

고속축중계 설치구간의 포스트텐션 콘크리트 포장 설계 방안

Design of Post-Tensioned Concrete Pavement for Weigh-in-Motion Installed Section

박희범* · 김성민** · 윤동주*** · 오한진**** · 배종오*****

Park, Hee Beom · Kim, Seong-Min · Yun, Dong Ju · Oh, Han Jin · Bae, Jong Oh

1. 서론

콘크리트 포장 슬래브에 강선의 긴장을 통해 프리스트레스를 도입하여 도로를 건설하는 방식인 프리스트레스트 콘크리트 포장 공법(PSCP: Prestresses Concrete Pavement)은 콘크리트 슬래브에 발생하는 인장응력을 프리스트레스로 상쇄시켜 균열발생 등의 파손을 억제하고 장기 서비스 기간 동안 유지보수 없는 고내구성 및 고품질의 서비스를 제공한다. PSCP는 현장타설 콘크리트 슬래브에 프리스트레싱을 가하는 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement)과 미리 제작된 콘크리트 슬래브를 프리스트레싱 기법을 이용하여 체결하는 프리캐스트 프리스트레스트 콘크리트 포장(Precast Prestressed Concrete Pavement)으로 구분할 수 있다. PTCP는 프리스트레싱 도입에 의한 발생 인장 응력의 감소로 포장체의 피로 파손을 줄여 내구성을 보장할 수 있으며 줄눈의 감소로 이와 연계된 손상 또한 감소시킬 수 있는 우수한 포장 형식이라 할 수 있다. 이러한 PTCP의 포장의 대략적인 구성 및 설계 개념을 그림 1에 나타내었다.

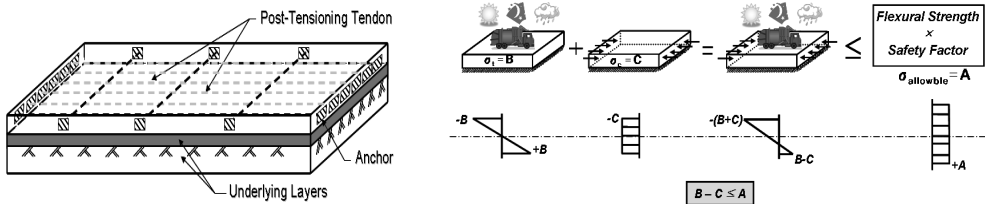


그림 1. PTCP 구성 및 설계 개념

2. 고속축중계(WIM: Weigh In Motion) 개요

국내 고속도로 포장의 대부분은 콘크리트 포장을 사용하고 있으나 국도의 경우에는 부분적으로 줄눈 콘크리트 포장을 사용하고 있는 실정이다. 국도의 경우 중차량의 통행량이 그리 많지 않고 설계 수명이 20년 이

* 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 박사과정(E-mail : bambarns@khu.ac.kr)
 ** 정 회원 · 경희대학교 토목공학과 교수 · 교신저자 · 공학박사 · 031-201-3795(E-mail : seongmin@khu.ac.kr)
 *** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : yowaa@khu.ac.kr)
 **** 학생회원 · 경희대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : fantum2040@khu.ac.kr)
 ***** 정 회원 · 경희대학교 토목공학과 박사과정 · 삼우IMC 기술연구소장(E-mail : jobae77@naver.com)

상 길지 않기 때문이다. 일부 공업단지 진출입로 같은 경우에는 중장비 혹은 중금속의 적재 차량들로 인해 파손이 심각한 상태에 있다.

WIM(Weigh In Motion)은 최첨단 차량무게 측정 시스템으로서 도로상에 설치된 초정밀 Lineas Quartz WIM Sensor로 고속주행 차량의 축(Axle)간 차량무게와 총무게 및 차종과 속도 등 교통정보를 개별차량 또는 시간단위별 통계자료로 구분하여 측정하는 시스템이다. WIM의 개념에 대해 그림 2에 나타내었으며 WIM의 주요 특징 및 기능은 도로 주행차량의 각종 Data 측정, 실시간 개별차량 및 통계 Data 수집, On-line 통신 및 Data 수집 가능, 과적 자동단속 시스템에 응용 등이다.

