Construction & Transportation R&D Report

R&D정책 · 인프라사업 최종보고서

R&D / 09TRPI-C052262-01

포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 실용화 기술개발 및 현장 검증에 관한 연구

2011. 8. 12.

주관연구기관 / ㈜삼우아이엠씨

국 토 해 양 부
한국건설교통기술평가원

제 출 문

국토해양부 장관 귀하

이 보고서를 "포스트텐션 콘크리트 포장의 실용화 기술개발 및 현장 검증에 관한 연구"과제의 사업화 기획 보고서로 제출합니다.

2011. 8. 12.

주관연구기관명 : (주)삼우아이엠씨

주관연구책임자 : 배종오

수석연 구 원 : 김만호

수석연 구 원 : 길용수

선임연 구 원 : 전범준

선임연 구 원 : 정원경

연 구 원 : 양정식

연 구 원 : 박삼종

연 구 원 : 이현호

보고서 요약서

<table>
<tr><td>과제고유번호</td><td>09TRPI-C052262-01</td><td>해 당 단 계
연 구 기 간</td><td colspan="2">2009.11.25.
~
2011.08.12.</td><td>단 계 구 분</td><td>2 / 2</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 사 업 명</td><td>중 사 업 명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부사업명</td><td colspan="5">R&D 정책・인프라사업</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 과 제 명</td><td>대 과 제 명</td><td colspan="5"></td></tr>
<tr><td>세부과제명</td><td colspan="5">포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 실용화 기술개발 및 현장 검증에 관한 연구</td></tr>
<tr><td rowspan="2">연 구 책 임 자</td><td rowspan="2">배 종 오</td><td>해당단계
참 여
연구원수</td><td>총 : 8명
내부 : 8명
외부 : 0명</td><td>해당단계
연 구 비</td><td colspan="2">정부: 100,000천원
기업: 66,666천원
계: 166,666천원</td></tr>
<tr><td>총연구기간
참 여
연구원수</td><td>총 : 16명
내부 : 16명
외부 : 0명</td><td>총연구비</td><td colspan="2">정부: 200,000천원
기업: 133,332천원
계: 333,332천원</td></tr>
<tr><td>연구기관명 및
소 속 부 서 명</td><td colspan="2">(주)삼우아이엠씨
기술연구소</td><td>참여기업명</td><td colspan="3"></td></tr>
<tr><td>국제공동연구</td><td colspan="6">상대국명 : 상대국연구기관명 :</td></tr>
<tr><td>위 탁 연 구</td><td colspan="6">연구기관명 : 연구책임자 :</td></tr>
<tr><td colspan="5">요약</td><td>보고서면수</td><td>235 page</td></tr>
<tr><td colspan="7">국내의 콘크리트 포장은 줄눈콘크리트 포장 공법 주로 적용되고 일부 연속철근 콘크리트 포장 공법으로 시공된 바 있다. 그러나 줄눈부에서의 스폴링, 줄눈재파손, 균열, ASR, D-균열 등의 파손으로 유지보수 작업이 빈번이 시행되고 있다. 따라서 본 연구개발에서는 균열과 같은 구조적 파손, ASR이나 D-균열과 같은 재료적 파손, 스폴링과 같은 기능적 파손이 발생하지 않고 포장두께가 감소하며, 설계수명이 증대되는 포스트텐션 콘크리트 포장공법을 개발하여 실용화하는데 필요한 기술개발과 현장에서의 실험과 평가를 통해 그 우수성을 검증하여 폭 넓게 보급되도록 기술개발을 수행하였다.</td></tr>
<tr><td rowspan="2">색 인 어
(각 5개 이상)</td><td>한 글</td><td colspan="5">포스트텐션, 콘크리트 포장, 조인트, 갭슬래브, 텐던</td></tr>
<tr><td>영 어</td><td colspan="5">Post-Tensioned, Concrete Pavement, Joint, Gap Slab, Tendon</td></tr>
</table>

요 약 문

Ⅰ. 제 목

“포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 실용화 기술개발 및 현장 검증에 관한 연구”

Ⅱ. 연구개발의 필요성 및 중요성

1. 연구개발의 필요성

우리나라에서 조사된 도로포장 실제수명은 계획된 설계수명의 75% 수준에 미치지 못하고 있는 것으로 분석되고 있으며 도로의 장기 공용성과 내구성을 향상시키기 위한 다양한 연구와 기술개발이 최근 들어 추진되고 있으나 아직까지는 가시적인 성과가 도출되지 못하고 있는 실정이다. 시멘트 콘크리트 포장의 고내구성, 장기 공용기간 동안 안전한 서비스를 제공할 수 있는 기술의 개발은 최근의 도로파손과 유지보수가 빈번한 상황에서 더욱 절실히 요구된다 할 수 있다.

특히 국내의 시멘트 콘크리트 포장은 아스팔트 포장에 비하여 국내의 풍부한 매장량을 확보하고 있는 시멘트 자원을 활용함으로서 경제적이고 내구성이 뛰어난 이점을 가지고 있어 총연장 20,000km를 목표로 한국도로공사에서는 꾸준히 시멘트 콘크리트의 도로건설을 추진하고 있다. 그러나 현재 국내 시멘트 콘크리트 포장은 여러 가지 형태의 다양한 파손양상을 나타내고 있으며 도로의 노후화가 심화되어가고 있어 이에 대한 보수·보강 및 유지관리가 관계기관의 중대한 문제로 부각되어 있다. 특히 줄눈콘크리트 포장에서 발생하는 대표적 형태의 횡방향 균열(transverse cracking)과 종방향 균열(longitudinal cracking), 스폴링(spalling), 표면결함 등은 승차감뿐만 아니라 이용자의 안전운행에 심각한 교통장애를 일으키고 있다. 이러한 부분에 대해서 전단면보수가 불가피하나 현재의 상황에서는 교통지·정체의 문제로 인해 그 방법 자체가 적용 불가능한 상

태이며 이에 대한 근본적인 대책마련이 시급한 실정에 놓여있다.

따라서 본 연구는 국내의 풍부한 매장량을 보유한 시멘트 자원을 활용할 수 있고 종래의 기술보다 고품질의 고내구성을 확보한 콘크리트 포장기술을 개발함으로서 최소 40년 이상 파손과 유지보수 없이 서비스 될 수 있는 장점뿐만 아니라 생애주기비용 측면에서 매우 경제적인 기술로 완성하여 국가의 비효율적 예산낭비를 방지하고 도로 이용자에게 양질의 서비스를 제공할 수 있는 기술로 개발하고자 하였다.

2. 연구개발의 중요성

국내의 시멘트 콘크리트 포장에 대한 설계 및 계획의 인식부족, 관계기관의 낮은 관심도 등은 지금까지 콘크리트 포장기술의 발전을 저해하는 요소로 작용하였으며 현재 당면해 있는 여러 가지 형태의 파손과 유지보수 문제, 이로 인한 이용자의 불편 등의 결과를 초래하는 주원인이 되었다. 종래의 기술로 건설하여 파손된 도로는 승차감의 저하는 물론 소음발생의 원인이 되고 있으며 도로 이용자에게 쾌적한 주행성을 제공하지 못하고 있다. 따라서 이를 보수하기 위하여 빈번히 시행되어지는 보수작업은 장시간의 교통 통제하에 작업이 이루어지기 때문에 차량의 원할한 소통에 장애가 되고 있으며 빈번한 교통체증의 유발과 교통사고를 초래함으로서 국민의 소중한 인명과 재산을 앗아가는 결과를 초래하고 있는 실정이어서 이에 대한 기술개발 노력은 매우 중요한 일이 아닐 수 없다. 또한 종래의 콘크리트 포장의 기술이 가지고 있는 조인트의 파손과 소음을 방지하여 주행성을 개선시키고 최소 40년 이상 서비스가 가능하도록 하여 불필요한 국가예산의 낭비를 방지할 뿐만 아니라 장기 공용성 측면의 경제적인 도로포장 기술개발은 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

또한 본 기술은 콘크리트 슬래브의 두께를 기존 포장의 50%의 수준으로 시공할 수 있기 때문에 콘크리트 제조에 필요한 원자재의 절감효과를 기대할 수 있다. 따라서 콘크리트 생산에 소모되는 골재자원을 절감함으로서 골채채취로 인한 소음·분진 등의 환경문제, 하천골재 채취로 인한 하천의 형질변경, 골재난 해소 등 환경문제와 사회적 문제를 동시에 해결하는 이점을 기대할 수 있다. 뿐만 아니라 국내의 기술 개발력을 향상시킴으로서 국가 경쟁력 확보에도 기여하는 바가 클 것으로 예상되기 때문에 국가 차원의 정책적인 기술개발 장려가 필요할 것으로 사료된다.

특히 비산유국인 우리나라의 실정을 감안하면 기존 기술에 비하여 일일 생산량이 증대시킴으로서 관련 산업에 필요한 중장비의 회전률 향상으로 인한 유류비 절감 효과와 교통 지·정체 문제를 해결함으로서 얻어지는 이용자의 간접유류비 절감 효과를 동시에

가져올 수 있다. 또한 본 기술에 사용되는 자재, 인력, 장비 등 관련 전문건설에 관계된 중·소기업의 산업부문 활성화를 불러일으키고 본 기술개발의 적용으로 관련 산업의 시장이 확대형성 되어 중·소기업의 시장발전에 크게 기여할 것으로 판단되며 범 국가적인 차원의 기술개발과 관련 산업의 장려 및 기업 육성을 실천하는 일에 크게 기여해야 할 것으로 판단된다.

Ⅲ. 연구개발의 내용 및 범위

본 연구는 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement) 공법이 도로 포장에 활용되기 위해서 시공성이 우수한 공법으로 완성되도록 하고, 타 공법 및 외국의 기술에 비하여 경제성이 확보될 수 있는 기술로 완성하여 공법의 경쟁력 및 국가경쟁력에 기여할 수 있도록 하였다. 본 공법이 파손과 유지보수 없이 장기 공용되기 위해서 장수명 고내구성의 공법으로 완성되어야 하며 이러한 관점에서 본 연구개발의 내용과 범위를 [표 1]과 같이 설정하였다.

[표 1] 연구내용 및 범위

연구내용	연구범위
· 장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합 - 최적배합 설계, 강도 및 내구성 평가	· 삼성분계 고내구성 콘크리트 연구 · 고내구성 초속경 콘크리트 연구 · 고내구성 초조강 콘크리트 연구
· 시공기술 개발	· 슬립폼 페이버에 의한 시공방법 연구 · 데크피니셔에 의한 시공기술 연구
· 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 방법 연구 · 횡방향 프리스트레스 도입률 향상방안 연구
· 조인트 시스템의 개발 - 내구성 조인트 시스템 개발 - 최적 조인트 유간계산	· 조인트 제작 · 조인트 설계 연구 · 조인트 시공 및 평가
· 갭슬래브 방식의 시공기술 개발	· 갭슬래브 시공 및 단부처리방안 연구 · 갭슬래브 설계 및 시공기술 연구
· 평탄성 확보 기술 개발	· 데크피니셔에 의한 평탄성 확보 기술 연구
· 현장적용 시험 연구	· 현장적용성 평가 · 현장조사 및 데이터 측정
· 과적차량 단속구간 포장 적용 방안	· 시공기술 연구 · 구조해석 및 설계검토 · 콘크리트 적용 방안 연구
· 영업소 광장부 포장 콘크리트 개발	· 플라이애시 콘크리트 개발 · 작업성, 강도발현, 최적배합설계
· 데크피니셔에 의한 시공기술 개발	· 광폭 시공 · 평탄성 확보
· 횡방향 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 재료 설계 및 개발 · 횡방향 프리스트레스 도입률 향상 방안 · 횡방향 쉬스 설계 및 제작
· 조인트 시스템의 개발	· 내구성 조인트 시스템 개발 · 최적 조인트 유간계산
· 교량접속 슬래브 적용	· 강선설치, 인장방법

Ⅳ. 연구개발결과

본 기술개발의 연구내용에 의거 개발된 주요 결과물은 다음 [표 2]와 같다.

[표 2] 주요 연구개발 결과

연구내용	주요 연구결과
· 장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합	· 최적배합 도출 · 고내구성 초속경 및 초조강 콘크리트 개발
· 시공기술 개발	· 슬립폼 페이버에 의한 시공방법 정립 · 데크피니셔에 의한 시공기술 개발 · 사이드스프레더 개발
· 스트레싱 시공기술 개발	· 프리스트레스 도입률 향상 · 사이드폼을 이용한 횡방향텐던 고정방법개발
· 조인트 시스템의 개발	· 아모 조인트 시스템 개발 · 조인트 시공방법 정립
· 갭슬래브 방식의 시공기술 개발	· 갭슬래브 시공방법 개발 · 갭슬래브 설계 및 시공기술 개발
· 평탄성 확보 기술 개발	· 데크피니셔에 의한 평탄성 확보 기술 개발
· 현장적용 시험 연구	· 현장적용성 평가 · 콘크리트 재료 시험 검증
· 과적차량 단속구간 적용 방안	· 시공방법 개발 · 구조해석 및 설계검토 · 콘크리트 적용성 검증
· 영업소 광장부 포장 콘크리트 개발	· 플라이애시를 사용한 영업소 광장부 포장 콘크리트의 개발: 작업성, 강도발현, 최적배합설계
· 데크피니셔에 의한 시공기술 개발	· 광폭 시공기술 개발 · 평탄성 확보기술 개발
· 횡방향 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 시공방법 개발 · 일단인장방식에 의한 횡방향 프리스트레스 도입률 향상
· 조인트 시스템의 개발	· 내구성 조인트 시스템 개발 · 조인트 유간 측정결과 및 분석에 의한 최적 설계안 정립
· 교량접속 슬래브 적용	· 교량접속 슬래브 시공방법 정립: 강선설치, 인장방법

Ⅴ. 연구개발결과의 활용계획

본 연구개발결과는 다음과 같이 고속도로 본선 포장, 영업소 광장부 및 주차장 포장, 버스전용차로 포장, 과적차량 단속구간 포장공법, 항만포장 및 야적장(주차장 포함) 포장, 공항포장(주기장, 유도로, 에이프런, 활주로), 스마트하이웨이 포장 등 다양한 토목시설물에 활용할 계획이다.

1. 고속도로 본선 포장에 활용

고속도로 본선포장은 60% 이상이 콘크리트 포장으로 시공되어 왔으며 균열이나 줄눈부에서의 잦은 파손으로 이에 대한 유지보수가 빈번이 시행되고 있는 실정이다. 또한 영업소 광장부 포장도 마찬가지로 줄눈부 스폴링, 줄눈재 파손 등 파손상태가 심각하여 빈번한 유지보수 작업이 시행되고 있다. 본 공법은 줄눈이 필요 없는 공법으로 고속도로 본선에 매우 적합한 포장형식으로 검토되고 있으며 이러한 분야에 매우 활용가치가 크다고 할 수 있다. 주문진-속초 구간의 고속도로 본선 포장 시험시공이 성공적인 결과를 보이고 있으나 적용연장이 너무 짧아 포장으로서의 평가를 인정받기에 다소 미흡하여 2011년 7월에 목포-광양 고속도로에 시범적용토록 계약되어 시공준비중이다.

2. 영업소 광장부 및 주차장 포장에 활용

영업소 광장부 및 주차장 포장은 균열이나 줄눈부에서의 심각한 파손을 나타내어 유지보수가 빈번이 시행되고 있는 실정이다. 영업소 광장부나 주차장 포장은 줄눈부 스폴링, 줄눈재 파손, 균열 및 단차로 인한 파손상태가 심각하여 이러한 파손형태를 방지할 수 있는 포장공법으로 이러한 분야에 활용가치가 매우 크다고 할 수 있다. 따라서, 전주-남원 임실 영업소, 경부고속도로 천안 영업소등에 적용하였고 2012년에는 냉정-부산간 서부산 영업소에 적용할 계획이다.

3. 버스전용차로 포장에 활용

버스전용차로는 주로 아스팔트 포장으로 시공되고 있으나 교통하중의 초과와 고온 및 정지하중으로 인한 소성변형, 포트홀 등의 파손으로 버스의 운행에 심각한 지장을 초래하는 구간이 많은 실정이다. 이러한 분야에 하중저항능력이 우수하고 장기공용기간 내

구성이 양호한 본 기술을 적용한다면 상당한 효과를 가져올 수 있으며 활용가치가 매우 크다고 할 수 있다. 서울시 버스전용차로 구간에 본 공법을 적용하도록 지속적인 연구화 추진이 이루어질 것이다.

4. 과적차량 단속구간 포장에 활용

국내의 과적차량 단속시스템은 대부분 국도를 위주로 운영되고 있으며 주로 아스팔트 포장에 설치되어 운영되고 있다. 그러나 아스팔트 포장은 포장체의 특성상 소성변형과 중차량에 취약하여 잦은 파손이 발생되고 있으며, 포장의 파손으로 인하여 축하중 계측센서의 파손은 물론 센서의 정밀도와 정확도가 저하되어 이에 대한 포장형식의 대안이 요구되었다. 따라서 본 연구개발 결과를 과적차량 단속구간 포장공법으로 적용하여 축하중 계측센서의 정확도와 정밀도를 향상시키고 포장체의 파손과 유지보수 없이 장기 공용되도록 적용할 수 있는 우수한 대안이라 할 수 있다. 이에따라 순천국도구간에 적용한 WIM 구간 PTCP 포장에 대해 지속적인 모니터링으로 확대적용토록 검토중에 있다.

5. 항만포장 및 야적장 포장에 적용

항만의 터미널포장 및 야적장 포장이나 주차장 포장은 일반적으로 철근콘크리트 슬래브 형식으로 설계되고 시공되어 왔으나 포장단면에 비해 막대한 철근자재가 소요되어 공사비 및 공기 상승의 주요 원인이 되고 있으며, 포장의 구조특성상 많은 줄눈의 시공이 필요하나 줄눈부에서의 파손으로 유지보수 및 공용성 저하가 불가피한 실정이다. 따라서 포장단면 감소효과 및 공사비 절감효과, 유지보수 비용 절감 효과가 우수한 본 공법은 매우 높은 활용성이 있다고 할 수 있다. 울산항 야적장에 적용하기위해 지속적인 검토를 수행하였으나 사업의 전반적인 지연으로 아직 결실을 맺지못하고 있다.

6. 공항포장에 적용

본 공법을 공항포장의 유도로, 주기장, 에이프런 및 활주로에 적용함으로서 포장 단면을 감소시키고 설계수명을 증대시켜 우수한 포장형식으로 적용 가능하다. 줄눈이 없어 파손이 감소되고 공용성과 서비스가 증대된 본 공법은 공항포장에 매우 적합한 포장 형식이라 할 수 있다. 이에 따라 인천국제공항의 제 2 활주로 건설시 계류장등에 적용할 수 있도록 지속적으로 추진중이다.

SUMMARY

Jointed concrete pavements in Korea have been used widely for several decades, but the problem is that occur the distresses such as spalling, ASR (Alkali-silica reaction), transverse or longitudinal cracking, D-cracking and so on. Frequent repairs due to the these distresses in the jointed concrete pavement result in the waste of valuable, limited financial resources, increased user costs, and inconvenience to roadway users due to traffic delays. Post-tensioned concrete pavement(PTCP) expects the requirement of zero-maintenance while providing good long-term performance.

Accordingly, the major object of this research project is to develop a commercialization technique of post-tensioned concrete pavement that could provide good long-term at least 40 years performance with minimal maintenance needs.

The contents of this studies include long-life, high-durability concrete pavement mix, development of construction technique by slip-form paver and deck finisher, development of stressing technique, development of joint system, development of construction technique using an improved gap slab, development of technique for evenness, field test and evaluation, and application of control section for overloaded vehicle.

The results obtained from this study are as the follows: (1) high-durability concrete, rapid-setting concrete, ultra early strength concrete and fly-ash concrete were developed and studied construction technique by slip-form paver and deck-finisher, (2) stressing technique was developed and rate of prestress application improved, (3) armor joint system of mono-cell type was developed and the design and construction technique of gap slab were developed, (4) the technique to get the evenness by deck finisher was developed, (5) field test and evaluation were performed.

Also, the findings could be used to the area such as control section for main lane and toll-gate area of highway, bus-only lane system, overloaded vehicle, harbor terminal including open-air storage yard, airport pavement, and smart highway.

CONTENTS

CH.1 INTRODUCTION

1.1 Objective ---------- 1

1.2 Necessity ---------- 3

1.3 Research Scope ---------- 5

CH.2 CURRENT STATE OF TECHNIQUE

2.1 Oversea ---------- 7

2.2 Domestic ---------- 18

CH.3 CONTENTS AND FINDINGS OF RESEARCH

3.1 Background ---------- 22

3.2 Experimental Approach ---------- 28

3.3 Research Contents and Findings ---------- 48

CH.4 ACHIEVEMENT OF GOAL AND LEVEL OF CONTRIBUTION

4.1 Goals By Year ---------- 87

4.2 Achievement of Goal ---------- 88

4.3 Level of Contribution for Goal ---------- 94

CH.5 APPLICATION PLAN OF RESEARCH FINDINGS

5.1 Necessity of Additional Study ---------- 97

5.2 Application for Other Research ---------- 97

5.3 Business Plan ---------- 97

CH.6 OVERSEA TECHNIQUE INFORMATION OBTAINED FROM THIS RESEARCH PROJECT---------- 103

CH.7 REFERENCES ---------- 105

APPENDIX 1 ---------- 107

APPENDIX 2 ---------- 132

APPENDIX 3 ---------- 133

APPENDIX 4 ---------- 148

APPENDIX 5 ---------- 149

APPENDIX 5 ---------- 192

목 차

제1장 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 목적 ---------- 1

1.2 연구개발의 필요성 ---------- 3

1.3 연구개발 범위 ---------- 5

제2장 국내외 기술개발 현황

2.1 국외의 기술개발 현황 ---------- 7

2.2 국내의 기술개발 현황 ---------- 18

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 이론적 배경 ---------- 22

3.2 실험적 접근방법 ---------- 28

3.3 연구내용 및 결과 ---------- 48

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

4.1 연도별 연구목표 ---------- 87

4.2 연구개발 목표의 달성도 ---------- 88

4.3 관련분야 기술발전에의 기여도 ---------- 94

제5장 연구개발결과의 활용계획

5.1 추가연구의 필요성 ---------- 97

5.2 타 연구에의 응용 ---------- 97

5.3 사업화 추진방안 ---------- 97

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보 ---------- 103

제7장 참고문헌 ---------- 105

부 록 1 ---------- 107

부 록 2 ---------- 132

부 록 3 ---------- 133

부 록 4 ---------- 148

부 록 5 ---------- 149

부 록 6 ---------- 192

그림 목차

[그림 1] 콘크리트 포장의 스폴링 파손(JCP) ---------- 2

[그림 2] 콘크리트 포장의 조인트문제(JCP) ---------- 2

[그림 3] 콘크리트 포장의 보수(JCP) ---------- 2

[그림 4] 콘크리트 포장의 펀치아웃 파손(CRCP) ----------2

[그림 5] 버지니아, 펜실베니아, 미시시피, 아리조나의 프리스트레스트 포장방법----- 10

[그림 6] 미시시피 현장사진---------- 11

[그림 7] 1985년 시공된 PTCP 현장---------- 13

[그림 8] 텍사스의 프리스트레스트 콘크리트 포장 방법(1985년)---------- 13

[그림 9] 아모(Armor) 조인트---------- 13

[그림 10] 텍사스 현장사진---------- 14

[그림 11] 텍사스 PTCP 시공현장(2008년)---------- 14

[그림 12] 펜실베니아 현장사진---------- 16

[그림 13] 1970년대 미시시피, 버지니아, 펜실베니아의 시공 방법---------- 16

[그림 14] 미국의 콘크리트 포장 건설현황(자료출처: 미국콘크리트포장협회)------- 18

[그림 15] 컬링 현상---------- 22

[그림 16] PTCP 슬래브 해석 예---------- 23

[그림 17] 마찰저항의 영향---------- 24

[그림 18] 긴장응력 크기 결정을 위한 개념---------- 26

[그림 19] 피로파손 기준 설계 개념---------- 27

[그림 20] 긴장응력 크기 결정을 위한 개념---------- 28

[그림 21] 피로파손 기준 설계 개념---------- 29

[그림 22] 기술의 설계 흐름도---------- 31

[그림 23] 콘크리트 포장 절단면 비교 사진---------- 37

[그림 24] 절단면 간격변화 측정결과---------- 37

[그림 25] 유지보수 개념도---------- 41
[그림 26] 긴장에 의한 등가하중과 모멘트---------- 43
[그림 27] 굴곡 부재의 중심선을 따른 긴장---------- 44
[그림 28] 굴곡 부재의 중심선 대칭 긴장---------- 45
[그림 29] 굴곡이 존재하는 슬래브의 변형---------- 45
[그림 30] 지반 강성에 따른 좌굴 임계 응력---------- 46
[그림 31] 강도 평가결과---------- 50
[그림 32] 투수저항성 및 내구성지수 평가결과---------- 50
[그림 33] 표면박리저항성 평가결과---------- 51
[그림 34] 화학저항성 평가결과---------- 52
[그림 35] 알칼리-골재 반응 사례와 반응성 평가결과---------- 53
[그림 36] Maturity 실험결과---------- 55
[그림 37] 현장에서 시간에 따른 Maturity 발현 특성---------- 56
[그림 38] 냉정방향 구간 설계도---------- 60
[그림 39] 부산방향 구간 설계도---------- 60
[그림 40] 조인트 설계와 시공---------- 61
[그림 41] 텍사스 시공방식과 개발기술의 시공 방식 비교---------- 62
[그림 42] 스페이서 비교---------- 63
[그림 43] 임실영업소 광장부 PTCP 시공 평면도---------- 64
[그림 44] 임실영업소 PS강연선 및 철근 배근도---------- 64
[그림 45] PE쉬트 및 사이드폼 설치---------- 65
[그림 46] PS강연선 및 보조철근 설치---------- 66
[그림 47] 테크피니셔 설치---------- 66
[그림 48] 콘크리트 포설---------- 67
[그림 49] 콘크리트 양생---------- 67

[그림 50] 인장작업---------- 68
[그림 51] 텍사스의 횡방향 텐던 배치 방식---------- 69
[그림 52] 개발기술(갭슬래브 시공 방식)의 강선배치와 인장작업---------- 69
[그림 53] 아스팔트 노면 커팅---------- 71
[그림 54] 노면파쇄기에 의한 아스팔트 절삭---------- 72
[그림 55] 버럭처리---------- 73
[그림 56] 고압 살수 진공흡입 청소---------- 74
[그림 57] 표면건조 포화상태---------- 74
[그림 58] 레벨링 시멘트페이스트 포설---------- 75
[그림 59] 분리막 설치---------- 76
[그림 60] 횡방향 보조철근 설치---------- 77
[그림 61] PS강연선 설치----------77
[그림 62] 데크피니셔 설치---------- 78
[그림 63] 콘크리트 생산 및 포설---------- 79
[그림 64] 타이닝---------- 80
[그림 65] 양생제 살포---------- 80
[그림 66] 보온양생---------- 81
[그림 67] 인장작업---------- 82
[그림 68] 갭슬래브 앵커설치 및 철근조립---------- 83
[그림 69] 갭슬래브 콘크리트 포설---------- 83
[그림 70] 시공완료---------- 84
[그림 71] 노후된 줄눈콘크리트 포장 위에 아스팔트 포장---------- 101
[그림 72] 노후된줄눈콘크리트포장에 PFC 적용---------- 101
[그림 73] PFC(Porus Friction Coarse) 근경---------- 102
[그림 74] 애리조나 교통국의 합성포장 연구 내용----------102

표 목차

[표 1] 연차별 연구목표 및 주요 연구내용---------- 6

[표 2] 유럽의 프리스트레스트 포장 건설현황---------- 8

[표 3] 1970년대 미국의 프리스트레스트 포장의 건설현황---------- 9

[표 4] 펜실베니아 US220 현장의 PTCP 포장현황---------- 10

[표 5] 텍사스 IH-35 현장의 포장현황---------- 12

[표 6] 펜실베니아 US220 현장의 포장현황---------- 15

[표 7] 미국의 시장규모---------- 18

[표 8] 국내 고속도로 건설계획---------- 20

[표 9] 고속도로 공사 발주계획---------- 21

[표 10] PTCP 설계와 국외 설계 비교---------- 32

[표 11] 콘크리트 표준시방서 검토 결과---------- 33

[표 12] 종방향 텐던 인장작업 결과---------- 35

[표 13] 포스트텐션 콘크리트 포장의 구조적 파손 분류와 보수방안---------- 37

[표 14] 포스트텐션 콘크리트 포장의 파손 및 손상의 종류---------- 38

[표 15] PTCP 콘크리트의 배합기준---------- 49

[표 16] PTCP 콘크리트 배합표---------- 49

[표 17] 고내구성 초속경 콘크리트 배합기준---------- 53

[표 18] 고내구성 초조강 콘크리트 배합기준---------- 54

[표 19] 영업소 광장부 PTCP 콘크리트 배합 및 품질기준---------- 54

[표 20] 종방향 텐던의 긴장작업 결과---------- 57

[표 21] 횡방향 텐던의 긴장작업 결과---------- 57

[표 22] 공법 검토안---------- 59

[표 23] 주요 시공결과---------- 70

[표 24] 종방향 PS강연선 설치간격---------- 76

[표 25] 연구 진행 사항---------- 86
[표 26] 설계 결과---------- 86
[표 27] 1차년도 세부 연구목표 및 연구내용---------- 87
[표 28] 2차년도 세부 연구목표 및 연구내용---------- 88
[표 29] 1차년도 연구개발 달성도---------- 89
[표 30] 2차년도 연구개발 달성도---------- 90
[표 31] 1차년도 연구개발 달성내용---------- 91
[표 32] 2차년도 연구개발 달성내용---------- 92
[표 33] PTCP 연구 개발 내용---------- 93
[표 34] 구조적 측면의 품질---------- 98
[표 35] 재료적 측면의 품질---------- 99
[표 36] 공용성 측면의 품질---------- 99
[표 37] 유지관리비용을 고려한 생애주기비용---------- 101
[표 38] 사용자 비용을 고려한 생애주기비용----------102

제1장 연구개발과제의 개요

1.1 연구개발의 목적

국내의 고속도로 건설 사업은 한국도로공사의 정책에 따라 1980년대부터 88고속도로를 시작으로 현재까지 신설과 확장사업이 꾸준히 추진되고 있으며 향후 동서 9축 남북 7축의 총연장 20,000km를 목표로 건설되고 있어 국토의 균형발전과 교통수요에 적합한 국가 간선도로망이 건설교통부의 도로정책에 따라 지속적으로 건설되고 있는 실정이다. 그러나 현재까지 국내의 실정은 건설에만 비중을 두어 왔으며 도로포장 제품의 조기파손이나 유지관리 등을 근본적으로 개선하기 위한 노력이나 기술개발에는 관심이 저조하였다.

현재 폭 넓게 적용되고 있는 아스팔트 도로는 온도에 따라 탄성계수가 달라짐으로서 중차량에 의한 영구소성변형, 정지하중 및 하절기 대기온도 상승에 취약함으로서 4~5년 주기로 재포장해야하는 문제가 있으며 이에 따른 유지보수 비용이나 덧씌우기 비용을 감안하면 경제성과 내구성을 만족시키지 못하고 있다. 또한 콘크리트 포장은 아스팔트 포장에 비하여 국내의 풍부한 매장량을 보유하고 있는 시멘트 자원을 활용함으로서 경제적이고 내구성이 뛰어난 이점을 가지고 있다. 그러나 현재 우리나라에서 폭 넓게 사용되고 있는 줄눈콘크리트(JCP: Jointed Concrete Pavement) 포장 기술은 조인트에서의 스폴링(그림1)과 벌어짐 현상(그림2)으로 인한 실런트 재료 파손, 균열, 단차 등은 잦은 유지보수(그림3)를 초래함으로서 교통체증과 교통사고의 원인을 제공하고 있으며 국가의 예산낭비와 함께 이용자의 불편을 가중시키는 문제를 야기하고 있다. 또한 제한적으로 사용했던 연속철근 콘크리트(CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement) 포장 제품도 마찬가지로 종방향 조인트의 파손과 균열부에서의 파손 및 펀치아웃(그림4) 등으로 인해 유지보수가 불가피한 실정이다.

이처럼 우리나라에서 조사된 도로포장 설계수명은 계획된 설계수명의 70%에 못미쳐 다양한 파손이 도출되고 있으며 파손된 도로는 유지보수 및 유지관리를 위하여 매년 막대한 국가예산이 투입되고 있고 보수작업으로 인하여 발생되는 교통체증과 교통사고 등은 이제 사회적 문제로 심화되어 있는 실정이다.



그림 1 콘크리트 포장의 스폴링 파손(JCP)



그림 2 콘크리트 포장의 조인트문제(JCP)



그림 3 콘크리트 포장의 보수(JCP)



그림 4 콘크리트 포장의 펀치아웃 파손(CRCP)

따라서 본 기술개발에서는 국내의 풍부한 매장량을 보유한 시멘트 자원을 활용하여 기존의 도로포장 기술에 비해 경제적이고 내구성이 우수할 뿐만 아니라 장기 공용기간 동안 파손과 유지보수 없이 서비스 될 수 있는 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement) 기술이 실용화 되기 위한 연구와 현장 검증을 통하여 국가의 비효율적 예산낭비를 방지하고 도로 이용자에게 양질의 서비스를 제공함으로서 교통체증과 교통사고에 따른 국민의 소중한 인명과 재산 보호는 물론 국내 기술력을 증진시켜 국가경쟁력 확보에 기여하고자 하였다.

1.2 연구개발의 필요성 및 중요성

(1) 기술개발의 필요성

건설교통부의 도로정책 기본방향은 국토의 균형발전과 교통수요에 부응하는 간선도로망을 구축하기 위해 지속적으로 고속도로의 확충과 국도 건설을 위해 국가차원의 다양한 정책이 추진되고 있다. 그러나 우리나라에서 조사된 도로포장 실제수명은 계획된 설계수명의 75% 수준에 미치지 못하고 있는 것으로 분석되고 있으며 도로의 장기 공용성과 내구성을 향상시키기 위한 다양한 연구와 기술개발이 최근 들어 추진되고 있으나 아직까지는 가시적인 성과가 도출되지 못하고 있어 안타까운 실정에 놓여있다. 따라서 국가적인 차원의 관련 산업 장려나 기업의 육성이 절실히 필요하며 시멘트 콘크리트 포장의 고기능성과 고내구성, 장기 공용기간 동안 안전한 서비스를 제공할 수 있는 기술의 개발은 더욱 더 절실히 요구된다 할 수 있다.

특히 국내의 시멘트 콘크리트 포장은 아스팔트 포장에 비하여 국내의 풍부한 매장량을 확보하고 있는 시멘트 자원을 활용함으로서 경제적이고 내구성이 뛰어난 이점을 가지고 있어 총연장 20,000km를 목표로 한국도로공사에서는 꾸준히 시멘트 콘크리트의 도로건설을 추진하고 있다. 그러나 현재 국내 시멘트 콘크리트 포장은 여러 가지 형태의 다양한 파손양상을 나타내고 있으며 도로의 노후화가 심화되어가고 있어 이에 대한 보수·보강 및 유지관리가 관계기관의 중대한 문제로 부각되어 있다. 특히 줄눈콘크리트 포장에서 발생하는 대표적 형태의 횡방향 균열(transverse cracking)과 종방향 균열(longitudinal cracking), 스폴링(spalling), 표면결함 등은 승차감뿐만 아니라 이용자의 안전운행에 심각한 교통장애를 일으키고 있다. 이러한 부분에 대해서 전단면보수가 불가피하나 현재의 상황에서는 교통지·정체의 문제로 인해 그 방법 자체가 적용 불가능한 상태이며 이에 대한 근본적인 대책마련이 시급한 실정에 놓여있다.

이러한 도로의 파손으로 인하여 발생하는 국고의 유지보수 예산은 매년 증대하고 있으며 보다 효율적이고 합리적인 기술을 개발하여 불필요한 국가예산의 낭비를 방지하고 체계적이고 합리적인 콘크리트 포장기술을 개발하는 일은 매우 중요한 일이 아닐 수 없다. 이렇게 도로포장의 설계기간 동안 공용되는 보수작업과 유지관리 비용은 생애주기비용 측면에서 상당한 비효율성과 비경제성의 결과를 초래하고 있으며 건설기간과 유지관리기간 동안 사용자 비용뿐만 아니라 도로관리 기관의 간접비용과 도로의 이용자 및 도로시설에 대한 관리기관의 관심빈도에 직접적 악 영향을 미치고 있다.

따라서 본 기술개발에서는 국내의 풍부한 매장량을 보유한 시멘트 자원을 활용할 수

있고 종래의 기술보다 장수명의 고내구성 콘크리트 포장 기술을 개발하여 최소 40년 이상 파손과 유지보수 없이 서비스 될 수 있는 장점 뿐만 아니라 생애주기비용 측면에서 매우 경제적인 기술로 개발하여 국가의 비효율적 예산낭비를 방지하고 도로 이용자에게 양질의 서비스를 제공함으로서 교통체증과 교통사고에 따른 국민의 소중한 인명과 재산을 보호하며 국내 기술력을 증진과 국가경쟁력 확보에 기여하는 기술로 완성하고자 한다.

(2) 기술개발의 중요성

국내의 시멘트 콘크리트 포장은 설계 및 계획의 인식부족, 관계기관의 낮은 관심도 등은 지금까지 콘크리트 포장기술의 발전을 저해하는 요소로 작용하였으며 현재 당면해 있는 여러 가지 형태의 파손과 유지보수 문제, 이로 인한 이용자의 불편 등의 결과를 초래하는 주 원인이 되었다. 그러나 시멘트 콘크리트 포장은 기술개발과 함께 합리적인 계획과 설계를 통하여 장기간 동안 서비스 되어야 한다. 따라서 이러한 문제를 효과적으로 개선하고 장기적인 도로의 안전과 서비스를 제공할 수 있는 근본적인 기술개발을 요구하는 중요한 시점에 도래해 있다.

종래의 기술로 건설하여 파손된 도로는 승차감의 저하는 물론 소음발생의 원인이 되고 있으며 도로 이용자에게 쾌적한 주행성을 제공하지 못하고 있다. 따라서 이를 보수하기 위하여 빈번히 시행되어지는 보수작업은 장시간의 교통 통제하에 작업이 이루어지기 때문에 차량의 원할한 소통에 장애가 되고 있으며 빈번한 교통체증의 유발과 교통사고를 초래함으로서 국민의 소중한 인명과 재산을 앗아가는 결과를 초래하고 있는 실정이어서 혁신적인 기술개발 노력은 매우 중요한 일이 아닐 수 없다.

또한 종래의 콘크리트 포장의 기술이 가지고 있는 조인트의 파손과 소음을 방지하여 주행성을 개선시키고 최소 40년 이상 서비스가 가능하도록 하여 불필요한 국가예산의 낭비를 방지할 뿐만 아니라 장기 공용성 측면의 경제적인 도로포장 기술개발은 관련기관·산업 및 학계가 풀어나가야 할 매우 중요한 과제라 할 수 있다.

또한 본 기술개발은 콘크리트 슬래브 제품의 두께를 기존 제품의 50%의 수준으로 제작할 수 있기 때문에 콘크리트 제조에 필요한 원자재의 절감효과를 기대할 수 있다. 따라서 콘크리트 생산에 소모되는 골재자원을 절감함으로서 골채채취로 인한 소음·분진 등의 환경문제, 하천골재 채취로 인한 하천의 형질변경, 골재난 해소 등 환경문제와 사회적 문제를 동시에 해결하는 이점을 기대할 수 있다. 뿐만 아니라 국내의 기술 개발력을 향상시킴으로서 국가 경쟁력 확보에도 기여하는 바가 클 것으로 예상되기 때문에 국가

차원의 정책적인 기술개발 장려가 필요할 것으로 사료된다.

특히 비산유국인 우리나라의 실정을 감안하면 기존 제품에 비하여 일일 생산량이 증대시킴으로서 관련 산업에 필요한 중장비의 회전률을 향상으로 인한 유류비 절감 효과와 교통 지·정체 문제를 해결함으로서 얻어지는 이용자의 간접유류비 절감 효과를 동시에 가져올 수 있다. 또한 본 기술에 사용되는 자재, 인력, 장비 등 관련 전문건설에 관계된 중·소기업의 산업부문 활성화를 불러일으키고 본 기술개발의 적용으로 관련 산업의 시장의 확대형성 되어 중·소기업의 시장발전에 크게 기여할 것으로 판단되며 범 국가적인 차원의 기술개발과 관련 산업의 장려 및 기업 육성을 실천하는 일에 크게 기여될 것으로 사료된다.

1.3 연구개발 범위

본 연구의 기술개발 범위는 1차년도와 2차년도로 구분되며 [표 1]과 같다. 1차년도의 연구개발 범위는 PTCP 기술의 도로본선 포장에 필요한 장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합을 포함하여 슬립폼페이버에 의한 시공기술, 스트레싱 기술, 조인트 시스템, 갭슬래브 시공기술, 과적차량 단속구간 적용에 대한 내용이 주요 연구의 범위라 할 수 있다. 2차년도의 연구개발 범위는 고속도로 본선 포장외 영업소 광장부 포장에 대한 콘크리트 재료 개발, 데크피니셔에 의한 시공기술, 교량접속슬래브 적용 기술 등이 주요 연구개발 범위라 할 수 있다.

[표 1] 연차별 연구목표 및 주요 연구내용

연 차	연구목표	주요 연구내용
1차년도	· 장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합	· 최적배합 설계, 내구성 평가
	· 슬립폼에 의한 시공기술 개발	· 시공성 저하요인 분석 및 해결방안 · 슬립폼에 의한 시공기술 개발
	· 횡방향 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 재료 설계 및 개발 · 횡방향 프리스트레스 도입률 향상 방안 · 횡방향 쉬스 설계 및 제작
	· 조인트 시스템의 개발	· 내구성 조인트 시스템 개발 · 최적 조인트 유간계산
	· 갭슬래브 방식의 시공기술 개발	· 갭슬래브 단부처리 방안 연구 · 구조검토 및 안정성 검토
	· 평탄성 확보 기술 개발	· 평탄성 확보 및 유지 방안 연구
	· 현장적용 시험 연구	· 확대적용을 위한 현장적용 시험 연구
	· 과적차량 단속구간 적용 방안	· 시공기술 개발 · 구조해석 및 설계검토 · 콘크리트 적용방안
2차년도	· 영업소 광장부 포장 콘크리트 개발	· 작업성, 강도발현, 최적배합설계
	· 데크피니셔에 의한 시공기술 개발	· 광폭 시공 · 평탄성 확보
	· 횡방향 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 재료 설계 및 개발 · 횡방향 프리스트레스 도입률 향상 방안 · 횡방향 쉬스 설계 및 제작
	· 조인트 시스템의 개발	· 내구성 조인트 시스템 개발 · 최적 조인트 유간계산
	· 교량접속 슬래브 적용	· 강선설치, 인장방법
	· 갭슬래브 방식의 시공기술 개발	· 갭슬래브 단부처리 방안 연구 · 구조검토 및 안정성 검토
	· 평탄성 확보 기술 개발	· 평탄성 확보 및 유지 방안 연구
	· 현장적용 시험 연구	· 확대적용을 위한 현장적용 시험 연구
	· 과적차량 단속구간 적용 방안	· 시공기술 개발 · 구조해석 및 설계검토 · 콘크리트 적용 방안

제2장 국내외 기술개발 현황

2.1 국외의 기술개발 현황

(1) 국외기술 동향

본 기술은 1940년대 처음으로 유럽에서 시도되었다. 최초로 이 기술을 적용하였던 국가는 1943년 잉글랜드였으나 실제로 현장에 사용하기는 프리스트레스트 콘크리트의 개념을 처음으로 제안한 프레시넷(Freyssinet)의 모국인 프랑스로 1946년 올리 국제공항에 적용되었다. 프랑스에서 성공적으로 적용되자 오스트리아, 벨기에, 잉글랜드, 독일, 네덜란드, 알제리아 및 뉴질랜드 등에서 이 방법을 사용하여 콘크리트 포장을 건설하기 시작했으며 그 후에는 이탈리아, 일본, 스위스에서도 시도되었다.

[표 2]는 초창기 유럽에서 시공되었던 프리스트레스트 포장기술의 적용사례에 대한 국가별 현황을 요약한 것이다. 유럽에서 프리스트레스트 콘크리트 포장기술이 성공적으로 현장에 적용될 즈음 미국도 군용공항의 활주로 포장을 이 기술로 건설했다. 1953년에 메릴랜드 Patuxent River Naval 공항은 7인치의 두께로 건설된 프리스트레스트 포장이었으며, 이 경험에 이어 두 개의 프리스트레스 콘크리트 포장이 텍사스 주에 건설되었는데 하나는 1955년 샌안토니오 국제공항과 1959년 엘파소의 공군기지였다. 처음으로 고속도로에 실험적으로 프리스트레스트 콘크리트 포장을 적용한 사례가 펜실베니아의 피츠버그에 있었으나 1970년까지 미국에서 공용중인 도로에는 건설되지 않았다. 이후 1971년 미연방도로국에서는 버지니아의 듈러스 국제공항에 폭 24피트와 6인치의 두께로 총 연장 3200피트를 건설하였는데 이 프로젝트는 다른 형식의 콘크리트 포장방법에 비하여 경제적이고 실용적으로 하기 위하여 미연방도로국의 연구프로그램으로 건설되었다.

미연방도로국에서 수행한 이 프로젝트의 목적은 두 가지였다. 하나는 고속도로의 광범위한 건설로 현존의 기술을 사용하여 실용적이고 경제적인 결과를 얻는 것이었고 또 하나는 콘크리트 포장의 미소한 거동특성을 분석하고, 컬링(curling)과 와핑(warping)의 영향, 마찰(friction)과 구속응력에 대한 연구를 수행하여 보다 진보적인 설계기준을 정립하고자 한 것이다. 그러나 프리스트레스트 콘크리트 포장은 조인트에서의 파손과 스폴링 등의 문제가 있었고 좀 더 기술력의 향상과 보완을 위해 미연방도로국은 펜실베니아, 미시시피 및 아리조나주에 추가적인 프로젝트를 구상하여 건설을 추진하였다. 이러한 범국가적인 차원에서의 프로젝트로 추진된 미국의 기술은 설계와 시공에 있어서 다양한 기후조건과 교통조건에 따라 풍부한 경험을 얻게 되었다. [표 3]은 이 당시 건설된 현황을 나타낸 것이다.

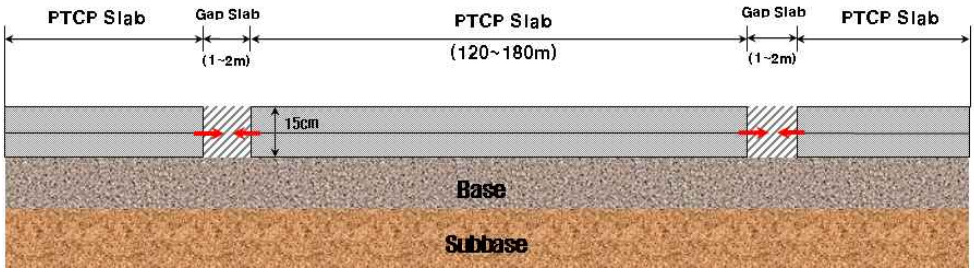
[표 2] 유럽의 프리스트레스트 포장 건설현황

국 가	적용대상	건설기간	건설면적 (yd^2)	슬래브두께 (in)
독 일	고속도로 활주로 유도로	1953~1960	1,358,226	5½~8
프랑스	고속도로 활주로 유도로 에이프런	1946~1961	368,790	4¾~7
벨기에	고속도로 활주로	1947~1960	216,546	3~7
오스트리아	고속도로 시도로 활주로 유도로	1954~1959	149,439	6~8
네덜란드	고속도로 유도로	1950~1960	31,335	4¾~6
스위스	국도 시도로	1955~1960	31,455	4¾~6
잉글랜드	일반도로 에이프런	1950~1957	21,205	5~6½

[표 3] 1970년대 미국의 프리스트레스트 포장의 건설현황

구 분	버지니아	펜실베니아	미시시피	아리조나
<건설개요>				
위 치	Dulles 국제공항	Harrisburg	Brookhaven	Tempe
건설년도	1971	1973	1976	1977
연장(mile)	0.6	1.5	2.5	1.2
차선수	2	4	4	4
<포장구조>				
슬래브 길이(ft)	400~760	600	450	400
전체 슬래브 수	6	46	58	30
슬래브 두께(in.)	6	6	6	6
보조기층재	시멘트처리기층 (6인치)	역청질골재기층 (6인치)	아스콘 (4인치)	린콘크리트 (4인치)
<텐던 및 조인트>				
텐던수	12	12	12	16
텐던간격(in.)	24	24	24	24
텐던직경(in.)	0.5	0.6	0.5	0.5
조인트구조	Gap슬래브	Gap슬래브	Gap슬래브	Gap슬래브
간섭슬래브에 대한 조인트의 수	2	1	2	2
<스트레싱 방법>				
스트레싱 위치	단부	단부	단부	단부
1차 스트레싱	10kip@1000psi (1st day)	14kip@1000psi (1st day)	14kip@1000psi (1st day)	11kip@1300psi (1st day)
2차 스트레싱	20kip@2000psi	46.9kip@2500psi	33kip@2500psi (5th day)	24kip@2400psi (2nd day)
3차 스트레싱	29kip@3000psi	-	-	31kip@3000psi (3.5 days)
슬래브 단부 응력(psi)	201	326	229	215

이 시기에 건설된 프리스트레스트 콘크리트 포장은 [그림 5]에 나타낸 것과 같이 프리스트레스 도입을 위한 공간이 필요하여 하나의 슬래브를 완성하는데 하나의 갭슬래브(Gap slab)가 필요했으며 이로 인해 두개의 조인트가 발생되었다.



[그림 5] 버지니아, 펜실베니아, 미시시피, 아리조나의 프리스트레스트 포장방법

(1) 미시시피

1970년대 건설되어 현재 공용중인 도로가 미시시피에 건설된 PTCP 현장이며 1976년 Brookhaven에 위치한 US84 고속도로상에 건설되었다. 총 연장은 2.5마일이며 폭 24ft의 양방향 총 4차선으로 건설되었고 슬래브는 450ft의 길이로 총 58개가 건설되었다. 슬래브의 두께는 6인치였으며 2겹의 폴리에틸렌 쉬트가 설치되고 4인치의 보조기층이 아스팔트로 시공되었다. 텐던은 24인치 간격으로 12개가 배치되었으며 텐던의 직경은 0.5인치가 사용되었다. 포장구조는 [표 4]에 나타낸 바와 같다.

[표 4] 펜실베니아 US220 현장의 PTCP 포장현황

포장개요		포장구조	
전체 시공연장	2.5miles	포장두께	6in.
차선수	4lanes	폴리에틸렌 쉬트	2 layer
전체 슬래브의 수	58	subbase	4in. Asphalt
폭	24ft	subgrade CBR	20
슬래브 길이	450ft	Soil Classification	sandy clay

미시시피 현장은 공용기간 33년이 경과된 구간이며 Gap 슬래브를 사용한 방식으로 건설되었다. Gap 슬래브 구조는 다웰바가 설치되고 실런트가 주입된 조인트 구조에 콘크리트 슬래브 두께를 2인치 증가시켜 보강철근이 배근되어 있는 구조이다. 조인트에 시공한 실런트 부분이 양호한 구간도 있었으나 전반적으로는 이미 상당한 파손이 발생하여 소음과 승차감 저해의 원인으로 작용하고 있었다. 포장 슬래브는 횡방향 텐던을 시공하지 않고 도로폭의 중앙을 따라 인위적으로 유도한 것으로 보이는 종방향 줄눈을 설치하였고 일부 구간에서 스폴링 파손이 있었으나 전반적인 공용성에는 크게 영향을 미치지 않았다. 또한 일부 구간에 심각한 횡방향 균열이 발생한 부분과 포장 배수 불량에 따른 노반의 침하로 인하여 파손된 부분을 제외하고는 전반적인 노면상태는 매우 우수하였다. 또한 동일한 시기에 CRCP와 PTCP가 동시에 건설되어 두 형식간의 공용성 차이를 확인할 수 있었다. CRCP 구간의 경우 횡방향의 균열이 2~3ft 간격으로 발생되어 있으며 과도한 균열폭으로 대부분의 균열부는 스폴링 파손으로 진전되고 있어 아스팔트로 균열부를 실링한 부분이 매우 많아 조속히 재포장해야 될 것으로 판단되었다.



(a) 양호한 PTCP 전경



(b) 동일구간 CRCP 파손 상태

[그림 6] 미시시피 현장사진

(2) 텍사스

1980년대 들어 미국의 텍사스에서는 1985년 1마일의 프리스트레스트 콘크리트 포장을 Waco에 위치한 I-35번 도로상에 건설하였다. 총연장 1마일의 2차선 도로를 슬래브 두께 6인치, 폭 38피트, 슬래브 길이는 240피트와 440피트로 하여 총 32개의 슬래브를 시공하였다. 텐던의 배치는 240피트의 길이에 대하여 19개 440피트에 대하여 29개를 배치

하였고 배치간격은 24인치로 하였다. 텍사스의 방법은 펜실베니아, 미시시피, 아리조나에서 설계된 방법과는 달리 간섭슬래브가 필요 없는 방법으로 시공되었고 루프형태의 횡방향 텐던을 배치하는 등 종래의 방법보다는 진보성을 나타내었다. 이는 펜실베니아, 아리조나, 미시시피, 버지니아의 경험을 분석하여 시행착오를 줄이고 좀 더 기술을 발전시키고자 했던 노력을 엿볼 수 있다. 그러나 텍사스 방법에서의 문제점은 갭슬래브를 사용하지 않는 대신 [그림 7~9]에 나타낸 바와 같이 아모 조인트를 사용함으로서 하나의 슬래브에 하나의 조인트만 필요로 하는 이점과 시공의 연속성 및 조인트에서의 파손발생이 줄어들고 유지관리가 간편해진 효과를 얻을 수 있는 반면 조인트를 시공 전 설치함으로서 콘크리트 초기 건조수축을 조인트에서 수용해야하기 때문에 과도한 조인트 유간으로 소음, 승차감 저하의 문제와 네오프렌 실링재가 파손되는 문제, 포켓의 설치와 제거로 인한 과도한 시간이 소요되어 시공성 저하 및 이 부분에서의 인력마무리에 의한 평탄성 저하 등 이에 대한 기술개발 필요성과 개선의 여지를 남기게 되었다.

1985년 9월17일~11월20일 사이에 건설된 텍사스 현장은 텍사스 주 Waco에 위치한 IH-35 고속도로상에 건설되어 현재까지 약 23년 정도 공용되고 있다. 총 연장 1마일의 2차선으로 길이가 각각 240ft인 슬래브 18개와 440ft인 슬래브 14개가 건설되었다. 슬래브의 두께는 6인치이며 그 아래 폴리에틸렌 쉬트와 4인치의 아스팔트가 시공되어 있다. 슬래브의 폭은 38ft로서 1차선과 Inside shoulder가 17ft, 2차선과 Outside shoulder가 21ft이며 24인치 간격으로 텐던이 배치되어있다. [표 5]는 텍사스 현장의 포장개요와 구조에 대하여 나타낸 것이다.

