

# 합성 박스형 교량의 온도에 의한 응력 및 변형

## Temperature-Induced Stresses and Deformation in Composite Box Girder Bridges

장 승 필<sup>1)</sup>  
Chang, Sung Pil

임 창 균<sup>2)</sup>  
Im, Chang Kyun

요 약 : 합성 박스형 교량의 비선형 온도분포로부터 유발되는 열응답(thermal response)은 여러 변수들의 영향을 받는다( 기상조건, 재료상수, 교량의 위치 및 방향, 단면형상 등). 본 논문에서는 계절, 교량의 위치 및 방향, 단면형상 그리고 몇 가지 재료특성치의 변화가 합성 박스형 교량의 축변형, 곡률 및 응력에 미치는 영향 파악을 위해 매개변수해석을 수행하였으며, 이 해석을 수행하기 위한 2차원 시간 종속적 유한요소모델에 대해 간략히 언급하였다. 먼저, 매개변수들이 하루동안의 곡률 변화에 미치는 영향에 대해 고려하고, 최대 곡률을 나타내는 시간의 합성 박스형 단면의 온도 및 응력분포에 미치는 영향에 대해 고려하였다. 최종적으로, 이 매개변수들의 변화가 온도에 의한 축변형, 곡률 및 응력의 일최대값에 미치는 영향에 대해 고려하였다. 온도에 의한 영향은 경우에따라서는 사하중이나 활하중이 구조물에 주는 영향만큼 클 수 있고 또한 강합성교의 설계시 바닥판 콘크리트 슬래브와 강재들보와의 온도차를 10℃로 가정하고, 동시에 온도의 분포가 콘크리트 슬래브단면과 강재들보단면에서 일정하다고 가정하고 구한 온도응력은 실제 온도하중의 영향을 과소평가할 수 있다.

ABSTRACT : Thermal response induced from nonlinear temperature distribution in composite box girder bridges depends on several variables(environmental conditions, physical and material properties, location and orientation of bridge, and cross-section geometry). In this paper, parametric study are conducted in order to find the effects of variations of seasons, location and orientation of bridge, sectional geometry and some material properties on the axial deformation, curvature and stresses in composite box girder bridge. A two-dimensional transient finite element model

1) 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수, 포항제철 석좌교수  
2) 서울대학교 토목공학과 박사과정수료

본 논문에 대한 토의를 1998년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

to conduct this parametric studies is briefly presented. Firstly, the effects of the parameters on the diurnal variation of curvature are considered, and for the time of maximum curvature, on the distribution of temperature and stresses of composite box girder sectional are considered. Finally, some considerations about the influence of the parameters on the daily maximum values of axial deformation, curvature and stresses are carried out. The influence of thermal effect on structures is important as much as the influence of live or dead load in some cases. In the design of steel composite bridges, the thermal stresses calculated on the supposition that the temperature difference between the concrete slab and steel girder is 10°C and the temperature distributions are uniform in concrete slab and steel girder can be under-estimated

핵심 용어 : 합성 박스형교, 열응력, 고유응력, 연속체응력, 곡률변형, 매개변수해석

KEYWORDS : composite box girder bridge, thermal stresses, eigen-stresses, continue-stresses, curvature, parametric analysis

## 1. 서론

교량은 시간에 따라 연속적으로 변화하는 온도 분포에 의한 변형과 응력의 영향을 받는다. 지금까지 이러한 온도하중효과는 교량의 손상에 빈번히 영향을 미쳐왔다<sup>(7)</sup>. 교량에 발생하는 온도변화는 교량이 놓인 지리적 위치, 교축의 방향, 단면형상, 열전달에 관련된 상수 그리고 기상조건 등 여러 매개변수의 영향을 받으며, 지금까지 많은 연구결과들에서 이와 같은 매개변수들의 변화가 온도 및 이로 인한 응력 및 변형에 미치는 영향에 대해 고려하였다. 기존의 연구는 주로 콘크리트교량에 대한 것으로서, 참고문헌<sup>(3)</sup> 및 <sup>(7)</sup>의 연구에서는 콘크리트 교량에서의 매개변수의 변화 특히 단면형상의 변화가 단면온도분포에 미치는 영향을 고려하고 있다. 특히, 참고문헌<sup>(5)</sup>는 콘크리트 교량에 있어서 단면형상 뿐만 아니라 교량의 위치 및 방향, 열전달에 관련된 재료특성치 그리고 기상조건 등 보다 다양한 매개변수들의 변화가 교량의 온도분포에 미치는 영향을 해석하였다. 반면, 참고문헌<sup>(4)</sup>는 합성 박스형 교량에서 교축방향과 강박스 복부 기울기의 변화가 온도에 미치는 영향

에 대해 해석하였고, 몇 가지 경우의 온도분포에 대해서 응력분포를 구하였다. 그의 연구결과에서 강박스의 복부가 높은 경우 태양일사의 영향으로 합성박스형 단경간 교량의 복부에서는 최대 98(MPa)에 이르는 압축응력이 발생하는 것을 보여주고 있다. 참고문헌<sup>(6)</sup>의 합성 박스형 교량에 대한 매개변수해석에서는 슬래브내민부의 길이를 매개변수로 하여 단면온도차의 시간별 변화에 미치는 영향에 대해 고려하였고, 참고문헌<sup>(1)</sup>에서는 최근 합성 박스형 교량에 대한 실교량 온도계측을 수행한 결과를 보이고 있다. 이 온도계측결과에서 측정된 단면온도분포의 크기와 형태는, 특히 이른 봄의 경우, 일반적으로 단순화시킨 온도분포와는 큰 차이를 나타내고 있다. 교량의 온도하중효과에 관한 지금까지의 연구결과들로부터 교량에서 태양일사 및 대기온도의 영향으로 유발되는 응력 및 변형의 중요성을 인식하는데는 충분하지만, 대부분의 연구결과들이 단면평균온도, 단면온도차 등 온도결과에 치우쳐서 이루어졌다.

