였다.

(가) 콘택트 게이지 방법

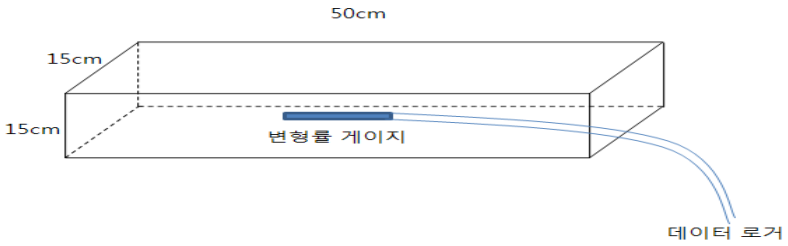
콘택트 게이지 방법은 표준자를 수평한 대 위에 놓고, 표준자의 게이지 플러그에 콘택트 게이지의 측점을 누른 후, 콘택트 게이지의 눈금을 읽는다. 같은 방법으로 콘택트 게이지의 좌우를 반대로 해서 같은 조작을 하고 다시 눈금을 읽는다. 공시체를 게이지 플러그가 붙어 있는 면을 위로하여 수평한 면 위에 놓고, 공시체의 게이지 플러그에 콘택트 게이지를 눌러 게이지의 눈금 평균치를 구해 건조수축률을 구한다. <그림 3.2.6>은 콘택트 게이지 방법을 통해 건조수축을 측정하는 것을 나타내고 있다.



<그림 3.2.6> 콘택트 게이지 측정방법



<그림 3.2.7> 다이얼 게이지 측정



<그림 3.2.8> 변형률 게이지 방법의 개념도

(나) 다이얼 게이지 방법

먼저 길이 측정용 틀은 연직된 상태로 정치한다. 표준자 한쪽 플러그에 길이 측정용 틀의 접점을 접촉시켜, 다이얼 게이지의 스핀들 끝이 표준자의 축에 일치해서 움직이도록 한다. 스핀들을 서서히 표준자의 다른 한쪽에 접촉시켜, 다이얼 게이지 눈금을 읽는다. 이와 같은 조작을 통하여 건조수축 변형률을 구한다. 다이얼 게이지의 측정은 다음 <그림 3.2.7>과 같다.

(다) 변형률 게이지 방법

기존 KS 방법에 의한 건조수축 실험은 오차가 크다고 판단하여 보다 정확하고 정밀한 변형률 게이지를 사용하여 실험을 하였다. 건조수축 측정을 위하여 시험체의 크기는 15×15×55cm인 일반 휨몰드에 변형률 게이지를 매립하였다. 공시체를 24시간 후 탈형하여 항온항습실에서 습윤(20℃, 습도55%)양생과 동시에 데이터로거를 이용하여 일정 시간마다 건조수축을 측정하였다. <그림 3.2.8>은 건조수축 측정에 사용한 시편 및 개념도를 보여주고 있다.

(6) 동결융해 저항성 측정방법

포장용 투수콘크리트에 대한 동결융해 저항성을 측정하는 시험방법 및 기준은 아직까지 규정되어 있지 않다. 본 실험에서는 보통 콘크리트의 동결융해 저항성 평가에 적용되는 KS F 2456(급속동결융해법에 의한 콘크리트 저항 시험방법)규정에 따라 공시체를 14일간 양생한 후, <그림 3.2.9>와 같이 -18℃～+4℃의 온도조건 하에서 동결융해 저항성을 평가하였다. 본 연구에서는 투수 콘크리트가 도로 포장용으로 적용되어 물에 잠겼을 때 동결융해에 대한 저항성을 실제와 거의 비슷한 상황에서 살펴보기 위하여 수중동결 수중융해 방식을 채택하였다. 투수 콘크리트는 특성상 내구성 지수 측정을 위한 상대동탄성계수의 측정이 사실상 불가능하므로 20사이클마다 중량측정, 초음파 속도 및 표면상태를 육안관측 하였다.



<그림 3.2.9> 동결융해 저항성 실험



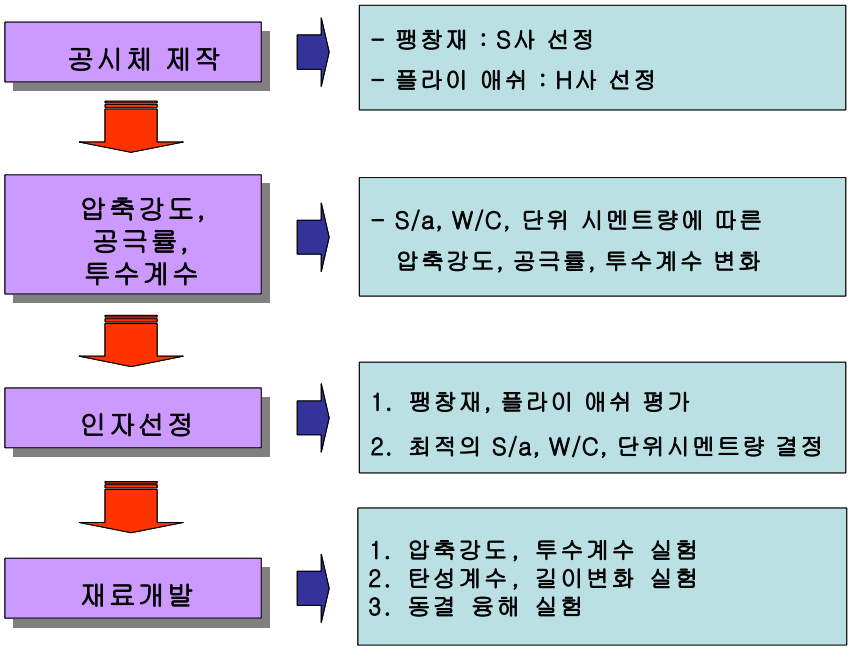

<그림 3.2.10> 중량측정 및 초음파 속도 측정

일반적으로 콘크리트의 동결융해 저항성 실험은 30사이클 마다 시행하는 것을 기준으로 한다. 그러나 본 실험에서는 투수 콘크리트의 동결융해 저항성이 상대적으로 낮은 관계로 외국의 문헌을 근거, 사이클 수를 낮춰 매 20사이클 마다 <그림 3.2.10>과 같이 중량측정 및 Ultra-Sonic을 이용하여 초음파 속도 측정을 실시하였다.

나. 저수축 불투수 CTB 재료개발

CTB를 아스팔트 포장에 적용 시 공용성에 문제가 되는 반사균열을 저감시키기 위한 재료를 개발하였다. 문헌고찰을 통하여 건조수축에 영향을 주는 주요 인자로는 W/C비 조절과 다양한 혼화재 사용임을 알 수 있었다. 혼화재로는 수축저감에 뛰어난 플라이 애쉬, 수축저감재 그리고 팽창재 등을 선택하여 실험을 수행하였다. 예비실험으로 국내에 판매되고 있는 수축저감재와 팽창재를 각각 두 개씩 선택하였고, 한전산업개발에서 생산하는 플라이 애쉬(Type F)를 0, 10, 20, 30% 변화시키며 강도와 길이변화를 측정하였다.

예비실험을 통하여 각 혼화재가 건조수축 저감에 미치는 효과를 살펴보고 이를 토대로 본 실험을 수행하였다. <그림 3.2.11>은 저수축 시멘트 처리 기층의 재료개발을 위한 실내실험 계획 과정을 보여주고 있다.



<그림 3.2.11> 불투수 CTB 실내실험

(1) 예비실험

(가) 실험계획

국내에 시판되고 있는 팽창재 및 수축저감재의 저감효과를 살펴보고, 환경친화적이며 건조수축 저감 효과가 있는 것으로 판명된 플라이 애쉬에 대한 효과를 살펴보기 위해 예비실험을 수행하였다. <표 3.2.1>은 실험에 사용된 각 혼화재에 대한 권장 사용량과 가격정보이다. 예비실험에서는 각 회사에서 제시하는 권장사용량을 첨가하여 길이변화를 조사하였다. 배합은 도로공사에서 적용하고 있는 린 콘크리트 배합을 선택하였다.

<표 3.2.1> 불투수 CTB에 고려된 혼화재

구 분	회사명	권장사용량 (cement 중량 %)	단위	가격(원)
팽창재	SS 사	10	kg	500원
	S 사	1	kg	2000원
수축저감재	E 사	10	kg	3600원
	S 사	10	kg	2500원
플라이 애쉬	보령 화력발전소	-	kg	24원
시멘트	포틀랜드 시멘트	-	kg	61원

<표 3.2.2> 불투수 CTB용 시멘트, 잔골재, 플라이 애쉬 비중

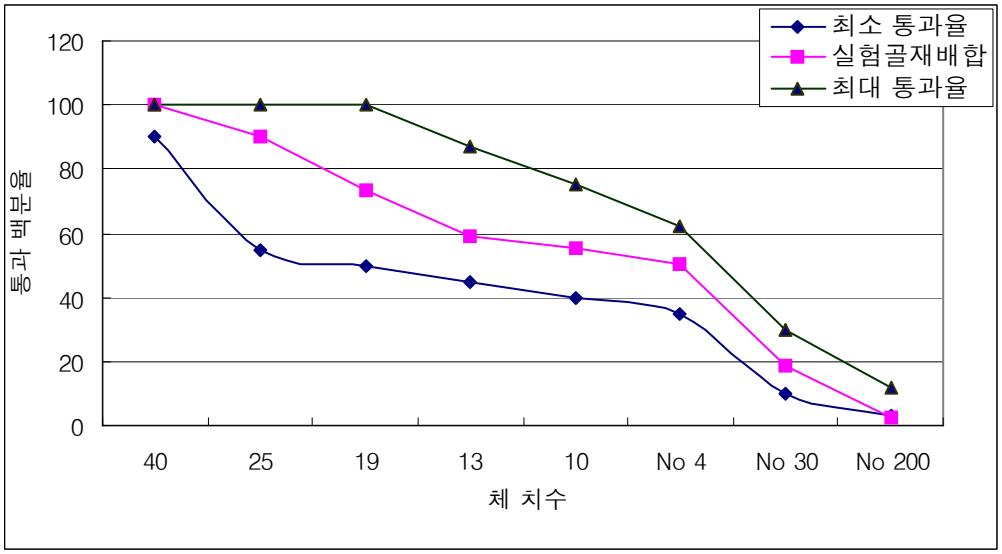
구 분	시멘트	잔골재	플라이 애쉬
비 중	3.15	2.76	2.1

<표 3.2.3> 불투수 CTB용 골재 물리적 특성

골재	골재치수(mm)	표건비중	흡수율(%)	마모율(%)
굵은골재	25	2.60	0.57	29
잔골재	5	2.76	0.83	-

(나) 실험재료

예비실험에서 사용된 시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 H사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 플라이 애쉬는 한전산업개발 발전소에서 생산된 것을 사용하였다. 굵은 골재와 잔골재는 경기도 양주군의 골재를 사용하였다. <표 3.2.2>와 <표 3.2.3>은 골재 및 혼화재에 대한 물리적 특성을 보여주고 있다. <그림 3.2.12>는 도로공사 린 콘크리트 최대 및 최소 입도 범위와 예비실험에 사용한 골재의 입도범위를 나타내고 있으며, 입도가 기준 범위 안에 있음을 알 수 있다.



<그림 3.2.12> 불투수 CTB 골재의 입도분포

<표 3.2.4> 불투수 CTB 실험용 배합설계

종별	최대 골재치수 (㎜)	단위수량 (kg)	시멘트 (kg)	잔 골재 (kg)	굵은 골재 (kg)	플라이 애쉬(kg)	혼화재 (kg)	비고
일반린	40	125	151	730	1397	0	-	-
플라이 애쉬 (E사)		125	136	730	1397	15	-	10%
		125	113	730	1397	38	-	20%
		125	105	730	1397	45	-	30%
팽창재(SS사)		125	136	730	1397	-	15	10%
팽창재(S사)		125	151	730	1397	-	1.5	1%
저감재(E사)		125	136	730	1397	-	15	10%
저감재(S사)		125	136	730	1397	-	15	10%

(다) 배합설계

예비실험은 플라이 애쉬, 팽창재, 수축저감재의 수축저감 효과를 독립적으로 살펴보는데 그 목적이 있다. 플라이 애쉬는 0%, 10%, 20%, 30%로 변화시켜 실험하였으며, 팽창재와 수축저감재는 각 제품의 권장량을 사용하였다.

(2) 예비실험결과 및 분석

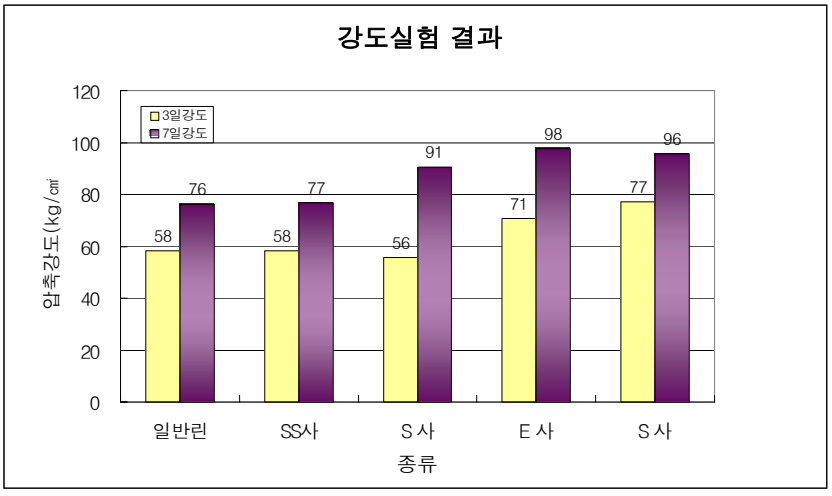
예비실험에서는 일반 린 콘크리트와 수축저감을 위해 혼화재가 첨가된 배합들에 대하여 압축강도와 건조수축 등을 살펴보았다.

① 압축강도 실험결과

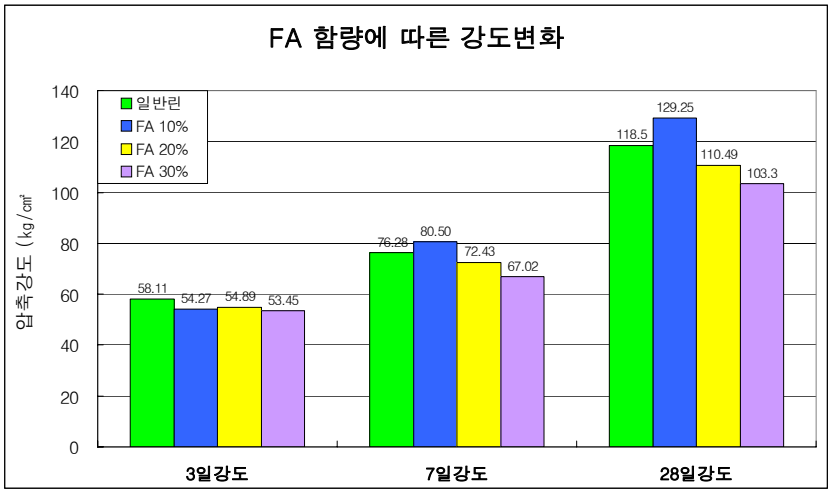
도로공사 시방서 기준에서 일반 린 콘크리트 목표강도는 50kg/cm^{2}으로 제시하고 있다. 예비실험에서는 KS F 2405를 이용하여, 3일과 7일 강도를 측정하였다. 특히 플라이 애쉬는 장기강도를 살펴보기 위하여 28일 강도까지 측정하였다.

<그림 3.2.13>은 팽창재와 수축저감재 첨가 시, 강도에 미치는 영향을 보여주고 있다. 재령 3일 압축강도는 팽창재의 경우, 일반린과 비슷하였지만 수축저감재는 20% 이상 증가하였다. 또한 재령 7일 후에는 팽창재 및 수축저감재 모두 목표강도를 만족하였을 뿐만 아니라 SS사를 제외하고는 다른 혼화재 첨가 시, 일반린에 비해 강도가 20% 이상 증가함을 알 수 있다.

<그림 3.2.14>는 플라이 애쉬를 10%, 20%, 30% 증가에 따른 3일, 7일, 28일 강도 측정 결과를 보여주고 있다. 재령 3일 강도에서 플라이 애쉬 변화에 따른 강도 변화가 없었다. 재령 7일에서는 플라이 애쉬 10% 첨가 시 강도가 9% 증가함을 알 수 있었으나, 20%, 30% 첨가 시에는 강도가 각각 5%, 12% 저감함을 알 수 있었다.



<그림 3.2.13> 불투수 CTB의 팽창재, 수축저감재 첨가 시 강도

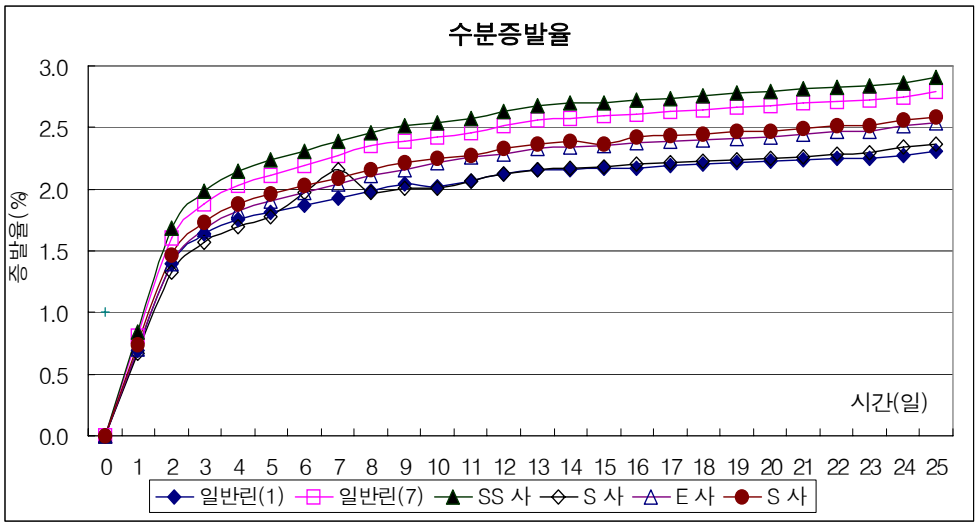


<그림 3.2.14> 불투수 CTB의 FA 연화에 따른 강도

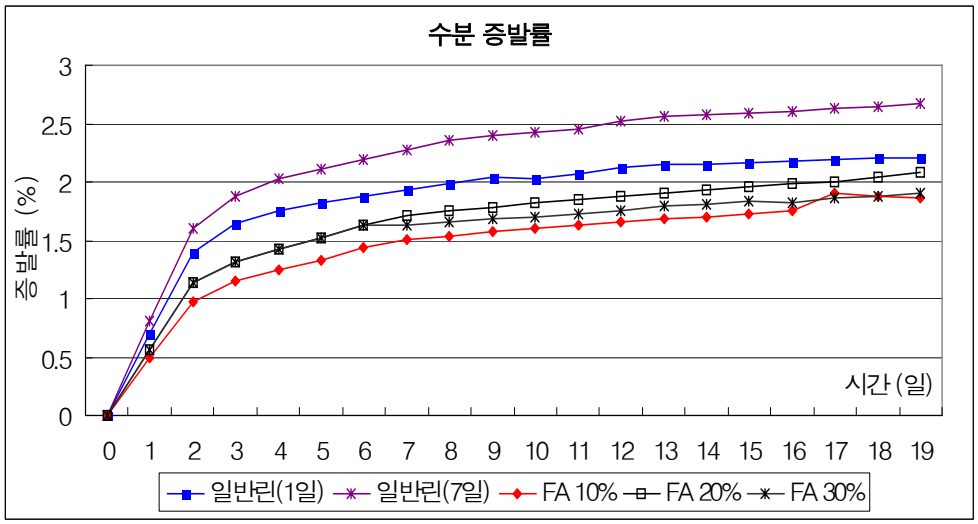
② 수분 증발율 실험결과

Sherman은 시멘트 처리기층이 BB층에 비해 강도가 크고 경제성이 좋지만, 반사균열로 인한 유지보수가 문제 시 됨에 따라, 반사균열의 원인이 되는 건조수축에 대하여 연구하였다.(Sherman,1974) 다양한 실내 및 현장실험을 통하여 건조수축 변화와 수분손실이 비슷한 경향이 있음을 발견하였다. 본 연구에서도 각 시편에 대해 한달동안 무게 측정을 통해 수분증발율을 조사하였다.

<그림 3.2.15>는 혼화재 종류에 따른 수분 증발율을 보여주고 있다. 본 실험은 1일 탈형한 일반린과 7일 수중양생한 린층을 추가하여 측정한 결과 SS사의 팽창재가 수분증발율이 가장 크고 오히려 1일 탈형한 일반린이 수축증발율이 가장 낮음을 알 수 있다. 이는 건조수축 실험결과와 비교하였을 때 Sherman의 실험과는 차이가 있음을 알 수 있다. <그림 3.2.16>은 플라이 애쉬를 10%, 20%, 30%로 변화시켰을 때의 수분 증발율을 보여주고 있다. 플라이 애쉬 10%가 수분 증발율이 가장 적고, 7일 수중 양생한 일반 린이 가장 크게 나타났지만, 상대적으로 플라이 애쉬를 첨가하였을 때 수분증발율이 감소함을 알 수 있었다. 본 실험은 상대적인 값과 저울의 민감성 등으로 인해 더 이상 진행하지 않았다.



<그림 3.2.15> 불투수 CTB의 혼화제 사용에 따른 수분증발율



<그림 3.2.16> 불투수 CTB의 FA 사용에 따른 수분증발율

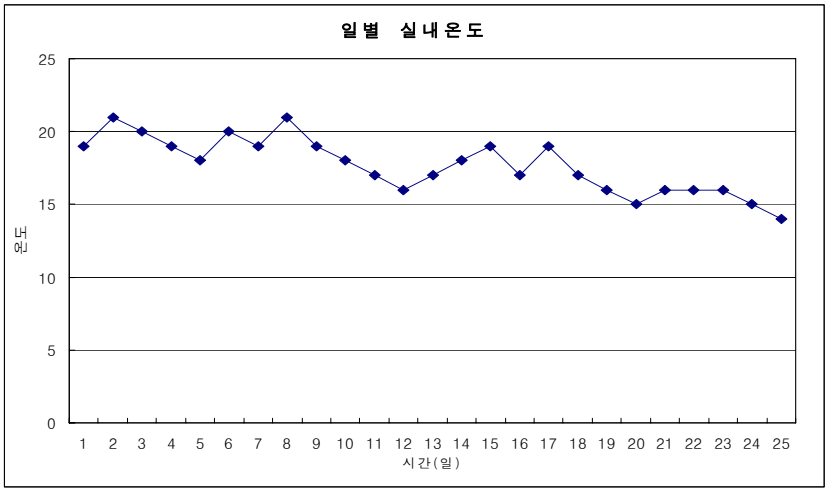
③ 건조수축 실험결과

예비실험에서는 혼화재 종류와 플라이 애쉬 첨가 양 변화에 따른 건조수축 실험을 실시하였다. 일반적으로 건조수축에 의한 건조수축 시험은 10×10×40cm 콘크리트 표준 공시체를 제작하여 재령 7일까지는 수중 양생 한 후 항온항습에서 측정하도록 한국산업규격에서는 제시하고 있다. 그러나 이번 실험은 각 혼화재에 대한 민감도를 상대적으로 분석하기 위한 예비실험이므로 상온에서 실험을 실시하였다. 또한 린 콘크리트 최대골재 치수가 40mm이므로 표준 공시체가 맞지 않다고 판단하

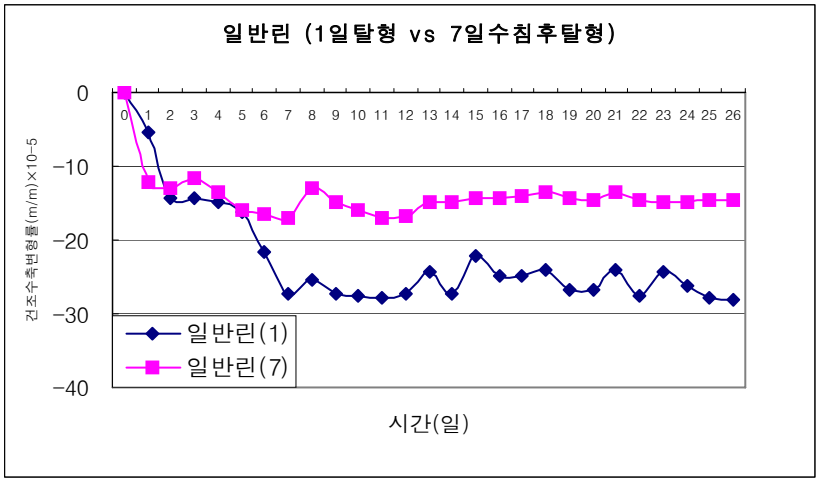
여 일반 휨 몰드 15×15×55cm를 사용하여 약 한달 동안 측정하였다.

㉮ 양생에 따른 건조수축

건조수축 실험은 7일까지 수중 양생을 한 후 측정하지만, 실제 현장을 모사하기 위해서는 1일 탈형 후 측정하는 것이 타당하다고 판단하였다. <그림 3.2.17>은 측정일에 따른 실내온도를 나타낸 것이며, <그림 3.2.18>은 양생에 따른 건조수축 실험 결과를 보여주고 있다. 약 한달 간 측정결과 공시체를 1일 탈형한 경우가 7일까지 수중 양생 한 공시체보다 2배 이상 건조수축이 크게 나타남을 알 수 있었다.



<그림 3.2.17> 불투수 CTB의 건조수축 실험실 실내온도

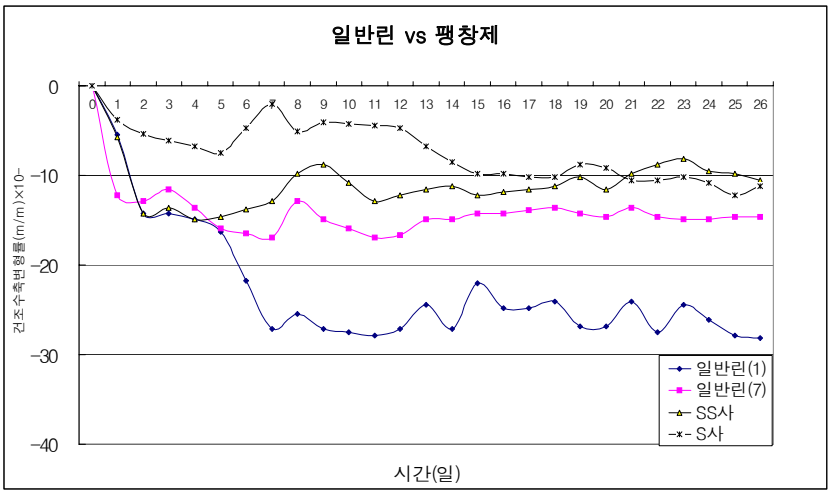


<그림 3.2.18> 불투수 CTB의 양생에 따른 건조수축

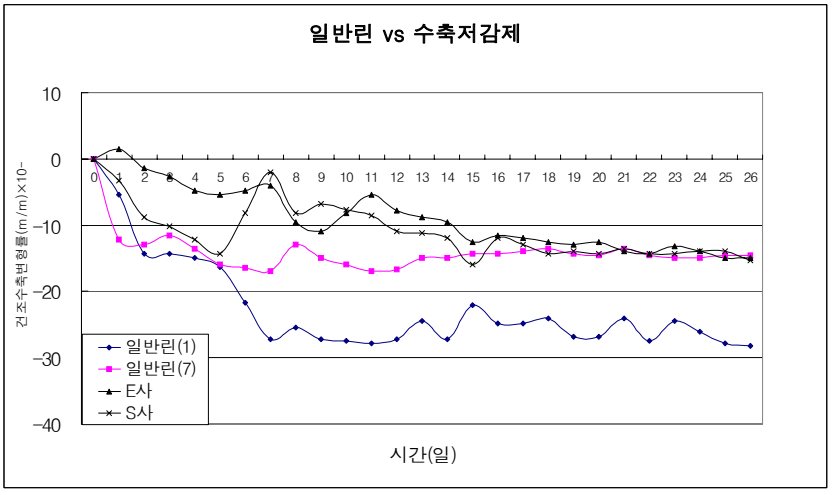
㈏ 혼화재에 대한 영향

약 한 달간에 걸쳐 혼화재에 대한 건조수축을 측정한 결과 팽창재의 경우 초기에 일반린에 비해 수축저감율이 매우 큼을 알 수 있었다. 팽창재가 수화 반응에 의해 에트린가이트(Ettringite) 등을 생성하여 콘크리트를 팽창시키는 작용을 하기 때문이었다.

수축저감재도 팽창재와 마찬가지로 양생초기에 상당한 수축저감효과를 보였으나, 시간이 지남에 따라 일반린과 같은 건조수축 거동을 보임을 알 수 있었다. 또한 같은 종류의 다른 회사 제품이 초기에는 차이를 보이고 있지만 20일이 지난 후부터는 큰 차이가 없음을 알 수 있었다.



<그림 3.2.19> 혼화재에 대한 영향-팽창재



<그림 3.2.20> 혼화재에 대한 영향-수축저감재

㈐ 플라이 애쉬에 대한 영향

<그림 3.2.21>은 플라이 애쉬를 10%, 20%, 30% 변화시켜 측정한 건조수축을 보여주고 있다. 플라이 애쉬를 시멘트 양에 10, 20, 30%로 치환했을 때의 건조수축을 측정한 결과 플라이 애쉬 10%에서는 큰 차이를 보여주고 있지 않지만 플라이 애쉬를 20, 30%로 치환했을 때에는 50% 이상 저감되었다. 이는 기존의 문헌조사에서 플라이 애쉬를 10% 치환 시 수축저감이 10% 비율로 감소한다는 결과를 훨씬 상회한 것이다. 실험결과 20%, 30% 치환시, 수축저감 효과면에서는 큰 차이가 없지만, 30% 치환 시 7일 강도 측면에서는 약 12% 저감되었으며 28일 강도에서도 이와 비슷한 결과를 나타냈다.

와이오밍에서는 플라이 애쉬를 시멘트 처리 기층에 25% 치환하여 시험포장에 적용하여 공용성을 조사한 결과 일반 CTB와 차이가 없음을 보고하였다.(K. Ksaibati, P.E., 2001) 따라서 본 예비실험을 통하여 강도와 수축저감율을 고려할 때 25% 정도로 타당하다고 판단하였다.

(3) 본 실험계획

본 실험에서는 문헌조사와 예비실험 결과를 바탕으로 실험계획 및 방법을 선정하여 대우기술연구소의 협조를 받아 각 주요 인자별 물성실험 및 정밀한 건조수축 실험을 수행하였다.

예비실험을 통해 팽창재와 수축저감재는 회사마다 가격이 다소 차이가 있지만 강도나 건조수축에는 큰 차이가 없음을 확인하였다. 또한 플라이 애쉬의 치환양은 강도와 수축저감률을 고려할 때 25%가 합리적이라고 판단하였다.

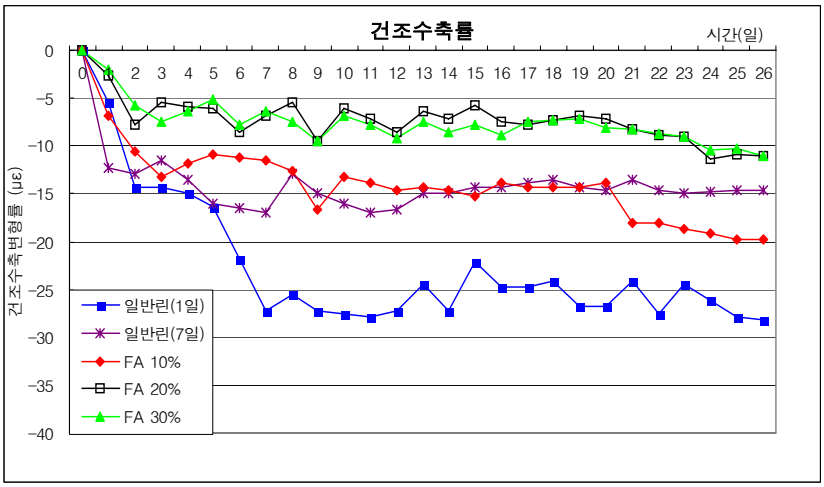
<표 3.2.5>는 불투수 CTB 예비 실험계획표로서 시멘트 양에 따른 물성 및 건조수축, 플라이 애쉬 유·무에 따른 물성 및 건조수축 그리고 팽창재 양의 변화에 따른 물성 및 건조수축을 측정하였다. 특히 수축저감재와 팽창재는 시멘트 수축저감 시 작용 메커니즘이 서로 다르므로 본 실험에서는 이를 함께 사용했을 경우의 영향도 살펴보고자 하였다. 그러나 경제성과 현장성을 고려하여 수축저감재와 팽창재는 각각 5%, 10% 로 제한하였다.

<표 3.2.5> 불투수 CTB 예비 실험계획표

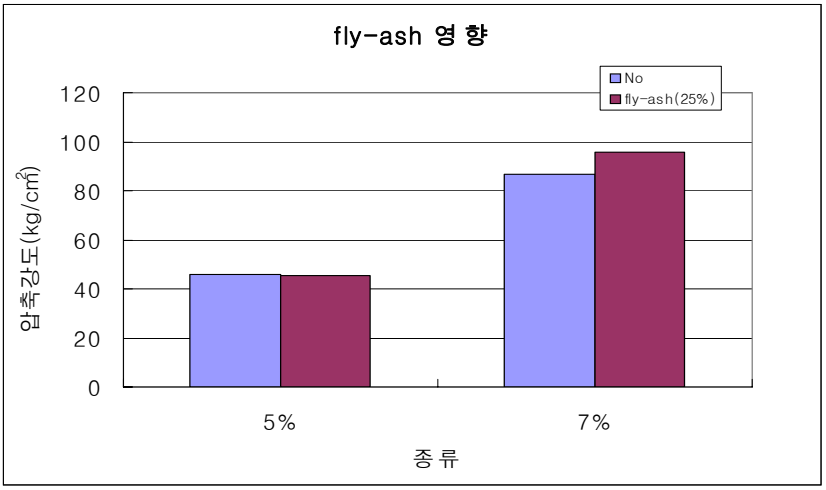
구 분		시멘트 5%(106kg/m^3)		시멘트 7%(151kg/m^3)	
		플라이 애쉬 치환율(0%)	플라이 애쉬 치환율(25%)	플라이 애쉬 치환율(0%)	플라이 애쉬 치환율(25%)
수축 저감재 0%	팽창재 0%	●-1	●-7	●-1	●-7
	팽창재 5%	●-2	●-8	●-2	●-8
	팽창재 10%	●-3	●-9	●-3	●-9
수축 저감재 5%	팽창재 0%	●-4	●-10	●-4	●-10
	팽창재 5%	●-5	●-11	●-5	●-11
	팽창재 10%	×	×	×	×
수축 저감재 10%	팽창재 0%	●-6	●-12	●-6	●-12
	팽창재 5%	×	×	×	×
	팽창재 10%	×	×	×	×

(4) 본 실험 결과

본 실험에서는 일반 린 콘크리트와 수축저감을 위해 첨가된 혼화재에 따른 압축강도와 건조수축에 미치는 영향을 살펴보았다.



<그림 3.2.21> 플라이 애쉬에 첨가량에 대한 영향



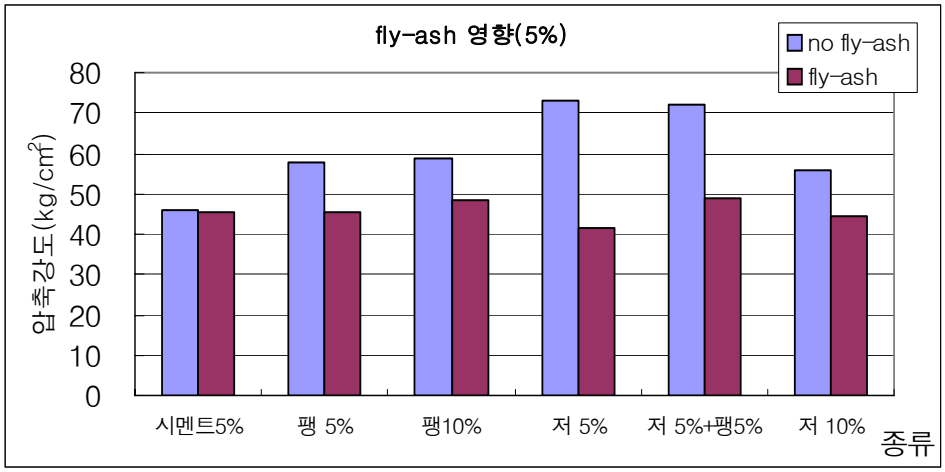
<그림 3.2.22> 시멘트 양과 플라이 애쉬에 대한 압축강도 변화

① 압축강도 실험결과

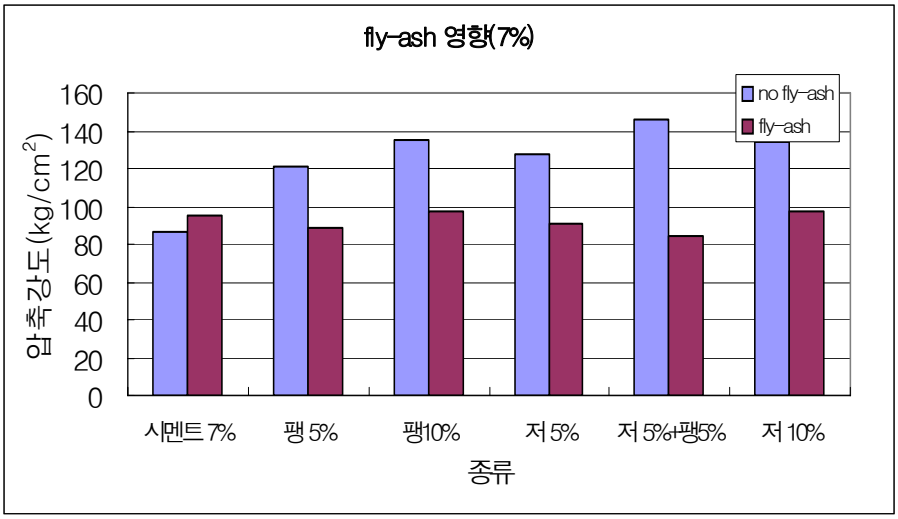
1일 탈형 후 6일간 20℃에서 수중 양생 후 7일에 강도를 측정하였다. <그림 3.2.22>는 시멘트 양과 플라이 애쉬에 대한 강도 특성을 보여주고 있다. 시멘트 양이 7%에서 5%로 감소하였을 때 강도는 약 50% 정도 감소하였으며, 시멘트 5%는 허용강도인 50kgf/cm^{2}을 만족하지 못하였다. 그러나 텍사스 도로국의 경우 반사균열 저감을 위하여 시멘트 사용량과 압축강도의 허용기준을 낮추어 사용하고 있는 실정이므로 허용강도에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. 플라이 애쉬를 25% 첨가 시에 시멘트가 5%인 경우 큰 강도 변화를 보이지 않았으며 예비실험과 비슷한 실험결과를 나타냈다.

<그림 3.2.23>과 <그림 3.2.24>는 시멘트 5%와 시멘트 7%일 때 각 배합 종류에 따른 강도변화를 보여주고 있다. 플라이 애쉬를 첨가할 경우 대체적으로 강도가 떨어짐을 알 수 있는데, 팽창재 또는 수축 저감재 사용 시 20%~40% 강도 증가를 보여 일반 시멘트만을 사용한 경우와 유사한 강도를 보여주고 있다.

일반 시멘트를 기준으로 비교하였을 때 플라이 애쉬와 혼화재를 함께 사용했을 경우에는 강도에는 문제가 없음을 알 수 있었다.



<그림 3.2.23> 시멘트 5%일 때 플라이 애쉬 혼화재의 영향



<그림 3.2.24> 시멘트 7%일 때 플라이 애쉬 혼화재의 영향

<표 3.2.6> 불투수 CTB 시험 배합의 강도 - 시멘트 7%일 때

물성 / 종류	압축강도 (kg/cm^2)	탄성계수 (kg/cm^2)	비파괴탄성계수 (kg/cm^2)
NO.	86.94	63813.50	266509.63
팽 5%	121.16	101320.00	3.28E+05
팽10%	135.23	100515.00	306011.28
저 5%	127.42	102613.00	313760.65
저 5%+팽5%	145.45	103483.00	308891.97
저 10%	133.62	91277.00	313999.18
플25%	95.57	58742.00	278627.80
플25%+팽5%	88.71	65903.50	292689.41
플25%+팽10%	97.47	73689.50	297861.53
플25%+저5%	91.01	47467.50	267924.82
플25%+저5%+팽5%	84.08	57520.00	277737.76
플25%+저10%	97.24	77484.50	298518.19

② 탄성계수 및 비파괴 탄성계수 실험결과

<표 3.2.6>은 시멘트 7%일 때 혼화재 종류에 따른 압축강도, 탄성계수, 비파괴탄성계수 값을 나타내고 있다. 본 연구에서는 SPSS 통계분석 프로그램을 이용하여 Pearson 상관계수를 구하였다. <표 3.2.7>은 물성 특성에 따른 상관계수를 나타내고 있다. 분석결과 상관계수는 0.01 수준에서 모두 유의함을 알 수 있다. 따라서 비파괴를 이용한 탄성계수 및 압축강도 추정이 가능하다고 판단된다.

그러나 압축강도와 비파괴 탄성계수는 상대적으로 상관계수가 낮음을 알 수 있다. 이는 비파괴 시험이 공시체 매질을 통과하는 파의 속도와 밀접한 관련이 있는데 파의 속도는 공시체 속 혼합된 재료들이 얼마나 파를 잘 전달시키느냐의 문제가 상당한 영향을 끼친다. 그러나 CTB는 콘크리트의 구조상 단위 시멘트량이 적으며 잔골재율이 많아 내부에는 수많은 공극들이 생기므로 이러한 공극들이 파 속도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

<표 3.2.7> 압축강도, 탄성계수, 비파괴탄성계수와의 상관관계(시멘트 7%)

Correlations[a]

		탄성계수	압축강도	비파괴
탄성계수	Pearson Correlation	1	.906**	.930**
	Sig. (2-tailed)	.	.000	.000
압축강도	Pearson Correlation	.906**	1	.760**
	Sig. (2-tailed)	.000	.	.007
비파괴	Pearson Correlation	.930**	.760**	1
	Sig. (2-tailed)	.000	.007	.

**. Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed).

a. Listwise N=11

<표 3.2.8> 불투수 CTB 시험 배합의 강도 - 시멘트 5%

5%	압축강도 (kg/cm2)	비파괴탄성계수 (kg/cm2)
NO.	45.77	179185.17
팽 5%	57.55	220190.18
팽10%	58.66	230354.14
저 5%	73.12	244222.89
저 5%+팽5%	71.96	239311.92
저 10%	55.85	236259.23
플25%	45.44	215992.86
플25%+팽5%	45.46	188493.90
플25%+팽10%	48.58	2.11E+05
플25%+저5%	41.33	1.89E+05
플25%+저5%+팽5%	49.00	212354.92
플25%+저10%	44.36	214336.46

<표 3.2.9> 압축강도, 비파괴탄성계수와의 상관관계(시멘트 5%)

Correlations [a]

		압축강도	비파괴
압축강도	Pearson Correlation	1	.820**
	Sig. (2-tailed)	.	.001
비파괴	Pearson Correlation	.820**	1
	Sig. (2-tailed)	.001	.

**. Correlation is significant at the 0.01 level

a. Listwise N=12

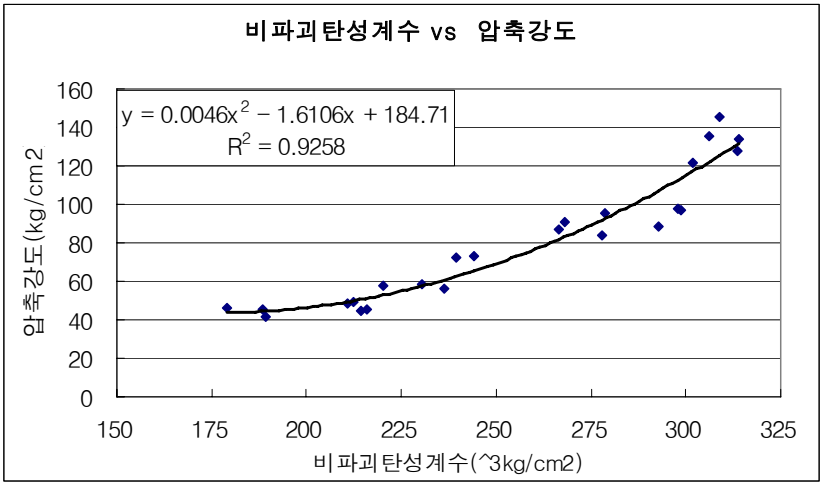
<표 3.2.8>과 <표 3.2.9>는 시멘트 5%일 때 압축강도 및 탄성계수의 측정값과 이때의 상관관계를 나타내고 있다. 분석결과 시멘트 5%에서도 압축강도와 탄성계수의 관계는 0.01 수준에서 모두 유의함을 알 수 있다. 따라서 비파괴 방법을 이용한 압축강도 추정이 가능하다고 판단된다.

③ 물성값 추정

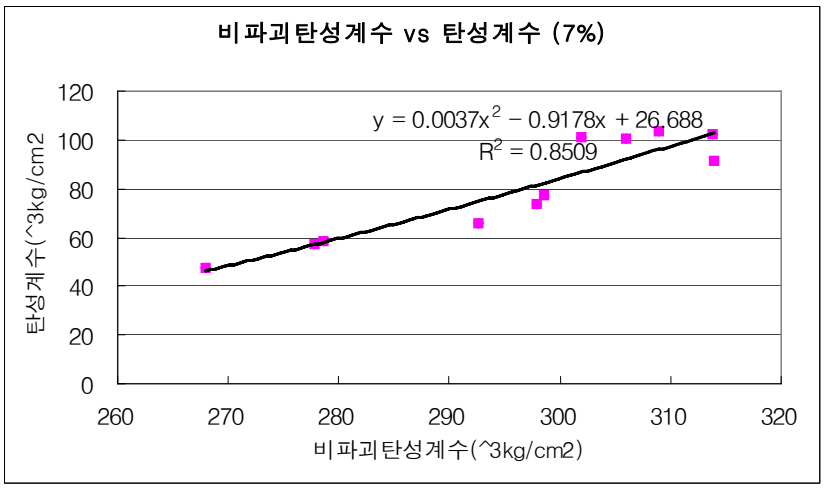
SPSS 통계프로그램을 이용하여 상관관계를 분석한 결과 압축강도, 탄성계수 및 비파괴탄성계수는 유의함을 알 수 있었다. 파괴실험을 통한 물성값 측정은 시간 및 노력이 필요하므로 본 연구에서는 통계분석 결과를 통해 보다 쉽고 간편한 비파괴 방법을 이용한 물성값 추정 회귀식을 개발하였다.

<그림 3.2.25>는 시멘트 5%와 시멘트 7%일 때 압축강도와 비파괴탄성계수와의 관계를 회귀식으로 나타낸 값이다. 회귀식 추정결과 상관계수를 나타내는 R^2은 0.9258로 매우 높은 값을 보임을 알 수 있다. 따라서 현장에서 시멘트 안정처리 기층에 대하여 비파괴방법을 통해 강도추정이 가능하다고 판단된다.

<그림 3.2.26>은 탄성계수와 비파괴탄성계수와의 관계를 보여주고 있다. 시멘트 5%에서는 몰드 주변의 공극으로 인해 탄성계수 측정이 불가능하였다. 본 회귀식은 시멘트 7%에서의 실험을 통한 결과이며, 회귀식 추정결과 상관계수 R^2은 0.8509로 비교적 높은 값을 보임을 알 수 있다.



<그림 3.2.25> 불투수 CTB의 비파괴탄성계수와 압축강도와의 관계



<그림 3.2.26> 불투수 CTB의 비파괴탄성계수와 탄성계수와의 관계

④ 건조수축 실험결과

시멘트 양 5%, 7%에 팽창재, 수축저감재 및 플라이 애쉬 유무에 대한 건조수축 실험을 50일에 걸쳐 항온항습실에서 실시하였으며 실험방법은 KS규격이 아닌 변형률 게이지를 이용하였다.

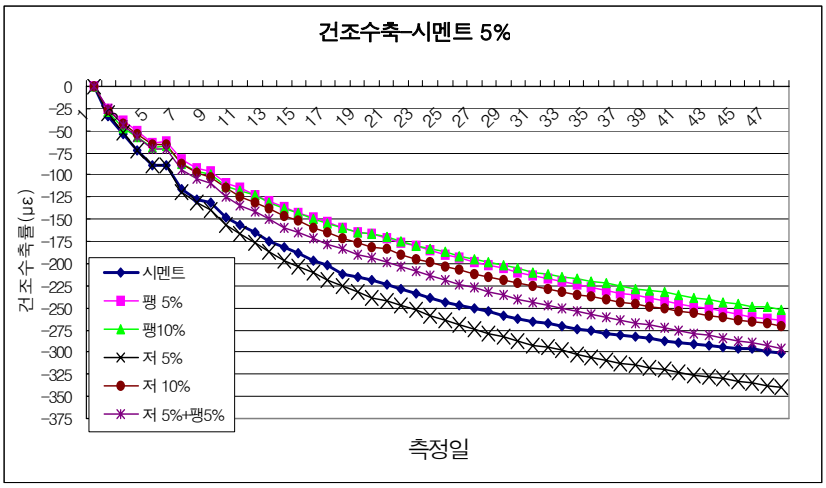
㉮ 시멘트 5%

<그림 3.2.27>은 혼화재 종류와 양에 따른 건조수축을 보여주고 있다. 실험결과 팽창재 10%를 첨가하였을 때의 건조수축 저감효과는 일반린 보다 약 16%로 가장

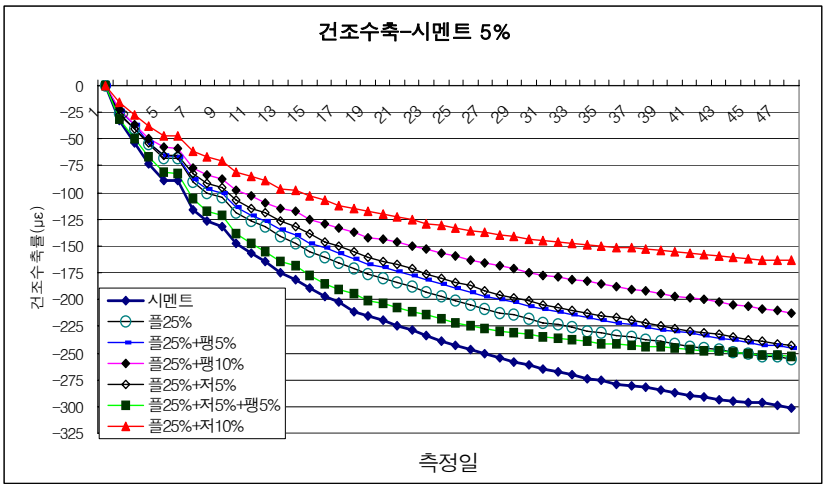
큼을 알 수 있었다. 또한 팽창재 5%와 수축저감재 10%를 첨가하였을 때에도 각각 12%, 10%의 저감효과를 보였다. 그러나 수축저감재 5%만을 추가했을 경우에는 오히려 건조수축이 증가함을 알 수 있었다.

<그림 3.2.28>은 플라이 애쉬 25%와 함께 혼화재를 첨가하였을 때의 실험결과이다. 일반린과 비교하였을 때 플라이 애쉬 첨가 시 25%의 건조수축 저감효과를 보였으며 다른 혼화재와 함께 첨가하였을 때에도 저감효과가 매우 큼을 알 수 있다. 저감 효과가 가장 큰 것은 플라이 애쉬와 수축 저감재(10%)를 첨가하였을 때로 46%의 저감효과를 보였다. 다음으로 플라이 애쉬와 팽창재(5%)를 첨가하였을 때 30%의 저감효과를 보였다. 그러나 건조수축 저감효과에 있어서 다른 메커니즘을 보이고 있는 수축저감재와 팽창재를 동시에 첨가하였을 때에는 거의 효과가 없음을 알 수 있었다.

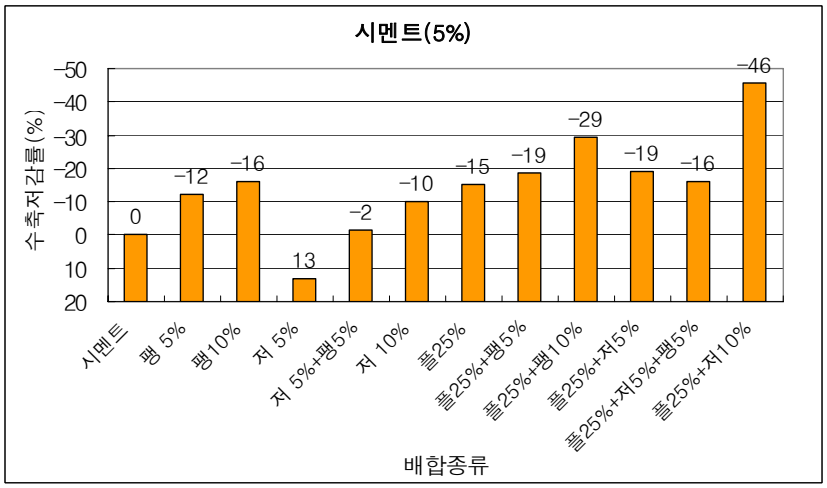
<그림 3.2.29>는 시멘트 5%일 때 플라이 애쉬, 팽창재 및 수축저감재에 따른 수축저감률를 보여주고 있다.



<그림 3.2.27> 혼화재별 불투수 CTB의 건조수축 - 시멘트 5%



<그림 3.2.28> 플라이 애쉬와 혼화재에 따른 건조수축 - 시멘트 5%



<그림 3.2.29> 불투수 CTB의 배합종류별 수축저감률 비교 - 시멘트 5%

㈏ 시멘트 7%

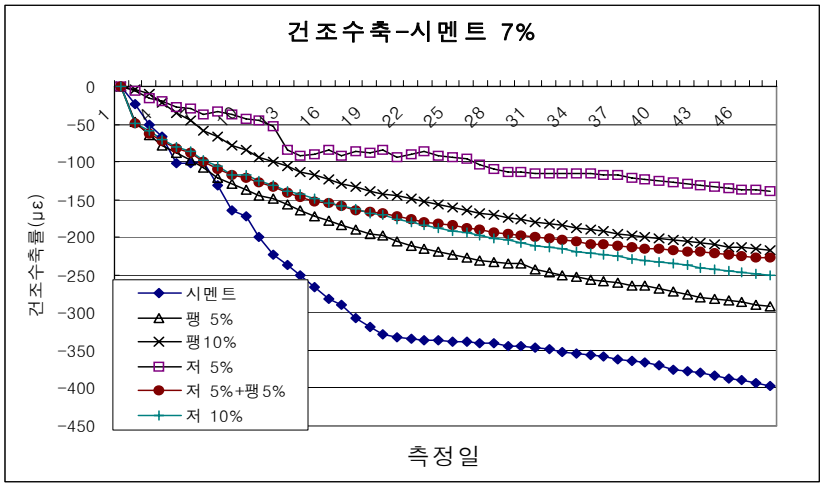
<그림 3.2.30>은 시멘트 7%일 때 혼화재의 종류와 양에 따른 건조수축을 보여주고 있다. 실험결과 시멘트5%와 달리 수축저감재 5%를 첨가하였을 때, 일반린보다 저감효과가 가장 커서 이후 65%수준 이었다. 또한 팽창재 10%와 수축저감재 및 팽창재를 5%를 함께 첨가하였을 때에 각각 45%, 43%의 저감효과를 보였다.

일반적으로 수축저감재 양이 10%일 때보다 5%일 때 수축저감률이 더 큰 것은 기존 문헌조사 결과와 상의하였다. 그러나 강릉대(이승우, 2004)에서 흙을 이용한 시멘트 안정처리 기층 실험에서도 이와 비슷한 실험결과가 나왔다. 따라서 향후 이에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 판단된다.

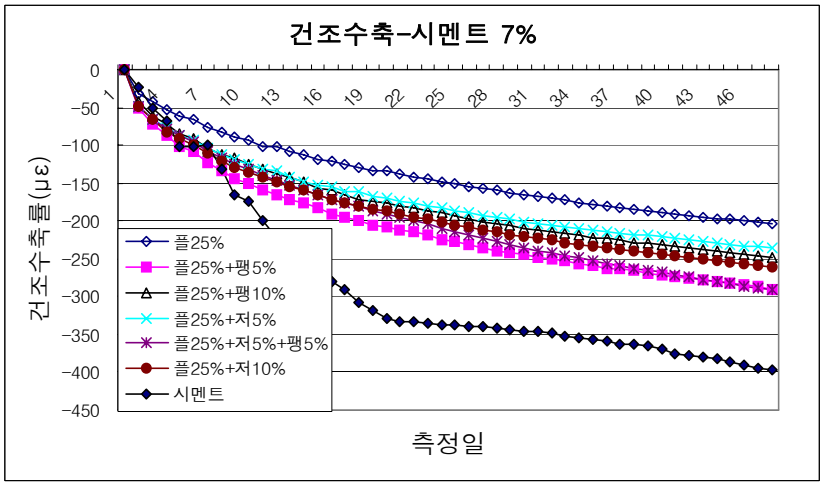
수축 저감재와 팽창재를 5% 첨가 시 시멘트 5%일 때 실험 결과와는 달리 저감 효과가 컸다. 두 혼화재가 서로 다른 메커니즘으로 반응하기 위해서는 일정량 이상의 최소 시멘트 양이 필요하기 때문이다. 그러나 현장적용성 및 경제성을 고려한다면 두 혼화재를 동시에 사용하는 것은 합리적이지 않다고 판단된다.

<그림 3.2.31>은 플라이 애쉬 25%와 함께 혼화재를 첨가하였을 때의 실험결과를 보여주고 있다. 플라이 애쉬 첨가 시 48%의 저감률을 보이고 있으며, 플라이 애쉬와 혼화재를 동시에 첨가했을 때에도 약 40% 정도의 저감률을 보이고 있다.

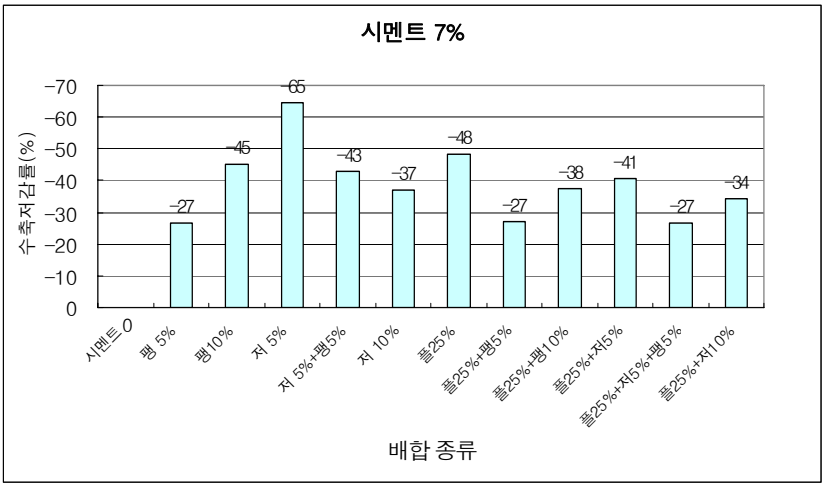
<그림 3.2.32>는 시멘트 7%일 때 플라이 애쉬, 팽창재 및 수축저감재에 따른 수축저감률를 보여주고 있다.



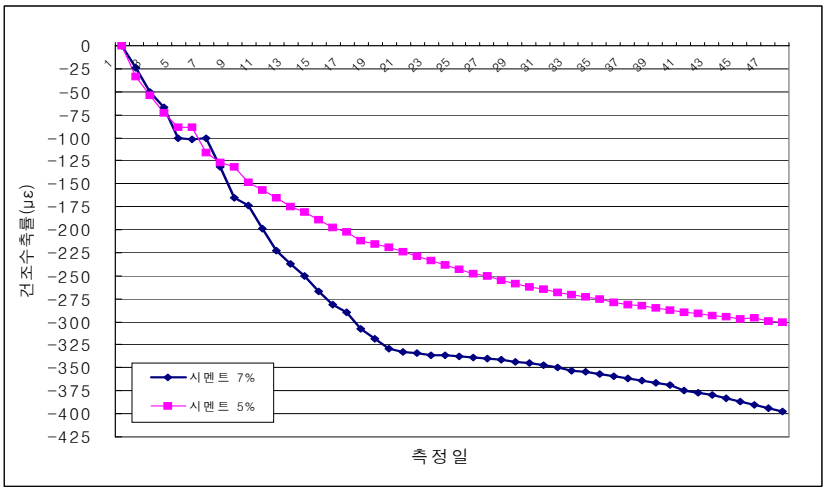
<그림 3.2.30> 혼화재별 불투수 CTB의 건조수축 - 시멘트 7%



<그림 3.2.31> 플라이 애쉬와 혼화재에 따른 건조수축 - 시멘트 5%



<그림 3.2.32> 불투수 CTB의 배합종류별 수축저감률 비교 - 시멘트 5%



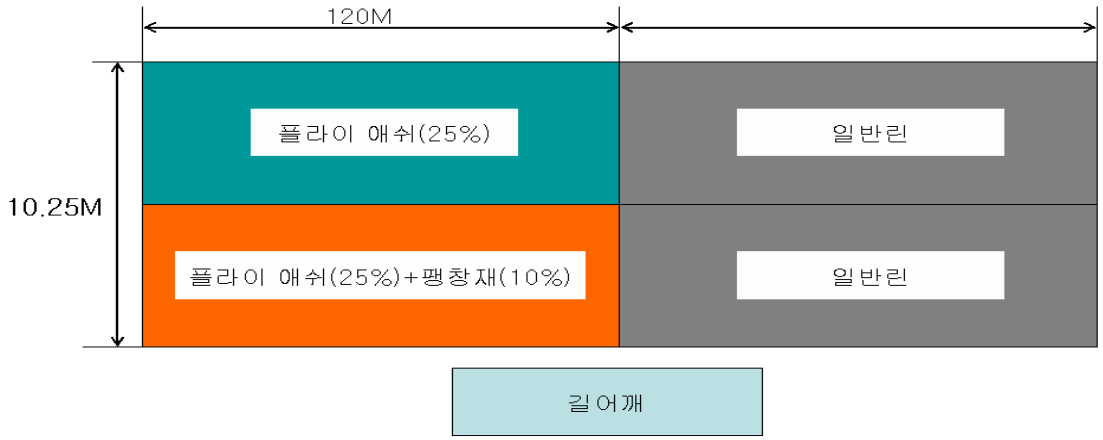
<그림 3.2.33> 불투수 CTB 실험 배합의 시멘트 양에 따른 건조수축

㉰ 시멘트 양에 따른 건조수축

시멘트 양 7%와 5%에 대한 50일 동안의 건조수축 측정 결과, 약 건조수축이 25%정도 감소함을 알 수 있다. 비록 시멘트 5% 사용 시 허용강도를 충분히 만족하지 못하지만 미국 도로국에서는 허용강도 기준이 국내 기준보다 낮음을 고려했을 때, 국내 아스팔트 포장에 맞는 시멘트 안정 처리 기층 적용 시 허용강도 기준을 낮춘다면 반사균열 저감 효과도 기대할 수 있다고 판단된다.

(5) 현장 실험결과 및 요약

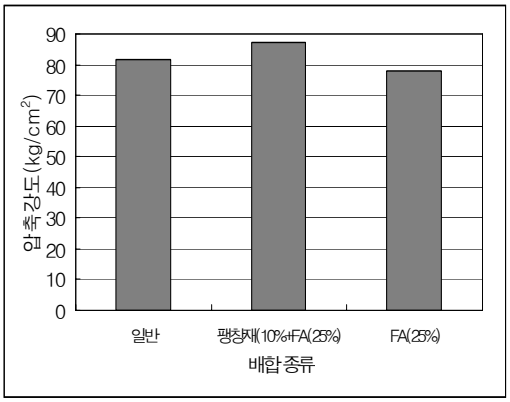
실내에서 실시한 압축강도와 건조수축 실험에서 양호한 결과를 나타낸 플라이애쉬(25%)+팽창재(10%), 플라이 애쉬(25%)를 최적 대안으로 선정하였다. 따라서 실내실험과 동일한 <표 3.2.10>과 같은 배합으로 2004년에 상주-충주간 중부 내륙고속도로 제 8공구 현장에 실제 적용하여 압축강도, 간접인장강도, 균열을 조사를 하였다. 시험포장 위치는 STA 2+600~2+720, 연장 120m, 폭원은 10.25m이다. <그림 3.2.34>는 현장실험 구간의 평면도이다.



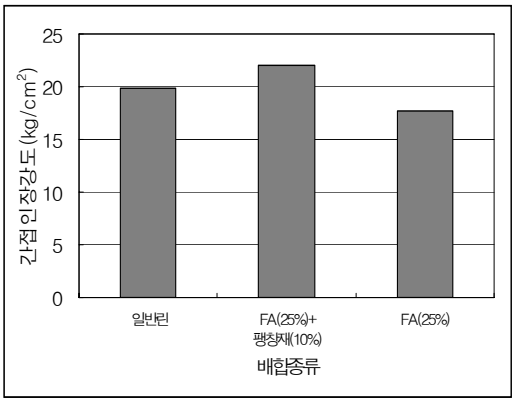
<그림 3.2.34> 불투수 CTB 현장실험 구간 평면도

<표 3.2.10> 불투수 CTB 시험 시공 배합

	시멘트 양	플라이애쉬 (25%)	팽창재 (10%)	수축저감재 (5%)	물	굵은골재	잔골재
대안 1	112.88	37.63	0	0	120.4	1386.03	666.80
대안 2	101.59	37.63	11.29	0	120.4	1386.03	666.80



<그림 3.2.35> 불투수 CTB 현장 압축강도



<그림 3.2.36>불투수 CTB 현장시공의 간접인장강도

① 강도 측정

<그림 3.2.35>는 현장실험 7일 후에 현장조건과 동일한 공시체의 압축강도 결과를 나타낸 것이며, 실내 실험 결과와 마찬가지로 플라이 애쉬(25%)+ 팽창재(10%) > 일반린 > 플라이 애쉬(25%) 순으로 나타났다. <그림 3.2.36>은 시공 28일 후에 각 배합당 3개의 코어를 채취하여 간접인장강도 실험결과를 나타낸 것이며 압축강도와 동일한 경향을 보였다.

② 균열 조사

현장에 적용한 플라이 애쉬(25%)+팽창재(10%) 구간, 플라이 애쉬(25%) 구간, 일반 린 구간을 구분하여 배합별로 120m씩을 타설한 후, 콘크리트 표층을 타설하기까지 7주간 균열을 조사하였다. <그림 3.2.37>에 나타낸 것과 같이 일반린 구간은 많은 균열이 발생하였고 플라이 애쉬 구간은 소수의 균열이 발생하였다. 그러나 플라이 애쉬와 팽창재를 혼합한 구간은 전혀 균열이 발생하지 않았다. <그림 3.2.38>의 a, b, c는 시공 50일 후 각각의 시험구간에 따른 균열조사를 관측하였다. 마찬가지로 플라이 애쉬와 팽창재를 혼합한 구간이 가장 양호하였다. <그림 3.2.39>는 시험 시공 후 7주간의 균열 양상을 나타낸 그림인데 7주간 아무런 균열이 발생하지 않음을 알 수 있었다.

따라서 실내실험과 현장실험을 통하여 플라이 애쉬(25%)+팽창재(10%)가 최적의 재료임을 알 수 있었다.



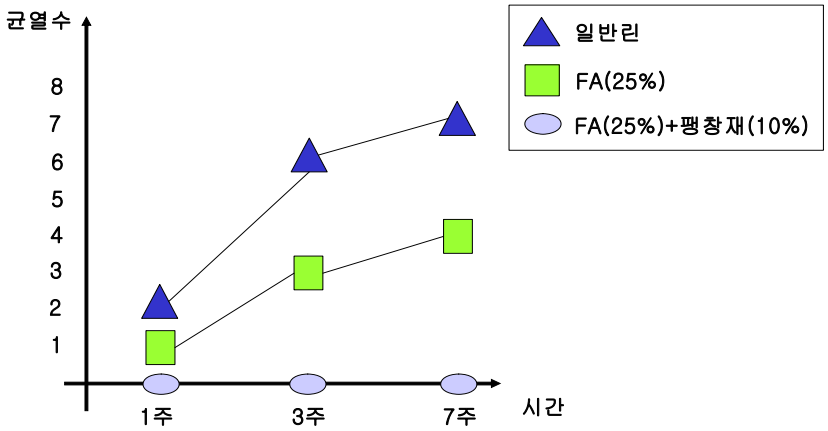
(a) FA(25%) + 팽창재(10%)　　(b) FA(25%)　　(c) 일반 린

<그림 3.2.37> 현장 시험시공 구간의 균열 사진(현장시공 4일후)



(a) FA(25%)+팽창재(10%)　　(b) FA(25%)　　(c) 일반린

<그림 3.2.38> 시공 50일 후 시험구간에 따른 균열관측

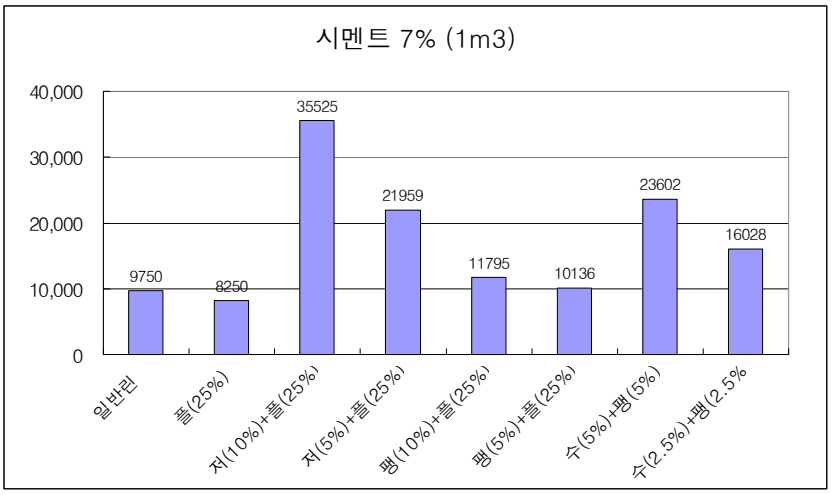


<그림 3.2.39> 불투수 CTB 현장 시험시공 구간의 균열현황

(6) 재료비용 분석

저수축 시멘트 안정 처리 기층을 현장에 적용 시 경제성은 매우 중요하다. <그림 3.2.40>은 기존 시멘트 안정 처리 기층에 플라이 애쉬, 팽창재, 수축 저감재 적용 시 재료비 변화를 보여주고 있다. 2004년 기준으로 플라이 애쉬 25% 치환 시에는 15% 정도 재료비용 절감효과를 볼 수 있다. 플라이 애쉬와 함께 혼화재 적용 시 수축 저감재와 플라이 애쉬 5% 사용시 재료비용이 일반린에 비해 2배 증가하며, 10% 증가 시 3.5배의 가격이 상승함을 알 수 있다. 이는 수축저감재가 외국에서 전량 수입되기 때문이다. 그러나 팽창재를 플라이 애쉬와 함께 적용했을 경우에는 팽창재 10% 사용 시에도 20% 정도 증가함을 알 수 있다. 따라서 현장 적용 시 경제성을 고려한다면 팽창재 적용이 경제적으로 무리가 되지 않는 것으로 판단된

다.



<그림 3.2.40> 불투수 CTB 실험에서의 재료비용 분석($1m^3$)

※ 플 : 플라이 애쉬, 저 : 수축저감재, 팽 : 팽창재.

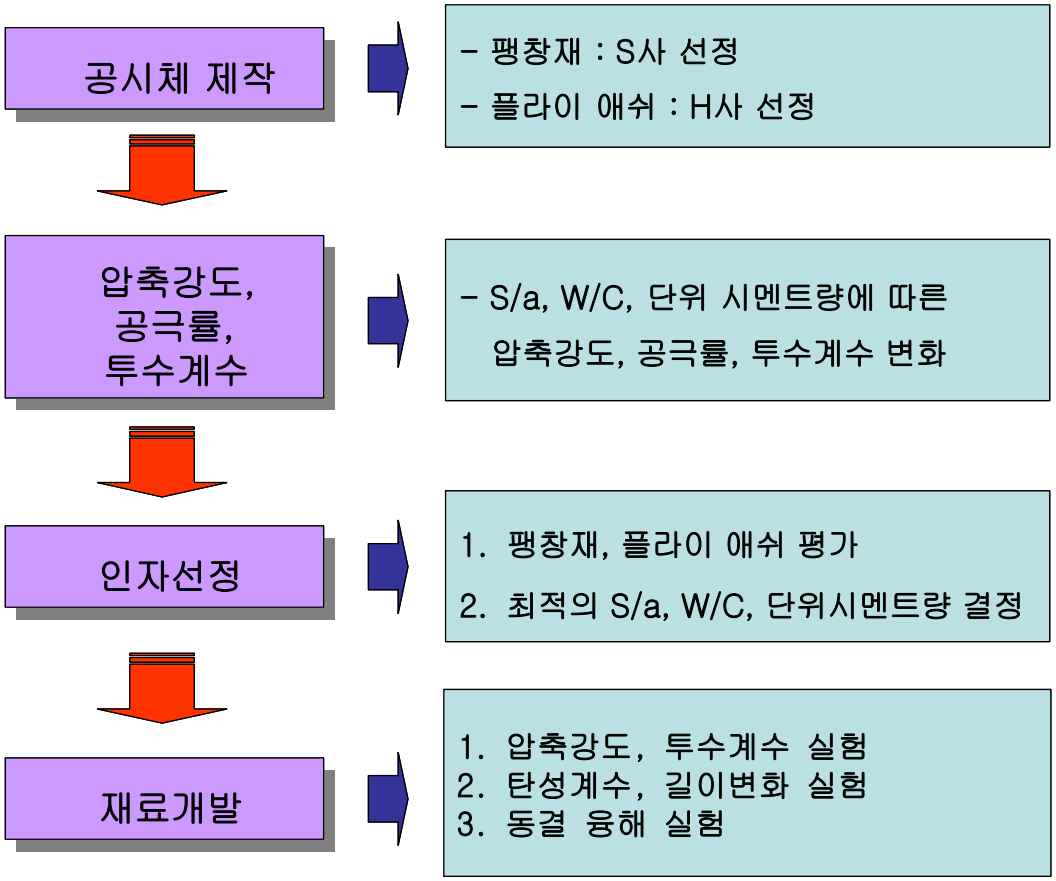
본 연구는 시멘트 안정 처리 기층을 아스팔트 포장 적용시 문제가 되는 반사균열을 해결하기 위하여 저수축 시멘트 처리 기층 재료를 개발하였다. 상온과 항온항습실의 다른 환경조건에서 양생조건에 따른 건조수축 그리고 혼화재 종류와 양에 따른 수축저감율을 측정하였다. 실내실험 결과를 바탕으로 현장실험에 적용하여 평가한 결과 최적의 저수축 시멘트 안정처리 기층 배합을 제시할 수 있었다. 현장실험의 압축강도, 간접인장강도, 균열조사를 통해 시멘트(7%)+플라이 애쉬(25%)+팽창재(10%)를 혼합한 재료배합을 개발하였다. 건조수축은 일반린에 비해 30% 저감효과가 있었고 압축강도는 80kg/㎠으로 도로공사 시방서 기준을 만족하였다. 재료비용은 일반린에 비해 1.2배 증가하나 반사균열 억제와 현장 적용성을 고려한다면 타당하다고 판단된다.

다. 저수축 투수 CTB 재료개발

본 장에서는 공용성에 가장 문제가 되는 반사균열을 억제하고 투수성을 향상시키기 위한 4S 포장 재료개발 과정을 설명하였다. 문헌고찰을 통하여 투수성능에 영향을 주는 주요 인자로 단위 시멘트량, 잔골재율, 물/시멘트비 조절등임을 알았으며 강도 및 내구성 확보를 위해 다양한 혼화재가 사용되고 있음을 알았다. 혼화재는

수축저감에 뛰어난 플라이 애쉬, 팽창재를 주요 인자로 선택하여 실험을 수행하였다. 또한 단위 시멘트량 5~9%, 잔골재율 0~10%, 물/시멘트비 40~45%의 변화에 따른 압축강도, 연속공극률, 투수계수를 측정하였다.

예비실험을 통하여 단위 시멘트량, 잔골재율, 물/시멘트비가 투수성능에 미치는 효과를 살펴보고 이를 토대로 본 실험을 수행하였다. <그림 3.2.41>은 저수축 투수 CTB 재료개발을 위한 실내실험 과정을 보여주고 있다.



<그림 3.2.41> 저수축 투수 CTB 실내실험 계획

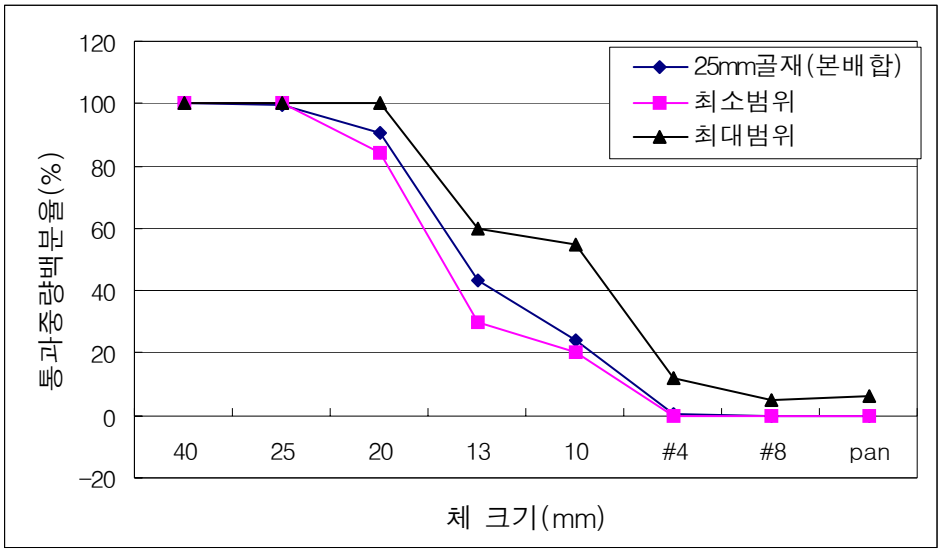
(1) 예비실험

(가) 실험계획

예비실험은 문헌조사를 바탕으로 잔골재율과 물/시멘트비, 단위 시멘트량에 따른 투수성능을 살펴보는데 그 목적이 있다. 실험에 사용된 각 혼화재의 물성은 불투수 CTB에 사용된 혼화재와 동일하다. 예비실험에서는 각 회사에서 제시하는 권장사용량을 첨가하여 압축강도, 공극률, 투수계수를 측정하였다.

(나) 실험재료

본 실험에서 사용된 시멘트는 KS L 5201의 규정에 적합한 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트를, 굵은골재와 잔골재는 경기도 양주군의 것으로 불투수용 CTB것과 동일하며 단 사용된 팽창재의 비중은 2.8이었다. 저수축 투수 CTB의 개발을 위한 입도 분포는 일리노이주 교통국의 연구사례를 이용하였으며, 실험에 사용한 25mm 골재는 <그림 3.2.42>와 같이 최대, 최소 범위를 만족하였다.



<그림 3.2.42> 저수축 투수용 CTB 입도분포

(통과중량백분율 최대, 최소범위 : IDOT, ASTM C 33)

<표 3.2.11> 저수축 투수용 CTB 실험 배합

구 분	굵은 골재 최대 치수 (mm)	단위 수량 (kg)	시멘트 (kg)	잔 골재 (kg)	굵은 골재 (kg)	플라이 애쉬 (kg)	팽창재 (kg)	AE제 (kg)	비 고
일반린	40mm	125	151	730	1397	-	-		
저수축 불투수 CTB	40mm	125	113	730	1397	38	15		
저수축 투수 CTB	25mm	57~ 103	108~ 194	0~ 318	1766~ 1787	56	15	0.03~ 0.06	

(다) 배합설계

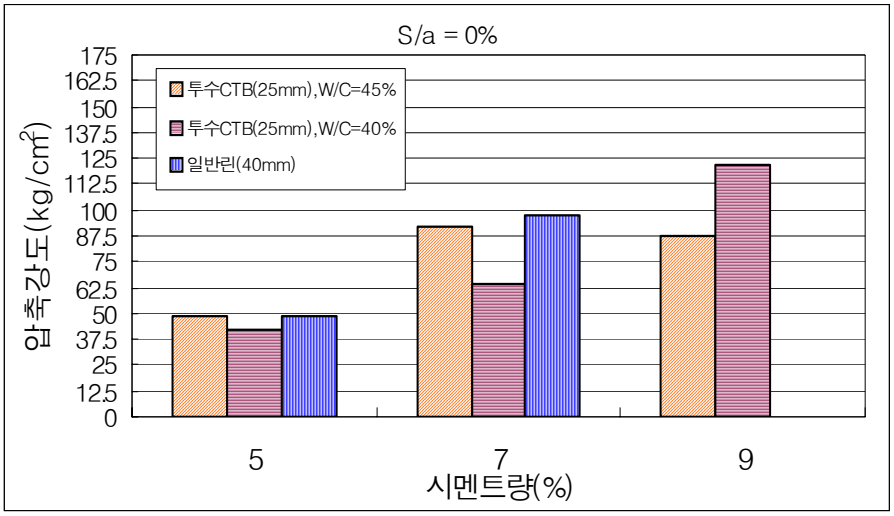
본 실험은 저수축 투수 CTB 재료개발을 위한 예비실험으로서 잔골재율과 물/시멘트비 변화에 따른 투수 성능을 살펴보았다. 단위 시멘트량은 5%, 7%, 9%로 변화시켜 실험을 실시하였으며, 플라이 애쉬는 25%, 팽창재는 S사에서 제시하는 권장 사용량 10%를 적용하였다.

(라) 예비 실험결과 분석

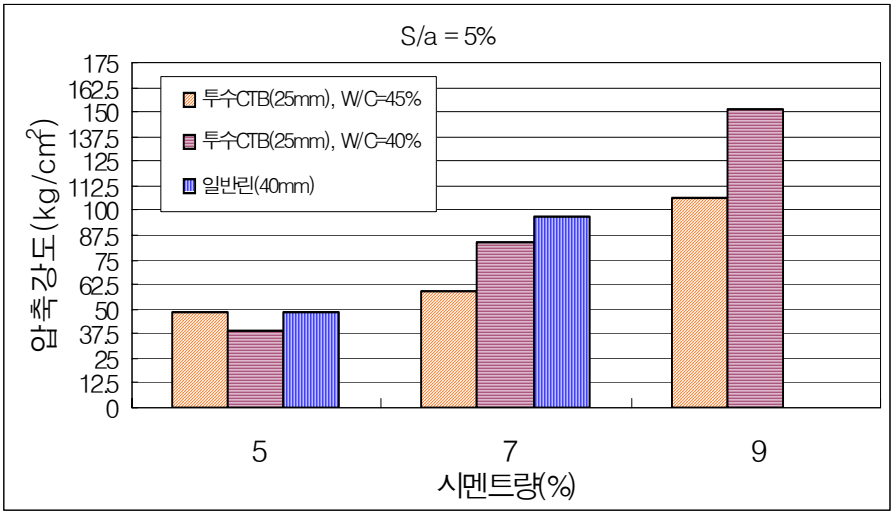
① 압축강도

본 실험에서는 KS F 2405에서 제시하는 압축강도 측정법에 따라 실시되었고 7일 강도를 측정하였다.

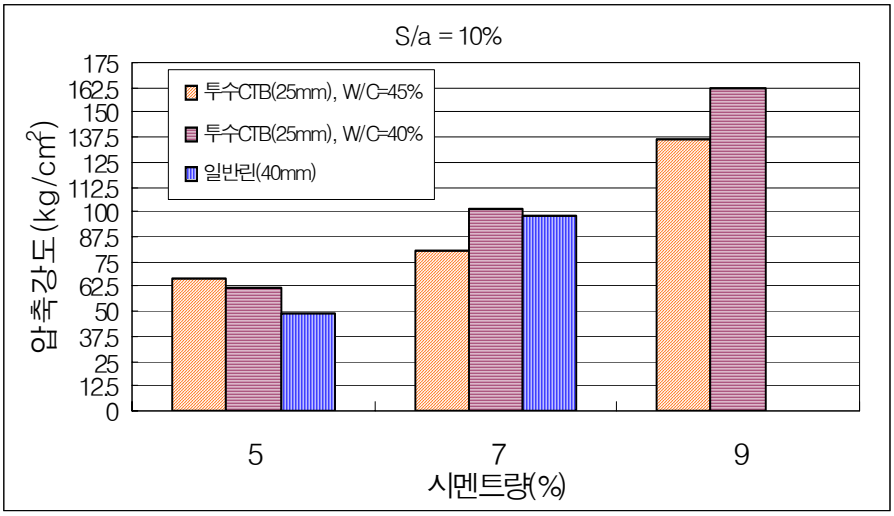
<그림 3.2.43>~<그림 3.2.45>는 잔골재율 0, 5, 10%, 단위 시멘트량 5, 7, 9% 변화에 따른 압축강도 측정결과를 나타내고 있다. 압축강도는 잔골재율 변화에 상관없이 단위시멘트량 7%, 9%에서 재령 7일 기준강도 50kg/cm^{2}를 만족함을 알 수 있었다. 대체적으로 잔골재율과 단위 시멘트량이 증가할수록 강도가 증가하는 현상을 볼 수 있었지만, 물/시멘트비의 변화는 경향을 파악할 수 없었다.



<그림 3.2.43> 시멘트량 변화에 따른 강도실험 결과(잔골재율 0%)



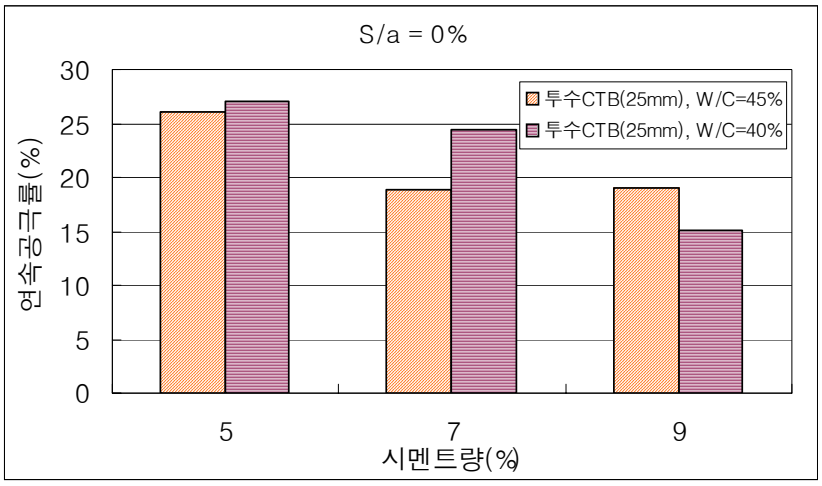
<그림 3.2.44> 시멘트량 변화에 따른 강도실험 결과(잔골재율 5%)



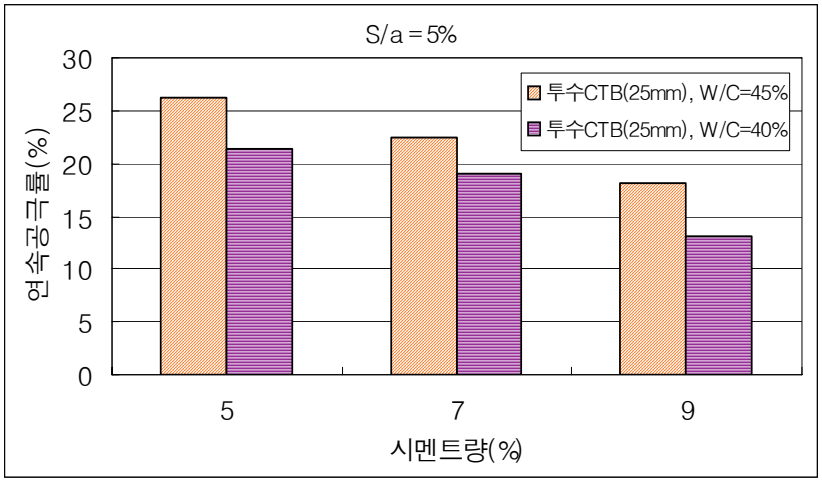
<그림 3.2.45> 시멘트량 변화에 따른 강도실험 결과(잔골재율 10%)

② 연속공극률

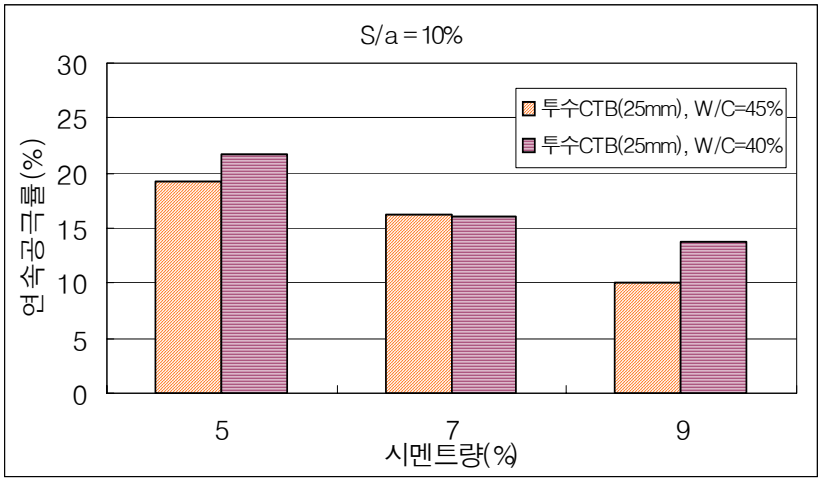
보통 투수콘크리트의 연속공극률은 5~30% 정도이나 본 연구에서는 기층에 적용될 것을 감안하여 목표 공극률을 15%로 정의하였다. <그림 3.2.46>~<그림 3.2.48>은 잔골재율 0, 5, 10%와 단위 시멘트량 5, 7, 9%의 변화에 따른 연속공극률 측정결과를 나타낸 것이며, 잔골재율이 0%인 경우에서는 목표 공극률 15%를 모두 만족하는 결과를 나타냈다. 잔골재율과 단위 시멘트량이 감소할수록 연속공극률이 커지고 물/시멘트비가 클수록 연속공극률이 작아지는 것을 알 수 있었다. 그 이유로는 잔골재량과 시멘트량이 증가하면 할수록 공시체의 부피를 차지하기 때문이다. 또한 물/시멘트비가 증가하면 시멘트 페이스트가 증가되어 내부공극이 적어지므로 연속공극율도 감소하게 됨을 확인할 수 있었다.



<그림 3.2.46> 시멘트량 변화에 따른 연속공극률 측정결과(잔골재율 0%)



<그림 3.2.47> 시멘트량 변화에 따른 연속공극률 측정결과(잔골재율 5%)

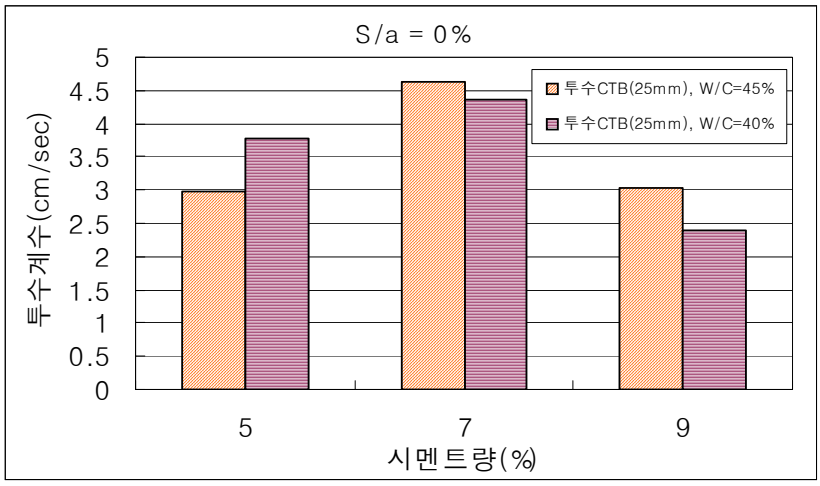


<그림 3.2.48> 시멘트량 변화에 따른 연속공극률 측정결과(잔골재율 10%)

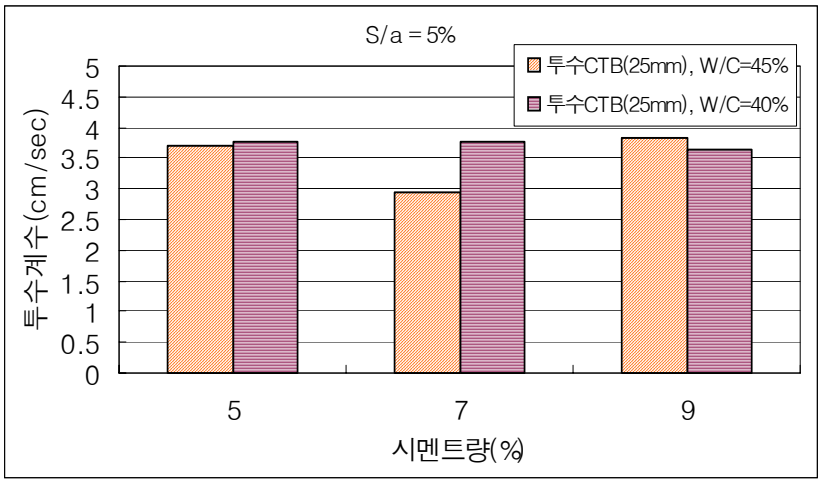
③ 투수계수 실험결과

1976년 네덜란드 도로건설연구센터에서 발표한 보고서에 따르면, 투수 콘크리트의 표층 투수계수가 0.8cm/sec 이상이 되어야 한다고 기술하고 있다. 본 실험에서는 표층의 투수계수 보다 크게하여 저수축 투수 CTB의 허용 투수계수를 1.0cm/sec로 정의하였다.

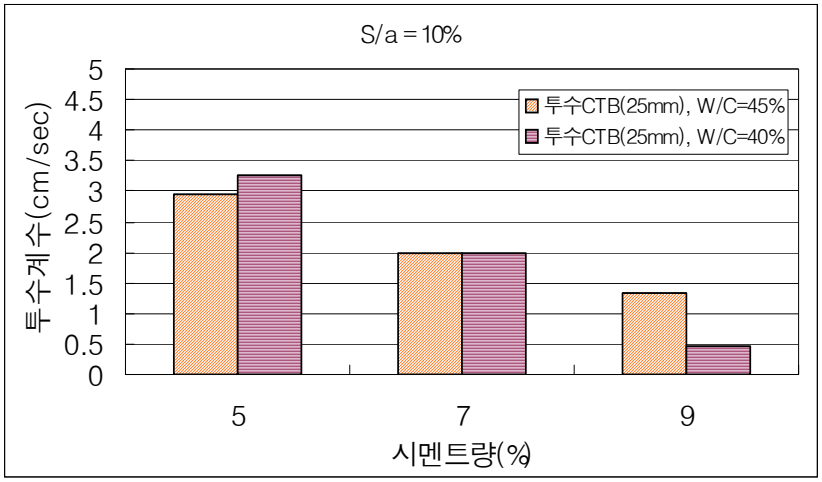
<그림 3.2.49>~<그림 3.2.51>은 잔골재율 0, 5, 10%과 단위 시멘트량 5, 7, 9%의 변화에 따른 투수계수 측정결과를 나타낸 것이다. 대체적으로 잔골재율과 단위 시멘트량이 증가할수록 투수계수가 작아졌지만, 물/시멘트비에 대한 영향은 실험오차로 인하여 파악할 수 없었다. 잔골재량과 시멘트량이 증가하면 내부공극이 밀실하게 되어 연속공극률이 감소하게 된다. 따라서 연속공극을 통해 침투하는 물의 속도가 감소함으로 투수계수도 작아지게 된다. 시멘트가 9%이상 들어간 경우를 제외하고는 모든 경우에 투수계수 기준을 만족하고 있었다.



<그림 3.2.49> 시멘트량 변화에 따른 투수계수 측정결과(잔골재율 0%)



<그림 3.2.50> 시멘트량 변화에 따른 투수계수 측정결과(잔골재율 5%)



<그림 3.2.51> 시멘트량 변화에 따른 투수계수 측정결과(잔골재율 10%)

(2) 본 실험

예비실험을 통해 잔골재율과 물/시멘트비 및 단위 시멘트량에 따른 압축강도, 연속공극률, 투수계수 실험을 측정하였다. 잔골재율 변화에 따른 압축강도 결과는 다소 차이가 있었으며, 단위 시멘트량은 잔골재율에 관계없이 7%, 9%에서 재령 7일 기준강도 50kg/cm^{2}를 만족함을 알 수 있었다. 따라서 경제성을 고려할 때 단위 시멘트량은 7%가 합리적이라고 판단되었다.

<표 3.2.12> 투수 CTB 재료개발을 위한 본실험 실험계획표

굵은 골재 최대 치수 / W/C / 단위 시멘트량 / S/a		25mm	
		45%	55%
7%	5%	●	●
	10%	●	●
	15%	●	●
	20%	●	●

<표 3.2.12>는 잔골재율에 따른 압축강도 및 투수계수 변화, 물/시멘트비에 따른 강도 및 투수변화를 측정하기 위한 계획을 나타낸 것이다. 그러나 경제성과 현장 적용성을 고려하여 잔골재율은 5%, 10%, 15%, 20%로 4가지로 구분하여 투수성능을 비교하였다.

(가) 잔골재율과 물/시멘트비에 따른 강도, 연속공극률, 투수계수과의 관계

본 연구에서는 단위 시멘트량과 굵은 골재의 최대치수를 고정시키고 잔골재율과 물/시멘트비의 변화를 주어 저수축 투수 CTB의 물성을 살펴보기 위한 실험을 실시하였으며 결과는 <표 3.2.13>과 같다.

저수축 투수 CTB의 압축강도 변화는 <그림 3.2.52>와 같은 결과를 나타냈다. 동일한 단위 시멘트량에서 물/시멘트비가 55%인 경우가 45%에 비해 높은 강도를 나타냈다. 일반 콘크리트는 물/시멘트비가 작아지면 시멘트 페이스트의 강도가 증가되어 재료의 강도가 증진된다. 그러나 공극이 많은 투수 콘크리트의 경우에는 오히려 물/시멘트비가 높은 배합이 내부 공극을 밀실하게 하므로 강도가 커짐을 볼 수 있다.(채창우 외, 1999). 압축강도 50kg/cm^{2}이 넘는 배합의 범위는 물/시멘트비에 관계없이 잔골재율 10%이상에서 만족함을 알 수 있다.

<표 3.2.13> 배합에 따른 실험결과

배합 번호	단위 시멘트량 (kg)	물/ 시멘트비	잔골 재율	굵은 골재	잔골재	압축강도 (kg/cm^2)	공극률 (%)	투수계수 (cm/sec)
1*	151	45	5	2081.0	102.3	31	25	3.45
2*	151	55	5	2032.7	99.9	49	24	2.61
3*	151	45	10	1971.5	204.6	55	21	1.89
4*	151	55	10	1925.7	199.8	65	18	1.29
5*	151	45	15	1862.0	306.8	63	20	1.13
6*	151	55	15	1818.7	299.7	87	15	0.94
7*	151	45	20	1752.4	409.1	64	15	0.50
8*	151	55	20	1711.7	399.6	83	9	0.20
9**	151	80	33	1348.4	620.2	220	4	0.15
10***	158	79	33	1448	702	71	9	0.25

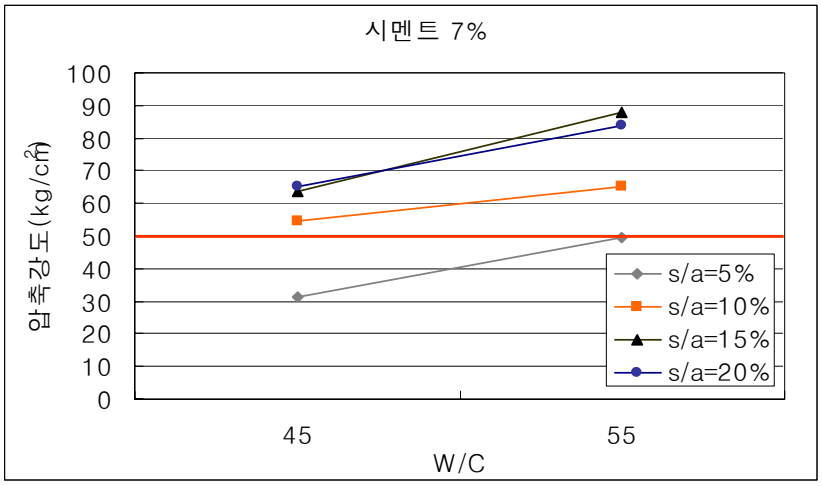
※ * : 저수축 투수 CTB, ** : 저수축 불투수 CTB, *** : 일반린.

※ 일반린 콘크리트 강도 : 재령 7일 50kg/cm^2(도로공사 시방서)

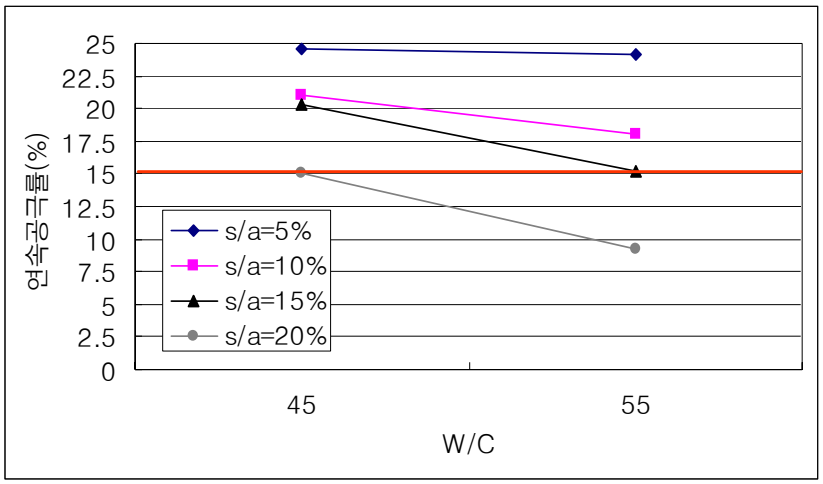
본 실험에서 나타난 공극률의 범위는 9~25%이며, <그림 3.2.53>은 잔골재율에 따른 연속공극률의 결과를 보이고 있다. 잔골재율이 증가됨에 따라 연속공극율이 감소하는 것을 보였다. 물/시멘트비에 대한 영향은 앞에서 언급한 바와 같이 시멘트 페이스트가 증가되어 내부공극이 적어지므로 연속공극율도 감소하는 결과를 나타냈다.

본 연구의 목표 공극률은 15%이므로 잔골재 20%를 혼합한 배합을 제외하고는 목표 공극률을 만족하였다.

압축강도는 콘크리트가 밀실한 정도에 비례하는 경향이 있으나 투수계수는 콘크리트가 밀실 할수록 작아지므로 강도와 투수계수에 대한 기준치를 만족하는 최적의 배합 도출이 중요하다. 일반적으로 투수 콘크리트의 투수계수는 1.0×10^{-1}cm/sec를 요구하는데 대부분의 배합에서는 이 수준을 만족하고 있다.(채창우 외, 1999)



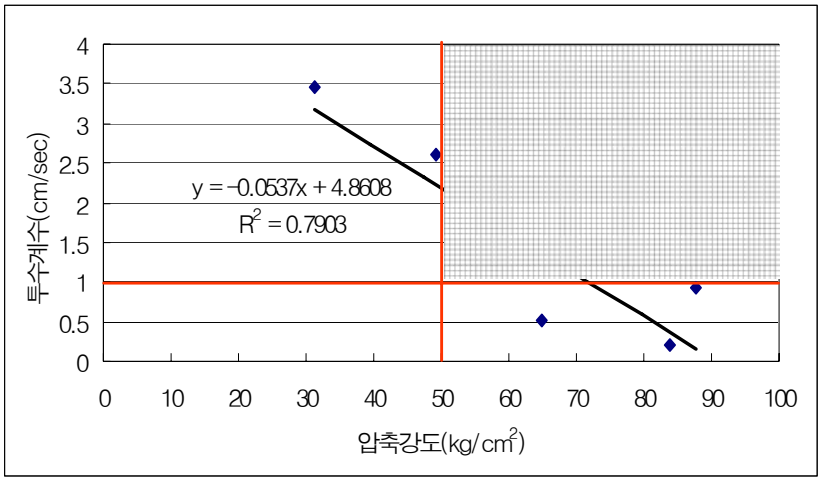
<그림 3.2.52> 잔골재율에 따른 압축강도 변화



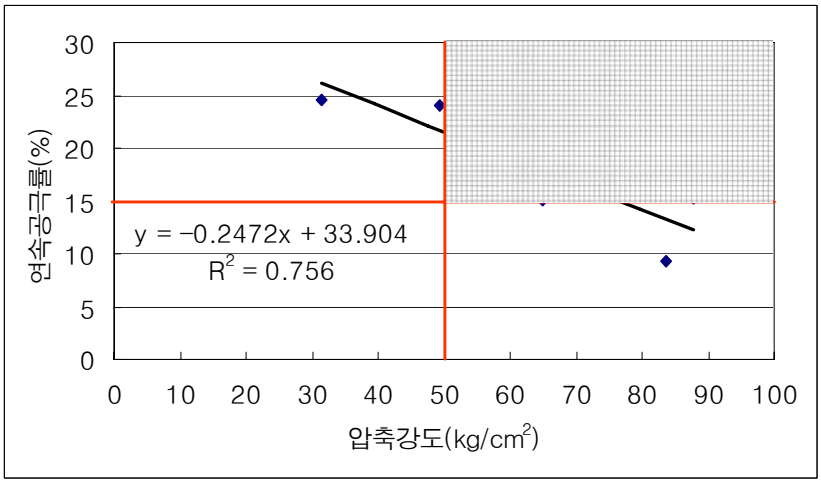
<그림 3.2.53> 잔골재율에 따른 연속공극률 변화

국외 문헌조사 결과, 연속공극률과 투수계수의 상관관계를 명확히 규명하지 못했지만,(ACBM, 2003) 국내 문헌조사에 따르면 연속공극률과 투수계수의 상관관계는 R^2 값이 0.83으로 어느 정도 상관관계가 있는 것으로 보고되었다. 본 실험에서도 R^2 값이 그 값과 근사하게 연속공극률과 투수계수가 상관관계가 있는 것으로 나타났지만 분석한 시편의 표본수가 적어 신뢰도는 다소 떨어졌다. 일반적으로 연속 공극을 형성할 때 공극률은 동일하지만 단면적의 크기에 따라 투수 능력이 다르다고 할 수 있다.

본 연구에서 실시한 투수 CTB 재료의 투수계수와 압축강도, 연속공극률과 압축강도와의 관계를 <그림 3.2.54>, <그림 3.2.55>에 나타내었다. 빗금친 부분은 실내실험을 통하여 얻은 결과, 본 연구에서 제시한 투수계수, 연속공극률, 압축강도 기준을 모두 만족하는 영역을 나타내고 있다. 전자는 압축강도와 투수계수의 관계를 나타낸 것으로 투수계수가 증가할수록 압축강도가 감소하는 것으로 나타났으며, R^2 값이 0.79로 어느 정도의 상관관계가 있는 것으로 판단되었다. 후자는 시편 내부의 연속공극률이 증가할수록 압축강도가 감소하는 것을 나타내고 있으며 투수계수와 압축강도 간의 상관관계와 비슷한 경향을 나타냈다.



<그림 3.2.54> 투수계수와 압축강도와의 관계



<그림 3.2.55> 연속공극률과 압축강도와의 관계

<표 3.2.14> 본실험 결과에 따른 최적 배합표

구 분	배합 1	배합 2	배합 3
W / C	45	45	55
S / a	10	15	10

본 실험결과에 따라 <표 3.2.14>는 투수계수, 연속공극률, 압축강도 기준을 모두 만족하는 최적 배합표를 나타낸 것이다.

(나) 탄성계수 측정결과

<표 3.2.15>는 일반린, 저수축 CTB, 저수축 투수 CTB 배합1과 배합2에 대한 압축강도 및 탄성계수 값을 나타내고 있다. 압축강도는 저수축 CTB가 가장 높고 저수축 투수 CTB, 일반린 순으로 나타났다. 또한 탄성계수도 저수축 CTB가 가장 높았으나 압축강도특성과는 달리 일반린이 저수축 투수 CTB 보다 더 높게 측정되었다.

<표 3.2.15> 일반린, 저수축 CTB, 저수축 투수 CTB에 대한 물성값

물성 / 종류	압축강도(kg/cm^2)			탄성계수(kg/cm^2)		
	7일	14일	28일	7일	14일	28일
일반린	54.29	58.40	77.78	114391.52	130062.79	178545.48
저수축 불투수 CTB	138.79	163.52	201.78	151982.85	162567.31	220872.04
저수축 투수 CTB 1 (잔골재율 10%, 물/시멘트비 45%)	63.55	64.91	86.35	85835.13	96661.00	105396.18
저수축 투수 CTB 2 (잔골재율 15%, 물/시멘트비 45%)	65.44	67.64	94.79	88657.18	107951.17	114201.40

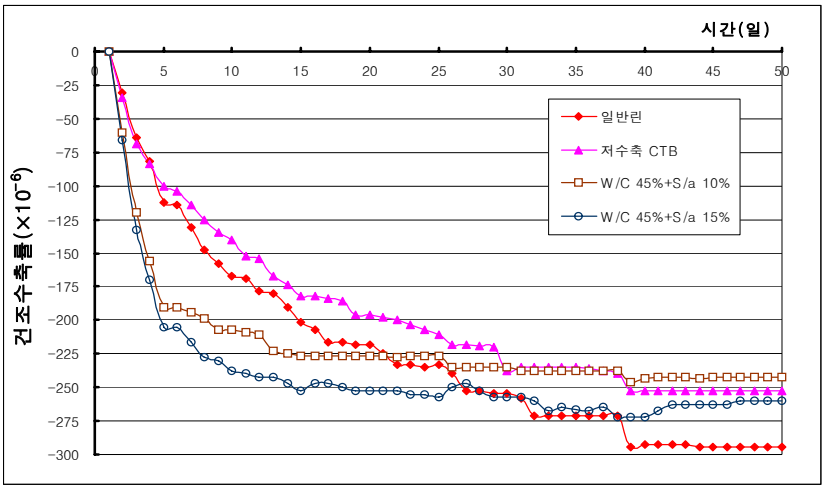
(다) 건조수축 실험결과

본 연구에서 도출된 최적 배합 잔골재율 10~15%, 물/시멘트비 45%에 대해 건조수축 실험을 50일간에 걸쳐 항온항습실에서 실시였으며 디지털 게이지를 이용해서 다음과 같은 결과를 얻었다.

<그림 3.2.56>은 일반린, 저수축 불투수 CTB, 저수축 투수 CTB(물/시멘트비=45%, 잔골재율=10~15%)의 건조수축을 보여주고 있다. 실험결과 저수축 투수 CTB(물/시멘트비=45%, 잔골재율=10%)가 일반린 보다 17%로 건조수축 저감효과가 가장 컸으며 저수축 투수 CTB(물/시멘트비=45%, 잔골재율=10%)와 저수축

CTB도 각각 11%, 10% 저감효과를 보였다.

저수축 투수 CTB는 재령 7일 내에 건조수축이 78%로 매우 크게 일어나는 것을 볼 수 있다. 이는 저수축 투수 CTB의 경우 공극을 가지고 있기 때문에 수분 증발이 저수축 불투수 CTB와 일반린에 비해 빨리 일어나므로 건조수축이 초기에 크게 발생함을 알 수 있었다. 초기에 품질관리의 중요성을 나타내는 것으로 시공시 비닐 깔기등의 준비를 통해 초기 수분 증발을 억제해야 할 것이다. 장기적으로는 저수축 투수 CTB(물/시멘트비=45%, 잔골재율=10~15%)와 저수축 불투수 CTB, 일반린의 건조수축 실험을 비교한 결과, 저수축 투수 CTB는 반사균열 저감에 효과적이라고 판단된다.



<그림 3.2.56> 건조수축 실험결과

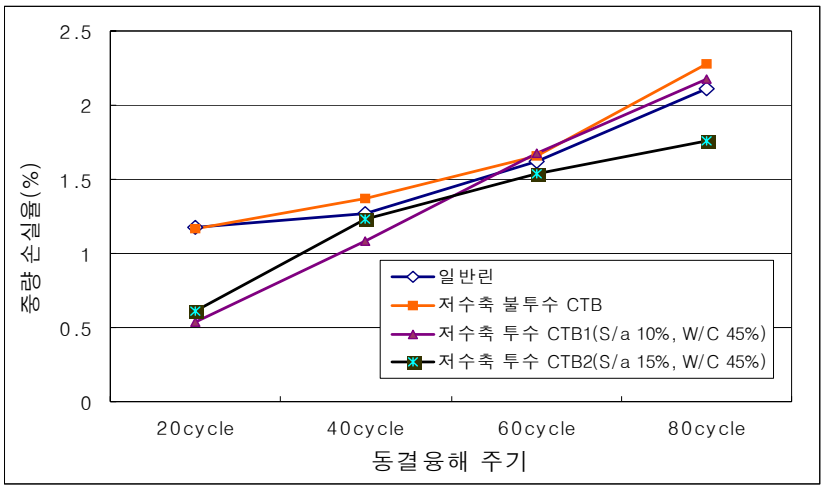
(라) 동결융해 저항성 실험결과

본 연구에서 최적배합으로 도출된 S/a=10~15%, W/C=45%의 저수축 투수 CTB의 동결융해 저항성을 평가하였다. 비교실험을 위해 일반린과 저수축 불투수 CTB도 동일한 조건하에 동결융해 실험을 80cycle 동안 수행하였다.

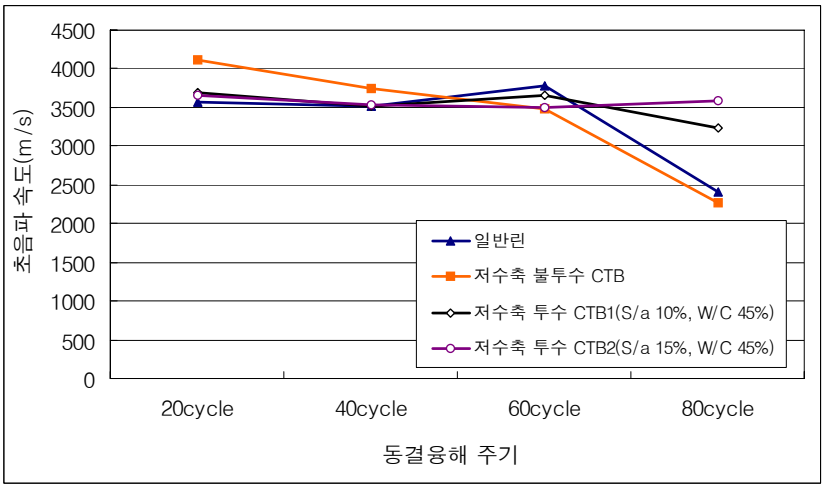
투수 콘크리트는 특성상 내구성 지수 측정을 위한 상대동탄성계수의 측정이 사실상 불가능하므로 20cycle마다 중량측정, 초음파 속도 및 표면상태를 육안관측하는 것으로 하였다. <그림 3.2.57>은 각 배합에 대한 중량을 측정하여 손실율을 나타내었다. 실험결과 저수축 투수 CTB2가 중량 손실율이 가장 적었고, 일반린과 저수축 불투수 CTB의 손실율 변화와 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 또한 80

Cycle 동안의 전체 손실량에 있어서도 1.8~2.1% 정도를 나타내었다.

<그림 3.2.58>은 동결융해 주기에 따른 초음파 속도를 측정한 결과이다. 초음파 속도는 매질의 균질함과 관계가 있다. 즉, 초기 속도 보다 작아졌다면 재료의 균질함이 저하되었음을 의미한다. 실험결과를 보면 저수축 불투수 CTB와 일반린의 초음파 속도가 작아지는 경향을 볼 수 있다. 그러나 저수축 투수 CTB는 초기 초음파 속도와 별다른 변화가 없음을 보이고 있으며 동결융해 저항성에 대해 일반린 정도의 역할을 할 수 있다고 판단된다.



<그림 3.2.57> 동결융해 주기에 따른 중량손실률

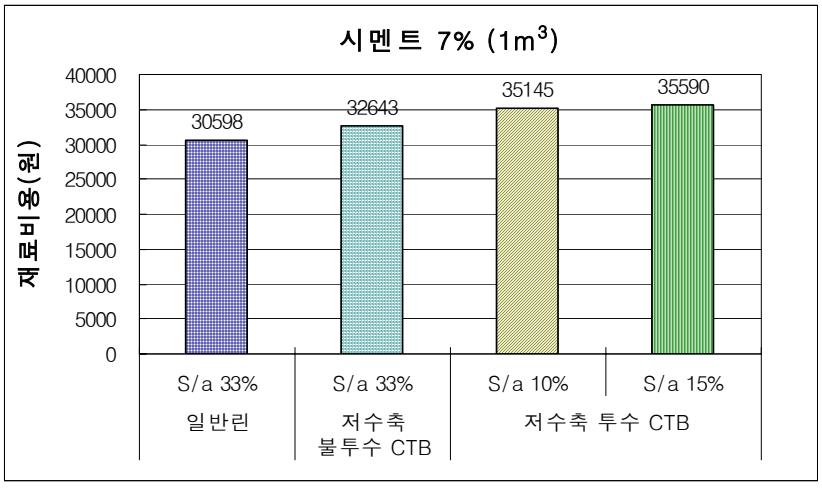


<그림 3.2.58> 동결융해 주기에 따른 초음파 속도변화

(3) 재료비용 분석 및 요약

<그림 3.2.59>는 기존 CTB에 플라이 애쉬, 팽창재를 적용함에 따른 저수축 불투수 CTB 및 저수축 투수 CTB의 재료비 상승을 보여주고 있다. 2005년 기준으로 저수축 불투수 CTB는 일반린 보다 1.07배 정도 증가함을 알 수 있고, 저수축 투수 CTB는 일반린 보다 1.15~1.16배 증가함을 알 수 있다. 따라서 저수축 투수 CTB는 반사균열을 저감시키는 동시에 투수 기능을 가진 친환경 포장재료로 적용함이 타당하다고 판단된다.

본 연구에서는 배수성 아스팔트 및 투수성포장의 기층에 적용될 저수축 투수 CTB를 연구하였다. CTB 적용 시 문제가 되는 반사균열 해결과 투수성 확보를 위하여 다양한 실험을 수행하였다. 굵은골재 최대치수 25mm, 단위 시멘트량 7%, 잔골재율 10~15%, 물/시멘트비 45~55%인 배합이 투수계수, 연속공극률, 압축강도 기준을 모두 만족하였다. 건조수축 실험결과, 저수축 투수 CTB는 일반린 보다 17% 수축저감 효과가 나타났다. 동결융해 저항성은 중량 손실율, 초음파 속도, 육안관측 결과 현재 80Cycle까지는 매우 양호한 것으로 확인되었다. 재료비용은 일반린 보다 1.15~1.16배 증가하나 반사균열을 저감시키는 동시에 투수 기능을 가진 친환경 포장재료로 사용 가능하다고 판단된다.



<그림 3.2.59> 재료비용 분석결과($1m^3$ 당)

2. 배수성 아스팔트 재료 개발

가. 아스팔트 배수성 포장

(1) 배수성 포장의 규격

(가) 골재

배수성 포장은 용적중량의 대부분이 굵은 골재이며, 이 굵은 골재의 품질, 형상 및 입도가 혼합물의 품질에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서 골재를 선정하는데 있어서 굵은 골재의 마모율, 형상 등이 중요한 요소로 평가되고 있다. <표 3.2.16>은 유럽 국가별 배수성 포장 비율을 보여주고 있으며 <표 3.2.17>은 일본과 국내에서 배수성 포장에 적용하고 있는 굵은 골재의 품질기준을 나타낸 것이다.

<표 3.2.16> 유럽 국가별 배수성 포장 비율(1990년)

국 가	배수성 포장 비율(%) (전체 가열아스팔트 혼합물에 대한)
벨기에	9
네덜란드	6
스위스	6
오스트리아	5
이탈리아	5
프랑스	4
독일	1
영국	매우 적음

<표 3.2.17> 배수성 포장용 굵은 골재의 품질기준

항 목	단위	일본도로 협회	한국도로 공사	한국도로 교통협회
비중(표건)	-	2.45 이상	2.5 이상	2.45 이상
흡수량	%	3.0 이하	3.0 이하	3.0 이하
안정성 시험 감량	%	12 이하	12 이하	-
마모감량	%	30 이하	35 이하	30 이하
편평 및 세장편 함유량	%	10 이하	20 이하	-
피복면적	%	-	95 이상	-

골재의 품질기준은 일본과 국내에서 적용되고 있는 기준이 큰 차이는 없지만 편평 및 세장편 함유량의 경우 일본은 10%이하로 제한하는 반면 한국도로공사의 경우 20% 이하로 제한하고 있다. 일본의 편평 및 세장편 규정은 ASTM D 4791과 동일하며, 골재 두께와 길이의 비가 1:3으로 편석과 장석을 모두 포함하고 있는 경우를 의미한다. 한국도로공사에서 적용하고 있는 KS F 2575 규정은 골재 두께에 대한 폭의 비 혹은 폭의 대한 길이의 비가 3배 이상인 것으로 규정하고 있다. KS 규정 방법으로 측정을 할 경우 ASTM 방법보다 편장석 함유량이 적게 계산된다. 이것은 국내의 골재 생산 현황을 반영한 것이다.

(나) 아스팔트 바인더

배수성 혼합물은 일반 아스팔트 혼합물에 비해 일광, 공기, 물 등의 영향을 받기 쉽다. 따라서 사용되는 아스팔트는 내구성이 좋고, 골재에 대한 파악력(把握力, N·m, 저항성의 전체 질량), 점착력이 크고, 박리 저항성이 뛰어나며, 골재를 두껍게 피복 할 수 있는 것이어야 한다. <표 3.2.18>은 일본과 국내에서 배수성 포장에 적용하고 있는 아스팔트의 품질기준을 나타낸 것이다.

<표 3.2.18> 배수성 포장용 아스팔트의 품질기준

항 목	단위	일본도로공단	일본도로협회	한국도로공사	한국도로교통협회
침입도	1/10㎜	40 이상	40 이상	40 이상	40 이상
연화점	℃	70 이상	80 이상	70 이상	80 이상
신도(15℃)	㎝	50 이상	50 이상	50 이상	50 이상
박막가열질량변화율	%	0.6 이하	0.6 이하	0.6 이하	0.6 이하
박막가열침입도잔류율	%	65 이상	65 이상	65 이상	65 이상
터프니스	㎏ · ㎝	200 이상	200 이상	200 이상	200 이상
티네시티	㎏ · ㎝	150 이상	150 이상	150 이상	150 이상
60℃점도	poise	200,000 이상	200,000 이상	200,000 이상	200,000 이상

배수성 포장용 아스팔트의 품질 기준은 일본과 국내의 기준이 큰 차이는 없다. 규정 항목 중 터프니스와 티네시티(Toughness & Tenacity)는 아스팔트의 파악력(把握力, N・m, 저항성의 전체 질량)과 점결력(粘結力, N・m, 저항성의 후반의 질량)을 평가하기 위해 실시하는 시험으로 국내에는 보편화되어 있는 시험 방법은 아니며, 일본에서는 개질 아스팔트의 규격 평가에 적용되는 항목이다.

(다) 아스팔트 혼합물

배수성 혼합물은 충분한 내구성 확보와 동시에 기능성이 확보되어야 한다. 내구성은 안정도, 칸타브로 손실률, 동적안정도로 평가하고, 기능성은 공극률 확보와 투수능력으로 평가하고 있다. <표 3.2.19>는 일본과 국내에서 배수성 포장에 적용하고 있는 아스팔트 혼합물의 품질기준을 나타낸 것이다.

<표 3.2.19>를 살펴보면 배수성 아스팔트 혼합물의 품질기준도 일본과 국내 기준이 크게 차이가 나지는 않는다. 일본도로협회의 마샬안정도와 동적안정도 기준

차이 이외에는 큰 차이가 없다. 투수능력의 경우 일본은 실내 투수 시험이 정리되어 투수계수로 제한하고 있으며, 한국도로공사의 경우는 국내에 기준이나 방법이 마련되어 있지 않아 현장투수능력으로 제한하고 있다.

<표 3.2.19> 배수성 포장용 아스팔트 혼합물의 품질기준

항 목	단위	일본도로공단	일본도로협회	한국도로공사	한국도로교통협회	OGFC
공극률	%	20 이상	18 이상	20 이상	20 이상	15-20
다짐 횟수	-	양면 50회	양면 50회	양면 50회	양면 50회	양면 50회
안정도	kg	500 이상	350 이상	500 이상	500 이상	-
흐름값	1/100㎝	20～40	20～40	20～40	20～40	-
잔류안정도	%	75 이상	-	75 이상	75 이상	-
칸타브로 손실률	%	20 이하	20 이하	20 이하	-	-
동적안정도	회/㎜	3,000 이상	1,500 이상*	-	3,000 이상	1,500 (3,000)
투수능력	㎝/sec	10-2 이상	10-2 이상	10 이상**	-	-

* 일반적으로 교통량이 많은 곳에서 1,500회/㎜ 이상을 설정하는데, 특히 대형차 교통량이 많은 지점에서는 3,000회/㎜ 이상으로 설정하고 있다.

** 일본은 실내 투수 성능에 대한 기준이며, 한국도로공사는 현장투수시험기를 이용하여 시공된 현장에서 배수되는 현장투수능력 기준이다.

(2) 국내 배수성 포장용 바인더

(가) DAMA 아스팔트 바인더

다마(DAMA ; Drain Asphalt Modified Additive)는 열가소성 수지분말(PE)및 폐타이어 고무가루와 PMA(Polymer Modified Asphalt Additive)의 일종인 분말형 아스팔트 개질 첨가제를 혼입하여 제조한 것이다. 열가소성 수지(PE)는 140℃ 이상에

서 용해되어 아스팔트와 결합함으로써 아스팔트의 물리적 성질을 개선시킨다.

이러한 아스팔트는 고점도로서 골재 결합력을 증대시키며 연화점이 높아 하절기 고온에서 발생하는 러팅을 방지한다. #40체 이하의 미립분의 폐타이어 고무가루는 고온의 아스팔트에 일부는 용해되어 아스팔트의 물리적 성질을 개선시키며 일부는 알갱이로 존재하면서 고무 특유의 역할을 담당한다. 이로 인해 저온 시 취성파괴를 저감시키는 효과를 가지며 기타 재료들은 아스팔트의 노화를 방지하여 포장 내구성을 증진시키는 등의 효과를 갖는다.

(나) CRM 아스팔트 바인더

CRM 아스팔트 바인더는 폐타이어 고무가루와 아스팔트 시멘트를 혼합해서 아스팔트의 성질을 개선한 것으로서 포장의 균열과 러팅 저항성을 강화한 것이다. 시공 시 필요한 경우 박리방지제를 사용한다.

(다) Superphalt 배수성 아스팔트

Superphalt 배수성 아스팔트는 플라스틱과 고무의 두 가지 성질을 가진 열가소성 Elastomer와 접착력이 우수한 공중합수지 및 Asphalt와 반응하는 개질재를 사용하여 물리적·화학적 안전성을 갖도록 제조된 개질 아스팔트이다. <표 3.2.20>은 Superphalt 배수성 아스팔트 물성을 보여 주고 있다.

이 밖에 <표 3.2.6>에서 보는 바와 같은 여러 종류의 배수성 아스팔트 혼합물이 상용화되어 있는데, 표에서 보는 바와 같이 일반 아스팔트 혼합물에 비해 가격이 상당히 높음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 재료의 성능 개선뿐만 아니라 경제적인 측면을 고려하여 보다 경제성 있는 제품의 개발을 유도하고자 한다.

<표 3.2.20> Superphalt 배수성 아스팔트 물성

항 목	기 준	시험결과	시험방법
침입도(25℃) 1/10mm	40 이상	55.3	ASTM D 5
연화점 ℃	80 이상	99.0	ASTM D 36
신도(15℃) cm	50 이상	75	ASTM D 113
박막가열질량변화율 %	0.6 이상	0.13	JIS K 2207
박막가열침입도잔류율 %	65 이상	94	JIS K 2207
터크니스(25℃) kg·cm	200 이상	373.6	일본포장시험법편람
테너시티(25℃) kg·cm	150 이상	256.9	일본포장시험법편람
점도(60℃) poise	200,000 이상	500,000 이상	ASTM D 2171
밀도(15℃) g/cm^3	-	1.03	ASTM D 70
인화점(℃) g/cm^3	-	300 이상	ASTM D 92

<표 3.2.21> 국내 배수성 아스팔트 혼합물 단가

품명	규격	단위	가격
일반아스콘	사용골재굵기 #67	M/T	38,000
PPA(PMA배수성 아스콘)	19, 13mm	M/T	69,000
에코팔트아스콘	13mm(배수성)	M/T	73,000
CRM 아스콘(페타이어고무)	개립도(배수성)	M/T	81,000
투수아스팔트(특허 제272799호)	암갈색	M/T	81,000
에스팔트(TPS)	13mm(고점도 배수성)	M/T	85,000

(3) 배수성 포장용 바인더 첨가제

<표 3.2.22>는 일반적으로 사용되고 있는 아스팔트 첨가제 및 개질재의 종류를 나타낸 것이다.

<표 3.2.22> 아스팔트 첨가제 및 개질재의 일반적인 분류

종 류	일반적인 예
1. 채움재	· 광물성 채움재 : 크러셔의 분말, 석회(Lime) 포틀랜드 시멘트, 플라이애쉬 · 카본블랙
2. 중량재(extender)	· 황(Sulfur) · 리그린(lignin)
폴 리 머	
3. 고 무 ① 천연라텍스 ② 인조라텍스 ③ 코폴리머 ④ 재생고무	· 천연고무 · 스티렌 부타디엔(Styrene-butadiene) 또는 SBR · 폴리크로프렌 라텍스(Polychroprene Latex) · 스티렌 부타디엔 스티렌(Styrene-butadiene-Styrene, SBS) · 스티렌 이소프렌 스티렌(Styrene-isoprene-Styrene, SIS) · 분쇄고무 개질재(Crumb rubber modifier)
4. 플라스틱	· 플리에칠렌(Polyethylene)/폴리프로필렌(Polypropylene) · 에칠렌 아크릴 코폴리머(ethylene acrylate copolymer) · 에칠 비닐 아세테이트(ethyI-vinyI-acetate, EVA) · 염화 폴리비닐(PolyvinyI chloride, PVC) · 에칠렌 프로필렌(ethylene propylene) 또는 EPDM · 폴리오레핀(Polyolefins)
5. 섬유	· 천연재료 : 석면(asbestos), 암면(rock wool) · 인공재료 : 폴리프로필렌(Polypropylene) 폴리에스터(Polyester), 유리섬유(fiberglass) 광물질 섬유(mineral cellulose)
6. 산화제(Oxidant)	· 망간염(Manganese salts)
7. 산화방지제	· 납 합성물(lead compounds) · 카본(carbon) · 칼슘 염(calcium salts)
8. 탄화수소 (Hydrocarbon)	· 재생오일 · 단단한 천연 아스팔트
9. 박리방지제	· 아민(Amines) · 석회(Lime)
10. 폐기물	· 지붕재(Roofing shingles) · 폐타이어 · 유리
11. 기타	· 실리콘 · 융빙염화칼슘

이 중에서 현재 일반적으로 배수성 아스팔트 포장에 이용되는 첨가제는 다음과 같다.

(가) 채움재

아스팔트 혼합물에 사용되는 광물성 채움재는 다음과 같은 역할을 가지고 있다.

■ 아스팔트 혼합물 내의 공극에 채워 최적 아스팔트 함량을 줄인다.
■ 골재 입도의 규정을 맞게 한다.
■ 아스팔트 혼합물의 안정도를 증가시키다.
■ 아스팔트와 골재의 점착력을 증진시킨다.

일반적으로 아스팔트 혼합물 내의 채움재 첨가량을 증가시키면, 최적 아스팔트 함량이 감소되고, 밀도와 안정도가 증가된다. 광물성 채움재는 아스팔트 혼합물의 골재 입자 사이의 공극을 채우고, 규정된 입도 기준을 맞추는데 사용되어 왔다. 이러한 채움재는 아스팔트 혼합물을 제조하는 과정에서 정확하고 균질한 비율로 투입되어야 한다. 한 예로 채움재의 투입량이 많게 되면, 골재 간극비(VMA)가 감소되어 충분한 아스팔트량을 얻을 수 없게 된다. 그리고 골재의 표면적을 증가시켜 골재를 둘러싸게 될 아스팔트 피막 두께가 감소됨으로써, 아스팔트 혼합물의 내구성이 저하될 수 있다. 이러한 이유로 일부 시방서에서는 아스팔트 혼합물의 배합설계에 사용될 아스팔트에 대한 채움재의 비율(F(채움재량)/A(아스팔트량))을 규정하고 있다. 일반적으로 아스팔트에 대한 채움재의 비율은 중량비로 0.6에서 1.2 사이가 권장되고 있다.

(나) 증량재(Extender)

증량재는 1973년의 오일 쇼크 이후 제안된 개념의 개질재로 아스팔트 가격의 급증에 따라 혼합물 내의 아스팔트량을 감소시키기 위한 대체 재료로 연구가 추진되었다. 따라서 증량재를 사용하게 되면 비교적 아스팔트 혼합물의 가격을 낮추게 되어, 동일한 비용으로 더 많은 양의 아스팔트 혼합물을 생산하고, 주어진 아스팔트



(a) 액상화 (b) 분말화

<그림 3.2.60> SBR Latex

를 이용해 더 많은 양의 아스팔트 혼합물을 생산할 수 있다. 그러나 이렇게 생산된 아스팔트 혼합물의 내구성에 대한 영향은 아직 충분히 검토되지 않은 상태이다.

(다) SBR 라텍스

스타이렌과 부타디엔을 유화 중합하여 제조한 고무 입자의 수분 산액으로 일반적으로 라텍스라 불리는 유액상의 합성고무이다. SBR 라텍스(Latex)는 약 10여년간 교량등에서 그 품질을 확인하여 우수성을 입증하였으며, 내소성 변형은 물론 내구성이 일반 아스콘의 2~3배(약 10년)에 달하고 있다. 또한 플랜트 믹스형이기 때문에 언제 어디서나 간단히 제조할 수 있고, 유지보수도 매우 용이하다. <그림 3.2.60>은 SBR 라텍스의 액상화된 것과 분말화된 것을 보여준다.

SBR Latex는 열경화성인 SBR 폴리머 계통의 액상 아스팔트 개질재로 폴리머화하여 생산한 것이며, 감온성을 감소시켜 저온에서 혼합물의 균열을 방지한다. 연화점을 높이는 효과로 고온에서의 강도를 증진시켜 러팅과 밀림 현상을 감소시키며 표면의 마모로 저항성을 증진시키고 치핑골재의 부착력을 증진시킨다. 고형질 무게 기준으로 아스팔트 무게의 3%를 첨가하는 비율이 가장 효율적이며 국내 교량, 교면 포장 등에 사용한 경험이 있다.

(라) SBS

SBS 개질 아스팔트는 국내에서 가장 많이 사용되는 개질 아스팔트로 타 개질

아스팔트에 비해 구입 및 사용이 용이하며 일반 아스팔트에 비해 변형(러팅 및 피로)과 균열에 대한 저항이 우수한 것으로 알려져 있다. 또한 아스팔트의 감온성을 둔화시켜 저온에서의 연성과 고온에서의 유동저항을 크게 증가시킨다.
국내에서 사용 가능한 SBS 개질 아스팔트는 Ⅰ,Ⅱ형 두 가지가 있는데, Ⅰ형(82-22)은 가격이 비싸고 구입이 어려운 반면 Ⅱ형(76-22)은 Ⅰ형에 비해 구입 및 가격이 용이하고 싸다. 그러나 침입도 및 연화점 등이 일반 아스팔트(AP-5)에 비해 약간 낮거나 높은 것으로 알려져 있다.

(마) 폐타이어

폐타이어를 분쇄한 미세 입도의 고무분말로 아스팔트 바인더의 고온 점도를 증가시키고 연화점과 강성(Stiffness), 탄성 회복을 증가 시키지만 저온 강성을 감소시키는 것으로 알려져 있다. 폐타이어 개질 바인더의 물성은 제조과정의 온도, 숙성시간, 고무분말의 크기 및 입도, 고무분말의 첨가량에 의해 영향을 받는다. 실험에 사용된 폐타이어는 #80을 사용하였다.

(바) 박리방지제

액체박리방지제는 아스팔트 바인더와 혼합하였을 때 표면장력을 줄임으로써 골재에의 부착력을 증진시키는 표면활성 첨가제이다. 최근에 사용되는 박리방지제는 아민(amine)을 함유하는 화학화합물이다. 일반적으로 액체박리방지제는 골재와 아스팔트 바인더와 혼합하기 전에 액체상태의 아스팔트 바인더에 혼합하여 사용한다.
석회첨가제는 액체박리방지제와 달리 아스팔트 바인더와 혼합하기 전에 골재에 첨가한다. 석회첨가제는 소석회와 생석회가 모두 효과가 있으나, 일반적으로 전자가 사용된다.

(사) 왁스(Wax)

왁스란 상온에서는 고체 상태이면서 온도를 높이면 유체로 변하는 분자량 수백 정도의 물체이다. 광택, 윤활 작용 및 방수, 방부 효과가 있기 때문에 여러 분야에

서 단독 또는 기타 수지류와 섞어 사용된다. 또한 양초 및 접착제, 잉크, 계면활성제의 원료로도 많이 이용된다. 왁스에는 수많은 종류가 있으나, 주로 녹는 온도(융점, 融點)에 따라 저융점 왁스 (일반 파라핀 왁스, 밀납 등) 와 고융점 왁스 (마이크로크리스탈린 왁스, 카나우바왁스, 합성왁스 등) 으로 나누기도 하며, 원료에 따라 석유계 왁스(파라핀, 마이크로크리스탈린 왁스), 동물성 천연왁스, 식물성 천연왁스, 합성왁스 등으로 분류하기도 한다. 넓은 의미의 왁스에는 반 유동성의 바세린, 액체 상태의 유동형 파라핀, 액체 파라핀 등이 포함된다. 따라서 어떠한 왁스들은 상온에서 반유동상이거나, 완전 유동상일 수도 있다. 겔 형태의 왁스도 있으나 이는 주로 유동상의 왁스와 겔 형성 고분자 수지를 섞은 것이므로 원래의 왁스로 분류하기 힘들다고 할 수 있다.

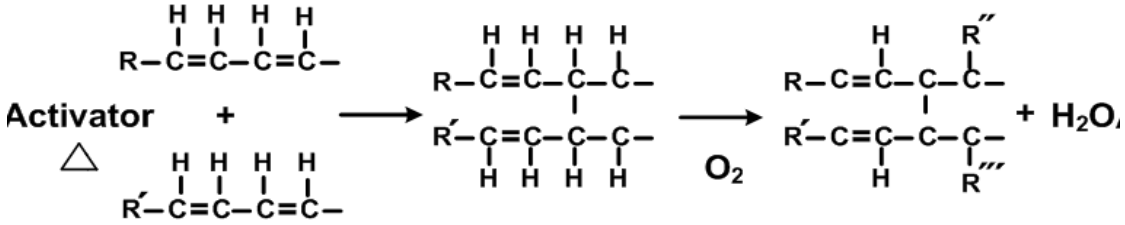
(아) 활성제(Activator)

Activator는 <그림 3.2.2>와 같은 분자 구조로 이루어져 있으며, 아스팔트 바인더와 개질제의 혼합 시 반응작용이 화학적으로 안정 될 수 있도록 도와주는 역할을 하는 촉매제이다.

R,R′,R′′,R′′′은 SBS 또는 아스팔트를 의미하며 Activator에 의하여 이중결합이 깨어진다. 이때 두 개의 분자들이 결합을 이루며 Activator에서 제공된 전자로 인하여 분자중의 수소가 떨어져 Activator에서 제공된 산소와 결합하여 물이 발생하게 되는데, PMA제조 시 주어진 아스팔트의 온도에 의하여 증발하게 된다. 결과적으로 R, R′, R′′, R′′′은 결합하여 분자량이 큰 고분자가 이루어지게 된다.

(자) 산화제(Oxidant)

산화제 종류의 아스팔트 개질재는 아스팔트 혼합물의 강성을 증가시키기 위하여, 혼합물의 생산 과정에서 포장이 포설 이후의 기간 동안 발현되는 아스팔트의 경화



<그림 3.2.61> Activator의 반응도

현상을 유도하기 위해 첨가한다. 이러한 종류의 개질재로 국내에서는 캠크리트가 주로 사용되고 있으며, 아스팔트 포장의 러팅 방지에 효과적인 것으로 알려져 있다.

이러한 장점에 반해 산화제 종류의 개질재를 아스팔트에 첨가하는 경우, 조기에 포장의 경화 현상이 촉진되고, 이로 인해 표층 부분의 아스팔트 혼합물이 너무 단단해져 초기에 온도 균열이 발생할 수 있는 단점이 있다. 실제로 국내에서도 이러한 사례가 조사된 바가 있다. 따라서 산화제 종류의 개질재는 표층보다는 기층에 사용하는 것이 적합한 것으로 알려져 있다.

(차) 산화방지제(Antioxidant)

산화 방지제 종류의 아스팔트 개질재는 산화제와는 반대로 아스팔트 혼합물이 생산, 포설, 공용 기간 동안에 산화 및 경화 현상을 감소시키는 역할을 한다. 따라서 포장의 공용 기간 동안의 산화 현상에 의해 아스팔트가 단단해지는 것을 방지하기 때문에, 아스팔트의 균열 저항성이 개선되고, 아스팔트 혼합물의 내구성을 향상시킬 수 있다. 그러나 아스팔트 혼합물을 생산하는 동안 아스팔트의 산화 현상을 감소시켰기 때문에 포설과 초기 공용 기간 동안 연한 혼합물이 되는 단점이 있다. 현재까지 이러한 산화방지제 종류의 개질재는 대부분 시험실 연구에 국한되어 사용되며, 국내에서는 시공 실적이 없는 실정이다.

(카) 탄화수소(Hydrocarbone)

탄화수소 종류의 아스팔트 개질재는 아스팔트를 구성하는 주요 성분 중 하나인

탄화수소의 특성을 변화시킴으로써, 아스팔트를 더 경화시키거나 연화시키기 위해 사용되며, 활용 목적에 따라 2가지 종류로 구분할 수 있다. 이는 회수 아스팔트 포장의 재활용을 위해 노화된 아스팔트를 연화시키는 재생첨가제와 높은 응력을 받는 아스팔트 혼합물의 강성을 개질한 경화첨가제로 나누어진다. 국내에서 사용되고 있는 개질재로는 현장 아스팔트 재생포장 공법의 적용 시 기존의 노화된 아스팔트의 특성을 개선시키기 위하여 첨가하는 아스팔트 재생재, 구스 아스팔트 포장에서 사용하는 아스팔트인 천연 아스팔트, 그리고 길소나이트 등이 포함된다.

천연 아스팔트는 남미의 Trinidad 섬에서 생산되며 천연적으로 생성된 고체형태의 아스팔트이다. Trinidad Lake Asphalt의 약자를 딴 TLA라 불리기도 한다. 이 아스팔트는 다량의 석분을 함유하고 있어 일반 아스팔트에 비하여 매우 단단한 것이 특징이다. 천연 아스팔트는 일반 아스팔트와 혼합시켜 구스 아스팔트 포장에 사용하기 위한 아스팔트를 생산하는데 첨가된다. 구스 아스팔트 포장은 주로 강상판 교량 위의 교면 포장용으로 사용되는 포장 공법으로 유럽과 일본을 중심으로 많이 사용되고 있다.

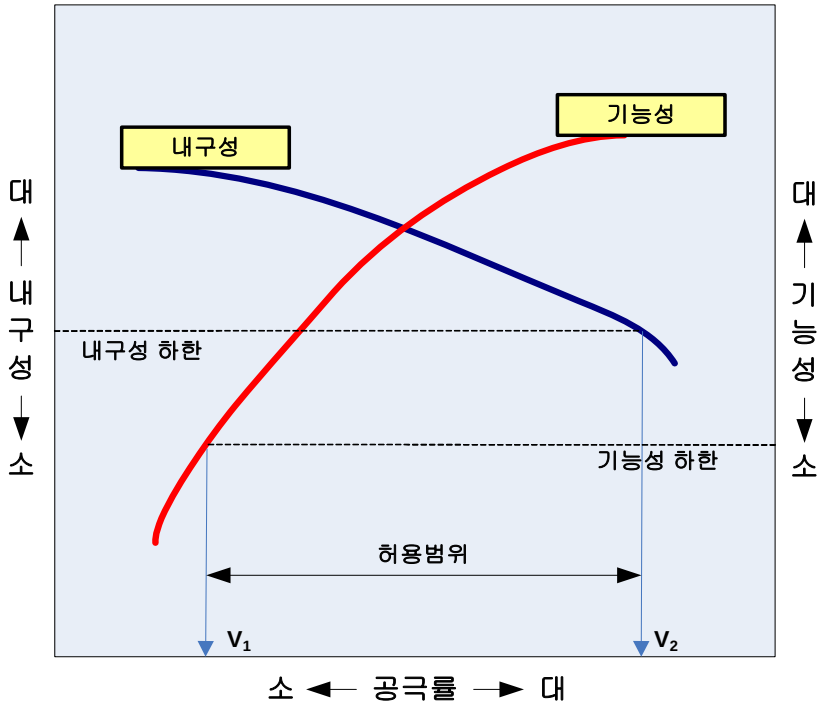
길소나이트는 지층 속에 있던 원유가 화석화되는 과정을 거친 천연 아스팔트의 일종으로, 전세계적으로 미국의 유타주에서만 유일하게 생산되는 광물이다. 길소나이트에는 아스팔텐 성분이 가장 많이 함유되어 있는 것으로 알려져 있으며, 이를 아스팔트 첨가하여 아스팔트 혼합물을 향상시킬 수 있다.

나. 배수성 포장용 바인더 개발

(1) 개발 개요

(가) 기능성 포장으로서 필요한 조건

배수성 포장이 기존의 포장과 근본적으로 다른 점은 투수성과 흡음성 등의 특수 기능을 갖춘 기능성포장이라는 점이다. 하지만 기존 포장과 비교해서 공극률이 크기 때문에, 포장 공용성이 저하될 수 있는 문제점이 있다. 배수성 포장은 목표로 하는 특수 기능을 갖는 동시에 충분한 내구성도 확보되어야 한다.



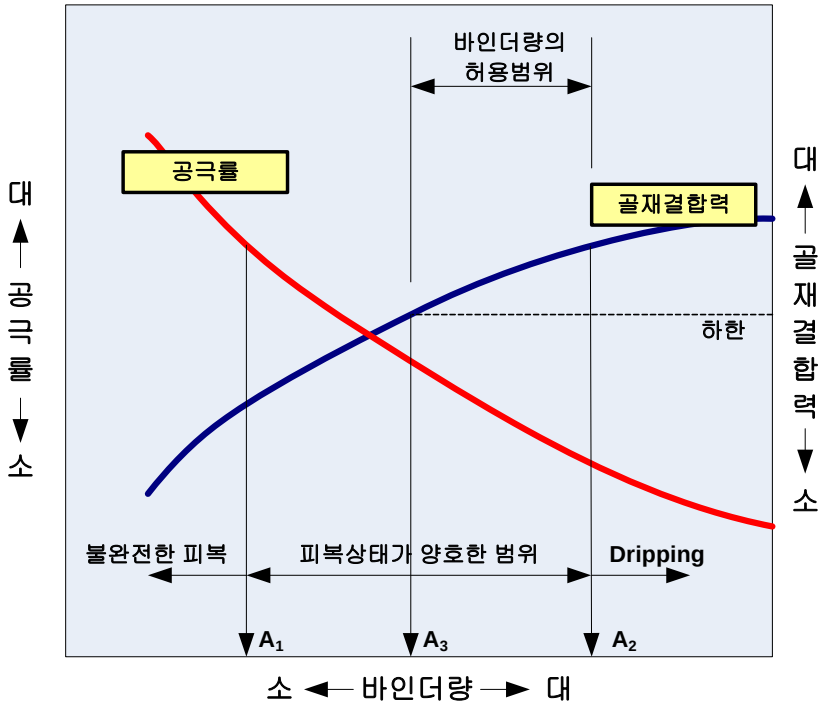
<그림 3.2.62> 기능성포장으로서 필요한 조건

<그림 3.2.62>는 배수성 포장용 혼합물의 공극률과 기능성, 공극률과 내구성과의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 나타낸 것과 같이 배수성 포장은 기능성과 내구성 모두 만족될 수 있도록 혼합물의 공극률을 적정히 선정하는 것이 중요하다.

배수성 포장에 이용하는 아스팔트 혼합물의 배합설계에는 공극률의 적정범위를 결정해야 하는데, 공통된 범위의 하한값(V1)은 혼합물의 기능성으로, 상한값(V2)은 내구성으로 결정된다. 배수성 포장의 기능성에 대해서는 투수성과 흡음성 등을, 내구성에 대해서는 유동특성과 마모특성 등의 역학적 저항성, 그리고 내후성(耐候性)과 내수성(耐水性) 등이 검토 대상이 된다.

(나) 실용적인 혼합물의 성질을 얻기 위한 조건

배수성 포장에 사용되는 혼합물은 기존의 일반 혼합물에 비해 비산(飛散)저항성 등의 내구적 특성이 떨어지므로 기능성과 내구성을 만족시키는 공극률과 혼합물의 일반적 특성들도 적용상에 문제가 없어야 한다. 특히 허용공극률 범위에서 골재의 피복 불량이 일어나지 않도록 하고 골재사이로부터 바인더가 흘러나오지 않도록



<그림 3.2.63> 실용적인 혼합물 특성을 얻기 위한 조건

하기 위해, 적정한 바인더 량의 결정이 매우 중요하다. 또한 혼합물에 외력이 가해졌을 때의 안정성을 확보할 수 있도록 골재간의 결합력을 확보해야 하고, 내후성과 내수성 등도 바인더 량의 결정에 고려되어야 한다.

바인더량과 공극률 및 골재간 결합력과의 일반적인 관계는 <그림 3.2.63>과 같다. 바인더량이 A1 이하인 경우에는 바인더가 피복되는 것이 불완전하기 때문에 골재간의 결합력은 낮아진다. 바인더량이 증가함에 따라 골재의 피복은 양호해지고 골재간의 결합력도 증가하지만, 공극률은 감소한다. 바인더량이 A2 이상이 되면 바인더가 과잉이 되어 골재사이로부터 흘러나오는 현상(Dripping)이 발생하며 골재간의 결합력에도 거의 기여하지 못하게 된다. 그리고 실질적으로 바인더량이 증가하지 않기 때문에 공극률도 크게 변화하지 않는다. 단, 바인더량 A2는 혼합물 제조시 바인더의 점도에 따라 다르다.

이와 같이 배수성 아스팔트의 적정한 바인더량은 <그림 3.2.63>에서 실선으로 A1~A2의 범위가 되지만, 실용적인 혼합물로서의 안정성을 확보하기 위해서는 골재간의 결합력이 어느 정도 일정값 이상이 되는 바인더량 A3를 설정할 필요가 있다. 따라서 바인더량은 실용적인 혼합물의 성질을 얻을 수 있는 A3~A2의 범위에

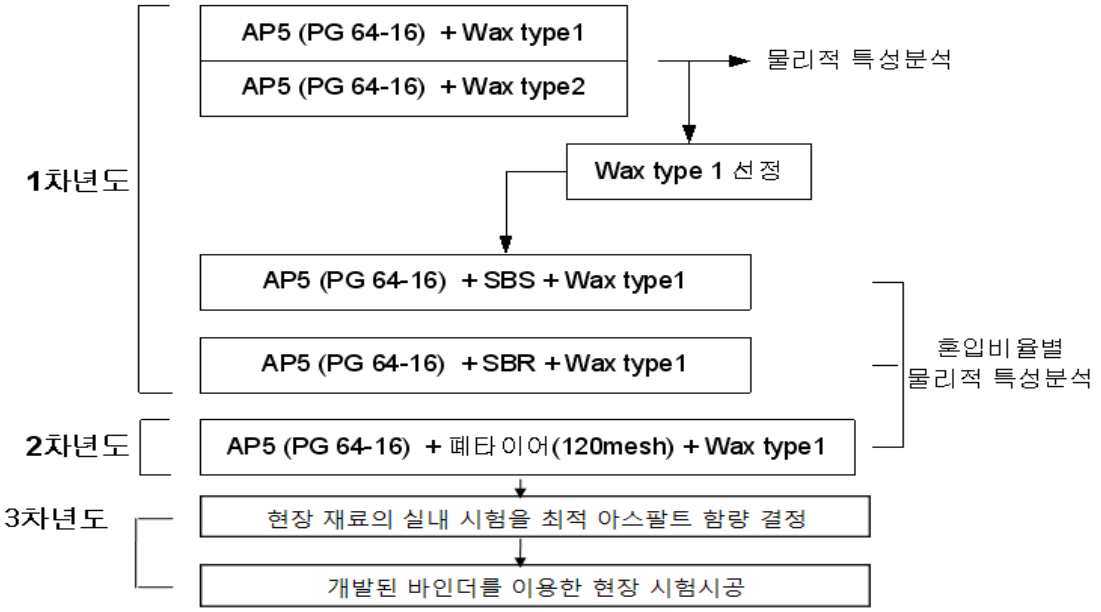
존재한다. 이 범위의 하한값(A3)은 골재간의 결합력에 의하여, 상한값(A2)은 Dripping이 생기는 바인더의 한계량으로 결정된다. 이와 같이 배수성 아스콘에서는 기능성 포장으로서의 조건과 실용적인 혼합물의 성질을 얻기 위한 조건을 동시에 만족시키는 바인더량이 아스팔트로 요구된다.

그러나 이들은 공극률에 크게 영향을 받기 때문에 기존 아스팔트와 같이 공극률 감소만을 중시한 바인더양의 결정방법으로는 실용적인 혼합물의 성질을 확보하기 어렵다. 따라서 배합설계의 기본개념은 이들 2가지 조건을 동시에 만족시키는데 있다. 즉, 혼합물의 기능성과 내구성을 함께 만족하는 공극률을 설정하고 그 공극률을 확보하기 위한 골재입도에서의 적정한 바인더량을 합리적인 평가방법에 의해 결정하는 것이다.

(2) 아스팔트 바인더 시험 개요

본 연구에서는 기존 개질 아스팔트 바인더가 가지고 있는 문제점 중 시공성의 문제를 극복하면서, 소성 변형 저항성 향상・저온 균열 방지・수분 민감성 감소 등의 효과를 발휘할 수 있는 재료를 개발하고자 한다. <그림 3.1.64>는 본 연구의 바인더개발 시험 개요를 나타내고 있다.

1차년도 연구에서는 개질바인더의 작업성 개선을 위해 두 가지 종류의 Wax를 사용하여 물리적 특성을 평가하였고, 여기서 작업성 개선과 더불어 고온특성도 향상시켜주는 Wax type I 을 선정하였다. 또한 선정된 Wax type I 을 SBS, SBR과 혼합하여 바인더의 물리적 특성을 평가하였다. 2차년도 연구에서는 Wax type I 에 폐타이어가루(120 mesh)를 혼입한 개질바인더를 제조하여 추가로 바인더 시험을 수행하였다. 또한 1, 2차년도에서 수행된 PG등급, 침입도, 절대점도, 동점도 시험결과를 상호 비교・분석하여 최종바인더를 결정하였다. 3차년도에서는 선정된 바인더를 가지고 현장실험을 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 최적의 배합을 결정하였다. 3차년도에는 선정된 바인더를 이용하여 현실 시험시공을 위한 기초 실내 실험을 실시하였으며 그 결과를 바탕으로 최적의 배합을 결정하였다.



<그림 3.1.64> 아스팔트 바인더개발 시험개요

(3) 아스팔트 바인더 시험방법

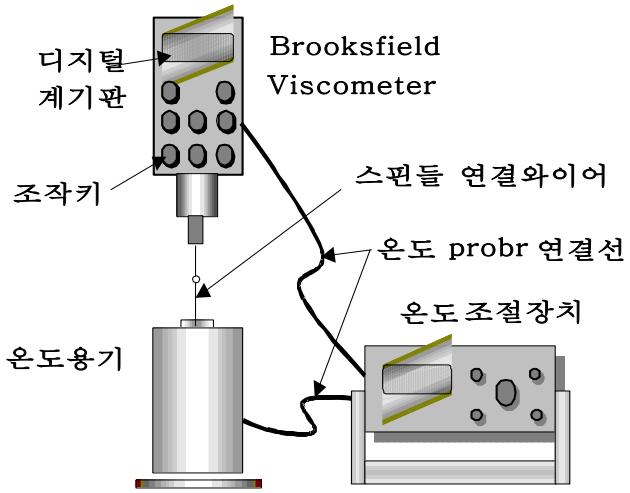
본 연구에서는 개질 아스팔트 바인더의 종류별로 상온영역(25℃)에서의 아스팔트의 거동특성 또는 물리적 성질을 알아보기 위한 침입도 시험, 고온영역에서의 러팅 저항성을 알아보기 위한 온도단계별 동적전단유동기시험(DSR), 저온영역에서의 온도균열저항성을 알아보기 위한 온도단계별 처짐보유동기시험(BBR), 60℃에서의 절대 점도시험과 같은 실내시험을 실시하였다.

(가) 침입도 시험(Penetration Test)

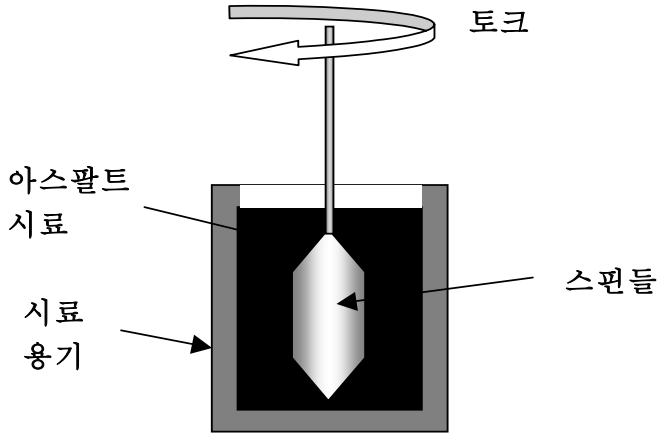
고체 또는 반고체상태의 아스팔트에 대하여 굳기(consistency)를 측정하는 가장 간단하면서 신속한 시험법으로, 국내 아스팔트 시멘트의 경우 그 침입도의 범위에 따라서 제품의 등급을 구분한다. 시험방법은 아스팔트 포장의 공용 중 평균온도라고 가정된 25℃에서 100g의 하중이 재하된 바늘이 5초 동안 아스팔트 시멘트 시료에 관입된 깊이를 0.1mm 단위로 측정한다. 아스팔트의 굳기(consistency)가 부드러울수록 침입도는 커지며, 침입도 2이하와 500이상의 값은 신뢰할 수 없는 범위로 보고 있다.

(나) 동점도(Kinematic viscosity) 시험

아스팔트 바인더를 hot-mix 플랜트에서 다룰 때는 펌핑 또는 배합이 용이하도록 가능한 충분히 액체상태를 유지해야 한다. 회전점도시험은 고온에서 아스팔트 바인더의 워커빌리티를 측정 평가하는 데 사용된다. 이 시험장치에 대한 개략도는 <그림 3.2.65>와 <그림 3.2.66>에 나와 있다. 약 135℃의 아스팔트 시료 내에 원통형 스핀들이 일정한 회전속도를 유지하는데 필요한 토크를 측정하여 바인더의 점도를 자동적으로 계산하고 계기판에 계시한다. 측정된 점도는 3Pa-s(3000 centiPoise)이하가 되야한다. 전술한 대로 회전점도시험은 플랜트에서 아스팔트 바인더의 작업성을 평가하는 것이기 때문에 노화되지 않은 시료에 대하여만 측정한다.



<그림 3.2.65> 회전점도기의 개략도



<그림 3.2.66> 점도측정방법

(다) 아스팔트 바인더 노화시험

아스팔트의 공용기간에 따른 노화 정도를 모사하기 위하여 다음의 두 가지 방법으로 아스팔트를 산화시킨다.

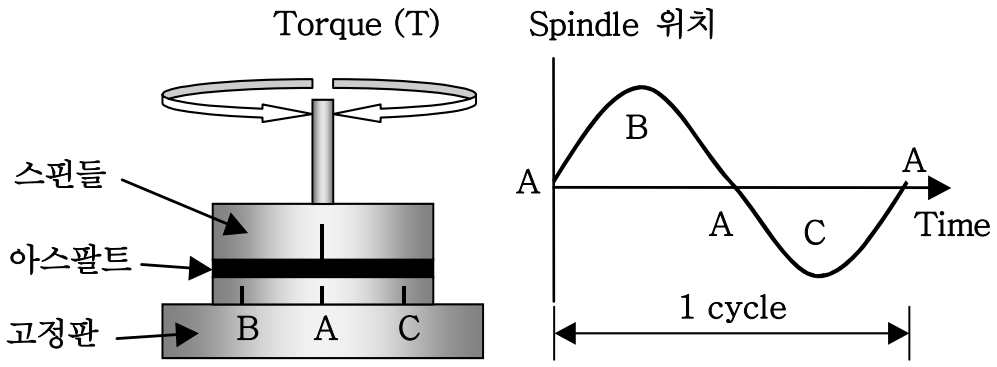
• 회전 박막가열 시험(Rolling Thin Film Oven, RTFO) - 163℃의 온도조건 하에서 얇은 막으로 펴진 아스팔트 바인더에 공기를 불어넣어 바인더를 산화시키는 장비로서 아스팔트 콘크리트의 생산과정 중초기 플랜트에서 고온으로 골재와 혼합되고 현장으로 이동, 포설되는 과정의 노화를 모사한다. 이 장치를 이용하여 1차 노화된 바인더는 무게를 측정하여 휘발성분의 증발에 의한 질량손실률을 계산하고 DSR시험과 그 후의 추가적인 노화시험(PAV)용 시료로 이용된다. 1차 노화 후 계산된 질량손실률은 1%이내이어야 한다.

• 압력노화용기 시험(Pressure Aging Vessel, PAV) - PAV는 고온·고압의 압력용기 속에 RTFO시험에서 1차 노화된 아스팔트 바인더를 넣고 산화시킴으로써 장기간에 걸친 아스팔트의 노화를 단기간에 모사하기 위한 장치이다. RTFO와 마찬가지로 노화된 시료에 대해서는 DSR시험을 실시하고, 추가적으로 BBR시험과 필요한 경우 직접전단시험을 실시한다.

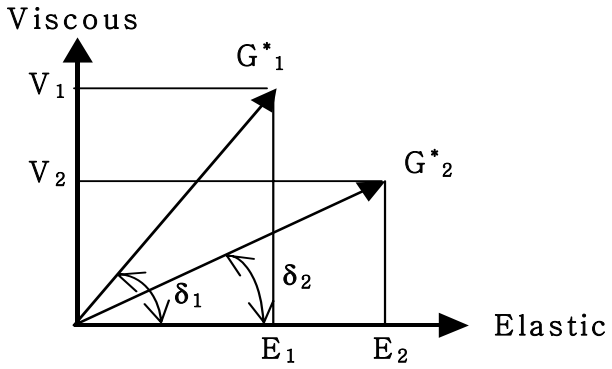
(라) DSR(Dynamic Shear Rheometer) 시험

아스팔트 바인더의 거동은 시간 및 온도의 영향을 받으므로 이 두 가지 요소에 대한 영향을 동시에 측정하는 것이 이상적이다. DSR은 이러한 목적에 대하여 이상적인 실험을 할 수 있도록 개량된 장치이다. <그림 3.2.67>은 DSR 시험의 개략도이며, 하부의 고정판과 상부의 스핀들 사이에 시료를 장착하고 스핀들에 의해 일정한 strain이 발생하도록 비틀림을 가하고 이때 발생되는 토크(T)와 위상각(δ)을 측정하여 복합전단계수(Complex shear modulus, G*)를 계산한다. 여기서 복합전단계수는 탄성과 점성 두 가지 형태의 저항능력으로 구성되어 있다.

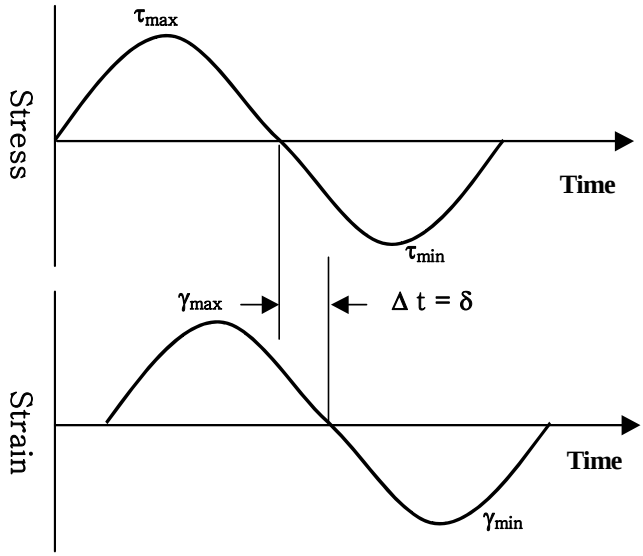
위상각 δ는 가해진 전단응력과 전단변형률 발생 사이의 시간차로서 δ값이 0에 가까워질수록 응력과 변형률 발생 사이에 시간차가 없어지는 것을 뜻하므로 점점 탄성체와 같은 거동을 하게 되는 것이다. <그림 3.2.68>과 <그림 3.2.69>는 이러한 점을 설명하고 있다.



<그림 3.2.67> DSR 시험의 개략도



<그림 3.2.68> δ의 물리적 의미



<그림 3.2.69> DSR 시험에서 δ의 측정방법

DSR시험은 노화되지 않은 원래의 바인더와 단기노화(RTFO노화)시료, 그리고 장기노화(PAV노화) 시료에 대하여 모두 수행한다. DSR 프로그램에서 G*값은 다음의 식을 사용하여 계산된다.

$$G^* = \frac{\tau_{max} - \tau_{min}}{\gamma_{max} - \gamma_{min}}$$

여기서, $\tau = \frac{2T}{\pi r^3}$

T = 시료에 가해지는 최대 토크

r = 아스팔트시료의 반경

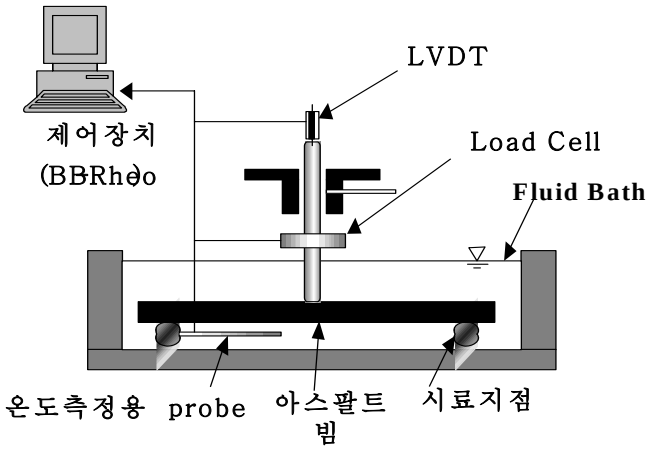
$\gamma = \frac{\theta d}{2h}$

d = 아스팔트시료의 직경

h = 아스팔트시료의 두께

(마) BBR(Bending Beam Rheometer) 시험

지금까지의 아스팔트 바인더 시험법들은 25℃와 60℃ 등 제한적인 범위에서의 물리적 특성에 대하여 측정하였다. 그러나 실제 공용중인 아스팔트 포장은 고온과 중간온도는 물론이고 빙점 이하의 낮은 온도조건의 영향도 받고 있으며, 이때의 아스팔트는 매우 단단하여 탄성체와 유사한 거동을 하게 된다. BBR은 이러한 저온조건하에서의 아스팔트 특성을 평가하기 위하여 빔 이론을 기초로 개발된 장치로서 아스팔트의 물리적 경화에 대한 참고자료의 제공이 주된 목적이다. 실제 시험에서는 포장이 경험하게 될 가장 낮은 온도조건 하에서 빔의 형태로 제작된 아스팔트 시료에 Creep 하중(일정하중)을 240초 동안 가하며 처짐을 측정하고 Creep하중에 대한 저항능력인 Creep 강성(St)과 강성의 변화율(m-value)을 계산한다.
<그림 3.2.70>은 BBR 시험장치의 개략도이다. BBR 시험의 결과 데이터들은 컴퓨터 제어에 의해 자동적으로 계산되어진다.



<그림 3.2.70> BBR 시험의 개략도

계산되어진 강성이 300MPa 이상이면, 아스팔트 바인더는 상당히 취성적이라고 볼 수 있으며, 이러한 아스팔트 바인더는 저온조건에서의 성능이 나쁠 가능성이 크다고 볼 수 있다. 따라서 수퍼페이브 시방서는 크리프 강성 값이 300MPa 이하가 되도록 권고하고 있다. 만일 그 이상인 경우에는 추가적인 직접전단시험을 실시하여, 파괴시 인장변형량이 1% 이상이 되는지를 확인할 필요가 있다.

(바) 절대 점도 시험

점도는 유체의 흐름에 대한 저항성으로 간단하게 정의할 수 있다. 아스팔트 시멘트의 점도 등급은 60℃에서 측정한 점도를 기준으로 분류한 것이다. 60℃라는 온도는 여름철 아스팔트 포장 표면의 대략적인 최고 온도이다. 감압모세관점도계의 눈금 A~G까지 각각의 구간에 대하여 시간과 점도병 계수를 곱한 값을 평균으로 사용하며, 식은 아래와 같다.

절대점도(Poises) = K*t
여기서, K = 점도병계수(P/S)
t = 유출시간(time)



<그림 3.2.71> 절대 점도 시험기

본 시험은 감압모세관점도계를 이용하여 60℃에서의 점도를 측정하는 시험이며, 단위는 Pa.s로 나타낸다. 60℃ 점도를 높인 아스팔트는 유동 방지에 효과적이며 내유동성이다. 개질아스팔트 중 고점도 개질아스팔트나 초중교통용 개질아스팔트 등의 규격 항목에 포함된다.

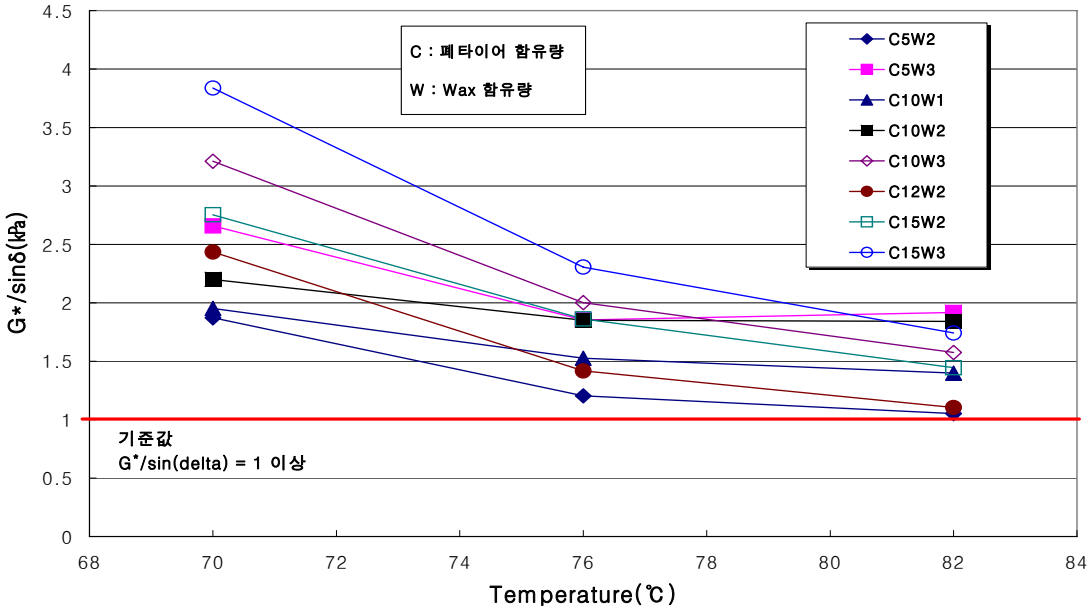
본 연구에서는 2회 실험값을 평균으로 사용하였으며, 배수성 포장의 기준값(200,000poise)을 통과하는지에 대하여 평가하였다. <그림 3.2.71>은 절대점도 시험기를 보여주고 있다.

(4) 아스팔트 바인더 시험 결과

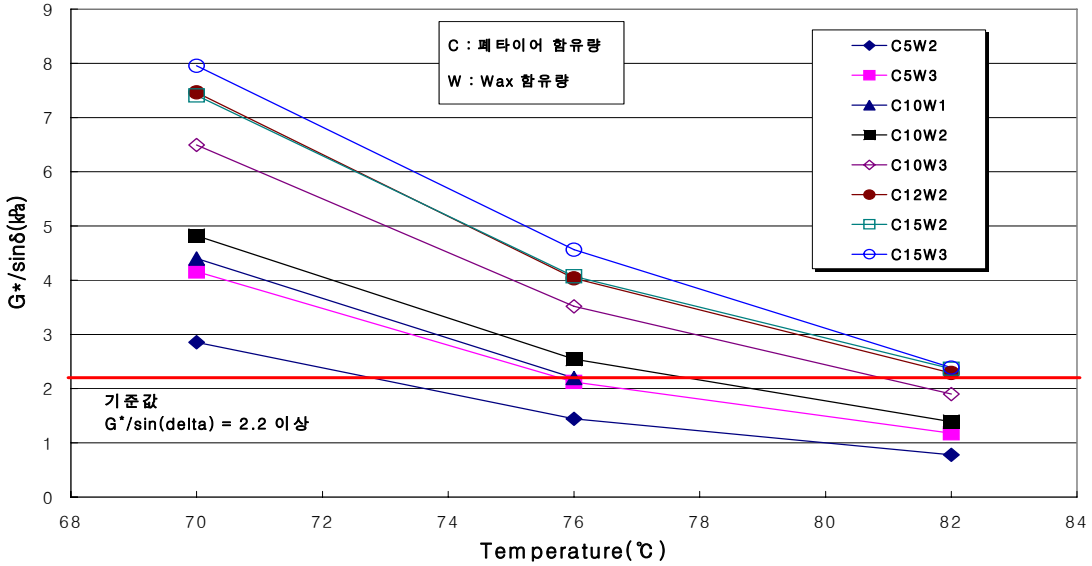
(가) PG 등급 시험결과

폐타이어(120 mesh)를 5%, 10%, 12%, 15%, Wax(type Ⅰ)를 1%, 2%, 3% 변화시켜서 DSR 시험과 BBR 시험을 통해 PG등급을 산정하였다. <그림 3.2.72>와 <그림 3.2.73>은 바인더의 DSR 시험결과, <그림 3.2.74>는 BBR 시험결과를 나타내고 있으며, <표 3.2.23>~<표 3.2.25>는 DSR과 BBR 시험결과를 이용한 PG등급 산정

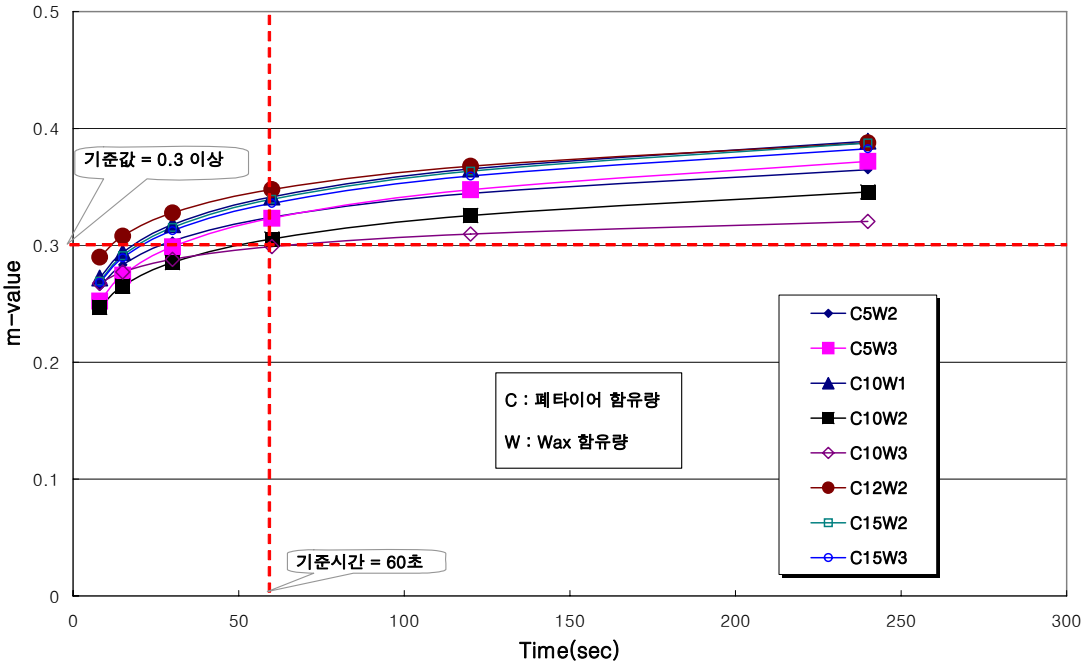
결과를 보여주고 있다. 표에서 나타낸 것과 같이 PG 82-22에 도달하기 위해서는 폐타이어를 12% 이상 혼입해야 됨을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 볼 때, 폐타이어와 Wax를 혼입한 시험에서 가장 적정한 혼입비율은 폐타이어 12% + Wax 2% (PG 82-22)로 판단된다.



<그림 3.2.72> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 DSR(Original) 시험결과



<그림 3.2.73> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 DSR(RTFO) 시험결과



<그림 3.2.74> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 BBR 시험결과(온도 : -12℃)

<표 3.2.23> Wax와 폐타이어 첨가율에 따른 바인더 특성 비교(1)

폐타이어 5% + Wax 2% (C5W2)					바인더 등급 PG70-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	1.873	pass	2.854	pass	0		
76	1.205	pass	1.444	fail	-6		
82	1.052	pass	0.780	fail	-12	229.58	0.324
폐타이어 5% + Wax 3% (C5W3)					바인더 등급 PG 70-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	2.658	pass	4.158	pass	0		
76	1.854	pass	2.124	fail	-6		
82	1.917	pass	1.175	fail	-12	218.02	0.323

<표 3.2.24> Wax와 폐타이어 첨가율에 따른 바인더 특성 비교(2)

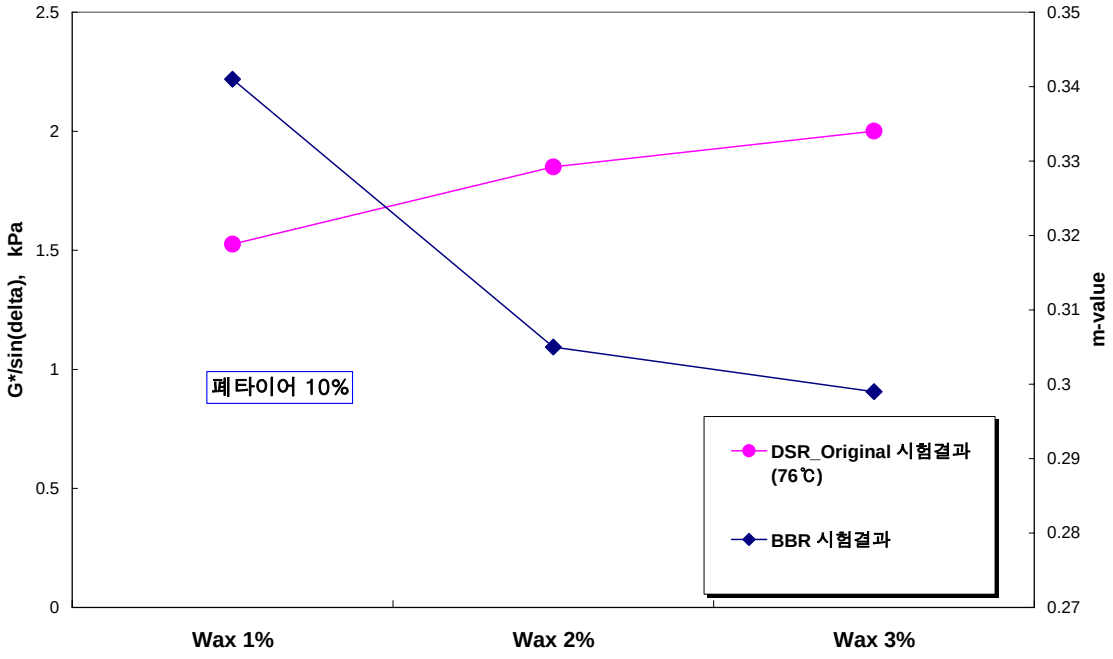
폐타이어 10% + Wax 1% (C10W1)					바인더 등급 PG70-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	1.952	pass	4.399	pass	0		
76	1.526	pass	2.195	fail	-6		
82	1.398	pass		fail	-12	139.05	0.341
폐타이어 10% + Wax 2% (C10W2)					바인더 등급 PG 76-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	2.2	pass	4.821	pass	0		
76	1.851	pass	2.543	pass	-6		
82	1.841	pass	1.391	fail	-12	209.45	0.305
폐타이어 10% + Wax 3% (C10W3)					바인더 등급 PG 76-16		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	3.211	pass	6.493	pass	0		
76	2.001	pass	3.518	pass	-6	165.30	0.315
82	1.576	pass	1.900	fail	-12	199.76	0.299

<표 3.2.25> Wax와 폐타이어 첨가율에 따른 바인더 특성 비교(3)

폐타이어 12% + Wax 2% (C12W2)					바인더 등급 PG82-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	2.435	pass	7.463	pass	0		
76	1.417	pass	4.035	pass	-6		
82	1.104	pass	2.289	pass	-12	133.17	0.348
폐타이어 15% + Wax 2% (C15W2)					바인더 등급 PG 82-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	2.754	pass	7.408	pass	0		
76	1.863	pass	4.072	pass	-6		
82	1.445	pass	2.367	pass	-12	120.48	0.339
폐타이어 15% + Wax 3% (C15W3)					바인더 등급 PG 82-22		
온도	Original_DSR		RTFO_DSR		PAV_BBR		
	G*/sine(deta)	Pass/Fail	G*/sine(deta)	Pass/Fail	온도	stiffness	m-value
70	3.837	pass	7.955	pass	0		
76	2.306	pass	4.562	pass	-6		
82	1.742	pass	2.387	fail	-12	131.5	0.336

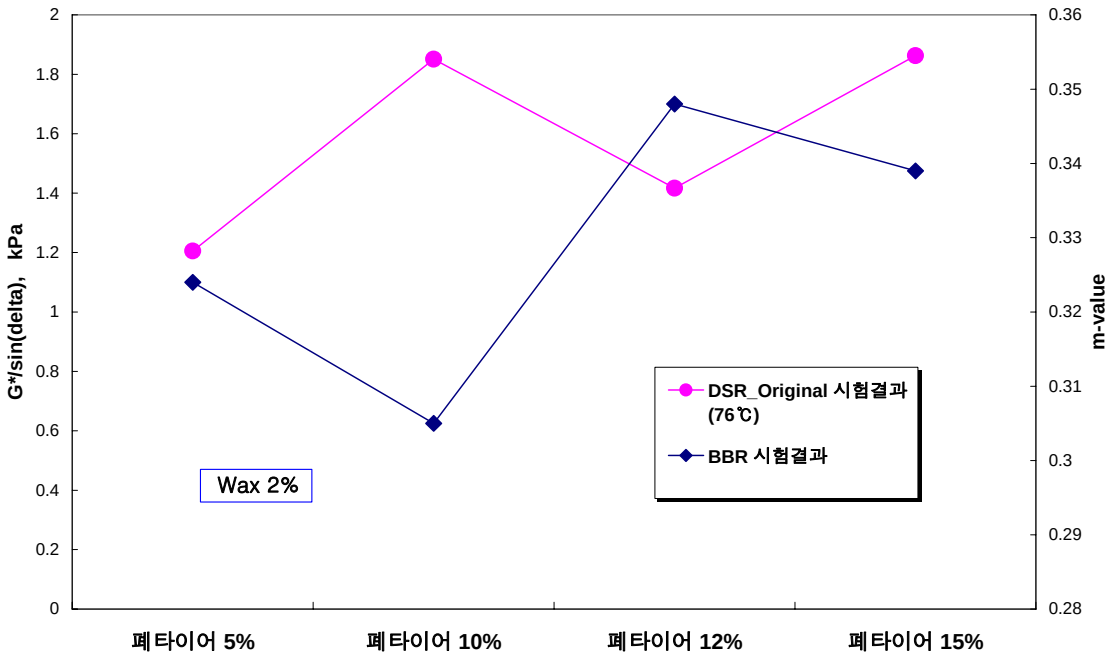
<그림 3.2.75>는 폐타이어의 양을 10%로 고정한 상태에서 Wax(type Ⅰ)의 혼입율 변화에 따른 DSR 시험과 BBR 시험결과를 비교한 것이며, <그림 3.2.76>은 Wax의 양을 2%로 고정한 상태에서 폐타이어 혼입율 변화에 따른 DSR 시험과 BBR 시험결과를 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, Wax(type Ⅰ)의 경우 혼입율이 증가함에 따라 고온특성은 강화되지만 저온특성이 저감되는 것을 알 수 있다. 또한 폐타이어의 경우, 혼입율 5%에서 10%로 증가할 때 고온특성이 강화되고 저온특성이 저감되지만, 혼입율 10%에서 12%로 증가할 때 정반대의 경향을 나타내며, 혼입율 12%에서 15%로 증가할 때 다시 고온특성이 강화되고 저온특성이 저감되는 것을 알 수 있다.

이와 같은 현상에 대한 원인을 물리적 관점에서 평가하기는 힘들 것으로 판단되며, 추후 화학적 이론과의 접목을 통해 상세한 분석이 요망된다.



<그림 3.2.75> Wax 혼입율 변화에 따른 고온·저온 특성 비교

<표 3.2.26>은 1, 2차년도에 수행된 바인더 PG 등급 시험결과를 모두 기재한 것이다. 이 시험결과를 비교하여 볼 때, 폐타이어(12% 이상)와 Wax를 혼입한 경우 고온특성·저온특성을 모두 만족하는 것을 알 수 있다.



<그림 3.2.76> 폐타이어 혼입율 변화에 따른 고온·저온 특성 비교

<표 3.2.26> PG 등급 시험결과 총괄표

기존 바인더	AP5	CRM	SK-Porous	DAMA	TPS	
	64-16	82-16	76-22	70-10	76-10	
SBS, SBR + Wax	W3	S3W3	S5W3	SR1W3	SR2W3	SR3W3
	82-10	82-X	82-X	76-16	82-16	82-16
폐타이어 + Wax	C5W2	C5W3	C10W1	C10W2	C10W3	
	70-22	70-22	70-22	76-22	76-16	
	C12W2	C15W2	C15W3			
	82-22	82-22	82-22			

W : Wax 함유량 ((ex) W3은 Wax가 3% 첨가된 것을 의미)

S : SBS 함유량

SR : SBR 함유량

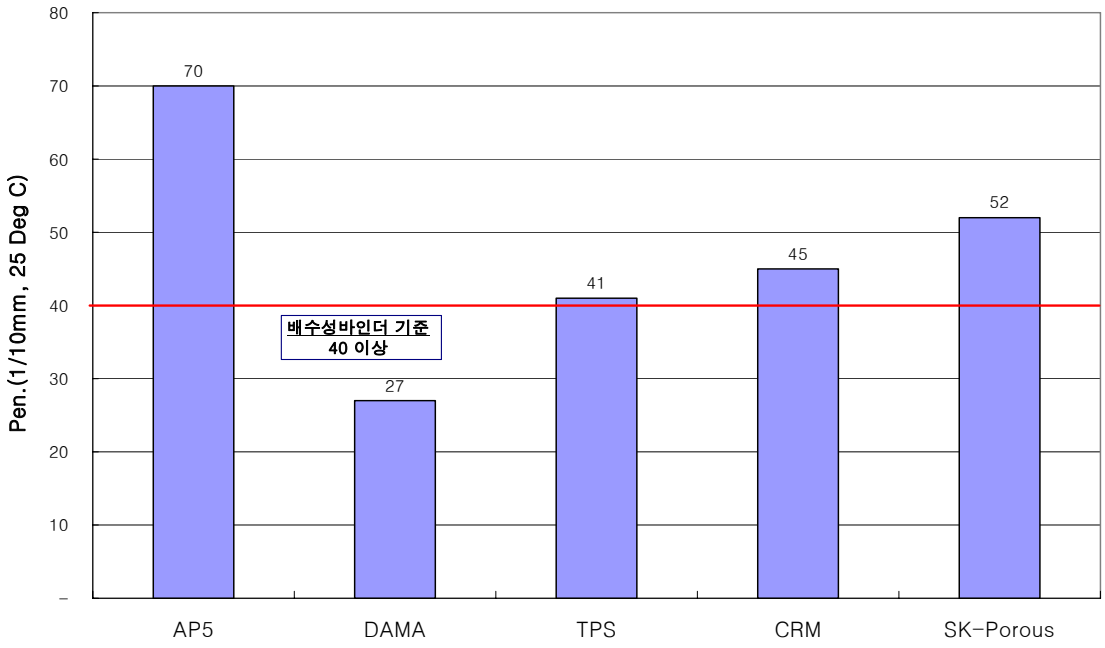
C : 폐타이어 함유량

X : BBR 시험(0℃)에서도 기준치를 통과하지 못함

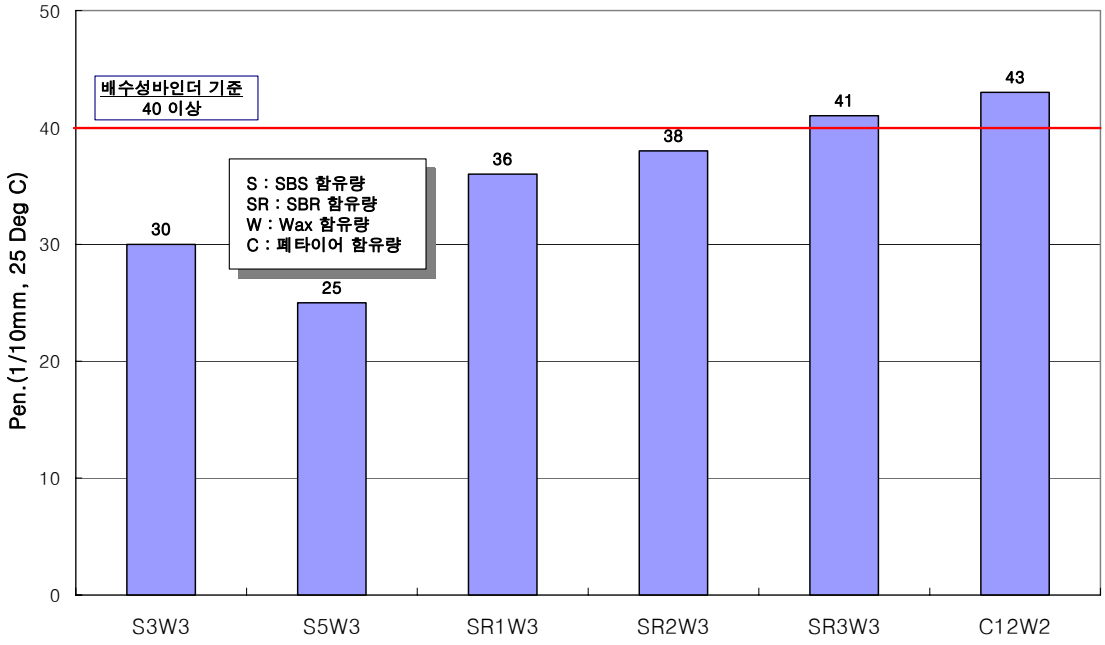
(나) 침입도 시험결과

<그림 3.2.77>은 기존 배수성 아스팔트 바인더의 침입도 시험결과를, <그림 3.2.19>는 SBS・SBR・폐타이어와 Wax를 첨가한 아스팔트 바인더의 침입도 시험결과를 나타내고 있다. 본 침입도 시험결과 기존 배수성 아스팔트 바인더의 경우 DAMA 아스팔트 바인더를 제외하고는 배수성 아스팔트 바인더 기준 40이상을 만족하는 것으로 나왔다. 또한 SBS・SBR・폐타이어와 Wax를 첨가한 아스팔트 바인더의 경우, SR3W3과 C12W2 바인더만이 40 이상의 값을 나타내었다.

본 결과에서 또 하나의 특징은 SBS의 양을 증가시킬때 침입도는 감소하고, SBR의 양을 증가시킬때 침입도는 증가하는 상반된 경향을 나타내었다.



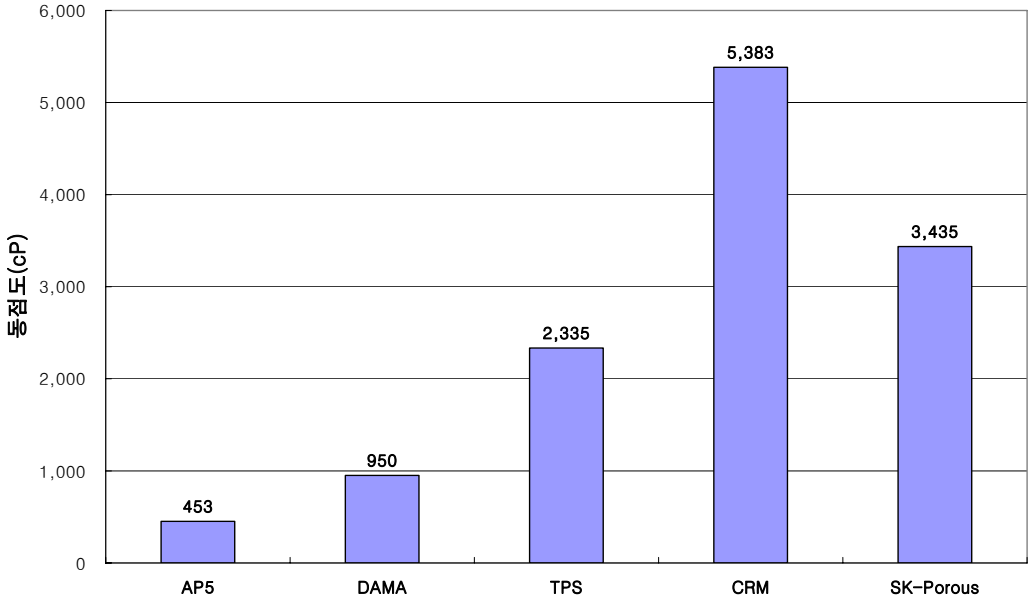
<그림 3.2.77> 기존 배수성 바인더의 침입도 시험결과



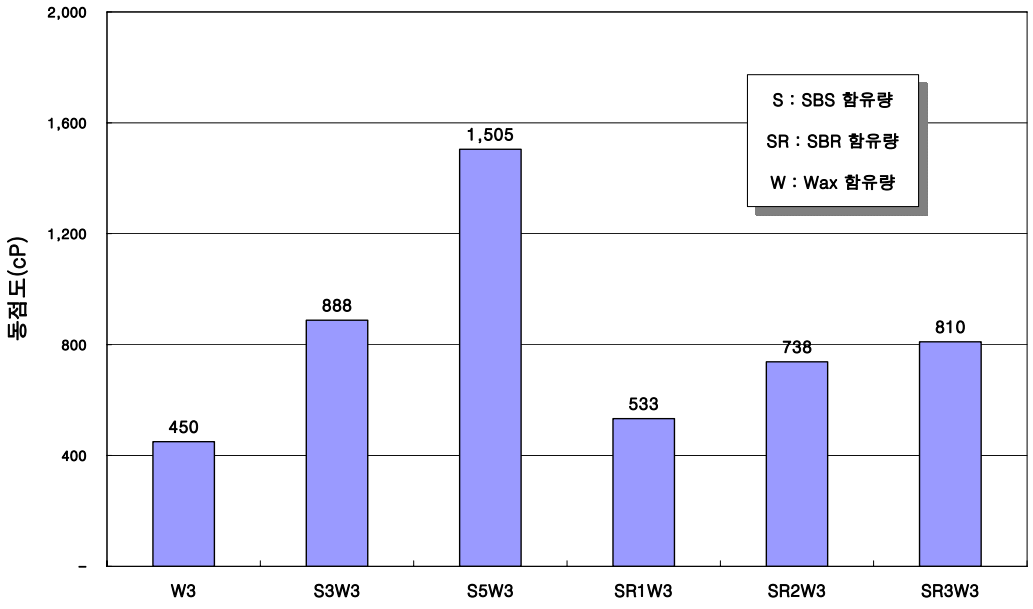
<그림 3.2.78> SBS · SBR · 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 침입도 시험결과

(다) 동점도 시험결과

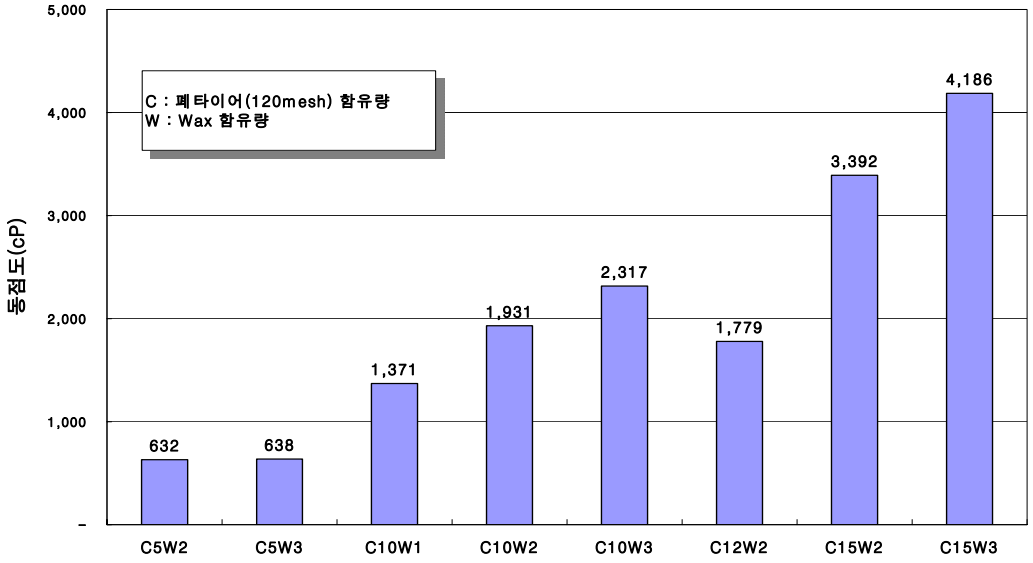
<그림 3.1.79>~<그림 3.1.81>은 135℃에서의 바인더 동점도 시험결과를 나타내고 있다. 기존 배수성 바인더의 경우, CRM이 동점도가 가장 크게 나왔으며, 그 다음이 SK-Porous로 두 번째로 큰 값을 나타내고 있다. SBS · SBR과 Wax를 첨가한 경우 SBS 또는 SBR의 양을 증가시킴에 따라 동점도값이 커짐을 알 수 있고, 상대적으로 SBR을 첨가한 바인더가 SBS를 첨가한 것보다 동점도가 작게 나타났다. 폐타이어와 Wax를 첨가한 경우 폐타이어의 양을 증가시킴에 따라 전반적으로 동점도 값이 커짐을 알 수 있으나, 폐타이어 첨가율 12%에서 오히려 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 또한 Wax의 첨가율을 증가시킴에 따라 동점도 값이 커지는 것을 알 수 있다. 하지만, 상대적으로 PG등급이 높은 CRM, SK-Porous와 비교하였을 때, Wax를 첨가한 개질 아스팔트 바인더가 상대적으로 동점도 값이 작으며, 이는 Wax의 일반적 특성인 작업성 개선 효과 때문이다.



