

# 하중전달계수 산정과정에서 온도보정모형 개발

## Developing of Temperature differential versus surface temperature for load transfer coefficient

안지환<sup>\*</sup> · 권수안<sup>\*\*</sup> · 김현욱<sup>\*\*\*</sup> · 김연복<sup>\*\*\*\*</sup>

Ji-Hwan An · Soo-ahn Kwon · Hyun-wook Kim

### 1. 서 론

국내의 도로 포장 설계법은 1970년 이후 차관 사업에 의한 도로 사업을 실시하면서 외국 기술자들에 의해 소개된 AASHTO 설계법이 기초를 이루고 있으며 현재 국내 설계에서 대부분의 경우 이를 채택하고 있는 실정이다. 그러나, 입력 변수의 경우 외국의 경험과 단편적인 조사자료에 의해 추천된 값들이 사용되어 왔고, 국내의 교통, 지역, 재료, 환경조건에 적합한 입력변수의 적용범위에 대한 평가나 관련조사는 미비한 실정이다. 하중전달계수(Load Transfer Coefficient 혹은 J-Factor)도 AASHTO 지침에서 제시한 값이 그대로 사용되고 있다. 콘크리트 포장은 준눈 부위에서 파손이 가장 많이 일어나며 기본설계는 물론 덧씌우기 설계에서도 하중전달계수가 고려되기 때문에 포장 기술자에게는 매우 중요하다.

AASHTO 도로시험이 실시된 시기는 1960년 대 초반이고 그 당시의 포장의 상태에 따라 결정된 하중전달계수의 값은 포장재료가 전에 비해 많이 발전하고 하중조건도 많이 달라진 오늘날의 조건에 비추어 본다면 설계 범위를 다르게 고려해야 할 필요가 있는 것이며 국내에서도 선진 기술의 개념을 국내의 상황에 맞도록 재구성할 수 있는 연구가 이루어져야 할 것이다. 따라서, 본 연구는 현재 사용되고 있는 하중전달계수의 문제점을 정의하고 FWD(Falling Weight Deflectometer)를 이용하여 콘크리트 포장에 대한 현장 시험을 하고 이론적인 분석을 통하여 국내 현장조건에 맞는 하중전달계수 산정을 위한 타당성을 검토한다. 그리고 시험시공을 통하여 국내 여건에 맞는 콘크리트 포장의 슬래브 온도차 추정할 수 있는 온도 보정 모형을 개발 이를 하중전달계수 산정과정에 수정·적용한다.

### 2. 콘크리트 포장에서 하중전달계수 산정방법

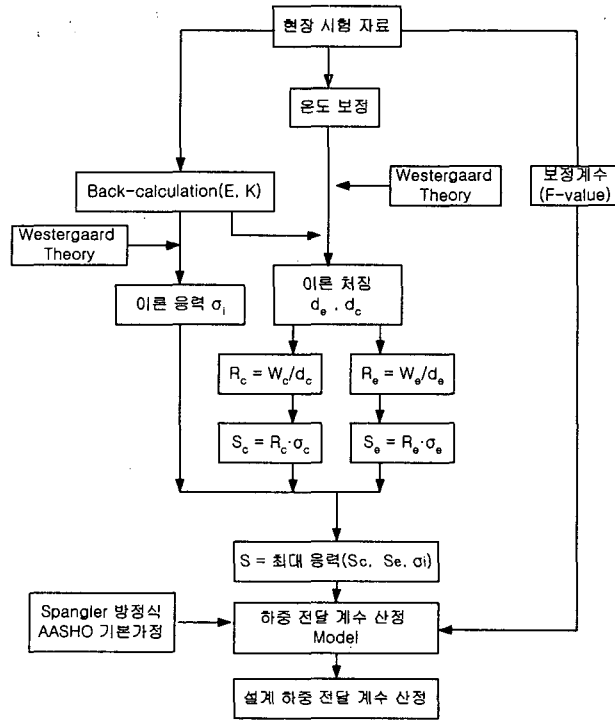
본 연구에서는 AASHTO에서 제시한 역학적 프로그램을 통하여 하중전달계수를 산정하는 방법 대신에 실제 현장의 처짐값을 바탕으로 하중전달계수(J-Factor)를 산정하는 방법론을 정립하여 계수를 산정했다. 산정 과정은 이미 발표한 대한 토목학회 논문집, 2001(김현욱, 조윤희, 권수안, “준눈콘크리트 포장에서의 하중전달계수에 관한 연구”)를 참고하면 되며 산정 흐름도는 다음 <그림 1>과 같다. 본 연구는 하중전달계수 전체 산정 흐름도에서 온도보정 항목에 적용되는 연구이다.