본 연구에서는 환경변수(대기온도, 태양일사, 풍속 등)의 영향을 받는 합성 박스형 교량의 열응답(thermal response)에 미치는 교축방향, 계

절, 슬래브내민부길이, 태양에너지흡수도, 대류열 전달계수의 영향에 대해서 고찰하였다. 해석결과 는 먼저 매개변수들의 변화가 시간별 곡률에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 그리고 최대곡률을 나타내는 시간의 단면온도분포 및 단면응력분포에 미치는 영향을 고찰하였다. 이 결과 들을 바탕으로 합성 박스형 교량의 단면에서 매개변수의 변화에 따라 나타날 수 있는 콘크리트 슬래브의 인장 응력, 강박스 복부의 압축응력 그리고 곡률 및 축 변형량 등의 일최대값에대해 고찰하였다. 또한, 6 경간 연속인 대상교량의 지점부 단면에서 활하중 및 사하중의해 발생하는 응력과 온도해석으로부터 얻어지는 열응력을 비교하였다.

## 2. 교량의 온도해석 모델

비선형 온도분포를 갖는 교량의 단면에서는 온도변형에 대한 구속으로부터 유발된 열응력 (thermal stress)이 발생한다. 교량의 온도응력을 계산하기 위해 본 연구에서는 아래의 세 가지 가정을 고려하였다 (1) 교량의 축방향에대한 온도변화는 무시한다<sup>(7)</sup> 이 가정으로부터 3차원 교량온도해석은 2차원 문제로 표현될 수 있다. (2) 변형 전에 평면이었던 교량의 단면은 변형 후에도 평면인 상태를 유지한다. (3) 응력과 변형도와의 관계는 선형탄성이다. 앞의 가정들로부터 단순지 지된 교량의 경우, 비선형 온도분포,  $T(x, y, t)$ 로부터 어느시간  $t$ 에 단면의 도심으로부터의 좌표가  $(x, y)$ 되는 곳에 발생하는 종방향 응력,  $\sigma_s(x, y, t)$ 은 식(1)과 같다.

$$\sigma_s(x, y, t) = E[\epsilon_0 + \psi_x y + \psi_y x - \alpha T] \quad (1)$$

식(1)에서  $\epsilon_0$ 는 온도분포,  $T(x, y, t)$ 에 의한 합성 박스형 교량의 축방향 변형이며 식(2)와 같다. 여기서  $E(x, y)$ 는 콘크리트 또는 steel의 탄성계수이며,  $\alpha$ 는 콘크리트 또는 steel의 열팽창계수

를 나타낸다.

$$\epsilon_0 = \frac{\int_A \alpha E T dA}{\int_A E dA} \quad (2)$$

식(1)에서  $\psi_x$ 와  $\psi_y$ 는 비선형온도분포,  $T(x, y, t)$ 에 의해 나타나는 각각  $x$ 축 및  $y$ 축에 대한 곡률을 나타내며, 식(3), (4)와 같다.

$$\psi_x = \frac{\int_A \alpha E T y dA}{\int_A E y^2 dA} \quad (3)$$

$$\psi_y = \frac{\int_A \alpha E T x dA}{\int_A E x^2 dA} \quad (4)$$

식(1)로부터 비선형온도분포,  $T(x, y, t)$ 에 의해 단순지 지된 교량의 단면에 발생하는 종방향 응력,  $\sigma_s$ 을 자기평형응력(self equilibrated stresses) 또는 고유응력(eigen stresses)이라고 한다.

부정정 교량의 경우 온도분포에 의해 식(3)과 식(4)로부터 계산되는 곡률,  $\psi_x$ 와  $\psi_y$ 의 구속으로부터 교량의 단면에서는 고유응력 뿐만 아니라 연속체응력(continuum stresses),  $\sigma_c$ 이 발생한다. 따라서, 지점구속이 있는 교량의 열응력 (thermal stress)은 식(1)로부터 구한 고유응력(eigen-stresses)에 곡률의 구속에 따라 발생하는 모멘트로부터 계산된 연속체응력(continuum stresses)을 증첩하여 구해진다. 지간이 일정하고 교량 축을 따라 단면의 변화가 없는 5경간까지의 연속교량들에서 지점 구속에 의해 발생하는 모멘트,  $M_c$  및 지점반력,  $R_c$ 은 3연모멘트법 등을 이용하여 그림1과 같이 구해질 수 있다.<sup>(5)</sup>

식(1)에 나타난 교량단면온도,  $T(x, y, t)$ 를 추정하기 위한 2차원 열전달방정식 및 경계조건은

참고문헌<sup>(1)</sup>에 나타난 것과 동일하다. 온도분포,  $T(x, y, t)$  및 고유응력,  $\sigma_s(x, y, t)$ 를 구하기 위한 수치적 방법으로는 참고문헌<sup>(5)</sup>에 의해 처음 개발되고 참고문헌<sup>(1)</sup>에 의해 수정된 유한요소프로그램인 FETAB(finite element thermal analysis of bridges)를 이용하였다. 이 수치해석법에서는 Bilinear요소 및 1차원 경계요소를 사용하여, 시간에 따라 변화하는 환경변수의 영향을 고려한 시간중속적 해석이 수행되었다. 이 수치해석법에서는 먼저 열전달해석을 통해 단면내 각 절점에서의 온도를 계산하고, 다음단계로 식(1)에서 식(4)로 부터 계산되는 단면내 각 절점에서의 고유응력(eigen-stresses)  $\sigma_s$ , 축방향변형  $\epsilon_0$  및  $x$ 축과  $y$ 축에 대한 곡률  $\psi_x$ 와  $\psi_y$ 를 계산한다.

위의 교량에 대한 온도해석모델의 타당성은 사당고가차도(서울)에 대한 현장온도측정결과와 비교 검토되었다<sup>(1)</sup>.