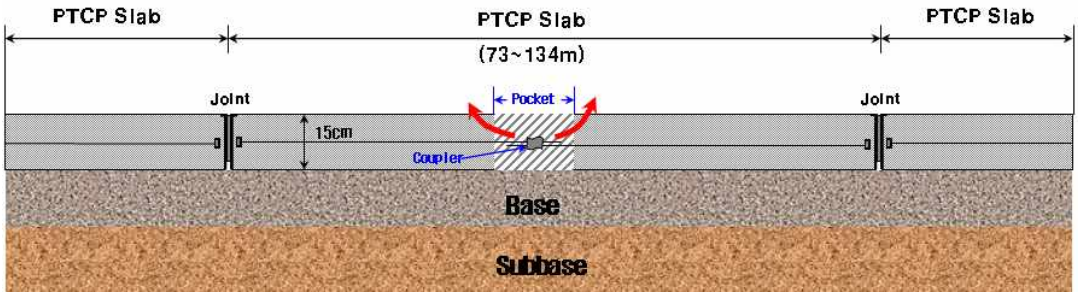
[표 5] 텍사스 IH-35 현장의 포장현황

포장개요		포장구조	
전체 시공연장	1mile	포장두께	6in.
차선수	2lanes+shoulder	폴리에틸렌 쉬트	1 layer
전체 슬래브의 수	32	subbase	4in. Asphalt
폭	38ft	subgrade CBR	20
슬래브 길이	240, 440ft	Soil Classification	sandy clay

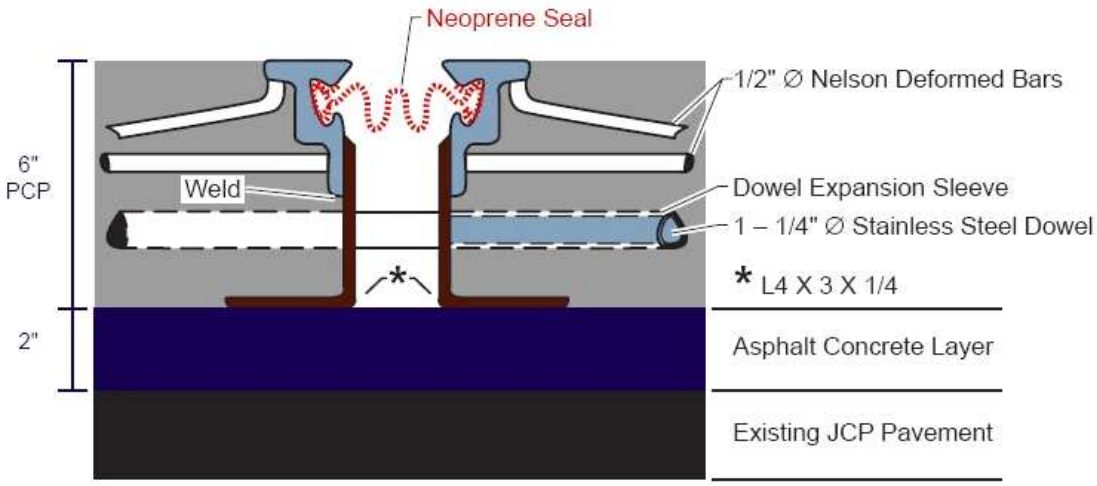


(a) 스트레싱 포켓부 미세한 종방향 균열 (b) 조인트 네오프렌 실런트 파손

[그림 7] 1985년 시공된 PTCP 현장



[그림 8] 텍사스의 프리스트레스트 콘크리트 포장 방법(1985년)



[그림 9] 아모(Armor) 조인트

이러한 조인트에서의 결점과 횡방향의 스트레싱 방법 등을 제외하고는 [그림 10]에서 나타낸 바와 같이 지속적으로 현장 모니터링을 수행한 결과 현재 25년 정도가 경과되었음에도 불구하고 중차량의 통행이 빈번한 상태에서 상당히 우수한 공용성을 나타내고 있어 지금도 광범위한 건설을 추진하고 있다.([그림 11]참조)



(a) IH-35 고속도로의 교통량 전경 (b) PTCP 공용 현장

[그림 10] 텍사스 현장사진



(a) 포켓설치 (b) 포켓제거 및 표면마무리

[그림 11] 텍사스 PTCP 시공현장(2008년)

(3) 펜실베니아

펜실베니아 주의 Blair County에 위치한 US220 고속도로 현장은 1988년 11월11일부터 18일사이 총 연장 2마일을 건설하였다. 이 현장에 건설된 프리스트레스트 콘크리트

포장은 7인치 두께로 폭 24ft의 60개 슬래브로 건설되었다. 슬래브는 길이는 400ft로 396ft의 주 슬래브와 4ft의 Gap슬래브 방식으로 건설되었으며 콘크리트는 7일에 3000psi, 28일에 3750psi의 강도를 발현하는 Class AA가 사용되었고, PC강선은 7연선 저릴랙세이션 강재로서 직경 0.6인치의 강선이 18인치 간격으로 총 15개가 사용되었다. [표 6]은 본 현장의 포장구조를 나타낸 것이다.

[표 6] 펜실베니아 US220 현장의 포장현황

포장개요		포장구조	
전체 시공연장	2miles	포장두께	7in.
전체 시공면적	31,411sq. yd.	폴리에틸렌 쉬트	2layer of 6mil.
전체 슬래브의 수	60개	린콘크리트 기층	5in.
폭	24ft.	보조기층	6in.
조인트 간격	400ft.	노상	Natural compacted

현장은 IH-99와 US220이 병행 사용되는 Northbound로 교통량이 적지 않으면서 중차량의 통행이 빈번한 도로였다. 펜실베니아는 겨울이 11월부터 4월까지로 눈이 내리기 때문에 제빙염을 많이 사용하고 있는 것으로 파악되었으나 제빙염에 의한 콘크리트의 표면열화나 조인트의 부식은 발견되지 않았다. 현장조사 결과 종방향의 균열이 일부 관찰되었으나 균열폭이 미소하여 전반적인 공용성에는 영향이 없는 것으로 평가되었으나, 40년의 장수명을 보장하기 위하여 종방향균열을 해결하기 위한 횡방향 텐던의 설계와 초기의 품질관리가 필요할 것으로 판단되었다. 일부의 조인트에서의 실링재가 파손되어 소음과 승차감 저해의 요인으로 작용하였으나 전반적인 승차감은 매우 우수하였다. 펜실베니아는 설계와 시공에 관한 세심한 노력을 기울여 왔던 것으로 평가되며 20년이 경과된 지금 일부 종방향 균열을 제외하면 아주 훌륭한 포장상태를 유지하고 있었다. 전반적으로 포장상태는 매우 양호하였으며 횡방향 텐던이 배치되지 않아 발생된 것으로 추정되는 종방향 균열과 조인트에서의 실링재 파손이 방지된다면 상당히 오랜 기간 동안 유지보수 없이 서비스가 가능할 것이라 판단되었다.

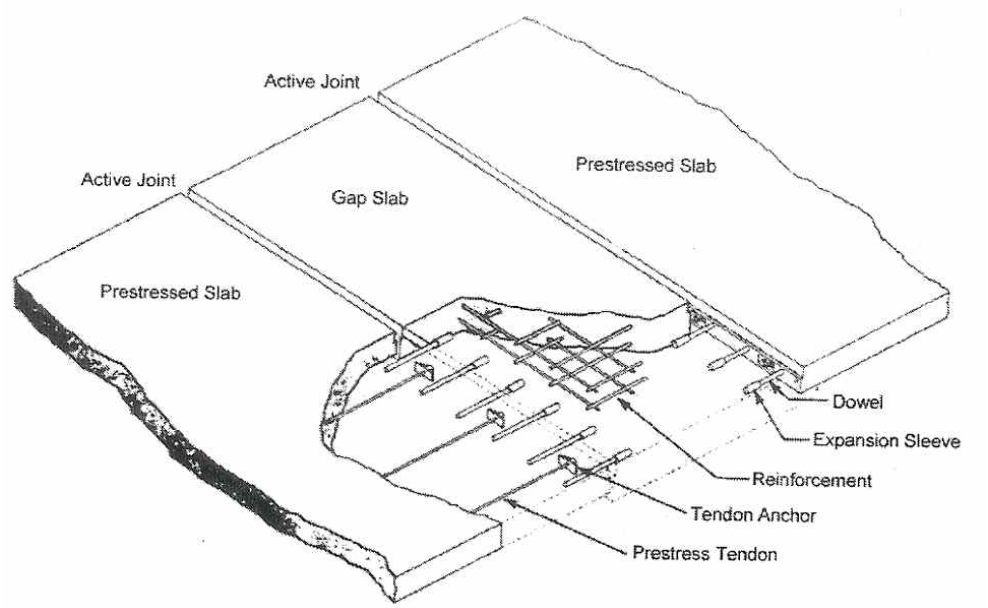


(a) 펜실베니아 PTCP 현장 전경



(b) 조인트 씰(seal) 파손사례

[그림 12] 펜실베니아 현장사진



[그림 13] 1970년대 미시시피, 버지니아, 펜실베니아의 시공 방법

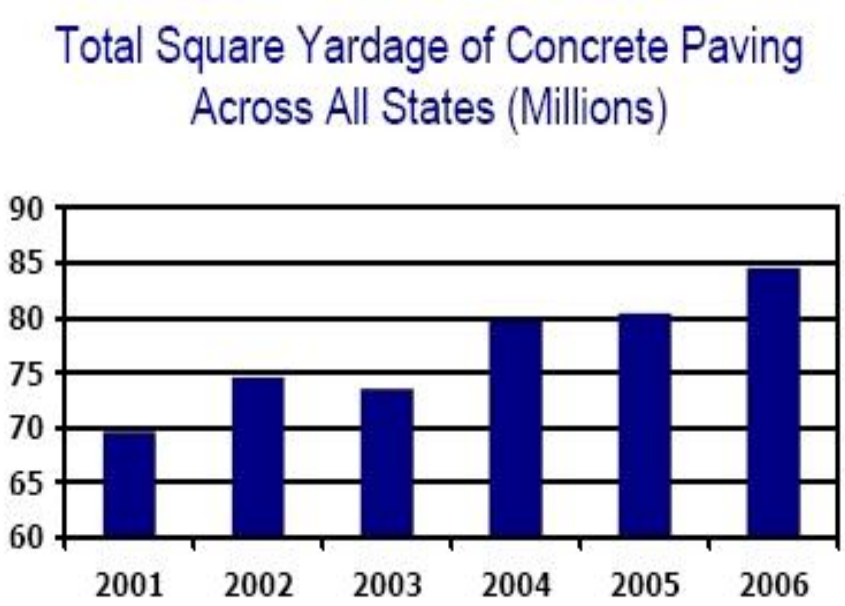
이 외에도 미국은 1980년 일리노이 주의 O'Hare 국제공항을 150피트 폭에 8~9인치의 두께로 약 400피트의 프리스트레스트 콘크리트 포장 슬래브를 건설하였으며, 1988년 펜실베니아 주는 US220 도로에 폭 24피트, 두께 7인치의 길이 400피트의 슬래브를 60여개 건설하였고, 1993년에는 Greater Rockford에 폭 75피트, 두께 7인치의 1200피트 세그먼트까지 건설하게 되었는데 이러한 프로젝트도 마찬가지로 [그림 11]에 나타낸 바와 같이 갭슬래브를 사용한 방법으로 건설되어 이 부분에 대한 기술개발 필요성의 여지를 남기게 되었다.

상기 기술한 바와 같이 미국은 콘크리트 포장 기술에 대해 지속적인 기술개발과 노력을 기울여왔다. 1980년대 부터는 전 세계적으로 활발한 연구를 발판으로 다양한 기술들을 선보였고 이처럼 많은 노력은 미연방도로국에서 약 30여년 전 부터 전략적 도로연구사업(SHRP: Strategic Highway Research Program)으로 추진되는 다양한 프로그램을 운영하여 자료를 축적하는 과정에서 알 수 있으며 이러한 프로그램의 목적은 도로의 공용성을 더욱 향상시키고 경제적인 도로를 건설하기 위함이었다. 또한 미국의 경우 도로포장 공학에서 도로설계 및 유지관리 측면에서의 효율성을 기하기 위하여 시험도로의 중요성을 인식하여 1960년대 AASHO 시험도로를 대규모로 건설하여 모니터링을 실시하고 여기서 축적된 자료는 미국의 콘크리트 포장기술의 설계에 기본데이터로 활용되었다. 이러한 장기적이고 집약적인 연구를 바탕으로 미국의 도로는 AASHTO 2002와 같은 설계기술이 개발되었고 이러한 결과물은 미국에서 기존의 도로기술에 대한 한계점을 인식하여 국가기관 및 산업계와 학계에서 열정적인 관심과 논의가 이루어낸 산물이라 할 수 있다.

(4) 국외 산업 동향

미국은 전 세계적으로 가장 많은 콘크리트 포장 도로건설을 추진해왔다. ACPA2)(미국콘크리트포장협회)가 발표한 자료에 따르면 미국은 2006년 85,000,000yd2의 콘크리트 포장을 건설했으며 이 규모는 우리나라의 도로폭 8.2m를 기준으로 환산할 때 년간 8,660km를 건설한 셈이다. 또한 이 규모는 현재 우리나라가 추진하고 있는 년간 콘크리트 포장 도로건설과 비교하면 무려 12배를 능가하는 규모이며 향후 10년간 건설예정인 고속도로 연장보다 훨씬 많은 물량이라 할 수 있다. [그림 14]는 ACPA에서 발표한 최근의 미국 콘크리트 포장 건설현황을 나타낸 것이다. 그림에 나타낸 바와 같이 미국의 콘크리트 포장 도로건설은 매년 평균 4~5%의 증가 추세를 나타내고 있으며 이러한 증가추세는 앞으로 지속될 것으로 전망하고 있다. [표 7]는 ACPA의 자료에 기초하여 연도별 예상되는 건설연장을 시장규모로 환산하여 나타낸 것이다. [표 7]에 나타낸 바와 같이 미국의 시장규모는 년간 2~3조원 이상이 형성될 것으로 예상되는 바 본 기술개발의 기술력을 국제적 수준 이상으로 개발시켜 국가경쟁력을 확보한다면 외화획득에 크게 기여하리라 예상된다.

미국을 제외한 세계시장 규모는 정확히 파악하기 어려우나 콘크리트 포장을 지속적으로 건설하고 추진하고 있는 유럽과 아시아, 남미 등을 고려해 보면 미국의 시장규모에 최소 10배 이상 될 것으로 추산된다.



[그림 14] 미국의 콘크리트 포장 건설현황(자료출처: 미국콘크리트포장협회)

[표 7] 미국의 시장규모

[단위: 억원]

년도	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	합계
금액	25,980	27,019	28,100	29,224	30,393	31,609	32,873	34,188	35,555	36,978	311,919

2.2 국내의 기술개발 현황

(1) 국내 기술 동향

국내의 교통상황은 최근 20여년간 도로연장은 2006년말을 기준으로 53,654km에서 102,061km으로 1.9배 증가한데 비하여 교통량은 1,611,375대에서 16,428,177대로 10배 정도로 급격히 증가 하게 되었고 차량하중의 중량화, 환경적 영향 등 복합적인 요인에 의해 광범위한 도로파손이 발생하고 있는 실정이며 이용자로 하여금 교통사고를 유발하도

록 원인을 제공하고 국가적으로는 유지보수를 위한 예산의 수요가 증가하는 상황에 처해 있다. 또한 지금까지의 정책은 건설에만 초점을 두어 왔으며 콘크리트 포장 슬래브의 파손이나 유지관리 등 장기적인 서비스 향상 방안에는 관심이 저조하였다. 따라서 우리나라에서는 이와 같은 현실적 대안을 마련하기 위해 2000년대 이후 건설교통부(현 국토해양부)의 주관하에 한국형 포장설계법 개발, 한국도로공사의 시험도로 연구, 한국건설기술연구원의 장수명·친환경 도로포장 연구 등이 본격적으로 시도되기 시작하였다. 그러나 이러한 연구는 종래 외국에서의 설계와 시공기술을 우리나라의 실정에 맞게 수정해 나가는 수준으로 장기적이고 기술집약적인 콘크리트 포장기술에 기초하여 서비스가 이루어질 수 있는 근본적인 기술개발 측면에서는 매우 미흡한 실정이다. 또한 본 신청신기술에서 개발된 포스트텐션 콘크리트 포장 공법에 대한 연구는 현재까지 전무한 상태였다.

전술한 바와 같이 국내와 국외에서의 관련기술 개발과 연구에 대하여 지금까지 상당기간 도로효율을 극대화 하려는 노력, 국가차원의 정책이나 지원 등에서 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 상황은 국민소득을 평가하는 지표(GNP나 GDP)에 따라 관점의 차이를 나타낸 다고 설명 할 수 있다. 즉 선진국에서의 도로파손에 대한 관점과 중진 및 후진국에서의 도로파손에 대한 관점의 차이는 분명하다고 할 수 있다. 다시 말하면 선진국의 경우 도로이용자의 사소한 불편함도 이를 개선하려는 의지를 가지고 있는 반면 후진국의 경우는 도로이용자의 심각한 교통장애(교통사고 등)가 없는 한 이에 대한 개선의지가 미약하다고 할 수 있으며 이는 국가의 경제적 수준과 상호 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다. 지금까지 우리나라는 지속적인 산업발전과 경제성장을 발판으로 국민의 의식수준은 상당히 향상되어 왔으며 현재의 도로이용자 및 관계기관의 도로에 대한 관점은 이미 선진국 수준에 이르러 그 관심빈도와 기술개발 의지가 매우 적극적이라 할 수 있다. 따라서 장래의 도로성능에 대한 수요는 종래의 기술과 품질만으로 이용자의 수준과 기대욕구를 충족시키기 어려울 것이라 판단되며 국민소득 증대에 부합되는 도로기술과 서비스를 제공하여 보다 향상된 서비스가 이루어져야 할 것이라 사료된다. 그러므로 본 기술개발은 이러한 우리나라의 실정에 가장 적합하고 관계기관 및 사용자의 도로서비스에 대한 기대수준과 욕구를 충족시킬 수 있는 미래 가치창조형 기술로서 서비스 될 것이라 사료된다.

(2) 국내 산업 동향

본 기술의 시장성을 파악하기 위하여 국내의 고속도로 건설계획을 파악하고 세부적

으로는 고속도로의 건설공사 및 발주현황을 파악하였다. [표 2]는 국내의 고속도로 건설계획을 요약한 것이다. [표 8]에 나타낸 바와 같이 국내의 고속도로는 2020년까지 간선도로망 확충과 고속도로망 확충으로 꾸준히 증가될 것으로 판단되며 지자체에서 발주되는 도로건설을 포함하면 상당한 연장이 될 것으로 전망된다.

또한 국내 고속도로 공사 발주현황을 살펴보면 [표 9]에 나타낸 바와 같이 2008년 6개의 노선이 시행 또는 발주예정이며 2012년까지 11개의 노선이 추가로 발주될 것으로 조사되었다. 이외에도 국토해양부에서 관할하는 고속국도와 한국공항공사에서 시행하는 공항포장, 철도청이나 항만청에서 시행하는 터미널 포장 등을 포함하면 본 공법과 관련된 시장규모는 상당히 클 것으로 예상된다.

[표 8] 국내 고속도로 건설계획

구 분	연장 (Km)	완공	비 고
국토간선도로망 구축 (7× 9)	6,523	2020	· 민자고속도로 · 2008년말 기준: 3,447Km예상
수도권 고속도로망 구축 (7× 4 + 3R)	686	2020	· 민자고속도로 · 제2외곽순환고속도로 · 제2경부고속도로
국도4차로 이상 확장	6,916	2010	· 2008년말 47% · 2010년 50%
대도시권 교통혼잡도로 개선 추진	136	2014	
중급 도시권 국대도 사업 추진	243	2014	
서울도심지하도로	149	2017	
계	11,657		

[표 9] 고속도로 공사 발주계획

구 분	노선명	연장(Km)	공사기간	비 고
2008년	목포-광양	106.8	2002~2018	
	여주~양평	36.6	2002~2012	
	음성-충주	45.6	2007~2014	
	동홍천-양양	71.7	2008~2014	2008. 발주
	주문진(양양)~속초	21.4	2008~2014	2008. 발주
	성산~담양	142.7	2008~2015	확장(2차로→4차로)
	소 계	424.8		
2009년	울산~포항	53.5	2009~2015	2009. 9 발주
	동해~삼척	18.3	2009~2014	2009. 4 발주
	충주~제천	23.9	2009~2015	2009. 발주
	소 계	95.7		
2010년	상주~영덕	110.6	2010~2015	2010. 5 발주
	부산순환	47.2	2010~2016	2010. 발주
	소 계	157.8		
2011년	제2경부(서울~세종)	128.8	2011~2017	
	소 계	128.8		
2012년	함양~울산	130.8	2012~2018	
	제2외곽(김포~포천)	210	2012~2020	
	제2서해안	66.4	2012~2018	
	대구순환	81.1	2012~2018	
	광주순환	102	2012~2018	
	소 계	590.3		
계		1397.4		

제3장 연구개발수행 내용 및 결과

3.1 이론적 배경

(가) PTCP의 이론적 배경

① 하중의 작용(차량하중 및 환경하중)

콘크리트 도로 포장은 차륜 하중 및 환경하중에 의해 인장응력이 발생한다. 이러한 인장응력 발생은 콘크리트 포장 슬래브의 균열의 주요 원인이 되며 차륜하중은 또한 피로 파손에 의한 균열을 유발한다. 포장 재료로 사용되는 콘크리트는 인장 강도가 압축강도의 10%정도로 압축에 저항하는 능력은 뛰어나지만 인장에는 다소 약한 것이 단점으로 지적되고 있다. 따라서 PTCP 슬래브에 강선을 이용한 긴장력을 도입하여 추가적인 압축응력을 포장 슬래브에 작용시켜 인장응력 발생을 줄이고 압축응력 발생을 증가시킴으로써 콘크리트 재료의 성질을 효율적으로 사용하도록 한다.

PTCP 슬래브에 작용하는 환경하중 및 차륜하중에 의한 발생 응력을 분석하여 슬래브에 작용시킬 인장력을 산정하도록 한다. 환경하중에 의한 발생응력은 대부분 슬래브 표면과 바닥면의 온도차에 의해 발생하는 컬링응력이다. 컬링 현상은 슬래브에 응력을 발생시키게 되며 낮에는 슬래브의 상부 온도가 하부보다 커짐으로 인해 상부가 위로 볼록하게 올라가는 형상의 컬링(이를 컬다운이라 함)을 유발하게 된다. 이때는 슬래브의 자중에 의해 슬래브가 다시 평평한 위치로 오려하기 때문에 슬래브의 하부에 인장응력이 발생하게 된다. 반대로 새벽에 슬래브의 상부 온도가 하부보다 작아지면 슬래브가 아래로 볼록한 형상을 하려고 변형(이를 컬업이라 함)하며 이에 따라 슬래브의 상부에 인장응력이 발생하게 된다. [그림 15]는 컬업과 컬다운 현상을 그림으로 보여준다.

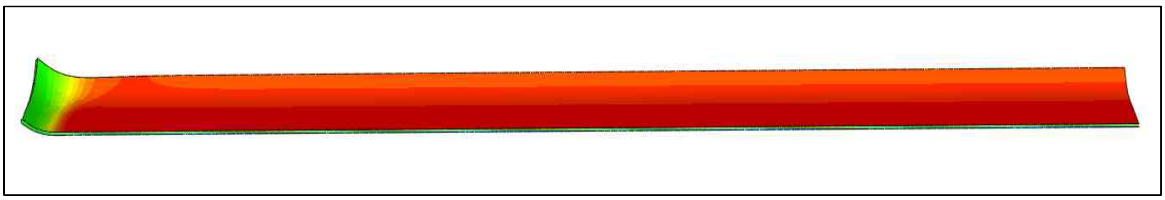


Curl Up *Curl Down*

[그림 15] 컬링 현상

이와 같은 컬링에 의한 거동도 설계 시 검토하여야 한다. 컬링 현상에 의한 응력은 하부지반 위에 슬래브가 놓여있기 때문에 발생하므로 하부를 연속적으로 지지하고 있지

않는 교량에서의 일반적인 보와 슬래브에서는 발생하지 않는다. PTCP 슬래브는 두께가 얇고 길이가 길기 때문에 [그림 16]에서와 같이 슬래브 단부 일부분을 제외한 슬래브 전 단면에 컬링응력이 일정하게 분포하며 하부지반 강성 및 슬래브 길이에는 크게 영향을 받지 않는다.



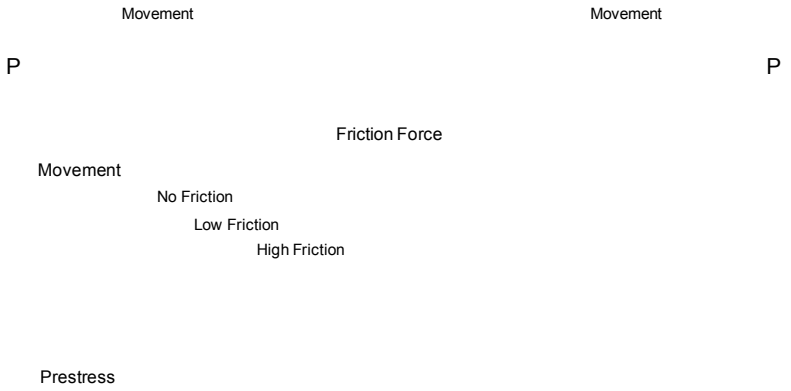
[그림 16] PTCP 슬래브 해석 예

차륜하중에 의해 PTCP 슬래브에 발생하는 응력은 차륜의 위치에 따라 다르게 분포되며 슬래브 단부에 차륜이 재하 될 때 종방향 응력이 가장 크게 나타나며 슬래브 우각부에 차륜이 재하 될 때에는 횡방향 응력이 가장 크게 나타난다. 단축 하중은 종방향 응력을 크게 발생시키며 복축 하중은 횡방향 응력을 크게 발생시킨다. 하부지반 강성이 증가할수록 차륜하중에 의해 발생되는 응력은 감소하게 된다. 차륜하중에 의한 응력은 하중의 크기에 비례하게 되며 일반적으로 차량의 종류에 따라 차이가 있다. 따라서 하나 또는 여러 가지의 설계 차량을 결정하여 이에 대한 응력을 산정한다. 콘크리트 포장의 차륜하중에 의한 인장응력은 보통 인장 강도보다는 매우 작기 때문에 한 번의 하중 재하에 따른 파손은 사실상 발생하지 않으며 반복적인 하중에 의하여 피로 파손이 생길 수 있게 된다. 이러한 피로파손을 예측하는 경험적인 공식이 많이 개발되어 있으며 이를 이용하여 설계 수명 동안의 예상 교통량에 적합한 슬래브 두께 등의 설계를 할 수 있다.

② 응력도입 손실 영향

PTCP 슬래브는 길이가 상당히 길기 때문에 콘크리트 슬래브와 하부층과의 마찰 및 하부층의 전단 저항에 의한 거동이 크게 영향을 받게 된다. [그림 17]에 나타낸 바와 같이 강선을 긴장하여 포장체에 압축응력을 가하게 되는데 이러한 압축응력은 포장체의 양단에서 가해지는 형태를 가지게 된다. 따라서 만약에 슬래브와 하부층 간에 마찰 저항이 없다면 슬래브에는 변형률이 길이에 따라 고르게 분포하게 되며 그림에서 보여주는 바와 같이 종방향으로의 변위는 양단에서 최대가 되며 선형으로 줄어들어 중앙에서는 변위가 발생하지 않게 된다. 하지만 슬래브와 하부층 간에 마찰 저항이 존재하면 이에 의해 포

장체의 종방향 변위는 구속이 발생되어 양단 부분에서 발생하는 변위는 마찰이 없을 때보다 감소하게 되며 중앙부에 가까워짐에 따라 변위가 비선형적으로 감소하게 된다. 물론 마찰 저항이 커질수록 종방향 변위는 감소하게 된다.



[그림 17] 마찰저항의 영향

이러한 마찰 저항은 종방향 변위 뿐 만 아니라 긴장 시에 가해지는 압축응력의 손실을 야기하게 된다. [그림 17]을 다시 살펴보면 슬래브와 하부층 간에 마찰 저항이 없을 경우에는 가해지는 응력이 골고루 포장체에 분포하게 되지만 마찰 저항이 있으면 포장체의 중앙부로 갈수록 양단에서 가해지는 응력이 그대로 전달되지 않아 손실이 생기게 된다. 따라서 슬래브 상부와 하부층 간의 마찰을 최소화 하는 것이 중요하며 만약에 마찰 저항이 존재하면 이를 적절히 파악하여 이에 의한 응력 손실을 감안하여 긴장량을 산정하는 것이 중요하다.

슬래브와 하부층과의 마찰에 의한 응력 손실 뿐 만 아니라 PTCP에서는 긴장에 의한 응력이 여러 가지 원인으로 인해 손실이 발생하게 되며 이를 고려하여 긴장력을 결정하여야 한다. 이러한 손실의 원인으로는 텐던과 쉬스관 사이의 마찰, 콘크리트 건조수축, 콘크리트 크리프, 강재의 릴랙세이션 등을 들 수 있다. 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t)은 텐던의 곡률과 Wooble에 의해서 결정된다. 텐던의 곡률은 계획된 텐던의 위치에 영향을 받고 Wooble은 계획되지 않은 텐던의 위치 변화에 의해 야기된다. 이러한 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의해 발생되는 손실 응력은 ACI에서 사용하는 식(1)을 이용하여 산정 할 수 있다.

$$f_t = f_{jacking}(1 - \exp\left\{-[ux + (\frac{KL}{2})]\right\}) \quad \text{식(1)}$$

여기서 $f_{jacking}$: 슬래브의 끝단에서 가해지는 종방향 긴장 응력, MPa

u : 곡률 마찰 계수

x : 슬래브 중간 지점에서 잭킹한 텐던의 각 변화, radian

K : wooble 마찰 계수, per m

L : 슬래브 길이, m

콘크리트의 건조수축과 크리프에 의한 긴장 손실 응력을 각각 계산하는 방법도 있지만 건조수축과 크리프에 대한 콘크리트 변형률을 한 개의 값, ε_{cu}로 표현하여 식(2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$f_{sc} = f_s + f_{cr} = \varepsilon_{cu} \times E_s \quad \text{식(2)}$$

여기서, $\varepsilon_{cu} = \varepsilon_s + \varepsilon_{cr}$, ε_s: 건조수축 변형률, ε_{cr}: 크리프 변형률

강선의 릴랙세이션에 의한 손실은 식(3)과 같이 구할 수 있다.

$$f_r = \left[\frac{\log t}{10}(\frac{f}{f_y} - 0.55)\right] f \quad \text{식(3)}$$

여기서, t : 긴장한 후 부터의 설계수명, hours

f : 텐던의 긴장 응력, MPa

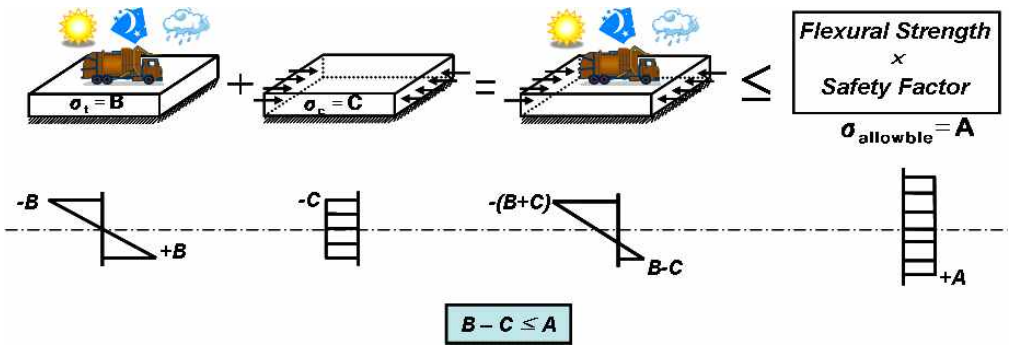
f_y : 텐던의 허용 응력, MPa

이와 같이 강선에 긴장력을 가하여 콘크리트 슬래브에 압축응력을 도입할 때는 강선에 가한 인장응력이 그대로 콘크리트에 압축응력으로 전달되는 것이 아니라 위에서 언급

한 여러 원인에 의해 손실이 발생하기 때문에 이러한 손실을 고려하여 긴장량을 산정하는 과정이 필요시 된다.

(나) PTCP의 공학적 원리

포스트텐션 콘크리트 포장의 가장 큰 특징은 슬래브 두께를 기존 콘크리트 포장의 절반수준으로 줄일 수 있다는 것과 줄눈의 간격을 100~200 미터 까지 증가시켜 줄눈의 수를 획기적으로 감소시키는 것이다. PTCP에서 가장 중요한 사항은 슬래브의 두께와 긴장력의 결정이라고 할 수 있다. 이를 위해 우선 PTCP의 초기 두께 및 슬래브 크기를 결정한다. 그리고 결정된 PTCP 슬래브에서 차륜 및 환경하중에 의해 발생되는 인장응력을 예측한다. 그 후 이러한 응력을 감소시켜서 콘크리트의 허용 휨강도보다 발생하는 응력이 작을 수 있는 크기의 압축 응력을 구해 이를 긴장량으로 결정한다. 이러한 개념을 [그림 18]에 나타내었다.



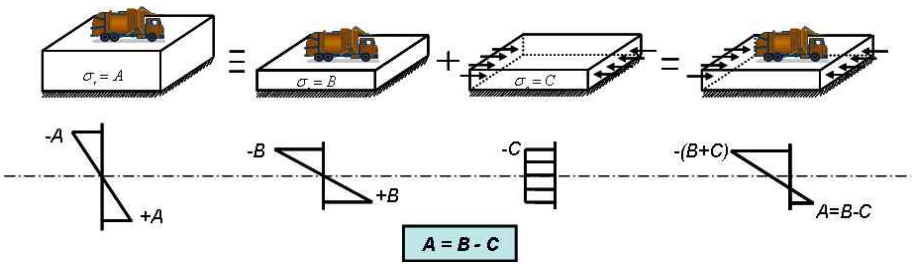
[그림 18] 긴장응력 크기 결정을 위한 개념

설계의 상세한 방법은 PTCP 슬래브에 차륜하중 및 환경하중이 가해질 때에 슬래브에 발생하는 인장응력을 산출한다. 이때 슬래브 두께 및 길이와 하부지반 강성 등에 따른 응력 발생을 분석하여 발생 가능한 최대 인장응력을 산정한다. 그리고 긴장에 사용되는 강선의 규격을 정하여 각종 긴장 손실을 고려하여 실제로 긴장에 의해 슬래브에 작용되는 유효 긴장량을 산정한다. 발생 최대 인장응력에서콘크리트의 허용 휨강도를 감하여 구한 값과의 유효 긴장량과의 비교를 통하여 긴장 간격 및 강선의 개수를 설계하게 된다. 결과적으로 슬래브에는 콘크리트의 허용 휨강도보다 작은 크기의 인장응력만이 발생하도록 긴장 설계가 이루어진다. 이러한 과정을 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\left\{\text{강선의 긴장하중} - \sum\text{손실량}\right\}\times\text{강선의 개수}}{\text{슬래브 긴장단면적(긴장폭}\times\text{슬래브두께)}} \geq \text{최대발생인장응력} - \text{콘크리트허용휨강도} \quad \text{식(4)}$$

$$\text{긴장 간격} = \frac{\text{강선의 긴장하중} - \sum\text{손실량}}{(\text{발생최대인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도})\times\text{슬래브두께}} \quad \text{식(5)}$$

PTCP의 긴장 설계가 끝나면 피로파손에 대한 검토를 수행한다. 피로파손에 대한 검토는 피로파손을 고려하여 설계된 다른 형식과 두께를 가지는 콘크리트 포장과의 비교 검토를 통해 이루어진다. 피로파손을 고려하여 설계된 JCP 혹은 CRCP의 누가 교통량 자료를 설계 수명 40년으로 추가 예측하여 JCP 혹은 CRCP의 두께를 산정한다. 그렇게 산정된 JCP 혹은 CRCP 슬래브와 PTCP 슬래브에 등가단축하중을 통과 시켜 발생되는 응력을 비교하여 PTCP에 발생되는 인장응력에서 긴장응력을 뺀 값이 설계수명 40년의 JCP 혹은 CRCP에서 발생된 인장응력 값과 같게 되면 PTCP의 설계 결과가 피로파손에 타당하게 된다. 이러한 개념을 [그림 19]에 나타내었다.



[그림 19] 피로파손 기준 설계 개념

슬래브 두께 및 프리스트레싱 긴장량 이외에 조인트의 간격에 대한 설계도 매우 중요한 사항이라 할 수 있다. 앞에서 설명한 바와 같이 PTCP는 종방향으로 수십 미터에서 일백 미터가 넘는 길이가 하나의 단일 슬래브 포장체로 제작되기 때문에 양단인 조인트의 움직임이 온도 변화에 의해 상당히 크게 발생하게 된다. 이러한 조인트의 움직임에 따라 조인트 간격을 적절히 설계하여야 한다. 만약에 조인트 간격이 너무 작으면 여름철에 온도 상승에 의해 포장체가 팽창하여 조인트가 닫히면서 서로를 밀게 되어 조인트 부분에 과대한 압축력이 작용하여 부분 파손을 야기할 수 있을 뿐 만 아니라 좌굴현상도 야기할 수 있게 된다. 하지만 조인트 간격이 지나치게 크게 되면 조인트 부분에서의 승차감이 떨어지게 되며 조인트 부분에서의 하중 전달 효과도 감소하게 된다.

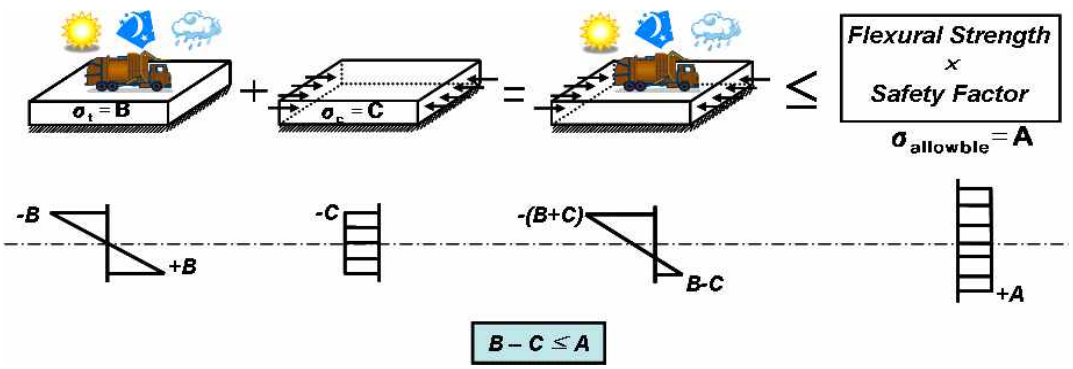
따라서 온도변화에 따른 합리적인 조인트의 수축과 팽창을 수용할 수 있는 조인트의 설계가 이루어지며 종방향 및 횡방향 PS강연선의 간격설계와 PS강연선의 재료특성을 활용하여 최적의 긴장량을 계산, 인장작업을 수행하면 상기 전술한 바와 같은 포장체의 응력을 프리스트레스로 상쇄하여 포장체에 균등한 압축력을 부여함으로서 균열발생 없이 반영구적인 콘크리트 포장 슬래브를 구성할 수 있다.

3.2 구조적 접근방법에 의한 검토 내용

본 기술개발에서는 구조적 접근방법에 의한 검토를 위해 설계, 시공 및 유지관리 단계별로 기술내용을 검토하였다. 본 기술은 교통하중이 직접 작용하는 포장이므로 공용중 발생할 수 있는 안정성을 위해 설계요소를 반영하여 콘크리트 강도나 포장두께를 결정하는 각종 포장설계법에 의해 결정되어야 한다.

(1) 설계 단계의 검토

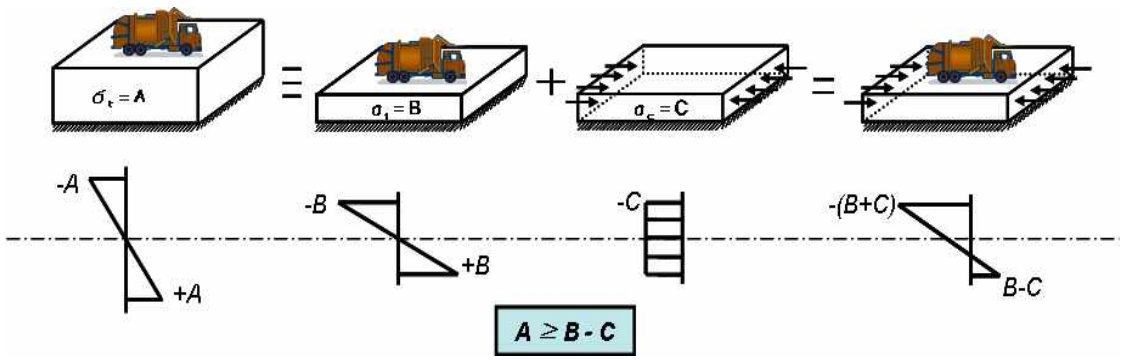
포스트텐션 콘크리트 포장의 가장 큰 특징은 슬래브 두께를 기존 콘크리트 포장에 비해 절반 수준으로 줄일 수 있다는 것과 조인트 간격을 100~200 미터 까지 증가시켜 줄눈의 수를 획기적으로 감소시키고 균열의 발생을 방지할 수 있다는 것이다. PTCP에서 가장 중요한 설계사항은 슬래브의 두께와 긴장력의 결정이다. 이를 위해 우선 PTCP의 초기 두께 및 슬래브 크기를 결정한다. 그리고 결정된 PTCP 슬래브에서 차량 및 환경하중에 의해 발생되는 인장응력을 예측한다. 그 후 이러한 응력을 감소시켜서 콘크리트의 허용 휨강도보다 발생하는 응력이 작을 수 있는 크기의 압축 응력을 구해 설계인장력을 결정한다. 이러한 개념을 [그림 20]에 나타내었다.



[그림 20] 긴장응력 크기 결정을 위한 개념

설계의 상세한 방법은 다음과 같다. PTCP 슬래브에 차륜하중 및 환경하중이 가해질 때에 슬래브에 발생하는 인장응력을 산출한다. 이때 슬래브 두께 및 길이와 하부지반 강성 등에 따른 응력 발생을 분석하여 발생 가능한 최대 인장응력을 산정한다. 그리고 긴장에 사용되는 강선의 규격을 정하여 각각의 프리스트레스 손실을 고려하고 실제로 인장에 의해 슬래브에 작용되는 유효 프리스트레스를 산정한다. 발생 최대 인장응력에서 콘크리트의 허용 휨강도를 감하여 구한 값과의 유효 인장량과의 비교를 통하여 긴장 간격 및 강선의 개수를 설계하게 된다. 결과적으로 슬래브에는 콘크리트의 허용 휨강도보다 작은 크기의 인장응력만이 발생하도록 긴장 설계가 이루어진다.

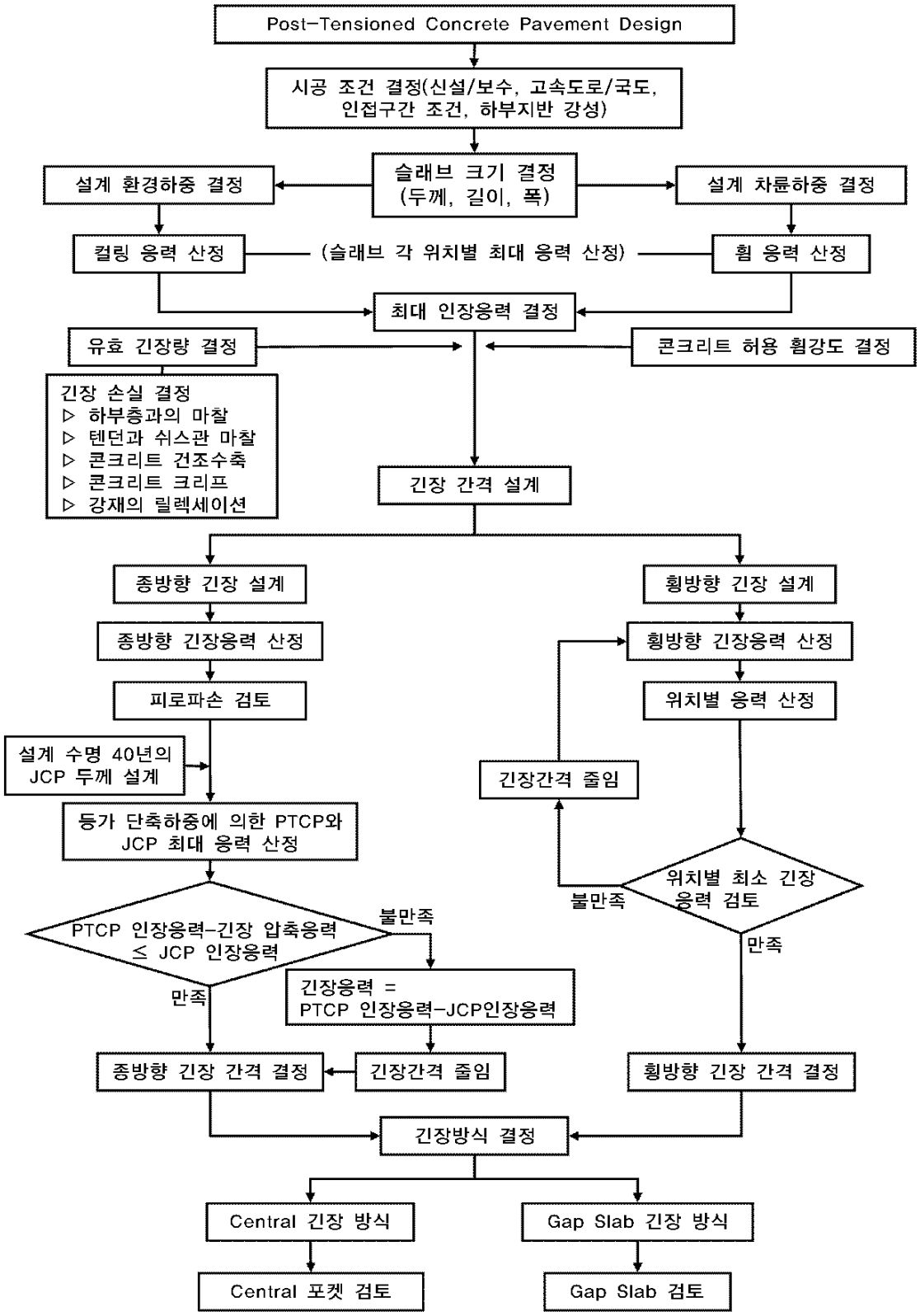
PTCP의 긴장 설계가 이루어지면 피로파손에 대한 검토를 수행한다. 피로파손에 대한 검토는 피로파손을 고려하여 설계된 다른 형식과 두께를 가지는 콘크리트 포장과의 비교검토를 통해 이루어진다. 도로설계편람 포장편 4장, 도로설계실무편람 포장편 2장, 도로설계요령 3장에 따라 피로파손을 고려하여 설계된 JCP 혹은 CRCP의 누적 교통량 자료를 설계 수명 40년으로 추가 예측하여 JCP 혹은 CRCP의 두께를 산정한다. 그렇게 산정된 JCP 혹은 CRCP 슬래브와 PTCP 슬래브에 등가단축하중을 통과시켜 발생되는 응력을 비교하여 PTCP에 발생되는 인장응력에서 긴장응력을 뺀 값이 설계수명 40년의 JCP 혹은 CRCP에서 발생된 인장응력 보다 작게 되면 PTCP의 설계 결과가 피로파손에 대해 충분한 저항성을 가지게 된다. 이러한 개념을 [그림 21]에 나타내었으며 이와 같이 PTCP의 피로파손에 대한 검토가 수행되었다.



[그림 21] 피로파손 기준 설계 개념

PTCP의 설계가 국외 유사시스템 설계와 비교하여 구조안정성이 보다 더 확보되도록 하기 위하여, 국외의 설계법을 면밀히 분석하여 본 기술의 설계법에서는 국외의 설계법 보다 진보된 설계가 가능하도록 하였다. 국외의 설계법은 AASHTO 93 Design Guide의 Part II, 3.5절에 설명되어있는 프리스트레스트 콘크리트 포장 설계를 분석하였으며,

미국연방도로국(FHWA)의 프리스트레스트 포장 설계는 1983년 보고서 FHWA/RD-82/090을 분석하였고, 미국 텍사스주에서 PTCP의 설계를 수행한 내용은 2003년 보고서 FHWA/TX-04/0-4035-1을 검토하여 분석하였다. 본 기술의 설계흐름은 [그림 22]에 나타 내었으며 미국의 설계법과의 주요 비교 결과는 [표 10]에 나타내었다. PTCP 설계법은 구조안정성이 증명된 국외 설계에서의 고려사항을 모두 포함하고 있으므로 구조안정성이 확보되었다고 할 수 있다.



[그림 22] 기술의 설계 흐름도

[표 10] PTCP 설계와 국외 설계 비교

구 분	PTCP 설계법	텍사스 설계법	미국연방도로국 (FHWA) 설계법	AASHTO 93 Guide
설계 개념	• 외부 하중으로 인해 발생되는 응력을 기준으로 종방향 및 횡방향 긴장 설계 & 피로파손 검토	• 외부 하중에 의한 탄성 설계 • 피로 파손 기준 설계	• 외부 하중에 의한 탄성 설계 • 피로 파손 기준 설계	• 피로 파손 기준 설계
환경 하중 응력	• 3차원 유한요소 해석을 통한 정밀 분석	• Bradbury 방정식을 사용한 단순 해석	• 이론식을 사용한 단순 해석	• 고려하지 않음
차륜 하중 응력	• 3차원 유한요소 해석을 통한 정밀 분석(단축 및 복축 하중 고려)	• 유한요소 해석을 통한 분석(윤하중만 고려)	• 이론식을 사용한 단순 해석	• 이론식을 사용한 단순 해석
하부 지반 마찰	• 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율을 산정하여 손실인자로 설계에 반영	• 마찰응력을 발생응력으로 포함하여 설계	• 마찰응력을 발생응력으로 포함하여 설계	• 마찰응력을 긴장력 손실로 계산
긴장 손실	• 슬래브 중앙의 긴장력 전달율 • 텐던과 쉬스관 사이 마찰 • 콘크리트 건조수축 • 콘크리트 크리프 • 강재의 릴렉세이션	• 텐던과 쉬스관 사이 마찰 • 콘크리트 건조수축 • 콘크리트 크리프 • 강재의 릴렉세이션	• 텐던과 쉬스관 사이 마찰 • 콘크리트 건조수축 • 콘크리트 크리프 • 강재의 릴렉세이션	• 탄성 수축 • 콘크리트 크리프 • 콘크리트 건조수축 • 강재의 릴렉세이션 • 긴장 강선의 오차 • 텐던과 쉬스관 사이 마찰 • 긴장 강선의 오차
횡방향 긴장	• 3차원 구조 해석으로 횡방향 긴장 설계 • 긴장 간격에 따른 응력 집중으로 인한 손실 고려	• 종방향 긴장과 동일한 방법으로 긴장 설계	• 횡방향 긴장 설계 없음	• 횡방향 긴장 없이 보강 철근 사용 • 종방향 긴장과 동일한 방법으로 횡방향 긴장 • 대각선 방향 긴장
긴장 방식	• Gap Slab 방식(두께 일정, 횡방향 긴장) • Central Prestressing 방식	• Central Prestressing 방식	• Gap Slab 방식(두께 증가 혹은 종방향 긴장 도입)	• 긴장 방식 언급 없음

(2) 시공 단계의 검토

콘크리트 표준시방서에서 프리스트레싱 할 때의 콘크리트 압축강도는 안전도를 확보하기 위하여 프리스트레스를 준 직후, 콘크리트에 일어나는 최대 압축응력의 1.7배 이상이어야 한다. 본 기술에서는 1차와 2차의 프리스트레싱 직후의 시방사항을 검토하였다. [표 11]은 검토 결과를 나타낸 것으로 1차와 2차의 프리스트레싱은 각각 콘크리트 강도가 7MPa와 21MPa에서 도입되며, 시방규정에 의한 콘크리트에 일어나는 최대 압축응력을 검토한 결과 안전도가 5로서 시방규정의 1.7배 보다 매우 안전도를 확보하여 작업됨을 알 수 있다.

[표 11] 콘크리트 표준시방서 검토 결과

구 분	콘크리트 강도	콘크리트에 일어나는 최대 압축응력(①)		안전도	검토결과
		①	①×1.7		
1차 프리스트레싱	7MPa	0.82MPa	1.4MPa	5	시방서 만족
2차 프리스트레싱	21MPa	2.47MPa	4.19MPa	5	시방서 만족

시공단계에서 구조검토는 프리스트레스의 도입률로 판단할 수 있다. 콘크리트표준시방서(9.3.2)에서 설계프리스트레싱력은 긴장할 때 프리스트레싱 긴장재의 인장응력을 극한인장강도의 80% 또는 항복강도의 94% 중 작은 값 이하로 하도록 규정하고 있으며, 미국 ACI 규정의 최대허용응력은 잭킹력(jacking force)이 항복강도의 94%, 단 극한인장강도의 80%와 제작사에 의해 추천되는 최대값의 작은값 보다 더 커서는 안된다고 규정하고 있다. 따라서 본 기술개발에서는 이러한 시방기준을 검토하여 인장작업 결과가 관련기준을 만족하는지 여부에 대해 검토하였다.

[표 12]는 PTCP 공법으로 시공된 2개의 슬래브에 종방향 텐던에 대한 인장작업 결과를 나타낸 것이다. [표 12]에서 설계인장력은 시방기준에 의거 강선의 항복강도에 94%에 해당하는 인장력이 도입되었고, 설계 신장량의 계산은 다음 식(6)에 의해 결정된다.

$$\delta = \frac{PL}{AE} \qquad \text{식(6)}$$

여기서, P는 3.17.4에서 결정된 프리스트레싱력

L은 슬래브의 길이

A는 PS강연선의 단면적

E는 PS강연선의 탄성계수이다.

포장의 경우에는 국내기준이 없으므로 미국 ACI에서 사용하는 식을 적용하여 계산하면 약 15%의 손실이 프리스트레싱 직후의 손실로 계산된다.

$$f_t = f_{jacking}(1 - \exp - [ux + (\frac{kL}{2})] = 0.835 \fallingdotseq 85\% \qquad \text{(식7)}$$

여기서, $f_{jacking}$: 슬래브의 끝단에서 가해지는 종방향 긴장응력

u: 곡률마찰 계수

x: 슬래브 중간지점에서 잭킹한 텐던의 각 변화, radian

k: wooble 마찰계수(0.003)

L: 슬래브 길이(120m)

따라서 도입률은 85% 이상이면 안전하도록 설계에 고려하였다. 그러나 인장작업 완료 후 설계 신장량에 대한 인장작업 결과 실측된 신장량에 대한 백분율을 계산, 프리스트레스 도입률을 분석하여 시공단계에서의 안정성을 확인한 결과 종방향 텐던의 프리스트레스 도입률은 첫 번째 슬래브에서 98.2%, 두 번째 슬래브에서 98.1%로 나타나 매우 우수한 도입률을 나타내었다. 이러한 결과는 본 기술개발에서 연구된 갭슬래브 시공방식을 적용하여 양단인장 방식에 의해 프리스트레스 손실을 최소화하였기 때문에 나타난 것이다. 따라서 시공단계에서 구조적 안정성이 확보 되었다고 할 수 있다.

[표 12] 종방향 텐던 인장작업 결과

슬래브 No.	텐던 No.	설계인장력		인장결과		프리스트레스 도입률
		인장력(ton)	신장량(mm)	인장력(ton)	신장량(mm)	
1	1	21.244	907	21.244	893	98.5%
	2	21.244	907	21.244	903	99.6%
	3	21.244	907	21.244	885	97.6%
	4	21.244	907	21.244	899	99.1%
	5	21.244	907	21.244	873	96.3%
	6	21.244	907	21.244	847	93.4%
	7	21.244	907	21.244	885	97.6%
	8	21.244	907	21.244	903	99.6%
	9	21.244	907	21.244	877	96.7%
	10	21.244	907	21.244	905	99.8%
	11	21.244	907	21.244	906	99.9%
	12	21.244	907	21.244	902	99.4%
	13	21.244	907	21.244	893	98.5%
	14	21.244	907	21.244	898	99.0%
	평균					98.2%
2	1	21.244	907	21.244	892	98.3%
	2	21.244	907	21.244	891	98.2%
	3	21.244	907	21.244	898	99.0%
	4	21.244	907	21.244	854	94.2%
	5	21.244	907	21.244	879	96.9%
	6	21.244	907	21.244	869	95.8%
	7	21.244	907	21.244	875	96.5%
	8	21.244	907	21.244	900	99.2%
	9	21.244	907	21.244	903	99.6%
	10	21.244	907	21.244	891	98.2%
	11	21.244	907	21.244	906	99.9%
	12	21.244	907	21.244	900	99.2%
	13	21.244	907	21.244	897	98.9%
	14	21.244	907	21.244	902	99.4%
	평균					98.1%

(3) 유지관리 단계의 검토

본 기술은 목표 설계수명 기간 동안 도로이용자들이 안전하고 유지보수로 인한 불편함을 최소화하기 위해 장수명 고내구성 포장 공법으로 개발되었다. 따라서 본 절에서는 공용기간 동안 일상 유지관리나 점검을 통하여 포장체의 균열이나 표면결함이 발생되어 보수 할 경우 구조적인 안정성이 확보되는지 여부를 검토하였다.

포스트텐션 콘크리트 포장은 설계수명 기간 동안 프리스트레스의 손실을 고려하여 구조설계에 반영하고 피로파손에 대한 검토과정을 거치게 되나, 거동특성이 줄눈콘크리트 포장이나 연속철근콘크리트 포장과 상이하기 때문에 파손의 형태와 정의가 다르므로 장기 공용성을 위한 유지관리가 필요하다고 할 수 있다.

[표 13]은 포스트텐션 콘크리트 포장의 구조적 파손 분류와 보수방안을 요약한 것이다. PTCP 슬래브의 구조적 파손은 균열과 펀치아웃으로 구분되며 그 외의 예측 불가능한 이유로 강선이 파단될 경우를 가정할 수 있다. 균열은 균열폭의 범위에 따라 보수여부가 결정되며, 펀치아웃이 발생하여도 [그림 23]에 나타낸 바와 같이 해당부분의 단면과 깊이까지만 보수를 실시할 수 있다. 강선이 파단되었을 경우는 강선을 복원 후 프리스트레스를 도입할 수 있다.