<sup>\*</sup>정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 · 연구원 · 031-9100-172(E-mail:jenix@kict.re.kr)

<sup>\*\*</sup>정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 · 선임연구원 · 031-9100-174(E-mail:sakwon@kict.re.kr)

<sup>\*\*\*</sup>정회원 · University of Illinois at urbana champaign · 박사과정 · (E-mail:hkim29@uiuc.edu)

<sup>\*\*\*\*</sup>정회원 · 한국건설기술연구원 토목연구부 · 연구위원 · 031-9100-310(E-mail:ybkim@kict.re.kr)

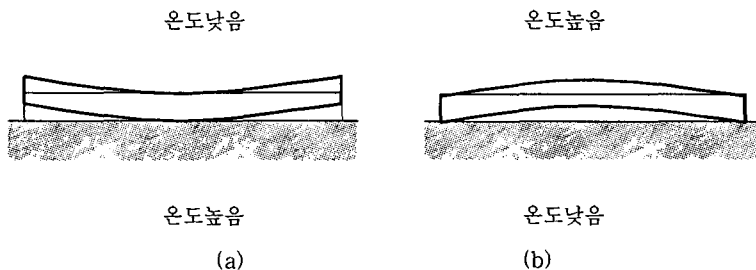


<그림 1> 줄눈콘크리트 포장에서의 하중전달계수 산정 흐름도

### 3 온도 보정 방법론

#### 3.1 온도보정의 필요성

많은 연구에서 포장의 경계면 근처에서 온도차이(DT)는 포장의 처짐의 측정에 중요한 영향을 준다고 밝혀왔다. 예를 들면, 포장 슬래브의 윗부분의 온도가 바닥보다 낮을 경우에는 온도차이가 음(-)의 값이며 <그림 2(a)>와 같이 포장이 위로 말려 올라가며 반대로, 포장 슬래브의 윗부분에서의 온도가 바닥의 온도 보다 높을 경우 온도차이는 양(+)의 값이며 이때 포장의 경계면은 <그림 2(b)>와 같이 아래로 말려진다. 만약, 포장 슬래브의 바닥과 윗부분의 온도가 같다면 (온도 차이가 0이라면) 포장 슬래브는 평평할 것이다.



<그림 2> 온도차에 따른 콘크리트 슬래브의 변형

일반적으로 처짐 측정은 온도 차이가 0일 경우의 표준상태로 보정되어 져야한다. 처짐 측정에 있어서 온도차이의 영향은 슬래브의 재료, 슬래브의 두께, 보조기층의 조건, 습도 조건, 그리고 길 어깨 형태 등에 따라 다양해진다. 조건의 복잡성



과 다양성 때문에 이 모든 변수들의 영향을 고려하는 것은 매우 어려운 일이다. 그러나, AASHO 도로시험에 따르면 측정된 처짐과 이에 대응하는 온도차이 간에는 밀접한 관계가 성립한다고 밝히고 있다. 그러므로, 현장조건에서의 측정된 처짐과 온도차이 간의 관계가 얻어진다면 동일한 형식의 포장 처짐 측정에 대한 온도차이의 보정이 이루어 질 수도 있을 것이다. 그러나, 이러한 관계를 규명하기 위해서는 콘크리트 포장의 현장 온도 측정 데이터베이스가 구축되어 있어야 하는데 그러한 자료가 부족하므로 본 연구에서는 AASHO 도로시험에서 추정된 온도모형을 적용하였으며 시험도로의 온도 자료 통한 온도 자료를 바탕으로 슬래브 상·하단의 온도차 모형을 정립하였다.

