

강바닥판 교량의 포장시 열영향 해석을 위한 등가열원 산정기법

An Estimation of Equivalent Heat Source for Thermal Analysis of Steel Deck Bridge under Pavement Procedure

정 흥 진† 유 병 찬* 이 완 훈**

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

(논문접수일 : 2007년 7월 9일 ; 심사종료일 : 2007년 8월 8일)

요 지

강바닥판 포장에 사용될 수 있는 특수아스팔트 중의 하나인 구스아스팔트는 240°C에서 260°C의 고온 상태에서 시공되기 때문에 강바닥판에 예상하지 못한 열응력 및 열변형을 발생시킬 수 있다. 따라서 구스아스팔트의 타설 중에 강바닥판에 미치는 열영향을 시공조건을 고려하여 사전에 평가하고 그 영향의 최소화를 위해서는 열전달 및 열응력 수치해석을 실시하여야 하지만 구조해석에서 주로 사용되는 평판/보요소의 특성상 3차원 구조해석 모델에서 구현하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 강바닥판 교량의 열영향해석을 위하여 일반적인 구조해석모델에 직접 적용할 수 있는 등가열원(EHS) 산정방법을 제안하였다. 강바닥판 교량의 구스아스팔트에 의한 열영향을 정확히 평가하기 위하여 (1) 기존의 실험결과를 이용하여 열전달해석에 필요한 물리량을 검증하고, (2) 정밀해석을 통해 3차원 교량모델에 적합한 등가열원을 산정하였으며, (3) 이를 해석모델에 적용하여 산정한 등가열원에 의한 수치해석방법의 타당성을 검증하였다. 본 연구에서 제안된 등가열원은 실제 강교량의 3차원 열전달 및 열응력 해석에 즉각 활용될 수 있으며, 등가열원산정기법은 용접잔류응력해석, 교량의 화재해석 등 열영향을 받는 다른 공학적 해석에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 강바닥판, 열전달해석, 아스팔트, 강교량

Abstract

Since the temperature of asphalt for deck plate of steel bridge during paving procedure is relatively high as 240°C to 260°C, the temperature of deck plate of bridge rises more than 100°C and excessive displacement and stress could occur. In order to avoid undesirable failure of base plate and determine the optimal pavement pattern, a thorough thermal analysis is needed. General structural model which is made of beam and plate element should be modified for transient heat transfer analysis; asphalt pavement material and convection effect on surface of structure need to be added. A new technique with the Equivalent Heat Source (EHS) for numerical thermal analysis for steel bridge under thermal load of Guss asphalt pavement is proposed. Since plate/beam elements which were generally used for structural analysis for bridge cannot explain convection effect easily on plate/beam surface, EHS which is determined based on calculated temperature with convection effect is used. To verify the EHS proposed in this study, numerical analyses with plate elements are performed and the results are compared with estimated temperatures. EHS might be used for other thermal analyses of steel bridge such as welding residual stress analysis and bridge fire analysis.

Keywords : Steel deck plate, heat transfer analysis, asphalt, steel bridge

1. 서 론

강바닥판 교량에 적용되는 아스팔트는 일반 아스팔트 포장체와 비교하여 열악한 상황에 노출되기 때문에 일반적인 성

능 이외에 다음과 같은 추가적인 성능이 요구된다. 먼저, (1) 상대적으로 유연한 강바닥판 교량의 변형을 잘 추종해야 하고, (2) 포설 시공중 일시적으로 발생하는 고온에 견뎌야 하며, (3) 저온에서도 균열이 발생하지 않는 우수한 피로성

† 책임저자, 정희원 · 전주대학교 토목환경공학과 부교수
Tel: 063-220-2755 ; Fax: 063-220-2056
E-mail: hjchung@jj.ac.kr

* 학생회원 · 전주대학교 토목환경공학과 석사과정

** 정희원 · 청운대학교 철도행정토목학과 부교수

• 이 논문에 대한 토론을 2007년 12월 31일까지 본 학회에 보내주 시면 2008년 2월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