<그림 3.2.79> 기존 배수성 바인더의 동점도 시험결과



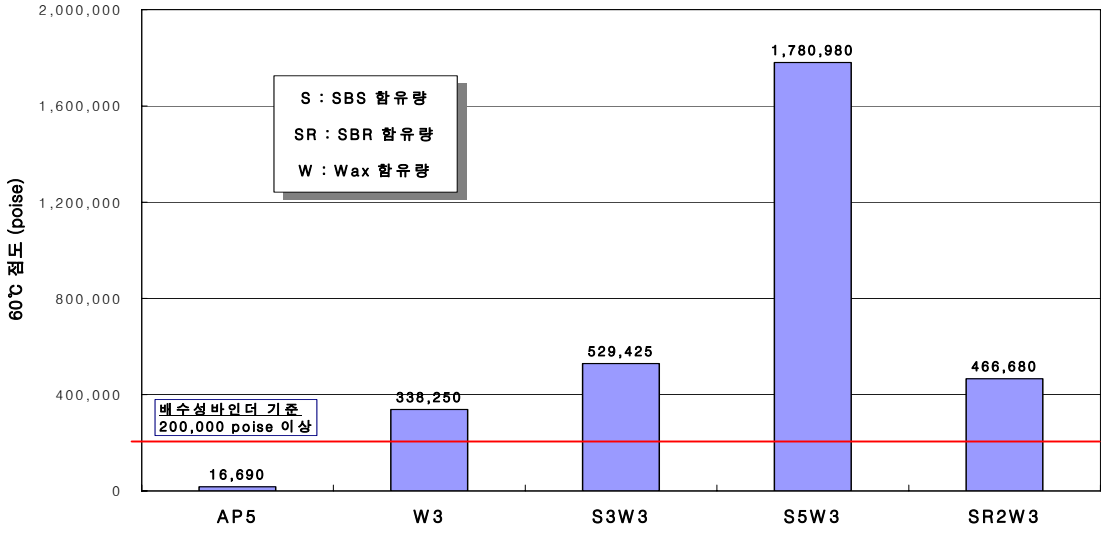
<그림 3.2.80> SBS, SBR과 Wax를 첨가한 바인더의 동점도 시험결과



<그림 3.2.81> 폐타이어와 Wax를 첨가한 바인더의 동점도 시험결과

(라) 절대점도 시험결과

<그림 3.2.82>는 절대점도 시험결과를 보여주고 있다. 본 그림에서 알 수 있듯이, SBS·SBR과 Wax를 첨가한 바인더의 절대점도시험결과 모두 배수성바인더 기준인 200,000 poise를 넘는 것으로 나타났다. 특히 SBS의 첨가량을 3%에서 5%로 증가시켰을때, 절대점도값이 급격하게 증가하는 현상이 나타났다.



<그림 3.2.82> SBS, SBR과 Wax를 첨가한 바인더의 절대점도 시험결과

(5) 개질 아스팔트 바인더 최종 선정

연구결과를 바탕으로 아스팔트 바인더 시험내용을 종합하여 다음과 같이 개질 아스팔트바인더를 선정하였다.

□ Mix Ⅰ : AP5(침입도60-80) + 폐타이어(120mesh) 12% + Wax(type Ⅰ) 2%
□ Mix Ⅱ : AP5(침입도60-80) + SBR 2% + Wax(type Ⅰ) 3% (1차년도 제안)

폐타이어를 12%이상, Wax 2% 또는 3%를 첨가한 개질 아스팔트 바인더가 모두 PG 82-22 등급을 나타냈지만, BBR 시험에서의 m-value가 폐타이어 15%를 첨가한 것보다 12%를 첨가한 경우에 약간의 더 큰 값을 나타내고 있으며, 동점도 시험결과를 볼 때 작업성면에서 폐타이어 12%를 첨가한 경우가 더 우수한 것으로 판단되어 위와 같이 Mix Ⅰ을 제안하게 되었다.

본 연구에서 제안한 개질바인더는 고온에서의 러팅저항성과 저온에서의 균열저항성을 강화하면서, 고점도 개질 아스팔트 바인더의 일반적인 단점인 작업성을 크게 향상시킬 수 있다는 장점이 있다.

다. 아스팔트 혼합물 시험

(1) 아스팔트 혼합물 시험

(가) 마샬 안정도 시험

마샬 안정도 시험은 아스팔트 혼합물의 경험적인 물성을 측정하는 것으로, 표준실험실 다짐도로 다져진 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 것이다.

2개의 반원형 재하 헤드를 통하여 직경 101.6mm인 원통형 공시체에 분당 50mm의 변형 비율로 압축 하중을 공시체가 파괴될 때까지 가하면서 이루어지며, 이를 통해 마샬 안정도와 흐름치를 측정한다. 시험 과정에서 공시체의 온도는 60℃를 유지시키는데, 이는 여름철 포장체의 대략적인 최고 포장 온도를 나타내는 것으로 아스팔트 혼합물에 대한 가장 열악한 온도 조건을 모사하기 위함이다.



<그림 3.2.83> 마샬안정도 시험 모습



<그림 3.2.84> 흐름 시험 전·후 모습

(나) 흐름 시험

배수성 혼합물은 아스팔트 막의 두께가 최대가 되도록 아스팔트 함량을 결정하는데 이 때 실시하는 시험이 흐름 시험이다. 흐름 시험은 다지지 않은 혼합물 약 2 kg 정도를 특정 용기에 넣어 170℃ 정도에서 1시간 방치한 후 아스팔트가 용기에 흘러내린 정도를 판정하게 된다. 흐름 시험 전·후를 <그림 3.2.84>에 나타내었다.

아스팔트 함량의 변화에 따라 각각의 손실률을 결정하고 아스팔트 함량과 흐름 손실률과의 관계에서 변곡점을 나타내는 아스팔트 함량을 최적 아스팔트 함량으로 결정하게 된다.



<그림 3.2.85> L.A.마모시험기와 칸타브로 시험 후 공시체

(다) 칸타브로 시험

칸타브로 시험은 개립도 아스팔트 혼합물의 마모 저항성을 모사한 시험이다. 칸타블로 시험은 50회 마샬햄머로 다져진 마샬공시체를 20℃의 항온조에 20시간 양생한 후 L.A.마모시험기(KS F 2508, ASTM C 131)에 넣어서 공시체로부터 재료가 분리되는 정도를 측정하는 시험이다. 다른 점이 있다면 L.A.마모시험기에는 쇠구슬은 넣는 반면에 칸타브로 시험시에는 쇠구슬은 넣지 않으며, 매분 30~33회전수로 300회 회전을 실시하여 손실중량을 측정한다. 칸타브로 시험은 시험 절차가 간단하고, 경제적인 측면에서 유리하며 공시체도 마샬 공시체를 사용하여서 미국 뿐 아니라 유럽의 여러나라에서 사용하고 있다. <그림 3.2.85>에 칸타브로 시험에 이용되는 L.A.마모시험기와 칸타브로 시험 후의 공시체 모습을 나타내었다.

(라) 휠트랙킹 시험

포장 표면을 회전하는 차륜에 의해 재하되는 포장체내의 응력 상태는 매우 복잡하고, 이를 실내 시험에서 정확히 재현시키기는 거의 불가능하여, 외국의 경우에는

주로 다른 재료에 대한 거동의 상대적 비교를 위해 포장가속 시험기(APT)를 통한 모사 시험을 사용하고 있다.

휠트랙킹 시험은 동적 반복 크리이프 시험의 일종으로, 영국의 도로교통운수연구소(TRRL)에서 개발되었으며, 실제 도로에서 고온일 때 중차량 주행으로 인한 바퀴 자국 패임이나 니딩 작용을 시뮬레이션 시킴으로써, 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하고자 하는 것이다. 아스팔트 혼합물에 대해서는 마샬 안정도를 이용하여 유동 저항성을 어느 정도 평가할 수 있는데, 휠트랙킹 시험은 차륜을 주행시키는 것보다 직접적인 평가 방법이라고 평가되고 있다.



<그림 3.2.86> 휠트래킹 시험 모습

(마) 수정 Lottman 시험

이 시험은 Kandhal에 의해 개발되었으며, 1985년에 AASHTO에서 표준 시험법으로 채택되었다. 수정 Lottman 시험방법은 Lottman의 방법(NCHRP 246)과 Tunnicliff와 Root의 방법(NCHRP 274)의 장점을 모은 것이다. 6개의 공시체를 3개씩 두 그룹으로 나누며, 그룹 1은 기준 공시체로 사용된다. 그룹 2는 물로 진공 포화(55~80% 수준으로 포화) 한 후 Lottman이 제안한 1회 동결과 1회 융해의 처리를 거친다. 모든 공시체는 51mm/분(2inch/분)의 하중 속도로 25℃에서 간접인장강도를 측정하여 인장강도비(TSR)를 결정한다. S. Cross와 M. Voth, G. Fager(2000)

등은 그들의 연구에서 0.9 이상의 인장강도비 값을 좋음(Good), 0.75~0.8 범위의 인장강도비는 보통(Fair), 0.7 이하의 인장강도비 값은 나쁨(Poor)으로 규정하였다. 일반적으로 인장강도비는 0.7 이상으로 규정되며, 일부 기관에서는 0.8 이상으로 규정한다.

$$\text{인장강도비(Tensile Strength Ratio, TSR)} = \frac{S_2}{S_1}$$

여기서, S_1 : 기준 공시체의 인장강도
S_2 : 수정 Lottman 시험을 거친 공시체의 인장강도

(바) 동적 수침시험

유럽 규정으로 제시되어 있는 동적 수침 시험은 골재와 아스팔트 바인더 사이의 수동적인 점착력 정도를 결정하기 위해서 설계되었다. 골재는 8.0mm~11.2mm크기의 건조하고 깨끗한 것으로 준비하고, 일정량의 아스팔트를 첨가하여 혼합한다. 혼합된 시료는 실온에서 15시간 동안 양생되며, 물과 함께 유리병 안에 담겨진 후 회전되어 진다. 회전하는 동안 유리병 안에 대각선으로 위치한 유리막대(Glass Rod)의 동적인 충격에 의해서 아스팔트 바인더 코팅이 벗겨진다. 이 시험은 24시간 동안 계속되어지며, 시험 결과는 육안 평가와 시료의 무게 비로 나타나게 된다. 육안 평가 시 평가자는 최소 2명 이상이어야 하고 무게는 0.01g의 감도를 가진 저울로 측정해야 한다. 이 시험법은 다소 주관적인 판단 결과가 나올 수 있으나 육안 평가와 병행하여 무게 비에 따른 잔류 피막율을 알 수 있어 초기 박리와 비박리를 판단하는데 효과적인 데이터를 제공하며, 시험이 비교적 간단하여 실험과정 중 발생되는 시험자에 따른 오차의 범위가 크지 않다는 장점이 있다. 또한 결과에 따른 육안적인 관찰까지 할 수 있어 박리와 비박리의 판별이 쉽다.

위에 언급된 시험법들의 고찰을 통해, 본 연구에서는 초기 박리에 대한 저항성을 평가하는 시험 중에서 비교적 시험이 간편하고 육안적인 판단까지 고려할 수 있는 동적 수침 시험(Dynamic Immersion Test, 이하 DIT)을 시행하였다.

이 시험 방법은 European Standard, prEN 12697-11에 시험 절차와 평가 방법을

나타내었다. 이 유럽 기준은 골재와 아스팔트바인더 사이의 관계를 다져지지 않은 골재가 물에서 활발한 작용을 받은 영향을 받은 후 골재에 코팅된 아스팔트 바인더에 피복 정도로 판단할 수 있다.

$$\text{잔류 피막율} = \frac{\text{시험 전 시료무게} - \text{시험 후 시료무게}}{\text{아스팔트 함량}} \times 100$$ 이며,

아스팔트 함량은 아래의 식과 같이 구할 수 있다.

$$\text{아스팔트 함량} = \frac{8g}{238g} \times \text{시험 전 시료무게}$$

여기에서, 8g: 제시된 표준 아스팔트 첨가량

238g: 제시된 표준 아스팔트 첨가량+골재 무게



<그림 3.2.87> DIT 장비 전경

(2) 아스팔트 배합설계 및 혼합물 실험결과

(가) 배합설계

배수성포장용 혼합물은 굵은 골재가 다량 함유된 개립도 혼합물로서 일반 밀입

도와 큰 차이가 있기 때문에 매우 주의하여 배합설계를 실시해야 한다.
배합설계에서는 목표로 하는 공극률을 만족시키고, 내구성을 중시하는 관점에서 아스팔트 막의 두께가 허용 범위의 최대가 되도록 설계 아스팔트 량을 결정한다.

① 골재 배합비 결정

선정된 골재를 이용하여 배수성 아스팔트 합성입도를 만족하고 공극률이 약 20%가 되도록 배합비를 결정한다.

- 골재입도는 중앙 입도 부근 또는 과거의 시공예를 참고로 잠정 중앙 입도를 설정한다.
- 시험 다짐용 골재 배합비는 채움재의 배합을 일정(5% 정도)하게 하고, 굵은 골재와 잔골재의 배합비를 변화시켜 2.5㎜ 체 통과 질량 백분율이 중앙 입도 부근에서 ±3% 정도의 3입도를 목표로 결정한다.
- 잠정 3입도에 대한 아스팔트 량은 배수성 혼합물의 공극률이 20%일 때 아스팔트 막의 두께가 거의 14㎛이므로 <표 3.2.27>과 다음 식으로부터 구한 양을 이용하여 마샬 공시체를 제작한다.

· 골재 표면적 $= (2+0.02a+0.04b+0.08c+0.14d+0.3e+0.6f+1.6g)/48.74$

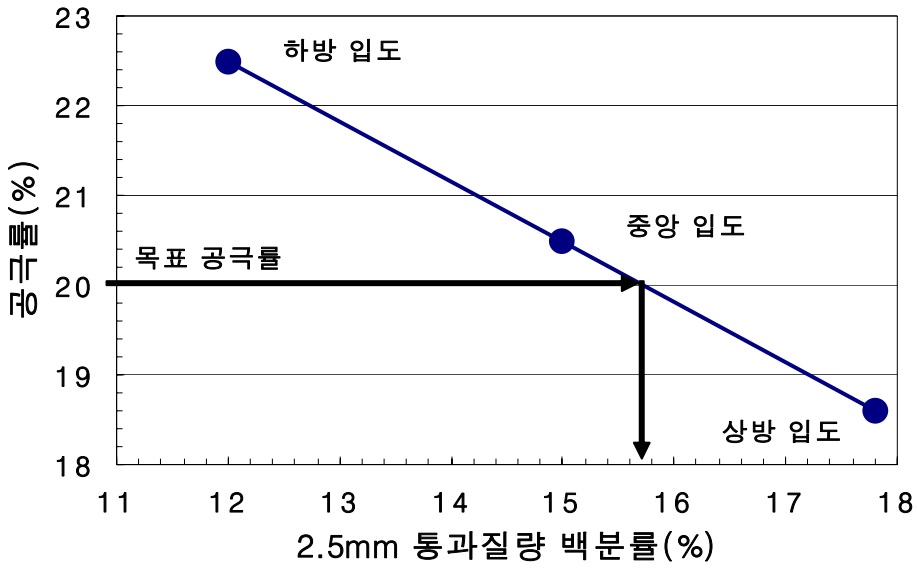
· 잠정 아스팔트 량 = 가정 막 두께(14㎛)×골재 표면적

- 잠정 3입도의 공극률과 2.5㎜ 체 통과 질량 백분율을 구하여 골재 배합비를 결정한다.

<표 3.2.27> 골재치수별 계수

체 눈의 크기(㎜)	5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.08
체 가적 통과 질량 백분률(%)	a	b	c	d	e	f	g
계 수	0.02	0.04	0.08	0.14	0.3	0.6	1.6

※ 1.2㎜ 체가 없을 경우에는 입도 곡선에서부터 1.2㎜ 체 가적 통과 질량 백분율을 읽어도 무방하다.



<그림 3.2.88> 2.5㎜ 통과 질량 백분율-공극률 곡선(예)

② 설계 아스팔트 함량 결정

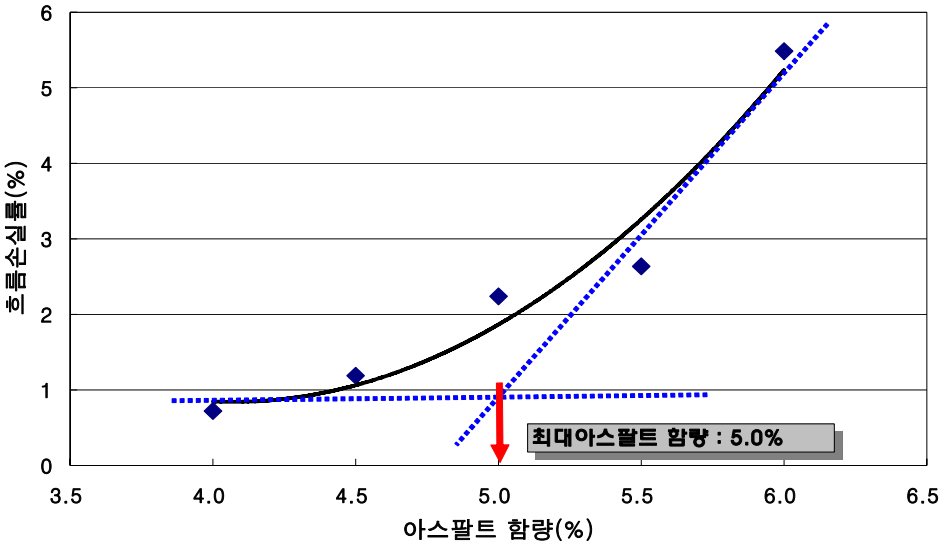
결정한 골재 배합 혼합물에의 흐름 시험으로부터 아스팔트 량을 설정한 후, 밀도, 마샬안정도, 칸타브로, 휠트래킹 시험을 통해 설계 아스팔트 함량을 결정한다.

• 흐름 시험은 일반적으로 아스팔트 량을 4.0~6.0% 범위에서 0.5% 단위로 5점 변화시킨 배수성 혼합물에 대하여, 각각의 아스팔트 흐름 손실률을 구한다.

흐름 시험 방법 : 다지지 않은 상태인 2㎏정도의 혼합물을 용기(45x25cm)에 펼친 후 170℃ 정도에서 1시간 방치한 후 용기를 뒤집는다(용기를 흔들거나 때리지 않음). 이때 용기에 잔류하는 무게를 측정하여 흐름 손실률을 구한다.

・흐름 손실률(%) = (용기잔류 시료무게/시험에 사용한 시료무게) × 100

• 4.0~6.0% 범위 중에서 변곡점이 명확하지 않을 경우에는 4.0% 이하 또는 6.0% 이상의 아스팔트 량에 대해 변곡점이 명확해질 때가지 0.5% 단위로 시험을 추가한다.



<그림 3.2.89> 최적 아스팔트 함량의 결정 방법

• 흐름 시험은 배수성 혼합물을 고온에서 정적 상태로 유지할 수 있는 최대 아스팔트 량을 흐름 손실률과 아스팔트 량의 관계 곡선의 변곡점으로부터 구하는데 사용한다. 여기서 결정된 최대 아스팔트 량을 최적 아스팔트 량으로 설정한다. <그림 3.2.30>에 최적 아스팔트 함량 결정(예)를 나타내었다.

• 결정된 최적 아스팔트 량에 대한 배수성 혼합물의 물성 시험을 실시하여 각 시험에 대한 목표값을 만족하는지 여부를 확인한다.

(나) 바인더 및 골재

5종류의 바인더를 선정하여 배합설계에 적용 평가하였다. 본 연구에서 개발한 3가지 바인더의 특성을 비교하기 위하여 일반 아스팔트 바인더(AP-5)와 1차년도 기존 배수성 바인더 특성분석 결과 가장 좋은 성능을 보인 S사의 배수성 아스팔트를 기준 바인더로 선정하였다. <표 3.2.28>은 배합설계에 사용된 혼합물의 명칭과 사용재료에 대한 설명이다. 이중에서 4S-1과 4S-2는 습식혼합과 건식혼합을 비교하기 위하여 선정되었다.

<표 3.2.28> 바인더 혼합물

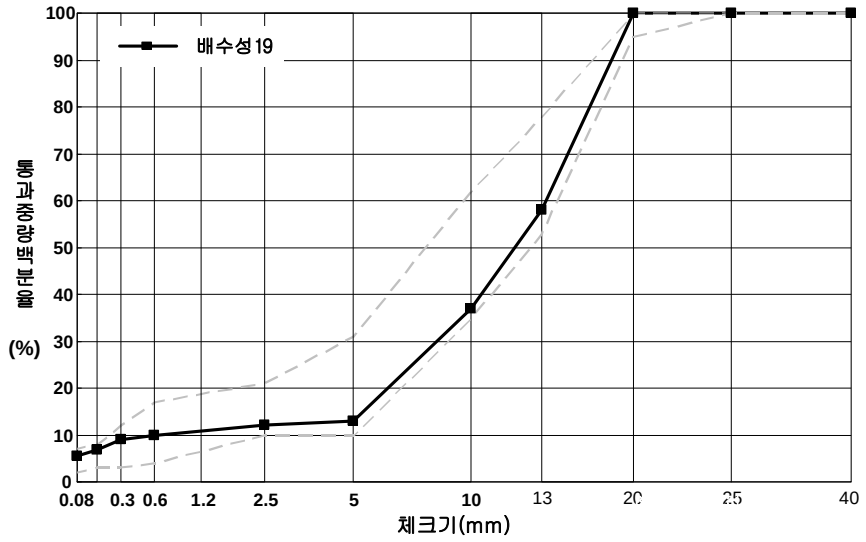
명칭	설명
AP5	침입도 60-80 아스팔트 바이더
4S-1	침입도 60-80 + Wax 2% + 폐타이어 12% (습식)
4S-2	침입도 60-80 + Wax 2% + 폐타이어 12% (건식)
4S-3	침입도 60-80 + Wax 3% + SBR 2% (습식)
S사	SBS 개질 바인더

<표 3.2.29> 골재의 물리적 특성

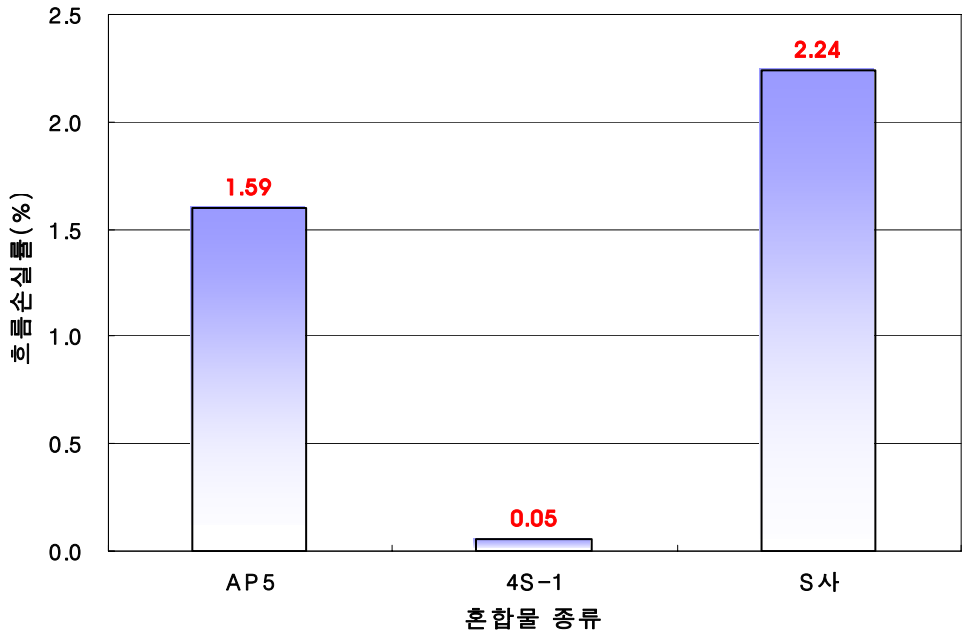
분 류	굵은골재	잔골재	채움재
진비중	2.72	2.74	2.83
흡수률 (%)	0.55	2.42	-
마모률 (%)	29.60	-	-

본 연구에서는 전국적으로 분포가 많고 성능이 좋은 화강암(Granite)을 선정하였다. 이들을 각기 KS F에 규정된 방법에 따라 품질 시험한 결과는 <표 3.2.29>와 같다. 또한 굵은골재 최대치수를 19mm로 하여 잔골재, 채움재와 혼합하여 배수성 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다.

아스팔트 혼합물의 목표 공극률을 20%로 설정하고, 목표 공극률을 만족할 수 있는 골재 배합비를 결정하였으며, <그림 3.2.90>에 골재 입도 분포를 나타내었다. 흐름 시험으로부터 각각의 최적(최대) 아스팔트 함량을 결정하였다. 결정된 최적 아스팔트 함량에 대해 마샬안정도, 휠트래킹, 칸타브로 시험을 수행하였다.



<그림 3.2.90> 골재입도 분포표



<그림 3.2.91> 아스팔트 혼합물별 흐름 손실률

(다) 흐름시험 결과

흐름 시험으로부터 결정된 최적 아스팔트 함량은 일반(AP-5) 5.0%, 4S-2 5.0%, 4S-2 5.0%, 4S-3 5.0%, S사 5.0%로 결정되었으며, 최적 아스팔트 함량에서의 흐름

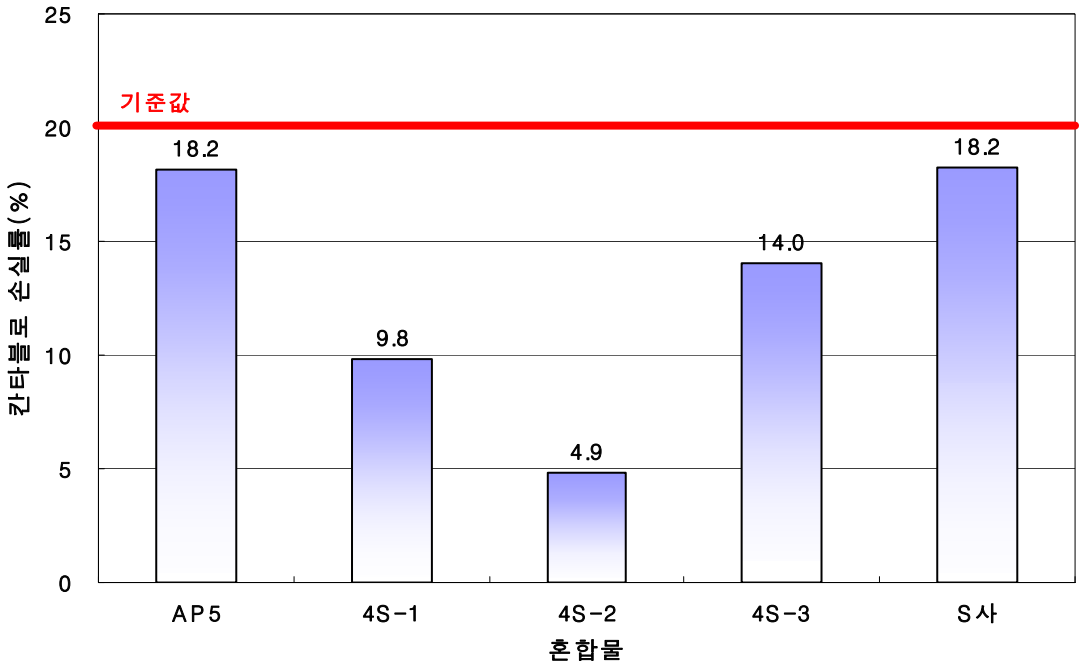
손실률은 <그림 3.2.91>에 나타내었다.

시험 결과 개질 아스팔트에 비해 일반 아스팔트의 흐름 손실률이 상당히 크게 나타났다. 배수성포장을 적용하고 있는 대부분의 나라에서 흐름 손실률에 대한 기준은 없지만 유럽의 일부 국가에서는 흐름 손실률을 제한하고 있는 경우도 있다.

(라) 칸타브로 시험

칸타브로 시험은 배수성 혼합물의 골재 비산 저항성을 평가하기 위한 물성 시험으로, 칸타브로 시험 결과를 <그림 3.2.92>에 나타내었다.

<그림 3.2.92>에서와 같이 모든 혼합물이 국내·외에서 적용하고 있는 20%이하의 기준을 모두 만족하는 것으로 나타났으며, S사 아스팔트 혼합물의 경우 일반(AP-5) 아스팔트 혼합물과 같은 칸타브로 손실률을 나타났다. 또한 S사의 바인더에 비하여 본 연구에서 개발한 바인더가 더 좋은 특성을 보여주고 있다. 특히, 4S-2 아스팔트 혼합물은 칸타브로 손실률이 5% 이하로 기준이 20%이하임을 감안한다면 골재 비산 저항성이 매우 우수할 것으로 판단된다.



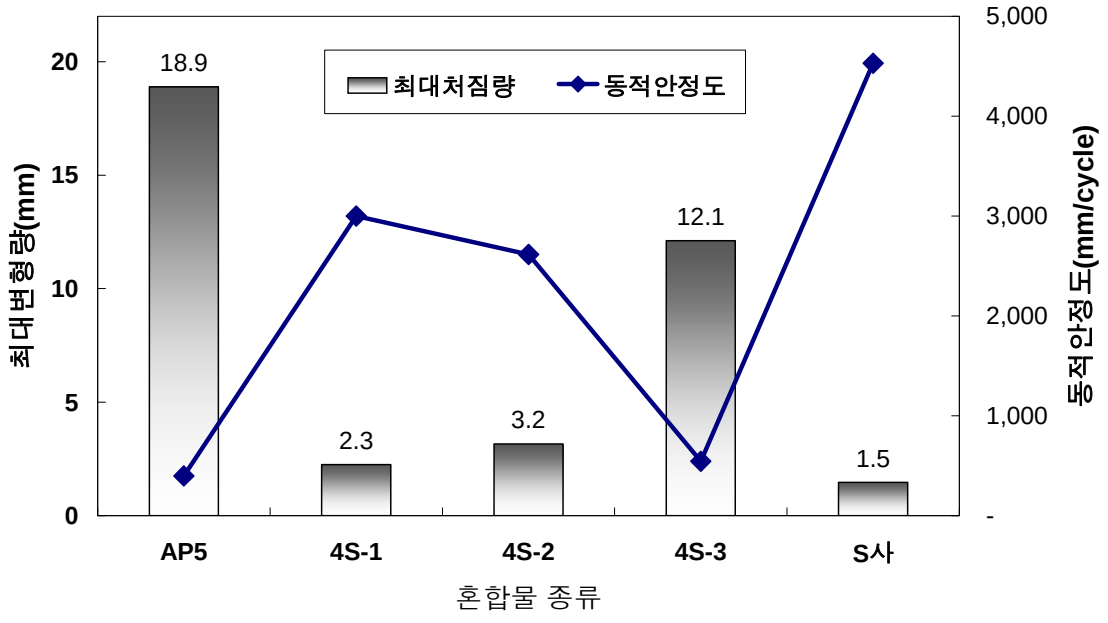
<그림 3.2.92> 칸타브로 시험 결과

(마) 휠트래킹 시험 결과

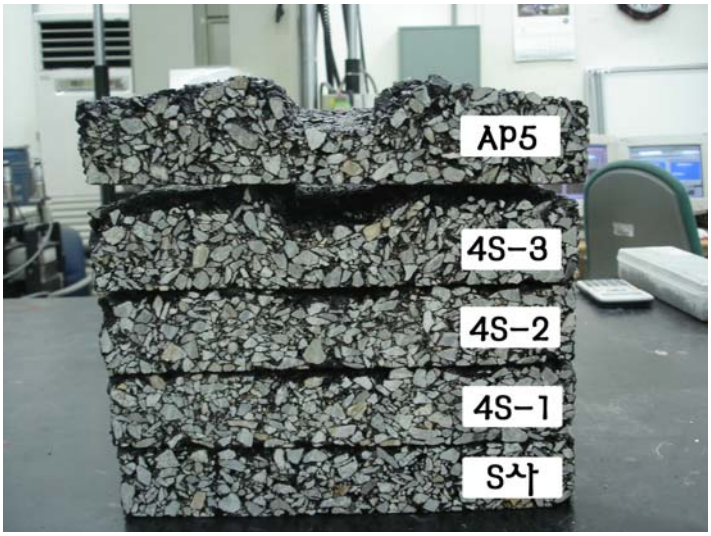
아스팔트 포장의 러팅 저항성을 평가하는 휠트래킹 시험은 차륜을 주행시키는 것보다 직접적인 평가 방법이라고 평가되고 있다. 휠트래킹 시험을 통해 얻어지는 동적안정도가 클수록 러팅 저항성이 큰 것으로 평가된다. <그림 3.2.93>에 휠트래킹 시험 결과를 나타내었다.

그림에서와 같이 본 연구에서 개발한 개질 아스팔트 혼합물이 일반 아스팔트 혼합물(AP-5)에 비해 러팅 저항성이 매우 우수한 것으로 나타났다. 특히 4S-1, 4S-2 아스팔트 혼합물의 경우, 일반 아스팔트 혼합물보다 7~8배정도 높게 나타났으며 동적안정도의 상한치가 6,000회/㎜임을 감안한다면 러팅 저항성이 매우 우수할 것으로 판단된다. 반면, 4S-3는 일반 아스팔트 혼합물과 차이가 없는 동적안정도 결과를 보여 러팅에 취약한 것으로 나타났다.

<그림 3.2.94>는 휠트래킹 시험 후의 공시체 단면을 나타낸 것으로 연구에서 개발된 아스팔트 혼합물은 육안으로는 차이를 구별하기 힘들 정도로 러팅 저항성이 높은 것을 확인된다.



<그림 3.2.93> 휠트래킹 시험 결과

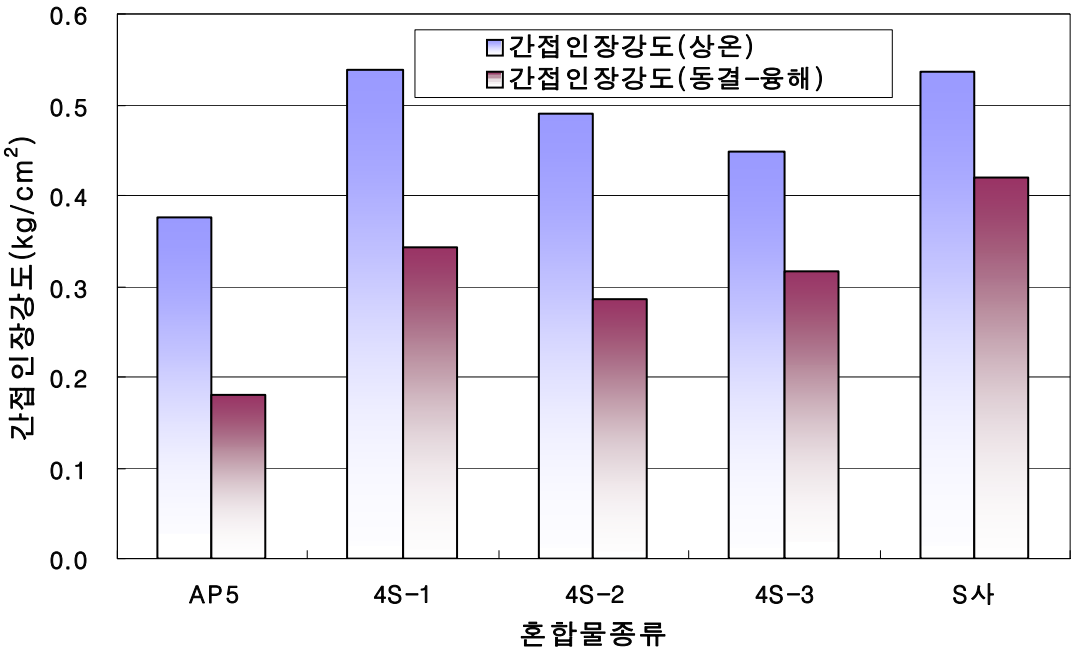


<그림 3.2.94> 휠트래킹 시험후 공시체 모습

(바) 수정 Lottman

이 시험 방법은 포화된 공시체에 1회 동결-융해를 거쳐 아스팔트 혼합물이 수분에 의한 박리 저항성을 평가하는 시험방법이다. <그림 3.2.95>는 각 일반 아스팔트 혼합물과 개질 아스팔트 혼합물을 제작하고 상온(25℃)에서의 간접인장강도와 동결-융해를 거친 후 간접인장강도를 시험한 결과를 나타낸다.

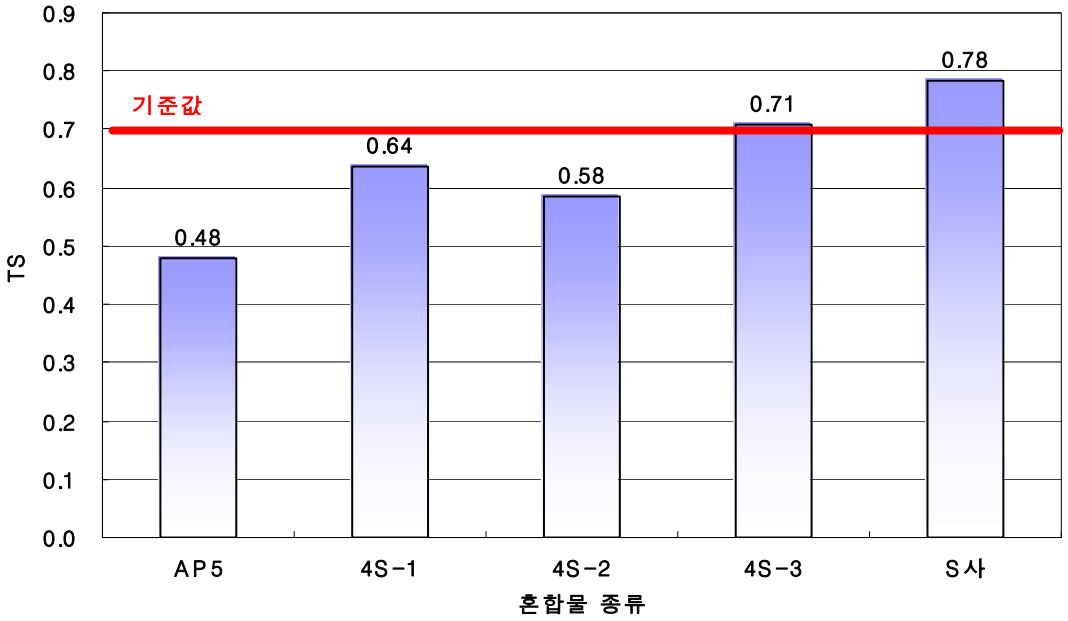
본 연구에서 개발한 아스팔트 혼합물은 골재와 아스팔트 바인더와의 부착력 및 점착력이 증가되므로 상온에서의 간접인장강도는 일반 아스팔트 혼합물보다 높게 나타났다. 4S-1과 S사 혼합물이 가장 높은 강도값을 나타냈었다. 하지만 수침후 강도는 S사 혼합물에 비해 4S-1 혼합물이 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 4S-2 혼합물의 박리 저항성이 약하다는 것을 확인 할 수 있다.



<그림 3.2.95> 간접인장강도 시험 결과

혼합물의 수분민감성을 측정하기 위하여 수침 전후 간접인장강도 시험 결과로부터 잔류인장강도비(Tensile strength ratio : TSR)를 계산하였다. <그림 3.2.96>은 수정 Lottman 시험 후 잔류인장강도비(TSR)의 결과를 나타낸다.

4S-3과 S사 혼합물을 제외하고는 인장강도 비(TSR)의 기준값인 0.7을 초과하지 못하였다. 하지만, 4S-3 혼합물의 경우 4S-1, S사 혼합물에 비교해 간접인장강도값이 낮게 측정 되었음에도 불고하고 TSR은 기준치를 넘는 것을 볼 수 있었다. 이것은 4S-3에 첨가한 개질재가 수분민감성을 증가시켜서 수침 전·후의 결과값이 차이가 없어서 나타나는 결과로 볼 수 있다. 앞서 언급했듯이 4S-1 혼합물은 S사 혼합물과 수침전 강도값이 비슷하게 나타났으나, 수분 저항성이 떨어져서 TSR 값이 낮게 나타났다.

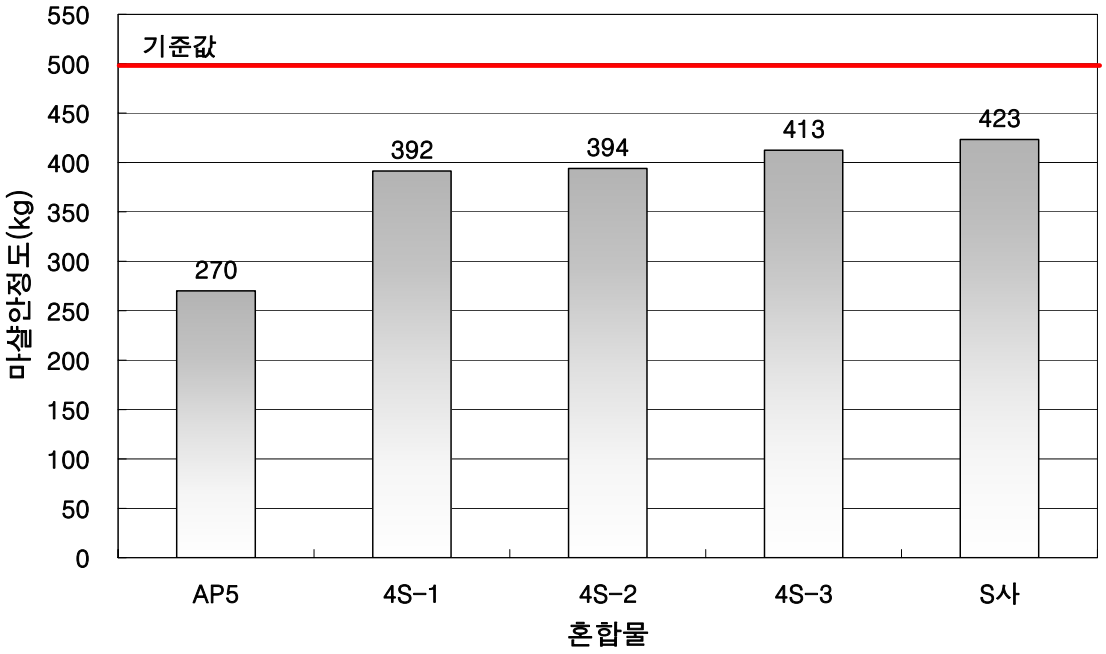


<그림 3.2.96> 수정 Lottman 시험 후 인장강도비(TSR) 결과

(사) 마샬안정도 시험

마샬안정도는 여름철 포장체의 대략적인 최고 포장 온도인 60℃에서 공시체가 견딜 수 있는 최대 하중을 나타내는 것으로, 아스팔트 혼합물의 강도를 측정하기 위한 것이다. <그림 3.2.97>에 마샬안정도 시험 결과를 나타내었다.

모든 혼합물에서 기준값 500kg을 넘지 못하고 있다. 하지만 일반 아스팔트 혼합물 비해 개질 아스팔트 혼합물이 약 1.5배 정도 높게 나타나는 것으로 볼 때, 이것은 아스팔트 바인더의 문제보다는 골재에 문제가 있는 것으로 판단된다. 본 실험에서 사용한 골재가 편장석율이 높아서 굵은 골재만 사용하는 배수성 혼합물 특성을 반영하지 못한 것으로 판단된다.



<그림 3.2.97> 마샬안정도 시험 결과

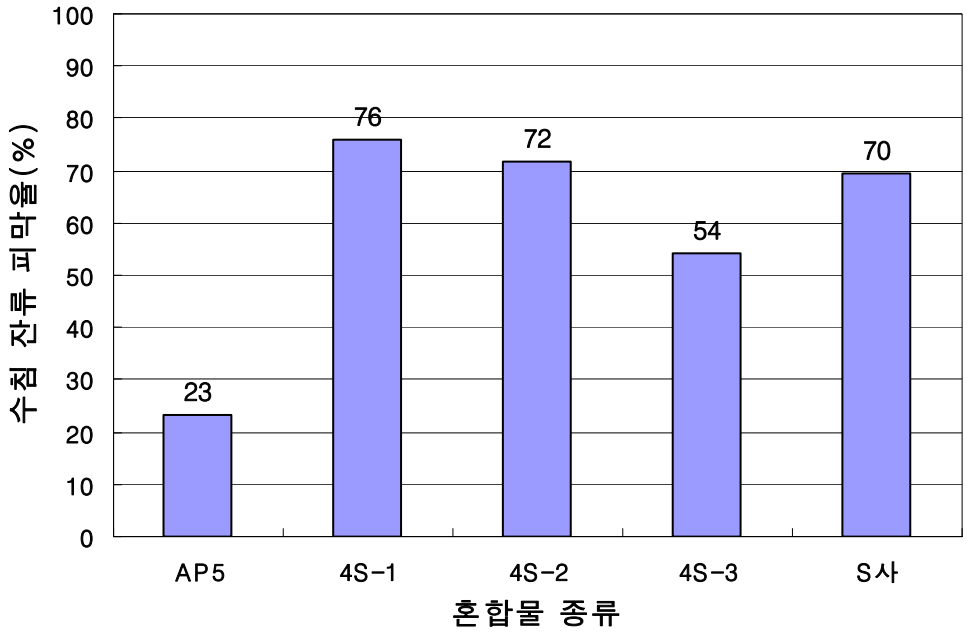
(아) 동적 수침시험

비다짐(Loose Mix) 아스팔트 혼합물의 수분에 의한 박리 특성을 평가하기 위한 동적 수침 시험을 실시한 결과 <표 3.2.15>은 아스팔트 바인더 종류에 따른 각각의 박리율을 나타낸다. 피막 박리비율은 99%이상 피막 된 아스팔트 바인더의 시험 전·후에 따른 시료 무게 비율로 구할 수 있다. 일반 AP5의 경우 타 재료에 비해 아스팔트 바인더의 소실량이 매우 크게 나타났다. 개발된 배수성 아스팔트 바인더의 경우 4S-1과 4S-2의 박리율은 각각 24%와 28%로 나타났으며, 이는 타 재료에 비해 낮은 박리율을 보이는 것으로 나타났다. 4S-1과 4S-2의의 박리율은 큰 차이를 보이진 않았으나 4S-1으로 개발된 배수성 아스팔트 바인더가 박리 저항성이 약간 더 우수한 것으로 나타났다. 그러나 피막 박리 비율이 20~40%이하일 때 박리 저항성이 우수하다고 볼 수 있으므로 일반 AP5를 제외한 시험된 아스팔트 바인더 모두가 박리 저항성이 우수하다고 볼 수 있다.

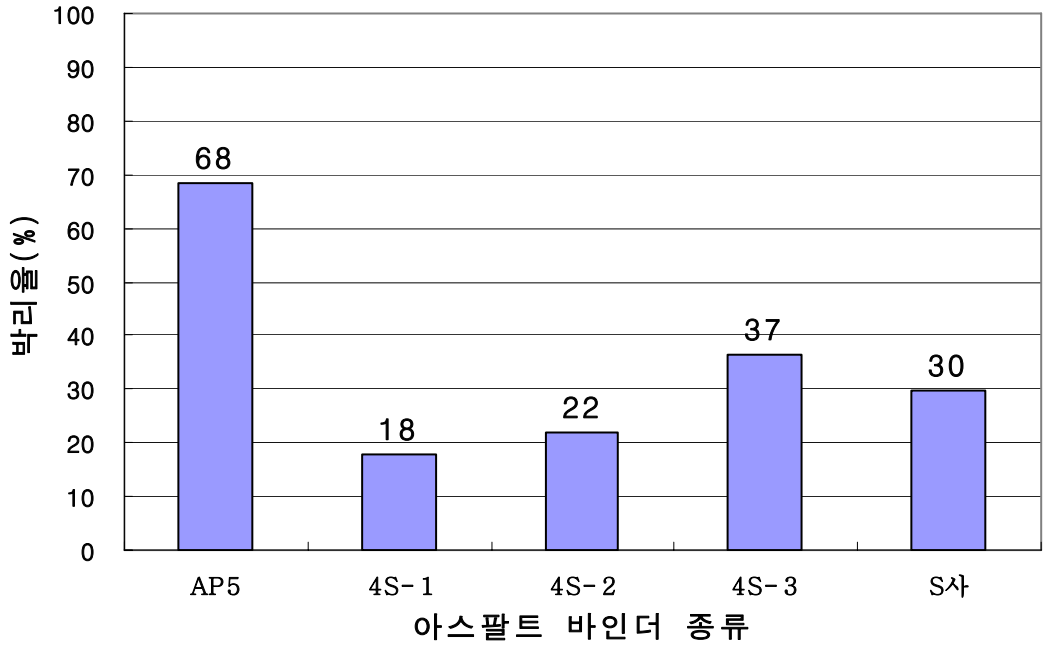
<표 3.2.30> 아스팔트 바인더 종류별 박리율

구 분	측정 전 시료 무게	측정 후 시료 무게	바인더함량 (g)	시험후 바인더 함량 (g)	소실량 (g)	박리율 (%)
AP5	115.38	112.33	3.88	0.83	3.05	78.64
	115.28	112.38	3.87	0.97	2.90	74.84
4S-1	115.02	114.13	3.87	2.98	0.89	23.02
	115.76	114.79	3.89	2.92	0.97	24.93
4S-2	115.49	114.43	3.88	2.82	1.06	27.31
	115.17	114.03	3.87	2.73	1.14	29.45
4S-3	115.62	114.31	3.89	2.58	1.31	33.71
	114.95	113.50	3.86	2.41	1.45	37.53
S사	115.81	114.61	3.89	2.69	1.20	30.83
	115.18	114.02	3.87	2.71	1.16	29.96

<그림 3.2.98>은 동적 수침 후 피막 정도를 알 수 있는 아스팔트 바인더별 수침 잔류 피막율을 보여준다. 박리율과 반비례되므로 잔류 피막율은 최소 60%이상 피복된 아스팔트 바인더가 잔류되어야 한다. 4S-3의 경우 64%, S사의 경우 70%의 양호한 잔류 피막율을 나타내었다. <그림 3.2.99>는 아스팔트 종류에 따른 박리의 육안 평가 결과이다. 3명의 육안평가자가 아스팔트 바인더의 코팅 정도에 따른 육안 평가 후 각각의 박리율을 기재한 후 그 평균값을 나타내었다. 육안 평가에서도 무게 비에 따른 평가 결과와 거의 흡사한 결과를 보였다. 4S-1 시료가 박리에 대한 영향이 가장 낮은 것으로 나타났고, 일반AP5 시료의 경우 무게 비율에 따른 박리율 보다는 높은 결과 값을 나타냈지만 여전히 박리율의 최대 범위인 40%보다 높게 나타났다.



<그림 3.2.98> 수침 시험 후 잔류 피막율



<그림 3.2.99> 아스팔트 종류별 박리의 육안 평가

라. 3차 시험시공에 적용된 아스팔트 재료 및 혼합물

(1) 시험시공에 적용한 배수성 아스팔트 혼합물

3차 시험 시공에 사용된 배수성 아스팔트 혼합물은 본 연구의 수행과정에서 개발한 바인더를 사용하여 만들어졌다. 실내시험을 통하여 개발된 바인더와 지금까지 이루어진 시험시공에서 적용한 바인더는 다음과 같다. 실내시험에서는 일반 바인더의 성능을 개선하기 위한 주 개질재로서 CRM과 SBR을 선택하였고, 혼합성능과 작업성능 향상을 위한 개질재로 AC395 왁스를 선택하였다. 그러나 AC395 왁스의 단가가 비싸기 때문에 한 등급 아래 재료로서 AC6702왁스를 같이 평가하였다.

각 재료들의 단가는 1kg으로 환산하여 CRM 분말이 800원, SBR 라텍스가 2500원, AC395 왁스가 10500원, AC6702 왁스가 6100원이다. 그리고 개질재를 넣기전의 일반 AP-5 바인더는 370원이다. 비교를 위하여 적용한 S사의 슈퍼팔트 포러스는 600원이다. 다음 <표 3.2.31>에서는 실내시험에서 개발된 바인더에 사용된 개질재들의 첨가량과 1 / 2 / 3 차 시험시공에서 사용된 개질재들의 첨가량과 단가가 나타나 있다. 단가는 바인더 및 개질재의 운반비를 고려하지 않고, 배치플랜트에 도착해서 사용하는 데 소요된 비용만을 정량적으로 비교한 것이다.

<표 3.2.31> 시험시공과 실내시험에서 첨가된 개질재

구 분		CRM	SBR	AC6702	AC395	단가
실내 시험	배합 1	12%			2%	592
	배합 2	12%		2%		516
	배합 3		2%		2%	700
시험 시공	1차	S사 슈퍼팔트 포러스 사용 (PG 82-22)				600
	2차	15%		2.5%		547
	3차	12%			2%	592

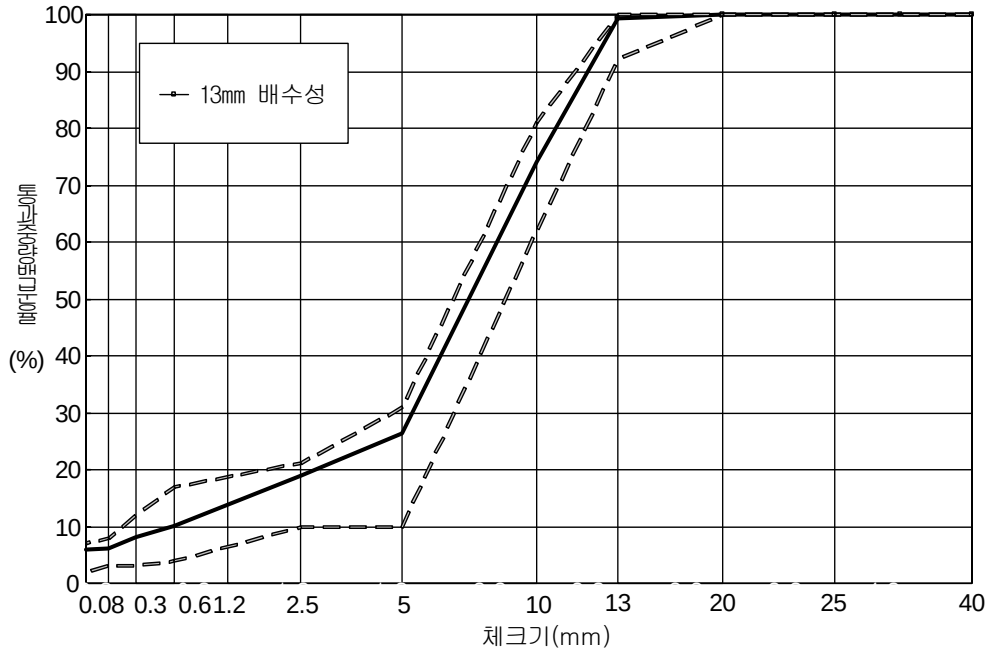
3차 시험시공에서는 실내시험에서 결정된 배합 중 1번에 해당하는 배합을 적용하였다. 배합 1은 실내시험 과정에서 우수한 성능을 나타냈지만 단가가 기존 제품과 비슷한 수준이라 이전 시험시공에서는 적용하지 않았지만, 3차 시험 시공은 본 연구의 마지막으로서 우수한 성능을 나타내는 재료들을 적용하고 검증하기 위한 목적에서 사용되었다. 배합 3은 기존 제품인 S사의 슈퍼팔트 포러스와 단가 측면에서는 비슷한 수준이지만, 플랜트에서 혼합하여 사용이 가능하므로 시공성 측면에서는 프리믹스(Pre-mix)형인 S사의 슈퍼팔트 포러스에 비하여 유리하다. 프리믹스형의 바인더들은 혼합물 생산을 위하여 배치 플랜트에 별도의 바인더 탱크를 필요로 하므로 불리하다.

(2) 배수성 아스팔트 혼합물의 재료

(가) 골재

배수성 혼합물의 성능에 가장 중요한 요소인 골재는 현지에서 확보하였다. 시험시공이 이루어진 무안-광주 1공구에 납품을 하는 아스콘 플랜트의 골재는 배수성 아스팔트 혼합물이 필요로 하는 품질관리 기준을 만족하지 못하여 인접한 타 아스콘 플랜트(신아-금호 아스콘)에서 혼합물을 생산하였다. 2차 시험시공에서 아스팔트 혼합물을 생산했던 사천의 구룡 아스콘에 비하면 골재의 품질은 편장석 비율 측면에서 약간 떨어지지만 배수성 아스팔트 혼합물의 품질 기준을 만족하는데 문제가 없기 때문에 본 시험시공에 사용하였다.

굵은 골재는 최대치수를 13mm로 하여 잔골재, 채움재와 혼합하여 배수성 아스팔트 혼합물의 규격에 적합한 입도로 조정하여 사용하였다. 아스팔트 혼합물의 목표 공극률을 20%로 설정하고, 목표 공극률을 만족할 수 있는 골재 배합비를 결정하였으며, <그림 3.2.100>에 배수성 아스팔트 혼합물에 사용된 골재의 입도 분포를 나타내었다.



<그림 3.2.100> 13mm 골재 입도 그래프

(나) 폐타이어 분말

배수성 아스팔트 혼합물을 생산하기 위해서 사용한 폐타이어 고무분말은 C사에서 생산하는 고무분말 중에서 냉동분쇄기술을 이용해 제조된 120mesh(125㎛) 입자크기의 고무분말이다. 시험시공을 위하여 생산한 배수성 아스팔트 혼합물에는 AP-5 바인더에 중량비로 12%를 120mesh 폐타이어 분말로 대체하여 사용하였다. 본 폐타이어 분말은 현재 중국에서 생산되고 있는 재료로서 완제품 상태에서 중국에서 수입하였다. 그러나 120mesh의 폐타이어 분말을 생산하는 원천기술은 국내 C사에서 보유하고 있다.

(다) 왁스

왁스는 H사의 High Density Oxidized Homopolymer(HD계)와 Oxidized Homopolymer(LD계) Wax(AC 395)를 사용하였는데, 구분의 편의상 본 연구에서는 전자는 type Ⅰ으로 후자는 typeⅡ로 명명하였다. <표 3.2.32>는 H사에서 제공한 PE Wax의 기본 물성값을 나타내고 있다.

<표 3.2.32> PE Wax의 기본 물성값

	High Density Oxidized Homopolymer	Oxidized Homopolymer
Mettler drop point (℃)	137	88
Hardness (dmm)	〈 0.5	90
Density (g/cc)	1.00	0.85
140℃ Viscosity(cP)	2,500	35
Acid Number(mg KOH/g)	41	15

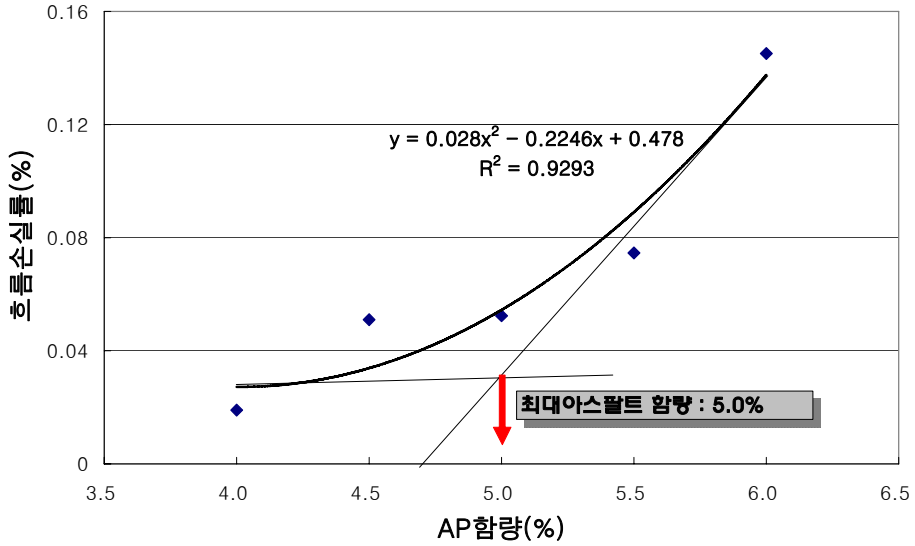
-Mettler drop point : 액상화되어 떨어질 때의 온도

-Acid Number : 시료 1g중에 함유되어 있는 산을 중화하는데 소비되는 KOH의 mg수

AC 395 왁스는 성상에 따라 고체 형태로 되어있는 재료와 분말 형태(AC 395A)로 되어있는 제품이 있는데, 본 시험시공에서는 분말상 제품을 선택하였다. 고체형태의 제품은 아스팔트 바인더를 미리 공장에서 혼합하는 프리믹스(Pre-mix) 방법으로 생산할 경우에 더 효율적이고, 분말상 제품은 일반 아스팔트 바인더에 왁스를 개질재의 형태로 플랜트에서 혼합(Plant-mix)할 때 더 효율적으로 작용하기 때문이다.

(3) 배수성 아스팔트 혼합물의 배합설계

배수성 아스팔트 혼합물의 배합설계에서 가장 중요한 아스팔트 함량을 결정하기 위해서 함량을 4~6%까지 0,5% 단위로 변화시켜가며 배합을 하고 흐름 시험을 실시하였다. <그림 3.2.101>과 <표 3.2.33>에서 나타낸 것과 같이 최적 아스팔트 함량은 5.0%에서 결정되었으며, 그때의 공극률, 마샬 안정도, 칸타블로 시험 결과는 모두 기준값을 만족하는 것으로 나타났다.



<그림 3.2.101> AP 함량에 따른 흐름손실률

<표 3.2.33> 아스팔트 배합설계 결과

아스팔트 함량		공극률 (%)	흐름 손실률 (%)	마샬 안정도 (kgf)	칸타블로 (%)
		20% 이상	-	500 kgf 이상	20% 이하
5.0%	1	22.45	0.053	500.4	18.43
	2	22.49		529.6	17.44
	3	24.49		311.0 (시험오류)	21.36

마. 결 과

■ 1차년도 연구에서는 배수성 개질 아스팔트 바인더를 개발하기 위해, SBS · SBR과 Wax를 첨가하여 물리적 특성을 분석하였으며, 2차년도 연구에서는 폐타이어(120 mesh)와 Wax를 첨가하여 물리적 특성을 분석하였다. 1, 2차년도의 개질 아스팔트 바인더의 실험결과를 토대로 아래와 같이 배수성 개질 아스팔트 바인더를 제안하였다.

- Mix Ⅰ : AP5(침입도60-80) + 폐타이어(120mesh) 12% + Wax(type Ⅰ) 2%
- Mix Ⅱ : AP5(침입도60-80) + SBR 2% + Wax(type Ⅰ) 3% (1차년도 제안)

■ 배수성 혼합물 시험에서는 총 5가지의 혼합물을 제작하여 실험을 수행하였다. 적용된 바인더 종류로는 Mix Ⅰ(건식타입, 습식타입), Mix Ⅱ와 본 연구에서 제안한 바인더와의 비교를 위해 일반 아스팔트 바인더(AP-5), S사의 배수성 아스팔트를 적용하였다. 이 혼합물들의 물리적 특성 시험결과,

명칭	설명
AP5	침입도 60-80 아스팔트 바이더
4S-1	침입도 60-80 + Wax 2% + 폐타이어 12% (습식)
4S-2	침입도 60-80 + Wax 2% + 폐타이어 12% (건식)
4S-3	침입도 60-80 + Wax 3% + SBR 2% (습식)
S사	SBS 개질 바인더

- 흐름시험 : Mix Ⅰ의 흐름손실률이 가장 작게 나타났다.

- 칸타블로 시험 : 모든 혼합물이 국내외에서 적용하고 있는 칸타블로 손실률 20%이하의 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 특히 주목할 점은 S사의 바인더에 비하여 본 연구에서 개발한 바인더가 더 좋은 특성을 보여주고 있다.

- 휠트랙킹 시험 : 4S-1, 4S-2 아스팔트 혼합물의 경우, 일반 아스팔트 혼합물보다 7~8배정도 높게 나타났으며 동적안정도의 상한치가 6,000회/㎜임을 감안한다면 러팅 저항성이 매우 우수할 것으로 판단된다. 반면, 4S-3는 일반 아스팔트 혼합물과 차이가 없는 동적안정도 결과를 보여 러팅에 취약한 것으로 나타났다.

- 수정 Lottman 시험 : 본 연구에서 개발한 아스팔트 혼합물은 골재와 아스팔트 바인더와의 부착력 및 점착력이 증가되므로 상온에서의 간접인장강도는 일반 아스팔트 혼합물보다 높게 나타났다. 4S-1과 S사 혼합물이 가장 높은 강도값을 나타냈었다. 하지만 수침후 강도는 S사 혼합물에 비해 4S-1 혼합물이 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 4S-2 혼합물의 박리 저항성이 약하다는 것을 확인 할 수 있다.

- 동적 수침시험 : 일반 AP5의 경우 타 재료에 비해 아스팔트 바인더의 소실량이 매우 크게 나타났으며, 개발된 배수성 아스팔트 바인더의 경우 4S-1과 4S-2의 박리율은 각각 24%와 28%로 이는 타 재료에 비해 낮은 박리율을 보이는 것으로 나타났다.

■ 3차 시험시공에는 본 연구진이 개발한 바인더를 이용하여 무안 고속도로 구간에 시험시공 하였다. 혼합물의 시험결과 최대 아스팔트 함량은 5% 로 결정되었으며 아스팔트 물성 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

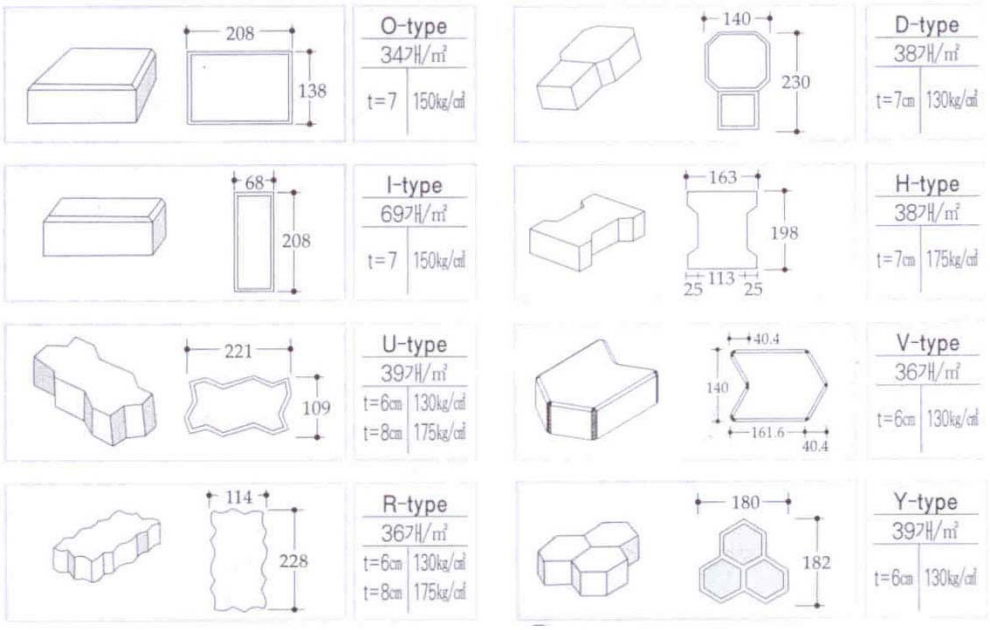
3. 페이버 포장

페이버 포장은 접근성과 안전성이 요구되는 이면도로, 광장포장 그리고 공항 등에 적합한 포장방식으로 뛰어난 공용성과 심미적 아름다움을 제공하는 장점을 가지고 있다. 구조 및 시공 측면에서 페이버 포장은 양생이 필요 없어 시공이 신속히 이루어지므로 교통 흐름에 매우 유리하며 여러 개의 절점을 가지게 되므로 교통하중에 의한 균열이나 표면 손상을 최소화할 수 있다. 이 외에도 페이버 포장은 가스 및 수도관 등과 같은 지하 설비를 보수할 경우에도 단순히 블록을 드러내고 다시 시공함으로써 신속한 작업이 가능하며 시각적으로도 원래의 상태를 회복할 장점을 가지고 있다.

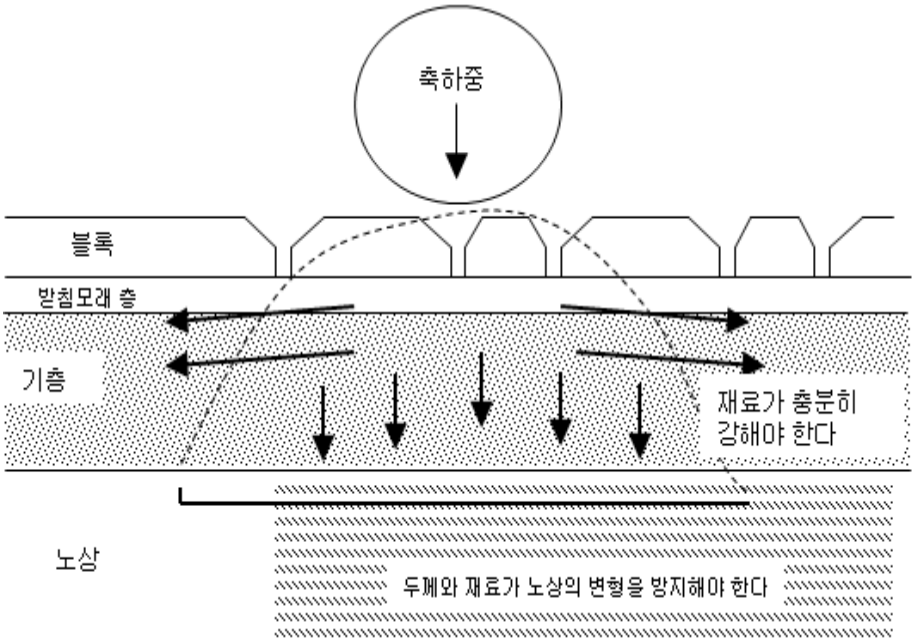
가) 페이버 포장의 개발 배경

페이버 포장에는 용도에 따라 여러 가지 형상이 있으나 본 연구에서는 보차도용 콘크리트 인터로킹블록 포장을 대상으로 한다. 보차도용 콘크리트 인터로킹블록 포장에는 <그림 3.2.102>과 같은 여러 가지 형태의 블록이 사용된다. 이 가운데 차량통행이 빈번하거나 차량의 속도가 시속 10~15 km를 넘는 경우에는 시공성 및 구조적 성능을 고려하여 <그림 3.2.102>에 있는 I형 및 U형 블록이 일반적으로 가장 많이 사용된다. 두께가 60 mm인 블록은 주로 보도용으로 광장이나 주차장 그리고 소도로에 사용되며 일반도로에는 두께가 80 mm인 블록이 사용된다.

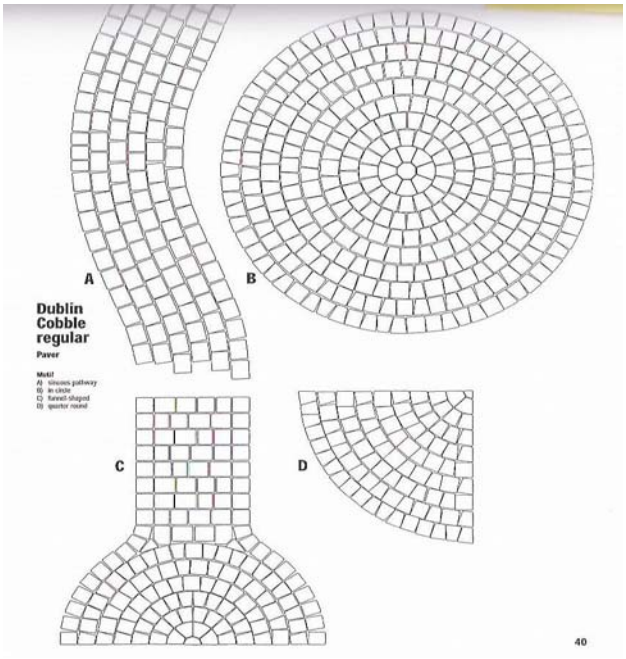
보차도용 콘크리트 인터로킹블록은 콘크리트 포장에 비해 균열발생의 문제가 없으며 유지보수가 간단하다는 장점이 있으나 블록 사이의 인터로킹에 의해 구조적 성능을 발휘함으로써 연속성 및 일체성이 부족한 단점을 가지고 있다. 보차도용 콘크리트 인터로킹블록의 구조적 성능 중 가장 중요한 것은 다음 <그림 3.2.103>과 같이 집중하중의 형태로 작용하는 차량하중을 되도록이면 넓게 분산시켜 포장 아래의 연약지반이 과응력 상태에 도달하지 않도록 하는 것이다. 이를 위해서는 블록들이 서로 연결되어 이웃한 블록들이 하나의 강체 매트(solid mat)로서 거동할 수 있어야 한다. 이러한 페이버의 구조적 성능을 고려하면 <그림 3.2.102>에서 U형 블록이 I형 블록에 비해 블록과 블록 사이에 서로 접촉하는 면적이 크며 기계적인 연결도 이루어져 하중분산 효과가 크기 때문에 효율적 형식이라 할 수 있다.



<그림 3.2.102> 인터로킹 블록의 종류



<그림 3.2.103> 페이버의 하중 분산 형태



<그림 3.2.104> 페이버의 다양한 배치 현황

페이버 포장은 공용성과 심미적 기능을 강화하기 위해 위의 <그림 3.2.104>와 같이 다양한 패턴으로 표현될 수 있어야 한다. 이럴 경우 U형 블록에 비해 I형 블록이 보다 편리하게 사용될 수 있다. 따라서 구조적 성능이 우수하면서 동시에 다양한 패턴의 표현이 가능한 블록 개발의 필요성이 대두 되었다.

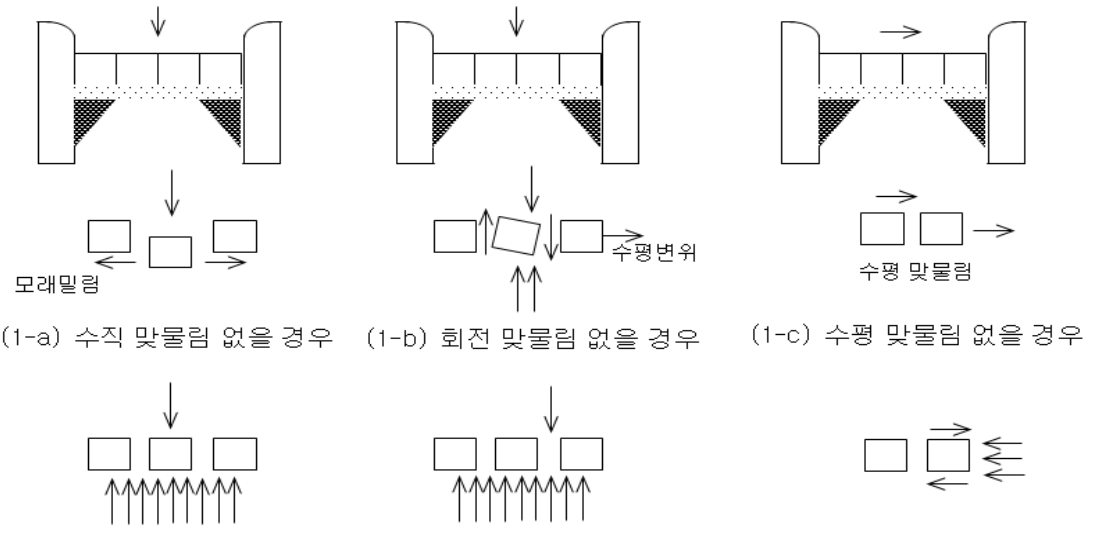
한편 집중강우가 발생할 수 있는 지역에 비투수성 페이버 포장을 사용할 경우 상하수로에의 지나친 우수의 유입은 여러 가지 환경적인 문제를 유발할 수 있다. 또한 신설 도로가 증가함에 따라 우수의 지하수로의 유입이 감소하면서 지하수의 고갈이 심화되면서 국가 자원의 차원에서도 대책의 필요성이 대두 되었다. 이외에도 강우 시 도로 위에 머무는 우수는 차량의 안전에도 영향을 미칠 수 있다. 이러한 문제점들을 개선하기 위해 페이버 포장의 경우 우수의 일부를 지반으로 흡수하는 방안에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다. 대표적인 방법으로는 블록의 물성변화를 통해 투수성을 증가시키는 방법과 그리드(grid)형 블록의 개발 그리고 블록과 블록 사이의 투수용 공간을 형성함으로써 투수성을 향상시키는 방법이 주로 사용되고 있다. 본 연구에서는 페이버의 내부에 인위적인 공극을 만들에 투수성을 향상시키는 방법을 시도 하였다.

나) 페이버 포장의 개발 목표

본 연구에서는 보차도용 콘크리트 인터로킹블록 포장을 대상으로 구조적 성능 및 시공성이 우수한 형상을 개발하고 동시에 투수성을 향상시킬 수 있는 블록을 개발하는 것이다.

인터로킹블록이 집중하중의 분산이라는 구조적 성능을 발휘하기 위해서는 다음 <그림 3.2.105>와 같은 세 가지 형태의 인터로킹이 이루어 져야 한다. 첫째, 수직 인터로킹(vertical interlocking)이다. 이는 블록 줄눈부의 채움 모래에 의해 한 블록에 작용하는 힘이 이웃한 블록으로 전단력의 형태로 전달되는 것을 의미한다. 둘째, 회전 인터로킹(rotational interlocking)이란, 충분한 두께의 블록이 서로 가깝게 배치됨으로써 한 블록의 회전이 이웃한 블록에 의해 구속되는 것을 말한다. 그리고 셋째, 수평 인터로킹(horizontal interlocking)이란, 블록의 배치 형태에 따라 차량의 가속, 정지, 회전에 의한 수평력을 분산하는 것을 말한다.

블록의 투수성을 향상시키려면 우수가 흐를 수 있는 공극을 형성해 주어야 하는데 블록에 형성하는 공극의 크기가 증가할수록 블록의 강도가 저하될 가능성이 높다. 따라서 공극의 형성에 따른 강도저하를 최소화 하면서 투수성을 향상시킬 수 있는 최적의 공극 크기 및 형상을 결정할 필요가 있다.



(1-a) 수직 맞물림 없을 경우 (1-b) 회전 맞물림 없을 경우 (1-c) 수평 맞물림 없을 경우

(2-a) 수직 맞물림 있을 경우 (2-b) 회전 맞물림 있을 경우 (2-c) 수평 맞물림 있을 경우

<그림 3.2.105> 세 가지 대표적 인터로킹의 형태

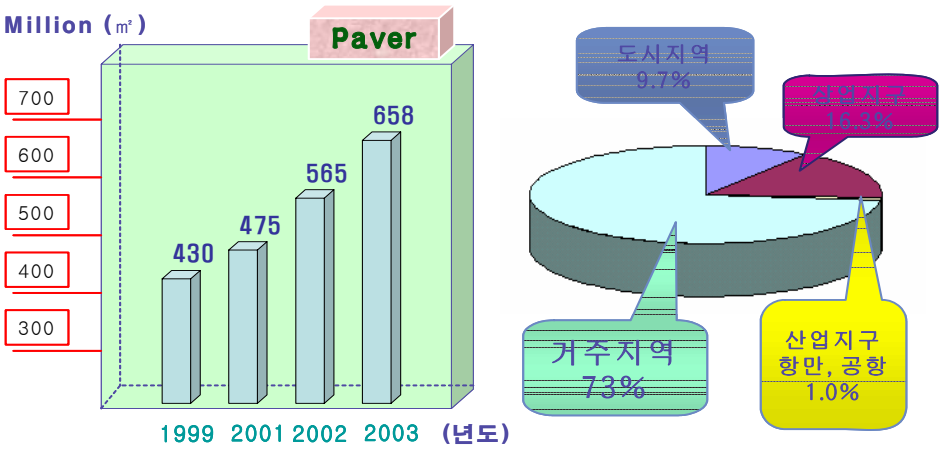
본 연구는 패턴의 표현이 자유롭고 인터로킹의 성능을 향상시킬 수 있으며 투수성이 우수한 새로운 형상의 블록을 개발함으로써 페이버 포장의 환경을 개선하고 도로 분야 경쟁력 향상에 기여하는 것을 목적으로 하였다.

다) 블록 포장의 개요

현대의 도로는 대부분 콘크리트나 아스팔트로 표면을 처리하는 것이 보통이다. 따라서 국내 많은 연구자들에 의해 콘크리트 포장과 아스팔트 포장의 장단점에 대해 연구가 진행되었다. 포장 재료로 콘크리트가 많은 장점이 있음에도 불구하고, 국내에서는 대부분의 경우에 아스팔트 포장을 선호하여 콘크리트 포장은 상대적으로 적은 비율을 보이고 있다.

그런데 유럽, 특히 네덜란드와 독일 같은 나라에서는 콘크리트를 벽돌 크기의 페이버으로 만들어 도로의 표면 재료로 사용하고 있다. 또한 미국의 경우에도 점차적으로 페이버의 사용이 증가하고 있는데 <그림 3.2.106>은 미국의 페이버 사용 추세를 보여주고 있다. 콘크리트가 갖는 재료의 장점을 최대한 살리고, 기존 콘크리트 포장의 단점을 보완하는 이 공법은, 경제성이나 내구성 측면에서 그 성능을 인정받고 있으므로 향후에 합리적인 콘크리트 도로 공법으로 인정받아 적용, 발전될 것으로 사료된다.

따라서 본 절에서는 콘크리트 페이버 포장의 소개와 설계 및 시공시 유의 사항을 소개하고, 파손 원인 및 유지 보수 대책 등에 대해 설명한다.



<그림 3.2.106> 미국 페이버 포장 현황

(1) 콘크리트와 아스팔트 포장

일반적으로 포장도로망이 구축된 많은 나라에서 콘크리트보다는 아스팔트가 포장 재료로 더 많이 채택되고 있다. 그 이유는 기술적인 것보다는 다른 요인이 많아 보인다. 현재까지 도로 재료의 선정은 구조적인 안전성과 더불어, 경제성 분석이 선행되어야 하지만, 콘크리트 포장은 많은 초기 비용 때문에 건설을 기피하는 경향이 있었다. 공학적으로 초기 비용보다는 설계 수명기간 동안에 경험하게 될 전체 포장 수명 비용(Life Cycle Cost)을 바탕으로 최적의 공법을 선정하는 것이 바람직하다. 그러나, 포장 수명 추정의 어려움과 더불어 장기간의 비용 분석은 불확실성을 내포하고 있다. 따라서, 정책의 결정권자들은 단기간의 비용과 이익에 많은 관심을 가져왔다. 실제로 미국 및 유럽 각국의 공법 선정은 초기 비용이 주요한 역할을 하고 있는 실정이다. 일반적으로 거론되는 콘크리트 포장의 장·단점을 열거하면 <표 3.2.34>와 같다.

외국의 경우, 얇은 두께의 아스팔트 도로는 많은 교통량 하에서도 포장이 갖추어야 할 기본적인 기능 즉, 평탄하고 조용한 표면 및 높은 미끄럼 저항을 제공하고 있다. 그러나 아스팔트 포장은 중하중에 의한 러팅 발생이라는 치명적 단점과 재활용의 어려움 등과 단점을 지니고 있다.

<표 3.2.34> 콘크리트 포장의 장·단점

콘크리트 포장의 장점	콘크리트 포장의 단점
• 휨강성은 연약한 노상 지지력을 가진 지역에서도 차량하중을 지탱 한다.	• 초기 비용이 높다. • 저교통 도로의 경우, 최소 슬래브 두께를 적용하여도 필요 이상으로 강한 포장이 된다.
• 차량하중에 따른 표면 변형은 무시	• 시공 후의 상태 점검이 어렵고, 하자 시 보수비용이 비싸다.
• 콘크리트 슬래브는 적은 유지 보수 비용으로 긴 수명을 갖는다.	• 슬래브 사이의 줄눈은 구조적 결함, 펌핑, 주행성의 저하 원인이 된다. • 균열이 발생한다.

페이버 포장 공법은 콘크리트 재료의 강도, 내구성, 수명 등 장점은 그대로 유지하는 반면, 유지 보수의 어려움 등 일반 콘크리트 포장에서 나타난 문제점들을 극복함으로서 경쟁력을 지니고 있다. 또한 초기 시공비가 아스팔트 포장과 비교하여도 충분히 경쟁력이 있는 것으로 사료된다.

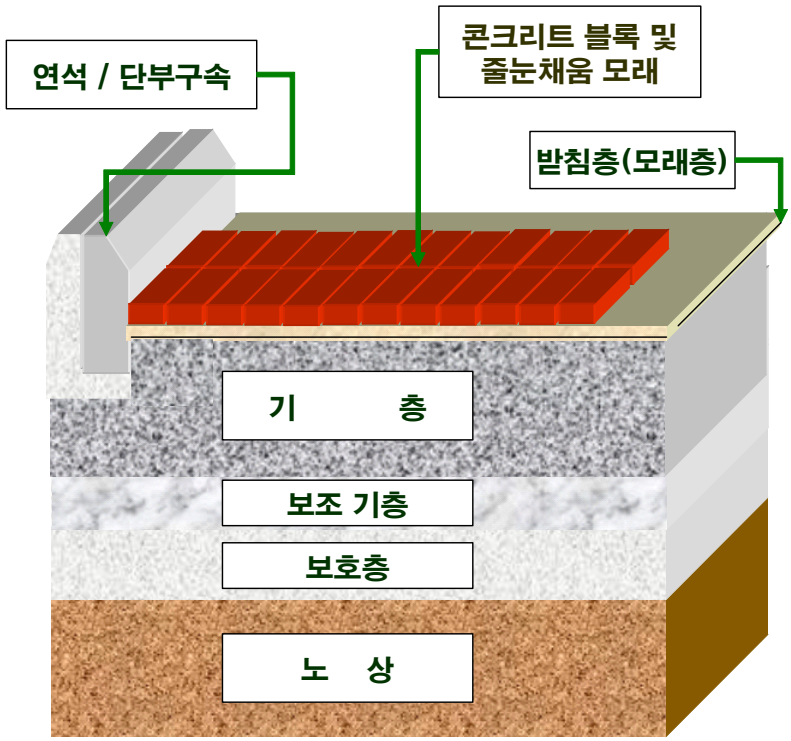
<표 3.2.35> 콘크리트 페이버 포장의 특징

구분	특징
구조적 측면	· 자동화된 공장에서 표준 제작을 통해 낮은 비용으로 높은 강도와 내구성을 보여줌 · 수명은 페이버 자체보다 보조 기층과 노상에 의해 결정되며 일반적인 아스팔트 포장보다 수명이 김 · 우수하게 시공된 포장은 콘테이너 운반 차량과 같은 저속의 중차량이 급정거나 가속 등을 할 때 발생하는 수평 전단응력과 재하하중에 높은 저항을 갖음.
경제적 측면	· 기계 시공을 이용하여 넓은 지역에 시공할 경우 기존의 포장장비 구성보다 간단하고 저렴 · 유지보수시 해당지역만 보수가 가능하고, 페이버를 재사용이 가능 · 역청 재료와 같은 비싼 재료를 사용하지 않음
환경적 측면	· 잭 해머를 이용하지 않고, 수작업을 통해 유지 보수함으로서 도심부나 거주 지역에 시공 시 소음 및 공해를 줄일 수 있음 · 석유 부산물과 같은 재료가 없으므로 환경에 영향을 주지 않음 · 여러 가지 색을 사용하므로, 노선, 횡단보도, 노면 표지와 같은 교통 표지 마킹을 영구히 구현할 수 있으며 주어진 환경과 친화할 수 있는 독특한 미적 장점을 제공

(2) 콘크리트 페이버 포장

콘크리트 페이버 포장은 저속 도로에 한하여 설치된다. 이 포장은 70 km/h까지의 교통속도에 적당하다고 알려져 있다. 높은 설계 속도를 갖는 도로에서 콘크리트나 아스팔트 표면처럼 평탄성을 유지하는 것이 가능한 지에 대해서는 아직 확실하게 밝혀진 바 없다. 그러나, 네덜란드와 독일을 포함한 여러 나라의 경험은 이 공법을 적용한 도로라 하더라도 주행속도가 70 km/h 이상임을 보여주고 있다.

페이버 포장은 얇은 모래층 위에 맞물림을 크게 하기 위해 일정한 패턴으로 콘크리트 페이버를 설치함으로서 비교적 매끈한 표면을 형성한다. 페이버 포장구조는 아스팔트 포장과 유사한 형식을 가지나 기존의 아스팔트 표층 대신에 페이버와 받침층이 사용된다는 점이 다르다. 일반적으로 페이버 포장은 아스팔트 포장과 비슷한 절차로 설계와 시공이 이루어진다. 30mm의 모래층 위에 80mm두께의 블록으로 이루어진 포장은 아스팔트 110mm두께의 포장과 하중 지지력에서 비슷하다고 알려져 있다. (A N S Beaty, 1999) 콘크리트 페이버 포장의 특징을 살펴보면 <표 3.2.35>와 같다.



<그림 3.2.107> 페이버 포장의 횡단면도

라) 페이버 포장의 구성 요소

페이버 포장의 일반적인 횡단면도는 <그림 3.2.107>로 나타낼 수 있다. 페이버 포장의 구성 요소는 다양한데 그 요소들의 정의 및 특징을 열거하면 다음과 같다.

(3) 노상

노상의 강도는 모든 포장의 설계에서 중요한 요소이다. 일반적으로 이 층이 약하면 포장 두께가 두꺼워진다. 블록포장에서 노상토의 지지력을 구하는데 널리 사용되고 있는 실험방법은 CBR 시험이다. CBR값이 5% 이하인 흙에서는 교통량에 의해 연약해짐을 방지해야 한다.

(4) 보호층(Caping Layer)

노상의 정리가 끝난 후 CBR값이 5% 이하인 경우에 설치되는 비교적 비용이 저렴한 입상 재료층을 의미한다. 이 층은 노상의 강도 저하에 따른 악영향을 줄이고, 건설 시 시공과 다짐을 위한 작업 장소를 제공한다. 영국이나 호주등의 경우 노상의 CBR값이 2% 이하이면 600 mm, CBR값이 2 ~ 5% 사이면 350 mm 두께를 적용한다.

(5) 보조기층

아스팔트 포장에서 이 층은 두꺼운 기층이 필요한 경우 대안으로 적용되고 있다. 일부에서는 석회나 시멘트 재료를 이용하여 치환하기도 하지만, 대부분은 입상 재료로 구성된다. 포장 구조의 하부에 위치한 이 층은 기층이 경험할 응력보다 작은 응력을 받으므로 더 싸고 질이 낮은 재료를 사용하게 된다. 사용되는 재료는 부순 돌이나 자연 모래, 강자갈 등이다. 각 나라의 시방서에 보조기층에 대한 기준이 규정되어 있는데, 국내의 경우 1996년의 아스팔트 포장 설계 시공 지침서를 예로 들 수 있다.

현장에서 다짐된 보조기층 재료는 CBR값이 최소 30% 이상 되어야 한다. 동결 영향을 받는 경우, 포장의 총 두께는 동결 심도보다 더 두꺼워져야 하는데 이 경우는 보조기층을 증가시키는 것이 경제적일 것이다. 일반적인 두께는 150 mm ~

225 mm이다.

(6) 기층

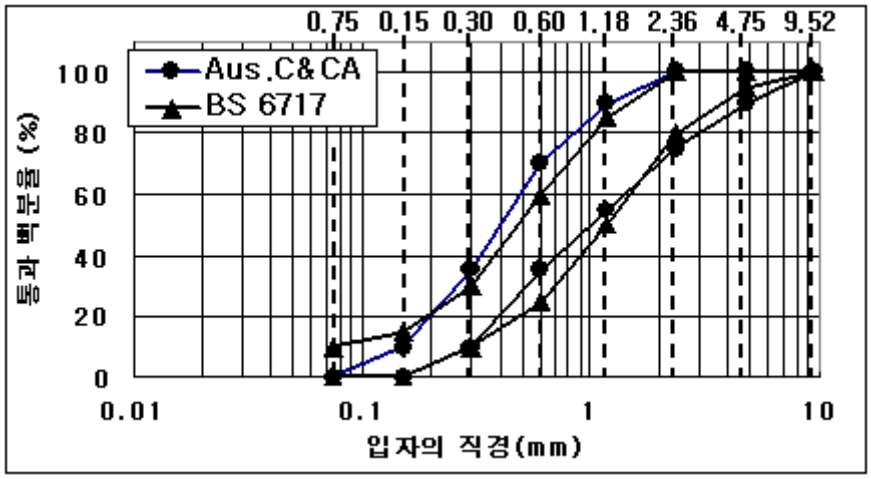
기층은 포장 구조에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 이 공법에서의 기층은 흙시멘트나 린콘크리트 같은 고품질의 시멘트 안정처리 재료로 구성된다. 기층은 배수를 위해 최소 2½%의 횡단 구배를 유지하며, 최소 1¼%의 종단 구배를 유지해야 한다. 마무리된 기층 표면의 허용 오차는 ±15 mm이다.

(7) 받침층(Laying Course)

이 층은 마무리된 기층의 위에 놓이는 층을 말하며, 콘크리트 배합에 사용되는 깨끗한 모래로 구성된다. 비 안정처리 기층이 채택된 경우에는 모래층의 손실을 줄이기 위해, 지오텍스타일을 설치할 수도 있다.

이 층에 사용되는 모래의 허용 입도는 시방서에 규정되어 있는데 동결이 의심되는 지역의 경우에는 75 μm체(0.075 mm) 통과량을 3% 이하로 제한하고 있다. 중하중을 받는 지역의 페이버 포장의 경우에는 받침층에 실리카를 함유하고 있는 자연사만을 사용함으로서 75 μm체 통과량이 3%를 초과하지 못하도록 하고 있다. 교통량이 많은 지역에 적용하는 경우에는 특히 75 μm보다 작은 미세한 재료들은 가급적 모두 피해야 하는데 이 경우 입도가 0.1% 이하가 되도록 규정해야 한다. <그림 3.2.108>은 호주 콘크리트 협회(ACCA)와 영국 표준(BT 6717)의 기준을 나타낸 것이다.

모래 입자가 맞물림에 의해 반복 하중을 견디는 것은 필수적이다. 따라서 입자의 모양과 강성은 매우 중요한데 얇고 긴 입자는 깨지기 쉬우므로 피해야 한다. 과적의 교통 하중 하에서 콘크리트 페이버 포장의 부분 파괴는 교통 하중의 반복 재하에 따라 모래층이 깨지고 따라서 입도가 변화됨에 따라 발생하는 경우가 많다. 그러므로 이 모래층의 시공 시 동일한 습도를 가져야 하고, 40 mm에서 45 mm 정도의 두께를 다짐 없이 펼쳐 놓아야 한다. 이 층은 콘크리트 페이버가 진동에 의해 다짐될 때 마무리되는데 이 때 다짐두께가 25 mm보다 작으면 안 된다.



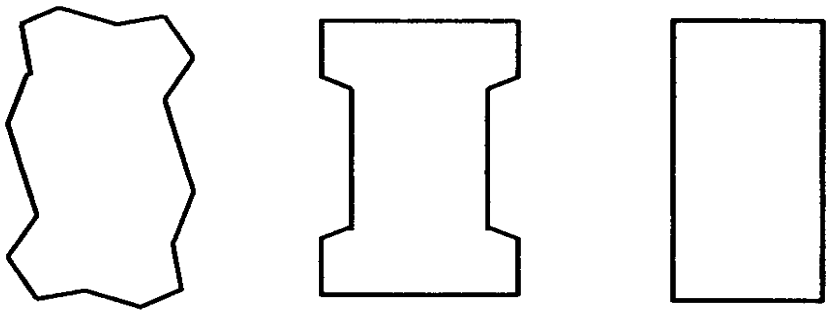
<그림 3.2.108> 호주 콘크리트 협회(ACCA)와 영국 표준(BT 6717)의 받침층 기준

(8) 콘크리트 페이버

페이버는 콘크리트로 구성되고, 주택에 사용되는 보통 벽돌의 크기를 갖는다. 일반적으로 고품질과 충분한 다짐을 얻기 위해 진동과 고압을 이용하여 공장에서 생산된다. 200 × 100 mm의 장방형 모양이 주로 선정되는데 대략 200개 이상의 모양 중 하나를 선택해서 사용하게 된다. 구조적 지지층으로서, 페이버간 맞물림 마찰력을 향상시키기 위해 페이버와 페이버 사이에 모래를 채워야 한다.

이 마찰을 키우기 위해 페이버는 크게 세 가지 형태로 나눌 수 있는데 <그림 3.2.109>에 나타나 있다. A형태는 네 면에 돌기가 있어 각각 맞물리는 것으로, 평면 기하구조에 의해 가로 및 세로축의 평행 움직임이 억제된다. B형태는 두 면으로 돌기가 있어, 서로 맞물리면 세로축의 줄눈 평행움직임을 억제한다. 다른 면의 맞물림은 정확한 단면치수에 의존한다. C의 경우는 돌기가 없이 맞물리는 것으로, 정확한 단면치수와 층의 정확도에 따라 구조적 강도가 결정된다.

캐나다의 기준인 CSA A231.2에 따르면, 페이버로부터 얻은 장방형 표본의 경우, 재령 28일 평균 압축강도가 개별적으로 45 KPa 이상이 되어야 하며, 재령 28일 후에 압축강도가 평균은 50 KPa 이상은 유지해야 한다. 동결융해 과정이 문제가 되는 경우에는 3%의 염분을 포함하고 있는 용액 안에서 초기 건조 중량 손실이 1% 이하가 되도록 제한하고 있다. 각각의 허용 오차는 길이의 경우 ±1.6 mm, 폭의 경우 ±1.6 mm, 두께는 ±3.2 mm이다.



A(2축 톱니)　　B(1축 톱니)　　C(톱니 없음)

<그림 3.2.109> 보편화 된 페이버의 형태

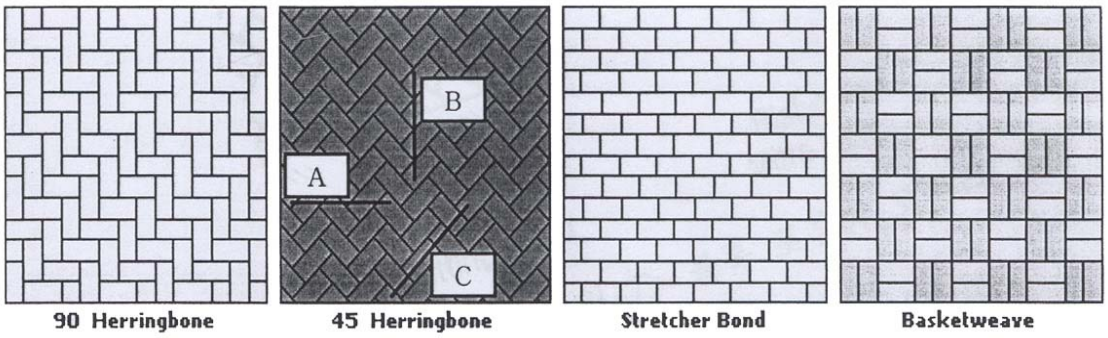
영국에서는 영국 표준 6717:Part 1을 따르는데 평균 49 MPa의 평균강도 요구에 개별적인 강도는 최소한 40 MPa로 규정되어 있다. 허용 오차는 길이와 폭이 ±2 mm이고, 두께는 ±3 mm이다. 건축물의 경우에는 페이버의 두께 60 mm가 주로 사용되는 반면, 교통을 지지해야 하는 포장에서는 80 mm의 두께가 일반적으로 사용된다. 특별한 경우, 상황에 따라 100 ~ 120 mm의 두께를 사용되기도 한다.

(9) 페이버 시공

기존의 페이버 포설은 특수 장비 없이 인력작업으로 진행되고 있으나 최근 자동화된 포설작업이 진행되고 있다. 일단 페이버가 놓이면, 진동판 다짐기가 표면을 처리한다. 이 과정은 표면을 평탄히 하고 페이버 사이의 줄눈에 모래를 채워 넣어 아래의 모래층까지 다짐 효과를 갖게 한다. 너무 가벼운 다짐기의 사용은 피해야 한다. 다짐기의 판 크기는 0.25 m^2 이상이어야 하고, 75 Hz에서 100 Hz의 범위의 진동수를 가지며, 75 kN/m^2 이상의 힘을 전달할 수 있어야 한다.

(10) 페이버층의 패턴

선택된 페이버 패턴은 수평 균열을 억제할 수 있어야 한다. 페이버 패턴은 교통 응력의 영향을 받지 않도록 결정되어야 하는데, 만약 영향을 받게 되면 페이버 층간의 접착 상태가 저하되어 결국 맞물림의 손실을 초래하기 때문이다. 현실적으로는 오늬(Herringbone) 무늬의 결합 패턴이 가장 좋으므로 포장에 자주 채택되고 있다.



<그림 3.2.110> 일반적인 페이버 포장의 시공형태

<그림 3.2.110>에서와 같이 오늬무늬 접착폼은 교통 방향에 따라 나눌 수 있다. 교통 진행방향에 45°의 각도로 놓여 있는 경우가 다른 두 가지보다 다소 유리하다. 포장의 결합부나 길어깨 부분 그리고 구조물과 만난 부분 등에서는 페이버를 절단하는 것이 필수적이다. 다른 패턴의 경우, 특히 Stretcher bond는 교통 방향에 평행하게 놓일 경우 교통 응력의 억제 능력이 감소되므로 주의를 요한다.

(11) 가장자리의 구속

페이버의 측면 움직임과 받침층으로부터 모래 손실을 방해하기 위해 가장자리의 구속은 필수적이다. 페이버 포장에서 가장자리의 구속은 콘크리트 연석이나 연석과 측구의 결합으로 이루어지는데 넓게는 길어깨 부분까지 구속에 이용된다. 효과적인 가장자리의 구속이 이루어지지 않으면 교통 하중으로 인해 페이버의 이동이 나타날 것이고 결국 맞물림 구조의 손실과 함께 포장의 파괴를 일으킬 것이다. 가장자리 구속은 <그림 3.2.109>에서 보는 바와 같은 Bishop's Mitre 페이버를 이용하게 된다.

(12) 줄눈 폭

모래로 채운 줄눈(페이버 틈)은 페이버 포장의 공용성에 매우 중요한 역할을 담당한다. 각각의 페이버 사이에 관절액 같은 적당한 활력을 줌으로서 유연성 있는 페이버 표면을 구성하는데, 구조적인 맞물림은 응력이 이웃 페이버로 분산 전달되는 역할을 제공한다.



<그림 3.2.111> 페이버 포장의 모서리 처리 형태

<표 3.2.36> 미국 및 캐나다의 줄눈부 채움 모래 기준

ASTM C 144		CSA A179	
체 크기	통과율	체 크기	통과율
No. 4(4.75mm)	100	5m	100
No. 8(2.36mm)	95~100	2.5mmm	90~100
No. 16(1.18mm)	70~100	1.25mm	85~100
No. 30(0.6mm)	40~75	0.630mm	65~95
No. 50(0.3mm)	10~35	0.315mm	15~80
No. 100(0.150mm)	2~15	0.160mm	0~35
No. 200(0.075mm)	0~10	0.075mm	0~10

줄눈 폭은 모래가 들어갈 수 있는 정도로 넓은 폭을 가져야 하지만 페이버의 이동이 자유로울 정도의 폭은 허용될 수 없다. 실무에서는 3 mm가 최적의 폭으로 사용되고 있으며, 5 mm 이상의 폭은 허용되지 않는다. 2 mm 이하의 폭은 올바른 채움이 되기 어려워, 결국 페이버의 움직임과 우수의 침투를 허용하게 된다. 최소 줄눈 폭을 확보하여 빠른 시공을 위해서는 직각의 면을 가진 2 mm 폭의 spacer ribs(간격대)가 필요하다.

(13) 줄눈부의 채움 모래

줄눈부의 채움재로는 시멘트 모르타르에 사용되는 것과 동일한 가늘고 깨끗하며 건조된 모래가 사용된다. 사용되는 모래 역시 시방서에 의해 입도가 정해져 있는데

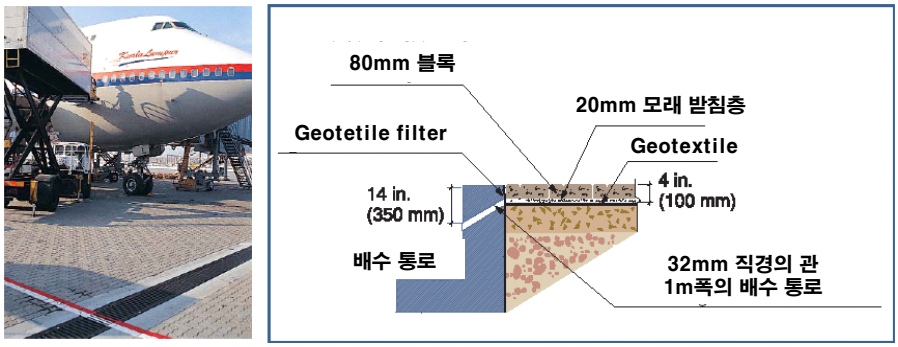
동결융해가 예상되는 기후의 지역에서는 75 μm 통과량을 3% 이하로 제한하고 있다. <표 3.2.36>은 미국과 캐나다의 기준을 나타내고 있다.

페이버 포장의 줄눈을 채울 때는 반드시 건조 모래가 사용된다. 채움의 과정은 페이버 표면에 우선 모래를 퍼뜨리고, 그 후에 진동판을 이용하여 모래가 줄눈 안으로 들어가도록 한다. 모래를 펴고 진동을 가하는 것은 채움이 끝날 때까지 계속 진행된다. 잉여의 모래는 제거하되, 청소할 때 줄눈으로부터 유출되지 않도록 주의한다. 줄눈의 모래 채움은 회전 및 왕복 운동에 대한 페이버간의 맞물림을 제공함으로서 포장을 안전하게 하고 줄눈 안으로 물이 들어오는 것을 줄여준다. 줄눈 모래의 시공 부실은 결국 질이 낮은 포장을 제공하게 된다. 예를 들어 줄눈에 들어가지 못할 정도의 굵고 거친 모래를 사용하면, 줄눈부를 완전히 채우지 못하게 되고, 계속해서 쓸어 넣을 경우 하부 구조체와 길바탕 흙에 물의 침투를 허용함으로서 결국에는 포장의 파괴에까지 이르게 된다. 길바탕 흙이 연약지반으로 구성된 경우, 수분의 함량 증가는 지지력의 손실을 가져올 것이고, 이는 바퀴 자국을 따라 움푹 패이는 함몰의 원인이 되며, 궁극적으로는 파괴로 이어질 것이다.

(14) 줄눈 실링

대부분의 도로에서 줄눈 실링이 필요한 것은 아니다. 정상적인 횡단 구배를 가진 콘크리트 페이버 포장은 방수처리가 양호하며, 초기 양생과정을 거치면서 방수 효과는 놀라울 정도로 향상된다. 다음과 같은 특별한 신설 콘크리트 페이버 포장의 경우 줄눈부에 모래를 안정화시키기 위해 실런트를 적용할 수 있는데 적용 범위는 다음과 같다.

- 줄눈에 물이 침입함으로서 하부 층의 모래 입도가 변하고, 액상화(liquifaction)될 수 있는 버스정류장과 같은 중 차량 통행이 잦은 장소
- 진공청소기나 고압의 청소장비를 사용해야 하는 장소
- 큰 종단 구배를 가진 교통량이 많은 도로



<그림 3.2.112> 홍콩 국제공항에 시공된 배수 처리시설 (ICPI, 2004)

마) 페이버 포장의 배수

표면과 표면 아래의 효과적인 배수는 모든 포장의 공용성에 필수적인 요소이다. 페이버 포장에서는 2.5%의 최소 횡단 구배와 1.15%의 최소 종단 구배를 유지해야 한다. 집수는 물이 포장 구조물이나 길바탕 흙 속으로 들어가지 않도록 적절하게 이루어져야 한다. 대략 만 번의 표준 축하중을 받는 초기 교통량 재하기간 이후에는 페이버간 맞물림이 완전히 이루어져야 하며, 각각의 줄눈은 물이 스며들지 않아야 한다. 그러나 연약하고 변형이 쉬운 길바탕 흙에서 배수가 부적절한 경우에는 과도한 침하로 인해 결국에는 보조기층의 파괴가 일어날 수도 있다. 가능하면 어느 곳이나 최소한 포장 표면 1.5 m 아래에 수위가 오도록 유지하는 것이 좋다.

배수가 중요시되는 공항과 같은 시설의 경우는 특수한 페이버 포장을 설치한다. 예를 들면 홍콩국제공항의 격납고 앞에 설치된 페이버 포장의 경우 <그림 3.2.112>과 같이 지오텍스타일과 배수로를 설치하여 배수를 돕고 있다.

바) 페이버 포장의 파손

콘크리트 페이버 포장의 원래 장점이 도로 교통을 지지하는 것임에도 불구하고, 파손은 발생한다. 미적인 관점만을 강조하며 공학적인 요소를 소홀히 할 위험도 있다. 파손의 잠재적인 원인은 다음과 같다.

- 페이버의 내구성 부족
- 적절치 못한 층의 결합 패턴을 사용

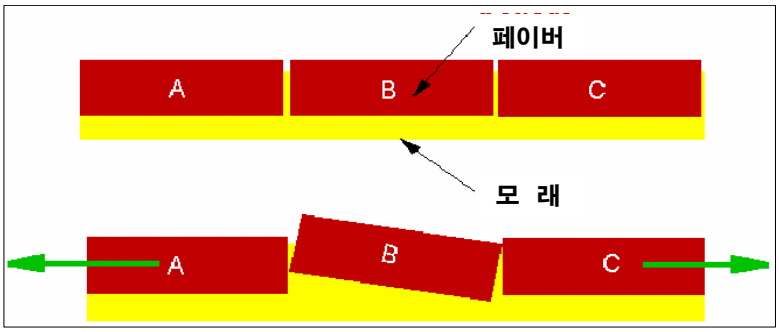
- 적절치 못한 모래의 사용 및 채움 방법의 사용
- 부정확한 줄눈 폭
- 결합력의 손실과 측면 유동을 허용하는 부적절한 가장자리 구속
- 페이버 크기와 모양의 혼용
- 배수의 부적절

사) 페이버 포장의 모양과 패턴에 따른 영향

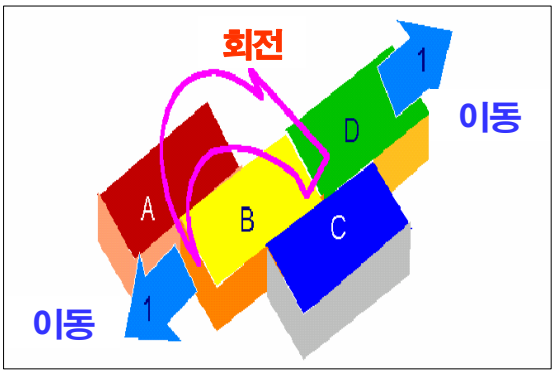
페이버 포장은 페이버의 미세 회전이 전체 페이버 포장의 공용성에 영향을 미치게 된다. 미세 회전들은 잘 보이지 않지만 종단측정기(profilometer)를 이용하면 측정할 수 있다. 측정결과 일반적으로 회전은 10°이하이며, 이동은 5mm이하이다. 수치가 작기 때문에 다른 포장의 관점으로는 중요하지 않을 수 있지만 정확한 간격을 유지해야하는 페이버 포장에서는 매우 중요한 요소가 된다.

페이버 포장은 블록 사이의 간격이 상대적으로 좁고 일정하다. <그림 3.2.113>에서 볼 수 있듯이 페이버 B가 회전을 하게 되면 인근 페이버인 A와 C를 밀어내게 되며 이는 페이버 포장의 문제를 일으키는 원인이 된다. 페이버의 회전으로 인한 인근 페이버의 이동현상은 가장자리를 구속하는 힘이 불충분할 경우 가장자리의 파손과 페이버간의 구멍이 넓어지는 현상의 원인이 된다.

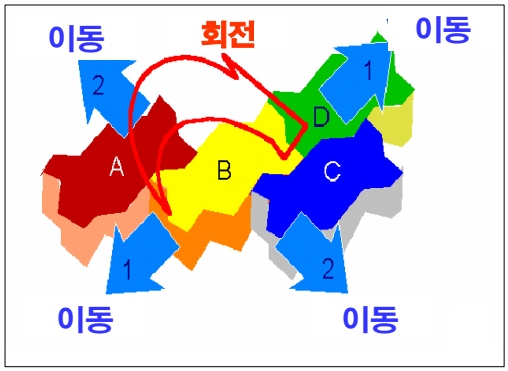
페이버의 회전에 영향을 미치는 가장 중요한 요소는 모양과 패턴이다. 먼저, 페이버 모양의 영향을 살펴보면, 직사각형의 블록의 거동이 <그림 3.2.112>에 나타나 있다. 만약 페이버 B가 가운데 축을 중심으로 회전을 한다면 A와 C를 미끄러져 D와 같은 축에 있는 페이버가 밀려나게 된다.



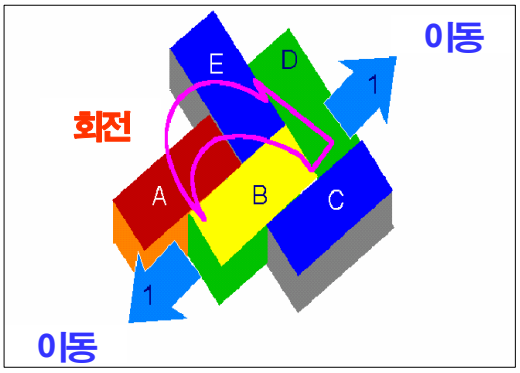
<그림 3.2.113> B의 회전으로 인한 인근 페이버의 거동



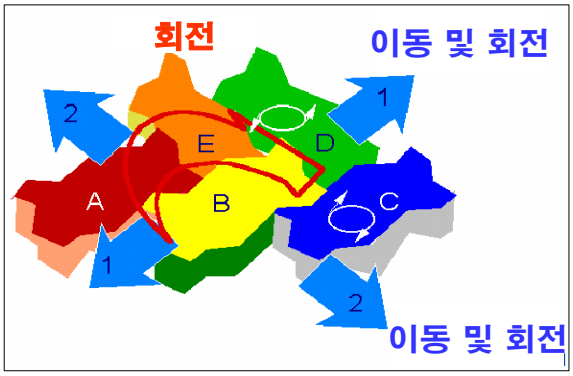
<그림 3.2.114> 직사각형 페이버의 회전에 의한 영향



<그림 3.2.115> 모양이 있는 페이버에서의 영향



<그림 3.2.116> 오늬무늬식에서 B회전으로 인한 거동



<그림 3.2.117> 일정한 모양을 가진 오늬무늬식의 거동

같은 회전현상이, <그림 3.2.115>와 같은 모양을 가진 페이버에서 나타난다면, 페이버 B는 A와 C를 밀어내지 않고는 회전할 수 없다. 즉, 1과 2방향으로 이동시킬 수 있는 충분한 힘이 있어야 B가 회전한다는 것을 의미한다. 즉, 페이버 포장시 많은 하중을 받는 지역에서 모양이 있는 페이버를 사용해야 한다는 것을 보여준다.

페이버 포장이 오늬무늬식 패턴을 가진다면, <그림 3.2.116>에서 알 수 있듯이 직사각형 모양의 페이버 B의 회전은 A와 C에 영향을 받지 않고, D에 약간의 회전을 일으키며 화살표 1의 방향으로 밀어냄을 알 수 있다. 즉 패턴이 없을 때보다 D를 회전시키는 힘이 더 필요하다는 것을 알 수 있다.

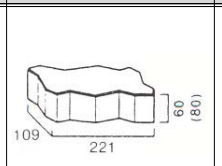
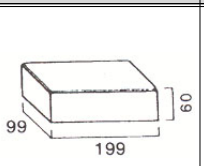
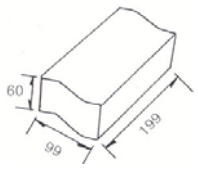
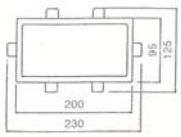
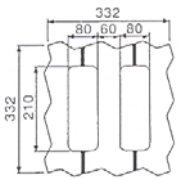
<그림 3.2.117>과 같은 모양을 가진 페이버를 같은 조건에서 살펴보면, B가 회전하기 위해서 D의 회전과 이동, A와 C의 이동시킬 만큼의 힘을 주어야 한다. 그러므로 B가 회전하기 매우 어렵다는 것을 알 수 있다. 위의 설명으로 모양을 가진 오늬무늬식의 페이버 포장이 하중이 많은 지역에 가장 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한 차도 설치시 자동차의 주 진행방향에 설치하면 가속이나 감속시 힘을 많

이 받게 되므로 진행방향에 45°각도를 가지고 페이버를 설치해야 한다.(Shackel B, 2003)

아) 페이버의 형상 비교

페이버는 형상에 따라 각각 용도와 하중 분산의 효과가 다르다. 이중 U형 페이버가 하중분산의 효과가 가장 큰 것으로 나타났다. 때문에 접근성이 높은 지역에 시공할 차도용 도로는 U형 페이버가 적합하다. <표 3.2.37>은 형상별 페이버의 특징 및 장·단점을 나타내고 있다.

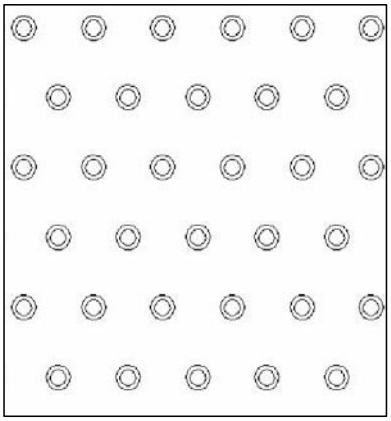
<표 3.2.37> 페이버의 형상 비교

구분	U형 페이버	I_2형 페이버	자전거도로용 페이버	보도용 잔디 페이버	차도용 잔디 페이버
모양					
특징	· 페이버간에 견고한 조립력	· 주로 보도용	· 모따기가 없음	· 가장자리를 경사지게 함 · 페이버으로 페이버 사이에 잔디가 성장	· 공원 조성 시 잔디 광장이나 주차 공간에 설치 · 잔디 면적이 32%
장점	· 하중 분산의 효과가 높음 · 불균등한 장소 포장이 용이	· 미끄럼방지의 안전성과 미관이 뛰어남	· 자전거 승차감을 높임 · 물빠짐이 좋음	· 도보 시 신발이 걸리지 않음 · 잔디 손상이 적은 잔디 공원 조성 가능	· U형 보도 페이버과의 연결 시공으로 시공성이 좋음 · 조경 면적이 높아짐
단점	· 계획적 시공이 이루어지지 않을 시 모서리 지점에서 큰 간격 발생	· 페어버간의 마찰력이 상대적으로 적어 이동이 많음	· 날카로운 물질에 대한 저항성이 적음 · 공극이 막힐 경우 물튀김현상 발생	· 가격이 고가 · 지속적인 관리필요	· 가격이 고가 · 지속적인 관리필요

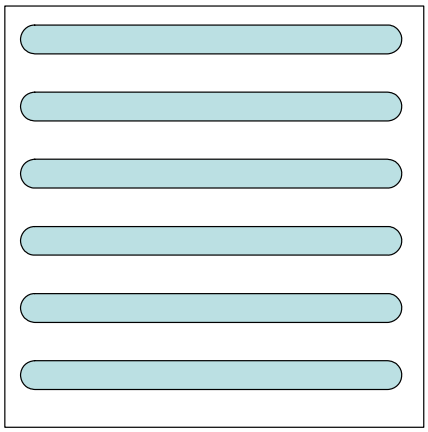
자) 기능성 페이버

(1) 점자 페이버

앞을 잘 보지 못하는 장애인들이 발로 느끼면서 안전하게 걷도록 하기 위해 고안된 페이버이다. 종류에는 이동방향을 가르쳐 주는 페이버와 주의를 주는 모양을 가지는 페이버가 있다. <그림 3.2.118>은 경고를 나타내는 페이버의 예, <그림 3.2.119>은 이동방향을 나타내주는 페이버의 예이다.



<그림 3.2.118> 경고를 나타내는 페이버



<그림 3.2.119> 이동방향을 나타내는 페이버



<그림 3.2.120> 식생 페이버의 모습



<그림 3.2.121> 식생 페이버가 주차장에 설치된 모습

(2) 식생 페이버

식생 페이버는 공극이 큰 페이버에 식물을 심어 열섬화 현상을 방지하는 기능을 가지고 있다 더불어서 강우시 유출량을 줄여주는 역할도 한다. <그림 3.2.120>은 일반적으로 사용되는 식생 페이버의 모습이며, <그림 3.2.121>은 주차장에 설치된 모습을 보여준다.(ICPI TECH SPEC-8)

(3) 재를 재활용한 페이버

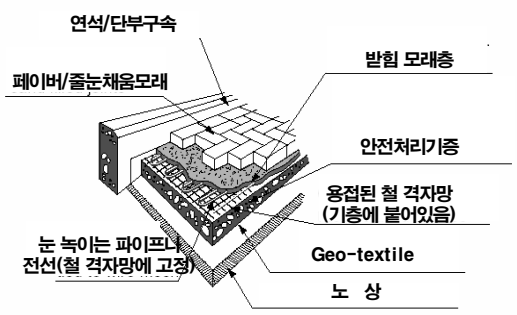
화력 발전소, 쓰레기 소각로등에서 많은 양의 재가 나오게 된다. 이 재들을 잔골재 대신에 사용함으로써 재활용 할 수 있다. 이중 재를 사용한 페이버는 초기 강도는 떨어지지만 90일 이후의 강도는 일반 콘크리트 페이버보다 더 강도가 크다고 연구되었다.

(4) 제설 페이버

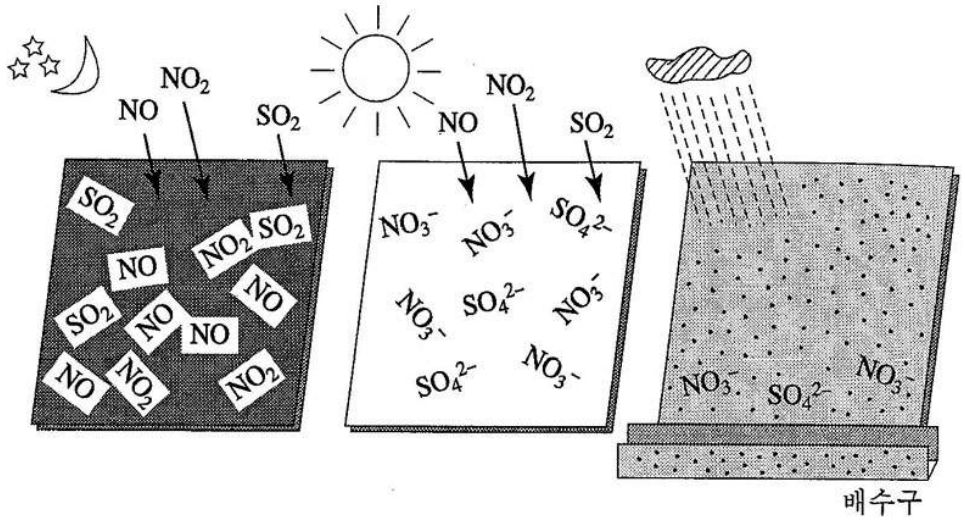
눈이 많이 오는 지역의 경우 제설의 필요성이 있다. 이런 지역에 설치되는 페이버로써 페이버 아래에 열선을 두어 눈을 녹이는 포장이다. <그림 3.2.122>는 미시간주에 설치되어 훌륭하게 작동하는 페이버를 보여주고 있다. <그림 3.2.123>은 일반적인 제설 페이버 설계 단면이다.(ICPI TECH SPEC-12)



<그림 3.2.122> 1988년에 시공된 미시간주의 제설 페이버



<그림 3.2.123> 일반적인 제설 페이버의 설계



<그림 3.2.124> 광촉매 페이버의 원리(정석진, 2002)

(5) NOx 물질 제거 페이버

NOx는 자동차의 증가로 많은 양이 배출되고 있다. NOx는 호흡기질환, 폐렴, 기관지염의 원인이 되고 산성비의 원인이 된다. 해결방안 중 하나로 티타늄을 이용한 광촉매 작용을 통해 대기중에 NOx를 없앨 수 있는 페이버를 설치한다. 페이버는 기존의 페이버와 6~8mm 정도의 티타늄막을 설치한다. 원리는 <그림 3.2.124>에서 볼 수 있듯이, 공기중의 NOx를 자외선에 의해 이온물질로 변환시킨 후 강우 시 자연스럽게 배수구로 흐르게 하는 방법이다. 연구에 따르면 자외선이 강한 9시에서 15시 사이에 70%를 넘는 제거율을 보였다. 일본에서는 Narashino와 Kawasaki에 설치되어 운영되고 있다.(Kitabukuro-cho, 2000)

(6) 투수성 페이버

투수성 페이버는 사용 재료에 따라, 투수 방법에 따라 나눌 수 있다. 사용재료에 따라 페이버 자체에 투수 콘크리트를 사용하는 페이버와 페이버 사이의 간격을 충분히 주어 투수를 시키는 방법으로 나눌 수 있다. 전자의 방법을 일본에서 기술개발이 활발하며, 후자의 방법은 유럽에서 발전되어 왔다. 투수 방법에 따라 우수를 기층에 전체 투수시키는 방법, 일부 투수시키고 일부는 배수하는 방법, 기층위에서

전체 배수시키는 방법이 있다. 투수성 페이버는 비가 내리는 즉시 표면의 강우를 제거하여 물튀김 현상, 마찰력 저하를 방지한다. <그림 3.2.125>는 영국에 주로 설치되어 있는 투수성 페이버를 나타내고 있다.



<그림 3.2.125> 영국에 설치된 투수성 페이버의 예

차) 4S 포장용 페이버 개발

(1) 하중 전달이 원활한 블록의 형태 개발 및 성능 시험

(가) 이론적 및 실험적 접근방법

본 연구에서는 패턴의 표현이 자유로운 I형 블록을 대상으로 인터로킹의 성능을 향상시키기 위해 블록의 측면에 돌기 및 홈을 형성한 새로운 형상의 블록을 제안하였다. 이러한 돌기 및 홈을 통해 블록과 블록이 기계적으로 결합함으로써 수직, 회전 및 수평 인터로킹의 성능을 개선할 수 있게 된다.

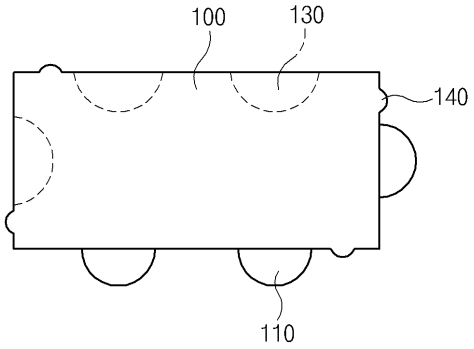
먼저 구조적 성능을 발휘할 수 있도록 돌기의 크기를 결정한 후 블록에 대한 강도실험을 통해 형상에 따른 강도변화 여부를 검증하였다. 또한 블록의 줄눈 사이에 줄눈채움 모래가 원활하게 흘러들어 갈수 있도록 돌기의 형상을 결정하며 실제로 모래 채움작업을 통해 최적의 형상을 찾아냈다. 최적형상 설계가 끝난 후 제안된 새로운 형상의 블록으로 이루어진 포장과 기존 형상의 블록으로 이루어진 포장에 대해 동일한 조건의 반복피로하중 실험을 통해 기존 형식과의 비교를 통한 구조적 성능을 검증하였다.

(나) 연구 내용

① 시험용 블록의 제작 과정

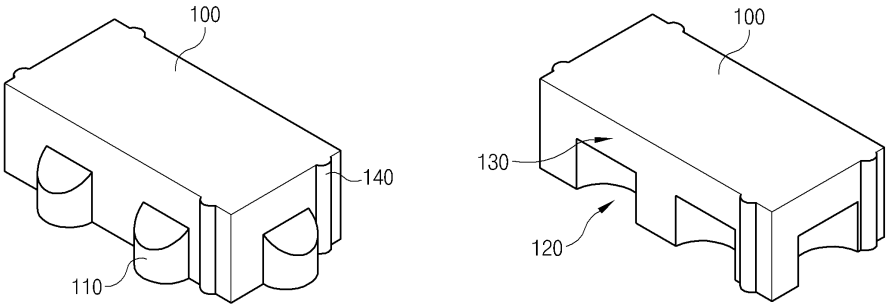
U형 블록이 I형 블록에 비해 블록과 블록 사이에 서로 접촉하는 면적이 크며 수평방향의 하중에 대해서는 기계적인 인터로킹도 부분적으로 이루어질 수 있다. 따라서 구조적 성능만을 고려하면 세 가지 인터로킹에 의한 구조적 성능이 우수하며 결과적으로 I형 블록에 비해 하중분산 효과가 큰 보다 효율적 형식이라 할 수 있다. 한편 페이버 포장은 공용성과 심미적 기능을 강화하기 위해 블록의 배치에 따라 다양한 패턴으로 표현될 수 있다. 이럴 경우 U형 블록에 비해 I형 블록이 보다 편리하게 사용될 수 있다.

최근 들어 교통량 및 차량하중이 크게 증가함에 따라 기존의 블록들에 비해 보다 뛰어난 구조적 성능을 갖는 새로운 형태의 블록 개발에 대한 필요성이 대두되었다. 따라서 구조적 성능이 보다 우수하면서 동시에 다양한 패턴의 표현이 가능한 <그림 3.2.126>와 같은 돌기 및 홈을 갖는 I형 인터로킹 블록(특허출원 2006-0071289)을 개발하게 되었다.



(a) 평면도

100 : 본체
110 : 돌부
120 : 흠부
130 : 덮개
140 : 간격유지용 돌부



(b) 투시도(돌부) (c) 투시도(홈부)

<그림 3.2.126> 개발된 돌기형 블록



<그림 3.2.127> 실내 시험용 블록 제작

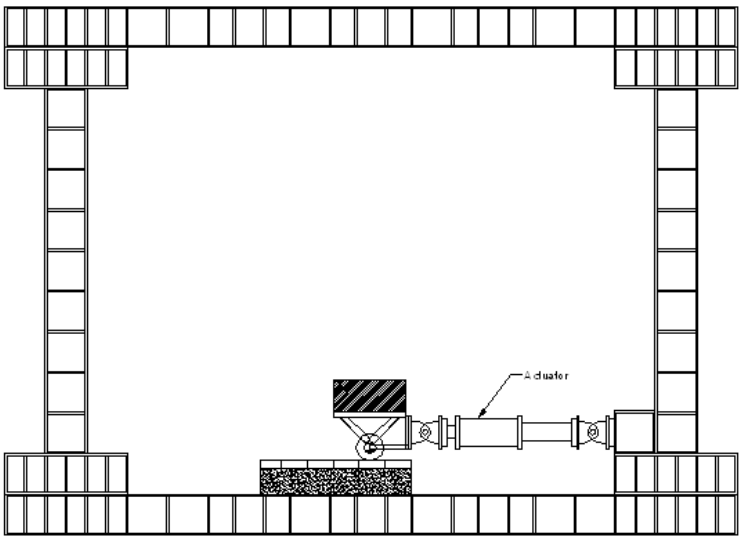
형상 개발을 통해 제안된 블록의 구조적 성능을 검증하기 위해 다음 <그림 3.2.127>과 같이 시험용 블록을 제작하였다. 제작된 블록들을 실제로 연결해 봄으로써 시공 상의 문제점들을 찾아내며 이를 근거로 구조적 성능 및 시공성을 확보할 수 있는 최적의 형상을 도출해 낸다. 최적의 형상이 결정되면 다시 시험용 블록을 제작한 후 제작된 블록에 대한 압축 및 휨강도 실험을 수행한다.

최적형상 블록에 대한 강도실험은 물성에 따른 강도변화를 연구하는 것이 아니

고 형상의 변화가 강도에 미치는 영향을 찾아내는 것이 주목적이다. 따라서 동일한 재료를 사용하여 기존의 I형 블록과 U형 블록을 제작한 후 기존 형상의 블록과 제안된 형상의 블록에 대한 실험결과를 비교함으로써 구조적 성능을 검증하였다.

② 인터로킹 성능시험 방법 및 장치

페이버 포장이 집중하중의 분산이라는 구조적 성능을 발휘하기 위해서는 우수한 인터로킹 거동을 발휘할 수 있어야 한다. 블록에 대한 압축 및 휨강도 실험을 통해 블록 자체의 구조적 성능을 검증하고 나면 블록과 블록의 결합을 통한 인터로킹 성능을 확인하기 위한 실험을 수행한다. 인터록킹 실험은 최적 형상의 블록을 사용하여 일정한 면적에 해당하는 페이버 포장을 형성한 후 <그림 3.2.128>과 같이 차량하중을 모델링한 장치를 액튜에이터를 사용하여 10초당 1회 반복으로 6000회를 반복적으로 이동시킴으로써 반복하중에 의한 포장의 변형을 조사하는 방법으로 진행하였다.



<그림 3.2.128> 차량하중을 모델링한 장치



<그림 3.2.129> 인터로킹 실험을 위한 차량모사 장치

인터로킹 실험은 일반적인 페이버 포장의 사용연한인 20년 동안에 발생할 수 있는 차량의 통과 횟수를 기본으로 하여 반복하중 회수에 따른 포장의 변화를 살펴본다. <그림 3.2.129>는 이 실험에 사용될 차량모사 장치를 나타낸 것이다.

현재 각국의 보차도용 페이버 포장에 대한 시방서에는 인터로킹 성능의 측정을 위한 기준이 마련되어 있지 않으므로 본 연구에서는 최적 형상의 블록을 사용한 페이버 포장과 기존의 I형 블록과 U형 블록을 사용한 페이버 포장에 대한 실험결과를 비교하는 방법을 통해 성능의 우수성을 검증하였다. 실험은 차량의 하중과 페이버 포장을 지지하는 지반층의 강성을 변수로 하여 수행하며 지반층의 강성변화는 고무판을 사용하였다.

(다) 연구 결과

현재 실험을 위한 최적 및 일반 형상의 블록 제작을 완료하여 돌기형 인터로킹 블록에 대한 구조적 우수성을 검증하기 위해 <그림 3.2.130>과 같이 차량하중을 모사한 반복하중 실험을 수행하였다. <그림 3.2.131>와 <그림 3.2.132>은 각각 실험 후 돌기형 블록과 U형 블록, 돌기형 블록과 I형 블록을 비교한 모습을 나타낸 것으로 동일한 횟수의 반복하중 하에서 기존의 블록에 비해 블록 사이의 침하가 크게 감소함으로써 인터로킹에 의한 뛰어난 구조적 성능을 발휘할 수 있음을 확인하였다.



<그림 3.2.130> 블록 성능 검증을 위한 반복하중 실험모습



<그림 3.2.131> 반복하중 실험 후 돌기형 블록(좌)과 U형 블록(우) 모습



<그림 3.2.132> 반복하중 실험 후 돌기형 블록(좌)과 I형 블록(우) 모습

(2) 투수계수 측정 방법의 고안

(가) 이론적 및 실험적 접근 방법

현재의 국내의 시방서에는 페이버 포장의 투수실험에 대한 기준이 마련되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 재료 및 형태로 만들어진 페이버 포장의 투수계수를 측정하여 상대적인 성능을 비교 분석 할 수 있는 장치 및 방법을 계획하였다.

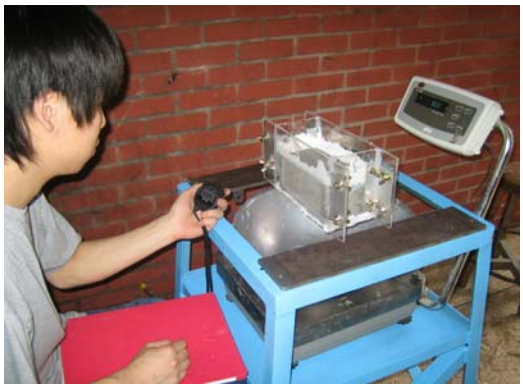
(나) 연구내용

본 연구에서는 <그림 3.2.133>과 같이 블록 각각의 투수계수를 측정할 수 있는 장치를 제작하였으며 이를 이용하여 <그림 3.2.134>와 같이 인터로킹 블록의 형태에 대한 투수계수를 측정하여 비교 분석을 수행하였다.

이외에도 <그림 3.2.135>와 같이 여러 개의 블록을 설치한 후 페이버 포장으로서의 투수계수를 측정할 수 있는 장치를 제작하여 <그림 3.2.136>과 같이 줄눈 모래 입도를 조정한 후 줄눈 모래 입도가 투수계수에 미치는 영향을 비교 분석하였다.



<그림 3.2.133> 블록의 재료 및 형태에 대한 투수계수 측정장치



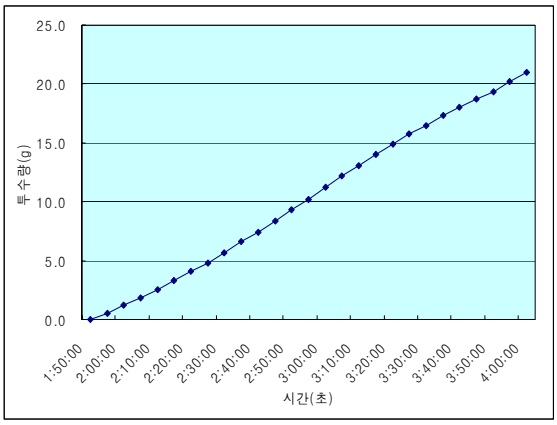
<그림 3.2.134> 블록의 형태에 대한 투수계수 측정모습



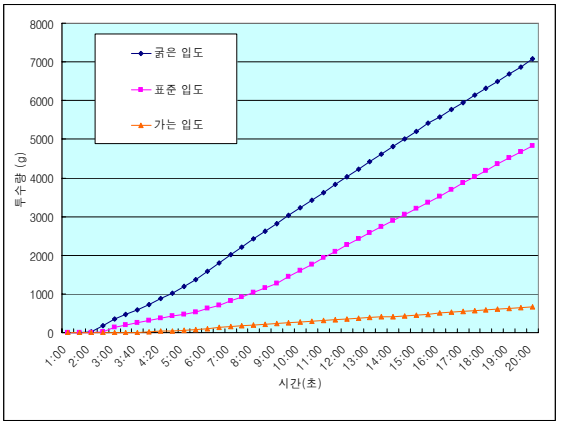
<그림 3.2.135> 줄눈모래 입도에 따른 투수계수 측정장치



<그림 3.2.136> 줄눈모래 입도에 따른 투수계수 측정모습



<그림 3.2.137> 인터로킹 블록의 투수 계수 (개구부가 없는 경우)



<그림 3.2.138> 줄눈 모래의 입도에 따른 투수 계수

(다) 연구결과

개구부 형성에 따른 인터로킹 블록의 투수 계수 측정한 결과 개구부가 있는 블록의 경우 투수시간 2분에 투수량은 4089g이었다. 개구부가 없는 경우는 <그림 3.2.137>과 같이 4분에 투수량은 20g 이었다. 따라서 개구부의 형성에 따라 투수계수가 증가하는 결과를 보였다. 줄눈 모래의 입도를 3가지로 조절하여 투수 계수를 측정한 결과 <그림 3.2.138>과 같이 줄눈 모래의 입도가 클수록 투수계수가 증가하는 결과를 얻었다.

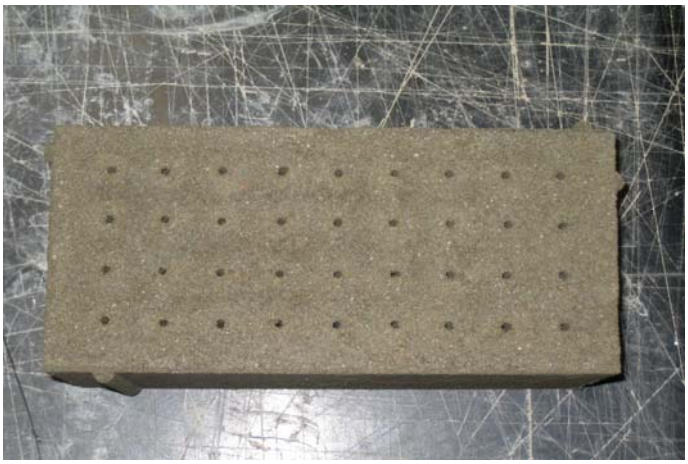
(3) 투수성을 증진 시킬 수 있는 블록의 개발

(가) 이론적 및 실험적 접근 방법

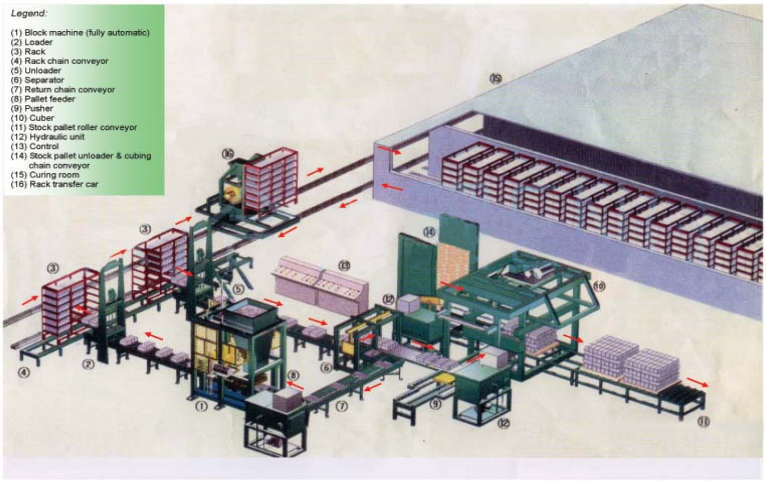
재료의 물성을 변화시키지 않으면서 블록의 투수성을 향상시키려면 블록과 볼록 사이 또는 블록 내에 우수가 흐를 수 있는 공극을 형성해 주어야 하는데 블록 내에 공극을 형성하는 경우 공극이 커지게 되면 블록이 강도 또한 저하되기 마련이다. 따라서 먼저 공극의 크기에 따른 블록의 압축강도의 변화를 유한요소해석을 통해 알아보고 이를 근거로 최적의 공극의 크기 및 형태 및 배치를 결정하도록 한다.

(나) 연구내용

유한요소 해석의 결과를 근거로 투수성을 증진 시키는 방법으로 블록과 볼록 사이에 공간을 형성하는 대신에 블록 내에 공극을 형성하는 방법을 사용하였으며 이 공극이 블록의 강도에 큰 영향을 미치지 않도록 공극의 형태 및 크기를 결정하는 연구를 수행 하였다. 이를 통해 제안된 블록에 대하여 먼저 압축강도 실험을 실시하여 블록에 대한 구조적인 성능을 검증하며 투수계수의 증진을 확인하기 위해 투수성 실험을 진행하고 있다. <그림 3.2.139>는 투수성 실험에 사용된 블록의 예를 나타내고 있다.



<그림 3.2.139> 투수성 실험에 사용된 블록



<그림 3.2.140> 인터로킹 블록 생산공정

카) 4S 포장용 페이버 보완

돌기형 블록은 기존의 블록에 비해 뛰어난 구조적 성능을 발휘할 수 있음에도 불구하고 시험시공을 위한 대량 생산의 단계에서 문제점이 도출되었다. 현재 콘크리트 블록은 <그림 3.2.140>과 같은 기계화공정을 사용하여 대량으로 생산되고 있다. 기계화 공정을 위해서는 모르터의 반죽질기가 된비빔이어야 하며 진동, 가압 및 탈형의 방법으로 블록을 제작하게 된다. 기계적 공정에 의한 탈형을 위해서는 몰드가 한 방향으로 빠져나올 수 있어야 하나 돌기형 블록의 경우 돌기 및 홈의 형성이 몰드의 탈형을 방해하므로 기계적 공정에 의한 블록의 제작이 불가능하다. 돌기형 인터로킹 블록을 생산하기 위해서는 몰드를 여러 방향으로 해체해야 하며 이는 블록 제작비의 상승 및 생산량의 감소를 초래하여 기존 인터로킹 블록에 대한 가격 경쟁력에서 불리해 지는 요인이 된다. 이를 문제점을 고려하여 돌기형 인터로킹 블록의 구조적 성능을 유지하면서 기계화 공정이 가능한 새로운 형태의 인터로킹 블록의 개발에 대한 필요성이 대두되었다.

(1) 보완 연구의 목표

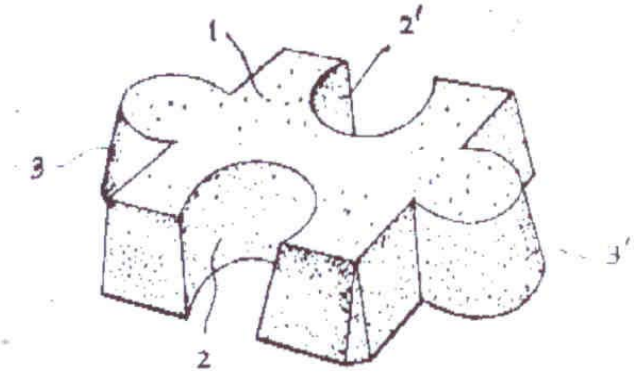
본 연구에서는 먼저 차도용 콘크리트 인터로킹블록 포장을 대상으로 블록 형상의 개선을 통해 기존의 블록에 비해 인터로킹 성능이 크게 우수하면서 동시에 시

공성 및 기계화 생산공정을 통한 가격 경쟁력을 유지할 수 있는 새로운 형상의 돌기형 블록을 개발한다. 또한 블록 자체의 강도에 대해서는 외국의 기준에서 요구하는 정도의 압축강도를 발휘할 수 있는 적정 배합비를 도출한다.

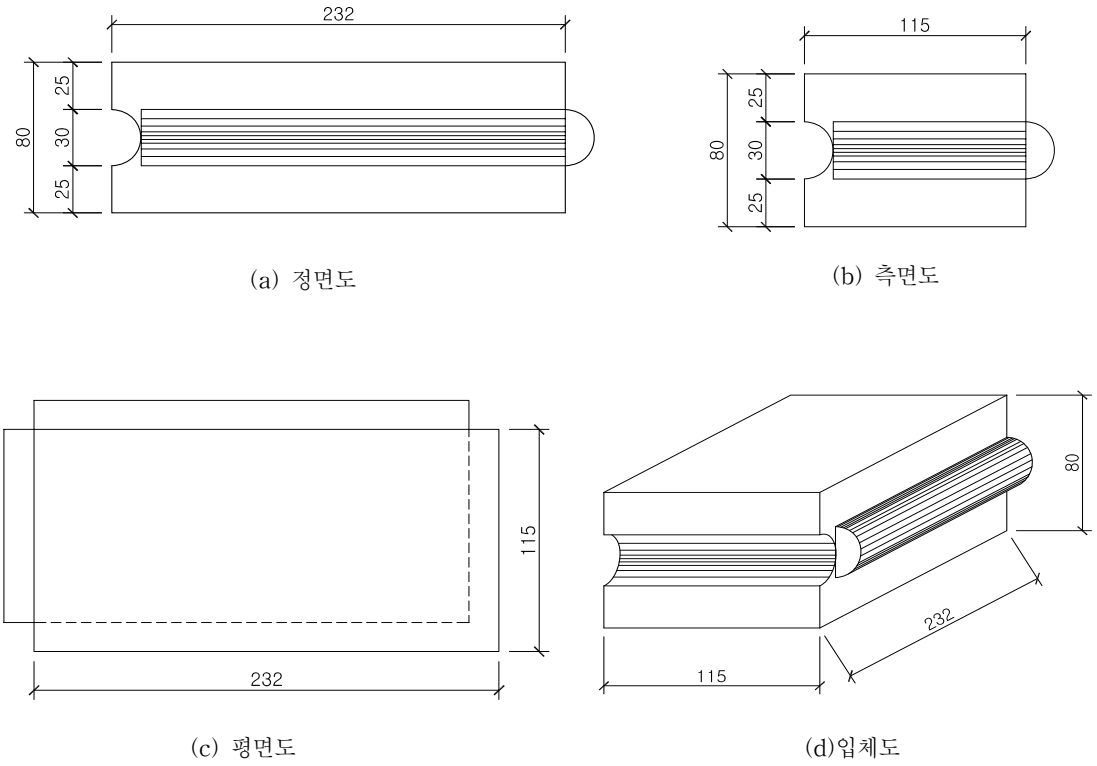
(2) 보완 연구 방법

(가) 관련 기술에 대한 검토

기계적 생산공정이 가능하면서 동시에 돌기 형상을 갖는 블록으로는 <그림 3.2.139>과 같은 기술(특허 실1982-0003943)이 제안되었다. 이 블록은 수직방향으로 몰드의 탈형이 가능한 형상을 가지고 있다. 그러나 이 블록은 구조적으로도 문제점을 가지고 있다. 먼저 시공을 위해서는 <그림 3.2.141>과 같은 첫 번째 블록의 돌기(3 및 3‘)에는 그림과 같은 블록을 뒤집은 형태인 블록의 홈(2 및 2’)이 위치하며 첫 번째 블록의 홈(2 및 2’)에는 그림과 같은 블록을 뒤집은 형태인 블록의 돌기(3 및 3’)이 결합하게 된다. 이러한 포장에 집중하중이 가해지는 경우 하중이 결합되는 블록에 가해질 때는 결합되는 블록의 수직이동을 첫 번째 블록이 지지할 수 있으나 하중이 첫 번째 블록에 가해지는 경우 이 블록을 인접한 블록들이 지지할 수 없게 되는 단점이 있다. 이 외에도 이러한 형상의 블록을 시공하기 위해서는 <그림 3.2.141>과 같은 블록을 하나 건너씩으로 배치한 후 그 사이에 뒤집은 형태의 블록을 끼워 넣어야 하나 이는 시공상에 많은 어려움을 야기할 수 있다. 이러한 이유로 인해 실용화 되지 못하고 있다고 판단된다.



<그림 3.2.141> 기계적 생산공정이 가능하면서 동시에 돌기 형상을 갖는 블록



(a) 정면도 (b) 측면도

(c) 평면도 (d)입체도

<그림 3.2.142> 새로운 돌기형 인터로킹 블록

(나) 기계화공정을 고려한 블록의 형상 제안

기계화공정을 사용하여 블록을 생산하기 위해서는 블록에 형성된 돌기 및 홈이 같은 방향으로 연속적으로 형성되어 있어야 한다. 돌기와 홈에 의한 기계적 연결을 가능하면서 동시에 기계화공정을 사용할 수 있는 새로운 형상의 블록으로 <그림 3.2.142>과 같은 돌기형 블록이 제안되었다. 이러한 블록은 돌기가 없는 면이 수직 방향이 되도록 세운 상태에서 가압 및 탈형할 수 있으므로 기계화 공정에 의한 제작이 가능하다. 결국 제안된 블록은 돌기와 홈의 기계적 연결에 의한 수직 및 회전 인터로킹 성능의 개선이 가능하면서 동시에 가압 및 탈형에 의한 기계화공정에 적합한 형상을 가지고 있다.

(다) 돌기형 블록의 인터로킹 성능

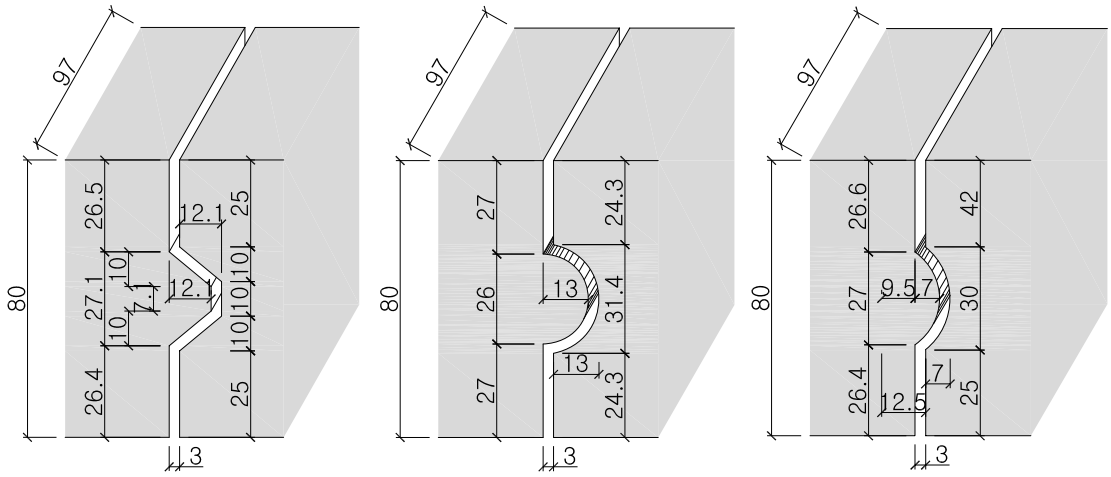
줄눈부 채움 모래는 줄눈부 안으로 빗물이 침투하는 것을 막음으로써 갈바탕흙을 보호하며 회전 및 왕복운동에 대한 블록 사이의 맞물림을 제공함으로써 한 블

록에 작용하는 응력을 이웃 블록으로 분산 전달하는 역할을 제공한다. 따라서 블록이 인터로킹 성능을 충분히 발휘하기 위해서는 블록의 줄눈 사이에 줄눈채움 모래가 원활하게 흘러들어 갈수 있어야 한다. 본 연구에서는 먼저 돌기형 블록에 대해 실제로 모래 채움 실험을 통해 최적의 돌기 형상을 찾아낸다. 최적의 돌기형상이 결정되고 나면 제안된 새로운 형상의 돌기형 블록으로 이루어진 포장과 기존 형상의 블록으로 이루어진 포장에 대해 동일한 조건의 반복피로하중 실험을 통해 기존 형식과의 비교를 통한 구조적 성능을 검증한다.

① 최적 돌기형상 결정

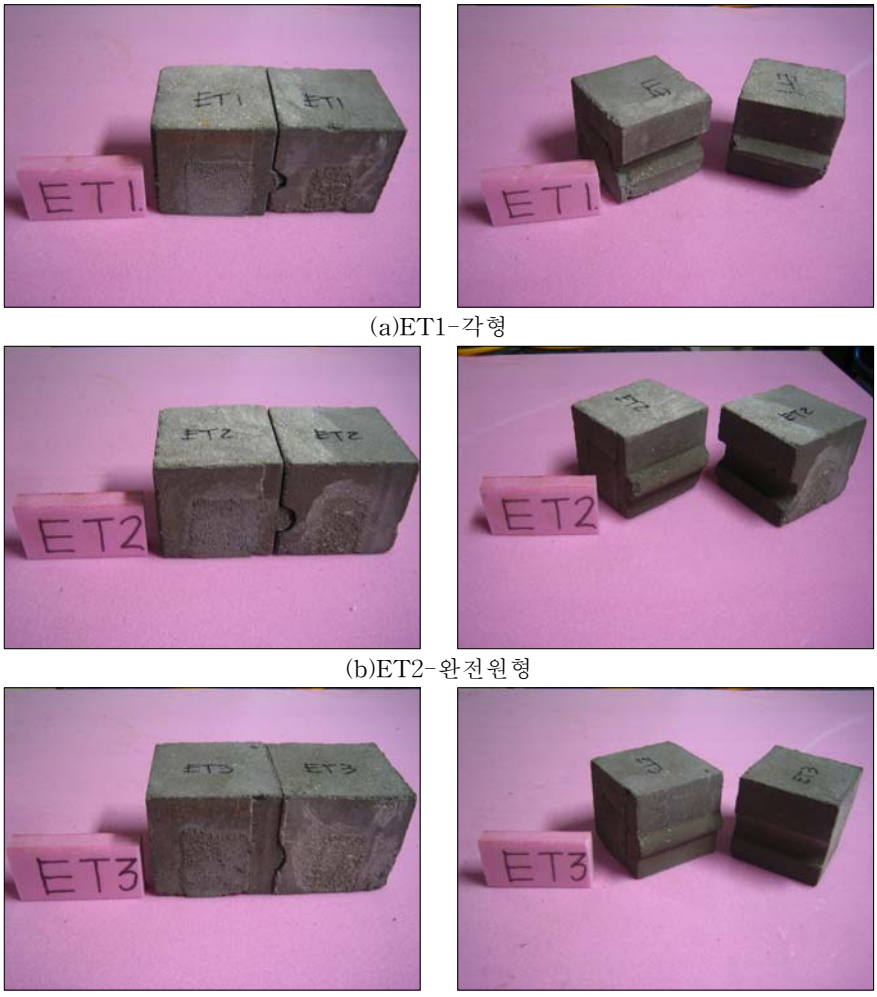
돌기의 형상에 따른 줄눈부 모래 채움의 정도를 확인하기 위해 <그림 3.2.143>과 같은 각형, 완전 반원형, 그리고 낮은 원형의 3가지 형태의 돌기 및 홈을 갖는 블록을 제작하였다. <그림 3.2.144>는 실험에 사용된 돌기형 블록 시험체를 나타낸 것이다. 줄눈부 모래 채움 실험에 사용된 모래로는 NO50(0.297mm)채에 남은 모래, NO30(0.59mm)채에 남은 모래, NO16(1.19mm) 채에 남은 모래 및 영국 표준(BS 6717)의 줄눈모래 입도기준을 만족하는 모래의 총 4가지를 사용하였으며 모든 모래는 완전히 건조된 상태로 만든 후 사용하였다.

실험방법은 먼저 각 돌기 형상의 블록을 모래채움 상태를 알 수 있도록 투명 플라스틱으로 만든 블록 고정틀 안에 설치한다. 줄눈부의 폭은 3 mm로 고정하였다. 블록의 상부에 모래를 퍼트리고 모래가 줄눈부 안으로 들어감에 따라 계속해서 모래를 추가하였다. 모래가 더 이상 들어가지 않으면 진동효과를 가하기 위해 고무망치를 사용하여 고정틀에 충격을 주면서 모래가 줄눈부를 완전히 채울 때까지의 가격 횟수를 측정하였다. 줄눈부 모래채움 실험에 사용된 고정틀은 <그림 3.2.145>와 같으며, <그림 3.3.146>과 같이 순서대로 실험을 진행하였다.



(a)ET1 (b)ET2 (c)ET3

<그림 3.2.143> 돌기형 블록 형상



(a)ET1-각형

(b)ET2-완전원형

(c)ET3-낮은원형

<그림 3.2.144> 돌기형 블록 시험체



<그림 3.2.145> 줄눈부 모래채움 실험에 사용된 고정틀



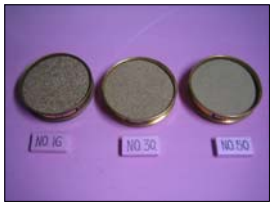
(a) 몰드 제작



(b) 모래건조



(c)모래 입자별 분류



(d) 입자별 정리



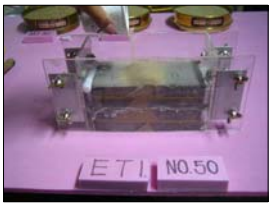
(e) 줄눈모래 입도기준에 따른 모래배합



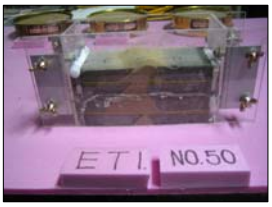
(f) SPACER 크기측정



(g) ET1 배치



(h) 입도별 모래 채움



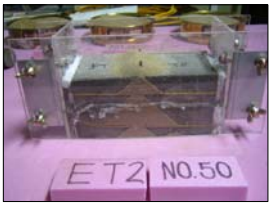
(i) 줄눈 모래 채움 확인



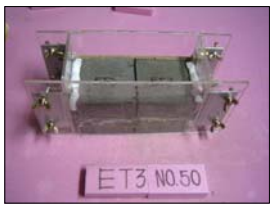
(j) ET2 배치



(k) 입도별 모래 채움



(l) 줄눈 모래 채움 확인



(m) ET3 배치



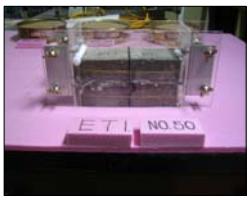
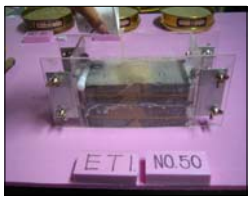
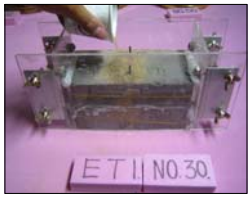
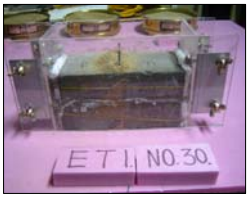
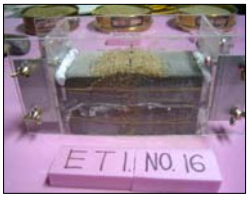
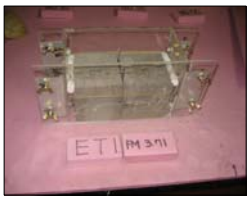
(n) 입도별 모래 채움



(o) 줄눈 모래 채움 확인

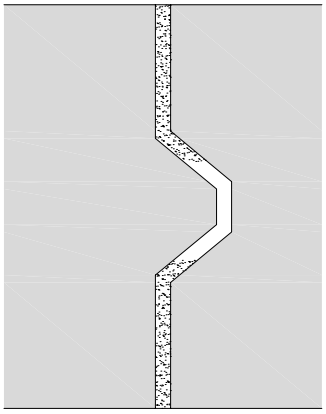
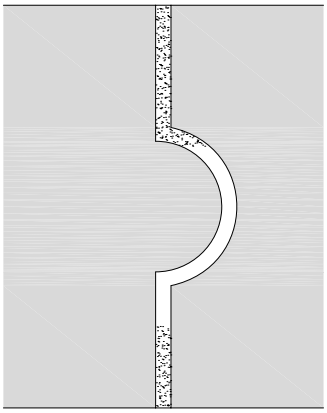
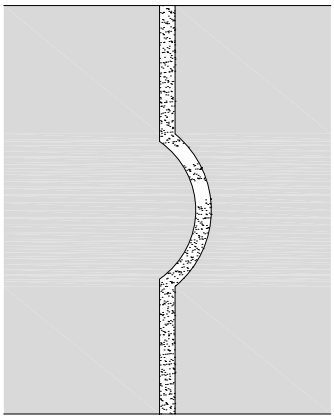
<그림 3.2.146> 줄눈부 모래채움 실험순서

<표 3.2.38> 각형 돌기의 실험결과

돌기형 블록 고정	줄눈 채움 시작	고무망치 타격	줄눈채움 완료
		----------> (고무망치 타격 불필요)	
		----------> (고무망치 타격 불필요)	
	----------> (사진 생략)	 (34회 타격)	
	----------> (사진 생략)	 (27회 타격)	

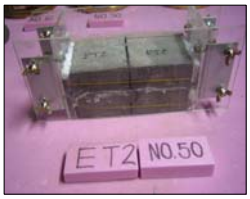
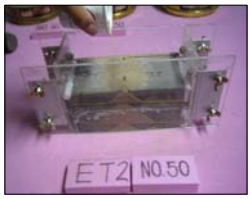
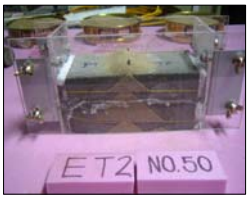
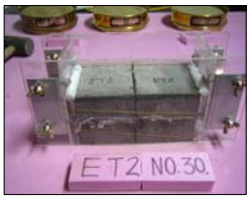
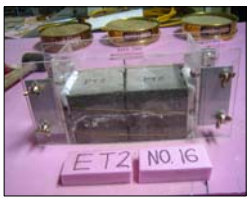
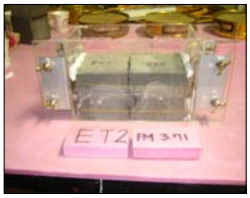
<표 3.2.38>은 각형 돌기를 갖는 블록 ET1의 실험결과를 나타낸 것이다. 각형 돌기를 갖는 블록은 NO50(0.297mm)채에 남은 모래와 NO30(0.59mm)채에 남은 모래는 고무망치의 타격 없이도 모래채움이 완료되었다. 비교적 거친 모래인 NO16(1.19mm) 채에 남은 모래는 모래채움이 일부 진행된 후 중지하였으며 고무망치 34회의 타격을 가한 후에 모래채움이 완료되었다. 또한 영국 표준(BS 6717)의 줄눈 모래 입도기준에 따른 모래(F.M=3.71)는 고무망치 27회의 타격을 가한 후에 모래채움이 완료되었다. <표 3.2.39>는 돌기의 형태에 따라 모래채움이 일부 진행된 후 중지한 상황을 나타낸 것이다.

<표 3.2.39> 줄눈부 모래채움이 중지된 상황

ET1	ET2	ET3
		
		

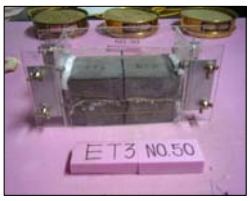
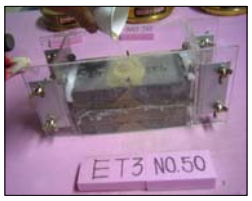
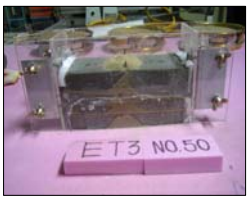
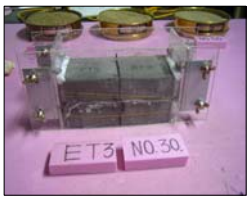
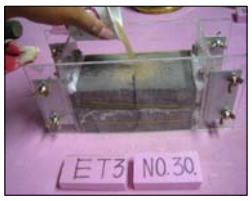
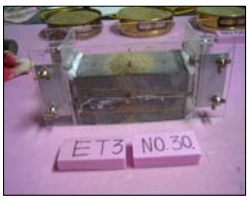
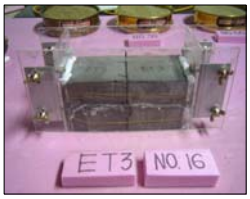
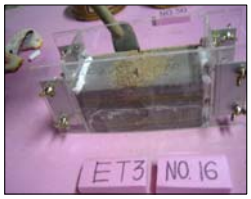
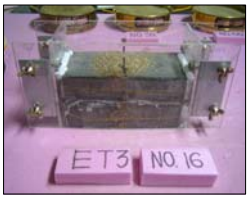
<표 3.2.40>은 반원형 돌기를 갖는 블록 ET2의 실험결과를 나타낸 것이다. 반원형 돌기를 갖는 블록도 NO50(0.297mm)체에 남은 모래와 NO30(0.59mm)체에 남은 모래는 고무망치의 타격 없이도 모래채움이 완료되었다. NO16(1.19mm)체에 남은 모래는 고무망치 50회의 타격을 가한 후에야 모래채움이 완료되었다. 또한 영국 표준(BS 6717)의 줄눈 모래 입도기준에 따른 모래(F.M=3.71)의 경우도 고무망치 50회의 타격을 가한 후에 모래채움이 완료되었다.

<표 3.2.40> 반원형 돌기의 실험결과

돌기형 블록 고정	줄눈 채움 시작	고무망치 타격	줄눈채움 완료
		----------> (고무망치 타격 불필요)	
		----------> (고무망치 타격 불필요)	
	----------> (사진 생략)	50회 타격	
	----------> (사진 생략)	 (50회 타격)	

<표 3.2.41>은 낮은 원형 돌기를 갖는 블록 ET3의 실험결과를 나타낸 것이다. 낮은 원형 돌기를 갖는 블록의 경우도 NO50(0.297mm)체에 남은 모래와 NO30(0.59mm)체에 남은 모래는 고무망치의 타격 없이도 모래채움이 완료되었다. 비교적 거친 모래인 NO16(1.19mm)체에 남은 모래는 고무망치 10회의 타격을 가한 후에 모래채움이 완료되었다. 한편 영국 표준(BS 6717)의 줄눈 모래 입도기준에 따른 모래(F.M=3.71)의 경우 고무망치의 타격 없이도 대부분의 줄눈부가 채워졌으며 고무망치 3회의 타격으로 모래채움이 완료되었다.

<표 3.2.41> 낮은 원형 돌기의 실험결과

돌기형 블록 고정	줄눈 채움 시작	고무망치 타격	줄눈채움 완료
		----------> (고무망치 타격 불필요)	
		----------> (고무망치 타격 불필요)	
	----------> (사진 생략)	 (10회 타격)	
	----------> (사진 생략)	3회 타격	

<표 3.2.42>는 돌기 형상에 따른 줄눈 모래채움 실험결과를 정리하여 나타낸 것으로 0.59mm이하의 입자를 가진 모래는 진동 등의 외력 작용이 없이 줄눈부 모래채움이 원활하게 되었고, NO16(1.19mm)채에 남은 모래 및 영국 표준(BS 6717)의 줄눈 모래 입도기준에 따른 모래(F.M=3.71)의 경우는 진동 등의 외력이 가해져야 줄눈 부 모래채움을 완료 할 수 있었다. 표로부터 낮은 원형 돌기형상이 줄눈부 모래채움에 가장 적합한 형상임을 알 수 있다.

<표 3.2.42> 돌기형상에 따른 블록의 줄눈부 모래채움 시 고무망치 타격횟수

모래 / 블럭	NO.50 (0.297mm)	NO.30 (0.59mm)	NO.16 (1.19mm)	BS 6717 (F.M=3.71)	결 과
ET1 (각형 돌기)	0 회	0 회	35 회	27 회	모래채움 성능 양호
ET2 (완전 반원형 돌기)	0 회	0 회	50 회	50 회	모래채움 성능 부족
ET3 (낮은 원형 돌기)	0 회	0 회	10 회	3 회	모래채움 성능 우수

② 돌기형 블록의 생산

줄눈부 모래채움 실험을 통해 결정된 낮은 원형의 돌기형상을 사용하여 인터로킹 성능시험을 위한 돌기형 블록을 생산한다. 최종적으로 돌기형 블록은 대량생산을 위한 설비를 갖춘 공장에서 기계화공정을 사용하여 제작되겠지만 본 연구에서는 연구의 목적으로 필요한 수량만큼의 돌기형 블록을 만들기 위한 몰드를 제작한 후 이를 사용하여 수동으로 블록을 제조하였다. <그림 3.2.147>은는 돌기형 블록을 제조하기 위한 몰드의 제작 상황을 나타낸 것이다.



<그림 3.2.147> 돌기형 블록의 몰드 제작



(a) 몰탈 채움



(b) 스팀양생



(c) 탈형



(d) 돌기형 블록

<그림 3.2.148> 돌기형 블록의 제조

한편 <그림 3.2.148>은 몰드를 사용하여 돌기형 블록을 제조하는 과정을 나타낸 것이다. 돌기형 블록은 기존 블록과 돌기형 블록의 인터로킹 성능을 비교하기 위해 블록의 재료적 성질이 서로 유사하도록 제조하였다. 이를 위해 시험 배합을 사용하여 휨강도가 5 MPa 이상인 기존의 블록과 유사한 강도를 발휘할 수 있는 배합비를 찾아낸 후 이를 이용하여 돌기형 블록을 제작하였다.

(라) 블록의 강도

포장구조의 구조적 성능은 집중하중의 형태로 작용하는 차량하중을 되도록이면 넓게 분산시켜 포장 아래의 연약지반이 과응력 상태에 도달하지 않도록 하는 것이다. 그러나 블록의 강도가 적절하지 않으면 페이버 포장이 집중하중의 분산이라는 구조적 성능을 발휘하기 전에 블록 자체의 파괴가 발생할 수 있다. 따라서 외국에서는 블록의 압축강도를 일반적으로 50 MPa 이상이 되도록 규정하고 있다. 국내

(KS F4419)의 경우 블록의 강도를 휨강도 5.0 MPa 이상으로 규정하고 있으나 이는 압축강도로 나타내면 평균적으로 15 MPa 정도에 해당한다. 따라서 이를 외국의 경우와 비교해 보면 외국의 기준에서 요구하는 압축강도의 약 1/3의 수준에 불과함을 알 수 있다.

<표 3.2.43>과 <표 3.2.44>는 국내에서 생산되는 I형 및 U형 인터로킹 블록에 대한 압축 및 휨강도 실험의 결과를 나타낸 것이다. 압축강도 실험은 점토 벽돌에 대한 규격인 KS L 4201에 따라서 수행하였으며 휨강도 실험은 인터로킹 블록에 대한 규격인 KS F 4419에 따라 수행하였다. 실험은 요업기술원에서 수행하였다. 표에서 알 수 있듯이 국내에서 생산되는 I형 및 U형 인터로킹 블록의 휨강도는 각각 3.7 MPa와 3.9 MPa로 인터로킹 블록의 휨강도에 대한 KS규격을 만족하지 못하고 있다. 또한 압축강도의 경우 I형 및 U형 인터로킹 블록에 대해 각각 21.4 MPa와 20.2 MPa로서 외국의 50 MPa에 비해 압축강도가 현저하게 낮은 것을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 차도용 인터로킹 블록에 대해 외국의 기준에서 요구하는 수준의 압축강도를 발휘할 수 있는 물성의 개발을 목표로 적정 배합비를 찾아내기 위한 물성실험을 수행하였다.

<표 3.2.43> I형 블록의 압축 및 휨강도 실험결과

시료명	시험분석항목	시험분석결과	시험분석방법	비고
샘플(1)시험체	(1-1)압축강도(N/㎟)	24	KS L 4201:2003	
	(1-2)압축강도(N/㎟)	19		
	(1-3)압축강도(N/㎟)	18		
	(1-4)압축강도(N/㎟)	22		
	(1-5)압축강도(N/㎟)	24		
	(1-6)휨강도(N/㎟)	3.9	KS F 4419:2004	
	(1-7)휨강도(N/㎟)	4.0		
	(1-8)휨강도(N/㎟)	3.3		
	(1-9)휨강도(N/㎟)	3.8		
	(1-10)휨강도(N/㎟)	3.4		

<표 3.2.44> U형 블록의 압축 및 휨강도 실험결과

시료명	시험분석항목	시험분석결과	시험분석방법	비고
샘플(2)시험체	(2-1)압축강도(N/㎟) (2-2)압축강도(N/㎟) (2-3)압축강도(N/㎟) (2-4)압축강도(N/㎟) (2-5)압축강도(N/㎟)	20 23 19 18 21	KS L 4201:2003	
	(2-6)휨강도(N/㎟) (2-7)휨강도(N/㎟) (2-8)휨강도(N/㎟) (2-9)휨강도(N/㎟) (2-10)휨강도(N/㎟)	3.9 3.9 3.7 4.0 3.9	KS F 4419:2004	

① 실험계획

국내(KS F4419)의 경우 인터로킹 블록의 제조시 물-시멘트 비를 25% 이하로 제한하고 있다. 그러나 이러한 물-시멘트 비를 만족하면서 블록을 제작하기 위해서는 모르터의 배합비(시멘트와 잔골재의 비)를 일정 이하로 낮출 수가 없다. 현재 국내 블록 생산 업체에서는 일반적으로 모르터의 배합비로 평균적으로 1:5 정도를 사용하고 있으나 이러한 높은 모르터 배합비로는 외국의 경우와 같은 40 MPa 이상의 높은 압축강도의 블록을 생산할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 외국의 경우와 유사한 40 MPa 이상의 압축강도를 얻기 위해 모르터의 배합비를 1:1.5와 1:2 그리고 1:2.5의 비율로 바꾸어 가면서 예비실험을 수행하였으며 그 결과 1:2의 경우가 강도와 작업성의 측면에서 가장 적합한 비율인 것으로 판단하였다. 따라서 본 실험에서는 모르터의 배합비를 1:2로 고정한 상태에서 물-시멘트 비를 25%, 28% 및 30%로 바꾸어 가면서 배합을 실시한 후 시공성과 흡수율 그리고 압축강도를 비교하는 실험을 수행하였다.

<표 3.2.45>는 본 연구에서 사용된 배합비를 정리하여 나타낸 것이다. 잔골재는 표준규격(KS F 2504, 2507, 2511, 2512 및 2513)을 만족하는 것을 사용하였으며 표 3.12와 같은 콘크리트용 잔골재의 표준입도(KS F 2526)를 만족하는 것을 사용하였다. <표 3.2.46>은 잔골재의 물리적 성질을 나타낸 것이다. 시멘트는 00사의 보통 포틀랜드 시멘트(KS L 5201)를 사용하였으며 표 3.14는 시멘트의 물리적 성질을

나타낸 것이다. 고성능 감수제로는 폴리카르본산계 고성능 AE 감수제 1%를 사용하였으며 <표 3.2.47>은 고성능 감수제의 물리적 성질을 나타낸 것이다.

<표 3.2.45> 블록의 배합 설계

W/C(%)	Water	Cement	Sand	Admixture
30.0	240	800	1600	8.0
28.0	224	800	1600	8.0
25.0	200	800	1600	8.0

<표 3.2.46> 골재의 표준입도 (KS F 2526)

체 번 호	10mm(3/8″)	No.4	No.8	No.16	No.30	No.50	No.100	비고
통과백분율%	100	95~100	80~100	50~85	25~60	10~30	2~10	

<표 3.2.47> 잔골재의 물리적 성질

골 재 종 류	비중	조립율 (F.M)	공극율 (%)	흡수율 (%)	단위용적중량 (kg/㎥)	No.200체 통과량 (%)
강모래	2.55	2.67	38.4	1.81	1,570	1.81

<표 3.2.48> 시멘트의 물리적 성질

비중	분말도 (㎠/g)	안전성 (%)	응결시간(분)		압축강도(kg/㎠)		
			초 결	종 결	3일	7일	28일
3.15	3,553	0.06	235	452	220	301	389

<표 3.2.49> 고성능 AE 감수제의 물리적 성질

주 성 분	형 태	비중(20°C)	알카리량 (%)	염화물이온량 (%)
폴리칼본산계	담갈색액체	1.06±0.02	0.5이하	0.01이하

② 실험내용

1) 물시멘트비(W/C)가 25%인 경우

<그림 3.2.149>는 물시멘트비가 25%인 경우의 주도시험(Flow Test)과 압축강도 몰드 제작 상황을 나타낸 것이다. 그림 3.7의 주도 실험에서 알 수 있듯이 물시멘트비가 25%인 경우에는 플로콘을 제거하여도 공시체의 직경의 변화가 없다. 따라서 모르터의 슬럼프가 0에 가까워 모르터의 반죽질기가 된비빔의 상태에 해당됨을 알 수 있다. 그림 3.7의 압축강도 몰드 제작 사진에서 알 수 있듯이 모르터의 배합비(시멘트와 잔골재의 비)를 1:2로 할 경우 시멘트 량의 증가로 인해 25%의 물시멘트비에서는 모르터의 성형성은 매우 나쁜 것으로 나타났다.

2) 물시멘트비(W/C)가 28%인 경우

<그림 3.2.148>은 물시멘트비가 28%인 경우의 주도시험(Flow Test)과 압축강도 몰드 제작 상황을 나타낸 것이다. 그림 3.8의 주도 실험에서 알 수 있듯이 물시멘트비가 28%인 경우에도 플로콘을 제거하였을 때 공시체의 직경의 변화가 거의 나타나지 않았다. 따라서 물시멘트비가 28%인 경우에도 모르터의 반죽질기가 된비빔의 상태에 해당됨을 알 수 있다. 그림 3.8의 압축강도 몰드 제작 사진에서 알 수 있듯이 모르터의 배합비(시멘트와 잔골재의 비)를 1:2로 한 경우에도 28%의 물시멘트비에서는 모르터의 성형성이 어느 정도 확보되는 것으로 나타났다.

3) 물시멘트비(W/C)가 30%인 경우

<그림 3.2.149>는 물시멘트비가 30%인 경우의 주도시험(Flow Test)과 압축강도 몰드 제작 상황을 나타낸 것이다. 그림 3.9의 주도 실험에서 알 수 있듯이 물시멘트비가 30%인 경우 플로콘을 제거하였을 때 공시체의 직경이 100 mm에서 102 mm로 약간 증가하였으나 큰 변화는 거의 나타나지 않았다. 따라서 물시멘트비가 30%인 경우에도 모르터의 반죽질기가 된비빔의 상태에 해당됨을 알 수 있다. 한편 그림 3.9의 압축강도 몰드 제작 사진에서 알 수 있듯이 30%의 물시멘트비에서는

압축강도 몰드 제작시 표면에 약간의 블리딩수가 나타났다. 실제의 기계화공정에서는 가압에 의한 성형이 이루어지므로 본 연구에서 사용된 배합비를 적용할 경우 성형에 문제가 없을 것으로 판단된다.



(a)Flow Test(주도 시험)



(b)압축강도 Mold 제작

<그림 3.2.149> 물시멘트비가 25%인 경우

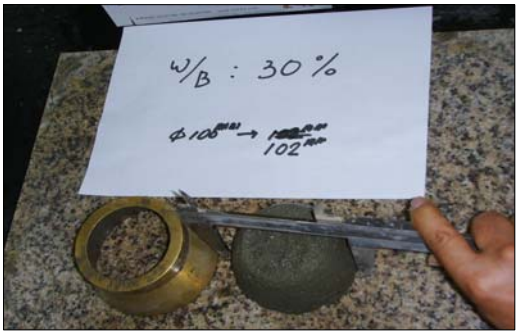


(a)Flow Test(주도 시험)

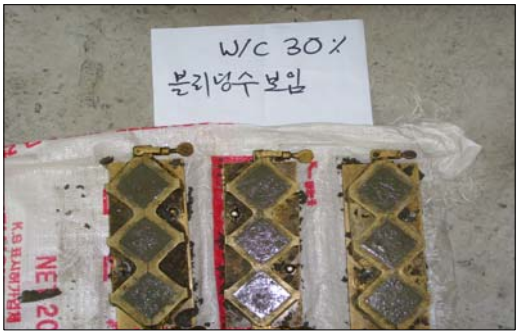


(b)압축강도 Mold 제작

<그림 3.2.150> 물시멘트비가 28%인 경우



(a)Flow Test(주도 시험)



(b)압축강도 Mold 제작

<그림 3.2.151> 물시멘트비가 30%인 경우

③ 결과 및 분석

압축강도 몰드 제작을 통해 만들어진 공시체에 대해 흡수율 및 압축강도 실험을 수행하였으며 그 결과가 <표 3.2.50>에 정리되어 있다. 공시체는 스팀양생을 하였으며 압축강도 실험은 스팀양생 1일 후와 7일 후에 수행하였으며 흡수율 실험은 스팀양생 2일 후에 수행하였다.

인터로킹 블록에 대한 한국산업규격(KS F 2526)은 동결융해에 대한 저항성을 고려하여 블록의 흡수율을 7% 이하로 제한하고 있다 그러나 본 실험에서는 25% - 30%의 모든 공시체에 대해 흡수율이 2% 이하인 것으로 나타나 흡수율에 대한 규정을 만족함을 알 수 있다. 이처럼 낮은 흡수율은 모르터의 배합비(시멘트와 잔골재의 비)를 1:2로 함으로써 기존의 블록에 비해 시멘트 량이 증가하고 또한 사용된 물의 대부분이 시멘트의 수화작용에 사용됨으로써 블록 내의 공극이 감소한 때문인 것으로 판단된다.

압축강도의 경우 물시멘트비가 28%인 경우 스팀양생 1일 후 및 7일 후 압축강도가 각각 44.7 MPa와 45.5 MPa로서 가장 높게 나타났다. 물시멘트비가 25%인 경우의 압축강도가 너 낮게 나타난 것은 사용된 물의 양이 시멘트가 수화반응을 일으키는데 필요한 양보다 더 작음으로써 충분한 수화반응이 일어나지 못하였기 때문인 것으로 판단된다.

<표 3.2.50> 흡수율 및 압축강도 실험결과

W/C(%)	흡수율(%)	압축강도(MPa)	
		1일 후	7일 후
30.0	1.66	41.8	44.6
28.0	1.67	44.7	45.5
25.0	1.67	39.5	41.0

④ 결론

차도용 인터로킹 블록에 대해 외국의 기준에서 요구하는 수준의 압축강도를 발

휘할 수 있는 물성의 개발을 목표로 적정 배합비를 찾아내기 위한 물성실험을 수행하였다. 실험의 결과 모르터의 배합비(시멘트와 잔골재의 비)를 1:2로 하고 물시멘트비를 28%로 하는 경우 2% 이하의 흡수율과 45 MPa 정도의 압축강도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

타) 요 약

당해연도에는 실내 실험을 통하여 페이버의 투수재료의 기준을 제시하고 이를 국내·외 기준과 비교 검토하며 투수실험에 대한 기준을 제시하였다.

본 연구진은 실내 투수실험 장치를 고안하여 투수실험 장치를 이용하여 여러 페이버의 대한 투수실험을 실시하여 투수 기능성에 대한 성능은 우수함을 밝혔다. 이어서 투수성을 증진 시킬 수 있도록 공극을 확보할 수 있는 방법을 연구 하면서, 이 공극이 블록의 강도에 영향을 적게 줄 수 있도록 형태 및 크기에 대해 고려하며 블록을 개발하였다. 이 블록을 이용하여 투수시험과 압축강도 실험을 실시하여 투수계수의 증진 여부와 압축강도의 감소 여부를 검증하였다.

블록의 내구성 및 사용성에 블록간에 하중전달이 얼마나 잘 이루어지는가에 의해 큰 영향을 받기 때문에 블록 간 하중전달을 페이버 포장에 있어서 매우 중요한 요소로 작용하는 것으로 판단이 되어졌다. 따라서 블록의 형태에 변화를 주어 하중전달이 원활히 이루어 질 수 있는 형태를 개발하고 이에 대해 내구성 실험을 실시하여 이를 검증하고 있다.

채움모래에 대한 실험 결과 0.59 mm이하의 입자를 가진 모래는 진동 등의 외력작용이 없이 줄눈부 모래채움이 원활하게 되었다. NO16(1.19mm)채에 남은 모래 및 영국 표준(BS 6717)의 줄눈 모래 입도기준에 따른 모래(F.M=3.71)의 경우는 진동 등의 외력이 가해져야 줄눈 부 모래채움을 완료 할 수 있었다. 줄눈부 모래채움를 고려했을 때 새로운 4가지 형상중에서 원형 돌기형상이 적합함을 알 수 있다.

차도용 인터로킹 블록에 대해 외국의 기준에서 요구하는 수준의 압축강도를 발휘할 수 있는 적정 배합비를 찾아내기 위한 물성실험을 수행하였다. 실험의 결과 모르터의 배합비(시멘트와 잔골재의 비)를 1:2로 하고 물시멘트비를 28%로 하는 경우 2% 이하의 흡수율과 45 MPa 정도의 압축강도를 얻을 수 있음을 확인하였다.

3절. 유한 요소 해석

1. 유한요소법(FEM)을 통한 포장해석 배경

유한요소법(FEM)은 연속체로 정의되는 복잡한 형상을 유한요소라는 간단한 기하형상의 집합으로 이산시킨 후, 하중과 구속조건을 적절하게 고려하여 거동분석을 위한 방정식을 구하고 이 방정식을 풀어 연속체의 반응을 근사적으로 설명하는데 사용한다. 특히 응력-변형률 관계의 비선형성과 동적 특성 및 크리프 현상과 같은 시간 의존성을 고려할 수 있는 장점이 있다. 유한요소법은 1940년대에 항공기 구조해석의 탄성체 문제를 풀이하는 과정에서 처음으로 나타났으며, 1950년대에 강성행렬이 유도되면서 급속히 체계화되었다.

아스팔트 포장에서 층탄성이론에 의한 구조해석은 실제 조건들을 반영하는데 한계가 있다. 층탄성이론에 의한 해석의 주요한 문제는 각 층이 층 전체에 걸쳐 동일한 물성을 갖는 균질한 층으로 가정하는 것이다. 이러한 가정은 안정처리가 되지 않은 입상기층과 보조기층 등과 같은 비선형재료로 구성된 층구조체를 해석하는데 어려움이 있다. 따라서, 비선형층의 어느 지점이 전체 층을 대표하는 것으로 선정되어야 할 것인가라는 문제가 발생하게 된다. 보통 포장설계의 경우에서처럼 설계를 지배하는 응력, 변형률, 변위만이 요구된다면, 재하위치에 가장 가까운 지점이 선정될 수 있다. 그러나 재하위치에 근접한 지점 또는 멀리 떨어져 있는 다른 지점에서의 응력, 변형률, 변위가 요구된다면, 비선형재료를 해석하기 위하여 층탄성해석을 사용하는 것은 타당하지 않다. 또한 재료의 특성인 구성방정식과 차량하중의 동적 특성, 하중 및 포장구조체의 기하특성 등을 다양하게 적용한 보다 정확한 거동을 해석하기에는 어려움이 있다. 이러한 어려움을 극복하기 위해서 유한요소법과 같은 수치해석기법이 최근 많이 사용되고 있다.

아스팔트 포장구조체의 경우 1968년 Duncan 등이 처음으로 도입한 후 1980년 Radd와 Figueroa가 비선형 유한요소 해석프로그램인 ILLI-PAVE를 개발하며 발전해 왔다. 1989년 Harichandran 등은 공용성 예측에 사용할 수 있는 MICH-PAVE를 개발하였고, 1991년 Hanazato 등은 점탄성 층이론과 유한요소해석을 조합한 동적 탄성 유한요소해석방법, 1992년 Chatti가 동적거동을 산정할 수 있는 DYNA-

SLAB을 개발하였다. 그러나 이런 개발된 프로그램들보다는 연구적인 측면에서 상용 동적유한요소해석 프로그램들을 통하여 포장체의 거동을 산정하는 방법들이 적용되고 있다.

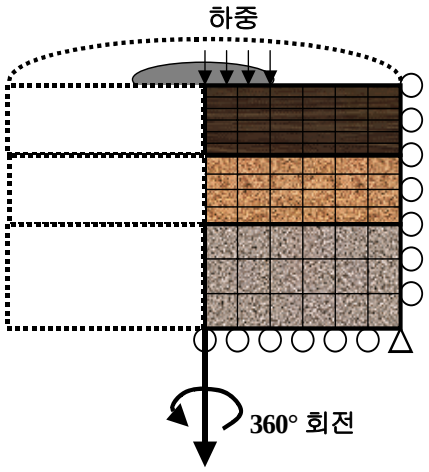
콘크리트 포장에서의 유한요소해석은 1960년대부터 연구가 진행되었으며 1977년 일리노이대학에서 유한요소개념을 도입한 최초의 콘크리트 포장구조해석 프로그램인 ILLISLAB이 개발되었다. 그 후, WESLIQID, JSLAB, KENSLABS 등 다양한 프로그램들이 개발되어 사용중이다. 최근에는 ABAQUS, SAP, ANSYS 등 유한요소법을 활용한 많은 범용 프로그램들이 개발되어 콘크리트 포장의 구조해석에 많이 사용되고 있다.

2. 유한요소 모형의 종류에 따른 포장 해석

유한요소 모형은 1차원, 2차원 및 3차원으로 만들어진다. 1차원 요소는 빔 요소와 같이 한방향으로만 거동하는 것(다웰바/타이바)을 모사하기 위해 사용된다. 반면 포장에 널리 사용되는 2차원 유한요소모형은 포장층을 모사하여 그 거동을 알아볼 수 있다. 2차원 유한요소모형은 해석시간이 짧은 큰 장점을 가지고 있음에도 불구하고 실제 포장거동에서 유발되는 비선형재료의 영향, 주행방향의 거동, 하중재하위치의 제한 등에 의해 현장 공용성과 많은 차이를 나타내었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 해석모형을 3차원으로 확장하여 최대한 실제 포장상태를 모사하면서 해석시간을 줄일 수 있는 방법들을 연구하고 있다.

가. 2차원 축대칭 유한요소모형

축대칭 유한요소모형은 Burmister가 1940년대 반무한 선형탄성 층이론을 제시한 이후 아스팔트 포장을 해석하는 일반적인 방법으로 사용되고 있다. 또한 다층 구조의 공항포장 해석에도 사용되고 있는데 축대칭 모형의 경우는 <그림 3.3.1>처럼 2차원 평면상에 만들어진 모형의 수직축을 기준으로 360° 회전시킴으로서 3차원과 같은 효과를 얻을 수 있게 한다. 이러한 축대칭 모형의 가장 큰 장점은 요소망을 만들기 쉬우며 수치적으로 풀기 쉽다 점이다. 축대칭 유한요소모형의 경우, 포장의



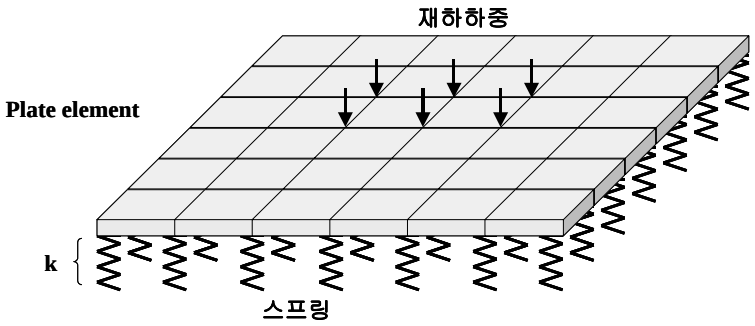
<그림 3.3.1> 2차원 축대칭 모형(조윤호, 2001년)

유한요소모형 중 가장 먼저 발달하였는데 1980년 ILLI-PAVE가 개발되었으며, 이후 1989년 MICH-PAVE, 1993년 KENLAYER 가 각각 개발되어 사용되고 있다.

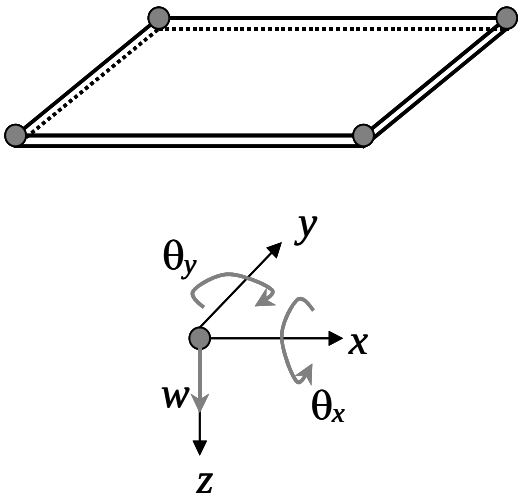
그러나 축대칭 유한요소모형은 원형의 하중재하만 가능하며 다양한 하중재하 위치에 대한 고려가 불가능하다는 단점이 있다. 또한, 콘크리트 포장의 줄눈과 같은 불연속면에 대한 고려가 어렵다는 제한이 있어 아스팔트 포장의 해석에 주로 사용된다.

나. 2차원 판 요소를 이용한 유한요소모형

판 요소(Plate Element)를 이용한 2차원 유한요소모형은 <그림 3.3.2>와 같이 탄성 기초(Elastic Foundation)나 탄성 스프링 요소 위에 판 요소가 놓여있는 모습으로 구성된다. 이러한 가정은 Westergaard의 공식에서 사용되는 것으로 길바탕 흙과 콘크리트 슬래브로 구성된 강성 포장의 해석에 적합하다. 일반적으로 ILLISLAB나 KENSLAB와 같은 기존의 콘크리트 포장 해석 프로그램에서의 슬래브는 판 요소를 이용하여 모사되었다. 판 요소는 각 절점에서 깊이 방향 변위와 종방향 및 횡방향 회전이 가능한 4 절점 12 자유도를 갖고 있는데, 이를 이용하여 슬래브를 해석하면 하중에 따른 포장의 처짐 및 수평방향 응력을 계산할 수 있으며 선형 온도 변화에 따른 포장의 상·하향 컬링(Curling)을 모사할 수 있다.



<그림 3.3.2> 2차원 판 요소 모형(조윤호, 2001년)



<그림 3.3.3> 판 요소의 자유도(조윤호, 2001년)

그러나 건조수축과 같은 수평방향 변위의 영향과 슬래브와 하부층 사이 및 슬래브와 다웰바 사이의 경계층 거동을 고려할 수 없으며, 수직방향 응력 역시 계산할 수 없는 한계가 있다. <그림 3.3.3>은 4 절점 12 자유도의 판 요소 개략도와 자유도를 나타내고 있다. 판 요소를 이용한 2차원 유한요소모형의 경우도 다양한 하중재하위치에 대한 고려가 가능하기 때문에 ILLI-SLAB, WESLIQID, JSLAB, KENSLABS 등 콘크리트 포장 해석용 프로그램에 많이 사용되고 있다.

그러나, 판 요소를 이용한 2차원 유한요소모형은 하부층의 전단변형을 고려하지 못하며, 다양한 층과 재료들로 구성된 다층의 포장을 단순히 길바탕 흙과 콘크리트

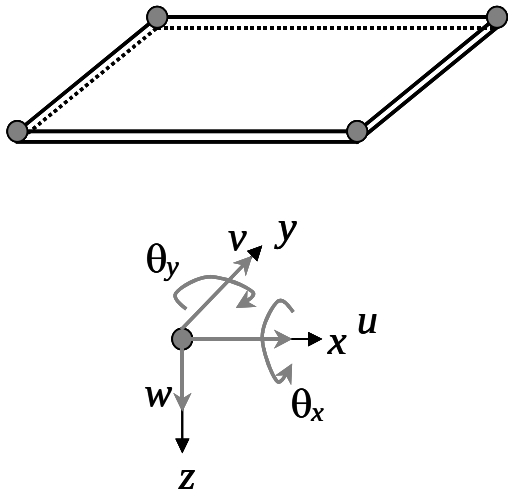
슬래브만으로 모사할 수밖에 없다는 단점이 있다. 또한, 탄성 기초나 탄성 스프링(Spring) 요소를 사용하기 때문에 하부구조의 깊이에 따른 응력이나 변형률 변화를 예측할 수 없다는 제한을 갖는다.

다. 쉘 요소(Shell Element)

<그림 3.3.4>의 쉘 요소는 포장 해석에 많이 사용되지는 않았으나, 포장의 거동 해석시 이론적으로는 판 요소보다 장점이 있다.

쉘 요소는 판 요소에 종방향과 횡방향 변위에 대한 자유도를 추가한 경우로 요소 당 4 절점의 20 자유도를 가지며, 이에 따라 절점에서 모든 방향의 변위와 수평 2방향에 대한 회전의 고려가 가능하다. 이러한 특성으로 인하여 포장의 횡방향 변위 특성인 건조수축에 의한 수평방향 등변위의 영향과 골재 맞물림의 영향을 고려할 수 있는 특징이 있다.

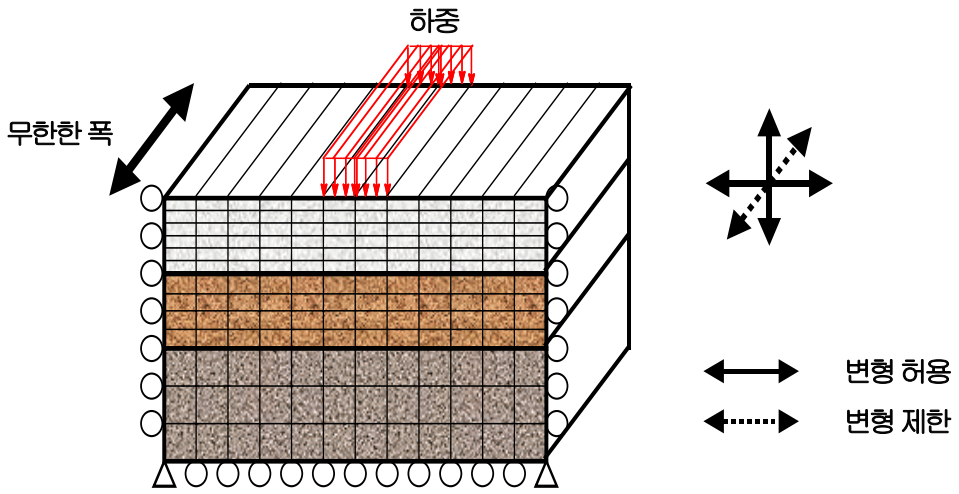
그러나, 수직방향 응력과 비선형 온도 분포에 따른 컬링이나 깊이 방향 비선형 온도 변화 등을 고려할 수 없는 점 등은 판 요소와 동일하다.



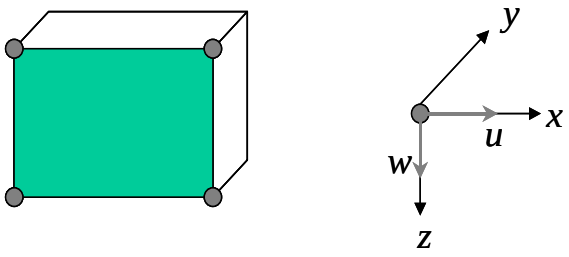
<그림 3.3.4> 쉘 요소의 자유도(조윤호, 2001년)

라. 2차원 평면 요소(2D Plane Strain/Stress Element)

평면 해석 조건에서 사용되는 2차원 요소는 폭방향과 깊이 방향의 변위에 대한 자유도를 가지고 있어, 선형이나 비선형 온도 분포를 고려한 포장의 건조수축이나 하부층 또는 다웰바와의 마찰을 고려할 수 있는 장점이 있다. 그러나 평면 변형 요소는 횡방향의 기하학적 변화, 구조적 거동 및 변위를 고려할 수 없으며, 평면 응력 요소는 횡방향의 구조적 거동 및 응력 분포를 고려할 수 없으므로 교통하중에 의한 포장의 횡방향 거동을 해석할 수 없는 한계가 있다. 평면 변형 요소 유한요소 모형은 축대칭 유한요소모형과 마찬가지로 해석할 요소수가 작다는 장점이 있으며 균열을 포함한 불연속면에 대한 고려도 가능하다. 그러나 한 방향에 대한 무한조건과 변형제한 조건, 무한한 폭 방향으로 하중이 무한대로 길게 존재하기 때문에 포장의 거동을 과다하게 평가하며 하중의 형태에 대한 정확한 모사가 불가능하다는 단점이 있다. 기본적인 4절점 8자유도의 2차원 solid element의 개략도는 <그림 3.3.6>과 같다.



