



# 환경하중에 의한 장스팬 콘크리트 포장 슬래브의 컬링 거동 특성 분석

## Curling Behavior of Long-Span Concrete Pavement Slab under Environmental Loads

김 성 민\*      심 재 수\*\*      박 희 범\*\*\*      윤 동 주\*\*\*\*  
Kim, Seong-Min      Shim, Jae Soo      Park, Hee Beom      Yun, Dong Ju

### Abstract

This study was conducted to investigate the characteristics of the curling behavior of long-span pavement slabs under environmental loads. By developing and using finite element models of the long-span pavement slabs, the stress distribution and the effects of slab length, slab thickness, stiffness of underlying layers, and the restraints of the slab ends on the curling behavior were analyzed. In addition, the field experiments were performed with the actual long-span pavement slab to obtain the curling behavior of the real structure under environmental loads. As a result of this study, it was found that the vertical displacements of the long-span pavement slab along the centerline due to the curling behavior were zero except for the areas near the slab ends, and the curling stresses were maximum and constant where the displacements were zero. The slab length and the stiffness of underlying layers did not affect the maximum curling stresses. The restraints at the slab ends made the curling stresses occur near the slab ends, but did not much affect the maximum curling stresses.

**Keywords :** long-span slab, curling, environmental load, joint, field experiment, finite element

### 요 지

본 연구는 장스팬 콘크리트 포장 슬래브가 환경하중을 받아 컬링 거동을 할 때의 특성을 분석하기 위하여 수행되었다. 먼저 장스팬 포장 슬래브의 유한요소해석 모델을 구성하여 컬링 시 응력분포 특성 및 슬래브 길이, 두께, 하부지지층 강성, 슬래브 단부 구속 등이 컬링 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 실제 시공된 장스팬 포장 슬래브를 이용하여 현장에서 환경하중에 의한 거동을 측정함으로써 컬링 거동 특성을 실험적으로도 분석하였다. 연구 결과, 장스팬 포장 슬래브는 단부에서부터 슬래브 중앙을 따라 어느 정도 안쪽으로 들어오면 컬링에 의한 수직변위가 발생하지 않으며 응력은 이곳에서부터 일정하게 최대치를 보이게 된다. 장스팬 포장 슬래브의 길이 및 하부지지층의 강성은 최대 컬링 응력에 영향을 미치지 않았으며, 슬래브 단부의 구속은 컬링 응력이 단부까지 발생하게 하지만 최대 컬링 응력의 크기에는 거의 영향을 미치지 않았다.

**핵심용어 :** 장스팬 슬래브, 컬링, 환경하중, 조인트, 현장실험, 유한요소

\* 정회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 부교수(E-mail: seongmin@khu.ac.kr)  
\*\* 비회원 · 경희대학교 공과대학 토목공학과 교수(E-mail: jsshim@khu.ac.kr)  
\*\*\* 학생회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 박사과정, 교신저자(E-mail: bambams@khu.ac.kr)  
\*\*\*\* 학생회원 · 경희대학교 대학원 토목공학과 석사과정(E-mail: yowaa@khu.ac.kr)



# 1. 서론

콘크리트 포장 슬래브는 슬래브 상하부의 온도차에 의해서 휨이 발생하게 되며 이러한 현상을 컬링(curling)이라 부른다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 일반적으로 낮에는 슬래브 표면의 온도가 하부의 온도보다 커지기 때문에 슬래브의 중앙부가 위로 솟고 줄눈부 또는 단부가 아래로 내려가는 형태의 휨인 컬다운(curl down)이 발생하게 되며, 반대로 밤에는 슬래브 표면의 온도가 하부보다 낮아져서 슬래브의 중앙부가 아래로 내려가고 줄눈부가 위로 올라가는 형태의 휨인 컬업(curl up)이 발생하게 된다. 이때 슬래브가 자유롭게 휨 수 있으며 자중도 없다면 슬래브에는 응력이 발생하지 않을 것이다. 하지만 슬래브는 컬링할 때 자중의 영향을 받으며 또한 줄눈부에서 구속도 받게 되므로 응력이 발생하게 된다. 콘크리트 포장에 작용하는 온도구배 등의 환경하중에 의한 응력은 차륜하중에 의한 응력 보다 큰 경우가 많으며 이러한 환경하중에 의한 응력은 표면건조수축균열, 스폴링, 핀치아웃, 내부수평균열 등의 손상의 원인이 된다. 따라서 콘크리트 포장 슬래브의 컬링 거동을 적절하게 분석하여 특성을 파악하는 것이 매우 중요하며, 현재 일반적인 콘크리트 포장 형식으로 사용되고 있는 줄눈콘크리트 포장과 연속철근콘크리트 포장의 컬링 거동에 대해서는 많은 연구가 수행되어 왔다(Kim et al., 1998; Jeong and Zollinger, 2004; Nam et al., 2006).

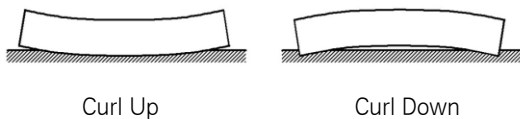


그림 1. 콘크리트 포장 슬래브의 컬링 현상

콘크리트 포장 형식 중에 최근에 주목받고 있는 포장 형식으로 포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Prestressed Concrete

Pavement)을 들 수 있다. PTCP는 강선의 긴장을 이용하여 콘크리트 슬래브에 프리스트레스를 도입함으로써 콘크리트의 인장응력을 감소시켜 파손을 방지할 수 있는 포장 공법이다(Friberg and Pasko, 1973; Brunner, 1975; Klunker, 1981; Powers, R. and Zaniewski, 1987). PTCP는 수십년 전부터 유럽 및 미국 등지에서 개발되기 시작했으며 이에 대한 고성능이 검증되면서 최근에 미국에서는 PTCP의 사용이 현저히 늘고 있는 실정이며, 우리나라도 최근에 PTCP 공법의 개발이 시작되었다(Medina and Won, 2005; 윤동주 외, 2009). 줄눈콘크리트 포장에서는 줄눈 간격을 하나의 슬래브로 고려하며 연속철근콘크리트 포장에서는 균열 간격을 하나의 슬래브로 고려하여 컬링에 대한 분석을 수행하는 것이 일반적이므로 슬래브 하나의 길이가 6m 이하인 경우가 일반적이다. 하지만 PTCP는 줄눈 간격이 일반적으로 100m 이상이므로 이러한 장스팬 슬래브의 컬링 거동을 분석하는 것이 PTCP의 거동을 이해하는데 반드시 필요하다고 할 수 있다.

