

## 콘크리트포장에서 하중전달효과 영향인자 연구

### A Study on Effect Factor of Load Transfer Efficiency in Concrete Pavement

양 홍 석\* · 서 영 찬\*\* · 권 수 안\*\*\*  
 Yang, Hong Suk · Suh, Young Chan · Kwon, Soo Ahn

#### Abstract

One of the most important factors accounting for the structural capacity of concrete pavement is load transfer efficiency. Load transfer efficiency is affected by slab temperature gradient, construction of dowel bars, degree of aging, and crack width. The purpose of this study is to determine the patterns of load transfer efficiency of concrete pavement; to determine the factors that affect the load transfer efficiency; and to present the proper measuring method of load transfer efficiency.

As a result from this study, load transfer efficiency was affected primarily by the average temperature in concrete slab. Load transfer efficiency decreased with decreasing temperature and increasing crack width. For the sections with dowel bars, there were little differences in load transfer efficiency regardless of temperature changes. For the sections without dowel bars, however, there were great losses of load transfer efficiency at low temperatures. For the old pavement, even in the sections with dowel bars, the load transfer efficiency reduced as the temperature dropped. For the sections in this study, 1.4% reduction of the load transfer efficiency was observed for each 1°C drop in the slab temperature.

**Keywords** : jointed concrete pavement, structural capacity, load transfer efficiency temperature variation

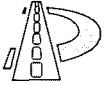
#### 요 지

콘크리트포장의 구조적 능력을 평가하는 가장 중요한 요소 중의 하나는 하중전달효과이다. 하중전달 효과는 슬래브 상·하부 온도차, 다우웰바 시공여부, 포장 노후도 그리고 균열틈 등에 영향을 받는다. 본 연구의 목적은 콘크리트 포장의 하중전달효과 특성을 파악하고 하중전달효과에 영향을 주는 요소를 정량화하고 적절한 하중전달효과 조사방법을 제시하는 것이다.

연구결과 하중전달효과는 슬래브 표면온도가 아닌 슬래브 평균온도 영향을 받는 것으로 나타났다. 하중전달효과는 온도가 내려가고, 균열틈이 벌어질수록 감소하는 것으로 나타났다. 다우웰바를 시공한 구간인 경우 온도변화에 따라 하중전달효과는 큰 차이를 보이지 않은 반면, 다우웰바를 시공하지 않은 구간에서는 온도가 내려갈수록 하중전달효과는 급격히 감소하였다. 다우웰바를 시공한 구간이라도 포장이 노후화되면 하중전달효과는 온도가 하락함에 따라 감소하는 것으로 나타났다. 본 조사대상 구간에서는 슬래브 단위온도 하락시 하중전달효과는 1.4% 감소하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 무근 콘크리트포장, 구조적 지지력, 하중전달효과, 온도변화

\* 정희원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 연구원  
 \*\* 정희원 · 한양대학교 교통공학과 부교수  
 \*\*\* 정희원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 선임연구원



# 1. 서 론

국내 콘크리트 포장의 연장은 88고속도로 개통을 시작으로 매년 꾸준한 증가 추세를 보이고 있다. 이런 증가 추세는 콘크리트 포장 효용성 증가와 더불어 2004년 고속도로 콘크리트 포장 연장 3,500km를 목표로 신설 고속도로는 대부분 콘크리트 포장으로 시공됨을 감안할 때 더욱 빠르게 증가할 것이다.

하중전달효과(load transfer efficiency)는 콘크리트 포장의 구조적 능력을 평가하는 중요한 요소 중 하나이다. 하중전달효과는 줄눈 양쪽의 슬래브 처짐량(deflection) 비로 결정되는데 하중전달효과가 상실된 줄눈에서는 차량 통행으로 인한 하중 발생시 줄눈 양쪽 슬래브의 처짐량 차이가 커지게 되어 한쪽 슬래브에만 콘크리트 응력이 과다하게 부하됨으로써 콘크리트 파손을 촉진시킬 뿐 아니라 펌핑(pumping)이나 단차(faulting)의 주요 원인이 되어 콘크리트 포장의 수명을 단축시킨다.<sup>(1)</sup>

하중전달효과는 슬래브 온도변화 및 상·하부 온도차, 다우월바 시공여부, 포장 노후화, 균열틈에 따른 골재 맞물림 파손 정도 등에 영향을 받는다. 그러나 현행 FWD(falling weight deflectometer)를 이용하여 하중전달효과 측정시에 이런 영향요소를 고려하지 않고 슬래브 표면온도만을 측정하여 하중전달효과 분석의 기준으로 삼고 있다. 또한, AASHTO 덧씌우기 설계법에서도 26.7°C(80°F) 미만에서 측정된 하중전달효과에 대해서는 아무런 보정 없이 사용하고 있다.<sup>(2)</sup>

따라서, 본 연구에서는 하중전달효과에 영향을 미치는 인자 중에서 슬래브 상 하부 온도차, 다우월바 시공여부, 포장 노후도, 균열틈(본 연구에서 균열이라함은 줄눈부에 설계된 균열을 의미)의 영향에 대해 분석·정량화 하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 국내 콘크리트 슬래브 온도변화 패턴을 조사하여 하중전달효과 측정 최적 시

기를 제시하였고, 하중전달효과에 영향을 미치는 온도가 슬래브 표면온도가 아닌 콘크리트 슬래브 평균온도임을 확인하였다. 또한, 본 연구 범위 내에서 표면온도와 대기온도를 이용하여 조사 계절별, 조사 시간대별 콘크리트 슬래브 평균온도 추정식을 제시하였으며 다우월바 시공여부 및 포장 노후화에 따른 온도 변화와 하중전달효과의 관계를 정량화 하였고, 균열틈과 하중전달효과와의 관계도 제시하였다.