모서리(Corner) 조건	$FT = 10^{0.015DT}$	<식 1>
단부(Edge) 조건	$FT = 10^{0.0075DT}$	<식 2>

여기서, FT는 온도차이 보정계수이다. 만약, DT를 사용중인 줄눈콘크리트 포장에서의 온도차이라고 하고 W를 측정된 처짐이라고 하면 온도차이가 0인 조건은 (FT)\*(W)와 같다.

포장 표면온도와 상·하단 온도차의 관계는 MORALES-VALENTIN의 자료를 바탕으로 개발되었고 6월과 9월, 10월에 사용중인 줄눈콘크리트 구간으로부터 얻은 자료를 이용하여 회귀분석을 통하여 얻은 세가지 회귀방정식을 단순한 형태로 바꾼 다음과 같은 <식 3>을 적용한다.

$$DT = -50.0 + 0.60 (STEMP) \quad \text{<식 3>}$$

여기서, DT : 콘크리트 슬래브 상·하단 온도차 (°F)   STEMP : 콘크리트 포장 표면 온도 (°F)

더 나아가, 슬래브의 두께와 온도차이간의 관계를 선형으로 가정하여 다음과 같은 일반화된 모형을 적용한다.

$$DT_D = -50.0 + 0.060 (STEMP) \times D \quad \text{<식 4>}$$

여기서, DT<sub>D</sub> : 콘크리트 슬래브 상·하단 온도차 (°F)   STEMP : 콘크리트 슬래브 표면온도 (°F)

D : 콘크리트 슬래브 두께 (in)

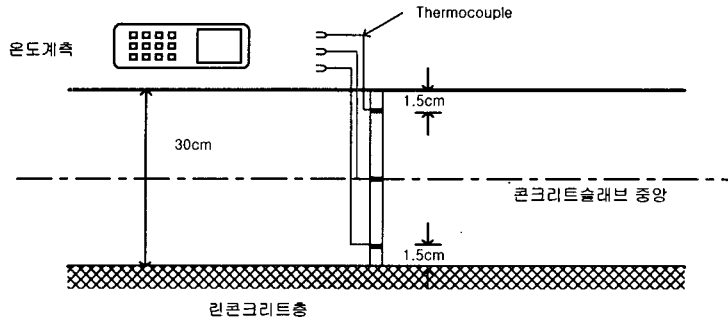
### 3.2 온도보정모형 개발을 위한 온도계측

#### (1) 개요

기존의 하중전달계수 산정을 위해 적용된 온도보정 모형이 국내에서 개발된 것이 없어 외국의 모형을 그대로 전용하였으나 시험도로의 온도자료를 이용하여 온도 자료를 습득하고 이를 바탕으로 국내의 포장조건에 맞는 콘크리트 슬래브 상·하단 온도차 모형을 개발하고자 한다.

#### (2)조사 방법

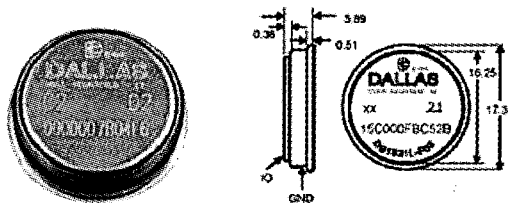
시험도로중에서 4개 구간을 선정하여 온도계측을 실시하였다. 우선 시공후 일주일 후 7일간 자료와 와 7주 후 7일간의 온도자료를 입수하였으며 시간은 2시간 간격으로 측정하였다. 콘크리트 포장내 온도와 더불어 대기 온도도 같이 측정하였다. 시험포장에서 측정할 콘크리트 포장내 계측 위치는 그림과 같다.