본 절에서는 PTCP 슬래브에 유지보수를 위하여 슬래브를 부분적으로 절삭하였을 경우 이에 대한 구조적 거동을 분석하였다. [그림 23](a)는 시험시공을 통하여 PTCP 슬래브를 인위적으로 부분절삭 한 경우이며, (b)는 JCP 슬래브에 줄눈을 설치하기 위하여 커팅한 사례를 보인 것이다. [그림 23]에 나타낸 바와 같이 PTCP 슬래브는 폭 5cm와 깊이 8cm로 부분절삭을 하였더라도 프리스트레스가 지속적으로 작용되기 때문에 절삭면 하부에 균열의 발생 없이 유지될 수 있다. 그러나 JCP의 경우 줄눈설치를 위한 커팅작업시 커팅깊이 이하에 균열이 발생하는 것을 볼 수 있다. [그림 24]에서는 절삭면에서 온도변화에 따른 절삭폭의 간격변화를 측정하여 나타낸 것이다. PTCP 슬래브에서는 0.1mm이하의 매우 작은 변화가 감지될 뿐 온도변화에 따른 슬래브의 구조거동에는 온도변화에 대해 변화량이 매우 미소함을 볼 수 있으나 JCP의 경우 온도변화에 따라 선형적으로 거동함을 볼 수 있다. 따라서 구조적 파손에 따라 유지관리 단계에서 부분단면 보수를 시행하더라도 구조적으로 안정성이 확보됨을 볼 수 있다.

이러한 결과는 과적차량 단속구간 포장공사에 WIM 센서를 설치할 경우 포장 슬래브에 구조적 안정성을 가지므로 이러한 분야에 효과적으로 적용할 수 있음을 보여 주며, 포장 파손 및 유지관리가 최소화됨으로서 WIM 센서의 수명과 내구성 및 측정의 정밀도를 향상시킬 수 있다.

[표 13] 포스트텐션 콘크리트 포장의 구조적 파손 분류와 보수방안

파 손 형 태	내 용	보수방안
종방향 균열	· 균열폭 1mm이하 · 균열폭 1~3mm의 균열 · 균열폭 3mm 이상	· 유지보수없이 공용 · 에폭시 주입 방법으로 실링 · 부분단면 보수
횡방향 균열		
펀치아웃	· 부분적인 펀치아웃 발생	· 부분단면 보수
강선파단	· 강선 절단	· PS강선 복원 후 프리스트레스 도입

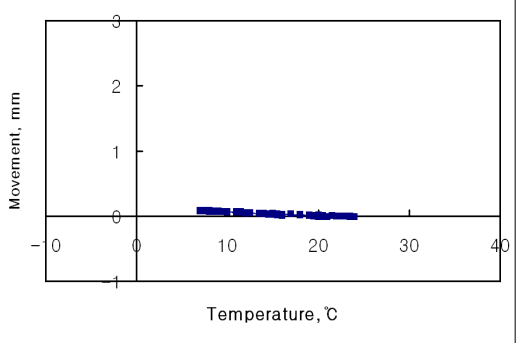


(a) PTCP 센서설치구간 절단면 : 균열없음

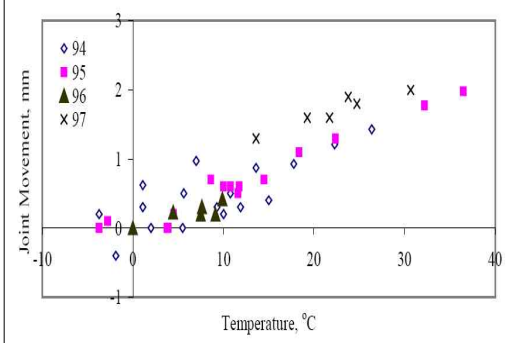


(b) JCP 줄눈 절단면 : 균열있음

[그림 23] 콘크리트 포장 절단면 비교 사진



(a) 개발기술(PTCP) 0.1mm 이내



(b) 기존기술(JCP) 2.0mm

[그림 24] 절단면 간격변화 측정결과

(4) PTCP 포장의 손상 및 보수 방법 검토

포스트텐션 콘크리트 포장은 환경하중과 교통하중에 의한 응력을 프리스트레스에 의하여 상쇄시켜 외력에 의해 콘크리트 포장에 발생하는 인장응력이 내력(콘크리트 휨강도와 프리스트레스 압축응력)보다 작게 하여 균열을 방지한다는 것이 기본 개념이다. 따라서 포스트텐션 콘크리트 포장 공법에서는 균열이 발생하지 않으며 종래의 줄눈개념은 액티브 아모 조인트에서 포스트텐션 콘크리트 포장 슬래브의 팽창과 수축을 수용하도록 설계된다. 또한 포스트텐션 콘크리트 포장에서 기층, 보조기층, 노상 등 표층 슬래브 하부구조의 침하나 약화로 인하여 발생되는 문제는 펀치아웃 파손으로 나타날 수 있다. 이러한 파손과는 별도로 슬래브에 배치되어 있는 PS강선이 파단 되었을 경우 포장 슬래브에서 프리스트레스가 이완되기 때문에 이 부분에 대한 보수를 통하여 프리스트레스를 복원시켜야 한다.

상기 기술한 파손형태가 포스트텐션 콘크리트 포장에서의 구조적 문제로 인한 주요 파손형태라 정의할 수 있으며 기능적 문제로 귀착되는 파손은 액티브 아모 조인트에서의 EVA 수지나 우레탄실런트의 찢어짐 현상이나 탈리, 균열발생부에서 발생할 수 있는 스폴링이라 할 수 있다. 구조적 파손과 기능적 파손 이외에는 스케일링, 마모, 망상형 균열과 같은 파손은 표면결함으로 구분 할 수 있다.

따라서 상기 기술한 포스트텐션 콘크리트 포장의 파손 및 손상의 분류는 표 14와 같이 요약할 수 있으며 이에 대한 보수 방안을 아래에 기술하였다.

[표 14] 포스트텐션 콘크리트 포장의 파손 및 손상의 분류

구 분	파 손 형 태	비 고
구조적 파손	종방향 균열	
	횡방향 균열	
	펀치아웃	
	강선파단	
기능적 파손	조인트 실런트 손상	
	균열부 스폴링	
표면결함	스케일링	
	마모(골재노출 포함)	
	망상형 균열	깊이 5㎜내외

㉮ 콘크리트 표면처리 방법

포스트텐션 콘크리트 포장 면에 스케일링, 마모, 망상형 균열과 같은 표면결함으로 콘크리트 표면의 일부가 벗겨져 탈리되었을 경우 파손부위의 깊이가 10mm 이하일 경우 슬러리시일로 임시 보수하며 표면결함의 깊이와 규모가 광범위할 경우 보수범위를 결정하여 손상된 부위를 절삭하고 초속경계열의 콘크리트로 팻칭한다.

㉯ 균열 실링 방법

균열은 차량진행 방향으로 발생되는 종방향 균열과 차량진행 방향의 직각방향으로 발생되는 횡방향 균열로 구분된다. 균열발생은 균열 폭과 정도에 따라 다음과 같은 보수방법에 의한다.

① 균열폭 1mm이하의 균열: PTCP 공법에서 미소한 균열은 프리스트레스에 의한 압축응력이 도입되는 상태로 유지되기 때문에 비활동성 균열이라 할 수 있다. 이러한 균열은 프리스트레스에 의해 지속적인 압축응력을 받는 상태이기 때문에 구조적으로 문제가 되지 않으며 별도의 유지보수 없이 공용되어도 무방하다.

② 균열폭 1~3mm의 균열: 균열발생부위를 에폭시 주입 방법으로 실링한다. 이 방법에서 균열부는 그대로 두고 균열부 전 깊이에 에폭시 수지를 주입하여 균열 진전을 방지한다. 에폭시는 균열내부로 고르게 충전되도록 일정한 속도와 압력을 유지하도록 한다.

③ 균열폭 3mm 이상의 균열: 균열발생 부위를 부분단면 보수한다. 균열발생 부위가 점차 스폴링으로 진전될 수 있기 때문에 균열부를 깊이 5cm 이내로 홈통모양 또는 V형으로 절삭하여 보수면 아래는 에폭시 주입에 의한 실링작업을 실시하고 절삭부위는 초속경계열의 모르터로 그라우팅한다. 이때 절삭면은 깨끗하게 손질하고 절삭에 의해 발생된 콘크리트 조각 및 분진은 에어 컴프레셔로 완전히 제거한다.

㉰ 균열부 스폴링

종방향이나 횡방향 균열 발생 후 스폴링으로 진전하여 보수가 필요로 하는 경우 스폴링 발생부위의 보수범위를 결정하여 부분단면 보수를 실시한다. 부분단면 보수 범위를 결정할 때 파손된 부분의 면적보다 10cm 정도 크게 선정하고 면전은 직사각형 형태로 설정한다. 부분단면 보수는 최소 40mm의 깊이로 절삭하며 콘크리트 절삭은 콘크리트 파쇄기 또는 절삭 장비를 이용하여 손상된 콘크리트를 제거한다. 절삭 후 노출면은 블라스팅 장비 등을 이용하여 신구콘크리트의 부착력을 증진시키도록 하여야 한다. 보수재료는

초속경계열의 콘크리트를 적용하여 단시간에 교통개방이 가능하도록 한다.

㉱ 조인트 보수

PTCP 공법에서 적용되는 조인트는 액티브 아모 조인트로서 주요 파손 형태는 EVA 수지의 노화 또는 우레탄실런트의 노화 및 탈리라 할 수 있다. 조인트 본체는 강재로서 대기중 노출된 면은 수십년이 지나도 파손없이 공용이 가능하며 만일 조인트가 더 이상 공용되기 어려울 정도의 파손이 발생하면 갭슬래브를 제거하여 재시공 한다.

① 우레탄 실런트의 찢어짐 및 탈리: 우레탄실런트를 제거한 후 제거부위의 이물질을 완전히 제거한 후 우레탄 실런트를 도포한다.

② EVA수지와 우레탄 실런트의 파손: 우레탄실런트와 EVA 수지가 모두 파손되어 더이 상 공용되기 어렵다고 판단되면 EVA 수지와 우레탄실런트를 모두 제거 한다. 제거한 부위의 이물질은 에어컴프레셔를 이용하여 완전히 제거하고 EVA 수지와 우레탄 실런트를 재설치 한다.

③ 조인트 본체의 교체: 조인트가 더 이상 공용되기 어려울 정도의 파손이 발생하면 갭슬래브를 교체하여야 한다. 갭슬래브의 재시공을 위해서 콘트롤조인트를 콘크리트 커터를 이용하여 절단한 후 이 부분을 모두 제거한다. 갭슬래브가 제거되면 바닥면을 고르게 하여 PE 쉬트를 설치하고 PTCP 메인 슬래브와 갭슬래브와의 일체거동을 위한 타이바를 PTCP 메인 슬래브를 천공한 후 설치한다. 타이바 설치가 완료되면 액티브 아모 조인트 및 갭슬래브의 시공 도면에 의하여 재설치 한다.

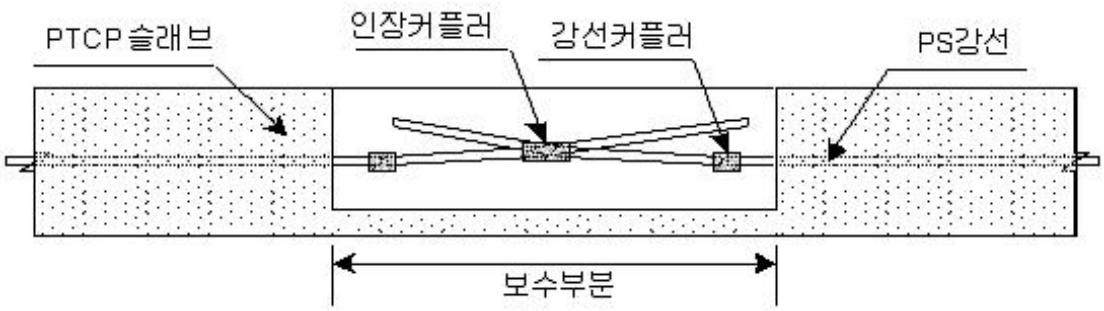
㉲ 펀치아웃 파손

국부적인 펀치아웃 파손 발생 시 보수범위를 결정하여 전단면 보수를 실시한다. 보수범위는 파손된 부위보다 10cm이상 넓게하여 정사각형 또는 직사각형 형태로 설정한다. 파손범위가 결정되면 이 부분에서의 콘크리트를 제거한다. 콘크리트 제거 시 종방향 텐던과 횡방향 텐던 유무를 확인하고 텐던에 손상이 가지 않도록 유의하여 절삭한다. 콘크리트 절삭이 완료되면 PTCP 포장 하부의 상태를 면밀히 관찰하여 지반의 침하나 공동에 의한 발생여부를 판단한다. 펀치아웃 파손은 대부분 포장 하부의 문제로 인하여 발생되는 경우이기 때문에 포장 하부에 대한 보강대책을 수립하여야 한다. 신속한 보수작업을 위하여 초속경계열의 콘크리트나 모르터를 사용하는 것이 바람직하며 하부보강이 이루어지면 보수부위에 분리막 설치 후 초속경계열의 콘크리트로 팻칭하여 마무리한 후 소

정의 양생이 완료된 후 교통개방 한다.

㉮ 강선의 파단에 의한 프리스트레스 복원

포스트텐션 콘크리트 포장 슬래브에 배치되어 있는 PS강선이 파단 되었을 경우 이로 인한 슬래브에 도입된 프리스트레스가 이완되어 슬래브의 설계인장력이 설계치 이하로 되기 때문에 이를 복구하여 설계인장력을 확보해야 한다. PS강선 복원방법은 <그림 25>에 나타낸 바와 같이 먼저 파단 된 부위의 콘크리트를 절삭한 후 인장커플러를 이용하여 파단 된 강선을 연결시킨다. 연결된 강선은 다시 인장커플러를 이용하여 결속시킨 후 유압잭킹을 사용하여 인장작업을 수행한다. 인장작업이 완료되면 보수부위를 초속경계열의 콘크리트로 팻칭하여 마무리 한 후 소정의 강도가 발현되면 교통을 개방시킨다.



(A) 강선연결 개념도



(B) 인장커플러를 이용한 인장작업 개념

<그림 25> 유지보수 개념도

㉮ 덧씌우기 및 재포장

설계공용수명에 도달하여 더 이상 서비스되기 어렵다고 판단되는 경우 덧씌우기를 시행하여 포장의 수명을 연장하거나 재포장을 실시한다. 덧씌우기 공사에 대해서는 고속도로공사 전문시방서에 의한다.

(5) 기타 구조적 안정성 검토

㉮ 곡선부 또는 절곡부 적용에 대한 PTCP 공법 검토

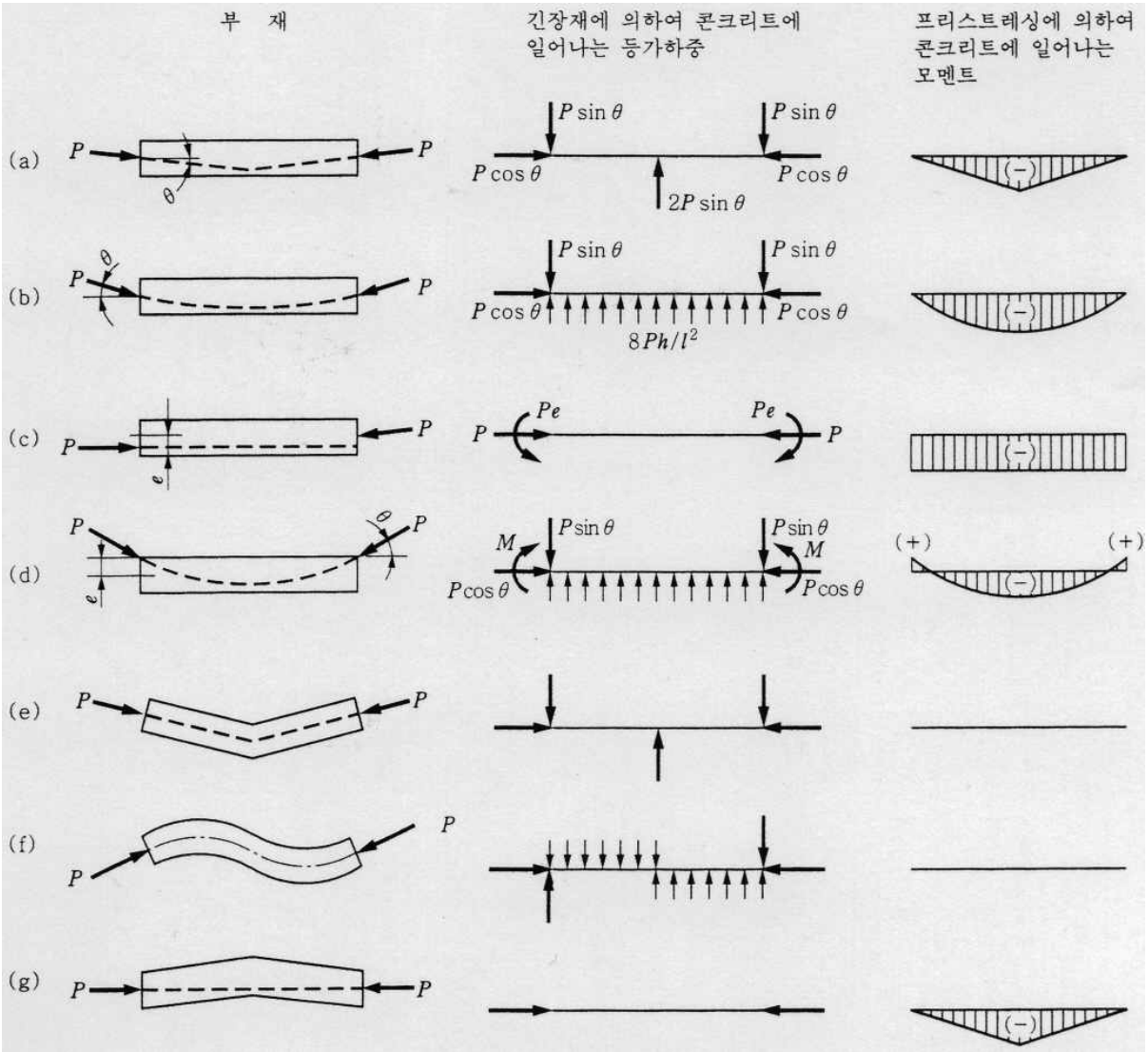
PTCP 슬래브에 평면 및 종단 선형이 존재 할 경우 텐던의 배치와 슬래브의 곡률 및 곡선 반경에 의해 긴장 시 슬래브에 어떠한 영향을 미치는지를 분석하고 이에 따른 평면 및 종단 선형이 존재하는 PTCP 슬래브의 긴장에 대한 안정성의 검토를 수행하였다.

프리스트레싱 부재를 해석하는 기본 개념으로써 프리스트레싱에 의한 부재 내력과 정착구에서 부재에 작용하는 하중을 서로 비기도록 하는 개념을 하중평형의 개념 또는 등가하중의 개념이라고 한다. 만약에 부재에 프리스트레싱을 가할 때 프리스트레싱의 작용이 연직하중과 비긴다면, 슬래브나 보와 같은 휨 부재는 주어진 하중작용 하에서 휨 응력을 일으키지 않게 된다. 결국 휨 부재를 축방향의 수직응력(direct stress)만을 받는 부재로 전환시키게 되어 복잡한 구조물의 설계와 해석을 매우 단순화 시킬 수 있다. 이 개념에서는 콘크리트를 자유 물체도로 보아야 하고, 긴장재는 콘크리트에 작용하는 힘으로 바꾸어 놓아야 한다.

하중평형의 개념은 유용한 개념이지만, 적용에 있어서는 주의를 요한다. 강선을 포물선으로 배치한 경우 혹은 절곡시켜 배치한 경우[그림 26(a), (b)]나 또는 [그림 26(c), (d)]의 경우는 콘크리트 부재의 도심선과 긴장 강선이 일치하지 않기 때문에 콘크리트 부재 내부에 휨 모멘트가 발생한다. 이러한 경우에는 하중 평형 개념을 적용할 수 없다. 그러나 콘크리트 부재가 직선이 아니며 부재의 도심선과 긴장재의 중심선이 일치할 경우인 [그림 26(e), (f)]를 살펴보자. 우선 [그림 26(e)]에 나타낸 경우를 보면 긴장에 의해 부재 중앙에 상향력이 발생하며 이러한 하중은 긴장력의 수직 분력에 해당하는 하중을 가지게 된다. 이러한 현상은 [그림 26(a)]에 나타낸 것과 일치하지만 [그림 26(e)]의 경우 부재에는 모멘트가 발생하지는 않는다. 왜냐하면 부재의 중앙 위치에서 모멘트를 계산하면 모멘트 암(arm)이 0이기 때문에 모멘트가 0이 되는 것을 쉽게 이해할 수 있다.

자유도를 나타낸 [그림 27]을 이용하여 부재의 어느 위치에서라도 모멘트를 계산해 보면 0이 되는 것을 알 수 있다. 예를 들어 A 위치에서 모멘트의 합을 구해보면 다음 식 (8)과 같다.

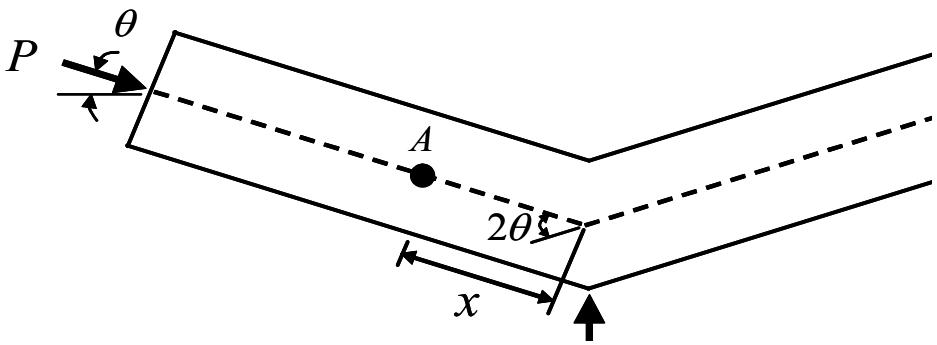
$$M = 2P\sin\theta\, x\cos\theta - P\, x\sin 2\theta \qquad \text{식(8)}$$



[그림 26] 긴장에 의한 등가하중과 모멘트

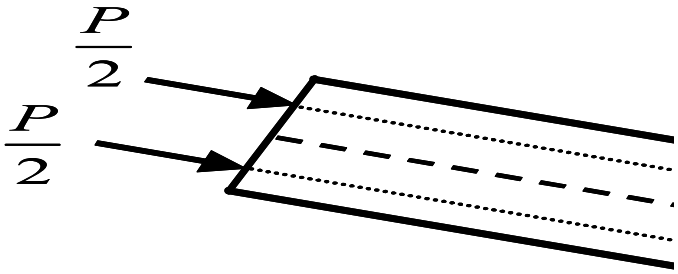
(신현묵, “프리스트레스트 콘크리트”, 동명사, 2008.)

여기서 $\sin 2\theta$는 $2\sin\theta\cos\theta$이기 때문에 모멘트는 결국 0이 되게 된다. 따라서 부재가 굴곡 되어 있는 경우 부재의 중심선과 긴장선이 일치하면 부재에 휨모멘트가 발생하지 않으며 압축응력만 발생하는 것을 알 수 있다.



[그림 27] 굴곡 부재의 중심선을 따른 긴장

만약에 [그림 28]에 나타낸 것과 같이 인장력이 부재의 중심선을 따라서 대칭으로 작용하면 부재에 어떠한 현상이 나타나는지를 살펴보자. 그림에서와 같은 긴장이 가해지더라도 부재 중앙에서의 수직방향으로의 힘은 이전의 경우와 같게 된다. 이 경우 점 A에서의 모멘트를 계산해 보면 다음과 같다.



[그림 28] 굴곡 부재의 중심선 대칭 긴장

$$M = 2P\sin\theta\, x\cos\theta - \frac{P}{2}(x\sin 2\theta - e) - \frac{P}{2}(x\sin 2\theta + e) \qquad \text{식(9)}$$
$$= 2P\sin\theta\, x\cos\theta - P\,x\sin 2\theta$$

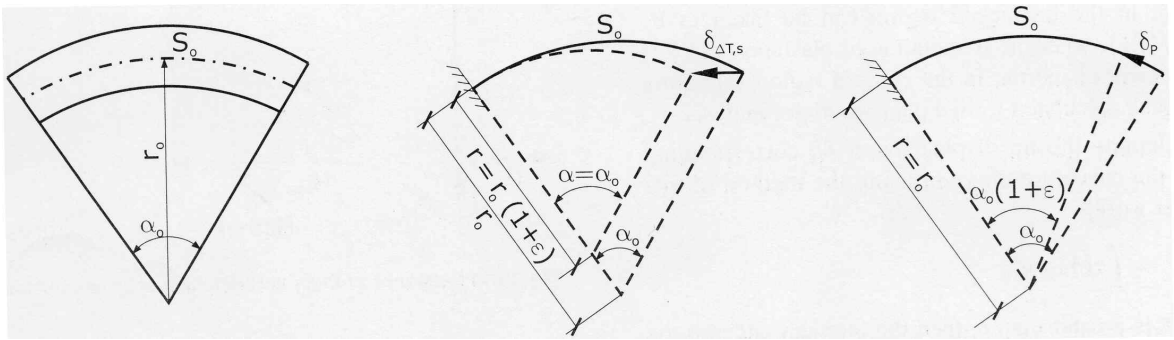
따라서 이 경우의 휨모멘트도 앞에 나타낸 식과 같게 되며 결국 0이 되게 된다. 즉, 인장력이 부재의 중심선을 따라서 대칭으로 배치되어 있어도 부재에는 압축응력만이 가해지게 되며 휨모멘트에 의한 응력은 작용하지 않게 된다.

[그림 26(f)]의 경우는 부재가 연속적으로 곡률의 변화를 가지고 있으며 긴장은 이러한 부재의 중심선을 따라서 가해졌을 경우이다. 이때에도 [그림 26(e)]의 경우와 마찬가지로 부재에는 휨모멘트가 발생하지 않게 되며 부재에 발생하는 수직방향 내부 부재력은 분포하중으로 작용하게 된다. 하지만 [그림 26(g)]에서 보인 바와 같이 긴장재의 배치가

부재의 중심선을 따라서 배치되지 않으면 부재는 휨모멘트를 받게 되는 것을 알 수 있다. 결과적으로 다시 정리하면 부재의 모양에 관계없이 긴장재의 배치가 부재의 중심선을 따라서 되어 있으면 부재에는 휨모멘트가 발생하지 않으며 따라서 긴장력에 의한 압축응력만이 부재에 작용하게 된다.

긴장부재가 곡선으로 되어있는 슬래브일 때 이러한 곡선 슬래브의 길이 변화는 프리스트레싱, 크리프, 건조수축, 그리고 온도변화에 의해서 발생한다. (Theodore L. N.; Pawan R. G.; Fadi A., (2006) "Post-Tensioning Manual," 6th Edition, Post-Tensioning Institute.). 프리스트레싱과 크리프로 인하여 발생하는 변위는 건조수축과 온도변화로 인하여 발생하는 변위[그림 29(b)]와는 근본적으로 다르다. 앞에서 살펴본 바와 같이 긴장에 의한 변형은 긴장이 부재의 중심선을 따라서 가해지면 부재의 축방향 변형만을 발생시킨다. 크리프에 대한 변형률은 프리스트레스로 인한 지속 응력에 의해서 발생되기 때문에 이 역시 축방향 변형률만을 발생시킨다. [그림 29(c)]는 곡선 슬래브에서 긴장과 크리프에 의해서 발생되는 변위를 보여주고 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브의 길이가 줄어들 때 슬래브의 곡선 반경은 변하지 않는 것을 알 수 있다.

따라서 PTCP에 선형이 존재할 때에도 긴장에 의해 선형이 변화하지 않기 때문에 이에 대한 구조적인 안정성이 확보되었다고 할 수 있다.



(a) 기본 선형 (b) 건조수축과 온도변화에 의한 변형 (c) 긴장과 크리프에 의한 변형

[그림 29] 굴곡이 존재하는 슬래브의 변형

㉯ PTCP의 좌굴 검토

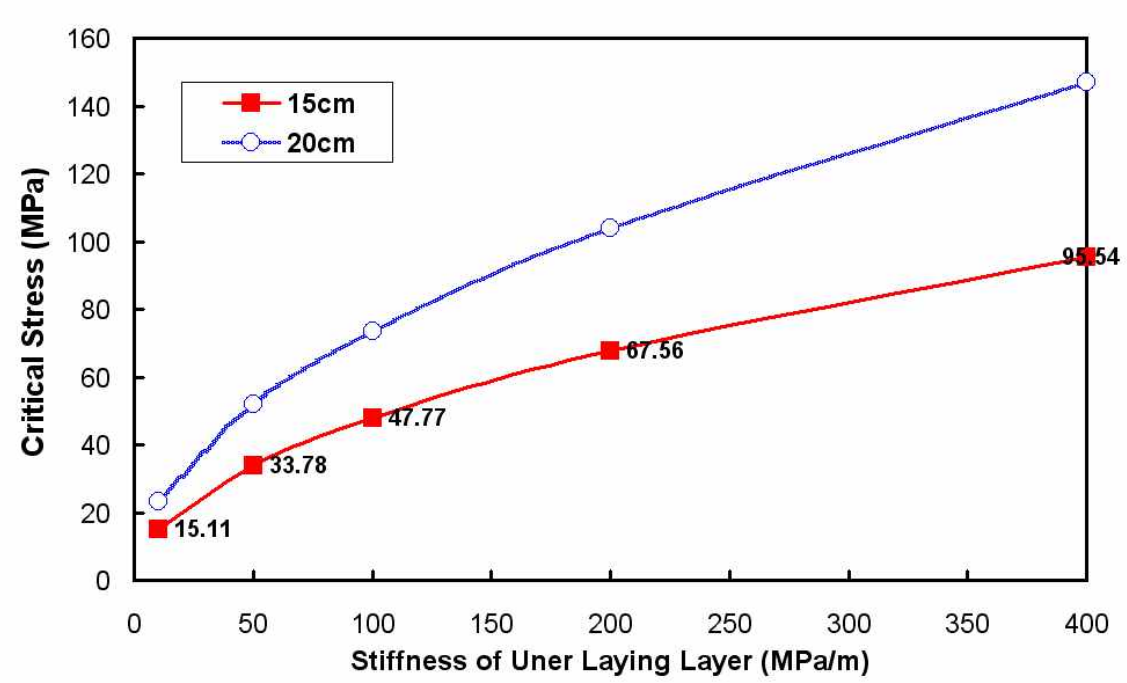
PTCP 슬래브는 길이가 매우 길며 두께가 얇기 때문에 긴장에 의한 압축응력으로 인한 좌굴 발생 검토가 필요시 된다. PTCP 슬래브는 일반적인 교량의 보 및 건축물의 슬래브와는 달리 하부에 지지층이 존재한다. 따라서 PTCP 슬래브의 경우에는 하부지반 위

에 놓인 슬래브의 좌굴 임계 하중을 구하는 방법을 사용하여야 한다. 다음 식은 지반위에 놓인 슬래브의 축방향 좌굴 임계하중을 구하는 공식이다.

$$P_{x\,cr} = 2\sqrt{D_P k} \qquad \text{식(10)}$$

$$\text{여기서, } D_P = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

위 식을 사용하여 슬래브 두께가 15cm와 20cm일 경우 PTCP 슬래브의 좌굴 임계 하중 및 응력을 탄성 하부지반 강성에 따라 구하여 [그림 30]에 나타내었다. 이 때 콘크리트의 탄성계수와 포와송비는 PTCP에 사용되는 물성을 사용하였고 탄성 하부지반 강성은 실제 존재 가능한 범위를 적용하였다.



[그림 30] 지반 강성에 따른 좌굴 임계 응력

그림에서 볼 수 있는 바와 같이 좌굴을 발생하는 임계응력은 PTCP의 하부지반 강성이 최소한 100MPa/m 이상이므로 슬래브 두께가 15cm일 경우 약 40MPa 이상, 슬래브 두께가 20cm일 경우 약 70MPa 이상 된다. 이는 콘크리트의 압축강도와 동등이상으로 매우 큰 응력이다. PTCP의 긴장응력이 2MPa 내외이기 때문에 좌굴을 야기하려면 약 20~30배 이상의 인장응력을 가해야 한다. 따라서 PTCP에서는 좌굴현상이 발생할 수 없

으며 이에 대한 구조적인 안정성이 확보 되었다고 할 수 있다.

(6) 생애주기비용 분석

포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP)과 일반적으로 사용되어져 오던 줄눈콘크리트 포장(JCP)과 연속철근콘크리트 포장(CRCP)의 공용수명동안 소요되는 생애주기비용에 대하여 비교 및 분석함으로서 유리한 형식을 선정하기 위하여 본 분석을 수행하였다. 각 포장공법의 유지관리항목은 기존의 연구보고서 및 관련기관의 문헌을 참고하여 선정하였으며, PTCP포장은 개념적으로 유지보수가 거의 없는 포장형식으로 2개 항목에 대하여 유지보수 비용을 산출토록 하였다. 또한 생애주기비용 측면 뿐만 아니라, 유지관리비용측면에서 기존의 콘크리트 포장에 비하여 어느 정도 향상된 공법인지 검토하기 위하여 실시하였다. 이에 대한 결과는 아래와 같으며 자세한 분석내용은 부록 6.에 첨부하였다.

콘크리트 포장형식 중 일반적으로 사용되어 왔던 JCP와 CRCP의 포장형식과 PTCP의 포장형식에 대한 LCC분석결과 결론은 아래와 같다.

1. 생애주기비용 측면에서 PTCP포장이 JCP와 CRCP에 비해 각각 47.3억(51.2%), 29.3억(31.7%)의 절감효과를 보여 공용수명기간동안 타 포장형식에 비하여 유리한 형식임을 알 수 있다.

2. 유지관리비용 측면에서 살펴보면, JCP포장, CRCP포장, PTCP포장의 비용이 각각 83.9억, 30.8억, 0.3억으로 나타나 PTCP포장이 가장 유리하게 나타났다. PTCP포장은 JCP포장과 CRCP포장에 비하여 각각 83.6억, 30.5억의 비용절감 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 사용자 비용을 고려한 생애주기비용 측면에서 살펴보면, PTCP포장은 JCP포장과 CRCP포장에 비하여 908.4억, 404.0억원의 비용절감 효과를 나타내어 타 공법에 비하여 유리한 형식임을 알 수 있다.

4. 사용자 비용을 고려한 유지관리측면을 살펴보면, PTCP포장의 유지관리비용(사용자비용포함)은 JCP포장과 CRCP포장에 비하여 각각 944.7억, 405.1억의 비용절감 효과를 나타내어 공용수명기간동안 유리한 형식임을 알 수 있다.

3.3 연구내용 및 결과

(1) 삼성분계 고내구성 콘크리트의 개발

PTCP 공법에 사용되는 콘크리트는 프리스트레싱(포스트텐션)이 가능한 강도의 확보뿐만 아니라 구조적 내구수명 연장에 따른 포장용 콘크리트로서의 내구성이 확보될 수 있도록 재료를 개발하였다. 현재 공용되고 있는 콘크리트 포장 슬래브는 20년의 설계수명으로 시공된다. 그러나 설계 공용기간의 70%에 못 미쳐 아스팔트 덧씌우기 등 유지보수를 함으로서 사실상 수명을 다하는 실정이다. 이러한 파손의 형태는 균열, 스폴링, ASR, D-균열, 스케일링, 단차 등 다양하게 나타나고 있으며 이 중 ASR, D-균열, 스케일링 등은 콘크리트 재료의 내구성 부족에 기인한 파손으로 장기 공용 가능한 포장공법으로 완성시키기 위해서는 고내구성 콘크리트 재료개발이 필요하다.

따라서 현재 콘크리트 포장의 수요가 가장 많은 신설 고속도로 콘크리트 포장을 기준으로 재료적 측면에서 포장용 콘크리트로서의 내구성을 향상시키기 위하여 다양한 시험배합을 통하여 작업성, 내구성 및 강도발현이 만족되도록 하였다. 신설 고속도로가 아닌 경우 PTCP 공법에 적용할 수 있는 콘크리트는 초속경 콘크리트, 초조강 콘크리트 및 조강성 콘크리트 등 다양한 콘크리트를 사용목적에 맞게 적용할 수 있다. 신속하게 작업을 종료한 후 교통 개방이 필요한 경우 특히 기존 공용중인 포장을 절삭 후 덧씌우기 또는 In-lay 방식에 적용할 경우는 양생시간이 단축되는 초속경, 초조강 또는 조강계열의 콘크리트를 적용이 가능하도록 하였다.

㉮ 고내구성 콘크리트의 배합설계

다양한 배합조건의 시험배합을 통하여 본 기술에 적합한 최적의 콘크리트 포장 배합을 개발하였다. 한국도로공사의 알칼리-골재 반응 억제에 대한 배합 지침에 따라 플라이애쉬를 시멘트 중량대비 20% 사용하였고, 조기강도 증진, 투수저항성 및 화학저항성 등의 내구성 향상을 위해 시험배합을 수행하여 시멘트 중량대비 5%의 실리카흄 사용을 결정하였다. 1차 프리스트레싱에 요구되는 초기강도를 고려하여 단위결합재량을 480㎏/㎥으로 결정하고, 다양한 실내실험을 수행하여 검증한 결과 우수한 초기강도와 내구성이 확보되었다. [표 15]는 조기강도 증진, ASR 방지, 내구성 증진을 위한 PTCP 콘크리트의 품질기준을 설정하였으며 이러한 품질기준을 만족하기 위한 배합을 개발하여 [표 16]에 나타내었다.

[표 15] PTCP 콘크리트의 배합기준

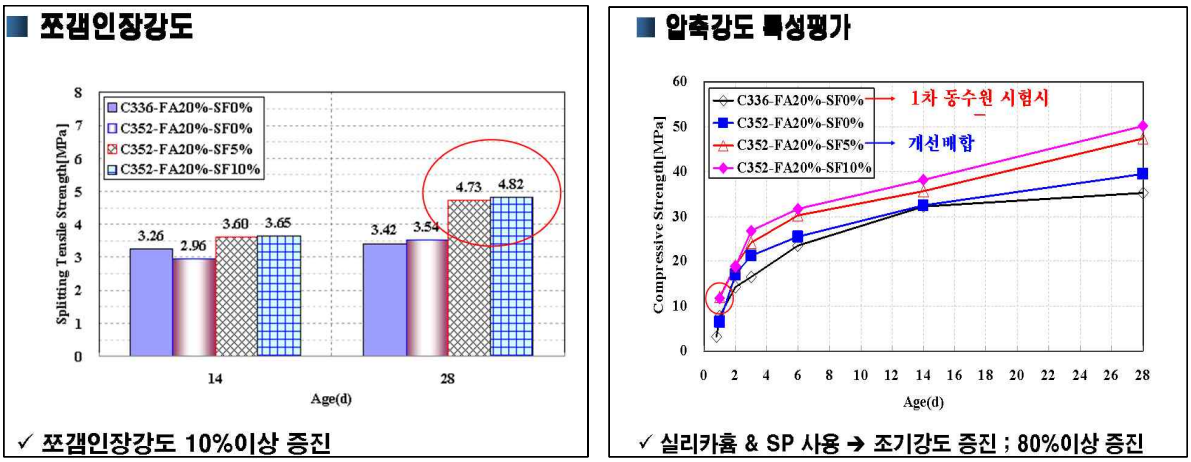
항 목	시험방법	단위	기준	비 고
· 단위수량	-	kg/㎥	160이하	
· 굵은골재 최대치수	-	mm	25	
· 슬럼프	KS F 2402	mm	40±20	
· 공기량	KS F 2409	%	4~7	
· 압축강도	KS F 2405	MPa	21	재령3일
	KS F 2405	MPa	40	재령28일
· 알카리-골재 반응	ASTM C 1206	%	1.0%이하	재령28일
· 투수저항성	ASTM C 1202	Coulomb	1000이하	재령56일
· 동결/융해저항성	KS F 2456	%	80이상	Durability Index 기준
	ASTM C 457	㎛	250이하	Spacing factor 기준
· 화학저항성(염산)	ASTM C 267	%	5이하	중량손실 기준
· 화학저항성(황산)	ASTM C 267	%	5이하	〃
· 화학저항성(염화칼슘)	ASTM C 267	%	5이하	〃
· 표면박리저항성	Boras Method	등급	G등급이상	〃

[표 16] PTCP 콘크리트 배합표

구 분	물/시멘트비(%)	잔골재율(%)	결합재(kg)	물(kg)	잔골재(kg)	굵은골재(kg)	S.P.(%)	A.E.(%)
시방배합	32	40	480	154	656	1,010	C×0.50%	C×0.015%

㈏ 콘크리트의 강도

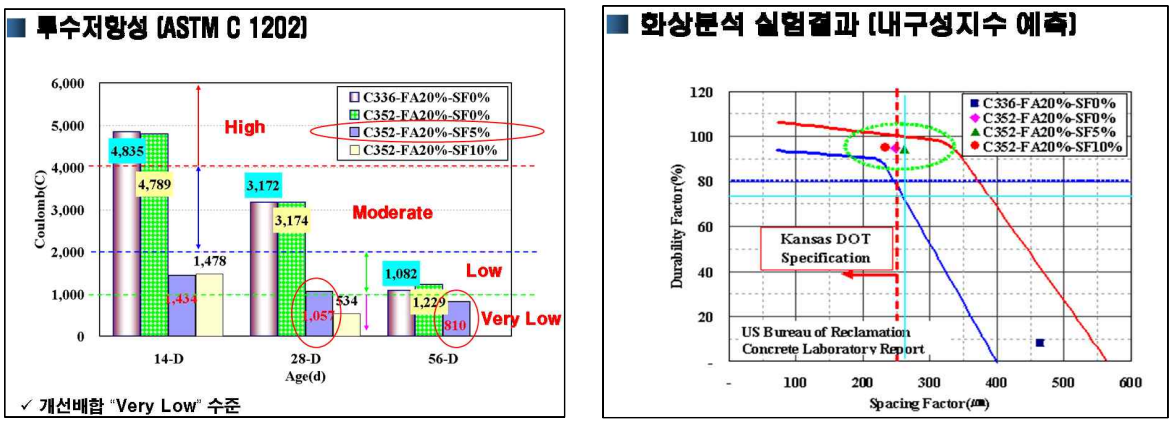
콘크리트의 압축강도, 인장강도에 대해 초기재령 및 다양한 재령에서 실험을 수행하여 초기 인장작업에 필요한 재령 3일의 압축강도 21MPa을 만족시키고 또한 재령 28일에서 압축강도 40MPa 이상 발현되는 강도발현 특성을 나타냈으며 [그림 31]에 나타내었다.



[그림 31] 강도 평가결과

㉰ 콘크리트의 투수저항성 및 내구성 지수

콘크리트의 투수저항성 평가는 ASTM C 1202 실험방법에 준하여 평가하였고, 공극구조 특성은 ASTM C 457 실험방법에 준하여 실시하였다. 투수저항성 평가결과 PTCP 콘크리트의 재령 28일 염소이온 통과전하량이 1,000쿨롱 범위로, 재령 56일 염소이온 통과전하량은 810쿨롱으로 평가되어, ASTM C 1202기준 “Very Low”수준으로 우수한 투수저항성을 나타냈다. 공극구조 분석결과 연행공기가 고루 분포하였고, 간격계수가 250μm 범위로 평가되어 Kansas DOT Specification 기준을 만족하는 내구성 지수 80%이상으로 평가되어 우수한 동결융해 저항성을 나타내었으며 [그림 32]에서 확인할 수 있다.

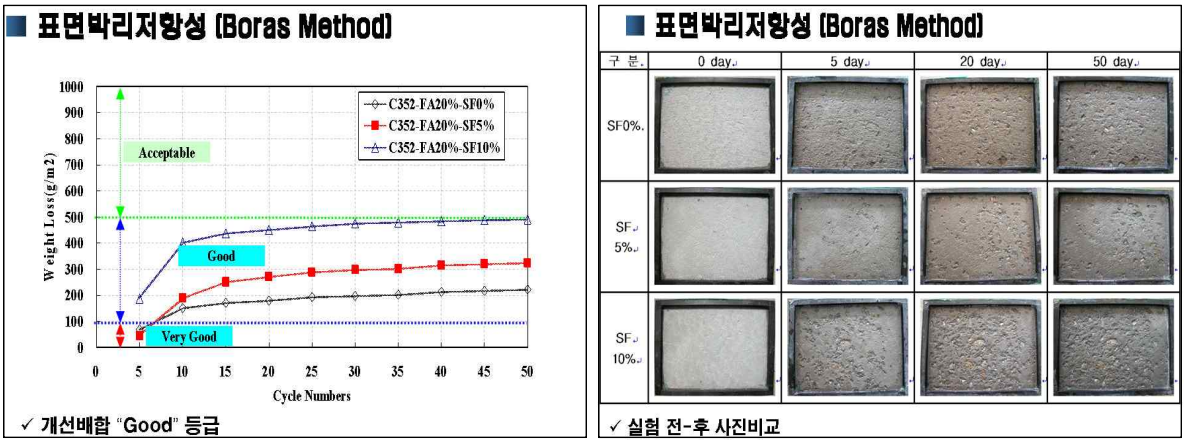


[그림 32] 투수저항성 및 내구성지수 평가결과

㉱ 콘크리트의 표면박리 저항성

황산, 염산, 염화칼슘에 대하여 중량손실 5% 이내의 결과를 나타내었고 표면박리 저

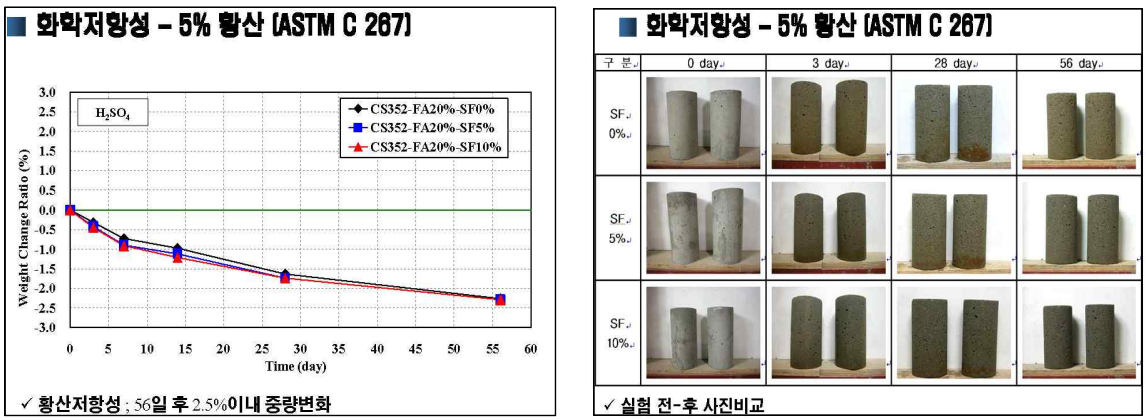
항성은 G등급 이상 확보되었다. 줄눈콘크리트 포장에서 발생하는 주요한 파손의 형태는 균열, 줄눈 결함, 표면 결함 및 기타 복합파손으로 구분된다. 표면박리 저항성 실험은 ASTM C 672 기준에 준하여 가로×세로 250×200㎟의 시험편을 제작하여 총 50-cycle 동안 실험을 실시하였다. 1㎡의 면적에 해당하는 박리량을 기준으로 표면박리 저항성을 평가한 결과, “Good” 등급을 만족하였다.



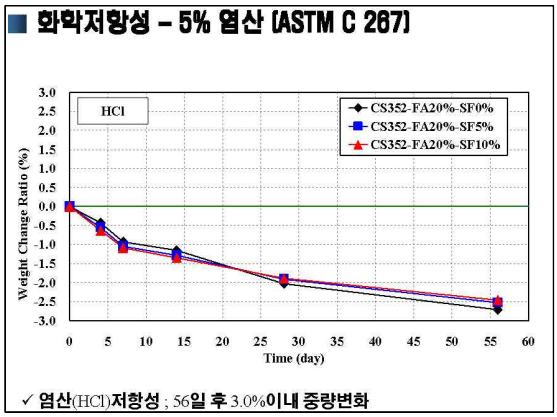
[그림 33] 표면박리저항성 평가결과

㉮ 콘크리트의 화학저항성

화학저항성 평가는 ASTM C 267 실험방법에 준하여 평가하였고, 28일 표준양생 후 56일간 5% 황산, 염산, 및 염화칼슘 수용액에 침지하여 중량손실을 평가하였다. [그림 34]에서 확인할 수 있듯 평가결과 황산, 염산 및 염화칼슘에 대한 중량손실률이 5% 이내로 측정되어 화학저항성이 우수하였다.

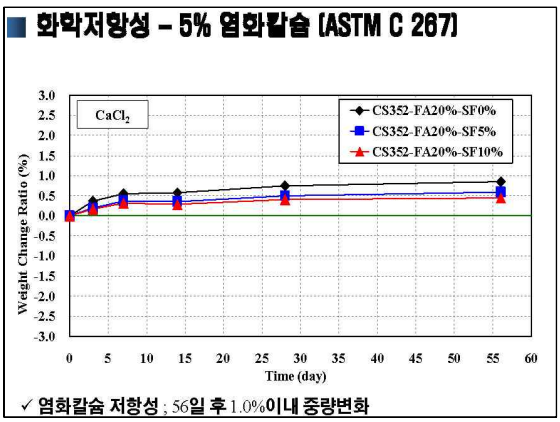


(a) 황산저항성 실험결과





(b) 염산저항성 실험결과



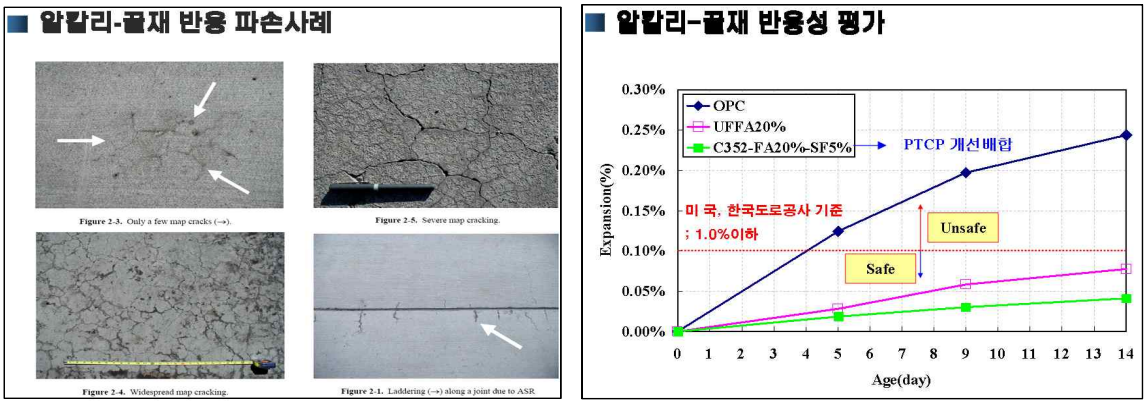


(c) 염화칼슘저항성 실험결과

[그림 34] 화학저항성 평가결과

㉥ 콘크리트의 알칼리-골재 반응성

촉진 모르타르 봉 시험법을 적용하여 알칼리-골재 반응성을 평가한 결과(반응성 골재 사용 ; 충남 보령-실트암), 1종 시멘트를 사용한 OPC의 팽창률은 0.25%로 평가되어 유해한 팽창이 발생한 반면, PTCP 콘크리트는 최대 팽창이 0.04%로 측정되었고, 초고분말도 플라이 애시(플라이 애시를 20% 치환하는 방법이 일반적으로 알칼리-골재 반응을 억제하기 위해 사용되고 있는 방법임)가 사용된 콘크리트 보다 팽창률이 적게 평가되어 알칼리-골재 반응에 대한 저항성이 매우 우수하였다.



[그림 35] 알칼리-골재 반응 사례와 반응성 평가결과

(2) 고내구성 초속경 및 초조강 콘크리트 개발

속경성 및 긴급공사에 적합한 초속경성분을 포함한 특수시멘트를 사용하여 고내구성 초속경 콘크리트(HRC: Hign-durability Rapid-set Concrete)를 적용하고, 초조강성 시멘트를 사용하여 고내구성 초조강 콘크리트(HUC: Hign-durability Ultra-early-strength Concrete)를 적용함으로서 신속한 교통개방 및 공사완료가 가능하도록 하였다. 본 연구에서 도출된 고내구성 초속경 콘크리트(HRC)의 배합 기준은 [표 17]과 같으며, 고내구성 초조강 콘크리트 (HUC)의 배합기준은 [표 18]과 같다.

[표 17] 고내구성 초속경 콘크리트 배합기준

구분	굵은골재 최대치수 (㎜)	슬럼프의 범위 (㎝)	공기량의 범위 (%)	단 위 량(kg/m³)					
				물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G	라텍스 L	고성능 AE감수제
HRC	25	15~22	3~6	120	360	916	761	54	-

[표 18] 고내구성 초조강 콘크리트 배합기준

구분	굵은골재 최대치수 (㎜)	슬럼프의 범위 (㎝)	공기량의 범위 (%)	단 위 량(kg/m³)					
				물 W	시멘트 C	잔골재 S	굵은골재 G	라텍스 L	고성능 AE감수제
HUC	25	15~22	3~6	143	428	528	1158	65	-

(3) 영업소 광장부 포장용 콘크리트 개발

㉮ 콘크리트 배합

영업소 광장부 PTCP 공법에 적용된 콘크리트는 목표슬럼프를 15cm로 설정하여 펌프카에 의한 콘크리트 공급과 데크피니셔에 의한 작업성이 용이하도록 하였다. 초기 재령에서 프리스트레스 도입에 필요한 압축강도가 발현되도록 목표 강도를 재령 1일에 7MPa, 3일에 21MPa로 하였으며, 재령 28일에서 고강도가 발현되도록 목표강도는 40MPa로 하였다. 콘크리트는 보통포틀랜드 시멘트에 플라이애시가 20% 혼합된 시멘트를 적용하여 알칼리-골재 반응에 의한 파손을 방지하고자 하였다. 콘크리트의 재료특성은 [표 19]에 나타내었다.

[표 19] 영업소 광장부 PTCP 콘크리트 배합 및 품질기준

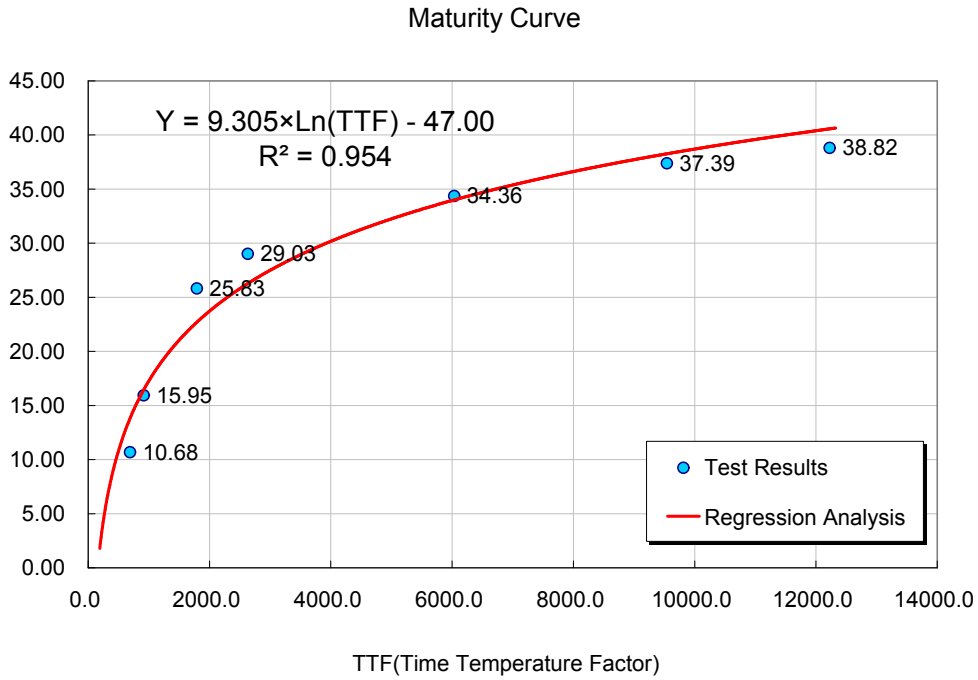
항 목		시험방법	단위	기준	시험결과	비고
콘크리트 특성	· 슬럼프	-	mm	150±30	180	
	· 공기량 범위	-	%	4~7	6.2	
	· 압축강도	KS F 2405	MPa	7	10.7@18hrs 16.0@24hrs	재령1일
	· 압축강도	KS F 2405	MPa	21	25.8@2days 29.0@3days	재령3일
	· 압축강도	KS F 2405	MPa	40	44.8	재령28일
	· 알칼리-골재 반응	ASTM C 1206	%	0.1%이하	0.065	재령28일

배합표	G_{max}	W/C	S/a	단위량(kg/㎥)						
				C	F.A	W	S	G	SP	AE
	25mm	0.36	0.40	386	96	173	635	993	C×0.6%	C×0.15%

㉯ Maturity 실험결과

본 현장에서 적용한 콘크리트는 초기재령에서 강도발현이 우수하고 하절기 대기온도가 높아 1차 긴장작업과 2차 긴장작업에 요구되는 압축강도가 초기재령에서 발현될 것으로 예상되었다. 콘크리트의 강도는 실내실험으로부터 Maturity Curve를 구하였고 시공현장의 종점부에 Maturity Meter를 설치하여 실시간 강도발현을 예측하였다. [그림 36]는 실내실험으로부터 계산된 Maturity 결과를 나타낸 것이다. 실험결과로부터 1차 긴장자업에 요구되는 7MPa의 강도는 TTF가 332 이상이고, 2차 긴장작업에 요구되는 21MPa의

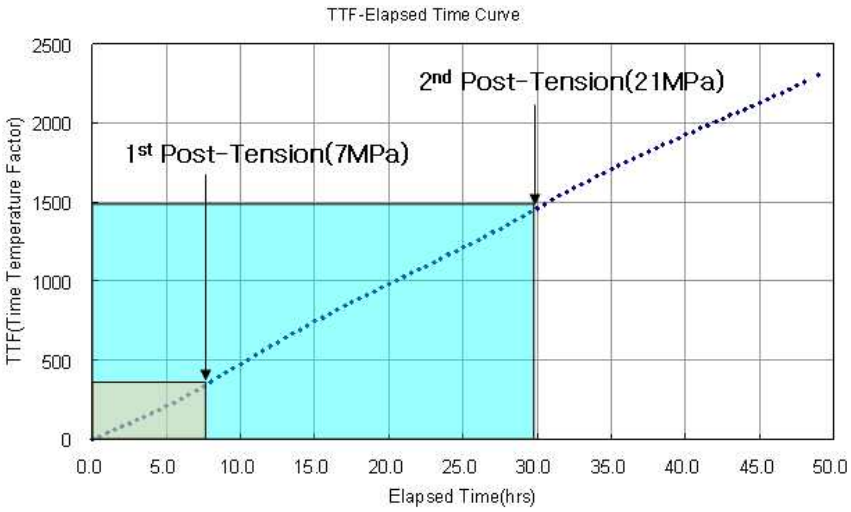
강도는 TTF가 1493 이상일때 발현되는 것으로 손쉽게 예측할 수 있다.