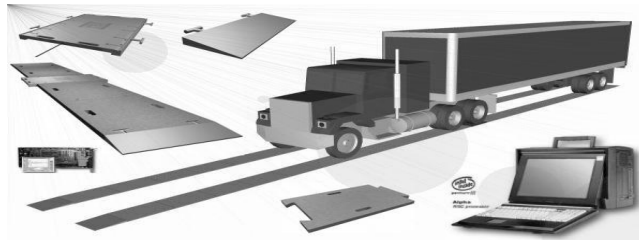


그림 2. WIM 개념

WIM은 차량의 무게를 고감도의 센서를 사용하여 정확하게 측정하는 시스템으로 도로 포장의 평탄성 및 진동에 매우 민감하게 반응한다. 따라서 국내 국도 포장에 WIM을 설치하기 위해서는 WIM 센서 작동에 방해를 주지 않는 평탄성 확보와 진동이 적은 포장 형식이 요구된다. 일반적으로 아스팔트 포장의 경우 중차량의 잦은 주행으로 인해 소성 변형 및 러팅(Rutting)이 빈번히 일어나고 있는 것이 현실이다. 따라서 고성능 고내구성의 PTCP 공법을 국도의 WIM 설치 구간에 적용하는 방안을 검토하였다. PTCP 공법의 경우 프리스트레스 도입으로 인해 중차량으로 발생하는 포장의 파손을 줄이고 WIM 측정 구간 내 줄눈이 없는 포장으로 WIM 측정 구간에 가장 적합한 포장 형식일 것이다. PTCP 슬래브를 WIM 구간에 적용하기 위하여 각종 검토 사항을 분석하고 WIM 구간의 PTCP 설계를 수행하였다.

3. 강선의 하향 배치

국도 WIM 설치 구간에 PTCP 공법을 적용하기 위해 먼저 WIM 센서 설치로 인한 강선의 하향 배치를 고려하였다. 국도에 설치될 WIM 센서의 높이는 약 70mm로 PTCP 슬래브 두께 150mm의 절반 정도의 크기이다. 포장 슬래브 전 단면에 압축력을 작용시키는 PTCP에는 강선이 슬래브 중립축을 따라 배치되기 때문에 WIM 센서와 엇갈리게 된다. 따라서 그림 3과 같이 WIM 센서가 설치되는 일부 구간에서 긴장 강선을 아래쪽으로 처지게 배치해야 될 것이다.

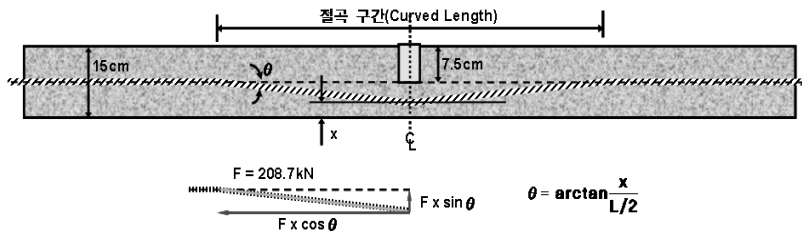


그림 3. WIM 설치구간 PTCP 강선 하향 배치

이 때 강선의 하향 배치로 인한 긴장력의 상향 분력이 발생할 것이다. 그림에서 $F \cdot x \cdot \sin\theta$ 가 긴장력 F 의

상향 분력으로 이 힘이 콘크리트의 자중보다 크게 되면 슬래브가 위로 들리게 될 것이다. 이를 확인하기 위해 그림 4와 같이 강선의 절곡으로 인한 긴장력의 분포를 살펴보았다. 절곡 구간(L)과 강선의 하향 배치로 인한 강선의 아래쪽 피복두께(x)를 변수로 두어 각각의 경우 수평 및 수직 분력을 분석하였다.

