

# 포스트텐션 콘크리트 포장의 줄눈 폭 설계

## Joint Width Design for Post-Tensioned Concrete Pavement

김 동 호 Kim, Dong Ho	정회원 · (주)삼우아이엠씨 기술연구소 수석연구원 · 교신저자 (E-mail : dhkim@samwoomc.com)
길 용 수 Kil, Yong Su	정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
김 진 웅 Kim, Jin-Woung	정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 박사과정
윤 경 구 Yun, Kyeong Ku	정회원 · 강원대학교 공과대학 토목공학과 교수 (E-mail : kkyun@kangwon.ac.kr)

### ABSTRACT

In post-tensioned concrete pavement(PTCP), one of the most important design variables is the initial joint width, in addition to the tensioning spacing. The joint width between PTCP slabs directly affects noise and ride quality. If the joint width is too wide, noise increases and ride quality decreases. If the initial joint width is too narrow, on the other hand, under high temperature, PTCP slabs can blow up, or failures near the joint can occur due to excessive compressive stresses. This study was conducted to determine the optimal initial joint width of PTCP and to investigate the joint width behavior under temperature changes. The experiments were performed using one-year-old PTCP slabs. The concrete temperatures were measured using the temperature measurement sensors installed at various depths. The joint widths were measured using vernier-calipers at different times of a day and the relationship between the joint width and temperature was analyzed. From this study, the design methodology to determine the optimal initial joint width of PTCP could be proposed.

### KEYWORDS

*post-tensioned concrete pavement, joint width, design*

### 요지

포스트텐션 콘크리트 포장(PTCP: Post-Tensioned Concrete Pavement)에서 강선의 긴장 간격 설계와 더불어 주요 설계 인자로서 줄눈의 초기 설계 폭을 들 수 있다. 줄눈 폭의 결정은 소음과 승차감에 직접 영향을 미치며 초기 폭이 과도하게 크면 소음과 승차감에 악 영향을 미치게 되며, 초기 폭이 지나치게 작게 되면 하절기 온도상승으로 블로우업 현상이 발생할 수 있으며 또한 과도한 압축응력에 의해 줄눈부의 파손이 발생할 수 있다. 따라서 본 연구는 PTCP의 초기 줄눈 폭 설계를 최적화하고 온도변화에 따른 줄눈 폭의 거동을 분석하기 위하여 수행되었다. 시공 후 1년이 경과한 PTCP 슬래브를 대상으로 줄눈 폭에 대한 실험을 수행하였다. 콘크리트의 온도는 PTCP 슬래브에 온도측정 센서를 깊이별로 설치하여 측정하였고, 줄눈 폭의 측정은 버니어캘리퍼스를 이용하여 하루 중 다양한 시간 대에 측정하여 온도와 줄눈 폭과의 연관성을 분석하였다. 본 연구를 통해 시공초기 최적화된 줄눈 폭 설계방안을 제시하였다.

### 핵심용어

*포스트텐션 콘크리트 포장, 줄눈 폭, 설계*

## 1. 서론

국내에서 설계 및 시공되고 있는 콘크리트 포장 공법은 초기 공사비가 저렴하고 시공성이 용이한 줄눈콘크리트 포장

(JCP:Jointed Concrete Pavement) 공법이 주로 적용되어 왔으며 일부 구간 연속철근콘크리트 포장(CRCP: Continuously Reinforced Concrete Pavement) 공법으로

시공된 바 있다. 그러나 국내 콘크리트 포장 형식의 주종을 이루어 왔던 JCP 공법은 초기 공사비가 저렴하여 경제적인 장점이 있음에도 불구하고, 종·횡방향 줄눈부에서의 스폐링과 균열 등의 파손이 발생하여 설계수명을 충족시키지 못한 채 다양한 파손으로 인한 유지보수가 빈번히 시행되고 있어 이용자의 불편과 매년 막대한 유지보수 예산이 발생되고 있는 실정이다. CRCP 공법은 자연적인 균열 발생을 허용함에 따라 미관이 저하되고 종방향 줄눈부와 균열부에서의 파손 등으로 인해 유지보수 사례가 발생되고 있다. 이처럼 파손된 도로포장의 유지보수를 위하여 매년 막대한 국가예산이 투입되고 있고, 보수작업으로 인하여 발생하는 교통체증과 교통사고는 국민 생활수준 향상에 적지 않은 악영향을 미치는 등 콘크리트 포장의 장점을 드러내지 못하고 있다(김동호 등 2009).

이처럼 국내 콘크리트 포장의 95%가 JCP 공법으로 적용되어 지난 수십년을 이어오면서 국내의 콘크리트 포장에 대한 기술발전은 매우 미비하였고 공용년수가 도래하여 파손과 유지보수를 수행하면서 공법의 한계를 드러내고 있는 실정이다. 최근 개발되어 건설신기술로 지정된 포스트텐션 콘크리트 포장은 슬래브에 PS강연선을 설치하여 프리스트레싱을 가하기 때문에 구조적인 특성으로 인하여 균열발생이 방지되고 줄눈이 대폭 감소되어 장기 공용기간 파손과 유지보수가 최소화되는 장수명 고내구성 콘크리트 포장 공법으로 개발되었다. 개발된 기술에서 가장 설계를 최적화해야 하는 부분 중 하나는 조인트의 설계와 시공이며 특히 시공 초기 줄눈 폭의 결정은 소음과 승차감에 직접 영향을 미치는 요소라 할 수 있다. PTCP에서 줄눈부의 초기 폭을 결정할 때 초기 폭이 과도하게 크면 소음과 승차감에 악영향을 미치게 되며, 초기 폭이 지나치게 작게 되면 하절기 온도상승이 클 경우 블로우업 현상을 야기할 수 있으며 또한 과도한 압축응력에 의해 줄눈부의 파손이 우려된다.

따라서 본 연구에서는 시공 초기에 줄눈부 설계 폭을 계산하고 현장에서 실측한 데이터를 분석하여 검토한 후 PTCP의 줄눈 폭에 대한 최적화된 설계방안을 제시하고자 하였다.

