

포장 열영향 해석을 위한 아스팔트 열원 평가

Numerical Modeling of Heat Analysis of Bridge Pavement

이 완 훈* · 유 병 찬** · 정 흥 진***

Lee, Wan-Hoon · Yoo, Byoung-Chan · Chung, Heung-Jin

ABSTRACT

Guss asphalt used in pavement of a steel deck bridge may cause severe stress and displacement on the bridge as it is treated using very high temperatures ranging from 220°C to 260°C. Therefore, it is critical to estimate the thermal effect of Guss asphalt on the steel deck bridge before the width and pattern of the unit portion are decided to minimize impact. In this study, introduce a new analysis method styled the Heat source of equivalent of the cable stayed bridge were conducted to verify the feasibility of numerical value analysis by comparing the results with the data measured. The thermal effects of Guss asphalt on the steel deck bridge according to temperature changes were also studied.

Keywords: Guss asphalt, steel deck bridge, heat source, temperature change, thermal effect.

1. 서 론

강바닥판 교량에 적용되고 있는 구스아스팔트 포장은 기존의 아스팔트에 비하여 강바닥판과의 수밀성, 부착성, 내구성 등에서 우월한 특성을 가지는 것으로 알려져 있다. 그러나 구스아스팔트는 220°C ~ 260°C의 고온상태에서 시공되며 이때 강바닥판의 하면에는 100°C ~ 130°C 정도의 온도 상승이 유발되며 포장체에 의한 열 영향으로 구조물에 문제가 발생할 수 있다. 따라서 교량설계 시에 정확한 열전달 해석을 통하여 발생하는 열응력과 열변형을 검토할 필요가 있다.

기존 연구에서 이완훈 등(2002)은 선형으로 단순화시킨 온도하중을 이용하여 열 영향을 검토하였으나 연결부재료의 열전달 및 대기로의 열방출을 고려하지 못하는 단점이 있다. 서기홍 등(2006)은 2차원 모델에 영향선 개념을 이용한 근사해석을 사용하였으나 교량의 2차 부재 및 다이아프램 등의 구속효과, 기상조건 그리고 포설패턴 등을 고려하지 못하였다. 따라서, 본 연구에서는 포장체의 열 영향을 보다 정확히 평가하기 위하여 먼저 [1]기존 계측자료와 2차원 정밀수치해석결과를 비교하여 해석계수를 검증하고, [2]실제 교량 수치 모델에 적용하기 위하여 열원을 산정하였으며, [3]실제 교량구조물에 적용하여 그 열 영향의 결과를 기존의 이완훈 등(2002)의 방법과 비교하여, 제안하는 해석방법의 타당성을 검증하고자 한다.

* 정회원 · 청운대학교 철도행정토목학과 교수 Email: whlee@chungwoon.ac.kr

** 학생회원 · 전주대학교 토목환경공학과 석사과정 Email: chany1120@nate.com

*** 정회원 · 전주대학교 토목환경공학과 교수 Email: hjchung@jj.ac.kr

2. 열전달 해석계수 검증

2.1. 시간에 따른 온도변화 해석

본 연구에서는 고온의 포장체의 영향에 따른 강상판의 거동을 다루는 것으로 시간에 따른 열전달 해석 및 열응력해석이 필요하다. 열전달문제의 지배미분방정식을 얻기 위해 먼저 일정한 체적 V 에 대하여 식 (1)과 같은 열에너지 보존식을 사용한다.

$$\int_V cv \frac{\partial T}{\partial t} dV = - \int_S n \cdot q \cdot dS + \int_V Q dV \quad (1)$$

여기서, $cv = du/dt$ (비열, u 는 단위체적당 에너지), n 은 경계 S 에서의 법선벡터, q 는 열유속(heat flux), Q 는 단위체적당 내부 발열속도이다. 발산정리를 이용하면 경계 적분을 체적적분으로 바꿀 수 있으므로 식(2)와 같은 지배미분방정식을 얻게 된다.

$$cv \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}q - Q = 0 \quad (2)$$

여기에 푸리에 열전도식을 적용하면 식 (3)의 온도에 대한 미분방정식을 얻게 된다.

