

특수 구간 도로 포장에 포스트텐션 콘크리트 포장 적용 방안

Application Methodologies of Post-Tensioned Concrete Pavements for Specialized Section Pavements

배종오 Bae, Jong Oh	정회원 · 경희대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : jobae@samwooinc.co.kr)
박희범 Park, Hee Beom	경희대학교 토목공학과 박사과정 (E-mail : bambams@khu.ac.kr)
김성민 Kim, Seong-Min	정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수 · 교신저자 (E-mail : seongmin@khu.ac.kr)

ABSTRACT

This research was conducted to propose the design methodologies of post-tensioned concrete pavements (PTCPs) for specialized section pavements. The specialized sections considered in this study included bus stop sections in urban bus-only lanes and culvert existing highway sections that often showed severe failures. The PTCP designs of those specialized sections were performed based on both the stresses and the fatigue failures, and more conservative design results were selected. In the stress based design, the maximum tensile stress under extreme load conditions was obtained using finite element analyses first. Then, the number of tendons and the tendon spacing were determined so that the tensile stress was less than the allowable flexural strength. The AASHTO fatigue failure equations were used in the fatigue failure based design. From this study, the design methodologies of PTCP for bus stop sections in bus-only lanes and culvert existing highway sections were successfully suggested.

KEYWORDS

post-tensioned concrete pavement, bus-only lane, bus stop, culvert, tensioning, design

요지

본 연구는 특수 구간의 도로 포장에 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement) 공법을 적용하기 위한 설계 방안을 제시하기 위하여 수행되었다. 본 연구에서 고려한 특수 구간으로는 기존의 포장에서 많은 문제점이 발생하는 도심지 버스전용차로 정류소 구간과 고속도로 암거 설치 구간을 선정하였다. 이러한 특수 구간의 PTCP 설계는 응력 기준 설계와 피로파손 기준 설계로 이루어지며 두 설계 결과 중에서 보수적인 결과를 설계에 적용한다. 응력 기준 설계에서는 유한요소해석을 통해 극한의 하중조건을 고려하여 발생할 수 있는 최대 인장응력을 산정한 뒤 이를 감소시켜서 최대 인장응력이 허용휨강도 이하가 되도록 텐던의 개수와 긴장 간격을 산정하였다. 피로파손 기준 설계에서는 AASHTO 피로파손 공식을 기반으로 긴장 설계를 수행하였다. 연구 결과, 버스전용차로 정류소 구간과 암거 설치 구간에 PTCP 공법을 적용할 수 있는 설계 방안을 수립하였다.

핵심용어

포스트텐션 콘크리트 포장, 버스전용차로, 정류소, 암거, 긴장, 설계

1. 서론

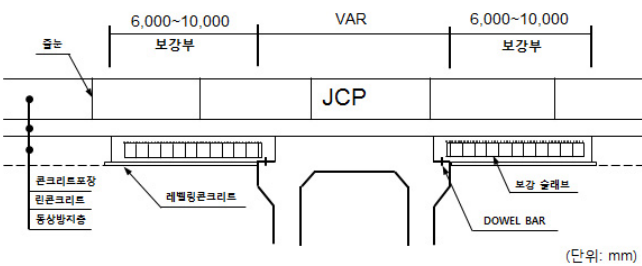
포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement)은 하중에 의해 포장체에 발생하는 인

장응력을 텐던의 긴장에 의해 콘크리트 슬래브에 압축응력을 가함으로써 감소시키는 방식으로 콘크리트 포장 슬래브의 두께를 기존 콘크리트 포장에 비해서 반 이하로 대폭 줄일 수

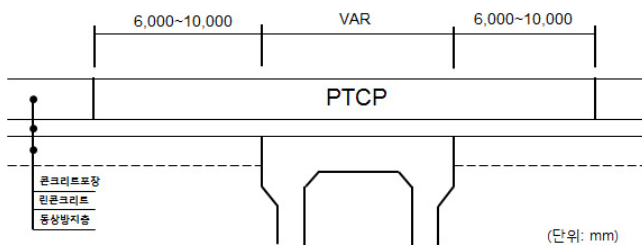
있을 뿐만 아니라 줄눈 간격을 100m가 넘도록 자유롭게 조절할 수 있다. PTCP의 설계 개념은 슬래브에 발생하는 인장 응력이 콘크리트의 허용 휨강도보다 작아지도록 긴장력을 선정하는 것이다. 미국, 유럽 등 여러 나라에서는 이러한 형식의 도로 포장 공법을 사용해 오고 있다(Friberg and Pasko, 1973; Brunner, 1975; Klunker, 1981; Powers and Zaniewski, 1987). 국내에서도 최근에 활발한 연구가 진행되고 있으며 국도 및 고속도로에 점진적으로 적용하고 있는 실정이다(윤동주 외, 2009).