## 2. 줄눈 폭 설계 요소

### 2.1. 초기재령에서 PTCP 슬래브의 신축량 변화

그림 1은 미국의 Texas에서 Choi and Won(2010)에 의해 연구된 것으로 PTCP가 시공된 후 슬래브의 길이방향에 대한 변화량을 실측하여 나타낸 것이다. 슬래브에서 크립와 건조수축의 복합적인 영향 하에 슬래브의 신축 변화는 온도변화, 슬래브의 연장, 콘크리트 재료의 특성 등에 따라 좌우된다. 이러한 거동은 PTCP 슬래브에 계측센서를 설치하여 그 움직임을 측정함으로써 정확한 값을 알아낼 수 있다.

이 데이터에서 초기 2~5일의 기간은 데이터 측정이 수행되지 않아 데이터가 나타나 있지 않지만 초기재령을 콘크리트

포장 후 7일로 가정하면 재령 7일까지 슬래브는 콘크리트의 크립와 건조수축 및 탄성변형에 의한 거동이 모두 복합되어 수축되는 것을 볼 수 있으며 이후에는 일일 온도변화에 의하여 슬래브가 수축과 팽창을 반복하는 것을 볼 수 있다. PTCP에 사용되는 콘크리트는 초기에 프리스트레싱 작업에 필요한 소정의 강도가 발현되어야 하기 때문에 일반 콘크리트 포장에 사용되는 콘크리트 보다는 경화속도가 빠르다. 따라서 초기재령에서 크립와 건조수축 및 탄성변형에 의해 발생하는 슬래브의 종방향 수축량은 대략 10mm 정도임을 알 수 있다. 이 데이터는 슬래브의 길이가 대략 90m 정도에 대한 측정결과이다. 본 연구에서 대상으로 하는 PTCP 슬래브의 길이가 120m이므로 이 값을 역산하면 초기 7일 이내의 수축량은 대략 13mm로 예상할 수 있다.

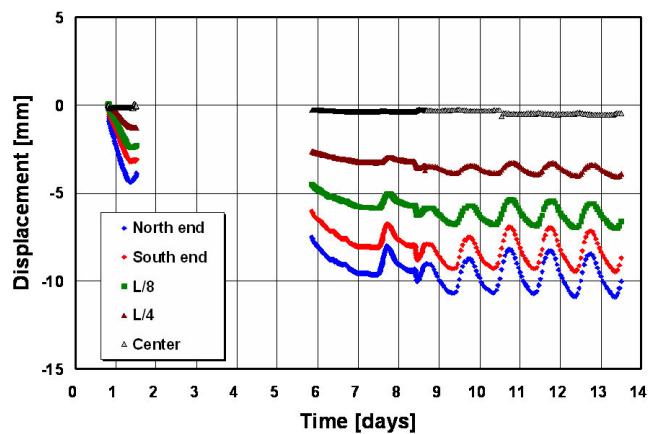


그림 1. 종방향 길이 변화(Choi and Won, 2010)

## 2.2. 줄눈 폭 설계 요소

### 2.2.1. 온도변화

콘크리트 슬래브는 온도변화에 따라 수축과 팽창을 반복하며 설계 시 예상되는 최대 온도와 최저 온도를 결정해야 한다. 본 연구에서는 주문진 현장을 대상으로 최대 온도는 영상 40℃, 최저 온도는 영하 -20℃로 가정하였다. 따라서 60℃의 온도 변화량( $\Delta T$ )을 설계에 고려한 것이다. 그림 2는 계절의 변화에 따른 PTCP 슬래브의 거동을 표현한 것으로 동절기에 최대의

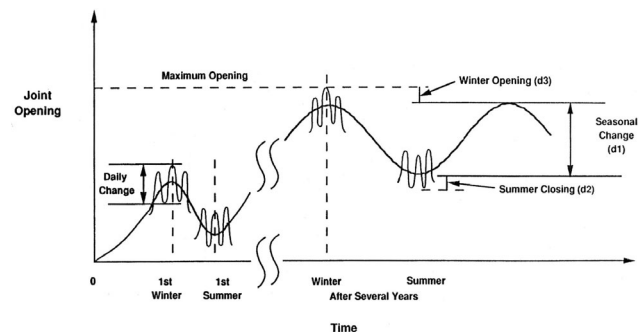


그림 2. 일일과 계절별 줄눈 폭의 변화(Okamoto et al. 1991)

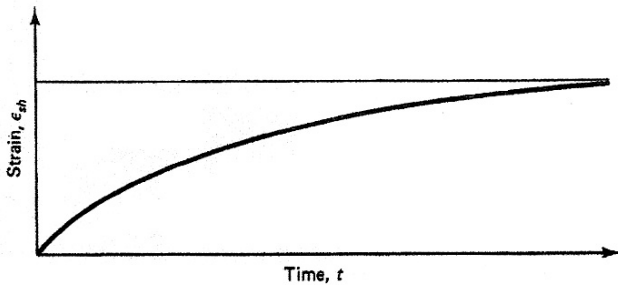
줄눈 폭을 나타내며 하절기에 최소 줄눈 폭이 된다. 이러한 거동은 콘크리트의 건조수축이 종료되는 시점까지 줄눈 폭은 점진적으로 증가되며 건조수축이 종료된 후 일일 온도변화를 포함한 연간 계절적 온도변화에 따라 줄눈 폭이 변화된다.