능을 가져야 할 뿐만 아니라, (4) 강바닥판의 표면에 잘 부착되어 방수기능과 녹방지 기능 등을 갖추고 있어야 한다. 국내에서는 위와 같은 성능을 갖춘 구스아스팔트가 강바닥판 교량의 포장에 적용되고 있다. 국내 구스아스팔트 혼합물은 일반적으로 트리니다드레이크 아스팔트(TLA)와 석유아스팔트를 혼합한 경질아스팔트와 굵은 골재, 잔골재 및 채움재 등으로 구성되며, 기존의 아스팔트에 비하여 강바닥판과의 수밀성, 부착성, 내구성 등에서 우월한 특성을 가지는 것으로 알려져 있다(이완훈, 2006). 최근 국내 강바닥판 교량의 수요가 꾸준히 증가하고 있고, 기존 포장체의 잦은 보수/보강에 따른 추가비용 등을 해결하기 위한 방법으로 강바닥판 교량의 포장으로 채택되고 있다. 그러나 구스아스팔트는 기존 아스팔트와 달리 240℃~260℃의 고온상태에서 적절한 시공과 품질관리가 가능하므로 시공 중 과도한 온도에 따른 열변형과 열응력이 발생하게 된다(이완훈, 2006). 이러한 국지적인 열응력 및 온도의 차이에 의한 잔류변형등은 강교량의 장기적 수명에도 불리한 영향을 미치게 되며, 강교량의 수명 산정시 반드시 고려되어야 한다(Satya N. Atluri, 1997). 고온상태의 구스아스팔트 포장체가 3~4cm의 두께로 강바닥판에 시공되면, 강바닥판은 약 100℃~130℃정도로 상승하는 것으로 알려져 있고, 이러한 온도 상승은 시공중인 구조물에 열변형을 유발하며 시공 후에는 잔류응력 및 잔류변형의 형태로 남게 된다. 따라서 포장의 속도, 규모, 순서 등의 내용을 담은 포장계획을 수립하여야 하며 이를 위해서 포장 과정에 대한 열전달 및 열응력해석을 통하여 열응력 및 열변형을 예측하여 최적의 시공 방법을 결정하여야 한다.

이와 관련하여 최근 다양한 연구가 이루어지고 있는데, 이완훈 등(이완훈 등, 2003)은 계측한 온도의 분포를 선형으로 단순화시켜서 온도하중의 형태로 순차적으로 적용하는 방법을 제안하였으나 연결부재로의 열전달 및 주변 대기로의 대류에 의한 시간에 따른 온도의 변화를 정확하게 모사하지 못하는 단점이 있었다. 또한 구스아스팔트 시공시 관찰되어 보고된 바 있는 교좌장치의 부반력 발생현상을 효과적으로 고려해주시 못하고 있다. 서기홍 등(서기홍 등, 2006)은 2차원 교량해석모델에 영향선 개념을 이용하여 근사해석을 하였고 계산이나 실행방법이 간단하지만 온도를 일정하게 고정하였고, 기상조건이나 포장시공계획에서 중요한 타설패턴 등을 고려하기 어려운 문제점이 있었다. 기존의 연구들은 모두 고정된 온도분포를 가정하여 사용하였기 때문에 열전도나 대류에 의한 열손실에 영향을 미치는 시공시 기온과 바람의 세기 등을 고려하기가 어렵다.

본 연구에서는 구스아스팔트 시공시 강바닥판에 미치는 열영향을 보다 정확히 평가하기 위하여 먼저 실측자료와 포장

체를 모델링한 해석결과를 비교하여 사용된 과도열전달해석 기법(transient heat transfer analysis)과 수치해석 과정에서 적용된 물성치의 타당성을 검증하였다. 그리고 시험모델의 엄밀해석을 통해서, 교량의 구조해석모델에 쉽게 적용되고 구스아스팔트의 온도하중 상태를 구현할 수 있는 등가열원을 산정하고 수치해석을 통하여 검증하였다. 본 연구에서 제안한 등가열원은 기존의 연구들에서는 고려할 수 없었던 강바닥판 교량의 실제 시공시 환경조건을 고려하여 산정할 수 있기 때문에 보다 정확한 아스팔트 포장 시공 중 열영향을 평가할 수 있다.

2. 해석 방법 및 해석 모델 검토

2.1 과도 열전달 및 열응력 해석법

본 연구에서는 포장체의 타설에 따라 시간에 따라 변하는 온도와 이에 따른 열응력을 구하여야 하므로 과도열전달해석이 필요하다. 열전달에 대한 지배미분방정식을 유도하기 위하여 다음과 같은 임의의 체적(Control Volume) V 에 대한 열에너지 변화식을 얻었다(Petr Krysl, 2005).

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

여기서 T 와 t 는 각각 온도와 시간이며, $c_V = du/dT$ 는 비열(specific heat), u 는 단위체적당 에너지, \mathbf{n} 은 경계 S 에서의 법선벡터, \mathbf{q} 는 열유속(heat flux)벡터, Q 는 단위체적당 내부 발열속도이다. 발산정리를 이용하여 경계적분을 체적적분으로 바꾸면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\int_V c_V \frac{\partial T}{\partial t} dV = -\int_V \text{div } \mathbf{q} dV + \int_V Q dV \quad (2)$$

식 (2)가 임의의 체적에 대하여 성립한다면 다음과 같은 미분방정식을 얻게 된다.

$$c_V \frac{\partial T}{\partial t} + \text{div } \mathbf{q} - Q = 0 \quad (3)$$

한편, 열유속은 열전도계수 κ 와 온도를 포함하는 Fourier 열전도 관계식

$$\mathbf{q} = -\kappa(\text{grad } T)^T \quad (4)$$

으로 나타낼 수 있으므로 다음과 같은 경계조건을 갖는 열평형 미분방정식을 얻게 된다.

$$c_v \frac{\partial T}{\partial t} - \text{div}[\kappa(\text{grad} T)^T] - Q = 0 \quad (5)$$