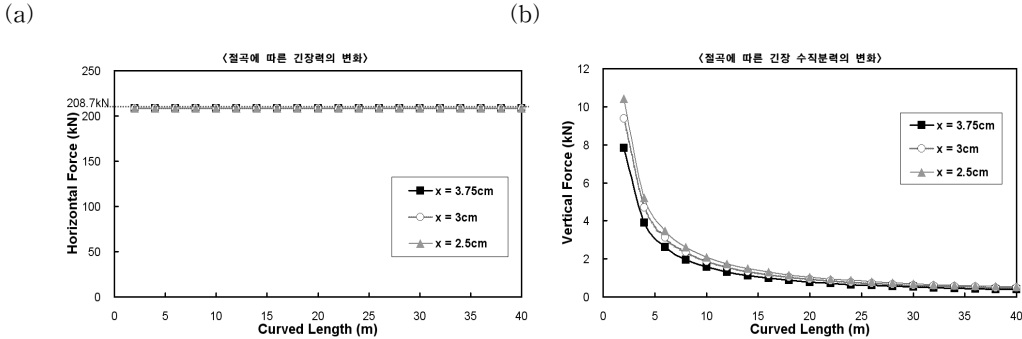


그림 4. 강선의 절곡으로 인한 긴장력 분포 : (a) 수평방향, (b) 수직방향

절곡길이(L)에 비해 강선이 하향배치된 거리가 상대적으로 매우 작기 때문에 강선의 수평방향 분력은 거의 변화가 없다. 절곡 후에도 강선의 긴장하중 208.7kN이 그대로 유지되기 때문에 절곡에 의한 수평방향 긴장력 손실은 무시할 수 있다. 또한 강선의 하향 배치로 인한 긴장력의 수직 분력은 그 크기가 긴장 하중(208.7kN)에 비해 매우 작게 나타난다. 절곡 길이가 커짐에 따라 수직 분력의 값은 더욱 작은 값을 나타낸다. 이러한 수직 분력으로 인한 PTCP 슬래브의 들림 현상을 확인하기 위해 그림 5에 단위 절곡 길이에 대한 수직 분력으로 강선 1개가 영향을 미칠 수 있는 콘크리트 슬래브의 단위 길이 당 무게와 비교 분석하여 그림 5에 나타내었다.

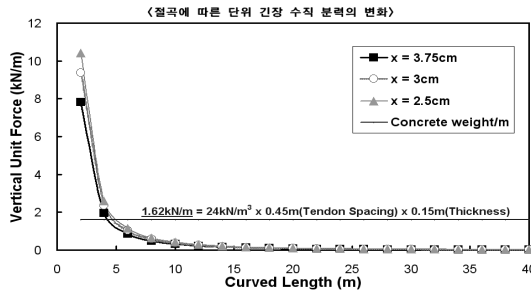


그림 5. 단위 절곡 길이에 대한 긴장력의 수직분력 분포

강선 1개의 하향 배치로 인한 수직분력과 이를 절곡 길이로 나눈 단위 길이 당 수직 분력이 PTCP 슬래브의 자중보다 크게 되면 슬래브가 들리게 될 것이다. 그림에서와 같이 단위 절곡 길이 당 수직 분력을 절곡 길이와 피복 두께에 따라 분석이 되었고 콘크리트 슬래브의 자중 또한 그림에서와 같이 콘크리트의 단위 중량과 긴장 간격 및 슬래브 두께의 곱으로 구할 수 있다. 따라서 단위 길이 당 수직 분력이 콘크리트 자중 1.62kN/m보다 작게 되는 절곡 길이(5m 이상)를 선택하여 시공하면 절곡에 의한 슬래브 들림 현상은 일어나지 않을 것이다.