<그림 3.3.5> 2차원 평면 변형률 모형(조윤호, 2001년)

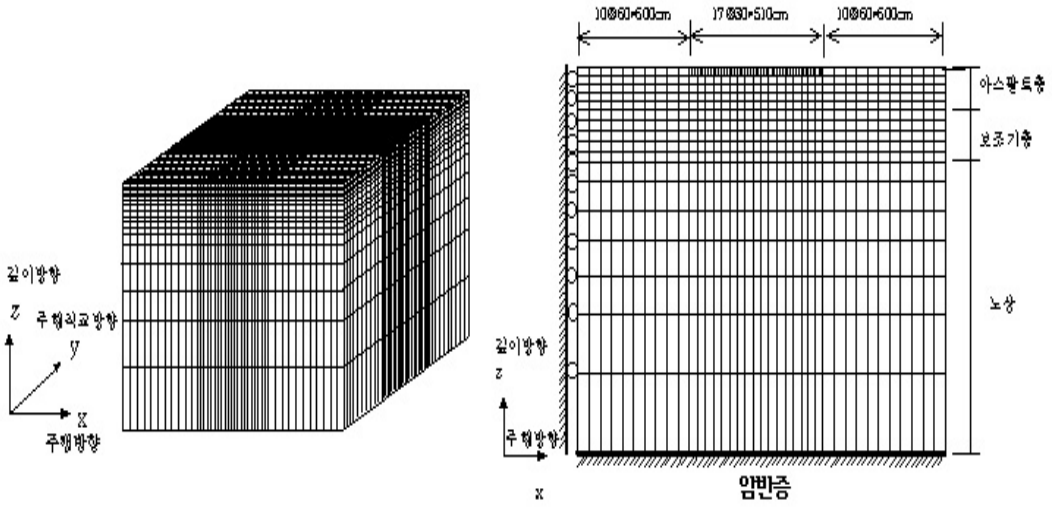


<그림 3.3.6> 2D solid element의 자유도(조윤호, 2001년)

마. 3차원 유한요소모형

3차원 유한요소모형은 실제 3차원으로 존재하는 포장구조물을 그대로 모사한다는 점에서 가장 정확한 결과 예측이 가능하다. 또한, 아스팔트 포장이나 콘크리트 포장 모두에 적용이 가능하며 다양한 하중형태와 하중재하 위치에 대한 모사가 가능하다. 균열이나 줄눈과 같은 불연속면에 대한 고려도 자유로워 포장 해석 모형으로 가장 적합하다. 3차원 유한요소모형은 해석할 요소가 많아지는 문제로 인해 다른 모형들과는 달리 1980년대부터 포장의 해석에 사용되기 시작하였으며, 주로 정하중, 진동하중, 충격하중, 이동하중 등 다양한 재하형태에 대하여 해석할 수 있다. 또한 하중이 포장의 가장자리에 작용하는 경우와 같이 기하, 하중, 재료특성 조건이 축대칭이거나 평면변형률이 아닌 경우에는 축대칭해석인 층탄성해석이나 2-D 유한요소법을 사용할 수 없으며, 이런 경우에 3-D 유한요소법이 매우 유용하게 적용될 수 있다.

그러나 3차원 유한요소모형의 경우 필요한 요소의 개수가 많고 이에 따라 해석 요소수가 커져 해석 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다. 하지만 이와 같은 단점은 컴퓨터 성능의 빠른 향상으로 점차 해결되고 있는 상황이다. <그림 3.3.7>은 3-D 해석을 위한 포장구조체 요소망으로 모델링 및 결과를 나타내고 있다.



<그림 3.3.7> 3-D 포장구조체 모델링(건교부, 2002년)

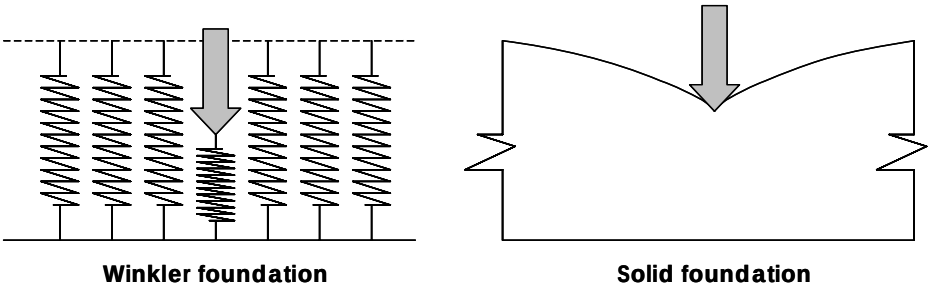
바. 포장 하부 스프링 요소 (Spring Element)

노상을 스프링 요소로 모사할 경우에는 해당 절점에 재하된 집중하중에만 영향을 받아 거동하므로 하부층에서 발생하는 전단력을 고려할 수 없다. 아래 <그림 3.3.8>과 같이 슬래브의 상향 컬링이 발생한 경우에는 스프링 요소에 인장이 발생하여 포장 가운데 상부의 인장응력을 과대평가하거나 모서리의 변위를 과소평가할 수 있는 단점이 있으며, 하향 컬링이 발생한 경우에도 반대의 영향을 발생시킨다.

그러나 스프링 요소는 전단응력을 고려할 수 없는 특성으로 인하여 하중이 재하되지 않은 부분의 강성도 행렬이 영(zero)이 되는 대각행렬을 생성하므로 다른 가정에 비하여 해석 수행 시간이 빠르며, 현장의 노상 지지력 계수를 사용한 해석을 수행할 수 있는 장점이 있다.

사. 포장 하부 연속체 요소 (Continuum Solid Element)

노상을 3차원 요소로 모사할 경우에는 모든 층의 완전/부분/비 부착 상태를 고려하여 해석할 수 있으며, 기층과 노상의 거동을 정밀하게 해석할 수 있다는 장점이 있다.



<그림 3.3.8> Winkler foundation과 Solid foundation의 거동 비교(건교부, 2002년)

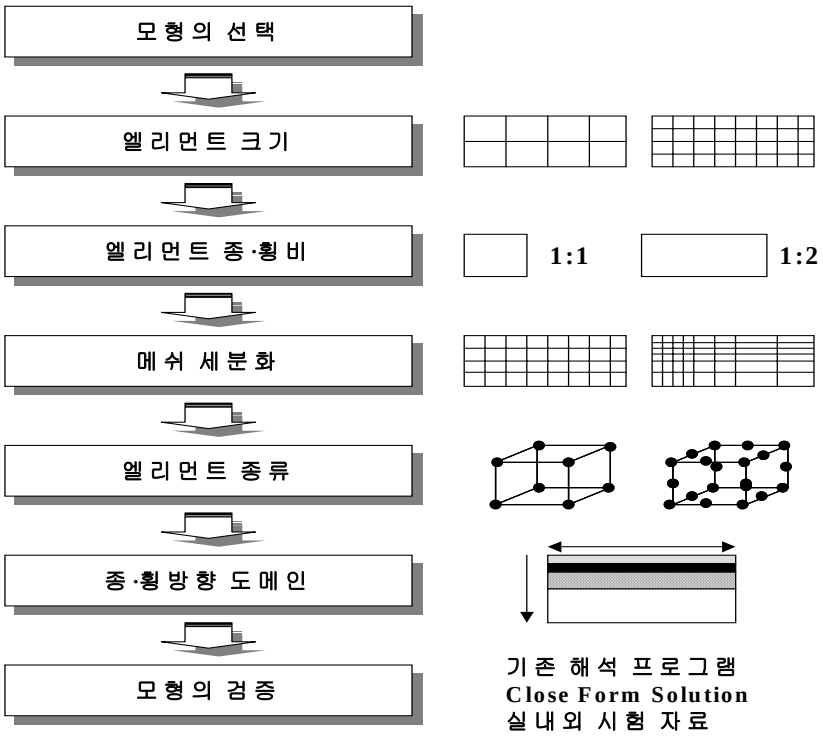
그러나 3차원 연속체 요소를 이용할 경우에는 모형에 적용될 요소망 생성이 복잡하고 요소수가 증가하여 해석 시간이 오래 걸리는 문제가 있다. 그러므로 3차원 연속체 요소를 이용할 경우에는 요소망 생성을 위한 최적화 알고리듬 개발이 필요하며, 실무 적용을 위하여 해석 요소수와 시스템에 따른 해석시간 분석이 필요하다.

또한 노상지지력 계수가 적용되지 않으며, 지지력을 탄성계수로 정확하게 환산하여 적용하기 어려우므로, 탄성계수 개념으로 노상의 지지력을 산정하는 현장 실험 방법에 대한 실용화 연구가 필요하다.

3. 4S 포장의 구조해석 모형 개발

가. 기존 연구의 분석을 통한 4S 구조해석 모형 개발 방향 수립

유한요소모형을 이용한 포장의 거동분석은 지금까지 개발된 방법 중 가장 다양한 조건을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 정확한 포장구조의 거동분석을 위해서는 유한요소모형을 개발하는 과정에서 요소에 대한 재정립이 필요하다. 본 연구진은 2001년부터 약 3년에 걸쳐 수행한 “신속개방형 중하중 교통 도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공 기술개발”이라는 연구를 통해 포장의 구조해석관련 지식 및 기술을 축적하였다. 기존의 구조해석을 수행한 결과에 대해 검토하고 이를 바탕으로 4S 구조해석 모형의 기초안을 작성하였으며 그 세부 내용은 다음과 같다.



<그림 3.3.9> 유한요소 모형 정립과정(조윤호, 2001년)

(1) 2차원 요소를 이용한 구조해석 모형 검토

기존 연구에서는 유한요소 모형을 개발하기 위해 요소망과 요소 크기, 종류를 결정해야한다. 3차원 모형으로 최적 모형을 정립하기에는 프로그램 해석시간이 너무 길게 소요되기 때문에 전체적인 경향을 파악하기 위해 우선 콘크리트 슬래브를 모사한 2차원 모형을 이용하여 파악하였다.

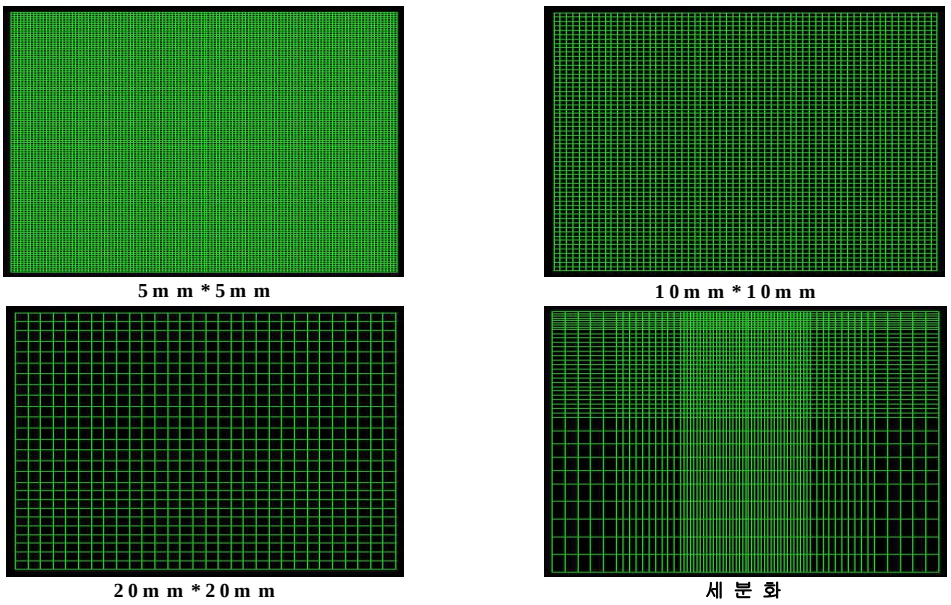
또한 2차원을 이용한 최적모형 검증을 위해 기존에 수행한 HWLS 에서 정적 하중 재하시험 결과를 통해 모형의 타당성을 살펴보았다. <그림 3.3.9>는 유한요소 모형개발을 위해 선행되어야 할 과정을 흐름도로 나타내었다.

(가) 요소 크기

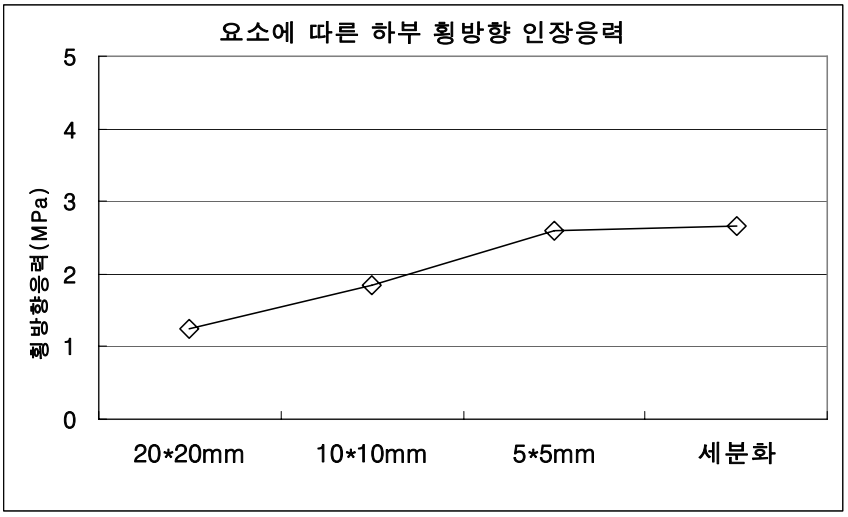
포장의 유한요소모형을 만드는 과정에서 적절한 요소 크기에 대한 고려가 반드시 필요하다. 요소 크기가 작아질수록 해석결과는 실제 최대 횡방향 응력값에 근접하게 된다. 그러나 요소 크기가 작아질 경우 모형에 들어가는 전체 요소의 수는 증

가하고 이에 따른 요소수도 증가한다. 그러므로 해석에 사용하는 컴퓨터의 능력을 고려하여 적절한 크기의 요소를 선정하여야 한다.

이러한 문제에 대한 보다 효율적인 해결방법으로 요소망을 세분화(Mesh Refinement)하는 방법이 있다. 요소망의 세분화는 <그림 3.3.10>에서 보는 것처럼 원하는 부분의 요소 크기를 작게 하고 상대적으로 포장의 거동에 영향을 적게 미치는 부분에는 큰 요소를 사용하여 요소망을 생성하는 방법이다. 포장의 경우 일반적으로 하중재하위치에 따라 최대인장응력 발생지점에서는 요소망을 세분화하여야 한다. 이와 같은 이론적 결과를 검증하기 위해 2D 평면 변형률 모형을 이용하여 요소망 크기에 따른 응력의 변화를 살펴보기위해 <그림 3.3.10>과 같이 요소망 크기를 4가지 경우로 구성하였다. 하중은 중앙부 상부에 약 400 Kg을 재하였으며, 하중재하 위치의 표층 하부 10cm 에서의 응력를 살펴본 결과 <그림 3.3.11>과 같았다. 평면변형률 유한요소모형에서 요소 크기가 작아질수록 횡방향 응력이 보다 크게 나타났으며 5*5 mm 요소망과 요소망 세분화 한 모형이 유사한 결과를 보였다. 이점을 고려하여4 S 포장 구조해석에서는 해석시간을 줄이고 정확성을 높이기 위해 요소망 세분화한 모형을 사용하였다.



<그림 3.3.10>2차원 평면 변형율 모형을 이용한 요소망 분할



<그림 3.3.11> 요소 크기에 따른 2차원 평면 변형률 모형 분석결과 (400Kg)

(나) 요소 종류

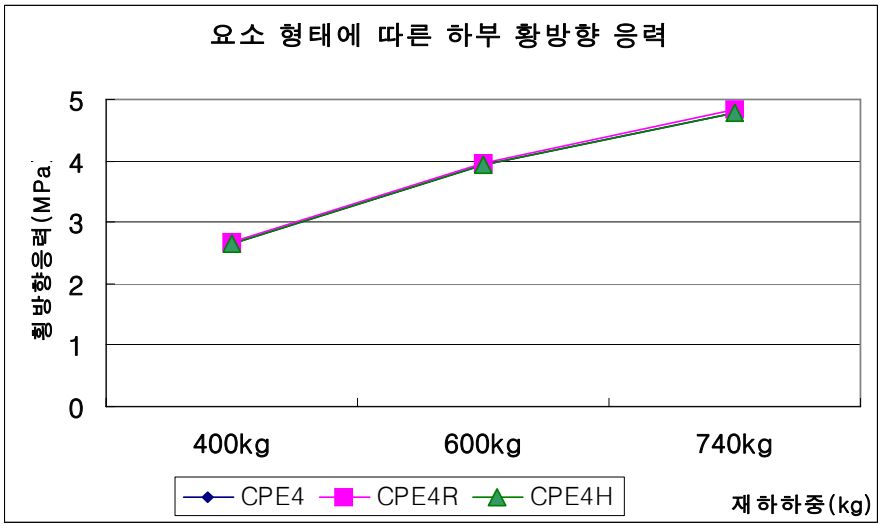
유한요소모형에 사용되는 요소는 앞에서 살펴본 바와 같이 3차원 요소, 빔 요소, 쉘 요소 등 다양한 종류가 존재하며 해석모형의 기본가정에 따라 적절한 요소를 사용해야 한다.

<그림 3.3.12>는 평면변형률 유한요소모형에서 요소망을 세분화한 모형을 바탕으로 <표 3.3.1>의 요소를 이용하여 해석하였다.

<그림 3.3.12>에서 보듯이 요소의 크기가 적을 때는 종류에 따른 영향을 크게 받지 않는 것으로 판단되었다. 따라서 3차원 구조해석 모형 개발에 사용되는 다양한 요소들(C3D8, C3D8I, C3D8H, C3D8R, C3D8RH 등)이 있지만 일반적으로 사용되는 C3D8 요소를 바탕으로 하중 재하 부분을 세밀하고 모형화하여 해석을 수행하도록 한다.

<표 3.3.1> 2차원 요소의 특정 (ABAQUS User Manual 2)

요소	특징
CPE4	4절점
CPE4R	4절점, 시간제한이 있는 감소적분형태 요소
CPE4H	4절점, 동일압력을 받는 변형 요소



<그림 3.3.12> 요소 크기에 따른 2차원 평면 변형률 모형 분석결과(조윤호, 2001년)

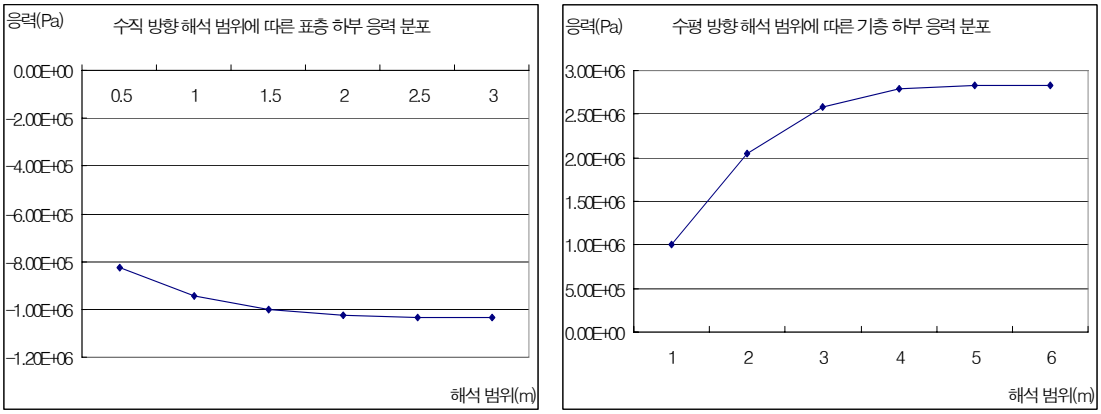
(다) 요소 종·횡비(Aspect Ratio)

유한요소모형에 사용되는 요소의 종·횡비는 해석에 직접적인 영향을 미치는 중요부분의 경우 1:5를 넘지 않아야 한다. 유한요소모법은 요소를 구성하는 절점을 통하여 모든 수치적 해석이 이루어지므로 종·횡비가 과다하게 커질 경우에는 전단변형이나 굽힘에 대한 고려가 부적절하게 이루어질 수 있다. 또한, 요소의 내부각은 30°이상 150°이하로 유지하여 수치해석시 발생하는 오차를 줄이도록 한다.

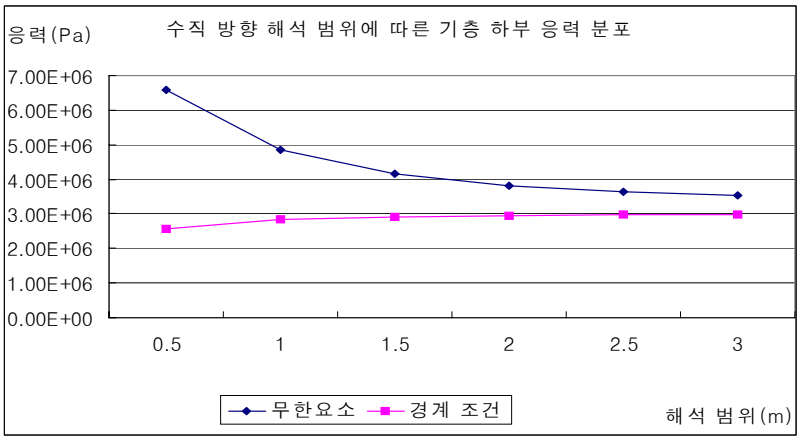
(라) 종·횡방향 도메인

<그림 3.3.13>은 수직 및 수평 해석 범위에 따른 포장체의 거동을 살펴본 것이다. 수직 방향은 노상의 깊이를 고려하는 것이며 수평 방향은 포장층 전체의 수평방향 해석 영역을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 노상의 깊이를 깊게 할수록, 해석 범위를 넓게 설정할수록 응력값이 일정한 값에 점점 수렴해가고 있다.

<그림 3.3.14>는 경계면 처리에 따른 해석 결과를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 노상의 깊이를 무한 요소로 처리하였을 경우 포장층의 응력이 약간 큰 경향이 있다. 기존의 연구 결과에서는 무한 요소보다는 롤러지지를 하여 경계면을 처리한 것이 처짐량이나 변형률이 실측 결과와 더 유사한 결과를 나타내었다.



<그림 3.3.13> 수직/수평방향 해석 범위에 따른 거동(조윤호, 2001년)



<그림 3.3.14> 경계 조건에 따른 기층 하부 응력(조윤호, 2001년)

본 4S 연구에서는 이 결과를 바탕으로 해석시간과 정확도를 고려하여 노상 깊이는 1.5 m, 수평방향 해석 범위는 6 m 로 결정하였고 롤러지지의 경계조건을 적용하도록 한다.

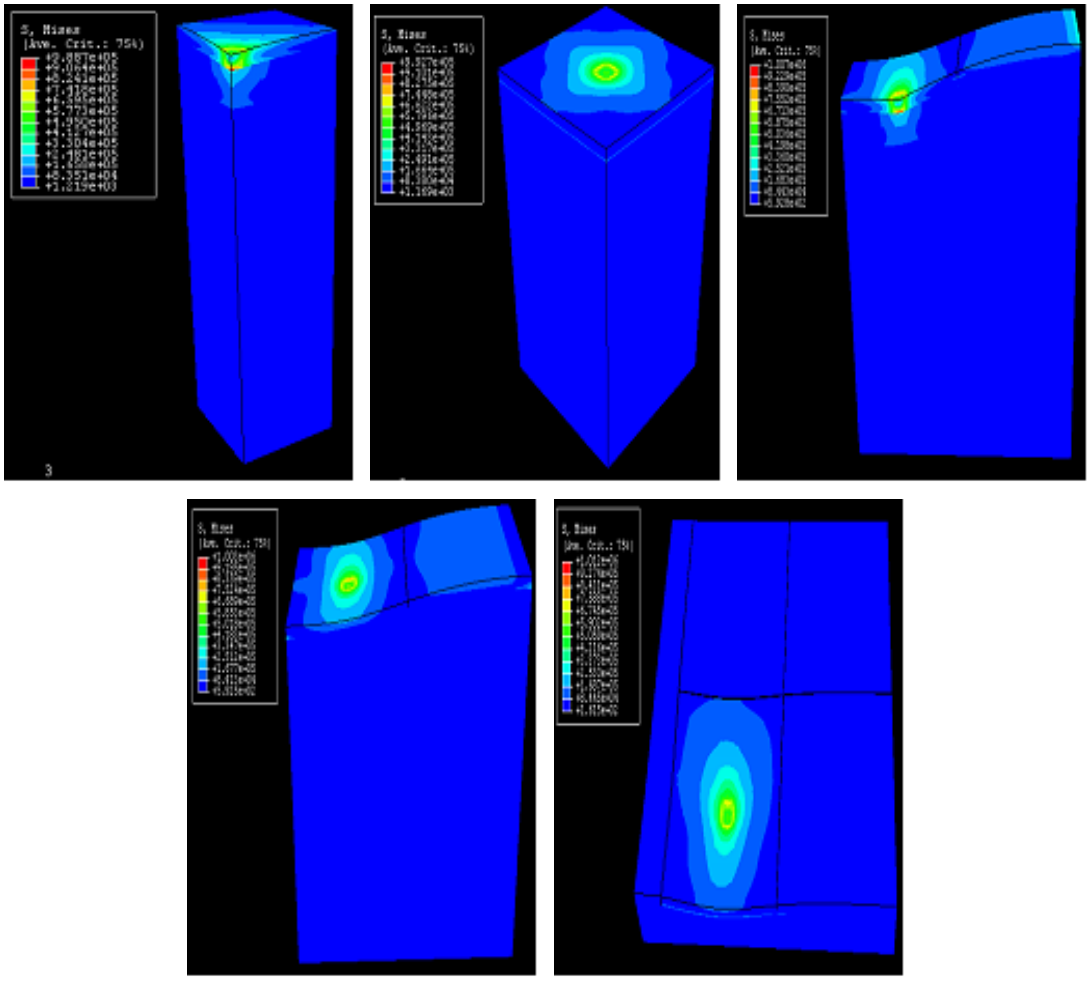
(2) 3차원 요소를 이용한 구조해석 모형 검토

2차원 모형은 짧은 시간동안에 단면 조건을 다양하게 변화시켜가며 포장의 거동을 분석할 수 있으나 실제 포장의 거동과 달라 정확한 해석이 불가능하고 포장 구조 해석자가 관측하고 싶은 위치에서의 응력이나 처짐량을 알 수 없다는 한계점이 있다. 따라서 이러한 점을 해결하기 위해서는 3차원 구조해석 모형이 필요하다.

본 연구진은 3차원 축대칭, 단일 슬래브 모형, 다중 슬래브 모형을 개발하여 그

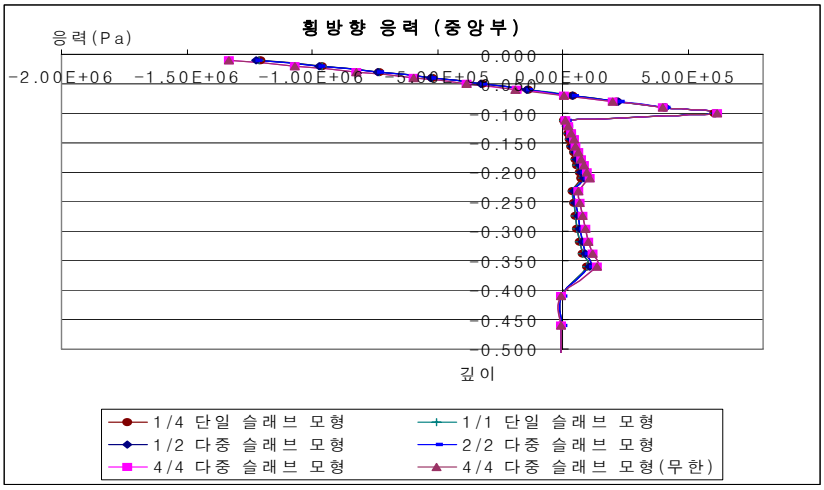
거동 특성을 살펴보았다. 비록 해석 시간은 2차원 모형보다 오래 걸리지만 경계층 조건이나 하중 위치 및 종류에 따른 포장의 거동을 분석할 수 있으며 해석 결과의 정확성이 높다는 장점이 있다.

다음 <그림 3.3.15>는 중앙부 하중재하를 모사한 3차원 유한 요소 해석 결과를 나타낸 것이다. <그림 3.3.16>은 하중재하 위치의 횡방향 응력을 깊이에 따라 살펴본 것이다. 발생 응력은 해석 범위에 큰 영향을 받지 않았으나 처짐량은 해석 범위에 따라 차이가 있는 것으로 나타났다. 4S 연구에서는 줄눈부가 없기 때문에 슬래브 수 및 줄눈부의 거동은 고려할 필요가 없을 것이다.



<그림 3.3.15> 3차원 구조해석 모형(조윤호, 2003년)

(1/4 단일 슬래브, 1/1 단일 슬래브, 1/2 단일 슬래브, 2/2 다중 슬래브, 4/4 다중 슬래브 모형)



<그림 3.3.16> 3차원 모형의 해석모형의 응력 비교(조윤호, 2003년)

<표 3.3.2> 구조해석 모형간의 해석 결과(조윤호, 2003년)

		축대칭 유한요소모형	평면변형률 유한요소모형	3차원 유한요소모형	정적하중재하 시험결과
400kg 재하	응력(MPa)	1.261	2.663	1.311	1.413
	오차	-12.5	+88.5	+7.8	
600kg 재하	응력(MPa)	1.882	3.924	1.959	1.933
	오차	-2.7	+103.0	+1.3	
740kg 재하	응력(MPa)	2.313	4.786	2.411	2.397
	오차	-3.6	+99.7	+0.6	
해석 요소수		4032	5822	24300	-
해석 시간(sec)		57	112	3820	-

(3) 실내 실험 결과를 이용한 모형의 결과 분석

<표 3.3.2>는 ABAQUS를 이용하여 축대칭 모형/ 평면 변형률 모형/ 3차원 모형으로 해석한 결과와 HWLS 의 정적하중재하시험 결과를 비교한 것이다. 평면변형률 유한요소모형의 경우는 포장의 거동을 두 배 가량 과대평가하는 것으로 나타나 해석 모형으로는 적합하지 않은 것으로 판단되었다. 축대칭 유한요소모형과 3차원 유한요소모형의 경우는 실제 시험결과와 근사한 값을 나타내는 것으로 밝혀졌으나 3차원 유한요소모형의 해석 결과가 정적하중재하시험 결과에 보다 근사한 것으로

<표 3.3.3> 4S 포장의 기본모형(안) 제시

구분	4S 3차원 구조해석 모형의 적용
요소의 크기	요소 세분화
요소의 종류	C3D8
요소 종・횡비	한계응력지점 - 1 : 2 이내 기타 부분 - 1 : 20 이내
종・횡방향 도메인	노상 깊이 - 1.5 m 수평 방향 - 6×6 m
경계 조건	롤러지지 조건

나타났다. 또한, 축대칭 유한요소모형의 경우 다양한 하중 형태와 하중재하 지점을 모사할 수 없다는 모형 자체가 갖는 단점이 있다. 따라서 이러한 점을 고려하여 최종적으로 3차원 유한요소모형을 4S의 해석 모형으로 선정하였다.

(4) 기존 연구결과 요약

기존 연구결과를 바탕으로 4S 포장의 구조해석 모형 개발을 위해 <표 3.3.3>과 같이 기본안을 수립하였다.

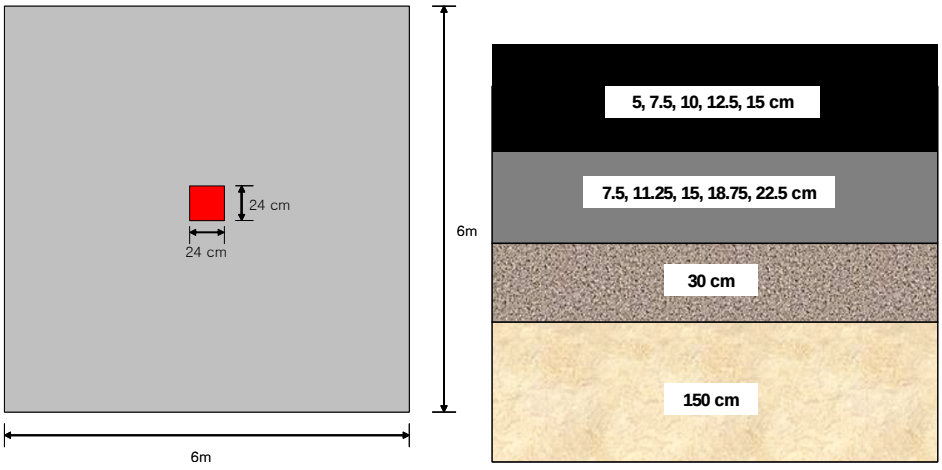
나. 4S 포장의 3차원 구조해석 모형 정립

앞에서 언급한 바와 같이 3차원 SOLID 요소를 이용한 4S 구조해석 모형의 요소 크기 및 종류에 대한 선정은 2차원, 3차원 유한요소모형에 대한 기존 연구 결과를 이용하여 최적화 모형의 정립 방향을 구상하였다.

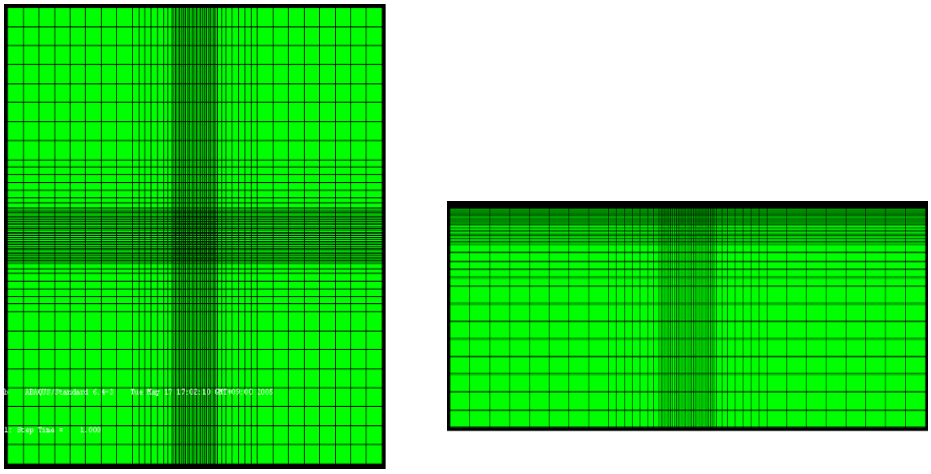
<그림 3.3.17>과 같이 입력변수는 하중의 크기, 하중 재하 면적, 재하 위치 및 각 포장층이 갖는 고유 물성값 등으로 구분할 수 있다. 접지 면적은 24 cm×24 cm, 재하 압력은 695,034 Pa(100 psi)이 재하되는 것으로 해석하였으며 이를 축하중으로 환산하면 약 4 ton(9000 lb)이다.

<표 3.3.4>는 모형을 해석하기 위해 입력되는 각 포장층의 물성값을 나타낸 것이다. 이 표에서 두께와 탄성계수값이 제외되었는데 이는 민감도 분석의 입력 변수로 고려되었기 때문이다. 투수 CTB의 단위중량은 실내 실험을 통해 실측한 데이터

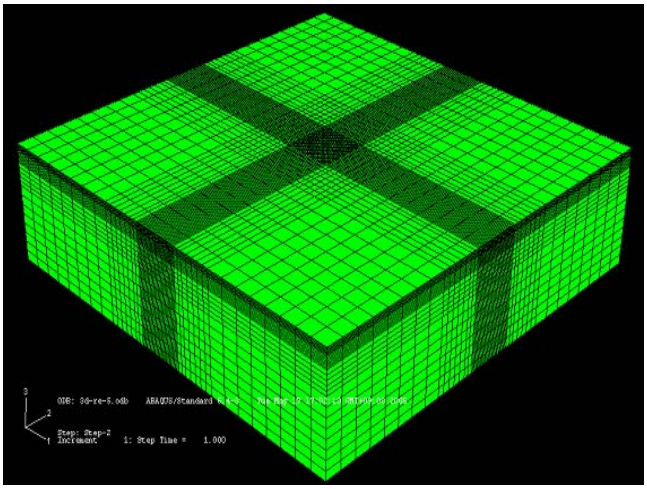
를 사용하였고 투수 AP 탄성계수 및 단위중량은 문헌 고찰 내용을 토대로 가정한 값을 사용하였다. 또한 두 층의 포아손비는 대표값을 사용하였다. 골재 보조기층과 노상의 물성값들은 일반적으로 사용되는 값들이다. <그림 3.3.18>, <그림 3.3.19>는 생성된 기본 요소망의 형태이다.



<그림 3.3.17> 4S 포장의 해석 범위 및 두께 변화에 따른 경우의 수



<그림 3.3.18> 평면 및 측면에서 본 요소망의 형태

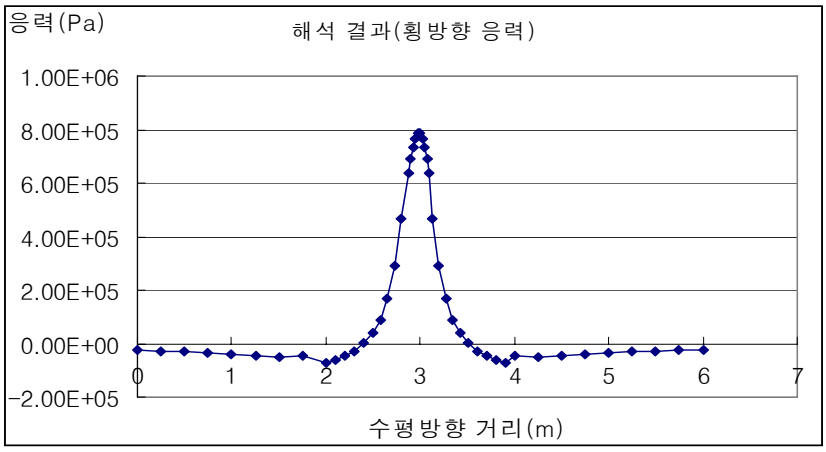


<그림 3.3.19> 4S 구조해석 모형의 전체 요소망 형태

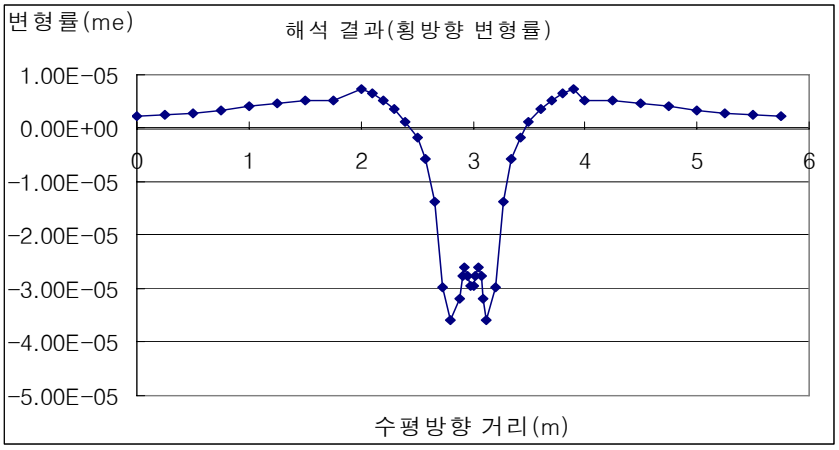
<표 3.3.4> 기초 모형 분석을 위한 해석 단면의 물성값

포장층	물성 항목	물성값
투수 AP	열팽창계수	3.5 με/℃
	단위중량	1.9 t/m3
	포아송비	0.35
투수 CTB	열팽창계수	5.0 με/℃
	단위중량	1.85 t/m3
	포아송비	0.2
골재 보조기층	탄성계수	0.21 GPa
	포아송비	0.35
노상	탄성계수	48 MPa
	포아송비	0.40

*Yang H. HUANG 및 한국형 포장 설계법 2차년도 보고서



<그림 3.3.20> 4S 구조해석 모형 결과(CTB 하부)



<그림 3.3.21> 4S 구조해석 모형 결과(AP 하부)

하중은 정중앙부에 재하하였으며 응력분포는 하중재하 곳의 주변에 가장 큰 응력이 발생하였으며 거리가 멀어질수록 그 영향은 작았다.

<그림 3.3.20>,<그림 3.3.21>은 앞에서 살펴본 기초 입력 변수를 바탕으로 해석한 결과 중 CTB 하부의 인장 응력, AP 표층 하부 변형률을 나타낸 그림이다. 한계응력은 하중재하 중앙부에서 발생하였다. 반면 투수 아스팔트 층의 하부는 하중재하 위치에서 압축 변형률이 발생하였고 하중재하위치 주변에서 작은 인장변형률이 발생하였으나 그 영향이 매우 작게 나타났다. 4S 포장 시스템은 일반 아스팔트 포장과 달리 기층이 강성이 크고 탄성거동을 나타내는 CTB를 사용하였기 때문에 투수 아스팔트 표층에서는 압축변형만 발생하였다. 따라서 피로 수명을 산정하기 위해서는 투수 AP의 변형률 대신 CTB의 인장응력을 고려해야할 것으로 판단된다.

다. 4S 포장의 민감도 분석

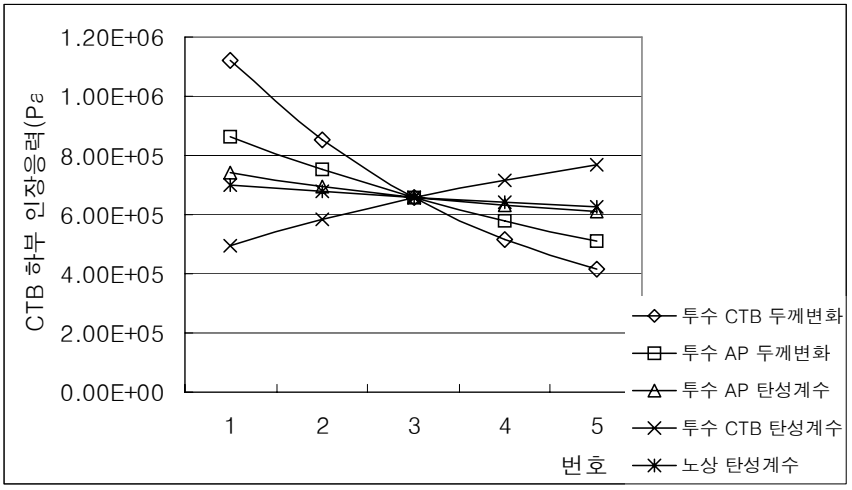
투수 CTB 위에 투수 아스팔트 포장의 거동에 영향을 미치는 인자를 알아보기 위해 민감도 분석을 실시하여 단면설계에 반영하고자 하였다. 복합 투수 포장 단면 설계시 민감도 분석의 결과를 토대로 인자를 결정하고, 각 인자에 대한 변수의 개수를 결정하고자 한다. <표 3.3.5>와 같이 민감도 분석을 위한 투수 아스팔트 표층의 두께변수는 현재 고속도로에 시공되어 있는 투수 아스팔트 표층의 두께를 기준으로 하였으며, 투수 CTB 기층의 두께기준은 일반 시멘트 안정처리 기층의 두께를 적용하였다. 반면에 투수아스팔트와 투수 CTB 기층에 대한 탄성계수는 기존 밀입도 아스팔트와 시멘트 안정처리기층에서 제시된 값보다 높은 공극률을 고려했을 때 탄성계수가 낮을 것으로 판단하여 약 75%의 값을 기준으로 적용하였다. 표층과 기층의 두께와 탄성계수, 노상의 탄성계수에 대한 변수는 기준을 중간 값으로 ± 25%의 동일한 비율로 각각 5가지씩 총 30가지의 경우의 수를 해석하였으며, 차량 하중크기에 따른 영향을 살펴보기 위해 축 하중도 5가지로 나누어 분석하였다. 이렇게 동일한 비율로 변수를 결정한 것은 기준 값에 대해 민감도 분석 인자 상호간의 관계를 하나의 그래프에서 기울기의 변화로 판단할 수 있기 때문이다.

<그림 3.3.22>는 3차원 유한요소해석을 통해 투수 포장에 영향을 미치는 인자들을 고려하여 항목에 대하여 개별적으로 25 가지 경우에 대한 민감도 분석한 결과이다. 중간값을 기준으로 각각의 인자에 대한 기울기를 비교해 보면 투수 CTB 기층의 두께가 가장 큰 영향을 준다고 나타났으며, 투수 아스팔트 표층두께가 두 번째로 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

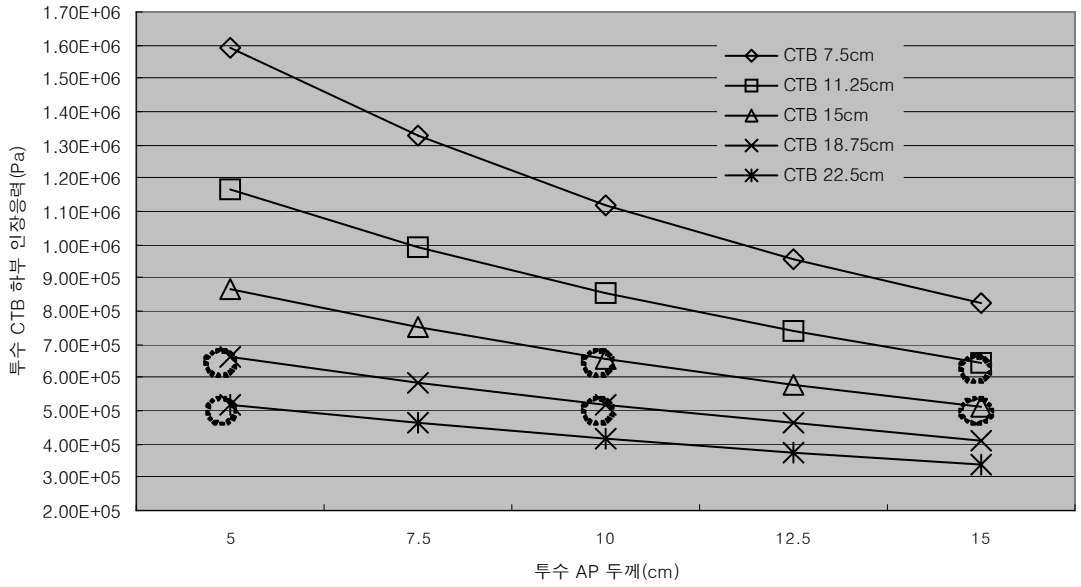
각 층의 탄성계수는 두께인자에 비해 상대적으로 포장 거동에 미치는 영향이 작고, 노상 탄성계수에 따른 응력의 변화는 미미하였다. 이는 투수 CTB의 탄성계수가 크고 강성의 특성을 나타내기 때문에 하중에 대한 포장 하부로의 응력 전달이 콘크리트 포장과 같은 특성을 나타낸다고 판단되며 이는 일반 밀입도 아스팔트와 같은 포장구조해석에서 나타나는 것만큼 노상 영향력이 크지 않은 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 상대적으로 영향이 적은 표층 및 기층의 탄성계수를 제외하고 125가지 경우(표층, 기층, 하중)에 대한 구조해석을 수행하였으며 데이터는 부록에 수록하였다.

<표 3.3.5> 민감도 분석을 위한 인자 선정

인자	50%	75%	기준(100%)	125%	150%
번호	1	2	3	4	5
투수 표층 두께(cm)	5	7.5	10	12.5	15
투수 CTB 두께(cm)	7.5	11.25	15	18.75	22.5
투수 표층 탄성계수 ($\times 10^6$psi)	2.5	3.75	5	6.25	7.5
투수 CTB 탄성계수 ($\times 10^6$psi)	7.5	11.25	15	18.75	22.5
노상 탄성계수 ($\times 10^3$psi)	7.5	11.25	15	18.75	22.5
축하중(t)	3.5	5.25	7	8.75	10.5



<그림 3.3.22> 민감도 분석 결과(기준하중)



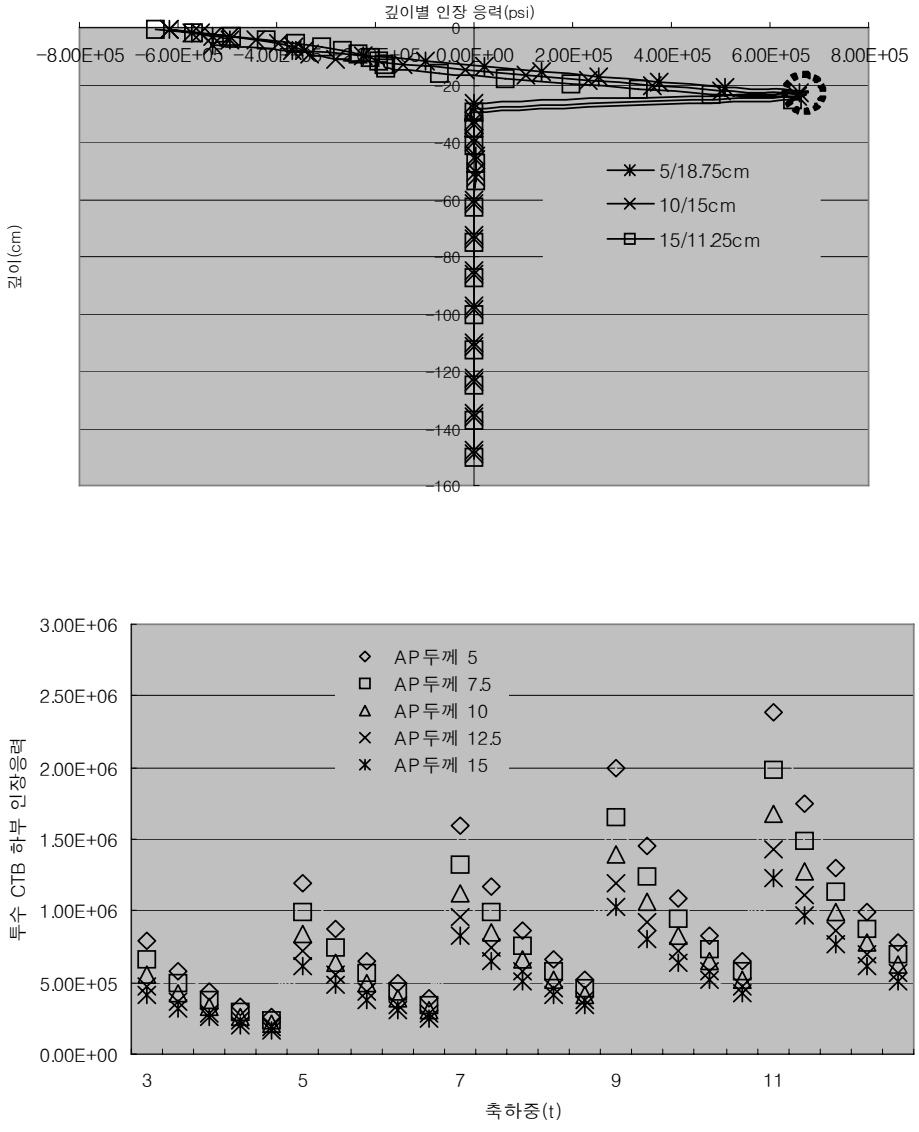
<그림 3.3.23> 투수 아스팔트 및 투수 CTB 두께 변화에 따른 투수 CTB 하부 인장응력

<그림 3.3.22>의 결과를 근거로 투수 아스팔트 두께와 투수 CTB 기층두께 조합이 포장거동에 미치는 영향을 보다 세부적으로 살펴보았다. 동일한 축하중에서 투수 CTB 기층의 두께변화가 투수 아스팔트 표층 두께변화보다 포장거동에 더 민감하게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 즉, 투수 CTB의 두께가 커질수록 동일한 투수 아스팔트 표층의 두께변화에 대해 인장응력 변화폭이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 특히 <그림 3.3.22>에서 축하중 7t에서 점선으로 표시된 부분과 같이 투수 아스팔트 표층두께가 5cm감소함에 따라 투수 CTB 두께가 3.75cm 증가하는 경향을 보였다. 이는 경제성 측면에서 고려할 때 초기 시공비가 큰 투수 아스팔트 표층의 두께를 감소시키고 투수 CTB의 두께를 상대적으로 작게 증가시켜도 동일한 포장거동을 예측할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

투수 CTB 기층 하부의 인장 응력이 비슷한 포장 두께별 깊이에 따른 인장응력의 변화를 알아본 결과 <그림 3.3.23>과 같다. 깊이별 인장응력의 변화는 두께가 두꺼워질수록 선형적으로 중립축이 내려가고, 하부로 갈수록 응력변화가 줄어들어 투수 CTB 하부에서 가장 큰 인장응력이 비슷하게 발생함을 알 수 있었다.

<그림 3.3.24>는 축 하중을 3, 5, 7, 9, 11 ton 으로 증가시켰을 때 투수 AP와 투수 CTB의 두께변화에 따른 응력 변화를 나타낸 것이다. 하중이 증가할수록 응력은

선형적으로 증가했으며, 두께가 커질수록 응력 변화폭은 줄어드는 경향을 나타내었다. 이는 교통량 정량화 방법에서 축 하중 분포에 따른 누적 손상개념을 적용할 때 중 하중 차량이 포장 파손에 큰 영향을 줄 수 있음을 추정할 수 있다. 축 하중이 작은 경우는 포장 층 두께가 큰 영향을 나타내지 않지만, 축 하중이 증가할수록 포장 층 두께가 포장파손의 주요인자가 되는 것으로 해석되었다.



<그림 3.3.24> 축하중 변화에 따른 투수 CTB 하부 인장응력 변화

라. 한계응력 예측식 개발

SPSS 통계 프로그램을 이용하여 초기 30가지 해석의 경우에 대한 분석을 수행하여 다음과 같은 CTB 하부응력 예측식을 개발하였다. <표 3.3.6>은 구조해석 입력 변수에 따른 해석결과와 회귀식 결과를 나타낸 것이다. 개발식은 향후 시험데이터와의 비교분석을 통하여 검증할 계획이다.

<표 3.3.6> 입력 변수에 따른 구조해석결과와 회귀식 결과

번호	표층 두께 (Cm)	기층 두께 (Cm)	표층 탄성계수 (Gpa)	기층 탄성계수 (Mpa)	노상 탄성계수 (Mpa)	하중 크기 (MPa)	해석 결과 (Pa)	회귀식 결과 (Pa)
1	5	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	865,460	844,508
2	7.5	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	752,370	756,386
3	10	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	657,880	668,264
4	12.5	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	578,630	580,142
5	15	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	511,720	492,020
6	10	7.5	3.45	10.3	10.35	0.55158	1,119,200	1,016,664
7	10	11.25	3.45	10.3	10.35	0.55158	852,300	842,464
8	10	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	657,880	668,264
9	10	18.75	3.45	10.3	10.35	0.55158	517,920	494,065
10	10	22.5	3.45	10.3	10.35	0.55158	415,610	319,865
11	10	15	1.72	10.3	10.35	0.55158	740,900	733,192
12	10	15	2.59	10.3	10.35	0.55158	692,810	700,540
13	10	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	657,880	668,264
14	10	15	4.31	10.3	10.35	0.55158	631,190	635,989
15	10	15	5.17	10.3	10.35	0.55158	610,000	603,713
16	10	15	3.45	5.17	10.35	0.55158	496,500	534,493
17	10	15	3.45	7.76	10.35	0.55158	586,520	602,031
18	10	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	657,880	668,264
19	10	15	3.45	12.9	10.35	0.55158	717,150	736,063
20	10	15	3.45	15.5	10.35	0.55158	768,260	803,862
21	10	15	3.45	10.3	51.7	0.55158	698,780	678,297
22	10	15	3.45	10.3	77.6	0.55158	676,320	684,581
23	10	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	657,880	668,264
24	10	15	3.45	10.3	12.93	0.55158	641,640	668,890
25	10	15	3.45	10.3	15.52	0.55158	626,730	669,519
26	10	15	3.45	10.3	10.35	0.27579	328,940	339,325
27	10	15	3.45	10.3	10.35	0.413685	493,410	503,795
28	10	15	3.45	10.3	10.35	0.55158	657,880	668,264
29	10	15	3.45	10.3	10.35	0.689475	822,350	832,734
30	10	15	3.45	10.3	10.35	0.82737	986,820	997,204

<표 3.3.6>의 결과를 바탕으로 다음과 같은 회귀식을 제안한다.

$$\sigma_{CTB} = -35248.8 \times T_1 - 46453.3 \times T_2 - 37530.1 \times E_1 + 26076.3 \times E_2 \\ 242.626 \times E_3 + 1192719 \times P + 918053.1 \quad \text{<식 3.3.>)}$$

여기서, σ_{CTB} : CTB 하부의 응력 (Pa)

T_1 : 투수 AP 두께 (cm)

T_2 : CTB 두께 (cm)

E_1 : 투수 AP 탄성계수 (GPa)

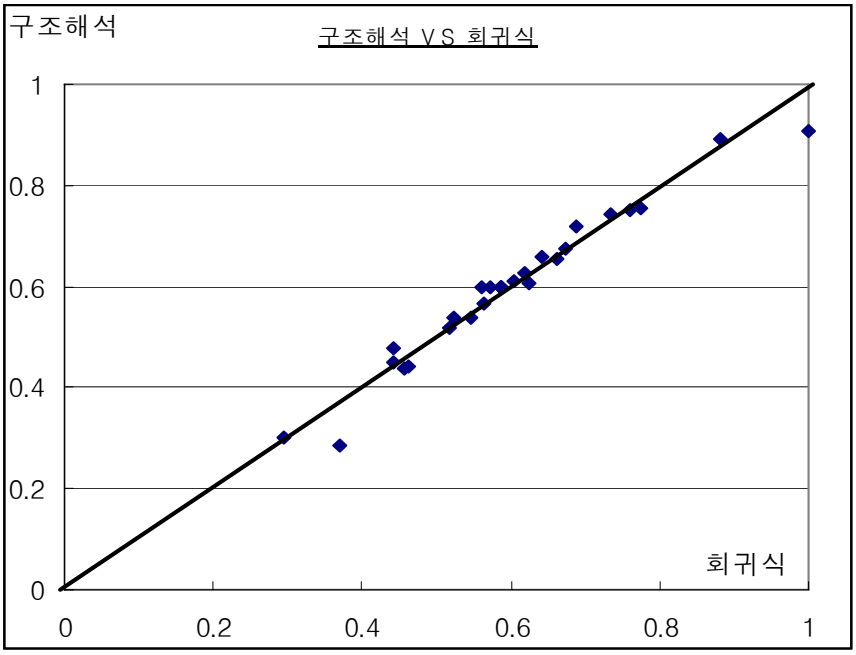
E_2 : CTB 탄성계수 (GPa)

E_3 : 노상 탄성계수 (10^7 Pa)

P : 재하 압력 (MPa), 단 하중 면적은 24 cm×24 cm 로 제한됨

<그림 3.3.25>에서와 같이 비교적 구조해석한 결과와 한계응력 예측식이 잘 맞는 것을 알 수 있다.

이 식은 피로식의 응력을 산출하는데 활용될수 있을 것이라 판단되며 향후 현장 데이터를 이용하여 검증해야할 것이다.



<그림 3.3.25> 해석 결과와 회귀식 결과의 비교

4. 4S 포장의 최적 단면 제안

4S 포장의 최적 단면을 제안하기 위해서 구조해석 모형을 이용하여 다양한 조건의 구조해석을 수행하였다. 이에 근거한 해석 결과는 현장 시험 및 일반 도로에 4S 포장을 건설할 경우 매우 적합한 것으로 평가한다. 또한 본 과제의 과업 중에 하나인 KALES를 이용한 공용성 평가를 위한 기본 단면을 구조해석 결과를 이용하여 제안하였다.

가. 단면 계획

<표 3.3.7>은 “한국형 포장 설계법” 보고서에서 제시한 우리나라 포장의 대표층 두께와 탄성계수를 보여주고 있다. 본 연구의 투수 포장 층 단면을 계획하는데 이를 기준으로 사용하였다. 최근 고속도로에서 일반 밀입도 아스팔트 표층은 주로 10cm를 사용하고 있으며 이중 투수 아스팔트는 4-5cm를 적용하는 것으로 조사되었다. FEM 해석에서 사용되는 각 포장단면의 탄성계수는 현재 각 등급별 도로에 적용되고 있는 각 포장 층별 탄성계수 범위를 참고하였으며, 기층재료인 CTB의 탄성계수는 “저수축 시멘트 안정처리 기층 연구”에서 제시한 탄성계수 값을 기본으로 일반 린 콘크리트 탄성계수 값을 넘지 않도록 계획하였다. 따라서 본 단면계획에서 투수 아스팔트 표층은 5-10cm의 범위내에서 계획하였고, 민감도 분석결과를 바탕으로 투수 아스팔트 표층보다 민감도가 크게 나타난 투수 CTB의 두께는 일반 린 콘크리트 두께 15cm를 기준으로 하여 10-20cm 범위에서 4가지 변수를 설계하였다. 또한 투수 아스팔트 표층과 투수 CTB 기층에 대한 탄성계수도 각각 3가지씩 변수로 설정하였다.

고속도로와 일반국도의 포장 단면계획은 설계수명을 고려하여 두께 조정으로 결정하고자 한다. <표 3.3.8>은 FEM 구조해석을 위해 계획한 단면 두께와 탄성계수에 대한 변수를 나타내고 있다.

<표 3.3.7> 우리나라 포장 대표 층 두께 및 물성

도로등급	고속도로	일반국도	지방도
AP 표층두께 (cm)	5-10 투수포장: 4-5	5-10 투수포장: 5	5-10
AP 기층두께 (cm)	15-30	15-20	10-20
보조기층 (cm)	30-40	15-30	15-20
AP 표층 탄성계수 (psi)	150000-1000000		
AP 기층 탄성계수 (psi)	60000-600000		
보조기층 (psi) 고정	15000-70000		
노상 (psi) 고정	7000-40000		

※ 참고:한국형 포장설계법(아스팔트 포장설계법 개발)

<표 3.3.8> FEM 해석 단면계획

도로등급	고속도로 / 일반국도											
투수 표층두께 (cm)	5				7.5				10			
기층 CTB두께 (cm)	10	15	20	25	10	15	20	25	10	15	20	25
표층 탄성계수 $(psi)10^6$	0.3	0.5	0.7		0.3	0.5	0.7		0.3	0.5	0.7	
CTB 탄성계수 $(psi)10^6$	1	1.25	1.5		1	1.25	1.5		1	1.25	1.5	
보조기층 (psi) 고정	30cm / 300000 psi				30cm / 300000 psi				30cm / 300000 psi			
노상(최소값) (psi) 고정	7000 psi				7000 psi				7000 psi			

나. 구조해석 결과

<그림 3.3.26>은 투수 아스팔트 두께 5,10,15 cm에 따라 3개 그룹으로 응력분포를 나타내었는데, 투수 CTB 기층 두께가 작고 탄성계수가 클수록 기층 하부에 큰 인장응력이 발생하는 것으로 분석되었다.

기존 콘크리트 슬래브의 휨강도는 재령 28일에 640psi가 기준이나, 응력비 산정을 위한 투수 CTB 기층의 휨강도는 “저수축 시멘트 안정처리 기층 재료개발”에서 제시한 화강암 재령 28일 압축강도를 기준으로 휨강도를 환산한 370psi를 적용하여 응력비 산출하였다. <표 3.3.9>는 콘크리트 포장에서 피로파손 모델의 물성 기준과 이를 변환한 투수 CTB 기층에 타당한 물성 값이다.

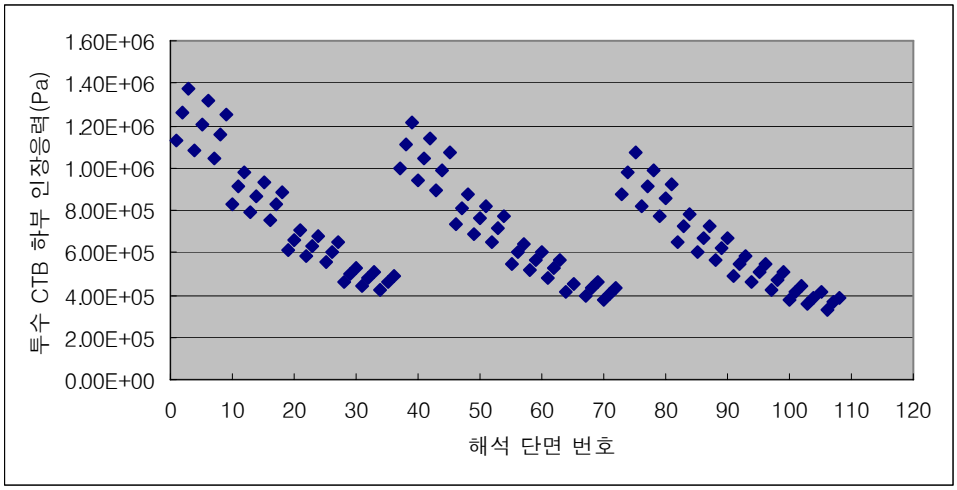
<표 3.3.10>은 108개 단면계획에 대해 FEM 구조해석 결과 각각의 탄성계수와 두께 조합에서 투수 CTB 기층하부의 인장응력이 가장 크게 나타난 단면과 결과 값이다. 투수 아스팔트 표층두께 5cm와 투수 CTB 기층두께 10cm에서는 표층의 탄성계수 범위 내에서 기층의 탄성계수가 1500000 psi인 경우 모두 큰 응력이 발생하였다.

<표 3.3.9> 투수 CTB 기층 휨강도 기준

	콘크리트 슬래브	CTB
28일 재령 압축강도	280kg/㎠	160-180kg/㎠
28일 재령 휨강도 (압축강도의 1/6)	45kg/㎠ / 640psi	26-30kg/㎠ / **370**-420psi

* 강성칠, 2004년, 저수축 시멘트 안정처리기층 개발

* 안지환, 2000년, 콘크리트 포장에서 휨강도 추정을 위한 기초물성 연구



<그림 3.3.26> 108 단면 FEM 구조해석 결과

<표 3.3.10> FEM 해석결과 값

번호	두께(cm)		탄성계수(psi)		CTB인장응력 (psi)	응력비
	투수 표층	CTB	투수 표층	CTB		
1	5	10	300000	1250000	184	0.50
2	5	10	300000	1500000	200	0.54
3	5	10	500000	1250000	175	0.47
4	5	10	500000	1500000	190	0.51
5	5	10	700000	1500000	181	0.49
6	5	15	300000	1500000	142	0.38
7	5	20	300000	1500000	100	0.27
8	5	25	300000	1500000	80	0.22
9	7.5	10	300000	1500000	175	0.47
10	7.5	15	300000	1500000	128	0.35
11	7.5	20	300000	1500000	93	0.25
12	7.5	25	300000	1500000	67	0.18
13	10	10	300000	1500000	160	0.43
14	10	15	300000	1500000	114	0.31
15	10	20	300000	1500000	85	0.23
16	10	25	300000	1500000	64	0.17

*여기서, 응력비 = 응력(계산된 값) / 강도(26 kg/㎠ = 370 psi))

다. 설계수명 추정

FEM 구조해석을 통해 나온 값을 기준으로 본 연구과제의 투수 포장 단면에 대한 설계수명을 피로파손모형을 이용하여 추정하였다. 피로파손 모형은 Darter Model <식 3.3.2>과 최근 “한국형 포장 설계법”에서 제안한 <식 3.3.3>를 이용하여 비교 검토하였다.

$$\log N = 16.61 - 17.61\frac{\sigma}{MR} \qquad \text{<식 3.3.2>}$$

$$\mathrm{Ln}(N_F') = 31.889 - 29.155\left(\frac{\sigma_{max}}{MR_{56}}\right) \qquad \text{<식 3.3.3>}$$

위에서 제시한 피로모델은 콘크리트 슬래브의 응력비에 대한 최대 허용 하중 재하회수를 산정하는 방법이나, CTB 기층에 대한 피로모델이 개발되어 있지 않기 때문에 잠정적으로 본 설계수명 추정에서는 재령 휨강도(MR)를 변환하여 적용하였다.

투수 포장 단면의 설계수명을 추정하기 위한 설계 교통량은 고속도로와 일반국도로 분류하여 누적 등가 축 하중 교통량(ESAL)을 이용하였다. 고속도로 설계 교통량은 <표 3.3.11>과 같이“시험도로 포장 단면에 관한 연구”에서 중부내륙고속도로의 장래 교통량 추정 자료를 이용하였으며 일반국도의 경우는 전체 AADT가 큰 구간과 중차량 비율이 높은 구간 중 누적 등가 축 하중 교통량이 큰 국도 48호선의 2002년 AADT를 기준으로 교통량 증가율을 선형적으로 5% 증가로 가정하여 <표 3.3.10>과 같이 산정하였다.

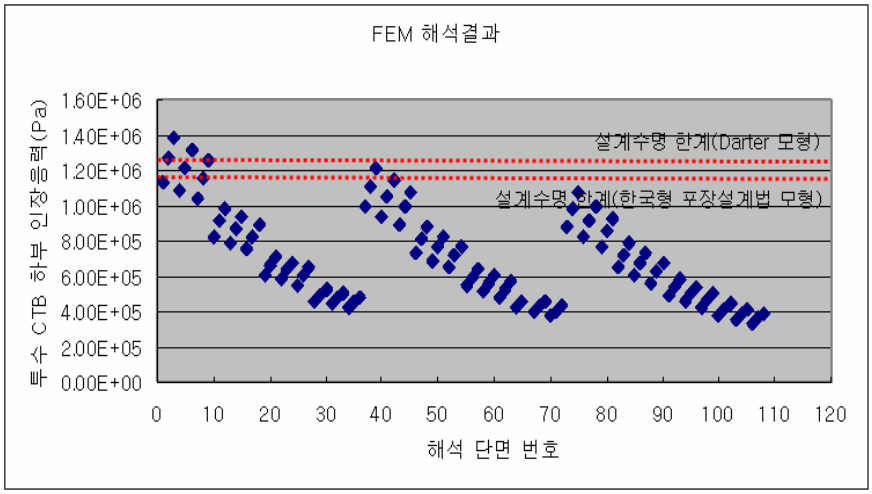
<식 3.3.2>에서 제안한 피로모델을 이용하여 설계수명을 추정한 결과 <그림 3.3.27>과 같이 3개 단면이 설계수명을 만족하지 못했고, <식 3.3.3>를 이용하여 추정한 결과 6개 단면이 20년 설계수명을 만족하지 못한 것으로 나타났다. 이를 이용하여 설계수명을 만족하는 범위 내에서 동일한 응력을 나타내는 단면의 두께와 탄성계수를 변화시켜 단면설계에 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

<표 3.3.11> 고속도로 및 일반국도의 설계 누적 등가 축 하중 교통량

	AADT	ESAL(10^6)	누적등가 교통량(10^6)	중방향 계수	차로계수	교통량 증가율
시공년도	38,001	3.4	3.4	0.8	0.5	5%
설계수명 (20년)	63,717	4.9	88.9			

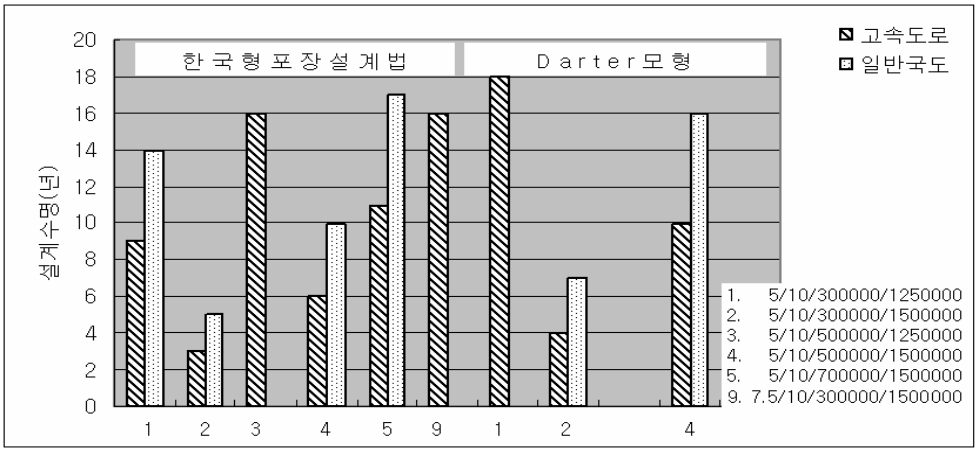
	AADT	ESAL(10^6)	누적등가 교통량(10^6)	중방향 계수	차로계수	교통량 증가율
초기	38,636	1.7	1.7	0.8	0.5	5%
설계수명 (20년)	76,500	3.5	57.9			

* ESALF 산정 : “도로포장공학”, 구미서관 참조



<그림 3.3.27> 피로모형을 통한 설계수명 한계 인장응력

<그림 3.3.28>은 <그림 3.3.27>에서 분석한 설계수명을 만족하지 못하는 6개의 단면에 대한 세부적인 설계수명을 추정한 것이다. 고속도로와 일반국도로 분류하여 추정하였으며, X축의 번호는 <표 3.3.7>에 제시한 단면번호를 나타낸 것이다. 투수 아스팔트 표층이 5cm인 경우 투수 CTB 기층의 두께가 최소한 10cm를 초과해야 설계수명에 만족하는 것으로 나타났다. 또한 투수 CTB의 탄성계수를 1500000 psi로 가정한 단면에 대해서는 투수 아스팔트 표층의 탄성계수에 관계없이 설계수명에 미치지 않았다. <식 3.3.3>의 “한국형 포장설계법”에서 제안한 피로모델에서



<그림 3.3.28> 투수 포장 설계수명 추정

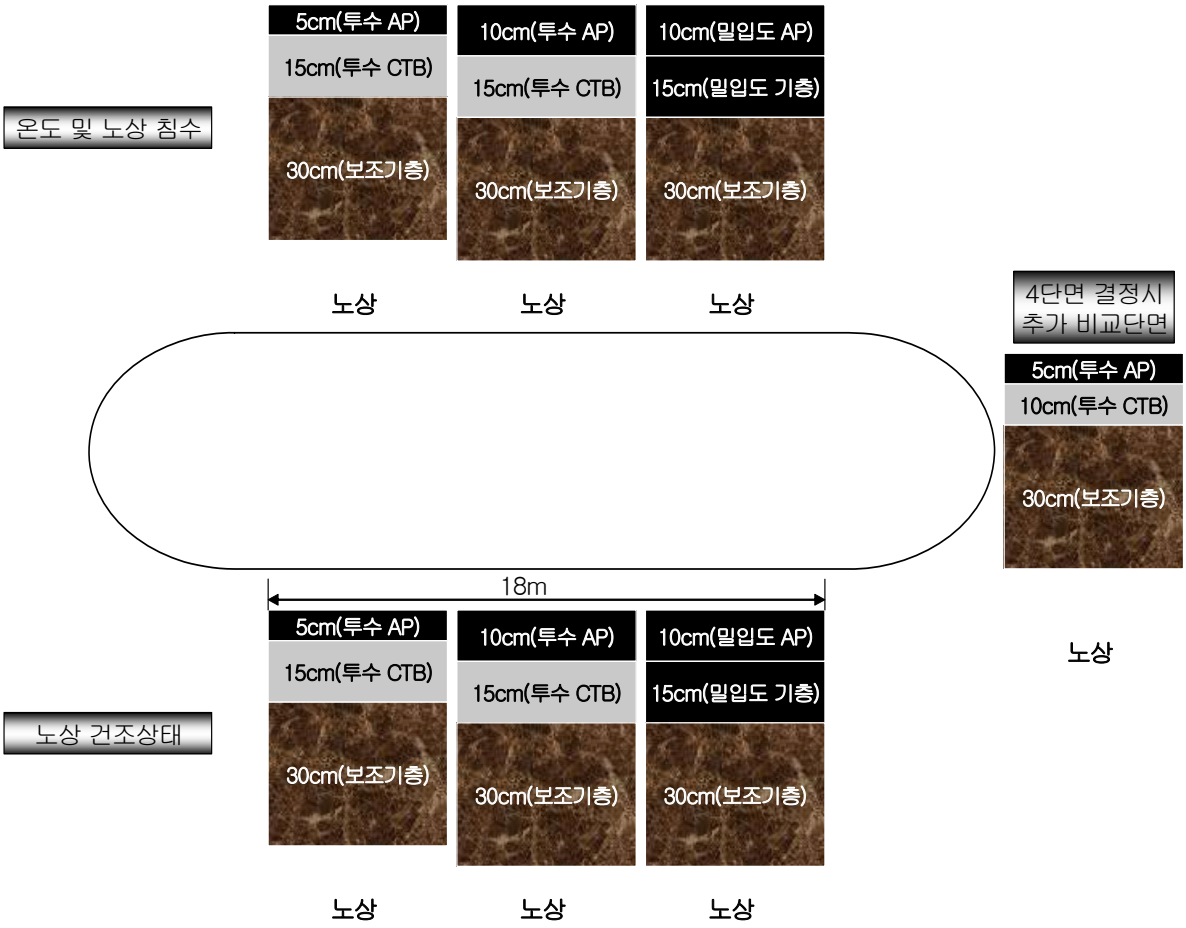
는 투수 아스팔트 표층 7.5cm, 투수 CTB 기층 10cm인 경우에도 고속도로 교통량에서는 설계수명을 만족하지 않았다.

라. 최적 단면 제시

본 연구과제의 투수 포장 단면설계 과정에서 민감도 분석을 통한 변수선정, FEM 구조해석을 통한 응력산출, 피로 파손모형을 이용한 설계수명을 추정한 결과 투수 CTB 기층의 두께는 최소한 10cm를 초과하여 계획하고, 탄성계수는 1250000 psi를 넘지 않는 범위에서 정의하는 것이 타당할 것으로 판단되었다. 투수 아스팔트 표층의 두께는 고속도로와 일반국도의 교통량 차이와 시공성을 고려했을 때 5cm와 10cm로 결정하는 것이 합리적인 것으로 판단된다. 그러나, 이러한 결과는 여러 가지 가정을 도입한 FEM 구조해석 결과로서 향후 실내 포장 가속 시험기를 이용해 단기 공용성을 파악하고 시험시공을 통해 검증하고자 한다. <표 3.3.12>는 4S 포장 실험 단면을 제안한 것이다.

<표 3.3.12> 4S 포장 실험 단면 제안

<table>
<tr><th rowspan="2"></th><th colspan="2">최적단면(두께)</th><th rowspan="2">비교단면(두께)</th></tr>
<tr><th>고속도로</th><th>일반국도</th></tr>
<tr><td rowspan="2">3개 단면일 경우</td><td>투수 아스팔트
: 10cm</td><td>투수 아스팔트
: 5cm</td><td>밀입도 아스팔트
: 10cm</td></tr>
<tr><td>투수 CTB 기층
: 15cm</td><td>투수 CTB 기층
: 15cm</td><td>아스팔트 기층
: 15cm</td></tr>
<tr><td rowspan="3">4개 단면일 경우</td><td rowspan="2">투수 아스팔트
: 10cm</td><td rowspan="2">투수 아스팔트
: 5cm</td><td>밀입도 아스팔트
: 10cm</td></tr>
<tr><td>아스팔트 기층
: 15cm</td></tr>
<tr><td>투수 CTB 기층
: 15cm</td><td>투수 CTB 기층
: 15cm</td><td>투수 아스팔트 : 5cm
투수 CTB 기층 : 10cm</td></tr>
<tr><td>최적단면 결정기준</td><td colspan="3">1. 현장 시공성 고려
2. 도로 등급별 교통량 고려
3. 투수 CTB 기층 두께를 10cm 초과 적용
4. 투수 CTB 기층 탄성계수를 1250000 psi이하로 적용
5. 비교단면은 최근 일반국도 설계 단면을 참고</td></tr>
</table>



<그림 3.3.29> 실내 포장 가속 시험(KALES) 구간 단면 배치도

<그림 3.3.29>는 시험구간에서 선정 단면에 따른 단면 배치도를 나타낸 것이다.

5. 온도 및 하중에 의한 반사균열 확인

4S 포장의 기본은 투수 CTB 위에 투수 아스팔트 포장을 포설하는 것이다. 이러한 포장 시스템에서 구조적으로 가장 문제가 되는 것은 기층의 균열로 인한 반사균열의 진전이다. 본 연구에서는 반사균열의 구조해석 모형을 개발하여 이에 대한 타당성을 검증하였다. 기본 물성은 앞에서 살펴본 물성을 이용하였으며 투수 CTB에 완전 균열이 진전된 것으로 가정하여 해석을 수행하였다. 또한 교통하중과 더불어 포장체의 거동에 영향을 주는 인자로 환경하중, 즉 포장층의 상하부 온도차에 따른 응력 발생 정도를 해석하기 위해 모형에 이를 고려할 수 있도록 조정하여 요

소망을 재설정하였다.

온도의 영향을 고려하기 위해서 한국형 포장 설계법 개발의 현장 검증을 목표로 건설된 중부내륙 고속도로내 시험도로 데이터 중 콘크리트 포장 구간의 것을 이용하였다. 시험도로의 콘크리트 포장은 표층 25cm, 30cm, 35cm 로 건설되었으며 계측된 데이터는 2003년 10월에 표층 30, 25cm 구간에서 측정한 것으로 <표 3.3.13>과 같다. 온도 데이터는 실제 4S 포장과 동일한 단면 두께에서 측정한 것이 아니라 표층에 국한되어 시간에 따라 측정된 것이다. 산정한 온도차는 표층의 경우 표층 상부온도에서 표층 10cm 의 온도를 뺀 값이며, 기층의 경우 표층 10cm 에서의 온도를 25cm 의 위치의 온도로 뺀 값이다. 표에서 나타난 온도는 상부 온도에서 하부의 온도를 뺀 값을 의미한다. 즉 (+) 기호는 상부의 온도가 하부의 온도보다 더 높은 것을, (-) 기호는 하부의 온도가 상부의 온도보다 더 높은 것을 나타낸다.

하지만 이 자료를 근거로 실제 포장체가 얼마만큼의 온도차가 발생하며 이에 따른 영향을 고려할 수 있다. 표에서 알 수 있듯이 표층 상부의 온도 변화가 하부의 온도변화보다 더 크게 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 4S 구조해석에서는 이를 고려하여 각 층의 온도 구배의 변화 크기를 가정하였으며 포장체의 온도를 실제보다 더 극한 상황으로 설정하여 해석에 사용하였다.

<표 3.3.13> 중부내륙 고속도로내 시험도로의 콘크리트 포장 구간에서의 깊이별 온도차

(2003년 10 월말)

두께 30cm	표층 (10)	기층 (15)	두께 30cm	표층 (10)	기층 (15)	두께 30cm	표층 (10)	기층 (15)	두께 25cm	표층 (10)	기층 (15)
0:00	-1.7	-1.08	0:00	-1.74	-1.14	0:00	-2.427	-1.76	0:00	-0.775	-1.156
1:00	-2.29	-1.24	1:00	-2.02	-1.27	1:00	-2.515	-1.929	1:00	-0.83	-1.203
2:00	-1.89	-1.47	2:00	-1.83	-1.37	2:00	-2.552	-2.067	2:00	-1.499	-1.148
3:00	-1.73	-1.48	3:00	-1.57	-1.61	3:00	-2.616	-2.121	3:00	-1.39	-1.233
4:00	-1.57	-1.43	4:00	-1.52	-1.47	4:00	-2.652	-2.234	4:00	-1.249	-1.426
5:00	-1.46	-1.51	5:00	-1.52	-1.51	5:00	-2.548	-2.375	5:00	-1.192	-1.263
6:00	-1.68	-1.54	6:00	-1.87	-1.48	6:00	-2.555	-2.412	6:00	-1.082	-1.291
7:00	-2.03	-1.7	7:00	-2.09	-1.77	7:00	-2.705	-2.473	7:00	-0.998	-1.345
8:00	-1.77	-1.8	8:00	-1.76	-1.81	8:00	-2.255	-2.503	8:00	-0.887	-1.428
9:00	-0.11	-1.69	9:00	0	-1.69	9:00	-1.744	-2.369	9:00	-0.663	-1.288
10:00	1.32	-1.06	10:00	1.53	-1.08	10:00	-0.979	-2.174	10:00	0.962	-1.258
11:00	3.75	-0.02	11:00	4.41	-0.19	11:00	0	-1.733	11:00	2.178	-1.118
12:00	4.97	1.29	12:00	5.67	1.06	12:00	1.263	-1.208	12:00	3.873	-0.823
13:00	5.72	2.47	13:00	6.45	2.15	13:00	2.11	-0.19	13:00	4.502	-0.652
14:00	5.26	3.3	14:00	5.81	2.98	14:00	2.21	0.33	14:00	5.05	-0.03
15:00	4.58	3.58	15:00	4.5	3.37	15:00	1.8	0.54	15:00	4.67	0.27
16:00	2.54	3.47	16:00	2.38	3.11	16:00	1.5	0.68	16:00	3.86	0.52
17:00	0.57	2.85	17:00	0.31	2.43	17:00	0.4	0.54	17:00	3.22	0.62
18:00	-0.71	1.89	18:00	-0.89	1.57	18:00	-0.32	0.22	18:00	2.62	0.73
19:00	-1.36	1.02	19:00	-1.44	0.81	19:00	-0.62	-0.11	19:00	1.98	0.76
20:00	-1.6	0.36	20:00	-1.73	0.18	20:00	-0.84	-0.38	20:00	1.83	0.78
21:00	-1.7	-0.16	21:00	-1.78	-0.23	21:00	-0.84	-0.6	21:00	1.07	0.73
22:00	-1.87	-0.55	22:00	-2.02	-0.6	22:00	-0.81	-0.71	22:00	1.35	0.7
23:00	-2.05	-0.87	23:00	-2.14	-0.89	23:00	-0.76	-0.76	23:00	0.83	0.62

4S 포장의 반사균열 해석에서 고려한 것은 온도 하중과 함께 공용 년수가 늘어갈수록 포장체의 탄성계수 감소한다는 점이다. 이와 같은 이론은 미국에서 개념적으로 정리중에 있는 것으로써 차량 및 환경 하중에 의해서 포장체가 손상을 받으면 그로 인해 포장의 강성이 작아져 발생되는 응력이나 변형률도 달라지게 된다는 것이다. 이러한 점을 고려하기 위해서 온도차이와 함께 투수 AP 와 투수 CTB 층의 물성을 <표 3.3.14>, <표 3.3.15>와 같이 변화시켜가며 거동을 살펴보았다.

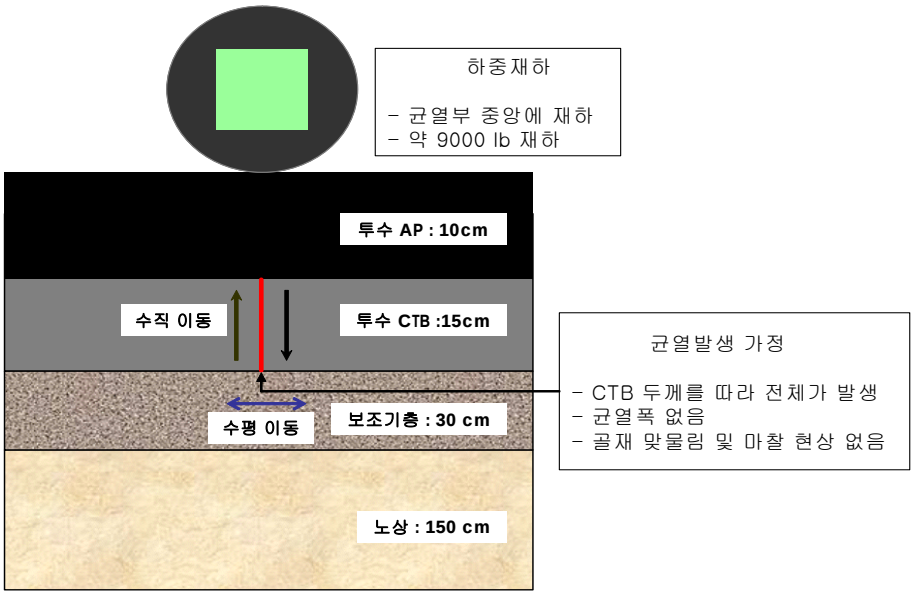
<표 3.3.14> 4S 포장의 반사균열 모형에 사용된 표층 및 기층의 온도차

구분	상하부 온도차 △T (℃)				
	- 10	- 5	0	+ 5	+ 10
투수 AP	- 6	- 3	0	+ 3	+ 6
투수 CTB	- 4	- 2	0	+ 2	+ 4

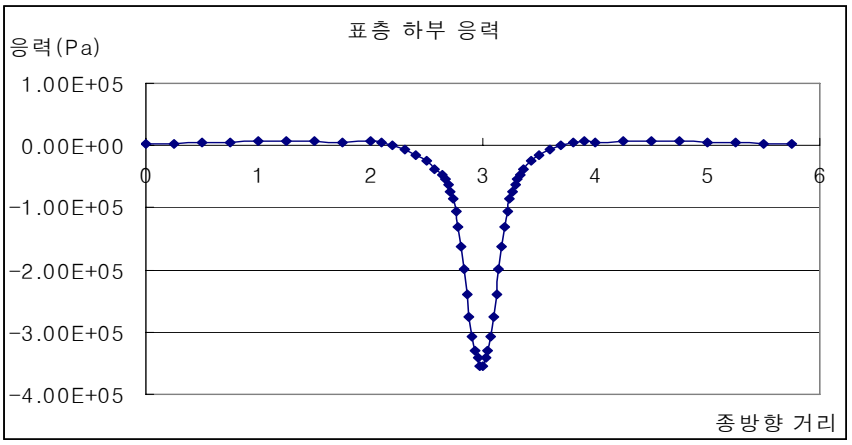
<표 3.3.15> 4S 포장의 반사균열 모형에 사용된 표층 및 기층의 탄성계수 변화

구분	탄성계수 변화 (Pa)				
	140 %	120 %	100 %	80 %	60 %
투수 AP	2.8958 E09	2.4821 E09	2.0684 E09	1.65472 E09	1.24104 E09
투수 CTB	9.6527 E09	8.2738 E09	6.8948 E09	5.5152 E09	4.1364 E09

다음 <그림 3.3.30>은 반사 균열이 진전되는 원리를 설명한 그림이다. 기층의 균열부에 지속적인 반복하중으로 전단력과 휨응력이 발생하여 이로 인해 하부 기층이 상부로 진전되는 것을 설명하는 그림이다. 본 연구에서도 투수 CTB 에 깊이에 따라 완전 균열이 발생한 것으로 가정하고 하중은 중앙부에 재하되는 것으로 모형화하였다. 최대 응력 및 변형률은 반사균열이 존재하는 표층의 중앙 하부에서 발생하였다. 해석 결과 <그림 3.3.31> 같이 균열을 따라 횡방향 인장응력이 발생하였다.



<그림 3.3.30> 반사균열 발생 모식도

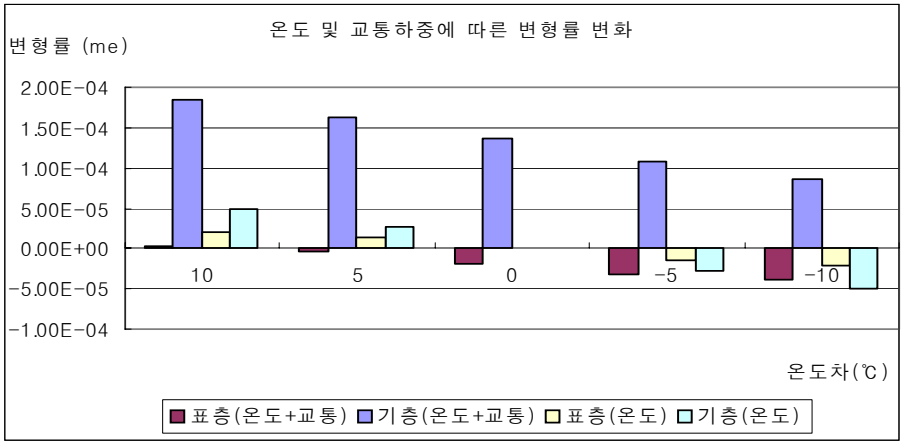


<그림 3.3.31> 반사균열 발생 원인 (종방향 거리에 따른 응력분포)

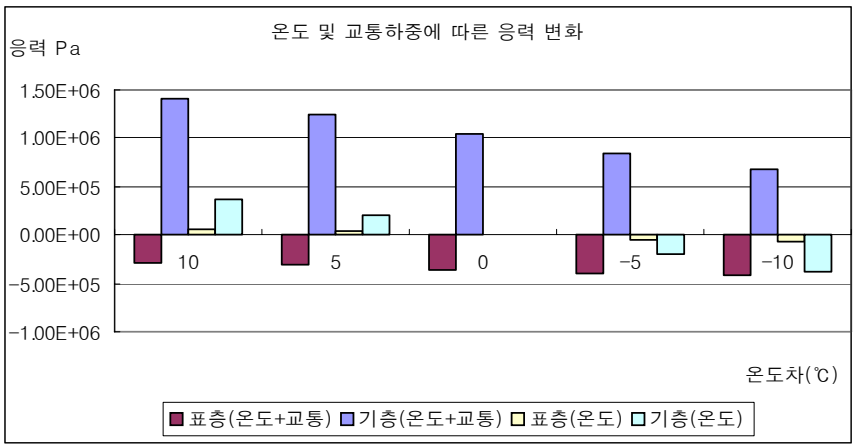
온도에 따른 해석 결과를 정리하면 <그림 3.3.32>, <그림 3.3.33>과 같다. 해석결과 모형의 중앙부에서 최대 거동(응력 & 변형률)이 나타났다. 투수 AP 하부에서는 CTB 균열 발생 부분 바로 그 위치, CTB는 그 층의 가장 하부의 균열부이다.

결과에서 보듯이 깊이에 따른 온도차가 '0' 일 경우 교통하중만이 재하된 경우이며 이 결과를 표층 및 기층의 온도만을 해석한 결과 중 표층 하부의 인장변형률을 비교할 경우, 4S 포장의 거동에 영향을 미치는 요인으로 온도차에 의한 하중이 교통하중보다 더 큰 것으로 나타났다.

또한 투수 AP 포장의 피로 파괴를 일으키는 인장변형률은 (+) 온도차가 발생하였을 때, 기층의 인장응력은 (+) 온도차와 교통하중이 함께 작용할 경우 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다.



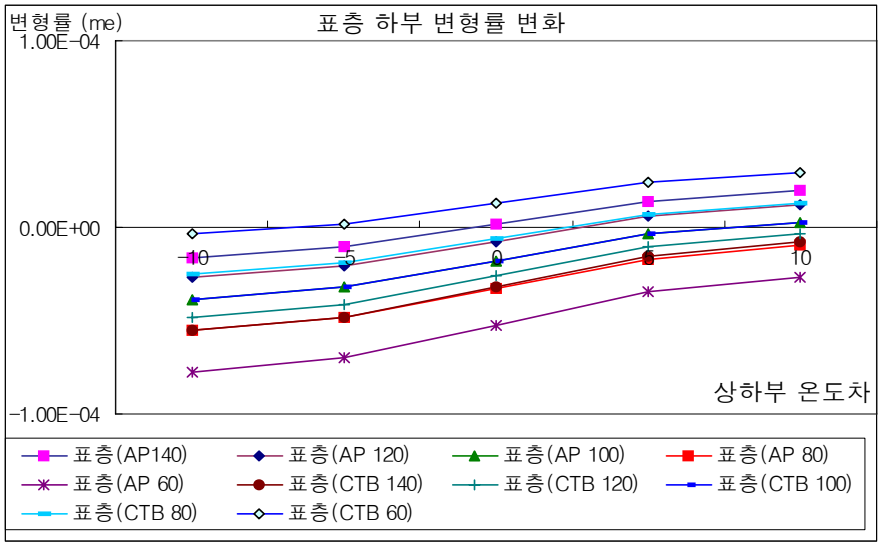
<그림 3.3.32> 온도 변화를 고려한 4S 반사균열 모형의 해석 결과 (변형률)



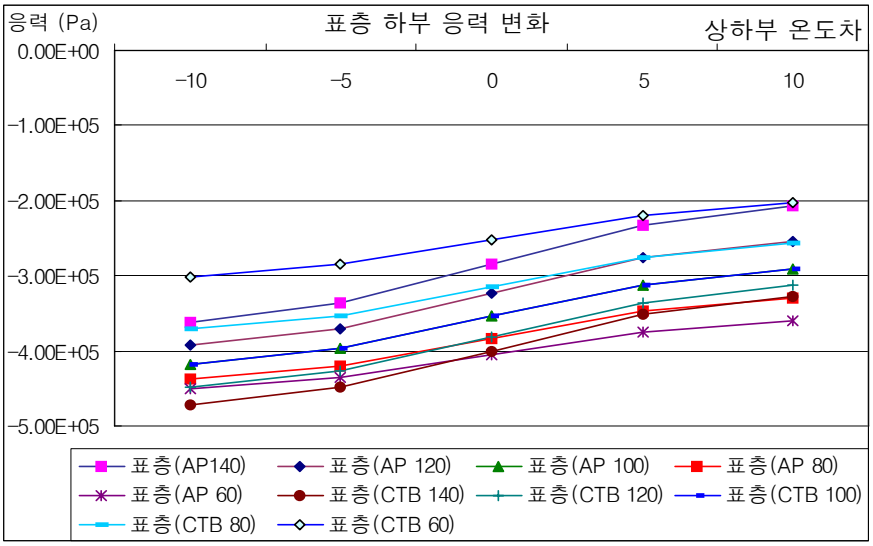
<그림 3.3.33> 온도 변화를 고려한 4S 반사균열 모형의 해석 결과 (응력)

투수 CTB 포장의 하부에서는 (+) 온도차와 교통하중이 재하되었을 경우 균열이 발생한 CTB 끝단에서 크게 발생하였으며 이는 CTB 균열 단부의 구조적인 2차 파손을 유발할 수 있는 것으로 판단된다.

다음은 투수 AP 및 투수 CTB의 탄성계수 감소에 따른 거동을 살펴보았다. <그림 3.3.34>, <그림 3.3.35>는 그 해석 결과를 정리한 결과이다. <그림 3.3.34>, <그림 3.3.35>에서 알 수 있듯이 투수 AP의 탄성계수가 증가할수록, 투수 CTB의 탄



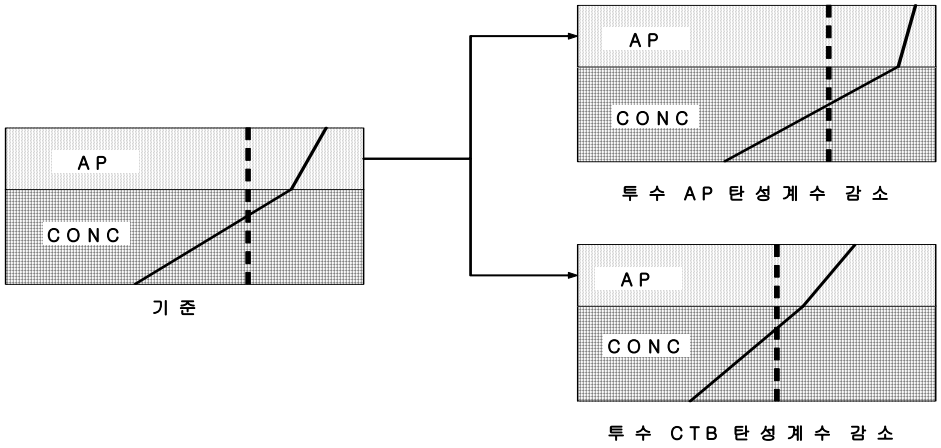
<그림 3.3.34> 탄성계수 감소를 고려한 4S 반사균열 해석 결과 (투수 AP 변형률)



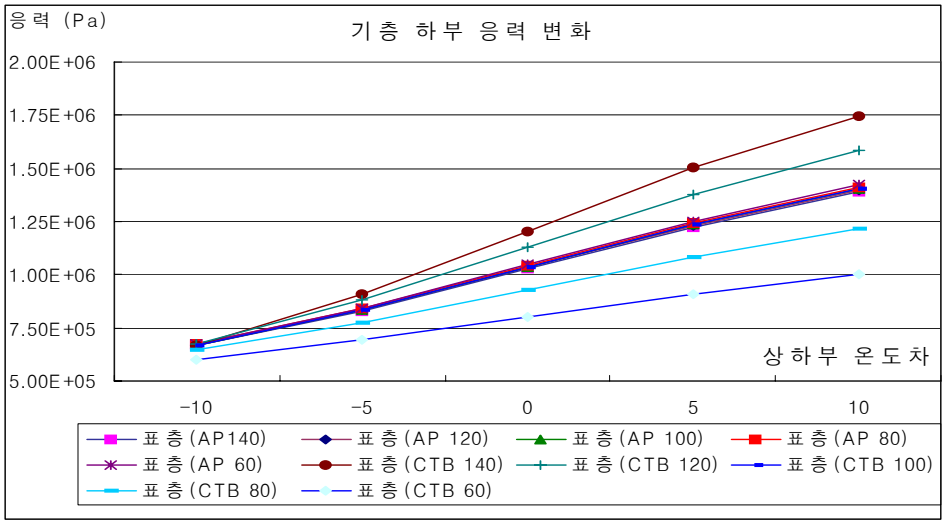
<그림 3.3.35> 탄성계수 감소를 고려한 4S 반사균열 해석 결과 (투수 AP 응력)

성계수가 감소할수록 표층 하부에서 발생하는 변형률 및 응력은 더 크게 나타났다.

이러한 결과의 원인은 먼저 투수 AP 탄성계수가 감소시 투수 CTB의 탄성계수에 영향이 더 지배적이게 된다. 즉, 기준 상태보다 투수 CTB 상부에 더 압축응력이 증가하게 되고 이로 인해 투수 AP 하부에 압축응력이 더 커지게 된다. 반면 투수 CTB의 탄성계수가 감소할 경우 투수 AP의 영향이 더 커지게 되고 이로 인해 표준보다 투수 AP 축에서 대칭을 이루기 위해 투수 AP 하부의 인장 응력 및 변형 점점 작아지게 된다. 이러한 영향으로 인해서 <그림 3.3.36>과 같은 결과가 도출된 것으로 판단된다.



<그림 3.3.36> 탄성계수 감소 따른 거동 원인



<그림 3.3.37> 탄성계수 감소를 고려한 4S 반사균열 해석 결과 (투수 CTB 응력)

또한 기준(100)에서 120%로 증가되었을 때의 변화폭 보다 100%에서 80%, 그리고 80%에서 60%로 감소할 때 그 변화폭이 점점 커짐을 확인할 수 있었다. 즉 이는 누적 손상으로 인해서 탄성계수가 감소 시, 건설 초기보다 공용 후 시간이 지남에 따라 동일 기간동안에서 후자일 경우가 포장의 파손이 더 심각하게 발생함을 알 수 있다. 온도차에 의한 영향은 일정하지만 상대적으로 공용 연수에 따른 탄성계수 감소에 의한 변화폭의 증가로 인해 감소하는 경향을 확인하였다.

탄성계수 감소에 따른 투수 CTB 하부의 균열부에서 발생하는 응력은 <그림 3.3.37>과 같다. 투수 AP 의 탄성계수의 변화는 투수 CTB 하부의 응력에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 반면 투수 CTB 의 탄성계수 감소는 앞에서 살펴본 바와 같이 CTB 하부의 발생 인장응력을 감소시키는 것으로 났다. 따라서 이러한 점을 고려하였을 CTB 의 건설시 품질관리의 향상으로 탄성계수의 감소를 최소화 하여야 할 것으로 판단된다.

6. FWD 데이터와의 비교 분석

가. 민감도 분석

FWD와의 비교를 위하여 9000lb의 하중이 재하될 때의 처짐에 대한 민감도 분석

을 실시하였다. 민감도 분석은 노상, 보조기층, 기층, 표층에 대하여 각각 민감도 분석을 수행하였다.

유한요소 해석을 할 경우 밀도를 정의하게 되면 FWD와 경향이 다른 것으로 나타났기 때문에 유한요소 해석시 밀도는 고려하지 않았다.(중하중 교통 도로의 신속 개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공기술 개발, 2004)

<표 3.3.17>은 모델에 사용된 각층의 기준 물성 값을 나타낸 것이다. 노상의 탄성계수는 DCP로 측정한 값 중 적은 값을 사용하였다. 투수 및 불투수 CTB의 탄성계수는 실내실험을 통하여 실측한 값을 사용하였으며, 포아손비는 문헌고찰을 참고하여 적용하였다.

시험시공 현장에서 FWD 실험을 한 시점의 온도는 0~5도 사이였기 때문에 이에 맞는 아스팔트 동탄성 계수값에 대한 민감도 분석을 하였다. 한국형 포장설계법 1단계 보고서에 따르면 기층용 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 5도일 경우 최적 아스팔트 함량일 때 4,200~6000MPa인 것으로 나타났다. 또한 19mm골재를 사용한 불 투수 표층일 경우 3,500~8,500MPa정도인 것으로 나타났다. (한국형 포장설계법 1단계 보고서) 민감도 분석시의 기준값은 이값 중 중간 값을 선택하여 사용하였다.

<표 3.3.16> 분석시 사용된 각 층의 물성 중간값

구분	두께	탄성계수(MPa)	포아손비
노상	3m	150	0.4
보조기층	20cm	200	0.35
투수 CTB	15cm	15,500	0.15
불투수 CTB	15cm	24,660	0.15
일반BB	15cm	5000	0.35
일반AP	5cm	6000	0.35

나. 하부구조 민감도 분석

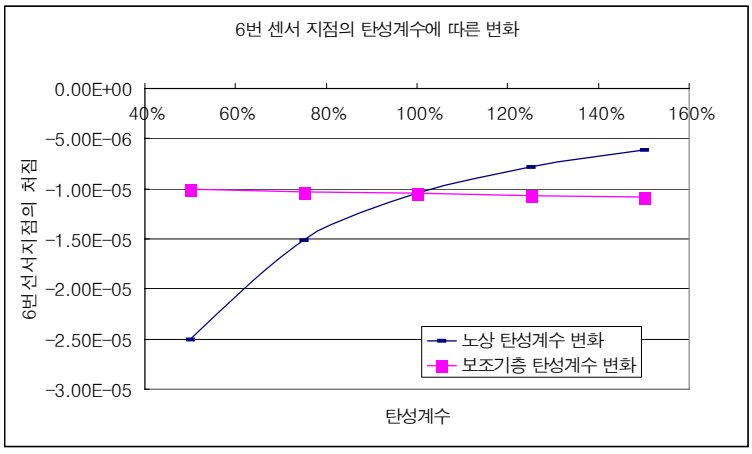
노상과 보조기층의 탄성계수의 변화에 따른 민감도 분석을 실시하였다. 하부구조의 민감도 분석 시 상부구조의 탄성계수는 일반BB층과 일반 AP값으로 고정하였다. <표 3.3.17>와 같이 노상의 민감도 분석에 사용된 탄성계수는 75Mpa~225Mpa 값을 사용하였으며, 보조기층의 경우는 100~300Mpa값을 적용하여 민감도 분석을 실시하였다.

<그림 3.3.38>은 노상 및 보조기층의 변화에 따른 6번센서 지점(하중으로 부터 180cm 떨어진 지점)에 대한 처짐을 보여주고 있다. 노상의 탄성계수가 변할 때는 전체적으로 처짐의 변화가 발생하지만, 보조기층의 탄성계수의 영향은 미비하였다. 이는 연직하중에 따른 연직 하중이 하부로 갈수록 분포가 증가하게 됨에 따라 하중재하지점에서 먼 거리의 처짐의 경우 노상에 대한 영향만을 받기 때문으로 판단된다.

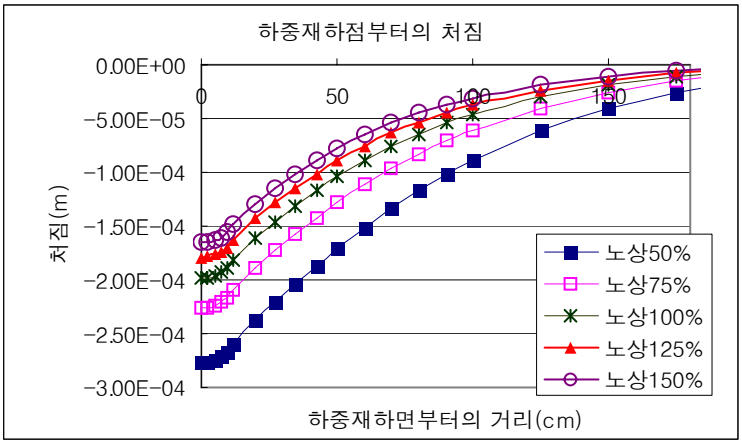
<그림 3.3.39>, <그림 3.3.40>은 노상과 보조기층의 탄성계수가 변할 때 하중 재하지점으로부터의 거리에 따른 처짐값을 나타낸 값이다. 보조기층의 탄성계수의 영향에 비하여 노상의 탄성계수의 영향이 처짐에 더 크게 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 이는 위의 해석 조건에서 노상의 두께가 보조기층에 비해 15배 이상 두껍기 때문으로 판단된다. 공통적으로 2m지점부터는 처짐이 0에 가까워지는데 이는 유한요소해석시 하중 재하면으로부터 3m 떨어진 지점에 경계조건이 설정되어 발생하는 것으로 판단된다.

<표 3.3.17> 하부구조의 민감도 분석을 위한 탄성계수 적용값(단위 : MPa)

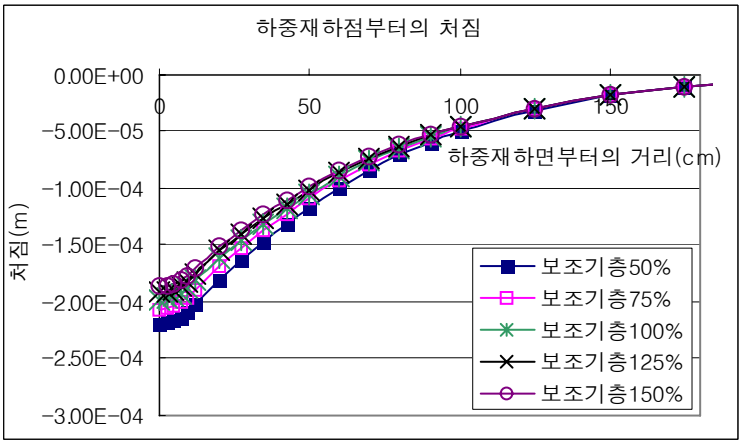
구분	50%	75%	100%	125%	150%
노상	75	112.5	150	187.5	225
보조기층	100	150	200	250	300



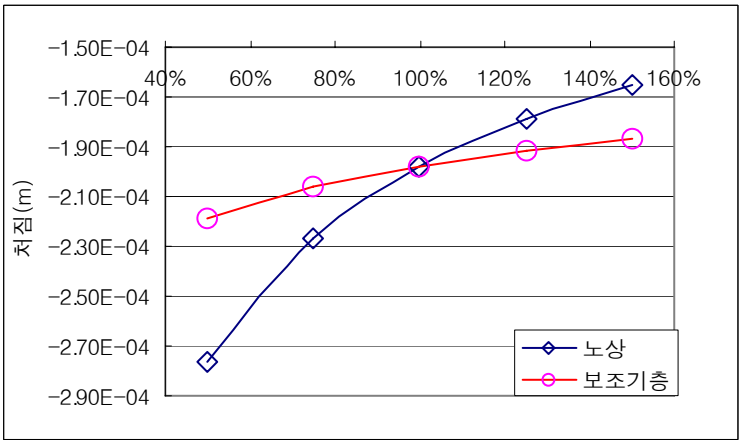
<그림 3.3.38> 노상 및 보조기층의 탄성계수에 따른 6번 센서 지점의 처짐 변화



<그림 3.3.39> 노상 탄성계수변화에 따른 처짐



<그림 3.3.40> 보조기층 탄성계수변화에 따른 처짐



<그림 3.3.41> 노상과 보조기층의 탄성계수의 변화에 따른 처짐값 비교

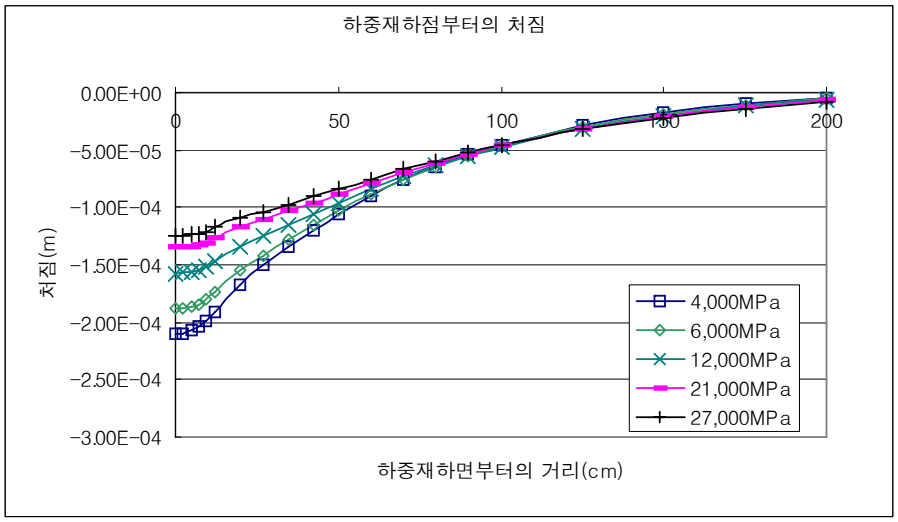
<그림 3.3.41>은 하중재하지점의 처짐값을 노상과 보조기층의 변화에 따라서 나

타낸 그래프이다. 보조기층의 탄성계수가 1.5배 증가하는 것보다 노상의 탄성계수가 1.25배 증가하는 것이 더 처짐이 적어진다는 것을 알 수 있다.

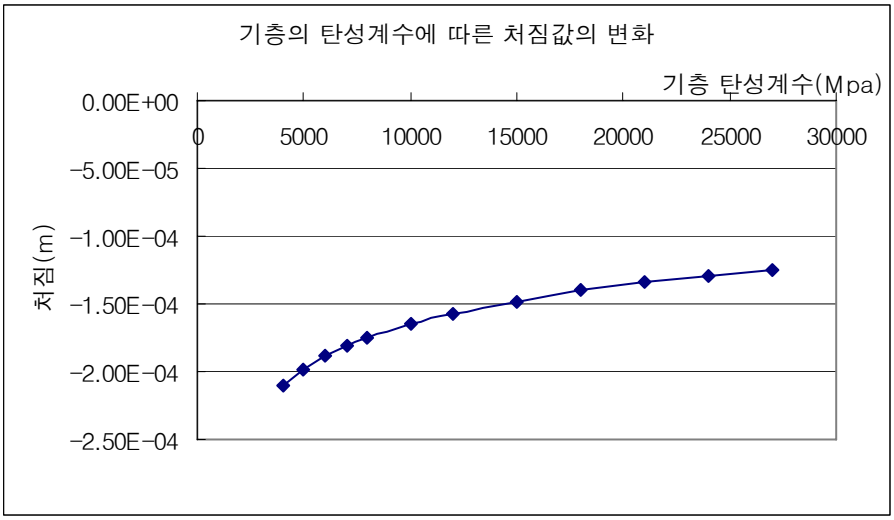
다. 기층에 관한 민감도 분석

기층의 탄성계수는 일반 BB층일때 4000Mpa부터 불투수 CTB층을 사용하였을 때, 24660Mpa까지 다양하므로 넓은 범위에 있어서의 기층의 탄성계수에 대한 민감도 분석을 실시하였다. 노상과 보조기층의 탄성계수는 각각 150Mpa과 200Mpa로 표층은 6,000MPa로 고정하였다. 기층의 탄성계수가 4,000MPa~30,000MPa로 변할 때에 대하여 민감도 분석을 실시하였다.

<그림 3.3.42>은 기층의 탄성계수가 변할 때 하중으로부터의 거리에 따른 처짐값을 나타낸 값이다. 재하지점으로부터 약 90cm이후에 대한 처짐값은 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 즉 기층의 변화는 FWD의 3번 센서지점 이후의 처짐의 변화에는 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.



<그림 3.3.42> 기층의 탄성계수의 변화에 따른 처짐



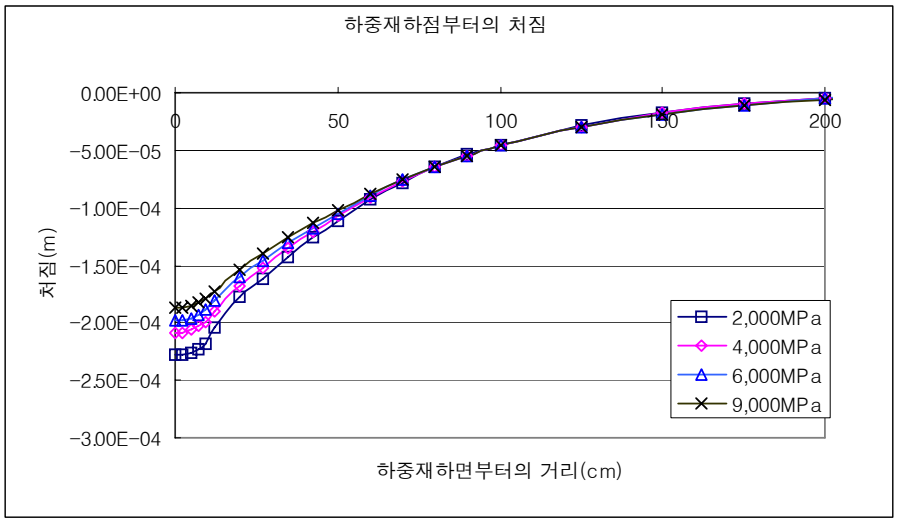
<그림 3.3.43> 기층의 탄성계수에 따른 하중 재하지점 처짐값의 변화

<그림 3.3.43>는 기층의 탄성계수가 변화되었을 때 하중재하지점의 처짐값을 나타낸 값이다. 기층의 탄성계수가 비교적 작은 범위인 10,000Mpa이하에 있을 때가 10,000Mpa이상일 경우보다 더 민감하게 나타남을 알 수 있다. 즉, 기층의 탄성계수를 10,000MPa이상 확보 할 때에는 표층의 처짐의 방지에 매우 효과적인 것으로 나타났다.

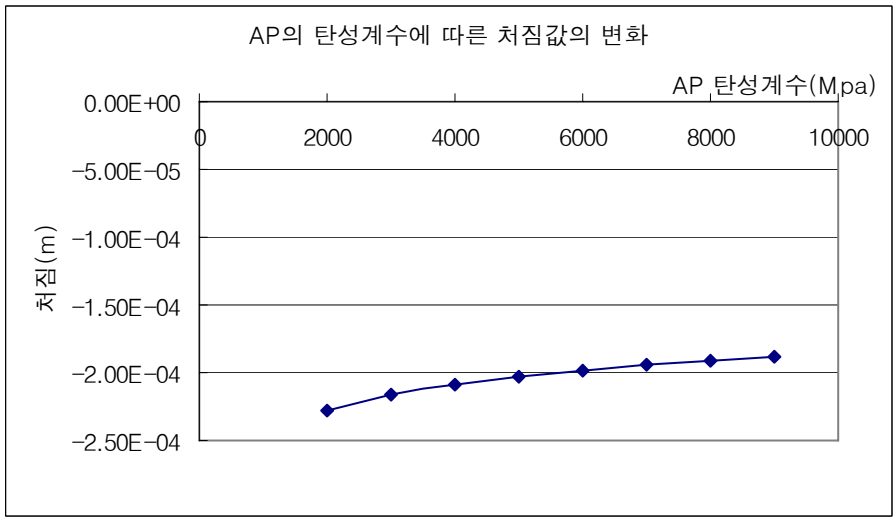
라. 표층에 관한 민감도 분석

아스팔트 포장의 경우 온도에 따라 탄성계수 값이 변한다. 아스팔트 혼합물의 동탄성계수는 0~5도에 19mm골재를 사용한 표층일 경우 5,298~7,536MPa인 것으로 나타났다. 포러스 아스팔트의 경우 공극의 영향으로 인하여 이보다 더 적은 탄성계수를 가질 것으로 추정된다. 때문에 2000MPa~9000MPa사이의 민감도 분석을 실시하였다.

<그림 3.3.44>은 하중 재하 지점부터 거리에 따른 처짐형상이다. 다른 층에 비하여 탄성계수의 변화에 따른 처짐의 변화는 적은 것으로 나타났으며 약 60cm이후에 대한 처짐은 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.



<그림 3.3.44> 표층의 탄성계수의 변화에 따른 처짐



<그림 3.3.45> 표층의 탄성계수에 따른 하중 재하지점 처짐값의 변화

<그림 3.3.45>는 AP의 탄성계수에 따른 처짐값의 변화를 나타내고 있다. 다른 하부층보다 처짐에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타났다. 탄성계수가 5배정도 커져도 처짐값은 큰 변화가 없는 것으로 나타났다. 이는 포장층이 다른 층에 비하여 얇기 때문으로 판단된다.

마. 회귀식 도출

민감도 분석결과 노상, 보조기층, 기층, 표층의 순으로 탄성계수에 따른 처짐의 영향이 큰 것으로 나타났다.

<표 3.3.17>는 앞에서 분석한 30가지 경우를 종합한 값이다. 엑셀 프로그램을 이용하여 회귀분석을 실시하였다. <표 3.3.18>는 회귀분석을 선형, 로그, 분수형태에 대하여 각각 적용한 결과에 대한 값이다. 다중 상관계수를 분석한 결과 로그식의 형태일 때 가장 잘 일치하는 것으로 나타났다. 처짐을 예측하는 식으로 로그형태의 회귀식을 사용하였다.

<표 3.3.18> 탄성계수에 대한 하중재하지점 구조해석 처짐값

구분	노상탄성계수(MPa)	보조기층탄성계수(MPa)	기층탄성계수(MPa)	표층탄성계수(MPa)	구조해석 처짐값(m)	회귀식 처짐(m)
1	75	200	5000	6000	-2.77E-04	-2.70E-04
2	112.5	200	5000	6000	-2.27E-04	-2.28E-04
3	150	200	5000	6000	-1.98E-04	-1.99E-04
4	187.5	200	5000	6000	-1.79E-04	-1.76E-04
5	225	200	5000	6000	-1.65E-04	-1.57E-04
6	150	100	5000	6000	-2.19E-04	-2.19E-04
7	150	150	5000	6000	-2.06E-04	-2.07E-04
8	150	200	5000	6000	-1.98E-04	-1.99E-04
9	150	250	5000	6000	-1.92E-04	-1.92E-04
10	150	300	5000	6000	-1.87E-04	-1.87E-04
11	150	200	4000	6000	-2.10E-04	-2.09E-04
12	150	200	5000	6000	-1.98E-04	-1.99E-04
13	150	200	6000	6000	-1.89E-04	-1.91E-04
14	150	200	7000	6000	-1.81E-04	-1.84E-04
15	150	200	8000	6000	-1.75E-04	-1.77E-04
16	150	200	10000	6000	-1.65E-04	-1.67E-04
17	150	200	12000	6000	-1.57E-04	-1.59E-04
18	150	200	15000	6000	-1.48E-04	-1.49E-04
19	150	200	18000	6000	-1.40E-04	-1.41E-04
20	150	200	21000	6000	-1.34E-04	-1.34E-04
21	150	200	24000	6000	-1.29E-04	-1.28E-04
22	150	200	27000	6000	-1.24E-04	-1.22E-04
23	150	200	5000	2000	-2.28E-04	-2.28E-04
24	150	200	5000	3000	-2.17E-04	-2.17E-04
25	150	200	5000	4000	-2.09E-04	-2.10E-04
26	150	200	5000	5000	-2.03E-04	-2.04E-04
27	150	200	5000	6000	-1.98E-04	-1.99E-04
28	150	200	5000	7000	-1.94E-04	-1.95E-04
29	150	200	5000	8000	-1.90E-04	-1.91E-04
30	150	200	5000	9000	-1.88E-04	-1.88E-04

<표 3.3.19> 회귀식 다중 상관계수의 비교

구분	함수식	다중 상관계수
선형식	$\delta=a\times E_1+b\times E_2+c\times E_3+d\times E_4+e$	0.9639
로그식	$\delta=a\times\ln(E_1)+b\times\ln(E_2)+c\times\ln(E_3)+d\times\ln(E_4)+e$	0.9974
분수식	$\delta=a/E_1+b/E_2+c/E_3+d/E_4+e$	0.9922

여기서, δ : 하중재하지점 처짐(m)

E1 : 노상 탄성계수(MPa)

E2 : 보조기층 탄성계수(MPa)

E3 : 기층 탄성계수(MPa)

E4 : 표층 탄성계수(MPa)

a, b, c, d, e : 처짐값을 구하기 위한 파라메터

회귀분석의 결과를 바탕으로 <식 3.3.4>과 같은 하중재하지점 처짐에 대한 회귀식을 제안한다.

δ = 0.00010269 × ln(E1) + 0.00002918 × ln(E2) + 0.00004545 × ln(E3) + 0.000026501 × ln(E4) (식 3.3.4)

여기서 δ : 하중재하지점 처짐(m)

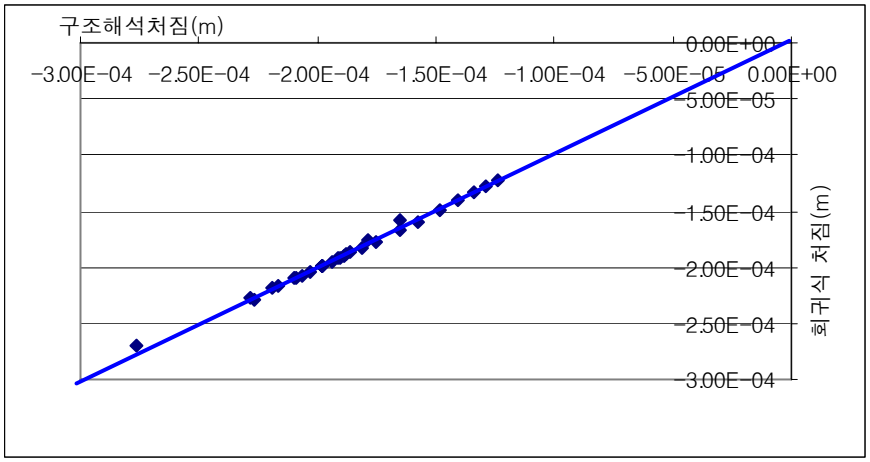
E1 : 노상 탄성계수(MPa)

E2 : 보조기층 탄성계수(MPa)

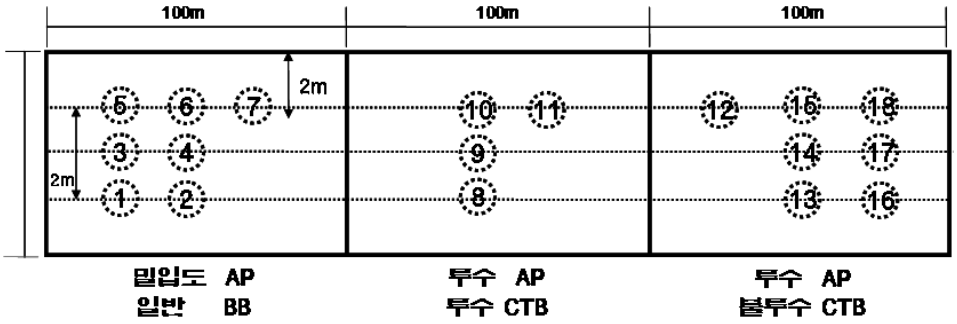
E3 : 기층 탄성계수(MPa)

E4 : 표층 탄성계수(MPa)

<그림 3.3.46>과 같이 비교적 구조해석 결과로 해석한 값과 처짐 예측 값이 잘 맞는 것을 알 수 있다. 이 식은 FWD결과로 인한 탄성계수 값을 추정할 때 사용할 수 있다.



<그림 3.3.46> 구조해석 처짐 결과와 회귀식 처짐 결과의 비교



<그림 3.3.47> 물성치 추정을 위한 1차 시험시공에서의 FWD 측정 지점

바. FWD 결과를 이용한 물성치 추정

김천 시험시공에서는 총 18개의 장소에서 FWD 시험을 실시하였다. 각 단면당 4장소 이상에서 측정하였다. <그림 3.3.47>은 측정한 위치를 나타내고 있다. 노상의 다짐도가 일정하다고 판단되는 횡방향으로 FWD측정값은 비슷하게 관찰되었으며, 길이방향으로의 처짐값은 다소 차이가 있었다.

(1) 실측 데이터의 정리

시험시공 현장 데이터를 이용하여 서로 다른 하중을 토대로 5번 이상 측정한 데이터를 이용하여 최소 자승법을 이용하여 회귀식을 도출한 후 9000lb의 하중이 재하되는 것으로 환산하였다. 처짐값은 일반적으로 하중값과 비례하기 때문에 이 방

법은 타당하다고 판단된다.

<표 3.3.20>은 각 단면별로 FWD 시험결과를 종합한 결과이다. 일반AP+일반BB의 경우 지점 1~7의 결과를, 투수AP+투수CTB의 경우 지점 8~11을, 투수AP+불투수CTB구간의 경우 12~18지점의 결과를 토대로 작성하였다.

평균과 표준편차의 경우 각 센서별 처짐값을 종합하여 산정하였다. 최대와 최소의 경우 분포가 정규분포를 따른다고 보았을 때, 95%신뢰도의 범위에서 평균처짐-1.96×표준편차의 값을 최대 처짐으로, 평균처짐+1.96×표준편차를 이용하여 산정하였다. 실측값과 비교결과 최대값과 최소값 사이에 모든 데이터가 포함되어 있는 것으로 나타났다.

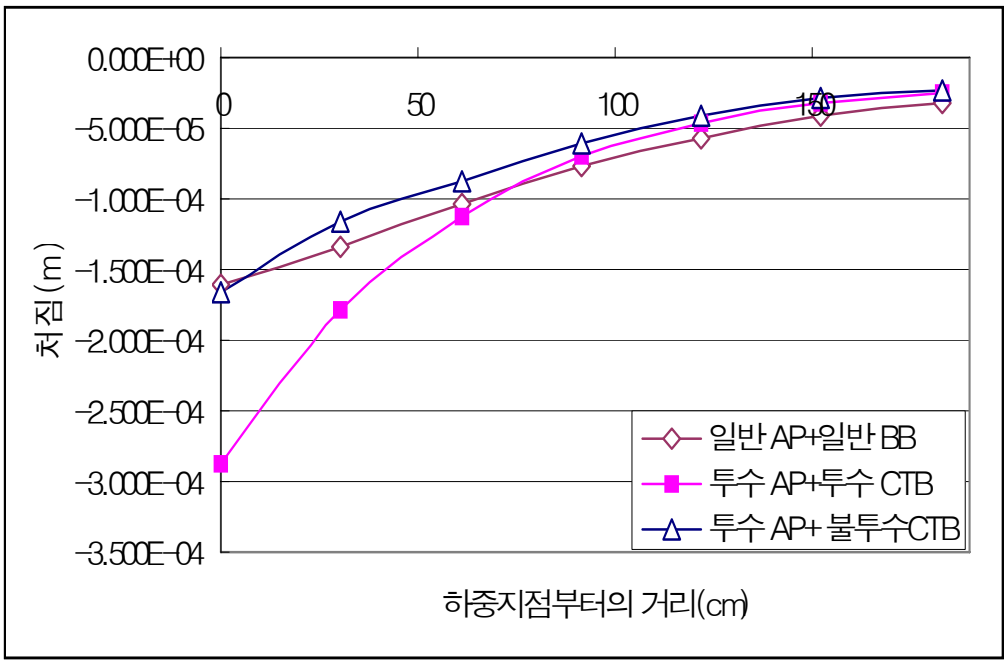
<표 3.3.20> 각 단면별 FWD 시험결과 종합

위치(단위:m)		0번 센서	1번 센서	2번 센서	3번 센서	4번 센서	5번 센서	6번 센서
일반 AP + 일반 BB	평균	-1.599E-04	-1.331E-04	-1.044E-04	-7.661E-05	-5.648E-05	-4.139E-05	-3.155E-05
	표준편차	2.939E-05	2.733E-05	2.176E-05	1.613E-05	1.078E-05	7.358E-06	5.028E-06
	최소	-1.023E-04	-7.950E-05	-6.172E-05	-4.499E-05	-3.535E-05	-2.696E-05	-2.169E-05
	최대	-2.175E-04	-1.866E-04	-1.470E-04	-1.082E-04	-7.762E-05	-5.581E-05	-4.140E-05
투수 AP + 투수 CTB	평균	-2.884E-04	-1.790E-04	-1.124E-04	-7.023E-05	-4.600E-05	-3.261E-05	-2.549E-05
	표준편차	3.959E-05	1.551E-05	6.590E-06	2.682E-06	1.185E-06	5.408E-07	5.809E-07
	최소	-2.108E-04	-1.486E-04	-9.946E-05	-6.497E-05	-4.367E-05	-3.155E-05	-2.435E-05
	최대	-3.659E-04	-2.094E-04	-1.253E-04	-7.549E-05	-4.832E-05	-3.367E-05	-2.663E-05
투수 AP + 불투수 CTB	평균	-1.653E-04	-1.166E-04	-8.688E-05	-6.006E-05	-4.126E-05	-2.911E-05	-2.279E-05
	표준편차	3.169E-05	2.023E-05	1.203E-05	5.404E-06	2.229E-06	3.357E-06	2.364E-06
	최소	-1.032E-04	-7.694E-05	-6.330E-05	-4.947E-05	-3.689E-05	-2.253E-05	-1.816E-05
	최대	-2.274E-04	-1.563E-04	-1.105E-04	-7.066E-05	-4.562E-05	-3.569E-05	-2.743E-05

앞에서 살펴본 바와 같이 6번 센서의 경우 노상의 탄성계수에 대한 영향이 가장 크다고 볼 수 있으며 다른 층에 대한 영향은 노상의 탄성계수의 영향에 비하여 미비하다고 볼 수 있다. 3개의 구간 중 6번 센서의 영향이 가장 큰 표준편차를 보이는 구간은 일반AP+일반BB구간으로써 노상에 대한 다짐의 차이가 발생하였다고 볼 수 있다.

0번 센서를 살펴보면 가장 크게 처지는 구간은 투수AP+투수CTB구간으로서 이 구간에 대하여 겨울철 포장체의 탄성계수 값이 다른 두 구간에 비하여 낮다고 판단된다.

<그림 3.3.48>은 각 단면별로 하중 지점부터의 거리별 처짐량을 보여준다. 투수AP+투수CTB층의 경우 전체적으로 큰 처짐값을 나타냈으며, 투수AP+불투수CTB구간과 일반AP+일반BB구간의 하중재하부 처짐은 비슷한 값으로 나타났으며 2번센서의 처짐값은 투수AP+불투수CTB구간의 처짐이 훨씬 적게 나타났다. 이는 하부구조로 갈수록 투수AP+불투수 CTB구간의 탄성계수값이 높은 것으로 판단된다.



<그림 3.3.48> 각 단면별 하중지점부터의 거리별 처짐량

(2) FEM을 통한 각 층의 물성치 추정

앞에서 제시한 <식 3.3.4>를 바탕으로 FWD 중앙부 처짐 값의 평균을 이용하여 각층에 대한 탄성계수를 추정하였다. <표 3.3.21>은 각 구간별 적용한 탄성계수를 나타내고 있다. 보조기층의 탄성계수는 일반적으로 사용되는 탄성계수 값을 적용하였다.

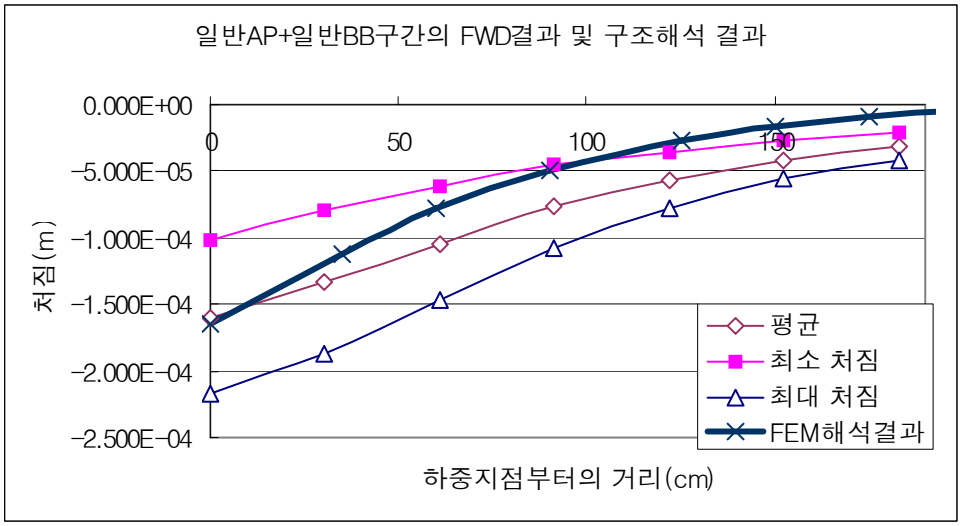
일반 AP+일반 BB의 경우 노상의 탄성계수는 DCP로 측정한 값 중 평균값을 사용하였으며, BB층과 AP층에 대하여는 0~5도사이일 때의 각층에 대한 탄성계수 값으로 적용하였다. <그림 3.3.49>는 일반 AP+일반 BB층에 대한 FEM해석 결과와 실제 조사된 FWD 결과를 나타내고 있다.

투수AP+투수CTB층의 경우 노상의 경우 함수비의 증가로 인한 탄성계수 감소를 고려하여 140MPa로 적용하였으며, 투수 AP는 일반 AP에 비하여 공극의 증가로 탄성계수가 감소할 것으로 판단되어 일반 AP보다 1000MPa이 적은 7000MPa을 적용하였다. 투수 CTB는 앞의 물성치를 적용한 후 FWD시험결과의 하중재하면의 처짐을 고려하여 양호한 구간에 대하여 회귀식을 통하여 추정하였다. 불투수 CTB 실내실험에서는 탄성계수가 15,500MPa로 측정되었으나 현장에서의 강도발현의 저하로 낮은 값으로 추정되었다. <그림 3.3.50>은 투수AP+투수CTB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과를 나타내고 있다. 해석결과 비교적 양호한 구간에서는 5000MPa의 탄성계수를 보일 것으로 판단된다.

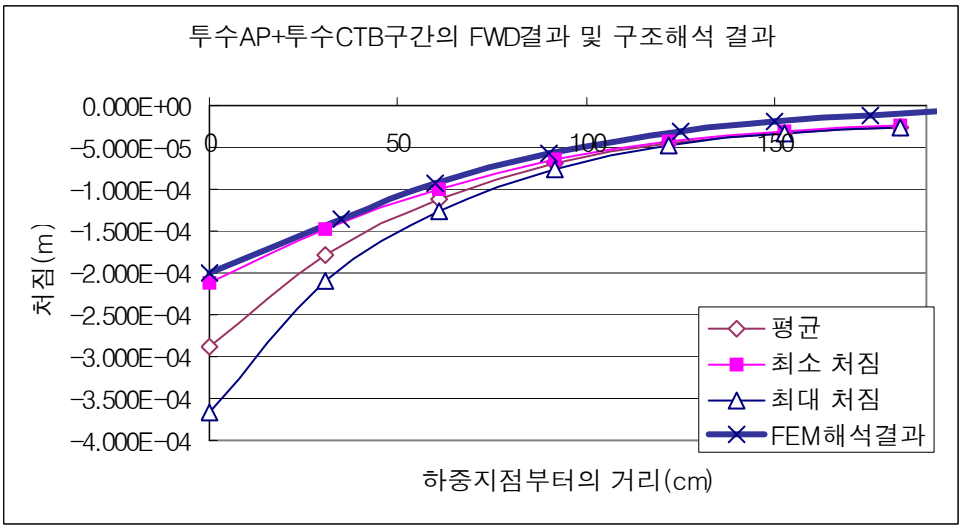
<표 3.3.21> 포장 형식별 FEM해석에 적용한 탄성계수

구분	층	탄성계수(MPa)
일반AP+일반BB	일반 AP	8000
	일반 BB	7000
	보조기층	200
	노상	170
투수AP+투수CTB	투수 AP	7000
	투수 CTB	5000
	보조기층	200
	노상	140
투수AP+불투수CTB	투수 AP	7000
	불투수 CTB	10000
	보조기층	200
	노상	150

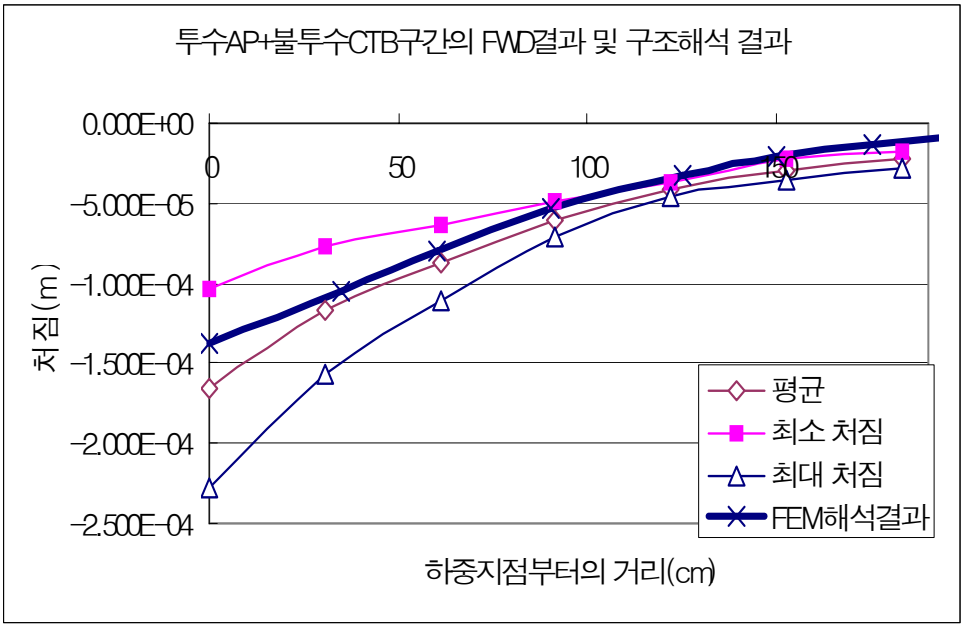
투수AP+불투수CTB층의 경우 FWD를 측정할 때, 함수비가 투수CTB층과 비슷하게 측정되었기 때문에 노상의 탄성계수를 150MPa로 가정하였으며, 투수CTB층과 같은 방법으로 불투수 CTB의 탄성계수를 추정하였다. 실내실험에 비하여 약 1/4정도의 작은 값으로 탄성계수가 추정되었다. <그림 3.3.51>은 투수AP+불투수CTB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과를 나타내고 있다.



<그림 3.3.49> 일반AP+일반BB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과



<그림 3.3.50> 투수AP+투수CTB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과



<그림 3.3.51> 투수AP+불투수CTB구간의 FWD결과와 FEM해석 결과

7. 요약

4S 포장의 구조해석 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

■ 다양한 유한요소 및 모형들에 대한 고찰 결과 정확한 해석을 위해서는 3차원 유한요소를 이용하여 모형을 개발하였다. 단 모형의 기초안을 만들기 위해서 기존에 본 연구진에서 수항행한 2차원, 3차원 모형의 해석결과를 분석하였다. 그 결과 요소망의 세분화, 경계조건의 롤러지지, 해석 범위(수평 6 m, 노상 1.5 m) 등을 사용하는 것이 타당하였으며 이를 4S 포장의 3차원 구조해석 모형에 적용하였다.

■ 3차원 구조해석 모형을 정립하였으며 이를 통해 영향 인자에 따른 민감도 분석을 한 결과 영향 정도는 투수 CTB의 두께, 탄성계수, 투수 AP의 탄성계수, 두께 순으로 나타났다. 그리고 아스팔트 표층의 두께가 5cm 감소할 때 CTB 두께를 3.75 정도씩 증가시키면 투수 CTB 하부의 유사한 응력 결과가 도출되었다. 한계응력 예측식의 기본 모형을 개발하였으며 향후 이에대한 검증을 수행해야 할 것이다.

■ 구조해석 결과 고속국도는 투수 AP 10 cm, 저수축 CTB 15cm, 일반국도는 투수 AP 5 cm, 투수 CTB 10cm를 최적 단면 제안하였다. 이 결과를 KALES 시험시공 단면 계획에 적용하였다.

■ 반사균열에 대한 구조해석을 수행하여 표층 하부 인장변형률을 살펴본 결과, 교통하중에 의한 영향보다는 온도하중에 의한 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 반사균열에 대한 탄성계수 감소에 따른 영향은 투수 AP의 탄성계수 변화는 표층의 인장변형률을 거의 발생시키지 못했으며 투수 CTB의 탄성계수 영향이 더 큰 것으로 나타났다. 향후 이에 대한 연구를 추가적으로 진행하여 보완해 나가야 할 것이다.

■ 선형 FEM 해석을 바탕으로 각층의 물성값을 추정할 수 있었다. 그렇지만 노상의 탄성계수가 처짐값에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났다. 때문에 코어링을 통하여 얻은 시편을 바탕으로 실제적인 탄성계수 측정이 이루어진 후에 검증차원에서 FEM을 통한 FWD의 해석이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4절 실내 파손촉진 장비를 이용한 4S 포장의 공용성 평가

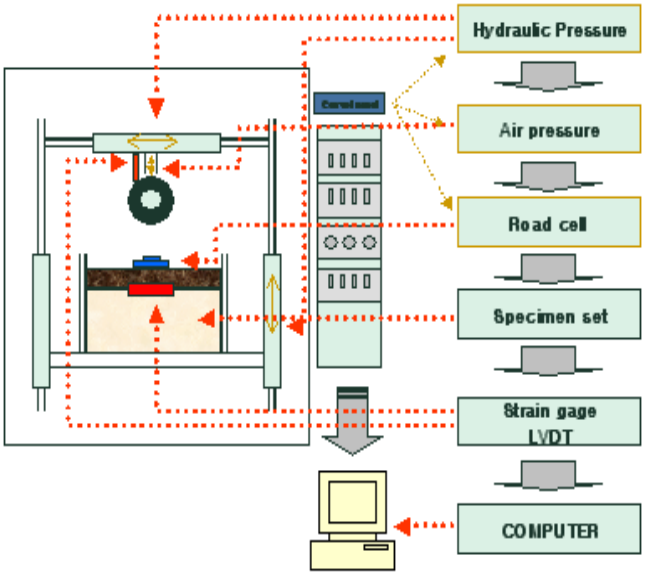
1. HWLS를 이용한 공용성 평가

본 절에서는 친환경 4S 포장 시스템을 대표할 수 있는 투·배수성 포장 및 일반 밀입도 아스팔트 포장을 실내에서 제작하고 휠트래킹(wheel tracking) 장비를 이용하여 공용성을 비교·평가하고자 한다. 반복 하중재하 실험을 통해 포장체의 러팅을 평가하며 정적 하중재하를 통해 포장체의 변형율을 측정한다. 이 결과들을 이용하여 강도감소계수를 산정하고 본 연구에서 제안하는 H계수 및 R_D값을 산출하고자 한다. 그리고 이 장비를 이용하여 블록 포장의 공용성을 평가하고자 한다.

가. HWLS(HEART Wheel Load Simulator)

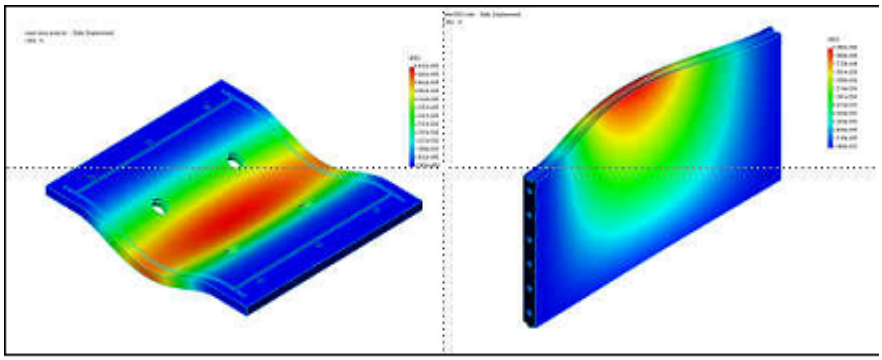
휠트랙킹 장비는 현장 시험과는 달리 다양한 조건을 조절하며 효율적으로 결과를 얻어낼 수 있는 장점이 있어 다양한 형태로 개발되어 실내시험에 사용되고 있다. 기존의 휠트랙킹 장비를 이용하여 현장의 러팅을 정량적으로 모사하는데 한계가 있다. 또한 아스팔트 표층만으로 평가하는 현재 실험 장비의 경우 포장 하부층에 따른 공용성을 평가할 수 없다는 단점이 있다. 또한 휠트랙킹 장비는 한쪽 방향의 일정한 축방향만으로 반복하중을 재하할 수 있어, 실제 교통하중을 모사할 수 없는 단점이 있다.

위와 같이 기존 장비의 단점을 개선하여 보다 현실과 유사한 환경을 모사할 수 있도록 개발된 장비가 HWLS라 할 수 있다. 이 장비의 구동방식은 정교한 제어를 요구하는 하중재하 실린더를 공기압으로 조절하고 그 외에 작동부분은 유압을 이용하여 작동하도록 설계되어 있다. <그림 3.4.1>은 HWLS의 내부구조로서 작동원리를 보여주고 있다. 실험판의 유압실린더와 공시체 제작 및 제거 시 작동하도록 되어있는 실험저판의 경우 장비자체의 조절 스위치를 통해서만 작동이 가능하며 바퀴의 위치와 속도, 실험시 횡방향 이동을 위한 실험판은 포텐샤메터를 통해 프로그램 상에서 제어가 가능하다.



<그림 3.4.1> HWLS의 개념도

HWLS의 하중 재하는 위에서 언급한 바와 같이 공기압에 의해 하중을 재하하게 되며 바퀴의 자중(약 15kgf(1.47kN))으로부터 1000kgf(9.81kN)까지 재하가 가능하며 이는 장비에 설치된 로드셀(Load cell)로 측정하여 하중을 재하하도록 되어있다. 장비에서 제작이 가능한 공시체는 300㎜×300㎜×100㎜와 600㎜×600㎜×5~700㎜로써 자체 제작이 가능하도록 되어있다. 공시체를 제작하기 위한 지그는 실험자의 편의를 고려하여 조립이 용이한 알루미늄으로 제작되었으며 하중 및 온도 등에 따른 안정성을 유한요소 프로그램으로 해석하여 검증하였다. <그림 3.4.2>는 해석결과의 일부를 보여주고 있다.

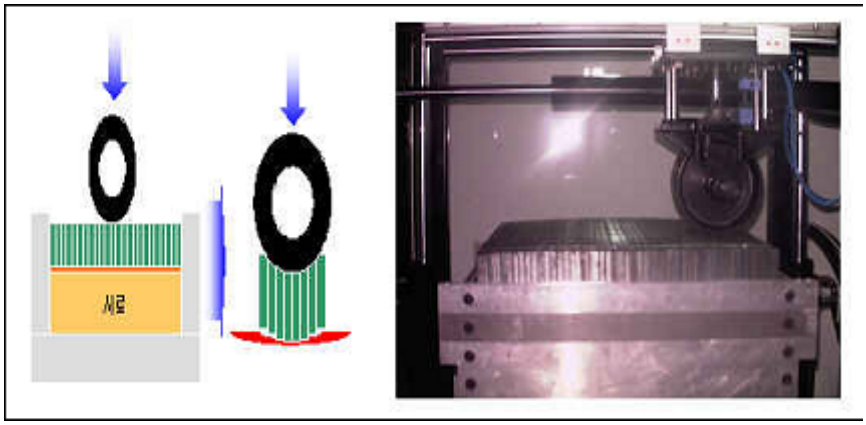


<그림 3.4.2> 바닥판과 측면판 유한요소 해석 결과

(1) HWLS의 특징

HWLS의 특징은 다음과 같다.

(가) 기존의 장비는 공시체 제작과정과 시험과정이 분리되어 있다. 즉, 기존의 장비는 별도의 다짐장비를 이용하여 공시체를 제작하고, 이를 시험기기의 규격에 맞추어 가공 처리하여 이용하였다. 그러나, 본 장비는 다짐과 시험을 동시에 수행할 수 있도록 개량하였다. 최근에 개발된 선형 하중재하 다짐(Linear Kneading Compaction)방식으로 다짐을 실시할 수 있도록 하였다. <그림 3.4.3>은 HWLS의 다짐 개념도와 다짐을 실시하는 모습이다.



<그림 3.4.3> HWLS의 다짐 개념도와 다짐 모습

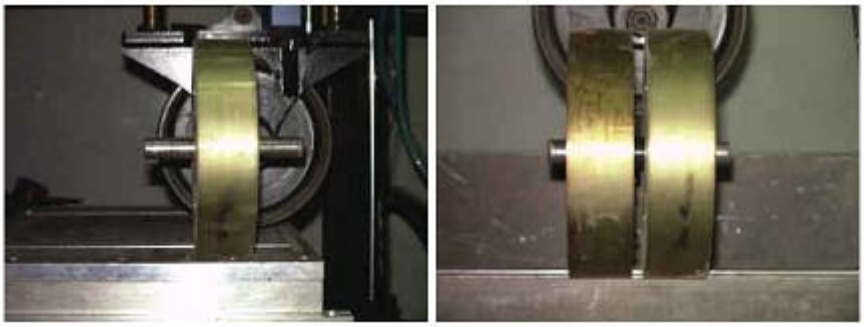


<그림 3.4..4> 하부구조 실험 개념도와 실험 후 하부구조 단면

(나) 기존의 장비는 아스팔트 포장용 공시체(slab)만의 시험이 가능하였고, 시편의 외곽부를 강성이 매우 큰 철판으로 고정한 것이다. 그러나, 현장에서의 포장체는 노상, 기층, 보조기층, 표층 등으로 구성되므로 강판 위에 올려진 슬래브만의 거동으로 포장체의 러팅을 정확히 예측하는데 한계를 지니고 있다. 그러나, 개발된 장비는 이러한 포장체의 각각의 구성단면을 모두 구현할 수 있도록 개량되었다. 앞에서 설명된 것처럼, 노상, 기층, 보조기층 역시 본 시험기기내에서 적정한 다짐을 이용하여 구성할 수 있다. 이는 현장에서의 포장시공순서에 따라 포장체 시편의 제작이 가능하고, 또한 현장의 다짐조건을 실내시험에 최대한 반영함으로서, 실제 포장체의 거동을 좀 더 근접하게 재현할 수 있도록 고안된 것이다. <그림 3.4.4>는 하부구조 모사 실험의 모습이다.

(다) 기존의 시험기기에서는 주로 철륜(steel wheel)을 이용하고 있다. 이는 실제 타이어 하중과는 다른 시험 조건을 만들기 때문에 시험결과로부터 포장체의 거동을 예측하는데 상당한 오차를 가져오는 주요 원인이 된다. 이를 해결하기 위해 본 장비에서는 FRP wheel을 적용하여 실제 타이어하중에 가깝게 개량하였다. 또한, 기존의 시험장비가 하나의 차륜을 가지는 단축하중(single tire-single axle)을 주로 이용한 반면에, 본 장비에서는 단축에 두 개의 차륜(dual tire-single axle)을 적용할 수 있도록 개량하였다. HWLS는 일반적으로 많이 사용되고 있는 강재 바퀴, 경도 84±4와 경도 100±5바퀴를 각각 2개씩 제작하였다. <그림 3.4.5>는 FRP 단륜과 복륜의 모습이다.

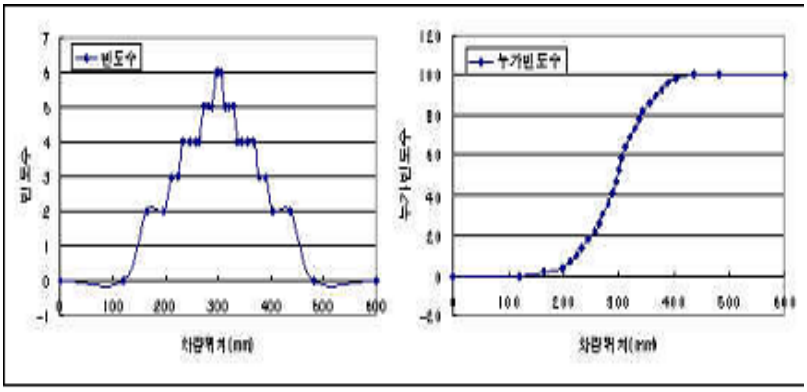
(라) 기존의 장비들은 주로 하중추를 이용하여 차량하중을 구현하였으나, 본 장비에서는 공기압을 이용하여 하중조절이 매우 쉽도록 개량하였다. 시험전에 바퀴의 하단에 로드셀을 설치하여 계기판상의 압력과 하중과의 관계를 정의하고, 원하는 하중으로 조절하여 1000kgf(9.81kN)에 이르는 하중을 다양하게 재하할 수 있다.



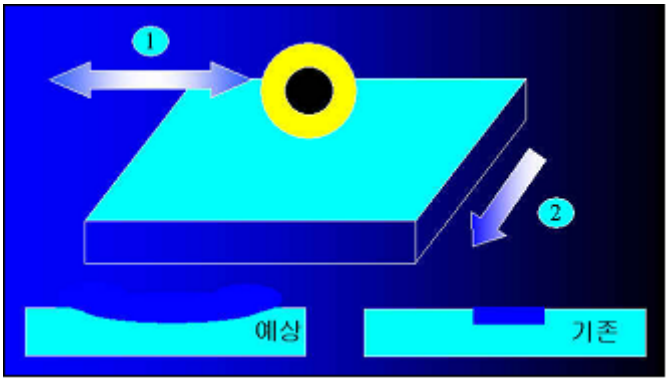
<그림 3.4.5> HWLS에 사용되는 단륜 및 복륜의 모습

(마) PURWheel에 적용된 임의분포도를 적용하여 시험 시 바퀴의 위치를 실제 도로상의 차량의 원더링과 유사하게 맞추어 시험이 가능하다. 또한, 바퀴의 움직임은 왕복운동 또는 일방향운동으로 구분하여 시험이 가능하도록 개량되었다. 이는 기존의 도로에서 포장체에 작용하는 하중이 주로 한 방향으로만 적용되므로, 이를 보완한 것이다. 이는 곧 기존의 장비들이 주로 왕복운동을 하는 것과는 달리, 실제 차량하중방향을 시험에 반영할 수 있는 것이다. <그림 3.4.6>은 HWLS에 적용되는 바퀴 위치에 대한 원더링을 나타내고 있으며 <그림 3.4.7>은 윤하중 이동 시험 시 예상되는 파손 모형을 나타내는 것이다.

(바) 기존의 시험장비는 주로 공시체(슬래브)의 러팅만을 측정하는데 반해, 본 장비에서는 제작된 공시체 내부에 시그날 컨디셔너(Signal Conditioner)를 부착하여 각종 센서 (주로 아스팔트 변형률 게이지, 콘크리트 변형률 게이지, 토압계, 간극수압측정계등)의 설치가 가능하고, 필요시 AD Board의 변경으로 20채널 이상의 확장모드를 적용할 수도 있다. 따라서, 휠트랙킹 시험중에 포장체내에서 발생하는 응력-변형관계를 살펴볼 수 있고, 이는 포장해석을 위한 각종 정보를 제공하게 된다.



<그림 3.4.6> 원더링 기능 이용한 차륜위치 빈도수 및 누가 빈도수

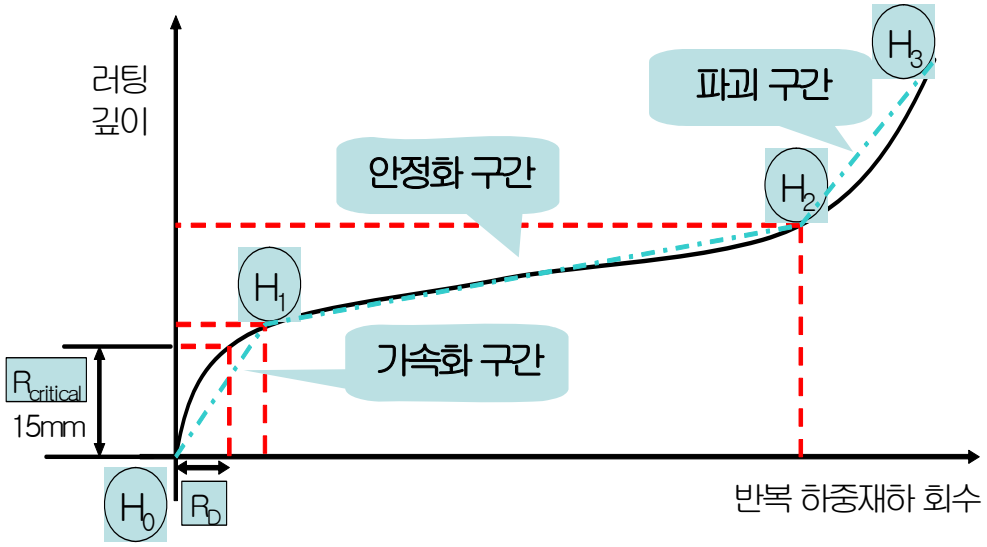


<그림 3.4.7> 원더링 기능을 적용한 후 파손 예상 모습

(2) 아스팔트 포장의 러팅 실험

(가) H계수(HEART-index)와 RD 의 제안

일반적으로 아스팔트 포장에서의 러팅 발생 경향을 살펴보면, 초기 발생량이 많으며 차츰 줄어들어 안정화되는 직선구간이 생기고 이후 러팅이 빠르게 진행되어 파괴에 이르게 된다. 본 연구에서는 <그림 3.4.8>과 같이 러팅의 발생 경향을 가속화 구간, 안정화 구간, 파괴 구간으로 나누었으며 각 구간별 시·종점을 H_0~H_4까지 명명하였다. 또한 가속화 구간을 구성하는 H_0와 H_1의 기울기를 H_A(Acceleration), 안정화 구간 H_1과 H_2의 기울기를 H_S(Stabilization), 파괴 구간 H_2와 H_3의 기울기를 H_C(Critical Point)로 하여 아스팔트 포장의 러팅 발생 경향에 따른 특성을 파악하고자 하였으며 이를 H계수(HEART-index)라 정의하였다. 추가적으로 러팅 깊이



<그림 3.4.8> H계수 및 R_D 값

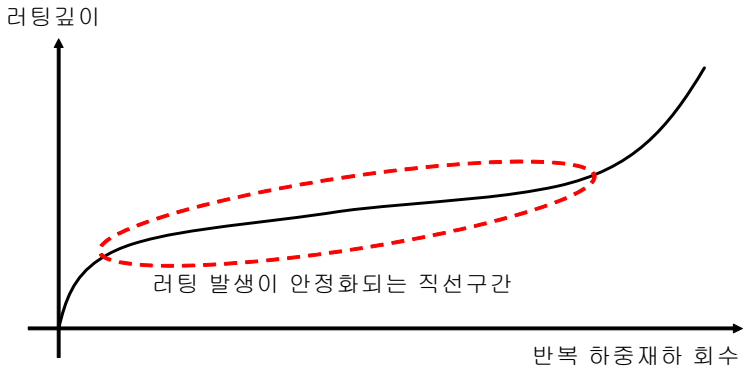
15mm까지의 반복 하중재하 회수를 Rutting의 'R'과 Distress의 'D'를 줄여 R_D값(회수/15mm)으로 정의하였다.

포장의 거동을 분석할 때에는 각 구간을 구성하는 H계수를 이용하게 된다. 가속화 구간의 시·종점인 H_0와 H_1의 기울기 H_A는 포장이 타설된 후 공용 초기의 거동을 나타내며 이 구간 H_A가 클수록 초기 러팅 발생이 빠른 것으로 판단한다. 안정화 구간의 시·종점인 H_1과 H_2의 기울기 H_S는 공용 중기의 거동을 나타내며 포장의 수명 및 유지보수 시기 예측에 유용하게 사용될 수 있다. 이 구간의 H_S가 작고 구간의 길이가 길수록 포장의 수명 및 유지보수 시기가 연장된다. 파괴구간의 시·종점인 H_2와 H_3의 기울기 H_C는 안정화 구간 이후 포장의 파손에 이르기까지의 거동을 파악하는데 이용될 수 있으며 H_C가 급할수록 포장 파괴에 이르는 속도가 빠르다 할 수 있다. 그러므로 본 연구에서 제안하는 H계수는 HWLS 실험 결과를 바탕으로 KALES 및 시험시공에서의 H계수들을 비교하여 교통량이나 포장의 형식에 따라 아스팔트 포장이 어떠한 특성을 나타내는지 정량화 시킬 수 있으며, 대상 교통량이나 특성 등을 고려하여 설계에 반영할 수도 있다.

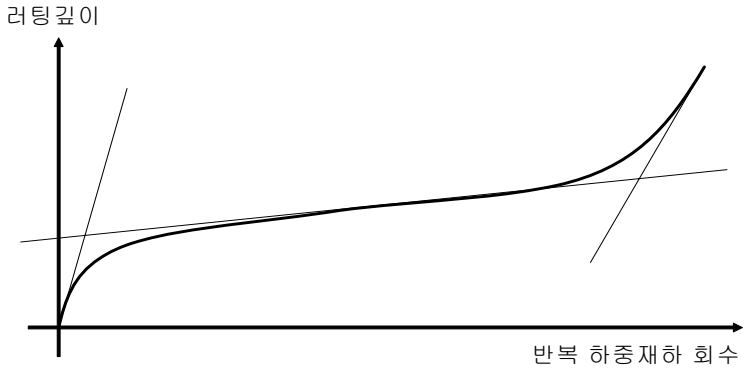
R_D 값은 러팅의 최종 수명시 까지 교통량 재하 회수를 의미하고 이를 이용하여 현장의 시험시 교통량과 실제 러팅과의 관계를 설명할 수 있을 것으로 판단된다.

<그림 3.4.9>를 참고하여 H계수의 산정방법을 살펴보자. 그림(a)에서처럼 일반적인 러팅 발생 경향은 초기와 말기 중간에 러팅이 안정화되는 직선구간이 나타나게

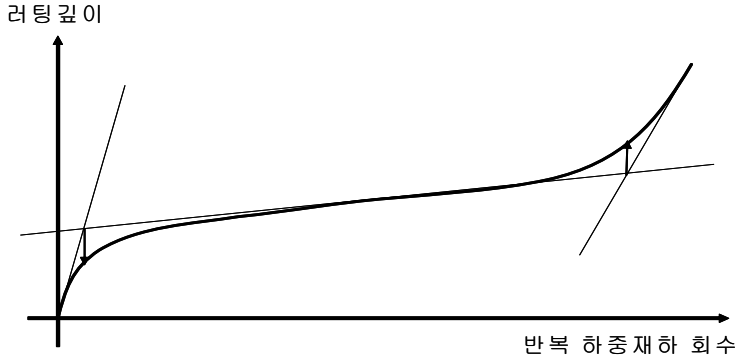
된다. 이 직선구간과 초기와 말기에 각각 1차 접선을 그어 각각의 교점을 결정한다. 그림(b)와 같이 교점을 결정하고 나면 이때의 반복 하중재하 회수를 2차 접선의 시작점으로 한다. 2차 접선의 시작점에서 다시 접선을 그어 직선구간에서의 접선과 만나는 점을 결정한다(그림 (d)) 이때의 반복 하중재하 회수를 파악하고 이를 안정화 구간의 시·종점으로 한다. 또한 러팅 그래프에서 안정화 구간 이전을 가속화 구간, 안정화 구간 이후를 파괴 구간으로 구분한다.



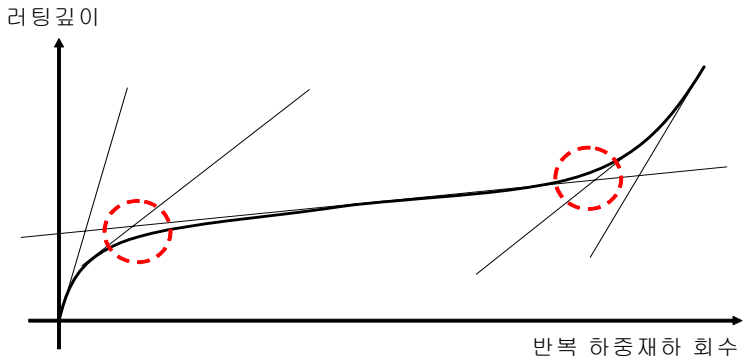
(a) 반복 하중재하에 따른 러팅 깊이 측정



(b) 1차 접선 결정



(c) 1차 접선 교점을 이용한 2차 접선 시작점 결정



(d) 2차 접선 교점을 이용해 안정화구간 시·종점 결정

<그림 3.4.9> H계수 산정 절차

(3) 강도감소계수를 이용한 4S 포장 시스템의 손상 예측 이론 제안

(가) 누적손상 개념

누적손상개념은 포장체의 손상을 매시간별 혹은 몇 시간 간격으로 계산하고 이를 계속 누적시켜 전체의 손상을 계산하는 방법이다. 이는 포장의 전체 공용수명기간동안 특정 시점에서의 외부환경에 따라 포장체의 물성이 변화되는 것을 설계자가 고려할 수 있다는 장점이 있다. 예를 들어 하중재하 회수 및 크기, 포장체 내부온도가 변화하게 되면 포장 각층의 강성이 변화되며 이로 인해 거동이 달라진다. 이러한 변화를 고려하여 하중재하시기별로 단위 손상을 누적하면 전체 파손을 살펴볼 수 있다.

기본적인 단위 시간동안 특정크기의 축하중에 의해 발생되는 손상도(Damage ratio)는 다음과 같이 표현되며,

$$D_k = \frac{n_k}{N_{f,k}} \qquad \text{<식 3.4.1>}$$

여기서 D_k = k번째 크기의 축하중에 대한 손상도

n_k = k번째 크기의 축하중의 회수

$N_{f,k}$ = k번째 크기의 축하중의 허용회수

(k 번째 하중에 대한 포장 수명(여기서 f: 포장 파손을 의미))

총 공용기간동안인 M개월 동안 발생된 전체 손상도는 다음과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^{M} \sum_{j=1}^{L} \sum_{k=1}^{K} \frac{n_{ijk}}{N_{f,ijk}} \qquad <식\ 3.4.2>$$

여기서 , D = 누적손상도,

n = 축하중의 회수

N_f = 축하중의 허용 회수(포장 수명)

K = 축하중 크기 그룹수

L = 1개월 동안의 시간그룹수,

M = 총 공용기간 (월)

만약 위의 식에서 D의 값이 1을 초과하면 포장은 파손된 것으로 간주한다.

(나) 강도감소계수를 이용한 4S 포장 시스템의 파손 예측

누적손상개념에 의한 포장체의 파손예측은 먼저 주어진 교통 및 재료조건 하에서 포장의 구조를 가정하고 구조해석을 수행한다. 이를 통해 산정된 포장층의 인장변형률, 인장응력을 사용하여 포장의 공용성 모형을 통해 수명을 계산한다. 기존의 수행된 대부분의 공용성 해석은 공용기간동안 포장층은 동일하다는 가정하에 이뤄지고 있다. 하지만 실제 공용중인 포장의 물성은 변화한다.

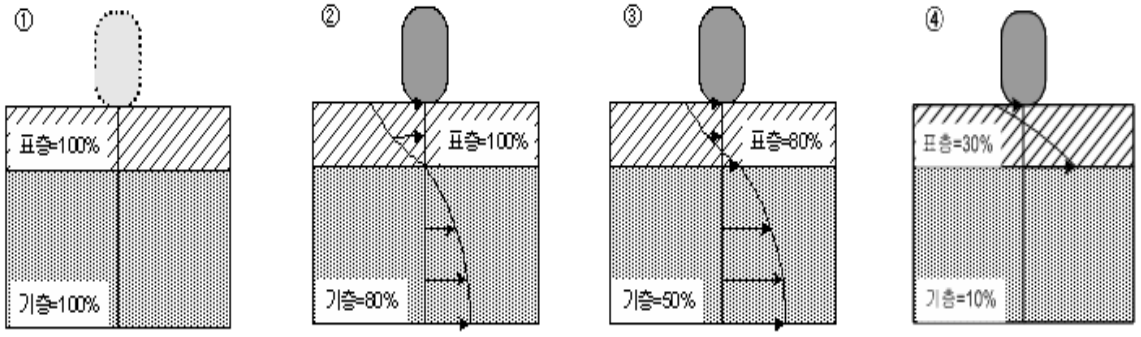
일반적으로 포장은 교통 개방 직후 교통하중 및 환경하중에 의해 포장체가 손상되지 않아 각 층의 물성은 초기값을 유지하고 있다. 하지만 공용 년수가 증가함에 따라 반복적으로 교통하중과 환경하중에 노출되는 포장은 초기의 물성을 유지하지 못한다.

① 일반 아스팔트 포장의 강도감소계수 이론

일반 아스팔트 포장은 아스팔트 기층 위에 아스팔트 표층이 시공된다. 이 포장에 누적손상이론을 적용하면 그림 ①에서 보는 바와 같이 공용개시직후에 표층은 압축응력을 받기 때문에 인장변형률이 먼저 발생하는 기층부터 기층혼합물에 대한 손상모형을 통해 손상도를 계산한다. 그림 ②와 같이 발생한 손상도만큼 기층의 강성을 감소시켜 다시 구조해석을 수행한다. 만약 표층에도 인장변형률이 발생(그림 ③)하면 표층의 재료에 대한 손상모형을 통해 손상도를 계산하고 손상도 만큼 표층의 강성을 감소시켜 다시 구조해석을 수행한다. 기층의 손상도가 1에 도달하면(그림④) 기층은 파손된 것으로 보고 입상재료로 가정하고 계속 해석을 수행하여 표층의 손상도가 1에 도달하면 포장의 공용수명은 끝난 것으로 한다.

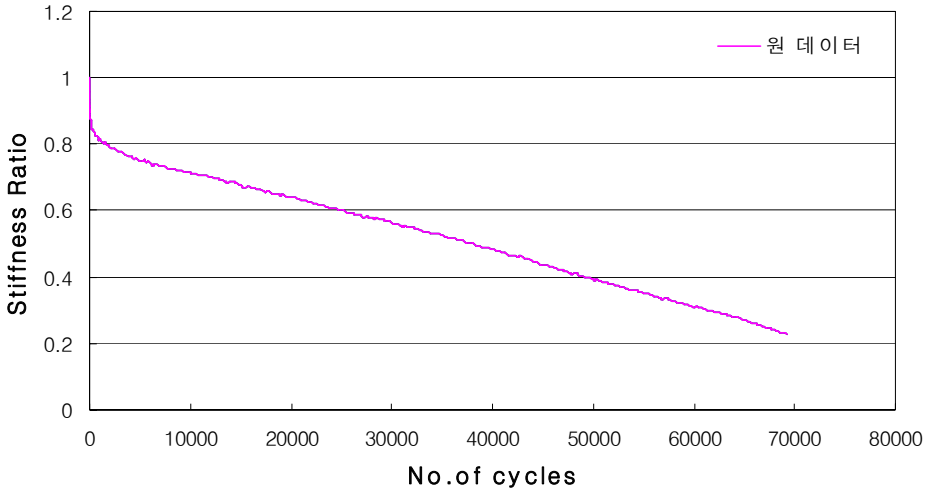
이와 같이 누적손상개념을 이용하여 포장체의 파손 상태를 계산하기 위해서는 손상도에 따른 강성의 변화특성을 파악하여야 한다.

<그림 3.4.11>은 반복 하중재하 시험을 통해 산출된 전형적인 강성비-하중재하 회수의 관계 그림이다. 그림에서 포장체의 피로수명(N_f)는 혼합물의 강성(S)이 초기강성(S_i)의 i %에 도달할 때의 하중재하 회수(N)로 결정된다. 손상도 $D = N/N_f$으로 정의되기 때문에 N을 N_f로 나누어주면 손상도를 구할 수 있다. 또한 강성을 초기강성으로 나누어 강성비(Stiffness Ratio)를 구할 수 있다. 이러한 방법으로 한 포장체에 대해 실제 수행한 반복 하중재하 시험 결과로부터 <그림 3.4.12>와 같은 곡선을 얻을 수 있다.



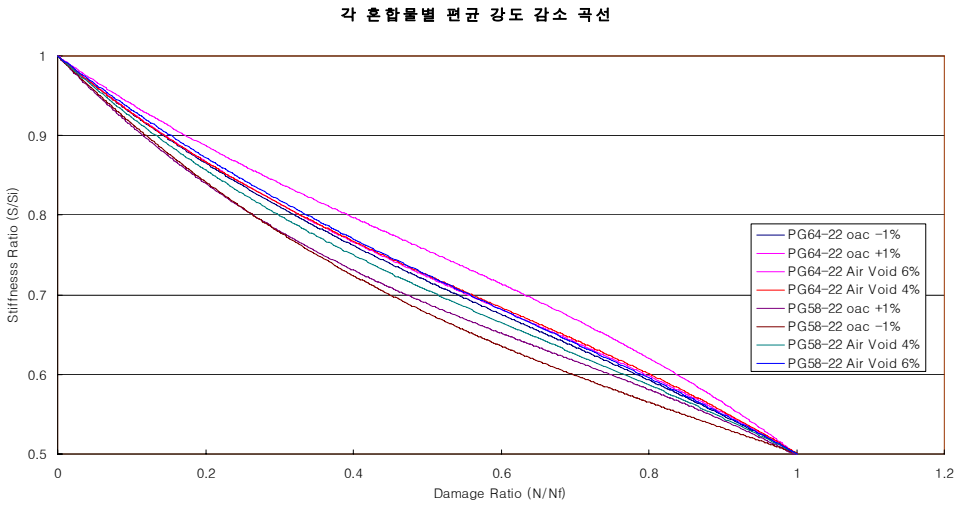
<그림 3.4.10> 공용기간동안에 표층과 기층의 응력변화

(한국형 아스팔트 포장 설계법 개발, 2004)



<그림 3.4.11> 전형적인 강성비와 하중재하 회수 관계

(한국형 아스팔트 포장 설계법 개발, 2004)



<그림 3.4.12> 아스팔트 혼합물의 강성 감소 곡선

(한국형 아스팔트 포장 설계법 개발, 2004)

이러한 아스팔트 포장의 강성감소 곡선은 <식 3.4.3>, <식 3.4.4> 등과 같이 다양한 형태로 나타낼 수 있다.

$$S_R = aD^3 + bD^2 + cD + 1 \text{ , when } D \leq 1$$ <식 3.4.3>

$$S_R = -2.88618 + 2.93253 \times (1 - e^{-0.731347 \times D})^{-0.225089}, \text{ when } D>1 \quad \text{<식 3.4.4>}$$

여기서, $D = N/N_f$, 허용 하중재하 회수를 현재 하중재하 회수로 나눈 손상도,

$S_R = S/S_i$, 현재강성을 초기강성으로 나눈 강성 감소 비율

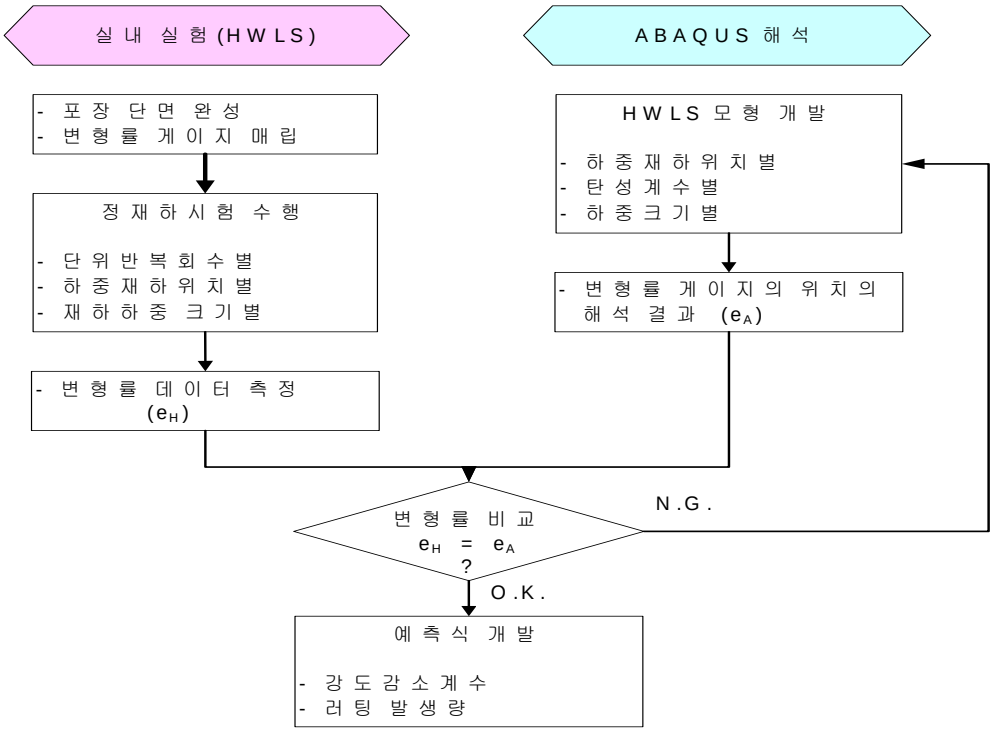
<식 3.4.3>은 한국형 아스팔트 포장 연구진에 의해서 제안된 강성감소식이며 D ≤1 일 경우에만 사용하고 <식 3.4.4>는 AASHTO 2002 설계법에서 제안한 식들 중 D≥1 경우에만 사용하는 것이다.

② 4S 강도감소계수 예측을 위한 방법론 정의

기존의 연구는 피로실험과정에서 혼합물의 강성을 비파괴 혹은 파괴적인 방법으로 정의한 것으로 특정한 온도 및 하중 조건하에서 단일 재료에서의 거동을 보여주는 이론적인 값이다. 그러나 실제로 포장체는 시공상의 변수(두께, 재료, 다짐정도) 때문에 많은 변동성을 내포한다. 또한 하부조건에 따른 응력재하상태도 기존 단일 하중조건에 따른 피로현상과 다를 수 밖에 없다. 더불어 기존의 실험은 단일 재료에 한정되어 있다.

4S 포장의 강도감소계수를 예측하기 위하여 기본적으로 본 연구진이 보유하고 있는 HWLS 장비와 ABAQUS 해석 결과에 근거하여 연구를 수행하였다. 본 연구에서도 4S 포장 시스템의 파손 예측을 위한 변형률 게이지를 활용하는 방안을 고안하였으며 <그림 3.4.13>과 같은 절차로 진행된다.

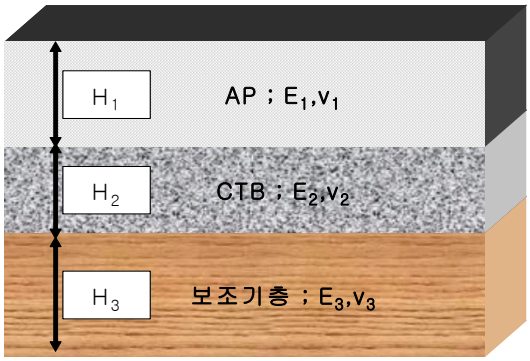
HWLS를 이용하여 실제 포장 형태를 완성하고 온도와 하중주기를 결정한 후 하중 반복회수와 러팅과의 관계를 조사한다. 일정 하중재하 회수 때마다 정적 하중재하 실험을 통해 변형율을 측정한다.



<그림 3.4.13> 강도감소계수 및 러팅 발생량 예측식 개발 흐름도

실제 포장층에 매설된 변형률 게이지는 하나이므로 하중 재하 위치를 바꾸어 가며 변형률을 측정하고 기존 역산법처럼 ABAQUS를 이용하면 반복계산하면 각 층의 상대적인 강성을 알 수 있게 된다. 이를 이용하여 다층 재료의 강성변화를 알 수 있게 된다. 이 과정을 도식화하면 다음과 같다.

ㄱ. 기본 단면의 결정 : 각층의 탄성계수, 포아손비 가정



<그림 3.4.14> HWLS에서의 실험을 위한 기본 단면 결정

ㄴ. HWLS 시료 완성



<그림 3.4.15> HWLS 시료 완성

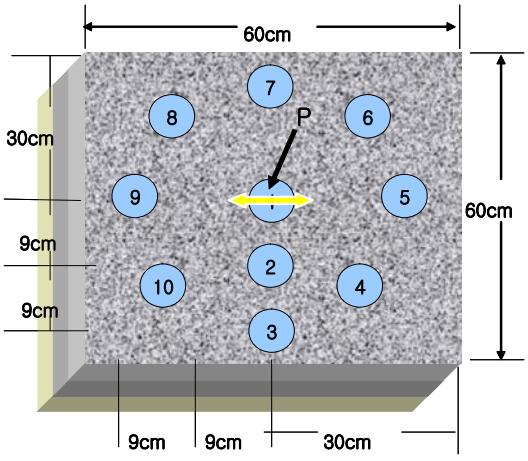
ㄷ.정적하중 재하 실험 : x 개의 위치에서 하중재하 및 변형률 측정

x=1 때, $\sigma_{11}-\varepsilon_{11}$, $\sigma_{21}-\varepsilon_{21}$,.... $\sigma_{x1}-\varepsilon_{x1}$

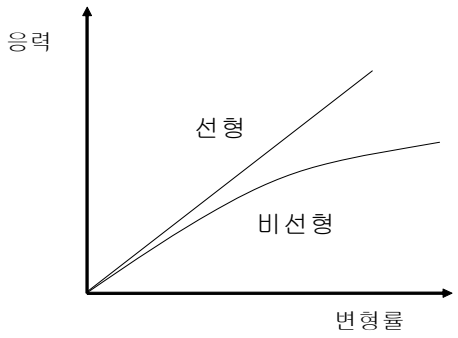
x=2 때, $\sigma_{12}-\varepsilon_{12}$, $\sigma_{22}-\varepsilon_{22}$,.... $\sigma_{x2}-\varepsilon_{x2}$

x=x 때, $\sigma_{1x}-\varepsilon_{1x}$, $\sigma_{2x}-\varepsilon_{2x}$,.... $\sigma_{xx}-\varepsilon_{xx}$

이때, 응력과 변형률과의 관계를 살펴보고 선형탄성 범위 혹은 비선형 범위인지를 결정한다.

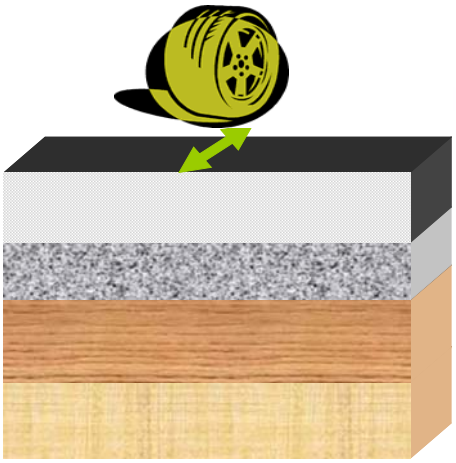


<그림 3.4.16a> 재하 위치에 따른 정적하중재하실험

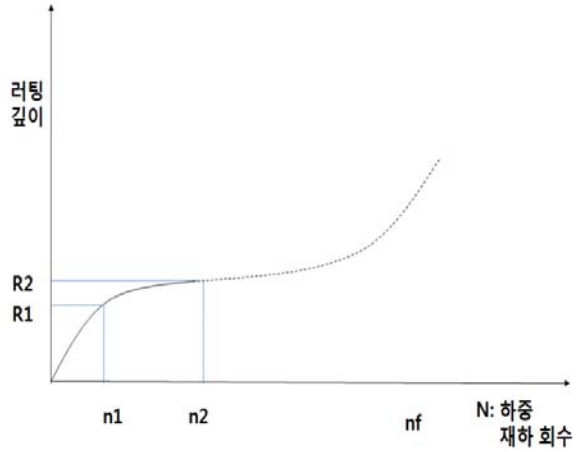


<그림 3.4.16b> 정적하중 결과를 이용한 관계 검토

ㄹ. n회의 반복하중을 재하한 후 러팅 및 “ㄷ” 항의 정적하중재하 실시

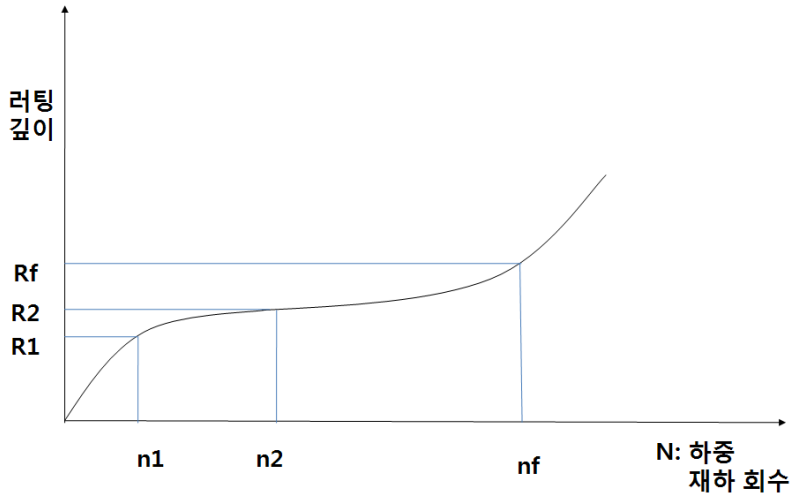


<그림 3.4.17a>반복하중재하 실험수행



<그림 3.4.17b> 일정 회수에 따른 러팅량 측정

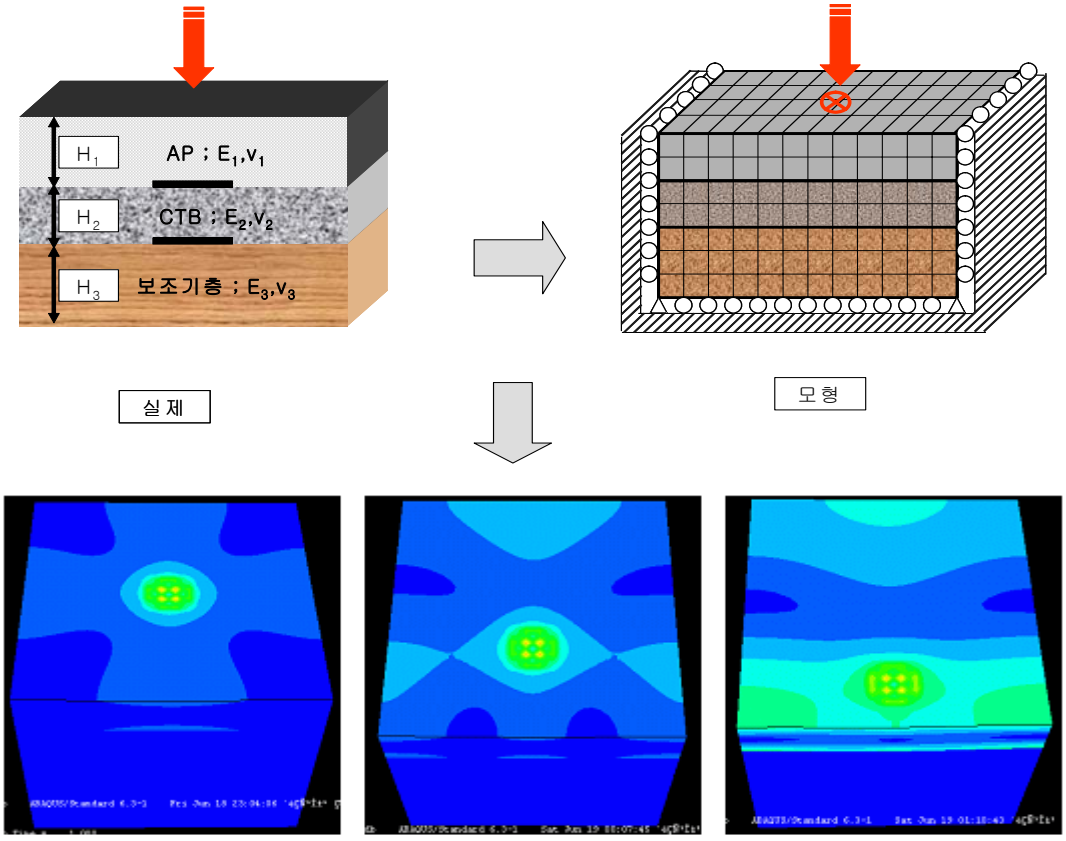
ㅁ. 현재 재하되는 반복회수가 러팅 임계값(Rf) 또는 재하 회수가 최종 재하회수(nf)를 넘지 않은 경우 (다),(라)를 반복 수행하며, 조건을 충족하는 경우 실험을 종료하고 러팅량과 반복 하중재하 회수와의 관계를 그린다.



<그림 3.4.18> 실험 종료 후 전체 반복하중재하 결과

ㅂ. ABAQUS 3차원 모형 기본토대 구축

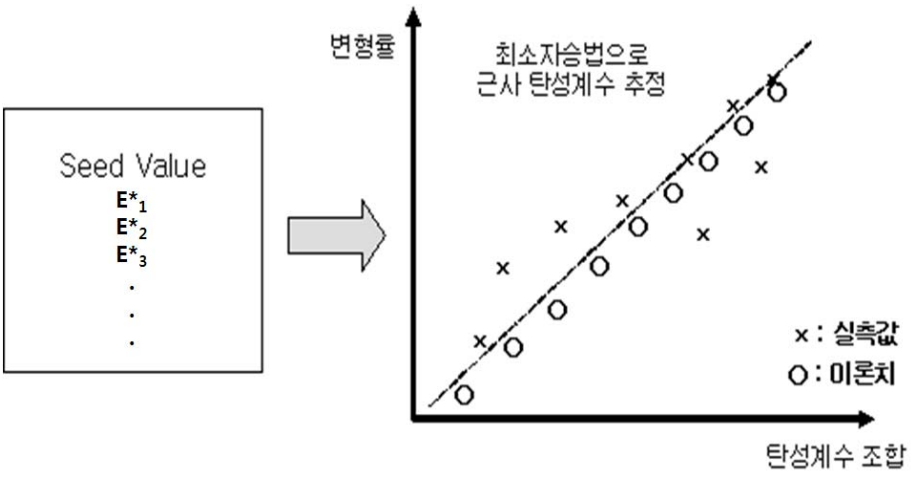
초기값을 가정하여 해석모형에 대입하고 각 지점별 변형률에 대한 해석 결과를 산출한다.



<그림 3.4.19> HWLS 실험의 구조해석을 통한 위치별 변형률 계산

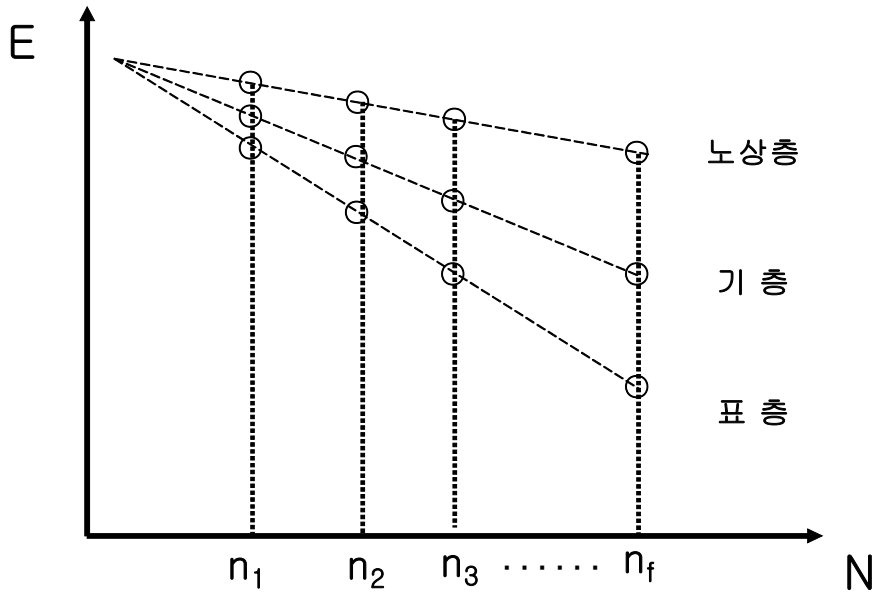
ㅅ. 하중재하회수 'i' 에서 각층의 탄성계수(Ei)값을 역산

즉, 가정한 초기값이 실험 결과와 동일한 경우를 찾기 위해서 반복해석을 수행한다. 각 지점별 실측결과와 해석결과의 오차가 최소가 되는 탄성계수값을 찾는다.



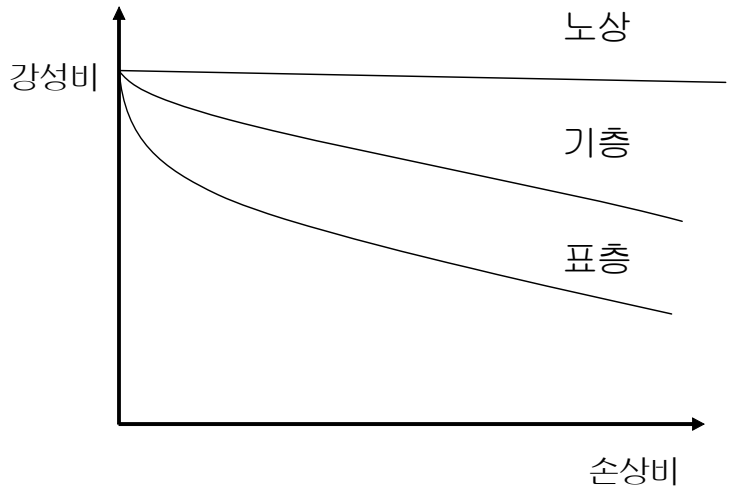
<그림 3.4.20> 최소 자승법으로 근사해 추정

ㅇ.하중재하회수별 각층의 탄성계수(Ei)값 추정 및 강성비 산정



<그림 3.4.21> 하중재하회수에 따른 각층의 탄성계수값 산정

ㅈ.각층의 상대 강성비 곡선 제안



<그림 3.4.22> 상도강도계수 곡선 계산

(4) HWLS 실험

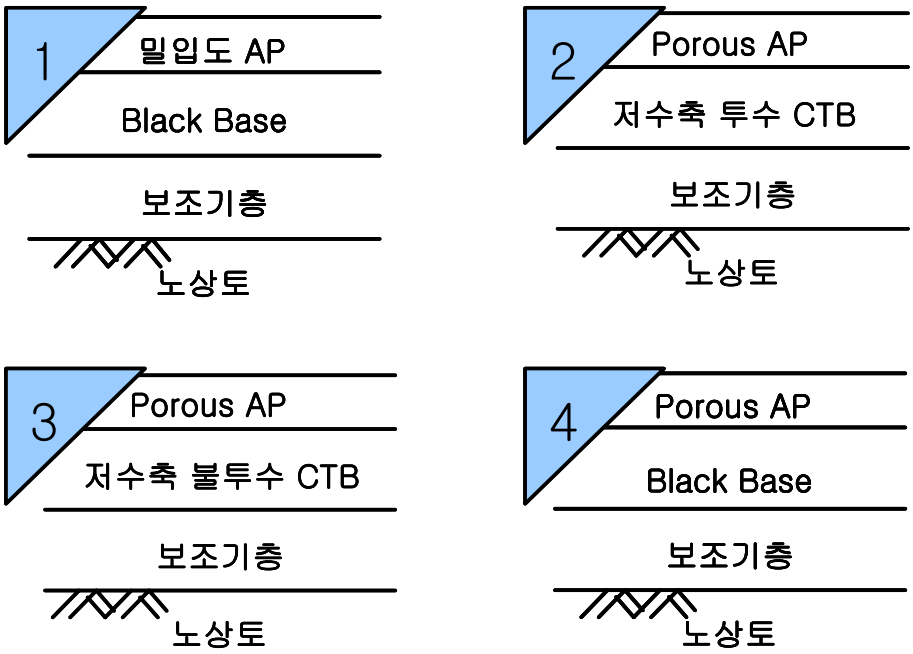
본 실험의 목적은 '친환경 4S 포장 시스템'을 실제 도로에 적용하기에 앞서, 기존 아스팔트 포장과 투수 및 배수성 포장의 공용성 차이를 평가하는 것이다. 새로운 포장 시스템의 도입 시 실제 도로에 적용 가능한 공법인가를 판단하는 것은 중요한 기준이기 때문이다. 문헌조사 및 ABAQUS 해석 결과를 실내 '친환경 4S 포장 시스템'의 대표 단면을 선정한 후 HWLS를 이용하여 공용성을 평가하였다. 단면의 종류, 물성 등의 변화에 따른 단면별 거동을 조사하고, 그 결과에 근거하여 최적단면을 제시하고자 한다.

(가) 예비실험

예비실험에서는 아스팔트 표층의 러팅만을 측정하였으며 실험시의 문제점을 파악하여 개선 방향을 모색하였다. 또한 Porous AP와 저수축 투수 CTB로 구성된 단면의 경우 겨울철 노상까지 물을 투수시켰을 때 어떠한 문제점이 발생하는지 살펴보았다.

