T00732384

GOVP1201010890

건설기술혁신사업 제 3차년도 최종보고서

R&D / 06건설핵심C20

구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구보고서

2009. 12. 16.

주관연구기관 / (주)한맥기술
협동연구기관 / 한국도로공사
(주)장헌산업
위탁연구기관 / 인하대학교

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부장관(한국건설교통기술평가원장) 귀하

본 보고서를 "구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구"의 3차년도 최종보고서로 제출합니다.

2009. 12. 16.

주관연구기관 : (주)한맥기술

대 표 이 사 : 최 영 수

협동연구기관 : 한국도로공사

사 장 류 철 호

협동연구기관 : (주)장헌산업

사 장 안 병 록

■ 총 괄 연 구 책 임 자 / 수석연구원 남영국 연구 총괄

■ 주관연구기관 참여연구원 / 수석연구원 한형관 이론 정립
/ 수석연구원 최동식 추적 조사
/ 수석연구원 이홍수 이론 정립
/ 선임연구원 손영태 이론 정립
/ 선임연구원 김경태 이론 정립
/ 선임연구원 김인수 추적 조사
/ 연 구 원 오종은 추적 조사
/ 연 구 원 황상민 추적 조사

■ 협동연구기관 참여연구원 / 전임연구원 홍승호 시험 계획

	/ 수석연구원	한승환	시험 계획
	/ 전임연구원	유태석	시험 계획
	/ 연 구 원	심영환	시험 분석
	/ 수석연구원	안병록	제품 개발
	/ 선임연구원	김인열	제품 개발
	/ 연 구 원	양종식	제품 개발
	/ 연 구 원	이정훈	제품 개발
■ 위탁연구기관 참여연구원	/ 수석연구원	정진훈	구조 해석
	/ 연 구 원	임진선	구조 해석
	/ 연 구 원	박상구	실험
	/ 연 구 원	손석철	실험

요 약 문

Ⅰ. 제 목

구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 필요성

현재 국내 고속국도는 줄눈 콘크리트포장으로 대부분 이루어져 있다. 줄눈 콘크리트포장의 경우 콘크리트 타설 후 건조수축, 수화열 및 기층과의 마찰 등으로 인해 슬래브내의 발생되는 인장응력을 제어하여 포장체의 조기 파손을 억제하고자 일정 간격의 인위적인 컷팅을 통한 줄눈을 설치한다. 그러나 줄눈으로 인한 포장체내의 불연속면 형성은 구조적으로 취약성을 지니고 있기 때문에 줄눈 콘크리트포장 파손의 대표적인 형태인 스폴링(spalling), 단차(faulting) 발생의 원인이 되며 이로 인해 포장의 공용성 저하 및 막대한 유지관리비용이 소모되고 있다. 따라서 국내 시멘트 콘크리트포장의 대부분을 차지하는 줄눈 콘크리트포장에 대한 구조적 안정성과 공용성 확보를 위한 새로운 시공 방안이 필요한 실정이다.

이에 본 연구에서는 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장을 수행하였고 시허포장에 대한 추적조사 및 효과분석을 실시하였다. 또한 시험포장 결과를 이용한 구조해석과 역학적 이론정립, 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격 제시, 분리막 사용 기준 제시를 위한 연구를 진행하였다. 또한 줄눈 균열 유도공법 설계 및 시공 매뉴얼(안)을 작성하였다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구에서는 연구의 최종 목표인 줄눈 균열 유도장치 및 공법 개발, 포장의 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시, 분리막 사용 기준 제시를 달성하기 위하여 다음과 같은 3차년도 연구를 수행하였다.

연구 내용	연구 범위
▣ 줄눈부 성능향상을 위한 현장 시공도로 시험포장 추적조사 ▣ 개발기술의 실증 및 최적화를 통한 줄눈부 시공 개선안 도출 ▣ 줄눈 균열 유도공법의 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성	- 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장
	- 시험포장에 대한 추적조사 및 효과분석
	- 시험포장 결과를 이용한 구조해석
	- 역학적 이론 정립
	- 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격 제시
	- 분리막 사용 기준 제시
	- 줄눈 균열 유도공법 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성

Ⅳ. 연구개발결과

본 연구는 콘크리트 포장 줄눈부의 조기 파손을 막기 위한 줄눈 균열 유도장치 및 공법개발과 콘크리트 포장 수명 연장과 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시를 위해 수행되었다. 이를 위하여 줄눈부 성능 향상을 위한 시공도로 시험포장 및 추적조사를 실시하였고 줄눈부 시공 개선안을 도출하였다. 또한 줄눈 균열 유도 공법의 설계 및 시공 매뉴얼을 작성하였으며 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

■ 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장

3차년도 연구에서는 줄눈 누름장치 효과 검증 및 줄눈 누름시기 결정, 줄눈 균열에 의한 박락 원인과 대안 시험을 위해 다양한 종류의 줄눈 균열 유도장치를 제작하여 1차 시험포장을 실시하였다. 시험포장 결과 줄눈부의 균열을 유도하기 위해서는 줄눈 균열 유도 장치의 높이가 높을수록 유리하다는 사실을 확인할 수 있었으며, 콘크리트 슬래브 상부에 줄눈 누름을 통한 홈을 내어주는 것이 필요하다는 사실을 알 수 있었다. 계측기 매설 결과

■ 시험포장에 대한 추적조사 및 효과 분석

시험포장 구간에 대한 추적조사를 실시하기 위하여 1차년도에 실시된 시험포장 구간의 자료를 정리하였다. 또한 3차년도 연구에 실시된 여주-양평 고속도로 현장에서 실시된 FWD 시험을 통하여 줄눈 균열 유도공법에 대한 성능 시험을 실시하였으며 포장가속시험을 통하여 줄눈 균열 유도장치의 성능을 검증하였다.

■ 시험포장 결과를 이용한 구조해석

보조기층 별 마찰력 실험의 결과를 이용하여 에너지법을 개발하였고, 3차원 유한요소모델 결과 합리적인 모델임이 파악되었다. 또한, 현장 실험 결과와 3차원 유

한요소모델의 결과 그리고 AASHTO 줄눈폭 예측식 모델을 비교 및 분석한 결과, 3차원 유한요소모델의 결과는 현상 실험 결과는 보조기층 종류에 따라 콘크리트 슬래브의 줄눈 거동폭은 유사하였다. 반면에 AASHTO 줄눈폭 예측식 모델은 린 콘크리트 보조기층을 제외한 쇄석 보조기층 및 아스팔트 보조기층은 차이가 큰 것을 나타내었다.

■ 역학적 이론 정립

콘크리트 슬래브 최대 응력, 슬래브 상·하부 등가온도차이, 슬래브 두께 및 길이를 사용하여 응력회귀식을 제안하였고, 국내의 지역 별 적정 줄눈간격을 산출하였다.

■ 수명 연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격 제시

국내의 지역 별 적정줄눈간격을 산출하기 위하여, 3차원 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 다양한 교통하중 및 환경하중에 대해 구조해석을 실시하였고, 적정 줄눈 간격을 역학적으로 산출하기 위해 슬래브 내부 최대응력, 슬래브 상·하부간 등가온도 차이, 슬래브 두께 및 길이를 통계분석 프로그램인 SPSS를 사용하여 선형 중다 회귀분석을 실시하였다.

■ 분리막 사용 기준 제시

분리막의 유·무에 따른 슬래브와 보조기층의 특성은 현장시험 결과, 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층에서 분리막을 사용하지 않은 경우와 비교하였을 때 최대 마찰계수는 크게 줄어들고 이때의 수평변위는 크게 증가하였다. 구조해석 결과, 분리막을 설치하지 않은 시멘트 계열의 보조기층 재료는 콘크리트 슬래브와 완전부착이 발생됨과 동시에 환경에 의한 거동을 구속하였고, 국내의 환경을 고려한다면 래브의 인장강도는 4.5MPa를 초과하여 균열이 발생한다.역학적 방법에 의한 줄눈간격 산출 결과, 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층의 콘크리트 슬래브 최대 길이는 분리막을 설치하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 콘크리트 슬래브 최대

길이보다 약 0.8m 가 더 증가되었다.

■ 줄눈 균열 유도공법 시공 매뉴얼(안) 작성

본 연구에서는 줄눈 균열 유도공법을 현장에서 적용하기 위한 시공 매뉴얼을 작성하였다. 본 시공메뉴얼은 줄눈 균열 유도공법을 적용하는 현장 실무자가 충분히 공법을 숙지할 수 있도록 줄눈 균열 유도장치의 주요 제원, 구성항목과 더불어 시공 절차 및 유의사항을 상세히 수록하였다.

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구는 "구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화"를 위한 것으로 3차년도 연구 성과를 다음과 같이 활용할 계획이다.

- 당해연도에 실시한 줄눈 균열 유도장치 시작품의 성능 분석을 통하여 문제점 및 개선사항을 파악하였으며, 이를 통한 줄눈 균열 유도장치 시제품을 제작하였다. 새로 고안된 줄눈 균열 유도장치 시제품을 이용하여 총 3회에 걸쳐 시험포장을 실시하였다. 시험포장 결과 슬래브 중간의 랜덤 크랙 등 줄눈 균열 유도장치에 의한 하자 요인은 발생하지 않았다고 판단된다. 따라서 본 공법의 시공성 및 작업 숙력도를 향상시켜 실제 현장 적용이 가능하도록 보완할 예정이다.

- 당해 3차년도의 개선된 줄눈균열 유도장치는 기존의 줄눈균열 유도장치에 비해 시공개선, 초기균열율, 줄눈부 거동 폭, 하중전달율이 개선되었음을 확인하였다. 이를 종합적으로 고려하였을 때, 개선된 줄눈균열 유도장치는 기존 공법인 다웰바의 역할인 슬래브 간의 하중 전달 및 골재간의 맞물림 현상을 작용시킬 수 있다고 판단된다. 또한, 줄눈부의 인위적인 컷팅이 아닌 타설 초기의 줄눈부 누름 작업은 줄눈부의 구조적인 취약부를 감소시킬 수 있어, 기존의 콘크리트 슬래브의 타설 공법과 비교 시, 한층 더 개선되어 현장 적용이 가능할 것이다.

- 마찰 저항 실험을 통하여 슬래브와 다양한 보조기층 종류의 마찰특성을 파악하였다. 이러한 결과를 통하여 구조해석을 실시하였고, 줄눈부의 거동을 3차원 구조해석을 실시하였다. 또한, 시험도로의 다양한 보조기층 별 콘크리트 슬래브의 줄눈부 거동 계측 결과와 3차원 구조해석 결과에 따르면, 줄눈부의 거동은 상당히 유사하였으나, 보조기층 종류에 따라 콘크리트 슬래브 내부의 응력 발생은 다양한 결과가 나타남을 파악하였다. 이러한 결과를 이용하여 국내의 연평균 대기온도차이 및 일최대온도차이를 이용한 모델을 제시하였다. 그 결과 국내 보조기층의 종류에 따라 지역별 줄눈간격 및 두께를 제시할 수 있었으며, 포장 설계를 실시하는데 하나의 입력변수로의 제시가 가능하다.

– 총 4회에 걸쳐 진행된 시험포장 준비 및 시공과정, 결과 등을 토대로 줄눈 균열 유도공법의 현장 적용을 위하여 줄눈 균열 유도공법에 대한 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성해 콘크리트 포장 현장에 활용할 것이다.

SUMMARY

Ⅰ. Title

A Study for Improving The Mechanical Construction of Cement Concrete Pavement Considering Structural Performance

Ⅱ. Goal and Necessity of Study

Currently national highways are constructed mainly with jointed concrete pavement. Jointed concrete pavement constructs joints through artificial cutting at regular intervals to suppress early damages on pavements by controlling tensile strength within slabs caused by drying shrinkage, heat of hydration and frictions with supporting base after laying concretes. However, the creation of joints within pavements caused by joints contains structural weakness thus it becomes the cause for spalling, faulting which are typical damages on jointed concrete pavement and this results in reducing serviceability of pavements and spending considerable costs for maintenance. Therefore, there requires new construction methods for securing structural stability and serviceability on jointed concrete pavement which takes most of domestic concrete pavements.

Thus, research on the advanced technologies throughout the world and relating data has been collected in this study. The effects of Pre-Cracked Devices were examined by pursuing a test pavement for road construction sites. From this analysis a prototype was developed, which has made up for the device's weak points. Through this research, patents and utility models were applied for. In addition, the thermal expansion coefficient, drying shrinkage, frictional factor and other physical properties were experimented to estimate a rational joint spacing for concrete pavement.

Ⅲ. Details and Scope of Study

This study performed studies based on the followings as a study for achieving the final goal of the study for developing pre-cracked device and construction methods, presenting appropriate joint spacing for extending service life and securing optimal serviceability and presenting standard on using membranes.

Subject of Research	Scope
▣ Development of Pre-Cracked Device and Construction method	- Researched on the advanced technologies overseas and collected relating data
	- Analysis on Pre-Cracked Device(P.C.D) trial products' performance through test pavement for road construction sites
	- Pre-Cracked Device prototype developed
	- Applied for patents and utility models on the development of Pre-Cracked Devices and construction methods
	- Indoor experiment on testing the physical property of concrete(thermal expansion coefficient, drying shrinkage)
	- Outdoor experiment on testing the physical property of concrete(frictional resistance)
	- Calculation of reasonable distance between joints using Pavement Analysis
	- Test pavement for road construction site Plan established.

Ⅳ. Study Results

■ Research and data collection on advanced technology overseas

Acquired advanced technical skills after recently participating in the "International Conference on Optimizing Paving Concrete Mixtures and Accelerated Concrete Pavement Construction and Rehabilitation", which was held in Atlanta, USA. Analysis was recently done about the tendency of research on concrete pavement in USA was done to be used in this study.

By the latest observation on the pavement conditions of American highways, they were using both concrete and asphalt pavement where the conditions were fine. In the case of cement concrete pavement, they used Diamond grinding construction method, which creates low noise and better roadability.

■ Analysis on Pre-Cracked Device(P.C.D) trial products' performance through test pavement for preliminary movement sites

From the test pavement for preliminary movement sites that was executed in the first year, physical properties of concrete slabs. These measurements were used to analyze the performance of Pre-Cracked Device(P.C.D) trial products.

- From the test results, we have verified that the P.C.Ds shows greater efficiencies when the height of the device is higher. The uniformity of the crack demonstrated better functioning when the groove was deepened, using a Press Device.
- To examine the characteristics of the Load Transfer Efficiency(LTE) between concrete slabs, FWD(Falling Weight Deflectometer) was used to perform a test for impact loading. Results turned out that the Load Transfer Efficiency were low in the order of dowel bar, pre-cracked device and also showed that as the inductive wall height was lower the performance of the Pre-Cracked Device was superior.

■ Development of Pre-Cracked Device Prototypes

As a result of performing test pavement for road construction sites after manufacturing prototypes of Pre-Cracked Devices, problems such as inferior constructability and low load transfer efficiency occurred, including an issue that happened in the connection part where the pre-cracked induced walls and the surface met at the time when concrete was placed.

Also, other various problems, including the pre-cracked induced walls thrust effect that took place. These problems were examined and given consultations from specialists, in order to fix the problems from the trial product and a new prototype was modeled.

Class	height of inductive wall(㎜)	height from bottom(㎜)	Improvements
improved trial product	100	70	· deformed bar was used for the baseplate (fixation problem solved)
prototype(Ⅰ)	50	120	· perpendicular supporting plate edge was removed
prototype(Ⅱ)	50	150	· Installed a steel round bar(12mm) for the role of the dowel bar · perpendicular supporting plate edge was removed

Also, from the results of the first year test pavement, cracks were inducted at the area where the joint-pressing process was performed. A Pressing Device that could enhance the ability of the Pre-Cracked Device was planned taking the results into account.

■ Patents and utility models applied on the development of Pre-Cracked Devices and construction methods

①Inductive Device of Expansion Joint and Working Method

- Even if the concrete has not gone through a period of curing, a joint can be formed in the early stage of placing concrete. This patent mentions that the construction process, followed by joint formation, should be more simple to decrease the construction period and costs by the use of a Pre-Cracked Device and utilizing this device in the construction method.

②Press Device and Travelling Apparatus for Forming Expansion Joint and Working Method

- The patent was on a construction method using a Pressing Device, which increases the ability of the Pre-Cracked Device. Since joints can be constructed at the state of when concrete is a fluid, it can minimize the change in the concrete's quality.

■ Indoor experiment on testing the physical property of concrete (thermal expansion coefficient, drying shrinkage)

In this study, thermal expansion coefficient and drying shrinkage tests were performed for researching experiments and analysis, which were done to improve the performance of the Jointed Concrete Pavement.

- In the case of the thermal expansion coefficient, environmental factors such as the type of coarse aggregate, mixing ratio, humidity, temperature and so on affected the change of the coefficient. Especially coarse aggregate was observed to have a greatest influence in changing thermal expansion coefficient by these factors.
- Due to the difference in drying shrinkage of the upper and lower portion of the concrete slab non-uniform drying shrinkage happened. A model equation was made so that the change of drying shrinkage could be estimated by the age and depth of the slab. This equation was derived from the earlier

proposed equation on the estimation on drying shrinkage of KPRP.

■ Outdoor experiment on testing the physical property of concrete(frictional resistance)

Through analyzing various concrete slabs based on subbase and friction tests within the subbase, a plan on the usefulness of constructing a membrane(polyethylene sheet) and standards are going to be proposed.

- Through the results, a membrane(polyethylene sheet) gave a decrease in friction factor.
- In the case of asphalt subbase the concrete slab and asphalt layer sticked so that tensile failure had occurred on the asphalt layer. Also, showing a high coefficient of friction.
- In the case of lean concrete subbase, after the maximum of static friction force, the friction factor decreased greatly.
- By simulating a wetting condition between the concrete slab and subbase layer, it was observed that the coefficient of friction wasn't affected much by humidity.

■ Calculation of reasonable distance between joints using Pavement Analysis

In this study the joint that establish Pre-Cracked Device and the joint that establish Non-Dowel Bar, which has similar mechanisms were observed. There was a gap between joints where the Load Transfer Efficiency was greatly decreased. Furthermore, this became the standard of evaluating the reasonable distance between joints.

- Closer distance between joints were examined from the areas where the temperature is similar throughout the year compared to the areas where the year temperature varies. Also, all regions showed a longer gap than the length of 6m, which is a standard value used in our country.
- The factor that mattered in deciding the joint gap in a certain region was the highest and lowest temperature and variation in humidity.

■ Test pavement for road construction sites Plan established.

For the main purpose of this study, which is the development of the Pre-Cracked Device and construction method, plans on making 2 trials of test pavement for road construction sites were established.

- The route, in which the experimental pavement is going to be executed, was chosen to be the newly constructing Daejeon ~ Dangjin and Seocheon~GongJu freeway's concrete pavement sector.
- Various Pre-Cracked Device and Pressing Devices are going to be used on the 300m of pavement for the test pavement.
- Through test pavement long and short period follow-up surveys are planned. Also, the performance of Pre-Cracked Devices and general dowel bar sections will be compared and analyzed.

V. Plan on utilizing the results of study

This study is a base study for "Performance enhancing construction of cement concrete paving taking into account structural performances" and it is planned that the results of study from the second year will be utilized in the following ways in the following year.

- Problems were found and solutions were given for the functionality test for the Pre-Cracked Device trial product that was performed that year. Through this analysis a prototype was developed. The newly developed Pre-Cracked Device prototype was applied to the next year's research on improving the performance of concrete where it was used to do a follow-up survey and analyze effects on test pavement.

- Indoor experiments on testing the physical property of concrete (thermal expansion coefficient, drying shrinkage) and Outdoor experiments on testing the physical property of concrete(frictional resistance) were performed. Through these experiments analysis the reasonable distance between joints were estimated. And a test pavement for road construction sites was performed by using that year's Pre-Cracked Device prototype. From this, a standard joint distance is going to proposed for the life extension and optimized performance on concrete slabs.

- Experiments on testing the physical property of concrete were done on the change in friction for concrete slabs and each subbase where the membrane(polyethylene sheet) exists and doesn't exist. From this a standard for membrane(polyethylene sheet) is going to be given for the use of domestic concrete pavement.

- The first year's and current year research results are going to be used for future purposes and test pavement for road construction sites, follow-up surveys, use and optimization of new technology, for the use of joint enhancement in performance, are going to be derived. Lastly it will be used for the design and construction manual for pre-cracked induction method.

목 차

제 1 장 서론·····1
1절 연구개발의 목적 및 필요성·····1

제 2 장 국내·외 기술개발 현황·····4
1절 국내 기술개발 현황·····4
2절 국외 기술개발 현황·····14
3절 연구개발과제 및 대상기술의 중복성 검토·····20

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과·····23
1 절 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장·····23
2 절 시험포장에 대한 추적조사 및 효과분석·····68
3절 시험포장 결과를 이용한 구조해석·····108
4절 역학적 이론 정립·····145
5절 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시·····180
6절 분리막 사용기준 제시·····206
7절 줄눈 균열 유도공법 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성·····218

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도·····221
1절 연구개발 목표 및 달성도·····221
2절 관련분야에의 기여도·····223

제 5 장 연구개발결과의 활용 계획·····224
1절 연구 성과의 활용방안·····224
2절 기대성과 및 파급 효과·····226
3절 연구결과의 기업 활용방안·····227
4절 정부 정책과의 연계 방안·····228
5절 관련 후속연구개발의 전망·····228

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보·····229
1절 해외관련 기술·····229
2절 해외관련 특허·····236

제 7 장 참고문헌·····240

제 1 장 서론

1절 연구개발의 목적 및 필요성

1. 연구개발의 목적

국내 도로망의 총 연장은 2005년 12월 31일 기준으로 102,293km으로서 이중에 고속국도는 2,968km이며, 고속국도와 같이 중차량이나 교통량이 많은 도로에서는 시멘트 콘크리트포장이 건설되어 왔으며, 현재 시공 및 설계중인 대부분의 고속국도가 콘크리트포장으로 건설될 예정이다. 이러한 콘크리트 포장형식은 대부분 줄눈 콘크리트포장이다.

줄눈 콘크리트포장의 슬래브는 온도나 습도변화에 의한 구속변형에 의해서 종방향 균열이나 횡방향 균열이 발생하게 되는데 이러한 균열 발생을 방지하기위해 포장 슬래브를 인위적으로 절단하고, 줄눈 부위를 다웰바나 타이바로 보강한다. 줄눈 설치에 의한 균열발생의 제어가 없으면 포장체의 구조적 또는 기능적 파괴를 유발할 수 있는 무작위 균열(random cracking)이 발생될 수 있다.

그러나, 이러한 목적으로 설치된 줄눈은 포장체의 불연속면 형성과 상대적으로 구조적인 취약성을 지니고 있기 때문에 콘크리트포장의 조기파손 원인이 되고 있다. 그러므로 줄눈 콘크리트포장의 줄눈부에 대해 구조적 성능 개선이 필요한 실정이다.

본 연구에서는 줄눈 균열 유도장치 및 공법 개발, 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시, 분리막 사용 기준 제시의 최종 연구 목표를 달성하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

▣ 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장
▣ 시험포장에 대한 추적조사 및 효과 분석
▣ 시험포장 결과를 이용한 구조해석
▣ 역학적 이론 정립
▣ 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격 제시
▣ 분리막 사용 기준 제시
▣ 줄눈 균열 유도공법 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성

2. 연구개발의 필요성

가. 기술적 측면

최근 국내 고속국도 콘크리트포장의 공용연수가 증가함에 따라 피로균열과 스폴링(Spalling), 표면박리 등의 파손이 발생하고 있으며 포장 상태 악화로 인하여 안전성과 주행쾌적성이 저하되고, 유지보수비용이 증가하고 있는 실정이다. 콘크리트포장은 아스팔트 포장에 비해 내구성이 뛰어난 반면에 유지보수가 어려운 단점이 있으며, 유지보수의 대부분이 줄눈부에서 발생하므로 설계·시공 시 하자발생 요인을 제거할 필요성이 대두되고 있다. 이에 국내 여건에 적합한 설계 및 시공 개선안 연구를 하고자 한다.

나. 경제·산업적 측면

본 연구가 성공적으로 수행되어 줄눈 균열 유도공법을 현장에 적용할 경우 기존의 다웰바 설치시의 다웰바 어셈블리 제작비, 줄눈 주입재, 줄눈 절단비용 등이 생략되어 시공 공정을 단순화함으로서 공사기간 단축은 물론 공사비를 대폭 절감할 수 있다. 4차로 도로의 1km당 가로수축 줄눈의 소요공사비용이 기존 공법은 65백만원, 줄눈 균열 유도공법은 32백만원으로 산출되어 약 50% 절감효과를 기대할 수 있다.

2004년 고속국도 유지보수 비용은 도로포장 표면처리, 소파보수, 덧씌우기 및 재포장을 포함하여 약 1,420억원이 소요되었고 이중 포장보수 비용은 약 386억원이 소요되었다(국토해양부 통계연보, 2004년). 이는 관리자 비용 및 사용자 비용을 고려하지 않은 것으로 이를 고려할 경우 현재 콘크리트포장 유지보수에 따른 경제적 손실은 막대하다. 고속국도의 경우 콘크리트포장이 많은 비율을 차지하고 있어 시멘트 콘크리트포장 개선으로 인하여 포장의 공용수명 및 보수주기를 증대시켜 사용자에게 보다 양질의 도로 서비스를 제공할 수 있을 뿐만 아니라 유지보수비용 및 사용자 비용을 절감할 수 있을 것으로 예상된다.

다. 사회·문화적 측면

콘크리트포장의 줄눈부 파손으로 인하여 고속운전을 하는 도로이용자의 안전성이 크게 위협을 받고 있으며, 주행 쾌적성이 저하되고 있는 실정이다. 콘크리트

포장 시공방법 개선으로 인하여 포장의 공용수명이 연장될 수 있으며 교통사고 감소로 인한 도로 이용자들의 안전성 향상과 주행쾌적성을 확보할 수 있어 "안전하고 인간중심의 도로" 란 이미지를 심어줄 수 있다. Spalling 파손의 감소로 인하여 콘크리트포장의 유지보수는 차량을 장기간 차단해야 하는데 이로 인한 교통 혼잡비용과 국가물류비용의 절감을 통한 국가 경쟁력 확보 및 국민의 삶의 질 향상에 대한 욕구를 충족시키는 데 기여할 것으로 예상된다.

콘크리트포장의 설계와 시공에 반영할 수 있으며 전문기술자의 지속적인 개선방안연구 풍토를 조성할 것이다. 또한 콘크리트포장기술의 정착으로 국내 시멘트 콘크리트포장의 기술력향상이 기대되며, 중국이나 동남아시아 등 해외로 기술을 전파할 시 국가 위상 제고가 예상된다.

3. 연구개발의 범위

본 연구에서는 줄눈 균열 유도장치 및 공법 개발, 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시, 분리막 사용 기준 제시의 최종 연구 목표를 달성하기 위한 3차년도 연구로 다음과 같은 목표 및 범위를 기준으로 연구를 수행하였다.

연구 목표	연구 범위
▣ 줄눈부 성능 향상을 위한 현장 시공도로 시험포장 및 추적조사 ▣ 개발기술의 실증 및 최적화를 통한 줄눈부 시공 개선안 도출 ▣ 줄눈 균열 유도공법의 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성	- 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장
	- 시험포장에 대한 추적조사 및 효과 분석
	- 시험포장 결과를 이용한 구조해석
	- 역학적 이론 정립
	- 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시
	- 분리막 사용 기준 제시
	- 줄눈 균열 유도공법 시공 매뉴얼(안) 작성

제 2 장 국내·외 기술개발 현황

1절 국내 기술개발 현황

국내에서 줄눈 콘크리트포장에 있어서 다웰바를 설치한 곳과 설치하지 않은 곳에 대한 하중전달효율을 비교한 연구는 있으나 다웰바를 대체할 수 있는 공법에 대한 연구는 이루어지지 않고 있다. 또한 경험적으로 분리막을 시공하고 있어 이에 대한 검증연구는 이루어지지 않았으며, 획일적으로 줄눈간격을 6m로 설계·시공하고 있으며, 최근에 이르러 줄눈간격이 콘크리트 파손에 미치는 영향에 대한 연구와 모델을 통한 줄눈간격 설계에 대한 연구가 수행되었다. 국내의 줄눈 콘크리트포장은 검증되지 않은 경험적 방법이나 외국에서 제시된 방안을 따르고 있는 실정이다.

1. 국내 시장 현황 및 예측

그림 1과 같이 국토해양부(구 국토해양부(구 건설교통부))의 도로정책추진 방향은 2020년까지 남북 7개축 및 동서 9개축의 격자형 국가간선망(6,160km)을 구축하는 계획에 따라 2010년까지 4,000km의 수준으로 확충할 예정이며, 2010년까지 4차로 이상의 국도 비율을 34%(2002년)에서 50% 이상으로 확충시켜 지역간 도로망의 양적 · 질적 수준을 제고시키는 계획이다.

또한, 기존도로 시설기준 강화 및 철저한 품질관리, 도로시설의 수명연장과 노후·위험교량 완전개축, 낙석·산사태 위험지구의 완전정비, 고속국도 우회도로 ITS 구축 및 도로표지 종합관리센터 운영, 교통사고 사망자 감소, 환경친화적인 도로설계기법 개발 등 환경친화적 · 친인간적인 안전한 도로건설을 추진하고 있다. 표 1은 국내의 최근 5년간을 기준으로 한 도로현황을 살펴보면 우리나라 도로의 총 연장은 102,293km로서 78.6%의 포장율을 나타내고 있다.

고속국도의 경우 2005년 말을 기준으로 민자노선을 포함하여 2,968km가 건설되어 운영 중에 있으며, 2010년까지 4,000km의 수준까지 구축할 계획이며, 2020년까지 남북 7개축, 동서 9개축의 격자형 국가간선망 6,160km를 구축하는 계획을 가지고 있다(그림 2~3).

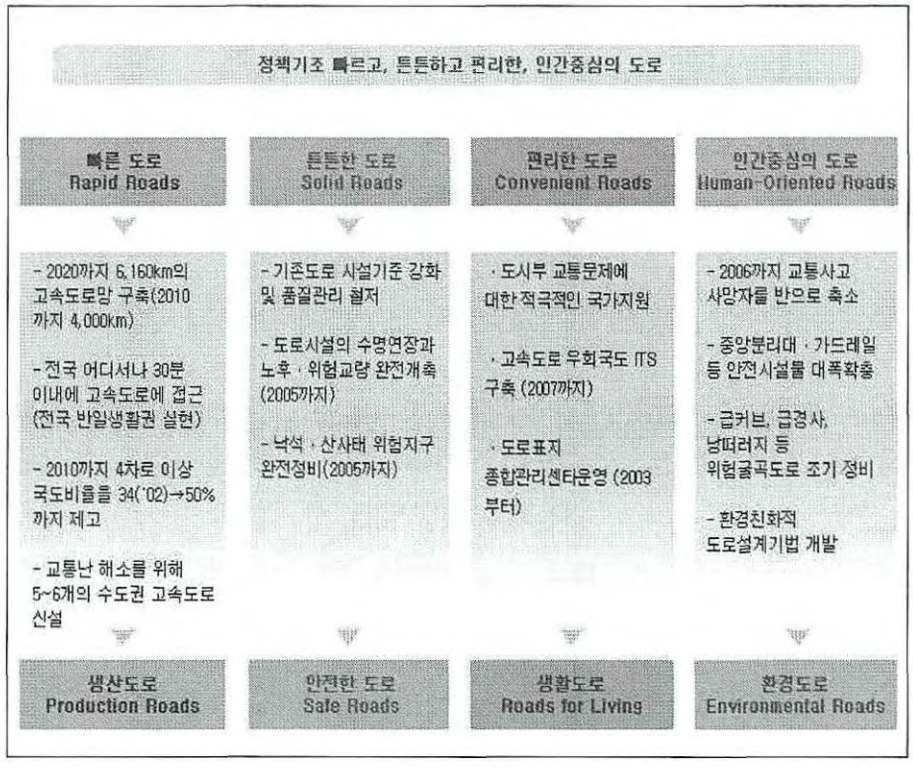


그림 1. 국토해양부(구 건설교통부)의 정책추진 방향

표 1. 도로 및 포장 현황

(단위 : km)

구 분	2001년	2002년	2003년	2004년	2005년	포장연장	비율(%)
고속국도	2,637	2,778	2,778	2,923	2,968	2,968	100
일반국도	14,254	14,232	14,234	14,246	14,224	13,846	97.3
특별·광역시도	17,810	18,224	17,130	17,371	17,506	17,408	99.4
지방도	15,705	17,084	17,485	17,476	17,709	13,989	79
시도	17,533	20,017	21,683	24,539	25,820	17,224	66.8
군도	23,458	23,702	23,942	23,723	24,065	13,132	54.5
계	91,396	96,037	97,252	100,278	102,293	78,587	76.8

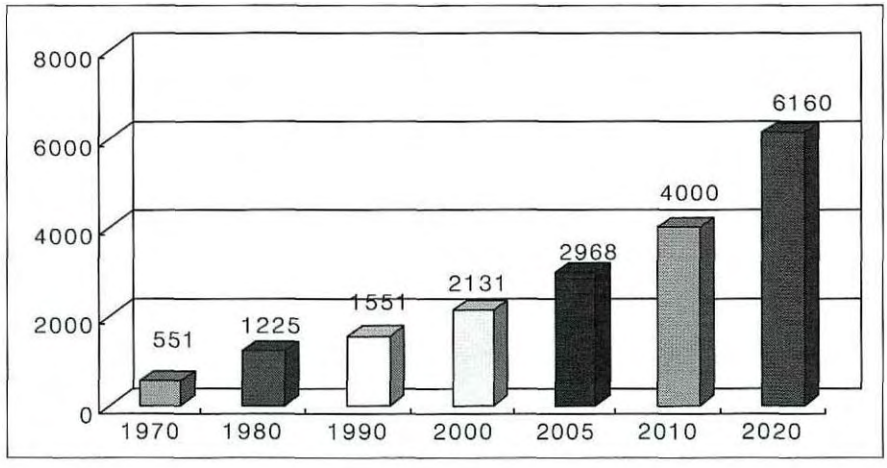


그림 2. 연도별 고속국도 현황 및 구축계획

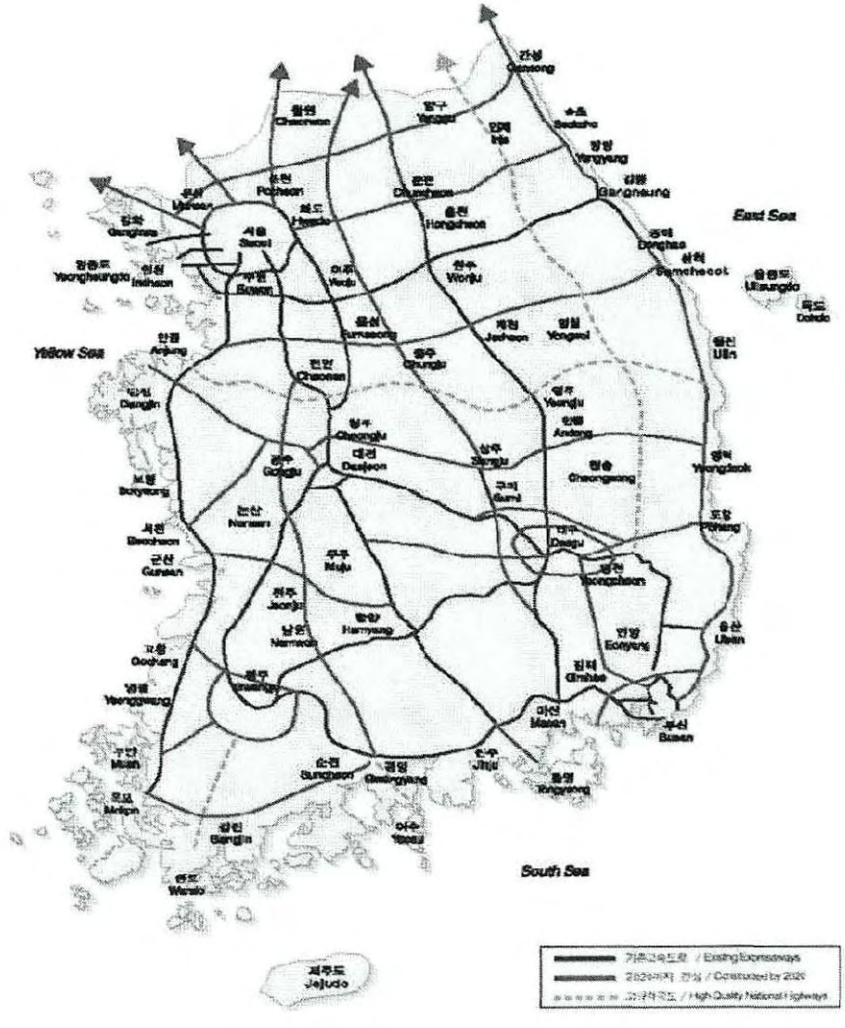


그림 3. 장기 전국 간선도로망 체계 구성도

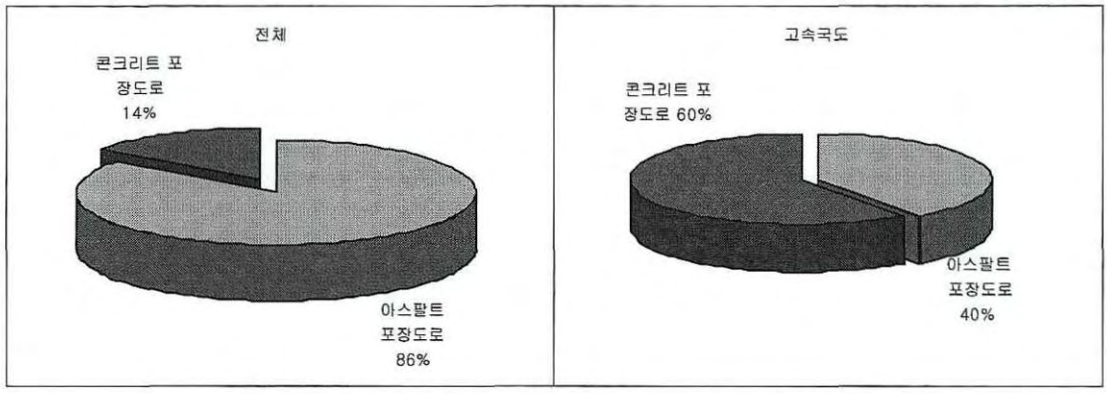


그림 4. 국내 총 도로 연장과 고속국도에 대한 콘크리트포장 비율

국토해양부(구 건설교통부)에서 발행된 도로현황조서(2005)에 따르면 우리나라 포장도로의 14.4%가 시멘트 콘크리트로 포장되었으나 중차량이나 교통량이 많은 고속국도의 경우 59.9%, 특별·광역시도의 39.1%가 시멘트 콘크리트로 포장되었다 (그림 4).

본 연구가 종료되는 향후 3년 후인 2010년에는 연구결과를 통한 실용화 및 지적재산권 확보 등의 실용화 초기 단계에 접어들게 될 것으로 판단된다. 건교부의 정책방향에 따르면 향후 15년 동안 고속국도는 약 3,192km 이상이 신설될 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 연간 약 200km의 도로가 신설된다고 가정하였으며, 고속국도는 콘크리트포장의 비율이 높기 때문에 시멘트 콘크리트 시장규모가 확대될 것으로 예상할 수 있다. 이에 다음과 같이 가정하고 시멘트 콘크리트포장의 시장규모를 예측해 보았다(표 2).

▣ 가정사항

- 국토해양부의 장기 고속국도망 계획을 반영하여 2020년까지 신설포장 3,192km 예상
- 전체 신설도로에 콘크리트포장 90% 적용(연약지반구간 제외)
- 고속국도 양방향 2차로, 1km 당 콘크리트 슬래브 공사비용 : 354백만원

표 2. 콘크리트포장의 시장규모(예측치)

기준년도	누적 신규 도로연장(km)	콘크리트포장 적용연장(km)	시장규모(억원)
5년	1,000	900	3,186
10년	2,000	1,800	6,372
15년	3,192	2,980	10,519

표 3. 줄눈 균열 유도장치 적용시 예산 절감 효과

기준년도		다웰바 설치 시 (수축줄눈 시공)	줄눈 균열 유도장치 적용시	증감액 (백만원)	비고
줄눈공사비 (백만원/1㎞)	1차검토	65	32	▽ 33	최초 시작품 형상
	2차검토	65	46	▽ 19	줄눈 균열 유도장치 형상변경

줄눈 균열 유도장치를 적용할 경우 기존의 다웰바 설치시의 다웰바 어셈블리 제작비, 줄눈 주입재, 줄눈 절단비용 등이 생략되어 시공 공정이 단축되고, 경제성이 확보된다. 4차로 도로의 1km당 공사비용을 산출한 것으로 줄눈 균열 유도장치 최초 시작품 적용 시 기존의 다웰바 시공보다 1km당 시공비용이 약 50% 절감효과가 나타났으며, 2차 연구결과를 통해 줄눈 균열 유도장치 형상을 개선하여 적용했을 경우, 기존의 다웰바 시공보다 약 30% 절감효과가 나타났다. 따라서 연간 200㎞의 신설 도로 중에서 180㎞가 콘크리트포장으로 시공된다고 하면 연간 약 34억원의 절감효과가 있다(표 3).

2. 국내 주요 관련 업체

업체명	업체별 능력	비 고
(주)삼성건설	종합건설업체, 시공 및 설계	도로 이외의 건설 전분야에 걸친 종합건설업체
(주)대우건설	종합건설업체, 시공 및 설계	
(주)현대건설	종합건설업체, 시공 및 설계	
(주)GS건설	종합건설업체, 시공 및 설계	
(주)현대산업개발	종합건설업체, 시공 및 설계	
(주)유신코퍼레이션	토목 종합 설계 및 감리	토목 전 분야에 걸친 종합설계 및 감리업체
(주)삼안건설기술공사	토목 종합 설계 및 감리	
(주)도화종합기술공사	토목 종합 설계 및 감리	
(주)한국종합기술개발공사	토목 종합 설계 및 감리	
(주)한맥기술	토목 종합 설계 및 감리	
도로교통연구원	도로관련 전문연구기관	연구기관
한국건설기술연구원	건설관련 전문연구기관	
(주)한국고속국도관리공단	도로유지관리 및 유지보수	포장유지관리 업체
(주)로드코리아	포장유지관리	
(주)로드텍	포장유지관리	
(주)성도건설	도로포장 시공 및 유지보수	포장 시공 및 유지보수 전문건설업체
(주)남경건설	도로포장 시공 및 유지보수	
(주)다사건설	도로포장 시공 및 유지보수	
의왕개발	콘크리트포장 시공	콘크리트포장 시공 업체
새길 건설산업	콘크리트포장 시공	
한포토건	콘크리트포장 시공	
성도건설	콘크리트포장 시공	
토림건설	콘크리트포장 시공	

3. 국내 전문가 및 연구기관 현황

항목	전문가	소속기관	기술개발현황	수준 (국외대비)
시멘트 콘크리트포장	이광호	한국도로공사 도로교통연구원	포장데이터 구축 및 활용방안 연구	100
	한승환	한국도로공사 도로교통연구원	비파괴시험을 통한 콘크리트포장 하부 평가기법 개발	100
	홍승호	한국도로공사 도로교통연구원	콘크리트포장의 파손 예측 모델 개발	100
	유태석	한국도로공사 도로교통연구원	콘크리트포장의 구조적 평가 연구	100
	김연복	한국건설기술 연구원	공항 PMS개발	100
	유평준	한국건설기술 연구원	도로포장관리시스템 개발	100
	권수안	한국건설기술 연구원	콘크리트포장의 비파괴 기법 적용 연구	100
	남영국	(주)한맥기술	콘크리트포장의 기초이론과 설계기법	100
	정진훈	인하대학교	포장구조해석연구	100
	서영찬	한양대학교	도로 및 공항 PMS 연구 및 개발	100
	이승우	강릉대학교	콘크리트포장의 적정줄눈간격 연구	100
	조윤호	중앙대학교	신속개방형 조강 콘크리트재료 및 시공법 개발	100
	김지원	TPS	콘크리트포장 구조해석 모델 개발	100

4. 국내연구 인프라 수준

기술 분야	인프라 항목	선진국 대비 인프라 수준				
		부족	다소부족	동등	우월	보다 우월
다웰바 설치	연구시설 및 설비			○		
	기초인력			○		
	산업기술 인력			○		
	산학연공동연구기반		○			
	정보화		○			
	신뢰성평가		○			
	표준화기반			○		
	기술이전 및 거래		○			
	국제기술 협력기반	○				
줄눈간격 조정	연구시설 및 설비		○			
	기초인력		○			
	산업기술 인력		○			
	산학연공동연구기반			○		
	정보화		○			
	신뢰성평가	○				
	표준화기반	○				
	기술이전 및 거래		○			
	국제기술 협력기반		○			
콘크리트포장 파손 촉진 평가	한국도로공사 도로교통연구원에는 콘크리트포장의 공용성을 평가하기 위한 포장 파손 가속 시험시설을 갖추고 있음			○		
콘크리트포장 현장 공용성 평가	포장 지지력 측정 장치 (FWD 및 HWD)			○		
콘크리트물성 평가	100ton 만능시험기동결-융해시험기			○		
콘크리트 내부 특성 평가	SEM 및 EDX 분석장치		○			
	공기량 분석 장치		○			
분리막 설치	연구시설 및 설비		○			
	기초인력			○		
	산업기술 인력		○			
	산학연공동연구기반	○				
	정보화		○			
	신뢰성평가		○			
	표준화기반		○			
	기술이전 및 거래		○			
	국제기술 협력기반	○				

5 국내 기술개발 수준

세부기술 내용	국외 현황 (주요선진국명)	국내 개발 현황	수준 (국외대비)
줄눈 균열 유도장치 개발	미국에서는 줄눈부에 균열을 유도하기 위하여 다웰바가 설치된 위치에 2차례에 걸쳐 줄눈을 절단하고 절단부에 실런트를 삽입하여 우수나 이물질의 침입을 막고 있다. 보다 효율적으로 줄눈에 균열을 발생시키기 위하여 줄눈의 적절한 절단깊이와 줄눈절단 시간 등에 관한 연구가 이미 진행되었거나 진행 중이며 그 결과로서 현장에서 사용할 줄눈절단 장비에 대한 제원까지 제시되고 있는 실정이다. 또한, 본 연구개발에서 개발하려고 계획 중인 줄눈 균열 유도장치가 연속철근 콘크리트포장 시험에 사용되기도 하였다(미국 Texas A&M 대학교, Dr. D.G. Zollinger).	국내에서는 최근에 와서 성숙도개념을 적용하여 줄눈절단 시기에 대한 연구를 시작하였으며, 이와 함께 줄눈의 내구성을 고려하는 최적의 줄눈설치 방법에 대한 연구가 진행 중이다. 하지만 보다 효율적이고 저렴하게 원하는 위치에 균열을 유도하려는 시도가 아직까지 이루어지지 않고 있어 본 연구개발의 결과도출 및 적용이 시급한 실정이다. (중앙대학교 조윤호 교수)	40%
분리막 설치방법 개선	콘크리트 슬래브에 발생하는 균열을 감소시키기 위한 대책으로 린 콘크리트 기층 위에 분리막을 덮은 후 슬래브를 타설하는 방법을 사용하고 있다. 이 경우 슬래브와 기층이 분리막에 의하여 마찰 없이 완전히 미끄러진다는 가정하에 줄눈 등이 설계되고 있으나 현장시험 등을 통하여 비선형 마찰이 발생하는 것을 확인하고 이를 고려하기 위한 노력이 시도되고 있다(미국 Construction Technology Laboratory, Inc., Mr. T. Yu).	국내에서 슬래브의 응력과 균열 발생에 미치는 분리막에 대한 연구가 매우 미흡한 실정으로 설계에서도 단순히 미국의 설계법을 따르고 있다. 하지만 이를 개선하기 위한 연구가 일부 수행된 적이 있으며 이 연구결과를 바탕으로 본 연구개발에서 목적으로 하고 있는 분리막의 제거 또는 보다 합리적인 분리막 재료 및 시공방법 제시 등의 결과를 도출할 수 있을 것으로 보여 진다(한양대학교 서영찬 교수).	40%

줄눈 균열 유도장치를 이용한 줄눈간격 결정	미국은 주로 골재 또는 아스팔트 안정화 기층을 사용하고 있으며 경험적인 방법에 의하여 최대 줄눈간격을 제안하고 있다. 하지만 콘크리트 타설 초기 온도분포에 의하여 발생하는 줄눈에서의 응력발생에 관한 연구가 진행되면서 역학적으로 줄눈간격을 결정하기 위한 노력이 진행 중이다(미국 Transtec Group, Inc., Dr. R.O. Rasmussen).	국내에서도 경험적 방법에 의하여 최대 줄눈간격을 제시하고 있으나 그 방법이 획일적이다. 미국과 마찬가지로 역학적 설계를 하기 위한 노력을 하고 있으나 아직 초기 단계로서 미국의 연구성과를 활용하고 있는 실정이며, 국내에서의 보다 많은 현장검증을 통한 보정이 필요하다(강릉대학교 이승우 교수).	60%

2절 국외 기술개발 현황

다웰바가 설치된 위치를 찾아 줄눈을 2차례에 걸쳐 절단하고 절단부에 줄눈을 삽입하는 일련의 절차는 매우 번거로울 뿐만 아니라 특히, 곡선부에서는 다웰바의 위치에 정확하게 줄눈을 절단하기가 어려운 단점을 갖고 있다. 미국 등 국외에서는 주로 골재기층이나 안정화기층 등을 사용하지만 국내에서는 린 콘크리트를 기층으로 사용하여 줄눈부에 실런트를 주입하지 않아 생길 수 있는 문제가 발생하지 않기 때문에 국외보다는 국내에서 본 연구개발의 성과가 더 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 하지만, 린 콘크리트 기층을 사용하는 경우, 국외에서도 사용될 수 있는 기술이므로 본 연구에서 개발되는 줄눈 균열 유도장치는 건설비용과 유지관리비용을 크게 절감할 수 있으므로 외국시장에서도 전망은 밝다고 할 수 있다.

콘크리트 슬래브에 무작위로 발생하는 균열을 감소시키고 양생 초기에 균열을 줄눈위치로 집중시키기 위하여 기층 위에 설치하는 분리층은 많은 시공비용이 소요된다. 하지만, 분리층에 대한 충분한 연구가 이루어지지 않은 상태로 콘크리트포장의 설계시에 분리층의 종류에 따른 슬래브 하부와의 마찰이 제대로 고려되지 않고 있다. 우리나라에서 기층으로 주로 사용하고 있는 린 콘크리트 기층의 경우, 슬래브와의 사이에 폴리에틸렌을 재료로 하는 분리막을 설치하여, 슬래브와 기층 사이의 마찰은 전혀 없다고 가정한다. 하지만, 연구결과에 의하면, 이 경우에도 슬래브와 린 콘크리트 기층 사이에 마찰이 존재하며 그 분포가 비선형이다. 게다가 유화아스팔트를 분리막으로 사용하거나 아예 분리막을 사용하지 않는 경우가 하중재하 시 콘크리트 하부에서 발생하는 인장응력을 발생을 크게 감소시킨다는 연구결과가 있으므로 줄눈균열 발생과 피로균열 발생 두 가지 측면에서 분리막의 효용성에 대한 연구가 있어야 할 것이다. 만약, 분리막을 사용하지 않고 콘크리트 슬래브를 린 콘크리트 기층 위에 바로 타설할 수 있다면 건설비용을 크게 절감할 것이므로 시장에서의 전망은 매우 밝다고 할 수 있다.

골재 또는 안정화기층을 콘크리트포장의 하부층으로 사용하고 있는 미국 또한 양생초기에 줄눈으로 균열을 유도할 수 있는 줄눈 최대간격을 경험적으로 설계에 사용하고 있다. 우리나라의 경우, 대부분 린 콘크리트를 기층으로 사용하고 있으며

슬래브와의 사이에 폴리에틸렌 분리막을 사용하여 마찰을 최대한 줄임으로써 균열 발생 양상이 미국의 경우와는 다르다. 또한, 공용중 슬래브의 하부에 발생하는 인장응력이 분리막의 종류에 따라 달라지므로 줄눈간격의 영향이 추가로 작용하게 되면서 발생하는 양생초기의 환경하중에 의한 줄눈균열 또는 공용중의 교통하중에 의한 임의균열에 대한 연구는 매우 중요하다.

따라서 본 연구를 통하여 각 조건에 따른 최적의 줄눈 균열 유도장치 간격이 결정된다면 줄눈절단 또는 줄눈 균열 유도장치 설치에 따른 건설비용과 유지관리비용을 절감할 수 있으므로 시장전망은 매우 밝은 것으로 판단된다.

1. 주요국가의 시장 규모

주요 선진국인 OECD 국가들의 도로현황은 다음 표 4와 같다.

표 4. OECD 국가별 도로현황(건설교통부, 2006)

구분	총 도로 연장(km)				
	계	고속국도	국도	지방도로	기타
한국	102,293	2,968	14,224	17,710	67,391
일본	1,177,278	6,617	53,777	128,182	988,702
미국	6,378,154	89,859	613,057	698,600	4,976,638
영국	619,398	3,476	46,663	115,164	454,095
프랑스	891,290	10,390	25,900	355,000	500,000
독일	231,581	12,037	41,246	86,868	91,430
이탈리아	479,688	6,621	46,009	114,909	312,149
스페인	666,292	12,009	24,858	139,727	489,698
네덜란드	116,500	2,235	6,650	57,500	50,115
노르웨이	91,916	213	26,917	27,041	37,745

미국의 경우 주간 고속국도는 대부분 콘크리트포장으로 건설되어 있으며, 텍사스주의 경우 많은 도로에 콘크리트포장이 건설되어 있다. 벨기에의 경우 고속국도(Mortorways)는 1,600km가 건설되었는데 이중 46%가 시멘트 콘크리트로 포장되었으며 국도(Trunk roads)는 13,100km중 50%가 콘크리트로 포장되어 있다.

최근에 경제가 지속적이고, 안정적으로 고속발전하고 있어 세계에서 발전 잠재력이 가장 큰 나라로 주목받고 있는 중국에 대한 도로현황과 계획을 살펴보면, 2004년 말 기준으로 중국 내 도로의 총길이는 약 187만km에 이르고 있다(이승재외, 2005). 1988년 상해-지싱 간 고속국도가 개통되면서 중국의 고속국도시대가 열리게 되었다. 1990년에 들어 내수확장 및 기반시설의 건설이 가속화됨에 따라 고속국도건설은 날로 진보하였으며, 2004년 말에 개통된 전국의 고속국도의 길이는 총 34,228km에 이르고 있으며, 향후에도 많은 고속국도 건설이 예상되고 있다(그림 5).

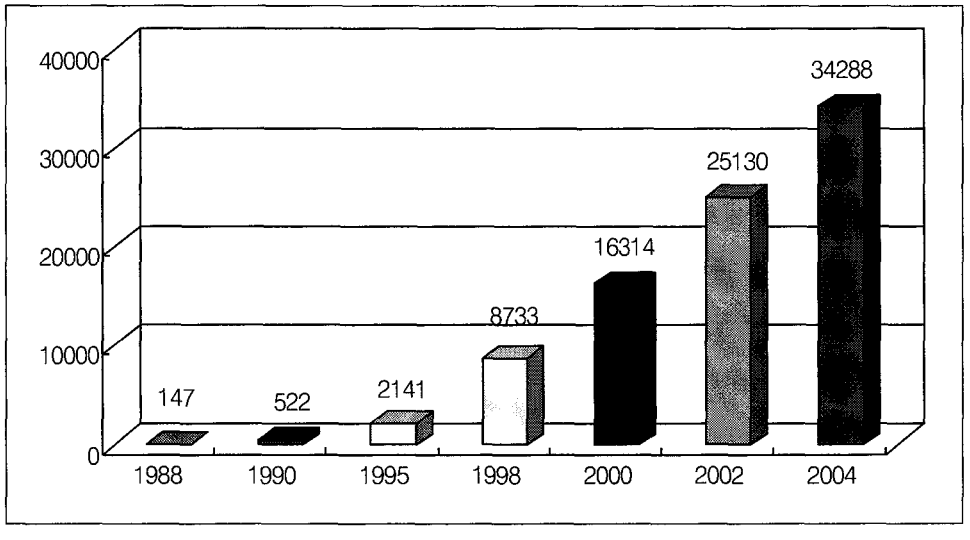


그림 5. 중국 고속국도 총 연장(이승재외, 2005)

중국의 국가 고속국도망 계획은 수도 북경을 중심으로 하는 방사선형 노선과 남북 종방향 및 동서 횡방향의 격자망을 결합하여 분포시키는 방안으로 향후 30년간 약 2조 위안(한화 280조원)을 투자하여 건설하는 거대한 도로건설 계획이다. 이는 7개의 수도 방사선형 노선과 9개의 남북 종방향 노선 및 18개의 동서 횡방향으로 구성되는 총 길이 85,000km이다. 이처럼 중국은 개혁과 개방 이후, 산업화가 급

격히 이루어짐에 따라 단기간 내에 급속한 발전을 이루었다. 따라서 본 연구가 성공적으로 수행하게 된다면 거대한 중국시장을 진출할 수 있을 것이다.

▣ 아시안 하이웨이(Asian Highway) 네트워크 구축

아시안 하이웨이는 아시아 지역에서의 국가간 도로교통망 개발을 도모하여 교역 및 관광을 촉진시키기 위한 목적으로 1959년부터 추진되었다. 아시안 하이웨이는 한국, 중국, 일본, 러시아, 인도, 이란 등 아시아 지역 32개국을 연결하는 55개 노선 14만 km로 구성되어 있으며(그림 6), 도로망은 아시아 각국의 수도 및 상공업 도시, 항만은 물론 주요 사적지, 관광지를 연결하는 방향으로 구상되었다. 또한, 아시안 하이웨이가 완성되기 위해서는 남북의 도로망이 구축되어야 하는 등 향후 해외 도로의 시장규모는 대단히 크다고 할 수 있다.

아시안 하이웨이가 구축되면 아시아지역 국가간의 물적 교류가 활발해져 교통량이 빈번해지고 차량하중이 커질 것으로 예상되기 때문에 시멘트 콘크리트포장으로 설계될 가능성이 매우 커 본 연구과제의 최종 목표인 「구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화 연구」를 통해 개발되는 줄눈 균열 유도장치 및 공법을 활용하게 되면 해외진출이 가능하게 되어 국가에 미치는 경제적·산업적 효과는 막대하리라고 판단된다.

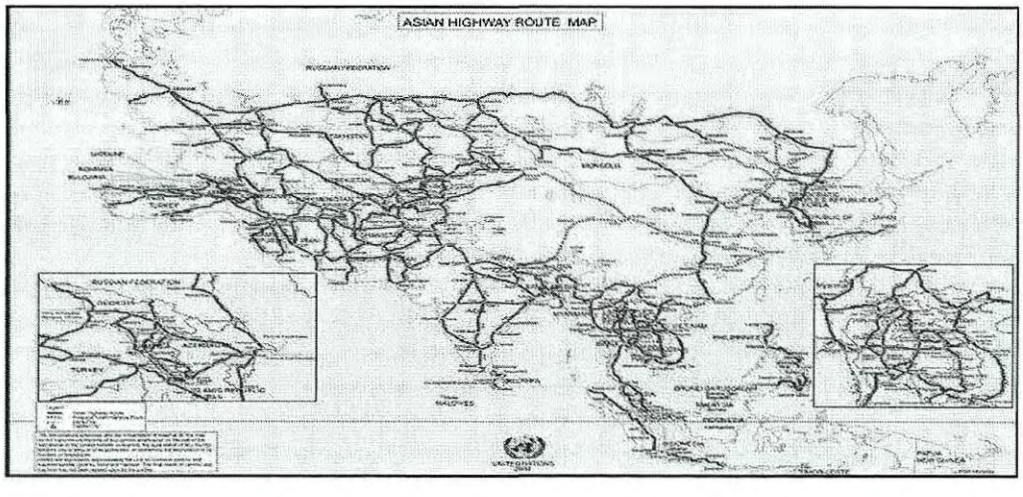


그림 6. 아시안 하이웨이(Asian Highway) 노선도(국토해양부(구 건설교통부))

2. 세계시장을 선도하는 주요 업체

업체명(국적)	업체별 능력	중점 분야
Cedar Valley Corp. (미국)	▪ 콘크리트포장 전문 업체 ▪ 고속국도, 활주로, 주차장 등 풍부한 시공경험 보유 ▪ 화이트타핑 시공	콘크리트포장 시공
Unique paving materials corporation (미국)	▪ 보수재료(필러, 패치, 개질 아스팔트) 개발 및 시공 ▪ 고강도 급속 경화 콘크리트 보수 재료 생산	포장 보수재료 생산 및 시공
ERES(미국)	▪ 미국 및 기타국가 도로 및 공항 포장유지관리 및 컨설팅	포장유지관리 및 컨설팅
Dynatest(미국)	▪ 미국 및 기타국가 도로 및 공항 포장유지관리 및 컨설팅	포장유지관리 및 컨설팅
Boart Longyear (남아공) CEDIMA(독일)	▪ PC 6000, PC 5000A, PC 5000B ▪ CBC-1200 ▪ PRM 3804, PRM 3800 다이아몬드 그라인딩 장비생산	다이아몬드 그라인딩장비생산
住友大阪시멘트 (일본)	▪ 도로 포장용 초조강 레디믹스트 콘크리트 생산 및 출하	레디믹스트 콘크리트 생산
Wrigen(독일)	▪ SP 1600, SP 850 등의 Slip Form 페이버 생산	콘크리트포장 시공 장비

3. 해외 시장예측 및 발전전망

교통량이 빈번해지고 차량하중이 커짐에 따라 이에 견딜 수 있는 콘크리트포장의 건설은 점점 더 많아질 것으로 예측된다. 줄눈 콘크리트포장은 연속철근 콘크리트포장과 함께 세계적으로 널리 쓰이고 있는 포장형식으로 향후 더 많은 건설물량이 예상되고 있다. 줄눈 콘크리트포장의 경우에는 다른 포장형식과는 다르게 줄눈에 균열이 유도되므로 줄눈에 스폴링이나 단차와 같은 파손이 발생하게 되어 구조적 및 기능적 성능이 저하된다. 따라서 본 연구개발에서 제안하는 내용을 성공적으로 수행한다면 우려되는 줄눈 콘크리트포장의 성능저하를 최소화할 수 있어 국

내는 물론이고 해외에서도 널리 사용될 수 있을 것으로 전망된다.

우선, 기존에 줄눈을 2차례 절단하여 그 위치에서 하향의 균열을 유도하던 방법을 개선하여 기층에 설치한 줄눈 균열 유도장치를 통해 상향의 균열을 효과적으로 유도할 수 있다면 기존의 줄눈을 절단하던 노력과 비용을 크게 절감할 수 있기 때문에 해외에서도 이 기술을 이용한 시공이 널리 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. 줄눈 균열 유도장치의 규격이나 적정 간격에 대한 추가적인 연구를 통하여 비용을 보다 절감할 수 있을 것이다.

현재 린 콘크리트 기층 위에 설치되는 폴리에틸렌 분리막에 대한 검증을 통하여 보다 효율적으로 양생초기에 줄눈 균열 유도장치의 위치에 균열을 발생시키며 공용중에 차량하중에 의하여 발생하는 슬래브 하부의 인장응력을 감소시킬 수 있을 것이다. 이를 통하여 슬래브와 기층 사이에 분리막사용에 대한 필요성을 검증할 수 있을 것이며 본 연구가 성공적으로 수행되어 신뢰성 있는 결과가 얻어진다면 이를 국내는 물론이고 외국의 시공지침에 반영시킬 수 있을 것으로 판단된다.

줄눈 균열 유도장치의 적정 간격은 앞에서 언급한 줄눈균열유도공법 개선이나 분리막사용 유무의 연구주제와 밀접한 관련을 갖고 있다. 최적의 간격으로 인위적으로 줄눈 균열을 최적의 간격으로 유도할 수 있다면 줄눈 균열 유도장치의 사용을 최소화하여 시공비용을 크게 절감할 수 있을 것이다. 줄눈간격 결정에 관한 본 연구는 외국에서도 큰 관심을 갖고 수행 중인 대규모 연구과제로서 본 연구가 성공적으로 수행된다면 국내는 물론이고 외국에서도 본 연구개발을 통하여 제시된 지침대로 줄눈 균열 유도장치를 적정 간격으로 설치할 수 있을 것으로 판단된다.

3절 연구개발과제 및 대상기술의 중복성 검토

국가연구개발비의 효율적인 투자를 위하여 연구개발과제의 중복성 조사를 유사과제, 관련 논문으로 구분하여 실시하였다. 조사대상은 핵심기술을 중심으로 하였으며, 각각의 핵심기술에 대해 국·영문 핵심키워드를 선정하고 이를 이용하여 유사과제의 경우는 국가연구개발사업 종합관리시스템(www.kordi.go.kr)과 한국건설교통기술평가원(www.kicttep.re.kr)에서 조사하였으며, 논문 조사는 토목연구정보센터(www.ceric.net)에서 수행하였다. 문헌조사를 통해 수집한 각종 관련 기관으로부터 중복성 조사를 수행하였다.

1. 유사연구 과제 검토 결과

가. 줄눈 콘크리트포장의 줄눈손상 해석 및 대책 연구(한국도로공사, 1998)

- "줄눈콘크리트포장의 줄눈손상 해석 및 대책 연구" 과제에서는 포장설계에 관련된 사항과 유지보수에 관련된 사항을 다루었다. 줄눈콘크리트포장 설계를 위해서는 줄눈재(Joint Sealant) 시공과 다웰바 설치의 타당성을 검토하였다. 포장의 유지보수를 위해서 줄눈콘크리트 줄눈부를 평가할 수 있는 시스템을 개발하였고, 줄눈부의 파손이 심한 경우에 시행하는 전단면 보수를 내구성이 좋은 초속경 시멘트를 이용하여 실내시험 및 현장 시험시공을 실시하였다.
- 줄눈재의 종류와 역할, 줄눈재 파손형태 및 원인, 줄눈재 형태의 특성 등을 검토결과 줄눈재 파손의 최소화로 줄눈부 파손 및 포장체 파손을 방지하기 위해서 줄눈재 설치시의 주의사항을 열거하였다.
- 현장 추적조사를 통하여 다웰바 설치유무에 따른 하중전달효과의 차이점을 분석하고, 이것이 줄눈부 손상에 미치는 영향을 평가하여, 린 콘크리트 위에 포설된 줄눈콘크리트포장의 다웰바의 필요성을 재검토한 결과 줄눈콘크리트포장의 하중전달효과는 다웰바의 설치유무, 대기온도, 포장의 노후도에 영향을 받으며, 린 콘크리트를 기층으로 하는 줄눈콘크리트포장에서 다웰바 설치여부는 하중전달효과에 큰 영향을 미친다는 결론을 얻었다.

- 줄눈콘크리트포장 줄눈부의 파손이 심한 경우에는 전단면 보수를 하며, 새로운 초속경 시멘트를 이용한 콘크리트를 실내시험 및 현장 시험시공을 실시하여 물리화학적 특성, 작업성, 강도발현 특성, 슬래브 거동특성 및 내구특성을 분석하여 기존 시멘트의 대체 가능성을 파악해보았다.

나. 한국형 줄눈 콘크리트포장의 적정 줄눈간격 산정(교육인적자원부, 2002~2003)

- "한국형 줄눈콘크리트포장의 적정 줄눈간격 산정" 연구는 줄눈 콘크리트포장에서 초기거동과 장기거동을 고려하여 적정 줄눈간격 산정에 관하여 연구하였다. 초기거동에서 국내 권역별 기후자료를 HIPERPAV에 적용하여 무작위 균열이 발생하지 않도록 예측된 줄눈간격은 28~43m로 큰 값을 보였으며, 이는 과도한 줄눈폭 움직임을 유발하여 포장체의 조기파손의 원인이 될 수 있으며 초기거동에서 HIPERPAV를 통한 품질관리가 중요하지만 적정 줄눈간격 설계에선 임계설계변수가 아님을 확인하였다.
- 장기거동에서 86AASHTO Guide에서 제시한 줄눈폭 산정식에 신뢰도 개념을 도입하여 산정한 국내 권역별 줄눈간격 잠정안은 6~8m로서, 산정한 권역별 줄눈간격 잠정안을 통해 지역별 기후 특색에 적합한 적정 줄눈간격을 산정할 수 있다.

다. 한국형 포장설계법 개발과 포장 성능 개선방안 연구(국토해양부, 2002~2010)

- "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구-콘크리트포장설계법 개발" 과제는 국내 포장 설계의 한계를 극복하기 위하여 3단계 9년(2002년~2010년)으로 계획된 과제로서 그 세부과업 중의 하나로 국내의 건설 재료, 기후, 교통조건 등을 고려한 콘크리트포장 설계법 개발이 추진되고 있다. 콘크리트포장설계법 개발은 교통하중 정량화, 재료물성 정량화, 구조해석 모형개발, 피로파손 모형 개발, 불연속면 정량화 및 포장 평가 정량화 연구 분야로 구분된다. 현재는 3단계 연구가 진행되고 있는 상태이다.
- 본 연구와 유사한 분야는 불연속면 정량화 연구로서 콘크리트포장에 대한 HIPERPAV 프로그램을 이용한 초기거동 연구를 통하여 최대줄눈간격을 산정하였으며, 공용성 모델을 통한 포장 수명의 예측과 Joint Sealant Failure와 하중전달

효과를 고려하여 줄눈간격을 산정하였다. 초기거동 및 장기거동을 고려하여 권역별 줄눈간격 잠정안을 제시하였다. 줄눈 콘크리트포장에 설치하는 다웰바의 간격이나 크기에 대한 국내외 적용현황을 살펴보았으며, 하중전달 장치의 효율을 평가하기 위한 설계인자를 고찰하였다.

2. 연구관련 유사 논문 검토

구분	논문제목	차이점
국내 논문	콘크리트포장에서 하중전달계수에 관한 연구(김현욱 외, 대한토목학회 논문집, 2002)	기존 논문은 사용되고 있는 하중전달계수의 문제점을 정의하고 FWD를 이용하여 각각의 콘크리트포장에 대한 현장시험을 통하여 국내 현장조건에 맞는 하중전달계수를 산정하여 제시한 반면 본 연구에서는 줄눈 균열 유도장치 개발과 현장시험시공을 통하여 줄눈을 유도하기위한 공법을 제시하고자 함
	비파괴 조사 장비를 이용한 무근 콘크리트포장의 다웰바 시공 상태 평가(이재훈 외, 대한토목학회 정기학술대회논문집, 2005)	다웰바의 시공 상태를 조사하는 장비인 MIT Scan-2 장비의 상용 방법과 이를 이용한 현장 조사자료 결과를 간략하게 소개함 본 연구에서는 줄눈을 유도하는 줄눈 균열 유도장치 개발과 이에 따른 적정줄눈간격 제시를 목표로 함
	유리섬유강화 합성 다웰바의 물리·역학적 특성(원종필 외, 대한토목학회 논문집, 2005.09)	유리섬유강화합성(GFRP) 다웰바의 물리·역학적 특성을 분석한 반면, 본 연구에서는 인위적인 줄눈절단이 아닌 자연발생 줄눈을 유도하는 기존의 다웰바 기능을 대체할 수 있는 줄눈 균열 유도장치 개발을 목표로 함
	줄눈콘크리트포장의 적정 줄눈간격에 대한 연구(전범준, 이승우, 한국도로학회 논문집, 2005.12)	국내 권역별 기후자료를 바탕으로 HIPERPAV 프로그램을 이용하여 초기거동에 적용하고 장기거동에서는 다웰바의 하중전단율을 고려하여 권역별 줄눈 간격 잠정안을 제시함 본 연구에서는 구조해석뿐만 아니라 줄눈 균열 유도장치를 개발하여 다양한 간격으로 현장시험포장을 실시하여 적정줄눈간격을 제시를 목표로 함
해외 논문	Evaluation of Load Transfer Efficiency for SMP Sections in the LTPP Database (Mr.J.Mauricio Ruiz, TRB, 2003)	LTPP 정보자료를 이용한 계절별 모니터링 프로그램(SMP) 부분에 있어 교통하중과 환경조건이 미치는 영향에 대한 하중전달계수를 평가한 반면 본 연구에서는 기존 다웰바의 성능과 시공성을 개선한 새로운 타입의 줄눈 균열 유도장치 개발을 목표로 함
	Evaluation of Dowel Bars Installed in Airfield Concrete Pavement Construction Joints by Using Plastic Sleeves (Thomas Yu, TRB, 2005)	콘크리트포장의 시공줄눈 설치시 플라스틱 커버를 이용한 개선된 다웰바의 고정 방법을 제시한 반면 본 연구에서는 기존 다웰바의 성능과 시공성을 개선한 새로운 줄눈 균열 유도장치 개발을 목표로 함
	Evaluation of Dowel Bar Retrofit Alternatives Using Accelerated Pavement Testing (John Harvey, TRB, 2006)	처짐과 하중전달효과(LTE)를 측정함으로서, 다웰바 보강(DBR) 줄눈과 균열의 공용성 평가를 위하여 중차량 시뮬레이션(HVS)을 이용한 포장가속시험기(APT)의 결과를 보여줌 본 연구에서는 기존 다웰바의 성능과 시공성을 개선한 새로운 줄눈 균열 유도장치 개발을 목표로 함

제 3 장 연구개발 수행 내용 및 결과

1절 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장

1. 1차 시험포장(08년 11월, 장헌산업 당진공장)

가. 시험포장 개요

2008년 11월에 실시된 1차 시험포장은 기존 줄눈 설치에 따른 줄눈부 조기 파손 및 공용성 저하를 개선시키고자 개발된 줄눈 균열 유도장치의 성능 평가를 위해 시행하였다. 시험포장에 사용된 균열 유도 장치를 2가지 타입으로 제작하여 각각의 경우에 대한 성능을 비교 분석하였다. 또한 2차 시험포장을 위하여 고안.제작된 줄눈 누름장치 및 줄눈 누름캡을 시험포장에 적용하여 그 성능을 확인하고자 하였으며 아래 그림 7은 1차 시험포장 전경을 나타낸 것이다.



그림 7. 1차 시험포장 구간 전경

(주)장헌산업 당진공장 진입로 총 117m 연장에 시험포장을 실시하였으며 다웰바 5ea, 줄눈 균열 유도장치 type Ⅰ8ea, 줄눈 균열 유도장치 type Ⅱ8ea. 역 T 형 줄눈 균열 유도장치 2ea에 대한 성능 시험을 실시하였다. 아래 그림 8는 1차 시험포장 구간의 평면도이다.

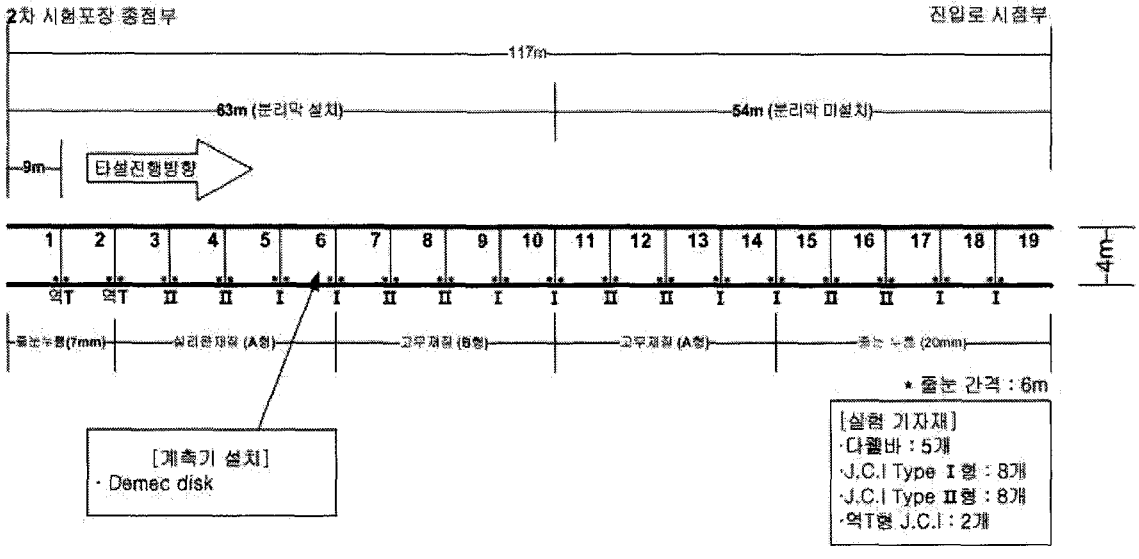


그림 8. 1차 시험포장 평면도

나. 줄눈 균열 유도장치 시제품

1차년도 줄눈 균열 유도장치 시작품 제작 후 사전 거동 현장 시험포장을 실시한 결과 시공성의 불량, 낮은 하중전달율 및 콘크리트 타설 시 줄눈 균열 유도벽체와 바닥판 접속부에 대한 공극이 발생하였다. 또한, 줄눈 균열 유도벽체의 밀림 현상이 발생하는 등 다양한 문제점이 지적되어 이에 대한 검토 및 전문가들의 다양한 자문을 받은 결과를 바탕으로 기존 줄눈 균열 유도장치의 성능을 보완한 시작품을 통해 시제품 모델을 제작하였다.

기존 시작품의 경우 유도벽체와 바닥판 사이 접속부 공극발생을 억제하기 위하여 줄눈 균열 유도벽체 내 일정 크기 천공을 한 후 바닥면에서 50㎜ 정도 공간이 생기도록 제작하였으나, 연구자의 판단에 의해 표 5와 같이 세 가지 형상을 고안하여 제품의 시공 효율성을 향상 시킬 수 있도록 개선하였다.

또한 줄눈 균열 유도장치는 페이버 구동에 따른 콘크리트 혼합물의 압력에 장

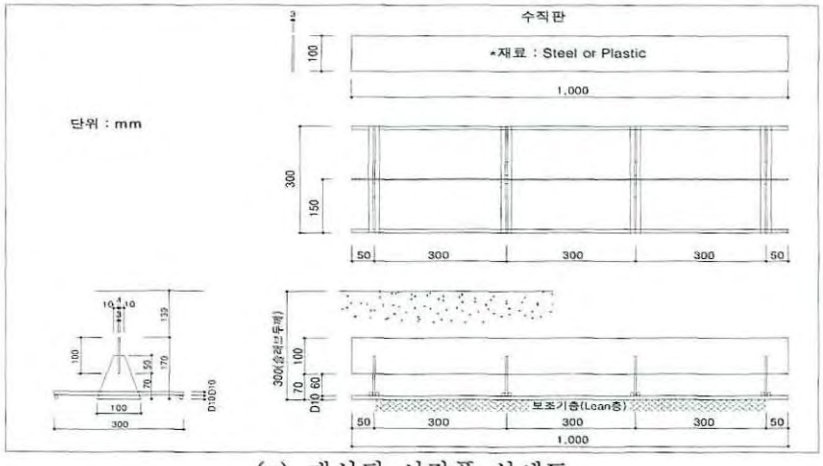
치의 변형을 최소화하기 위하여 구조연 압연강재(KS D-3503, SS490)와 동일한 재질로 제작하였다.

표 5. 줄눈 균열 유도장치 시제품 구분에 따른 특성

구분	유도벽체 높이(㎝)	바닥면과의 높이(㎝)	보완
개선된 시작품	10	7	· 바닥판 이형철근 사용 (정착성 보완)
시제품(Ⅰ)	5	12	· 수직받침판 모서리 제거
시제품(Ⅱ)	5	15	· 다웰바 역할의 원형봉강 (12㎜) 설치, · 수직받침판 모서리 제거

(1) 개선된 시작품

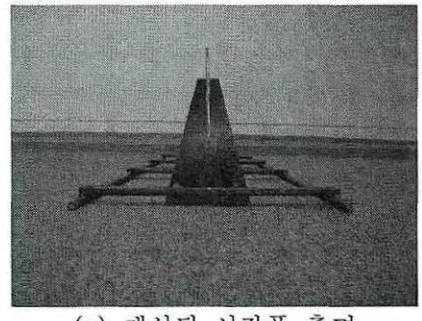
줄눈부의 줄눈 균열 유도를 위하여 개선된 시작품의 형상은 그림 9와 같다. 페이버에 의한 콘크리트 타설 및 다짐 시 콘크리트의 이동을 원활하게 하고 줄눈 균열 유도벽체의 밀림현상을 방지하기 위한 목적으로 수직받침판과 줄눈 균열 유도벽체 사이 간격을 7cm 띄웠으며, 줄눈 균열 유도벽체의 높이를 10cm로 하였다. 바닥판은 기존 철판에서 10mm 이형철근으로 대체한 후 고정핀을 사용하여 부착하는 형식으로, 바닥판이 보조기층에서 이탈되는 문제점을 보완하였으며 철재사용을 줄여 재료비 절감효과를 얻을 수 있다. 줄눈 균열 유도장치의 높이는 17cm로 하였다.



(a) 개선된 시작품 상세도



(b) 개선된 시작품 정면



(c) 개선된 시작품 측면



(d) 개선된 시작품 좌측면

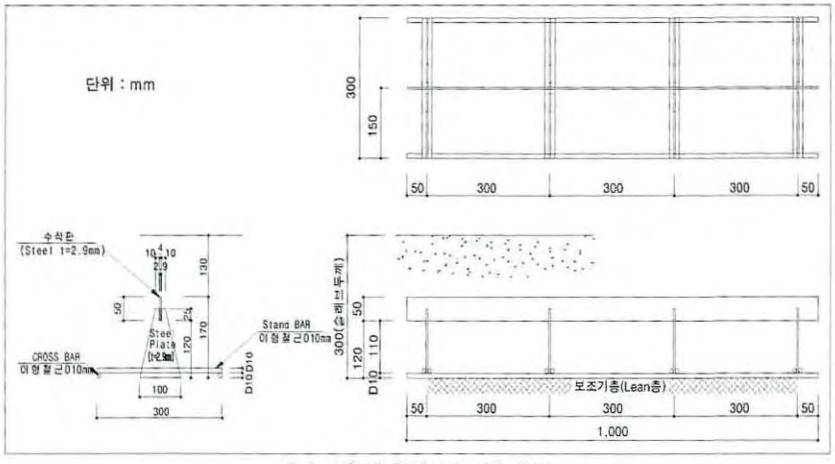


(e) 개선된 시작품 우측면

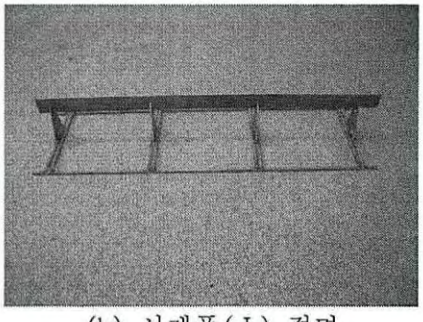
그림 9. 개선된 줄눈 균열 유도장치 시작품

(2) 시제품 (I)

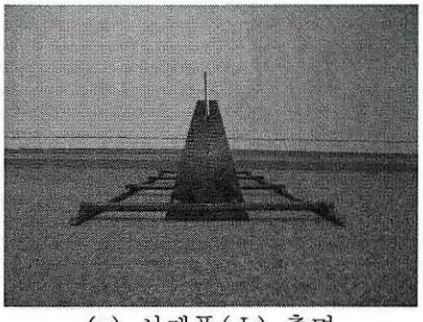
이후, 균열 발생 여부는 줄눈 균열 유도벽체의 높이에 따른 상관관계가 미비하고 골재 맞물림 효과를 크게 하여 하중전달율을 높이기 위해 그림 10과 같이 줄눈 균열 유도벽체의 높이를 5㎝로 변경하였다. 그림 10은 그림 11과 동일한 형상과 제원을 나타내고 있으나, 수직받침판의 모서리부분을 절단하여 모서리부 응력집중 현상을 억제하고 불규칙 균열이 발생하는 것을 미연에 방지하는 형식으로 고안하였다.