여기서 경계조건 및 초기조건은 고정온도경계(S_1), 열유속경계(S_2) 및 대류경계(S_3)에서 각각 다음과 같다. 즉 경계조건은

$$T(x, t) - \bar{T}(x, t) = 0, \quad x \text{ on } S_1 \quad (6a)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} - \bar{q}_n = 0, \quad \text{on } S_2 \quad (6b)$$

$$\mathbf{n} \cdot \mathbf{q} - h(T - T_a) = 0, \quad \text{on } S_3 \quad (6c)$$

이며 초기조건은,

$$\bar{T}_0(x) = \bar{T}(x, 0), \quad x \text{ on } S_1 \quad (7)$$

이 된다. 식 (5)는 유한요소 정식화를 거치면,

$$[C]\{\dot{T}\} + [K_T]\{T\} = \{R_T\} \quad (8)$$

을 얻을 수 있다. 여기서 C는 비열행렬(specific heat matrix), K는 전도행렬(conductivity matrix), R은 영역의 표면에서의 열유속, 대류경계에서의 열전도, 내부 발열 등을 나타내는 벡터이다. 과도열전달해석은 일반적으로 모우드방법(modal method)과 직접적분법(direct time integration method)이 있으며(Cook R.D., 2002), 본 연구에서처럼 교량 전체보다는 아스팔트 포설위치에서 국부적으로 단기간에 급격한 온도변화가 있는 문제의 경우에는 직접적분법을 사용하는 것이 적당하다.

한편, 과도열전달해석에서 구한 강교량의 아스팔트 포설시 온도분포를 이용하여 강교량의 변형과 열응력을 구할 수 있다. 즉, 위에서 구한 시간에 따른 온도변화를 열하중으로 산정하여 다음과 같이 구조물에 적용하여 열응력 해석을 수행한다. 일반적인 응력-변형률 관계(stress-strain relations)는 탄성행렬[E]을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\{\sigma\} = [E]\{\varepsilon\} \quad (9)$$

여기에 온도차이에 의한 변형률, $\{\varepsilon_T\}$ 의 영향을 추가하면

$$\{\sigma\} = [E](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon_T\}) \quad (10)$$

이다. 일반적인 열응력해석의 경우, 열전달해석에서 계산된 온도분포와 열응력해석에서 계산된 응력분포가 서로 영향을 미치게 되어 열전달해석과 열응력해석을 연계해서 계산하여야 한다(coupled method). 하지만 본 해석의 경우에는 강바닥판의 열응력이 열전달해석의 물성치에 미치는 영향이 매우 적다고 판단되어 열전달해석과 열응력해석을 분리해서 순차적으로 해석하는 비결합방법(uncoupled method)을 사용하였다(ANSYS). 기존의 연구들(서기홍 등, 2006; 이완훈, 2006; 이완훈 등, 2003)은 대부분 아스팔트 포설시 포장과 강바닥판과의 온도차를 타설 후 90분까지는 100℃로, 90분에서 120분까지는 70℃로 일정하게 가정하고, 나머지 강바닥판 하부 부재의 온도는 선형적으로 분포한다고 가정하여, 실제 상태에서 시간에 따라 변동되는 온도의 분포를 정확히 고려해 주지 못하는 단점이 있다.

2.2 열전달 수치해석 모델 검증

여기에서는 열전달 및 열응력해석에 앞서 해석에 사용 할 수 치해석 모델의 적절성을 검증하기 위하여, 현장에서 실시한 구조요소의 실제 구스아스팔트 타설실험(이완훈 등, 2003)에서 실측한 온도분포와 2차원 요소로 모델링한 수치해석 결과를 비교하였다. 열전달, 열응력 해석에 사용할 물성치는 해석결과에 크게 영향을 미치는 중요한 인자이나, 기존에 구스아스팔트의 열전달 해석은 이루어지지 않아 적합한 물성치를 산정할 필요가 있으며, 따라서 사용할 계수의 결정을 위해 실측실험과 산정한 계수를 이용한 열전달 해석의 결과를 비교하여 계수를 최종 선정하고자 하였다.

열전달 측정실험에서는 시험체의 양면에 적절한 버팀재를 사용하여 구스아스팔트가 흐르지 않도록 균형을 유지하면서 4cm의 두께로 구스아스팔트를 타설하였다. 이 실험은 실내에서 실시하여 바람의 영향은 없었으며, 대기 온도 및 실험체의 온도를 1분 간격으로 측정하였다. 그림 1은 실제 측정 실험시 사용한 구조물의 제원과 계측기의 위치를 표시한 것이다.