본 연구의 목적은 구조해석과 현장 실험을 통해 PTCP 슬래브 등 줄눈간격이 100m 이상으로 긴 장스팬 포장 슬래브의 컬링 특성을 분석하는 것이다. 우선 유한요소법을 이용하여 장스팬 포장 슬래브의 모델을 구성하여 수치해석에 의해 장스팬 포장 슬래브의 길이, 두께, 하부지지층 강성, 단부 구속 등이 컬링 거동에 미치는 영향을 분석하였다. 또한 장스팬 포장 슬래브에 대한 컬링 거동 측정 현장 실험을 수행하여 실제 장스팬 포장 슬래브의 컬링 특성을 분석하였다. 본 논문에서는 이러한 연구 내용 및 결과에 대하여 상세히 기술한다.

# 2. 구조해석을 통한 컬링 거동 분석

종방향으로 길이가 긴 장스팬 포장 슬래브의 컬링 거동을 적절히 예측할 수 있는 구조해석 모델을 구성하기 위하여 유한요소해석 프로그램인

ABAQUS(ABAQUS, 2007)를 사용하였다. 기본 모델은 콘크리트 슬래브의 종방향 길이를 120m, 횡방향 길이는 2차선과 노건을 합쳐서 8.2m, 그리고 두께는 PTCP에서 시공 가능한 최소 두께인 0.15m로 하여 구성하였다. 해석에 사용된 물성치로는 콘크리트 탄성계수 27GPa, 프와송비 0.15를 사용하였다. 슬래브가 온도 하중을 받을 때의 거동은 종횡양방향으로 대칭이므로 그림 2와 같이 슬래브의 1/4 만 모델링하였다. 슬래브 하부의 지지층은 복합수직강성을 가지는 무인장(Tensionless) 스프링을 사용하여 모델링 하였으며 슬래브에 작용하는 온도구배(Temperature Gradient)를 1°C/cm로 가정하였다.

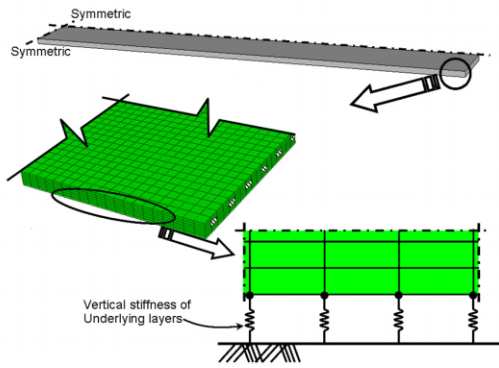


그림 2. 구조해석 모델

슬래브의 컬링 거동은 슬래브의 단부가 위로 솟고 중앙부는 내려앉는 모양의 컬업 현상과 그 반대의 컬다운 현상을 모두 고려하였다. 컬링현상에 의한 응력은 슬래브 상하부에 압축과 인장이 대칭으로 발생하기 때문에 상하부 표면에서 발생하는 최대 인장 응력을 고려하였다. 그림 3은 하부지반 강성이 100MPa/m일 때 슬래브의 컬링 거동을 나타낸 그림이다. 그림에서 슬래브는 종방향 길이가 매우 길며 종횡방향으로 모두 대칭 거동을 하기 때문에 종방향으로 한쪽 끝 20m정도만 나타내었으며 횡방향으로도 한쪽 대칭부분의 변형만을 보여준다. 그림에

서 볼 수 있듯이 슬래브는 단부 부분에서만 종방향, 횡방향으로 휘어지고 단부로부터 종방향으로 어느 정도 떨어지면 횡방향으로만 휘게 되는 것을 알 수 있다.

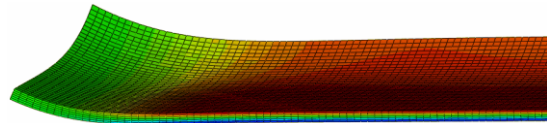
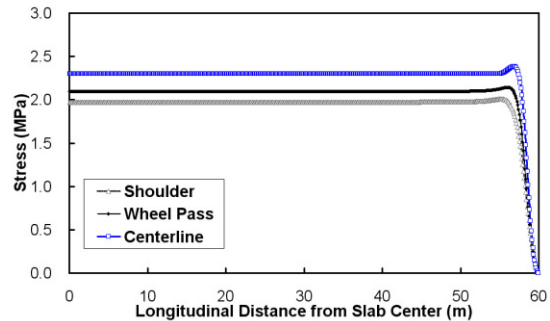
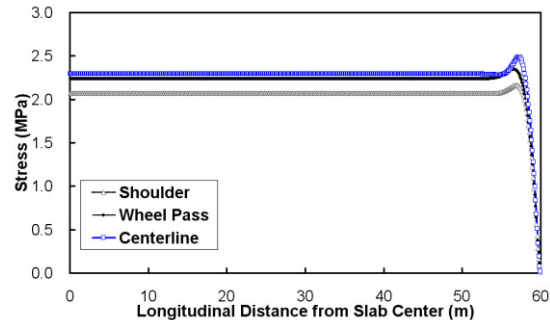