## 2. 현장조사

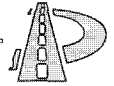
### 2.1 하중전달효과 조사

본 연구에서는 온도변화, 포장 노후도, 균열틈이 하중전달효과에 미치는 영향을 평가하기 위하여 봄, 여름, 겨울 세 차례에 걸쳐 다양한 온도조건에서 하중전달효과를 측정하였다. 조사대상 구간은 88 고속도로 지리산 IC 부근의 국내 최초로 콘크리트 덧씌우기가 시험시공 된 구간이며 신설 포장과 거의 동일한 비접착식 덧씌우기(UBCO : unbonded concrete overlay) 구간에서 조사하였다. 하중전달효과 세부일정은 표 1과 같다.

조사장비는 그림 1에서 보듯이 비파괴 포장상태 측정장비인 FWD를 사용하여 주행차선 바깥쪽

표 1. 하중전달효과 조사 일정

조사 분류	조사 일시	조사 빈도	조사 간격	비 고
1차조사	'97. 4. 23	1회	슬래브 3개 간격	조사계절 봄, 가을 대표
2차조사	'97. 7. 8	2회	슬래브 3개 간격	조사계절 여름 대표
3차조사	'97.10.16, '97.10.17	4회	슬래브 전구간	조사일자는 가을이나 조사시 온도가 겨울 온도와 유사하여 조사계절을 겨울로 취급



(a) FWD 장비

측대		
추월선		
주행선	조사위치 → ×	.....
노면		줄눈부

(b) 하중전달효과 조사위치

그림 1. 하중전달효과 조사

바퀴 통과지점(Outer wheel path)에서 실시하였다.

본 연구에서 하중전달효과는 그림 2와 같이 줄눈부에 하중을 재하하여 식(1)과 같이 양쪽 슬래브의 처짐량의 비에 의해 계산되는 AASHTO 방식(2)을 적용하여 산출하였다. 본 조사대상 구간 중 일부 구간에서 하중전달효과가 100% 이상으로 나타났다. 이것은 양쪽 슬래브의 처짐량 차이가 적어서 하중전달효율이 높은 구간에 슬래브 기울임 보정계수(B) 값이(일반적으로 1.05~1.15 적용) 곱해져서 나타난 것으로 판단되며 이러한 구간의 경우 하중전달효과는 100%로 환산하여 분석하였다.

$$\Delta LT = 100 \times \left( \frac{\Delta_{ul}}{\Delta_l} \right) \times B \quad (1)$$

여기서,  $\Delta LT$  : 하중전달에 따른 처짐비, %

$\Delta_{ul}$  : 하중이 재하되지 않은 쪽의 처짐량, inch

$\Delta_l$  : 하중이 재하된 쪽의 처짐량, inch

B : 측정에 따른 슬래브 기울임 보정계수 (slab bending correction factor)

$$B = \frac{d_{0center}}{d_{12center}}$$

여기서,  $d_{0center}$  = 슬래브중앙에서 하중재하 지점의 처짐량

$d_{12center}$  = 슬래브중앙에서 하중재하 지점에서 12inch 떨어진 지점의 처짐량

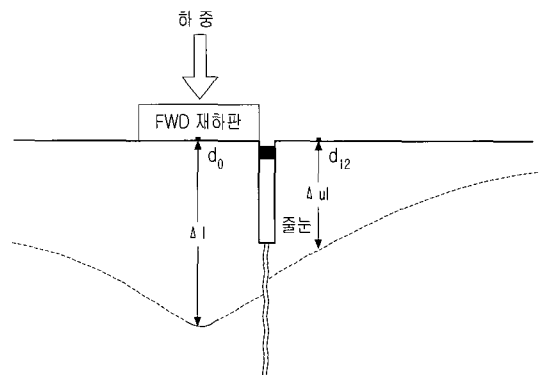
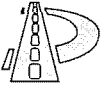


그림 2. 하중전달효과 측정방법

## 2.2 줄눈틈 거동 조사

줄눈틈 거동과 하중전달효과와의 관계를 알아보기 위해 하중전달효과 조사와 병행하여 줄눈틈 거동조사를 실시하였다. 줄눈틈 거동이라 함은 줄눈의 벌어진 정도를 의미한다.



줄눈틈 거동 조사는 줄눈 부위에 Demec Locating Disc를 설치하고 Demec Gauge를 이용하여 조사하였다.

### 2.3 콘크리트 슬래브 시험시공 및 내부 온도 조사

국내 콘크리트 슬래브 깊이별 온도변화 패턴을 알아보기 위해 그림 3과 같이 온도계(thermocouple)를 매설한 콘크리트 슬래브(3×3×0.3m)를 시공하였다.

온도계를 슬래브 표면에서 2cm 떨어진 곳을 기준으로 6.5cm 간격으로 매설하여 겨울, 봄, 여름 각각 3일 동안 1일 11회 조사를 기준으로 슬래브 깊이별 온도변화 패턴을 조사하였다. 콘크리트 슬래브 내부온도 조사 일정은 표 2와 같다.

표 2. 콘크리트 슬래브 내부온도 조사 일정

조사계절	조사 일시	조사 빈도
겨울	1998. 2. 24 ~ 26	11회/일 기준으로 3일 연속 조사
봄	1998. 4. 28 ~ 30	
여름	1998. 8. 18 ~ 20	

### 3. 국내 콘크리트 슬래브 온도 변화 패턴

본 연구에서 조사된 국내 콘크리트 슬래브의

깊이별 시간대별 온도변화 패턴은 그림 4와 같으며 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 슬래브 상부로 갈수록 대기온도에 민감하게 변화하여 대기온도와 비슷한 변화패턴을 보였다.