<그림 3> 콘크리트 포장내 온도계측 위치

온도측정을 위한 측정방식으로는 i-button을 사용하였다. 지금까지 굳지 않은 콘크리트(fresh concrete)의 온도를 측정하는 방식은 thermocouple type과 thermistor type이 주를 이루었는데 이 방식을 사용할 경우의 측정방법은 reader 기를 사용하여 수동계측을 하거나, data logger를 이용한 자동계측 방법이 있다. 하지만 수동계측을 할 경우에는 온도측정을 할 때마다 사람이 직접 기록을 해야 하는 번거로움과 시간손실이 있어서 지양되고 있다. 그렇다고 항상 고가의 data logger를 이용하여 자동계측을 할 수도 없는 것이 현실이다. Data logger를 사용할 경우에는 channel(온도측정지점)의 수가 한정되어 있어서 대규모 연구에서는 여러 대의 data logger가 필요하다. 또한 data logger에는 전원공급을 해야 하기 때문에 전기공사가 되어 있지 않은 시공현장에서는 불편할 뿐만 아니라, 외부 환경적 요인으로 인한 오작동의 우려가 항상 있다. 이러한 단점을 극복하고자 i-button을 사용하였다

i-Button은 기존의 전선형태의 아날로그 온도계와는 달리 단추처럼 동그랗게 생긴 디지털 온도계로 모양 및 크기는 <그림 4>에 나타나 있다. 직경 16mm의 조그만 케이스에 온도센서가 내장되어 있고, 전원공급장치와 memory가 있어 data logger 없이 자동계측과 무인시스템이 가능하다. 따라서 콘크리트 포장체에 적용될 경우 비용이 절약될 뿐만 아니라 많은 양의 data를 얻을 수 있다.



<그림 4> i-button의 크기

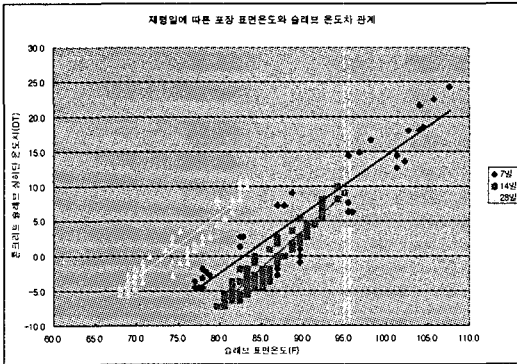
### 3.3 온도보정모형 개발

시험도로에서의 온도측정 자료를 통해 우선 양생일 별로 슬래브의 표면 온도와 슬래브 상·하단 온도차를 비교하여 보았다. 여기서 나타내는 온도는 화씨(°F)단위를 사용하고 있다. 이는 온도차이 보정계수에 적용하기 위해서는 화씨(°F)단위를 사용해야 하기 때문이다.

시공 후 7일째 온도자료 바탕으로 분석한 결과 온도분포가 넓게 분포하고 있었다. 이는 아직 콘크리트 양생중 발생하는 수화열의 영향이 미치기 때문에 높은 온도까지 오르는 것이다.

시공 후 14일째에는 어느 정도 수화열 반응이 많이 진행된 상황이라 온도가 7일째 양생시 온도보다는 높게 올라가지는 않는다.

시공 후 28일에는 어느정도 수화열 반응이 끝난 상태라 14일째 양생시 온도 분포보다 낮은 온도 분포를 나타내고 있다.



각 양생일별 슬래브의 표면온도와 슬래브 상·하단의 온도차 관계는 다음과 같은 회귀식으로 나타내어진다.

7일  $DT = -69.697 + 0.8406 (STEMP) \quad (R^2 = 0.8614)$  <식 13>

14일  $DT = -92.648 + 1.0695 (STEMP) \quad (R^2 = 0.9174)$  <식 14>

28일  $DT = -67.202 + 0.9162 (STEMP) \quad (R^2 = 0.9182)$  <식 15>

여기서,  $DT$  : 콘크리트 슬래브 상·하단 온도차 (°F)

$STEMP$  : 콘크리트 포장 표면 온도 (°F)

<그림 5> 재령일에 따른 콘크리트 슬래브 표면온도와 상·하단 온도차 관계

J-Factor에 사용되는 온도 보정식의 경우 포장이 개방된 이후 공용중일때의 온도를 사용하므로 재령 28일 이후 3주간 시간별 온도 측정자료 1800여개를 바탕으로 슬래브의 표면온도와 슬래브 상·하단의 온도차 관계를 분석하였다.