4. 슬래브 처짐 검토

WIM 센서는 작동 특성상 도로의 평탄성과 포장 및 자량의 진동에 민감하게 반응한다. 따라서 소성 변형

및 러팅, 줄눈, 균열의 발생을 최대한 줄여야 하며 포장 슬래브 자체의 처짐 또한 제한된다. 포장의 처짐이 크게 되면 WIM 센서 역시 포장과 마찬가지로 피로파손이 발생하게 된다. 따라서 포장의 종류 및 형식에 따라 WIM 설치에 적합한 처짐 기준이 마련되어 있다. 이러한 처짐의 기준은 표 1과 같으며 최소한 III등급 안에 들어야 한다. 아래 기준은 차륜하중 130kN/Axle 정도의 AASHTO 설계 축 하중 (80kN/Axle)보다 약간 큰 과적 차량의 축 하중을 기준으로 한 것이다.

표 1. WIM 설치 구간 포장 슬래브 처짐 기준(콘크리트 포장)

Pavement (mm)			WIM Site Class		
			I (Excellent)	II (Good)	III (Acceptable)
Deflection	Semi-rigid	Mean deflection	≤0.15	≤0.20	≤0.30

따라서 WIM 구간에 적용될 PTCP 슬래브의 수직 처짐을 유한요소해석 프로그램(ABAQUS, 2007)과 Westergaard 방정식을 사용하여 분석을 실시하였다. 포장 슬래브의 길이는 PTCP 슬래브가 100m~200m 정도로 길기 때문에 변수로 지정하지는 않았다. 슬래브 두께는 15cm와 20cm를 고려하였다. 그림 6은 하부지반 강성에 따른 PTCP 슬래브의 수직 처짐을 그래프로 나타낸 것이다.

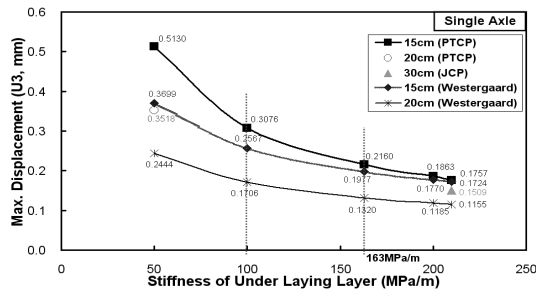


그림 6. 하부지반 강성에 따른 PTCP 수직 처짐 분포

포장 하부지반 강성과 슬래브 두께가 클수록 수직 처짐 값이 작아지는 것을 알 수 있다. Westergaard 방정식으로 구한 처짐 값이 유한요소 해석 프로그램으로 구한 처짐 값보다 다소 작은 결과 값을 보이는 것을 알 수 있다. 20cm 두께의 PTCP 슬래브와 30cm JCP 슬래브의 최대 처짐은 참고로 나타낸 값이다. 하부지반 강성이 100MPa(380pci)로 다소 약한 경우에는 15cm 두께의 PTCP 슬래브의 최대 처짐이 WIM 설치에 의한 처짐 기준을 만족하는 경계에 존재한다. 따라서 하부지반 강성이 100MPa/m 보다 커지면 처짐에 대한 WIM 설치 기준을 만족하는 것을 알 수 있다.

5. 내구성 검토

PTCP의 내구성을 검토하기 위하여 PTCP 슬래브에 횡방향 긴장을 생략하고 설계를 수행했을 때 그 결과가 만족하는지 여부를 확인하였다. FEM 프로그램을 사용하여 환경 하중 및 차륜하중의 조건을 최악의 조건으로 하여 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력을 산출하였다. 이 때 슬래브의 횡방향 폭은 3.5m로 하였고 PTCP와 같은 장 경간 슬래브에서는 슬래브의 종방향 길이는 횡방향 응력에 무관하기 때문에 비교적 작은 길이인 80m를 기준으로 하였다. 표 2는 횡방향 발생응력 분석 결과를 나타낸 것이다.