### 2.2.2. 콘크리트 건조수축

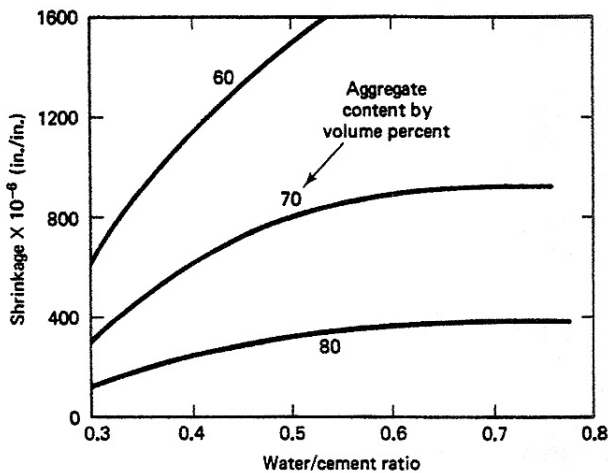
콘크리트의 건조수축(drying shrinkage)은 단위 시멘트량과 단위수량의 영향을 크게 받으며 골재의 종류, 골재의 치수, 시멘트 종류와 품질, 시공 중 다짐상태, 양생방법 및 부재의 치수에 영향을 받는다. 표준 습도상태에서 건조수축은 시간의 함수이며 습윤양생한 콘크리트의 임의시간  $t(\text{day})$ 에서의 건조수축 변형률은 다음 식 (1)로 표현할 수 있다(Nawy 2000).

$$\epsilon_{sh,t} = \frac{t}{35+t} \epsilon_{sh,u} \quad (1)$$

여기서,  $\epsilon_{sh,t}$ 는 시간  $t(\text{day})$ 에서 건조수축 변형률이며,  $\epsilon_{sh,u}$ 는 최종 건조수축 변형률(ultimate shrinkage strain)이다.



(a) 시간-건조수축 변형률 곡선



(b) 물/시멘트 비와 골재 함량의 영향

그림 3. 콘크리트 건조수축 특성(Nawy 2000)

본 논문에서는 최종 건조수축 변형률을  $80 \times 10^{-6}$ 으로 가정하였다. 그 이유는 콘크리트 배합이 단위수량이 작고 물/시멘트 비가 낮을수록, 슬럼프 4cm로 시공되었고, 줄눈 설치 시 PTCP 슬래브 시공 이후 11일 후에 시공되었기 때문에 초기재령에서 건조수축이 상당히 진행된 것으로 판단되기 때문이다. 따라서 그림 3에서 제시된 최종 건조수축 변형률을  $300 \times 10^{-6}$ 으로 가정할 때 약 70% 이상의 건조수축이 종료된 것으로 가정하면 최종 건조수축 변형률은  $80 \times 10^{-6}$ 로 볼 수 있다.

### 2.2.3. 콘크리트 크리프

PTCP 슬래브는 PS 강연선에 의해 프리스트레스가 장기간 지속되므로 크리프의 영향을 받게 된다. 프리스트레스가 도입된 직후 콘크리트의 탄성변형은 기존의 연구를 고찰할 때 매우 작은 값이다. 그 이유는 PTCP 슬래브에 도입된 프리스트레스력은 차량하중과 환경하중이 재하될 경우 구조해석을 통하여 그 크기를 예측하여 균열발생이 방지되는 범위에서 설계되기 때문에 2.4MPa 정도의 프리스트레스가 도입된다. 설계수명 40년의 PTCP 슬래브의 크리프 변형을 정확하게 예측하기는 매우 어려우며 현재 제시된 크리프 제안식을 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 미국 텍사스에서 25년 지난 West시의 PTCP를 고려할 때 크리프에 의한 PTCP의 장기 변형은 매우 작은 것으로 판단된다(Chavez 등, 2003).

따라서 크리프에 의한 변형이 줄눈 폭의 변화에 미치는 영향은 온도변화와 건조수축에 비해 상당히 작은 값으로 판단되기 때문에 본 연구에서는 설계요소에서 제외하였다.

### 2.2.4. 콘크리트 경화온도

콘크리트 포장에서 줄눈 폭이나 균열 폭은 건조수축뿐만 아니라 콘크리트가 경화되는 시점을 기준으로 한 소위 경화온도(setting temperature)에 의존된다. PTCP 슬래브의 줄눈 폭은 소음을 줄이고 승차감을 향상시키기 위하여 매우 작은 폭으로 유지될 필요가 있다. 그러나 콘크리트 포장은 상당히 긴 연장을 연속적으로 포설하기 때문에 콘크리트의 초기재령에서 경화온도를 제어하는 것은 매우 어려운 일이다. 또한 본 연구에서 PTCP는 Gap슬래브 시공방식이 적용되어 슬래브 시공 후 약 7일 이상 경과 후 줄눈이 설치되기 때문에 초기 줄눈 폭 설계는 시공 시 콘크리트의 평균온도를 기준으로 하였다.

### 2.2.5. 콘크리트 열팽창계수

콘크리트의 열팽창계수( $\alpha$ )는 단위온도변화에 대한 길이변화로 콘크리트 포장에서 열팽창 특성이 크면 온도차에 의한 응력발생으로 균열발생 가능성이 커지므로 열팽창계수가 작은 골재를 사용하는 것이 이상적이다. 콘크리트의 열팽창계수는 골재의 열팽창 특성에 직접 영향을 받으며 골재 사용량이나 물/시멘트 비 등에 의존적이다. 일반적으로 70~80%의 골재를

사용한 콘크리트 배합의 열팽창계수는 그림 4와 같이  $6 \sim 12 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 갖는다. 본 연구에서 PTCP 시공에 사용된 굵은골재는 화강암으로 Mehta(1993)는  $8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 갖는다고 연구된 바 있지만 콘크리트의 배합과 재료특성이 상이하므로 본 연구에서는  $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 를 가정하였다.

