



콘크리트포장의 줄눈의 잠김에 대한 연구

A Study for Joint Freezing in Concrete Pavement

이 승 우*

Lee, Seung Woo

Abstract

Joints in jointed concrete pavement are designed to control against randomly occurred cracks within slabs, which may be caused by temperature or moisture variation. The advantage of these artificial cracks (joints) over naturally occurred cracks are easy access of protections, such as installation of joint seal and load transfer mechanism. The potential benefits of joint seals are to prevent infiltration of surface water through the joint into underlying soil and intrusion of incompressible materials (debris, fine size aggregate) in to the joint, which may prevent weakening of underlying soils and spallings due to excessive compressive stress, respectively. For the adequate design of joint seal, horizontal variation of joint widths (horizontal joint movements) are essential inputs. Based on long-term in-situ joint movement data of sixteen jointed concrete pavement sections in Long Term Performance Pavement Seasonal Monitoring Program (LTPP SMP), it was indicated that considerable portion of joints showed no horizontal movements with change in temperature. This phenomenon is called "Joint Freezing". Possible cause for joint freezing is that designed penetrated cracks do not occur at a joint. In this study, a model for the prediction of the ratio of freezing joints in a particular pavement sections is proposed. In addition, possible effects of joint freezing against pavement performance are addressed.

Keyword: Jointed Concrete Pavement, Joint Seal, Joint Freezing

요 지

줄눈콘크리트포장의 줄눈은 온도 및 습도변화에 기인하여 발생하는 슬래브내에 무작위하게 발생하는 균열을 제어할 목적으로 설계된다. 이러한 인위적인 균열(줄눈)은 자연발생적인 균열에 비하여 줄눈채움, 하중전달장치등의 보호대책을 강구하는 것이 용이하다는 장점을 가지고 있다. 줄눈채움의 잠재적인 이점은 표면수의 하부층으로의 침투로 인한 하부층의 약화 및 비압축성 물질(작은 입자위 골재)의 줄눈내에 끼어듦으로 인한 스프링클링을 방지하는데 있다. 합리적인 줄눈 채움의 설계를 위해서는 줄눈폭의 변화(줄눈의 수평 움직임)의 산정이 중요한 입력요소이다. LTPP SMP 연구에 포함된 16개의 줄눈콘크리트포장의 줄눈의 수평움직임에 대한 장기 현장계측자료를 토대로 상당수의 줄눈에서 수평움직임을 허용하지 않고 있다는 것이 밝혀진바 있다. 이러한 현상을 줄눈잠김이라고 한다. 줄눈잠김이 발생하는 원인은 설계상에 계획된 줄눈부의 균열이 발생하지 않기 때문이라고 추정된다. 본 연구에서는 임의의 줄눈콘크리트포장에서 줄눈잠김의 비율을 예측할 수 있는 모델을 제시하였고 줄눈 잠김이 포장체의 성능에 미치는 영향을 조사하였다.

핵심용어: 줄눈콘크리트포장, 줄눈채움재, 줄눈잠김

* 정회원 · (주)대우건설 차장, 공학박사



1. 서론

줄눈콘크리트포장에서 줄눈폭의 변화는 줄눈에 인접한 슬래브의 수평변형의 결과이다. 온도 및 습도 변화에 따른 포장 슬래브의 체적변화로 인하여 발생하는 슬래브의 수평변형은 슬래브와 하부층사이 마찰력을 유발하고 마찰저항은 슬래브의 수평변위를 일부 구속한다. American Associate of State Highway and Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986 (1986), Federal Highway Administration, FHWA Concrete Pavement Design Manual (1992), 한국도로공사 도로설계요령 (1992)에서는 마찰저항이 수평변위를 구속하는 효과를 고려하기 위하여, 줄눈폭의 변화량을 마찰저항에 의한 구속이 없는 조건에서의 슬래브의 수평변위에 보정계수 C를 곱하여 산정하고 있다. 보정계수 C는 안정처리층에 대해서는 0.65, 입상재료층에 대해서는 0.80을 적용하고 있다. Lee (2000)의 마찰저항을 받는 슬래브의 거동에 대한 역학적 모델링연구의 결과는 보정계수 C가 보조기층의 재료특성뿐 아니라 슬래브의 길이, 온도변화량의 크기에 상당한 영향을 받고 있음을 보여주었다.

줄눈폭 변화량 산정식들의 적용성을 검토하기 위해서 Lee 등 (2001)은 Long Term Performance Pavement Seasonal Monitoring Program (LTPP SMP)의 일환으로 계측된 줄눈폭의 변화량 데이터를 분석하였다. 분석결과 슬래브내의 상당한 온도변화에도 불구하고 줄눈폭의 변화량이 없는 줄눈이 약 30%에 달한다는 것을 발견하였다. 본 연구에서는 이러한 줄눈잠김이 포장체의 성능에 미치는 영향에 대하여 조사하였고, 임의 줄눈콘크리트포장에서의 줄눈잠김 빈도를 예측할 수 있는 모델을 제시하였다.

2. LTPP SMP 연구에서의 줄눈의 수평움직임에 대한 계측

Minkarah 등 (1982), Bodocsi 등 (1993) 및 Morian (1999)등이 현장계측을 토대로 줄눈폭의 변화량에 대한 영향인자에 대한 조사를 시도하였으나, 계측구간수의 적음, 데이터분석 기술의 미비 등으로 줄눈폭 변화량에 미치는 영향인자를 제한적으로만 확인 할 수 있었다. 또한 줄눈폭 변화량과 포장 슬래브내 온도변화간의 명확한 선형관계를 구할 수 없었다. Lee 등 (2001)은 줄눈잠김, 줄눈폭 단합, 동일포장 구역내에서의 각 줄눈 변화량의 상이함등을 고려한 줄눈폭 변화량 계측 자료의 체계적인 분석방법을 제시하였고 제시된 방법을 이용하여 LTPP SMP 데이터를 분석하여 계측된 줄눈폭 변화량과 포장슬래브내 온도변화간의 명확한 선형관계를 구할 수 있었다. LTPP SMP 줄눈변화량 데이터는 미국 및 캐나다 15개 주에 분포된 16개 줄눈콘크리트포장구간에서 90개의 줄눈에 대해서 3 - 5년간, 8 - 56회에 걸쳐서 줄눈폭의 변화량 및 계측시의 슬래브내의 온도측정 결과를 동시를 포함하고 있다. 이 연구에 포함된 포장구간은 표 1과 같이 다양한 기후조건 및 설계조건을 갖추고 있다.