표 1. 매개변수 및 변화범위

매개변수	변화 범위	기준조건
계절 및 교축방향, $\gamma$ (그림3 참조)	겨울, 여름: $\gamma=0^\circ \sim 90^\circ$	겨울; $\gamma=0^\circ$
슬래브내면부길이, $l$ (그림2 참조)	$l=0.9m \sim 2.7m$	$l = 1.5m$
아스팔트 및 강박스의 태양일사흡수도, $\alpha_a$ 및 $\alpha_s$	$\alpha_a=0.1 \sim 0.9$ ; $\alpha_s = 0.1 \sim 0.9$	$\alpha_a = 0.9$ ; $\alpha_s = 0.8$
대류열전달계수, $h_v$ ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )	$h_v = 5.58 \sim 25$	$h_v = 10$

표 2. 재료특성치

재료특성치	콘크리트	강박스	아스팔트
열전도율, $k$ ( $W/m \cdot ^\circ C$ )	0.93	45	0.74
비열, $c$ ( $J/kg \cdot ^\circ C$ )	960	500	920
태양일사흡수도, $a$	0.5	0.8	0.9
방출율, $e$	0.8	0.7	0.92
열팽창율, $\alpha$ ( $1/^\circ C$ )	$10 \times 10^{-6}$	$12 \times 10^{-6}$	$10 \times 10^{-6}$
밀도, $\rho$ ( $ton/m^3$ )	2.4	7.8	2.1
탄성계수, $E$ (GPa)	26.7	206.0	0.1

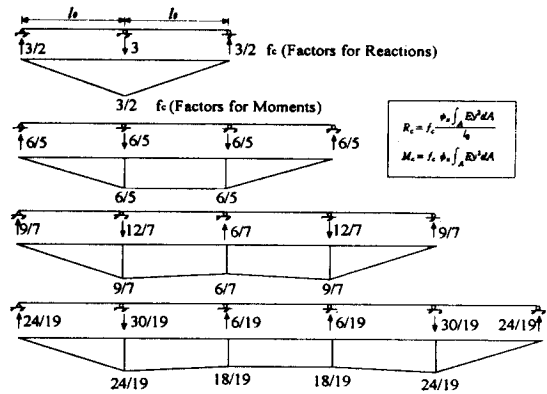


그림 1. 지점반력 및 모멘트

표 3. 기상조건

	겨울철	여름철
일일총일사량( $MJ/m^2/day$ )	11.49	20.48
최대/최소 기온( $^\circ C$ )	7.7/-1.7	34.6/28.0

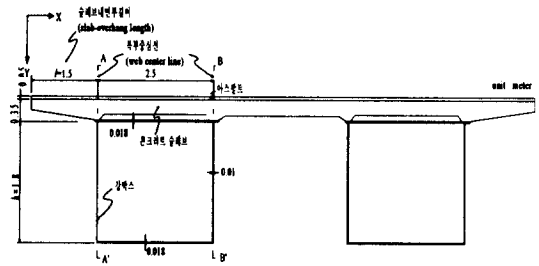


그림 2. 기준단면

### 3. 매개변수해석

교량의 온도변화에 의한 열응답(thermal response)은 여러 변수들의 영향을 받는다. 온도 해석을 위해 필요한 자료들을 몇 가지로 나누어 보면 다음과 같다. (1)교량의 단면형상 (2)교량이 위치한 곳의 위도, 해발고도, 교축방향 (3)태양일사흡수도, 방출율, 밀도, 비열, 열전도계수, 대류 열전달계수 (4)날짜 및 시간 (5)기상조건.

대부분 재료특성치나 기상조건등은 그 정확함을 정하기가 쉽지 않다. 특히 교량 표면상태에

관련된 태양일사흡수도와 주로 풍속에 관련된 대류 열전달계수의 경우에는 더욱 그렇다. 이 절에서는 식(1)~(4)로부터 계산되는 온도변화에의해 발생하는 합성 박스형 교량의 고유응력(eigen-stress), 곡률(curvature) 및 축방향변형에 표1에 나타낸 매개변수의 변화가 미치는 영향을 파악하기 위한 매개변수해석의 결과를 나타냈다. 해석에서 교량은 위도  $\phi=37.57^\circ$  N, 해발고도 85.5(m)에 위치한 것으로 가정하였다. 앞의 위도와 해발고도는 서울 지방기상대의 그것과 같은 값이다.

매개변수해석의 여러 결과들을 비교하기 위한 기준조건을 표 1에서 각 매개변수의 변화범위와 같이 나타냈으며, 기준단면은 그림 2와 같다. 이 그림에서 좌표축 x는 그림3에서 교축방향,  $\gamma$ 를 정의하는데 사용된 좌표축 x와 동일하다. 온도해석에서 필요로 하는 재료특성치들은 표2에 나타냈다.

### 3.1 계절 및 교축방향의 영향

계절 및 교축방향의 변화가 고유응력(eigen stress)과 곡률 및 축변형에 미치는 영향에 대한 매개변수해석을 수행하였다. 표 3에 나타낸 두 가지 경우의 기상조건에 대해서 교축방향  $\gamma$  (그림 3 참조)를 동-서방향( $\gamma=0^\circ$ ) 으로부터 남-북방향( $\gamma=90^\circ$ ) 까지  $30^\circ$  간격으로 증가시키면서 해석하였다. 표3의 기상자료중 일사량은 서울지방기상대의 측정값이며, 풍속은 2(m/sec)로 가정하였다.