그림 3. 컬링에 의한 장스팬 슬래브 변형

그림 4와 5는 길이 120m 슬래브의 중앙에서부터 단부까지 Shoulder 경계 부분과 Wheel Pass, Centerline을 따라 종방향 및 횡방향 응력 분포를 나타낸 것이다. 여기서 Shoulder 경계는 슬래브 단부에서 0.5m 만큼 슬래브 안쪽으로 들어온 곳이며 Wheel Pass는 차륜이 지나가는 곳으로 슬래브 단

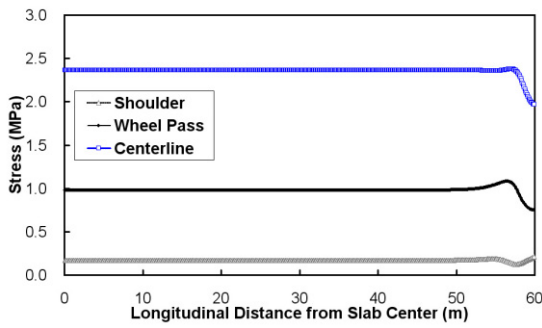


(a) 컬업

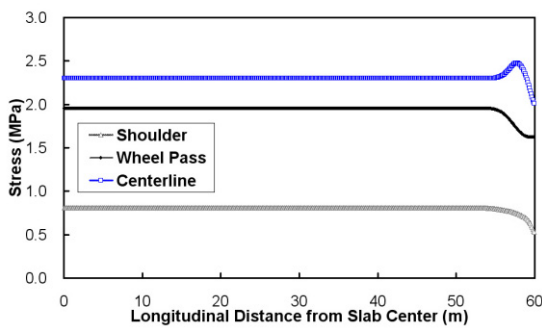


(b) 컬다운

그림 4. 환경하중에 의한 슬래브 종방향 응력분포



(a) 컬업



(b) 컬다운

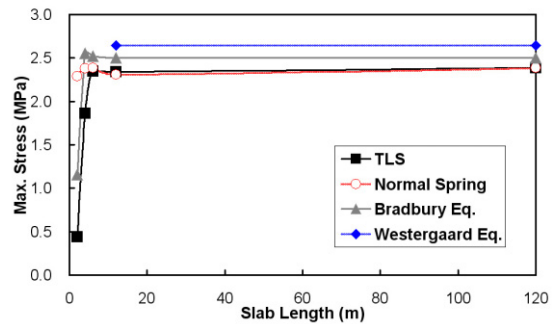
그림 5. 환경하중에 의한 슬래브 횡방향 응력분포

부에서 1.36m 안쪽으로 들어온 곳이다. 그림에서 볼 수 있듯이 Centerline에서의 응력이 가장 큰 것을 알 수 있고 Shoulder 경계에서의 응력이 가장 작은 것을 알 수 있으나 종방향 응력의 경우 서로 간의 차이는 그리 크지 않은 것을 볼 수 있다(그림 4). 횡방향 응력의 경우는 응력을 구한 각 위치가 횡방향으로 다른 거리에 위치하기 때문에 응력 크기에 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있다(그림 5). 또한 일반적으로 길이가 짧은 슬래브의 컬링에 의한 응력 분포와는 다르게 그림 3에서 이미 살펴본 바와 같이 슬래브의 종방향 길이가 매우 길어서 슬래브 안쪽은 종방향으로 휘지는 않고 응력만 발생하게 되며 이러한 응력은 거의 일정한 값을 나타내게 된다. 횡방향 응력에서도 위치별 횡방향 응력을 종방향을 따라 나타냈기 때문에 종방향 응력과 같은 양상을 나타낸다. 최대응력은 슬래브 단부에서 약 3m정도 안쪽으

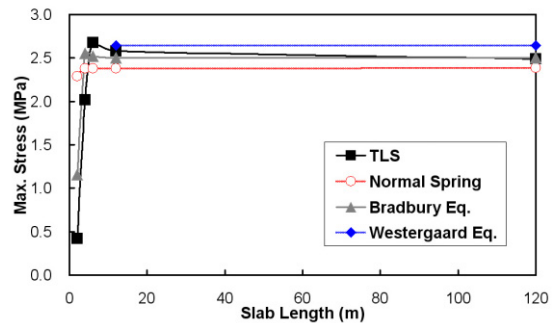
로 들어온 부분에서 발생하는 것을 알 수 있으나 그 크기는 슬래브 안쪽에서의 일정한 응력에 비해 그리 크지는 않다.

## 2.1 슬래브 길이 영향

슬래브 길이에 따른 컬링 거동을 알아보기 위하여 슬래브 길이를 다르게 하여 컬링 응력을 분석하였다. 그림 6에 나타낸 바와 같이 슬래브의 길이가 길어질수록 최대응력이 커지는 것을 알 수 있으나 슬래브 길이가 약 10m에 다다르면 길이에 따른 최대응력의 변화가 없는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 그림에서와 같이 Bradbury 방정식 및 Westergaard 방정식을 이용하여서도 확인할 수 있다(Bradbury, 1938; Huang, 1993; Westergaard, 1925). 횡방향 응력 또한 횡방향 폭에 따라 최대 응력 발생이 동일한 결과를 가져올 것이다. 참고로 그림에서 TLS로 표시한 것



(a) 컬업



(b) 컬다운

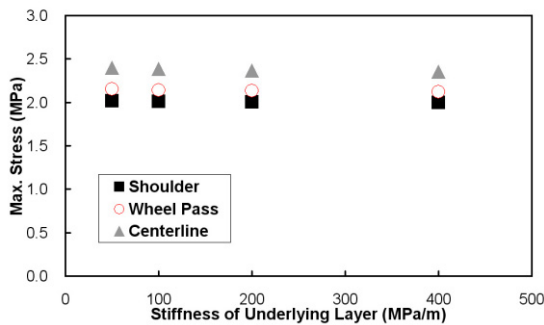
그림 6. 슬래브 길이에 따른 종방향 최대 응력분포

은 무인장 스프링으로 하부지반을 모델링한 것이며 Normal Spring은 스프링이 슬래브에 항상 접촉하고 있는 상태로 하부지반을 모델링한 것이다.

