

# 시간에 따른 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP)의 균열 폭 변화

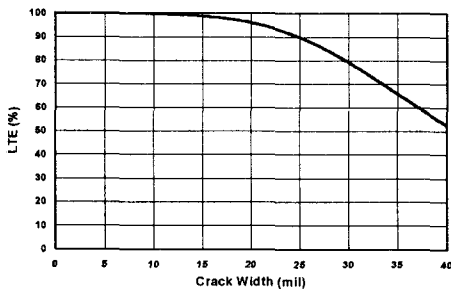
## Variation of Crack Width over Time in Continuously Reinforced Concrete Pavement(CRCP)

남정희\* · 김동호\*\* · 최성철\*\*\* · 원문철\*\*\*\*

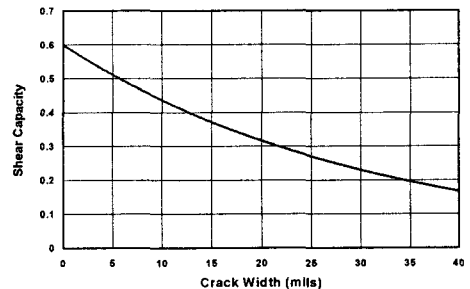
Nam, Jeong-Hee · Kim, Dong-Ho · Choi, Seongcheol · Won, Moon C.

### 1. 서론

연속 철근 콘크리트 포장에서는 시공준눈 외에는 횡방향 준눈을 설치하지 않는다. 환경하중에 의한(온도 및 습도변화) 콘크리트 포장의 체적 변화는 자연스럽게 발생한 횡방향 균열에 의해서 제어되며, 이 균열은 종방향 철근이 밀실하게 잡아 준다. 환경하중에 의한 콘크리트 포장체의 응력(Stress)은 횡방향 균열의 발생으로 자연스럽게 재분배(Redistribution)된다. 종방향 철근이 잡아주고 있는 횡방향 균열은 하중전달(Load Transfer)을 지속적으로 유지시켜, 차량하중에 의한 응력발생을 최소화하며, 포장체의 수명을 증가시킨다. 또한 밀실한 균열폭은 종방향 철근까지 수분의 침투를 방지해 주고, 철근의 부식을 억제한다. 그림 1-(a)는 NCHRP 1-37에서 사용하고 있는 균열폭과 하중전달효율(Load Transfer Efficiency)과의 상관관계를 보여주고 있다<sup>(1)</sup>. 예에서, 균열폭이 0.64 mm (25 mils)를 넘을 경우, LTE 값이 균열폭에 선형 비례하여 감소하며, 균열폭이 1.02 mm (40 mils)인 경우 LTE 값은 균열 발생이 없는 경우의 LTE 값의 53%에 달한다. 그림 1-(b)는 NCHRP 1-37에서 사용하고 있는 균열폭과 전단능력(Shear Capacity)과의 상관관계를 나타내고 있다. 균열폭이 0에서 0.54 mm (21 mils)로 증가할 경우 전단능력이 절반으로 줄어드는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 균열폭의 증가에 따른 LTE 값과 전단능력이 줄어들어 따라, CRCP의 구조적 Distress의 가장 중요한 요소인 Punchouts의 발생 가능성이 증가되는 것이다.



(a) Effect of crack width on LTE



(b) Effect of crack width on shear capacity

그림 1. Effect of crack width on LTE and shear capacity

그림 1에서와 같이, 차량하중에 의한 응력발생에 영향을 미치는 가장 중요한 요인중 하나는 균열폭이다. 따라서 CRCP 설계의 중점은 설계 수명동안 균열폭을 얼마만큼 작게 유지하느냐에 있다. 현재 사용되고 있는 CRCP 설계의 주요 변수로는 포장체 두께, Zero-Stress 온도, 콘크리트의 열팽창계수(COTE), 건조수축계수, 중

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원 · 공학박사 · 031-910-0190(E-mail: archnam@kict.re.kr)  
 \*\* 정희원 · The University of Texas at Austin Post-Doctoral Fellow · 공학박사 · 1-512-232-3075(E-mail: donghokim@mail.utexas.edu)  
 \*\*\* 정희원 · The University of Texas at Austin Post-Doctoral Fellow · 공학박사 · 1-512-232-3073(E-mail: chois@mail.utexas.edu)  
 \*\*\*\* 정희원 · The University of Texas at Austin Research Associate Professor · 공학박사 · 1-512-232-3135(E-mail: mwon@mail.utexas.edu)