3. 줄눈잠김현상

줄눈 콘크리트포장체의 가로수축 줄눈은 일반적으로 포장두께에 일반적으로 25%정도를 절단 또는 스트립의 삽입으로 설치한다. 따라서 줄눈부는 역학적으로는 약화단면 (Weakened Section)이고, 줄눈부에서 초기 건조수축 및 온도변화에 의하여 발생하는 슬래브내 인장응력에 의해 균열이 줄눈부 약화단면을 관통하는 것이 설계개념이다. 임의의 줄눈에서 균열이 슬래브를 관통하지 못하면 (줄눈잠김), 줄눈부에서 불연속성을 확보하지 못하기 때문에 줄눈폭이 변하지 않으며 실제 슬



표 1. LTPP SMP 줄눈폭 변화량 데이터 측정구간의 계측, 설계, 기후, 재료, 교통하중

포장구역	LTPP ID No.	완공 시기	계측	단면	줄눈	기후	계측사까지의 누적교통량
Arizona	040215	93/10	95/09 - 98/11 (6/18)	JPCP (28.7) Crushed Gravel (15.5) Silty Sand & Gravel	4.57 RD 3.18	44.0 232.0 0.0	5540
California	063042	79/06	95/06 - 98/11 (6/23)	JPCP (22.4) Cemented Agg.+Agg. (11.4+14.8) Fine Grained Soil	4.72 Agg. -	43.0 470.0 0.2	28600
Georgia	133019	81/12	96/01 - 98/04 (6/20)	JPCP (23.1) Crushed Stone (18.3) Silty Sand with Gravel	6.10 RD 6.99	49.0 1387.4 16.8	3340
Kansas	204054	85/10	96/02 - 98/11 (6/8)	JRCP (24.1) Econcrete (8.6) Inorganic Clay	9.15 RD 6.35	61.0 819.4 144.6	6250
Indiana	183002	78/04	93/10 - 98/08 (6/24)	JPCP (24.1) Crushed Stone (15.0) Sandy Clay	4.72 RD 4.45	60.4 416.0 679.0	4100
Minnesota	274040	79/10	93/10 - 97/08 (6/43)	JRCP (20.5) Uncrashed Gravel (15.2) Lean Clay with Sand	8.23 RD 5.08	69.8 714.1 754.8	2820
Nebraska	313018	85/05	96/03 - 98/11 (6/9)	JPCP (30.2) Soil Cement (14.2) Poorly-Graded Sand	4.72 Agg. 1.27	65.4 639.5 171.5	10840
New York	364018	74/06	94/03 - 97/10 (5/36)	JRCP (23.8) None Geavel with Sand	19.38 RD 5.08	61.2 1089.9 326.8	28460
North Carolina	370201	94/07	96/03 - 98/11 (6/24)	JPCP (22.9) Crushed Stone(16.8)+LimeTreated(20) Clay	4.57 RD 3.18	57.6 1150.8 1.4	3780
Pennsylvania	421606	77/09	94/03 - 98/10 (5/30)	JRCP (25.1) Crushed Gravel (19.8) Lean Clay with Sand	14.18 RD 6.35	55.5 994.9 198.1	2700
Texas	484142	76/09	95/05 - 96/10 (5/26)	JRCP (24.4) Asphalt Treated Sand (19.3) Clay with Sand	6.10 RD 3.18	46.1 1552.9 5.2	2200
Texas	484143	70/10	95/11 - 97/11 (5/30)	JRCP (26.4) Cement Aggregate Mixture (21.1) Lean Organic Clay	18.45 RD 3.18	46.1 1499.8 2.0	2830
Utah	493011	80/03	93/11 - 97/09 (6/56)	JPCP (25.9) Cement Aggregate Mix (18.3) Clay+Gravel+Sand	4.57 Agg. 3.18	61.0 422.0 145.4	9760
Washington	533813	66/08	95/07 - 96/08 (6/14)	JPCP (19.8) Crushed Stone (6.1) Clay with Sand	4.57 Agg. 3.97	45.8 1215.8 14.3	3840
Manitoba	833802	85/09	93/11 - 97/10 (6/39)	JPCP (24.9) None Sandy Clay	4.57 Agg. 6.99	73.8 529.8 1043.2	3160
Quebec	893015	85/04	93/11 - 97/11 (5/20)	JPCP (20.9) Crushed Stone (33.8) Poorly Graded Sand	6.09 RD 1.98	67.1 1051.6 687.4	4720
비고		년/월	계측기간 (계측 위치/횟수)	포장종류 (두께 cm) 보조기층 (두께 cm) 노상토	간격 (m) 하중전달장 치깊이 (mm)	연간온도변화량 (°C) 연강우량 (mm) 동결지수 (°C-Day)	KESAL



래브의 길이가 줄눈 간격 (설계된 슬래브 길이) 보다 길게되어 인접줄눈 혹은 슬래브내 균열이 과도한 벌어짐을 보일 수 있고, 또한 보조기층의 마찰저항 및 슬래브 상하부 온도차에 의해 발생하는 인장응력이 과대하게 발생할 수 있다.