$$cv \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}[k(\text{grad}T)^T] - Q = 0 \quad (3)$$

그리고 식 (3)에 적절한 경계조건과 초기조건을 고려해서 유한요소 정식화를 거치면 식 (4)를 유도할 수 있다.

$$[C]\{\dot{T}\} + [K_T]\{T\} = \{R_T\} \quad (4)$$

여기서, C 는 비열행렬(Specific Heat Matrix), K 는 전도행렬(Conductivity Matrix), R 은 영역의 표면에서의 열유속과 대류경계에서의 열전도 및 내부 발열을 나타내는 벡터이다. 본 연구에서처럼 국부적으로 급격한 온도변화가 있는 문제의 경우는 직접 시간적분법이 알맞다. 직접시간적분법은 Δt 로 분리된 두 온도 상태 $\{T\}_n$, $\{T\}_{n+1}$ 를 고려할 때, 시간 적분은 다음 식을 이용 한다

$$\{T\}_{n+1} = \{T\}_n + \Delta t \{ (1 - \beta)\dot{T}_n + \beta\dot{T}_{n+1} \} \quad (5)$$

한편, 온도차에 의한 변형률의 영향을 포함한 응력-변형률 관계는 식 (6)과 같다.

$$\{\sigma\} = [E](\{\epsilon\} - \{\epsilon_T\}) = [E] \left(\{\epsilon\} - \begin{Bmatrix} \alpha T \\ \alpha T \\ 0 \end{Bmatrix} \right) \quad (6)$$

여기서, $\{\epsilon_T\}$ 는 온도차에 의한 변형률이다.

따라서 온도의 변화는 구조물에 응력을 발생시키는 중요한 요인 중의 하나이며, 보다 정확한 열 영향의 검토를 위해서는 시간에 따라 변동되는 온도의 분포를 적절히 고려하여야 한다.

2.2. 포장체 물성치

열전달, 열응력 해석에 있어서 재료의 물성치는 해석결과에 큰 영향을 미치는 중요한 인자이다. 따라서 열전달 계측값과 열전달 수치해석의 결과를 비교 검토하는 방법으로 수치해석에서 사용될 물성치 계수를 선정하였다. 그림1은 계측 실험시의 구조물 형상과 계측기의 위치를 표시한 것이다. 측정은 1분 간격으로 실시하였다.

2차원 수치해석에는 ANSYS를 사용하였으며 사용한 구스 아스팔트의 물성치는 주요 성분인 아스팔트, 골

재(화강암)의 물성치를 중량비로 고려하여 평균한 것이며, 편차에 의한 계수의 변동은 계측 결과와 가장 유사한 결과를 보이는 계수로 선정하였다. 대기 온도는 16°C, 바람의 영향은 거의 없는 상태로, 대류계수는 11 $W/m^2 \cdot C$ 이 사용 하였다. 사용한 물성치는 표 1에 나타낸바와 같다.

모델링에 사용한 요소는 2차원 8절점 요소(plane77)이며, 강바닥판의 두께에 따른 영향을 고려하고, 계측 시와 유사한 결과를 도출하기 위하여 요소의 크기는 충분히 작게 하였다. 정밀해석은 시간이 지나면서 온도가 변하는 과도열전달해석(Transient Heat Analysis)을 실시하였고, 80분 동안 실시하여 강제 및 포장체의 온도 변화를 살펴보았다. 해석결과 강바닥판(ch2)은 약 12분 만에 최대 온도 132°C를 보였으며, 초기 온도 16°C를 고려하면 온도 상승량은 116°C였다. 그림 2는 최대온도를 보인 12분에서의 강바닥판 및 포장체의 온도분포이다.