(a) 시제품(Ⅰ) 상세도



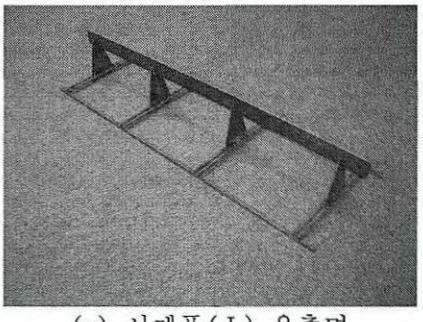
(b) 시제품(Ⅰ) 정면



(c) 시제품(Ⅰ) 측면



(d) 시제품(Ⅰ) 좌측면



(e) 시제품(Ⅰ) 우측면

그림 10. 줄눈 균열 유도장치 시제품(Ⅰ)

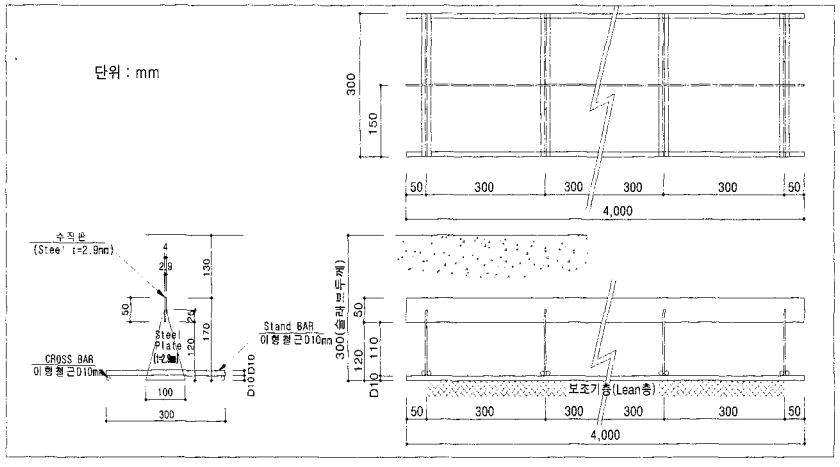
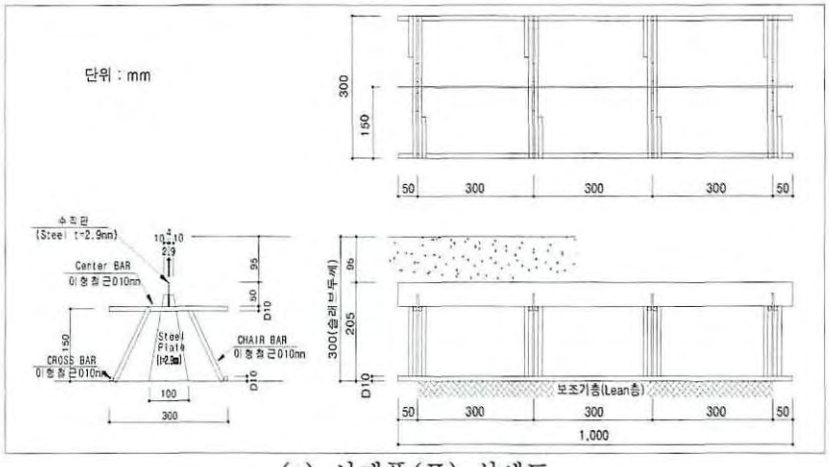


그림 11. 줄눈 균열 유도장치 시제품(Ⅰ)의 보완, (단위:mm)

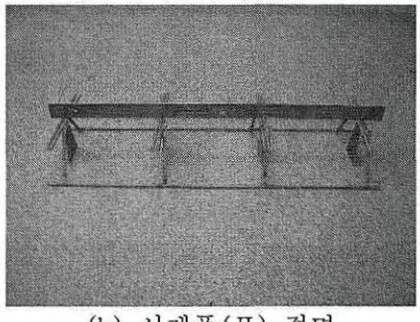
(3) 시제품 (Ⅱ)

그림 12는 1차년도 시험포장 시 줄눈 균열 유도장치 설치구간의 하중전달율이 낮게 나타난 점을 보완하기 위해 고안된 형상으로, 기존 다웰바의 원리를 응용하여 일정량의 하중전달을 도모하기 위해 제작된 것으로 이형철근의 지름을 10㎜로 하였다.

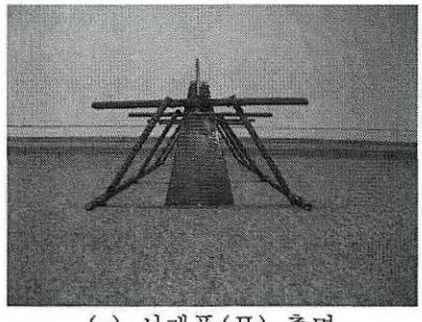
그림 13은 그림 11과 같이 수직받침판 모서리를 제거하여 응력집중에 의한 불규칙 균열을 방지하고자 고안하였다. 또한, 콘크리트 슬래브의 수평거동을 원활하게 하기 위해 이형철근을 직경 12㎜인 원형봉강으로 대체하였다. 이는 하중전달율을 좀 더 높이기 위한 방안이다. 향후 2차 시험포장을 통해 하중전단율을 다시 측정하여 보완할 필요가 있다면, 철근 지름을 증가시킬 방안도 고려중이다.



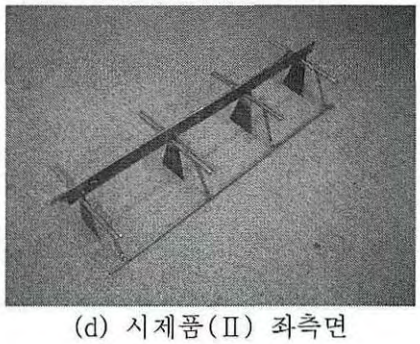
(a) 시제품(Ⅱ) 상세도



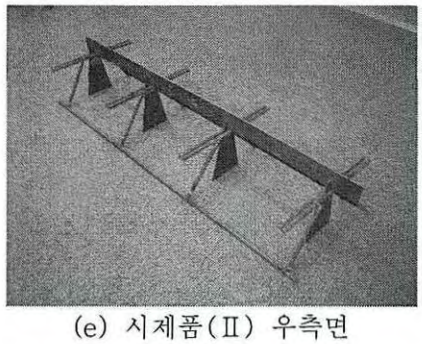
(b) 시제품(Ⅱ) 정면



(c) 시제품(Ⅱ) 측면



(d) 시제품(Ⅱ) 좌측면



(e) 시제품(Ⅱ) 우측면

그림 12. 줄눈 균열 유도장치 시제품(Ⅱ)

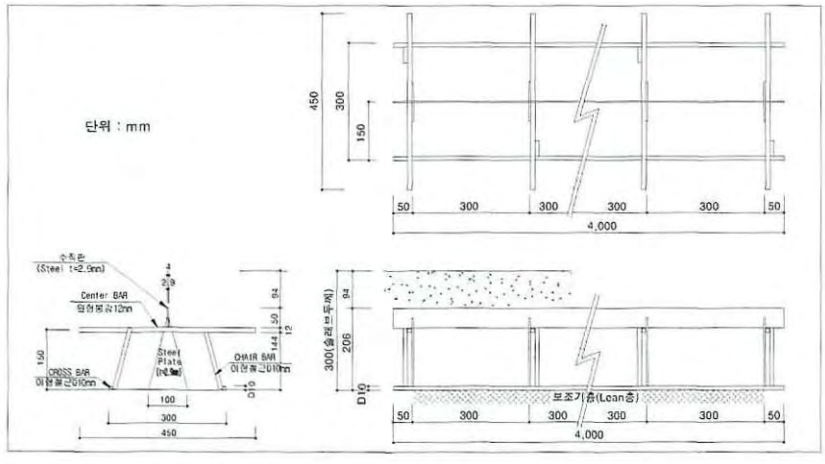


그림 13. 줄눈 균열 유도장치 시제품(Ⅱ)의 보완, (단위:mm)

다. 줄눈 누름 장치 및 줄눈 누름캡

1차년도 시험포장 시 적용한 표면 홈 누름장치를 개선하였고 '줄눈 누름 장치' 로 명명하였다. 1차년도 시험포장 결과, 줄눈 균열 유도장치의 높이가 높을수록 자연 균열이 발생된다는 사실을 확인할 수 있었다. 하지만 발생된 자연 균열은 일정한 경향을 보이지 않았으며 아래 그림 14는 1차년도 시험포장 시 발생한 자연 균열의 모습이다.

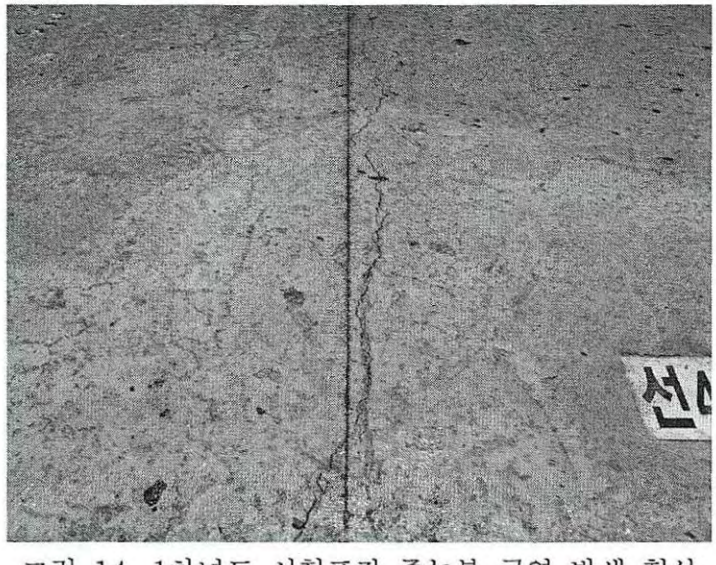


그림 14. 1차년도 시험포장 줄눈부 균열 발생 형상

이와 같이 줄눈 균열 유도장치에서 유도된 균열이 일정하지 않은 이유는 아래 그림 15와 같이 콘크리트 슬래브 상부에 존재하는 굵은 골재로 인하여 일정한 경향으로 균열이 유도되지 않았기 때문으로 분석된다.

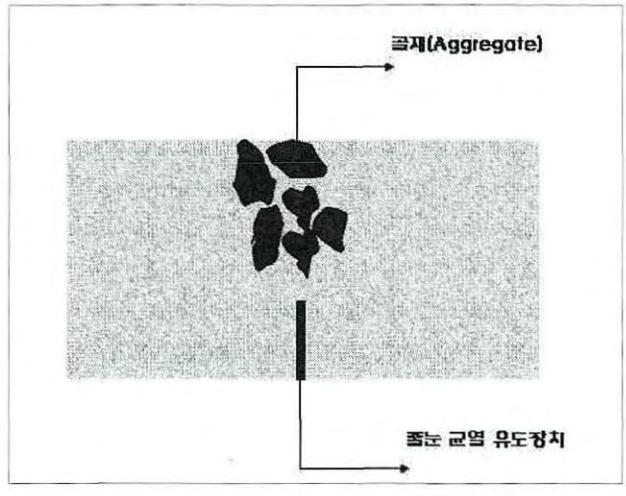


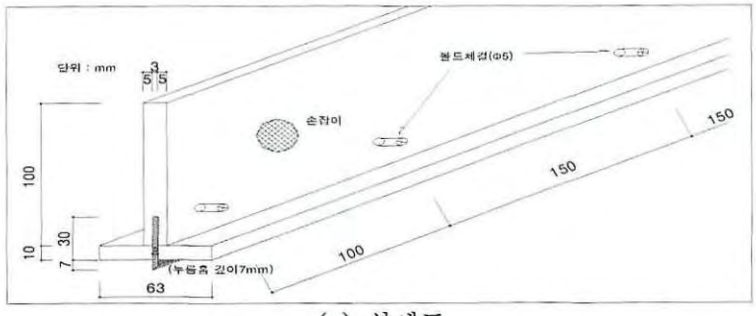
그림 15. 줄눈 균열 유도장치 균열 발생 개념도

따라서 줄눈부의 줄눈을 형성시켜 콘크리트 슬래브 상부의 굵은 골재를 제거하고 자연 균열을 조금 더 안정적으로 유도하도록 하기 위하여 줄눈 누름 장치 및 줄눈 누름캡을 제작하였다.

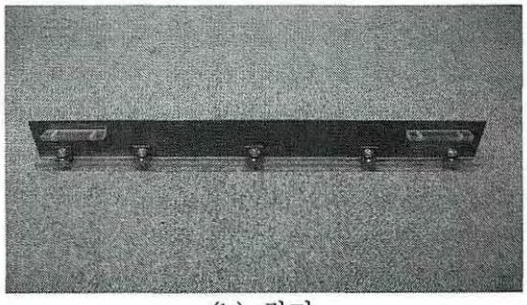
(1) 줄눈 누름 장치

줄눈 균열 유도장치의 성능평가를 위해 시행한 1차년도 사전 거동 시험포장의 결과, 콘크리트 타설 후 줄눈 누름 작업을 실시한 경우, 줄눈 누름 작업을 실시한 위치로 균열이 유도되고 균열 형상도 일정한 것으로 나타났다. 이를 착안하여 줄눈 균열 유도장치의 성능을 향상시킬 수 있는 줄눈 누름장치를 고안하였다.

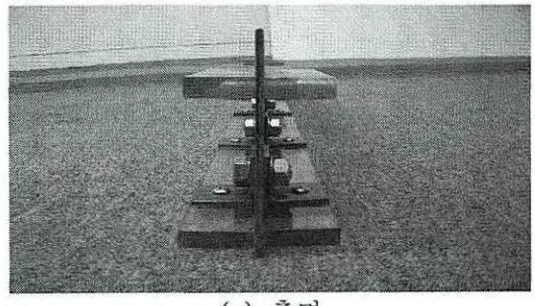
줄눈 누름장치는 콘크리트 타설 후 굳지 않은 콘크리트 포장 내에 일정깊이(7㎜)로 삽입하는 방식으로, 콘크리트 슬래브 상부에 수직 방향으로 임의의 줄눈을 형성시키는 수직판과, 수직판 양 측면으로 수평하게 돌출 형성된 누름판으로 구성된다. 누름판은 콘크리트 타설 후 줄눈 누름장치를 포장 내에 삽입하여 줄눈을 형성시킬 때 굳지 않은 콘크리트 포장면과 접하여, 수직판 삽입에 따른 콘크리트 부피 변화를 억제 한다.



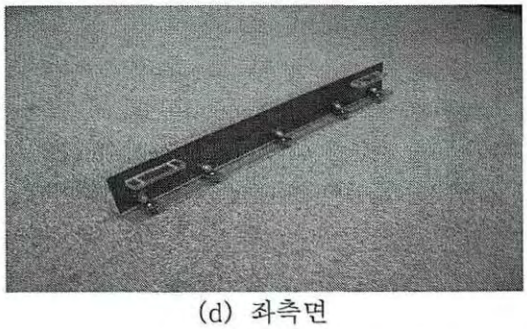
(a) 상세도



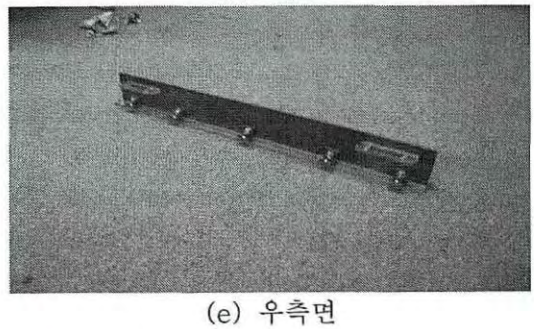
(b) 정면



(c) 측면



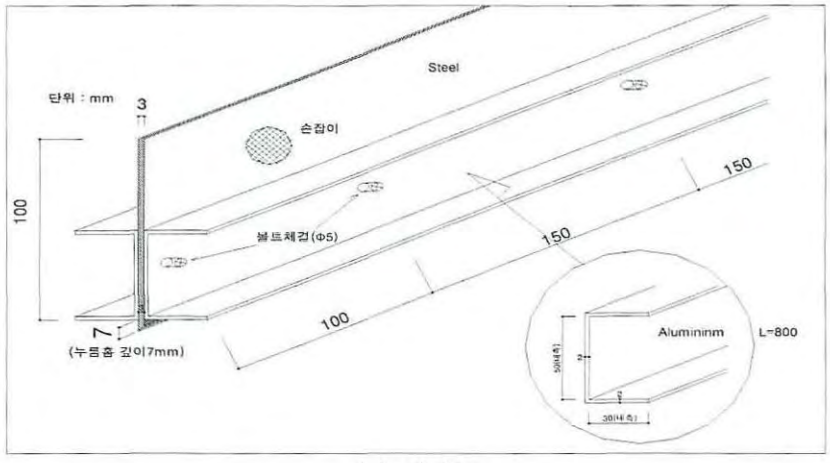
(d) 좌측면



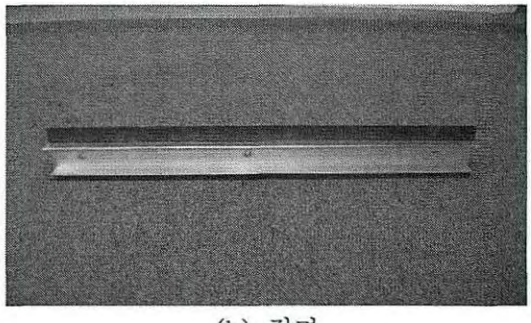
(e) 우측면

그림 16. 줄눈 누름장치(Ⅰ)

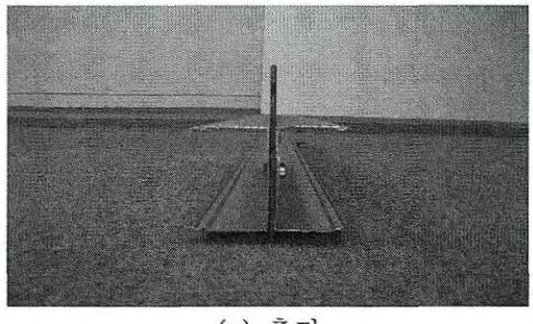
줄눈 누름장치는 두 가지 형식으로 제작되었으며 그림 16~17에 나타내었다. 줄눈 누름장치(Ⅰ)의 경우 강재질의 수직판에 아크릴 재질의 손잡이와 콘크리트 부피 팽창을 제어하는 누름판을 덧대어 만들었다. 줄눈 누름장치(Ⅱ)의 경우 강재질의 수직판에 알루미늄 재질의 손잡이와 콘크리트 부피 팽창을 제어하는 누름판을 일체화 하여 볼트 체결하였다. 각각의 줄눈 누름장치는 인력으로 시공하며 일정 깊이의 홈을 형성하기 위하여 시공 시 하중재하에 주의를 해야 하는 어려움이 있다.



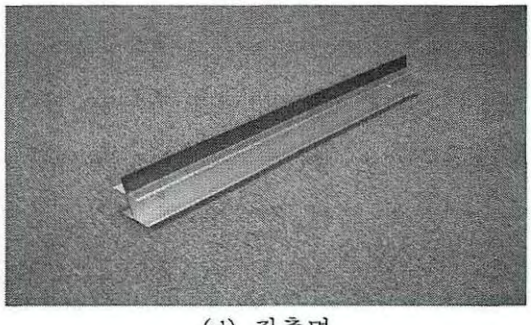
(a) 상세도



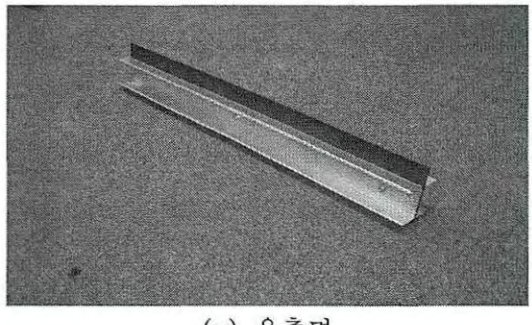
(b) 정면



(c) 측면



(d) 좌측면



(e) 우측면

그림 17. 줄눈 누름장치(Ⅱ)

(2) 개선된 줄눈 누름장치

그림 18은 인력식 줄눈 누름장치를 개선한 것으로 그림 16의 문제점을 보완하였다. 기존의 줄눈 누름장치는 콘크리트 표면의 홈 형성 시 콘크리트의 부피팽창을 제어하기 위한 누름판의 폭이 63㎜이었으나, 개선된 줄눈 누름장치는 163㎜로 증가시켜 콘크리트의 부피팽창을 최대한 방지하였다. 또한, 누름판 모서리부분을 완만하게 처리하여 콘크리트 표면과 맞닿는 부분의 눌림을 방지하였다.

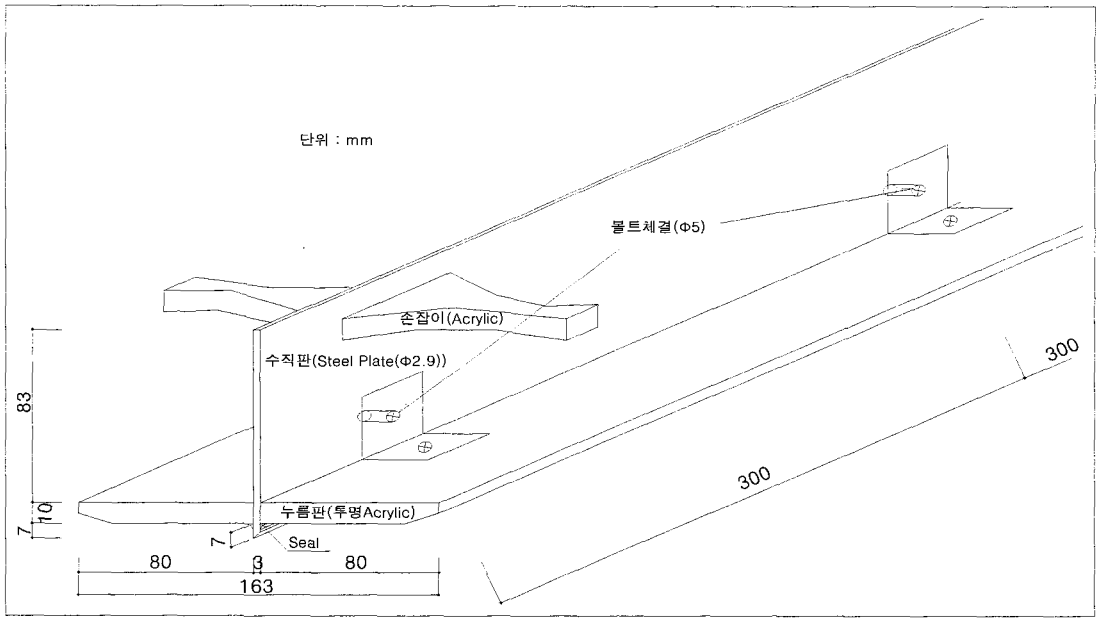
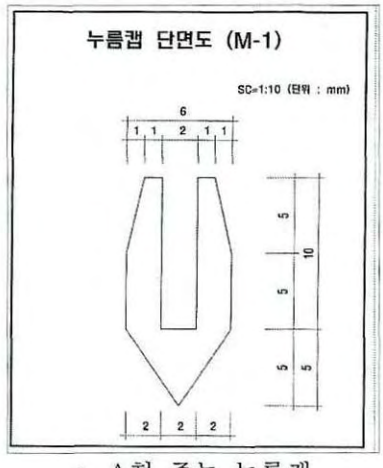


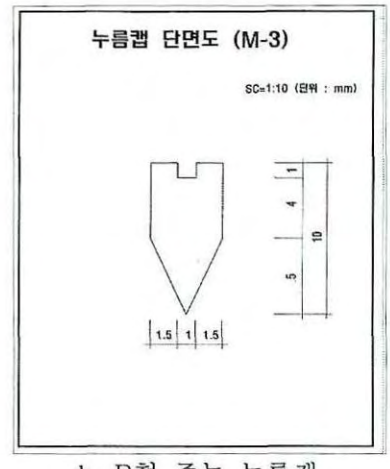
그림 18. 개선된 줄눈 누름장치

(3) 줄눈 누름캡

균열을 유도하기 위하여 줄눈 누름 장치를 제작하였으며 누름장치를 이용하여 생성된 줄눈을 유지하기 위하여 줄눈 누름캡을 제작하였다. 줄눈 누름캡은 별도의 가이드 프레임을 이용하여 줄눈 누름작업 후 생성된 줄눈에 삽입하도록 하였다. 고무와 실리콘 재질의 줄눈 누름캡을 제작하였고 아래 그림 19는 줄눈 누름캡의 형상이다.



a. A형 줄눈 누름캡



b. B형 줄눈 누름캡

그림 19. 줄눈 누름캡 형상, 재질 : EPDM(고무) 실리콘

라. 시험시공 절차

줄눈 균열 유도공법을 적용하는 콘크리트 포장의 시공절차는 일반적인 줄눈 콘크리트포장과 동일하나, 린콘크리트 타설 후 다웰바를 대신하여 줄눈 균열 유도장치를 정착시킬 위치에 유도선을 긋고 줄눈 균열 유도장치를 고정시킨다. 아래 그림 20은 줄눈 균열 유도공법의 시공 절차를 나타낸 것이다.

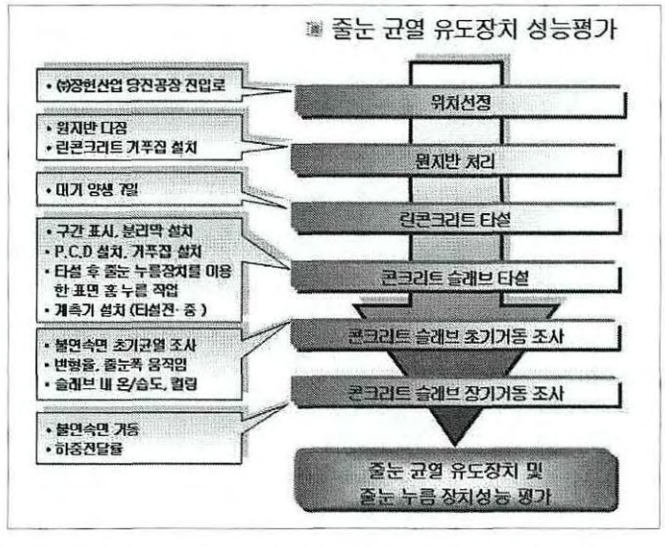


그림 20. 줄눈 균열 유도공법 시공 절차도

이 후, 줄눈 균열 유도벽체가 밀리지 않도록 주의하여 콘크리트를 타설한 후 줄눈 누름작업 또는 성형줄눈재를 삽입한다. 줄눈누름 또는 성형줄눈재 삽입 시 콘크리트 체적변화로 인한 함몰 구간에 대해 면처리를 실시한다. 이에 대한 시공 과정은 아래 그림 21과 같다.

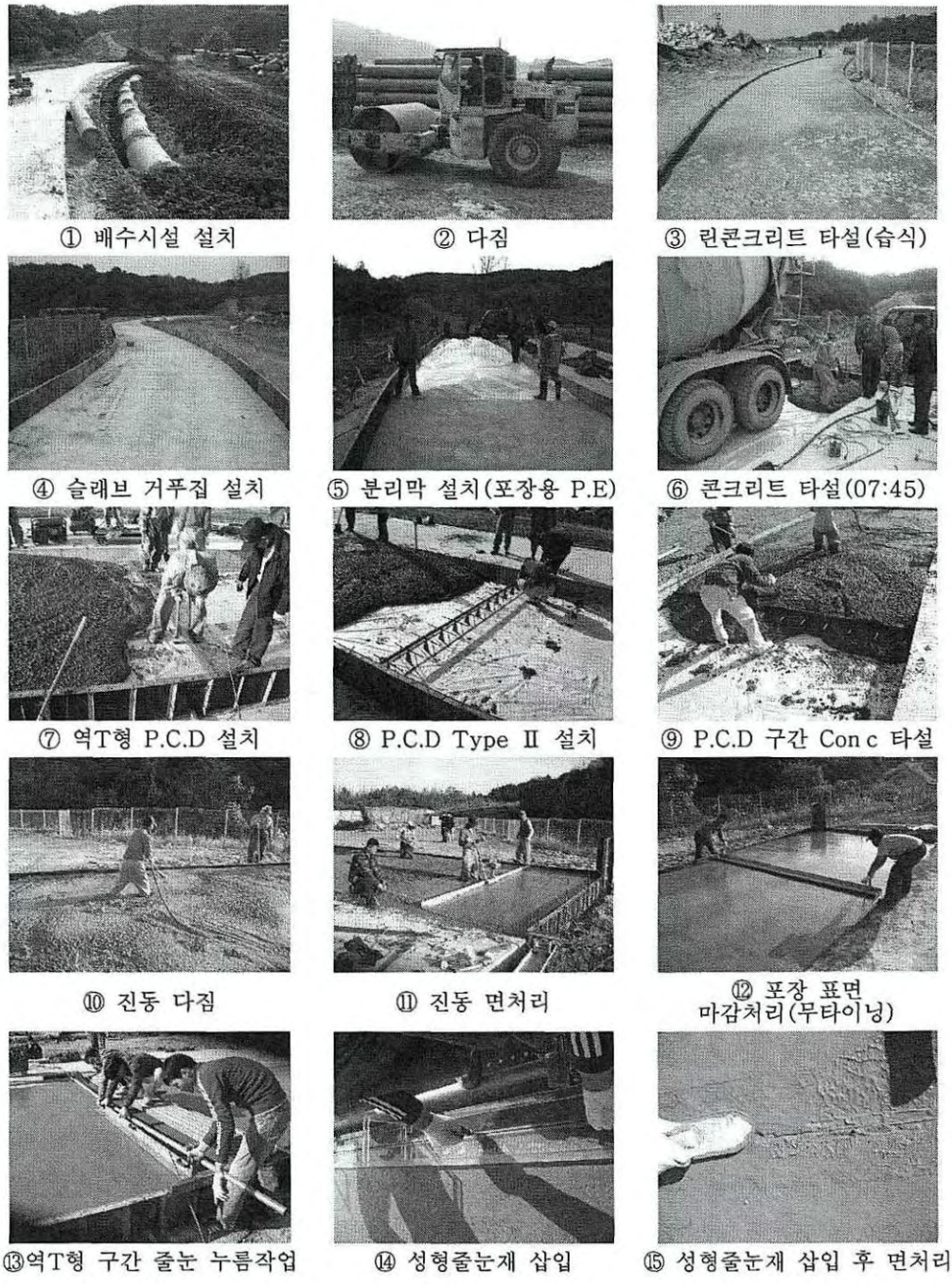


그림 21. 1차 시험포장 시공 절차

시험포장에 사용된 레디믹스트 콘크리트는 현장에서 10분 거리에 위치한 플랜트에서 운반되었으며 인력으로 시공하였다. 11월 10일 07시 45분에 콘크리트 타설이 시작되어 15시 30분경에 종료되었으며, 117m 시험 포장 구간의 콘크리트 타설에 소요된 시간은 7시간 45분이다.

콘크리트의 시방배합은 현장 인근 플랜트의 여건을 반영하여 굵은골재의 최대치수 및 단위재료량을 변화시켰다. 이에 대한 현장배합표는 아래 표 6과 같으며 콘크리트 타설 후 양생제 살포는 시험포장 관리자의 판단에 의하여 생략하였다.

표 6. 현장배합표

<table>
<tr><th rowspan="2">굵은골재
최대치수
(㎜)</th><th rowspan="2">호칭
강도
(MPa)</th><th rowspan="2">슬럼프
범위
(㎜)</th><th rowspan="2">공기량
(%)</th><th rowspan="2">W/C
(%)</th><th rowspan="2">S/a
(%)</th><th colspan="8">단위재료량(kg/m³)</th></tr>
<tr><th>G1</th><th>G2</th><th>S1</th><th>S2</th><th>C1</th><th>C2</th><th>C3</th><th>C4</th></tr>
<tr><td rowspan="4">25</td><td rowspan="4">4.5</td><td rowspan="2">60</td><td rowspan="2">4.5</td><td rowspan="4">44.0</td><td rowspan="4">39.0</td><td>1,113</td><td>0</td><td>340</td><td>351</td><td>292</td><td>0</td><td>73</td><td>0</td></tr>
<tr><td>W1</td><td>W2</td><td>AD1</td><td>AD2</td><td>AD3</td><td>AD4</td><td>AD5</td><td></td></tr>
<tr><td rowspan="2">±15</td><td rowspan="2">±1.5</td><td>94</td><td>40</td><td>1.83</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td>0.00</td><td></td></tr>
<tr><td colspan="14">자재종류</td></tr>
<tr><td>G1</td><td colspan="3">부순자갈 25㎜ (#57)</td><td>C1</td><td colspan="3">포틀랜드 시멘트 1종</td><td>AD1</td><td colspan="3">AE감수제 표준형</td></tr>
<tr><td>S1</td><td colspan="3">세척사</td><td>C3</td><td colspan="3">플라이애쉬 2종</td><td>AD3</td><td colspan="3">-</td></tr>
<tr><td>S2</td><td colspan="3">부순모래</td><td>W1</td><td colspan="3">지하수</td><td>AD4</td><td colspan="3">-</td></tr>
<tr><td>-</td><td colspan="3">-</td><td>W2</td><td colspan="3">회수수</td><td>AD5</td><td colspan="3">-</td></tr>
</table>

마. 계측기 설치

기존 줄눈 설치에 따른 줄눈부 조기 파손 및 공용성 저하를 개선시키고자 개발된 줄눈균열 유도장치 Type-Ⅰ형 및 Ⅱ형의 성능 평가를 위한 1차 시험콘크리트 포장을 2008년 11월 10일 당진에 위치한 장헌산업 공장부지 내 진입로에 실시하였다. 온도 변화에 따른 줄눈 및 균열폭 움직임 분석하기 위하여 시험콘크리트포장 내 모든 줄눈에 디멕 디스크를 설치하였다.

바. 1차 시험포장 결과 분석

(1) 균열 발생 경향 분석

각각의 공정별 작업 시간을 확인해본 결과, 줄눈 누름 및 성형줄눈재 삽입에 따른 작업시간은 표 7 및 그림 22과 같이 나타났다. 3차 시험포장 초기 성형줄눈재 삽입 시 평균적으로 19분 가량 소요되었으나, 작업 숙련도 증가, 작업 편의성 확보 및 작업방식의 변경으로 인하여 시험을 거듭할수록 7㎜ 줄눈 누름 작업과 유사한 11분대를 나타내어 시공성을 확보하였다.

표 7. 공정별 작업시간(1차 시험포장)

작업순서	구분		작업시간 (분)	평균 (분)	비고
1	7㎜ 줄눈 누름		11	11	작업시간 단축 원인 1. 작업숙련도 증가 2. 작업의 편의성 확보 3. 작업방식 변경 (홈파기 후 삽입)
			11		
2	성형줄눈재	실리콘 A형	22	19.25	
			20		
			20		
			15		
3		고무 B형	13	17.50	
			17		
			25		
			11		
4		고무 A형	16	10.75	
			9		
			8		
			10		
5	20㎜ 줄눈 누름		5	5.5	
			5		
			6		
			6		

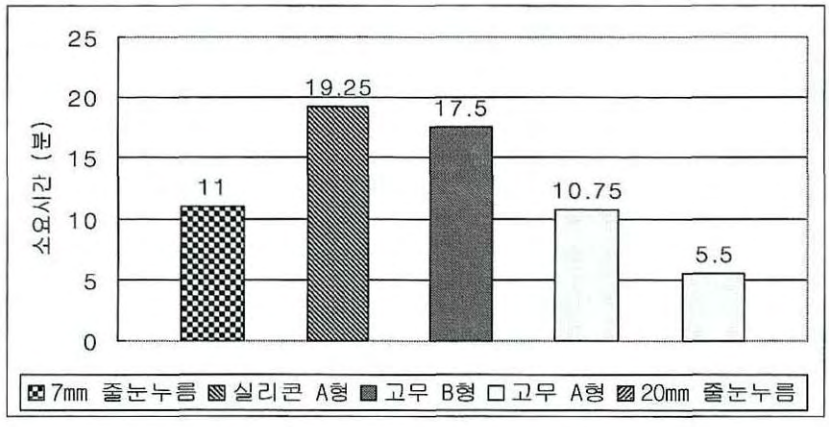


그림 22. 유도 균열 작업 공정별 소요시간

본 시험포장은 줄눈 균열 유도장치를 사용하였을 때, 슬래브 내의 균일한 균열 유도 효과를 발현하기 위하여, 균열을 발생시키고자 하는 줄눈부에 다양한 형태의 줄눈 누름 방식을 적용하여 그 효과를 시험해본 것으로, 이에 대한 초기 균열 발생 경향은 표 8와 그림 23과 같다.

표 8. 줄눈 균열 발생 경향(1차 시험포장)

시점(m)	슬래브 No.	콘크리트 타설시간 (08년 11월 10일)	줄눈 균열 유도 장치 Type	줄눈 누름 형식	균열 발생 유무			비고
					2008.11.11 08:00	2008.11.17 15:00	2009.1.19 13:00	
9	2	08:41 ~ 08:50	역T형	줄눈 누름(7㎜)	-	×	×	분리막 설치
15	3	08:50 ~ 09:01	역T형	줄눈 누름(7㎜)	-	×	×	
21	4	09:01 ~ 09:17	Type Ⅱ	실리콘 (A형:15㎜)	×	○	○	
27	5	09:17 ~ 09:37	Type Ⅱ	실리콘 (A형)	○	○	○	
33	6	09:54 ~ 10:03	Type Ⅰ	실리콘 (A형)	×	×	×	
39	7	10:09 ~ 10:37	Type Ⅰ	실리콘 (A형)	×	×	×	
45	8	10:43 ~ 11:03	Type Ⅱ	고무 (B형:10㎜)	○	○	○	
51	9	11:03 ~ 11:14	Type Ⅱ	고무 (B형)	×	×	×	
57	10	11:14 ~ 11:32	Type Ⅰ	고무 (B형)	○	○	○	
63	11	11:34 ~ 11:42	Type Ⅰ	고무 (B형)	×	×	×	
69	12	11:42 ~ 13:06	Type Ⅱ	고무 (A형:15㎜)	×	×	×	분리막 미설치
75	13	13:06 ~ 13:33	Type Ⅱ	고무 (A형)	○	○	○	
81	14	13:33 ~ 13:44	Type Ⅰ	고무 (A형)	○	○	○	
87	15	13:44 ~ 14:06	Type Ⅰ	고무 (A형)	○	○	○	
93	16	14:06 ~ 14:51	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	○	
99	17	14:51 ~ 15:00	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	○	
105	18	15:02 ~ 15:32	Type Ⅰ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	○	
111	19	15:32 ~ ∞	Type Ⅰ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	○	
117~진입로 시점부				무다웰 구간(6m 간격으로 컷팅)				

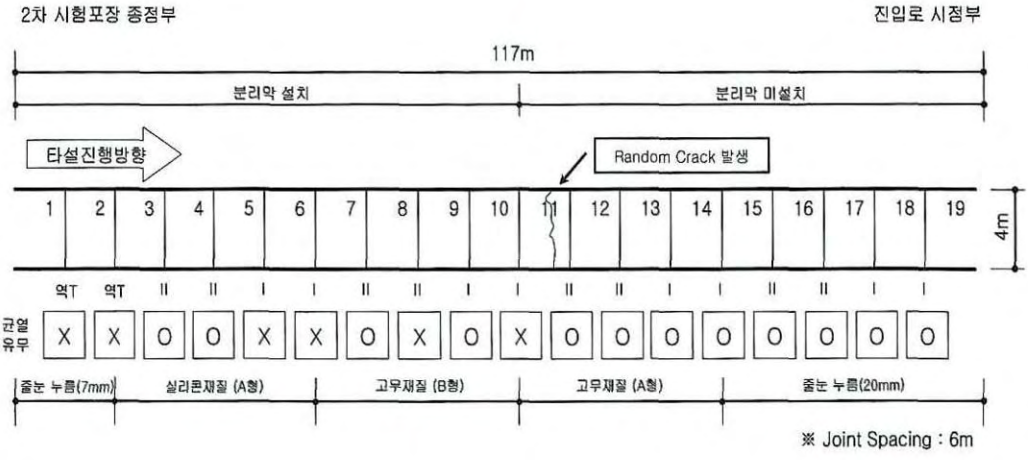


그림 23. 줄눈 균열 발생 결과(1차 시험포장)

본 시험포장의 경우 줄눈균열 유도공법 적용에 따른 유도균열 발생 특성을 알아보고자 시행하였으나, 초기 의도와는 달리 한정된 구간에 대해 다양한 시험변수를 적용하여 그 양상을 파악하기에 부족하였다. 다음의 표 9는 다양한 변수에 대한 시험포장의 줄눈균열 발생율을 나타낸 것이다.

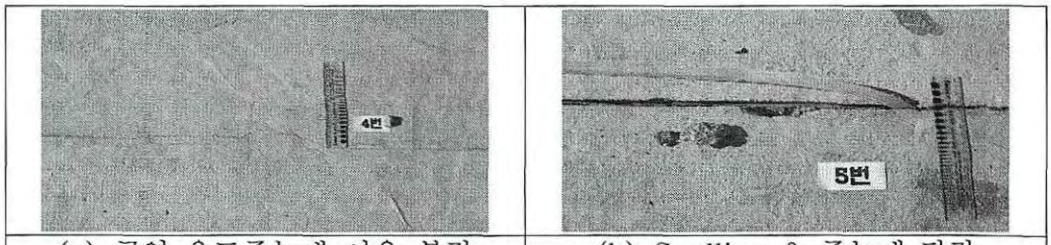
표 9. 다양한 시험변수에 대한 유도균열 발생율

		줄눈균열 유도장치 Type			비고
		역T형	Type I	Type II	
단순비교		0%	62.5%	75%	유도장치에 대한 비교
줄눈누름 (7㎜)		0%	-	-	역T형 구간 적용
유도 줄눈재 (15㎜)	고무	-	50%	75%	-
	실리콘	-	50%	75%	-
유도줄눈재 (10㎜)		-	50%	50%	합성고무
줄눈누름 (20㎜)		-	100%	100%	-

줄눈균열 유도장치 및 균열 유도줄눈재 Type에 대한 균열 유도 효과의 판단은 무리가 있을 것으로 판단되나, 각 시험변수에 대한 개략적인 특성을 확인하였다. 먼저 줄눈균열 유도장치 Type에 대한 단순비교를 살펴보면 Type Ⅱ의 성능이 뛰어나며, 역T형의 경우 균열 유도효과가 미비함을 알 수 있다. 이를 통해 역T형 줄눈균열 유도장치의 현장적용은 어려울 것으로 판단된다. 또한 줄눈균열 유도장치 및 유도줄눈재 Type에 대한 유도균열 발생율을 살펴보면, 줄눈누름 20㎜의 성능이 우수하며, 줄눈균열 유도장치 Type Ⅱ 및 유도줄눈재 15㎜를 적용할 경우 75%의 성능을 나타낸다. 균열 유도줄눈재 Type에 대한 단순비교의 경우, 줄눈누름(h=20㎜)은 100% 유도균열이 발생하였다. 고무재질의 15㎜ 균열 유도줄눈재는 75%의 유도균열 발생율을 보여 타 공정보다 성능이 우수한 것으로 보이나 이를 적용하기엔 무리가 있을 것으로 판단된다. 또한 슬래브 표면의 재료분리 깊이를 관점으로 살펴보면 깊이가 깊어질수록 균열 유도효과가 증가함을 알 수 있다.

줄눈균열 유도장치 및 균열 유도줄눈재를 사용한 1차 시험포장의 경우 지난 1차년도에 실시한 시험포장과는 달리 줄눈 균열이 유도되었으나 상당부분 줄눈 잠김 현상(Joint Freezing)이 발생하였으며, 줄눈 형상도 시공도로에 적용할 수 있을 만큼의 품질을 확보하지 못하였다. 아래의 그림 24~27은 1차 시험포장 줄눈부의 다양한 문제점을 나열한 것으로 시급한 개선이 필요할 것으로 판단된다.

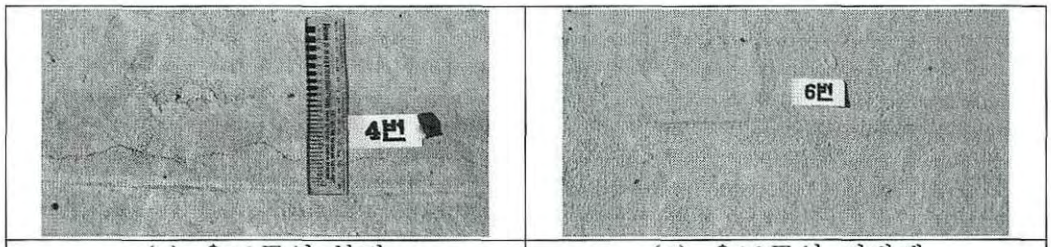
그림 24는 균열 유도줄눈재 이음 불량에 따른 줄눈 균열 형상을 나타낸 것이다. 이는 시험포장시 작업의 편의를 위해 2차례에 걸쳐 균열 유도줄눈재를 삽입한 결과 그 이음새를 마무리하지 못해 발생하였으며, 향후 슬래브 폭과 일정하게 균열 유도줄눈재를 삽입하거나 이음새 마무리에 주의한다면 개선될 소지가 있다고 판단된다. 그림 24 (b)의 경우는 균열 유도줄눈재 삽입 시 발생할 수 있는 가장 큰 문제점을 나타낸 것으로서 줄눈폭이 과도하게 벌어질 경우 줄눈재 탈락을 유발할 수 있다. 그림의 경우는 인위적으로 줄눈재를 탈락 시킨 것으로서 공용 후 이와 같은 문제점이 충분히 발생할 것으로 판단된다.



(a) 균열 유도줄눈재 이음 불량 (b) Spalling & 줄눈재 탈락

그림 24. 1차 시험포장의 문제점 사례(계속)

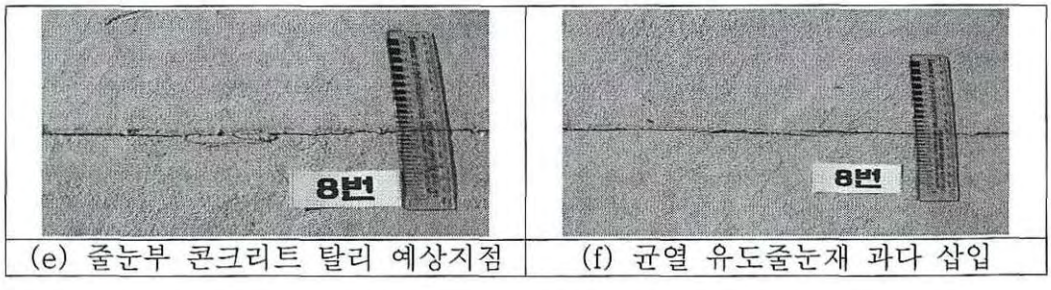
그림 (c)와 (d)는 의도하지 않은 구간에 유도균열이 발생하였거나, 줄눈잠김현상이 발생한 것으로서 균열 유도줄눈재의 형상변경을 통한 개선이 필요할 것으로 사료된다.



(c) 유도균열 불량 (d) 유도균열 미발생

그림 25. 1차 시험포장의 문제점 사례(계속)

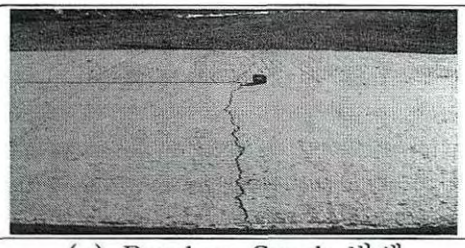
그림 (e)와 (f)는 균열 유도줄눈재의 과다삽입으로 인해 슬래브 표면 콘크리트가 탈리되는 현상을 나타낸 것으로 줄눈재 삽입깊이를 명확히 규정하여 이와 같은 현상을 방지해야 할 것이다.



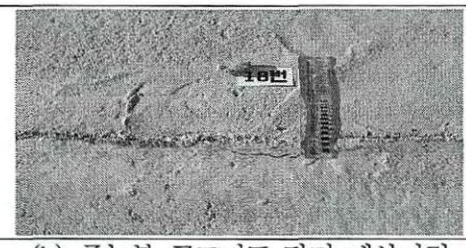
(e) 줄눈부 콘크리트 탈리 예상지점 (f) 균열 유도줄눈재 과다 삽입

그림 26. 1차 시험포장의 문제점 사례(계속)

그림 (g)의 경우는 줄눈부가 아닌 콘크리트 슬래브에 발생한 불규칙 균열로서 분리막 설치 유·무의 경계지점이자 인접 줄눈부의 줄눈잠김현상으로 인해 발생한 것으로 판단된다.



(g) Random Crack 발생
(약 65m 지점)



(h) 줄눈부 콘크리트 탈리 예상지점
(20㎜ 줄눈누름구간)

그림 27. 1차 시험포장의 문제점 사례(계속)

1차년도 시험포장 결과 콘크리트 슬래브에 일정한 균열을 유도하기 위해서는 줄눈 누름 작업을 실시하여 슬래브 상부의 굵은 골재들을 분리해야 한다는 결론을 얻었다. 따라서 3차년도에 실시된 1차 시험포장에서는 줄눈 누름장치와 삽입형 줄눈재를 개발하였다. 하지만 시험포장 결과 낮은 콘크리트 슬럼프로 인하여 줄눈 누름 작업 시 콘크리트 슬래브에 과다한 함몰이 발생하였을 뿐만 아니라 성형 줄눈재 삽입 후 표면 처리에 어려움을 겪었다. 또한 삽입된 성형 줄눈재는 경도가 낮아 삽입 후 본래의 형상을 잃어버리거나 탈리되는 현상도 발생하였다. 고속도로 포장공사에 쓰이는 콘크리트는 1차 시험포장에서 사용된 콘크리트에 비해 슬럼프도 낮을 뿐만 아니라 굵은 골재 최대치수 또한 높은 점을 감안한다면 줄눈 누름 작업 및 줄눈재 삽입은 시공성이 저하된다는 결론을 얻게 되었다.

(2) 계측기 측정 결과

디멕 게이지 측정방법은 콘크리트 슬래브 줄눈부를 중심으로 일정 간격을 두고, 디멕 디스크를 설치하여 줄눈부의 거동을 측정하는 것을 기본으로 한다. 1차 시험포장에서는 20개 줄눈부에 디멕 디스크를 설치하였으며, 설치위치는 시험포장평면도에 표시된 위치와 같으며, 계측시간은 콘크리트 타설 후 하루가 지난 2008년 11월 11일 오전 8시부터 11월 12일 오전 11시까지 3시간에 한 번씩 측정하였다.

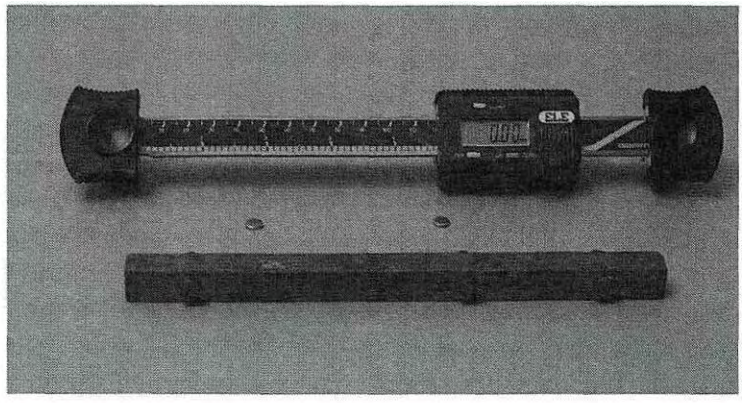


그림 28. 디멕 게이지, 디스크, 스탠드 바

콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층 계면부의 분리막의 유무, 개선된 줄눈 균열 유도장치, 그리고 분리막 사용의 유·무를 구분하여 슬래브간 변위량(Joint Movement)의 측정결과를 분석하였다.

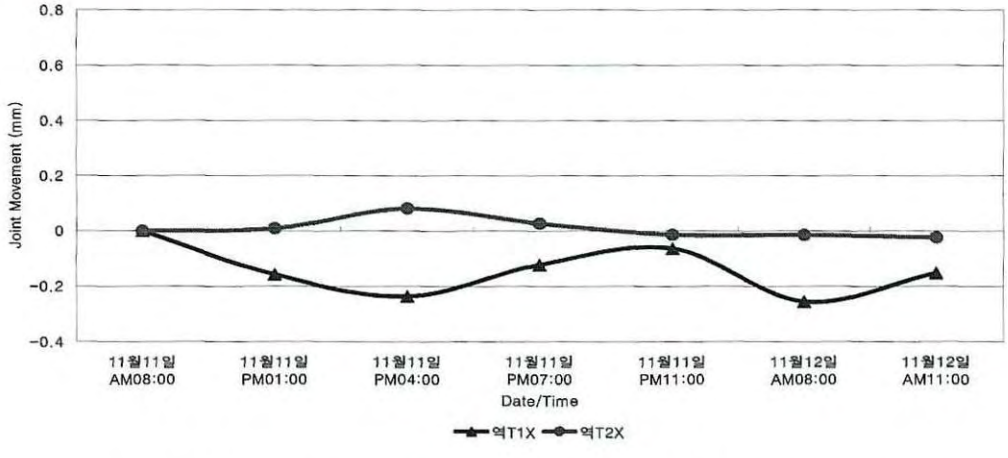


그림 29. 분리막(有,) 역T형 줄눈 균열 유도장치, 줄눈 누름 장치

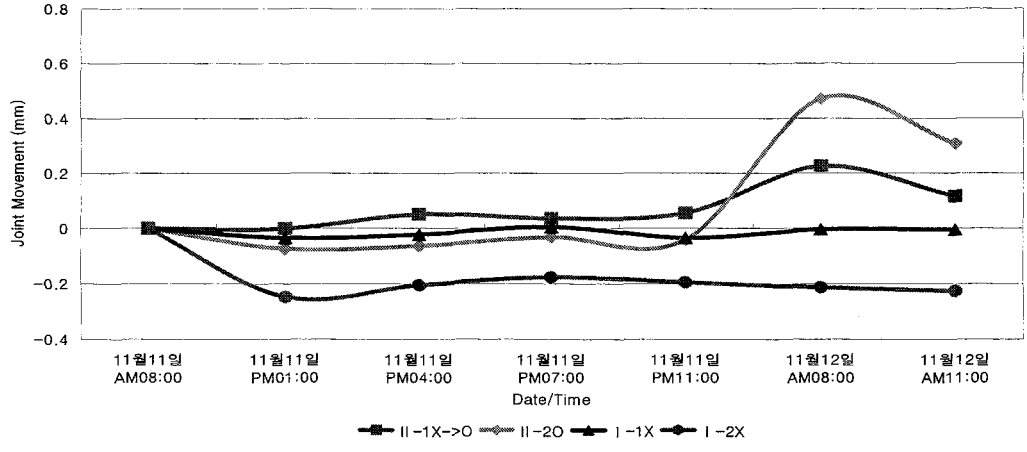


그림 30. 분리막 유(有), 줄눈 균열 유도장치(TYPE Ⅰ, Ⅱ), 실리콘 15mm

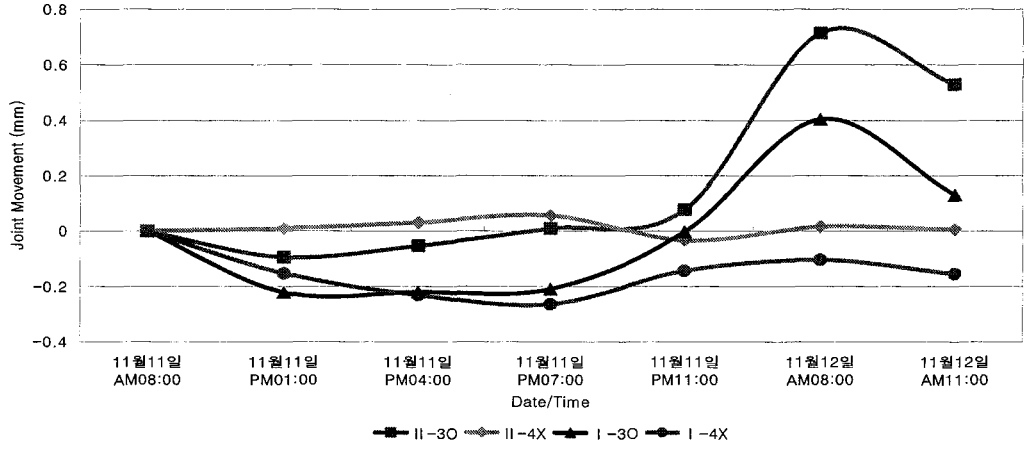


그림 31. 분리막 유(有), 줄눈 균열 유도장치(TYPE Ⅰ, Ⅱ), 고무 10mm

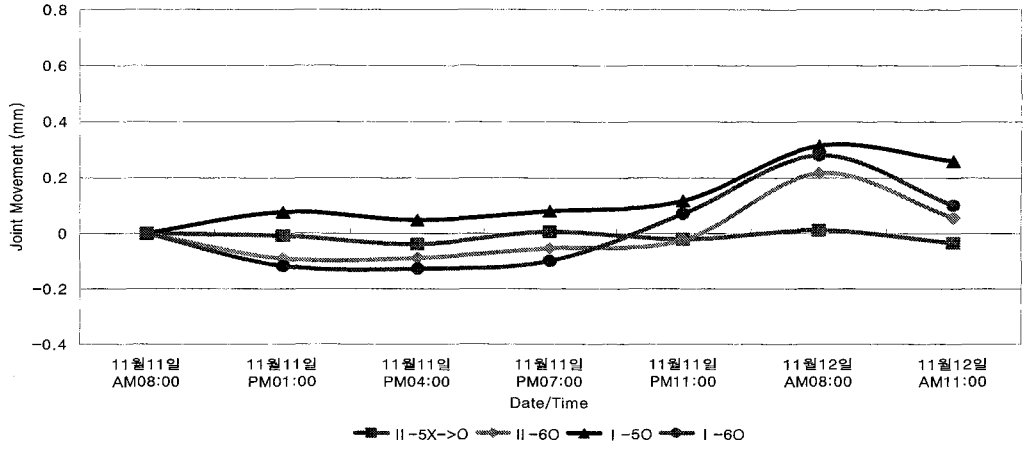


그림 32. 분리막 유(無), 줄눈 균열 유도장치(TYPE Ⅰ, Ⅱ), 고무 15mm

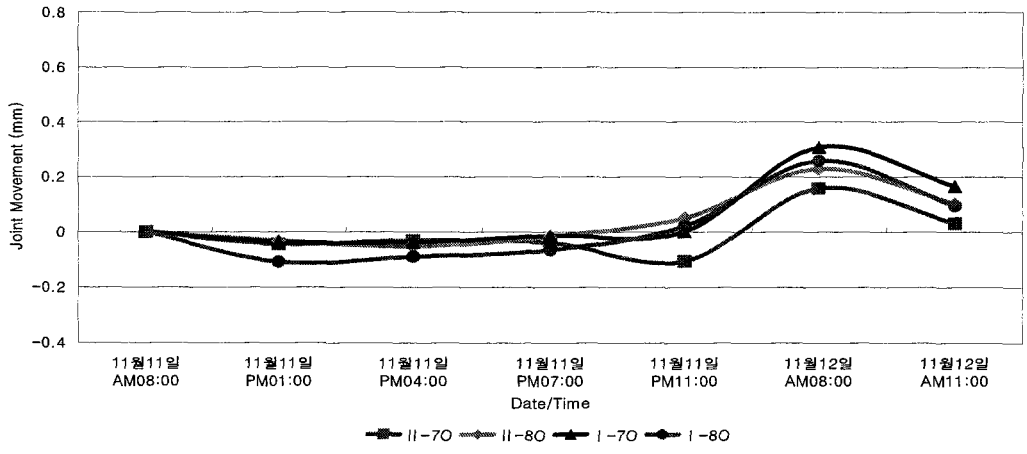


그림 33. 분리막 무(無), 줄눈 균열 유도장치(TYPE Ⅰ, Ⅱ), 누름 20mm

디멕 게이지를 사용하여 줄눈부의 거동을 측정한 결과, 기존의 역T형 줄눈균열 유도장치(J.C.I)보다 개선된 줄눈균열 유도장치의 균열이 크게 나타났다. 분리막 미설치구간은 분리막 설치구간보다 더 빠르게 균열이 발생되었으며, 분리막 설치구간이 분리막 미설치구간보다 줄눈부의 거동폭이 더 크게 발생하였다. 이러한 현상은 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 사이의 마찰력의 차이로 발생된 것으로 판단된다.

또한, 디멕 게이지의 계측을 통한 줄눈 거동폭은 0.158mm 이상 발생 시 줄눈부에 균열이 발생되었음을 알 수 있고, 줄눈 거동폭은 기온이 최고 온도에 이르는 오후에 가장 적게 측정되고, 기온이 최저 온도에 도달하는 새벽에 그 폭이 크게 측정되는 것으로 보아, 줄눈 거동폭이 외부 온도에 큰 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있다.

2. 2차 시험포장(09년 10월, 한국도로공사 여주-양평 고속도로 건설현장)

가. 시험포장 개요

줄눈 균열 유도공법의 시공성 및 균열발생 추이, 줄눈 균열 유도장치의 성능을 확인하기 위하여 실제 고속도로 현장에서 2차 시험포장을 실시하였다. 2009년 11월 실시된 폭 5.5m, 총 연장 162m의 2차 시험포장은 한국도로공사의 여주-양평 고속도로 건설현장(1공구) 여주 요금소 부근에서 실시되었다. 본 시험포장은 실제 고속도로 현장에서 실시된 것으로 노상다짐 및 배수시설이 잘 이루어졌으며, 콘크리트 배합비 역시 32mm의 굵은 골재를 사용하는 등 최초 시험목적에 가장 잘 부합하는 시험포장 구간이며 아래 그림 34는 2차 시험포장 구간의 포장 계획도이다.

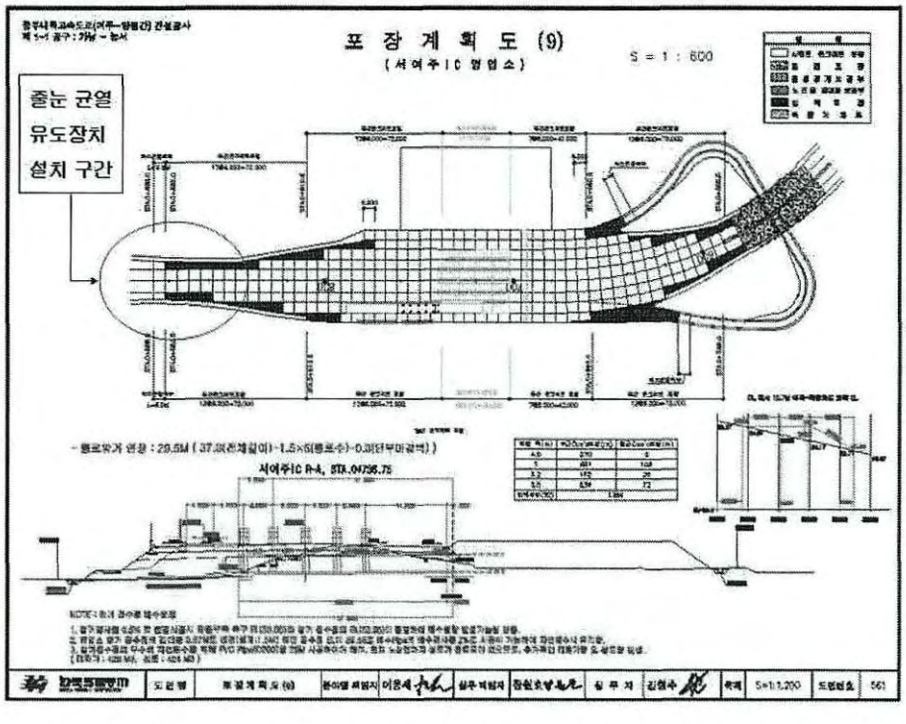


그림 34. 2차 시험포장(여주-양평 고속도로 공사 1공구) 포장 계획도

본 시험포장 구간에서는 줄눈 균열 유도장치와 기존 다웰바를 동시에 삽입하여 초기 균열 발생 경향을 분석하였다. 줄눈 균열 유도장치와 다웰바의 직접 비교를 위하여 총 연장 162m 중, 최초 포장공 시점으로부터 6m 간격으로 총 3개의 줄눈

균열 유도 장치를 삽입하였고 이 후 구간은 다웰바를 삽입하였다. 줄눈 균열 유도 장치의 경우 1차 시험포장에서 사용된 Type-Ⅱ를 사용하였다. 아래 그림 34는 2차 시험포장 개념도 이다.

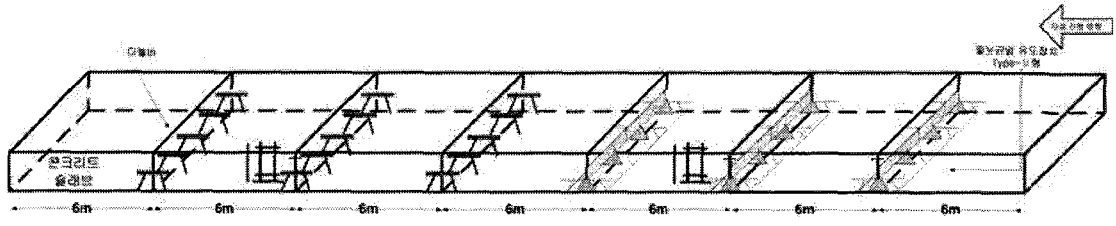


그림 35. 2차 시험포장 개념도

2차년도 연구 보고서 및 3차년도 연구개발계획서에서는 한국도로공사의 대전-당진 고속도로 건설현장에서 시험포장을 실시하고자 하였다. 하지만 대전-당진 고속도로공사가 2009년 5월에 조기 완공되어 본 공법을 적용할 수 없었다. 따라서 최초 연구개발계획서의 대전-당진 고속도로 건설현장이 아닌 여주-양평 고속도로 건설현장에서 2차 시험포장을 실시하게 되었다.

나. 시험시공 절차

2차 시험포장에서 실시된 줄눈 균열 유도공법의 시험시공 절차는 1차 시험포장과 유사하나 균열을 유도하기 위해 실시하였던 줄눈 누름 작업과 성형줄눈재 삽입 공정은 배제하였다. 그 이유는 본 보고서에서 언급한 바와 같이 줄눈 누름 작업 및 줄눈재 삽입 작업 시 콘크리트 슬래브의 표면처리가 굉장히 어렵고 양생 후 줄눈재가 탈리되는 등의 문제점이 발견되었기 때문이다. 따라서 콘크리트 슬래브의 균열을 유도하기 위하여 다양한 방법을 연구하였다. 그 결과 콘크리트의 체적변화를 일으킬 수 있는 방식은 어렵다고 판단, 저속 그라인더를 이용하여 자연 줄눈을 발생시키는 방법을 고안하였다. 아래 그림 36과 같이 저속 그라인더를 이용하여 슬래브 표면에 자연 줄눈을 발생시키면 강제 컷팅 방식에 비해 굵은 골재를 절단하지 않을 뿐만 아니라 콘크리트 시료자체에 주는 교란효과도 거의 없어 구조적 취약성을 극복할 수 있을 것이라 판단하였다.

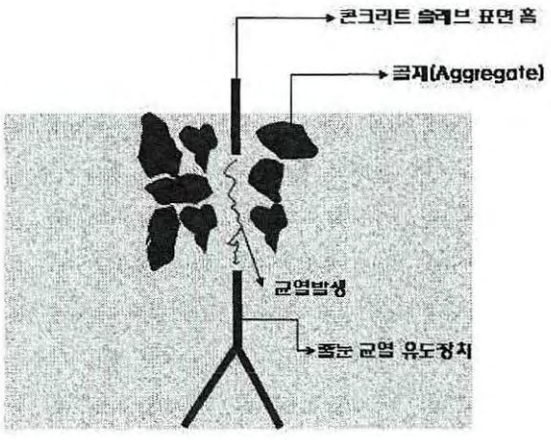


그림 36. 균열 유도 발생 개념도

그라인더날의 삽입 깊이는 '전체 콘크리트 슬래브 높이의 1/3 이상을 강제 분리 시, 자연 균열이 발생한다.' 는 외국의 참고 문헌을 고려하였다. 따라서 줄눈 균열 유도장치의 높이를 고려하여 그라인더날의 삽입 깊이는 2cm로 결정하였다. 공업용 그라인더를 이용하여 자연 줄눈을 발생시키기 위하여 아래 그림 37과 같이 거치대를 제작하였다.

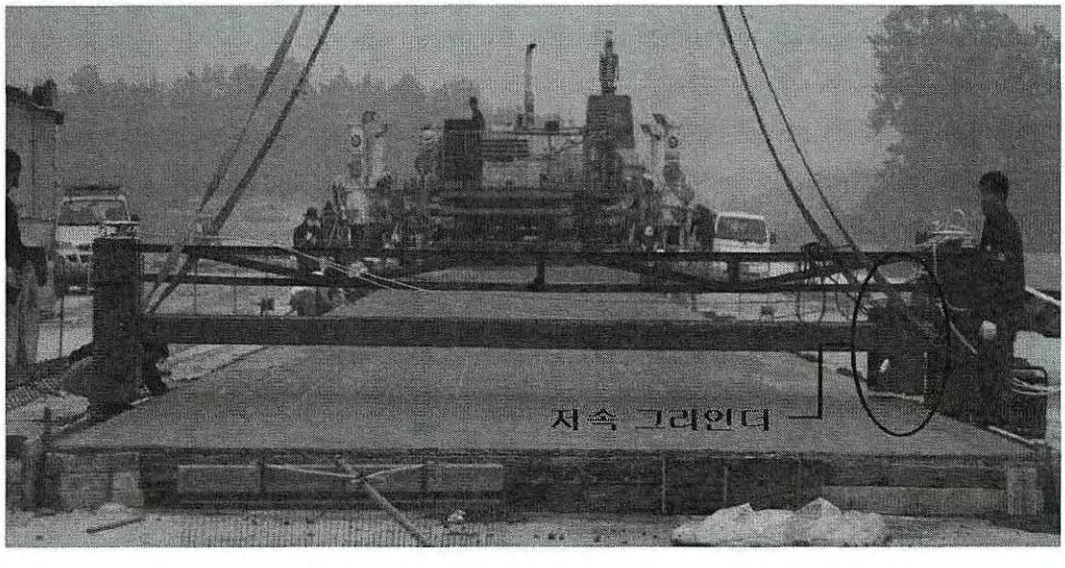
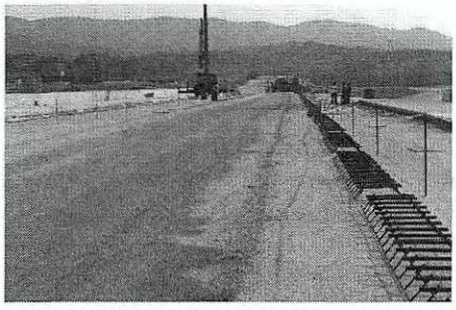
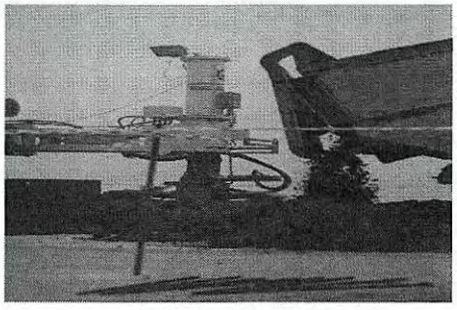


그림 37. 자연 줄눈 발생을 위한 저속 그라인더 거치대

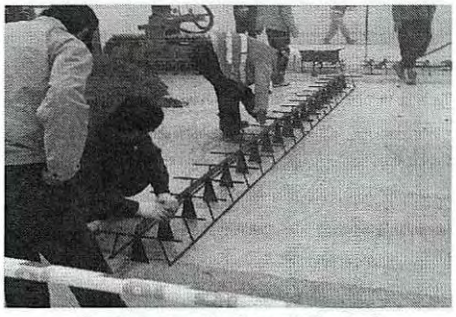
줄눈 균열 유도 장치 시험시공은 린 콘크리트 층 위에 비닐 분리막을 설치 한 후 줄눈 균열 유도장치를 린 콘크리트 층에 고정하였다. 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 지점에 콘크리트를 타설하였고 백호 장비로 고루게 펴는 작업을 수행하여 포설 작업이 원활하게 진행될 수 있도록 하였다. 콘크리트 포장 포설이 완료된 후, 초기 양생 중에 그림 36과 같은 자연 줄눈 생성 장치를 이용하여 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈부에 줄눈 생성 작업을 실시하였다. 앞서 언급한 바와 같이 이와 같은 작업을 통하여 줄눈 균열 유도 장치에 의해 유도된 균열이 줄눈 누름 부위로 유도될 수 있을 것으로 판단된다. 일반 다웰바 설치 구간은 미리 제작된 다웰바를 인력에 의해 운반하여 설치하게 된다. 다웰바의 설치 후 고정 작업과 포설 작업은 줄눈 균열 유도 장치와 동일한 작업으로 진행하게 된다. 일반 다웰바가 설치된 지점은 콘크리트 포장 포설 후 1일 경과된 시점에 절단 작업을 실시하였다. 아래 그림 38은 2차 시험포장의 시공과정을 나타낸 것이다.



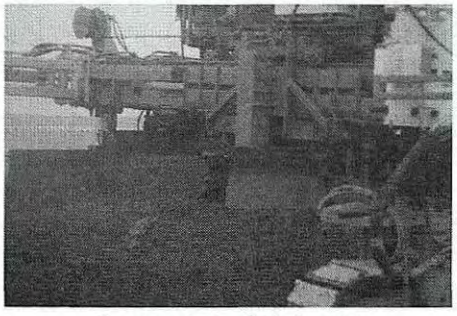
① 린콘크리트 시공



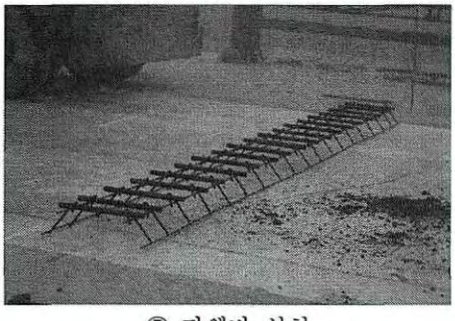
② 콘크리트 타설



③ 줄눈 균열 유도장치 설치



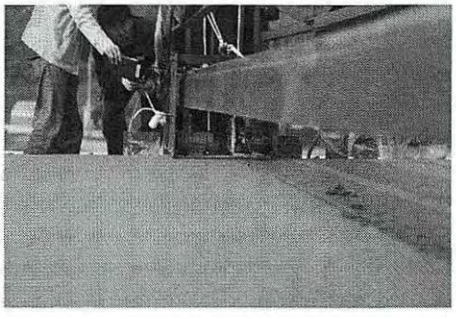
④ 콘크리트 페이버 구동



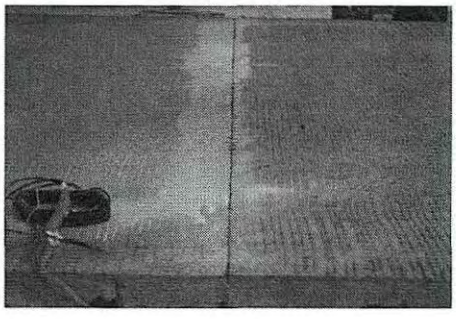
⑤ 다웰바 설치



⑥ 콘크리트 페이버 구동



⑦ 줄눈 생성 공정



⑧ 다웰바 절단

그림 38. 2차 시험포장 시공 절차

본 시험포장 구간의 포장 단면은 하부 린 콘크리트 층과 상부 콘크리트 포장 단면으로 구성되어 있다. 린 콘크리트 층에 적용된 배합표는 아래 표 10과 같고, 상부 콘크리트 포장 단면의 배합표는 표 11과 같다. 굵은 골재는 32mm와 19mm를 혼합하여 사용하였다.

표 10. 린콘크리트 배합표(배합기준 : 2006)

구분	설계 기준 강도 (kgf/cm^2)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m^3)					
							W	C	잔골재	굵은골재	혼화제	
빈배합	f7=50	40	-	1~2	79.1	32.4	125	158	695	1,449	-	

표 11. 여주-양평 1공구 콘크리트 포장 배합표(배합기준 : 2009)

구분	설계 기준 강도 (Mpa)	굵은 골재 최대 치수 (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m^3)					
							W	C	잔골재	굵은골재	AE 혼화제*	
기계	$F_{bk}28$=4.5	32	4~6	4~6	43	39	148	353	699	1,072	2.47	0.30

다. 계측기 설치

2009년 10월 26일에 여주-양평 고속도로 공사 1공구에서 2차 시험포장을 실시하였으며, 콘크리트 타설 시간에 따른 슬래브 내 온도의 분포를 비교하기 위하여 2개의 슬래브에 깊이별로 I-Button을 매설하였다. 또한 다웰바 구간의 콘크리트 슬래브의 거동과 줄눈균열 유도장치 Type-Ⅱ형의 슬래브의 거동을 파악하기 위하여 V/W Strain Gauge를 I-Button을 매설한 슬래브에 매설하였며 표 12는 계측기별 설치 목적을 나타내며 그림 39는 계측기 매설 개념도이다.

표 12. 계측기별 설치 목적

계측 기기	목 적
I-Button	· 콘크리트 슬래브 내부온도 및 대기온도 측정을 통한 초기 수화열 발생 특성 분석
V/W Strain Gauge	· 콘크리트 슬래브 깊이 및 위치에 따른 콘크리트 내부 변형율 측정을 통한 초기 및 장기 콘크리트 변형률 분석

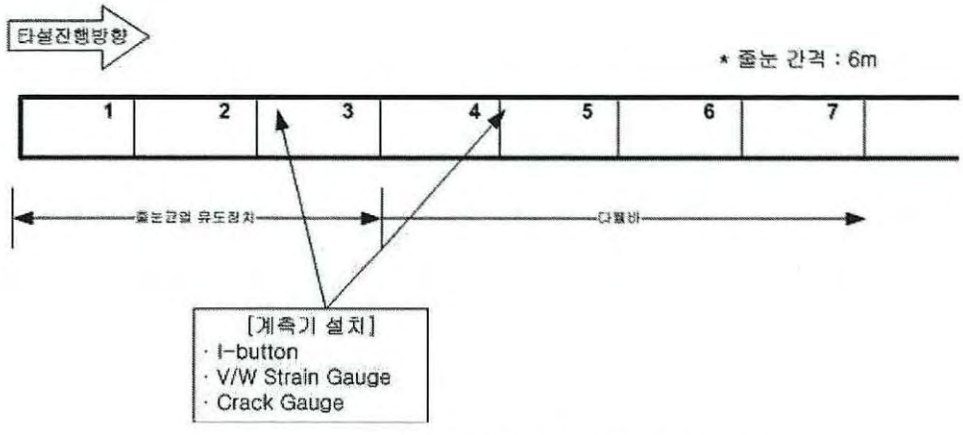


그림 39. 2차 시험포장 계측기 매설 개념도

포장체 양생 특성 분석을 위한 센서는 그림 39와 같이 콘크리트 포장 시공 중에 설치하였다. 줄눈 거동 측정을 위한 변위 계측기는 콘크리트 시공이 완료된 후 종결이 완료된 시점(타설 후 6시간 경과)에 줄눈 균열 유도장치가 설치된 줄눈부와 일반 다웰바가 설치된 지점에 설치하였다.

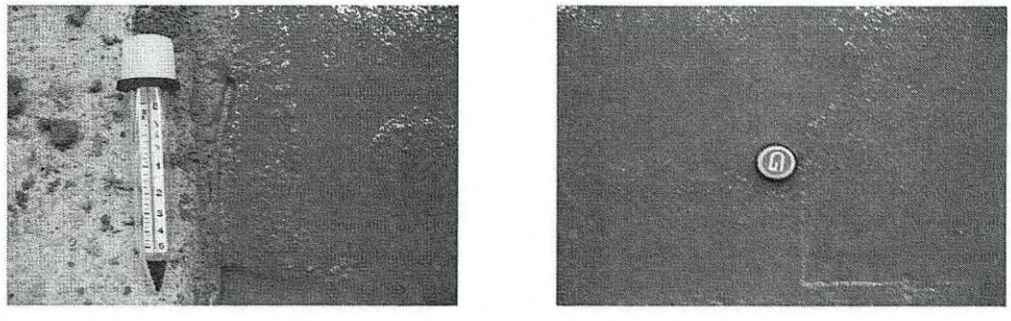


그림 40. 콘크리트 양생 추정 센서

라. 2차 시험포장 결과분석

(1) 초기 균열 발생 경향

기존 공법의 경우 콘크리트 페이버의 진행속도 1m/1min에 맞추어 작업공정이 진행되었으며 콘크리트 타설 및 양생제 살포 12시간 후 콘크리트 슬래브에 Saw-cut을 진행하였다. 줄눈 균열 유도공법은 콘크리트 및 페이버 진행 후 양생제를 살포하기 앞서 자연줄눈을 발생시켰다. 전체적인 작업 시간은 평균 6분/slab가 소요되었으며 작업이 진행될수록 숙련도가 높아져 작업시간이 짧게 소요되었다. 본 시험포장은 실제 고속도로 건설현장에서 줄눈 균열 유도장치를 사용하였을 때, 슬래브 내의 균일한 균열 유도를 목표로 실시되었으며 이에 대한 초기 균열 발생 경향은 표 13와 그림 41과 같다.