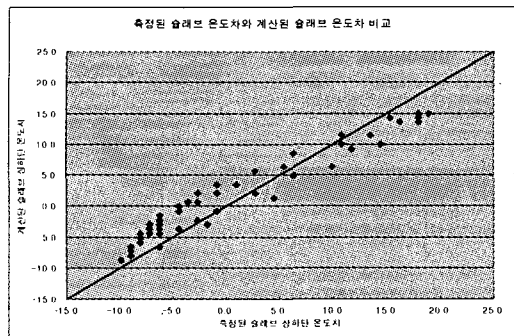
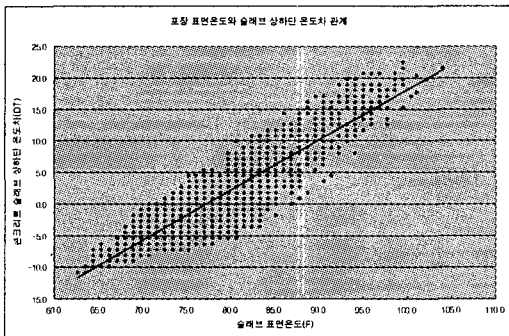
<식 5>와 같은 회귀식이 도출되었으며 결정계수( $R^2$ )의 경우 표본수 증가로 인한 감소라 회귀식으로 사용하기에 타당하다.

$DT = -60.687 + 0.7865 (STEMP) \quad (R^2 = 0.7845)$  <식 5>

위 식을 보다 단순하게 나타내면 다음식과 같다.

$DT = -61.0 + 0.8 (STEMP)$  <식 6>

<식 6>을 통해 계산된 슬래브 상하단 온도차이와 실제 온도측정으로 계산된 슬래브 상하단 온도차이를 비교해 보면 다음 <그림 7>과 같다. 대각선 직선을 기준으로 값들이 분포하는 것을 알 수 있다. 만약 값들이 차이가 많이 난다면 대각선에서 멀리 떨어진 위치에 값들이 나타나게 된다. <그림 7>에 나타난 분포는 추정된 식이 타당하다는 것을 시각적으로 보여준다.



<그림 6> 콘크리트 슬래브 표면온도와 상·하단 온도차 관계 <그림 7> 측정된 슬래브 온도차와 계산된 슬래브 온도차 비교

여기에 제안된 식은 기존에 미국에서 제시된 식보다 온도차이가 큰 것으로 나타났다. 기존에 제시된 식의 경우 6월, 9월, 10월에 측정된 자료를 통해 만들어 졌으며 물론 여기에 제시된 식 역시 8월, 9월에 측정된 자료를 바탕으로 만들어져서 계절적 변화가 고려되지는 않았다. 그러므로 향후 꾸준한 자료 관측을 통해 계속 수정·보완 시켜 나가야 할 것이다.



### 3.4 온도보정 모형 적용

기존의 슬래브 온도차이를 나타내는 회귀식과 국내에서 시험시공을 통한 회귀식을 적용하여 하중전달계수를 비교하였다. 각 고속도로 별로 비교하였는데

- ① J-Value : 계산을 통해 나온 값
- ② J-Value (온도보정) : 기존 온도모형 적용 값
- ③ J-Value (국내 온도보정) : 국내 온도모형 적용 값
- ④ J-Value (F-보정, 온도보정) : F-보정을 한 기존 온도모형 값
- ⑤ J-Value (F-보정, 국내온도보정) : F-보정을 한 국내 온도모형 값

이렇게 5가지 값을 가지고 비교하였다. 최종적으로 사용하게 되는 값은 F-보정과 국내 온도보정을 한 J-Value 이다. 온도보정된 J-Value는 낮시간대인 상부 온도가 높고 하부 온도가 낮은 시간대에 측정된 경우 계산된 J-Value 보다 큰 값으로 보정이 되고 상부온도가 낮고 하부 온도가 높은 시간대에 측정된 경우 계산된 J-Value 보다 낮은 값으로 보정이된다.

이는 슬래브가 (+)상태일 경우 상·하단 온도차이가 없는 0 상태와 비교할 때 실제 처짐량이 적게 측정되고 슬래브가 (-)상태일 경우 그 반대 상태가 된다.