① 러팅 저항성 평가를 위한 HWLS 실험 단면 계획 및 실험방법

HWLS를 이용하여 공용성을 평가하기 위해 <그림 3.4.23>과 같이 4가지의 실험 단면을 선정하였다. 단면별 노상토와 보조기층은 동일한 재료를 사용하였다. 일반적인 포장의 공용성을 평가하기 위한 1번 단면의 경우 밀입도 아스팔트와 Black Base로 단면을 구성하였다. 투수성 단면의 공용성을 평가하기 위한 2번 단면의 경우 Porous 아스팔트 표층과 저수축 투수 CTB, 배수성 단면의 공용성을 평가하기 위한 3번, 4번 단면의 경우 표층에는 Porous 아스팔트를 타설하였고 기층에는 저수축 불투수 CTB와 Black Base를 타설하여 공용성을 평가하였다.



<그림 3.4.23> HWLS 공용성 평가를 위한 단면 구성

<표 3.4.1> 아스팔트층에 사용된 골재의 비중

구 분	굵은골재	잔골재	채움재
비 중	2.62	2.76	2.73

<표 3.4.2> 아스팔트층의 입도 분포

구 분 / 종 류 / 호칭치수(㎜)	체 통과 중량 백분율(%) 밀입도 표층 (WC-3)	Black Base (BB-3)	Porous 아스팔트
25	100	100	100
20	95~100	75~100	95~100
13	-	-	53~78
10	75~90	50~85	35~62
5	45~65	30~70	10~31
2.5	35~50	-	10~21
2	-	20~50	-
0.6	25~45	-	4~17
0.4	-	5~25	-
0.3	10~21	-	3~12
0.15	6~16	-	3~8
0.08	4~8	1~7	2~7

보조기층의 경우, 실험에서 사용된 시료는 한국도로공사 보조기층 재료인 SB-2를 사용하였다. 저수축 투수 CTB 및 저수축 불투수 CTB는 3장 2절에서 언급한 재료와 배합을 사용하였다. 밀입도 아스팔트 표층, Porous 아스팔트 표층, Black Base에 쓰인 골재의 물성은 <표 3.4.1>과 같다.

밀입도 아스팔트의 입도는 한국도로공사 고속도로공사 전문시방서의 기준에 따라 표층은 WC-3, 기층은 BB-3의 입도분포를 사용하였다. Posous 아스팔트 표층의 입도는 국내 S사에서 제안한 배수성 포장 입도분포를 따랐다. <표 3.4.2>는 실험에 사용된 아스팔트층의 입도분포를 나타낸 것이다.

아스팔트 바인더는 밀입도 표층과 Black Base의 경우 AP-5(PG 64-22), Porous 아스팔트 표층은 국내 S사에서 판매되고 있는 Porous 아스팔트 바인더(PG 82-28)를 사용하였다. 단면의 두께는 표층 10cm, 기층 15cm, 보조기층 15cm, 노상 10cm로 하였다.

CTB의 다짐도를 결정하기 위해 공시체를 제작하고 HWLS에서 시편을 제작하여 공시체의 밀도와 시편 코어의 밀도를 비교하였다. 공시체의 7일 양생 시 밀도와 유사한 범위의 밀도를 가지는, 코어 제작시의 다짐 조건을 CTB의 다짐 조건으로 정의하였다. 그 결과 재하 하중 800kgf, 재하 회수 30회, 재하 속도 0.67km/h를 도출하였다. 또한 노상, 보조기층, 아스팔트층의 다짐은 <표 3.4.3>에 제시한 재하 하중, 재하 회수, 재하 속도에 따라 실시하였다. <그림 3.4.24>는 HWLS에서의 실험 과정을 나타낸 것이다.

<표 3.4.3> HWLS에서의 층별 다짐 조건(백우현, 2001)

	재하 하중(kgf)	재하 회수	재하 속도(㎞/h)
노 상	600	30회	0.67(3단)
보조기층	600	30회	0.67(3단)
CTB	800	30회	0.67(3단)
아스팔트층	800	20회	0.97(5단)

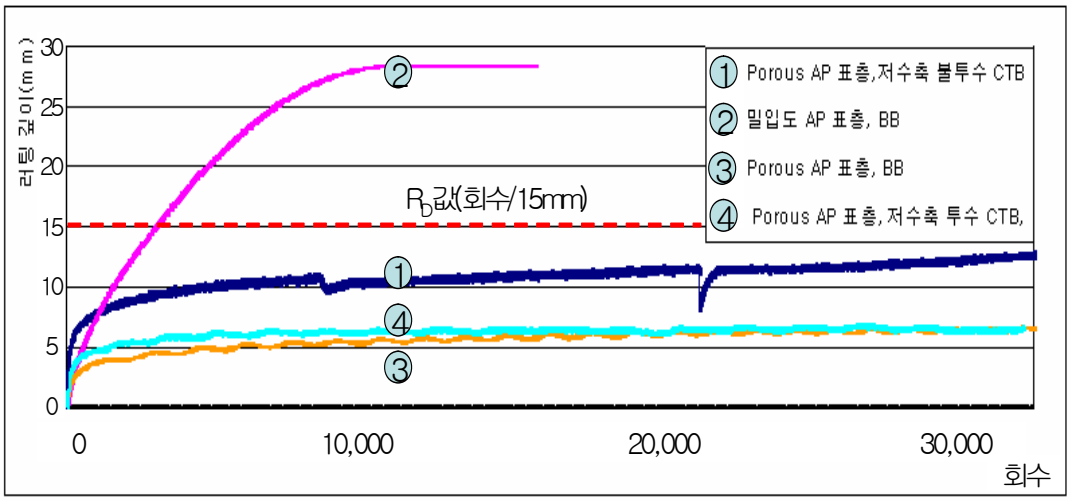


<그림 3.4.24> HWLS에서의 공용성 평가 실험 모습

② 실험 결과

공용성 평가를 위해 각 단면별로 반복하중 재하 회수에 따른 러팅을 측정하였다. 하중 조건 200kgf, 왕복 40,000회까지의 재하 회수에서 살펴보았다. 하중의 크기는 HWLS 고무 휠의 접지면적이 60×60mm이며 고무 휠 접지압이 5.56 kg/㎠로써, 우리나라의 도로 설계 및 해석에 주로 사용되고 있는 AASHTO 설계법의 바퀴 접지압이 5~6 kg/㎠임을 감안한 것이다.

러팅 측정 결과를 살펴보면, 밀입도 아스팔트 표층과 Black Base(1번 단면)의 경우 러팅이 15 mm이상 발생하여 이를 포장의 수명이 끝난 상태로 정의하고 더 이상의 측정을 실시하지 않았다. 기타 포장들은 약 40,000회까지 하중을 재하 하였음에도 불구하고 15mm까지의 진전이 없었다. 10,000회 당시의 러팅은 Porous 아스팔트 표층과 저수축 투수 CTB(2번 단면)는 7mm, Porous 아스팔트 표층과 저수축 불투수 CTB(3번 단면)은 13mm, Porous 아스팔트 표층과 Black Base(4번 단면)의



<그림 3.4.25> 각 단면별 러팅 측정 결과

경우는 7mm 정도의 러팅이 발생하였다.

러팅에 대한 저항성만을 살펴본 예비실험의 결과 Porous 아스팔트 표층과 저수축 투수 CTB로 구성된 2번 단면 및 Porous 아스팔트 표층과 Black Base로 구성된 4번 단면이 가장 우수한 것으로 나타났다. <그림 3.4.25>는 단면의 러팅 측정 결과이며 <그림 3.4.26>은 표층 및 기층의 단면 모습을 나타낸 것이다.

<그림 3.4.25>를 이용하여 H계수를 산출하였다. 러팅 발생 그래프를 살펴보면 가속화 구간과 안정화 구간까지의 경향은 확실히 나타나지만 파괴 구간의 형상은 나타나지 않고 있다. 이 구간들의 H계수를 산출하기 위해서 보다 많은 회수의 반복 하중재하 실험이 요구되며 예비실험에서는 가속화 구간 및 30,000회까지를 안정화 구간으로 가정하고 H계수를 살펴보았다.

가속화 구간의 H계수들을 살펴보면 <표 3.4.4>에서 나타나듯이 H_A가 가장 큰 것은 Porous AP 표층과 저수축 투수 CTB(4번)로서 공용 초기 가장 빠르게 러팅이 발생하는 것을 알 수 있다. H_A가 가장 낮은 단면은 밀입도 AP 표층과 BB였으며, 가장 느리게 초기 러팅이 진행되었다. 그러나 밀입도 AP표층과 BB로 구성된 단면의 H_1을 살펴보면 러팅의 깊이가 24.533mm로 가장 나쁜 것으로 나타나 안정화 이전에 거의 파괴상태에 이르렀다 할 수 있다.

30,000회까지의 안정화 구간을 살펴보면 밀입도 AP표층과 BB로 구성된 단면 이외의 3단면 모두 구간의 길이는 비슷한 것으로 나타났다. Porous AP 표층과 저수

축 투수 CTB로 구성된 단면의 H_S가 1.62×10^{-4} mm/회로 가장 높았고 Porous AP 표층과 저수축 투수 CTB 단면은 0.73×10^{-4} mm/회로 가장 느린 속도로 러팅이 진행됨을 알 수 있었다.

R_D 값은 밀입도 AP 표층과 BB을 제외한 기타 단면에서는 측정되지 않았다. 이를 정리하면 <표 3.4.4>와 같다.

<표 3.4.4> 예비실험에서의 H계수 및 R_D 값 산정 결과

단면번호	H_0		H_1		H_2		H_3		H_A	H_S	H_C	R_D
	회수	러팅	회수	러팅	회수	러팅	회수	러팅	(mm/회)	(mm/회)	(mm/회)	
①	0	0	876	7.701 (mm)	3000	12.412 (mm)	–	–	8.8×10^{-3}	1.62×10^{-4}	–	–
②	0	0	6671	24.533 (mm)	–	–	–	–	3.6×10^{-3}	–	–	866회/15mm =53.73(회/mm)
③	0	0	475	3.249(mm)	3000	6.409 (mm)	–	–	6.8×10^{-3}	1.07×10^{-4}	–	–
④	0	0	402	4.218 (mm)	3000	6.406 (mm)	–	–	10.9×10^{-3}	0.73×10^{-4}	–	–



<그림 3.4.26> 각 단면의 표층 및 기층의 모습

(a) 밀입도 AP 표층, BB
(b) Porous AP 표층, 저수축 투수 CTB
(c) Porous AP 표층, 저수축 불투수 CTB
(d) Porous AP 표층, BB

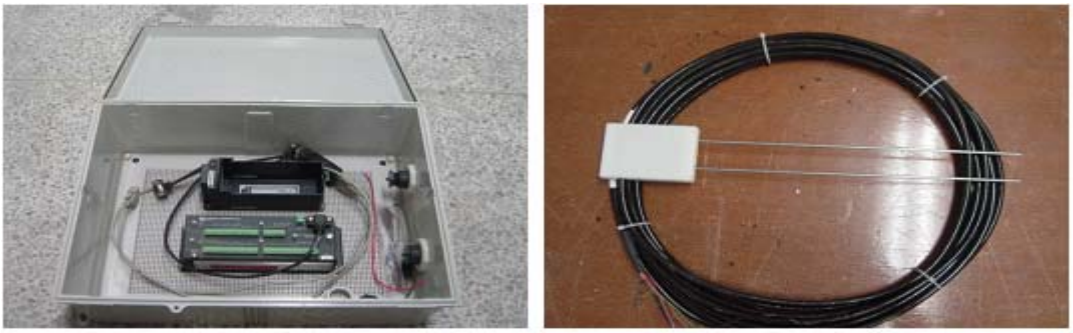
③ 물의 침투에 따르는 투수성 포장의 공용성 평가

물이 노상까지 침투했을 때 투수성 포장의 거동에는 어떠한 영향을 미치는지 알아보았다. 노상의 함수 상태를 파악하기 위하여 TDR(Time-Domain Reflection, 이하 TDR)방식 함수량계를 사용하였고 거동의 평가는 'Rutting 저항성 평가'와 동일한 조건에서 수행하였다.

ㄱ. TDR 센서 및 보정

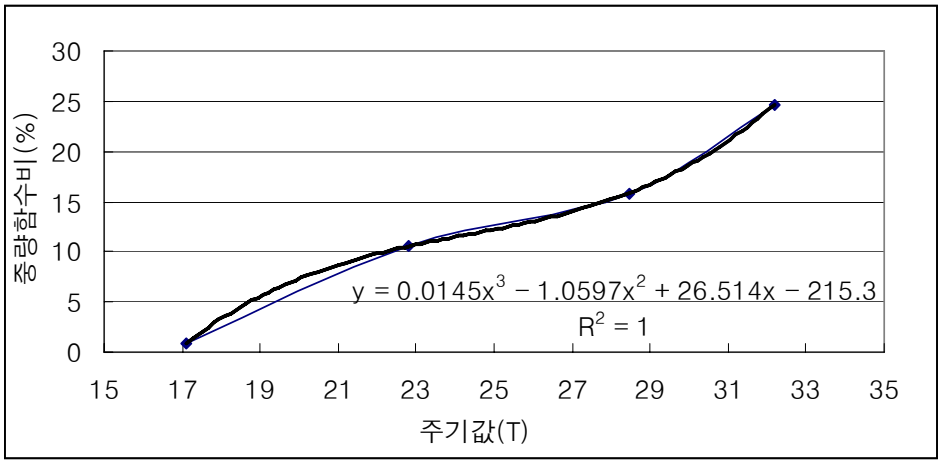
TDR은 흙의 종류, 다짐밀도 등에 의해 많은 오차가 발생하기 때문에 HWLS 노상 다짐조건에서의 보정실험(calibration test)을 하였다. TDR을 노상에 매설하기 위해 아크릴 지그를 제작하였다. 아크릴 중간에 구멍을 뚫어 TDR의 위치를 결정한 후 고정시켰다. 물이 새는 것을 방지하기 위해 아크릴 중간에 위치한 TDR 센서와 다른 지그 주위에 실리콘을 덮었다. 실험에서의 함수비는 중량함수비(Gravimetric Water Content)를 말하며 0%, 10%, 20%, 30%로 변화 시켜가며 다짐을 실시하고 TDR의 주기값을 측정하였다. 다짐이 끝난 이후의 흙을 샘플링하여 무게를 측정하고 절대건조 상태의 무게를 비교하여 다짐 당시의 실제 함수비를 산출하였다.(KS F 2306) 이 값과 TDR 주기값의 관계로 회귀분석을 실시하여 보정방정식을 산정하였다. <그림3.3.27>은 실험에 사용된 TDR의 모습이다.

<그림 3.4.28>은 노상의 다짐 후 실측된 함수비와 TDR 주기값과의 관계를 3차 회귀분석한 결과이다. 이를 통해 나온 보정방정식은 <식 3.4.5>와 같다.



(a) TDR Data Logger　　(b) TDR 센서

<그림 3.4.27> 실험에 사용한 TDR의 모습



<그림 3.4.28> 함수비와 TDR 주기값과의 관계

$GWC\ (\%) = 0.0145T^3 - 1.0597T^2 + 26.514T - 215.3$ <식 3.4.5>

여기서, GWC (%) : 중량함수비(Gravimetric Water Content)

T : TDR 주기값

ㄴ. 투수에 따르는 투수성포장의 공용성 평가

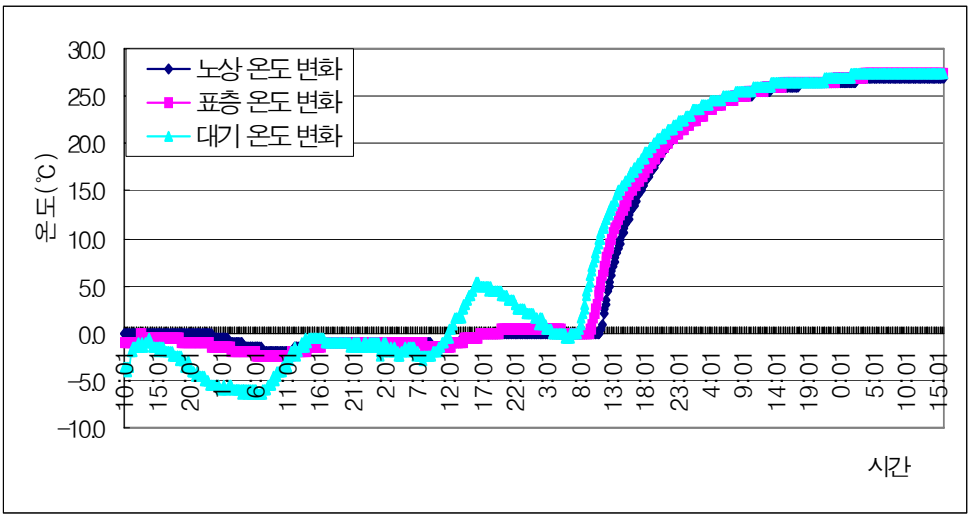
이 실험은 투수성 포장에 우수로 인한 물이 스며들어 노상에 함수비가 높아졌을 때를 가정하여 수행하였다. 또한 기온이 하강하여 함수비가 높은 노상이 동결 및 융해되었을 때 투수성 포장에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보았다. 단면의 구성은 Porous 아스팔트 표층, 저수축 투수 CTB, 보조기층, 노상의 순서로 구성되었으며 이외의 실험 조건은 이전과 동일하였다. 단, 노상의 함수비 상태를 파악하기 위해 TDR을 설치하였으며 노상, 표층, HWLS 챔버 내에 i-button을 설치하여 온도 변화를 살펴보았다.

실험을 하기 위한 투수성 단면을 완성하고 지그와 지그가 접합되는 부분마다 실리콘을 덮어 누수가 되는 것을 방지하였다. 우수로 인해 포장에 투수가 되는 상황을 가정하여 <식 3.4.5>를 이용하여 노상의 중량 함수비가 이론적으로 30%가 될 때까지 물을 표층위로 고르게 살포하였다. HWLS 챔버 내 온도를 영하로 떨어뜨려 노상을 동결시켜 주었으며 i-button 및 TDR을 이용하여 노상에서의 온도 및 함수비의 변화를 살폈다. 동결상태에서의 반복하중 재하는 15,000회를 실시하였으며 챔

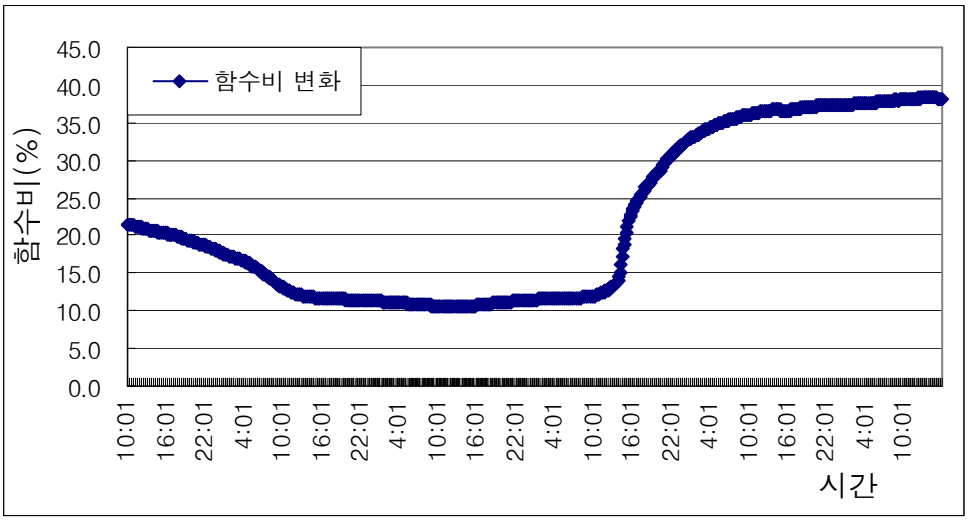
버 내 온도를 30℃로 높여 노상을 융해시킨 이후 10,000회를 추가로 실시하였다.

온도에 따른 함수비의 변화를 살펴보면 <그림 3.4.29>~<그림 3.4.31>과 같다. 이들은 시간에 따른 온도, 노상 함수비, 포장체의 거동을 그래프로 나타낸 것이다. <그림 3.4.29>에서와 같이 챔버 내 온도가 떨어지기 시작하면서 표층 및 노상의 온도가 약간의 시간적인 거리를 두고 유사한 경향으로 변하였다. <그림 3.4.30>에서처럼 TDR의 주기값을 환산한 함수비 역시 동일한 경향을 가지고 낮아지기 시작하였다. 이는 물과 얼음상태에서 TDR 주기값이 차이가나며 이로 인해 얼음 상태를 물로 인식하지 못하기 때문으로 파악된다. 이와 같은 경향은 기존의 연구에서도 제시된바 있어 온도와 함수비가 낮아진 상태를 노상의 동결상태로 판단하였다.

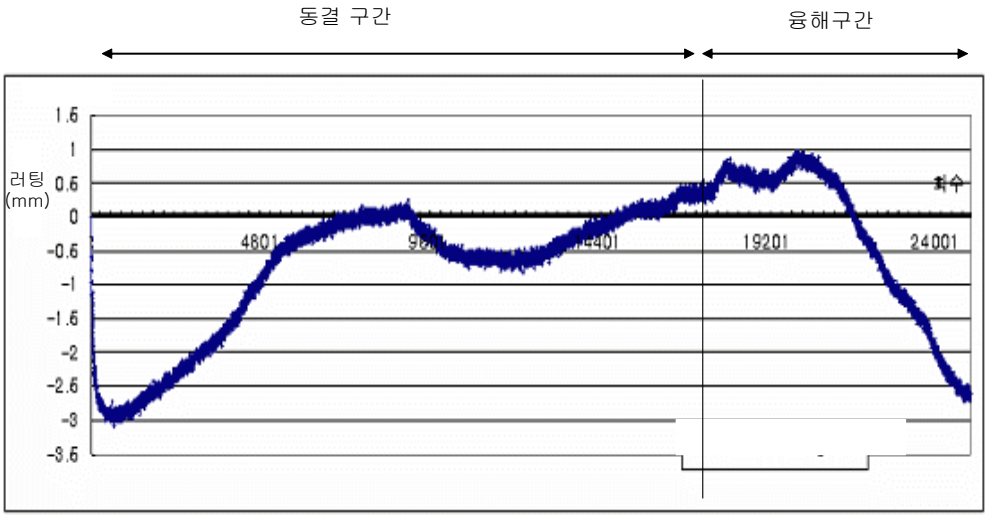
<그림 3.4.31>과 같이 시간에 따른 함수비와 러팅의 변화를 살펴보았다. 노상의 동결이 일어나는 시점 즉 함수비가 낮아지는 시점에 기존 러팅의 경향과는 달리 LVDT 변형량이 줄어들어 포장체가 3mm정도 융기되는 현상이 시작되는 것을 측정할 수 있었다. 이는 대단한 부피변화로 판단되며 투수성 포장의 수분이 노상에 존재할 때 보여주는 위험성을 나타내준다. 따라서 신속한 배수는 투수성 포장의 성능을 위해 매우 중요한 요소임을 알려주고 있다. 챔버 내의 온도를 30℃로 상승시켜 주었을 때에는 다시 LVDT 변형량이 늘어나 포장체가 내려가거나 정상적인 러팅의 거동을 나타내었던 것으로 판단된다. 이는 노상의 동결에 따라 동상현상이 발생하여 포장체가 솟아 올라왔다가 융해가 시작되면서 서서히 내려갔던 것으로 사료된다. 본 실험에서는 포장체의 거동을 LVDT 측정값만으로 판단하였는데 이러한 현상이 동상에 의한 영향인지 혹은 표층이 온도에 영향을 받아서인지 확실한 규명이 어렵다. 그러므로 추후 이러한 실험에서 표층의 러팅을 측정하는 LVDT 이외에 포장체 자체의 거동을 측정할 수 있는 별도의 게이지 설치가 요구된다. 이러한 온도, 수분에 따른 거동, 변형율 측정 등은 투수성 포장의 거동을 평가하는데 있어서 매우 중요한 의미를 가지나 HWLS의 기능만으로는 한계가 있었다. 그러므로 보다 정확한 환경 조건 모사를 위해 장비가 필요하므로 HES 의 제작은 큰 의미가 있다.



<그림 3.4.29> 시간에 따른 온도변화



<그림 3.4.30> 시간에 따른 노상의 함수비 변화



<그림 3.4.31> 반복하중 재하 회수에 따른 LVDT 변형량

(나) 본실험

예비실험 이후 실험 방법론적 개선 및 배합 재정의, 계측 결과 미비점 보완 등을 한 후 본실험을 실시하였다. 반복 하중재하 실험을 통해 러팅 발생깊이를 측정하고 이를 이용하여 포장의 특성을 나타낼 수 있는 다양한 값들을 산정하고자 한다. 또한 반복 하중재하 회수에 따른 정적 하중재하 실험을 실시하여 표층 및 기층 변형율을 측정하였다. 이를 통해 역해석을 실시하고 층별 탄성계수의 변화를 조사하여 강도감소계수를 구하고자 한다.

① 반복 하중재하 실험

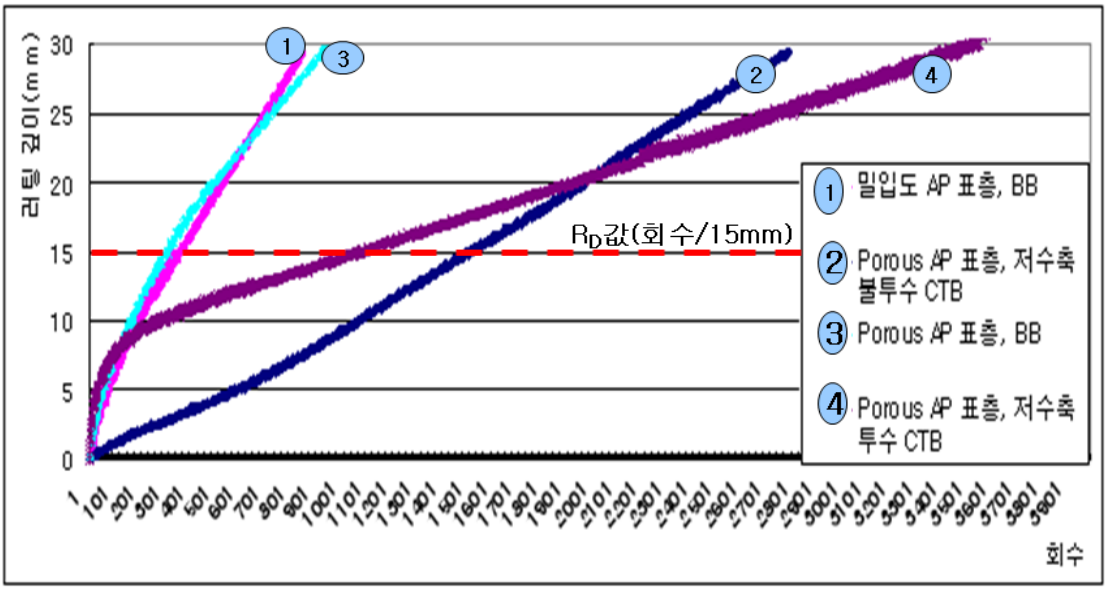
본 실험 단면에서 실험 시 챔버 내의 온도를 60℃로 유지하여 반복하중 재하 실험을 수행하였다. 예비실험에서 포장의 설계수명으로 정의하였던 R_D값(러팅 15mm)까지의 반복 하중재하 회수를 살펴보았다.

30℃에서의 러팅의 발생 경향은 크게 두단계로 나누어 생각할 수 있었다. 초기에 급속히 러팅이 발생하는 시기와 발생량이 줄어들어 서서히 안정화에 이르는 단계이다. 그러나 이번 본 실험에서의 러팅의 경향은 거의 선형적으로 빠르게 진행되어 안정화되는 단계를 찾기가 힘들었다. 또한 R_D값까지의 반복 하중재하 회수도 굉장

히 짧아져서 Porous AP 표층과 저수축 불투수 CTB, Porous AP 표층과 저수축 투수 CTB로 구성된 단면을 제외하고 나머지 단면들은 1000회 이전에 R_D값을 초과하는 러팅이 발생하였다.

R_D 값까지의 결과만으로 포장의 공용성을 평가하였을 경우, 반복 하중재하 회수 약 1600회 정도에 15mm의 러팅이 발생한 Porous AP 표층과 저수축 불투수 CTB로 구성된 단면이 가장 우수하게 나타났다. 밀입도 AP 표층과 BB, Porous AP 표층과 BB로 구성된 단면은 각각 450, 330회 정도에 15mm의 러팅이 발생하였다. <그림 3.4.32>는 러팅 측정 결과를 그래프로 나타낸 것이다.

<표 3.4.5>는 본실험에서의 H계수와 R_D 값을 정리한 결과이다. Porous AP 표층 및 저수축 불투수 CTB(2번)로 구성된 단면의 경우 러팅의 경향이 거의 선형으로 나타나 H값 산정에 어려움이 있었으며, 나머지 단면의 경우 실험 시 온도의 영향으로 러팅이 과도하게 발생하여 R_D값까지의 러팅 깊이 및 회수만을 고려하였다. R_D값의 경우 CTB를 사용한 단면이 일반 밀입도 단면보다 2배이상의 좋은 공용성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.



<그림 3.4.32> 본 실험에서의 각 단면별 러팅 측정 결과

<표 3.4.5> 본실험에서의 H계수, R_D 값 산정 결과 및 비교

	H_0		H_1		H_2		H_3		H_A (mm/회)	H_S (mm/회)	H_C (mm/회)	R_D
	회수	러팅 깊이	회수	러팅 깊이	회수	러팅 깊이	회수	러팅 깊이				
밀입도 AP 표층 Black Base	0	0	121	7.16 (mm)	706	25 (mm)	-	-	0.059	0.0304	-	450회/15mm =30(회/mm)
Porous AP 표층 저수축 불투수 CTB	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1520/15mm =101(회/mm)
Porous AP 표층 Black Base	0	0	489	19.94 (mm)	822	25 (mm)	-	-	0.041	0.0151	-	330/15mm =22(회/mm)
Porous AP 표층 저수축 투수 CTB	0	0	123	7.99 (mm)	2750	25 (mm)	-	-	0.065	0.0064	-	1100/15mm =73(회/mm)
결과값 비교												
	가속화구간		안정화구간		파괴구간				H_A (mm/회)	H_S (mm/회)	H_C (mm/회)	R_D
밀입도 AP 표층 Black Base	100%		100%		-				100%	100%	-	100%
Porous AP 표층 저수축 불투수 CTB	-		-		-				-	-	-	337%
Porous AP 표층 Black Base	404%		56.9%		-				69.4%	49.6%	-	73.3%
Porous AP 표층 저수축 투수 CTB	101%		449%		-				110.1%	21%	-	244.4%

가속화 구간의 H계수들을 살펴보면 밀입도 AP 표층 및 BB로 구성된 단면의 경우 Porous AP 표층과 BB로 구성된 단면에 비해 안정화 구간에 접어드는 시기가 조금 더 빨랐으며 러팅의 깊이도 적었다. 그러나 H_A의 결과를 보면 러팅이 발생하는 속도가 상대적으로 빠른 것을 알 수 있다. 안정화 구간의 경우도 비슷한 경향을 가지며 결론적으로 밀입도 AP 표층 및 BB로 구성된 단면이 최종 수명이 더 짧을 것이라 예상할 수 있다.

② 정적 하중재하 실험

반복 하중재하 회수 0, 1000, 10,000회에 반복 하중재하를 잠시 정지하고 정적 하중재하 실험을 실시하였다. 각 단면별 초기 변형율은 밀입도 AP 표층과 BB, Porous AP 표층과 BB 두 단면과 Porous AP 표층과 저수축 불투수 CTB, Porous AP 표층과 저수축 투수 CTB 두 단면이 비슷한 값을 나타내었다. 그러나 이후 1000 회, 10,000회에서는 뚜렷한 경향을 찾기가 힘들었다. 밀입도 AP 표층과 BB로

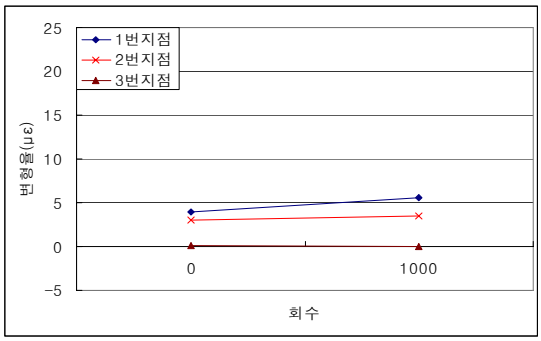
구성된 단면의 경우 60℃ 실험 온도에서의 너무 빠른 러팅 발생 때문에 1000회까지 정적 하중재하 실험을 수행할 수 있었으며 그 이후는 나머지 3단면만 실시하였다. 하중재하는 <그림 3.4.16>에 나타난 ①, ②, ③번 위치에 재하하였다. 또한 HWLS 챔버 내의 온도가 60℃ 에서 반복 하중재하 실험 중 장비를 멈추고 본 실험을 진행하였기 때문에 하중크기를 변화해 가며 하중을 재하할 수 없었다. 왜냐하면 동일 위치에서 하중 재하 후 변형된 표층이 다시 회복하는데는 상당한 시간이 걸리기 때문에 반복 하중재하 실험의 최종 결과에 영향을 줄 것으로 판단했기 때문이다. <그림 3.4.33>~<그림 3.4.35>는 각 단면별 정적 하중재하 실험결과를 그래프로 나타낸 것이다.

ㄱ. 밀입도 AP 표층, BB

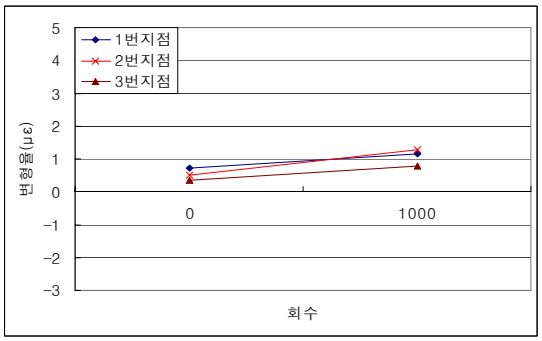
<그림 3.4.33>의 경우 1000까지만 측정하였으며 초기값과 1000회에서의 값의 변형율의 변화는 약간 증가하는 추세를 나타내고 있다. 표층에서의 변형율은 하중 재하 위치가 변형율 게이지에 가까울수록 크고 민감하게 나타났다. 기층에서의 변형율은 전반적으로 표층에서의 결과보다 20% 수준으로 나타났으며 세 지점간 변형율의 차이가 크지 않았다.

ㄴ. AP 표층, 저수축 투수 CTB

<그림 3.4.34> 역시 표층에서, 변형율 게이지와의 거리가 가까울수록 변형율이 민감하고 크게 나타났다. 하중 재하 회수가 늘어남에 따라 표층에서의 변형율의 변화는 더 커졌으며 이는 공용 후 포장의 강도가 떨어지는 것과 동일한 현상에 의한 결과라 판단된다. 저수축 불투수 CTB의 경우 회수가 증가함에 따라 인장변형율이 아닌 압축변형율이 발생하는 것을 볼 수 있었다. 이는 표층이 얇아짐으로 인해, 변형율계와의 거리가 멀어지는 가장자리에서는 하중이 직접 콘크리트 기층을 누르는 것과 같은 효과가 생겨 인장력이 아닌 압축력이 생기는 현상으로 사료된다.

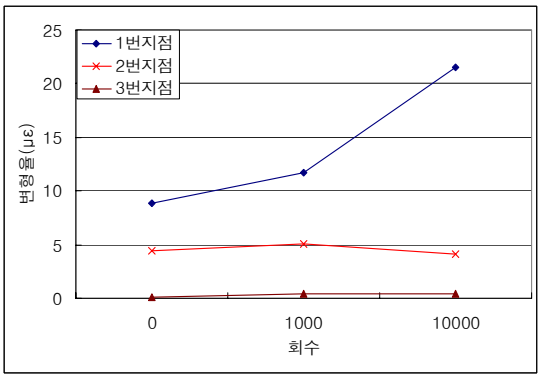


(a) 표층에서의 변형율

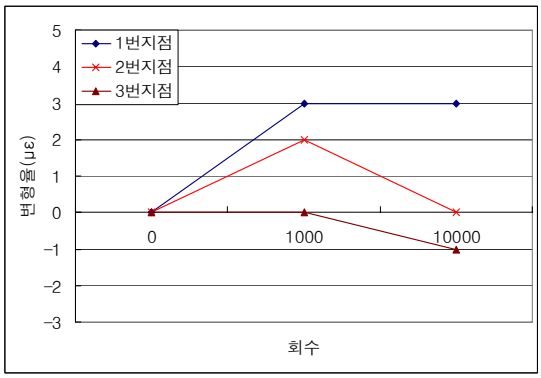


(b) 기층에서의 변형율

<그림 3.4.33> 밀입도 AP 표층, BB 단면에서의 정적 하중재하 실험 결과

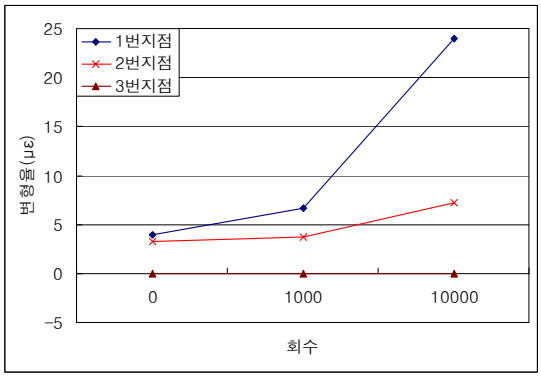


(a) 표층에서의 변형율

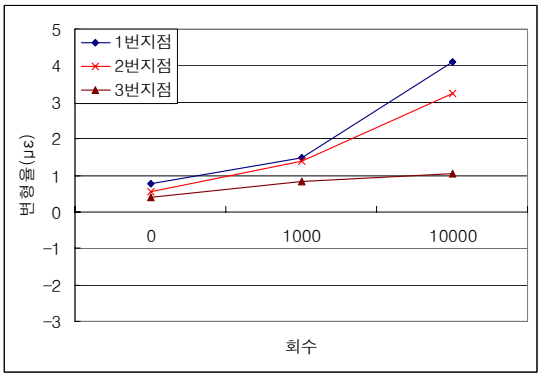


(b) 기층에서의 변형율

<그림 3.4.34> Poruos AP 표층, 저수축 불투수 CTB 단면에서의 정적하중재하 실험 결과



(a) 표층에서의 변형율



(b) 기층에서의 변형율

<그림 3.4.35> Poruos AP 표층, BB 단면에서의 정적 하중재하 실험 결과

ㄷ. Porous AP 표층, BB

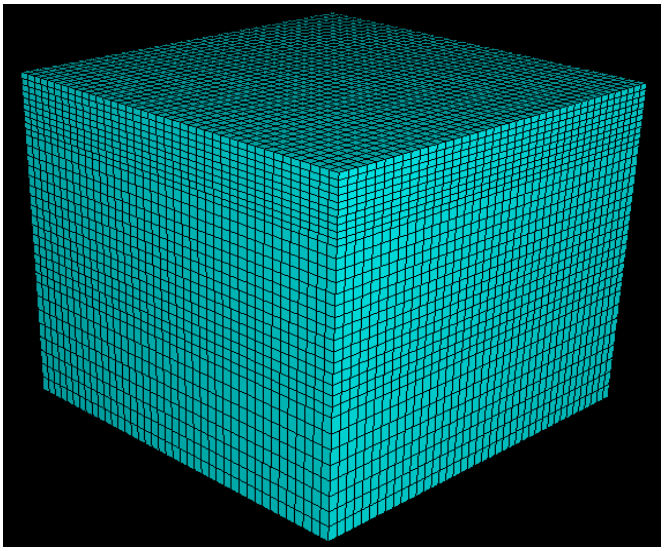
<그림 3.4.35>에서도 앞서 설명한 단면과 유사한 경향이 나타났다. 표층 및 기층 모두 아스팔트 층이므로 CTB에서와 같은 강성 포장에서의 변형율 양상, 즉 포장체 가장자리에 하중을 가했을 때 슬래브 중간에 압축이 발생하는 등의 경향은 찾아볼 수 없었다.

③ 실험 결과와 ABAQUS 해석 결과와의 비교(예)

앞에서 살펴본 바와 같이 상대강도감소계수를 구하기 위하여 HWLS 결과와 구조해석 모형의 해석 결과를 비교하였다. 하지만 실험 데이터의 양이 한정되고 고온에서 실험한 결과이기 때문에 여기서는 단지 예로써 제시하였다. 사용한 정적하중 시험 결과는 상대적으로 실험 오차가 작은 투수 AP / BB 단면을 선택하였다.

ㄱ. 해석 모형

본 연구를 위해서 HWLS 실험을 모사할 수 있는 모형을 <그림 3.4.36>과 같이 개발하였다. 하중재하 위치에 따른 변형률을 측정하기 위해서 모형에서는 평면상 등간격으로 3D 요소망을 생성하였다. 하중은 정적하중재하시험과 동일한 크기이며 물성을 달리하여 해석하였다.



<그림 3.4.36> 러팅 발생해석을 위한 모형

ㄴ.실험 결과와의 비교

HWLS에서 실험한 투수 AP / BB 층의 실험 결과와 ABQUS 해석 결과를 비교하였다. <표 3.4.6>은 실험결과를 반복하중재하 회수에 따른 지점별 변형률을 나타낸 것이다. <표 3.4.7>에서 보듯이 표층과 기층의 물성을 변화해가며 해석한 결과이다. 최적해는 최소자승법을 이용하였다. 각 위치별 실측결과와 해석결과의 차의 합이 가장 작은 물성값을 추정 물성값으로 선정하였다. 그 결과 초기의 물성은 오차의 합이 가장 작은 표층 7.5 GPa, 기층 7GPa 정도의 값을 산출하였다. 1000회일 경우, 탄성계수가 감소하여 표층 5 GPa, 기층 4.5 GPa 정도로 추정되었다. 표층은 약 33% 정도 강도가 감소하였으며, 기층은 36% 정도 감소한 것으로 나타났다.

<표 3.4.6> 반복하중재하 회수에 따른 지점별 변형률

	위치	반복하중 회수	1번지점	2번지점	3번지점
변형률 (με)	기층	0	0.78	0.55	0.4
		1000	1.47	1.39	0.82
	표층	0	3.91	3.26	-0.02
		1000	6.62	3.73	0.03

<표 3.4.7> 변형률에 의한 해석 결과

물성	표층	GPa	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7	7.5
	기층		3.5	4	4.5	5	5.5	6	6.5	7
	보조기층	10 Mpa	13.031	13.031	13.031	13.031	13.031	13.031	13.031	13.031
변형률 10^{-6}	기층	1번지점	3.36	2.99	2.68	2.44	2.23	2.06	1.91	1.78
		2번지점	3.01	2.67	2.40	2.18	1.99	1.84	1.71	1.59
		3번지점	2.07	1.83	1.65	1.50	1.37	1.27	1.17	1.10
	표층	1번지점	6.77	5.95	5.30	4.78	4.36	4.00	3.70	3.44
		2번지점	3.79	3.32	2.95	2.66	2.42	2.22	2.05	1.90
		3번지점	0.673	0.579	0.507	0.451	0.406	0.369	0.338	0.312
오차	기층	0 회	15.49	11.41	8.59	6.59	5.13	4.04	3.21	2.57
		1000 회	7.76	4.96	3.17	2.01	1.25	0.74	0.42	0.21
	표층	0 회	8.93	4.51	2.31	1.35	1.09	1.25	1.64	2.18
		1000 회	0.44	0.93	2.57	4.70	6.98	9.26	11.46	13.54

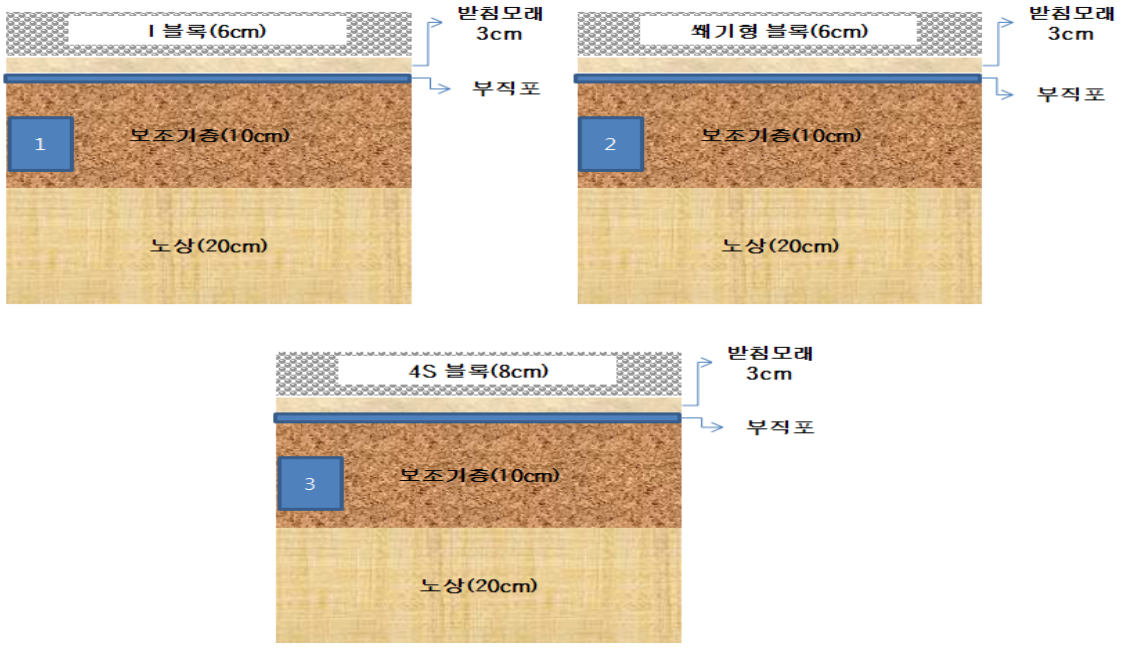
(5) HWLS 를 이용한 블록의 공용성 평가

본 연구에서 HWLS 를 이용하여 기존 불록(I 형, 쐐기형)과 4S 블록의 공용성을 비교하기위한 실험을 진행하고 있다. 현재 I 형 블록에 대한 실험이 거의 완료된 상태이며 쐐기형과 4S 블록은 I 형 블록 실험을 마친 후에 진행할 계획이다. 기존 블록은 일반 건설 자재 업체에서 구매하였으며 4S 블록은 본 연구진이 개발한 것이다.

(가) 실험 계획

블록 공용성 평가 실험은 다음 <그림 3.4.37>과 같이 실시할 예정이다. HWLS 에 노상 20cm, 보조기층 10cm를 깔고 얇은 부직포를 그 위에 설치한 다음 받침 모래층을 약 3cm 포설하고 블록을 설치하였다.

각 단면에 대해 우레탄 바퀴를 이용하여 약 200kg 정도의 하중을 재하하여 그 공용성을 살펴볼 것이다. 공용성 항목은 블록의 처짐량 및 파손 정도, 모래층 및 보조기층의 처짐량을 조사한다.



<그림 3.4.37> HWLS를 이용한 블록 실험 계획

(나) 기존 블록의 물성 및 크기

<그림 3.4.38>과 <그림 3.4.39>는 실험에 사용하기 위한 일반 블록들과 4S 블록을 나타낸 것이다. 4S 블록은 홈과 돌기부를 이용하여 맞물림 효과를 극대화 시킬 수 있도록 형상 설계가 되어 있다.

일반 건설 자재 업체에서 블록에 대한 시험 성적서 결과를 정리한 것이 <표 3.4.8>, <표 3.4.9> 이다. 블록의 물성실험은 보차도용 콘크리트 인터로킹블록(KS F 4419)에 근거하여 수행된 것이다. 기존 I 형 블록은 쐐기형 블록에 비하여 흡수율이 조금 높은 것으로 나타났으며 휨강도 부분에서는 더 좋은 것으로 나타났다. 4S 블록은 현자 그 물성을 평가 중에 있다.



<그림 3.4.38> I 형 블록과 쐐기형 블록 형상



<그림 3.4.39> 4S 블록 형상

<표 3.4.8> 기존 I 형 블록 크기 및 물성

구분	치수(mm)			흡수율(%)	휨강도(MPa)
	가로	세로	두께		
1	198.8	98.7	60.2	4.8	8.4
2	199.0	98.9	60.4	5.2	8.5
3	199.0	99.0	60.6	5.1	8.6
4	198.5	98.5	60.3	4.8	8.6
5	198.7	986	60.3	5.1	8.2

<표 3.4.9> 기존 쐐기형 블록 크기 및 물성

구분	치수(mm)			흡수율(%)	휨강도(MPa)
	가로	세로	두께		
1	219	107	60	4	8.3
2	218	107	60	4	7.5
3	219	107	60	4	7.0
4	219	107	60	4	7.4
5	219	107	60	4	6.6

(다) 노상 및 보조기층 설치

HWLS 에 설치하는 노상 및 보조기층 재료는 4S 3차 시험시공 현장인 무안-광주간 고속국도에서 사용되는 재료를 수급하여 본 실험에 이용하였다. <표 3.4.10>은 노상 및 보조기층 재료의 물성 실험 결과를 나타낸 것이다. 이 물성표를 이용하여 보조기층의 E 다짐법의 OMC, 노상은 많이 사용되는 A 다짐법의 OMC 를 이용하여 HWLS 단면을 제작하였다.

노상 및 보조기층의 다짐은 다음 <표 3.4.11>에 나타난 바와 같이 실시하였다.

<표 3.4.10> 노상 및 보조기층의 기초 물성

구분	수정 CBR (%)	비중 (kg/m^3)	균등계수	곡률계수	최대건조밀도 (kg/m^3)		OMC (%)	
보조기층	59	2.64	/	/	E 다짐	2.201	E 다짐	6.1
노상	25	2.64	24.2	1.839	A 다짐	1.774	A 다짐	15.3
					D 다짐	1.865	D 다짐	14.1

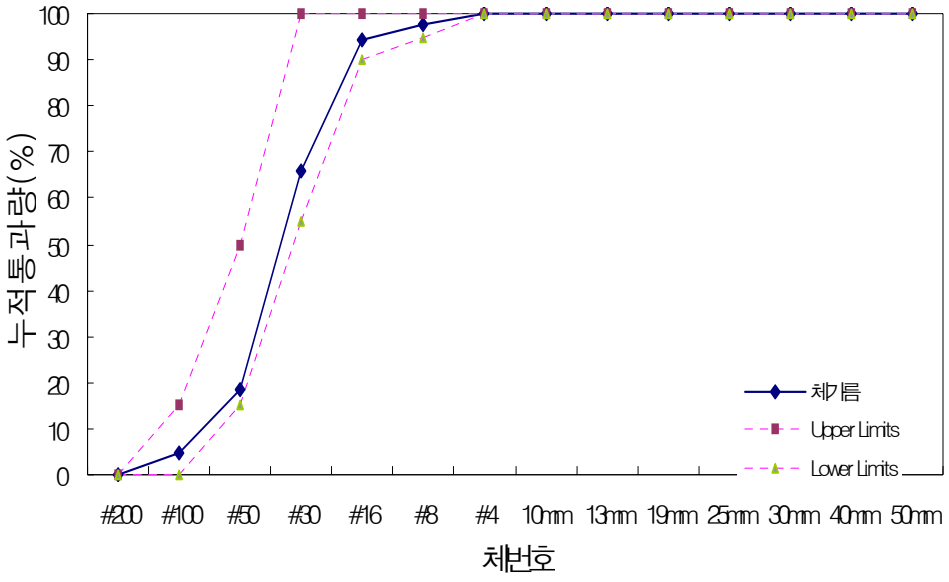
<표 3.4.11> 노상 및 보조기층 다짐

	재하 하중(kgf)	재하 회수	재하 속도(㎞/h)
노 상	600	30회	0.67(3단)
보조기층	600	30회	0.67(3단)

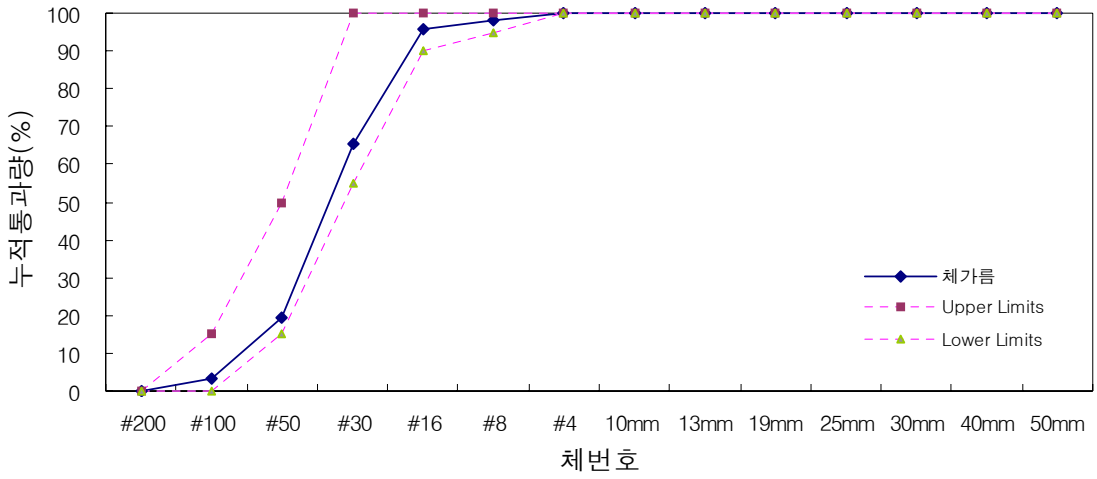
(라) 모래 받침층 및 줄눈 채움 모래

모래 받침층은 영국의 입도 기준에 근거하여 상한선과 하한선 내에 들어올 수 있도록 하였다. <그림 3.4.40>는 받침 모래의 입도 분포를 나타낸 그림이며 <그림 3.4.41>은 줄눈 채움 모래의 입도 분포를 나타낸 그림이다.

두 모래층 모두 입도 기준을 만족하는 것을 알 수 있었으며 블록 실험 시 모래는 반드시 입도 시험을 실시하여 사용할 것이다.



<그림 3.4.40> 받침 모래 입도 분포 곡선



<그림 3.3.41> 줄눈 채움 모래 입도 분포 곡선



<그림 3.4.42> HWLS용 일반 블록 시공

(마) 블록 시공

블록 시공은 HWLS 폭이 60×60 cm 이기 때문에 블록을 절단하여 그 크기를 맞춰 시공하였다. 바퀴의 주행 방향이 블록의 폭 방향이 되도록 설치하였으며 수평자를 이용하여 받침 모래 및 블록층의 수평을 맞췄다. 블록 설치 후 줄눈 채움 모래를 뿌려 일정한 양의 모래가 줄눈을 채울 수 있게 하였다.



<그림 3.4.43> HWLS에서의 하중 재하 후 블록 파손

(바) 주행 시험 및 결과

주행 시험은 원더링 효과를 고려하여 진행하였다. <표 3.4.12>는 블록 실험에 적용한 시험 조건을 나타낸 표이다.

<그림 3.4.43>은 약 12000회 정도 주행하였을 때 블록의 파손 상태를 나타낸 그림이다. 하중이 집중적으로 재하된 중앙부에서는 블록이 파손되는 현상이 나타났으며 블록간의 단차가 심하게 발생하였다. 또한 모래층이 꺼짐으로 인해 블록의 모서리 부분끼리 맞물려서 파손이 발생하는 것을 알 수 있었다.

시험 종료시 블록층을 걷어 내고 받침 모래층과 보조기층의 처짐량을 살펴보았다. <그림 3.4.44>에서 알 수 있듯이 블록이 맞물림 현상이 효과적이지 못했기 때문에 하중이 분산되지 못하고 모래층과 보조기층에 직접 전달되어 각 층에서 처짐량이 발생하였다. 받침 모래층은 약 1.7 cm, 보조기층은 1.5~1.9 cm 정도로 나타났다.



<그림 3.4.44> 받침 모래 및 보조기층의 처짐

<표 3.4.12> HWLS 주행 시험 방법 세팅

주행방법	주행방향 (mm)	Acq 시간 (Sec)	속도 (Km/h)	하중 형태
원더링	500	0.2	3.0	High Load

(6) 요약

HWLS를 이용하여 친환경 4S 단면인 투·배수성 포장을 제작하고 공용성을 평가하였다. 반복 하중재하 및 정적 하중재하 실험 결과를 통하여 강도감소계수 및 H계수, R_D 값을 제안하였다. 포장의 형식에 따른 H계수, R_D 값, 강도감소계수를 산정하고 이를 이용하여 제안한 신포장 시스템이 러팅 저항성 측면에서 문제가 없음을 밝혔다. 또한 블록의 주행 시험을 진행하여 이에 대한 공용성 평가를 수행하고 있으며 추가적으로 I 형 블록 이외에 쐐기형과 4S 블록을 추가로 진행할 계획이다.

■ 예비실험과 본실험에서 챔버 내의 온도를 달리하여 실험을 실시하였으나, 공용성 평가에 있어서 동일한 결론을 도출하지 못하였다. 추후 보완 실험이 요구된다. 단, 30℃에서의 공용성 평가에서 가장 우수한 값을 나타낸 것은 Porous AP 표층과 BB, Porous AP 표층과 저수축 투수 CTB 였으며 60℃에서 가장 좋은 공용성을 나타낸 것은 Porous AP 표층과 저수축 불투수 CTB로 구성된 단면이었다.

■ H 계수를 정의했고 R_D를 비교한 결과 실내실험 장비인 HWLS의 포장평가 적용 가능성을 알 수 있었다. 특이 이들을 이용하여 신포장 평가 및 품질기준 수립, 현장 공용성 자료와의 전환 등이 가능해 졌다.

■ 강도감소계수를 구할 수 있는 이론적 토대를 마련하였는데 HWLS 실험과 ABAQUS 해석을 통해 접근할 수 있었다. 이론적 토대를 바탕으로 강도감소계수를 산정하였으나 이론식이어서 추후 검증 연구가 필요하다.

■ 블록에 대한 실험을 수행하였으며 현재 기존의 I 형 블록에 대한 평가가 진행되었다. 이를 통해 블록의 맞물림을 평가하였으며 받침 모래, 줄눈 채움 모래의 중요한 기능을 알 수 있었다. 향후 과제가 종료 되더라도 쐐기형과 4S 블록에 대한 실험을 진행할 것이다.

2. 포장가속시험기를 이용한 공용성 평가

가. 포장가속시험기의 구성

본 연구에서는 한국도로공사 도로교통 기술원에서 보유하고 있는 포장 가속시험기를 이용한 공용성 평가에 이용되는 장비의 구성을 살펴보고, 연구수행에 적합하도록 최적화한 시설 변경 부분에 대한 내용을 기술하기로 한다.

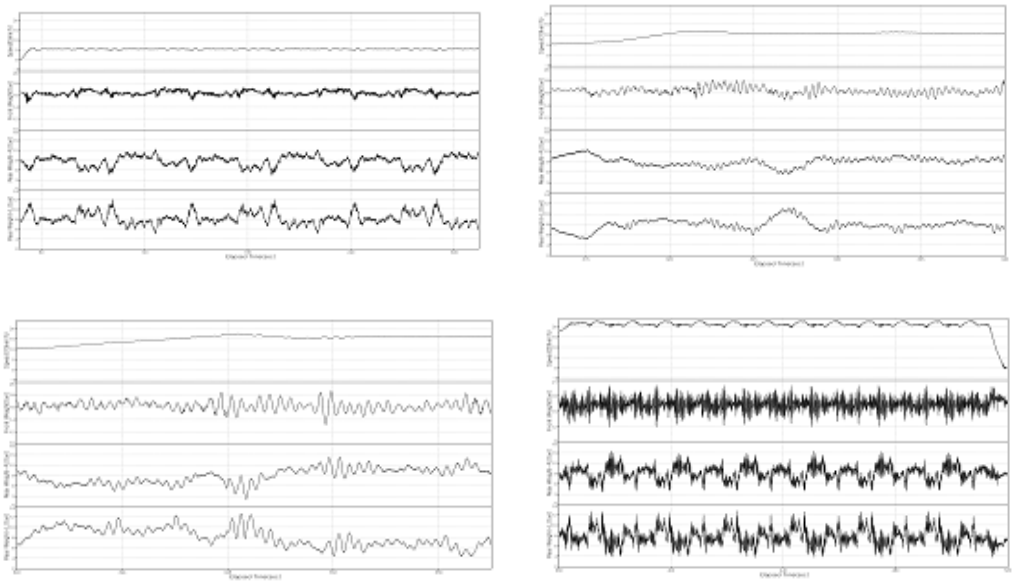
포장가속시험은 단기간에 여러 해 동안의 교통하중을 모사하는 것으로 다음의 <그림 3.4.45>와 같은 차량에 의해 교통하중을 포장체에 가하게 된다. 이러한 카트는 3개가 반복적으로 트랙을 회전하면서 포장체에 교통 하중을 가하는데, 카트의 중량은 16.5ton에서 36ton까지 변화시킬 수 있다.

본 가속시험기는 차량의 기본 구조를 그대로 모사한 시험기로서 실제 차량의 운동을 거의 다 구현하는 특징이 있다. 일반적으로 도로를 주행하는 차량은 3차원 직각좌표계에서 x, y, z방향으로의 병진운동에 대한 자유도를 가지며, 아울러 x, y, z 방향으로의 회전운동에 대한 자유도를 가진다. 따라서 도로 표면의 평탄성이나, 경사, 횡방향 구배등에 의해 각 자유도에 대한 차량의 운동이 계속적으로 발생하게 되며, 이는 끊임없이 변화하는 하중 형태를 가지게 된다.

이러한 운동에 의해 축을 통해서 포장체에 작용되는 하중은 실제 카트의 무게보다 작을 수도, 또는 클 수도 있다. 본 연구에서는 예비실험 단계에서 이에 대한 검토를 수행하였으며, 카트의 회전 운동을 최대화하는 방법을 통해서 속도별로 축



<그림 3.4.45> 포장가속시험시설의 카트



<그림 3.4.46> 카트의 주행에 따른 축하중 변화

(좌상 : 5km/hr, 우상 : 10km/hr, 좌하 : 15km/h, 우하 : 20km/h)

하중의 분포에 대해 <그림 3.4.46>와 같은 결과를 얻을 수 있었다. <그림 3.4.46>에서 보는 바와 같이 저속의 주행임에도 불구하고 인위적인 회전 운동의 유발로 인해 뒤축의 좌우하중의 최대, 최소값이 상반되는 경향을 나타내었다. 그리고 하중의 변동량은 최대 8ton 정도인 것으로 나타났으며, 이러한 경향은 속도가 증가함에 따라 증대되는 것으로 나타났다. 변화의 폭이 주기적으로 크게 나타났는데, 주로 곡선구간에 들어와서 원심력의 영향으로 인해 차이값이 커지는 경향을 나타내었다. 구체적인 위치와 하중의 관계, 그리고 앞뒤축의 하중 변동에 대한 위상차이, 뒷축 좌우측의 하중변화에 대한 위상차이 등과 같은 세부 내용은 본 연구의 범위를 벗어나므로 기술하지 않기로 하며, 포장 시스템의 응답 및 거동 분석시 앞서 기술한 바와 같은 하중변화에 대한 영향을 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

(1) 환경하중 모사를 위한 온도 챔버

교통하중과 더불어 포장체의 공용성에 많은 영향을 미치는 환경하중의 주요한 요소인 온도하중은 다음의 <그림 3.4.47>과 같은 온도 챔버 내에서의 온도변화를 통해 구현할 수 있다.

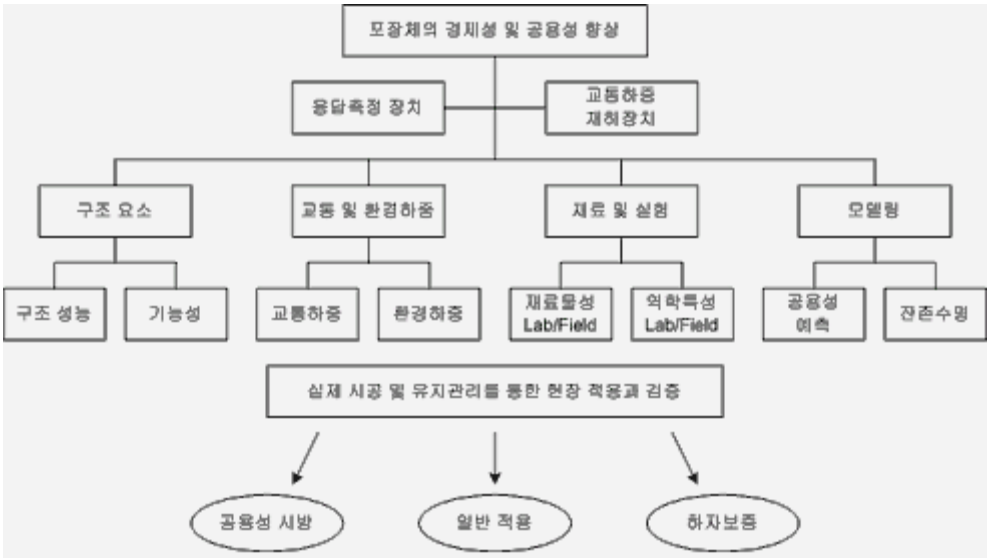


<그림 3.4.47> 환경모사를 위한 온도 챔버



<그림 3.4.48> 지반동결조건의 모사를 위한 냉각 파이프

챔버 내에서의 온도는 -20～+60℃로 변화가 가능하며, 공기의 대류방식에 의해 가열, 냉각을 한다. 본 연구에서는 본격적인 환경하중의 적용을 통한 누적 손상을 평가하지는 않으나, 온도 변화에 따른 응답특성의 변화 등을 측정할 계획이다. 그리고 온도 조건과 더불어 다음의 <그림 3.4.48>와 같이 노상에 매설된 냉각 파이프를 통해 전달된 냉각조건을 통해 지반동결조건을 모사할 수 있다.



<그림 3.4.49> 포장가속시험시설의 활용 분야

(2) 활용분야

포장가속기는 포장 시스템의 공용성을 향상시키고 경제성을 제고하기 위한 목적으로 가속시험을 수행하는 것으로, 다음의 <그림 3.4.49>와 같이 다양한 분야에 걸쳐 이용될 수 있다. 본 연구는 연구과정 중에 도출되는 새로운 포장 시스템에 대하여 수행되는 내용으로 <그림 3.4.49>의 구분 영역 중에서 재료 평가 부분과 공용성 평가 부분에 해당한다고 할 수 있다. 그리고 실험시 계측되는 다양한 응답 정보로부터 하중에 대한 응답 특성, 즉 포장체 내부 변형율, 기층과 보조기층으로 전달되는 압력의 크기, 지지력 변화, 탄성계수 변화 등에 대한 정보를 활용할 수 있다.

실험실 내에서 수행되는 소규모의 재료실험의 경우에는 재료의 물성 평가가 부분적인 목적을 가지고 수행되는 것이 일반적이다. 이러한 실험실 내에서의 작업은 엄밀한 물성평가에 효율적으로 활용되나, 거시적인 의미에서의 공용성 평가에는 한계점이 존재한다. 특히 도로 시설물인 포장은 현장에서의 시공 특성, 전체 구조 시스템의 거동특성이 공용성에 주요한 영향을 미치므로 포장가속시험시설을 이용한 공용성 평가에 큰 의미가 있는 것으로 판단된다.

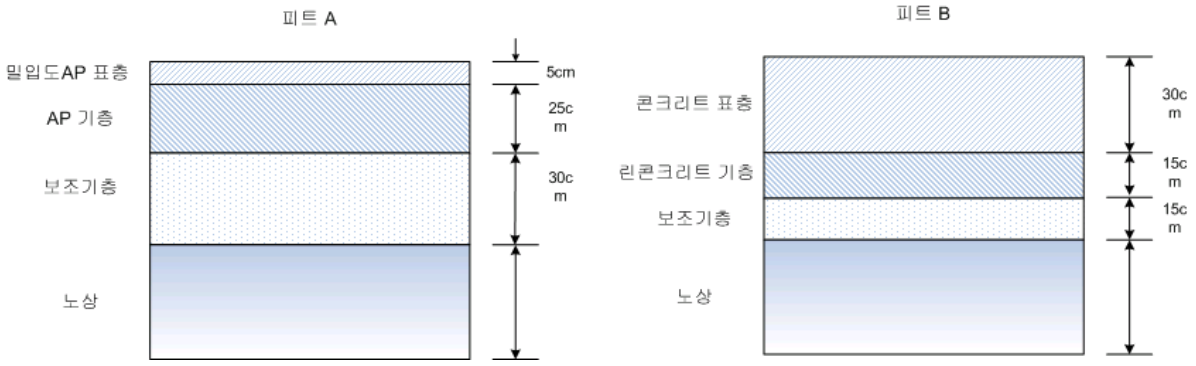
나. 운용성 검토를 위한 예비실험

(1) 개요

본 연구에서는 포장가속시험시설을 통한 새로운 포장 공법의 평가에 대한 효율성을 높이기 위하여 본 실험 이전에 예비 시험체를 타설하여 운용성에 대한 검토를 수행하였다. 예비실험은 앞서 기술한 바와 같은 하중패턴 분석, 시험체의 시공절차 확립, 장비운용 효율성 제고 등의 목적을 가지고 수행되었다.

(2) 시험체의 설치

본 연구에서 사용되는 포장가속시험시설은 실제 현장에서와 동일한 방법과 장비 그리고 품질관리 기준에 의해 시험체가 타설되는 장점을 가진다. 따라서 거의 현장조건과 동일한 시험체가 만들어지는 것이다. 시험체의 단면 두께는 일반적인 고속도로 포장의 단면을 기준으로 하여 정의 하였으며, 각 층의 두께는 다음의 <그림 3.4.50>과 같다. 시험운용의 목적을 달성하기 위해서 아스팔트 포장과 시멘트 콘크리트 포장 두가지 형식을 두 개의 피트에 나누어 설치였다. 즉 아스팔트 포장과, 콘크리트 포장의 시공성 검토 및 운용 특성을 모두 살펴보고자 하였다.



<그림 3.4.50> 포장가속시험시설의 시험운용을 위한 포장 단면



<그림 3.4.51> 예비실험에서
노상의 포설 전경



<그림 3.4.52> 예비실험에서
밀입도 아스팔트 표층의 포설 전경

(가) 노상 및 보조기층의 타설

트랙 내의 직선구간에 위치한 피트 내에 시험체를 타설하는데, 노상 및 보조기층은 다음의 <그림 3.4.51>과 같이 장비를 피트 안에서 운용한다. 다음의 <그림 3.4.51>은 버켓차량으로 노상의 그레이딩을 하고 소규모 롤러에 의한 진동 다짐을 실시하는 전경이다. 한 개 차로폭의 크기를 갖는 시험체의 폭으로 인해 시험운용에서는 작은 규모의 장비를 사용하였으나, 평판재하나 다짐도 시험을 수행한 결과에 의하면 현장 품질관리 기준을 상회하는 물리적, 역학적 특성을 나타내었다. 피트의 하부와 측면이 콘크리트 구조물로 되어 있어 다짐에너지의 효율이 높은 것으로 판단되었다. 보다 큰 용량의 장비도 사용에 문제가 없다는 판단을 하였으며, 피트의 시점부와 종점부의 경사로를 통해 피트 내부로의 장비의 진출입에 큰 문제가 없는 것으로 나타났다. 단 노상 포설 초기에 노상의 토피고가 낮은 경우 오히려 작은 장비의 진출입이 불리한 것으로 나타났다.

(나) 기층 및 표층의 타설

앞서 기술한 바와 같은 단면에 기층, 표층을 타설하였으며, 아스팔트 기층과 표층 그리고 린콘크리트층 타설시에는 현장에서 사용되는 피니셔에 의한 포설을 하였다. 그리고 시멘트 콘크리트 표층 슬래브는 시험일정과 임대 장비의 일정이 원활하게 조정이 안되어 인력포설의 방법으로 타설하였다. 포장가속시험동 내부 공간에서 피니셔의 운용에 별다른 문제점이 없었으며, 온도 챔버 내부에서도 장비운용

이 가능하였다.

다음의 <그림 3.4.52>은 시험 포장체의 아스팔트 표층을 피니셔 장비의 의해 타설하는 장면으로 현장과 동일한 방법에 의해 포설이 수행되는 것을 알 수 있다.

(다) 시험체의 계측

시험체의 계측은 표면의 균열, Rutting, 지지력 변화 등과 같이 표면의 성상변화를 통해 1차적인 정보를 수집함으로써 이루어진다. 이러한 표면 계측이 직접적으로 주요한 계측 항목이며, 여기에 추가적으로 역학적 특성 변화나 육안으로 관측하기 어려운 누적 손상을 포장체 내부에 계측기를 설치함으로써 알아볼 수 있다. 아직까지는 많은 도로 재료 및 공법과 관련한 실험들이 표면성상 변화의 추이 관찰에 의존하고 있고, 최종적인 공용특성이 이러한 특징에 의해 결정이 된다. 본 연구에서의 계측기를 통한 계측은 포장가속시험의 주요한 특징 중에 하나인, 제어되는 하중조건(Controlled loading condition)을 효과적으로 활용하는 방안으로 다양한 계측기들의 응답정보 수집방안을 검토하고자 하였다.

① 계측기 설치

본 시험운용에서는 포장체 내부의 변형율을 측정하기 위한 변형율 게이지, 하부층으로 전달되는 압력을 측정하기 위한 토압계, 그리고 내부의 온도변화를 측정하기 위한 온도 게이지를 시험체 타설과 동시에 매설하여 응답을 측정하고자 하였다.

<그림 3.4.53>는 보조기층 상부에 토압계를 매설하는 전경을 나타내는 그림으로 계측기를 안치 시킨 후 측정면의 접촉을 보장하기 위해 별도의 모래층을 계측기 상하부에 설치하는 것을 보여주고 있다.

포장 표층 또는 린콘크리트 기층의 내부에 설치되는 변형율계는 다음의 <그림 3.4.54>과 같이 별도의 거치대를 설치하여 매설하기도 한다. 단 아스팔트 표층의 경우에는 표층을 포설한 이후에 측정부분을 절취하거나 미리 매설된 함체를 제거하여 공간을 확보한 뒤에 계측기를 설치하고 다시 매우는 방식으로 변형율계를 설치하였다. 현장에 설치된 계측기는 다음의 <그림 3.4.55>과 같이 정적 데이터와 동적 데이터로 구분하여 별도의 로거에 의해 시험장 중앙이나 인접 계측 공간에서

수집하였다. 제어실까지 계측기 연결선을 연장하는 것은 연결선의 길이가 증대함에 따라 발생할 수 있는 노이즈를 방지하고 계측기로부터의 데이터 정보에 대한 신뢰성을 높이기 위해서 이다. 동적 데이터의 경우 로거에서 추출되고 디지털화된 계측정보의 양이 매우 크고, 계속적인 관리가 필요하므로 다음의 <그림 3.4.56>와 같이 제어 사무실로 무선전송하여 PC 서버에서 관리하도록 하는 시스템을 구축하였다.

그 동안의 계측 경험에 의하면 포장체 내의 계측기는 여러 가지 변화 요인에 의해 처음에 요구하는 데이터 정보의 수집이 매우 어렵고, 실물 시험의 경우에 데이터 크기가 작아 분석에 어려움을 겪는 경우가 많다. 따라서 매우 세밀한 계측기 설치와 정보수집 절차와 확립이 매우 중요한 사항이다. 본 연구에서는 이에 대한 충분한 검토를 위한 목적으로 계측기를 앞서의 그림과 같이 설치하고 정보를 수집하였다.



<그림 3.4.53> 토압계를 보조기층 상단에 설치하는 전경

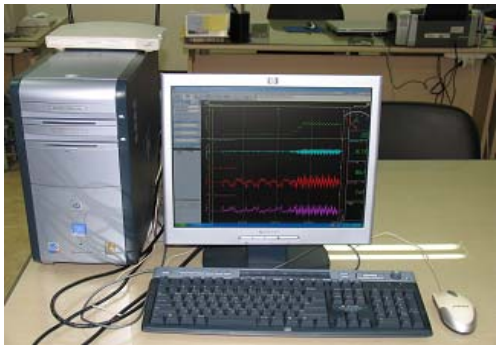


<그림 3.4.54> 변형율계를 표층 내부에 설치하는 전경





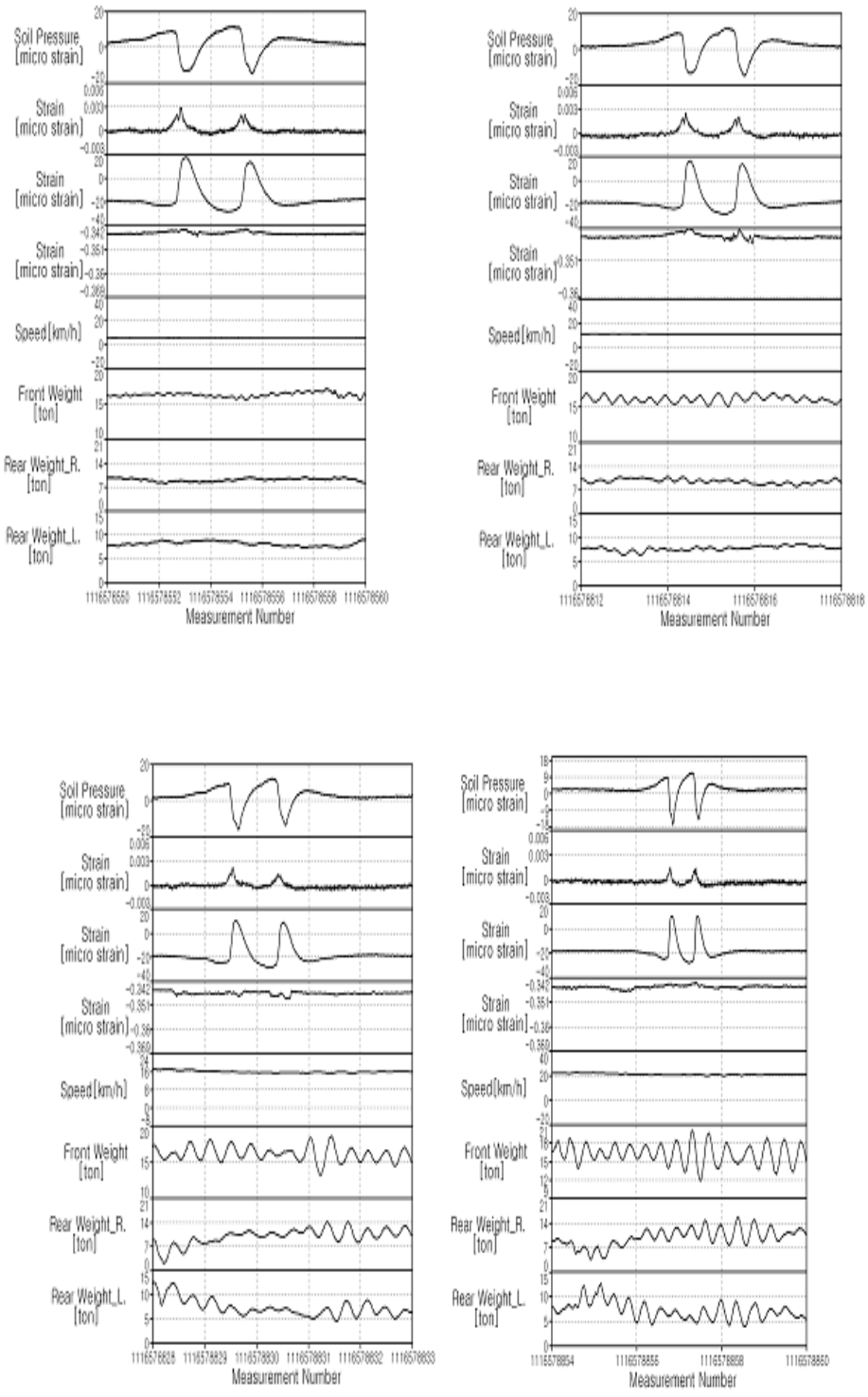
<그림 3.4.55> 응답측정을 위한 정적, 동적 데이터 로거



<그림 3.4.56> 제어실 계측용 서버

② 시험체의 응답

개별적인 계측기로부터 얻어진 데이터에 대한 분석은 본 연구의 범위를 벗어나므로, 본 연구에서는 데이터의 개괄적인 소개만을 기술하기로 한다. 다음의 <그림 3.4.57>에서 보는 바와 같이 다양한 계측 정보가 동적 로거를 통해 속도의 변화에 대한 시간영역에서 측정되는 것을 알 수 있었다. 측정 결과 소정의 필터링 절차만으로도 데이터의 분석이 가능할 정도로 노이즈의 발생이 매우 작아 데이터 축적에 문제가 없음을 알 수 있었다. 다음은 속도에 따라 토압계, 변형율계, 그리고 카트의 축중량의 변화를 한 번에 볼 수 있도록 구성한 그래프이다.



<그림 3.4.57> 카트 속력 에서 계측기로부터 얻어지는 응답 데이터

(좌상 : 5km/hr, 우상 : 10km/hr, 좌하 : 15km/h, 우하 : 20km/h)

다. 4S 포장(배수성 아스팔트/ 저수축 투수 CTB)의 가속시험

(1) 시험목적 및 개요

(가) 시험개요

본 연구에서 수행되는 포장가속시험시설을 이용한 공용성 평가는 주관연구기관과 물성개발팀에서 얻어진 결과로부터 도출된 단면인 저수축 린콘크리트 위에 배수성 아스팔트 표층으로 구성되는 포장 시스템에 대하여 수행한다. 각 실험용 피트(3.3m×24m×2m)에 저수축 린콘크리트 기층 배수성 아스팔트 시험체 제작 설치와 동시에 각종 계측용 게이지를 매설하여 기분물성실험, FWD, 정적재하, Core 채취, 현장투수실험, Rutting실험, 미끄럼저항측정 등을 포장가속시험 운용횟수에 맞춰 실시했다.

<표 3.4.13> 시험체 제작 시 기본물성실험

기본물성실험	
보조기층	들밀도실험, 평판재하실험, DCP
저수축 투수 CTB	압축몰드 제작, 휨몰드 제작, 실내 투수실험
투수 Asphalt	공극률 측정, 동탄성계수 측정, 간접인장강도 실험
밀입도 Asphalt	공극률 측정, 동탄성계수 측정, 간접인장강도 실험
Black Base	공극률 측정, 동탄성계수 측정, 간접인장강도 실험

<표 3.4.14> KALES 운용횟수에 따른 실험항목

횟수 / 항목	0	500	1,000	5,000	10,000	500,000	1,000,000
FWD	●		●		●	●	●
정적재하	●		●		●	●	●
Core 채취	●		●		●		●
노면조도	●	●	●	●	●	●	●
현장투수실험	●	●	●	●	●	●	●
Rutting	●	●	●	●	●	●	●
미끄럼저항성	●	●	●	●	●	●	●

(함수량, 온도 항시계측)

<표 3.4.15> 포장 가속 실험 시 측정변수

구 분	포장가속시험기의 운용
측정항목	①4S형 포장의 공용성 및 시공성 ②일반 Asphalt포장과의 거동 특성 비교검토 ③Rutting 및 투수성 ④미끄럼 저항 ⑤온도
실험내용	①육안관측 ②FWD 실험 ③정적재하실험 ④온도측정 ⑤토압측정 ⑥현장투수실험 ⑦KALES 운용횟수에 따른 러팅 측정 ⑧미끄럼 저항 측정(BPT) ⑨Dynamic 변형률 실험 ⑩기본 물성시험(다짐도, 지지력, CBR, 노상 함수비 등)
시험장소	포장가속실험동(A, B pit)

(나) 실험변수

포장가속시험을 통해 수행되는 세부적인 측정항목 및 실험내용은 다음의 <표 3.4.15>와 같으며, 기본물성실험은 노상, 보조기층, 기층, 표층의 순서로 타설이 되면서 측정을 한다. 그리고 물성실험은 데이터 축적의 목적뿐만 아니라 시험체 타설의 품질관리 목적을 가진다.

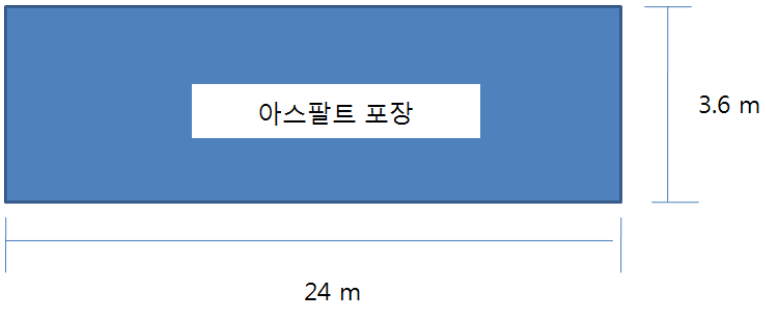
(2) 포장가속시험기 시험단면 및 계측기 설치 계획

(가) 시험단면계획

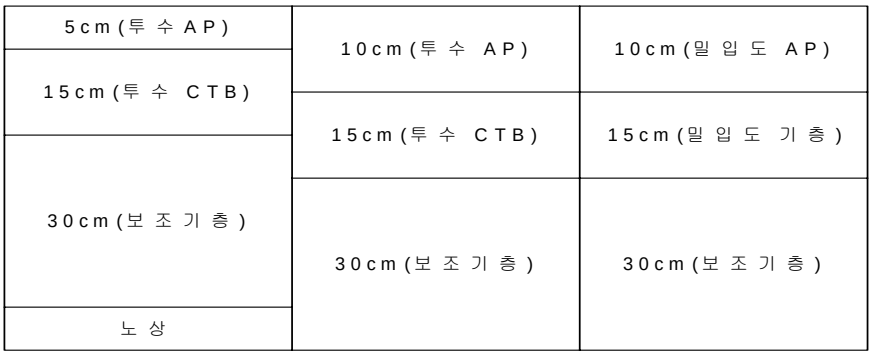
포장가속시험기 시험운용 주목적이므로 시험운용의 목적을 달성할 때 까지 실험을 수행하며, 시험운용의 세부목적은 다음의 <표 3.4.16>과 같다.

<표 3.4.16> 포장가속 실험에 대한 세부연구 목적 및 평가항목

구 분	세부연구목표	평가의 착안점 및 척도
목 적	■ KALES를 이용한 파손 정량화	■ KALES실험에 따른 파손 - Rutting, 공용성



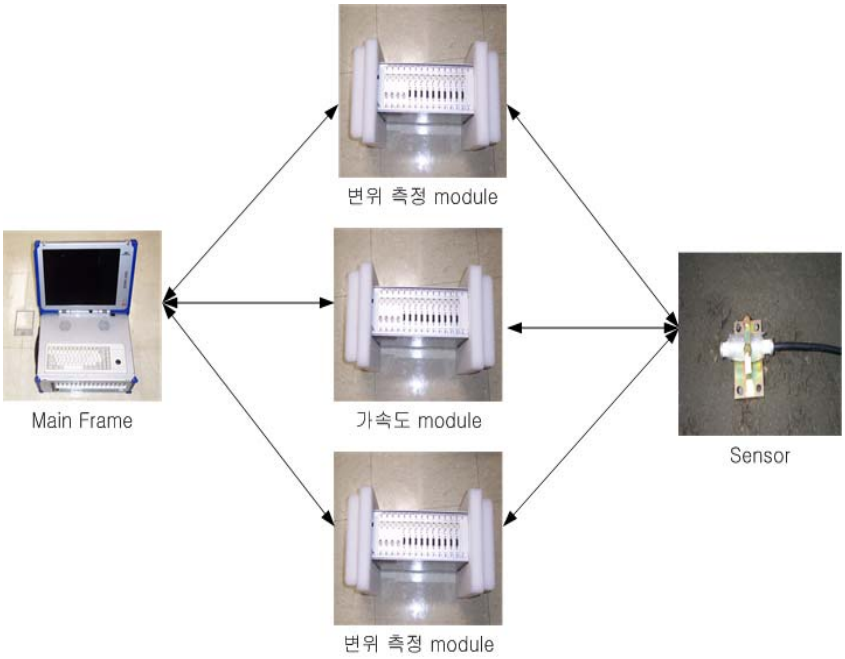
<그림 3.4.58> 포장가속 실험기 실험 피트 폭과 길이



<그림 3.4.59> 포장가속 실험기 실험 단면(A, B 동일)

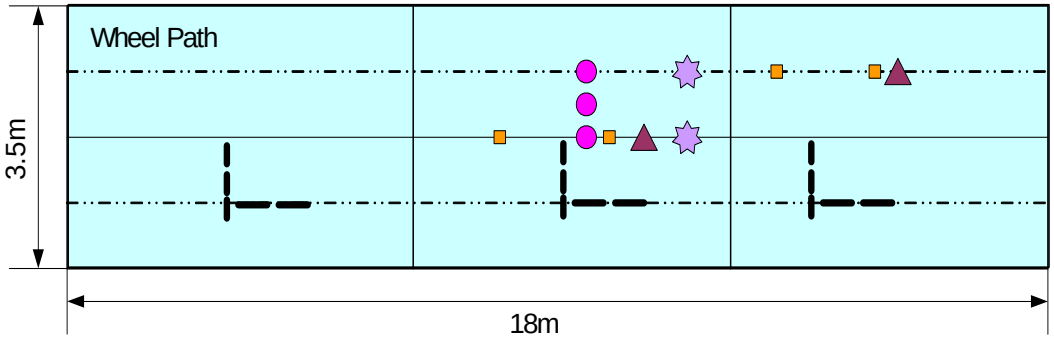
(나) 계측기 매설 계획

계측기를 통한 응답 데이터의 수집은 다음의 <그림 3.4.60>과 같이 계측기로부터 얻어진 신호를 로거의 개별적인 센서에 적합한 모듈에서 처리하여 메인 프레임에서 분석 저장하는 방법으로 이루어진다. 그리고 앞서 언급했던 바와 같이 필요한 경우 분석제어실의 서버로 무선 전송이 된다. <그림 3.4.61>과 <그림 3.4.62>는 각각 계측 매설 평면도와 계측기 매설 측면도를 보여주고 있다.

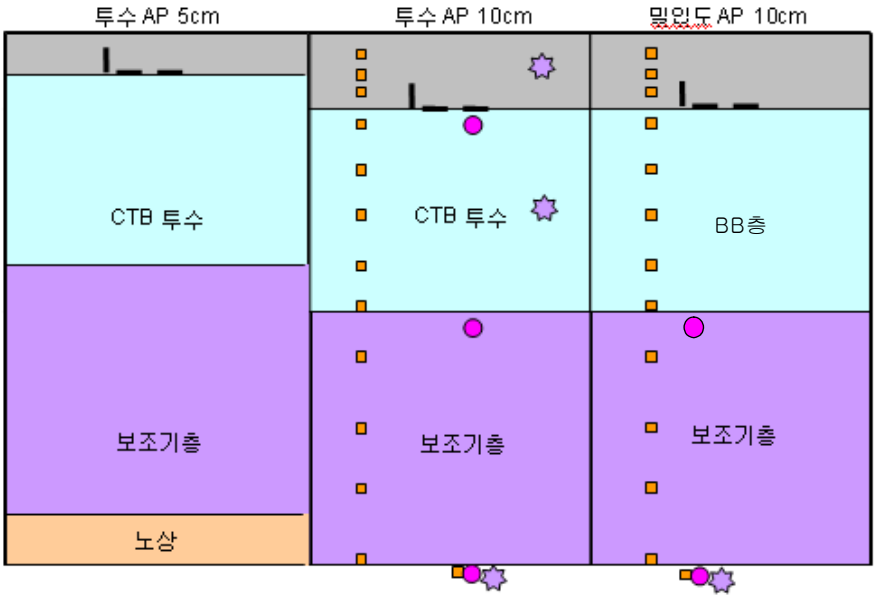


<그림 3.4.60> 포장가속 실험기 계측 개요도

: 변형율 센서
: 토압계
: 온도계
: 함수량계
: 가속도계



<그림 3.4.61> 포장가속 실험 계측기 매설 평면도



<그림 3.4.62> 포장가속 실험 계측기 매설 측면도

(3) 시험체의 타설

(가) 노상의 타설

노상은 미리 야적장에 적치된 노상재료를 <그림 3.4.63>과 같이 피트내에 덤핑하고 버켓 차량을 이용하여 그레이딩을 실시한 후, 다짐을 하는 방법으로 수행되었다. 노상의 설치는 품질관리 시방서에 규정된 바와 같이 소요의 품질을 얻기 위해 1층을 20cm 이하로 하여 수행하였다.



<그림 3.4.63> 피트내 노상 설치 전경

<그림 3.4.64>에 나타난 바와 같이 다짐은 15ton 용량의 진동롤러로 수행하였는데, 별도의 다른 롤러를 사용하지 않고도 소요의 품질조건을 확보할 수 있다는 판단에 의하였다. 노상의 두께는 <그림 3.4.65>와 같이 피트 측면에 사전에 표시된 기준선에 의해 관리하였고, 면마무리 후에도 검측을 수행하여 소요의 두께가 포설되도록 관리하였다. 특히 표층의 두께 차이로 인해 인위적인 높이 차이를 노상, 보조기층, 린콘크리트 층에 발생시켜야 하므로, 이의 관리에 세심한 주의가 필요하였다. 그리고 진동롤러의 다짐이 부족할 수 있는 측면부와 피트의 양끝단부는 <그림 3.4.66>에 나타나듯이 별도의 소형 진동 콤팩터를 사용하여 추가적인 다짐을 수행하였다. 노상의 다짐 공정 후에는 사전에 재료 시험에 의해 결정된 최대건조밀도의 95% 이상의 다짐도를 갖는 지에 대한 시험을 실시하여 실제 현장의 품질관리 기준에 부합되는가를 확인하였다.



<그림 3.4.64> 진동롤러에 의한 노상의 다짐



<그림 3.4.65> 노상 레벨 설정 및 검측




<그림 3.4.66> 소형 컴팩터에 의한 모서리부와 단부의 추가 다짐

(나) 보조기층의 타설

보조기층은 노상의 포설과 거의 동일한 공정에 의해 진행되었으며, 설계된 보조기층의 두께가 30cm 이므로 두 개의 층으로 나누어 약 15cm 씩을 포설하고 다짐하는 방법에 의하였다. 다음의 <그림 3.4.67>은 피트 내에 보조기층 재료를 덤핑하고 그레이딩을 하는 전경이고, <그림 3.4.68>은 노상과 마찬가지로 진동롤러에 의해 다짐을 수행하는 전경이다.

보조기층의 타설은 높이의 편차를 1cm 이하로 관리하기 위하여 세심한 주의를 기울였으며, 일부 구간의 경우에는 최종 마무리면의 높이가 높게 포설되어 면을 절삭해내고 재다짐을 수행하기도 하였다.




<그림 3.4.67> 보조기층 재료의 덤핑과 그레이딩





<그림 3.4.68> 보조기층면의 진동롤러에 의한 다짐

(다) 투수 CTB 타설

투수 CTB를 타설하기 전 포장체의 거동을 측정하기 위한 온도측정 게이지와 토압계를 보조기층에 매설하였다. <그림 3.4.69>와 <그림 3.4.70>은 각각 온도측정 게이지와 토압계 모습을 보여주고 있다.



<그림 3.4.69> 온도측정 게이지 매설



<그림 3.4.70> 토압계 매설



<그림 3.4.71> 투수 CTB 포설장면



<그림 3.4.72> 진동롤러 다짐 모습



<그림 3.4.73> 타이어 롤러 다짐 모습



<그림 3.4.74> 다짐 이후의 투수 CTB

투수 CTB 현장 배합은 지리적으로 가까운 시멘트 공장에서 실시하였다. <그림 3.4.71>은 아스팔트 피니셔를 활용하여 투수 CTB를 타설하는 장면을 보여주고 있으며 <그림 3.4.72>과 <그림 3.4.73>는 각각 타설 후 진동롤러와 타이어 롤러를 이용하여 다짐하는 모습을 나타내고 있다. <그림 3.4.74>는 다짐 이후의 투수 CTB 보조기층의 모습을 보여주고 있다.

변위측정 게이지를 매설하기 위하여 기층을 시공하기 전에 <그림 3.4.75>과 같은 블록아웃 방법을 적용하기위해 함체를 함께 기층에 매설하고 다짐을 실시하였다. 이 후 <그림 3.4.76>과 같이 함체를 제거하고 변위측정 게이지와 더불어 온도측정 게이지를 투수 CTB와 일반 BB에 각각 매설하였다. 게이지를 매설한 이후 소형 진동 롤러를 이용해서 다짐을 실시하였다. <그림 3.4.77>과 <그림 3.4.78>는 각각 게이지 매설 모습과 다짐 모습을 보여주고 있다.



<그림 3.4.75> 투수 CTB에 매설된 함체



<그림 3.4.76> 매설된 함체제거



<그림 3.4.77> 변위측정 게이지 매설 모습



<그림 3.4.78> 소형진동 롤러를 이용한 다짐

(라) 투수 AP와 밀입도 AP 타설

<그림 3.4.79>에서 보여주듯이 투수AP 타설 이전에 변형률 측정을 위한 게이지 매설 위치를 확인해 보았다. 타설은 투수 AP, 밀입도 AP순으로 진행되었다. <그림 3.4.80>은 아스팔트 피니셔로 표층을 타설하는 장면을 보여주고 있다.

<그림 3.4.81>은 변형률 측정 게이지를 매설하기 위해 위치를 선정하는 모습을 보여주고 있으며, <그림 3.4.82>은 변형률 측정 게이지를 매설하는 장면을 나타내고 있다. 게이지를 매설할 때에는 굵은 골재에 의한 게이지의 변형을 방지하기 위해 아스팔트를 체가름한 후 잔골재를 이용하여 게이지를 매설하였다. 표층을 다지기 위해 <그림 3.4.83>와 같이 진동 롤러를 이용해 다짐을 실시하였고 이후 머캐덤 롤러를 이용하여 2차 다짐을 하였다. <그림 3.4.84>은 머캐덤 롤러를 이용한 다짐 모습을 보여주고 있다.



<그림 3.4.79> 변형률 측정 게이지의 위치 선정



<그림 3.4.80> 표층 AP 타설 모습



<그림 3.4.81> 게이지 매설 위치 선정



<그림 3.4.82> 게이지 매설 모습



<그림 3.4.83> 진동 롤러를 이용한 다짐



<그림 3.4.84> 마카댐 롤러를 이용한 다짐

(4) 시공관리를 위한 품질시험

(가) 노상의 다짐도

노상의 물리적 특성인 노상의 현장 다짐도에 대한 측정을 수행하여, 사전에 시험으로 결정된 최대건조밀도의 95% 이상이 구현되었는지를 평가하여 시공 관리 항목으로 수행하였다. 다음의 <그림 3.4.85> 포설 전에 노상토의 최대건조밀도 및 최적함수비 결정을 위한 실험전경과 포설 후 현장에서 노상의 다짐 밀도를 측정하기 위해 시료를 채취하는 전경을 나타낸 것이다.

노상의 최대건조밀도 및 최적함수비는 KS F 2313 흙의 다짐시험방법에 의해서 E방법을 따라 수행하였으며, 현장다짐밀도는 KS F 2311 현장에서 모래 치환법에 의한 흙의 단위중량 시험방법에 의해서 수행하였다.

다음의 <표 3.4.17>은 현장에서 측정된 노상의 건조밀도로 최대건조밀도의 95% 이상의 조건을 만족하는 것으로 나타났다.




<그림 3.4.85> 최대건조밀도 측정과 노상 포설 후 다짐도 측정을 위한 노상토의 채취

<표 3.4.17> 노상의 현장 다짐 최대 건조 밀도

No.	건조전중량 (kg)	건조후중량 (kg)	함수비 (%)	부피 (cm^3)	건조밀도 (g/cm^3)	평균 (g/cm^3)
1	5.1	4.56	10.59	2500	1.82	1.88
2	4.39	3.94	10.25	2100	1.87	
3	5.15	4.67	9.32	2400	1.95	
4	7.30	6.71	8.1	3600	1.86	

(나) 노상의 지지력

노상의 역학적 특성인 지지력을 측정하기 위하여 다음의 <그림 3.4.86>과 같이 평판재하시험을 실시하였다. 이러한 평판재하시험은 시험시간이 많이 소요되어 많은 구간의 측정에 어려운 점이 있다. 따라서 본 연구에서는 다음의 <그림 3.4.87>과 같이 간편하게 측정이 가능한 동적 지지력 측정 장비에 의해 각 피트별로 약 15개 정도의 개소에 대한 별도의 동적 지지력을 측정하였다.

다음의 <표 3.4.18>은 KS F 2310 도로의 평판재하시험 방법에 의해 수행된 결과로서 다소 위치에 따라 편차가 있지만 40.0kgf/cm^2의 값을 나타내어 고속도로 노상의 품질관리 기준을 상회하는 것으로 나타났다.

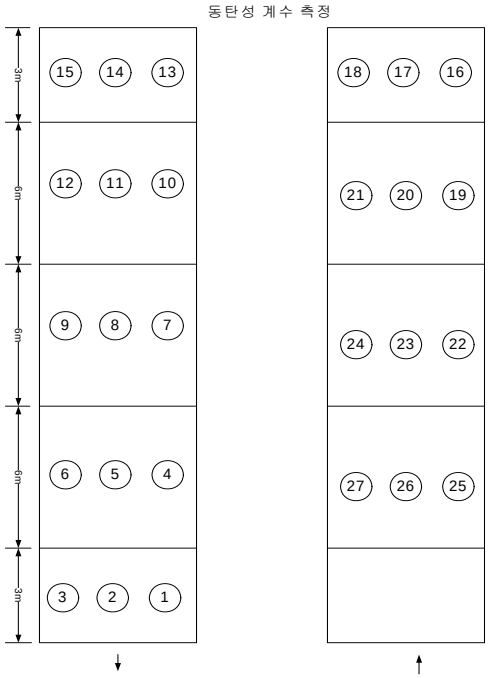
노상의 동탄성 계수의 측정은 다음의 <그림 3.4.88>와 같이 피트내의 여러 개소에 대하여 시험을 실하였는데, 각각의 측정값은 다음의 <표 3.4.19>와 같다.



<그림 3.4.86> 평판재하시험에 의한 노상 지지력 측정



<그림 3.4.87> 동적지지력 측정 장비에 의한 노상 지지력 측정



<그림 3.4.88> 노상의 동탄성 계수 측정 위치

<표 3.4.18> 포장가속 실험기 노상의 평판재하 시험결과

(지름 : 30cm, 면적 : 706.5cm^2)

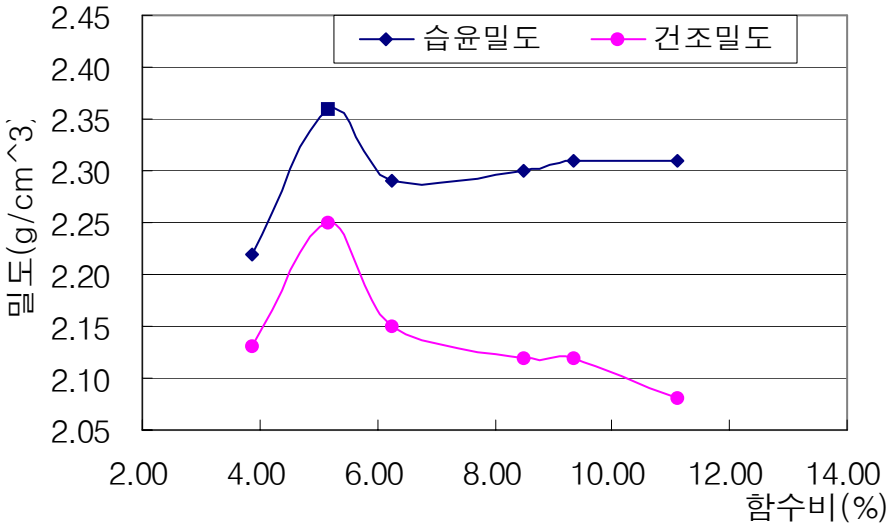
하 중	침 하			
하중강도	변위계의 눈금(mm)			침하량
(kN/m^2)	왼쪽	오른쪽	평균	(mm)
35	0	0	0	0
70	0.09	0.08	0.085	0.085
105	0.20	0.17	0.185	0.185
140	0.34	0.29	0.315	0.315
175	0.48	0.41	0.445	0.445
210	0.64	0.53	0.585	0.585
245	0.73	0.60	0.665	0.665
280	0.84	0.74	0.79	0.79
315	0.96	0.86	0.91	0.91
350	1.07	0.85	0.96	0.96
385	1.17	1.03	1.1	1.1
420	1.27	1.11	1.19	1.19
455	1.36	1.18	1.27	1.27
490	1.47	1.27	1.37	1.37
525	1.57	1.35	1.46	1.46
560	1.64	1.41	1.525	1.525
595	1.73	1.48	1.605	1.605
630	1.83	1.56	1.695	1.695
665	1.92	1.64	1.78	1.78
700	2.02	1.72	1.87	1.87
735	2.11	1.81	1.96	1.96
770	2.19	1.88	2.035	2.035
805	2.29	1.97	2.13	2.13
840	2.36	2.04	2.2	2.2
875	2.43	2.11	2.27	2.27
910	2.52	2.19	2.355	2.355
954	2.59	2.27	2.43	2.43
980	**2.67**	**2.36**	**2.515**	**2.515**
1015	2.74	2.45	2.595	2.595
1050	2.80	2.53	2.665	2.665
지지력 계수			40.0	

<표 3.4.19> 포장가속 실험기 노상면의 동탄성 계수 측정결과

Site No.	처짐량 (mm)	평 균 (mm)	동탄성계수 (MN/m^2)	Site No.	처짐량 (mm)	평 균 (mm)	동탄성계수 (MN/m^2)	비 고
1	0.529	0.523	43.0	16	0.681	0.702	32.1	
	0.510				0.718			
	0.531				0.706			
2	0.635	0.605	37.2	17	0.569	0.583	38.6	
	0.601				0.601			
	0.578				0.579			
3	0.611	0.654	34.4	18	0.751	0.736	30.6	
	0.684				0.739			
	0.666				0.719			
4	0.835	0.820	27.4	19	0.703	0.666	33.8	
	0.821				0.672			
	0.803				0.623			
5	0.701	0.722	31.2	20	0.773	0.734	30.7	
	0.723				0.662			
	0.741				0.768			
6	1.035	1.068	21.1	21	0.641	0.649	34.7	
	1.125				0.622			
	1.043				0.683			
7	0.917	0.937	24.0	22	1.126	1.170	19.2	
	0.948				1.106			
	0.945				1.139			
8	1.204	1.210	18.6	23	0.766	0.767	29.3	
	1.216				0.754			
	1.211				0.782			
9	1.127	1.174	19.2	24	0.997	0.951	23.7	
	1.201				0.868			
	1.195				0.987			
10	0.634	0.569	39.5	25	0.819	0.835	26.9	
	0.520				0.843			
	0.554				0.843			
11	0.657	0.640	35.2	26	0.442	0.383	58.7	
	0.648				0.322			
	0.616				0.386			
12	1.106	1.047	21.5	27	0.557	0.542	41.5	
	1.089				0.499			
	0.945				0.569			
13	1.017	1.008	22.3					
	1.009							
	0.997							
14	0.958	0.974	23.1					
	0.966							
	0.999							
15	0.576	0.541	41.6					
	0.507							
	0.541							

(다) 보조기층의 다짐도

보조기층의 물리적 특성인 보조기층의 현장 다짐도는 노상의 다짐도 측정과 동일한 절차 및 방법에 의해 수행되었으며, 최대건조밀도 측정 결과는 다음의 <그림 3.4.89>와 같이 변화하는 것으로 나타났다. 따라서 최대건조밀도는 최적함수비 5.17%에서 2.25g/cm^{3}인 것으로 나타났으며, 현장 다짐도는 최대건조밀도의 95% 이상인 2.05g/cm^{3}으로 관리되어야 함을 알 수 있었다. 시험체 타설 현장에 측정된 보조기층의 다짐도는 다음의 <표 3.4.20>과 같으며, 품질관리 기준을 모두 만족하는 것으로 평가되었다.



<그림 3.3.89> 함수비의 변화에 따른 보조기층의 밀도

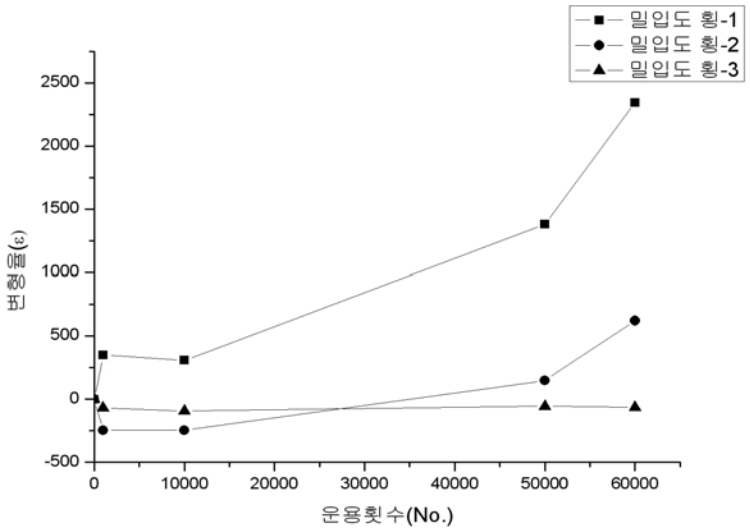
<표 3.4.20> 시험체 타설 현장의 다짐 밀도 측정 결과

No.	건조전중량 (kg)	건조후중량 (kg)	함수비 (%)	부피 (cm^3)	건조밀도 (g/cm^3)	평균 (g/cm^3)
5	3.63	3.55	2.2	1600	2.21	2.2
6	4.23	4.09	3.3	2000	2.05	
7	3.97	3.87	2.51	1600	2.41	
8	5.70	5.54	2.8	2600	2.13	

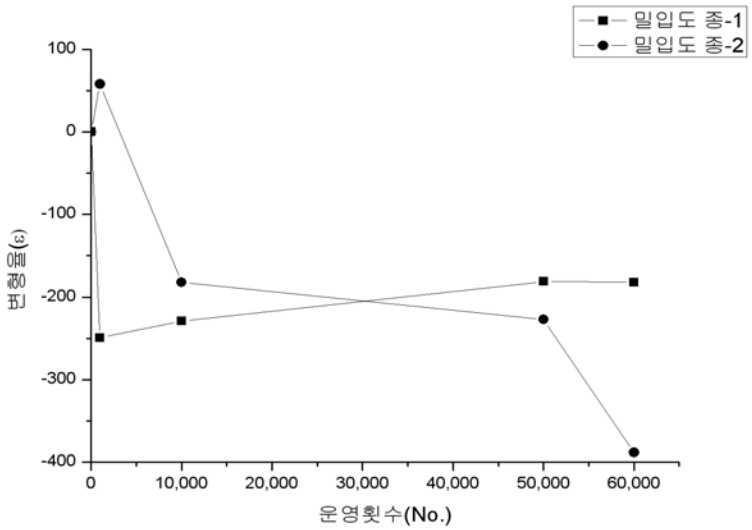
(5) 동적계측 실험

일반 포장은 주행하는 차량에 의해서 파손이 일어난다. 하지만 연구나 현장 계측에서는 동적인 인자를 고려하여 계측하지 보다는 정적인 하중에 의한 포장체의 거동을 살피고 있다. 본 연구에서는 포장 가속을 시키는 움직이는 카트에 의해 포장체의 거동이 어떠한지를 알아보고자 동적 계측을 수행하였다.

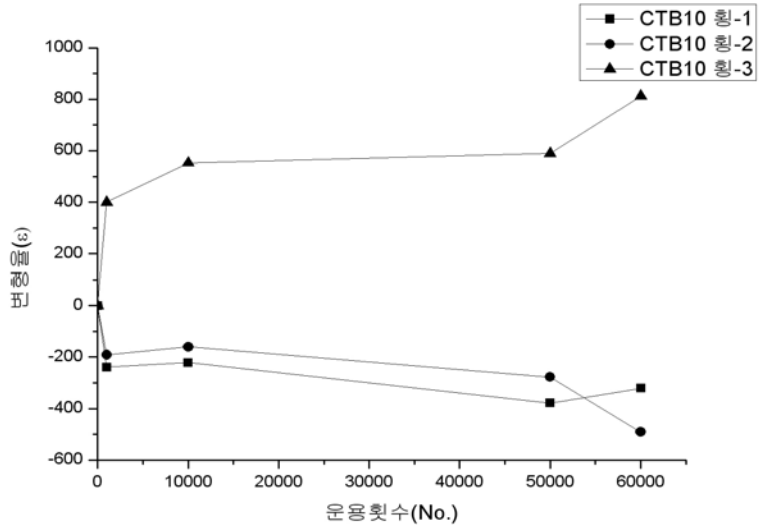
<그림 3.4.90>부터 <그림 3.4.95>까지는 센서의 매설 위치 및 측정 위치에 따른 변형율을 측정한 결과이며, X축은 운용횟수, Y축은 최대 수평변형율을 측정한 결과이다. 동적계측 실험에서 측정된 파형은 대칭형이 아니다. 센서의 위치에 Wheel이 도달하기 전에 파형은 zero setting 상태이며 센서의 수직면 위치에 도달할 때 수평응력은 최대가 되며, 하중재하가 끝나면 파형은 하중재하 시와 동일한 형상을 따르지 않는다. 추가적으로 수평응력은 하중 재하 후에 초기 zero setting 상태에 도달하지 않았다. 분석 결과 포장 재료에 일정부분 회복 수평응력이 발생하며, 이러한 회복응력들은 속도 감소에 따라 증가한다고 판단된다. 일반 밀입도 포장의 경우 최대 2,250με, 배수성 포장은 최대 800με의 변형율이 발생이 계측되었다. 이러한 계측 결과를 토대로 배수성 포장이 일반 밀입도 포장에 비해 피로균열에 대한 내구성이 뛰어나다고 판단된다.



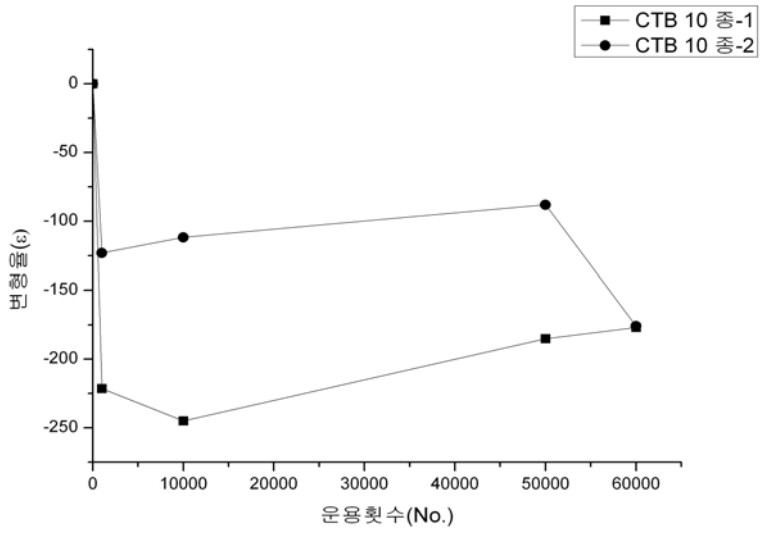
<그림 3.4.90> 운용횟수 별 일반 밀입도 포장의 변형율(횡방향)



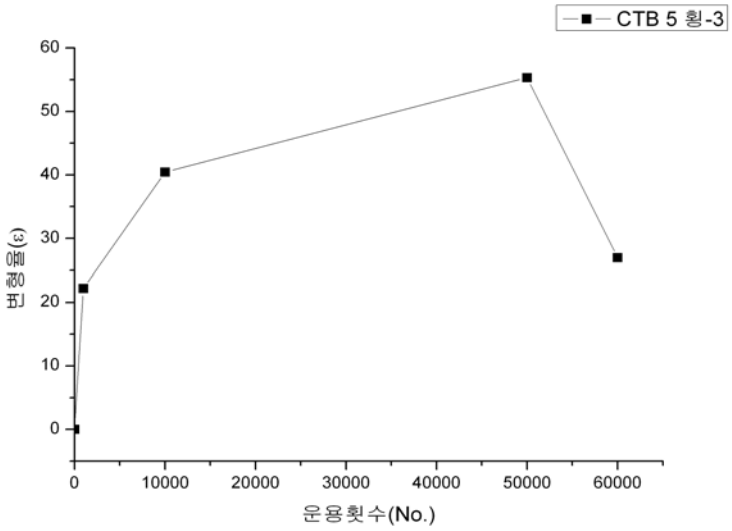
<그림 3.4.91> 운용횟수 별 일반 밀입도 포장의 변형율(종방향)



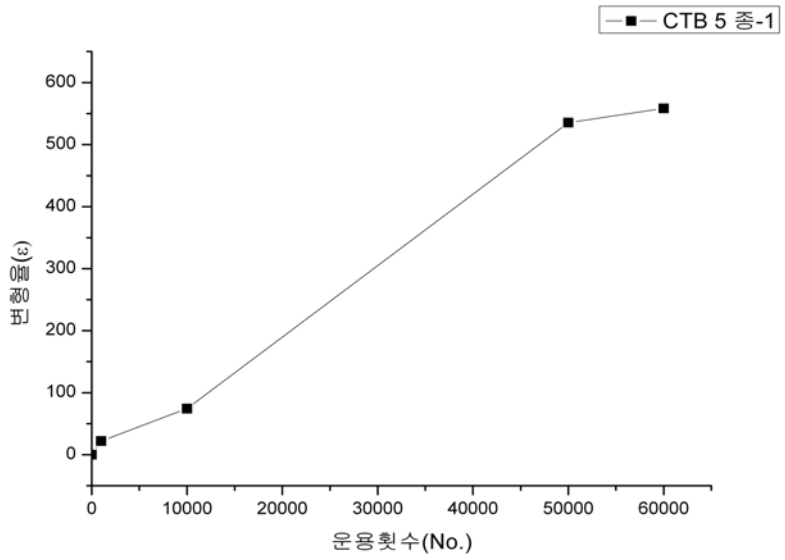
<그림 3.4.92> 운용횟수 별 CTB10 배수성포장의 변형율(횡방향)



<그림 3.4.93> 운용횟수 별 CTB10 배수성포장의 변형율(종방향)



<그림 3.4.94> 운용횟수 별 CTB5 배수성포장의 변형율(횡방향)



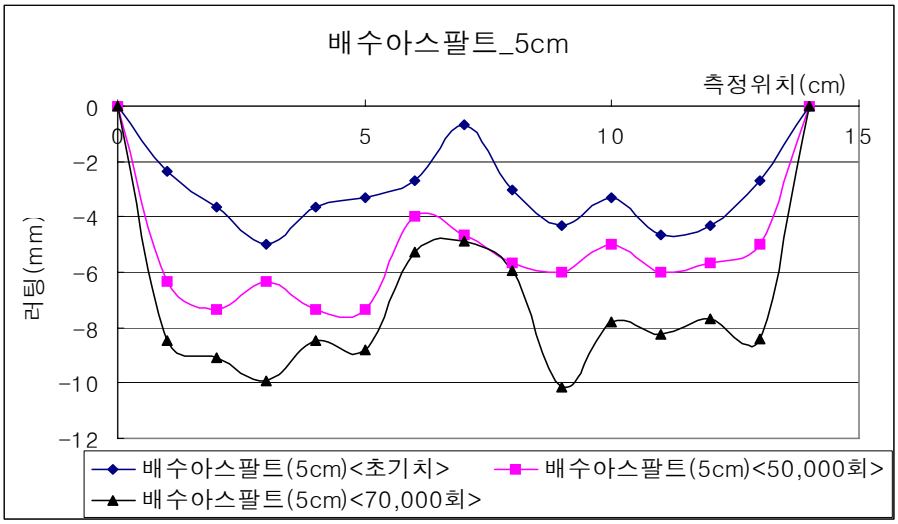
<그림 3.4.95> 운용횟수 별 CTB5 배수성포장의 변형율(종방향)

(6) 러팅

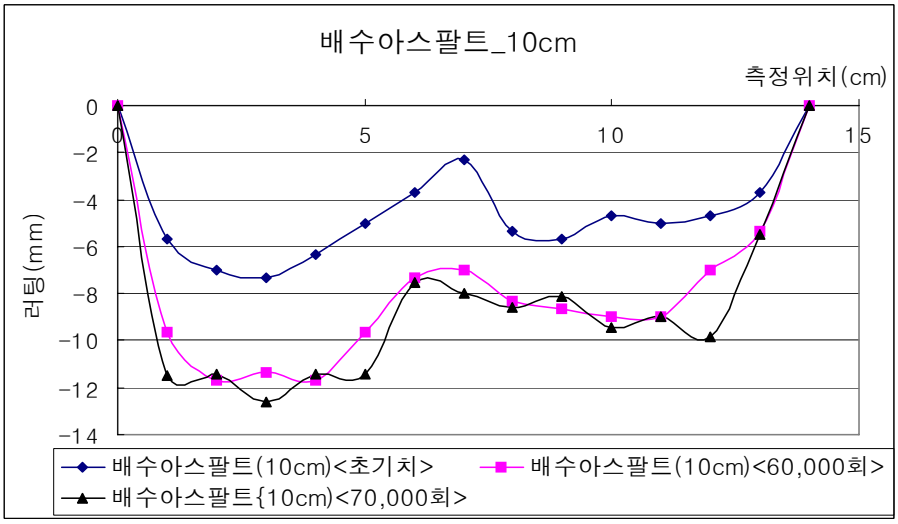
아스팔트포장에 발생하는 하중조합 파손에 가장 중요한 형태 중에 하나가 영구변형 이다. Wheel path에 러팅과 같이 조합되며, 누적 반복하중에 따라 점진적으로 성장한다. 일반적인 러팅은 Wheel path 양측면의 작은 융기와 세로 침하로 나타난다. 러팅의 폭과 깊이는 현장의 주변 환경, 교통체계, 교통량 및 포장구조(포장층 두께와 품질)에 크게 의존한다. 일반적으로, 안전도와 중요하게 관련되어 있기 때문에 포장면의 측면, 횡단면 이력에 영향을 미치는 포장구조의 전체 변형에 관심을 갖는다.

주요 발생문제들은 변경된 포장면의 압밀차로 인한 포장이력의 변화에 관련될 수 있다. 횡단 이력에서 Wheel path에 발생하는 러팅은 배수특성을 변경하고 배수량을 감소시킨다. 주행차선에 누적된 우수는 수막현상, 미끄럼저항 감소, 불안전한 교통상태 등을 유발한다. 동절기에는 눈과 얼음 제거 시 평탄성 문제로 제거되지 않는다. 횡단면에서 재료나 시공 상의 변경으로 인한 영구변형의 차이는 평탄성 불량이 증가하고 도로의 전체적인 사용성을 감소시킨다. <그림 3.4.96>부터 <그림 3.4.99>까지는 포장가속시험기 운용횟수별 각 단면의 러팅을 측정한 결과이며, 측정결과 일반밀입도 포장에 비해서 배수아스팔트의 내구성이 전체적으로 뛰어난 것

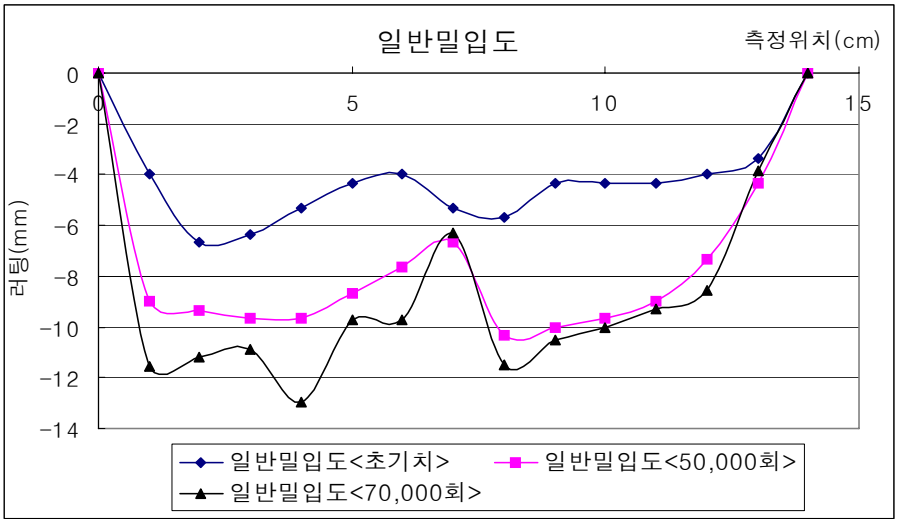
으로 측정되었다. <그림 4.26>은 포장가속시험기 100,000회 운용 후 각 단면의 러팅을 비교한 결과이다. 일반밀입도의 러팅이 CTB10의 배수성 아스팔트에 비해 러팅이 좌측에서 적은 것으로 측정되었으나, 측정최대값의 차이는 측정 위치에 따라 골재탈락이나 이물질에 의한 차이로 판단된다. 또한 포장가속시험기 운용 시 Wheel path에 이물질에 의한 상대변위의 발생가능성이 있으므로 시편채취 및 이물질 제거 후 각 포장층별 변위량, 절대변위량을 두께별, 재료별로 비교 평가가 필요하다.



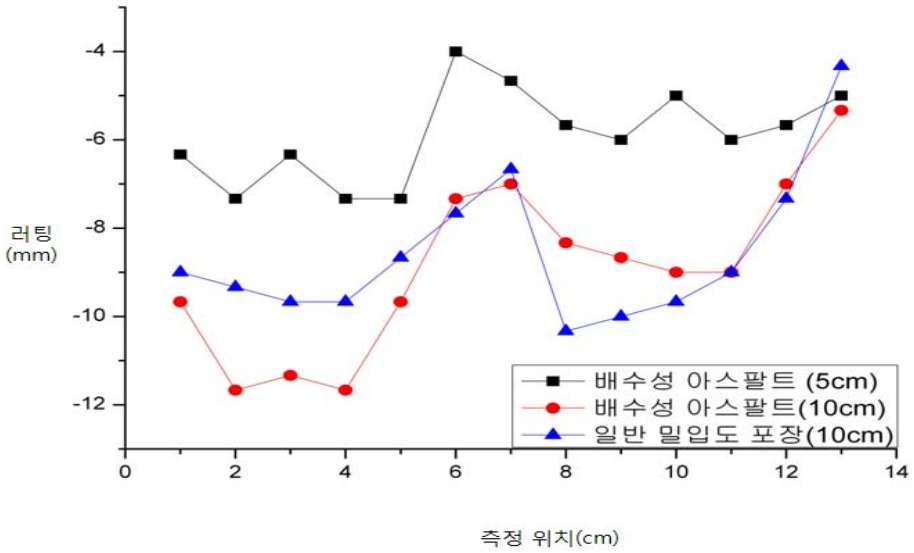
<그림 3.3.96> 운용횟수 별 투수AP 5cm 배수성포장의 러팅



<그림 3.3.97> 운용횟수 별 투수AP 10cm 배수성포장의 러팅



<그림 3.3.98> 운용횟수 별 일반 밀입도포장의 러팅



<그림 3.3.99> 포장별 러팅 비교(100,000회)

(7) 투수 시험

투수계수 산정 방법은 Q(유량)=A(직경)×V(속도)에서 Q는 400ml(400 cm^3), A는 도로 표면에 투수장비가 접하는 부분의 직경을 15cm로 하였을 때 176.1cm^2이다. 이때 15초 동안 400ml의 유량이 176.1cm^2의 면적을 통과할 때를 나타낸 것이 투수계수이다.

경과시간 ≤ 15sec

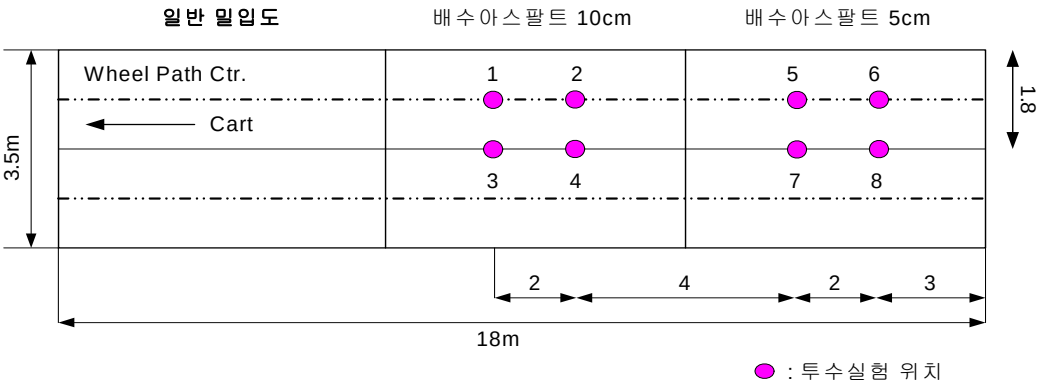
현장투수실험에서 투수계수(k)보다는 실험 시 측정시간이 15초 이내여야 투수성을 만족하는 것으로 판단한다. 투수 시험은 시공초기, 포장가속시험시설 운용횟수별로 각 10,000회, 50,000회, 60,000회에 실시하였으며, 포장가속시험결과 현장투수시험 측정값은 <그림 3.4.104>와 같이 횟수에 비례하여 투수시간이 증가하였으나 모두 15초 이내의 우수한 투수성을 나타내었다.



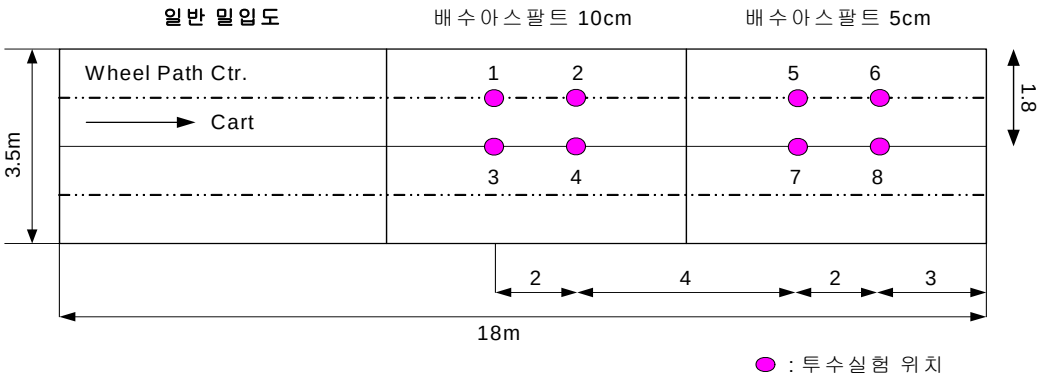
<그림 3.4.100> 투수능력 측정을 위한 현장투수실험기



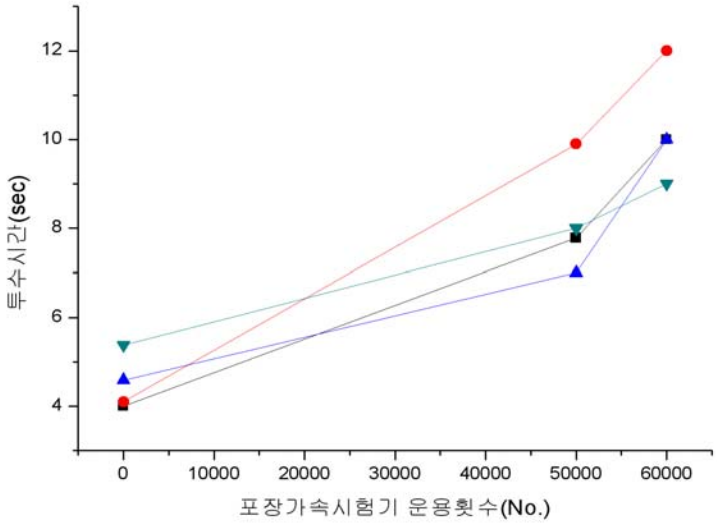
<그림 3.4.101> 포장가속실험 후 현장투수실험결과



<그림 3.4.102> A-site 현장투수실험 배치도



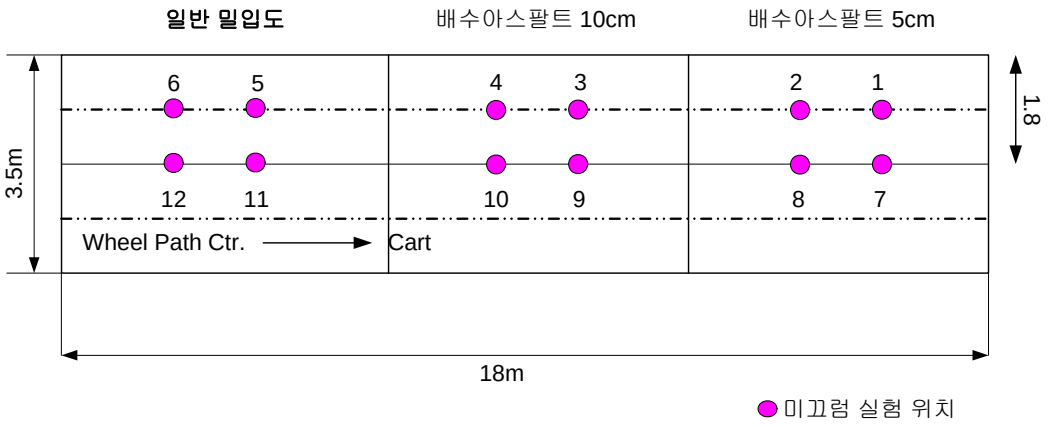
<그림 3.4.103> B-site 현장투수실험 배치도



<그림 3.4.104> 운용횟수에 따른 투수시간의 변화(단면중앙)

(8) FWD 실험

포장가속시험에서의 실험은 서로 다른 3가지 포장단면에 대하여 하중 크기에 대한 포장 응답의 정량화를 평가하기 위해 진행하였다. FWD실험은 운용횟수 증가에 따른 별개의 환경조건에서 구조적 능력을 조사하기 위해 정기적으로 수행하였다. <그림 3.4.105>와<표 3.4.21>은 6,000회 주행 시 FWD 실험위치와 실험결과를 나타낸 것이다.



<그림 3.4.105> 포장가속실험 후 각 단면별 FWD실험 위치

<표 3.4.21> 포장가속 실험 후 위치별 FWD 실험결과(60,000회)

측정위치	유효지지력	탄성계수
NO	pci	psi
1	249	89426.41
2	246	104323
3	293	99863.9
4	290	154586.3
5	408	590032.1
6	419	631610.9
7	350	369513.8
8	391	233575.4
9	408	167645.6
10	394	216120
11	376	611222.4
12	385	666963.7

라. 요약

본 연구에서는 물성개발팀의 연구결과로 도출된 친환경적인 새로운 포장 시스템이 가져야 할 도로 포장의 기본적인 요소인 구조적 저항성과 기능성의 확보에 대한 평가를 목적으로 수행하였다. 이러한 구조적 저항성과 기능성을 평가하기 위하여, 실제 현장 조건과 동일하게 시험 포장체를 포장가속시험시설에 시공하고, 포장

가속시험기에 의한 가속시험을 실시하여 공용성을 검토하였다.

■ 문헌조사를 통해 포장가속시설의 활용성을 제고할 수 있는 방안과 기존 포장가속시험의 문제점을 검토하였다.

■ 본 연구의 효율을 높이기 위하여 포장가속시험시설의 하중 계측 시스템을 보완하였으며, 동적인 데이터의 수집이 원활하도록 하였다.

■ 예비 시험 타설을 실시하여 본 시험시 제기될 수 있는 현장과 동일한 시험체 제작시 발생할 수 있는 장비사용, 공정, 품질관리 등의 문제점에 대한 검토를 실시하였다. 그리고 계측기를 시험운용을 위한 포장체에 매설하여 포장가속시험기 카트의 하중 정보와 포장체 내의 응답특성의 동기화 등에 대한 계측 시스템 운용을 검토하였다.

■ 본 연구의 중간성과로 도출된 새로운 포장 시스템인 저수축 린콘크리트에 설치되는 배수성 아스팔트 포장에 시험체의 시공을 실시하였다. 시험체의 시공은 현장조건과 동일한 방법과 공정 순서에 의해 진행하였으며, 시공 중의 품질관리 또한 현장과 동일한 방법에 의해 수행하고 관리하였다.

■ 공용성 평가의 신뢰성을 높이기 위하여 시험체의 노상, 보조기층 등의 현장 밀도 및 지지력 실험 결과는 양호한 것으로 나타났다.

■ 일반 밀입도 아스팔트 포장보다 배수성 아스팔트포장의 러팅 저항성이 더 우수하였다.

■ 배수성 아스팔트 포장에서 포장가속시험시설을 60,000회 이상 공용했을 시에도 투수성에 문제가 없음을 확인하였다.

5절. 4S 포장의 환경가치 평가

본 절에서는 국내의 비점오염원의 현황에 대해 살펴보고 도로상에서 발생하는 비점오염원의 특성을 파악하였다. 이를 근거로 본 연구에서 개발하고자 하는 4S 포장 시스템의 환경 가치 평가를 위한 기초 자료 수집 및 분석을 실시한다.

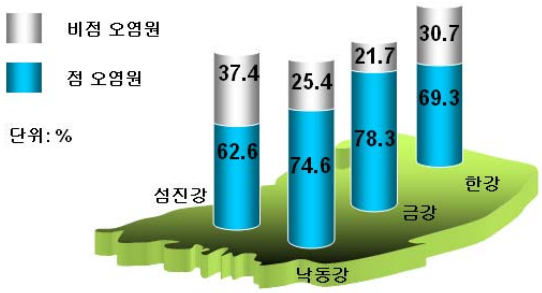
1. 국내의 비점오염원

가. 비점오염원의 개념

비점오염원은 제도적으로 관리되어 오던 하·폐수, 축산 폐수 배출 시설 등 점오염원의 상대적 개념으로, 일반적으로 농지에 살포된 비료 및 농약, 대기 오염 물질 퇴적물, 축사에서의 유출물, 도로상에 쌓인 도로오염물질, 도시 지역의 먼지와 쓰레기 등으로써 건기 시에 축적되어 있다가 빗물과 함께 유역으로 유출되는 것을 말한다. 점오염원의 경우 배출지점이 명확하여 관리하기 쉽고, 처리 비용대비 효율이 높으나, 비점오염원은 배출지점이 유역 전체에 걸쳐 있어 제어가 어렵고 강우량에 따라 유입량이 크게 변동하여 관리상에 어려움이 많다. 또한, 우리나라의 경우 현재까지 물관리 대책이 수질오염에 영향이 큰 산업폐수, 생활하수 처리에 중점적으로 추진됨에 따라 이러한 점오염원처리 시설에 대해서는 만족할 만한 성과를 거두었으나, 비점오염원에 대한 관리를 배제한 점오염원 위주의 정책만으로는 4대강 유역의 수질 개선에는 만족할 수 없었다.

나. 비점오염원의 발생 형태 및 오염 기여도

비점오염물질의 각 유역별 오염 부하량의 기여도는 아래 <그림 3.5.1>과 같이 BOD를 기준으로 전체의 22~37%에 이르는 것으로 추정되고 있으며, 개발에 따른 토지 이용의 증가에 비례하여, 지속적으로 비점오염원 부하 비율이 증가하게 된다. (환경부, 1995)



<그림 3.5.1> 4대강 유역의 점오염원 및
비점오염원 기여율 (환경부,1995)

<표 3.5.1> 강우시 도로상에 발생하는 비점오염물질 부하량 (서울시, 2002)

항목	도로 지역 (kg/ha/day)	도시 지역 (kg/ha/day)
BOD	1.7~5.5	0.8~1.1
COD	1.9~6.4	1.3~1.4
SS	11.0	1.7

따라서, 쾌적한 환경에 대한 국민적 요구수준이 높아지고 있는 현실에서 비점오염원에 대한 구체적인 처리/관리 방안에 대한 수립이 시급하다.

한편, 서울시에서 발표한 중랑천 비점오염원 관리 대책 연구 보고서에 의하면, 아래 <표 3.5.1>과 같이 도로 지역은 도시 지역에 비해 수질항목에 따라 1.5~17배로 오염 부하량이 크게 발생하는 것으로 나타났다. 이를 종합해 볼 때, 실제 유역 수질에 영향을 주는 것으로 도로에서 발생하는 비점오염 부하량이 상당히 높은 비중을 차지하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 도로는 물류와 국민의 이동 수단으로서의 순기능과, 수계 환경을 오염시키는 오염원 통로로서의 역기능이 동시에 발생한다고 할 수 있다.

다. 국내 비점오염원 관련 주요 정책

정부에서는 비점오염원에 대한 구체적인 관리 방안을 확립하기 위하여, 지난

2003년 12월 “4대강 비점오염원관리 종합 대책“에 대해서 수립/마련하기로 하였다. 이 중, 비점오염원의 오염 기여율이 높은 도로 분야 비점오염 물질에 대한 관리 방안이 주요 사안으로 제시되었으며, 도로와 관련된 각 부처별 비점오염원 관리에 대한 구체적인 내용은 다음과 같다.

이러한 정부의 정책과 친환경적 건설 산업이라는 새로운 패러다임으로 변모하는 환경에서, 도로에서 발생하는 비점오염원에 대한 관리 방안과 이에 대한 해결은 필수적인 과제라고 할 수 있다.

<표 3.5.2> 각 부처별 비점오염원관리 대책 방안(국무총리실 등, 2003)

해당 부처	대책안	추진 계획
환경부	- 비점오염물질 배출규제 법제화 (수질환경 보전법 개정)	‘04
	- 개발·건축 및 농지 정비등 각종 규정에 비점오염원 관리 방향 반영	‘04～’05
	- 비점오염원 관리 시설 설치 추진 (시범사업)	‘04~～’07
	- 비점오염원 관리 시설 설치비 분담(국고, 지방비, 기금등)	‘04～’05
	- 광장, 주차장 등 도시 기반 시설의 비점오염물질 발생 최소화 추진	‘06
	- 환경 영향 평가서 관련 업무 편람에 비점오염원과 관련된 내용 개정	‘05～’07
건설 교통부	- 도로의 구조/시설에 관한 규칙 및 도로 설계 편람 개정	‘04
	- 노면 배수로, 우수 유출 저감 시설, 초기 우수처리 시설등의 기준을 규칙 및 편람에 반영	‘04
	- 도로상 오염물질의 하천직유입 억제를 위한 설치 및 유지관리 기준 보완	‘05～’09
	- 하천 내 식생조성 및 정화 시설 설치, 하천부지 개발 억제	‘05～’07
산업 자원부	- 폐광산·공장 등 사업장 관리 대책 마련 (골프장, 공장등 사업장에 대한 비점오염원 관리 기준 마련	‘04～’06

2. 도로 발생 비점오염원 특성 및 기존의 처리 방안

가. 도로 발생 비점오염원 특성

도로에서 차량 운행 시 발생되는 타이어 마모물질, 기름 및 윤활유, 중금속류, 먼지 등 도로 표면에 쌓여 있던 오염물질이 강우수 도로 표면 및 배수로를 따라 별다른 처리 없이 하천 등 수계로 유입되고 있다. 이들 오염물질은 하천 바닥에 침전되어 수생태계를 파괴하고, 호소의 부영양화를 유발시킨다. 이러한 도로상에서 발생하는 오염물질의 부하량은 아래 <표 3.5.3>과 같이 수질 환경 기준을 상회하는 높은 농도로 유출되고 있음을 알 수 있다. 특히, 영양염류(질소, 인)와 중금속 성분 등은 다른 오염물질에 비해, 자연적인 분해 속도가 매우 느리기 때문에 하천 유역에서 누적되어, 오염을 유발시키는 개연성이 매우 크다. 그리고 하천 또는 호소 인근의 도로나 교량의 경우 하천 유역으로 바로 유입됨으로써 수질오염을 가중시키게 되는 문제점이 있다.

<표 3.5.3> 도로상 발생 비점오염물질 배출 농도

BOD		TSS		T-N		T-P		아연		구리		납	
농도	부하	농도	부하	농도	부하	농도	부하	농도	부하	농도	부하	농도	부하
12.2	18.7	131	229	1.03	1.42	0.33	0.48	0.208	0.269	0.034	0.043	0.05	0.112
5	6.5	118	145	0.73	0.98	0.11	0.13	0.05	0.079	0.007	0.01	0.016	0.042

(M. E. Barrett, J.F. Malina and R.J. Charbeneau, 1995)

이러한 도로상 발생하는 비점오염물질의 성분, 발생 원인은 아래 <표 3.5.4>와 같이 대부분 주행 차량에 의해 기인된 것들이 대부분이며, 다른 토지 이용 형태에서 형성된 비점오염물질에 비해 유해성이 높은 성분들은 포함하고 있다.

<표 3.5.4> 도로상 발생하는 비점오염물질의 종류, 발생원 및 환경 영향

오 염 물 성 분		주요 발생원	환경에 미치는 영향
분 진		도로 마모, 차체/엔진 마모, 제설제, 모래, 타이어 마모	인체 유해 물질, 방향족 화합물이 침착된 이송 수단 역할, 물고기의 아가미를 막히게 함.
영양염류 (질소, 인)		비료, 도로 주변 식생	부영양화 현상 발생
중금속	납	납 첨가 휘발유, 타이어 마모, 윤활유 및 그리스, 브레이크 라이닝 마모	인체 축적되어 신경계 및 뇌 손상
	아연	타이어 마모, 모터오일, 그리스	용존 특성이 높음, 인체 축적되어 질병 유발, 수생태계 유해 물질
	철	차체 마모, 도로상의 금속 구조물, 엔진	부영양화 발생, 탈색현상
	구리	금속도금, 엔진부품, 베어링 마모, 브레이크 라이닝 마모	수생태계 유해물질, 입자성 퇴적물 형태로 주로 존재, 인체에 축적됨
	카드뮴	타이어 마모, 살충제	발암물질
	크롬	금속 도금, 엔진 부품, 브레이크 라이닝	발암물질
	브롬	배기가스	유해물질
	시안	염화 제빙제 입상화 방지를 위한 화합물	인체 및 수생태계에서 유해물질
기타 유해 물질	황산염	도로 표층, 연료, 염화 제설제	물의 산성화 유발
	석유	윤활유의 누출, 아스팔트 표면 침출액 연료	발암물질, 지하수 오염
	PCBs, 농약	도로사면 식생부 농약 살포, 합성타이어의 PCBs촉매	인체 축적됨, 발암물질
	병원성 세균	거름, 조류/짐승의 분비물, 축산용 트럭에서의 분비물	수인성 질병 유발
	석면	브레이크 라이닝 마모	발암물질

앞서 제시한 내용들을 볼 때, 도로상에 발생하는 오염물질의 환경영향은 매우 심각한 상황에 직면해 있으며, 이러한 비점오염원 관리 기술에 대한 노력이 시급한 실정이다.

나. 기존 도로 발생 비점오염원 처리

기존 도로 배수 구조물의 경우 강우 시 도로 빗물의 원활한 배수 성능만을 목적으로 설치되었다. 일반 도로나 교량부의 경우 인근 하천으로 비점오염원을 포함하는 강우 유출수가 별다른 처리 없이 배출되어, 직접적인 하천 오염을 유발하고 있다. 국외의 경우 이러한 배수 구조물에서 수계로 방류되기 이전에 별도의 비점오염물 처리하도록 설치/계획 중인 시설들이 있다. 국내에서도 간헐적으로 상수원 보호구역 주변을 중심으로 환경 영향 평가를 실시할 때 지적사항으로 비점오염저감 시설에 대한 시공을 제안하고 있다. 그러나, 이러한 도로 발생 비점오염원에 대한 저감 시설은 단순히 저류 기술에만 국한되어 있으며, 도로 비점오염원 관리 시설에 대한 내용은 현재 도입단계에 불과하다. 또한, 이미 개발되어 있는 국외 적용기술을 국내에 도입함에 있어서 높은 용지 보상비, 민원 발생 등 여러 가지 문제점으로 인해 그 적용에는 한계가 있다.

3. 도로발생 비점오염원 측정 및 특성 분석

가. 도로 발생 비점오염원 측정

(1) 조사 지역

조사지역은 서울에 위치한 원효대교로 하루 평균 교통량이 약 84,000대 정도로 통행량이 많은 곳이다. 아스팔트 포장으로 교량 본선의 경우 편도 2차선(인도 1차선)이고, 교량 남/북측 양단에 접속로(Ramp)구간에는 3차선으로 구성되어 있다. 빗물받이 간격은 5~10m간격으로 설치되어 있으며, 도로 종단을 기준으로 양방향 배수 형상을 갖고 있다. 교량 하부에는 한강 시민 공원 부지가 조성되어 있으며, 배수 시설물에서 강우수의 직강하를 피하기 위해 약 20~25m간격으로 종배수관에 의해 차집후 배수되는 구조였다. 그 외, 하천 횡단 구간은 각 빗물받이에서 바로 배출되도록 설치되어 있다. 또한, 일반 고속도로와 달리 교량에는 주변에 식생이 전혀 존재하지 않기 때문에 강우 시 유출되는 오염물질이 도로 노면에 축적된 오염물질 이외에 다른 오염원이 유입되지 않는 특징이 있다.

(2) 시료 채취 및 분석

종배수관을 통해 배출되는 도로 노면 유출수의 유량은 그다지 높지 않기 때문에 일정 시간 동안 집수 용기를 이용하여 집수된 유량으로 간단하게 계산하였다. 시료 채취는 강우 이후 유량이 발생한 시점부터 초기에는 10~15분 간격으로 이 후 30~60분 간격으로 시료를 채취하였으며 4℃에서 냉장 보관 후, 측정하였다.

채취한 시료의 분석 항목으로는 COD, BOD, T-N, T-P, SS, 중금속(Cu, Cr, Cd, Pb, Zn)을 주로 분석하였으며, 각 항목별 측정 방법은 수질오염 공정시험법과 Standard method(APHA, AWWA, and WEF, 1998)에 준하여 분석하였다.

나. 도로 발생 비점오염원의 특성 분석

교량 비점오염원의 유출 특성을 파악하기 위해, 일반적으로 사용되는 유량 가중 평균 농도를 산정하였으며, 각 강우 사상별로 계산된 결과는 <표 3.5.5>에 나타내었다. 강우 사상 중 발생한 각 오염물질별 배출 농도를 확인해 보면, 전반적으로 <표 3.5.6>의 기존 외국 비점오염원 관련 조사에서 제시된 오염물질 EMC 농도에 비해 전반적으로 높게 나타남을 확인할 수 있다. 정확한 조사 결과값에 대한 비교를 위해서는 국내 자료를 활용하는 것이 타당하지만 국내에서는 아직 도로 비점오염원 관련 조사/연구가 부족하므로 국외 자료를 기준으로 비교하였다.

<표 3.5.5> 측정 지역의 유량 평균 가중 농도 (단위 : mg/L)

Date	ADD	Rainfall (mm)	Duration (hr)	COD	BOD	TN	TP	SS	Cr	Cu	Pb	Zn
06/17/04	20.38	21	11	178.42	42.24	8.85	0.53	165.66	0.01	0.13	0.14	0.90
09/05/04	10.6	7.5	4	183.04	30.48	2.94	0.21	109.48	0.01	0.05	0.11	0.53
09/11/04	3.6	56.5	19	91.23	26.93	5.43	0.14	24.11	0.01	0.06	0.10	0.23
09/20/04	1.8	16.5	10	131.48	26.22	4.31	0.91	111.98	0.00	0.04	0.11	0.15
Average				146.04	31.47	5.38	0.45	102.81	0.01	0.07	0.12	0.45

<표 3.5.6> 다른 지역(외국)의 유량 평균 가중 농도 (단위 : mg/L)

Reference	COD	SS	T-N	T-P	Cr	Zn	Cu	Pb	ADT
NCHRP (2001)	114	142	1.83	0.4	-	0.329	0.054	0.4	>30000
Wu et al. (1998)	70	283	2.25	0.43	0.008	-	0.024	0.021	25000
Legret (1999)	103	71	2.3	-	-	0.356	0.045	0.058	12000
Barrett et al. (1995)	126	131	1.03	0.33	-	0.208	0.034	0.05	58150
IECA (2002)	103	141	1.82	0.43	-	0.158	0.003	0.049	-

<표 3.5.7> 연간 발생 부하량 추정치 (단위 :kg/ha/yr)(최영화, 2004)

COD	BOD	T-N	T-P	SS	Cr(x1000)	Cu(x1000)	Pb(x1000)	Zn(x1000)
1696.67	365.83	62.50	5.00	1195.00	88.33	785.83	1345.83	5261.67

COD의 경우, 91.23~178.42mg/L 정도로 나타난 반면 기존 조사 결과에서는 70~126mg/L로 나타났다. TN의 경우는 2.94~8.85mg/L로 계산되었으나, 국외 자료에서는 1.03~2.25mg/L 정도로 상대적으로 낮았다. TP의 경우는 전반적으로 매우 낮은 양으로 배출되고 있으며, 도로 영향 요소와는 큰 영향을 받지 않는 성분임을 추측할 수 있었다. 중금속 성분은 다른 오염물과 동일하게 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이러한 오염 농도 차이의 원인 중 하나는 본 조사 지역의 교통량(84,000대)과 다른 지역의 교통량이 현격한 차이를 보이기 때문으로 생각된다.

<표 3.5.5>의 강우 사상별 비점오염원 부하량을 바탕으로 단위 시간당 단위 토지면적에서 배출되는 부하량을 계산하여 각 오염물질별 연간 발생 부하량을 <표 3.5.7>과 같이 제시하였다. 연간 발생 부하량은 기존 연구에서 제시된 결과값에 비해 다소 높게 나타났다.

4. 4S 포장 시스템의 환경 가치 평가

앞서 살펴본 바와 같이 도로상에서 비점오염 형태의 오염부하량(massloading)이 결코 무시할 수 없으므로 도로의 비점오염원은 환경적인 관심대상으로 충분하다. 그러나 도로부에서 발생되는 오염원은 배출지점이 유역 전체에 걸쳐 있어 제어가 어렵고 강우량에 따라 유입량이 크게 변동하여 관리상에 어려움이 많다. 현재 이를 제어하고자 도로부의 강우유출수를 도로부 주변에 단순 저류하는 기술을 활용하고자 시범적으로 시공되고 있으며 다양한 기술이 개발되고 있는 상황이다. 하지만 기존 비점오염원 처리의 개념과는 달리 4S 포장 시스템에서는 포장체에 투수성을 부여하여 오염물질이 포장층을 투과함에 따라 자연적으로 정화되는 새로운 개념의 비점오염원 제어를 이루었다.

가. 4S 포장의 비점오염원 제어

본 절에서는 4S 포장의 투수 시스템을 통해서 도로 비점오염원을 제어하는 방안에 대해서 검토하고자 한다. 기존 불투수포장이 노면에 축적된 오염물질을 빗물과 함께 그대로 인근 농경지나 하천으로 배출시키는 것에서 투수성포장은 우수에 녹아 씻겨지는 오염물질을 포장층 아래로 투수시켜 최종적으로 토양으로 보내게 된다.

토양으로 이동된 오염물질은 자연저감(Natural Attenuation) 또는 자연정화(natrual remediation)에 의해서 그 농도가 저감되는 현상이 나타날 것이다. 여기서 자연저감이란 자연적으로 발생하는 물리, 화학 및 생물학적인 작용에 의해서 시공간적으로 오염지하수내에 함유되어 있는 오염물질의 농도나 질량이 자연적으로 감소되는 현상을 의미한다. 이 현상은 오염물질의 분산, 희석, 흡착, 휘발, 지하수의 지하함량(recharge)에 의한 희석과 혼합현상 및 생분해로 인한 생물학적 전이(biotransformation)와 비생물학적인 분해와 변이 등이 포괄적으로 포함된다. 자연저감에 의한 정화는 개념적으로 매우 단순하며, 부지고유특성에 따라 좌우되긴 하지만, 미국의 경우 오염된 토양을 정화하고자 하는 RCRA(Resource Conservation and Recover Act)나 CERCLA(Comprehensive Environmental Respose, Compensation and Liability Act) 등의 법령에서도 이러한 자연정화방식의 적용가

능성을 충분히 언급하고 있다.

그러므로 투수성 포장의 도로부 비점오염의 제어(control)는 도로부에서 발생되는 오염원이 투수성 포장을 통해서 토양층과 대수층으로 이동하였을 경우, 1차적으로 오염원이 다른 지점이나 다른 상(phase)으로 전이되지 않도록 하여 하천이나 농경지의 오염부하를 줄여주는 역할을 할 수 있다. 2차적으로는 그 자체의 자연 저감 능력(Natural Attenuation)을 통해서 토양내 수질오염에 대한 Scavenger(오염저감제)로써의 역할을 수행할 수 있다고 판단된다.

5. 요약

■ 본 절에서는 도로의 비점오염원의 발생 현황과 그 오염 정도에 대해서 기존 문헌 조사를 통해 파악함으로써 도로상에서 비점오염의 유해성에 대해 알 수 있었다. 더불어 서울지역의 교량에서 도로 오염물질을 측정하고 그 결과를 외국자료와 비교·분석하였는데 각 오염물질별 연간 발생부하량이 외국에 비해 높게 나타났다.

■ 4S 포장의 투수 시스템은 우수에 의한 오염물질을 우수와 함께 아래로 투수시키게 된다. 이 과정에서 포장층의 자연정화에 의해 오염물질의 농도 및 질량이 자연적으로 감소하게 됨으로 도로의 비점오염을 제어할 수 있을 것이다.

6절. 친환경 4S 포장 공용성 평가를 위한 시작품 제작

1. 환경모사시험기(HEART Environmental Simulator) 제작

가. 환경모사시험기(HES) 제작배경 및 목적

본 “친환경 4S(safe, Silence, aeSthetic, and Satisfaction) 포장시스템 개발 연구”는 기존 포장형식과 다른 투/배수성 포장을 국내에 적용하기 위한 것이다. 투/배수성 포장은 유럽에서 1980년대부터 적용된 포장 형식으로 노면에서 빗물을 신속히 포장체 밖으로 배수하거나 물을 포장체 내로 침투시켜 노상까지 전달하는 포장이다. 이 포장형식은 차량 주행시 발생하는 소음을 감소할 수 있고 우천시 빗물을 포장체로 침투시켜 수막현상(hydroplanning)을 방지할 수 있는 장점이 있어 적극적인 도입이 실시되고 있다. 또한 미끄럼 사고를 방지하고 야간 시인성을 향상할 수 있는 장점이 있다.

그러나 기존의 포장과 비교할 때 구조적인 안정성이 확보되는가에 대한 검토가 필요하다. 일반적인 포장은 물의 포장표면 흐름을 통해 포장체 내 침투를 막음으로써 포장체 하부구조에 대한 물의 영향을 최소화하였다. 하지만 투/배수성 포장은 물의 포장체 내 침투를 허용함으로써 노상의 함수비를 증가시킨다. 함수비가 증가된 노상은 지지력이나 강도가 저하됨으로써 포장 전체의 구조적인 안정성에 악영향을 끼칠 우려가 있다. 이에 따라 본 연구에서는 투/배수성 포장의 현장 적용에 앞서 물의 포장체 내 침투시 포장의 거동을 평가할 수 있는 HES를 개발하고 실험을 통해 그 영향성을 파악하고자 한다.

본 연구에서 개발하고자 하는 HES는 기존의 휠 트래킹 장비의 기능에 도로의 실제 환경을 모사할 수 있는 기능을 추가함으로써 현실에 가까게 재현하는 것이다. 장비를 구현하는 것을 목적으로 한 본 연구 단계에서는 기존에 개발된 장비를 이용하여 함수비 관련 기초 실험을 실시하였다.

나. 기존 장비의 고찰

본 단원에서는 기존에 개발된 국내외 포장가속시험기의 성능과 특징 및 현장 공용성에 대한 비교 결과를 살펴보고 본 연구에서 개발하고자 하는 HES의 성능 및 실험 방법 개선에 대한 방안을 모색하고자 한다.

(1) 국내 포장가속시험기

(가) Full Scale 포장가속시험기

국내에서는 현재 Full Scale로 한양대학교와 한국도로공사에서 개발한 2대의 포장가속시험기를 보유하고 있다. 한양대학교 포장가속시험기는 직선형이고, 한국도로공사 장비는 타원형의 트렉에서 시험이 가능하다. 두 장비 모두 실내 고정식으로 운영되고 있으며 실내외에서 시험이 가능한 이동식 포장가속시험기는 개발되어 있지 않는 상태이다.

① 한국도로공사 포장가속시험장비(KALES)

한국도로공사에서는 1997년부터 1999년까지 3개년간 Full-Scale 포장가속시험기 제작에 앞서 모형 포장가속시험기(KALES, Korea Accelerated Loading and Environment Simulator)를 제작하여 현재까지 운영해 오고 있다. 그리고 지금까지의 모형 포장가속시험기의 운영과정에서 발생되는 문제점을 개선하여 2003년도에 도로교통기술원 내에 포장가속시험가동과 Full-Scale 포장가속시험기 제작을 완료하였으며 2004년 말까지 시험운용을 실시하고 현재 사용 중에 있다.

② 한양대학교 포장 가속 시험기(HAPT)

한양대학교에서 개발한 포장가속시험기(HAPT, Hanyang Accelerated Pavement Tester)는 Full-Scale 직선형 포장가속시험기로써 포장체에 실제와 유사한 환경하중과 교통하중을 시험실내에서 단기간에 모사하여 도로 신소재의 적용성과 기존 설계방법이나 재료의 공용성 평가를 목적으로 하고 있다.

<표 3.6.1> 한양대학교 포장가속시험기의 기본 사양

항목	제원
Test Length	12m
Wheel System	복륜하중
하중 부가	30~130KN
타이어압	0.69 MPa
속도	1~15km/h
Lateral Wander	조절가능
주행방향	일방향, 양방향 모두가능
환경제어	Heating System

(나) 소규모 포장가속시험기

외국으로부터 수입된 휠 트래킹 장비는 한국건설기술연구원, 건설 자재 시험 연구소 등의 연구 기관 및 학교 등에서 보유하고 있다. 본 연구기관에서 개발한 국내 포장가속시험장비는 HWLS(HEART Wheel Load Simulator)가 있다.

① 한국건설기술연구원

한국건설기술연구원에서 소유하고 있는 장비는 실제 도로가 고온의 환경 조건일 때 중차량의 주행으로 인한 러팅 등을 시뮬레이션 시킴으로써, 아스팔트 혼합물의 내유동성을 평가하기 위해 도입되었다. 전체 항온실의 크기는 1800×1600×2200(mm)이고 하중이 재하되는 공시체의 크기는 300×300×(50,150)(mm)이다. 크랭크 방식의 변속 구동형 시험기로써, 최대 하중은 70±1 kgf까지 가할 수 있고 하중재하 속도는 0.6km/h 정도까지 증가시킬 수 있다. 또한 실험시 항온실의 온도는 0~60℃까지 모사가 가능하다. 다음 <그림 3.6.1>은 한국건설기술연구원 소유의 휠 트랙킹 장비의 모습이다.



<그림 3.6.1> 한국건설기술연구원 휠 트래킹 장비

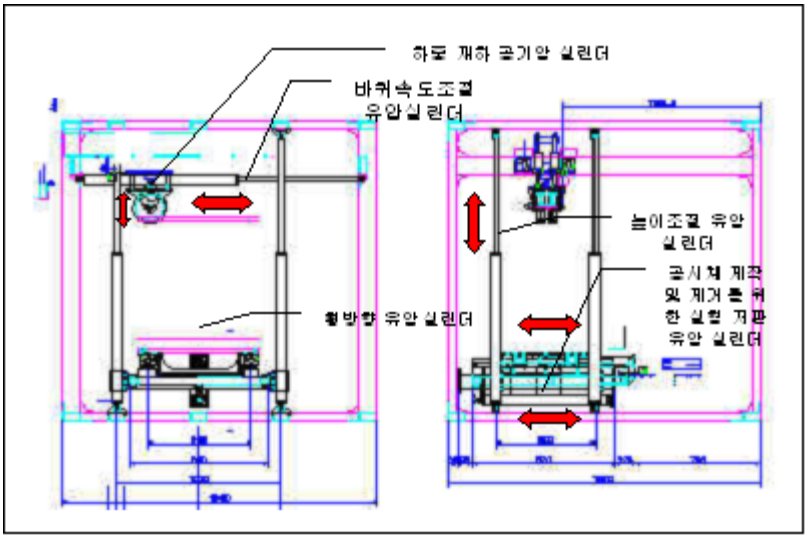
② 중앙대학교(HWLS: HEART Wheel Load Simulator, 이하 HWLS)

기존 장비의 단점을 개선하여 보다 현실과 유사한 포장 조건을 모사하기 위해 개발된 장비로 구동방식은 정교한 제어를 요구하는 하중재하 실린더를 공기압으로 조절하고 그 외의 작동부분은 유압을 이용하여 작동하도록 설계되어 있다.

본 장비에서 제작이 가능한 공시체는 600mm×600mm×(50~700)mm로써 공시체의 제작 또한 장비 내에서 가능하도록 설계되었다. 또한 공기압에 의해 하중을 재하하게 되어 있으며 바퀴의 자중으로부터 약 1000kg 까지 재하가 가능하도록 제작되었다. 가해진 하중은 로드셀(Load cell)로 측정할 수 있다.

다음 <그림 3.6.2>는 HWLS의 기본 설계를 나타낸 것으로 실험판의 유압실린더와 공시체 제작 및 제거시 작동하도록 되어있는 실험저판의 경우 장비자체의 조절스위치를 통해서만 작동이 가능하다. 또한 바퀴의 위치와 속도, 실험시 횡방향 이동을 위한 실험판은 포텐샤메터를 통해 프로그램 상에서 제어가 가능하게 설계되었다.

HWLS의 단점으로는 첫째, 지그의 조립과 공시체의 제작시간이 지체되며 해체시 어려움이 있다. 둘째, 휠 트래킹에 시간이 오래 걸린다. 셋째, 하중을 재하하는 공기압 실린더 내부에 로드셀을 설치하였을 경우 보다 손쉬운 하중의 변화가 가능하지만 하중변화시 로드셀을 이용하여 재하하중을 측정해야하는 어려움 등이 있다. (백우현, 2001) 특히 제작과정에서 환경 모사 실험 장비가 미비 됨으로서 관련 실험 자체가 불가능하다는 점이 있다.



<그림 3.6.2> HWLS의 기본 설계

(2) 국외 포장가속시험기

(가) Full Scale 포장가속시험기

국외에서는 다양한 고정식, 이동식 Full Scale 포장가속시험기가 개발되어 실무에 적용되고 있다. 그 중 대표적인 것으로는 INDOT/Purdue-APT(고정식), HVS, TxMLS 등이 있다.

① INDOT/Purdue-APT

INDOT/Purdue-APT는 1990년에 Indiana DOT와 Purdue University 사이의 공동연구에 의해 INDOT에 설치되었다. 본 시험장비는 원형 두께의 포장 단면에서 트럭 교통량을 모사하기 위해 제작되었으며 APT 시험 단면에 사용되는 재료, 하중 조건 및 환경 조건 등의 모든 조작이 가능하도록 설계되었다.

이 장비는 186m^{2}의 환경제어가 가능한 건물 내에 6.1×6.1×1.8m의 실험 섹션, 하중 재하 장치, 제어 및 모니터 장비 등을 포함하고 있다. 실험 섹션 내의 온도는 복사열을 이용한 시스템을 이용하여 조절이 가능하며 55℃까지 온도를 올릴 수 있게 제작되었다. 또한 필요할 경우에는 물을 실험 섹션 내에 투입이 가능하며 수위 또한 조절이 가능하다.

일반적인 복축의 트럭 바퀴나 광폭의 단축 트럭 바퀴가 사용되고 8km/h까지 속도를 증가시킬 수 있도록 개발되었다. 하중의 재하는 개발 초기에는 20KN의 하중재하가 가능하였지만 수정을 통해 약 178KN까지 하중을 가할 수 있게 되었다. 데이터는 정기적으로 장비가 멈춘 다음 계속적인 수집을 통해 이루어진다. 코어 채취는 시험 이후에 바퀴 자국의 안쪽과 바깥쪽에서 가능하다.(Khaled A.Galal외 1명, 1999)

② HVS(Heavy Vehicle Simulator)

HVS는 1972년에 남아프리카 공화국 CSIR(Council for Scientific and Industrial Research)에서 개발한 이동식 포장가속시험기로 매우 다양한 포장구조에서 500개가 넘는 시험구간을 시험하였다. 장거리 이동시에는 주로 트레일러에 의해 움직이고 단거리의 경우에는 장비 자체 내에 이동 기능이 있어 스스로 움직일 수 있다. 최대 15 km/h의 속도와 15ton의 하중으로 8m의 시험구간을 시간당 최대 1,000회의 반복하중으로 시험이 가능하며 이는 2~3개월 내에 고속도로에서 20년 정도의 하중효과를 시뮬레이션 하는 것에 해당한다. 또한 일방향 또는 양방향으로 하중을 재하할 수 있는 기능을 가지고 있다.

이 장비는 1994년에는 미국 캘리포니아 도로국에서 도입하여 CAL-APT 프로그램에 사용되고 있다. CAL-APT 프로그램에는 남아프리카공화국에서 시험하였던 자료와 미국의 시험자료를 데이터베이스화하여 연구 결과의 교류를 통한 발전적인 협력 관계를 유지하고 있다. 최근에는 미국 플로리다 도로국에서도 이 장비를 도입하여 장비를 운영하고 있다.

<표 3.6.2> HVS 기본사양

항목	제원
Test Length	8m
Wheel System	단륜, 복륜하중, 단축하중
하중 부가	20~200KN
타이어압	0.5~0.69 MPa
속도	1~10km/h
Lateral Wander	1.5m
주행방향	일방향, 양방향 모두가능
환경제어	Heating, Cooling System

<표 3.6.3> TxMLS 기본사양

항목	제원
Test Length	12m
Wheel System	복륜, 복축하중
하중 부가	22.5~47.5KN
타이어압	0.64 MPa
속도	12~25km/h
Lateral Wander	0.6m
주행방향	일방향
환경제어	-

③ TxMLS(Texas Mobile-Load Simulator)

TxMLS는 텍사스 도로국에서 1995년에 개발된 장비로 이동성이 우수하고 트럭의 현가장치(Suspension System)를 사용하여 시간당 8,800번까지 동적하중을 가할 수 있다. 이 장비는 6개의 텐덤축 또는 12개의 축하중을 포장에 가할 수 있어 시험기간이 단축되고 트럭과 유사한 축 배치를 사용함으로써 실제포장과 차량간의 상호 접촉관계를 잘 모사할 수 있다. 일반적으로 20km/h의 속도로 19톤까지 하중을 가할 수 있다. 또한 소음을 줄이고 환경조건을 통제하기 위해 완전히 밀폐된 공간으로 장비가 설계되었으며 소음, 온도, 가속도 등이 지정값 이상이 될 때에는 장비가 자동으로 폐쇄되는 안전장치를 갖추고 있는 것이 특징이다.

(나) 소규모 포장가속시험기

소규모 실내 포장가속시험기는 대부분 외국에서 개발되었는데 대표적인 것으로 Hamburg Wheel-Tracking Device, Georgia Load Wheel Tester 등을 들 수 있다.

① Hamburg Wheel-Tracking Device(HWTD)

이 장비는 1970년대 독일의 Esso A.G. of Hamburg에서 개발된 장비로써 아스팔트 콘크리트의 러팅과 스트리핑(stripping)에 대한 저항성을 모사하기 위해 개발되었다. HWTD는 폭 260mm×길이 320mm×두께 40mm의 슬래브형 공시체를 사용하고 선형 다짐기를 이용하여 공기량을 7±1%로 다짐한다. HWTD의 실험 방법은 2

5℃와 70℃의 범위에서 침수 상태로 반복하중을 가하여 포장상태를 살펴보는데 일반적으로 50℃에서 705N(71.94kgf)하중으로 폭 47mm철제 바퀴를 이용하여 실험하여 초당 330mm의 속도로 20,000회를 주행하거나 20mm의 처짐이 발생할 때 실험을 중단한다.

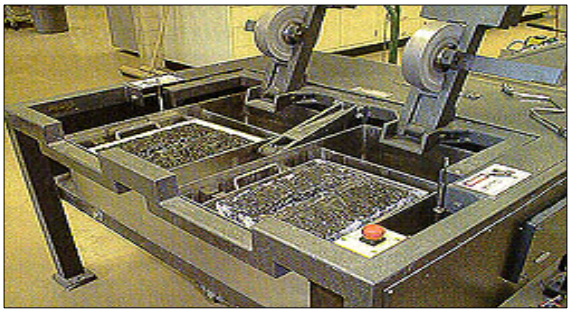
이와 같이 실험한 결과는 세로축을 러팅의 깊이로, 가로축을 주행횟수로 표시하여 그래프를 그리고 초기의 기울기를 크리프기울기(creep slope)로, 변곡점을 스트리핑 변곡점(stripping infection point)으로, 말기의 기울기를 스트리핑 기울기로 표시하며 이를 아스팔트 혼합물의 물성치로 표시하게 된다.

② Georgia Load Wheel Tester(GLWT)

GLWT는 1980년대 중반에 Georgia DOT와 Georgia Institute of Technology에서 개발한 장비로 슬러리실 시험기를 개량한 것이다. 실험실에서 러팅에 대한 저항성을 측정하여 현장의 HMA현장 품질관리를 위해 개발되었다.

GLWT는 빔 형태의 아스팔트와 원주 형태의 공시체를 사용한다. 빔 형태는 267KN의 하중으로 선형 다짐한 폭 125mm×길이 300mm×두께 75mm이고 원주형의 경우 직경 150mm×높이 75mm크기이며 선형 다짐 또는 선회 다짐기(gyratory compactor)를 사용한다.

445N(45kgf)하중을 알루미늄 축하중으로 8,000회 재하하여 러팅깊이를 측정한다. 러팅 깊이는 실험전후의 평균 깊이로 사용하게 되며 실험 온도는 초기에는 Georgia의 여름철 평균온도인 35℃를 사용하였으나 점차적으로 40.6℃로 높이고 있다. <그림 3.6.4>는 GLWT를 이용하여 실험하는 모습이다.



<그림 3.6.3> Hamburg Wheel Tracking Device



<그림 3.6.4> GLWT의 모습

다. HES(HEART Environmental Simulator)

(1) HES 개발 의의

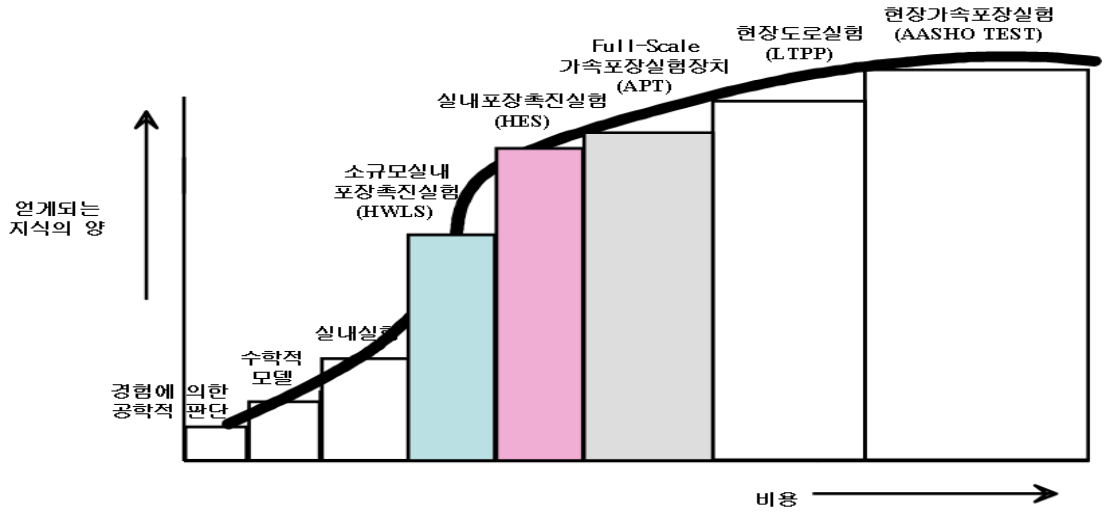
포장은 교통하중, 환경조건, 그리고 포장의 노화 간 상호작용으로 인해 시공 직후부터 그 공용성이 악화된다. 포장의 공용성을 예측함으로써 포장의 공용 수명을 알 수 있게 되고 포장이 적절한 기능을 수행할 수 있도록 유지보수 시기를 결정할 수 있게 되어 공사 시 포장 형식의 선정에 대한 합리적인 LCC(Life Cycle Cost) 분석이 가능해진다.

포장의 공용성 예측을 위하여 다양한 방법과 시험법들이 적용돼 왔으며 그 방법들의 유효성에 대해 평가하여 왔다. 그 대표적인 예가 장기포장 공용성 연구(Long Term Pavement Performance Study: LTPP Study)이다. 그러나 이 연구의 최대 단점은 의미 있는 결과가 나오기까지 엄청난 시간과 비용이 소요된다는 것이다.

대안으로 제시된 방법이 최근 많이 사용하고 있는 포장가속시험기에 의한 포장의 공용성 예측이다. 포장가속시험기는 비교적 짧은 시간동안 적절한 하중을 포장에 반복적으로 가하여 포장 재료의 효과, 설계요소, 그리고 다양한 시공방식을 포장의 공용성과 연관시켜 실험하여 평가할 수 있는 장비이다. 실내 소규모 파손촉진 실험 장비와 Full Scale의 고정식, 이동식 포장가속시험기가 국내외에 개발되어 있다.

Full Scale 포장가속시험장비는 이용에 있어서 비용이 많이 들고 대규모 공사를 실시해야 하며 강우, 온도 등의 자연환경 조건을 그대로 모사할 수 없는 단점이 있다. 또한 기존의 소규모 파손촉진 실험 장비는 실제 도로상에서 주행하는 차량의 환경을 그대로 모사할 수 없으며 포장체의 크기가 너무 작아서 현실과의 오차가 어느 정도 존재하게 된다.

기존 장비들의 단점을 보완하기 위해 본 연구에서는 강우장치를 이용하여 강우조건을 현실과 유사하게 모사하고 온도 및 습도 조절이 가능한 환경 챔버를 이용하여 실제 대기온도를 모사할 수 있는 환경모사시험기(HES, HEART Environmental Simulator)를 개발하고자 한다. 이와 같이 실내에서 도로의 환경 및 차량 하중을 가장 유사하게 모사하여 도로 포장의 상태에 따른 거동과 공용성을 분석하고 평가할 수 있다.



<그림 3.6.5> HES 개발의 의의

HES는 포장가속시험기의 일종으로 <그림 3.6.5>에 나타나듯이 실제 현장의 환경 조건과 유사하게 모사한 실내실험 장비를 이용하여 현장 포장가속시험기의 결과와 유사한 값을 최소한의 비용으로 얻어낼 수 있는 장비이다. HES의 개발의의는 본 연구실에서 보유하고 있는 소형 포장모사시험기인 HWLS의 여러 단점을 보완하여 실제 도로의 환경을 소규모로 모사할 수 있다는 점이다.

(2) HES제작 시 고려사항

(가) 포장가속시험기제작 시 고려사항

포장체는 다양한 요소들이 서로 상호작용을 하여 그 공용성에 영향을 준다. 포장가속시험기를 이용하여 포장의 거동을 모사하기 위해서는 다음의 요소들이 고려되어야 한다. HES의 개발에 앞서 포장가속시험기의 고려사항에 대해 살펴봄으로써 본 장비가 갖추어야 할 요소에 대해 확인할 수 있다.

- 교통하중의 모사
  - 바퀴하중의 강도
  - 원더링에 의한 효과
  - 교통속도
  - 교통하중의 재하방향
  - 타이어 압력/접지응력
  - 단축/복축

· 환경하중의 모사

- 온도 - 강우조건

- 바람, 복사열

① 교통하중의 모사

포장가속시험기는 실제 포장체의 다양한 교통하중을 모사하기 위해 일반 차량 하중에서부터 항공기의 하중까지 모사가 가능하도록 적용하고 있다.

바퀴하중의 강도는 포장의 공용성에 큰 영향을 미치지만 실제 포장에 있어서는 제어가 불가능한 변수이다. 또한 하중과 공용성의 관계는 일정하지도 않고 선형적이지도 않은 것으로 널리 알려져 있다. 포장체의 형태에 따라 축하중 강도를 달리하여 포장의 파손 정도를 측정하는 방법으로 이루어졌으며 각 실험에 따라 포장체, 재료 특성, 노상의 강도, 기후 조건 등이 다르므로 상이한 결과를 나타내었다. 교통하중의 재하방향에 관한 연구에서는 일방향과 양방향 교통의 영향에 대한 모순된 점이 보고되었다. 1999년 영국의 Brown과 Brodrick에 따르면 양방향 교통 시스템이 상대적인 공용성 측면에서 더 심각하다고 본 반면, 핀란드의 Huhtala와 Pihlajamaki의 연구결과에 따르면 두 경우에 대해서 공용성에 차이가 없다고 보고되었다. 이론적인 해석을 통해서는 잔류 응력의 영향으로 인해 두 가지의 경우에 공용성에 차이가 있다고 알려졌다.

대부분의 포장가속시험기는 원더링 효과를 모사할 수 있도록 제작되었다. White의 연구 결과에 따르면 포장가속시험기에서 원더링을 적용하였을 경우 아스팔트 포장의 주요 파손인 러팅이 많이 감소된다고 한다.(White, 1999) 실험치에 따르면 원더링이 약 250 mm 의 폭으로 분포할 경우 러팅 깊이는 30%~40% 정도 감소하는 것으로 보고된다. 그러므로 포장가속시험기를 이용하여 포장의 러팅 공용성을 평가할 때에는 원더링에 따른 러팅 깊이의 변화에 대해 고려해야 한다.

타이어와 포장체 사이의 경계면은 특히 아스팔트 포장 표층의 공용성에 많은 영향을 준다. De Beer는 VRSPTA(Vehicle-Road Surface Pressur Transducer Array) 시스템을 이용하여 "차량 타이어의 3차원 타이어/포장체 접촉 응력"의 크기를 설명하였다.(De Beer, 1997) <그림 3.6.6>과 같은 VRSPTA 시스템은 이동 타이어의 실제 접촉 응력을 계산하기 위해 개발되었다. 접촉 응력은 접촉 면적에 걸쳐

일정하지 않은 값으로 타이어압과 타이어의 성질에 따라 접촉 면적의 중심과 가장자리 사이에서 다양하며 이러한 접촉 응력은 표면균열의 주요 발생 원인으로 알려져 있다.

Balb는 타이어압, 하중, 타이어의 형태가 포장체의 접지 응력에 영향을 미치는 주요한 요소라는 것을 발견하고 타이어 가장자리의 높은 수직 접지 응력이 표면 러팅과 균열을 일으키는 가장 중요한 요소라고 주장하였다. (Balb, 1999)

또한 Bonaquist은 광폭 싱글타이어와 듀얼타이어의 영향에 대해 연구하였다. 연구 결과에 따르면, 아스팔트 내에서는 타이어 압력이 재하하중보다 더 중요하게 작용하지만, 아스팔트 층의 하부에서 작용하는 인장 변형률과 노상과 기층에서 작용하는 압축 변형률은 하중에 의해 더 많이 지배받는다는 것을 알 수 있다. 또한 광폭 싱글타이어에서 발생한 러팅이 듀얼타이어에서 발생한 것에 비해 1~2.4배 정도 크다는 것을 알았다. (Bonaquist, 1992)

포장가속시험기에서 교통속도에 따른 영향은 다른 요소들에 비해 많은 관심을 받지 않았다. 왜냐하면 대부분의 포장가속시험은 넓은 범위의 속도에 대해 실시하지 않고 또한 교통하중 재하 중 동적인 처짐을 측정하기 위한 것도 아니기 때문이다. Corté의 연구 결과에 따르면 속도가 40~50km 정도의 범위일 경우 15%의 속도 증가는 20~35% 정도 러팅을 감소시킨다고 한다. 특히 포장 구조체 내에 아스팔트가 있을 경우에는 하중재하 속도에 대한 영향을 고려하여 결과를 해석하여야 한다. (Corté, 1997)

Gramsammer는 LCPC 보고서에서 축의 수에 따른 영향은 결정적이지 않다고 하였다. (Gramsammer, 1999) 하지만 Newcomb는 Mn/ROAD 프로젝트에서 차량하중과 축의 형태, 차량속도 등에 다양한 범위를 적용하여 이를 경험적-역학적 설계법의 개발에도 적용하였다. (Newcomb, 1999)



<그림 3.6.6> HVS 아래 포장에서의 VRSPTA

② 환경하중의 모사

포장체에 대한 환경적인 영향은 온도, 물, 바람, 방사열 등과 관련된 물리적, 화학적 반응에 의해 필수적으로 유발된다. 최근 포장가속시험기를 이용한 포장 구조체 내 온도와 물의 영향에 대한 연구는 많이 진행되고 있지만 바람과 방사열에 대한 영향은 거의 고려하지 못하는 실정이다.

포장의 공용성은 공용기간 중 포장체 내 온도 범위에 의해 영향을 받으므로 포장가속시험 시 실제 온도를 모사하기 위한 여러 방법들이 있다. 다음 표에서는 각 포장가속시험기에서 온도를 제어하는 방법이 제시되어 있다.

영국의 Lister는 포장가속시험기를 이용하여 하중과 온도를 변화시키면서 포장의 거동을 분석하였다. 그 결과는 온도가 10~20℃ 변화함에 따라 포장의 영구 변형에 큰 영향을 미침을 알 수 있었다. (Lister, 1972)

포장체가 0℃ 이하로 내려갈 경우 얼게 된 물은 동결융해 현상을 일으킴에 따라 포장의 거동에 매우 큰 영향을 미치는 요소가 된다. 덴마크의 Zhang과 Macdonald는 저온에서의 포장체 거동에 대한 Full scale 포장가속시험을 실시하였다. 포장단면 주위의 온도챔버를 -10℃로 유지함으로써 포장체를 동결시킬 수 있었으며 동결을 멈춘 후 표면의 프로파일을 측정하였다. 그 결과 동결의 영향으로 얼음이 형성되어 포장표면이 6~26mm 정도까지 융기하였음을 알 수 있었다.(Zhang, Macdonald, 1999)

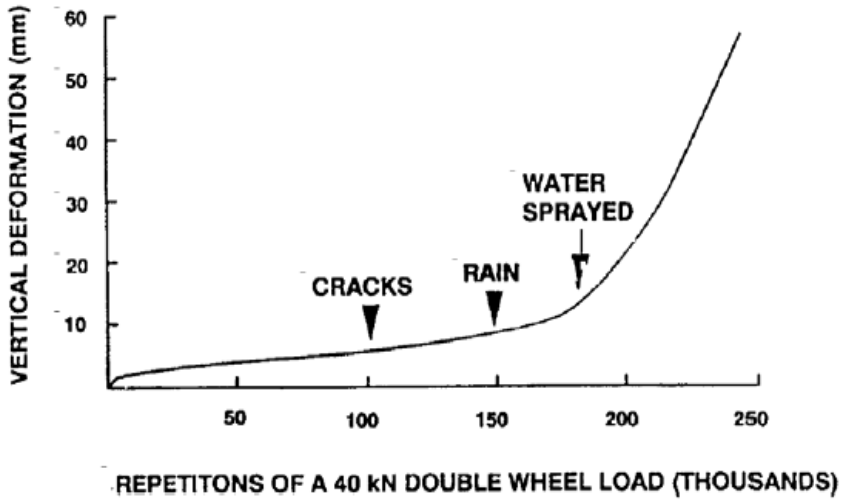
<표 3.6.4> 온도 제어 장치를 가진 포장가속시험기의 특징

APT 명	냉각 기능	난방 기능	챔버 온도의 제어 기능	온도 범위	포장체 온도 제어 기능	온도 범위
CAL/APT HVS	○	○	○	약 20℃	○	약 20℃
DRTM (Denmark)	○	○	○	-10~40℃	○	-4~25℃
FAA NAPTF	×	×	○	-1~35℃	×	2~27℃
FHWA PTF ALF	×	○	n/a	n/a	○	10~76℃
LCPC (France)	×	○	n/a	n/a	○	약 10℃
ATLaS (University of Illinois)	○	○	×	n/a	×	n/a

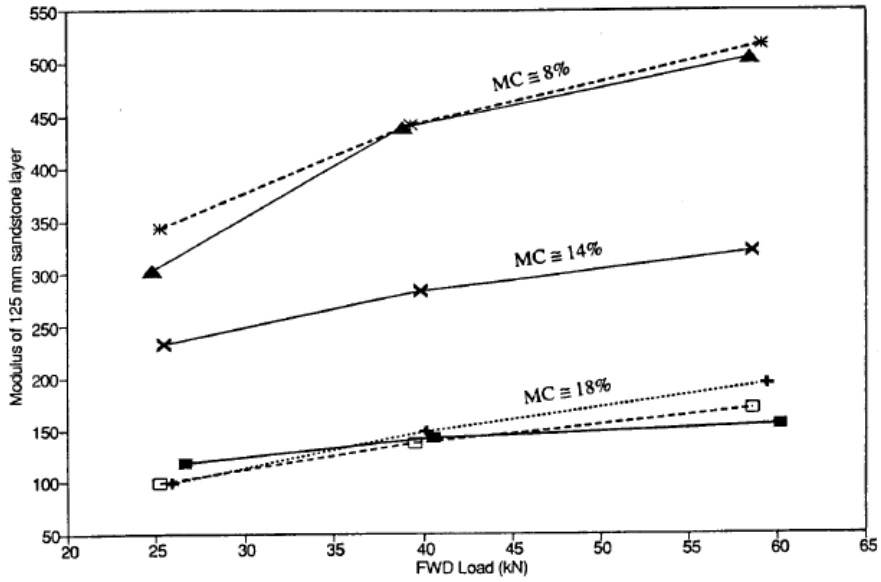
포장이 물에 젖게 되면 포장 파손이 더 촉진된다는 것이 일반적인 견해이므로 물이 포장의 공용성에 미치는 영향에 대해서는 연구가 활발히 이루어지고 있다. 주기적인 강우계절을 모사하기 위해 포장가속시험기에서는 포장표면에 스프링클러나 호스 등을 이용하여 포장 시스템에 물이 들어가도록 한다. 다른 방법으로는 실험 섹션을 따라 주입파이프를 이용하는 것과 전기적인 삼투압 시스템을 이용하여 포장의 입상층으로 물을 이동시키는 방법 등이 있다.

일반적으로 포장 구조에 물이 들어가는 영향은 동적이며 그에 따른 포장의 파손에는 포장 표면의 라벨링, 하부 포장층의 스트리핑, 노상과 기층 재료의 약화, 동결융해 주기의 영향 등이 있다. Maree 등은 입상기층(unbound base)의 변형과 관련된 연구에서 HVS(Heavy Vehicle Simulator)를 이용하여 포장에 물이 들어갈 경우 포장의 변형에 영향을 미친다는 것을 알아내었다. 하지만 포장이 적절하게 유지보수 되거나 배수 시설을 둔 경우에는 변형의 정도가 급격하게 감소한다고 보고하였다. 또한, Vuong 등은 함수비에 따른 노상과 기층에서의 거동 특성을 포장가속시

험기를 이용하여 조사하였다. 다른 하중 조건과 함수비 상태에 따른 사암(sandstone) 기층의 탄성계수 변동은 <그림 3.6.8>과 같다. 각 층의 탄성계수는 FWD(Falling-weight Deflectometer)로부터 나온 데이터를 역산하여 구하였으며 시간에 따른 탄성계수의 변화는 계절적인 환경 변화에 따른 상관계수를 결정하는데 유용하게 사용된다. 일반적으로 하중이 증가함에 따라 탄성계수 또한 증가하는 경향을 보이지만 함수비가 증가할 경우에는 탄성계수가 감소함을 알 수 있다.



<그림 3.6.7> 물에 의한 포장체의 변형 특성



<그림 3.6.8> 함수비와 하중조건에 따른 사암 기층의 탄성계수 변화

하지만 우리나라에서 적용하고 있는 포장 구조는 주로 기층 재료를 품질이 우수한 것을 사용하고 그 두께 또한 두꺼우므로 물에 의한 노상이나 기층의 강성 감소 영향이 크지 않을 것이다. 또한 본 연구에서 적용하고자 하는 투수성 포장에서는 아스팔트 층 아래 시멘트 층을 적용함으로써 물에 의한 노상에서의 강성 약화에 대한 영향을 최소화할 수 있다.

(나) HES에 적용된 기능

본 장비는 기존의 소규모 장비보다 규모가 훨씬 크므로 지그의 제작에 유의해야 한다. 본 연구실에서 보유하고 있는 HWLS의 경우에는 지그를 레고 형식으로 하나씩 홈에 맞춰 끼워 나가는 방식으로 제작하였다. 하지만 HES에서 이런 방법을 적용할 경우 지그틀 하나의 크기가 너무 커지게 되므로 조립이 불가능하다고 판단하였다. 또한 HWLS의 경우 지그틀에 난 틈 사이로 물이 새어나감으로써 투수성 실험을 실시할 때 오차가 발생함을 확인하였다. 이를 방지하기 위해서라도 일체형으로 지그를 제작하는 방법을 선택하였다. 그리고 지그를 제작할 때 짧은 변을 가진 면을 두꺼운 아크릴로 대체하여 물이 포장체 속으로 침투하는 모습을 눈으로 직접 관측할 수 있게 할 것이다.

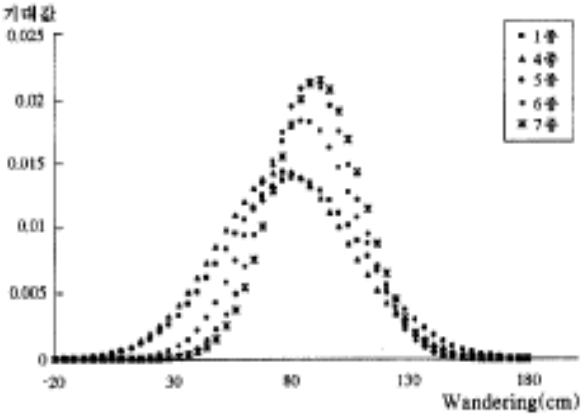
다음으로 강우조건을 모사하는 것은 본 장비의 개발 의의와도 관련 있는 것으로 스프링클러를 이용해 전면적에 대해 강수조건을 모사하고 포장체 내부에 포화파이프를 넣음으로써 노상의 포화를 촉진시킬 수 있는 방법을 적용하고자 하였다. 먼저 스프링클러를 이용하여 위에서 물을 뿌리는 형태에 필요한 물의 양은 노상과 보조기층에도 물이 투과되는 정도를 고려할 경우 약 3000L 정도의 물의 용량이면 물의 손실이 없는 한 포장체를 포화시킬 수 있을 것으로 판단하였다.

다음으로 데이터 수집은 기본적으로 모든 작업은 컴퓨터 제어가 가능하여야 한다. 하중과 변형률을 데이터 파일로 컴퓨터에 저장하여 이를 파일로 볼 수 있어야 한다. 또한 여러 가지 시험장비(데이터로거, 변형률계 등)를 여러 채널을 이용해서 수집할 수 있어야 한다.

바퀴는 탈부착이 가능하도록 제작하여 경우에 따라서 단륜과 복륜을 모사할 수 있도록 해야 한다. 본 시험장비는 필요에 따라 복륜을 부착할 수 있으므로 여러 종의 차량에 대한 실제 거동을 모사할 수 있다. 또한 현실과 유사한 환경을 모사하기

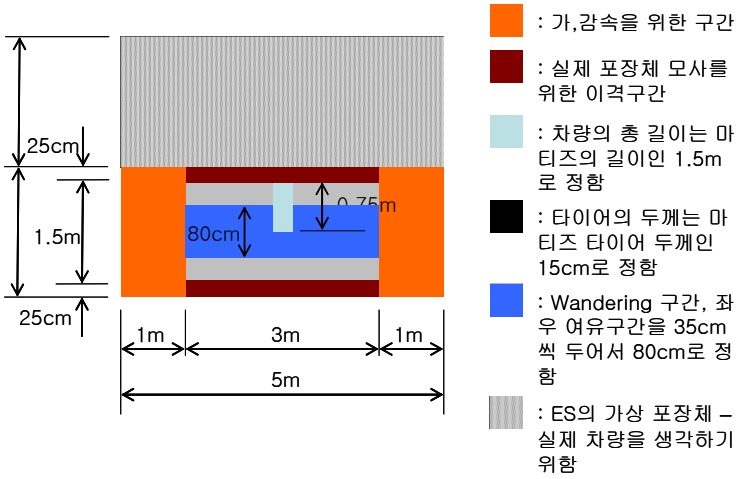
위해 바퀴의 재질을 고무타이어로 하고 바퀴의 크기를 실제의 크기와 동일하게 제작하였다. 우레탄 바퀴도 제작함으로써 큰 재하하중에 적용할 수 있게 하였다.

다음으로 실제 도로 위를 주행하는 차량의 거동을 모사하기 위해 바퀴 위치에 대한 random 산포도를 적용하여 wandering 효과를 표현할 것이다. 도로의 크라운(crown)과 곡선 주로의 편경사 등에 대한 모사를 위해 공시체 지그틀 자체를 작은 각도(2~4%이내)로 기울이는 tilting을 모사할 수 있게 제작한다. 또한 바퀴의 움직임 역시 왕복운동 또는 일방향 운동으로 구분하여 시험이 가능하도록 제작하여야 한다. 차량 Wandering의 포장손상 저감 정량화 연구(강민수, 2002)에 따르면 차폭이 넓을수록, 차도의 폭이 좁을수록 wandering의 간격이 좁다고 한다. 포장의 파손에 주된 영향은 중차량에 의한 것이므로 본 연구진이 모사해야 하는 차량은 대형차량(7종)으로 95% 신뢰수준으로 계산을 하면 1.96×18.7=36.652cm가 나온다. 그러므로 HES에서 모사해야 하는 wandering 간격을 한쪽으로 40cm(양쪽으로는 80cm)로 정하였다.



구 분	1종	4종	5종	6종	7종
표준편차	29.3	26.8	22.0	19.7	18.7
평 균	81.5	80.0	86.2	88.6	93.2
P-value	0.624	0.587	0.559	0.446	0.527

<그림 3.6.9> 다양한 차종의 분포(차도폭 : 3.5m)



<그림 3.6.10> HES wandering 모사도

온도제어 부분과 관련되어 Environment chamber 자체의 크기를 공시체의 제작 및 제거에 방해가 되지 않도록 하되 될 수 있는 한 최대로 줄여야 한다. 온도 조건은 가능하다면 실제 포장이 겪을 수 있는 최악의 사항을 모사할 수 있도록 하기 위해 -20℃~60℃ 를 모사할 수 있도록 하였다.

그리고 하중을 재하할 수 있는 범위는 바퀴의 자중에서부터 약 12,000lb(5.44tonf) 정도까지이다. 이 정도의 하중을 가하기 위해서는 반력식으로 해야하므로 하중 재하를 위한 트러스 구조물의 바닥면에 앵커 등을 박아서 반력을 주어야 할 것이다.

LVDT를 바퀴 옆에 부착하여 하중이 작용할 때 포장체의 처짐을 구할 수 있어야 한다. 또한 영하의 온도(-20℃)에서 LVDT가 정상적으로 작동할 수 있는지에 대한 검토가 꼭 필요하다. 다른 센서의 경우에도 온도변화에 따라 민감하게 센서가 반응하므로 온도가 변화함에 따라 그 결과치가 달라질 수 있음으로 확인하는 것이 필요하다.

라. 기존 포장 가속기(HWLS)를 이용한 예비실험

(1) 투수성 포장에 대한 HWLS를 이용한 공용성 평가 실험

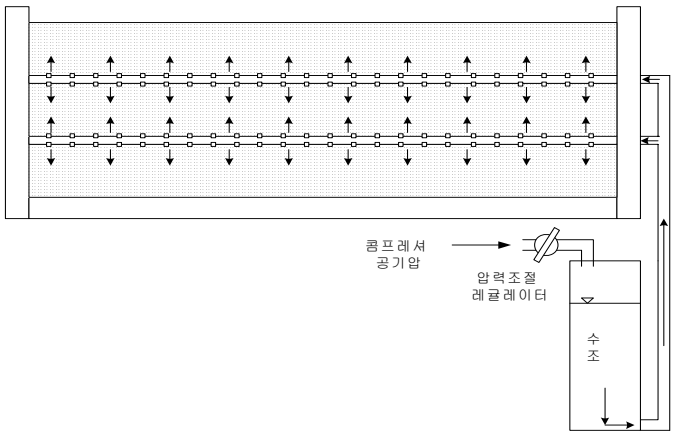
기존의 HWLS 장비를 이용하여 HES 장비의 검증을 위한 목적으로 예비실험을 수행하였다.

(가) 파이프를 이용한 포화장치 예비실험

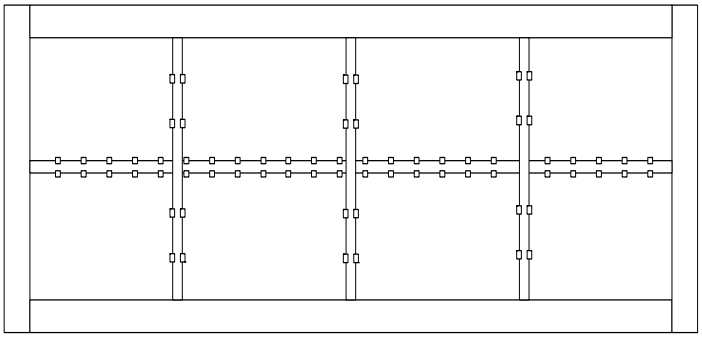
① 실험 개요

본 연구에서 개발하고자 하는 HES는 강우조건을 조절함으로써 노상이 포화된 상태에서 바퀴하중을 재하할 수 있다는 장점이 있다. 이 실험을 진행하기 위해서는 먼저 노상을 포화시킬 수 있는 장치가 필요하다. 강우 조건을 모사하기 위해 실험장비가 장착하고 있는 스프링클러만으로는 노상의 포화가 쉽게 되지 않는다. 그리하여 본 연구에서는 <그림 3.6.11>~<그림 3.6.12>와 같은 방법을 HES에 적용하여 좀 더 빠른 시간에 흙을 포화시키고자 한다.