그림 3(a)는 합성 박스형교량에서 교축방향과 계절에 대해 식(3)으로부터 구해지는 곡률  $\phi_x$ 의 시간별 변화를 나타낸다. 오전3시에서 최대 양의 방향 곡률(상부인장)을 그리고 정오에서 오후1시 사이에 최대 음의 방향 곡률(하부인장) 혹은 최소 양의 곡률을 나타낸다. 겨울철 기상조건에서는 오전9시에서 그리고 오후4시에서 오후5시 사이에 각각 곡률이 0(零)으로 나타난다. 여름철 기상조건에서는 곡률이 0(零)인 때는 나타나지 않으며, 정오에 최소 곡률을 나타낸다. 겨울철과 같이 태양의 고도가 낮아서 태양일사가 직접 작용하는 강

박스 복부는 콘크리트 슬래브보다 높은 온도 분포를 보여 교량은 음의 방향 곡률을 나타낸다. 그림 3(b)는 콘크리트 교량에 대한 참고문헌<sup>(5)</sup>의 결과로서 합성박스형 교량과는 반대로 오전6시에서 9시 사이에 최소곡률이, 오후3시에서 7시 사이에 최대곡률이 발생한다.

그림 4는 그림 3(a)에서 최대 곡률을 나타내는 오전3시 및 오후1시의 단면 복부중심선 A-A'(그림2참조)를 따른 식(1)로 부터 계산되는 고유응력분포이다. 그림 4(a)에 보인바와 같이 겨울철 교축방향의 변화는 교량, 특히 강박스의 복부가 받는 태양 일사량에 영향을 미친다. 강박스에 작용하는 직접일사(direct soar radiation)에 의해 오후1시 중심선 A-A'에서 온도는  $23^\circ\text{C}$ 까지 상승하며 이로 인해 강박스 복부에서는 국부적으로  $-40.4(\text{MPa})$ 의 고유응력이 발생한다. 2경간 연속보라고 가정한 경우의 연속체응력  $-7.4(\text{MPa})$ 을 고려하면 실제로  $-47.8(\text{MPa})$ 의 압축응력이 발생한다. 태양고도가 높은 여름철의 경우 슬래브 내면부예의해 강박스의 복부에는 태양 직접일사의 대부분이 차단된다. 따라서 그림 4(b)에서 최대 음의 곡률을 나타내는 오후1시의 응력분포는 그림 4(a)의 오후1시 응력분포와는 달리 강박스에서 균일한 분포를 보인다.

그림 5는 곡률 및 고유응력의 일최대값(daily maximum value)에대한 교축방향의 영향이다. 그림 3(a)로 부터 최대 양의 곡률은 교축방향에 따라 영향을 받지 않으므로, 일최대 음의 곡률(daily maximum negative curvature)(여름철 기상조건에서는 음의 곡률이 발생하지 않아 겨울철 기상조건에 대해서만 나타냈다)에 대해서만 고려하였다. 그림 5에서 괄호 안의 값은 표 1에서 나타난 기준조건, 즉  $\gamma=0^\circ$  일 때의 결과값으로 나눈 값이다.

그림 5(a)에서 일최대 음의 곡률은 겨울철 기상조건에서 교축이 동-서방향( $\gamma=0^\circ$ )에서 남-북방향( $\gamma=90^\circ$ )으로 변화함에 따라  $-21.9 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})$ 에서  $-10.3 \times 10^{-6} (\text{m}^{-1})$ 으로 51% 감

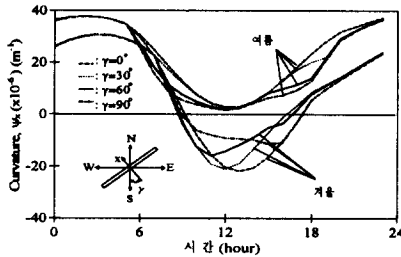
소하였다. 최대값은 강박스 복부에 직접일사(direct radiation)의 영향이 가장 크게 작용하는 때에 발생했는데, 교축이 동-서방향에 가까운 경우 오전11시에서 오후1시 사이에 나타났으며, 남-북방향에 가까운 경우는 오후3시에 발생했다.

그림 5(b)는 강박스의 복부에 발생하는 압축고유응력의 일최대값이다. 겨울철 기상조건의 경우 방위각  $\gamma=30^\circ$  에서 가장 큰 값인  $-42(\text{MPa})$ 을 나타내며, 교축방향이 남-북을 향하는 쪽에 가까울수록 감소하다가 최소값을 보이는  $\gamma=90^\circ$  인 경우에는  $\gamma=30^\circ$  인 경우의 48%인  $-20(\text{MPa})$ 까지 감소한다. 강박스에 발생하는 압축고유응력의 일최대값은 교축이 동-서방향( $\gamma=0^\circ$ )에 가까울수록 정오근처에서 발생하였으며, 교축이 남-북방향에 가까울수록 일출직후나 일몰직전에 나타났다. 여름철 기상조건에서는 높은 태양 고도로 인해  $\gamma$ 가 작은 경우 강박스의 복부에는 직

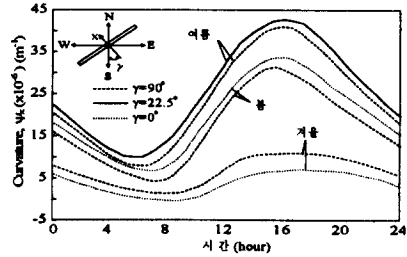
접일사(direct radiation)가 작용하지 못해  $\gamma=0^\circ$  인 경우 강박스 복부의 일최고압축고유응력은  $-4.5(\text{MPa})$ 에 불과 하지만,  $\gamma$ 가 증가하여 남-북방향( $\gamma=90^\circ$ )에 가까워짐에 따라 오전 혹은 오후에 강박스의 한쪽웨브에 작용하는 직접일사량에 의한 국부적인 온도의 상승으로 강박스의 복부에 발생하는 일최고압축고유응력은  $-26(\text{MPa})$ 까지 증가하였다. 일최대값은 겨울철의 경우와 마찬가지로 교축이 남-북방향( $\gamma=90^\circ$ )에 가까울수록 일출직후나 일몰직전에 나타났다.