PTCP 공법은 일반적으로 고급도로 포장, 즉 고속도로에 적용성이 높게 평가되고 있지만 그 외의 특수한 도로 포장 구간에도 적용이 가능하다. 예를 들어, 도심지의 버스전용차로 정류장 구간 포장이나 교차로 구간 포장은 아스팔트 포장으로 되어있기 때문에 차량의 속도 변화에 의해 발생하는 가속도에 의한 하중 및 정차 시의 정지하중에 의해 소성변형 및 이와 연관된 파손이 흔히 발생하여 유지보수에 어려움을 겪고 있다. 이와 같은 구간의 포장을 PTCP 공법을 적용하여 강성포장으로 교체하면 내구성이 우수해지며 유지보수비용을 절감할 수 있을 것이다.

또한 고속도로 줄눈콘크리트 포장(JCP: Jointed Concrete Pavement)에서 하부에 암거가 설치된 구간은 평탄성 불량 및 파손이 빈번히 발생하는 구간이며 이에 따른 유지관리비도 급격히 증가하고 있다. 이러한 원인은 성토고가 충분히 확보되지 않은 암거 구간은 암거 뒤채움부의 부등침하로 인해 포장체를 지지하는 하부층의 지지력이 손실되기 때문이다. 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 현재는



(a) 기존 암거 구간 포장(JCP)



(b) PTCP 공법 적용

그림 1. 암거 구간 포장 공법

그림 1(a)에 나타난 바와 같이 토공부에 보강슬래브를 설치하여 뒤채움부 처짐의 영향을 최소화하려고 노력하고 있으나, 여전히 암거구간 포장에서 문제가 발생하고 있다. 따라서 암거 구간 포장에 그림 1(b)와 같이 PTCP를 적용하면 뒤채움부의 부분적인 침하가 발생하더라도 이로 인한 포장체의 파손과 평탄성의 저하를 최소화할 수 있을 것이다.

본 연구는 버스전용차로 정류소 구간이나 암거 구간과 같은 특수 구간의 포장에 PTCP 공법을 적용하기 위하여 각각의 응력분포 특성을 분석하고 이와 같은 구간에 적합한 긴장 설계 방안을 제시하기 위하여 수행되었으며 이러한 연구 내용을 본 논문에서 상세히 기술한다.

2. PTCP 설계 개요

PTCP의 설계는 응력기준 포장 설계와 피로파손에 의한 포장 설계로 이루어진다. 먼저 응력기준 설계는 슬래브에 작용하는 차륜 및 환경하중의 극한 조건을 고려하여 각각의 하중 및 하중 조합에 의해 발생할 수 있는 최대 인장응력을 산정한다. 그 후 긴장에 사용할 강선의 제원 및 이에 따른 긴장력을 결정하고 긴장 시 하부층과의 마찰로 인한 긴장량 손실 등 각종 손실량을 고려하여 긴장에 의해 실제 슬래브가 받을 압축응력을 산정한다. 그리고 하중에 의해 발생한 최대 인장응력에서 강선의 긴장에 의한 압축응력을 감한 응력이 허용인장응력 보다 작아지도록 텐션의 개수와 긴장 간격을 설계한다.

이러한 PTCP의 종방향 긴장 설계 과정을 그림 2에 나타내었으며 횡방향 긴장 설계 과정을 그림 3에 나타내었다. 종방향 긴장 설계에서의 주요 차이점은 횡방향 긴장 설계 시에는 최대 인장응력을 산출할 때 하중조합 경우의 수가 늘어나며, 횡방향 긴장간격이 일반적으로 크기 때문에 정착 구간의 여러 위치에서의 긴장력 손실율을 고려해야 하는 것이다.

