

# Tensionless Spring을 이용한 줄눈 콘크리트 포장의 온도 응력 예측식 개선

## Improve Prediction Equation Of Temperature Stress On Joint Concrete Pavement With Tensionless Spring Element

류성우\* · 임광수\*\* · 이창준\*\*\* · 조윤호\*\*\*\*

Ryu, Sung-Woo · Lim, Kwang-Soo · Lee, Chang-Joon · Cho, Yoon-Ho

### 1. 서론

기존 도로 포장은 국의 설계 기준이나 경험을 바탕으로 국내 환경 조건과 경제성을 고려하지 못한 채 획일적인 두께와 형식으로 시공되고 있다. 이같은 문제를 해결하기 위해서 국토해양부와 포장 관련 전문가들이 9년여에 걸쳐 한국형 도로 포장 설계법 개발 연구를 진행해 오고 있다. 현재는 3단계 2차년도 연구 단계로 아스팔트 포장 및 콘크리트 포장의 각 설계모듈의 정확성을 검토하고 정밀성을 향상시키기 위한 노력을 하고 있다. 콘크리트 포장의 구조해석은 누적 손상이론을 적용하는 한국형 콘크리트 포장 설계법에서, 피로식의 입력 변수중의 하나인 온도 하중과 차량 하중에 의한 최대 응력 및 지점을 분석하는 역할을 한다. 특히 온도 하중의 경우 차량 하중에 비해 더 큰 영향을 미치는 것으로 문헌 조사 및 연구 결과 나타났다. 온도 하중에 의한 영향을 보다 정확히 예측하고 설계에 반영할 수 있다면 포장 설계의 정확성 향상 및 국가 예산 낭비를 막을 수 있을 것이다. 본 연구에서는 기존의 온도 응력 예측을 위해 개발한 ABAQUS 모형을 개선하여 기존 모형과의 비교 검토를 통해 합리적인 온도 응력을 예측할 수 있는 회귀식을 개발하였다. 다양한 조건에 대해 민감도를 분석하고 피로 수명의 영향 정도를 파악하였으며 최종적으로 콘크리트 도로 포장 설계법 프로그램에 회귀식을 탑재할 예정이다.

### 2. 구조해석 모형

#### 2.1 기존 해석 모형의 문제점

기존 온도 예측 모형의 문제점은 표층 상하부 온도차에 의해 발생한 슬래브 내부의 온도 응력이 과대 평가 되었다. 그 이유는 콘크리트 표층을 모사하는 Shell 요소와 이를 지지하는 하부층을 요소가 Linear Spring으로 구성되어 있기 때문이다. 즉, 일반적으로 슬래브의 거동에 의해 하부층은 인장력을 받지 못하지만 기존 모형의 경우는 인장력을 받아 더 큰 응력을 발생할 수도 있다. 이러한 조건을 살펴본 결과가 그림 1이다. ISLAB2000에서는 이러한 인장력이 발생하지 않도록 Tensionless Spring을 적용하여 해석한 결과이다. 기존 모형의 해석 결과를 바탕으로 만들어진 응력 예측식이 KPRP 회귀식으로 표기된 것이다. 상하부 온도차가 15°C 이상이 될 경우 두 결과의 차이가 점점 커지는 것을 알 수 있다. 이 문제점을 해결하기 위해 기존 온도 예측 모형의 하부 Spring을 Tensionless Spring으로 교체하였다.