Collins 등 (1986)은 줄눈콘크리트포장의 줄눈부의 균열이 동시에 관통되지 않을 뿐 아니라, 상당수의 줄눈부에서는 균열이 관통되지 않을 수 있다고 추정하였다. Zollinger 등(1994)은 Texas주의 Texakana의 6개 포장구간에 대하여 줄눈부의 균열관통을 설치후부터 8개월간 관측하였다. 설치 2개월후에는 10 - 30 %, 4개월후는 10 - 70 %, 8개월 후는 40 -100 %의 줄눈에서 관통균열이 관측 되었다. Lee 등 (2001)은 줄눈폭 변화량 데이터를 이용한 비관통 줄눈부의 판별방법을 줄눈폭변화와 온도변화의 상관관계를 기준으로 제시하였고, 제시된 판별방법을 토대로 분석하여 2년이상된 줄눈 콘크리트 포장에서는 줄눈부의 균열관통비율이 증가하지 않고, 또한 상당수의 줄눈

부에 균열이 관통되지 못했다는 것을 보였다. 그림 1의 Joint 133과 그림 2의 Joint 127은 인접한 줄눈으로 온도변화에 상이한 반응을 보이고 있다. Joint 133의 경우 줄눈폭 변화량이 온도변화와 선형관계를 보이는 반면, Joint 127 은 온도변화와 상관관계를 보이지 않고 있으며 Joint 127에서 줄눈잠김현상이 발생한다고 추정할 수 있다. Lee 등 (2001)의 LTPP SMP에 대한 줄눈폭 변화량 연구를 토대로한 각 포장구간에 대한 줄눈잠김빈도는 표 2에 정리되어 있다.

Best Subset Model을 이용하여 줄눈포장형식 (JCP, JRCP), 보조기층 종류, 줄눈부의 하중전달장치 (LTE) 방법, 동결지수, 연중강우량, 시멘트 종류, 포장체의 재령, 슬래브 두께, 줄눈 간격, 줄눈 설치깊이등 콘크리트줄눈의 잠김현상에 미칠 수 있는 요인들이 표 2에 관측된 포장구역별 줄눈잠김 빈도에 미치는 영향을 분석한 결과, 포장 형식 및 줄눈 깊이와 슬래브 두께의 비율이 중요한 인자로 판명되었다. 줄눈 설치시기, 양생

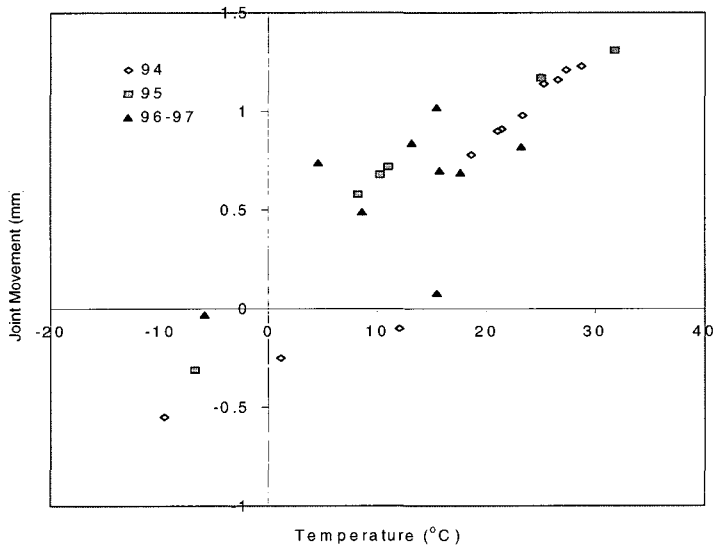


그림 1. 균열이 관통된 경우의 줄눈폭과 슬래브내 온도와의 상관관계
LTPP Section No. 484142, Joint 133
(+ Movement: 줄눈단침 방향, - Movement: 줄눈벌어짐 방향)



표 2. LTPP SMP의 줄눈 콘크리트 포장에서의
줄눈잠김

포장구역	LTPP ID No.	계측된 줄눈수	잠김줄눈 수
Arizona	040215	6	6
California	063042	5	5
Georgia	133019	6	1
Kansas	204054	6	0
Indiana	183002	6	0
Minnesota	274040	6	0
Nebraska	313018	6	0
New York	364018	5	0
North Carolina	370201	6	1
Pennsylvania	421606	5	0
Texas	484142	5	2
Texas	484143	5	1
Utah	493011	6	5
Washington	533813	6	6
Manitoba	833802	6	1
Quebec	893015	5	0

시의 기후는 미국 Federal Highway Administration (FHWA)에서 주관하는 High Performance Pavement (HIPERPAV) 연구결과에서 지적되었듯이 줄눈부의 인위적인 균열형성에 중요한 인자이다 (Foster, 1992). 그러나 LTPP SMP 포장구간의 줄눈 설치시기, 콘크리트 초기강도 발현에 대한 정보는 구할 수 없기 때문에 이 인자들이 줄눈잠김에 미치는 영향을 본 연구에서는 고려할 수 없었다. 줄눈 잠김빈도에 대한 모델형식은 대수회기분석모델(Logarithmic Regression Model)을 선택하였다. 대수회기분석모델은 예측치와 영향인자간의 비선형 상관관계를 고려할 수 있고 예측결과가 항상 0 이상 1이하로 제한시킬 수 있기 때문에 빈도예측 모델로서 적합하다. 16개의 LTPP SMP 연구 포장구간에서 측정된 줄눈 잠김빈도와 포장형식 및 줄눈 설치 깊이와 슬래브 두께의 비율을 이용하여 다음과 같은 상관관계를 제시할 수 있다.