환경 및 차륜하중에 의해 PTCP 슬래브에서 발생할 수 있는 횡방향 최대 인장응력은 2.15MPa이다. 이는 콘크리트의 허용휨강도 2.25MPa보다 작은 값이기 때문에 횡방향 긴장 설계는 필요없게 된다. 따라서 3.6m

폭의 PTCP 슬래브는 횡방향 긴장 없이 구조 안정성이 만족된다. 하지만 40년 설계 수명을 만족하기 위해서 피로파손에 대한 검토가 필요하다.

표 2. WIM 구간 적용 PTCP 슬래브 횡방향 발생응력

횡방향 응력	응력 발생 위치	Shoulder (kPa)	Wheel Pass (kPa)	Centerline (kPa)
Environmental	슬래브 상단(Curl Up)	103	450.5	920.3
	슬래브 하단(Curl Down)	267	894.2	1090
Vehicle	슬래브 상단	985.9	985.9	338.2
	슬래브 하단	985.9	1059.5	1059.5
Max. Stress	슬래브 상단	1088.9	1436.4	1258.5
	슬래브 하단	1252.9	1953.7	2149.5

횡방향 긴장 없이 WIM 구간에 적용되는 PTCP 슬래브의 40년 설계 수명에서의 공용성을 검토하기 위해 40년 설계 수명의 JCP 슬래브와 비교를 실시하였다. 설계 수명 40년으로 설계된 JCP 슬래브에서의 발생응력 보다 횡방향 긴장이 없는 PTCP 슬래브의 횡방향 발생 응력이 더 작게 발생할 경우 설계 수명 40년의 PTCP 슬래브는 피로파손에 의한 공용성이 확보될 수 있다. 따라서 AASHTO 경험 공식(AASHTO, 1993)을 사용하여 WIM 설치 구간에 적용할 JCP 슬래브를 설계하였다.

국도 포장의 교통량 예측 환산을 위해 일반적인 국도 포장의 교통량을 가지고 40년 설계 수명의 교통량을 예측하였으며 그림 7은 그 과정을 보여준다. 예측된 단축 하중 환산 교통량을 통해 포장 슬래브 두께를 산정하였다. 설계 수명 20년인 포장의 두께는 24.0cm 이며, 설계 수명 40년인 포장의 두께는 26.1cm로 산정 되었다.

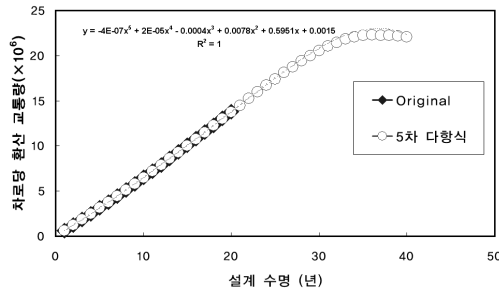


그림 7. 설계 수명에 대한 교통량 예측

두께 설계가 끝난 JCP 슬래브와 횡방향 긴장이 없는 PTCP 슬래브의 각각의 횡방향 응력을 비교하기 위해 각각의 경우를 구조해석을 통해 구하였다. 차륜하중은 80kN/Axle의 단축 하중을 고려하였고 응력 발생이 크도록 슬래브 단부에 축 하중을 재하 시켰다. 그림 8은 JCP 슬래브에 단축하중이 재하 될 때의 종방향 응력 분포를 나타낸 것이고 그림 9는 PTCP 슬래브에 단축하중이 재하 될 때의 횡방향 응력 분포를 나타낸 것이다. JCP의 경우 종방향 응력이 지배적으로 피로파손을 일으키고 PTCP의 경우 횡방향 긴장이 없는 슬래브의 종방향 줄눈의 타당성을 검증하기 위해 횡방향 발생응력을 분석하였다. 표 3은 발생응력 분포 분석 결과를 표로 나타낸 것이다.