하지만 이 방식으로 우리의 실험목적에 맞는 흙의 포화가 이루어질지 확인하고자 HES의 토조를 제작하기 전에 연구실에서 제안한 흙의 포화 방식이 실제로 적용 가능한지를 기존 장비인 HWLS를 이용하여 확인해 보고았다.



<그림 3.6.11> 토조의 포화 계통도



<그림 3.6.12> 파이프라인(토조 상부 정면도)

② 실험 방법 및 과정

먼저 노상토 내에 묻은 파이프의 효용성에 대한 상대적인 비교를 위하여 두 번에 걸친 실험을 실시하였다. 첫 번째 실험은 파이프를 통해 포화를 시키는 것이 아니라 노상토 위에서 인공적으로 물을 뿌려서 노상토를 포화시키고자 하였다. 두 번째 실험은 노상토 내에 묻혀진 파이프를 이용하여 물을 투입함으로써 노상토를 포화시켰다. 이 둘의 상대적인 포화 정도를 노상토 내부에 매설해 둔 TDR(Time Domain Reflectometer)을 이용하여 비교할 수 있다.

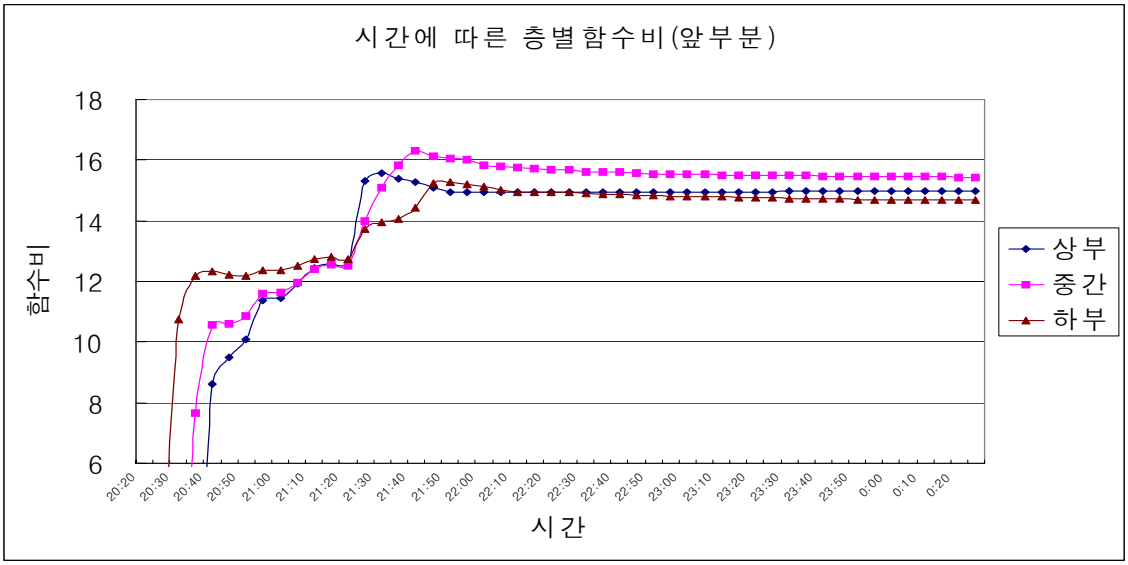
③ 실험 결과 및 분석

㉮ 물을 위에서 뿌려준 경우

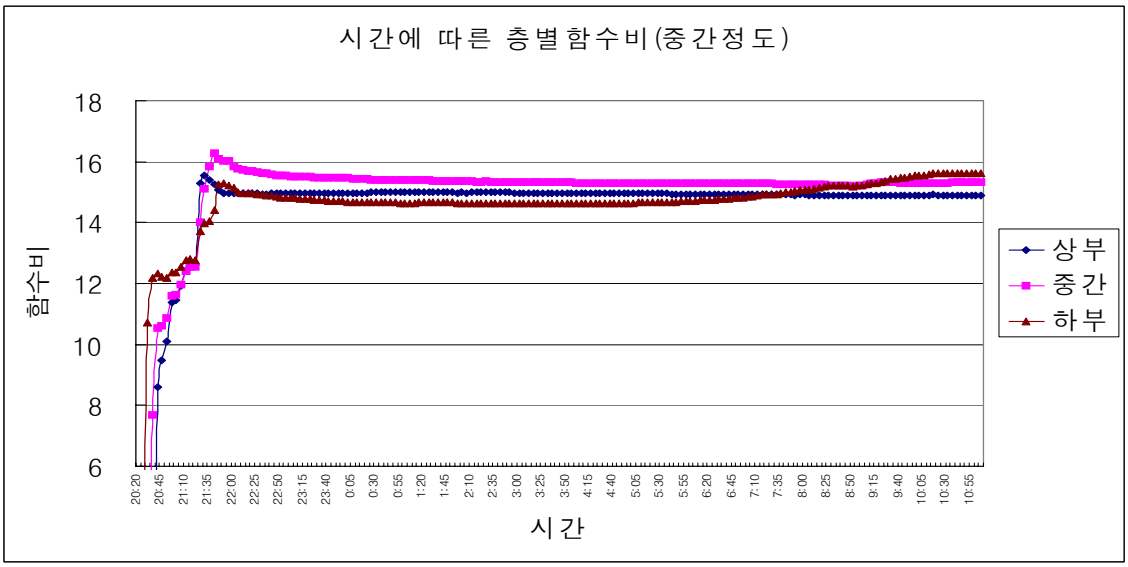
실험 결과를 그래프로 나타내면 다음과 같다. TDR 위치에 따라서 상부, 중간, 하부로 데이터를 구별하였다. 또한 시간에 따라 5분 간격으로 데이터를 측정하였으므로 그 양이 많아 함수비의 변화가 심한 부분을 따로 떼어내어 나타냈다. <그림 3.6.13>에서 보듯이 TDR을 매설함에 따라 함수비가 급격히 증가함을 알 수 있다. 하부 TDR이 제일 먼저 흙에 묻혔으므로 시간적으로 가장 빨리 함수비가 증가하였다.

또한 <그림 3.6.13>에서 다짐을 실시한 시간에 함수비가 급격히 증가함을 알 수 있다. 이 경우 상부 TDR의 함수비 증가가 매우 급격하게 일어났으며 다짐으로 인해 흙 속의 물이 표층으로 올라온 것으로 판단된다. 그리고 중간 TDR의 경우 함수비가 많이 증가함을 알 수 있는데 이는 TDR이 벽에 가까운 곳에 위치하였기 때문이라 생각된다. 다짐이 끝난 후 1%의 함수비에 해당하는 물을 침투시켰지만 초기 함수비의 증가 현상은 거의 발생하지 않음을 알 수 있다.

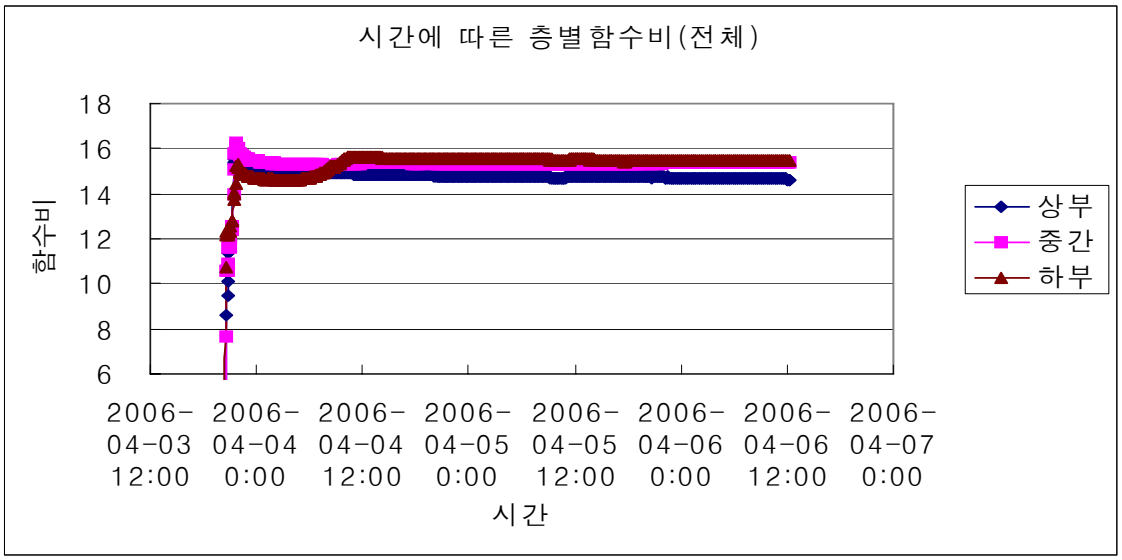
마지막으로 HWLS에서 흙을 제거할 때 TDR 주변 흙의 샘플을 이용하여 함수비를 측정함과 동시에 TDR 값과 비교를 실시하였다. 각 층별로 TDR을 이용한 함수비의 경우 상부, 중간 : 14.71%, 하부 : 15.66%로 나타났지만 흙의 샘플을 이용한 경우에는 상부 : 10.75%, 중간 : 11.15%, 하부 : 13.93%로 나타났다.



<그림 3.6.13> 매설 초기 TDR의 함수비 변화량



<그림 3.6.14> 매설 초·중기 TDR의 함수비 변화량



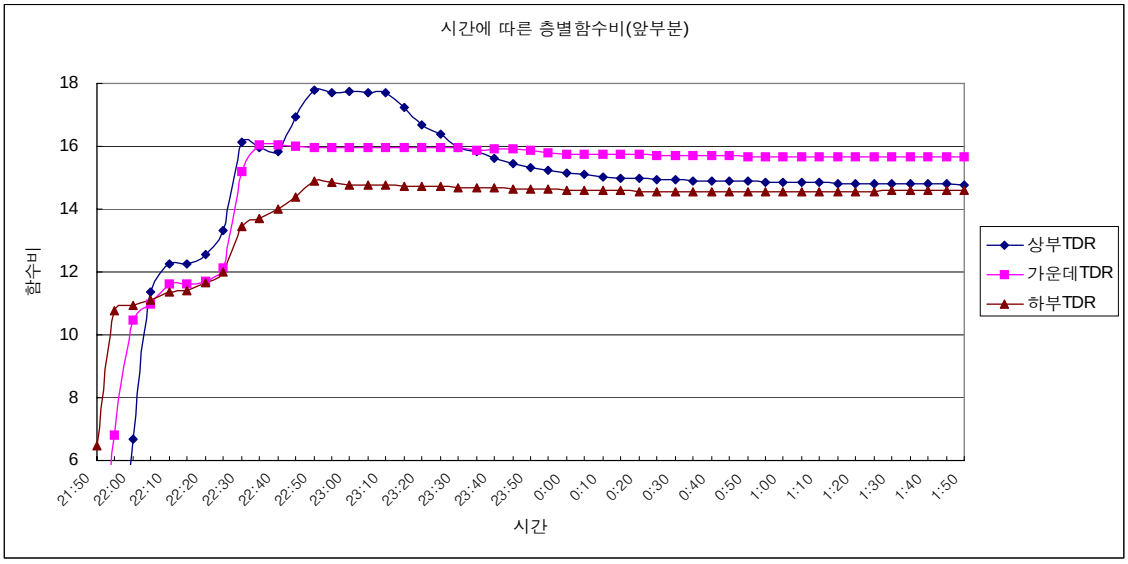
<그림 3.6.15> 전기간 TDR의 함수비 변화량

㉯ 파이프를 이용하여 물을 투입한 경우

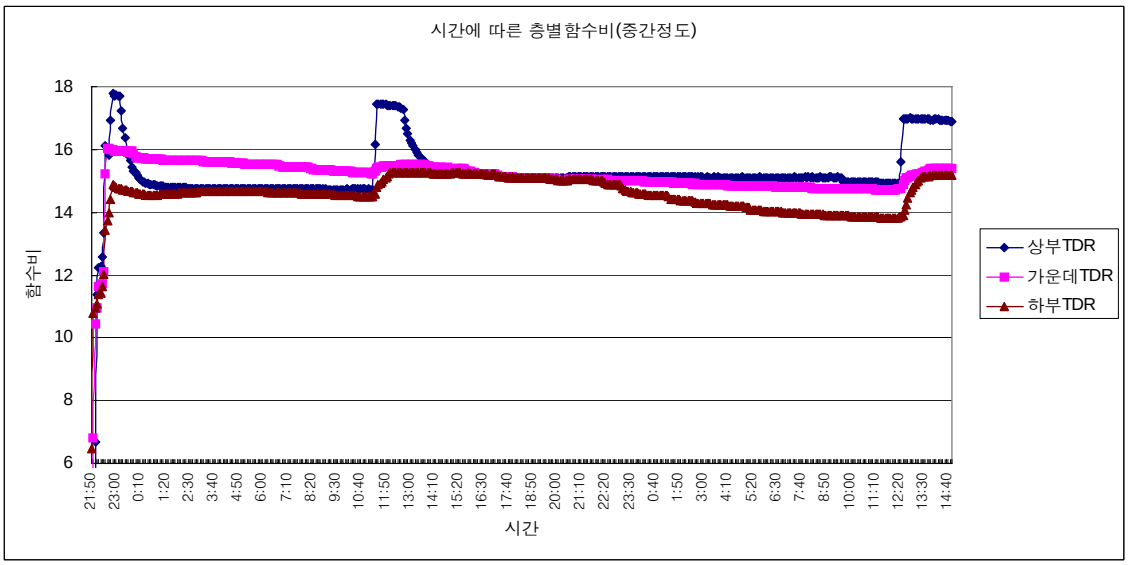
<그림 3.6.16>은 TDR 위치에 따른 함수비의 변화를 보여준다. <그림 3.6.16>은 데이터의 앞부분만을 이용해서 그린 것이고 <그림 3.6.17>는 세 번째 물을 뿌린 시간까지의 데이터를 이용해서 그린 것이며 마지막 그림은 모든 데이터를 이용해서 그린 그림이다. <그림 3.6.17>를 보면 파이프를 이용하여 물을 침투시킨 시간에 상부 TDR의 함수비가 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 위에서 물을 뿌렸던 실험과는 달리 파이프를 이용하여 물을 침투시킬 경우가 더 빨리 물을 포화시킨다는 것을 보여준다. 물을 침투시킨 시간에서 상부 TDR은 급격하게 증가하고 중간층과 하부층의 TDR은 함수비의 값이 상부 TDR 보다는 작게 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 파이프를 가운데 매설하였으므로 파이프를 통해 물이 나올 경우 공극이 가장 빠지기 쉬운 위쪽에서부터 공기가 빠져나가고 그 자리를 물이 채워 넣음으로써 상부의 함수비가 가장 증가하게 되었다는 것을 증명해준다. 이 결과를 이용해서 본 실험에서는 파이프를 가운데에 매설하기보다는 하부층에 매설함으로써 파이프를 이용해 물을 침투할 경우 노상층 전체에 함수비가 비슷하도록 유도할 것이다.

<그림 3.6.18>에서 세 번째 물을 침투시킨 이후에는 함수비가 전체적으로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 이는 히터를 이용하여 HWLS 온도를 20℃로 유지하였으

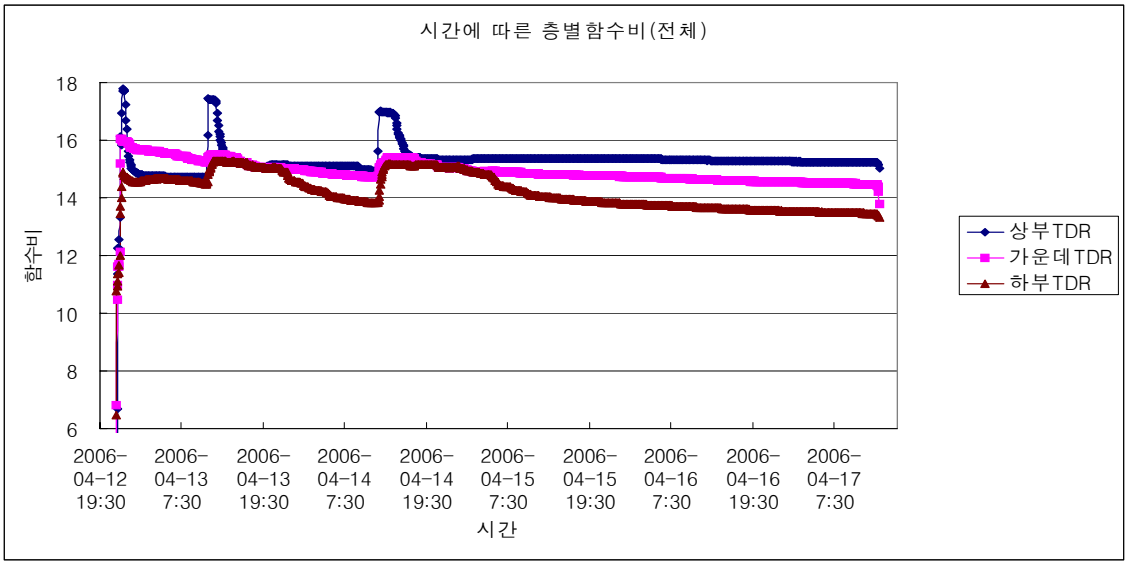
므로 물이 증발한 것으로 판단된다. 실제 실험에서는 포화상태를 계속 유지하기 위해서 물을 일정 시간간격을 두고 계속 주입시켜야 하며, 그 함수비를 16% 정도로 맞춤으로써 포화함수비 상태(16.35%)를 유지하도록 할 것이다.



<그림 3.6.16> 매설 초기 TDR의 함수비 변화량



<그림 3.6.17> 3회 물투입 후 TDR의 함수비 변화량



<그림 3.6.18> TDR의 전기간 함수비 변화량

(나) 기존 장비(HWLS)를 이용한 투수성 포장에 대한 공용성 평가 실험

HES의 개발에 앞서 기존 장비를 이용한 투수성 포장에 대한 공용성 평가 실험을 먼저 실시하였다. 이 실험을 통해 노상의 상태에 따른 포장체의 거동을 비교하였으며 실험시의 문제점을 파악하여 HES 개발시 개선 방향을 제시하고자 하였다.

① 실험 개요

본 실험은 두 가지의 목적을 가지고 실시되었다. 먼저, 본 연구에서 제작하고자 하는 HES를 검증하기 위한 것으로 기존의 휠트랙 장비인 HWLS를 이용한 실험을 실시하고 그 결과값을 HES를 이용한 실험과 비교한다. 다음으로 HWLS에서 최적함수비 상태일 경우와 포화상태일 경우를 모사하여 두 경우의 거동 차이를 비교해 봄으로써 노상의 상태에 따른 포장체의 거동을 평가할 수 있다.

실험의 개요도는 <그림 3.6.19>과 같으며 노상의 상태에 따라 최적함수비 상태와 포화 상태 두 가지에 걸쳐 실험을 진행하였다. 노상의 상태에 따라 가장 크게 영향을 받을 수 있는 투수성 포장 단면을 실험 단면으로 선정하였으며 노상의 상태 변화에 따른 포장체의 거동을 측정하는 것이 목적이므로 실험변수로 노상의 상태를 가정하였다. 다음으로 실험에 사용되는 재료에 대한 물성평가를 실시하여 노

상, 보조기층의 포화상태에 대해 정의할 수 있었다. 투수 CTB와 투수 AP에 대한 기본 물성 실험도 실시하였다. 실험 단면을 제작하고 반복하중을 주면서 노상의 상태에 따른 포장의 거동을 평가하고 결과를 분석하였다.

② 단면 두께 선정

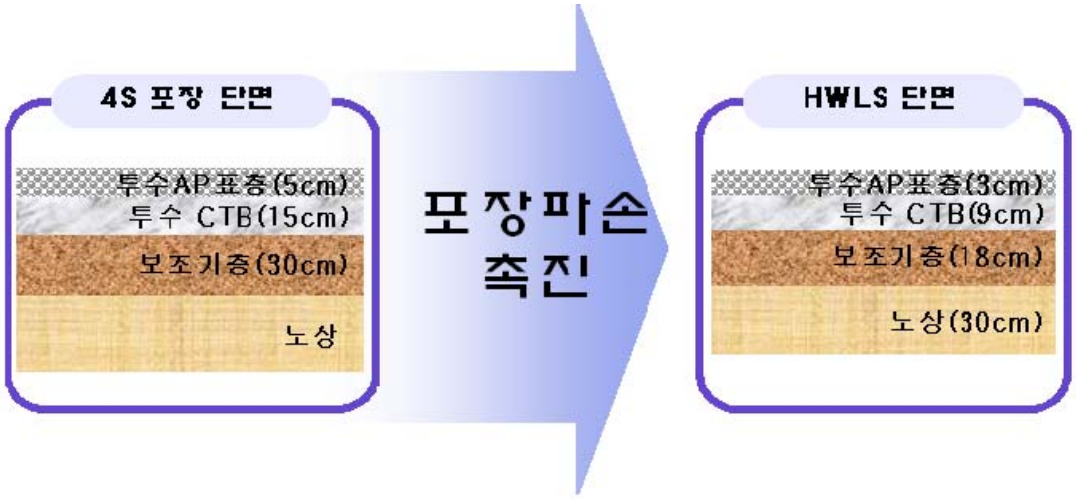
실험 단면은 앞서도 말했듯이 투수성 포장을 적용하였다. 투수성 포장 중 최근 중앙대학교에서 연구 중에 있는 4S 포장 단면을 이용하였다. 4S 포장 단면을 한국도로공사 포장가속시험기에 적용한 실험 결과, 가장 좋은 결과값을 보인 단면은 투수 AP 5cm, 투수 CTB 15cm, 보조기층 30cm, 나머지 노상인 경우이었다. 이를 상사법칙을 이용하여 높이 60cm인 HWLS 단면에 적용할 경우 노상은 30cm, 보조기층은 18cm, 투수 CTB 9cm, 투수 AP 3cm 의 단면이 된다.

③ 실험 과정 및 방법

HWLS 실험 과정은 크게 재료에 대한 물성 평가, 재료의 타설 및 게이지 매설, 층별 다짐, 파이프를 이용한 노상토 포화, 반복하중재하 실험에 따른 러팅 발생량 및 정적하중재하 실험에 따른 변형률 측정 등으로 나눌 수 있다. <그림 3.6.21>은 이에 대한 실험 과정을 나타낸 것이다.



<그림 3.6.19> HWLS를 이용한 예비 실험의 개요도



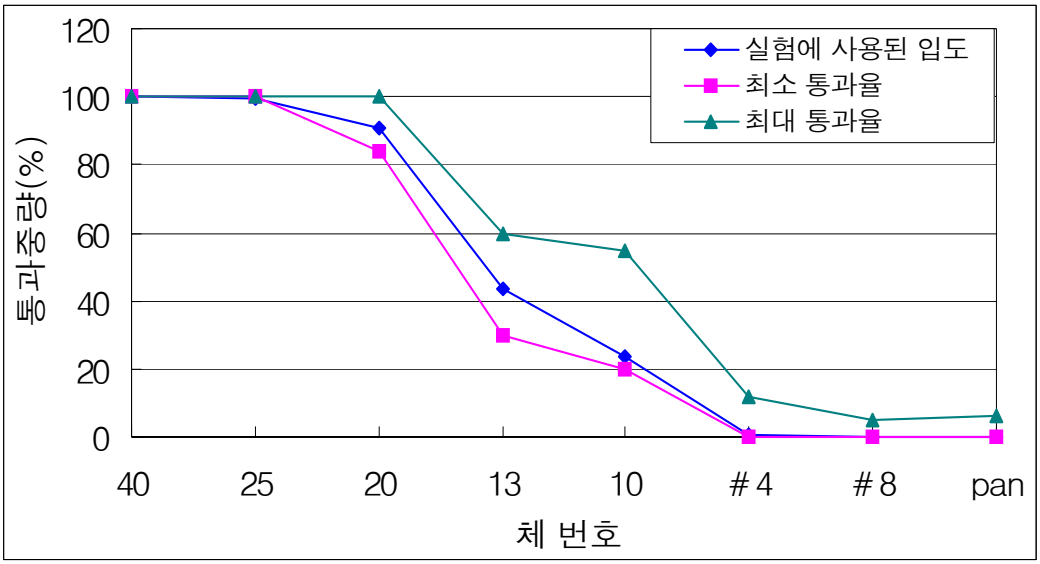
<그림 3.6.20> HWLS 실험을 이용한 단면 두께의 선정



<그림 3.6.21> HWLS를 이용한 실험 과정

실험에 사용된 각 층별 재료에 대한 물리적인 특성에 관한 실험을 실시하였다. 먼저 노상과 보조기층에 대해 다짐 실험, 비중 실험, 체분석 실험 등을 실시하여 최적함수비, 최대건조밀도, 비중, 입도분포 등을 알아보았다. 그 결과는 다음 <표 3.6.6>과 같다.

투수 CTB와 투수 AP에 대한 기본 물성 실험도 실시하였으며 그 결과는 다음과 같다. 콘크리트 및 아스팔트에 사용된 골재의 물성은 <표 3.6.6>과 같다. 투수 CTB는 <표 3.6.7>의 배합을 적용하였으며 입도분포는 <그림 3.6.22>와 같다.



<그림 3.6.22> 투수 CTB 입도 곡선

<표 3.6.5> HWLS 실험용 노상 및 보조기층의 물성

	채취장소	최적함수비(%)	최대건조밀도	비중	균등계수	곡률계수
노상	한국도로공사 시험도로	12.9	1.88	2.59	10	1.06
보조기층	경기도성남시 골재 채취장	7.3	2.29	2.45	22.5	0.8

<표 3.6.6> HWLS 실험에 사용된 재료의 물리적 특성

구 분	굵은골재	잔골재	채움재	시멘트	플라이애쉬	팽창재
비 중	2.62	2.76	2.73	3.15	2.1	2.58
흡수율	0.57	0.83	-	-	-	-

<표 3.6.7> 투수 CTB 배합설계

구 분	굵은골재 최대치수	잔골재율 (%)	시멘트 (kg)	물 (kg)	굵은골재(kg)	잔골재 (kg)	플라이애쉬 (kg)	팽창재 (kg)	AE재 (kg)
투수 CTB	25mm	15	113	70	1,766	314	56.4	16.6	0.023

<표 3.6.8> 실험에 적용한 투수 AP의 입도 분포

호칭치수 (mm)	25	20	13	10	5	2.5	0.6	0.3	0.15	0.08
체통과 중량백분율 (%)	100	95 ~ 100	53 ~ 78	35 ~ 62	10 ~ 31	10 ~ 21	4 ~ 17	3 ~ 12	3 ~ 8	2 ~ 7

투수 AP 표층의 입도는 국내 S 사에서 제안한 배수성 포장의 입도분포를 따랐으며 바인더는 역시 국내 S사 제품(PG 82-28)을 사용하였다.

앞서 말한 단면의 두께에 해당하는 만큼 각 재료를 타설한 후 게이지를 매립한다. 노상에 묻는 게이지의 경우 파이프는 노상 하부에서 5cm 높이에 묻고 TDR 게이지는 노상의 하부에서 5cm, 15cm, 25cm 되는 지점에 묻는다.

보조기층의 타설 후, 투수 CTB를 배합기준에 맞게 믹싱하여 타설하였다. 정적하중재하시 CTB 하부에서의 인장응력 및 인장 변형률을 알기 위해 CTB 하부에 매립형 콘크리트 변형률 게이지를 매설하였다. 투수 CTB의 조기 양생을 위하여 온도 30℃에서 양생을 실시하였으며 공시체를 제작하여 강도를 측정하고 기준 압축강도 50kgf/cm^{2}을 넘었을 때 투수 AP를 타설하였다. 투수 AP 하부에 아스팔트 변형률 게이지를 매립하여 하중에 따른 변형률을 측정하였다.

각 층의 다짐 정도는 다짐 후 높이로 조절하였다. 노상의 경우 일정한 흙과 물의 양에 대해 다짐 후 높이가 30~31.58cm 사이이면 상대다짐도 95% 이상을 만족하였고 보조기층의 경우, 18~18.95cm 사이이면 이를 만족하였다. 본 실험에서 적용한 HWLS에서의 층별 다짐 조건은 다음 표와 같다. 이는 기존 문헌에서 제시한 다짐 조건과 상이하지만 사용되는 흙의 특성에 따라 다짐 조건 또한 달라지므로 본 실험에 적용하여도 무방할 것이다.

파이프에 공기압을 가하여 물을 침투시켜 노상토를 포화시킨 후 TDR을 이용하여 함수비가 증가하는 것을 확인하고 정적하중재하 실험 및 반복하중재하 실험을 실시한다. 함수비 변화에 따른 반복하중재하 실험을 통해 러팅 발생 깊이를 측정하고 특정 반복재하횟수(0회, 2000회, 5000회, 10000회, 20000회)에서 하중의 크기에 따른 정적하중재하 실험을 실시하여 표층 및 기층의 변형률을 측정하였다. 정적하중재하 실험시 하중을 재하하는 위치는 <그림 3.6.21>에 제시된 1, 2, 3과 같다.

<표 3.6.9> HWLS에서의 층별 다짐 조건

	재하 하중(kgf)	재하 회수	재하 속도(㎞/h)
노 상	800	30회	0.67(3단)
보조기층	800	30회	0.67(3단)
CTB	800	50회	0.67(3단)
아스팔트층	800	20회	0.67(3단)

④ 실험 결과 및 분석

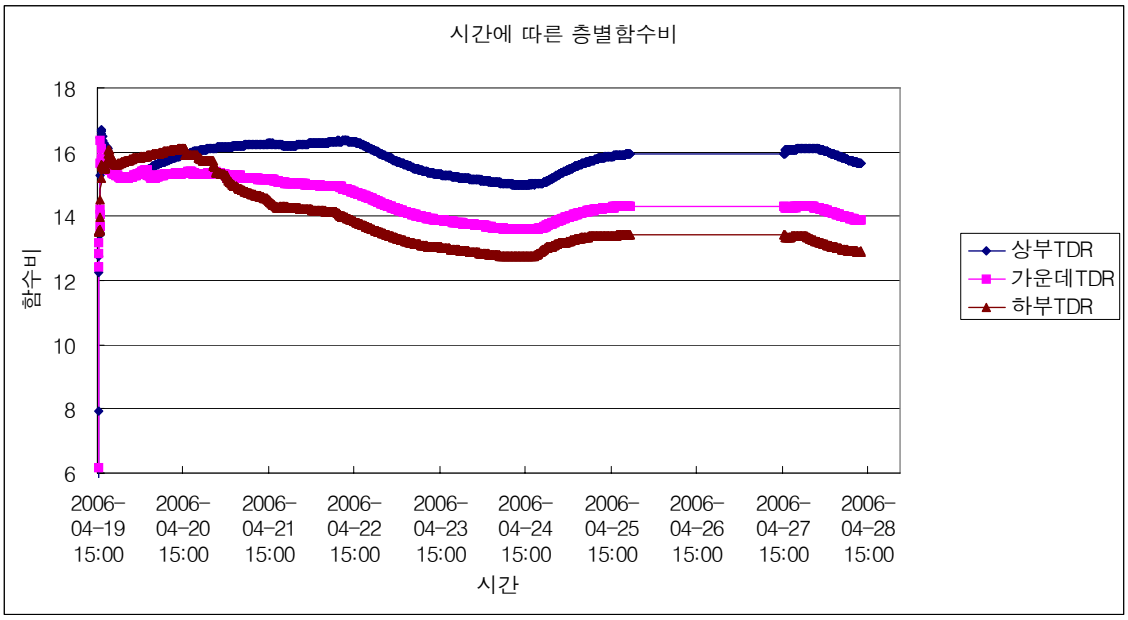
노상이 최적함수비 상태일 경우와 포화상태일 경우 두 가지에 대해 노상의 함수비 변화를 측정하였으며 표층에서의 러팅 발생 정도와 정적하중재하실험을 통한 표층, 기층에서의 하중크기 및 재하위치에 따른 반복하중재하횟수당 변형률을 비교하였다.

㉮ 노상의 함수비 변화

1) 최적함수비 상태

<그림 3.6.23>는 노상이 최적함수비 상태를 유지하고 있을 때 노상의 각 층별 함수비 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 다짐을 실시함에 따라서 전체적으로 함수비가 크게 나오고 시간이 지남에 따라 함수비가 점차 감소한다는 것을 알 수 있다. 또한 중간 정도에서 갑자기 모든 TDR의 함수비가 증가하는 경향을 보이는데 이는 타설된 공시체에 휠트래킹을 실시한 시기로 다짐과 동일한 효과가 작용한 것으로 판단된다.

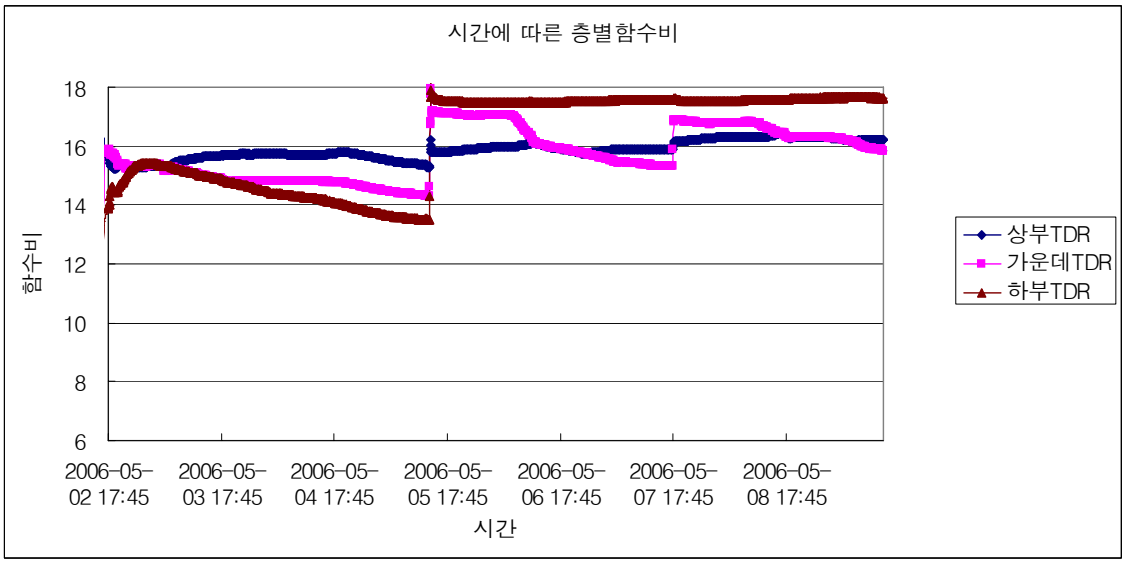
또한 전체적으로 상부 TDR 값이 가장 큰 함수비를 유지하고 있었으며 평균적으로 14% 정도의 함수비를 일정하게 유지하는 것으로 나타났다. 그림에서 직선으로 나타난 부분은 TDR 베터리가 소모되어 데이터를 얻지 못한 구간으로 거의 일정한 함수비 상태를 유지한 것으로 판단하여 직선으로 나타내었다.



<그림 3.6.23> 최적함수비 상태에서의 시간에 따른 층별 함수비

2) 포화 상태

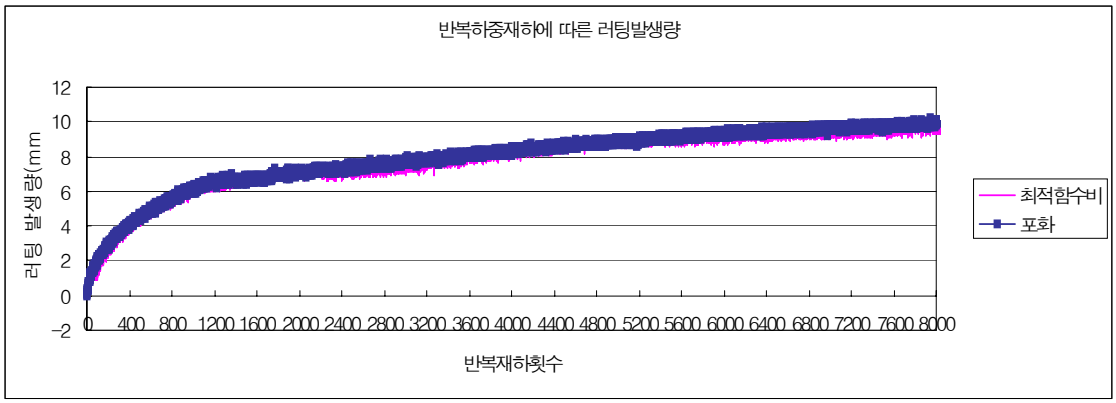
<그림 3.2.24>은 예비실험을 통해 검증된 파이프를 이용하여 노상을 포화 상태로 유지할 때 노상의 각 층별 함수비 변화를 나타낸 것이다. 실험을 실시하는 동안 함수비를 일정하게 유지하기 위해 일정 시간 간격으로 파이프를 이용해 물을 투입하였다. 본 실험에서 사용한 노상은 포화 함수비가 16.35% 정도로 계산되었으며 실험을 하는 동안 이를 유지하고자 하였다. 그림에서 보면 파이프를 이용하여 물을 투입하였을 때 모든 TDR의 함수비가 갑자기 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 하부 TDR의 경우 파이프와 가장 가까이 위치하고 있으므로 그 반응이 가장 크다는 것을 알 수 있다.



<그림 3.6.24> 포화 상태에서의 시간에 따른 층별 함수비

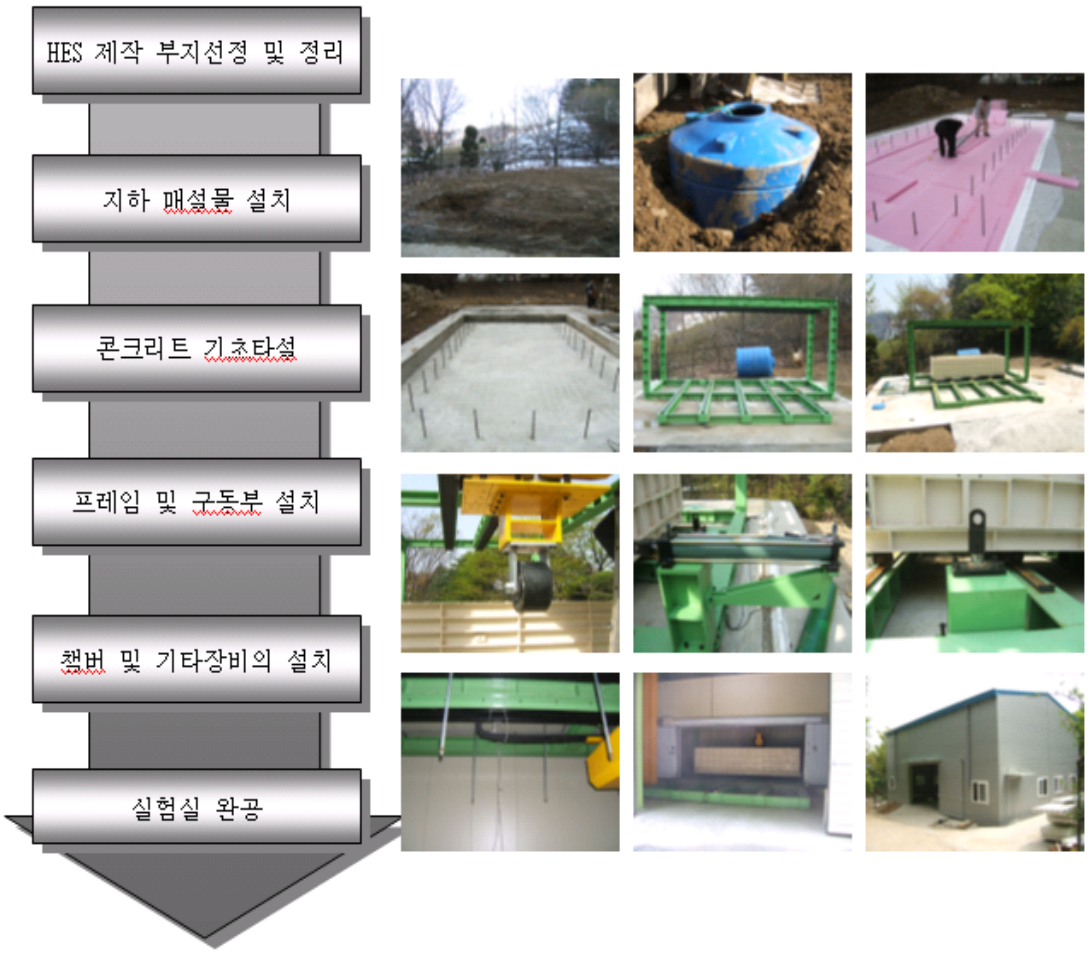
㈏ 반복하중재하에 따른 표층 러팅 발생량

HWLS의 LVDT를 이용하여 반복하중재하횟수에 따른 표층의 러팅 발생량을 측정하였다. 아래 그림에서 보듯이 전체적으로 반복재하횟수가 증가함에 따라 러팅이 점차적으로 증가하는 경향을 보임을 알 수 있다. 하지만 노상이 최적함수비 상태일 경우와 포화 상태일 경우 러팅 발생은 크게 차이가 없음을 알 수 있다. 이는 투수 CTB 층의 강성이 크기 때문에 러팅의 발생이 표층에만 국한되어 일어남에 따라 노상의 포화 유무와는 상관이 없는 결과를 보이는 것으로 판단된다.



<그림 3.6.25> 반복하중재하에 따른 표층 러팅 발생량 비교

마. HES 건설과정



<그림 3.6.26> HES 건설과정 흐름도

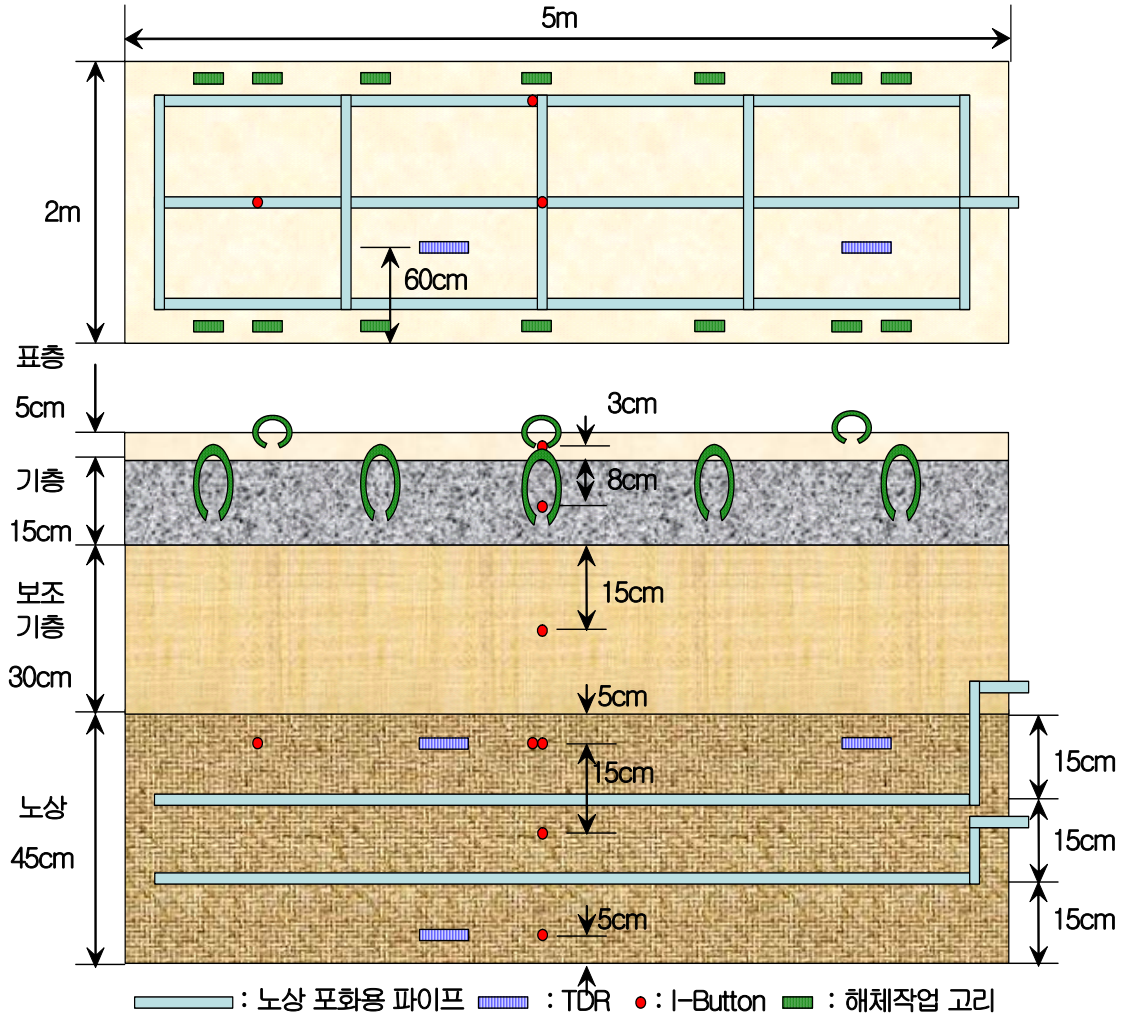
HES의 주요기능중 하나인 물의 공급과 배수를 위해 실험실 지하에 5000ℓ 용량의 물탱크를 매설하였다. 기초 콘크리트는 2번 나누어서 타설했는데 1차 타설 이후 온도챔버가 건설되는 공간의 바닥에 온도 손실을 방지하지 위한 우레탄 폼을 추가적으로 설치하였다. 또한 휠 트래킹 장비의 구동시 진동으로 인한 측정오차를 최소화하기 위해 프레임 설치전에 기초 콘크리트에 앵커를 설치하여 기계장치 프레임 부분을 고정시키고자 하였다. Wandering과 tilting기능을 위해 토조의 측면부분에 실린더 장비를 설치하였고 강우모사를 위해 토조 윗부분에 스프링클러를 설치하였다.

바. HES 시편 제작

본 실험의 목적은 HES 의 시공성을 확인하고 HES 의 시운전을 통해 4S 포장 시스템을 평가할 수 있는 적절한 시스템인가를 평가하기 위함이다.

(1) 실험 계획

시공은 <그림 3.6.27>과 같이 노상 45cm, 보조기층 30, CTB 15cm, 표층 5cm 계획하였다. 노상은 포화를 시키기 위하여 15cm 간격으로 물이 유입될 수 있는 호스를 설치하였으며 TDR을 매립하여 함수비에 따른 포장의 거동을 평가하였다. 기층과 표층은 쇠고리를 연결하여 시편 해체 시 용이하게 하였다. 각 단면에는 포장체의 온도를 측정할 수 있는 I-Button 을 매립하였다.



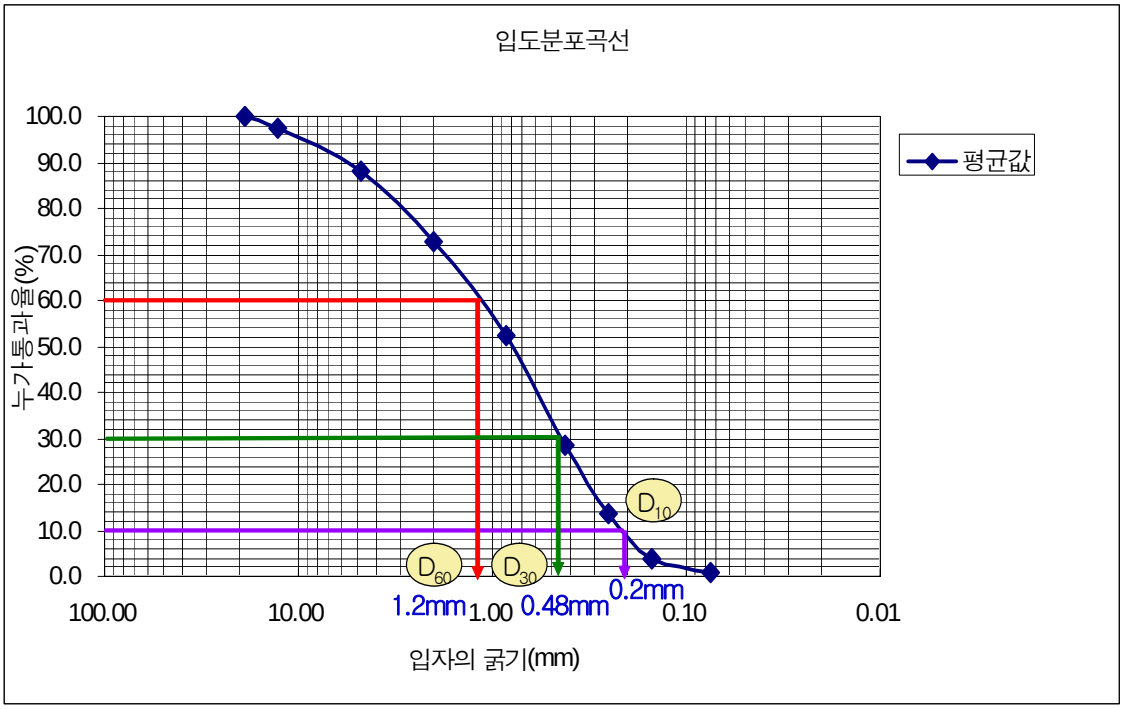
<그림 3.6.27> HES 시공 단면 계획

각 단면에 대한 실험은 노상의 경우 시공전에 다짐실험(흙의 최적함수비, 최대건조밀도 실험), 비중실험, 체가름 실험하였으며 시공 중에는 들밀도 실험을 통해 다짐도를 평가하였다. 보조기층의 경우 다짐실험(흙의 최적함수비, 최대건조밀도 실험), 비중실험, 체가름 실험을 실시하였다. CTB 층은 김천 시험시공 현장과 동일한 배합으로 시공하였으며 투수 AP 표층은 일반 배수성 단면을 시공하였다.

(2) 노상 및 보조기층 실험

(가) 노상 체가름 실험

노상의 체가름 시험한 결과 <그림 3.6.28>와 같은 입도 분포 곡선이 나왔다. 균등계수는 6, 곡률계수는 0.96로 계산되었다. 이것으로 시험에 사용될 노상토는 빈입도임을 알 수 있었다. <그림 3.6.28>과 <표 3.6.10>을 이용해서 통일분류법으로 노상토로를 분류해보면 SP에 속한다는 것을 알 수 있다.



<그림 3.6.28> 노상토 입도분포 곡선

<표 3.6.10>노상토 분류

입경(mm)	자갈(G)	모래(S)		실트(M)	점토(C)	합계
		굵은모래 (4.75~0.425)	가는모래 (0.425~0.075)	0.075~0.002	0.002 이하	
함유율(%)	11.8	59.6	27.7	0.9	0	100

(나) 노상 및 보조기층 다짐 실험

재료의 물성을 확인하고 다짐을 정량화하기 위하여 비중실험, 체가름시험, 최적다짐함수비 실험을 실시하였다. 실험을 통하여 얻은 건조밀도와 최적다짐함수비를 실험에 적용할 시 몇 가지 문제가 있음을 확인할 수 있었다. 현장에서의 타설하는 흙의 무게를 측정할 수 없기 때문에 한 층을 타설할 시의 정확한 물량 계산이 어렵고 현장에서 재료에 대하여 즉각적으로 실시하는 함수비 측정이 정확하지 않음을 알 수 있었다. 본 연구에서는 흙을 가스버너를 이용해 건조시키는 방법으로 현장에서 함수비를 측정하였다.

(3) 노상 타설

HES에서 노상을 타설하기 위해서는 다음과 같은 사전 작업이 필요하다.

첫째, 노상의 함수비를 적정비율로 유지하는 것이 중요하다. 본 실험의 경우 긴 장마로 인하여 측정한 노상의 함수비가 최적다짐함수비보다 3%높았다. 함수비가 높으면 최적다짐함수비를 맞출 수 없으므로 사전에 충분히 노건조하여 최적다짐함수비 아래로 함수비를 유지하여야 한다.

둘째, 3층 다짐의 높이를 토조 안쪽에 표시해 두어야 한다. 본 실험에서는 정확한 타설 높이를 표시해 놓지 않아서 막대자를 이용하여 주기적으로 깊이를 측정하며 실험을 실시하였다.

셋째, 다짐할 때의 높이변화를 실험을 통해서 도출하여야 한다. 현장에서 다짐을 실시하였을 경우 실험실에서의 수치와 차이가 있었다. 따라서 본실험을 실시하기 전 다짐실험을 통하여 변화되는 예상 높이를 예측하여야 하며 그에 따라서 다짐을 실시하기 전의 흙의 양을 장비의 버켓 부피를 이용하여 계산해 두어야 한다.



<그림 3.6.29> HES에서의 노상 시공 순서

순서 : 현장 함수비 측정 / 노상토 타설 / 평탄화 작업 / 다짐기 온반 / 진동다짐 / 호스설치 / TDR 매설 / 온도계측기 매설 / 들밀도 시험 / 노상 다짐 마무리 / 노상 타설 완료

실제 노상 타설은 다음과 같은 프로세스로 진행되었다. 먼저 노상을 타설하기 전 다짐에 필요한 물의 양을 계량하여 두어야 한다. 물은 정량화를 위하여 조리개를 이용, 다짐전 수평화 작업을 할 때 뿌려줌으로써 잘 스며들도록 했다. 하지만 이번 실험에서는 노상이 최적함수비 이상이었으므로 이 과정은 생략하였다. 다짐은 15cm로 구분하여 진동 롤러를 이용하여 실시하였다. 각 면적당 5회 왕복하였고 모서리 부분과 다짐이 골고루 되지 않은 부분에 대해서는 플레이트 컴팩터를 이용하여 세부적으로 다짐을 실시하였다. 다짐의 평가방법으로 들밀도 시험을 채택하였으나 실험의결과가 산출이 부정확하고 시간을 많이 소요하였다. 따라서 추후 실험에서는 DCP와 비슷한 형태의 콘관입시험기를 자체 제작하여 타격횟수에 따른 침하깊이를 이용하여 다짐을 정량화 할 수 있는 장비의 개발이 필요할 것으로 생각되었다. 다짐 후에 각 층에 필요한 게이지와 물 주입 호스를 매설하였다.



<그림 3.6.30> HES에서의 보조기층 시공 순서

순서 : 보조기층 평탄화작업 / 보조기층 다짐 / 보조기층 다짐 마무리 / 보조기층 다짐완료



<그림 3.6.31> HES에서의 투수 AP 표층 시공

(4) 보조기층 타설

보조기층의 경우 우수한 작업성 때문에 속도가 노상보다 더 빠르게 진행되었다. 본 실험에서는 현장 보조기층의 함수비가 5%였고 최적다짐함수비가 7%였으므로 15cm를 타설하는데 약 50kg의 물을 첨가하였다. 하부층의 15cm를 타설할 시에는 평탄화 작업 후에 다짐을 실시하면서 다짐면에 뿌린 물이 완전히 침투되지 못하고 약간의 수분이 표면으로 올라오는 현상이 나타났다.

(5) CTB 및 투수 AP 시공

CTB 생산은 본 연구를 통해 개발한 배합을 이용하여 만들었으며 일반 레미콘 회사에서는 소량을 생산하지 않기 때문에 본 연구진이 보유한 믹서기를 이용하여 믹싱하였다. CTB 타설 때에도 다짐을 하기 위해서 진동 롤러를 이용하였다.

투수 AP 타설량이 소량이기 때문에 본 연구진이 개발한 바인더를 사용하지 못하고 인근의 투수 아스팔트 회사에서 생산하는 재료를 이용하여 시공하였다. 표층도 진동 롤러를 이용하여 다짐하였다. <그림 3.6.31>는 시공된 CTB 위에 AP 표층을 시공하는 장면을 나타내는 그림이다.

사. HES 공용성 평가

(1) HES 얼림으로 인한 히빙(Heaving) 현상 측정

온도에 따라 포장체가 어떻게 거동하는지를 평가하기 위해서 시공된 토조에 물을 주입하고 2회에 걸쳐 영하 10℃의 온도를 4~5일간 지속하였다. <그림 3.6.32>은 실제 다이얼 게이지를 HES에 설치한 모습이다.

철의 열팽창계수는 종류에 따라 다르지만 $8\sim12\times10^{-6}(\mu\varepsilon/℃)$ 이기 때문에 실제 히빙량에 비해 철의 변형량은 미미하기 때문에 여기에서는 고려하지 않았다.

측정결과, 첫 번째의 경우 히빙량은 1번 위치에서 2.42 mm, 3 번 위치에서 3.54 mm로 측정되었다. 두 번째의 경우 1번 위치에서 2.96 mm, 2 번 위치에서 2.47 mm, 3 번 위치에서 5.5 mm로 측정되었다. 전체적으로 배수구가 있는 3번 위치에 물이 집중되어 있어 히빙량이 더 큰 것을 알 수 있었다. 1회에 비해 2회가 더 큰 것은 2회 측정 시 물을 더 주입하였기 때문으로 판단된다.

전체적으로 강우모사장비를 이용하여 뿌려진 물이 불투수층인 노상과 보조기층을 통과하지 못하고 측면으로 배수되지만 밖으로 배수되지 못하고 토조내에 불균등하게 분포한다. 위와 같은 조건에서 노상 함수비가 ES와 유사하고 겨울철 영하의 온도가 지속된다면 4S 포장은 최대 5 mm 정도의 포장 융기가 되고 이로 인해 평탄성이 나빠질 가능이 있을 것으로 판단된다.



<그림 3.6.32> HES에서의 다이얼 게이지 설치 모습

<표 3.6.11> HES 히빙량 측정

	1회 (mm)			2회 (mm)		
구분	얼리기 전	얼린 후	히빙량	얼리기 전	얼린 후	히빙량
1	0.63	3.05	2.42	5.11	8.07	2.96
2	/	/	/	5.83	8.30	2.47
3	0.70	4.24	3.54	5.37	10.87	5.5




<그림 3.6.33> HES BPT 실험장면

(2) HES 얼림 전후의 미끄럼 저항값 측정

4S 포장의 미끄럼 저항성 평가를 위하여 HES에서 상온일 때와 영하 10℃ 일 때에 BPT 시험을 실시하였다. <그림 3.6.33>에 나타난 바와 같이 “KS F 2375 노면의 미끄럼 저항성 시험 방법(BPT)” 기준에 따라 BPT 장비를 이용하여 BPN 값을 측정하였다. 4S 포장의 경우 HES 에 시공된 표층에서 2 곳에서 시험하여 BPN 값을 측정하였으며, 비교 대상으로 19 mm 일반 밀입도 포장의 APT 시편을 제작하여 평가하였다.

<표 3.6.12>은 시험 결과를 정리한 것이다. 상온에서는 19 mm 일반 밀입도 포장이 건식과 습식 모두 4S 포장에 비하여 BPN 값이 높게 나타났다. 습식에서 일반 밀입도 포장은 처음측정 시에 물이 고여 있었으나 시험으로 인해 시편에서 물기 흘러내려서 점차 BPN 값이 높아지는 경향이 있다. 반면 4S 포장은 물이 투과되기 때문에 일정한 변동률 내에서 유사한 결과치를 나타냈다.

<표 3.6.12> HES 온도에 따른 BPN 값

	BPN 값							
	상온				-10℃			
	4S		19 mm 일반 밀입도		4S		19 mm 일반 밀입도	
시험 조건	건식	습식	건식	습식	건식	습식	건식	습식
1	82	76	112	100	54	55	57	54
2	85	73	108	105	54	53	60	50
3	83	76	108	107	53	54	62	45

-10℃에서 실험한 결과 4S 포장과 19 mm 일반 밀입도 포장 모두 상온에 비하여 BPN 값이 떨어졌다. 상대적으로 19 mm 일반 밀입도 포장이 4S 포장에 비해 그 변화 폭이 훨씬 더 큰 것을 알 수 있다. 또한 19 mm 일반 밀입도 포장은 시험을 하면 할수록 BPN 값이 작아졌다. 이는 <그림 3.6.33>의 오른쪽과 같이 표면에 고인 물이 영하의 포장체 및 대기 온도로 인해 얼어서 시험을 반복할수록 그 값이 작아지는 것을 알 수 있다. 따

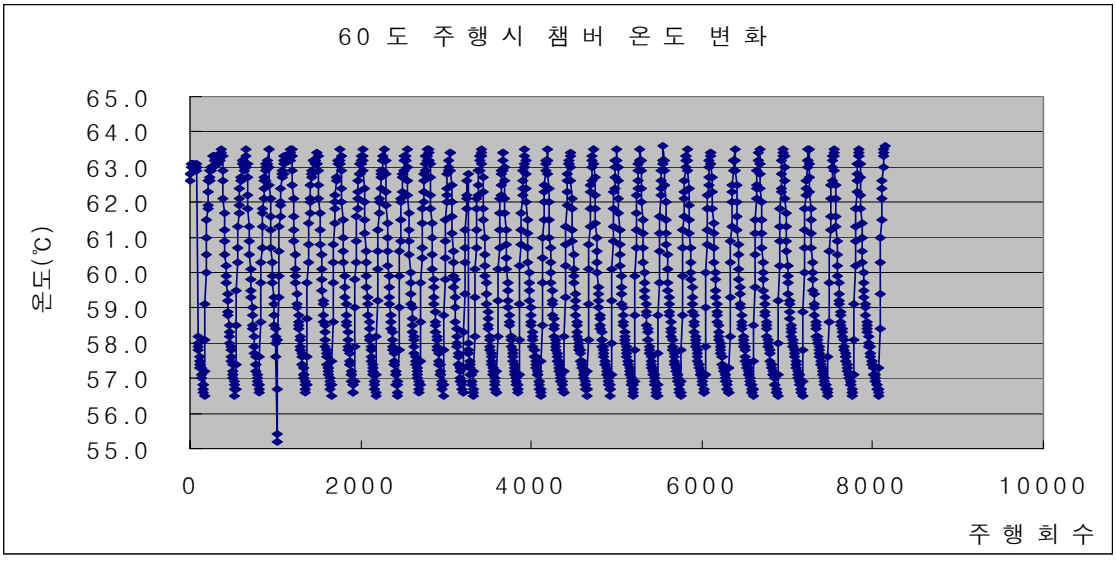
따라서 겨울철 영하의 온도가 지속되고 비나 눈이 올 경우, 4S 포장이 일반 밀입도 포장에 비해 미끄럼 측면에서 더 안전한 것을 알 수 있다.

(3) HES 러팅 실험

HES에서 하중재하 회수에 따른 러팅 깊이를 측정하는 실험을 수행하였다. 실험조건은 대기온도를 60 ℃ 로 약 3일간을 유지한 후 포장체의 온도가 일정 온도 이상 되었을 때 실험하였다. 실험 바퀴는 우레탄 바퀴를 이용하여 하중을 765 Kg 로 재하하였다. 이 하중은 우레탄 바퀴가 폭이 약 15cm 이고 재하시 접지길이가 약 6cm 이었기 때문에 이를 psi 로 계산할 경우 약 120 psi 가 되는 하중이다. <그림 3.6.34>는 러팅 실험 장면을 나타내는 그림이다.

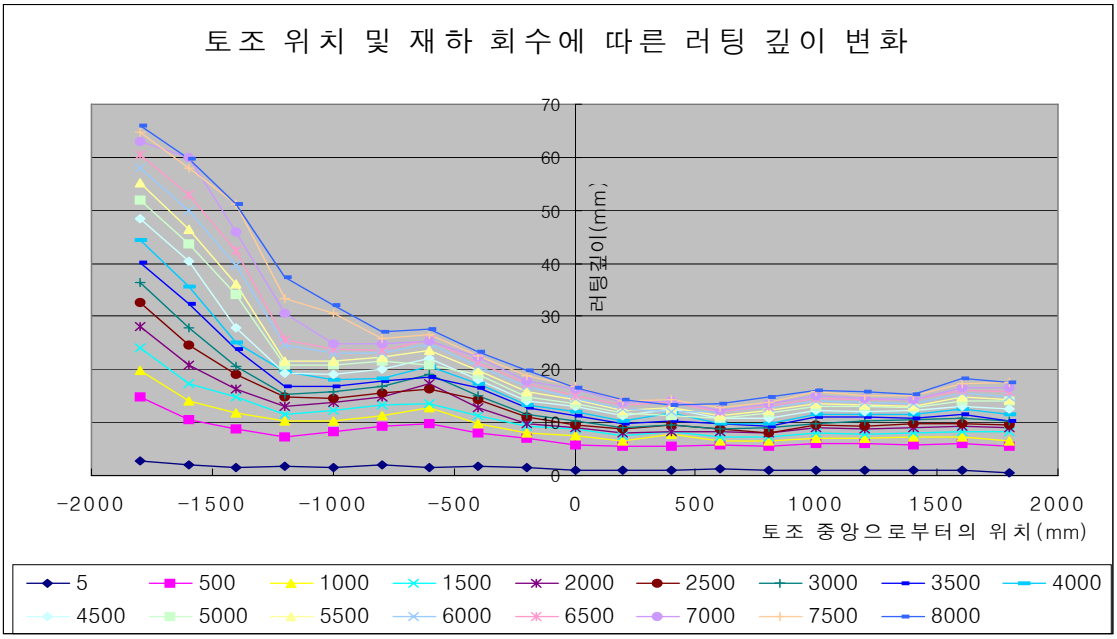


<그림 3.6.34> HES 러팅 실험 장면

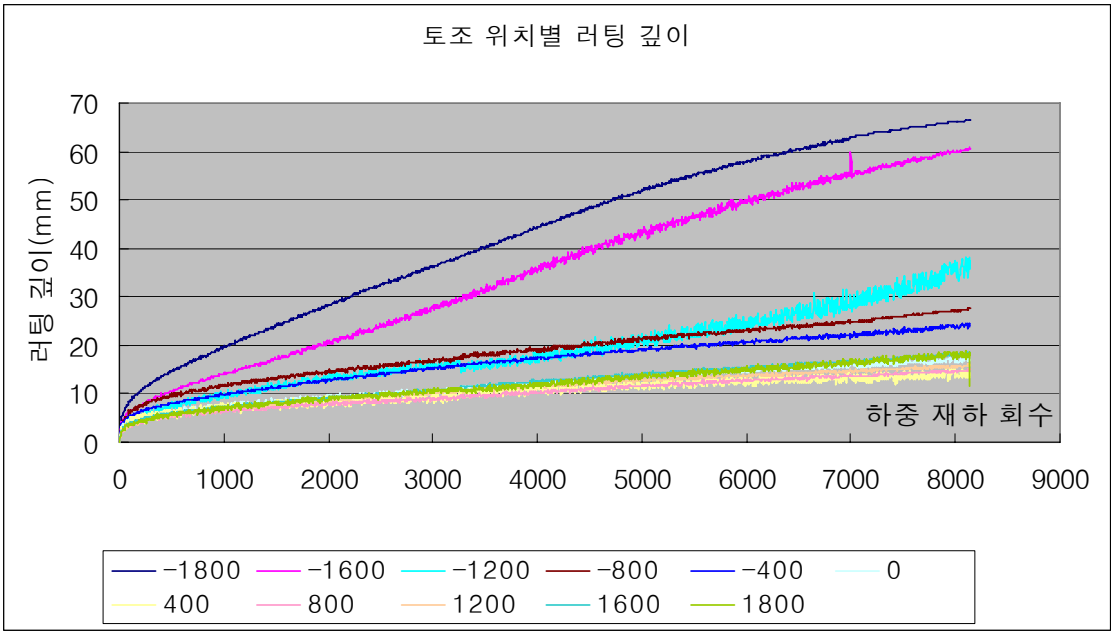


<그림 3.6.35> 60 ℃로 HES 온도 세팅시 변화 폭

실험시 60 ℃로 챔버내의 대기 온도를 상승하였으며 이의 온도 변화폭을 측정하였다. <그림 3.6.35>에서 알 수 있듯이 챔버 온도는 60 ℃로 일정하게 유지되는 것이 아니라 약 ±3.5 ℃내에서 변화하는 것을 알 수 있었다.



<그림 3.6.36> 토조 위치 및 재하 회수에 따른 러팅 깊이



<그림 3.6.37> 토조 위치별 러팅 깊이

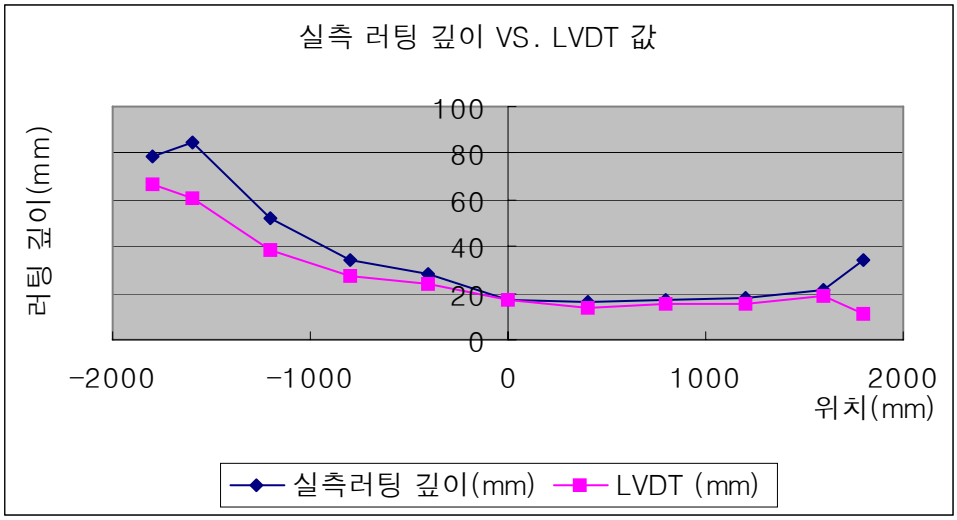
러팅 깊이는 구동시 바퀴에 장착된 LVDT 장비를 통해 산출되었다. <그림 3.6.36>는 러팅 측정 위치 및 하중 재하 회수에 따른 것을 나타낸 그림이다. 전체적으로 컴퓨터 작동실 쪽에 있는 곳의 러팅 깊이가 반대편보다 훨씬 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 원인은 투수 AP 표층 타설시 균일한 두께로 시공되지 않고 컴퓨터 작동실 쪽의 두께가 더 두꺼워 진 것이 하나의 이유이다.

<그림 3.6.37>은 재하 회수에 따라 각 위치별 러팅 깊이를 나타낸 것이다. 학계 연구에서는 러팅이 하중재하 초반에 급격히 발생하고 안정기를 거쳐 파괴시 급격히 러팅이 발견된다고 보고 있다. HES 실험을 통해서는 하중재하 초반에는 러팅이 급격히 발생한 후에 안정기를 갖는 것을 알 수 있었다.

러팅 깊이와 실제 러팅 깊이와의 차이를 검토하기 위하여 <그림 3.6.38>와 같이 각 위치별로 실제 러팅 깊이를 측정하였다. 그 결과, 구동부의 장착된 LVDT의 러팅 값과 비교한 것이 <그림 3.6.39>이다. 그림에서 알 수 있듯이 실측 러팅 깊이가 더 깊게 나왔다. 이는 <그림 3.6.40>에서 보듯이 휠패스 주변에 러팅이 발생하면서 내려앉은 일정 부피만큼 휠패스 측면이 융기되었기 때문인 것이다. 전반적으로 컴퓨터 조작실 부근에서 그 차이가 컸으며 반대편은 융기량이 적어 그 차이가 크기 않았다.



<그림 3.6.38> 실제 러팅 깊이 측정



<그림 3.6.39> LVDT 러팅 깊이 VS 실제 러팅 깊이



<그림 3.6.40> 휠패스 주변의 측면 융기



<그림 3.6.41> 층별 러팅 발생 검토

<그림 3.6.41>은 HES 단면을 해체하면서 트랜치 컷을 한 후에 단면별로 러팅 발생 여부를 조사한 사진이다. 조사결과 러팅은 표층에서만 발생한 것을 알 수 있었다. 이는 4S 포장 시스템의 특성상 표층 아래 강성의 CTB가 있기 때문으로 판단된다.

(4) HES 보조기층 투과 여부

4S 포장은 투수를 기본으로 하는 것이기 때문에 투수된 물이 어디로 가는지를 확인하기 위하여 물에 잉크와 페인트를 섞어 뿌려보고 해체시 그 위치를 확인하였다. <그림 3.6.42>에서와 같이 보조기층 종류에 따라 다소 차이가 있을 수 있지만 본 실험에 사용된 보조기층에서는 두 구간 모두 CTB 까지는 투과하였지만 보조기층을 투과하지 못하는 것을 알 수 있다. 따라서 4S 시공 시 기층과 보조기층 사이로 물이 흘러 갈 것이고 이에 대한 배수 시설이 필요한 것을 확인하였다.



<그림 3.6.42> HES에서의 투수 시험 결과

(5) HES 해체 작업

HES 실험 후 해체 작업을 진행하였다. 해체 작업은 <그림 3.6.43> 과 같이 진행되었다. 먼저 트랜치 컷하여 CTB 층까지 절단기로 잘랐다. 자른 단면을 미니 굴삭기에 쁘렉카를 달아 파쇄 시키고 버켓을 이용해 조각들을 긁어냈다. 건설 폐기물은 트럭을 이용하여 산업 폐기물 처리장소 까지 운반하여 폐기하였다. 해체시의 문제는 단면 시공시의 문제점과 비슷하게 출입문이 좁아 미니 굴삭기의 작업 효율이 낮았다는 것이다. 이는 추후 개선을 통하여 해결해야 할 것이다.



<그림 3.6.43> HES 해체 작업

아. 장비 개발 진행상황 및 향후 계획

본 연구를 통해 개발하고 있는 HES에는 기존 파손촉진 실험장비의 휠 트래킹을 할 수 있는 장비와 추가적으로 환경을 모사할 수 있는 장치(온도조절 : -20~60℃, 강우시설)를 설치하였다. HES는 환경을 모사할 수 있는 장치를 이용해 환경적인 요소가 포장체에 어떤 영향을 줄 수 있는지를 평가할 수 있는 세계유일의 장비이다. 따라서 본 연구에서는 추가적인 투/배수성 포장의 단면을 시공하여 계측 결과의 정확성을 검토하여 기본적 계획이며 1차 단면 실험을 통해 발견된 보안 사항에 대하여 개선할 계획이다

2. HEART CPX(Close-Proximity Method) 트레일러 제작

일반적으로 투·배수성 포장은 표층의 유효공극으로 인해 교통소음이 밀입도 포장에 비해 많이 저감되는 것으로 알려져 있다. 하지만, 교통 소음에 대한 기준 및 그 측정 방법에 대해서는 국제적인 표준이 제시되어 있지 않은 실정이다. 이에 투·배수성 포장의 소음저감 기능을 평가하고 기준을 마련하기 위해, 본 연구에서는 근접소음 측정법(Close-Proximity Method, 이하 CPX)을 적용하고자 하며, HEART CPX(이하 HCPX) 트레일러를 제작하여 투·배수성 포장의 공용 후 소음저감 효과를 평가하는데 활용하고자 한다.

가. 도로 소음 특성 평가법 및 연구 사례 분석

도로의 소음특성을 평가하기 위한 최적의 측정 장비 및 방법을 도출하기 위해서는 도로 소음의 특성과 기존의 도로소음 측정 방법에 대한 조사 및 고찰이 선행되어야 한다. 이를 통해 국내 여건에 적합한 도로소음 측정 장비 및 방법을 제안하고, 국내·외의 관련 연구사례에 대한 분석을 수행하였다.

(1) 도로 소음의 특성

(가) 소음원의 기본적 특성

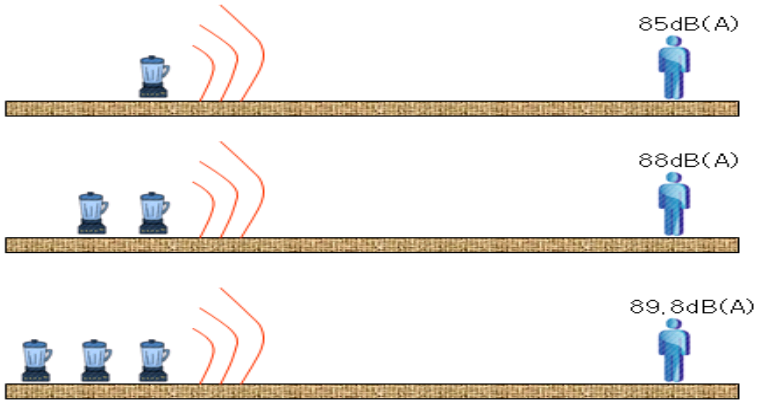
소음도(Noise Level)는 기본적으로 로그 스케일(logarithmic scale)로 표현된다. 따라서 교통 소음은 배수로 증가하는 소음원의 조합에 따른 영향을 고려해야 한다. n개의 소음원에 대한 소음도의 조합은 다음 식으로 표현된다.

$$dB(A)_t = 10 \times log(10^{dB(A)_1/10} + 10^{dB(A)_2/10} + \cdots + 10^{dB(A)_n/10}) \qquad <식\ 3.6.1>$$

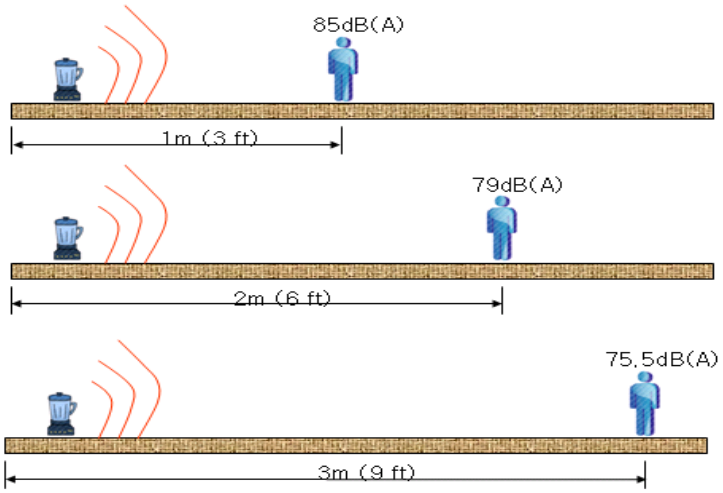
<그림 3.6.44>은 소음원의 수에 따른 영향을 나타내고 있다. 3ft 거리에 있는 믹서기에서 발생하는 소음을 예로, 한 개의 소음원이 있을 때 발생한 소음은 85dB(A)였다. 그리고 한 개씩 추가하여 같은 거리에서 측정한 소음은 각각

88dB(A), 89.8dB(A)로 나타났다. 따라서 소음원이 두 배로 증가하게 되면 약 3dB(A) 정도의 소음이 증가하는 것을 알 수 있다. 이를 도로에 적용시키면 교통량이 두 배로 증가하는 경우 약 3dB(A)의 소음이 더 발생한다고 볼 수 있다.(Hanson, 2004)

음압은 역제곱 법칙(Inverse-square law)에 따라 감소하는 현상을 보인다. 소리의 전파 성질에 대한 기본적인 법칙으로 소리는 음원에서 떨어진 거리에 역제곱으로 비례한다는 의미이다. 예를 들어, 음원과의 거리가 3배로 증가하면 소음도는 3^2 배로 감소한다. <그림 3.6.45>에서 보인 바와 같이 음원에서부터의 거리에 따라 소음이 줄어드는 것을 볼 수 있다.



<그림 3.6.44> 소음원 증가에 따른 소음도 변화(Hanson, 2004 참조)



<그림 3.6.45> 거리에 따른 소음도 영향(Hanson, 2004 참조)

도로에서 발생하는 소음도는 교통에 의해 발생하는 소음 뿐 아니라 도로에 인접한 지면의 특성에도 영향을 받는다. FHWA에서는 도로 표면과 도로 인접 지면의 특성을 고려하여 다음과 같이 교통 소음 모델을 제시하였다.

$$\text{거리에 따른 } dB(A) = 10 \times log_{10}\{(d_2/d_1)^{1+\alpha}\} \qquad \text{<식 3.6.2>}$$

여기서, α = 0.0(단단한 지면, 도로 포장면) ~ 0.5(부드러운 지면)

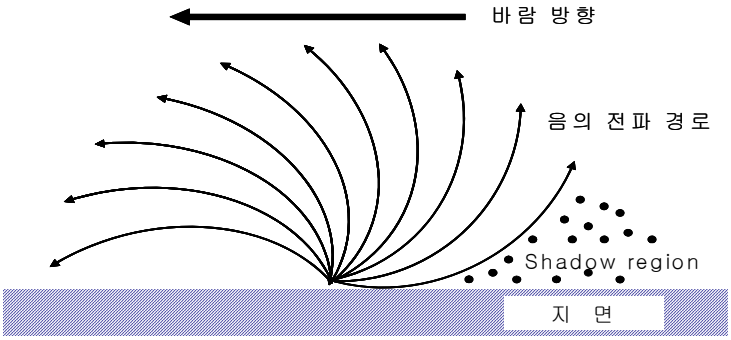
d_1 = 음원으로부터 첫 번째 소음 측정 지점까지의 거리

d_2 = 음원으로부터 두 번째 소음 측정 지점까지의 거리

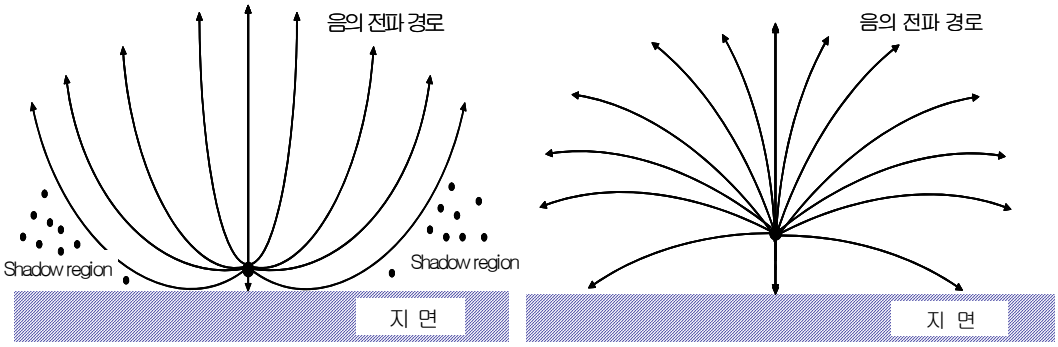
따라서 도로에서부터 16ft 떨어진 곳에서의 소음이 85dB(A)인 경우, 200ft 거리에 있는 위치에서의 소음은 68.5dB(A)이 된다. 도로변 바깥으로 잔디 등의 비교적 부드러운 지면이 있다면 발생한 소음 전달 과정에서 지면에서의 흡음으로 인해 소음이 다소 감소되는 것이다.

<그림 3.6.46>과 <그림 3.6.47>는 바람의 영향 및 낮과 밤에 대한 소음 발생 경로를 나타내고 있다. 바람의 방향에 따라 음은 <그림 3.6.46>과 같이 바람 방향으로 향하면서 바람개비형으로 퍼지게 된다. 이같은 현상으로 인해 바람이 불어오는 방향으로 shadow region이 형성된다. 일반적인 측정 기준에 의하면 풍속이 5m/s가 넘게 되면 소음 측정을 실시하지 않는다. 낮과 밤에 대한 음의 전파 경로는 <그림 3.6.47>와 같다. 낮의 경우 소리가 위로 향하는 듯한 모습으로 퍼지게 되며 음원에서 일정거리 이상으로 멀어지게 되면 shadow region이 형성되어 음의 영향에서 벗어나게 된다. 밤에는 낮과는 달리 소리가 밑으로 깔리는 듯한 형상으로 퍼지게 된다. 낮보다 밤에 소리가 울리는 듯하게 크게 들리는 현상도 이에 기인한다.

이와 같이 소음은 교통량에 따라, 소음 측정 위치에 따라 매우 다르며 바람이나 측정 시간에 따라서도 다른 값을 가지므로 측정 방법을 표준화 할 필요가 있다.



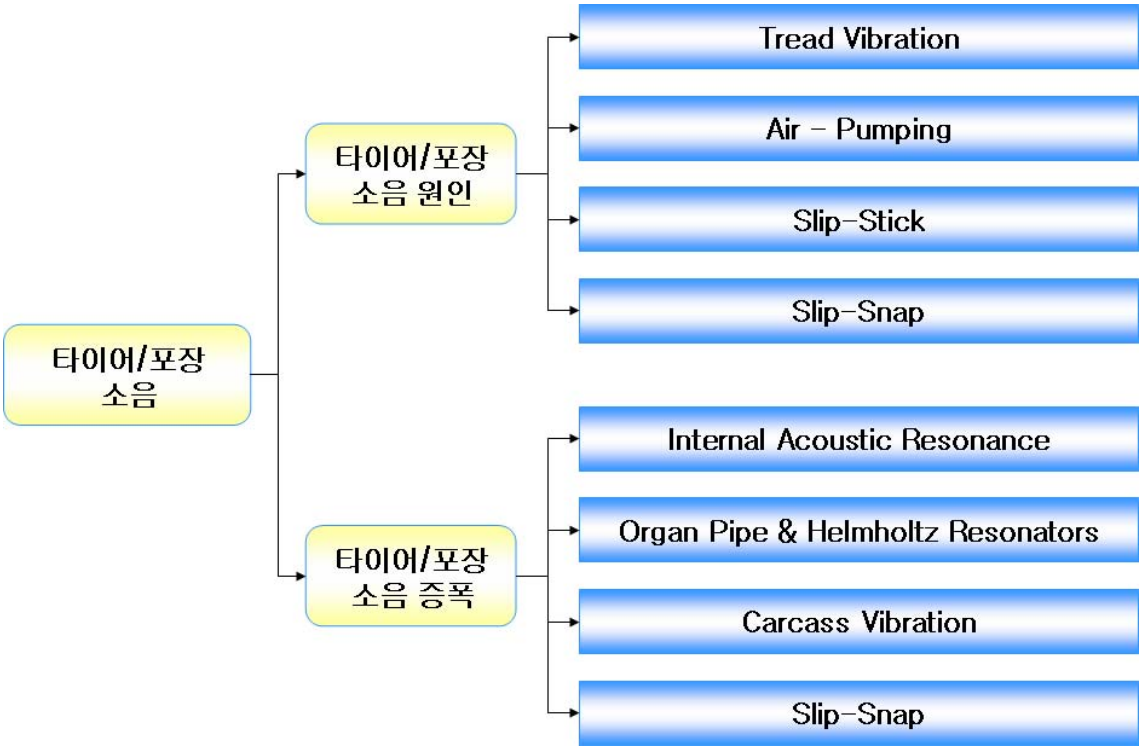
<그림 3.6.46> 바람의 방향에 따른 음의 전파 경로(강대준, 2001)



<그림 3.6.47> 낮과 밤에 대한 음의 전파 경로(좌 : 낮, 우 : 밤)(강대준, 2001)

나. 도로 소음(Road noise)의 발생 메커니즘

<그림 3.6.48>에서는 포장체와 타이어 사이의 상호작용에 의해 발생하는 소음의 세부 구분을 보여주고 있다. 타이어와 포장체 사이에서 발생하는 소음원과 발생된 소음을 증폭시키는 원인에 대하여 고찰하였다.



<그림 3.6.48> 타이어와 포장에서 발생하는 소음의 세부구조

(1) 소음 발생원

포장과 타이어에 의해 발생하는 소음원은 크게 네 가지로 나뉠 수 있다. 첫째는 충격이다. 타이어 트래드가 포장체에 닿을 때 트래드에는 충격이 발생한다. 이 충격이 타이어를 진동시키는 원인이 되며 마치 고무망치로 포장체를 두드리는 효과와 유사하다. 트래드 블록과 포장체가 모두 탄성체이면 있다면 이러한 충격으로 인해 발생된 에너지는 감소하고 소음 발생의 기여도는 매우 낮을 것이다. 타이어 트래드 패턴과와 포장체 노면을 임의적 디자인하는 것은 이러한 반복적인 충격을 줄일 수 있어 소음 저감 효과를 나타내는 것이다. 둘째는 공기의 압축과 공기 펌핑 때문에 소음이 발생한다. 타이어와 포장체 표면에 닿을 때, 타이어의 면과 포장체의 홈 부분은 압축되고 비틀리게 된다. 이러한 공간 안에 갖힌 공기는 밖으로 분산될 것이다. 발생 주파수 범위는 약 800Hz~2500Hz으로 높은 주파수 범위에서 넓게 분포한다. 이러한 현상은 일상에서 박수치기(clapping hands)할 때와 유사하다. 셋째는 미끄러짐과 정착 (Slip-Stick)이다. 접지면 내에서 트래드들은 타이어에서 포장체로 가속하거나 멈추기 위해 끄는 힘을 전달한다. 그리고 포장체와 닿은 타

이어의 부분이 뒤틀려 있기 때문에 트래드와 포장체의 접합면에서는 큰 수평방향 힘을 발생한다. 수평방향 힘이 마찰력보다 클 경우 타이어 트래드는 포장체에서 순간순간 미끄러짐과 포장체에 접하는 현상을 반복할 것이다. 슬리핑과 스틱킹 작용은 꽤 빨리 일어나고 이것은 소음과 진동을 동시에 발생시킨다. 이러한 현상은 체육관에서 운동선수가 운동화를 신고 코트를 뛸 때 종종 일어난다. 넷째는 미끄러짐과 당김 (Slip-Snap)이다. 트래드와 포장체가 닿은 후 떨어질 때 접착현상이 발생한다. 이러한 작용 원리는 화장실의 변기가 막혔을 때 뚫는데 사용하는 화장실 변기 압축기와 같다. 즉 트래드가 접지면에 닿아 있을 경우, 이때 두 면에서 발생하는 접착력은 트래드가 떨이지지 않게 잡고 있을 것이다. 하지만 이것이 분리 될 때 소리와 진동이 함께 발생하게 된다.

(2) 소음의 증가 효과

포장위에서 타이어가 만나는 모습 즉 접지시의 형상은 전통적인 호른 모양은 아니지만 호른과 같은 효과를 나타내고 있다. 호른의 입구 가까이에 있는 소리원에 의해 발생된 소리는 호른과 같이 커지게 된다. 둘째는 오르간 파이프 및 헬름홀쯔 공진 (Organ Pipe & Helmholtz Resonators)이다. 포장체에 타이어가 닿을 때, 타이어 트래드 내의 공간은 소리를 크게 하는 시스템으로 구성된다. 이것은 오르간 파이프의 공진기나 헬름홀쯔 공진기와 같은 역할을 한다. 일상에서 볼 수 있는 현상으로는 뚜껑이 열린 병에 바람을 불 때 발생하는 소리와 같다. 셋째는 타이어 진동 (Carcass Vibration)이다. 타이어와 포장체 사이에 발생한 진동에너지는 타이어의 진동에 의해서 더 커지게 된다. 진동파가 트래드 밴드로 전달되고 타이어가 같이 진동을 하여 발생한 소리를 더 크게 한다. 또한 차량 주행시 타이어의 사이드 월 진동이 발생한다. 사이드 월 진동은 트래드에서 전달받은 충격에 의해서 타이어의 측면이 전체적으로 진동하여 소음을 일으키는 것을 말한다. 이와 같은 측면 진동에 의한 소음은 200~800Hz의 주파수 범위에서 발생하게 되며, 포장 표면의 조직이 거칠수록 낮은 주파수 범위에서 소음이 발생한다고 보고되었다. 마지막으로 타이어 내부 음향 공진 (Internal Acoustic Resonance)이다. 타이어 내부의 공기는 타이어의 거동에 인해 변화한다. 이때, 타이어 내부에 도우넛 모형으로 갖힌 공기의 주파수가 타이어의 고유 주파수와 일치할 때, 공기는 공진하게 된다. 이러한 타

이어 내의 공기는 충분히 공진을 시킬 수 있다.

(3) 도로 소음 측정 방법 고찰

소음 측정 방법을 표준화 하는 것은 포장 특성별로 주행 소음을 비교하기 위한 중요한 작업이다. 이를 위한 다양한 방법들이 제안되었는데 도로 소음 측정법 중 일반적으로 쓰이고 있는 것은 다음과 같이 분류할 수 있다.(Hanson, 2004)

㉮Far-field measurements : 도로변에 다소 거리를 두고 설치한 마이크로폰으로 측정

㉠통계적(Statistical) Pass-by 소음 측정법(SPB)

-ISO(International Standards Organization) 11819-1, FHWA manual Measurement of Highway-Related Noise 참조

㉡제어된(Controlled) Pass-by 소음 측정법(CPB)

-단독 차량(The single vehicle) 또는 다차량(multiple selected vehicles) Pass-by 소음 측정법

㉯Near-field measurements : 타이어/포장의 접촉면에 근접하여 위치한 마이크로폰에 의해 측정되며, 이 측정 절차들은 근접 소음 측정법(Close proximity method(CPX))으로써 두 가지로 분류

㉠Europe에서 개발되어 ISO Standard 11819-2 초안(draft)으로 규정되어 있는 측정법

-소음도 측정을 위해 sound pressure(음압)를 측정하는 일반적인 CPX 방법

㉡Dr. Paul Donavon에 의해 개발된 측정법

-소음도 측정을 위해 sound intensity를 사용하는 방법으로 General Motors에서 개발

㉰기타 측정법

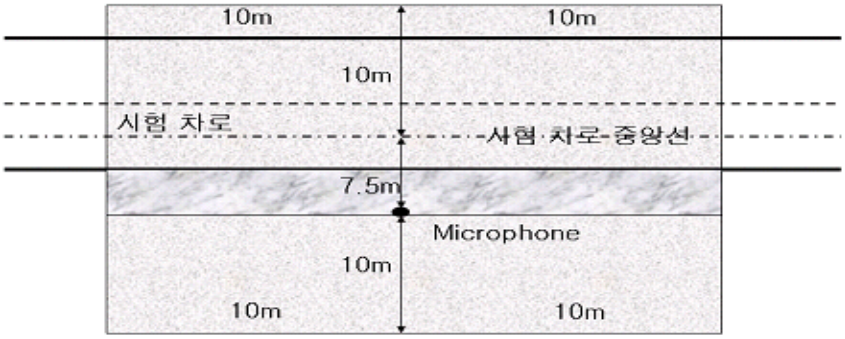
㉠흡음률 측정법(Sound Absorption Properties In-Situ)

-ISO 10534-2와 ISO 13472-1 내용 참조

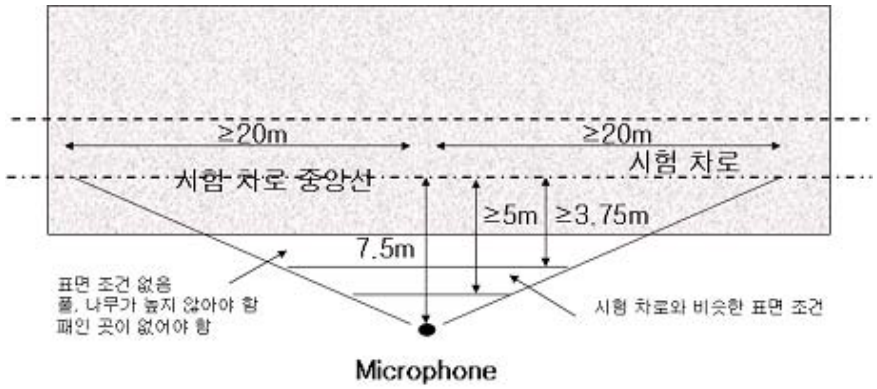
㉡실내 소음 측정법(Tire/Road noise measurement inside the vehicle)

(가) 통계적 소음 측정법(SPB; Statistical Pass by)

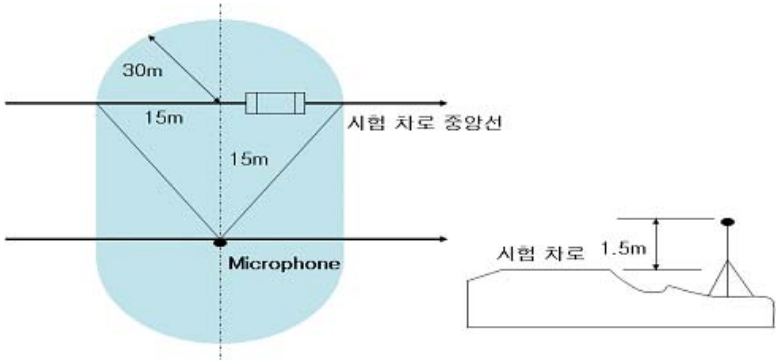
통계적인 주행 소음 측정법인 SPB는 마이크로폰을 주행 차량으로부터 길어깨쪽으로 설치하여 소음을 측정하는 방법이다. ISO에서는 주행 차로의 중앙을 기준으로 7.5m 떨어진 지점에 포장면 기준 1.2m의 높이로 마이크로폰을 설치하도록 규정하고 있다. 또한 180대의 차량(승용차 100대, dual · multi axle 트럭 80대)에 대한 속도 및 소음 특성을 조사하여 이를 바탕으로 statistical pass-by index(SPBI)를 산정한다. <그림 3.6.49>과 <그림 3.6.50>에서는 소음 측정 구간에 대한 조건을 나타내고 있다. <그림 3.6.49>에서 제시한 범위 내에 안전 울타리(safety barrier) 등의 시설이 없어야 한다. <그림 3.6.50>에서는 마이크로폰과 주행 차로 사이의 조건들을 나타낸다. 주행 차로를 기준으로 3.5m 이내의 표면은 포장 표면과 같은 조건을 유지해야 한다.



<그림 3.6.49> SPB 소음 측정 조건-1 (ISO 11819-1, 1997)



<그림 3.6.50> SPB 소음 측정 조건-2 (ISO 11819-1, 1997)



<그림 3.6.51> SPB 소음 측정 조건 (FHWA, 1996)

FHWA에서 제안하는 조건은 다소 차이가 있다. 마이크로폰의 위치는 주행 차로의 중앙을 기준으로 50ft(15m) 지점, 포장면 기준 1.5m의 높이로 규정하고 있으며, 측정 구간부터 마이크로폰까지의 표면은 흡음성이 없는 단단한 특성을 지녀야 한다. 또한 차량들의 속도가 일정하게 유지되어야 한다. 그러나 이 방법에는 실험에 쓰이는 차량수가 명시되어있지 않았기 때문에 실험 차량들의 수는 임의적으로 결정되었다. 단 차량들의 속도가 51~60mph일 경우 최소 요구되는 차량 수는 200대로 규정되어 있다. <그림 3.6.51>는 FHWA에서 제시한 소음 측정 장소에 대한 조건을 보이고 있다.

(나) 단독 차량(The single vehicle) pass-by 소음 측정법(CPB)

단독 차량 pass-by 소음 측정법은 시험 차량(승용차, 소형 트럭 등)에 대한 소음 측정이 측정 조건에 따라 설계된 시험 구간에서 실시되며, 도로 표면에 따른 일반적인 규정은 아직 제시된 것이 없다. 한 예로 위스콘신 도로국(Wisconsin DOT, 2000)에서는 승용차에 대해서 속도별로 소음을 측정하였다. 속도는 각각 60, 65, 70mph로 주행했고 두 개의 마이크로폰은 주행 차로 중앙을 기준으로 25ft 떨어진 곳에 5ft의 높이로 각각 설치했으며 두 마이크로폰의 거리는 200ft였다. <그림 3.6.52>는 위스콘신의 시험 조건을 보이고 있다.

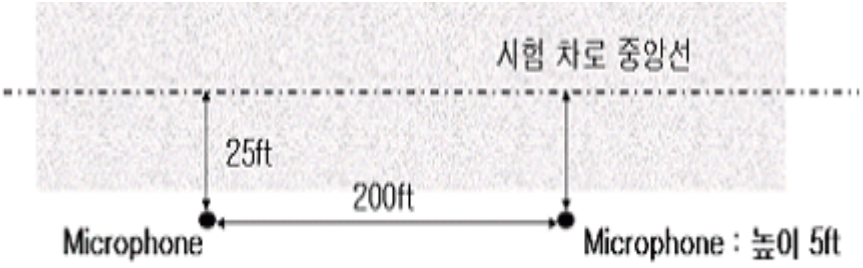
ISO에서는 차량 자체의 소음 측정으로 Pass-by method를 제시하고 있다. ISO의 가속 주행 시험은 50km/h의 속도를 유지하여 엔진이 가동되는 상태에서 차량의 소

음을 측정한다. 이 방법을 통해 측정되는 소음은 차량의 가속 능력과 엔진 등의 소음에 영향을 받기 때문에 타이어/포장 소음을 측정하기에는 적합하지 못한 조건으로 판단된다. 또 다른 형태의 시험은 80km/h의 속도를 유지한 상태로 엔진을 정지시켜 이 때의 소음을 측정하는 방법이다. 이 방법은 타이어의 규격에 따라 기준이 세분화되어 있고, 타이어 소음이 전체 발생 소음의 90% 이상의 비중을 차지하고 있다. <그림 3.6.53>에서는 두 실험에 대한 구간 조건을 나타내고 있으며, 노면에 대한 설계 및 시공 등의 관련 사항에 대해서는 ISO 10844에서 규정하고 있다. (ISO Basic template, 1997)

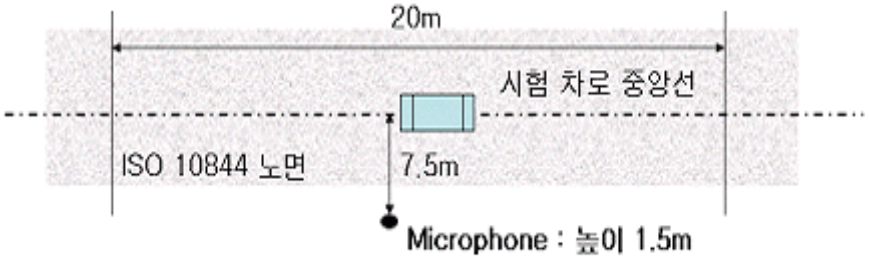
소음 측정 시험의 방법은 그 목적에 따라 다르고 도로 교통 소음이나 주행 소음 등을 측정하는 기준은 각 나라마다 차이가 있지만 대부분 ISO에서 제시하는 기준에 준하여 소음 측정을 실시하고 있다.

ISO 규정에 따르면 소음 측정 시험장소는 다음과 같은 조건을 만족해야한다.

1. 시험 차로의 중앙부분으로부터 반경 50m이내에는 건물이나 다리, 언덕 등과 같은 측정에 장애가 될 수 있는 요소가 없어야 한다.
2. 시험 차로와 주변 도로 표면은 건조해야하며 깨끗한 상태를 유지해야 한다.
3. 마이크로폰의 주변에는 소음 측정에 영향을 줄 수 있는 장애물이 없어야하며 발음점과 마이크로폰 사이에는 측정하는 사람이 있어서는 안된다.



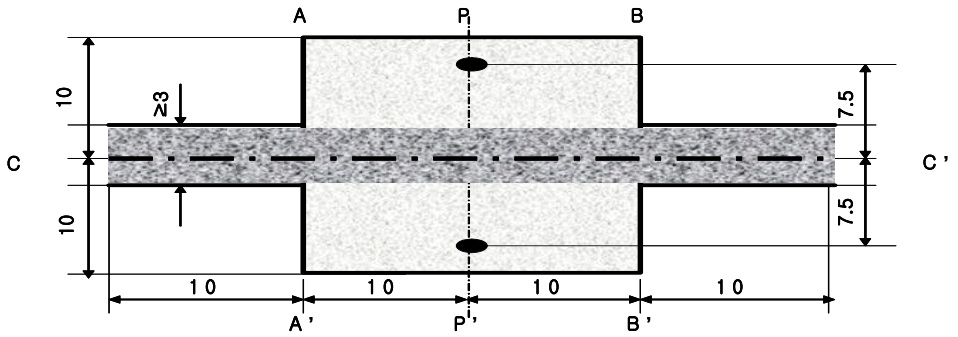
<그림 3.6.52> 위스콘신의 단독차량 pass-by method 시험 조건



<그림 3.6.53> 단독차량 pass-by method(ISO)

<그림 3.6.54>은 소음 측정 장소에 대한 개략도를 나타내고 있다. 시험 주로의 폭은 3m로 규정하고 있고 측정점으로부터 10m지점으로 진입하게 되면 일정한 속도를 유지해야 한다. 검게 칠해진 면은 도로 표면으로 덮여야하는 범위를 나타낸 것이며 측정 높이는 1.2m, 측정 거리는 중심선으로부터 7.5m이다. ISO 규정에 따르면 주행 차량의 양쪽으로 마이크로폰을 설치하는 것을 권장하고 있다. 두개의 마이크로폰이 설치되어 있을 경우에는 한방향으로 주행하여 발생한 소음도를 기록하게 된다. 한 개의 마이크로폰이 설치된 경우에는 차량이 양쪽방향으로 주행하여 차량의 양쪽에서 발생하는 소음을 측정한다고 명시되어 있다. 측정시 온도는 5~40℃ 사이가 되어야 한다. 마이크로폰이 위치한 곳의 풍속이 5m/s 이상이면 소음 측정 실험을 수행하지 않는다. 또한 주변 암소음은 주행 차량에서부터 측정된 소음도에서 15dB(A) 정도 낮아야하며 최소한 10dB(A) 차이가 있어야한다.

다음 <표 3.6.13>은 각 국가별 단독 차량 pass-by 소음측정시험 방법을 정리한 것이다.



<그림 3.6.54> 가속주행소음 시험장(한국, 일본, 유럽)(ISO 362 Working Draft, 2001)

<표 3.6.13> 각 국가별 소음측정시험방법

구분	적재 조건	가속 조건				배기 소음	
		마이크로폰 위치	사용변속 기어	진입속도	가속 구간	마이크로폰 위치	엔진 회전수
한국	공차	중심선으로부터 우측 7.5m에 지상(수직) 1.2m 높이로 설치	2~4단 : 2단 5단 : 3단 보조변속기 (8단이상) : 최고 변속단의 1/2단	50km/h 또는 사용 변속단의 최고출력 시속의 3/4속도 중 작은 속도	측정점 전후 10m	배기관의 중심선 으로부터 45° 사각의 0.5m 거리에서 배기관의 높이로 설치 (단 지상최소 높이 20cm)	최고출력 시 회전 속도의 3/4 회전수
일 본	적차	〃	〃	〃	〃	〃	〃
미 국	-	중심선으로부터 우측 15m에 지상(수직) 1.2m높이로 설치	최고단	최대 엔진 회전수의 2/3속도	측정점 전후 15m		
유 럽 (ISO)	공차	중심선으로부 터7.5m에 지상 (수직)1.2m 높 이로 설치하여 자동차의 양쪽 에서 측정함	-2~4단 : 2단 -5단 이상: 2단과 3단에 서 2회 이상 측정하여 평균치 사용 (ISO에서는 4 회 이상측정)	한국과 동일	한국과 동일	한국과 동일	한국과 동일

(다) 근접 소음 측정법(Close proximity method (CPX))

① ISO Standard 11819-2 draft에 의한 방법(sound pressure측정에 의한 방법)

마이크로폰을 차량 타이어에 근접하여 설치하고 타이어와 포장면에서 발생하는 소음을 측정하는 방식이다. ISO에서는 CPX(Close proximity method : 근접 소음 측정) 측정법에 쓰이는 트레일러 장비를 제시하고 있다. 타이어와 포장에서 발생하는 소음에 대해서 <그림 3.6.55>에 나타난 트레일러에 마이크로폰을 장착하여 엔진 등의 기타 소음의 영향을 최소화할 수 있다.

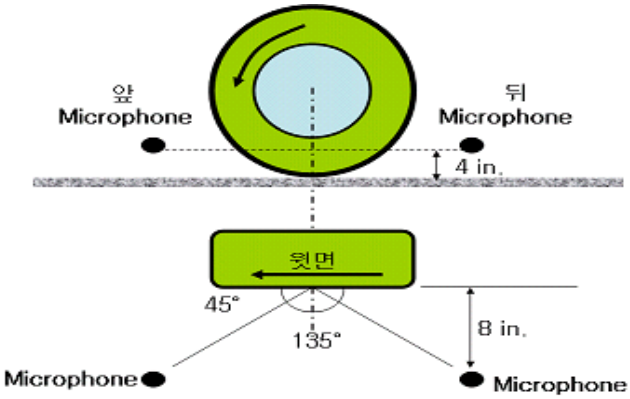


<그림 3.6.55> 근접 소음 측정 트레일러

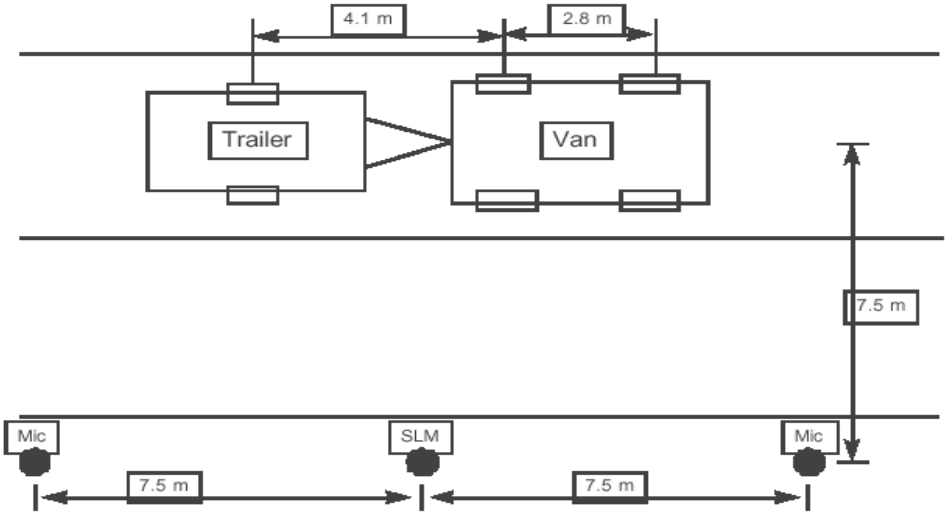
ISO에서 제시한 마이크로폰의 위치는 타이어의 중앙을 기준으로 20㎝(8inch) 떨어진 거리에서 지면과의 높이는 10㎝(4inch)로 앞뒤에 설치하게 되어있다. <그림 3.6.56>에서는 마이크로폰의 위치에 대한 조건을 설명하고 있다.

주행 차량에서 발생하는 소음은 저속일 경우, 엔진 등의 기계적인 소음이 전체 소음에서 큰 비중을 차지하며 고속으로 주행할수록 타이어/포장에서 발생하는 소음의 비중이 증가하게 된다. 따라서 CPX는 포장면에 따른 소음 발생 정도를 평가할 경우, 낮은 속도와 높은 속도를 모두 비교할 수 있는 수단으로 판단된다.

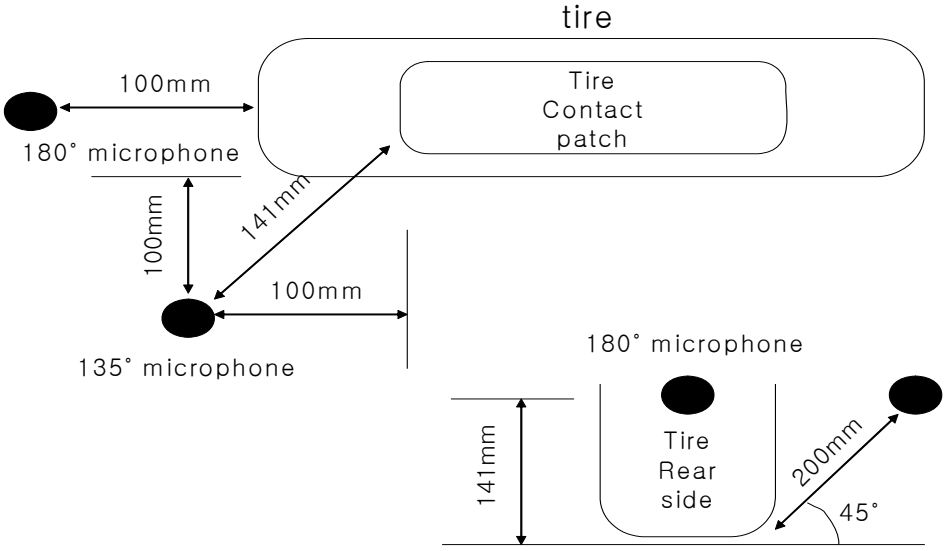
<그림 3.6.58>는 텍사스에서 수행한 소음 측정 방법을 나타낸 것이다. 기본적으로 ISO에서 제시한 조건을 바탕으로 실험을 수행했으며 트레일러를 이용하여 바퀴에 마이크로폰을 장착하여 근접 소음을 측정하는 방식을 취했다. 각각의 마이크로폰에 대해 전방을 기준으로 135°와 180° 위치로 설치하도록 되어 있다. 워싱턴주에서의 근접 측정 실험은 90°와 135°의 위치를 제시했으나 측정된 결과값에서는 큰 차이가 나타나지 않았다.(McNerney, 1998)



<그림 3.6.56> 근접 소음 측정법 마이크로폰 위치(ISO)



<그림 3.6.57> 트레일러를 이용한 소음 측정(McNerney, 1998)



<그림 3.6.58> 텍사스 도로국의 근접 소음 측정 마이크로폰 위치(McNerney, 1998)

② Dr. Paul Donavon에 의해 개발된 측정법

General Motors에서는 도로 소음 측정을 위해 일반적으로 행하는 음압(sound pressure)을 측정하는 것이 아닌, 음의 세기(sound intensity)를 측정하는 CPX법을 개발하였다. 음의 세기는 음원(타이어/노면 사이의 접촉면)에서 발생하는 음향에너지(acoustic energy)의 흐름을 표현하는 것으로서, 음압을 측정하는 심플한 마이크로폰들이나 소음측정기와는 달리 <그림 3.6.59>에서 보이는 바와 같이 탐침기(sound intensity probe)를 통해 측정하게 된다. 음의 세기 측정 방법의 경우 측정하고자 하는 음원에서 발생하는 음만을 정확하게 잡아내며, 다른 음으로부터의 상호작용을 제거하기 때문에 별도의 음향실(acoustic chamber)처리가 필요 없다는 장점이 있다.



<그림 3.6.59> 음의 세기 측정용 탐침기의 탑재 모습

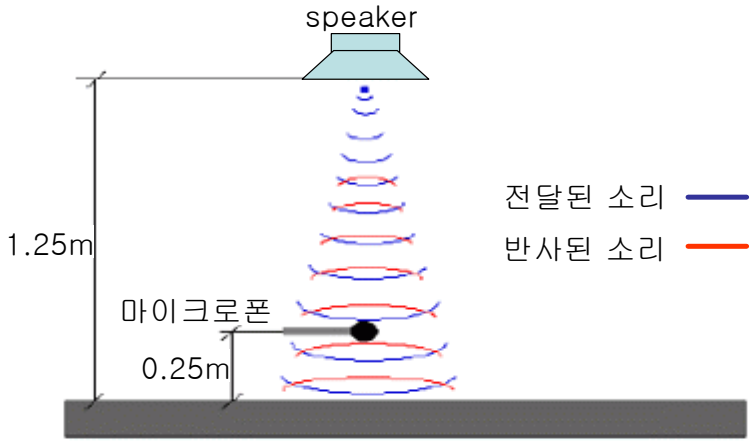
(라) 흡음률 측정법(Sound Absorption Properties In-Situ)

흡음률 측정법은 도로 표면의 한 지점에 대해서 발생한 소리가 반사되는 정도를 측정하는 방법이다. 주행 중인 차량에서 발생하는 타어어/포장 소음이 표면 공극을 지닌 배수성 아스팔트, 배수성 콘크리트 등의 포장에서는 흡음 효과로 인해 발생 소음이 줄어들게 된다. 따라서 표면 공극에 대한 흡음률을 측정하여 소음 저감에 대한 효과를 간접적으로 확인할 수 있다. <그림 3.6.60>에서는 임피던스 튜브를 사용하여 흡음 실험을 하는 장면을 보이고 있다.

본 측정법은 도로 표면의 한 지점(in-situ)에서 임피던스 튜브(impedance tube)를 이용하여 측정하며, ISO 10534-2에 그 기준을 규정하고 있다. 기본적으로 임피던스 튜브가 도로 표면에 밀착하여 튜브 내부가 완전히 밀봉된 상태가 되어야 한다. 크기가 비교적 큰 튜브를 사용할 경우 발생음에 대한 흡음률을 1600Hz 범위까지 측정할 수 있다. 또 다른 방법으로는 표면의 한 지점에서 흡음률 계수를 계산하는 방법으로 주파수 범위는 250~4000Hz이다. 이는 ISO 13472-1에 제시되어 있다. <그림 3.6.61>에서 보인 바와 같이 신호 발생기(signal generator)에서 음을 표면으로 향해 발생시키면 신호 발생기와 표면 사이에 위치한 마이크로폰에서 발생된 음과 표면에서 반사된 음을 받아들임으로써 흡음률 계수를 산정할 수 있다.



<그림 3.6.60> 임피던스 튜브를 이용한 포장 흡음율 측정



<그림 3.6.61> 흡음률 측정 원리(Garai, 1998)

(마) 실내 소음 측정법(Tire/Road noise measurement inside the vehicle)

주행 중의 차량에서 발생하는 타이어/포장 소음이 차량에 탑승한 사람에게 미치는 소음의 정도를 측정하는 방법으로서 규정으로 명시된 바는 현재까지 없으나 자동차 회사와 같은 경우 <그림 3.6.62>과 같이 모형 소음 분석 장치를 활용하여 소음 분석 및 운전자의 심리에 미치는 영향을 조사하고 있다. 기본적으로 실내에 미치는 소음 정도를 확인할 수 있을 뿐 아니라 차량 실내에 전달되는 소리의 질(sound quality)을 파악하여 이를 개선시키는 연구에 활용할 수 있다.



<그림 3.6.62> 실내 소음 측정 모습

다. 도로 소음 측정법 제안

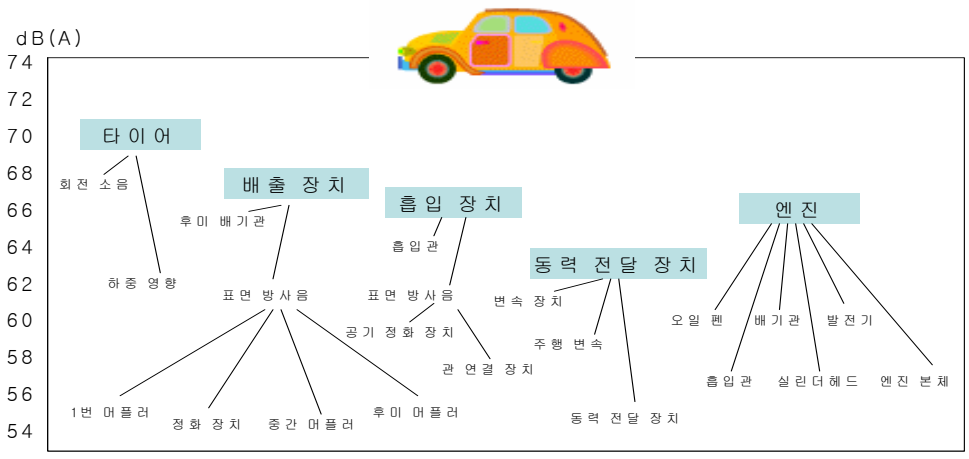
포장 표면 처리에 따른 소음도를 측정하고 비교 및 분석할 수 있는 합리적인 측정법 개발을 위해 기존 측정법에 대해 살펴보았다. 통계적 소음 측정법인 SPB 방법의 경우에는 일반 2차로 혹은 4차로 도로에 대한 교통 소음 측정이 타당할 것으로 판단된다. 또한 도로 표면 처리별 소음도를 비교하기 위한 측정 방법으로는 단독 차량 pass-by 소음 측정법이 적합하다. 차량에서 발생하는 소음으로 인해 도로 표면에 대한 절대적인 소음도를 측정하기에는 적절하지 못하지만 같은 조건으로 구간별 비교 실험으로는 사용 가능할 것으로 판단된다. 환경부에서도 도로변에 소음 측정기를 설치하여 일정 시간 동안 측정된 소음도를 통해 등가 소음도를 산정하는 방식을 채택하였다. 소음진동공정시험방법에서 제시하는 도로 소음 측정 방법은 5분 이상의 소음 측정값을 통해 등가 소음도를 구하게 되어 있다.(환경부, 2000)

<표 3.6.14> 소음한도의 측정방법 - 도로소음(환경부, 2000)

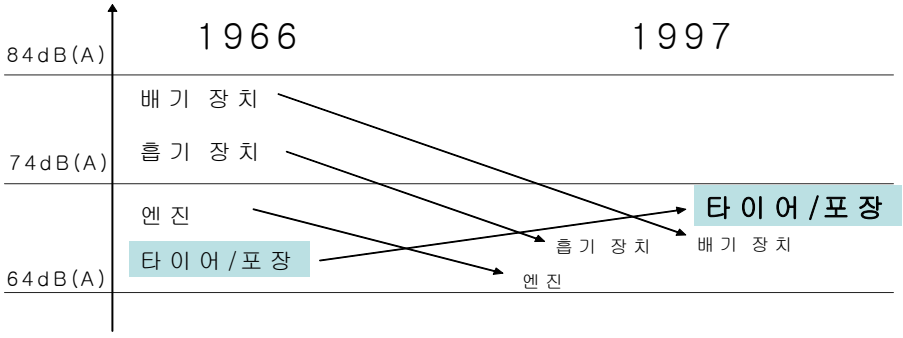
항 목	내 용
측정점	① 피해가 예상되는 자의 부지경계선 중 소음도가 높을 것으로 예상되는 지점에서 지면위 1.2~1.5m 높이로 한다. ② 높이가 1.5m를 초과하는 장애물이 있는 경우에는 장애물로부터 도로방향으로 1~3.5m 떨어진 지점으로 한다. ③ 피해가 우려되는 곳이 2층이상의 건물인 경우 피해가 예상되는 자의 부지경계선에 비하여 소음도가 더 큰 장소가 있는 경우에는 소음도가 높은 곳에서 소음원 방향으로 창문·출입문 또는 건물벽 밖의 0.5~1m 떨어진 지점으로 한다.
측정조건	① 소음계의 마이크로폰은 받침장치를 설치하여 측정하는 것을 원칙으로 한다. ② 소음계는 측정자의 몸으로부터 50cm 이상 떨어져야 한다. ③ 풍속이 2m/sec 이상일 때에는 방풍망을 설치하며, 5m/sec를 초과할 때에는 측정하지 않는다.
측정기기의 조작	① 소음계의 청감보정회로는 A특성에 고정하여 측정한다. ② 소음계의 동특성은 빠름(Fast)을 사용하여 측정한다.
측정시각 및 측정지점수	① 적절한 측정시각에 2지점 이상의 측정지점수를 선정·측정하여 그 중 가장 높은 소음도를 측정소음도로 한다.
측정자료 분석	① 디지털 소음자동분석계인 경우, 샘플주기를 1초이내에서 결정하고 5분이상 측정하여 자동 연산·기록한 등가소음도를 그 지점의 측정소음도 또는 암소음도로 한다. ② 소음도 기록기를 사용할 경우, 5분 이상 측정 기록하여 변동폭이 5dB(A)이내일 때에는 변화폭의 중간소음도, 불규칙하고 대폭적으로 변하는 경우에는 최대치에서 크기순으로 10개를 택하여 산술평균한 소음도를 구한다. ③ 소음계만으로 측정할 경우 목측으로 5초 간격 50회 판독하여 ②와 같은 방법으로 소음도를 구한다.

도로 소음을 기존 방법에 의해 측정할 경우 도로 주변에 대한 전체적인 소음도를 측정할 수는 있지만 소음도 측정시 도로 주변 환경에 의한 영향을 많이 받게 될 것이다. 즉, 차량과 도로면에서 발생하는 직접적인 소음에 대한 평가를 하긴 어렵다. <그림 3.6.63>에서는 승용차에 대한 Pass-by 소음 측정시 발생 소음원을 나타내고 있다. 도로 주변 환경 뿐 아니라 차량에서도 도로면과 차량에서 발생하는 소음 이외에도 많은 소음이 발생하고 있는 것을 알 수 있다. <그림 3.6.64>에서는 타이어/포장 소음과 배출 및 흡입 기관, 엔진 등의 소음이 시대에 따라 전체 소음에 미치는 영향이 달라진 것을 볼 수 있다. 자동차의 성능이 향상됨에 따라 점차 타이어/포장 소음이 지배적인 역할을 하는 것을 알 수 있다. 따라서 발생 소음원 중 가장 많은 비중을 차지하는 타이어/포장 소음을 보다 객관적으로 평가할 수 있는 방법을 모색해볼 필요가 있다.

근접 소음 측정법인 CPX 방법은 차량이나 환경적인 제약 조건을 최소화하기 위한 가장 합리적인 방법이라 생각된다. 차량의 기계적인 소음을 최대한 배제시킬 수 있고 시험 구간에 대한 주변 환경 조건에 비교적 자유롭다. 이는 표면별 소음도를 측정하는 것 뿐 아니라 타이어에 따른 소음도를 비교하는 방법으로 가장 이상적인 방법이라고 판단된다. 본 연구에서는 합리적인 도로 소음 평가 방법으로 트레일러를 이용한 CPX 측정법을 제안하고자 한다.



<그림 3.6.63> 승용차 주행시 발생 소음원(Pass-by 측정(74dB(A))(Affenzeller, 2003)



<그림 3.6.64> 타이어/포장 소음의 기여도 변화(Affenzeller, 2003)

라. 트레일러를 이용한 CPX 측정의 연구사례

현재 유럽에서는 대부분의 국가에서 소음 측정용 CPX 트레일러를 자체적으로 개발하여 보유하고 있다. 또한 미국에서도 뉴저지, 아리조나 등에서 CPX 트레일러를 이용한 소음 연구가 진행 중에 있다.(Atlanta, 2004) <그림 3.6.65>~<그림 3.6.68>에서는 유럽 및 미국에서 개발된 CPX 트레일러를 보이고 있다.

CPX 트레일러를 이용하여 도로 소음을 측정할 경우 Pass-by 소음 측정법과는 달리 긴 구간에 대한 소음을 측정할 수 있다. 또한 해당 구간의 날씨 또는 환경적인 영향을 거의 받지 않고 도로 소음을 측정할 수 있으며 주기적인 소음 측정을 통해 포장 표면에 대한 노화 정도 혹은 배수성 포장일 경우의 공극 막힘 정도 등을 파악하는 자료로 활용될 수 있다. CPX 트레일러에 대한 장점을 정리하면 다음과 같다.

- 어떠한 장소에도 관계없이 도로 표면의 소음 특성을 결정할 수 있다.
- 도로 표면에 대한 소음 특성을 판단하는데 사용할 수 있다.
- 유지보수 여부를 결정하는 기준이 될 수 있다. 다공성 포장의 경우 공극 막힘이나 표면 파손 등에 따라 소음도에 영향을 줄 수 있다.
- SPB 측정에 비해 간편하게 측정할 수 있다. 본 측정방법은 SPB에 비해 빠르고, 실용적이며, 경제적이다.
- 엔진 소음은 배제하면서 타이어/포장 소음만을 측정한다.
- 주행하는 차량에서 측정하므로 교통 정체 등의 악영향을 주지 않는다.



<그림 3.6.65> 네덜란드의 CPX 트레일러



<그림 3.6.66> 스웨덴의 CPX 트레일러



<그림 3.6.67> 핀란드의 CPX 트레일러



<그림 3.6.68> 미국의 CPX 트레일러(아리조나)



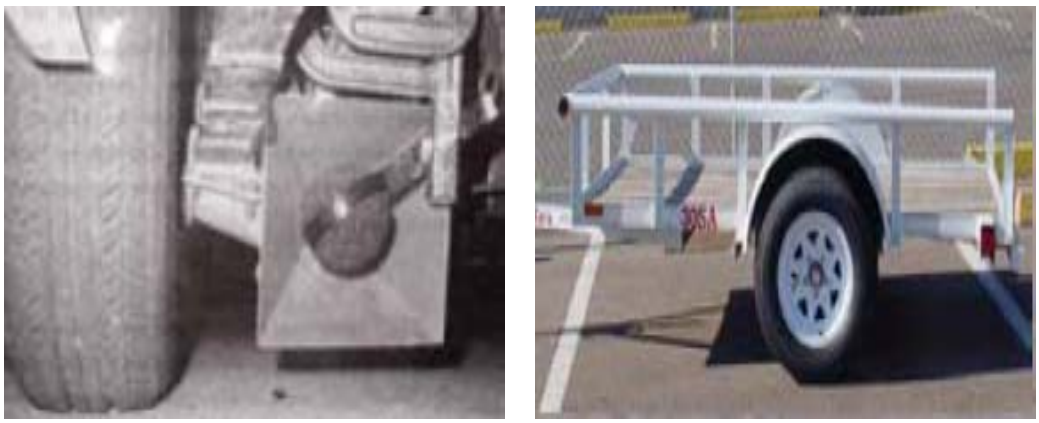
<그림 3.6.69> 영국의 CPX 장비(TRL)



<그림 3.6.70> 스웨덴의 CPX 장비(TUG)

국외에서 개발된 CPX 트레일러에 장착되는 마이크로폰은 2~5개이다. 앞서 제시했듯이 ISO 11819-2에서는 기본적으로 두 개의 마이크로폰을 장착하게 되어있고 필요시 타이어 중앙부와 타이어 앞·뒤면 등 세 개의 마이크로폰을 추가적으로 설치할 수 있다. <그림 3.6.69>과 <그림 3.6.70>에서는 유럽에서 제작된 트레일러에 마이크로폰이 장착된 모습을 보이고 있다.

초기 CPX 측정 방식은 <그림 3.6.71(a)>와 같이 주행 차량의 타이어 뒤로 마이크로폰을 장착하는 것이었다. 그러나 주행 차량의 타이어에서 발생하는 소음을 직접 측정하게 될 경우 배기 장치 및 엔진 소음 등의 차량에서 발생하는 소음도 영향을 미치게 된다. 따라서 도로 표면의 소음 특성만을 고려하기 위해 <그림 3.6.71(b)>와 같이 마이크로폰이 장착된 트레일러를 차량에 연결시켜 소음을 측정하는 방식이 고안되었다. 이와 같은 형식의 트레일러는 환경적인 요인에 영향을 받을 수 있다. <그림 3.6.72>은 주행용 축과 측정용 타이어를 구분하여 측정용 타이어는 무향실로 덮개를 처리하여 타이어/포장 소음 이외의 영향을 최대한 배제하는 방식을 취하고 있다.



<그림 3.6.71> CPX 측정 방식(좌(a) : 주행 차량 직접 측정, 우(b) : 트레일러)



<그림 3.6.72> 마이크로폰이 설치된 측정용 타이어의 무향실 처리 모습

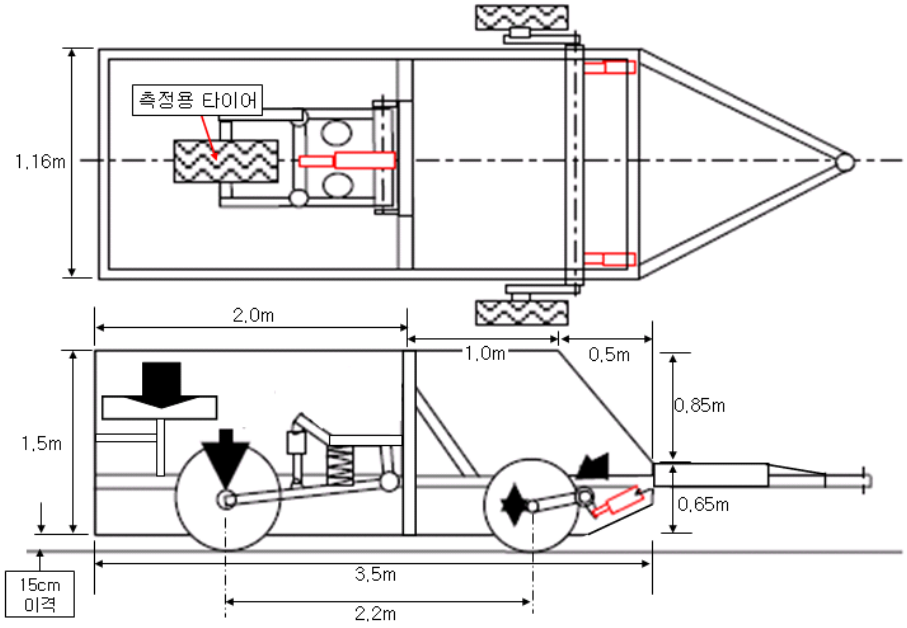
CPX 트레일러를 이용한 도로 소음 측정 방법은 앞서 밝힌 바와 같이 도로 표면과 타이어 사이에서 발생하는 소음을 직접적으로 측정함으로써 최대한 기타 소음을 배제할 수 있다. 그러나 트레일러를 이용한 측정법은 트럭, 버스와 같은 중차량에 대한 소음 특성을 파악하기 힘들다. 즉, 차종에 따른 소음을 측정할 수 없다. 그러나 도로 표면에 대한 객관적인 소음도를 비교할 수 있는 가장 합리적인 방법이라 판단되며, 차종에 대한 특성을 트레일러에 적용할 수 있는 방법을 고려하여 측정에 반영한다면 이상적인 소음 측정 방법이 될 것으로 보인다.

CPX 트레일러는 도로를 주행하는 과정에서의 발생 소음을 실시간으로 측정할 수 있다. 따라서 일정 시간 주기에 따른 각각의 소음 데이터를 획득할 수 있기 때문에 같은 표면 처리 공법이 적용된 구간에서도 소음도의 차이에 대한 비교가 가능하다. CPX 측정법은 측정 바퀴 주변에 설치된 2~5개의 마이크로폰에서 동시에 소음 측정이 이뤄지기 때문에 각각의 데이터를 분석할 수 있으며 이들의 평균값을 구간 소음도의 대표값으로 활용할 수 있을 것이다. 본 연구에서는 CPX 트레일러를 직접 제작함으로써 다양한 구간에서의 소음 측정 실험을 거쳐 국내 여건에 맞는 실험법을 정량화할 계획이다.

마. HEART 근접소음측정(CPX) Trailer 장비의 개발

(1) HEART CPX Trailer 장비의 개발

시간 경과에 따른 포장의 다양한 기능적 측면에서의 공용성 저하 시, 이를 평가하고 적절한 유지보수 업무를 수행할 수 있는 기준의 마련은 매우 중요한 과업이다. 이에 기존의 외국 장비의 장·단점을 분석하고 이를 개선하여 보다 합리적으로 국내 여건에 적용될 수 있도록 HEART CPX Trailer 를 개발했다. 다음 <그림 3.6.73>은 HEART CPX Trailer의 제원, 구조 및 원리를 나타내고 있으며, <그림 3.6.74>은 완성된 모습을 보여주고 있다.



<그림 3.6.73> HEART CPX Trailer의 설계도



<그림 3.6.74> HEART CPX Trailer 및 견인차량

(2) HEART CPX Trailer 장비의 특징

현재 국내에서는 소음 측정용 Trailer의 제작이 전무한 상태이기 때문에 국외의 제작 및 연구 사례 고찰을 통해 장·단점을 평가·분석함으로써 국내 최초로 도로 소음 측정용 HEART CPX Trailer 장비를 개발하였다.

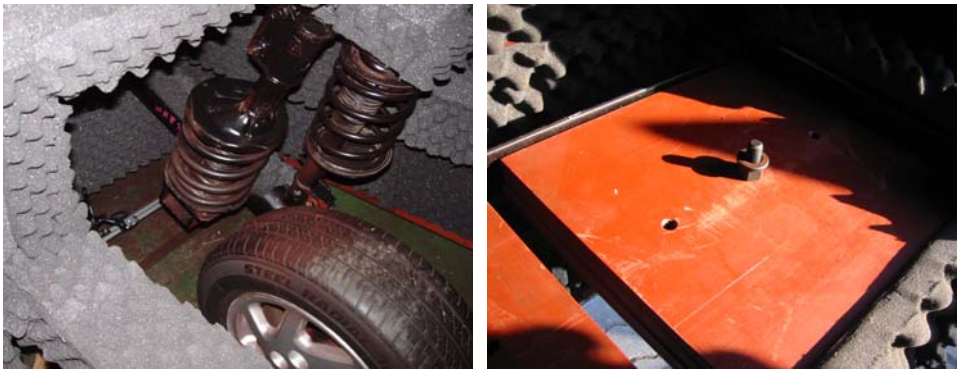
HEART CPX Trailer 장비의 특징은 다음과 같다.

1) 국외의 기존 CPX Trailer의 장비는 유압장치를 탑재하여 실제 차량 바퀴하중을 모사하거나 단순히 Trailer 자중만으로 측정용 타이어에 가압을 하는 형태가 일

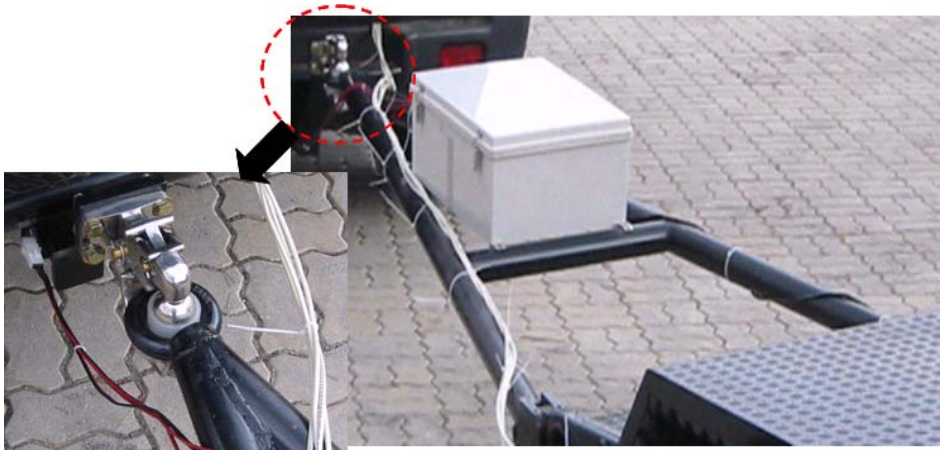
반적이었다. 그러나 유압장치에 의한 실제 차량 모사 방식은 유압시스템 자체에서 발생하는 암소음에 대한 처리가 필요하며 비용이 많이 들고 고정밀도의 운영기술이 요구되어 진다. 특히, 실제 공용 중인 도로상에서 주행상태에서 소음을 측정하는 CPX Trailer 장비이기 때문에 이동시 유압의 손실이 발생하는 단점을 가지고 있었다. 또한, Trailer 자중을 통해 가압하는 방식은 다양한 조건에서의 연구가 불가능하였다. 반면 HEART CPX Trailer 장비는 측정용 바퀴의 실제 차량바퀴 모사를 위해 차종에 따라 유연하게 대처할 수 있도록 추의 탈·부착을 통해 하중조절이 가능하도록 제작함으로써 이를 보완하였다. 다음 <그림 3.6.75>는 실제바퀴를 모사한 측정용 타이어와 하중을 조절할 수 있는 추를 거치한 모습을 보여주고 있다.

2) 기존의 국외 장비는 마이크로폰의 설치를 위한 지지대 제작 시, ISO Standard 11819-2 규정에 따른 위치를 준수하도록 고정식으로 제작되어 있어, 마이크로폰의 설치 위치에 따른 소음에 대한 영향 분석이 불가능한 것들이 대부분이었다. 그러나 HEART CPX Trailer 장비는 마이크로폰의 설치용 지지대 내에서 마이크로폰의 위치 및 각도 등을 자유롭게 이동·고정할 수 있도록 고려함으로써 측정용 타이어로부터 다양한 위치에서의 근접소음(CPX) 측정이 가능하도록 하였으며, 마이크로폰 탈·부착부의 소음 및 진동을 최소화하였다.

3) 기존의 장비는 견인차량의 종류에 따른 높이 등의 변화에 능동적으로 대처하지 못함으로써 장비 운용에 한계가 있었다. 그러나 본 장비는 <그림 3.6.76>에서와 같이 견인차와 Trailer 간의 연결을 위한 어댑터를 제작, 견인차량의 차종 및 높이 변화 등에 유연하게 대처할 수 있도록 제작하였다.



<그림 3.6.75> HEART CPX의 측정용 바퀴 및 하중재하용 추



<그림 3.6.76> HEART CPX Trailer와 견인차량의 연결부

4) 기존의 CPX Trailer를 이용한 연구에서는 장비 자체에 대한 검증이 없이 CPX 측정결과와 기존 방식의 측정결과를 단순 비교하는 것이 대부분이었다. 이에 HEART CPX Trailer 장비는 반무향실 처리에 대한 적합성을 검정하기 위해, KS A ISO 3745 규정에 입각하여 Trailer의 반무향실 검증 시험을 수행하였다. 이를 통해, 기존의 타 장비보다 보다 신뢰성 높은 CPX Trailer 장비를 이용한 소음 측정을 가능하도록 하였다.

(3) HEART CPX Trailer 장비 검증 시험

(가) 무향실 및 반무향실의 성능평가 방법 및 사례 고찰

제작된 HEART CPX Trailer 장비의 측정 결과의 신뢰성을 확보하기 위해, 한국표준 협회의 'KS A ISO 3745'규정에 따라 반무향실의 성능평가 및 검증 작업을 수행하였다. 무향실 및 반무향실의 성능 평가는 음원으로부터의 거리에 따른 음압의 역제곱 비례법칙을 확인하는 것이 가장 일반적인 방법이다. 자유음장에서는 점음원으로부터 발생된 음압이 거리가 2배로 증가함에 따라 음압레벨이 6dB 감소한다. 이를 확인하기 위해서는 무향실내에서 무지향성 음원을 사용하여 순음을 발생시킨 후 음압 감소량을 확인한다. 여기서 순음은 순간의 음압이 시간의 단일 정형함수, 즉 한주파수의 음을 의미하며, 이러한 방법을 사용하여 역제곱 비례법칙을 확인함으로써 무향실의 최저한계 주파수는 물론 자유음장 조건을 만족시키는 무향

실내의 공간범위도 찾을 수 있다.

본 연구에서 제작한 반무향실의 경우, 바닥 면 이외의 흡음구조는 무향실과 동일하다. 그러나 역제곱 비례법칙에 의한 성능검사를 위한 음원을 무향실과 같은 모양으로 실 중심부(바닥 면으로부터 떨어진 위치)에 놓는 것은 적당치 않다. 이것은 바닥 면으로부터 오는 반사음과의 간섭에 의해서 음원으로부터 거리감쇠 특성이 불규칙하게 되기 때문이다.

영국 'TRITON'의 'TRL′s CPX test vehicle′의 경우, ISO 규정(KS A ISO 3745)에서는 마이크로폰 두 군데 위치에서의 자유장 음압도와 음향덮개를 씌운 상태(반무향실 상태)에서의 음압도 간의 차이가 1/3 옥타브 밴드에서 ±1dB 범주를 벗어나지 않으면 CPX 측정장비의 반무향실 설비에 대해 인증을 주고 있다. 그러나 이는 무향실(자유음장 상태) 설비가 별도로 필요하기 때문에 시간과 비용의 문제가 단점으로 지적된다.(S M Phillips, 2001)

ISO 규정(KS A ISO 3745)에 따르면 시험용 스피커(speaker)를 바닥면 중앙부(가능한 바닥면에 접근한 위치)에 설치하고, 이것으로부터 실천정 네방향 모퉁이에 대해서 거리감쇠를 측정하는 방법을 간편법으로 채택하고 있다. 그러나 실질적으로 KS A ISO 3745에서는 이보다 좀 더 세밀한(마이크로폰의 이동 및 위치, 측정점의 수 등) 측정법을 제시하고 있다.

(나) 'KS A ISO 3745'에 의한 방법(KS A ISO 3745, 2002)

① 일반사항

일반적으로 자유음장 또는 반자유 음장에 대한 요구사항은 점음원에서 방사되는 소리에 대해서 역제곱 법칙으로부터의 음압의 허용 편차에 의해 주어진다.

② 측정기

마이크로폰 및 케이블을 포함하는 측정 시스템은 KS C 1505에서 규정하는 1등급 요구사항에 적합한 것으로 한다. 사용할 필터는 IEC 61260에서 규정하는 1등급 요구사항에 적합한 것으로 한다. 본 연구에서는 'B & K'사의 free-field 마이크로폰과 옥타브 분석·측정 시스템 및 필터를 이용하였다.

반무향실의 반사면상에 설치한 스피커를 포함하는 전기 음향 시스템에는 충분한

출력 레벨, 고안전성 및 본질적으로 전지향성을 가진 것을 사용한다. 본 연구에서는 도로 교통소음에 지배적인 400 ~ 2000Hz의 주파수 대역에 해당하는 권장 스피커를 사용하였으며 음원의 높이는 ISO 규정에 따른 마이크로폰 위치에서의 높이와 일치시켰다..

③ 시험용 음원 및 마이크로폰의 설치

시험용 음원의 중심이 반사면상으로부터 0.1파장 이내가 되도록 음원을 반사면 위에 둔다. 이를 위해서는 시험 음원을 반사면에 만든 비트 안에 두거나 또는 반사면 바로 위에 두도록 한다.

마이크로폰의 이동은 시험용 음원의 음향 중심으로부터 적어도 서로 다른 다섯 방향의 직선 경로에 대해서 한다. 기본적인 마이크로폰 경로는 음원으로부터 시험실 구석으로 향하는 직선이다. 반무향실의 경우에는 반사면에 아주 가깝고 평행한 경로를 피한다.

④ 시험 방법

②와 ③에 있는 전기 음향 시스템을 측정 대상 음원의 대상 주파수 범위에 걸치는 이산 주파수로 작동시킨다. 125Hz 미만 및 4000Hz를 넘는 중심 주파수로서는 1/3 옥타브 간격의 주파수를 사용한다. 125 ~ 4000Hz에 대해서는 옥타브 간격의 주파수를 사용한다.

마이크로폰은 각 주파수에 대해서 마이크로폰의 이동 경로에 따라서 이동시킨다. 음압레벨의 측정은 스피커의 음향 중심으로부터 측정 반구면 사이에서 실시한다. 측정점 간격은 시험 주파수음의 1/4파장 이하로 한다. 그러나 1000Hz 이상의 주파수에서는 0.1m의 간격으로 한다. 측정점의 수는 마이크로폰 경로의 각 방향에 대해서 10점 이상으로 한다. 그 밖에는 마이크로폰을 연속 이동시켜 음압 레벨을 기록한다. 이 경우 마이크로폰 이동시스템으로부터의 반사를 주의 깊게 피한다.

⑤ 역제곱 법칙에 대한 편차의 산출

각 측정점에서 측정한 음압 레벨로부터 측정 각 방향마다 역제곱 법칙에 기초한 음압레벨의 추정값은 다음 <식 3.6.3>에 의해 산출한다.

$$L_p(r) = 20lg[\frac{a}{r - r_0}] \qquad \text{<식 3.6.3>}$$

여기에서

$$a = \frac{(\sum_{i=1}^{N} r_1)^2 - N\sum_{i=1}^{N} r_i^2}{\sum_{i=1}^{N} r_i \sum_{i=1}^{N} q_i - N\sum_{i=1}^{N} r_i q_i}$$

$$r_0 = -[\frac{\sum_{i=1}^{N} r_i \sum_{i=1}^{N} q_i - \sum_{i=1}^{N} r_i^2 \sum_{i=1}^{N} q_i}{\sum_{i=1}^{N} r_i \sum_{i=1}^{N} q_i - N\sum_{i=1}^{N} r_i q_i}]$$

$$q_i = 10^{0.05 L_{pi}}$$

r_i : 측정 반구면의 중심으로부터 i번째 측정점가지의 거리(m)

L_{pi} : i번째 측정점에서의 음압 레벨

N : 각 측정 방향에서의 측정점의 수

역제곱 법칙에 근거한 음압 레벨의 추정값을 사용하여 모든 측정점에서의 음압 레벨의 역제곱 법칙으로부터의 편차를 다음 <식 3.6.4>로 산출한다.

$$\triangle L_{pi} = L_{pi} - L_p(r_i) \qquad \text{<식 3.6.4>}$$

여기에서 $\triangle L_{pi}$: 역제곱 법칙으로부터의 편차(dB)

L_{pi} : i번째 측정점에서의 음압 레벨(dB)

$L_p(r_i)$: 역제곱 법칙으로부터 추정한 거리 r_i에서의 음압 레벨(dB)

⑥ 평가 방법

<식 3.6.5>을 통해 산출한 편차는 <표 3.6.15>에 있는 값을 넘지 않도록 한다. 편차는 측정 구면 또는 반구면의 허용 반지름 및 측정 표면을 선정할 수 있는 음원 주변의 최대 공간을 결정한다. 이렇게 구한 측정면이 실제 측정 대상 음원인 근거리 바깥쪽에 있으면 이 측정면은 이 규격에 의한 음향 파워 레벨 산출에 적합하다.

<표 3.6.15> 이론적 역제곱 법칙에 대한 측정 음압레벨의 최대 허용 편차

시험실의 종류	1/3 옥타브 대역 주파수(Hz)	허용 편차
무향실	≤ 630	± 1.5
	800 ~ 5000	± 1.0
	≥ 6300	± 1.5
반무향실	**≤ 630**	**± 2.5**
	800 ~ 5000	**± 2.0**
	≥ 6300	**± 3.0**

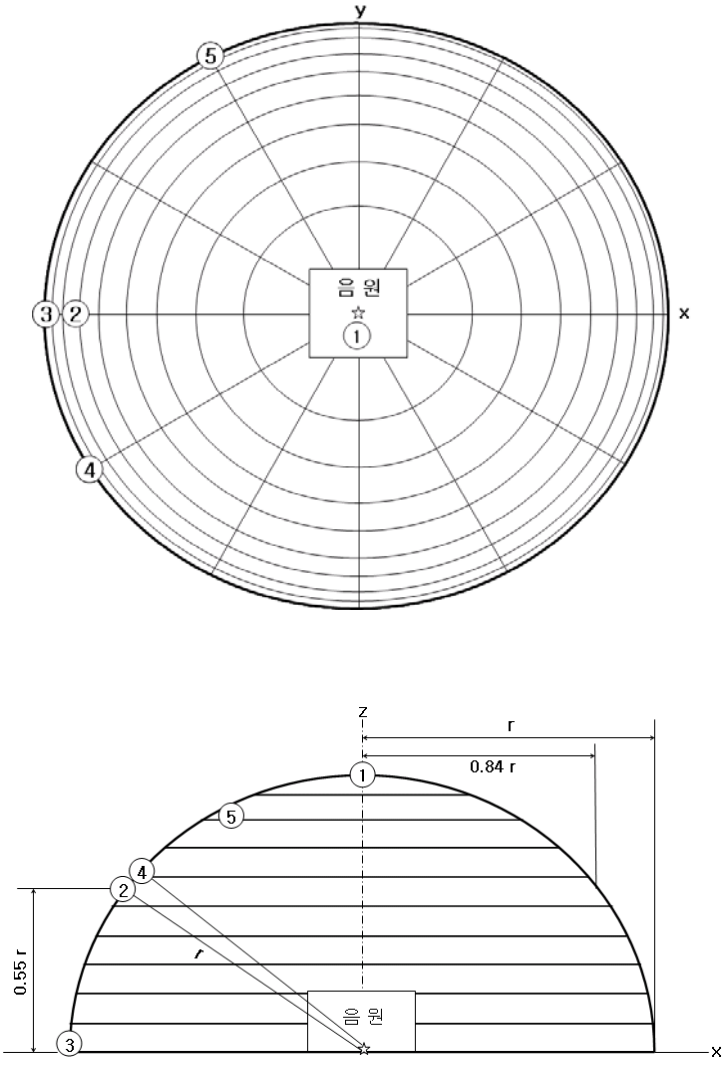
(다) 검증 시험

본 검증 시험에서는 포장 표면 처리별 소음 특성 평가를 목적으로 개발한 HEART CPX Trailer 소음 측정 장비의 반무향실 설계 및 제작에 대한 적합성을 판단하고자 하였으며, 시험법은 전술한 'KS A ISO 3745'규격을 준수하였다. HEART CPX Trailer 장비의 경우 실제 도로 상에서의 주행 안전성 등의 문제로 일반 고정식 반무향실과 달리 하부의 반사면(도로 표면)과 일정거리(약 15cm)의 이격이 불가피하다. 따라서 실측 음압레벨과 역제곱 법칙에 기초한 특정 주파수별 음압레벨의 편차가 허용 편차 범위 내에 대한 존재 여부를 확인하였다. 다음은 본 연구에서 수행한 검증시험 내용을 나타낸 것이다.

1) 음원에서 발생시키는 소음(순음)은 제2장에서 전술하였던 타이어/노면 소음 특성을 고려하였으며, 1/1 옥타브밴드의 중심 주파수들 중 63Hz, 125Hz, 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz, 4000Hz, 8000Hz의 8개의 중심주파수를 선택하여 테스트 하였다. 특히 '타이어/노면' 소음에 지배적인 중심주파수 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz에서의 적합성을 살펴보았다.
2) 도로교통 소음의 원인 중, 타이어/포장 소음과 같이 광대역 음원에 대해서 KS A ISO 3745 규정이 권장하는 위치 중 반무향실의 좌우 대칭 구조를 감안하여 5개의 방향에 대해 고정 마이크로폰을 배치하였으며 그 위치를 <그림 3.6.77>에 나타내었다. 이때, 마이크로폰의 수음 특성에는 아무런 가중치를 주

지 않았다.(HEART CPX 반무향실은 반경(r) 100cm로 제작되었다.)

3) 제작한 Trailer의 반무향실의 크기가 작은 관계로 역제곱 법칙에 의한 편차를 산출하기 위해 각 마이크로폰 위치의 방향마다 거리를 25cm, 50cm, 100cm로 변화시키면서 1/1 옥타브밴드의 중심주파수별 소음도를 측정하였으며, 이를 추정식에 의해 산출된 값을 이용하여 편차를 구하였다. 다음 <그림 3.6.78>~<그림 3.6.81>은 HEART CPX Trailer 장비의 검증 시험 모습을 보여주고 있다.



<그림 3.6.77> HEART CPX Trailer 장비 반무향실에서의 적용한 마이크로폰 5점 배치



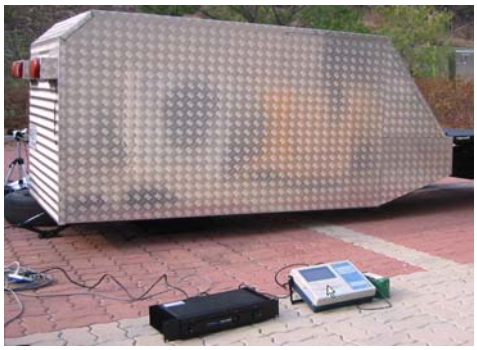
<그림 3.6.78> Noise Generator 및 앰프



<그림 3.6.79> 마이크로폰 및 소음분석기



<그림 3.6.80> 마이크로폰 이동에 따른 측정



<그림 3.6.81> 반무향실 검증 시험 모습

(라) 결과 분석

HEART CPX Trailer 장비의 신뢰성을 확보하기 위해 ISO 규정에 따라 수행한 반무향실 검증시험 및 분석 결과는 <표 3.6.16>~<표 3.6.20>과 같으며, <그림 3.6.82>~<그림 3.6.86>은 중심주파수 중에서 500Hz 및 1000Hz에서의 실측 음압레벨과 추정 음압레벨과의 편차를 보여주고 있다.

<표 3.6.16> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(①번 방향 (위쪽 방향))

중심 주파수 (Hz)	실측 음압레벨(dB)			이론 추정값(dB)			편 차			
	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	**평균**
63	104	104	106	108.7	109.2	110	-4.7	-5.2	-4.0	-4.6
125	114	109	112	115.1	114.8	114.0	-1.1	-5.8	-2.0	-3.0
250	116	111	109	114.5	112.5	106.6	1.5	-1.5	2.4	**0.8**
500	118	115	111	117.1	115.2	109.4	0.9	-0.2	1.6	**0.8**
1000	118	115	110	116.7	114.5	106.8	1.3	0.5	3.2	**1.7**
2000	116	115	112	117.1	116.1	113.7	-1.1	-1.1	-1.7	**-1.3**
4000	104	106	101	106.7	105.9	103.9	-2.7	0.1	-2.9	**-1.8**
8000	88	81.5	80.7	85.9	83.9	77.3	2.1	-2.4	3.4	**1.0**

<표 3.6.17> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(②번 방향 (전방 55cm 높이 방향))

중심 주파수 (Hz)	실측 음압레벨(dB)			이론 추정값(dB)			편 차			
	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	**평균**
63	103	103	109	110.4	111.7	113.7	-7.4	-8.7	-4.7	-6.9
125	115	110	104	111.9	108.5	81.5	3.1	1.5	22.5	9.0
250	117	111	109	114.7	112.4	104.3	2.3	-1.4	4.7	**1.9**
500	118	114	112	117.2	115.6	111.2	0.8	-1.6	0.8	**0**
1000	117	113	109	115.3	113.1	105.3	1.7	-0.1	3.7	**1.8**
2000	112	106	105	110.2	108.3	102.3	1.8	-2.3	2.7	**0.7**
4000	99.6	95.4	88.5	96.7	93.4	68.1	2.9	2.0	20.4	8.4
8000	87.4	81.3	80.1	85.4	83.4	76.8	2.0	-2.1	3.3	**1.1**

<표 3.6.18> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(③번 방향 (전방 0cm 높이 방향))

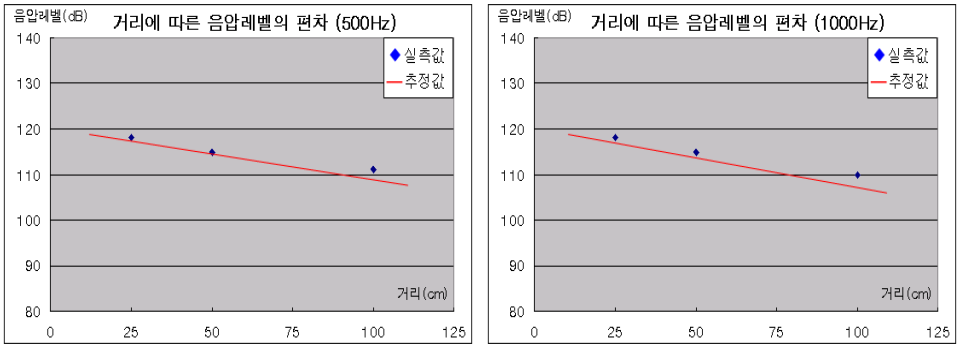
중심 주파수 (Hz)	실측 음압레벨(dB)			이론 추정값(dB)			편 차			
	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	**평균**
63	102	103	106	108.3	109.1	110.5	-6.3	-6.1	-4.5	-5.6
125	114	111	112	115.6	115.2	114.3	-1.6	-4.2	-2.3	-2.7
250	115	109	108	113.2	111.3	105.3	1.8	-2.3	2.7	**0.7**
500	117	112	109	115.0	112.7	104.8	2.0	-0.7	4.2	**1.8**
1000	115	111	107	113.3	111.1	103.3	1.7	-0.1	3.7	**1.8**
2000	109	105	100	106.9	104.3	93.9	2.1	0.7	6.1	3.0
4000	95.8	92.1	88.7	94.6	92.7	86.6	1.2	-0.6	2.1	**0.9**
8000	81.5	78.1	73.7	80.1	78.0	70.7	1.4	0.1	3.0	**1.5**

<표 3.6.19> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(④번 방향 (30° 대각선 방향))

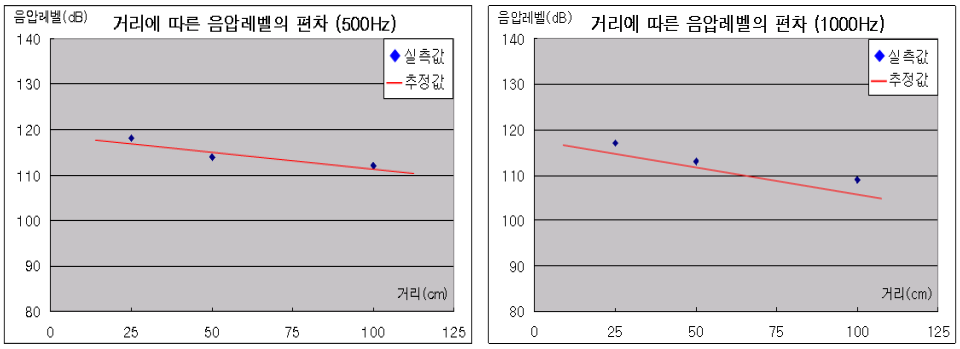
중심 주파수 (Hz)	실측 음압레벨(dB)			이론 추정값(dB)			편 차			
	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	**평균**
63	104	103	109	110.5	111.6	113.5	-6.5	-8.6	-4.5	6.5
125	115	109	102	111.5	108.1	73.2	3.5	0.9	30.8	11.7
250	117	114	108	115.3	112.7	102.7	1.7	1.3	5.3	2.8
500	118	115	111	117.1	115.2	109.4	0.9	-0.2	1.6	**0.8**
1000	117	114	110	116.1	114.2	108.4	0.9	-0.2	1.6	**0.8**
2000	109	104	101	107.0	104.7	96.8	2.0	-0.7	4.2	**1.8**
4000	99.8	94.9	89.2	96.8	93.6	73.5	3.0	1.3	15.7	6.7
8000	84.9	78.2	75.4	81.8	78.9	65.1	3.1	-0.7	10.3	4.2

<표 3.6.20> 역제곱 법칙에 대한 1/1옥타브 중심주파수별 측정 음압레벨의 편차(⑤번 방향 (60° 대각선 방향))

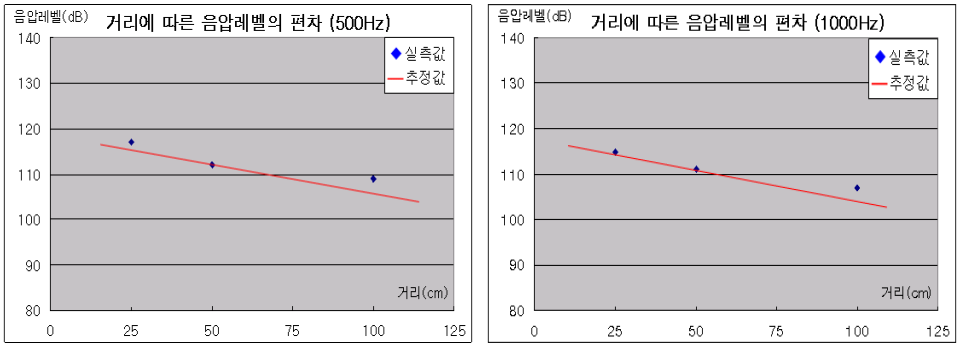
중심 주파수 (Hz)	실측 음압레벨(dB)			이론 추정값(dB)			편 차			
	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	25cm	50cm	100cm	**평균**
63	105	101	104	106.9	106.8	106.7	-1.9	-5.8	-2.7	-3.5
125	118	116	116	119.8	119.4	118.5	-1.8	-3.4	-2.5	-2.6
250	117	114	110	116.1	114.2	108.4	0.9	-0.2	1.6	**0.8**
500	114	112	111	115.3	114.6	113.0	-1.3	-2.6	-2.0	**-2.0**
1000	119	115	112	117.8	115.9	110.0	1.2	-0.9	2.0	**0.8**
2000	113	112	111	115.1	114.7	113.7	-2.1	-2.7	-2.7	-2.5
4000	105	104	101	106.1	105.1	102.7	-1.1	-1.1	-1.7	**-1.3**
8000	88.8	84.8	82.7	88.0	86.4	81.8	0.8	-1.6	0.9	**0.0**



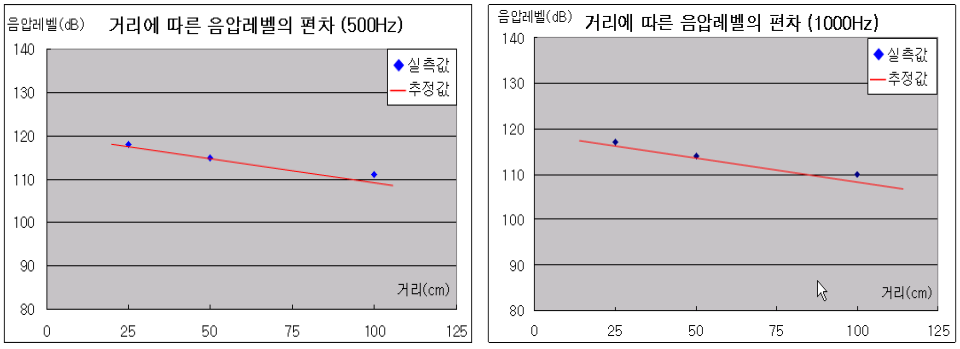
<그림 3.6.82> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(①번 방향 (위쪽 방향))



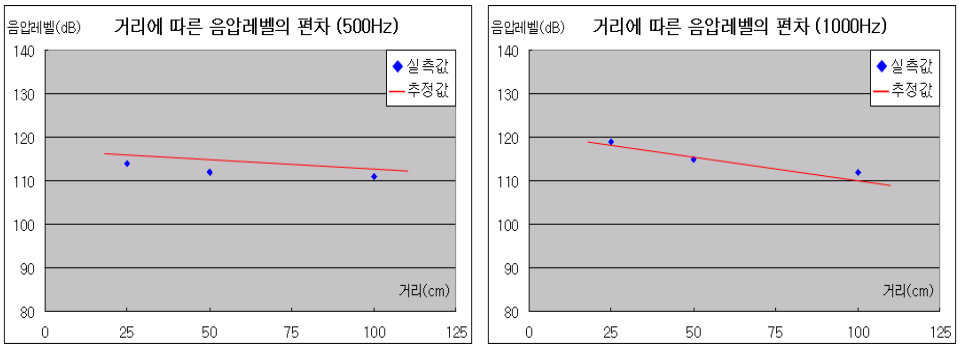
<그림 3.6.83> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(②번 방향 (전방 55cm 높이 방향))



<그림 3.6.84> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(③번 방향 (전방 0cm 높이 방향))



<그림 3.6.85> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(④번 방향 (30° 대각선 방향))



<그림 3.6.86> HEART CPX Trailer 장비 반무향실의 각 방향별 검증시험 결과(⑤번 방향 (60° 대각선 방향))

HEART CPX Trailer 장비의 반무향실 제작에 대한 적합성 검증시험의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 5가지 측정 방향에서 1/1옥타브 대역에서의 8가지 중심주파수에 대한 분석 결과, 62.5%가 허용 편차 이내에서 만족하였다. 그러나 도로 소음특성에 지배적인 영향을 미치는 중심주파수 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz에 대한 편차는 85%가 허용 편차 이내에서 만족하였다.

2) 음원으로부터 위쪽 방향과 전방 55cm 방향에서는 250Hz, 500Hz, 1000Hz, 2000Hz에서 모두 만족하였으나, 전방 0cm 높이 방향과 60° 대각선 방향에서는 2000Hz에서 각각 +1.0과 -0.5 허용 범위를 벗어났다. 또한, 30° 대각선 방향에서는 250Hz에서 +0.3 초과하였다. 여기서 2000Hz는 앞장에서 전술한 바와 같이 '타이어/노면' 소음의 원인 중 공기 공명에 의한 소음에 영향을 미치므로 이에 대한 고려가 필요하며, 250Hz는 타이어 진동에 의한 소음에 영향을 미친다.

3) 전반적으로 65Hz와 125Hz의 저주파수 영역에서 허용 편차 범위를 벗어나는 결과를 보인 것에 대해서는 향후 장비의 반무향실에 대한 개선을 통해 해결해야 할 과제라고 판단된다.

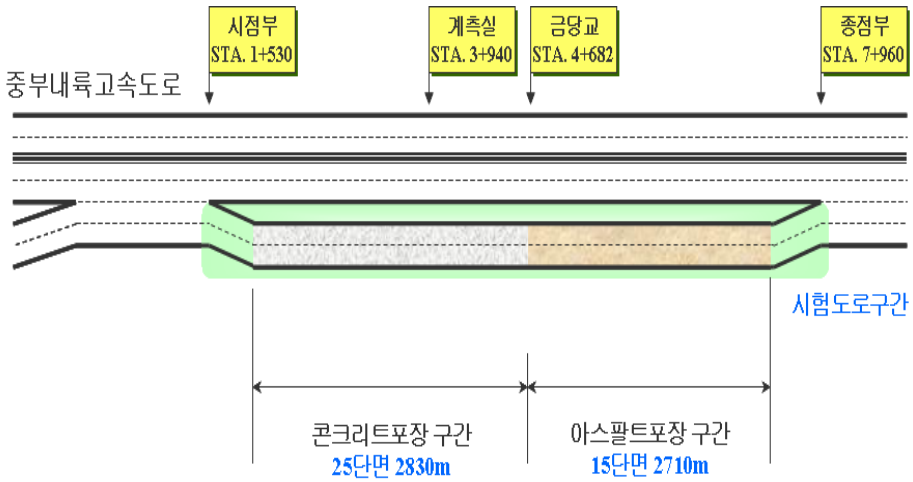
4) 본 검증 시험을 통해, HEART CPX Trailer 장비의 각 주파수 대역별에 따른 적합성 및 신뢰도를 확인할 수 있었으며, 도로 소음 및 포장 표면에 대한 평가를

목적으로 하는 장비로서 적합하다고 판단된다.

바. 현장 시험 및 결과 분석

현장에서의 HEART CPX Trailer 소음 측정 장비를 활용한 표면 처리 공법 및 조직에 따른 음압레벨의 차이를 조사하기 위해 '중부 내륙 고속도로'에 위치한 '시험도로'를 시험 구간으로 지정하였다. 본 시험도로는 한국도로공사에서 시공한 것으로 평상시에는 차량이 이용하지만 실험을 위해서는 차량을 본선으로만 진행시키는 국내 유일의 시험 구간이다. 본 구간은 <그림 3.6.87>와 같이 아스팔트와 콘크리트 포장이 모두 시공되어 있으며, 본 연구에서는 <표 3.6.21>에 보인 바와 같이 일부구간(콘크리트 표면 처리별 4개 구간과 비교를 위한 아스팔트 1개 구간)에 대한 시험을 진행하였다. 본 시험은 도로 소음 측정법으로서의 CPX 측정법에 대해 기존의 CPB 소음 측정법과 비교・분석을 수행함으로써 그 타당성 및 현장 적용성을 검증하기 위한 목적으로 진행되었다.

본 시험에 앞서, HEART CPX Trailer 장비의 측정 정확도에 대한 검증을 위해 특정 구간에 대한 반복측정 시험을 수행하였다. 본 시험에서는 HEART CPX Trailer 측정 장비를 이용하여 각 표면 처리 구간별로 하중 및 속도 변화에 따른 소음 분석을 실시하였다. 또한 HEART CPX 측정용 타이어와 동일한 타이어를 장착한 승용차(SM 5)를 이용하여 표면 처리 구간별로 동일 조건으로 CPB 방식에 의한 실외소음을 분석함으로써 그 결과를 CPX 측정 결과와 비교・평가하였다. 소음 측정시 '시험도로' 진행방향 좌측의 '중부내륙 고속국도' 본선에서는 실제 교통소음이 존재함으로써 기존의 CPB 측정법에 대한 CPX 측정법의 타당성을 비교 검증할 수 있었다. 또한 속도, 하중 및 표면처리 조건에 따라서 타이어/노면 소음 및 환경소음이 전체 도로소음에 어떠한 영향을 미치는가를 알아보고자 하였다.



<그림 3.6.87> 한국도로공사의 시험도로 단면 구성도

<표 3.6.21> 시험도로 단면별 표면처리

단면 번호	슬래브 번호	소음 및 미끄럼 저항 측정 위치	표면처리
J9	A01 ~ A14		25mm 횡방향 타이닝
J8	B01 ~ B14		
CRCP(C1, C2, C3)	번호 구분 없음		
J6	C01 ~ C15		
J7	D01 ~ D16		
J5	E01 ~ E24	E3 ~ E4	
J5-1	F01 ~ F13		
J5-2	G01 ~ G19		
J5-3	H01 ~ H12		
J5-4	I01 ~ I26		
J3	J01 ~ J03		
J3	J04 ~ J18	J14 ~ J15	18mm 종방향 타이닝
J4	L01 ~ L14		
J4	L15 ~ L16		26mm 종방향 타이닝
J2	K01 ~ K20		
J1	M01 ~ M17	M12 ~ M13	
J10	M18 ~ M23		임의간격 횡방향타이닝
J11	N01 ~ N19		
J12	O01 ~ O17		
J15	P01 ~ P23		
J14	Q01 ~ Q02		
J15	R01 ~ R21	R05 ~ R06 (예비 시험) R08 ~ R09 (본 시험)	
J14	Q01 ~ Q02		
J13	S01 ~ S14		
J4-0	T01 ~ T14		25mm 횡방향 타이닝
J5-0	U01 ~ U21		
J6-0	V01 ~ V16		
		아스팔트	아스팔트 포장

(1) 장비 정밀도 검증을 위한 반복 측정 시험

본 연구에서는 제작한 HEART CPX Trailer 소음 측정 장비의 정밀도 검증을 위해 '시험도로'에 위치한 임의간격 횡방향 타이닝 구간을 선정하여 특정 슬래브(R05~R06)에 대해 반복 측정 시험 및 결과 분석을 수행하였다.

(가) HEART CPX Trailer 반복 소음 측정 방법

반복 소음 측정 시험은 측정 결과에 대한 통계적인 분석 시, '중심극한정리(CLT)' 이론을 적용하기 위해 각각의 속도에 대해 30회씩 수행하였으며, 측정용 바퀴에 재하되는 하중은 420kgf으로 하였다. 다음 <표 3.6.22>은 반복측정 시험 결과를 각각의 속도 및 마이크로폰위치 별로 나타낸 것이다.

(나) 반복소음 측정 시험 결과 분석

본 연구에서는 HEART CPX Trailer 소음 측정 장비의 정밀도에 대한 정보를 추측하기 위해 통계적 추정(Statistical estimation)을 수행하였다. 장비를 통해 실제로 측정되어지는 마이크로폰별 또는 구간별 음압레벨 값들의 분포는 먼저 그 형태에 따라 구분되고, 이는 다시 해당분포의 특성을 나타내는 고유의 상수에 의해 구체적으로 결정된다. 이때, 분포를 구체적으로 특징짓는 고유의 상수를 모수(parameter)라 한다. 모수적 방법을 통한 통계적 추론은 확률표본으로부터 얻어진 측정값을 이용하여 HEART CPX Trailer 장비의 정밀도에 대한 정보를 추측하는 통계적 절차를 의미한다.

<표 3.6.22> 속도에 따른 반복측정 시험 결과

측정 횟수	소음 측정값(dB(A))														
	40km/h					60km/h					80km/h				
	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	횟수별 평균	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	횟수별 평균	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	횟수별 평균
1	88.1	87.4	88.5	86.5	87.63	95.4	94.1	95.8	93.0	94.58	100	99.4	102	99.9	100.3
2	87.7	86.7	88.1	86.1	87.15	95.5	93.9	95.9	93.2	94.63	102	101	103	102	102.0
3	88.2	87.6	88.4	86.9	87.78	96.0	94.9	96.5	94.5	95.48	101	100	103	101	101.3
4	88.6	87.9	89.2	87.4	88.28	96.2	95.0	96.9	94.7	95.70	102	102	103	102	102.3
5	89.2	88.4	89.7	87.9	88.80	96.8	95.6	97.6	95.3	96.33	102	101	103	102	102.0
6	88.5	87.6	88.9	87.1	88.03	97.5	96.7	97.9	96.8	97.23	100	99.2	101	99.8	100.0
7	89.9	88.6	90.2	88.3	89.25	98.2	96.5	98.2	96.8	97.43	102	101	103	101	101.8
8	89.7	89.0	89.7	88.1	89.13	96.2	95.0	97.4	95.0	95.90	102	101	103	102	102.0
9	90.5	89.0	90.2	89.0	89.75	97.0	96.2	97.6	96.1	96.73	102	100	102	100	101.0
10	87.9	86.7	88.2	85.9	87.18	95.6	94.2	96.7	94.5	95.25	100	99.0	101	99.2	99.80
11	89.9	88.9	90.6	88.4	89.45	95.1	94.3	95.8	93.6	94.70	101	99.8	102	100	100.7
12	88.6	87.7	88.5	86.8	87.90	95.4	94.5	96.6	94.3	95.20	103	102	103	102	102.5
13	88.0	87.1	88.3	86.7	87.53	96.4	95.9	97.7	95.7	96.43	101	100	103	101	101.3
14	89.5	88.2	90.3	88.8	89.20	97.6	96.8	98.1	96.5	97.25	102	101	103	102	102.0
15	90.5	89.4	90.8	89.0	89.93	97.1	96.2	98.0	96.1	96.85	103	102	104	103	103.0
16	91.9	90.9	92.2	90.9	91.48	97.3	95.9	98.0	95.9	96.78	101	100	102	100	100.8
17	90.4	88.7	90.5	88.9	89.63	96.4	95.0	97.2	94.7	95.83	102	101	102	100	101.3
18	89.6	88.4	90.4	87.7	89.03	97.3	95.9	98.0	95.3	96.63	101	101	103	101	101.5
19	89.5	88.4	90.3	88.0	89.05	98.7	97.1	99.4	97.4	98.15	103	102	103	102	102.5
20	91.0	89.2	90.9	88.8	89.98	97.8	96.5	98.4	96.6	97.33	101	100	102	99.9	100.7
21	92.4	91.3	92.5	90.5	91.68	98.8	97.5	98.7	97.6	98.15	102	101	103	101	101.8
22	89.5	88.6	90.1	87.6	88.95	97.6	96.6	98.4	96.2	97.20	102	101	103	102	102.0
23	90.6	89.1	91.2	88.8	89.93	98.4	97.8	98.7	97.3	98.05	102	101	103	102	102.0
24	89.9	87.9	89.6	87.3	88.68	98.9	97.5	98.8	97.5	98.18	101	99.8	102	100	100.7
25	92.4	91.0	92.5	91.5	91.85	98.0	97.1	98.4	96.8	97.58	103	102	104	103	103.0
26	91.2	90.1	91.3	89.3	90.48	98.9	97.8	99.2	97.7	98.40	102	101	103	102	102.0
27	88.6	87.5	88.8	86.5	87.85	98.1	96.9	98.8	97.1	97.73	101	100	102	101	101.0
28	89.5	88.6	90.0	87.4	88.88	99.1	97.7	99.5	97.8	98.53	103	102	103	102	102.5
29	91.5	90.5	91.4	89.9	90.83	99.7	98.1	99.9	98.4	99.03	102	101	104	102	102.3
30	89.7	88.2	90.2	88.0	89.03	99.1	98.3	100.0	98.8	99.05	101	99.5	102	100	100.6

본 연구에서는 HEART CPX Trailer 장비를 통한 측정값들이 어떠한 분포를 나타낼지에 대한 정보가 없었기 때문에 '중심극한정리(Central Limit Theorem : CLT)'를 적용하였다. 즉, CLT에 의하면, 실제 분포에 대한 확신이 없거나 정규분포가 아닌 경우라 할지라도 측정한 결과값(표본)들의 크기가 충분히 큰 대표본이라면 측정값들의 분포는 정규분포를 가정해도 무방하다는 것이다. 다음 <표 3.6.23>은 수행한 반복측정 시험 결과들에 대한 유형별 통계량(statistic)들을 정리한 것이며, 여기서 통계량은 표본, 즉 측정결과 값들로부터 얻는 특성값들을 의미한다.

<표 3.6.23> 각 속도별 측정값으로부터 얻은 통계량

통계량	40km/h					60km/h					80km/h				
	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	구간 평균	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	구간 평균	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	구간 평균
평균	89.75	88.62	90.06	88.13	89.14	97.34	96.18	97.94	96.04	96.87	101.7	100.7	102.7	101.2	101.6
분산	1.71	1.46	1.57	1.92	1.61	1.71	1.68	1.33	2.32	1.70	0.78	0.83	0.57	1.11	0.72
표준편차	1.31	1.21	1.25	1.39	1.27	1.31	1.30	1.15	1.52	1.30	0.88	0.91	0.76	1.06	0.85

<표 3.6.22>과 <표 3.6.23>에 나타난 반복측정 시험 결과에서 알 수 있듯이 R05~R06 구간에서의 주행속도 40km/h, 60km/h, 80km/h에 따른 HEART CPX Trailer의 소음 측정값 평균의 점추정 값은 각각 89.14dB(A), 96.87dB(A), 101.6dB(A)을 나타내었다. 또한 측정값 분포의 퍼짐성을 결정하는 분산값의 경우, 전체적으로 속도에 관계없이 우수한 측정 정밀도를 보였다. 특이할 사항으로는 저속인 40km/h와 60km/h에서는 비슷한 정밀도를 나타내었던 것과는 달리 고속인 80km/h의 경우에는 평균값을 중심으로 그 편차가 현저히 줄어듦을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 주행속도에 관계없이 도로소음 측정을 수행함에 있어 HEART CPX Trailer의 정밀도가 우수함을 나타내는 것이며, 특히 저속보다는 고속주행에서 그 정밀도가 향상된다는 사실을 확인할 수 있었다.

(2) 현장 도로소음 측정 시험

(가) 단독차량(승용차) controlled pass-by 소음 측정 결과

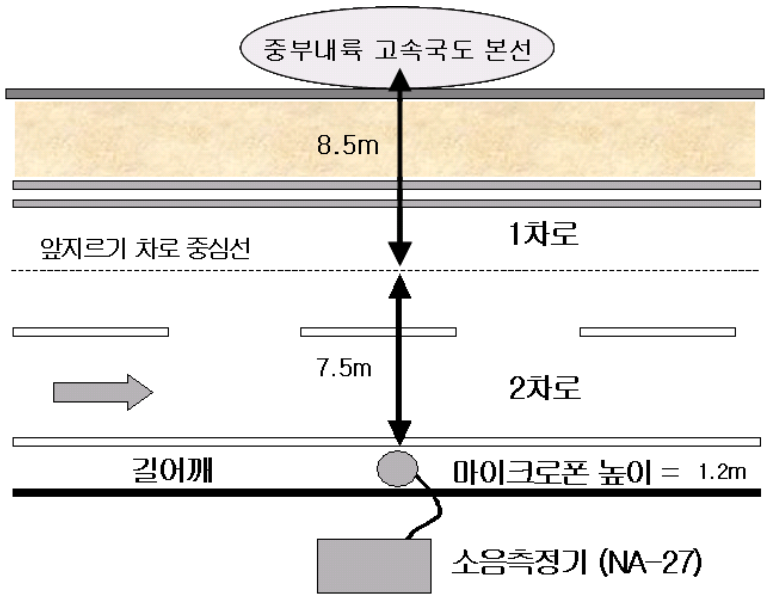
대상 구간별 단독차량 pass-by법에 따른 실외소음은 <그림 3.6.88>와 같이 차량 주행 차로의 중앙으로부터 7.5m 떨어진 곳에 소음기를 설치하고 높이는 1.2m로 하여 ISO의 실외 소음 측정 기준에 준하여 시험을 수행하였으며, 중부내륙 고속국도 본선으로부터는 약 16m 이격되어 설치되었다. 콘크리트 표면 처리별 4개 구간과 아스팔트 1개 구간을 지정하여 총 5가지 구간에 대해서 40km/h, 60km/h, 80km/h의 속도로 승용차에 대해서 엔진 가동 및 정지에 대해 각각 2회씩 실외소음을 측정하였으며, 시험용 차량으로는 'SM 5'를 선정하였다.

<표 3.6.24>와 <표 3.6.25>은 승용차에 대해서 CPB 측정법(단독차량)을 통해 표

면 처리 구간별 속도 변화에 따른 실외소음 평균값을 나타낸 것이다.

<표 3.6.24> 표면에 따른 속도별 단독차량 CPB 소음 측정 결과

표면 처리 방법	소음 측정값(dBA) 승용차 실외 소음		
	40km/h	60km/h	80km/h
일정간격 18mm 종방향	74.0	75.2	80.3
	76.2	77.6	79.6
평균	75.1	76.4	79.95
일정간격 26mm 종방향	74.3	78.6	81.0
	75.9	79.1	82.5
평균	75.1	78.85	81.75
일정간격 25mm 횡방향	72.4	80.8	82.4
	73.9	80.5	81.8
평균	73.15	80.65	82.1
임의간격 횡방향	75.0	79.7	80.7
	74.3	80.9	82.1
평균	74.65	80.3	81.4
아스팔트 구간	72.0	74.9	77.0
	73.5	73.8	78.2
평균	72.75	74.35	77.6



<그림 3.6.88> 승용차 실외소음 측정 개요 및 소음기 위치도

<표 3.6.25> 표면에 따른 속도별 단독차량 CPB 소음 측정 결과(엔진 정지)

표면 처리 방법	소음 측정값(dBA)		
	승용차 실외 소음		
	40km/h	60km/h	80km/h
일정간격	74.9	75.1	78.8
18mm 종방향	69.1	74.8	78.9
평균	72	74.95	78.85
일정간격	78.7	80.1	78.4
26mm 종방향	76.5	79.3	79.1
평균	77.6	79.7	78.75
일정간격	73.3	77.1	82.8
25mm 횡방향	74.4	77.6	84.6
평균	73.85	77.35	83.7
임의간격	79.4	76.2	80.6
횡방향	80.1	76.8	82.5
평균	79.75	76.5	81.55
아스팔트	73.3	74.9	78.4
구간	72.8	75.2	79.7
평균	73.05	75.05	79.05

(나) CPX Trailer 장비를 이용한 소음 측정 및 결과 분석

본 연구에서 개발된 HEART CPX Trailer 장비를 현장에 적용하여 '중부 내륙 고속국도' 내의 시험도로 구간에서 소음 측정을 실시하였다.

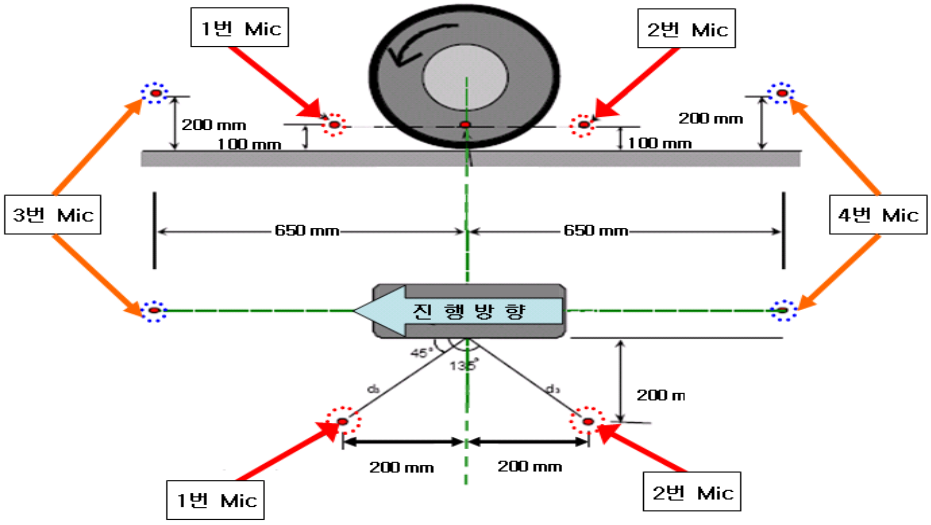
HEART CPX Trailer 장비를 이용한 측정에서는 CPB 측정 방법과의 비교를 목적으로 동일한 측정용 타이어 및 하중조건을 적용하였으며, 속도 변화에 따른 변화를 측정하였다. 또한, 타이어 하중에 따른 도로 소음의 영향을 분석하기 위해 100kgf의 추가하중을 가한 상태에서도 시험하였다.

① 승용차와 동일 하중 조건인 경우

HEART CPX Trailer 소음측정 장비를 이용하여 전술한 '단독차량 CPB 소음 측정'과 동일한 조건으로(속도별, 구간별) 승용차 하중 하(420kgf)에서 소음을 측정하였다. <그림 3.6.89>와 <그림 3.6.90>은 측정용 타이어의 하중 조건을 setting 하는 모습과 Trailer의 진행방향에 따른 측정용 마이크로폰의 위치를 보여주고 있으며, <그림 3.6.91>은 HEART CPX Trailer 장비를 이용하여 도로 소음을 측정하는 장면을 나타내고 있다.



<그림 3.6.89> 측정용 타이어 하중 조건의 Setting



<그림 3.6.90> CPX Trailer 장비를 이용한 소음 측정 장면



<그림 3.6.91> CPX Trailer 장비를 이용한 소음 측정 장면

다음의 <표 3.6.26>~<표 3.6.27>는 조건별 도로 소음 측정 결과를 정리한 것이다.

<표 3.6.26> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (420kgf)

표면 처리 방법	소음 측정값(dBA)											
	40km/h				60km/h				80km/h			
	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.
일정간격 18mm 종방향	87.4	87.2	89.4	86.9	92.8	92.8	94.6	92.5	98.3	98.0	101	98.7
	87.8	87.7	89.3	87.4	93.2	92.8	94.5	92.6	97.5	97.9	99.9	98.1
	89.1	88.9	90.4	88.4	93.5	93.1	95.4	93.3	97.9	97.6	100	98.0
	87.9	87.6	89.4	87.1	94.3	94.2	95.9	93.9	98.0	98.0	100	98.1
평균	88.05	87.85	89.63	87.45	93.45	93.23	95.1	93.08	97.93	97.88	100.2	98.23
전체평균	88.25				93.72				98.56			
일정간격 26mm 종방향	89.7	88.5	91.2	88.6	94.5	94.0	96.3	93.7	101	101	104	102
	86.6	87.2	88.7	87.7	97.0	96.5	98.4	96.0	102	102	105	103
	90.8	90.9	92.8	90.8	93.9	93.7	96.1	93.6	101	101	104	101
	88.4	89.1	90.2	89.0	98.7	98.0	99.5	97.8	100	100	102	100
평균	88.88	88.93	90.73	89.03	96.03	95.55	97.58	95.28	101	101	103.8	101.5
전체평균	89.39				96.11				101.83			
일정간격 25mm 횡방향	89.7	89.5	91.6	89.8	94.9	94.3	96.0	94.3	100	99.8	102	100
	89.9	89.8	91.6	89.9	95.4	95.5	97.3	95.5	99.8	100	102	101
	88.8	88.6	90.5	88.6	95.5	96.4	98.2	96.6	100	100	103	101
	90.8	90.7	91.9	90.1	96.6	96.6	98.5	97.1	99.2	99.4	102	99.7
평균	92.05	89.65	91.4	89.6	95.6	95.7	97.5	95.88	99.75	99.8	102.3	100.2
전체평균	90.68				96.17				100.51			
임의간격 횡방향	88.1	87.8	89.0	86.9	96.8	96.4	98.3	96.6	101	100	102	101
	90.1	89.1	91.5	88.5	97.4	97.4	98.0	95.7	101	101	103	102
	91.9	92.0	91.5	91.5	98.0	96.9	99.0	97.2	101	101	103	102
	89.1	88.0	90.0	86.9	96.7	96.1	98.5	97.0	105	104	106	105
평균	89.8	89.23	90.5	88.45	97.23	96.7	98.45	96.63	102	101.5	103.5	102.5
전체평균	89.5				97.25				102.38			
아스팔트 구간	86.0	85.4	87.4	84.3	92.0	91.7	93.5	89.0	97.0	96.9	99.2	95.6
	84.1	83.4	85.6	82.0	91.6	92.3	93.5	90.0	95.9	95.6	98.3	94.6
	86.7	86.3	88.1	84.9	92.0	91.6	93.3	89.5	97.4	96.8	99.0	95.5
	84.4	83.7	86.3	82.8	91.4	90.9	92.9	89.2	97.3	97.4	100	96.2
평균	85.3	84.7	86.85	83.5	91.75	91.63	93.3	89.43	96.9	96.68	99.13	95.48
전체평균	85.09				91.53				97.05			

<표 3.6.27> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (엔진 정지 420kgf)

표면 처리 방법	소음 측정값(dBA)											
	40km/h				60km/h				80km/h			
	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.
일정간격	86.8	86.5	88.1	86.0	91.8	91.7	94.2	92.5	97.1	96.5	98.5	97.0
18mm 종방향	87.1	86.6	88.6	86.2	92.1	92.3	94.6	92.1	-	-	-	-
평균	86.95	86.55	88.35	86.1	91.95	92.0	94.4	92.3	97.1	96.5	98.5	97.0
전체평균	87.49				92.66				97.28			
일정간격	89.3	89.2	90.7	89.6	93.8	94.3	97.3	94.3	99.8	99.9	101	99.6
26mm 종방향	89.7	88.5	91.2	88.6	93.5	92.9	96.2	94.8	-	-	-	-
평균	89.5	88.85	90.95	89.1	93.65	93.6	96.75	94.55	99.8	99.9	101	99.6
전체평균	89.6				94.64				100.08			
일정간격	84.9	84.7	86.4	84.7	93.9	92.5	95.3	93.6	101	100	103	101
25mm 횡방향	88.5	88.6	90.5	88.4	93.1	93.0	95.8	93.1	-	-	-	-
평균	86.7	86.65	88.45	86.55	93.5	92.75	95.55	93.35	101	100	103	101
전체평균	87.09				93.79				101.25			
임의간격	87.3	86.5	88.2	86.3	93.0	92.4	94.7	92.4	100	100	102	100
횡방향	89.0	88.2	90.3	87.8	94.0	93.3	95.7	93.9	101	101	103	101
평균	88.15	87.35	89.25	87.05	93.5	92.85	95.2	93.15	100.5	100.5	102.5	100.5
전체평균	87.95				93.68				101.0			
아스팔트	83.5	83.0	84.8	81.6	90.9	90.9	92.5	88.5	96.0	95.6	98.1	94.5
구간	82.8	81.8	84.2	81.5	89.9	89.8	91.5	88.1	94.9	94.5	96.9	93.0
평균	83.15	82.4	84.5	81.55	90.4	90.35	92	88.3	95.45	95.05	97.5	93.75
전체평균	82.9				90.26				95.44			

② 하중 조건을 변화시킨 경우

도로 소음에 대한 차량 하중의 영향에 대해 알아보기 위해서 CPX Trailer 소음 측정용 타이어에 재하 하중의 크기를 100kgf 증가(520kgf)시켜 '단독차량 CPB 소음 측정'과 동일한 조건으로(속도별, 구간별) 소음 변화를 측정하였다. <표 3.6.28>~<표 3.6.29>은 조건별 도로 소음 측정 결과를 정리한 것을 보여주고 있다.

<표 3.6.28> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (520kgf)

표면 처리 방법	소음 측정값(dBA)											
	40km/h				60km/h				80km/h			
	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.
일정간격 18mm 종방향	87.6	87.6	89.5	87.5	94.3	93.9	96.3	94.3	안전 상의 문제로 미측정 (곡선부)			
	88.5	88.0	90.6	88.7	93.3	93.4	95.6	94.1				
	90.6	90.3	92.0	90.3	93.1	93.2	95.5	93.1				
	85.5	85.3	87.9	85.5	94.1	93.5	96.4	94.6				
평균	88.05	88.45	90.0	88.0	93.7	93.5	95.95	94.03				
전체평균	88.63				94.3				-			
일정간격 26mm 종방향	91.7	91.3	93.8	91.7	95.3	95.6	97.7	96.2	안전 상의 문제로 미측정 (곡선부)			
	89.0	89.5	91.5	89.9	94.7	95.0	97.4	95.8				
	91.1	91.0	92.9	91.1	94.6	94.8	97.4	95.6				
	86.9	86.8	88.3	87.1	95.2	95.0	97.5	95.5				
평균	89.68	89.65	91.63	89.95	94.95	95.1	97.5	95.78				
전체평균	90.23				95.83				-			
일정간격 25mm 횡방향	89.5	88.2	90.9	89.6	96.4	96.5	98.2	96.1	안전 상의 문제로 미측정 (곡선부)			
	91.2	90.9	93.2	90.9	97.5	97.0	99.4	97.7				
	90.6	89.9	92.1	90.4	95.7	95.3	98.0	96.0				
	90.0	90.4	92.0	90.3	96.1	95.4	98.3	96.2				
평균	90.33	89.85	92.05	90.3	96.43	96.05	98.48	96.5				
전체평균	90.63				96.87				-			
임의간격 횡방향	91.9	91.2	93.5	92.3	97.5	97.4	99.6	98.0	100	99.9	103	101
	92.4	91.3	93.4	92.0	98.2	97.6	101	99.1	102	101	104	102
	90.3	89.3	91.5	90.0	96.3	95.3	98.6	96.5	101	101	103	102
	90.5	89.3	91.8	89.9	98.1	97.6	101	98.9	102	101	104	102
평균	91.28	90.28	92.55	91.05	97.53	96.98	100.1	98.13	101.3	100.7	103.5	101.8
전체평균	91.29				98.19				101.83			
아스팔트 구간	86.6	85.3	88.0	86.6	92.7	92.7	94.6	91.1	96.4	96.3	99.6	95.7
	86.1	85.3	87.9	83.9	91.6	91.5	93.8	89.9	96.3	96.9	99.0	95.9
	87.6	86.5	88.7	85.8	92.8	92.7	94.9	91.1	96.2	96.0	99.4	96.2
	86.7	85.8	88.2	85.0	92.9	92.9	95.1	91.7	-	-	-	-
평균	86.75	85.73	88.2	85.33	92.5	92.45	94.6	90.95	96.3	96.4	99.3	95.9
전체평균	86.5				92.63				96.98			

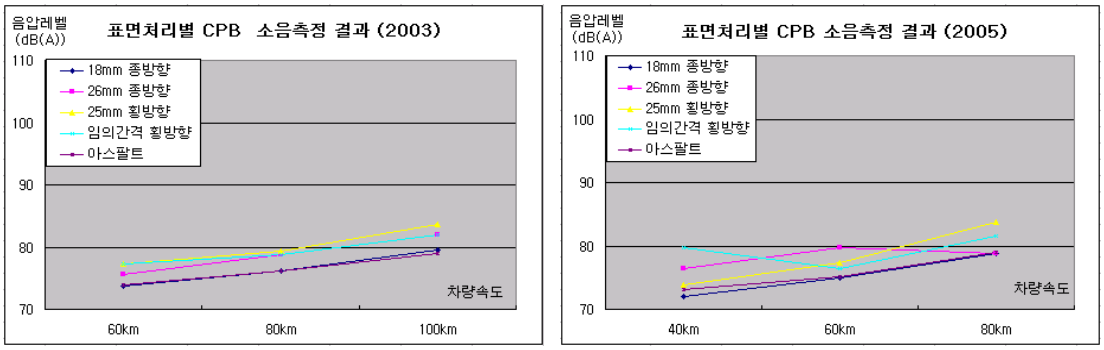
<표 3.6.29> 표면에 따른 속도별 CPX 소음 측정 결과 (520kgf)

표면 처리 방법	소음 측정값(dBA)											
	40km/h				60km/h				80km/h			
	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.	1번 Mic.	2번 Mic.	3번 Mic.	4번 Mic.
일정간격	87.7	87.3	89.2	87.0	92.8	92.6	95.2	93.1	안전 상의 문제로 미측정 (곡선부)			
18mm 종방향	85.7	85.5	87.3	85.8	92.7	93.0	95.2	93.1				
평균	86.7	86.4	88.25	86.4	92.75	92.8	95.2	93.1				
전체평균	86.94				93.46				-			
일정간격	88.1	87.9	90.3	88.4	95.2	95.3	97.8	95.8	안전 상의 문제로 미측정 (곡선부)			
26mm 종방향	87.9	88.3	89.9	88.6	94.9	94.8	97.5	95.8				
평균	88.0	88.1	90.1	88.5	95.05	95.05	97.65	95.8				
전체평균	88.68				95.89				-			
일정간격	88.5	88.3	90.7	90.1	94.4	94.0	96.8	94.6	안전 상의 문제로 미측정 (곡선부)			
25mm 횡방향	90.0	89.3	91.8	89.9	95.6	95.5	98.3	95.6				
평균	89.25	88.8	91.25	90.0	95.0	94.75	97.55	95.1				
전체평균	89.83				95.6				-			
임의간격	88.2	87.1	89.4	88.1	94.8	94.6	97.3	95.1	101	101	103	102
횡방향	87.9	86.7	89.1	87	96.6	96.6	99.1	97.6	101	101	103	102
평균	88.05	86.9	89.25	87.55	95.7	95.6	98.2	96.35	101	101	103	102
전체평균	87.94				96.46				101.75			
아스팔트	85.0	84.5	86.5	83.7	92.0	91.9	94.0	90.2	97.4	97.6	101	97.6
구간	83.2	82.7	85.3	82.5	90.7	90.5	92.6	89.2	95.5	94.7	98.2	94.0
평균	84.1	83.6	85.9	83.1	91.35	91.2	93.3	89.7	96.45	96.15	99.6	95.8
전체평균	84.18				91.38				97.0			

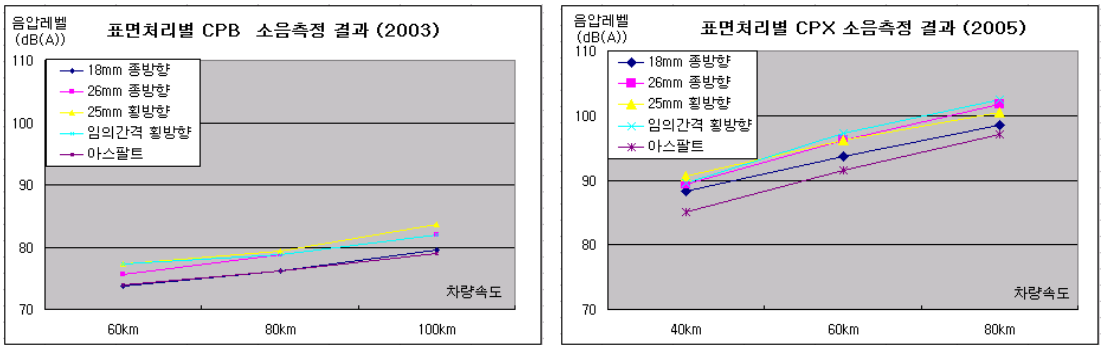
③ 결과 분석

HEART CPX 장비를 이용한 각 조건별 도로 소음의 측정 결과는 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 본 연구에서 수행한 CPB 방법에 의한 도로소음 측정 결과는 교통 개방 전(2년 전) 중앙대학교에서 수행하였던 결과와는 달리 주변 교통 및 환경소음의 영향으로 표면 처리 공법별 일정한 경향을 보이지 않았다. <그림 3.6.92>는 교통 개방 전과 후의 차이에 따른 CPB 방법에 의한 소음 측정 결과를 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 교통개방 상태에서의 CPB 측정법은 결과에 대한 신뢰도가 매우 떨어짐을 확인할 수 있었다.