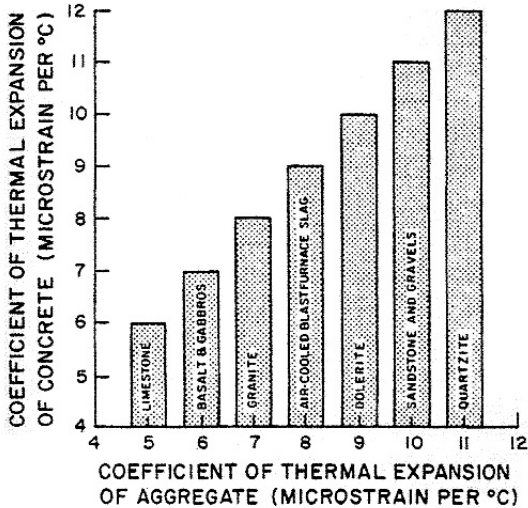


그림 4. 골재의 종류별 콘크리트 열팽창계수 특성(Mehta, 1993)

### 2.2.6. 슬래브와 기층의 마찰

온도나 습도변화로 인하여 PTCP 슬래브의 변형이 발생되면 PTCP 슬래브는 수축과 팽창이 발생할 때 슬래브와 하부 기층과의 마찰로 인하여 계산된 수축량과 팽창이 다르게 된다. 그림 5는 이러한 거동을 나타낸 것으로 슬래브와 기층과의 마찰로 인한 구속이 크면 슬래브의 움직임이 작고 구속이 작다면 슬래브는 자유롭게 신축하게 된다. 이러한 요소는 줄눈 폭 설계에 영향을 미치며 마찰계수로 고려할 수 있다. Chavez(2003)와 Okamoto(1991)는 PTCP 슬래브 밑면에 분리막을 단층(single layer)으로 설치할 경우 마찰특성의 영향으로 슬래브의

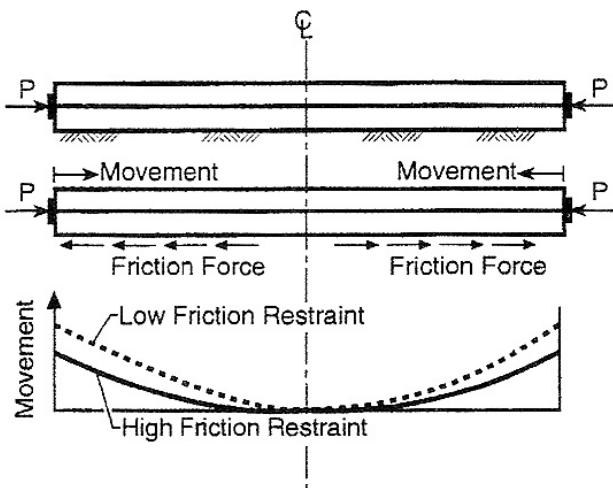


그림 5. PTCP 슬래브와 기층과의 마찰에 따른 영향(Chavez, 2003)

수축과 팽창은 80~85%의 범위를 나타내는 것으로 제시하였다. 그러나 본 연구에서는 Chavez(2003)와 Okamoto(1991)의 연구결과를 검토하여 10%가 더 감소될 것으로 예상하고 0.7의 마찰계수를 적용하였다.

### 2.2.7. 슬래브 길이

본 연구에서 PTCP 슬래브의 길이는 120m로 설계·시공되었다. 슬래브의 길이가 길면 수축과 팽창이 크게 되므로 줄눈 부에서의 소음이 크고 승차감을 저하시키며 슬래브와 기층과의 마찰이 크게 나타나기 때문에 프리스트레스의 손실이 크게 된다. 반면 슬래브의 길이가 너무 짧으면 소음과 승차감은 양호하지만 시공성이 저하된다. 표 1은 미국의 PTCP 슬래브 연장 시공 사례이다. 미국의 경우 최대 360m 이상까지 시공한 경험이 있으나 이는 현실적으로 시공성이 저하되고 대략 120m의 수준에서 시공한 사례가 가장 적절한 것으로 판단된다. 따라서 시험시공의 경험과 외국의 문헌을 검토할 때 설계 슬래브 연장은 120m가 가장 적절할 것으로 판단된다.

표 1. 미국의 PTCP 슬래브 시공 연장 사례

구분	시공년도	슬래브 길이	비고
버지니아	1971	400~760ft (122~232m)	공항
펜실베이니아	1973	600ft(183m)	도로
	1988	400ft(122m)	도로
미시시피	1976	450ft(137m)	도로
애리조나	1977	400ft(122m)	도로
텍사스	1985	240ft(73m) 440ft(134m)	도로
	2008	300ft(91m)	도로
일리노이	1980	400ft(122m)	공항
	1993	1200ft(366m)	공항

## 3. 포스트텐션 콘크리트 포장의 줄눈 폭 설계

PTCP 슬래브의 줄눈 폭 설계 시 신축량 계산은 식 (2)로 표현될 수 있다.

$$\Delta l = \Delta l_t + \Delta l_s + \Delta l_c \quad (2)$$

여기서,  $\Delta l_t$ 은 온도변화에 의한 것으로  $\Delta l_t = \alpha \times \Delta T \times l$ 로 계산된다( $\alpha$ 는 콘크리트의 열팽창계수,  $\Delta T$ 는 온도변화량,  $l$ 은 슬래브의 길이이다).

$\Delta l_s$ 는 건조수축에 의한 신축량이며,  $\Delta l_c$ 는 크리프에 의한 신축량이다.



또한, 줄눈 설치 시 시공성을 고려하여 설치여유를 두어야 하나 설치여유가 크면 소음과 승차감에 악영향을 미치기 때문에 시공이 가능한 범위에서 최소의 여유를 부여하는 것이 바람직하다. 따라서 본 설계에서는 설치여유를 10mm 이내로 가장 하고 줄눈 설치 시 설계 폭이 10mm를 초과할 경우는 설치여유를 두지 않도록 하였다.

PTCP 슬래브의 신축량 계산은 식 (3)과 같이 온도변화에 의한 신축량에 슬래브와 기층과의 마찰계수를 고려하여 신축량을 계산한다. 건조수축에 의한 신축량은 앞서 기술한 바와 같이 미국의 실험결과에서 볼 수 있듯이 콘크리트 포장에 적용되는 슬럼프가 4cm 정도로 매우 낮기 때문에 초기재령에서 건조수축이 상당부분 진행됨을 알 수 있고 크리프는 설계요소에서 배제하였다. 또한 식 (3)과 같이 온도변화에 의한 신축량에 슬래브와 기층과의 마찰계수를 고려하여 신축량을 계산할 수 있다.

$$\Delta l_i = \alpha \times \Delta T \times l \times C_f \quad (3)$$

여기서,  $C_f$ 는 PTCP 슬래브와 기층과의 마찰을 고려한 계수로서 0.7을 적용하였다.