표 13. 줄눈 균열 발생 경향(2차 시험포장)

No.	콘크리트 타설시간 (09년 10월 26일)	줄눈 균열 유도 장치 Type	줄눈 누름 형식	균열 발생 유무		비고
				2009.11.8	2009.11.20	
1	08:30 ~ 08:50	Type Ⅱ	자연 줄눈 발생	×	×	줄눈 균열 유도 장치
2	08:50 ~ 09:05	Type Ⅱ	자연 줄눈 발생	×	×	
3	09:10 ~ 09:20	Type Ⅱ	자연 줄눈 발생	×	×	
4	09:20 ~ 09:26	-	양생 후 Saw-cut	×	×	다웰바 (12시간양생 후 Saw-cut
5	09:30 ~ 09:36	-	양생 후 Saw-cut	×	×	
6	09:40 ~ 09:46	-	양생 후 Saw-cut	×	×	

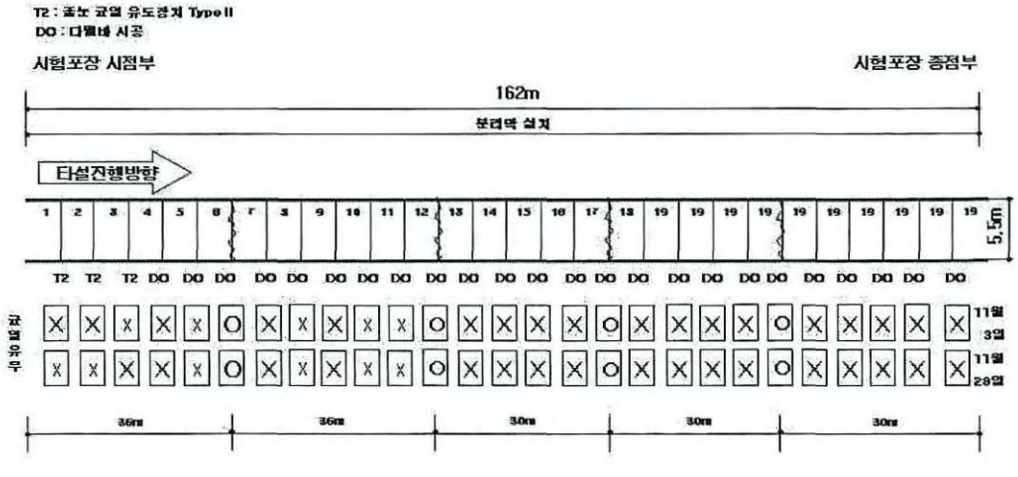


그림 41. 줄눈 균열 발생 결과(2차 시험포장)

09년 11월 3일과 11월 29일 2차 시험포장 구간의 추적조사를 실시하였다. 추적조사결과 줄눈 균열 유도장치를 설치한 구간에서 초기 균열은 발생하지 않았다. 하지만 줄눈 균열 유도장치 설치 구간뿐만 아니라 다웰바 설치 구간 역시 6m 간격의 줄눈에서 초기 균열이 발생하지 않았다. 전체 시험포장 구간 162m로 살펴보면, 위의 그림 40과 같이 36m, 30m, 간격으로 초기 균열이 발생한 것을 알 수 있으며 아래 그림 42와 43은 2차 시험포장 구간의 초기 균열 발생 모습이다.

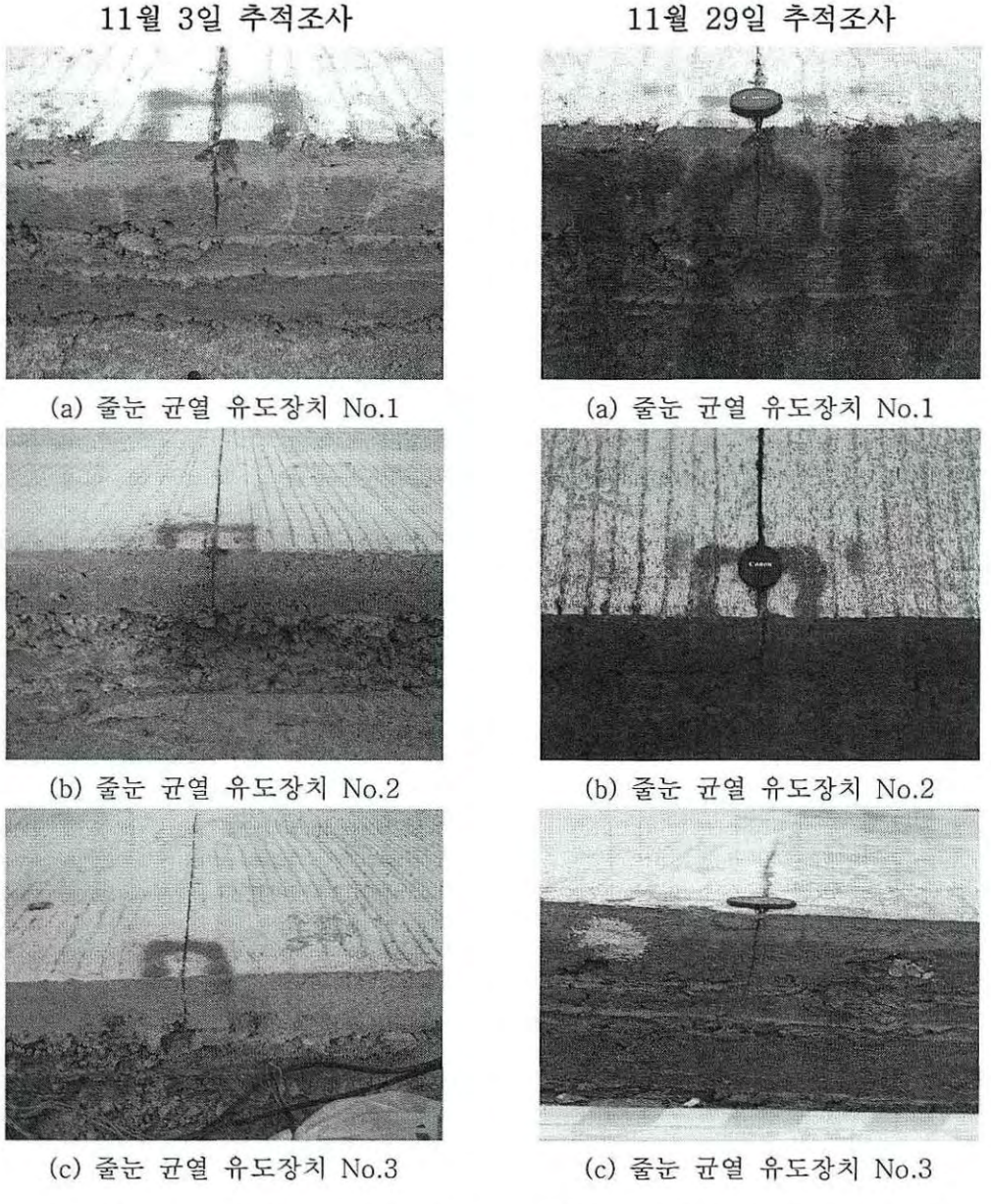
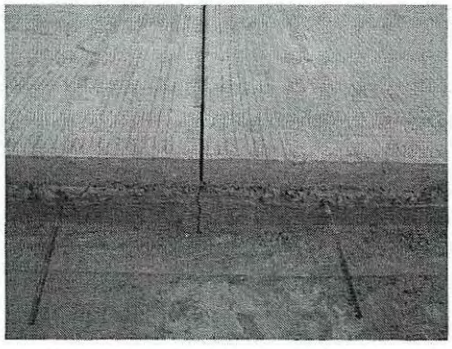
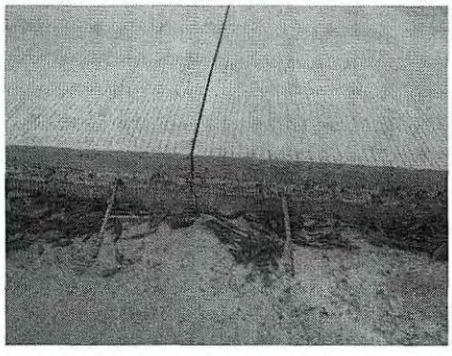


그림 42. 2차 시험포장 줄눈 균열 유도장치 삽입구간 초기 균열 형상

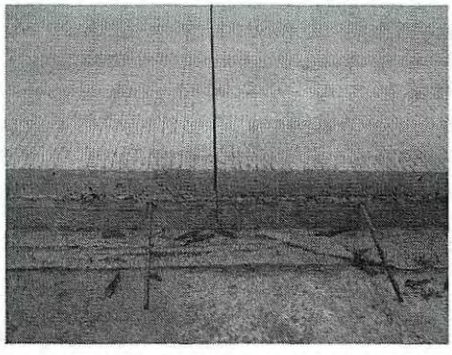
11월 3일 추적조사



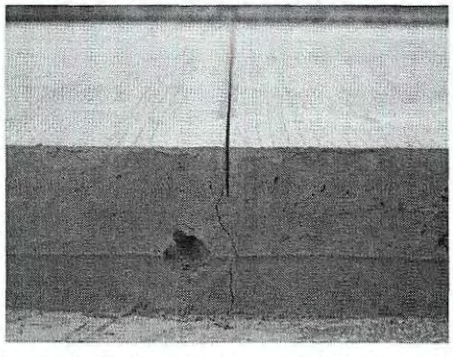
(a) 균열 발생 구간 No. 1(시점부 36m)



(b) 균열 발생 구간 No. 2(시점부 72m)



(c) 균열 발생 구간 No. 3(시점부 100m)

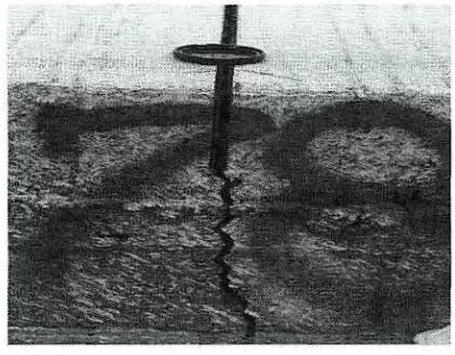


(d) 균열 발생 구간 No. 4(시점부 130m)

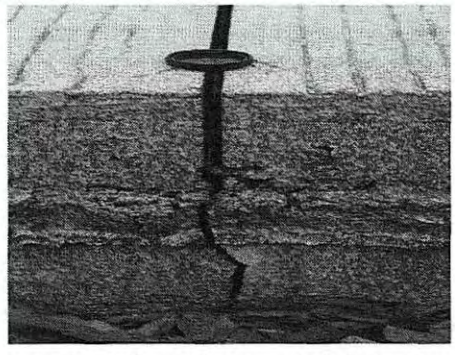
11월 29일 추적조사



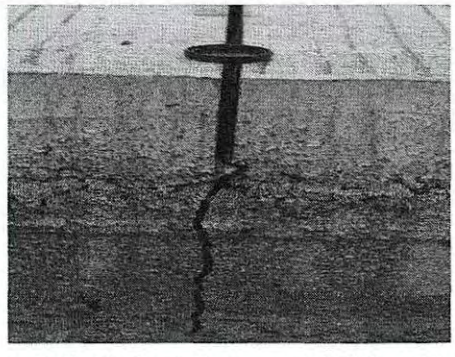
(a) 균열 발생 구간 No. 1(시점부 36m)



(b) 균열 발생 구간 No. 2(시점부 72m)



(c) 균열 발생 구간 No. 3(시점부 100m)



(d) 균열 발생 구간 No. 4(시점부 130m)

그림 43. 2차 시험포장 다웰바 삽입구간 초기 균열 형상

시험 시공구간의 줄눈부 균열의 추가 발생 현황 및 기타 특이사항을 조사하고자, 2010년 1월 1일 3차 시험포장 추적 조사를 실시하였다. 추적조사구간은 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 No. 1, 2, 3 줄눈부 지점과 일반 다웰바가 설치된 No. 4, 5, 6 줄눈분에 대한 관측조사를 실시하였다.

하지만 3차 추적조사 역시 1,2차와 마찬가지로 추가적인 자연 균열은 유도되지 않았다. 하지만 No. 6지점의 경우 줄눈폭이 1,2차에 비해 증가함을 확인할 수 있었는데 이는 기온 하강에 따른 포장체의 수축으로 인한 것으로 생각된다.

따라서 본 시험시공의 줄눈부 균열거동 분석 결과는 시험포장 당일 온도가 낮고 습도가 높아 콘크리트 슬래브 전체에 재하된 온도하중에 의해 발생된 응력이 높지 않기 때문인 것으로 판단된다. 계측자료를 이용한 상세 분석은 (2) 계측기 측정 결과에서 제시하였다.

(2) 계측기 측정 결과

(가) 포장체 타설 7일 간 온도변화

시공 구간의 콘크리트 포장 완료 후 7일 간 대기온도와 포장체 온도는 그림 44, 45에서 보는 것과 같다. 대기 온도는 1지점에서 콘크리트 타설 중에 15℃~30℃까지 변화된 것으로 알 수 있었고, 7일 동안 -1℃~33℃까지 변화한 것으로 조사되었다. 포장체 온도는 4지점의 위치에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 대기 온도가 전반적으로 낮아 포장체의 온도도 전반적으로 낮은 것으로 판단된다. 2지점도 1지점의 온도 변화와 유사한 경향을 보이는 것으로 조사되었다.

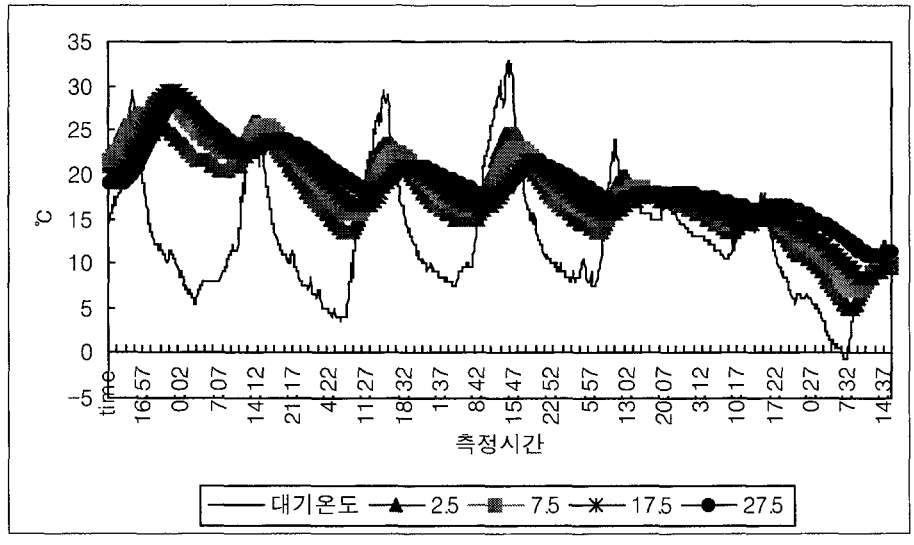


그림 44. 시험 포장 구간 1지점 대기 및 포장체 온도 변화

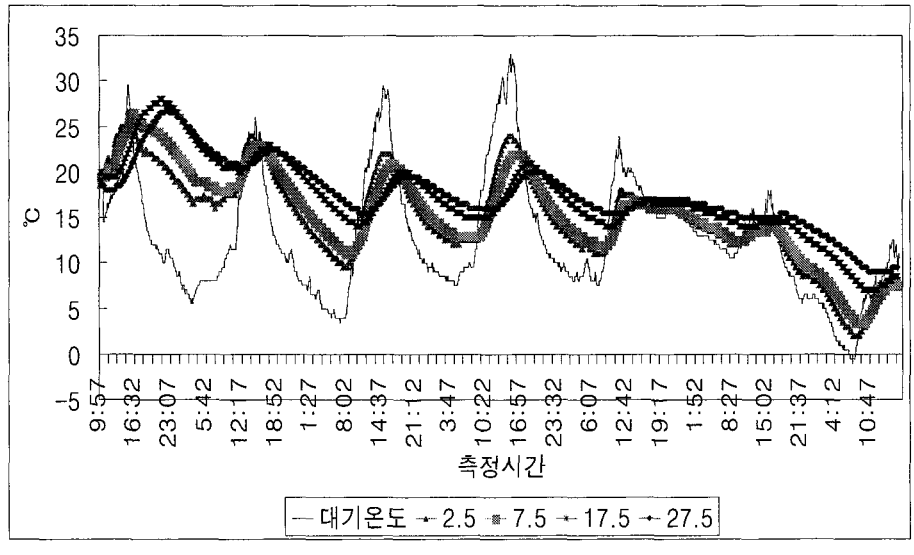


그림 45. 시험 포장 구간 2지점 대기 및 포장체 온도 변화

(나) 포장체 타설 후 양생 중 온도변화

시험시공 구간의 콘크리트 포장은 초기 7일 간 양생 이후 그림 46, 47에서 보는 것과 같이 대기 및 포장체 위치별로 온도가 변화된 것으로 조사되었다. 이 기간 중 1지점에서 대기온도는 최저 -7.5℃에서 최대 32.5℃까지 변화되었으며, 포장체 온도는 상부 2.5cm 깊이에서 최저 -7℃에서 최대 21℃까지 변화된 것으로 조사되었다. 2지점에서도 1지점과 유사하게 온도가 변화된 것으로 조사되었다.

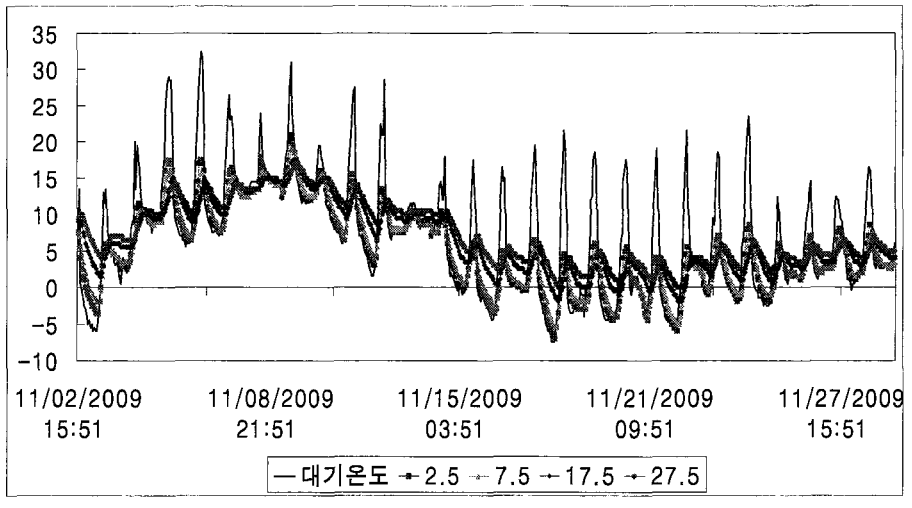


그림 46. 시험 포장 구간 1지점 대기 및 포장체 온도 변화(11.2~11.27)

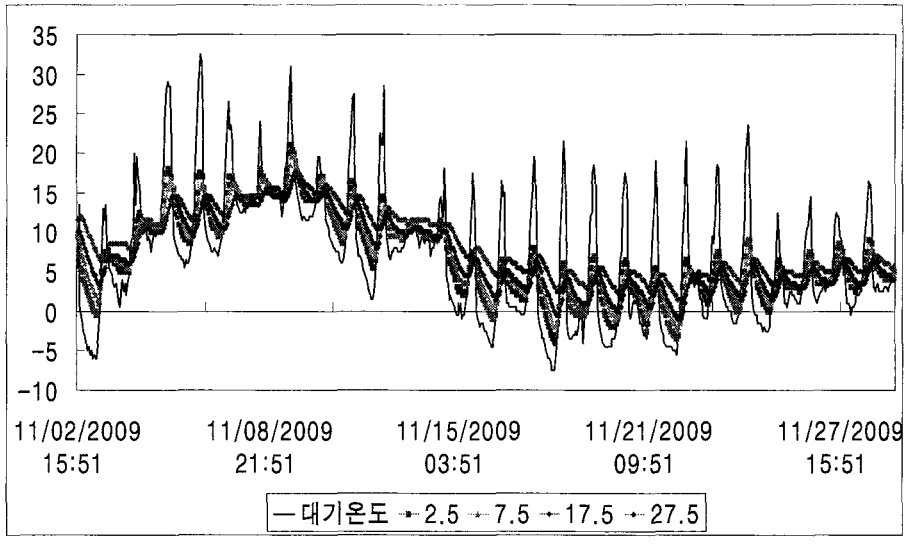


그림 47. 시험 포장 구간 2지점 대기 및 포장체 온도 변화(11.2~11.27)

(다) 콘크리트 포장 응결 및 양생 특성

본 시험시공 구간에 타설된 콘크리트에 대하여 콘크리트의 응결시간 시험(KS F 2436)을 실시하였다. 본 구간에 타설된 콘크리트는 그림 48에서 보는 것과 같이 초결(3.5MPa)이 3:40분에 진행되었고, 종결(28MPa)은 6:50분에 종료된 것으로 시험되었다.

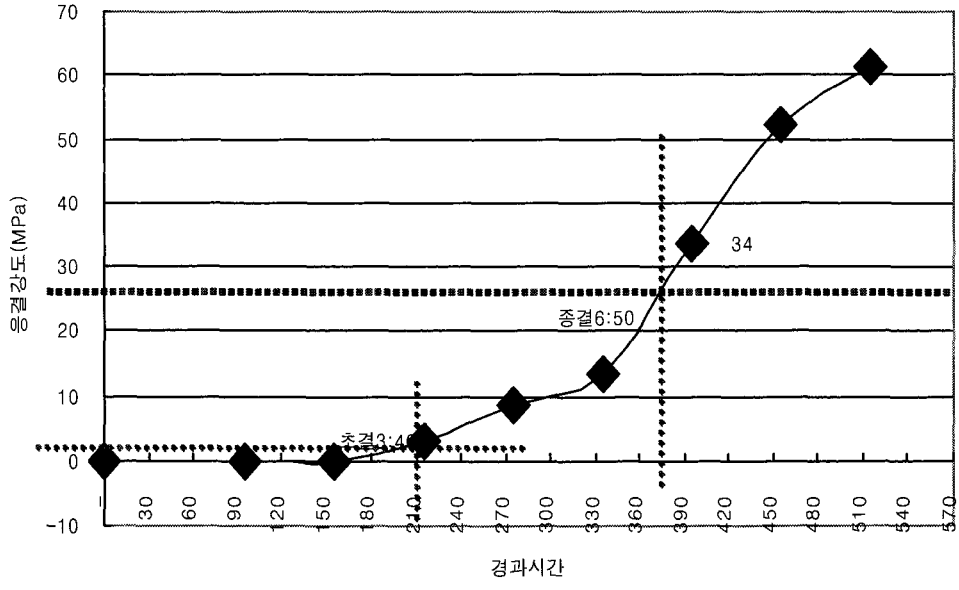


그림 48. 콘크리트 포장 초결(3.5Mpa) 및 종결 특성(28Mpa)

포장 시공 시간에 따른 위치별 양생 특성은 그림 49에서 보는 것과 같이 타설 시점부인 G1 지점이 시간에 따라 양생이 빠르게 진전되는 것으로 나타났다. 그러나, 타설 시점이 늦은 G2~G3 지점은 G1 지점과 비교하여 양생은 느리게 진전된 것으로 조사되었다. 이와 같은 현상은 앞서 그림 44, 45의 대기온도 및 포장체 온도 조사에 나타난 바와 같이 시험시공 당일의 온도가 낮고, 안개로 인하여 습도가 높은 상태에 의한 것으로 판단된다.

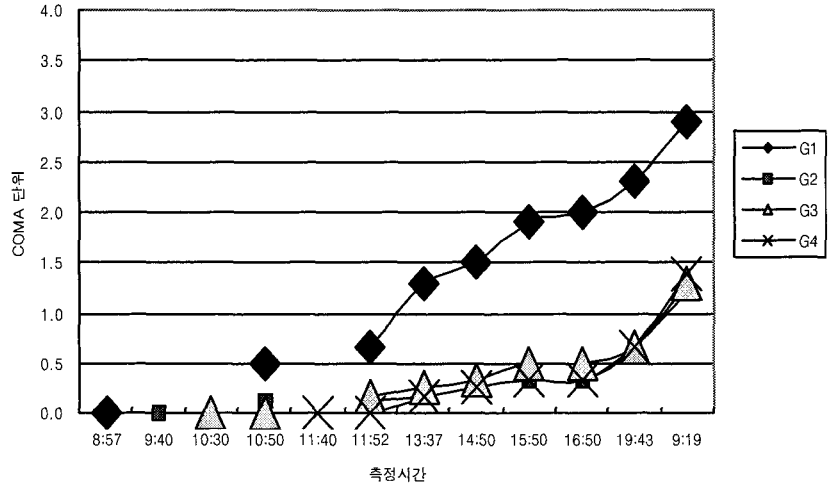


그림 49. 포장 시공 위치별 양생 특성

(라) 줄눈부 균열 거동

콘크리트 포장 타설 후 10월 27일 17:20분부터 1차 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈부와 일반 다웰바가 설치된 줄눈부에 대한 줄눈부 거동 특성에 대하여 조사하였다. 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 지점과 일반 다웰바가 설치된 줄눈부는 그림 50에서 보는 것과 같이 10월 27일 17:20분부터 10월 29일 09:20분까지 특이한 거동이 계측되지 않아 유도 균열이 발생하지 않은 것을 알 수 있다.

콘크리트 포장 타설 후 약 25일 경과된 11월 24일 2차 조사를 실시하였다. 2차 조사에는 줄눈 균열 유도장치가 설치된 콘크리트 포장 슬래브 줄눈부와 일반 다웰바가 설치된 콘크리트 포장 슬래브 줄눈부에 대하여 조사하였다. 줄눈부 거동은 그림 51에서 보는 것과 같이 타설 1일 경과 시점에 유도 균열이 발생한 일반 다웰바 설치 지점인 No. 6지점에서 0~0.95mm까지 가장 크게 거동하는 것으로 조사되었다. 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈부는 No. 2에서 0~0.8mm 거동하고, No 3에서 0~0.55mm 거동하는 것으로 조사되었다. 일반 다웰바가 설치된 지점은 No. 6은 크게 거동하는 반면에 No. 5, 7 지점은 거의 거동하지 않은 것으로 나타나 유도 균열은 발생하지 않은 것으로 판단된다.

본 시험시공 구간에 대한 줄눈부 거동 특성 분석을 통하여 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈은 초기에 유도균열이 발생하지 않으나, 포장이 양생 진행되면서 유도 균열이 발생되는 것으로 사료되며, 일반 다웰바 구간은 초기에 큰 유도 균열이 발생한 콘크리트 포장 인접부의 줄눈부는 유도 균열이 발생하지 않거나 늦게 발생될 것으로 판단된다.

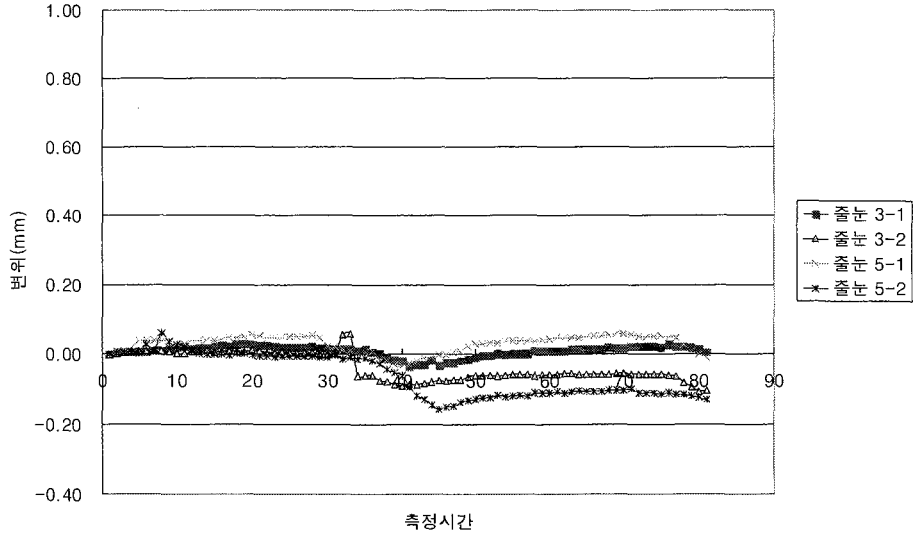


그림 50. 줄눈부 거동 특성 분석(2009.10.27 17:20~10.29 09:20)

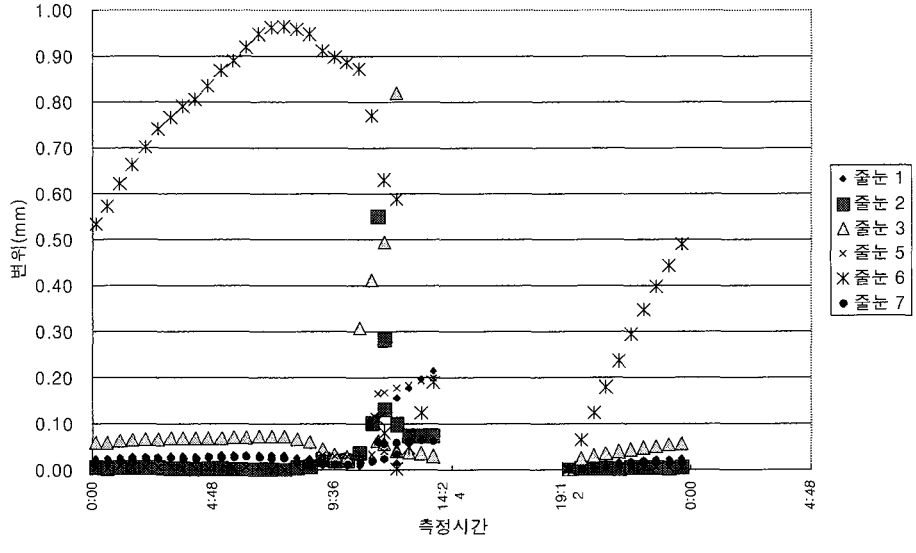


그림 51. 줄눈부 거동 특성 분석(2009.11.24 19:08~11.26 13:38)

(마) 포장체 변형율 특성

콘크리트 포장 타설 시에 매설된 매립형 게이지를 통하여 포장체의 상부와 하부의 거동 특성을 조사하였다. 콘크리트 포장 타설 후 초기에는 그림 51에서 보는 것과 같이 줄눈 균열 유도 장치와 일반 다웰바가 설치된 포장체의 상부와 하부에서 특이한 거동은 발생하지 않는 것으로 조사되었다. 콘크리트 포장 타설 후 약

25일 경과된 11월 24일 2차 조사에서는 그림 52에서 보는 것과 같이 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 일부 지점에서 거동이 발생한 것으로 조사되었다. 이와 같은 거동은 본 측정 시점에 포장체 지지력 측정 장비 가동으로 인해 포장체 차량 하중과 지지력 측정으로 인한 하중 재하에 의해 발생한 것으로 판단된다.

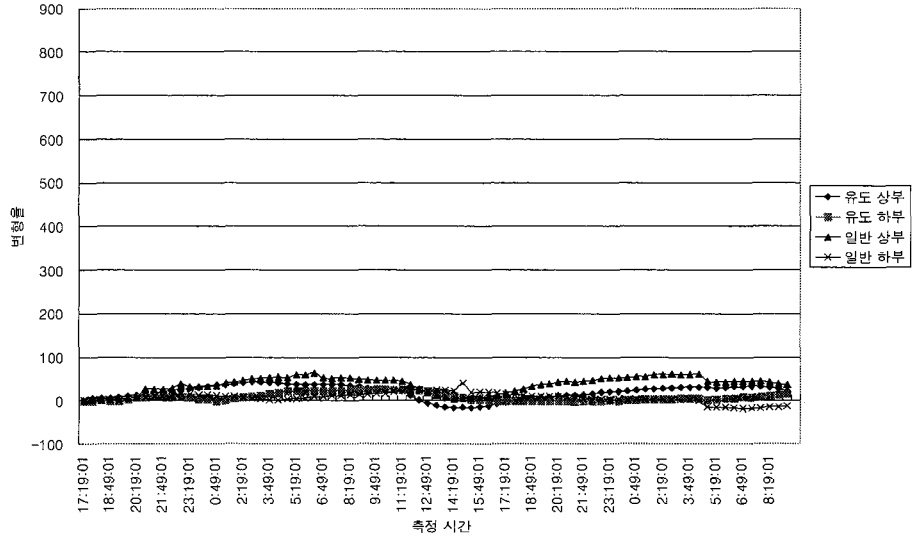


그림 52. 줄눈부 변형률 분석(2009.11.247 19:20~11.29 09:20)

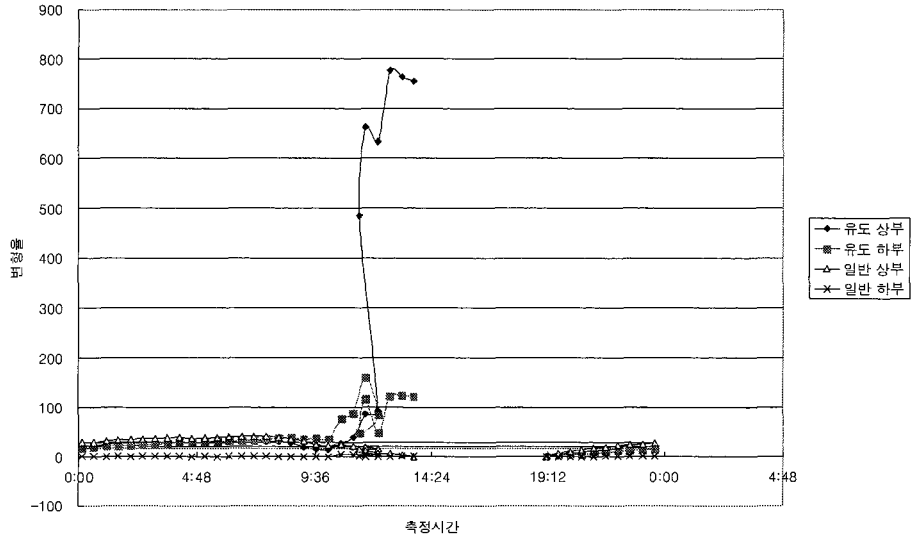


그림 53. 줄눈부 거동 특성 분석(2009.11.24 19:08~11.26 13:38)

2. 3차 시험포장(09년 10월, 당진공장))

가. 시험포장 개요

2009년 10월 29일에 실시된 3차 시험포장은 고속도로 공사 현장에서 실시된 2차 시험포장에서 실시하지 못한 변수를 기준으로 시험을 진행하였다. 최초 연구개발계획서는 대전-당진 고속도로 공사 구간에 줄눈 균열 유도공법을 적용 시켜 실제 예산 절감을 목표로 제시하였다. 예산 절감 방법으로는 분리막 미설치 및 줄눈 간격 확대, saw-cut 공정 생략 등이었다. 하지만 대전-당진 고속도로 건설이 2009년 5월 조기 완공되어 여주-양평 고속도로 건설 현장과 시험포장을 위한 사전협의를 진행하였다. 그 결과, 분리막 미설치, 줄눈간격 확대부분은 담당기관의 우려로 2차 시험포장에 적용할 수 없었다. 따라서 2차 시험포장에는 기존 공법과 같이 분리막 설치 및 6m 줄눈 간격을 유지하였고, 실제 고속도로 건설현장에서 줄눈 균열 장치의 성능을 분석하였다. 따라서 연구개발계획서 상의 연구목표를 달성하기 위하여 추가적인 시험포장을 (주)장헌산업 당진공장에서 실시하였다. 총 연장 108m 구간에 분리막을 설치하지 않았으며, 6m 간격으로 줄눈 균열 유도장치를 설치하여 초기 균열 발생 경향을 확인하였다.

시험포장 구간은 1차 시험포장(08.11) 구간을 1개차로 확장한다는 개념으로 부지를 선정하였으며 총 연장 100m를 시험포장구간으로 선정하였다. 아래 그림 54와 55는 3차 시험포장 전경도 및 평면도이다.



그림 54. 3차 시험포장 전경

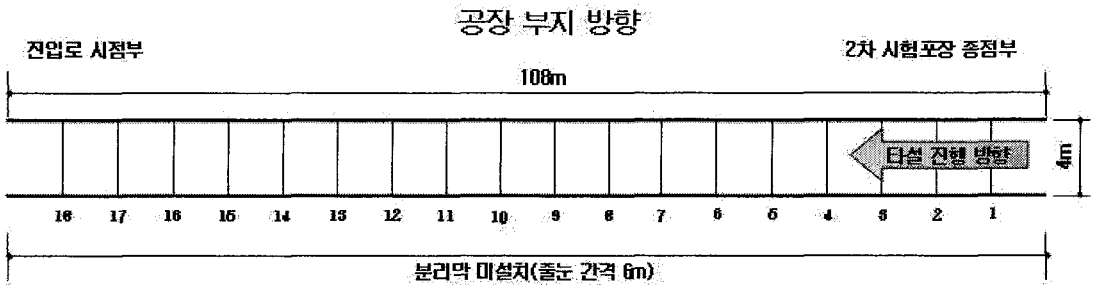


그림 55. 3차 시험포장 평면도

줄눈 균열 유도장치는 1,2차 시험포장에서 사용한 Type Ⅱ형을 사용하였으며, 자연 균열을 유도하기 위하여 콘크리트 슬래브 상부에 줄눈 누름 작업을 실시하였다. 줄눈 누름 작업은 1차 시험포장에서 콘크리트의 체적변화를 일으킬 뿐만 아니라 표면처리에 어려움이 있어 2차 시험포장에서는 공업용 그라인더를 이용하여 자연 줄눈을 생성하였다. 하지만 3차 시험포장에서는 인력식 시공을 실시하였고, 슬럼프가 6~7로 조금 높은 편이었다. 따라서 인력식 시공과 동시에 줄눈 누름 작업을 진행하였고 줄눈 누름 작업 후 표면 처리 작업을 실시하였다. 전체적인 시공 절차는 분리막 설치를 제외한 전 공정이 동일하며 콘크리트 배합표 역시 1차 시험포장과 동일하다.

나. 시험포장 결과 분석

3차 시험포장은 분리막을 설치하지 않고 6m 간격으로 줄눈 균열 유도장치를 삽입 하였다. 각각의 공정별 작업 시간을 살펴보면, 줄눈 누름 작업 및 표면처리 작업은 평균 10여분이 소요되어 1차 시험포장에 비하여 숙련도가 높아짐에 따라 시공성이 향상됨을 알 수 있었다.

3차 시험포장의 초기 균열은 줄눈 균열 유도장치를 설치한 18개의 줄눈부 중 총 14개소에서 초기 균열이 발생하였다. 또한 총 3개소에서 랜덤크랙이 발생하였는데 랜덤 크랙이 발생한 곳 인근 줄눈부에는 초기균열이 발생하지 않은 것으로 확인되었으며 3차 시험포장의 줄눈 발생 경향은 아래 표 14와 같다.

표 14. 줄눈 균열 발생 경향(3차 시험포장)

No.	콘크리트 타설시간 (08년 11월 10일)	줄눈 균열 유도 장치 Type	줄눈 누름 형식	균열 발생 유무		비 고
				2008.10.31 08:00	2008.11.23 15:00	
1	08:41 ~ 08:50	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
2	08:50 ~ 09:01	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	×	×	랜덤크랙 발생
3	09:01 ~ 09:17	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
4	09:17 ~ 09:37	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
5	09:54 ~ 10:03	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
6	10:09 ~ 10:37	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	균열폭 1mm이상
7	10:43 ~ 11:03	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
8	11:03 ~ 11:14	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
9	11:14 ~ 11:32	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
10	11:34 ~ 11:42	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	균열폭 1mm이상
11	11:42 ~ 13:06	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
12	13:06 ~ 13:33	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
13	13:33 ~ 13:44	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	×	×	랜덤크랙발생
14	13:44 ~ 14:06	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
15	14:06 ~ 14:51	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
16	14:51 ~ 15:00	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	×	×	랜덤크랙발생
17	15:02 ~ 15:32	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	
18	15:32 ~ ∞	Type Ⅱ	줄눈 누름(20㎜)	○	○	

총 18개소의 줄눈부 중 15개소에서 초기 균열이 발생하였음을 확인할 수 있었다. 1차, 2차 시험포장에 비하여 초기 균열이 원활히 발생한 이유는 분리막을 설치하지 않았기 때문으로 판단된다. 콘크리트 슬래브의 초기 균열 발생에 영향을 미치는 요소로는 대기온도와 습도 등의 환경적 요인과 더불어 콘크리트 슬래브 하층과의 마찰력이 큰 영향을 미친다. 콘크리트 슬래브의 초기 균열은 교통 하중이 재하되기 전 온도 차에 의한 콘크리트 슬래브의 수축 거동에 따른 응력 집중현상으로 발생한다. 콘크리트 포장의 줄눈은 이러한 응력집중 현상에 따른 랜덤크랙을 막기 위하여 설치하는 것으로, 3차 시험포장에서 분리막을 설치 하였기 때문에 온도하중에 의한 콘크리트 슬래브의 수축 거동 시 분리막을 설치한 경우에 비하여 더 큰 응력 집중 현상을 받았을 것이라 판단된다. 또한 시험포장 실시 후 총 2회에 걸쳐 시험포장 구간에 대한 추적조사를 실시하였지만 초기 균열 양상과 동일한 결과를 얻었다. 시험포장 실시 후 본 연구보고서 4절에서는 콘크리트 슬래브와 다양한 하부층 사이의 마찰력 테스트를 통하여 마찰력이 콘크리트 슬래브에 미치는 영향을

보다 자세히 분석하였다.

랜덤크랙의 경우 3차 시험포장의 옆차선에 기포설된 1차 시험포장의 시험 결과가 영향을 미친 것으로 판단된다. 3차 시험포장의 No. 15 줄눈부 근처에 발생한 랜덤크랙은 1차 시험포장 당 시 No. 11 줄눈부에 발생한 랜덤크랙과 횡방향으로 붙어 있음을 확인할 수 있었다. 또한 No. 2와 No. 16 줄눈부 사이의 랜덤크랙은 슬래브 타설 전 런콘크리트 자체에 균열이 발생되었는데, 해당 균열이 슬래브에 영향을 주어 발생한 균열로 판단된다. 아래 그림 56은 3차 시험포장의 줄눈 균열 발생 결과를 나타낸 것이고 그림 56은 3차 시험포장에서 발생한 랜덤크랙의 형상이다.

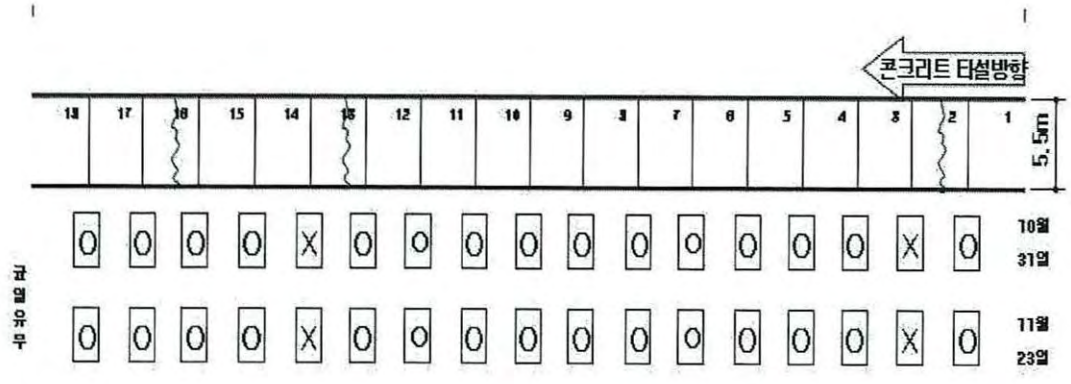
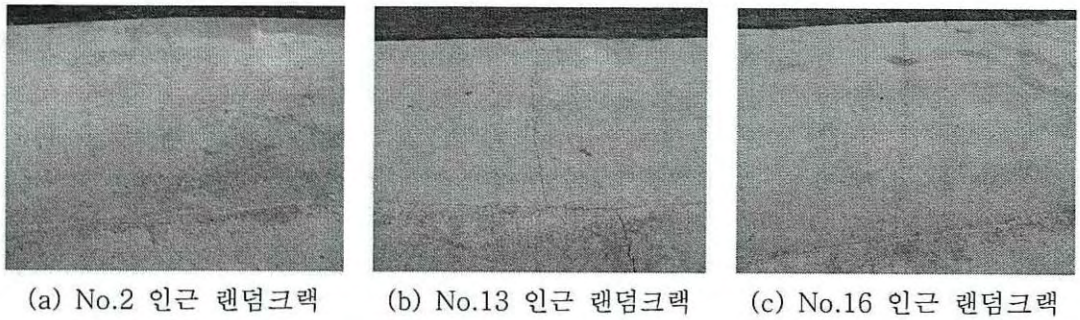


그림 56. 줄눈 균열 발생 결과(3차 시험포장)



(a) No.2 인근 랜덤크랙 (b) No.13 인근 랜덤크랙 (c) No.16 인근 랜덤크랙

그림 57. 3차 시험포장 랜덤 크랙 발생 형상

2절 시험포장에 대한 추적조사 및 효과 분석

1. 1차년도 시험포장(07년 5월, 장헌산업 당진공장)

가. 시험포장 개요

줄눈 균열 유도장치를 이용한 현장 시험을 2007년 5월 29일부터 6월 5일까지 충청남도 당진군에 위치한 (주)장헌산업 공장 내 부지(그림 57), 총 연장140m의 편도 2차로 시험포장 구간에서 실시하였다. 1차년도에 시행된 본 시험포장은 줄눈 균열의 발생, 형태, 거동 등을 줄눈 균열 유도장치의 높이별로 초기와 장기로 구분하여 관찰하였다.

표 15와 그림 59는 시험 포장에 사용된 줄눈 균열 유도장치의 제원 및 형상으로 기존 줄눈 설치 시 사용되고 있는 다웰바와 동일한 재료인 구조용 압연강재(KS D-3503, SS490)를 사용해 제작하였고, 줄눈 균열 유도장치는 벽체 높이를 10, 15, 22cm 3종류로 제작하였다. 바닥판의 경우 줄눈 균열 유도벽체 높이에 상관없이 동일하게 제작하였으며, 시공 시 줄눈 균열 유도장치의 위치 이탈 방지를 위해 바닥판에 일정 간격의 천공을 통해 힐티핀으로 하부층과 고정할 수 있도록 제작하였다.

표 15. 줄눈 균열 유도장치 제원

재료	구조용 압연강재(KS D3503, SS490)
구성	줄눈 균열 유도벽체 [길이× 높이(h)× 두께 = 4m× 10, 15, 22cm× 0.3cm]
	바닥판 (길이× 폭× 두께 = 50cm * 5cm * 0.3cm)
고정 방식	힐티핀(NK-27)
총 중량(4.1m기준)	24kg(h=22cm), 18kg(h=15cm), 13kg(h=10cm)

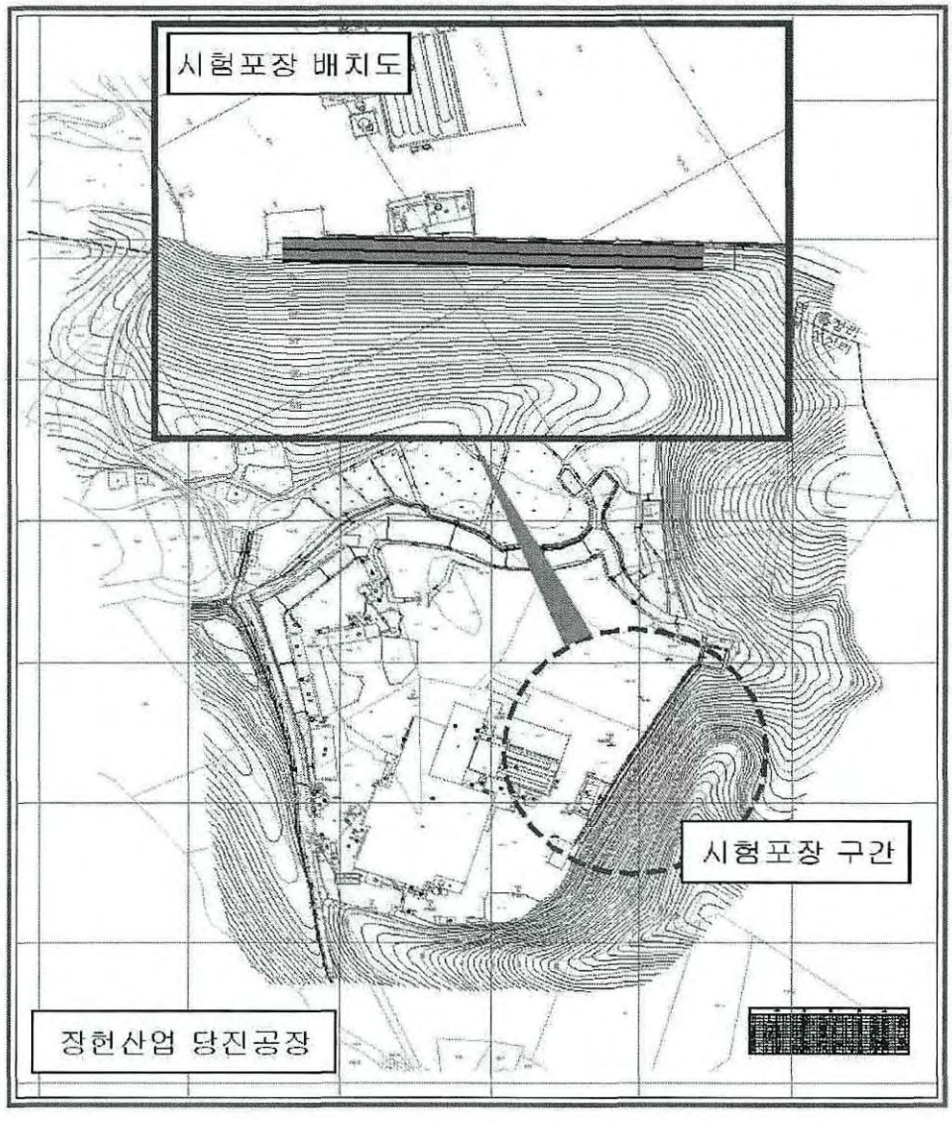


그림 58. (주)장헌산업 공장 내 시험포장 부지(충남 당진)

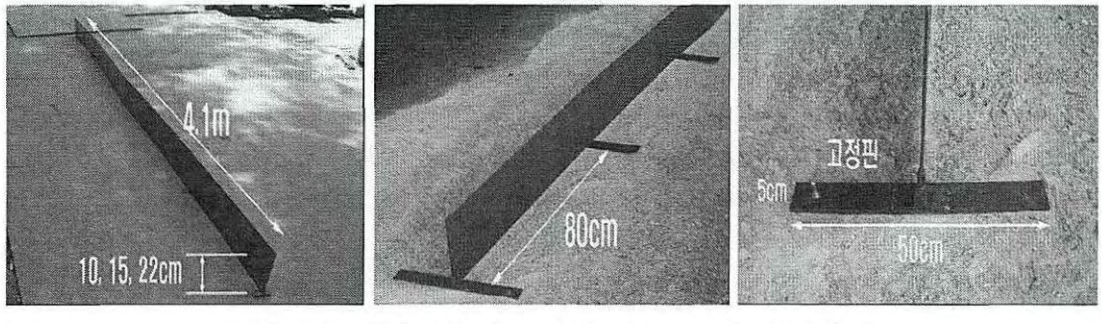


그림 59. 시험포장에 설치된 줄눈 균열 유도장치

그림 59와 같이 1차로에는 22㎝, 15㎝, 10㎝의 높이별 4개씩 총 12개의 줄눈 균열 유도장치를 린 콘크리트 기층 위의 줄눈 위치에 높이별로 하나씩 번갈아가며 정착시켰으며, 2차로에는 같은 높이의 줄눈 균열 유도장치 4개씩을 모아서 린 콘크리트 기층에 정착시켜 높이별로 3개의 구간이 되도록 하였다.

나. 계측기 설치

1차로는 07년 5월 31일, 2차로는 07년 6월 3일에 콘크리트를 각각 타설 하였으며, 줄눈균열의 거동을 측정하기 위하여 모든 줄눈에 Demec disc를 설치하였다. 콘크리트 타설 시간에 따른 슬래브 내 온도의 분포를 비교하기 위하여 차로 당 20개씩의 슬래브 중 2, 9, 20번째 슬래브 위치에 I-Button을 깊이별로 매설하였다. 또한 슬래브의 상세 거동을 측정하기위하여 V/W Strain Gauge, Moisture Sensor, Dial Gauge 등을 2차로 9번째 슬래브에 집중하여 매설하였다. 계측기별 설치 목적은 표 16과 같다.

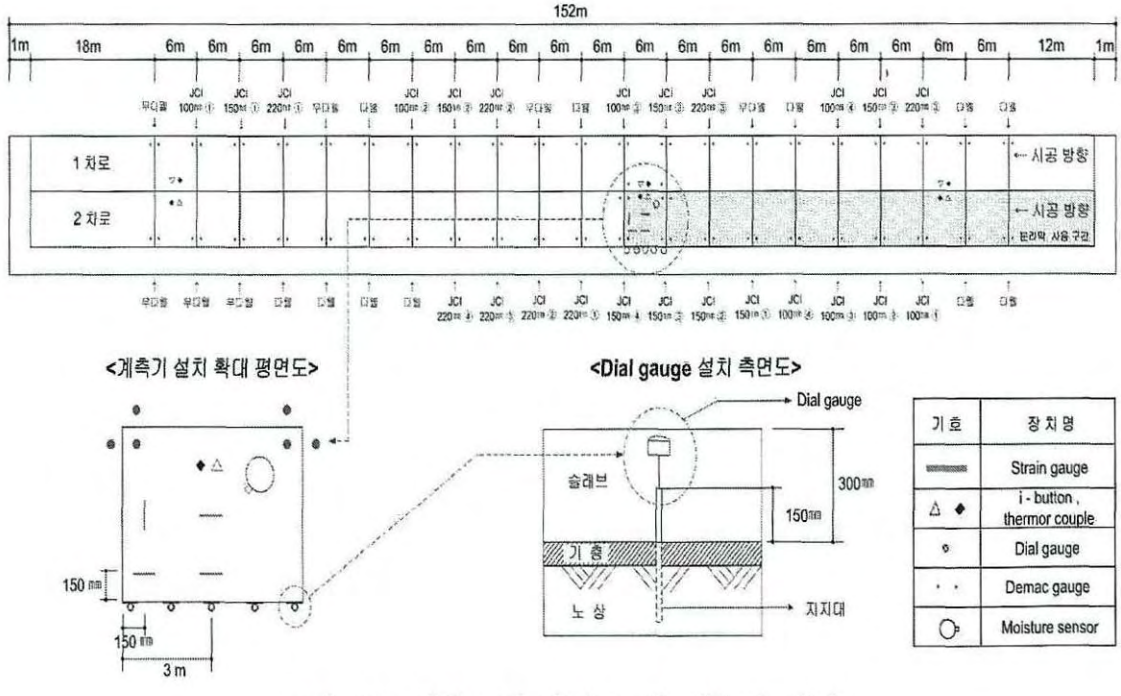


그림 60. 시험포장 평면도 및 계측기 매설

표 16. 계측기별 설치 목적

계측 기기	목 적
I-button	· 콘크리트 슬래브 내부온도 및 대기온도 측정을 통한 초기 수화열 발생 특성 분석
Crack Gauge	· 줄눈 균열 유도장치를 통해 유도된 자연 균열 폭 거동 분석
Dial Gauge	· 타설 후 초기 수화열 및 온·습도 변화에 따른 슬래브 거동 분석
Thermocouple	· I-button 측정값과 비교를 통해 계측 신뢰성 분석
Strain Gauge	· 콘크리트 슬래브 깊이 및 위치에 따른 콘크리트 내부 변형율 측정을 통한 초기 및 장기 콘크리트 변형율 분석
Moisture Sensor	· 콘크리트 슬래브 내부 습도 측정을 통해 타설 초기 콘크리트 내부 습도 변화 분석
Demac Gauge	· 온도 변화에 따른 줄눈 및 균열폭 움직임 분석

다. 현장 시험포장 콘크리트 물성 측정 결과

(1) 스트레인 게이지(Strain gauge)

스트레인 게이지는 슬래브의 거동을 측정하는 계측 장비로써, 린콘크리트 층에 정착시킨 후 콘크리트를 타설하여, 스트레인 게이지용 리더를 통하여 실시간으로 변형률과 온도를 측정하는 장치이다.

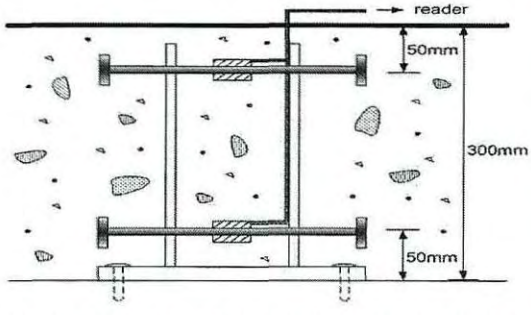


그림 61. 스트레인 게이지 정착 단면도

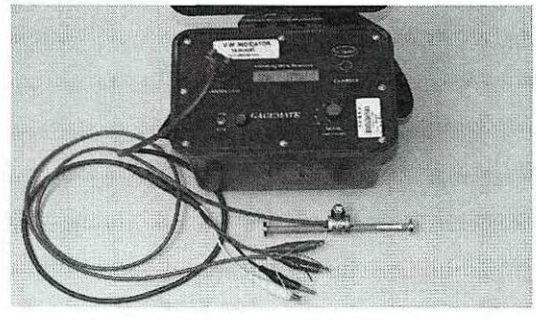


그림 62. 스트레인 게이지와 리더

그림 61~62에서와 같이 현장 시험에서는 미국 Geokon사의 4200 Model을 사용하였으며, 콘크리트 슬래브의 두께 300㎜ 중 상·하단으로부터 각각 50㎜ 씩 간격을 유지하여 스트레인 게이지용 지지대에 정착시켰다. 스트레인 게이지의 설치 위치는 콘크리트 타설 전 보조기층에 그림 63과 같이 설치하였다.

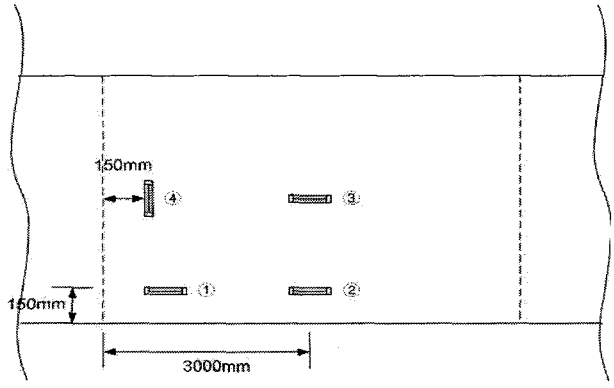


그림 63. 스트레인 게이지 정착 평면도

스트레인 게이지 별 위치에 따라 ①~④ 로 구분하였으며, 위치에 따른 재령별 변형률(Strain) 결과 값은 아래 그림 64~67과 같다. 콘크리트 슬래브는 초기경화 시간부터 일정한 경향을 나타내기 시작하므로 초기경화시간에 측정된 변형률을 영점으로 정하였으며, 식 1을 사용하여 Gauge로부터 측정한 값을 실제 변형률로 환산하였다.

$$\mu = (R_1 - R_0)B + (T_1 - T_0)C_1 \qquad (1)$$

여기서, R_0, R_1 = 초기경화시간과 매 측정 시 Gauge로부터 측정한 값

B = Gauge 상수(=0.96)

T_0, T_1 = 초기경화 시간과 매 측정시의 온도

C_1 = Gauge의 열팽창계수 ($12.2\mu\varepsilon/℃$)

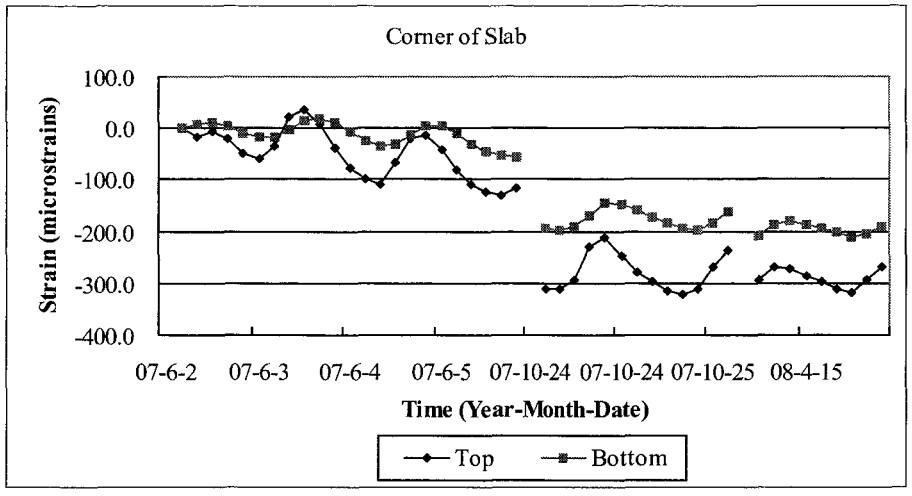


그림 64. 스트레인 게이지 ①

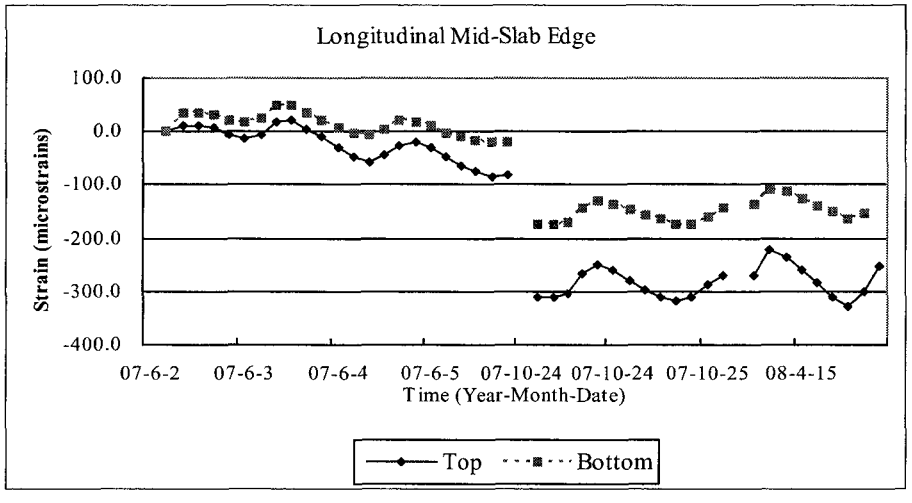


그림 65. 스트레인 게이지 ②

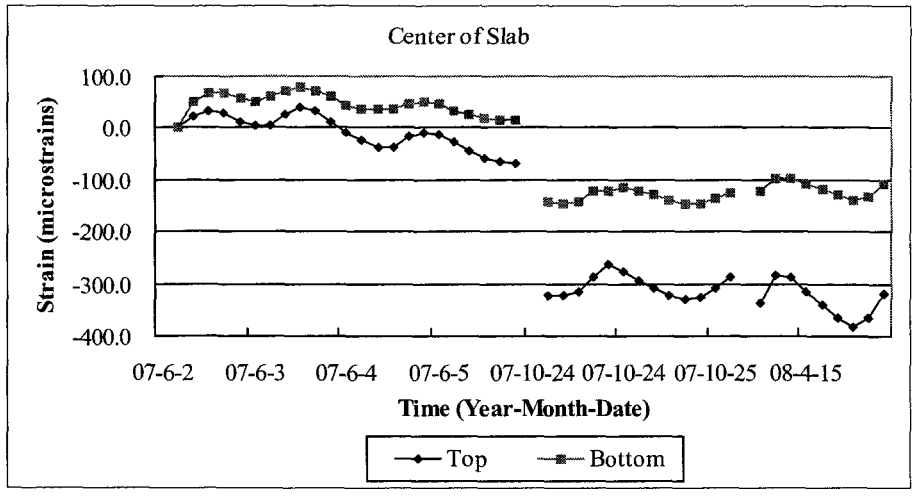


그림 66. 스트레인 게이지 ③

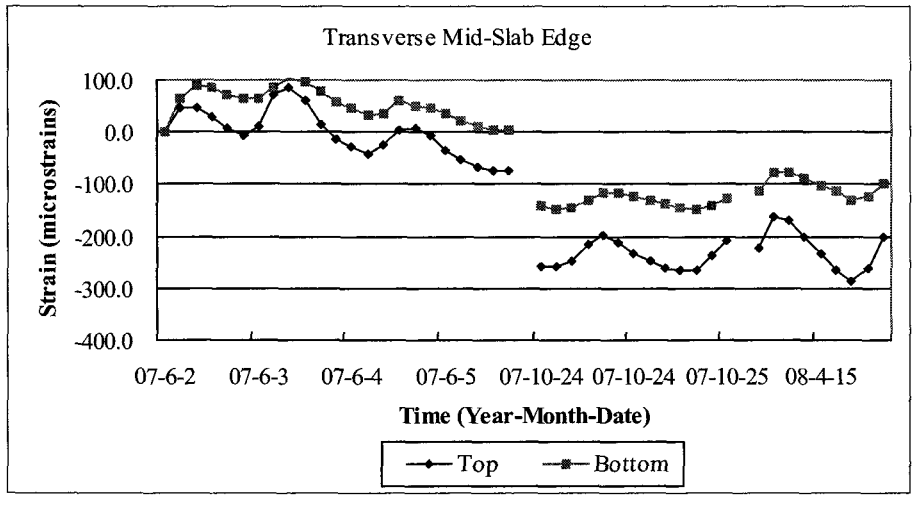


그림 67. 스트레인 게이지 ④

그림 64~67에서와 같이 초기경화 직후 슬래브의 상·하부 모두에서 인장변형률이 수 시간 동안 증가한 후에 압축변형률로 변화하였는데, 초기에 발생한 인장변형률은 수화열 및 오후의 높은 대기온도에 의한 콘크리트 슬래브의 온도상승 때문이며, 압축변형률은 오전에 내려간 대기온도와 콘크리트의 꾸준한 건조수축 때문에 발생한 것으로 판단되었다. 측정기간 동안 슬래브 상부의 변형률이 하부의 변형률보다 변화가 더 큰 것을 관찰할 수 있었는데, 이는 대기에 접한 슬래브의 상부가 하부에 비해 기상변화에 더 많은 영향을 받았기 때문으로 판단된다. 콘크리트 슬래브가 타설되고 약 1년이 지난 후 측정한 결과에서도 콘크리트 내의 장기적인 수분

증발로 인한 건조수축의 영향으로 콘크리트 슬래브 상부의 압축변형율의 증가가 더욱 커지는 것으로 나타났다.

(2) 디멕 게이지(Demac gauge)

디멕 게이지 측정방법은 콘크리트 슬래브 줄눈부를 중심으로 일정 간격을 두고, 디멕 디스크를 설치하여 줄눈부의 거동을 측정하는 것을 기본으로 한다. 1차 시험 포장에서는 2차로 총 46개 줄눈부에 디멕 디스크를 설치하였으며, 설치위치는 현장 시험 상세도에 표시된 위치와 같으며, 계측시간은 2007년 5월 31일 19시부터 6월 5일 07시 까지 3시간에 한번씩 측정하였다.

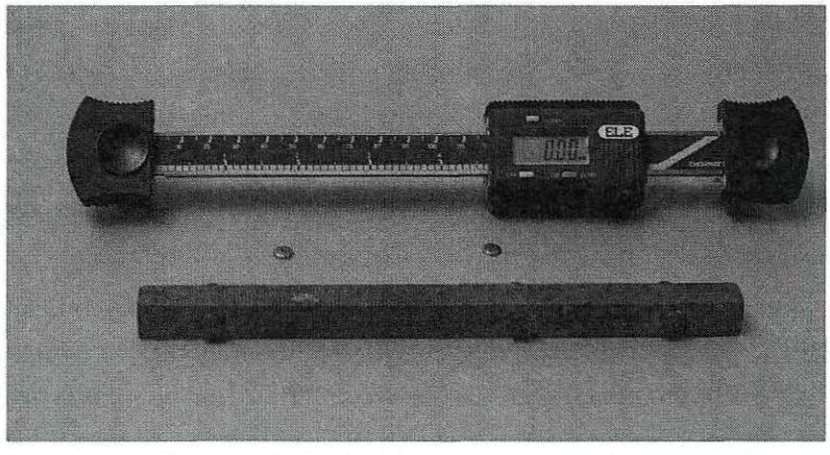


그림 68. 디멕 게이지, 디스크, 스탠다드 바

디멕 게이지는 1차로와 2차로로 나뉘어 측정하였으며, 줄눈 균열 유도장치의 높이 및 다웰바 사용 유·무를 구분하여 슬래브간 변위량(Joint Movement)의 측정결과를 분석하였다.

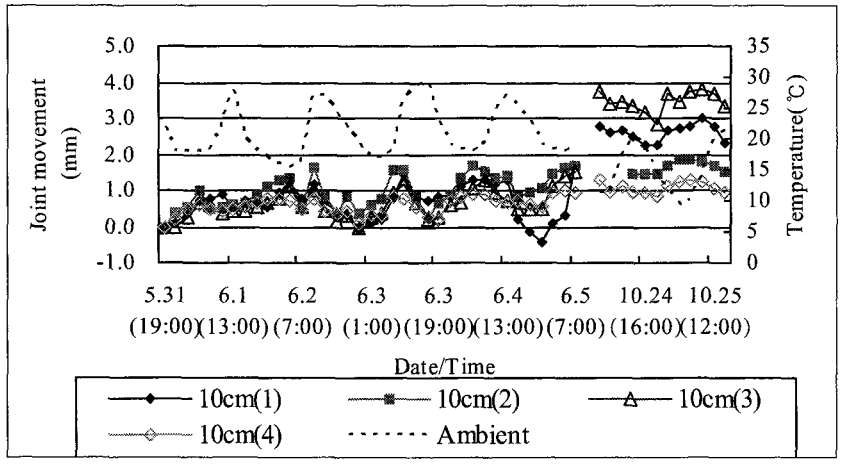


그림 69. 1차로(줄눈 균열 유도장치 h=10cm) 측정결과

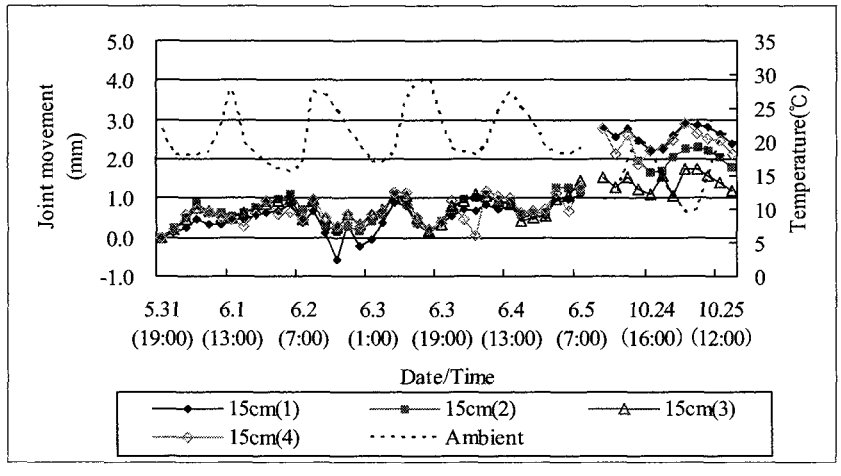


그림 70. 1차로(줄눈 균열 유도장치 h=15cm) 측정결과

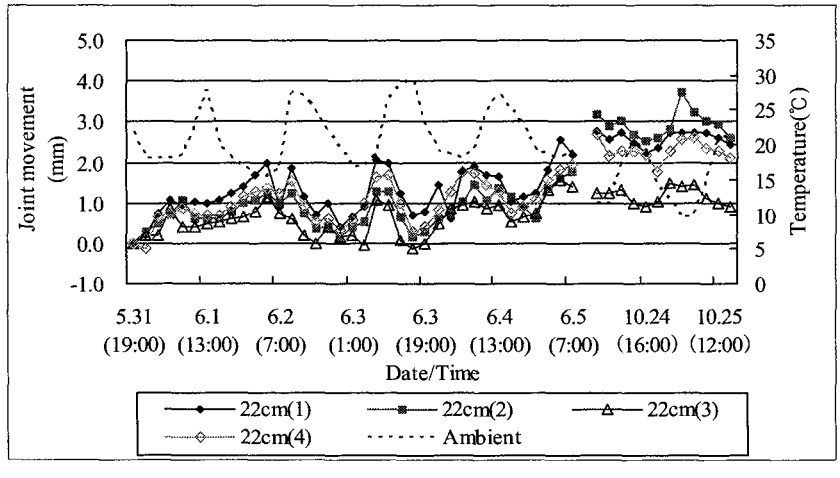


그림 71. 1차로(줄눈 균열 유도장치 h=22cm) 측정결과

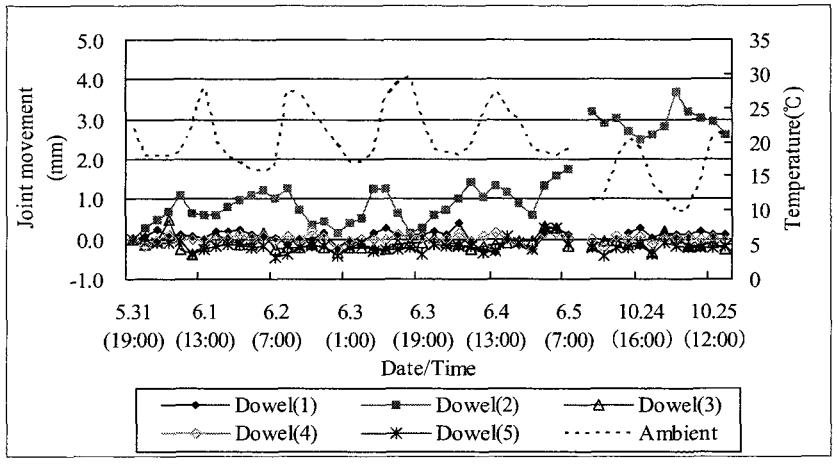


그림 72. 1차로(다웰바 사용 구간) 측정결과

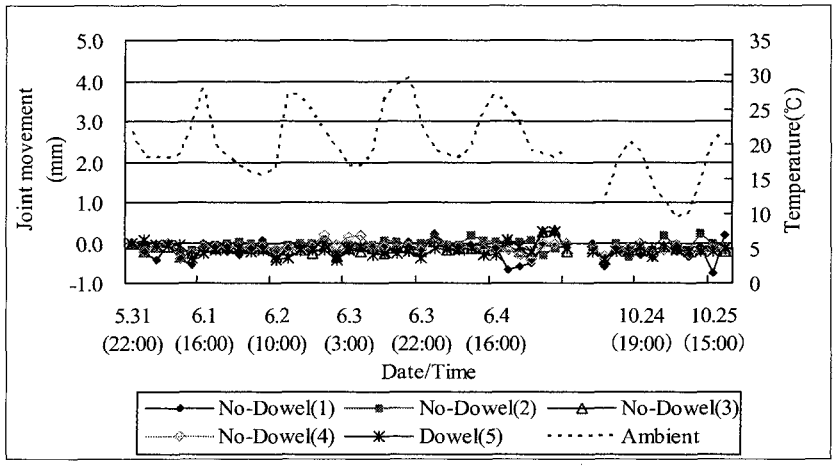


그림 73. 1차로(다웰바 미사용 구간) 측정결과

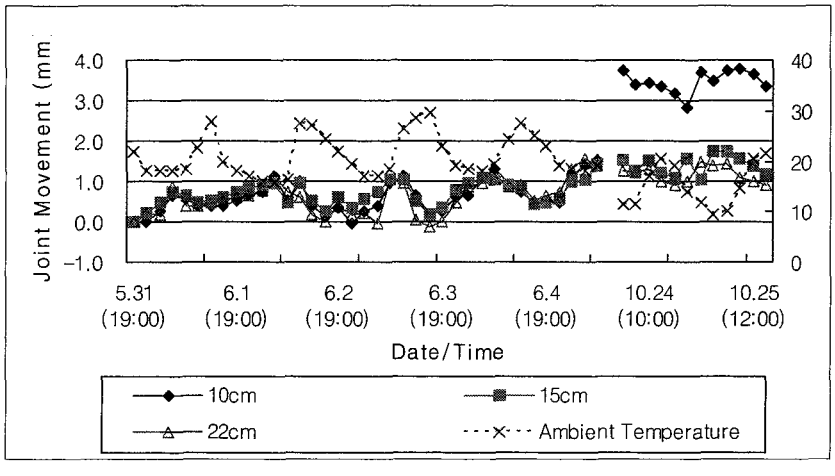


그림 74. 1차로의 측정결과 비교

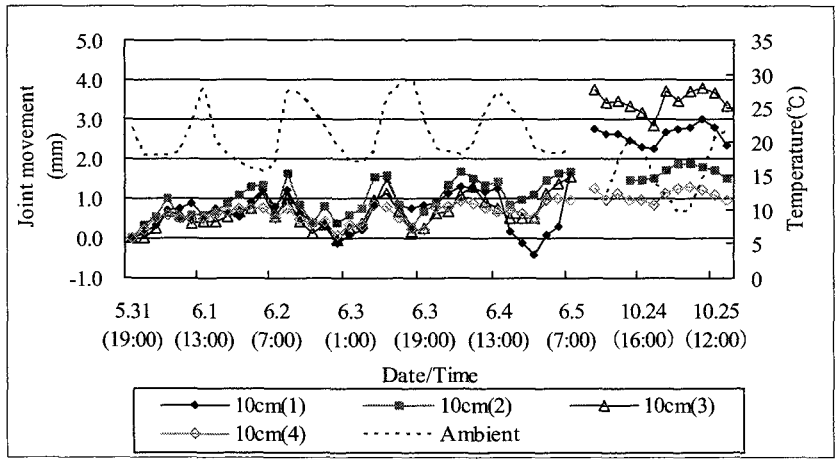


그림 75. 2차로(줄눈 균열 유도장치 h=10cm) 측정결과

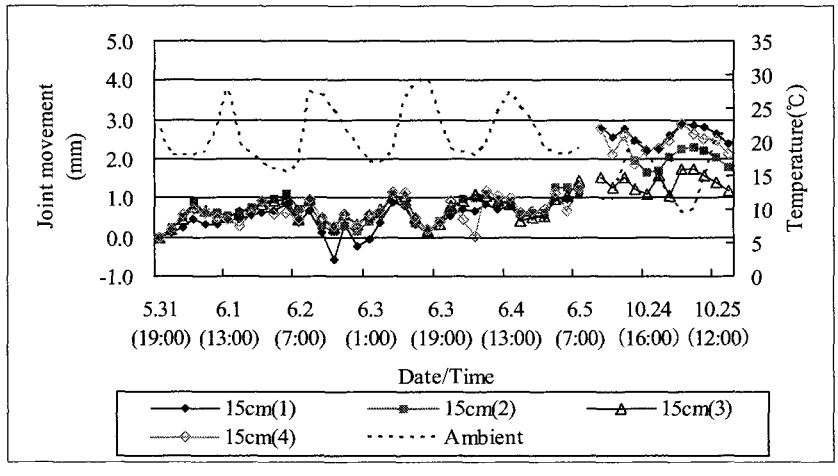


그림 76. 2차로(줄눈 균열 유도장치 h=15cm) 측정결과

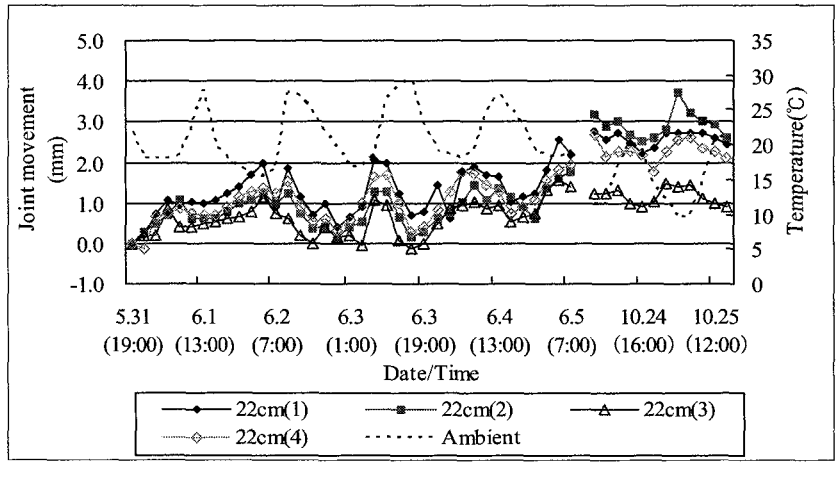


그림 77. 2차로(줄눈 균열 유도장치 h=22cm) 측정결과

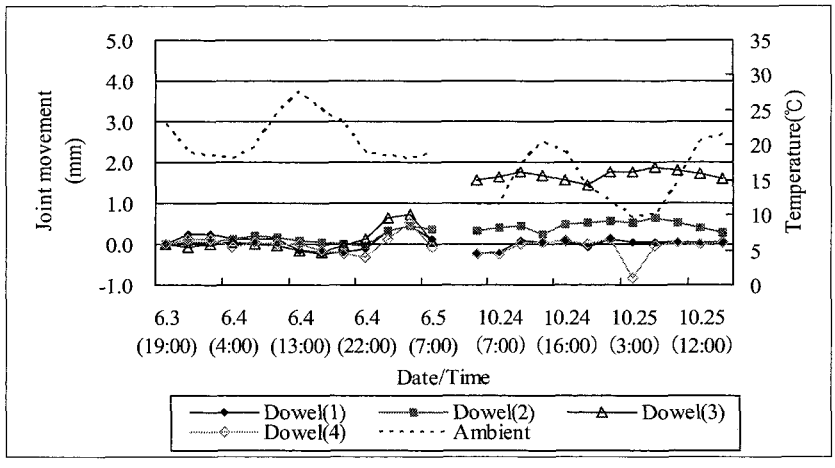


그림 78. 2차로(다웰바 사용 구간) 측정결과

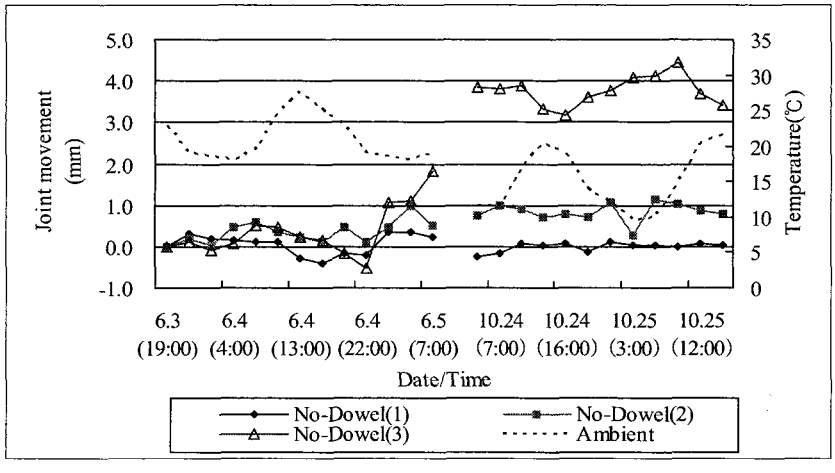


그림 79. 2차로(다웰바 미사용 구간) 측정결과

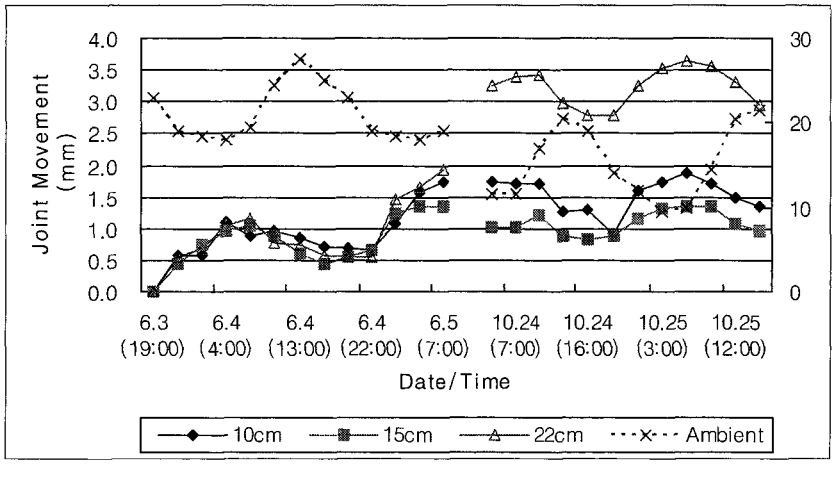


그림 80. 2차로 측정결과 비교

디멕 게이지를 사용하여 줄눈부의 거동을 측정한 결과, 줄눈 균열 유도장치를 사용한 줄눈부의 거동이 다웰바 설치 구간과 무다웰바 구간에서의 줄눈 거동보다 크게 측정 되었으며, 22cm의 줄눈 균열 유도장치를 사용한 구간에서의 거동이 10cm나 15cm의 줄눈 균열 유도장치를 사용한 구간의 거동보다 크게 나타났다. 또한 줄눈 폭은 기온이 최고 온도에 이르는 오후에 가장 적게 측정되고, 기온이 최저 온도에 도달하는 새벽에 그 폭이 크게 측정되는 것으로 보아, 줄눈 거동이 외부 온도에 큰 영향을 받고 있음을 확인 할 수 있다.