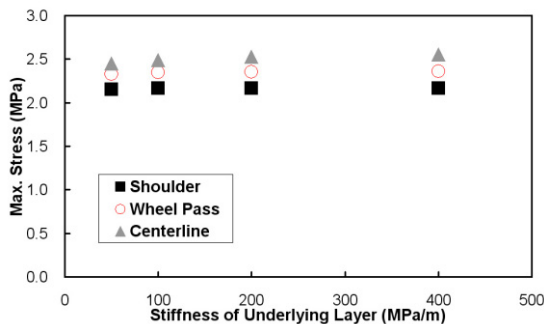
## 2.2 하부지반 강성 영향

하부지반 강성이 환경하중에 의해 장스팬 슬래브가 컬링 할 때 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였다. 일반적으로 슬래브 길이가 6m 이내인 준준콘크리트 포장 슬래브의 환경하중에 의한 컬링 응력은 차륜하중에서의 경우와는 반대로 하부지반 강성이 증가할 수록 커지는 경향을 보이게 된다. 하지만 슬래브의 길이가 긴 장스팬 슬래브에서는 그림 7에 나타난 바와 같이 하부지반 강성이 환경하중에 의한 종방향 최대 응력의 크기에는 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

횡방향 응력에 대한 하부지반 강성의 영향은 그림

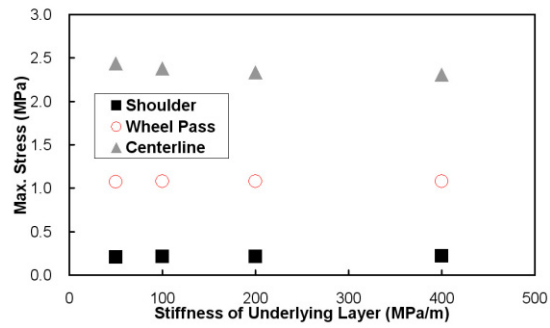


(a) 컬업

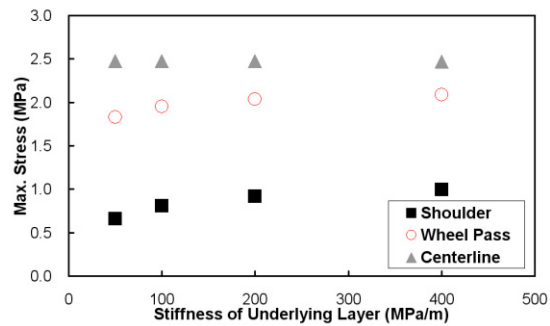


(b) 컬다운

그림 7. 하부지반 강성에 따른 종방향 최대 응력



(a) 컬업



(b) 컬다운

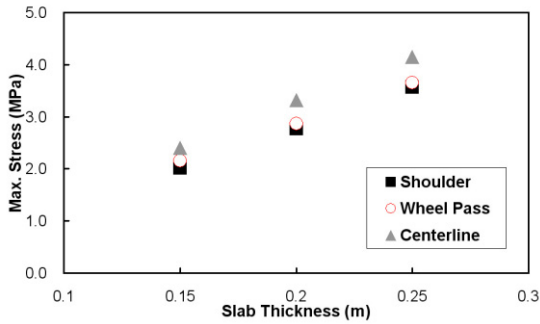
그림 8. 하부지반 강성에 따른 횡방향 최대 응력

8에서 볼 수 있다. 슬래브가 컬다운 할 때 Shoulder 경계와 Wheel Pass 부분에서는 하부층의 수직강성이 비교적 작을 경우에는 수직강성이 증가하면 최대 응력이 다소 증가하는 경향을 볼 수 있다. 하지만 대체적으로 하부층의 수직강성은 환경하중에 의한 슬래브의 횡방향 최대 응력의 크기에도 종방향 응력의 경우와 같이 거의 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

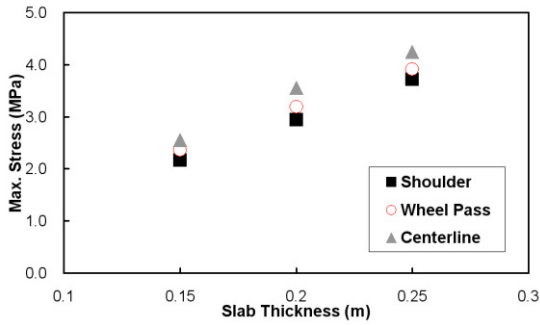
## 2.3 슬래브 두께 영향

슬래브 두께에 따른 장스팬 슬래브의 컬링 응력을 분석하기 위하여 슬래브 두께가 0.15, 0.2, 0.25m 일 때 컬링에 의한 최대 응력을 구하였다. 이미 살펴본 바와 같이 길이가 긴 슬래브에서 하부지반 강성에 의한 영향은 거의 없기 때문에 하부지반 강성은 보편적인 값인 100MPa/m로 하였으며 온도구배는

1°C/cm를 적용하였다. 그림 9에서 볼 수 있는 바와 같이 슬래브 두께가 증가할수록 최대 응력이 커지는 것을 알 수 있다. 이는 차륜하중에 의한 응력을 줄이기 위해 무작정 슬래브 두께를 증가시키면 오히려 환경하중에 의한 컬링 응력은 증가하여 궁극적으로 포장 슬래브의 성능을 저하시킬 수도 있다는 것을 보여준다.