줄눈 설치 시 설계 폭은 다음 식 (4)에 의해 계산할 수 있다.

$$\Delta l_{joint\ width} = \alpha \times (T_i - T_s) \times L \quad (4)$$

여기서,  $T_s$ 는 기준온도(15℃),  $T_i$ 는 줄눈 설치 시 콘크리트의 평균 온도(℃),  $L$ 은 슬래브의 길이이다.

앞에서 검토한 입력변수를 사용하여 줄눈 설치 시 유간을 계산하면 다음과 같다.

표 2. 포스트텐션 콘크리트 포장 시공 시 줄눈 폭 설계

PTCP 시공 시 콘크리트 온도(℃)	PTCP 시공 시 설계 줄눈 폭 계산(mm)	PTCP 시공 시 설계적용 줄눈 폭(mm)
5	29.4	30
10	25.2	26
15	21.0	21
20	16.8	17
25	12.6	13
30	8.4	9
35	4.2	5

## 4. PTCP 슬래브 줄눈 폭 변화량 측정

### 4.1. 온도변화 측정

PTCP 슬래브의 온도변화를 측정하기 위해 온도측정센서인 아이버튼을 설치하였다. 15cm 두께의 포장에 3개의 아이버튼

을 상, 중, 하의 깊이에 설치하였으며, 대기온도 측정을 병행하여 대기온도와 콘크리트 온도의 변화를 비교하여 나타내었다. 콘크리트에 설치된 아이버튼의 설치깊이는 콘크리트 표면으로부터 2cm, 7.5cm, 및 13cm에 위치하도록 하였다. 그림 6은 현장에서 측정한 결과이다. 측정은 2010년 8월 17일과 18일 동안 약 24시간의 변화를 측정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 콘크리트 표면에서의 온도는 변화가 가장 크다. 본 연구에서는 상, 중, 하의 온도를 평균하여 그 값을 기준으로 분석하였다.

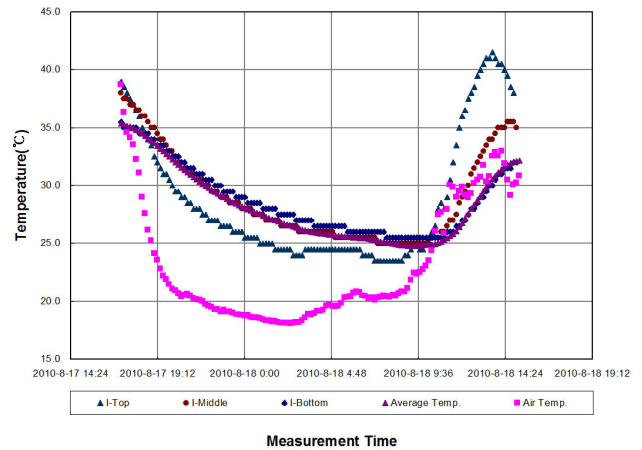


그림 6. PTCP 슬래브의 깊이별 온도변화 측정결과

### 4.2. 줄눈 폭 변화량 측정 방법

줄눈 폭 측정은 1/100mm 단위로 측정이 가능한 버니어 캘리퍼스를 이용하였다. 동일한 위치에서의 측정이 가능하도록 조인트의 측정위치에 표점을 설정하여 반복측정에 따른 측정오차를 최소화하도록 하였다. 그림 7은 측정방법을 나타낸 것이다. 버니어 캘리퍼스의 움직임이 없도록 고정시키기 위하여 철재 지그를 제작하여 부착시켜 반복측정이 용이하도록 하였다.

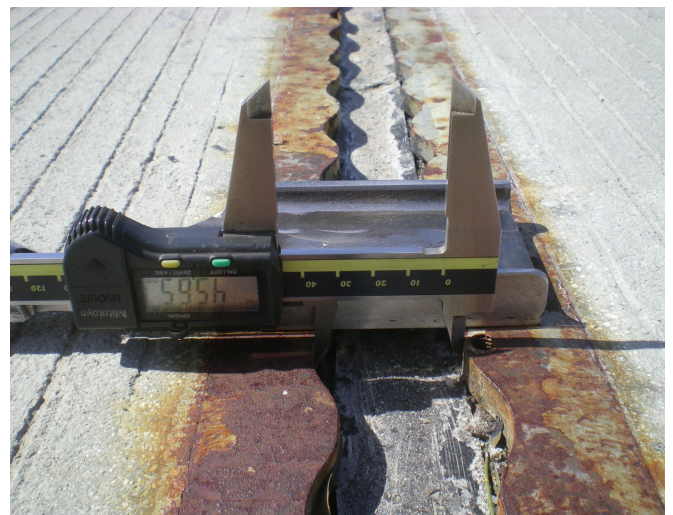


그림 7. 줄눈 폭 측정 방법

### 4.3. 줄눈 폭 변화량 측정결과

#### 4.3.1. 콘크리트 온도와 줄눈 폭 변화

줄눈 폭 측정은 콘크리트의 온도변화를 예상하여 오전 6시, 9시, 11시 오후 1시, 3시, 5시, 7시를 기준으로 총 7회를 반복 측정 하였다. 그림 8은 콘크리트 온도변화에 따른 줄눈 폭 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 데이터는 6개소에서 측정한 줄눈 폭의 평균치를 나타낸 것이다. 그림 8에서 콘크리트 온도가 25.5℃를 나타낼 때 줄눈 폭은 25.62mm와 26.32mm를 나타내고 있다. 이러한 차이는 콘크리트 습도가 미치는 결과로 귀결된다. 25.62mm를 나타낼 때 콘크리트는 건조한 상태이며, 26.32mm를 나타낼 때는 3시간 비가 지속된 후 측정된 결과이기 때문이다. 즉 콘크리트가 습윤상태와 건조상태의 차이는 0.7mm의 차이를 나타낸다고 할 수 있다. 좀 더 엄밀하게 콘크리트와 줄눈 폭의 변화는 일정한 습도 하에 측정되어야 하나 실제로 현장에서는 이러한 조건을 구현하기는 불가능하고 콘크리트 깊이에 따라 습도가 변화되기 때문에 이러한 영향은 건조상태와 습윤상태로 구분하여 분석하는 것이 합리적이라 판단된다.