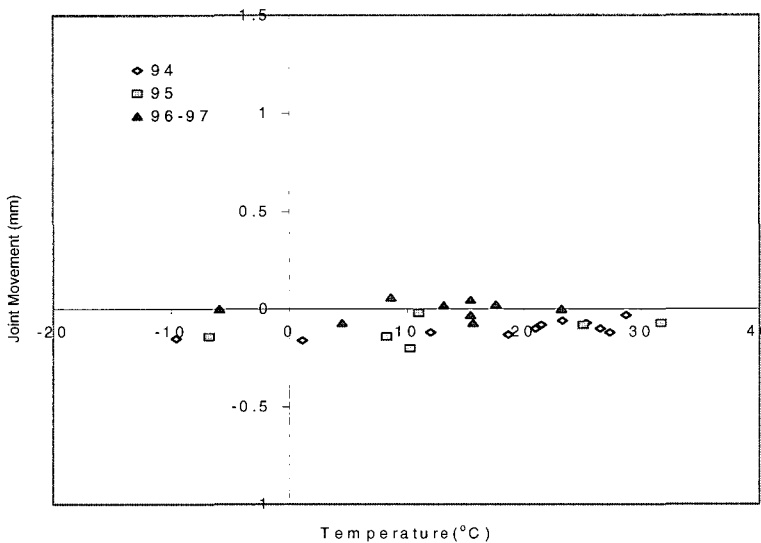


그림 2. 균열이 관통 안된 경우의 줄눈폭과 슬래브내 온도와의 상관관계
LTPP Section No. 484142, Joint 127
(+ Movement: 줄눈달힘 방향, - Movement: 줄눈벌어짐 방향)



$$\text{줄눈잠김비} = e^{\frac{(3.248-3.146*PT-14.104*JD/Th)}{[1+e^{(3.248-3.146*PT-14.104*JD/Th)}]}} \quad (1)$$

여기서 줄눈잠김비는 줄눈잠김이 발생한 줄눈의 빈도이고, PT는 JCP의 경우는 0, JRCP의 경우는 1, JD는 줄눈재 채움부 깊이, Th는 슬래브 두께이다. 줄눈잠김비는 JRCP 보다 JCP에서 높게 나타나는데 이는 JRCP의 경우 슬래브내 횡방향균열이 발생한 후에도 보강 철근의 작용으로 균열부에서 슬래브의 역학적 연속성을 유지시키기 때문에 줄눈부에서 균열을 야기시킬 수 있는 인장응력이 일어날 확률이 높은 반면, JCP의 경우 줄눈 인접 슬래브내에 횡방향 균열이 발생하면 줄눈부에 인접한 슬래브의 에서 균열을 일으킬만한 충분한 인장응력이 발생하지 않을 수 있기 때문인 것으로 판단된다. 식 (1)의 개발에 이용된 LTPP SMP 포장지역은 줄눈잠김 관측시기의 재령이 일년이상 되기 때문에 그 적용성이 포장 재령이 일년 이상 되는 경우로 제한되는데, 줄눈

잠김비율은 포장의 재령이 일년 이상 되는 경우에는 포장재령에 영향을 받지 않는 것으로 분석되었다. 본 연구에서는 검토되지 못 했지만 포장 재령 1년 전의 시기에는 포장재령은 줄눈잠김비에 영향을 미치는 주요한 인자일 것으로 판단된다.

그림 3에서 보이듯이 Eq (1)의 결과와 실측치의 차이는 0에서 20%로 보이고 있다 단 줄눈잠김비의 관측치가 0인데 비하여 예측치가 0.94인 이상치 (Outlier) 를 한 점 볼 수 있는데, 이 포장구역은 (LTPP Section No. 13018) 미국 Nebraska내에 위치하고 있다. 이 지역 포장관리자에게 줄눈 설치시 이중단면줄눈설치 (Over Sawcut)를 수행한 것을 확인하였다. 이중단면줄눈의 경우줄눈재 채움부의 깊이보다 절단깊이가 깊는데 Section No. 13018의 경우 절단깊이 (Over Sawcut 깊이)가 기록되어 있지 않아서 줄눈재 채움부 깊이가 예측에 이용되었다. 따라서 Section No. 13018에서의 예측치와 관측치의 큰 차이는 절단깊이(Sawcut)와 줄눈재 채움부의 깊이의 차이로 인하여 나타난 것으로 추정된다.

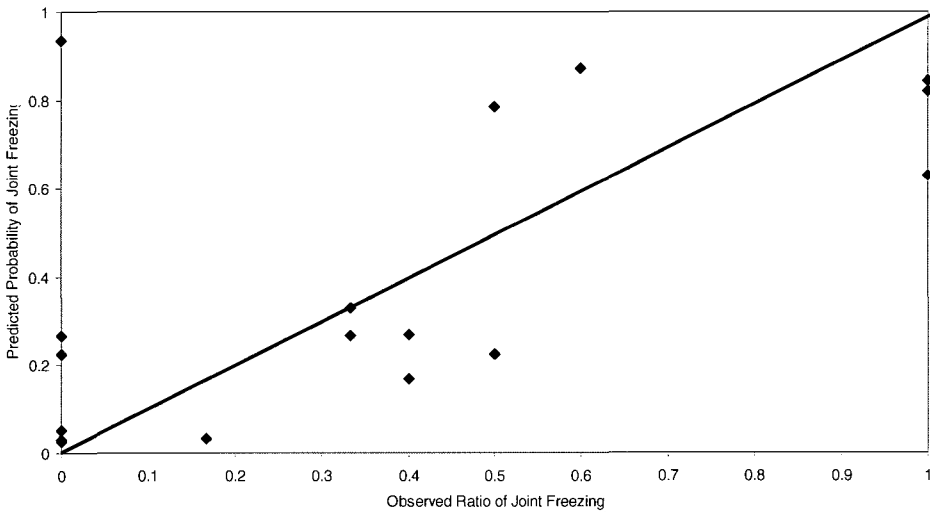
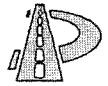