[그림 36] Maturity 실험결과

㈐ 긴장작업 결과

[그림 37]은 현장에 설치한 Maturity Meter로부터 기록된 시간경과에 따른 Maturity 값을 나타낸 것이다. 7MPa의 압축강도는 콘크리트 포설 후 7.5시간 경과 후 발현됨을 알 수 있으며, 21MPa의 압축강도는 대략 30시간 경과 후 발현됨을 알 수 있다. 1차의 긴장작업은 콘크리트 포설 후 12시간 후에 시작되었으며 이때 압축강도는 약 10MPa 이상 발현되었을 것으로 판단된다. 2차 긴장작업은 TTF가 1500에서 진행되었으며 압축강도는 21MPa이 상회할 시점으로 판단된다. [표 20]와 [표 21]은 종방향 및 횡방향 텐던의 긴장작업 결과를 나타낸 것이다. 설계신장량에 대한 긴장작업 후 신장량으로 계산한 프리스트레스 도입률은 종방향 텐던이 98.6%, 횡방향 텐던이 97.5%를 나타내어 우수한 결과를 보여주었다.



[그림 37] 현장에서 시간에 따른 Maturity 발현 특성

[표 20] 종방향 텐던의 긴장작업 결과

텐던 No.	설계긴장력		긴장작업 결과			
	설계 긴장력 (ton)	설계 신장량 (cm)	긴장전 강선의길이 (Lo)	긴장후 강선의길이 (L)	강선의 신장량 (L′)	프리스트레스 도입률 (%)
1†	21.244	356.1	516	872	356	100.0
2†	21.244	356.1	521	873	352	98.8
3‡	21.244	264.2	518	778	260	98.4
4†	21.244	356.1	545	901	356	100.0
5‡	21.244	264.2	512	773	261	98.8
6†	21.244	356.1	520	865	345	96.9
7†	21.244	356.1	521	874	353	99.1
8†	21.244	356.1	524	875	351	98.6
9‡	21.244	264.2	513	772	259	98.0
10†	21.244	356.1	524	872	348	97.7
11†	21.244	356.1	517	866	349	98.0
12‡	21.244	264.2	533	797	264	99.9
13†	21.244	356.1	523	879	356	100.0
14‡	21.244	264.2	526	788	262	99.2
15†	21.244	356.1	515	871	356	100.0
16†	21.244	356.1	618	955	337	94.6
17†	21.244	356.1	522	877	355	99.7
18†	21.244	356.1	517	873	356	100.0
19‡	21.244	264.2	518	774	256	96.9
20†	21.244	356.1	524	880	356	100.0
21‡	21.244	264.2	528	787	259	98.0
22†	21.244	356.1	532	883	351	98.6
23‡	21.244	264.2	541	801	260	98.4
24†	21.244	356.1	524	880	356	100.0
25†	21.244	356.1	529	884	355	99.7
26†	21.244	356.1	517	858	341	95.8
평균						98.6

주) † : 1구간 슬래브 연장 46.5m, ‡ : 2구간 슬래브 연장 34.5m

[표 21] 횡방향 텐던의 긴장작업 결과

텐던 No.	설계긴장력		긴장작업 결과			
	설계 긴장력 (ton)	설계 신장량 (cm)	긴장전 강선의길이 (Lo)	긴장후 강선의길이 (L)	강선의 신장량 (L′)	프리스트레스 도입률 (%)
1†	21.244	118.7	684	796	112	94.4
2†	21.244	118.7	594	712	118	99.4
3†	21.244	118.7	674	786	112	94.4
4†	21.244	118.7	601	715	114	96.0
5†	21.244	118.7	593	709	116	97.7
6†	21.244	118.7	552	670	118	99.4
7†	21.244	118.7	823	938	115	96.9
8†	21.244	118.7	572	690	118	99.4
9†	21.244	118.7	664	781	117	98.6
10†	21.244	118.7	655	770	115	96.9
11†	21.244	118.7	567	681	114	96.0
12†	21.244	118.7	604	722	118	99.4
13†	21.244	118.7	750	867	117	98.6
14†	21.244	118.7	550	664	114	96.0
15‡	21.244	80.4	719	798	79	98.2
16‡	21.244	80.4	658	737	79	98.2
17‡	21.244	80.4	640	720	80	99.5
18‡	21.244	80.4	502	580	78	97.0
19‡	21.244	80.4	635	712	77	95.8
평균					105.8	97.5

주) † : 1구간 슬래브 폭 15.5m, ‡ : 2구간 슬래브 폭 10.5m

(4) 경부고속도로 천안 영업소 포장 시공

PTCP 공법을 경부선 천안영업소 축증차로 이설공사에 적용하였다. 그리고 2010.8.19.부터 2010.10.27.까지 약 2개월에 걸쳐 시공하였으며 이에 대한 시공관련 사진들을 부록 2에 첨부하였다.

(5) 냉정-부산 구간 서부산 영업소 포장 설계(2012년 시공) 검토

㉮ 개 요

냉정-부산 고속도로 서부산 영업소는 당초 철근콘크리트 및 무근콘크리트로 설계되었으나 무근콘크리트 구간에 대해 아스팔트로 변경(안) 검토되면서 검토에서 누락된 포스

트텐션 콘크리트 포장공법에 대한 추가적인 검토를 수행하여 포장형식의 적용방안을 수립하고자 하였다. 추가검토를 실시하여 본 공법을 적용하고자 한 이유는 서부산영업소는 연약지반 심도차가 크고 부등침하 예상으로 인한 포장체의 조기 파손이 우려되어 아스팔트로 변경안이 검토되었으나 고강도, 고내구성 콘크리트가 사용되고 프리스트레스가 도입되어 내구성 및 공용수명이 증대되고 하중에 대한 저항성이 우수한 포스트텐션 콘크리트 포장 공법을 추가적으로 검토하여 적정 포장형식을 제시하고자 하였다. 이에 따라 서부산영업소 광장부 포장형식에 대한 추가 검토내용은 [표 22]과 같이 나타났다.

영업소 포장에서 대부분의 파손유형은 종방향 및 횡방향 줄눈에서의 파손이다. 따라서 영업소 포장에 PTCP를 적용하여 줄눈의 수를 획기적으로 줄임으로써 영업소 포장의 고성능 고내구성을 가져올 수 있을 것으로 사료된다.

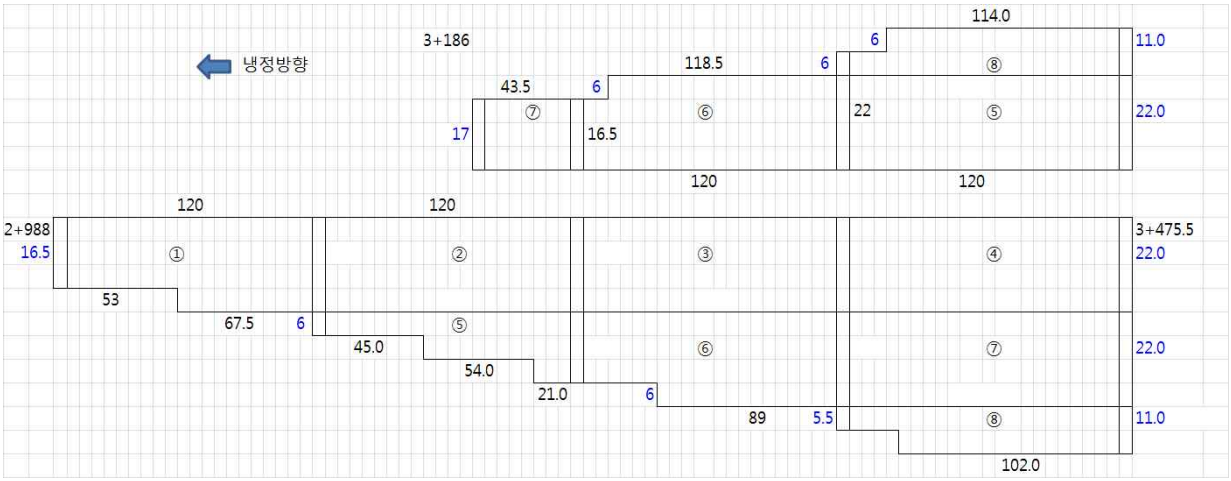
[표 22] 공법 검토안

구분	당초설계	변경검토안	추가검토안
포장공법	무근콘크리트	아스팔트	프리스트레스 콘크리트
공법개요	콘크리트 포장 슬래브에 줄눈을 설치하여 균열발생을 유도	교통하중이 표층과 보조기층, 노상에 전달되며 지지	프리스트레스를 도입하여 하중에 대한 저항성을 증대시킨 공법
장점	시공경험 많음 부분보수 용이 초기공사비 유리	소음 양호 승차감 양호 부분보수 용이 시공경험 많음	**사하중 감소로 인한 안정.** 고강도 콘크리트 적용으로 인장강도 증대 삼성분계 콘크리트 적용으로 장기내구성 우수 조기강도 증진으로 시공기간 단축 및 조기교통개방 가능 균열저항성 우수 가로수축줄눈 감소 포장두께 감소 설계수명 증대 유지보수비 최소 생애주기비용 유리
단점	조기파손 우려 스폴링 파손 우려 줄눈부 파손으로 평탄성 불리 유지보수비	초기공사비 불리 소성변형 발생 정지하중 및 고온에 취약 잦은 덧씌우기 유지관리비 과다 생애주기비용 불리	초기공사비 불리 지반침하시 파손에 대한 보수비용 불리
검토안			●

㈏ 서부산 영업소 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP) 설계 단면

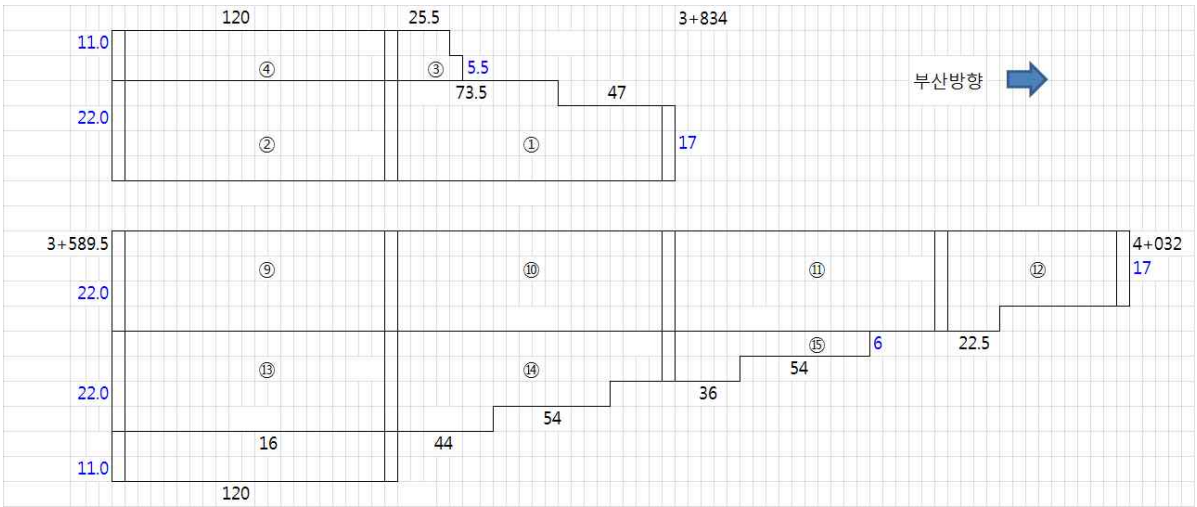
서부산 영업소 PTCP 설계 단면은 다음과 같다.

가) 냉정방향 구간



[그림 38] 냉정방향 구간 설계도

나) 부산방향 구간



[그림 39] 부산방향 구간 설계도

설계두께(15cm, 20cm)별 응력기준 포장 설계(종방향, 회방향 설계)를 통하여 서부산 영업소 포장의 적정 PTCP 포장 설계를 제시하였으며 설계도서는 부록 5 에 첨부하였다.

(6) 조인트 시스템 개발

현재 외국에서 공용중인 포스트텐션 콘크리트 포장의 소음과 승차감 문제는 조인트 파손이 원인으로 이를 보수하기 위한 유지관리가 매우 중요하다. 따라서 기존의 조인트가 가지고 있는 한계성을 극복하기 위해 고내구성 조인트 시스템을 개발하여 조인트에서의 파손과 유지보수로 인한 예산의 낭비를 방지하고 소음과 승차감을 향상시키고자 하였으며, 최소 40년 이상의 서비스기간 동안 공용성을 확보할 수 있도록 개발하였다.

㉮ 조인트 형식

조인트 형식은 미시시피에서 적용하였던 팽창조인트의 사용을 시공여건 및 현장여건에 따라 선택적으로 적용할 수 있도록 하며 장기공용기간 내구성 확보를 위해서 펜실베니아 및 텍사스의 아모조인트를 개선한 형식으로 설계하였다. 아모조인트는 방수기능 및 소음흡수 기능이 유지되도록 하여 조인트 내부로의 우수나 염화물 침투가 방지되도록 EVA 수지를 내부에 설치한 후 우레탄 실런트를 코팅하여 2중의 방수기능 및 자외선 차단과 소음흡수 기능을 유지하도록 하였다.



(a) 조인트 설계 형상 (b) 조인트 시공

[그림 40] 조인트 설계와 시공

㉯ 조인트 시공

조인트 시공에서 PTCP 슬래브와의 평탄성 확보여부는 승차감에 영향을 미칠 수 있다. 조인트를 정밀시공하기 위하여 시공 시 조인트의 높이조절이 가능하여 평탄성이 양호하도록 하였다. [그림 40(b)]는 조인트 시공 예를 보인 것으로 조인트 설치시 좌,우 PTCP 슬래브의 평탄성이 확보되도록 장치를 고안하였으며 콘크리트 포설시 스크리드를 사용하여 정밀시공이 가능하도록 하였다. 또한 조인트 시공 시에는 조인트 하부에 흡음재를 추가로 설치하여 2중 소음흡수가 가능하도록 하였다.

(7) 슬립폼 페이버에 의한 시공기술 개발

㉮ 시공방법

PTCP 시공은 포켓을 이용한 시공방식과 갭슬래브를 이용한 시공방식으로 구분할 수 있다. 수차례의 시험시공을 통하여 각 시공방식에 대한 시공성, 경제성 등을 분석하여 개선된 갭슬래브 시공방식을 개발하였다. [그림 41]은 텍사스의 시공 방식과 개발기술의 시공 방식을 비교하여 나타낸 것이다.



(a) 포켓 시공 방식(텍사스 2008)



(b) 갭슬래브 시공 방식(개발기술)

[그림 41] 텍사스 시공방식과 개발기술의 시공 방식 비교

㉯ 시공성 향상

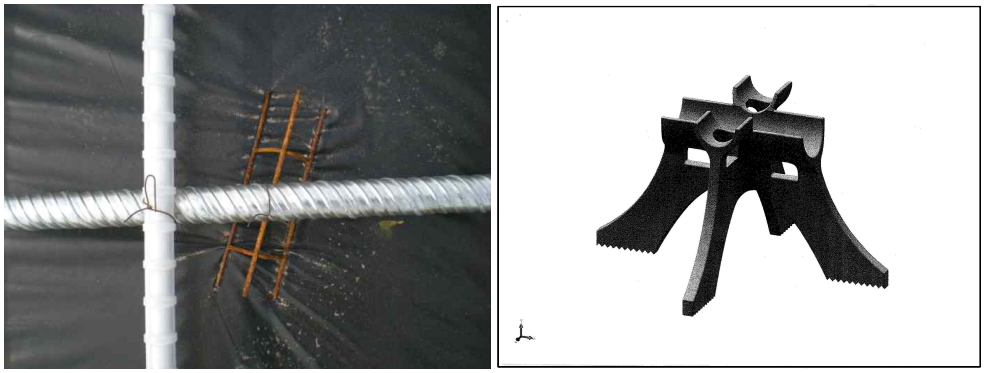
본 공법의 일단은 횡방향 정착구 설치를 위해 사이드 폼을 사용하며 타단은 슬립 폼을 사용하여 시공하는 방안을 적용하였다. 또한 일단의 사이드 폼은 길이 3m의 강재 거푸집을 사용하며 장비의 포설 후 즉시 제거하여 다음 슬래브의 시공에 사용하도록 하는 방안을 적용하였다.

㉰ 횡방향 보조철근의 적용

PTCP 슬래브 내에 설치되는 강선의 설계위치를 확보하고 강선의 처짐이나 변형을 방지하도록 하기 위해 사용되는 횡방향 보조철근은 가장 경제적이면서 효율성이 확보되도록 다양한 간격(1m, 0.75m, 0.6m)으로 나누어 실물시험을 통해 평가하였다. 그 결과 최적의 횡방향 보조철근 간격으로 0.75m가 결정되었으며, 콘크리트의 슬럼프가 클 경우 1m의 간격도 적용이 가능한 것으로 분석되었다.

㉲ 스페이서 개발

본 기술은 포스트텐션이 공법의 핵심이므로 정확한 포스트텐션에 필요한 강선의 배치 정밀도를 향상시키기 위하여 경제적이고 시공성이 양호한 스페이서를 개발하였다. 개발된 스페이서는 녹 발생이 없고 강선의 변위를 방지하여 설계위치에 고정할 수 있도록 제작하였으며, 강선의 조립시간을 단축하여 시공성 향상에 기여할 수 있도록 개발된 제품이다.



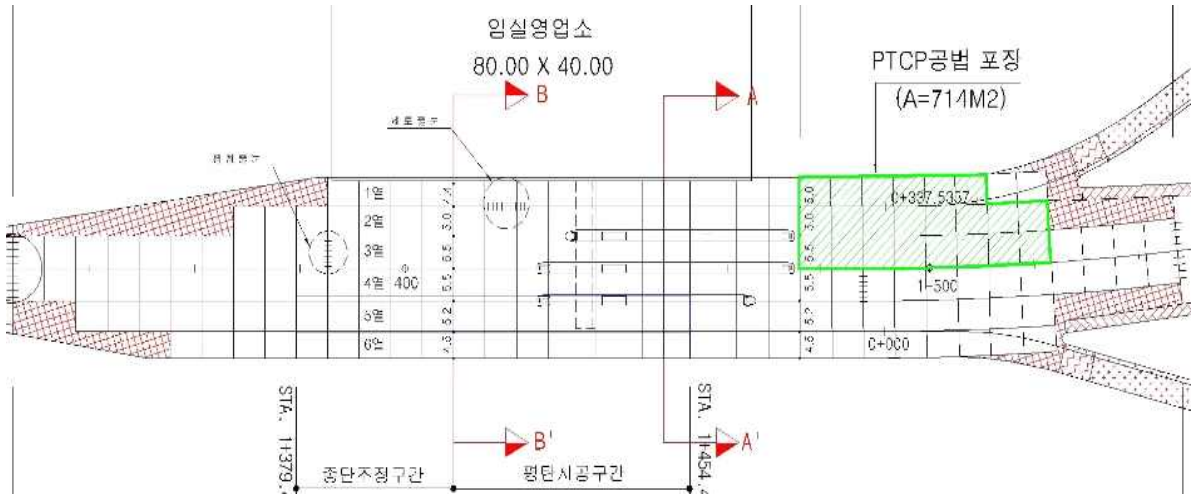
(a) 외국의 스페이서(텍사스 2008) (b) 개발된 스페이서

[그림 42] 스페이서 비교

(8) 데크피니셔에 의한 시공기술 개발

㉮ 시공개요

임실영업소 광장부 포장은 국내에서는 처음으로 고속도로 영업소 광장부에 PTCP 공법을 적용한 시공사례라 할 수 있다. 시공현장은 한국도로공사 전주-남원사업단 6공구로서 주요 시공장비는 데크피니셔, 펌프카, 유압잭 및 유압펌프가 사용되고, 자재는 플라이애시 혼합시멘트 약 50톤과 PS강연선 2톤 정도가 투입되었다. [그림 43]에 나타낸 임실영업소 PTCP 시공구간은 슬래브 연장이 46.5m, 폭이 15.5m의 면적이며 종단구배가 변화되는 부분(연장 12m, 폭 5.0m)는 시공구간에서 제외하였다. [그림 44]은 강연선 및 철근 배근도를 나타낸 것이다.



[그림 43] 임실영업소 광장부 PTCP 시공 평면도



[그림 44] 임실영업소 PS강연선 및 철근 배근도

㈏ 시공방법

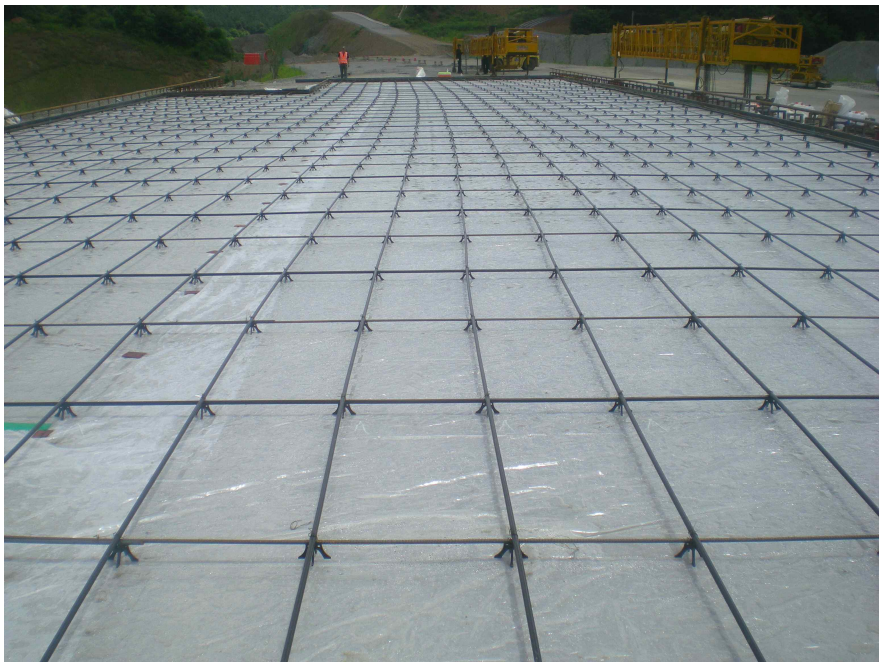
영업소 광장부 PTCP 시공은 다차로를 동시 전면 포설하기 때문에 본선포장에서 사용되는 슬립폼페이버나 사이드스프레더가 사용되지 않고 펌프카와 데크피니셔의 장비조합으로 시공된다. 콘크리트의 공급은 B/P에서 생산된 콘크리트를 현장에 운반하여 펌프카를 이용하여 공급되며 포장 슬래브의 연장이 작기 때문에 일단 인장방식을 적용하여 시공하였다.

㉰ 임실영업소 시공기술 내용

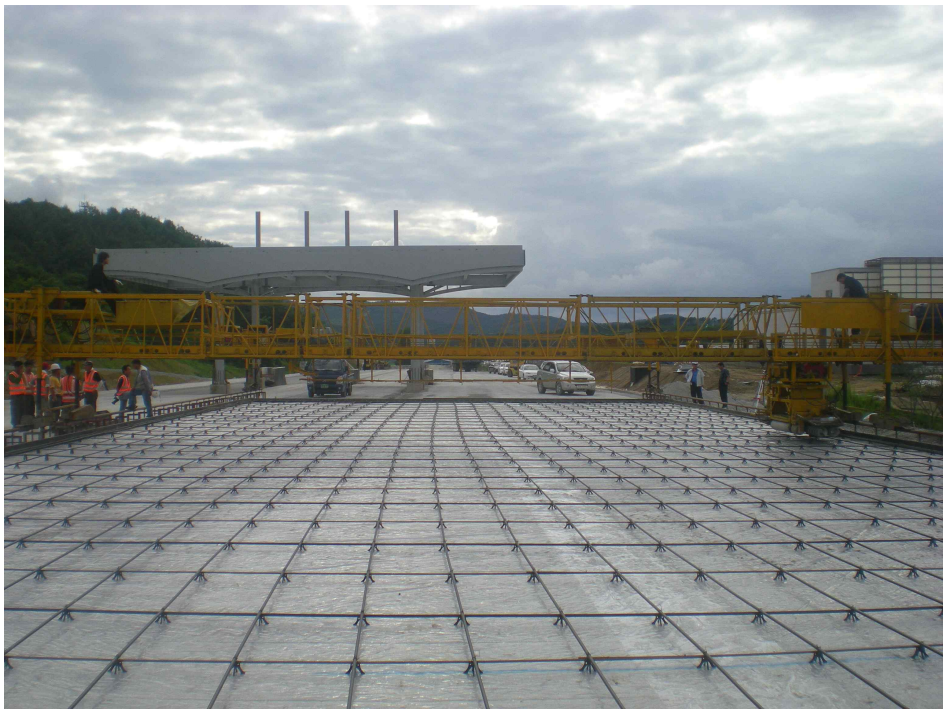
[그림 45]~[그림 50]는 임실영업소 광장부 포장에 적용된 PTCP 공법의 주요 시공과정을 나타낸 것이다. 시공대상 위치에 먼저 분리막과 사이드폼을 설치한 후 PS강연선과 보조철근이 설치된다. 평탄성 확보를 위하여 정밀측량을 실시한 후 레일과 데크피니셔를 설치한다. 모든 설치작업이 완료되면 펌프카를 이용하여 콘크리트를 공급하면서 데크피니셔에 의한 콘크리트 포장과 양생제를 살포하여 콘크리트 포설작업을 완료한다. 본 현장에서 적용한 콘크리트는 초기재령에서 강도발현이 우수하도록 설계되었고 하절기 대기온도가 높아 1차 인장작업에 필요한 7MPa의 강도는 12시간 이내에 발현되었다. 2차 인장작업에 요구되는 21MPa의 압축강도는 콘크리트 포설 후 약 36시간에 발현되었다.



[그림 45] PE쉬트 및 사이드폼 설치



[그림 46] PS강연선 및 보조철근 설치



[그림 47] 테크피니셔 설치



[그림 48] 콘크리트 포설



[그림 49] 콘크리트 양생



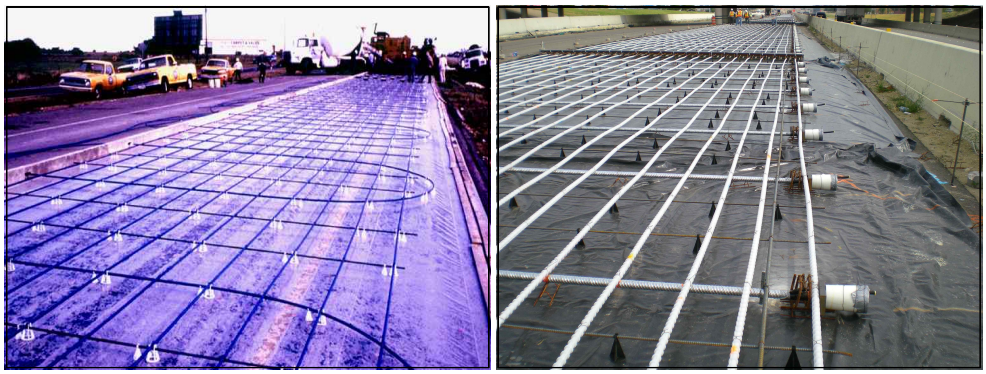
[그림 50] 인장작업

(9) 스트레싱 시공기술 개발

종래 해외에서 사용하여 왔던 종방향 프리스트레싱 방법은 메인 슬래브 타설 후 인장작업에 필요한 공간 때문에 갭슬래브가 필요하고, 갭슬래브는 철근을 보강한 포장으로 PTCP 슬래브에 비하여 훨씬 더 두꺼운 포장으로 구성하였다. 이는 시공상 번거로움 특히 단면변화 구간에 대한 시공성 저하 및 추가적인 시간과 노력이 필요하였다. 또한 최근에 시공되었던 텍사스의 방법은 스트레싱을 위하여 갭슬래브 대신 포켓을 만드는데 포켓 부분의 모서리에서 균열이 발생하는 등 문제점이 있었다.

또한 해외의 방법은 횡방향 스트레싱을 고려하지 않아 종방향으로의 균열이 발생하는 문제점을 가지고 있었으며, 텍사스에서는 횡방향 텐던을 루프형태로 배치하여 스트레싱하는 방법을 시도하였으나 마찰로 인한 프리스트레싱의 손실과 스트레싱을 가하기 위한 추가적인 포켓을 만들어 시도 하였지만 이 역시 시공상의 번거로움과 차로폭 확장 시 이 부분을 효과적으로 연결해 나갈 수 있는 방법이 없는 한계성을 가지고 있었다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 스트레싱 방법을 개발하여 차로 폭 확장 시 별도의 노력 없이 콘크리트 슬래브를 시공할 수 있는 효율적인 방법을 개발하였다. 또한 종방향 스트레싱을 효율적으로 수행하기 위하여 프리스트레스의 손실을 최소화하기 위한 대안으로 양단긴장방식이 가능하도록 하고 갭슬래브 내에 횡방향 텐던을 배치, 철근을 보강하여 단면변화

가 없도록 하였다.



(a) 루프형 횡방향 텐던 배치(1985)　　(b) 횡방향 텐던 시공(2008)

[그림 51] 텍사스의 횡방향 텐던 배치 방식



(a) 종방향 및 횡방향 강선 배치　　(b) 인장작업

[그림 52] 개발기술(갭슬래브 시공 방식)의 강선배치와 인장작업

(10) 과적차량 단속구간 시공기술

㉮ 주요 시공결과

본 연구에서는 과적차량 무인단속시스템 포장성능 향상과 WIM 센서의 정밀도, 정확도 및 내구성을 향상시키기 위해 순천국도유지사무소 관내 4개소에 PTCP 공법을 적용하여 시공였다. 주요 시공결과는 [표 23]과 같다. 서면검문소(곡성방향)는 당초 초조강 콘크리트로 설계되었으나, 신속한 교통개방을 위해 설계변경 증액 없이 초속경 콘크리트로 변경하여 시공하였다. 송기검문소(순천방향)의 바닥면 정지작업은 당초 설계에 의하여 시공하였으나, 이를 제외한 3개 현장은 바닥면 상태를 양호하게하여 센서의 영향이 없도록 초속경 시멘트 페이스트를 도포하여 바닥면 평탄성을 확보하도록 하였다. 시방기준에 의

하여 평탄성을 측정한 결과 모두 시방기준 16cm/km 이하를 나타내 양호한 결과를 나타내었다. 인장작업 결과는 4개현장 평균 98%이상을 나타내어 매우 우수한 결과를 나타내었다. 콘크리트의 압축강도는 현장에서 제작된 공시체를 품질시험 기관에 의뢰하여 시험하였다. 재령 1일의 압축강도는 [표 23]에 나타낸 바와 같이 우수한 초기 강도발현 특성을 나타내었으며, 재령 28일에서도 초조강 콘크리트를 제외하고는 40MPa를 훨씬 상회하는 결과를 나타내었다. 초조강 콘크리트의 경우 28일의 강도가 40MPa 이하를 나타낸 원인은 공시체를 시험의뢰하는 과정에서 초기 보온박스 공간이 부족하여 양생이 미숙한 공시체를 28일에 시험하였기 때문으로 파악되었다.

[표 23] 주요 시공결과

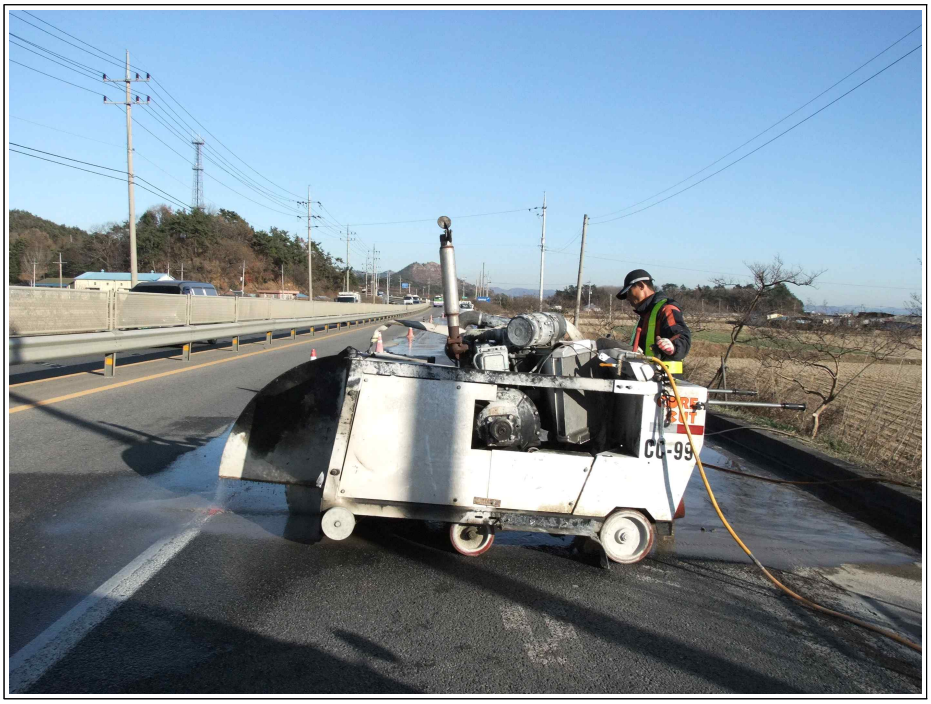
구분	시공규모	콘크리트	바닥면 정지작업	평탄성 (PRI: cm/km)	인장작업 결과 (PS도입률: %)	압축강도 (MPa)
1. 송기검문소 (순천방향)	연장: L=80m 폭: W=3.50m 두께: T=15cm	초속경 콘크리트	절삭면 정지작업	2.5	99.6%	1일:30.0 7일:36.1 14일:38.8 28일:46.1
2. 송기검문소 (보성방향)	연장: L=80m 폭: W=3.50m 두께: T=20cm	초조강 콘크리트	레벨링 페이스트 도포	7.5	99.6%	1일:25.8 7일:29.5 14일:32.6 28일:37.3
3. 오미검문소 (구례방향)	연장: L=80m 폭: W=3.15m 두께: T=15cm	초속경 콘크리트	레벨링 페이스트 도포	3.8	97.3%	1일:30.6 7일:37.1 14일:39.0 28일:47.3
4. 서면검문소 (곡성방향)	연장: L=80m 폭: W=3.65m 두께: T=15cm	초속경 콘크리트	레벨링 페이스트 도포	5.0	97.0%	1일:28.2 7일:35.9 14일:38.7 28일:45.6

㈏ 주요 시공기술 내용

전체 4개의 시공현장 중 송기검문소(순천방향), 오미검문소(구례방향) 및 서면검문소(곡성방향)는 신속한 교통개방이 가능하도록 초속경 콘크리트로 시공하였으며, 송기검문소(보성방향)는 초조강 콘크리트로 시공하였다. 다음은 시공과정별 상세한 시공사항을 기술하였다.

㈎ 아스팔트 노면 커팅

기존 아스팔트를 노면파쇄기에 의하여 절삭할 경우 절삭부 측면 상태가 불량하여 불필요한 마찰력을 유발할 수 있다. 이러한 현상을 방지하기 위하여 본 시공에 앞서 대형 커터기를 이용하여 1차와 2차로 나누어 노면 커팅을 실시하였다. 1차와 2차로 나누어 작업한 이유는 1차의 작업으로 절삭깊이를 정확히 확보하기 어려우므로 1차 작업시 5cm를 커팅하고 2차 작업시 10cm를 작업하여 설계 절삭깊이를 확보하였다. 아스팔트 노면 커팅 작업은 본 공정과 별도로 구분하여 작업하였으며, 본 공사와 병행할 경우 과도한 작업시간이 소요되기 때문에 작업시간 지연으로 인한 교통정체 현상을 최소화하도록 하였기 때문이다. [그림 53]는 작업공정을 나타낸 것이다.



[그림 53] 아스팔트 노면 커팅

㈏ 기존 아스팔트 포장 절삭

[그림 54]은 노면파쇄기에 의한 기존 아스팔트 절삭 공정을 나타낸 것이다. 초속경 콘크리트에 의해 시공된 송기검문소(순천방향), 오미검문소(구례방향) 및 서면검문소(곡성방향)는 15cm로 절삭하여 시공되었고, 초조강 콘크리트로 시공되는 송기검문소(보성방향)는 20cm로 절삭하여 시공되었다. 기존 아스팔트 포장의 절삭작업은 보통 1시간 이내에 완료되나 본 시범사업의 포장공사는 바닥면 상태를 양호하게 하여, 노면 절삭 후 마찰력에 의한 인장응력이 최소화 되도록 세심한 작업을 수행한 결과 다소 공사시간이 초과되기도 하였다.



[그림 54] 노면파쇄기에 의한 아스팔트 절삭

㈐ 진공청소 및 절삭면 표건상태 준비작업

아스팔트 노면절삭 후 절삭면의 잔여물질을 깨끗한 상태로 하기위하여 진공흡입트럭을 이용한 청소작업을 실시하였다. 송기검문소(순천방향) 공사에서는 설계에 포함되지 않아 진공청소와 레벨링 페이스트 시공이 시행되지 않았으나, 송기검문소(보성방향), 오미검문소(구례방향) 및 서면검문소(곡성방향)은 진공흡입 청소와 레벨링 페이스트 시공을 시행하였다.

진공흡입 청소 후 절삭면은 수분이 부분적으로 존재한다. 레벨링 페이스트의 부착력을 높여 포장변형을 방지하기 위해서는 수분을 완전히 제거하기 위한 절삭면 건조작업을

수행하였다. 이러한 공정은 전체 작업시간이 다소 지연되는 원인이 되었다.

㈑ 레벨링 페이스트 시공

[그림 55]는 이동식 믹서트럭에 의하여 초속경 VES시멘트와 물을 혼합하여 페이스트를 생산한 후 레벨링 페이스트를 포설하는 공정을 나타낸 것이다. 전술한 바와 같이 당초 설계에는 본 공정이 계획되지 않았으나 바닥면 상태를 PTCP 포장과의 마찰저항이 최소화 되도록하고 PC강선이 정확한 설계위치에 시공되도록하기 위하여 시공하였다. 본 공정은 1시간 이내의 작업으로 바닥면 상태를 매우 우수하게 시공하는데 큰 효과를 나타내었다. 본 공정의 추가로 대략 1시간 정도의 작업시간이 추가로 소요되었다.



[그림 55] 버럭처리



[그림 56] 고압 살수 진공흡입 청소



[그림 57] 표면건조 포화상태



[그림 58] 레벨링 시멘트페이스트 포설

㈅ 횡방향 보조철근 설치 및 PS강연선 설치

PTCP 슬래브와 아스팔트 기층과의 마찰을 최소화하기 위하여 PE시트를 설치하였다. PE시트는 절삭 측면을 포함하여 설치하였다. [그림 59]는 PE시트 설치공정을 나타낸 것이다.

PE시트 설치 후 종방향으로 PC강선을 설치하기 위하여 횡방향의 보조철근이 선 시공된다. 횡방향의 보조철근의 고정과 콘크리트 포설시 강선의 설계위치를 고정하기 위하여 횡방향 보조철근의 양단은 종방향의 보조철근으로 결속된다. 또한 WIM 센서가 설치되는 구간(17m)은 철근이 센서에 영향을 미칠수 있어 플라스틱으로 특수 제작된 환봉이 사용되었다. [그림 60]은 횡방향 보조철근 시공과정을 나타낸 것이다.

횡방향 보조철근 설치 후 종방향의 PS강연선이 설치된다. 도로의 폭과 포장두께에 따라 종방향의 설치간격을 설계하여 시공하였고, 그 현황은 다음과 같다.

[표 24] 종방향 PS강연선 설치간격

구 분	송기(순천)	송기(보성)	오미(구례)	서면(곡성)
도로 폭	3.5m	3.65	3.15m	3.65m
포장두께	15cm	20cm	15cm	15cm
PS강연선개수	6	7	5	6
간격	60cm	50cm	60cm	60cm



[그림 59] 분리막 설치



[그림 60] 횡방향 보조철근 설치



[그림 61] PS강연선 설치

㈐ 콘크리트 생산 및 포설

데크피니셔 설치작업은 PS강연선 설치와 병행하였다. PS강연선의 설치작업 시 평탄성 확보를 양호하게 하기 위하여 레벨측량을 실시한 후 측량성과에 따라 데크피니셔 레일을 설치하였다.

초속경 및 초조강 콘크리트는 가사시간이 짧아 일반 레미콘 공장에서의 생산 및 운반이 불가능하다. 이러한 특수 콘크리트는 현장에서 이동식믹서에 의해 콘크리트를 생산하여 포설한다. [그림 62]은 이동식믹서에 의한 콘크리트 생산과 포설과정을 나타낸 것이다. 시공 중 콘크리트는 중단 없이 연속적으로 포설이 이루어져야 하며, 이동식 믹서가 콘크리트를 배출한 후 다른 믹서가 투입될 경우에는 부득이 1~2분정도 콘크리트가 중단되는 경우가 있었으나 이러한 경우 이음부의 콘크리트를 충분히 다짐하였다.



[그림 62] 데크피니셔 설치



[그림 63] 콘크리트 생산 및 포설

㈅ 타이닝, 양생제 살포, 양생

초속경 및 초조강 콘크리트는 가사시간이 매우 짧아 일반적으로 지연제를 이용하여 작업시간을 조절한다. 과다한 지연제의 사용은 콘크리트의 강도발현을 지연시키기 때문에 대기온도를 고려하여 적절한 지연제의 양을 조절하여 사용하였다. 또한 강한바람과 직사광선에 노출될 경우는 콘크리트의 표면이 급속하게 건조하여 소성수축 균열이 발생할 수 있어 콘크리트 포설 직후 양생제를 도포하였다. [그림 64]과 [그림 65]은 각각 타이닝 작업과 양생제 살포를 나타낸 것이다.



[그림 64] 타이닝



[그림 65] 양생제 살포

본 공사시 대기온도가 낮은 관계로 보온양생이 필요하다고 판단하여 4중 보온양생을 실시하였다. 보온양생은 1차 양생포, 2차 버블시트, 3차 칼라양생포 및 4차 천막을 설치하여 충분한 보온양생을 실시하였다. 이러한 보온양생 효과는 매우 적절하여 양생지연으로

인한 공사의 작업지연은 크게 나타나지 않았다. 다만 일반적인 초속경 콘크리트의 실용강도(21MPa)가 발현되는 시간은 3시간 전후이며, 초조강 콘크리트는 24시간 전후이나 시공당시 대기온도가 낮아 초속경 콘크리트는 1시간 정도의 강도발현이 늦은 것으로 나타났으며, 초조강 콘크리트는 12시간 정도 양생시간이 추가로 소요되었다.



[그림 66] 보온양생

㈐ 인장작업

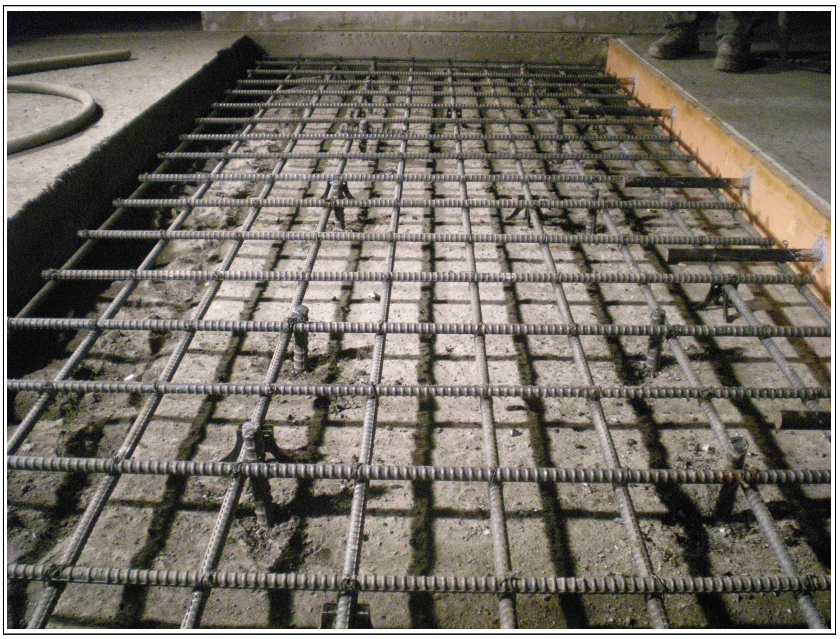
인장작업은 작업이 휴대와 운반이 간편한 포터블 유압잭과 펌프를 이용하여 수행하였다. 인장작업은 1차와 2차로 나누어 인장작업을 수행하였다. 송기검문소(순천방향)의 인장작업시 유압잭이 콘크리트 단면과 일치하지 않아 재인장을 실시한 경우를 제외하고는 전반적으로 인장작업은 양호하게 시행되어 프리스트레스 도입률도 우수하게 나타났다.



[그림 67] 인장작업

㈜ 갭슬래브 시공

인장작업 완료 후 인장작업 공간은 철근으로 보강하고 앵커를 설치하여 차량하중에 의한 갭슬래브가 미소하게 움직이는 것을 방지하는 역할을 한다. 갭슬래브내에 보강된 철근은 충분한 양의 철근으로 보강됨으로서 외력에 저항하도록 설계되었으며, 철근작업 조립은 인장작업시 병행하여 신속하게 마무리되도록 하였다. 이 부분의 작업은 다웰바 및 신축이음재(스티로폼)의 설치작업과 함께 병행되었으며, 수작업으로 인하여 작업시간이 예상외로 추가되었다. 추후 이 부분의 시공은 공정시간 단축이 이루어지도록 시공개선이 이루어져야 할 것으로 사료된다. [그림 68]는 갭슬래브내에 배근된 철근과 앵커를 나타낸 것이다.



[그림 68] 갭슬래브 앵커설치 및 철근조립

갭슬래브의 철근과 앵커를 설치한 후 초속경 콘크리트를 포설하였다. 갭슬래브는 PTCP 슬래브가 초속경 콘크리트나 초조강 콘크리트로 시공된것과 관계없이 신속한 양생과 교통개방을 위해 4개 현장 모두 초속경 콘크리트로 시공하였다. [그림 69]는 갭슬래브 콘크리트 포설 공정을 나타낸 것이다.



[그림 69] 갭슬래브 콘크리트 포설

㈐ 공사완료(교통개방)

갭슬래브의 콘크리트가 실용강도(21MPa 이상)가 발현되면 신속히 교통안전시설물을 제거하여 교통을 개방함으로서 공사를 완료하였다. [그림 70]는 공사완료 후 현장전경을 나타낸 것이다.



[그림 70] 시공완료

(12) 순천시공구간 DCP 실험

㉮ 개요

- 순천국도 무인과적차량 단속구간에 기 시공된 PTCP 포장의 DCP 시험을 통하여 포장처짐과 지지력과의 상관성을 분석하고자 하였다.

- 시험결과는 경희대에서 구조해석의 입력변수로 활용하여 구조검토 수행 후 발주처 및 관계기관에 설명하고자 하였다.

- 향후 PTCP 설계시 포장 하부지반에 대한 설계요소 적용 방안 및 향후 조치계획을 수립하고자 하였다.

㉯ 시험 결과

순천국도 PTCP 현장의 포장하부 지지력을 파악하기 위하여 DCP 시험을 수행한 결과

아래와 같은 결과가 분석되었으며 시험에 대한 전체 내용은 부록 3에 첨부하였다.

1) 송기(순천방향)검문소 시험결과 보조기층의 Modulus가 크게 나타나 포장하부의 지지력이 양호한 것으로 나타났다.

2) 서면검문소의 시험결과는 송기현장에 비하여 관입량이 크게 나타나 지지력 불량에 의한 PTCP 슬래브의 처짐이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

3) 오미검문소의 시험결과는 PTCP 슬래브의 노견에서 관입량이 매우 크게 나타나므로 지지력이 매우 불량한 것으로 판단할 수 있으며, 하동방향의 아스팔트 포장에서 시험한 결과는 서면검문소와 송기검문소의 대략 중간정도의 관입량을 나타내었다.

(13) 여주-양평간 고속도로 교량 접속슬래브 PTCP 시공

여주-양평간 고속도로 교량 접속글래브에 PTCP를 적용하였으며, 2010.5.27.부터 2010.6.17.까지 시공을 실시하였으며 접속슬래브에 대한 PTCP 공법 적용하였으며 접속슬래브 길이는 9m 이고 인장부 주철근 피복은 100mm 그리고 중앙부 강선 피복은 80mm로 설계하였으며 마지막으로 단ㄴ부강선위치는 단면중심에 설치하였다. 이에 대한 자세한 설계 계산서는 부록 4에 첨부하였다.

(14) 목포-광양 본선 시공 설계

㉮ 개요

PTCP 공법을 적용하기 위하여 아래 [표 25]와 같이 연구를 진행 하였으며 이를 통해 목포-광양 구간에 2.1km 구간에 대하여 시공을 하게 되었으며 이를 위하여 PTCP 설계를 검토하였다. 그러나 PTCP 공법이 설계단계에 반영되지 못하고 기 발주된 JCP공법을 변경하여 적용하는 것 이므로 본선의 일정구간을 시범 적용하는 수준에 머무르고 있어 이번 적용 시공결과에 따라 향후 본격적인 설계 반영이 예상된다.

[표 25] 연구 진행 사항

구분	내용	비고
2011년 4월	사업단방문 공법설명회 개최	(자료요청 및 질의에 대해 답변)
2011년 5월	원도급사와 포장업체 미팅	
2011년 5월	목포-광양구간 5공구 현장 방문	
2011년 6월	한라건설 방문 후 공법 및 시공관련 설명	
2011년 7월	시공계약 체결	시공을 위한 자재 구입 계약서 첨부(부록)

㈏ PTCP 포장 설계 결과

본 구간의 PTCP의 경우 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 15cm에 대해 설계 결과는 아래 [표 26]와 같다. 종방향 70cm간격으로 12개 강선과 횡방향 6m 간격 20개를 배치의 설계 결과를 보였으며 자세한 설계내용은 부록 1에 설계도서를 첨부하였다.

[표 26] 설계 결과

PTCP 긴장 설계 결과			
긴장 방향	**긴장 간격(s)**	**강선의 개수(n)**	**긴장응력(σ_P)**
종방향 긴장	70cm	12개	1313kPa
횡방향 긴장	6m	20개	33.3kPa

제4장 목표달성도 및 관련분야에의 기여도

4.1 연도별 연구목표

4.1.1 1차년도

[표 27]은 1차년도 연구의 세부 연구목표 및 연구내용을 나타낸 것이다. 주요 연구목표는 PTCP 공법이 실용화되기 위한 사항으로 재료, 시공, 조인트, 현장적용에 대한 기술적인 내용과 과적차량 단속구간에의 적용에 연구목표를 설정하였다.

[표 27] 1차년도 세부 연구목표 및 연구내용

연구목표	주요 연구내용
· 장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합	· 최적배합 설계, 내구성 평가
· 슬립폼에 의한 시공기술 개발	· 시공성 저하요인 분석 및 해결방안 · 슬립폼에 의한 시공기술 개발
· 횡방향 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 재료 설계 및 개발 · 횡방향 프리스트레스 도입률 향상 방안 · 횡방향 쉬스 설계 및 제작
· 조인트 시스템의 개발	· 내구성 조인트 시스템 개발 · 최적 조인트 유간계산
· 갭슬래브 방식의 시공기술 개발	· 갭슬래브 단부처리 방안 연구 · 구조검토 및 안정성 검토
· 평탄성 확보 기술 개발	· 평탄성 확보 및 유지 방안 연구
· 현장적용 시험 연구	· 확대적용을 위한 현장적용 시험 연구
· 과적차량 단속구간 적용 방안	· 시공기술 개발 · 구조해석 및 설계검토 · 콘크리트 적용 방안

4.1.2 2차년도

[표 28]는 2차년도 연구의 세부 연구목표 및 연구내용을 나타낸 것이다. 주요 연구목표는 PTCP 공법이 영업소 광장부 포장에 실용화되기 위한 사항으로 플라이애시 콘크리트 재료 개발, 데크피니셔에 의한 시공기술, 조인트 시스템 개발, 교량접속 슬래브 적용 등에 대한 기술적인 내용과 과적차량 단속구간에 확대적용하기 위한 기술보완에 연구목표를 설정하였다.

[표 28] 2차년도 세부 연구목표 및 연구내용

연구목표	주요 연구내용
· 영업소 광장부 포장 콘크리트 개발	· 작업성, 강도발현, 최적배합설계
· 데크피니셔에 의한 시공기술 개발	· 광폭 시공 · 평탄성 확보
· 횡방향 스트레싱 시공기술 개발	· 횡방향 스트레싱 재료 설계 및 개발 · 횡방향 프리스트레스 도입률 향상 방안 · 횡방향 쉬스 설계 및 제작
· 조인트 시스템의 개발	· 내구성 조인트 시스템 개발 · 최적 조인트 유간계산
· 교량접속 슬래브 적용	· 강선설치, 인장방법
· 갭슬래브 방식의 시공기술 개발	· 갭슬래브 단부처리 방안 연구 · 구조검토 및 안정성 검토
· 평탄성 확보 기술 개발	· 평탄성 확보 및 유지 방안 연구
· 현장적용 시험 연구	· 확대적용을 위한 현장적용 시험 연구
· 과적차량 단속구간 적용 방안	· 시공기술 개발 · 구조해석 및 설계검토 · 콘크리트 적용 방안

4.2 연구개발 목표의 달성도

4.2.1 연구개발 달성도

(1) 1차년도

[표 29]는 1차년도 연구개발 달성도를 나타낸 것으로서 PTCP 공법이 고속도로 본선

포장에 실용화되기 위한 기술개발이 완성되어 2010년 전주-남원 고속도로구간 임실영업소에 시공하였다.

[표 29] 1차년도 연구개발 달성도

구분 / 개발내용		연구개발기간 1	2	3	4	5	6	진도(%)
장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합	계획	■	■	■				100
	달성도	■	■	■				
시공기술 개발	계획		■	■				100
	달성도		■	■				
스트레싱 기술 개발	계획			■	■			100
	달성도			■	■			
조인트 시스템의 개발	계획			■	■			100
	달성도			■	■			
갭슬래브 시공방식 개발	계획			■	■			100
	달성도			■	■			
평탄성 확보기술 개발	계획				■	■		100
	달성도				■	■		
현장적용 시공	계획				■	■		100
	달성도				■	■		
현장적용 시험	계획				■	■		100
	달성도				■	■		
데이터 분석	계획				■	■	■	100
	달성도				■	■	■	
최종과업보고서	계획						■	100
	달성도						■	

(2) 2차년도

[표 30]은 2차년도 연구개발 달성도를 나타낸 것으로서 PTCP 공법이 영업소 광장부 포장에 실용화되기 위한 기술개발이 완성되어 2010년 전주-남원 고속도로구간 임실영업소에 시공한 바 있으며 2011년 9월 목포-광양간 고속도로 본선 시공을 실시할 예정이다. 또한 2012년 부산-냉정 고속도로 구간 서부산영업소에 확대적용을 검토중에 있다. 또한 교량접속 슬래브 시공기술은 2010년 여주-양평 고속도로 구간에 시공하여 향후 이러한 부분에도 적극 활용을 추진하고 있다. 또한 기 시공된 동해고속도로 주문진-속초 구간과 순천국도에 시공된 과적차량 단속구간, 임실영업소 등은 지속적인 데이터 측정과 모니터링을 통하여 기술의 우수성을 검증할 계획이다.