실험 결과를 정리한 <표 1>, <표 2>, <표 3>, <표 4>를 보면 88 고속도로와 중앙 고속도로의 경우 슬래브가 (-)상태일 때 측정했으므로 J-Value(온도보정), J-Value(국내온도보정)값이 계산된 J-Value 보다 작게 나타났다. 반대로 중부고속도로의 경우 슬래브가(+)인 상태일 때 측정하였으므로 J-Value(온도보정), J-Value(국내온도보정) 값이 계산된 J-Value 보다 크게 나타났다.

<표 1> 88고속도로 하중전달값 비교

<표 2> 중앙고속도로 하중전달값 비교

	평균	표준 편차	최소	최대	5%	95%
①	2.28	0.58	1.47	3.53	1.54	3.50
②	1.74	0.30	1.27	2.36	1.33	2.28
③	1.76	0.27	1.34	2.34	1.37	2.26
④	2.39	0.44	1.68	3.24	1.73	3.17
⑤	2.42	0.39	1.77	3.13	1.81	3.06

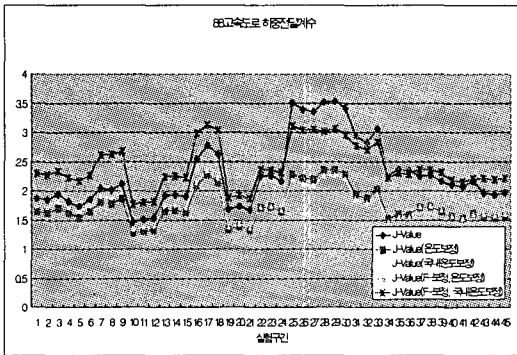
	평균	표준 편차	최소	최대	5%	95%
①	1.89	0.29	1.36	2.53	1.43	2.40
②	1.62	0.26	1.14	2.18	1.20	2.07
③	1.70	0.28	1.18	2.29	1.25	2.17
④	2.29	0.35	1.65	2.95	1.69	2.89
⑤	2.40	0.38	1.71	3.12	1.75	3.05

<표 3> 중부고속도로 하중전달값 비교(JCP)

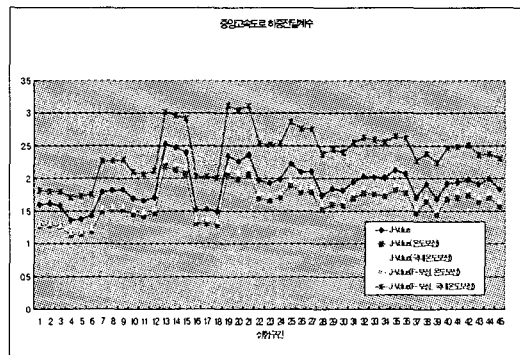
<표 4> 중부고속도로 하중전달값 비교(CRCP)

	평균	표준 편차	최소	최대	5%	95%
①	1.19	0.30	0.77	2.00	0.83	1.90
②	1.47	0.36	0.96	2.42	1.02	2.30
③	1.74	0.42	1.13	2.85	1.21	2.70
④	2.02	0.49	1.54	3.27	1.60	3.20
⑤	2.38	0.57	1.82	3.85	1.90	3.80

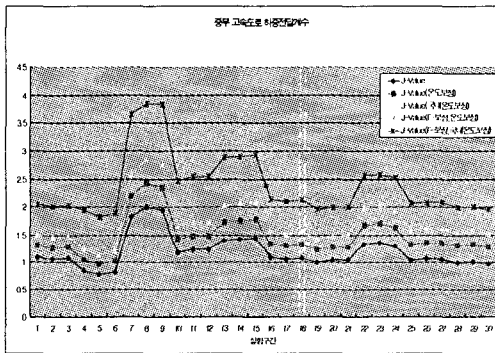
	평균	표준 편차	최소	최대	5%	95%
①	1.76	0.36	1.25	2.77	1.27	2.60
②	2.19	0.45	1.55	3.44	1.58	3.22
③	2.53	0.52	1.79	3.97	1.83	3.72
④	2.86	0.61	1.95	4.44	1.98	4.30
⑤	3.30	0.70	2.24	5.12	2.29	4.95