(3) 습도 측정기(Moisture sensor)

습도 측정은 콘크리트 타설 전 린 콘크리트층에 PVC로 제작한 원통형 관을 정착시켜 시간대별 콘크리트 슬래브의 습도변화를 측정할 수 있도록 하였다. PVC 원통형 관은 콘크리트 슬래브보다 2cm 높게 제작되었고, 덮개를 부착시켜 콘크리트 타설 후 원통 안으로 빗물이 침투하여 습도측정에 악영향을 미치는 것을 방지하였다. 또한 원통형 내부는 콘크리트 슬래브의 높이별 습도를 측정할 수 있도록 하기 위하여 슬래브 상부에서부터 5.75cm, 17.75cm, 27.75cm 에 직경 약 2cm의 작은 관을 연장시켜, 습도계를 연결할 수 있도록 제작하였다.

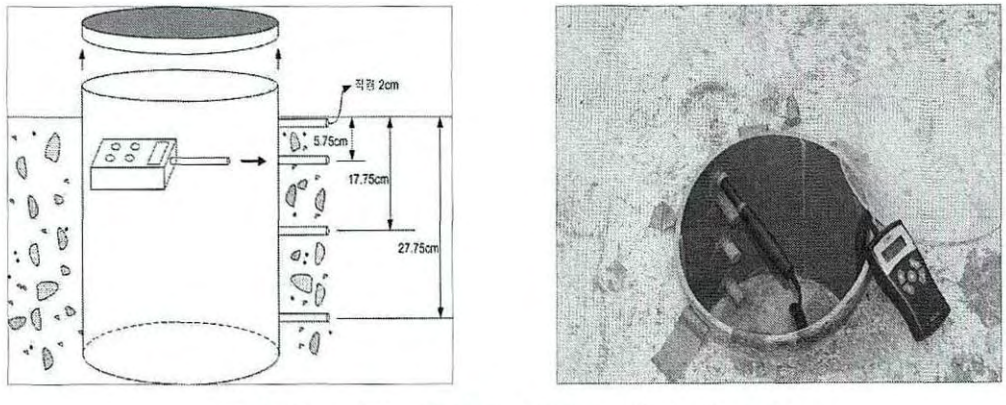


그림 81. 습도 측정기 단면도 및 측정 모습

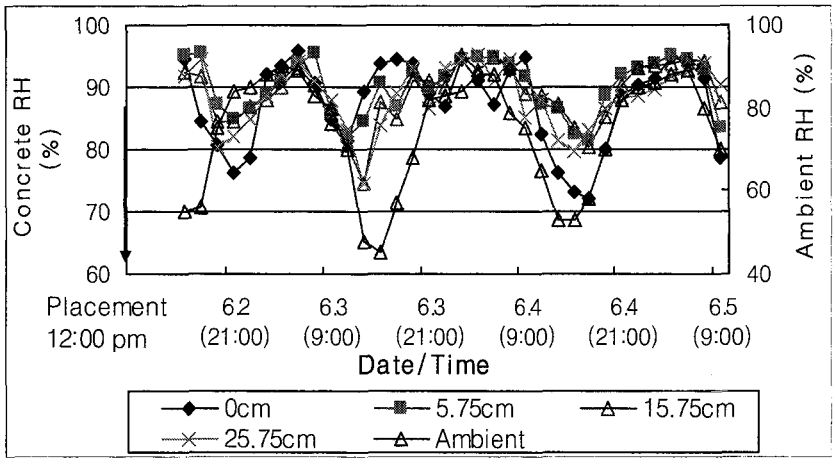


그림 82. 슬래브 깊이에 따른 습도변화 추이

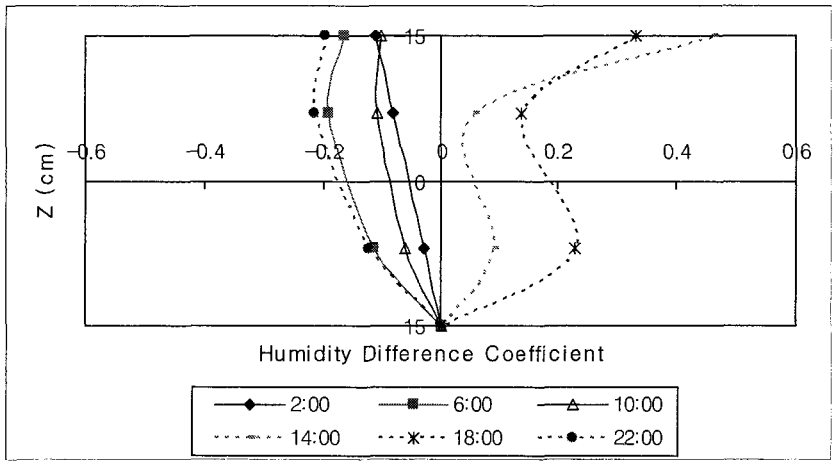


그림 83. 습도 차이 계수

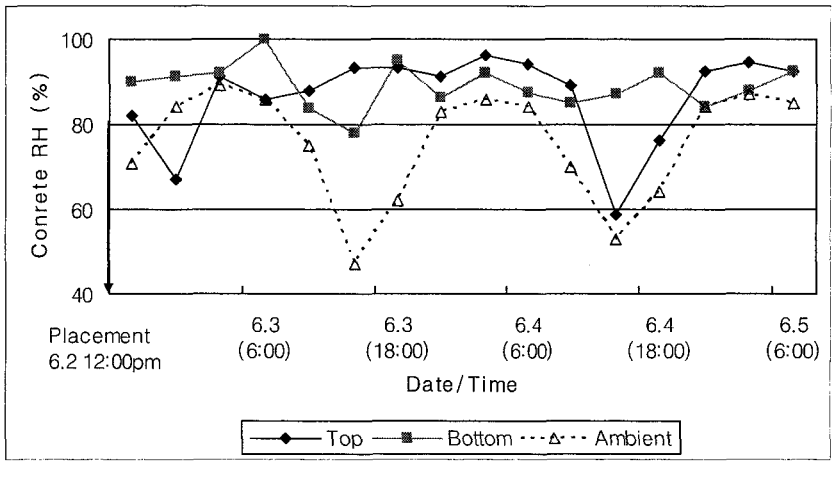


그림 84. 슬래브 상·하부 습도변화 추이

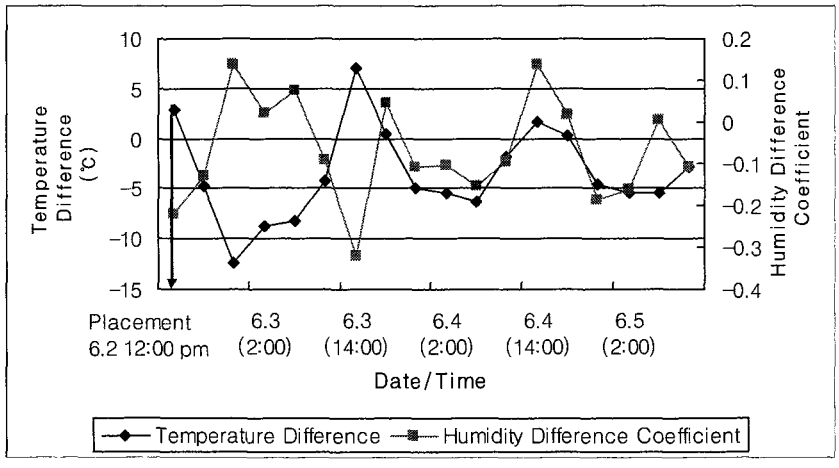


그림 85. 온도 차이 및 습도 차이 계수의 등가 추이

타설 직후 수분을 많이 포함한 콘크리트 슬래브의 습도는 깊이에 상관없이 약 95%내외의 일정한 값을 약 13시간 동안 나타내었다. 하지만, 타설 당일 오후에 콘크리트 상부표면에서의 수분증발로 인하여 상부에서 약 75%, 하부에서 약 85%까지 습도가 하강하였으며, 대기의 상대습도가 높아진 다음날 아침에 다시 습도 상승하였다. 이는 콘크리트 슬래브가 대기상대습도와 마찬가지로 아침에는 높은 상대습도를 나타내었고 오후에는 낮은 상대습도를 나타내어 24시간 주기의 사이클을 나타내었는데, 대기와 가까운 슬래브 상부에서의 상대습도의 변화가 대기에서 먼 슬래브 하부에서의 변화보다 큰 것으로 나타났다. 온도의 경우와 마찬가지로 대기와 가까운 슬래브 상부에서 대기상대습도와 거의 동일한 상대습도 사이클을 나타낸 반면, 대기와 먼 슬래브 하부에서는 일중 최저 및 최고 대기상대습도가 발생하고 수 시간이 지난 후에야 일중 최저 및 최고 콘크리트 상대습도를 나타내었다. 이처럼 콘크리트의 상대습도가 대기상대습도의 영향을 많이 받기 때문에 콘크리트 슬래브의 습도차이 계수는 온도차이 계수와 상관관계가 있음을 알 수 있다.

(4) 슬래브 내 온도 측정기(I-Button)

1차년도 시험포장에서는 콘크리트 슬래브의 초기 및 장기거동에 큰 영향을 미치는 온도를 최소한의 시간간격으로 측정하기 위하여 콘크리트 타설 직후 아이버튼을 아래 그림 86과 같이 지지대를 제작하여 콘크리트 슬래브 내에 정착시켰다.

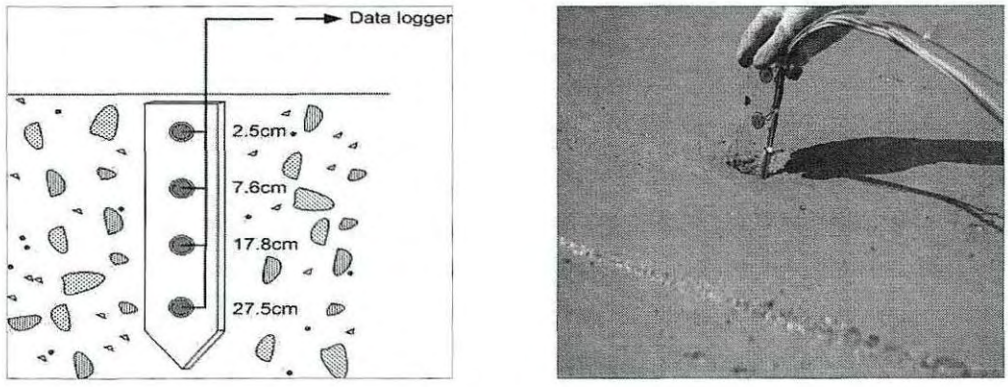


그림 86. i-Button 설치 단면도 및 설치 모습

아이버튼은 직경 1.5cm의 스테인리스 재질로 제작되어 수분으로 인한 부식을 방지할 수 있으며, 자체 배터리와 메모리를 사용하므로 설치 전에 측정 초기값을 설정 해놓으면, 추후에 전용 프로그램을 이용하여 간편하게 온도 데이터를 얻어낼 수 있는 장점이 있다. 슬래브의 깊이 별 온도를 측정하기 위하여 아이버튼을 슬래브 상부에서부터 2.5cm, 7.6cm, 17.8cm, 27.5cm 위치에 정착시켰으며, 측정 시간 간격은 콘크리트를 타설했을 때부터 매 30분 간격으로 측정하였다. 아이버튼은 1차로, 2차로 각각 3개씩 총 6개의 슬래브에 설치하였으며, 자세한 설치 위치는 앞에서 언급한 현장 시험 상세도에서 확인할 수 있다.

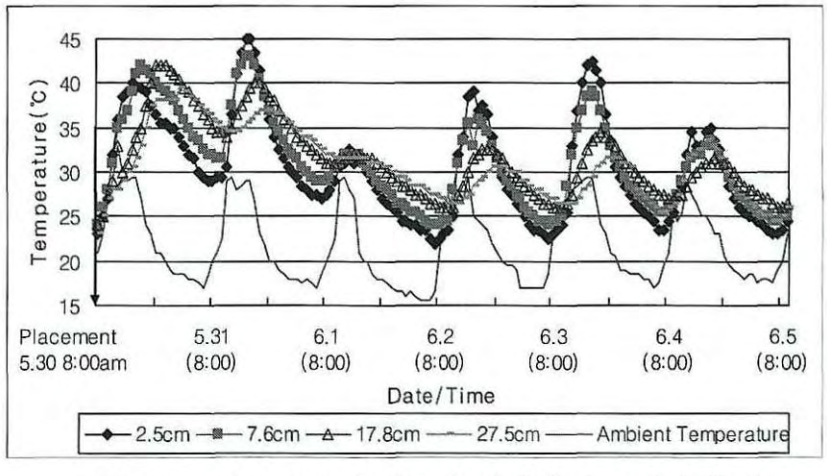


그림 87. 1차로 2번 슬래브의 깊이별 온도변화 추이

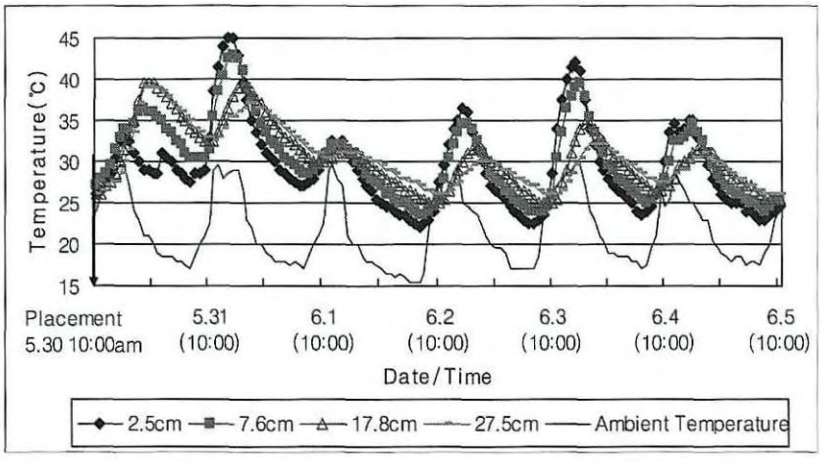


그림 88. 1차로 9번 슬래브의 깊이별 온도변화 추이

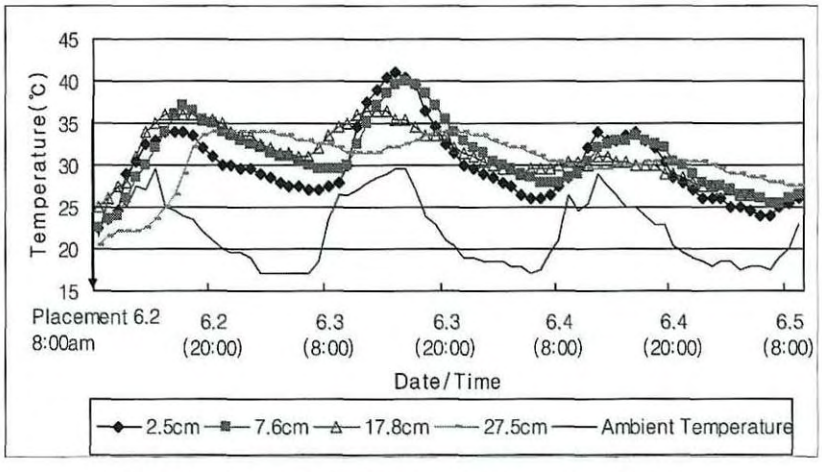


그림 89. 2차로 2번 슬래브의 깊이별 온도변화 추이

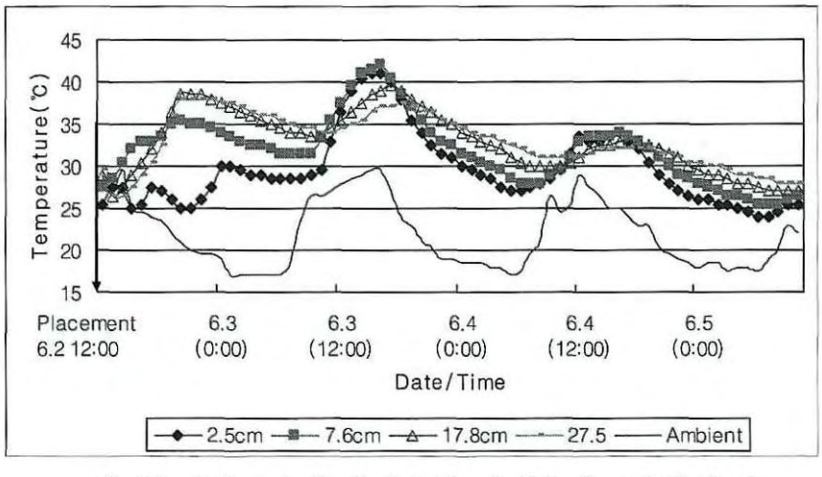


그림 90. 2차로 9번 슬래브의 깊이별 온도변화 추이

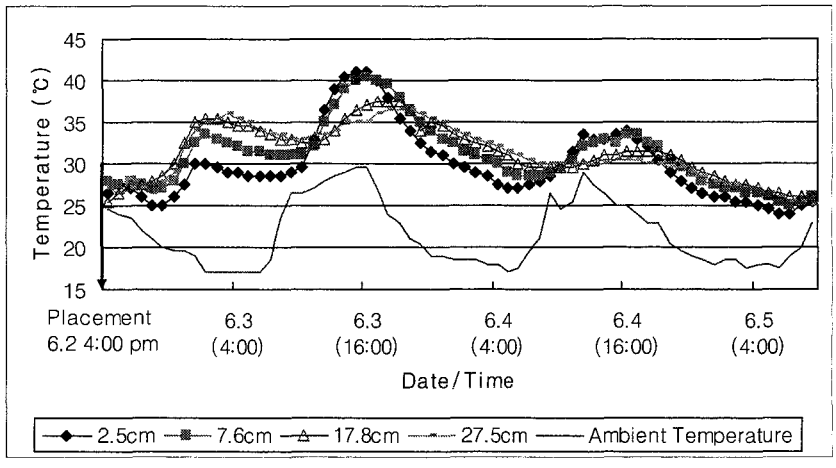


그림 91. 2차로 20번 슬래브의 깊이별 온도변화 추이

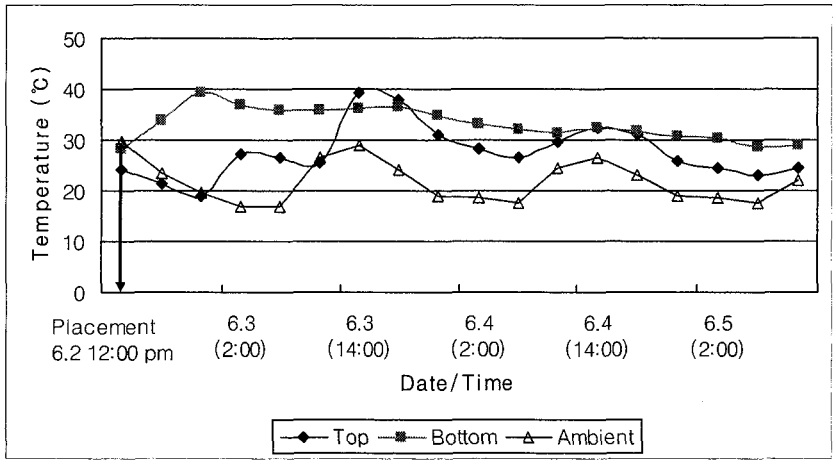


그림 92. 슬래브 상·하부 온도변화 추이

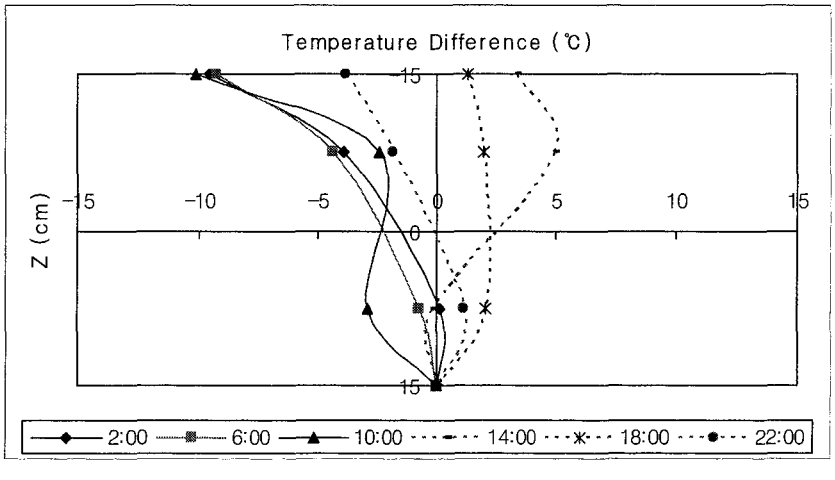


그림 93. 2차로 2번 슬래브의 온도차이(6월 3일)

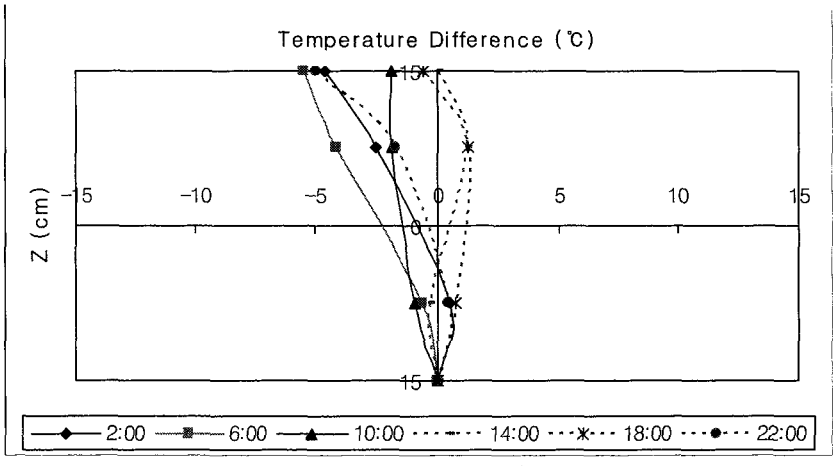


그림 94. 2차로 2번 슬래브 온도차이(6월 4일)

1, 2차로 콘크리트 슬래브의 온도는 양차로 모두 콘크리트를 타설한 후 약 28시간이 경과한 16시경에 그림 87~93과 같이 최고값을 나타내었는데, 이는 수화열의 발생량이 대기온도가 높을수록 많아지므로(Schindler 2004) 콘크리트 타설 당일 정오 이후에는 대기온도가 크게 하강하여 수화열의 발생량이 적었으며, 대기 온도가 다시 높아진 타설 이튿날 오후에야 수화열의 발생량이 많아졌기 때문으로 판단된다. 슬래브의 깊이별 온도를 측정한 결과, 슬래브의 상부표면과 가까운 25㎜와 75㎜ 깊이에서 슬래브 하부인 175㎜와 275㎜에서보다 온도의 변화가 더 큰 것으로 측정되었는데, 슬래브 상부표면은 콘크리트 내부와 대기의 열이 서로 전달되는 경계면이므로 온도의 변화가 컸으나 슬래브 하부는 대기와 멀리 떨어져 열의 이동이 적었기 때문으로 판단된다. 또한, 대기와 가까운 슬래브 상부에서는 대기온도와 거의 동일한 크기와 시간의 온도 사이클을 나타내었으나 슬래브 하부에서는 대기와의 열전달에 걸리는 시간이 길기 때문에 일중 최저 및 최고 대기온도가 나타난 수 시간 후에야 일중 최저 및 최고온도를 나타내었고 온도의 변화도 작았다. 타설 직후 콘크리트 내에 발생했던 수화열을 대기 및 린 콘크리트 기층으로 빼앗기면서 높았던 콘크리트 슬래브의 초기 온도는 점차 낮아져서 대기온도에 비슷한 경향을 보이는 것으로 나타났다.

(5) 다이얼 게이지(Dial Gauge)

본 시험은 콘크리트 슬래브 초기재령의 건조수축 및 장기재령의 Curling & Warping(뒤틀림)을 측정하기 위하여 콘크리트 슬래브 타설 후, 슬래브 옆면에 5개의 다이얼 게이지를 부착하고 데이터 로거에 연결하여 그 값을 확인하였다.

2차로 한 개의 슬래브에 5개의 다이얼 게이지를 설치한 후, 데이터로거에 연결하여 슬래브의 거동을 측정하였으며, 자세한 설치 위치는 아래 그림 95와 같다.

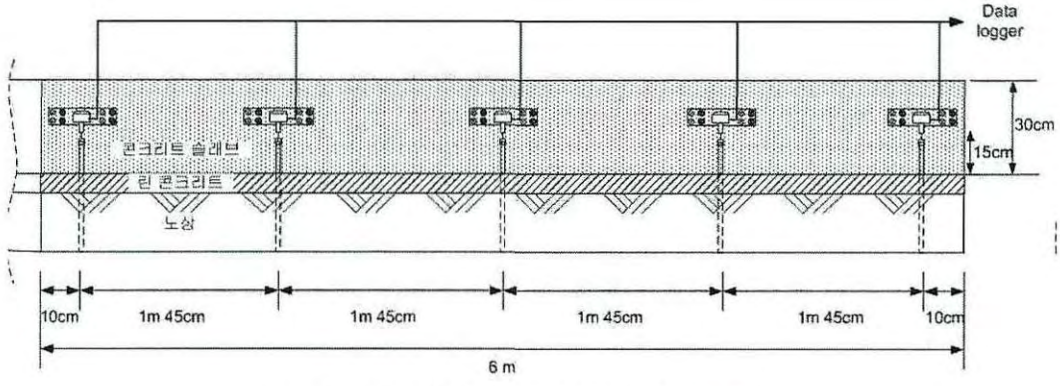


그림 95. 다이얼 게이지 설치 측면도

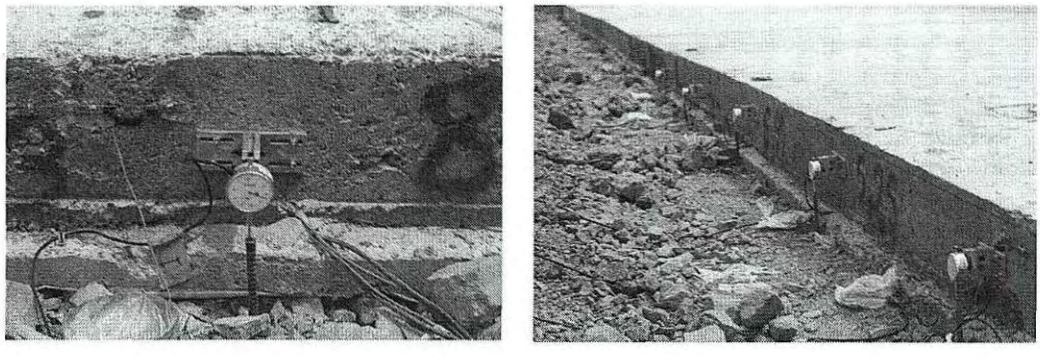


그림 96. 다이얼 게이지 설치 전경

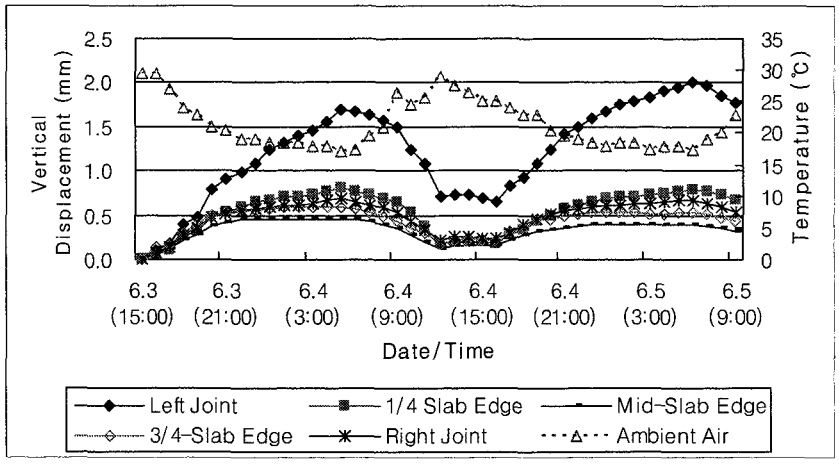


그림 97. 슬래브 연직거동 추이

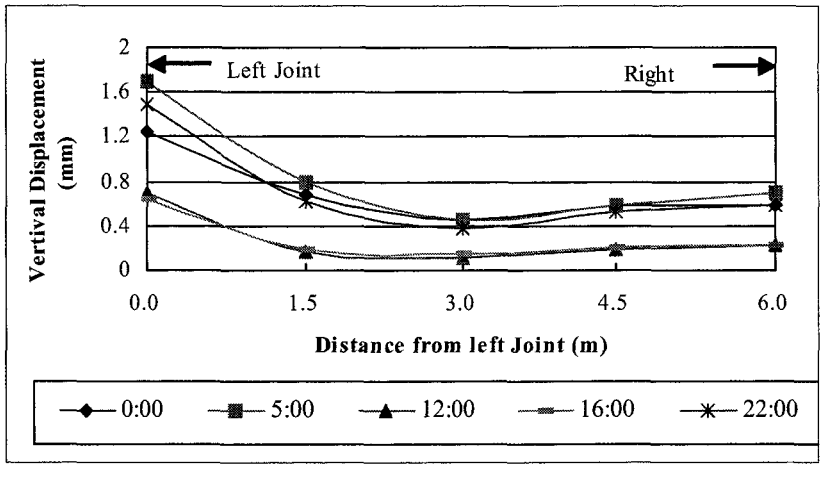


그림 98. 시간별 종방향 모서리의 컬링형상

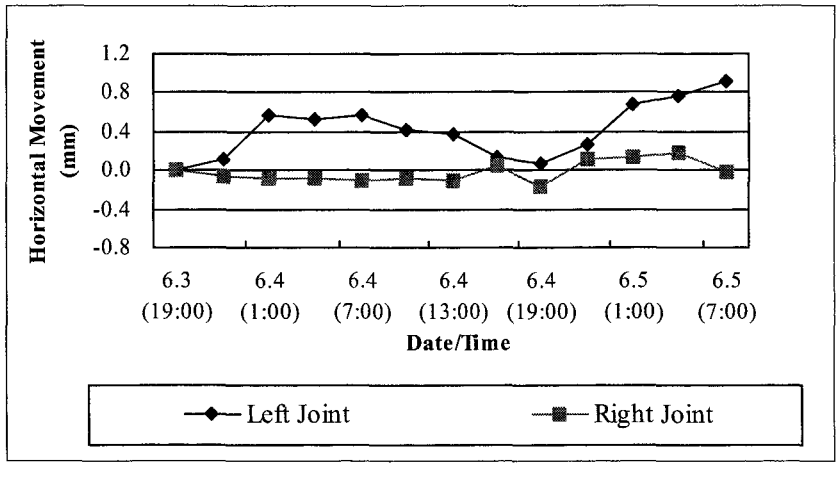


그림 99. 줄눈부의 수평변위

그림 95에서 보인 것과 같이 6m의 길이를 갖는 콘크리트 슬래브의 종방향 모서리를 따라 1.5m 간격으로 5곳에 설치된 Dial Gauge를 사용하여 측정한 린 콘크리트 기층과 슬래브 간의 연직방향 상대변위를 분석하여 슬래브의 컬링을 조사하였다. Gauge 설치 상의 문제로 인하여 콘크리트 슬래브가 타설되고 하루가 지난 6월 3일 15시부터 슬래브 연직변위의 측정을 시작하였으며, 이때 측정된 값을 영점으로 정하였다.

측정된 슬래브의 연직변위는 그림 97과 같이 대기온도에 따라 변화하였는데, 대기온도가 크게 내려간 이른 아침에는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 낮아지면서 Dial Gauge가 설치된 종방향 모서리는 상향의 연직변위를 나타내었으며, 대기온도가 올라간 오후에는 슬래브 상부의 온도가 하부보다 높아지면서 종방향 모서리는 하향의 연직변위를 나타내었다.

콘크리트 슬래브의 자중이나 린 콘크리트 기층과의 마찰 등의 컬링거동에 대한 구속 정도가 작은 우각부에서 연직변위의 변화가 더 크게 나타났으며, 종방향 모서리의 중간 지점에서는 상대적으로 작은 연직변위의 변화를 나타내었다.
수분이 증발하는 위치인 콘크리트 슬래브 상부의 건조수축은 하부보다 크고 그 차이가 시간에 따라 증가하므로 이로 인한 상향의 컬링도 시간에 따라 증가하는 경향을 보이게 된다. 따라서 그림 97에서 6월 3일부터 6월 5일까지 대기온도가 유사한 사이클을 보였음에도 불구하고 콘크리트 슬래브의 연직변위는 점점 커져서 건조수축에 의한 상향의 컬링이 증가하였음을 확인할 수 있었으며, 이러한 경향은 슬래브 좌측 우각부에서 가장 크게 나타났다.

그림 98은 연직변위에 의하여 6월 4일 하루 동안 시간별로 발생한 슬래브 종방향 모서리 형상의 변화로서, X-축은 좌측 줄눈으로부터 측정지점까지의 거리이고 Y-축은 측정지점에서의 연직변위이다. 대기온도의 하강으로 슬래브 상부의 온도가 많이 내려간 오전에 상향의 컬링이 최대였으며, 대기온도의 상승으로 슬래브 상부의 온도가 많이 올라간 오후에 상향의 컬링이 최소인 것을 확인할 수 있었다.

분설 결과, 콘크리트 슬래브의 우측 줄눈보다 좌측 줄눈에서 시간에 따른 상향 연직변위의 증가가 더 컸는데, 이는 줄눈부에 발생한 균열 폭의 증가와 관련이 있을 것으로 추정되었다. 따라서 슬래브 좌우측 줄눈부에서 균열의 발생 시간을 육안으로 관찰하고 줄눈부에 설치한 Demac point를 이용하여 6월 3일 19시부터 균열의 수평방향 움직임을 측정하였다. 콘크리트 타설 당일인 6월 2일 16시에서 18시

사이에 슬래브 좌측의 줄눈부에 균열이 발생되었으나 우측 줄눈부에서는 조사기간 동안 균열이 발생되지 않았다. 콘크리트 슬래브 좌측 줄눈에 발생한 균열의 폭은 그림 99에서 보듯이 대기온도가 내려가 슬래브가 수축한 오전에 가장 컸으며, 대기온도가 올라가 슬래브가 팽창한 오후에 가장 작았다. 또한, 균열이 발생되지 않은 슬래브 우축의 줄눈부는 수평방향으로 거의 움직이지 않았음을 확인할 수 있었다. 그림 97~98에서 보인 콘크리트 슬래브의 연직변위와 그림 99에서 보인 줄눈부의 수평방향 움직임을 비교한 결과, 연직변위가 더 큰 슬래브 좌측 줄눈부의 수평방향 움직임이 우측 줄눈부보다 더 큰 것을 확인할 수 있었는데, 이는 균열이 발생하여 시간에 따라 균열 폭이 증가한 슬래브 좌측 줄눈의 경우 골재의 맞물림이 감소하고 줄눈의 강성이 작아져서 균열이 발생하지 않은 우측 줄눈부보다 컬링거동에 대한 구속이 훨씬 작아졌기 때문으로 판단된다.

다. 시험포장에 대한 추적조사 결과분석

(1) 유도 균열의 균일정도 측정

1차년도에 실시된 시험포장은 줄눈 균열 유도장치를 사용하였을 때, 슬래브 내의 균일한 균열 유도 효과를 발현하기 위하여, 균열을 발생시키고자 하는 줄눈부에 다양한 깊이의 홈을 내어, 그 효과를 시험해 보는 것이었다. 슬래브 내에 홈을 내는 목적은 일반적인 줄눈 콘크리트 포장에서 균일한 줄눈을 얻기 위하여 줄눈을 컷팅하는 것과는 달리, 줄눈 균열 유도장치를 사용할 때, 간편하게 홈을 내어 균열의 균일한 정도를 확인해보고, 슬래브 표면의 균열발생 예상위치를 홈을 낸 곳을 기준으로 보았을 때, 좌·우측으로 균열의 벗어난 정도를 측정하기 위함이다. 또한, 본 시험의 결과는 줄눈 균열 유도장치를 사용하는데 있어, 줄눈의 발생 위치를 통제하고 균일한 줄눈을 얻기 위한 기초 자료라 판단된다.

다음의 표 17, 그림 101~103은 본 시험의 유도 균열의 균일 정도 결과를 나타낸다.

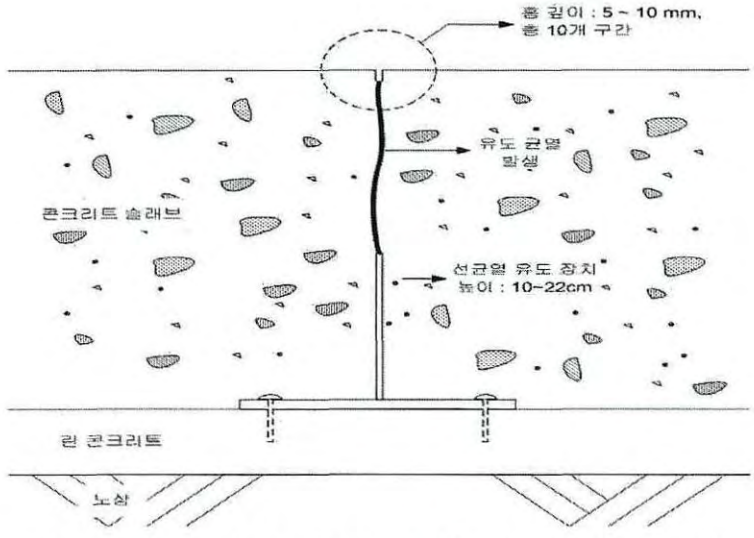


그림 100. 줄눈 균열 유도장치 및 슬래브 홈의 균열 발생 메카니즘

표 17. 줄눈 균열 유도장치별 균열발생 예상위치로부터 벗어난 균열 폭

줄눈 균열 유도장치	h=10cm						h=15cm			
홈 깊이	5㎜		5㎜		5㎜		7㎜		10㎜	
벗어난	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우
균열폭	4.0㎝	0.2㎝	6.0㎝	0.3㎝	2.2㎝	4.2㎝	3.0㎝	0.5㎝	2.0㎝	0.0㎝
줄눈 균열 유도장치	h=22cm									
홈 깊이	3㎜		3㎜		5㎜		5㎜		10㎜	
벗어난	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우	좌	우
균열폭	0.5㎝	0.5㎝	3.5㎝	0.3㎝	2.5㎝	0.3㎝	3.0㎝	1.0㎝	0.0㎝	0.0㎝

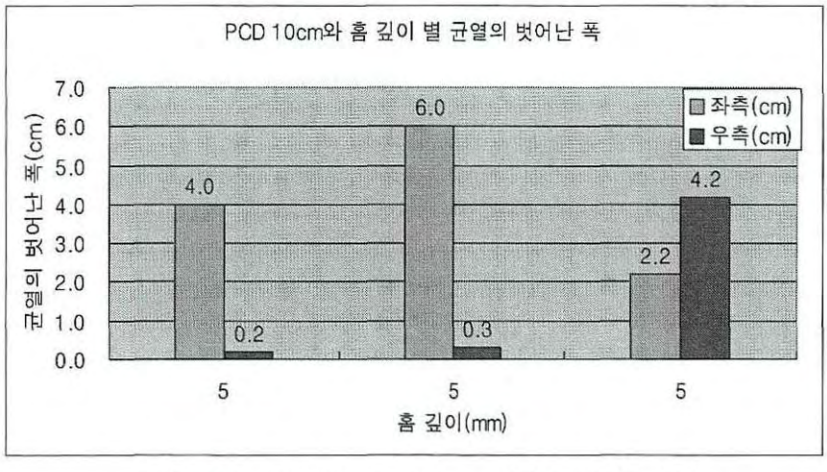


그림 101. P.C.D h=10cm 좌/우 균열 변위

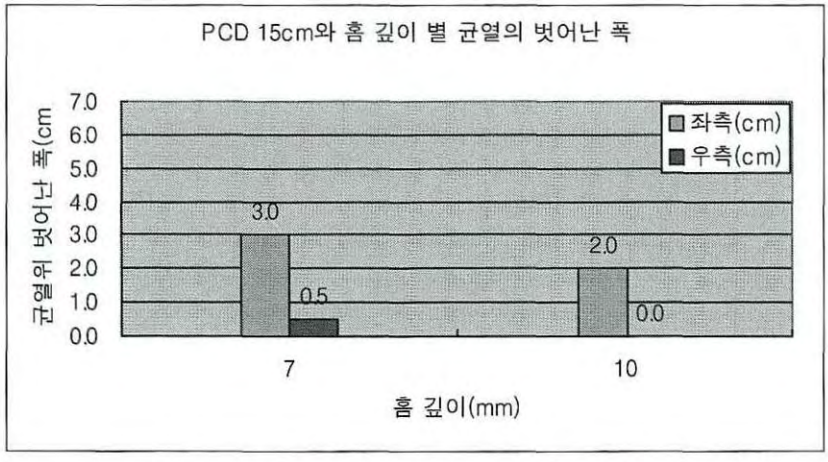


그림 102. P.C.D h=15cm 좌/우 균열 변위

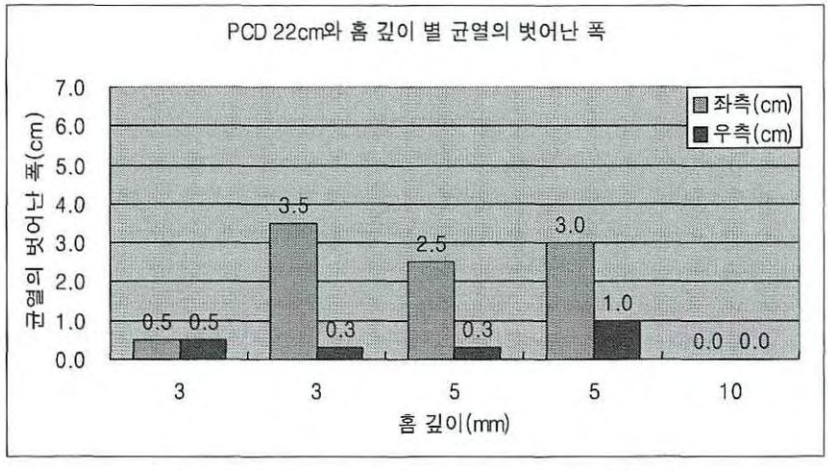


그림 103. P.C.D h=22cm 좌/우 균열 변위

1차년도 시험포장 결과, 유도 균열의 균일한 정도는 홈을 깊게 낼수록 그 성능이 우수하였으며, 홈을 낸 구간 내에서는 줄눈 균열 유도장치의 높이가 높을수록 효과가 더욱 향상되는 것으로 측정되었다. 또한 대부분의 줄눈 균열 유도장치를 사용한 구간에서, 균열 예상 기준선을 기준으로 보았을 때, 우측보다는 좌측으로 주로 균열이 벗어나는 것을 볼 수 있다. 이는 콘크리트 타설이 포장구간 우측에서 시작하여 좌측으로 진행되면서 타설된 콘크리트의 압력이 줄눈 균열 유도장치에 전달되어 좌측으로 휘어짐에 따라 균열 또한 좌측으로 벗어나는 것으로 판단된다. 이를 해결하기 위해서는 줄눈 균열 유도장치가 콘크리트로부터 받는 압력을 최소화 시켜야 하므로, 콘크리트가 줄눈 균열 유도장치에 압력의 영향을 적게 주면서 통과

할 수 있도록 빈 공간을 만들어주어야 할 것으로 판단된다.

(2) 유도균열의 형상 조사

줄눈 균열 유도장치의 균열 유도효과를 살펴보기 위하여, 2개의 차로 중 먼저 시공된 1차로에서 예비 시험을 수행한 결과, 줄눈 균열 유도장치만 설치하고 슬래브 표면에 균열유도 홈을 만들어주지 않은 경우에는, 줄눈 균열 유도장치의 상단으로부터 진전된 균열이 슬래브 상부 표면에서는 곡선 형태로 나타나, 향후 차량하중에 의한 국부적 파손이 쉽게 발생할 것으로 예상되고 이로 인한 장기적인 공용성 저하가 우려되었다.

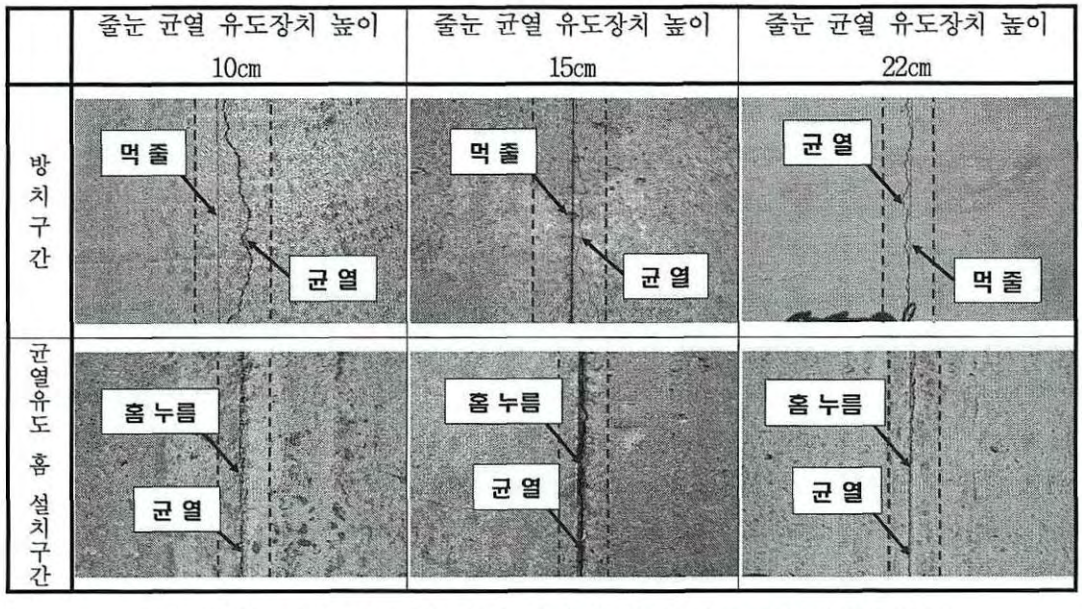


그림 104. 균열유도 홈 설치 유무에 따른 줄눈균열 형상 비교

2. FWD 장비를 이용한 처짐 특성 및 하중전달능력 조사

가. 측정방법

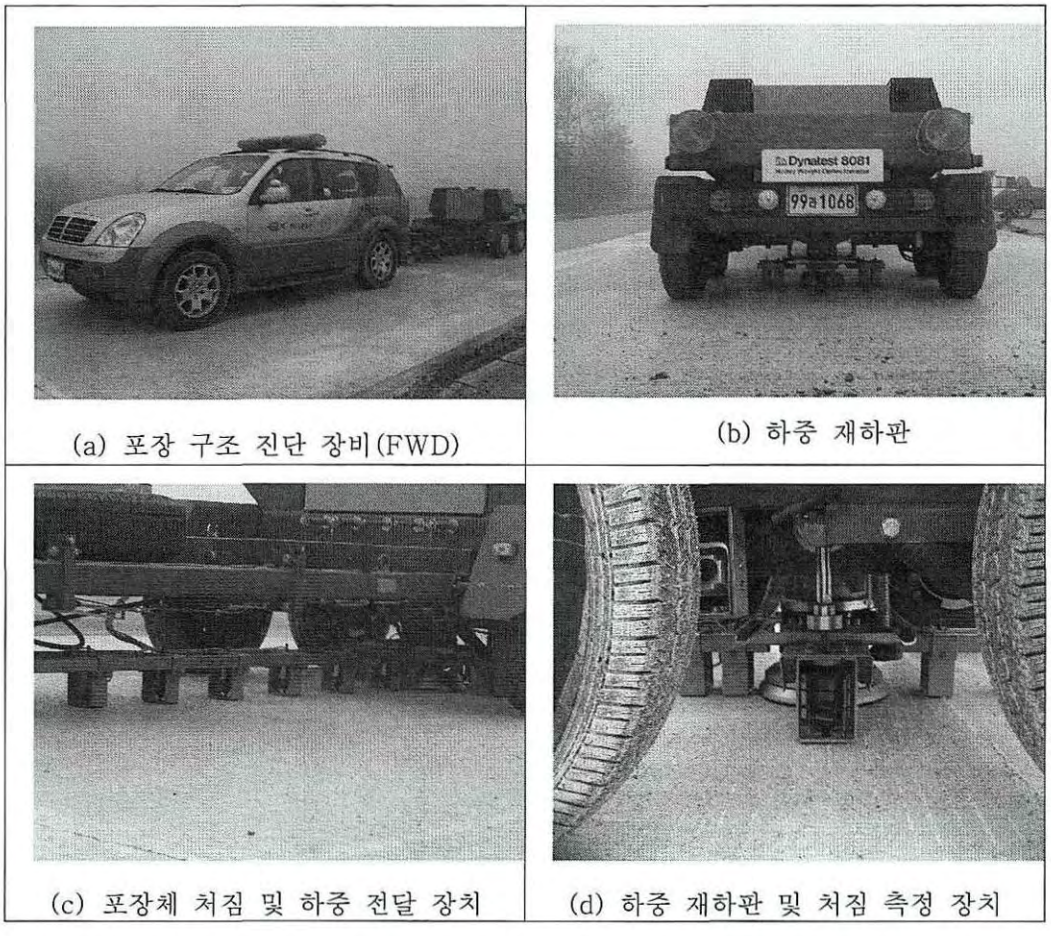
시험시공(09.10, 여주-양평 고속도로 건설현장)이 실시된 구간에 FWD를 사용한 하중전달율 및 처짐 조사를 그림 105~108과 같이 실시하였다. 포장의 하중전달율 조사는 슬래브의 중앙을 따라 수행하였고 줄눈을 사이에 두고 충격하중을 주었을 때 반대편에서 얼마만큼의 처짐이 발생하는지를 조사하여 간접적으로 하중분담율을 추정하였다. 처짐의 경우 3종류의 하중을 사용하여 하중단계에 따라 다른 처짐이 발생하였으나 100kN으로 환산 하였다. 하중은 단면별로 반복 측정하여 얻어진 값을 평균하여 사용하였다. 하중전달율 산정공식은 식 1과 같다.

$$\text{하중전달율}(\%) = W_{UL} \times 100 / W_L \qquad (2)$$

여기에서, W_{UL} : 줄눈에서 하중이 가해지지 않은 부분의 처짐

W_L : 줄눈에서 하중이 가해진 부분의 처짐

포장구조진단기 조사는 11시 40분 부근에 시작하여 약 30분간 진행되었다. 시험은 차량의 진행방향으로 슬래브 중앙 및 줄눈 처짐을 측정하였고 그림 105와 같으며 10개의 슬래브에 반복하였다. 10개 슬래브 가운데 처음 3개 슬래브의 줄눈에는 줄눈유도장치가 설치되었고 나머지는 일반적인 시공방법을 사용하여 시공되었다. 그림 5에서 원으로 표시된 부분은 하중 재하 지점으로 재하 지점의 중심에서부터 차량진행방향으로 처짐 센서가 설치되어 처짐 형상을 얻을 수 있도록 되어있다.



(a) 포장 구조 진단 장비(FWD)　(b) 하중 재하판

(c) 포장체 처짐 및 하중 전달 장치　(d) 하중 재하판 및 처짐 측정 장치

그림 105. 포장 구조 진단 장비 전경

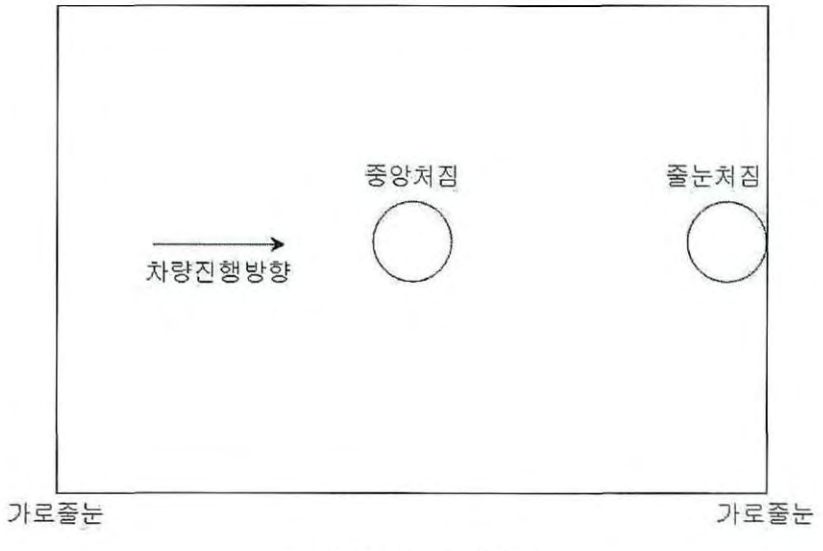


그림 106. 시험방법

나. 측정결과

포장구조진단기를 이용한 시험결과는 표 18과 같이 정리되며, 그림 107~109와 같다. 줄눈 균열 유도장치가 설치된 부분은 1~3슬래브의 줄눈으로 줄눈처짐, 중앙처짐 및 하중전달율의 결과를 볼 때 큰 차이를 나타내지는 않는 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 2007년도 시험시공 결과와 다소 차이를 나타내는 것으로 당시 시험결과는 전반적인 하중전달율의 양상은 다웰, 무다웰, JCI의 순서로 높게 나타났고 줄눈 처짐의 경우 다웰 구간이 가장 낮고 무다웰 및 JCI 구간이 높게 나타났다. 이러한 차이는 시험시공 구간에 대한 시험이 줄눈유도가 충분하게 되지 않은 상태에서 수행되었을 가능성과 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈에 하중전달 장치가 설치된 점 때문으로 판단된다. 다만 다웰이 설치되어 있는 6번 슬래브의 경우 타 슬래브에 비해 줄눈 처짐이 크게 나타나고 하중전달율이 낮게 나타났는데 이것은 유도된 줄눈의 간격이 넓어 골재 맞물림에 의한 하중전달 효과가 감소되었을 가능성이 있는 것으로 판단되었다.

표 18. 시험시공구간 포장구조진단기 시험결과

슬래브번호	줄눈처짐 ($\times 10^{-6}$m)	중앙처짐 ($\times 10^{-6}$m)	하중전달율 (%)
1	163	159	91
2	162	146	92
3	166	147	92
4	164	145	90
5	157	136	92
6	228	148	79
7	133	132	89
8	125	111	91
9	132	116	91
10	135	121	91

* 표에 나타낸 줄눈 및 중앙 처짐 값은 100kN에 대한 환산 처짐

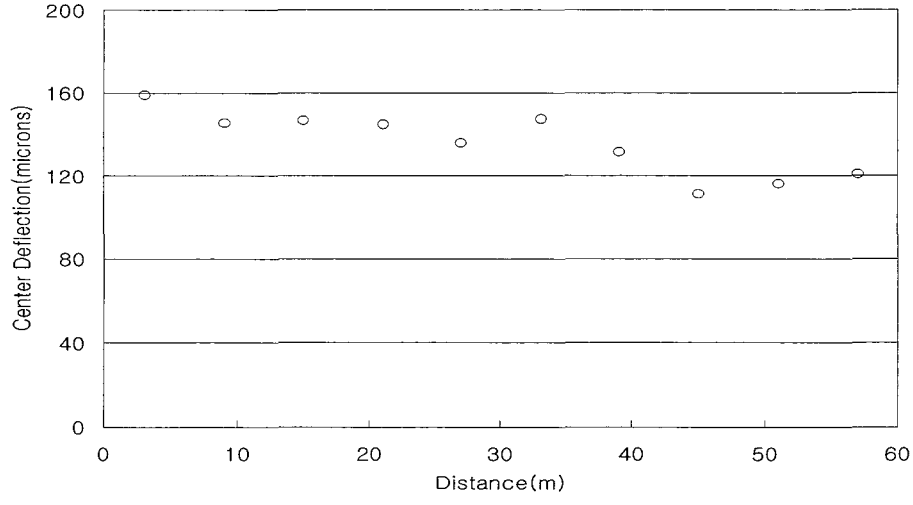


그림 107. 슬래브 중앙의 처짐 양상

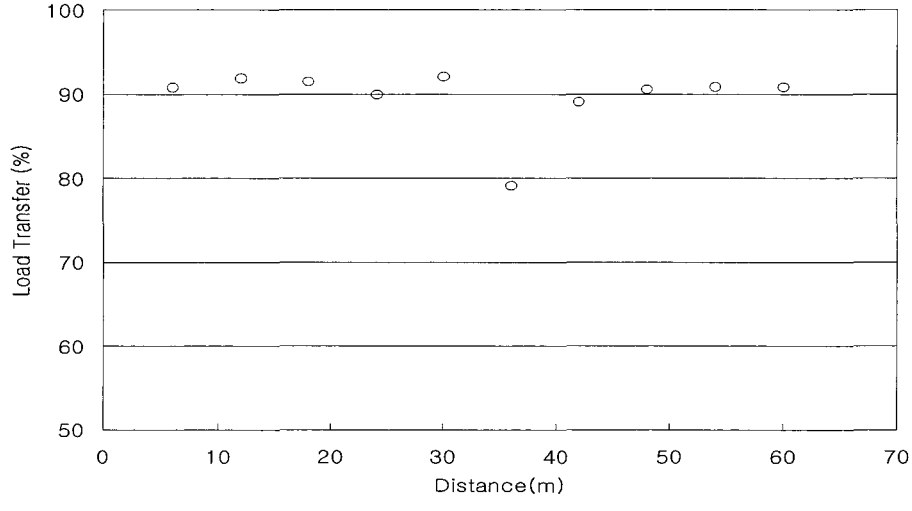


그림 108. 줄눈의 하중전달율 양상

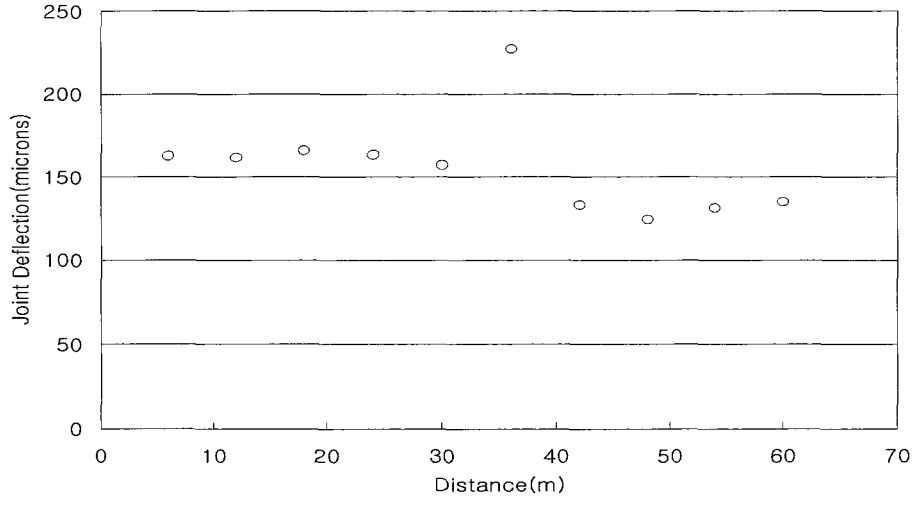


그림 109. 줄눈의 처짐 양상

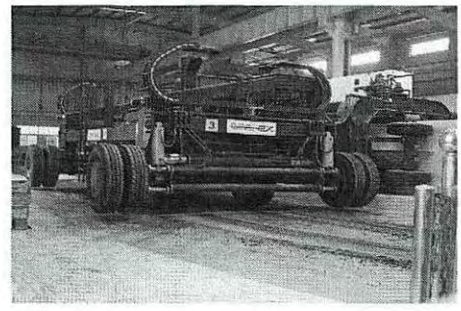
3. 포장가속시험기 시험시공

가. 개요

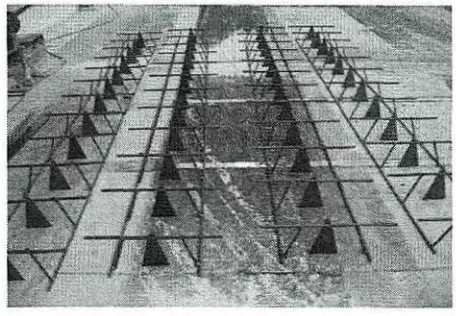
줄눈 균열 유도 장치를 시공한 콘크리트 포장체의 공용성을 평가하고자 포장가속시험기를 이용하여 실제 차량 하중(총 하중 36 ton)과 유사한 실물 차량 시스템으로 그림 110(a), (b)과 같이 수행하였다. 줄눈 유도 장치가 시공된 콘크리트 포장체와 줄눈부에 실제 차량 하중 통과 실험을 통하여 발생할 수 있는 특이성을 분석하였다. 줄눈 균열 유도장치는 그림 110(c)과 같이 Type Ⅱ형을 선정하여 설치하였다. 줄눈 균열 유도장치가 설치되는 포장면은 그림 110(d)에서 보는 것과 같이 미리 포장 두께만큼 절삭하였고 하부 층에 고정시켜 설치하였다. 절삭된 포장면은 그림 110(e)에서 보는 것과 같이 포장층과 하부층에 비닐 분리막을 설치하였다. 줄눈 균열 유도 장치와 분리막이 설치된 단면에 그림 110(f)와 같이 콘크리트를 타설한 후 인력으로 시공하였다. 타설이 완료된 콘크리트 포장면은 그림 110(g)와 같고, 그림 110(h)와 같이 양생을 실시하였으며 양생 상태를 점검하기 위하여 계측 센서를 설치하였다.



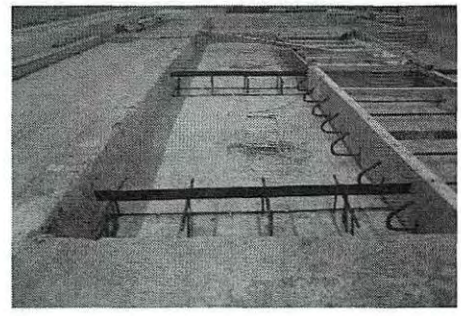
(a) 포장가속시험기



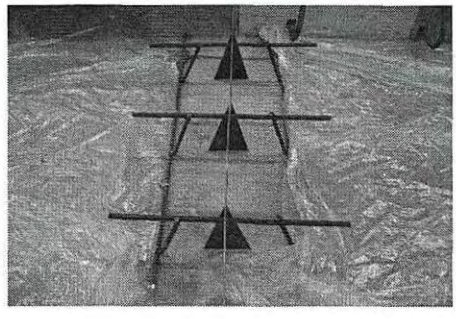
(b)그림 포장가속시험기 차륜부



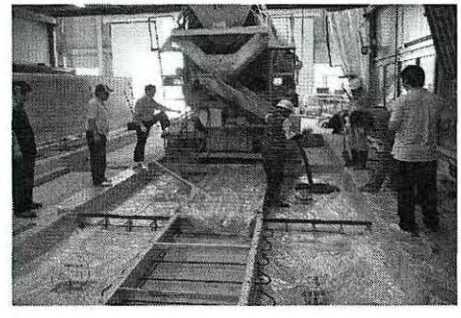
(c) 줄눈 균열 유도 장치



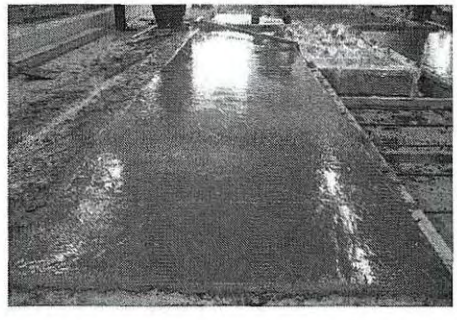
(d) 줄눈 균열 유도 장치 설치



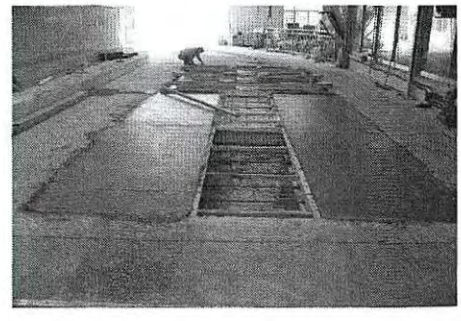
(e) 분리막 설치



(f) 콘크리트 포장 타설



(g) 콘크리트 포장 타설

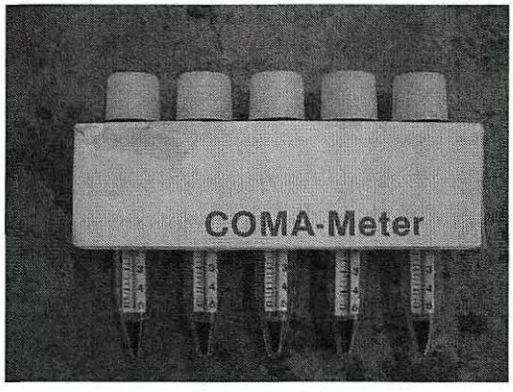


(h) 초기 양생 및 줄눈 유도

그림 110. 포장가속 시험기 시공 절차

나. 계측기 설치

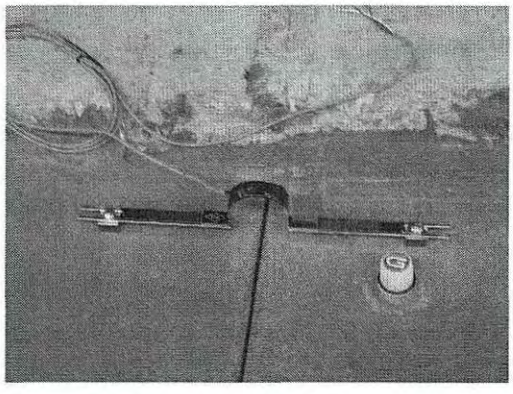
본 시험시공 구간에는 콘크리트 타설 전에 콘크리트의 초기 강도를 추정하기 위하여 그림 111(a)와 같은 강도 추정센서(COMA-METER)를 그림 111(b)와 같이 설치하였고, 줄눈부 거동을 측정하기 위하여 그림 111(c)와 같은 변위 게이지(CRACK GAUGER: PI-5-20)를 줄눈부에 설치한 후 계측을 실시하였다.



(a) 양생 진행 추정 센서



(b) 양생 진행 추정 센서 설치



(c) 균열 게이지 및 양생 센서



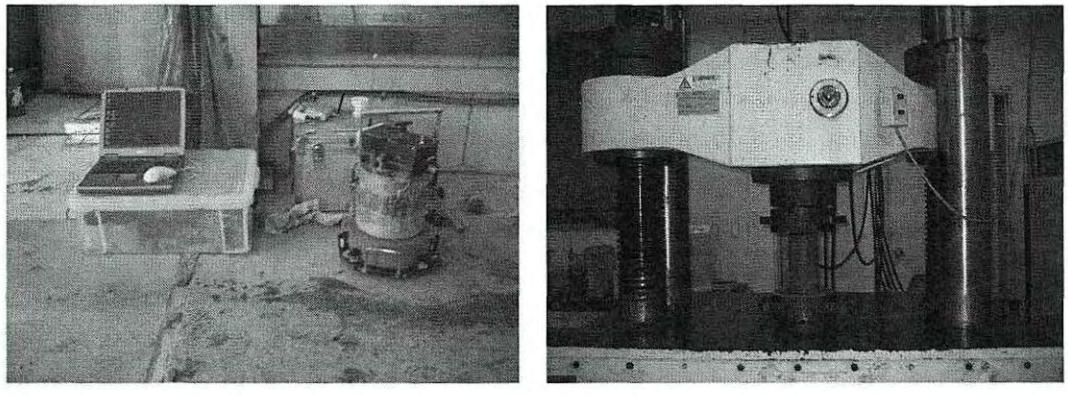
(d) 균열 게이지 계측

그림 111. 포장가속시험 계측기 설치

다. 콘크리트 포장배합 및 시공

포장 가속시험기 시험을 위한 포장 배합에는 굵은 골재 크기가 25mm이고 28일 압축강도가 30 MPa인 일반 레미콘을 적용하였다. 레미콘 배합에는 시멘트

65%, 고로슬래그 25% 및 플라이애시 10%가 혼합된 제품이 사용되었다. 콘크리트 포장 타설시의 슬럼프는 12cm 이고, 공기량은 그림 112(a)과 같은 장비를 사용하여 4%가 측정되었다. 초기 압축강도 특성을 분석하기 위하여 그림 112(b)와 같이 강도 측정을 실시하였다.



(a) 콘크리트 공기량 측정 (b) 초기 강도 추정 압축강도 측정

그림 112. 시험용 콘크리트 공기량 및 강도 측정

라. 초기 계측 평가

줄눈부 거동을 측정하기 위하여 변위 게이지(CRACK GAUGER: PI-5-20)를 콘크리트 포장 타설 후 약 6시간이 경과된 시점에 설치한 후 계측을 실시하였다. 줄눈 1지점과 줄눈부 2지점은 그림 23에서 보는 것과 같이 7월23일 18:02부터 7월 27일 07:33분까지 특이한 거동을 보이지 않아 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈부에 유도 균열이 발생하지 않은 것을 알 수 있었다. 포장가속시험기에서 콘크리트 포장 타설 후 초기 5일 동안 계측을 통하여 초기 양생 중에는 줄눈 균열 유도 장치에 의해 유도 균열은 발생하지 않았으며, 이와 같은 현상은 포장 가속시험기 내에 온도 변화가 일정하고 시험시공 단면의 길이가 작고 포장면의 좌·우측의 구속에 의한 것으로 판단된다. 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 줄눈부는 양생 완료 후 포장가속시험기가 작동된 후 주기적인 관찰을 통하여 유도 균열 발생 여부를 조사할 예정이다.

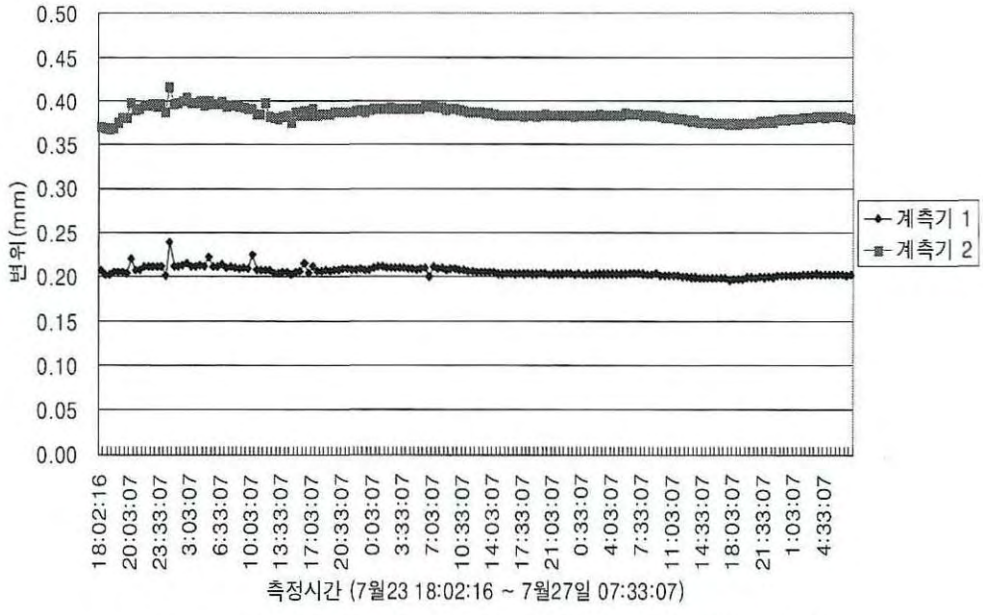


그림 113. 줄눈 유도 장치 설치 줄눈부 거동 특성

마. 포장가속시험 가동 후 추적조사

줄눈 균열 유도장치가 설치된 포장 위치는 그림 114에서 보는 것과 같이 4지점에 설치하였다. 포장가속시험기의 차륜이 통과한 지점은 그림 114에서 보는 것과 같이 변색되어 있는 것을 알 수 있다.

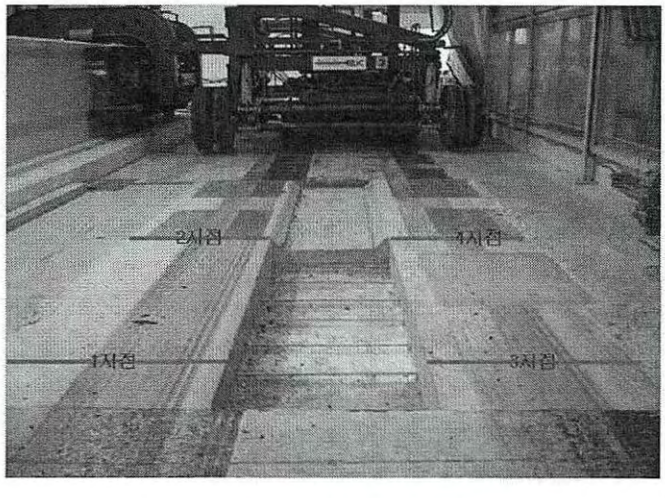


그림 114. 줄눈 균열 유도장치 시공위치

(1) 포장가속 시험기 1차 운행 후 공용성 평가

줄눈 균열 유도 장치가 설치된 단면에 대한 포장가속 시험시기 1차 운영 후 공용성 평가를 실시하였다. 1차 공용성 평가는 포장가속시험기가 4,918회 운행한 2009년 8월 5일에 육안에 의해 실시하였다. 줄눈 균열 유도 장치 그림 115 (a)~(c)에서 보는 것과 같이 1, 2, 3 지점에서 특이한 변화는 관찰되지 않았다. 그림 115 (d)에서 보는 것과 같이 4지점의 일부 줄눈부에서는 탈리 현상이 발생한 것으로 조사되었다.

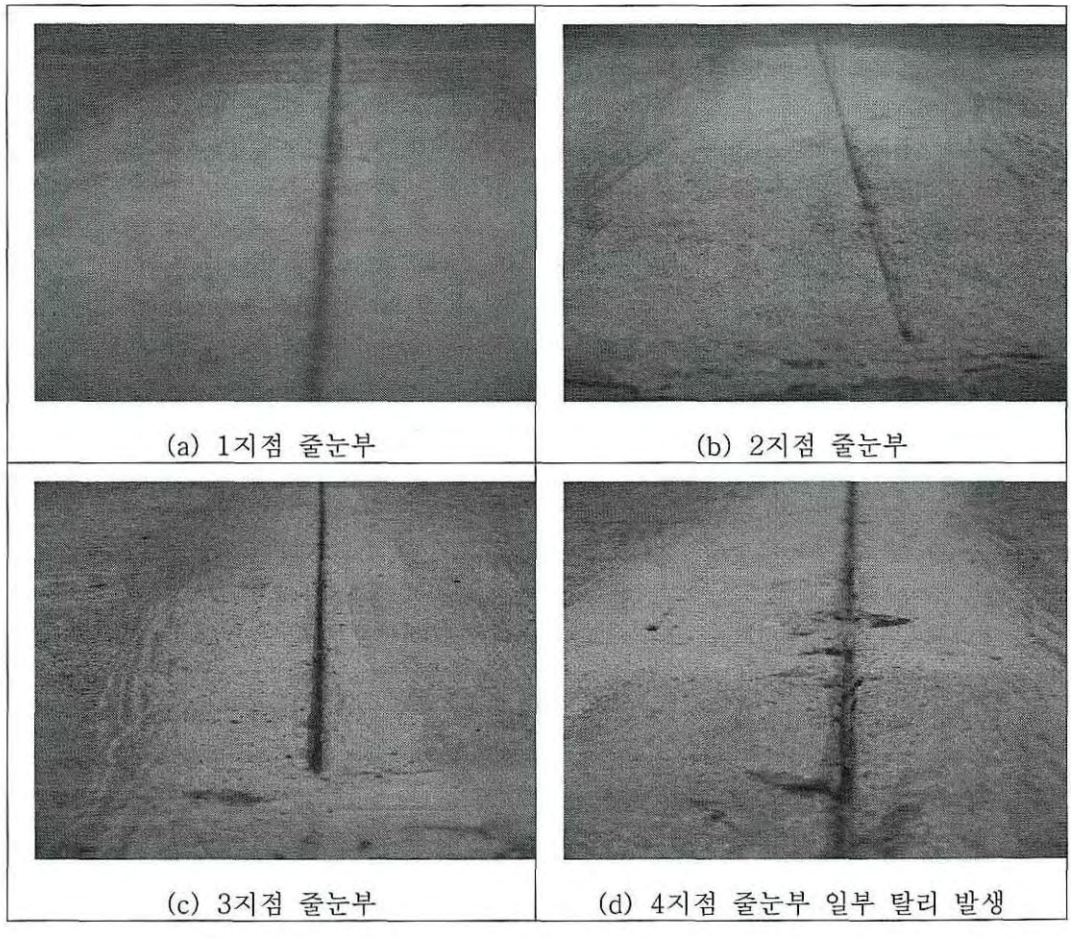
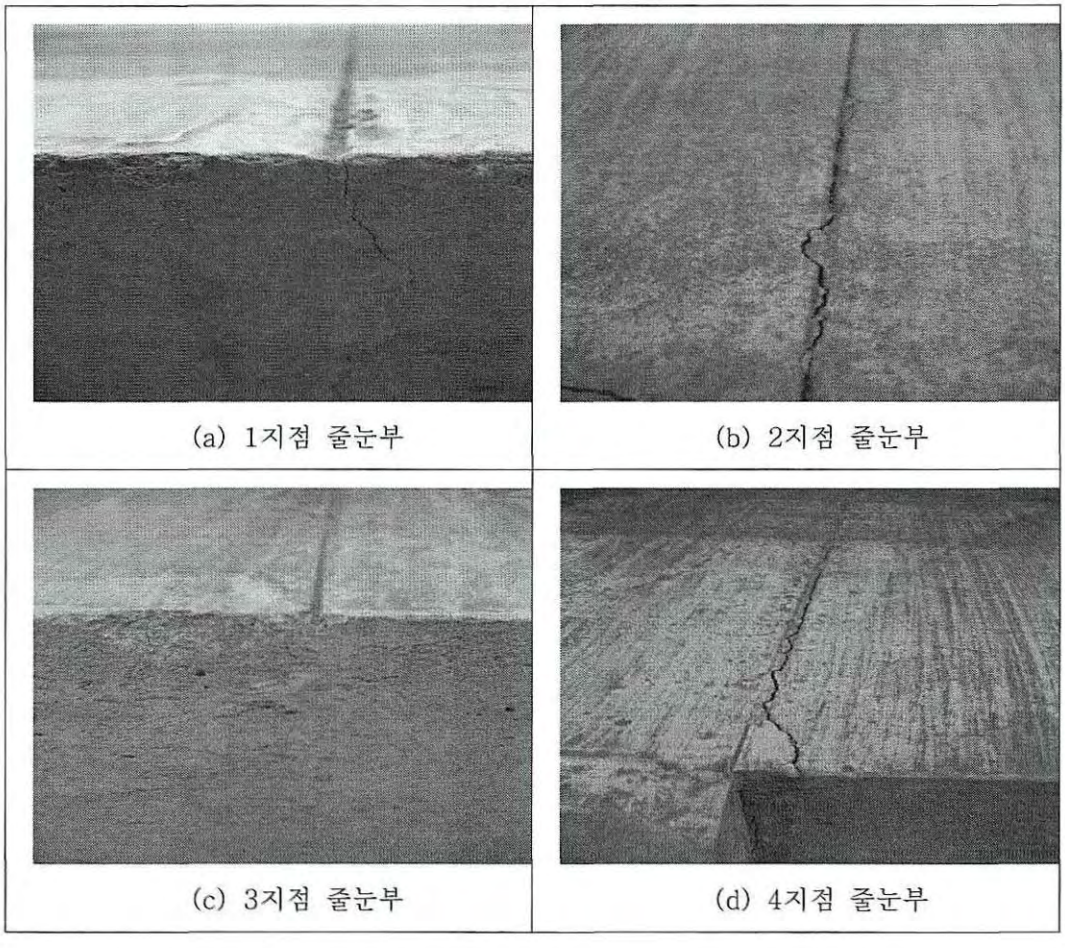


그림 115. 포장가속시험 줄눈부 형상(1차 공용후)

(2) 포장가속 시험기 2차 운행 후 공용성 평가

줄눈 균열 유도 장치가 설치된 단면에 대한 포장가속 시험시기 2차 운영 후 공용성 평가를 실시하였다. 2차 공용성 평가는 포장가속시험기가 20,918회 운행한

2009년 10월 12일에 육안에 의해 실시하였다. 2차 운행 후 그림 116 (a), (b) 및 (d)에서 보는 것과 같이 줄눈 균열 유도 장치 1, 2, 4 지점에서 유도 균열이 발생한 것으로 관찰되었으며, 그림 116 (c)에서 보는 것과 같이 3지점에서는 유도 균열이 발생하지 않은 것으로 조사되었다.