\* 정회원 · 중앙대학교 토목공학과 박사과정 · 02-816-0251(E-mail:htsrsw@hanmail.net)

\*\* 정회원 · 국토해양부 간선도로과 서기관 · 02-2110-8719(E-mail:lim579@mltm.go.kr)

\*\*\* 정회원 · 한국건설기술연구원 · 공학박사 · 031-9100-114(E-mail:cjlee4@kict.re.kr)

\*\*\*\* 정회원 · 중앙대학교 건설환경공학과 정교수 · 공학박사 · 02-820-5336(E-mail:yhcho@cau.ac.kr)

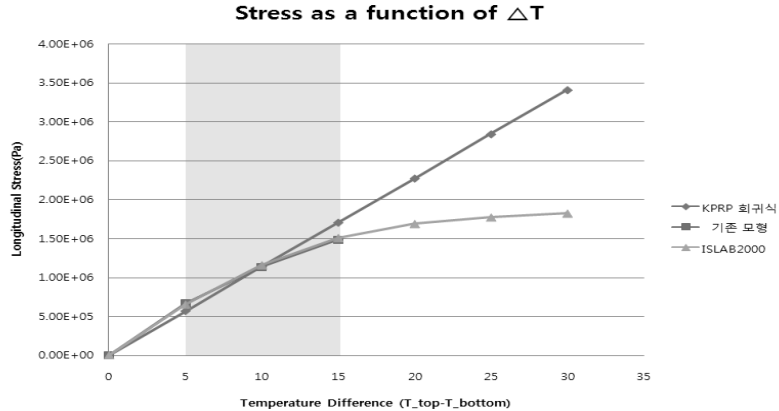


그림 1. 기존 온도 응력 예측 모형의 문제점

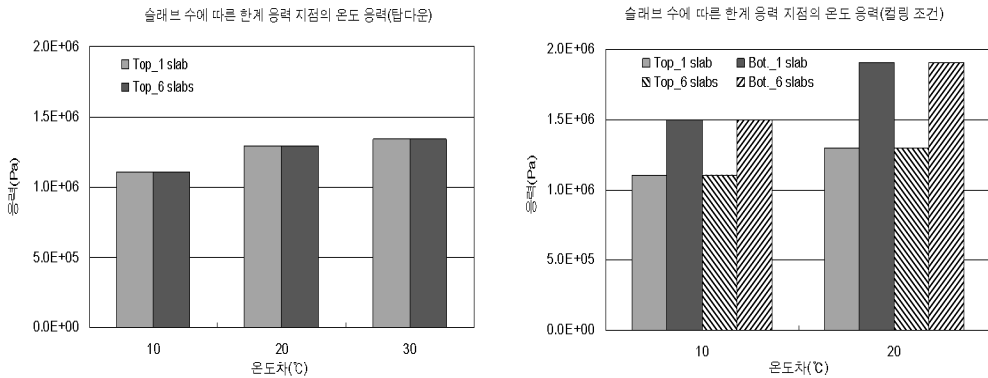


그림 2. 단일 슬래브 VS 다중 슬래브 및 탑다운 VS 바텀업 응력 결과 비교

## 2.2 구조해석 모형

새로운 해석 모형은 슬래브가 Shell 요소로 된 기존 모형의 하부를 개선하여 개발하였다. 해석 시간을 검토하기 위해서 2종류의 해석 범위에 대하여 검토하였다. 첫 번째는 콘크리트 슬래브가 종방향 3개, 횡방향 2개(3.6m×6.0m)이며, 다웰바/타이바를 모사한 것이다. 두 번째는 단일 슬래브로 하중 전달 장치는 없는 모형이다. 해석 두께는 일반적으로 시공되는 30 cm 콘크리트 포장 단면이다. 모형에 입력한 표층의 탄성계수 30 GPa, 단위 중량 2.4 ton/m<sup>3</sup>, 포아손 비 0.15, 열팽창계수 10.8  $\mu\text{e}/^\circ\text{C}$ 이며 하부 지지력은 243.9 MPa/m 이다. 한계응력은 종방향 단부의 종방향 응력에 대하여 검토하였다

해석 결과, 다중 슬래브 모형과 단일 슬래브 모형에서 한계 응력 지점의 응력 크기는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이 결과를 바탕으로 구조해석에 사용할 모형을 해석 시간이 짧게 소요되는 단일 슬래브 모형으로 결정하였다. 켈링에 따른 표층 슬래브의 모양이 달라지기 때문에 하부 스프링에 재하되는 하중이 달라진다. 때문에 켈링 다운(바텀업 응력)과 켈링 업(탑다운 응력)에 의해 발생하는 슬래브 내의 응력 크기를 검토하였다. 그 결과, 바텀업 응력이 탑다운 응력보다 1.4 배정도 크게 산출되는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 탑다운 응력과 바텀업 응력 회귀식을 각각 개발하였다.