(a) 컬업



(b) 컬다운

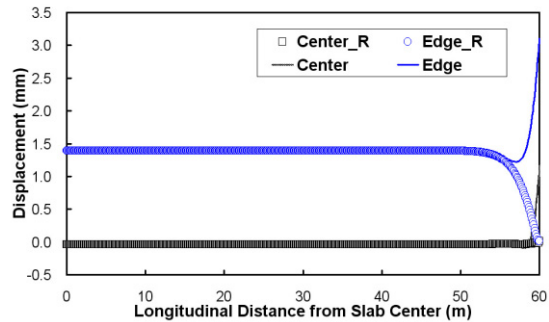
그림 9. 슬래브 두께에 따른 최대 응력

## 2.4 슬래브 단부 구속 영향

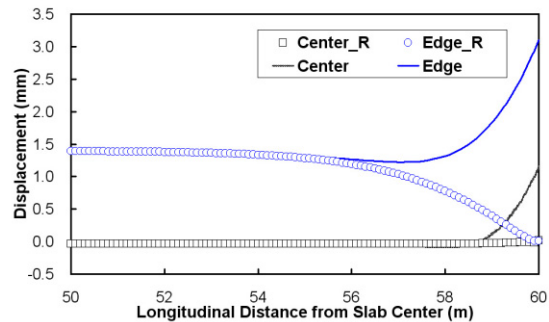
장스팬 포장 슬래브에서 양단에 Wide Flange 조인트 또는 armored 조인트를 사용하게 되면 조인트가 설치되는 슬래브 양단에서 슬래브의 컬링 거동을 구속할 수 있게 된다. Armored 조인트는 철재 빔이 콘크리트 슬래브 끝단부와 완전히 부착되어 있으며 강재의 강성이 콘크리트의 강성보다 훨씬 더 크기 때문에 콘크리트 슬래브의 컬링을 억제하게 된다.

Wide Flange 조인트는 철재 빔으로 구성된 조인트가 바닥에 고정되어 있으며 콘크리트 슬래브의 끝단부가 이러한 조인트의 내부에서 자유롭게 움직일 수 있도록 설계된 조인트이지만 시공 시 부주의로 인해 콘크리트 슬래브의 끝단부 거동을 다소 억제하기도 한다. 이와 같이 슬래브 양단부의 수직 변위가 억제되면 슬래브에 추가적인 응력이 발생할 것이며 이에 대한 분석을 수행하였다.

그림 10은 장스팬 슬래브 양단부의 수직 변위가 구속 되었을 때의 슬래브 변형을 구속이 없을 경우와 비교하여 나타낸 것이다. 그림에서 Center는 슬래브 중앙의 대칭축에서의 수직 변위를 나타낸 것이고 Edge는 슬래브 횡단부를 따라 발생한 수직 변위를 나타낸 것이다. 또한 Center나 Edge 뒤에 R로 표시한 것이 슬래브 끝단부의 수직 변위를 구속한 경우이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 끝단부가 구속되었을 경우와 구속되지 않았을 경우의 수직 변



(a) 전체



(b) 끝단 부분 확대

그림 10. 슬래브 단부 구속에 따른 수직변위 분포

위는 끝단부에서는 큰 차이를 보이지만 슬래브 안쪽으로 조금만 들어오면 차이가 없게 되는 것을 알 수 있다.

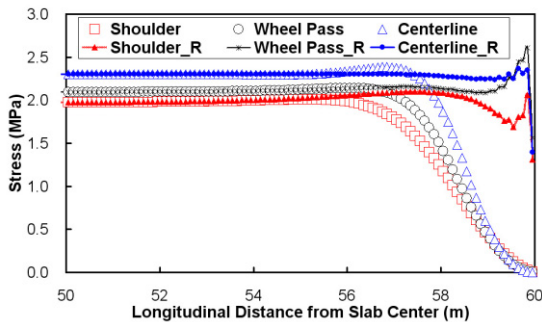
슬래브 양단부에서의 수직 변위 구속으로 인해 슬래브 각 위치에서 발생하는 종방향 및 횡방향 응력 또한 수직 변위 구속이 없을 경우와 비교하여 그림 11에 나타내었다. 슬래브 끝단부로부터 10m 이내의 부근에서 경우에 따른 응력의 차이가 크게 나타났기 때문에 그림에서는 그 부분만을 나타내었다.

종방향 응력의 경우 단부 구속이 없으면 단부로부터 약 3m 부분부터 응력이 감소하여 단부에서의 응력이 0이 되지만, 단부 구속이 있으면 응력이 단부까지 계속 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 슬래브 전체에서의 최대 응력은 거의 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 횡방향 응력의 경우는 수직변위 구속으로 인해 슬래브 각 위치에서의 발생응력이 수직 변위 구속이 없는 경우와 비교하여 슬래브 단부 약 5m 이

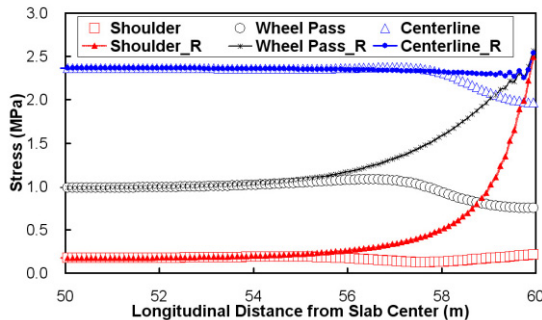
내의 부분에서 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 끝단부에서는 횡방향 각 위치에 따른 횡방향 응력이 거의 같아지게 되며, 이는 단부의 수직변위 구속이 단부에서의 횡방향 컬링 자체를 완전히 구속하게 되기 때문이다. 하지만 슬래브 단부 구속에 따른 슬래브 전체의 횡방향 최대응력은 단부 구속이 없는 경우와 거의 같은 것을 알 수 있다.