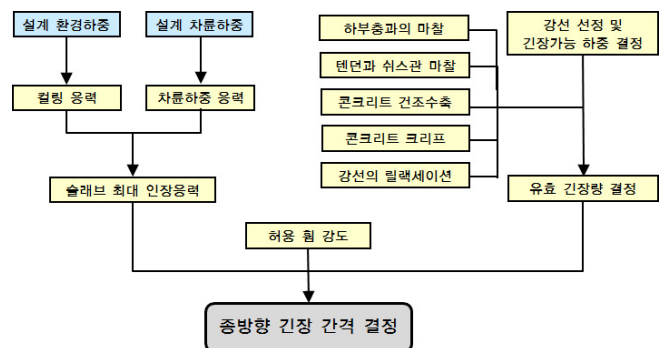


그림 2. PTCP 종방향 긴장 설계

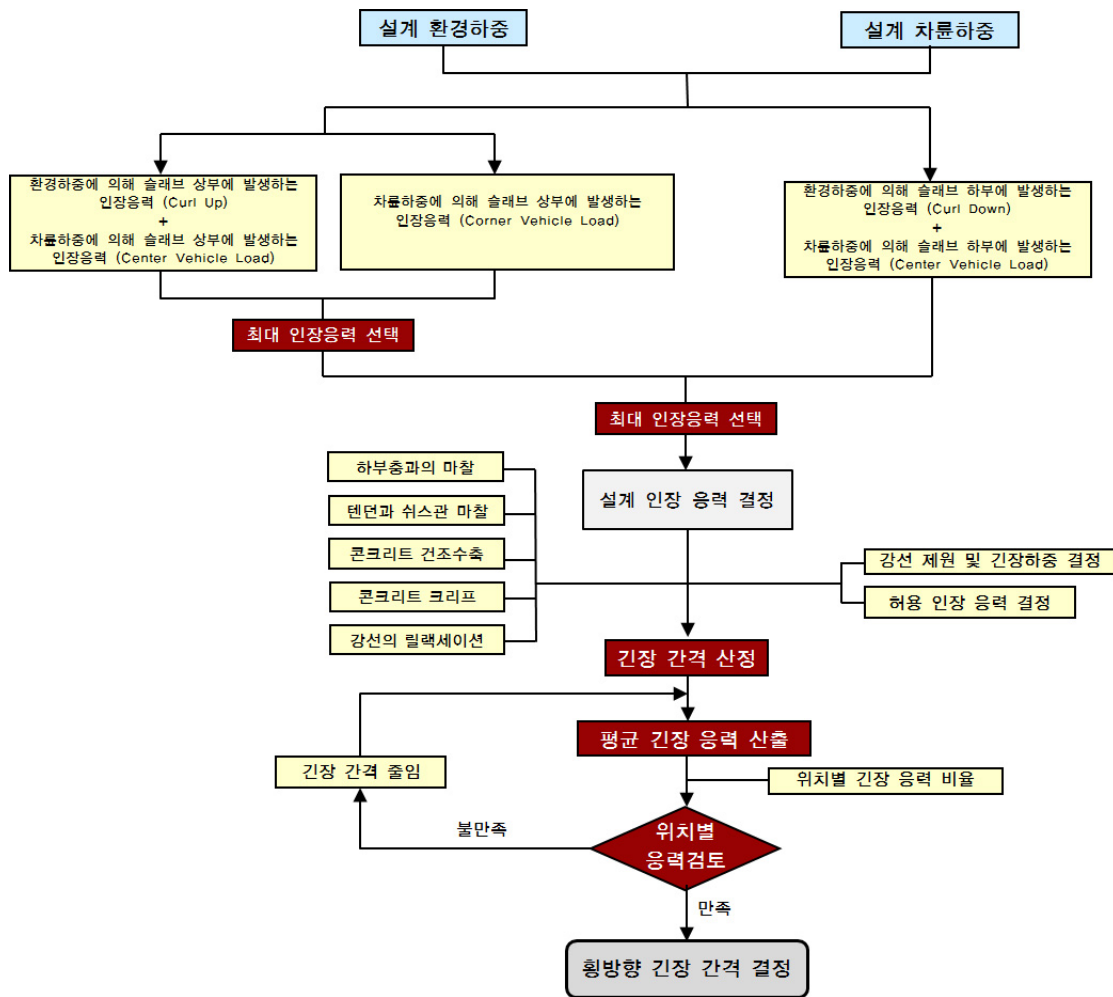


그림 3. PTCP 횡방향 긴장 설계

피로파손 기준에 의한 설계는 AASHTO 피로파손 공식 (AASHTO, 1993)을 기반으로 하여 긴장력을 산정하여 설계하는 방법이다. 우선 PTCP가 어떠한 두께의 콘크리트 포장을 대신하여 건설되어질 것인지를 결정하고 이러한 포장에 차륜하중에 의해 발생하는 인장응력을 산정한다. 그 후 PTCP 슬래브의 두께를 결정하여 이러한 슬래브에 같은 하중이 작용할 때의 인장응력을 구해서 두 인장응력의 차이에 해당하는 압축응력을 가할 수 있도록 긴장량을 산정한다. 이러한 피로파손 기준에 의한 포장 설계 개념을 그림 4에 나타내었다.

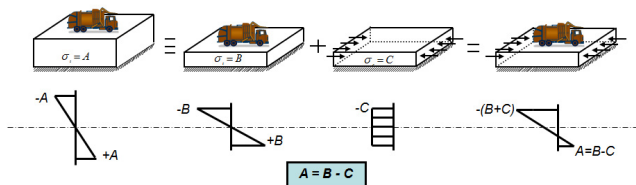


그림 4. 피로파손 기준에 의한 PTCP 설계 개념

이와 같이 특수 구간 PTCP는 응력 기준 설계와 피로파손 기준 설계의 두 가지 설계 방법을 이용하여 설계를 수행한 뒤 보다 보수적인 결과를 나타내는 설계에 따라 긴장 설계를 수행한다.

3. 버스전용차로 정류소 구간 PTCP 설계 방안

3.1. 응력 기준 설계

버스전용차로 정류소 구간의 아스팔트 포장을 제거하고 종방향 길이 72m, 횡방향 폭 3.3m, 두께 15cm 크기의 PTCP를 건설하는 가정으로 설계를 수행하였다. 먼저 포장 슬래브에 차륜하중 및 환경하중에 의한 발생응력을 분석하기 위해 유한요소해석 프로그램을 사용하여 극한의 하중 조건으로 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력을 산출하였다(ABAQUS, 2007). 환경하중에 의한 발생응력은 실제 콘크리트 포장에서 발생가능한 상하부의 온도차를 고려하여 수직 온도경사 (Temperature Gradient)를 0.5°C/cm로 산정하였으며 컬

업(Curl Up)과 쉐다운(Curl Down)을 모두 고려하였다. 하부층의 모델링은 실제 하부지층의 거동을 모사할 수 있도록 무인장스프링 (Tensionless Spring)을 사용하였으며 지지력계수(K)값은 시방 규정값인 66.8MN/m³를 사용하였다. 차륜하중에 의한 발생응력은 단축 및 복축하중을 사용하여 축당 82kN의 하중이 작용하도록 하여 슬래브 중앙과 단부에 축하중을 재하하여 최대 인장응력을 산출하였다. 환경하중 및 차륜하중에 의한 종방향 발생응력을 슬래브 각 위치별로 구하여 표 1에 나타내었다.