둘째, 대기온도, 슬래브 표면온도 모두 05~06시에 최저 온도, 13~14시에 최고 온도를 기록했다.

셋째, 일교차가 크고 온도가 높을수록 슬래브 상·하부의 온도차(temperature gradient)는 커진다.

넷째, 20시부터 익일 07시 사이에는 슬래브 상부의 온도가 하부의 온도보다 낮았으며 09시에서 17시 사이에는 슬래브 상부의 온도가 하부의 온도보다 높게 나타났다. 즉, 슬래브가 냉각되는 감온시간(cooling time)은 20시부터 익일 07시까지이고 슬래브가 가열되는 가온시간(heating time)은 09시에서 17시까지이다.

다섯째, 08~09, 18~19시 사이에는 사계절 모두 슬래브 깊이에 상관없이 비슷한 온도를 보였다.

본 연구에서는 국내 콘크리트 슬래브의 온도변화 패턴과 미국에서 조사된 슬래브 온도변화 패턴을 비교하였다. 표 3은 미국 플로리다주 교통국에서 1983년부터 1986년까지 콘크리트 온도변화 패턴 중 무작위로 230일을 선정하여 통계 분석한 결과이다(3). 비교 결과 대기온도, 슬래브 온도

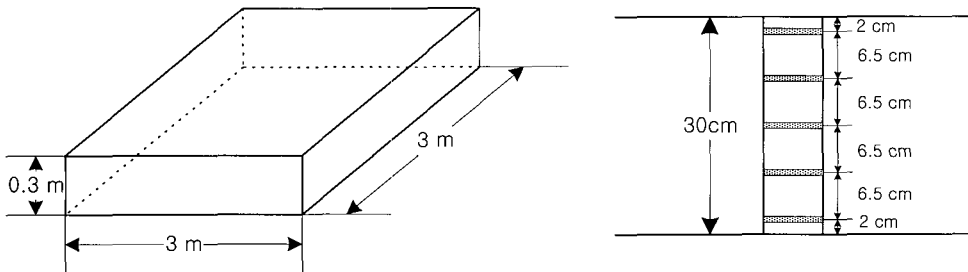
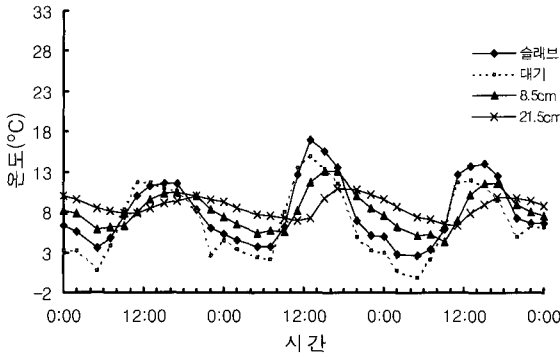
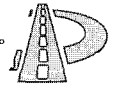
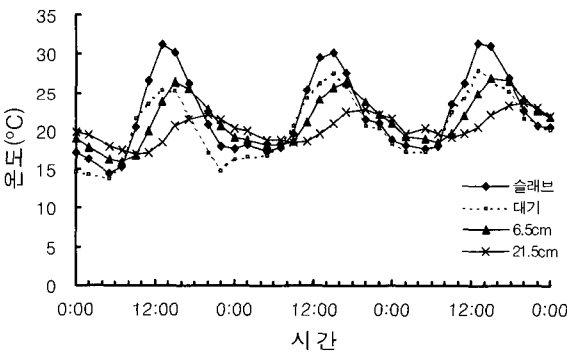


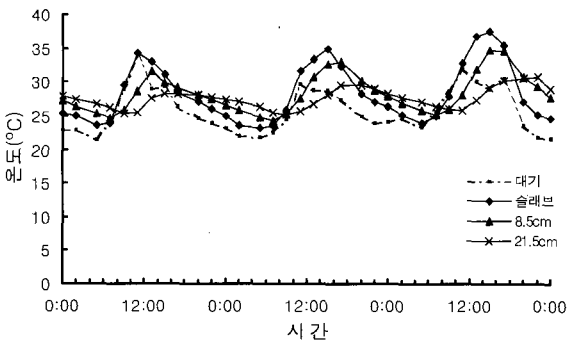
그림 3. 온도계(Thermocouple) 매설 위치



(a) 겨울



(b) 봄, 가을



(c) 여름

그림 4. 국내 콘크리트 슬래브의 시간대별 온도변화 패턴

및 슬래브 상·하부의 온도차가 최대, 최소를 기록하는 시간이 국내와 거의 비슷함을 알 수 있었으며 그림 5에서 보여지는 24시간 동안의 슬래브 깊이별 온도변화 패턴도 국내와 거의 동일하게 09시, 18시 부근에서 슬래브 깊이에 상관없이 비슷한 온도를 나타냈다.

표 3. 콘크리트 내부온도(플로리다)

	최 소		최 대	
	시간	빈도(%)	시간	빈도(%)
대기 온도	5:00~7:00	64	12:00~14:00	36
슬래브 온도	6:00~8:00	81	13:00~15:00	68
상부>하부온도	-		5:00~7:00	54
상부<하부온도	-		12:00~15:00	67

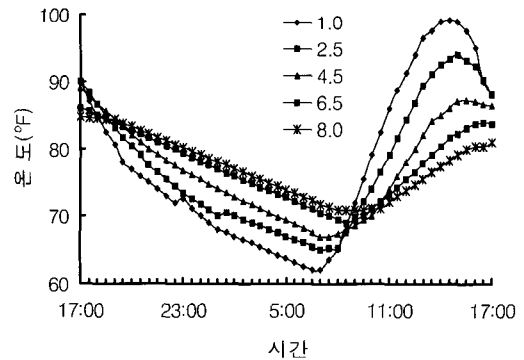
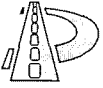