### 3. 실험을 통한 컬링 거동 분석

장스팬 콘크리트 포장 슬래브의 컬링 거동을 측정하여 특징을 분석하기 위하여 현장 실험을 수행하였다. 실험을 위하여 동수원 IC 근처에 시험시공 된 길이 120m, 폭 8.2m, 두께 0.15m의 PTCP 슬래브를 사용하였다. 슬래브의 위치별 수직방향 변위를 측정하기 위하여 그림 12에 보인 바와 같이 양 끝 조인트 부분과 조인트로부터 종방향으로 20m 간격으로 LVDT를 설치하였다. 실험 시에 슬래브의 온도 변화를 슬래브 깊이에 따라 측정하기 위하여 온도 측정 센서인 ThermoChron i-Button을 슬래브 표면, 7.5cm, 15cm 깊이에 장착하였다. 또한 대기 온습도 측정을 위한 온습도 측정 센서인 HygroChron i-Button을 슬래브 근처에 설치하였다.



(a) 종방향 응력



(b) 횡방향 응력

그림 11. 슬래브 단부 구속에 따른 응력 분포

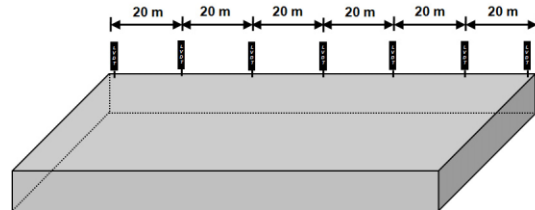


그림 12. 수직방향 LVDT 설치

#### 3.1 환경 하중

약 일주일간의 대기 온도 변화와 이에 따른 슬래브의 깊이별 온도변화 추세를 그림 13에 나타내었다.



그림에서 볼 수 있듯이 대기의 온도가 상승하면 슬래브 표면의 온도가 가장 먼저 상승하며 깊이가 깊어질수록 최대온도가 낮아지게 된다. 또한 각 측정 깊이에서 최대 온도에 다다른 시간은 깊이가 깊어질수록 늦어지는 것을 알 수 있다. 이와 반대로 대기의 온도가 감소하면 슬래브 표면의 온도가 가장 많이 감소하게 되며 깊이가 깊어질수록 온도변화가 작은 것을 알 수 있다. 따라서 낮에는 슬래브 표면의 온도가 가장 높고 슬래브 하부의 온도가 가장 낮아져서 슬래브가 쪼그라들게 되며, 반대로 새벽에는 슬래브 표면의 온도가 가장 낮고 슬래브 하부의 온도가 가장 커져서 슬래브가 팽창을 하게 된다. 이는 두께가 0.15m인 포장 슬래브에서도 일반적인 콘크리트 포장 두께인 0.3m일 경우와 거의 유사한 온도변화 경향이 발생한다는 것을 의미한다.

슬래브의 쪼그라들 현상을 분석하기 위하여 그림 13에 나타낸 깊이별 온도 변화를 이용하여 평형 선형 온도

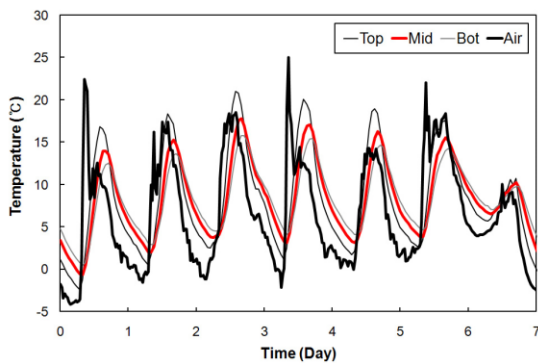


그림 13. 깊이에 따른 온도변화

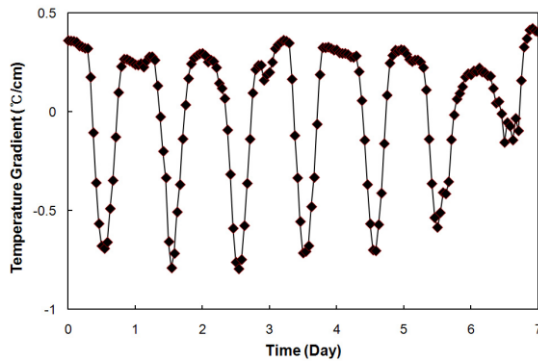


그림 14. 수직 온도구배 변화

구배(김성민 외, 2008)를 구하여 그림 14에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 대기의 온도 증가에 의해 슬래브의 상부 온도가 증가하였을 때는 슬래브의 쪼그라들음을 야기하는 부(-) 온도구배가 증가하며 대기 온도 감소에 의해 슬래브의 상부 온도가 감소하였을 때는 슬래브의 팽창을 야기하는 정(+) 온도구배가 증가하는 것을 알 수 있다.