표 1. 포장체 및 강재의 물성치

항 목	단위	포장체	강재
초기온도	$^{\circ}C$	260	16
열전도도	$W/m \cdot C$	1.6	74
밀 도	Kg/m^3	2,491.7	7,870
비 열	$J/kg \cdot C$	871.1	420

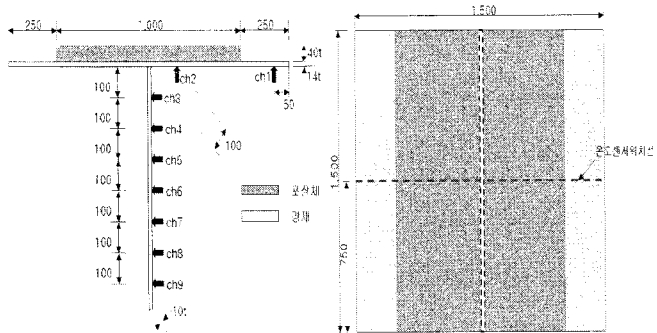


그림 1. 계측 모델의 형상

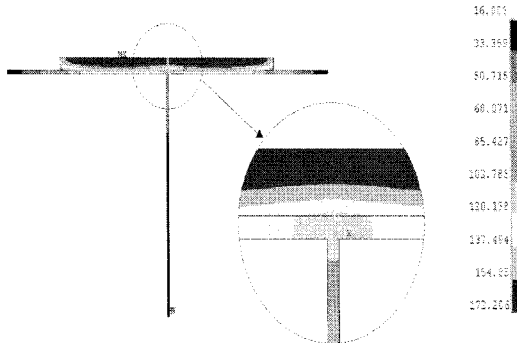


그림 2. 정밀 해석 결과 온도분포 (12분)

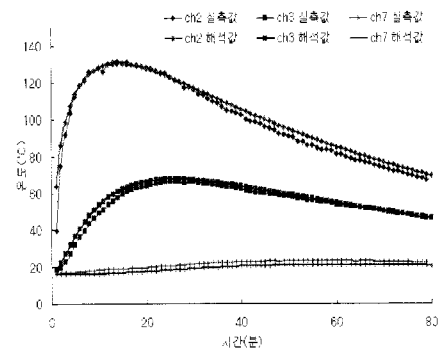


그림 3. 측정값과 해석값의 온도비교

포장체의 열이 강바닥판은 물론 하부 부재까지 전달되어 영향을 미치고 있는 것을 확인 할 수 있으며, 이러한 수치해석 결과를 앞서 실시한 계측 결과와 비교하였다. 그림 3에서 계측값과 해석결과가 주요위치에서 온도변화 값이 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있으므로 표 1의 물성치와 해석 방법이 적절하다고 판단되며, 산정한 물성치를 열영향 평가를 위한 수치해석에 적용하였다.

3. 열원의 산정

열전달 및 열전도 해석을 위한 강교량 구조물의 3차원 수치해석 모델은 쉘/평판요소와 보요소를 적절히 사용하여 구성한다. 따라서 고체요소의 경우에 가능한 표면열전도, 표면열전달 해석기법을 그대로 적용할 수 없기 때문에 쉘/평판요소를 사용한 3차원 해석모델의 열전달 및 열도해석을 위한 가상 등가열원을 산정하였다.

포장체 시공 시 발생하는 열전달 현상을 그림4를 이용하여 간단히 살펴보면, 포장체의 열은 인접한 부재로 전도(conduction)현상에 의해 전달되며, 강재 및 포장체의 표면에서는 대류열전달(convective)이 발생한다. 그리고 쉘/평판요소나 빔요소로 구성된 교량 수치해석모델에서 대류의 영향을 고려하기 곤란하므로, 대류의 영향을 포함하는 열원 하중을 산정하였다. 강재가 대류 및 전도에 의한 온도의 영향을 그림 5와 같이 나타낼 수 있다.