그림 5. 콘크리트 내부온도 변화(플로리다)

## 4. 하중전달효과 영향 요소

### 4.1 하중전달효과 분석시 기준 온도

콘크리트포장의 하중전달은 실제로 슬래브 표면으로부터 슬래브 두께의 1/3~1/2 지점에서 발생하기 때문에 하중전달효과는 슬래브 두께 1/3~1/2 지점의 균열틈에 영향을 받는다. 이런 균열틈은 슬래브 깊이별로 상이한 온도변화 패턴을 보이는 콘크리트 특성상 표면온도가 아닌 슬래브



두께 1/3~1/2 지점의 콘크리트 온도에 의해 형성된다. 본 연구에서는 전체 콘크리트 슬래브 평균 온도가 슬래브 두께의 1/3~1/2 지점에서 형성됨을 확인하였다. 따라서, 하중전달효과는 그림 6에서 보이는 슬래브 두께의 1/3~1/2 지점의 온도 즉, 콘크리트 슬래브 평균온도에 영향을 받게된다.

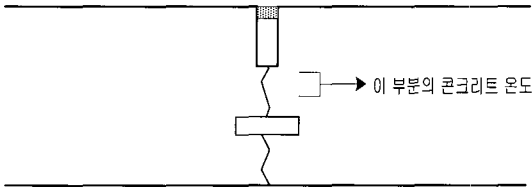


그림 6. 하중전달효과 분석시 기준온도

이것은 다우월바가 설치되지 않은 구간에서 온도와 하중전달효과와의 관계를 도시한 그림 7과 그림 8에서 확연히 나타난다. 겨울 오전, 겨울 밤, 여름 밤에 측정된 A, B, D를 비교해 보면 A와 B의 경우 표면온도 10°C 이상의 차이에도 불구하고 비슷한 하중전달효과를 보여주고 있으며 A와 D의 경우 표면온도는 거의 비슷하지만 하중전달효과는 40% 이상 차이가 나타남을 알 수 있다. 이것은 A의 경우 표면온도가 슬래브 평균온도보다 높은 가운데 시간에 측정되었고, B와 D의 경우 표면온도가 슬래브 평균온도보다 낮은 가운데 시간에 측정되었기 때문에 판단된다. A,B,D를 슬래브 평균온도로 변환하면 각각 13, 11, 20°C로 보정되어 그림 8에서 보는 바와 같이 슬래브 평균온도가 비슷하면 유사한 하중전달효과가 나타남을 알 수 있다. 따라서, 하중전달효과는 슬래브 표면온도가 아닌 평균온도와 상관관계가 큰 것을 알 수 있다. 즉, 하중전달효과 분석에 기준이 되는 것은 슬래브 평균온도이다.

표 4는 하중전달효과 분석 결과 및 측정 당시의 대기온도, 표면온도, 추정된 슬래브 평균온도를 정리한 것이다.

표 4. 하중전달효과 분석 결과 및 측정시 온도조건

조사 시기	2차조사 (봄)	3차조사 (여름)		4차 조사 (겨울)			
	가온시간 (Heating Time)	가온시간 (Heating Time)	감온시간 (Cooling Time)	가온시간 (Heating Time)	감온시간 (Cooling Time)		
대기온도 (°C)	20.7	29.3	20.2	16.3	23.0	8.0	5.5
표면온도 (°C)	28.0	24.0	19.0	20.5	26.0	9.0	7.3
평균온도 (°C)	21.7	22.0	20.5	13.4	13.8	10.9	9.7
하중전달효과(%)	98.6	98.4	91.4	51.8	88.6	50.0	40.2

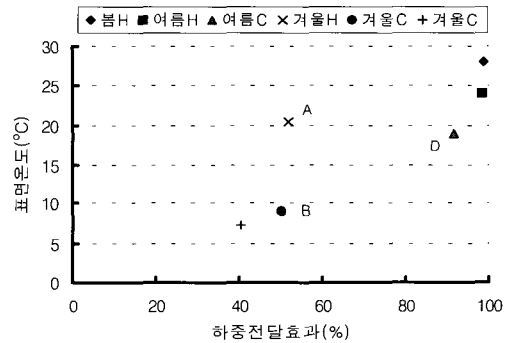


그림 7. 표면온도와 하중전달효과의 관계

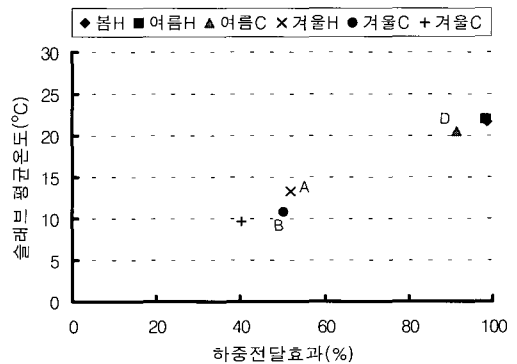
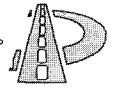


그림 8. 평균온도와 하중전달효과의 관계



그러나 일반적으로 하중전달효과는 공용중인 포장에서 측정되기 때문에 측정당시에 슬래브 내부온도를 측정하는 것은 불가능하다.

본 연구에서 조사된 국내 콘크리트 슬래브 온도변화 패턴을 보면 08~09시, 18시~19시 사이에 콘크리트 슬래브는 깊이에 상관없이 비슷한 온도를 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 08~09시, 18시~19시 사이에 하중전달효과를 측정할 경우 표면온도를 아무런 보정없이 하중전달효과 분석의 기준온도로 사용할 수 있다. 그러나 조사현장 여건의 문제로 인해 위의 시간대에 조사를 실시하지 못한 경우에는 본 연구에서 제시한 콘크리트 포장 평균온도 추정식에 조사 계절, 시간대, 대기온도 및 표면온도를 대입하여 슬래브 평균온도로 보정한 후 하중전달효과를 분석하여야 한다.