### 3.2 쪼그라들 거동

장스팬 슬래브가 그림 13과 14에 나타낸 온도 변화를 받을 때의 쪼그라들 거동을 그림 15에 나타내었다. 그림에서 수직변위 측정값의 기울기가 음(-)의 방향이면 쪼그라들이 발생하는 것이며 양(+)의 방향이면 팽창이 발생하는 것으로 표시하였다. 쪼그라들 현상이 발생하면 슬래브의 양 끝 지점인 0m와 120m 지점이 가장 큰 수직변위 변화량을 보여야 하지만 그림에서 볼 수 있듯이 120m 지점은 가장 작은 수직변위의 변화를 나타내었고 0m 지점도 다른 지점들에 비해 작은 변화량을 나타내었다. 그 이유는 실험에 사용된 장스팬 슬래브의 양단 조인트는 Wide Flange 형식의 조인트이며 이러한 조인트가 슬래브의 쪼그라들 거동을 일부 구속하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 슬래브의 양 끝단을 제외한 다른 위치에서의 쪼그라들 거동을 살펴보면 수직변위의 변화가 서로 매우 비슷한 것을 알 수 있다. 이는 구조해석을 통해서 분석한 결과와 일치하는 것으로서 슬래브의 길이가 긴 경우에는

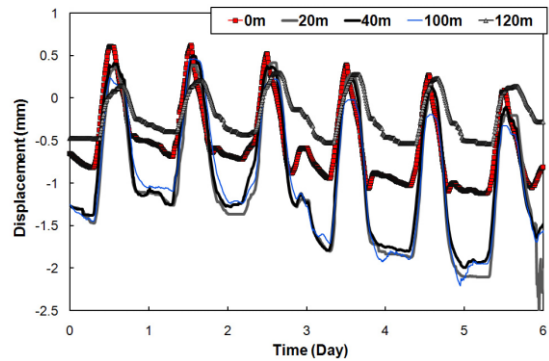
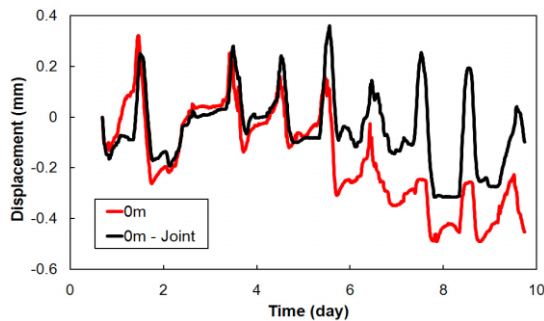


그림 15. 쪼그라들에 의한 수직 변위 변화

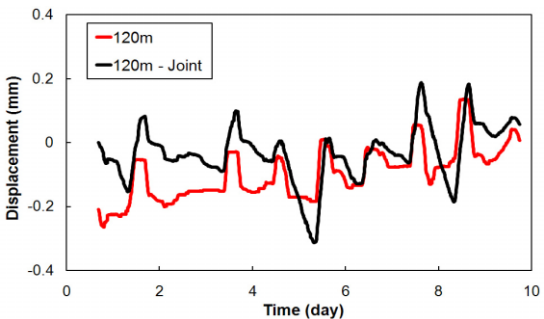


양 끝단 부분 이외의 위치에서는 컬링에 의한 수직변위의 변화가 거의 동일하다는 것을 실험을 통해서도 확인해 주는 것이다. 참고로 슬래브의 중앙 지점인 60m 위치에 설치한 LVDT로 부터의 결과는 이곳에 프리스트레싱을 위한 많은 수의 포켓이 설치되어 있어서 일반적인 슬래브로 볼 수 없기 때문에 데이터 분석에서 제외시켰으며, 80m 지점에 설치한 LVDT에서는 적절한 데이터를 수집하지 못하여서 분석에서 제외시켰다.

슬래브의 양 끝단에 위치한 Wide Flange 조인트가 슬래브의 컬링거동을 구속하고 있는지 여부를 정확하게 파악하기 위하여 각각 0m, 120m 지점의 철재 조인트 부분과 조인트 바로 옆 콘크리트 슬래브 부분에 LVDT를 장착하여 수직변위를 측정하였다. 그림 16에 나타낸 바와 같이 0m 지점과 120m 지점 두 지점에서 조인트의 수직변위와 슬래브의 수직변위가 비슷한 추세를 보이며 컬링거동을 하였다. 만약에 장스팬 슬래브 시공 시 Wide Flange 조인트가



(a) 0m



(b) 120m

그림 16. 조인트와 슬래브의 수직 변위 변화

적절하게 시공되었다면 수직변위 측정 시 조인트의 거동은 미소하여야 하며 슬래브는 자유롭게 컬링거동을 보여야 한다. 하지만 측정 결과 조인트와 슬래브 모두 컬링거동을 나타내고 있으며 이는 슬래브가 조인트에 의해 구속되어 있으며 조인트는 슬래브의 컬링 거동에 의해 함께 수직 변위의 변화를 보인다는 것을 보여주고 있는 것이다.

그림 17에서는 그림 14에 나타낸 수직 온도구배와 그림 15에 나타낸 수직 변위 변화를 이용하여 일일 온도구배와 수직 변위와의 관계를 구하여 보여준다. 이미 살펴본 바와 같이 0m와 120m 지점은 조인트의 구속으로 인해 온도구배 변화에 따른 슬래브의 수직 변위 변화량이 그리 크지 않은 것을 알 수 있으며, 그 이외의 부분에서는 온도구배의 변화에 따른 수직 변위의 변화가 서로 매우 비슷한 것을 볼 수 있다. 또한 온도구배가 증가할 때 수직변위가 감소하는 정도는 온도구배가 감소할 때 수직변위가 증가하는 정도와 매우 비슷하므로, 슬래브가 컬업과 컬다운을 할 때 온도구배의 변화에 따른 수직변위의 변화가 서로 비슷한 추세를 보인다는 것을 알 수 있다.