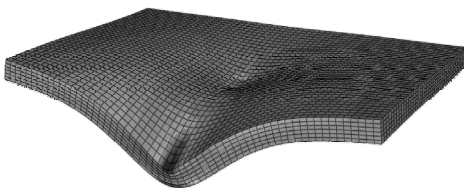


그림 8. JCP 슬래브의 종방향 발생응력

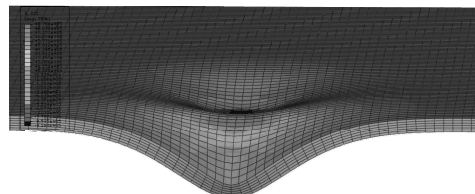


그림 9. PTCP 슬래브의 횡방향 발생응력

표 3. 피로파손 검토를 위한 응력 비교

	JCP(Max. Stress)	PTCP(Transverse Stress)
	σ_{26cm}	σ_{15cm}
Vehicle	0.8838MPa	0.8738MPa
소요 긴장량	0	-
* 소요 긴장량 = $\sigma_{15cm} - (\sigma_{30cm})$		

이러한 분석 결과를 이용하여 설계 수명 40년의 JCP 슬래브에서 발생하는 최대 응력보다 횡방향 긴장이 없는 PTCP 슬래브의 횡방향 발생응력에서 횡방향 긴장응력을 뺀(횡방향 긴장이 없으므로 0) 값이 더 작기 때문에 결과적으로 설계 수명 40년으로 설계된 JCP 슬래브보다 횡방향 긴장이 없는 PTCP 슬래브가 더 적은 응력을 받는다. 따라서 40년 수명의 JCP에서 발생하는 종방향 인장응력보다 PTCP에서 발생하는 횡방향 응력이 작으므로 PTCP는 40년 이상의 수명으로 설계된 것으로 평가된다. 표 4는 이러한 비교 결과를 나타낸 표이다.

표 4. 횡방향 긴장 없는 PTCP의 횡방향 피로파손 검토

	피로 파손 (설계 수명 40년)	PTCP 설계		
	σ_{26cm}	σ_{15cm}	설계 긴장량, σ_p	$\sigma_{15cm} - \sigma_p$
Max. Stress	0.8838MPa	0.8738MPa	0MPa (횡방향 긴장 無)	0.8738MPa
	$0.8838MPa > 0.8738MPa$			

6. 결론

본 연구에서는 중차량의 잦은 주행으로 인해 소성 변형 및 러팅이 빈번히 일어나고 있는 국도 포장에 고성능 고내구성의 PTCP 공법을 국도의 WIM 설치 구간에 적용하는 방안을 설계하기 위하여 수행되었으며 다음의 결론을 도출하였다.

- WIM 설치로 인한 강선의 하향 배치에 대하여 검토하였고 절곡길이를 5m 이상으로 시공 시 강선의 절곡에 의한 슬래브 들림 현상은 발생하지 않는 것으로 나타났다.
- WIM 설치로 인한 슬래브의 처짐을 검토하였고 하부지반 강성이 100 MPa/m 보다 커지면 처짐에 대한 WIM 설치 기준을 만족하는 것을 알 수 있었다.
- WIM 설치 구간의 종방향 줄눈의 안정성과 장기 공용성을 FEM 프로그램을 사용하여 검토하였다. 또한 AASHTO 경험공식을 사용하여 피로파손에 대하여 검토 한 결과 40년 수명의 JCP에서 발생하는 종방향 인장응력보다 PTCP에서 발생하는 횡방향 응력이 작으므로 PTCP는 40년 이상의 수명으로 설계된 것으로 평가되었다.

참고 문헌

1. AASHTO (1993). Guide for Design of Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials.
2. ABAQUS (2007). User's Manual Version 6.7, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I