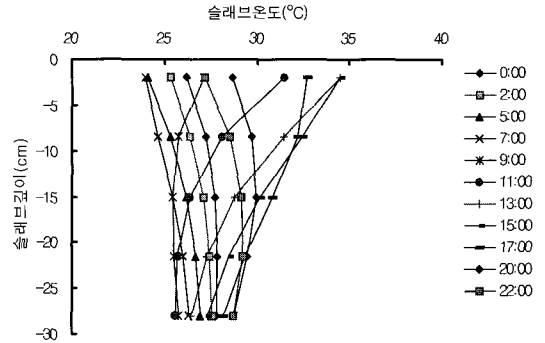


그림 9. 하루 중 슬래브 깊이별 온도변화 패턴

식으로 도출하였고 식(2)의 방법으로 적분을 실시하여 콘크리트 슬래브 전체 온도를 산정하고 이것을 두께로 나누어서 콘크리트 슬래브 평균온

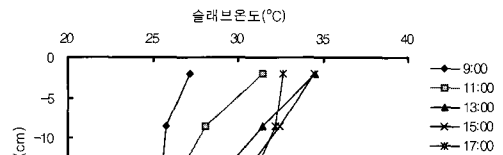
#### 4.2 콘크리트 슬래브 평균온도 추정 방법

FWD를 이용하여 콘크리트 포장의 하중전달효과를 측정할 때 대기온도와 표면온도는 자동 측정되지만 하중전달효과 분석의 기준이 되는 슬래브 평균온도를 측정하는 것은 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 조사 계절별, 조사 시간대별 표면온도와 대기온도를 이용하여 콘크리트 포장의 평균온도 추정식을 제시하였다.

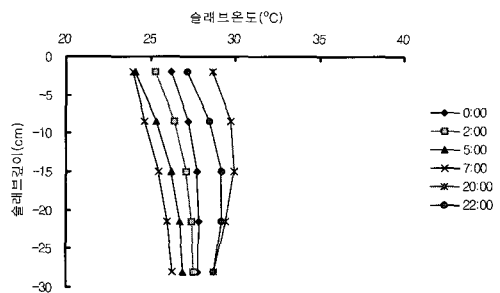
하루 중 콘크리트 슬래브 깊이별 온도 변화 패턴은 그림 9와 같다.

이것을 온도변화 패턴이 비슷한 시간대로 구분하면 그림 10과 같이 표면온도가 슬래브 내부온도보다 높은 가온시간과 표면온도가 슬래브 내부온도보다 낮은 감온시간으로 구분된다. 그림에서 보듯이 가온시간은 09시부터 17시 사이이고, 감온시간은 20시부터 익일 07시까지이다.

본 연구에서는 콘크리트 슬래브 평균온도를 추정하기 위하여 적분평균 방법을 이용하였다. 그림 11과 같이 조사시간대별 내부 온도 변화 패턴을



(a) 가온시간(Heating Time)



(b) 감온시간(Cooling Time)

그림 10. 콘크리트 슬래브 내부 온도 변화 패턴 구분

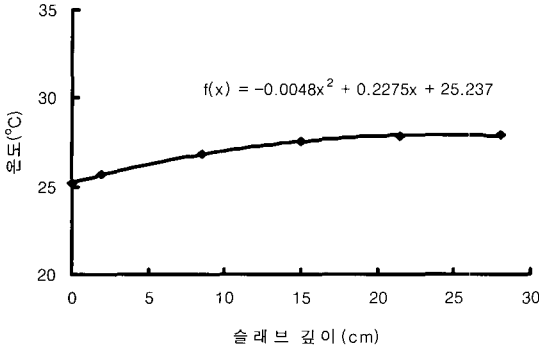
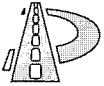


그림 11. 콘크리트 슬래브 내부온도 변화 패턴 식

도를 결정하였다. 다음으로 계산된 슬래브 평균온도를 다시 내부온도 변화 패턴 식에 대입하여 슬래브 평균온도와 일치하는 두께를 산정하였다.

$$Y = \frac{\int_0^X f(x) dx}{X} \quad (2)$$

여기서, Y : 콘크리트 평균온도

f(x) : 콘크리트 슬래브 내부온도 변화 패턴 식

X : 콘크리트 슬래브 두께

이것을 각 조사계절별 가온시간, 감온시간에 대해 확장 실시한 결과 조사 계절별, 조사 시간대별 콘크리트 슬래브 평균온도 깊이는 표 5와 같다. 가온시간의 경우 콘크리트 슬래브 평균온도는 약 12.5cm 깊이의 온도와 감온시간의 경우는 약 11cm 깊이의 온도와 일치하였다. 즉, 슬래브 두께의 1/3~1/2 지점의 온도와 슬래브 평균온도는 거의 일치하였다. 따라서, 전술한 바와 같이 하중 전달효과는 슬래브 1/3~1/2 지점의 온도에 영향을 받기 때문에 하중전달효과의 기준온도는 슬래브 평균온도이다.