방향 철근비, 및 환경요인으로 들 수 있는데, 이 모든 변수들이 횡방향 균열폭에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 설계시 가장 기본적 가정은 넓은 균열 간격은 넓은 균열폭을 유발한다는 것이다. NCHRP 1-37에 의하면, 횡방향 철근위치에서의 콘크리트 균열폭은 다음 식으로 정의하고 있다. 식 1에 따르면, 균열간격에 따라 콘크리트 인장 응력이 달라져, 균열폭의 증가율은 달라지지만, 균열 간격이 넓어지면 균열폭이 넓어진다.

$$cw = CC \cdot \bar{L} \left( \varepsilon_{shr} + \alpha_{PCC} \Delta T_{\zeta} - \frac{c_2 f_{\sigma}}{E_{PCC}} \right) \cdot 1000 \tag{Eq. 1}$$

If  $cw < 0$ ,  $cw = 0$

- $cw$  = 횡방향 철근위치에서의 균열폭의 평균, mils
- $CC$  = 지역적 보정 상수 ( $CC = 1$  일반적 보정상수),
- $\bar{L}$  = 평균 균열 간격, inch
- $\varepsilon_{shr}$  = 횡방향 철근 위치의 구속되지 않은 콘크리트의 건조수축 변형률,
- $\alpha_{PCC}$  = 콘크리트의 열팽창 계수, °F (COTE)
- $\Delta T_{\zeta}$  = 횡방향 철근위치에서의 콘크리트 Zero-Stress 온도에서부터의 온도차,
- $c_2$  = 철근의 이차 부착 계수 증분,
- $f_{\sigma}$  = 횡방향 철근위치에서 콘크리트의 최대 횡방향 인장 응력
- $E_{PCC}$  = 콘크리트의 탄성계수, psi.

CRCP의 장기공명성 향상을 위한 연구의 일환으로 CRCP 거동에 대해 계측기를 이용한 미시적 (microscopic) 접근 방법을 채택하였으며, 특히 균열 발생 거동 및 시간에 따른 균열폭 변화가 본 논문의 주요 연구 주제이다. 이 연구의 목적은 횡방향 균열폭을 최소화하면 Punchouts의 발생 가능성을 줄일 수 있고, CRCP의 장기 공명성을 증가시킬 수 있으므로, 기존 연구에서 주로 연구하는 횡방향 균열 간격 대신, 횡방향 균열폭의 거동을 분석하는 것이다. 그 연구의 결과로 3개 구간의 시험포장이 진행되었고, 콘크리트 거동의 미시적 접근 및 균열폭 변화를 계측하였다.

## 2. CRCP의 미시적 거동에 대한 현장 계측

콘크리트의 미시적 거동 및 균열 폭 거동을 계측하기 위해, 표 1에서와 같이 3개 구간(Austin, Cleveland, Wichita Falls)에 시험포장을 실시하였다. 콘크리트 체적 변화와 다양한 깊이의 균열폭을 측정하기 위해서 진동현 게이지(Vibrating Wire Gage)를 여러 구간에 설치하였다. 그림 2는 진동현 게이지의 대표적 설치 모습이다. 게이지 설치 위치에 균열을 유발하기 위해 균열 유발 줄눈을 설치하였다. 콘크리트 포설 직후 균열 유발 줄눈을 표면에서 약 25 mm 깊이에 설치하였다. 균열 유발 줄눈을 설치할 부위의 상부, 중앙부, 하부에 종방향으로 진동현 게이지를 설치하였다.(상부는 표면에서 25 mm, 중앙부는 포장두께의 중심, 하부는 기층에서 25 mm 위에 설치하였다. 종방향 철근은 포장두께의 중심부에 설치되어 있다.) 온도와 균열폭을 매시간 계측 하였으며, 온도에 의해 선형으로 변화되는 콘크리트 균열폭의 변화율을 균열폭 변화율 (Crack Width Rate, CWR)로 정의하였다.

표 1. Pavement Outline in Three Test Sections

	Austin	Cleveland	Wichita Falls
Highway	US 183	US 59	US 287
Construction	Sep 25, 2003	Jul 20, 2004	Aug 31, 2005
Thickness	11 inch (280 mm)	13 inch (330 mm)	12 inch (305 mm)
Pavement Structures	- 11 in. CRCP - 4 in. ASB* - Flexible base	- 13 in. CRCP - 1 in. ASB* - 6 in. CTB** - 6 in. LTS***	- 12 in. CRCP - 4 in. ASB* - 8 in. JCP - 4 in. ASB*

\* ASB: Asphalt Stabilized Base    \*\* CTB: Cement Treated Base    \*\*\* LTS: Lime Treated Subgrade