### 3.2 슬래브내민부길이의 영향

슬래브내민부길이(slab overhang length),  $l$  (그림 2 참조)의 변화가 온도분포로 인해 유발되는 고유응력과 곡률에 미치는 영향에 대해 고찰하였다. 슬래브내민부길이에 의해 강박스의 복부에

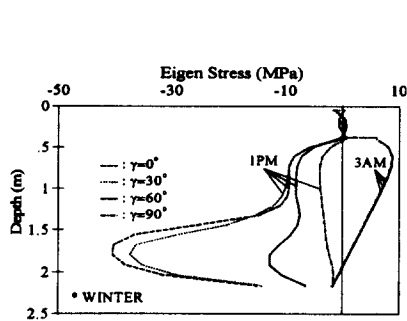


(a) 합성 박스형 교량

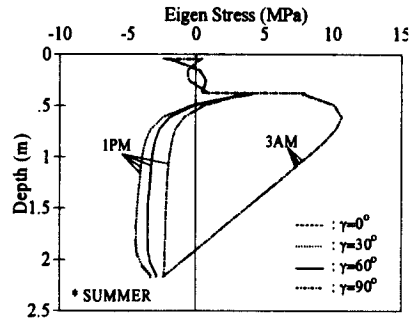


(b) 콘크리트 박스형 교량[5]

그림 3. 방위각 및 계절의 변화에 따른 시간별 곡률,  $\psi_x$ 의 변화



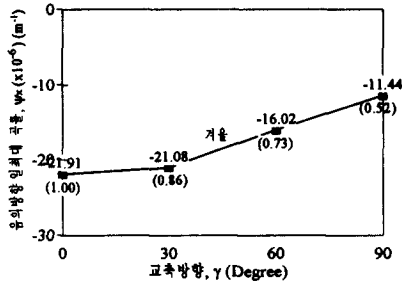
(a) 겨울철 기상조건(1997년2월8일)



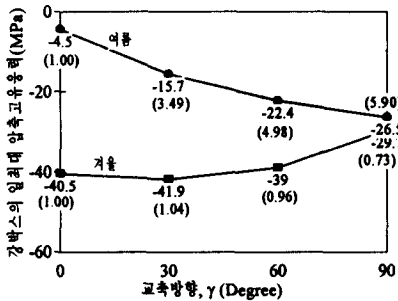
(b) 여름철 기상조건(1997년7월25일)

그림 4. 최대 곡률이 발생하는 경우의 복부 중심선 A-A'에 대한 고유응력분포

서 직접일사가 차단되는 부분은 참고문헌<sup>(4)</sup>의 식 (10)과 같이 계산된다. 그림 2의 기준단면에서, 슬래브 내민부 길이  $l$ 을 0.9m에서 2.7m까지 0.6m씩 증가시키며 해석하였다. 교축방향은 태양 일사의 영향이 크게 나타나는 동-서방향 ( $\gamma=0^\circ$ )으로 가정하였으며, 재료특성치는 표 2에서 주어진 값을 이용하였다. 기상자료는 표 3에 나타낸 겨울철 기상조건을 이용하였다.



(a) 음의방향 곡률



(b) 강박스 압축응력

그림 5. 계절 및 교축방향의 변화에 따른 곡률 및 고유응력의 일최대값

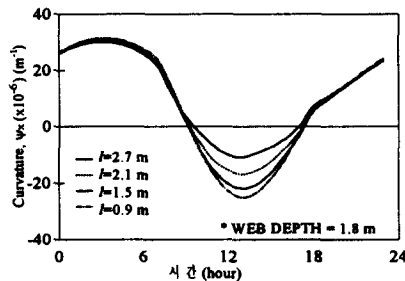


그림 6. 슬래브내민부길이의 변화에 따른 시간별 곡률,  $\psi_x$ 의 변화

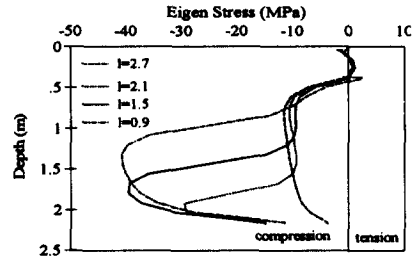
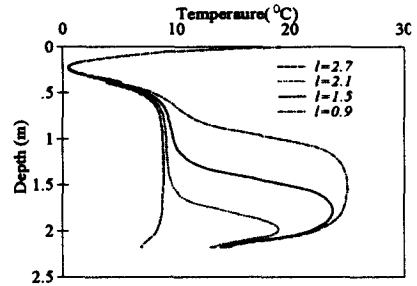
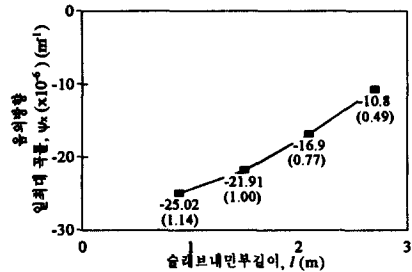
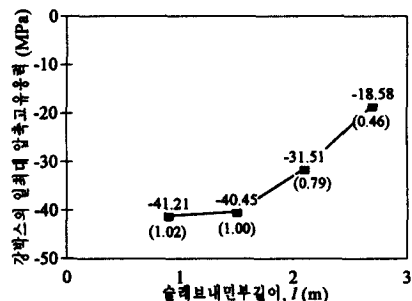


그림 7. 슬래브내민부길이의 변화에 따른 온도분포 및 고유응력분포의 변화 (겨울철, 정오)



(a) 음의방향 곡률



(b) 강박스 압축고유응력

그림 8. 슬래브내민부길이의 변화에 따른 변형 및 고유응력의 일최대값

그림 6은 슬래브내민부길이의 변화에 따른 곡률의 시간별 분포를 나타낸다. 슬래브내민부길이가 짧아질수록 직접적인 강박스에 유입되는 열유량(heat flux)이 증가하여 일조시간동안 곡률은 음의방향으로 더욱 크게 나타난다. 이러한 영향은 강박스의 열전도율이 충분히 높아서 일몰이후에는 나타나지 않는다. 앞의 계절 및 교축방향에대한 해석결과에서와 마찬가지로 오전3시에 곡률은 양의방향으로 최대값을 그리고 정오에서 오후1시 사이에 음의방향으로 최대값을 나타냈다.