본 연구에서는 콘크리트 슬래브 평균온도를 대기온도와 표면온도로 나타내기 위하여 각 조사 계절별, 조사 시간대별 슬래브 평균온도를 종속변

표 5. 콘크리트 슬래브 평균 온도 깊이

조사계절	조사시간	평균온도 깊이(cm)
겨울	가온시간 (Heating Time)	13.0
	감온시간 (Cooling Time)	11.7
봄	가온시간 (Heating Time)	12.0
	감온시간 (Cooling Time)	10.1
여름	가온시간 (Heating Time)	12.7
	감온시간 (Cooling Time)	10.8

수로 동 계절 및 시간대의 대기온도와 표면온도를 독립변수로 식(3)과 같은 회귀분석을 실시하였다. 조사 계절별, 조사 시간대별 슬래브 평균온도 추정식은 표 6과 같다.

$$T_{ave} = aT_{air} + bT_{sur} + c \quad (3)$$

여기서, Tave : 콘크리트 슬래브 평균온도

Tair : 대기온도

Tsur : 표면온도

a, b, c : 회귀상수

또한, 본 연구에서는 기 조사된 콘크리트 내부

표 6. 조사 계절별 가감온 시간대별 평균온도 추정식

조사계절	조사시간	평균온도 추정식
겨울	가온시간 (Heating Time)	$T_{ave} = -0.7068 T_{air} + 0.9387 T_{sur} + 5.6414$
	감온시간 (Cooling Time)	$T_{ave} = -0.3165 T_{air} + 1.1613 T_{sur} + 2.9908$
봄	가온시간 (Heating Time)	$T_{ave} = 0.2014 T_{air} + 0.4523 T_s + 4.9118$
	감온시간 (Cooling Time)	$T_{ave} = -0.0726 T_{air} + 1.1332 T_{sur} + 0.4897$
여름	가온시간 (Heating Time)	$T_{ave} = -0.6751 T_{air} + 0.8201 T_{sur} + 22.0532$
	감온시간 (Cooling Time)	$T_{ave} = 0.7612 T_{air} + 1.4649 T_{sur} + 8.0887$



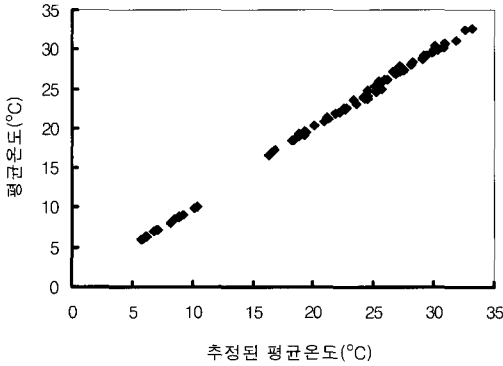
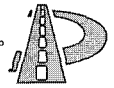


그림 12. 콘크리트 평균온도와 추정온도와의 상관관계

온도 자료 중에서 모델을 만드는데 사용된 자료를 제외한 나머지 데이터를 이용하여 표 6에서 제시된 콘크리트 평균온도 추정식을 검증하였다. 검증 결과는 그림 12에서 보는 바와 같이 본 연구에서 제시된 평균온도 추정식이 상당히 우수한 것으로 나타났다. 그러나 이것은 동일 지역, 동일 슬래브의 결과이므로 향후, 타 지역에서 조사된 슬래브 내부온도 조사 자료를 이용하여 본 연구에서 제시한 추정식을 검토 보완할 예정이다.

본 연구에서 제시된 콘크리트 슬래브 평균온도 추정 방법을 요약하면 다음과 같다.

- Step 1. 조사 시간대별 내부온도 변화 패턴식을 산정한다.
- Step 2. 콘크리트 내부온도 변화 패턴식을 적분하여 콘크리트 슬래브 전체 온도를 구하고 이것을 두께로 나누어서 슬래브 평균온도를 산정한다.
- Step 3. 슬래브 평균온도를 내부온도 변화 패턴식에 대입하여 슬래브 평균온도와 일치하는 슬래브 깊이를 결정한다.
- Step 4. 조사 시간대별, 조사 계절별로 산정된 슬래브 평균온도를 조사 당시의 대기온도

와 표면온도로 회귀분석하여 콘크리트 슬래브 평균온도 추정식을 제시한다.

### 4.3 다우월바 시공 여부에 따른 하중전달효과

콘크리트 포장에서 하중전달 장치로서 다우월바를 사용한다. 본 연구에서는 다우월바가 하중전달효과에 미치는 영향을 알아보기 위해 다우월바 시공 구간과 미시공 구간에 대해 동일 조건에서 하중전달효과 조사를 실시하였다. 그림 13은 다우월바 시공 구간과 미시공 구간의 온도변화에 따른 하중전달효과 변화이다. 다우월바를 시공한 구간에서는 하중전달효과가 온도에 관계없이 거의

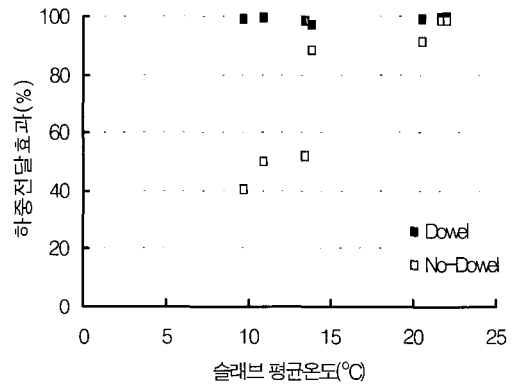
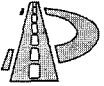


그림 13. 다우월바 시공 유무에 따른 하중전달효과 변화

100% 수준으로 양호한 편이었으나 다우월바를 시공하지 않은 구간에서는 고온의 경우 비교적 양호한 편이지만 온도가 내려갈수록 하중전달효과는 감소하였다. 특히, 슬래브 평균온도가 15°C 이하로 내려갈 경우 하중전달효과는 50% 미만으로 떨어짐을 알 수 있다. 이것으로 보아 다우월바가 하중전달 장치로서 효용성이 있다고 판단된다.