표 1. 버스전용차로 정류소 PTCP 종방향 발생 응력

종방향 응력	응력 발생 위치	Max.	Max.
		Stress(kPa) Single Axle	Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	1166	
	Bottom of Slab(Curl Down)	1194	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	1826	1476
	Bottom of Slab(Edge)	2772	2268
	Top of Slab(Corner)	2214	2428
Total Max. Stress (Max. Environmental Stress+Max. Vehicle Stress)	Top of Slab	3594	
	Bottom of Slab	3966	

긴장 설계에서 중요한 요소 중 하나인 콘크리트의 허용휨강도는 일반 콘크리트의 휨강도 4.5MPa의 절반인 2.25MP로 가정하였다. 허용 휨강도를 휨강도의 절반 이하로 할 경우 피로에 의한 파손이 거의 발생하지 않는다고 보기 때문에 이러한 값을 사용하였다. PTCP 포장 슬래브에 발생하는 인장응력 및 각종 손실을 구하고 콘크리트의 허용휨강도를 적용하여 세부적인 종방향 설계 수식을 식 (1)과 (2)에 나타내었다.

$$\frac{\{강선의 인장하중(208.7kN) - \sum \text{손실량}\} \times \text{강선의 개수}(n)}{\text{슬래브 긴장단면적(폭}(3.3\text{m}) \times \text{두께}(0.15\text{m}))} \geq \text{하중에 의한 최대인장응력} - \text{콘크리트 허용휨강도} \quad (1)$$

여기서, 손실량:

- i) 하부층 마찰저하에 따른 슬래브 중앙에서의 긴장력 손실
- ii) 텐던과 쉬스관 사이의 마찰에 의한 손실
- iii) 콘크리트 건조수축에 의한 손실
- iv) 콘크리트 크리프에 의한 손실
- v) 강선의 릴랙세이션에 의한 손실

$$\text{긴장 간격}(s) = \frac{\text{강선의 인장하중}(208.7kN) - \sum \text{손실량}}{(\text{하중에 의한 최대인장응력} - \text{콘크리트 허용휨강도}) \times \text{슬래브 두께}(0.15\text{m})} \quad (2)$$

PTCP 버스전용차로 정류소 구간 설계를 위해서 각종 인자들을 적용하여 설계 결과를 다음 식에 나타내었다.

$$\begin{aligned} \text{긴장 간격}(s) &= \frac{208.7 - (20.87 + 21.37 + 6.24 + 12.6)}{(3966 - 2250) \times 0.15} \\ &= 0.574\text{m} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 분자의 괄호 안에 나타낸 숫자들은 긴장 시 발생하는 손실량이며 이에 대한 자세한 사항은 이전의 연구에서 볼 수 있다(윤동주 외, 2009). 설계 수식을 통해 긴장간격이 0.574m로 나왔으며 시공성을 고려하여 긴장간격을 0.5m로 결정하였다. 결정된 긴장간격을 이용하여 아래와 같이 필요한 강선의 개수를 산정하였다.

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}(3.3\text{m})}{\text{긴장간격}(0.5\text{m})} = 6.6\text{개} \quad (4)$$

식 (4)를 통해 산정된 강선의 개수는 6.6개로 나왔으므로 PTCP 버스전용차로 정류소 구간의 종방향 긴장에 필요한 강선의 개수는 7개로 결정하였다.

다음 과정으로 종방향 발생응력 산정방식과 마찬가지로 환경하중 및 차륜하중에 의한 횡방향 발생응력을 슬래브 각 위치별로 구하여 표 2에 나타내었다. 표 2에서 볼 수 있듯이 차륜하중 및 환경하중에 의한 횡방향 최대 인장응력이 콘크리트의 허용휨강도 2250kPa보다 작기 때문에 응력 기준 설계

표 2. 버스전용차로 정류소 PTCP 횡방향 발생 응력

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max.	Max.
		Stress(kPa) Single Axle	Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	773	
	Bottom of Slab(Curl Down)	926	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	983	1120
	Bottom of Slab(Edge)	1128	1154
Total Max. Stress (Max. Environmental Stress+Max. Vehicle Stress)	Top of Slab	773	
	Bottom of Slab	2080	

에서는 횡방향 긴장이 필요없는 것으로 산정되었다.