그림 7은 음의 곡률이 최대로 나타나는 시간의 북부중심선 A-A'(그림 2 참조)를 따라 나타나는 온도분포 및 고유용력분포이다. 직접일사가 작용하는 강박스 북부의 온도는 하부 플랜지로의 열전달효과 때문에 타원형 분포를 보이며, 최대값은 직접일사가 작용하는 부분의 중앙부에서 발생한다.

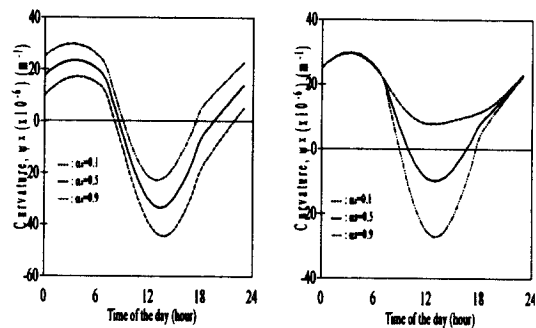
그림 8은 슬래브내민부길이의 변화가 곡률 및 고유용력의 일최대값에 미치는 영향을 나타내고 있다. 그림에서 괄호 안의 값은 표 1에 나타낸 기준조건,  $l=1.5m$  에대한 결과로 나눈 값이다. 그림 8(a)에서 최대 음의 곡률에대한 결과는 기준단면인 슬래브내민부길이,  $l$ 가 1.5m 일 때의 결과에 비교하여 0.49배에서 1.14배의 범위에서, 슬래브 내민부 길이가 증가함에 따라 감소하였다. 슬래브 내민부 길이가 0.9m인 경우 일최대 음의방향 곡률  $-25.02 \times 10^{-6} (m^{-1})$  은 표 1에 나타낸 매개변수 해석의 결과 중에서 가장 큰 값이다. 일최대값은 항상 오후1시에 발생했다.

그림 8(b)에서 강박스에 발생하는 일최대 압축고유용력은 슬래브내민부길이가 작아짐에 따라 증가하는데, 증가율은 점차 작아져서  $l=1.5m$ 에서 0.9m로 변화하는 것에 의해서는 2%의 차이를 보이는 것에 불과했다.  $l=2.7m$  인 경우 강박스에 작용하는 태양일사는 그림 2에서 중심선A-A'을 갖는 북부에 대해서 오전과 오후에 일정시간

동안만 작용하였고, 이 영향으로 일최대압축고유용력은 오전9시에 발생하였다. 일최대값은 슬래브내민부길이가 작아질수록 정오에 가까운 시간에 발생하였다.

### 3.3 태양일사흡수도(solar radiation absorptivity)의 영향

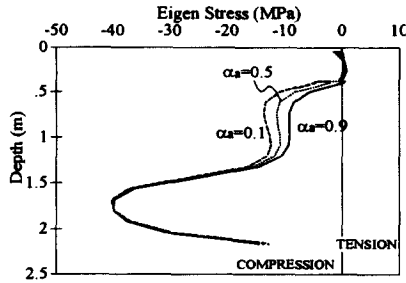
교량표면의 태양일사흡수도는 태양일사의 영향을 받는 표면 상태에 따라 변화한다. 참고문헌<sup>(4)</sup>에 따르면, 아스팔트 포장 면의 태양일사흡수도는 눈이 쌓인 경우 0.13에서 그렇지 않은 경우 0.9까지 변화하며, 강박스 표면의 태양일사흡수도는 조도, 산화의 정도, 도장색갈에 따라 0.12에서 0.95까지 변화한다. 이 절에서는 표면상태에 따라 광범위하게 변화하는 아스팔트 및 강박스의 태양일사흡수도가 교량의 축변형, 곡률 및 고유용력에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 북부에 작용하는 일사량의 변화를 보다 강조하기 위해 교량은 동-서방향( $\gamma=0^\circ$ )으로 놓여있다고 가정하였고, 표 3으로부터 겨울철 기상조건을 이용하였으며, 매개변수 변화의 범위는 표1과 같다.



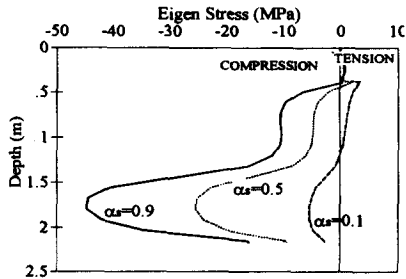
(a) 아스팔트표면의 태양에너지 흡수도에 따른 곡률변화 (b) 강박스표면의 태양에너지 흡수도에 따른 곡률변화

그림 9. 태양에너지흡수도에 따른 시간별 곡률,  $\phi_x$ 의 변화



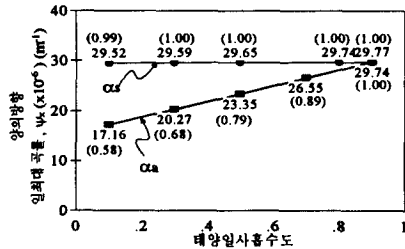


(a) 아스팔트의 태양일사흡수도

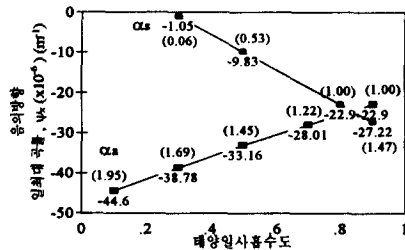


(b) 강박스의 태양일사흡수도

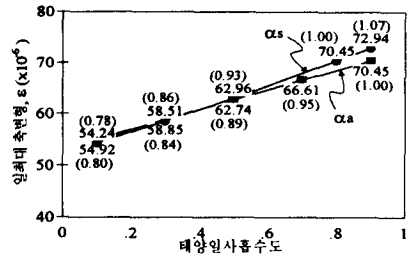
그림 10. 최대 응의 곡률이 발생하는 때의 태양일사흡수도의 변화에 따른 고유응력분포