### 4.4 포장 노후화에 따른 하중전달효과

본 연구에서는 포장의 노후화가 하중전달효과에 미치는 영향을 알아보기 위해 신설포장과 인



근의 덧씌우기가 안된 노후포장에서 하중전달효과 조사를 실시하였다. 조사 결과 그림 14와 같이 다우월바가 시공된 경우라 하더라도 포장이 노후화 되면 온도변화에 따라 하중전달효과가 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 포장이 노후화됨에 따라 줄눈하부의 골재 맞물림이 마모에 의해 파손되어 골재간의 맞물림이 헐거워지며 다우월바 아래의 콘크리트가 오랜 반복하중으로 파괴되었기 때문으로 판단된다.

현행 AASHTO 덧씌우기 설계식에서 26.7°C (80°F) 이하에서 측정된 하중전달효과는 아무런 보정없이 사용되고 있는데 그림 14에서 보듯이 노후된 콘크리트포장의 경우 하중전달효과는 온도에 따라 변화하기 때문에 이에 적당한 보정이 필요하다고 판단된다.

그림 14의 노후된 포장의 온도변화에 따른 하중전달효과 감소 경향을 회귀분석한 결과  $Y(\text{하중전달효과}) = 1.4 \times (\text{슬래브온도}) + 63.8$ 라는 회귀식을 얻었다. 이것은 본 시험구간의 경우 단위온도 하락에 따른 하중전달효과 감소는 약 1.4%임을 의미한다.

향후 다양한 온도조건에서 하중전달효과를 실

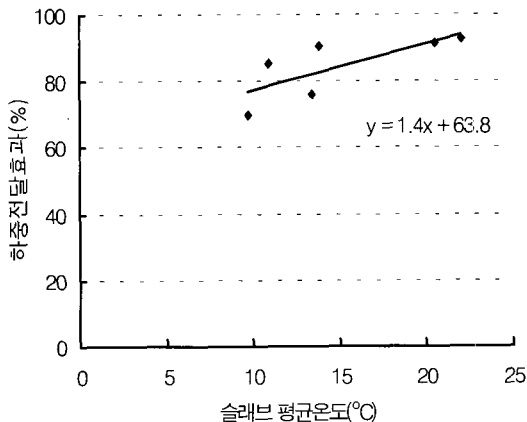


그림 14. 노후포장의 온도변화에 따른 하중전달효과

시하여 국내 콘크리트 포장에 적용할 수 있는 온도변화와 하중전달효과와의 온도 보정식 산출을 위한 연구가 필요하다고 판단된다.

#### 4.5 줄눈틈 거동에 따른 하중전달효과

하중전달효과는 콘크리트 슬래브 양쪽의 처짐량 비로 결정되기 때문에 줄눈틈이 커지게 되면 골재간의 맞물림이 약해지게 되어 하중전달효과는 감소하게 된다.

줄눈틈에 영향을 주는 요소는 균열발생 시기와 슬래브 온도변화 등이 있다. 시공 후 초기균열(early-age crack)이 발생하면 그림 15와 같이 콘크리트의 잔여 건조 수축은 대부분 균열이 벌어지는 형태로 발생하여 균열틈은 점점 커지게 된다.

본 연구의 조사대상 구간 중 초기균열이 다우월바를 시공하지 않은 구간 중 2개 슬래브(45번, 47번 줄눈)에서 발생했다. 초기 균열이 발생이 하중전달효과 미치는 영향은 그림 16과 같다. 그림에서 보듯이 초기 균열이 발생한 45번 47번 줄눈의 경우 고온에서는 슬래브가 팽창하여 줄눈틈이 벌어지는 것을 방지하여 비교적 높은 하중전달효과를 나타내지만 저온일 경우 슬래브가 수축되어

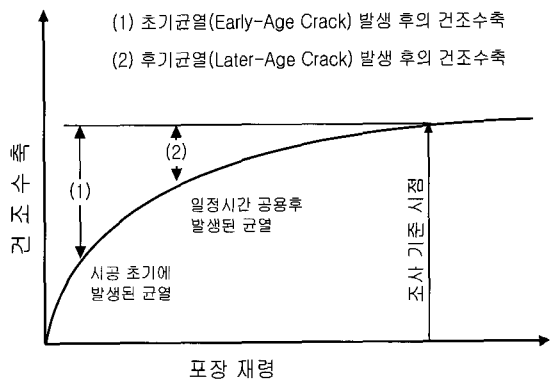


그림 15. 콘크리트 건조 수축에 따른 균열틈 변화<sup>(4)</sup>

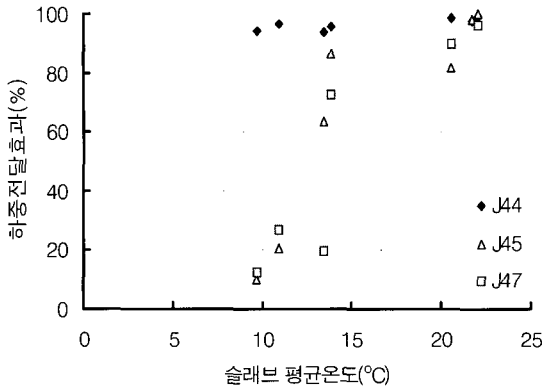


그림 16. 초기 균열 발생에 따른 하중전달효과 변화

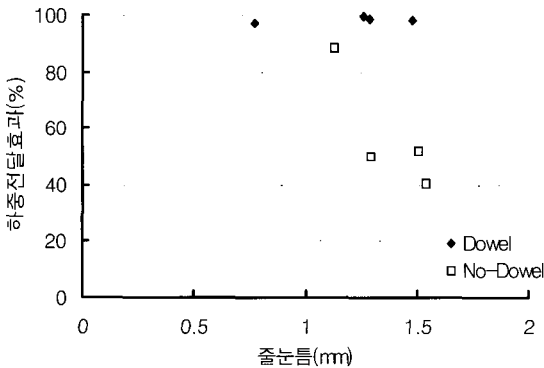


그림 17. 줄눈틈에 따른 하중전달효과 변화

줄눈틈 간격이 더욱더 벌어져서 하중전달효과는 급격히 감소함을 알 수 있다.