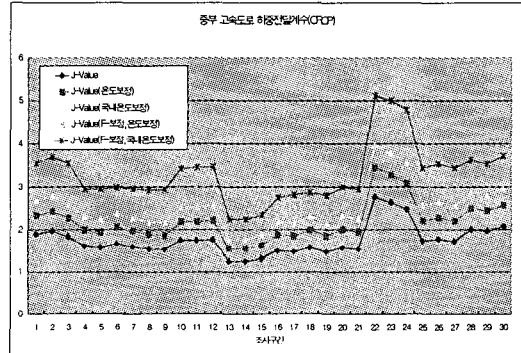
<그림 8> 88고속도로 하중전달값 비교



<그림 9> 중앙고속도로 하중전달값 비교



<그림 10> 중부고속도로(JCP) 하중전달값 비교



<그림 11> 중부고속도로(CRCP) 하중전달값 비교

4. 결론

일반적으로 AASHTO 지침을 사용하여 구조설계를 하는 경우 하중전달계수는 필수적인 입력변수이며 국내에서도 대부분의 도로포장설계에서 AASHTO 지침의 하중전달계수 값을 그대로 적용하고 있으며 기존 연구를 검토한 결과 공용연수가 오래지났음에도 불구하고 설계값보다 더 나은 하중전달 능력을 보이는 경우도 있었으며 또는 크게 하중전달능력이 떨어지지 않는다는 것을 보았다. 이는 국내에 적합한 모형이 아니라는 점과 체계적인 데이터 부족으로 인한 공용초기 값과 비교가 힘들다는 것이다.

일반적으로 AASHTO 지침에서 산정된 변수값은 신뢰도를 고려한 공용식에 따라 50%값을 기준으로 제안되었다. 그러나, 본 연구에서 일부 산정한 하중전달계수 값은 2월과 4월에 현장 측정된 값으로서 겨울과 봄이라는 한정된 계절조건만을 대표하고 있어 계절별로 포장의 처짐이 매우 다양하다면 하중전달계수값은 조정되어야 할 것이다.

본 연구에서는 AASHTO에서 제시한 역학적 프로그램을 통하여 하중전달계수를 산정하는 방법 대신에 실제 현장의 처짐값을 바탕으로 하중전달계수(J-Factor)를 산정하는 방법론을 정립하여 계수를 산정했다.

$$J = 3.2 \frac{S_{SP-A}}{S_{LP} \sigma_{SP-Sect} F} \quad <식 7>$$

시험시공을 통하여 국내 여건에 맞는 콘크리트 슬래브 상·하단 온도차이를 구하는 식을 만들었으며 이를 이용하여 온도보정된 하중전달계수를 구하였다.

$$DT = -61.269 + 0.7938 (STEMP) \quad (R^2 = 0.79) \quad <식 8>$$



위 식을 보다 단순하게 나타내면 다음식과 같다.

$$DT = -61.0 + 0.8 (STEMP)$$

<식 9>

온도자료가 일부 기간 동안만 측정된 자료를 바탕으로 온도보정 모형이 만들어졌기 때문에 향후 장기간 온도자료조사를 통한 계절별 특성을 고려한 모형이 만들어져야 할 것이다.

#### 참고문헌

1. 김현욱, 조윤호, 권수안, “줄눈콘크리트 포장에서의 하중전달계수에 관한 연구”, 대한토목학회 논문집, 2001
2. 한승환, 유태석, “자체변형에 의한 부분지지조건을 갖는 콘크리트 슬래브”, 대한토목학회, 1999
3. AASHTO, “Design of Pavement Structures”, 1993
4. AASHTO, “AASHTO Guide for Design of Pavement Structures Volume 2”, 1986
5. Chao Wei, B. Frank McCullough, W. Ronald Hudson, Kenneth Hankins, “Development Of Load Transfer Coefficients For Use With The AASHTO Guide For Design Of Rigid Pavements Based On Field Measurements”, Research Report 1169-3, CTR, 1990