그림 3. 측정된 줄눈잠김비와 예측된 줄눈잠김비의 비교



4. 줄눈잠김이 포장체에 미치는 영향

제한적이고 정성적이지만, 줄눈잠김현상 발생에 대하여서는 Collins 등 (1986), Zollinger 등 (1994), Foster (1998) 등이 문제점을 제기한 바 있으나, 줄눈잠김이 포장체에 미치는 영향에 대하여서는 체계적인 연구결과가 제시되지 않고 있다. 줄눈잠김으로 인하여 슬래브의 역학적 길이가 길어짐이 포장체에 미칠 수 있는 사항은 잠김 줄눈의 인접한 줄눈에서의 과도한 줄눈폭 변화량으로 인한 줄눈채움재의 조기파손, 슬래브와 하부층과의 마찰저항 및 슬래브 상하 온도차에 의한 인장응력의 과대 발생이 있다.

4.1 줄눈폭 변화량

AASHTO 86 Guide (AASHTO, 1986) 등 현재 일반적으로 사용되고 있는 설계법에서는 줄눈폭 변화량을 산정시 다음 식을 이용하고 있다.

$$\text{줄눈폭 변화량} = C \cdot (\alpha \cdot \Delta_T + Z) \cdot JS \quad (2)$$

여기서 C는 보조기층과 슬래브 마찰저항에 대한 보정계수 (안정처리한 보조기층에 대해서 0.65, 입상재료층은 0.80), α 는 콘크리트 슬래브의 열팽창계수 Δ_T 는 슬래브내 온도변화, Z는 콘크리트 슬래브의 건조수축계수, JS는 줄눈 간격이다.

Pobelete 등 (1988), Bdocsi 등 (1993)은 다수의 안정처리한 보조기층 및 입상재료층위에 설치된 줄눈 포장콘크리트의 줄눈 변화량에 대한 현장측정연구를 토대로 C값이 1.0에 근접하고 있음을 보였다. AASHTO 86 Guide 에서는 추천하고 있는 C값은 매우 제한적인 데이터 (4개의 줄눈포장콘크리트 구역)으로부터 구해진 값이기 때문에 (Darter and Barenberg, 1977) 다수의 구역에서 Pobelete 등 (1988), Bdocsi 등 (1993)의 연구결과

가 신뢰성이 있다고 사료된다. Lee (2000)는 보조기층에서 마찰 저항을 받는 콘크리트 슬래브의 수평변위에 대한 역학적 모델링 결과를 토대로 C 값은 보조기층 종류뿐 아니라 온도변화폭, 슬래브 길이의 영향을 받고, 온도변화폭이 30 °C 이상일 경우 일반적으로 사용되고 있는 입상재료 보조기층, 안정처리된 보조기층에서 모두 C 값이 1에 접근하고 있음을 보였다. 또한 재령이 1년이상 된 포장슬래브내에서는 추가적인 건조수축량이 미세하므로 재령 1년이상된 줄눈콘크리트 포장의 줄눈폭 변화량은 다음의 식으로 예측하는 것이 합리적이다.

$$\text{줄눈폭 변화량} = \alpha \cdot \Delta_T \cdot JS \quad (3)$$

줄눈채움재는 줄눈을 통한 우수의 하부층으로의 침수를 방지하고, 비압축성물질의 줄눈부에 침투로 인에 발생하는 스폐링등을 방지하는 기능을 갖고 있다. 이를 만족시키기 위해서는 줄눈채움재는 줄눈폭의 변화량만큼 파손없이 압축 및 신장될 수 있어야 한다. 설계시 고려된 줄눈폭의 변화량보다 과도하게 줄눈이 벌어 질 경우 줄눈채움재가 그 기능을 수행하지 못하고 조기 파손하여 하부층으로의 우수침투로 인한 포장구조성능의 저하 및 비압축성물질의 줄눈부 침투로 인한 스폐링의 발생등의 우려가 있다.

16개의 LTPP SMP 각각의 구간에서 5 - 6개의 연속된 줄눈에 대한 줄눈폭 변화량이 측정되었는데 동일 포장구간에서 줄눈폭 변화량은 상당한 차이를 보였다. 특히 관측된 90개의 줄눈부중 13개의 줄눈부에서 $1.5 \cdot \alpha \cdot \Delta_T \cdot L$ 보다 큰 줄눈폭 변화량을 보였고, 과도한 줄눈폭 변화량을 보인 13개의 줄눈부에 인접한 줄눈에서 줄눈잠김 현상을 확인 할 수 있었다 (Lee and Stoffels, 2001). LTPP SMP 포장구간에서 관측된 90개의 줄눈중 32개의 줄눈에서 줄눈잠김현상 (줄눈폭변화량이