이러한 영향을 배제하고 선형회귀분석하여 도출된 줄눈 폭의 변화는 콘크리트 온도가 1℃변화할 때 1.2728mm의 변화를 나타낸다. 이 값은 PTCP 슬래브의 길이를 1/2로 고려할 때 60m에 대해 0.6364mm가 변화되는 것이다. 이 값을 다시 역산하여 표현하면 PTCP 슬래브의 열팽창 특성은 단위 온도변화에 따라  $10.6067 \times 10^{-6}/\text{℃}$ 로 계산할 수 있다.

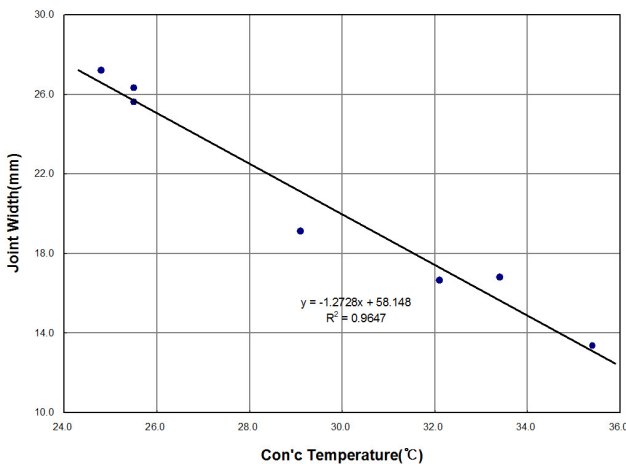


그림 8. 콘크리트 온도변화에 따른 줄눈 폭 변화

#### 4.3.2. 줄눈 위치별 거동 특성

그림 9는 6개의 측정위치에 따른 콘크리트 온도변화와 줄눈 폭의 변화를 나타낸 것이다. PTCP 슬래브의 외측은 아스팔트 노면이 시공되고 내측은 증분대 콘크리트가 포설되었다. 따라서 슬래브 측면의 마찰로 인하여 위치별 줄눈 폭의 변화가 차이를 나타내는지 분석하고자 하였다. 그림 9에서 보는 바와 같

이 조인트의 위치별 줄눈 폭은 미소한 차이를 나타낸다. 이는 줄눈 설치 시 줄눈 폭을 설정할 때 시공 상 오차에 기인한 것으로 판단되며 온도변화에 따른 위치별 줄눈 폭은 대부분 일정한 거동을 나타내는 것을 볼 수 있다. 표 3은 위치별 단위온도변화에 대한 열팽창 특성을 비교하여 나타낸 것이다. 거의 모든 위치에서 큰 차이는 나타나지 않으며, 위치 1에서의 줄눈 폭 변화량이 2~5번에 비하여 다소 크게 나타났다. 1번 위치는 PTCP 슬래브의 가장 외측의 측점으로 아스팔트 노면과 인접한 부분이며 아스팔트와 콘크리트가 완전 분리되어 PTCP 슬래브가 온도변화에 따라 거동하는데 구속이 전혀 없기 때문에 미소한 차이를 나타내는 것으로 판단된다.

표 3. 위치별 열팽창 특성 비교 분석

Location	단위 온도변화에 대한 줄눈폭 변화량(mm)	열팽창 특성(α)
1	1.3182	$1.0985 \times 10^{-5}$
2	1.2841	$1.0701 \times 10^{-5}$
3	1.2536	$1.0447 \times 10^{-5}$
4	1.2681	$1.0568 \times 10^{-5}$
5	1.2435	$1.0363 \times 10^{-5}$
6	1.2695	$1.0579 \times 10^{-5}$

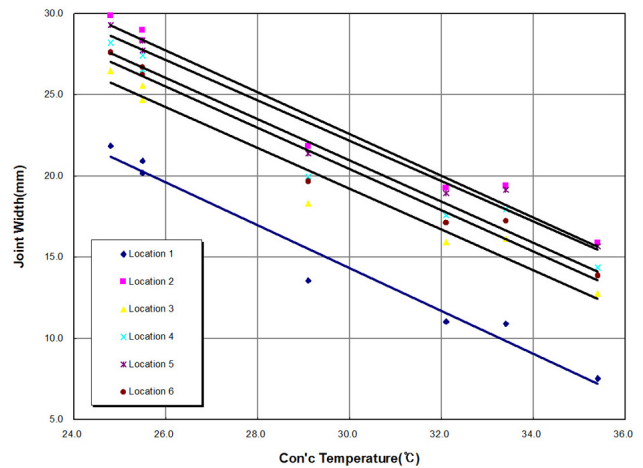


그림 9. 측정위치에 대한 콘크리트 온도와 줄눈 폭 변화

#### 4.3.3. 온도변화에 따른 줄눈부 위치별 상대변화

그림 10은 온도변화에 따른 줄눈부 위치별 상대 변화량을 나타낸 것이다. 최초로 측정한 데이터를 영점으로 하여 온도가 변화되면서 변화되는 상대 줄눈 폭의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 콘크리트 온도가 25.5℃일 때 줄눈 폭의 상대변화가 큰 것으로 보여 지나 이 데이터는 이미 서술한 바와 같이 2회의 측정결과가 모두 포함되어 있기 때문이다. 즉 콘크리트가 건조한 상태와 습윤상태일 때의 데이터가 모두 표현되어 있다. 각 데이터를 분석해 보면 상대변화가 작은 경우 0.2mm의 범위를

나타내며 가장 클 경우 0.7mm를 나타내었다.