따라서 응력 기준 설계에 의해 산정된 버스전용차로 정류소 구간 PTCP의 종방향 및 횡방향 긴장 간격 설계는 종방향으로는 0.5m 간격으로 7개의 강선을 사용하고 횡방향으로는 긴장력 도입이 필요없는 것으로 산정되었다.

3.2. 피로파손 기준 설계

피로파손 기준에 의한 설계에서는 우선 버스전용차로 정류소 포장 구간을 JCP 포장으로 가정하였을 때의 설계 결과를 구한다. JCP는 AASHTO 공용방정식과 단축하중 환산 교통량을 이용하여 포장 슬래브의 두께를 산정한다(AASHTO, 1993). 그러나 도심지 버스전용차로의 교통량이 명확하지 않아 PTCP에서 발생하는 인장응력을 이용하여 JCP 포장에서 발생하는 종방향 최대 인장응력을 결정하였으며 이를 역산하여 JCP의 두께를 산정하는 방법을 식 (5)와 같이 사용하였다.

$$\begin{aligned} & \text{차륜하중에 의한 PTCP 종방향 최대 인장응력 (2772kPa)} \\ & - \text{긴장응력 (2088kPa)} \\ & = \text{JCP 종방향 최대 인장응력 (684kPa)} \end{aligned} \quad (5)$$

차륜하중에 의한 종방향 응력은 단축하중이 슬래브의 모서리부에 작용할 때 최대 인장응력이 발생하므로 식 (5)를 통해 알아낸 JCP 종방향 최대 인장응력을 이용하여 설계수명 40년의 JCP 두께를 역산하면 34.5cm가 된다. 또한 이를 현재 고속도로 설계에서 적용하고 있는 20년 설계수명의 JCP로 환산하면 두께가 31cm가 된다. 이러한 결과는 일반적으로 고속도로에서 공용되고 있는 JCP의 두께가 30cm인 점을 고려하면 이보다 두께가 크기 때문에 피로파손에 대하여는 안전한 것으로 분석된다.

따라서 도심지 버스전용차로 정류소 구간에 적용할 PTCP를 응력 기준 설계와 피로 파손 기준 설계로 수행한 결과 피로파손에 대하여는 안전한 것으로 분석되었기 때문에 설계 긴장 간격을 응력 기준 설계 결과로 결정하였다.

4. 암거 설치 구간 PTCP 설계 방안

4.1. 응력 기준 설계

암거 설치 구간에 종방향 길이 18m, 횡방향 폭 8.2m, 두께 30cm 크기의 PTCP를 건설하는 것을 가정으로 설계를 수행하였다. 암거 설치 구간은 뒤채움부에 침하가 발생할 수 있기 때문에 이를 고려한 응력산정이 필요하다. 이를 위해 그림 5에 나타난 바와 같이 뒤채움부에 보강슬래브 길이인 6m의 70%에 해당하는 지반에 침하가 발생하였다고 가정하여 구조

해석을 수행하였다. 이러한 이유는 교량 접속슬래브 설계 시 뒤채움부의 침하를 고려하여 유효설계 길이를 슬래브 길이의 70%로 가정하여 설계하기 때문이다(도로부대시설, 1998).

우선 슬래브에 차륜하중 및 환경하중에 의한 발생응력을 분석하기 위하여 유한요소해석 프로그램을 사용하여 극한의 하중 조건으로 슬래브에 발생 가능한 최대 인장응력을 산출하였다. 환경하중에 의한 발생응력은 이전과 같이 수직 온도 경사를 0.5°C/cm로 하여 컬업과 컬다운 모두를 고려하였으며 무인장스프링을 사용하여 하부층을 모델링 하였다. 노상 지지력계수(K_1)는 100MN/m³을 사용하였으며 암거구간의 지지력 계수(K_2)는 1000MN/m³을 사용하였다. 차륜하중에 의한 발생응력은 단축 및 복축하중(82kN/Axle)을 사용하여 슬래브의 중앙부와 단부에 차륜하중을 재하하여 최대 인장응력을 산출하였다. 환경하중 및 차륜하중에 의한 종방향 발생응력을 슬래브 각 위치별로 구하여 표 3에 나타내었다.

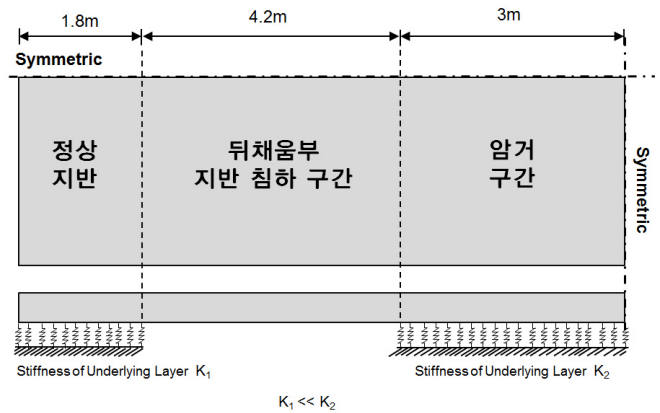


그림 5. 암거 설치 구간 PTCP 구조해석 모델

표 3. 암거 설치 구간 PTCP 종방향 발생 응력

종방향 응력	응력 발생 위치	Max.	Max.
		Stress(kPa) Single Axle	Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	2396	
	Bottom of Slab(Curl Down)	2390	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	1042	1337
	Bottom of Slab(Edge)	1648	2198
	Top of Slab(Corner)	776	794
Total Max. Stress (Max. Environmental Stress+Max. Vehicle Stress)	Top of Slab	3190	
	Bottom of Slab	4588	