수치해석은 실험체 길이방향에 대한 온도변화를 무시하여 2차원 해석으로 하였고 구스아스팔트 및 강판의 초기온도는 각각 250℃와 16℃로 하였다. 강판의 해석에 사용한 구스아스팔트의 물성치는 주요 성분인 아스팔트, 골재(화강암)의 물성치를 중량비를 고려하여 기중평균한 것이다. 대기 온도는 실험시와 같은 16℃를 사용하였고, 바람에 따라 대류계수가 달라지지만 실내실험이었으므로 바람은 영향을 없는 상태로 가정하여

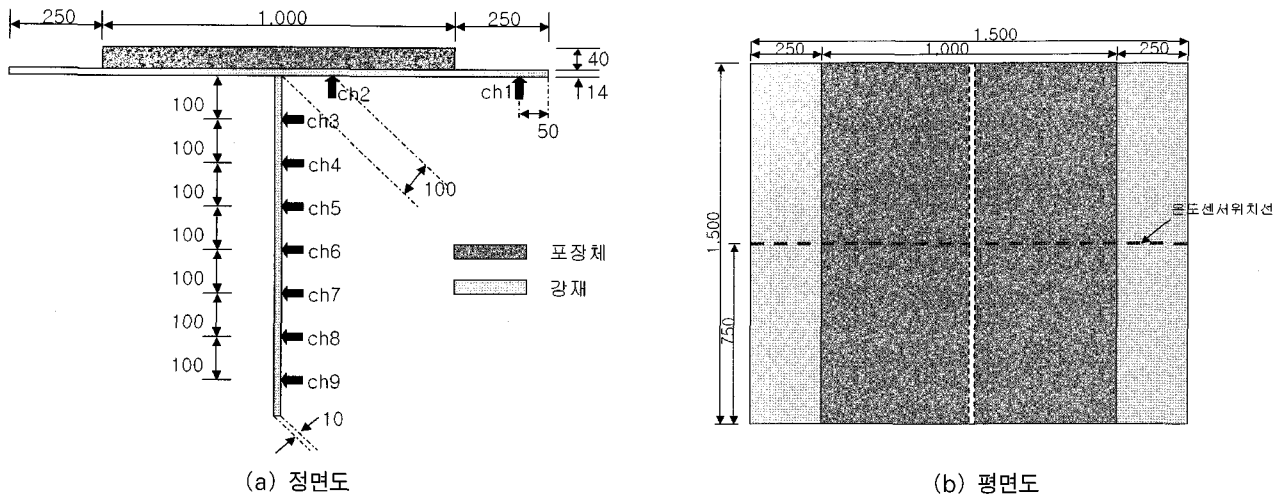


그림 1 타설실험 모델의 형상 및 계측기 위치(단위:mm)

표 1 포장체 및 강재의 물성치

	포장체	강재
초기온도, T [°C]	250	16
열전도도, K [W/m°C]	2.56	74
밀도, ρ [kg/m³]	2,492	7,850
비열, c [J/kg°C]	852.9	448

실험식 $h_a = 9.6 + 1.12v$ (kcal/m² · hr · °C) (포항산업과학연구원, 1997)을 이용하였으며, 이 때 v는 풍속으로 단위는 (m/sec)이고, 실험식을 단위환산하여 대류계수를 11.0 (W/m°C)로 결정하였다. 사용한 물성치는 표 1에 정리하였다.

본 연구에서는 열전달해석을 위하여 범용유한요소프로그램인 ANSYS를 사용하였다. 해석요소는 2차원 4절점 요소를 사용하고, 요소의 크기는 강상판의 두께에 따른 영향을 고려할 수 있도록 충분히 작게 하였다. 시간에 따라 온도가 변하는 과도열전달해석을 실시하였고, 80분 동안 실시하여 강재 및 포장체의 온도 변화를 살펴보고자 하였다. 해석결과 강바닥판(그림 1의 ch2위치)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 온도분포를 보여주고 있다. 포장체의 열이 강바닥판은 물론 하부까지 어느정도 영향을 미치고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 3은 주요 계측 위치에서의 측정결과와 수치해석결과의 시간에 따른 온도를 비교한 것이다. 측정값과 해석값을 비교할 때 주요위치에서의 최대 온도 및 시간에 따른 온도변화가 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있어 해석모델 및 해석방법이 적절하다고 판단된다. 다음 단계에서는 이렇게 결정된 해석모델 및 해석기법을 사용하였다.

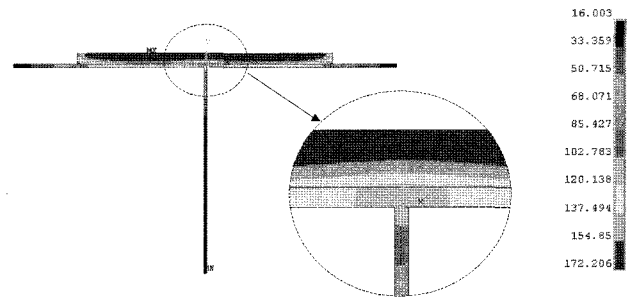


그림 2 포장체 및 강판의 온도분포(타설 12분 후)