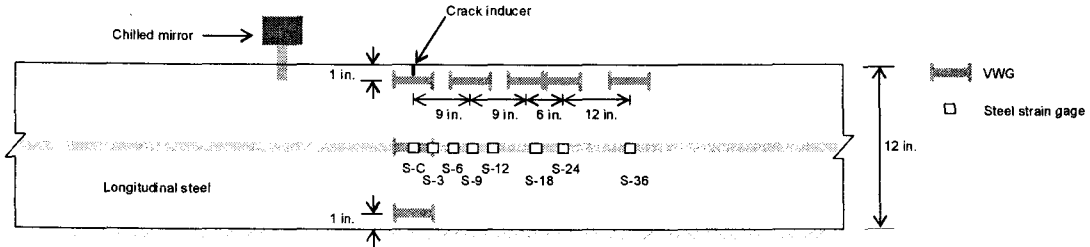


그림 2. Typical layout of gage installations

### 3. 시간 경과에 따른 균열폭 변화

콘크리트의 수분이 증발하면서 건조수축이 발생한다. 시간이 경과함에 따라 건조수축은 지속되고, 균열폭을 예측하는 식 1에 따르면 실질적으로 건조수축이 완료되는 시점까지 균열폭은 지속적으로 넓어지게 된다. Austin 시험포장 구간은 2년 10개월, Cleveland 시험포장 구간은 2년 그리고 Wichita Falls 구간은 11개월이 경과된 시점이다. 시험포장 3곳의 콘크리트 포장 상부의 균열폭 변화를 각각 정리하였다. 방대한 양의 계측 자료를 정리하여, 매 측정 당일 콘크리트 표면의 균열폭이 가장 큰 시점 (상부의 콘크리트 온도가 가장 낮은 시점)의 자료를 기준으로 정리하였으며, 한정된 자동계측 장비로 인해, 균열폭 계측을 지속적으로 하지 못하고, 주기적으로 측정하였다.

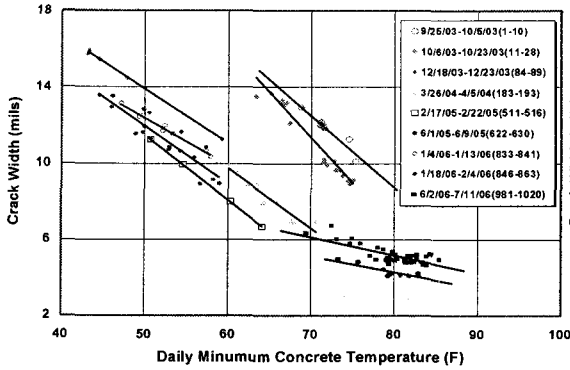
그림 3은 각 시험포장 구간의 시간에 따른 균열폭 변화를 보여주고 있다. 콘크리트 상부의 최저온도에서 최대 균열폭이 계측되었으며, 전반적으로 각 계측 기간 동안 콘크리트 최저온도와 균열폭사이에는 깊이와 시간에 따라 일정한 CWR을 보여주고 있다. 실제로 시공 후 Austin 시험 포장 구간에서는 630일까지의 균열폭은 최초 발생했을 당시의 균열폭보다 감소하고 있고, 그 이후 계측결과에서는 미세한 증가가 보여진다. Cleveland 와 Wichita Falls 시험포장 구간 역시 균열폭이 계측기간 동안 감소되고 있다. 일반적으로 시공 후 약 1년 이내에 환경하중에 의한 균열은 안정화되는 양상을 보이므로, 추가적인 횡방향 균열로 인해 균열폭이 감소되었다는 가정은 적절하지 않을 것이다. 그리고 건조수축이 재령 초기에 활발히 일어남을 고려해 보더라도, 2년 동안의 지속적인 균열폭 감소는 설명할 수가 없다. 건조수축에 대한 ACI<sup>(2)</sup> 나 CEB-FIP<sup>(3)</sup> 모델의 경우도 대부분의 건조수축은 2년 이내에 발생하는 것으로 나타나고 있고, 2년 후에 추가적으로 발생하는 건조수축량은 아주 소량인 것으로 연구되어지고 있다. Wells<sup>(4)</sup> 등의 연구에 따르면, 시공 후 150-250일 사이에, 건조수축현상이 오히려 줄어드는 회복 건조수축 (Reversible drying shrinkage)이 계측되었다. 이같은 회복건조수축은 부분적으로 균열폭이 줄어드는 현상을 설명해 줄 수 있을 것이다. 이와 같은 시간에 따른 균열폭 감소 현상은 재령이 아주 오래된 CRCP 구간에서 발견되는 미세 균열을 통해서도 간접적으로 알 수 있다. 그림 4는 재령 36년된 CRCP에서 볼 수 있는 전형적인 횡방향 균열양상으로 균열의 진진이 중앙부에 위치한 철근에서 멈춘 것을 볼 수 있다. 시간에 따른 균열폭의 감소 원인에 대해서는 현 단계에선 명확히 설명할 수 없으며, 현재 재료적 관점과 구조적 측면에서 지속적으로 연구 중이다.