긴장 설계에서 중요한 요소 중 하나인 콘크리트의 허용휨강도는 본 설계에서는 콘크리트의 휨강도가 일반적인 4.5MPa일 경우와 고강도인 6MPa인 두 가지 경우를 고려하여 이의 절반인 2.25MPa과 3MPa을 사용하였다. 암거 설치

구간 PTCP 포장 슬래브에 발생하는 인장응력 및 각종 손실을 구하고 우선적으로 콘크리트의 허용휨강도 2.25MPa를 적용하여 식 (1)과 (2)를 사용하여 종방향 긴장간격을 산정하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{긴장 간격}(s) &= \frac{208.7-(20.87+5.56+6.24+12.6)}{(4594-2250) \times 0.30} \\ &= 0.232\text{m} \end{aligned} \quad (6)$$

설계 수식을 통해 긴장간격이 0.232m로 나왔기 때문에 시공성을 고려하여 긴장간격을 0.2m로 결정하였다. 결정된 긴장간격을 이용하여 아래와 같이 필요한 강선의 개수를 산정하였다.

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}(8.2\text{m})}{\text{긴장간격}(0.2\text{m})} = 41\text{개} \quad (7)$$

위 식을 통해 산정된 강선의 개수는 41개로 나왔으나 강선의 개수를 40개로 하여도 종방향 긴장응력이 허용 범위 안에 들어가므로 암거 설치 구간 PTCP의 종방향 긴장에 필요한 강선의 개수는 40개로 결정하였다.

같은 방식을 사용하여 콘크리트의 허용휨강도가 3MPa인 경우에 대하여 종방향 긴장 설계를 수행하였으며 그 결과 0.3m 간격으로 25개의 강선을 사용해야 하는 것으로 분석되었다.

종방향 발생응력 산정방식과 마찬가지로 환경하중 및 차륜하중에 의한 횡방향 발생응력을 슬래브 각 위치별로 구하여 표 4에 나타내었다. 버스전용차로 정류소 구간 PTCP 포장 슬래브에서는 폭이 1차로인 경우를 예를 들었기 때문에 환경하중과 차륜하중에 의해 발생하는 각각의 최대인장응력의 합이 콘크리트의 허용휨강도 보다 작아 횡방향 긴장이 필요 없는 것으로 산정되었으나, 암거 설치 구간 PTCP 포장 슬래브에서는 발생하는 각각의 최대 인장응력의 합이 허용휨강도인 2.25MPa보다 크기 때문에 그림 3의 흐름도에 나타난 방식으로 긴장 설계를 수행하였다. 종방향 긴장 간격 산정 방식과 유사하게 횡방향 긴장 간격을 다음과 같이 산정하였다.

$$\begin{aligned} \text{긴장 간격}(s) &= \frac{208.7-(20.87+2.55+6.24+12.6)}{(3012-2250) \times 0.30} \\ &= 0.728\text{m} \end{aligned} \quad (8)$$

설계 수식을 통해 긴장간격이 0.728m로 나왔으며 시공성을 고려하여 긴장간격을 0.7m로 결정하였다. 결정된 긴장간격을 이용하여 강선의 개수를 산정하면 다음과 같다.

$$\text{강선의 개수}(n) = \frac{\text{슬래브 폭}(18\text{m})}{\text{긴장간격}(0.7\text{m})} = 25.7\text{개} \quad (9)$$

표 4. 암거 설치 구간 PTCP 횡방향 발생 응력

횡방향 응력	응력 발생 위치	Max.	Max.
		Stress(kPa) Single Axle	Stress(kPa) Tandem Axle
Environmental	Top of Slab(Curl Up)	2015	
	Bottom of Slab(Curl Down)	2070	
Vehicle	Bottom of Slab(Center)	725	942
	Top of Slab(Center)	236	352
	Bottom of Slab(Edge)	381	485
	Top of Slab(Corner)	539	780
Total Max. Stress (Max. Environmental Stress+Max. Vehicle Stress)	Top of Slab	2367	
	Bottom of Slab	3012	

위 식을 통해 산정된 강선의 개수는 25.7개로 나왔으나 강선의 개수를 25개로 하여도 종방향 긴장응력이 허용 범위 안에 들어가므로 횡방향 긴장에 필요한 강선의 개수를 25개로 결정하였다.

콘크리트의 허용휨강도가 3MPa인 경우에는 구조해석을 통해 산정된 횡방향 최대인장응력이 콘크리트의 허용휨강도와 거의 비슷하기 때문에 횡방향 긴장이 필요 없는 것으로 분석되었다.