(a) 1지점 줄눈부 (b) 2지점 줄눈부

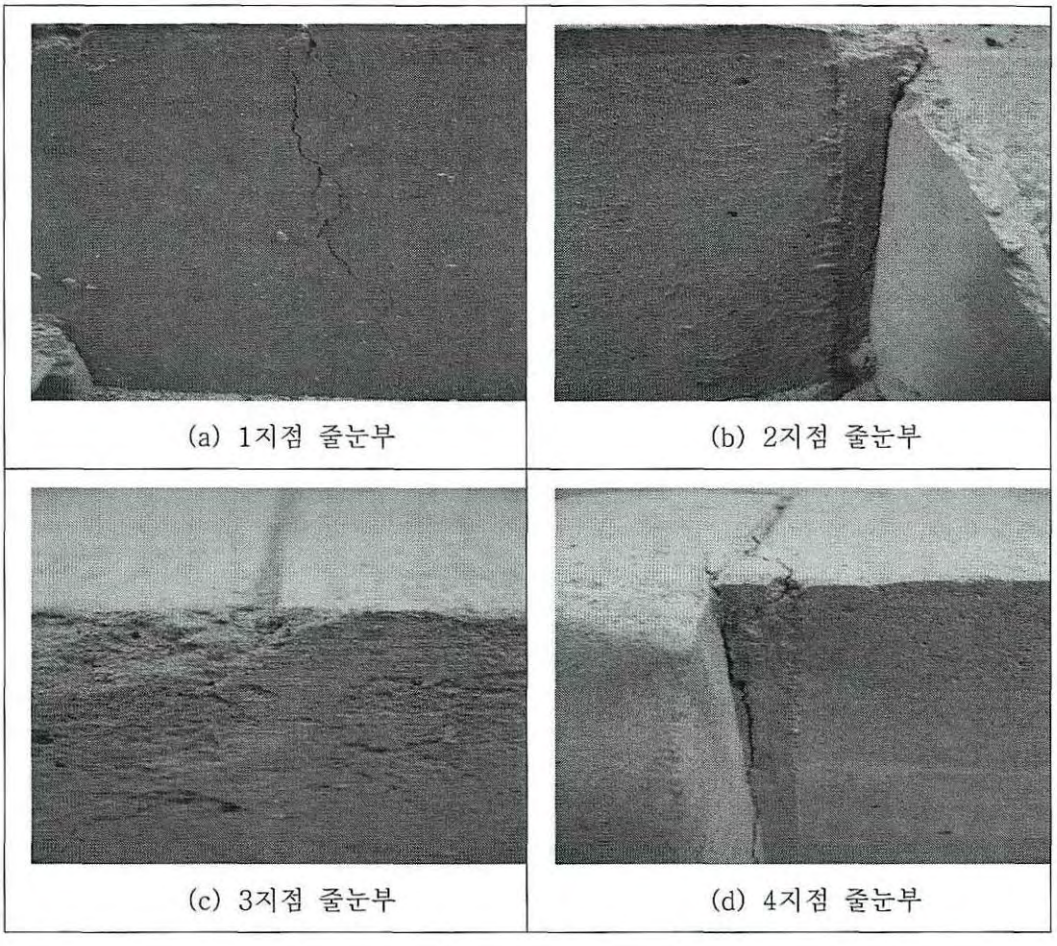
(c) 3지점 줄눈부 (d) 4지점 줄눈부

그림 116. 포장가속시험 줄눈부 형상(2차 공용후)

(3) 포장가속 시험기 3차 운행 후 공용성 평가

줄눈 균열 유도 장치가 설치된 단면에 대한 포장가속 시험시기 3차 운행 후 공용성 평가를 실시하였다. 3차 공용성 평가는 포장가속시험기가 31,526회 운행한 후 2009년 11월 23일에 육안에 의해 실시하였다. 3차 운행 후 그림 117 (a), (b) 및 117 (d)에서 보는 것과 같이 줄눈 균열 유도 장치 1, 2, 4 지점에 발생한

유도 균열은 2차 조사 때보다 좀 더 진행한 것으로 관찰되었으며, 그림 35에서 보는 것과 같이 3지점에서는 유도 균열이 발생하지 않은 것으로 조사되었다.



(a) 1지점 줄눈부 (b) 2지점 줄눈부

(c) 3지점 줄눈부 (d) 4지점 줄눈부

그림 117. 포장가속시험 줄눈부 형상(3차 공용후)

바. 결론

포장가속시험기를 이용한 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 콘크리트 포장 단면에 대한 공용성 평가를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 포장가속시험기에서 콘크리트 포장 타설 후 초기 5일 동안 계측을 통하여 초기 양생 중에는 줄눈 균열 유도 장치에 의해 유도 균열은 발생하지 않았으며, 이와 같은 현상은 포장 가속시험기 내에 온도 변화가 일정하고 시험

시공 단면의 길이가 작고 포장면의 좌·우측의 구속에 의한 것으로 판단된다.

(2) 포장가속시험기의 3회의 운행 후 추적조사를 통하여 2차 운행 후 줄눈 균열 유도 장치 1, 2, 4 지점에서 유도 균열이 발생한 것으로 관찰되었으며, 3지점에서는 유도 균열이 발생하지 않은 것으로 조사되었다. 3차 운행 후 2차 운행 때 보다 유도 균열의 폭은 진전된 것으로 조사되었다.

상기와 같은 결과를 통하여 포장가속시험기를 통한 실험에서 줄눈 균열 유도 장치에 의한 포장 단면은 초기 양생 중일 때보다는 포장가속시험기를 운행 한 후 유도 균열이 발생하는 것을 알 수 있어 차륜 하중에 의해 줄눈 균열 유도 장치가 설치된 단면에서 유도 균열이 발생하는 가능성이 높은 것으로 판단된다.

3절 시험포장 결과를 이용한 구조해석

1. 콘크리트 슬래브와 보조기층 마찰시험

가. 연구배경 및 목적

콘크리트포장은 콘크리트 타설 직후의 초기 거동에 의해서 포장체의 수명 및 품질이 결정되어진다고 해도 과언이 아니다. 그리고 콘크리트포장에서의 건조수축은 콘크리트 포장의 초기거동 및 공용성에 상당한 영향이 있는 것으로 밝혀지고 있다. 재료특성의 이해부족과 시공 환경조절의 실패 등으로 인해 예상 줄눈 절삭시간보다 일찍 발생하는 건조수축 균열은 여러 가지 문제점을 일으킨다. 이러한 콘크리트포장의 건조수축에 의한 균열발생은 그림 118과 같은 메커니즘에 의해 설명될 수 있다.

콘크리트포장은 시공초기 건초수축과 수화열의 하강으로 인하여 슬래브 수축이 발생하며 이러한 수축을 콘크리트 슬래브와 보조기층의 마찰로 인한 저항력인 마찰력이 발생한다. 콘크리트슬래브와 보조기층 사이에서 작용하는 마찰력으로 인해 콘크리트 내부에 인장응력이 발생하게 되며 포장에 사용된 콘크리트의 인장강도를 넘어설 때 균열이 발생하게 된다.

현재 국내 고속국도 포장의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트포장의 경우 보조기층과 콘크리트 슬래브 사이에 마찰저항을 최소화 하기 위해 분리막(폴리머시트)을 설치하여 시공하고 있다. 하지만 국내 콘크리트포장의 설계법으로 사용되고 있는 AASHTO Guide에서도 분리막 설치에 따른 마찰력 기준이 명확히 제시되어 있지 않으며, 국내 도로관련 대표 기준서인 도로설계기준(건설교통부, 2005) 및 도로설계요령(한국도로공사, 2001)만이 분리막 설치 방법에 대해 간단하게 언급하고 있다.

도로설계기준에서는 JCP와 JRCP에서 슬래브 바닥과 보조기층과의 마찰저항을 감소시키기 위해 분리막을 설치하고, 린콘크리트와 연속 철근 콘크리트 설계 시 분리막은 설치하지 않도록 기술하고 있다. 도로설계요령에서는 분리막으로 보통 폴리에틸렌필름(Polyethylene film)를 사용하고, 필름을 콘크리트 포설전 설치하거나

타이바(Tie bar)를 둔 뒤틀림 줄눈을 두는 무근콘크리트포장에서는 120㎛두께가 적합한데, 다만 필름에 손상이 없도록 설치되어야 한다고 기술하고 있다. 또한 필름의 겹이음폭은 300㎜, 세로 방향100㎜ 이상 이어야하고, 강우 시에도 빗물이 필름 아래로 스며들지 않도록 겹이음을 하도록 제시하고 있다.

본 연구에서는 이를 바탕으로 다양한 보조기층 조건에서 마찰력 측정 시험을 통해 보조기층별 콘크리트 슬래브의 마찰저항 특성을 분석하여 구조해석 프로그램의 입력변수를 정량화하고 이를 3차원 구조해석 프로그램으로 수치해석하여 분리막 설치 효용성 검증 및 기준을 제시할 계획이다.

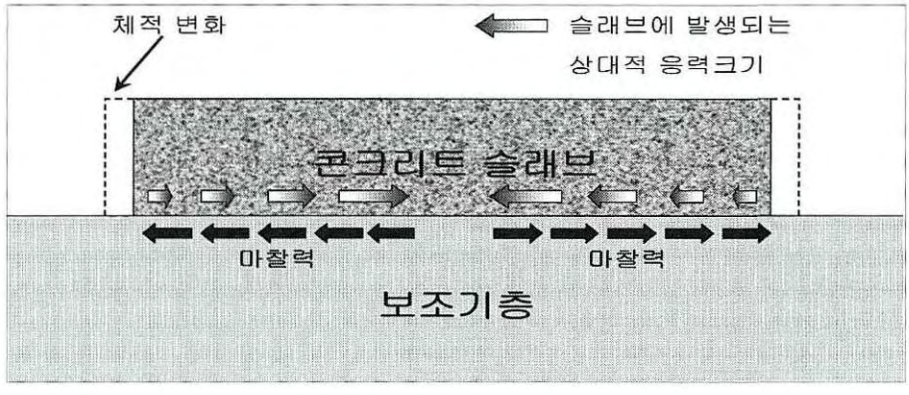


그림 118. 콘크리트 슬래브와 보조기층간의 거동

나. 마찰력 문헌조사 및 이론

마찰력에 대한 기존 문헌을 조사해본 결과, Teller와 Bosely (1930), Friberg(1954), 그리고 Timms (1963)은 하중재하 횟수에 따른 마찰 저항 변화를 관찰하였다. Teller(1935), Timms(1963), 그리고 Wesevich et al(1987)는, 슬래브 두께를 변화 시키며 마찰 저항의 변화를 확인하였다. Goldbeck (1924), Teller and Boseley (1930), 그리고 Timms (1963)은 접촉면의 습도변화에 따른 효과를 시험하였다. Stott과 Wesevich(1963), McCullough와 Burns(1987)는 슬래브와 보조기층사이의 전단 파괴면의 위치를 확인했다. Stott (1963), Timms(1963), Lee and Ludena (1981), 그리고Jones, Darter, Littlefield (1968)은 하중재하 속도에 따른 마찰 저항의 변화를 확인하였다.

마찰력은 물체가 서로 접촉하여 운동할 때 그 접촉면 사이에 작용하며, 서로 다른

물체의 표면에 평행하게, 운동방향과 반대 방향으로 작용한다. 따라서 마찰력은 물체가 무거울수록(수직항력이 클수록), 물체와 바닥면 사이가 거칠수록(마찰계수가 클수록) 커진다. 그리고 이상적인 상태에서 마찰력은 접촉 면적과 거의 무관하고 접촉하는 물질의 종류와 밀접한 관계가 있다.

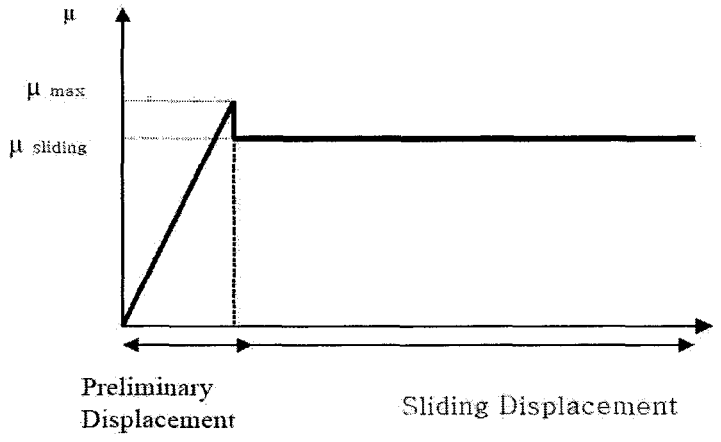


그림 119. 수평변위에 대한 마찰력의 변화

(1) 마찰계수(μ)

바닥 위를 운동하고 있는 물체는 바닥면에서 운동방향의 반대 방향으로 운동마찰력이 작용한다. 또한, 바닥 위에 정지해 있는 물체를 수평 방향의 힘으로 밀어도 미는 힘이 마찰력보다 작으면 물체는 움직이지 않는다. 이때 미는 힘에 저항하여 바닥면에서 물체에 미는 힘과 반대 방향의 정지 마찰력이 작용한다. 마찰력의 크기는 물체가 면을 수직으로 미는 힘의 크기에 비례해서 커지는데(식 1), 그 비례상수는 두 물체의 접촉면의 상태와 운동 상태 혹은 정지 상태에 있는가에 의해 결정되며 접촉면의 크기나 물체의 빠르기에는 거의 영향을 받지 않는다. 이러한 비례상수를 마찰계수라 하는데 운동마찰계수와 정지마찰계수로 구별하며, 전자의 값은 후자의 값보다 작다.

$$\mu = F / N = \text{Constant} \qquad (3)$$

여기서 μ는 마찰계수, F는 마찰력, N은 미끄러지려는 물체의 무게이다.

(2) 최대정지 마찰계수(μmax)

정지하고 있는 물체가 힘을 받아 움직이려는 순간의 마찰계수이고 어떤 물체를 움직이기 위해서 가장 큰 힘이 들어가는 시점이다.

(3) 운동마찰계수(μsliding)

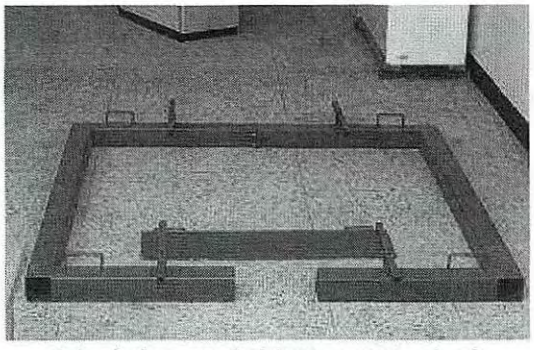
운동하고 있는 물체에 작용하는 마찰계수이며, 물체가 등속운동 또는 등가속도 운동을 하는 경우이다.

다. 마찰시험(Push-off Test) 개요

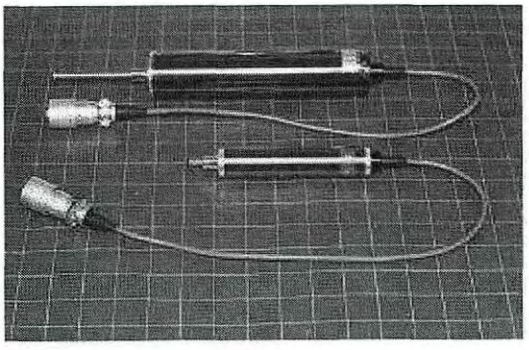
본 연구에서는 충남 당진에 위치한 (주)장헌산업 공장부지 내에서 마찰시험을 실시하였다. 그림 3과 같이 반력벽 좌·우측면에 각각의 보조기층을 모사할 수 있는 7개의 section을 제작하였으며 그 중 2개 구간에서 예비시험을 실시하였다. 예비시험구간을 포함하여 총연장은 14m이며, 2008년 4월 15일부터 19일까지 시험을 실시하였다. 마찰시험은 각각의 보조기층위에 콘크리트슬래브를 모사하는 시편을 제작하여 일정한 수평하중을 적용했을 때 발생하는 수평변위를 측정하는 것이다.

수평하중을 재하하기위해 유압잭과 감속기를 사용하였으며 최대정지마찰력 이상의 수평하중을 콘크리트 슬래브시편에 적용하기 위하여 고정식 반력벽을 설치하였다. 또한, 하중재하에 따른 콘크리트 슬래브시편의 수평거동을 측정하기 위하여 4개의 LVDT를 설치하여 각각의 변위를 측정하였다. 이때 수평하중의 편심을 방지하기 위한 방안으로 철판을 덧대었으며 콘크리트 슬래브시편의 정중앙에 유압잭을 위치시켰다. 마찰시험에 사용된 콘크리트 슬래브시편의 크기는 100× 75× 20㎝ (가로× 세로× 높이)이다.

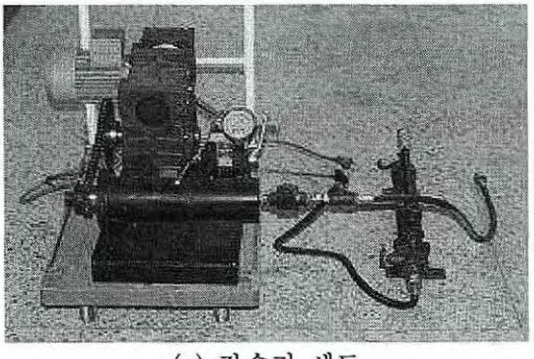
라. 시험 장비



(a) 가이드 프레임(180 * 180cm) 및 덧댐 철판(두께 : 13mm)



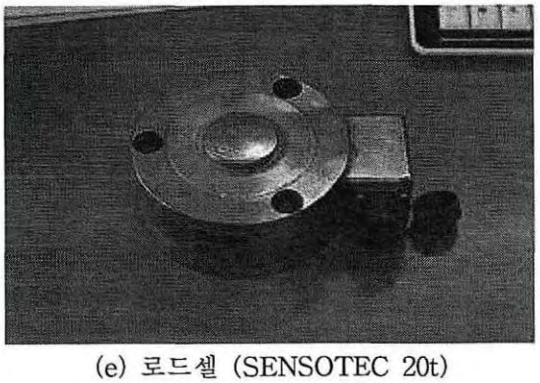
(b) LVDT (KTML CDP-50) 4EA



(c) 감속기 세트



(d) 유압실린더 (ENERPAC 20t)



(e) 로드셀 (SENSOTEC 20t)



(f) 데이터 로거 (Kyohwa EDX-1500A)

그림 120. Push-off Test 장비

(1) 수평변위계(LVDT)

수평변위계는 감속기에 의해 서서히 하중을 가하였을 때 콘크리트슬래브의 수평방향 변위를 매우 정밀하게 측정하기 위해 하중방향 및 반대방향 슬래브 측면에 4개를 설치하였다. 이는 하중이 중심부에 제대로 가해지는지 모니터링하기 위한 부수적인 목적도 있다.

(2) 감속기

감속기는 건조수축과 슬래브 내부의 온도 저하에 의한 수축을 모사하기 위해 시간당 4㎝를 움직일 수 있도록 별도의 유압잭을 제작하여 시험에 사용하였다.

(3) Data logger

시험 장비를 설치한 후 자료의 수집은 Data logger를 이용하여 자동 수집을 하였다. 자동으로 수집되는 자료는 수평하중(Load cell) 및 수평변위(LVDT)를 기록하는데 사용하였다.

(4) 비닐막

비닐막은 슬래브와 보조기층 사이에 발생하는 마찰력을 줄여 콘크리트슬래브가 구속을 적게 받으며 수축할 수 있도록 하기 위해 포장용 폴리에틸렌필름을 사용하였다.

마. 시편 및 보조기층별 배합설계

(1) 콘크리트 슬래브 시편

표 19. 콘크리트 슬래브시편 배합표

구분	설계 기준 강도 (kgf/cm^2)	굵은 골재 최대 치수(mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m^3)					
							W	C	잔골재	굵은골재	혼화제*	
기계	$F_{bk}28=45$	32	4~6	4~6	45.1	38.1	147	326	692	1,122	0.963	0.30
인력	$F_{bk}28=45$	32	8	4~6	44.1	39.4	161	365	700	1,078	1.095	0.30

* AE제는 고성능 AE 감수제를 사용하고 있음 고속도로 콘크리트포장 배합기준 (2006)

(2) 린 콘크리트 보조기층

표 20. 린콘크리트 보조기층 배합표

구분	설계 기준 강도 (kgf/cm^2)	굵은 골재 최대 치수(mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	단위량(kg/m^3)					
							W	C	잔골재	굵은골재	혼화제*	
빈배합	f7=50	40	-	1~2	79.1	32.4	125	158	695	1,449	-	

고속도로 콘크리트포장 배합기준 (2006)

(3) 아스팔트 보조기층

표 21. 아스팔트 보조기층 배합표

Composition of Mix Used in Bondbreaker		
Sieve	Total Percent Passing	
12.5mm(1/2inch)	100	95-100
4.75mm(No. 4)	58.3	55-90
2.37mm(No. 5)	42.5	35-50
600㎛(No. 30)	23.1	18-30
300㎛(No. 50)	15.6	10-21
150㎛(No. 100)	10.3	6-16
75㎛(No. 200)	6	4-8
Bitumen(% of Total Mix)	5.8	
% Air	4.2	
Flow(0.1mm)	32	

Suh, Lee & Kang (2001)

(4) 자갈(쇄석) 보조기층 - 고속도로 전문시방서

① 재료 : 부순돌, 자갈, 모래, 스크리닝스, 슬래그 기타 감독자가 확인한 재료 및 혼합물

표 22. 자갈(쇄석)보조기층 입도기준

호칭입경 (mm)	공칭 입경에 대한 체 통과중량 백분율(%)								
	100	75	50	40	20	5	2	0.4	0.08
SB-1		100	-	70-100	50-90	30-65	20-55	5-25	0-8
SB-2			100	80-100	55-100	30-70	20-55	5-30	0-8

표 23. 자갈(쇄석)보조기층 품질기준

구분	시험방법	기준
액성한계(%)	KS F 2303	25 이하
마모감량(%)	KS F 2503	50 이하
소성지수(%)	KS F 2303	6 이하
수정 CBR(%)	KS F 2320	50 이상
모래당량(%)	KS F 2340	25이상

② 다짐

- 장비 : 탠덤 롤러(Tandem Roller), 진동 롤러(Vibration Roller) 타이어 롤러(Tire Roller)
- 기준 : · 최대 건조밀도 95%이상 다짐(KS F 2312 E 다짐법)
  · 최적 함수비의 ± 2% 이내 유지

③ 마무리 (평탄성)

- 3m 직선자를 이용해 도로 중심선에 평행 또는 직각으로 측정 시 요철의 크기가 1cm 이내일 것

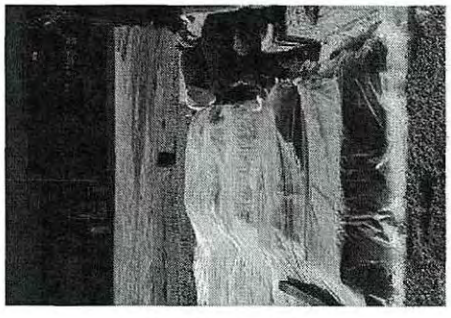
바. 시험 절차



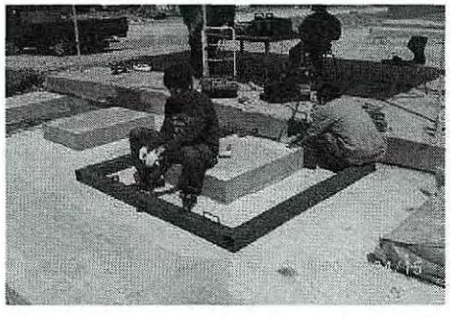
(a) 거푸집 설치



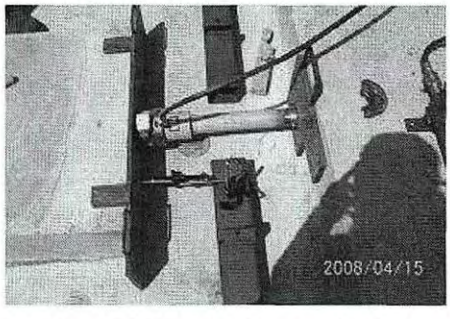
(b) 콘크리트 슬래브 타설



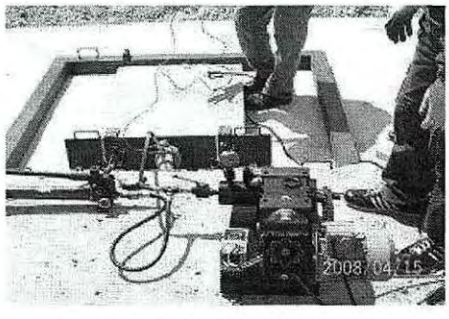
(c) 28일 양생



(d) 가이드 프레임 및 LVDT 설치



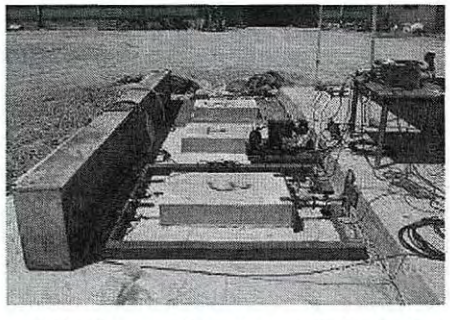
(e) 유압실린더 및 로드셀 설치



(f) 감속기에 유압실린더 연결



(g) 측정장비와 데이터로거 연결



(h) 감속기 가동 후 데이터 수집

그림 121. Push-off Test 절차

수평변위계(LVDT)를 이용하여 콘크리트슬래브의 수평변위를 기록하며, 측정시에는 수평변위계(LVDT)의 용량과 유압잭의 용량을 생각하여 수평변위계(LVDT)의 용량이 부족하지 않도록 하고 흔들리지 않도록 단단히 고정시킨다. 로드셀을 설치할 때에는 콘크리트 슬래브의 중앙에 설치하여 편심이 생기지 않도록 하는 것이 바람직하며, 반력벽을 설치할 때 감속기가 미는 힘에 의해 뒤로 밀리지 않도록 해야 한다.

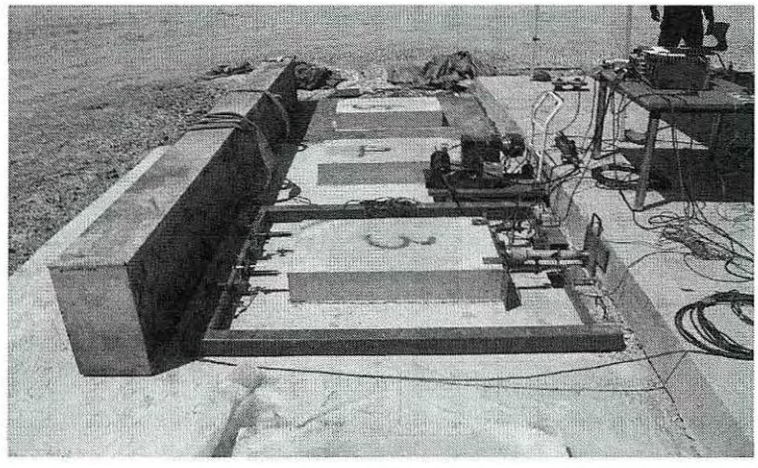


그림 122. 이동식 반력벽 설치

사. 시험결과 및 분석

보조기층 위에 설치된 슬래브가 미끄러질 때까지 수평하중을 가하는 방법으로 보조기층 별로 4번씩 수평하중과 슬래브 수평변위를 측정하고 그 결과를 분석하였다. 보조기층 종류에 따라 측정되고 분석된 실험 결과는 다음과 같다.

(1) 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층

분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 경우 1차 하중 재하 시 강성이 매우 큰 린 콘크리트 보조기층과 콘크리트 슬래브가 부착되어 하중 재하 장치의 재하 범위인 90kN의 하중에도 접촉면에서의 파괴가 발생하지 않아 슬래브가 미끄러지지 않았다. 따라서 중장비로 슬래브를 밀어 린 콘크리트 보조기층으로부터 콘크리트 슬래브를 강제로 분리한 후 실험을 계속할 수 있었다. 린 콘크리트가 매

우 높은 강성을 지녔음에도 불구하고 슬래브의 파괴면을 확인해 본 결과 슬래브의 면을 따라서 파괴되었는데, 이는 접촉면에서의 부착력 보다 슬래브 및 린 콘크리트 보조기층 내부의 재료 간의 결합력이 더 강하였기 때문으로 판단되었다. 슬래브를 사이에 두고 마주보는 반력벽을 번갈아 사용하면서 실시한 2차와 3차 실험 결과, 강제로 분리된 슬래브와 보조기층 사이의 최대 마찰계수는 그림 123과 같이 각각 0.67과 0.64로 측정되었다. 4차 실험에서 측정된 습윤 상태에서의 최대 마찰계수는 0.64로서 건조 상태와 비교 시 거의 유사한 값을 나타냈다.

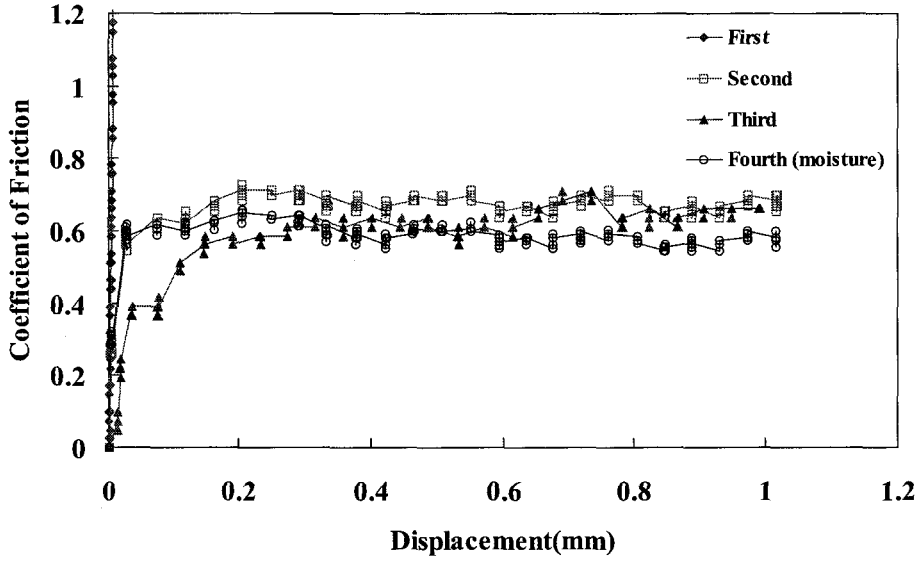


그림 123. 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층 마찰실험 결과

(2) 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층

분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층에서 1차 하중 재하시의 최대 마찰계수는 그림 124에서 보듯이 0.91이었고 이때의 수평변위는 0.05mm였다. 2차 및 3차 실험에서는 최대 마찰계수가 각각 0.38과 0.41로 1차 실험에서보다 낮게 나타났다. 분리막이 존재함에도 불구하고 린 콘크리트 보조기층과 슬래브 사이가 어느 정도 맞물려 있기 때문에 1차 실험에서는 최대 마찰계수가 크게 나타났지만 분리된 후에는 최대 마찰계수가 낮아졌고 동일한 실험을 반복하여도 거의 동일한 마찰계수를 나타내는 것으로 조사되었다. 최대 마찰계수가 발생할 때까지 발생한 변위는 1차 하중 재하시보다 상당히 큰 것으로 나타났다. 습윤 상태를 재현한 4차 실

험에서는 2차 및 3차 실험의 결과에 비해 약간 낮은 수준의 마찰계수를 보였으며 최대 마찰계수는 0.35로 나타났다. Goldbeck(1924)이 흙과 모래 등의 낮은 강성을 갖는 보조기층 재료에 대해 마찰저항 실험을 실시하여 얻은 결과와 달리 분리막이 깔린 린 콘크리트 보조기층은 습윤 및 건조 상태에 큰 영향을 받지는 않는 것으로 판단되었다. 분리막을 사용하지 않은 경우와 비교하였을 때 최대 마찰계수는 크게 줄어들고 이때의 수평변위는 크게 증가하는 것으로 나타나 분리막의 효과가 큰 것으로 판단되었다.

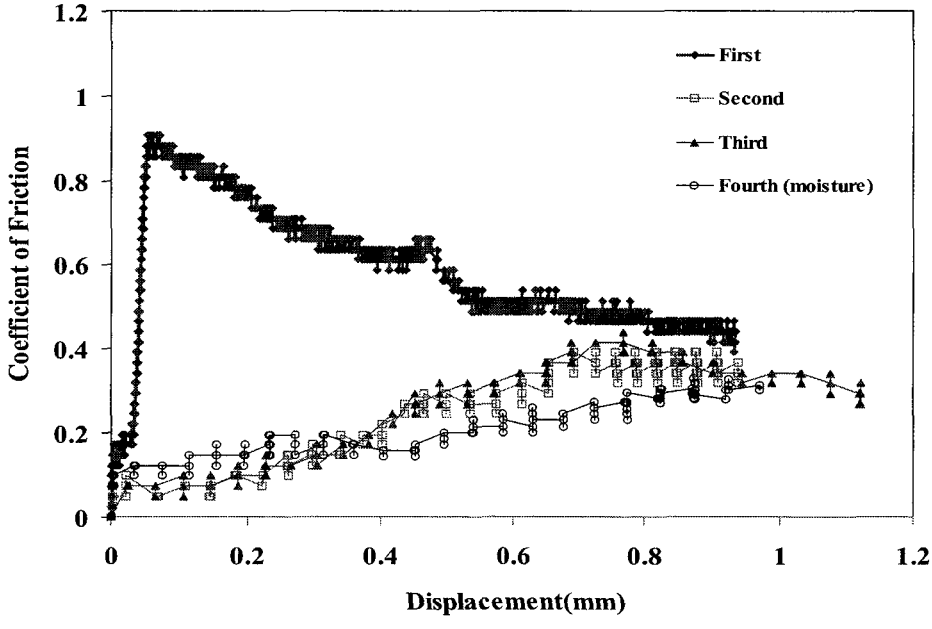


그림 124. 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층 마찰실험 결과

(3) 분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층

분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층에서의 1차 하중 재하 시 최대 마찰계수는 그림 125와 같이 3.35로서 매우 컸으며, 이때의 수평변위는 0.23mm로 측정되었다. 2차 및 3차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 모두 2.57로 동일하게 측정되었으며, 강제로 분리된 린 콘크리트 보조기층보다 높은 마찰계수를 나타낸 이유는 콘크리트 슬래브의 하부와 쇄석 보조기층 표면의 골재가 서로 맞물려 있었기 때문으로 판단되었다. 최대 마찰계수가 발생될 때의 수평변위도 상대적으로 컸는데 이는 슬래브가 미끄러지기 전까지 슬래브와 맞닿아 있는 골재가 함께 밀렸기 때문으

로 추정되었다. 습윤 상태에서의 최대 마찰계수는 1.69로서 건조 상태에서 낮아졌는데 이는 콘크리트 슬래브와 쇄석기층 사이에 침투한 수분이 골재 간의 결합력 내지는 다짐도를 떨어뜨렸기 때문으로 판단되었다.

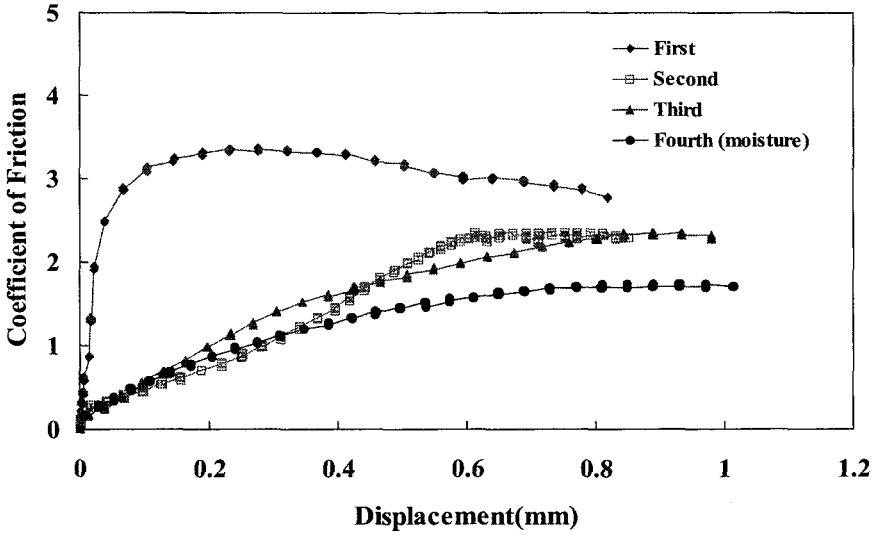


그림 125. 분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층 마찰실험 결과

(4) 분리막을 사용한 쇄석 보조기층

분리막을 사용한 쇄석 보조기층에 대하여 1차 하중 재하 시 최대 마찰계수는 그림 126과 같이 0.76이었으며 이때의 수평변위는 0.11mm로 측정되었다. 2차와 3차 실험에서 측정된 최대 마찰계수는 각각 평균 0.44, 0.42로서 1차 하중 재하 시 측정된 최대 마찰계수의 거의 절반 수준으로 감소된 것을 확인 할 수 있었다. 분리막을 사용하지 않은 경우보다 최대 마찰계수는 감소하여 린 콘크리트 보조기층의 경우와 동일한 경향을 나타내었으나 최대 마찰계수 발생 시의 수평변위는 감소하여 린 콘크리트 보조기층의 경우와 반대의 경향을 나타내었다. 그 원인에 관해서는 보다 면밀한 조사와 분석이 필요한 것으로 판단되었다. 습윤 상태에서 측정된 최대 마찰계수는 0.41로서 건조 상태에서보다는 약간 감소하였다.

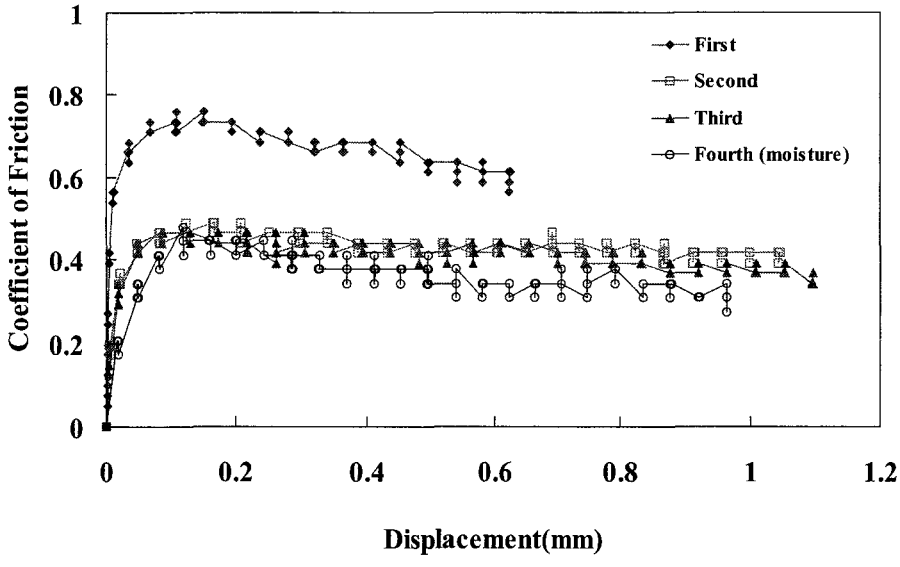


그림 126. 분리막을 사용한 쇄석 보조기층 마찰실험 결과

(5) 분리막을 사용하지 않은 아스팔트 보조기층

아스팔트 보조기층에서 1차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 그림 127에서 보듯이 5.23이었으며 이때의 수평변위도 0.44mm로서 모두 매우 크게 측정되었다. 2차 실험에서는 측정 장치의 오류로 인하여 최대 마찰계수에 도달하기 전에 측정이 중단되었지만 3차 실험과 결과가 유사하여 3차 실험 결과만을 사용하여도 무관할 것으로 판단되었다. 2차와 3차 실험에서 측정된 최대 마찰계수는 1차 하중 재하 시보다 약간 작았으나 이때의 수평변위는 훨씬 큰 것으로 측정되었다. 아스팔트 보조기층은 린 콘크리트 보조기층과는 달리 1차 하중 재하 후에도 콘크리트 슬래브와 완전히 분리되지 않고 아스팔트 보조기층 내부에서 불규칙한 파괴면이 생성되면서 일부는 콘크리트 슬래브와 부착되어 육안으로 보기에는 수평하중에 의하여 슬래브가 밀리면서 슬래브 부근의 아스팔트가 찢어지는 것처럼 관찰되었다. 2차 및 3차 하중 재하 시 측정된 결과는 1차 실험에서의 경향과 크게 차이가 나지는 않았으며 단지, 슬래브가 미끄러질 때의 수평변위에서만 차이를 구별할 수 있었다. 습윤 상태에서 아스팔트 보조기층의 최대 마찰계수는 3.76으로 측정되어 다른 보조기층과는 달리 습윤 및 건조 상태에 비교적 큰 영향을 받는 것으로 판단되었다.

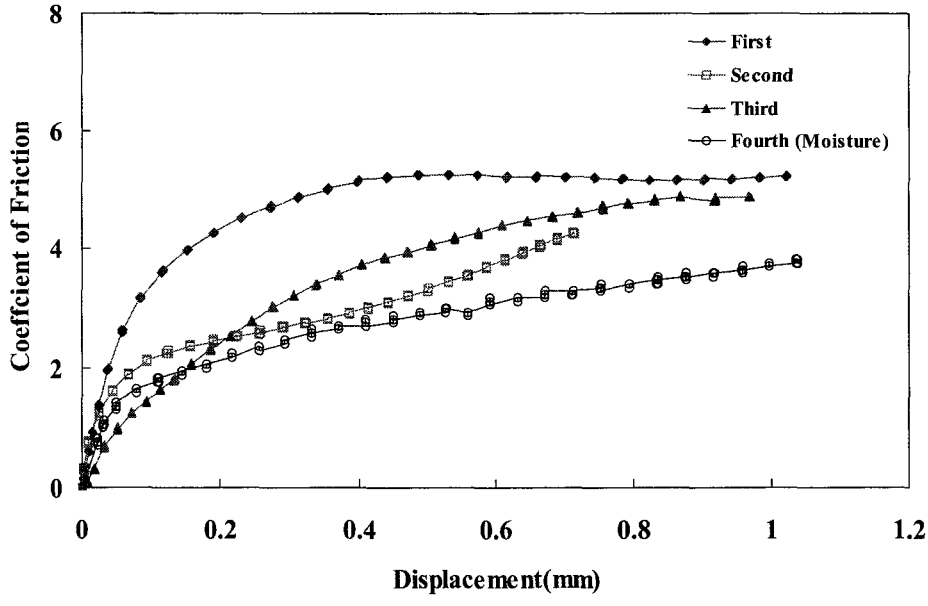


그림 127. 분리막을 사용하지 않은 아스팔트 보조기층 마찰실험 결과

(6) 실험 결과의 비교

표 24와 그림 128은 1차 하중 재하, 안정화 상태, 그리고 습윤 상태에서의 최대 마찰계수와 최대 마찰계수시의 수평 변위를 비교한 것으로 여기서 안정화 상태란 1차 하중 재하로 슬래브와 보조기층이 분리된 이후 수 차례의 하중이 가해져 마찰저항 거동이 유사해진 상태를 말하며, 본 연구에서는 2회 하중재하 시부터 안정화 상태라고 가정하였다. 1차 하중 재하 시의 최대 마찰계수는 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트, 아스팔트, 분리막을 사용하지 않은 쇄석, 분리막을 사용한 린 콘크리트, 그리고 분리막을 사용한 쇄석 보조기층 순으로 큰 것으로 나타났고, 안정화 상태에서는 아스팔트, 분리막을 사용하지 않은 쇄석, 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트, 분리막을 사용한 쇄석, 그리고 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층의 순으로 큰 것으로 조사되었다. 분리막을 사용한 경우 안정화 상태에서의 최대 마찰계수는 1차 하중 재하 시의 40%에서 50%까지 크게 감소한 반면, 분리막을 사용하지 않은 경우에는 10%에서 30%의 감소효과만 발생하였다. 아스팔트 보조기층과 분리막이 설치되지 않은 쇄석 보조기층과 같이 건조 상태에서의 최대 마찰계수가 컸던 보조기층에서 슬래브와 보조기층 사이가 습윤 상태가 되었을 때의 최대 마찰계수 감소효과가 컸으나 건조 상태에서 최대 마찰계수가 작았던 다른 보조

기층에서는 감소효과가 작은 것으로 나타났다.

표 24. 보조기층 별 최대 마찰계수 및 수평변위

보조기층 종류	1차 하중 재하		안정화 상태		습윤 상태	
	최대 마찰 계수 (μ_{max})	μ_{max} 일 수평 변위 (mm)	최대 마찰 계수 (μ_{max})	μ_{max} 일 수평 변위 (mm)	최대 마찰 계수 (μ_{max})	μ_{max} 수평 변위 (mm)
린 콘크리트 (분리막 미사용)	-	-	0.68	0.20	0.64	0.21
린 콘크리트 (분리막 사용)	0.91	0.05	0.41	0.72	0.35	0.88
쇄석 (분리막 미사용)	3.35	0.23	2.57	0.71	1.69	0.92
쇄석 (분리막 사용)	0.76	0.11	0.42	0.12	0.41	0.12
아스팔트	5.23	0.44	5.05	0.88	3.76	1.07

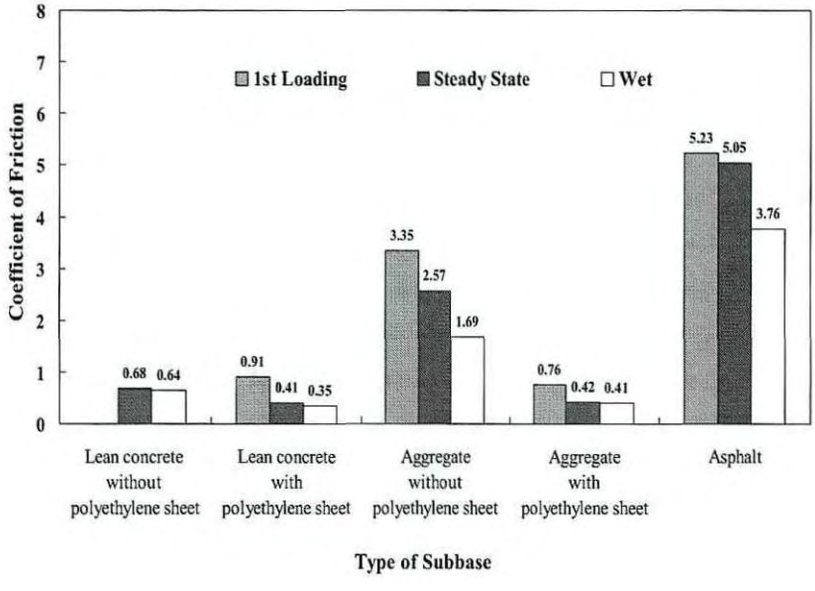


그림 128. 보조기층 별 현장실험 마찰계수 결과 비교

(7) 실험 결과의 적절성 검토

현장실험 결과의 적절성을 검토하기 위해 본 연구에서 수행된 실험 결과를 그림 13과 같이 Wesevich 등(1987)의 실험 결과와 비교하였다. Wesevich 등은 Texas주 Houston에서 10월에 100mm와 200mm 두께의 슬래브를 대상으로 노상, 석회 안정처리 보조기층, 아스팔트 안정처리 보조기층, 시멘트 안정처리 보조기층, 그리고 아스팔트 보조기층에서 1차 하중만을 재하하여 실험을 수행하였다. 본 연구에서 수행한 현장실험은 200mm 두께의 슬래브에 대한 실험이므로 200mm 두께의 슬래브에 대한 1차 하중 재하 결과를 비교하였다.

분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 경우 큰 수평하중에도 불구하고 슬래브와 보조기층 사이가 분리되지 않아 그림 129와 같이 최대 마찰계수를 측정할 수 없었는데 이는 Wesevich 등의 실험 중 린 콘크리트와 물성이 비슷한 시멘트 안정처리 보조기층에서의 결과와 동일했다. 현장에서 측정된 아스팔트 보조기층의 최대 마찰계수는 Wesevich 등의 실험 결과와 유사한 결과를 나타냈으나, Wesevich 등의 실험이 본 연구의 현장실험보다 낮은 기온에서 수행되었으므로 최대 마찰계수에 이르기 전의 변위에 따른 마찰계수 변화율은 더 큰 경향을 나타냈다. 쇄석 보조기층의 최대 마찰계수는 Wesevich 등의 아스팔트 안정처리 보조기층 및 석회 안정처리 보조기층의 최대 마찰계수와 유사하거나 다소 컸으며 변위에 따른 마찰계수의 변화율도 안정처리 보조기층보다는 큰 경향을 나타냈다. 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층 및 분리막을 사용한 쇄석 보조기층의 최대 마찰계수는 Wesevich 등의 실험 결과 중 가장 낮은 최대 마찰계수를 보였던 노상보다 약 70% 가량 작았다. 재료 및 기상 등의 실험조건에 다소 차이가 있었음에도 불구하고 본 연구에서 수행된 현장실험 결과는 기존 연구 결과와 비교할 때 합리적인 경향을 나타내어 실험 결과의 적절성을 충분히 검증하였다고 판단되었다.

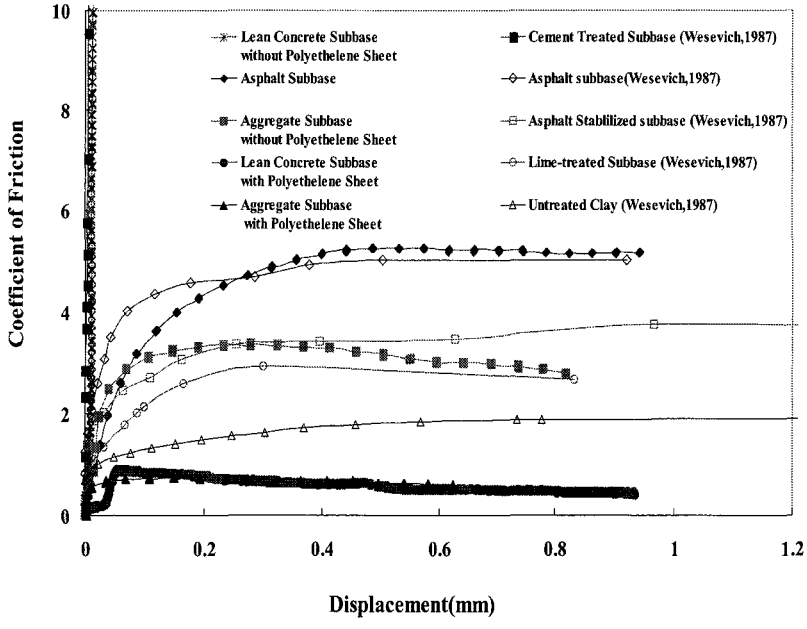


그림 129. 1차 하중재하 시의 실험결과와 Wesevich 등(1987)의 실험결과 비교

2. 현장시험 결과를 이용한 구조해석

가. 연구배경 및 목적

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 비선형성, 동적 특성 및 크리프 현상과 같은 시간 의존성을 고려할 수 있는 장점이 있다. 유한요소법이 먼저 발전된 분야는 항공공학 분야로 항공기 구조의 복잡화와 성능의 고속화 등 획기적인 발전으로 인해 항공기 구조해석의 탄성체 문제를 풀이하는 과정에서 많은 발전을 이루었으며, 1950 년대에 강성행렬이 유도되면서 급속히 체계화되었다. 그 후 여러 분야에서도 다양한 용도로 사용되기 시작했으며 포장 구조체를 해석하기 위한 유용한 도구로도 사용되고 있다.

이와 같은 이유로 줄눈, 철근 및 하중 전달 장치와 온도에 따른 영향으로 인해

복잡한 거동을 하는 콘크리트 포장의 경우 유한요소법이 많이 적용되고 있다. 처음에는 콘크리트 포장을 해석하기 위하여 판이론을 도입하였다. 즉, Plate on the Spring 이론으로써 슬래브는 판(plate)이나 쉘 요소(shell)를, 슬래브 이하의 하부구조는 탄성 스프링 요소(elastic spring element)를, 다웰바는 보 요소(beam element)를 사용하여 해석을 수행하였다. 이와같이 콘크리트포장의 유한요소 모형은 1차원, 2차원 및 3차원으로 만들어진다. 1차원 요소는 빔 요소와 같이 한 방향으로만 거동하는 경우(다웰바/타이바)를 모사하기 위해 사용된다. 반면 포장에 널리 사용되는 2차원 유한요소모형은 포장층을 모사하여 그 거동을 알아볼 수 있다. 하지만 2차원 유한요소모형은 해석시간이 짧은 큰 장점을 가지고 있음에도 불구하고 실제 포장거동에서 발생하는 비선형재료의 영향, 주행방향의 거동, 하중재하 위치의 제한 등에 의해 현장 공용성과 많은 차이를 나타내었다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 해석모형을 3차원으로 확장하여 최대한 실제 포장상태를 모사하면서 해석시간을 줄일 수 있는 방법들이 연구되고 있다. 자유로워 포장 해석 모형으로 가장 적합하다. 3차원 유한요소모형은 해석할 요소가 많아지는 문제로 인해 다른 모형들과는 달리 1980년대부터 포장의 해석에 사용되기 시작하였으며, 단축하중뿐만 아니라 복축 등 다양한 재하 간격 및 형태에 대하여 해석할 수 있다. 또한 하중이 포장의 가장자리에 작용하는 경우와 같이 기하, 하중, 재료특성 조건이 축대칭이거나 평면변형률이 아닌 경우에는 3차원 유한요소법이 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 3.7.6은 3차원 해석을 위한 포장 구조체 요소망 모델을 나타내고 있다.

본 연구의 목표 중 하나인 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시 및 분리막 사용 기준 제시하는데 있다. 유한요소법을 이용한 역학적 해석 모형을 개발함과 동시에 현장실험 결과를 이용하여 모형을 검증 및 보정함으로써 효율적인 단면 설계 및 시공 절차를 결정할 수 있다. 일반적인 콘크리트 포장 구조를 해석할 경우에는 Westergaard 나 Spangler 가 제안한 이론식이나 이를 근거로 개발된 포장 구조 해석 프로그램을 이용하여 포장체의 거동을 간략하게 확인할 수 있다. 하지만, 선행 연구자의 이론식은 슬래브와 보조기층사이의 마찰특성을 고려할 수 없어 이에 대한 정확한 해석 결과를 얻기 어렵다. 따라서 2차년도의 실험

중 콘크리트 슬래브와 다양한 보조기층 간의 마찰저항 시험의 결과를 이용하여 슬래브와 보조기층 사이의 마찰저항을 정량화 하였고, 이를 모사하기 위하여 3차원 유한요소 해석 프로그램 ABAQUS를 이용하여 마찰저항 실험 유한요소 모델링을 만들어 해석을 수행하고 이를 분석하였다.

나. 슬래브-보조기층 간 접촉면 모델링

현장에서 마찰저항 실험을 통해 얻은 마찰저항과 변위의 관계는 앞의 선형(Nonlinear) 형태이나 이 결과를 직접 설계 및 구조해석에 직접 반영하기에는 한계가 있다. 본 장에서는 슬래브-보조기층 사이의 접촉면 마찰 저항에 대하여 비선형 결과를 bilinear형태로 근사화하는 기존의 방법을 살펴보고 에너지 방법을 이용하여 bilinear화 하는 방안을 제시한다. 그리고 3차원 유한요소모델 프로그램으로 접촉면을 모델링하여 이 방법에 대하여 검증하였다.

(1) 기존 슬래브-보조기층 접촉면 모델

최근, 몇몇 연구자들은 슬래브와 보조기층(slab-subbase)사이가 모두 접촉된 상태에 대하여, 접촉면의 응력 및 변위의거동에 대해 아래 식 (4)와 같이 bilinear 형태의 함수로 근사화 하는 방법을제시하였다(13,14). 식 (4)는 그림 21의 line-②와 같이 나타낼수 있으며, 슬래브와 보조기층(slab-subbase)사이의 restraint slope인 k는 $\tau(x)/u(x)$로 정의된다.

$$\tau(x)=\begin{cases}\dfrac{\tau_0}{\delta_0}u(x) & if\,|u(x)|\le\delta_0\\ \tau_0 & if\,u(x)>\delta_0>0\\ -\tau_0 & if\,u(x)<-\delta_0<0\end{cases} \qquad (4)$$

여기서,

$\tau(x)$=x점에서의 슬래브 보조기층의 계면 마찰 저항력 (MPa)

slab-subbase interfacial friction restraint at x (MPa)

τ_0 = 계면 정상 상태 마찰 응력steady-state friction stress at interface(MPa)

δ_0 = τ_0에 대한 미끄러짐 또는 변위

slippage or displacement corresponding to τ_0 (mm)

$u(x)$ =평균 변위average displacement (mm)

Xin.D 등은CRCP의 슬래브-보조기층 접촉면 마찰 거동에 대하여 식(5)과 같은 선형 미분방정식을 제안하였고 Rasmussen & Rozycki는 식 (5)를 유한차분 법을 이용하여 현장결과를 bilinear형태의 함수로 근사화 하였다.

$$u(x)\frac{d^2u_c}{dx^2}-\left(\frac{b}{E_cA_c}\right)\tau_f=0 \qquad (5)$$

여기서,

u_c = 콘크리트 슬래브의 축 변위PCC axial displacement(mm)

x = 축 이동방향coordinate in direction of axial movement

b = 포장 두께pavement width(m)

E_c =콘크리트 슬래브 탄성계수(kPa)modulus of elasticity of PCC(kPa)

A_c = 콘크리트 슬래브 면적cross sectional area of pavement(m^2)

τ_f = 마찰저항력(kPa)restraint stress(kPa)

$u(x)$ = 평균 변위 average displacement (mm)

Davids et al(2000)이 개발한 줄눈콘크리트 포장 3차원 유한 요소해석 프로그램인 Everfe는 슬래브-보조기층사이의 접촉면이 bilinear interface 요소로 되어 져 있어, bilinear로 정량화된 값을 해석에 사용할 수 있다.

(2) 에너지 법을 통한 선형(bilinear) 근사화

Rasmussen & Rozycki가 식 (5)를 유한차분법을 이용해 식 (4)로 근사시킨 방법은 합리적이나, 매우 복잡한 과정과 많은 가정이 필요하다. 따라서 현장의 실험결과를 간단히 정량화를 하기 위해서 하중과 변위의 관계인 에너지 방법을 통해 선형(bilinear)으로 근사 시키는 방법을 제안한다. 현장에서 마찰저항 실험을 실시하는 동안 소요된 에너지에 대하여 이와 동일한 에너지가 유발하게 하는 선형(bilinear) 근사모형을 다음과 같이 제시하였다. 그림 130은 에너지방법을 이용하여 모델링하는 방법에 대하여 나낸 것이며, 표 25와 결과값이 계산되었다.

(가) 식 (6)과 같이 실험을 통한 에너지, E_{field}와 bilinear 근사 모델의 에너지, $E_{modeling}$는 같다 가정한다.

$$E_{field} - E_{modeling} = 0 \tag{6}$$

(나) 그림. 130에서 현장실험에 결과에 해당하는 line-①의 에너지는 아래 식 (7)을 수치 적분하여 얻을 수 있다. 여기서 δ'는 현장에서 τ_0에 해당하는 변위를 말한다.

$$E_{field} = \int_0^{\delta'} \tau(x)du \tag{7}$$

(다) 그림. 130에서 근사 모델인line-②의 에너지는 아래 식 (8)의 관계를 통해 얻을 수 있다. 여기서 δ_0는 근사 모델의 τ_0에 해당하는 변위를 말한다.

$$E_{modeling} = \tau_0(\delta' - \frac{1}{2}\delta_0) \tag{8}$$

(라) 위 관계로부터 식 (9)와 같이 δ_0를 결정할 수 있으며 이로부터 k(= τ_0/δ_0)를 결정할 수 있다.

$$\delta_0 = \frac{2(\tau_0 \cdot \delta^{'} - E_{field})}{\tau_0} \tag{9}$$

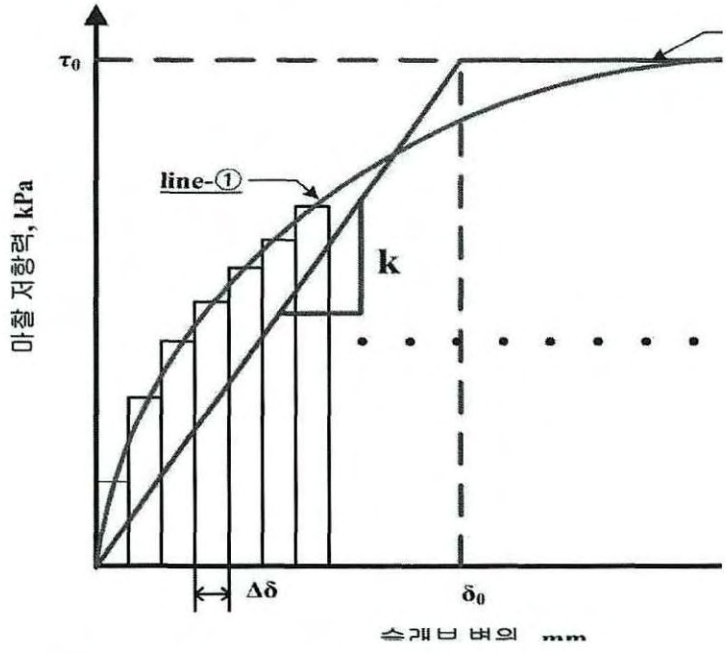


그림 130.에너지방법을 이용한 선형 근사화

표 25. 현장실험에 대한 보조기층 종류별bilinear 근사화한 결과

보조기층 형태	최대 마찰 저항, τ_0 (kPa)	최대 마찰 저항에 대한 변위, δ_0 (mm)	구속 강성,K (kPa/mm)
린 콘크리트 (분리막)	1.802	0.766	2.353
린 콘크리트	2.903	0.274	10.601
쇄석 (분리막)	1.902	0.040	47.992
쇄석	9.611	0.602	15.950
아스팔트	19.922	0.522	38.153

다. 3차원 구조해석 모델 개발 및 검증

콘크리트 슬래브-보조기층 별 마찰력은 첫 번째의 수평하중 재하 시와 두 번째의 수평하중 재하 시 변위에 따라 상당한 차이가 나타남을 알 수 있다. 하지만, 두 번째의 수평하중 재하 시와 세 번째의 수평하중 재하시는 변위에 따라 큰차이가 발생하지 않음을 확인하였다. 또한, 이승우(년도 적을 것)는 마찰 저항 시험에서 세 번째 이후의 수평하중 재하 및 변위 곡선은 크게 다르지 않다는 것을 확인하였다. 이러한 실험자료와 기존문헌을 통하여, 그림__와 같이 세 번째의 수평하중 및 변위의 곡선의 결과 값을 기준으로 유한요소 모델링을 실시하였다.

(1) 크기, 물성치

마찰 저항-변위의 비선형 곡선을 3차원 유한요소모델에 적용하여 현장 push-off 시험을 모사하였다. 3차원 유한요소모델에서 슬래브와 보조기층은 20절점요소를 사용하였다. 노상의 일부는 8절점요소를 사용하였고, 나머지는 무한요소를 그림 131과 같이 사용하였다. 슬래브와 보조기층 사이에는 비선형 전단 요소를 사용하였고, 보조기층과 노상층은 tie constraints를 사용하여 정의하였다. 3차원 유한요소모델을 증명하기위해 표 26과 같이 입력변수를 사용하여, 그림 132와 같이 유한요소 모델링을 완성하였다.

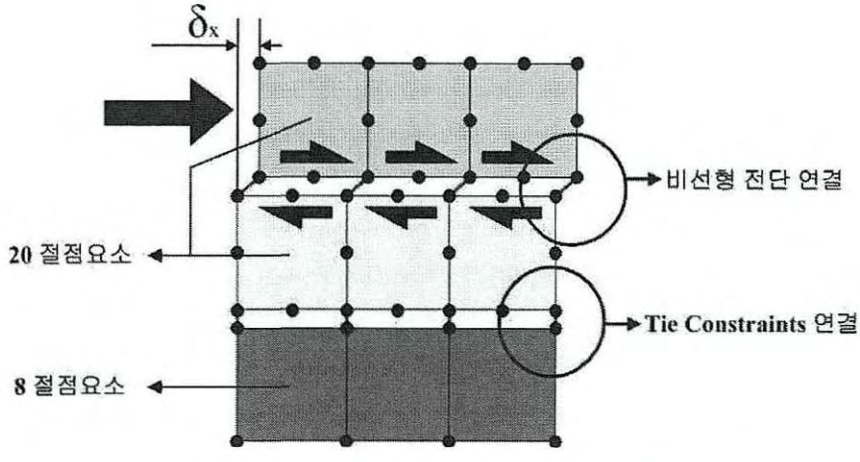


그림 131. 마찰저항 모사를 위한 3차원 유한요소 개념도

표 26. push-off 시험의 유한요소 모델링에 사용된 입력변수

	크기(m)	탄성(MPa)	포아송비	열팽창계수
슬래브	1x0.75x0.2	28000	0.18	$9.41x10^{-6}$
린콘크리트 보조기층	4x4x0.1	15000	0.2	-
쇄석 보조기층	4x4x0.1	200	0.35	-
아스팔트 보조기층	4x4x0.04	3000	0.4	-
노상	4x4x1	50	0.3	-

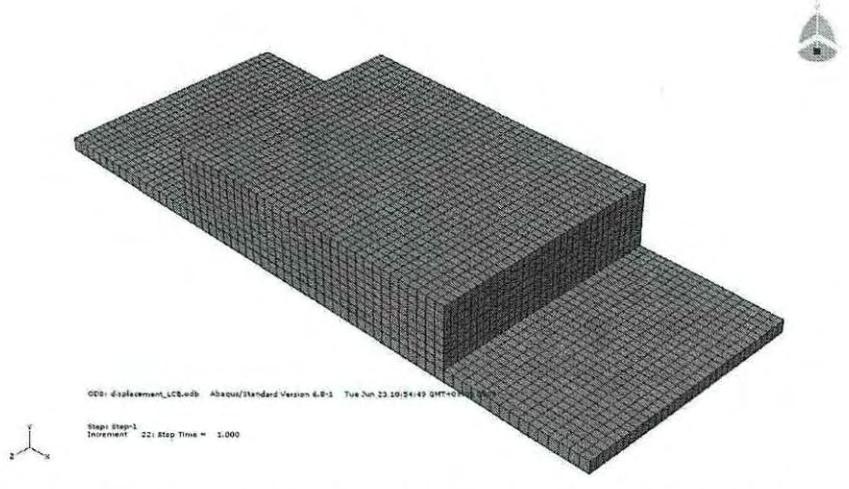


그림 132. Push-off 현장실험 3차원 유한요소 모델

(2) 현장 마찰시험과 유한요소 모델링의 비교 및 검증

유한요소모델을 검증하기 위하여 세 번째 수평하중 재하를 실시한 마찰저항 실험 결과 값을 입력하였다. 변위 제어를 사용하여 하중을 모사하였고, 비선형 전단연결을 사용하여 반력을 검토하였다. push-off 시험과 유한요소모델의 수평하중-변위의 곡선은 그림 133~137과 같이 유사하게 나타났다. 따라서, 유한요소모델은 슬래브와 보조기층의 마찰거동의 모사가 합리적임을 알 수 있다.

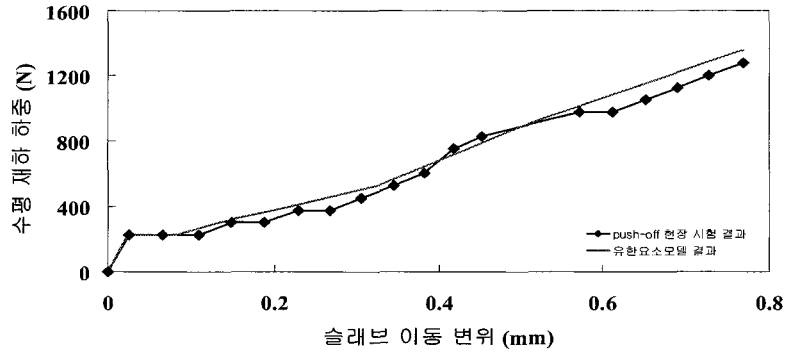


그림 133. 현장 마찰저항 실험 결과와 유한요소모델 분석 결과의 비교 (린 콘크리트 보조기층(분리막))

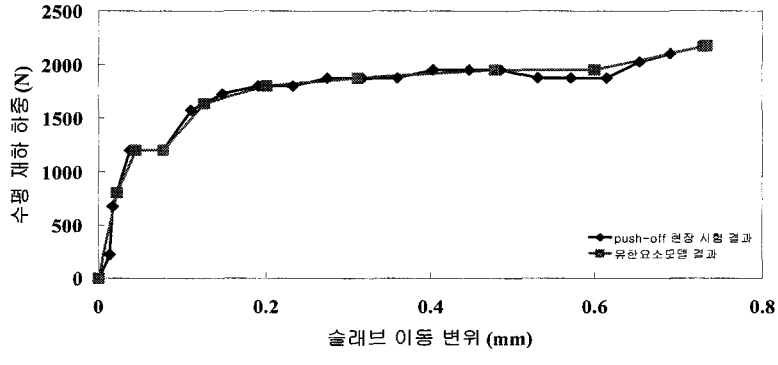


그림 134. 현장 마찰저항 실험 결과와 유한요소모델 분석 결과의 비교 (린 콘크리트 보조기층)

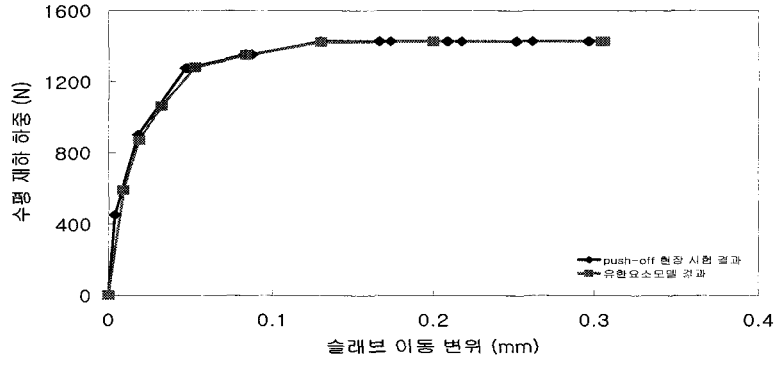


그림 135. 현장 마찰저항 실험 결과와 유한요소모델 분석 결과의 비교 (쇄석 보조기층(분리막))

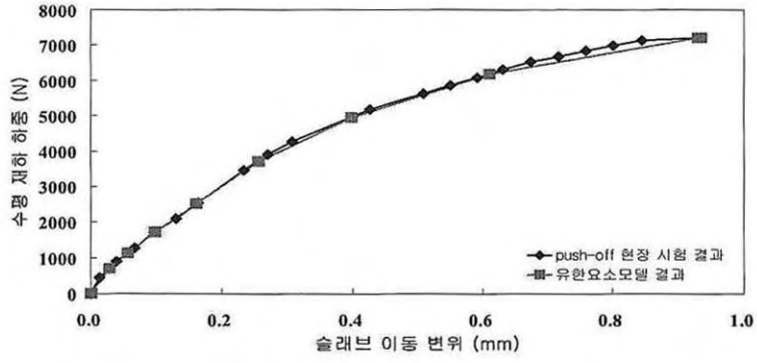


그림 136. 현장 마찰저항 실험 결과와 유한요소모델 분석 결과의 비교 (쇄석 보조기층)

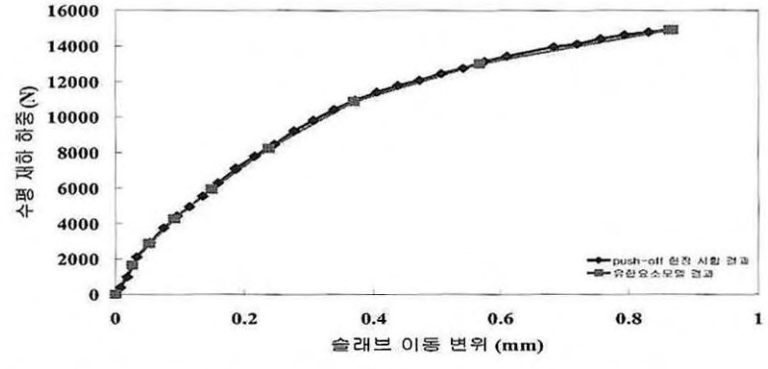


그림 137. 현장 마찰저항 실험 결과와 유한요소모델 분석 결과의 비교 (아스팔트 보조기층)

(3) 마찰저항 유한요소 모델링 결과

변위제어를 통하여 유한요소 모델링의 결과는 다음 그림 138과 같으며, 보조기층 종류에 따라 콘크리트의 마찰 전단 저항 응력이 표 27과 같이 차이가 발생함을 알 수 있다.

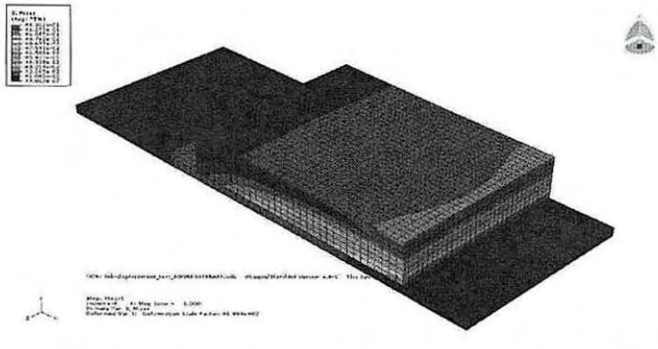


그림 138. 콘크리트 슬래브와 보조기층의 마찰 전단 유한요소 모델 결과(쇄석 보조기층)

표 27. 수평하중 재하에 따른 콘크리트 슬래브와 보조기층 간의 최대 마찰 저항 응력 및 변위

보조기층 종류	최대 마찰 저항 응력(kPa)	변위 (mm)
린 콘크리트 (분리막)	30.9	0.769
린 콘크리트	48.09	0.443
쇄석 (분리막)	25.75	0.306
쇄석	147.91	0.935
아스팔트	279.54	0.867

(4) 유한요소 모델링을 통한 비선형 해석결과와 선형화 해석결과의 비교

현장의 비선형 마찰 저항 값과 에너지 법을 통한 선형(bilinear) 근사화한 마찰 저항 값을 3차원 유한요소 모델링을 하여 구조해석을 실시하였다. 표 28은 슬래브 내부의 최대 전단 주응력에 대한 해석결과를 보여주며, 비선형 해석 결과와 선형(bilinear) 근사 값의 해석 결과는 상대오차가 5개 기층 모두 10% 미만임을 알 수 있었고, 이를 통해 에너지 방법을 통한 슬래브-보조기층 간 마찰 저항의 선형(bilinear) 근사화는합리적임을 알 수 있었다.

표 28. 비선형 유한요소 모델링과 선형(bilinear) 유한요소 모델링의 최대 전단 응력의 결과 및 비교

보조기층 종류	비선형 유한요소 모델의 최대 전단 응력 (kPa)	선형화한 유한요소 모델의 최대 전단 응력 (kPa)	상대오차 (%)
린 콘크리트 (분리막)	30.9	33.91	8.88
린 콘크리트	48.09	50.95	5.62
쇄석 (분리막)	25.75	26.42	2.54
쇄석	147.91	162.1	8.76
아스팔트	279.54	293.73	4.83

(5) 국내 콘크리트 슬래브 구조해석

마찰전단 실험을 3차원 유한요소 모델을 실시하였고 구조해석을 한 결과, 합리

적으로 모사가 되었다고 판단된다. 이러한 콘크리트 슬래브와 보조기층 사이의 비선형 전단 연결 요소를 사용하였고, 노상과 보조기층의 면은 tie node로 연결하였으며 표 29와 같이 국내의 줄눈 콘크리트 포장의 물성치를 사용하였다. 또한, 그림 139와 같이 슬래브와 보조기층의 mesh 크기는 0.1m X 0.1m X 0.075m로 하였고, 노상의 mesh 크기는 0.4m X 0.4m X 0.45m로 하였다.

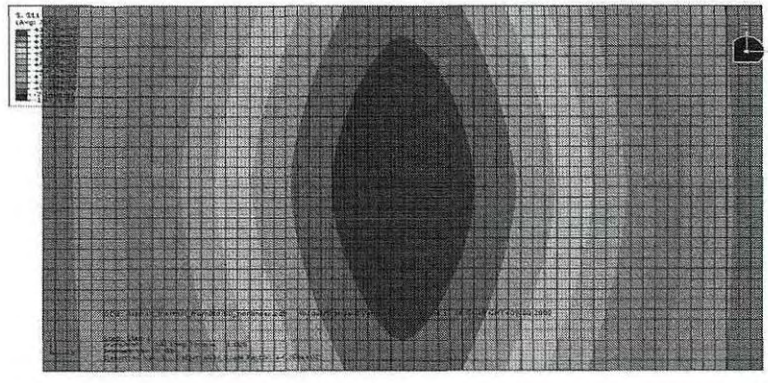
표 29. 국내 줄눈 콘크리트 포장의 유한요소 모델링에 사용된 입력변수

	콘크리트 슬래브 크기(m^3)	탄성(MPa)	포아송비	열팽창계수
슬래브	6X3.6X0.3	28000	0.18	$9.41x10^{-6}$
린콘크리트 보조기층	10X10X0.15	15000	0.2	-
쇄석 보조기층		200	0.35	-
아스팔트 보조기층		3000	0.4	-
노상	10X10X0.45	50	0.3	-

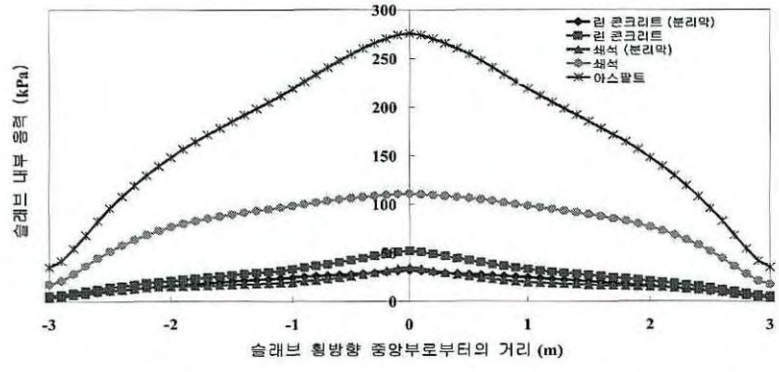


그림 139. 국내 줄눈 콘크리트 포장 모사

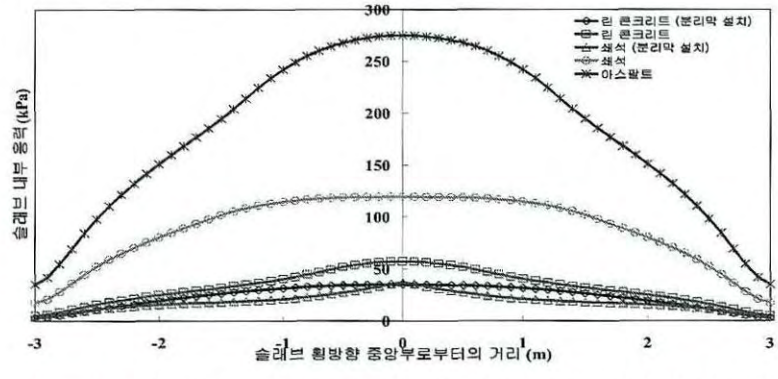
국내 콘크리트 슬래브가 온도하강에 의해 수축할 때의 포장의 거동을 살펴보기 위해, 슬래브에 온도하중을 0℃에서 -51.5℃의 변화를 주어 구조해석을 실시하였다. 그림 138, 139와 같이 슬래브 하부면을 나타내고 있으며, 슬래브 하단 중앙부에서 최대 인장 응력이 발생한 것을 확인할 수 있다. 또한, 표 30과 같이 콘크리트 슬래브와 보조기층 종류에 따라 비선형의 3차원 유한요소 모델과 선형의 3차원 유한요소 모델의 구조해석을 실시한 결과, 상대오차가 10%미만임을 확인할 수 있었다.



(a) 슬래브 환경하중 재하 시 콘크리트 슬래브 하부의 내부 인장 응력 형상



(b) 콘크리트 슬래브-보조기층 별 슬래브 내부 응력 발생 (비선형)



(c) 콘크리트 슬래브-보조기층 별 슬래브 내부 응력 발생 (선형)

그림 140. 콘크리트 슬래브-보조기층 별 슬래브 내부 응력 발생

표 30. 콘크리트 슬래브에 -51.5℃의 온도하중 재하 시 비선형 유한요소 모델과 선형 유한요소 모델의 비교

보조기층형태	비선형		선형		슬래브 내부 최대 인장응력 상대 오차 (%)
	슬래브 내부 최대 인장응력 (kPa)	슬래브 줄눈폭 변화 (mm)	슬래브 내부 최대 인장응력 (kPa)	슬래브 줄눈폭 변화 (mm)	
린 콘크리트 (분리막)	28.06	2.82	30.80	2.82	8.69
린 콘크리트	45.78	2.82	50.31	2.82	8.99
쇄석 (분리막)	30.98	2.82	32.62	2.82	5.02
쇄석	97.34	2.81	104.98	2.81	7.27
아스팔트	241.99	2.79	241.31	2.79	0.28

라. AASHTO 줄눈 폭 모델, 3차원 유한요소 모델 및 현장계측 결과의 비교

(1) AASHTO 줄눈폭 예측식 모델

일반적으로 줄눈폭 예측에 있어 AASHTO식을 사용하고 있다. 86 AASHTO Guide는 1977년 Darter 등에 의해 제안된 줄눈폭 예측식을 이용하고 있다. 그러나 이 식은 단 4군데의 포장 부분의 제한된 현장 데이터를 기초로 개발되었고 그 신뢰성에 대한 체계적 검토 없이 사용되어 왔다. 또한, 최근 들어 많은 연구자들이 이 모델이 현장에서 실측 값과 잘 맞지 않음을 보고하고 있으며, 보조기층 종류에 따른 확연한 차이가 없음을 보고하고 있다(TRB 참고문헌 17,18)

$$\Delta L = C \cdot JS[(\alpha_c \cdot T) + Z] \qquad (10)$$

여기서,

ΔL = AASHTO 줄눈폭 예측 모델에 의한 줄눈폭 (mm)

C = 보조기층을 고려한 보정계수(린 콘크리트 = 1.0, 쇄석 = 0.8, 아스팔트 = 0.65)

JS = 슬래브 횡방향 길이 (mm)

α_c = 콘크리트 슬래브 열팽창계수(/℃)

T = 연중 슬래브의 최대 온도차(℃)

Z = 콘크리트 슬래브 건조 수축 지수

(2)현장 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화

기존문헌에 따르면 지난 1998년부터 2002년까지 중부내륙 고속도로의 시험도로에서 5.54km의 2차선의 시험 도로를 시공하였다. 시험구간은 22개의 JPCP(Jointed Plain Concrete Pavement) 구간과 3개의 CRCP(Continuously Reinforced Concrete Pavement) 구간, 그리고 33개의 ACP(Asphalt Concrete Pavement) 구간으로 구성하였으며, 시험구간의 JPCP의 횡방향 길이는 6m로 시공하였다.

10개 구간에서 JPCP의 97개의 줄눈폭 변화는 디맥 설치 후인 2005년 5월과 슬래브 온도가 가장 높은 8월 그리고 슬래브 온도가 가장 낮은 다음 해의 1월에 3차례에 걸쳐 슬래브 온도를 측정하였고, 콘크리트 슬래브의 측정을 시행하는 기간 동안의 최고 및 최저의 온도 차이는 51.5℃였다. 줄눈폭 변화는 줄눈부에 인접한 콘크리트 슬래브 표면에 두 개의 디맥 포인트를 설치하여 줄눈폭을 측정하였다. 시험구간은 3개의 서로 다른 보조기층 재료(린 콘크리트, 쇄석, 아스팔트)와 3개의 서로 다른 슬래브 두께(250mm, 300mm, 350mm)로 선정하였다. 시험구간의 세부사항은 다음 표 31과 같다.

표 31. 시험구간 세부사항

구간	슬래브 두께 (mm)	보조기층 재료	줄눈폭 측정 수
J1	250	린 콘크리트	10
J5-1	300		10
J9-J8	350		10
J10	250	쇄석	10
J11	300		11
J12	350		10
J13	250	아스팔트	10
J14	300		10
J15	350		10
J6	250	린 콘크리트	6

다음 그림 141~144는 시공 후 2005년까지 매 계절마다 슬래브 줄눈폭 변화를 측정한 결과, 보조기층 재료에 따른 시험구간에서 측정된 줄눈폭 변화의 분포를 나타었다. 그림 141는 린콘크리트 보조기층, 142는 쇄석 보조기층 그리고 143은 아스팔트 보조기층으로서, 각 보조기층 별로 1mm 내의 줄눈폭 변화는 50%이상 나타남을 알 수 있었다. 또한, 그림 144는 중부내륙 고속도로에서 보조기층 종류별 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화 평균 값과 AASHTO 줄눈폭 예측식을 이용한 줄눈폭을 비교한 것이다.