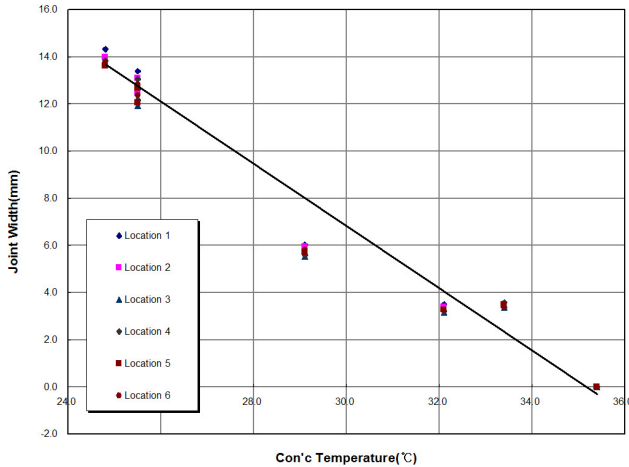


그림 10. 측정위치에 대한 콘크리트 온도와 줄눈 폭 변화

#### 4.4. 온도 상승과 하강시의 줄눈 폭 변화

그림 11은 콘크리트의 온도가 상승되는 경우와 하강하는 경우에 대한 줄눈 폭 변화를 나타낸 것이다. 콘크리트의 온도가 상승되는 경우 줄눈 폭이 좁아지고 반대로 하강하는 경우 줄눈 폭이 넓어지는 특성이 있다. 그림에서 온도가 하강하는 경우 줄눈 폭의 변화는 회귀분석식을 볼 때 데이터의 신뢰도가 높은 것을 볼 수 있으나 온도가 상승하는 경우 데이터의 분산성이 큰 것을 볼 수 있다. 온도가 하강하는 경우의 데이터는 콘크리트가 건조한 상태에서 측정된 결과이며, 하강할 경우는 비가 온 후부터 측정된 결과로서 콘크리트의 습윤상태가 열팽창 특성 거동에 영향을 미쳤기 때문인 것으로 판단된다. 이러한 영향을 제외하면 온도의 상승과 하강의 영향은 매우 작아 설계에 고려하지 않아도 무방할 것으로 판단된다.

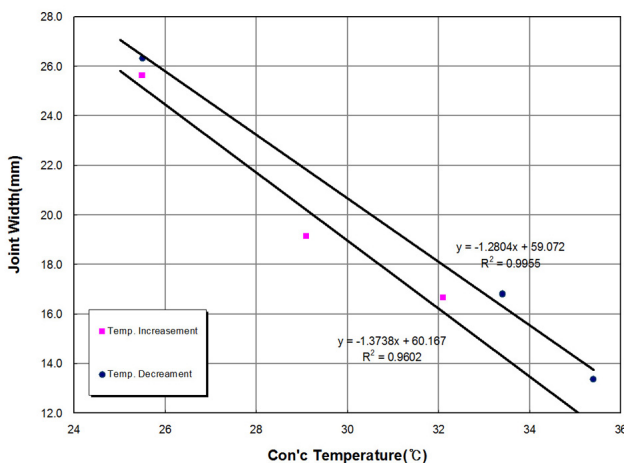


그림 11. 콘크리트 온도 상승 및 하강에 따른 줄눈 폭 변화

#### 4.5. PTCP 공법의 줄눈 폭 설계 방안

표 4에서 PTCP의 줄눈 폭 설계요소를 검토하여 가정된 이론적 분석에 의해 설계값을 제시하였다. 본 절에서 공용 후 1년여 시간이 경과한 시점에서 온도변화에 따라 줄눈 폭 변화를 측정하고 분석한 결과에 기초하여 당초 가정한 설계(안)에 대해 향후 줄눈 폭 설계방안을 제시하고자 한다.

우선 콘크리트의 온도변화와 열팽창계수는 전절에서 검토한 바와 같이 PTCP 공법이 시공되는 지역의 기후특성을 반영하여 설정하고, 콘크리트에 사용되는 굵은골재의 종류를 고려하여 열팽창계수를 결정한다. 둘째, 콘크리트의 크리프는 설계에서 무시한다. 전술한 바와 같이 PTCP에 도입되는 프리스트레스 힘이 적고, 미국의 사례를 검토할 때 콘크리트의 크리프가 줄눈 폭에 미치는 영향은 미소하므로 고려하지 않는다. 셋째, 콘크리트 슬래브와 기층과의 마찰계수는 당초 설계에서 0.7로 고려하였으나 콘크리트의 평균온도를 측정할 때 데이터를 사용할 때 마찰계수에 대해 줄눈 폭의 변화가 크게 지배되지 않는 것으로 판단된다. 따라서 분리막을 단층으로 설치할 때 마찰계수는 1.0을 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 넷째, 콘크리트 건조수축 영향에 대한 설계적용은 줄눈 시공이 PTCP 슬래브가 시공되고 7일 후 시공하는 것으로 가정하여 최종 건조수축 변형률을  $120 \times 10^{-6}$ 로 고려할 때 줄눈 폭의 수축량은 14.4로 계산된다. 그 이유는 줄눈이 시공될 때 콘크리트의 온도를 16°C로 하여 시공한 결과 1년정도 공용 후 측정된 줄눈 폭의 차이가 14mm로 나타났기 때문이다. 따라서 최종 건조수축량은  $120 \times 10^{-6}$ 로 하여 15mm 이내를 건조수축에 의한 줄눈 폭의 감소분으로 설계 적용하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 그 외 줄눈 폭 설계요소 중 콘크리트의 경화온도는 PTCP를 시공한 후 약 7일 경과 후 조인트를 시공하기 때문에 경화온도의 영향은 배제하고 줄눈 설치 시 콘크리트의 평균온도를 기준으로 설계 폭을 결정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

상기 기술한 사항을 적용하여 당초 설계한 줄눈 폭 설계는 표 4와 같이 수정하여 설계안을 제시하고자 한다. 표 4는 설계 조건에 명시한 요소를 적용하여 설계 줄눈 폭을 계산한 후 콘크리트의 건조수축에 의한 감소분을 제외하여 설계적용 줄눈 폭을 계산한다. 이 때 계산결과가 너무 작거나 음수를 나타낼 때 설치여유를 부여하는 것으로 하였으며 설계적용은 이를 고려하여 제시하였다. 표 4에서 콘크리트의 온도가 평균 35°C 이상일 때 설계치는 0에 가깝게 된다. 즉 이 값은 콘크리트의 건조수축을 고려하여 시공 시 줄눈 폭을 거의 허용하지 않는 것이며 줄눈 폭을 최소화하여 불필요한 줄눈 폭의 허용으로 소음 방지와 승차감을 향상시키기 위함이다.