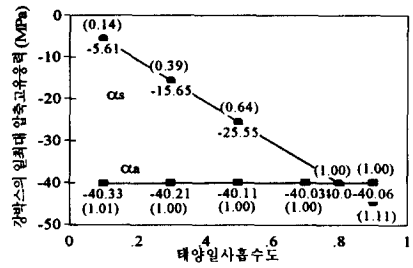
(a) 양의 곡률



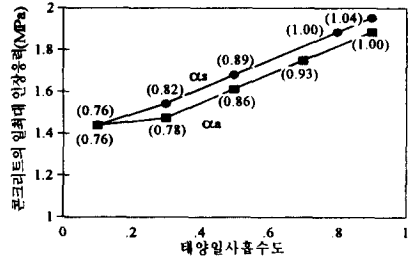
(b) 음의 곡률



(c) 측방향변화량



(d) 강박스 압축고유응력



(e) 슬래브 인장고유응력

그림 11. 태양일사흡수도에 따른 일최대 곡률, 측방향변화형 및 고유응력의 변화

그림 9(a)는 아스팔트 포장면의 태양일사흡수도에 따른 시간별곡률변화이다. 흡수도가 증가함에 따라 더욱 많은 양의 열에너지가 교량 상부 슬래브로 유입되어 양의 곡률의 증가를 유발한다. 이러한 영향은 콘크리트의 열전도율이 충분히 낮아서 일조시간 뿐만 아니라 일사가 작용하지 않는 밤까지 영향을 미친다. 강박스의 태양일사흡수도,  $\alpha_s$ 를 매개변수로 고려한 그림 9(b)의 경우 흡수도가 증가함에 따라 강박스로의 열유량(heat

flux) 유입이 증가하여 곡률은 점차 작아지며 마침내 음의방향 곡률을 나타낸다. 음의 곡률의 최대값은 태양일사흡수도에 상관없이 오후1시에 나타났다. 그림 9에서 곡률이 0(零)이 되는 시간은 태양일사흡수도에 따라 크게 변하는데, 대략 오후 1시를 기준으로 대칭을 이루었다. 특히, 강박스표면의 태양일사흡수도의 변화에 따른 곡률의 최소값은 아스팔트의 경우보다 광범위하게 영향을 받는다.

그림 10은 음의방향 곡률이 가장 크게 나타나는 오후1시의 태양일사흡수도의 변화에 따른 북부중심선 A-A'(그림 2 참조)의 고유응력분포이다. 그림 10(a)에서 아스팔트의 태양일사흡수도의 변화는 아스팔트와 콘크리트 슬래브의 온도분포에만 영향을 미치지만, 콘크리트 슬래브의 온도 변화는 슬래브에 인접한 강박스의 고유응력분포에 영향을 미친다.

그림 11은 태양일사흡수도의 변화에 따른 일최대 곡률, 축변형 및 일최대 고유응력값의 변화이다. 그림에서 괄호 안의 값은 각 매개변수해석의 결과들을 기준조건,  $\alpha_a=0.9$  및  $\alpha_s=0.8$ 일때의 결과로 나눈 값이다.

그림 11(a)에서 양의 방향 일최대값은 아스팔트의 태양일사흡수도,  $\alpha_a$ 가 증가함에 따라 일정한 기울기로 증가하여, 흡수도가 0.1일 때에 비해 0.9일 때 일최대값은 42%증가했다. 반면에, 강박스의 태양일사흡수도가 0.1에서 0.9까지 변화하는 것에 대하여 양의 곡률 일최대값은 1%의 이내의 차이를 나타냈다. 그림 11(b)에서 곡률의 음의방향 일최대값은 아스팔트의 태양일사흡수도가 감소할수록, 그리고 강박스의 태양일사흡수도가 증가함에 따라 곡률의 음의방향 일최대값은 증가하였다. 일조시간동안 콘크리트 슬래브와 강박스가 동시에 직접일사의 영향을 받는 경우 상대적으로 열전도율이 높은 강박스는 슬래브보다 더욱 높은 온도를 나타내서 오후1시에서 2시 사이에 음의방향으로 최대곡률이 발생하고, 일몰이후 강박스의 온도는 슬래브보다 빨리 내려가서 오전3

시에서 4시 사이에 일최대 양의 방향 곡률을 나타낸다.

그림 11(d)의 압축고유응력의 일최대값은 아스팔트의 태양일사흡수도가 0.1에서 0.9까지 변화하는 것에 대해 1%이하의 영향을 보인 반면, 강박스의 태양일사흡수도가 0.1일 때 -5.61(MPa)이던 일최대압축응력은 태양일사흡수도가 0.9일 경우에는 -44.8(MPa)까지 증가하였다. 그림 11(e)에 나타난 콘크리트 슬래브에 발생하는 일최대 인장응력은 슬래브내민부의 끝단에서, 슬래브 상부 표면보다는 슬래브내부에서 발생하였다. 슬래브의 인장응력은 아스팔트의 태양일사흡수도 뿐만 아니라 강박스의 태양일사흡수도의 변화에도 영향을 받았다.