### 3. 온도 응력 예측식 제안

#### 3.1 온도 응력 예측식 개발

단일 슬래브 모형에 Tensionless Spring 으로 하부 모형을 개선한 모형을 이용하여 기존과 같이 슬래브 길이, 탄성계수, 두께, 하부 지지력, 온도차, 열팽창계수를 해석 변수로 설정하였다. 탑다운 응력과 바텀업 응력에 대해 각각 729개의 조건에 대하여 구조해석을 실시하였다. 각 변수와 해석 결과를 이용하여 SPSS 통계분석 프로그램을 이용하여 표 1, <식 1>과 같은 새로운 회귀식을 개발하였다. 그 결과, 바텀업 응력 예측식은 R2=89 %, 탑다운의 경우는 R2=91 % 로 나타나 상당히 높은 설명력을 갖고 있음을 확인하였다.

#### 3.2 온도 응력 예측식의 민감도 분석

새로 제안한 온도응력 예측식과 기존 온도응력 예측식에 대한 비교를 위한 민감도 분석을 하였다. 앞서 구조해석에 사용한 입력 변수들에 대하여 분석한 결과, 그림 3과 같다. 전체적으로 기존 온도 응력 예측식이 온도 응력을 더 높게 평가하는 것으로 나타났다. 반면 앞서 살펴본 바와 같이 새로운 예측식은 바텀업 응력이 탑다운 응력보다 더 크게 예측하였다. 분석한 입력변수의 절대값에 따라 차이가 있지만 본 연구의 민감도 분석 조건에서는 전체적으로 온도차, 열팽창계수, 탄성계수, 슬래브 길이, 하부 지지력 순으로 그 크기가 증가할수록 온도 응력은 더 커지는 것으로 나타났다. 반면 슬래브 두께의 경우는 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다.

표 1. 새로운 응력식의 계수

구분		BU	TD
상수	T1	1.665	1.824
L : 길이(m)	T2	1.477	1.976
ΔT : 온도차(℃)	T3	0.648	0.471
Th : 두께(m)	T4	-0.822	-0.849
K : 지지력(Mpa/m)	T5	0.124	0.0844
E : 탄성계수(Pa)	T6	0.45	0.342
열팽창계수(με/℃)	T7	0.572	0.426

$$\sigma_{Temp} = 10^{t_1} \times L^{t_2} \times \Delta T^{t_3} \times K^{t_4} \times Th^{t_5} \times E^{t_6} \times \alpha^{t_7} \quad \text{<식 1>}$$