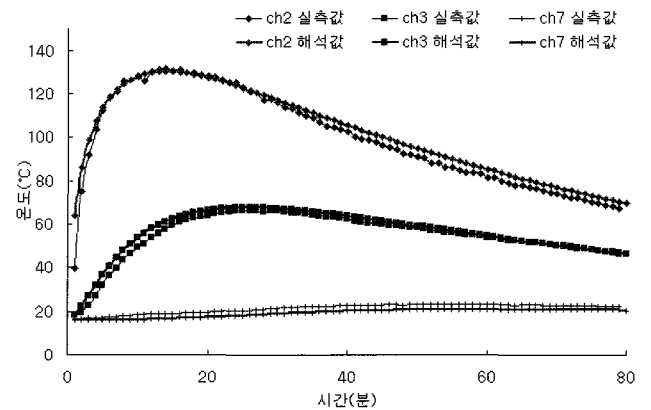


그림 3 측정값과 해석값의 비교(온도)

3. 등가열원의 산정

실제 강교량 구조물의 3차원 수치해석 모델은 일반적으로 판/셸요소(plate/shell element)와 보/프레임요소(beam/frame element) 등으로 이루어진다. 이러한 요소들은 일반적으로 요소의 표면이나 절점 이외의 부분에서 발생하는 열에너지의 이동을 구현하기가 매우 복잡하며 많은 요소를 사용하는 3차원 교량 모델에서는 거의 불가능하다고 할 수 있다(그림 4 참조). 본 연

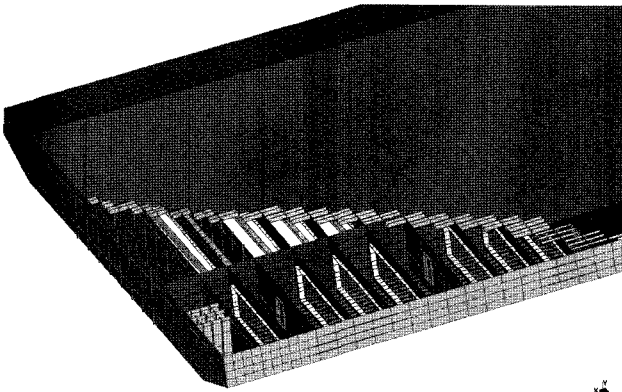
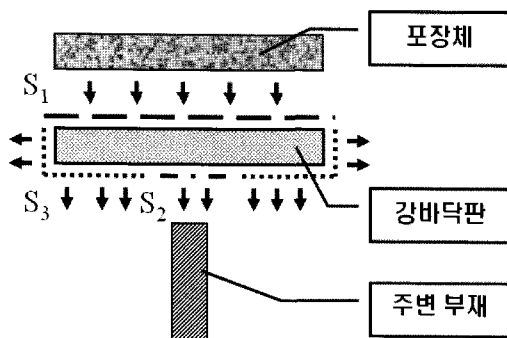
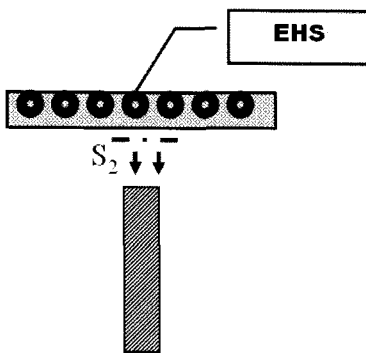


그림 4 일반적인 교량의 3차원 수치해석 모델(평판요소 및 보요소)



(a) 실제 모델



(b) EHS를 이용한 등가모델

그림 5 열전달 모델 개념 비교

구에서는 기존의 강교량 3차원모델을 그대로 사용하면서 교온의 포장체에 의한 열영향해석이 가능할 수 있도록 등가열원(EHS, equivalent heat source)을 제안하였다.

그림 5(a)에서는 포장에 의해 강교량의 강바닥판에 적용되는 열에너지의 이동을 설명하고 있다. 포장체가 강바닥판에 포설되면 열에너지가 포장체와 강바닥판의 경계(S₁)을 통하여 강재로 전도(conduction)되게 되고, 강바닥판 표면(S₃) 대기의 영향으로 대류열전달(convection)이 일어나며, 강바닥판의 열에너지는 주변부재와의 접촉면(S₂)을 통하여 주변부재로

전달된다. 이를 열에너지 변화식으로 나타내면

$$\int_{S_1} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_1 dS = \int_V c_V \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_{S_2} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_2 dS + \int_{S_3} h(T - T_\alpha) dS \quad (11)$$

이 된다. 여기서 \mathbf{q}_1 및 \mathbf{q}_2 는 각각 포장체에서 유입되는 열유속 및 주변부재로 빠져나가는 열유속이고 T_α 는 주변대기 온도이다. 판요소나 보요소로 구성되는 교량 수치해석모델에서는 대류의 영향을 고려하기가 현실적으로 어렵고 번거로운 일이며, 특히 장대교량의 경우는 더욱 그러하다. 따라서 그림 5(b)에서처럼 포장체에서의 열에너지유입과 대류의 영향을 미리 고려한 열하중을 산정하였고 이때 열에너지 변화식은,

$$\int_V Q^* dV = \int_V c_V \frac{\partial T}{\partial t} dV + \int_{S_2} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_2 dS \quad (12)$$