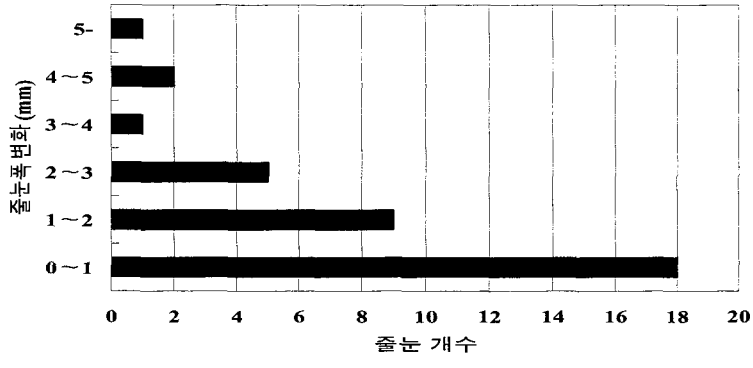


그림 141. 분리막을 린 콘크리트 보조기층의 슬래브 줄눈폭 변화

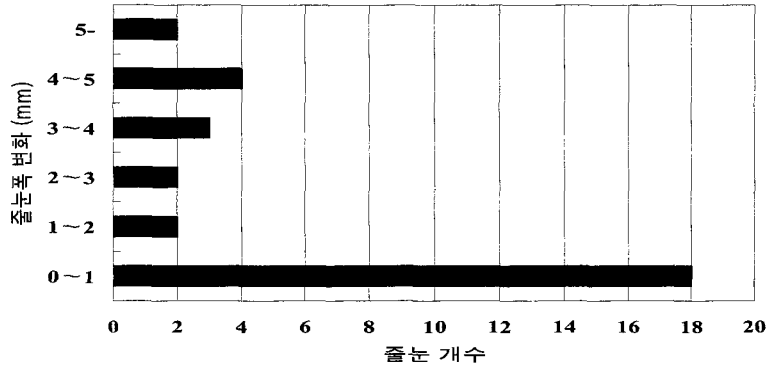


그림 142. 쇄석 보조기층의 슬래브 줄눈폭 변화

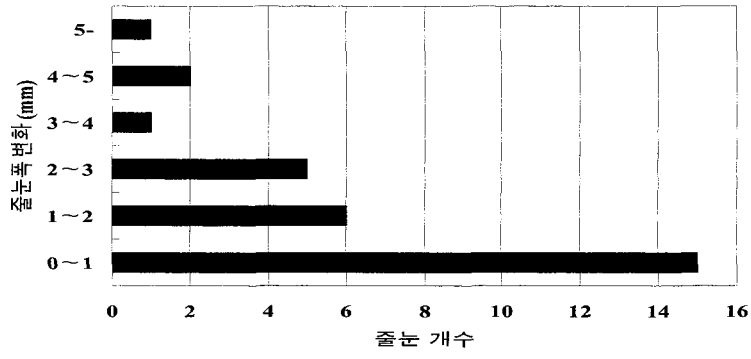


그림 143. 아스팔트 보조기층의 슬래브 줄눈폭 변화

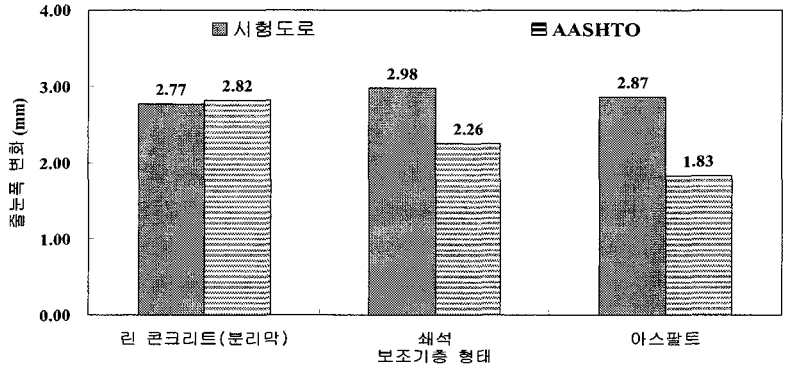


그림 144. 보조기층별 줄눈폭 변화 평균값과 AASHTO 예측식에 의한 줄눈폭 변화의 비교

그림 144를 살펴보면 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층의 콘크리트 슬래브 줄눈폭 변화와 AASHTO 줄눈폭 예측식을 통한 줄눈폭을 비교한 결과, 줄눈폭은 유사한 것을 확인할 수 있다. 하지만, 쇄석 보조기층과 아스팔트 보조기층의 콘크리트 슬래브 줄눈폭 변화는 AASHTO 줄눈폭 예측식을 통한 줄눈폭과는 차이가 큰 것으로 나타났다.

(3) AASHTO 줄눈폭 예측식 모델, 현장 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화, 3차원 유한요소 구조해석을 통한 줄눈폭 변화의 비교

AASHTO 줄눈폭 예측식 모델과 중부내륙 고속도로의 시험도로 구간 그리고 3차원 유한요소 구조해석을 통한 줄눈폭 변화의 비교를 실시하였다. 그림 145와 같이 시험도로 구간의 줄눈폭 변화와 3차원 유한요소 모델에 의한 줄눈폭의 거동은 큰 차이가 없었다. 따라서, 3차원 유한요소 모델은 합리적으로 모델링이 되었다고

판단된다. 반면에 AASHTO 줄눈폭 예측식 모델과는 다소 차이가 발생함을 알 수 있었으며, AASHTO 줄눈폭 예측식 모델은 개선이 필요하다고 판단된다.

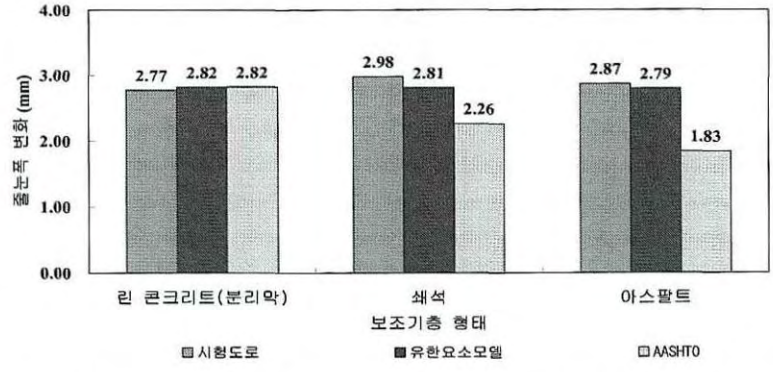


그림145. 보조기층별 줄눈폭 측정, 해석, 예측 결과의 비교

마. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항 특성을 조사하기 위해 국내 콘크리트 포장에 주로 적용되는 린 콘크리트, 쇄석, 아스팔트 보조기층에 대하여 분리막 사용 여부 및 습윤 상태에 따른 마찰력 실험(Push-off test)을 실시하였다. 이를 통하여 1차 하중 재하 시와 안정화 상태 시 및 습윤 상태에서의 각 보조기층 별 최대 마찰계수와 수평변위를 측정하였고 이를 비교 분석하였다. 또한, 마찰저항 실험 결과를 이용하여 에너지법을 개발하였고, 현장 실험 결과와 3차원 유한요소모델의 결과를 비교 및 분석하였다. 마지막으로 국내의 고속국도에서 사용하는 콘크리트 슬래브와 보조기층을 3차원 유한요소 모델링 및 구조해석을 실시하여, AASHTO 줄눈폭 예측식 모델과 중부내륙 고속도로의 시험도로의 줄눈폭 계측 결과를 비교 및 분석하였다. 본 연구를 통하여 도출된 주요한 결론은 다음과 같다.

(1) 분리막이 설치되지 않은 경우 1차 하중 재하 시 콘크리트 슬래브와 린 콘크리트 보조기층이 부착되어 매우 큰 마찰저항을 나타냈으며, 중장비로 강제 분리 후 관찰한 결과 파괴면은 슬래브의 면을 따라 발생되었다. 이는 슬래브와 린 콘크리트 보조기층 간의 부착강도가 린 콘크리트의 인장강도 보다 작았기 때문으로 판단된다.

(2) 강제 분리된 린 콘크리트 보조기층과 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층은 2차 하중재하 시부터 유사한 값의 비교적 작은 마찰계수가 측정되었다. 분리막을 사용한 쇄석 보조기층의 경우에도 린 콘크리트 보조기층과 유사한 작은 마찰계수를 나타냈다.

(3) 분리막을 사용하지 않은 쇄석기층에서는 슬래브 하부에 부착된 골재가 슬래브의 미끄러짐을 방해하여 분리막을 사용하였을 때 보다 훨씬 큰 마찰계수를 나타났다.

(4) 슬래브와 아스팔트 보조기층 간의 부착강도가 아스팔트의 인장강도 보다 커서 보조기층 내부에 파괴면이 불규칙하게 형성되었으며, 다른 보조기층보다 높은 강성으로 인하여 비교적 큰 마찰계수가 측정되었다.

(5) 1차 하중재하 결과 린 콘크리트 > 아스팔트 > 쇄석 > 분리막 사용 보조기층 순으로 최대 마찰계수가 크게 측정되었으며, 2차 및 3차 실험에서는 아스팔트 > 쇄석 > 강제 분리 된 린 콘크리트 > 분리막 사용 보조기층 순으로 크게 측정되었다.

(6) 강제 분리된 린 콘크리트 보조기층 및 분리막을 사용한 보조기층에서는 습윤 및 건조 상태가 슬래브와 보조기층 간의 마찰계수에 미치는 영향이 비교적 작았으나 분리막을 사용하지 않은 쇄석 보조기층과 아스팔트 보조기층에서는 그 영향이 큰 것으로 조사되었다.

(7) 1차 하중재하에 대한 현장실험을 기존 연구자의 실험과 비교한 결과 린 콘크리트 보조기층과 시멘트안정처리기층이 매우 유사한 경향을 보였으며, 아스팔트 보조기층의 경우 최대마찰계수는 유사한 결과를 얻었으나 실험현장의 기온차로 인하여 변위에 대한 마찰계수 변화율은 차이를 나타냈다. 쇄석 보조기층의 경우에는 아스팔트 안정처리 기층 및 석회 안정처리 기층과 유사한 경향을 보였다. 분리막을 사용한 보조기층의 경우 노상위에서 실험한 결과보다도 매우 낮은 마찰계수를 보였고, 이를 통해 분리막을 사용하면 슬래브와 보조기층 간의 마찰저항을 줄이는 효과가 매우 탁월함을 알 수 있었다.

(8) 3차원 유한요소 프로그램을 사용하여 마찰저항 실험 모델링을 실시하였으며, 슬래브-보조기층 종류 별 현장 마찰저항 결과와 구조해석을 통한 마찰저항 결과는 유사한 경향을 보였다.

(9) 비선형의 최대 마찰 응력은 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층은 30.9 kPa, 린 콘크리트 보조기층은 48.09 kPa, 분리막을 설치한 쇄석 보조기층은

25.75kPa, 쇄석 보조기층은 147.91kPa, 그리고 아스팔트 보조기층은 279.54 kPa 임을 확인할 수 있다.

(10) 선형의 최대 마찰 응력은 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층은 33.91 kPa, 린 콘크리트 보조기층은 50.95 kPa, 분리막을 설치한 쇄석 보조기층은 26.42kPa, 쇄석 보조기층은 162.1 kPa, 그리고 아스팔트 보조기층은 293.73 kPa 임을 확인할 수 있다.

(11) 비선형 해석 결과와 선형 해석 결과는 5개의 보조기층의 상대오차가 10%미만임을 확인할 수 있다.

(12) 슬래브에 온도하중을 재하시킨 결과, 슬래브 바닥 중앙부에 최대 인장 응력이 발생됨을 확인할 수 있다.

(13) 비선형의 슬래브 바닥 중앙부의 최대 인장 응력은 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층은 28.06 kPa, 린 콘크리트 보조기층은 45.78 kPa, 분리막을 설치한 쇄석 보조기층은 30.98 kPa, 쇄석 보조기층은 97.34 kPa, 그리고 아스팔트 보조기층은 241.99 kPa 임을 확인할 수 있다.

(14) 선형의 슬래브 바닥 중앙부의 최대 인장 응력은 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층은 30.8 kPa, 린 콘크리트 보조기층은 50.31 kPa, 분리막을 설치한 쇄석 보조기층은 32.62 kPa, 쇄석 보조기층은 104.98 kPa, 그리고 아스팔트 보조기층은 241.31 kPa 임을 확인할 수 있다.

(15) 비선형 해석 결과와 선형 해석 결과는 5개의 보조기층의 상대오차가 10% 미만임을 확인할 수 있다. 하지만 슬래브 끝단에서의 수축된 변위는 보조기층의 종류와 상관없이 거의 일치하는 것을 알 수 있다.

(16) 중부내륙고속도로의 시험도로 구간에서 세 가지 보조기층(분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층, 쇄석 보조기층, 아스팔트 보조기층)에서 콘크리트 슬래브 줄눈폭의 변화를 중부내륙 고속도로의 시험도로에서 조사하였다. 측정결과, 보조기층별 콘크리트 슬래브의 줄눈폭 변화는 차이가 크지 않았다.

(17) AASHTO 줄눈폭 예측식, 시험도로 그리고 유한요소모델 구조해석의 줄눈폭을 비교한 결과, 시험도로에서 측정된 평균 줄눈폭과 유한요소모델에 의하여 계산된 줄눈폭은 유사한 것으로 나타났다. 하지만 시험도로에서 측정된 줄눈폭을 AASHTO 줄눈폭 예측식과 비교했을 때, 린 콘크리트 보조기층을 제외한 쇄석 보조기층과 아스팔트 보조기층은 차이가 큰 것으로 나타났다.

4절 역학적 이론 정립

1. 개요

콘크리트 포장의 수명에는 기층의 종류, 포장의 두께, 리고 기후조건에 의한 포장의 온도 및 습도의 변화 등 다양한 인자들이 영향을 미친다. 또한, 줄눈 콘크리트 포장에 발생하는 응력은 교통하중과 환경하중에 의한 것으로 대개 콘크리트의 항복응력보다 훨씬 적은 수준으로 발생한다. 하지만 국내 줄눈 콘크리트 포장은 국내 지역별 및 기층의 종류를 고려하지 않고, 획일적으로 슬래브 두께 30cm와 슬래브 길이 6m를 사용하고 있는 실정이다. 이러한 현상은 지역별 과소 설계 및 과대 설계를 유발할 수 있다. 따라서 2차년도에 콘크리트 슬래브-보조기층 별 마찰실험 값을 이용하여 슬래브 두께 별 콘크리트 슬래브 내부응력의 발생 정도와 온도 습도를 고려한 환경하중에 의한 콘크리트 슬래브 내부응력 발생 정도를 연구하였다.

2. FEM 구조해석

3절에서 현장실험과 3차원 구조해석을 통해 검증하여 제시한 콘크리트 슬래브-보조기층 별 구속강성 값을 이용하여 적정 줄눈간격을 제시하기 위한 기초 자료로서 콘크리트 슬래브의 3차원 구조해석을 실시하였다. 본 연구에서 사용되어진 3차원 유한요소 해석 프로그램인 EverFe 2.24는 다음과 같은 특징을 지닌다.

- 총9 개(3×3)의 슬래브까지 모델링 할 수 있다.
- 콘크리트 슬래브 와 노상을 제외한 기층 및 보조기층을 3개 층까지 확장하여 모델링 할 수 있으며, 슬래브와 기층간의 마찰을 고려할 수 있다.
- 종방향 줄눈부에서의 골재 맞물림을 통한 선형 혹은 비선형 전단 전달을 고려할 수 있다.
- 다웰바 및 타이바에 대하여 다양한 길이, 위치를 고려할 수 있다.
- 다양한 축하중을 손쉽게 고려할 수 있다.

• 선형, 이중선형 및 삼중선형 온도구배를 고려할 수 있고 이를 통하여, 온도 및 건조수축에 대한 고려를 할 수 있다.

• 해석결과를 다양한 위치에서 손쉽게 얻을 수 있다.

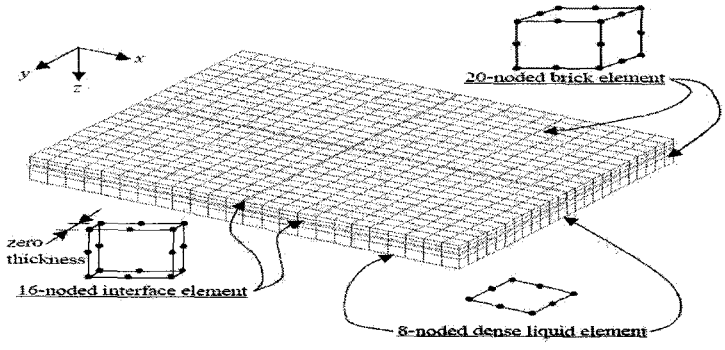


그림 146. 구조해석 프로그램 요소의 구성

그림 146과 같이 3차원 유한요소 해석에 사용되어진 모형은 다음과 같은 요소로 각각 구성되어졌다. 슬래브와 기층은 20개의 절점을 가지는 직육면체 요소(20-noded brick element)로 모델링 되어졌으며, 슬래브의 줄눈부와 슬래브와 기층의 접촉면은 16개의 절점을 가지며 두께가 없는 접촉면요소(16-noded interface element)를 사용하였다. 또한 노상은 8개의 절점을 가지는 dense liquid요소와 Tensioness 스프링 요소로 모델링되어졌다.

가. 교통하중 유한요소 해석

교통하중은 포장 설계에 가장 민감한 입력변수로서 포장 파손의 주요원인이 된다. 이에 대해 슬래브 길이와 두께를 변화시켜 교통하중에 따른 콘크리트 슬래브 내부응력을 파악하였다.

(1) 입력변수

(가) 콘크리트 슬래브 및 보조기층의 크기

교통하중에 의한 콘크리트 슬래브 내부응력을 파악하기 위하여, 입력변수 중 콘크리트 슬래브의 크기를 다음 표 32와 같이 실시하였다. 콘크리트 슬래브와 보조기층의 물성치 입력은 3절의 물성치와 동일하게 적용하였다.

표 32. 교통하중에 의한 응력을 파악하기 위한 콘크리트 슬래브 크기별 입력변수

콘크리트 슬래브 횡방향 길이 (mm)	콘크리트 슬래브 두께 (mm)
5000	150
6000	200
	250
7000	300

교통하중은 AASHTO 설계에서 포장 설계에 사용되는 등가단축하중 80kN을 사용하였으며, 그림 147과 같이 슬래브의 횡방향 측면 중앙부에 재하하였다.

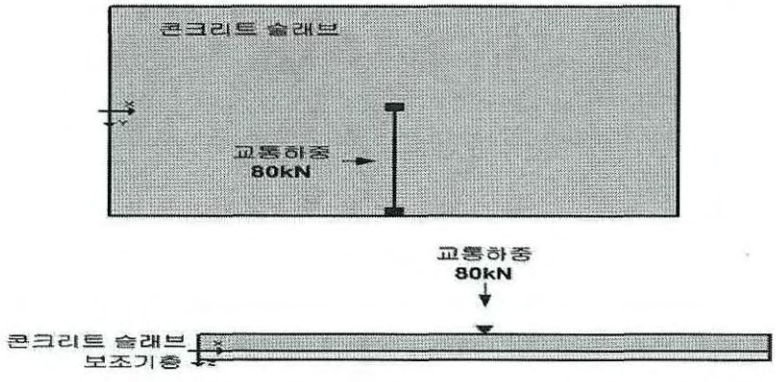


그림 147. 슬래브에 교통하중을 재하시킨 형상

(나) 구조해석 결과

콘크리트 슬래브 횡방향 길이별, 콘크리트 슬래브 두께별 그리고 보조기층 별 교통하중에 대한 형상은 그림 148과 같으며 결과는 그림 149~152와 같다.

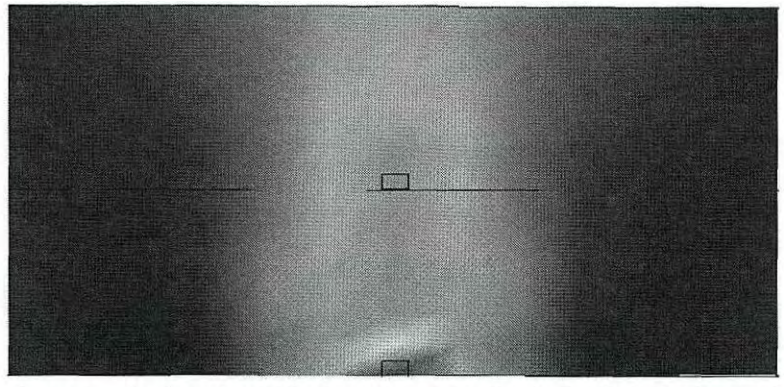


그림 148. 슬래브의 하부에 교통 하중에 의해 발생한 응력 분포

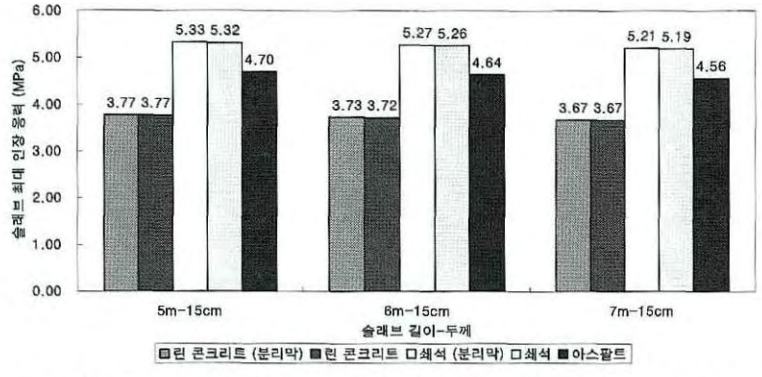


그림 149. 슬래브 횡방향 길이별, 보조기층 별 슬래브 최대 인장 응력슬래브 두께 15cm)

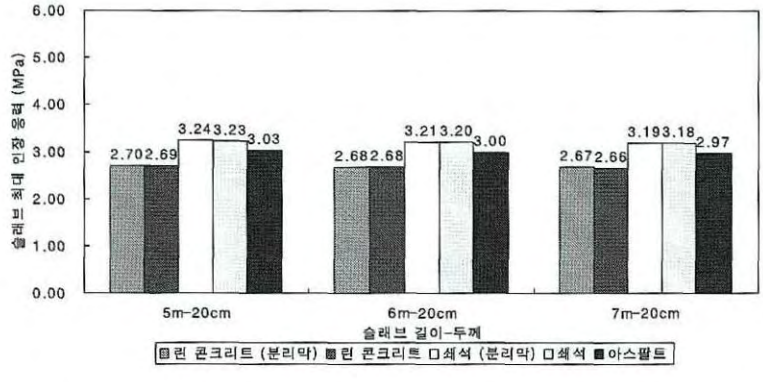


그림 150. 슬래브 횡방향 길이별, 보조기층 별 슬래브 최대 인장 응력슬래브 두께 20cm)

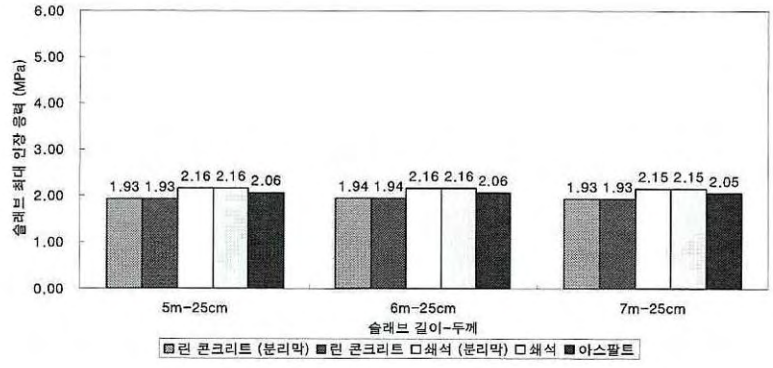


그림 151. 슬래브 횡방향 길이별, 보조기층 별 슬래브 최대 인장 응력슬래브 두께 25cm)

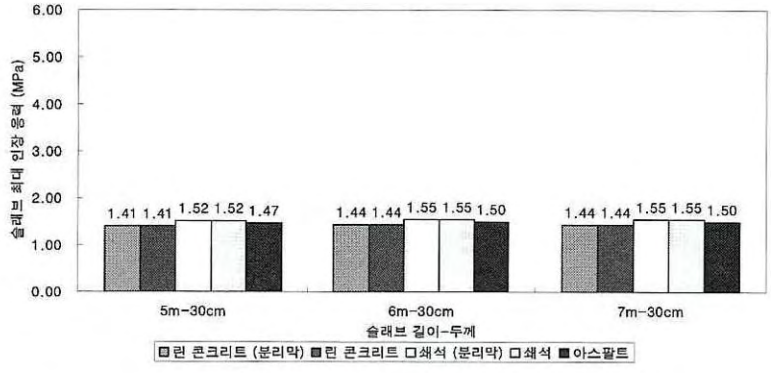


그림 152. 슬래브 횡방향 길이별, 보조기층 별 슬래브 최대 인장 응력슬래브 두께 30cm)

교통하중(80kN)을 슬래브 측면부 중앙에 슬래브 길이와 두께를 다르게 하여 구조해석을 실시한 결과, 슬래브 두께별 분석 결과는 두께가 두꺼울수록 슬래브 내부에 최대 인장응력이 감소하였고, 보조기층 별 분석결과는 보조기층 종류에 따라서 슬래브 내부에 최대 인장응력이 다른 것을 파악할 수 있었다. 반면에, 슬래브 길이 별 분석결과는 길이의 변화에 대해 슬래브 최대 인장응력은 변화가 미비하였다. 이러한 현상은 등방성 탄성체로 모델링을 실시하였고, 온도 및 습도와 같은 환경하중을 고려하지 않은 결과로 판단된다. 그러나, 그림 153~155와 같이 보조기층에 따른 응력변화에 따른 슬래브 두께를 제시 할 수 있다고 판단된다.

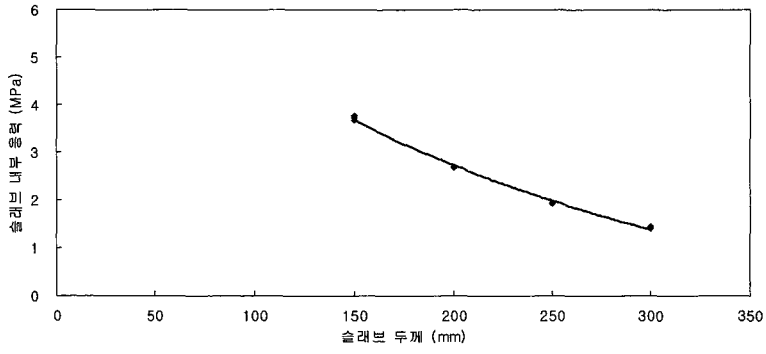


그림 153. 슬래브 내부 인장 응력에 따른 슬래브 두께 (린 콘크리트)

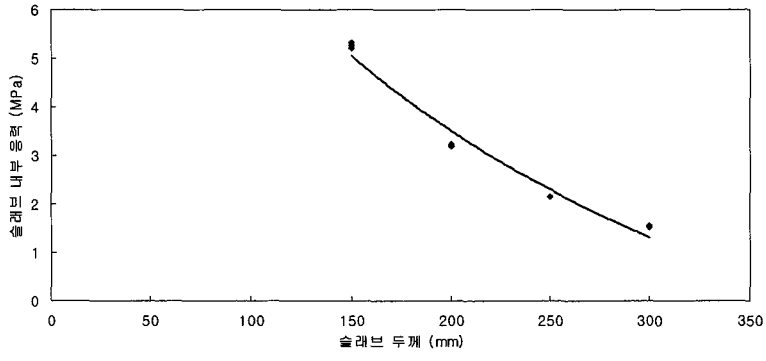


그림 154. 슬래브 내부 인장 응력에 따른 슬래브 두께 (쇄석)

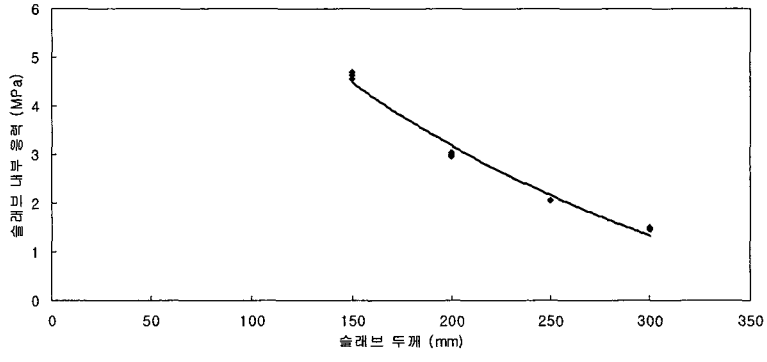


그림 155. 슬래브 내부 인장 응력에 따른 슬래브 두께 (아스팔트)

나. 환경하중 유한요소 구조해석

온도 및 습도등의 환경 하중은 부피변화로 인해 포장에 응력을 살생시킬 가능성이 크고 노상 지지력 감소 등과 같은 물성의 변화를 야기시켜 포장파손을 촉진시킨다. 본 장에서는 슬래브 상·하부 등가 온도차이를 10℃부터 50℃까지 10℃의 변화를 슬래브 길이 및 두께 별, 보조기층 종류에 따라 구조해석을 실시하였다.

(1) 콘크리트 슬래브 및 보조기층의 크기

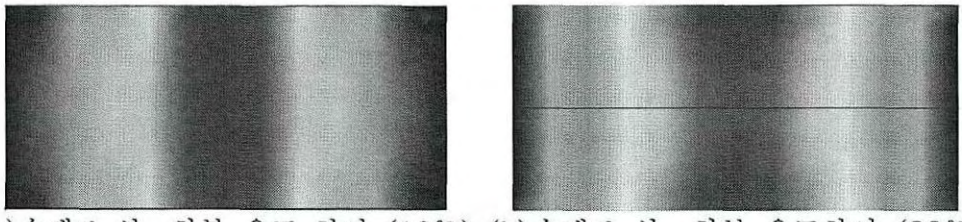
환경하중에 의한 콘크리트 슬래브 내부응력을 파악하기 위하여, 입력변수 중 콘크리트 슬래브의 두께, 길이 및 온도차이 입력변수를 다음 표 33과 같이 60가지 상화에 대해 실시하였다. 콘크리트 슬래브와 보조기층의 물성치 입력은 3절의 물성치와 동일하게 적용하였다.

표 33. 교통하중에 의한 응력을 파악하기 위한 콘크리트 슬래브 크기별 입력변수

슬래브 횡방향 길이 (mm)	슬래브 두께 (mm)	슬래브 상·하부 등가온도 차이 (℃)	
5500	150	10	-10
	200	20	-20
6000		30	-30
	250	40	-40
7500	300	50	-50

(2) 구조해석 결과

콘크리트 슬래브에 상·하부 온도차이를 재하한 결과, 상·하부 온도차이가 적은 경우 슬래브 최대 인장응력은 슬래브 중앙부에 발생하였으며, 상·하부 온도차이가 커질수록 슬래브 최대 인장응력은 슬래브 중앙부 측면으로 이동하는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 슬래브 상·하부 온도차이가 클수록 슬래브의 내부응력은 증가하는 형상이 나타났다. 슬래브 두께를 기준으로 횡방향 길이별, 보조기층별로 그림 156과 같이 정리하였다.

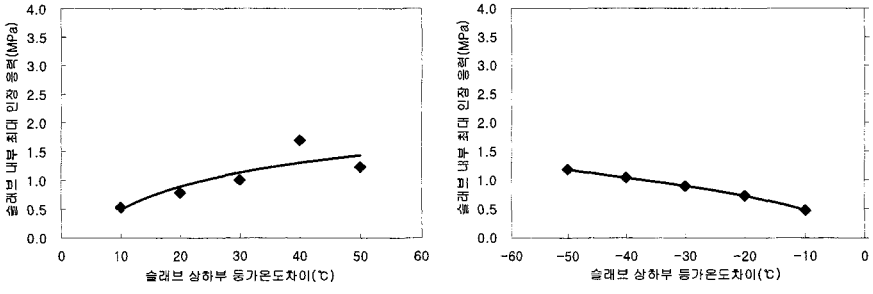


(a)슬래브 상·하부 온도 차이 (10℃) (b)슬래브 상·하부 온도차이 (30℃)

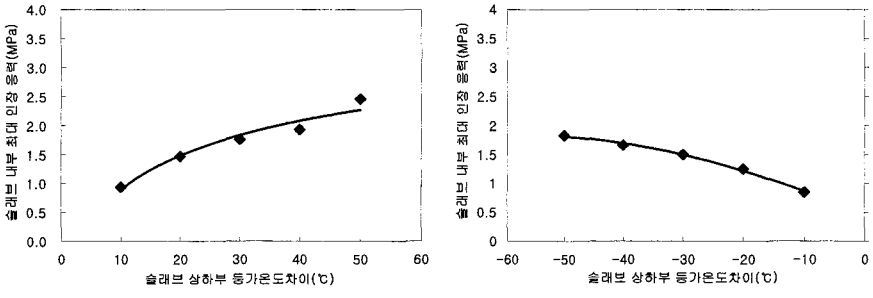
그림 156. 슬래브 상·하부 온도차이에 따른 슬래브 내부 인장응력 발생 형상

(가) 슬래브 두께 30cm 인 경우

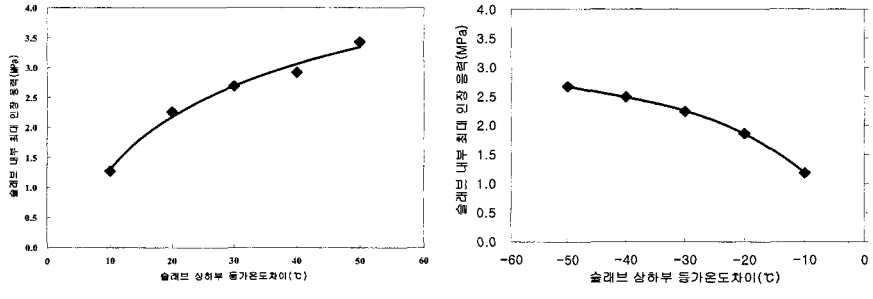
① 분리막을 설치한 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



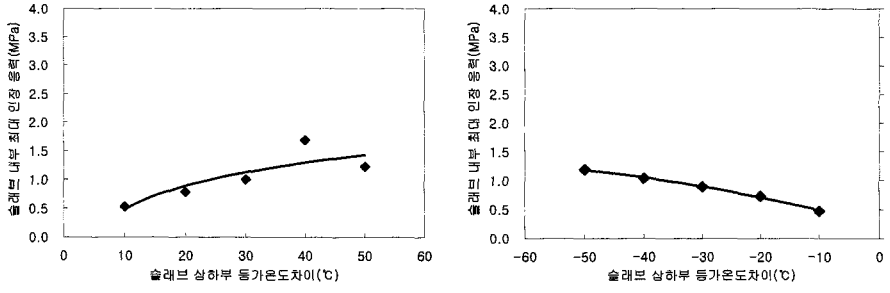
(b)슬래브 길이 6.0m



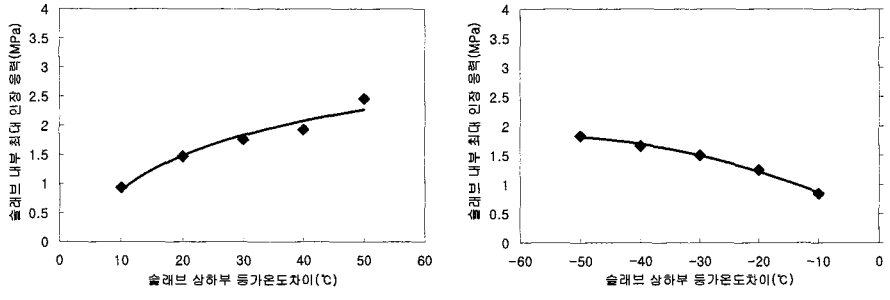
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 157. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 린 콘크리트)

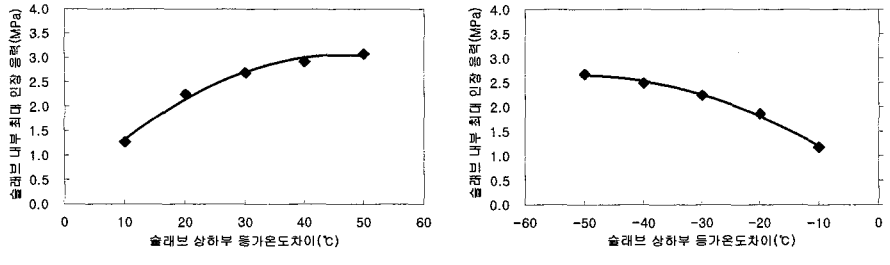
② 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



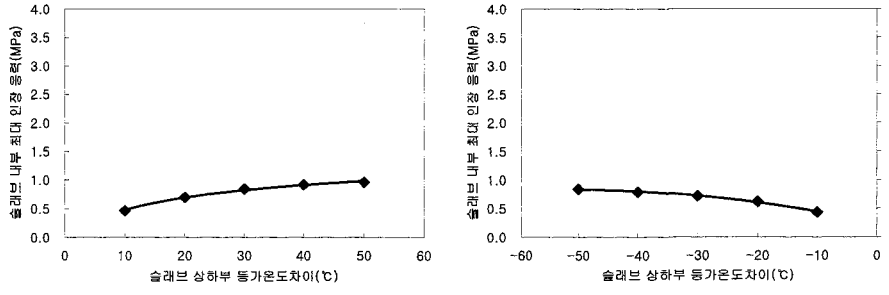
(b)슬래브 길이 6.0m



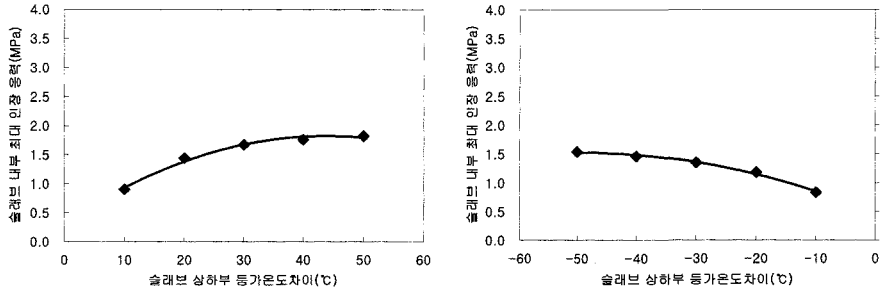
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 158. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(린 콘크리트)

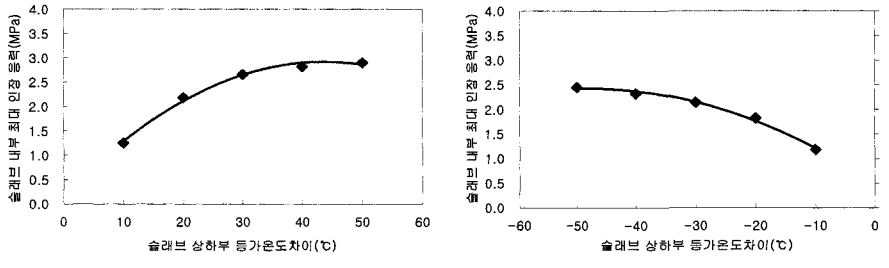
③ 분리막을 설치한 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



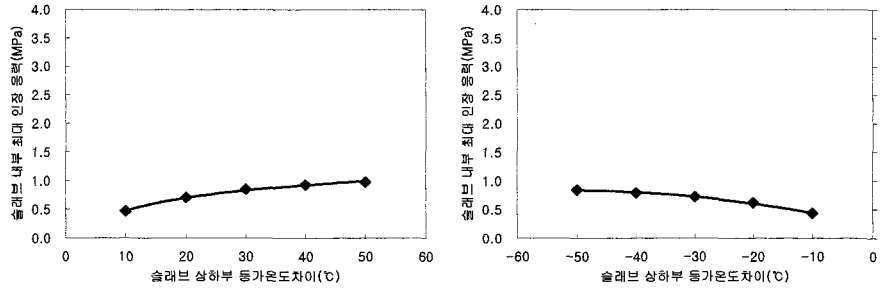
(b)슬래브 길이 6.0m



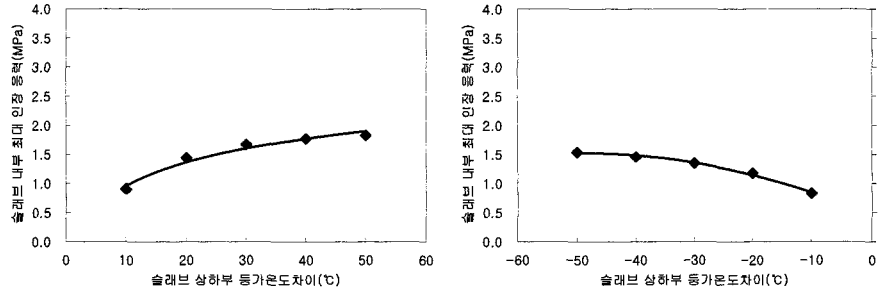
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 159. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 쇄석)

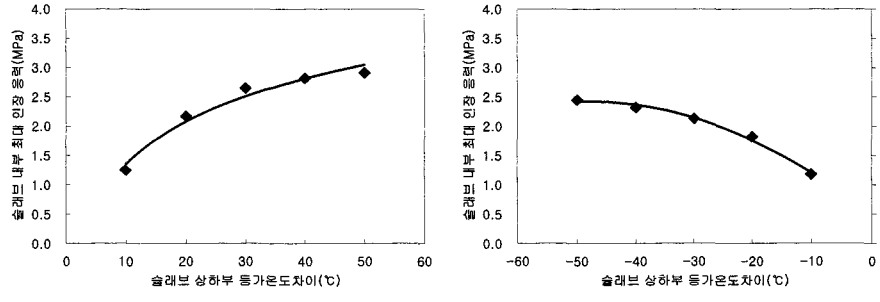
④ 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



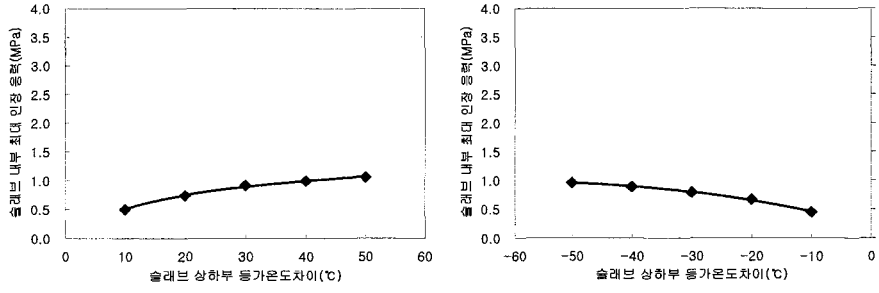
(b)슬래브 길이 6.0m



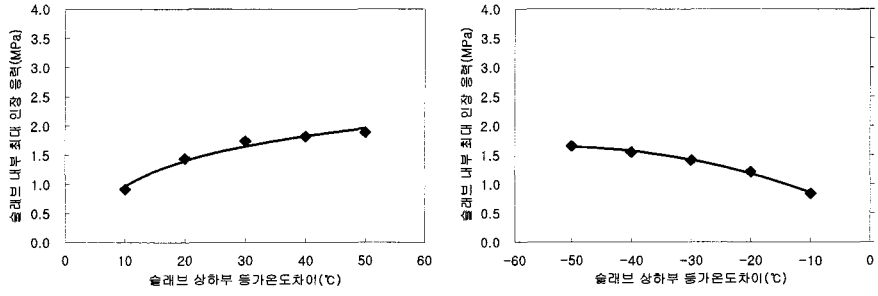
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 160. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(쇄석)

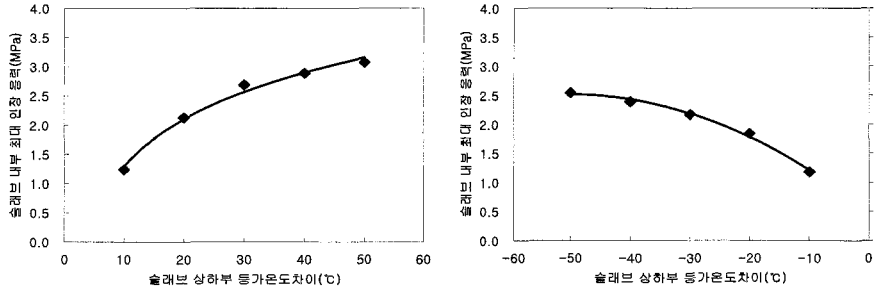
⑤ 아스팔트



(a)슬래브 길이 4.5m



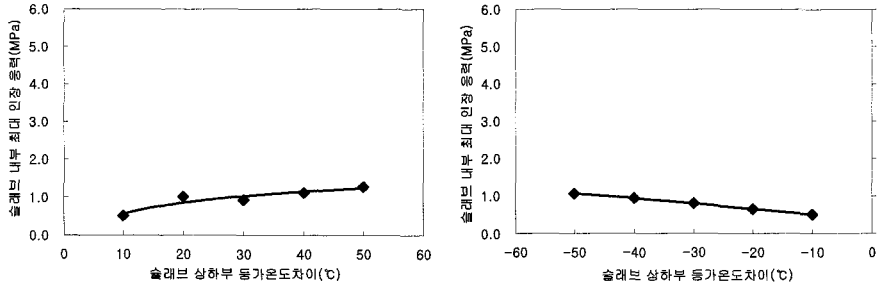
(b)슬래브 길이 6.0m



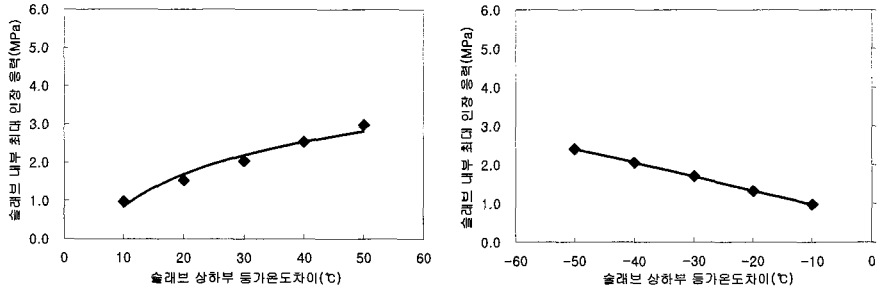
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 161. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(아스팔트)

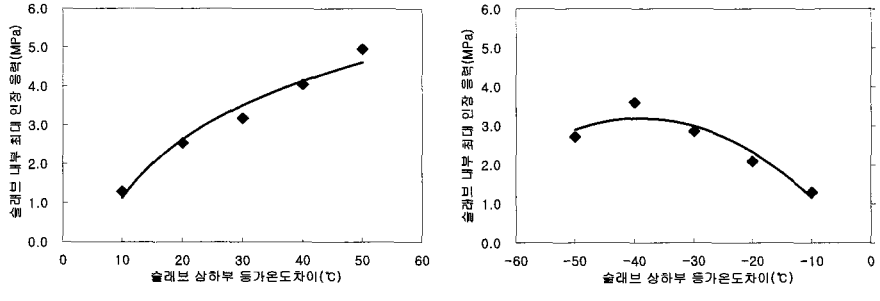
⑥ 노상



(a)슬래브 길이 4.5m



(b)슬래브 길이 6.0m

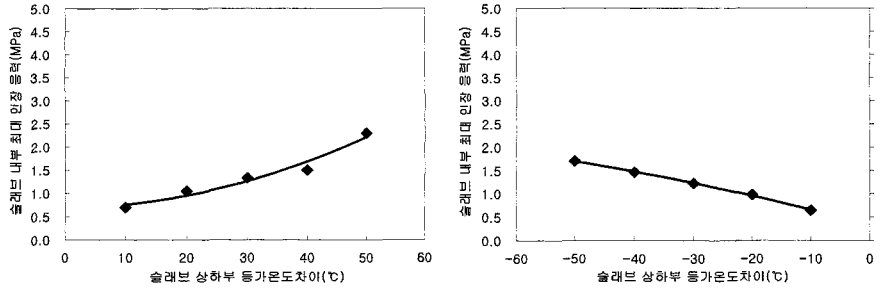


(c)슬래브 길이 7.5m

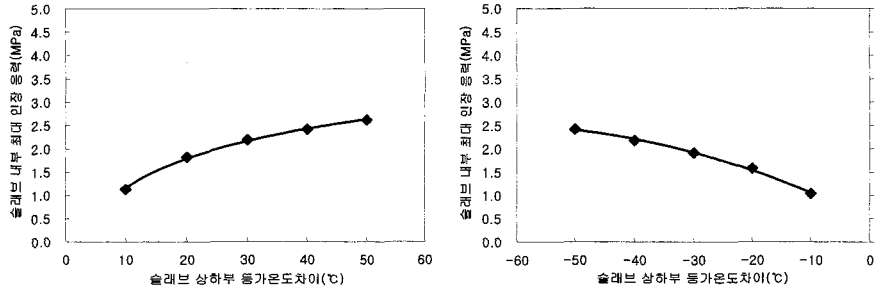
그림 162. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(노상)

(나) 슬래브 두께 25cm 인 경우

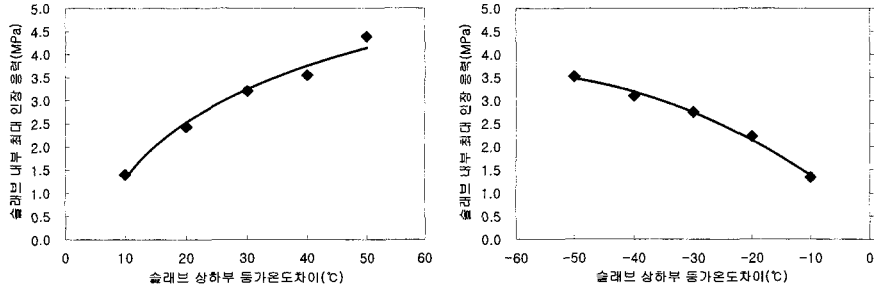
① 분리막을 설치한 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



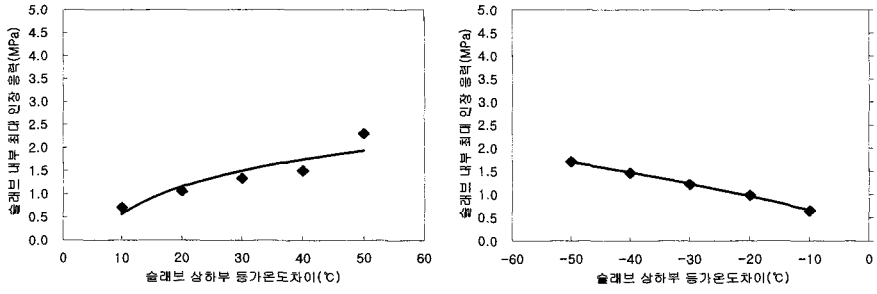
(b)슬래브 길이 6.0m



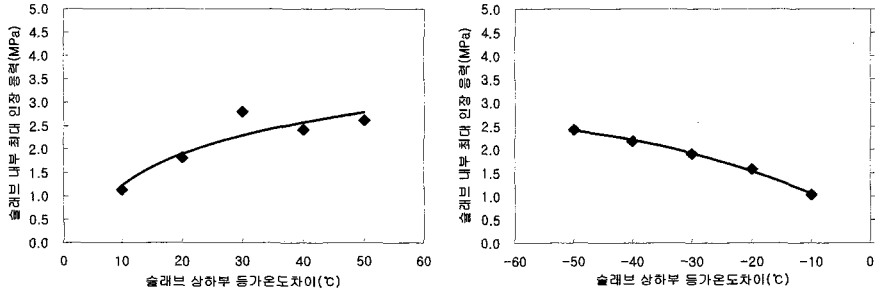
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 163. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 린 콘크리트)

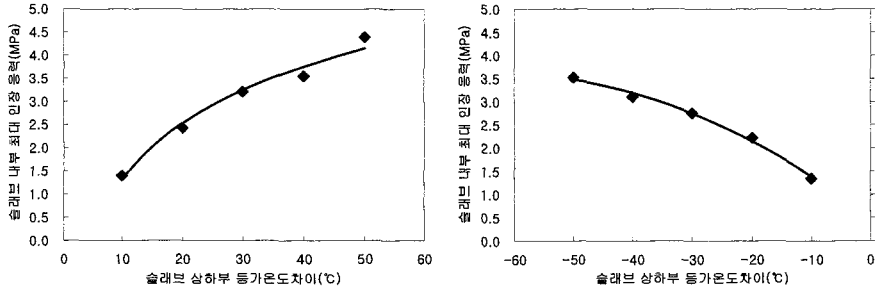
② 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



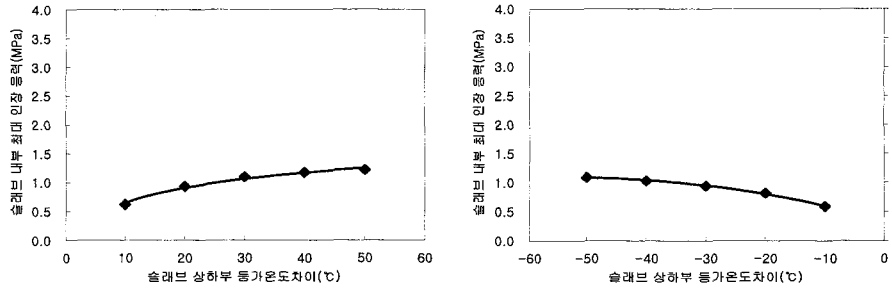
(b)슬래브 길이 6.0m



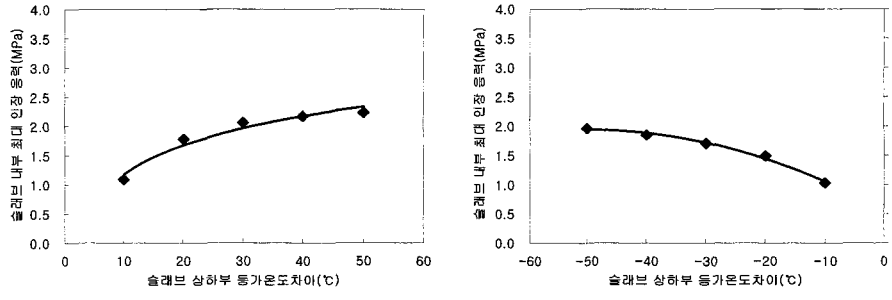
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 164. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(린 콘크리트)

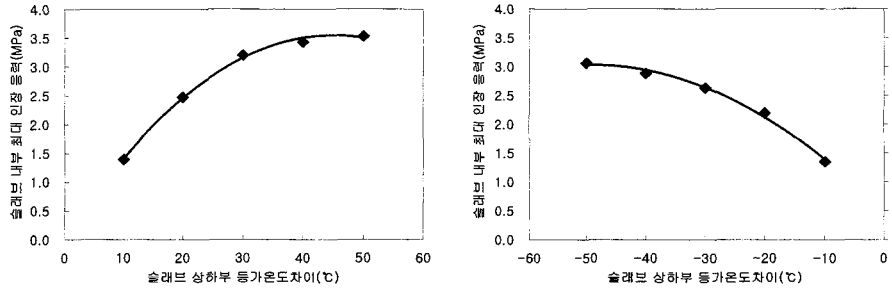
③ 분리막을 설치한 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



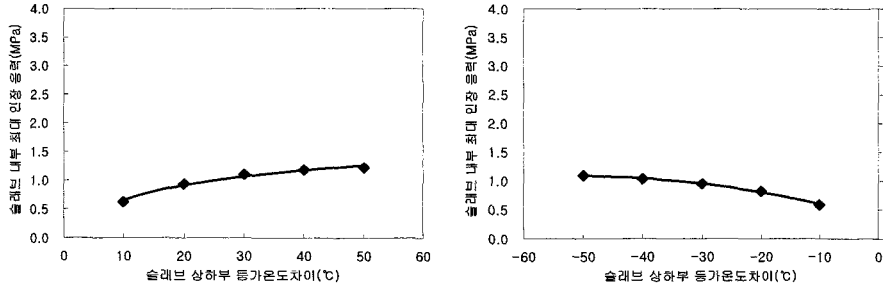
(b)슬래브 길이 6.0m



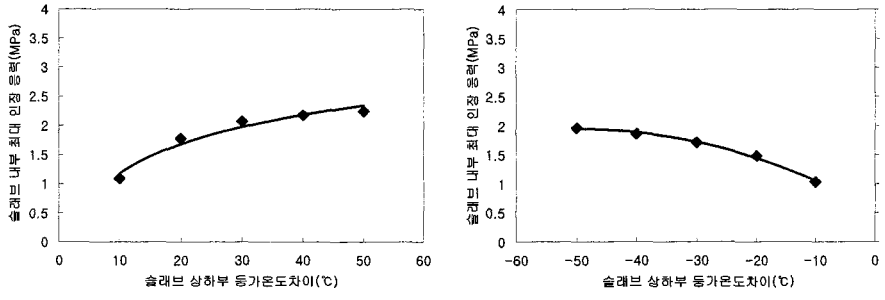
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 165. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 쇄석)

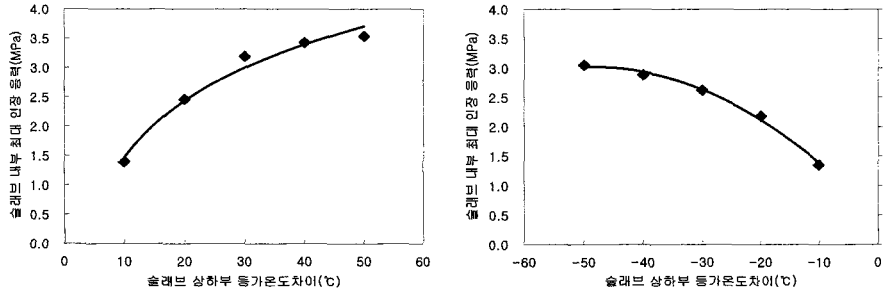
④ 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



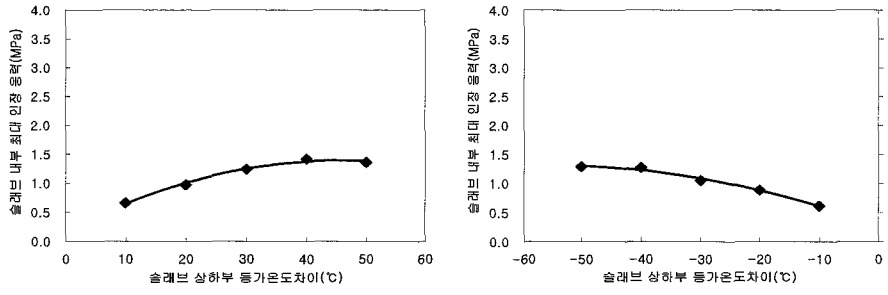
(b)슬래브 길이 6.0m



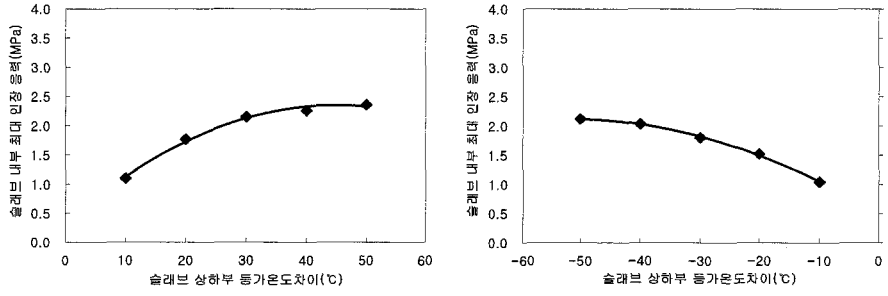
((c)슬래브 길이 7.5m

그림 166. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(쇄석)

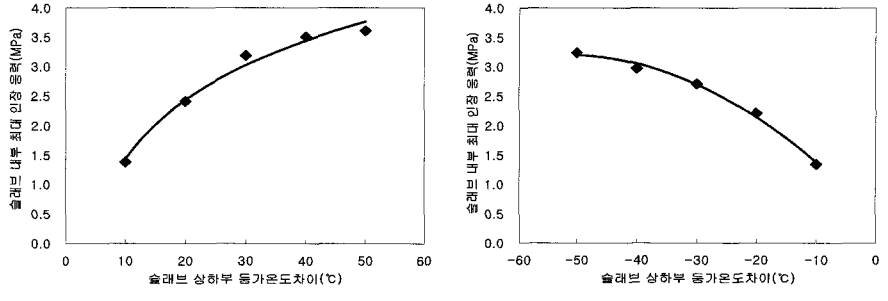
⑤ 아스팔트



(a)슬래브 길이 4.5m



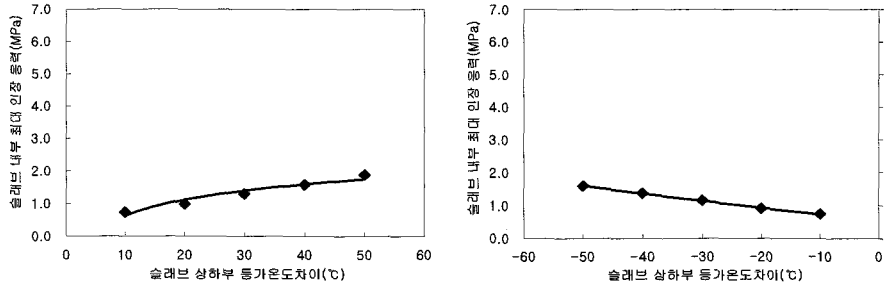
(b)슬래브 길이 6.0m



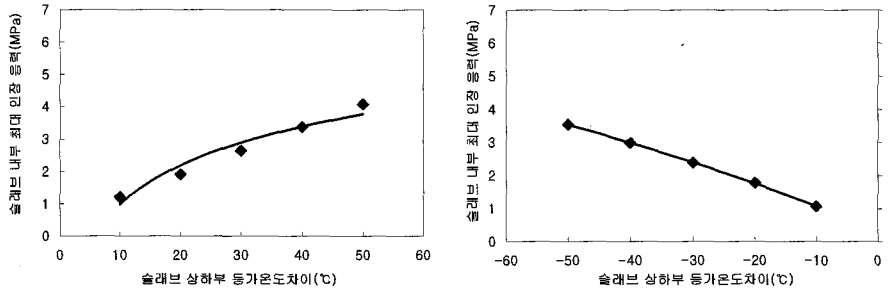
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 167. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(아스팔트)

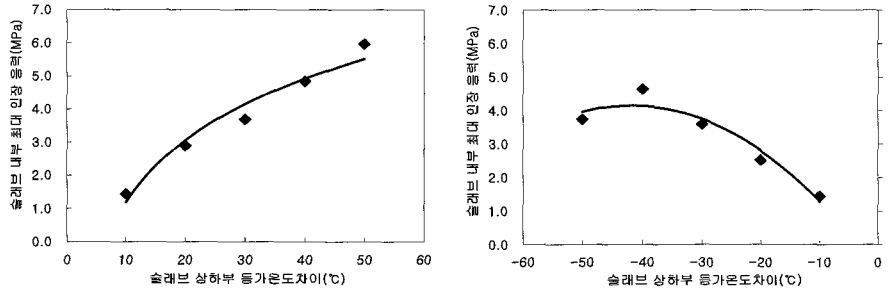
⑥ 노상



(a)슬래브 길이 4.5m



(b)슬래브 길이 6.0m

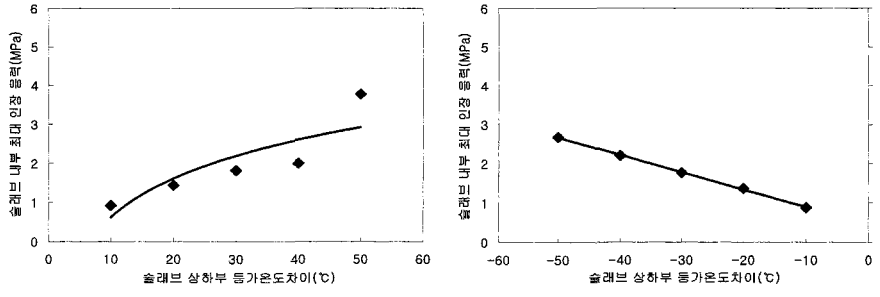


(c)슬래브 길이 7.5m

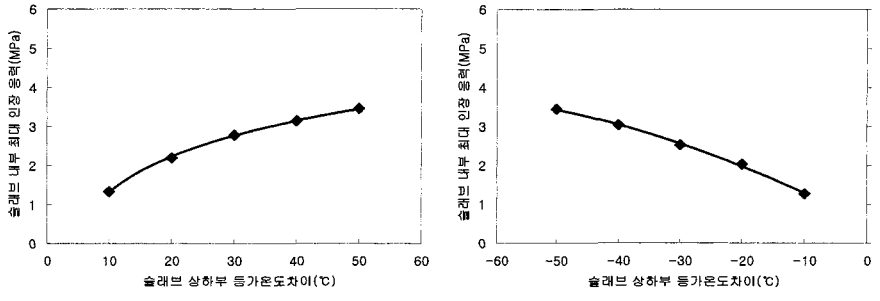
그림 168 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(노상)

(다) 슬래브 두께 20cm 인 경우

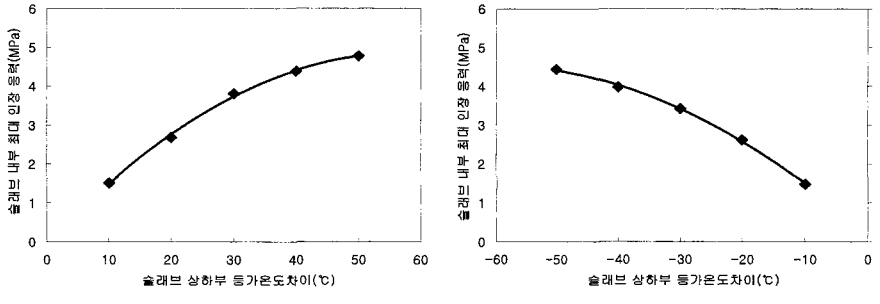
① 분리막을 설치한 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



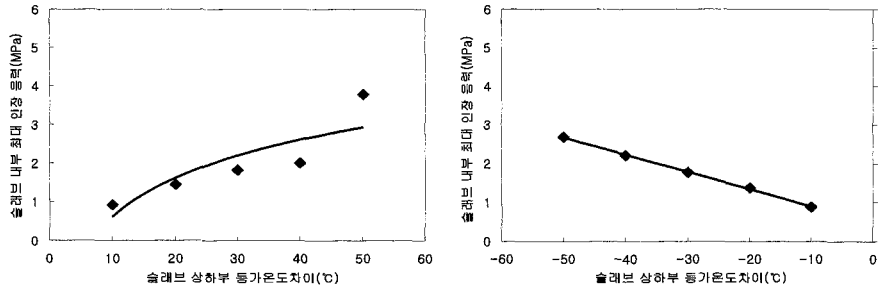
(b)슬래브 길이 6.0m



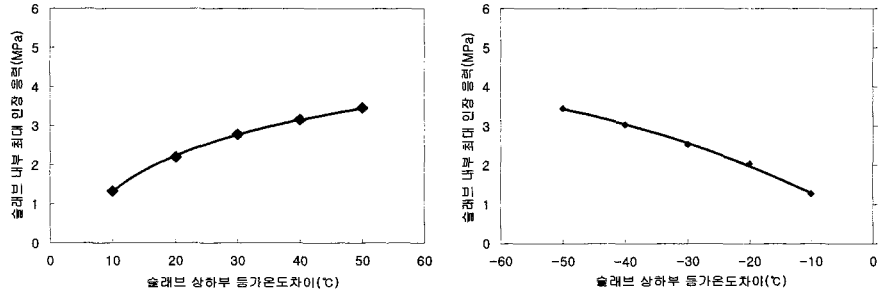
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 169. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 린 콘크리트)

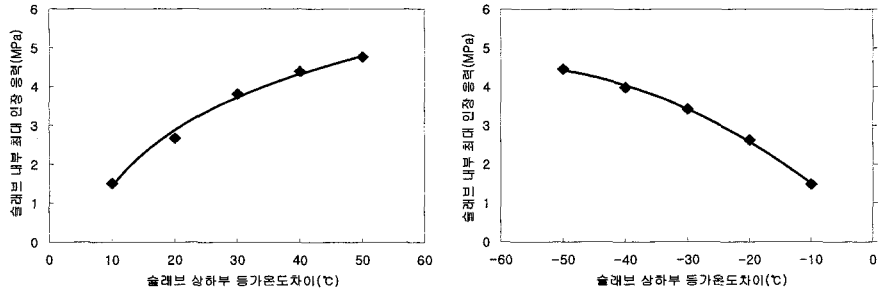
② 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



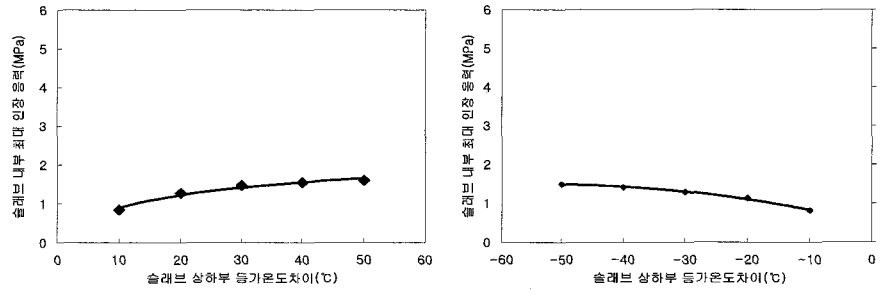
(b)슬래브 길이 6.0m



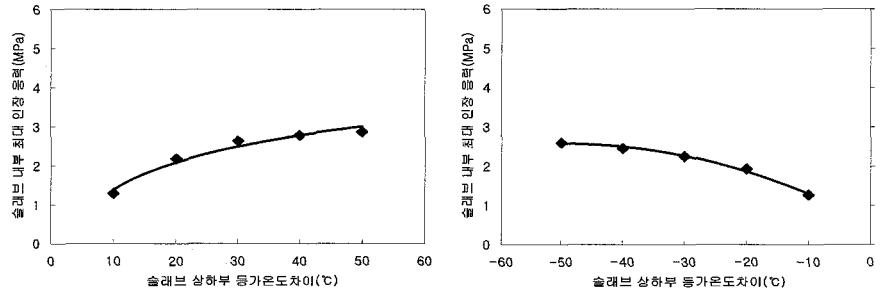
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 170. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(린 콘크리트)

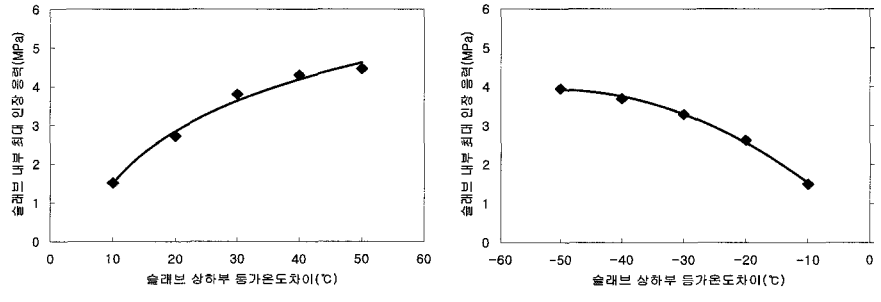
③ 분리막을 설치한 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



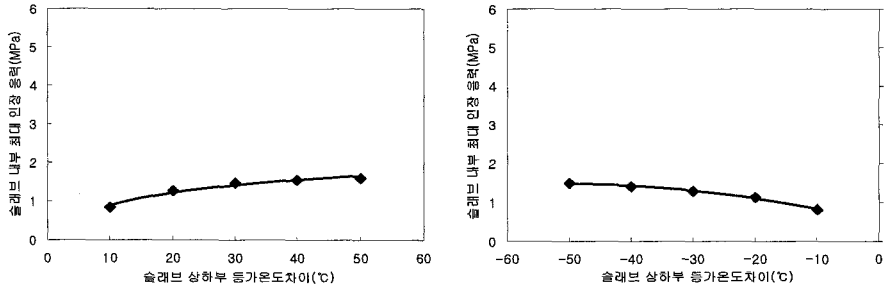
(b)슬래브 길이 6.0m



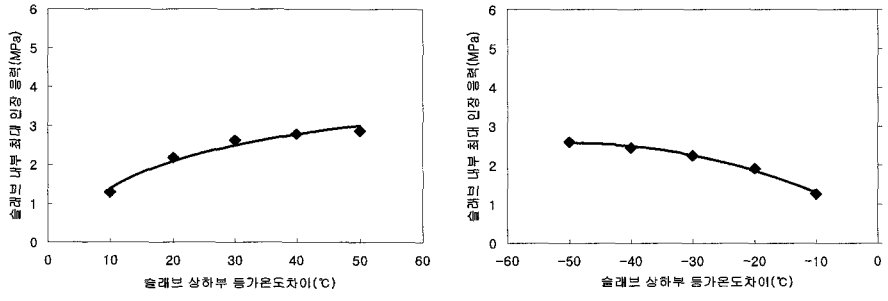
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 171. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 쇄석)

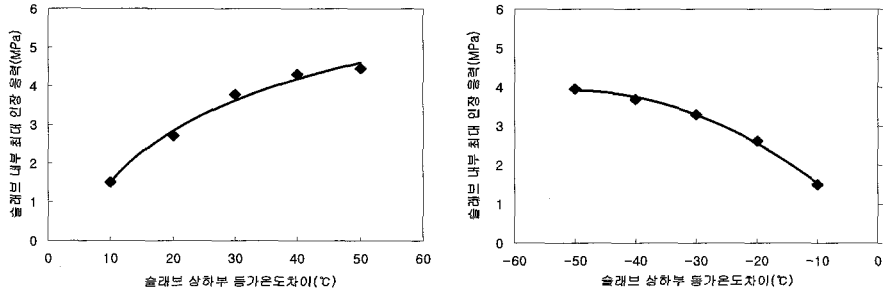
④ 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



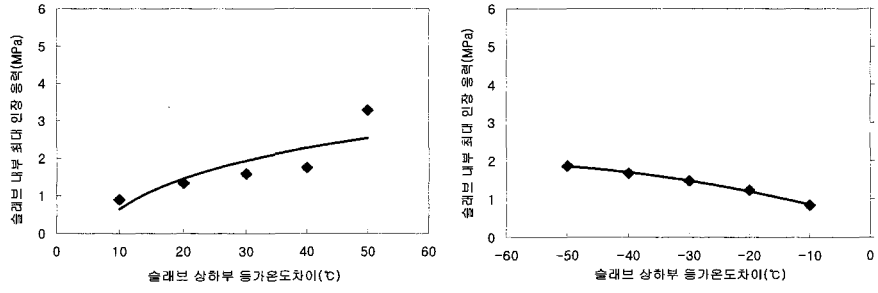
(b)슬래브 길이 6.0m



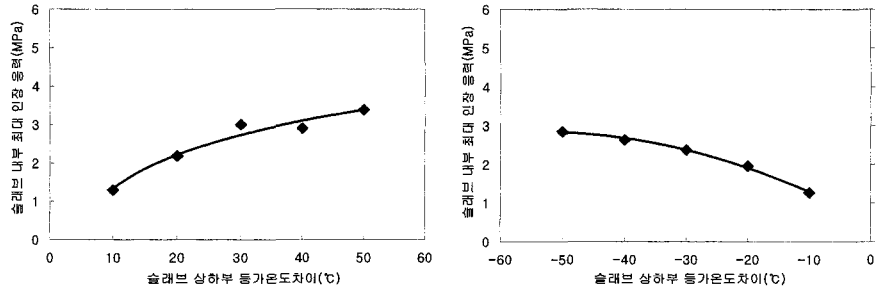
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 172. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(쇄석)

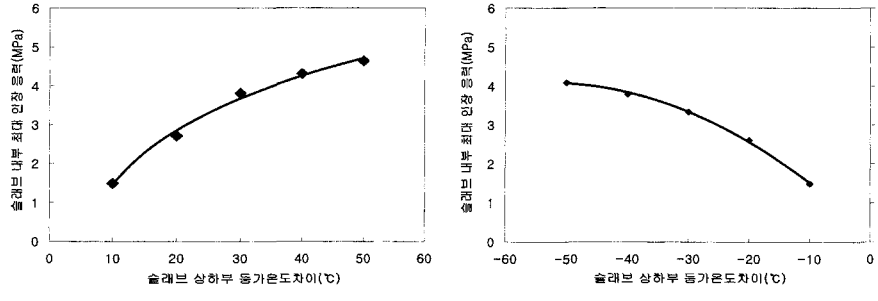
⑤ 아스팔트



(a)슬래브 길이 4.5m



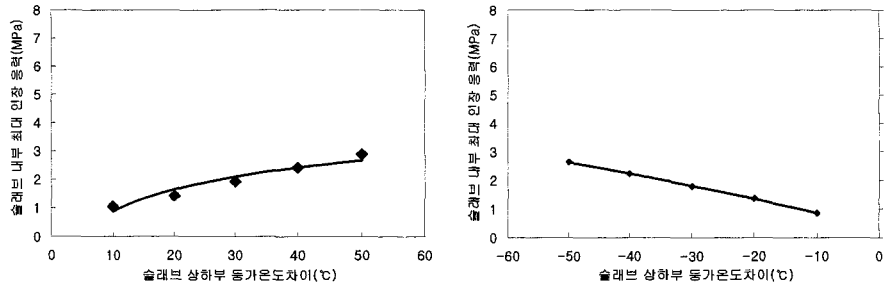
(b)슬래브 길이 6.0m



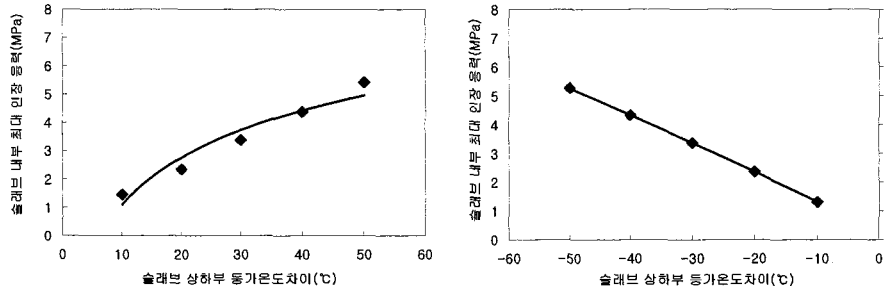
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 173. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(아스팔트)

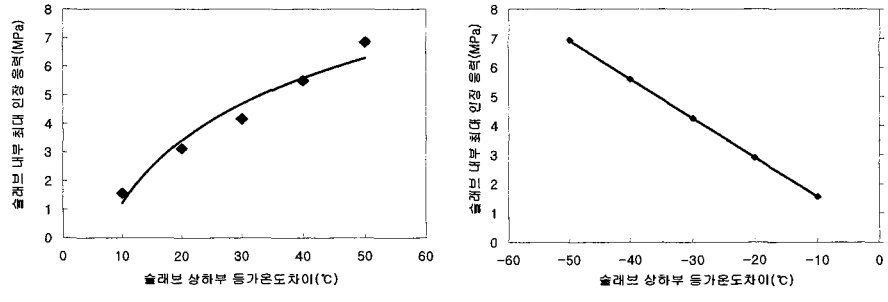
⑥ 노상



(a)슬래브 길이 4.5m



(b)슬래브 길이 6.0m

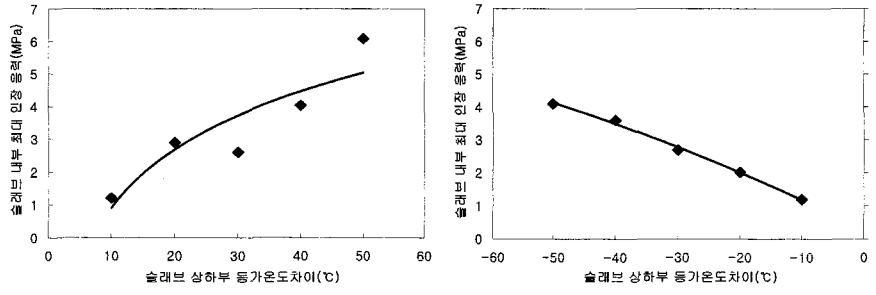


(c)슬래브 길이 7.5m

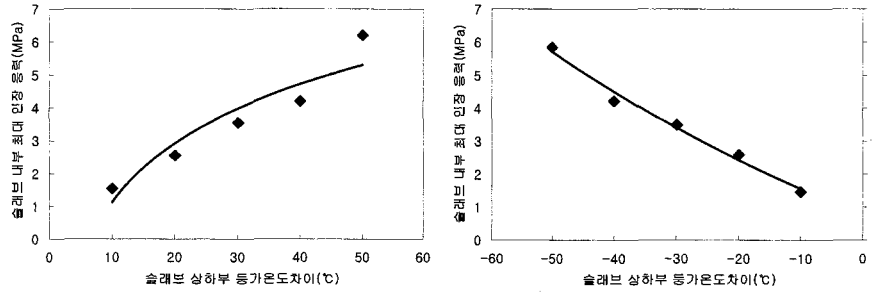
그림 174. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(노상)

(라) 슬래브 두께 15cm 인 경우

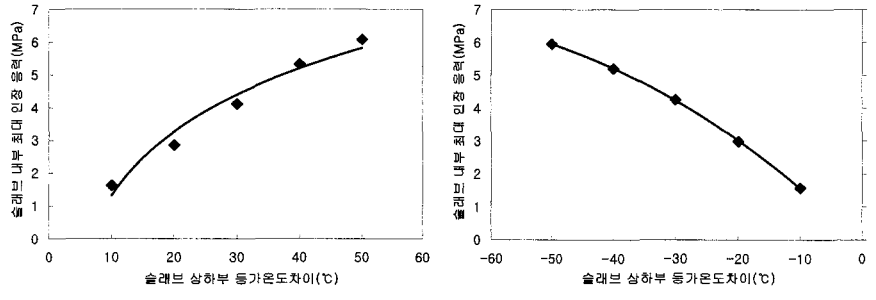
① 분리막을 설치한 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