[표 30] 2차년도 연구개발 달성도

구분 / 개발내용		연구개발기간 1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	진도(%)
자료조사 및 분석	계획													100
	달성도													
아모조인트시스템 개발	계획													100
	달성도													
교량접속 슬래브 시공기술	계획													100
	달성도													
영업소 PTCP 포장 콘크리트 개발	계획													100
	달성도													
영업소 PTCP 시공기술 개발	계획													100
	달성도													
영업소 PTCP 현장조사 및 검증	계획													100
	달성도													
현장시공	계획													100
	달성도													
현장시험	계획													100
	달성도													
데이터분석	계획													100
	달성도													
최종과업보고서	계획													100
	달성도													

4.2.2 연구개발 달성내용

(1) 1차년도

1차년도 연구개발 달성내용은 [표 31]과 같다.

[표 31] 1차년도 연구개발 달성내용

목 표	달성도 (%)	내 용
장수명 고내구성 콘크리트 포장 배합	100	· 콘크리트의 작업성, 강도 및 내구성 연구 · 삼성분계 시멘트 콘크리트 개발 - 작업성: 슬럼프 4± 2cm 만족 - 강 도: 재령 1일과 3일에 7MPa과 21MPa 발현 - 내구성: ASR 방지, 동결/융해 저항성, 투수저항성, 화학저항성, 표면박리 저항성 · 고내구성 초속경 및 초조강 콘크리트 개발 - 초속경: 3~4시간 이내에 21MPa 이상의 강도발현 - 초조강: 1일 이내에 21MPa 이상의 강도발현
시공기술 개발	100	· 슬립폼을 사용하여 콘크리트 포설시 사이드폼을 사용하여 시공성을 만족 · 데크피니셔를 사용하여 콘크리트 포설시는 사이드폼을 사용하지 않고 시공이 가능하도록 시공방법을 개발 · 재포장의 경우 절삭면을 신속하고 균질하게 하기 위해 초속경시멘트페이스트를 박층 도포하는 시공방법 개발
스트레싱 기술 개발	100	· 프리스트레스의 도입률을 향상시키기 위하여 슬래브의 길이가 120m일 경우 양단인장방식을 적용 · 슬래브의 길이가 80m일 경우 일단인장방식으로도 프리스트레스 도입률이 97% 이상 만족
조인트 시스템의 개발	100	· 줄눈이 필요없고 단일 PTCP 슬래브에 하나의 횡방향으로 아모조인트를 설계 및 시공함으로서 공용성이 우수하고 파손이 최소화 되도록 조인트 시스템 개발 · 조인트는 소음이 감소되고 평탄성이 우수하도록 조인트의 유간이 최소화 되도록 개발
갭슬래브 시공방식 개발	100	· 갭슬래브는 철근이 보강되고 구조적으로 교통하중에 대해 충분한 저항성이 확보되도록 설계 및 시공방식 개발
평탄성 확보기술 개발	100	· 데크피니셔에 의해 시공할 경우 인력마무리를 최소화하여 평탄성이 향상되도록 시공방식 개발 · 데크피니셔가 설치시 정밀측량을 통해 평탄성 확보
현장적용 시공	100	· 현장적용성을 향상시키기 위해 현장에서 장비투입, 인력투입 및 자재투입을 적재적소에 시공이 원활하게 이루어지도록 공정관리 수행. · 재료적 특성과 공용성, 내구성이 만족되도록 품질관리를 엄격히하여 현장적용성이 우수한 기술로 완성
현장적용 시험	100	· 현장에서 콘크리트 강도측정, Maturity 측정, 평탄성 측정
데이터 분석	100	· PTCP 슬래브의 거동측정, 재하시험 결과 분석
최종과업보고서	100	· 최종보고서 작성

(2) 2차년도

2차년도 연구개발 달성내용은 [표 32]과 같다.

[표 32] 2차년도 연구개발 달성내용

목 표	달성도 (%)	내 용
자료조사 및 분석	100	· 외국의 PTCP 자료조사 및 분석 · 텍사스 PTCP 현장의 시공자료 및 연구자료조사 및 분석
아모조인트시스템 개발	100	· 콘크리트도로의 아모조인트 시스템 개발 · 현장에서 아모조인트의 시공기술 개발
교량접속 슬래브 시공기술	100	· 교량접속 슬래브 PTCP 설계 및 시공기술 개발
영업소 PTCP 포장 콘크리트 개발	100	· 영업소 PTCP 포장용 플라이애시 콘크리트 개발 - 작업성: 슬럼프 15± 2cm 만족 - 강 도: 재령 1일과 3일에 7MPa과 21MPa 발현 - 내구성: ASR 방지, 동결/융해 저항성, 투수저항성, 화학저항성, 표면박리 저항성
영업소 PTCP 시공기술 개발	100	· 데크피니셔를 이용한 영업소 PTCP 시공기술 개발
영업소 PTCP 현장조사 및 검증	100	· 임실영업소 PTCP 현장조사 및 추적조사
현장시공	100	· 여주-양평 고속도로 교량접속슬래브 현장시공 · 전주-남원 고속도로 임실영업소 현장시공
현장시험	100	· 현장에서 콘크리트 강도측정 · 콘크리트의 Maturity 측정 · 평탄성 측정
데이터분석	100	· PTCP 슬래브의 조인트 유간거동 측정 및 데이터분석 · 슬래브 깊이별 온도측정 데이터분석
최종과업보고서	100	· 최종보고서 작성

(3) PTCP 연구개발 내용

본 연구과제의 개발 내용을 항목별로 정리하면 다음 [표 33]과 같다.

[표 33] PTCP 연구 항목별 개발 내용

연 구 성 과			내 용
콘크리트 배합 연구	삼성분계 고내구성 콘크리트의 개발		· 작업성, 강도, 내구성이 우수한 삼성분계 시멘트 콘크리트 개발
	초속경, 초조강 고내구성 콘크리트 개발		· 초속경, 초조강의 고내구성 초속경 및 초조강 콘크리트 개발
	영업소 PTCP 포장 콘크리트 개발		· 강도 및 내구성이 우수하고 펌프카를 이용한 시공이 가능한 영업소 PTCP 포장용 플라이애시 콘크리트 개발
시공 기술 개발	시공 방법	슬립폼 페이버	· 슬립폼을 사용한 시공시 사이드폼을 사용하여 시공성을 만족
		데크피니셔	· 데크피니셔를 사용하여 시공이 가능하도록 시공방법을 개발 (영업소, 본선, 터널 등 적용가능)
		아스팔트 절삭면 위 시공	· 절삭면 처리를 위한 초속경시멘트페이스트를 박층 도포하는 시공방법 개발 (재포장의 경우)
	스트레싱 기술 개발		· 슬래브의 길이가 120m일 경우 양단인장방식 적용 -> 프리스트레스 도입률 향상 · 슬래브의 길이가 80m일 경우 일단인장방식 적용 -> 프리스트레스 도입률 97% 이상 만족
조인트개발	조인트 시스템의 개발		· 아모조인트 시스템 개발 (공용성 향상 및 파손 최소화)
	갭슬래브 시공방식 개발		· 철근 보강을 통해 구조적으로 교통하중에 충분한 저항성이 확보되도록 설계 및 시공방식 개발
	아모조인트시스템 개발		· 콘크리트도로의 아모조인트 시스템 개발 · 현장에서 아모조인트의 시공기술 개발
현장 적용 연구 개발	영업소 PTCP 시공기술 개발		· 영업소 포장 PTCP 설계 및 시공기술 개발 · 경부고속도로 천안 영업소 포장 시공 · 내정-부산 구간 서부산 영업소 포장 설계(2012년) 검토
	국도 과적차량 단속구간 시공기술 개발		· 아스팔트 포장 절삭면에 대한 면처리 방법과 PTCP 설계 및 시공기술 개발
	축중차로 PTCP 시공기술 개발		· 축중차로 포장 PTCP 설계 및 시공기술 개발 (경사로 PTCP 포장 현장시공 실시)
	교량접속 슬래브 시공기술		· 교량접속 슬래브 PTCP 설계 및 시공기술 개발
	현장시공		· 순천 국도 WIM 구간 현장시공 · 여주-양평 고속도로 교량접속슬래브 현장시공 · 전주-남원 고속도로 임실영업소 현장시공 · 천안지사 천안IC 축중차로 현장시공
	현장시험		· 현장에서 콘크리트 강도측정 · 콘크리트의 Maturity 측정 · 평탄성 측정

4.3 관련분야 기술발전에의 기여도

(1) 기술적 측면에서 기술발전에의 기여도

(가) 콘크리트 포장 기술의 구조적 측면

・포장두께의 감소효과: 기존포장의 포장두께가 보통 30cm로 설계되나 본 연구개발에서는 포장두께를 15cm로 감소시킨 기술로 개발하여 포장기술과 포장구조 측면에서 기술개발 효과가 기대된다.

・줄눈감소효과: 기존포장은 6m 간격의 횡방향 줄눈과 연속적인 종방향 줄눈이 시공되나 본 연구개발에서는 횡방향 줄눈이 필요 없는 포장형식으로 개발되고 특히 종방향 줄눈은 횡방향 프리스트레스를 도입함으로서 필요없는 포장이 된다.

・본 연구개발에서는 팽창줄눈 대신 아모조인트를 적용함으로서 파손 없이 장기공용성이 기대된다.

・줄눈이 감소됨으로서 승차감이 향상되며 주행성이 개선된다.

(나) 재료적 측면

・작업성이 우수하고 조기에 강도발현이 우수하다.

・조기강도를 확보하여 양생기간을 단축시키는 효과가 기대된다.

(다) 공용성 측면

・설계수명을 40년 이상으로 함으로서 장기간 서비스가 가능하다.

・파손이 최소화되는 공법으로 완성하여 유지보수 예산의 낭비를 방지 할 수 있다.

・유지보수로 인한 이용자의 불편을 방지할 수 있다.

(라) 기타

・콘크리트의 재료가 종래의 기술에 비하여 50% 수준으로 감소될 수 있으므로 골재의 채취로 인한 소음・분진 등의 환경문제, 하천골재 채취로 인한 하천의 형질변경 등 환경문제 해결에 기여된다.

・다웰바 및 타이바 설치가 불필요 하다.

・줄눈커팅, 실링재 삽입 등의 작업이 불필요 하다.

・종래 선진국 기술보다 향상된 기술이라 할 수 있다.

・국내기술력을 증진시킴으로서 국가 경쟁력 확보에 기여할 수 있다.

(2) 경제・산업적 측면에서 기술발전에의 기여도

(가) 경제적 측면

・콘크리트의 량이 50% 수준으로 감소되기 때문에 시멘트 및 골재의 재료량이 획기적으로 줄어들고 기존 제품에 비하여 일일 생산량이 증대되므로 이로 인한 장비의 회전률이 향상되고 장비 가동으로 인한 유류비 절감 효과를 기대할 수 있다.

・줄눈커팅, 실링재 삽입에 소요되는 인력 및 장비, 재료비의 절감효과를 기대할 수 있다.

・기존 제품의 경우 유지보수 작업으로 인한 교통 지・정체 문제가 해결됨으로서 이로 인한 유류비 절감 효과를 가져 올 수 있다.

・교통 지・정체로 인한 교통사고를 방지함으로서 국민의 소중한 인명과 재산을 보호하는데 기여할 수 있다.

・최소 40년 이상의 공용기간 동안 서비스를 제공할 수 있음으로 기존 제품으로 인한 유지보수 예산의 절감효과를 가져오게 되며 국가의 불필요한 예산낭비를 방지함으로서 국민의 공공복지 향상에 기여할 수 있다.

・LCC 분석시 초기의 공사비는 다소 증가되나 40년 공용기간의 생애주기비용을 분석할 때 200% 이상의 원가를 절감하는 결과를 나타내어 매우 경제적인 기술과 제품이 될 것이라 판단된다.

(나) 산업적 측면

・슬래브 두께가 종래의 공법에 비하여 절반으로 줄어들기 때문에 콘크리트량이 감소되어 콘크리트를 제조하는데 소요되는 시멘트량이 획기적으로 줄어든다. 따라서 시멘트 생산으로 발생되는 탄소배출량을 감소시킬 수 있어 범국가적인 목표인 저탄소 녹색성장에 기여할 수 있는 공법이라 할 수 있다.

・본 기술에 사용되는 자재, 인력, 장비 등 관련 전문건설에 관련된 중・소기업의 산업

부문 활성화에 크게 기여될 것으로 예상할 수 있다.

・본 기술개발의 적용으로 관련 산업의 시장이 형성되어 중・소기업의 시장발전에 크게 기여할 것으로 판단된다.

・본 기술이 선진외국의 기술력보다 더욱 우수하여 기술력의 국외수출을 기대할 수 있으며 이로 인한 외화획득을 기대할 수 있다.

제5장 연구개발결과의 활용계획

5.1 추가연구의 필요성

본 기술개발과 관련한 추가연구는 포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 완성도를 더욱 향상시키기 위하여 필요하며 본 연구로부터 수행된 연구결과를 기초로하여 추가적인 연구는 다음과 같은 사항이 필요할 것으로 판단된다.

- 장기 공용성을 검증하고 평가하기 위한 정기적인 추적조사를 수행하여 기술의 우수성을 입증하고 이에 대한 결과를 홍보한다.
- 포장체의 단기 및 장기거동을 계측하여 설계자료로 활용한다.
- 측정된 계측 데이터를 축적하여 데이터베이스화하여 다양한 환경조건에서의 거동을 분석한다.
- 차량하중과 환경하중에 대하여 구조해석 결과와 실측결과를 비교하여 정밀한 설계가 되도록 한다.
- 줄눈파손부 보수작업이 시행된 구간의 소음을 측정하여 PTCP 공법의 조인트에서의 소음을 비교·분석한다.
- 연구결과 및 성과를 국내외 학술대회에 발표하여 국제적으로 공인받는 기술이 되도록 완성한다.

5.2 타 연구에의 응용

본 기술을 타 연구에 응용할 수 있는 분야는 다음과 같다.

- 건축구조물의 기초콘크리트에 적용하여 균열발생으로 인한 누수방지에 효과적일 것으로 사료되며,
- 슬래브에 적용하여 철근사용량을 절감시키고 두께를 감소시켜 공사기간 단축, 공사비 절감 등에 효과적으로 응용될 수 있을 것으로 사료된다.

5.3 사업화 추진방안

① 마케팅 방안

PTCP 공법은 구조적 측면, 재료적 측면 및 공용성 측면에서 우수한 품질을 장점으

로하여 마케팅해야 한다. 구조적 측면에서의 품질은 기존기술에서 가장 광범위한 파손이 발생되는 줄눈이 필요 없고 균열발생이 방지된다는 것이다. 재료적 측면에서의 품질은 기존의 기술과 비교할 때 강도 및 내구성이 우수하다 할 수 있다. 공용성 측면에서의 품질은 기존의 기술과 비교할 때 공용기간, 소음, 승차감, 미관에서 현저한 차이를 나타낸다. 기존기술은 줄눈파손으로 인한 보수작업이 잦아 이 부분에서의 소음과 승차감 저하를 나타내며 보수작업으로 인하여 미관이 저하된다. 이러한 품질의 우수성을 제품정책으로 마케팅한다.

[표 34] 구조적 측면의 품질

구 분	기존기술			개발기술 PTCP
	JCP	CRCP	JRCP	
구조형식	무근콘크리트	철근콘크리트	철근콘크리트	프리스트레스트 콘크리트
슬래브 두께(cm)	30	30	30	15
슬래브 길이(m)	6	연속	9~12	120
슬래브내 균열발생	○	○	○	×
설계수명(년)	20	30	20	40
유지보수	필요	필요	필요	부분필요
줄눈 또는 균열간격 (m)	6	0.5~2 (균열간격)	9~12	120
줄눈형식	다웰바 타이바	타이바	다웰바 타이바	아모조인트

[표 35] 재료적 측면의 품질

구 분	기존기술			개발기술 PTCP
	JCP	CRCP	JRCP	
콘크리트 강도(1일)	기준없음	기준없음	기준없음	7MPa이상
콘크리트 강도(3일)	〃	〃	〃	21MPa이상
콘크리트 강도(28일)	270MPa이상	270MPa이상	270MPa이상	400MPa이상
투수저항성	기준없음	기준없음	기준없음	1000C이하
동결/융해 저항성	〃	〃	〃	내구성지수 80%이상
내화학성 (황산,염산,염화칼슘)	〃	〃	〃	중량손실 5%이하
표면박리 저항성	〃	〃	〃	G등급 이상

[표 36] 공용성 측면의 품질

구 분	기존기술			개발기술 PTCP
	JCP	CRCP	JRCP	
공용기간(년)	20	30	20	40
소음	줄눈파손부의 보수로 인한 소음발생	균열부 스폴링 및 펀치아웃으로 인한 소음	줄눈 및 균열부 파손으로 소음발생	흡음재사용 소음감소
승차감	줄눈파손부의 보수로 인한 승차감 저하	보수부 평탄성 저하로 승차감 저하	줄눈 및 균열부 보수로 승차감 저하	줄눈감소로 승차감 향상
미관	보수작업으로 미관저하	균열발생으로 미관저하	보수작업과 균열발생으로 미관저하	미관양호
공용기간 중 유지보수의 필요성	필요	필요	필요	최소필요

② 가격경쟁력 방안

본 개발기술은 초기공사비가 높은 반면에 유지보수비용과 사용자비용 분석에서 매우 경제적임을 부각할 수 있다.

㉮ 초기공사비

초기 공사비는 4차선 도로를 1km 건설하였을 경우 기존기술 JCP 및 CRCP와 비교하여 높다. PTCP의 초기공사비는 PS강선설치 및 인장작업과 조인트 및 갭슬래브 시공과 아울러 고내구성 콘크리트 생산으로 인하여 기존공법 JCP와 비교할 때 65%의 공사비 상승이 발생되나 기존기술 CRCP에 비하여는 다소 경제적이다. CRCP가 PTCP에 비하여 공사비가 높은 이유는 적절한 균열폭 제어를 위하여 보통 콘크리트 단면에 대해 보통 0.6~0.7% 이상의 철근량이 투입되며 철근의 가공 및 조립에 상당한 비용이 소요되기 때문이라 할 수 있다. 이에 비하여 PTCP는 CRCP에 비해 강재가 1/4 정도 사용되기 때문에 초기공사비의 차이가 발생된 것으로 분석된다.

㉯ 유지관리비

유지관리비용을 고려한 생애주기비용 분석은 도로연장 10.0km를 기준으로 도로폭 4차로(폭16.4m)에 대하여 분석하였다. JCP의 유지관리 비용이 크게 발생되는 이유는 줄눈부 파손을 비롯하여 ASR 및 부분단면 보수가 발생되기 때문이다. 이에 비하여 PTCP는 보수비용이 최소화되어 상당한 비용절감 효과가 있음을 알 수 있다. [표 37]는 사용자 비용을 제외한 생애주기비용을 나타낸 것이다. 초기공사비와 유지관리 비용을 고려한 총 생애주기비용은 PTCP가 가장 경제적이며 CRCP와 JCP는 PTCP와 상대 비교할 때 각각 1.51 및 1.37배의 비용이 추가 발생하는 것으로 나타났다. 따라서 유지관리비가 거의 필요하지 않는 장점을 부각시킨 가격홍보가 필요할 것으로 판단된다.

[표 37] 유지관리비용을 고려한 생애주기비용

[금액단위: 억원]

구 분	JCP	CRCP	PTCP
초기공사비용	55.7	95.8	92.2
유지관리비용	83.9	30.8	0.3
총생애주기비용	139.6	126.6	92.5
상대LCC	1.51	1.37	1.00

㉰ 사용자 비용

유지보수비용 뿐만 아니라 사용자비용은 도로의 시공, 보수, 재시공 등을 위하여 일시적인 교통통제 및 우회 시 이용자에게 부담되는 비용으로 차량운행비용, 시간지연비용, 사고비용뿐만 아니라 환경영향에 의한 추가비용을 포함하고 있다. 유지관리비용 분석조건으로 사용자 비용을 계산한 결과 총 생애주기비용은 [표 38]과 같다. 신청기술은 40년의 수명으로 설계되고 JCP와 CRCP는 각각 20년과 30년으로 설계되기 때문에 총 생애주기비용 분석은 40년을 기준으로 분석하였다. 개발기술의 초기공사비는 기존기술 JCP에 비하여 높지만 40년의 설계수명을 기준으로 분석할 때 JCP 및 CRCP에 비하여 매우 경제적인 공법이라 할 수 있다. 이러한 결과는 현재 줄눈과 균열 및 ASR 등의 소파보수비용이 크게 발생되고 표면보수와 덧씌우기 비용이 발생되기 때문이며, 신청기술에서는 줄눈을 없애고 아모조인트를 설치함으로서 파손과 유지보수 비용이 최소화하여 장기 공용가능하기 때문으로 분석된다. 또한 사용자 비용을 고려할 때 유지보수작업으로 인한 차량운행 비용과 시간지연 비용 등 간접적으로 발생되는 사용자 비용을 감안할 때 PTCP 공법은 기존기술 JCP 및 CRCP에 비하여 상당한 경제적 이득과 사회적 유익성이 확보됨을 알 수 있으며 이러한 장점을 부각한 마케팅전략이 필요할 것으로 사료된다.

[표 38] 사용자 비용을 고려한 생애주기비용

[금액단위: 억원]

구 분	JCP	CRCP	PTCP
초기공사비용	55.7	95.8	92.2
유지관리비용	83.9	30.8	0.3
사용자비용	1135.2	583.7	182.2
총생애주기비용	1274.8	710.3	274.6
상대LCC	4.64	2.59	1.00

③ 홍보방안

본 연구에서 개발된 기술은 고속도로의 본선 포장 및 과적차량 단속구간 포장을 비롯하여 영업소 광장부 포장과 주차장 포장, 교량접속슬래브 포장, 공항의 활주로나 유도로, 주기장 포장 등에 적용될 수 있도록 지속적인 시장의 다양화를 추진해 나갈 계획이다. 시장의 다양화를 추진하기 위해 한국도로공사, 국토해양부 및 공항공사 등 관계자에게 적극 홍보하고 설명회를 개최하여 본 기술의 홍보를 도모할 계획이다.

뿐만 아니라 항만시설이나 철도 등의 활용가치가 있는 분야에 확대 적용하기 위해 기술 자료집을 제작하여 항만청, 철도청 등의 관계기관에 배포하여 홍보할 계획이다. 또한 본 기술개발로부터 도출되는 연구성과를 대한토목학회, 한국도로학회 등 유명 학술지에 발표하고 게재함으로서 기술력과 공법의 우수성을 객관적으로 인정받고 본 연구성과가 적극 홍보되도록 추진할 계획이다.

④ 시장진입 방안

본 기술개발의 성과를 국가 기간시설물에 활용하기 위해서는 기술력은 물론 공법의 우수성을 객관적으로 검증되도록 하여 국토해양부, 한국도로공사, 항만공사 및 공항공사의 실무 기술자들이 쉽게 이해하고 현장에 적용할 수 있도록 기술교육 등을 통하여 본 공법을 국내시장에 성공적으로 정착되도록 노력할 계획이다. 아울러 국내의 시장 뿐만 아니라 본 기술이 외국의 기술보다 우수함을 인정받아 유럽과 미국 등 해외시장에도 수출될 수 있도록 적극 노력할 계획이다.

제6장 연구개발과정에서 수집한 해외과학기술정보

[그림 71]은 미국의 텍사스주에서 노후된 줄눈콘크리트 포장의 유지관리 방법의 대안으로 아스팔트 덧씌우기를 시행한 구간을 나타낸 것이다. 노후된 줄눈콘크리트 포장의 줄눈부 반사균열 방지 처리를 하지 않아 줄눈간격마다 반사균열이 발생되는 것을 볼 수 있다. 그러나 [그림 72]에 나타낸 구간은 반사균열을 방지하기 위하여 줄눈부 팻칭후 PFC로 덧씌우기 시행하여 현재 9년이 경과되었음에도 불구하고 반사균열이 발생하지 않은 것을 알 수 있다.



[그림 71] 노후된 줄눈콘크리트 포장 위에 아스팔트 포장



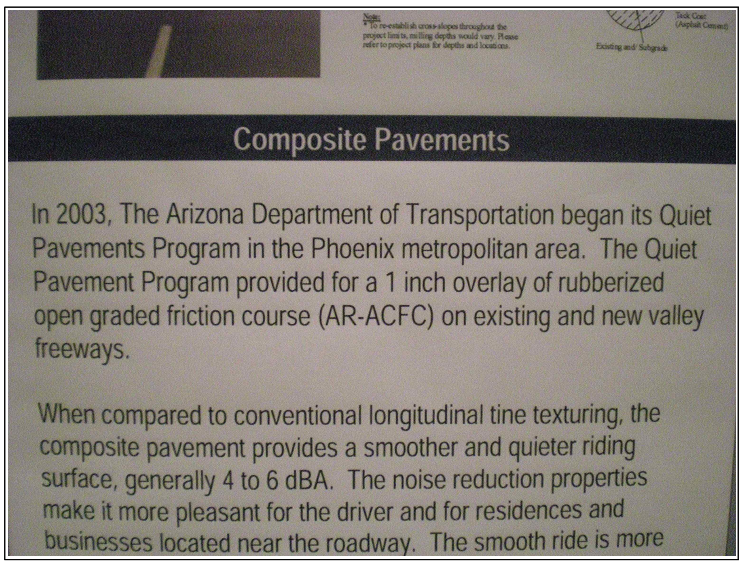
[그림 72] 노후된줄눈콘크리트포장에 PFC 적용

PFC로 덧씌우기한 포장의 상태는 많은 부분의 공극은 막혀 있어 배수기능이 저하되었을 것으로 예상됨.



[그림 73] PFC(Porus Friction Coarse) 근경

[그림 74]은 아리조나 교통국에서 수행한 노후된 콘크리트 포장의 공용성 증진방법 중의 하나로 Composite Pavement에 대해 연구한 결과로서 2003년부터 연구를 수행하여 현재 콘크리트 포장에 1인치 두께의 아스팔트로 덧씌우기를 수행하여 승차감이 양호하고 소음이 향상된 것으로 보고되고 있다.



[그림 74] 애리조나 교통국의 합성포장 연구 내용

제7장 참고문헌

Chavez, C.M., B.F. McCullough, and D.W. Fowler(2003) Design of a Post-Tensioned Prestressed Concrete Pavement, Construction Guidelines, and Monitoring Plan, *Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin*, Research Report 0-4035-1, pp. 1-55

Mandel, E., J. Colunga, K. Hankins, N.H. Burns, and B.F. McCullough(1989) The Performance of a Prestressed Concrete Pavement, *Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin*, Research Report 556-4F, pp. 1-13

Okamoto, P.A., S.D. Tayabji and E.J. Barenberg(1991) Instrumentation and Evaluation of Prestressed Pavement U.S.220, Blair County, Pennsylvania, *Pennsylvania Department of Transportation*, Research Project No. 87-19, pp.1-21

Theodore L. N.; Pawan R. G.; Fadi A., "Post-Tensioning Manual," 6th Edition, Post-Tensioning Institute, 2006.

김동호,배종오,김기헌,이봉학,김성민,원문철“외국의 프리스트레스트 콘크리트 포장 기술과 국내 적용 방안”, 대한토목학회 학술발표회, 2008.10.

김동호,배종오,김기헌,이봉학,김성민,원문철“미국의 포스트텐션 콘크리트 포장 사례와 연구개발 방향" 한국도로학회 학술발표회, pp.199~204, 2008.10.14.

김성민,윤동주,김동호,“횡방향 긴장에 따른 프리스트레스트 콘크리트 포장의 거동 분석" 한국도로학회 2008 학술대회 논문집, pp.205~209, 2008.10.14.

김성민,윤동주,김동호, “횡방향긴장에 의한 프리스트레스트 콘크리트 포장의 거동분석” 한국도로학회 논문집, 제10권 제4호, pp.257~267, 2008.12.

김성민,윤동주,배종오, “프리스트레스트 콘크리트 포장의 횡방향 긴장 설계방안” 한국도

로학회 논문집, 제10권 제4호, pp.269~279, 2008.12.

윤동주,김성민,배종오, "포스트텐션드 콘크리트 포장의 횡방향 긴장 설계법 개발" 한국도로학회 학술발표회, 2009.3.12.

윤동주,김성민,배종오, "포스트텐션드 콘크리트 포장의 종방향 긴장 설계 방안",한국도로학회 논문집, 제11권1호, 2009.3.

박희범,김성민,김동호, "현장실험을 통한 포스트텐션드 프리스트레스트 콘크리트 포장의 긴장 시 거동분석", 한국도로학회 논문집, 제11권1호, 2009.3.

김동호,이현호,배종오,김기헌 "포스트텐션 콘크리트 포장의 시험시공", 한국콘크리트학회 논문집, 2009.5.7.

박희범,김성민,김동호 "포스트텐션드 콘크리트 포장의 프리스트레스 도입 시 거동 분석", 한국콘크리트학회 논문집, 2009.5.7.

윤동주,김성민,배종오, "프리스트레스트 콘크리트 포장의 최적 긴장량 도입을 위한 설계", 한국콘크리트학회 논문집, 2009.5.7.

최판길,이봉학,정범석,김동호 "포스트텐션 콘크리트 포장에서 고내구성 콘크리트의 적용", 한국콘크리트학회 논문집, 2009.5.7.

신현묵, 프리스트레스트 콘크리트, 제10판", 동명사, 2008.

안성순, "중부 고속도로 20년 공용성 평가를 통한 CRCP와 JCP의 비교연구", 한양대학교 대학원 박사학위논문, 2006. 8.

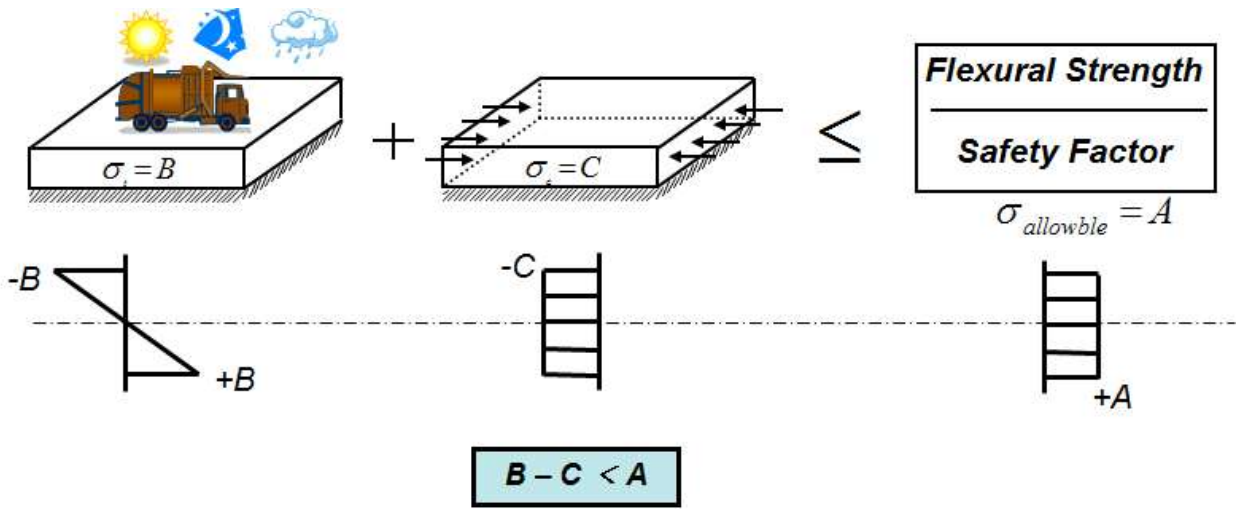
한국도로공사 설계처, "연속철근콘크리트포장 확대적용방안 검토", 한국도로공사, 2008. 12.

부록 1. 목포-광양 구간 고속도로 본선 PTCP 적용을 위한 설계도서 및 계약서

□ 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP) 설계도서

1. PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement) 설계 개요

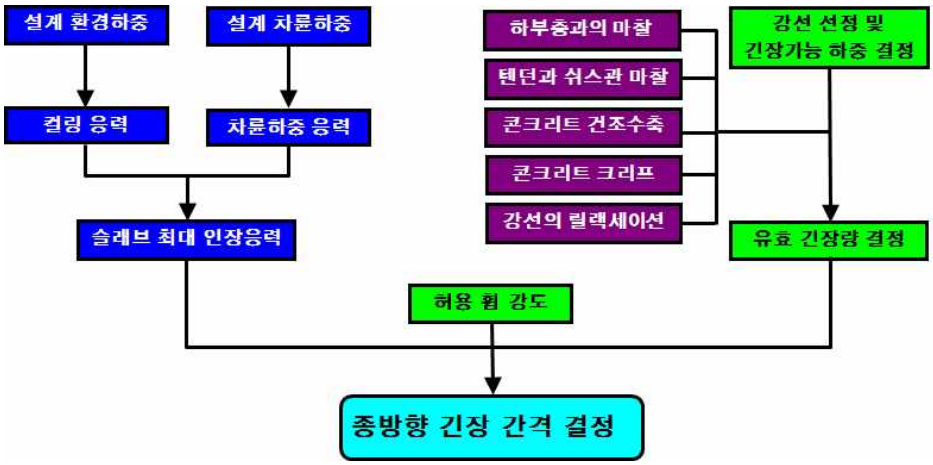
PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement)는 하중에 의해 포장체에 발생하는 인장 응력을 긴장력을 가하여 감소시키는 방식으로 텐던의 긴장에 의해 콘크리트 슬래브에 압축응력을 가하기 때문에 두께를 기존 콘크리트 포장에 비해서 반 이하로 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 줄눈 간격을 일반적으로 100m 내외에서 200m 이상까지도 가능하게 한다. PTCP의 설계 개념은 슬래브에 발생하는 응력을 콘크리트의 허용 휨강도보다 작도록 긴장력을 작용하는 것이다. 이러한 설계 개념은 미국의 FHWA와 Texas 교통부에서 도입하여 실제 사용 하고 있는 개념이다.

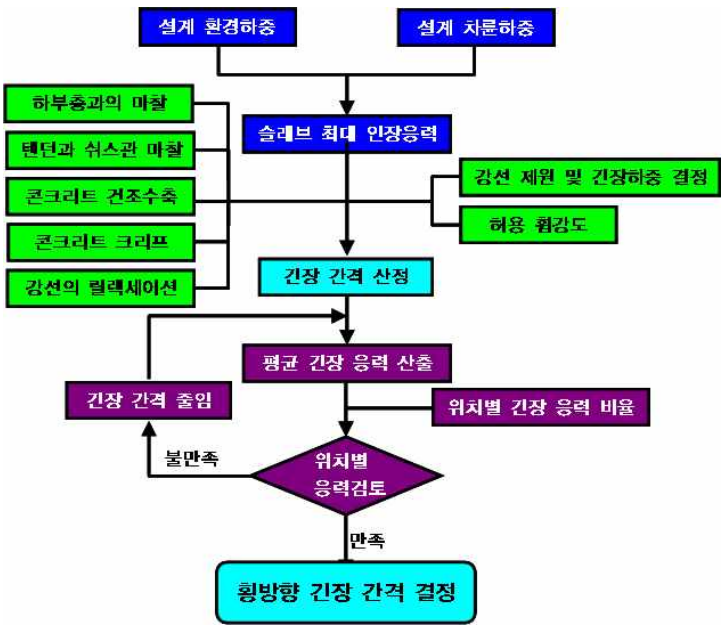


2. 응력 기준 포장 설계

1) 응력기준 설계 개념

PTCP의 긴장 설계는 최악의 하중조건을 고려하여 슬래브에 발생할 수 있는 최대 인장응력을 산정한 뒤, 강선의 제원과 하중 조합 경우를 결정하고 하부층과의 마찰로 인한 손실 등 각종 손실량을 구하여 실제 슬래브가 받을 압축응력 및 Tendon의 개수와 긴장 간격을 구함으로써 수행할 수 있다. PTCP 종방향 및 횡방향 긴장 설계 과정을 그림으로 나타내면 다음과 같다.





2) 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 15cm PTCP 설계

① PTCP 종방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력 산출

○ 콘크리트 탄성계수(E): 27GPa

○ 포와송비(v): 0.15

○ 노상지지력계수(K): 210MN/m^3(일반적인 고속도로 포장의 노상 지지력계수)

○ 환경하중 : 온도구배 0.5℃/cm, Curl Up, Curl Down 모두 고려

⇨ 실제 하부 지지층을 모사 할 수 있도록 무인장 스프링을 이용하여 하부층 모델링

○ 차륜하중 : 단축 및 복축 하중(82kN/Axle)

⇨ 슬래브 각 위치에 단축 및 복축 하중이 재하 되는 경우의 최대 응력 산정

⇨ 슬래브 중앙, 종방향 및 횡방향 단부, 슬래브 우각부 차륜하중 재하

○ 분석 결과(종방향 단부 단축하중 재하시 슬래브 하단에 최대 응력 발생)

종방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	**1242**	
	Bottom of Slab(Curl Down)	**1271**	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	1333	1210
	Bottom of Slab(Edge)	**2163**	1890
	Top of Slab(Corner)	1724	**2071**
Total Max. Stress	Top of Slab	3313	
	Bottom of Slab	**3434**	

▷ 세부적인 종방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}\} \times \text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{폭}(8.2m) \times \text{두께}(0.15m))}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨강도}$$

▷ 종방향 긴장간격 산정 수식

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}) \times \text{슬래브 두께}(0.15m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 종방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t) ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr}) ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ 각종 손실 인자 산정

○ $F_{jacking} = 222kN \times 0.94 = 208.7kN$

○ $F_f = F_{jacking}(1 - \text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율}) = 208.7(1-0.9) = 20.87kN$

○ $F_t = F_{jacking}\left(1 - \exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right) = 208.7\left(1 - \exp\left[-\frac{0.003 \times 120}{2}\right]\right) = 34.38kN$

○ $F_{sc} = \epsilon_{cu} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$

○ $F_r = \left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y} - 0.55\right)\right] F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55\right)\right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ 콘크리트의 허용 휨강도는 4.5MPa의 1/2로 가정한 경우에 대하여 분석

- 4.5MPa 휨강도 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 34.38 + 6.24 + 12.6)}{(3434 - 2250) \times 0.15} = 0.758m$$

⇨ 종방향 강선 긴장 간격 70cm로 결정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}(8.2m)}{\text{긴장간격}(0.7m)} = 11.71\text{개}$$

⇨ 종방향 강선 개수 12개로 결정

▶ 12개의 강선을 70cm 간격으로 종방향 긴장

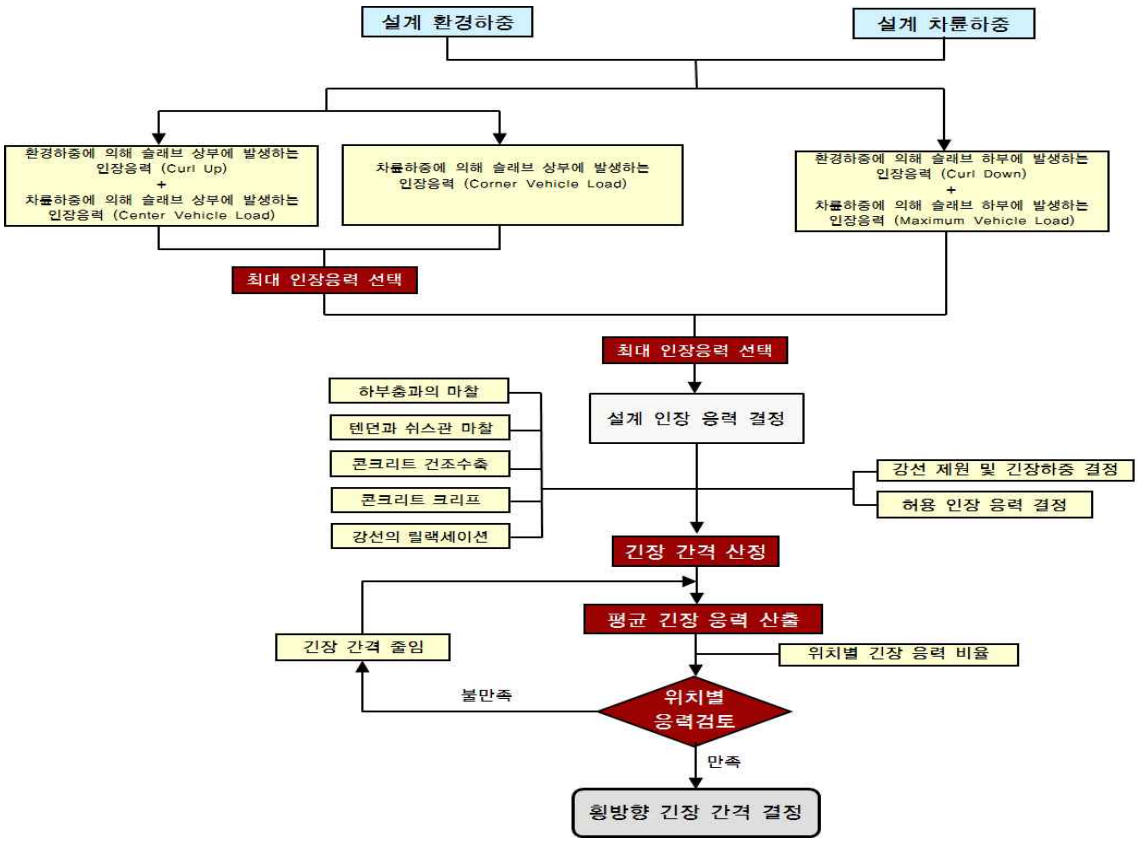
* 종방향 긴장응력 (1313KPa) + 허용 휨강도 (2250KPa) = 3563KPa

> 종방향 발생응력 (3434KPa)

② PTCP 횡방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 횡방향최대 인장응력 산출

○ 횡방향 긴장 설계 흐름도



○ 인장응력 분석 결과

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1242	
	Bottom of Slab(Curl Down)	**1271**	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	982	985
	Top of Slab(Center)	428	469
	Bottom of Slab(Edge)	991	**1003**
	Top of Slab(Corner)	1524	**1868**
Total Max. Stress	Top of Slab	1868	
	Bottom of Slab	**2274**	

▷ 세부적인 횡방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}\}\times\text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{길이}(120m)\times\text{두께}(0.15m))}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ 횡방향 긴장간격 산정 수식

$$\text{긴장 간격}(s)=\frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력}-\text{콘크리트 허용 휨 강도})\times\text{슬래브 두께}(0.15m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 횡방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t) ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr}) ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ 각종 손실 인자 산정

○ $F_{jacking}=222kN\times0.94=208.7kN$

○ $F_f=F_{jacking}(1-\text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율})=208.7(1-0.9)=20.87kN$

○ $F_t=F_{jacking}\left(1-\exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right)=208.7\left(1-\exp\left[-\frac{0.003\times8.2}{2}\right]\right)=2.55kN$

○ $F_{sc} = \epsilon_{cu} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$

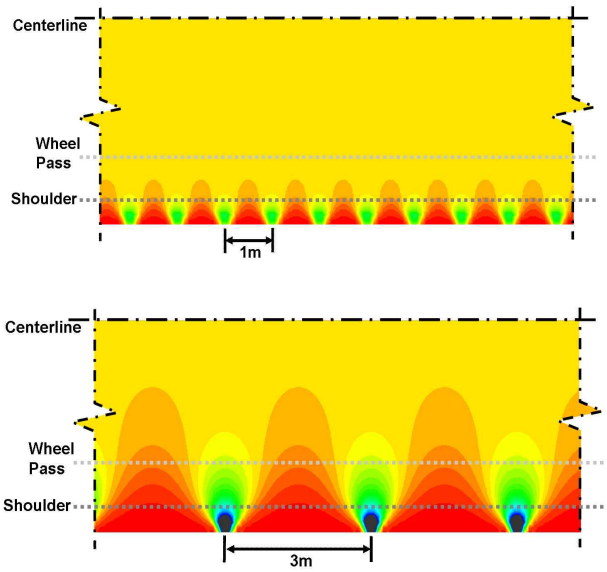
○ $F_r = \left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y} - 0.55\right)\right] F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55\right)\right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ 콘크리트의 허용 휨강도는 4.5MPa의 1/2로 가정한 경우에 대하여 분석

- 4.5MPa 휨강도 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

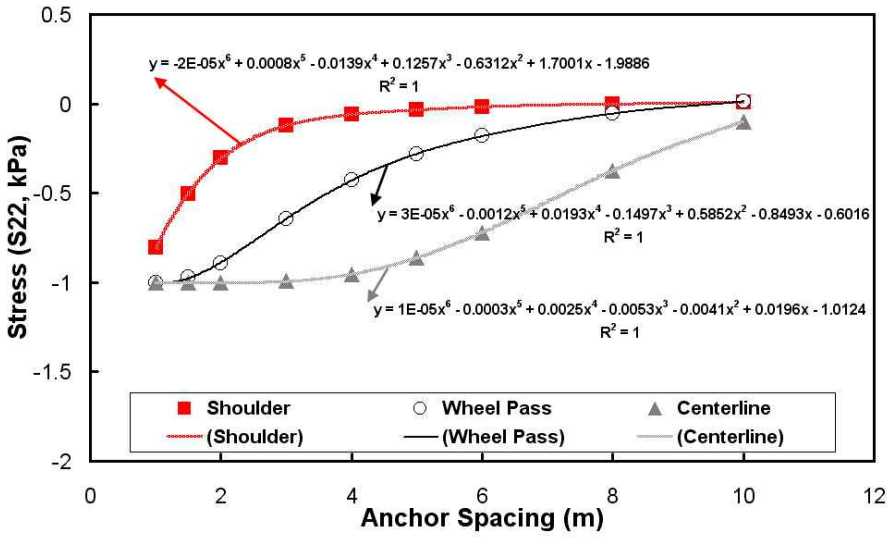
※ 긴장 간격에 따른 횡방향 긴장 응력 손실 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 정착구 사이의 횡응력 손실 범위 발생



⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소 긴장응력 변화

: 압축응력 1kPa을 긴장응력으로 작용하였을 때 슬래브 위치별 발생 최소 압축응력



- 슬래브 각 위치별 긴장응력 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소응력 비율

긴장 간격(m)	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10
Shoulder	0.806	0.502	0.302	0.122	0.060	0.032	0.018	0.001	0
Wheel Pass	0.999	0.972	0.891	0.642	0.427	0.281	0.180	0.055	0
Centerline	1.000	1.000	1.000	0.993	0.953	0.860	0.719	0.373	0.098

○ 포장 특성상 Shoulder 부분에는 차륜하중이 재하되지 않는 것으로 가정하고 Wheel Pass에서의 횡방향 긴장력 전달률을 고려함

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

$$\text{긴장간격}(s)=\frac{208.7-(20.87+2.55+6.24+12.6)}{(2274-2250)\times 0.15}=46.23m$$

⇨ 횡방향 긴장 간격 46.2m로 결정

$$\text{강선의 개수}(n)=\frac{\text{슬래브폭}(120m)}{\text{긴장간격}(46.2m)}=2.597\text{개}$$

⇨ 횡방향 강선 개수 3개로 결정

- 긴장응력 검토

○ 긴장 간격 10m 이상이면 긴장응력이 슬래브에 전달되지 않음 **(불만족)**

⇨ 횡방향 긴장 간격 6m로 결정

$$\text{강선의 개수}(n)=\frac{\text{슬래브폭}(120m)}{\text{긴장간격}(6m)}=20\text{개}$$

⇨ 횡방향 강선 개수 20개로 결정

- 긴장응력 검토

○ 필요긴장응력$(\sigma_p)=24kPa$

○ Wheel Pass부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_p) < 긴장응력×긴장응력 전달비율

$$24kPa<185kPa\times 0.18=33.3kPa \quad \textbf{(만족)}$$

▶ 20개의 강선을 6m간격으로 횡방향 긴장

③ 응력 기준 설계 결과

PTCP 긴장 설계 결과			
긴장 방향	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
종방향 긴장	70cm	12개	1313kPa
횡방향 긴장	6m	20개	33.3kPa

2) 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 20cm PTCP 설계

① PTCP 종방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력 산출

○ 콘크리트 탄성계수(E): 27GPa

○ 포와송비(v): 0.15

○ 노상지지력계수(K): 210MN/m^3(일반적인 고속도로 포장의 노상 지지력계수)

○ 환경하중 : 온도구배 0.5℃/cm, Curl Up, Curl Down 모두 고려

⇨ 실제 하부 지지층을 모사 할 수 있도록 무인장 스프링을 이용하여 하부층 모델링

○ 차륜하중 : 단축 및 복축 하중(82kN/Axle)

⇨ 슬래브 각 위치에 단축 및 복축 하중이 재하 되는 경우의 최대 응력 산정

⇨ 슬래브 중앙, 종방향 및 횡방향 단부, 슬래브 우각부 차륜하중 재하

○ 분석 결과(종방향 단부 단축하중 재하 시 슬래브 하단에 최대 응력 발생)

종방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	**1738**	
	Bottom of Slab(Curl Down)	**1792**	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	874	757
	Bottom of Slab(Edge)	**1452**	1198
	Top of Slab(Corner)	1184	**1337**
Total Max. Stress	Top of Slab	3075	
	Bottom of Slab	**3244**	

▷ 세부적인 종방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum \text{손실량}\} \times \text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{폭}(8.2m) \times \text{두께}(0.20m))}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ **종방향 긴장간격 산정 수식**

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}) \times \text{슬래브 두께}(0.20m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 종방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t) ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr}) ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ **각종 손실 인자 산정**

○ $F_{jacking} = 222kN \times 0.94 = 208.7kN$

○ $F_f = F_{jacking}(1 - \text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율}) = 208.7(1-0.9) = 20.87kN$

○ $F_t = F_{jacking}\left(1 - \exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right) = 208.7\left(1 - \exp\left[-\frac{0.003 \times 120}{2}\right]\right) = 34.38kN$

○ $F_{sc} = \epsilon_{cu} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$

○ $F_r = \left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y} - 0.55\right)\right] F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55\right)\right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ **콘크리트의 허용 휨강도는 4.5MPa의 1/2로 가정한 경우에 대하여 분석**

- 4.5MPa 휨강도 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

▷ **긴장 간격 및 강선의 개수 산정**

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 34.38 + 6.24 + 12.6)}{(3244 - 2250) \times 0.20} = 0.68m$$

⇨ 종방향 강선 긴장 간격 60cm로 결정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}(8.2m)}{\text{긴장간격}(0.6m)} = 13.67\text{개}$$

⇨ 종방향 강선 개수 14개로 결정

▶ 14개의 강선을 60cm 간격으로 종방향 긴장

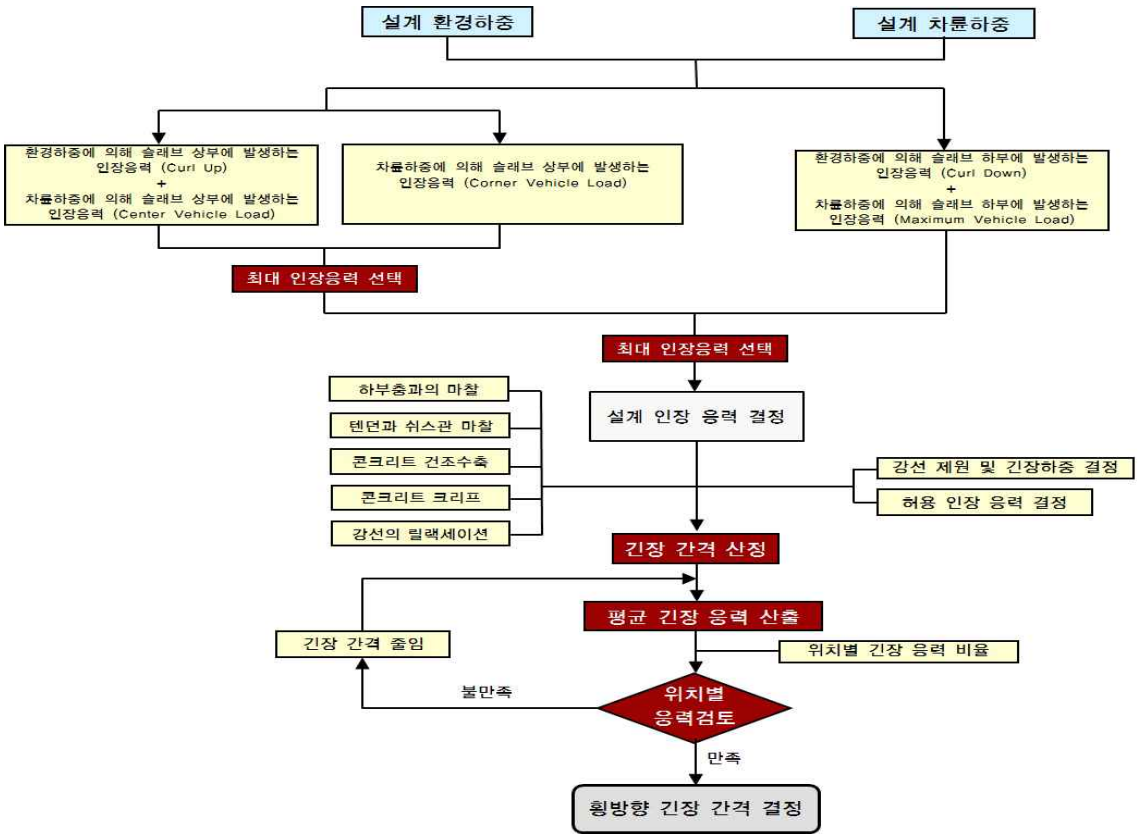
* 종방향 긴장응력 (1149KPa) + 허용 휨강도 (2250KPa) = 3399KPa

> 종방향 발생응력 (3244KPa)

② PTCP 횡방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 횡방향최대 인장응력 산출

○ 횡방향 긴장 설계 흐름도



○ 분석 결과

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1739	
	Bottom of Slab(Curl Down)	1792	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	638	644
	Top of Slab(Center)	224	252
	Bottom of Slab(Edge)	622	627
	Top of Slab(Corner)	1130	1217
Total Max. Stress	Top of Slab	1991	
	Bottom of Slab	2436	

▷ 세부적인 횡방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}\}\times\text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{길이}(120m)\times\text{두께}(0.20m))}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ 횡방향 긴장간격 산정 수식

$$\text{긴장 간격}(s)=\frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력}-\text{콘크리트 허용 휨 강도})\times\text{슬래브 두께}(0.20m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 횡방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t) ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr}) ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ 각종 손실 인자 산정

○ $F_{jacking}=222kN\times0.94=208.7kN$

○ $F_f=F_{jacking}(1-\text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율})=208.7(1-0.9)=20.87kN$

○ $F_t=F_{jacking}\left(1-\exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right)=208.7\left(1-\exp\left[-\frac{0.003\times8.2}{2}\right]\right)=2.55kN$

○ $F_{sc} = \epsilon_{cu} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$

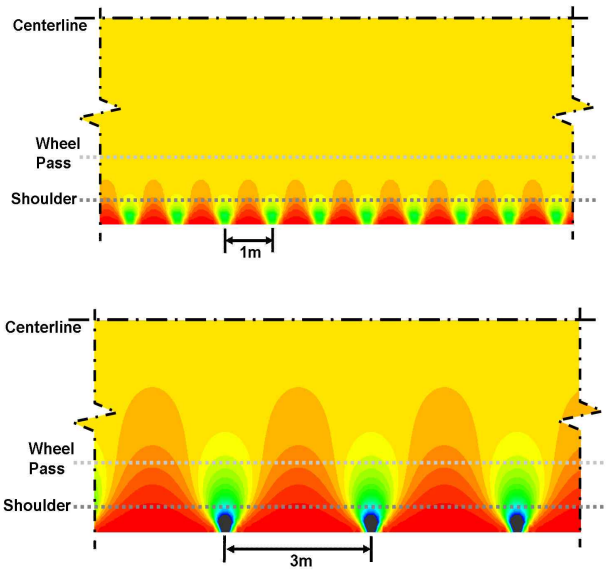
○ $F_r = \left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y} - 0.55\right)\right] F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55\right)\right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ 콘크리트의 허용 휨강도는 4.5MPa의 1/2로 가정한 경우에 대하여 분석

- 4.5MPa 휨강도 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

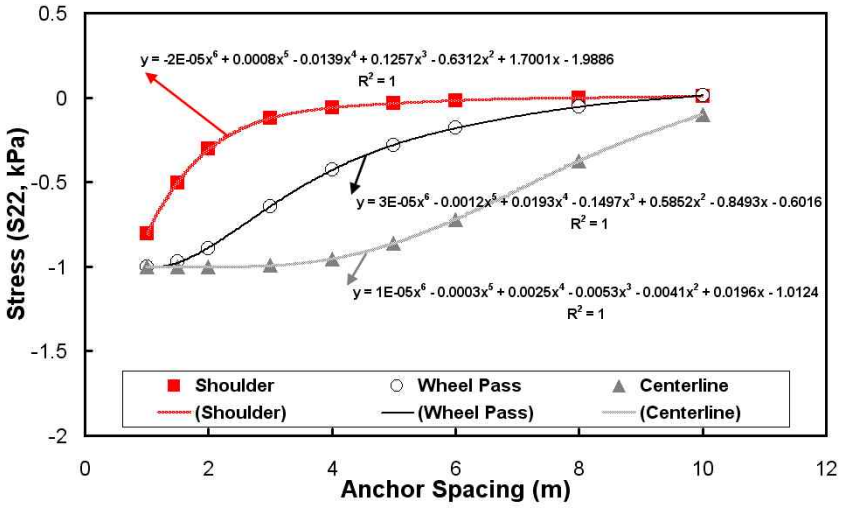
※ 긴장 간격에 따른 횡방향 긴장 응력 손실 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 정착구 사이의 횡응력 손실 범위 발생



⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소 긴장응력 변화

: 압축응력 1kPa을 긴장응력으로 작용하였을 때 슬래브 위치별 발생 최소 압축응력



- 슬래브 각 위치별 긴장응력 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소응력 비율

긴장 간격(m)	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10
Shoulder	0.806	0.502	0.302	0.122	0.060	0.032	0.018	0.001	0
Wheel Pass	0.999	0.972	0.891	0.642	0.427	0.281	0.180	0.055	0
Centerline	1.000	1.000	1.000	0.993	0.953	0.860	0.719	0.373	0.098

○ 포장 특성상 Shoulder 부분에는 차륜하중이 재하되지 않는 것으로 가정하고 Wheel Pass에서의 횡방향 긴장력 전달률을 고려함

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7-(20.87+2.55+6.24+12.6)}{(2436-2250)\times 0.20} = 4.47m$$

⇨ 횡방향 긴장 간격 4.4m로 결정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브폭}(120m)}{\text{긴장간격}(4.4m)} = 27.27\text{개}$$

⇨ 횡방향 강선 개수 28개로 결정

- 긴장응력 검토

○ 28개의 강선을 4.4m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = 186kPa

○ Wheel Pass 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$186kPa > 194kPa \times 0.36 = 70kPa \quad \textbf{(불만족)}$$

⇨ 횡방향 긴장 간격 2.8m로 결정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}(120m)}{\text{긴장간격}(2.8m)} = 42.86\text{개}$$

⇨ 횡방향 강선 개수 43개로 결정

- 긴장응력 검토

○ 43개의 강선을 2.8m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = 186kPa

○ Wheel Pass 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$186kPa < 298kPa \times 0.693 = 206.5kPa \quad \textbf{(만족)}$$

▶ 43개의 강선을 2.8m간격으로 횡방향 긴장

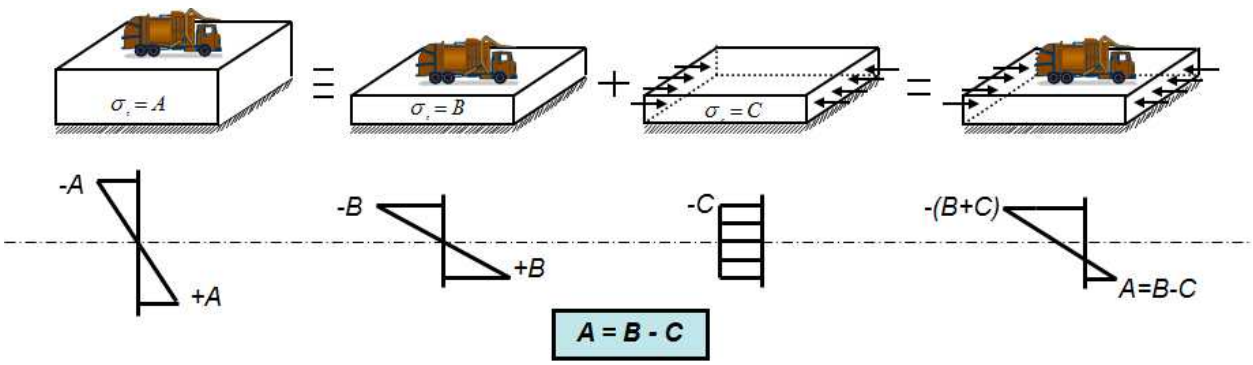
③ 응력 기준 설계 결과

PTCP 긴장 설계 결과			
긴장 방향	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
종방향 긴장	0.6m	14개	1149kPa
횡방향 긴장	2.8m	43개	206.5kPa

3. 피로파손에 의한 포장 설계

1) 피로파손 기준 설계 개념

PTCP를 설계할 때에 가장 중요한 두 가지의 항목은 슬래브의 두께와 긴장응력의 결정이라고 할 수 있다. AASHTO 피로 파손 공식을 기준으로 긴장력을 산정하는 설계 개념은 PTCP가 어떠한 두께의 콘크리트 포장을 대신하여 건설되어질 것인지를 결정하고 이러한 포장에 차륜하중에 의해 발생되는 인장응력을 예측한다. 그 후 PTCP 슬래브의 두께를 결정하여 이러한 슬래브에 하중이 작용할 때의 응력을 구하고 이러한 응력을 감소시켜서 대체될 콘크리트 포장에 발생하는 응력과 같아질 수 있는 크기의 응력을 구해 긴장량을 산정한다. 이러한 PTCP 설계 개념을 아래에 나타내었다.