이 된다. 여기서 Q^* 는 등가열원의 내부발열속도이다. 한편 식 (11)과 식 (12)를 비교하면,

$$\int_V Q^* dV = \int_{S_1} \mathbf{n} \cdot \mathbf{q}_1 dS - \int_{S_3} h(T - T_\alpha) dS \quad (13)$$

이 되어 등가열원의 내부발열속도는 포장체에서의 열에너지유입과 대류효과를 고려한 것임을 알 수 있다. 따라서 포장체에서의 열에너지 유입과 대류효과를 고려한 등가온도변화, T^* 를 구한 후 다음 식을 이용하여 등가열원을 산정할 수 있다.

$$\int_V Q^* dV = \int_V c_V \frac{\partial T^*}{\partial t} dV \quad (14)$$

이를 위해서 그림 6과 같이 포장체와 강바닥판으로 이루어진 엄밀해석 모델을 설정하였고, 포장체의 표면과 강판의 표면에서 대류효과를 고려하였다. 주변 부재로의 전도에 대한 영향을 배제하기 위해 측면은 단열조건으로 가정하였다. 해석에 사용한 계수는 표 1에서의 값을 이용하였으며 강바닥판의 온도가 원래의 온도로 회복 될 것으로 예상되는 210분 동안 해석하였다. 해석 결과 강바닥판에 해당하는 강바닥판(ch2) 위치의 시간에 따른 온도분포를 얻을 수 있으며(그림 7), 이 결과와 식 (14)를 이용하여 그림 8과 같은 등가열원을 산정할 수 있었다.

참고로 그림 9에서는 대류 및 전도에 대한 영향이 온도분화에 미치는 영향을 도시하였다. 여기서 ①은 강바닥판 주변

으로의 전도나 대류의 영향을 고려하지 않고 포장에 의한 열 유입만을 고려한 경우의 온도변화이며, ②는 여기에 주변 대류의 영향을 고려한 경우, ③은 여기에 주변부재를 통한 전

도를 고려한 온도분포이다. 따라서 등가온도변화 T^* 는 온도 변화 ②에 해당한다고 볼 수 있다.

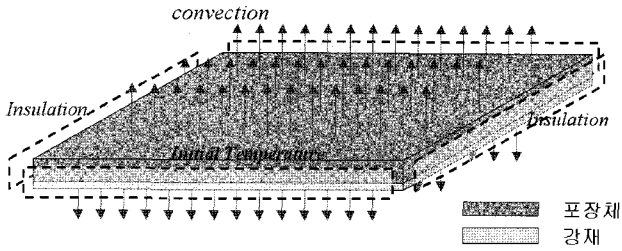


그림 6 강재의 대류열전달 해석

4. 등가열원의 적용성

본 연구에서 제안한 등가열원의 적용성을 검토하기 위해서 평판요소 에 등가열원을 적용한 경우와 엄밀해석결과를 비교하였다. 등가열원의 적용에서는 구조해석프로그램인 STRAND7을 사용하였고(Strand7 manual) 엄밀해석은 ANSYS를 사용하였다. 그림 10에서는 식 (14)를 이용하여 등가열원을 산