응력 기준 설계에 의해 산정된 종방향 및 횡방향 긴장 간격 설계는 콘크리트의 휨강도가 4.5MPa인 경우에는 종방향으로는 0.2m 간격으로 40개의 강선을 사용하고 횡방향으로는 0.7m 간격으로 25개의 강선을 사용해야 되는 것으로 분석되었다. 또한 콘크리트의 휨강도가 6MPa인 경우에는 종방향으로는 0.3m 간격으로 25개의 강선을 사용하고 횡방향으로는 긴장력 도입이 필요 없는 것으로 분석되었다.

4.2. 피로파손 기준 설계

암거 설치 구간 PTCP의 피로파손 기준에 의한 설계에서는 우선 암거 설치 구간 포장을 JCP 포장으로 가정하였을 때의 설계 결과를 구한다. JCP는 AASHTO 공용방정식과 단축하중 환산 교통량을 이용하여 설계수명이 20년과 40년 일 때의 슬래브의 두께를 식 (10)을 이용하여 산정한다. 교통량은 일반적인 고속도로 교통량을 사용하였다. 산정된 설계 수명에 따른 JCP 포장의 두께는 표 5에 나타내었다.

$$\log_{10} W_{18} = 7.35 \log_{10}(D+1) - 0.06 + \frac{G_r}{1 + \frac{1.624 \times 10^7}{(D+1)^{8.46}}} + (4.22 - 0.32P_f) \log_{10} \left[\frac{S'_c(D^{0.75} - 1.132)}{215.63J \left(D^{0.75} - \frac{18.42}{\left(\frac{E_c}{K_c} \right)^{0.25}} \right)} \right] \quad (10)$$

여기서,

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

P_f : 설계 최종 서비스 지수

J : 콘크리트 포장형식에 따른 연속성을 반영하는 하중 전달 계수

E_c : 콘크리트 슬래브의 설계탄성계수

K_c : 콘크리트 슬래브와 접촉면에서의 노상반력계수

D : 포장 슬래브 두께

S'_c : 콘크리트 슬래브의 설계 휨강도

G_r : $\log_{10} \left(\frac{4.5 - P_f}{4.5 - 1.5} \right)$ 로 표시되며, 임의 시점에 이어

$P_f = 1.5$ 인 경우 최대 서비스 능력 손실량에 대한 서비스 능력의 손실량 비율을 나타내는 함수

표 5. 암거 설치 구간 JCP 설계 두께

콘크리트 휨강도	설계 수명에 따른 JCP 두께	
4.5MPa	20년(D ₂₀ 년)	27.0cm
	40년(D ₄₀ 년)	30.1cm
6.0MPa	20년(D ₂₀ 년)	22.9cm
	40년(D ₄₀ 년)	25.7cm

암거 설치 구간 포장을 JCP로 가정했을 때의 두께 산정이 끝나면 암거 설치 구간 포장을 PTCP로 설계할 경우의 긴장량을 산정한다. JCP 설계에 의한 두께를 가지는 포장 슬래브 단부에 차륜하중이 재하될 경우의 응력을 그림 6과 같이 유한요소해석 프로그램을 사용하여 분석하였으며 분석 결과를 표 6에 나타내었다. 표 6에 나타난 20년과 40년 설계 수명을 가지는 PTCP의 피로파손에 의한 종방향 및 횡방향 긴장 간격 설계를 수행한 결과 콘크리트의 휨강도가 4.5MPa인 경우 20년 설계 수명을 가지는 PTCP는 0.4m 간격으로 20개의 강선을 사용하고 40년 설계 수명을 가지는 PTCP는 0.4m 간격으로 21개의 강선을 사용해야 하는 것으로 설계되

었다. 또한 콘크리트의 휨강도가 6MPa인 경우에는 20년 설계 수명을 가지는 PTCP 슬래브는 0.45m 간격으로 18개의 강선을 사용하고 40년 설계 수명을 가지는 슬래브는 0.45m 간격으로 19개의 강선을 사용해야 하는 것으로 산정되었다.

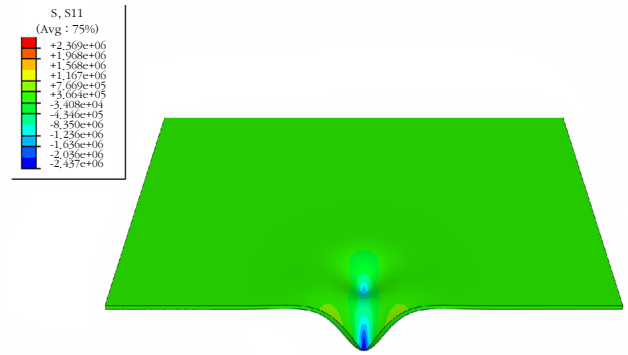


그림 6. 포장 슬래브에 발생하는 종방향 최대 인장응력 산출

표 6. 슬래브에 발생하는 종방향 최대 인장응력

콘크리트 휨강도	종방향 응력	JCP		PTCP
		20년 수명	40년 수명	σ_{30cm}
4.5MPa	차륜하중	0.945MPa	0.838MPa	2,198MPa
	소요 긴장량	1,253MPa	1,36MPa	-
6.0MPa	차륜하중	1,087MPa	0,99MPa	2,198MPa
	소요 긴장량	1,111MPa	1,208MPa	-

따라서 암거 설치 구간에 적용할 PTCP를 응력 기준 설계와 피로파손 기준 설계를 사용하여 분석한 결과 설계 수명과 관계없이 응력 기준 포장 설계 결과가 보수적이기 때문에 설계 긴장 간격을 응력 기준 설계 결과로 결정하였다.