2) 포장 설계

i) JCP 설계

▷ 설계 요소

○ 설계 교통하중(18kips 단축하중 환산 교통량) : DTN

○ 최종 서비스 지수 : Pt = 2.5

○ 하중전달계수 : J = 3.2

○ 콘크리트 휨강도 : 4.5MPa

○ 콘크리트 허용강도(휨강도의 75%) : 3.375Mpa(480psi)

○ 콘크리트 탄성계수 : 27GPa (프와송비 : 0.15)

○ 하부 지반강성 : 210MPa/m(774pci)

▷ 콘크리트 포장 슬래브 계산식에 의한 두께 산정

⇨ 경험적 공용방정식

$$\log_{10} W_{18} = 7.35\log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{G_t}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22-0.32P_t)\log_{10}\left[\frac{S_c'(D^{0.75}-1.132)}{215.63\,J\left(D^{0.75}-\frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K_c}\right)^{0.25}}\right)}\right]$$

여기서 W_{18} : 설계기간 동안의 82kN 등가단축하중(ESAL)의 설계 차로당 누가 통가횟수

P_t : 설계 최종 서비스 지수

J : 콘크리트 포장형식에 따른 연속성을 반영하는 하중전달 계수(3.2 적용)

E_c : 콘크리트 슬래브의 설계 탄성계수(27GPa)

K_c : 콘크리트 슬래브아래 하부지반의 노상 지지력 계수(PCI)

D : 포장 슬래브 두께(m)

S_c' : 콘크리트 슬래브의 설계 휨강도

G_t : $\log_{10}\left(\frac{4.5-P_t}{4.5-1.5}\right)$로 표시되며, 임의 시점에 이어 Pt = 1.5인 경우 최대 서비스 능력 손실량에 대한 서비스 능력의 손실량 비율을 나타내는 함수

▷ 설계 교통량 산정

- 일반 고속도로 교통량 사용

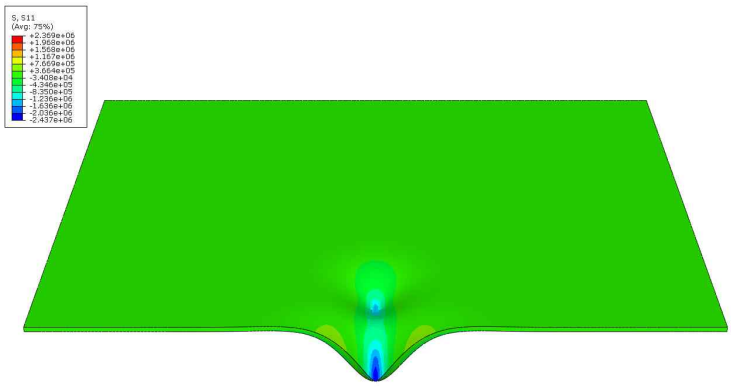
⇨ 20년 설계 교통량: 18.855(X10^6대)

⇨ 40년 설계 교통량: 37.71(X10^6대)

설계 수명 JCP 두께	
20년($D_{20년}$)	25.5cm
40년($D_{40년}$)	28.7cm

ii) PTCP 종방향 소요 긴장량 산정

○ 차륜하중 : 단축하중(82kN/Axle), Edge Loading일 경우 최대 응력 발생



⇨ 슬래브에 발생하는 종방향 최대 인장응력 산출

- 분석 결과

종방향 응력		JCP		PTCP	
		20년 수명	40년 수명	σ_{15cm}	σ_{20cm}
Vehicle		1.018MPa	0.853MPa	2.163MPa	1.454MPa
소요 긴장량	15cm	1.145MPa	1.31MPa	–	–
	20cm	0.436MPa	0.601MPa		

iii) 긴장 간격 산정

① 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 15cm PTCP 설계

피로파손에 의한 포장 설계 결과 (종방향 긴장)			
설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
20년 설계 수명	80cm	11개	1.204MPa
40년 설계 수명	70cm	12개	1.313MPa

② 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 20cm PTCP 설계

피로파손에 의한 포장 설계 결과 (종방향 긴장)			
설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
20년 설계 수명	1.5m	6개	0.480MPa
40년 설계 수명	1.1m	8개	0.656MPa

4. PTCP 설계 결과

① 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 15cm PTCP 설계

응력 기준 포장 설계 결과			
긴장 방향	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
종방향 긴장	70cm	12개	1313kPa
횡방향 긴장	6m	20개	33.3kPa

피로파손에 의한 포장 설계 결과 (종방향 긴장)			
설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
20년 설계 수명	80cm	11개	1204kPa
40년 설계 수명	70cm	12개	1313kPa

∴ 응력 기준 포장 설계 결과가 보수적이기 때문에 이에 따라 PTCP를 설계하여야 하며 피로파손을 고려할 경우에도 40년 이상의 포장 수명이 보장된다.

② 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 20cm PTCP 설계

응력 기준 포장 설계 결과			
긴장 방향	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
종방향 긴장	0.6m	14개	1149kPa
횡방향 긴장	2.8m	43개	206.5kPa

피로파손에 의한 포장 설계 결과 (종방향 긴장)			
설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	긴장응력(σ_P)
20년 설계 수명	1.5m	6개	480kPa
40년 설계 수명	1.1m	8개	656kPa

∴ 응력 기준 포장 설계 결과가 보수적이기 때문에 이에 따라 PTCP를

설계하여야 하며 피로파손을 고려할 경우에도 40년 이상의 포장 수명이 보장된다.

5. 고속도로 본선 포장 PTCP 설계

- 종방향 길이 120m, 횡방향 폭 8.2m

설계 두께 15cm		
긴장 방향	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)
종방향 긴장	70cm	12개
횡방향 긴장	6m	20개
설계 두께 20cm		
긴장 방향	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)
종방향 긴장	60cm	14개
횡방향 긴장	2.8m	43개

∴ 피로파손을 고려할 경우 40년 이상의 포장 수명이 보장된다.

- 계약서

건설공사 표준하도급 계약서 (기본)

1. **발 주 자** : 한국도로공사
2. **원도급공사명** : 고속국도 제10호선 장흥-광양간 건설공사 (제6공구)
3. **하도급공사명** : PTCP포장공사
4. **공 사 장 소** : 전남 보성군 보성읍 용정리~수남리
5. **공 사 기 간** : 착공 2011년 07월 29일 ~ 준공 2011년 12월 31일
6. **계 약 금 액** : 일금 삼억사천육백오십만 원 정 (₩346,500,000)
   - o 공 급 금 액 : 일금 삼억일천오백만 원 정 (₩315,000,000)
   - (노무비 : 일금 원 정)
   - * 건설산업기본시행령 제84조 규정에 의한 노무비
   - o 부가가치세 : 일금 삼천일백오십만 원 정 (₩31,500,000)
   - ※ 변경전계약금액 : 일금 원 정 (₩0)
7. **대금의 지급**
   - 가. 선급금
     - (1) 계약체결후 ( ) 일 이내에 일금 원 정 (₩0)
     - (2) 발주자로부터 지급받은 날 또는 계약일로부터( ) 일 이내 그 내용과 비율에 따름
   - 나. 기성부분금 : (1) 월 (1) 회
     - (2) 목적물 수령일로부터 (60) 일 이내
     - (3) 지급방법 : 현금 100.00 % , 어음 0.00 %
   - 다. 설계변경, 경제상황변동 등에 따른 대금조정 및 지급
     - (1) 발주자로부터 조정받은 날로부터 (30)일 이내 그 내용과 비율에 따라 조정
     - (2) 발주자로부터 지급받은 날로부터 15 일 이내 지급
8. **지급자재의 품목 및 수량** : 별도첨부
9. **계 약 보 증 금** : 일금 삼천사백육십오만 원 정 (₩34,650,000)
10. **하자보수보증금율** : 3 %
11. **하자담보책임기간** : 원도급공사 준공 후 2 년
12. **지 체 상 금 율** : 0.1 %
13. **공 동 지 분 율** :

당사자는 위 내용과 별첨 공사하도급 계약조건, 설계도 (0) 장, 시방서 (0)책에 의하여 이 공사하도급 계약을 체결하고 계약서 2통을 작성하여 각각 1통씩 가진다.

2011 년 07 월 29 일

*** 원사업자**

주소 : 서울 특별시 송파구 신천동 7 - 19

상호 : 한 라 건 설 주 식 회 사

성명 : 정 무 현 (인)

*** 수급사업자**

주소 : 강원 춘천시 효자동 192-1 강원대학교강원창업보육센타 117호

상호 : (주) 삼우아이엠씨

성명 : 김 기 헌 (인)

본계약서는 한라건설(주)과 상기업체간에 공인인증을 득하여 체결한 전자계약서입니다.
본계약서에 대한 문의는 한라건설(주) 담당부서에 문의하시기 바랍니다.

한 라 건 설 주 식 회 사

부록 2. 경부고속도로 천안영업소 포장에 PTCP 적용

시공 전경을 아래에 정리하였다.



(1) 보조기층



(2) 강선 배치



(3) 강선 배치 전경



(4) 콘크리트 타설



(5) 인장 작업 실시



(6) 시공 전경

부록 3. 순천국도 PTCP 현장 DCP 시험결과

1. 개요

- 순천국도 무인과적차량 단속구간에 기 시공된 PTCP 포장의 DCP 시험을 통하여 포장처짐과 지지력과의 상관성을 분석하고자 하였다.
- 시험결과는 경희대에서 구조해석의 입력변수로 활용하여 구조검토 수행 후 발주처 및 관계기관에 설명하고자 하였다.
- 향후 PTCP 설계시 포장 하부지반에 대한 설계요소 적용 방안 및 향후 조치계획을 수립하고자 하였다.

2. 시험내용

2.1 포장현황

- 송기(순천) 및 송기(보성) 현장은 처짐현상이 관찰되지 않으나 서면과 오미현장에서 중차량 통과시 PTCP 슬래브와 Gap 슬래브에서 처짐현상이 관찰되었다.
- 순천국도 4개 현장의 현황은 다음과 같다.

[표 1] 순천국도 PTCP 포장 현황

현장	시공규모 (L×W×T)	콘크리트	바닥면 처리	처짐현상	WIM
송기(순천)	80×3.50×0.15m	초속경	Sand	없음	PVDF
송기(보성)	80×3.65×**0.20m**	**초조강**	Cement Paste	없음	Ceramic (ECM)
서면(곡성)	80×3.50×0.15m	초속경	Cement Paste	**처짐발생**	**Quarts (Kistler)**
오미(구례)	80×3.15×0.15m	초속경	Cement Paste	**처짐발생**	PVDF

2.2 DCP 시험 내용

■ DCP 시험은 [표 2]의 일정으로 수행하였다.

[표 2] 순천국도 DCP 시험 일정

일 정	시험현장	시험개소	비 고
2010년 10월 4일	· 예비시험	· 1개소	· DCP 예비시험
10월 5일	· 오전: 송기(순천)	· 5개소	· PTCP 슬래브 인접 5cm 노견에서 시험
	· 오후: 오미	· 7개소	· 하동방향 아스팔트 포장 5개소와 구례방향 PTCP 노견에서 2회 시험
10월 6일	· 서면	· 5개소	· PTCP 슬래브 인접 5cm 노견에서 시험

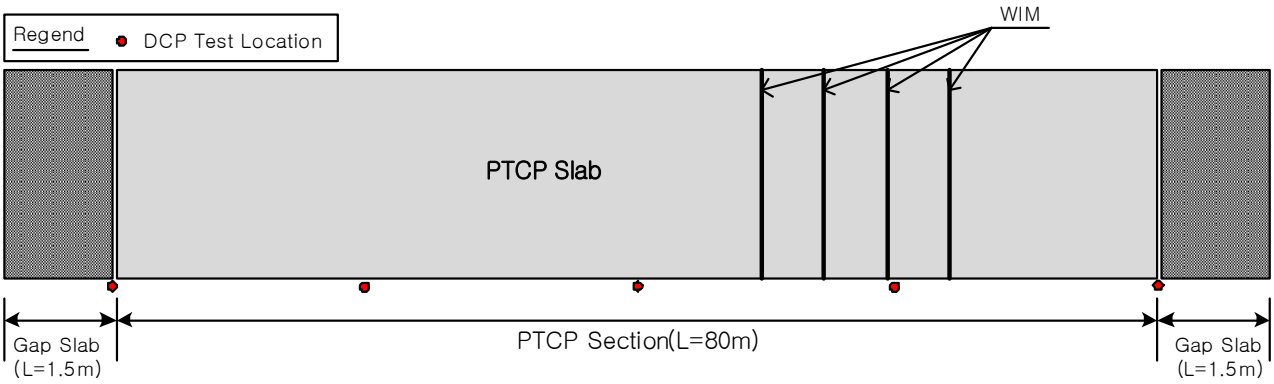
■ DCP Test(콘관입시험)를 통하여 포장하부 보조기층의 Modulus를 구하여 지지력을 판단하고, Modulus는 구조해석 입력변수로 사용하고자 하였다.

■ 송기(순천), 서면, 오미 3개 현장에 대해 DCP 시험 수행.

- 송기(보성)은 송기(순천)과 동일한 구간에 위치하므로 포장하부의 차이가 없을 것으로 예상되므로 측정대상에서 제외하였다.

■ DCP Test 측정위치

- 각 현장마다 20m의 간격으로 5개소를 시험하며 오미현장만 7개소 시험하였다.



[그림 1] DCP Test 측정 위치

3. 시험방법

■ 아스팔트 포장 천공

▶ 천공 후 에어컴프레셔를 이용하여 분진제거



[그림 2] DCT 시험위치 천공

■ 수직확인, 천공깊이 측정, 시험장비 설치



[그림 3] DCP 장비 설치

■ 타격횟수와 관입량 측정

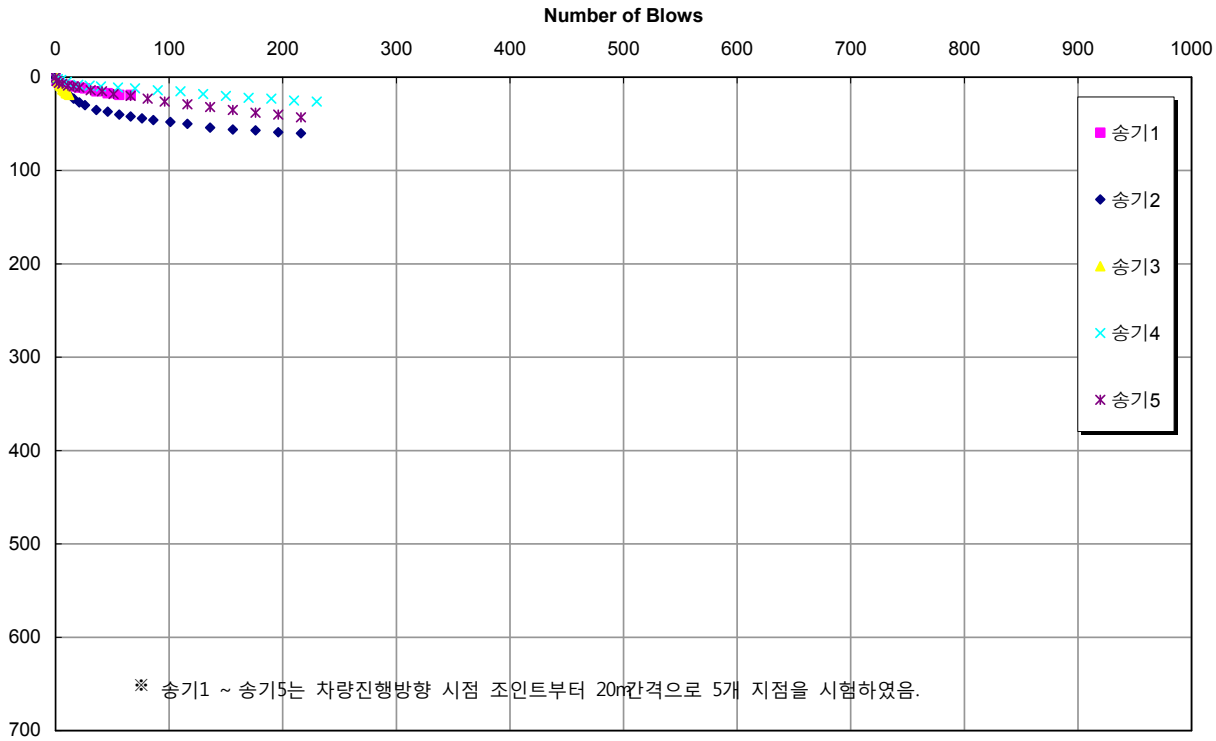


[그림 4] DCP 시험

4. 시험결과

4.1 송기(순천방향) 시험결과

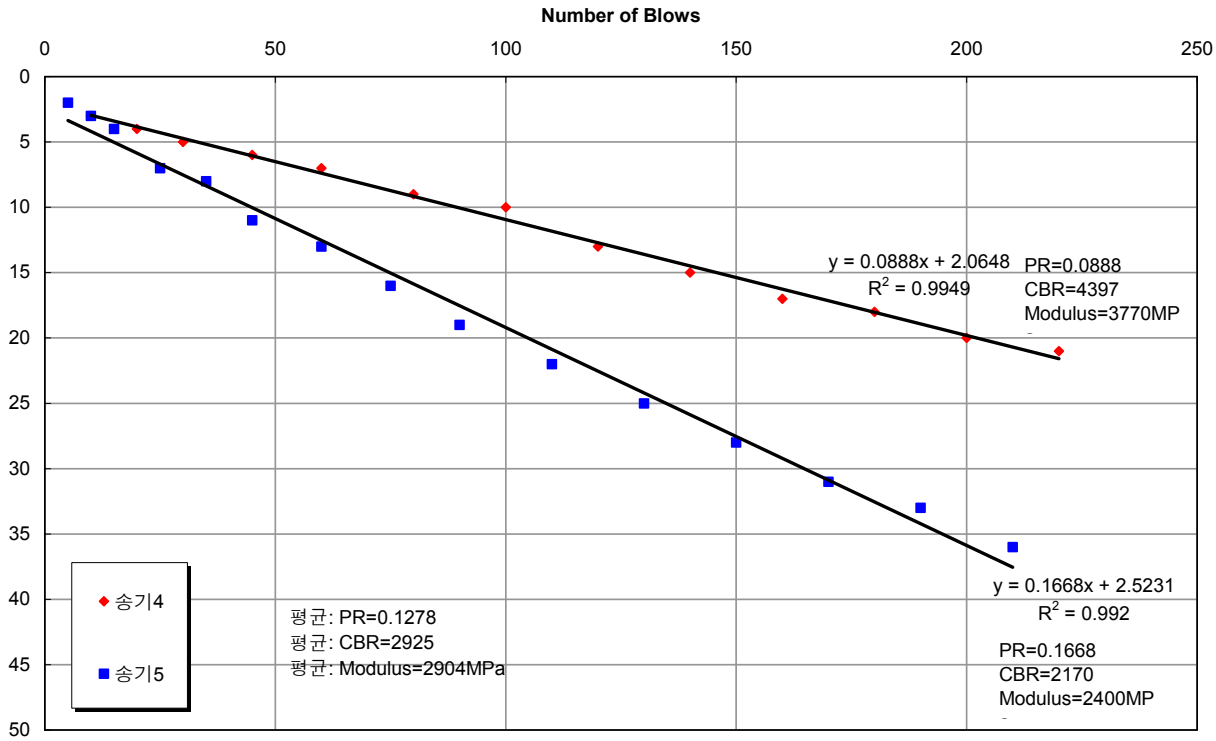
- [그림 5]는 송기(순천방향)검문소 DCP 시험결과를 나타낸 것으로 총 5개지점을 시험하였다.
- 5개지점 모두 타격횟수에 따라 관입량이 매우 적게 나타남. 200회 이상을 타격하여도 관입깊이가 매우 미소하여 시험을 중단하였다. (송기 1, 3번은 콘이 골재에 걸려 시험 중단됨.)
- 이 결과는 송기현장의 아스팔트 포장하부가 매우 양호한 지지력을 나타내는 것으로 판단된다.



[그림 5] 송기(순천방향)검문소 시험결과

- [그림 5]의 데이터를 분석할 때 결정계수(R^2)가 크게 나타나는 4번과 5번을 대표값으로하여 보조기층의 Modulus를 분석하였다.

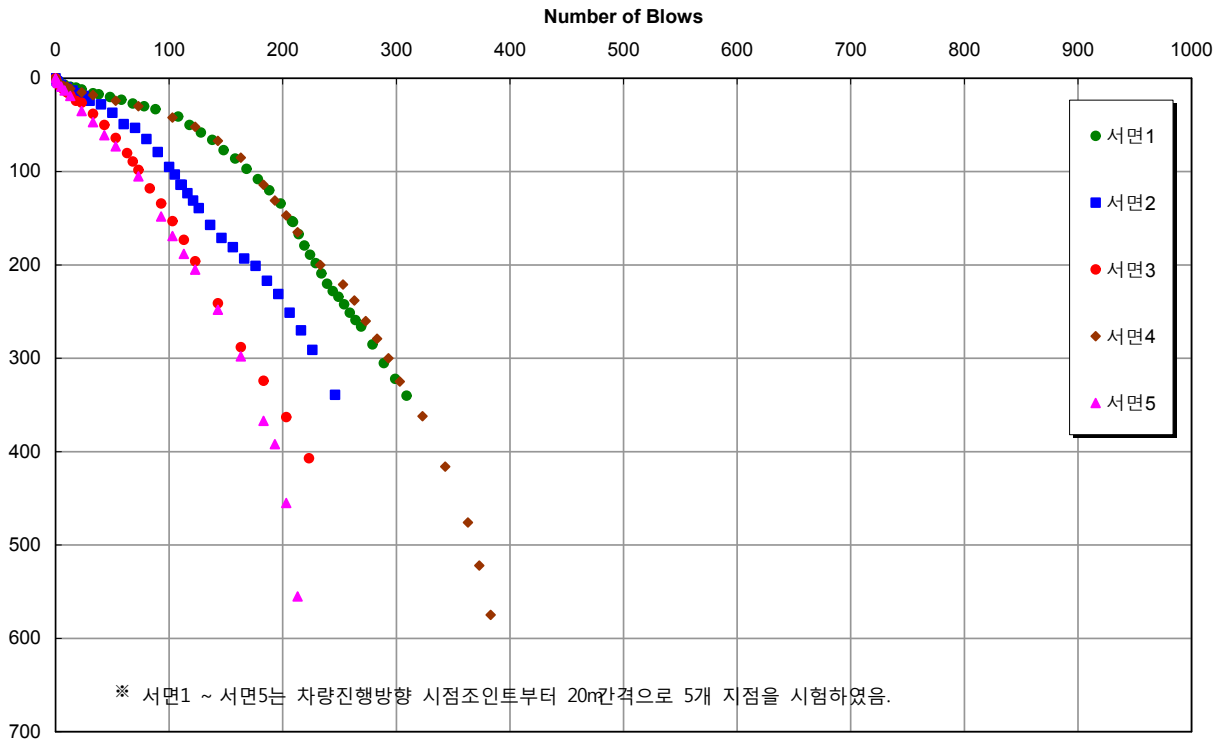
■ 평균 PR은 0.1278mm/blow이며 이 값과 CBR 및 Modulus의 상관관계식으로 계산한 결과 [그림 6]에서와 같이 평균 Modulus는 2904MPa로 나타났다.



[그림 6] 송기(순천방향)검문소 시험결과의 Modulus 분석

4.2 서면 시험결과

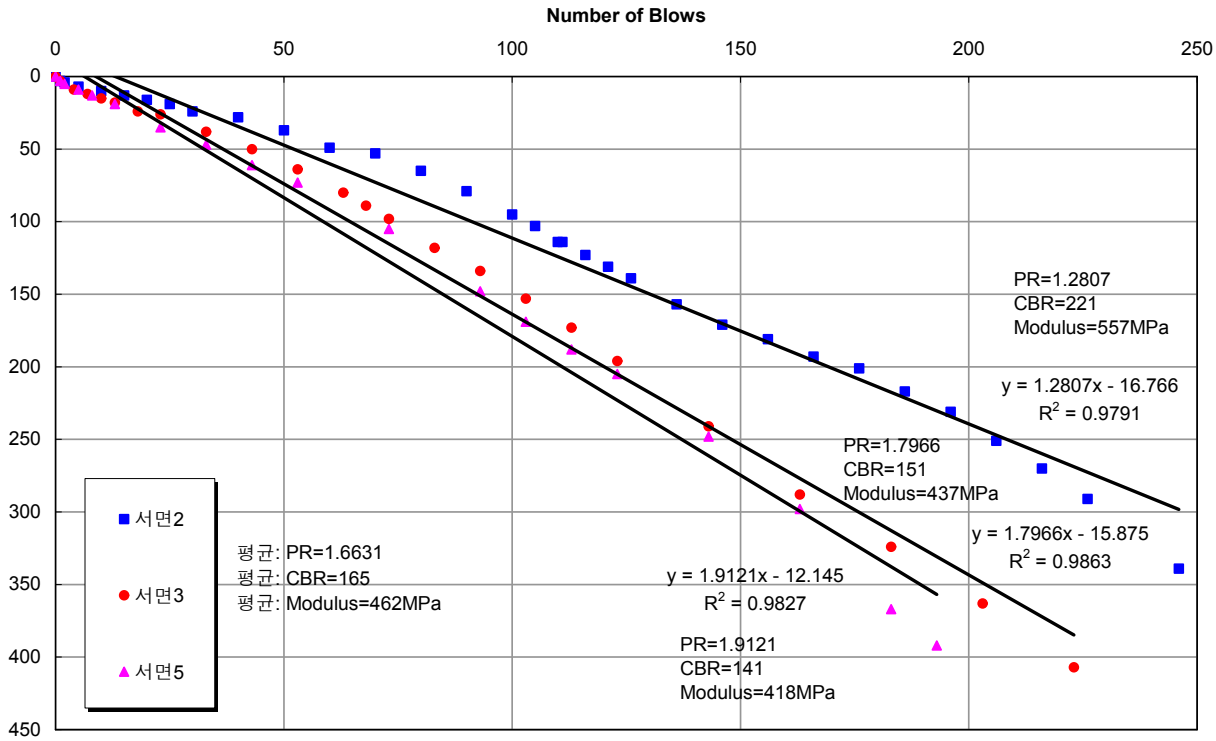
- [그림 7]은 서면검문소 DCP 시험결과를 나타낸 것으로 총 5개지점을 시험하였다.
- 5개지점 모두 타격횟수에 따라 관입량이 매우 크게 나타나며, 송기현장과는 매우 대조되는 경향을 나타낸다.
- 이 결과는 서면현장의 아스팔트 포장하부가 매우 불량한 지지력을 나타내는 것으로 판단되며 이러한 이유로 중차량 통행시 처짐이 크게 나타나는 것으로 판단된다.



[그림 7] 서면검문소 시험결과

- [그림 7]의 데이터에서 결정계수(R^2)가 크게 나타나는 2, 3, 5번을 대표값으로하여 보조기층의 Modulus를 분석하였다.

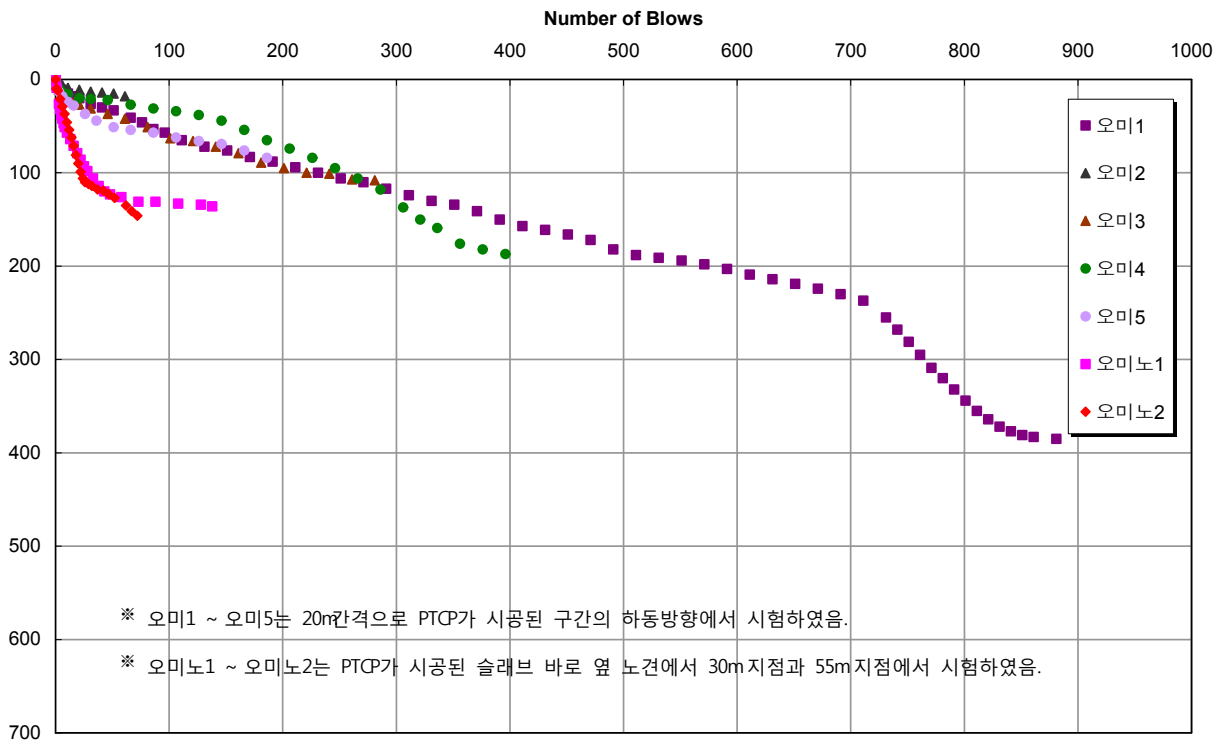
■ 평균 PR은 1.6631mm/blow로 나타났으며 평균 Modulus는 462MPa로서 송기검문소에 비하여 6.3배 차이를 나타내었다.



[그림 8] 서면검문소 시험결과의 Modulus 분석

4.3 오미 시험결과

- [그림 9]는 오미검문소 DCP 시험결과를 나타낸 것으로 하동방향의 아스팔트 포장에서 5개지점(오미1~오미5) 시험 후, 구례방향 PTCP가 시공된 노견에서 2개지점(오미노1~2)에서 시험하였다.
- 하동방향 아스팔트 포장에서 시험한 결과는 [그림 7]의 오미1~5로 나타내었으며 오미2와 오미5지점에서는 시험중 콘이 골재에 걸려 시험이 중단하였다.
- 시험이 중단된 2개소를 제외하고 하동방향에서 시험한 결과는 송기와 서면현장의 중간정도의 경향을 나타낸다.
- 그러나 PTCP 슬래브 노견에서 시험한 2개소의 결과는 관입량이 서면현장에 비하여 현저하게 크게 나타났다. 이러한 결과로 판단할 때 서면현장과 마찬가지로 중차량 통과시 처짐이 크게 나타나는 원인으로 판단된다.



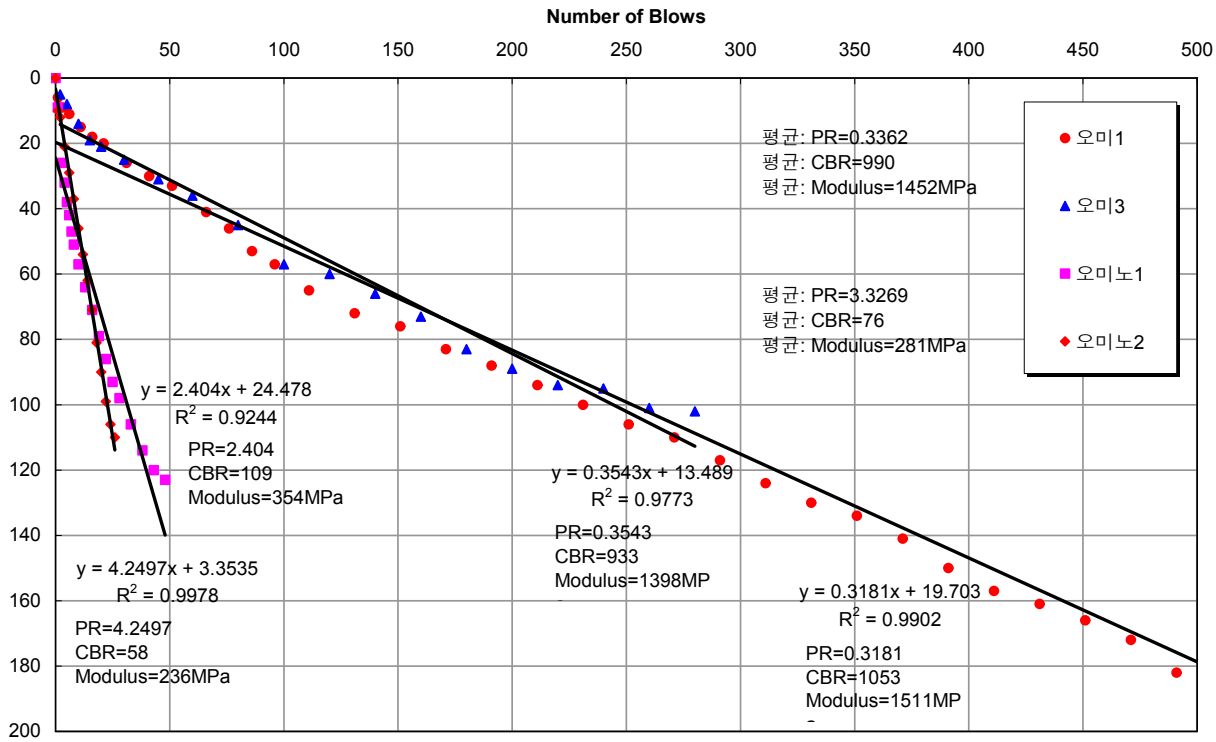
[그림 9] 오미검문소 시험결과

■ [그림 9]의 데이터에서 결정계수(R^2)가 크게 나타나는 오미1, 3번과 노견에서 측정한 1, 2번을 대표값으로하여 보조기층의 Modulus를 분석하였다.

■ 중앙선에서 1m 위치한 아스팔트 구간에서 평균 PR은 0.3362mm/blow로 나타났으며 노견에서의 PR은 4.2497mm/blow로 현저한 차이를 나타내었다.

■ 이 값을 Modulus로 역산할 때 각각 1452MPa과 281MPa로 계산된다.

■ Modulus의 차이는 송기검문소와 상대 비교할 때 아스팔트 1m에 위치한 지점에 비하여 2배의 차이이며, PTCP 노견에서 측정한 값과는 무려 10.3배의 차이를 나타낸다.

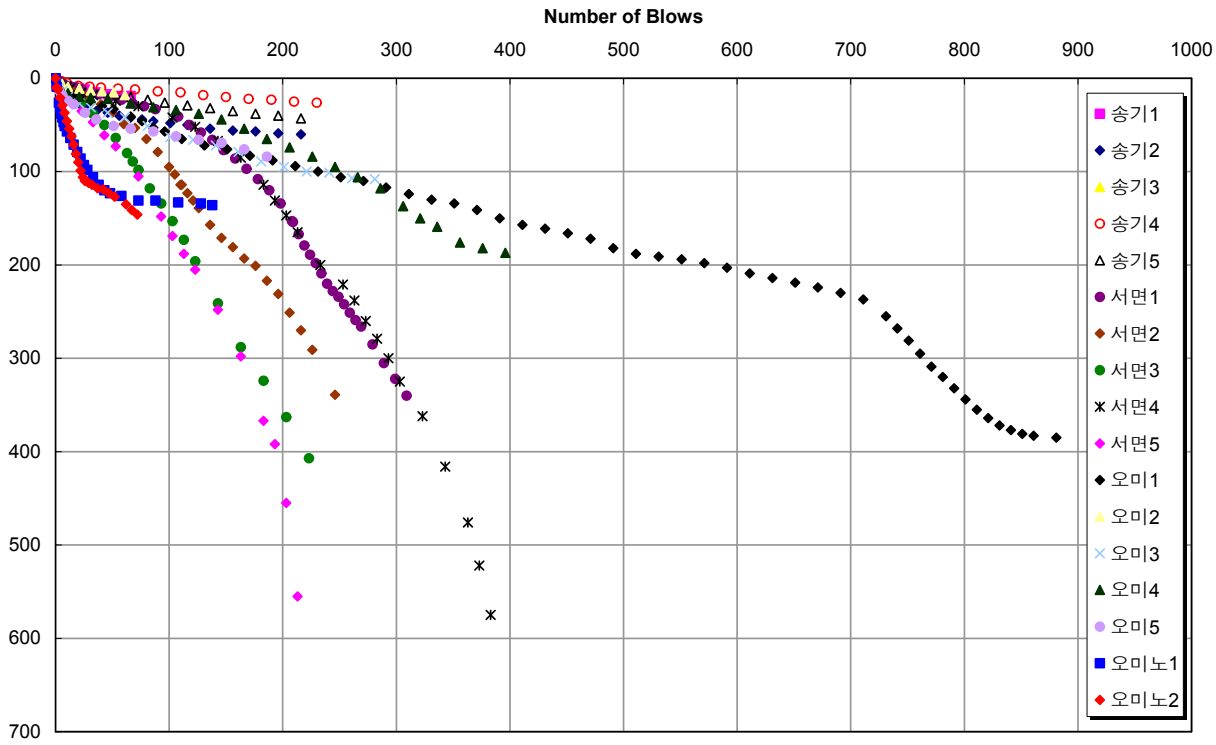


[그림 10] 오미검문소 시험결과의 Modulus 분석

4.4 시험결과 종합

■ [그림 11]은 DCP 시험을 수행한 3개 현장의 데이터를 모두 포함하여 나타낸 것이다. 기 서술한 바와 같이 송기검문소의 시험결과는 타격횟수에 따라 관입량이 매우 미소한 것을 알 수 있으며 오미와 서면검문소 순으로 나타남을 볼 수 있다.

■ 오미검문소의 PTCP 슬래브 노견에서 수행한 시험결과는 가장 관입량이 큰 것을 볼 수 있다.



[그림 11] 전체 시험결과

■ 각 현장별 DCP 시험의 경향이 확연하게 나타나고 상관계수가 높은 데이터를 분석하여 Modulus를 분석한 결과는 [표 3]에 요약하였다.

■ 시험결과를 종합할 때 송기검문소는 Modulus가 가장크게 나타나 양호한 지지력을 제공하는 것으로 판단할 수 있으며, 서면검문소와 오미검문소의 노견의 지지력은 매우 불량한 것으로 판단된다.

[표 3] 순천국도 DCP 시험결과 요약

구분	송기검문소	서면검문소	오미검문소		비고
			중앙선에서 1m 위치	PTCP 노견	
PR (mm/blow)	0.1278	1.6631	0.3362	3.3269	
CBR	2925	165	990	76	
Modulus (MPa)	2904	462	1452	281	

5. 결론 및 향후 대안

■ 순천국도 PTCP 현장의 포장하부 지지력을 파악하기 위하여 DCP 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결과가 분석되었다.

1) 송기(순천방향)검문소 시험결과 보조기층의 Modulus가 크게 나타나 포장하부의 지지력이 양호한 것으로 나타났다.

2) 서면검문소의 시험결과는 송기현장에 비하여 관입량이 크게 나타나 지지력 불량에 의한 PTCP 슬래브의 처짐이 크게 나타나는 것으로 판단된다.

3) 오미검문소의 시험결과는 PTCP 슬래브의 노견에서 관입량이 매우 크게 나타나므로 지지력이 매우 불량한 것으로 판단할 수 있으며, 하동방향의 아스팔트 포장에서 시험한 결과는 서면검문소와 송기검문소의 대략 중간정도의 관입량을 나타내었다.

■ 본 DCP 시험결과에 기초하여 향후 대안은 다음과 같다.

1) 경희대학교의 구조해석 입력변수로 고려하여 해석적 결과를 검토하여 추후 발주처에 제시하여야 할 것으로 사료된다. 이는 향후 WIM 구간에 PTCP를 적용할 경우 설계단계에서 DCP 시험을 통하여 지지력을 평가한 후 포장두께를 결정하는 것이 바람직할 것으로 제시해야 할 것으로 사료된다.

2) 송기검문소는 매우 양호한 지지력을 나타내므로 순천방향과 보성방향 2개소 모두 정확도가 높은 Quarts 센서로 교체하여도 무방할 것으로 판

단된다. (발주처와 WIM 관련 업체가 이러한 사항을 고민하는 것으로 판단됨.)

3) PTCP 슬래브의 횡방향 컬링 현상에 대한 방안은 첫째, WIM 설치 및 제어 업체에서 컬링에 대한 보정기법 개발 및 제시하여 최대한 오차율을 감소시키는 것이 가장 바람직할 것이며, 둘째, 아스팔트와 PTCP의 경계면에 분리막을 설치하지 않는 방안, 셋째, 포장두께 증가 방안(WIM 관련업체의 컬링에 대한 보정이 가능한 두께 제시), WIM 센서가 설치되는 구간에 횡방향 PS강연선을 설치하는 방안 또는 종방향 줄눈을 설치하여 컬링의 영향을 최소화 하는 방안에 대한 제시가 필요할 것으로 판단된다.

4) PTCP 슬래브의 처짐이 크게 나타나는 서면현장 및 오미현장은 지속적인 모니터링을 수행하여 PTCP 포장의 파손여부를 관찰하고 본 시험결과와 구조해석 결과를 관계기관에 제시하여 이에 대한 논의가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

부록 4. 여주-양평간 고속도로 교량접속구간 슬래브에 대한 PTCP 적용

접속슬래브 계산서

☞ 구속조건 : Higne + Elastic Link

☞ 접 속 슬 래 브 길이 : 9.00m

☞ 인장부 주철근 피복 : 100mm

☞ 중앙부 강 선 피복 : 80mm

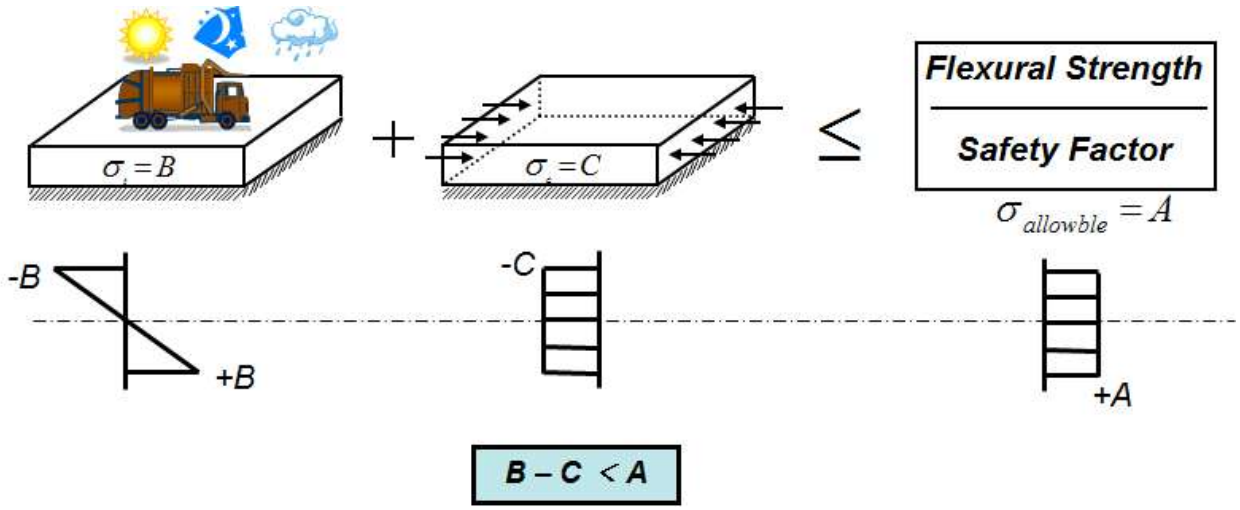
☞ 단 부 강 선 위치 : 단면 중심

부록 5. 냉정-부산 구간 서부산 영업소 PTCP 설계도서(검토)

□ 서부산 영업소 구간 PTCP 설계도서

1. PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement) 설계 개요

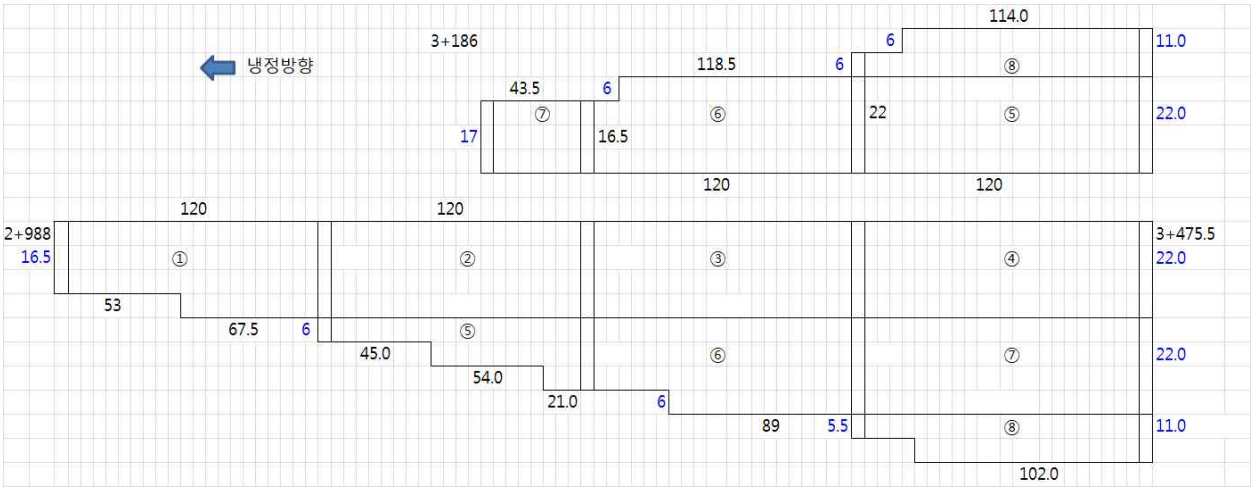
PTCP(Post-Tensioned Concrete Pavement)는 하중에 의해 포장체에 발생하는 인장 응력을 긴장력을 가하여 감소시키는 방식으로 텐던의 긴장에 의해 콘크리트 슬래브에 압축응력을 가하기 때문에 두께를 기존 콘크리트 포장에 비해서 반 이하로 대폭 줄일 수 있을 뿐만 아니라 줄눈 간격을 일반적으로 100m 내외에서 200m 이상까지도 가능하게 한다. PTCP의 설계 개념은 슬래브에 발생하는 응력을 콘크리트의 허용 휨강도보다 작도록 긴장력을 작용하는 것이다. 이러한 설계 개념은 미국의 FHWA와 Texas 교통부에서 도입하여 실제 사용 하고 있는 개념이다.



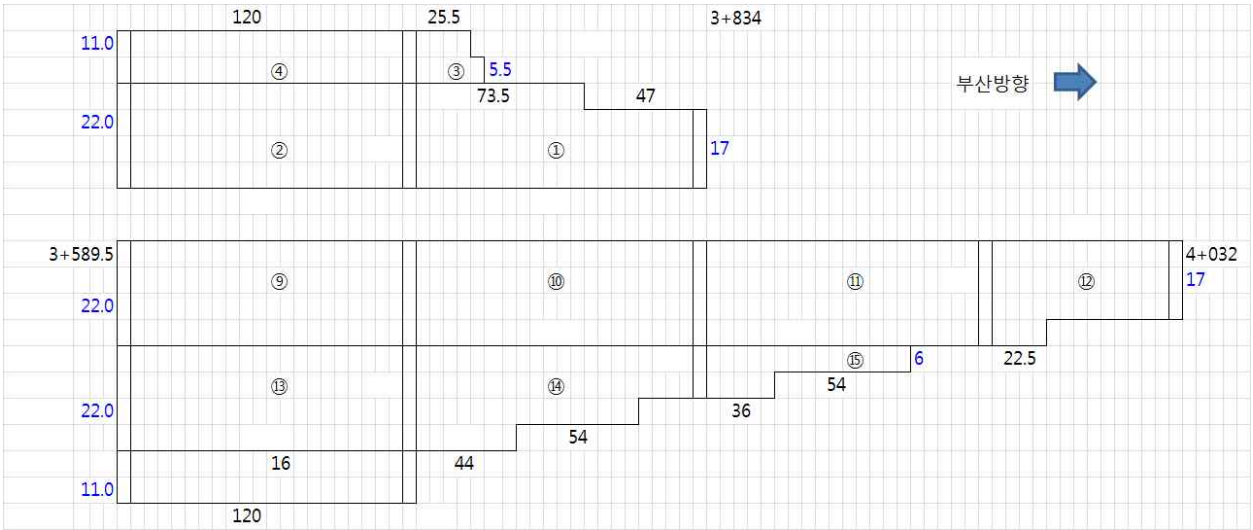
영업소 포장에서 대부분의 파손유형은 종방향 및 횡방향 줄눈에서의 파손이다. 따라서 영업소 포장에 PTCP를 적용하여 줄눈의 수를 획기적으로 줄임으로써 영업소 포장의 고성능 고내구성을 가져올 수 있을 것이다. 본 설계도서는 서부산 영업소 구간의 포장을 PTCP 단일 슬래브로 시공하기 위한 종방향 및 횡방향 긴장 간격설계에 대하여 기술하였다.

2. 설계 단면

1) 냉정방향 구간



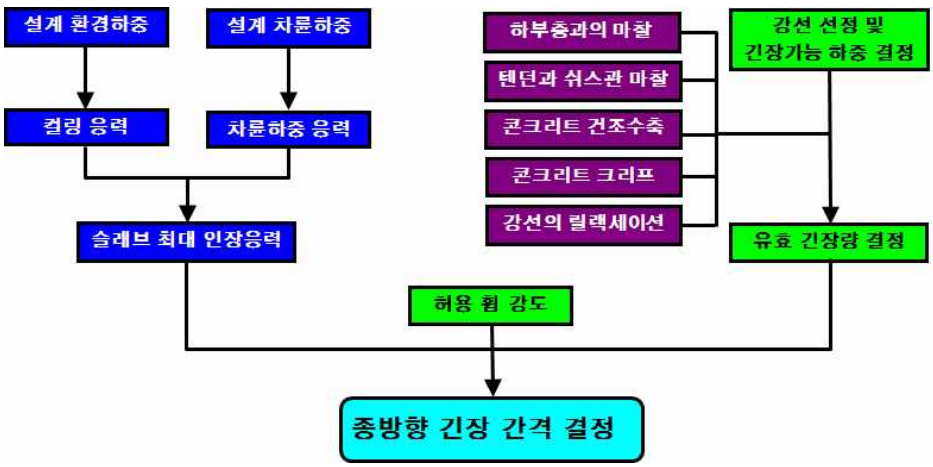
2) 부산방향 구간

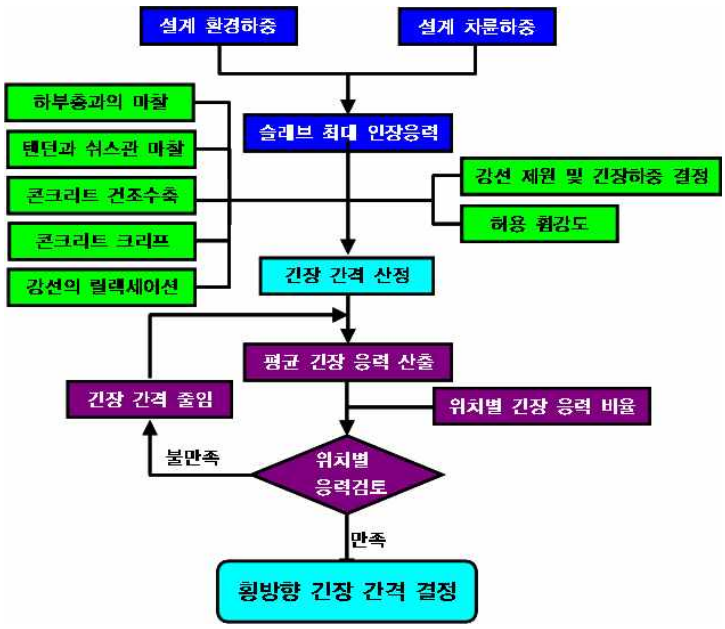


3. 응력 기준 포장 설계

1) 응력기준 설계 개념

PTCP의 긴장 설계는 최악의 하중조건을 고려하여 슬래브에 발생할 수 있는 최대 인장응력을 산정한 뒤, 강선의 제원과 하중 조합 경우를 결정하고 하부층과의 마찰로 인한 손실 등 각종 손실량을 구하여 실제 슬래브가 받을 압축응력 및 Tendon의 개수와 긴장 간격을 구함으로써 수행할 수 있다. PTCP 종방향 및 횡방향 긴장 설계 과정을 그림으로 나타내면 다음과 같다.