그림 5의 온도곡선 ①은 전도나 대류의 영향을 고려하지 않은 경우 강재에 발생하는 시간에 따른 온도변화이며, 대류의 영향을 고려하게 되면 받으면 강재 표면으로부터 열발산에 의해 곡선 ②와 같이 강재의 온도는 감소하게 되고, 보강재 및 측면부재 등을 통해 전도까지 고려하면 강재의 온도는 곡선 ③과 같이 나타난다. 열전도는 쉘/평판요소 및 보요소로 해석 프로그램 내에서 구현되므로, 대류현상을 고려한 열원을 산정할 필요가 있다. 열원 산정을 위한 포장체의 초기 온도를 250°C이며, 시간범위는 210분(3.5시간)으로 설정하였다. 이를 위한 일련의 수치해석 결과 강바닥판에 해당하는 강바닥판(ch2) 위치의 시간에 따른 온도변화 곡선을 그림 7과 같이 산정하였으며, 이 온도변화 곡선 그림 7을 이용하여 그림 8에 나타난 바와 같은 열원을 산출하였다. 그림 7의 온도변화 곡선은 그림 5의 ②에 대응하는 곡선이며, 그림 8의 열원곡선은 3차원 교량 수치해석의 열원으로 사용된다.

포장체에서 강바닥판에 유입된 열에너지(E_{in})는 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{in} = \Delta U_e + E_{out} \quad (7)$$

실제 교량 해석 모델에서는 대류로 인한 열손실을 계산하지 않으므로 등가열원에 의한 등가에너지 식 (8)로부터 산정된다.

$$E_{eq} = \Delta U_e + E_{conv} = c\rho V_e \Delta T \quad (8)$$

여기서, c 는 비열($J/kg \cdot C$), ρ 는 단위체적당 질량(kg/m^3), V_e 는 요소의 체적이다. 그리고, 시간당 강바닥판에 유입되는 열에너지는 식 (8)에 시간당 유출된 에너지 항을 추가한 식(9)를 이용하여 산정될 수 있다.

$$Q = \frac{\Delta U_e}{\Delta t V_e} = c\rho \frac{(\Delta T + \Delta T_m)}{\Delta t} \quad (9)$$

따라서 식 (9)를 이용하여 강바닥판의 열영향 검토를 위한 열원을 얻을 수 있다.

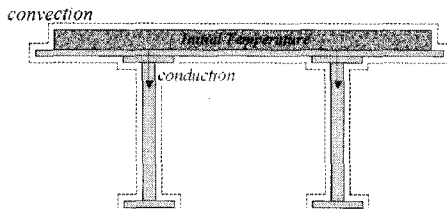


그림 4. 교량이 받는 구스아스팔트의 열영향

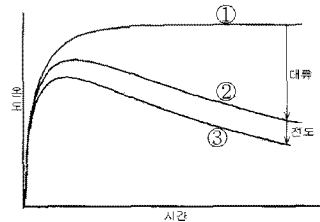


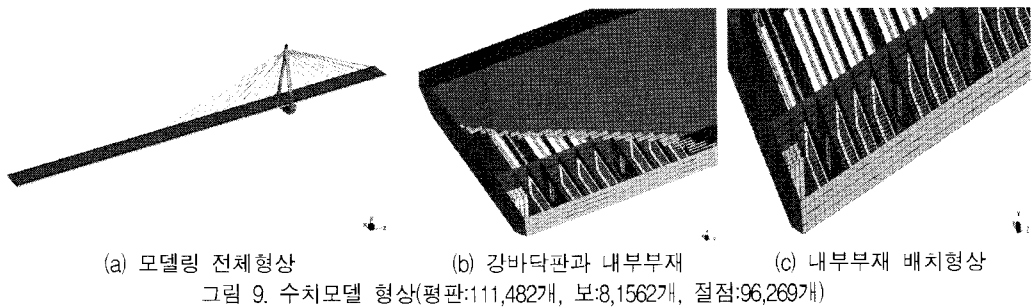
그림 5. 강재가 받는 열영향

4. 강바닥판 교량의 열영향 해석

산정된 열원을 이용하여 구스아스팔트의 열영향을 검토하기 위하여 강바닥판 비대칭 사장교 해석하였다. 아스팔트 포장에 의한 열영향은 발생변위, 지지점 이동량, 비대칭 변위량, 최대 발생응력 등의 항목을 위주로 검토되어야 하지만 본 연구에서는 기존 검토 방법과 열원을 이용한 부재별 발생응력만을 비교하였다. 수치해석으로 도출된 응력은 Von Mises 응력으로 산출하여 허용응력과 비교하는 방법이 일반적이며 포장 열영향에 대한 강재의 허용응력 할증계수는 시공 중 그리고 온도하중 재하시의 할증계수 이용하여 산정한다(허용응력할증계수 ; $\alpha = 1.15 \times 1.25 = 1.4375$).