### 4. 결론

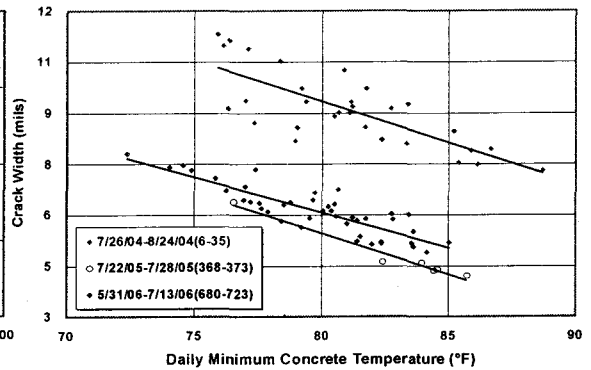
CRCP에서 가장 심각한 Distress 현상중 하나인 Punchouts의 발생 가능성은 균열폭이 커짐에 따라서 증가된다. Punchouts을 방지하거나 최소화하기 위해서는, 가능한 한 균열폭을 좁게 유지하는 것이 중요하다. 포장체의 균열폭에 영향을 미치는 요인으로는, 포장체 두께, Zero-Stress 온도, 콘크리트의 열팽창계수, 건조수축계수, 종방향 철근비, 및 기타 환경요인으로 들 수 있다. 시간에 따른 콘크리트 포장의 균열폭 변화를 Texas내 3곳의 시험포장 구간에서 계측하였다. 진동현 게이지를 종방향으로 포장체의 깊이에 따라 3곳에 설치하였고, 진동현 게이지가 설치된 구간에 균열유발 줄눈을 설치하였으며, 콘크리트 균열폭 변화를 계측하였다. 전반적으로 균열폭은 본 연구가 진행되고 있는 계측기간 내에서 감소하는 경향을 보이고 있다. 시간의 경과에 따른 균열폭의 감소 비율은 건조 수축율이 가장 큰 재령 초기에 가장 크게 나타났다. 시간의 경과에 따른 균열폭 감소는 CRCP의 장기 공용성에 긍정적인 효과를 가져다준다. 시간에 따른 균열폭의 감소 원인



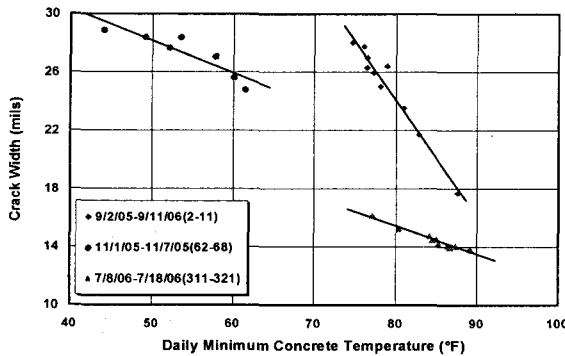
에 대해서는 현 단계에선 명확히 설명할 수 없으며, 현재 재료적 관점과 구조적 측면에서 지속적으로 연구 중이다.



(a) Austin section



(b) Cleveland Section



(c) Wichita Falls section



그림 4. Transverse crack in 36 year old CRCP

그림 3. Crack width variations over time

### 감사의글

본 연구를 가능케한 TxDOT과 Center for Transportation Research(CTR)- U.T at Austin 에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. ARA, Inc., ERES Division "Guide for Mechanistic-Empirical Design of New and Rehabilitated Pavement Structures," Final Report, March 2004 pp. Appendix LL
2. ACI Committee 209 Report No. ACI 209R-92 , Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures, ACI Manual of Concrete Practice 2004 Part 1, 24 pp.
3. Wicke, M., (Ed), Structural Concrete-Text Book, V. 1, Updated knowledge of the CEB/FIP model code 1990, Federation Internationale du Beton (FIP), Lausanne, 1999, 224 pp. CEB-FIP
4. S.A. Wells, B. M. Phillips, and J. M. Vandebossche, "Characterizing Strain Induced by Environmental Loads in Jointed Plain Concrete Pavements Immediately after Paving and throughout the First Ten Months," TRB 2006 Annual Meeting CD-ROM