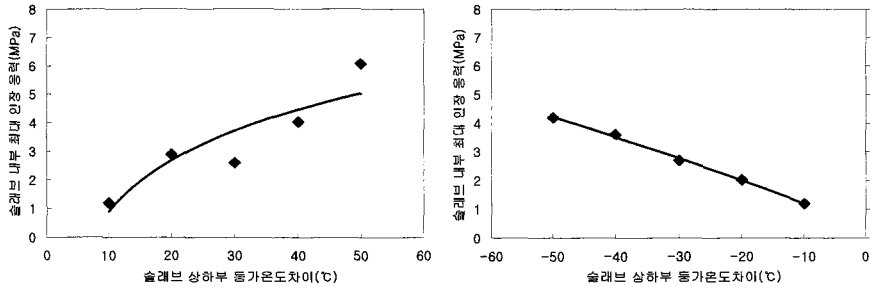
(b)슬래브 길이 6.0m



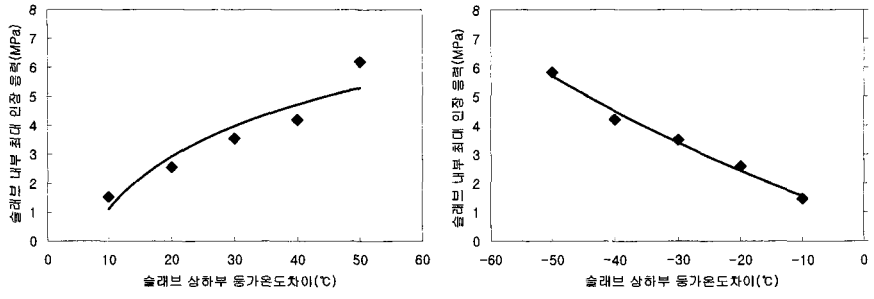
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 175. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 린 콘크리트)

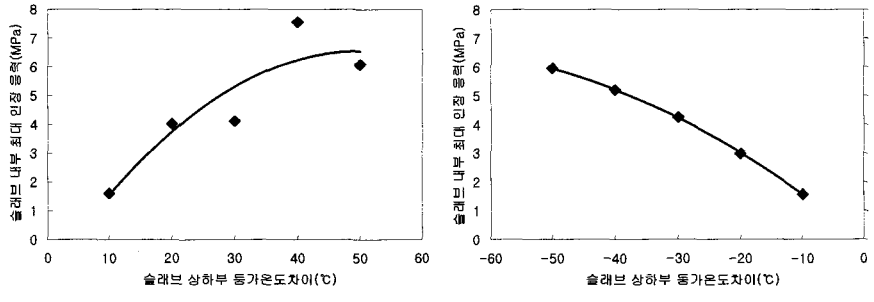
② 린 콘크리트



(a)슬래브 길이 4.5m



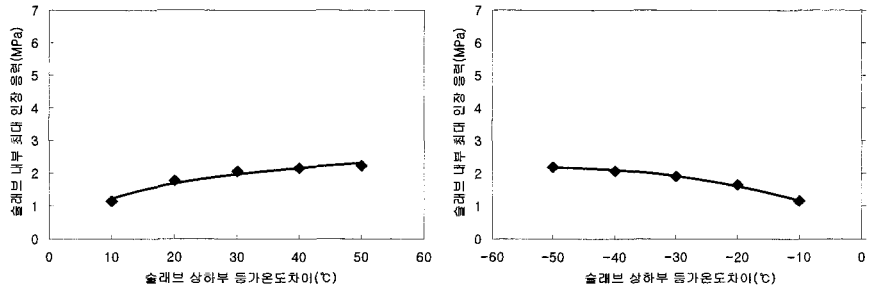
(b)슬래브 길이 6.0m



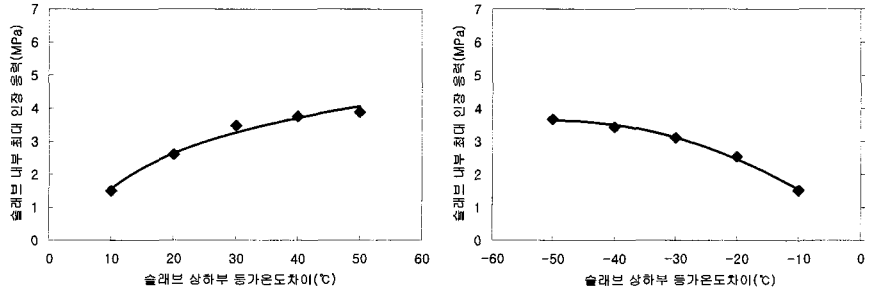
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 176. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(린 콘크리트)

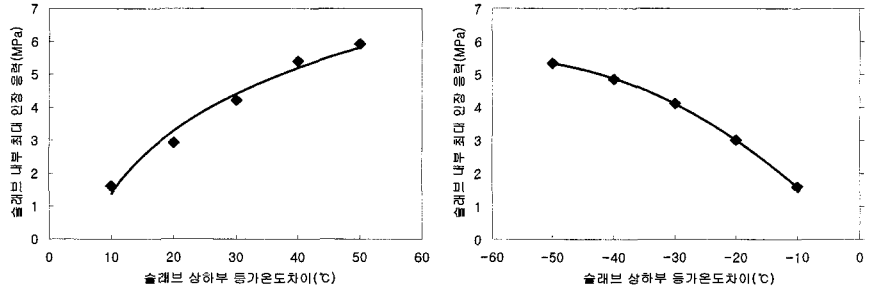
③ 분리막을 설치한 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



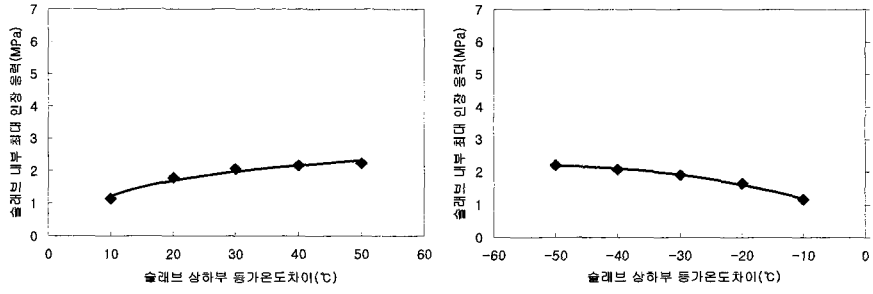
(b)슬래브 길이 6.0m



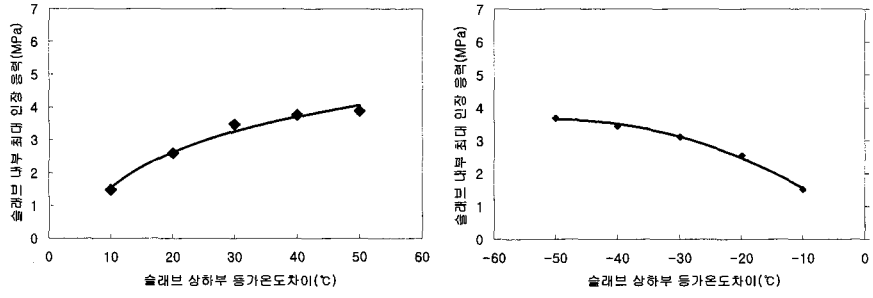
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 177. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(분리막을 설치한 쇄석)

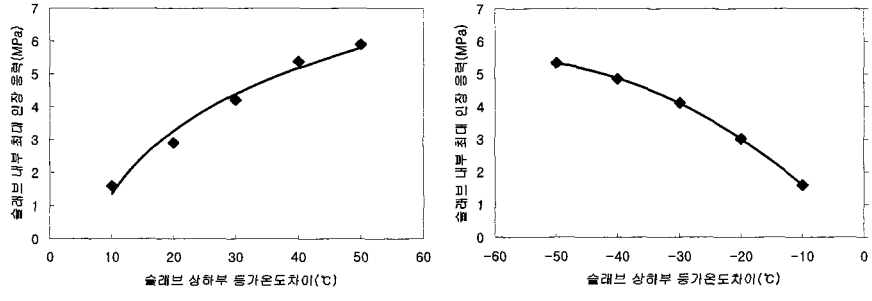
④ 쇄석



(a)슬래브 길이 4.5m



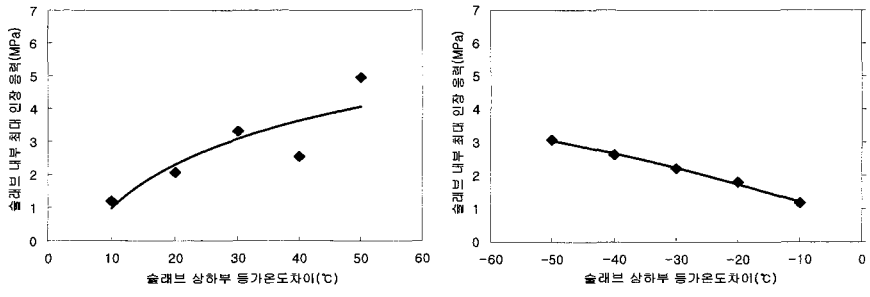
(b)슬래브 길이 6.0m



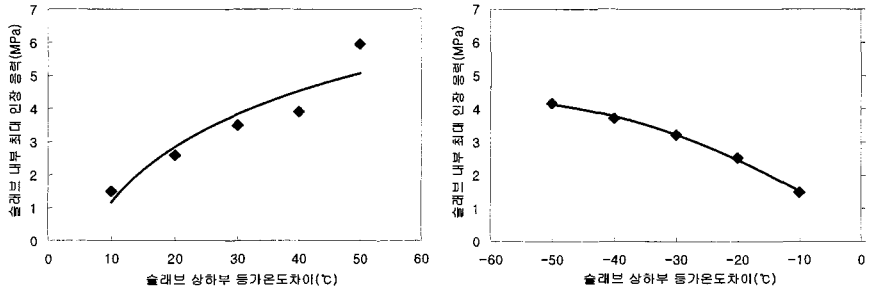
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 178. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(쇄석)

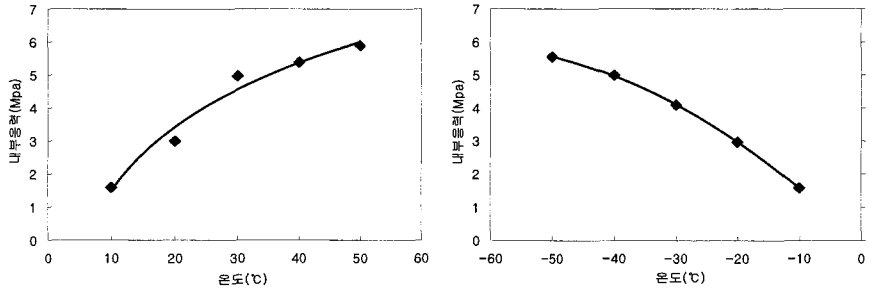
⑤ 아스팔트



(a)슬래브 길이 4.5m



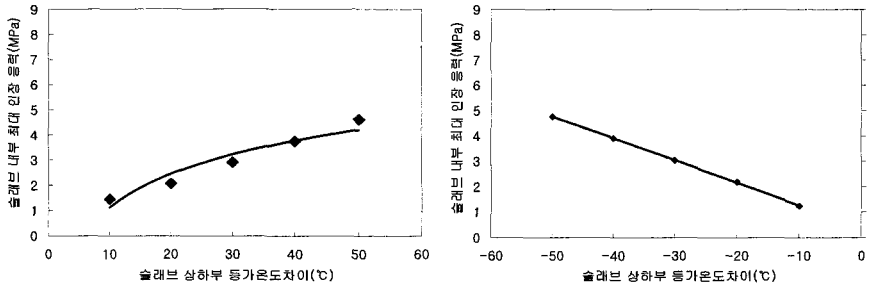
(b)슬래브 길이 6.0m



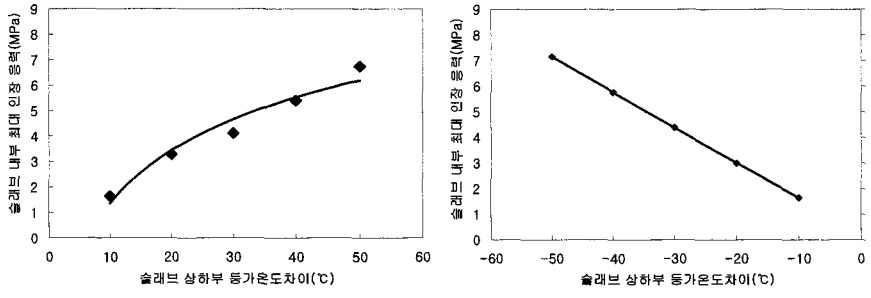
(c)슬래브 길이 7.5m

그림 179. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(아스팔트)

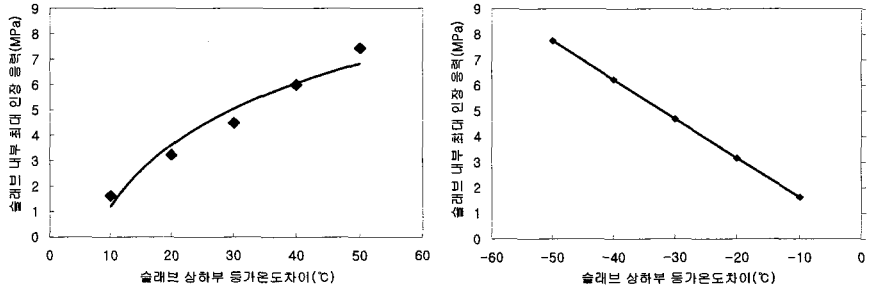
⑥ 노상



(a)슬래브 길이 4.5m



(b)슬래브 길이 6.0m



(c)슬래브 길이 7.5m

그림 180. 슬래브 상·하부 등가온도 차이를 고려한 슬래브 최대 내부 응력(노상)

환경하중을 고려한 슬래브 상·하부간 등가온도 차이를 이용하여 슬래브 두께 및 길이 길이별, 보조기층의 종류에 따라 슬래브 내부 최대응력이 다양하게 발생하였다. 또한, 양(+)의 슬래브 상·하부 등가온도 차이는 로그함수와 같은 선형으로 표현되는 경향이 큼을 확인할 수 있었다. 선형에 크게 벗어나는 응력은 슬래브 중앙부에 최대 응력이 발생한 것이 아닌 슬래브 중앙의 측면부로 최대 응력이 발생하였다고 판단된다.

다. 회귀분석을 통한 응력식 개발

환경하중인 슬래브 상·하부간 등가온도 차이를 이용하여 슬래브 두께 및 길이별, 보조기층 종류에 따라 슬래브 내부 최대 응력을 구조해석을 통하여 산출하였다. 적정줄눈 간격을 역학적으로 산출하기 위해 슬래브 내부 최대응력, 슬래브 상·하부간 등가온도 차이, 슬래브 두께 및 길이 통계분석 프로그램인 SPSS를 사용하여 식 (11)의 관계를 선형 중다 회귀분석을 실시하였다.

$$\log\sigma_{\max} = a + b\times\log(\Delta T) + c\times\log(L) + d\times\log(t) \qquad (1)$$

여기서, $\sigma_{\max}$: 환경하중에 의한 슬래브 단부에서의 최대 응력(MPa)

ΔT : 슬래브 상하부 간의 등가온도차이(℃)

L : 줄눈간격(m)

t : 슬래브의 두께(mm)

표 34. 분리막을 설치한 린콘크리트 보조기층의 구조해석결과를 이용한 회귀분석 결과

계수[a]

모형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차한계	VIF
1	(상수)	-,618	,150		-4,124	,000	-,920	-,316					
	VAR00002	,675	,110	,671	6,143	,000	,454	,896	,671	,671	,671	1,000	1,000
2	(상수)	-1,600	,190		-8,438	,000	-1,982	-1,218					
	VAR00002	,675	,081	,671	8,370	,000	,513	,838	,671	,780	,671	1,000	1,000
	VAR00003	1,277	,201	,510	6,357	,000	,872	1,681	,510	,688	,510	1,000	1,000
3	(상수)	,645	,202		3,189	,003	,237	1,052					
	VAR00002	,675	,038	,671	17,557	,000	,598	,753	,671	,935	,671	1,000	1,000
	VAR00003	1,277	,096	,510	13,333	,000	1,084	1,470	,510	,695	,510	1,000	1,000
	VAR00004	-,960	,077	-,474	-12,409	,000	-1,116	-,804	-,474	-,882	-,474	1,000	1,000

a. 종속변수: VAR00001

표 35. 린콘크리트 보조기층의 구조해석결과를 이용한 회귀분석 결과

계수[a]

모형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차한계	VIF
1	(상수)	-,636	,159		-3,987	,000	-,957	-,315					
	VAR00002	,694	,117	,659	5,940	,000	,459	,930	,659	,659	,659	1,000	1,000
2	(상수)	-1,518	,204		-7,439	,000	-1,929	-1,107					
	VAR00002	,649	,092	,616	7,055	,000	,464	,834	,659	,725	,613	,992	1,008
	VAR00003	1,235	,226	,477	5,468	,000	,780	1,690	,533	,632	,475	,992	1,008
3	(상수)	-,780	,179		-4,348	,000	-1,142	-,419					
	VAR00002	,721	,066	,684	10,990	,000	,588	,853	,659	,856	,672	,967	1,034
	VAR00003	1,475	,163	,570	9,062	,000	1,147	1,802	,533	,807	,554	,946	1,057
	VAR00004	-,440	,064	-,436	-6,849	,000	-,569	-,310	-,187	-,718	-,419	,925	1,081

a. 종속변수: VAR00001

표 36. 분리막을 설치한 쇄석 보조기층의 구조해석결과를 이용한 회귀분석 결과

계수[a]

모형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차한계	VIF
1	(상수)	-,545	,175		-3,113	,003	-,897	-,193					
	VAR00002	,589	,128	,561	4,591	,000	,331	,848	,561	,561	,561	1,000	1,000
2	(상수)	-1,885	,181		-10,400	,000	-2,250	-1,520					
	VAR00002	,589	,077	,561	7,640	,000	,434	,744	,561	,751	,561	1,000	1,000
	VAR00003	1,743	,192	,666	9,078	,000	1,356	2,130	,666	,804	,666	1,000	1,000
3	(상수)	,300	,180		1,667	,103	-,063	,664					
	VAR00002	,589	,034	,561	17,187	,000	,520	,658	,561	,933	,561	1,000	1,000
	VAR00003	1,743	,085	,666	20,422	,000	1,571	1,915	,666	,951	,666	1,000	1,000
	VAR00004	-,935	,069	-,442	-13,555	,000	-1,074	-,796	-,442	-,898	-,442	1,000	1,000

a. 종속변수: VAR00001

표 37. 쇄석 보조기층의 구조해석결과를 이용한 회귀분석 결과

계수[a]

모형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차한계	VIF
1	(상수)	-,548	,174		-3,154	,003	-,898	-,198					
	VAR00002	,592	,127	,565	4,645	,000	,335	,848	,565	,565	,565	1,000	1,000
2	(상수)	-1,877	,180		-10,406	,000	-2,240	-1,513					
	VAR00002	,592	,077	,565	7,713	,000	,437	,746	,565	,755	,565	1,000	1,000
	VAR00003	1,728	,191	,663	9,046	,000	1,343	2,113	,663	,803	,663	1,000	1,000
3	(상수)	,299	,179		1,671	,102	-,062	,660					
	VAR00002	,592	,034	,565	17,391	,000	,523	,660	,565	,934	,565	1,000	1,000
	VAR00003	1,728	,085	,663	20,397	,000	1,557	1,899	,663	,951	,663	1,000	1,000
	VAR00004	-,931	,068	-,442	-13,593	,000	-1,069	-,793	-,442	-,899	-,442	1,000	1,000

a. 종속변수: VAR00001

표 38. 아스팔트 보조기층의 구조해석결과를 이용한 회귀분석 결과

계수[a]

모형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차한계	VIF
1	(상수)	-.586	.167		-3.505	.001	-.922	-.249					
	VAR00002	.636	.123	.608	5.187	.000	.389	.882	.608	.608	.608	1.000	1.000
2	(상수)	-1.760	.196		-8.963	.000	-2.156	-1.365					
	VAR00002	.636	.084	.608	7.607	.000	.467	.804	.608	.750	.608	1.000	1.000
	VAR00003	1.528	.208	.586	7.343	.000	1.109	1.947	.586	.738	.586	1.000	1.000
3	(상수)	.598	.199		3.012	.004	.198	.998					
	VAR00002	.636	.038	.608	16.831	.000	.560	.712	.608	.930	.608	1.000	1.000
	VAR00003	1.528	.094	.586	16.247	.000	1.338	1.717	.586	.926	.586	1.000	1.000
	VAR00004	-1.009	.076	-.479	-13.277	.000	-1.162	-.856	-.479	-.895	-.479	1.000	1.000

a. 종속변수: VAR00001

표 39. 노상의 구조해석결과를 이용한 회귀분석 결과

계수[a]

모형		비표준화 계수		표준화 계수	t	유의확률	B에 대한 95% 신뢰구간		상관계수			공선성 통계량	
		B	표준오차	베타			하한값	상한값	0차	편	부분	공차한계	VIF
1	(상수)	-.670	.168		-3.974	.000	-1.009	-.330					
	VAR00002	.745	.124	.664	6.028	.000	.496	.993	.664	.664	.664	1.000	1.000
2	(상수)	-1.858	.197		-9.424	.000	-2.255	-1.461					
	VAR00002	.745	.084	.664	8.878	.000	.576	.913	.664	.798	.664	1.000	1.000
	VAR00003	1.546	.209	.554	7.402	.000	1.125	1.966	.554	.741	.554	1.000	1.000
3	(상수)	.405	.231		1.750	.087	-.061	.871					
	VAR00002	.745	.044	.664	16.927	.000	.656	.833	.664	.931	.664	1.000	1.000
	VAR00003	1.546	.110	.554	14.112	.000	1.325	1.766	.554	.905	.554	1.000	1.000
	VAR00004	-.968	.088	-.429	-10.936	.000	-1.146	-.789	-.429	-.855	-.429	1.000	1.000

a. 종속변수: VAR00001

이와 같이 회귀분석은 슬래브 내부 최대 응력을 종속변수로 설정하였고, 슬래브 상·하부간 등가온도, 슬래브 길이 그리고 슬래브 두께를 각각 독립변수를 사용하여 회귀분석을 실시하였다. 본 연구에서의 회귀분석 결과는 콘크리트 슬래브 및 보조기층의 가정된 물성치에 한해서 구조해석된 자료를 사용하였으며, 이에 대한 조건에서 사용할 수 있으며 식 (11)의 회귀계수는 다음 표 40과 같이 보조기층 종류에 따라 다음과 같이 제시하였다.

표 40. 보조기층 종류에 따른 응력회귀 계수

보조기층 종류	회귀계수			
	a	b	c	d
린 콘크리트	−0.780228	0.720546	1.474503	−0.439765
린 콘크리트 (분리막)	0.644746	0.675133	1.276594	−0.95996
아스팔트	0.598163	0.635649	1.527768	−1.00873
쇄석 (분리막)	0.300452	0.589179	1.743045	−0.93477
쇄석	0.299014	0.591806	1.72822	−0.93057
노상	0.404756	0.744574	1.545617	−0.96771

3. 결 론

3차원 유한요소 해석 프로그램인 EverFe 2.24를 사용하여, 교통하중 및 환경하중에 대한 구조해석을 실시하였고, 비교 및 분석은 다음과 같다.

(1) 교통하중(80kN)을 슬래브 측면부 중앙에 슬래브 길이와 두께를 다르게 하여 구조해석을 실시한 결과, 슬래브 두께별 분석 결과는 두께가 두꺼울수록 슬래브 내부에 최대 인장응력이 감소하였고, 보조기층 별 분석결과는 보조기층 종류에 따라서 슬래브 내부에 최대 인장응력이 다른 것을 파악할 수 있었다. 반면에, 슬래브 길이 별 분석결과는 길이의 변화에 대해 슬래브 최대 인장응력은 변화가 미비하였다.

(2) 콘크리트 슬래브에 상·하부 온도차이를 재하한 결과, 상·하부 온도차이가 적은 경우 슬래브 최대 인장응력은 슬래브 중앙부에 발생하였으며, 상·하부 온도차이가 커질수록 슬래브 최대 인장응력은 슬래브 중앙부 측면으로 이동하는 것을 파악할 수 있었다. 또한, 슬래브 상·하부 온도차이가 클수록 슬래브의 내부응력은 증가하는 형상이 나타났다.

(3) 환경하중을 고려한 슬래브 상·하부간 등가온도 차이를 이용하여 슬래브 두께 및 길이 길이별, 보조기층의 종류에 따라 슬래브 내부 최대응력이 다양하게 발생하였다. 또한, 양(+)의 슬래브 상·하부 등가온도 차이는 로그함수와 같은 선형으로 표현되는 경향이 큼을 확인할 수 있었다. 로그선형에 크게 벗어나는 응력은 슬래브 중앙부에 최대 응력이 발생한 것이 아닌 슬래브 중앙의 측면부로 최대 응력 값이 계산되었다.

(4) 적정줄눈 간격을 역학적으로 산출하기 위해 슬래브 내부 최대응력, 슬래브 상·하부간 등가온도 차이, 슬래브 두께 및 길이 통계분석 프로그램인 SPSS를 사용하여 선형 중다 회귀분석을 실시하였고, 콘크리트 슬래브 최대 응력, 슬래브 상·하부 등가온도차이, 슬래브 두께 및 길이를 사용하여 응력회귀식을 제안하였다.

5절 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격 제시

1. 적정 줄눈간격 산출의 필요성

현재 국내 줄눈콘크리트포장 설계 시 적용되는 적정 줄눈간격 산정방식은 국내 지역별 온·습도의 변화 및 사용되는 골재의 열팽창계수 등의 영향인자를 지역별 시공환경에 맞춰 충분히 고려하지 않고 사용하고 있으며, 획일적으로는 6m로, 미국에서는 대체로 4.5m로 설계되고 있는 현실에 비추어 볼 때 과소 설계의 우려가 있어, 슬래브 내 무작위 균열 및 우각부 파손과 줄눈의 과도한 벌어짐 등에 따른 유지보수 비용 증가에 따른 문제점이 발생할 수 있다. 또한, 콘크리트 포장의 줄눈부는 전체적인 포장의 거동에 중요한 영향을 미친다. 불연속면은 슬래브 크기를 조절하여 포장 내 응력을 완화시켜주는 역할을 해주는 반면, 그 자체가 취약부이기도 하다.

기존의 줄눈콘크리트포장 시공 시 인위적으로 줄눈을 컷팅하여 설치하던 것과는 달리, 본 연구과제의 시작품인 줄눈균열 유도장치를 이용할 때 줄눈간격을 새롭게 산정해야 할 필요가 있다. 따라서, AASHTO Guide의 줄눈간격 산정공식을 변환한 확률론적 줄눈폭 예측모형을 개발하여 국내 환경에 적합한 줄눈 간격을 예측하고자 한다.

시작품으로써 개발된 줄눈 균열 유도장치는 하중전달 메카니즘이 다웰바(Dowel bar)가 미설치된 무다웰 줄눈과 같이 슬래브 간 하중의 전달이 골재 맞물림에 의해서만 일어나므로 다웰바가 설치된 경우에 비하여 줄눈간격을 줄여서 설계 및 시공할 필요가 있다. 줄눈간격을 줄일 경우 공사비가 다소 증가하는 단점이 있으나 기존의 6m는 미국에 비하여 비교적 과대하기 때문에 Curl-up에 의한 Top-down 균열 또는 우각부 균열 발생 가능성이 높으므로 줄눈균열 유도장치의 사용으로 줄눈간격을 줄인다면 포장의 파손을 감소시킬 수도 있을 뿐만 아니라 합리적인 적정 줄눈간격의 설계는 포장의 응력을 적절하게 완화시켜 주면서도 취약점을 보강함으로써 포장의 공용성을 증진시켜줄 수 있다..

따라서 본 연구에서는 줄눈균열 유도장치 설치줄눈과 동일한 메카니즘을 갖는 무다웰 줄눈부를 조사하여 하중전달율이 급격히 저하되는 줄눈 균열폭을 찾고 이를 기준으로 적정 줄눈간격을 산정한다. 또한, 지역별 최대 일교차에 따른 콘크리

트 슬래브 등가온도를 이용하여 적정줄눈간격을 산정한다. 이를 위하여 수집된 전국 각 지역의 장기적인 기상자료 및 한국형 포장설계 프로그램과 로 개발된 역학적 이론식 모델에 입력하여 지역별 적정 줄눈간격을 제시하고자 한다.

2. AASHTO 줄눈간격 산정식을 이용한 모델

현재 줄눈 간격 산정에 있어서 국내 콘크리트 포장에서 주로 사용되는 굵은골재의 종류별 열팽창계수에 대한 고려와 온·습도 변화 및 하부지반과의 마찰을 충분히 고려하지 않고 경험적인 방법으로 AASHTO 줄눈간격 산정식에 의해 획일적으로 설계되고 있어, 과대 또는 과소 설계가 될 경우 무작위 균열 발생 및 공사비 증가 등의 문제점이 발생된다. 또한, 3차원 구조해석 결과에서도 보조기층 별 슬래브의 내부 응력 차이는 발생하였으나, 슬래브에 대한 거동은 큰 차이가 없는 것을 확인하였다.

정진훈(2006)은 보조기층 종류에 상관없이 콘크리트 슬래브의 줄눈폭은 변화는 유사함을 알 수 있었다. 또한 국내 및 해외 문헌 조사 결과, 콘크리트 슬래브의 줄눈폭이 5mm 발생 시, 하중전달율(LTE)이 급격히 떨어지는 것으로 보고되었다. 따라서 본 연구에서는 아래의 식을 온도 및 습도를 이용한 줄눈폭 예측모형을 사용하여, 보다 합리적으로 적정 줄눈 간격을 예측하고자 한다. 이를 위하여 전국 각 지역의 연중 온도 차이를 장기적으로 조사하여 줄눈의 거동을 계산하고 허용 줄눈폭 변화를 만족하는 적정 줄눈간격 계산 및 현장 검증시험 등을 통해 적정 유도균열 간격을 제시하고자 한다.

$$\Delta L = L \cdot [(\alpha_c \cdot T) + \epsilon_{sh}] \qquad (11)$$

여기서, L = 줄눈 간격

α_c = 콘크리트의 열팽창계수

T = 연최고온도와 연최저온도의 차

ε_{sh} = 건조수축 변형률

앞에서 제시된 식 (1)에 적합한 계수를 입력하기위해 본 연구에서는 국내 29개 권역, 63개 지역의 30년간 최고·최저 온도 및 평균 상대습도 등의 기후 자료를 수집하고 정량화 하여 입력하였으며, 식 1을 통해 본 연구에서는 최종적으로 L(줄눈 간격)을 산출해 내는 것이 목표이므로, ΔL(줄눈 균열 폭)을 그림112와 같이 미국 LTPP 49-3011 구간에서 하중전달율이 급격하게 저하되는 줄눈 균열 폭이 5mm로 산정하여 줄눈 간격을 역산하였다. 이는 무다웰 줄눈의 하중전달 메커니즘이 본 연구의 줄눈균열 유도장치에 의한 균열의 메커니즘과 유사하다는 판단 하에 이 결과를 줄눈간격의 예측에 적용하였다.

또한, 건조수축 변형률인 ε_{sh}는 Bazant가 제안한 식 2에 의하여 추정하였다.

$$\varepsilon_{sh} = \varepsilon_{sh\infty}(1-h^3) \qquad (12)$$

여기서, h = 상대습도(%)

$\varepsilon_{sh\infty}$ = 최종건조수축 ($=1330-970y$)

y = $(390z^{-4}+1)^{-1}$

z = $0.381\sqrt{f_{c@28}} \cdot [1.25\sqrt{\frac{a}{c}}+0.5(\frac{g}{s})^2]^3\sqrt{\frac{1+\frac{s}{c}}{\frac{w}{c}}}-12$

a/c = 전체골재-시멘트 비

g/s = 굵은골재-잔골재 비

s/c = 잔골재-시멘트 비

w/c = 물-시멘트비

$f_{c@28}$ = 콘크리트의 28일 압축강도

가. AASHTO 줄눈간격 산정식을 이용한 국내 권역별 적정 줄눈간격 산출

국내 지역별 적정 줄눈간격 산출을 위해 표 41과 같이 63개 지역의 30년간 최고·최저 온도 및 평균 상대습도 등의 기후 자료를 기상청 홈페이지에서 수집하고 그림 181과 같이 국내에서 생산되는 암종의 약 90%를 차지하는 심성암 계열에 속하

는 화강암의 열팽창계수를 온도 및 습도를 이용한 줄눈폭 예측모형에 대입하였다. 또한, 그림 182와 같이 줄눈간격 산정 시 줄눈부 균열의 폭이 5mm 이상일 때 하중전달율이 급격히 떨어지므로 무다웰 줄눈의 하중전달 메카니즘이 본 연구의 줄눈 균열 유도장치에 의한 균열의 메카니즘과 유사하다는 판단 하에 5mm를 적정 줄눈간격 산출식에 적용하였다. 이를 바탕으로 온도 및 습도를 고려하여 표 41와 같이 지역별 적정 줄눈간격을 산출하였다.

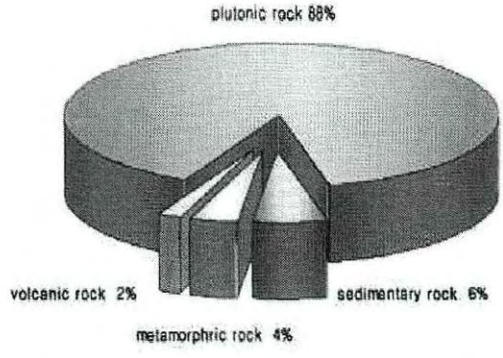


그림 181. 국내 암종 분포도 (이춘오 외 2006)

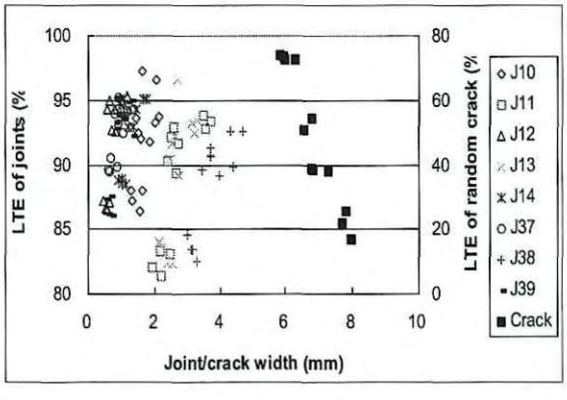


그림 182. 하중전달율과 임의 균열폭의 상관관계 (정진훈 2006)

표 41. 지역별 30년간 최고·최저 온도 및 평균 상대습도

권 역	지역	최고 온도	최저 온도	평균상대 습도	권 역	지역	최고 온도	최저 온도	평균상대 습도
강원 동해안	강 릉	36.6	-15.6	59.4	전남동부 남해안	고 흥	35.7	-12.3	65.1
	속 초	37.1	-15.6	64.0		여 수	35.4	-10.0	65.1
강원북부	인 제	36.5	-24.6	66.9	전북중부	임 실	35.7	-21.8	72.4
	철 원	34.6	-29.2	69.6		전 주	36.5	-15.1	68.7
강원남부	원 주	36.4	-21.2	54.5		정 읍	36.7	-15.1	69.7
강원중부	춘 천	36.2	-24.5	70.4		장 수	34.0	-23.2	72.8
	홍 천	36.2	-26.7	64.5	전북남부	남 원	37.0	-19.7	70.1
강원산간	대관령	32.3	-25.6	73.7	전북서부	부 안	35.7	-19.2	73.6
	태 백	35.0	-20.2	64.2		군 산	35.7	-14.7	72.5
경기남부	이 천	35.9	-23.2	66.3	경북북부	대 구	38.3	-11.8	59.2
	수 원	35.9	-18.3	65.7		안 동	36.7	-17.8	65.5
경기중부	서 울	36.2	-18.6	63.3		영 덕	36.9	-14.2	64.3
경기서부	인 천	37.0	-18.2	67.8		울 진	36.3	-13.3	66.3
	강 화	35.7	-22.1	67.3		의 성	37.3	-19.1	65.2
경기동부	양 평	37.1	-21.8	69.5		문 경	35.2	-17.4	67.8
충남남부	금 산	35.5	-19.7	67.4	경남남부	거 제	35.2	-10.1	63.4
	부 여	37.0	-17.6	70.5		남 해	37.2	-11.6	63.2
충남중부	대 전	35.6	-17.4	67.3		마 산	37.0	-10.5	62.0
	천 안	36.7	-23.9	68.2		부 산	34.9	-10.6	63.6
충북북부	제 천	35.5	-26.0	66.3		산 청	37.2	-13.3	62.7
	충 주	36.3	-19.3	67.0		진 주	37.5	-15.7	67.6
	보 은	35.5	-18.7	63.2		통 영	36.3	-10.7	65.5
충북서해안	보 령	34.9	-14.8	70.7	경남서부	거 창	37.0	-15.8	68.1
충북중부	청 주	36.2	-18.1	65.1		합 천	38.4	-14.8	64.8
	추풍령	36.1	-17.5	66.2	경남중부	밀 양	38.5	-14.8	65.6
충남서해안	서 산	37.1	-18.7	72.0	경남동부	울 산	37.4	-10.8	60.9
전남중부	광 주	35.8	-12.5	67.5	경북서부	구 미	37.0	-13.7	62.3
	순 천	37.4	-16.0	68.0		영 주	37.2	-18.5	63.7
전남서부 남해안	목 포	36.1	-10.2	71.8		영 천	37.9	-14.8	64.5
	완 도	36.3	-9.1	71.0	경북동해안	포 항	37.7	-11.7	61.8
	해 남	35.5	-14.1	70.0	제주	제 주	37.4	-3.2	68.4
						서귀포	35.6	-3.3	67.6

표 42. 지역별 적정 줄눈간격 산출 결과

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)
강원 동해안	강 릉	6.0	전남동부 남해안	고 흥	7.0
	속 초	6.0		여 수	6.5
강원북부	인 제	6.0	전북중부	임 실	7.0
	철 원	6.0		전 주	6.5
강원남부	원 주	6.0		정 읍	7.0
강원중부	춘 천	6.0		장 수	7.0
	홍 천	6.0	전북남부	남 원	6.5
강원산간	대관령	6.5	전북서부	부 안	7.0
	태 백	6.0		군 산	7.0
경기남부	이 천	6.0	경북북부	대 구	6.0
	수 원	6.0		안 동	6.5
경기중부	서 울	6.0		영 덕	6.5
경기 서해안	인 천	6.5		울 진	6.5
	강 화	6.0		의 성	6.5
경기동부	양 평	6.0		문 경	6.0
충남남부	금 산	6.5	경남남부	거 제	7.0
	부 여	7.0		남 해	7.0
충남중부	대 전	6.5		마 산	6.5
	천 안	6.5		부 산	6.5
충북북부	제 천	6.0		산 청	6.5
	충 주	6.5		진 주	7.0
	보 은	6.5		통 영	7.0
충북서해안	보 령	7.0	경남서부	거 창	6.5
충북중부	청 주	6.0		합 천	6.5
	추풍령	6.5	경남중부	밀 양	6.5
충남서해안	서 산	7.0	경남동부	울 산	6.5
전남중부	광 주	7.5	경북서부	구 미	6.5
	순 천	7.0		영 주	6.5
전남서부 남해안	목 포	7.0		영 천	6.5
	완 도	7.5	경북동해안	포 항	6.0
	해 남	7.0	제주	제 주	7.5
				서귀포	7.5

한 예시로, 줄눈폭 및 온도 및 습도를 이용한 줄눈간격 모델을 사용한 국내 지역별 줄눈간격 산출 결과 중 지역별 환경하중의 영향이 상이한 강원도 인제시와 제주도 제주시의 줄눈간격 산출에 대한 세부 과정 및 적용계수에 대한 비교는 다음의 표 43과 같다.

표 43. 제주시, 인제시 적정 줄눈 간격 주요 입력변수

입력 변수	제주시	인제시
열팽창계수(α_c)	$9.41X10^{-6}$	$9.41X10^{-6}$
연 최고온도와 최저온도차(℃, T)	40.6℃	61.1℃
건조수축 변형율(ε_{sh})	247.252	254.506
계산 결과	7.83m	6.38m
적정 줄눈 간격 제안	7.5	6m

콘크리트의 열팽창계수(α)는 국내 석재산지에서 90%이상 생산되는 화강암의 열팽창계수를 측정하여 9.41$\mu\varepsilon$/℃를 사용하였고, 연최고온도와 연최저온도의 차(T)는 인제시와 제주시의 30년간 기온자료를 분석하여 각각 61.1℃, 40.6℃로 산정하였다.

연중 최고와 최저온도의 차이가 크지 않은 지역의 경우, 온도차이가 큰 지역보다 좁은 줄눈간격이 계산되었으며, 모든 지역에 걸쳐, 현재 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 6m보다 넓은 줄눈간격이 계산되었다.

줄눈폭 및 온도 및 습도를 이용한 적정줄눈간격 모델을 사용하여 본 과제에서 개발될 줄눈 균열 유도장치를 이용하게 될 경우, 기존에 획일적으로 사용했던 6m보다 늘어난 6.5~7.5m의 줄눈 간격을 사용해야 할 것으로 계산되었다. 지역별 최고 및 최저온도와 평균 상대습도의 차이가 지역별 적정 줄눈간격을 결정하는데 가장 중요한 요소였으며, 본 연구에서 제시한 범위의 줄눈간격을 사용할 경우, 줄눈 콘크리트 포장에서 문제가 되어온 각종 균열 및 과도한 줄눈의 벌어짐으로 인한 실런트의 찢어짐 등의 파손을 감소시켜 포장의 장기적 공용성을 향상시키고 이에 따른 유지보수 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단되었다.

나. 역학적 방법에 의한 적정 줄눈간격 모델

(가) 개요

역학적 이론 및 해석을 기반으로 적정 줄눈간격을 산출하기위해 2차년도의 현장실험인 마찰 저항실험을 통하여 슬래브-보조기층 종류에 따라 마찰저항강성에 관한 입력변수를 도출하였고 마찰 강성을 이용하여 슬래브 두께와 길이 변화에 따라 포장 설계에 중요한 인자인 교통하중과 환경하중을 60가지 경우의 3차원 구조해석을 실시하였다. 슬래브 단부에서의 총 최대응력은 식(3)와 같이 교통하중과 환경하중의 결과를 중첩의 원리를 사용하여 구할 수 있다. 그리고 역학적인 방법에 의해 줄눈 간격을 결정하기 위해 국내에서 대표적으로 사용되는 줄눈 콘크리트 포장 형식인 린콘크리트 보조기층에 분리막을 사용한 폭3.6m 줄눈간격 6m 및 두께 300mm 슬래브 구조에 대한 최악의 상황을 기준으로 하여 그림 3과 같은 순서에 의하여 줄눈간격을 산출하였다. 기준최대환경응력은 국내 환경조건에서 가장 열악한 조건의 환경하중에 의해서 산출된 응력이며, 기준최대교통응력은 주어진 조건에서 등가단축하중 80kN이 슬래브 단부 중앙에 재하되었을 때을 의미하며, 설계환경응력은 응력회귀식을 이용하여 줄눈간격을 결정할 때 사용되어지는 응력을 말한다. 그리고 설계환경하중에 의하여 결정된 줄눈간격은 역학적 이론으로 결정된 최대 줄눈간격이며, 시공성을 고려한 적정줄눈 간격은 이보다 적게 설계되어져야 한다.

$$\sigma_{total} = \sigma_{traffic} + \sigma_{environmental} \qquad (13)$$

여기서, σ_{total} : 교통하중과 환경하중에 의해 슬래브 단부에서 유발되는 최대응력(MPa)

$\sigma_{traffic}$: 교통하중 의해 슬래브 단부에서 유발되는 최대응력(MPa)

$\sigma_{environmental}$: 환경하중 의해 슬래브 단부에서 유발되는 최대응력(MPa)

(나) 환경하중 수집

환경하중은 기상청 홈페이지를 이용하여 표 44와 같이 63개 지역의 30년간 최고·최저 일교 차이를 기상청 홈페이지에서 수집하였고, 표 44~47과 같이 최대 슬래브 상 · 하부 등가온도의 차이는 베타버젼 한국형 포장 설계법 프로그램의 서브프로그램인 온도예측 프로그램(박희문 2004)을 이용하여 63개 지역의 최대 슬래브 상 · 하부 등가온도 차이의 데이터를 획득하였다.

표 44. 지역별 30년간 최대 일교차

권 역	지 역	최대 일교차	권 역	지 역	최대 일교차
강원 동해안	강 릉	11.5	전남동부 남해안	고 흥	14.5
	속 초	9.5		여 수	8.7
강원북부	인 제	16.8	전북중부	임 실	16.7
	철 원	16.7		전 주	13.6
강원남부	원 주	15.9		정 읍	14.5
강원중부	춘 천	16		장 수	17.3
	홍 천	17.8	전북남부	남 원	16.6
강원산간	대관령	13.6	전북서부	부 안	13.6
	태 백	14.9		군 산	10
경기남부	이 천	15.8	경북북부	대 구	13.8
	수 원	14		안 동	15.9
경기중부	서 울	11.4		영 덕	13.8
경기 서해안	인 천	9.9		울 진	11.8
	강 화	13.2		의 성	18.3
경기동부	양 평	16.8		문 경	15.5
충남남부	금 산	16.4	경남남부	거 제	11.7
	부 여	15.5		남 해	12.2
충남중부	대 전	14.1		마 산	11.4
	천 안	15.2		부 산	9.6
충북북부	제 천	16.7		산 청	15.6
	충 주	16.4		진 주	15.1
	보 은	17		통 영	9.8
충북서해안	보 령	13	경남서부	거 창	16.9
충북중부	청 주	15.4		합 천	15.7
	추풍령	14.4	경남중부	밀 양	16.1
충남서해안	서 산	13.6	경남동부	울 산	12.6
전남중부	광 주	13	경북서부	구 미	16.1
	순 천	15.8		영 주	16.5
전남서부 남해안	목 포	10.7		영 천	16.2
	완 도	9	경북동해안	포 항	11.4
	해 남	13.7	제주	제 주	8.6
				서귀포	8.6

표 45. 지역별 두께 300mm 슬래브의 상·하부 최대 등가온도 차이

권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이	권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이
강원 동해안	강 릉	28.7	전남동부 남해안	고 흥	28.9
	속 초	29.9		여 수	28.8
강원북부	인 제	29.5	전북중부	임 실	29.4
	철 원	28.9		전 주	29.0
강원남부	원 주	29.3		정 읍	29.6
강원중부	춘 천	29.4	전북남부	남 원	36.0
	홍 천	29.9	전북서부	부 안	33.5
강원산간	대관령	31.5		군 산	25.0
경기남부	이 천	29.2	경북북부	대 구	29.8
	수 원	29.2		영 덕	29.2
경기중부	서 울	24.4		울 진	28.5
경기 서해안	인 천	29.0		의 성	30.1
	강 화	32.7		문 경	35.0
경기동부	양 평	29.2	경남남부	거 제	29.5
충남남부	금 산	33.5		남 해	30.7
	부 여	32.4		부 산	24.3
충남중부	대 전	30.8		산 청	34.0
	천 안	28.9		진 주	29.3
충북북부	제 천	29.6		통 영	29.3
	충 주	29.2	경남서부	거 창	33.2
	보 은	33.4		합 천	29.6
충북서해안	보 령	28.3	경남중부	밀 양	35.4
충북중부	청 주	29.6	경남동부	울 산	29.5
	추풍령	29.4	경북서부	구 미	31.8
충남서해안	서 산	29.9		영 주	29.6
전남중부	광 주	29.4		영 천	30.0
	순 천	29.5	경북동해안	포 항	29.9
전남서부 남해안	목 포	24.0	제주	제 주	29.6
	완 도	28.5			
	해 남	29.4			

표 46. 지역별 두께 250mm 슬래브의 상·하부 최대 등가온도 차이

권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이	권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이
강원 동해안	강 릉	27.3	전남동부 남해안	고 흥	27.5
	속 초	28.2		여 수	23.3
강원북부	인 제	31.1	전북중부	임 실	31.3
	철 원	28.9		전 주	30.2
강원남부	원 주	30.4		정 읍	32.6
강원중부	춘 천	30.3	전북남부	남 원	34.8
	홍 천	31.8	전북서부	부 안	32.3
강원산간	대관령	30.1		군 산	26.1
경기남부	이 천	31.0	경북북부	대 구	28.3
	수 원	27.5		영 덕	29.3
경기중부	서 울	25.4		울 진	30.8
경기 서해안	인 천	25.2		의 성	37.5
	강 화	31.4		문 경	33.6
경기동부	양 평	33.6	경남남부	거 제	28.3
충남남부	금 산	32.0		남 해	29.5
	부 여	30.9		부 산	25.4
충남중부	대 전	29.4		산 청	32.8
	천 안	30.1		진 주	29.6
충북북부	제 천	33.1		통 영	25.2
	충 주	31.9	경남서부	거 창	31.7
	보 은	32.2		합 천	30.9
충북서해안	보 령	26.9	경남중부	밀 양	34.3
충북중부	청 주	28.7	경남동부	울 산	30.6
	추풍령	30.0	경북서부	구 미	30.3
충남서해안	서 산	28.3		영 주	31.4
전남중부	광 주	27.8		영 천	32.7
	순 천	31.7	경북동해안	포 항	30.8
전남서부 남해안	목 포	25.1	제주	제 주	33.1
	완 도	25.8			
	해 남	32.4			

표 47. 지역별 두께 200mm 슬래브의 상·하부 최대 등가온도 차이

권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이	권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이
강원 동해안	강 릉	29.0	전남동부 남해안	고 흥	24.8
	속 초	27.9		여 수	24.5
강원북부	인 제	32.4	전북중부	임 실	30.8
	철 원	31.3		전 주	30.7
강원남부	원 주	31.5		정 읍	27.9
강원중부	춘 천	32.1	전북남부	남 원	30.3
	홍 천	32.7	전북서부	부 안	24.5
강원산간	대관령	31.6		군 산	27.7
경기남부	이 천	31.3	경북북부	대 구	25.2
	수 원	24.1		영 덕	30.9
경기중부	서 울	28.2		울 진	24.6
경기 서해안	인 천	31.3		의 성	30.9
	강 화	28.1		문 경	31.6
경기동부	양 평	31.6	경남남부	거 제	27.8
충남남부	금 산	32.3		남 해	29.0
	부 여	31.0		부 산	24.9
충남중부	대 전	24.7		산 청	31.4
	천 안	30.3		진 주	31.7
충북북부	제 천	31.7		통 영	25.0
	충 주	31.5	경남서부	거 창	32.4
	보 은	32.0		합 천	32.1
충북서해안	보 령	29.1	경남중부	밀 양	31.0
충북중부	청 주	24.5	경남동부	울 산	29.3
	추풍령	32.0	경북서부	구 미	31.7
충남서해안	서 산	24.6		영 주	32.0
전남중부	광 주	24.3		영 천	32.9
	순 천	32.3	경북동해안	포 항	24.6
전남서부 남해안	목 포	23.9	제주	제 주	25.2
	완 도	24.2			
	해 남	27.9			

표 48. 지역별 두께 150mm 슬래브의 상·하부 최대 등가온도 차이

권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이	권 역	지 역	상·하부 등가온도 차이
강원 동해안	강 릉	23.6	전남동부 남해안	고 흥	23.1
	속 초	23.7		여 수	19.6
강원북부	인 제	28.1	전북중부	임 실	28.2
	철 원	26.9		전 주	26.8
강원남부	원 주	27.0		정 읍	25.7
강원중부	춘 천	27.9	전북남부	남 원	30.4
	홍 천	27.8	전북서부	부 안	27.9
강원산간	대관령	25.8		군 산	21.7
경기남부	이 천	26.8	경북북부	대 구	23.8
	수 원	23.1		영 덕	24.7
경기중부	서 울	21.1		울 진	25.5
경기 서해안	인 천	23.6		의 성	29.1
	강 화	27.2		문 경	29.4
경기동부	양 평	29.7	경남남부	거 제	24.5
충남남부	금 산	27.5		남 해	25.6
	부 여	26.7		부 산	21.1
충남중부	대 전	24.7		산 청	28.3
	천 안	26.2		진 주	27.5
충북북부	제 천	28.2		통 영	22.1
	충 주	27.0	경남서부	거 창	26.6
	보 은	27.9		합 천	27.9
충북서해안	보 령	22.7	경남중부	밀 양	29.7
충북중부	청 주	25.7	경남동부	울 산	25.6
	추풍령	27.7	경북서부	구 미	25.5
충남서해안	서 산	23.9		영 주	27.8
전남중부	광 주	23.4		영 천	26.9
	순 천	26.6	경북동해안	포 항	25.7
전남서부 남해안	목 포	20.8	제주	제 주	22.4
	완 도	23.6			
	해 남	25.5			

다. 역학적 줄눈간격 산정

국내 고속국도에서 가장 일반적으로 사용되는 콘크리트 포장은 표 49와 같으며, 이론적 해석으로국내에서 온도에 의한 환경하중이 최대로 발생하는 지역인 남원의 슬래브 상하부간의 등가온도차이는 ΔT=36℃이다. 적정 줄눈간격을 결정하기 위해 결정되어야 하는 기준응력은 표 49의 조건, 남원의 등가온도차이, 80kN 단축하중이 적용되었을 때 슬래브 내부의 최대인장응력은 3차원 구조해석 결과 3.42MPa였으며, 이를 기준으로 다양한 보조기층 종류 및 두께에 대하여 그림 183의 절차를 따라서 지역별 가능 최대 줄눈간격을 산출하였다.

표 49. 국내 고속국도에서 사용되는 콘크리트 포장의 크기

	길이 및 두께 (mm)
콘크리트 슬래브 횡방향 길이	6000
콘크리트 슬래브 종방향 길이	3600
콘크리트 슬래브 두께	300
분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층의 두께	150

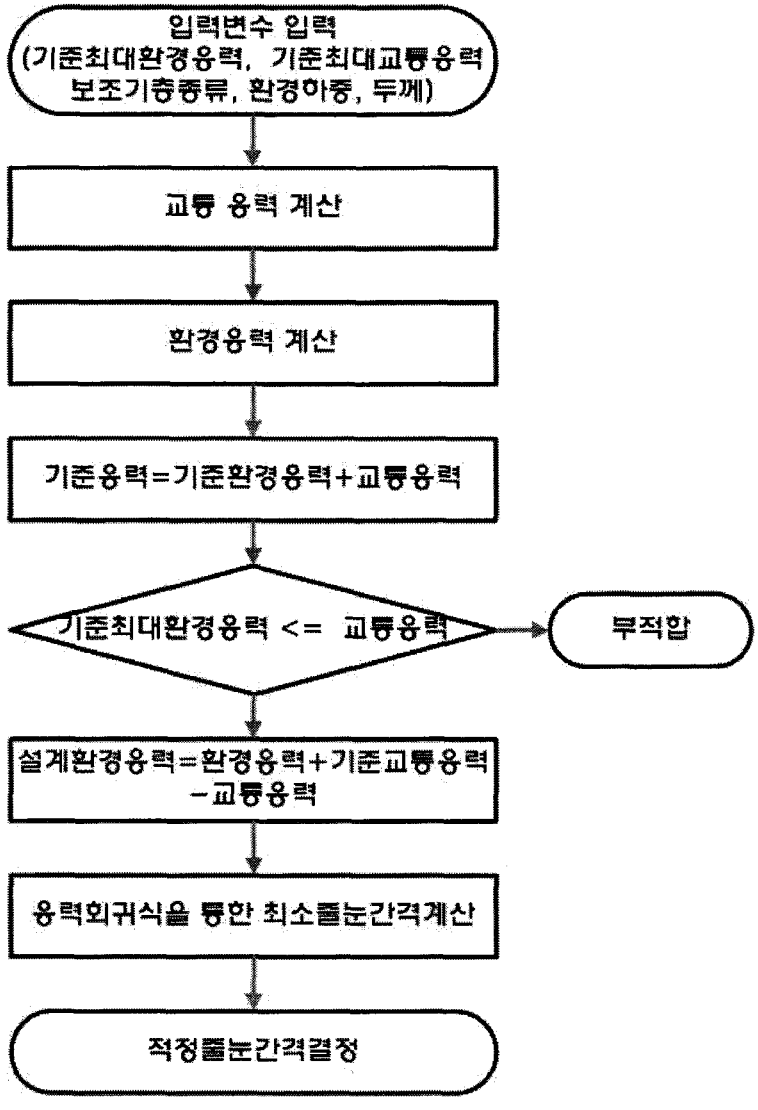


그림 183. 역학적 줄눈간격 산정 순서도

표 50. 린 콘크리트 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 적정 줄눈 간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)		권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250		두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	5.5	4.5	전남동부 남해안	고 흥	5.5	4.5
	속 초	5.5	4.5		여 수	5.5	5.0
강원북부	인 제	5.5	4.5	전북중부	임 실	5.5	4.0
	철 원	5.5	4.5		전 주	5.5	4.0
강원남부	원 주	5.5	4.5		정 읍	5.5	4.0
강원중부	춘 천	5.5	4.5	전북남부	남 원	5.0	4.0
	홍 천	5.5	4.5	전북서부	부 안	5.0	4.0
강원산간	대관령	5.5	4.5		군 산	6.0	4.5
경기남부	이 천	5.5	4.5	경북북부	대 구	5.5	4.5
	수 원	5.5	4.5		영 덕	5.5	4.5
경기중부	서 울	6.0	4.5		울 진	5.5	4.0
경기 서해안	인 천	5.5	4.5		의 성	5.5	4.0
	강 화	5.5	4.0		문 경	5.5	4.0
경기동부	양 평	5.5	4.0	경남남부	거 제	5.5	4.5
충남남부	금 산	5.0	4.0		남 해	5.5	4.5
	부 여	5.5	4.0		부 산	6.0	4.5
충남중부	대 전	5.5	4.0		산 청	5.0	4.0
	천 안	5.5	4.0		진 주	5.5	4.5
충북북부	제 천	5.5	4.0		통 영	5.5	4.5
	충 주	5.5	4.0	경남서부	거 창	5.0	4.0
	보 은	5.0	4.0		합 천	5.5	4.0
충북서해안	보 령	5.5	4.5	경남중부	밀 양	5.0	4.0
충북중부	청 주	5.5	4.5	경남동부	울 산	5.5	4.0
	추풍령	5.5	4.0	경북서부	구 미	5.5	4.0
충남서해안	서 산	5.5	4.5		영 주	5.5	4.0
전남중부	광 주	5.5	4.5		영 천	5.5	4.0
	순 천	5.5	4.0	경북동해안	포 항	5.5	4.0
전남서부 남해안	목 포	6.0	4.5	제주	제 주	5.5	5.0
	완 도	5.5	4.5				
	해 남	5.5	4.0				

표 51. 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 최대 줄눈 간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)		권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250		두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	6.5	4.5	전남동부 남해안	고 흥	6.5	4.5
	속 초	6.5	4.5		여 수	6.5	5.0
강원북부	인 제	6.5	4.5	전북중부	임 실	6.5	4.5
	철 원	6.5	4.5		전 주	6.5	4.5
강원남부	원 주	6.5	4.5		정 읍	6.5	4.0
강원중부	춘 천	6.5	4.5	전북남부	남 원	6.0	4.0
	홍 천	6.5	4.0	전북서부	부 안	6.0	4.0
강원산간	대관령	6.5	4.5		군 산	7.0	4.5
경기남부	이 천	6.5	4.5	경북북부	대 구	6.5	4.5
	수 원	6.5	4.5		영 덕	6.5	4.5
경기중부	서 울	7.6	5.0		울 진	6.5	4.5
경기 서해안	인 천	6.5	5.0		의 성	6.5	4.0
	강 화	6.0	4.5		문 경	6.0	4.0
경기동부	양 평	6.5	4.0	경남남부	거 제	6.5	4.5
충남남부	금 산	6.0	4.0		남 해	6.5	4.5
	부 여	6.0	4.5		부 산	7.5	5.0
충남중부	대 전	6.5	4.5		산 청	6.0	4.0
	천 안	6.5	4.5		진 주	6.5	4.5
충북북부	제 천	6.5	4.3		통 영	6.5	5.0
	충 주	6.5	4.0	경남서부	거 창	6.0	4.0
	보 은	6.0	4.0		합 천	6.5	4.5
충북서해안	보 령	6.5	4.5	경남중부	밀 양	6.0	4.0
충북중부	청 주	6.5	4.5	경남동부	울 산	6.5	4.5
	추풍령	6.5	4.5	경북서부	구 미	6.0	4.5
충남서해안	서 산	6.5	4.5		영 주	6.5	4.5
전남중부	광 주	6.5	4.5		영 천	6.5	4.0
	순 천	6.5	4.0	경북동해안	포 항	6.5	4.5
전남서부 남해안	목 포	7.5	5.0	2.0	제 주	6.7	5.0
	완 도	6.5	5.0				
	해 남	6.5	4.0				

표 52. 아스팔트 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 적정 줄눈 간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	6.5	4.5
	속 초	6.5	4.5
강원북부	인 제	6.5	4.5
	철 원	6.5	4.5
강원남부	원 주	6.5	4.5
강원중부	춘 천	6.5	4.5
	홍 천	6.5	4.5
강원산간	대관령	6.5	4.5
경기남부	이 천	6.5	4.5
	수 원	6.5	4.5
경기중부	서 울	7.0	5.0
경기 서해안	인 천	6.5	5.0
	강 화	6.0	4.5
경기동부	양 평	6.5	4.5
충남남부	금 산	6.0	4.5
	부 여	6.0	4.5
충남중부	대 전	6.5	4.5
	천 안	6.5	4.5
충북북부	제 천	6.5	4.5
	충 주	6.5	4.5
	보 은	6.0	4.5
충북서해안	보 령	6.5	4.5
충북중부	청 주	6.5	4.5
	추풍령	6.5	4.5
충남서해안	서 산	6.5	4.5
전남중부	광 주	6.5	4.5
	순 천	6.5	4.5
전남서부 남해안	목 포	7.0	5.0
	완 도	6.5	5.0
	해 남	6.5	4.5

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250
전남동부 남해안	고 흥	6.5	4.5
	여 수	6.5	5.0
전북중부	임 실	6.5	4.5
	전 주	6.5	4.5
	정 읍	6.5	4.5
전북남부	남 원	6.0	4.0
전북서부	부 안	6.0	4.5
	군 산	7.0	5.0
경북북부	대 구	6.5	4.5
	영 덕	6.5	4.5
	울 진	6.5	4.5
	의 성	6.5	4.0
	문 경	6.0	4.5
경남남부	거 제	6.5	4.5
	남 해	6.5	4.5
	부 산	7.0	5.0
	산 청	6.0	4.5
	진 주	6.5	4.5
	통 영	6.5	5.0
경남서부	거 창	6.0	4.5
	합 천	6.5	4.5
경남중부	밀 양	6.0	4.5
경남동부	울 산	6.5	4.5
경북서부	구 미	6.5	4.5
	영 주	6.5	4.5
	영 천	6.5	4.5
경북동해안	포 항	6.5	4.5
제주	제 주	6.5	5.0

표 53. 분리막을 설치한 쇄석 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 적정 줄눈 간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)		권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250		두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	6.5	4.5	전남동부 남해안	고 흥	6.5	4.5
	속 초	6.5	4.5		여 수	6.5	5.0
강원북부	인 제	6.5	4.5	전북중부	임 실	6.5	4.5
	철 원	6.5	4.5		전 주	6.5	4.5
강원남부	원 주	6.5	4.5		정 읍	6.5	4.5
강원중부	춘 천	6.5	4.5	전북남부	남 원	6.0	4.5
	홍 천	6.5	4.5	전북서부	부 안	6.0	4.5
강원산간	대관령	6.5	4.5		군 산	7.0	5.0
경기남부	이 천	6.5	4.5	경북북부	대 구	6.5	4.5
	수 원	6.5	4.5		영 덕	6.5	4.5
경기중부	서 울	7.0	5.0		울 진	6.5	4.5
경기 서해안	인 천	6.5	5.0		의 성	6.5	4.4
	강 화	6.0	4.5		문 경	6.0	4.5
경기동부	양 평	6.5	4.5	경남남부	거 제	6.5	4.5
충남남부	금 산	6.0	4.5		남 해	6.5	4.5
	부 여	6.0	4.5		부 산	7.0	5.0
충남중부	대 전	6.5	4.5		산 청	6.0	4.5
	천 안	6.5	4.5		진 주	6.5	4.5
충북북부	제 천	6.5	4.5		통 영	6.5	5.0
	충 주	6.5	4.5	경남서부	거 창	6.0	4.5
	보 은	6.0	4.5		합 천	6.5	4.5
충북서해안	보 령	6.5	5.0	경남중부	밀 양	6.0	4.5
충북중부	청 주	6.5	4.5	경남동부	울 산	6.5	4.5
	추풍령	6.5	4.5	경북서부	구 미	6.0	4.5
충남서해안	서 산	6.5	4.5		영 주	6.5	4.5
전남중부	광 주	6.5	4.5		영 천	6.5	4.5
	순 천	6.5	4.5	경북동해안	포 항	6.5	4.5
전남서부 남해안	목 포	7.0	5.0	제주	제 주	6.5	5.0
	완 도	6.5	5.0				
	해 남	6.5	4.5				

표 54. 쇄석 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 적정 줄눈 간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)		권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250		두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	6.5	4.5	전남동부 남해안	고 흥	6.5	4.5
	속 초	6.5	4.5		여 수	6.5	5.0
강원북부	인 제	6.5	4.5	전북중부	임 실	6.5	4.5
	철 원	6.5	4.5		전 주	6.5	4.5
강원남부	원 주	6.5	4.5		정 읍	6.5	4.5
강원중부	춘 천	6.5	4.5	전북남부	남 원	6.0	4.5
	홍 천	6.5	4.5	전북서부	부 안	6.0	4.5
강원산간	대관령	6.5	4.5		군 산	7.0	5.0
경기남부	이 천	6.5	4.5	경북북부	대 구	6.5	4.5
	수 원	6.5	4.5		영 덕	6.5	4.5
경기중부	서 울	7.0	5.0		울 진	6.5	4.5
경기 서해안	인 천	6.5	5.0		의 성	6.5	4.0
	강 화	6.0	4.5		문 경	6.0	4.5
경기동부	양 평	6.5	4.5	경남남부	거 제	6.5	4.5
충남남부	금 산	6.0	4.5		남 해	6.5	4.5
	부 여	6.0	4.5		부 산	7.0	5.0
충남중부	대 전	6.5	4.5		산 청	6.0	4.5
	천 안	6.5	4.5		진 주	6.5	4.5
충북북부	제 천	6.5	4.5		통 영	6.5	5.0
	충 주	6.5	4.5	경남서부	거 창	6.3	4.5
	보 은	6.0	4.5		합 천	6.5	4.5
충북서해안	보 령	6.5	4.5	경남중부	밀 양	6.0	4.5
충북중부	청 주	6.5	4.5	경남동부	울 산	6.0	4.5
	추풍령	6.5	4.5	경북서부	구 미	6.0	4.5
충남서해안	서 산	6.5	4.5		영 주	6.5	4.5
전남중부	광 주	6.5	4.5		영 천	6.5	4.5
	순 천	6.5	4.5	경북동해안	포 항	6.5	4.5
전남서부 남해안	목 포	7.0	5.0	제주	제 주	6.5	5.0
	완 도	6.5	5.0				
	해 남	6.5	4.5				

표 55. 노상에 설치한 지역 별, 두께 별 적정 줄눈 간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)		권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250		두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	6.5	5.0	전남동부 남해안	고 흥	6.5	5.0
	속 초	6.5	5.0		여 수	6.5	5.0
강원북부	인 제	6.5	4.5	전북중부	임 실	6.5	4.5
	철 원	6.5	4.5		전 주	6.5	4.5
강원남부	원 주	6.5	4.5		정 읍	6.5	4.5
강원중부	춘 천	6.5	4.5	전북남부	남 원	6.0	4.5
	홍 천	6.5	4.5	전북서부	부 안	6.0	4.5
강원산간	대관령	6.5	4.5		군 산	7.0	5.0
경기남부	이 천	6.5	4.5	경북북부	대 구	6.5	5.0
	수 원	6.5	5.0		영 덕	6.5	4.5
경기중부	서 울	7.0	5.0		울 진	6.5	4.5
경기 서해안	인 천	6.5	5.0		의 성	6.5	4.5
	강 화	6.0	4.5		문 경	6.3	4.5
경기동부	양 평	6.5	4.5	경남남부	거 제	6.5	5.0
충남남부	금 산	6.0	4.5		남 해	6.5	4.5
	부 여	6.5	4.5		부 산	7.0	5.0
충남중부	대 전	6.5	4.5		산 청	6.0	4.5
	천 안	6.5	4.5		진 주	6.5	4.5
충북북부	제 천	6.5	4.5		통 영	6.5	5.0
	충 주	6.5	4.5	경남서부	거 창	6.0	4.5
	보 은	6.0	4.5		합 천	6.5	4.5
충북서해안	보 령	6.5	5.0	경남중부	밀 양	6.0	4.5
충북중부	청 주	6.5	4.5	경남동부	울 산	6.5	4.5
	추풍령	6.5	4.5	경북서부	구 미	6.5	4.5
충남서해안	서 산	6.5	5.0		영 주	6.5	4.5
전남중부	광 주	6.5	5.0		영 천	6.5	4.5
	순 천	6.5	4.5	경북동해안	포 항	6.5	4.5
전남서부 남해안	목 포	7.0	5.0	제주	제 주	6.5	5.0
	완 도	6.5	5.0				
	해 남	6.5	4.5				

현재 국내 고속국도에서 사용되고 있는 콘크리트 슬래브 크기와 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층 및 교통하중과 환경하중을 기준으로 슬래브 내부 최대 응력을 중심으로 하여 지역 별, 슬래브 두께에 따라 적정 줄눈간격을 산출하였다. 슬래브 두께가 150mm인 경우에는 현재 국내에서 사용되고 있는 콘크리트 슬래브 내부 최대 응력을 교통하중에서 초과하여 배제하였다. 또한, 슬래브 두께 200mm, 보조기층 종류에 따라 1.5~2.5m의 슬래브의 적정 줄눈 간격이 계산되었지만, 현실적으로는 불가능하다고 판단된다.

환경하중인 슬래브 상·하부 등가온도를 이용한 줄눈간격에서는 분리막을 사용했을 시 줄눈간격은 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 줄눈간격에 비하여 크게 나타났다. 따라서, 장기적인 공용성을 고려하였을 때 분리막을 사용하는 편이 유리하다고 판단된다.

교통하중 및 환경하중인 슬래브 상·하부 등가온도를 이용한 줄눈간격에서는 기존에 획일적으로 사용했던 6m보다 늘어난 6.5m~7.5m의 줄눈간격을 사용해야 할 것으로 계산되었다. 지역별 슬래브 상·하부 등가온도 및 일교 차이가 가장 중요한 요소였으며, 본 연구에서 제시한 범위의 줄눈간격을 사용할 경우, 줄눈 콘크리트 포장에서 문제가 되어온 각종균열 및 과도한 줄눈의 벌어짐으로 인한 실런트의 찢어짐 등의 파손을 감소시켜 포장의 장기공용성을 향상시키고 이에 따른 유지보수 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

또한, 줄눈간격을 길이만이 아닌 폭 대 길이의 비(함수)로 표현하는 것에 대해 간단히 설명하면, 줄눈간격의 길이 이외에 슬래브의 중앙부와 측면부의 온도 및 습도는 차이가 있으므로 폭 대 길이의 비(함수)로 분석하는 것은 매우 중요할 것으로 생각되지만, 국내 대부분의 도로 폭의 설계가 일반적으로 4m를 기준으로 설계되고 있으며, 현재까지의 기술수준으로는 슬래브를 측방향 및 중앙부로 분리하여 연구하기에는 현실적으로 어려움이 있다.

다. 최종 적정줄눈간격 산출

본 연구에서는AASHTO 줄눈간격 산정식을 이용한 모델과 역학적 방법에 의한 줄눈간격 모델을 계산하였다. 계산 한 결과 값 중, 다음 그림 184의 알고리즘을 통하여 적정 줄눈간격을 산출한다.

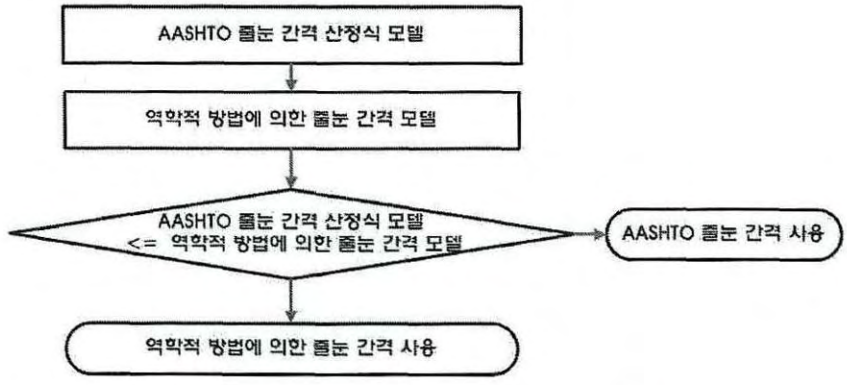


그림 184. 적정 줄눈 간격 산출 과정

한 예시로, AASHTO 줄눈간격 산정식을 이용한 모델과 역학적 줄눈간격 모델을 사용한 국내 지역별 줄눈간격 산출 결과 중 지역별 환경하중의 영향이 상이한 강원도 인제시와 제주도 제주시의 줄눈간격 적정 줄눈간격 비교는 다음의 표 56과 같다.

표 56. 인제시,제주시의 적정 줄눈 간격 비교

입력 변수		인제시 줄눈 간격(m)	제주시 줄눈 간격(m)
AASHTO 줄눈간격 모델		6.0	7.5
역학적 줄눈간격 모델 슬래브 두께 300mm	린 콘크리트 (분리막)	5.8	5.7
	린 콘크리트	6.7	6.7
	쇄석 (분리막)	6.6	6.6
	쇄석	6.6	6.6
	아스팔트	6.7	6.6
	노상	6.7	6.7

AASHTO 줄눈간격 모델은 지역 별 연중 최고 및 최저 온도의 입력변수가 가장 민감한 부분으로 적용되었으며, 최대 연교차에 의해 인제시는 6m로 계산되었고 제주시는 7.5m로 계산되었다. 역학적 줄눈간격 모델은 분리막을 설치한 린 콘크리

트 보조기층을 제외한 보조기층은 6.6~6.7m로서 비슷한 경향을 보였다. 또한, 모든 지역에 걸쳐, 현재 국내에서 일반적으로 사용되고 있는 6m보다 넓은 줄눈간격이 계산되었다.

두 가지의 모델을 계산 후, 그림 4와 같이 적정 줄눈간격 산출 과정의 알고리즘을 통하여 적정 줄눈간격을 결정한다. 현재 국내에서 사용되고 있는 콘크리트 슬래브 두께 30cm와 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층을 고려한다면, 인제시에서는 두 가지의 모델 중 슬래브 길이가 짧은 6m를 선택하여 설계를 실시하고, 제주시에서는 6.7m를 선택하여 설계를 실시한다.

본 연구에서 제시한 두 가지의 모델을 이용한 줄눈간격을 계산하여 사용할 경우, 줄눈 콘크리트포장에서 문제가 되어온 각종 균열 및 과도한 줄눈의 벌어짐으로 인한 실런트의 찢어짐 등의 파손을 감소시켜 포장의 장기적 공용성을 향상시키고 이에 따른 유지보수 비용 절감을 기대할 수 있을 것으로 판단된다..

3. 결 론

줄눈 폭 5mm를 기준으로 산출한 AASHTO 줄눈 간격 모델을 사용하여 산출된 줄눈간격과 역학적 이론 및 해석을 통해 결정된 줄눈간격을 비교 및 검토하면 다음과 같다.

(1 AASHTO 줄눈 간격 모델의 입력변수는 골재의 열팽창계수, 연교차, 건조수축 변형률과 같이 3가지였고, 연교차가 줄눈 간격을 결정하는데 가장 민감한 입력변수로 작용하였다.

(2) 역학적 줄눈 간격 모델은 역학적 이론 및 해석을 기반으로하여 적적정 줄눈간격을 산출하기위해 2차년도의 현장실험인 마찰 저항실험을 통하여 슬래브-보조기층 종류에 따라 마찰저항강성에 관한 입력변수를 도출하였고 마찰 강성을 이용하여 슬래브 두께와 길이 변화에 따라 포장 설계에 중요한 인자인 교통하중과 환경하중을 60가지 경우의 3차원 구조해석을 실시하였다.

(3) 역학적인 방법에 의해 줄눈 간격을 결정하기 위해 국내에서 대표적으로 사용되는 줄눈 콘크리트 포장 형식인 린콘크리트 보조기층에 분리막을 사용한 폭 3.6m 줄눈간격 6m 및 두께 300mm 슬래브 구조에 대한 최악의 상황을 기준으로 하여 줄눈간격을 산출하였다. 기준최대환경응력은 국내 환경조건에서 가

장 열악한 조건의 환경하중에 의해서 산출된 응력이며, 기준최대교통응력은 주어진 조건에서 등가단축하중 80kN이 슬래브 단부 중앙에 재하되었을 때을 의미하며, 설계환경응력은 응력회귀식을 이용하여 줄눈간격을 결정할 때 사용되어지는 응력을 말한다. 그리고 설계환경하중에 의하여 결정된 줄눈간격은 역학적 이론으로 결정된 최대 줄눈간격이며, 시공성을 고려한 적정줄눈 간격은 이보다 적게 설계되어져야 한다.

(4) 이론적 해석으로 국내에서 온도에 의한 환경하중이 최대로 발생하는 지역인 남원의 슬래브 상하부간의 등가온도차이(ΔT)는 36℃이다. 적정 줄눈간격을 결정하기 위해 결정되어야 하는 기준응력은 80kN의 단축하중이 적용되었을 때 슬래브 내부의 최대인장응력은 3차원 구조해석 결과 3.42MPa였다.

(5) 슬래브 두께가 150mm인 경우에는 현재 국내에서 사용되고 있는 콘크리트 슬래브 내부 최대 응력을 교통하중에서 초과하여 배제하였다.

(6) 슬래브 두께 200mm, 보조기층 종류에 따라 1.5~2.5m의 슬래브의 적정 줄눈간격이 계산되었지만, 현실적으로는 불가능하다고 판단된다.

(7) 환경하중인 슬래브 상·하부 등가온도를 이용한 줄눈간격에서는 분리막을 사용했을 시 줄눈간격은 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 줄눈간격에 비하여 크게 나타났다.

(8) AASHTO 줄눈 간격 산정식 모델은 미국의 AAHSTO의 줄눈폭 예측식을 바탕으로 줄눈폭 및 온도와 습도를 이용한 적정줄눈간격 모델을 개발하였으나, AASHTO의 식 자체에서도 이러한 어려움 때문에, 슬래브 측방향 중앙부에 대한 고려는 하지 못하고 있는 실정이다. 또한, 줄눈폭이 5mm 일 때, 하중전달율이 급격히 떨어진다는 기존의 연구자료는 지역별로 다를 것으로 판단되어, 향후 지역별 하중전달율이 급격히 떨어지는 연구를 통해 정립할 필요가 있다고 판단된다.

(9) 역학적 방법에 의한 줄눈 간격 모델은 교통하중 및 환경하중에 따른 슬래브의 응력을 기준으로 개발하였으나, 줄눈폭 예측, 하중전달율 등에 대해 고려를 하지 못하였다. 또한, 지역별 콘크리트 슬래브의 깊이별 등가온도가 다를 것으로 판단되어, 향후 추가적인 연구를 통해 정립할 필요가 있다고 판단된다. 또한, 개발된 두 가지의 줄눈간격 모델 연관성을 적용시켜야 할 필요성이 있으며, 향후 추가 연구를 통해 정립할 필요가 있다.

6절 분리막 사용 기준 제시

1. 현재 국내 분리막 사용 기준

현재 국내 고속국도 포장의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트포장의 경우 보조기층과 콘크리트 슬래브 사이에 분리막(폴리머시트)을 설치하여 시공하고 있다. 하지만 국내 콘크리트포장의 설계법으로 사용되고 있는 AASHTO Guide에서도 분리막 설치에 따른 마찰력 기준 조차 제시되어 있지 않으며, 국내 도로관련 대표 기준서인 도로설계기준(건설교통부, 2005) 및 도로설계요령(한국도로공사, 2001)만이 분리막 설치 방법에 대해 간단하게 언급하고 있다. 도로설계기준에서는 JCP와 JRCP에서 슬래브 바닥과 보조기층과의 마찰저항을 감소시키기 위해 분리막을 설치하고, 린콘크리트와 연속 철근 콘크리트 설계 시 분리막은 설치하지 않도록 기술하고 있다. 또한, 도로설계요령에서는 분리막으로 보통 폴리에틸렌필름(Polyethylene film)를 사용하고, 필름을 콘크리트 포설전 설치하거나 타이바(Tie bar)를 둔 뒤틀림 줄눈을 두는 무근콘크리트포장에서는 120㎛두께가 적합한데, 다만 필름에 손상이 없도록 설치되어야 한다고 기술하고 있다. 또한 필름의 겹이음폭은 300㎜, 세로 방향100㎜ 이상 이어야하고, 강우 시에도 빗물이 필름 아래로 스며들지 않도록 겹이음을 하도록 제시하고 있다.

2. 현장시험과 구조해석 결과를 이용한 분리막 사용유무 결정

그림 185와 같이 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 경우 1차 하중 재하 시 강성이 매우 큰 린 콘크리트 보조기층과 콘크리트 슬래브가 부착되어 하중 재하 장치의 재하 범위인 90kN의 하중에도 접촉면에서의 파괴가 발생하지 않아 슬래브가 미끄러지지 않았다. 따라서 중장비로 슬래브를 밀어 린 콘크리트 보조기층으로부터 콘크리트 슬래브를 강제로 분리한 후 실험을 계속할 수 있었다. 린 콘크리트가 매우 높은 강성을 지녔음에도 불구하고 슬래브의 파괴면을 확인해 본 결과 슬래브의 면을 따라서 파괴되었는데, 이는 접촉면에서의 부착력 보다 슬래브 및 린 콘크리트 보조기층 내부의 재료 간의 결합력이 더 강하였기 때문으로 판단되었다. 또한 해외 연구사례에서도 린콘크리트 보조기층과 유사한 시멘트 안정처

리 기층 또한 이와 유사한 현장실험 사례를 보고하였다.(Wesevich 외 3 1987)

그림 186과 같이 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층에서 분리막을 사용하지 않은 경우와 비교하였을 때 최대 마찰계수는 크게 줄어들고 이때의 수평변위는 크게 증가하는 것으로 나타나 분리막의 효과가 큰 것으로 판단되었다.