4.1. 수치모델 형상

수치해석에 사용된 비대칭 사장교의 형상은 그림 9와 같다



4.2. 포장체의 포설순서 및 포설폭

수치해석 대상교량은 교폭 20m, 교강이 500m이다. 포장체 포설순서는 교량의 경사 및 구조형상 그리고 1일 시공가능 물량 및 시간을 고려하여 설정하였으며 포설폭은 아스팔트 포장체의 품질관리를 위하여 U-리브, 강바닥판의 용접선, 그리고 차륜의 위치와 겹치지 않도록 설정하였다. 시공속도는 1.0m/분을 기준으로 하였다.

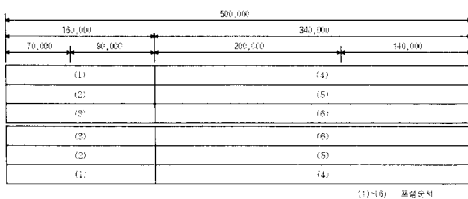


그림 10. 구스아스팔트 포설순서

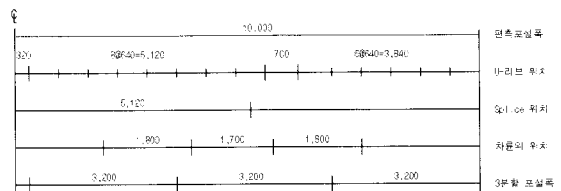


그림 11. 포설폭 분할

4.3. 수치해석결과

수치해석결과 발생응력 분포는 그림 12같으며 포장 시공 중 구조물에 발생하는 최대 응력의 크기는 표 2에 정리하여 나타낸 바와 같다.

표 2. 발생 최대응력(단위:kgf/cm²)

부재명	기존방법	열원해석
강바닥판	2,707	2,933
하부평판	2,316	2,449
격막 및 웨브	2,422	2,232
U-리브	2,982	2,454

허용응력 : 3,018kgf/cm²

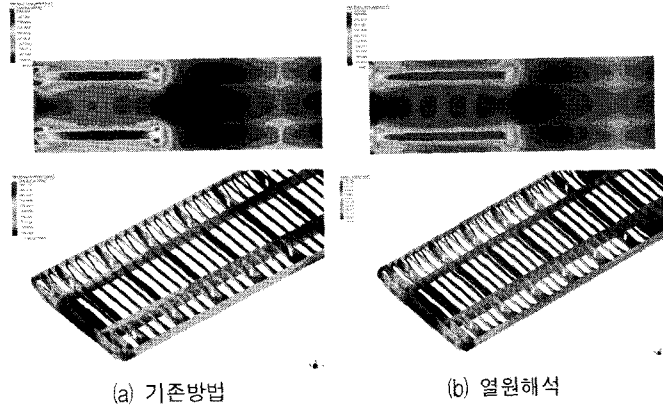


그림 12. 수치해석결과

5. 결 론

열원을 이용한 열전도 해석 및 열응력 해석을 통하여 보다 합리적이고 실제에 가까운 구스아스팔트 포장 시 강바닥판에 발생하는 변위 및 응력의 정도를 평가할 수 있는 기틀이 마련되었다고 판단된다.

참 고 문 헌

- 이완훈외1명 (2006) 특수포장 실무자를 위한 강바닥판 교량의 열영향, 구미시관.
- 서기홍외3명 (2006) 영향선을 이용한 강상판 교량의 구스아스팔트 포장에 대한 근사해석 연구, 한국구조물진단학회지, 한국구조물진단학회, 10(4), pp127-134.
- 이완훈외2명 (2002) 영종대교 하로도로 강바닥판의 구스아스팔트 열 영향, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 22(3), pp.489-497.
- 김태훈 (2000) 영종대교 구스아스팔트 포장 시공보고서, 한국도로포장공학회지, 한국도로포장공학회, 2(4), pp.57-67.