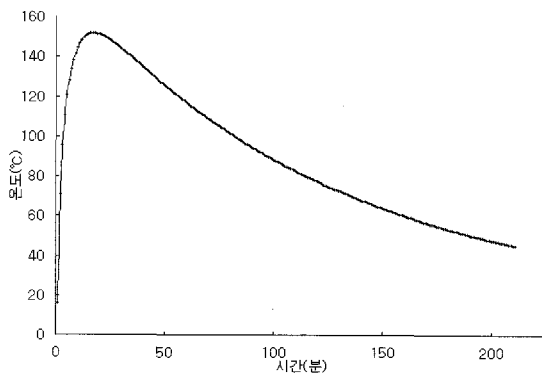


그림 7 온도분포

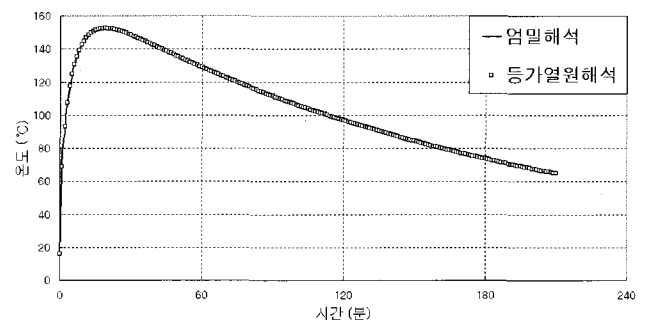


그림 10 엄밀해석과 등가열원해석 결과비교

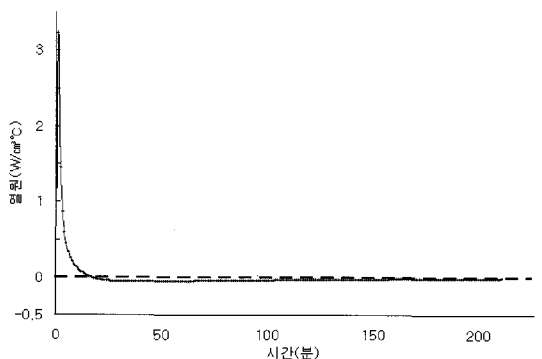
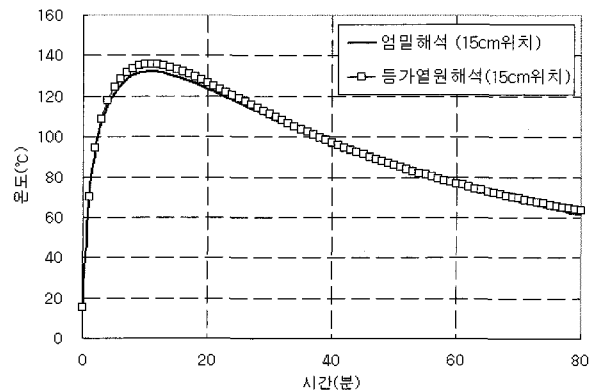


그림 8 등가열원



(a) 15cm 위치

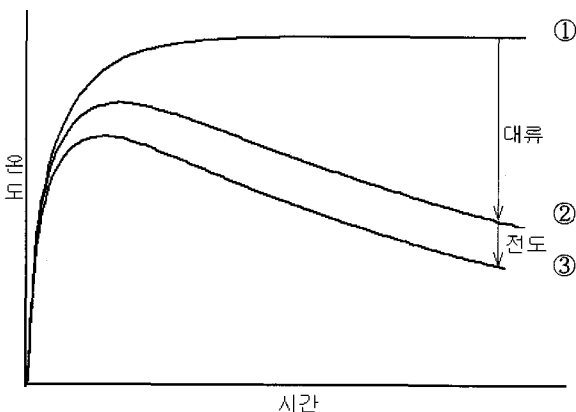
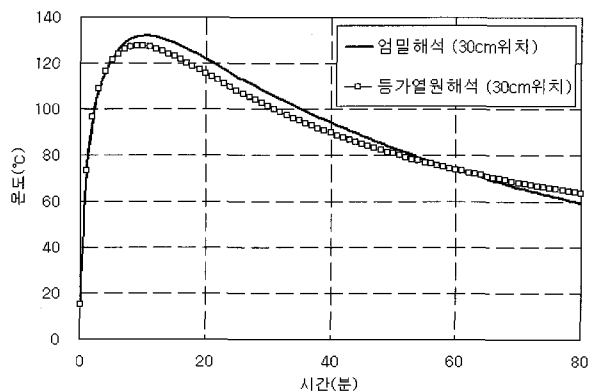
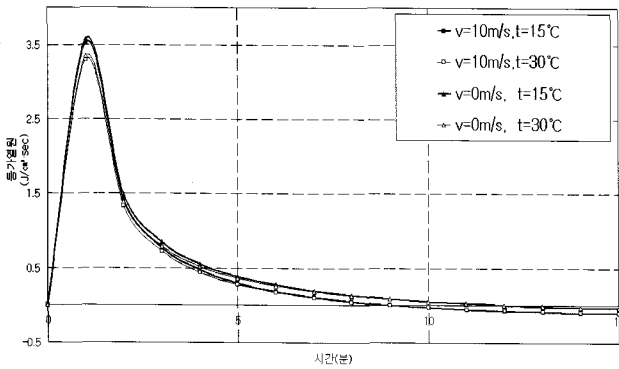


그림 9 대류 및 전도효과에 따른 온도변화 차이

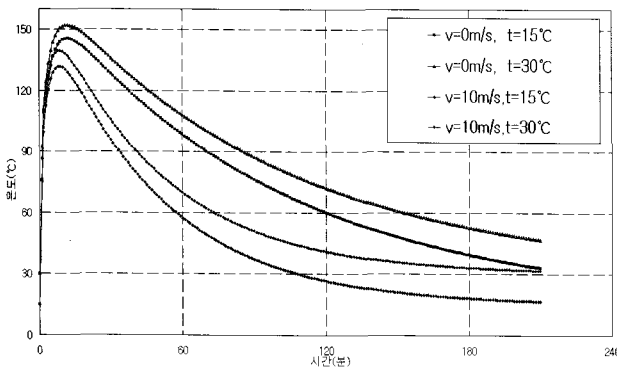


(b) 30 cm 위치

그림 11 T형 모델의 엄밀해석과 등가열원해석의 비교



(a) 등가열원



(b) 강바닥판 온도변화

그림 12 주변 풍속과 주변 온도가 등가열원에 미치는 영향

정하기 위한 등가온도변화 T^* 가 정확히 재현되는 것을 확인할 수 있다.

등가열원의 적용성을 파악하기 위해 그림 1의 타설실험모델을 평판요소로 모델링하고 등가열원을 적용하였다. 그림 11은 강바닥판의 중앙에서 15cm, 30cm 떨어진 위치에서의 온도변화를 엄밀해석결과와 비교한 결과이다. 약간의 차이를 보이고 있는데, 이는 등가열원모델에서는 T형모델의 주변부재인 수직강판의 대류영향을 고려하지 않기 때문인 것으로 판단된다.

