

포장온도해석프로그램(CP3D)을 사용한 콘크리트포장 온도분포특성 연구

A Study on Temperature Distribution Characteristics of Concrete Pavement Using Thermal Analysis Program (CP3D)

유태석* · 한승환** · 이명규***

Yoo Tae Seok · Han Seung Hwan · Lee Myong Kyu

1. 서 론

포장은 외부 환경에 24시간 노출되면서 태양의 복사에너지, 바람의 영향 등으로 지속적인 온도구배의 변화가 발생하는데 이러한 온도구배는 하부의 모든 부분이 지면과 접촉하고 있는 포장이 복잡한 거동을 하게 하는 주요한 이유가 된다. 이러한 이유로 최근의 포장해석과 설계는 온도구배로 인한 거동을 중요한 요소로 생각하고 이를 고려한 결과를 도출하고자 하고 있으나 국내의 경우 이러한 연구를 체계적으로 하는데 필요한 포장 온도분포에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구는 콘크리트 포장에 주는 열원에 대한 분석과 모델링, 열원의 변화를 고려한 수치해석을 수행하고 이를 이용한 콘크리트포장의 슬래브, 줄눈부 및 아스팔트 포장 길어깨의 온도분포 특성을 조사하였다.

2. 온도해석을 위한 열원의 모델링

온도해석은 식과 같은 열전도 지배방정식으로부터 3차원 8절점 요소를 이용하여 수행되었다. 여기에서, ρ 와 c 는 각각 비열과 밀도를 나타내고 T 는 3차원 온도분포를 나타내는 함수를 의미하며 이때의 경계조건은 $T|_{s_1} = T_e$, $k_n \partial T / \partial n |_{s_2} = q^S$ 와 같이 표현된다. 이때, T_e 는 대기온도, k_n 는 물체의 열전도율이고, n 은 표면에 수직한 방향을 의미하며, q^S 는 표면에서 열류의 출입량을 나타낸다.

$$\frac{\partial}{\partial x} (k_x \frac{\partial T}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (k_y \frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z} (k_z \frac{\partial T}{\partial z}) + g = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (\text{식 1})$$

위의 지배방정식을 이용한 해석을 수행하기 위해서는 포장 경계에서의 열류 출입을 합리적으로 모델링하여야 한다. 본 연구에서는 날짜, 시간에 따라 불규칙하게 변하는 주변의 기상현상에 영향을 받게는 단면내의 온도분포를 구하기 위하여 주변의 대기온도, 태양복사강도, 재복사에 대한 모델링을 실시하였다. 포장의 표면과 주변대기 사이의 재복사로 인한 열전달은 Stefan-Boltzman 법칙에 의하여 모델되어진 비선형 경계조건으로 나타내어지고 본 프로그램에서는 이를 선형으로 근사시켜 사용하였다. 대기온도와 태양복사강도에 대한 고려는 다음과 같이 실시되었다.

* 정회원 · 한국도로공사 연구개발실 포장연구그룹 연구원 · 공학석사 · 02-2230-4659 (E-mail : TaeSeok@freeway.co.kr)
** 정회원 · 한국도로공사 연구개발실 포장연구그룹 책임연구원 · 공학박사 · 02-2230-4854 (E-mail : hansu@freeway.co.kr)
*** 정회원 · 전주대학교 토목공학과 교수 · 공학박사 · 063-220-2721 (E-mail : concrete@jeoniu.ac.kr)



2.1 주변대기의 온도변화

해석프로그램에서는 해석하는 콘크리트 포장구조물의 주변 대기 온도의 측정자료가 있는 경우에는 온도를 직접 입력 할 수 있도록 하였으며, 주변 대기 온도자료가 없는 경우에는 프로그램내에서 자동 생성되도록 하였다. 포장구조물의 대기온도는 Emanuel 등이 재현기간 11년 최고 온도 모델과 재현기간 4.5년의 최저 온도모델을 적용하여 식과 같이 계산하였다. 여기에서, d 는 일년중 날수를 h 는 그날의 시각을 의미한다.

$$T_{\max} = 4.3 \times \sin \frac{2\pi \times (h - 9.0)}{24} + 11.1 \times \sin \frac{2\pi \times (d - 110 + \frac{h}{24})}{365} + 17.6 \quad (\text{식 } 2)$$

$$T_{\min} = 4.1 \times \sin \frac{2\pi \times (h - 9.0)}{24} + 15.8 \times \sin \frac{2\pi \times (d - 110 + \frac{h}{24})}{365} + 3.5 \quad (\text{식 } 3)$$

위에서 얻어진 공식을 이용하고 표면온도와 대류 열전달계수를 사용하면 대류에 의한 열전달율을 구할 수 있다. 그러나 우리의 기후조건에 맞는 공식은 아니므로 데이터의 축적을 통한 개선이 기대된다.