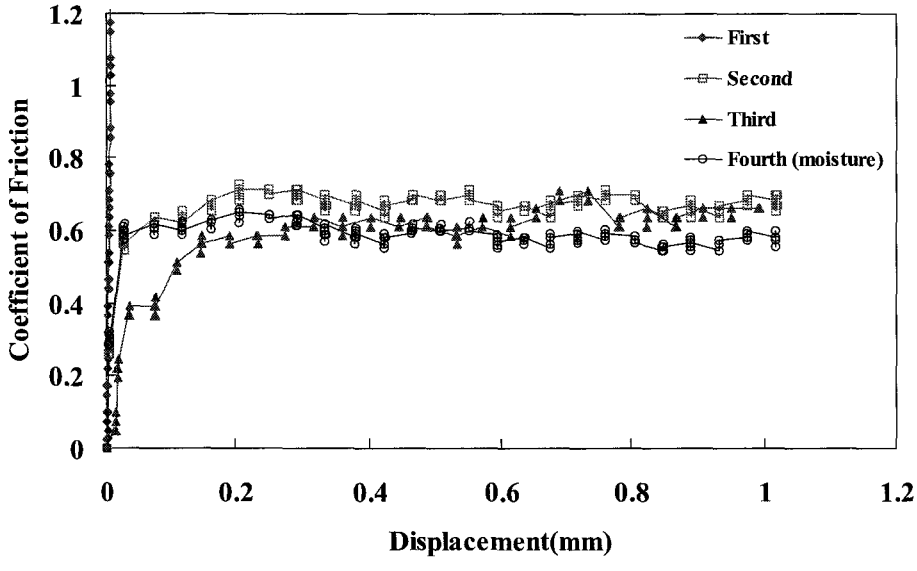


그림 185. 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층 마찰실험 결과

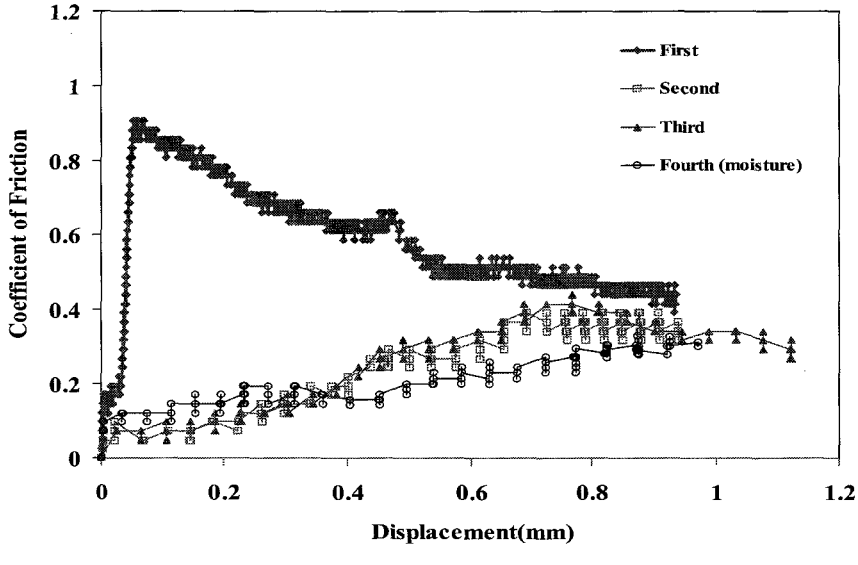


그림 186. 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층 마찰실험 결과

보조기층 종류에 따른 분리막 사용 기준 제시를 위해 3차원 유한요소 프로그램인 EverFe 2.24를 이용하여 구조해석을 통해 해석결과를 분석하였다. 시멘트 재료계열의 린콘크리트 보조기층의 경우 환경에 의한 컬링 응력과 교통 하중에 의한 응력은 그림 187~194와 같이 분리막이 없는 것이 유리한 것으로 계산되었다.

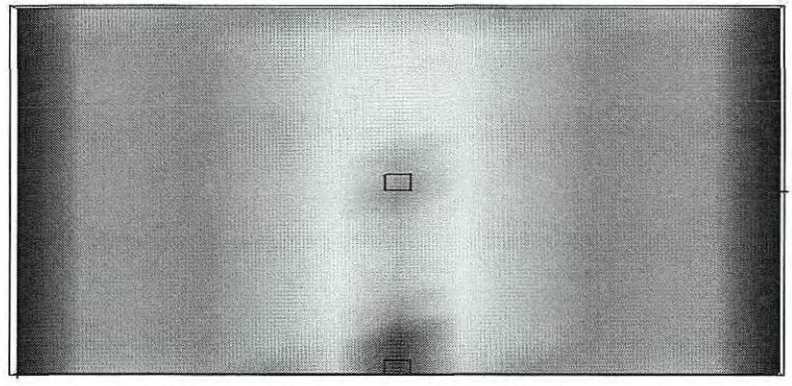


그림 187. 컬링과 교통(80kN) 분리막 미 적용, 상하부 등가온도 10℃ (1.13Mpa)

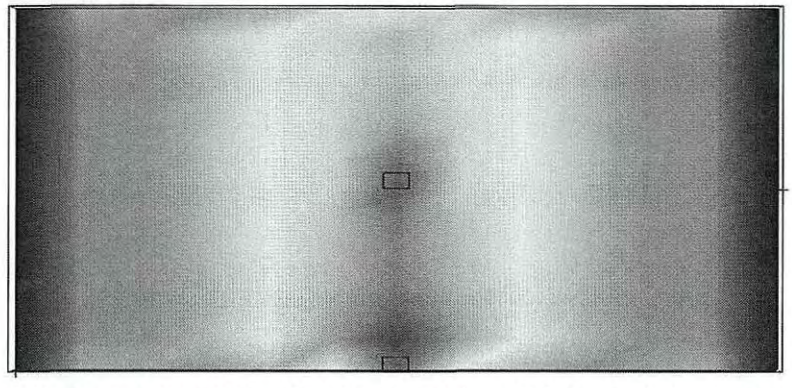


그림 188. 컬링과 교통(80kN) 분리막 미 적용, 상하부 등가온도 20℃ (1.5Mpa)

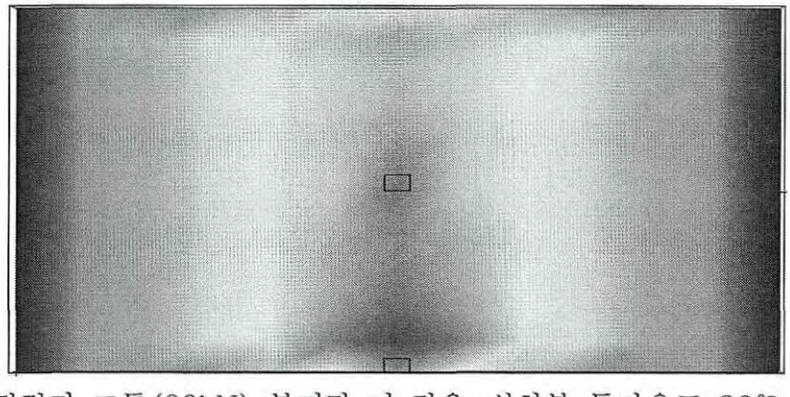


그림 189. 컬링과 교통(80kN) 분리막 미 적용, 상하부 등가온도 30℃ (2.29Mpa)

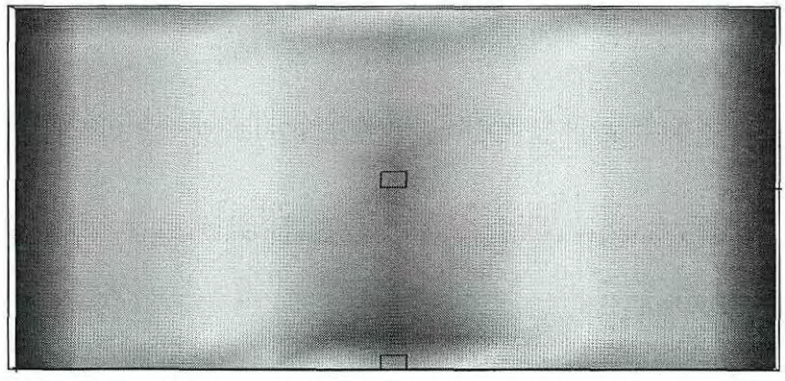


그림 190. 컬링과 교통(80kN) 분리막 미 적용, 상하부 등가온도 40℃ (2.95Mpa)

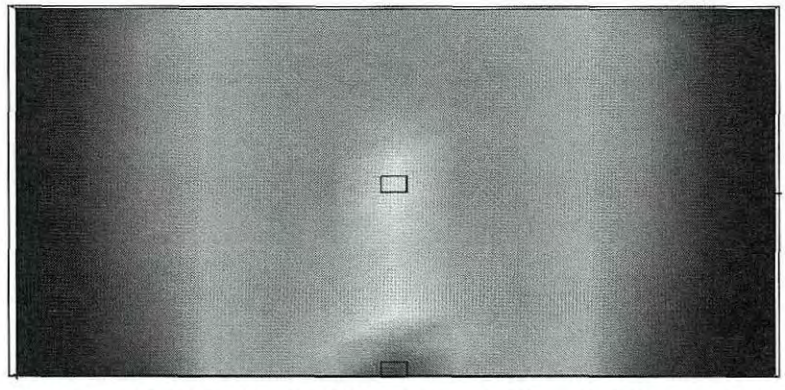


그림 191. 컬링과 교통(80kN) 분리막 적용, 상하부 등가온도 10℃ (2.36Mpa)

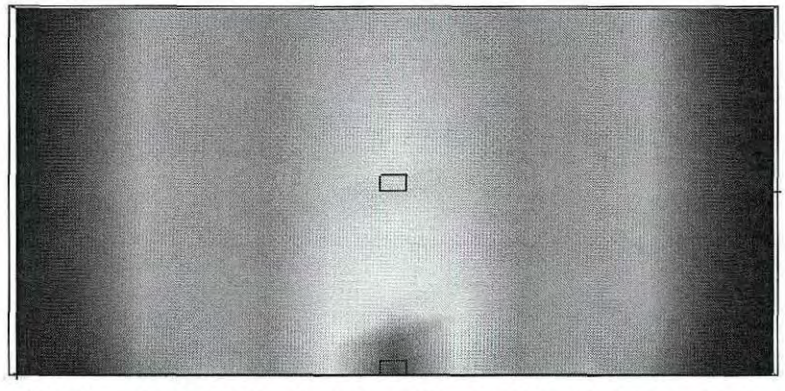


그림 192. 컬링과 교통(80kN) 분리막 적용, 상하부 등가온도 20℃ (3.21Mpa)

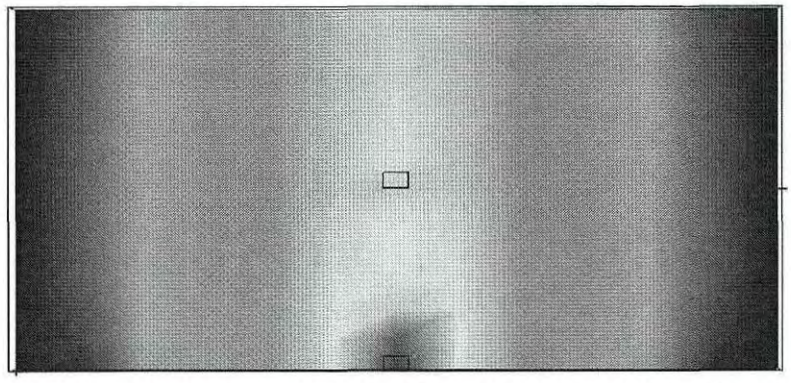


그림 193. 컬링과 교통(80kN) 분리막 적용, 상하부 등가온도 30℃ (3.82Mpa)

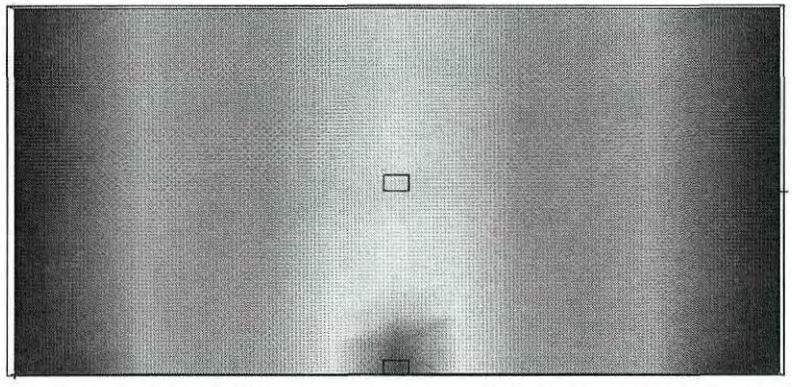


그림 194. 컬링과 교통(80kN) 분리막 적용, 상하부 등가온도 40℃ (4.32Mpa)

건조 수축 온도 변화 등의 원인으로 인하여 슬래브가 수평 거동을 할 때, 슬래브 하부 우각부에서 매우 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 또한, 슬래브 내부의 온도가 −28.5℃일 때 슬래브의 인장강도는 4.5MPa를 넘는다. 이와 같이 분리막을 설치하지 않은 시멘트 계열의 보조기층 재료는 콘크리트 슬래브와 완전부착이 발생됨과 동시에 환경에 의한 거동을 구속하여 균열이 발생한다. 또한, 현장 시험 시공 시 분리막을 설치하지 않은 린 콘크리트 보조기층에서 균열이 발생하였다. 따라서, 린 콘크리트 보조기층을 포함한 시멘트 계열의 보조기층 재료는 분리막이 필요하다고 판단된다.

쇄석 보조기층과 온도에 따라 물성이 변하는 점탄성 재료의 아스팔트 보조기층은 3차원 유한요소 구조해석 결과 분리막을 설치하지 않아도 된다는 결과를 도출하였다. 국내의 다양한 보조기층에 콘크리트 슬래브를 타설한 지역도 많이 분포되어 있어, 향후 추가 실험 및 연구를 통해 정립할 필요가 있다.

역학적 방법에 의한 줄눈간격 산출의 결과 값인 5절의 표 50에서 린 콘크리트 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 줄눈 간격과 5절의 표 51에서 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층을 설치한 지역 별, 두께 별 줄눈 간격을 비교를 해본 결과, 분리막을 설치한 린 콘크리트 보조기층의 콘크리트 슬래브 최대 길이는 분리막을 설치하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 콘크리트 슬래브 최대 길이보다 약 0.8m 가 더 증가된 것을 확인 할 수 있다.

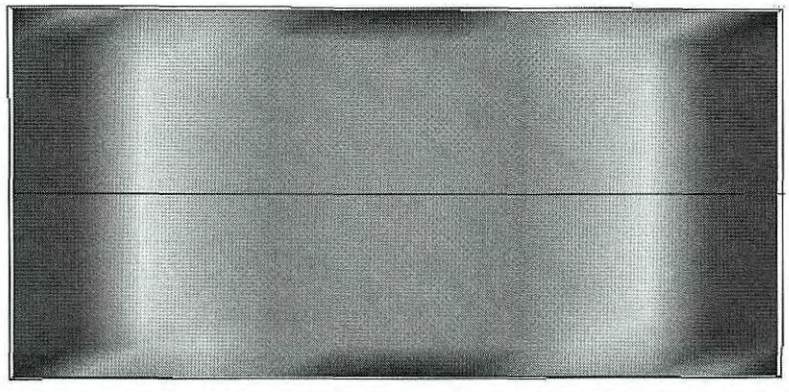


그림 195. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 -10℃ (슬래브 하부 우각부 1.55Mpa)

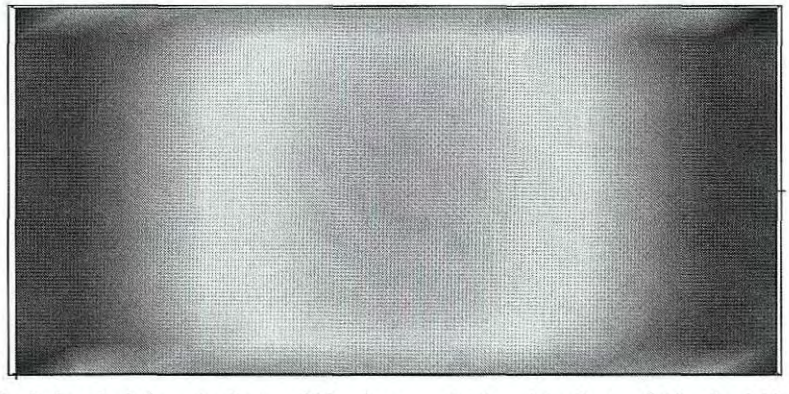


그림 196. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 -20℃ (슬래브 하부 우각부 3.135Mpa)

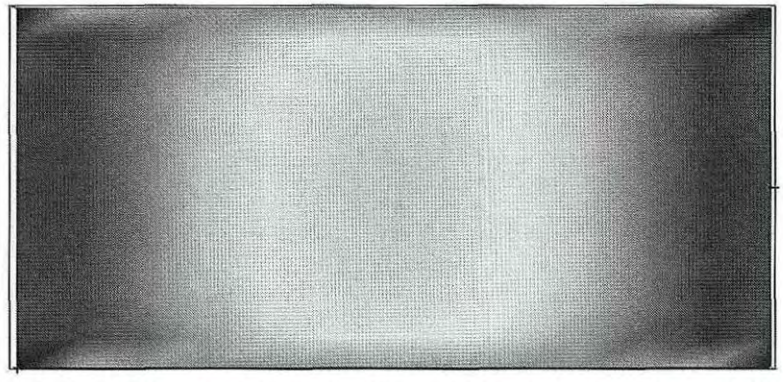


그림 197. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 -30℃ (슬래브 하부 우각부 4.71Mpa)

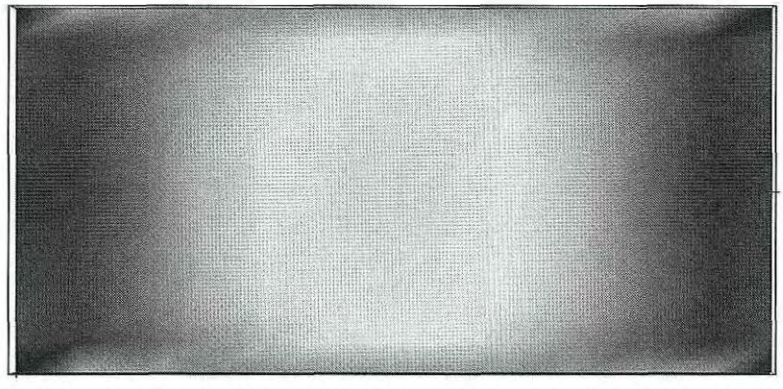


그림 198. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 -40℃ (슬래브 하부 우각부 6.28Mpa)

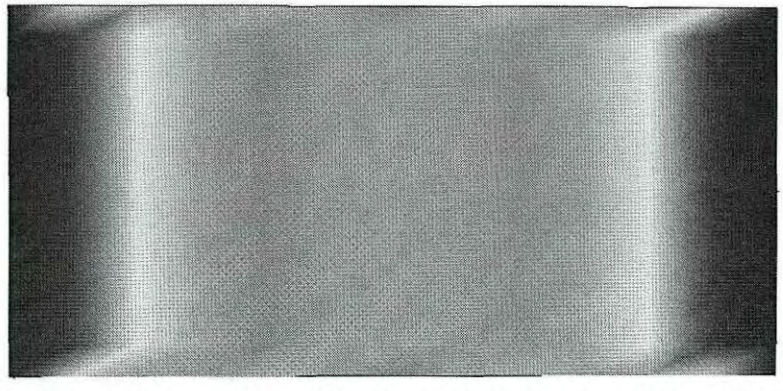


그림 199. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 10℃ (슬래브 상부 우각부 1.03Mpa)

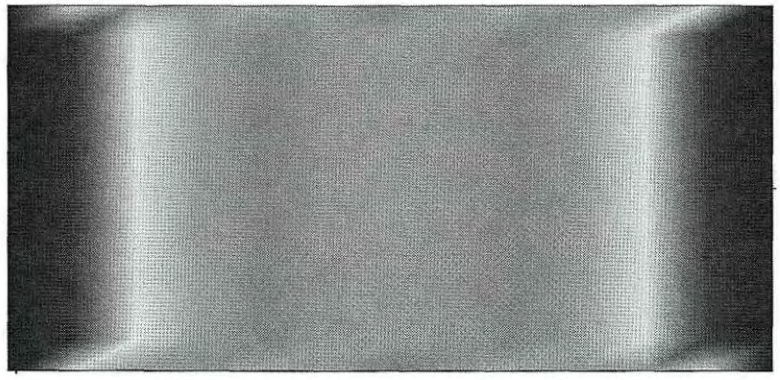


그림 200. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 20℃ (슬래브 상부 우각부 2.06Mpa)

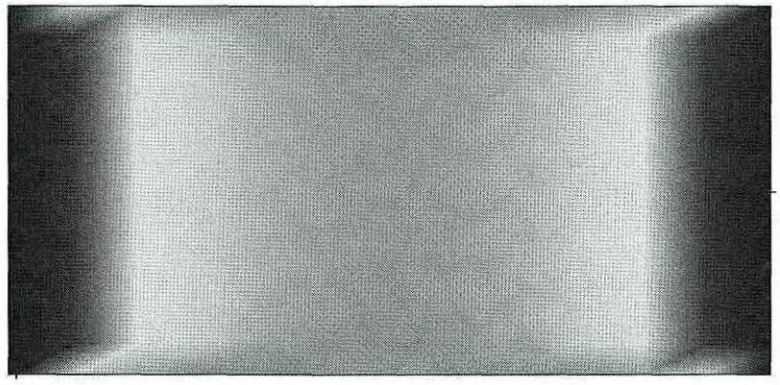


그림 201. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 30℃ (슬래브 상부 우각부 3.11Mpa)

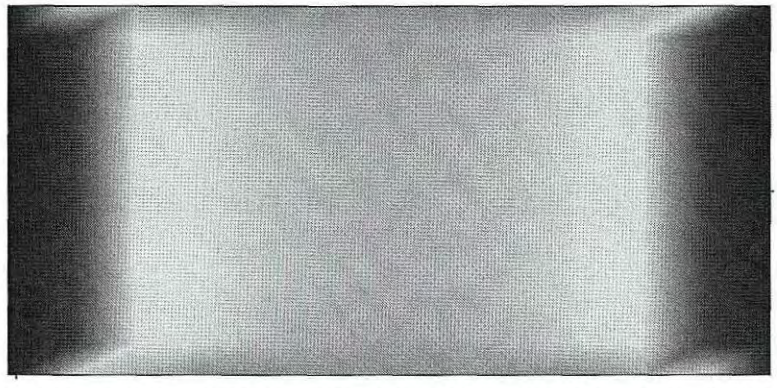


그림 202. 분리막 미적용, 슬래브 내부 온도 40℃ (슬래브 상부 우각부 4.16Mpa)

3. 분리막 사용 기준 제시

가. 시멘트 계열의 보조기층의 경우 콘크리트 슬래브와 완전 부착하여 건조수축 등의 원인으로 콘크리트 슬래브의 길이 변화 시, 슬래브의 균열발생확률이 커짐으로 되도록 분리막을 반드시 설치한다.

나. 도로등급이 일반국도 및 고속국도이며, 차로 당 일 평균 교통량이 3000대 이상의 줄눈 콘크리트 포장 도로의 경우, 린 콘크리트 보조기층 위에 분리막을 사용하지 않을 시, 5절에서 제시된 분리막을 설치한 적정 줄눈간격에서 다음 표 57을 참고하여 제시된 줄눈간격을 조절 한다.

슬래브 두께 (mm)	줄눈 간격 조절 (m)
300	1
250	0.5

다. 쇄석 보조기층 및 아스팔트 보조기층의 경우, 슬래브 보조기층 사이 마찰이 역학적으로 큰 문제를 발생치 않으나, 현장 시공성을 고려하여 분리막을 설치한다. 단 아스팔트 보조기층의 경우, 연평균일최저온도가 −15℃이하인 지역은 5절의 표 52에서 제시된 줄눈간격보다 1m 적은 줄눈간격 또는 분리막을 설치한다.

라. 포장두께가 200~250mm이고, 차로 당 일평균교통량이 3000대 미만의 저급도로는 린 콘크리트 보조기층에 분리막을 설치하지 않을 경우, 다음 표 57과 같이 줄눈간격을 결정한다.

표 57. 저급도로의 분리막을 설치하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 두께별 적정 줄눈간격

권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)		권 역	지 역	적정 줄눈 간격(m)	
	두 께 (mm)	300	250		두 께 (mm)	300	250
강원 동해안	강 릉	4.5	4.5	전남동부 남해안	고 흥	5.0	4.5
	속 초	5.5	5.0		여 수	5.5	5.0
강원북부	인 제	5.5	5.0	전북중부	임 실	5.5	5.0
	철 원	5.5	5.5		전 주	6.0	5.5
강원남부	원 주	5.5	5.0		정 읍	5.5	5.5
강원중부	춘 천	6.0	5.5	전북남부	남 원	5.0	4.5
	홍 천	6.0	5.5	전북서부	부 안	5.5	5.0
강원산간	대관령	5.0	4.5		군 산	5.0	4.5
경기남부	이 천	5.5	5.0	경북북부	대 구	5.0	4.5
	수 원	5.5	5.0		영 덕	5.5	5.0
경기중부	서 울	5.5	5.0		울 진	5.5	5.0
경기 서해안	인 천	5.5	5.0		의 성	5.5	5.0
	강 화	5.0	4.5		문 경	5.5	4.5
경기동부	양 평	5.5	5.0	경남남부	거 제	5.5	4.5
충남남부	금 산	5.0	4.5		남 해	5.5	4.5
	부 여	5.5	5.0		부 산	5.5	5.0
충남중부	대 전	5.0	4.5		산 청	5.5	5.0
	천 안	5.5	5.0		진 주	6.0	5.5
충북북부	제 천	5.5	5.5		통 영	6.0	5.5
	충 주	6.0	5.5	경남서부	거 창	5.0	4.5
	보 은	5.0	4.5		합 천	6.0	5.5
충북서해안	보 령	5.5	5.0	경남중부	밀 양	5.0	4.5
충북중부	청 주	6.0	5.5	경남동부	울 산	5.5	5.0
	추풍령	6.0	5.5	경북서부	구 미	5.0	4.5
충남서해안	서 산	5.5	5.0		영 주	5.5	5.0
전남중부	광 주	5.0	4.5		영 천	5.5	5.0
	순 천	5.5	5.0	경북동해안	포 항	6.0	5.5
전남서부 남해안	목 포	5.0	4.5	제주	제 주	5.5	5.5
	완 도	5.5	5.0				
	해 남	6.0	5.5				

4. 결 론

마찰저항 실험 결과, 3차원 구조해석을 통한 결과 그리고 역학적인 방법에 의한 줄눈간격 산출 모델을 다음과 같이 비교 및 검토를 하였다.

(1) 현장 실험 결과, 분리막을 사용하지 않은 린 콘크리트 보조기층의 경우 1차 하중 재하 시 강성이 매우 큰 린 콘크리트 보조기층과 콘크리트 슬래브가 부착되어 하중 재하 장치의 재하 범위인 90kN의 하중에도 접촉면에서의 파괴가 발생하지 않아 슬래브가 미끄러지지 않았다. 또한, 린 콘크리트가 매우 높은 강성을 지녔음에도 불구하고 슬래브의 파괴면을 확인해 본 결과 슬래브의 면을 따라서 파괴되었는데, 이는 접촉면에서의 부착력 보다 슬래브 및 린 콘크리트 보조기층 내부의 재료 간의 결합력이 더 강하였기 때문으로 판단된다. 반면에 분리막을 사용한 린 콘크리트 보조기층에서 분리막을 사용하지 않은 경우와 비교하였을 때 최대 마찰계수는 크게 줄어들고 이때의 수평변위는 크게 증가하는 것으로 나타나 분리막의 효과가 큰 것으로 판단되었다.

(2) 3차원 유한요소 프로그램인 EverFe 2.24를 이용하여 구조해석을 실시한 결과, 환경에 의한 컬링 응력과 교통 하중에 의한 응력은 같이 분리막이 없는 것이 유리한 것으로 계산되었다. 하지만, 건조수축 및 온도 변화 등의 원인으로 인하여 슬래브가 수평거동을 할 때, 슬래브 하부 우각부에서 매우 큰 응력이 발생함을 알 수 있다. 또한, 슬래브 내부의 온도가 −28.5℃일 때 슬래브의 인장강도는 4.5MPa를 넘어 우각부에서 파괴가 예상된다. 따라서 콘크리트 슬래브에 가장 민감한 하중인 온도하중을 고려할 때, 콘크리트 슬래브와 시멘트 계열의 재료인 린 콘크리트 보조기층과의 계면에서는 분리막의 효과가 큰 것으로 판단되었다.

(3) 분리막을 설치하지 않은 시멘트 계열의 보조기층 재료는 콘크리트 슬래브와 완전부착이 발생됨과 동시에 환경에 의한 거동을 구속하여 균열이 발생한다. 또한, 현장 시험시공 시 분리막을 설치하지 않은 린 콘크리트 보조기층에서 균열이 발생하였다. 따라서, 린 콘크리트 보조기층을 포함한 시멘트 계열의 보조기층 재료는 분리막이 필요하다고 판단된다.

(4) 쇄석 보조기층과 온도에 따라 물성이 변하는 점탄성 재료인 아스팔트 보조기층은 3차원 유한요소 구조해석 결과 역학적으로는 분리막을 설치하지 않아도 된다는 결과를 도출하였다. 하지만 현장 시공성 및 초기재령에서의 거동을 고려하기 위해 추가적인 현장실험이 향후에 필요하다 사료된다.

7절 줄눈 균열 유도공법 시공 매뉴얼

1. 개요

현재 토목 시공 현장의 설계 및 시공 방법을 규정짓고 있는 규정에는 표준시방서, 전문시방서, 공사시방서 및 각종 규칙과 지침, 매뉴얼 등이 있다. 특히 건설기술관리법 시행규칙에 따라 '표준시방서', '전문시방서', '공사시방서'의 성격이 규정되어 있으며, 기타 지침 및 규칙의 하위 규정들이 건설 실무에서 통용되고 있다. 표준시방서라 함은 시설물의 안전 및 공사시행의 적정성과 품질확보 등을 위하여 시설물별로 정한 표준적인 시공기준으로서 발주청 또는 설계등 용역업자가 공사시방서를 작성하는 경우에 활용하기 위한 시공기준을 말한다. 또한 전문시방서라 함은 시설물별 표준시방서를 기본으로 모든 공종을 대상으로 하여 특정한 공사의 시공 또는 공사시방서의 작성에 활용하기 위한 종합적인 시공기준을 말한다. 공사시방서는 공사별로 건설공사 수행을 위한 기준으로서 계약문서의 일부가 되며, 설계도면에 표시하기 곤란하거나 불편한 내용과 당해 공사의 수행을 위한 재료, 공법, 품질시험 및 검사 등 품질관리, 안전관리계획 등에 관한 사항을 기술하고, 당해 공사의 특수성, 지역여건, 공사방법 등을 고려하여 공사별, 공종별로 정하여 시행하는 시공기준을 말한다. 이 외에 각종 지침 및 규칙 매뉴얼 등이 사용되고 있다.

본 연구에서 개발한 줄눈 균열 유도공법을 현장에서 적용하기 위한 시공 매뉴얼을 작성하였다. 줄눈 균열 유도공법이란 줄눈 균열 유도장치를 이용하여 자연 발생적인 줄눈 균열을 유도하는 공법으로 기존 줄눈 콘크리트포장의 다웰바 및 인위적인 줄눈 절단(Saw-cut)를 대체하기 위하여 개발되었다.

본 시공메뉴얼은 줄눈 균열 유도공법을 적용하는 현장 실무자가 충분히 공법을 숙지할 수 있도록 줄눈 균열 유도장치의 주요 제원, 구성항목과 더불어 시공 절차 및 유의사항을 상세히 수록하였으며 아래는 시공 매뉴얼의 목차 및 주요 내용이며 전문은 부록에 수록하였다.

또한 2009년 11월 부산도로학회, 2009년 R&D 성과포럼 등 본 연구에 대한 홍보활동을 지속적으로 진행하여 왔으며 향후 본 매뉴얼의 추가적인 배포 및 홍보활동을 통하여 줄눈 균열 유도공법의 현장 적용 및 활용도를 높일 수 있도록 할 예정이다.

줄눈균열 유도공법 시공 매뉴얼

1. 총칙

1.1 목적

→ 본 줄눈균열 유도공법 시공 매뉴얼의 작성목적, 적합한 재료선택, 시공방법의 소개, 양질의 시공을 위한 유의사항 소개 등

1.2 적용 범위

→ 본 시방서는 줄눈균열 유도공법을 적용한 시멘트 콘크리트 포장에 적용함을 밝히고 본 줄눈균열 유도공법을 적용할 수 있는 도로의 등급 소개 또는 도로 등급별 줄눈균열 유도장치의 적용방법 제시

1.3 용어의 정의

→ 본 줄눈균열 유도공법 시공 매뉴얼에서 사용되는 용어들에 대한 소개

2. 재료

2.1 일반사항

→ 일반적인 콘크리트 포장 재료에 대한 시방규정은 콘크리트 표준시방서 등을 참고하도록 명시

2.1 줄눈균열 유도장치

→ 줄눈균열 유도장치의 구조를 설명하고 각 부위별 재료를 소개

3. 줄눈균열 유도장치 제작

3.1 수직판

→ 제작 시 피니셔의 가이드 또는 거푸집과 간섭이 일어나지 않도록 적정 길이를 설정하여야 하며 수직판이 휘지 않도록 생산 시 유의

3.2 받침판과 바닥판

→ 제작 시 받침판과 바닥판의 용접이음이 떨어지지 않도록 제작하고 바닥판이 휘지 않도록 생산 시 유의

4. 시공

4.1 시공순서

→ 줄눈균열 유도공법의 시공순서를 순서도 형식으로 표현

4.2 적재 및 운반

→ 적재 및 운반 시 유의사항 소개 (연장이 있는 만큼 적재 시 유도장치의 형상이 변형되지 않도록 유의하여야 하며 적재 방법을 소개)

4.3 줄눈균열 유도장치의 설치

→ 타설 전 유도장치를 설치할 장소에 표시를 남겨 타설 후 표면 홈 생성작업을 원활히 할 수 있도록 한다.

→ 유도장치의 고정은 피니셔, 진동기의 압력에 충분히 지지할 수 있도록 고정한다

→ 포장폭이 넓어 수직판을 연결해야 할 경우 이음부분이 휘거나 움직이지 않도록 고정한다

4.4 표면 홈 생성작업

→ 표면 홈의 형상 소개

→ 표면 홈 생성작업은 콘크리트 타설 후 약 2~3시간 이내에 시행토록 하고 줄눈균열 유도장치가 설치된 정확한 지점에 이뤄져야 한다.

→ 표면 홈 생성장비가 홈 생성 후 표면 마무리 작업 시 기계식 포장인 경우 무너지지 않도록 유의토록 하고 인력식 포장인 경우 거푸집과 표면 홈 생성장비가 간섭이 일어나지 않도록 이를 고려 생성장비의 높이를 설정한다.

→ 표면 홈 생성장비를 이용 홈 생성 시 적정 속도를 유지하여 콘크리트 표면의 흐트러짐을 최소화 한다

4. 부록

제 4 장 연구개발 목표 달성도 및 관련분야에의 기여도

1절 연구개발 목표 및 달성도

1. 최종목표

- 줄눈 균열 유도장치 및 공법 개발
- 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈 간격 제시
- 분리막 사용 기준 제시

· 현재의 줄눈 콘크리트포장은 인위적인 절단을 통해 줄눈을 설치하고 있다. 콘크리트 슬래브 절단 시 깊이나 폭이 균일하지 못하여 조기 파손이 발생되고 있으며, 줄눈 콘크리트포장 대부분의 파손이 줄눈부에서 발생되고 있는 실정이다. 이에 대한 해결책으로 줄눈 균열 유도장치 개발을 통해 이는 인위적인 줄눈 절단이 아닌 자연발생적인 균열을 유도할 수 있도록 하는 것이다. 또한 시험시공과 추적조사 등을 통해 줄눈 균열 유도장치의 효과를 검증할 것이다.

· 현재 국내 콘크리트포장 줄눈 시공은 경험적이고 획일적으로 6m 간격으로 시공되고 있다. 이에 본 연구에서는 구조해석을 통해 합리적인 줄눈 간격을 검토하여 국내 환경을 고려한 포장의 수명연장과 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격을 제시하고자 한다.

· 현재의 모든 콘크리트포장에서는 기층과 슬래브 사이에서 마찰저항을 감소시키기 위해서 분리막을 사용하고 있으나, 실제 마찰저항이 발생하는 것으로 최근 연구에서 밝혀졌다. 이에 본 연구에서는 다양한 기층을 사용한 마찰계수 측정 시험을 통해 국내 실정에 맞는 분리막 사용 기준을 제시하고자 한다.

2. 당해연도 연구목표 및 연구 내용

연 차	연구내용	주요 연구 성과
3차년도 (당해연도)	▪ 콘크리트 포장의 기능 개선을 위한 현장 시공도로 시험포장	▪ 줄눈 누름장치 효과 검증 및 줄눈 누름 시기 결정을 위한 1차 시험포장(장헌산업 공장부지) ▪ 줄눈 균열에 의한 박락 원인과 대안 시험 ▪ 줄눈 균열 유도장치 효과 검증을 위한 2차 시험포장(여주-양평 고속도로 건설현장)
	▪ 실험포장에 대한 추적조사 및 효과 분석	▪ 줄눈 균열 유도 장치 시제품, 다웰바, 무다웰바 구간에 대한 추적조사(1차년도 시험포장) ▪ 1, 2차 시험포장 구간의 온.습도, 변형률, 컬링 계측을 통한 콘크리트 거동특성 분석 ▪ 1, 2, 3차 시험포장을 통한 줄눈 균열 유도장치 설치 구간별 균열 발생 특성 분석 ▪ 2차 시험포장 구간의 FWD 장비를 이용한 처짐특성 분석 ▪ 포장가속시험기를 이용한 줄눈 균열 유도장치 성능 검증
	▪ 시험포장 결과를 이용한 구조해석	▪ 시험포장 결과를 입력 자료로 활용한 구조해석
	▪ 역학적 이론 정립	▪ 적정줄눈간격 및 분리막에 대한 이론식 모델 정립
	▪ 수명연장 및 최적 공용성 확보를 위한 적정 줄눈간격 제시	▪ 국내 환경 조건을 고려한 적정 줄눈 간격 제시
	▪ 분리막 사용 기준 제시	▪ 하부층(보조기층) 조건에 따른 마찰력 측정 및 분석을 통한 분리막 사용기준 제시
	▪ 줄눈 균열 유도공법 시공 메뉴얼(안) 작성	▪ 시험시공구간의 추적조사 및 공용성 평가를 통한 줄눈 균열 유도공법 설계 및 시공 매뉴얼 작성

2절 관련분야 기여도

본 연구에서 개발하고자 하는 줄눈 균열 유도장치를 실용화하여 현장 적용성 검증을 통한 분리막 설치 기준제시와 적정 줄눈간격 기준 제시는 현재 연구 중인 "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구(국토교통부)" 에 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 도로설계에 곧바로 적용이 가능하며, 현재 시공중인 현장에 적용할 수 있어 줄눈콘크리트포장에 확대 적용이 기대된다.

환경적인 측면에서 콘크리트포장의 파손 감소 효과로 인해 포장수명 증가로 폐콘크리트 등의 건설 폐기물이 감소하게 되어 환경 친화적인 도로건설이 가능해질 것이다. 또한 중차량 교통량이 많을 것으로 예상되는 국내 도로망, 공항 활주로, 항만 등 사회간접자본시설에 콘크리트포장이 확대될 것으로 판단됨에 따라 본 연구 성과로 도로관련 산업의 확대 및 창출이 증가할 것으로 사료된다.

제 5 장 연구개발결과의 활용 계획

1절 연구 성과의 활용방안

본 연구는 "구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선 시공화" 를 위한 것으로 3차년도 연구 성과를 다음과 같이 차년도에 활용할 계획이다.

- 당해연도에 실시한 줄눈 균열 유도장치 시작품의 성능 분석을 통하여 문제점 및 개선사항을 파악하였으며, 이를 통한 줄눈 균열 유도장치 시제품을 제작하였다. 새로 고안된 줄눈 균열 유도장치 시제품을 이용하여 총 3회에 걸쳐 시험포장을 실시하였다. 시험포장 결과 슬래브 중간의 랜덤 크랙 등 줄눈 균열 유도장치에 의한 하자 요인은 발생하지 않았다고 판단된다. 따라서 본 공법의 시공성 및 작업 숙력도를 향상시켜 실제 현장 적용이 가능하도록 보완할 예정이다.

- 당해 3차년도의 개선된 줄눈균열 유도장치는 기존의 줄눈균열 유도장치에 비해 시공개선, 초기균열율, 줄눈부 거동 폭, 하중전달율이 개선되었음을 확인하였다. 이를 종합적으로 고려하였을 때, 개선된 줄눈균열 유도장치는 기존 공법인 다웰바의 역할인 슬래브 간의 하중 전달 및 골재간의 맞물림 현상을 작용시킬 수 있다고 판단된다. 또한, 줄눈부의 인위적인 컷팅이 아닌 타설 초기의 줄눈부 누름 작업은 줄눈부의 구조적인 취약부를 감소시킬 수 있어, 기존의 콘크리트 슬래브의 타설 공법과 비교 시, 한층 더 개선되었다고 판단된다.

- 마찰 저항 실험을 통하여 슬래브와 다양한 보조기층 종류의 마찰특성을 파악하였다. 이러한 결과를 통하여 구조해석을 실시하였고, 줄눈부의 거동을 3차원 구조해석을 실시하였다. 또한, 시험도로의 다양한 보조기층 별 콘크리트 슬래브의 줄눈부 거동 계측 결과와 3차원 구조해석 결과에 따르면, 줄눈부의 거동은 상당히 유사하였으나, 보조기층 종류에 따라 콘크리트 슬래브 내부의 응력 발생은 다양한 결과가 나타남을 파악하였다. 이러한 결과를 이용하여 국내의 연평균 대기온도차이 및 일최대온도차이를 이용한 모델을 제시하였다. 그 결과 국내 보조기층의 종류에

따라 지역별 줄눈간격 및 두께를 제시할 수 있었으며, 포장 설계를 실시하는데 하나의 입력변수를 제시하였다고 판단된다.

- 총 4회에 걸쳐 진행된 시험포장 준비 및 시공과정, 결과 등을 토대로 줄눈 균열 유도공법의 현장 적용을 위하여 줄눈 균열 유도공법에 대한 설계 및 시공 매뉴얼(안) 작성해 콘크리트 포장 현장에 활용할 것이다.

- 현재 본 연구와 관련하여 1건의 특허등록(줄눈 유도장치 및 시공방법)이 09년 9월 11일 완료되었으며 1건의 특허가 출원되어 심사를 받고 있다. 향후 등록된 지적재산권을 바탕으로 본 연구결과인 '줄눈 균열 유도공법' 과 시공메뉴얼에 대한 지속적인 현장 적용 및 활용을 추진할 것이다.

2절 기대성과 및 파급 효과

1. 기술적 측면

본 연구의 최종 성과물인 줄눈 균열 유도장치는 다웰바를 설치하고 줄눈을 인위적으로 절단하는 것이 아니라 자연적으로 줄눈을 유도하는 공법으로서 기존 다웰바의 기능인 하중전달효과를 기대할 수 있으며, 줄눈절단으로 야기된 줄눈부의 강도저하로 인한 스폴링을 최소한으로 억제할 수 있어 줄눈부의 스폴링에 의한 파손이 획기적으로 감소하게 되어 콘크리트포장 수명이 증가하게 되고 다웰바 어셈블리 제작과 줄눈절단과정이 생략되어 공사기간의 단축과 시공성 향상이 기대된다. 또한 분리막 설치 기준제시와 적정 줄눈간격 제시로 인하여 도로포장 공사의 시공성이 향상될 것으로 기대된다.

고속국도나 중차량 교통량이 많은 구간 등 신설될 도로의 콘크리트포장이 확대될 것으로 판단되며, 공용기간이 오래되어 전단면 보수(재포장)가 필요한 포장에 대하여 확대 적용이 가능할 것으로 판단된다.

또한, 본 연구의 최종 성과물은 줄눈 콘크리트포장에 대한 기술 경쟁력의 우위를 선점하게 되어 미래의 건설시장의 최대 시장인 중국과 동남아시아에서 도로공사 설계 및 시공 수주시 유리할 것으로 판단된다.

2. 사회·경제적 측면

본 연구의 최종 성과물인 줄눈 균열 유도장치는 줄눈절단으로 야기된 줄눈부의 강도저하로 인한 스폴링을 최소한으로 억제할 수 있어 줄눈부의 스폴링 파손이 획기적으로 감소하게 되어 유지관리비용의 절감과 다웰바 어셈블리와 줄눈 절단과정이 생략되어 재료비와 시공비용의 절감효과를 창출할 것으로 예상된다. 스폴링 파손의 감소로 인하여 도로 이용자들의 안전성과 쾌적성을 확보할 수 있으며, 콘크리트포장의 유지보수는 차량을 장기간 차단해야 하는데 이로 인한 교통잡비용과 국가물류비용이 절감을 통한 국가 경쟁력 확보 및 국민의 삶의 질 향상에 대한 욕구를 충족시키는 데 기여할 것으로 예상된다.

표 37. 줄눈 균열 유도장치 및 공법의 기대효과

	기존공법(Dowel-bar 사용)	신공법(줄눈 균열 유도공법)	비고
시공비	· 다웰바 어셈블리 제작 (재료비 : 14,000원/m) · 줄눈 컷팅(Saw-cutting) · 줄눈채움재	· 줄눈 균열 유도장치 제작 (재료비 : 9,600원/m)	· 재료비 : 기존대비 30% 절감 예상(잠정) · 시공비용 절감 효과
공정추진	· 단계별 시공 · 인위적인 줄눈 설치 (Saw-cutting) · 줄눈채움재 주입	· 단계별 시공 공정 단축 · 자연적인 균열 유도 · 공정추진 신속	· 공사기간 단축 · 시공성 향상
유지보수	· 인위적인 줄눈 절단으로 포장 조기 파손에 따른 유지보수 비용 증가	· 자연발생적인 줄눈 유도로 인한 포장 조기 파손 최소화	· 유지보수 초기 비용 감소

3절 연구결과의 기업 활용방안

(주)한맥기술은 토목 종합 설계 및 감리회사로서 본 연구에서는 연구개발을 통하여 최종 성과물인 줄눈 균열 유도장치에 대한 특허 및 실용신안을 출원하여 국내·외적으로 기술료를 얻을 수 있을 것이며, (주)장헌산업은 건설신기술 벤처기업으로서 본 연구개발을 통해 콘크리트포장 분야에 뛰어들 발판을 마련하게 되고, 개발될 제품에 대한 특허 및 실용신안을 출원 및 상용화하여 기업의 이윤을 창출할 수 있을 것이다.

한국도로공사 도로교통연구원은 국내 고속국도의 설계·시공·유지관리 등을 책임지는 정부산하기관으로서 본 연구 성과의 활용을 통해 고속국도의 품질향상 및 예산절감을 도모할 수 있을 것이다.

4절 정부 정책과의 연계 방안

정부의 도로정책 기조는 빠르고, 튼튼하고 편리한, 인간중심의 도로를 추구하는 것이다. 본 연구에서는 줄눈콘크리트포장의 자연발생적인 균열을 유도하여 스폴링과 단차 등의 조기 파손을 획기적으로 감소시킴으로서 운전자의 안전성과 주행쾌적성을 향상시키며, 도로 포장의 내구성을 증진시켜 유지보수를 감소시켜 포장수명을 증진시키는 것이다. 이는 정부의 도로정책방향과 동일한 것이다. 본 연구가 성공적으로 완료되어 실용화되기 위해서는 연구 성과를 콘크리트포장 설계·시공에 반영해야 한다.

이를 위해서 먼저, 이론정립, 실내·외 시험과 현장시험포장의 피드백 단계를 통해 객관성을 확보한다. 연구 성과에 대한 결과를 국내·외 학술지에 게재하거나 학술발표회를 통해 발표할 것이다. 또한 현장실무에 적용하기 위해서는 도로공사나 국토해양부의 설계 및 시방서의 개정이 필요하므로 자체성과발표회를 개최하여 정부, 학계, 민간건설사, 시민단체에 연구개발 성과의 공개를 통해 검증을 받을 것이다.

이러한 일련의 과정을 통해 객관성과 합리성을 확보하여 정부 및 관련 공공기관과의 협조를 받을 수 있을 것이며, 정부 담당자를 설득할 수 있을 것으로 판단된다.

5절 관련 후속연구개발의 전망

본 연구에서는 가로수축 줄눈부에 한정하여 기존의 다웰바를 개선하여 줄눈콘크리트포장의 경제성과 시공성을 향상시킬 것으로 예상되며, 향후에는 세로방향 줄눈에 대한 연구가 필요하다. 또한, 고내구성의 콘크리트포장 개발과 소음을 저감할 수 있는 공법, 시공 후 단 시간 내에 교통을 통행시킬 수 있는 콘크리트포장 재료 개선 등의 연구가 계속적으로 진행되어야 한다. 이로 인하여 환경친화적인 도로건설이 가능하며 줄눈 콘크리트포장 분야에서 전 세계적으로 기술 경쟁력을 갖추게 된다. 이를 바탕으로 국가 예산의 절감 및 동남아시아 등 해외시장 진출 발판을 삼을 수 있을 것으로 예상된다.

제 6 장 연구개발과정에서 수집한 해외 과학 기술정보

1절 해외관련 기술

1. Iowa 주

Iowa 주에서는 줄눈 콘크리트포장의 줄눈부 개선을 위해 그림 114~115와 같이 다웰바 상부에 L형 앵글을 부착하거나 자갈기층 표면에 L형강을 부착시킨 후 표 38과 같이 높이별로 시험 포장을 설정하여 자연 균열 유도 특성을 관찰하였다.

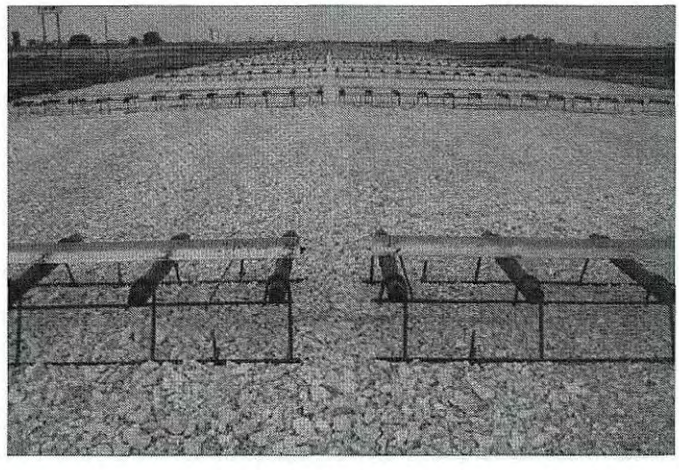


그림 114. 다웰바 상부에 부착시킨 L형 앵글

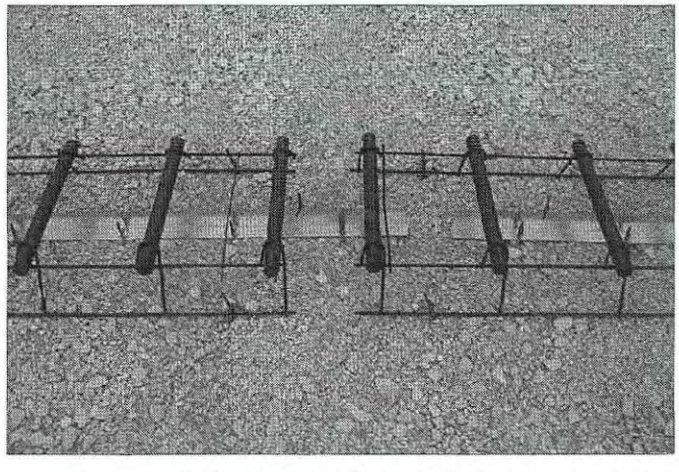


그림 115. 자갈 기층 표면에 부착시킨 L형 앵글

표 38. 구간별 L형 앵글 설치 조건

Approximate station(m)	East/west end of test	Bottom/top	Size
933+74	West	Top	51-㎜(2.0in.) plate
934+10	East		
934+74	West	Top	44.5-㎜(1.75-in.) plate
935+10	East		
935+74	West	Top	38.1-㎜(1.5-in.) plate
936+10	East		
936+64	West	Bottom	76.2-㎜(3.0-in.) plate
937+00	East		
937+64	West	Bottom	70-㎜(2.75-in.) plate
938+00	East		
941+44	West	Bottom	64-㎜(2.5-in.) plate
941+80	East		

시험포장 결과 대부분 콘크리트 슬래브 상부까지 균열이 유도되지 않았고, 일부 구간의 경우 L형 앵글 이탈 현상을 보이는 곳도 있는 것으로 조사되었다. 본 연구 문헌의 경우 L형 앵글 설치 약 1개월경과 후 L형 앵글이 설치된 위치에 줄눈 컷팅을 실시하였고, 길어깨 시공으로 인해 장기적인 균열 추적 조사가 이루어지지 못한 것으로 조사되었다.

또한 시험포장 시공 당시 낮은 대기온도 및 초기 양생기간 중의 내린 비로 인해 양생시 충분한 수화열이 발생되지 못해 줄눈부 균열 유도 지연 및 미발생 결과가 나타난 것으로 분석하고 있다.

2. 스페인의 FAROBEL 社

스페인의 FAROBEL 社는 그림 116과 같이 JRI+ JOINT 장치를 개발하였다. 스페인과 오스트레일리아에서 시험시공을 하면서, FAROBEL 社는 JRI+ JOINT는 줄눈부 절단 없이 자연 균열 유도 특성을 관찰하였다.

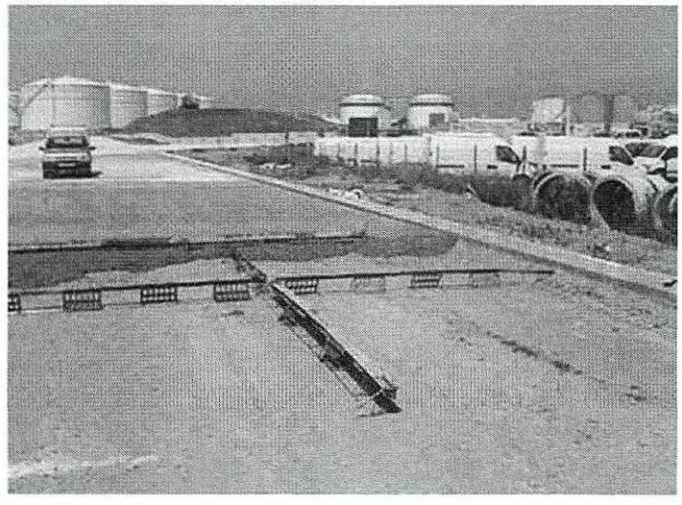


그림 116. JRI+ JOINT 장치

콘크리트 슬래브의 자연 균열 유도 형상은 그림 117과 같이 발생하였고, 역학적인 면에서의 이점을 살펴보면 콘크리트 슬래브의 인장응력은 기준 인장 응력에 비해 훨씬 작은 인장 응력이 발생하였고, 슬래브의 압축과 휨강도에 대한 전달이 가능하다고 조사되었다. 슬래브 우각부에는 골재의 맞물림과 JRI+ JOINT 장치로 인하여 하중전달율(L.T.E)가 100%로 발생한다고 조사되었다.

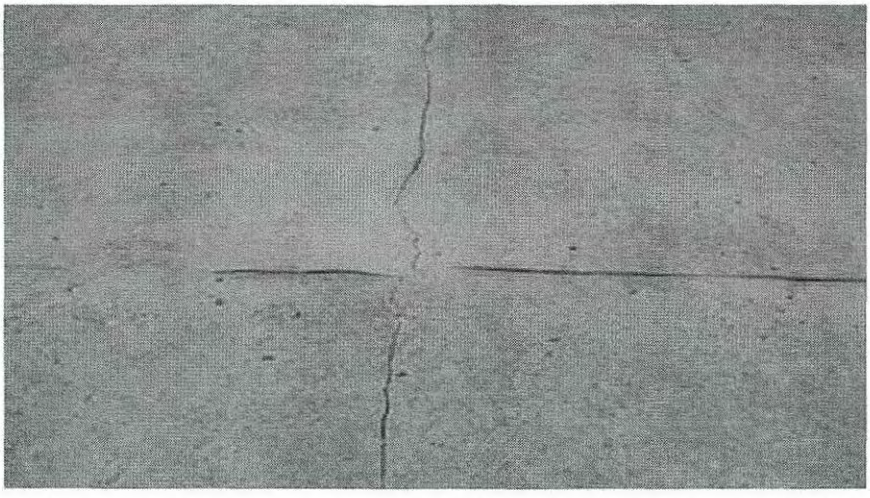


그림 117 JRI+ JOINT 장치를 통한 콘크리트 슬래브 균열 형상

또한, JRI+ JOINT 장치를 사용하므로써, 표 39와 같이 콘크리트 슬래브의 두께를 감소시킬 수 있다고 보고되었다.

표 39. 포장 형태에 따른 슬래브 두께

pavement type	slab thickness(mm)
Motorways	200
Parking Platform	150
Tramway	200
Railway	250
Air Crafts Parking Zones	250~300

3. CANZAC 社

뉴질랜드와 오스트레일리아의 연구자들로 구성된 CANZAC 社는 그림 118과 같이 중차량 하중에 견딜 수 있는 armour joint를 개발하였다. 아연도금을 입힌 강으로 제작하였으며, 길이는 3m이다.

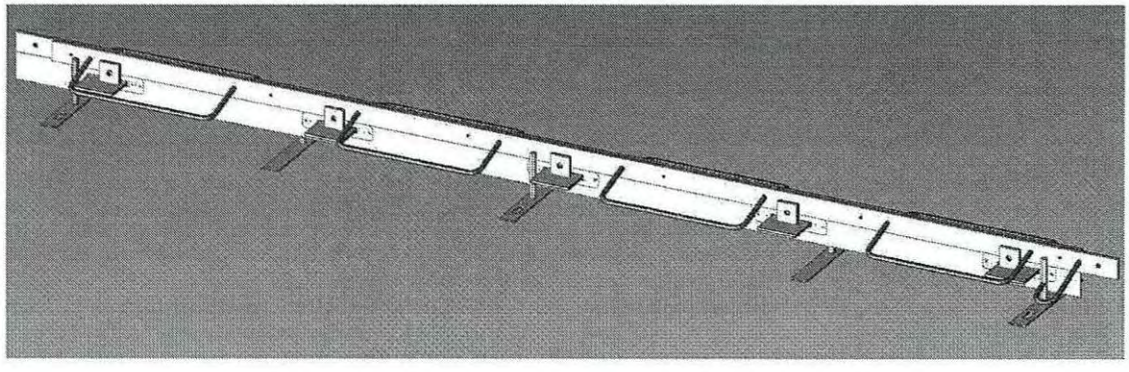


그림 118. (1) armour joint 형상(CAD 도면)

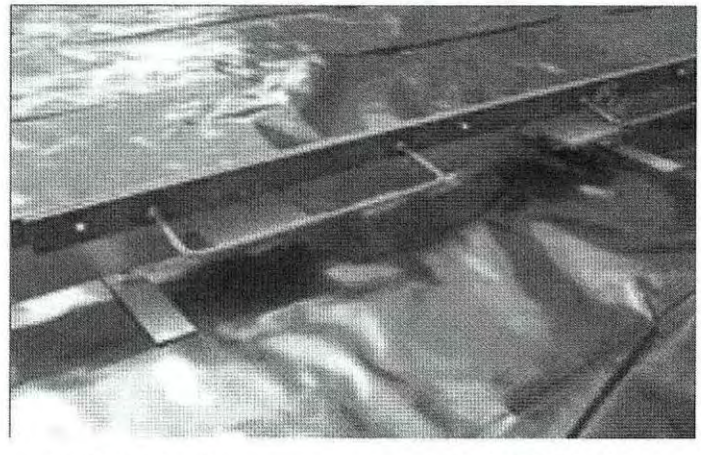


그림 119. (2) armour joint 형상(실제 형상)

armour joint의 설치는 dowel bar와 같이 빠르게 설치할 수 있을뿐만 아니라, 콘크리트 슬래브의 취약부분인 우각부의 컬링을 방지할 수 있고, 콘크리트 슬래브의 횡방향과 종방향에 모두 사용할 수 있다고 조사되었다.

CANZAC 社의 armour joint는 공장용 바닥판을 제작하는 회사로서, 일반도로의 슬래브의 유도장치성능은 시험포장 계획중인 것으로 조사되었다.

4. West Virginia Department of Transportation(WVDOT)

WVDOT(West Virginia Department of Transportation)는 WVU(West Virginia University)에서 개발한 GFRP-CRCP(glass fiber-reinforced polymer - continuously reinforced concrete pavements)를 개발하였다.

WVDOT는 석회암 굵은 골재 위에 GFRP-CRCP 305m를 시험시공을 하였으며, 슬래브의 두께는 25cm로 조사되었다. GFRP-CRCP를 설치한 부분에 그림 120과 같이 균열 유도장치를 설치하였고, 그림 121과 같이 균열 형상이 발생하였다고 보고되었다.

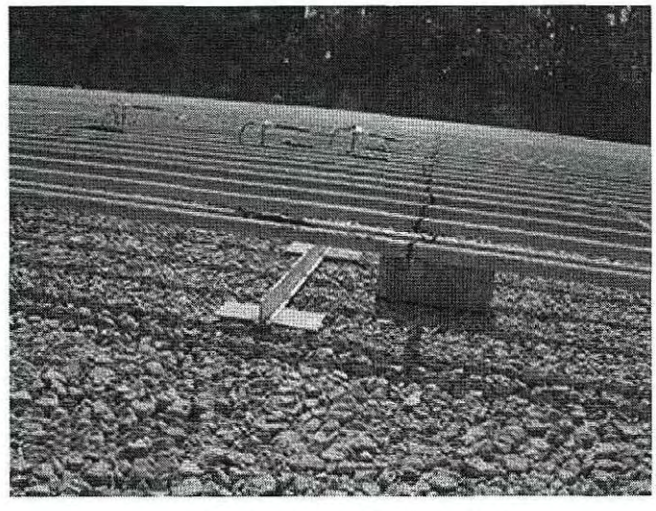


그림 120. 균열 유도장치

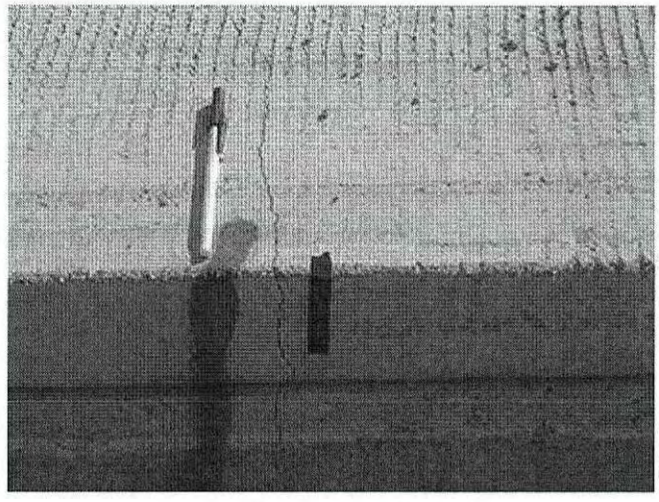
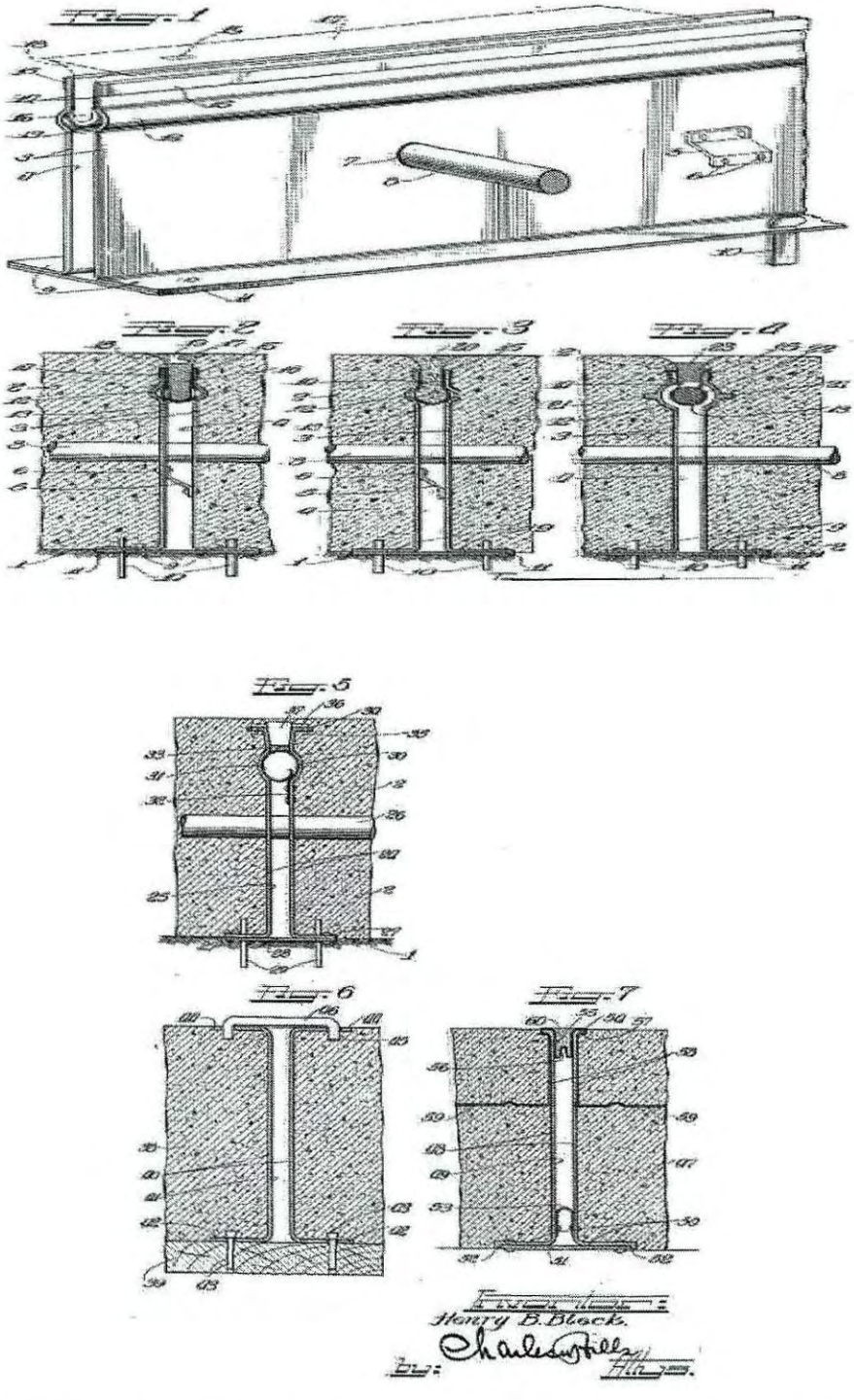


그림 121. 균열 형상

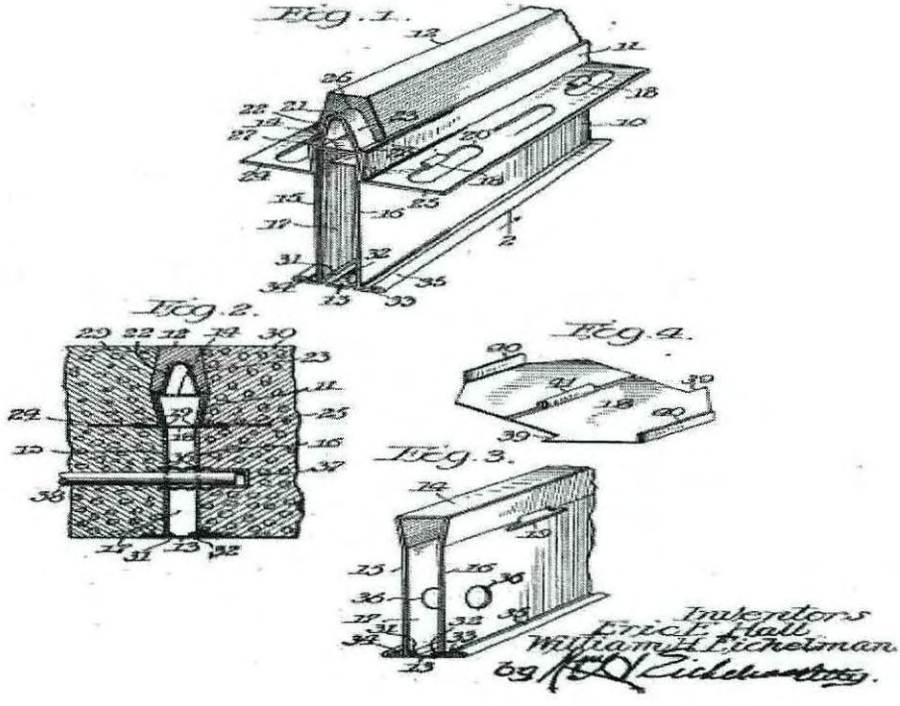
콘크리트 슬래브 타설 후 128일이 지난 2008년 2월 31일에는 균열폭이 평균적으로 0.0086mm로 발생되었다고 보고되었다.

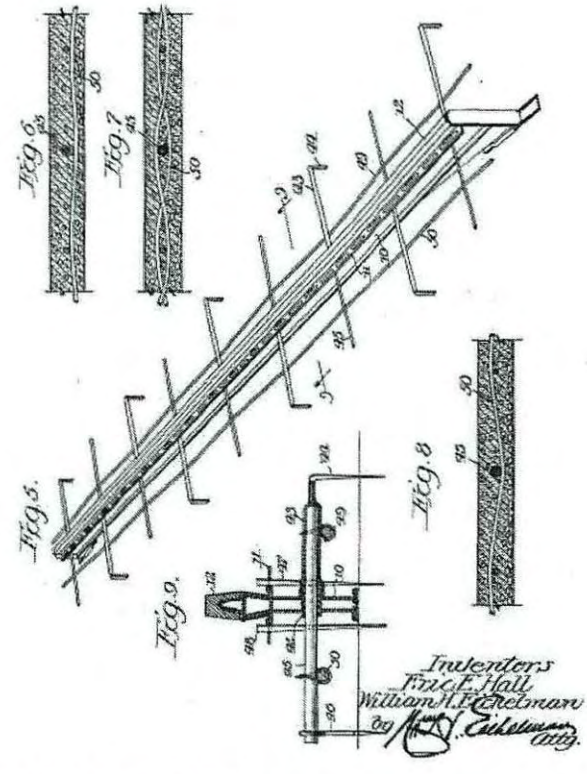
향후 추가적인 연구를 통해 하중 전달 반응을 연구할 것이고, 일정 기간을 간격으로 균열이 발생한 부분에서 하중전달율을 조사할 것이라고 보고되었다.

2절 해외관련 특허

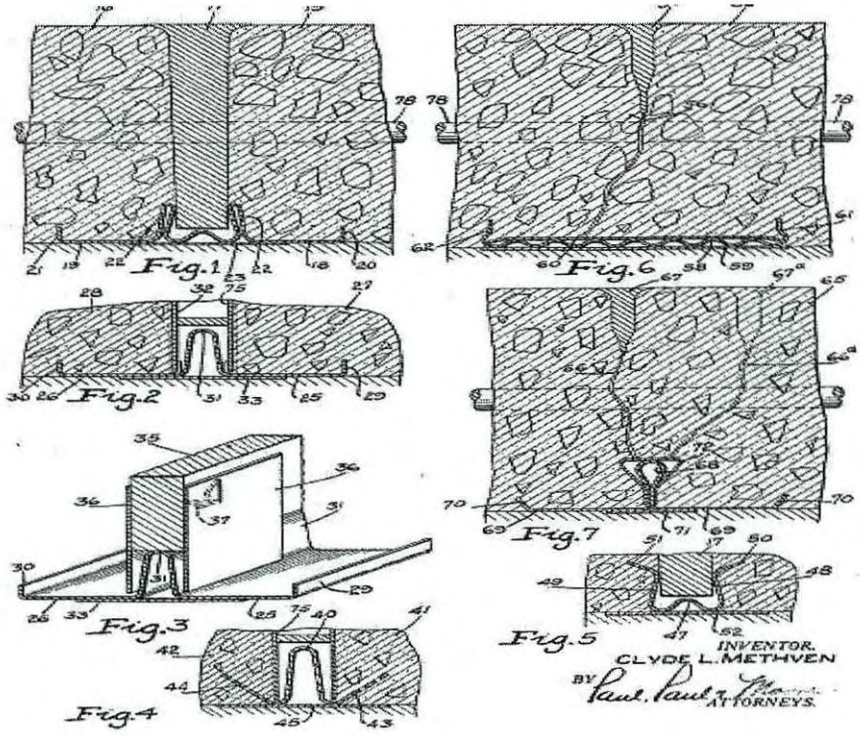


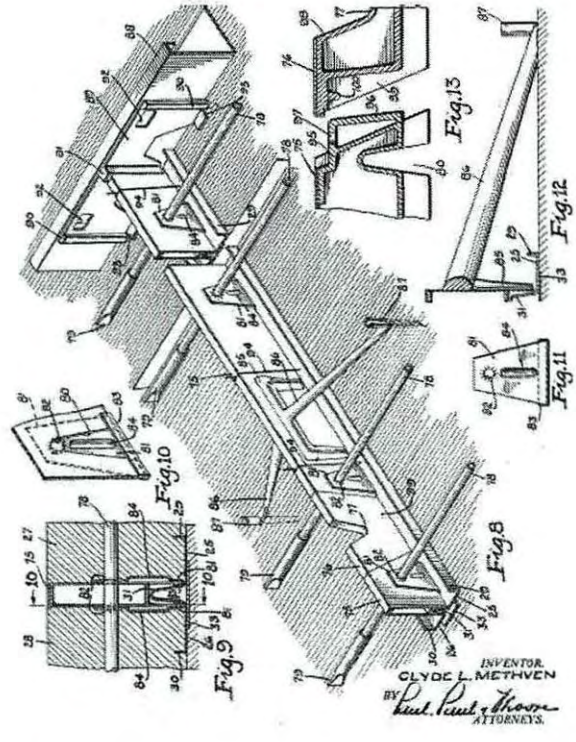
Inventor: Henry B. Black
Material: Walls constructed of asbestos cement composition board or fiberboard, air cell filled with an expansion material filler after wedge plug is removed



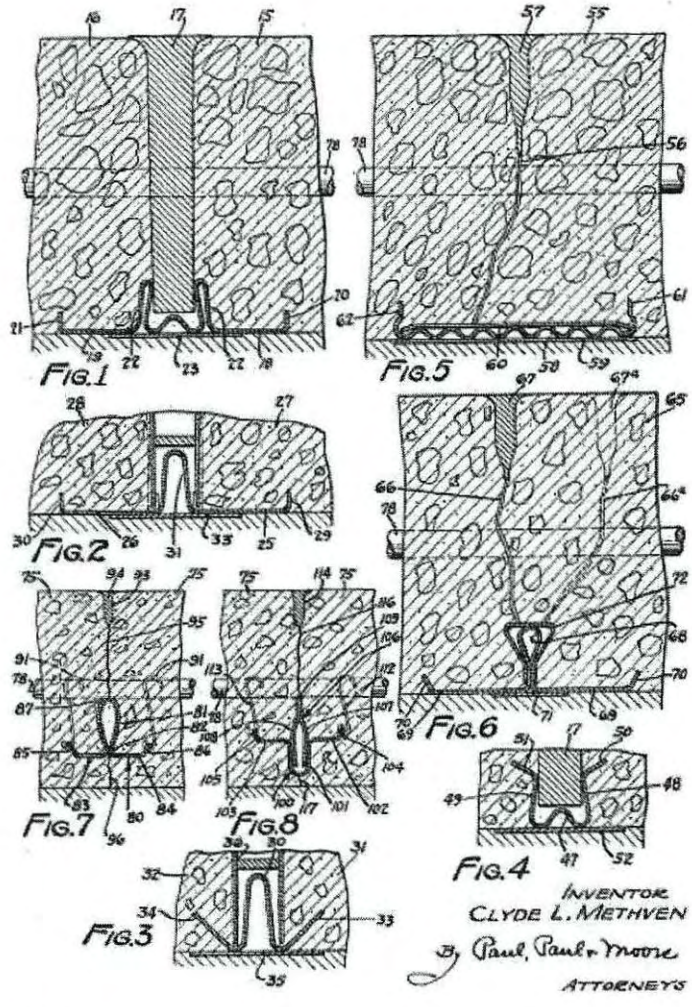


Inventor: Eric E. Hall and William H. Eichelman
Materials: Most of joint is made of sheet metal, with a seal (#11) on to made from copper or another flexible material.





Inventor: Clyde L. Methven
Materials: Frame made from metal with bituminous material as filler. A water seal is present made of an enduring and non-corrosive metal.



Inventor: Clyde L. Methven
Materials: Metal, 17 is a bituminous material, 31 is a metal seal to keep water out, 80 is a thin flexible material such as copper.

제 7 장 참고문헌

김진철 외(2003), "골재종류가 콘크리트의 열팽창계수에 미치는 영향", 한국콘크리트학회 2003년도 봄 학술발표회 논문집

김형배(2004), "콘크리트포장의 수명연장을 위한 줄눈재의 성능개선 및 품질기준 정립", 한국도로공사

김현욱 외(2002), "줄눈 콘크리트포장에서 하중전달계수에 관한 연구", 대한토목학회 논문집

국토해양부(구 건설교통부)(2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 1단계 1차년도, 국토해양부(구 건설교통부)

국토해양부(구 건설교통부)(2002), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 1단계 2차년도, 국토해양부(구 건설교통부)

국토해양부(구 건설교통부)(2003), "한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구", 1단계 2차년도 최종보고서

썬 런쥬안, 최기효, 정진훈, 권수안(2007), "성능기준 확립을 위한 공항 줄눈 콘크리트포장의 초기거동 조사"

이승우(2000), "Characteristics of Friction between Concrete Slab and Base", 대한 토목학회 논문집

이재훈 외(2005), "비파괴 조사 장비를 이용한 무근 콘크리트포장의 다웰바 시공상태 평가", 대한토목학회 정기학술대회

이춘오 외(2006), "국내 석재산지의 지역별 분포유형과 특성", 2006년도 한국암석학회 논문집

이효림 외(2003), "골재종류에 따른 콘크리트의 열팽창계수 측정실험", 한국도로포장공학회 2003년도 학술발표논문집

양성철 외(2002), "콘크리트 팽창계수 측정 실험", 한국도로포장공학회 2002년도 학술발표논문집

윤경구(1998), "줄눈콘크리트포장의 줄눈손상 해석 및 대책 연구", 한국도로공사

윤태영 외(2003), "Data Pave를 이용한 줄눈 콘크리트포장의 하중전달율 분

석", 대한토목학회 정기학술대회
원종필 외(2005), "유리섬유강화 합성 다웰바의 물리·역학적특성", 대한토목학회 논문집
전범준 외(2005), "줄눈콘크리트포장의 적정 줄눈간격에 대한 연구", 한국도로학회 논문집
정진훈 외(2005), "콘크리트 타설 시간에 따른 줄눈의 초기 및 장기 거동", 대한토목 학회 정기학술대회
정진훈 외(2007), "확률론적 줄눈폭 예측모형을 사용한 지역별 적정 줄눈 간격 연구", 2007 건설교통 R&D 성과 포럼 논문집
한국도로공사(1988), "줄눈콘크리트포장의 줄눈손상해석 및 대책연구", 1998 연구보고서
한국도로공사(2001), " 도로 설계 요령", 한국도로공사
한국도로공사(2001), "FWD를 이용한 LTPP구간의 포장 공요성평가 연구", 한국도로공사
한국도로공사(1998), "린콘크리트의 재료물성 및 단면개선 방안 연구", 한국도로공사
AASHTO(2005), "TP 60-00 Coefficient of Thermal Expansion of Hydraulic Cement Concrete"
AASHTO(1986), "AASHTO Guide for Design of Pavement Structure", AASHTO
Anastasios M. Ioannides(2005), "Stress Prediction for Cracking of Jointed Plain Concrete Pavements, 1925-2000", 2005 TRB
Bian, Kohle and Harvey(2007), "Laboratory Evaluation of Fiber Reinforced Polymer Dowel Bar for Jointed Concrete Pavements", TRB
Cable and Williams(2006), "Evaluation of Transverse Joint Forming Methods for PCC Pavement", final report, CP(National Concrete Pavement Technology Center
Crovetti and Bischoff(2001), "Construction and Performance of Alternative Concrete Pavement Design in Wisconsin", TRB
Elfino, Hossain and Yu(2007), "Virginia Experience in Evaluation Dowel

Bar Alignment Measuring Equipment" , TRB

Gaedicke and Villalobos(2006), "Fracture Mechanic Analysis For Saw Cutting Requirement of Concrete Pavement" , TRB

Huang(1992), "Pavement Analysis and Design", Prentice Hall PTR

Jagannath Mallela(2005) "Measurement and Significance of the Coefficient of Thermal Expansion of Concrete in Rigid Pavement Design", 2005 TRB

Jin-Hoon Jeong(2005), "Age and Moisture Effects on Thermal Expansion of Portland Cement Concrete"

Jung(2006), "Effect of Curling on Movement and Load Transfer Capacity of Saw Cut Joint" , TRR

Khazanovich and Gotlif(2003), "Evaluation of Joint and Crack Load Transfer" , final report, FHWA

Lee, Jung and Chon(2006), "Development of a Probabilistic Joint Opening Model Using LTPP Data" , TRB

NCHRP(2002), "Guide for Mechanical-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures" , 1-37A final report, NCHRP

Odden(2004), "Performance Testing Of Experimental Dowel Bar Retrofit Designs" , final report, Minnesota university

Poter(2001), "DOWEL BAR OPTIMIZATION: PHASES I AND II", final report, Iowa state university

Poter(2003), "Alternative Dowel Bars" , Mid-Continent Transportation Research Symposium

Porter and Cable(2005), "Field Evaluation of Elliptical Fiber Reinforced Polymer Dowel Performance" , final report, Iowa state university

Porter and Cable(2006), "Laboratory Study of Structural Behavior of Alternative Dowel Bars" , National Concrete Pavement Technology Center

Porter and Guinn, Jr(2002), "Assessment of Dowel Bar Research" , final report, Iowa state university

Rasmusser and Rozycki(2001), "Characterization and Modeling of Axial Slab-Support Restraint" , TRB

Ruiz(2003), "Evaluation of Load Transfer Efficiency for SMP Sections in the LTPP Database", TRB

Seung Woo Lee(2006), "Development of a Probabilistic Joint Opening Model using LTPP Data"

Shoukry and William(2002), "Evaluation of Load Transfer Efficiency Measurement", final report, Mid-Atlantic Universities Transportation Center

Suh, Lee and Kang(200), "Variability of Concrete Pavement Load Transfer Efficiency Data", TRB

Taylor and Kosmatka(2006), "Integrated Materials and Construction Practices for Concrete Pavement: A State-of-the-Practice Manual", FHWA

Wu and Tayabji(2002), "Variability of Concrete Pavement Load Transfer Efficiency Data", TRB

Yu and Tayabji(2007), "The Need for Improved Specifications on Dowel Bar Placement Tolerance", TRB

Yu and Khazanovich(2005), "Use of Magnetic Tomography Technology to Evaluate Dowel Placement", final report, FHWA

주 의 사 항

1. 본 보고서는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술 연구개발사업의 중간 연구보고서입니다.
2. 본 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 건설기술연구개발사업임을 밝혀야 합니다.
3. 국가보안 차원에서 필요하다고 인정되는 내용은 대외적으로 발표 및 공개하여서는 아니 됩니다.

본 보고서와 관련하여 문의를 원하시는 분은 아래의 문의처로 연락을 주시기 바랍니다.

■ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
(주)한맥기술 TEL 02)2141-7244
한국도로공사 도로교통연구원 TEL 031)371-3440
(주)장헌산업 TEL 02)404-5545
인하대학교 TEL 032)873-5332

R&D / 06건설핵심C20

구조적 성능을 고려한 시멘트 콘크리트포장의 기능 개선을 위한 시공화 연구 2차년도 중간보고서

■ 발행일 / 2009. 12. 16.

■ 발행처 / (주)한맥기술

서울시 송파구 거여동 33-3 한맥 B/D

TEL : 02-2141-7244

■ 인쇄처 / 연희제록스