표 4. 포스트텐션 콘크리트 포장의 줄눈 폭 설계 방안

PTCP 시공시 콘크리트 온도(℃)	설계조건에 의한 줄눈 폭 계산(mm)	콘크리트 건조수축에 의한 감소분(mm)	콘크리트 건조수축을 고려한 줄눈 폭 계산(mm)	설치 여유(mm)	설계 적용 방안
5	42	15	27	-	27
10	36	15	21	-	21
15	30	15	15	-	15
20	24	15	9	-	10
25	18	15	3	5	8
30	12	15	-3	8	5
35	6	15	-9	10	1

※설계조건: 콘크리트의 온도변화( $\Delta T$ )=60℃  
 콘크리트의 열팽창계수=10×10<sup>-6</sup>/℃  
 콘크리트의 최종 건조수축 변형률=120×10<sup>-6</sup>  
 슬래브와 기층과의 마찰계수=1.0

### 5. 결론

본 연구에서는 온도변화에 따라서 포스트텐션 콘크리트 포장의 줄눈 폭이 변화되는 거동을 실측하여 분석하고 이론적 계산에 의한 설계요소의 검토와 향후 설계방안에 대하여 연구하였다. 본 연구를 통하여 도출된 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. 설계가정한 콘크리트의 열팽창 특성은 실측값을 분석하여 검토할 경우 단위 온도변화에 따른 줄눈 폭의 변화를 계산할 때 평균 10.6×10<sup>-6</sup>/℃로 나타났다. 이 결과에 기초하여 슬래브와 기층과의 마찰을 가정한 0.7의 계수는 과다평가된 것으로 판단되며 향후 콘크리트의 평균온도를 적용한 설계에는 마찰계수를 1.0으로 적용하는 것이 타당할 것으로 판단되었다.
2. 포스트텐션 콘크리트 포장의 줄눈 부 위치별 온도에 따른 줄눈 폭 변화를 분석한 결과 내측 중분대 콘크리트와 접하는 부분과 슬래브 중앙에서의 열팽창 특성은 유사한 것으로 나타났다. 그러나 슬래브 내측 및 중앙부와 외측 아스팔트 노면과는 미소한 차이를 나타내었다. 이 차이는 아스팔트 노면과 PTCP 슬래브가 완전 분리되어 거동하므로 미소한 차이를 나타내는 것으로 판단되며 설계 시 위치별 특성에 대한 고려는 불필요할 것으로 판단된다.
3. 온도변화에 따라 PTCP 줄눈 폭의 변화를 측정된 결과 동일한 온도에서 슬래브가 건조한 경우와 습윤상태인 경우 0.7mm의 차이를 나타내었다. 따라서 설계 시 습윤상태의 조건을 고려한다면 약 1mm의 여유 폭을 부여할 수 있겠으나 이 값이 매우 작으므로 설계시 배제하여도 무방할 것으로 판단된다.
4. 본 연구에서 시공 후 약 1년이 경과한 시점으로 볼 때 콘크리트 건조수축의 영향으로 슬래브가 수축된 양은 약

14.4mm로 분석되었으며 이 시점을 건조수축의 종료시점으로 가정한다면 설계 시 약 15mm 이내를 고려하면 타당할 것으로 판단된다.

5. 본 연구에서 줄눈 폭 설계요소를 검토한 결과 프리스트레스에 의해 장기적으로 발생될 것으로 예상되는 크리프 거동은 프리스트레스의 크기가 구조부재에 적용되는 크기에 비하여 매우 작은 값이므로 이에 대한 거동은 설계 시 무시하여도 무방할 것으로 판단된다.

향후 연구에서는 계절적 온도변화에 따라 장기적으로 변화되는 PTCP의 줄눈 폭 변화를 관찰하여 거동을 분석하고, PTCP 공법과 JCP 공법이 연결되는 줄눈부의 설계에 대해서도 연구가 수행되어야 할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가원의 기술사업화 지원사업의 연구비에 의해 수행된 것으로 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

김동호, 배종오, 김기현, 이봉학, 김성민, 원문철, “외국의 프리스트레스트 콘크리트 포장 기술과 국내 적용 방안”, *대한토목학회 학술발표회*, 2009.

김동호, 배종오, 이봉학, 김성민, 한승환, 유태석, “포스트텐션 콘크리트 포장의 설계와 시공”, *대한토목학회 학술발표회*, 2009.

김동호, 배종오, 이봉학, 한승환, 김영강, 김덕용, “포스트텐션 콘크리트 포장 공법의 현장적용”, *한국도로학회 학술발표회*, 2009.

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

Choi, S. C. and Won, M. C., “Time-Dependent Behavior of Post-Tensioned Concrete Pavements under Environmental Loading,” *Proceedings of the 89th Annual Meeting of the Transportation Research Board*, Washington, D.C., 2010.

Mehta, P. K., *Concrete Structure, Properties, and Materials*, Prentice Hall, Inc., 1993.

Nawy, E. G., *Prestressed Concrete*, Prentice Hall, Inc., 2000.

Okamoto, P. A., Tayabji S. D. and Barenberg, E. J., “Instrumentation and Evaluation of Prestressed Pavement U.S.220, Blair County, Pennsylvania,” *Research Report No. 87-19*, Pennsylvania Department of Transportation, 1991.

접 수 일 : 2010. 8. 10  
 심 사 일 : 2010. 8. 11  
 심사완료일 : 2010. 8. 30