5. 결론

본 연구는 기존의 도로 포장에서 많은 문제점이 발생하고 있는 도심지 버스전용차로 정류소 구간 및 고속도로 암거 설치 구간 등에 PTCP 공법의 적용성을 검토하고 이러한 특수 구간에 적용된 PTCP의 긴장 설계 방안을 제시하기 위하여 수행되었다. 본 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

1. 특수 구간에 적용할 PTCP의 설계는 응력 기준 설계와 피로파손 기준 설계를 이용하며 설계 결과가 보수적인 설계 방법을 통해 긴장 간격을 산정한다.
2. 버스전용차로 정류소 구간 PTCP는 응력 기준 설계에서는 종방향은 0.5m 간격으로 7개의 강선을 사용하고 횡방향으로는 긴장력 도입이 필요 없는 것으로 산정되었으며, 피로파손에 대하여는 안전한 것으로 분석되었다.
3. 암거 설치 구간 PTCP는 응력 기준 설계에서 콘크리트의

- 휨강도가 4.5MPa인 경우에는 종방향으로는 0.2m 간격으로 40개의 강선을 사용하고 횡방향으로는 0.7m 간격으로 25개의 강선을 사용해야 하는 것으로 산정되었다. 또한 콘크리트의 휨강도가 6MPa인 경우에는 종방향으로는 0.3m 간격으로 25개의 강선을 사용하고 횡방향으로는 긴장력 도입이 필요 없는 것으로 산정되었다.
4. 압거 설치 구간 PTCP의 피로파손 기준에 의한 설계에서는 콘크리트의 휨강도가 4.5MPa인 경우 20년 설계 수명을 가지는 PTCP는 0.4m 간격으로 20개의 강선을 사용하고 40년 설계 수명일 경우는 0.4m 간격으로 21개의 강선을 사용해야 하는 것으로 산정되었다. 또한 콘크리트의 휨강도가 6MPa인 경우에는 20년 설계 수명의 경우 0.45m 간격으로 18개의 강선을 사용하고 40년 설계 수명의 경우는 0.45m 간격으로 19개의 강선을 사용해야 하는 것으로 분석되었다.
 5. 압거 설치 구간 PTCP는 설계 수명과 관계없이 응력 기준 설계 결과가 보수적이기 때문에 설계 긴장 간격을 응력 기준 설계 결과로 결정하였다.
 6. 도심지 버스전용차로 정류소 구간 아스팔트 포장에서의 대부분 파손유형은 정지하중 및 차량 가감속에 의해 발생하는 소성변형과 연관된 파손이다. 따라서 이러한 포장에 PTCP 공법을 적용하여 강성 포장으로 포장 형식을 교체하면 고성능 고내구성을 가져올 수 있을 것으로 판단된다.
 7. 압거 설치 구간 포장은 뒤채움부의 부등침하로 인한 평탄성 불량 및 파손이 빈번히 발생하는 구간이므로 PTCP의 적용을 통해 줄눈간격을 증가시켜 포장체의 연속성을 증대시키면 이러한 파손을 방지하여 우수한 공용성을 보일 것으로 판단된다.

참고 문헌

- 건설교통부 (1998). 도로부대시설 (교량부대시설, 철근가공조립, 기타시설 편), 건설교통부.
- 윤동주, 김성민, 배종오 (2009). "포스트 텐션드 콘크리트 포장의 종방향 긴장 설계 방안", 한국도로학회논문집, Vol. 11, No. 1, pp. 203-215.
- AASHTO (1993). *Guide for Design of Pavement Structures*, American Association of State Highway and Transportation Officials.
- ABAQUS (2007). *User's Manual Version 6.7*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I.
- Brunner, R. J. (1975). "Prestressed Pavement Demonstration Project," *Transportation Research Record*, No. 535, Transportation Research Board, pp. 62-72.
- Friberg, B. F. and Pasko, T. J. (1973). "Prestressed Concrete Highway Pavement at Dulles International Airport," *Highway Research Record*, No. 466, Highway Research Board, pp. 1-19.
- Klunker, F. (1981). "Status and Developments in the Construction of Prestressed Concrete Runways in European Airport," *Proceedings of the 2nd International Conference on Concrete Pavement Design*, Session 6: Airport Pavement, Purdue University, West Lafayette, Indiana.
- Powers, R. and Zaniewski, J. (1987). "Nine Year Performance Evaluation of Arizona's Prestressed Concrete Pavement," *Transportation Research Record*, No. 1136, pp. 1-11.

접 수 일 : 2011. 3. 30
 심사 일 : 2011. 3. 31
 심사완료일 : 2011. 4. 18