표 3. 임의 줄눈에서 줄눈잠김 및 슬래브내 횡방향 균열에 의한 슬래브 길이의 변화

조건	임의줄눈에 인접한 한쌍의 슬래브 길이	임의줄눈에 인접한 한쌍의 슬래브 길이 합
Case 1: 임의 줄눈에 잠김현상 발생	(0, 0)	0
Case 2: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 양쪽 슬래브내에 균열이 발생	(0.5 JS, 0.5 JS)	JS
Case 3: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 슬래브중에 한쪽에만 균열이 발생하고, 반대 방향 인접 줄눈에는 잠김이 발생하지 않음	(0.5 JS, 1 JS) (1.5 JS, 0.5 JS)	1.5 JS
Case 4: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 양쪽 슬래브내에 균열이 발생하지 않고, 인접한 양쪽 줄눈에는 잠김이 발생하지 않음 (AASHTO Guide의 줄눈폭변화량 산정식에서 고려된 경우임)	(JS, JS)	2 JS
Case 5: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 슬래브중에 한쪽에만 균열이 발생하고, 반대 방향 인접 줄눈에는 잠김이 발생하고, 잠김줄눈에서 임의 줄눈에 대해 외곽쪽으로 인접한 슬래브내에 균열발생	(0.5 JS, 1.5 JS) (1.5 JS, 0.5 JS)	2 JS
Case 6: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 양쪽 슬래브내에 균열이 발생하지 않고, 인접한 한쪽 줄눈에만 잠김이 발생하고, 잠김줄눈에서 임의 줄눈에 대해 외곽쪽으로 인접한 슬래브내에 균열발생	(JS, 1.5 JS) (1.5 JS, JS)	2.5 JS
Case 7: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 슬래브중에 한쪽에만 균열이 발생하고, 반대 방향 인접 줄눈에는 잠김이 발생하지 않고, 반대 방향 인접 줄눈에 인접한 슬래브에 균열이 발생치 않고 그 인접 줄눈에 줄눈잠김이 발생하지 않음	(0.5 JS, 2 JS) (2 JS, 0.5 JS)	2.5 JS
Case 8: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 슬래브중에 한쪽에만 균열이 발생하고, 반대 방향 인접 줄눈에는 잠김이 발생하지 않고, 반대 방향 인접 줄눈에 인접한 슬래브에 균열이 발생치 않고 그 인접 줄눈에 줄눈잠김이 발생하고 그 인접한 슬래브에 균열이 발생	(0.5 JS, 2.5 JS) (2.5 JS, 0.5 JS)	3 JS
Case 9: 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 양쪽 슬래브내에 균열이 발생하지 않고, 인접한 한쪽 줄눈에만 잠김이 발생하고, 잠김줄눈에서 임의 줄눈에 대해 외곽쪽으로 인접한 슬래브내에 균열발생치 않고, 그 외곽줄눈에 받침이 발생치 않음	(JS, 2 JS) (2 JS, JS)	3 JS
Case 10 임의 줄눈에 설계된 균열이 발생하고, 인접한 양쪽 슬래브내에 균열이 발생하지 않고, 인접한 양쪽 줄눈에만 잠김이 발생하고, 잠김줄눈에서 임의 줄눈에 대해 외곽쪽으로 인접한 슬래브내에 균열발	(1.5 JS, 1.5 JS)	3 JS
Case 11 - Case N Case 1 -10의 조건산출 방식에 따라 확장	(0.5 JS, 3 JS) (3 JS, 0.5JS)	3.5 JS
	(JS, 2.5 JS) (2.5 JS, JS)	3.5 JS
	(1.5 JS 2 JS) (2 JS, 1.5 JS)	3.5 JS
	(0.5 JS, 3.5 JS) (3.5 JS, 0.5 JS)	4 JS
	(JS, 3 JS) (3 JS, JS)	4 JS
	(1.5 JS 2.5 JS) (2.5 JS, 1.5 JS)	4 JS
	(2 JS, 2 JS)	4 JS
	Case 1 -17의 조건산출 방식에 따라 확장	4.5 JS -

* 균열: 슬래브 두께를 관통한 횡방향균열이며 슬래브 중앙에 발생한다고 가정함.
* JS : 줄눈 간격



표 4. 슬래브의 역학적 길이변화에 따른 줄눈폭 변화량
(콘크리트 열팽창 계수 = 10^{-5} cm/cm/°C,
온도 변화량 = 50°C)

줄눈간격 (m)	표 3에서의 Case No.	인접한 한쌍의 슬래브의 역학적 길이의 합 (m)	줄눈폭 변화량 (mm)
6	1	0	0
	2	6	1.50
	3	9	2.25
	4, 5	12	3.00
	6, 7	15	3.75
	8, 9 10	18	4.50
	11, 12, 13	21	5.25
20	14, 15, 16, 17	24	6.00
	1	0	0
	2	20	5.00
	3	30	7.50
	4, 5	40	10.00
	6, 7	50	12.50
	8, 9 10	60	15.00
11, 12, 13	70	17.50	
14, 15, 16, 17	80	20.00	

없음)이 확인되었는데, 이 중 13개의 줄눈만이 인접 줄눈에 과도한 줄눈폭 변화량을 야기 시키는 유는 나머지 잠김현상이 일어난 줄눈과 인접줄눈 부사이의 슬래브내에서 발생한 횡방향 균열에서 슬래브의 횡방향변위를 횡방향 관통균열폭의 변화로 흡수하기때문으로 추정된다. 이러한 동일한 포장구간에서의 상이한 줄눈폭 변화량의 발생은 줄눈잠김 및 횡방향균열에 의한 슬래브의 역학적 길이의 변화 때문에 야기된다고 판단된다.

표 3은 임의의 포장구역내에서도 줄눈잠김 및 횡방향균열에 의한 슬래브의 역학적 길이의 변화에 따라서 줄눈폭 변화량이 각각의 줄눈마다 달라질 수 있음을 보이고 있다. 표 3의 Case 4의 경우가 AASHTO (1986)등에서 줄눈폭 변화량 산정시 고려하는 줄눈폭 변화에 영향을 미치는 슬래브의 길이이다. 그러나 슬래브내 사용중인 도로에서의 횡방향 균열 및 줄눈잠김은 임의 줄눈에 인접한 슬래브의 길이가 Case 4 와는 달리 표 4에서 보이는 다른 Case와 같이 될 수 있다.

Case 1의 경우는 줄눈변화폭이 없고 Case 2 는 Case 4 의 50%의 변화폭이, Case 5는 75%의 변화폭만이 예측된다. 반면에 Case 6 이상에서는 Case 4 보다 큰 줄눈변화폭이 예측된다. 각 Case 별 발생 빈도를 예측 할 수 있으면 동일 포장내 줄눈폭 변화량의 발생 빈도를 예측할 수 있기 때문에 합리적인 줄눈 및 줄눈채움재 설계에 유용한 자료로서 활용될 수 있다고 판단된다.