2.2 태양복사에너지

태양복사에너지는 태양광선의 복사에 의해 구조물이 받는 열유입으로 무차원의 흡수율과 함께 태양복사의 열전달율로 환산된다. 포장의 표면에 도달하는 태양복사에너지 I_s 는 태양광선이 구조물 표면에 직접 도달하여 열에너지를 발생하는 직접복사(direct radiation)에너지 I_{dir} , 대기중에 산란되었다가 구조물에 도달하는 산란복사(diffuse radiation)에너지 I_{dif} , 지표에 반사되어 복사되는 지표복사(global radiation)에너지 I_{glb} 로 구성되며 일반적으로 수평면과 β 의 각을 이루는 면에서의 태양복사에너지의 총량은 다음으로 나타낼 수 있다.

$$I_{s, \beta} = I_{dir} \cdot \cos \theta_i + I_{dif} \frac{1 + \cos \beta}{2} + I_{glb, hor} \rho_g \frac{1 - \cos \beta}{2} \quad (\text{식 } 4)$$

여기서, $I_{glb, hor}$ = 수평면이 받는복사에너지 = $I_{dir} \cos \theta_s + I_{dif}$

θ_s = 태양의 천정각, θ_i = 태양의 입사각

β = 구조물표면이 수평면과 이루는 경사각

ρ_g 는 지표반사율 (0.2 : 눈이 덮이지 않은 경우, 0.7 : 눈으로 덮인 경우,
0.35 : 재량이 적은 콘크리트, 0.20 : 재량이 큰 콘크리트)

3. 콘크리트포장 온도해석

3.1 콘크리트포장 모델링

콘크리트포장의 온도해석을 위한 모델은 그림과 같다. 그림의 포장은 두께 30cm의 콘크리트 슬래브 아래에 15cm 두께의 린콘크리트와 15cm 두께의 선택층으로 구성된다. 선택층 아래에는 약 1.5m 가량의 동상방지층이 있으며, 맨 밑에는 노반이 놓이게 된다. 구조물의 불연속성이나 경계의 영향을 검토하기 위하여, 수축이 음부와 길어깨부분에 대한 상세 해석을 수행하였다.

주변 대기온도는 앞에서 설명한 우리 나라 대표모델을 적용하였다. 태양의 복사에너지는 년중변화, 태양의 고도변화에 따른 영향을 고려하여 내부계산된 값을 사용하였으며, 날씨는 맑은 것으로 가정하고 혼탁도를 3.0으로 하여 해석을 수행하였다.

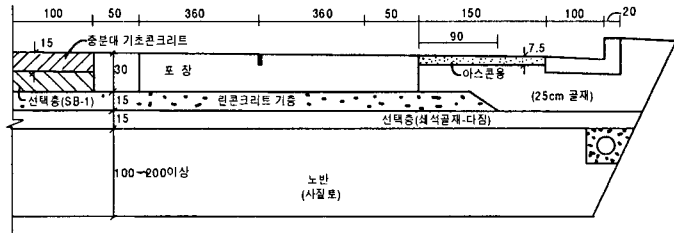


그림 1 해석을 수행한 편도 2차선 콘크리트 포장의 개요도

3.2 수축이음부의 온도분포 해석

수축이음부는 그림 2와 같이 모델링하였고 1월 21일 오후1시의 표면하부 0.6m 및 1.6m의 온도 분포는 다음 그림 3과 같다. 그림과 같이 1.6m에서의 변화는 거의 없으나 0.6m에서 변화를 나타내어 외기온도의 영향 깊이를 추정할 수 있었다.

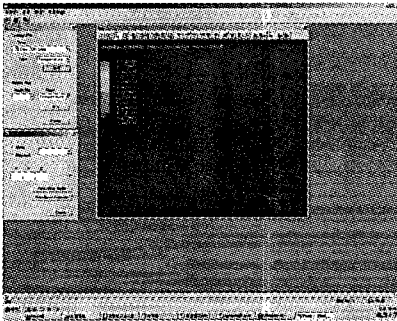


그림 2 수축이음부 모델링

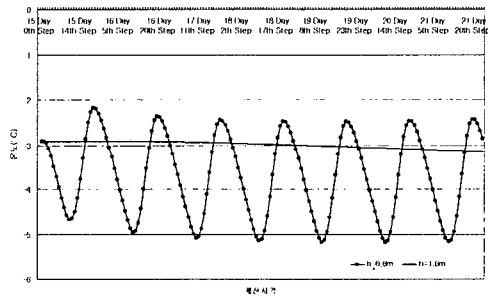


그림 3 콘크리트 기층에서의 온도이력

3.3 길어깨의 온도분포 해석

그림 1의 아스팔트 길어깨에 대하여 오후 1시 및 오전 6시에 대하여 온도분포 해석을 수행하였다. 아스팔트의 열전도율은 콘크리트의 약 20배에 달하는데 이러한 영향으로 그림 4, 5와 같이 표면의 온도가 하부의 온도에 비해서 빨리 올라가 급격한 구배를 나타내었다. 또한 아스팔트층 아래의 골재부에서부터 온도변화가 둔화되는데 아스팔트 층과 접하는 부분을 지나면 온도변화가 적어져 본선에 비해 얇은 영향깊이를 가지는 것으로 판단되었다.