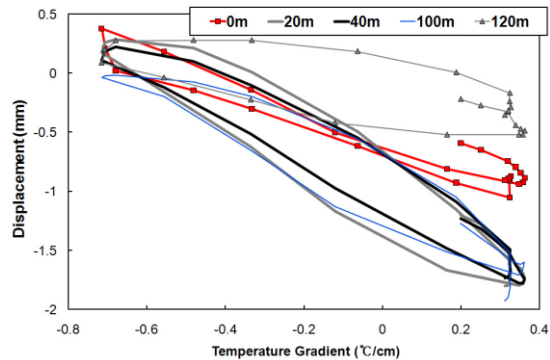


그림 17. 온도구배에 따른 슬래브 위치별 수직변위 변화

#### 4. 결론

본 연구는 장스팬 콘크리트 포장 슬래브의 환경하중에 의한 컬링 거동 특성을 분석하기 위하여 수행되



었다. 장스팬 슬래브의 수치해석 모델을 구성하여 컬링 시 응력분포 및 슬래브 길이, 두께, 하부층 강성, 단부 구속 등이 컬링 거동에 미치는 영향을 분석하였으며, 실제 시공된 PTCP 슬래브를 이용하여 현장 실험을 수행함으로써 장스팬 슬래브의 컬링 거동 특성을 실험적으로도 분석하였다. 본 연구를 수행함으로써 도출한 결론은 다음과 같다.

- 장스팬 포장 슬래브에 환경하중이 작용하여 슬래브가 컬링 거동을 할 경우에 슬래브의 수직 변위는 슬래브 단부 부근에서는 크게 발생하지만 슬래브 안쪽으로 약 5m 정도 들어오면 수직변위가 발생하지 않아 슬래브가 평평한 상태로 유지되게 된다.
- 장스팬 슬래브의 컬링에 의한 응력은 슬래브 단부에서는 발생하지 않으며 슬래브 안쪽으로 들어올수록 증가하다가 약 5m 정도 이내로 들어오면 응력의 크기가 일정하게 유지된다.
- 슬래브 길이가 약 10m 이하일 경우에는 슬래브 길이가 증가할수록 컬링에 의한 최대 응력이 증가하게 되지만, 슬래브의 길이가 약 10m 이상일 경우에는 길이에 상관없이 최대 응력의 크기가 일정하게 된다.
- 장스팬 포장 슬래브에서는 하부지지층의 강성이 컬링에 의한 슬래브 최대 응력의 크기에 영향을 미치지 않는다.
- 동일한 수직 온도구배를 장스팬 슬래브가 받을 경우에는 슬래브의 두께가 증가할수록 컬링에 의해 슬래브에 발생하는 최대 응력 또한 증가하게 된다.
- 장스팬 슬래브 단부에 철재 빔을 이용한 조인트를 사용할 경우에는 컬링이 이로 인해 억제될 받게 되며 따라서 컬링 응력이 단부까지 발생하게 된다. 하지만 슬래브에 발생하는 최대 응력은 거의 영향을 받지 않는다.
- 장스팬 포장 슬래브의 컬링 거동을 실측한 결과 단부에서 어느 정도 안쪽으로 들어오면 종방향

모서리를 따라 발생하는 수직 변위의 변화가 위치에 관계없이 거의 유사하게 된다.

- 장스팬 슬래브가 컬링할 때 온도구배의 변화에 따른 슬래브 수직 변위의 변화는 컬업과 컬다운 시에 서로 매우 유사한 양상을 보였으며 거의 선형의 관계를 나타낸다.

#### 감사의 글

본 논문은 2007년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2007-331-D00493).

#### 참고 문헌

김성민, 박희범 (2008). "지반위에 놓인 콘크리트 슬래브의 온도하중 하의 컬링 거동 및 하부층 영향 실험적 분석," 한국도로학회논문집, 한국도로학회, Vol. 10, No. 4, pp. 171-180.

윤동주, 김성민, 배종오 (2009). "포스트 텐션드 콘크리트 포장의 종방향 긴장 설계 방안," 한국도로학회 논문집, 한국도로학회, Vol. 11, No. 1, pp. 203~215.

ABAQUS (2007). *User's Manual Version 6.7*, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R. I.

Bradbury, R. D. (1938). *Reinforced Concrete Pavements*, Wire Reinforcement Institute, Washington, D.C.

Brunner, R. J. (1975). "Prestressed Pavement Demonstration Project," *Transportation Research Record*, No. 535, Transportation Research Board.

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.

Huang, Y. H. (1993). *Pavement Analysis and*



- Design, Prentice Hall, New Jersey.
- Jeong, J. H. and Zollinger, D. Z. (2004). "Early-age curling and warping behavior: Insights from a fully instrumented test-slab system," *Transportation Research Record - Journal of the Transportation Research Board*, No.1896, National Research Council. pp. 66~74.
- Kim, S.-M., Won, M. C. and McCullough, B. F. (1998). "Numerical modeling of continuously reinforced concrete pavement subjected to environmental loads," *Transportation Research Record*, No. 1629, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 76~89.
- 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.
- Medina-Chavez, C. I. and Won, M. (2005). "Design Standards, Special Specifications, and Monitoring Plan for PCP in Texas," *Research Report 5-4035-01-1*, Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin. pp. 1~50.
- Nam, J.-H., Kim, S.-M. and Won, M.C. (2006). "Measurement and analysis of early-age concrete strains and stresses: Continuously reinforced concrete pavement under environmental loading," *Transportation Research Record-Journal of the Transportation Research Board*, No.1947, National Research Council. pp. 79~90.
- Powers, R. and Zaniewski, J. (1987). "Nine Year Performance Evaluation of Arizona's Prestressed Concrete Pavement," *Transportation Research Record*, No. 1136, Washington, D. C.
- Westergaard, H. M. (1925). "Stresses in Concrete Pavements Computed by Theoretical Analysis," *Public Roads*, Vol. 7, pp. 25~35.

접 수 일 : 2009. 7. 10  
심 사 일 : 2009. 7. 13  
심사완료일 : 2009. 8. 19