주변의 풍속이나 대기온도는 주로 대류효과에 영향을 미치므로 무시할 수 없는 인자이다. 주변 풍속과 주변 대기온도에 따라 등가열원의 차이를 보기 위해 바람이 없는 경우(0m/s) 및 강한 경우(10m/s)와 온도가 낮은 경우(15°C) 및 높은 경우(30°C)에 대하여 해석하였다. 특히 바람의 경우에는 20°C에서 30°C까지의 온도차이를 보이고 있어서 타설시 바람의 유무가 강바닥판에 미치는 열영향의 강도에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 하지만 타설시 주변기온의 경우에는 주변기온의 차이만큼 정확히 강바닥판의 온도차이로 나타나고 있음을 알 수 있었다. 따라서 강바닥판의 포장계획에서는 시공시 예측되는 바람의 영향을 반드시 고려해야 한다.

5. 결론

일반적으로 판요소나 보요소로 구성되는 교량의 구조해석 모델을 이용하여 포장 열영향해석을 수행하는 경우에는 먼저 시공순서에 따라 포장체를 추가하여야 하고 교량의 각 부재의 표면에 대한 대류효과를 고려해야 하는데 이는 매우 어렵고 번거로운 일이다. 따라서 기존의 연구들은 해석편의를 위해 포장체를 생략하고 온도를 일정하게 고정하는 방법을 사용하였지만 주변온도나 풍속의 차이가 심하거나 연결부재가 많은 경우 심각한 오차를 가져올 수 있으며 해석결과에 대한 신뢰를 떨어뜨리는 요인이 된다. 본 연구에서는 강교량의 아스팔트 시공시 강바닥판에 미치는 열영향을 기존의 구조해석 모델의 변경없이 정확하고 편리하게 평가하기 위하여 강바닥판에 직접 등가열원을 부여하는 방법을 제안하였다.

본 연구에서는 실측자료와 포장체를 모델링한 해석결과를 비교하여 사용된 과도열전달 해석기법과 수치해석 과정에서 적용된 물성치의 타당성을 검증하였다. 그리고 시험모델의 엄밀해석을 통해서, 교량의 구조해석모델에 쉽게 적용되고 구스아스팔트의 온도하중 상태를 구현할 수 있는 등가열원의 개념을 제안하고 수치해석을 통하여 검증하였다. 등가열원은 기존의 연구들에서는 고려할 수 없었던 강바닥판 교량의 실제 시공시 환경조건을 고려하여 산정할 수 있기 때문에 보다 정확하게 아스팔트 포장 시공 중 열영향을 평가할 수 있다.

다양한 조건에서 등가열원을 산정한 결과 10m/s의 풍속 차이에도 강바닥판의 온도가 최고 30°C까지 변화되는 것을 알 수 있었고 따라서 포장시공계획시 주변 풍속의 영향을 고려해야 한다고 판단된다. 본 연구에서 제안한 해석방법으로 요즘 증가하고 있는 강상판 구스아스팔트 포장시공시 우려되는 열응력에 의한 구조물의 변형을 막고, 포장체 시공에 있어서 최적의 시공순서, 시공속도를 결정하는데 필요한 자료를 얻을 수 있을 것으로 판단된다. 등가열원을 이용한 다양한 교량에 대한 해석 및 결과분석은 연구자의 다음 논문에서 발표될 예정이다.

감사의 글

본 연구는 LG연암문화재단의 연암해외연구교수 연구지원으로 이루어진 것으로 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

- 김태훈 (2000) 영종대교 구스아스팔트 포장 시공보고서, 한국도로포장공학회지, 한국도로포장공학회, 2(4), pp.57~67.

- 서기홍 외 3명** (2006) 영향선을 이용한 강상판 교량의 구스아스팔트 포장에 대한 근사해석 연구, 한국구조물진단학회지, 한국구조물진단학회, 10(4), pp.127~134.
- 이완훈** (2006) 강바닥판교량의 열영향, 구미서관.
- 이완훈 외 2명** (2003) 강바닥판 교량의 구스아스팔트 열영향, 전산구조공학, 한국전산구조공학회, 16(4), pp.29~37.
- 포항산업과학연구원** (1997) 광안대교 교각기초 콘크리트의 수화열 제어 연구.
- ANSYS** 활용안내서시리즈 2, Heat Transfer Analysis, 태성에스엔이.
- Cook, R.D.** (2002) Concepts and Applications of Finite Element Analysis, *John Wiley & Sons*, New York.
- Daryl L. Logan** Logan의 유한요소법 첫걸음, 시그마프레스.
- Petr Krysl** (2005) A Pragmatic Introduction to the Finite Element Method for Thermal and Stress Analysis, Personal Communication.
- Satya N.Atluri** (1997) Structural Integrity & Durability, Tech Science Press.
- Strand7 manual** (2nd Edition) G+D Computing.