2) 설계 두께 15cm

① 종방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력 산출

○ 콘크리트 탄성계수(E): 27GPa

○ 포와송비(v): 0.15

○ 노상지지력계수(K)

⇨ 노상지지력계수(K)값은 '86 AASHTO에 제시된 기초방정식을 이용하여 흙쌓기(다짐도 95% 이상)의 시방 규정값을 사용하였다.

⇨ 시방 규정값: K_{30}=15kgf/cm^3 이상

$K_{75}=\frac{1}{2.2}\times 15kgf/cm^3=6.81kgf/cm^3=246PCI$

○ 환경하중 : 온도구배 0.6℃/cm, Curl Up, Curl Down 모두 고려

⇨ 실제 하부 지지층을 모사 할 수 있도록 무인장 스프링을 이용하여 하부층 모델링

○ 차륜하중 : 단축 및 복축 하중(82kN/Axle)

⇨ 슬래브 각 위치에 단축 및 복축 하중이 재하 되는 경우의 최대 응력 산정

⇨ 슬래브 중앙, 종방향 및 횡방향 단부, 슬래브 우각부 차륜하중 재하

○ 분석 결과

종방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	**1502**	
	Bottom of Slab(Curl Down)	**1530**	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	1650	1397
	Bottom of Slab(Edge)	**2773**	2224
	Top of Slab(Corner)	2203	**2218**
Total Max. Stress	Top of Slab	3720	
	Bottom of Slab	**4303**	

▷ **세부적인 종방향 긴장 설계 수식**

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}\}\times\text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{폭}\times\text{두께})}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ **종방향 긴장간격 산정 수식**

$$\text{긴장 간격}(s)=\frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력}-\text{콘크리트 허용 휨 강도})\times\text{슬래브 두께}(0.15m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 종방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t)

ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr})

ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ **각종 손실 인자 산정**

○ $F_{jacking}=222kN\times0.94=208.7kN$

○ $F_f=F_{jacking}(1-\text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율})=208.7(1-0.9)=20.87kN$

○ $F_t=F_{jacking}\left(1-\exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right)=208.7\left(1-\exp\left[-\frac{0.003\times\text{종방향 길이}}{2}\right]\right)$

○ $F_{sc}=\epsilon_{cu}\cdot E_s\cdot A_s=(2.25\times10^{-4})\times2\times10^{11}\times0.0001387=6.24kN$

○ $F_r=\left[\frac{\log t}{10}(\frac{F}{F_y}-0.55)\right]F=\left[\frac{\log 262800}{10}\times(\frac{155.4}{222}-0.55)\right]\times155.4=12.6kN$

▷ **콘크리트의 허용 휨강도는 휨강도 4.5MPa의 1/2로 가정**

∴ **콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa**

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

- 긴장 간격 산정

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 7.83 + 6.24 + 12.6)}{(4303 - 2250) \times 0.15} = 0.523m$$

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 34.38 + 6.24 + 12.6)}{(4303 - 2250) \times 0.15} = 0.437m$$

∴ 종방향 길이가 가장 짧은 경우와 가장 긴 경우를 모두 고려하여 설계 긴장 간격을 43cm로 결정

- 강선의 개수 산정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}}{\text{긴장간격}(0.43m)}$$

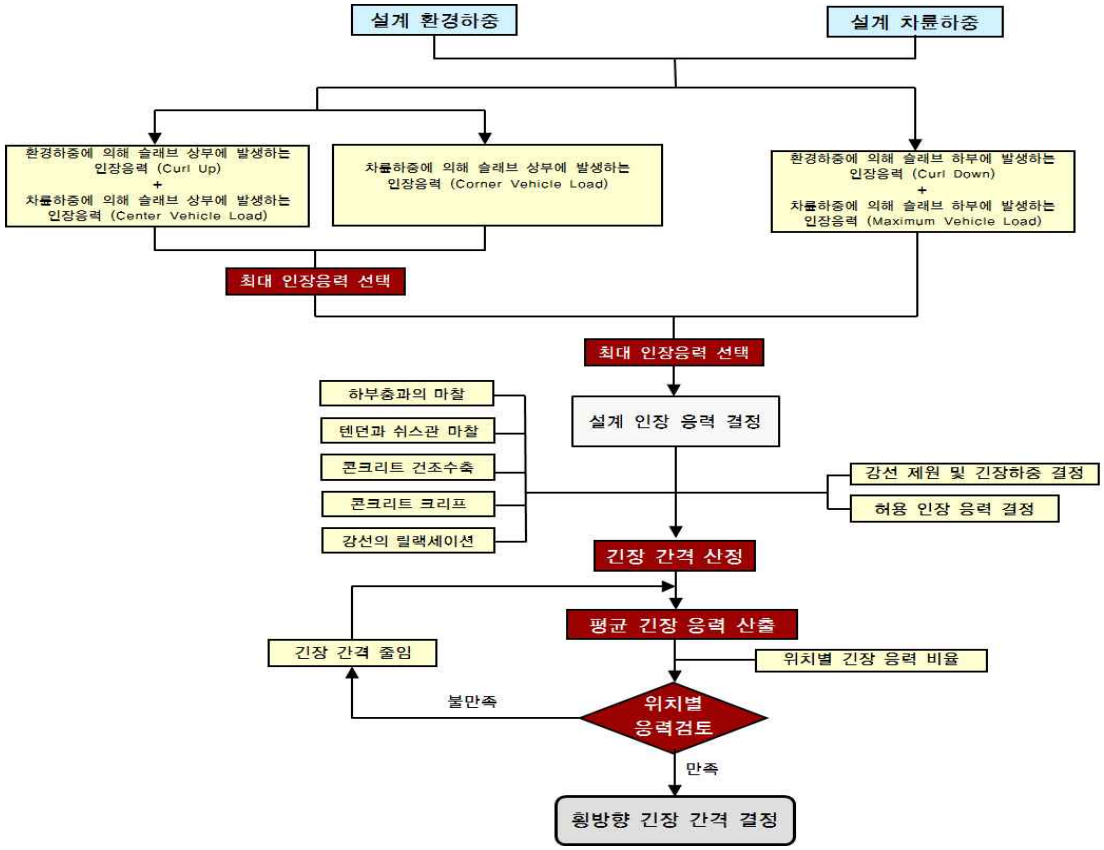
∴ 설계 구간별로 강선의 개수 산정

	PTCP 종방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	0.43m	상행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 폭 11m)	26개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	26개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	26개
부산 방향 (하행선)	0.43m	상행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 폭 11m)	26개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 폭 11m)	26개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 11m)	26개

② 횡방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 횡방향최대 인장응력 산출

○ 횡방향 긴장 설계 흐름도



○ 분석 결과

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1532	
	Bottom of Slab(Curl Down)	**1571**	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	1178	**1236**
	Top of Slab(Center)	374	437
	Bottom of Slab(Edge)	1120	1148
	Top of Slab(Corner)	2038	**2352**
Total Max. Stress	Top of Slab	**2352**	
	Bottom of Slab	**2807**	

▷ 세부적인 횡방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}\} \times \text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{종방향길이} \times \text{두께})}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ 횡방향 긴장간격 산정 수식

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}) \times \text{슬래브 두께}(0.15m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 횡방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t) ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr}) ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ 각종 손실 인자 산정

○ $F_{jacking} = 222kN \times 0.94 = 208.7kN$

○ $F_f = F_{jacking}(1 - \text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율}) = 208.7(1-0.9) = 20.87kN$

○ $F_t = F_{jacking}\left(1 - \exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right) = 208.7\left(1 - \exp\left[-\frac{0.003 \times \text{횡방향길이}}{2}\right]\right)$

○ $F_{sc} = \epsilon_{cu} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$

○ $F_r = \left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y} - 0.55\right)\right] F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55\right)\right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ 콘크리트의 허용 휨강도는 휨강도 4.5MPa의 1/2로 가정

∴ 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

- 긴장 간격 산정

ⅰ) 횡방향 길이가 가장 짧은 5.5m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 1.71 + 6.24 + 12.6)}{(2807 - 2250) \times 0.15} = 2.002m$$

ii) 횡방향 길이가 가장 긴 22m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7-(20.87+6.77+6.24+12.6)}{(2807-2250)\times 0.15} = 1.94m$$

∴ 종방향 길이가 가장 짧은 경우와 가장 긴 경우를 모두 고려하여 설계 긴장 간격을 1.9m로 결정

- 강선의 개수 산정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 종방향 길이}}{\text{긴장간격}(1.9m)}$$

∴ 설계 구간별로 강선의 개수 산정

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 슬래브

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{25.5m}{1.9m} = 13.42\text{개}$$

→ 설계 강선의 개수 14개로 결정

* 횡방향 긴장응력 594kPa + 허용 휨강도 2250kPa = 2844kPa

> 횡방향 발생응력 2807kPa

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 슬래브

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{120m}{1.9m} = 63.16\text{개}$$

→ 설계 강선의 개수 64개로 결정

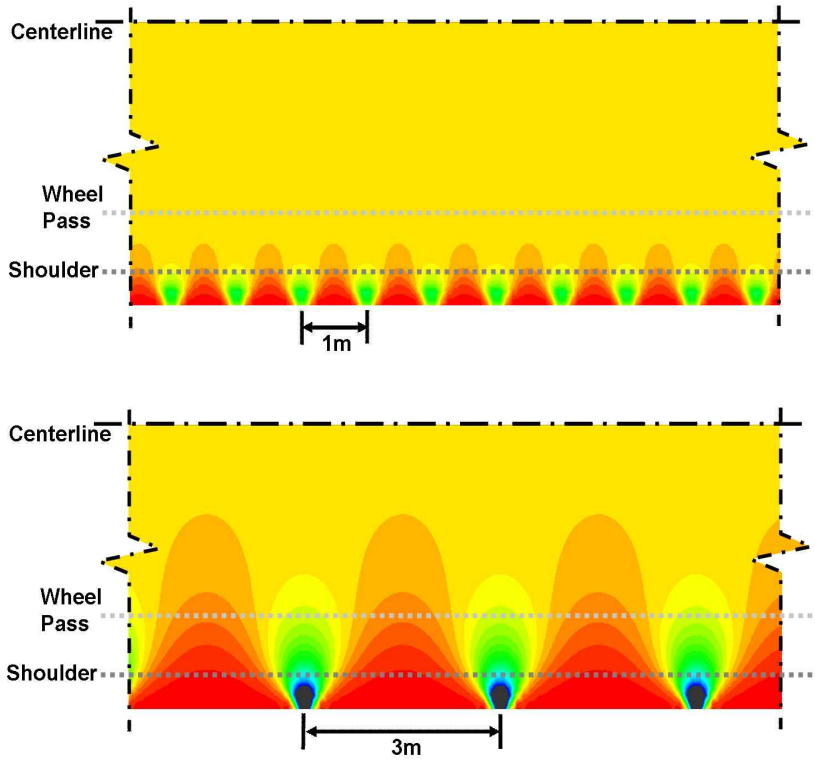
* 횡방향 긴장응력 577kPa + 허용 휨강도 2250kPa = 2827kPa

> 횡방향 발생응력 2807kPa

∴ 종방향 길이와 가장 긴 슬래브와 가장 짧은 슬래브 모두 긴장 간격을 1.9m로 하였을 때 응력 기준 만족

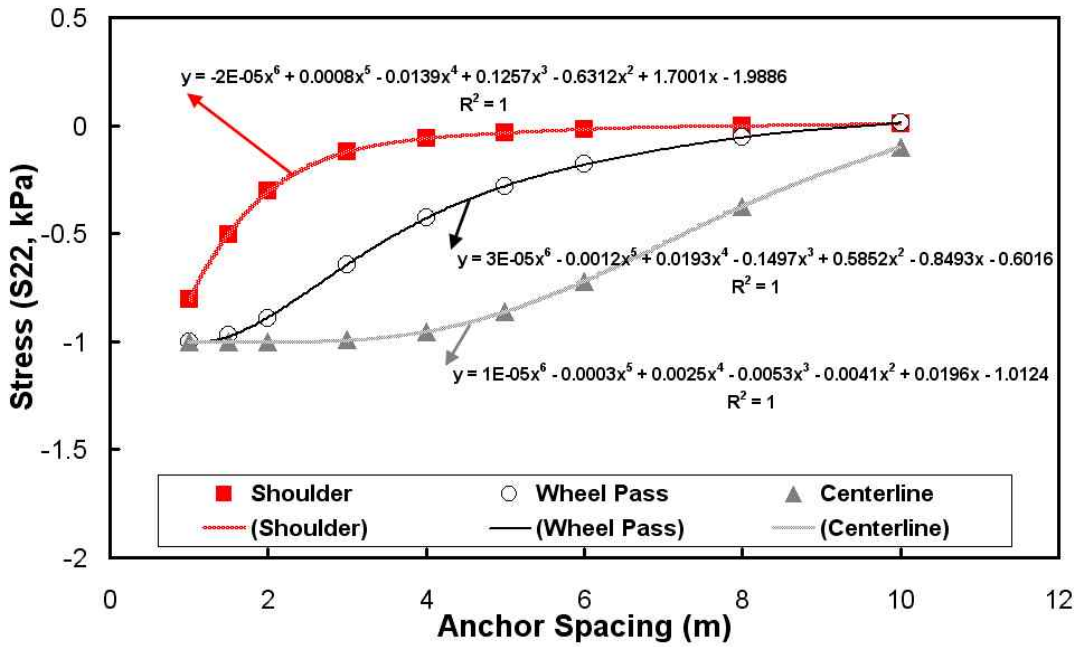
- 긴장 간격에 따른 횡방향 긴장 응력 손실 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 정착구 사이의 횡응력 손실 범위 발생



⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소 긴장응력 변화

: 압축응력 1kPa을 긴장응력으로 작용하였을 때 슬래브 위치별 발생 최소 압축응력



- 슬래브 각 위치별 긴장응력 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소응력 비율

긴장 간격(m)	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10
Shoulder	0.806	0.502	0.302	0.122	0.060	0.032	0.018	0.001	0
Wheel Pass	0.999	0.972	0.891	0.642	0.427	0.281	0.180	0.055	0
Centerline	1.000	1.000	1.000	0.993	0.953	0.860	0.719	0.373	0.098

○ 영업소 포장 특성상 Shoulder 부분에는 차륜하중이 재하되지 않는 것으로 가정하고 Wheel Pass에서의 횡방향 긴장력 전달률을 고려함

- 손실률을 고려한 긴장응력 검토

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 슬래브의 긴장응력 검토

○ 14개의 강선을 1.9m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = $557kPa$

○ 중앙부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$557kPa > 594kPa \times 0.911 = 541kPa \qquad \text{(NG)}$$

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 슬래브의 긴장응력 검토

○ 64개의 강선을 1.9m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = $557kPa$

○ 중앙부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$557kPa > 577kPa \times 0.911 = 525kPa \qquad \text{(NG)}$$

- 손실률을 고려한 긴장간격 및 강선의 개수 재산정

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 슬래브의 긴장간격 및 강선의 개수 재산정

○ 15개의 강선을 1.8m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = 557kPa

○ 중앙부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$557kPa < 636kPa \times 0.93 = 592kPa \quad (\text{OK})$$

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 슬래브의 긴장간격 및 강선의 개수 재산정

○ 67개의 강선을 1.8m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = 557kPa

○ 중앙부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$557kPa < 604kPa \times 0.93 = 562kPa \quad (\text{OK})$$

∴ 긴장간격 1.8m 결정, 설계 구간별 강선 개수 산정

	PTCP 횡방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	1.8m	상행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 길이 43.5m)	25개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	67개
부산 방향 (하행선)	1.8m	상행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 길이 25.5m)	15개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 77m)	43개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 90m)	50개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 120m)	67개

3) 설계 두께 20cm

① 종방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력 산출

○ 콘크리트 탄성계수(E): 27GPa

○ 포와송비(v): 0.15

○ 노상지지력계수(K)

⇨ 노상지지력계수(K)값은 '86 AASHTO에 제시된 기초방정식을 이용하여 흙쌓기(다짐도 95% 이상)의 시방 규정값을 사용하였다.

⇨ 시방 규정값: K_{30}=15kgf/cm^3 이상

$$K_{75}=\frac{1}{2.2}\times 15kgf/cm^3=6.81kgf/cm^3=246PCI$$

○ 환경하중 : 온도구배 0.6℃/cm, Curl Up, Curl Down 모두 고려

⇨ 실제 하부 지지층을 모사 할 수 있도록 무인장 스프링을 이용하여 하부층 모델링

○ 차륜하중 : 단축 및 복축 하중(82kN/Axle)

⇨ 슬래브 각 위치에 단축 및 복축 하중이 재하 되는 경우의 최대 응력 산정

⇨ 슬래브 중앙, 종방향 및 횡방향 단부, 슬래브 우각부 차륜하중 재하

○ 분석 결과

종방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	**1938**	
	Bottom of Slab(Curl Down)	**1997**	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	1071	923
	Bottom of Slab(Edge)	**1828**	1497
	Top of Slab(Corner)	**1459**	1268
Total Max. Stress	Top of Slab	**3397**	
	Bottom of Slab	**3825**	

▷ 세부적인 종방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}\}\times\text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{폭}\times\text{두께})}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ **종방향 긴장간격 산정 수식**

$$\text{긴장 간격}(s)=\frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN)-\sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력}-\text{콘크리트 허용 휨 강도})\times\text{슬래브 두께}(0.20m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 종방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t)

ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr})

ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ **각종 손실 인자 산정**

○ $F_{jacking}=222kN\times0.94=208.7kN$

○ $F_f=F_{jacking}(1-\text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율})=208.7(1-0.9)=20.87kN$

○ $F_t=F_{jacking}\left(1-\exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right)=208.7\left(1-\exp\left[-\frac{0.003\times\text{종방향 길이}}{2}\right]\right)$

○ $F_{sc}=\epsilon_{cu}\cdot E_s\cdot A_s=(2.25\times10^{-4})\times2\times10^{11}\times0.0001387=6.24kN$

○ $F_r=\left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y}-0.55\right)\right]F=\left[\frac{\log 262800}{10}\times\left(\frac{155.4}{222}-0.55\right)\right]\times155.4=12.6kN$

▷ **콘크리트의 허용 휨강도는 휨강도 4.5MPa의 1/2로 가정**

∴ 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

- 긴장 간격 산정

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 7.83 + 6.24 + 12.6)}{(3825 - 2250) \times 0.2} = 0.511m$$

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 34.38 + 6.24 + 12.6)}{(3825 - 2250) \times 0.2} = 0.427m$$

∴ 종방향 길이가 가장 짧은 경우와 가장 긴 경우를 모두 고려하여 설계 긴장 간격을 42cm로 결정

- 강선의 개수 산정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}}{\text{긴장간격}(0.43m)}$$

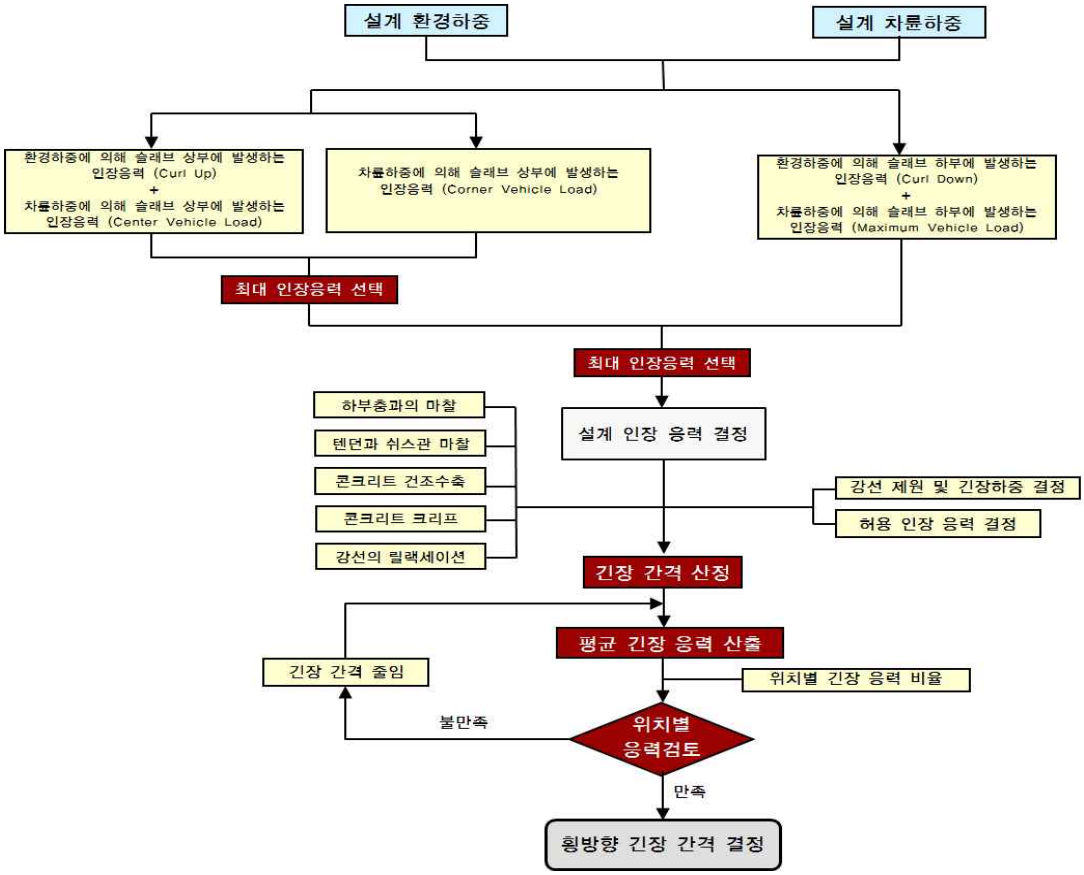
∴ 설계 구간별로 강선의 개수 산정

	PTCP 종방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	0.42m	상행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 폭 11m)	27개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	27개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	27개
부산 방향 (하행선)	0.42m	상행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 폭 11m)	27개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 폭 11m)	27개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 11m)	27개

② 횡방향 설계

▷ FEM 프로그램을 사용하여 최악의 하중 조건을 고려하여 슬래브에 발생 가능한 횡방향최대 인장응력 산출

○ 횡방향 긴장 설계 흐름도



○ 분석 결과

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max. Stress(kPa) Single Axle	Max. Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1686	
	Bottom of Slab(Curl Down)	2021	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	754	823
	Top of Slab(Center)	127	123
	Bottom of Slab(Edge)	651	655
	Top of Slab(Corner)	1160	1415
Total Max. Stress	Top of Slab	1813	
	Bottom of Slab	2844	

▷ 세부적인 횡방향 긴장 설계 수식

$$\frac{\{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}\} \times \text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장 단면적}(\text{종방향길이} \times \text{두께})}$$

$$\geq \text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}$$

▷ 횡방향 긴장간격 산정 수식

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum\text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대 인장응력} - \text{콘크리트 허용 휨 강도}) \times \text{슬래브 두께}(0.20m)}$$

※ 이 때 긴장 작업 시 발생 할 수 있는 각종 손실들을 반드시 고려

○ 횡방향 긴장 손실

ⅰ) 하부층 마찰저항에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실(f_f)

ⅱ) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실(f_t) ⅲ) 콘크리트 건조수축에 의한 손실(f_s)

ⅳ) 콘크리트 크리프에 의한 손실(f_{cr}) ⅴ) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실(f_r)

▷ 각종 손실 인자 산정

○ $F_{jacking} = 222kN \times 0.94 = 208.7kN$

○ $F_f = F_{jacking}(1 - \text{하부 마찰로 인한 슬래브 중앙의 긴장력 전달율}) = 208.7(1-0.9) = 20.87kN$

○ $F_t = F_{jacking}\left(1 - \exp\left[-\frac{KL}{2}\right]\right) = 208.7\left(1 - \exp\left[-\frac{0.003 \times \text{횡방향길이}}{2}\right]\right)$

○ $F_{sc} = \epsilon_{cu} \cdot E_s \cdot A_s = (2.25 \times 10^{-4}) \times 2 \times 10^{11} \times 0.0001387 = 6.24kN$

○ $F_r = \left[\frac{\log t}{10}\left(\frac{F}{F_y} - 0.55\right)\right]F = \left[\frac{\log 262800}{10} \times \left(\frac{155.4}{222} - 0.55\right)\right] \times 155.4 = 12.6kN$

▷ 콘크리트의 허용 휨강도는 휨강도 4.5MPa의 1/2로 가정

∴ 콘크리트 허용 휨강도 = 2.25MPa

▷ 긴장 간격 및 강선의 개수 산정

- 긴장 간격 산정

i) 횡방향 길이가 가장 짧은 5.5m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 1.71 + 6.24 + 12.6)}{(2844 - 2250) \times 0.2} = 1.41m$$

ii) 횡방향 길이가 가장 긴 22m 인 경우

$$\text{긴장간격}(s) = \frac{208.7 - (20.87 + 6.77 + 6.24 + 12.6)}{(2844 - 2250) \times 0.2} = 1.365m$$

∴ 종방향 길이가 가장 짧은 경우와 가장 긴 경우를 모두 고려하여 설계 긴장 간격을 1.3m로 결정

- 강선의 개수 산정

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 종방향 길이}}{\text{긴장 간격}(1.3m)}$$

∴ 설계 구간별로 강선의 개수 산정

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 슬래브

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{25.5m}{1.3m} = 19.62\text{개}$$

→ 설계 강선의 개수 20개로 결정

* 횡방향 긴장응력 636kPa + 허용 휨강도 2250kPa = 2886kPa

> 횡방향 발생응력 2844kPa

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 슬래브

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{120m}{1.3m} = 92.31\text{개}$$

→ 설계 강선의 개수 93개로 결정

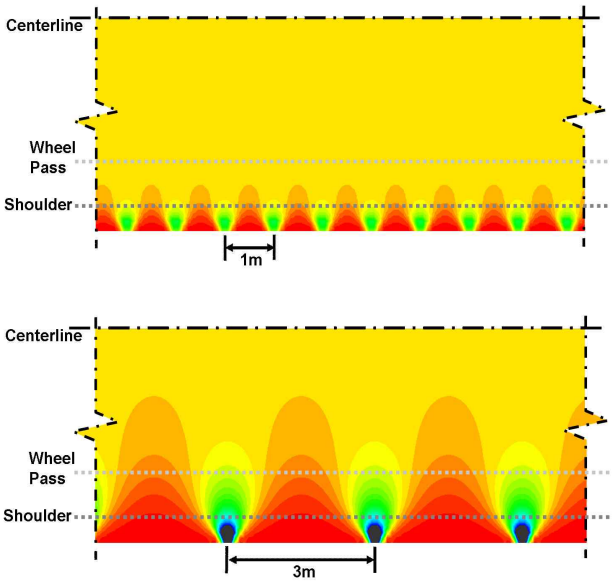
* 횡방향 긴장응력 629kPa + 허용 휨강도 2250kPa = 2879kPa

> 횡방향 발생응력 2844kPa

∴ 종방향 길이와 가장 긴 슬래브와 가장 짧은 슬래브 모두 긴장 간격을 1.3m로 하였을 때 응력 기준 만족

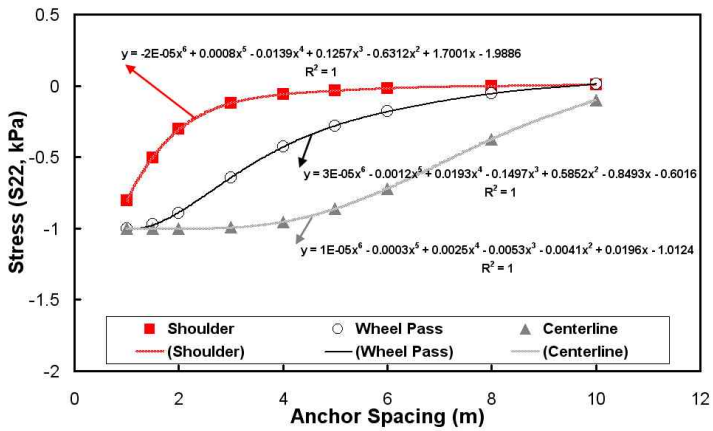
- 긴장 간격에 따른 횡방향 긴장 응력 손실 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 정착구 사이의 횡응력 손실 범위 발생



⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소 긴장응력 변화

: 압축응력 1kPa을 긴장응력으로 작용하였을 때 슬래브 위치별 발생 최소 압축응력



- 슬래브 각 위치별 긴장응력 검토

⇨ 긴장 간격에 따른 횡방향 최소응력 비율

긴장 간격(m)	1	1.5	2	3	4	5	6	8	10
Shoulder	0.806	0.502	0.302	0.122	0.060	0.032	0.018	0.001	0
Wheel Pass	0.999	0.972	0.891	0.642	0.427	0.281	0.180	0.055	0
Centerline	1.000	1.000	1.000	0.993	0.953	0.860	0.719	0.373	0.098

○ 영업소 포장 특성상 Shoulder 부분에는 차륜하중이 재하되지 않는 것으로 가정하고 Wheel Pass에서의 횡방향 긴장력 전달률을 고려함

- 손실률을 고려한 긴장응력 검토

i) 종방향 길이가 가장 짧은 25.5m 슬래브의 긴장응력 검토

○ 20개의 강선을 1.3m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = $594kPa$

○ 중앙부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$594kPa < 629kPa \times 0.996 = 626kPa \qquad (OK)$$

ii) 종방향 길이가 가장 긴 120m 슬래브의 긴장응력 검토

○ 93개의 강선을 1.3m 간격으로 횡방향 긴장

○ 필요긴장응력(σ_P) = $594kPa$

○ 중앙부 응력 검토

⇨ 필요긴장응력(σ_P) < 긴장응력×긴장응력전달비율

$$594kPa < 636kPa \times 0.996 = 634kPa \qquad (OK)$$

∴ 긴장간격 1.3m 결정, 설계 구간별 강선 개수 산정

	PTCP 횡방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	1.3m	상행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 길이 43.5m)	34개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	93개
부산 방향 (하행선)	1.3m	상행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 길이 25.5m)	20개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 77m)	60개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 90m)	70개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 120m)	93개

4) 응력 기준 설계 결과

① 설계 두께 15cm

- 종항뱡 긴장 설계

	PTCP 종방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	0.43m	상행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 폭 11m)	26개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	26개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	26개
부산 방향 (하행선)	0.43m	상행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	52개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 폭 11m)	26개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 폭 11m)	26개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 22m)	52개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 11m)	26개

- 횡항뱡 긴장 설계

	PTCP 횡방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	1.8m	상행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 길이 43.5m)	25개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	67개
부산 방향 (하행선)	1.8m	상행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 길이 25.5m)	15개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 77m)	43개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 90m)	50개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 120m)	67개

② 설계 두께 20cm

- 종항뱡 긴장 설계

	PTCP 종방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	0.42m	상행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 폭 11m)	27개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	27개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	27개
부산 방향 (하행선)	0.42m	상행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 폭 11m)	27개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 폭 11m)	27개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 11m)	27개

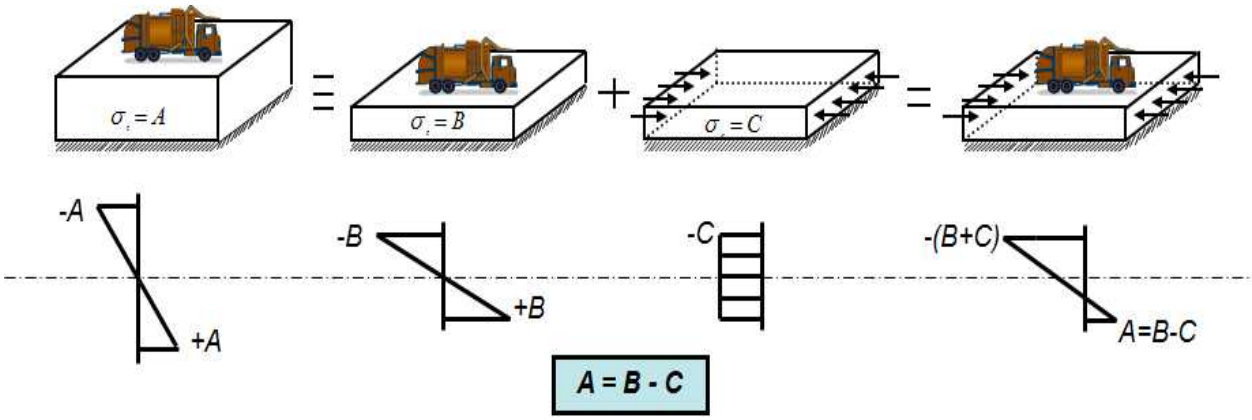
- 횡항뱡 긴장 설계

	PTCP 횡방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	1.3m	상행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 길이 43.5m)	34개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	93개
부산 방향 (하행선)	1.3m	상행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 길이 25.5m)	20개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 77m)	60개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 90m)	70개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 120m)	93개

4. 피로파손에 의한 포장 설계

1) 피로파손 기준 설계 개념

PTCP를 설계할 때에 가장 중요한 두 가지의 항목은 슬래브의 두께와 긴장응력의 결정이라고 할 수 있다. AASHTO 피로 파손 공식을 기준으로 긴장력을 산정하는 설계하는 개념은 PTCP가 어떠한 두께의 콘크리트 포장을 대신하여 건설되어질 것인지를 결정하고 이러한 포장에 차륜하중에 의해 발생되는 인장응력을 예측한다. 그 후 PTCP 슬래브의 두께를 결정하여 이러한 슬래브에 하중이 작용할 때의 응력을 구하고 이러한 응력을 감소시켜서 대체될 콘크리트 포장에 발생하는 응력과 같아질 수 있는 크기의 응력을 구해 긴장량을 산정한다. 이러한 PTCP 설계 개념을 아래에 나타내었다.



2) 포장 설계

i) JCP 설계

▷ 설계 요소

○ 설계 교통하중(18kips 단축하중 환산 교통량) : DTN

○ 최종 서비스 지수 : Pt = 2.5

○ 하중전달계수 : J = 3.2

○ 콘크리트 휨강도 : 4.5MPa(640psi)

○ 콘크리트 허용강도 : 4.5×0.75 = 3.375MPa

○ 콘크리트 탄성계수 : 27GPa (프와송비 : 0.15)

○ 하부 지반강성 : 66.8MPa/m(246pci)

▷ 콘크리트 포장 슬래브 계산식에 의한 두께 산정

⇨ 경험적 공용방정식

$$\log_{10} W_{18} = 7.35 \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{G_t}{1+\frac{1.624\times10^7}{(D+1)^{8.46}}} +$$

$$(4.22-0.32P_t)\log_{10}\left[\frac{S_c'(D^{0.75}-1.132)}{215.63\,J\left(D^{0.75}-\frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K_c}\right)^{0.25}}\right)}\right]$$

여기서 W_{18} : 설계기간 동안의 82kN 등가단축하중(ESAL)의 설계 차로당 누가 통가횟수

P_t : 설계 최종 서비스 지수

J : 콘크리트 포장형식에 따른 연속성을 반영하는 하중전달 계수(3.2 적용)

E_c : 콘크리트 슬래브의 설계 탄성계수(27GPa)

K_c : 콘크리트 슬래브아래 하부지반의 노상 지지력 계수(66.8MPa/m)

D : 포장 슬래브 두께(m)

S_c' : 콘크리트 슬래브의 설계 휨강도(4.5MPa)

G_t : $\log_{10}\left(\frac{4.5-P_t}{4.5-1.5}\right)$로 표시되며, 임의 시점에 이어 Pt = 1.5인 경우 최대 서비스 능력 손실량에 대한 서비스 능력의 손실량 비율을 나타내는 함수

▷ $\log_{10}$(단축하중환산교통량) = $\log_{10} W_{18}$ ⇨ 포장 슬래브 두께 산정

○ 장유 IC~ 가락 IC 사이 환산 교통량

: 설계 수명 20년 = 91.291×10^6 ⇨

: 설계 수명 40년 = 182.582×10^6

⇨ $D_{20년}$ = 35.1cm

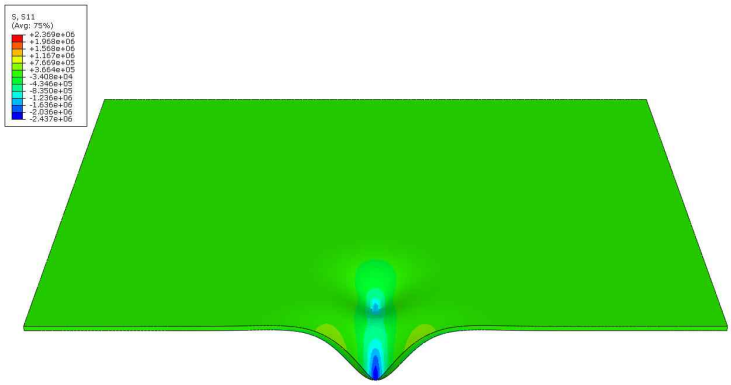
⇨ **$D_{40년}$ = 39cm**

ii) PTCP 종·횡방향 소요 긴장량 산정

① 설계 두께 15cm

▷ 종방향 소요 긴장량 산정

○ 차륜하중 : 단축하중(82kN/Axle), Edge Loading일 경우 최대 응력 발생



⇨ 슬래브에 발생하는 종방향 최대 인장응력 산출

- 분석 결과

종방향 응력	JCP		PTCP
	20년 수명 $\sigma_{35.1cm}$	40년 수명 σ_{39cm}	σ_{15cm}
Vehicle	0.665MPa	0.53MPa	2.773MPa
소요 긴장량	2.108MPa	2.243MPa	-

※ 소요 긴장량 = σ_{15cm} - ($\sigma_{35.1cm}$ or σ_{39cm})

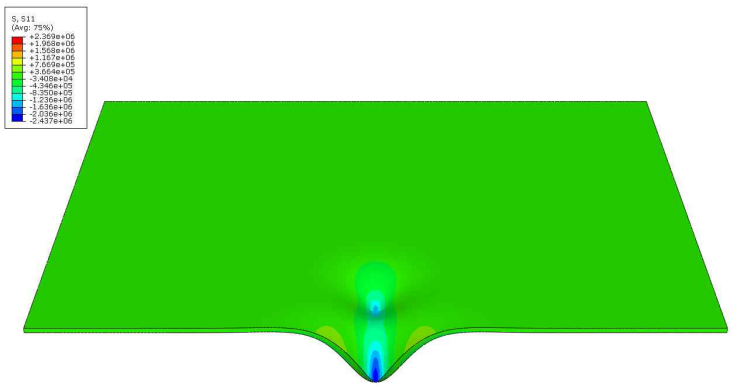
⇨ 긴장 간격 산정

PTCP 긴장 설계 결과	
설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)
20년 설계 수명	43cm
40년 설계 수명	40cm

② 설계 두께 20cm

▷ 종방향 소요 긴장량 산정

○ 차륜하중 : 단축하중(82kN/Axle), Edge Loading일 경우 최대 응력 발생



⇨ 슬래브에 발생하는 종방향 최대 인장응력 산출

- 분석 결과

종방향 응력	JCP		PTCP
	20년 수명 $\sigma_{35.1cm}$	40년 수명 σ_{39cm}	σ_{20cm}
Vehicle	0.665MPa	0.53MPa	1.828MPa
소요 긴장량	1.163MPa	**1.298MPa**	-

※ 소요 긴장량 = σ_{20cm} - ($\sigma_{35.1cm}$ or σ_{39cm})

⇨ 긴장 간격 산정

PTCP 긴장 설계 결과	
설계 수명에 따른 피로파손 검토	**긴장 간격(s)**
20년 설계 수명	78cm
40년 설계 수명	70cm

4. 서부산 영업소 구간 PTCP 설계 결과

1) 설계 방법에 따른 결과 비교

① 설계 두께 15cm

- 종항향 긴장 설계

◦ 응력 기준 설계

	긴장 간격(s)
냉정 방향 (상행선)	0.43m
부산 방향 (하행선)	0.43m

◦ 피로 파손 설계

설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)
20년 설계 수명	43cm
40년 설계 수명	40cm

∴ 40년 설계 수명을 포장 수명으로 본다면 피로 파손에 의한 설계 결과가 보수적이기 때문에 이에 따라 서부산 영업소 구간 두께 15cm PTCP를 설계하여야 함.

② 설계 두께 20cm

- 종항방 긴장 설계

◦ 응력 기준 설계

	긴장 간격(s)
냉정 방향 (상행선)	0.42m
부산 방향 (하행선)	0.42m

◦ 피로 파손 설계

설계 수명에 따른 피로파손 검토	긴장 간격(s)
20년 설계 수명	78cm
40년 설계 수명	70cm

∴ 40년 설계 수명을 포장 수명으로 본다면 응력 기준에 의한 설계 결과가 보수적이기 때문에 이에 따라 서부산 영업소 구간 두께 20cm PTCP를 설계하여야 함.

2) 설계 결과

① 설계 두께 15cm

- 종항뱡 긴장 설계

	PTCP 종방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	0.4m	상행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	55개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	55개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 폭 11m)	28개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	28개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	28개
부산 방향 (하행선)	0.4m	상행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	55개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	55개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 폭 11m)	28개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 폭 11m)	28개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 22m)	55개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 11m)	28개

- 횡항뱡 긴장 설계

	PTCP 횡방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	1.8m	상행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 길이 43.5m)	25개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	67개
부산 방향 (하행선)	1.8m	상행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	67개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 길이 25.5m)	15개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 길이 120m)	67개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 77m)	43개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 120m)	67개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 90m)	50개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 120m)	67개

② 설계 두께 20cm

- 종항뱡 긴장 설계

	PTCP 종방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	0.42m	상행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 폭 11m)	27개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	27개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 폭 11m)	27개
부산 방향 (하행선)	0.42m	상행선 슬래브 1 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 폭 22m)	53개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 폭 11m)	27개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 폭 11m)	27개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 22m)	53개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 11m)	27개

횡항뱡 긴장 설계

	PTCP 횡방향 긴장 설계 결과		
	긴장 간격(s)	강선의 개수(n)	
냉정 방향 (상행선)	1.3m	상행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 7 (슬래브 길이 43.5m)	34개
		상행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 3 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 5 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 6 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 7 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 8 (슬래브 길이 120m)	93개
부산 방향 (하행선)	1.3m	상행선 슬래브 1 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 2 (슬래브 길이 120m)	93개
		상행선 슬래브 3 (슬래브 길이 25.5m)	20개
		상행선 슬래브 4 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 9 (슬래브 길이 120m)	93개
		하행선 슬래브 10 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 11 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 12 (슬래브 폭 77m)	60개
		하행선 슬래브 13 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 14 (슬래브 폭 120m)	93개
		하행선 슬래브 15 (슬래브 폭 90m)	70개
		하행선 슬래브 16 (슬래브 폭 120m)	93개

부록 5. PTCP의 LCC 분석 보고서

콘크리트 포장(PTCP)의 LCC분석

2010. 1

[주]아이엠기술단

1. 서론

1.1 LCC분석 배경

산업화의 진전과 더불어 우리나라 고속도로의 교통량도 급격히 증가하는 추세였으며, 1980년대에 들어 교통량이 많은 고속도로를 바탕으로 아스팔트 포장에 비하여 비교적 긴 공용수명을 가진 콘크리트 포장의 시공이 이루어 지게 되었다.

88고속도로에서 콘크리트 포장의 경험을 터득한 이후 중부고속도로에서 본격적으로 콘크리트 포장을 하게 되었다. 그 이후 현재에 이르기까지 신설 고속도로의 주된 포장형식으로 콘크리트 포장이 널리 이용되고 있다.

중부고속도로는 1987년 12월 콘크리트 포장으로 개통이래 공용기간이 20여년에 이르고 있으며, 한국도로공사의 유지관리체계 하에서 다양한 유지관리데이터가 축적되어져 오고 있다. 중부고속도로의 가장 큰 특징 중의 하나는 콘크리트 포장의 대표적인 포자형식인 줄눈콘크리트 포장(JCP ; Jointed Concrete Pavement)과 연속철근콘크리트 포장(CRCP ; Continuously Reinforced Concrete Pavement)이 함께 사용되어져 왔다는 것이다. 특히, CRCP포장이 대규모로 시공된 실적은 중부고속도로가 유일하며, CRCP포장의 설계 및 시공에 대한 평가 및 유지관리이력 등을 평가하기 위해서는 반드시 중부고속도로의 자료를 조사해야 할 것이다.

그렇지만, 중부고속도로 이후 JCP포장의 형식이 일반적으로 시공되었으며, 이는 CRCP에 대한 부정적인 선입견(초기 균열부의 스폴링 등 2차 파손우려, 철근조립등의 시공성 불량 등)으로 인하여 실적이 부진하였다. CRCP가 JCP에 비해 장점보다는 초기시공비용 및 시공의 난이도 측면에서 불리하다는 인식이 팽배한 것이 이유였을 것이다. 그럼에도 불구하고 이후 JCP와 CRCP의 포장 형식에 대한 장단점을 비교하고 합리적인 적용기준을 제시한 연구도 거의 없는 실정이었다.

JCP와 CRCP포장 등은 알칼리 골재반응으로 인한 대규모 유지보수작업이 필요한 시기가 도래하였으며 유지관리에 많은 인력과 비용이 소요되고 있다. 따라서 기존 콘크리트 포장보다 개선된 포장형식에 대한 필요성이 대두되게 되었다. 최근에는 기존 포장공법들의 단점을 보완한 포스트텐션 콘크리트포장(PTCP ; Post-Tensioned Concrete Pavement)공법이 개발되어 시공이 이루어지고 있다. 이 포장공법은 개념상으로 유지보수작업이 거의 필요 없는 포장형식으로 인정받아오고 있다.

1.2 LCC분석 목적 및 방법

본 분석은 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP)과 일반적으로 사용되어져 오던 줄눈콘크리트 포장(JCP)과 연속철근콘크리트 포장(CRCP)의 공용수명동안 소요되는 생애주기비용에 대하여 비교 및 분석함으로서 유리한 형식을 선정하기 위하여 수행하였다. 각 포장공법의 유지관리항목은 기존의 연구보고서 및 관련기관의 문헌을 참고하여 선정하였으며, PTCP포장은 개념적으로 유지보수가 거의 없는 포장형식으로 2개항목에 대하여 유지보수 비용을 산출토록 하였다. 또한 생애주기비용 측면 뿐만아니라, 유지관리비용측면에서 기존의 콘크리트 포장에 비하여 어느 정도 향상된 공법인지 검토하기 위하여 실시하였다.

2. 콘크리트포장

2.1 포장의 분류

PTCP포장의 형식을 비교하기 위하여 콘크리트 포장 중 JCP포장과 CRCP포장을 선정하였다. JCP포장은 일정한 간격으로 가로줄눈을 설치하여 줄눈하단부에서만 균열발생을 유도하고, Dowel bar와 tie bar를 이용하여 하중을 전달하는 구조이다.

CRCP포장은 횡방향 줄눈을 완전히 제거하고 균열발생 허용한다. 또한 종방향 철근을 이용하여 균열의 확대를 방지(철근량 콘크리트 단면적의 0.5~0.7%)하도록 하는 구조이다.

표 2.1은 JCP포장과 CRCP포장의 일반적인 차이를 비교하여 나타낸 것이며, 줄눈구조와, 균열, 활동, 하중전달에 대하여 비교하였다.

표 2.1 JCP포장과 CRCP포장의 비교

구 분	JCP	CRCP
줄눈구조	. 가로 수축줄눈(6m 이하 간격) . 팽창줄눈 . 세로수축줄눈(차선위치)	. 가로 수축줄눈 완전생략 . 팽창 줄눈 . 세로 줄눈
균열	. 가로 수축 줄눈 설치로 건조수축으로 인한 균열유도(6mm-13mm) . 포장Slab 균열 허용 않음	. 균열발생을 허용함 . 상당량(콘크리트 단면적의 0.5~0.7%) 종방향 철근을 사용, 균열틈의 벌어짐을 억제함
활동	. Conc Slab 활동가능토록 분리막 설치	. 온도변화 및 건조수축에 의한 conc slab의 움직임을 막아야하므로 분리막 사용 않음 . 이형철근삽입 활동 억제
하중전달	. Dowel Bar (단차방지, Pumping 현상을 방지하고 하중전달을 유지시킴)	. 조골재 맞물림 및 세로철근으로 하중전달

표 2.2는 JCP포장과 CRCP포장의 주요특징을 비교한 것이며, 구조적인 특징, 시공성, 내구성, 평탄성, 유지보수와 공용성 등 크게 구분될 수 있는 항목에 대하여 비교하였다.

표 2.2 JCP포장과 CRCP포장의 주요 특징 비교

구 분	JCP	CRCP
구조	. Con'c Slab 자체로 교통하중 및 온도변화에 대해 지지함 . Slab에 불규칙한 균열을 방지하는 줄눈 중 가로 수축줄눈은 4-6m간격으로 설치 . 골재 맞물림 작용 및 dowel bar를 통해 slab간 하중전달	. Con'c Slab 자체로 교통하중 및 온도변화에 대해 지지함 . Slab에 발생하는 균열을 연속철근으로 억제 . 팽창줄눈은 필요하나 수축줄눈은 불필요
시공성	. 줄눈설치 및 콘크리트 양생 등으로 다소불리	. 콘크리트 측방공급에 따른 작업공간필요(확장구간에 부적합) . 콘크리트 품질관리에 고도의 숙련도 필요
내구성	. 중차량에 대한 적응성 양호	
평탄성	. 4-6m간격 가로수축 줄눈설치로 불리함	. 양호함
유지보수	. 유지관리비저렴(단, 줄눈부의 정 기적인 유지보수필요)	. 높은 시공수준이 요구되나 유지보수비는 저렴 . 제설용 화물에 의한 철근부식 우려

	. CRCP에 비해 국부적인 파손대 한 보수가 용이함	
공용성	. 장기적인 양생필요(보통 포틀랜 드 시멘트 사용시 최소 14일이상 소요) . 수축줄눈의 설치로 승차감불량 . 소음발생	. 장기간 양생 필요 . 무근 콘크리트 포장에 비해 승차감 양호 . 소음 발생
토질영향	. 침하량이 크거나 부등침하 발생에 따른 조기 파손	
적용도로	. 중차량의 구성비가 큰 도로 . 절성토 경계부가 많은 도로 . 신설 도로	. 4차선 이상 신설도로 . 지형 평탄하고 선형이 좋은 본선 구간도로 . 양호한 주행성이 필요한 도로
공사실적	. 부산-마산 고속도로, 88올림픽고속도로, 중부고속도로 . 호남고속도로, 남해고속도로확장 및 국도포장 다수	. 중부고속도로 일부구간 적용 (설계속도 120km/h구간)

PTCP포장은 콘크리트 포장슬래브에 발생되는 인장응력을 프리스트레스를 도입하여 상쇄시킴으로서 균열발생을 억제하고 줄눈을 대폭 감소시켜 콘크리트 포장의 수명과 내구성을 증진시키고, 파손과 유지가 불필요한 반영구적인 포장형식을 말한다. 즉, 최소 40년 이상의 장기 공용수명기간동안 파속과 유지보수가 거의 없도록(Zero Maintenance) 고안된 포장형식이다.

표 2.3은 PTCP포장의 주요 특징을 나타낸 것이며, 구조적 및 시공성 등 다양한 분야에서 기존 공법의 단점을 보완한 공법이다.

표 2.3 PTCP포장의 주요 특징

구 분	특 징	비고
구조	. 줄눈콘크리트 포장형식에 시공되는 가로 및 세로줄눈 불필요 . 프리스트레스 도입으로 균열발생 방지 . 종래 콘크리트 포장형식에 비하여 두께감소 . 삼성분계 시멘트 콘크리트 포장 배합으로 장기내구성 향상 . 아모조인트 사용으로 조인트의 내구성 및 공용성 향상	
경제성	. 공용수명동안의 생애주기비용 절감으로 경제적	
공용성	. 줄눈감소 및 균열발생 방지로 주행성 향상	
환경성	. 포장두께 감소로 시멘트 및 골재 사용량 절감 . 시멘트 사용량 절감으로 저탄소 녹색성장 실현	
조인트	. 흡음재 사용으로 소음감소 . 우레탄 실런트를 사용하여 2중 코팅, 흡음재 자외선 차단으로 노화방지 . 아모조인트 설치 시 하부 흡음재 시공으로 2중 소음흡수	
시공성	. 개선된 Gap 슬래브 시공방식에서 강선을 양단 인장함으로써 프리스트레스 도입율 향상	

3. LCC분석 이론

3.1 LCC 분석 개요

3.1.1 LCC의 정의

LCC란 총 생애주기비용(Life Cycle Cost;이하 LCC라 칭함.)이라는 것은 시설물의 기획 단계에서부터 폐기 처분 시까지의 모든 비용 즉, 계획·설계비, 건설비, 운용관리비, 폐기물 처분 비용을 합한 것으로 시설물의 생애에 필요한 모든 비용을 말하며, LCC 분석이란 총 생애주기비용(LCC)를 최소화할 수 있는 대안의 비교를 통한 의사결정기법을 의미한다.

3.1.2 LCC의 비용항목

그림 3.1은 시설물의 일반적인 LCC비용항목을 나타낸 것이며, 생애주기비용의 구성항목으로는 초기비용, 유지관리비용, 처리비용 이외에 발주처 부담비용, 제 3집단 부담비용, 처리비용등으로 구성된다.

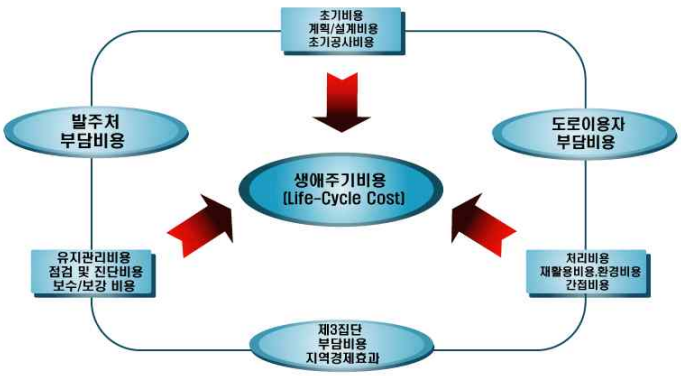


그림 3.1 시설물의 일반적인 LCC 비용 항목 (임종권, 2000)

3.1.3 LCC의 기대효과

그림 3.2에서 보는 바와 같이 LCC는 설계 초기단계에서 과거의 경험을 바탕으로 분석할 때 가장 큰 비용 절감 효과를 기대할 수 있다.

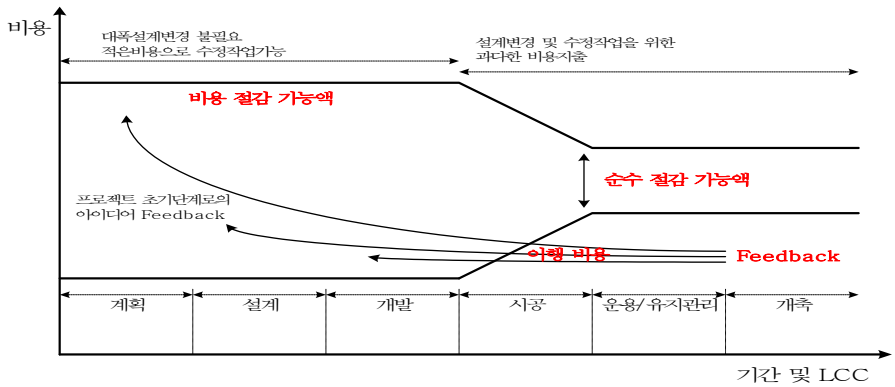


그림 3.2 LCC기법의 도입시기와 비용절감 가능성 (Kirk/Dell'Isola, 1995)

3.1.4 LCC 분석의 법제화

(1) 미국

미육상운송효율화법 (Intermordal Surface Transportation Efficiency Act : ISTEA) Sections 1024, 1025에서 주정부의 교량, 터널, 포장 등의 설계 및 시공시 LCC를 검토토록 법적 의무화하였다. 1994년 US DOT에서는 Executive Order 12893에 연방정부 기간시설물 투자를 위한 LCC 평가 의무화하였으며, 1995년 NHS Designation Act 법률로서 2,500만불 정부공공 발주공사에 대해서는 LCC 분석 의무하였다.

(2) 한국

2000년 3월 건설교통부(2000)의 예산절감을 위한 「공공 건설사업 효율화 종합대책」의 일환으로 건기법에 설계의 경제성 등 검토에 대한 시행규칙(2000. 7. 29 건설교통부 장관이 명함)에 의한 설계 VE의 법제화(건기법 시행령 제38조 13)에 의함 500억원 이상의 정부발주공사에 설계 VE 검토의무화하였다. VE 검토시 비용측면은 LCC(소위 생애주기비용)의 검토를 의무화하였으며, 100억원이상의 건설공사에 확대적용(건기법 시행령 제38조 13,2008.6개정)토록 건설기술관리법을 개정하였다.