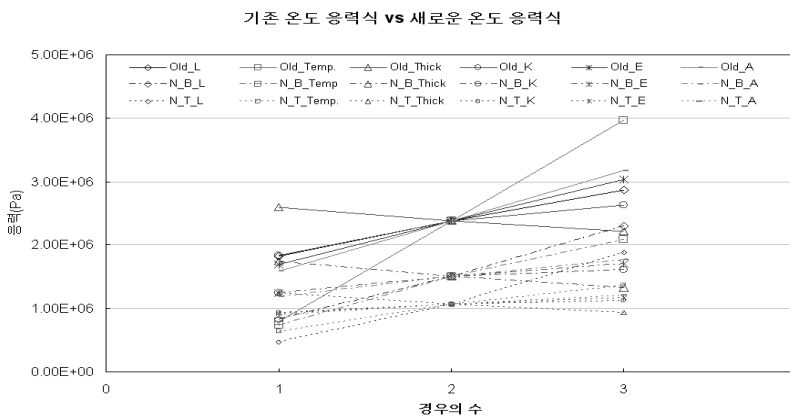


그림 3. 기존 온도 응력 예측식(Old)과 새로운 온도 응력 예측식(N\_U, B\_T)의 민감도 분석 결과

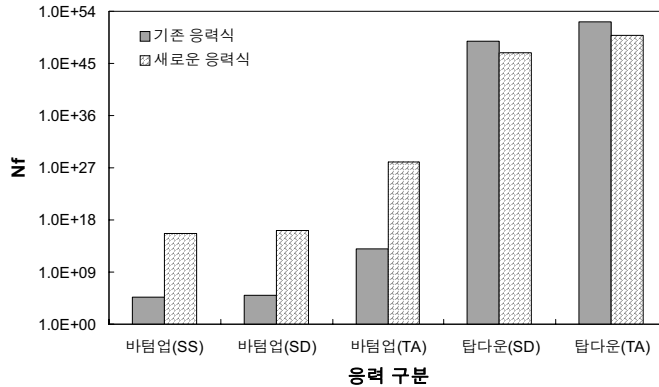


그림 4. 피로수명의 영향 검토

### 3.3 온도 응력 예측식에 따른 피로수명 검토

온도 응력 예측식이 피로 수명에 어떠한 영향을 미치는지를 파악하기 위하여 한국형 도로포장 설계법의 공용성 모형 중의 하나인 피로 수명 예측모형에 그 결과를 입력하여 피로수명을 산출하였다. 입력 변수는 두께 30 cm, 탄성계수 30 GPa, 열팽창계수 10  $\mu\text{e}/\text{C}$ , 243.9 MPa/m, 슬래브 길이 6 m, 온도는 6월달의 예측 온도로 바텀업 온도차는 23 $^{\circ}\text{C}$ , 탑다운 온도차는 -5 $^{\circ}\text{C}$ 이다. 차량 하중은 9종 차량으로 총중량은 30 ton, 콘크리트 휨강도는 4.5 MPa 로 가정하여 분석한 결과, 그림 4와 같다.

바텀업 피로 수명은 기존 온도 응력 예측식에 비해 새로운 식이 응력을 더 낮게 예측하여 피로 수명이 더 커지는 것을 알 수 있었다. 반면 탑다운 응력에 의한 피로 수명은 큰 차이는 없지만 피로 수명이 더 낮아지는 것으로 나타났다. 이러한 이유는 피로 수명 예측식 자체가 응력비 및 최소 응력이 피로 수명을 예측하는데 들어가 있기 때문이다.

## 4. 결 론

기존 콘크리트 포장의 온도 응력 예측식이 15 $^{\circ}\text{C}$  이상이 될 경우, 과대 평가하는 것으로 나타났다. 이를 개선하기 위해 Tensionless Spring을 이용한 모형으로 다양한 조건하에서 구조해석을 하였다. 그 결과를 이용하여 새로운 온도 응력 예측식을 개발하였고 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. Tensionless Spring 을 사용한 새로운 모형이 온도 응력을 더 낮게 평가하였으며, 기존과 달리 쉐어링 조건에 따른 탑다운 응력과 바텀업 응력의 크기가 다른 것을 확인하였다.
2. 새로운 개발한 온도 응력 예측식은 설명력이 높은 것으로 나타났으며 민감도 분석 결과 경향은 기존 것과 동일하였으나 절대적 크기는 차이가 있었다.
3. 한국형 도로 포장 설계법의 피로 수명 예측식에 대입한 결과, 바텀업의 경우는 피로수명이 증가한 반면, 탑다운은 감소하였다. 탑다운 응력이 감소하였음에도 불구하고 피로수명이 감소한 것은 피로수명 예측식의 입력 변수 중 응력비 및 최소 응력 조건 때문으로 판단된다.

### 참고 문헌

1. “한국형 포장 설계법 개발과 포장 성능개선 방안 연구”. 건설교통부, 2007. 10
2. “ABAQUS/Standard User’s Manual, Volume II”. Hibbitt, Karlsson & Sorensen, Inc, 2000
3. “Pavement Analysis and Design”. Hwang