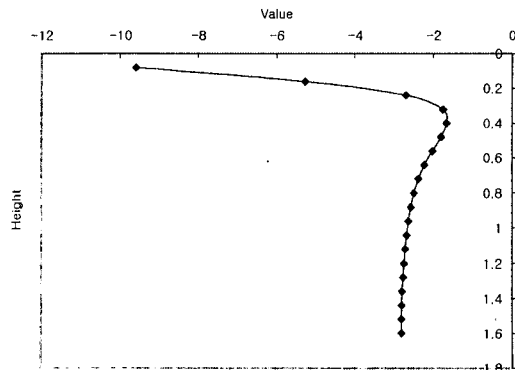
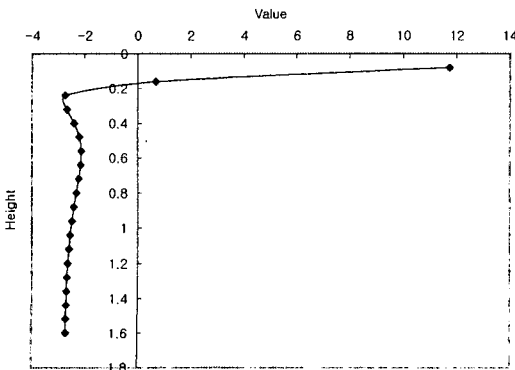


그림 4 길어깨 아스팔트 아래 온도구배(오후1시) 그림 5 길어깨 아스팔트 아래 온도구배 (오전6시)

3.4 본선포장의 온도 구배

본선포장에 대하여 길어깨와 같은 시간에서의 해석을 수행하였고 그림 6 및 7과 같은 결과를 나타내었다. 그림과 같이 콘크리트포장 표면에서의 온도경계조건 변화에 의한 온도구배는 주로 슬래브 내에서만 발생하였고 비선형의 온도분포를 나타내었다. 특히 발생하는 온도구배는 포장의 표면 60cm이내에서 크게 변하며 그 이상의 깊이에서는 온도변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 본 장에서 수행한 온도구배에 대한 시뮬레이션 결과는 그 합리성에 대한 현장보충 실험 등을 통하여 포장체의 거동예측에 대한 기초적인 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

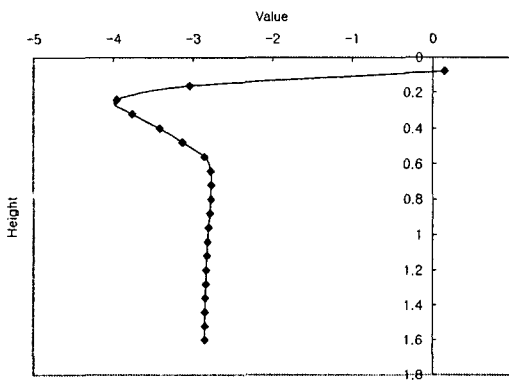


그림 6 콘크리트 포장 아래 온도구배 (오후1시)

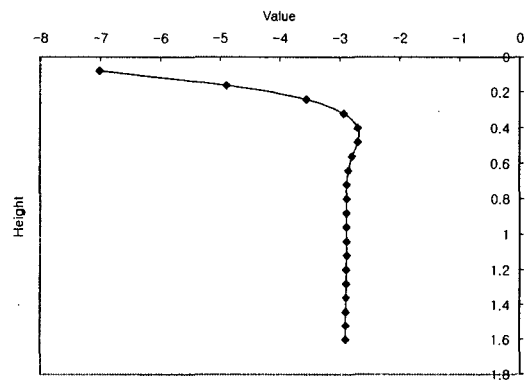


그림 7 콘크리트 포장 아래 온도구배(오전6시)

4. 결 론

대기온도, 태양에너지의 영향을 고려한 콘크리트포장의 3차원 온도분포특성을 해석하였다. 해석결과 본선포장의 경우 줄눈의 존재로 인해 포장체 내부의 온도분포가 받는 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 또한 온도구배는 슬래브 내부에서 비선형의 분포로 발생하고 표면하부 60cm이내에서 온도구배가 크게 변하지만 그 이하에서는 온도변화가 크지 않은 결과를 보였다. 아스팔트포장 길어깨의 경우 흡수도가 큰 아스팔트 포장의 온도 상승이 크고 이러한 온도분포가 아스팔트 층과 인접한 보조기층 부분의 온도변동에 큰 영향을 주는 것으로 판단되었다. 그러나 깊이가 깊어질수록 점점 온도변화가 둔화되어 본선포보다 영향깊이가 얕은 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 한승환 외, "영업소 광장부 포장 개선 방안 연구(I)," 도로연 01-23, 2001.
2. Finney, E. A., and L. T. Olchler, "Final Report on Design Project, Michigan Test Road," Proc. Highway Research Board, Vol.38, 1959.
3. Design and Performance of Road Pavements, Crony, D., and Croney P., 3rd Edition, McGraw Hill, NewYork, U.S.A., 1997.
4. Hsieh C.K., Chaobin Qin, and Ryder E.E, "Development of Computer Modeling for Prediction of Temperature Distribution Inside Concrete Pavements" University of Florida Mechanical Engineering Department Gainseville, Florida 32611, 1988.