4.2 보조기층과 슬래브 마찰저항에 의한 인장응력

보조기층과 슬래브사이의 마찰저항에 의해 발생하는 인장응력은 다음과 같이 계산 할 수 있다. (Huang, 1993)

$$\sigma_{cf} = \gamma_c L_c f_a / 2 \quad (4)$$

여기서, σ_{cf} 는 슬래브내 중앙에서의 인장응력, γ_c 는 콘크리트 단위중량, L_c 는 슬래브의 길이 그리고 f_a 는 슬래브와 보조기층사이의 마찰 계수이다. 그림 3의 줄눈잠김 및 횡방향균열에 의

표 5. 줄눈 간격 6m JCP에서의 줄눈잠김 및 슬래브내 횡방향균열발생에 인하여 슬래브길이 변화에 따른 슬래브와 보조기층사이의 마찰력으로 유발된 슬래브내 인장응력 (콘크리트 단위중량=2.3 t/m², 보조기층: 시멘트 안정처리층 f=1.8)

표 3에서의 Case No.	슬래브의 역학적 최장길이 (m)	슬래브와 보조기층사이의 마찰력으로 유발된 슬래브내 인장응력 (kg/cm ²)
2	3	0.62
4	6	1.24
3, 5, 6, 10,	9	1.86
7, 9, 13, 17	12	2.48
8, 11, 16	15	3.11
12, 15,	18	3.72
14,	21	4.35
	24	4.97



표 6. 줄눈 간격 20m인 JRCP에서의 줄눈잠김 및
슬래브내 횡방향균열발생에 인하여
슬래브 길이 변화에 따른 슬래브와
보조기층사이의 마찰력으로 유발된 슬래브내 인장응력
(콘크리트 단위중량 = 2.3 t/m²
보조기층: 시멘트 안정처리층 f=1.8)

표 3에서의 Case No.	슬래브의 역학적 최장길이 (m)	슬래브와 보조기층사이의 마찰력으로 유발된 슬래브내 인장응력 (kg/cm ²)
2	10	2.25
4	20	4.50
3, 5, 6, 10,	30	6.75
7, 9, 13, 17	40	9.00
8, 11, 16	50	11.25
12, 15,	60	13.50
14,	70	15.75
	80	18.00

한슬래브길이의 변화에 따른 보조기층과 슬래브
사이의 마찰저항에 의해 발생하는 인장응력의 변
화는 표 5 및 6에 보이고 있다. 줄눈잠김에 의해
슬래브 길이가 길어짐에 비례하여 보조기층과 슬
래브사이의 마찰저항에 의해 발생하는 인장응력
은 커진다. 따라서 줄눈잠김에 의해 역학적인 슬
래브 길이가 길어진 경우 인장응력이 설계시 고
려된 크기보다 과도하게 발생하여 슬래브내 균열
이 조기에 발생할 수 있다.

4.3 슬래브 상하온도차에 의한 인장응력

유한길이의 슬래브에서 슬래브 상하온도차에
의한 슬래브내 최대 인장응력은 다음의 Wester-
gaard의 공식에 의해 산정 할 수 있다.

$$\sigma_{ct} = [E a_c \Delta_t (C_x + v C_y)] / 2(1 - v^2) \quad (5)$$

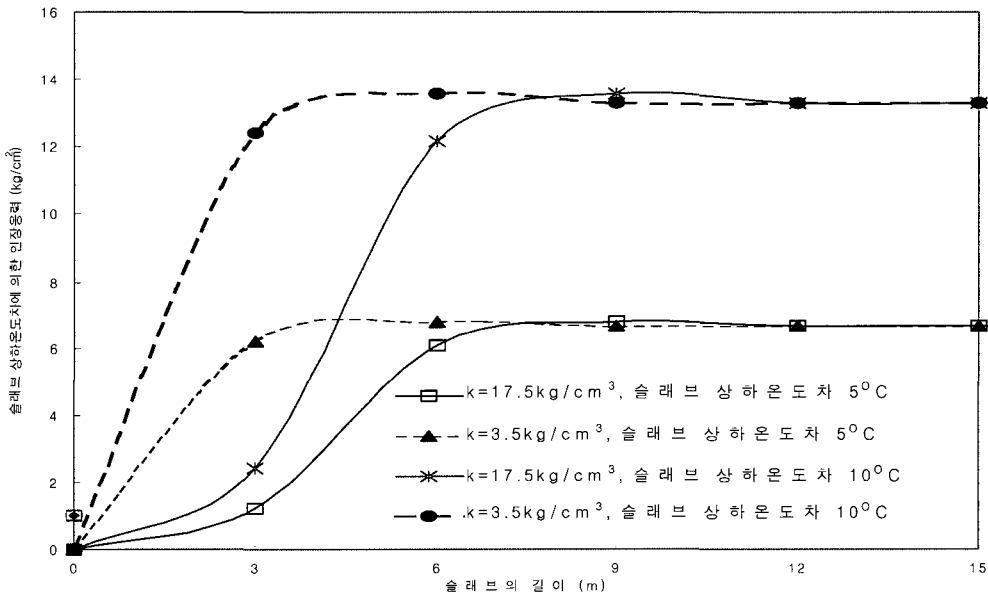


그림 4. 슬래브 상하온도차 및 슬래브길이 변화에 따른 인장응력크기의 변화
(콘크리트 탄성계수 = 250,000 kg/cm², 포아손비 = 0.15, 슬래브 두께 30 cm)



여기서 σ_c 는 슬래브 상하온도차에 의한 인장 응력, E 는 콘크리트 탄성계수, α 는 콘크리트 열 팽창계수, Δt 는 슬래브 상하온도차, v 는 콘크리트 포아손비 C_x 및 C_y 는 유한길이 슬래브에 대한 응력 보정계수이다.