<그림 3.6.92> 표면처리별 CPB 측정법에 따른 소음 측정 결과(좌:교통 개방 전, 우:교통 개방 후)



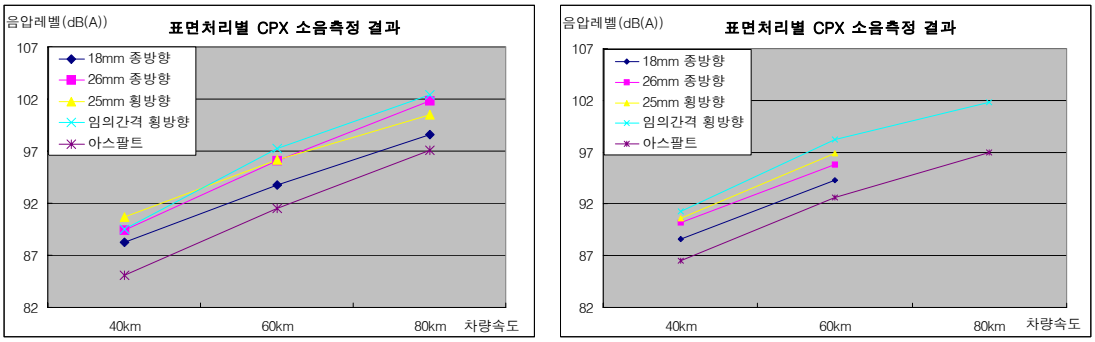
<그림 3.6.93> 표면처리별 측정법에 따른 소음 측정 결과(좌:CPB 측정법(교통 개방 전), 우:HEART CPX Trailer(교통 개방 후))

2) CPB 측정법과 동일한 조건(바퀴하중, 속도, 표면처리공법 등)하에서 수행한 HEART CPX Trailer에 의한 도로소음 측정 결과는 <그림 3.6.93>에서와 같이 교통 개방 전에 수행하였던 CPB 측정 결과와 유사한 경향을 보였으며 측정 속도가 증가함에 따라 음압레벨도 증가하였다. 이는 견인차량의 기계소음을 비롯한 공용중인 도로 주변의 환경소음으로부터 영향을 거의 받지 않음을 확인할 수 있는 예라 판단된다. 따라서 HEART CPX Trailer 장비를 활용한다면 공용 중에도 객관적인 소음 측정이 가능함을 확인할 수 있었다.

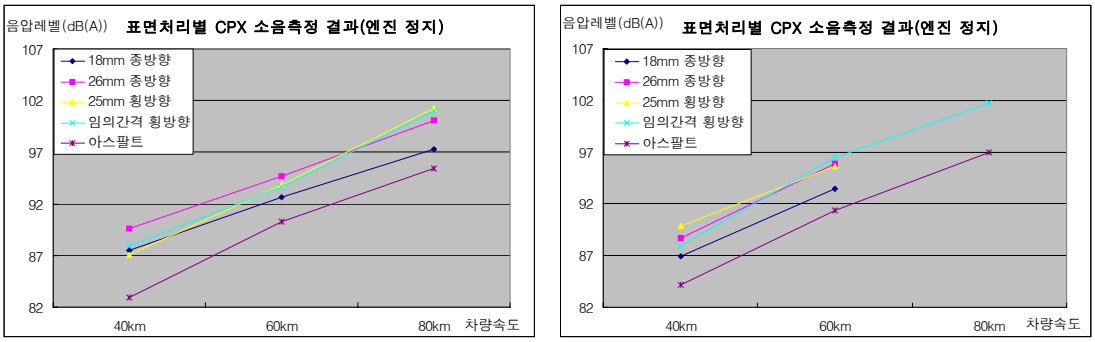
3) HEART CPX Trailer 장비를 적용한 도로 소음 측정의 경우, 다른 조건이 동일한 상태에서 측정용 타이어에 재하되는 하중을 달리 적용하였을 때의 결과를 <그림 3.6.94>~ <그림 3.6.95>에 나타내었다. <그림 3.6.94>~ <그림 3.6.95>에

서 보듯이 견인차량의 엔진의 작동 여부에 관계없이 재하되는 바퀴하중이 증가할수록 발생하는 도로 소음의 음압레벨도 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나 동일 바퀴하중 하에서 엔진 정지시의 음압레벨이 엔진 가동시의 음압레벨보다 약간 작은 것으로 보아 소음측정시 견인차량의 엔진소음이 완전히 배제되지는 않음을 확인할 수 있었다.

4) 공용 전 또는 공용 후에 관계없이 HEART CPX Trailer 장비를 적용한 소음측정법은 포장 표면 특성별, 하중별, 차량속도별에 따라 일정한 경향을 보였으며, 이러한 결과는 각 조건마다 불규칙한 경향을 보였던 교통개방 중에 수행한 CPB 측정과는 매우 상이한 것이었다. 따라서 도로 소음특성을 평가하는데 있어 HEART CPX Trailer 장비를 이용하는 방법이 현재 통용되고 있는 CPB 측정법에 비해 적절하다고 판단된다.

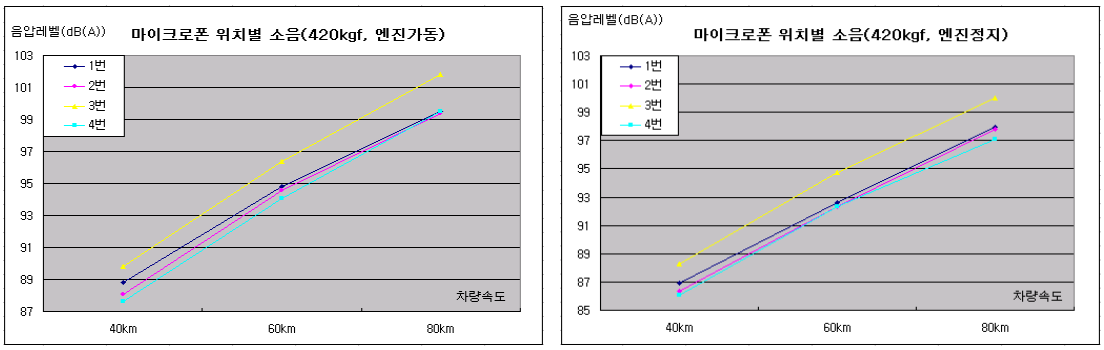


<그림 3.6.94> 표면처리별 바퀴하중에 따른 소음 측정 결과(엔진 가동 시, 좌:420kgf 재하, 우:520kgf 재하)

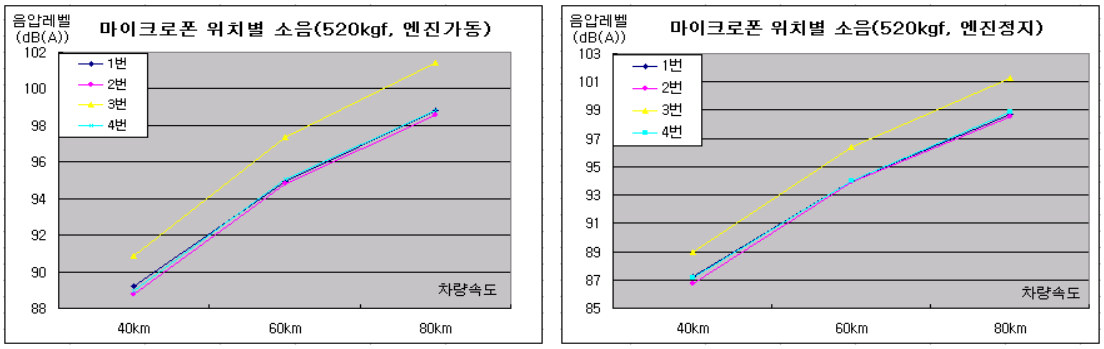


<그림 3.6.95> 표면처리별 바퀴하중에 따른 소음 측정 결과(엔진 정지 시, 좌:420kgf 재하, 우:520kgf 재하)

5) HEART CPX Trailer 장비를 적용한 도로 소음 측정에서 각 위치별 마이크로폰의 측정값을 비교해 본 결과를 <그림 3.6.96>~ <그림 3.6.97>에 나타냈다. 3번 마이크로폰(optional, 타이어 전방)의 경우 엔진가동 여부 및 타이어 하중에 관계없이 타 마이크로폰들에 비해 큰 음압레벨이 측정되었다. 평균적으로는 3번, 4번(optional, 타이어 후방), 1번(mandatory, 타이어 측면 전방 45°), 2번(mandatory, 타이어 측면 후방 45°) 마이크로폰의 순으로 측정되었다. 이러한 결과는 측정용 타이어가 노면에 접촉하면서 발생하는 '타이어/노면' 소음은 접촉 순간의 타이어 전면에서 발생하는 충격음으로부터의 영향이 노면에서 떨어져 나갈 때의 발생 음보다 크기 때문인 것으로 판단된다. 또한 측면에서의 소음보다 측정용 타이어 전·후면에서 측정되는 음압레벨이 더욱 큰 수치를 나타냈다.



<그림 3.6.96> 마이크로폰 위치에 따른 소음 측정 결과(420kgf, 좌:엔진 가동 시, 우:엔진 정지 시)



<그림 3.6.97> 마이크로폰 위치에 따른 소음 측정 결과(420kgf, 좌:엔진 정지 시, 우:엔진 정지 시)

(a) 엔진 가동 시 (b) 엔진 정지 시

(다) CPX Trailer 장비 암소음(background noise) 측정 및 결과 분석

CPX Trailer를 이용하여 측정용 타이어와 포장 표면의 접합부에서 발생하는 소음을 측정할 때 실제 환경소음의 영향을 받는지, 즉 HEART CPX 장비를 활용한 도로 소음 측정의 신뢰성 여부를 알아보기 위해서 HEART CPX 장비의 암소음 측정을 통해 실제 도로 주행시의 측정 음압과 비교해 보았다. 또한, Trailer 내의 측정용 타이어와 노면 간의 접합부에서 발생하는 고유 음압레벨을 측정하기 위해서는 암소음에 대한 보정이 필요하다. 각 마이크로폰 위치 및 각 주파수 대역에서의 암소음 레벨 L''_{pi}가 실제 도로를 주행하면서 발생하는 측정음압 레벨 L'_{pi}보다도 15dB부터 10dB의 범위로 낮은 경우에는 암소음의 영향에 대해 L'_{pi}의 값을 보정한다. 암소음 보정값 K_1은 다음의 식으로 구한다.(KS A ISO 3745)

$$K_1 = -10lg(1-10^{-0.1\triangle L}) \qquad \text{(식 3.7.5)}$$

여기에서 △L : L'_{pi} - L''_{pi}

이때 암소음 레벨이 실제 주행시 측정음압레벨보다 15dB 이하 낮은 경우에는 보정하지 않는다. 암소음과 도로주행 시 측정음압의 각 측정점 및 각 주파수 대역에서의 음압레벨과의 차이가 10dB 이내인 경우에는 이 측정으로부터 얻어진 값의 정밀도는 저하된다.

<표 3.6.30>은 HEART CPX 장비의 암소음 레벨을 3회 측정한 결과를 나타내고 있다. 표에서 알 수 있듯이 전체 음압레벨(sum)이 가장 크게 나온 3번째 측정에서 각 중심주파수별 암소음 레벨도 대부분 가장 크다는 것을 확인할 수 있다. 이를 실제 도로주행 시 측정 음압과 비교해 보기 위해, <표 3.6.31>에서는 가장 작은 음압레벨이 측정되었던 아스팔트 구간(하중 : 420kgf, 속도 : 40km, 등속주행) 주행시의 측정값과 △L값을 나타내었다.

<표 3.6.30> 마이크로폰 위치별 암소음 측정 결과

암소음 측정값 (L''_{pi} ; dB(A))																
주파수	1번 Mic.				2번 Mic				3번 Mic				4번 Mic			
(Hz)	1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균	1회	2회	3회	평균
63	27.4	27.7	**33.2**	29.4	27.6	30.8	**31.6**	30.0	27.7	26.7	**31.4**	28.6	30.2	34.7	**32.3**	32.4
125	37.6	43.6	**46.1**	42.4	38.3	44.7	**47.2**	43.4	38.4	42.2	**45.3**	42.0	39.4	44.3	**47.9**	43.9
250	38.2	41.7	**47.6**	42.5	37.5	39.8	**49.9**	42.4	37.3	40.3	**47.1**	41.6	36.8	37.0	**44.9**	39.6
500	39.5	45.8	**52.3**	45.9	40.1	44.6	**52.2**	45.6	42.0	45.4	**52.1**	46.5	40.7	43.6	**50.1**	44.8
1000	58.6	54.3	**58.1**	57.0	55.3	54.7	**56.7**	55.6	**62.5**	56.4	59.3	59.4	**61.2**	53.5	57.3	57.3
2000	47.7	49.5	**51.3**	49.5	46.8	49.0	**52.1**	34.3	50.8	50.1	**52.1**	51.0	47.4	48.7	**51.3**	49.1
4000	35.1	37.0	**38.4**	36.9	35.1	37.0	**38.8**	37.0	35.5	37.1	**38.4**	37.0	33.8	36.2	**38.2**	36.1
8000	32.2	32.5	**32.1**	32.3	31.6	32.2	**32.2**	32.0	31.8	32.0	**32.2**	32.0	31.3	31.9	**32.1**	31.8
Sum	61.9	60.4	**65.9**	62.7	59.5	60.2	**65.2**	61.6	65.0	61.4	**66.2**	64.2	61.2	60.1	**64.8**	62.0

<표 3.6.31> 마이크로폰 위치별 최소 주행소음 측정값 및 △L값

주파수	아스팔트 구간 40km 등속주행 소음 측정값 (L'_{pi} ; dB(A))				△L : L'_{pi} - L''_{pi}			
	1번 Mic.	2번 Mic	3번 Mic	4번 Mic	1번 Mic.	2번 Mic	3번 Mic	4번 Mic
63Hz	42.0	42.7	44.9	42.3	8.8	11.1	13.5	10.0
125Hz	55.6	55.5	57.0	56.0	9.5	8.3	11.7	8.1
250Hz	66.6	60.7	64.5	66.4	**19.0**	10.8	**17.4**	**21.5**
500Hz	71.3	67.5	69.6	67.9	**19.0**	**15.3**	**17.5**	**17.8**
1000Hz	75.4	75.1	76.1	71.7	**17.3**	**18.4**	13.6	10.5
2000Hz	70.1	68.5	74.2	70.1	**18.8**	**16.4**	**22.1**	**18.8**
4000Hz	61.5	63.3	62.9	62.8	23.1	24.5	24.5	24.6
8000Hz	50.0	53.1	49.8	50.8	17.9	20.9	17.6	18.7
Sum	82.8	83.0	84.8	81.6	**16.9**	**17.8**	**18.6**	**16.8**

그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 도로 소음의 관심 주파수 대역의 전체 음압레벨 관점에서 볼 때, HEART CPX 장비의 주행 시 발생하는 도로 소음 측정 음압레벨과 암소음 측정 음압레벨의 차이가 모두 15dB 이상이었으며, 이는 본 장비를 통해 측정되는 도로 소음의 고유 음압레벨에 대한 보정이 필요 없음을 의미한다. 즉, HEART CPX를 활용한 도로 소음 측정에 대한 신뢰성을 확인할 수 있었다.

2) 도로 소음 측정시, 주파수 분석을 실시할 경우에는 2번 마이크로폰의 250Hz와 3번 및 4번 마이크로폰의 1000Hz에서 암소음 측정값과의 비교를 통해 이에 대한 보정이 필요함을 알 수 있었다.

3) 전체적으로 고주파수 대역에 비해 저주파수 대역에서는 암소음에 대한 보정이 필요한 것으로 나타났으며, 이는 전술하였던 반무향실 제작 적합성과도 일맥상통하였다.

4) 기존의 CPB 방법을 통한 포장 표면 처리에 따른 소음 저감 효과에 대한 평가는 CPX Trailer를 이용한 측정방법으로 대체해야 할 것으로 판단된다.

3. 요약

본 절에서는 기존의 관련 문헌에 대한 고찰을 통해 장비들의 장·단점 및 성능, 현장 공용성에 대한 비교 결과를 살펴봄으로써 HES의 개발에 대한 기초 자료를 수집하고 제작 목적, 과정 및 기초 검증 실험에 대하여 서술하였다. 또한 CPX 트레일러의 제작과 관련하여 기본적으로 소음원에 대한 전파 성질 및 국외의 다양한 소음측정기법 및 장비들을 고찰하였다. 또한 도로 소음 특성에 대한 문헌고찰을 통해 도로 소음측정을 함에 있어서 보다 적합한 장비를 제작하기 위해서 노력하였다.

■ 기존의 장비들의 단점을 보완하여 보다 실제와 가까운 환경을 모사함으로써 투·배수성 도로 포장의 공용성을 정량적으로 평가하기 위한 포장가속 실험 장비인 HES를 개발하였다. 또한 이를 바탕으로 하여 본 연구를 통해 개발한 HES가 가져야할 특징 및 성능에 대해 알아보았고 이를 장비 제작시에 적용하였다.

■ 투·배수성 포장의 HES 적용을 위한 실험 계획을 수립한 후 실제 실험을 통해 데이터를 수집하여 각각의 영향인자에 따른 공용성을 평가하고 이를 현장 시험시공에 참고할 계획이다. 또한 원하는 환경하중 후의 포장의 공용성 평가를 위한 실험도 병행하려고 한다.

■ HES 의 예비 시험을 통해 환경하중에 의한 영향을 기본적으로 살펴보았다. 고온일 경우에 하중 재하회수와 러팅과의 관계와 표층과 기층을 투과한 물이 어디로 흘러가는지를 평가하였다. 토조 해체시 작업 효율을 위한 기계화 해체작업을 적용하였으며 개선점이 있긴 하지만 많은 문제는 없는 것을 알 수 있었다.

■ 국내의 경우 기타소음의 영향 때문에 도로포장/타이어 간의 소음, 즉 포장체의 소음저감 효과에 대한 정확한 평가를 내리는데 많은 문제점을 가지고 있었다. 이를 해결하기 위해 본 연구에서는 기본적으로 소음원에 대한 전파 성질 및 국외의 다양한 소음측정기법 및 장비들을 고찰하였다. 그 결과, 차량이나 환경적인 제약조건을 최소화할 수 있고, 투·배수성 포장의 소음저감 기능을 객관적으로 평가할 수

있는 근접 소음 측정법(CPX)을 제안하였으며, 이를 투·배수성 포장의 공용성 평가 및 유지보수 의사결정 기준으로 활용하고자 하였다.

■ HEART CPX 트레일러를 실시 설계 및 제작하였고 이를 기존의 실험장비를 통한 측정값들과 비교·검증함으로써 보정하는 작업을 수행하였다. 장비의 검증 이후 투·배수성 포장을 대상으로 한 측정 계획을 수립한 후 실제 측정을 통해 자료를 수집함으로써 다양한 분석에 활용하고자 한다.

■ 경북 김천에 실시한 현장은 구간이 짧고(300m), 가속 구간이 별도로 준비되어 있지 못하여 CPX를 활용한 측정이 곤란하였다. 차후에서 충분한 가속구간을 통하여 측정하고자 하는 속도에서 CPX를 이용하여 친환경 투·배수성 포장시스템의 기능성을 평가하도록 하겠다.

7절. 현장 시험 시공

1. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 제1차 현장 시험시공

가. 개요

과제수행을 통해 개발된 신재료인 저수축 투수/불투수 시멘트 안정처리 기층(Cement Treated Base; 이하 CTB)의 현장 생산 및 특성을 평가하고 본 연구진이 제안하고 있는 친환경 4S 포장시스템의 구조적 안전성 및 기능성을 평가하기 위해 경북 김천에 1차로 현장 시험시공을 실시하였다. 본 절은 현장 시험시공 과정과 초기 공용성 평가 결과를 다루고자 한다. 경북 김천 시험시공 구간은 교통량이 적어 환경하중만을 고려할 수 있다는 점에서 그 의미가 아주 높다.

FWD(Falling Weight Deflectometer)실험, 정적하중 재하실험, 현장투수실험 등 초기 공용성 평가분석을 통해 일반아스팔트 포장체와 투·배수성 포장체을 비교함으로써 신공법의 구조적인 안전성과 우수한 기능성을 살펴보았다.

나. 시험 시공 목적

경북 김천에 시험 시공한 친환경 4S 투·배수성 포장시스템은 국내의 경우 시공실적이 전무한 새로운 형식의 공법이다. 따라서 현장 시험시공은 다음과 같은 목적을 지니고 있다.

Ⅰ. 기술적 시공성 및 초기 공용성 평가
Ⅱ. 경제적 타당성 평가

다. 시험 시공 계획

현장 시험시공 계획은 총 3단계로 나누어 수립하였다. 첫 번째, ABAQUS를 이용한 FEM해석을 통해 단면을 설계하였고, 두 번째, 계측기 매립계획을 수립하였다.

<표 3.7.1> 1차 시험시공 일정 및 실험목적, 항목

날짜		공 정	실험 목적	실험 항목
2005년	10월 18일	노상 완성		
	10월 19일		노상 지지력 평가 및 노상중량함수비 측정	DCP, 들밀도, 평판재하 실험 실시 TDR, 온도측정계측기 매설
			CTB 시험 배합	저수축 불투수/투수CTB 공시체 제작(각각 9개씩)
	10월 27일	L형 측구 완성		파이프 매설 위치 파악 및 TDR 케이블선 처리, 7일 강도 측정
			AP 시험 배합	AP바인더 함량, Draindown 시험 등
	10월 29일	보조기층 완성	보조기층 지지력 평가	평판재하 실험 실시 온도측정계측기 매설
	11월 2일	저수축 불투수/투수CTB 및 일반BB 타설	포장 거동 특성 및 초기변형률 측정	온도측정계측기, 콘크리트 변형률 계측기 매설
			CTB 현장배합 평가	강도측정 및 입도분석
	11월 17일	투수AP 및 일반AP 타설	포장 거동 특성	온도측정계측기, 아스팔트 변형률 계측기 매설
			AP 현장배합 평가	입도 분석

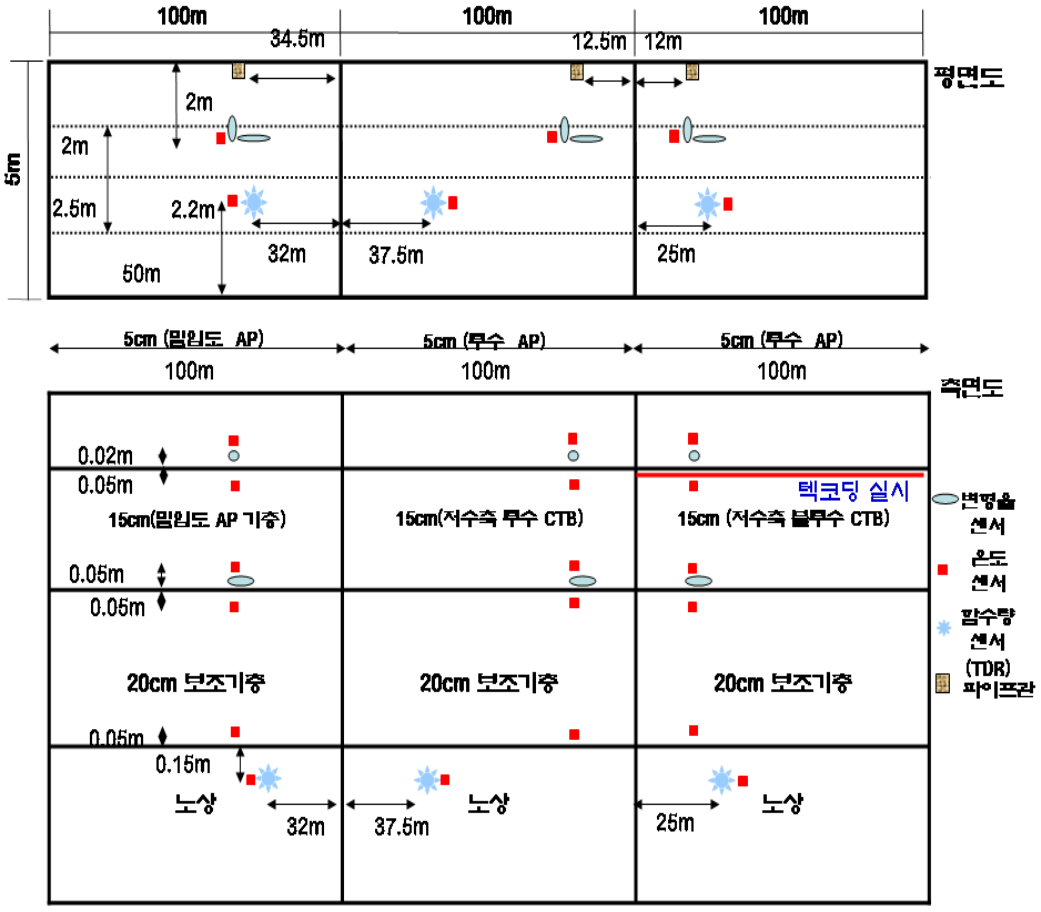
계측기 매립을 통해 4S 투·배수성 포장의 거동을 실내 모형과 비교·분석할 계획이다. 세 번째로 세부적인 공용성 평가 항목을 선정하여 4S 투·배수성 포장의 초기 공용성을 평가하고 장기 공용성 평가의 기초자료로서 활용하고자 한다. <표 3.7.1>은 전체적인 시험시공 일정을 나타내고 있다.

(1) 단면계획

친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 1차 시험시공 단면은 총 세 개로 투수AP/저수축 불투수CTB 단면, 투수AP/저수축 투수CTB 단면 및 일반아스팔트 단면이다.

(2) 계측기 매립계획

<그림 3.7.1>은 친환경 4S 투·배수성 포장체와 일반아스팔트 포장체의 전체 단면도 및 계측기 매립 현황을 보여주고 있다. 투·배수성 포장과 일반아스팔트 포장의 배수처리방식 차이에 따른 노상 중량함수비의 변화를 관찰하고자 하였으며 정기적인 FWD실험을 실시하여 노상 중량함수비 변화에 따른 구조적 지지력을 평가하였다. 4S 투·배수성 포장체의 기층으로 활용하고 있는 저수축 투수/불투수CTB에 콘크리트 변형률계측기(KM-100B)와 온도계측기(I-Button)를 매설하여 환경에 의한 신재료의 초기거동을 관찰하고 건조수축 저감을 확인하였다. 아울러 기층에 매설한 콘크리트 변형률계측기와 표층에 매설한 아스팔트 변형률계측기(KM-100HAS)를 이용하여 정적하중재하실험을 실시하여 포장 거동을 파악하고 FEM 해석과의 비교·분석을 통해 4S 친환경 투·배수성 포장의 거동 특성을 이해하고자 한다.



<그림 3.7.1> 1차 시험시공 단면도 및 계측기 매립 현황

(가) TDR(Time-Domain Reflection)

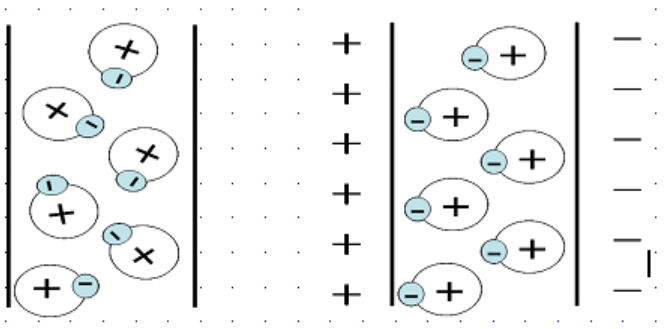
TDR 방식 함수량계는 1970년대 최초로 농업연구자들에 의해 용수로 설치와 관련하여 흙의 함수비 측정을 목적으로 사용되었으며, 이후 지질공학 분야에서, 최근 들어 도로 포장관련 연구에서 많이 사용 되고 있다. 또한 이것은 다른 타입에 비하여 정밀도가 우수하여, 포장하부구조의 함수비를 측정하는데 유용하다는 것이 많은 연구에서 보고되었다. (전성일, 2003)

① TDR의 이론적 배경

1) 유전체와 유전율(dielectric material and dielectric constant)

유전체(dielectric material)는 말 그대로 전기적 성질을 유도하는 물질이다. 전기장 속에 물체가 들어가면 전기장의 영향을 받아 자유전자가 한쪽으로 치우치는 분극현상이 발생되는데 이렇게 분극되는 물질을 유전체라고 하며 진공과 부도체가 유전체에 속하게 된다. <그림 3.7.2>는 분식을 표현하고 있다.

유전율(dielectric constant)은 전극사이에 유전체를 넣었을 경우와 넣지 않은 경우(엄밀히 진공상태)의 전기용량(전하를 저장할 수 있는 양) 비이다. 물의 유전율과 건조된 흙의 유전율이 각각 80, 3~8정도 된다. TDR의 원리는 물과 흙의 유전율이 크게 차이가 있다는 데에서 기초한다.(전성일, 2003)



<그림 3.7.2> TDR에서의 분극현상 모식도

2) TDR의 원리

TDR은 전기적 불연속성을 지닌 물체로부터 전자기파(electromagnetic wave)의 이동시간(travel time)을 측정하는 것을 바탕으로 하고 있다. 유전율은 전자기파의 이동시간과 도파관(waveguide)길이를 통해 계산할 수 있다. 식 (1)과 식(2)는 유전율과 흙에서 도파관을 따라 이동하는 전자기파의 속도 v 와의 관계를 보여주고 있다.(전성일, 2003)

$$v = \frac{c}{\sqrt{K_a}} \quad \text{.....(1)}$$

여기서, c = 진공상태에서의 빛의 속도(3×10^8m/s)

K_a = 유전율

유전율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_a = (\frac{ct}{L})^2 \quad \text{.....(2)}$$

여기서, t = TDR에 의해 측정된 전자기파의 이동시간(sec)

L = TDR의 도파관 길이

② 온도측정계측기(I-Button)

i-Button[www.iButton.com]은 디지털 온도센서의 일종으로, 온도변화에 민감한 음식물을 보관하는 냉동 창고나 음식물 수송차량의 내부에 설치하여 시간에 따른 온도변화를 알아보는 용도로 사용되었다. 원하는 장소에 i-Button을 설치하면 i-Button은 내부에서 전원을 공급받아 온도 자료를 스스로 저장할 수 있게 된다. 그 후, 저장된 자료는 언제든지 간편하게 다운로드를 할 수 있도록 되어있다. 또한 계측 과정은 모두 자동으로 이루어지며 사람의 감시가 없어도 가능하게 되어 있다. <그림 3.7.3>은 이러한 i-Button의 모양과 크기를 보여주고 있다.(박대근, 2002)



<그림 3.7.3> i-Button (온도측정게이지)

(나) 공용성 평가 계획

현장 시험시공을 통해 아래와 같은 측정항목을 설정하여 모니터링 계획을 세웠다.

■ FWD실험 - 일반 아스팔트 포장체와 투·배수성포장체의 처짐량을 비교하여 적정성을 검토하고 정기적인 측정을 통해 노상 중량함수비에 따른 거동 변화 관측

■ 정적하중 재하실험 - 하중에 따른 일반 아스팔트 포장체과 투·배수성포장체의 거동 비교·분석 및 FEM해석을 통한 모델 보완

■ 코어링 - 일반 아스팔트 포장체과 투·배수성포장체에서 표층과 기층과의 접착 및 실제 두께 확인을 통한 시공성 검토, 간접인장강도를 통한 투수AP 및 일반AP 물성 파악, 밀도 공극률 평가

■ 육안관찰 - 육안관찰을 통하여 재료별 생산 및 시공 특성 분석, 균열 및 기타 파손 현상 발견을 통해 신공법의 적용 가능성 평가 및 장래 공용성 초기 자료 제시

■ 현장투수 시험 장비를 이용한 투수성능 평가 - 현장투수 시험 장비를 이용하여 일반아스팔포장체와 투·배수성포장체와의 투수성능 평가

■ 노상중량함수비 관찰 - TDR를 활용하여 각 단면별 환경(강우량, 온도 등)에 따른 노상 중량함수비 관찰

■ 소음측정 - 속도별에 따른 단면별 소음측정을 통해 소음 저감 현상의 상대적

관찰

■ 미끄럼저항성 측정 - BPT장비를 이용하여 각 단면별 미끄럼저항성 비교・관찰

<표 3.7.2>는 시험시공 직후 공용성 평가를 위한 시기별 실험 항목을 나타내고 있다.

<표 3.7.2> 1차 시험시공 시기별 공용성 실험 항목

기간 \ 항목		초기 (시공 이후) (겨울)	6개월 (봄)	9개월 (여름)	1년	3년	5년	..
구조적 평가	FWD	●		●	●	●	●	
	정적하중 재하시험	●		●	●	●	●	
	Core	●			●	●	●	
	육안관찰	●	●	●	●	●	●	
기능성 평가	투수계수 및 함수량	●	●	●	●	●	●	
	소음	●	●	●	●	●	●	
	SN(BPT)	●	●	●	●	●	●	

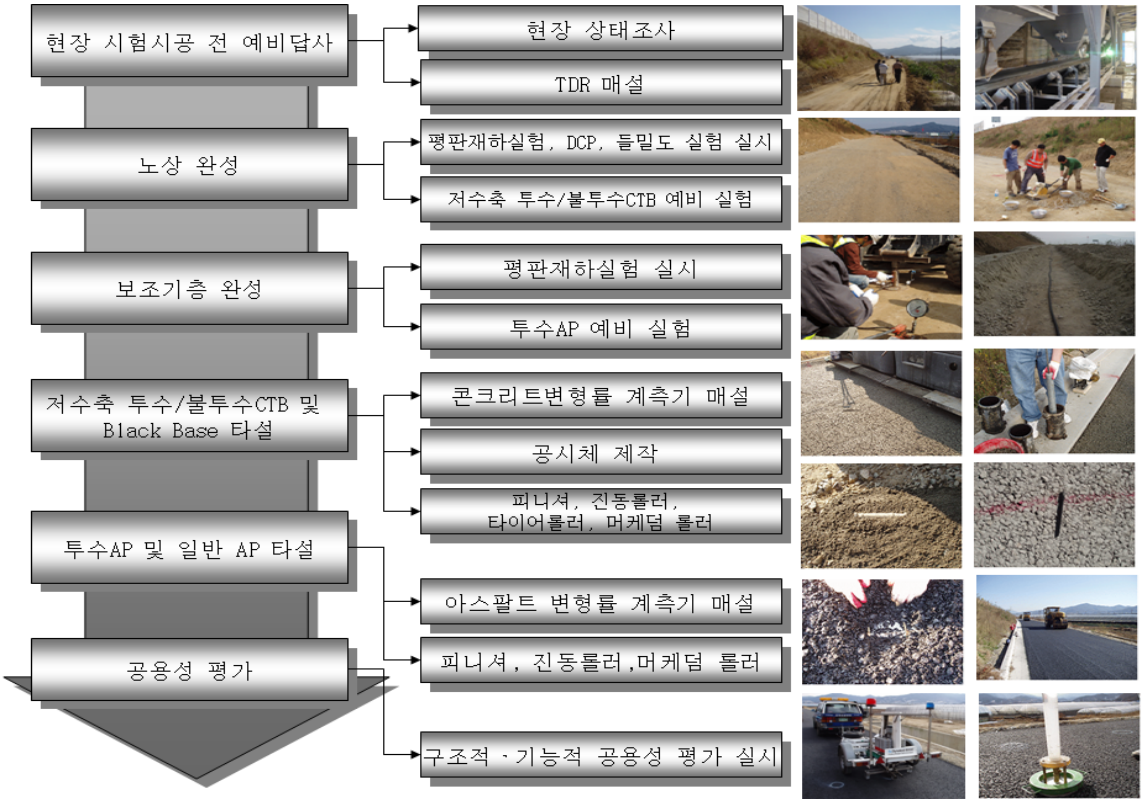
라. 현장 시험시공 및 초기 공용성 평가

(1) 시험시공

친환경 4S 투・배수성 포장시스템 시험시공은 다음과 같은 순서로 진행되었다. 예비답사를 통한 현장 상태를 조사 한 후 노상과 보조기층을 완성하고, 물성평가를 위한 실험과 계측기 매설을 실시하였다. 이후 저수축 투수/불투수CTB와 아스팔트 안정 처리 기층(Black Base; 이하 BB) 그리고 투수AP표층, 일반 밀입도AP표층을 차례로 타설하였다. 타설 시 데이터 계측을 위한 계측기를 매립하고 초기 공용성을 평가하는 순서로 진행하였다. <그림 3.7.4>은 경북 김천 현장 시험시공 위치를 나타냈으며 <그림 3.7.5>은 전체적인 시험시공 흐름도에 따른 연구 세부 항목을 열거해 놓은 것이다.



<그림 3.7.4> 1차 현장 시험시공 위치 (경북 김천)



<그림 3.7.5> 1차 시험시공 흐름도

(가) 예비답사 및 노상, 보조기층 완성

현장 시험시공 구간은 경부고속도로 영동~김천간 6차로 확장공사 제 5공구 부체도로 부산방향 구간으로 총 길이는 약 300m 이고 일부 곡선구간이 포함되어 있다. 시험시공 현장 언덕 너머로 중부 내륙고속도로가 위치해 있으며 그 반대편으로 농사지역이 위치해 있다. 현장에서는 부분적으로 지지력이 기준 이하인 지반에 대해서는 재생골재를 이용하여 치환을 실시하였다. 본 연구진은 국내 시공사례가 전무한 공법을 실제 많은 교통량이 있는 구간에 시험시공을 실시하는 것은 많은 위험성을 내포하고 있다고 판단하였다. 따라서 차량의 통행이 다소 적은 장소에 시험시공을 실시하여 공법의 안정성 및 시공성을 확인하며 환경하중만이 재하되는 상태에서 공용성을 측정할 수 있는 시험구간을 마련 하였다.

노상 완성 이후 물성평가를 위하여 DCP(Dynamic Cone Penetrometer), 들밀도 실험, 평판재하 실험을 실시하였다. 또한 본 시험시공의 중요 목적중의 하나인 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 단면별의 노상 중량함수비 변화를 살펴보기 위하여 TDR방식 함수량계를 단면별로 하나씩 매설하였다. 또한 노상 내부온도 측정을 위하여 온도측정계측기(I-Button)도 TDR과 함께 매설하였다. 노상 내부온도가 영하로 떨어질 경우 물이 얼음으로 변함에 따라 측정되는 중량함수비가 저하되는 현상이 발생한다. 온도측정계측기의 매설목적은 겨울철 노상내부의 중량함수비의 급격한 감소가 발생할 경우 정확한 원인을 파악하기 위함에 있다.

(나) 저수축 투수/불투수CTB 및 Black Base 타설

저수축 투수AP/불투수CTB와 아스팔트 안정 처리 기층(BB, Black Base, 이하 BB)은 아스팔트 피니셔 장비를 이용하여 타설하였다. 저수축 투수/불투수CTB는 한 번에 15cm가 타설된 이후 다짐을 실시했으며 BB의 경우 10cm, 5cm로 나누어서 다짐을 실시하였다. CTB의 현장다짐은 진동롤러, 타이어롤러, 텐덤롤러 순으로 진행되었으며 각각 4, 5, 5회를 실시하였고 BB의 경우에는 같은 순서로 각각 3회, 6회, 4회를 실시하였다. 저수축 투수/불투수CTB와 BB에 변형률계측기 1개와 온도측정계측기(I-Button)를 2개 씩 매설하였다. 변형률계측기는 기층 하부로부터 위쪽

으로 3cm위치에 매설하였고 온도측정계측기는 각각 기층 상·하부로부터 3cm에 설치하였다. 매설방법은 시공성과 데이터의 정확성을 고려하여 마운드방법을 사용하였다. 기층 타설 후 Data Logger(TDS-303)를 이용하여 저수축 투수/불투수CTB 단면에서 초기 변형률 데이터를 측정하였다.

(다) 투수AP 및 일반AP 타설

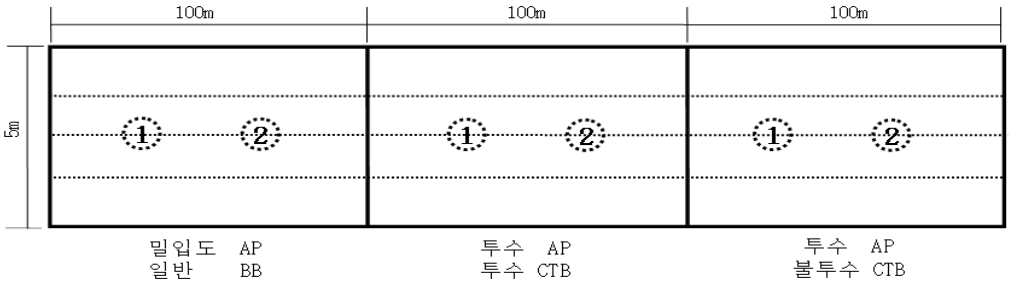
투수AP와 일반AP의 경우에도 피니셔 장비를 이용하여 타설을 실시하였으며 투수AP의 경우 본 연구진의 자체 바인더가 마련되지 않은 관계로 국내에서 많이 생산되고 있는 S사 바인더를 사용하였다. 투수AP 다짐의 경우 머케덤, 머케덤, 탠덤 순으로 각각 2회, 3회, 1회를 실시하였고 일반AP의 경우에는 아스팔트 변형률계측기 1개와 온도측정계측기 1개를 단면 별로 하부로부터 2cm지점에 매설하였다.

(라) 현장 시험시공의 시공성 평가

① 노상 및 보조기층

본 연구진은 현장품질관리차원에서 노상에서는 DCP(Dynamic Cone Penetrometer), 평판재하실험을 보조기층에서는 평판재하실험을 실시하였다.

<그림 3.7.8>~<그림 3.7.9>은 DCP, 평판재하실험 모습을 보여주고 있으며 <그림 3.7.6>은 실험 위치를 나타내고 있다. 노상의 구간별 2 지점씩 선정하여 실험을 실시하였으며 평판재하실험과 DCP를 비슷한 위치에서 실시하였고 보조기층에서 실시한 평판재하실험 역시 같은 지점에서 실시하였다.



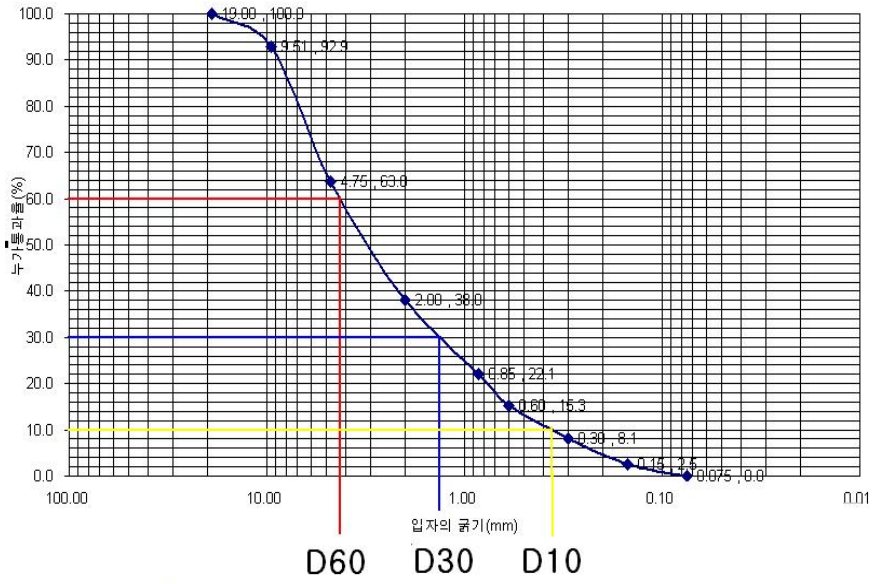
<그림 3.7.6> DCP, 평판재하실험 위치도

② 노상 기초물성실험

현장에서 사용된 노상의 물리적인 특성 파악을 위한 실험을 실시하였다. 노상에 대하여 체분석 실험, 다짐 실험, 비중 실험을 실시하여 입도 분포, 흙의 성분, 최적 함수비, 최대건조밀도, 비중 등을 살펴보았다. 실험은 KS F 2302, KS F 2312, KS F 2308에 준하여 실시하였다.

㉮ 체가름 실험

흙의 공학적 성질을 알기 위해 입도 분포와 흙의 분류를 알기 위한 실험으로 현장 노상의 체가름 실험 결과는 <그림 3.7.7>와 <표 3.7.3>에 나타나 있다.



<그림 3.7.7> 현장 노상 입도 분포곡선

<표 3.7.3> 1차 시험시공 현장 노상 입도분포표

Sieve No.	입경	남은무게		누가 백분율	
		각체	누가	잔류(%)	통과(%)
	19.00	0.00	0.00	0.00	100.0
9.51mm	9.51	71.15	71.15	7.12	92.9
#4	4.75	291.30	362.45	36.25	63.8
#10	2.00	257.75	620.20	62.02	38.0
#20	0.85	158.55	778.75	77.88	22.1
#30	0.60	68.65	847.40	84.74	15.3
#50	0.30	71.50	918.90	91.89	8.1
#100	0.15	56.25	975.15	97.52	2.5
#200	0.075	24.85	1000.00	100.00	0.0
체 치기 전 무게			1000.00		

<표 3.7.4> 1차 시험시공 노상 성분 함유율

입경(mm)	자갈(G)	모래(S)		실트(M) 0.075~0.002	점토(C) 0.002 이하	합계
		굵은모래 (4.75~0.425)	가는모래 (0.425~0.075)			
함유율(%)	36.2	52.7	11.1	0	0	100

실험 결과 본 실험에 사용한 노상는 양입도라 판단되며 통일분류법에 따르면 이 흙은 No.200체 통과량이 50% 이하이므로 조립토에 속하며 그 중 No.4체 통과량이 50%이상이며 세립분이 거의 없고(No. 200체 통과율 5% 이하) 입도분포가 좋은 흙이므로 SW에 속한다. 성분 함유율의 <표 3.7.4>와 나타나 바와 같다.

㈏ 다짐실험 및 비중실험

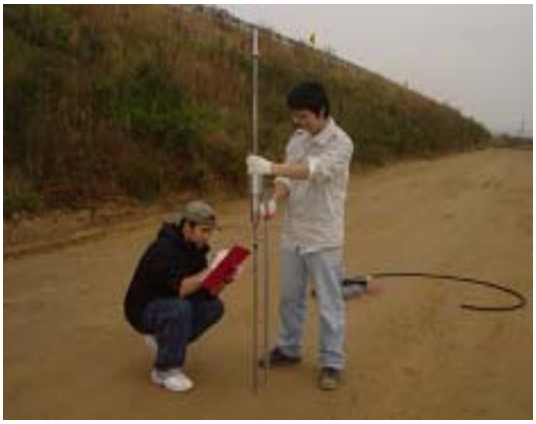
다짐실험은 자연 건조시킨 흙 시료에 함수비를 변화시킴과 동시에 동일한 부피와 에너지로 다져서 함수비-건조 밀도 관계 곡선을 구한 후 최대 건조밀도와 최적 함수비를 구하기 위한 실험이다. 다짐 결과를 이용하여 다짐 현장의 함수비 범위를 구하고, 최대 건조밀도를 이용하여 다져진 지반의 상대 다짐도의 평가한다.

비중 실험은 노상토의 공기 중 및 수중 무게로 구하며 비중과 건조밀도를 구함으로써 노상토의 함수비와 포화도의 관계를 알아낼 수 있다. 실험 결과는 다음 <표 3.7.5>와 같다.

DCP는 직접 시료를 채취하지 않고 포장 하부의 관입깊이에 따른 지지력 성분을 측정하여 현장 지지력을 직접 평가하는 장비이다. DCP는 기본적으로 직경 16mm의 강봉과 해머(8kg) 및 콘(직경 20mm, 내각 60도)으로 구성되어 있고, 슬라이딩 해머의 자유낙하(낙하고 575mm)에 의해 충격이 가해질 때, 지중에 관입된 깊이(mm), 관입지수(mm/blow; 해머 1회 타격 당 관입 깊이)를 기록하며, 장비의 총 무게는 약 12kg이다. <그림 3.7.10>은 DCP의 제원을 나타내고 있다.

<표 3.7.5> 1차 시험시공 현장 노상의 기초물성실험 결과

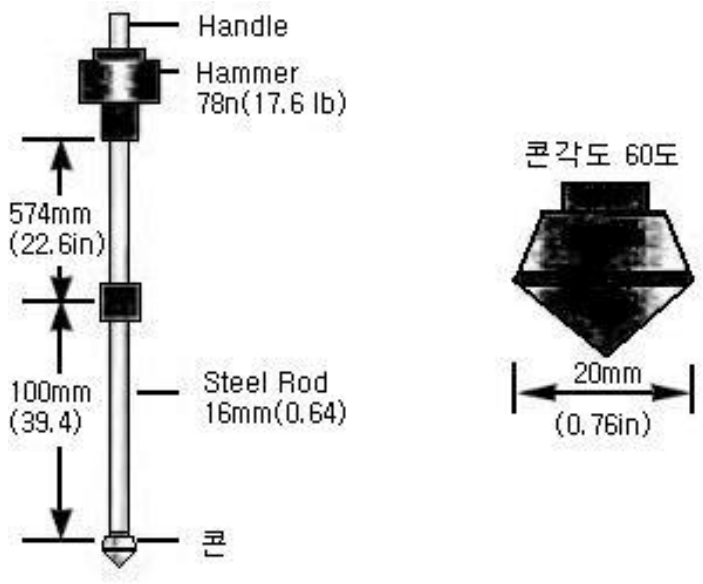
노상	채취장소	최적함수비(%)	최대건조밀도	비중	균등계수	곡률계수
	시험시공 현장	10.68	1.9245	2.59	11.05	1.14



<그림 3.7.8> 1차 시험시공 DCP 실험 모습



<그림 3.7.9> 1차 시험시공 평판재하실험 모습



<그림 3.7.10> DCP 제원(권수안, 2004)

DCP은 타격 시 3인이 1조가 되어 한 명은 DCP가 수직으로 관입할 수 있도록 잡아주고 다른 한 명은 슬라이딩 해머를 낙하고까지 끌어올린 후 자유낙하 시킨다. 기록수는 매회 타격 시 눈금을 확인하며 기록한다. DCP 측정 시 해머를 낙하고 까지 끌어올릴 때 DCP가 들리지 않도록 하여야 하고 관입 봉의 수직상태 유지에 주의해야 한다. <표 3.7.6>는 DCP 결과를 나타내고 있다. 각 구간에 대하여 탄성계수는 아래의 식으로 추정하였다.(류명찬, 2003)

$$E = 2586.1 - 519.8 \times Ln(PI)$$

여기서 E : 탄성계수(kg/cm2)

PI : 관입지수(mm/blow)

국내의 노상의 설계 기준은 DCP지수로 환산하였을 때 15mm/blow정도이다. 즉 DCP지수가 15mm/blow 이하일 때 노상토가 충분한 지지력을 가지고 있다고 판단된다.(권수안, 2004) 현장 시험시공 구간에서는 DCP지수가 모두 15mm/blow이하를 나타내었다.

평판재하실험은 KS F 2310에 준하여 실시하였다. 노상과 보조기층의 평판재하실험 결과는 <표 3.7.7>와 <표 3.7.8>에 나타나 있다. 투수AP/불투수CTB 단면과 투수AP/투수CTB 단면의 경우에는 기층이 시멘트 안정처리 기층이므로 도로 공사의 평판재하 시험 기준 중 콘크리트 포장 기준을 따랐으며 일반아스팔트 단면은 아스팔트 포장 기준을 이용하였다. 노상 3구간 밀입도AP 1지점을 제외하고는 모두 기준에 만족하는 것으로 나타났다. DCP와 평판재하실험 결과를 바탕으로 노상의 상태는 양호하다고 판단되었으며 평가 기준은 <표 3.7.9>에 나타나 있다.

<표 3.7.6> 1차 시험시공 DCP 실험 결과

구간	1지점		2지점		평균값		기준
	탄성계수 (kg/cm^2)	DCP지수 (mm/blow)	탄성계수 (kg/cm^2)	DCP지수 (mm/blow)	탄성계수 (kg/cm^2)	DCP지수 (mm/blow)	탄성계수 ($kg./cm^2$)
1구간 (저수축 불투수CTB)	1611.47	6.521	1553.82	7.286	1582.65	6.903	210~2,800
2구간 (저수축 투수CTB)	1785.95	4.661	1692.30	5.582	1739.12	5.122	
3구간 (밀입도AP 구간)	1665.04	5.882	1624.93	6.354	1644.99	6.112	

<표 3.7.7> 1차 시험시공 평판재하실험 실험 결과(노상)

구간	1지점		2지점		평균값	
	지지력계수 (K_{30}) (kgf/cm^3)	결과	지지력계수 (K_{30}) (kgf/cm^3)	결과	지지력계수 (K_{30}) (kgf/cm^3)	결과
1구간 (저수축 불투수CTB)	17.7	만족	31.0	만족	24.35	만족
2구간 (저수축 투수CTB)	37.3	만족	18.7	만족	28.0	만족
3구간 (밀입도AP 구간)	19.5	불만족	20.7	만족	20.1	만족

<표 3.7.8> 1차 시험시공 평판재하실험 실험 결과(보조기층)

구간	1지점		2지점		평균값	
	지지력계수 (K_{30}) (kgf/cm^3)	결과	지지력계수 (K_{30}) (kgf/cm^3)	결과	지지력계수 (K_{30}) (kgf/cm^3)	결과
1구간 (저수축 불투수CTB)	22.5	만족	37.4	만족	29.5	만족
2구간 (저수축 투수CTB)	38.0	만족	24.0	만족	29.0	만족
3구간 (밀입도AP 구간)	32.0	만족	31.5	만족	33.5	만족

<표 3.7.9> 고속도로 포장형식에 따른 평판재하 시험기준

구분			단위	노체		노상	뒷채움재료	선택, 보조기층
				암성토	일반성토			
평판재하시험	Con'c 포장	침하량	cm	0.125	0.125	0.125	0.25	0.125
		지지력계수 (K_{30})	kg/cm^3	20이상	10이상	15이상	30이상	20이상
	AP 포장	침하량	cm	0.125	0.25	0.25	0.25	0.25
		지지력계수 (K_{30})	kg/cm^3	20이상	15이상	20이상	30이상	30이상

③ 저수축 투수/불투수CTB의 현장 생산 및 특성 평가

㉮ 저수축 투수/불투수CTB 예비 실험

신재료의 현장 생산성을 평가하기 위해 현지 Batch Plant(이하; BP)를 방문하여 포설될 저수축 투수/불투수CTB의 예비 실험을 실시하였다. BP에서 각 배합 당 $1m^3$씩 생산하여 배합의 현장 품질 관리와 강도 확인을 위한 공시체를 제작하였다. 본 현장에서 사용되는 골재의 기본물성으로 배합을 조정하여 현장배합으로 수정하였다. 당일 현장 골재들의 표면수율은 굵은골재(0.2%), 잔골재(2.9%)였으며 이에 따라 배합을 수정하였다. <표 3.7.10>는 저수축 투수/불투수CTB의 배합표이다.

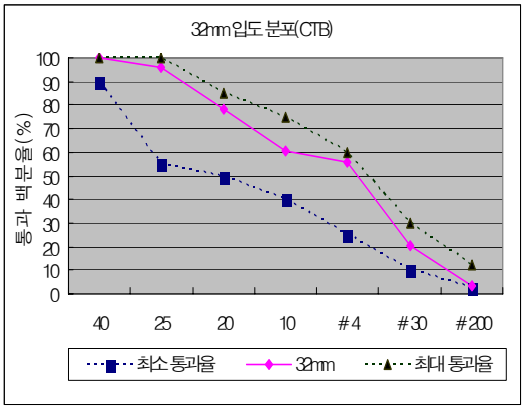
제작된 공시체들은 1일 타령 후 습윤 양생을 실시하였으며 예비실험을 통한 7, 14, 28일 강도 측정 결과 강도가 도로공사 시방서 기준인 7일 강도 50kg/㎠를 초과하였다. CTB 현장 품질 관리방법으로 슬럼프실험을 통한 CTB의 무슬럼프 특성을

<표 3.7.10> 1차 시험시공 저수축 투수/불투수CTB 배합표

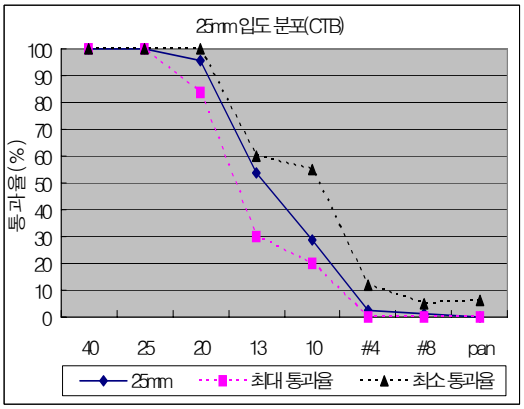
구 분 ($1m^3$)	시멘트 양 (kg)	물 (kg)	FA(25%) (kg)	팽창재(%) (kg)	굵은골재 (kg)	잔골재 (kg)	공기연행제 (kg)
저수축 불투수 CTB	113	120	37.63	11.3	1402	688	-
저수축 투수 CTB	113	70	56.4	16.6	1787	314	0.023

확인하는 이외에 수분량 측정 등을 이용한 추가적인 현장 품질 관리 기준의 제시가 필요한 것으로 보인다.

현장 시험시공에서 사용할 현장 골재를 입도분석을 실시하였다. 분석결과 기준에 부합하였으며 불투수CTB의 경우 40mm 골재를 사용해야 하나 현지 BP 사정으로 32mm 골재를 사용하였다. <그림 3.7.11>과 <그림 3.7.12>는 각각 현장 시험시공 시 사용된 투수CTB 및 불투수CTB의 입도분포를 나타낸다.



<그림 3.7.11> 불투수CTB 현장입도분포(32mm)



<그림 3.7.12> 투수CTB 현장입도분포(25mm)

㈏ 현장 시험시공에서의 저수축 투수/불투수CTB 현장 생산 및 특성 평가

1) 현장 생산 및 Mixing

저수축 투수/불투수CTB을 생산 시에 골재, 잔골재, 플라이애시의 경우에는 Mixing 시 Bin을 이용했다. 그러나 팽창제의 경우 Bin를 통해 기계를 통한 물량조절이 어려워 직접 포설하는 방법을 취했다. 생산 당일 날 현장 골재의 흡수율, 비중을 측정하여 배합에 적용하였다.

2) 현장 타설

저수축 투수/불투수CTB는 덤프트럭을 이용하여 이동하였고 BP와 시험시공 현장은 거리상 아주 근접해 있어 이동시간은 약 3분 정도 소요되었다. 건식배합임을 고

려하여 타설은 아스팔트 피니셔 장비를 이용하였다. 불투수CTB의 경우에는 타설 시 문제점이 발생되지 않았으나 투수CTB의 경우 시멘트 모르타르, 잔골재 및 굵은 골재가 골고루 혼합되지 못하고 일부에는 굵은 골재가 주로 있는 재료 분리 현상이 발견되었다. 이는 투수성능 저하와 탈리현상의 한 가지 원인으로 판단된다.

3) 현장 다짐

현장다짐은 CTB에 진동롤러 4회, 타이어롤러 5회, 텐덤롤러 5회를 실시하였다. 다짐 전후의 다짐 높이를 측정하여 우리가 원하는 타설 높이(15cm)를 확인하였으며 대체로 14~15cm를 유지하였다. <그림 3.7.13>은 CTB의 타설 높이 측정 모습이다. CTB의 경우에는 <그림 3.7.14>에 나와 있는 AP 시공에서처럼 측면을 적절히 관리하지 못해 측면에서 탈리현상이 많이 발생하였다.

다짐 시 투수 CTB의 경우에는 진동을 가하지 않고 다짐을 실시하였으면 이는 진동에 의한 Bleeding현상을 방지하기 위함이었다. 여기서 한 가지 유념해야 할 점은 투수CTB 다짐 시의 타이어롤러 다짐의 제한이다. 타이어롤러 다짐은 투수CTB의 공극을 막히게 하는 특성이 있었다. 이 점은 다른 다짐장비들은 다짐부분이 철로 구성되어 있으며 다짐기계 내에서 물이 살포되면서 작업이 진행되어 먼지가 붙는 것을 방지하는 것에 비하여 타이어 롤러 바퀴부분에 먼지가 붙을 경우 이 먼지가 표층 상부에 묻어 공극을 막히게 하는 모습이 관찰되었다.



<그림 3.7.13> CTB 포설 두께 측정



<그림 3.7.14> 인력을 이용한 측면 처리(투수AP)

4) 현장 품질 관리 및 평가

현장 품질 평가 항목으로 공시체 제작, 현장투수실험 및 코어링이며 강도 측정, 투수CTB의 투수성능, 부착정도 등이 있다.

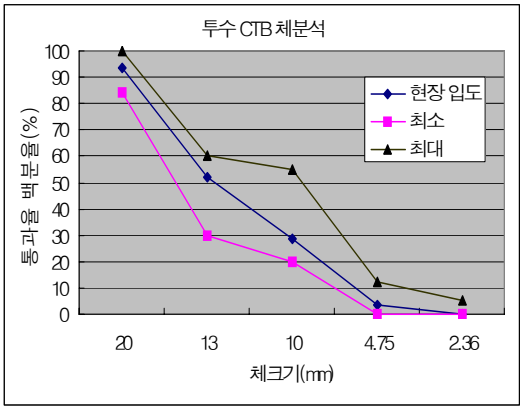
투수CTB의 경우 현장투수시험기를 사용하여 투수성 기층의 투수성능을 평가하였다. 투수CTB 단면에서 현장투수실험을 한 위치눈 구간을 3×3의 직사각형으로 나눈후 각각의 중앙에서 측정하였다.

투수CTB의 현장투수시간은 평균 5.9(s)로 기준인 15(s)내로 양호한 투수성능을 지니고 있었다. 5, 9번 위치에서는 약 9(s)의 시간을 나타내었는데 이는 잔골재가 모여 있어 투수성능이 저하된 것으로 판단된다.

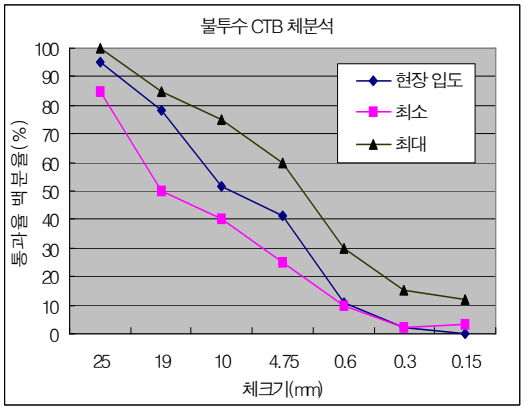
체분석은 굳지 않은 상태에서 물로 깨끗이 씻어서 체를 치고 골재를 건조시킨 후 골재를 다시 체를 쳐서 골재입도를 분석하여 입도분포를 만족시키는지 확인한다. 확인 결과 투수CTB의 경우 입도분포를 만족하였다. 불투수CTB 경우에는 입도 분석결과 NO.4번체 이하의 경우는 입도를 만족하지 않는 것으로 나타났으나 잔골재가 시멘트와 함께 씻겨 나가서 생긴 오차로 생각된다. NO.4번체 이상의 경우는 입도분포를 잘 만족하는 것으로 나타났다. 굳지 않은 상태의 CTB 체분석 결과는 <그림 3.7.15>와 <그림 3.7.16>에 나타나 있다.

<표3.4.11> 1차 시험시공 투수CTB 현장투수실험 결과

위 치	초(sec)
1	4.9
2	4.2
3	5.3
4	4.3
5	9.5
6	4.1
7	5.5
8	6.5
9	9.6
평균	5.9



<그림 3.7.15> 현장 투수CTB 체분석



<그림 3.7.16> 현장 불투수CTB 체분석

<표 3.7.12> 1차 시험시공 현장 품질 평가 항목 실험 결과

현장 품질 평가		실험 결과	평가 결과	시공 계획 및 평가 기준
입도 분석		시방 입도에 속함	양호	시방서 참조
강도		50kg/cm^2 초과	양호	50kg/cm^2 이상
투수성능		평균 5.9(s)	양호	15(s) 이내
코어링 부착정도 (불투수CTB)		비부착	비부착	부착
육안관측	건조수축	건조수축 발생하지 않음	양호	건조수축 발생하지 않음
	투수CTB	-	탈리발생	-
	불투수CTB	-	표면박리현상 발생	-

입도분석, 강도, 투수성능, 건조수축면에서 양호한 상태라 판단되며 표층과 기층의 비부착현상, 탈리현상, 표면박리현상이 문제점으로 지적됐다. 2차와 3차 시험시공에서는 이들 문제를 해결하는 노력을 진행하였다.

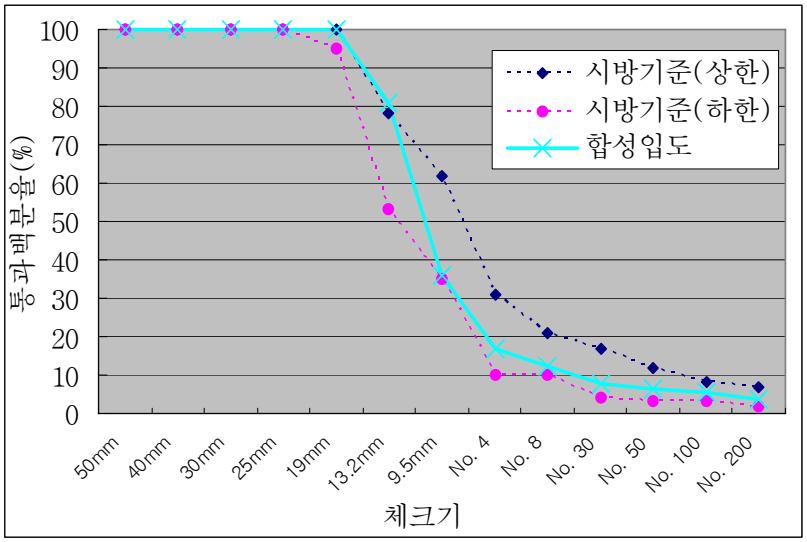
④ 투수성 표층의 현장 생산 및 투수 특성 평가

1) 투수 아스팔트 바인더 예비 실험

투수AP 배합 시 사용되는 S사 바인더의 최적 OAC(Optimum Asphalt Content)을 결정하고 바이어탑 섬유질 첨가유무를 판단하기 위해 S사 BP장에서 예비배합 실험을 실시하였다. 공시체는 19mm, 13m, 8mm 골재를 이용하여 배합설계를 실시하였으며 합성입도는 <그림 3.7.17>에 나와 있다. AP BP로부터 현장까지 한 시

간 정도 이동해야 하므로 Draindown 방지를 위해 바이어탑 섬유질 첨가를 결정하였다.

실험항목은 칸타브로, 공극률, 흐름도 실험이었으며 결과는 <표 3.7.13>와 같다. <그림 3.7.18>는 칸타브로 실험 전후를 보여주고 있다.



<그림 3.7.17> 투수 아스팔트 입도 분포(19mm, 13mm, 8mm) 합성 입도



a.제작된 공시체 b.칸다브로실험 후의 공시체

<그림 3.7.18> 투수성 표층 칸타브로실험

<표 3.7.13> 1차 시험시공 공시체 제작 실험 결과

공시체	Sample 1	Sample 2	Sample 3	평가기준
AP함량(%)	4.8	5.0	5.2	
칸타브로 실험(%)	5	9	13	20이하
공극률 측정(%)	28.6	21.9	20.3	20이상
	28.6	20.1	20.7	
	23.5	22.1	19.5	
평균	26.9	21.4	20.2	
안정도(kg)	627	816	613	500이상

예비 실내배합 실험을 통해 OAC는 5.0%로 결정되었고 Draindown 실험을 실시한 결과 0.04%(기준 0.1% 이하)로 좋은 결과를 나타내었다. 바이어탑의 치환비율은 일반적으로 적용되는 전체 바인더에서 0.9%로 결정하였다.

2) 현장 시험시공에서의 투수성 표층의 현장 생산 및 특성 평가

가) 현장 생산 및 이동

현장 BP 사정상 투수 아스팔트 바인더의 투입형식은 탱크로리에서 By-pass 방식으로 투입하는 형식을 취했다. 현장 생산시기가 기온이 낮은 관계로 바인더의 점성이 높아져 유동성이 떨어져 바인더 공급이 원활하지 않아 예상시간 보다 두 시간 정도 지연되었다. 기온이 낮을 시에는 시공을 자제하거나 보온할 수 있는 별도의 장비가 요구된다.

투수 아스팔트 혼합물은 개질제 아스팔트 바인더를 사용하므로 특성상 <표 3.7.14>에서 나와 있듯이 일반 아스팔트 혼합물에 비하여 높은 온도에서 혼합과 다짐이 실시되어야 한다.

덤프트럭을 이용하여 혼합물을 이동하였으며 이동 시간 동안의 온도 저하를 막기 위해 덮개를 이용하여 보온을 실시하였다.

<표 3.7.14> 아스팔트 혼합물의 혼합 및 다짐 시 온도(건교부, 2005)

아스팔트 종류	혼합 온도(℃)	다짐 온도(℃)
일반 아스팔트 혼합물	145~150(±2)	135~140(±2)
투수성 아스팔트 혼합물(S사)	175~185	140~160

나) 현장 타설

배수성 아스팔트 혼합물은 아스팔트 피니셔를 이용하여 타설하였다. 포설 시 레이저센서 장비를 이용한 온도 측정 결과 기준 온도인 160℃를 초과하였다. 그러나 몇몇 차량의 경우 낮은 기온과 한 시간정도 이동 거리로 인하여 포설 기준 온도인 160℃로 이하로 나타났다. 현장 품질 관리차원에 겨울철 시공을 자제하며 부득이한 시공 시에는 이동 거리를 최소화하거나 혼합물 온도 유지를 위한 대책이 요구된다.

시공 시작시점으로부터 약 10~15m 정도의 구간을 재시공하였는데 피니셔 조작자의 조작미숙으로 인하여 포설높이가 맞지 않은 것이 원인이었다. 또한 운영 중에 시멘트가 섞어 나오기도 했는데 확인 결과 전날 시멘트 포설 이후 장비관리에 소홀했던 것으로 밝혀졌다. 시공 전 장비의 상태조사가 차후 시험시공 시 반드시 행해져야 할 부분이다. 타설 시 Draindown 발생하지 않아 섬유질 첨가가 양호한 효과를 나타내는 것으로 판단된다.

다) 현장 다짐

다짐은 머캐덤롤러를 왕복 5회에 걸쳐 실시하였으며 탠덤롤러는 왕복 1회를 실시하였다. 머캐덤롤러의 경우 역시 투수CTB와 마찬가지로 Bleeding방지를 위해 진동 없이 다짐하였다. 투수AP/투수CTB 구간에서 마지막부분 15m 정도 구간을 물량부족으로 인하여 투수AP를 타설하지 못하였다. 포설 높이를 L형 측구에 맞추어 실시하였는데 L형 높이 오차와 CTB에서의 높이 오차가 복합적으로 이루어져서 발생한 것으로 판단된다.

라) 현장 품질 평가

현장 품질 평가항목은 아래의 <표 3.7.15>와 같이 코아 채취를 통한 투수AP 두께, 밀도, 공극률, 칸타브로 등이다. 코어링을 통한 측정 결과 당초 계획인 두께 5cm보다 두꺼운 6.5cm로 판명되었다.

현장투수시험기를 이용한 투수성능평가에서 평균 3.8(s)를 나타내어 투수성능이 양호하였다. 소음 측정 결과 일반아스팔트 단면보다 약 2.3dB(A)의 소음 저감 효과를 나타내었다.

<표 3.7.15> 1차 시험시공 현장 품질평가 항목 실험 결과

평가 항목	실험 결과	평가 결과	시공 계획 및 평가 기준
두께	평균 6.5cm	계획보다 1.5cm 두꺼움	5cm
투수성능	평균 3.8(s)	양호	15(s) 이내
소음 측정	일반아스팔트 단면에 비하여 2.3dB(A) 소음 저감 발생	양호	속도 80km/h 시

마) 육안 관측

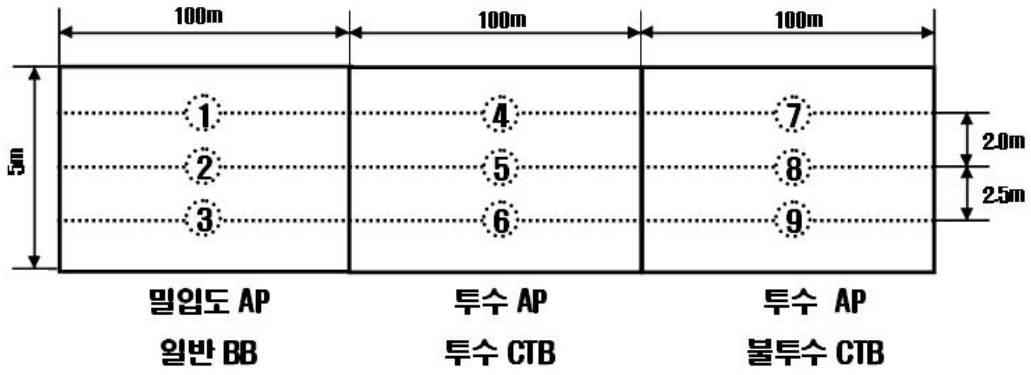
시공 마무리된 이후 육안 관측을 통해 투수 아스팔트 표층의 상태를 점검하였다. 투수AP/투수CTB 단면 아스팔트 단면 쪽 끝부분에 탈리현상이 발생했는데 이는 다짐이 마무리된 이후 투수 아스팔트 표층이 채 양생이 끝나기 전에 덤프트럭이 난입 한 결과이다.

(2) 공용성 평가 실험 및 분석

(가) FWD실험

FWD는 비파괴 실험장비의 일종으로 하중에 의하여 발생하는 포장표면의 처짐을 추정하기 위해 개발되었다. 본 장비는 추를 사용하여 포장 면에 충격하중을 재하하

고 그에 따른 포장면의 처짐을 측정하여 도출된 처짐 곡선으로부터 역산법을 통하여 각 층의 물성을 파악하는 장비이다. FWD실험을 통해 측정된 처짐량 데이터 분석을 통하여 시험시공 구간에서의 단면별 처짐량을 비교하였다.



<그림 3.7.19> 1차 시험시공 FWD측정 장소

<그림 3.7.19>은 FWD실험 측정장소를 보여주고 있다. 일반아스팔트 포장과 투수AP/불투수CTB의 경우에는 시험구간이 100m임을 감안하여 총 6개의 장소를 측정 지점으로 삼았다.

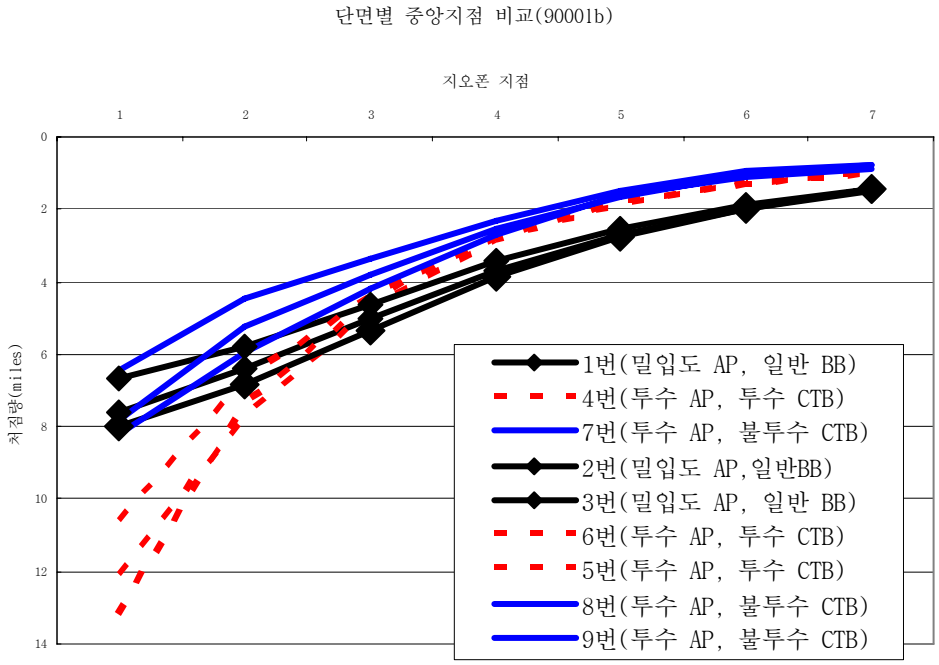
FWD 실험은 1지점 당 총 5회씩 실험을 실시하였으며 처짐량의 비교를 위해 보간법을 사용하여 9000lb로 하중과 처짐량을 조정한 후 평가를 실시하였다.

<그림 3.7.24>는 투수AP/불투수CTB 단면과 투수AP/투수CTB 단면 및 일반아스팔트 단면에서 실시한 FWD실험의 처짐량 데이터를 비교한 그래프이다.

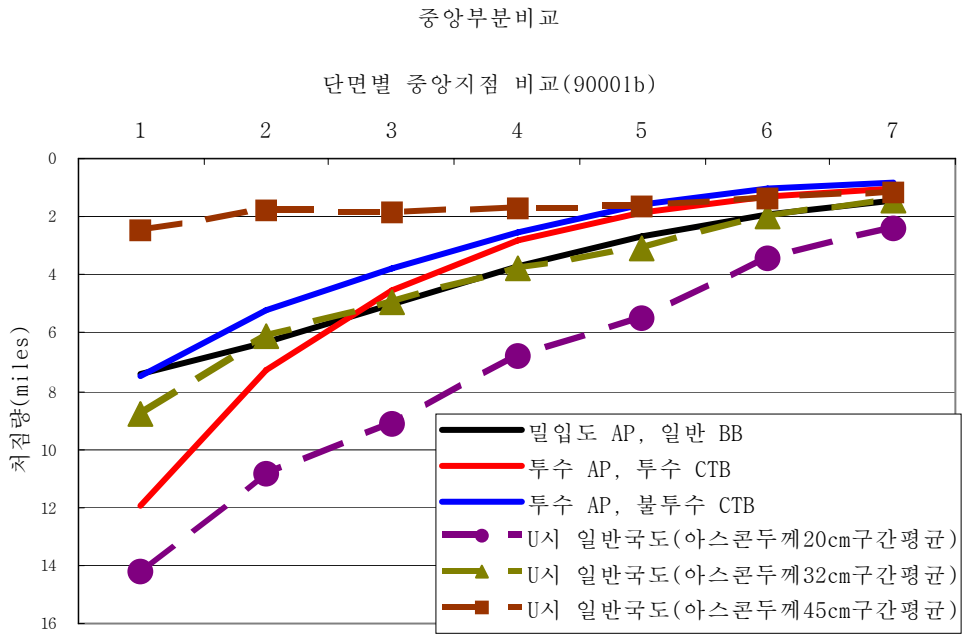
처짐량 분석결과 일반아스팔트 단면과 투수AP/불투수CTB 단면이 동일한 값을 보이고 투수성 포장의 경우 가장 많은 처짐량을 보여 주었다. 실험 당시 실제 온도 측정계측기로부터 온도를 확인한 결과 대기온도가 2℃를 나타내어 매우 쌀쌀한 날씨였고, 레이저 온도측정센서를 이용하여 표면온도를 측정한 결과는 영하 8℃를 나타났다. 또한 BB과 CTB층은 4~6℃로 비슷한 온도를 나타냈다. 일반 아스팔트 혼합물의 경우 0℃일때 탄성계수가 12,400(Mpa)이고 20℃일때는 4,400(Mpa)로 약 세 배정도가 차이가 발생한다.(한국형 포장 포장설계법 개발, 2003) 따라서 온도에 따른 아스팔트의 점탄성적인 특징으로 인하여 겨울철에 실시한 FWD실험 결과는 일반 아스팔트 혼합물과 투수AP/불투수CTB와의 처짐량에서 큰 차이가 발생하지 않

은 것으로 판단된다.

한편 투수AP/투수CTB 단면의 경우 다른 단면에 비하여 표층부분(지오폰 1번)에서 대안들보다 2배 정도 큰 것으로 드러났다. 불투수 CTB에 비해 높은 값은 표층이 동일한 재료임을 감안할 때 기층의 강성치로 발생한 것으로 보인다.



<그림 3.7.24> 1차 시험시공 FWD 처짐량 비교 - 재하위치별

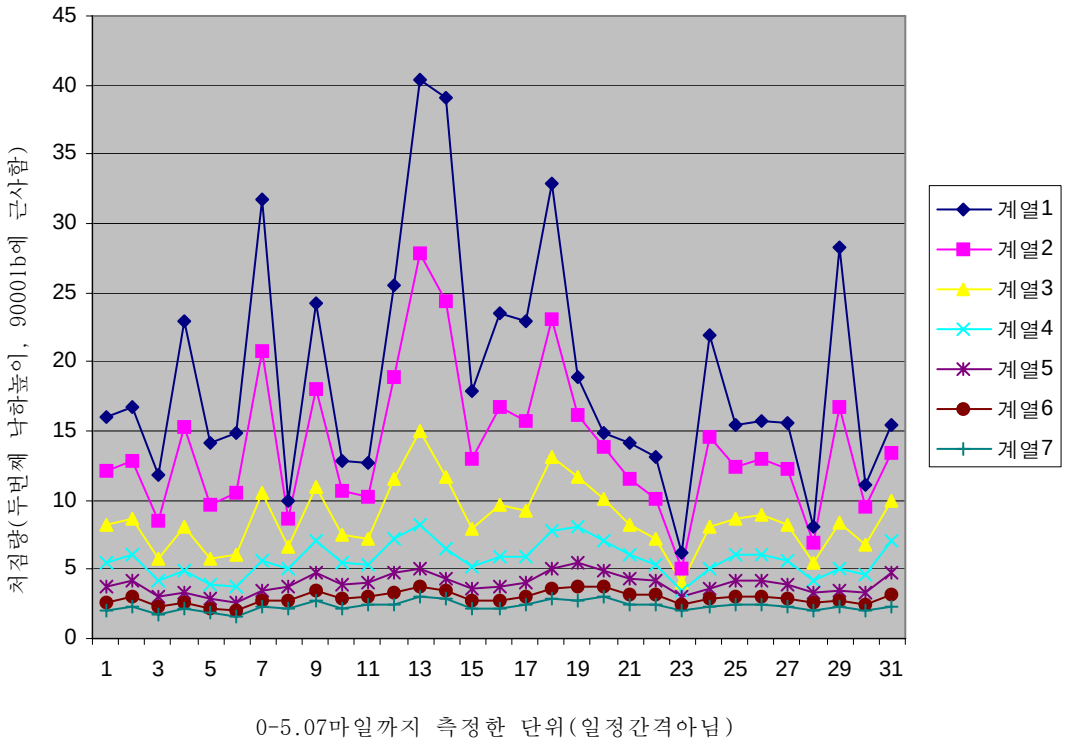


<그림 3.7.21> U시 일반국도와 친환경 4S 투·배수성 포장시스템과의 처짐량 비교

<그림 3.7.21>에 나타난 바와 같이 국내 U시 일반국도에서 2001년 12월에 측정한 처짐량 데이터와 현장 시험시공 처짐량을 비교해 보았다. U시에서 실시한 구간의 아스팔트 포장 두께는 각각 20, 32, 45cm였으며 평균값을 이용하였다. 그래프를 살펴보면 현재 공용중인 20cm 아스콘의 처짐량이 표층과 노상에서 투수AP/투수CTB의 처짐량보다 큰 것을 알 수 있다. 이는 곧 우리가 제시하는 포장 시스템이 국도에 사용하는 것보다 구조적으로 안전함을 보여주는 것이다.

또한, 텍사스에서는 우리나라의 지방도 급에 해당하는 FM 655번 도로에서 1월에 FWD를 이용한 실험의 결과로 <그림 3.7.22>과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 포장의 표면 상태는 비교적 양호하였으며, 포장 두께가 10cm이었다. 포장두께의 차이로 직접적이 처짐량의 상대비교는 불가능 하지만 <표 3.7.16>를 참조해 보면 평균 19mils 이상인 도로가 운영되고 있음을 알 수 있었다.

이러한 국·내외를 FWD측정 데이터를 토대로 감안해보면 본 연구진이 제안하고 있는 투수포장이 교통량이 적은 지방도나 시가지 도로에 적용되지 못할 정도로 큰 값이 아님을 알 수 있다.



<그림 3.7.22> 텍사스 지방도 아스팔트 도로(FM655)의 처짐 곡선

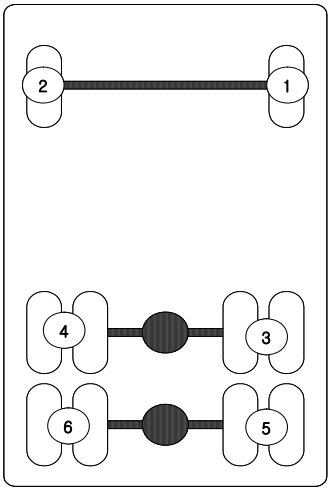
<표 3.7.16> 텍사스 지방도 아스팔트 도로(FM655)의 평균 처짐량(mils, 각센서당)

평균	19.0	13.9	8.7	5.7	4.0	3.0	2.4
표준편차	8.5	5.1	2.4	1.2	0.7	0.5	0.4

(나) 정적하중 재하실험

정적하중 재하실험이란 교통하중을 모사하는 정적하중을 포장체의 각 위치에 재하하여 그 때의 변형률을 계측함으로써 포장거동을 살펴보는 것을 말한다. 또한 측정결과 값을 산출하여 해석 프로그램, 상사 모형의 결과 값과 비교하여 실제 포장거동의 특성을 파악할 수 있다.

하중의 크기는 2.78t의 트럭하중이다. <그림 3.7.27>와 <표 3.7.14>은 각각 실험에 사용된 덤프트럭의 차축형태와 차륜하중제원을 보여주고 있다.



<그림 3.7.27> 정적 하중 재하 실험을위한 차축 형태 모식도

<표 3.7.14> 차륜 하중 제원

구 분	하중(kg)
	트럭
총중량	14.22
①	2,780
②	2,780
③	1,980
④	2,380
⑤	2,020
⑥	2,280

정적하중 재하실험은 다음의 순서에 따라서 진행되었다.

1) 계측기가 매설된 위치를 정확하게 파악하고 하중재하위치를 선정한다.

2) 차량이 재하하기 전에 매설된 계측기의 초기값을 기록한다.

3) 차량을 계측기 매설위치로 표기된 곳에 ①바퀴를 재하한다.

4) 차량의 엔진의 시동을 끈다. 그리고 그 값을 기록한다.

5) Data Logger(TDS-303)를 측정하였으며 재하직후 1분 간격으로 2회를 기록한다. 또한 재하 하중이 제거된 직후와 1분 간격으로 2회 측정한다.

<그림 3.7.24>와 <그림 3.7.25>는 각각 축하중 측정 모습과 정적하중 재하실험 모습을 보여주고 있다.

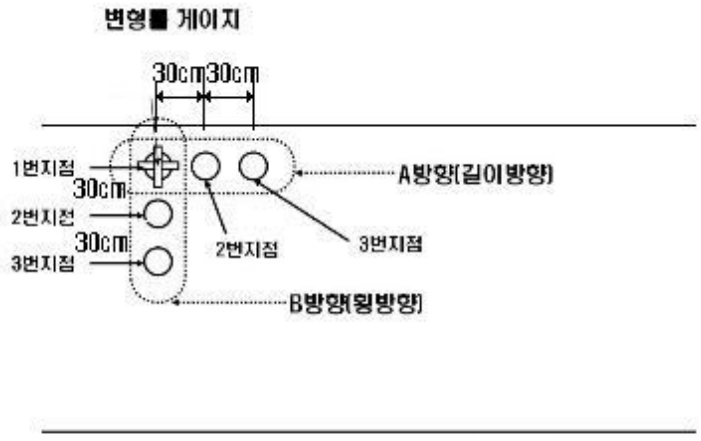


<그림 3.7.24> 축중계를 이용한 접지압 측정

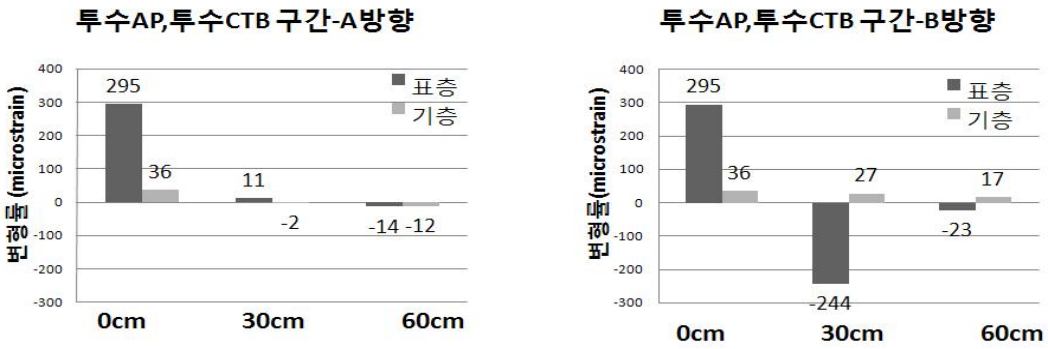


<그림 3.7.25> 측정 위치에 정적하중 재하

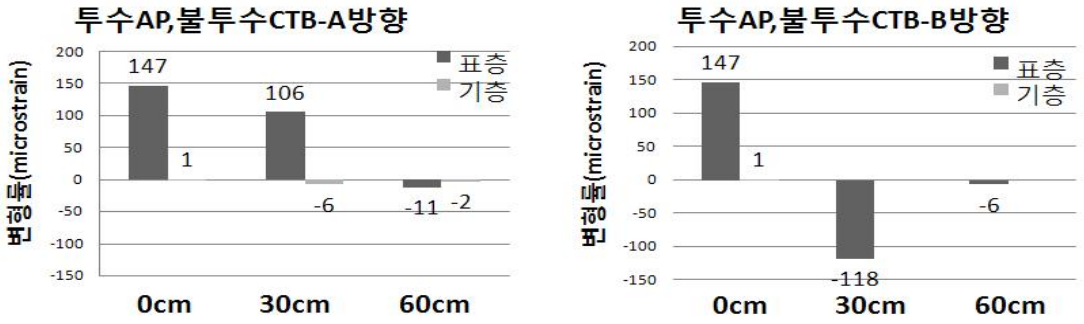
변형률 계측기는 표층의 경우 횡방향으로 기층의 경우 길이방향으로 설치되어 있다. 하중재하는 계측기를 1번으로 하여 정사각형 형태의 9개의 지점에 실시하였으며, 각 지점의 거리는 30cm이격하였다. 계측기의 매설방향에 따른 차이를 알아보기 위하여 <그림 3.7.26>와 같이 계측기를 중심으로 길이방향, 횡방향으로 나누어 정리하였으며, 편의에 따라 길이방향을 A방향, 횡방향을 B방향으로 표시하였다. <그림 3.7.27>과 <그림 3.7.28> 그래프에서 1번 지점 변형률값은 계측기 바로 상부에서 하중재하를 했을 경우의 결과이며 2지점, 3지점의 값이 각각의 방향으로 30cm, 60cm 이격한 지점에서 재하실험을 실시한 결과이다.



<그림 3.7.26> 정적 하중 재하 실험의 위치 및 지점



<그림 3.7.27> 투수AP/투수CTB구간의 정적하중데이터



<그림 3.7.28> 투수AP/불투수CTB구간의 정적하중데이터

투수AP/투수CTB, 투수AP/불투수CTB 구간에서의 실험결과로 <그림 3.7.27>과 <그림 3.7.28>과 같은 그래프를 얻을 수 있었다. 계측기가 매설된 지점을 중심으로 A방향(길이방향), B방향(횡방향)의 데이터를 분석한 결과 계측기가 매설된 위치에서의 하중에 대해서는 표층, 기층 모두 인장변형률을 나타내었으며 투수AP/투수CTB구간에서의 투수AP 인장변형률은 투수AP/불투수CTB 보다 약 50% 더 큰 것을 알 수 있었으며 불투수CTB의 경우에는 거의 변형이 발생하지 않았다. 변형률 게이지에서 인장으로 읽힌 값은 지점이 계측기에서 멀어지게 됨에 따라 인장에서 압축으로 변형하고 결국에는 변형률을 0으로 수렴하게 됨을 알 수 있었다. 투수포장의 경우 길이방향(A)으로 불과 30cm만 떨어지면 게이지에 미치는 영향이 적음을 알 수 있다. 횡방향(B)의 경우 30cm 떨어졌을 경우 달라짐을 보여주고 있다 즉 그만큼 과다한 응력이 걸릴 수 있음을 보여주고 있어 4S 포장의 경우 차량의 Wandering이 매우 중요함을 보여주고 있다. CTB의 경우에도 이러한 추세는 보이지만 표층에 비해서는 거의 변형이 일어나지 않는다.

(다) 코아(Coring)



(a) 일반밀입도 (b) 투수AP/투수CTB (c) 투수AP/투수CTB

<그림 3.7.29> 1차 시험시공 현장 코어링을 통해 채취한 시료 모습

코아 채취를 통해 가장 먼저 육안으로 할 수 있었던 점은 부착정도였다. 일반아스팔트포장을 제외한 투수AP/투수CTB와 투수AP/불투수CTB의 경우에는 부착이 되어 있지 않은 상태였다. 그러나 코아 채취순간에 표층과 기층이 분리된 것이 아니고 코아 공시체를 뽑아내는 순간에 떨어지는 현상이 발생하였기에 기본적으로 부분부착된 상태라고 판단된다. 특히, 투수AP/불투수CTB의 경우에는 부착을 위해 텍코팅을 실시하였으나 CTB층의 텍코팅 살포불량과 CTB의 표면박리현상으로 인하여 부착이 되지 않은 것으로 생각된다. 투수AP/투수CTB의 경우에는 코아 채취 도중에 공시체가 파쇄되는 경우가 발생하였다. <그림 3.7.29.b>은 투수CTB의 파쇄된 경우를 보여주고 있다.

(라) 육안 관찰

다짐 이후 2주 기간 동안 투수/불투수CTB 구간에 대한 육안 관측을 실시하였다. 2주 동안의 관찰기간동안 건조수축은 발생하지 않았다. 그러나 불투수CTB의 표면에서 박리현상이 발생했으며 투수CTB의 탈리현상이 발생하였다. 불투수층의 경우 시공 직 후 아스팔트 층과의 부착을 강화하기 위해 비닐도포를 시행하거나, 택코팅을 실시하되 늦게 양생되는 유화제를 뿌리는 등의 다양한 재료 적용을 통해 CTB 위층의 수분손실을 최소화할 수 있는 방안을 찾아야 할 것이다.



<그림 3.7.30> 1차 시험시공 투수CTB의 탈리 현상 예

투수/불투수CTB 시공 이후 AP가 타설되기 전까지 약 2주 기간 동안 투수/불투수CTB의 표면을 육안 관측하였다. 결과적으로 두 단면 모두 육안으로 건조수축 현상을 발견할 수 없었으며 불투수CTB의 경우 표면이 박리 현상이 나타났고 투수CTB의 경우 실내실험에서 발견할 수 없었던 탈리현상이 발생하였다. 맵 작성은 탈리정도에 따라 상, 중, 하로 1, 2, 3단계로 구분하여 기록하였다. 배합, 시공이나 양생과정에서 수분을 많이 상실한 것이 원인으로 판단되며 탈리현상은 투수CTB의 지지력을 상실시켜 FWD 실험 시 처짐량을 다른 단면에 비하여 크게 발생하게 한 원인으로 판단된다. <그림 3.7.31>는 투수CTB 탈리맵과 <그림 3.7.32>는 투수CTB의 탈리 단계 모습을 보여주고 있다.

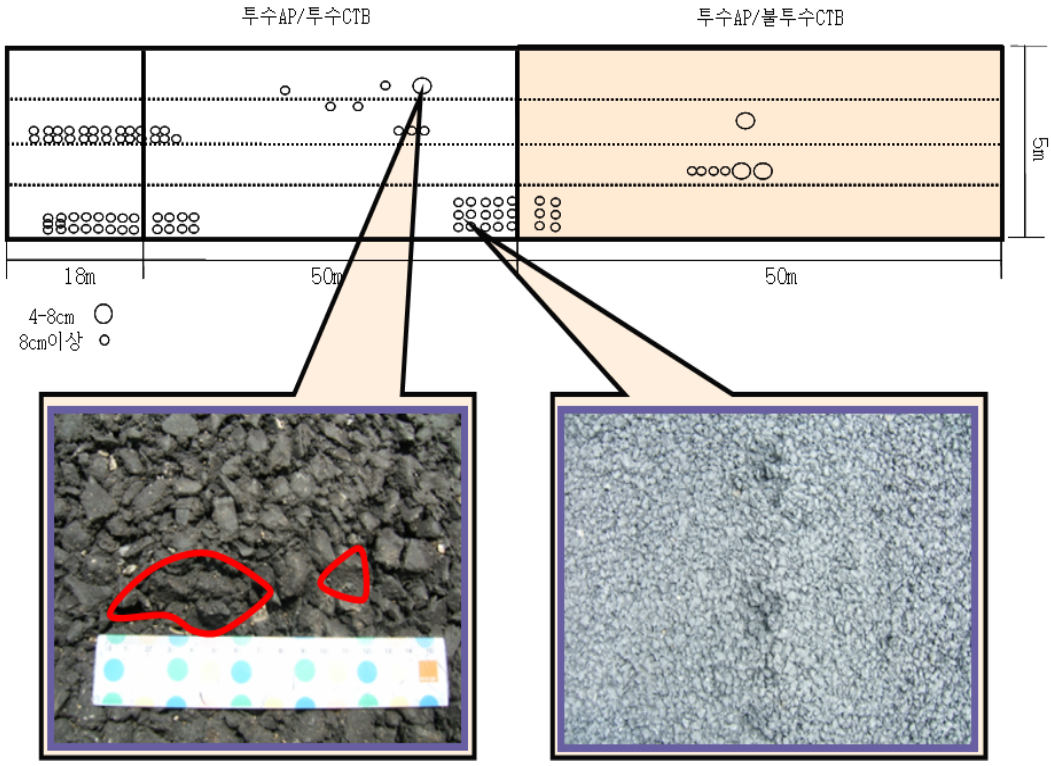


<그림 3.7.31> 1차 시험시공 투수CTB 탈리MAP



(a) 1단계 탈리 (b) 2단계 탈리 (c) 3단계 탈리

<그림 3.7.32> 1차 시험시공 투수CTB 탈리 단계



<그림 3.7.33> 투수AP 표층 육안 관측 결과

<그림 3.7.33>은 투수AP의 육안관찰 결과를 보여주고 있다. 기준은 투수AP에 사용된 골재가 19mm 골재이므로 두 개 이상 떨어져 나간 경우를 탈리현상으로 보았다. 특히 <그림 3.7.33>에서 투수AP/투수CTB 단면상 왼쪽 끝으로 18m 지점까지의 탈리현상은 투수AP 다짐이 마무리된 이 후 채 공용이전에 트럭이 진입하여 바퀴에 골재가 이탈된 경우이다.

시험시공 현장에서 강우이후의 투수성포장과 일반포장과의 포장표면 상태를 육안관찰하였다. 관측한 날은 약 7.5mm/hr의 강우량을 나타내었다. <그림 3.7.34>에서 볼 수 있듯이 투수성포장 표면에 비하여 일반아스팔트포장 표층에 물이 배수되지 않고 있는 모습을 나타내고 있다.

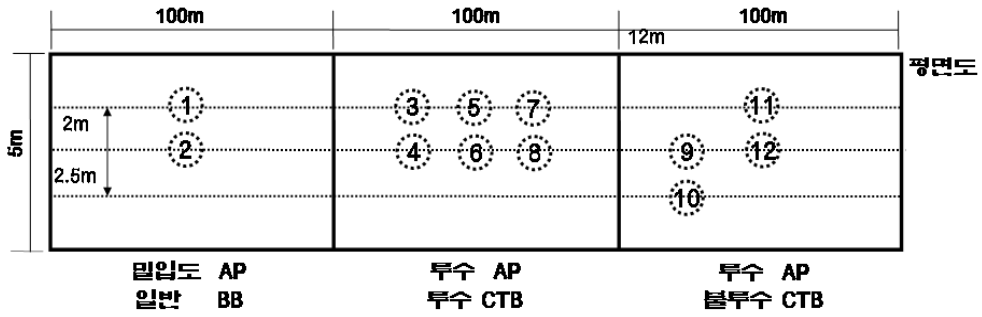


<그림 3.7.34> 강우이후의 포장 표층 상태

(마) 표층투수실험

현장투수특성은 친환경 4S 포장시스템의 주요한 친환경적인 기능성중의 하나이며 이를 통해 우천 시 안전한 미끄럼저항성 확보와 소음 감소가 가능하다. 그러나 투·배수성 포장은 공용기간이 증가함에 따라 먼지, 미세물질 등에 의하여 공극막힘현상이 발생하며 결과적으로 투수능력 및 소음 감소효과 떨어지는 단점이 있다. 김천 시험시공 현장은 교통량이 미미하므로 오로지 환경에 의한 공극막힘현상을 볼 수 있다. 본 연구진은 정기적인 현장투수시험을 통해 투·배수성 포장의 시간에 따른 공극막힘현상을 살펴보며 유지보수관리 및 평가를 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

단면에 따른 측정위치는 <그림 3.7.35>에 나타난 바와 같으며 측정결과는 <표 3.7.18>에 나타나 있다.



<그림 3.7.35> 1차 시험시공 현장투수시험 측정 위치도

<표 3.7.18> 1차 시험시공 현장투수시험 결과

위 치		초(sec)	비고
밀입도 AP 일반 BB	1	17.45	투수가 발생하지 않음(표면배수)
	2	16.17	
투수 AP 투수 CTB	3	3.38	
	4	3.98	
	5	3.76	
	6	3.61	
	7	3.66	
	8	3.89	
	평균	3.71	
투수 AP 불투수 CTB	9	4.35	
	10	4.12	
	11	3.64	
	12	4.20	
	평균	4.08	

결과를 분석해보면 투수AP/투수CTB단면과 투수AP/불투수CTB단면에서 투수시간 기준인 15초 이내의 결과가 나와 대체로 양호한 투수성능을 지니고 있음을 알 수 있었다. 투수 CTB의 경우 평균 5.7초임을 감안할 때 평균 2초 정도 빠른 것을 알 수 있다.

시험시공의 장소의 편구배가 2%임을 감안하여 물을 투입하였다. 이는 투수AP/불투수CTB, 투수AP/투수CTB 및 일반아스팔트포장의 단면별 배수형태 및 방향특성을 살펴보는데 있다.



<a> 투수AP/불투수CTB　　<b> 투수AP/투수CTB　　<c> 일반아스팔트포장

<그림 3.7.36> 1차 시험시공 배수형태 및 방향측정

<그림 3.7.36>은 투수AP/불투수CTB에서 강제 투입된 물의 배수형태 및 방향을 보여주고 있다. <그림 3.7.36.a>에서 보여주듯이 투수AP를 통과한 물은 불투수CTB를 통과하지 못하고 측면배수형태로 배수되고 있는 모습을 육안으로 확인할 수 있었다. 같은 실험을 투수AP/투수CTB와 일반아스팔트 포장에서도 반복 실시하였다. <그림 3.7.36.b>를 살펴보면 물이 측면으로 배수되지 않고 있다. 이는 기층으로 사용된 투수CTB로 물이 바로 투수된 것을 판단된다. 마지막으로 일반아스팔트 포장은 <그림 3.7.36.c>에서 보여주듯이 물이 내부로 침투하지 못하고 편구배를 따라 표면 배수됨을 육안으로 볼 수 있었다.

(바) TDR를 이용한 자연환경(강우량, 온도 등) 노상 중량함수비 변화 관측

본 연구진이 제안하고 있는 친환경 4S 투·배수성 포장시스템은 물이 포장체 내부로 투과되어 노상까지 투수되거나 표층을 통과한 이후 기층에서 표면배수가 되는 형식을 지니고 있다. 일반적으로 포장체에 물이 침투하거나 존재할 경우 탈리와 러팅이 발생하며 노상의 지지력 약화 등으로 구조적·기능적 측면에서 약영향을 끼쳐 포장체의 공용수명을 단축시킨다고 여기고 있다. 이 부분에 대한 편견을 불식시키는 것과 하부구조에 물이 존재라도 적정한 구조적 안전성을 유지할 수 있다는 것을 증명하는 것이 본 연구목적 중의 큰 부분을 차지한다. 도로포장관련 연구에서 많이 사용되고 있는 함수량측정기 TDR(Time-Domain Reflectomemter)를 노상에 매설하여 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 각 단면별 노상함수비의 변화를 살펴보았다. 그러나 이전에 TDR은 흙의 타입, 다짐밀도 등에 의해 오차가 많이 발생하

기 때문에 보정실험(Calibration Test)을 실시하였다.

㉮ TDR 보정실험(Calibration Test)

TDR 보정실험은 다음 순서와 같이 진행되었다.(전성일, 2003)

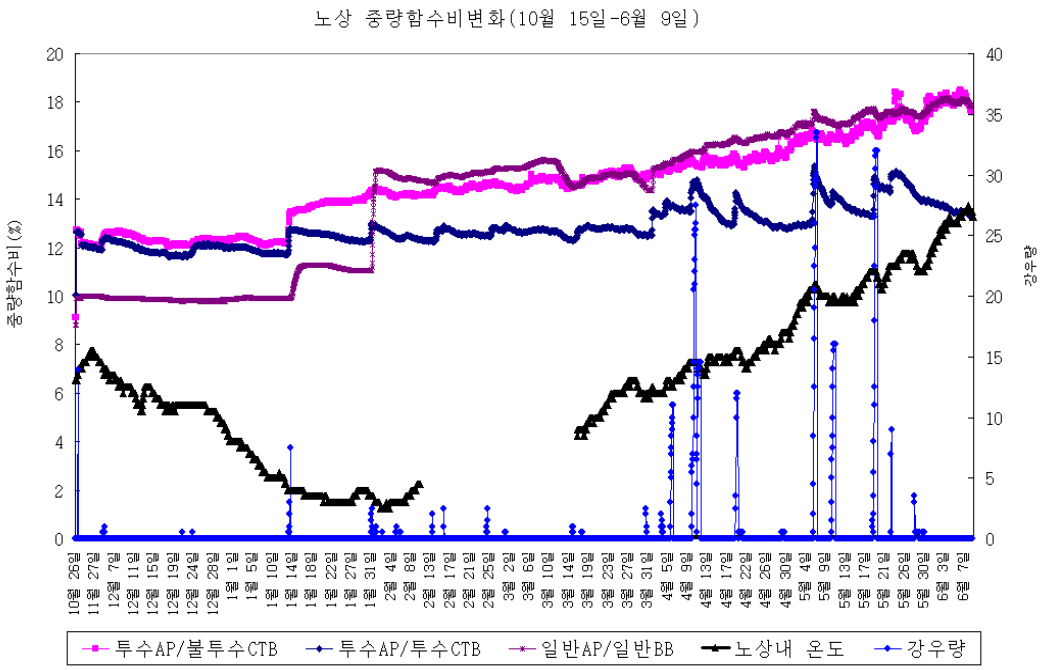
1. 50cm×50cm×30cm 크기의 박스를 제작한다.(플라스틱을 이용하여 박스를 제작하였다.)
2. 각각의 중량함수비에 따라 물과 흙을 계량하고, 혼합하였다.
3. 혼합된 흙을 3층 다짐을 실시하였다.
4. 두 번째 층 다짐 시 TDR를 설치한다. TDR는 박스 크기와 오차를 고려하여 두 개를 매설하였다.
5. 다짐이 마무리 되면 TDR 측정을 실시하며 주기값(T)이 수렴할 때 까지 측정 하였다.
6. 측정이 끝나고 상부의 흙을 제거한 후 TDR 근처의 흙을 샘플링한다.
7. 샘플링한 흙의 무게를 재고 오븐에 넣어 완전건조 시킨 후 다시 흙의 무게를 잰다. 이는 KS F 2306에 준한다.
8. 이를 통하여 결정된 중량함수비와 TDR Output과의 관계를 회귀분석하여 보정방정식을 산정한다.

보정방정식(calibration equation)은 식(3)과 같이 다음과 같다.

$$GWC(\%) = 0.0168X^3 - 1.2625X^2 + 32.164X - 267.52 \quad \text{.....(3)}$$

여기서, GWC(%) : 중량함수비(Gravimetric Water Content)
T : TDR 주기값(T)

㉯ 시간에 따른 노상 중량함수비 관찰



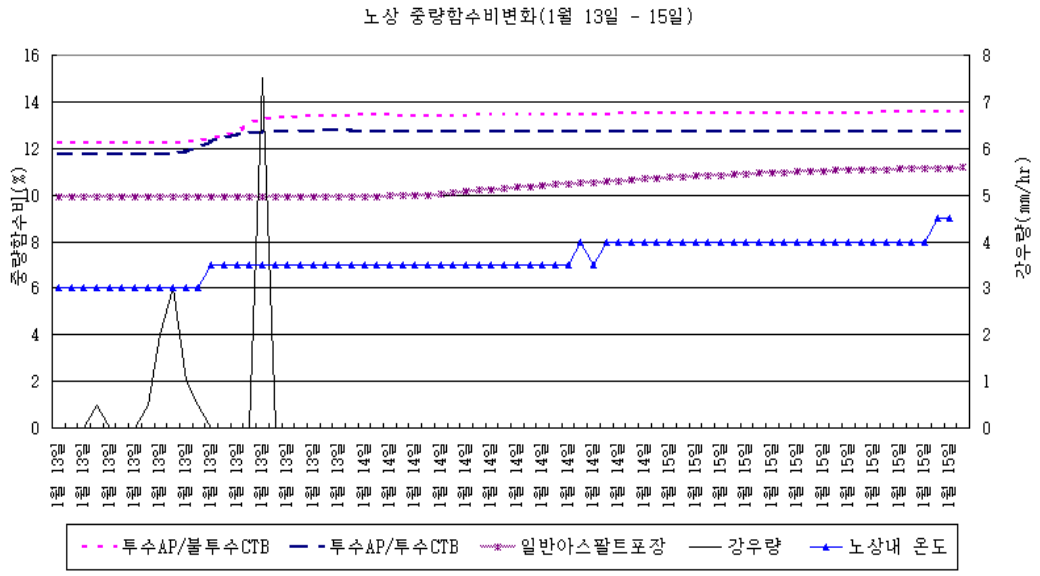
<그림 3.7.37> 강우량에 따른 노상 중량함수비의 변화

<그림 3.7.37>은 약 9개월 동안(2005년 10월~2006년 6월) 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 단면별 노상 중량함수비의 변화를 나타낸 그래프이다. 시공 직후의 노상 중량함수비는 투수AP/투수CTB 단면, 투수AP/불투수CTB 단면, 일반아스팔트 단면 모두 9~10% 대체로 비슷하였다.

그래프를 살펴보면 강우량에 따라 투수AP/투수CTB 단면, 투수AP/불투수CTB 단면, 일반아스팔트 단면 순으로 노상 중량함수비가 증가하는 것을 볼 수 있으며 특히 투수AP/투수CTB 단면 다른 단면에 비하여 강우량에 따라 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있다.

노상 중량함수비량이 적은 초기에는 적은 강우량에도 큰 폭으로 노상 중량함수비가 증가하였으나 2006년 3월 이후 겨울철에 비하여 상대적으로 많은 강우량에도 불구하고 투수AP/투수CTB 단면을 제외한 나머지 단면은 증가율이 둔화되고 있다.

또한 같은 강우량 하에서 투수AP/투수CTB 단면을 제외한 투수AP/불투수CTB 단면과 일반아스팔트 단면의 노상 중량함수비가 계속적으로 증가하고 있다. 반면에 투수AP/투수CTB 단면의 경우는 강우량이 발생할 때는 급격히 증가하고 비가 없는 무강우일이 계속되는 경우에는 노상 중량함수비가 저하되는 요동(Fluctuation)현상이 발생하고 있다.



<그림 3.7.38> 강우량에 따른 단면별 노상 중량함수비 변화 추이

이는 투수AP/투수CTB 단면이 다른 단면에 비하여 표층과 기층에 모두 공극을 가지고 있어 대기와의 교류가 활발하여 노상에서의 수분 소산이 활발히 일어나기 때문이라고 판단할 수 있다고 생각된다. 또한, 노상의 온도가 상승할수록 노상 중량함수비의 저감되는 정도가 점점 커지는 것을 4월 이후에 살펴볼 수 있었다.

<그림 3.7.37>에서는 강우량에 따른 단면별 변화를 확인하기가 어려웠다. 따라서 강우량에 따른 단면별 노상 중량함수비 변화를 살펴보기 위하여 특정일에 대하여 살펴보았다.

<그림 3.7.38>은 1월 13일에 발생한 누적강우량 7.5mm/hr에 따른 단면별 노상 중량함수비의 변화를 보여주고 있다. 데이터 분석 결과 강우 시작 이후 투수AP/투수CTB 단면은 약 4시간 이후 노상 중량함수비가 증가하기 시작했고 투수AP/불투수CTB 단면과 일반아스팔트 단면은 각각 7시간과 18시간 이후에 노상 중량함수비가반응을 보이기 시작했다.

(사) 소음

일반적으로 투·배수성 포장은 일반아스팔트포장에 비하여 많은 공극을 지니고 있어 소음의 주발생원인인 Pumping 효과 저감에 따라 소음이 감소되는 효과가 있

다. 본 실험의 목적은 투·배수성 포장과 일반 아스팔트 포장을 비교함으로써 친환경 4S 포장시스템의 소음 저감 효과를 보고자 한다. 또한 정기적인 계측을 통해 공극막힘현상으로 인하여 소음 저감효과가 떨어지는 경향을 살펴볼 수 있으며 이는 투·배수성 포장의 유지관리 및 보수에 관한 기초자료로 활용이 가능하다.

본 연구진은 2차년도 연구 수행을 통해 주변 환경에 구애받지 않고 포장과 타이어간의 사이에서 발생하는 소음만을 측정할 수 있는 HCPX(Close-Proximity Method) Trailer를 개발하였다. 그러나 경북 김천 시험시공 장소는 부채도로라는 지리적인 특성으로 일정한 속도로 주행하기 위한 여건이 어려워 이번 측정에서는 이용하지 못하였다.

따라서 단독 차량(The single vehicle) pass-by 소음 측정법(CPB)를 이용하여 측정을 하였으며 시험시공 장소가 비교적 짧아 원하는 속도를 내기가 어려웠고 장소가 협소하여 ISO에서 제시한 7.5m 이격거리를 확보하지는 못하였다. 그러나 일반 아스팔트포장과 투·배수성 포장의 상대비교가 주목적이므로 절대적인 소음 결과값에 의미를 두기보다는 단면간의 상대적인 차이에 비중을 두었다. <그림 3.7.39>에서 나타나듯이 소음측정장소 뒤쪽으로 언덕이 위치하고 언덕 너머로는 중부내륙고속도로가 지나고 있다. 이에 따라 중부내륙고속도로에서 발생하는 주변소음과 언덕으로 인해 발생하는 반사음의 발생으로 포장과 타이어간의 실제 발생소음보다 더 큰 소음이 측정됐다고 판단된다. 측정에 사용된 소음측정기와 차량은 각각 S-NA 소음측정기와 코란도였으며 측정방식은 L_A방식으로 실시하였다. <그림 3.7.40>는 소음 측정 장면 모습을 보여주고 있다.

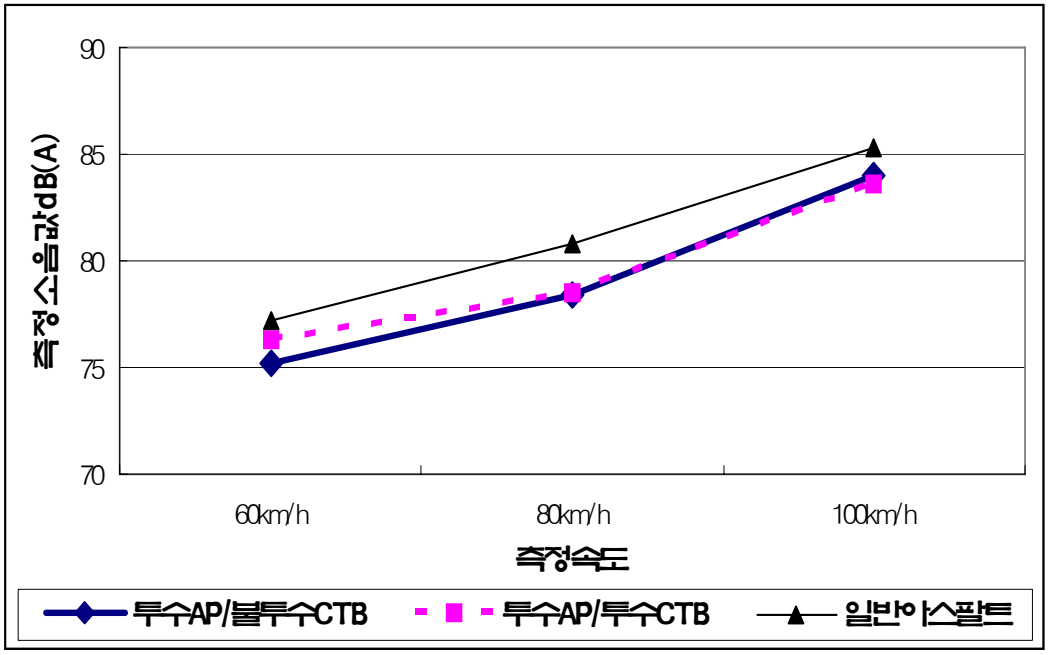


<그림 3.7.39> 1차 시험시공 소음측정 장소 주변현황



<그림 3.7.40> 단독차량 Pass-by 소음 측정 장면

측정 속도는 60, 80, 100km/h였으며 각 단면별로 3회 씩 측정을 실시하였다. 측정결과는 <표 3.7.19>와 같으며 <그림 3.7.41>은 속도에 따른 단면별 측정소음값을 보여주고 있다. 데이터를 살펴보면 60km/h에서는 일반아스팔트포장과 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB는 각각 2dB(A)과 0.9dB(A) 차이를 나타내었다. 80km/h의 경우에는 2.4dB(A)과 2.3dB(A) 차이가 발생하였으며 100km/h에서는 1.3dB(A)과 1.7dB(A) 차이를 나타내었다. 결과적으로 살펴보면 본 연구진이 당초 예상하였던 3dB(A) 이상의 차이가 발생하지는 않았지만 이격거리가 7.5m이하이고 주변소음과 반사음을 고려하여 볼 때 일반아스팔트포장에 비하여 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB구간에서 소음 저감 효과가 발생했다고 판단된다. 또한 60km/h보다 80km/h에서 보다 소음저감효과가 발생하였으나 100km/h에서는 그 효과가 저감되었다.



<그림 3.7.41> 속도에 따른 단면별 측정소음값

<표 3.7.19> 1차 시험시공 단면별 소음측정결과

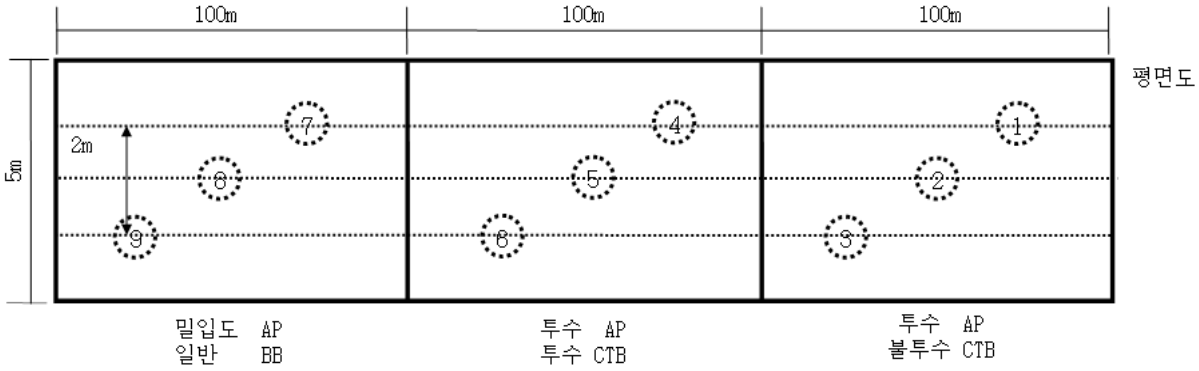
속도(km/h)	투수AP/불투수CTB 소음도(dB(A))	투수AP/투수CTB 소음도(dB(A))	일반아스팔트포장 소음도(dB(A))
60	75.0	76.1	77.7
	74.9	76.7	77.2
	75.6	76.1	76.7
평균	**75.2**	**76.3**	**77.2**
80	78.2	79.5	82.0
	78.7	78.0	80.3
	78.4	78.0	80.0
평균	**78.4**	**78.5**	**80.8**
100	83.2	83.2	86.2
	85.5	85.5	85.0
	83.3	82.3	84.8
평균	**84.0**	**83.6**	**85.3**

(아) 미끄럼저항성

BPT 장비를 이용하여 김천 시험시공 구간의 단면별 초기 미끄럼저항성을 측정하였다. 투·배수성 포장은 일반아스팔트포장에 비하여 우천 시 안정적인 미끄럼저항성을 확보할 수 있는 장점이 있다. 본 연구진은 BPT장비를 이용하여 건조 시와 습윤 시의 각 단면별 미끄럼저항성의 차이를 살펴보았다.

<그림 3.7.42>는 BPT 시험 장소를 보여주고 있다. 각 단면마다 세 곳을 선정하여 실험을 실시하였으며 시험위치마다 습윤 시와 건조 시를 나누어 실시하였으며 실험횟수는 각각 3회씩이었다. 실험방법은 KS F 2375에 준하여 실시하였다.

<표 3.7.20>는 실험 결과를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 전체적으로 영국이 정하고 있는 BPN 50을 초과하여 안전한 미끄럼저항성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다. 습윤 시 보다 건조 시에서의 실험결과가 대체적으로 높았으며 습윤 시의 단면별 비교를 통해 투수AP단면이 일반아스팔트단면보다 최소 6에서 최대 14의 BPN 차이를 나타내었다. 건식 시에도 비슷한 경향을 나타내어 10~19의 BPN 차이를 보였다. 전체적으로 투수AP단면이 일반아스팔트단면보다 습윤 시와 건조 시의 초기 미끄럼저항성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.



<그림 3.7.42> BPT 시험 측정 위치도

<표 3.7.20> 1차 시험시공 BPT 시험 결과

위 치		1 회(습윤)			결과	2 회(건식)			결과
밀입도 AP 일반 BB	7	66	65	66	66	81	83	81	81
	8	65	69	67	67	80	78	79	79
	9	67	67	71	67	78	74	76	76
투수 AP 투수 CTB	4	75	74	73	74	90	90	91	90
	5	74	74	74	74	87	89	91	89
	6	80	79	79	79	86	87	86	86
투수 AP 불투수 CTB	1	70	75	73	73	89	90	91	90
	2	79	79	78	79	90	94	95	94
	3	80	80	79	80	93	95	95	95

(자) 환경에 의한 저수축 투수/불투수CTB의 초기거동 분석

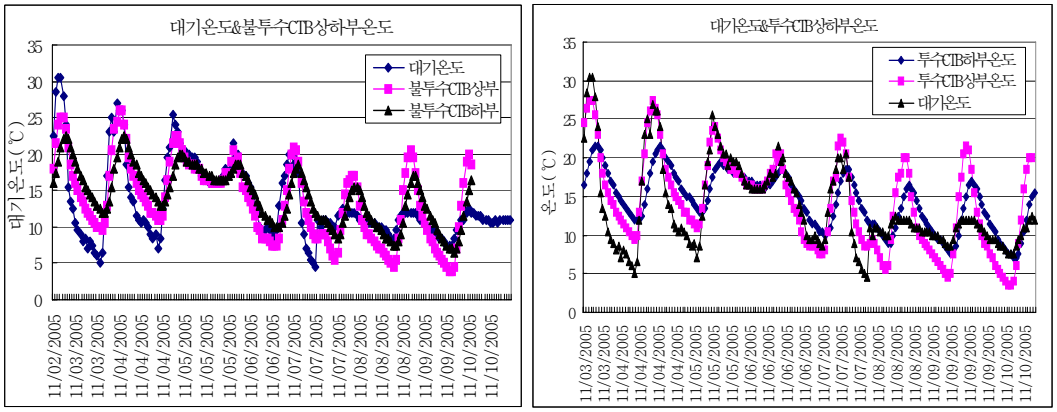
실내실험을 통해 개발한 저수축 투수/불투수CTB의 초기 특성 및 특징을 현장시험시공을 살펴보았다.

① 대기온도에 따른 저수축 투수/불투수CTB의 온도 변화

대기온도에 따른 투수/불투수CTB의 내부온도를 살펴보아 대기온도에 따른 민감

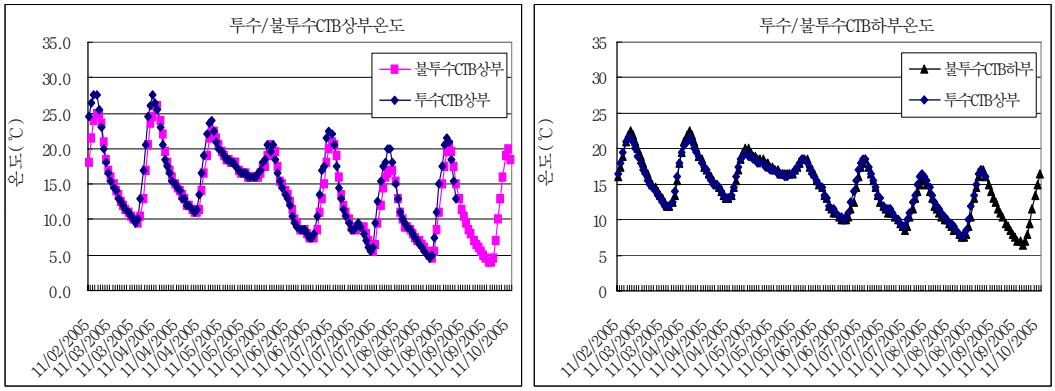
도를 살펴보았다. <그림 3.7.43>을 살펴보면 약간의 시간차이로 대기온도에 따라 투수/불투수CTB 상·하부의 온도가 주기적으로 변화함을 알 수 있다. 그러나 2005년 11월 7일 이후 대기온도가 점차적으로 낮아지고 변화가 작음에도 불구하고 투수/불투수CTB의 내부온도변화가 2.5배 이상 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.

대기온도에 따른 투수/불투수CTB의 상하부 온도를 비교해 보았다. <그림 3.7.44>을 살펴보면 결과적으로 상부의 경우에는 피크치가 투수CTB가 좀 더 높았으며 하부의 경우 거의 차이를 보이지 않았다. 이는 투수CTB가 공극으로 인하여 불투수CTB 보다 상부에서 온도로 인하여 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있었다.



(a) 불투수CTB (b) 투수CTB

<그림 3.7.43> 대기온도와 CTB 온도 비교



(a) 불투수 CTB (b) 투수 CTB

<그림 3.7.44> CTB의 상하부 온도비교

② 환경하중에 의한 저수축 투수/불투수CTB의 초기 변형률 변화

콘크리트 슬래브의 초기거동에 영향을 끼치는 요인은 여러 가지가 있으며 문헌에 따르면 환경하중인 온도, 습도 등이 콘크리트 슬래브의 초기거동에 상당한 영향을 끼친다고 한다.(Rao et al, 2001)

남정희에 따르면 시간에 따른 콘크리트의 변형은 크게 응력하중에 의해 발생하는 변형과 환경화중에 의해 발생하는 변형으로 구분된다고 하였으며 외부하중을 통해 발생하는 변형은 탄성변형과 크리프변형이 대표적이며 온도변형과 건조수축은 환경하중의 대표적인 경우라 하였으며 아래의 식(4)과 같이 변형률의 종류를 구분하였다.(Nam, 2006)

$$\begin{aligned} \triangle\varepsilon_i^T &= \triangle\varepsilon_i^\sigma + \triangle\varepsilon_i^0 \\ &= \triangle\varepsilon_i^e + \triangle\varepsilon_i^c + \triangle\varepsilon_i^{th} + \triangle\varepsilon_i^{sh} \end{aligned} \quad \text{.....(4)}$$

여기서, $\triangle\varepsilon_i^T$: 전체 변형률

$\triangle\varepsilon_i^\sigma$: 응력 독립 변형률(stress-independent strain)(탄성변형률, 크리프변형률)

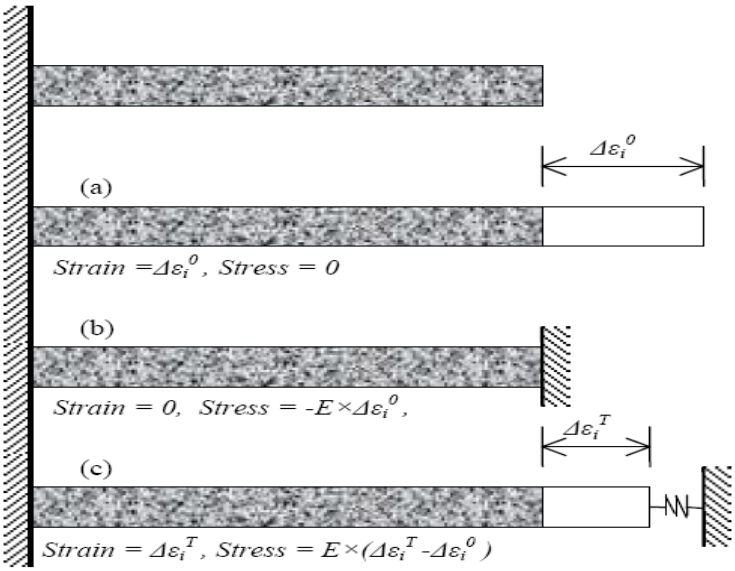
$\triangle\varepsilon_i^o$: 응력 비독립 변형률(stress-dependent strain)(온도변형률, 습도변형률, 건조수축변형률)

$\triangle\varepsilon_i^e$: 탄성변형률

$\triangle\varepsilon_i^c$: 크리프변형률

$\triangle\varepsilon_i^{th}$: 온도변형률

$\triangle\varepsilon_i^{sh}$: 건조수축변형률



<그림 3.7.45> 다른 조건하에서의 응력과 변형률(Nam, 2006)

또한 남정희는 다양한 조건하에서의 응력과 변형률과의 관계를 <그림 3.7.45>를 통해 설명하였다. 만약에 교통응력이 없고 온도와 습도 같은 환경하중만이 존재한다면 환경하중에 의해서만 변형이 발생하게 된다. 예를 들어, bar에 환경하중에 의해 발생하는 응력 독립 변형률(stress-independent strain; 이하 SIS)이 $\triangle\varepsilon_i^\sigma$라고 가정한다면 그림 (a)와 같이 구속이 없다면 환경하중에 의해 bar의 SIS은 $\triangle\varepsilon_i^\sigma$이고 응력은 존재하지 않는다. 다른 경우로 그림 (b)와 같이 bar가 완벽하게 구속이 되어 있는 상태이고 같은 힘의 환경하중이 작용한다면 구속으로 인하여 변형률은 발생하지 않고 이때의 응력(압축)은 SIS과 탄성계수의 곱이 된다. 유사하게 bar에 특정한 변형률 $\triangle\varepsilon_i^T$이 발생한다면 이 bar에 환경하중에 의해 발생하는 응력 비독립 변형률(stress dependent strain; 이하 SDS)은 전체변형률과 SIS와의 차이이다. 이 경우 아래의 식(5)처럼 응력 σ_i는 전체변형률과 SIS 차이에 탄성계수를 곱하여 얻을 수 있다.

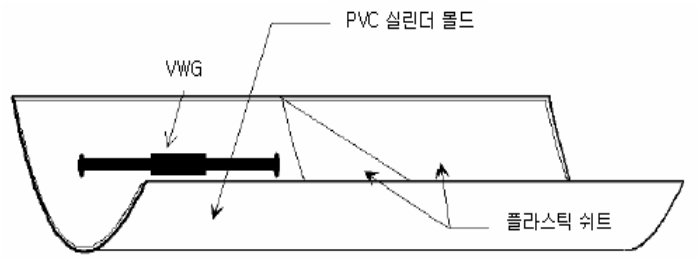
$$\sigma_i = E_i(\triangle\epsilon_i^T - \triangle\epsilon_i^o) \quad \text{.....(5)}$$

또한 SDS 측정 장비를 이용하여 획득한 응력 독립 변형률은 포장시스템에서의 실제 콘크리트 변형률을 계산하는데 이용할 수 있다. 예를 들어, 만약 주어진 콘크

리트 포장 위치에서 응력 독립 변형률을 알고 같은 위치에서 전체 변형률을 측정하였다면 그 위치에서의 실제 응력은 독립 변형률과 전체변형률의 차이에다가 탄성계수를 곱하면 구할 수 있다고 하였다.(Nam, 2006)

실제 포장체에서 SIS를 측정하기 위해서 몇몇 장비들이 발전되고 있다. SIS를 측정할 수 있는 반형 실린더의 개요도가 <그림 3.7.46>에 나와 있다. 반형 실린더는 플라스틱 필름 두층으로 이루어져 몰드와 콘크리트 사이의 마찰을 최소화하여 SDS를 0으로 한다. <그림 3.7.47>~<그림 3.7.48>은 각각 반형 실린더의 매설 전・후 모습이다.

또 다른 방법은 빔을 이용하는 방법인데 빔 하부에 유니스를 이용하여 미끄럼 저항성을 최소화시켜 SDS를 제거하고 SIS를 측정한다. <그림 3.7.49>은 빔을 이용한 실험모습을 나타내고 있다.



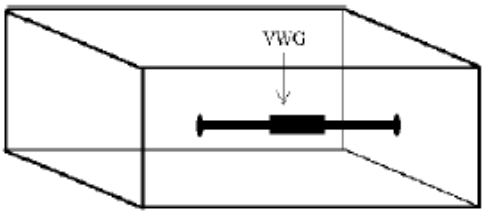
<그림 3.7.46> 반형 실린더 모식도



<그림 3.7.47> 반형 실린더 매설 전



<그림 3.7.48> 반형 실린더 매설 후







<그림 3.7.49> 스몰 몰드를 이용한 SIS 측정

TxDOT에서는 반형 실린더 실험과 스몰 몰드 실험을 통해 콘크리트 COTE(Coefficient of Thermal Temperature)를 구하였다. 온도와 변형률과의 평균 기울기 그래프를 통해 COTE를 얻을 수 있다. COTE와 아래의 식을 이용하여 SIS에서 온도변형률 분리하고 건조수축 변형률을 알아내었으면 CRCP의 포장 거동 특성을 분석하였다.

$$\begin{aligned}\triangle\varepsilon_i^{sh} &= \triangle\varepsilon_i^{o} - \triangle\varepsilon_i^{th} \\ &= \triangle\varepsilon_i^{T}\ of\ Stress \in dependent\ device - (\triangle T \times COTE)\end{aligned}$$

여기서, $\triangle\varepsilon_i^{tos}$: 온도변형률을 제외한 나머지 변형률(건조수축변형률, 습도변형률)

$\triangle\varepsilon_i^{o}$: 환경하중에 의한 변형률

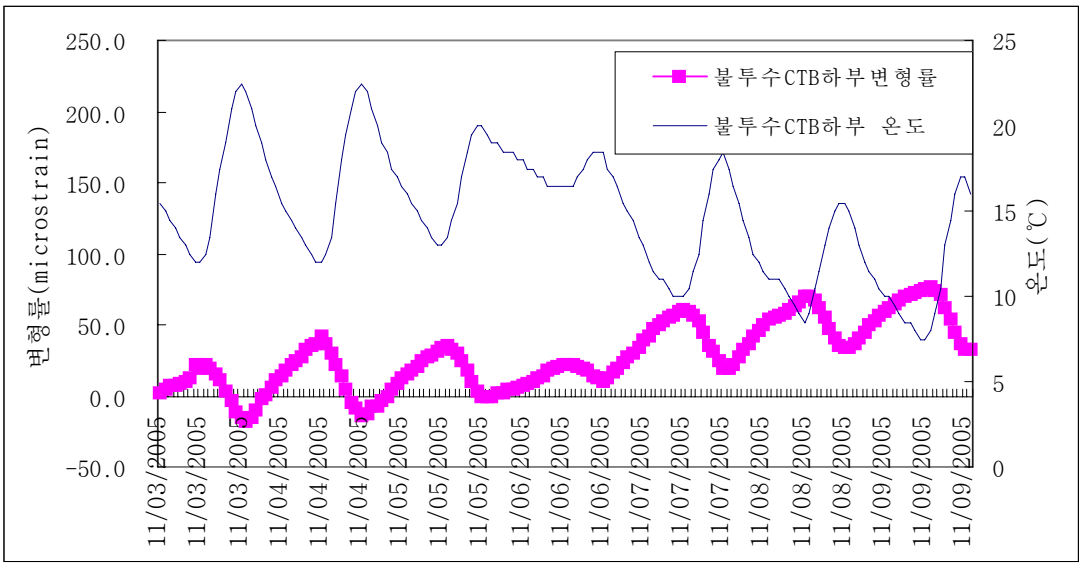
$\triangle\varepsilon_i^{th}$: 온도변형률

COTE : 열팽창계수

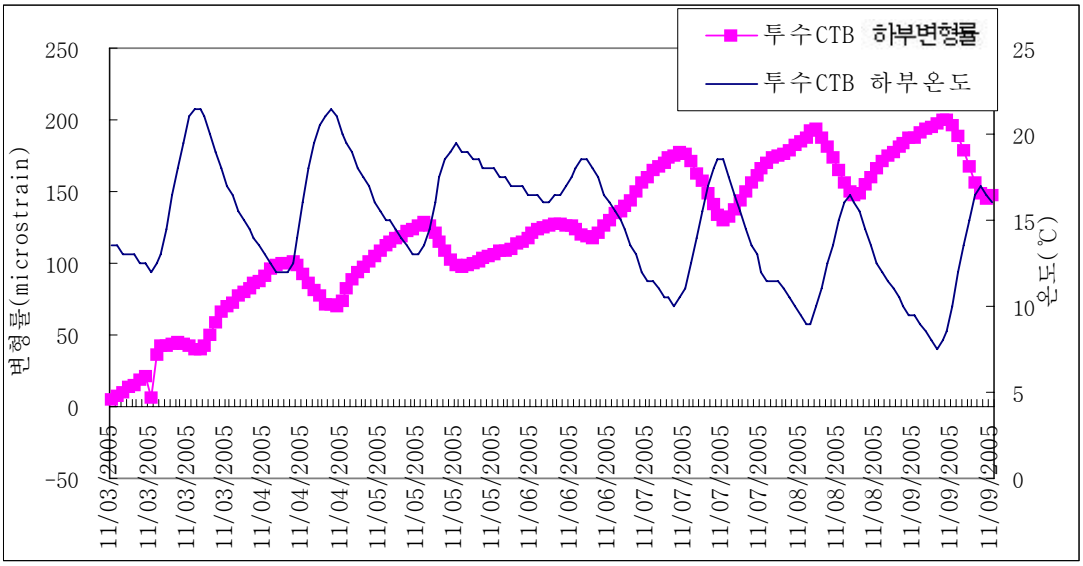
최성철은 초기에 측정한 변형률 데이터와 온도를 비교해 보면 재료의 일반적인

거동과 정대반대의 현상이 목격되는데 이는 계측기의 열팽창계수와 재료의 열팽창계수의 차이 때문에 발생한다고 말하고 계측기의 열팽창계수를 이용하여 보정이 필요성을 말하였다.

문헌고찰을 바탕으로, 현장 시험시공에서 측정한 저수축 투수/불투수CTB의 초기 변형률을 분석하였다. 측정결과는 <그림 3.7.50>~<그림 3.7.51>에 나타나 있으면 각각 불투수CTB와 투수CTB의 초기 측정 변형률을 나타낸다.



<그림 3.7.50> 불투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 전)



<그림 3.7.51> 투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 전)

그래프를 살펴보면 저수축 투수/불투수CTB 변형률 모두 CTB 내부 온도가 상승하면 압축이 발생하고 온도가 내려갈 때 인장이 발생하고 있다. 이러한 현상은 CTB 재료의 일반적인 특성과는 다른 모습이다. 이는 콘크리트 변형률 계측기(KM-100B)와 CTB 재료물성과의 열에 의한 거동 특성 차이, 즉 열팽창계수의 차이로 생각할 수 있다. 따라서 콘크리트 변형률 계측기의 보정계수(Compensation Coefficient)와 온도 교정계수(Correction Coefficient of Temperature)를 이용하여 보정(Calibration)을 실시하여 초기 변형률에서 온도 변형률 제거하였다. 식은 아래와 같다.

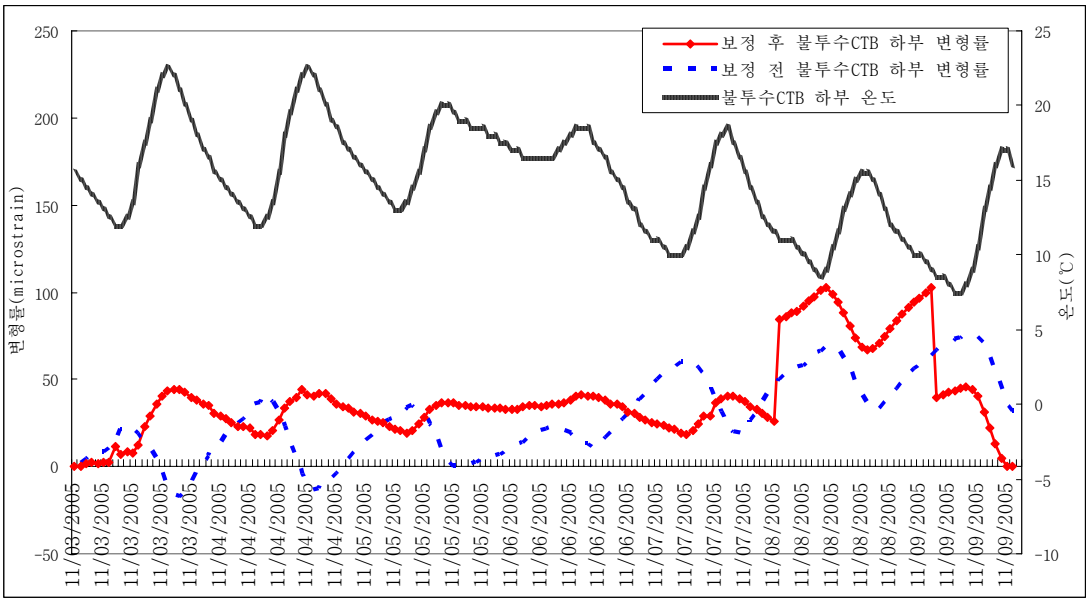
Real Strain = Initial Strain - Initial Strain × Compensation Coefficient × Correction Coefficient of Temperature

여기서 , 보정계수 : Compensation Coefficient(불투수CTB : $10.1\times10^{-6}/℃$, 투수CTB : $10.3\times10^{-6}/℃$)

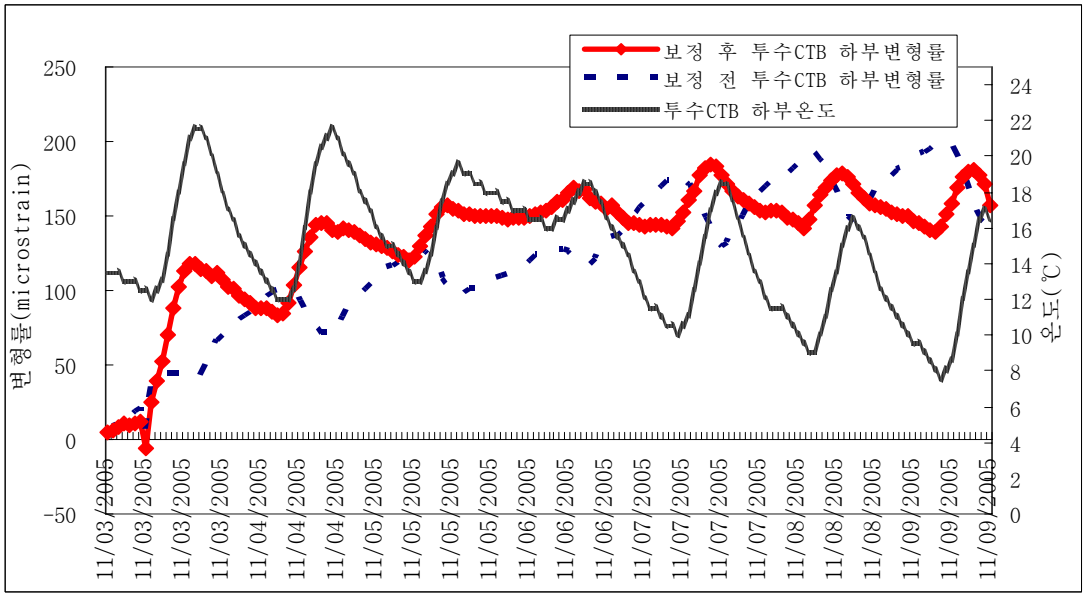
온도 교정계수 : Correction Coefficient of Temperature($0.0195\times10^{-6}/℃$)

Initial Strain : 보정 전 초기 변형률

Real Strain : 초기 변형률에서 계측기의 열팽창계수 차이에 의한 보정 실시 후 변형률



<그림 3.7.52> 불투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 후)



<그림 3.7.53> 투수CTB 변형률과 하부 온도차와의 관계(보정 후)

<그림 3.7.52>~<그림 3.7.53>에서 초기 변형률과 보정 이후의 변형률을 CTB 하부 온도와 동시에 비교해 보았다. 앞서 초기 변형률과 하부 온도와의 비교와는 달리 보정 이후의 변형률과 하부 온도를 비교해 보면 온도가 증가할 때 변형률이 증가하고 온도가 낮아질 때 변형률이 감소하는 경향을 살펴볼 수 있다.

저수축 투수/불투수CTB의 보정 이후의 전제적인 변형률을 살펴보면 초기 변형률 측정에 있어서 불투수CTB에 비하여 투수CTB에서 더 큰 변형률이 발생하고 있다.

본 연구진은 초기 계측을 통해 변형률 데이터와 포장체의 온도를 측정하였고 이를 통해 포장체 거동에 미치는 인자들(온도, 습도 등)을 분류하고 각각의 영향에 대하여 살펴보고자 하였다.

그러나 측정한 변형률 데이터에는 SIS와 SDS가 모두 포함되어 있어 분류하기 어렵고 SDS을 0으로 만드는 작업 즉, 구속이 없는 상태에서의 변형률 측정실험이 부족하였다.

마. 20개월 후 공용성 평가

1차 현장시험시공 실시 20개월 후 공용성 평가를 재차 실행하였다. 주요 평가 항목은 탈리에 대한 저항성과 기능성 저하에 관한 항목이며 육안조사, 현장투수시험, BPT를 기본으로 하였다.

(1) 현장투수시험

현장투수시험 결과, 투수능력이 저하되었음을 확인할 수 있었다. 초기 공용성 평가 시에 투수AP/투수CTB 구간의 경우 400㎖의 통과 시간이 약 4초 미만이었지만 20개월 후의 현장 투수시험 결과 평균 5초 이상이 소요되었다. 또한 투수AP/불투수CTB 구간의 경우도 5초 이상이 소요되는 등 투수능력이 저하됨을 알 수 있었다. 이는 현장시험시공 구간 인접 포장 공사시의 공사재료에 의한 공극막힘 현상이 발생했음으로 사료된다. 또한 강우 후의 현장시험시공을 실시한 결과 7.6초의 소요시간을 보여주었다. 이는 강우 후 우수의 포장에서의 이동 속도가 저감하였음을 보여준다. 현장투수시험의 결과는 <표 3.7.21>과 같다.

<표 3.7.21> 20개월 공용후 현장투수시험 결과

위 치		초(sec)		비고
		초기	20개월후	
밀입도 AP 일반 BB	1	17.45	15.20	투수가 발생하지 않음(표면배수)
	2	16.17		
투수 AP 투수 CTB	3	3.38	5.1	
	4	3.98		
	5	3.76	5.2	
	6	3.61		
	7	3.66	7.6 (포화상태)	
	8	3.89		
투수 AP 불투수 CTB	9	4.35	5.2	
	10	4.12		
	11	3.64	5.6	
	12	4.20		



<그림 3.7.54> 20개월 공용 후 현장투수시험

(2) BPT

미끄럼 저항성의 저감 효과를 살펴보기 위하여 BPT에 의한 평가를 실시하였다. BPT 결과 미끄럼 저항성의 효과가 초기 시공시보다 저감하였음을 확인할 수 있었다. 특히 투수AP / 투수CTB 구간의 중간부분에서는 공사에 의한 공극막힘과 평탄화로 인하여 초기 공용성 평가시의 측정값보다 현저히 저감하였음을 확인 할 수 있었다.



<그림 3.7.55> 20개월 공용 후 BPT (British Pendulum Tester)

<표 3.7.22> 20개월 공용후 BPT 결과

위 치		초기공용성평가		20개월 후		비고
		습식	건식	습식	건식	
밀입도 AP 일반 BB	7	66	81	45	60	
	8	67	79			
	9	67	76			
투수 AP 투수 CTB	4	74	90	65	78	
	5	74	89	60	72	
	6	79	86	56	60	
투수 AP 불투수 CTB	1	73	90	62	70	
	2	79	94	55	64	
	3	80	95	61	70	

(3) 육안관측

20개월이 경과된 후의 포장상태는 상당히 파손이 되었다. 특히 포장 중간부에 농작로 포장 공사차량들에 의한 공극 막힘 현상이 발생하였고, 공사구간에서는 심각한 탈리 현상이 발견되었다. 특히 현장시험시공구간의 상부에 위치하고 있는 고속도로에서의 배수시설이 1차 현장 시험시공의 하부를 관통하게 되는데 이 부분의

경우 탈 리가 더 발생함을 확인 할 수 있었다. 이는 초기 공용성 평가시 코어 채취를 통해 확인된 바 있으며 배수시설에 대한 고려가 필요할 것으로 사료된다. 강우시의 투수에 관해서는 성능을 유지하고 있음을 육안으로 확인할 수 있었다.



<그림 3.7.56> 20개월 공용 후 공극막힘현상



<그림 3.7.57> 20개월 공용 후 부분적 탈리 발생



<그림 3.7.58> 20개월 공용 후 강우시 투수능력 유지

바. 결론

■ FWD실험을 통해 세 단면 중앙부에서의 처짐량을 비교해 보았을 때 투수AP/불투수CTB 단면의 처짐량이 가장 적게 발생하였고 투수AP/투수수CTB 단면의 처짐량이 일반아스팔트 단면보다 더 큰 처짐량을 보였다. 이는 실험시기가 겨울철이라는 특성상 일부 투수CTB 구간에서 발생한 탈리현상이 원인으로 판단된다. 국·내외 현재 공용중인 일반도로의 처짐량을 비교해본 결과 본 연구진이 제안하고 실측한 친환경 4S 포장의 처짐량이 교통량이 적은 지방도나 시가지 도로에 적용되지 못할 정도로 큰 값이 아님을 알 수 있었다.

■ 코아 채취를 통하여 단면별 부착정도를 육안으로 판단하였다. 일반아스팔트 단면을 제외하고는 부착이 되어있지 않았다. 특히 투수CTB의 경우에는 일부 공시체가 파쇄 되는 경우도 발생하였다.

■ 육안관측 결과 투수CTB에서 탈리현상이 발생하였으나 강우 시 일반아스팔트 포장과 투·배수성포장을 비교하여 볼 때 투·배수성의 투수성능을 눈으로 확인할 수 있었다.

■ 현장투수시험기를 이용하여 단면별 투수실험을 실시하여 투수AP/투수CTB 단면 및 투수AP/불투수CTB 단면에서 기준에 합당한 결과를 나타내었다.

■ TDR를 이용한 함수량 측정 결과 강우량에 따른 단면별 노상 중량함수비를 관찰하였다. 강우량에 따라 투수AP/투수CTB 단면, 투수AP/불투수CTB 단면, 일반아스팔트 단면 순으로 노상 중량함수비가 증가하였다. 투수AP/투수CTB 단면은 다른 단면에 비하여 소산 정도가 크게 발생하였는데 노상 내부 온도가 증가할수록 소산 정도는 더 크게 발생하였다.

■ 일반아스팔트단면과 친환경 4S 투·배수성 포장 단면에서 소음 측정을 실시하였다. 상대적인 비교·평가로써 의미가 있는 측정 결과 일반아스팔트 단

면보다 2~2.4dB(A)의 소음 저감효과가 발생하였다.

■ BPT 장비를 이용하여 각 단면별 미끄럼저항성을 측정하였다, 측정 결과 투수 AP 단면이 일반아스팔트 단면보다 습윤 시와 건조 시의 초기 미끄럼저항성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

■ 투수/불투수CTB 하부에 매설한 콘크리트 변형률계측기(KM-100B)와 상·하부에 매설한 온도측정계측기(I-Button)를 이용하여 환경하중에 따른 변형률 관계를 살펴보았다. 투수/불투수CTB 모두 대기온도의 영향을 받고 있으며 특히 투수CTB가 더 큰 영향을 받는 것으로 나타내었다. 초기 측정 변형률의 보정을 통해 온도와 따른 변형률의 관계를 살펴볼 수 있었다.

■ 20개월 후의 공용성 평가의 결과, 투수능력과 미끄럼 저항성이 조금 감소하였으며 전체적인 탈리가 발생하였으며, 특히 공사차량에 의한 포장의 파손과 상부 고속도로에서의 배수시설에 의한 탈리가 지속적으로 발생하였음을 확인하였다. 하지만 포장의 기능성은 일정수준 이상으로 유지되고 있음을 확인할 수 있었다.

2. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 제2차 현장 시험시공

본 장에서는 경남 사천에서 실시한 제 2차 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템 현장 시험시공 개요, 목적, 계획 및 시공 흐름도를 기술하였다. 더불어 친환경 4S 투·배수성 포장시스템에서 기층으로 활용되는 저수축 투수/불투수CTB(Cement Treated Base)의 현장 적용성을 높이기 위한 예비실험에 대하여 다루었다.

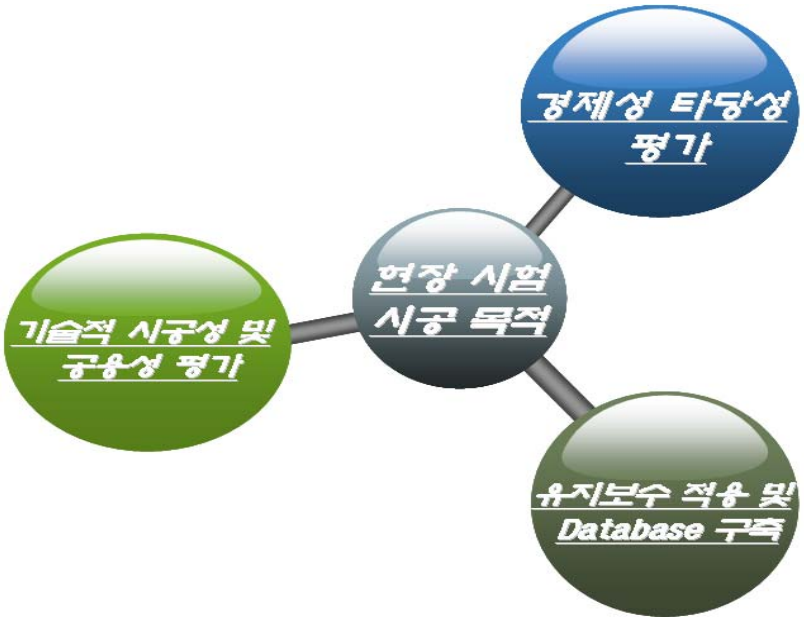
가. 시험 시공 개요

친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템의 구조적 안정성 및 기능성을 평가하기 위해 경남 사천에 시험시공을 실시하였다. 경남 사천구간은 1차 시험시공 단면과 달리 실제 교통량이 존재하여 교통하중과 환경하중을 모두 고려할 수 있는 특징이 있다.

FWD(Falling-Weight Deflectometer)실험, 투수능력 평가, 미끄럼 저항성 평가 등을 통해 초기 공용성을 평가 및 분석하여 일반아스팔트 포장체와 투·배수성 포장체를 비교함으로써 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 공법의 구조적인 안정성과 우수한 기능성을 살펴보고자 하였다.

나. 시험 시공 목적

경남 사천에 시험 시공한 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템은 다음과 같은 목적을 지니고 있으며 다양한 실험 및 평가를 통해 검토하고자 한다.



<그림 3.7.59 > 2차 현장 시험 시공 목적

다. 시험 시공 계획

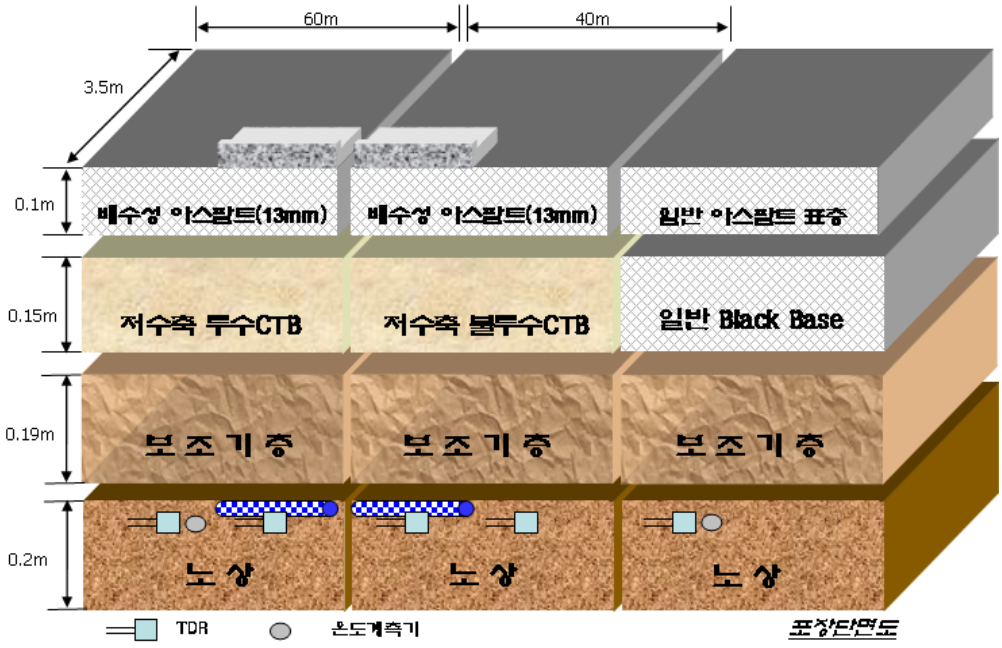
현장 시험시공 계획은 총 4단계로 수립하였다. 첫 번째로 단면두께 및 종류를 설계하였으며 현장 상황에 맞는 구간길이를 선정하였다. 두 번째로는 친환경 4S 포장시스템의 우수처리방식을 평가하기 위하여 맹암거와 유공관을 설치하였다. 이는 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템의 투 · 배수성능을 검증하기 위함이다. 세 번째로는 계측기 매립계획을 수립하였다. TDR(Time-Domain Reflection)과 I-Button을 매설하여 각 단면별 노상 중량 함수비, 온도변화를 살펴보았다. 마지막으로 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템의 구조적 안정성과 기능성을 평가하기 위한 세부적인 공용성 평가 항목을 선정하였다.

(1) 단면계획

친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템의 단면구성은 총 세 개구간으로 투수AP/저수축 불투수CTB 단면, 투수AP/저수축 투수CTB 단면 및 일반아스팔 단면으로 구성되었으며 단면두께의 경우 표층 10cm, 기층 15cm, 보조기층 19cm, 노상 20cm로 하였다. <그림 3.7.64>는 단면구성, 길이 및 두께를 보여주고 있다.

(2) 친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 투·배수성능 평가 계획

경북 김천에서 실시한 제 1차 현장 시험시공 결과, 우수의 노상 침투를 허용하는 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템이나 일반아스팔트 포장 모두 궁극적으로는 포화율이 100%에 이른다는 것을 관측할 수 있었다. 또한, 공극으로 인하여 투수성 포장의 경우 소산 작용으로 인하여 무강우일이 지속될 경우 노상 중량함수비가 감소한다는 사실도 알 수 있었다. 그러나 배수로를 설치하지 않아 배수로 설치에 따른 노상 중량함수비의 변화와 투·배수성능을 평가할 수 없었다. 이에 따라 경남 사천에서 실시하는 제 2차 현장 시험시공의 경우 일부구간에 대하여 맹암거, 유공관 및 L형 측구를 설치하였다. 이는 배수로 유무에 따른 노상 중량함수비의 변화와 투·배수성능을 관측하며 향후 본선 시공 시 배수로 설치 기초자료로 활용하고자 한다.



<그림 3.7.60> 2차 시험 시공 단면도

(3) 계측기 매립 계획

<그림 3.7.60>는 친환경 4S 투 · 배수성 포장체와 일반아스팔트 포장체의 계측기 매립 현황을 보여주고 있다. 노상의 경우 TDR 매설을 통해 자연환경(강우량, 온도 등)과 맹암거 및 유공관 설치에 따른 노상 중량함수비의 변화를 살펴보고자 하였으며 I-Button의 경우에는 노상 동결유무 검토한다, 또한 FWD측정을 통해 포화율과 노상 지지력와의 관계를 단면별로 비교·검토할 계획이다.

(4) 공용성 평가 계획

2차 시험시공에서는 효율적이고 체계적인 공용성 평가를 위하여 <표 3.7.23>과 같이 시기별로 공용성 평가 계획을 수립하였다.

라. 시험 시공 예비 실험

실내실험을 통해 개발된 신재료를 실제 현장에 바로 적용하기에는 많은 부담감이 뒤따른다. 따라서 1차 현장 시험시공에서의 경험을 바탕으로 현장 적용성을 높이기 위한 양생 방법에 따른 내구성 평가, 굳지 않은 CTB 현장품질평가 실험, 투수AP 표층과 투수CTB간의 최적부착을 위한 OTC(Optimum Tack coating Content)실험을 실시하였다.

<표 3.7.23> 시기별 공용성 실험 항목

항목 \ 기간		초기 (시공직후)	3개월 (겨울)	6개월 (봄)	9개월 (여름)	1년	2년
구조적 평가	FWD	●	●	●	●	●	●
	Core	●				●	●
	Rutting			●		●	●
기능성 평가	투수성능 및 함수량	●	●	●	●	●	●
	PrI	●				●	
	SN(BPT)	●				●	
기타	교통량 측정	●		●		●	●

(1) 양생 방법에 따른 내구성 평가

경북 김천에서 실시된 제 1차 시험시공 시 CTB기층에서 두 가지의 보완사항이 관측되었다. 하나는 저수축 불투수CTB에서의 표면박리 현상이었으며 다른 하나는 저수축 투수CTB에서의 골재 탈리 현상이었다. 이는 배합 시 사용되는 플라이애시(25%)가 포졸란 반응을 일으키기까지 충분한 수분공급이 이루어지지 않았기 때문이라고 판단된다. 콘크리트의 경우, C_3A, C_3S, C_2S가 수화반응을 통해 C-S-H와 수산화칼슘을 생성하며 C-S-H는 콘크리트 강도발현에 기여하게 되며 수산화칼슘은 강도와 관계없으며 수분친화성을 지니고 있다. 이때 포졸란 재료를 첨가하면 아래 식과 같이 포졸란 반응을 일으켜 추가적인 C-S-H를 생성하게 된다.

$$SiO_2 + Ca(OH)_2 + H_2O \rightharpoonup C\text{-}S\text{-}H$$

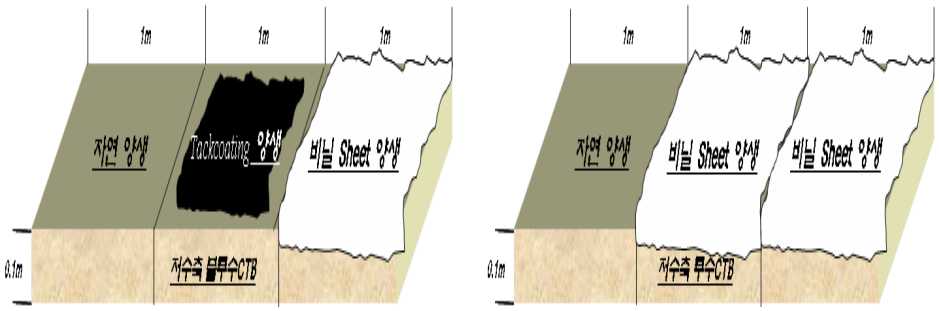
그러나 포졸란 반응은 반드시 수분이 필요하며 따라서 플라이애시가 충분한 포졸란 반응을 할 수 있는 시간까지의 수분보존을 위한 장기간 양생이 필요하다. 텍사스의 경우 플라이애시를 이용할 경우 10일 이상의 장기간 양생을 요구하고 있다.

이에 따라 양생 방법에 대한 실험을 실시하였으며 LA마모 실험을 통해 양생 방법에 따른 내구성을 평가하였다.

(가) 실험 개요

양생 방법에 따른 저수축 투수/불투수CTB의 내구성을 평가하기 위해 3m×1m×0.1m(길이×폭×높이)크기의 거푸집을 2개 제작하였다. 실험단면은 <그림 3.7.65>와 같이 총 6개 단면이었다. 저수축 불투수CTB의 경우 비닐 및 텍코팅 양생 방법을 적용하였으며 이를 비교하기 위한 일반 양생 구간도 제작하였다. 저수축 투수CTB에서는 비닐 양생 방법만을 적용하였으며 비교를 위한 일반 양생 구간 또한 타설하였으며 저수축 투수/불투수CTB와의 비교를 위한 일반린도 제작하였다.

또한 하이드로크론(DS1923)을 저수축 투수CTB 일반 양생구간과 비닐 구간 상부에 3cm 각각 매설하여 계측기를 통한 표층부근에서의 상대습도의 변화와 관측하고 함수비 변화를 간접적으로 평가하고자 하였다.



(a) 저수축 불투수CTB　　(b) 저수축 투수CTB

<그림 3.7.61> 내구성 평가를 위한 실험적용 양생 방법 종류



<그림 3.7.62> 내구성 평가 다짐 모습



<그림 3.7.63> 내구성 평가 비닐 및 택코팅 양생

비닐 양생 방법의 경우 비닐을 이용하여 수분증발 방지 및 유지를 꾀하였으며 택코팅 양생 방법의 경우 타설 즉시, 살포함으로써 유화제로 통하여 수분증발을 최소화 하고자 하였다. 이 밖에 양생재 및 추가적인 물 살포 등이 고려되었으나 경제성 및 시공성 측면에서 배재되었다. 두께 0.1cm의 비닐를 사용하였으며 택코팅의 경우 도로공사 시방기준(0.2~0.6 ℓ/m^2)을 준수하여 살포하였다. 다짐은 소형롤러 다짐기를 이용하여 6회 실시하였으며 실험의 정확성을 위해 경남 사천 현지 S사 골재를 이용하였다. <그림 3.7.62>과 <그림 3.7.63>은 각각 다짐 모습과 비닐 및 택코팅 양생 모습을 보여주고 있다.

배합의 경우에는 저수축 불투수CTB의 경우 시멘트 7% 배합을 사용하였으며 저수축 투수CTB의 경우 내구성 향상을 위하여 기존 시멘트 7% 배합에서 9%로 증가시킨 배합을 실험에 적용하였다.



<그림 3.7.64 > 내구성 평가 코어링 모습



<그림 3.7.65> 내구성 평가 LA마모 실험

(나) 실험 방법

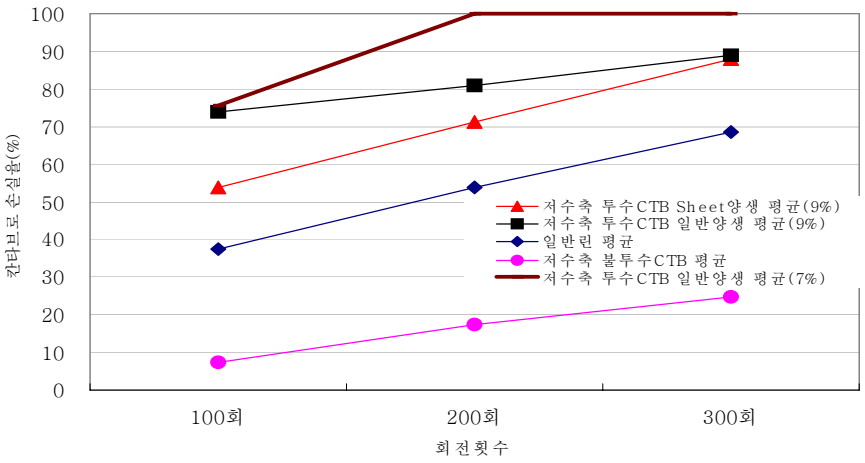
타설 7일 이후, 단면에 대하여 총 6개의 코어링을 실시하여 LA 마모실험 을 실시하였다. <그림 3.7.64>~<그림 3.7.65>는 각각 코어링 모습과 LA 마모실험 실험 모습을 보여주고 있다. LA 마모실험은 총 300 회전횟수를 적용하였으며 각각 KSF 2508에 준하여 실시하였다.

(다) 결과 분석

<그림 3.7.66>에 나타나듯이 LA 마모 실험 결과, 저수축 불투수CTB의 손실량이 가장 적었으며 이후 일반린, 저수축 투수CTB 일반 양생(9%), 저수축 투수CTB 비닐 양생(9%), 저수축 투수CTB 일반 양생(7%) 순이었다.

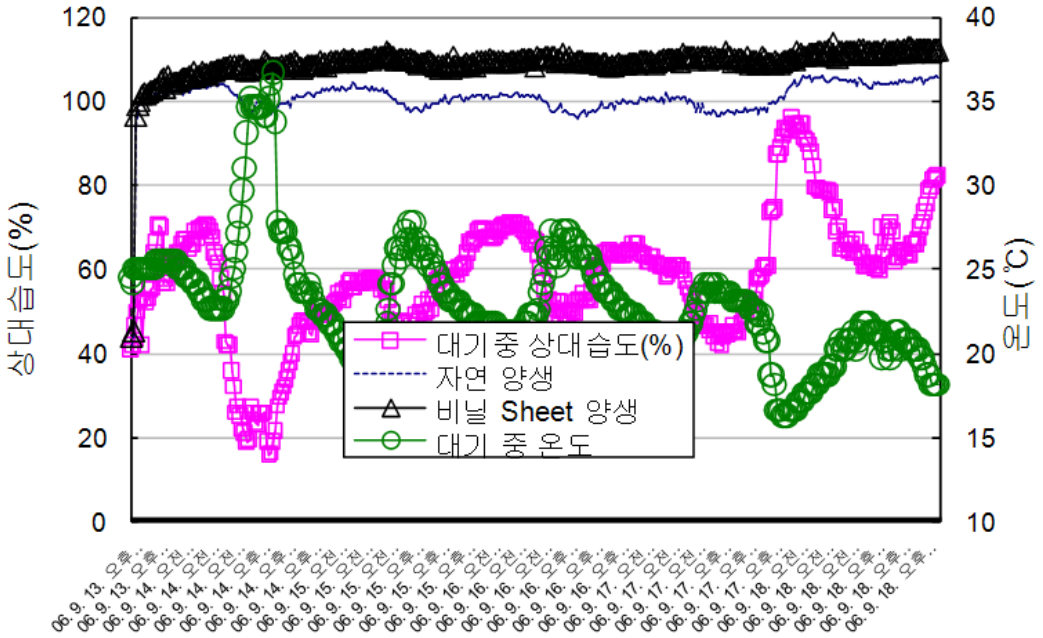
저수축 투수CTB의 경우 시멘트 비율 7%와 9%를 비교해 보았을 때 100회에서 일반 양생사이에서는 차이가 발생하지 않았으나 비닐 양생 방법은 일반 양생에 비하여 약 20%의 손실저감 효과가 있었으며 200회에서 각각 약 80%, 70%의 칸타브로 손실이 300회에서는 약 90%의 손실이 발생하였다. 반면에 저수축 투수CTB 일반 양생(7%)의 경우에는 200회 시 이미 손실율 100%에 도달하였다.

저수축 투수CTB(9%)간의 비교 경우 일반 양생방법에 비하여 비닐 양생 방법이 100회 및 200회에서 각각 20.1%, 9.5%의 칸타브로 손실저감 효과가 나타났다. 이는 시멘트 함량 증가와 비닐양생 방법이 저수축 투수CTB의 내구성 증진에 기여했다고 생각된다.



<그림 3.7.66> 양생법에 따른 칸타브로 손실율 평가

또한, <그림 3.7.67>은 하이그로크론(DS1923)을 이용하여 타설 후, 7일 동안의 상대습도 변화를 나타낸 그래프이다. Data 분석 결과, 일반 양생 방법의 경우 지속적으로 상대습도가 저하되다가 타설 6일 째 내린 비로 인하여 상대습도가 증가되는 경향을 보였다. 반면에 비닐 양생 방법의 경우 외부 대기 온도 및 상대습도 변화에 관계없이 습도가 일정하게 유지됨을 볼 수 있었다.



<그림 3.7.67> 하이크로크론(DS1923)을 이용한 상대습도 측정

(2) 저수축 시멘트 안정처리 기층에 대한 현장품질 평가

현장에서 콘크리트를 평가함에 있어서 크게 현장품질관리와 현장품질평가 로 구분할 수 있다. 현장품질평가는 이미 시공이 완료된 이후에 실시하는 것으로 평가결과가 품질 기준에 미달하였다고 하더라도 재시공을 실시하기에는 현실적으로 어려움이 있다. 따라서 굳지 않은 콘크리트 상태에서 실시하는 현장품질관리의 중요성이 여기에 있다고 할 수 있다. 기존의 현장품질관리 방법으로는 슬럼프 시험과 공기량 시험을 주로 이용하였으나 저수축 투수/불투수CTB의 경우 건식배합이라는 특성을 지니고 있어 슬럼프 시험과 공기량 시험을 적용할 수 없는 어려움이 있다. 이에 따라 저수축 투수/불투수CTB의 굳지 않은 콘크리트 상태에서의 현장품질관리를 위한 새로운 실험법에 대한 연구를 시행하였다.

(가) 실험 개요

영국 기준에 따르면(BS 1881, 1983) 현장품질관리의 경우 <표 3.7.24>에 나타난 바와 같이 작업성 상태에 따라 다른 실험법을 적용하고 있다. 작업성이 낮을 경우에는 Vebe 시간, 다짐 인자를 사용하고 있다. 기존 장비의 원리를 참고하여 저수축 투수/불투수 CTB를 평가할 수 있는 HFT(Heart Portable Fresh Concrete Test)를 개발하였고 이에 따른 검증 실험을 실시하였다.

<표 3.7.24> 다양한 작업성에 따른 Test 방법(BS 1881, 1983)

작업성	Method
Very low	Vebe time
Low	Vebe time, compacting factor
Medium	Compacting factor, slump
High	Compacting factor, slump, flow
Very high	Flow

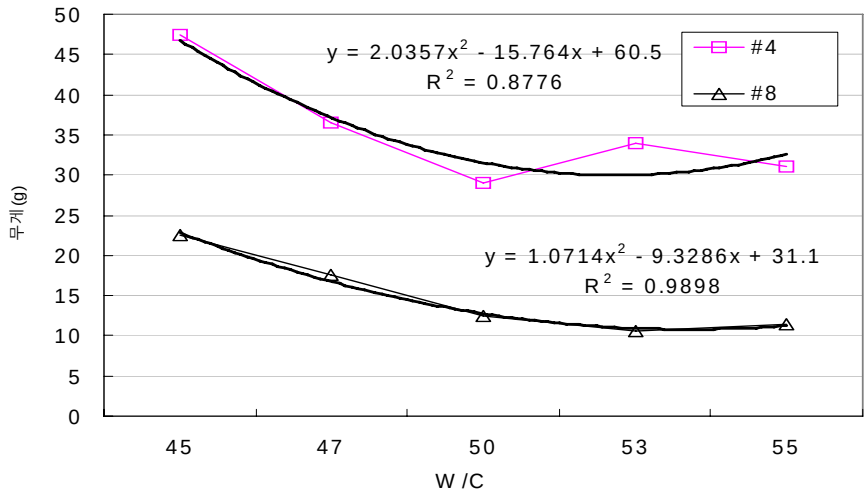
(나) 실험 방법

HFT 장비의 활용성을 평가하기 위하여 저수축 투수CTB에 대하여 검증실험을 실시하였다. <그림 3.7.68>는 HFT 검증실험 모습을 보여주고 있다. W/C를 45, 47, 50, 53, 55%로 달리하여 5회 대하여 실시하였다. 실험 절차는 아래와 같다.

① HFT장비를 설치하고 조립한다.
② 굳지 않은 콘크리트 상태에서 1.5kg를 준비한다.
③ 300g 분할하여 총 5회 씩 실험을 실시한다.
④ 체를 통과한 무게를 측정한다.
⑤ 같은 실험을 세 번 반복하여 실시하였다.



<그림 3.7.68> HFT(Heart Portable Fresh concrete Test) 검증 실험



<그림 3.7.69> W/C에 따른 잔골재 무게 변화

(다) 실험 결과

<그림 3.7.69>에서 나타나듯이 실험결과, #4, #8 모두 W/C가 증가할수록 잔골재의 무게가 점차적으로 감소하는 경향을 보였으며 #4보다 #8에서 보다 좀 더 좋은 결과를 도출하였다. 이는 W/C가 증가할수록 시멘트 모르타르와 잔골재간의 점착력이 높아져 분리되는 잔골재가 적어지는 것이 원인으로 판단된다. W/C 53% 이후 55%에서 다소 증가하는 모습을 보이고 있는데 이는 W/C 적을수록 자유낙하에 의해 분리되는 잔골재가 증가하지만 일정량의 W/C를 초과할 경우에도 분리되는 잔골재의 양이 증가하는 것으로 생각된다.

(3) OTC(Optimum Tack coating Content)실험

도로공사 시방지침에 따르면 기층과 표층과의 부착력을 위하여 택코팅을 실시하도록 하고 있다. 시험 시공 시 기층으로 적용하고 있는 저추숙 투수CTB는 공극을 지님으로써 우수를 노상까지 침투시키며 소음을 저감시키는 기능성을 갖추고 있다. 그러나 표층과 기층간의 부착을 위해 택코팅시 기존의 시방지침에 살포할 경우 공극이 막혀 기능성을 상실하게 되며 너무 적은 양을 살포할 경우 부착이 되지 않아 CTB의 하중분배효과를 기대하기가 어렵다. 따라서 저수축 투수CTB의 기능성을 상실하지 않으면서 CTB의 하중분배효과를 유지할 수 있는 Optimum Tack coating Content와 살포 방법에 대하여 실험을 실시하였다.

(가) 실험 개요

저수축 투수CTB 타설 후 코어링을 통해 택코팅 비율에 따른 부착강도를 평가하고자 한다. 코어채취 할 부분을 미리 표시하여 0%에서 100%까지 6단계로 3개씩 분할하여 각 시료의 부착강도를 측정한다.

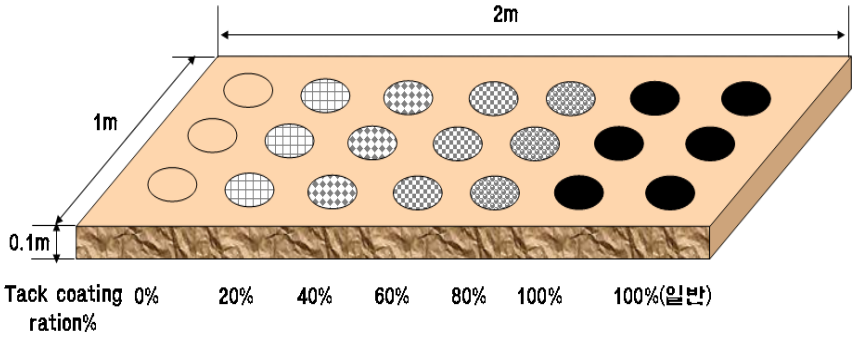
(나) 실험 방법

1m×2m×0.1m(폭×길이×높이)의 거푸집을 제작하여 투수CTB를 타설한 후 7일간

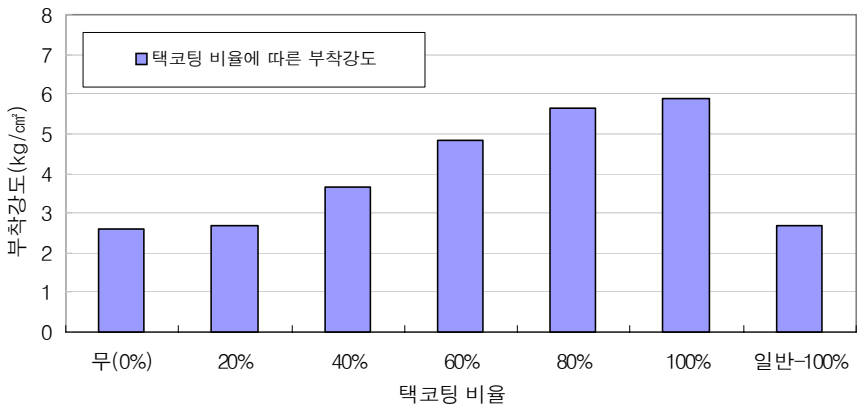
양생시킨다. 이후 <그림 3.7.70>와 같이 투수CTB 위에 비율을 달리하여 택코팅을 실시한다. 0, 1/5, 2/5, 3/5, 4/5, 1의 비율로 택코팅을 실시한 후 1일 간 건조시킨다. 아스팔트 타설 후 위치를 정확히 잡을 수 있도록 조치하고 각 비율 당 3개의 코어를 채취할 수 있도록 조치한다. 투수AP 타설 이후 미리 정해진 부분의 코어를 채취하여 부착강도시험기를 통하여 실험을 실시하였다. 택코팅은 I사 제품을 이용하였다.

(다) 실험 결과

실험 결과, <그림 3.7.71>에 나타난 바와 같이 택코팅 비율에 따라 점차적으로 부착강도가 증가함을 볼 수 있었으며 100%를 사용하였을 경우 기존 일반 택코팅 제품에 비하여 2.2배 이상의 부착강도를 나타내었다. 현장 시험에는 투수성과 경제성을 고려하여 택코팅 60%를 적용하였다.



<그림 3.7.70> OTC (Optimum Tack coating Content) 실험 개요도



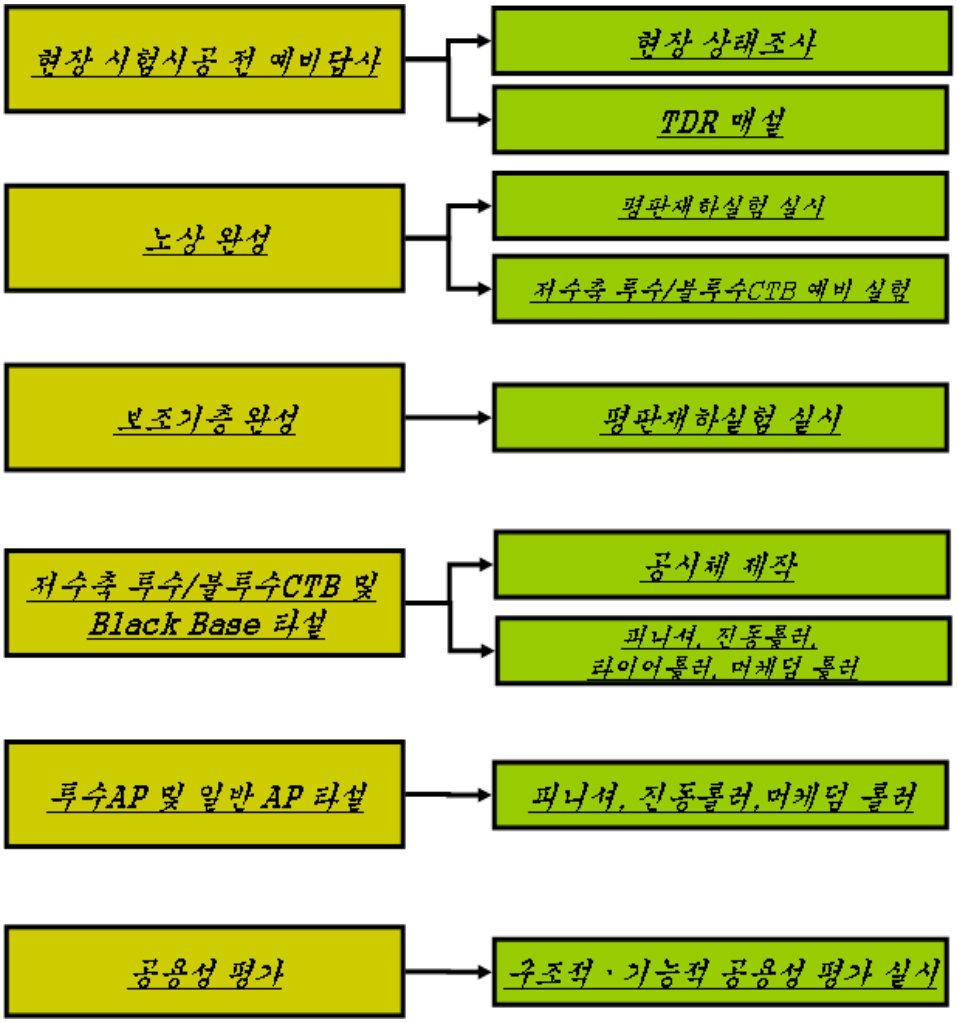
<그림 3.7.71> 택코팅비율에 따른 부착강도

마. 친환경 4S 투 · 배수성 포장 시스템 시험 시공 흐름도

경남 사천에서 실시된 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템 시험 장소는 노상이 균일하지 않고 토사, 파쇄암 등으로 구성되어 있어 선정시 노상의 균일성에 대해 높은 비중을 두었다. 이후 저수축 투수/불투수CTB를 그리고 투수AP표층을 차례로 시공하였다. 노상과 기층부분에는 데이터 계측을 위한 TDR, I-Button를 매설하였으며 표층 완성 이후 초기 공용성 평가를 실시하였다. <그림 3.7.72>은 경남 사천 현장 시험 시공 위치를 보여주고 있으며 <그림 3.7.73>은 전체적인 시험 시공 흐름도를 실험 세부 항목과 함께 나열해 놓은 것이다.



<그림 3.7.72> 경남 사천 현장 시험 시공 위치



<그림 3.7.73> 2차 시험 시공 흐름도

바. 친환경 4S 투·배수성 포장 시스템 시험 시공 초기 공용성 평가

(1) 현장 시험 시공의 시공성 평가

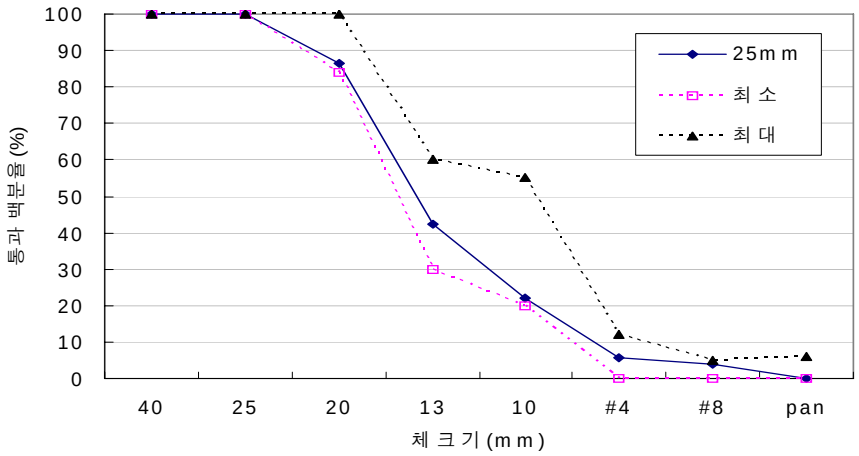
(가) 노상 및 보조기층

현장 시험 시공 과정을 통해 시공성과 현장품질평가차원에서 노상, 보조기층에 대하여 평판재하실험을 실시하였다. 실시 결과, 노상과 보조기층의 평균지지력 계수가 각각 23.96kg/cm^3, 32.96kg/cm^{3}로 측정되어 평판재하 시험기준에 만족하는 것으로 나타났다.

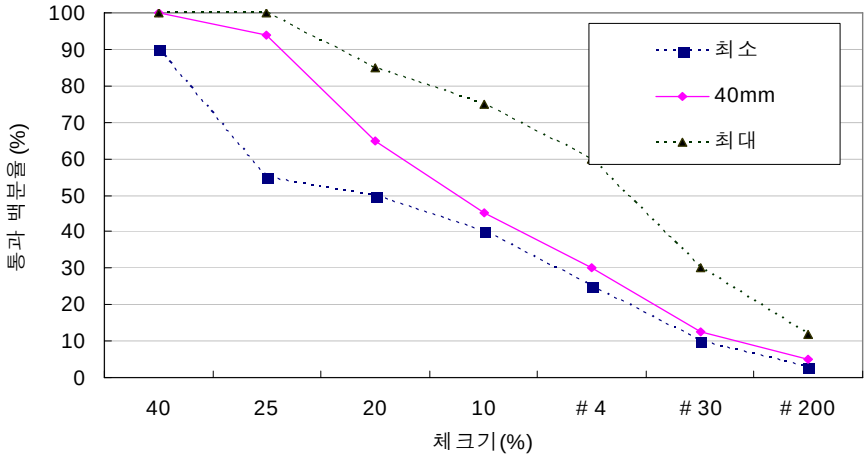
(나) 저수축 투수/불투수CTB의 현장 생산 및 특성 평가

① 저수축 투수/불투수CTB 예비 배합 실험

저수축 투수/불투수CTB의 현장품질관리 및 평가를 위해 현지 S Batch Plant(이하, BP)를 방문하여 예비 실험을 실시하였으며 각각 1m^{3}씩 생산하였다. 신재료의 현장품질관리차원에서 HFT(Heart portable Fresh concrete Test)실험을 실시하였고 현장품질평가차원에서 공시체를 제작하여 강도를 측정하였다. HFT Test 결과, 기준 W/C인 0.47보다 높은 0.53으로 측정되었으며 차후 본 시험시공 시 정확한 표면수 보정이 요구된다. 기준강도의 경우에는 7일 강도 50kg/cm^{2}를 초과하여 도로공사 시방기준에 준하였다. <그림 3.7.74>과 <그림 3.7.75>는 각각 현장 시험시공 시 사용된 저수축 투수/불투수CTB의 입도분포를 나타내며 <표 3.7.25>은 현장 시공에 사용한 배합표이다.



<그림 3.7.74> 저수축 투수CTB의 현장입도분포



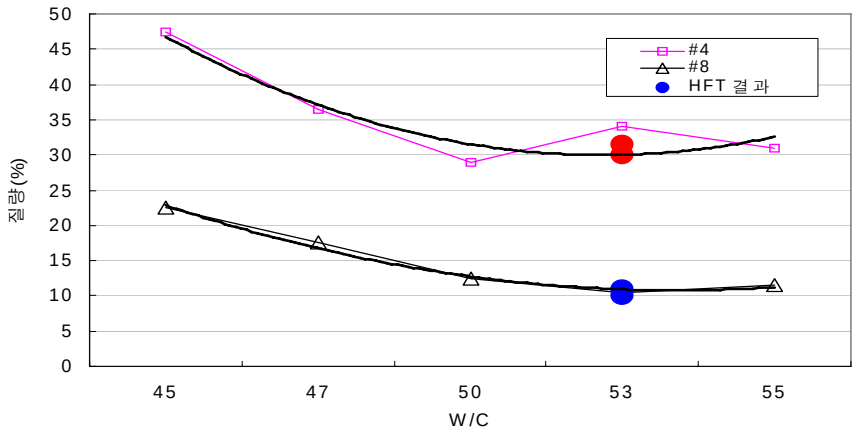
<그림 3.7.75> 저수축 불투수CTB의 현장입도분포

<표 3.7.25> 2차 시험시공 저수축 투수/불투수CTB 배합표

구분 ($1m^3$)	시멘트양 (kg)	아스팔트양 (kg)	물 (kg)	FA(25%) (kg)	팽창제(%) (kg)	굵은골재 (kg)	잔골재 (kg)	공기연행제 (kg)
저수축 불투수 CTB	113	-	120.4	37.75	11.3	1386	667	-
저수축 투수 CTB	145.1	-	90.3	72.6	21.4	1671.6	293.9	0.029

② 현장 생산 및 Mixing

골재, 잔골재의 경우에는 Bin를 이용하여 생산하였고 플라이애시, 팽창제의 경우에는 $2m^3$씩 개량하여 인력을 이용하여 직접 포설하였다. 생산 당일 현장 잔골재의 표면수를 측정해 물량을 보정하였다. 저수축 투수CTB의 경우 <그림 3.7.76>에 나타나듯이 HFT Test 결과 배합 기준 W/C 0.47보다 높은 0.53으로 다소 높은 물량이 포함되어 있는 것을 알 수 있었다. 이는 전날 강우로 인하여 실험을 통한 표면수와 실제 표면수의 오차가 원인이었다고 판단된다.



<그림 3.7.76> 현장 품질관리를 위한 HFT Test 결과

③ 현장 타설

저추숙 투수/불투수CTB는 덤프트럭을 이용하여 이동하였으며 BP장과 시험 시공 현장까지는 약 15~20분 정도의 시간이 소요되었다. 타설은 불투수CTB부터 시작하였으며 기층 재료가 건식배합임을 고려하여 타설은 아스팔트 피니셔를 이용하였다. 그러나 피니셔의 경우, 전날 아스팔트층 포설 이후 유화제가 남아 있어 첫 부분에서 유화제와 CTB가 섞이는 현상이 발생하였다. 차후 시공 시 이점을 고려하여 포설 전 피니셔의 상태 점검이 필요하다고 생각된다. 또한 불투수CTB 시공 이후 투수CTB 타설 시 피니셔에 잔류에 있던 불투수CTB를 처리하고 않고 저수축 투수CTB를 포설하여 불투수CTB와 투수CTB가 공존하는 전이구간이 발생하였다. 현장 관리차원에서 피니셔의 관리 감독이 요구되는 사항이라 생각된다.

④ 현장 다짐

현장 다짐의 경우 진동롤러 10회, 타이어 롤러 3회, 텐덤롤러 4회를 실시하였다. 진동롤러의 경우 불투수CTB의 경우에는 진동을 가하였으며 투수CTB의 경우에는 진동을 주지 않았다. 또한 시험 시공 공정 사정상 기층타설 이전에 L형 측구를 이전에 타설하지 못하고 기층 타설 이후에 실시하였다. 이에 따라 인력을 이용하여 측면 관리를 실시하였으나 측면관리가 올바로 이루어 지지 못하였다. 저수축 투수/불투수CTB의 경우에는 L형 타설을 통한 측면관리가 필수적이라고 판단된다.

⑤ 양생



<그림 3.7.77> 2차 시험시공 비닐 양생 모습

다짐 이후, 예비실험을 통해 결정되었던 비닐 양생을 실시하였다. <그림 3.7.77>은 비닐 양생을 통해 내부에 수분이 존재하고 있음을 보여주고 있다.

⑥ 현장 품질 관리 및 평가

현장 품질 관리 측면에서 HFT Test를 실시하였으며 현장 품질 평가 차원에서 강도측정, 현장투수실험, 코어링을 실시하였다. HFT Test 결과는 W/C 0.53으로 나타났으며 강도측정 결과 7일 강도가 도로공사 시방 기준인 50kg/cm^{2}를 초과하였다. 현장투수실험 결과 평균6.5(s)를 기록하였으며 코어링 결과 평균 12.5%의 공극률을 확인할 수 있었다. <표 3.7.26>은 현장 품질 평가 실험 결과를 보여주고 있다.

<표 3.7.26 > 2차 시험시공 현장 품질 평가 항목 실험 결과

현장 품질 평가	실험 결과	평가 결과	시공 계획 및 평가 기준
HFT Test	W/C 0.53	기준 이상	W/C 0.49
강도	50kg/cm^2 초과	양호	50kg/cm^2 이상
투수성능	평균 6.5(s)	양호	15(s) 이내
공극률 (저수축 투수CTB)	평균 12.5%	양호	13%

⑦ 육안 관측

저수축 투수/불투수CTB 타설 이후 투수 아스팔트 표층 타설 전까지 육안 관측은 총 2회에 걸쳐 실시하였다.

타설 이후 7일째, 1차 육안 관측 결과 건조수축은 발생하지 않았으며 전체적으로 양호한 표면상태를 보였다. 그러나 저수축 불투수CTB 시작 부분에서 소성수축에 의한 Hair Crack이 발견되었으며 골재가 떨어져 나간 구역도 발견되었다. 저수축 투수CTB의 경우에도 7일째 까지 탈리 현상은 일어나지 않았다.

14일 이후 2차 육안 관측 시에는 저수축 불투수CTB 단면에서 계측기를 묻었던 부분에 1개의 횡방향 균열이 발견되었으며 이는 계측기 매설 시 다량의 잔골재를 사용했던 점이 원인으로 생각된다. 저수축 투수CTB 단면의 경우에는 비닐 양생 이후에 소규모의 탈리 현상이 발생하였다. 이는 자연환경에 노출된 점과 더불어 L형 측구 타설 시 공사 차량의 이동로 활용되었기 때문이라고 판단된다. <그림 3.7.82>는 CTB의 구간 현황이며 <그림 3.7.78>과 <그림 3.7.79>는 저수축 불투수CTB에서 발생한 Hair Crack과 골재 탈리를 보여주고 있다. <그림 3.7.81>는 저수축 투수CTB의 탈리 현상을 나타내고 있다. 여기서 횡방향 균열이 발생한 곳에서 향후 교통 개방 이후 반사균열 여부를 확인 할 수 있을 것이다.



<그림 3.7.78> 2차 시험시공 CTB 구간의 전경



<그림 3.7.79> Hair Crack 및 골재 탈리(불투수CTB)



<그림 3.7.80> 계측기로 인한 횡방향 균열

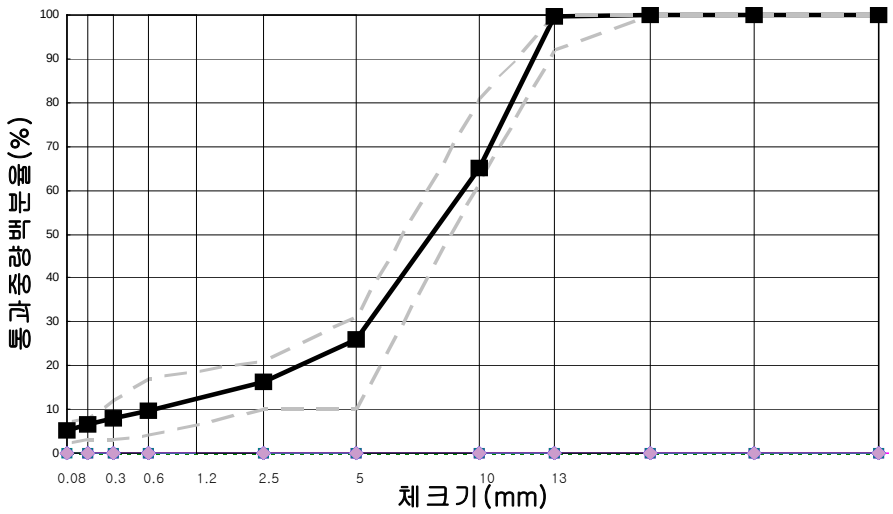


<그림 3.7.81> 골재 탈리(투수CTB)

(다) 투수 아스팔트 표층의 현장 생산 및 특성 평가

① 현장 생산 및 Mixing

현장에서 생산된 혼합물을 덤프트럭을 이용하여 이동하였으며 이동 시간 동안의 온도 저하를 막기 위해 덮개를 이용하여 보온을 실시하였다. 일반적인 배수성 아스팔트의 Mixing 시간은 약 45(s)이다. 본 시험 시공에서는 윤활제로 사용되는 Wax의 기능성을 높이며 CRM의 혼합을 향상시키기 위해 일반 배수성 아스팔트의 Mixing 시간보다 15(s) 긴 60(s) 동안 실시하였다. <그림 3.7.82>의 경우에는 Mixing 시 사용된 입도분포를 보여준다.