하중전달효과와 온도변화에 따른 줄눈틈과의 상관관계는 그림 17과 같다. 그림에서 보듯이 다우월바가 시공된 구간에서는 줄눈틈의 크기와 상관없이 하중전달효과가 거의 100%를 나타내었다. 이것은 줄눈틈이 벌어져서 생기는 하중전달 손실을 다우월바가 보충해 주기 때문으로 판단된다. 그러나 다우월바가 시공되지 않은 구간에서는 골재 맞물림에 의해서만 하중전달이 이루어지기 때문에 줄눈틈이 커질수록 골재 맞물림이 약해져서 하중전달효과는 감소한다.

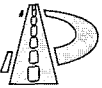
## 5. 결론 및 건의 사항

본 연구의 범위 내에서 콘크리트 포장에서 하중전달효과 영향인자 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 하중전달효과 분석시 사용되는 기준온도는 슬래브 표면온도가 아니라 슬래브 평균온도로 나타났다. 하중전달효과 측정시에는 대기온도와 표면온도만 측정될 뿐 슬래브 평균온도를 측정하는 것은 불가능하다. 따라서, 본 연구에서는 조사 계절별, 조사 시간대별 대기온도와 표면온도를 이용하여 아래와 같은 콘크리트 슬래브 평균온도 추정식을 제시하였다.

조사 계절	조사 시간	평균온도 추정식
겨울	가온시간 (Heating Time)	$T_{ave} = -0.7068 T_{air} + 0.9387 T_{sur} + 5.6414$
	감온시간 (Cooling Time)	$T_{ave} = -0.3165 T_{air} + 1.1613 T_{sur} + 2.9908$
봄	가온시간 (Heating Time)	$T_{ave} = 0.2014 T_{air} + 0.4523 T_{sur} + 4.9118$
	감온시간 (Cooling Time)	$T_{ave} = -0.0726 T_{air} + 1.1332 T_{sur} + 0.4897$
여름	가온시간 (Heating Time)	$T_{ave} = -0.6751 T_{air} + 0.8201 T_{sur} + 22.0532$
	감온시간 (Cooling Time)	$T_{ave} = -0.7612 T_{air} + 1.4649 T_{sur} + 8.0887$

- (2) 국내 콘크리트 슬래브는 08~09시, 18~19시 사이에 슬래브 깊이에 상관없이 비슷한 온도변화 패턴이 나타났다. 따라서, 위 시간대



에 하중전달효과를 측정할 경우 슬래브 표면온도와 평균온도가 거의 일치하므로 표면온도를 보정 없이 하중전달효과 분석의 기준온도로 이용할 수 있다. 또한, 위의 시간대에 하중전달효과를 측정하지 못한 경우에는 본 연구에서 제시한 콘크리트 슬래브 평균온도 추정식을 이용하여 표면온도를 평균온도로 보정할 수 있다.

- (3) 다우월바를 시공한 구간에서는 줄눈틈과 온도변화에 따른 하중전달효과 변화가 적었다. 이것은 온도하락과 줄눈틈이 벌어져서 발생하는 하중전달 손실을 다우월바가 보완해 주기 때문이다.
- (4) 다우월바를 시공하지 않은 구간에서는 줄눈틈이 커질수록 온도가 내려갈수록 하중전달효과는 급격히 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 다우월바를 시공하지 않은 구간에서는 골재 맞물림에 의해 하중전달이 이루어 지는데 평균온도가 높은 경우에는 슬래브가 팽창되어 서로 밀착되기 때문에 하중전달 감소를 보완해 주는 반면 평균온도가 낮은 경우는 슬래브가 압축되고 줄눈틈이 벌어지게 되어 골재 맞물림이 약해지기 때문이다.
- (5) 다우월바가 시공된 구간이라도 포장이 노후화되면 하중전달효과는 감소하는 것으로 나

타났다. 본 연구 조사대상 구간인 88고속도로의 경우 단위온도 하락에 따른 하중전달효과는 1.4% 감소하는 것으로 나타났다.

### 감사의 글

본 논문은 한국 과학 기술부·한국과학재단에서 지원한 첨단 도로 연구센터의 연구수행 결과입니다.

### 6. 참고문헌

- (1) 양홍석(1999), "콘크리트 덧씌우기 줄눈부에서의 하중전달효과 연구," 한양대학교 석사학위 논문.
- (2) AASHTO, "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1993"
- (3) Jamshid M. Armaghani, Torbjorn J. Larsen, and Lawrence L. Smith(1987), "Temperature Response of Concrete Pavements," *TRB, Transportation Research Record 1121*.
- (4) Suh, Y.C., and McMollough, B.F.(1994), "Factors Affecting Crack Width of Continuously Reinforced Concrete Pavement," *TRB Annual Meeting, Washington DC*.
- (5) M. Poblete, R. Valenzuela, and R. Salsilli(1987), "Load Transfer in Undoweled Transverse Joints of PCC Pavements," *TRB, Transportation Research Record 1207*.
- (6) Wilbur Charles Geer, Jr., P.E.(1990), "Seasonal Variation in Joint Efficiency of Doweled Concrete Pavements," *Bearing Capacity of Roads and Airfields Third International Conference*.

(접수: 2001. 6. 1)