3.1.5 LCC 분석방법 및 절차

LCC분석기준 및 지침서는 아래와 같이 정리할 수 있다.

(1) LCC 분석 기준 및 지침서

- 한국도로공사 (2001), 고속도로 LCC 분석 기법 잠정지침(안)
- 미연방도로청(Federal Highway Administration:FHWA, 1999)의 Life-Cycle Cost Analysis in Pavement Design.
- BridgeLCC 1.0 프로그램 및 교량 LCC 분석 메뉴얼(Ehlen, 1999)
- @Risk 4.5 프로그램 및 위험도분석 메뉴얼(Palisde Co., 2002)
- ProLCC 1.0 프로그램 및 교량 LCC 분석 매뉴얼(한국시설안전기술공단, 2002)

(2) 국외관련연구 및 지침서

- TRB-NCHRP Project 12-43(Hawk, 1998)
- R/C부재 철근 부식 및 균열에 대한 확률적 열화 예측 모형 제시(Thoft-Christensen)
- 경제적 유지관리 LCC분석 모델제시, 도로이용자 비용의 중요성 강조(Brito & Branco, 1995)
- QUADRO - 도로건설계획에 대한 LCC 평가 (1982)
- LCC 개념을 도입한 200년 수명 교량에 대한 경제성평가(Nishikawa, 1997)
- 교량 LCC 평가 시스템, 다이세이 건설/Shinozuka연구소
- RC 구조물의 열화 및 LCC평가 시스템 개발, 카지마연구소

(3) 국내관련연구 및 지침서

VE/LCC 검토가 법적으로 규정되어 있으나 아직까지 국내 실정에 맞는 도로, 구조물에 대한 LCC 평가 지침서 및 모델이 거의 없는 실정이다. 단, 최근에 LCC에 관련된 기초연구가 활발히 진행되고 있어 아래와 같이 관련연구기관의 참고자료를 활용하였다.

• 국토연구원, 민간투자 도로사업의 운영관리비 산정에 관한 연구 - 고속도로 유지관리비를 중심으로, 2001.
• 임종권, 「구조수명간 최소기대비용에 기초한 교량의 최적내진안전수준의 결정을 위한 신뢰성 해석기법」한양대학교 박사학위논문, 1999. 8.
• 한국건설기술연구원, 「교량관리체계개선에 관한 연구」, 건설교통부, 1999. 11.
• 시설안전기술공단 「도로교의 공용수명 연장방안 연구」, 건설교통부, 2000. 12.
• 임종권 (2000), 「도로시설물 설계를 위한 Life Cycle Cost 분석」 도로와 공항, 제 7권, 통권 3호.
• 시설안전기술공단,「LCC 개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화 방안 연구」, 건설교통부, 2001. 2.
• 한국도로공사, 「고속도로 LCC분석기법 잠정지침(안)」, 2001
• 한국도로공사, 「교량구성요소와 교량형식별 LCC분석연구」, 2002
• 한국시설안전기술공단, 「교량의 LCC 분석모델 개발 및 DB 구축방안 연구」, 건설교통부, 2002
• 한국도로공사, 「고속도로 교량의 구성요소별 생애주기비용분석 연구」, 2002
• 한국수자원공사, 「수도건설사업의 원가절감을 위한 LCC분석기법 적용방안 연구」, 2003

3.2 LCC 분석 모델

3.2.1 LCC분석모델

일반기간시설물에 공히 적용 가능한 NIST(Ehlen & Marshall, 1996) 모델 사용하며, LCC 분석방법은 투자기법에 가장 일반적으로 사용하는 현재가치화법을 사용하였다.

표 3.1 LCC분석 모델 및 현재가치화

일반적인 적용 모델	현재가치화
PVLCC = CI + PVOMR + PVD .PVLCC : 총기대비용의 현재가치 . CI : 초기비용 .PVOMR : 유지보수비용의 현재가치 . PVD : 철거폐기비용의 현재가치	$PV(LCC) = CI + \sum_{n=1}^{k} \frac{C_n}{(1+i)^n}$ .PV : 미래에 발생하는 현재가치 .Cn : n년 후에 발생하는 비용 . i : 할인율 . k : Life Cycle 고려시 설계수명

3.2.2 할인율

표 3.2는 할인율의 정의와 종류에 대하여 나타낸 것이며, 주로 LCC분석에는 실질할인율을 적용한다.

표 3.2 할인율의 적용 및 종류

구분	내용	비 고
적용 목적	·할인율은 미래발생비용을 현재가치화하기 위한 지수	
할인율의 종류	·명목할인율(nominal discount rate) : 인플레이션, 물가상승률을 고려하지 않은 할인율 ·실질할인율(real discount rate) : 인플레이션, 물가상승률을 고려한 할인율 ⇒ 일반적인 LCC 분석시 사용	

표 3.2(계속) 할인율의 적용 및 종류

구분	내용	비 고
할인율 적용 사례	·미국 LCC평가 : 3~5 % ·영국 LCC평가 : 5~8 % ·통계청(1999)「한국의 주요경제지표 1999」의 최근 7년간(1993~1999)의 평균실질할인율 4.5% (시설안전기술공단, 2001) ·하헌구/조희덕(1999)의 사회적할인율 7% 추천, 교통개발연구원 보고서 ·한국개발연구원(1999), 「도로 및 철도부문 사업의 예비타당성 조사 표준지침 연구」에서 사회적할인율 7.5% ·시설안전기술공단(2001), 「LCC 개념을 도입한 시설안전관리체계 선진화방안 연구」에서 통계청 자료인 4.5%	

주1) 자료 : 한국은행, 경제통계연보, 1999

주2) 실질할인율 ir = [(1+in) / (1+f)] - 1 (in = 공칭이자율; 은행금리, f = 인플레이션율)

3.2.3 본 과업의 적용모델 및 분석기준

표 3.3은 콘크리트 포장의 LCC분석에 적용한 모델 및 분석기준을 나타낸 것이며, 할인율은 7%, 공용수명기간은 40년으로 가정하여 분석하였다.

표 3.3 LCC분석 적용모델 및 분석기준

구 분	LCC분석 적용모델 및 LCC분석기준
분석자료	• 설계지침, 정부출연기관 등의 자료 등 이용 (포장.터널.사면 생애주기비용(LCC)분석연구 최종보고서, 2008.11, 한국도로공사 기술심사처)
분석모델	• LCC 모델 : NIST 모델(Ehlen/Marshall, 1996) 적용 • PVLCC = IC + PVOMR + PVD (여기서, PVLCC = 현재가치의 총기대비용, IC = 초기비용, PVOMR = 유지보수비용의 현재가치, PVD = 철거 및 폐기비용의 현재가치)
분석방법	• 현재가치화법(NPV : Net Present Value) • ASTM의 표준화된 방법인 E-917(ASTM, 1994)에서 채택한 NPV는 현재가치로 할인된 화폐가치임 • 일반적으로 LCC 검토시 다음과 같은 식으로 표현됨 $NPV = C_I + \sum_{k=1}^{N} C_{M_k} [\frac{1}{(1+i)^k}]$ (여기서, CI : 초기비용, N : 설계수명, C_{M_k} : k번째 연도에서의 소요비용, i : 할인율) • 식에서 i(할인율)를 실질할인율(Real Discount Rate)로 사용할 경우 k번째 년도에서의 소요비용 C_{M_k}는 미래에 발생하는 비용이기는 하지만 물가상승률을 고려하지 않은 현재의 단가로 계산한 비용을 사용하면 됨
할 인 율	• 분석항목에 대한 실질할인율 적용(도로시설물의 경우, 7%적용)
분석기간	• 콘크리트 포장의 분석기간은 40년으로 적용함.

3.3 사용자비용 산정

3.3.1 사용자 비용의 산정

사용자비용은 도로의 시공, 보수, 재시공 등을 위하여 일시적인 교통통제 및 우회시 이용자에게 부담되는 비용을 말하며, 그림 3.3과 같이 운행비용, 시간지연비용, 사고비용뿐만 아니라 사용자비용에 환경영향에 의한 추가비용 발생한다.

통상 차량운행비용(Vehicle Operating Costs: VOC), 시간지연비용(Traffic Delay Costs), 사고비용(Accident Costs: AC)으로 산정되나 본 분석에서는 사고비용은 고려하지 않았다.

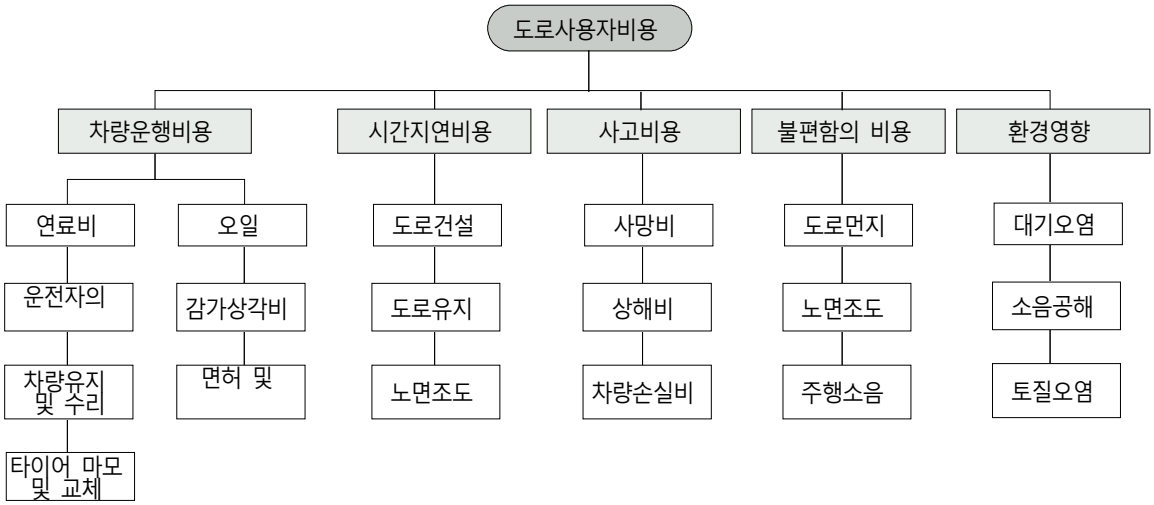


그림 3.3 사용자비용의 구성

1) 사용자비용 추정모델

사용자 비용(User Cost)은 초기 건설시, 보수/보강시에 주로 발생하며, 광범위한 의미를 갖기 때문에 도로의 이용자가 정상적으로 통행을 하지 못하게 되어 추가로 지불되는 비용을 말한다. 즉, 도로의 전단면보수, 부분단면보수 등의 작업동안 도로를 우회하거나 차량통행시 운행속도의 지연에 의해 이용자가 부담하게 되는 비용을 말한다.

표 3.4 JCP포장의 작업일수 산정

공종			작업일수 산출			
			Q값	일수	준비, 마무리등	실 소요일수
표면보수	균열실링		240	29	3	87
	다이아몬드 그라인딩		460	25	3	75
소파보수	부분단면 보수		40	358	3	1074
	줄눈부 보수	가로	100	27	3	81
		세로	300	1	3	3
	가로줄눈 보수		584	5	3	15
	세로줄눈 보수		584	3	3	9
	ASR보수		500	1010	3	3030
덧씌우기	아스팔트 덧씌우기		2,000	7	3	21
	절삭 덧씌우기		1,600	5	3	15

표 3.5 CRCP포장의 작업일수 산정

공종			작업일수 산출			
			Q값	일수	준비,마무리 등	실 소요일수
표면보수	균열실링		240	50	3	150
	다이아몬드 그라인딩		460	30	3	90
소파보수	부분단면 보수		40	342	3	1026
	줄눈부 보수	가로	-	-	-	-
		세로	300	1	3	3
	가로줄눈 보수		-	-	-	-
	세로줄눈 보수		584	3	3	9
	ASR보수		500	1,010	3	3,030
덧씌우기	아스팔트 덧씌우기		2,000	6	3	18
	절삭 덧씌우기		1,600	4	3	12

교통장애기간은 각 포장공법을 고려하여 표 3.4~표 3.5와 같이 가정하였고 통제 차로수는 일방향 차로수인 1차선으로 가정하였다. 본 분석에서는 사용자비용 중 사고비용을 제외한 차량운행비용과 시간지연비용을 고려하였다.

2) 사용자비용의 정식화과정

사용자비용의 모델 표 3.6과 같이 Ehlen/Marshall(1996)의 함수중 우회도로를 고려한 수정모델 사용하였다. 차량운행비용은 공사작업으로 인해 차량의 운행이 지연됨으로써 발생되는 비용을 말하며, 시간지연비용은 차량의 운행이 지연됨으로써 운전잔의 시간에 대해 발생되는 비용을 말한다.

표 3.6 Ehlen/Marshall(1996)의 함수중 우회도로를 고려한 수정모델

항목	내용
차량운행 비 용	$VOC = \frac{L}{S} \times ADT \times N \times r - \frac{L_n}{S_n} \times ADT_n \times N \times r_n$ L = 우회상태의 도로길이, Ln= 정상상태의 도로길이 S= 우회상태의 교통속도, Sn= 정상상태의 교통속도 ADT= 우회상태의 평균일일교통량, ADTn= 정상상태의 평균일일교통량, N= 공사기간 r= 우회상태에서의 차량운행비용의 가중평균, rn= 정상상태에서의 차량운행비용의 가중평균,
시간지연 비 용	$TDC = \frac{L}{S} \times ADT \times N \times w - \frac{L_n}{S_n} \times ADT_n \times N \times w_n$ L= 우회상태의 도로길이, Ln= 정상상태의 도로길이 S= 우회상태의 교통속도, Sn= 정상상태의 교통속도 ADT= 우회상태의 평균일일교통량, ADTn= 정상상태의 평균일일교통량 , N= 공사기간 w= 우회상태에서의 시간지연비용의 가중평균,wn= 정상상태에서의 시간지연비용의 가중평균

3) 단가산출과정

본 분석에서 사용자비용 산출시 안전사고비용의 차이는 고려하지 않고, 차량운행비용과 시간지연비용의 합으로 산정하였다. 또한, 교통통제기간 동안의 교통속도 산정식은 손의영「교통혼잡비용 예측연구, 1992」에서 제시한 교통혼잡비용의 추정모델에 기초하였다.

4) 차량운행비용 중 고정비 산출

표 3.7~표 3.9는 차량운행비중 고정비 산출을 나타낸 것이며, 차량운행비 중 고정비는 차종별 운전기사의 시간당 인건비, 차량이용에 따른 시간당 감가상각비, 책임보험과 종합보험과 종합보험료의 시간당 보험료, 시간당 각종 제세공과금으로 구성된다.

표 3.7 차량운행비 중 고정비 산출

구 분	산 출 근 거
인 건 비	차종별 운전기사의 월평균 급여에 차량의 월평균 가동시간으로 산출.
감가상각비	정액법에 의하여 감가상각 대상액(취득가액에서 취득가액의 10%인 예상 잔존가치를 제외한 금액)에 대한 시간당 감가상각액 산출(자료출처: 차종별 기준차량에 대한 현대자동차 판매가격 내부자료).
보 험 료	기준차량의 종합보험과 책임보험료 등 평균 연간 보험료에 대한 시간당 보험료 산출(자료출처: 보험감독원, "보험통계연보," 1998년 동부화재보험회사 내부자료).
제세공과금	기준차량의 면허세, 자동차세 등 각종 제세공과금의 시간당 금액산출 (자료출처: 강남구청 자동차세 징수 담당자에게 문의한 '97년 대비 자동차세 인상률을 '97년에 값에 적용하여 산출)

표 3.8 '99년 고정비의 원 단위 값 종합가격표(단위: 원/대・시)

구 분	인건비	감가상각비	보험	제세공과금	합계
승용차	0	484	246	181	911
소형버스	6,936	787	350	148	8,221
대형버스	9,583	1,725	948	125	12,381
화물차	6,816	792	409	75	8,092

* '99 전국교통혼잡비용 산출과 추이분석, 김동효, 안강기, 정광복, 교통개발연구원 정책연구 2000-16 참조

표 3.9 차량운행비용(고정비) 산출내역서

항 목 / 차 종	① 구성비	② 1시간당 차량운행비용(고정비)	①×②(원)
승용차	0.6087	911	555
버 스	0.1008	20,602	2,077
화물차	0.2905	8,092	2,351
합 계	1.000	-	4,983 (원)

5) 차량운행비 중 변동비 산출

차량운행비 중 변동비는 표 3.10과 같이 연료소모량 산출 회귀식으로 산정한다. 총 4차

선 중 보수시에 편도 1차선 통제에 따른 병목현상이 극심할 것으로 추정한다. 그러나 이러한 병목현상에 의하여 차량지체효과에 대한 것도 현재 연구단계로서 적용할 특별한 기준이 없으므로 여기서는 10분 지연되는 것으로 가정하였다.

표 3.10 연료소모량 산출 회귀식

$$G_A(S) = (4.0031 + 0.41167S - 0.002741S^2)^{-1}$$

$$G_B(S) = -0.000062 + \frac{7.539}{S} + 0.0000123S^2$$

$$G_T(S) = -0.000912 + \frac{7.4865}{S} + 0.00001602S^2$$

여기서, $G_A(S)$, $G_B(S)$, $G_T(S)$는 승용차, 버스, 트럭의 연료소모량이고, S는 차량운행 속도임.

차량속도별 연료소모량을 산출(평균 l 당 휘발유 1300원 /l , 경유 650원 / l, LPG 500원 /l를 적용)

※ '99 전국교통혼잡비용 산출과 추이분석, 김동효, 안강기, 정광복, 교통개발연구원 정책연구 2000-16 참조

표 3.11과 표 3.12는 차종에 따른 단위길이당 연료비를 정상상태시와 공사시로 구분하여 산정한 것이다.

표 3.11 차종에 따른 단위길이당 연료비 (정상상태시)

속 도 / 차 종	80 (*km/h*)	
	l/km	원/*km*
승용차, 택시	0.0516	67.08
승합차, 버스	0.1729	112.39
화물차(소, 대)	0.1952	126.88
합계	-	-

표 3.12 차종에 따른 단위길이당 연료비 (공사시)

속 도 / 차 종	5.88 (*km/h*)	
	l/km	원/㎞
승용차, 택시	0.1580	205.40
승합차, 버스	1.2825	833.63
화물차(소, 대)	1.2729	827.36
합계	-	-

표 3.13과 표 3.14는 차량운행비용 중 변동비에 대하여 정상상태 시와 공사 시로 구분하여 산정한 것이다.

표 3.13 차량운행비용(변동비)의 산출내역 (정상상태시)

차 종	1대당 1km당 차량운행비용(변동비) (원/km)	1시간당 1km당 차량운행비용 (원/km)
승 용 차	67.08	40.83
버 스	112.39	11.33
화 물 차	126.88	36.86
합 계	-	89.02
☞ 1대당 1hr당(과업구간의 설계속도 80 km/hr) 차량운행비용(변동비) = 7,122 원/hr ☞ 1대당 1hr당 차량운행비용의 합계 = 고정비+변동비 = 4,983 원 + 7,122 원 = 12,105 원/hr		

표 3.14 차량운행비용(변동비)의 산출내역 (공사시)

차 종	1대당 1km당 차량운행비용(변동비) (원/km)	1시간당 1km당 차량운행비용 (원/km)
승용차	205.40	125.03
버 스	833.63	84.03
화물차	827.36	240.34
합 계	-	449.41
☞ 1대당 1hr당(우회구간의 주행속도 5.88 km/hr) 차량운행비용(변동비)= 2,643 원/hr ☞ 1대당 1hr당 차량운행비용의 합계= 고정비+변동비 = 4,983 원 + 2,643 원 = 7,626 원/hr		

6) 시간지연비용 산출

시간지연비용은 수단별(승용차, 버스), 목적별(업무, 비업무)로 나누어 수단별 평균재차인원을 고려하여 추정하였으며 표 3.15와 같다.

표 3.15 평균 재차 인원

차 종	승 용 차	버 스	화 물 차
평 균	1.43	14.41	1.30

* 임종권 (1999)의 간선도로 상의 데이터 적용

표 3.16 통행목적별, 차종별 시간가치비용('99년)

		월평균소득(원)	월평균근로시간(시간)	시간가치(원)
업무통행	승용차	2,710,266	206.6	13,118
	버스	1,543,598		7,471
비업무통행		385,900		1,868

* '99 전국교통혼잡비용 산출과 추이분석, 김동효, 안강기, 정광복, 교통개발연구원 정책연구 2000-16 참조

표 3.17 차량 1대당 1시간 시간가치비용의 추정

		시간당가치(①)	통행비율(②)	차량구성비(③)	차량1대당 평균 재차인원(④)	①×②×③×④(원)
승용차	업무통행	13,118	0.3	0.6087	1.43	1,142
	비업무통행	1,868	0.7			1,463
버 스	업무통행	7,471	0.1	0.1008	14.41	1,085
	비업무통행	1,868	0.9			2,442
차량1대당 1시간당 가치비용(원)		-	-	-	-	6,132 (원)

7) 사용자비용

사용자 비용은 차량운행비용과 시간지연비용을 합하여 산정하는데 다음과 같이 산정할 수 있다.

사용자비용 = 차량운행비용(고정비+변동비) + 시간지연비용

= 12,105 + 6,132 = 18,237 원/대・hr (정상시)

= 7,626 + 6,132 = 13,758 원/대・hr (지체시)

도로용량 축소에 의한 차량통행시간을 산정하기 위해서 교통통제시의 주행속도를 가정해서 본 분석에 적용하였다. 『도로유형별 지체함수 정립에 관한 연구, 강호익과 박창호, 1998』 연구를 보면 아직까지 국내의 정체류 상태에서의 교통용량과 교통량 및 주행속도에 관한 연구가 별로 알려진 것이 없으므로 정체류 상태에서의 속도-교통량의 일반적인 관계로서 주행속도와 통행시간을 가정하였다.

8) 교통량 조건

교통량 조건은 고속도로의 평균 일일 교통량(예, 서해안고속도로의 경우 일평균 교통량이 약 26만대로 추정)과 공사구간의 길이는 표 3.18과 같이 가정하여 적용하였다.

표 3.18 교통량 산정 및 공사구간 길이

No	항 목	적 용 공 법		
		JCP	CRCP	PTCP
1	정상상태의 속도(km/h)	100	100	100
2	공사로 인한 지체속도(km/h)	80	80	80
3	평균 일일 교통량(대)	260,000	260,000	260,000
4	평균 일일 교통량(대, 20년 후)	360,000	360,000	360,000
5	공사구간의 길이(m)	10,000	10,000	10,000

4. 콘크리트 포장공법의 LCC분석

4.1 분석조건

1) 도로의 제원 및 입력데이터

도로의 연장은 10km, 폭원은 16.4m(4.1m×4차로)의 콘크리트 포장형식의 고속도로로 가정하였다.

LCC분석을 하기 위하여 초기공사비용, 유지관리비용, 해체폐기비용에 대하여 정의되어야 하며, 초기공사비는 현재 일반적으로 적용되는 단위면적당 단가를 적용하여 표 4.1과 같이 적용하였다.

표 4.1 포장 형식별 초기공사비 산정

(2010년 1월 기준)

포장형식	단위	단위면적당 단가(원)	비고
JCP	㎡	33,993	
CRCP	㎡	55,335	
PTCP	㎡	56,113	

도로의 유지관리비용을 산출하기 위해서는 포장의 형식별로 유지관리작업에 소요되는 비용 및 관련 작업의 이력, 즉 유지관리데이터를 분석하여 유지관리항목에 따른 유지보수주기, 보수율, 보수단가 등을 산출하여야 한다. 그러나, 국내의 실정상, 포장형식별로 분류하여 유지관리에 관련된 데이터를 database화하지 않고 있으며, 유지관리에 대한 이력이 짧아서 그 마저도 분석하기 어려운 실정이다.

따라서 본 분석에서는 최근 한국도로공사에서 제시한 연구보고서(포장, 터널, 사면 생애주기비용(LCC)분석연구 최종보고서, 2008.12)에서 콘크리트 포장형식 중 JCP, CRCP, PTCP포장에 대한 유지관리데이터를 적용하여 분석하였다.

LCC분석에 필요한 입력데이터는 JCP포장, CRCP포장, PTCP포장에 대하여 표 4.2 ~표 4.4과 같이 각각 적용하였으며, 포장형식별 보수단가는 JCP포장의 단가로 통일하여 적용하였다. 또한 각 포장형식에 따른 보수주기는 열화를 고려하여 10년마다 보수주기가 1년 감소하는 것으로 가정하였다.

표 4.2 JCP포장의 유지관리비용 산출을 위한 입력데이터

JCP포장			보수주기(년)	보수율(%)	단가(원)	물량	단가(단위)
표면보수	균열실링		4.17	1.10	13,000	67,333	m
	다이아몬드그라인딩		7.68	1.39	12,673	164,000	㎡
소파보수	부분단면보수		5.67	1.23	117,294	164,000	㎡
	줄눈부 보 수	가로	10.0	3.94	120,000	17,359	m
		세로	10.0	0.86	120,000	12,700	m
	가로줄눈보수		6.00	1.61	6,627	27,333	m
	세로줄눈보수		5.05	1.17	6,627	20,000	m
	ASR 보수		5.67	14.5	132,000	164,000	㎡
덧씌우기	아스팔트 덧씌우기		7.10	1.71	34,195	164,000	㎡
	절삭 덧씌우기		10.0	1.28	65,710	164,000	㎡

표 4.2는 JCP포장의 유지관리비용 산출을 위한 입력데이터를 나타낸 것이다. JCP포장의 유지관리항목 중 줄눈부보수(가로, 세로)와 세로줄눈보수 및 ASR보수는 기존의 연구보고서에는 제시되어 있지 않으나, JCP포장에서는 빈번히 일어나는 유지보수작업이므로 항목을 추가하여 적용하였다.
표 4.3은 CRCP,포장의 유지관리비용 산출을 위한 입력데이터를 나타낸 것이다. CRCP포장의 유지관리항목중 줄눈부 보수와 ASR보수는 CRCP포장의 특성상 주요한 유지관리항목이므로 항목을 추가하여 적용하였다.

표 4.3 CRCP포장의 유지관리비용 산출을 위한 입력데이터

CRCP포장			보수주기(년)	보수율(%)	단가(원)	물량	단가(단위)
표면보수	균열실링		5.38	1.00	13,000	164,000	m
	다이아몬드그라인딩		6.11	1.30	12,673	164,000	㎡
소파보수	부분단면보수		5.25	1.10	117,294	164,000	㎡
	줄눈부보수	가로	-	-	-	-	-
		세로	10.0	0.86	120,000	12,700	m
	세로줄눈보수		5.05	1.17	6,627	20,000	m
	ASR 보수		5.67	4.00	132,000	164,000	㎡
덧씌우기	아스팔트 덧씌우기		7.05	1.30	34,195	164,000	㎡
	절삭 덧씌우기		10.0	1.17	65,710	164,000	㎡

표 4.4는 PTCP포장의 유지관리비용 산출을 위한 입력데이터를 나타낸 것이다. PTCP포장은 개념적으로 유지관리가 거의 없는 형식이나, 일부 신축이음장치의 실란트 보수와 부분단면 보수가 발생할 수 있으므로 이에 대한 항목을 선정하여 분석하였다.

표 4.4 PTCP포장의 유지관리비용 산출을 위한 입력데이터

PTCP포장		보수주기(년)	보수율(%)	단가(원)	물량	단가(단위)
신축이음장치 보수	실란트	5	50	13,000	1,367	m
소파 보수	부분단면 보수	10.0	0.11	117,294	164,000	㎡

4.2 LCC분석 결과 검토

4.2.1 공법별 LCC분석 결과

1) 생애주기 단계별 비용

표 4.5는 포장의 형식에 따른 생애주기단계별 비용을 비교하여 나타낸 것이다. JCP포장, CRCP포장, PTCP포장의 초기공사비가 각각 55.7억, 91.1억, 92.0억으로 소요되며 JCP포장이 초기공사비 측면에서 살펴보면 적게 소요되는 것을 알 수 있다. 그러나, 유지관리비용측면에서 살펴보면, JCP포장, CRCP포장, PTCP포장의 비용이 각각 83.9억, 30.8억, 0.3억으로 나타나 PTCP포장이 가장 유리하게 나타났으며, LCC측면에서 살펴보면 PTCP포장에 비하여 JCP포장과 CRCP포장이 각각 1.51배, 1.32배의 비용이 더 소요되어 장기적인 측면에서 불리하게 나타남을 알 수 있다.

표 4.5 생애주기단계별 비용

포장형식(억)	JCP	CRCP	PTCP
초기공사비용	55.7	90.8	92.0
유지관리비용	83.9	30.8	0.3
총생애주기비용	139.6	121.6	92.3
상대LCC	1.51	1.32	1.00
절감비용	47.3	29.3	-
비용절감율(%)	51.2	31.7	-

그림 4.1과 그림 4.2는 포장형식에 따른 생애주기단계별 비용분포를 나타낸 것이다. LCC측면에서 살펴보면 JCP포장이 139.6억, CRCP포장이 121.9억, PTCP포장이 92.3억으로 분석되어 PTCP포장이 유리함을 알 수 있다.

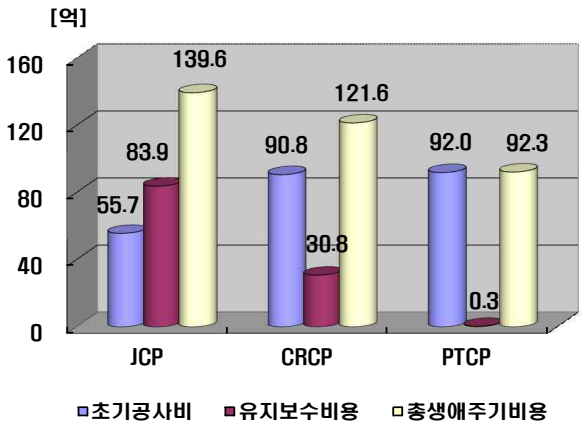


그림 4.1 포장형식별 비용분류

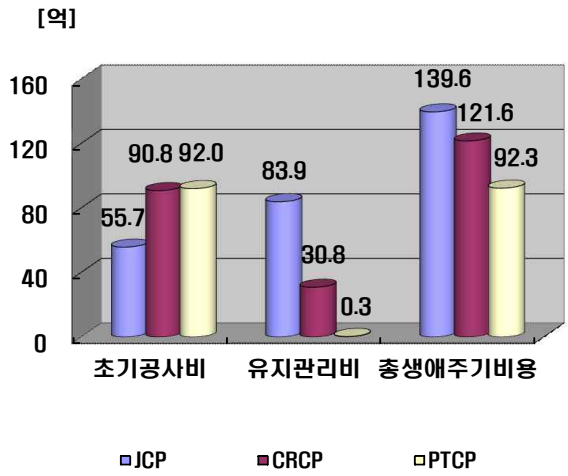


그림 4.2 유지관리단계별 비용 분류

그림 4.3은 각 포장공법별 누적LCC그래프를 나타낸 것이다. JCP포장은 초기공사비용이 타 공법에 비해 적게 소요되나, 유지관리비용 측면에서 살펴볼 때 불리하게 나타나고 있으며, 5년 이후 부터는 알칼리 골재반응에 의한 보수비용이 크게 소요되어 유지관리비용이 급격히 상승함을 알 수 있다.

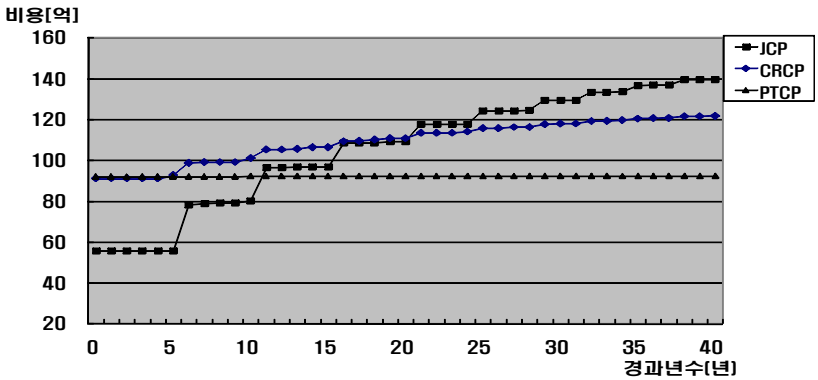


그림 4.3 각 포장공법별 LCC의 누적분포

2) 포장형식별 유지관리비용의 비교

표 4.6와 그림 4.4는 포장의 형식별 유지관리비용을 비교하여 나타낸 것이다. 유지관리항목에 따른 포장의 유지관리비를 살펴보면, JCP포장, CRCP포장, PTCP포장의 형식에 대하여 모두 소파보수에 대한 유지보수비용이 가장 크게 나타나는데 이는 빈번한 유지보수로 인하여 많은 비용이 소요되고 있음을 알 수 있다. PTCP포장은 유지관리비용 측면에서 타 포장 형식에 비하여 유리하게 나타났으며, JCP포장과 CRCP포장에 비하여 각각 83.6억, 30.5억의 비용절감 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

표 4.6 포장형식별 유지관리비용의 비교

포장형식(억)	JCP	CRCP	PTCP
표면보수(신축이음장치보수)	0.887	1.281	0.093
소파보수	79.786	26.893	0.221
덧씌우기	3.208	2.662	0.000
합 계	83.881	30.836	0.314
비용절감(억)	83.6	30.5	-

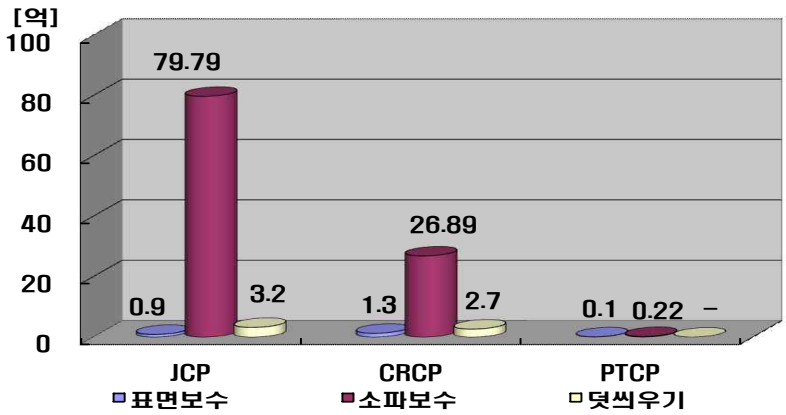


그림 4.4 각 포장공법별 유지관리항목에 따른 비용분포

4.2.2 공법별 LCC분석 결과(사용자 비용 고려)

1) 생애주기 단계별 비용

표 4.7은 각 포장형식별로 유지관리작업에 의해 발생되는 사용자비용을 고려하여 LCC를 산출하였으며, JCP포장의 경우는 총 생애주기비용이 약 1,274.8억원으로 산출되어 가장 비용이 많이 소요되는 것을 알 수 있다. 유지관리작업에 따른 사용자비용은 JCP포장, CRCP포장, PTCP포장이 각각 1,135.3억, 648.6억, 274.0억으로 나타나 JCP의 잦은 유지보수로 인하여 많은 사용자 비용이 발생함을 알 수 있다. 따라서, 초기비용측면에서 다소 불리하더라도, 유지관리비용과 사용자비용을 감안하여 총 생애주기비용 측면에서 유리한 포장형식을 선정하는 것이 장기적인 측면에서 살펴볼 때 예산을 절감할 수 있는 의사결정이 될 것이다.

표 4.7 생애주기단계별 비용(사용자 비용 고려)

포장형식(억)	JCP	CRCP	PTCP
초기공사비용	55.7	90.8	92.0
유지관리비용	83.9	30.8	0.3
사용자비용	1,135.1	648.7	274.0
총생애주기비용	1,274.7	770.3	366.3
상대LCC	3.48	2.10	1.00
비용절감액	908.4	404.0	0.00

그림 4.5와 그림 4.6은 포장형식별로 사용자 비용을 고려한 생애주기비용을 나타낸 것이며, JCP포장의 경우 가장 많은 비용이 소요됨을 알 수 있으며, PTCP포장은 유지관리측면과 사용자비용측면에서 고려해 볼때 가장 유리한 형식임을 알 수 있다.

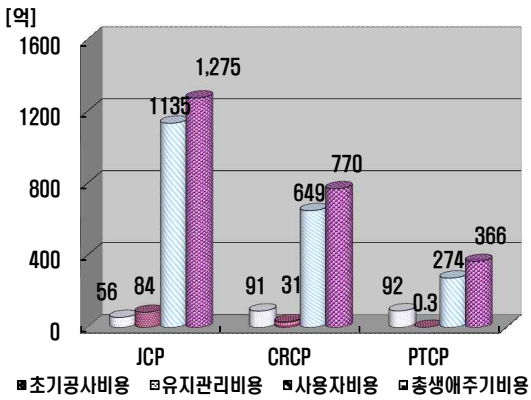


그림 4.5 포장형식별 비용분류

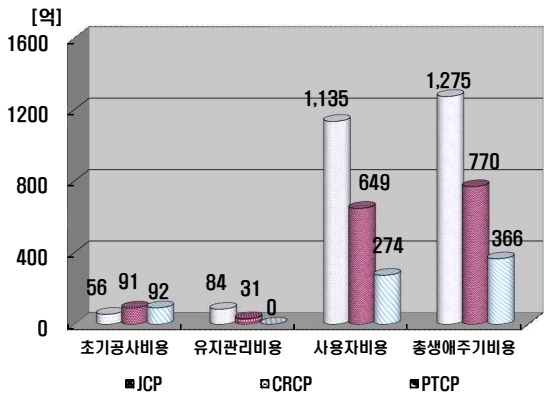


그림 4.6 유지관리단계별 비용

그림 4.7은 각 공법별로 사용자 비용을 고려한 생애주기비용의 누적분포를 나타낸 것이다. JCP포장의 경우 빈번한 유지관리 작업으로 인하여 사용자 비용이 타 공법에 비하여 내구년수에 따라서 크게 증가함을 알 수 있다. 반면에 PTCP공법은 상대적으로 유지관리 작업이 적게 소요되어 비용의 누적분포가 완만하게 증가함을 알 수있다.

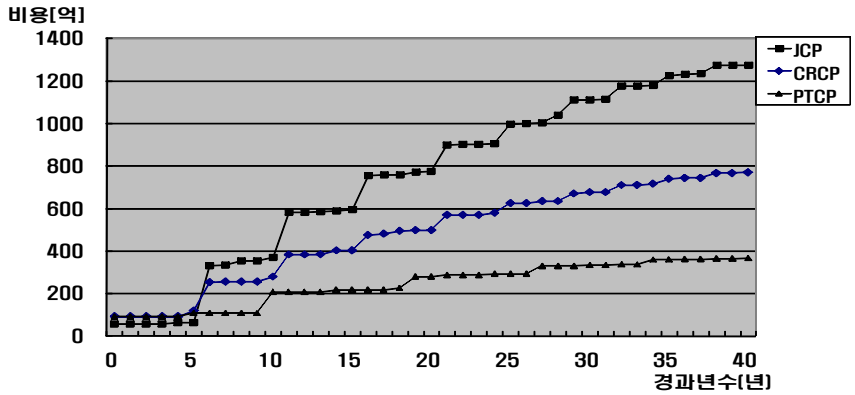


그림 4.7 공법별 LCC의 누적분포

2) 포장형식별 유지관리항목별 비용(사용자 비용포함)

표 4.8은 사용자 비용을 고려한 포장의 형식별 유지관리비용을 나타낸 것이며, 그림 4.8과 그림 4.9는 각각 포장의 형식별, 유지관리항목별 비용분포를 나타낸 것이다.

사용자 비용를 고려할 경우, JCP포장의 유지관리에 소요되는 비용은 1,219억원으로 PTCP포장에 비해 944.7억원이 많이 소요되어 약 4.4배 정도 많은 비용이 소요됨을 알 수 있다. CRCP의 경우는 PTCP의 유지관리비용에 비하여 약 2.5배 정도가 많이 소요되어 679.5억원의 비용이 산정되었다.

비용절감 측면에서 살펴볼 때, PTCP포장에 비해 JCP포장은 944.7억원, CRCP포장은 405.1억원의 비용절감효과를 나타내어 PTCP포장형식이 생애주기동안에 유리한 형식임을 알 수 있다.

표 4.8 포장형식별 유지관리비용의 비교(사용자 비용 고려)

포장형식(억)	JCP	CRCP	PTCP
표면보수	85.2	126.7	82.6
소파보수	1115.1	538.5	191.7
덧씌우기	18.7	14.3	0.0
합 계	1219.0	679.5	274.3
비용절감(억)	944.7	405.1	0.0

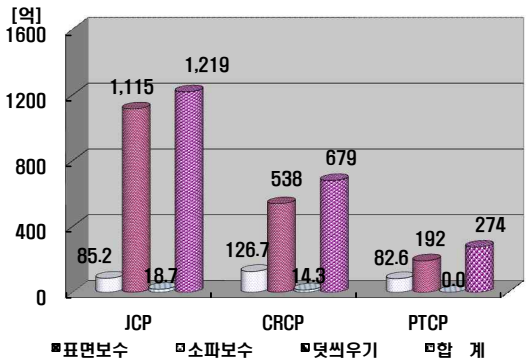


그림 4.8 유지관리항목별 비용분류

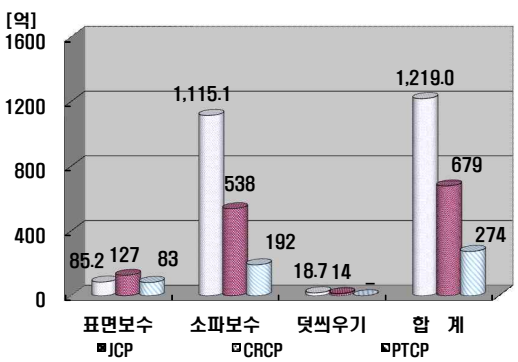


그림 4.9 형식별 유지관리비용 분류

4.3 민감도 분석

포장형식별로 할인율의 변화에 따른 생애주기비용의 민감도 분석을 실시하였다. 할인율은 미래의 비용을 현재가치화 하는데 사용되는 계수이며 선진국에 가까울수록 낮은 할인율이 적용된다, 즉 물가상승률 및 인플레이션등의 변화가 상대적으로 적게 작용한다는 것을 의미한다. 할인율의 변화에 따라서 각 공법별 LCC의 변화를 검토하고 최종적인 의사결정에 영향을 끼치는지 확인하기 위하여 민감도 분석을 실시하였다.

표 4.9와 그림 4.10은 할인율에 따른 LCC분석의 민감도를 나타낸 것이다. 할인율을 3%에서 10%범위까지 변화시켜 LCC분석을 실시한 결과 할인율 변화에도 불구하고 PTCP 포장이 LCC측면에서 가장 유리하게 나타났으며, 9%에서는 JCP와 CRCP의 포장이 거의 동일한 수준으로 분석되었다. 할인율이 10%인 경우 CRCP포장의 LCC가 가장 크게 나타나 의사결정 기준이 바뀔 수 있음을 알 수 있다. 하지만 할인율이 10%일지라도 PTCP포장은 LCC가 가장 저렴한 형식으로 나타났다.

표 4.9 할인율에 따른 민감도 분석(사용자비용 미고려)

구 분	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
JCP	224.70	195.18	172.18	154.06	139.63	128.02	118.58	110.82
CRCP	153.81	142.70	134.07	127.29	121.64	117.59	114.09	111.22
PTCP	92.67	92.55	92.47	92.40	92.34	92.29	92.26	92.22

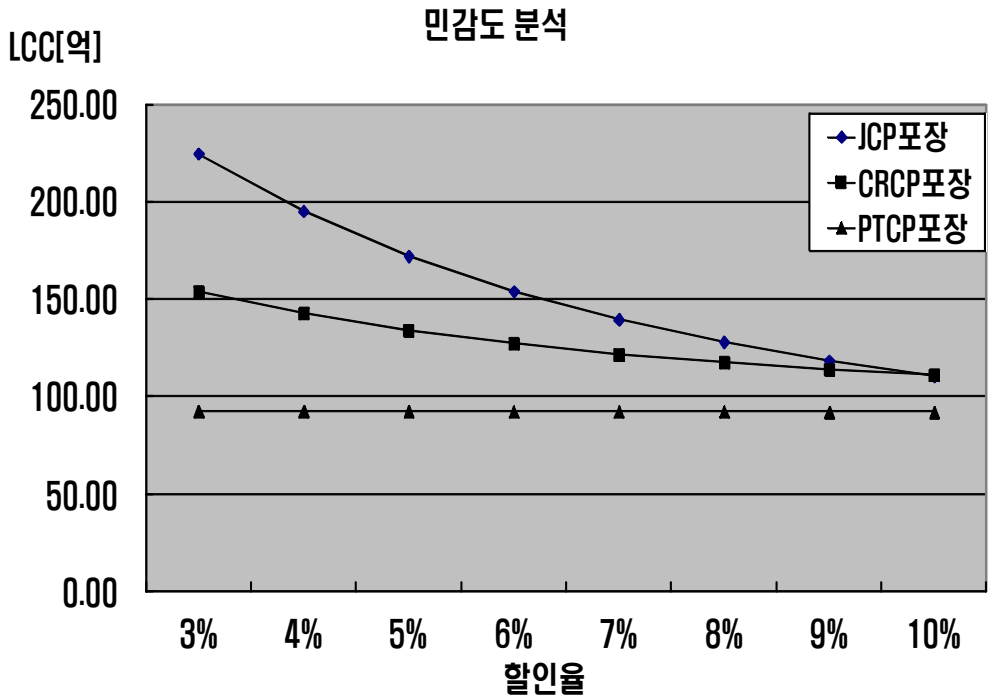


그림 4.10 할인율에 따른 민감도 분석(사용자비용 미고려)

표 4.10와 그림 4.10은 사용자 비용을 고려한 포장의 LCC를 할인율에 따른 민감도 분석을 실시한 결과를 나타내고 있다. 할인율이 3%~10% 까지 변화하더라도 포장의 LCC는 PTCP포장이 가장 유리하게 나타났으며, CRCP포장, JCP포장 순으로 LCC가 크게 나타남을 알 수 있다. 따라서, 할인율이 변화하더라도 LCC에 따른 비용의 크기 순서에는 크게 변화가 없음을 알 수 있다.

표 4.10 할인율에 따른 민감도 분석(사용자비용 고려)

구 분	3%	4%	5%	6%	7%	8%	9%	10%
JCP	2476.5	2007.1	1643.8	1359.6	1135.1	956.0	811.5	693.9
CRCP	1390.4	1130.6	929.7	772.7	648.7	549.6	469.8	404.7
PTCP	577.6	472.4	390.2	325.5	274.0	232.7	199.2	171.8

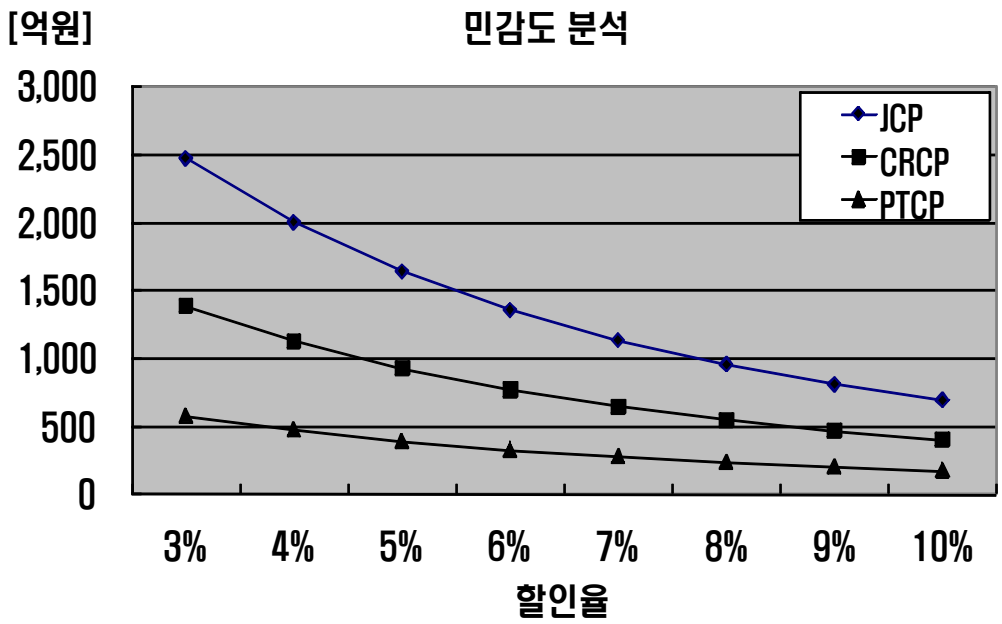


그림 4.11 할인율에 따른 민감도 분석(사용자비용 고려)

5. 결 론

콘크리트 포장형식 중 일반적으로 사용되어 왔던 JCP와 CRCP의 포장형식과 PTCP의 포장형식에 대한 LCC분석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 생애주기비용 측면에서 PTCP포장이 JCP와 CRCP에 비해 각각 47.3억(51.2%), 29.3억(31.7%)의 절감효과를 보여 공용수명기간동안 타 포장형식에 비하여 유리한 형식임을 알 수 있다.

2. 유지관리비용 측면에서 살펴보면, JCP포장, CRCP포장, PTCP포장의 비용이 각각 83.9억, 30.8억, 0.3억으로 나타나 PTCP포장이 가장 유리하게 나타났다. PTCP포장은 JCP포장과 CRCP포장에 비하여 각각 83.6억, 30.5억의 비용절감 효과를 나타내고 있음을 알 수 있다.

3. 사용자 비용을 고려한 생애주기비용 측면에서 살펴보면, PTCP포장은 JCP포장과 CRCP포장에 비하여 908.4억, 404.0억원의 비용절감 효과를 나타내어 타 공법에 비하여 유리한 형식임을 알 수 있다.

4. 사용자 비용을 고려한 유지관리측면을 살펴보면, PTCP포장의 유지관리비용(사용자비용포함)은 JCP포장과 CRCP포장에 비하여 각각 944.7억, 405.1억의 비용절감 효과를 나타내어 공용수명기간동안 유리한 형식임을 알 수 있다.

참고문헌

1. 한국도로공사, “곤지암 영업소, 경안영업소, 일죽영업소 포장 평가 및 보수방안 검토”, 도로교통기술원 포장연구그룹, 2005.04
2. 한국도로공사, “서해안 고속도로 포장파손 보수방안 검토”, 한국도로공사 도로처, 2005.9
3. [주]삼우아이엠씨, “영업소 광장부 콘크리트 포장 단면보수공사 VES-LMC 시공사례보고서”, 2005.12
4. 한국도로공사, “콘크리트 포장 파손부 단면보수 방안”, 한국도로공사 중부지역본부 도로팀, 2006.4
5. 한국도로공사, “경부선 콘크리트 포장 구간 파손원인 및 대책 검토결과”, 한국도로공사 도로교통기술원, 2007.10
6. 안성순, “중부고속도로 20년 공용성 평가를 통한 CRCP와 JCP의 비교 연구”, 한양대학교 박사논문, 2006.08
7. 한국도로공사, “중부고속도로 포장상태 분석 및 공용성 향상방안”, 한국도로공사 도로처, 2008.10
8. 한국도로공사, “포장・터널・사면 생애주기비용(LCC)분석 연구 최종보고서, 한국도로공사 기술심사처, 2008.11
9. 한국도로공사, “서울영업소 광장 기반시설 설치공사 실시설계 보고서”, 한국도로공사, 2008.12
10. 한국도로공사, “연속철근콘크리트포장 확대적용 방안 검토”, 한국도로공사 설계처 도로설계팀, 2008.12
11. 한국도로공사, “콘크리트포장의 알칼리골재반응 발생현황 및 보수방안”, 한국도로공사 도로처, 2009.11

첨부 1) 경과년수별 유지관리비용의 분포(사용자 비용 미고려) [단위 : 억원]

항목/경과년수		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
JCP	매년발생	0.00	0.00	0.00	0.07	0.01	22.51	0.60	0.22	0.00	1.19	16.10	0.00	0.40	0.04	0.10	11.44	0.03	0.00	0.91	0.02
	누적비용	0.00	0.00	0.00	0.07	0.08	22.60	23.19	23.42	23.42	24.61	40.71	40.71	41.11	41.15	41.25	52.70	52.73	52.73	53.64	53.67
CRCP	매년발생	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	5.95	0.45	0.00	0.00	1.90	4.24	0.00	0.30	0.91	0.00	2.93	0.09	0.69	0.59	0.00
	누적비용	0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	7.62	8.08	8.08	8.08	9.98	14.22	14.22	14.52	15.43	15.43	18.36	18.45	19.14	19.73	19.73
PTCP	매년발생	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00
	누적비용	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.24	0.24

항목		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
JCP	매년발생	8.23	0.02	0.00	0.21	6.22	0.02	0.27	0.16	4.88	0.01	0.01	3.92	0.11	0.15	3.17	0.09	0.11	2.59	0.01	0.01
	누적비용	61.90	61.92	61.92	62.13	68.36	68.37	68.65	68.80	73.69	73.70	73.71	77.64	77.75	77.90	81.07	81.17	81.28	83.87	83.87	83.88
CRCP	매년발생	2.72	0.00	0.00	0.61	1.65	0.00	0.60	0.00	1.36	0.31	0.00	1.29	0.08	0.37	0.84	0.21	0.06	0.86	0.00	0.16
	누적비용	22.45	22.45	22.45	23.06	24.70	24.70	25.30	25.30	26.66	26.97	26.97	28.26	28.34	28.72	29.55	29.76	29.82	30.68	30.68	30.84
PTCP	매년발생	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	누적비용	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.28	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31	0.31

첨부 2) 경과년수별 유지관리비용의 분포(사용자 비용 고려) [단위 : 억원]

경과년수		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
JCP	매년발생	0.0	0.0	0.0	7.8	0.8	268.0	3.6	16.5	0.0	17.8	211.9	0.0	2.6	5.2	7.0	158.1	4.0	0.4	12.5	3.4
	누적비용	0.0	0.0	0.0	7.8	8.7	276.7	280.2	296.7	296.7	314.5	526.4	526.4	529.0	534.2	541.2	699.4	703.4	703.8	716.3	719.7
CRCP	매년발생	0.0	0.0	0.0	0.0	27.1	134.2	2.7	0.0	0.0	24.2	103.7	0.0	1.9	17.0	0.0	73.0	6.3	13.7	3.4	0.0
	누적비용	0.0	0.0	0.0	0.0	27.1	161.3	164.0	164.0	164.0	188.2	291.9	291.9	293.8	310.8	310.8	383.8	390.1	403.8	407.2	407.2
PTCP	매년발생	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5	0.0	0.0	0.0	0.0	99.1	0.0	0.0	0.0	10.4	0.0	0.0	0.0	8.4	53.8	0.0
	누적비용	0.0	0.0	0.0	0.0	16.5	16.5	16.5	16.5	16.5	115.6	115.6	115.6	115.6	126.0	126.0	126.0	126.0	134.4	188.3	188.3

항목		21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
JCP	매년발생	124.3	3.0	0.0	4.2	90.8	2.3	4.7	35.8	70.2	1.9	1.6	60.6	2.2	2.2	47.4	4.1	3.3	38.8	0.9	1.0
	누적비용	844.0	847.0	847.0	851.3	942.0	944.3	949.1	984.8	1055.0	1057.0	1058.6	1119.2	1121.3	1123.5	1170.9	1175.0	1178.3	1217.1	1218.1	1219.0
CRCP	매년발생	71.5	0.0	0.0	10.4	45.8	0.0	8.8	0.0	35.7	6.3	0.0	34.0	0.5	5.5	23.3	4.2	0.4	22.6	0.0	3.2
	누적비용	478.8	478.8	478.8	489.2	535.0	535.0	543.8	543.8	579.5	585.7	585.7	619.7	620.3	625.8	649.0	653.2	653.6	676.3	676.3	679.5
PTCP	매년발생	7.1	0.0	0.0	5.8	0.0	0.0	36.5	0.0	0.0	3.9	0.0	3.4	0.0	22.7	0.0	2.6	0.0	2.2	0.0	2.0
	누적비용	195.3	195.3	195.3	201.1	201.1	201.1	237.6	237.6	237.6	241.5	241.5	244.8	244.8	267.6	267.6	270.1	270.1	272.4	272.4	274.3

부록 7. 성능시험 및 시험성적서

1. 임실영업소 포장 시공

2. 천안지사 포장 시공

주 의

1. 이 보고서는 국토해양부에서 시행한 R&D정책·인프라사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토해양부에서 시행한 사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

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

▶ 문의처 : 한국건설교통기술평가원 TEL 031)381-6311
㈜ 삼우아이엠씨 TEL 02)3400-8700

R&D / 09TRPI-C052262-01

포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 실용화 기술개발 및 현장검증에 관한 연구보고서

■ 발행일 / 2011. 08. 12.
■ 발행처 / ㈜ 삼우아이엠씨
강원도 춘천시 효자동 192-1 (우 200-948)
■ 인쇄처 / 은광 02-448-6920