<그림 3.7.82> 2차 시험시공 아스팔트 합성 입도

② 현장 타설

배수성 아스팔트 혼합물은 아스팔트 피니셔를 이용하여 타설하였다. 포설은 표층 하부 5cm, 표층 상부 5cm로 타설되었으며 총 4회에 걸쳐 포설되었다. 투수AP/불투수CTB의 상부를 구성하는 3차 포설을 제외하고는 포설 시 온도 측정 장비를 이용한 온도 측정 결과 기준 온도인 160℃를 훨씬 초과한 230~250℃를 기록하였으며 반면에 투수AP/불투수CTB의 상부를 이루는 혼합물은 기준 이하인 150℃를 기록하였다.

③ 현장 다짐

다짐은 머캐덤 롤러를 왕복 8회에 걸쳐 실시하였으며 탠덤롤러는 왕복 2회를 실시하였다. 머캐덤 롤러의 경우 역시 저수축 투수CTB와 마찬가지로 Bleeding방지를 위해 진동 없이 다짐하였다. 다짐 실시는 상부온도가 150℃, 120℃, 90℃ 일 때 머캐덤 1차, 2차, 탠덤롤러를 실시하였다. 일반적으로 다짐 장비는 물을 살포하면서 다짐을 실시하는데 과다하게 물을 살포할 경우, 상부온도와 하부온도의 큰 차이로 인해 적정한 다짐이 실시되지 않았다. 다짐 시 물 살포량의 최소가 요구된다.

④ 현장 품질 평가

현장 품질 평가항목은 코아 채취를 통한 투수AP 두께, 밀도, 공극률, 칸타브로 등이다. 코어링을 통한 측정 결과 당초 계획인 두께 10cm보다 두꺼운 11cm로 판명되었다. 현장투수시험기를 이용한 투수성능평가에서 평균 4.94(s)를 나타내어 양호한 투수성능을 나타내었다.

⑤ 육안 관측

시공 마무리된 이후 육안 관측을 통해 투수 아스팔트 표층의 상태를 점검하였다. 육안 관측 시 탈리 현상은 발생하지 않았다.



<그림 3.7.83> 2차 시험시공 현장투수시험
모습(KSF 2394)

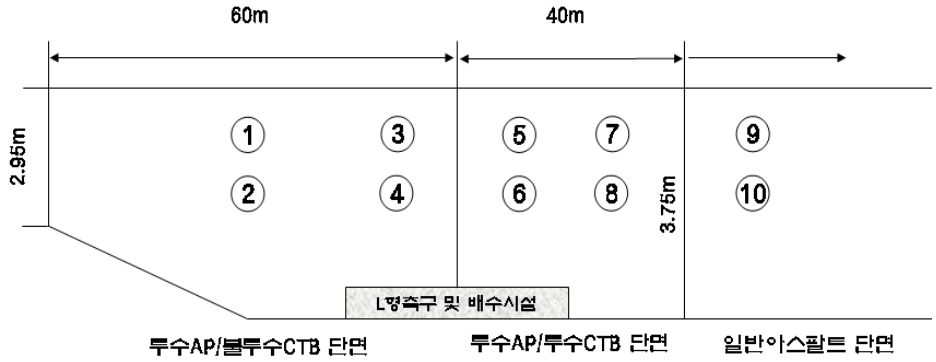
(2) 투수능력 평가

현장 투수능력은 친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 중요한 기능성 중의 하나이다. 우천 시 투수능력을 통해 안전한 미끄럼저항성을 나타내며 더불어 공극을 통해 소음 저감 효과를 이끌어 낸다. 실제 우천 시 투· 배수성 포장이 어떻게 강우를 처리하며 한계점에 대해 살펴보는 것은 기능성을 평가하는데 있어서 필수적이라 할 수 있다. 이에 따라 본 평가에서는 현장투수시험기를 이용하여 투수능력을 검증하고 이후 강우 모사를 통해 친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 투수 형태 및 능력을 평가한다.

(가) 현장투수시험기를 이용한 투수능력 검증

현장투수시험기는 KSF 2394에 준하여 제작되었으며 <그림 3.7.83>은 현장투수시험기 모습을 보여주고 있다.

단면에 따른 측정 위치는 <그림 3.7.88>에 나타난 바와 같으며 결과는 <표 3.7.84>와 같다. 측정 결과 투수AP/불투수CTB 단면의 투수능력이 투수AP/투수CTB 단면의 투수능력보다 작다는 것을 알 수 있었다. 이는 투수AP/불투수CTB 단면의 투수 아스팔트 표층 시공 시 혼합온도, 이동온도 및 다짐온도를 시방기준에 준수하여 시행하지 못하였기 때문이라고 판단되며 강우모사를 통한 투수능력 평가 시 고려해야 할 사항이라 생각된다.



<그림 3.7.84> 2차 시험시공 현장투수실험 측정 위치

<표 3.7.27> 2차 시험시공 현장투수시험 결과

위치		초(sec)	비고
투수AP/불투수CTB	1	5.89	
	2	5.22	
	3	5.55	
	4	4.95	
평균		5.40	
투수AP/투수CTB	5	4.35	
	6	4.22	
	7	4.55	
	8	4.78	
평균		4.47	
일반아스팔트 단면	9	-	투수가 일어나지 않음
	10	-	

(나) 강우모사를 통한 친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 투수형태 및 능력 평가

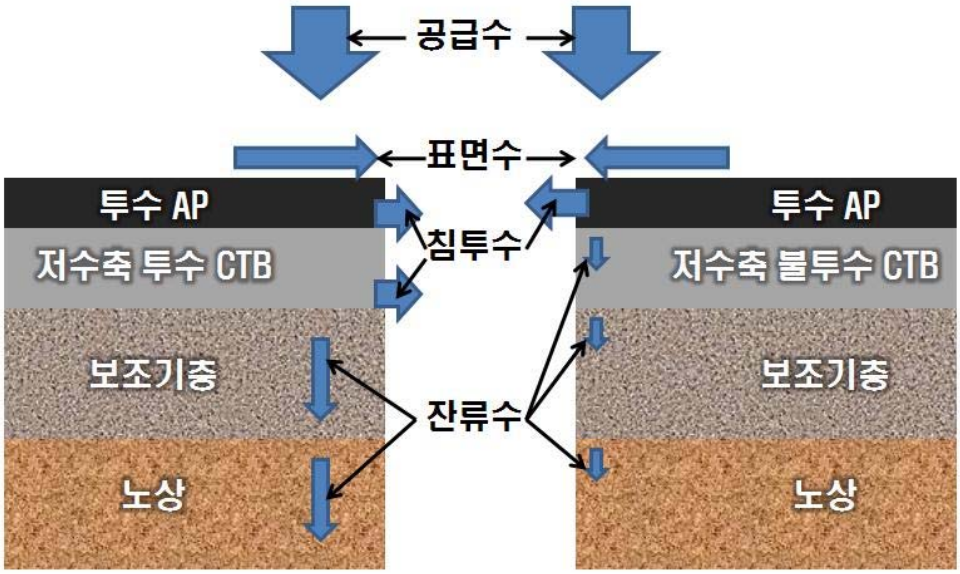
① 실험 목적

현장 투수능력 평가실험의 목적은 첫째, 강우모사를 통하여 친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 물저장력을 평가한다. 즉, 강우모사를 통해 이론적인 물저장력과 실제 물저장력을 비교하며 물저장력을 초과한 이후 강우 처리방식 변화에 대해 관측한다. 둘째, 강우의 세부적인 구분을 통해 친환경 4S 투·배수성 포장의 투·배수 능력을 정량적으로 검증한다. 강우에 대한 세부적인 분류와 정의는 <표 3.7.28>과 같다.

<표 3.7.28> 강우의 세분적인 분류와 정의

강우의 분류	정의
공급수	강우 모사를 통해 표층에 살수되는 물
침투수	투·배수성 포장시스템에서 표층이나 기층을 통과하여 유공관을 통해 배출된 물
표면수	투수계수 및 물저장력을 초과하여 표면배수를 통하여 발생하는 물
잔류수	포장체 내부 또는 보조기층, 노상에 존재하는 물
손실수	살수 및 측정 시 손실되는 물

*잔류수와 손실수의 경우 구분은 가능하지만 측정은 불가



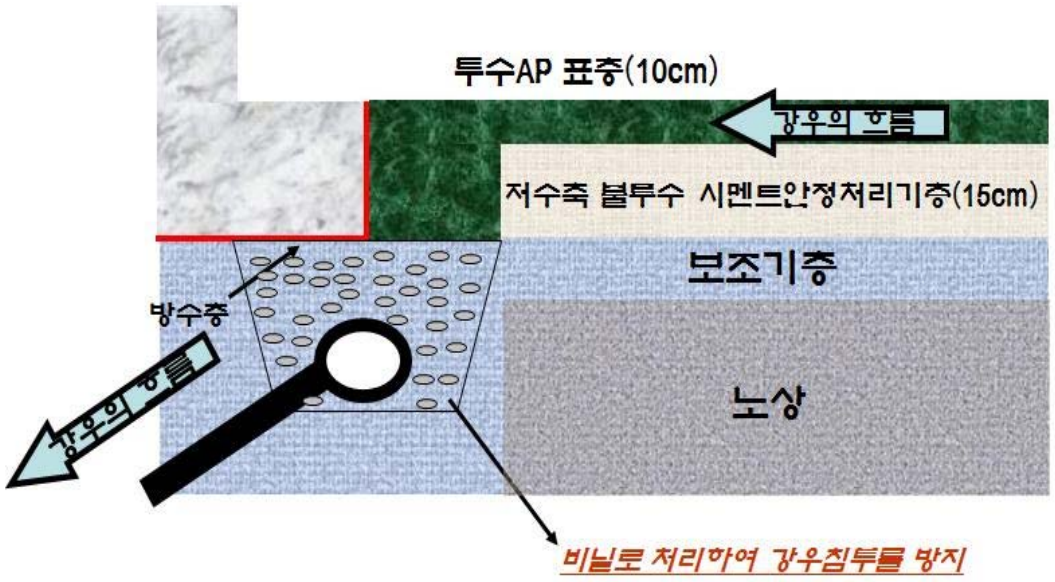
<그림 3.7.85> 강우의 세부 정의

*공급수=표면수+침투수+잔류수+a(손실수)

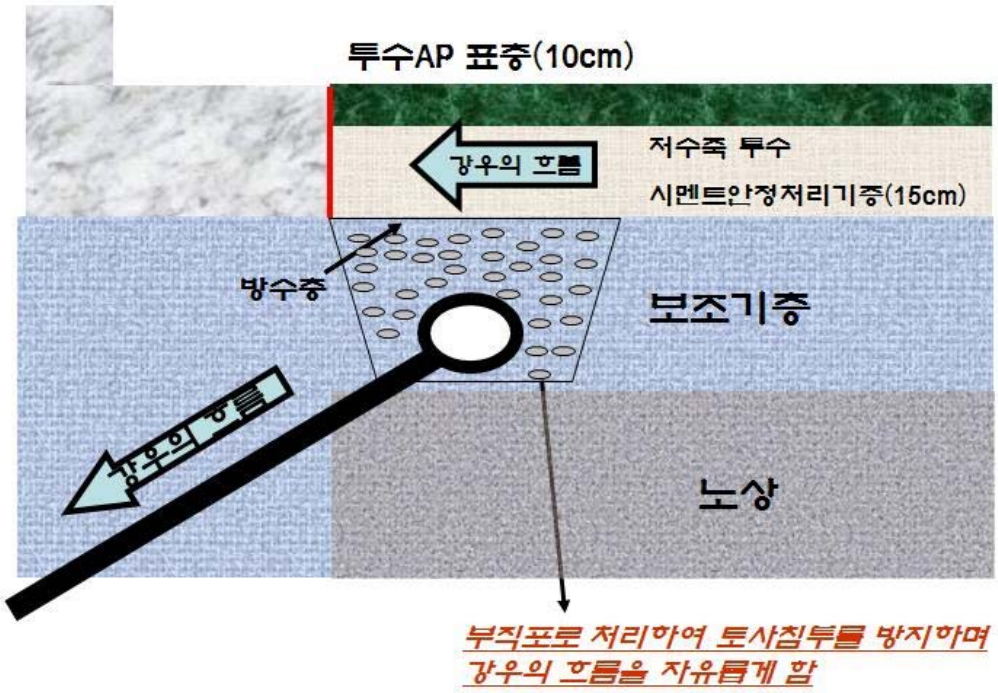
② 실험 방법

1) 배수 시설 계획

경남 사천에 실시된 시험 시공의 총연장은 110m로, 투수AP/저수축 불투수CTB 단면, 투수AP/저수축 투수CTB 단면 및 일반아스팔트 단면으로 이루어져 있다. 이 중 투수AP/저수축 불투수CTB 단면, 투수AP/저수축 투수CTB 단면에서 투수능력 평가를 위하여 구간별 20m 씩 L형 측구를 타설하고 맹암거 및 유공관을 이용하여 배수시설을 갖추었다. <그림 3.7.86>와 <그림 3.7.87>은 각각 투수AP/저수축 불투수CTB 단면, 투수AP/저수축 투수CTB 단면에서의 배수 설계 단면도를 보여주고 있다. 투수AP/저수축 불투수CTB 단면의 경우에는 우천 시 기층배수를 통한 강우의 흐름을 유도하였기에 보조기층 및 노상으로부터의 맹암거에 부직포와 비닐로 이용하여 강우 유입을 방지하였다.



<그림 3.7.86> 투수AP/저수축 불투수CTB 단면 배수계획



<그림 3.7.87> 투수AP/저수축 투수CTB 단면 배수계획



<그림 3.7.88> 2차 시험시공 맹암거 및 유공관 설치 모습

강우가 노상까지 투과되는 투수AP/저수축 투수CTB 단면에서는 투수AP/저수축 불투수CTB 단면에서와 달리 부직포로만 맹암거를 처리하여 보조기층 및 노상으로부터 강우의 흐름을 자유롭게 하였다. <그림 3.7.88>은 맹암거 및 유공관의 설치모습을 보여주고 있다.



<그림 3.7.89> 유량측정용 아크릴 부착



<그림 3.7.90> 2차 시험시공 표면수 측정 장치



<그림 3.7.91> 살수차를 이용한 강우 모사



<그림 3.7.92> 호스를 이용한 강우 모사 모습

2) 강우 모사

실험 이전에 <그림 3.7.89>에 보여주듯이 살수에 의한 손실수를 최소화 하기위해 실험구간에 대하여 아크릴을 설치하였다. 또한 <그림 3.7.90>에 나타나듯이 표면수를 측정하기 위한 장치를 L형 측구 단면에 구축하였다.

투수능력 평가하기 위한 강우 모사에는 살수차와 호스를 이용한 두 가지 종류의 방법이 사용되었다. 강우 모사 이전에 살수차와 호스의 분당 유출량에 대하여 측정하였다. 측정 결과 살수차와 호스의 경우 각각 540l/min, 113l/min의 유출능력을 지니고 있었다. 이를 실험면적에 따른 강우강도로 환산할 경우 살수차의 경우 약 7.29mm/min, (437mm/hr)의 강우강도를 나타내며 호스의 경우 약 1.75mm/min, (91mm/hr)를 나타낸다. <그림 3.7.91>와 <그림 3.7.92>는 각각 살수차 및 호스를 이용한 강우 모사 모습을 보여주고 있다.

살수 실험은 먼저 살수차를 이용하여 투수AP/투수CTB 구간에서 실시하였다. 이후 투수AP/불투수CTB 단면과 투수AP/투수CTB 단면에서 각각 3회씩 호스를 이용한 살수 실험을 실시하여 투・배수 능력을 검증하였다.

③ 실험 결과

1) 살수차를 이용한 예비 실험

투수AP/투수CTB 단면에서 살수차를 이용한 예비실험을 실시하였다.

7.29mm/min의 강우강도로 약 150sec 동안 살수하였으며 총 살수된 양은 1350l였다. 이는 투수AP/투수CTB 단면에서 강우가 표층과 기층을 통과한 후 보조기층과 노상을 통해 유공관을 배출되는 시간과 양을 확인하기 위해 먼저 실시되었다. 실험결과는 <표 3.7.29>과 같이 4.51%의 표면수가 발생하였다. 이는 강우강도가 높아짐에 따라 호스를 이용했던 경우와 달리 투수AP/투수CTB 단면의 투수성능이 저하되는 것을 볼 수 있다. 그러나 이 방법의 경우 살수차의 유출 및 위치에너지로 인하여 상당수의 물량이 바로 L형 측구 쪽으로 흐르게 되어 강우강도가 좀 더 작은 호스를 이용하는 방법을 적용하기로 하였다.

<표 3.7.29> 살수차를 이용한 강우모사에 따른 표면수, 잔류수 및 손실수

	공급수	표면수		잔류수 및 손실수	
1차 실험	1350l	61l	4.51%	1289l	95.49%

2) 투수AP/불투수CTB 배수 능력 평가 결과

투수AP의 공극률을 20%로 예상하였을 때 투수AP/불투수CTB 단면의 이론적인 물저장력은 1408l가 된다. 이에 따라 1차 실험에서는 물저장력 이하에서 실시하여 배수능력을 평가하였으며 이후 2, 3차 실험에서는 물저장력을 초과하는 상황에서의 배수능력을 살펴보았다.

1차 실험은 9분간 약 1023l 실시하였으며 살수가 시작된 지 5분 이후부터 표면수가 발생하였다. 또한 유공관의 경우 살수 이후, 10분 이후부터 20분간 약 10분에 걸쳐 침투수가 배수되었다. 2차, 3차 실험에서는 실험 직후 1분 후부터 표면수가 발생하였으며 살수 후 5분 이후부터 침투수가 배출되기 시작하였다. <그림 3.7.93>과 <그림 3.7.94>은 각각 살수 이후 표면수와 침투수가 발생하는 모습을 보여주고

있다. 이는 이론적인 물저장력을 초과하면서 투수성능이 저하돼 표면배수가 발생하는 것으로 판단된다.

투수AP/불투수CTB 단면에서 실시된 배수 능력 평가 결과는 <표 3.7.30>와 <그림 3.7.95>과 같다. 결과를 살펴보면 물저장력 이하에서는 표면수와 침투수가 각각 1.14%와 10.8%를 보였으나 이론적인 물저장력을 초과한 2, 3차 실험에서는 표면수가 22.2%와 31%로 상승하였으며 침투수의 경우 3.1%와 2.5%로 각각 감소하였다. 또한 잔류수 및 손실수 또한 점차적으로 실험횟수에 따라 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 공급수가 점차적으로 증가하면서 투수계수의 저하와 물저장력을 초과한 점이 원인으로 생각된다.



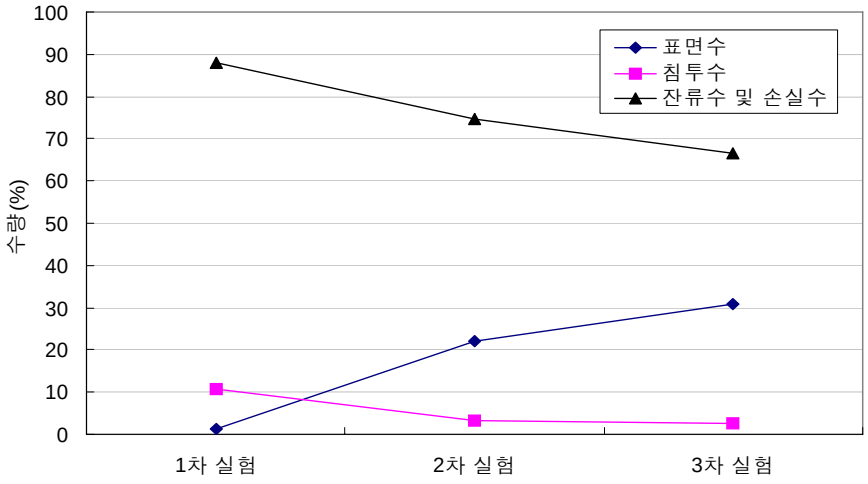
<그림 3.7.93> 실험 후 표면수 발생 모습



<그림 3.7.94> 실험 후 침투수 발생 모습

<표 3.7.30> 실험 횟수에 따른 표면수, 침투수, 잔류수 및 손실수

	공급수	표면수		침투수		잔류수 및 손실수	
1차 실험	1023*l*	117.6*l*	1.14%	88.25*l*	10.8%	817.15*l*	88.06%
2차 실험	499.5*l*	110.85*l*	22.2%	15.4*l*	3.1%	373.25*l*	74.7%
3차 실험	499.5*l*	155*l*	31%	12.5*l*	2.5%	332*l*	66.5%



<그림 3.7.95> 표면수, 침투수, 잔류수 및 손실수의 변화

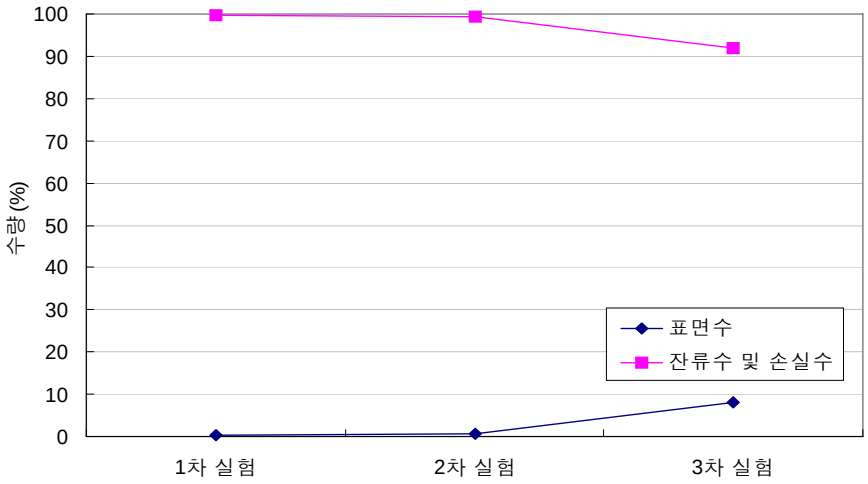
3) 투수AP/투수CTB 배수 능력 평가 결과

투수AP/투수CTB의 공극률을 각각 20%, 13%로 예상하였을 때 투수AP/투수CTB 단면의 이론적인 물저장력은 2920*l*가 된다. 이에 따라 1차, 2차 실험에서는 물저장력 이하에서 실시하여 배수능력을 평가하였으며 이후 3차 실험에서는 물저장력을 초과하는 상황에서의 배수능력을 살펴보았다.

1차 실험은 10분간 약 1068*l*을 살수하였으며 살수가 시작된 지 4분 30초 이후부터 표면수가 발생하였다. 2차 실험까지 표면수는 0.39%, 0.51%를 나타내었으나 물저장력을 초과하는 3차 실험에서는 7.98%의 표면수가 발생하여 1차, 2차 실험에 비하여 높은 표면수가 발생하였다. 이론적인 물저장력을 초과하면서 투수성능이 저하돼 표면배수가 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 투수AP/불투수CTB 단면과는 달리 유공관을 통한 침투수는 발생하지 않았다. 실험 결과는 <표 3.7.31>과 <그림 3.7.96>에 나타나 있다.

<표 3.7.31> 실험 횟수에 따른 표면수, 잔류수 및 손실수

	공급수	표면수		잔류수 및 손실수	
1차 실험	1068*l*	4.25*l*	0.39%	1063.75*l*	99.61%
2차 실험	1068*l*	5.51*l*	0.51%	1062.49*l*	99.49%
3차 실험	2670*l*	155*l*	7.98%	2515*l*	92.02%



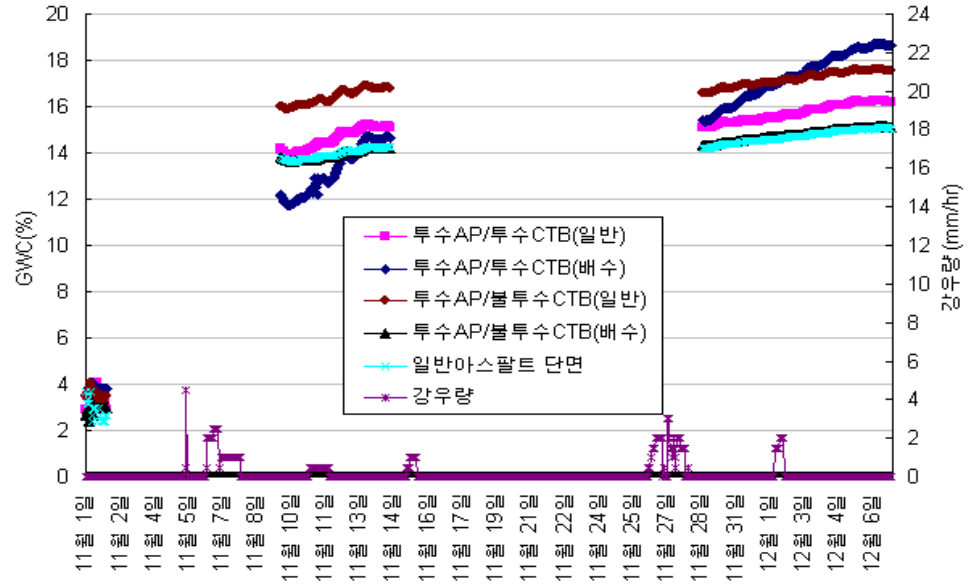
<그림 3.7.96> 표면수, 잔류수 및 손실수의 변화

(3) TDR를 이용한 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 노상 중량함수비 변화 관측

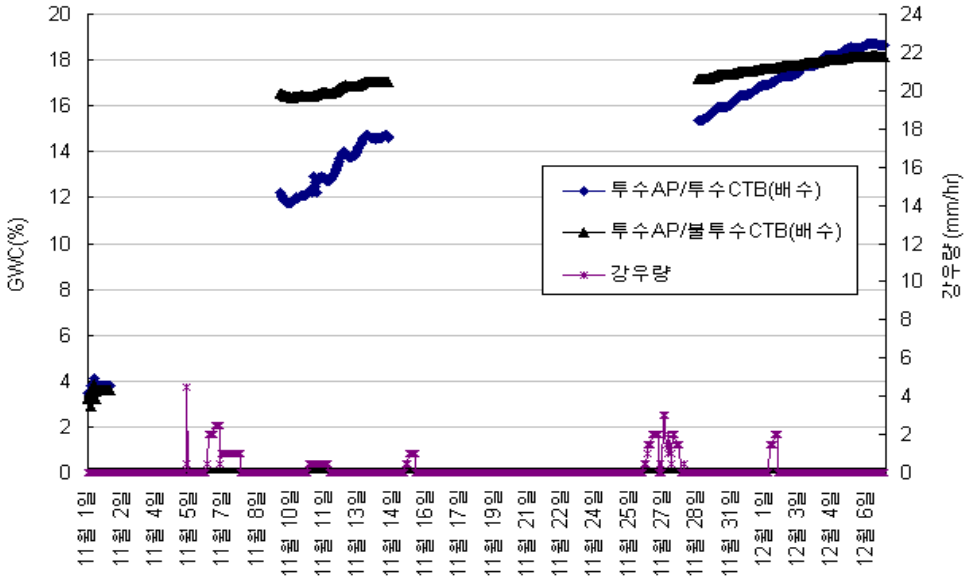
TDR(Time-Domain Reflectomemter)를 각 단면 노상에 매설하여 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 각 단면별 노상함수비의 변화를 살펴본다. 더불어 강우모사를 통한 투수능력 평가가 실시된 투수AP/투수CTB 및 투수AP/불투수CTB 단면에서의 노상 중량함수비 변화를 관측한다. 이를 통해 실제적으로 투수AP/불투수CTB 단면에서 기층배수와 투수AP/투수CTB구간에서 노상까지 침투가 발생하는지 간접적으로 살펴본다.

<그림 3.7.97>은 각 단면별 초기 노상 중량함수비의 변화를 나타내고 있다. 노상 타설 이후 TDR 매설 시 모든 단면의 최초 노상 중량 함수비는 약 2~4% 사이를 유지하고 있다. 그러나 저수축 투수/불투수CTB 타설 하루 전에 내린 4mm/hr의 강우량으로 인하여 노상 중량 함수비가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 이

<그림 3.7.98>는 강우모사 실험을 실시한 배수시설을 갖춘 투수AP/투수CTB 및 투수AP/불투수CTB 단면에서의 노상 중량함수비의 추이를 보여주고 있다. 강우모사 실험을 실시한 2006년 12월 29일 이후 투수AP/투수CTB 단면에서 노상 중량함수비가 증가하는 경향을 볼 수 있다. 이는 택코팅 실시 이후에도 강우의 흐름이 포장체를 통과하여 노상으로 침투하는 것을 확인할 수 있다고 판단된다.



<그림 3.7.97> 2차 시험시공 단면별 노상 중량 함수비 변화



<그림 3.7.98> 2차 시험시공 강우모사 전·후의 노상 중량함수비 변화

(4) FWD(Falling Weight Deflectometer) 실험

본 FWD실험의 경우에는 투수능력 평가실험 직후 실시되었다. 즉, L형 측구와

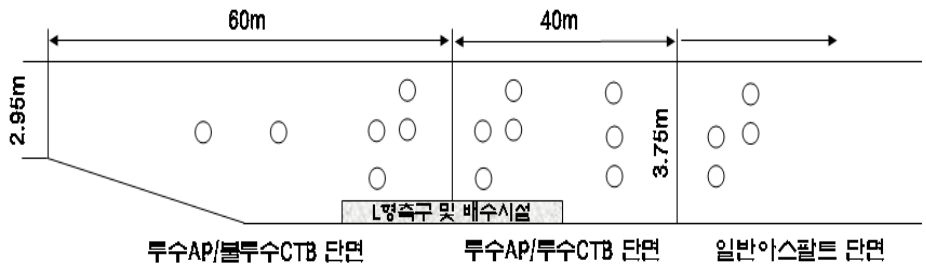
배수시설을 갖추고 있는 투수AP/불투수CTB 구간과 투수AP/투수CTB 구간은 포장체의 물저장력을 초과하는 물을 살수한 직후였다. FWD실험을 통해 측정되는 처짐량을 이용하여 친환경 4S 투 · 배수성 포장시스템과 일반아스팔트 구간과의 구조적 안정성을 비교 · 검토하고자 한다. 더불어 배수시설 유무에 따른 처짐 변화 특성 또한 고찰하여 우수의 노상침투가 포장체 지지력에 미치는 영향을 살펴보는데 그 목적이 있다.

<그림 3.7.99>는 FWD실험 측정 장소를 나타낸다. 구간의 길이를 고려하여 타격지점을 선정하였으며 FWD실험은 1회 측정 시 총 5회 타격하였다. 처짐량의 비교를 위하여 9000lb 하중을 기준으로 평가하였다.

(가) 결과 분석

처짐량 분석은 각 구간별 평균값을 기준으로 분석하였다. 비교 구간은 총 5개 구간으로 일반아스팔트 단면과 L형 측구 및 배수시설 설치 유무에 따라 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB는 두 개 구간씩 구분하였다. <그림 3.7.100>는 구간별 평균 처짐량을 보여주고 있다.

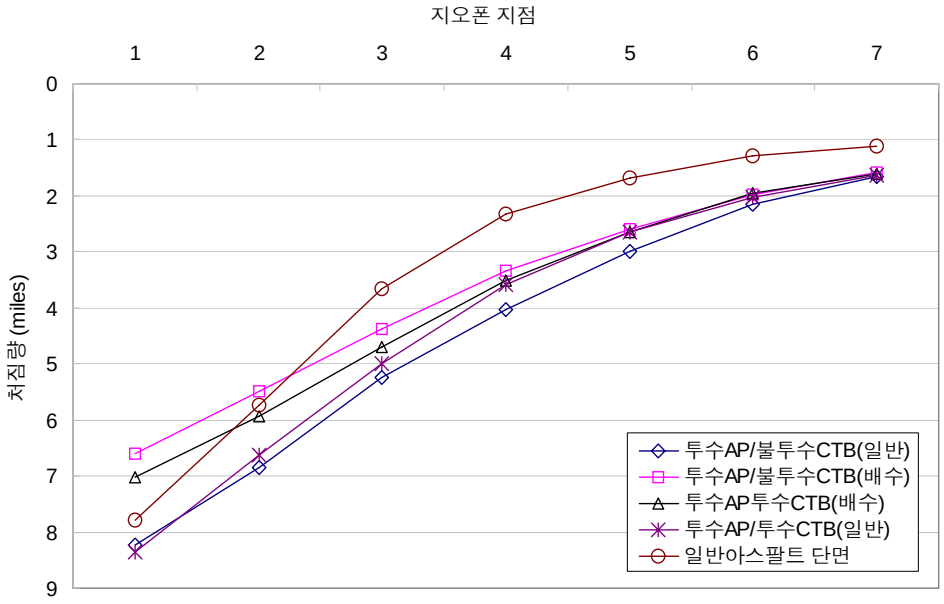
처짐량 분석 결과 배수시설을 갖추지 않은 투수AP/불투수CTB(일반) 구간과 투수AP/투수CTB(일반) 구간에서 가장 큰 처짐량을 나타내었다. 상대적으로 배수시설은 갖춘 투수AP/불투수CTB(배수) 구간과 투수AP/투수CTB(배수) 구간은 가장 적은 처짐량을 나타내었으며 노상(7번Geophone)에서의 더 큰 처짐량에도 불구하고 표층(1번 Geophone)에서 일반아스팔트 단면보다 작은 처짐량을 나타내었다.



<그림 3.7.99> 2차 시험시공 FWD 측정 장소

이는 배수시설을 통한 배수가 포장체의 구조적 지지력에 기여하는 것으로 판단되

며 본 연구에서 제시하고 있는 포장 시스템이 상대적으로 높은 처짐량에도 불구하고 안전한 포장 형식으로 자리 잡을 수 있음을 간접적으로 보여준다고 판단된다.



<그림 3.7.100> FWD 실험 후 단면별 처짐량 비교

(5) 코아(Coring) 실험

(가) 저수축 투수/불투수CTB 코어링

<그림 3.7.101>와 <그림 3.7.102>은 각각 저수축 투수/불투수CTB 코아 공시체



<그림 3.7.101> 저수축 불투수CTB 코아 공시체



<그림 3.7.102> 저수축 투수CTB 코아 공시체

의 모습이다. 코어 채취는 구간 별 3개 씩 총 6개의 코어를 채취하였다. 포장층 두께 측정 결과 저수축 투수/불투수CTB 모두 평균 14cm 두께를 나타내어 기준 두께인 15cm보다 작은 것으로 나타났다. 또한 저수축 투수CTB의 공극률은 평균 12.5%로 측정된 기준 공극률인 13%보다는 적은 수치를 보였다.

(나) 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB 코어링

코어 채취는 각 단면별 3개 씩 총 6개의 코어를 채취하였다. 코아 채취를 통해 가장 먼저 육안으로 확인 할 수 있는 점은 부착정도였다. 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB 단면에서 표층과 기층사이에 부착이 되었음을 확인할 수 있었다. <그림 3.7.103>과 <그림 3.7.104>은 각각 투수AP/불투수CTB와 투수AP/투수CTB 코아 공시체 모습을 나타낸다. 투수AP 두께는 평균 11cm로 나타났다.

(6) 부착강도 실험

(가) 실험 개요

시험 시공 전 예비 실험을 통하여 투수AP/투수CTB 단면에서 투수성능과 부착강도의 최적화를 위한 OTC(Optimum Tack coating Content) 실험을 실시하여 최적 비율과 방법에 대하여 고찰하였다. 예비 실험 결과를 바탕으로 현장 시험 시공에 적용하였으며 이후 현장투수시험기와 부착강도 실험을 통하여 투수성능과 Bonding stress를 검증하였다.



<그림 3.7.103> 투수AP/불투수CTB 코아 공시체 모습



<그림 3.7.104> 투수AP/투수CTB 코아 공시체 모습

(나) 실험 방법

택코팅 살포 이전에 저수축 투수/불투수CTB 표층에 있는 먼지 및 탈리된 골재에 대한 제거를 실시하였다. 택코팅 살포 이전에 표층 먼지 및 골재 제거는 필히 선행되어야 하는 작업이다. OTC의 경우, 투수AP/불투수CTB 단면에서는 기존 택코팅 비율인 0.6l/m^{2}를 적용하였으며 투수AP/투수CTB의 경우 경제성과 시공성을 고려하여 최적비율은 기존 택코팅 비율의 60%인 0.36l/m^2 적용하였으며 살포방법으로는 페인트 도구를 이용하여 인력살포를 실시하였다. 살포는 투수 아스팔트 표층 타설 24전 실시하여 양생하였다. <그림 3.7.105>와 <그림 3.7.106>은 택코팅 이전에 청소하는 모습과 페인트 도구를 이용하여 택코팅을 실시하는 모습을 보여주고 있다. <그림 3.7.107>과 <그림 3.7.108>는 택코팅 실시 이후 저수축 투수/불투수CTB 표면 모습을 보여주고 있다.



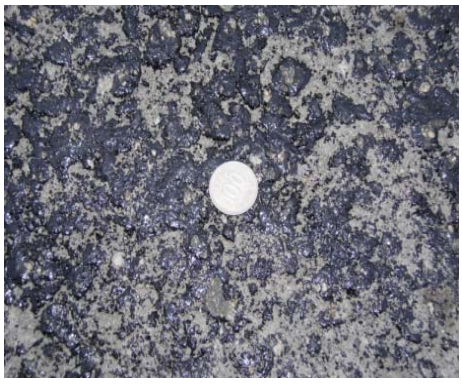
<그림 3.7.105> 먼지 및 탈리된 골재 제거



<그림 3.7.106 > 롤러를 이용한 택코팅 실시



<그림 3.7.107> 불투수CTB 표면 모습



<그림 3.7.108 > 투수CTB 표면 모습



<그림 3.7.109> 2차 시험시공 현장투수실험 모습



<그림 3.7.110> 2차 시험시공 표면 배수 모습

(다) 실험 결과

① 현장투수시험기를 이용한 투수성능 검증

투수 아스팔트 표층 타설 이전 저수축 투수/불투수CTB 단면에서 현장투수시험기를 이용하여 투수성능을 검증하였다. 검증 결과 평균 저수축 투수CTB에서는 약 8(sec)를 기록하여 택코팅 실시 이전 6.5(sec)보다 저하되었으나 기준(15(sec) 이내)에는 부합하는 결과를 나타내었다. 또한 저수축 불투수CTB의 경우에는 표면배수를 통해 배수되는 것을 확인 할 수 있었다. <그림 3.7.109>과 <그림 3.7.110>는 현장투수실험 모습과 저수축 불투수CTB 표면에서 표면배수가 되는 모습을 각각 보여주고 있다.

② 부착강도시험기를 이용한 Bonding stress 평가

투수 아스팔트 표층 시공 이후 표층과 기층간의 부착강도를 확인하기 위해 부착강도 실험을 실시하였다. 부착강도는 투수AP/불투수CTB 단면과 투수AP/투수CTB 단면과 이를 비교하기 일반아스팔트 단면에서 각각 3개씩 실시되었다. <그림 3.7.111>와 <그림 3.7.112>은 부착강도실험 모습과 실험 이후 공시체 모습을 보여주고 있으며 <표 3.7.32>는 결과를 나타내고 있다. 저수축 투수CTB의 경우 실내실험(4.81kg/cm^2)과 비교하여 보았을 때 4.42kg/cm^2로 비슷한 결과를 보였다. 저수축 불투수CTB는 6.37kg/cm^2로 다소 높은 값을 나타내었으며 저수축 불투수CTB가 공극이 있는 저수축 투수CTB에 비하여 상대적으로 면적이 넓어서 나온 결과라 생

각된다. 따라서 실내실험과 비교하고 코어링 상태를 고려하였을 때 표층과 기층간의 안정적인 부착이 일어났다고 판단된다. 그러나, 일반아스팔트 단면에 비해서는 상대적으로 20~25%로 작은 Bonding stress를 나타내었다.



<그림 3.7.111> 부착강도 실험 모습



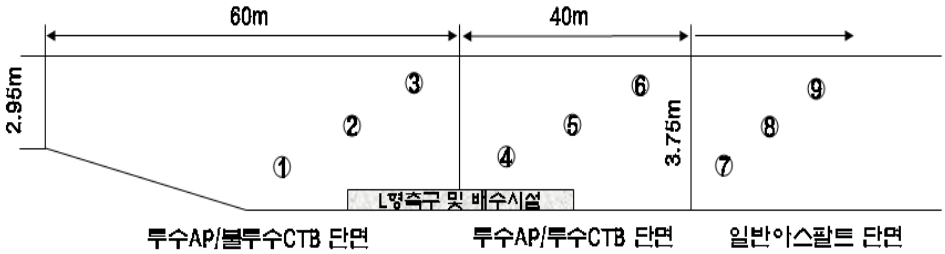
<그림 3.7.112> 부착강도 실험 절단면 모습

<표 3.7.32> Bonding stress 측정 결과

단면	1	2	3	평균(kgf/cm^2)
투수AP/불투수CTB 단면	5.55	6.75	6.8	6.37
투수AP/투수CTB 단면	4.35	4.25	4.65	4.42
일반아스팔트 단면	20.55	23.55	24.5	22.87

(7) 미끄럼 저항성 측정

<표 3.7.33>는 실험 결과를 나타내고 있다. 결과를 살펴보면 전체적으로 영국이 정하고 있는 BPN 50을 초과하여 안전한 미끄럼저항성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 투수AP/투수CTB 단면의 미끄럼 저항성은 일반아스팔트 단면에 비하여 건식과 습식에서 각각 약 10정도 적게 나타났다. 이는 아스팔트 표층 배합 시 작업성 향상을 위해 윤활제 역할을 한 Wax 성분으로 인하여 표층의 미끄럼저항성이 저하된 것으로 보인다. 반면에 투수AP/불투수CTB 단면의 경우에는 일반아스팔트 단면과 비슷하거나 다소 높은 경향을 보였다. 그러나 이 구간은 표층 아스팔트 타설 시 혼합 및 다짐 온도가 기준을 준수하지 못한 구간이다. 즉, Wax와 폐타이어가 충분히 혼합되지 않은 것이 원인으로 생각된다.



<그림 3.7.113> 2차 시험시공 BPT 실험 단면도

<표 3.7.33> 2차 시험시공 BPT 실험 결과

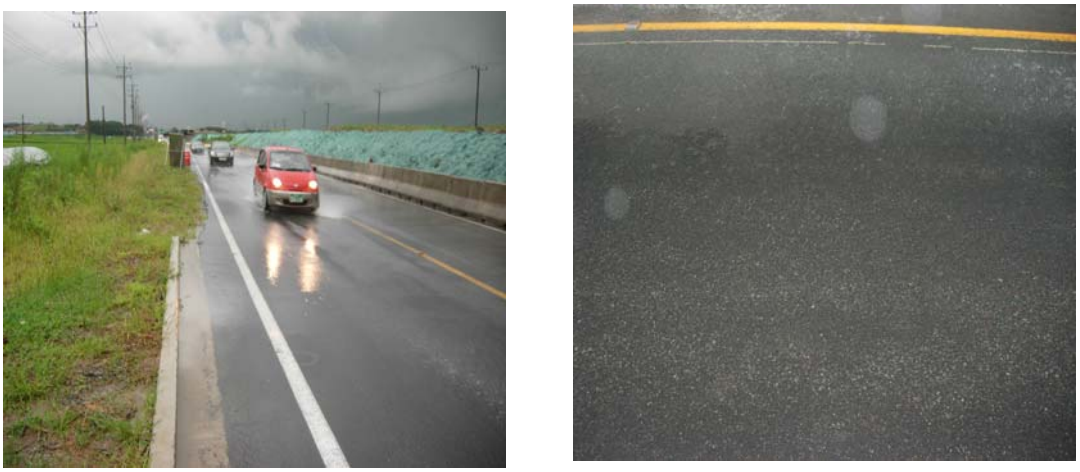
위 치		1 회(습윤)			결과	2 회(건식)			결과
투수 AP 불투수 CTB	1	67	67	67	67	77	77	76	77
	2	68	68	67	68	78	78	78	78
	3	68	68	68	68	77	77	76	77
투수 AP 투수 CTB	4	55	55	55	55	62	63	64	63
	5	55	55	55	55	62	62	62	62
	6	55	55	55	55	64	64	64	64
밀입도AP 일반BB	7	65	65	65	65	75	74	74	74
	8	65	67	66	65	74	74	74	74
	9	66	64	65	65	75	75	75	75

사. 2차 공용성 평가

2차 시험시공 8개월경과 후 공용성 평가를 실시하였다. 2차 시험시공 구간은 일교통량 25,000대의 왕복2차로이기 때문에 교통통제가 불가능 하였다. FWD, 현장투수시험, 인공강우실험, 미끄럼 저항성 측정 등은 불가능하여 부분적으로 현장 투수실험을 실시하고 육안 관측, 탈리 조사를 실시하였다.

(1) 육안관측 (강우시)

자연 강우시의 투수능력을 관측하기 위하여 육안관측을 실시하였다. 측정일의 일 강수량은 207.5mm로써 금년 가장 높은 강수량을 나타내고 있다. 강우시험 결과 1일 강수량이 200mm 이상인 경우에도 투수가 원활히 일어나며 표면수가 발생하지 않았다. 하지만 8개월 공용 후 육안관측 결과 중앙선 부분의 투수가 제대로 되지 않고 있음을 확인 할 수 있었다. 투수AP/투수CTB 구간과 투수AP/불투수CTB 구간에 관계없이 길어깨 부근에서는 투수가 일어나지만 중앙선 쪽 휠패스 부근에서는 투수가 원활히 이루어지지 않음을 알 수 있었다. 또한 중앙선쪽 휠패스 구간에는 러팅이 발생하여 수막현상을 가속화 하고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 일반구간에서의 표면수가 러팅 및 공극막힘 현상이 발생한 투수성AP구간으로 유입되었으며, 포장하부의 배수시설이 횡단면 경사의 변화로 인하여 원활히 작용하고 못한다는 것을 보여주고 있다. 강우강도가 약해졌을 때의 표면수는 길어깨 부근에서부터 투수되기 시작하여 중앙부분까지 표면수가 제거됨을 확인할 수 있었다. 하지만 중앙선 부근의 휠패스의 경우 투수가 일어나지 않고, 수막현상이 지속됨을 확인할 수 있었다. 러팅의 경우 일반밀입도 포장에 비해서는 적은 처짐량을 보였다.



<그림 3.7.114> 8개월 공용 후 수막현상 발생 및 러팅발생 모습




<그림 3.7.115> 8개월 공용 후 표면수의 투수

(2) 현장투수시험

교통량의 과다와 강우시의 위험도를 고려하여 전단면에 걸친 현장투수시험을 실시하지 못하고 각 단면의 특정 위치를 선정하여 현장투수시험을 실시하였다. 현장투수시험은 단면별 3회 실시하였고, 측정된 값은 <표 3.7.34>과 같다. 측정시 강수는 약하게 지속되고 있는 상태였으며 표면수가 투수된 직 후 포화된 포장에 투수시험을 실시하였다. 측정결과 초기공용성 평가시의 측정값의 2배 이상의 값이 측정되었다. 이는 강수 지속시 투수속도가 현저히 저하됨을 확인할 수 있었다. 또한 길어깨 부근의 측정값이 휠패스 구간의 값보다 좋게 나오는 것을 확인할 수 있었다. 이는 차량하중에 의하여 포장의 투수공극이 줄어들었으며 중앙에서 부터의 원활한 배수가 일어나고 있지 않음을 확인 할 수 있는 측정값이다.

<표 3.7.34> 8개월 공용 후 현장투수시험

단면	투수시간(초)	비고
일반 밀입도 구간	투수가 일어나지 않음	
투수AP / 투수 CTB 구간	11.3	
	12.5	
	8.6	길어깨 부근
투수AP / 불투수 CTB 구간	12.5	
	11.0	
	9.1	길어깨 부근



<그림 3.7.116> 8개월 공용 후 현장투수 실험(길어깨 부근)



<그림 3.7.117> 8개월 공용 후 현장투수 실험(중앙부)

<표 3.7.35> 현장투수시험 측정값 비교

단면	초기값(초) (건식)	8개월 공용후(초) (습식)
투수AP / 불투수CTB	5.89	12.5
	5.22	11.0
	5.55	9.1
투수AP / 투수CTB	4.35	11.3
	4.22	12.5
	4.55	8.6

아. 요약

본 연구에서는 친환경 4S 투·배수성 포장 시스템의 시험 시공을 실시하고 시공성 및 초기 공용성 평가를 수행하였다. 이를 통하여 친환경 4S 투·배수성 포장 시스템의 구조적 안정성과 기능성을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

■ 시험 시공 전 예비실험을 통하여 비닐 양생이 저수축 투수/불투수CTB 내구성 향상에 기여함을 알 수 있었다.

■ OTC 실험을 통해 저수축 투수CTB의 투수능력과 부착강도를 최적화할 수 있

는 비율과 방법에 대해 연구하였으며 이를 실제 시험 시공 시 적용하여 적정한 수준의 투수능력과 부착강도를 얻을 수 있었다.

■ 시공성 평가를 통해 저수축 투수/불투수CTB의 경우, 사후관리의 중요성을 투수 아스팔트 표층의 경우 온도관리의 중요성을 알 수 있었다.

■ 현장투수시험기를 이용한 투수검증에서 양호한 투수성능을 검증하였고 호스를 이용한 강우모사 실험을 통해 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB 배수 방향과 능력을 평가하여 물저장력을 초과할 경우 표면수가 급격히 증가함을 알 수 있었다.

■ TDR를 이용한 노상 중량함수비 측정 결과, 투수AP/투수CTB 구간에서 강우모사 실험 이후 증가하는 모습을 관측할 수 있었다. 이를 통해 강우의 흐름이 포장체를 침투하여 노상에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

■ FWD 측정을 단면별 처짐량을 비교하였다. 비교 결과 배수시설을 통한 배수가 포장체의 구조적 지지력에 기여하는 것으로 판단되며 본 연구에서 제시하고 있는 포장 시스템이 상대적으로 높은 처짐량에도 불구하고 안전한 포장형식으로 자리 잡을 수 있음을 간접적으로 보여준다고 판단된다.

■ 코어 채취를 통해 두께, 부착정도, 공극률을 측정하였으며 기준에 비교적 합당한 시공성을 얻을 수 있었다.

■ 미끄럼저항성 측정 결과, 투수AP/투수CTB 단면의 미끄럼저항성이 일반아스팔트 단면보다 약 10정도 BPN이 적게 측정되었다.

■ 공용 8개월 지속 후에 평가를 실시하였다. 시공시 우려하였던 헤어크랙에 의한 반사균열은 관측되지 않았으나, 투수AP/투수CTB 구간에서는 약간의 기능성 저하를 관찰하였다. 현장시험시공 구간의 교통량을 감안하여 고교통량 지역에서의 장기적인 평가가 필요하겠다.

3. 친환경 4S 투·배수성 포장시스템 3차 현장 시험시공

가. 개요

본 장에서는 친환경 4S 포장의 투•배수성 평가를 위하여 실시한 3차 현장시험시공의 계획과 과정의 전반을 기술하였다. 기이 시행된 1, 2차의 현장시험시공의 투•배수와 관련된 시험결과의 분석을 통한 새로운 연구방향 정립 및 문제점 보완 등을 반영하여 제3차 현장시험시공을 수행하였다.

나. 시험 시공 목적

친환경 4S 투·배수성 포장의 구조적인 안전성과 우수한 기능성을 확인하기 위하여 현장시험시공을 실시하였다.

3차 현장시험시공의 주된 목적으로는 친환경 4S 포장 시스템의 투·배수 능력평가와 투•배수 영향에 따른 구조적 안정성 평가에 있다. 이를 위하여 강우모사에 의한 투•배수 능력 평가시험, FWD(Falling-Weight Deflectometer) 실험 등의 평가를 실시하여 일반아스팔트 포장체와 4S 투 · 배수성 포장체을 비교 평가하였다.

제3차 현장시험시공의 목적

■ 인공 및 자연 강우시 투·배수 기능성 평가

⇒ 강우모사 및 Weather Station을 이용한 물저장력 검증

■ 투·배수 영향에 따른 구조적 안정성 평가

⇒ FWD 실험 등의 1, 2차 현장시험시공 결과와의 비교 검증



<그림 3.7.118> 3차 시험시공의 목적

다. 시험 시공 계획

현장시험시공 계획은 단면을 설계 후, 현장 상황에 맞는 대표단면별 구간배치를 하여 계측기 매립계획을 수립하였다. 세 번째로 친환경 4S 포장의 투•배수 능력을 평가하기 위한 우수처리 시스템으로 맹암거과 유공관을 설치하였다. 네 번째로 세부적인 공용성 평가 항목을 선정하여 친환경 4S 투・배수성 포장의 초기 공용성을 평가하였다.

(1) 시험포장 단면계획

(가) 단면 설정

3차 시험시공의 단면은 1,2차 시험시공의 경우를 바탕으로 설정하였다. 고속도로에서 일반 밀입도 아스팔트 표층은 주로 10cm를 사용하고 있으며, 이중 투수 아스팔트는 4~5cm를 적용되고 있다. FEM 해석에서 사용되는 각 포장단면의 탄성계수는 현재 각 등급별 도로에 적용되고 있는 각 포장 층별 탄성계수 범위를 참고하였으며, 기층재료인 CTB의 탄성계수는 “저수축 시멘트 안정처리 기층 연구”에서 제시한 탄성계수 값을 기본으로 일반 린 콘크리트 탄성계수 값을 넘지 않도록 계획하였다. 따라서 본 단면계획에서 투수 아스팔트 표층은 5~10cm의 범위 내에서 계획하였고, 민감도 분석 결과를 바탕으로 투수 아스팔트 표층보다 민감도가 크게 나타난 투수 CTB의 두께는 일반 린 콘크리트 두께 15cm를 기준으로 하여 10~20cm 범위에서 4가지 변수를 설계하였다. 또한 투수 아스팔트 표층과 투수 CTB 기층에 대한 탄성계수도 각각 3가지씩 변수로 설정하였다.

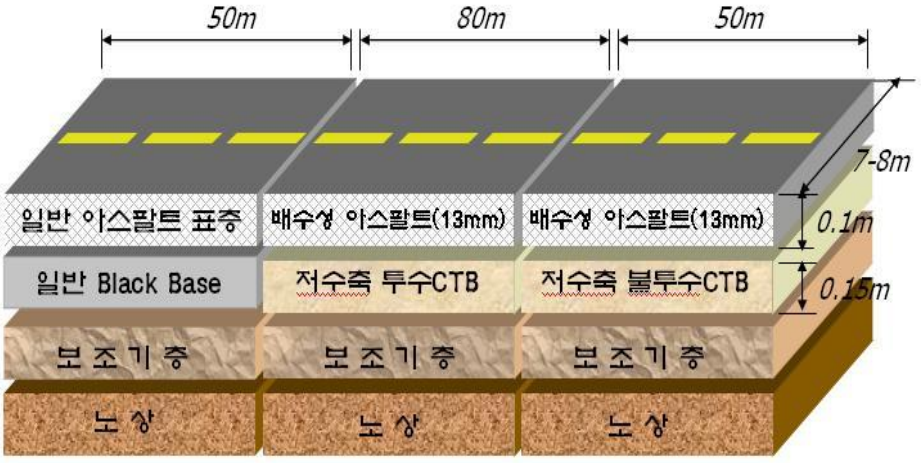
<표 3.7.36>은 친환경 4S 현장시험시공을 위한 최적단면을 결정한 사항이다.

<표 3.7.36> 4S 3차 시험시공 포장 실험 단면 결정

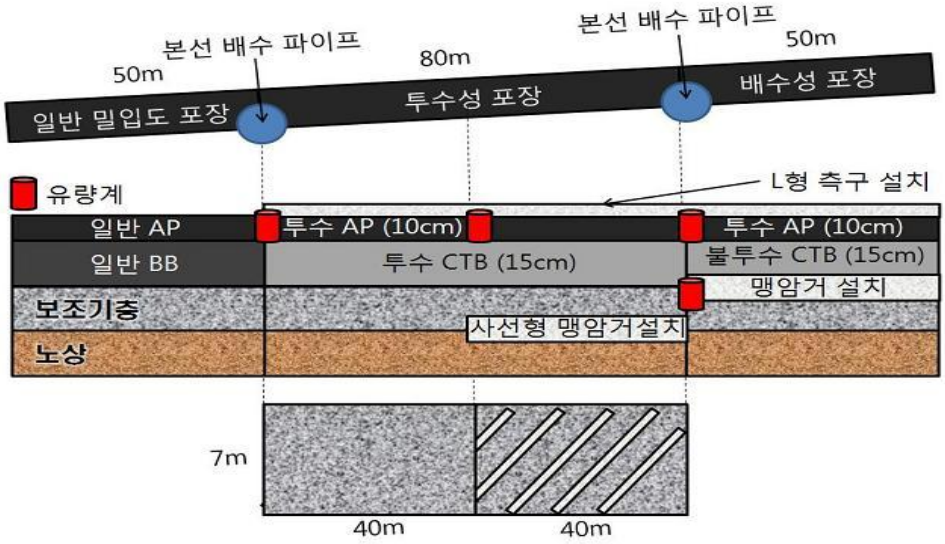
구 분	배수성 포장	투수성 포장	비교(일반밀입도포장)
단면계획	배수성 아스팔트(13mm) : 10cm	배수성 아스팔트(13mm) : 10cm	밀입도 아스팔트 : 10cm
	저수축 불투수 CTB : 15cm	저수축 투수 CTB : 15cm	일반 Black Base : 10cm
최적단면 결정기준	1. 현장 시공성 고려 2. 도로 등급별 교통량 고려 3. 투수 CTB 기층 두께를 10cm 초과 적용 4. 투수 CTB 기층 탄성계수를 1250000 psi이하로 적용 5. 비교단면은 실험포장 고속도로 현장의 설계단면을 참고		

(나) 시험포장 단면 배치계획 및 계측기 매립 계획

3차 현장시험시공의 단면은 <그림 3.7.119>과 같이 비교구간을 포함하여 총 3개로 책정하였다. 투수성포장과 배수성포장의 길이는 각 80m, 50m 이며 일반밀입도 포장의 길이는 50m로 배치하였다.



<그림 3.7.119 > 3차 시험시공 단면계획



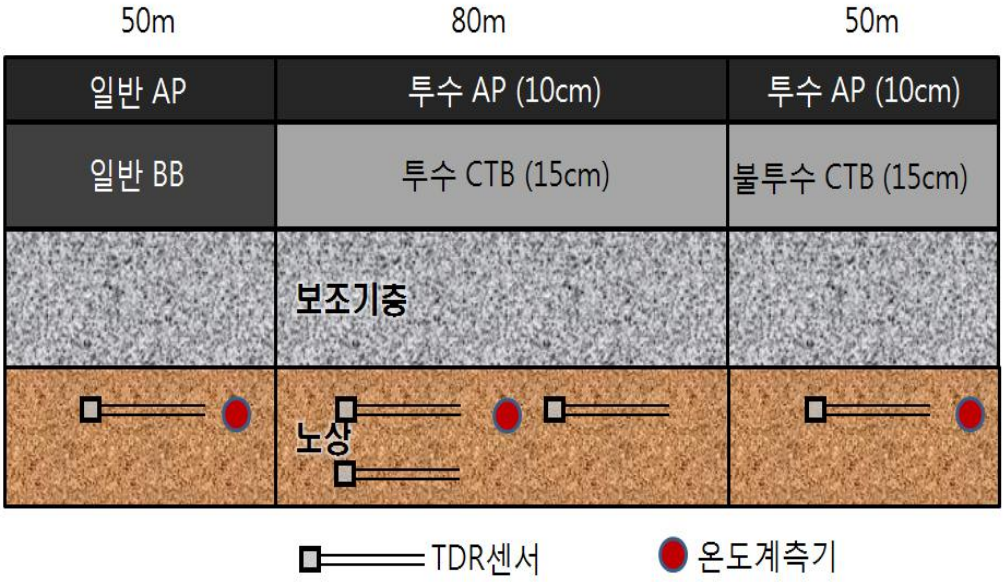
<그림 3.7.120> 3차 시험시공 배치계획

각 층의 포장형식은 1,2차 현장시험시공과 흡사하나, 배수처리시설의 보완을 통하여 투입되는 강우의 흐름을 알 수 있도록 하였다. 배수성 포장의 경우는 보조기층에 종방향 맹암거를 설치하였고, 특히 투수성 포장에는 보조기층에 횡방향 맹암거의 설치 구간과 미설치 구간을 배치 계획하여 강우지속시간에 따른 노상포화도 및 투수능력에 대한 평가를 수행하였다.

강우시의 표면수의 측정을 원활히 하기 위하여 경사가 있는 구간을 선정하였다. 발생하는 표면수와 침투수가 경사를 따라서 각 단면의 경계부분에 집합할 수 있도록 하였다. 여기에 100mm관을 매설, 유량계를 설치하여 각 단면별 표면수, 침투수를 측정하고자 하였다.

<그림 3.7.121>는 친환경 4S 투·배수성 포장체와 일반아스팔트 포장체의 계측기 매립 현황을 보여주고 있다. 노상의 경우 TDR 매설을 통해 자연환경(강우량, 온도 등)과 맹암거 및 유공관 설치에 따른 노상 중량함수비의 변화를 살펴보고자 하였으며 I-Button의 경우에는 노상 동결유무 검토한다, 또한 FWD측정을 통해 포화율과 노상 지지력와의 관계를 단면별로 비교·검토할 계획이다.

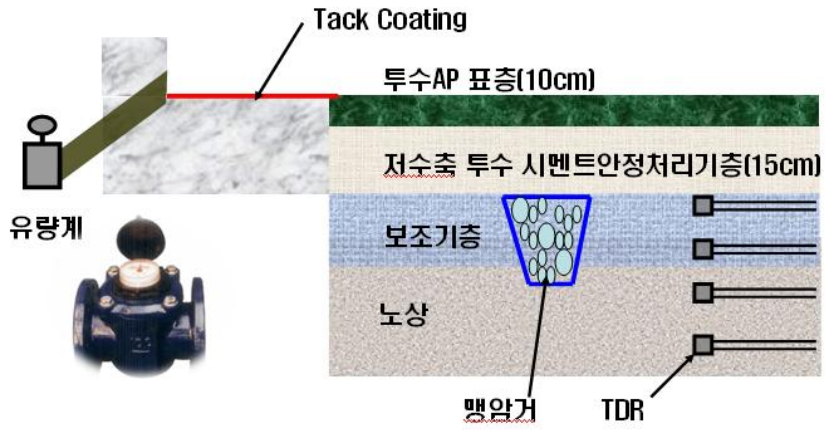
<그림 3.7.121>와 같이 계측기는 TDR(Time Domain Reflectometer)와 온도계측기를 매설할 계획이다. TDR의 경우 각 단면별 포화시기를 측정하기 위함이며, 투수성 포장의 경우 노상의 포화순서 및 시간을 측정하기 위하여 노상 상하부에 5개 매설하였다.



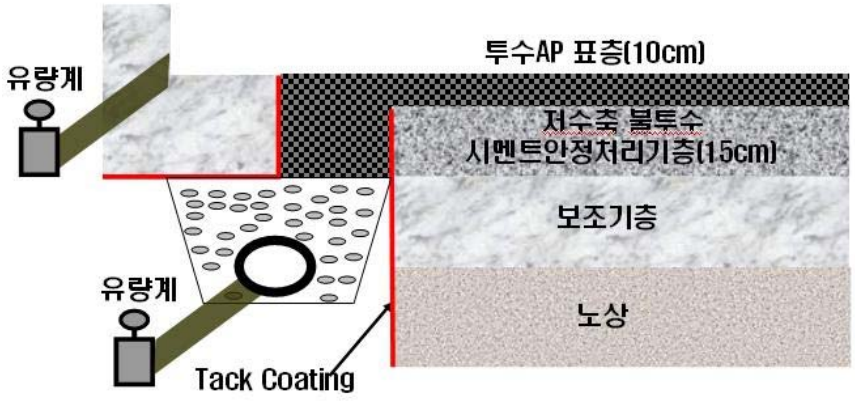
<그림 3.7.121> 3차 시험시공 계측기 매설계획

(다) 배수시설 계획

배수시설의 경우 2차 현장시험시공 경험을 바탕으로 시공하였으며, 배수시설에 유량계를 설치하여 표면수의 측정을 객관화 하였고, 각 단면별 유량을 측정하여 강우시험 시 데이터의 정확도를 높이고자 하였다. 3차 현장시험시공의 주된 평가 항목인 투•배수 능력 평가를 위하여 배수성 포장구간에는 측구와 포장단면사이의 유실을 줄이기 위하여 택코팅을 철저히 하여 유실수에 의한 오차를 최소화 할 수 있는 계획을 하였다. 투수성 포장구간에는 투수 AP 표층과 투수 CTB 기층을 통과한 빗물이 강우지속시간이 길어짐에 따라 노상이 포화된 경우 보조기층 내의 우수를 빠른 시간에 배수시설(종방향 맹암거)로 배출하기 위한 횡방향 맹암거를 설치하여 이를 설치하지 않은 투수성 포장구간과 구분하여 투배수 능력을 평가하도록 하였다.



<그림 3.7.122> 3차 시험시공 배수시설 계획 (투수성 포장)



<그림 3.7.123> 3차 시험시공 배수시설 계획(배수성 포장)

(라) CTB 및 AP 타설 계획

저수축 투수/불투수 CTB와 투수AP의 타설 공정 개요와 각 단면의 평가기준은 다음과 같다.

<표 3.7.37> 3차 시험시공 공정개요

공 정	항 목	방법
저수축 투수/ 불투수CTB 타설	현장배합 품질관리 및 평가	입도분석(입도의 정확성), 슬럼프 측정, HFT실험, 공시체 제작
투수AP 타설	현장배합 품질관리 및 평가	두께, 칸타브로, 공극률 등

<표 3.7.38 > 3차 시험시공 CTB 시공계획 및 평가기준

현장 품질 관리		시공 계획 및 평가 기준
입도 분석		시방서 참조
HFT 실험		기준치 통과
슬럼프 측정		무슬럼프
현장 품질 평가		**시공 계획 및 평가 기준**
강도		50kg/cm^2 이상
투수성능		15(s) 이내
코어링 부착정도		부착
육안관측	**건조수축**	건조수축 미발생
	투수CTB	탈리 미발생
	불투수CTB	표면박리 미발생

<표 3.2.39> 3차 시험시공 AP 시공계획 및 평가기준

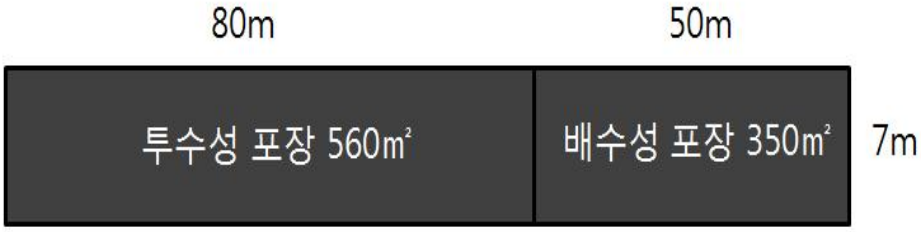
현장 품질 관리	시공 계획 및 평가 기준
혼합온도(℃)	175~185
다짐온도(℃)	140~160
현장 품질 평가	시공 계획 및 평가 기준
두께	10cm
칸타브로	손실률 20% 미만
공극률	20% 이상
밀도	-
입도 분석	시방서 규정 입도분포
투수성능	15(s) 이내
소음 측정	속도 80km/h

(2) 인공강우 모사 및 자연강우 실험 계획

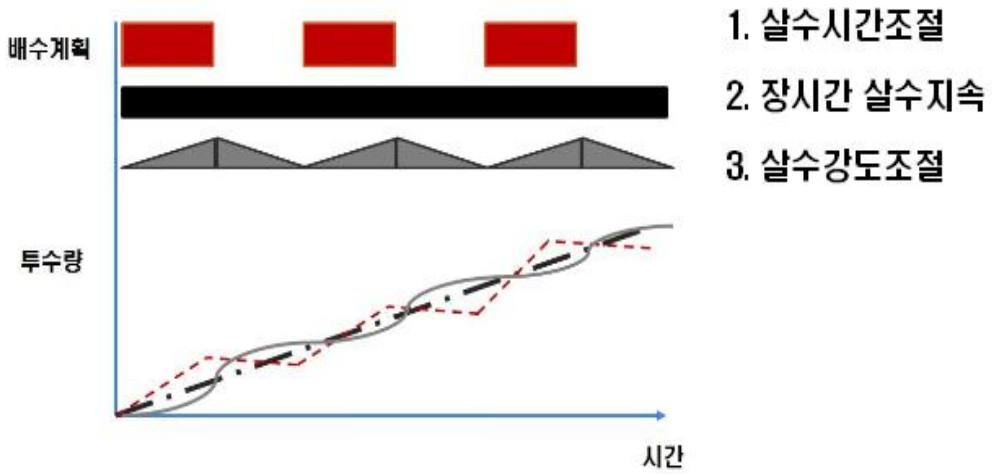
(가) 인공강우 모사 계획 (인공강우시험)

3차 시험시공구간의 포장면적을 계산한 결과 <그림 3.7.124>와 같이 투수AP/투수CTB 구간이 560㎡, 투수AP/불투수CTB 구간이 350㎡였다.

- 시간당 5mm의 강우량 모사 = 시간당 2.8ton, 1.75ton 살수
- 시간당 10mm의 강우량 모사 = 시간당 5.6ton, 3.5ton 살수
- 강우지속시간, 강우량, 강우강도에 따라 포장체의 투수능력을 평가하기 위하여 상이한 강우조건 하에서의 인공강우 실험 실시
- 강우시험 전후 FWD 실험을 통하여 강우 전후의 구조적 안정성 검토
- 강우실험기구의 능력은 흡입량으로 결정



<그림 3.7.124> 3차 시험시공 단면 넓이 계산



<그림 3.7.125> 3차 시험시공 강우량 모사 계획

<표 3.7.40> 3차 시험시공 강우량 모사 실험계획

회차	실험목적	실험내용		측정항목		비고
		투수성포장	배수성포장	투수성포장	배수성포장	
1회	점우(비지속성) 시간당 5㎜	시간당2.8t 1시간강우 후 1시간대기× 3회	시간당1.75t 1시간강우 후 1시간대기× 3회	표면수측정 TDR 계측	표면수 측정 맹암거유량측정 TDR계측	실험 후 건조기간을 둠
2회	점우(비지속성) 시간당 10㎜	시간당5.6t 1시간강우 후 1시간대기× 3회	시간당3.5t 1시간강우 후 1시간대기× 3회	표면수측정 TDR 계측	표면수 측정 맹암거유량측정 TDR계측	실험 후 건조기간을 둠
3회	지속강우 시간당 5㎜	시간당2.8t 6시간강우	시간당1.75t 6시간강우	표면수측정 TDR 계측	표면수 측정 맹암거유량측정 TDR계측	실험 후 건조기간둠 실험 전후 FWD 비교
4회	지속강우 시간당 10㎜	시간당5.6t 6시간강우	시간당3.5t 6시간강우	표면수측정 TDR 계측	표면수 측정 맹암거유량 측정 TDR계측	실험 후 건조기간을 둠
5회	랜덤강우 시간당 5㎜	5.6t의 물을 2시간에 나누어 강우	3.5t의 물을 2시간에 나누어 강우	표면수측정 TDR 계측	표면수 측정 맹암거유량 측정 TDR계측	Weather Station 강우측정

(나) 자연강우 실험 계획

Weather Station을 이용하여 자연강우시 우수의 흐름에 대한 평가를 계하였다. 강우량, 강우시간, 횟수에 따른 표면수, 침투수, 잔류수, 손실수를 측정하여 인공강우시의 측정내용을 검증코자 한다. 또한 인공강우 실험 시 발생할 수 있는 오차(증발량, 온도, 습도)를 보정할 수 있는 근거를 제시하고, 강우 전후 FWD를 통한 구조적 안전성 검토 자료로 활용하였다.

(3) 공용성 평가 계획

현장시험시공의 초기 공용성 평가는 <그림 3.7.126>과 같이 기능적 평가와 구조적 평가로 구분하여 계획하였다. 3차 현장시험시공 구간은 실제 교통량이 존재하는 구간으로써 시공 이후 공용 이전에 초기 공용성 평가를 실시하였다. 친환경 4S 포장의 기능적 평가 측면에서 투•배수능력 평가 및 TDR를 이용한 노상 중량 함수비 변화 관측을 수행하였다. 투•배수 영향에 의한 구조적 평가 측면에서 FWD(Falling Weight Reflectometer) 측정을 실시하여 투·배수성 포장과 일반아스팔트 포장간의 처짐량을 비교하여 구조적 안정성을 검토하고 표층 및 노상 처짐량 변화를 관측하였다.

투수능력 실험은 현장투수실험기를 통하여 단면별 투수능력을 평가하고 강우 모사를 통하여 친환경 4S 투·배수성 포장시스템의 물저장력와 투·배수 능력을 살펴본다. 또한 TDR를 이용하여 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 노상 중량함수비 변화를 관측하였다.

본 연구의 시공성 및 공용성 평가결과는 향후 친환경 4S 투•배수성 포장 시스템의 설계 프로세스 개발, 지침서 제안 및 유지관리방안지침 제안의 기초자료로 활용할 계획이다. 따라서 현장시험시공을 통해 필요한 자료를 얻기 위해 아래와 같은 측정항목과 목적을 설정하여 모니터링 계획을 세웠다.



<그림 3.7.126> 3차 시험시공 초기 공용성 평가의 연구 흐름도

<표 3.7.41> 3차 시험시공 공용성 평가 계획

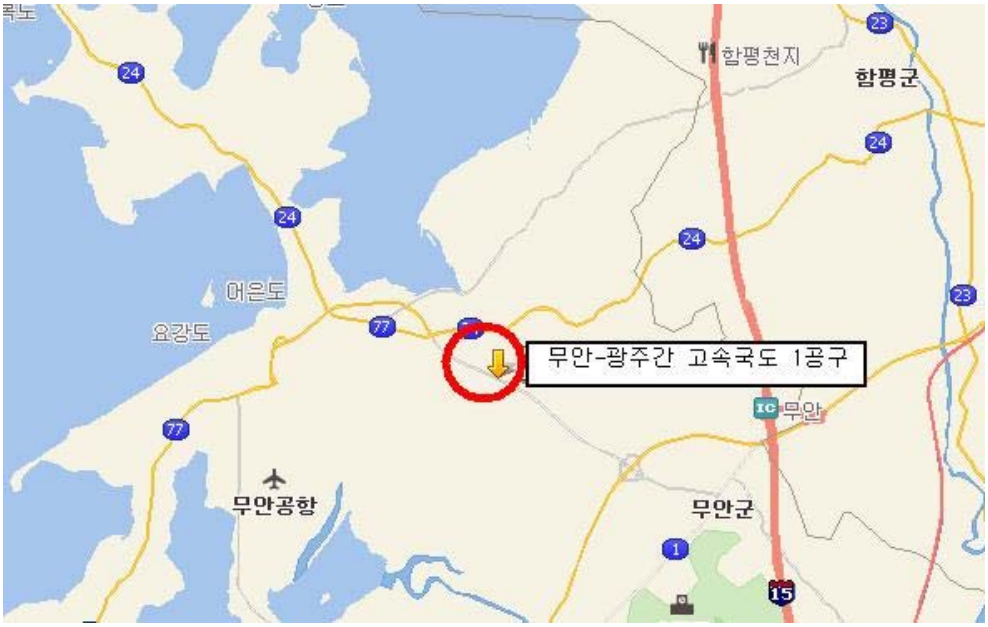
항목 \ 기간		평가시기			
		시공 직후	강우시험 직후	공용 직후	공용 후
기능성 평가	투수계수 및 함수량	●	●	●	●
	SN(BPT)	●			●
	미끄럼 저항성	●	●		●
구조적 평가	FWD	●	●	●	●
	Core	●			
	부착강도 실험	●			
	육안관찰	●	●	●	●
기타	교통량 측정			●	●

라. 현장 시험시공

(1) 제3차 현장시험시공 시행개요

친환경 4S 투·배수성 포장의 제3차 현장시험시공은 현장내 완성된 노상 위에 보조기층을 완성하고 물성평가를 위한 실험과 계측기를 매설하였다. 이후 저수축 투수/불투수CTB와 아스팔트 안정처리기층(Black Base ; 이하 BB) 그리고 투수AP 표층, 일반 밀입도 AP 표층을 차례로 타설 하였다. 노상과 기층부분에는 데이터 계측을 위한 TDR, I-Button를 매설하였다. 그리고 표층 완성 이후 초기 공용성 평가를 실시하였다.

전남 무안의 제3차 현장시험시공 위치는 다음과 같다.



<그림 3.7.127> 3차 시험시공 위치도

(2) 노상, 보조기층 완성

현장시험시공 구간은 무안~광주간 고속도로 현경 IC Ramp A 구간으로 총 길이는 약 300m 이고 일부 곡선구간이 포함되어 있다.

노상 완성 이후 물성평가를 위하여 평판재하 실험을 실시하였다. 단면별의 노상 중량함수비 변화를 살펴보기 위하여 TDR(Time-Domain Reflectometer)방식 함수량계를 단면별로 하나씩 매설하였다. 또한 노상 내부온도 측정을 위하여 온도측정계측기(I-Button)도 TDR과 함께 매설하였다. 보조기층의 경우에도 시공성을 평가하기 위해 평판재하실험을 실시하였다. 평판재하 실험결과 K30(하중강도/침하량) 값은 26.5kgf/㎤이며 이 값을 환산하면 약 260MN/㎥으로 이는 지지력에 대한 기준을 통과하는 것이다. 또한 벤겔만 빔 변형량 시험결과 최대변형량이 2.48, 영구변형량이 0.64로 측정되었으며 탄성변형률(mm)이 1.84로써 기준을 통과함을 알 수 있었다.

(3) 저수축 투수/불투수CTB 및 BB층 타설

저수축 투수AP/불투수CTB와 아스팔트 안정처리 기층(BB, Black Base, 이하 BB)은 아스팔트 피니셔 장비를 이용하여 타설하였다. 저수축 투수/불투수CTB는 한 번에 15cm가 타설된 이후 다짐을 실시했으며 BB의 경우 10cm, 5cm로 나누어서 다짐을 실시하였다. CTB의 현장다짐은 머캐덤롤러, 타이어롤러, 탠덤롤러 순으로 진행되었으며 각각 3, 5, 5회를 실시하였고 BB의 경우에는 같은 순서로 각각 3회, 6회, 4회를 실시하였다.

기존 시험포장에서 발견하였던 탈리 및 박리 현상을 교정하기 위하여 전 CTB 타설 구간은 <그림 3.7.129>와 같이 비닐양생을 실시하였다.

현장품질 관리를 위한 HFT(Heart Fresh-con′c Test)에서는 평균 27g, 40g으로 실험실에서의 실험치와 유사한 결과를 나타내어 생산된 CTB의 품질을 검증 할 수 있었다.



<그림 3.7.128> 3차시험시공 CTB 타설



<그림 3.7.129> 3차시험시공 CTB 양생

(4) 택코팅

택코팅의 경우 기존의 실험에서 책정하였던 60% 포설을 투수CTB에 포설하였다. 1㎡당 0.36ℓ를 포설하여 부착과 투수를 동시에 만족시켰으며, 불투수CTB의 경우는 일반 택코팅과 동일하게 실시하였다.



<그림 3.7.130> 3차 시험시공 택코팅 실시

(5) 투수 아스팔트 표층

(가) 시험시공 준비

시험시공의 준비를 위해서 아스팔트 생산 플랜트에서 실내시험을 통하여 결정된 배합설계를 검증하기 위한 시험생산을 실시하였다. 시험생산 과정에서 골재의 정확한 혼합비율을 유지하기 위하여 콜드빈에 대한 유출량 시험을 수행하였다. 그리고 1배치 1.5톤의 배수성 아스팔트 혼합물을 샘플로 비벼 시료를 채취하고 공극률 측정 시험을 수행하였다. 그 결과 21%의 공극률을 얻어 실내시험에 의한 배합설계를 검증하였다.

배수성 아스팔트 혼합물을 생산한 신아-금호 아스콘은 시험시공 현장에서 약 50분 거리에 위치한 업체로서 6월에 실시한 시험시공이기는 하지만 아스팔트 혼합물의 운반 중 온도저하를 막기 위하여 보온 덮개를 트럭에 설치하여 운반하는 것으로 시험생산 과정에서 결정하였다. 그리고 개질재가 잘 풀릴 수 있도록 혼합시간을 90초로 결정하였으며 1.5톤 단위로 혼합하는 것으로 결정하였다.

시험 생산 결과 소요 품질이 얻어졌기 때문에 시험 생산 이후에 배수성 아스팔트 혼합물 생산이 가능하도록 폐타이어 분말과 왁스를 미리 계량하여 시험시공을 준비하였다.

(나) 시험시공

시험시공 당일 배치플렌트에서 아스팔트 혼합물은 연구진의 철저한 감독 하에 생산되었다. 품질관리 요소들에 대한 대비는 다음과 같다.

1) 초도 생산: 폐타이어 분말을 사용하여 아스팔트 혼합물을 생산하는 경우 폐타이어분말이 화학반응을 제대로 이루도록 하기 위하여 아스팔트 혼합물의 배합온도를 180도 이상으로 유지할 필요가 있다. 생산온도를 안정화하기 위하여 아스팔트 혼합물 생산 이전에 골재만으로 세배치(4,5톤)을 비벼 온도를 확인한 이후에 본격적인 혼합물 생산을 시작하였다. 그리고도 네 번째 배치 1.5톤의 혼합물은 균질한 배합 상태를 확인한 이후에 폐기하고 다섯 번째 배치의 혼합물부터 시험시공에 투입하였다.

2) 개질재 투입: 개질재는 퍼그밀 믹서 상부의 개질재 투입구를 활용하여 투입하였다. 핫빈 골재가 모이는 곳으로 투입하면 더 높은 혼합 효율을 취할 수 있으나 폐타이어 분말의 양이 핫빈으로 투입하기에는 너무 많아서 믹서 상부에서 투입할 수밖에 없었다. 그에 대한 대비책으로 혼합시간을 90초까지 늘여 충분한 혼합이 가능하도록 하였다.

3) 운반중 혼합물의 온도 관리: 운반거리가 일반적인 경우보다 길어 운반시간이 길어지므로 보온덮개를 트럭 적재함 상부에서 이중으로 덮어 혼합물의 온도를 최대한 유지하였으며, 현장 반입시 혼합물의 온도가 150도 이상 되는 것을 확인하고 시험시공에 재료를 투입하였다.

4) 생산중 품질관리: 아스팔트 혼합물 생산 중간에 품질 확인을 위하여 시료를 채취하여 공시체를 만들어 가장 중요한 품질관리 요소인 공극률을 확인하였다. 공시체 두개를 만들어 확인한 결과 오전 생산분에서 배수성 혼합물의 공극률은 평균 20.2%가 나왔다. 오후에는 공극률을 23%정도로 조정하여 혼합물을 생산하였다.

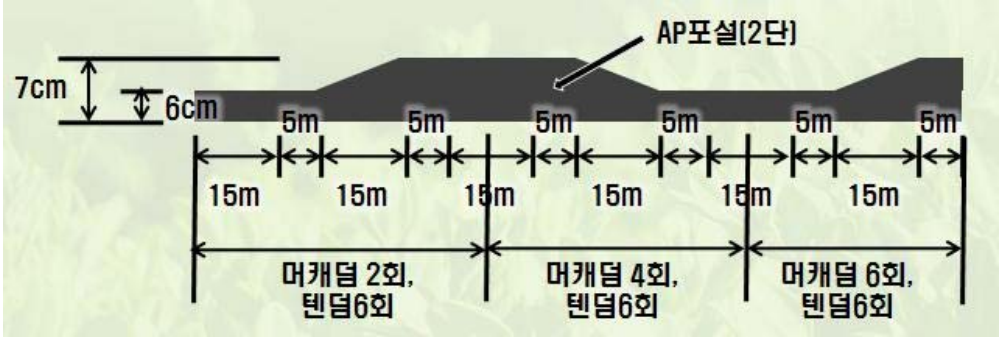
시험시공에 사용된 아스팔트 포장 장비는 피니셔 1대, 10톤 머캐덤롤러 1대, 5톤 탠덤롤러 1대였다. 머캐덤롤러는 다짐 중량이 충분하지만 탠덤롤러는 다짐 중량이 시방 기준에 미달하여 다짐 횟수를 늘리는 것으로 조정하였다. 다만 현장 여건

상 시험시공 연장이 약 120m에 불과하여 시험포장을 통하여 롤러 종류별 다짐횟수를 결정하지는 못하였다. 시험시공에서 총 10cm의 배수성 포장이 상부층과 하부층으로 각각 5차씩 오전과 오후로 나누어 시공되었다. 오전과 오후 모두 동일한 장비가 투입되었다. 투입된 장비들의 사진은 다음과 같다.

투수AP 다짐의 경우 배수로의 아스팔트 다짐을 위하여 골재의 높이만큼 포설한 후 다짐을 실시하였으며, 이후에 2층 포설을 통한 다짐을 실시하였다. 1층의 경우 동일하게 머캐덤, 탠덤으로 6회씩 실시하였으나, 2층의 경우 다짐횟수와 포설두께에 따른 다짐도의 변화를 체크하고 다짐량을 정의하기 위하여 구분을 두었다. 먼저 포설 두께를 5.5cm, 6.5cm의 두 가지 변수로 정하고 이에 따라 머캐덤의 횟수를 2회, 4회, 6회로 고정하였다. 이때 탠덤의 다짐횟수를 6회로 일정하게 유지하였다.



<그림 3.7.131> 표층 다짐에 투입된 시공 장비



<그림 3.7.132> 아스팔트 다짐도 실험을 위한 단면선정

마. 인공강우 실험

(가) 1차 인공 강우 실험

① 배수시설 계획

3차 현장시험시공의 총연장은 180m로 일반아스팔트 단면 및 투수AP/저수축 불투수CTB 단면, 투수AP/저수축 투수CTB 단면으로 구분 배치하였다.

투수능력 평가를 위한 배수시설로 표면수 측정을 위해 표면수 차단막을 설치하고, 침투수 측정을 위해 종방향 맹암거 및 유공관을 설치하였다. 투수AP/저수축 불투수CTB 단면의 경우에는 우천 시 기층배수를 통한 강우의 흐름을 유도하였기에 보조기층 및 노상으로부터의 맹암거에 부직포와 비닐로 이용하여 강우 유입을 방지하였다. 강우가 노상까지 투과되는 투수AP/저수축 투수CTB 단면에서는 투수AP/저수축 불투수CTB 단면에서와 달리 부직포로만 맹암거를 처리하여 보조기층 및 노상으로부터 강우의 흐름을 자유롭게 하였다.

특히 차단막 설치시 표면수의 유실을 방지하기 위하여 실리콘 코팅처리 하였으며 유량계 부분의 다이크와의 경계부분의 유실을 막기 위하여 다이크와의 접합부에도 실리콘처리를 실시하였다.



<그림 3.7.133> 3차 시험시공 배수시설 맹암거 처리



<그림 3.7.134> 표면수 측정용 차단막 설치



<그림 3.7.135> 표면수 측정용 차단막 코팅



<그림 3.7.136> 3차 시험시공 인공강우실험



<그림 3.7.137> 강우실험용 유량계 설치

② 강우 모사

2차 시험시공의 강우모사 실험의 경우 좁은 면적에서 호스를 이용하여 투수능력을 평가하였으나 시간에 따른 물흐름을 평가하지 못하였다. 따라서 본 3차 시험시공의 경우 실제 강우를 최대한 모사하고 다이크 모서리 실리콘 처리등을 통하여 표면수 및 침투수의 측정을 최대한 정확히 하고자 하였다.

살수기의 경우 <그림 3.7.136>과 같이 살수기와 분수호스를 이용하여 포장 전체에 대한 강우를 모사하였다. 또한 <그림 3.7.137>와 같이 포장의 하단부에 유량계를 설치하여 유출된 표면수를 유량계를 이용하여 연속적으로 측정하였다.

㉠ 투수AP-투수CTB 구간

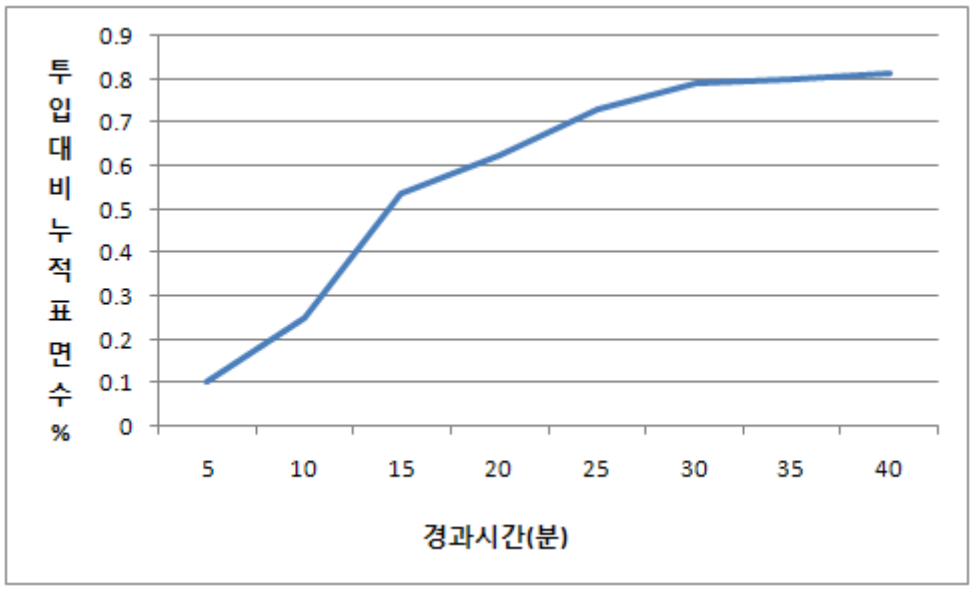
시험포장 구간에 구배가 있기 때문에 구배의 가장 하부인 투수AP-투수CTB 구간의 실험을 먼저 실시하였다. 국내의 경우 10여년 만에 한번씩 있는 기록적인 폭우의 경우 시간당 100mm 이고, 평균적 폭우의 일강우가 220mm이다. 따라서 본 실험에서는 각 단면에 2.5t이상 살수를 통해 시간당 강우량 10mm를 모사하고자 하였다.

본 실험에서 2.5t의 물을 살수 하였으나 포장체에서 표면수의 발생이 가능하지 않음을 확인하였으며 이후 1시간동안 8t의 물을 살포하여 시간당 강우량 26mm를 모사하였다. 살수시험결과 <그림 3.7.138>과 같이 표면수가 발생하지 않음을 확인할 수 있었다.

따라서, 표면수 유도를 위하여 40분동안 16t의 물을 살포하였으며 계획대로 표면수를 유도할 수 있었다. 표면수는 살수 후 5분이내에 발생하였으며 시간당 24t의 살수는 78mm/h의 살수량을 나타낸 것이다. 이때의 측정된 표면수는 130ℓ로써 전체 유입량의 약 0.8%이다. 이는 2차 시험시공의 경우와 비슷한 수치이며 대부분의 물이 포장 하부로 흡수된다는 것을 알 수 있었다.



<그림 3.7.138> 투수성 포장 8t 살수 결과



<그림 3.7.139> 78mm/h 살수시 경과시간에 따른 투입대비 누적 표면수(%)

㉡ 투수AP-불투수CTB 구간

투수AP-불투수CTB 구간에서는 본포장의 배수시스템의 문제로 전구간 강우 실험을 실시하지 못했다. 따라서 10㎡의 구간을 선정하여 <그림 3.7.140>와 같이 살수차를 이용, 인공강우 실험을 실시하였다. 살수량은 직접 계산하여 시간당 2t의 물이 방출되도록 하였다.

유량 측정은 5분 간격으로 실시하였으며 측정을 통한 값은 다음과 같다.



<그림 3.7.140> 살수차를 이용한 실험

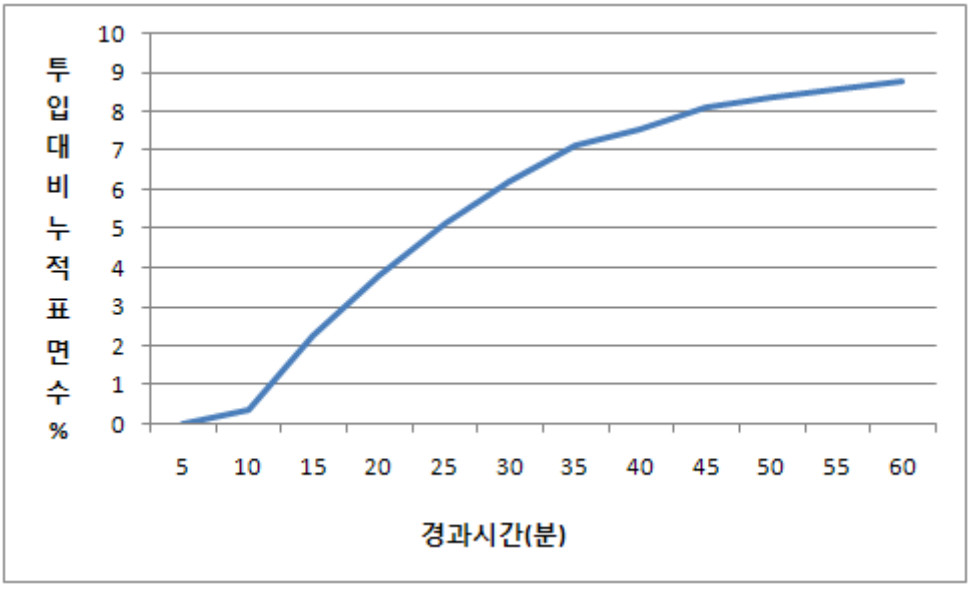


<그림 3.7.141> 살수실험에 의한 유량 측정

<표 3.7.42> 시간에 따른 유량측정

경과시간(분)	측정유량	시간당표면수	표면수누적량	비고
0	3511	0	0	
5	3511	0	0	
10	3520	9	9	
15	3595	75	84	
20	3702	107	191	
25	3834	132	323	
30	3977	143	466	
35	4137	160	626	
40	4269	132	758	
45	4425	156	914	
50	4558	133	1047	
55	4693	135	1182	
60	4831	138	1320	

투입량대비 속도가 일정한 것으로 보아 10㎡당 한계를 위와 같이 정의 할수 있다. 5분당 투입량이 1250ℓ이었을때 25분 뒤부터의 표면수는 평균 141ℓ인 것을 알 수 있다. 따라서 차후 강우실험에서는 전단면에 대한 실험을 통하여 정확한 한계용량에 대한 실험이 필요하다.



<그림 3.7.142> 150mm/h 살수시 경과시간에 따른 투입대비 누적 표면수(%)

(나) 2차 강우실험

① 실험목적

2차 강우실험은 FWD 실험과 병행하여 실시하였다. 포장체의 포화상태와 건조상태, 포화지속상태간의 구조적 안정성을 비교하기 위하여 인공적으로 살수실험이 필요했기에 2차 강우실험과 병행하여 실시하였다. 또한 기존 1차 실험 당시 포장의 용량을 결정하였으나 살수기의 살수용량을 살수차에서 방출되는 물의 총량으로 구성하였기에 수량변화에 문제가 있었으며, 일정한 유량을 강수하였는지에 대한 검증이 불확실한 상태였다. 따라서 2차 강우실험에서는 이러한 단점을 극복하고자 살수기에 직접 유량계를 설치하여 실시간 유량 조절이 가능도록 하였으며, 분수호스에서의 고른 압력에 의한 균등한 분배를 위하여 PVC파이프를 이용하여 물이 일정하게 분배될 수 있도록 장치하였다.

② 실험내용

1차 강우시험과 마찬가지로 살수호스와 살수기를 설치하고 각 단면에 대하여 전단면 살수실험을 실시하였다. 유량을 정확히 조절할 수 있었기에 투수속도와 강우속도를 이용하여 2가지를 가정해 볼 수 있었다. 첫째 투수속도가 강우속도보다 클 경우, 두 번째 강우속도가 투수속도보다 클 경우이다. 실험 방법은 표면수가 발생할 때까지 강우강도를 늘린 후 표면수가 발생했을 때의 강우량을 계산하고 그 점에서 한동안 강우를 지속하여 표면수의 발생이 일정한지 검토한다. 표면수의 발생량이 동일할 경우 포화되었다고 보고 강우강도를 낮추어 표면수의 발생 및 변동추이기록을 통하여 투수속도와 강우속도에 대한 비교를 해볼 수 있었다.

③ 실험결과

투수AP-투수CTB 구간의 경우, 처음 표면수 발생시기의 강우량은 12ton/hr 였다. 이때의 표면수 발생량은 평균 10분당 10ℓ로 30분 강우시험동안 일정하였으며 이후 강우량을 9ton/hr로 유지하였다. 이때 표면수가 더 이상 발생하지 않았으며 강

우속도보다 투수속도가 더 빠르다는 것을 알 수 있었다. 마지막 살수 실험인 3차 시험시공에서는 강우량의 변동을 통하여 강우 강도를 조절하고 그 양을 측정하여 강우능력을 평가하고 강우 전후에 현장투수실험을 실시하여 값을 산출하여야 한다.

투수AP-불투수CTB 구간의 경우, 동일한 양인 12ton/hr를 살수하였을 경우 투수AP-투수CTB 구간보다 표면수가 많이 발생하였다. 또한 강우량을 9ton/hr로 유지하였을 때에도 표면수가 발생하지만 측정이 제대로 되지 않을 만큼의 미량임을 알 수 있었다. 이는 본구간이 본래 투수AP-투수CTB 구간보다 투수 능력이 떨어지는 것과 포장의 경사도가 투수AP-투수CTB 구간보다 완만한 것에 기인할 수 있다.

살수 실험 결과, 두 개의 단면 모두 50mm/hr의 강우량에는 표면수가 크게 발생하지 않는다는 것을 알 수 있었으며 국내 강우량 기록으로 살펴볼 때 기록적인 폭우를 제외하고는 포장의 물저장력이 강우량을 능가하는 것을 알 수 있었다.

<표 3.7.43> 3차 시험시공 2차 살수실험

	투수AP/투수CTB		투수AP/불투수CTB	
50mm/h 살수	시간경과 (분)	누적표면수 (ℓ)	시간경과 (분)	누적표면수 (ℓ)
	0	0	0	0
	10	8	10	9
	20	18	20	25
	30	29	30	39
37mm/h 살수	시간경과 (분)	누적표면수 (ℓ)	시간경과 (분)	누적표면수 (ℓ)
	0	0	0	0
	10	0	10	2
	20	0	20	2

<표 3.7.44> 3차 시험시공 3차 강우시험계획

지속시간 (분)	투수AP-투수CTB (일반)	투수AP-투수CTB (사선형맹암거)	투수AP-불투수CTB	비고
60	12ton/hr = 40mm/hr	12ton/hr = 40mm/hr	15ton/hr = 50mm/hr	
60	15ton/hr = 50mm/hr	15ton/hr = 50mm/hr	18ton/hr = 60mm/hr	
60	18ton/hr = 60mm/hr	18ton/hr = 60mm/hr	21ton/hr = 70mm/hr	
30	18ton/hr = 60mm/hr	21ton/hr = 70mm/hr	24ton/hr = 80mm/hr	

바. 공용성 평가

(1) 현장투수시험을 통한 투수능력 평가

측정 결과 투수AP/불투수CTB 단면의 투수능력이 투수AP/투수CTB 단면의 투수능력보다 작다는 것을 알 수 있었다. 또한 투수능력에 있어서 1차보다 큰 값을 가졌으며 이는 시공 후 내린 비에 의해 투수 능력에 약간의 장애를 준 것으로 판단된다. 또한 보조기층 및 투수CTB에서의 결과를 보면 보조기층의 경우 중앙부에서 투수가 전혀 되지 않는 것을 확인하였다.

시공 40일 경과 후 2차 현장투수시험을 실시하였다. 2차 현장투수시험의 목적은 고속도로 본선 포장으로 인한 포장의 공용에 따른 투수계수변화 측정이며, 실제 본선 포장시 공사차량의 이동으로 인하여 투수AP의 공극이 이물질에 의하여 상당량 막혀있었다.




<그림 3.7.143> 3차 시험시공 현장 공용 후 현장 투수시험과 공극막힘 현상

<표 3.7.45> 3차 시험시공 현장투수시험 결과

위치		시공직후 초(sec)	시공40일경과 초(sec)	비고
투수AP/불투수CTB	1	4.89	10.4 (공극막힘)	
	2	4.22	18.5 (공극막힘)	
	3	4.55	4.9	
	4	4.95	5.1	
평균		4.65		
투수AP/투수CTB	1	4.35	8.6 (공극막힘)	
	2	4.22	7.5 (공극막힘)	
	3	4.55	5.0	
	4	4.78	4.8	
평균		4.47		
일반아스팔트 단면	1	-		
	2	-		
일반BB층	1	투수가 일어나지 않음		
	2			
보조기층	1	투수가 일어나지 않음		
	2			

측정결과 시공직후에는 대부분 투수시간 5초 이내로 좋은 값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 하지만 공용 40일 후에는 본선 공사 중 공사차량에 묻어나온 노상 때문에 투수층의 공극이 대부분 막혀 투수속도가 현저히 감소함을 알 수 있었다. 특히 공사현장과 더 인접한 투수AP/불투수CTB 구간의 경우 공극 막힘이 더 심하여 투수속도가 현저히 감소함을 알 수 있었다. 시험시공구간이 공구의 진입로이고 또한 투수AP/불투수CTB 구간의 경우 시공되지 않은 본선의 노상과 접해 있어 노상의 흙이 그대로 공극을 매움을 확인 할 수 있었다.

(2) BPT를 이용한 미끄럼 저항성 측정

BPT 장비를 이용하여 3차 시험시공 구간의 단면별 초기 미끄럼저항성을 측정하였다. 시험 항목은 건식과 습윤 2가지로 나누었으며 각 단면별 4개의 구간을 선정하여 시험하였으며 실험결과는 다음과 같다.



<그림 3.7.144> 3차 시험시공 미끄럼저항성 측정

<표 3.7.46> 3차 시험시공 BPT 시험 결과

위 치		1 회(습윤)			2 회(건식)		
투수 AP 투수 CTB	1	59	61	61	75	70	71
	2	62	64	62	77	72	74
	3	60	58	58	73	73	76
	4	48	54	52	68	72	72
투수 AP 불투수 CTB	1	61	62	61	74	74	70
	2	65	61	62	75	72	71
	3	60	53	62	70	65	73
	4	57	63	59	69	70	68

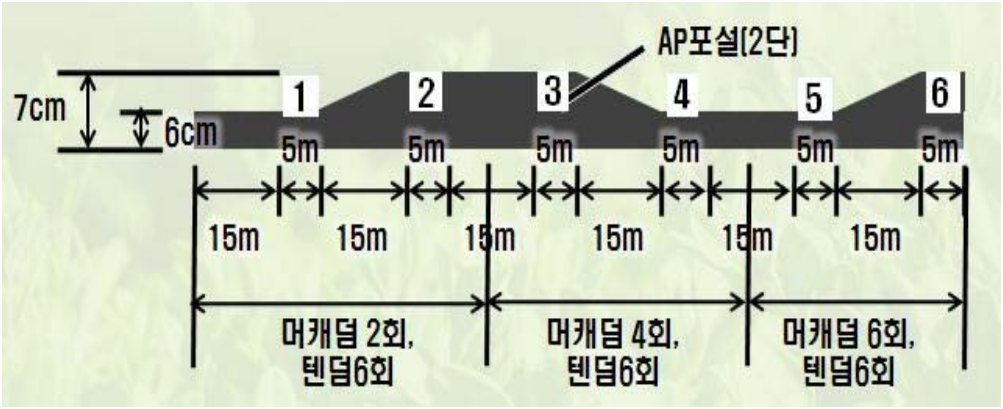
미끄럼 저항성 측정결과 BPN 50을 넘는 값을 나타냈으며 공극 막힘이 심하게 발생한 투수AP/투수CTB 4번지점에서 BPN 50을 넘지 못하는 값이 1번 발생하였다. 이는 공극막힘 과다로 인한 이물질이 표면에 과도하게 묻어있어 이러한 현상이 미끄럼저항성을 저하에 영향을 준 것으로 보인다.

전체적으로 1차 시험시공시보다 미끄럼 저항성이 적게 나타났다. 이는 이물질에 의한 미끄럼 저항성 감소와 바인더 변화(윤활작용)에 의한 감소, 그리고 BPT장비의 변화에 따른 오차로 판단된다.

(3) 코어링

3차 시험시공 후 각 단면에 대하여 코어링을 실시하였다. 코어링 실시의 목적은 포설두께를 확인하고 부착정도에 대한 평가, 그리고 AP 밀도 측정을 통한 다짐도 평가이다. AP 다짐도 평가를 위한 비교구간을 6구간으로 설정하였기 때문에 각 단면당 3개씩 총 18개 구간을 코어링 하였다.

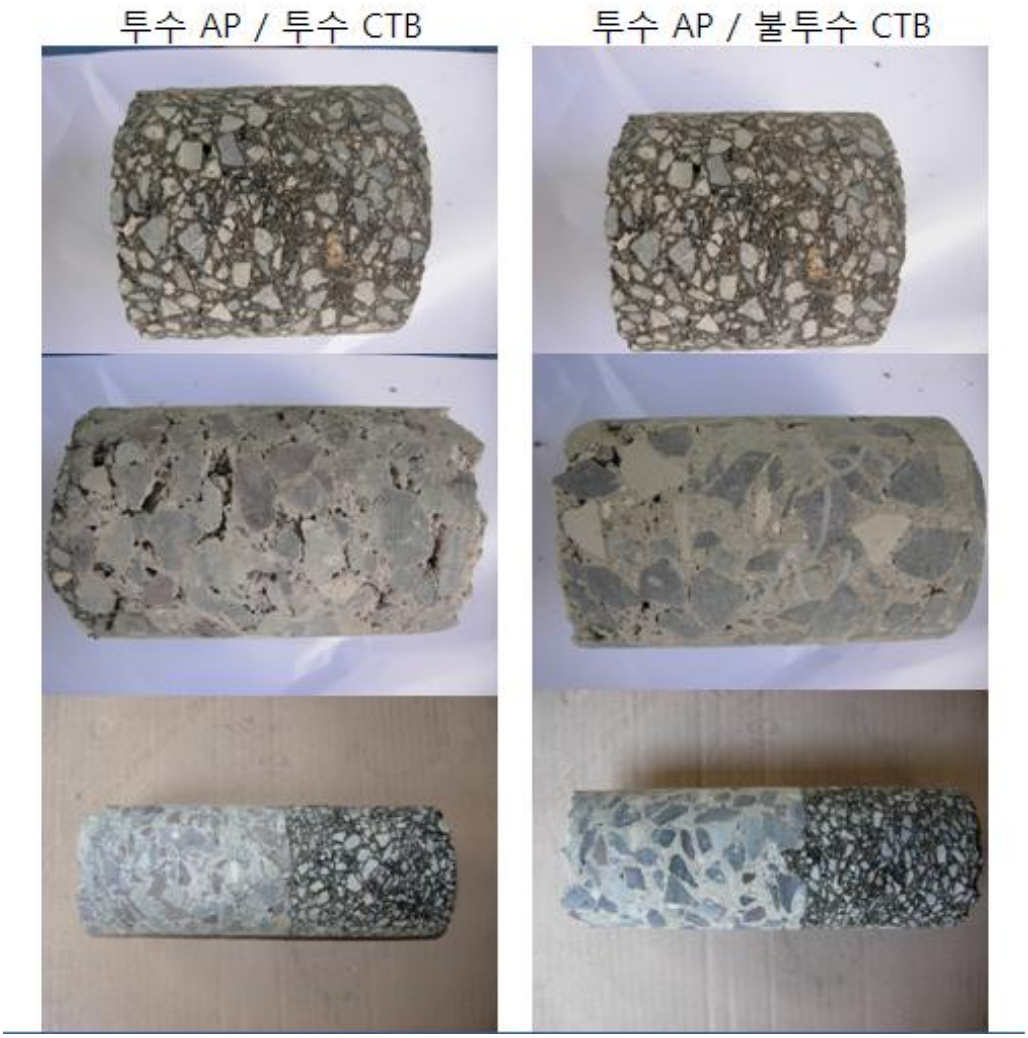
측정결과 각 단면에 대한 두께는 평균적으로 계획했던 높이에 근접하였으나 시공상의 문제로 인하여 두께를 미달하는 지점도 발생하였다. AP 밀도 측정결과, 머캐덤 4회, 탠덤 6회 구간에서 충분한 다짐도를 보여주었다.



<그림 3.7.145> 3차 시험시공 AP 단면 구분

<표 3.7.47> 3차 시험시공 코어링을 통한 시공성 평가

구간	AP두께	CTB두께	AP밀도	부착정도	비고
1	8.65	11.00	1.96	상	
2	11.20	13.86	1.92	상	
3	9.41	14.60	2.04	상	
4	10.45	12.55	2.00	상	
5	12.00	15.50	2.02	상	
6	11.7	16.70	1.98	상	



<그림 3.7.146> 3차 시험시공 코어링을 통한 시공성 평가

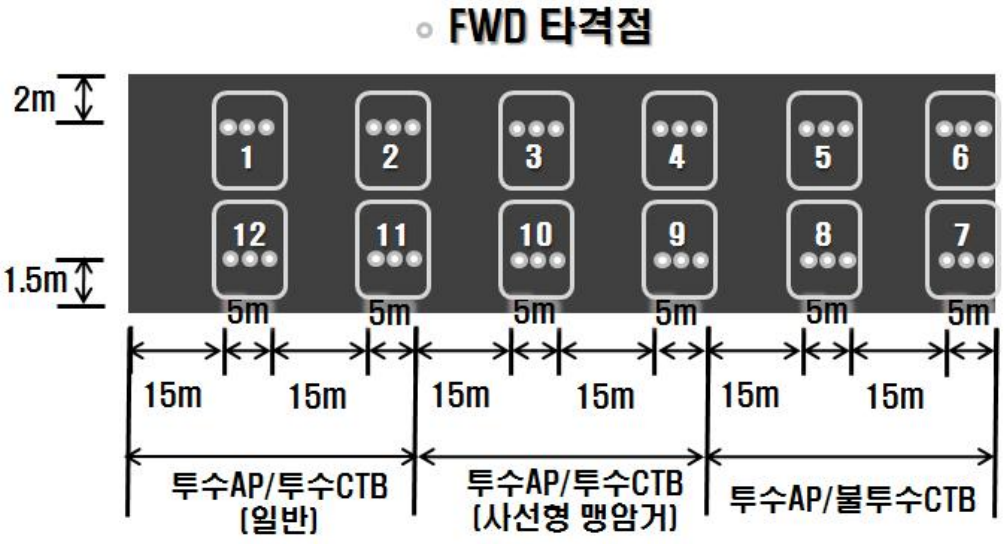
(4) FWD(Falling Weight Deflectometer)를 통한 구조적 안정성 검증

(가) 실험 목적

FWD실험을 통해 측정된 처짐량 데이터 분석을 통하여 시험시공 구간에서의 단면별 처짐량을 비교하였으며 이를 통해 각 단면별 구조적 안정성을 평가하였다. 또한 강우직후, 강우 후 포장의 포화정도에 따른 각 단면별 처짐 변화특성을 파악하였다.

(나) 실험방법

일반 밀입도 아스팔트 구간의 시공지연으로 인하여 투수AP/투수CTB 구간과 투수AP/불투수CTB구간의 처짐값만을 산출하였다. 높이에 따라, 다짐횟수에 따라 총 6개구간으로 나눌수 있었으며 각 구간에 6개 지점씩 총 36개 지점의 처짐량을 구했다. 처짐량의 비교를 위하여 보간법을 사용하여 9000lb로 하중과 처짐량을 조정한 후 평가하였다. 각 타격위치는 <그림 3.7.147>과 같다.



<그림 3.7.147> 3차 시험시공 FWD 측정 위치



<그림 3.7.148> 3차 시험시공 살수 전후 FWD 타격

타격시간은 다음과 같이 3가지 변수로 제한하였다.

○포장체 건조상태

○살수 직후

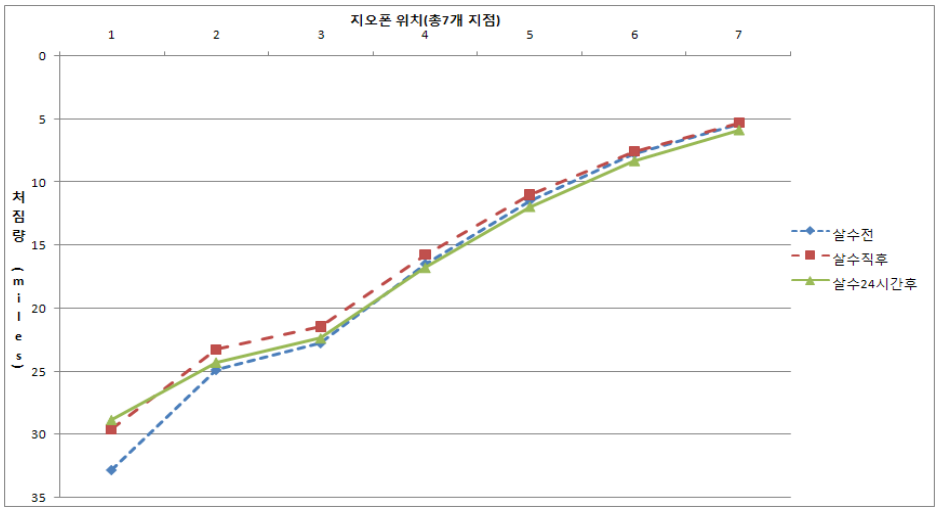
○살수후 24시간 경과

포장체가 충분히 건조된 상태에서 FWD 실험을 실시한 후 각 포장에 살수기를 통하여 포장체가 포화될때 까지 충분히 살수한 후 FWD 실험을 한번 더 실시하였다. 마지막으로 살수실험 24시간 후에 같은 지점에서 FWD 실험을 실시하여 데이터를 비교해 본다. 이는 FWD를 이용하여 포장체의 담수중 구조적 안정성 및 포화후의 노상, 보조기층의 안전성을 검증하기 위함이다.

(다) 결과분석

전체 36개의 지점을 살수 전후로 나누어 FWD 실험을 실시하였다. 각 지점에서의 지오폰 방향은 일정하게 유지 하였으며, 각 타격점에 대한 페인트 마킹을 통하여 일정한 위치에서의 FWD 실험을 실시하였다.

총 36개 지점의 건조시의 타격 결과 1, 2차 시험시공에서 타격한 처짐량보다 3차 시험시공의 처짐량이 2~3배가량 크게 측정되었다. 이는 FWD 매뉴얼에서 확인한 바, 도로의 경사도가 2% 이상 되었을 경우 FWD 사용을 권장하지 않는다는 사실을 알 수 있었다. 경사도 2% 이상의 도로에서 FWD를 타격하였을 경우 처짐량이 2배가량 증가하게 측정된다는 사실을 경험적으로 확인 할 수 있었다. 따라서 3차 시험시공구간에서의 처짐량은 각 단면별 비교를 원칙으로 하였다.

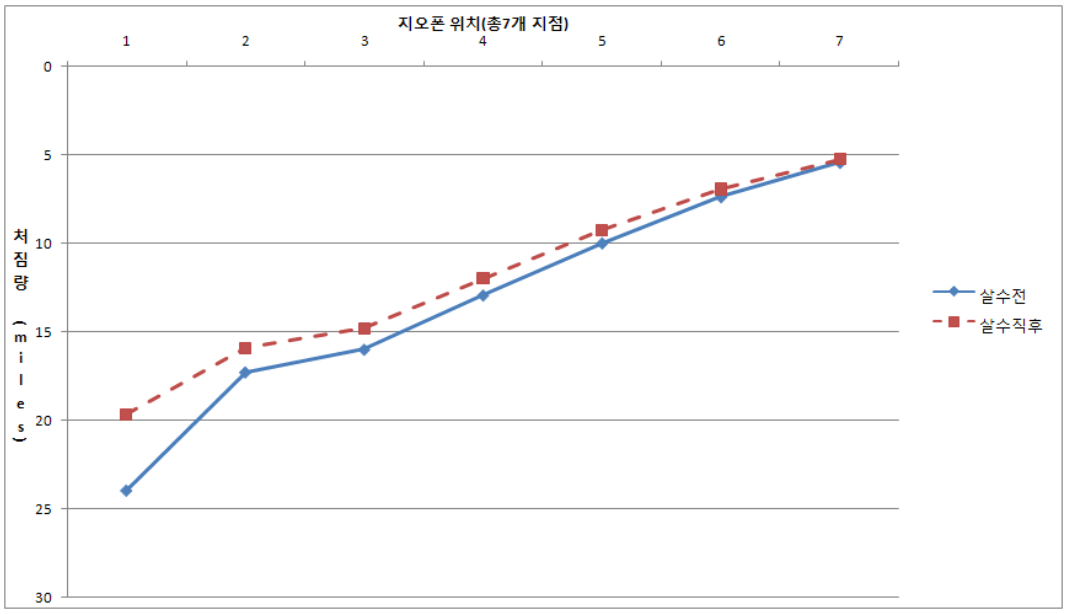


<그림 3.7.149> 투수 AP / 투수 CTB 처짐량 비교

먼저 투수AP/투수CTB 구간의 경우 살수 전과 살수 후의 처짐량이 큰 차이가 나지 않았으며 살수 후 타격의 경우 AP표층 온도의 저감으로 인하여 처짐량이 더 적게 측정된다는 것을 확인할 수 있었다. 살수 24시간 후의 측정값을 측정 하였을 때에도 표면온도 변화에 따른 표층에서의 변화만을 확인 할 수 있었다.기층에서의 처짐량은 표면온도의 변화에 관계없이 거의 일정함을 확인하였고, 이는 포장 하부에서는 물에 의한 강도저감이 나타나지 않는다는 것을 알 수 있었다. 또한 <그림 3.7.149>와 같이 1번 지오폰에서의 처짐량 변화에 비하여 2번 지오폰에서의 처짐량 변화가 적은 것으로 미루어 보아 표층 하부측에서 부터는 온도에 대한 영향이 현저히 감소함을 확인할 수 있었으며 배수성 AP의 특성상 온도에서의 순간 처짐량이 일반 AP보다 큼을 확인할 수 있었다.

투수AP/불투수CTB의 경우는 상대적으로 투수AP/투수CTB에 비하여 적은 처짐량을 나타내었다. 이는 기존 현장시험시공의 FWD 실험에서와 같이 투수AP/불투수CTB의 처짐량이 투수AP/투수CTB보다 적음을 다시한번 확인하게 해주었다. 여기에 투수AP/불투수CTB 구간의 경사도가 투수AP/투수CTB의 경사도보다 완만함 때문인 것으로 사료된다.

살수 전후의 실험결과는 투수AP/투수CTB 구간과 마찬가지로 살수후 표층 온도 하강으로 인한 처짐량 감소가 측정되었지만 2번 지오폰 이후의 값은 비교적 비슷한 값이 측정됨을 확인함으로서 물에 의한 포장하부의 강도변화는 적음을 알 수 있었다.



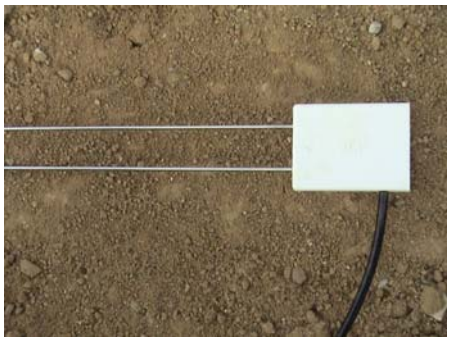
<그림 3.7.150> 투수 AP / 불투수 CTB 처짐량 비교

(5) TDR을 이용한 노상 중량함수비 변화 관측

본 3차 시험시공에서는 총 3가지 구간에 4가지 포장형식이 존재한다. 특히 투수AP/투수CTB구간의 경우 사선방향의 맹암거를 매설한 구간과 사선방향의 맹암거를 매설하지 않은 구간을 나누어 시공하였으므로 각 구간에 대한 노상의 포화시간 및 강우에 따른 포화도의 변화를 알아보고자 하였다.

TDR(Time-Domain Reflectomemter)을 각 단면 노상에 매설하여 자연환경(강우량, 온도 등)에 따른 각 단면별 노상함수비의 변화를 관측하였다. 더불어 강우모사를 통한 투수능력 평가가 실시된 투수AP/투수CTB 및 투수AP/불투수CTB 단면에서의 노상 중량함수비 변화를 관측하였다. 이를 통해 실제적으로 투수AP/불투수CTB 단면에서 기층배수와 투수AP/투수CTB구간에서 노상까지 침투가 발생하는지 간접적으로 살펴보았다.

CR10 Data logger를 이용하여 강우에 따른 노상 포화도를 측정하기 위하여 10분씩 간격씩 Data를 측정하였으며 현장에 직접 설치한 Weather station의 강우량 정보를 획득하여 강우량에 따른 노상 중량 함수비 변화를 살펴보았다. 단면별 노상 중량함수비 변화를 살펴보기 위하여 장기간 강우량에 따른 TDR의 변화를 살펴보았다.



<그림 3.7.151> 3차 시험시공 TDR 매설



<그림 3.7.152> Weather Station 설치

TDR 센서는 각 구간당 1개씩 매설하였으며 투수AP/투수CTB 구간의 경우 노상에서의 깊이에 따른 포화도 차이를 측정하기 위하여 수직 30cm 간격으로 2개 매설하였다. 이에 따라 강우시 노상에서의 수직방향 침투속도를 측정할 수 있을 것으로 예상된다.

(가) TDR 보정실험

TDR의 유전율은 노상의 입도와 상태에 따라 측정값이 다르기 때문에 보정실험을 실시하였다.

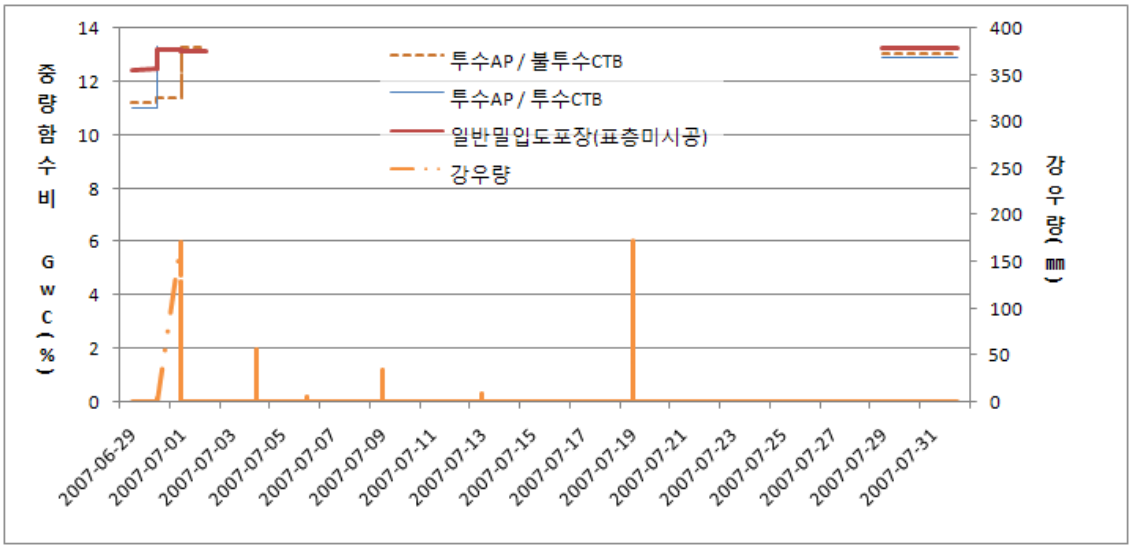
(나) 실험결과

<그림 3.7.153>은 각 단면별 초기 노상 중량함수비의 변화를 나타내고 있다. 노상 타설 이후 TDR 매설 시 실험상의 실수로 인하여 초기 값과 중간 값을 측정하지 못하였다. 특히 초기 값과 중간 값의 미측정으로 인하여 건조시의 노상의 함수비 변화를 관측할 수가 없었다. 그러나 Weather Station에서 측정한 값의 현장의 정확한 강우량을 바탕으로 관측한 결과 7월1일의 강우로 인하여 투수AP-투수CTB 구간이 포화에 도달하며, 투수AP-불투CTB 구간이 시간 경과후 도달한다는 것을 확인할 수 있었다. 일반 밀입도 포장의 경우 아직 BB층만이 타설된 상태이며 배수관계시설이 설치되지 않아 포화가 이른 것으로 판단된다.

또한 건조 상태가 지속되는 7월 말의 함수량을 살펴보면 투수AP-투수CTB 구간

의 함수비가 가장 적은 것을 확인할 수 있다. 이는 노상의 포화와 건조가 투수AP-투수CTB 구간에서 더 자유롭게 이루어짐을 나타낸다.

본래 Weather Station에서 Solar Radiation과 풍향을 측정하여 노상의 건조속도에 두 인자가 미치는 영향을 확인해 보고자 하였으나 측정 구간이 짧아 비교할 수 있는 구간이 없었다. 따라서 보완시험에서는 표면에서의 인자의 변화가 노상의 건조에 미치는 영향을 확인해 보아야 한다.



<그림 3.7.153> 3차 시험시공 TDR 측정 결과

사. 요약

3차 시험시공에서는 1,2차의 연구결과를 보완 발전시켜 친환경 4S의 포장의 현장 시공성과 안정성 등을 측정하였다.

■ 기존의 시험시공의 문제점이던 투수CTB의 탈리를 방지하기 위한 비닐 양생의 경우 내구성 향상에 기여함을 확인하였다.

■ 시공성 평가를 통해 저수축 투수/불투수CTB의 경우, 사후관리의 중요성을 투수 아스팔트 표층의 경우 온도관리의 중요성을 알 수 있었다.

■ 살수시험기를 이용한 강우모사 실험을 통해 투수AP/불투수CTB 및 투수AP/투수CTB 배수 방향과 능력을 평가하여 물저장력을 초과할 경우 표면수가 급격히 증가함을 알 수 있었다. 초기 표면수 발생 강우강도는 50mm/hr 으로 기록적 폭우를 제외하고는 거의 대부분의 경우에 수막현상을 방지할 수 있을 것으로 판단된다.

■ TDR를 이용한 노상 중량함수비 측정 결과 강우의 흐름이 포장체를 침투하여 노상에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.

■ FWD 측정을 단면별 처짐량을 비교하였다. 본 연구에서 제시하고 있는 포장 시스템이 표층에서 상대적으로 높은 처짐량에도 불구하고 수침투에 따른 하부구조의 변화가 적은 것으로 보아 안전한 포장 형식으로 자리 잡을 수 있음을 보여주었다.

■ 코어 채취를 통해 두께, 밀도, 부착 정도를 측정하였으며 기준에 합당한 시공성을 얻을 수 있었다.

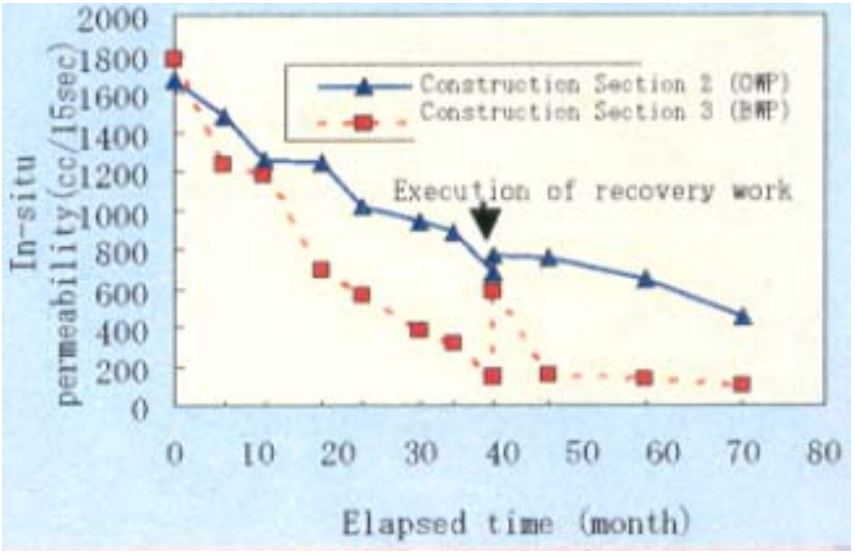
■ 미끄럼저항성 측정 결과, 투수AP/투수CTB 단면의 미끄럼저항성이 일반아스팔트 단면보다 약 10정도 BPN이 적게 측정되었다.

■ 시험시공구간이 본선도로와 불연속적으로 시공되었기 때문에 본선에서의 노상이 공사차량에 의하여 그대로 포장에 반입되었다. 그에 따른 포장의 기능성에 문제점이 발생하였고, 이를 방지하기 위한 시공후의 공사차량의 진출입에 대한 대책이 필요하다.

4. 투·배수성 포장의 유지보수공법 선정 및 타당성 검토

가. 개요

투·배수성 포장은 공극을 통해 소음 저감 효과와 수막현상을 방지하는 효과가 있다. 그러나 시간에 따른 먼지, 이물질에 의한 공극 막힘 현상으로 인하여 기능성이 떨어지는 모습을 보인다. 현재까지의 유지보수공법을 보면 유지보수 공법을 실시함에도 불구하고 기능성이 향상되지 못하는 경우가 대부분이어서 기능성을 상실하는 경우가 많다. <그림 3.7.154>에서 보면 시공 후 40개월이 지난 후 공극 청소를 실시했지만 투수 기능을 회복하지 못한 것으로 나타났다. 효과가 나타나지 않은 원인으로는 장비의 성능이 우수하지 못한 점, 포장의 시공 상태가 좋지 못한 점, 포장 공극 상태를 평가할 수 있는 규정의 부재 등을 생각할 수 있다. 따라서 투·배수성 포장의 경우 유지보수공법의 결정이 중요하며 타당성 있는 유지보수공법을 선정함으로써 기능성을 지속적으로 유지해야만 한다.



<그림 3.7.154> 유지보수 후의 기능성 향상 실패사례

나. 유지보수 공법 조사

현재까지 투·배수성 포장을 유지보수하기 위한 공법으로 전단면 보수와 장비를 활용하는 방법, 그리고 화학 약품을 이용하는 방법 등이 있다. 유지보수공법을 선정하는데 필요한 항목은 아래와 같다.

Ⅰ. 투·배수성 포장의 공극률 회복 정도
Ⅱ. 작업의 용이성
Ⅲ. 포장에 미치는 영향 최소화
Ⅳ. 환경에 미치는 영향 최소화(오염된 물, 소음 및 진동 문제 등)
Ⅴ. 경제성

전단면 보수의 경우 기능의 회복 정도에 대해서는 좋은 값을 가지지만, 보수보다는 재시공의 의미가 크며 투·배수성 포장의 경우 기능상실의 시간이 구조적 문제 발생 시점보다 빠르므로 경제성 측면에서 볼 때 타당성이 없다. 화학 약품을 이용한 공법은 현재의 기술에서는 과산화수소를 이용하여 공극사이의 이물질을 제거하는 방법이 있다. 하지만 이 방법의 경우 경제성이 전혀 없는 방법이므로 실험실에서만 사용할 수 있는 방법이다.

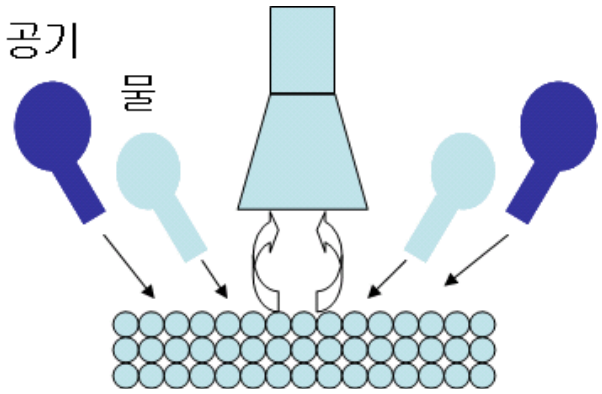
따라서 투·배수성 포장에서의 유지보수는 장비를 이용한 방법이 타당하며 장비를 이용한 방법 중 이용 가능한 방법을 찾아 투·배수성 포장의 유지보수공법으로 선정하여야 하겠다.

다. 투·배수성 포장 유지관리 장비의 원리 및 현황

(1) 장비 원리

현재 배수성 포장의 유지보수에 관한 개념은 기능을 회복시키는 관점에서 기능을 지속적으로 유지시키는 것으로 바뀌고 있다. 일본에서는 소음 저감 효과가 있는 배수성 포장 등의 친환경 포장 개발과 배수성 포장의 공극을 청소하는 장비를 개발하고 있으며 그 원리는 다음과 같다.

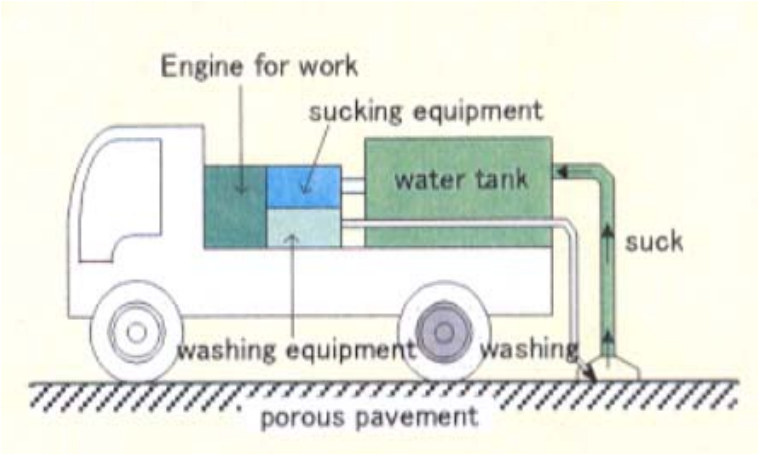
<그림 3.7.155>은 물과 공기를 동시에 사용하는 경우의 원리를 표현한 그림이며 물과 공기를 이용하여 배수성 포장의 공극을 청소하는 원리는 다음과 같다.



<그림 3.7.155> 물, 공기가 노즐에서 분사되는 형식



<그림 3.7.156> 공기 분사 노즐(좌)과 물 분사 노즐(우)



<그림 3.7.157> 공극 청소 장비의 기본 구조

먼저 약 5MPa의 압력으로 물을 분사하게 하고 물이 분사되는 노즐 옆으로 위치한 공기 노즐은 이물질과 물을 흡수관으로 유도하는 역할을 하게 된다. 이와 같은 작용으로 공극 속의 이물질과 물은 진공 흡수관으로 빨려 들어가게 된다. <그림 3.7.156>는 각각 공기와 물을 분사하는 노즐이다.

일반적인 포장 공극 청소 장비의 구성은 <그림 3.7.157>와 같다. 고압수가 표면으로 살수되면서 공극 속의 이물질을 제거하면 이물질이 뒤섞인 물을 빨아들이면서 포장 공극을 청소하게 된다.

(2) 장비 현황

현재 일본이 개발하여 보유중인 공극 청소 장비는 물만 사용하는 장비와 물과 공기를 동시에 사용하는 장비이다. 기존 공극 청소 장비는 물만을 사용하여 높은 압력을 이용한 살수 방식을 사용했지만 작업 속도를 향상시키기 위해 물과 공기를 함께 사용하는 경우도 있다.

<그림 3.7.158>은 현재 일본에서 보유하고 있는 장비들을 보이고 있다. 청소 장비의 물탱크는 3ton의 물을 수용할 수 있으며 약 30분 정도 작업할 수 있는 양이다. 한번 사용된 물은 이물질과 함께 진공 흡수관으로 흡수되어 정화되는 과정을 거친 후 다시 사용할 수 있다. 현재 이 같은 장비들이 가지고 있는 문제점은 효과가 크지 않고 비용이 많이 들며 장비를 가동하는 시간동안의 교통 지체가 발생하는 점 등이다.



<그림 3.7.158> 일본의 배수성 포장 공극 청소 장비

(3) 장비의 종류에 따른 차이점 분석

(가) 청소 방식에 따른 비교・분석

투・배수성포장 유지보수 장비에 대한 시험 가동 후 공기만을 사용했을 경우와 물과 공기를 함께 사용한 결과를 비교하였다.

먼저 공기만을 이용하여 표면을 청소하였다. <그림 3.7.159>은 공기를 이용한 청소 모습을 나타내고 있다. 그림에서 나타나듯이 공기로 표면을 청소하는 과정은 분진이 많이 발생하였다. 따라서 향후 공기만을 이용한 장비 개발에서는 이와 같은 분진 발생 문제를 해결해야 할 것으로 판단된다.



<그림 3.7.159> 공기만을 이용한 표면 청소 모습



<그림 3.7.160> 공기를 이용한 청소 이후의 표면



<그림 3.7.161> 공극 청소전의 배수성 포장 표면상태

<그림 3.7.160>과 <그림 3.7.161>는 공기를 이용한 청소 전·후 모습을 보이고 있다. 청소전의 표면보다는 깨끗해졌지만 뚜렷한 효과는 보이지 않았다. 청소 과정에서의 분진 발생이 무엇보다 큰 문제로 지적되고 있다.

다음으로 물과 공기를 모두 사용하여 같은 구간을 청소한 경우이다. <그림 3.7.162>은 물과 공기를 사용하여 청소를 하는 모습이고 <그림 3.7.163>은 청소 후의 표면 상태를 나타내고 있다. 청소 작업 도중에 분진이 발생하지 않았으며 청소 후 표면도 보다 깨끗해졌다. <그림 3.7.164>와 <그림 3.7.165>은 표면 청소 이후 걸러진 이물질을 보이고 있다. 물과 공기를 동시에 사용하는 방법은 표면의 골재가 부분적으로 떨어지는 현상이 발생한다고 한다. 따라서 물과 공기에 대한 노즐의 압력을 적절하게 조절하는 것이 필요할 것이다. 노즐의 분사 범위에 따라 청소 상태의 차이가 발생한 모습을 <그림 3.7.166>와 <그림 3.7.167>에서 볼 수 있다. 노즐의 분사 범위에 따라서 청소 상태가 우수한 부분과 그렇지 못한 부분이 부분적으로 발생한 것을 확인할 수 있었다.



<그림 3.7.162> 공극 청소 모습



<그림 3.7.163> 공극 청소 후의 표면 상태



<그림 3.7.164> 공극 청소 후 걸러진 이물질(1)



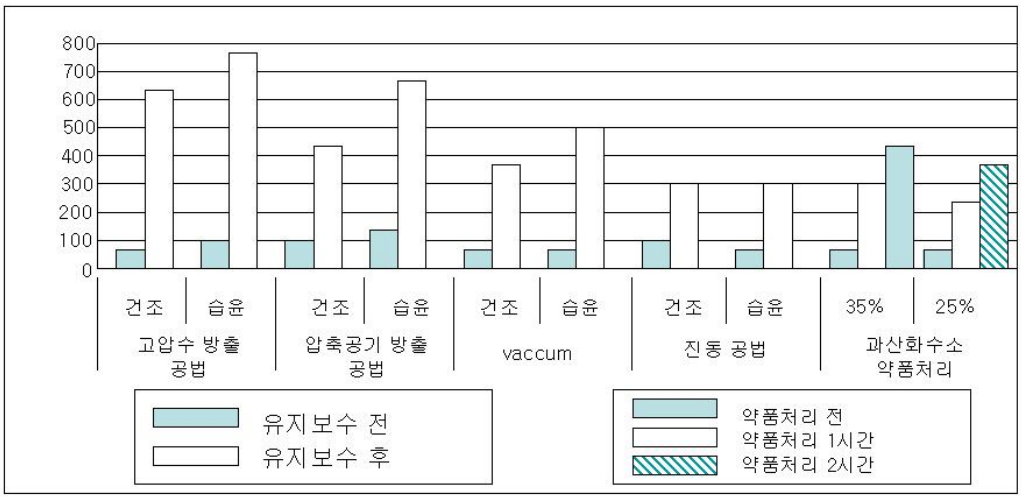
<그림 3.7.165> 공극 청소 후 걸러진 이물질(2)



<그림 3.7.166> 공극청소장비의 노즐에 의한 청소결과



<그림 3.7.167> 공극청소장비 노즐의 청소 범위 비교



<그림 3.7.168> 공극 청소 방법에 따른 청소 효과 비교

<그림 3.7.168>은 물과 공기, 진공과 진동, 그리고 과산화수소 등을 사용하여 공극을 청소한 경우를 비교한 것이다. 고압수를 사용하여 공극을 청소한 경우 가장 효과가 좋은 것으로 나타났으며 공기만을 사용한 경우에도 공극 청소 효과가 우수했다. 과산화수소와 같은 화학 약품은 비용이 많이 들기 때문에 실험적인 측면에서만 활용하였다.

(나) 작업 속도에 따른 분석

배수성 포장 공극 청소 장비(Conventional Machine)는 일반적으로 교통을 통제

한 후 작업을 실시한다. <표 3.7.48>은 물만을 사용하는 표준 작업 속도 1km/h인 장비에 대한 제원을 나타내고 있는데 이 경우 작업속도가 느려 교통의 흐름에 방해를 하고 있다.

교통의 흐름을 방해하는 것을 최소화하기 위해 작업 속도가 향상된 장비를 개발을 추진하였으나 장비의 속도를 높일 경우 작업 효율이 떨어지는 현상이 발생하였다. 따라서 작업성이 확보되는 속도를 조사하였고 실험 결과 10km/h에서의 작업이 타속도에 비해 효율적인 대안으로 나타났다. <표 3.7.49>에서는 기존 장비를 개선한 장비(High Speed Function Recovery Machine)에 대한 제원을 보이고 있다.

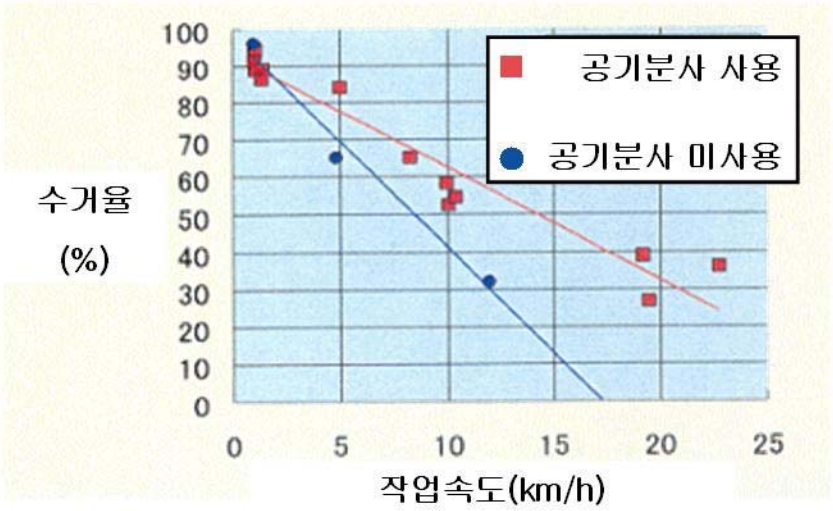
또한 <그림 3.7.169>은 공기를 사용한 경우와 사용하지 않은 경우에 대한 이물질 수거율을 비교하고 있다. 작업속도가 높아질수록 수거율을 전체적으로 떨어지고 있지만 공기를 함께 사용한 경우 청소 작업에 효과적인 것을 알 수 있다.

<표 3.7..48> 배수성 포장 청소 장비 제원

표준 작업 속도	1km/h
장비 총 중량	20.4t
물 분사 방식	Rotary Nozzle
청소 방식	Suction

<표 3.7.49> 개선된 장비에 대한 제원

표준 작업 속도	1~10km/h	
물 분사 압력	최대	작업시
	10MPa	5MPa
흡입 압력	-5KPa/100㎥	
환기 압력	10KPa/100㎥	
물 분사 방식	fixed nozzle	



<그림 3.7.169> 공기 사용 유무에 따른 작업 속도별 이물질 수거율

(다) 청소 시기와 횟수에 관한 분석

S 연구소에서는 청소 주기 및 횟수에 대한 실험을 실시하였다. 청소 시기는 11개월 후, 23개월 후, 35개월 후였으며 실험 횟수는 각각 1, 3, 5, 10회 적용하였다. 실험결과 11개월 이후에 청소는 횟수가 증가하여도 효과가 크지 않았다고 보고하였다.

라. 결론

투·배수성 포장의 기능성을 저하시키는 요소를 공극 막힘 현상으로 규정하고 이에 따른 유지보수기법에 대하여 알아보았다. 전단면 보수나 약품을 사용한 공법은 실질적으로 사용이 어려웠고, 현재 사용 가능한 보수공법으로는 장비를 사용한 보수공법이 있었다. 조사 결과, 장비를 이용한 유지보수 방법 중 물을 사용하는 경우, 물과 공기를 동시에 사용하는 경우가 가장 일반적인 경우로 나타났으며 작업속도, 청소 시기 및 횟수에 대하여 조사하였다.

장비를 이용한 유지보수 문헌고찰에 대한 결과는 다음과 같다.

● 시공 후 공용 시간이 짧을 경우 20km/h의 속도에서도 청소가 가능하다.
● 시공 후 공용 시간이 짧을 경우에 청소하는 것이 소음 감소에 효과적이다.
● 시공 후 11개월보다 빨리 청소가 이루어져야 한다.
● 청소 횟수보다 청소 작업에 대한 시점이 필요하다.
● 10km/h의 속도로 청소하는 것이 가장 효과적이다.

투·배수성 포장은 기능성이 강조된 포장이기 때문에 기능성을 회복하여 줄 적절한 유지보수공법의 선정 및 개발이 중요하다. 본 연구진은 현장시험시공구간에서 현장투수실험, 소음측정 등을 통해 환경에 의한 공극막힘 정도에 대한 데이터를 수집하고 있다. 또한 제2차 시험시공구간에서도 데이터를 수집할 계획이다. 이 데이터를 활용하여 유지보수관리를 위한 최적장비와 청소시기 등에 대한 타당성 검토를 실시할 예정이다.

5. 요약

■ FWD실험을 통해 세 단면 중앙부에서의 처짐량을 비교해 보았을 때 투수AP/불투수CTB 단면의 처짐량이 가장 적게 발생하였고 예상과 달리 투수AP/투수CTB 단면의 처짐량이 일반아스팔트 단면보다 더 큰 처짐량을 보였다. 이는 실험시기가 겨울철이라는 특성상 일부 투수CTB 구간에서 발생한 탈리현상이 원인으로 판단된다.

■ FWD 자료를 통하여 국·내외 현재 공용중인 일반도로의 처짐량을 비교해본 결과 본 연구진이 제안하고 실측한 친환경 4S 포장의 처짐량이 교통량이 적은 지방도나 시가지 도로에 적용되지 못할 정도로 큰 값이 아님을 알 수 있었다.
또한, 노상부분(지오폰 7번 위치)의 처짐량을 살펴보았을 때는 일반아스팔트 단면에 비해 노상 중량함수비가 3~4% 높음에도 불구하고 더 적은 처짐량을 나타냈다.

■ 코아 채취를 통하여 단면별 부착정도를 육안으로 판단하였다. 일반아스팔트 단면을 제외하고는 부착이 되어있지 않았다. 특히 투수CTB의 경우에는 일부 공시체가 파쇄 되는 경우도 발생하였다.

■ 육안관측 결과 투수CTB에서 탈리현상이 발생하였으며 이는 투수CTB 지지력을 상실시킨 것을 판단된다. 또한 강우 시 일반아스팔트 포장과 투·배수성 포장을 비교하여 볼 때 투·배수성의 투수성능을 눈으로 확인할 수 있었다.

■ 현장투수시험기를 이용하여 단면별 투수실험을 실시하여 투수AP/투수CTB 단면 및 투수AP/불투수CTB 단면에서 기준에 합당한 결과를 나타내었다. 또한 배수형태 및 방향측정을 통해서 각 단면별 배수특성을 육안으로 확인할 수 있었다.

■ TDR를 이용한 함수량 측정 결과 강우량에 따른 단면별 노상 중량함수비를 관찰하였다. 강우량에 따라 투수AP/투수CTB 단면, 투수AP/불투수CTB 단면, 일반아스팔트 단면 순으로 노상 중량함수비가 증가하였다. 투수AP/투수CTB 단면은 다른 단면에 비하여 소산 정도가 크게 발생하였는데 노상 내부 온도가 증가할수록 소산 정도는 더 크게 발생하였다.

■ 일반아스팔트단면과 친환경 4S 투·배수성 포장 단면에서 소음 측정을 실시하였다. 소음 측정은 지리적인 제약으로 ISO 규정을 지키기 못하였으나 상대적인 비교·평가로써 의미가 있다고 판단된다. 측정 결과 일반아스팔트 단면보다 2~2.4dB(A)의 소음 저감효과가 발생하였다.

■ BPT 장비를 이용하여 각 단면별 미끄럼저항성을 측정하였다, 측정 결과 투수AP 단면이 일반아스팔트 단면보다 습윤 시와 건조 시의 초기 미끄럼저항성이 높다는 것을 확인할 수 있었다.

■ 투수/불투수CTB 하부에 매설한 콘크리트 변형률계측기(KM-100B)와 상·하부에 매설한 온도측정계측기(I-Button)를 이용하여 환경하중에 따른 변형률 관계를 살펴보았다. 투수/불투수CTB 모두 대기온도의 영향을 받고 있으며 특히 투수CTB가 더 큰 영향을 받는 것으로 나타내었다. 초기 측정 변형률의 보정을 통해 온도와 따른 변형률의 관계를 살펴볼 수 있었다.

■ 투·배수성 포장에서 중요한 기능성을 상실하지 않기 위해 유지보수 공법을 연구하고 유지보수공법 중 보편타당한 장비를 이용한 유지보수에 관하여 살펴보았다.

8절. 설계 아키텍처 제안

1. 설계 프로세스 제안

가. 연구의 배경

본 연구를 통해 개발하는 4S 포장은 국내에 처음 시도되는 포장 형식으로 이에 대한 설계 방법이 전무한 상태이다. 이에 따라 본 연구에서는 4S 포장에 대한 다양한 입력 변수들의 정량화를 바탕으로 시공 조건에 따른 4S 포장의 두께를 설계 할 수 있는 간단한 설계 방법(안)을 제시하고자 한다.

나. 연구 목표 및 범위

본 연구에서는 4S 포장이 공용년수 증가에 따른 파손을 정량적으로 분석하여 주어진 재료의 물성, 환경, 기타 조건에 대해 포장체의 공용수명을 예측할 수 있는 설계 프로세스를 개발하는 것이 연구의 최종 목표이다.

이에 따라 역학적-경험적 방식에 의한 포장의 전체 설계 흐름에 대한 기본 아키텍쳐를 이해하고, 기본 설계 방법(안)을 개발하는 것을 연구의 범위로 한다.

2. 역학적-경험적 설계

가. 설계 개요

역학적-경험적 설계방식(예로 AASHTO 2002 프로그램 혹은 한국형 포장 설계법)은 경험적 설계법과 달리 포장입력변수를 정량화하여 설정된 기본 해석 모형을 바탕으로 포장 거동을 추정하고 경험적인 파손예측 모형을 이용하는 해석 방법을 따르고 있다. 즉 주어진 포장단면에 대해 해석을 수행하여 공용성을 예측하는 방식인 것이다.

역학적-경험적인 설계법인 한국형 포장 설계법의 전반적인 설계과정을 <그림 3.8.1>에 나타내었고, 이를 바탕으로 검토한 4S 포장의 중요한 설계 과정은 다음과 같다.

(1) 포장을 시공할 지역의 상태에 적합한 예비설계(trial design)를 실시한다. 지역의 상태에 적합한 조건이란, 예를 들어 교통량, 기후조건, 토질조건, 포장층의 조합, 포장재료의 물성, 그리고 설계 및 시공 조건 등을 고려하는 것을 말한다.

(2) 설계기간 종료시점까지 유지되어야 할 공용성에 대한 기준을 설정한다. 즉, 4S 포장 표층의 러팅, 피로균열, CTB 층의 균열 대한 허용기준을 설정한다.

(3) 전체 설계기간에 대한 해석에 필요한 교통량, 포장재료 및 기후와 관련된 입력 변수들에 대한 월별 값을 산정한다.

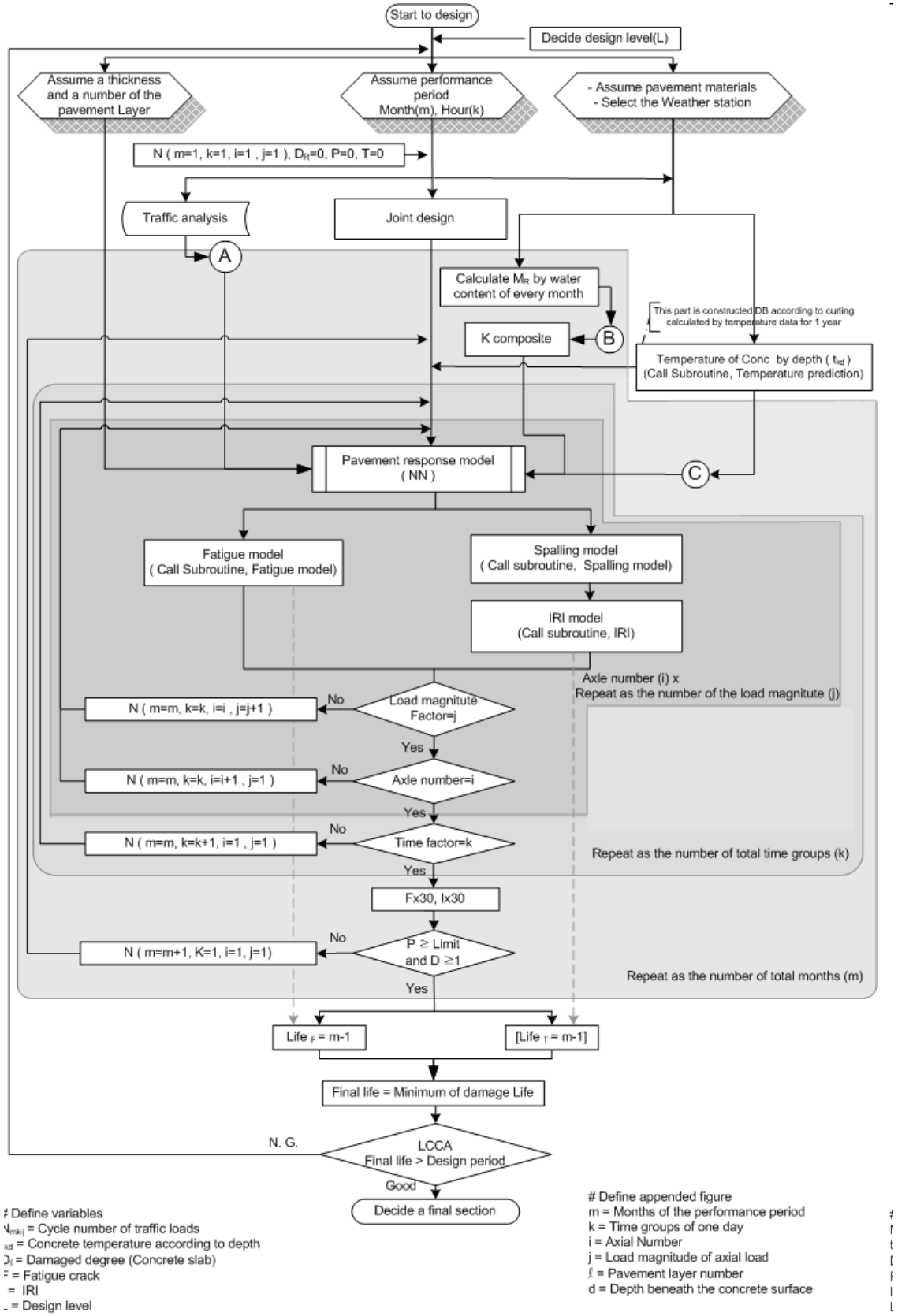
(4) 유한요소해석 기법을 통하여 포장의 구조적 거동을 계산한다. 이 계산은 한 달 동안의 설계기간에 대하여 각 축하중 종류와 하중크기에 대해 각각의 포장 손상을 계산하고 이를 누적한다.

(5) 전체의 설계기간에 대하여, 매월별로 누적된 손상을 계산한다.

(6) 실내시험을 통해 개발된 파손모형을 현장시험의 결과와 비교 분석하여 보정한 역학적-경험적 공용성 모형을 이용하여 매월별로 4S 포장의 파손을 예측한다.

(7) 예비설계가 공용성 기준을 만족하지 못하면, 설계를 변경한 후 다시 위의 (3)부터 (6)까지의 과정을 반복하여 그 설계가 공용성 기준을 만족할 때까지 수행한다.

(8) 목표한 공용성 기준을 만족시키는 설계에 대하여 생애주기비용분석을 수행하고 최적 대안을 도출한다.



<그림 3.8.1> 한국형 포장 설계법의 설계 프로세스

나. 누적손상개념 (2003 한국형 포장 설계법 개발)

4S 포장의 설계방법은 기존의 AASHTO 93, TA 설계법 등과 가장 큰 차이점은 중의 하나는 누적손상개념을 채택한 것이다. 이 방식은 포장의 전체 공용수명기간 동안 특정한 시점에서의 포장체 온도, 교통하중 및 포장의 물성이 변화되는 것을 설계자가 고려할 수 있다는 장점이 있다.

4S 포장의 공용성 기준을 투수성 AP 표층에서의 러팅, 피로 균열, 그리고 CTB 층에서 발생하는 피로 균열을 기준으로 삼는다. 이 공용성 기준들에 누적손상개념을 적용하면 다음과 같은 반복계산 및 해석을 통해 그 결과를 알 수 있다.

$$D_{ijk} = \frac{N_{ijk}}{N_{f,ijk}} \qquad \text{(식 3.8.1)}$$

여기서, D_{ijk} = i번째 1개월에서 k번째 축하중에 의해
j번째 한 시간동안 발생되는 손상도

N_{ijk} = i번째 1개월에서 j번째 한 시간 동안 가해지는 k번째
축하중의 회수

$N_{f,ijk}$ = i번째 1개월에서 동안 j번째 한 시간 동안 가해지는 k번째 축하중의 허용회수

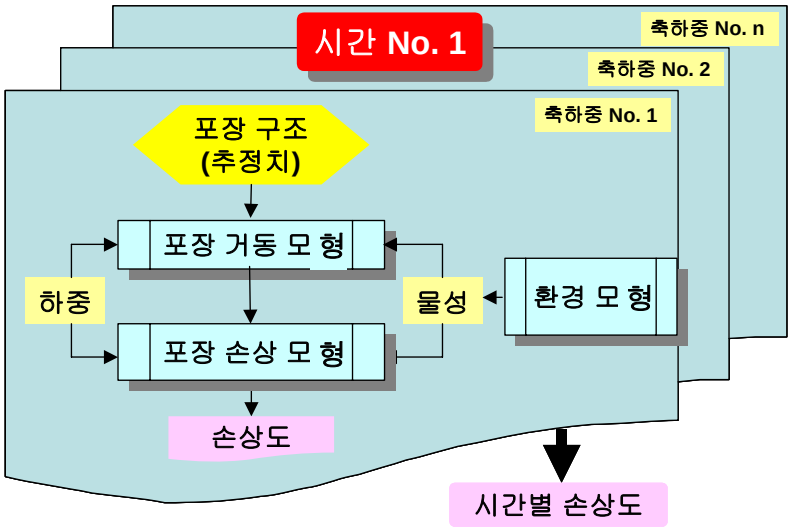
그러면 총 M 개월 동안 발생된 전체 손상도는 다음과 같다.

$$D = \sum_{i=1}^{M}\sum_{j=1}^{L}\sum_{k=1}^{K} D_{ijk} \qquad \text{(식 3.8.2)}$$

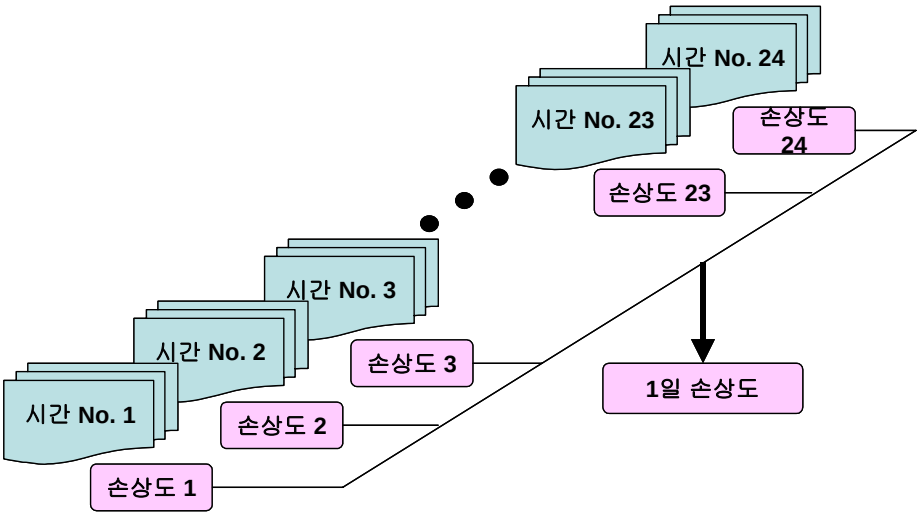
여기서 K는 축하중의 종류와 크기별 그룹으로 구분되어 있는 총 개수를 말한다. 예를 들어 단축하중이 하중 크기별로 10개 그룹이 있고, 2축 하중이 하중크기별로 6개 그룹, 그리고 3축 하중이 크기별로 5개 있다면 K는 21개가 된다. L은 1개월 동안의 시간으로서 30×24=720시간이 된다. 또한 M은 전체 공용기간 동안의 개월을 나타낸다. 만약 (식 3.8.2)의 D 값이 1을

초과하면 포장은 이론적으로 파손된 것으로 간주하게 된다.

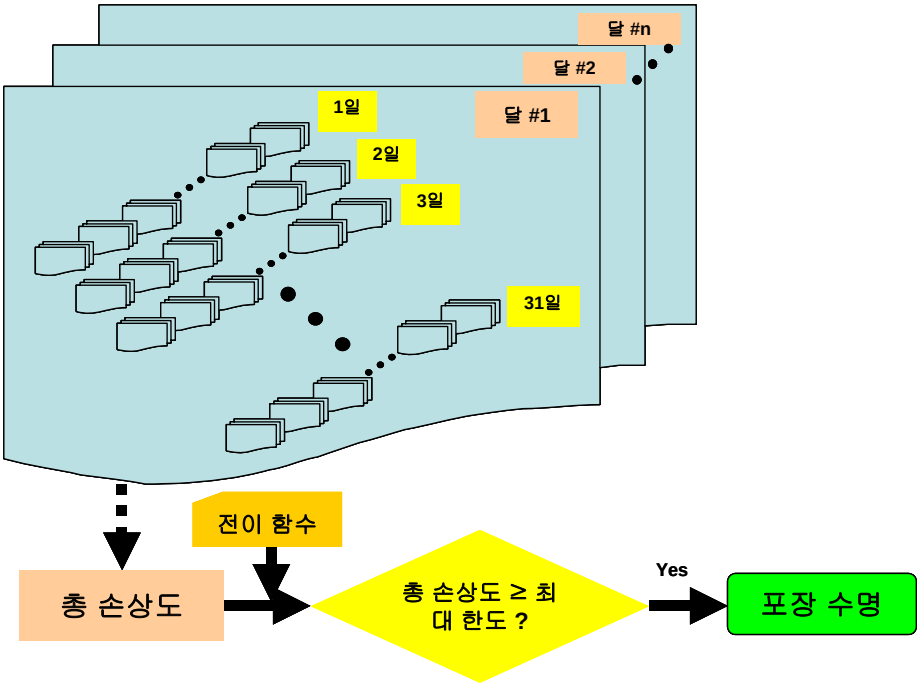
4S 포장에서 채택한 누적손상개념의 Framework을 개략적으로 도식화하면 <그림 3.8.2>~<그림 3.8.4>과 같다. 그림에서 보는 바와 같이 먼저 포장체의 손상도를 매 시간별 혹은 몇 시간 간격으로 계산을 하게 된다. 이렇게 계산된 시간별 손상도를 누적하여 하루 동안 발생된 손상도를 계산한다. 또한, 매일 발생되는 손상도를 누적 계산하여 1개월 동안 발생된 손상도를 계산하게 되고 전체 손상도 D가 1에 도달할 때까지 매월 발생되는 손상도를 누적 계산하면 D가 1에 도달할 때까지의 총 개월 수를 알 수 있으며 이것이 포장이 파손될 때까지의 공용기간이 된다. 물론 이론적인 값이 손상도 D가 1에 도달하더라도 경험적인 공용성 결과가 있다면 이를 이용해서 보정을 해주게 된다. 4S 포장이 세계 최초인 점을 감안할 때 본 연구진은 아스팔트 및 콘크리트 포장에 사용되는 기존 2002년의 모형을 되도록 채택할 예정이다.



<그림 3.8.2> 누적 손상 개념에 의한 시간별 손상도 계산



<그림 3.8.3> 누적 손상 개념에 의한 1일 손상도 계산



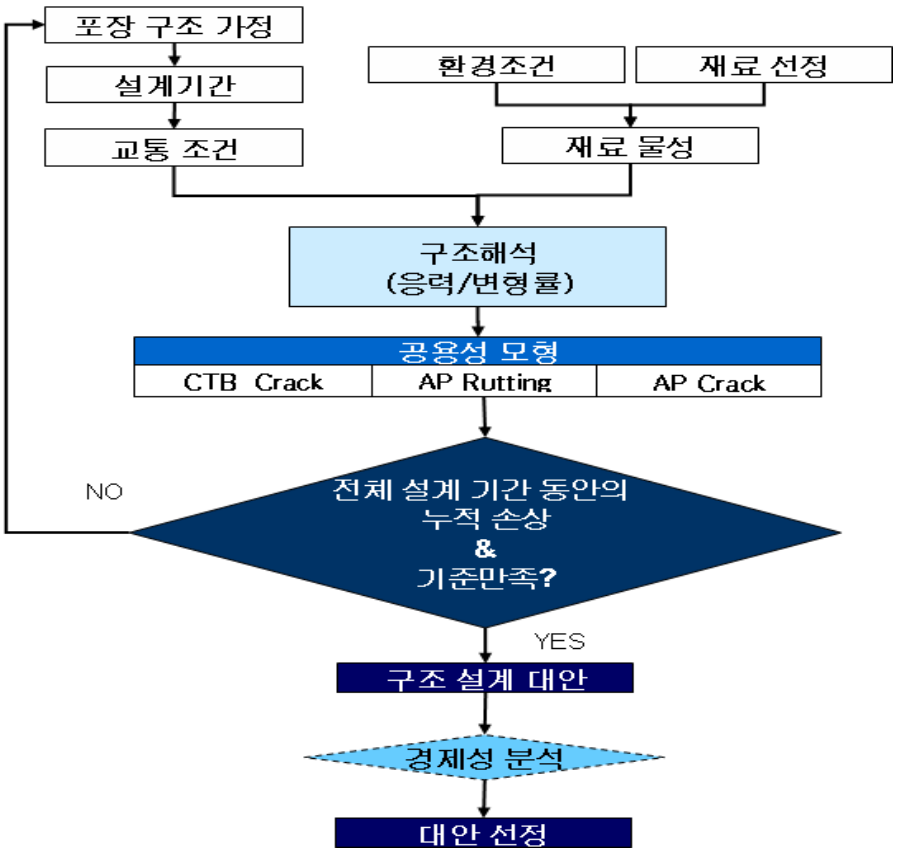
<그림 3.8.4> 전체 누적 손상도 계산

다. 4S 포장 시스템의 역학적-경험적 설계 모듈

4S 포장의 설계에 앞서 기본적으르 세부 모듈들에 대한 정량화가 선행되어야 한다. 앞에서 언급한 바와 같이 4S 포장체의 설계에 필요한 세부 모듈들에 대하여 국내외의 기존, 혹은 현재 개발이 진행 중인 역학적 경험적 포장 설계법을 고찰하고 정량화 방안을 연구하였다.

여기서, 기존의 AASHTO 2002 DG 나 한국형 포장 설계법의 모듈에 대한 검토를 수행한다. 이를 바탕으로 국내에 적용 가능한 4S 포장의 단면을 국내 교통량, 하부 재료, 환경 조건에 따라 분류하고 그에 적합한 카달로그 설계(안)을 제안할 계획이다.

<그림 3.8.5> 는 역학적- 경험적 설계 이론에 근거한 4S 포장의 설계 프로세스는 도시화한 그림이다. 세부 모형들은 한국형 포장 설계법에서 제안된 것을 채택하여 설계하지만 4S 포장 시스템의 신재료에 대한 물성은 실험 결과에 근거하도록 한다.



<그림 3.8.5> 4S 포장의 설계 흐름도

(1) 설계 입력 변수

설계입력 변수는 4S 포장체의 표층, 기층, 하부 재료의 물리적 특성을 정량화하고 교통하중 및 환경하중의 정립을 통해 설계를 위한 근간이 되는 부분이다. 다음 <그림 3.8.6>은 4S 포장을 설계하는데 있어 입력 변수의 중요성을 나타내는 그림이다.



<그림 3.8.6> 4S 포장 설계에 있어 입력 모듈의 역할

(가) 재료물성

① 아스팔트 표층

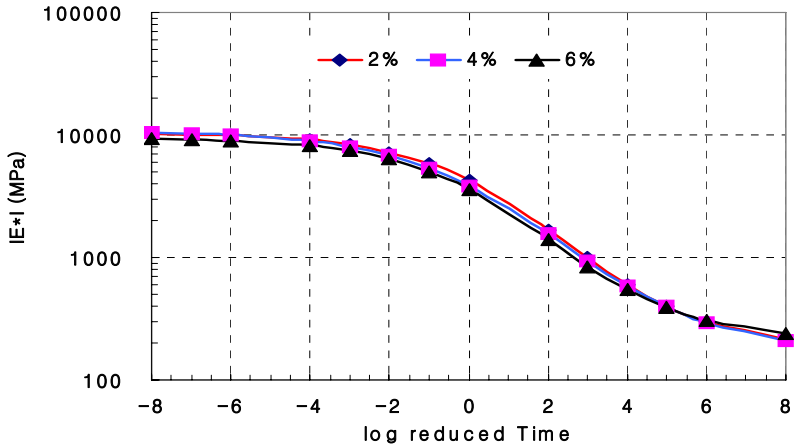
4S 포장 설계에 있어 재료 물성은 매우 중요한 부분이다. 기존의 경험적인 설계에서는 현장 경험을 바탕으로 아스팔트의 재료 물성을 추정하였다. 하지만 최근에 개발되는 역학적 경험적 설계에서는 역학적인 물성으로 크게 탄성계수와 포아손비를 사용하고 있다. 4S 포장 시스템의 투수성 아스팔트 바인더 및 아스팔트 혼합

물은 온도와 하중주기(loading frequency)에 크게 영향을 받는다. 따라서, 4S 포장 표층 재료의 역학적 성질은 현장에서 경험하게 되는 모든 영역의 조건들로부터 결정된다. 동적하중시험(Dynamic loading test)은 아스팔트 재료특성을 시험할 수 있는 편리한 시험방법인데 이를 통해, 위상각, 동탄성계수, 크리프 컴플라이언스 등을 구할 수 있다. (2001 한국형 포장 설계법)

<표 3.8.1>과 <그림 3.8.7>은 화강암 밀입도 13mm + PG 58-22 의 동탄성계수의 실험 결과 및 마스터 곡선을 나타낸다. 하중 재하 시간이 길어 길수록 아스팔트 혼합물의 강성계수값은 낮아지는 반면 하중 재하 속도가 빠르면 탄성계수가 커지는 것이다. 이는 차량의 속도에 따라 아스팔트 포장의 탄성계수가 달라져서 발생하는 포장체의 응력이 달라짐을 의미한다.

<표 3.8.1> 표층용 화강암 13mm + AP-3 (PG 58-22) (2006 한국형 포장 설계법)

공극율		4%		6%	
시험온도	주파수	$\|E^*\|$	δ	$\|E^*\|$	δ
-10도	0.05	7367.0	10.75	6359.0	9.64
	0.1	7547.0	10.21	6733.3	9.49
	1	8613.5	6.31	7722.5	6.91
	10	8959.5	4.50	8202.0	4.27
	25	8660.0	1.79	8491.8	5.88
5도	0.05	4662.0	15.91	4416.7	16.68
	0.1	4917.7	14.01	4694.3	15.21
	1	6060.3	10.30	5729.3	8.72
	10	6833.3	7.65	6668.3	7.16
	25	6964.7	4.35	6632.3	5.68
20도	0.05	2196.3	26.44	1957.0	27.02
	0.1	2150.7	24.96	2188.3	25.38
	1	3672.0	16.69	3342.3	16.29
	10	4802.7	10.37	4582.7	11.92
	25	5411.0	10.56	5013.0	11.91
40도	0.05	715.0	19.37	653.0	21.23
	0.1	791.3	19.79	739.7	20.55
	1	1143.0	19.52	1023.7	18.05
	10	1828.7	17.52	1574.3	21.15
	25	2108.3	14.12	1874.7	16.52
55도	0.05	302.7	14.46	274.0	12.26
	0.1	323.7	14.63	292.3	13.58
	1	433.7	16.73	368.0	16.27
	10	652.3	22.88	563.7	20.45
	25	834.3	27.23	677.7	20.13



<그림 3.8.7> 마스터 곡선 (화강암 밀입도 13mm + PG 58-22)

(2003 한국형 포장 설계법)

② 투수 및 불투수 CTB

4S 포장의 기층 재료인 CTB의 물성은 탄성계수, 강도, 포아손 비, 건조수축 계수, 열팽창 계수로 크게 구분된다. <표 3.8.2>는 각각의 물성에 대한 실험법을 정리한 것이다.

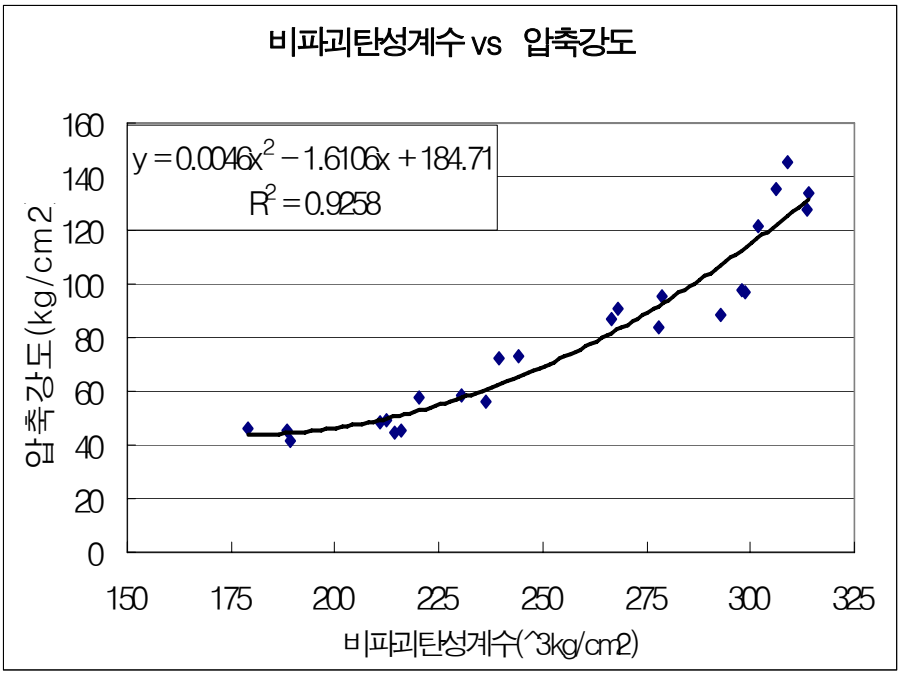
이와 같은 물성 시험법을 바탕으로 1차년도에 수행한 물성 시험 결과를 정리한 것이 <표 3.8.3>, <그림 3.8.8>~<그림 3.8.9>이다. <표 3.8.4>와 <표 3.8.5>는 한국형 포장 설계법에서 제안하는 재령에 따른 물성 추정예측식의 상수값과 재료의 열팽창 계수값을 정리한 것이다.

<표 3.8.2> 각 측정 물성에 따른 시험법

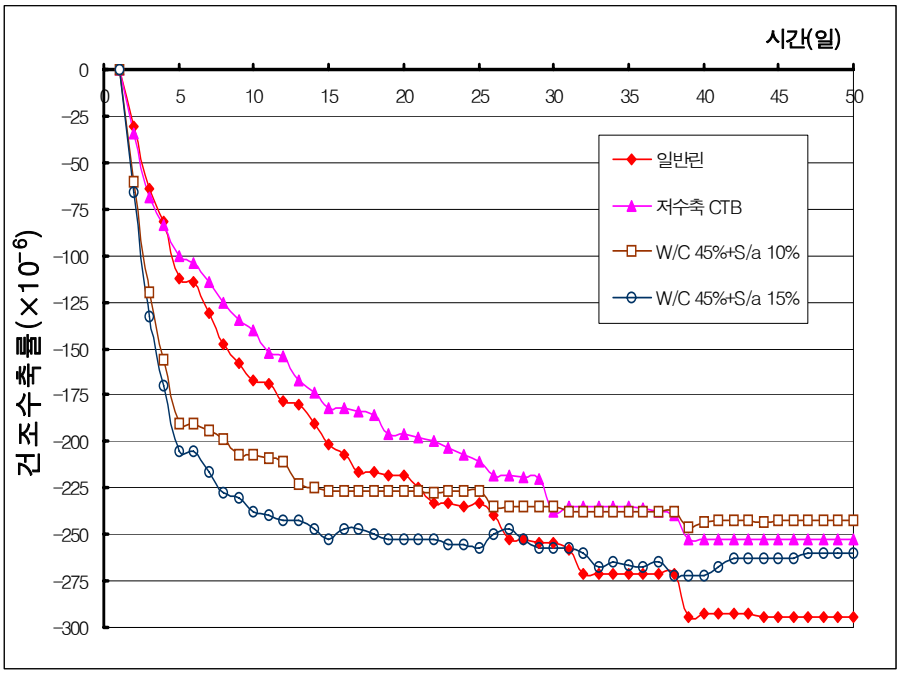
구분	시험법
압축강도	KS F 2405
건조수축계수	KS F 2424
탄성계수	KS F 2438-1992
열팽창 계수	AASHTO TP60-00 방법

<표 3.8.3> 일반린, 저수축 CTB, 저수축 투수 CTB에 대한 물성값(2005 4S 1차년도 보고서)

물성 / 종류	압축강도(kg/cm^2)			탄성계수(kg/cm^2)		
	7일	14일	28일	7일	14일	28일
일반린	54.29	58.40	77.78	114391.52	130062.79	178545.48
저수축 불투수 CTB	138.79	163.52	201.78	151982.85	162567.31	220872.04
저수축 투수 CTB 1 (잔골재율 10%, 물/시멘트비 45%)	63.55	64.91	86.35	85835.13	96661.00	105396.18
저수축 투수 CTB 2 (잔골재율 15%, 물/시멘트비 45%)	65.44	67.64	94.79	88657.18	107951.17	114201.40



<그림 3.8.8> 저수축 불투수 CTB의 비파괴탄성계수와 압축강도, 탄성계수와의 관계 (2005 4S 1차년도 보고서)



<그림 3.8.9> CTB 재료의 건조수축 실험 결과 (2005 4S 1차년도 보고서)

- 재령에 따른 물성의 변화 추정치 : fcm(t) = fc28 * {t / (a + b*t)}

여기서, fcm(t) : t 재령일의 물성값 fc28(t) : 28 일 재령의 물성값

t : 재령일 a, b : 상수

<표 3.8.4> 예측식을 위한 각 시험항목의 상수값 (2003 한국형 포장 설계법)

시험항목	골재종류	상수		R^2
		a	b	
압축강도	화강암	1.635	0.960	0.993
	석회암	7.146	0.725	0.956
	사암	2.183	0.937	0.827
휨강도	화강암	1.089	1.012	0.942
	석회암	4.818	0.743	0.858
	사암	1.007	0.843	0.513
할렬인장강도	화강암	1.673	0.966	0.986
	석회암	3.923	0.791	0.982
	사암	1.634	0.984	0.891
탄성계수	화강암	0.526	1.003	0.980
	석회암	1.423	0.905	0.954
	사암	0.723	1.005	0.911

<표 3.8.5> 콘크리트의 열팽창계수

골재종류	열팽창계수 (me/℃)
시험도로(RF)	10.2
화 강 암(GR)	10.7
안 산 암(AN)	9.2
사 암(SN)	9.6
편 마 암(GN)	10.7
재생골재(RA)	11.6

③ 하부구조

역학적 경험적 설계법에서는 흙에 대한 시험법을 고안하여 이를 바탕으로 흙의 종류 및 기타 변수에 따른 흙의 물성 정의 및 모형을 개발하여 반영하고 있다. 기존에는 대표적인 흙의 물성값으로 CBR, N, R을 사용하였으나 현재는 탄성계수 등을 주로 사용하고 있다. 4S 포장이 국내 하부구조위에 놓이므로 국내에서 개발 중인 하부층의 재료 물성을 산정하는 구성모델을 적용하여 분석하였다.

■ 노상

국내 노상토의 탄성계수는 함수비와 건조단위중량으로 대표되는 재료적 요인과 변형률 크기(또는 축차응력), 체적응력(또는 구속응력)에 대단히 큰 영향을 받고 있다. 따라서, 노상토의 구성모델은 함수비(환경변화), 구속응력(체적응력), 축차응력(변형률 크기), 하중주파수를 기본 독립변수로 한 구성모델을 제안하였다.

$$E = k_1 + k_2\,\Theta + k_3\,\log(\sigma_d) + k_4\,(w_{opt} - w) + k_5\,(w_{opt} - w)^2 \qquad \text{(식 3.8.3)}$$

여기서, E : 탄성계수 (MPa)

Θ : 체적응력($= \sigma 1 + \sigma 2 + \sigma 3$) (kPa)

σ_d : 축차응력 (kPa)

w_{opt} : 최적함수비 (%)

w : 함수비 (%)

$k_1 \sim k_5$: 모델계수로 k_1=3.572, k_2=2.688, k_3=1.258, k_4=1.197, k_5=1.019

<표 3.8.6> 탄성계수 범위값(2003 권기철)

구분	E_{max}	E_{min}
노상토(MPa)	280.0	37.83
보조기층(MPa)	422.0	60.0

■ 보조기층

보조 기층 재료는 함수비 변화에 따른 영향을 크게 없는 것으로 국내 연구 결과 밝혀졌다. 이러한 사항을 고려하여 다음과 같이 체적응력의 영향만을 고려한 선형모델으로 보조 기층의 물성을 예측하는 식을 제안하였다.

$$E = k_1 + k_2\theta \qquad \text{(식 3.8.4)}$$

여기서, E : 탄성계수 (MPa)

θ : 체적응력($= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$) (kPa)

k_1, k_2 : 모델계수이며 시험 결과 k_1=3.574, k_2=1.779

<표 3.8.6>은 국내에서 사용되고 있는 하부 재료의 탄성계수 범위에 대한 연구 결과로서 노상과 보조기층의 최대, 최소값이 제안되어 있다.

포아송비는 표층 및 기층의 재료와 마찬가지로 일반적으로 포장 재료에 적용되는 대표적인 값(0.25~0.5)을 사용한다.

(나) 환경하중

환경하중은 4S 포장의 온도 및 함수량 변화에 따라 포장체의 강도 저하, 노상 지지력 감소 등과 같은 포장체 물성 변화와 함께 포장체의 거동에 영향을 주는 원인이다.

포장은 건설을 시작함과 동시에 환경 하중의 영향을 받는다. 이러한 환경하중은 교통하중과 같이 포장의 파손을 일으키는 직·간접적인 요인이 되므로 이와 관련된 정량화 방안은 매우 중요하다. 환경 하중에 따른 포장체의 영향은 크게 표층 및 기

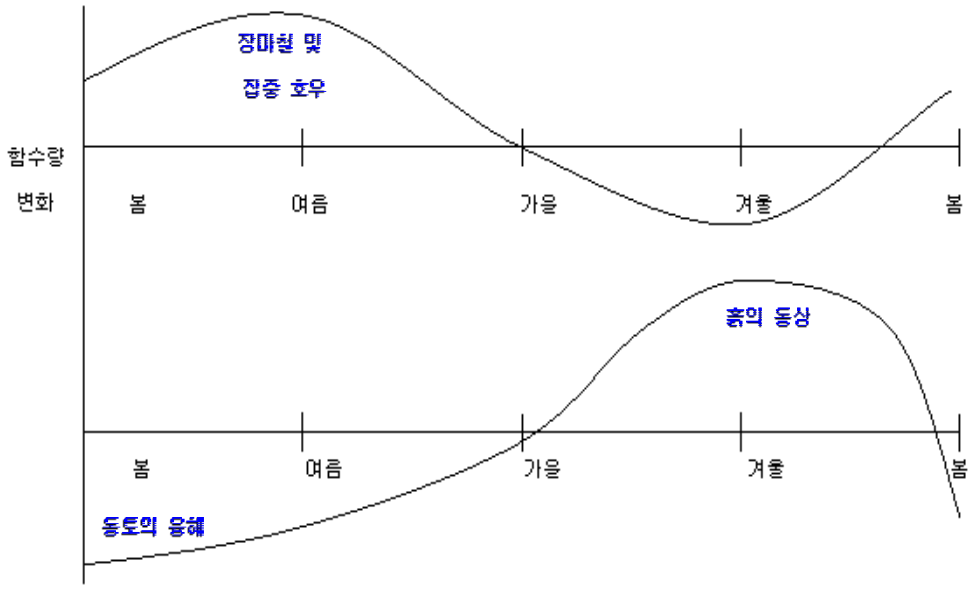
층 재료의 온도 영향, 하부 구조의 온도 및 함수량 영향으로 나뉜다.

아스팔트 표층은 온도 변화에 따라 재료의 물성이 민감하게 변화하는 포장재료이다. 여름철 대기 온도가 상승함에 따라 포장체의 내부의 온도가 상승한다. 이에 따라 아스팔트 재료의 탄성계수가 낮아지고 포장체의 처짐량이 증가하며 혼합물의 전단 저항을 약화시켜 포장체의 파괴를 유발시킨다.

CTB에서는 슬래브 상·하부의 온도차 및 함수비 변화에 의해 발생하는 컬링(Curling) 및 와핑(Warping)이 발생하여 포장 파손을 가속화 시킨다.

온도하중과 함께 포장체에 영향을 주는 또 다른 요인은 함수량으로 하부층인 보조기층, 및 노상토의 지지력에 영향을 미친다. <그림 3.8.10>에서와 같이 겨울철에는 포장의 하부까지 동결되는 원인을 제공하고, 봄철에는 융해되어 포장 하부구조의 지지력을 약화시킨다. 또한, 짧은 기간의 집중적인 강수는 포장하부구조의 함수비 변화를 초래하여 포장 파손을 일으키는 주요인으로 작용하기도 한다.

이러한 환경에 의한 포장체의 영향을 고려하기 위하여 포장 실무에서는 역학적인 모형 혹은 경험적인 모형을 개발하여 적용해 왔는데 4S 포장 역시 기본적인 흐름도를 반영하였다. 열평형 이론을 이용한 온도예측 모형을 채택하였으며, 이를 바탕으로 노상토의 함수량 변화 모형은 기존 자료를 바탕으로 추정된 값을 그대로 사용하였다.



<그림 3.8.10> 계절별 함수비 변화 및 동결 발생 가능성

여러 영향인자들 중 기상적인 인자인 강수량, 대기온도와 풍속은 어느 정도 유의성이 있는 상관관계가 있었지만 상대습도, 일사량 및 증발량은 노상토의 함수량변화에 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 또한, 노상토의 함수량변화는 흙의 종류에 따라 상당히 영향을 받고 있고, 지역이 같을 경우 성토지에 비해 원지형 또는 절토지의 함수량이 다소 높은 경향이 나타났다.

다음은 국내에서 현장 계측을 이용하여 얻은 데이터를 바탕으로 만든 월별 함수비 변화 모형이다.

$$W_w = a + b \times T_{avg} + c \times \log(P_{month}) \qquad \text{(식 3.8.5)}$$

여기서, W_w : 노상의 월별 무게당 함수비(1월~12월)(%)

T_{avg}: 월 평균 대기온도(℃)(1월~12월)

P_{month}: 월 평균 누적 강수량(mm)(1월~12월)

a,b,c : 년 평균 강수량에 의한 상수

(다) 교통 하중

4S 포장체의 거동 및 파손에 가장 큰 영향을 주는 요소 중의 하나는 교통하중이다. 교통하중 정량화 방법에 있어 설계에 반영하기 위해서 주로 고려되는 사항은 하중크기, 하중재하 위치. 바퀴 및 축수, 교통량 및 시간대별 분포 등이 있다.

하중 크기는 차량에 따라 모두 다르기 때문에 정량화가 쉽지 않다. 그러나 하중의 크기에 따라 포장에 누적되는 손상 정도가 크기 때문에 설계 인자로서 고려되어야 한다. 포장의 파손 형상은 누적손상개념에서 볼 때, 포장체에 재하되는 반복차량하중에 의해 발생하므로 설계기간 동안에 통과 차량 대수 또한 중요하다. 그 예로 중차량 비율이 높을수록, 일평균 교통량(AADT)이 많을수록 포장 파손은 가속화되는 것을 들 수 있다.

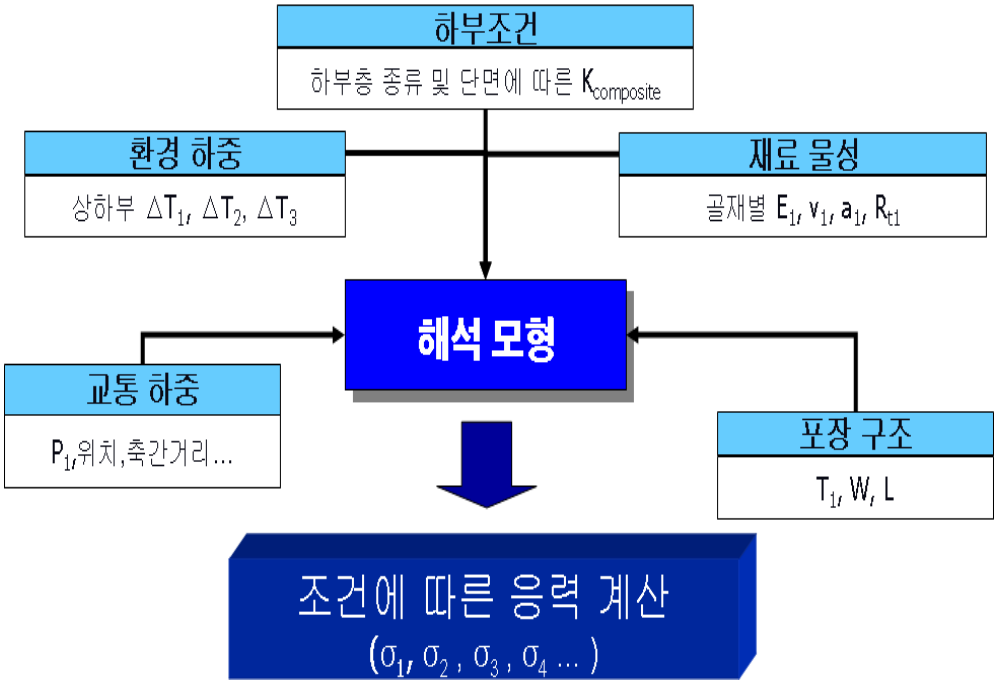
차량의 특성 관련 자료는 한국형 포장 설계법의 체계를 적용하며 특히 저 교통에 해당하는 지역에 대해서는 일반 국도의 비율을 그대로 사용하도록 한다.

3. 구조 해석

다양한 설계 인자들을 입력 변수로 하여 포장체의 역학적인 거동을 추정한다. 즉, 구조해석 모형은 포장체에 영향을 주는 재료 물성, 환경하중, 차량 하중, 기하구조 등을 입력 변수들을 이용하여 주어진 환경하에서 포장체거 어떻게 반응하는가를 알아볼 수 있는 도구이다. 해석 결과를 바탕으로 공용성 분석을 위한 기초 자료를 생성하여 최적의 포장 단면 설계가 이뤄질 수 있도록 하는 역할을 한다.

현재 한국형 포장 설계법에서는 아스팔트 포장과 콘크리트 포장의 구조해석 모형을 개발하였으며 AASHTO 2002 DG 에서도 ISLAB 2000을 개발하여 포장체의 거동을 분석하고 있다.

4S 포장의 구조해석은 ABAQUS 를 이용하여 3차원 요소로 해석을 수행한다. 4S 포장의 주요 파손으로는 CTB 층의 피로 균열과 AP 표층의 러팅과 피로 균열이 포함된다. 따라서 피로 균열은 CTB 층의 종방향 인장응력을 계산하도록 하고 AP 표층의 러팅 및 피로 수명을 예측하기 위해서는 수직, 수평 변형률을 살펴본다.



<그림 3.8.11> 구조해석 모형의 역할

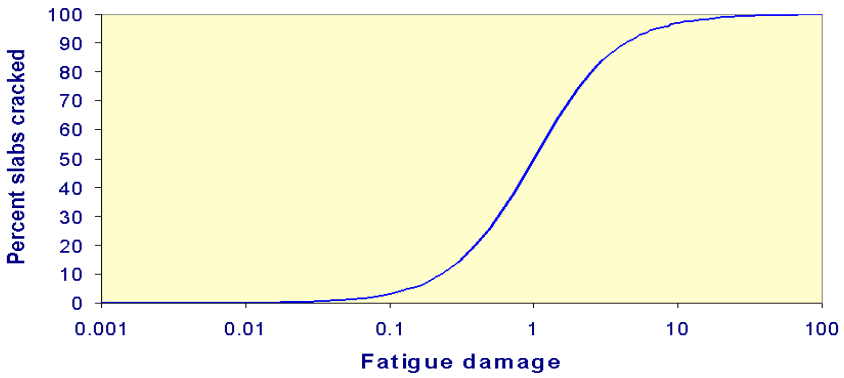
4. 공용성 예측 모형

포장의 공용성 예측을 실제 4S 포장을 설계 수명을 예측하고 이를 통해 최적의 두께 및 재료 선정의 근거를 제공하는 중요한 부분이다. 공용성 예측이 정확하지 않을 경우 많은 건설 초기 비용과 유지보수 비용이 집행되어야 하는 큰 문제를 발생시킬 수 있다. 따라서 4S 포장의 설계를 위해서는 실내 모형은 물론 앞으로 현장 데이터를 축적하여 보다정밀, 정확한 공용성 예측이 필수이다. 앞에서 언급했듯이 본 4S에서 공용성 기준으로 보는 파손은 AP 표층의 러팅과 피로 균열, CTB 하부의 피로 균열로 구분된다.

가. CTB 피로 균열

CTB 층의 반복하중에 의한 피로강도는 적용 최대응력의 최대강도에 대한 비율로 정의되며 피로강도는 응력수준, 응력비, 하중이력, 재료특성 등의 다양한 인자에 의하여 영향을 받는다. 국내 콘크리트 포장을 바탕으로 실내에서 개발된 식은 다음과 같다.

$$Ln(N_F) = 33.312 - 29.155\left(\frac{\sigma_{\max}}{MR_{56}}\right) \qquad \text{(식 3.8.6)}$$



<그림 3.8.12> 콘크리트 피로 균열 수명(2002 AASHTO DG)

여기서, σ_{max} : 슬래브의 발생 응력 수준

MR : 휨 강도

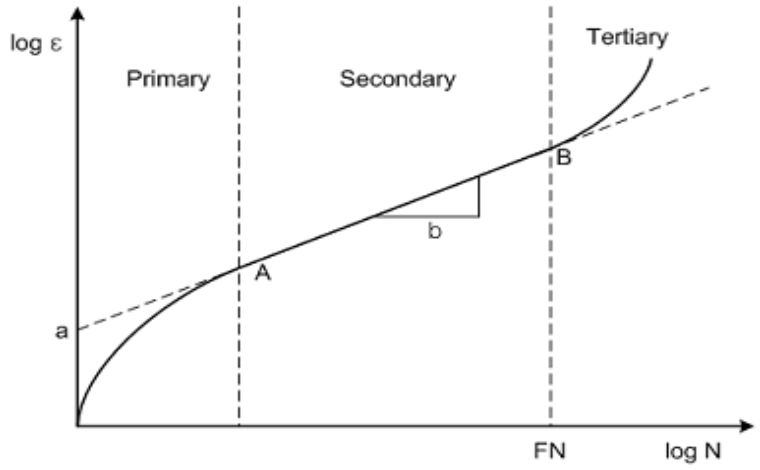
N_f : 하중 최대 허용 회수

나. 러팅

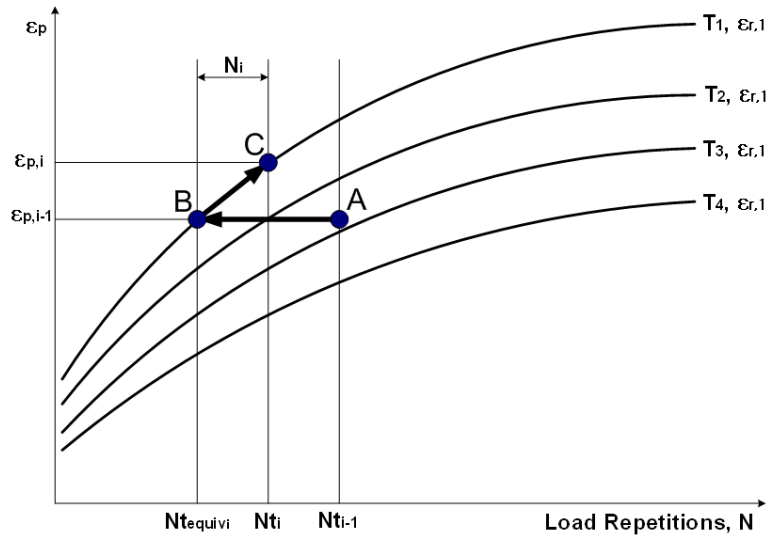
이들은 현장 공용성 자료와 결부되어 보정을 거치게 된다. 세계 최초인 본 포장 공법의 설계를 위해 AASHTO 2002에서 개발한 모형 <그림 3.8.12>를 사용한다.

러팅은 아스팔트 층과 보조기층 및 노상에서 발생하는 파손 형태이다. 하지만 4S 포장은 기층으로 강성의 투수 및 불투수 CTB 가 놓이게 되므로 국부적으로 보조기층이나 노상에서 발생하는 러팅은 제외하도록 한다. <그림 3.8.13>은 러팅 발생을 개략화 한 것으로 삼단계로 나누어 볼 수 있다. 일반적으로 표층의 러팅은 아스팔트 혼합물의 압밀화와 전단변형에 의해서 주로 발생한다. Secondary 구간까지는 압밀화에 의한 변형이, Tertiary 구간부터는 전단에 의한 변형이 지배적으로 작용한다. 또한 Tertiary 구간이 시작되는 B점을 흐름점이라 하며, 이때의 하중재하 횟수를 흐름값(Flow Number : FN)이라고 한다.

러팅량 계산은 <그림 3.8.14>와 같이 누적 손상이론에 근거하여 환경 및 교통하중 조건에 따라 각각의 러팅 발생량을 계산하고 증가율은 선형으로 가정하여 반복해서 더해간다.



<그림 3.8.13> 러팅률과 하중재하 회수의 전형적 관계



<그림 3.8.14> 러팅 모형의 개념

기존의 한국형 포장 설계법에서는 국내 대표적인 재료의 러팅 함수로 (식 3.8.7)을 제안하였다. 하지만 4S 포장의 표층 재료는 포러스한 층이기 때문에 그 거동 특성이 다르다. 실제 4S 포장의 경우 도로공사의 포장가속시험기 시험결과 일반 밀입도 아스팔트 포장보다 더 적은 러팅이 발생하였다. 따라서 이러한 점을 보안하기 위해서 제안된 식의 계수들을 실험을 통해 산출하거나 혹은 새로운 모형을 개발할 수 있을 것이다.

$$\frac{\varepsilon_p}{\varepsilon_r} = 10^{-0.691} N^{0.124} T^{0.071} AV^{1.468} \qquad \text{(식 3.8.7)}$$

여기서, ε_p = 러팅률

ε_r = 회복변형률

T = 온도(℃)

AV = 공극률(%)

R^2= 0.895

다. AP 표층 피로 균열

일반 아스팔트 포장과 마찬가지로 4S 포장의 피로균열도 아스팔트층의 하단에 발생한 인장 변형률이 그 원인이다. 일반 아스팔트 포장의 경우 표층과 기층에 대한 피로균열 발생률을 계산한다. 하지만 4S 포장의 경우 기층에 CTB 층이 적용되므로 아스팔트 표층에 대한 피로 수명만을 예측하게 된다.