줄눈잠김 및 횡방향균열에 의한 슬래브 길이의 변화에 따른 슬래브 상하온도차에 의한 인장응력의 변화는 그림 4와 같다.

연중 최고 슬래브 상하온도차는 지역별 기후조건, 포장두께조건마다 다르지만 $5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 가 일반적인 것으로 판단된다. 지반반력계수가 3.5 kg/cm^2 인 경우(노상지지 불량상태)는 슬래브의 길이가 길어짐에 따라 인장응력이 급속하게 증가하고 4m 이상의 경우에는 수렴함을 보이고 있다. 지반반력계수가 17.5 kg/cm^2 인 경우(노상지지 양호상태)는 슬래브의 길이가 길어짐에 따라 인장응력이 급속하게 증가하다가 6m 이상의 경우에는 수렴함을 보이고 있다. 일반적으로국내 고속도로 포장의 줄눈간격이 6~8m이다. 이 경우에는 줄눈잠김으로 슬래브의 역학적 길이가 증가하더라도 슬래브 상하온도차에 의한 슬래브 인장응력 발생크기는 크게 증가하지는 않을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 향후 연구사항

본 연구의 결론 및 향후 연구사항은 다음과 같다.

1. 재령 1년 이상된 줄눈콘크리트포장에서의 줄눈의 잠김의 빈도 예측식을 포장형식(JCP, JRCP), 슬래브의 두께와 줄눈깊이의 비율 등의 인자를 이용하여 제시되었다. 정보의 부재로 콘크리크양생시 온도 및 습도, 줄눈 절단시간 등은 줄눈 잠김빈도 예측식 개발에 고려하지 못하였지만 개발된 예측식의 결과는 관측치와 차이가 0%~20%이었다. 본 연구에서 고려하지 못한 콘

크리크양생시 온도 및 습도, 줄눈 절단시간등에 고려를 통해 보다 신뢰성 있는 예측이 가능 할 것으로 판단된다. LTPP SMP 구간에서의 다년간의 줄눈폭 변화의 다년간의 관측결과는 재령 1년 이상된 줄눈콘크리트포장에서의 줄눈의 잠김의 빈도는 포장재령의 영향을 받지 않음을 보이고 있다. 그러나 콘크리트 포장 설치후 초기에는 포장재령이줄눈의 잠김빈도에 주요한 영향을 미칠 수 있다고 생각된다.

2. 줄눈의 잠김현상은 줄눈의 과대한 벌어짐을 야기시킬 수 있다. 이러한 현상은 조사된 LTPP SMP 줄눈콘크리트포장 연구에서 수행된 90개의 줄눈부중 약 15%(각 포장구역별로 0~50%)의 줄눈에서 관측되었다. 반대로 과대한 벌어짐이 관측된 줄눈부의 인접 줄눈에서는 줄눈잠김이 100% 관측되었다. 이러한 과대한 벌어짐은 현재의 설계지침(AASHTO Guide 86, AASHTO, 1986), 도로설계요령(한국도로공사, 1992)에서 제시된 설계식으로는 고려할 수 없다. 줄눈의 잠김현상에 의해서 야기되는 줄눈의 과대한 벌어짐을 고려 할 수 있는 줄눈폭 변화량 산정방법의 개발이 합리적인 줄눈채움재 설계를 위해 요구된다.

3. 줄눈 잠김현상으로 슬래브의 역학적 길이가 설계된 슬래브 길이(줄눈간격)보다 길어지기 때문에 줄눈잠김현상이 일어난 줄눈의 인접 슬래브는 보조기층과의 마찰력에 의한 인장력이 설계치보다 과대하게 발생하여 슬래브내 균열의 조기발생을 초래 할 수 있다.

4. 위에서 언급한 동일 포장구간에서의 슬래브의 역학적 길이 변화에 따른 설계치보다 큰 인장응력 및 줄눈폭변화량의 발생등의 영향이 포장체에 성능에 미치는 영향을 보다 심도 있게 평가하기 위해서는 슬래브의 역학적 길이의 변화에 대한 빈도예측 모델이 필요하다.



감사의 글

본 논문은 한국과학기술부, 한국과학재단에서 지원한 첨단도로연구센터의 연구수행결과입니다.

참고문헌

1. 한국도로공사, 도로설계요령 제5권 포장, 1992
2. American Association of State Highway Transportation Officials, AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986, 1986.
3. Bodocsi A., Minkarah, I., and Rajagopal S. A., Analysis of Horizontal Movements of Joint and Cracks in Portland Cement Concrete Pavements, Transportation Research Record 1392, Transportation Research Board, p43-52, 1993.
4. Foster S., HIPERPAV: A User-Friendly Tool to Help Us Build IT Right Public Roads May/June, 1998.
5. Lee, S. W., Horizontal Joint Movements in Rigid Pavements, Ph.D. Thesis, Pennsylvania State University, 2000.
6. Lee, S. W. and Stoffels S. M., Analysis of In-Situ Joint Movement in Rigid Pavement , TRB 80th Annual Meeting, Transportation research Board, Washinton D.C., 2001
7. Minkarah, I., Cook, J. P., McDonough, J. F., and Jaghoory, S., Effect of Different Variables on Horizontal Movement on Concrete Pavement, ACI SP-70, p784-806, 1982.
8. Morian, D. A. and Stoffels S. M., Evaluation of Rigid Pavement Joint Seal Movement, Transportation Research Board 78th Annual Meeting, Washington D.C., 1999.
9. Zollinger, D. G., Tang, T. and Xin, D., Sawcut Depth Considerations for Jointed Concrete Pavement Based on Fracture Mechanics Analysis, Transportation Research Record No.1449, Transportation Research Board, p91-100, 1994.

(접수 : 2000. 11. 30.)