다음은 국내에서 개발된 일반 아스팔트 포장의 피로예측 모형이다. 하지만 러팅과 마찬가지로4S 포장의 표층 재료는 이 모형과 다소 차이가 있을 것으로 판단된다. 따라서 피로 예측 모형은 기존모형을 개선하거나 보완하여 사용할 수 있을 것이다.

$$N_f = SF \cdot 10^M \cdot TF \cdot \left[f_1 (\epsilon_t)^{f_2} (|E^*|)^{f_3} \right]$$

여기서, SF = 피로보정계수

$$M = 4.84 \times \left(\frac{V_b}{V_b + V_v} - 0.69 \right)$$

TF = 온도 영향계수

Vb = 아스팔트 바인더의 체적함량(%)

Va = 공극률(%)

|E*| = 아스팔트 층의 동탄성계수 (MPa)

5. 공용성 평가 및 생애주기비용 분석

가. 공용성 평가

누적손상개념을 적용한 포장 설계수명은 CTB 층의 피로 균열과 AP 표층의 러팅과 피로 균열이 된다. 이러한 파손들의 정도는 도로특성에 따라 분류한 교통량을 통해 설계 하중 반복 재하 회수를 구할 수 있다.

불투수 혹은 투수 CTB 는 구조해석을 통해 각 축하중에 대해 응력과 변형률을 구하고, 콘크리트 파괴강도로 나누어 응력비를 산출하고 이는 피로파손 모형의 입력변수로 사용되어 허용 하중 반복 재하 회수를 구한다. AP 표층의 러팅은 각 온

도와 교통조건에 따른 처짐량을 구하고 이를 합산하여 전체의 러팅 양을 계산한 후에 허용 하중 반복 재하회수를 구하게 된다. AP 표층의 피로 균열또 각 조건에 따른 구조해석을 수행하여 아스팔트 표층 하부의 인장 변형률을 구하고 이를 통해서 최대 허용 하중 반복 재하회수를 구하게 된다.
위와 같은 방법으로 설계기간에 대하여 포장의 공용성을 예측하여 이미 정립된 설계기준과 비교한다. 설계기준에 맞으면 다음 단계로 진행되지만 그렇지 않을 경우 예비설계를 개정하여 다시 공용성을 예측하고 설계기준이 모두 만족될 때까지 반복한다.

나. 생애주기비용분석

4S 포장의 예비설계가 각각의 파손 기준을 만족시키면 그 설계는 기술적으로 실행가능한 설계가 된다. 이 예비설계는 다른 설계 대안들과의 비교를 통한 최적의 설계를 결정하기 위해 생애주기비용분석을 행하게 되며, 생애주기비용분석을 통해 경제적으로 가장 유리한 대안을 최종 대안으로 선정하게 된다.
다음은 4S 포장의 재료 및 두께에 따른 초기 시공비용을 나타낸 표이다.

<표 3.8.7> 4S포장 1km/lane 비용(폭 3.5m)

구분		가격(천원)	계산기준	계산과정	비고
투수 아스팔트 (5cm)	시공비	2,128	m^2당 608원	3.5m×1000m×608원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	29,610	톤당 70,500원	3.5m×1000m×0.05m×2.4ton×70500원	조달청 정부물자가격
	계	31,738			
투수 아스팔트 (10cm)	시공비	4,448.5	m^2당 1,271원	3.5m×1000m×1,271원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	59,220	톤당 70,500원	3.5m×1000m×0.10m×2.4ton×70500원	조달청 정부물자가격
	계	63,668.5			
불투수 CTB기층 (10cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	16,339	m^3당 42,880원(레미콘) +1,330,980원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.10m××42,880원+1,330,980원	조달청 정부물자가격
	계	39,562			
불투수 CTB기층 (15cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	24,462	m^3당 42,880원(레미콘) +1,949,471원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.15m××42,880원+1,949,471원	조달청 정부물자가격
	계	47,685			
불투수 CTB기층 (20cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	32,123	m^3당 42,880원(레미콘) +2,596,269원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.15m××42,880원+2,596,269원	조달청 정부물자가격
	계	55,346			
투수 CTB기층 (10cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	17,319	m^3당 42,880원(레미콘) +2,310,830원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.10m××42,880원+2,310,830원	조달청 정부물자가격
	계	40,542			
투수 CTB기층 (15cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	25,956	m^3당 42,880원(레미콘) +3,443,996원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.15m××42,880원+3,443,996원	조달청 정부물자가격
	계	49,179			
투수 CTB기층 (20cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	34,608	m^3당 42,880원(레미콘) +4,591,162원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.20m××42,880원+4,591,162원	조달청 정부물자가격
	계	57,831			

6. 4S 포장의 카달로그 설계

4S 포장의 두께 설계를 하기 위해서는 세부 모듈들이 하나로 통합된 프로그램이 필요하다. 즉, 입력 변수, 구조해석, 공용성 해석 등의 전체 프로세스를 포함하고 각 모듈별로 상호 작용을 수행할 수 있는 프로그램이 바탕이 되어야만 역학적 경험적 설계를 할 수 있는 것이다.

가. 국내외 포장 설계법

(1) AASHTO 포장 설계법(1993)

AASHTO 포장설계법은 해석기간 내에서 예상되는 교통량을 8.2 톤 등가환산 축하중으로 환산하고, 차로수에 의하여 교통량을 보정한 후 일교통량으로부터 노모그래프를 또는 공용식을 이용하여 필요한 구조지수(SN ; Structural Number)를 구한다. AASHTO 포장설계법의 입력조건은 신뢰도, 8.2 톤의 등가환산단축하중, 노상토의 유효회복탄성계수 및 PSI 의 최종값 등이 있다.

아스팔트 포장의 경우 구조지수(SN) 값이 구하여진 후에 각 층의 필요 최소두께 또는 경제성을 고려하여 각 층의 구성을 결정하는데, 구조지수를 산출할 때에는 기층의 배수상태를 고려하도록 되어 있다. 공용성을 포장의 구조적, 기능적인 공용성으로 나누어 판단하였다. 구조적인 공용성은 교통하중을 전달하는 포장체의 능력에 악영향을 미치는 인자들(균열, 라벨링) 등과 같은 파손들과 관련된다. 기능적인 공용성은 포장이 도로 이용자들에게 어떠한 서비스를 할 수 있는가에 대한 것을 나타내는 지표이다. 기능적인 공용성을 판단하기 위하여 사용되는 지표는 PSI이다. PSI의 최종값은 도로조건에 의하여 1.5~3.0을 적용한다. 또한, 노상의 지지력은 회복탄성계수로 평가하는 것 외에 환경조건으로써 수분과 온도에 한정하여 팽창과 동상에 의한 지지력의 저하를 공용성의 저하로 고려할지 여부를 결정한다. 그 외에 재료조건은 사용재료의 회복탄성계수를 구하는 것을 기본으로 하며 신뢰도에 있어서는 포장 공용성의 예측에 있어서 도로의 중요도에 따라서 신뢰도 폭이 결정된다. 콘크리트 포장 설계법은 기후, 설계, 재료, 노상토 등의 다양한 조건에서 적용시킨

경험적인 방법에 근거한 설계법이다. 입력 변수로는 슬래브 두께, 보조 기층의 두께, 노상 지지력계수, 보조기층에서의 동결심도, 온도변화 주기, 줄눈 조건, 단축 하중 등에 대하여 제공되는 값들을 사용한다. 경험적인 방법으로 인한 단점을 보완하기 위해 Spangler 의 단부응력식(corner stress equation)을 사용하면서 재료의 특성, 콘크리트 포장의 휨강도, 탄성계수, 기초의 지지력 등에 대해 수정, 보완하였다. 1986년에 환경이나 위치에 따른 변화를 고려하기 위해 배수와 지지력 손실, 효율적인 K 값, 줄눈부의 다양한 하중 전달 등을 고려하여 설계식을 보완하였다

(2) 아스팔트 협회 (AI) 설계법

현행 AI(Asphalt Institute) 의 설계법은 1981 년에 MS-1 로 발행된 것으로써 그 이전 설계법의 PSI 및 상대강도계수 개념으로부터 이론적 설계법으로 개정된 것이다. 설계방법은 다층탄성프로그램 DAMA 에 의하여 미리 계산된 설계표를 이용하여 간단하게 포장두께 설계를 할 수 있고 이론적인 설계법임에도 불구하고 탄성계수 또는 포아손비가 불필요한 것이 특징이다. 두께 설계과정은 다음과 같은 과정을 거치게 된다.

1> 교통량

우선 설계기간(공용 후 최초의 덧씌우기를 필요로 하는 연수)을 설정하나 교통조건으로 표준하중 8.2 톤 환산누적축수로 교통량을 평가하고 통상 예측기간으로 20 년을 사용한다.

2> 노상, 보조기층, 기층의 물성

노상조건으로는 실측한 회복탄성계수를 기본으로 하나 실측이 곤란한 경우를 대상으로 CBR 치 또는 R 치를 회복탄성계수로 대체하고 있다. 또한, 도로의 중요도에 따라서 안전율을 추산하기 위해 환산누적축수에 의하여 분류한 세 가지의 백분율 값에 의하여 회복탄성계수를 보정한다. 보조기층이나 기층 재료는 액성한계, 소성지수, 최소 모래당량 등의 시방기준을 만족해야 한다.

3> 환경 조건

환경조건은 아스팔트 혼합물에 대하여 온도의 영향이 고려되고 입상토 재료에 대해서는 수분 및 동결융해의 영향이 고려되고 있다.

4> 두께 설계

월평균 온도 3 종류와 각 월평균 온도에서 전단면 아스팔트(full depth asphalt), 유화아스팔트 2 종, 골재기층 2 종의 6 종에 대하여 전부 18 종류의 설계표를 제작하여 예측교통량과 노상토의 유효회복탄성계수를 입력변수로 하는 아스팔트 포장단면을 구한다. 이러한 설계절차를 단순화시켜 노상의 3 등급에 의한 분류와 교통량 6 등급으로 분류하여 바로 포장단면을 구할 수 있도록 표준단면을 제시하였다.

(3) AASHTO 2002

한국형 포장 설계법과 마찬가지로 역학적 이론을 바탕으로 한 역학적-경험적 설계법이 개발되어 사용되고 있다. 이 포장설계법에서는, 먼저 포장구조체의 역학적 분석을 행하여 포장체의 거동을 예측한 후, 피로이론을 적용하여 포장의 파손을 예측하고, 포장의 공용성을 예측하는 것이다. 따라서, 이 포장설계법은 이 전의 포장설계법과 비교할 때 역학적인 면이 많이 고려되어 있다.

역학적-경험적 설계방식(예로 AASHTO 2002 프로그램)은 기존의 경험적 설계법과 가장 큰 차이는 AASHTO 포장설계법과 같은 설계 프로그램이 아니라, 엄격한 의미에서 해석프로그램 이라는데 있다. 즉 주어진 포장단면에 대해 해석을 수행하여 공용성을 예측하는 방식인 것이다.

먼저 설계입력변수에 대한 값들을 현장조건에 맞게 결정한다(예비설계단계). 그 설계 입력값들을 사용하여 구조해석모형을 통해 응력 및 처짐 등과 같은 구조적 거동을 예측한다. 이러한 포장체의 구조적 거동에 근거하여 포장체가 받는 손상을 계산하고, 설계기간을 통해 누적된 손상으로 포장체에 발생할 파손을 예측한다.
포장의 파손에 대한 예측이 완료되면, 다음으로는 평탄성을 예측한다. 이러한 과정을 거쳐 예비설계에 대한 파손 및 평탄성을 예측하게 된다. 만약 예측된 값들이 설계기준에 적합하지 않으면, 예비설계를 변경하여 다시 해석을 수행하게 된다. 이 과정에서 설계 신뢰도는 입력변수로서 포장 파손과 평탄성을 산정하는데 고려된다. 이러한 과정은 공용성의 기준이 모두 만족될 때까지 반복된다. 공용성 기준이 만족

되는 설계단면과 재료기준이 결정되면 구조적 및 기능적 측면에서 실행 가능하다는 판단이 내려지며, 추가적으로 생애주기비용분석을 수행하게 된다.

(4) 한국형 포장 설계법

현재 개발 중인 한국형 포장 설계법의 일부는 AASHTO 2002 와 유사한 부분들이 있지만 국내의 교통환경, 재료 조건, 환경 조건, 공용성 기준 등을 반영하여 개발중에 있다.

기본적으로 대상지역에 적합하다고 판단되는 단면을 가정하고 그 지역의 교통량, 기후조건, 토질조건, 포장 층의 두께조합, 재료물성 등을 입력한다. 이를 바탕으로 포장 해석모형을 바탕으로 거동을 추정하고 실제 포장의 파손진전 경험을 이용한 파손예측 모형을 통해 예측한다.

설계 기준은 국내 도로 포장의 주요 파손을 고려하였는데 콘크리트 포장의 경우 스폴링 및 균열을 아스팔트의 경우는 러팅, 균열 그리고 평탄성이 선정되었다.

유한요소법을 이용하여 설계 기준차량이 놓였을 때 포장의 구조적 거동(한계응력과 변형률)을 계산하는데 콘크리트 포장의 경우 Shell on the spring 개념을 이용하여 모형을 자체 개발하고 이를 HEART-JCP라 칭하였다. 개발될 모형은 실내외 실험을 통해 검증될 것이고 이를 통해 다양한 포장 형식별 하중 조건별 거동이 추정되게 된다. 포장 파손 모형은 기본적으로 누적 손상 개념을 이용하여 예측한다. 연도별 누적 손상을 반복 계산하고 주어진 포장 단면의 시간별 파손 진행을 추정함으로써 설정된 설계 기준에 만족하는가를 판단한다. 만약 기준을 만족시키지 못할 경우, 두께나 재료 혹은 구조를 변경한 후 공용성 기준을 만족할 때까지 반복 계산한다. 목표한 기준을 만족시키는 다양한 설계 단면들 중에서 생애주기 비용분석을 이용하여 최적의 대안을 찾게 된다.

나. 4S 포장의 카달로그 두께 제안

(1) 환경 하중의 카달로그

환경하중은 앞에서 살펴본 바와 같이 아스팔트 표층의 물성, CTB 층의 컬링 거

동, 노상의 함수비 변화 등에 대하여 영향을 준다.

AP 물성에서 살펴본 표에서 바인더 함량 4% 대해 시험체의 온도 변화에 따른 동탄성계수 변화률을 살펴보았다. 실제 대기 온도가 30도 이상이 되면 아스팔트 포장체의 내부 최대 온도는 60 이상되는 경우도 빈번하며 이점을 고려하여 실제 AP 혼합물의 시험체 온도를 조절한다. 표에서 알 수 있듯이 시험체 온도가 55 도가 될 경우 -10도에서 시험한 동탄성 계수의 0.1~0.04 배 정도 밖에 되지 않는다.

실제 선형탄성의 구조해석을 수행하여 물성에 따른 AP 포장체의 거동을 살펴보면 탄성계수가 절반으로 줄어들 경우 포장체 내에 발생하는 응력, 변형률도 동일한 비율로 감소하게 된다. 따라서 온도에 따른 구분은 중요한 요소가 될 것이다.

또한 노상층의 함수비 변화는 하부 재료의 탄성계수 변화에 많은 영향을 준다. 앞에서 살펴본 노상의 탄성계수 예측식을 이용하여 그 변화를 살펴본 결과 <표 3.8.9>와 같다. 최적 함수비 변화가 노상의 탄성계수에 많은 영향을 주는 것을 알 수 있다. 함수비 변화는 강수량에 많은 영향을 받으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

이와 같이 온도 조건, 함수비 조건(강우량)을 고려하여 권역별 분포를 정리 다음과 같이 정리하였다. 여기서는 CTB가 기층재료로 사용되기 때문에 하부층의 거동 변화가 온도에 의한 영향보다 상대적으로 적을 것이다. 이러한 가정하에 물성에 따른 구조해석을 수행하여 표층만의 처짐량을 살펴보았다. 해석 조건은 FWD 하중재하시 표준하중인 9000lb, 면적은 24*24 cm^2 표층 10 cm, CTB 15 cm 로 하였고 물성은 구조해석시 사용한 기준값을 적용하였다. 이러한 표준조건하에 AP 표층의 물성 변화, 노상의 물성 변화만을 고려하여 분석을 수행하였다.

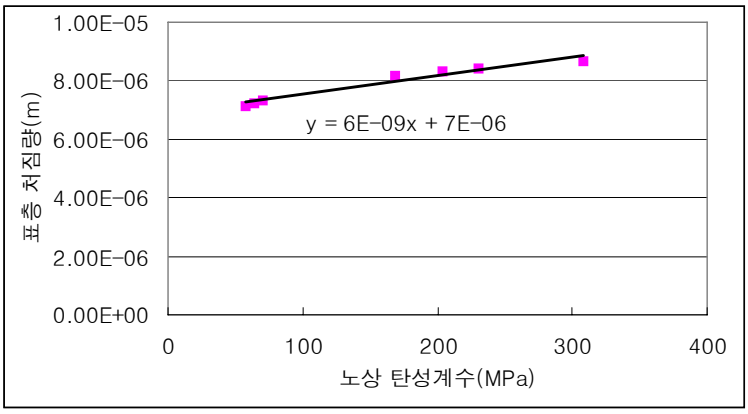
해석 결과 아스팔트 층의 물성 변화에 따른 표층의 처짐량 기울기를 “1”이라고 하였을 경우 노상의 탄성계수 변화에 따른 기울기는 약 “0.6” 정도 되었다. 이러한 근거하에서 온도와 강수량의 중요도 차이를 “0.625”와 “0.375” 비율로 각각 산정하였다.

<표 3.8.8> 온도 변화에 따른 AP 표층 재료의 동탄성계수 변화

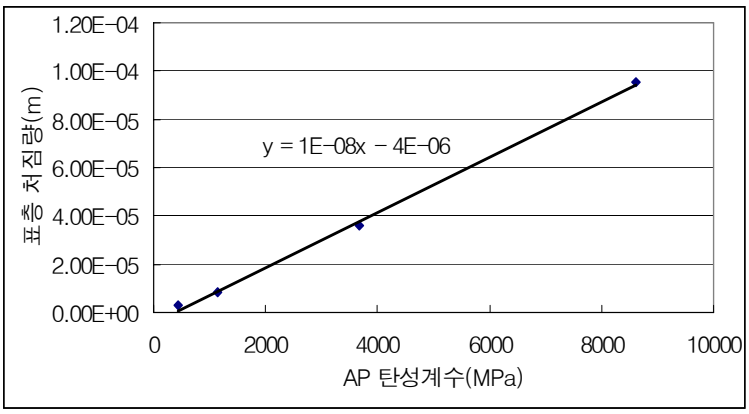
시험 온도	주파수	동탄성계수	기준 동탄성계수에 대한 비율
-10도	0.05	7367	각 하중 주파수에 대한 기준 동탄성계수
	0.1	7547	
	1	8613.5	
	10	8959.5	
	25	8660	
5도	0.05	4662	0.63
	0.1	4917.7	0.65
	1	6060.3	0.70
	10	6833.3	0.76
	25	6964.7	0.80
20도	0.05	2196.3	0.30
	0.1	2150.7	0.28
	1	3672	0.43
	10	4802.7	0.54
	25	5411	0.62
40도	0.05	715	0.10
	0.1	791.3	0.10
	1	1143	0.13
	10	1828.7	0.20
	25	2108.3	0.24
55도	0.05	302.7	0.04
	0.1	323.7	0.04
	1	433.7	0.05
	10	652.3	0.07
	25	834.3	0.10

<표 3.8.9> 함수비 변화에 따른 노상의 탄성계수변화

기본 조건		함수비 변화	노상의 탄성계수 변화(MPa)
k1	3.572	9	69.89005
k2	2.668	10	64.31005
k3	1.258	11	85.11305
k4	1.197	12	229.916
k5	1.019	13	168.719
구속 응력 (KPa)	22	14	203.522
축차 응력 (KPa)	42	15	308.325
최적 함수비(%)	12		



<그림 3.8.15> 노상 탄성계수 변화에 따른 표층 처짐량



<그림 3.8.16> AP 탄성계수 변화에 따른 표층 처짐량

따라서 이를 근거로 각 기상청 자료를 근거로 연평균 기온*.625+강수량*.375를 적용하였다. 여기서 연평균 기온 및 강수량은 표준화 처리를 하였다. 각 항목에 대하여 최저값을 뺀 후에 온도와 강우량의 범위값(최대값-최저값)으로 나누어 0~1 사이 값으로 만들었다.

<표 3.8.10>은 그 결과를 바탕으로 높은 순으로 분류한 결과를 나타낸 것이다. 이를 근거로 다음 각 권역을 2가지 카달로그로 구분하였다. 이 자료를 근거로 <표 3.8.12>와 같이 가중치 값이 0.53 이상의 지역과 0.53 이하의 지역으로 구분하였다. I 과 같은 경우는 상대적 연평균 기온이 높고 강수량이 많은 지역으로 구분되어 설계시 II 보다 두께를 증가시키거나 불투수 CTB를 사용하도록 한다.

<표 3.8.10> 포장 권역별 가중치

가중값	연평균 기온(℃)	강수량 (mm)	지역	가중값	연평균 기온(℃)	강수량 (mm)	지역
0.83	16.2	1391	서귀포	0.52	12.2	1245	거 창
0.72	14	1490	마 산	0.52	11.5	1375	금 산
0.71	12.9	1653	강 릉	0.52	11.8	1309	천 안
0.68	12.4	1656	대 전	0.52	14.2	834	대 구
0.68	13.8	1384	부 산	0.51	11.5	1334	서 산
0.66	16.2	873	제 주	0.51	11.2	1381	충 주
0.65	13.3	1390	전 주	0.51	11.6	1303	이 천
0.63	12.5	1509	군 산	0.50	10.9	1418	임 실
0.63	13.6	1290	광 주	0.49	11.4	1303	영 주
0.63	13.7	1269	통 영	0.48	10.1	1525	제 천
0.62	13.2	1337	고 흥	0.48	12	1156	인 천
0.61	13.7	1220	여 수	0.48	12.1	1134	순 천
0.61	12.5	1427	청 주	0.48	11	1334	춘 천
0.60	11.9	1527	부 여	0.48	12.2	1102	상 주
0.59	11.5	1571	원 주	0.47	12.6	1011	구 미
0.59	10.3	1798	홍 천	0.45	10.3	1378	동두천
0.58	13.9	1092	완 도	0.41	11.2	1099	진 도
0.58	12.1	1433	동 해	0.41	10.4	1252	영 월
0.57	12	1428	수 원	0.39	11.4	1008	추풍령
0.57	13.5	1120	합 천	0.38	12.5	773	영 천
0.56	12.1	1358	서 울	0.38	10.3	1172	문 산
0.55	13.3	1114	진 주	0.38	6.6	1881	대관령
0.55	12	1349	속 초	0.36	9.3	1323	철 원
0.54	12.6	1204	영 덕	0.36	10	1168	인 제
0.53	12.2	1267	보 령	0.34	11.3	882	안 동
0.53	13.5	1003	목 포	0.28	8.6	1226	태 백
0.53	10.7	1536	보 은				

<표 3.8.11> 4S 포장의 권역 구분

구분	가중값
Ⅰ	0.53 이상
Ⅱ	0.53 이하

(2) 하부구조

하부 구조는 상부층의 거동에 영향을 주는 인자로써 보조기층과 노상으로 구분된다. 기존 연구 결과에 따르면 국내 보조기층 및 노상토의 탄성계수 범위는 앞에서 살펴본 하부 물성값과 같다. 이에 대하여 최대, 최소, 중간값을 이용하여 구조해

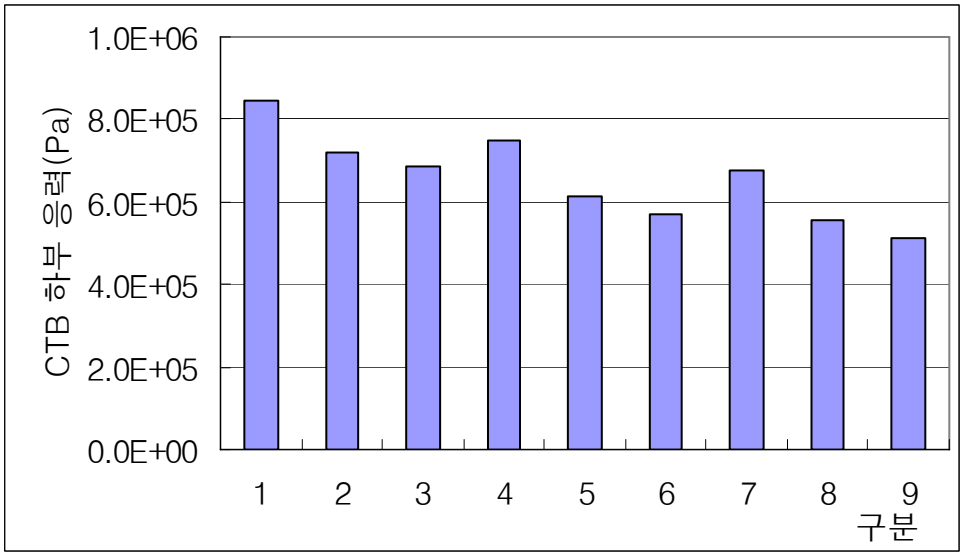
석을 수행하였고 결과 중 표층만의 처짐량을 살펴보았다.

<표 3.8.13>과 같이 그 영역에 따라 각 층마다 3가지 종류로 구분하였다.

이에 대한 구조해석 결과 <그림 3.8.17>과 같은 결과나 도출되었다. 이 결과를 바탕으로 1, 4, 7 번 경우를 A, 2. 3. 5 번 경우를 B, 6, 8, 9 경우를 C로 구분하였다. 설계시 이러한 것을 반영하기 위해서는 A 의 경우 양질의 하부 재료이므로 상대적으로 교통량이 많은 지역에 적용하거나 두께를 낮춰 설계하도록 한다. 반면 C 와 같이 A 재료에 비해 상대적으로 나쁜 역학적 성질의 재료이기 때문에 불투수 CTB 적용 및 두께를 증가하여 설계하도록 한다.

<표 3.8.12> 하부 물성에 따른 해석 조건

구분	노상 탄성계수(MPa)	보조기층 탄성계수(MPa)
1	40	60
2	160	60
3	280	60
4	40	240
5	160	240
6	280	240
7	40	420
8	160	420
9	280	420



<그림 3.8.17> 하부 재료의 탄성계수에 따른 구조해석 결과

<표 3.8.13> 하부 재료의 물성 구분

구분	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ
노상토(MPa)	E≥ 200	100≤E≤200	E≤100
보조기층(MPa)	E≥ 350	150≤E≤350	E≤150

<표 3.8.14> 하부층의 카타고리 제안

구분	A			B			C		
노상	Ⅰ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅲ
보조기층	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅲ	Ⅲ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ

(3) 교통 하중

교통하중은 앞에서 살펴본 바와 같이 정량화해야할 사항이 매우 많은 부분이다. 하지만 카달로그 설계에서는 모든 사항을 고려할 수 없기 때문에 차로당 일 교통량과 중차량 비율을 고려하였다. 실제 교통량이 많을 경우 소형 차량에 비해 무거운 중차량이 운행하였을 때 포장 파손이 빨리 진전되기 때문이다.

<표 3.8.15>는 도로 교통량 통계 연보의 자료를 정리하여 나타낸 것이다. 고속국도 및 지방도의 경우 중차량(일반국도 차종분류 5종차량 이상) 비율에서는 소형트럭의 비율을 제외하였다. 데이터 분석 결과 소형트럭은 일반국도 기준으로 4종 차량과 5종 차량이 함께 포함되어 있는데 일반국도의 자료를 근거로 볼 때 상대적으로 5종 차량의 비율이 매우 적기 때문이다. 일반국도의 경우는 모든 차종에 대한 비율이 나와 있어 이를 근거로 정리하였다.

고속 국도의 경우 60% 이상의 구간이 차로당 AADT 가 5000~15000 대에 분포하고 있다. 하지만 일반국도나 지방도의 경우 약 80 이상의 구간이 차로당 AADT 0~5000대 사이에 분포하고 있다.

중차량 비율은 도로 종류에 따른 등급별로 구분하였으며 평균값은 전체에 대한 평균을 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 고속국도의 경우 중차량 비율이 상당히 높고 지방도, 일반국도 순으로 나타났다. 데이터 측정 결과 세 도로의 평균 중차량 비율을 계산한 결과 15%로 나타났다.

이러한 결과를 바탕으로 교통량에 대한 카타고리는 다음과 같이 차로당의 AADT, 중차량 비율의 15% 초과 유무로 구분하였다. <표 3.8.16>과 같이 입력 변

수들에 따른 4S 포장의 종류를 나타내었다.

<표 3.8.15> 2005 도로 교통량 통계 연보(건교부)

구분	차로당 AADT	구간 수		중차량 비율
		개수	비율	
고속 국도	0-5000	49	0.14	0.26
	5000-10000	127	0.38	0.30
	10000-15000	76	0.22	0.31
	15000-20000	62	0.18	0.26
	20000 이상	24	0.07	0.26
	평균	338	1.00	0.29
일반 국도	0-5000	1288	0.78	0.10
	5000-10000	307	0.19	0.09
	10000-15000	50	0.03	0.08
	15000-20000	9	0.01	0.10
	20000 이상	0	0.00	0.00
	평균	1654	1.00	0.10
지방도	0-5000	972	0.89	0.18
	5000-10000	93	0.09	0.16
	10000-15000	21	0.02	0.15
	15000-20000	3	0.00	0.17
	20000 이상	0	0.00	0.09
	평균	1089	1.00	0.18

<표 3.8.16> 교통 조건에 따른 4S 포장의 두께 및 조합

구분	Ⅰ-1	Ⅰ-2	Ⅱ-1	Ⅱ-2	Ⅲ-1	Ⅲ-2
중차량 비율 15 %	이하	이상	이하	이상	이하	이상
교통량/일	5,000대 미만		5,000대 ~ 10,000대 이하		10,000대 이상	

다. 4S 포장의 카달로그 단면 제안

위의 입력 변수들에 따른 4S 포장의 두께 및 조합을 <표 3.8.17>과 같이 카달로그 식 포장 두께를 제안하였다. 보다 설계의 정확한 높이기 위해서는 현장의 데이터나 포장가속시험기 등의 데이터를 이용하여 검증을 필요하다. 과제가 종료되더라도 추적 조사를 통해서 이를 보완할 계획이다.

7. 요약

본 연구를 통해서 다음과 같은 내용을 알 수 있었다.

■ 국내외에서 개발 중인 역학적 경험적 설계법에 대한 기본 로직 및 설계 프로세스를 검토하였다. 역학적 경험적 설계 방법은 입력 변수들의 정량화를 통해 구조해석을 수행하고 그 결과를 통해 공용성을 예측하는 과정을 통해 이뤄진다. 여기서 가장 중요한 개념이 누적 손상 개념으로 포장의 손상은 계속 누적되어 공용 중에 계속 합쳐져서 나타나게 된다.

■ 역학적 경험적 설계법에 사용되는 세부 모듈들에 대하여 살펴보았고 이를 바탕으로 4S 포장의 설계 방법과의 연관성을 고찰하였다. 입력 변수로는 재료 물성, 환경 하중, 교통 하중 등이 있으며 이를 바탕으로 구조해석을 통해 포장체의 거동을 분석하고 그 결과를 통해 아스팔트 표층 러팅과 균열, CTB 기층의 균열을 예측하게 된다.

■ 4S 포장의 설계 프로세스를 정립하여 입력 변수에 따른 카달로그 단면을 할 예정이다. 기준은 설계 지역의 온도 및 강수량에 따른 가중치, 교통량 및 중차량 유무, 노상 및 보조기층의 탄성계수, 재료 조건 등에 따라 이를 정리하는 표를 제안하였다.

■ 카달로그 단면 설계를 완성하기 위하여 향후 시험시공 구간에서 추적조사를 지속적으로 진행하여 4S 단면 설계의 정확성을 높이도록 한다.

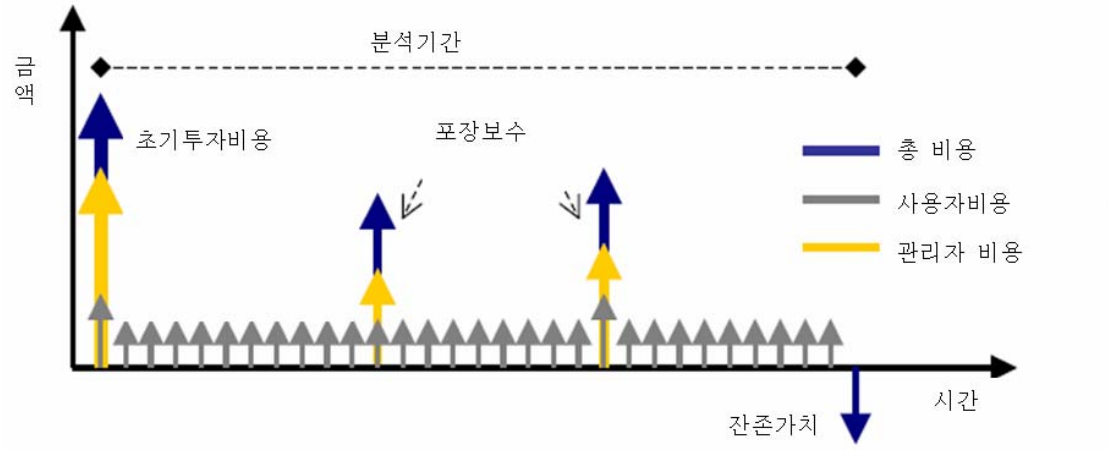
<표 3.8.17> 4S 포장의 카달로그 단면 설계 예시

설계 예	교통량											
		Ⅰ-1		Ⅰ-2		Ⅱ-1		Ⅱ-2		Ⅲ-1		Ⅲ-2	
하부 재료	환경 영향												
	구분	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ	Ⅰ	Ⅱ
A	AP	5	5	10	5	10	10	10	5	10	5	10	10
	CTB	투수 10	투수 10	투수 10	불투수 15	투수 15	투수 15	투수 10	투수 20	불투수 15	투수 20	불투수 20	불투수 20
B	AP	5	5	10	5	10	10	10	5	10	5	10	10
	CTB	투수 10	투수 10	투수 10	투수 15	투수 15	투수 15	불투수 10	투수 20	불투수 15	불투수 20	불투수 20	불투수 20
C	AP	10	5	10	10	10	10	10	5	10	5	10	10
	CTB	투수 10	투수 15	불투수 15	불투수 15	투수 15	투수 15	불투수 15	불투수 20	불투수 15	불투수 20	불투수 20	불투수 20

9 절 경제성 평가

본 절에서는 4S포장과 비교대안으로 기존 아스팔트 포장의 공법과의 비교를 통해 경제성 분석을 수행하였다. 과거 결정 방법에서는 초기투자비용만을 고려하여 시공하는 경향이 있었다. 그렇지만 포장은 초기단계의 비용보다는 주위 환경이나 교통량에 따라 유지비용이 2~5배에 이르는 경우도 있다. 선진국을 비롯한 다수의 건전한 도로 관리 기관에서는 도로의 수명을 고려하여 초기비용과 유지보수비용을 합한 금액으로 경제적 타당성을 검증하는 절차가 수립되어 있다. 비록 초기 투자비가 크더라도 적은 유지관리 비용으로 인하여 더 경제적인 공법이 있다면 이를 시행해야 한다는 뜻이다.

기본적으로 생애주기비용(LCC, Life Cycle Cost)은 제품의 생산, 사용, 폐기·처분 등의 각 단계에서 발생하는 모든 비용의 합산 금액을 말한다. 도로에서의 LCC 분석은 초기 건설비용과 유지보수, 재시공, 해체 및 폐기비용을 모두 포함한다는 것이다. <그림 3.9.1>에서 보듯이 생애주기비용 분석(LCCA-Life Cycle Cost Analysis)이란 생애 주기 동안 공통항목을 제외한 모든 비용을 각 대안별로 비교·분석하여 가장 경제적인 대안을 선택하게 하는 것이다. 생애주기 비용에 포함되는 금액으로는 <표 3.9.1>과 같다. 기획설계비, 감리비는 같은 구간에 대하여 포장형식만 다르므로 같다고 가정하였다. 또한 일반관리비용도 같다고 가정하였으며, 나머지 비용에 대하여 비교하였다.



<그림 3.9.1> LCC(Life Cycle Cost)의 개념(Kaan Ozbay, 2003)

<표 3.9.1> 생애주기를 고려한 비용 구성

항 목	세 부 항 목	
초기투자비용	기획설계비	
	건설비	
	감리비	
유지관리비용	관리자비용	일반관리비용
		유지보수비용
	사용자비용	차량운행비용
		운행지연비용
		교통사고비용
해체・폐기비용 잔존가치	해체비용	
	폐기처분비용	
	재활용 비용	
	잔존가치	

1. 상황의 설정

10km 양방향 4차선 도로에 대하여 4S포장의 경제성 분석을 실시하였다. 시공되는 구간은 길어깨 폭이 1m, 중앙분리대가 있으며 차선폭은 3.5m로 시공하며 오르막길은 없는 고속도로이다. 또한 구간의 설계최고 속도는 100km/h이다.

보수 공사기간의 제한속도는 80km/h로 제한한다.

공사구간의 시간별 교통량은 <표 3.9.2>와 같이 고속도로 통계자료와 비슷할 것으로 예측되었으며, 공사 후 개통년의 AADT는 90,000대/일 이라고 한다. 중형트럭 및 대형버스의 비율은 각각 7%, 8%로 예측되었다. 년간 교통량 증가율은 2%로 예상된다.

<표 3.9.2> 공사구간의 시간에 따른 교통량 % (한국도로공사 고속도로 통계)

시간	교통량(%)	시간	교통량(%)
0~1	1.6	12~13	5.6
1~2	1.1	13~14	5.7
2~3	0.8	14~15	6.1
3~4	0.6	15~16	6.2
4~5	0.7	16~17	6.3
5~6	1.2	17~18	6.5
6~7	2.9	18~19	6.7
7~8	4.9	19~20	5.8
8~9	5.8	20~21	4.7
9~10	5.3	21~22	4.0
10~11	5.8	22~23	3.3
11~12	6.0	23~24	2.4

2. 분석기간 및 포장 설계 대안의 수립

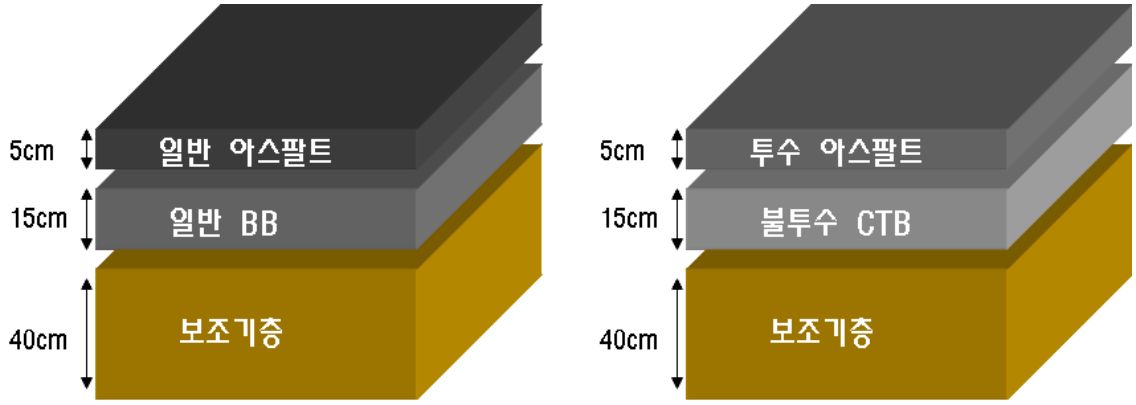
가. 분석기간

분석기간은 적어도 한 번이상의 재포장이 적용되는 시점을 포함해야 한다. <표 3.9.3>은 미국에서 예측하는 아스팔트 포장의 수명 및 덧씌우기 주기를 나타내고 있다. 나타내고 있다. 본 보고서에서는 분석기간을 40년으로 설정하며 콜로라도 DOT에서 채택한 10년 주기 표층 덧씌우기를 한다고 설정하여 분석하였다.

<표 3.9.3> 미국 각 주에서 예상하는 아스팔트 수명

구분	아스팔트	비 고
콜로라도DOT*	20	아스팔트 10년 주기 덧씌우기
위스콘신주**	12~14	-
미네소타주**	20	아스팔트12년 덧씌우기
켄 터 키 주**	12	-
뉴 욕**	10~13	-
FHWA(1985)**	6~20	-
서 버지니아주***	8	-

* : Colorado Dot(2005)
** : America Concrete Pavement Association(2002)
*** : West Virginia Department Of Transportation Division Of Highways Design Directive(2003)



<그림 3.9.2> 아스팔트 포장과 4S포장 단면 상세도

나. 대안의 설계

4S포장과 일반 아스팔트 포장을 대안으로 두고 비교한다. <그림 3.9.2>는 각 대안별 모습을 나타내고 있다. 일반 아스팔트 포장의 경우 구마선(대구~화원간) 고속도로와 같은 단면을 가지고 있다고 가정하였다.

시공비의 계산시 제잡비를 50%로 잡고 총 금액의 150%를 초기 공사비용으로 설정하였다. 가격의 산정은 건설교통부에서 6개월마다 발간하는 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가를 이용하여 산정하였다. 두 포장형식에 공통적으로 들어가는 공종인 보조기층 타설, 프라임 코팅 등에 관한 비용을 고려하지 않았다. 계산시에 사용된 아스팔트의 단위중량과 저수축 CTB의 단위중량은 2.4t/m^3을 적용하였다.

재료비에 포함된 가격은 공사현장 하차 포함가격을 적용하였다. <표 3.9.4>와 <표 3.9.5>는 공통적으로 들어가는 공정을 제외한 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 비용이다.

가격산정 시 투수 아스팔트 비용은 조달청 정부물자 가격정보를 이용하여 산정하였다. 저수축 CTB의 경우 일반 기층 레미콘의 비용에서 재료비에 더 추가되는 금액을 더하여 산정하였다. <표 3.9.6>은 도로공사에서 제시하는 배합표와 저수축 린의 배합을 비교한 표이다. <표 3.9.7>은 일반린과 저수축 CTB의 재료비를 비교한 값이다.

<표 3.9.4> 아스팔트 1km/lane 비용(폭 3.5m)

구분		가격(천원)	계산기준	계산과정	비고
일반 아스팔트 (5cm)	시공비	2,128	m^2당 608원	3.5m×1000m×608원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	18,858	톤당 44600원	3.5m×1000m×0.05m× 2.4ton×44900원	조달청 정부물자가격
일반BB층 (15cm)	시공비	4,235	m^2당 1210원	3.5m×1000m×1,210원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	49,140	톤당 39000원	3.5m×1000m×0.15m× 2.4ton×39000원	조달청 정부물자가격
계		74,361			

<표 3.9.5> 4S포장 1km/lane 비용(폭 3.5m)

구분		가격(천원)	계산기준	계산과정	비고
투수 아스팔트 (5cm)	시공비	2,128	m^2당 608원	3.5m×1000m×608원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	29,610	톤당 70,500원	3.5m×1000m×0.05m ×2.4ton×70500원	조달청 정부물자가격
불투수 CTB기층 (15cm)	시공비	23,223	m^2당 6,635원	3.5m×1000m×6635원	건설공사 실적공사비단가
	재료비	24,462	m^3당 42,880원(레미콘) +1,949,471원 (일반린과 차이)	3.5m×1000m×0.15m× ×42,880원+1,949,471원	조달청 정부물자가격
계		79,423			

<표 3.9.6> 한국도로공사에서 제시하는 배합표와 새로 개발된 저수축린의 배합($1m^3$기준)

구분	굵은골재 최대치수	시멘트	물	굵은골재	잔골재	플라이애쉬	팽창재
일반린	40	158	125	1397	730		
저수축린	40	113	120.4	1386	667	37.8	11.3

<표 3.9.7> 일반 린과 불투수 CTB 기층의 1km/lane 재료비

구 분		일반 린 콘크리트			불투수 CTB 기층		
항목	단위	수량	단가	금액	수량	단가	금액
시멘트	톤	83	64,240	5,331,920	60	64,240	3,854,400
굵은골재	m3	294	14,000	4,116,000	292	14,000	4,088,000
잔골재	m3	154	18,693	2,878,722	141	18,693	2,635,713
플라이애쉬	톤				20	19,000	380,000
팽창제	포				237	14,000	3,318,000
계		12,326,642			14,276,113		

보수비용의 산정에는 균열실링보수, 표면처리와 같은 공정은 4S 포장과 일반 아스팔트 포장이 유사할 것으로 가정하였다. 주요 보수 공정인 덧씌우기의 경우 일반 아스팔트 포장은 10년을 주기로 시행하는 것으로 분석하였다. 4S 포장은 하부 저수축 CTB가 파괴될 경우 CTB 재시공까지도 포함해야 하며, 덧씌우기 비용도 다소 높게 측정되었다. 4S 포장은 재시공 시점을 아직 판단할 수 없으므로 여러 가지 경우에 대하여 판단하였다. 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 보수에 대한 가격산정은 <표 3.9.8>과 같다. <표 3.9.9>는 폐기물 처리 조합에서 제공하는 해체 및 폐기비용이다 이 값을 이용하여 콘크리트와 아스팔트의 해체 비용을 산정하였다.

<표 3.9.8> 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 보수 가격 산정

구분			1km/lane 비용(천원) (3,500m^2)	계산 기준	비고
일반 아스팔트 보수공정	절삭 덧씌우기시	절삭 (5cm)	7,327	175m^3×2.4t/m^3× 17,443.77원	<표 3.9.9 참고>
		덧씌우기 (5cm)	20,986	재료비+시공비	<표 3.9.4> 참고
4S 포장 보수공정	절삭 덧씌우기시	절삭 (5cm)	7,327	175m^3×2.4t/m^3× 17,443.77원	<표 3.9.9 참고>
		덧씌우기 (5cm)	31,738	재료비+시공비	<표 3.9.4> 참고
	CTB 해체 및 재시공	절삭(5cm)	7,327	175m^3×2.4t/m^3× 17,443.77원	<표 3.9.9 참고>
		불투수 CTB 해체 (15cm×1,000m×3.5m)	20,029	525m^3×2.4t/m^3×1589 6.07원	<표 3.9.9 참고>
		불투수 CTB 및 아스팔트 재설치	79,423	재료비+시공비	<표 3.9.4> 참고

<표 3.9.9> 2005년 7월 29일 기준 해체비용 및 폐기 처분비용 (자료 : 폐기물처리 공제조합)

품 명	주요배출지	적 용 범 위	단위	최저가
폐콘크리트	콘크리트포장 도로,교량,옹벽	토목 구조물 해체시 발생하는 콘크리트 등의 성상으로서 이물질이 없는 순수한 폐콘크리트를 말한다.	TON	15,896.07
폐아스팔트 콘크리트	아스팔트 포장도로	이물질이 없는 포장도로에서 발생되는 순수한 폐아스팔트콘크리트를 말한다.	TON	17,443.77

해체 및 처리비용에 대하여 <표 3.9.9>의 값을 적용하였다. 4S포장의 경우 콘크리트를 하부구조에 사용하여 일반 아스팔트 포장보다 적은 금액으로 해체 및 처리가 가능하다. <표 3.9.10>은 1km/lane당 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 해체비용을 나타낸다.

<표 3.9.11>은 대안별 공사비용을 종합한 것이다. km/lane으로 계산된 결과를 10km와 4차선을 곱하여 값을 얻었다. 초기투자비 및 보수비에 관하여 제잡비 50%를 합친 가격으로 산정하였다. 해체비용은 이미 제잡비가 포함된 가격이기 때문에 100%값으로 계산하였다. 보수로 인한 차량 통제의 경우 4S포장은 일반 아스팔트포장의 보수에 비하여 CTB 해체작업이 포함될 경우 2시간을 더 통제하는 것으로 설정하였으며 일반 덧씌우기 경우에는 작업시간은 같다.

<표 3.9.10> 1km/lane 일반 아스팔트 포장과 4S 포장 해체비용

구 분		해체비용(천원)	계산과정
일반 아스팔트 포장		29,306	0.20m×1000m×3.5m×2.4t/m3×17,443.77원
4S 포장	투수AP	7,327	0.05m×1000m×3.5m×2.4t/m3×17,443.77원
	CTB	20,030	0.15m×1000m×3.5m×2.4t/m3×15,896.07원
	계	27,357	

<표 3.9.11> 대안별 공사 세부사항

구 분	일반 아스팔트 포장	4S 포장
초기투자비(천원)	4,461,660	4,765,380
보수비용(천원)	1,552,240	단순 덧씌우기시 : 2,197,360 CTB교체시 : 5,859,620
보수시기(년)	10, 20, 30	케이스별로 판단
보수로 인한 차량통제	한차선 0~7시 사이 4일간 1차선 차량 통제	CTB까지 교체시 : 한차선 0~9시 사이 4일간 1차선 차량 통제
해체 및 처리비용 (천원)	1,172,240	1,094,280

3. 기관 비용 및 사용자 비용의 산정

기관 비용이란 도로의 설계 및 시공, 관리에 기관이 소요하는 금액을 가리킨다. 사용자비용은 도로를 사용하는 사용자가 지출하는 금액을 말하며, 보수 및 재시공시과 같은 평상시와 다른 상태에서 발생하는 추가적인 비용을 뜻한다.

가. 도로용량 선정

도로용량은 크게 평상시 도로 용량, 지체시 도로용량, 공사시 도로용량으로 나눌 수 있다.

평상시 도로용량의 경우 도로용량편람을 바탕으로 계산하였다. <표 3.9.12>는 서비스 수준별 이상적인 조건일 때의 용량을 나타낸다. 100kph에서의 용량은 2,200pcphpl으로 나타났다. 실제 서비스 교통량은 <식 3.9.1>과 같이 계산할 수 있다.

$$SF_i = MSF_i \times N \times f_W \times f_{HV} \qquad \text{<식 3.9.1>}$$

여기서, SF_i = 서비스수준 i에서 주어진 도로 및 교통 조건에 대한 서비스 교통량(vph)

N = 편도 차로 수

f_W = 차로폭 및 측방여유폭 보정계수

f_{HV} = 중차량 보정계수

<표 3.9.12> 서비스 수준별 교통량(도로용량 편람, 건설교통부)

서비스 수준	밀도 (pcpkmpl)	설계 속도 120 kph		설계 속도 100 kph		설계 속도 80 kph	
		교통량 (pcphpl)	v/c비	교통량 (pcphpl)	v/c비	교통량 (pcphpl)	v/c비
A	≤6	≤700	≤0.3	≤600	≤0.27	≤500	≤0.25
B	≤10	≤1,150	≤0.5	≤1,000	≤0.45	≤800	≤0.40
C	≤14	≤1,500	≤0.65	≤1,350	≤0.61	≤1,150	≤0.58
D	≤19	≤1,900	≤0.83	≤1,750	≤0.8	≤1,500	≤0.75
E	≤28	≤2,300	≤1.00	≤2,200	≤1.00	≤2,000	≤1.00
F	>28	-	-	-	-	-	-

차로폭 및 측방여유폭 보정계수는 <표 3.9.13>에서 계수를 읽어서 산정한다. 길어깨 폭이 1,0m이고 차로폭이 3.5m이며 한쪽에만 장애물이 있는 경우이기 때문에 이 문제에서는 0.98이 보정계수로 사용된다.

중차량 보정계수는 <표 3.9.14>를 사용하여 산정한다. 설계도로는 평지이며 오르막 차로가 없으며 중형차 비율이 버스 7%, 트럭 8%이기 때문에 승용차 환산계수(E)를 1.5를 적용하여 계산한다.

<표 3.9.13> 고속도로 기본 구간의 차로폭 및 측방여유폭 보정계수

장애물까지의 거리(m)	한쪽에만 장애물이 있을 때[1]				양쪽에 장애물이 있을 때[2]			
	차로폭(m)							
	3.5 이상	3.25	3.00	2.75	3.5 이상	3.25	3.00	2.75
	4차로(편도 2차로) 고속도로							
1.5 이상	1.00	0.96	0.90	0.80	0.99	0.96	0.90	0.80
1.0	0.98	0.95	0.89	0.79	0.96	0.93	0.87	0.77
0.5	0.97	0.94	0.88	0.79	0.94	0.91	0.86	0.76
0.0	0.90	0.87	0.82	0.73	0.81	0.79	0.74	0.66
	6차로 이상(편도 3차로 이상)인 고속도로							
1.5 이상	1.00	0.95	0.88	0.77	0.99	0.95	0.88	0.77
1.0	0.98	0.94	0.87	0.76	0.97	0.93	0.86	0.76
0.5	0.97	0.93	0.87	0.76	0.96	0.92	0.85	0.75
0.0	0.94	0.91	0.85	0.74	0.91	0.87	0.81	0.70

주1) 일반적으로 콘크리트 방호벽 형태의 중앙분리대가 설치된 대부분의 (고속)도로가 해당된다.

주2) 콘크리트 방호벽 형태 이외의 중앙분리대가 설치된 경우 또는 중앙분리대가 설치되지 않은 경우(중앙선 표시)에 적용한다. 중앙선이 복선 또는 이격 설치된 경우는 대향 교통류도 장애물로 간주할 수 있으므로, 좌측의 측방여유폭은 중앙선의 중심선에서부터 차로의 포장단까지로 하며 좌측과 우측의 측방여유폭을 평균하여 구한다.

<표 3.9.14> 일반지형에서 중차량의 승용차 환산계수(도로 용량 편람)

지 형 / 차종 구분	평 지	구 릉 지	산 지
소 형(E_{T_0}) (2.5톤 미만 트럭, 16인승 미만 승합차)	1.0	1.2	1.5
중 형(E_{T_1}) (2.5톤 이상 트럭, 16인승 이상 버스)	1.5	3.0	5.0
대 형(E_{T_2}) (세미 트레일러 또는 풀 트레일러)	2.0		

<표 3.9.15> 공사시 평균 차선 용량 (James Walls III, 1998)

방향별 차선수		연구결과 건수	평균 용량	
정상시 운행	공사시 운행		Vehicles/hour	Vehicles/lane/hour
3	1	7	1,170	1,170
2	1	8	1,340	1,340
5	2	8	2,740	1,370
4	2	4	2,960	1,480
3	2	9	2,980	1,490
4	3	4	4,560	1,520

$$f_{HV} = \frac{1}{1 + P_{T_0}(E_{T_0} - 1) + P_{T_1}(E_{T_1} - 1) + P_{T_2}(E_{T_2} - 1)} \qquad <식\ 3.9.2>$$

<식 3.9.2>로 계산한 결과 중차량보정계수(f_{HV})는 0.930로 나타났다. 2200vphpl의 용량에 차로폭 및 측방여유폭 보정계수와 중차량 계수를 곱하여 도로용량을 구하면 2005vphpl이다.

지체시 도로용량은 <표 3.9.15>를 참고하여 정상시 운행이 2차선이며 공사시 운행이 1차선일때의 평균용량인 1,340vphpl을 적용하였다. 지체시 도로용량은 HCM에서 제시한 1,818vphpl을 사용하였다.

나. 일반 아스팔트 포장의 비용의 산정

(1) 기관 비용의 산정

<표 3.9.16>은 일반 아스팔트 포장의 기관비용을 나타내고 있다. 시공비용 및 보수비용은 공사시에 제시된 금액을 이용하여 산정하였다.

<표 3.9.16> 일반 아스팔트 포장의 기관비용 계산

구 분	시기(년)	비 용(천원)
초기 시공 비용	0	4,461,660
보수비용 1	10	1,552,240
보수비용 2	20	1,552,240
보수비용 3	30	1,552,240
처리비용	40	1,172,240

(2) 사용자 비용의 산정(아스팔트 포장 20년째 보수시점의 예)

사용자 비용은 보수 공사시 도로이용자가 평소 지불하는 비용에서 추가되는 비용이다. 여기에는 공사중 속도변화로 추가되는 시간가치와 VOC(Vehicle Operation Costs)의 변화를 토대로 계산을 하게 된다. 여기에서는 일반 아스팔트 포장에서 20년째에 보수를 실시하였을 때의 사용자 비용의 계산 방법을 설명하였다.

(가) 운행 지연 비용(건설교통부, 2004) 산정

전체적인 내용은 건설교통부에서 발간한 '공공교통시설 개발사업에 관한 투자평가지침'의 절차를 따른다.

공사로 인한 통행시간 지연은 그만큼의 비용을 낭비하게 된다. 통행시간의 가치는 통행 목적이 업무적이나 비업무적에 따라 그 시간 가치가 변하게 된다. 업무적일 경우 지연시간으로 인한 생산 활동의 감소를 계산해야 하며, 비업무적일 경우 여가활동에 관련된 시간의 감소를 가져오게 된다. 따라서 시간에 대한 계산을 해야 한다.

시간에 대한 가치 산정시 통행량 중 1/4정도를 업무통행으로 가정하였다. 업무통행에 관한 시간가치는 차량 탑승자 인건비를 기준으로 하여 임금율법으로 산정하였다. 급여 외에 복리후생비, 연금, 퇴직금충당금, 보험금 등의 오버헤드(overhead) 부분을 포함하고 월 평균 근로시간으로 나누어 산출하였다. 오버헤드 부분은 건설교통부의 "공공교통시설 개발 사업에 관한 투자평가지침"에 나온 내용을 인용하였다. 해당구간의 교통량을 이용하여 1인당 시간가치에 평균 재차인원을 곱하여 총 지연시간 비용을 산정하게 된다. 산정 시 비업무와 업무목적 통행을 고려하여 계산한다.

임금계산은 통계청 통계정보시스템(http://kosis.nso.go.kr/)을 사용하여 산정하였다. 승용차 탑승자의 임금은 2005년 비농 전체산업 임금을 기준으로 산정하였으며 버스 운전자의 임금은 시내버스, 마을버스, 시외버스, 고속버스, 전세버스에 대하여 임금 급여액에 종사자수를 나눈 값을 기준으로 계산하였다. 트럭운전자의 임금은 일반화물자동차 운송업, 택배화물 운송업에 대하여 임금 급여액에 종사자수르 나눈 값으로 계산하였다. 전세버스 및 용달 화물 자동차의 경우 종일 근무가 아닌 임시 근무의 개념이 강하기 때문에 이는 제외하고 산정하였다.

월 평균 근무시간은 승용차 운전자의 경우 전체산업의 평균 주간 근무시간을 이용하여 달로 환산하여 계산하였으며, 버스 및 트럭운전자의 경우 운수, 창고 및 통신업 근무시간을 적용하여 이를 환산하였다. 그렇지만 버스 및 트럭운전자의 경우 2005년에 대한 임금 및 근로자수의 통계가 이루어지지 않아 2004년 기준으로 적용하였다. 임금에 대한 오버헤드 비율은 건교부 투자평가 지침에서 인용하였다. <표 3.9.17>은 위의 절차를 따라서 산정한 승용차 운전자, 버스 운전자, 트럭운전자의 시간당 임금을 나타낸 값이다.

<표 3.9.18>은 승용차와 버스의 통행 시간가치를 산정한 표이다. 비업무 통행의 시간가치는 획일적으로 국내에서는 승용차의 경우 업무 시간가치의 1/3을 적용하고 있다. 이에 대한 연구가 많이 진행되지 않아 본 보고서에도 같은 값을 적용한다. 외국의 경우도 1/3정도가 합리적이라고 판단하고 있다. 승용차의 경우 비업무통행의 시간가치는 업무통행 시간가치의 33.3%를 적용한다. 버스의 경우 20.1%를 적용하였다. 승용차의 경우 업무통행시의 재차인원은 18세 미만을 제외한 재차인원을 적용하고 버스의 경우 재차인원의 통행목적은 업무통행과 비업무통행의 비율을 16.4 : 83.6로 적용하였다. 버스 승객중 업무목적인 경우는 평균 임금에 의한 승용차 운전자의 시간가치를, 비업무 목적은 비업무 통행의 시간가치를 적용하여 산출하였다. (한국개발연구원, 2001)

<표 3.9.17> 임금율법에 의한 업무통행의 시간가치 산출결과(2005년, 2004년 기준)

구 분	승용차 운전자	버스 운전자	트럭 운전자
1인당 월 평균 급여액(원/월)	2,524,917	1,956,324	1,804,688
근로시간(시간/월)	198.58	205.53	205.53
시간당 임금(원/인・시간)	12,714	9,518	8,781
임금에 대한 오버헤드 비율(%)	29.9	26.7	36.3
시간가치(원/인・시)	16,516	12,059	11,969

<표 3.9.18> 승용차와 버스의 통행 시간가치

(한국개발연구원(2001)의 자료를 이용하여 2004년 가치로 환산함)

구 분	승 용 차		버 스		
	업 무	비업무	운전사	업무	비업무
재차인원(인)	0.39	1.61	1	2.6	18.40
통행목적비율	19.5%	80.5%	16.4%		83.6%
시간가치(원/인·시)	16,516	5,505	12,059	16,516	2,424
평균시간가치(원/대·시)	6,441	8,863	99,599		
평균시간가치(원/대)	15,304		99,599		

(나) 교통량 계산

<표 3.9.19>는 20년째 보수시점의 1~5시 동안 한 차선을 막고 보수공사를 할 시점의 시간에 따른 교통량과 정체 교통량을 나타내고 있다.

① 교통량

교통량은 공사 시작년의 AADT를 바탕으로 <식 3.9.3>과 같이 계산한다. 교통량이 양방향 90,000(대)이므로 한방향으로 45,000대를 적용하여 계산한다. 보수시점의 AADT를 구한 후 시간대별 %에 따라 교통량을 각각 계산해 준다. 공사 시작년의 AADT가 보수시점의 AADT는 45,000(대)×$(1.02)^{20}$으로 계산하여 66,868(대)를 얻는다. 이 값을 AADT%에 따라서 배분하게 된다. 예를 들어 23~24시의 교통량은 <표 3.9.19>의 시간별 분포를 이용하여 1605대(66,868×2.4%=1,605)로 산정된다.

$$\text{보수시점의 AADT} = \text{한방향 AADT} \times (1+\text{교통량 증가율})^{\text{보수시점년}} \quad \text{<식 3.9.3>}$$

② 도로용량

도로용량은 공사와 정체의 경우에는 HCM을 바탕으로 구한 값을 적용하며, 평상시의 교통용량은 도로교통용량편람으로 계산한 용량을 적용한다. 예에서는 평상시 교통량은 한 차선당 2005 vphpl이며, 지체시 도로용량과 공사시 도로용량은 각각 1818vphpl, 1340vphpl로 구하였다.

<표 3.9.19> 일반 아스팔트 포장 20년째 보수시점의 시간당 교통량 정리

시간당 교통량 및 공사시간 유무 판단						교통량 변화					도로상태정의
시간	공사 유무	시간당 교통량 및 도로용량(vph)				④ 정체 추가 교통량	교통량				
		% AADT	① 교통량	② 도로 용량	③ 정체 교통량		⑤ 공사 구간 통과	⑥ 정체 구간 통과	⑦ 정체 경험 교통량	⑧ 공사 속도 통과	
0-1	공사중	1.6%	1,070	1,340	(270)	0	1070	0	0	1070	공사중,비정체
1-2	공사중	1.1%	736	1,340	(604)	0	736	0	0	736	공사중,비정체
2-3	공사중	0.8%	535	1,340	(805)	0	535	0	0	535	공사중,비정체
3-4	공사중	0.6%	401	1,340	(939)	0	401	0	0	401	공사중,비정체
4-5	공사중	0.7%	468	1,340	(872)	0	468	0	0	468	공사중,비정체
5-6	공사중	1.2%	802	1,340	(538)	0	802	0	0	802	공사중,비정체
6-7	공사중	2.9%	1,939	1,340	599	599	1340	1340	1939	0	공사중, 정체
7-8	비공사	4.9%	3,277	3,636	(359)	240	0	3636	3277	0	비공사중, 정체
8-9	비공사	5.8%	3,878	3,636	242	482	0	3636	3878	0	비공사중, 정체
9-10	비공사	5.3%	3,544	3,636	(92)	390	0	3636	3544	0	비공사중, 정체
10-11	비공사	5.8%	3,878	3,636	242	632	0	3636	3878	0	비공사중, 정체
11-12	비공사	6.0%	4,012	3,636	376	1008	0	3636	4012	0	비공사중, 정체
12-13	비공사	5.6%	3,745	3,636	109	1117	0	3636	3745	0	비공사중, 정체
13-14	비공사	5.7%	3,811	3,636	175	1292	0	3636	3811	0	비공사중, 정체
14-15	비공사	6.1%	4,079	3,636	443	1735	0	3636	4079	0	비공사중, 정체
15-16	비공사	6.2%	4,146	3,636	510	2245	0	3636	4146	0	비공사중, 정체
16-17	비공사	6.3%	4,213	3,636	577	2822	0	3636	4213	0	비공사중, 정체
17-18	비공사	6.5%	4,346	3,636	710	3532	0	3636	4346	0	비공사중, 정체
18-19	비공사	6.7%	4,480	3,636	844	4376	0	3636	4480	0	비공사중, 정체
19-20	비공사	5.8%	3,878	3,636	242	4619	0	3636	3878	0	비공사중, 정체
20-21	비공사	4.7%	3,143	3,636	(493)	4125	0	3636	3143	0	비공사중, 정체
21-22	비공사	4.0%	2,675	3,636	(961)	3164	0	3636	2675	0	비공사중, 정체
22-23	비공사	3.3%	2,207	3,636	(1,429)	1735	0	3636	2207	0	비공사중, 정체
23-24	비공사	2.4%	1,605	3,636	(2,031)	0	0	3105	1371	0	비공사중, 부분정체

( ) : 음수

③ 정체교통량

정체교통량은 교통량에서 도로용량을 빼준 값이다. 예를 들어 12~13시간대의 정체교통량의 경우 3,745대에서 3,636대를 빼주어 109대의 값을 계산하였다.

④ 정체추가교통량

정체추가교통량은 계산되는 시간대에서 추가적으로 정체가 발생하는 교통량이다. 즉, 교통량이 도로용량보다 커질 때 발생하는 교통량으로써 <식 3.9.4>로 계산한다. 16~17시의 경우 기존의 15~16시의 정체추가 교통량인 2,822대에 16~17시간대의 710대를 합하여 3,532대로 계산한다.

정체추가교통량 = 기존 정체추가차량숫자+정체교통량 <식 3.9.4>

⑤ 공사구간통과

공사구간 통과 교통량은 공사를 시행하는 시간대의 경우 그 시간대에 공사구간을 통과하는 교통량을 뜻한다. 용량보다 적은 교통량일 경우 교통량 전체가 통과하며, 용량보다 큰 교통량일 경우 그 시간대의 도로의 용량만큼 공사구간을 지나가게 된다.

⑥ 정체구간통과

정체구간 통과 교통량은 그 시간대에 정체가 발생한 경우 그 도로를 통과하는 교통량을 뜻한다. 11~12시의 경우 정체가 발생하였으며, 그 시간대의 도로용량이 3636vph이므로 3636대로 계산된다. 정체가 풀리는 시간대인 23~24의 경우 기존의 정체가 풀릴 때까지 영향을 받는 차량의 숫자로 계산한다. 기존에 정체되어 있는 차량의 숫자가 1735대이며, 이 차량의 정체가 풀리는데 걸리는 시간은 1735/2031시간이다. 즉 0.854시간 후에는 모든 정체구간이 풀리게 되는데 이 시기에 다가오는 교통량은 <식 3.9.5>에 의하여 총 1371대이며 이 차량들이 정체 영향을 받게 된다. 1371대에 기존의 정체되어 있는 교통량 1735대를 합하여 3105대가 정체구간 통과 교통량으로 산정된다.

1735/2031×1605=1371 <식 3.9.5>

⑦ 정체 경험 교통량

정체 경험 교통량은 그 시간대에 한번이상 기존 속도에서 속도를 떨어뜨려 멈추는 경우가 발생한 경우를 뜻한다. 즉, 기존에 80km/h로 달리다가 정체구간을 만나

면 0km/h로 떨어뜨리게 되는데 그런 차량의 숫자를 뜻한다. 이 값은 정체구간이 발생하였을 때의 교통량으로 산정된다.

⑧ 공사속도 통과 교통량

공사속도로 통과하는 교통량의 산정 경우, 공사를 할 경우 정체가 되지 않을 때의 통과하는 교통량을 뜻한다.

(다) 공사 중 공사구간을 통과하는 차량을 대상으로 한 사용자 비용 계산

<표 3.9.20>은 공사 중 공사구간에서 정체를 경험하지 않고 공사제한 속도인 80km/h로 공사구간을 통과하는 차량에 대하여 계산한 결과이다.

① 공사 구간 속도 감소로 인한 추가시간

평상시 속도인 100km/h로 가지 못하고 80km/h로 속도로 공사구간을 통과할 때 추가되는 시간에 따른 비용을 나타낸 값이다. 지체시간은 <식 3.9.6>에 의해 구하며 추가되는 시간에 교통량과 차량 1대의 시간가치를 곱하여 계산한다. 예를 들어 0~1사이의 승용차 교통량의 경우 <식 3.9.7>과 같이 구한다.

$$\frac{\text{공사거리}}{\text{평상시속도}} - \frac{\text{공사거리}}{\text{공사중속도}} = \frac{10}{80} - \frac{10}{100} = 0.025 \qquad \text{<식 3.9.6>}$$

0.025×1070(공사속도 통과 교통량)×0.85(승용차비율)×15,304(승용차 시간가치)

= 347,936(원) <식 3.9.7>

<표 3.9.20> 공사 중 공사구간 통과 차량의 사용자 비용

시간	①공사 구간 속도 감소로 인한 추가 시간				②VOC의 변화		
	지체시간(hr/v)	승용차 금액	트럭 금액	버스 금액	승용차금액	트럭금액	버스금액
0-1	0.0250	347,936	22409	213,118	-11,210	-5,624	-1,051
1-2	0.0250	239,206	15407	146,519	-7,707	-3,866	-722
2-3	0.0250	173,968	11205	106,559	-5,605	-2,812	-525
3-4	0.0250	130,476	8404	79,919	-4,204	-2,109	-394
4-5	0.0250	152,222	9804	93,239	-4,904	-2,460	-460
5-6	0.0250	260,952	16807	159,839	-8,408	-4,218	-788

② VOC(Vehicle Operation Cost)의 변화

- VOC 기본 계산

VOC의 변화를 계산하기 위하여 속도에 따른 차량 운행비용을 산정해야 한다. 차량운행비용의 산정은 건설교통부의 공공기관 투자기관 지침을 참고로 하여 작성하였다. 차량운행 비용의 변수로는 연료 소모량, 엔진오일 소모량, 타이어 소모량 등이 있으며 이를 총 합계로 나타낸다.

유류비는 건설교통부(2004)에서 도로부분의 투자평가 지침에서 사용된 자료인 국토 연구원의 도로사업 투자기법 정립을 사용하였다. 국토연구원에 의하면 고속도로에서 실측한 연료비와 속도는 <식 3.9.8>과 같은 관계식을 갖는 것으로 분석한다.

승 용 차 : $L_c = 0.02882+0.910/V+0.000003828\times V^2$

소형버스 : $L_{sb} = 0.03336+1.153/V+0.000004312\times V^2$

대형버스 : $L_{lb} = 0.02476+3.492/V+0.00001277\times V^2$

소(중)형트럭 : $L_{st} = 0.01695+1.292/V+0.00001647\times V^2$

대형트럭 : $L_{lt} = 0.06639+4.158/V+0.00002525\times V^2$ <식 3.9.8>

여기서, V=차량속도(km/h)

유류비는 국토 연구원에서 조사한 차종별 속도별로 연비측정실험에 의한 결과치(km/ℓ)와 유류실질 가격을 곱하여 산정한다. <표 3.9.21>은 계산시 필요한 유류비 가격이다.

유류비는 현재의 값으로 산정(2006. 6)하였으며 엔진오일비, 타이어비, 유지관리비, 감가상각비는 건설교통부의 공공기관 투자지침에서 근거자료로 활용하는 자료가 1999년 자료이므로, 2000년부터 2005년까지의 물가 상승비율을 고려하여 20.46%만큼 더해 준다.

<표 3.9.21> 유류비 세전 공장도 가격(2006. 6월 현재) (대한석유협회, 2006)

구 분	휘발유	경 유	LPG
유류실질가격(원/ℓ)	1540.41	1247.53	630.99

승용차는 휘발유 가격을 적용하고, 그 외 차량은 경유가격을 적용하여 계산한다. 현재 가정한 도로 상황이 승용차, 중형트럭, 대형버스로 구성되어있다고 가정하였으므로, 3가지 경우에 대하여 계산하였다. <표 3.9.22>~<표 3.9.24>는 각각에 대하여 계산한 값이다.

<표 3.9.22> 승용차의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	
승용차	10	185.162	6.260	7.541	0.430	0.518	7.230	8.709	150.350	181.114	383.044
	20	116.842	5.210	6.276	0.790	0.952	8.540	10.287	128.140	154.360	288.717
	30	96.427	4.520	5.445	1.220	1.470	10.120	12.191	109.350	131.725	247.258
	40	88.874	3.820	4.602	1.770	2.132	10.510	12.661	92.260	111.138	219.406
	50	87.172	3.820	4.602	2.260	2.722	11.830	14.251	78.590	94.671	203.417
	60	88.986	3.820	4.602	2.870	3.457	12.490	15.046	70.900	85.407	197.497
	70	93.314	3.820	4.602	3.540	4.264	13.140	15.829	64.920	78.204	196.212
	80	99.656	3.480	4.192	4.270	5.144	14.460	17.419	58.090	69.976	196.386
	90	107.733	3.130	3.770	5.190	6.252	14.850	17.889	53.820	64.832	200.477
	100	117.379	3.820	4.602	6.170	7.432	15.770	18.997	50.060	60.303	208.713
	110	128.488	4.870	5.866	7.510	9.047	17.480	21.057	45.790	55.159	219.617
	120	140.988	7.300	8.794	8.920	10.745	19.060	22.960	40.490	48.775	232.262

<표 3.9.23> 대형버스의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	
대형버스	10	468.119	12.450	14.997	0.880	1.060	11.280	13.588	521.710	628.461	1126.226
	20	255.080	10.630	12.805	1.420	1.711	12.940	15.588	454.400	547.378	832.561
	30	190.439	9.080	10.938	2.080	2.506	14.430	17.383	370.250	446.009	667.275
	40	165.288	8.300	9.998	2.900	3.493	14.930	17.985	302.930	364.915	561.679
	50	157.844	7.520	9.059	3.880	4.674	17.080	20.575	257.490	310.177	502.328
	60	160.847	7.000	8.432	5.030	6.059	19.070	22.972	227.200	273.689	471.999
	70	171.184	6.480	7.806	6.350	7.649	19.900	23.972	207.000	249.356	459.967
	80	187.302	5.960	7.180	8.100	9.757	23.220	27.971	185.120	222.999	455.208
	90	208.334	6.740	8.119	10.120	12.191	25.370	30.561	163.250	196.654	455.858
	100	233.762	8.040	9.685	12.530	15.094	27.030	32.561	146.420	176.380	467.482
	110	263.257	9.850	11.865	15.210	18.322	28.690	34.560	132.950	160.154	488.159

<표 3.9.24> 중형트럭의 속도별 운행비용 산정 (단위 : 원/km)

구분	속도	유류비	엔진오일비		타이어비		유지관리비		감각상각비		2006년 합계
		2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	1999년	2006년	
중	10	184.381	9.240	11.131	1.890	2.277	22.130	26.658	173.780	209.338	433.785
	20	109.955	8.350	10.059	2.990	3.602	23.580	28.405	147.040	177.127	329.147
	30	93.365	7.450	8.974	4.250	5.120	25.030	30.152	129.220	155.661	293.271
형	40	94.316	6.560	7.902	5.820	7.011	26.610	32.055	109.170	131.508	272.792
	50	104.749	5.960	7.180	7.710	9.288	29.390	35.404	95.800	115.402	272.022
	60	121.978	5.370	6.469	9.590	11.552	31.440	37.873	85.770	103.320	281.192
트	70	144.851	5.070	6.107	11.640	14.022	35.310	42.535	77.980	93.936	301.451
	80	172.793	4.470	5.385	14.470	17.431	38.700	46.619	71.290	85.877	328.104
	90	205.484	5.070	6.107	17.300	20.840	42.930	51.714	65.280	78.637	362.783
럭	100	242.732	5.670	6.830	20.760	25.008	45.960	55.364	60.820	73.265	403.199

<표 3.9.22>~<표 3.9.24>를 이용하여 3차항을 중심으로 회귀분석을 하여 속도와 km당 차량 운행비용에 대한 공식을 얻을 수 있다.

$$\text{km당 차량 운행비용} = A\times V^3+B\times V^2+C\times V+D \qquad \text{<식 3.9.9>}$$

여기서, V:차량속도, A, B, C, D는 파라메터

A, B, C, D의 각 차종별 계수는 <표 3.9.25>와 같다.

- 아스팔트 포장 20년째 보수공사의 VOC 계산

100km/h로 주행시와 80km/h로 주행시 연료비용을 각각 계산하여 공사구간인 10km를 지나는 데 추가되거나 감소되는 VOC의 금액을 구한다. 0~1시 사이 구간 중 승용차 VOC변화의 경우 <식 3.9.10>과 같이 구한다.

(196.386-208.713)×1070(공사속도 통과 교통량)×85%(승용차비율)=-11,210(원) <식 3.9.10>

<표 3.9.25> VOC 회귀식의 차종별 계수 값

구 분	A	B	C	D	R^2
승용차	-0.000433	0.120624	-10.206121	462.272736	0.982752
대형버스	-0.001798	0.456718	-37.218037	1434.256538	0.994624
중형트럭	-0.000772	0.197375	-13.437566	540.411261	0.984280

<표 3.9.26> 정체구간의 계산 결과

시간	①정체 시간당 계산 변수			②정체시 속도 감소로 인한 추가 비용 계산			③정체로 인한 VOC 추가금액		
	속도(km/h)	거리(km)	지체시간(hr/v)	승용차	트럭	버스	승용차 금액	트럭 금액	버스 금액
6-7	9.3	2.4	0.23437	4,085,290	263,121	2,502,327	446,163	7,492	88,213
7-8	35.5	6.0	0.10940	5,174,598	333,280	3,169,551	330,203	-184,964	-205,436
8-9	35.5	5.7	0.10302	4,872,497	313,822	2,984,508	310,925	-174,165	-193,442
9-10	35.5	6.5	0.11826	5,593,685	360,272	3,426,250	356,946	-199,944	-222,074
10-11	35.5	8.0	0.14593	6,902,146	444,545	4,227,710	440,442	-246,714	-274,021
11-12	35.5	13.2	0.23922	11,314,831	728,753	6,930,573	722,025	-404,444	-449,208
12-13	35.5	16.3	0.29714	14,054,300	905,193	8,608,556	896,837	-502,365	-557,968
13-14	35.5	18.7	0.34035	16,098,156	1,036,831	9,860,461	1,027,260	-575,422	-639,110
14-15	35.5	24.5	0.44625	21,107,069	1,359,440	12,928,526	1,346,890	-754,463	-837,968
15-16	35.5	32.6	0.59310	28,052,797	1,806,792	17,182,931	1,790,113	-1,002,735	-1,113,720
16-17	35.5	42.0	0.76335	36,105,411	2,325,436	22,115,327	2,303,968	-1,290,572	-1,433,415
17-18	35.5	53.8	0.97895	46,302,744	2,982,214	28,361,410	2,954,683	-1,655,072	-1,838,258
18-19	35.5	68.6	1.24670	58,967,320	3,797,899	36,118,730	3,762,838	-2,107,762	-2,341,052
19-20	35.5	70.6	1.28399	60,730,884	3,911,485	37,198,950	3,875,375	-2,170,799	-2,411,067
20-21	35.5	61.5	1.11895	52,924,752	3,408,716	32,417,529	3,377,248	-1,891,773	-2,101,157
21-22	35.5	48.1	0.87516	41,393,895	2,666,050	25,354,636	2,641,438	-1,479,607	-1,643,372
22-23	35.5	30.5	0.55391	26,199,036	1,687,397	16,047,464	1,671,820	-936,473	-1,040,124
23-24	35.5	10.0	0.18249	7,371,745	474,791	4,515,350	470,408	-263,500	-292,664

(라) 정체구간의 계산

<표 3.9.26>은 정체구간에 대하여 계산한 결과를 나타내고 있다. 예시에서 정체구간이 생기는 시간대는 11~24시이며, 이 시간대에 대하여 사용자 비용을 계산하였다. 다만 이시간대에 생기는 사용자 비용은 공사로 인한 사용자 비용이 아니라 평상시의 사용자 비용이므로 다음단계에서 제외하게 된다.

① 정체 시간당 계산 변수

정체 속도의 경우 HCM에 근거하여 용량 대 교통량으로 계산하게 된다. 평균속도와 V/C와의 관계를 통하여 얻은 추세선을 바탕으로 정체속도를 계산하였다. <식 3.9.11>은 계산에 사용된 V/C와 속도와의 관계를 구하는 추세선이다.

$$속도(km/h)=23.0512\times(V/C)+12.2896\times(V/C)^2+5.7392\times(V/C)^3 \quad <식\ 3.9.11>$$

여기서, V : Free Flow Capacity

C : 현재 상태의 교통 용량

<식 3.9.11>를 바탕으로 12~13시 구간의 속도를 구하기 위해 V에 4,010vph, C에 밀리기 시작할 때의 용량인 3,636vph를 대입하여 계산하면, 속도는 35.5km/h로 계산된다.

정체거리는 <식 3.9.12>를 이용하여 계산한다. 12~13시 구간의 정체거리계산을 예를 들었다.

$$정체거리=\frac{평균정체차량교통량(VHP)}{\frac{도로용량(VHP)}{정체속도(km/h)}-\frac{교통량(VHP)}{평상시속도(km/h)}}=\frac{(1117+1008)/2(vph)}{\frac{3636(vph)}{35.5(km/h)}-\frac{3745(vph)}{100(kn/h)}}=16.35(km)$$

<식 3.9.12>

정체시간은 정체거리를 평상시 속도로 지나갈 때에 비하여 추가되는 시간이다. 정체거리를 100km/h로 지나갈 때 걸리는 시간과 35.5km/h로 지나갈 때 걸리는 시간의 차이를 계산해 준다.

② 정체시 속도 감소로 인한 추가 비용 계산

정체시간을 바탕으로 정체시 추가비용을 계산하게 된다. 정체시간에 교통량과 시간가치를 곱하여 계산하게 된다. <표 3.9.27>은 승용차 금액 계산의 예를 들어주고 있다.

<표 3.9.27> 정체시 속도 감소로 인한 승용차 금액 계산 (예)

시간	정체속도 통과(대)	지체시간 (h/v)	승용차시간가치(원/대)	승용차금액	계산과정
22-23	3636	0.55391	15,304	26,199,036	3636(대)×0.85×15,304(원)×0.55391
23-24	3105	0.18249	15,304	7,371,745	3105(대)×0.85×15,304(원)×0.18249

③ 정체시 VOC의 추가 금액 계산

정체로 인하여 정체 속도로 정체거리를 가는데 추가되는 VOC비용을 구한다. <표 3.9.25>에서 제시한 추세식을 적용하여 승용차, 트럭, 버스의 경우에 대한 평상시 속도와 정체속도에 대한 VOC를 구한다. 구해진 VOC의 차이에 정체거리와 교통량을 곱하여 계산한다.

<식 3.9.13>은 22~23시의 정체로 인한 승용차 VOC의 추가금액을 계산하는 식이다.

$((-0.000433\times35.5^3+0.120624\times35.5^2-10.206121\times35.5+462.272736)-(-0.000433\times100^3+0.120624\times100^2-10.206121\times100+462.272736))\times3,636(대)\times10(km)\times0.85=1,671,820(원)$

<식 3.9.13>

(마) 일반 아스팔트 포장의 20년째 사용자 추가 비용 계산 종합

기존의 단계를 거쳐서 구한 정체시와 공사시의 금액을 합하여 공사시 사용자 비용을 구하게 된다. 그리고 공사가 없는 평상시 사용자 비용을 위의 절차와 같은 방법으로 계산한다. 계산 후 공사가 있을 때와 없을 때의 사용자비용을 차감해줘서 공사로 인하여 추가되는 사용자 비용을 계산하게 된다. <표 3.9.28>는 보수공사로 인한 사용자 추가 비용을 계산한 결과이다. 20년째 보수공사로 인하여 추가되는 사용자 비용은 1,282,789,871원이 된다.

<표 3.9.28> 20년째의 보수공사로 인한 사용자 추가 비용 계산 결과

시간	공사시 사용자 추가 비용			평상시 사용자 추가 비용			보수공사로 인한 사용자 추가 비용
	공사 유무	하루 시간당 총 금액	공사시 금액 (×공사일수)	공사 유무	하루 시간당 총 금액	평상시 금액 (×공사일수)	
0-1	공사중	565,580	2,262,318	비공사	0	0	2,262,318
1-2	공사중	388,836	1,555,344	비공사	0	0	1,555,344
2-3	공사중	282,790	1,131,159	비공사	0	0	1,131,159
3-4	공사중	212,092	848,369	비공사	0	0	848,369
4-5	공사중	247,441	989,764	비공사	0	0	989,764
5-6	공사중	424,185	1,696,739	비공사	0	0	1,696,739
6-7	공사중	7,392,605	29,570,418	비공사	0	0	29,570,418
7-8	비공사	8,617,231	34,468,926	비공사	0	0	34,468,926
8-9	비공사	8,114,145	32,456,580	비공사	0	0	32,456,580
9-10	비공사	9,315,135	37,260,539	비공사	0	0	37,260,539
10-11	비공사	11,494,108	45,976,432	비공사	0	0	45,976,432
11-12	비공사	18,842,530	75,370,119	비공사	20,957	83,827	75,286,292
12-13	비공사	23,404,554	93,618,216	비공사	1,241,121	4,964,485	88,653,731
13-14	비공사	26,808,177	107,232,708	비공사	4,414,471	17,657,883	89,574,825
14-15	비공사	35,149,493	140,597,973	비공사	11,784,769	47,139,077	93,458,896
15-16	비공사	46,716,179	186,864,715	비공사	23,095,398	92,381,593	94,483,121
16-17	비공사	60,126,155	240,504,619	비공사	36,243,644	144,974,574	95,530,044
17-18	비공사	77,107,721	308,430,883	비공사	52,683,953	210,735,812	97,695,071
18-19	비공사	98,197,973	392,791,892	비공사	73,207,846	292,831,386	99,960,507
19-20	비공사	101,134,828	404,539,312	비공사	78,506,013	314,024,053	90,515,259
20-21	비공사	88,135,317	352,541,267	비공사	67,849,286	271,397,142	81,144,124
21-22	비공사	68,933,039	275,732,157	비공사	49,900,909	199,603,635	76,128,522
22-23	비공사	43,629,120	174,516,480	비공사	25,704,904	102,819,616	71,696,864
23-24	비공사	12,276,129	49,104,514	비공사	2,164,621	8,658,486	40,446,029
합계		747,515,360	2,990,061,441	합계	426,817,892	1,707,271,570	1,282,789,871

<표 3.9.29> 일반 아스팔트 포장의 사용자 비용 종합

보수 시기	사용자 추가 비용
10년	21,512,213
20년	1,282,789,871
30년	3,836,074,086

(바) 일반 아스팔트 포장의 사용자 비용 종합

<표 3.9.29>는 20년째 보수공사와 같은 방법으로 10년째와 30년째의 보수공사로 인하여 추가되는 사용자 추가 비용을 구한 값이다.

(3) 일반 아스팔트 포장의 생애 주기 비용 산정

<표 3.9.30>은 기관비용, 사용자비용, 해체 및 처리비용을 모두 합친 일반 아스팔트 포장의 40년간의 생애 주기 비용을 나타내고 있다.

<표 3.9.30> 일반 아스팔트 포장의 생애주기 비용

구분	해당년도	금액(원)
시공비	0	4,461,660,000
보수 시공비	10	1,552,240,000
사용자 비용	10	21,512,213
보수 시공비	20	1,552,240,000
사용자 비용	20	1,282,789,871
보수 시공비	30	1,552,240,000
사용자 비용	30	3,836,074,086
해체 및 처리비용	40	1,172,240,000

<표 3.9.31> 4S 포장의 생애주기 비용

구분	해당년도	금액(원)
시공비	0	4,765,380,000
보수 시공비 (덧씌우기)	-	2,197,360,000
보수 공비 (CTB 재설치)	-	5,859,620,000
해체 및 처리비용	40	1,094,280,000

다. 4S포장의 생애주기비용 계산

(1) 기관비용 및 지체로 인한 사용자 비용

4S포장도 일반 아스팔트 포장의 계산절차와 마찬가지로 계산한다. <표 3.9.31>은 기관비용과 해체 및 처리비용을 정리한 값이다.

(2) 소음 저감비용

소음부분에 대한 정량화는 건설교통부의 '공공교통시설 개발 사업에 관한 투자평가지침'을 토대로 작성하였다. 방음벽 설치비를 기준으로 소음 저감의 편익을 산출한 결과하였다. 건설교통부 보고서의 결과 값을 2005년 단위로 환산한 결과는 <표 3.9.32>와 같다.

4S포장의 경우 포러스 표층이 소음에 3~4dBA 저감의 효과가 있음이 이미 문헌고찰을 통하여 나타났다. 때문에 여기에서는 3dBA의 소음 저감효과가 있다고 가정하여 계산하였다. 고속도로가 설치되는 구간은 지방지역이므로 지방지역에 대한 피해비용을 환산하였다. 10km에 대하여 매년 19,550,000원의 저감효과가 있음이 추정되었다.

<표 3.9.32> 교통소음에 대한 사용자 비용의 정량화 (건설교통부, 2004)

비 용 \ 도로위치	도시지역	지방지역
피해비용(천원/dBA/km/연)	5,611	1,955

<표 3.9.33> 도로 유형별 교통사로로 인한 사망자 및 부상자수

도로 유형	km당 사고건수	1억대·km당 사망자수	1억대·km당 부상자수
고속도로	3.44	1.78	43.56
일반국도	5.92	6.78	196.48
지방도	1.49	4.89	126.07

(경찰청, 2001, 건설교통부, 도로교통량통계연보, 2001)

<표 3.9.34> 교통사고 사망자 1인당 교통사고 비용(교통개발연구원, 2002) (단위 : 만 원)

구 분	사망자	부상자
교통사고비용	37,331.19	4,083.5

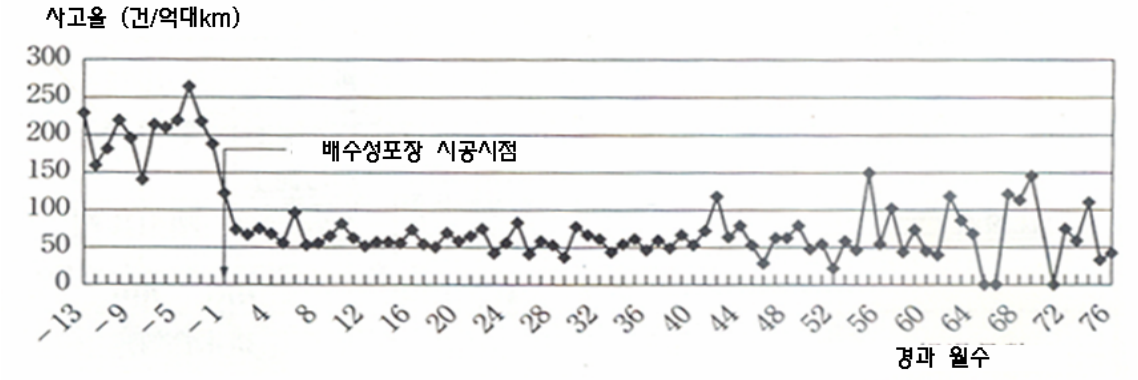
* 사고 휴유증을 포함한 금액이며, 부상사고건수당 사고비용은 평균부상사고비용임.

(3) 사고 저감 비용

<표 3.9.33>은 도로 유형별 교통사고로 인한 사망자 및 부상자수를 나타낸 표이며, <표 3.9.34>는 사망자 및 부상자에 대한 각각의 사회비용을 나타내고 있다. <표 3.9.33>과 <표 3.9.34>을 토대로 사고에 관련된 경제성 분석을 실시 할 수 있다.

4S포장은 물이 포장으로 스며들기 때문에 빗길 미끄럼 저항성을 높여주며, 수막현상 저감의 효과로 시야를 확보해 준다. 때문에 젖은 상태의 노면에서 사고가 저감될 것으로 판단된다.

일본의 경우 1989년부터 시험적으로 배수성 포장을 도입하였으며, 1995년까지 배수성 포장이 시공된 장소에 대하여 시공 전후의 사고율을 조사한 결과 명백히 사고율이 저하되는 효과가 있음을 확인하였다. <그림 3.9.3>은 배수성 포장 시공시점 이후의 월별 사고율 추이를 나타낸 그림이다.



<그림 3.9.3> 배수성 포장 전후의 사고율의 변화

(출처 : 低騷音舖裝 の槪說, 社團法人 建設物イ西 調査元, 2003)

또한 일본에서는 고속도로 중 일부를 배수성 포장으로 바꾸었을 때, 한 구간에서 비오는 날의 사고가 일년에 2981건이었지만 포장형식만 변화하였을 때 년간 488건의 사고가 발생하여 85%의 저감을 보였다. 다른 일본 조사에는 248건에서 206건으로 줄어들었으며 건조한 상태의 노면에의 차이는 크지 않았으며, 젖은 상태의 노면일 때의 76건에서 36건으로 줄어들었다. 보통 밀입도 도로의 사고 중 31%가 젖은 상태의 도로 사고였지만, 이를 14%정도로 줄인다는 결과를 얻었다. (Danish Road Institute, 2005) 위와 같은 연구결과를 바탕으로 젖은 상태 노면에서의 사고가 저감됨을 알 수 있었다.

<표 3.9.35>는 도로교통 공단에서 제공하는 자료 중 2001년도 기상별 교통사고 현황을 나타내고 있다. 비오는 날에 대한 사고를 젖은 상태에서 일어나는 사고로 생각한다면 전체 사고 중 약 3.68%이상이 젖은 상태의 노면 사고라고 판단된다. 일본의 경우 젖은 상태에서의 사고 감소율이 85~50%정도였기 때문에, 여기에서는 젖은 노면상태의 사고 감소율을 50%정도 가정하고 4S 포장의 사용자 편익을 계산하였다. 통계자료를 바탕으로 전체 사상자중 사망자는 5.15%, 부상자는 4.02%정도가 젖은 상태노면에서 발생하였다고 할 수 있다.

<표 3.9.35> 2001년도 기상별 교통사고 현황(도로교통공단, http://www.rtsa.or.kr)

구분	계	맑음	흐림	비	안개	눈
발생	260,579	239,441	8,726	9,594	497	2,321
사망자	8,097	7,144	413	417	59	64
부상자	386,539	352,272	13,513	15,548	865	4

<표 3.9.36> 도로 유형별 교통사로로 인한 사망자 및 부상자수(단위 : 1억대·km당)

상 태	총 사망자수	총 부상자수
합 계	1.78	43.56
젖은 상태 노면	0.09167	1.751112
4S 포장 젖은 노면상태 사상자수 예측	-0.045835	-0.875556

이 값을 이용하여 고속도로에서 감소되는 사망자 및 부상자수를 추론하면 <표 3.9.36>과 같은 결론을 얻을 수 있다. 4S 포장을 설치할 경우 1억대·km당 0.045835명 정도의 사망자수가 줄어든 것으로 판단된다.

교통량이 90000대/일 때의 사망자 및 부상자 감소로 인한 1년간 증가 편익은 각각 56,208,817, 117,449,687원으로 계산되었으며, 1년째의 편익의 증가는 173,658,504원으로 나타났다.

4. 현재가치 환산법

포장의 종류에 따라 시공시기, 공용연수가 다르므로 대안들을 비교하려면, 우선 기준이 되는 시점을 정하고, 이것을 기준으로 각 대안에 발생하는 현재 비용과 미래 비용을 환산해야 한다. LCCA에서는 물가 상승률과 이자율을 동시에 적용하여 하나의 실질 할인율로 나타내고 이 실질 할인율을 이용하여 미래에 발생되는 비용을 현재의 가치로, 또는 현재의 금액을 미래의 가치로 등가 환산한다. 이때 물가상승률과 이자율에 의한 실질 할인율을 산출하는 방법은 <식 3.9.14>와 같다.

$$i\ (\text{할인율}) = \frac{1+\text{이자율}}{1+\text{물가상승율}} - 1 \qquad \text{<식 3.9.14>}$$

초기 비용은 이미 현재가치로 표시되어 있으며, 매년 동일하게 반복되는 반복비용이 있을 경우 반복비용을 A, 할인율 i, 분석기간 n인 경우 반복비용의 현재가치(P)는 <식 3.9.15>와 같다.

$$P=\frac{A}{(1+i)}+\frac{A}{(1+i)^2}+\frac{A}{(1+i)^3}+\cdots+\frac{A}{(1+i)^n}=\frac{(1+i)^n-1}{i\cdot(1+i)^n}\times A \qquad \text{<식 3.9.15>}$$

$\frac{(1+i)^n-1}{i\cdot(1+i)^n}$: 년현재가치(PWA: Present Worth of Annuity)계수

그리고 n년 후에 1회만 발생하는 비 반복 비용이 F, 할인율이 i면 비 반복 비용을 현재 가치 (P)로 환산하는 공식은 <식 3.9.16>과 같다.

$$P=\frac{1}{(1+i)^n}\times F \qquad \text{<식 3.9.16>}$$

$\frac{1}{(1+i)^n}$: 현재 가치 (PW: Present Worth)계수

따라서, 각 대안들에 대한 총 현재가치는 초기투자비, 현재가치 계수에 의해 환산된 유지보수비와 사용자비용들의 합으로 계산되며 기본 공식은 <식 3.9.17>과 같은 모델을 사용한다.

$$\text{순현재가치} = \text{초기투자비} + \sum_t (\text{유지보수비} + \text{사용자비용} + \text{해체 및 처리비용})\left[\frac{1}{(1+i)^t}\right]$$

<식 3.9.17>

여기서, i : 할인율, t: 분석기간내 년수

현재가치법(NPV)에 적용되는 할인율은 <표 3.9.37>에서 제시된 내용을 바탕으로 10년간 할인율 평균을 적용한다. 10년간 할인율 평균은 3.475%이다. 분석에서는 할인율을 3.5%로 선택한다.

<표 3.9.37> 소비자 물가상승율 및 은행 시중금리(1996~2005) (한국은행 경제 통계 시스템)

년도	소비자물가상승율(%)	은행시중금리(%)	실질할인율(%)
1996	4.925	10.79	5.865
1997	4.439	11.32	6.881
1998	7.512	13.3	6.148
1999	0.813	6.9	6.087
2000	2.259	7.01	4.751
2001	4.1	5.43	1.33
2002	2.690	4.73	2.04
2003	3.555	4.15	0.595
2004	3.613	3.75	0.137
2005	2.703	3.62	0.917
평균	3.66	7.10	3.48

5. 현재가치 환산법을 적용한 생애주기 비용 계산

<표 3.9.38>은 일반 아스팔트의 생애주기비용을, <표 3.9.39>는 4S포장의 생애주기비용을 현재가치 환산법을 적용하여 계산한 값이다. 4S포장의 경우 보수시점과 공법이 아직 정해지지 않았으므로 이 비용을 제외한 나머지 비용을 산정하였다. 앞에서 제시한 <식 3.9.17>을 사용하여 현재가치로 환산하였으며, 매년 발생하는 비용의 경우 <식 3.9.15>를 사용하여 현재가치로 환산하였다.

사고 비용의 경우 교통량과 관련이 있다. 현재가치 환산법을 이용하여 계산하기 위하여 교통량과 관련 있는 금액의 경우 <식 3.9.18>를 사용한다.

$$\text{현재가치} = \frac{(1+i)^n - (1+g)^{n+1}}{(i-g)(1+i)^n} \times \text{초기금액} \qquad \text{<식 3.9.18>}$$

여기서, i : 할인율

g : 교통량 증가율

n : 분석년수

<표 3.9.38> 일반 아스팔트 포장의 생애주기 비용

구분	해당년도	금액(원)	현재가치환산(원)
시공비	0	4,461,660,000	4,461,660,000
보수 시공비	10	1,552,240,000	1,100,412,139
사용자 비용	10	21,512,213	15,250,413
보수 시공비	20	1,552,240,000	780,102,868
사용자 비용	20	1,282,789,871	644,686,426
보수 시공비	30	1,552,240,000	553,029,600
사용자 비용	30	3,836,074,086	1,366,710,378
해체 및 처리비용	40	1,172,240,000	296,075,550
계		15,430,996,170	9,217,927,374

<표 3.9.39> 4S 포장의 생애주기 비용

구분	해당년도	금액(원)	현재가치 환산(원)
시공비	0	4,765,380,000	4,765,380,000
보수 시공비 (단순덧씌위기)	-	2,197,360,000	-
보수 공비 (CTB 재설치)	-	5,859,620,000	-
사용자 비용	-	-	-
해체 및 처리비용	40	1,094,280,000	276,385,000
사고 비용	매년	-173,658,504 ~ -375,926,337	-5,120,725,856
소음 저감비용	매년	-19,550,000×40년	-417,491,664
계		-	-496,452,520

6. 4S포장의 유지보수 대안별 비교

4S 포장은 아직 실제적으로 포장이 된 사례가 없기 때문에, 어떤 공용성을 가질지 예측하는 것은 쉽지 않다. 때문에 여러 보수 사례를 가정하여 어떤 경우에 경제성을 가지는지 비교 검토하였다.

<표 3.9.40> 10년 주기 덧씌우기 계산

구분	해당년도	금액(원)	현재가치환산(원)
보수 시공비	10	2,197,360,000	1,557,749,844
사용자 비용	10	21,512,213	15,250,413
보수 시공비	20	2,197,360,000	1,104,318,172
사용자 비용	20	1,282,789,871	644,686,426
보수 시공비	30	2,197,360,000	782,871,928
사용자 비용	30	3,836,074,086	1,366,710,378
계		11,732,456,170	5,471,587,161

가. 10년 주기 덧씌우기

4S포장이 일반 아스팔트와 동일 공용성을 가질 경우 10년마다 덧씌우기를 실시하게 된다. 10년마다 일반 덧씌우기를 할 경우 <표 3.9.40>과 같은 보수비용과 사용자 비용의 결과를 얻었다. 사용자 비용의 계산은 일반 아스팔트 포장의 계산방법과 동일하게 적용하였다.

나. 10년째 덧씌우기, 20년째 CTB교체, 30년째 덧씌우기의 경우

CTB의 수명이 20년이라고 가정한다면, 20년째에는 CTB의 교체가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 또한 10년 주기로 덧씌우기를 할 때 보수에 따른 비용을 산정하였다. <표 3.9.41>은 보수로 인한 비용을 계산한 것이다. CTB의 교체시에는 2시간의 공사추가시간으로 인하여 사용자비용이 다소 증가하게 된다.

<표 3.9.41> 10년 주기 덧씌우기 계산(20년째는 CTB 교체)

구분	해당년도	금액(원)	현재가치환산(원)
보수 시공비	10	2,197,360,000	1,557,749,844
사용자 비용	10	21,512,213	15,250,413
보수 시공비	20	5,859,620,000	2,944,845,108
사용자 비용	20	3,104,952,589	1,560,443,244
보수 시공비	30	2,197,360,000	782,871,928
사용자 비용	30	3,836,074,086	1,366,710,378
계		17,216,878,888	8,227,870,915

<표 3.9.42> 10년 주기 CTB 교체

구분	해당년도	금액(원)	현재가치환산(원)
보수 시공비	10	5,859,620,000	4,153,994,859
사용자 비용	10	101,935,086	72,263,700
보수 시공비	20	5,859,620,000	2,944,845,108
사용자 비용	20	3,104,952,589	1,560,443,244
보수 시공비	30	5,859,620,000	2,087,656,100
사용자 비용	30	25,167,461,697	8,966,623,252
계		45,953,209,372	19,785,826,263

다. 10년 주기 CTB교체

10년 주기로 CTB를 교체할 경우 비용을 산정하였다. CTB의 강도 발현의 저하로 10년 주기로 교체해야 할 경우 <표 3.9.42>와 같이 보수에 대한 생애주기 비용이 산정된다.

7. 일반 아스팔트 포장과 4S포장의 경제성 비교

<표 3.9.43>은 일반 아스팔트 포장의 생애주기비용과 4S포장의 공용성을 각 대안별로 분석한 생애주기 비용을 비교하고 있다. 각각의 대안에 대하며 비교한 결과 4S 포장이 일반 아스팔트와 같은 거동을 보여 10년 주기 덧씌우기를 할 경우나 20년째 CTB교체를 할 경우 경제적으로 타당함을 알 수 있었다.

<표 3.9.43> 일반 아스팔트 포장의 생애주기 비용

구분		현재가치환산(원)	일반아스팔트와 차이(원)
일반아스팔트포장		9,217,927,374	-
4S포장	10년주기 덧씌우기	4,975,134,641	4,242,792,733
	10년주기 덧씌우기 20년째 CTB교체	7,731,418,395	1,486,508,979
	10년주기 CTB교체	19,289,373,743	-10,071,446,369

8. 요약

경제성 평가로 많이 사용되는 생애주기비용 분석 결과 4S포장은 일반 아스팔트 포장과 같이 10년 주기로 덧씌우기를 하는 경우나, 20년째에 CTB교체를 하는 경우에 대하여 경제적으로 타당하다고 판단되었다. 추후 4S포장을 시공한 후 장기적인 사고 저감 기록이나 구체적인 공용기간이 결정되면, 정확한 경제성 분석을 할 수 있을 것으로 판단된다.

■ 경제성 분석 요소는 각 기관에서 신뢰할만한 자료를 바탕으로 적용하였다.

■ 생애주기 비용 분석 결과 4S포장은 사고 및 소음의 저감으로 인한 사용자 비용이 감소하였다.

■ 생애주기 비용을 토대로 최소 공용성을 10년주기 덧씌우기와 20년째 CTB교체 시 일반 아스팔트 포장과 비교하여 경제성이 있는 것으로 판단되었다.

제 4 장 연구개발목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1절. 연구개발 목표의 달성도

1. 연구개발 목표의 달성도

가. 문헌 고찰과 국내외 적용사례 검토

(1) 국내 배수성 포장은 90년대 후반부터 활성화되어 고속도로 및 간선도로에 적용되고 있다. 일본의 경우는 배수성 포장의 적용과 동시에 유지보수에 대한 연구를 실시하여 공극 청소장비 등을 개발하여 현재 실용화 단계에 있다. 배수성 포장은 공극 막힘 등의 현상으로 인하여 공용 후 일정 기간이 지난 후에는 소음저감, 미끄럼 저항 등의 기능이 떨어지므로 유지·관리에 대한 대책 수립이 절실하다.

(2) 노상토 내 함수비가 증가함에 따라 노상의 탄성계수는 감소하지만 변형율의 크기에는 크게 영향을 미치지 않았다. 모관흡수력을 조절하여 함수비를 변화시킨 경우에는 전체적으로 함수비가 증가함에 따라 최대 전단탄성계수 값은 크게 감소함을 알 수 있었다. 모관흡수력 조절시험과 다짐함수비 조절시험의 결과를 비교한 경우는 건조 측에서는 큰 차이를 보이지만 습윤 측에서는 거의 동일함을 알 수 있었다.

(3) 미국에서는 강도와 내구성을 유지하면서 반사균열을 저감할 수 있는 CTB 재료 개발에 대한 연구가 진행 중에 있다. CTB는 아스팔트 처리기층과 비교해보면 유사한 공용성을 나타내고 있다. 그러나 국내의 CTB에 관한 연구는 새로운 안정기층에 관한 연구가 진행 중이며, 다양한 기층 재료가 개발되었지만 도로 기층 적용에는 미비한 실정이다. 따라서 친환경적이면서 도로 기층에 적용할 수 있는 CTB 재료 개발이 필요할 것이다.

(4) 국외의 투수콘크리트에 관한 연구는 습식-습식 공법을 이용하여 국도에 적용하고 있으며, 다양한 형태의 투수 포장을 현장에 적용하는 단계에 있다. 또한 기능성 포장이 일부분 실용화 되었고, 자연과의 조화를 목적으로 녹화 콘크리트를 적용하는 등 친환경적인 평가를 받고

있다.

(5) 이에 반해 국내에서는 보도 및 주차장 및 건물 주변시설 등에 국한되어 적용되고 있다. 투수 콘크리트의 차도 포장 적용은 미비한 실정이며 기초적인 물리적 특성을 연구하는 단계에 있다.

(6) 페이버의 경우 국내는 페이버의 재료 배합과 구성을 변화시키는 연구가 주로 진행되고 있다. 그러나 외국의 경우 페이버 포장의 공용성을 좌우하는 구성요소들에 대한 연구가 활발히 진행 중이며 페이버 포장에 관련된 많은 신기술들이 보급되어 사용되고 있다. 따라서 공용성에 영향을 주는 인자들에 대한 연구가 시행되어야 페이버 포장의 상용화가 이루어질 것으로 보인다.

(7) 여러 선진국에서는 다양한 소음분석기법을 통해 도로의 용도별, 차종별, 속도별 시간경과에 따른 소음특성을 분석하였으며, 이를 근거로 배수성 포장의 재료, 시공 및 장비, 유지보수 등 종합적인 관련 지침을 개발하여 실제 포장에 적용하고 있다. 그 결과 저소음 포장의 내구성 및 소음저감 효과를 지속시킬 수 있는 포장시스템을 도입하여 활성화하고 있다. 그러나 국내의 경우, 포장에 대한 소음 평가는 단순히 포장들간의 단순 비교 수준에 그치고 있다. 또한 공용 초기에는 저소음 포장에 대한 소음 저감 효과를 나타내고 있으나 공용 이후 포장 파손 및 급격한 소음저감 효과 감소 등의 문제점들을 야기하고 있다. 따라서 우수한 공용성을 갖춘 저소음 포장 개발을 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

(8) 일본에서는 기존의 인도나 주차장에서만 사용하던 투 배수성 포장을 차도에 적용하는 방법을 연구하는 등 투 배수성 포장의 활용을 위하여 노력하고 있다. 실내실험을 통해 단면을 결정하고, 시험시공을 통해 시공성을 검증하였으며 FWD를 이용한 지지력 측정, 소음측정, 투수측정, 환경평가 등을 하며 공용성을 평가하여 투·배수성 포장의 기술적 우수성을 발견할 수 있었다.

(9) 국외 문헌에서는 미국의 여러 주에서 연구되고 있는 계절의 변화에 따른 기층별 함수비 변화와 그 변화로 인한 기층 및 노상의 탄성계수 변화에 대해 살펴보았다. 기층 종류와 배수시설의 유무에 따라 다른 함수비 변화를 보인다. 흙의 종류에 따라 회복탄성계수의 감소 정도가

다르며 최적의 조건에서 회복탄성계수 값이 가장 큰 흙이 포화도에 가장 민감하게 반응한다. 대부분의 실험 결과에서 보듯이 함수비가 증가함에 따라 노상의 탄성계수 값이 감소함을 알 수 있다. 또한, 함수비의 증가에 따라 설계입력 변수인 회복 탄성 계수의 감소는 불가피하였으나 적절한 배수시스템 단면의 설계를 통해 극복할 수 있음을 알 수 있었다.

나. 기능성 포장의 재료 개발과 검증 실험

(1) 배수성 아스팔트 바인더 선정 시험 실시 및 재료 개발
(2) 강도에 큰 영향을 미치지 않도록 공극의 형태 및 크기를 결정하는 연구를 수행
(3) 블록과 블록의 결합을 통한 인터로킹 성능을 확인하기 위한 실험을 수행

다. APT(KALES)를 이용한 친환경 4S 포장 공용성 평가

(1) 포장모형가속기(KALES)를 이용한 4S 포장 시스템의 중·장기 구조적 안전성 및 기능성 검토 실시

라. 현장 시험 시공을 통한 신재료의 시공성 검토 및 초기 공용성 평가 실시

(1) 신재료 현장 생산 시스템 구축 및 시공성 평가 실시
(2) FWD, 정적하중재하실험을 통한 구조적 안전성 검토
(3) 투수성능평가, 소음측정, TDR를 이용한 노상 중량함수비 관찰 등 친환경 4S 포장의 기능성 검토
(4) 유지보수 적용 평가를 위한 예비단면 및 데이터베이스 구축

마. FEM를 이용한 포장 거동 분석

(1) 효율적인 3차원 1/4모델의 적용
(2) FEM을 통한 FWD결과를 이용한 물성치 추정 방법 적용
(3) FEM 해석을 통한 하부구조 물성치에 따른 응력, 처짐 민감도 분석

바. 친환경 4S 포장 공용성 평가를 위한 시작품 제작

(1) 온도, 강우량 등 환경하중의 조절이 가능한 포장모형가속기 구축
(2) 외부영향을 받지 않고 포장과 타이어와의 소음을 측정할 수 있는 장비 제작 및 실험 실시

사. 설계아키텍쳐 수립

(1) 기존 설계법 및 경험적 역학적 설계법 고찰
(2) 4S 포장의 설계 입력 변수 및 공용성 모형의 검토
(3) 카달로그 단면(안) 제시를 위한 기초 연구 수행

아. 경제성 분석

(1) 생애주기 비용을 이용한 경제성 분석 방법의 정립
(2) 사고 비용, 환경 비용을 이용한 4S포장의 경제적 타당성 입증
(3) 대안별 경제성 비용 분석을 통한 최소 공용기간 제시

2. 계획대비 수행실적

국내외 문헌조사, 3차에 걸친 시험시공, 시험시공 후 초기 공용성 평가가 충실하게 수행되어 당초 목표한 과제수행을 충실히 이행하였다. 3차 시험시공의 경우 기후와 현장여건의 문제로 인하여 수행기간 막바지에 이르러 실험이 이루어 졌으나 초기 공용성 평가까지 완료 하였으며, 과제 종료 후 많은 자료를 산출해 낼 수 있을 것으로 생각된다. 설계프로세스개발, 재료품질관리기법개발, 시공지침제시, 유지관리 기준 제시는 3년간의 연구 자료를 바탕으로 현실성과 목적성을 중심으로 완료하였다. 페이버 포장의 현장투수시험 및 기본물성제시의 경우, 대량생산을 위하여 2차년도와는 조금 다른 형상을 제시하였고, 이에 대한 각 실험을 통하여 개발재료에 대한 데이터 베이스를 구축하였다. 실용화 및 활성화 방안연구의 경우 포장 전반적인 시스템의 경우 구성인자가 정립되었지만 배수시설 및 유지보수에 대해서는 연구가 더 필요한 실정이다.

<표 4.1.1> 4S 포장시스템 개발 연구수행 내용

항 목	계 획	실 적
연구개발목표 달성정도 (주요 목표별)	○ 단기 공용성 평가	○ 2,3차 시험시공 실시
	○ 각종 지침 개발	○ 시험시공을 바탕으로 한 시공성, 안정성 평가
	○ 설계 프로세스 개발	○ 두께설계 프로세스 제안
	○ 실용화 및 활성화 방안 제시	○ 시험시공을 통한 문제점 개선
	○ 페이버 현장 투수실험 계획 및 진행	○ 기존 페이버 포장 대비 물성값 산출
	○ 페이버 투수 재료 기준 현장 검증	
	○ 페이버 포장의 기본 물성 제시	○ 물성에 따른 실내실험 실시
참여 연구원의 연구 현황 (해당기술 분야별)	**중앙대학교 조윤호 외 6명** · 사업 총괄,공용성평가, 기타연구보	· 시험시공, 지침서 개발 등 연구총괄 · 보고서 작성
	중앙대학교 류성우 외 1명 · 구조해석	· 아바쿠스 이용 구조해석 · 설계법, 지침서 개발
	중앙대학교 오재일 외 1명 · 비점오염	· 비점오염 정리 및 환경적 기대효과 정리
	중앙대학교 김경주 외 1명 · 시스템개발, LCC분석	· 전반적 시스템 개발 및 LCC 분석
	중앙대학교 곽호영 외 1명 · 기계시스템 활용	· HES 등 개발, 사용 장비에 대한 개발 및 활용 연구
	한국도로공사 한승환 외 6명 · APT 실험 및 시험시공 총괄	· 2,3차 시험시공 협조 및 포장가속 시험기 실험
	홍익대학교 박종원 외 8명 · 페이버 포장 연구총괄, 실험분석	· 페이퍼 포장 형상 수정 · 대량생산을 위한 기초형태 확립 · 페이버 포장 및 기존 블록포장 재료의 내구성, 기능성, 안정성 실험
연구개발 체계별 연구내용 (주관연구기관, 협동연구기관, 위탁연구기관 등)	**중앙대학교** · 4S 포장 시스템의 설계, 실내시험 및 현장시험 실시 · 종합적인 4S 포장 시스템의 재료 품질관리, 설계법, 시공 및 유지관리지침 등을 개발	· 2,3차 시험시공 실시 및 공용성 평가 · 페이버 실내실험 실시 · 현장품질관리용 기기 개발 · 품질관리, 설계법, 시공, 유리관리지침 개발
	한국도로공사 도로기술연구원 · 4S 포장의 APT를 이용한 현장 모의 실험 실시 (초기공용성 평가) · 시공절차 수립 · 시방서 배포 및 홍보	· 2,3차 시험시공 협조 · 초기공용성 평가 (FWD 실험 등) · 지침 검토 · 시방서 배포 및 홍보
	홍익대학교 · 현장 투수 계수 실험을 통한 현장 검증 · 투수재료기준현장검증 · 페이버 포장의 내구성 실험 · 페이버 포장 기본특성 제시	· 페이버 포장 및 기존 블록포장 재료의 내구성, 기능성, 안정성 실험 · 페이버 포장의 대량생산용 형상 수정 · 페이버 포장 현장 시험시공 계획
연구 기자재 활용 (주요 연구장비별)	**CR10X 외 게이지** · 게이지매설을 통한 공용성 평가	· 2,3차 시험시공 현장 및 HES 매설 및 계측을 통한 포장의 구조적, 기능적 우수성 입증
	HES(환경모사실험기) · 공용성 평가	· HES를 이용한 온도에 의한 포장 거동 파악 실험
	HFT(Heart Fresh Con'c Tester) · 현장 품질 관리 기준 제시	· 무슬럼프 건식 배합의 현장품질관리

<표 4.1.2> 4S 포장시스템 개발 계획 대비 수행실적

구분 / 개발내용	연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
문헌조사/기초조사	■	■	■	■									100%
단기공용성 평가	■	■	■	■	■	■							100%
장기공용성 예측 및 문제점 보완					■	■	■	■	■	■	■	■	100%
2차 시험시공				■	■	■							100%
시험시공 후 초기공용성 평가						■	■	■	■	■	■		100%
3차 시험시공									■	■	■		100%
시험시공 후 초기공용성 평가											■	■	100%
설계 프로세스 개발	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%
재료 품질관리 기법 개발						■	■	■	■	■	■	■	100%
시공 시장지침 제시							■	■	■	■	■	■	100%
유지관리기준제시							■	■	■	■	■	■	100%
실용화 및 활성화 방안연구							■	■	■	■	■	■	100%
페이버 현장투수 실험 계획 및 진행	■	■	■	■	■	■	■						100%
페이버 포장 기본물성 제시							■	■	■	■	■	■	100%
보고서 작성									■	■	■	■	100%
총 진도율	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	100%

2절. 연구개발 대외기여도

1. 기술발전 기여도

세계 환경산업은 향후 10~15년 동안 급속한 성장이 예상되며, 정부는 친환경 및 안정성 제고 분야를 국가 전략사업으로 인식하고 육성을 추진하고 있다. 또한 국민

생활 수준 향상에 따라 도로 환경에 대한 국민적 관심과 요구는 지속적으로 증가하는 추세이다. 본 연구 결과인 친환경 4S 포장 시스템은 이러한 정부의 정책 및 국민적 요구를 충족시킬 수 있을 것이다.

국외에서 성공적으로 적용되고 있는 친환경 포장 형식이 국내에는 아직 적용되지 못하고 있다. 국내에서 사용 가능한 재료를 이용하여 최적의 포장 재료를 개발하고 관련 시험, 시공, 평가 장비를 개발함으로써 기존의 경험적이고 영세한 국내 기술을 향상시킬 수 있다. 이를 통하여 사용자와 상호작용을 통한 도로포장의 신뢰를 회복할 수 있다.

본 친환경 4S 포장시스템의 적용 범위는 일반국도와 고속국도의 본선구간, 도심부 대형 주택 단지와 인접대로, 도심지 대로 및 중로 등 교통량에 따라 포장의 형식을 달리하여 적용할 수 있다.

또한 노면의 마찰 저항성을 증진시키고 배수 특성을 강화하여 안전한 주행환경을 실현함으로써 사고에 의한 사회적인 비용을 절감할 수 있으며, 노면 우수의 지하수 유입으로 도심부 배수 유량 절감 및 홍수 예방 기능을 발휘할 것이다.

2. 기대효과

본 연구 결과를 이용한 기대효과를 기술적 측면, 경제·산업적 측면, 환경적 측면, 사회적 측면으로 구분하였다. 다음 <표 4.2.1>은 이를 정리한 것이다.

<표 4.2.1> 4S 포장시스템 연구 기대효과

구분	기 대 효 과
기술적 측면	-기능성/환경성/내구성을 고려한 신개념 포장 시스템 개발 -도로 등급에 따른 다양한 포장 대안 제시 -도로 환경 평가 기술 개발 -다양한 형태와 색상의 심미적 포장 기술의 개발 -소음 저감 포장 공법 개발로 정온한 도로 환경 조성
경제·산업적 측면	-다양한 포장 공법 적용에 따른 예산 사용의 효율화 -도로 주변 환경 개선을 통한 보상비 지출 감소 -삶의 질 향상에 따른 도로 사용자 편익 증대 -안전성 증대를 통한 교통사고 비용의 절감 -환경 산업 분야의 활성화 기대
환경적 측면	-교통 소음 감소로 따른 정온한 생활환경 조성 -포장의 미적 요소 개발로 도로 주변 환경 개선 -생태와 공존하는 숨쉬는 도로 구현
사회적 측면	-향상된 도로 및 환경 서비스에 대한 욕구 만족도 증가 -친환경적 도로 정책 추진을 통한 대국민 신뢰도 상승 효과 -사고발생/소음/파손에 따른 민원의 감소

3. 관련 후속 연구개발의 전망

본 연구는 사용자 중심의 도로 포장 설계에 대한 전체적인 대안을 검토하고 포장 형식에 대한 재료, 설계, 시공에 이르는 전반적인 사항들을 다루고 있다. 이에 대한 아름답고 안전하며 조용한 도로 포장 시스템의 구축에 대한 장기적인 평가가 이뤄져야 할 것이다. 따라서 향후에는 지속적으로 현장 조사 및 시험 시공을 통하여 보다 완성된 포장 시스템 구축에 대한 연구가 뒤따라야 할 것이다. 본 연구를 통해 도출된 환경친화적인 포장공법이 앞으로도 계속 사용되고 연구될 수 있도록 지속적인 홍보와 교육이 필요하다. 또한 본 기술의 특성상 소음측정 및 분석, 투수공극 유지 및 관리 기술, 비점 오염원의 토양 오염 분석, 동결영향의 전기저항 분석 등 다른 연구 분야와의 접목을 통한 기술의 확장이 필요하다.

제 5 장 연구개발 결과의 활용계획

1절. 연구결과의 활용 방안

1. 활용 방안

본 연구의 성과로 제시될 친환경 4S 포장 시스템은 국민생활의 향상과 사회 인식의 변화에 따른 국민적 욕구를 충족시킬 것으로 기대된다. 안전하고, 조용하며, 아름다운 포장의 신개념에 적합한 포장 재료, 시공 및 장비, 유지보수 관련 지침 등을 개발 할 수 있다. 특히 적용 도로의 특성에 따라 다음과 같은 다양한 용도 활용이 가능하다고 판단된다.

■ 아름답고 안전한 포장
- 교통량이 적고 접근성이 강조되는 도로, 다양한 형태와 색상의 심미적 색상으로 아름다움이 강조되는 공원이나 주택단지 내의 포장으로 활용
- 저속 혹은 정지상태의 중하중을 받는 항만 하역장이나 공항 포장으로의 활용
- 포장의 미적 요소 개발을 통한 도로 및 주변경관의 개선이 가능하며, 나아가 생태계와 함께 살아 숨쉬는 도로 포장으로의 활용

■ 조용하고 안전한 포장
- 교통량이 많은 고속국도와 일반국도의 본선구간 또는 정온한 환경이 요구되는 도심부 대규모 주택단지 및 인접도로 포장으로 활용
- 기능성, 친환경성, 내구성을 고려한 포장 공법을 개발함으로써 도로의 합리적 건설 및 관리 측면의 다양한 의사결정이 가능
- 사고발생, 소음, 파손 등과 같은 민원에 대한 적극적인 대안으로써의 활용

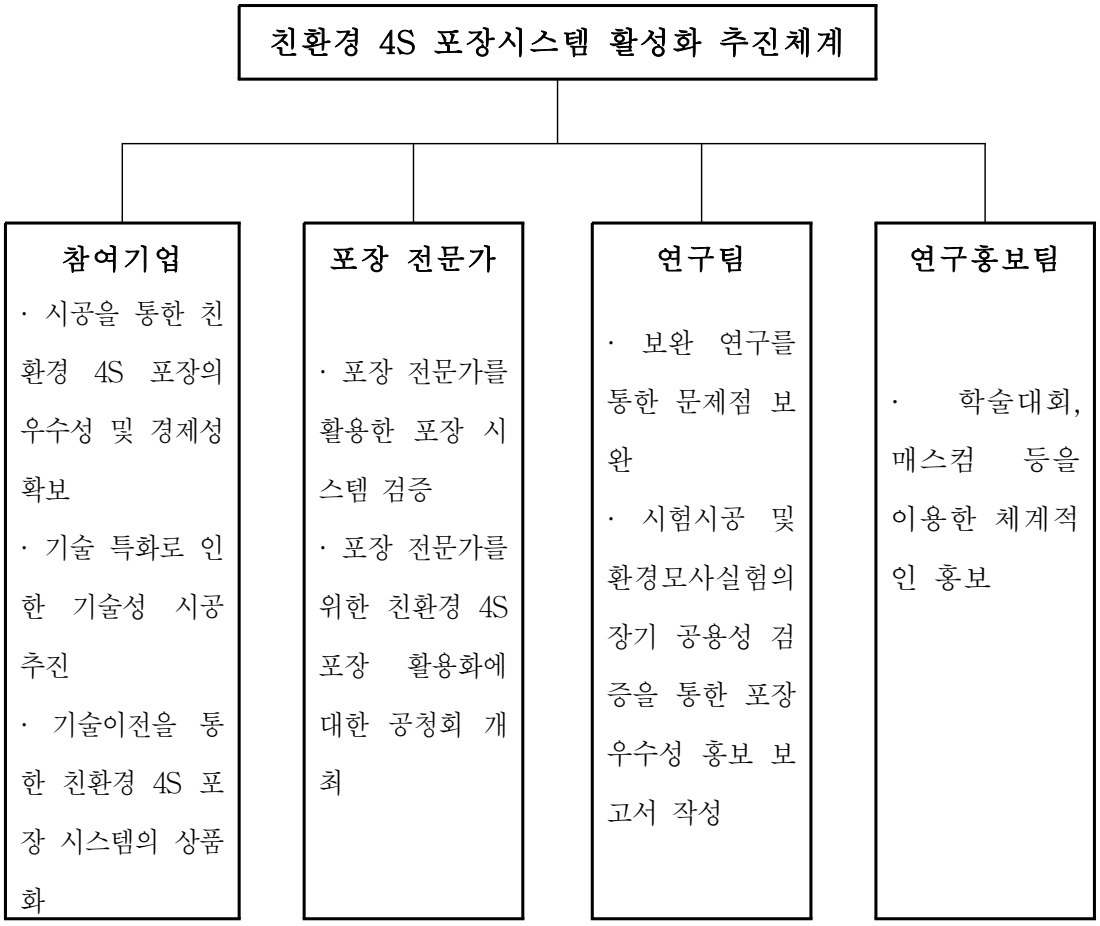
더불어 본 연구를 수행함으로써 제시될 포장 시스템을 도로의 용도별 특수포장 형태로 제시한다면 보다 폭넓은 활용성을 기대할 수 있을 것으로 판단된다. 본 친환경 4S 포장 시스템 기술은 사회변화 및 인식의 변화에 부응할 수 있는 포장으로써 사용자가 만족할 수 있는 도로 건설의 핵심 역할을 수행하게 될 것이다. 또한 관련 연구를 통한 기술력 향상을 꾀함으로써 도로 건설 산업 및 기타 관련 산업의 발전과 비용절감 등에 효율적으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

2. 신공법 적용의 법적·제도적 장치 마련 및 활성화

본 연구진은 건설교통부, 한국도로공사, 지방자치단체 등과의 공조를 통해 '친환경 4S 포장 시스템' 공법에 대한 시험시공을 실시할 계획이다. 이를 통해 공용성 평가 및 검증을 비롯한 시공실적, 품질관리 기준, 유지보수 지침 등 다양한 관련 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 수집한 정보를 바탕으로 보완 및 검토 작업을 수행하고, 신기술 및 특허 신청 등을 통해 향후 건설교통부 산하 제반 도로건설에 적극 활용하고자 하며, 친환경적 측면을 강조한 환경신기술 등록을 통한 신공법의 활성화를 도모할 것이다.

<표 5.1.1> 4S 포장시스템 연도별 활용계획

연구단계	연도	활용계획	비고
1단계 : 보완	2007	·기존 연구 성과 정리 및 데이터 베이스 구축 ·최종 보고서 제출 ·시험시공현장에 대한 지속적 데이터 측정 ·신공법 제출 ·환경모사시험기를 이용한 데이터 수집	
2단계 : 홍보	2008	·신기술활용 시공업체 선정 ·배수성 포장의 유지보수에 대한 기존포장, 시험시공 현장의 추적조사	
3단계 : 상품화	2009	·발주처와 도급업체 연계 기술홍보 ·중국 등 해외시장 개척 및 국내 패키지 상품화	
4단계 : 개선	2010	·친환경 4S 포장시스템을 바탕으로 지속가능한 친환경 포장 시스템 개발 착수 ·시간에 따른 배수성 포장의 기능성 저하와 이에 따른 유지보수에 대한 개발 제안	



<그림 5.1.1> 4S 포장 시스템 활성화 추진체계

<참고 문헌>

<1장>

○ 통계청, http://www.nso.go.kr

<2장>

○ 한국도로공사, “배수성 포장 연구,” 한국도로공사, 1995

○ 조대호, “배수성포장과 각국의 시공현황,” 도로기술자료집(상권), 한국건설기술연구원, 1992.

○ 한국기술교육대학교, “배수성(저소음) 포장 시험시공구간의 초기 공용성 평가,” 한국기술교육대학교, 1999. 12

○ “배수성포장 소음저감 효과 검토 결과 통보,” 한국도로공사, 2002. 12.

○ 다린 개발, “아스팔트 개질 첨가제(DAMA)를 이용한 다공성 아스팔트 포장기술,” 건설기술정보, 2000.9

○ 유인균, “환경과 안전을 배려한 도로포장,” 건설기술정보, 2005.1

○ 박성완, “환경친화 저소음 도로 포장 기술,” 건설기술정보, 2003.3

○ 박태순 외3명, “국내 개질 아스팔트 바인더 터프니스・테나시티 특성 및 문제점 연구,” 한국도로포장공학회, 2002

○ 도로연구소, “아스팔트 포장공사(고속도로 전문 시방서),” 한국도로공사, 2000.12

○ 도로연구소, “배수성 포장 연구,” 한국도로공사, 1995

○ 손종철, “배수성 포장의 활용방안과 품질 개선 방안,” 한국도로학회, 2004.12

○ 김주원, 박태순, “배수성포장(외국의 사례를 중심으로),” 한국도로포장학회, 2000.9

○ 이광호 외 3명, “고속도로 배수성 포장의 공용성능 분석,” 대한토목학회, 1998

○ 다린테크, “환경 친화적인 저소음/배수성(에코팔트)포장의 이론과 실제(건교부 신기술 제 206호),” 도로공항기술사회 논문집, 2002.12

○ 유인균, “배수성 포장의 이해와 적용,” 건설기술정보, 2003.11

○ 김현준, “일본 출장 보고서,” 다린테크, 2002.8

○ SK(주), “슈퍼팔트 혼합물의 생산 및 시공에 관한 특별시방서,” 2003.1

○ (주)아진토건, “칼라 에코팔트 포장(배수성/저소음)공사 시방서,” 2002.7

○ 다린테크, “다마아스팔트 혼합물 포장공사 특별시방서,” 2003.9
○ 하재담, 하상옥, “투수콘크리트 포장의 배합설계 및 시공사례,” 2000.6
○ 조규태 외 2명, “배수성 시멘트 콘크리트 포장공법의 현장 적용성 평가,” 대한토목학회 논문집, 2002.7
○ 콘크리트 분과 위원회(도로학회), “유럽의 콘크리트 포장 및 기능성 포장,” 한국도로학회, 2004
○ 한국건설기술연구소, “도로설계편람,” 건설교통부, 2000
○ 세종대학교 도로・지반 연구실, “장수명 교면포장 배수시스템 개발 연구,” 2005
○ 경희대학교 도로 및 교통공학 연구실, “특수포장 적용방안 연구,” 2003
○ 강릉대학교 도로・지반 연구실, “배수성 포장 시스템,” 2004
○ 천병식 외, “Soil-Cement 도로포장의 내구성,” Journal of the Research of industrial science, Vol. 35, 1992
○ “석분・시멘트 안정처리기층 포장공법,” 삼표산업(주), 용마 엔지니어링(주), 1994
○ 고준영, 고병순, 고병식, “GH 고화제를 이용한 도로노반처리공법,” 신기술지정신청서, 1999. 5.
○ 이송, 채점식, 이광열, “나프탈린계 토질안정제로 처리된 흙의 공학적 특성,” 토목학회, Vol.21 No.5-C, 2001
○ 김진철 외, “현장파쇄 재생골재를 사용한 린 콘크리트 시공구간의 성능평가,” 토목학회, 2003
○ 조규성 외, “개질 제강슬래그 사용 빈배합 콘크리트 시험시공,” 토목학회, 2004
○ 이승우 외, “저수축 시멘트 안정처리 지반 재료개발,” 한국도로학회, 2004
○ 문한영, 김성수, 정호섭, “투수성 콘크리트 포장의 실용화를 위한 실험적 연구,” 콘크리트학회지, 제10권 3호, 1998.
○ 최상흘, “물이 스며 흐르는 콘크리트,” 시멘트 1997.6
○ 문한영 외, “투수성 콘크리트 포장의 특성에 대한 실험적 연구,” 한국콘크리트학회, 1997
○ 김무한 외, “배합요인에 따른 포러스 콘크리트의 강도향상에 관한 실험적 연구,” 가을학술발표회, 1999
○ 채창우 외, “폴리머를 혼화재로 혼입한 투수콘크리트의 물리적 특성에 관한 실험적 연구,” 콘크리트학회, 2000

- 박승범 외, “섬유보강 포러스 콘크리트의 공극률과 투수계수 특성에 관한 연구,” 가을학술발표회, 2000
- 김무한 외, “이론공극율, 골재입도 및 양생방법이 포러스콘크리트의 강도 및 투수성능에 미치는영향,” 가을학술발표회, 2000
- 김무한 외, “굳지않은 포러스콘크리트의 품질관리를 위한 실험적 연구,” 봄학술발표회, 2002
- 박승범 외, “배합요인에 따른 포러스 콘크리트의 흡음특성,” 가을학술발표회, 2003
- 박승범 외, “결합재량 및 다짐에너지에 따른 포러스콘크리트의 특성에 관한 연구,” 콘크리트학회, 2004
- 한국형 포장설계법, 2002
- 정석진, 이병용, “광촉매를 이용한 NOx 및 휘발성 유기화합물(VOC) 제거기술,” 첨단환경기술 8월호, 2002
- 안남식, 조윤호, 양성철, 최재곤, “페이버 포장의 국내외 적용 사례 및 연구 동향,” 한국도로학회 2004 학술발표회 논문집, pp. 209～214
- 한천구, 이상태, 이대주, 신병철, 김진선, 권상준, “고로슬래그 시멘트를 사용한 인터로킹 블록의 특성에 관한 연구,” 토목학회 1997년 가을 논문집 Vol.19 No.2, pp. 203～206
- 성찬용, 김영익, “볏짚재를 혼입한 다공성콘크리트 블록의 식생을 위한 공학적 특성,” 콘크리트학회 2004년 가을 학술발표회 논문집, Vol.16 No.3, pp. 311～318, 2004
- 한천구, 김경민, 백명숙, 이상태, 최청각, 김기철, “재생골재를 이용한 식재용 콘크리트 블록의 형태개발에 관한 기초적 연구,” 콘크리트 학회 2002년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.14 No.2, pp. 261～264, 2002
- 소양섭, 김대규, 윤성진, 문경주, “도시 쓰레기 소각 비산재를 활용한 인공골재의 인터로킹 블록 적용,” 콘크리트 학회 2003년도 봄 학술발표회 논문집, Vol.15 No.1, pp. 327～332, 2003
- 조병완, 박승국, 김진일, “석탄회 인공골재를 이용한 콘크리트 프리캐스트 블록 연구,” 콘크리트 학회 2002년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.14 No.2, pp. 293～298, 2002

○ 권기철, “변형특성을 고려한 노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법”, 한국과학기술원, 박사학위논문. 1999
○ 김동수, 김민종, 서원석, “모관흡수력 및 함수비에 따른 노상토의 동적변형특성 연구”, 한국지반공학회논문집 제 18권 5호 pp. 109~122, 2002
○ 서원석, 김동수, 이세현, “모관흡수력 조절을 이용한 함수비 변화에 따른 노상토의 구성모델 평가”, 대한토목학회 정기학술대회 CD, pp. 3860~3863, 2005
○ 김희성, 진치섭, “주물공장 플라이애쉬를 혼합한 콘크리트 블록 및 벽돌의 기초적 성질,” 콘크리트 학회 2001년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.13 No.2, pp.87～92, 2001
○ 한천구, 신병철, 이상태, 김기철, 김진선, 권상준, “플라이애쉬 치환율 변화에 따른 인터로킹 불록의 특성에 관한 연구,” 콘크리트 학회 1998년 봄 학술발표회 논문집, Vol.10 No.1, pp. 99～104, 1998
○ 한천구, 이상태, 김기철, 신병철, 이동남, “미립분의 혼입율 변화에 따른 인터로킹 블록의 특성,” 콘크리트 학회 1999년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.11 No.2, pp. 171～174, 1999
○ 한천구, 이상태, 김기철, 신병철, 김진선, “인터로킹 블록의 품질에 미치는 물시멘트비와 화학혼화제의 영향,” 콘크리트 학회 1998년도 가을 학술발표회 논문집, Vol.10 No.2, pp. 157～160, 1998
○ 한국표준협회, “KS F 4419 : 보차도용 콘크리트 인터로킹 블록,” 2001
○ 안남식, 조윤호, 양성철, 최재곤, “페이버 포장의 국내외 적용 사례 및 연구 동향,” 한국도로학회 2004 학술발표회 논문집, pp. 209～214, 2004
○ 장수명 친환경 도로포장 연구단, “도심지 열섬완화를 위한 도로포장 시스템개발”, 2007
○ 김해동, 계명대학교, 건설 핵심기술 연구개발사업 “신도로포장재의 환경친화성 평가연구”, 2007
○ 이토오 마사히데, “빗물을 침투시키는 포장의 보급 실태와 앞으로의 전개,” (사)일본 도로협회, 2004
○ (사)일본 도로협회, “배수성 포장 관련 기술의 변천,” (사)일본 도로건설업협회 기술정책 등 정보부 회의, 2004
○ 가츠 도시유키 외 3명, “고속형 배수성 포장 기능회복차의 개발과 그 효과의 검

증," (사)일본 도로협회, 2004, 11
○ 고모다 유카 외 2명, "각종 포장재의 소음흡수성에 관한 검토," (사)일본 도로협회, 2004, 11
○ 이마이 히사오 외 1명, "통기시험기 개발과 배수성 포장의 투수성능 평가 예," (사)일본 도로협회, 2004, 10
○ 이하라 츠토무 외 2명, "배수성 포장의 노면 텍스쳐와 타이어/노면 소음에 관한 검토," (사)일본 도로협회, 2004.2
○ 미네기시 준이치 외 1명, "저소음 포장의 골재 비산 실태와 골재비산저항성 평가방법 검토," (사)일본 도로협회, 2003.5
○ 나카하라 다이키 외 3명, "조기교통개방형 다공질 콘크리트 포장의 실용화 검토," (사)일본 도로협회, 2002,9
○ 일본 (사) 시멘트협회 포장기술전문위원회, "포장용 다공질 콘크리트 공통시험결과," (사)일본 도로협회, 2000, 3
○ 다나카 사토시 외 3명, "차도용 투수성 콘크리트 포장의 개발," (사)일본 도로협회지, 1997,11
○ (사) 일본도로협회, "배수성 포장 기술 지침(안)," 1998.11
○ Nakanish Hiromitsu and Asano Kouzi(2001.2) "환경을 배려한 차도용 투수성포장의 개발", 포장
○ Nemoto Nobuyuki(2001.2), "수지 코트형 투수성 아스팔트포장의 차도의 적용". 포장
○ Tatebe Hidehiro(1996.9)."차도를 대상으로 한 투수성포장의 가능성". 포장
○ Dndo KAtsura(2002.2). "시험포장에 의한 차도용 투수성포장의 퍼포먼스". 포장
○ Prithvi S. Kandhal, Rajib B. Mallick, "OPEN-GRADED FRICTION COURSE:STATE OF THE PRACTICE," National Cneter for Asphalt Technology, 1998
○ Mohammad Faghri, Martin H. Sadd, "Performance Improvement of Open-Graded Asphalt Mixes," UNIVERSITY OF RHODE ISLAND TRANSPORTATION CENTER, 2002
○ Gemayel, C.A., Mamlouk, M.S, "Chracterization of Hot-Mixed Open Graded Asphalt Mixtures," Transportation Research Record 1171, pp 184-192, 1988

- Qi, X., Sebaaly P.E., “Evaluation of Polymer-Modified Asphalt Concrete Mixtures,” Journal of Materials in Civil Engineering, pp 117-124, 1995
- Rajib B. Mallick, Prithvi S. Kandhal, “DESIGN, CONSTRUCTION, AND PERFORMANCE OF NEW-GENERATION OPEN-GRADED FRICTION COURSES,” NCAT, 2000
- Donald E. Waston, L. Allen Cooley, Jr., “LABORATORY PERFORMANCE TESTING OF OGFC MICTURES,” NCAT, 2004
- United States Department of Transportation, Federal Highway Administration, Technical Advisory T 5040.31. “Open-Graded Friction Course,” December 26, 1990
- Bouzid Choubane, James A. Musselman, “FORENSIC INVESTIGATION OF BLEEDING IN OPEN-GRADED ASPHALT-RUBBER SURFACE MIXES,” Florida Dept, of Transportation, 1999
- Georgia Department of Transportation's Progress in Open-Graded Friction Course Development
- “ALABAMA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION,” December 24, 2002
- L. Allen Cooley, Jr., E. Ray Brown, “EVALUATION OF OGFC MIXTURES CONTAINING CELLULOSE FIBBERS,” NCAT, 2000
- Samuel B. Cooper, Jr., P.E., Chris Abadie, P.E., “EVALUATION OF OPEN-GRADED FRICTION COURSE MIXTURE,” Louisiana Transportation Research Center, 2004
- NAPA, "Lenexa, Kansas, Tries Porous Asphalt" Article in HMAT magazine, May/June 2005
- Michele C. Adams, "Porous Asphalt Pavement with Recharge Beds:20 Yeart and Still Warking" Stormwater magazine featured porous asphalt in a recent issue. May/June 2003
- “European Scan Touron Quiet Pavements", Quiet Asphalt 2005 Purdue University,2005
- NCAT, "Current Implementation Status of OGFC" National Center for Asphalt Technology, 1998

○ 玉井元治 外, “透水性コンクリート中における鐵筋の評價 と防食,” コンクリート工學年次論文 報告書, Vol. 15, 1993, pp. 691 ~ 696.
○ R. C. Meininger, “No-fines Pervious Concrete for Paving, Concrete International, 10,” No.8, pp. 20-7, 1988
○ “Porous Concrete Slabs and Pavement Drain Water,″ Concrete Construction, Concrete Construction Publications, Inc., Addison, Illinois, September 1983, pages 685 and 687-688.
○ Dallas N. Little and Eric. Males, ″Cementitious Stabilization″ Transportation Research Board, 2000
○ David J. White and Kenneth L. Bergeson, ″Long term strength and durability of hydrated fly-ash road bases″, Transportation Research Board Washington, D.C, 2001
○ K. Ksaibati, P.E and Melinda. M. Bowen, ″ Evaluating the performance of cement treated bases in Wyoming″, 2nd International Symposium on Maintenance and Rehabilitation of Pavement and Technological Control, 2001
○ Imran M.Syed and Tom Scullion, P.E. ″Performance evaluation of recycled and stabilized bases in Texas″ Transportation Research Board, 2001
○ H L Theyse, “Overview of the South Africa Mechanistic pavement design analysis method″ Transportation Research Board, 1996
○ “유럽의 콘크리트 포장 및 기능성 포장” 2004.10. 한국도로학회
○ Crovetti, J.A., and Dempsey, B. J., “Hydraulic Requirements of Permeable Bases,″ Transportation Record No. 1425, TRB, National Research Council, Washington DC, 1993, pp. 28-36.
○ Moynahan, Jr., T.J., and Steinberg, Y.M., “Effects on Highway Subdrainage of Gradation and Direction of Flow Within a Densely Graded Base Course Material,″ Transportation Research Record No. 497, TRB, National Research Council, Washington DC, 1974, pp.50-59.
○ Brown, D., “Highway Drainage Systems,″ Roads and Bridges, February 1996, pp. 34, 40-41.
○ Kozeliski, F.A., “Open-Graded Base as a Parking Lot Pavement,″ Presented

at the ACI 1996 Spring Convention, Denver, Colorado, March 15, 1996, 14 pages.

○ Kagata Mamoru 외, “하이브리드형 침투성 콘크리트포장”, 포장, 2001.2

○ B Shackel, “The challenges of concrete block paving as mature technology,” the 7th International Conference on Concrete Block Paving, 2003

○ Paul Lamparter, “CBP Sealing Structural and Environmental Benefits,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 195～201, 2000

○ Allan J. Dowson, “The Influence and Effects of Water in Laying Course Material in Concrete Block Paving Construction,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 151～158

○ Lazar. M, “Reflective pavers and kerbs,” the 7th International Conference on Concrete Block Paving, 2003.

○ Akihiko Karasawa, Yasuyuki Sano, “Study on Deflection and Joint Width of Interlocking Block Pavement Affecting Chipping of Block,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 71～80, 2000

○ Tatsuo Nishizawa, Sadanori Murai, Sigeo Suda, “Analysis of Spalling of Concrete Blocks by Photo-Elastic Experiment and FEM,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 90～97, 2000

○ Hata M, Toriiminami K, Ezumi N, “Properties of permeable concrete blocks with reversible and aesthetic surfaces,” the 7th International Conference on Concrete Block Paving, 2003

○ Mamoru Kagata, Tatsuo Nishizawa, Minoru Hata, “Effects of Block Dimension on Structural Performance of Block Pavement for Roadways,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 98～107, 2000

○ Inuzuka M, Sasaki K, Sato I, “Concrete blocks with tyres,” the 7th International Conference on Concrete Block Paving, 2003

○ Adolph Veit, “Suggestions for Improving Coloured Concrete Products,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 179～187, 2000

○ Gerald Buechner, Lutz Kohnert, “New Pigments for the Colouring of

Construction Materials Processing Advantages at Zero Tariff," The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 188～194, 2000

○ J. Geotech. and Geoenvir. Engrg "Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects" Volume 123, Issue 7, pp. 663-670, 1997

○ Vincent Janoo, Kent Shepherd "Seasonal Variation of Moisture and Subsurface Layer Moduli" Transportation Research Board Issue Number: 1709 pp. 98-107 ISSN: 0361-1981, 2000

○ Khaled Ksaibati, Jamshid Armaghani, Jason Fisher "Effect of Moisture on the Modulus Values of Base and Subgrade Materials" Transportation Research Board Issue Number: 1716 pp. 20-29 ISSN: 0361-1981, 2000

○ D. Yuan and S. Nazarian "Variation in Moduli of Base and Subgrade with Moisture", Transportation Research Board, 03-3286, 2003

○ Abraham Bae, Shelley M. Stoffels, D.E., P.E. "Observed Effects of Subgrade Moisture on Longitudinal Profile" Transportation Research Board, 06-2312, 2006

○ Hassan M. Salem and Fouad M. Bayomy "Effectiveness of Using Open-Graded Base Layer on the Subgrade Moisture Regime and the Overall Pavement Performance" Transportation Research Board 2006

○ Ruth Roberson, John Siekmeier "Determining Material Moisture Characteristics for Pavement Drainage and Mechanistic Empirical Design" Materials & Road Research 2002

<3장>

○ 한국도로공사, "배수성 포장 연구," 1995

○ 건설교통부, "한국형 포장 설계법 연구관련 국외전문가 초청 WORKSHOP," 2002

○ 중국교통부도로국, "제9회 한중도로기술교류회 논문집," 2004

○ 건설교통부, "중하중 교통도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공기술개발," 2004

○ 서호건업, "Interlocking Block Pavement", brochure, 2000

○ “한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구,” 건설교통부, 기본 계획보고서, 2001년

○ “한국형 포장 설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구,” 건설교통부, 1차년도 보고서, 2002년

○ 조윤호, 구한모, 윤태영, “A Behavior Analysis of Concrete Overlay Based on the Characteristics of Asphalt Pavements,” TRB, 2003년

○ 안지환, “콘크리트 포장에서 휨강도 추정을 위한 기초물성 연구,” 석사 졸업 논문, 2000년

○ “중하중 교통 도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공기술 개발,” 건설교통부, 2001년도 1차 보고서

○ “중하중 교통 도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공기술 개발,” 건설교통부, 2002년도 2차 보고서

○ “중하중 교통 도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공기술 개발,” 건설교통부, 2003년도 3차 보고서

○ “한국형 아스팔트 포장 설계법 개발 2004년 3차년도 보고서,” 2004

○ KS F 2312-2001 흙의 다짐 시험 방법(Test Method for Soil Compaction Using a Ramer), 한국산업규격, 2001.

○ KS F 2310-2001 도로의 평판 재하 시험 방법(Method of Plate Load Test on Soils for Road), 한국산업규격, 2001.

○ 백우현, “HWLS 및 관련 실험법 개발에 관한 연구,” 중앙대학교, 2001

○ “중하중 교통 도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 빛 시공기술 개발 제 1차년도 연차보고서”, 중앙대학교, 2001

○ 환경부, “소음/진동 환경개선 중장기 계획,” 2000

○ 한국도로공사, “2005년 고속도로 통계”, http://www.freeway.co.kr/

○ 대한건설 폐기물처리 공제조합, http://www.conwas.com/

○ 도로용량편람, 2001, 건설교통부

○ 건설교통부, “2005년 하반기 건설공사 실적공사비 적용 공종 및 단가”, 2005

○ 국토연구원, "도로사업 투자분석기법 정립", 1999

○ 건설교통부, “공공교통시설개발사업에 관한 투자평가지침”, 2004

○ 한국개발연구원, “2001년도 예비타당성 연구보고서『도로부문사업의 예비타당성

- 조사 표준지침 연구 (제3판)』", 한국개발 연구원, 2001
- 통계청 , "http://www.nso.go.kr"
- 한국은행, "http://www.bok.co.kr"
- 대한석유협회, "http://www.petroleum.or.kr"
- 기상별 교통사고 현황, 도로교통공단, http://www.rtsa.or.kr
- 정부구매물자 가격정보, 조달청, http://pps.go.kr
- 건설교통부, 도로교통량통계연보, 2001
- 아스팔트 포장 설계법 개발, 한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구, 2004. 10.
- 중앙대학교, 중하중 교통 도로의 신속개방형 대보수 및 덧씌우기용 고성능 강성 포장 재료의 설계 및 시공기술 개발, 2004
- 남양주시 진건하수처리장 진입도로 재생골재가 적용된 현장 공용성 평가 연구, 중앙대학교, 2004
- 권수안 외, "현장에서의 동적관입시험을 이용한 노상토의 지지력 평가연구", 2004
- 박대근, "i-Button의 실용화 및 콘크리트포장 초기균열 거동연구", 한양대학교, 2002
- TML, http://www.tml.jp/e/product/strain_gauge/what_strain.html
- 가열 아스팔트 혼합물 배합 설계 지침, 건설교통부, 2005
- 전성일 외, "포장하부구조 함수비 측정을 위한 TDR방식 함수량계의 실내보정실험", 2003
- KS F 2312-2001 흙의 다짐 시험 방법(Test Method for Soil Compaction Using a Ramer), 한국산업규격, 2001.
- KS F 2311-2001 현장에서 모래 치환법에 의한 흙의 단위 중량 시험 방법 (Testing Method for Density of Soil in Place by the Snad-Cone Method), 한국산업규격, 2001.
- KS F 2310-2001 도로의 평판 재하 시험 방법(Method of Plate Load Test on Soils for Road), 한국산업규격, 2001.
- A J Dowson, "The development of surface tatile indicators," the 7th International Conference on Concrete Block Paving, 2003

○ A N S Beaty, “interlocking Concrete Block Pavements for Roads,” Concrete 2000 Economical and durable construction through excellence, E & FN SPON, 1999

○ ICPI, “Case study in Engineered interlocking concrete pavement,” 2004

○ ICPI, “Tech spec No.10-Application Guide for interocking Concrete Pavements,” 2003

○ Development of function recovery/maintenance machine for porous pavement, 일본 세기동급공업주식회사(世紀東急工業株式會社) 자체 세미나, 2005.1

○ ICPI, “Tech spec No.8-Concrete grid pavement,” 2001

○ ICPI, “Tech spec No.12-Snow melting system for interlocking concrete pavements,” 2003

○ Kitabukuro-cho, “Air purifying blocks based on photocatalysis,” The 6th International Conference on Concrete Block Paving, pp. 570～578, 2000

○ Shackel B, Lim, D.O.O, “Mechanisms of paver interlock,” the 7th International Conference on Concrete Block Paving, 2003

○ Yang H. Huang, “Pavement Analysis & Design,”

○ E.J. Yoder, M.W. Witczak, “Principles of Pavement Design Second edition”

○ Khaled A.Galal외 1명, “INDOT-APT Test Facility Experience,” Indiana DOT and Purdue University, 1999

○ John B. METCALR, “Application of Full-Scale Accelerated Pavement Testing,” NCHRP 235, 1996

○ Owusu-Antwi, E., M. Mamlouk, F. McCullagh, “Accelerated Pavement Testing Phase I,” Arizona Department of Transportation, 2000

○ Hugo, F., A.D. Fortier Smit, P. Warren, “Report on APT Data Survey,” Transportation Research Circular, Center for Transportation Research and University of Texas at Austin, Texas, 1998

○ Hall, J.W., “Accelerated Pavement Testing : Data Guidelines,” NCHRP 512, 2003

○ “Acoustics-Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise-Part 1 : Statistical Pass-By method,” ISO 11819-1, 1997.2

- “Acoustics-Measurement of the influence of road surfaces on traffic noise-Part 1 : Statistical Pass-By method,” ISO 11819-2 1997.2
- “ISO / TC43 / SC1 / WG42,” ISO 362 Working Draft, 2001. 2
- J. Affenzeller, A. Rust, “Noise Technology Status Report,” AVL List GmbH, Austria, 2003. 11
- Larry Scofield, “SR202 PCCP Whisper Grinding Test Sections,” Arizona DOT, 2003. 10
- Michael T. McNerney, B. J. Landsberger, Tracy Turen and Albert Pandelides, “Comparative Field Measurements of Tire Pavement Noise of Selected Texas Pavements,” University of Austin, 1998
- M. Garai, M. Berengier, P. Guidorzi, Ph. L'Hermite, “Procedure for Measuring The Sound Absorption of Road Surfaces In Situ,” Euro Noise ´98 conference, 1998. 10
- Wisconsin Department of Transportation “Noise and Texture on PCC Pavements,” June, 2000
- M. E. Barrett, J.F. Malina and R.J. Charbeneau, ‘Characterization of highway runoff in the Austin , Texas area, Thechnical report CRWR 262,’ Center for Research in water resources, Univ. of Texas, 1995
- Noise reducing pavements in Japan- study tour report, Danish Road Institute, 2005. 12
- Kaan Ozbay, Neville A. Parker, Dima Jawad, Sajjad Hussain, "Guidelines for Life Cycle Cost Analysis", Presented at NJDOT, 2003
- Colorado DOT, Pavement design 2006 “Chapter9 PAVEMENT TYPE SELECTION AND LIFE CYCLE COST ANALYSIS”, 2005
- American concrete pavement association,, "Life cycle cost analysis : A guide for comparing alternate pavement designs", 2002
- West Virginia Department Of Transportation Division Of Highways Design Directive, "Pavement design selection guide", 2003
- “Highway Capacity Manual 1994", Released TRB Publications
- “Highway Capacity Manual 2000", Released TRB Publications

○ James Walls III, Michael R. Smith, "Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design-In search of better investment decisions-", Presented at Federal Highway Administration, 1998
○ 低騒音舗装の概説, 社團法人 建設物イ西 調査元, 2003
○ Yang H. HUANG, Pavement analysis and design, Pearson Education, Inc, 2004
○ Hugo, F. and Epps, Martin, "Significant Findings from Full-scale Accelerated Pavement Testing," NCHRP Synthesis of Highway Practice 325, ○ ○ Transportation Research Board, National Research Council, Washington, D.C., 201pp, 2004.
○ Jeong-Hee Nam, Ph.D., "MEASUREMENT AND ANALYSIS OF EARLY-AGE CONCRETE STRAINS AND STRESSES IN CONTINUOUSLY REINFORCED CONCRETE PAVEMENT UNDER ENVIRONMENTAL LOADING", Center for Transportation Research The University of Texas at Austin, 2006

관 리 번 호

사 본 번 호

친 환 경 4S(Safe, Silent, aeSthetic, and user Satisfaction guaranteed) 포장 시스템

표 준 시 방 서

2007. 8.

<목 차>

제 1 장 총설 ····· 1

제 2 장 친환경 4S 투수 아스팔트 표층 ····· 2

1절. 일반사항 ····· 2

1. 적용범위 ····· 2

2. 참조규격 ····· 2

3. 제출물 ····· 2

2절. 재료 ····· 3

1. 재료의 품질기준 ····· 3

2. 재료의 입도 ····· 4

3. 재료의 승인 및 시험 ····· 4

4. 재료의 저장 ····· 4

5. 배수성 아스팔트 혼합물 배합설계 기준 ····· 5

6. 기준밀도 ····· 7

3절. 시공 ····· 7

1. 플랜트 ····· 7

2. 기상조건 ····· 7

3. 시험포장 ····· 8

4. 현장배합 ····· 8

5. 혼합작업 ····· 8

6. 혼합물의 운반 ····· 8

7. 포설 ····· 8

8. 다짐 ····· 9

9. 이음 ····· 9

10. 마무리 ····· 9

11. 두께측정 ····· 9

12. 품질관리 및 검사 ····· 9

제 3 장 저수축 투수/불투수 CTB(Cement Treated Base) 10

1절. 일반사항 ····· 10

1. 적용범위 ····· 10
2. 참조규격 ····· 10
3. 제출물 ····· 10

2절. 재 료 ····· 11

1. 재료의 품질 기준 ····· 11
2. 골재의 입도 ····· 13
3. 배 합 ····· 13

3절. 시 공 ····· 14

1. 준비공 ····· 14
2. 시공기계 ····· 15
3. 기상조건 ····· 15
4. 시험포장 ····· 15
5. 현장배합 ····· 16
6. 혼합물생산 ····· 16
7. 혼합물운반 ····· 16
8. 포설 ····· 17
9. 다짐 ····· 17
10. 시공 이음 및 단부처리 ····· 18
11. 양생 ····· 18

제 4 장 Paver ····· 19

1절. 일반사항 ····· 19

1. 적용범위 ····· 19
2. 참조규격 ····· 19

2절. 차도포장의 구성요소 ····· 19

1. 길바탕 흙의 CBR이 30% 이상인 경우 ····· 19
2. 길바탕 흙의 CBR이 10% 이상이며 30% 이하인 경우 ····· 19
3절. 인터로킹 블록 ····· 20
1. 압축강도 ····· 20
2. 흡수율 ····· 20
3. 치수 허용차 ····· 20
4절. 줄눈부 ····· 20
1. 줄눈 폭 ····· 20
2. 줄눈 모래 ····· 20
5절. 기타시공 ····· 21
1. 가장자리 구속 ····· 21
2. 배수 ····· 21

제 5 장 친환경 4S 포장 택 코트 ····· 22
1절. 일반사항 ····· 22
1. 적용범위 ····· 22
2. 참조규격 ····· 22
3. 제출물 ····· 22
2절. 재료 ····· 22
1. 역청재의 품질 기준 ····· 22
2. 재료의 승인 및 시험 ····· 23
3절. 시공 ····· 23
1. 표면정비 ····· 23
2. 장비 ····· 23
3. 기상조건 ····· 23
4. 사용량 및 살포온도 ····· 24
5. 역청재의 살포 ····· 24
6. 유지관리 ····· 25

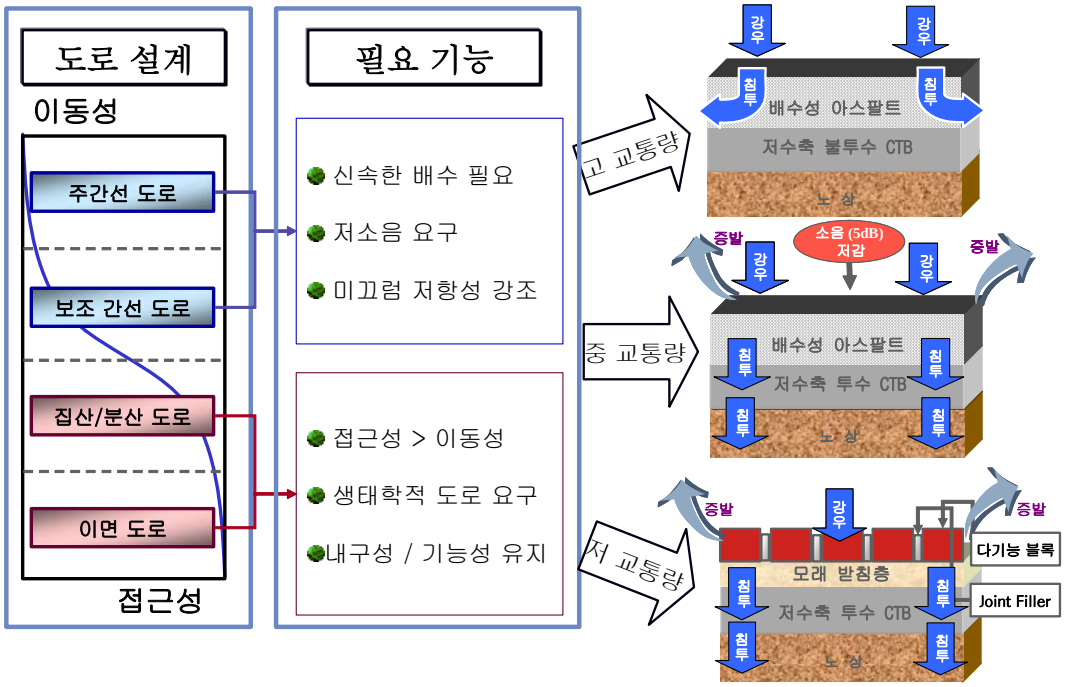
제 6 장 친환경 4S 포장 지하배수시설 ····· 26
1절. 일반사항 ····· 26
1. 적용범위 ····· 26
2. 참조시방 ····· 26
2절. 재료 ····· 26
3절. 설계 ····· 26
1. 투수성포장 (투수 아스팔트 / 저수축 투수 CTB) ····· 26
2. 배수성포장 (투수 아스팔트 / 저수축 불투수 CTB) ····· 27
4절. 시공 ····· 27

제 7 장 친환경 4S 포장시스템 유지관리 지침 ····· 28
1절. 일반사항 ····· 28
1. 적용범위 ····· 28
2. 개요 ····· 28
2절. 유지관리 ····· 28
1. 포장청소형식 ····· 28
2. 청소 시기와 횟수에 관한 분석 ····· 29
3. 추가사항 ····· 29
3절. 유지보수 ····· 29
1. 러팅 ····· 29
2. 탈리 ····· 30
3. 크랙 ····· 30
4. 평탄성 불량 ····· 30
5. 기능성상실 ····· 31
4절. 기타 ····· 31

제 1 장 총설

친환경 4S 포장시스템이란 도로 사용자 중심의 안전하고(Safe), 조용하며(Silence), 아름다운(aeSthetic) 포장으로써 사용자에게 만족(user Satisfaction)을 주는 포장 시스템을 말한다.

친환경 4S 포장시스템은 <그림 1.1>과 같은 3가지 포장형식으로 분류된다. 이동성이 높은 주간선 도로 및 보조간선 도로는 배수성/투수성 포장을 적용하여 소음을 저감시키고 빠른 배수를 통하여 빗길 안전성을 향상시킨다. 기존의 시멘트 안정처리 기층을 개선한 저수축 투수 시멘트 안정처리 기층을 이용하여 투수성 포장이 가진 내구성 및 강도 특성을 이용하는 한편 반사균열 문제를 해결하였다. 또한 다기능 Paver의 재료, 형상, 시공법, 유지보수 공법 등을 개발하여 접근성이 높은 집분산 도로 또는 이면 도로에 적용함으로써 사용자에게 아름다운 도로를 제공한다.



<그림 1.1> 4S 포장 시스템의 기본 개념도

제 2 장 친환경 4S 투수 아스팔트 표층

1절. 일반사항

본 시방서는 고속도로전문시방서의 9-6-2 배수성 아스팔트 포장 시방을 기본으로 한다.

1. 적용범위

이 시방은 친환경 4S 투수 아스팔트 표층공사에 적용한다.

2. 참조규격

KS F 2337 마샬시험기를 사용한 역청혼합물의 소성흐름에 대한 저항력 시험방법
KS F 2355 역청 골재 혼합물의 피막 박리 시험 방법
KS F 2389 아스팔트의 공용성 등급
KS F 2503 굵은 골재의 밀도 및 흡수율 시험 방법
KS F 2507 골재의 안정성 시험 방법
KS F 2508 로스엔젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모시험방법
KS F 3501 역청포장용 채움재
KS M 2252 역청재료의 침입도 시험 방법
KS M 2248 아스팔트의 동점도 시험 방법

3. 제출물

가. 해당공사의 공사 계획에 맞추어 시공계획서를 작성한 후 제출해야 한다.

나. 재료 시험 성적서를 추가로 제출해야 한다.

2절. 재료

1. 재료의 품질기준

가. 아스팔트바인더

아스팔트는 <표 2.1>의 친환경 4S 배수성 포장용 개질아스팔트를 원칙적으로 사용해야하며 <표 2.2>의 기준에 적합해야한다.

<표 2.1> 친환경 4S 포장시스템 표층용 투수성 아스팔트 바인더

명칭	설명			
	침입도	Wax(%)	폐타이어(%)	방식
4S-1	60-80	2%	12	습식
4S-2	60-80	2%	12	건식

<표 2.2> 배수성 포장용 개질아스팔트 품질기준

항목	기준
침입도(25℃, 100 g, 5초)	60-80
연화점(℃)	70 이상
신도25℃, 5 cm/min) (cm)	50 이상
박막가열후질량변화율(%)	0.6 이하
박막가열후침입도의비(%)	65 이상
터프니스(kgf · m)	200 이상
티네이시티(kgf · m)	150 이상
점도(60℃, poise)	200,000 이상
PG	82-22

나. 2.1.2 골재

고속도로전문시방서 9-4절2.2의 기준에 따른다..

2. 재료의 입도

잔골재, 굵은 골재 및 채움재를 혼합한 혼합골재의 입도는 <표 2.3>의 기준을 표준으로 한다.

<표 2.3> 혼합골재의 입도기준

구분	공칭 입경에 대한 체 통과중량 백분율(%)	
공치최대치수 / 호칭 입경(mm)	19mm	13mm
25	100	-
20	95-100	100
13	53-78	92-100
10	35-62	62-81
5	10-31	10-31
2.5	10-21	10-21
0.6	4-17	4-17
0.3	3-12	3-12
0.15	3-8	3-8
0.08	2-7	2-7

3. 재료의 승인 및 시험

고속도로전문시방서 8-4절 2.3에 따른다.

4. 재료의 저장

고속도로전문시방서 8-4절 2.4에 따른다.

5. 배수성 아스팔트 혼합물 배합설계 기준

배수성 아스팔트 콘크리트 표층용 혼합물은KS F 2337(다짐조건: 양면 각 50회)으로 시험하였을 때 <표 2.4>의 기준에 합격하는 것 이어야 한다.

<표 2.4> 배수성 혼합물의 배합설계 기준

항목	기준
안정도(kg)	500 이상
흐름값(1/100 cm)	20-40
수침마샬잔류안정도(%)	75 이상
공극률(%)	20 이상
현장투수능력(sec)	10 이내
동적안정도	3,000회/mm
칸타블로 손실률(%)	20% 이하

가. 골재 배합비 결정

선정된 골재를 이용하여 배수성 아스팔트 합성입도를 만족하고 공극률이 약 20%가 되도록 배합비를 결정한다.

- 골재입도는 중앙 입도 부근 또는 과거의 시공예를 참고로 잠정 중앙 입도를 설정한다.
- 시험 다짐용 골재 배합비는 채움재의 배합을 일정(5% 정도)하게 하고, 굵은 골재와 잔골재의 배합비를 변화시켜 2.5㎜ 체 통과 질량 백분율이 중앙 입도 부근에서 ±3% 정도의 3입도를 목표로 결정한다.
- 잠정 3입도에 대한 아스팔트 량은 배수성 혼합물의 공극률이 20%일 때 아스팔트 막의 두께가 거의 14㎛이므로 <표 2.5>와 다음 식으로부터 구한 양을 이용하여 마샬 공시체를 제작한다.

· 골재 표면적 = $\frac{2+0.02a+0.04b+0.08c+0.14d+0.3e+0.6f+1.6g}{48.74}$

· 잠정 아스팔트 량 = 가정 막두께(14㎛)×골재 표면적

<표 2.5> 골재치수별 계수

체 눈의 크기(㎜)	5.0	2.5	1.2	0.6	0.3	0.15	0.08
체 가적 통과 질량 백분률(%)	a	b	c	d	e	f	g
계 수	0.02	0.04	0.08	0.14	0.3	0.6	1.6

※ 1.2㎜ 체가 없을 경우에는 입도 곡선에서부터 1.2㎜ 체 가적 통과 질량 백분율을 읽어도 무방하다.

• 잠정 3입도의 공극률과 2.5㎜ 체 통과 질량 백분율을 구하여 골재 배합비를 결정한다.

나. 설계 아스팔트 함량결정

결정한 골재 배합 혼합물에의 흐름 시험으로부터 아스팔트 량을 설정한 후, 밀도, 마샬안정도, 칸타브로, 휠트래킹 시험을 통해 설계 아스팔트 함량을 결정한다.

• 흐름 시험은 일반적으로 아스팔트 량을 4.0~6.0% 범위에서 0.5% 단위로 5점 변화시킨 배수성 혼합물에 대하여, 각각의 아스팔트 흐름 손실률을 구한다.

(1) 흐름 시험 방법

다지지 않은 상태인 2㎏정도의 혼합물을 용기(45x25cm)에 펼친 후 170℃ 정도에서 1시간 방치한 후 용기를 뒤집는다(용기를 흔들거나 때리지 않음). 이때 용기에 잔류하는 무게를 측정하여 흐름 손실률을 구한다.

· 흐름 손실률(%) = (용기잔류 시료무게/시험에 사용한 시료무게) × 100

・4.0~6.0% 범위 중에서 변곡점이 명확하지 않을 경우에는 4.0% 이하 또는 6.0% 이상의 아스팔트 량에 대해 변곡점이 명확해질 때가지 0.5% 단위로 시험을 추가한다.

・흐름 시험은 배수성 혼합물을 고온에서 정적 상태로 유지할 수 있는 최대 아스팔트 량을 흐름 손실률과 아스팔트 량의 관계 곡선의 변곡점으로부터 구하는데 사용한다. 여기서 결정된 최대 아스팔트 량을 최적 아스팔트 량으로 설정한다.

6. 기준밀도

고속도로전문시방서 9-5절 2.6에 따른다.

3절. 시공

1. 플랜트

고속도로전문시방서 8-4절 3.1에 따른다.

2. 기상조건

고속도로전문시방서 8-4절 3.2에 따른다.

3. 시험포장

고속도로전문시방서 8-4절 3.3에 따른다.

4. 현장배합

가. 고속도로전문시방서 9-4절 3.4에 따른다.

나. 배수성 아스팔트 혼합물의 현장 배합시 허용오차범위는 <표 2.6>에 따른다.

<표 2.6> 배수성 아스팔트 혼합물의 현장배합시 허용오차 범위

호 칭 입 경(mm)	허용오차범위(%)
20, 13, 10	±4
5, 2.5, 0.6, 0.3, 0.15	±3
0.08	±2

5. 혼합작업

고속도로전문시방서 8-4절 3.5에 따른다.

6. 혼합물의 운반

고속도로전문시방서 8-4절 3.6에 따른다.

7. 포설

고속도로전문시방서 8-4절 3.7에 따르며, 다짐 후 1층 두께는 골재 최대치수 19 mm 혼합물에서 5cm, 13mm 혼합물에서 4cm가 되도록 포설해야 한다.

8. 다짐

가. 고속도로전문시방서 8-4절 3.8에 따른다. 다만, 타이어로울러는 사용하지 않아야 한다.

나. 배수성 포장의 혼합물 특성상 온도가 쉽게 내려가기 때문에 전압장비의 편성, 전압회수, 전압시기 등은 시험 포장을 실시하여 결정해야 하며, 배수능력, 내구성 등의 기능을 손상시키지 않도록 주의하여 신속히 전압해야 한다.

다. 머캐덤 다짐은 4회 이상 실시한다.

라. 골재의 부서짐 및 공극확보를 위해 진동을 사용하지 않는다.

마. 현장 다짐밀도는 고속도로전문시방서 9-5절 2.6 기준밀도의96 % 이상 이어야 한다.

9. 이음

고속도로전문시방서 8-4절 3.9에 따른다.

10.마무리

고속도로전문시방서 8-4절 3.10에 따른다.

11.두께측정

고속도로전문시방서 8-4절 3.11에 따른다.

12.품질관리 및 검사

고속도로전문시방서 8-5절 3.12에 따른다.

제 3 장 저수축 투수/불투수 CTB(Cement Treated Base)

1절. 일반사항

본 시방서는 고속도로전문시방서의 8-4 빈배합 콘크리트(Lean concrete) 시방을 기본으로 한다.

1. 적용범위

이 시방은 친환경 4S 포장시스템의 저수축 투수/불투수 CTB(Cement Treated Base)의 건식(Dry mixing type)공사에 적용한다.

2. 참조규격

KS F 2303 흙의 액성· 소성한계 시험 방법
KS F 2312 흙의 다짐 시험 방법
KS F 2364 다져진 역청 혼합물의 공극률 시험 방법
KS F 2394 투수성 포장체의 현장 투수 시험 방법
KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법
KS F 2503 굵은 골재의 비중 및 흡수량 시험 방법
KS F 2507 골재의 안정성 시험 방법
KS F 2508 로스앤젤레스 시험기에 의한 굵은 골재의 마모 시험 방법
KS F 2511 골재에 포함된 잔입자(008mm체를 통과하는) 시험 방법
KS F 2512 골재중에 함유되는 점토덩어리량의 시험 방법
KS F 2513 골재에 포함된 경량편 시험 방법
KS F 2516 긁기 경도에 의한 굵은 골재의 연석량 시험 방법

3. 제출물

가. 해당 공사의 공사계획에 맞추어 시공계획서를 작성한 후 제출해야 한다.

나. 다음 사항을 추가로 제출해야 한다.

(1) 재료시험 성적서
(2) 골재생산 계획서
(3) 시험포장 계획서

2절. 재 료

1. 재료의 품질 기준

가. 시멘트

고속도로전문시방서 13-1절에 따른다. 1종 포틀랜드 시멘트를 이용한다.

나. 물

콘크리트 혼합물에 사용하는 물은 깨끗하며, 기름, 염분, 산, 알카리, 당분, 기타 품질에 영향을 주는 유해물이 함유되어서는 안된다.

다. 굵은 골재

고속도로전문시방서 13-3-1절 2.2에 따른다. 다만, 굵은 골재의 품질 기준은 <표 3.1>을 따른다.

<표 3.1> 저수축 투수/불투수 CTB용 굵은 골재의 품질기준

구 분	시험방법	기준
점토덩어리 함유량(%)	KS F 2512	0.25이하
연한석편(5)	KS F 2516	5.0이하
골재씻기시험 손실율 (%) (0.08 mm체 통과량)	KS F 2511	1.0이하
비중 2.0의 액체에 뜨는 것 (%)	KS F 2513	0.5이하
흡 수 량 (%)	KS F 2503	3이하
밀도 (표면건조, g/㎤.)	KS F 2503	2.45이하
안정성 시험(%) (황산나트륨사용)	KS F 2507	12이하
마 모 감 량 (%)	KS F 2508	40이하

※쇄석의 경우 씻기 시험에서 손실분이 쇄석분인 경우에는 최대치를 1.5%로 해도 좋다.

라. 잔골재

고속도로전문시방서 13-3-1절 2.1에 따른다. 다만, 잔골재의 품질기준은 <표 3.2>에 따른다.

<표 3.2> 저수축 투수/불투수 CTB용 굵은 골재의 품질기준

구 분	시험방법	기준
소성지수	KS F 2303 KS F 2304	9이하
안정성 시험(%) (황산나트륨사용)	KS F 2507	10이하
골재씻기시험 손실율 (%) (0.08 mm체 통과량)	KS F 2511	3이하
점토덩어리 함유량 (%)	KS F 2512	1이하
밀도 2.0g/㎤의 액체에 뜨는 것(%)	KS F 2513	0.5이하

마. 플라이애시

고속도로전문시방서 13-6절에 따른다.

바. 팽창재

고속도로전문시방서 13-6절에 따른다.

사. AE제

고속도로전문시방서 13-6절에 따른다.

2. 골재의 입도

골재의 표준입도는 CTB의 종류에 따라 다음 <표>를 선정하여야 한다.

<표 3.3> 저수축 투수/불투수 CTB용 골재의 입도

구분 / 호칭치수(mm)	공칭입경에 대한 체 통과중량 백분율(%)	
	저수축 투수 CTB (공칭최대치수 25mm)	저수축 불투수 CTB (공칭최대치수 40mm)
50	-	100
40	100	90-100
25	90-100	-
20	50-100	50-85
10	40-75	40-75
5	35-60	25-60
0.6	10-30	10-30
0.08	0-8	0-8

3. 배 합

가. 기준목표

혼합물의 기준은 <표 3.4>와 같다.

<표 3.4> 저수축 투수/불투수 CTB용 혼합물 기준목표

	저수축 투수 CTB	저수축 불투수 CTB
재령7일 기준압축강도(kg/㎠)	50이상	50이상
목표 공극률(%)	15	-
투수계수(cm/sec)	1.0이상	-

배합은 <표 3.5>를 만족하는 범위 내에서 기준목표에 맞추어 배합한다.

<표 3.5> 저수축 투수/불투수 CTB용 배합기준

	저수축 투수 CTB	저수축 불투수 CTB
굵은골재 최대치수(mm)	25mm	40mm
단위시멘트량(%)	7	7
잔골재율(%)	10-15	10-15
물/시멘트비(%)	45-55	45-55
플라이애쉬(%)	25	25
팽창재(%)	10	-
AE제(%)	0.02	-

3절. 시 공

1. 준비공

가. 빈배합 콘크리트 기층 시공에 앞서 보조기층 표면의 뜬돌, 점토, 기타유해물이 있어서는 안된다. 보조기층면은 고속도로전문시방서 8-2절 37에 따라 양호한 상태로 유지 관리하여야 하며, 이 조건과 맞지 않으면 시공자 부담으로 이를 제거하고 재시공하여야 한다.

나. 보조기층면이 건조해 있을 때에는 균일하게 살수한 후 빈배합 콘크리트 기층을 시공하여야 한다.

2. 시공기계

가. 일반사항

고속도로전문시방서 10-1절 31에 따른다.

나. 배치 플랜트(Batch plant)

고속도로전문시방서 10-1절 31에 따른다.

다. 장비점검

사용장비 (피니셔(Finisher), 로울러(Roller) 등)는 공사 전 점검을 실시하여 작업 중 장비의 고장을 사전 예방할 수 있도록 제반 조치를 강구하여야 한다.

3. 기상조건

가. 빈배합 콘크리트 기층의 포설은 감독원이 지시한 경우를 제외하고는 기온이 4 ℃ 이하이거나 우천시에는 공사를 중지하여야한다.

나. 일평균 기온이 30 ℃ 이상인 경우에는 함수비의 관리에 특별히 유의하여야한다.

다. 양생기간 중 동결이 예상되는 경우에는 기층 면을 보호할 수 있도록 동상방지책을 강구하여 감독원의 승인을 받아 이를 조치하여야 한다.

4. 시험포장

가. 시공자는 본 절에 적합한 재료 및 시공기계를 사용하여 감독원 입회 하에 시험포장을 실시하여야 한다 시험포장면적은500 ㎡ 정도로 하며, 다

짐도, 다짐후의두께, 재료분리, 부설 및 다짐방법 등을 검토한다.

나. 시공자는 시험포장을 실시할 장소, 혼합물의 배합 등에 대하여는 감독원과 협의한 후 시험포장 계획서를 제출하고, 결과에 대하여는 감독원과 협의하여야 한다.

5. 현장배합

시공자는 저수축 투수/불투수 CTB에 사용할 대표적인 시료를 사용하여 감독원의 입회하에 시험생산 및 시험포장을 실시하고 그 결과를 검토하여 재료의 배합비를 결정하여 감독원의 승인을 받아야 한다.

6. 혼합물생산

가. 골재

골재는 잔골재와 굵은 골재로 구분하여 적재하고 계량하며, 잔골재율은 시험결과에 따라 감독원과 협의하여 조정하여야 한다.

나. 혼합

중앙혼합식으로 균등한 품질이 되도록 생산하여야 하며, 혼합시간은 2~4 분을 기준으로 한다.

다. 함수량

혼합 시 함수량은 본 시방서의 3장-2절-3을 기준으로 한다.

7. 혼합물운반

가. 콘크리트 혼합물의 운반은 운반차에 싣거나 내릴 때 그 높이를 가능한 낮게 하여 재료분리가 일어나지 않도록 하여야 한다. 운반차는 콘크리트를 내리는 작업이 쉬운 것이라야 하며, 내리기 작업 후에는 물로 씻어내야 한다.

나. 콘크리트가 비벼진 후부터 치기가 끝날 때까지의 시간은 1시간 이내 이어야 한다.

다. 하절기, 강풍, 기타의 경우에는 콘크리트가 운반도중에 건조하지 않도록 혼합물에 덮개를 씌워 보호하여야 한다.

8. 포설

가. 혼합물은 피니셔(Finisher)에 의해 균일한 두께로 포설하여야 한다.

나. 폭이 다르고 형상이 특수한 부분에는 인력으로 포설할 수 있다.

9. 다짐

가. 다짐은 혼합하여 믹싱 후 2시간 이내에 완료하도록 하며, 균일한 다짐도가 얻어지고 재료분리가 일어나지 않도록 평탄하게 마무리 하여야 한다.

나. 콘크리트의 최대건조밀도는 KSF 2312의 E 다짐방법으로 구하며 현장 다짐도의 기준은 100 % 이상으로 한다.

다. 다짐장비는 진동로울러, 탄댐로울러(Tandem roller)와 타이어 로울러(Tire roller)를 사용하며 로울러(Roller)별 다짐순서와 다짐횟수는 시험포장 결과에 따라 결정하며, 다짐장비의 종류를 변경코자 할 경우에는 반입 전에 감독원의 승인을 받아야 한다.

라. 저수축 투수 CTB의 경우에는 진동을 주지 않는다.

마. 다짐후의 두께 및 마무리 면에 대한 허용오차는 다음과 같다.

- 다짐후의두께: 15±1.5 cm

- 마무리면: 계획고±1.5 cm

10. 시공 이음 및 단부처리

가. 시공 이음은 도로중심선의 직각방향으로 설치하여야 한다.

나. 시공 이음부는 상부 층의 포장 공사시 손상하지 않도록 주의하여야 하며, 시공 이음부의 다짐을 철저히 하여야 한다.

11. 양생

가. 저수축 투수/불투수 CTB는 수분이 소량이므로 증발에 의하여 표면이 건조·이완되어 탈 리가 발생하지 않도록 비닐 덮기로 습윤 양생을 철저히 해야 한다.

제 4 장 Paver

1절. 일반사항

1. 적용범위

본 시방서는 차량의 속도가 50km/h 이하인 인터로킹 블록을 사용한 차도포장에 한하여 적용한다.

2. 참조규격

KS L 3305 내화 단열 벽돌의 압축 강도 시험 방법
KS F 4419 보차도용 콘크리트 인터로킹 블록
ASTM C 936 Standard Specifications for Solid Interlocking Concrete Paving Units.

2절. 차도포장의 구성요소

1. 길바탕 흙의 CBR이 30% 이상인 경우

1일 대형차량(8 tonf)의 교통량이 500대 이하인 경우 길바탕 흙 위에 두께 150 mm의 쇄석 기층을 사용하며 기층 위에는 두께 30 mm의 받침모래층을 설치하고 그 위에 두께 80 mm인터로킹 블록을 설치한다. 1일 대형차량의 교통량이 500대 이상인 경우에는 쇄석 기층의 두께를 200 mm로 한다.

2. 길바탕 흙의 CBR이 10% 이상이며 30% 이하인 경우

1일 대형차량의 교통량이 500대 이하인 경우 길바탕 흙 위에 두께 220 mm의 쇄석 보조기층을 설치하며 보조기층 위에 두께 150 mm의 린콘크리트 기층을 설치

한다. 기층 위에는 두께 30 mm의 받침모래층을 설치하고 그 위에 두께 80 mm인 터로킹 블록을 설치한다. 1일 대형차량의 교통량이 500대 이상인 경우에는 린콘크리트 기층의 두께를 200 mm로 한다.

3절. 인터로킹 블록

1. 압축강도

인터로킹 블록의 압축강도는 ASTM C 936 또는 KS L 3305 의 방법에 따라 구한다. 인터로킹 블록의 평균 압축강도는 40 MPa 이상이어야 하며 개개의 강도가 35 MPa 이상이어야 한다.

2. 흡수율

인터로킹 블록의 흡수율은 KS F 4419에 따라 구한다. 흡수율 시험의 결과 평균 흡수율은 7% 이하이어야 하며 개개의 경우 10% 이하이어야 한다.

3. 치수 허용차

블록 치수의 허용차는 길이 및 폭은 2 mm이며 두께는 3 mm이다.

4절. 줄눈부

1. 줄눈 폭

줄눈 폭은 3 mm를 최적으로 하며 2 mm 이하와 5 mm 이상의 폭은 허용되지 않는다. 정확하고 빠른 시공을 위해 간격대를 사용한다.

2. 줄눈 모래

1줄눈 모래는 가늘고 깨끗하며 건조된 모래를 사용하며 <표 4.1>과 같은 입도분포를 만족해야 한다. 줄눈 모래의 채움은 먼저 포장 표면에 모래를 퍼트리고 진동판을 이용하여 모래가 줄눈을 완전히 채울 때까지 진동을 가한다. 표면에 남은 모래는 빗자루를 이용하여 제거하며 이 때 줄눈으로부터 모래가 유출되지 않도록 주의한다.

<표 4.1> 줄눈 모래 입도기준

체 크기	통과율(%)
5mm	100
2.5mm	90~100
1.25mm	85~100
0.630mm	65~95
0.315mm	15~80
0.160mm	0~35
0.075mm	0~10

5절. 기타시공

1. 가장자리 구속

교통하중에 의한 인터로킹 블록의 측면 방향 움직임과 받침모래층으로부터 모래의 손실은 인터로킹 성능의 저하와 포장의 파괴를 유발한다. 이를 방지하기 위하여 인터로킹 블록의 가장자리에는 콘크리트경계블록을 설치해야 한다.

2. 배수

원활한 배수를 위해 블록 포장의 표면은 2.5%의 최소 횡단구배와 1.2%의 최소 종단구배를 유지한다. 모아진 물은 포장구조나 길바탕 흙 속으로 들어가지 않도록 적절히 처리되어야 한다.

제 5 장 친환경 4S 포장 택 코트

본 시방서는 고속도로전문시방서의 9-2 택 코트 시방을 기본으로 한다.

1절. 일반사항

1. 적용범위

이 시방은 포장면에 역청재를 얇게 살포하여 저수축 투수/불투수 CTB와 투수성 아스팔트 표층을 결합시키기 위해 실시하는 택코트에 적용한다.

2. 참조규격

KS M 2202 커트 백 아스팔트
KS M 2203 유화 아스팔트

3. 제출물

가. 해당 공사의 공사계획에 맞추어 시공계획서를 작성한 후 제출해야 한다.

나. 재료시험 성적서를 추가로 제출해야 한다.

2절. 재료

1. 역청재의 품질 기준

가. 택 코트에 사용할 역청재는 BD COAT로 하며, KS M 2202 또는 KS

M 2203에 합격하는 것이어야 한다.

나. 유화 아스팔트 인 경우에는 제조 후 60일 이상 지난 것은 사용하지 않아야 한다.

2. 재료의 승인 및 시험

공사에 사용하기 15일 전까지 사용할 역청재료에 대한 시험성과표를 제출하여 감독자의 승인을 받아야 한다.

3절. 시공

1. 표면정비

가. 택 코트를 시공할 포장면은 시공 전에 뜬 돌, 먼지 기타 유해물을 파워 부룸 (Power Broom) 및 파워 블로워 (Power Blower)로 제거하고 감독자의 확인을 받아야 한다.

나. 표면이 일정치 못한 파형부분은 적절한 재료로 치환, 보수해야 한다.

2. 장비

역청재료의 살포에는 가열이 가능하며 역청재료를 균일하게 살포할 수 있는 아스팔트 디스트리뷰터를 사용해야 한다. 이 디스트리뷰터에는 시간당 주행거리를 표시하는 회전속도계와 노즐에서 나오는 역청량을 기록하는 역청살포량의 기록장치가 되어 있어야 한다. 디스트리뷰터의 출입이 곤란하거나 협소한 곳에서는 감독자의 승인을 받아 엔진 스프레이어 또는 핸드 스프레이를 사용할 수 있다.

3. 기상조건

가. 택코트는 표면이 깨끗하고 건조할 때 시고해야 하며, 기온이 5℃ 이하일 때는 감독자의 승인 없이 시공하여서는 아니되며 충분한 양생시간을 확보해야 한다. 5℃ 이하의 조건에서 유화 아스팔트를 사용할 경우에는 유화제의 동결을 방지하고 양생시간을 단축하기 위하여 20-60℃의 범위에서 가열하여 살포온도를 높여서 시공한다.

나. 우천시는 물론이며, 작업도중 비가 내리기 시작하면 즉시 작업을 중지해야 한다.

다. 일몰 후 역청재를 살포시에는 사전 감독자의 확인을 받아야 한다.

4. 사용량 및 살포온도

가. 택 코트에 사용되는 역청재의 사용량 및 살포온도는 설계도서 또는 시험시공 결과에 따른다.

나. 택 코트에 사용되는 역청재의 사용량 및 살포온도는 <표 5.1>의 범위에서 결정할 수 있다.

<표 5.2> 택 코트에 사용되는 역청재의 사용량 및 살포온도의 표준

역청재	사용량	살포온도
BD COAT	0.36ℓ±0.036ℓ/㎡ (저수축 투수 CTB)	가열할 필요가 있을 때에는 감독자가 지시하는 온도
	0.6ℓ±0.06ℓ/㎡ (저수축 불투수 CTB)	

5. 역청재의 살포

가. 역청재는 표면을 정비한 후 아스팔트 디스트리뷰터로 살포해야 한다.

나. 역청재 사용량 및 살포온도는 설계도서에 따르며, 살포 전 현장시험을 통해 정확한 살포량을 결정해야 하며, 감독자의 확인을 받아야 한다. 역

청재는 과잉살포가 되지 않도록 주의해야 하며, 사전 결정된 양 이상으로 살포되어 포장의 결합에 유해하다가 판단되면 역청재를 제거하고, 재시공해야 한다.

다. 역청재 살포가 균일하지 못한 부분은 즉시 헝겊, 마대 등을 사용하여 균일하게 살포되도록 한다.

라. 살포시에는 교량의 난간, 중앙분리대, 연석 등 포장면 완성 후에 노출된 부분이 더럽혀지지 않도록 해야 한다.

마. 역청재는 살포 후 수분이 건조할 때까지 충분히 양생해야 하며, 표층 완료시까지 차량통행을 금지해야 한다.

6. 유지관리

역청재를 살포한 표면은 표층 완료시까지 손상이 되지 않도록 보호해야 하며, 손상 발생 시 표층포설전에 계약상대자 부담으로 보수해야 한다.

제 6 장 친환경 4S 포장 지하배수시설

1절. 일반사항

1. 적용범위

친환경 4S 포장의 배수를 위한 지하 배수시설의 제반사항을 규정한다.

2. 참조시방

고속도로전문시방서 5장3절 1 맹암거

2절. 재료

고속도로전문시방서 5장3절 1.2 맹암거의 재료를 따른다.

3절. 설계

1. 투수성포장 (투수 아스팔트 / 저수축 투수 CTB)

가. 맹암거를 저수축 투수 CTB의 바로 밑에 종방향, 횡방향으로 설치하며 횡방향 설치시 그 간격에 대해서는 감독관 입회하에 현장 상황에 맞추어 시공한다.

나. 횡방향 맹암거의 설치가 불필요할 상황에는 감독관 상의하에 횡방향 맹암거를 생략할 수 있다.

다. 종방향 맹암거는 반드시 포장 단면 범위 안에 설치한다.

라. 종방향 맹암거의 경우 안전성을 위해 최대한 주행로를 피해 설치한다.

2. 배수성포장 (투수 아스팔트 / 저수축 불투수 CTB)

가. 맹암거를 저수축 불투수 CTB의 바로 밑에 종방향으로 설치한다.

나. 표층에 침투된 물의 배수를 위하여 설치된 맹암거의 상부에는 저수축 불투수 CTB를 타설하지 않고 표층타설시 투수 아스팔트를 채워 마무리 한다.

다. 종방향 맹암거는 반드시 포장 단면 범위 안에 설치한다.

라. 안전성을 위하여 최대한 주행로를 피해 설치한다.

4절. 시공

고속도로전문시방서 5장3절 1.3 맹암거의 시공을 따른다.

제 7 장 친환경 4S 포장 시스템 유지관리 지침

1절. 일반사항

1. 적용범위

친환경 4S 포장 시스템의 유지관리에 대한 제반사항을 규정한다.

2. 개요

본 지침은 친환경 4S의 포장의 기능성 및 안전성을 유지하고 보수에 의한 예산 손실을 최소화하기 위한 각종 유지관리 및 보수 지침이다.

2절. 유지관리

투수성 포장 기능성 저하에 주요 원인인 공극 막힘 현상을 막기 위해서는 지속적인 유지관리가 필요하다. 본 절에서는 친환경 4S 는 지속적인 기능성 유지를 위한 포장 공극 청소를 통한 유지관리에 대해 규정한다.

1. 포장청소 형식

‘친환경 4S 포장 시스템 개발 최종보고서 3장 7절 4’에서 권장하고 있는 포장 청소 형식인 물과 공기 고압 분사를 통한 공극 청소장비를 이용하여 포장 청소를 실시하여야 한다. 포장 청소 차량의 경우 물을 약 5MPa의 압력으로 물과 공기를 분사한 후 노즐 옆의 공기노즐을 통하여 물, 공기, 이물질을 흡수하는 형식이다.

단 장비의 도입이나 제작이 불가능 한 경우, 감독관 및 전문가와의 협의를 통하여 청소 형식을 변경할 수 있다.

2. 청소 시기와 횟수에 관한 분석

‘친환경 4S 포장 시스템 개발’에서의 조사 결과에 의하며 공용 11개월 이후에는 청소 횟수를 증가시켜도 포장의 기능성이 회복하지 않는다고 한다. 따라서 친환경 4S 포장은 연 3회 이상의 포장면 청소를 권장하며 포장 청소간의 기간은 6개월을 넘지 않도록 한다.

3. 추가사항

차후 개발된 포장면 청소 기술에 대해서는 감독관 및 전문가의 승인 후 도입하도록 한다.

3절. 유지보수

본 절에서는 친환경 4S 포장의 파손 형태에 따른 유지보수 공법을 규정한다.

1. 러팅

가. 파손도의 규정

러팅의 정도는 코어링을 통하여 평가하며 기준단면의 30%이상 처짐이 발생하였을 때 유지보수를 실시한다.

나. 유지보수 공법

러팅의 정도나 파손 범위에 따라 유지보수 공법을 선택한다. 러팅이 부분적으로 발생하였을 때에는 부분적 패칭을, 30%이상 발생하였을 경우 콜드 밀링 후 표층 재시공을 파손의 폭이 커 기층에 구조적 영향을 끼친 것으로 판단되는 경우 전단면 재시공을 실시한다.

2. 탈리

가. 파손도의 규정

친환경 4S 포장에서의 탈리는 1㎡당 10%이상의 탈리 골재가 발생하였을 때, 유지보수를 실시하는 것으로 한다.

나. 유지보수 공법

탈리 정도가 구조적, 기능적으로 문제를 일으킬 정도가 아닌 경우, 실링을 칩씰(Chip seal)을 이용한 유지보수를 실시한다. 탈리 정도가 심할 경우 아스팔트 혼합물에 사용된 골재의 입도조사, 아스팔트 바인더 채취를 통하여 배합상의 문제를 확인하고, 발생구간에 대한 교통량 조사, 기타 환경 조사를 통하여 포장 적합성 여부를 판단한 뒤 상황에 맞는 포장을 재시공 한다.

3. 크랙

가. 파손도 규정

크랙의 경우 포장 하부층에 대한 구조적 파손을 고려해야 하므로 단위 면적당 10% 이상 발생하였을 때 유지 보수를 실시한다.

나. 유지보수 공법

크랙의 발생정도가 경미할 때에는 칩씰(Chip seal)을 실시하며 크랙의 발생정도가 심하여 반사균열이 의심될 때에는 하부층에 대한 구조적 안정성 검증 후, 전단면 보수까지 고려하여야 한다.

4. 평탄성 불량

가. 파손도 규정

표면 부분 침하나 포트홀(Pot hole) 등이 발생하여 도로의 평탄성이 불량할 경우 파손 정도에 대해서는 감독관이 부분 단면에 대한 유지 보수 여부를 규정한다.

나. 유지보수공법

감독관의 파손정도 규정 후 패칭(Patching)이나 칩씰(Chip seal)과 같은 소파보수를 적용한다.

5. 기능성 상실

가. 파손도 규정

친환경 4S 포장의 경우 공극 막힘에 의한 포장 기능성을 상실하였을 경우 예산 여부에 따라 보수를 실시할 수 있으며 미끄럼 저항성의 과도한 상실의 경우 감독관의 판단에 따라 긴급 보수할 수 있다. 공극 막힘의 정도는 현장 투수시험과 코어링 후 밀도측정을 통하여 판단하고, 공극률과 투수계수가 시공 기준보다 50%이상 감소했을 때 보수를 고려한다.

나. 유지보수공법

공극 막힘이 발생하였을 경우, 표층 재시공을 통하여 기능성을 회복하며 투수 CTB의 기능성 상실이 확인 되었을 때에는 기능성 상실에 의한 침수를 방지하기 위하여 배수 시설을 보강한다.

4절. 기타

1. 파손도나 파손정도에 대한 판단이 불확실 할 경우, 감독관과 전문가

의 협의 후 유지보수 방법 및 시기를 결정할 수 있다.

2. 기능성 유지 및 안전성 확보를 위해서는 포장에 대한 지속적인 관심이 필요하며, 유지관리를 위한 기술개발이 필요하다.

3. 개발된 신기술에 대해서는 감독관과 전문가의 협의 후 공법이나 장비를 도입할 수 있다.

주 의 사 항

1. 본 보고서는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술혁신 사업의 최종 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.
■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
중앙대학교 산학협력단 TEL 02)816-0251

R&D / 04핵심기술A02-05

건설기술혁신사업
친환경 4S (Safety, Silence, aeSthetic and user Satisfaction guaranteed) 포장시스템 개발 연구 최종보고서

■ 발행일 / 2007. 8. 19.
■ 발행처 / 중앙대학교 산학협력단
서울시 동작구 흑석동 221번지
TEL : 02-816-0251
■ 인쇄처 / 유일문화사