#### 3.4 대류열전달계수(convection heat transfer coefficient), $h_v$ 의 영향

교량의 온도 해석의 결과에 큰 영향을 미치는 변수 중의 하나인 대류열전달계수를 정확히 추정하는 것은 상당히 어려운 문제다. 대류열전달계수는 주로 풍속에 관련이 있으며, 이에 대한 실험식이 여러 연구 결과에서 발표되었다<sup>(4,7,9)</sup>. 본 연구에서는 참고문헌<sup>(9)</sup>에서 제안한 아래 식(5)을 이용하였다. 여기서,  $v$ (m/sec)는 풍속,  $h_v$ (W/m<sup>2</sup>°C)는 대류열전달계수이다.

$$h_v = 5.58 + 3.95v \quad (5)$$

윗 식에서와 같이 교량표면에서의 대류열전달계수는 시간에 따라 급격히 변화한다. 대류열전달계수가 증가할 수록 교량에대한 대류열전달작용에 따른 열유량(heat flux)의 유입 혹은 유출은 증가한다. 이러한 대류열전달계수가 교량의 곡률, 축방향변형 및 고유응력에 미치는 영향을 알아보기 위해, 풍속  $v=0$  (m/sec)에 해당하는 대류열전달계수  $h_v=5.58$  (W/m<sup>2</sup>°C)에서 풍속  $v=5$  (m/sec)에 해당하는  $h_v=25$

( $W/m^2\text{ }^\circ\text{C}$ )의 범위에서 해석을 수행하였다. 교량은 동-서방향으로 놓여있다고 가정하였고, 표 3에서 겨울철의 기상조건을 이용하였다. 매개변수로 택한 대류열전달계수를 제외한 해석에 필요한 재료특성치는 표 2에서 보인 것과 같은 값을 이용하였다.

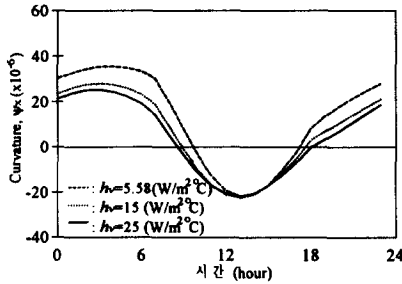


그림 12.  $h_v$ 에 따른 시간별 곡률,  $\psi_x$ 의 변화

곡률,  $\psi_x$ 의 시간별 변화인 그림 12에서 태양일사가 교량의 열전달에 지배적인 영향을 미치는 낮 시간 동안은 대류열전달계수의 변화에 따른 영향은 일몰 이후의 영향에 비해 작았으며, 특히 정오에서 오후 2시 사이에는 곡률변화에 미치는 영향이 가장 낮았다.

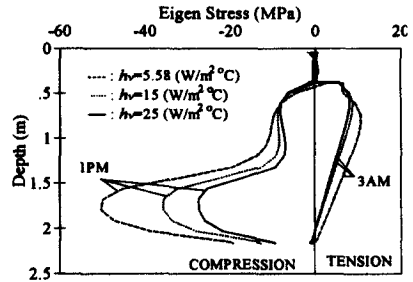
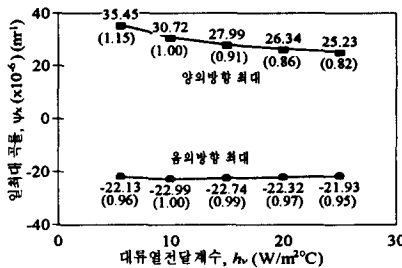
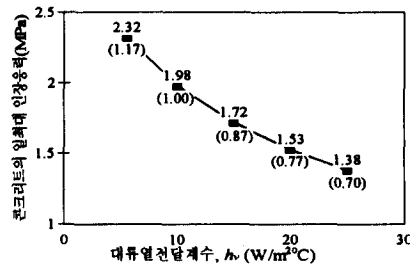


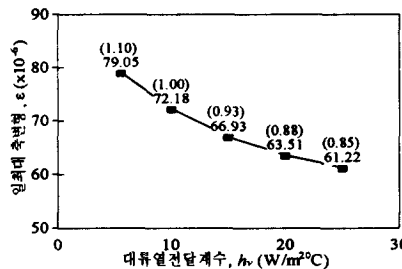
그림 13. 최대곡률이 발생할 때의 고유응력 분포.



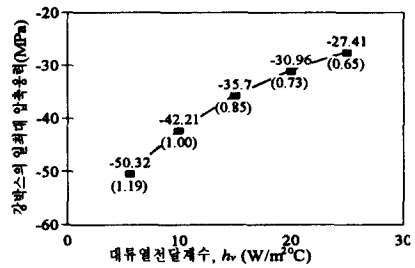
(a) 곡률



(c) 강박스 압축고유응력



(b) 축변형



(d) 슬래브 인장고유응력

그림 14. 대류열전달계수의 변화에 따른 일최대 곡률, 축변형 및 고유응력

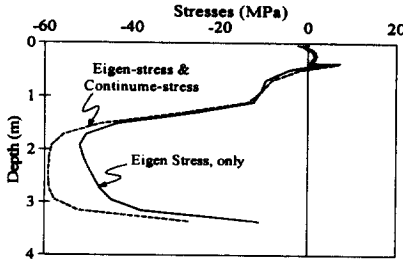


그림 15. 열응력분포

표 4. 내측지점부단면의 응력(MPa)

구 분	콘크리트슬래브	강박스
사하중에 의한 응력 (비합성)	0.	-113.2
활하중에 의한 응력	7.6	-58.7
온도에 의한 응력	2.0	-59.1

\* (+)인장응력, (-)압축응력

그림 13은 곡률이 최대 발생하는 오전3시(양의방향)와 오후1시(음의방향)의 단면 고유응력 분포이다. 그림에서 대류열전달계수가 증가할수록 그림 2의 중심선A-A'에대한 낮시간의 온도 분포와 밤 시간의 온도분포간의 온도차이는 점차 감소한다. 이러한 결과는 낮시간 동안 직접일사의 영향으로 대기온도보다 높은 온도를 유지하는 강박스 표면에서는 대기 중으로 대류열전달작용에 의해 열이 방출되며, 반대로 밤 시간동안은 대기 온도보다 낮은 온도상태를 유지하는 강박스 표면을 통해 열유량(heat flux)이 유입되는 대류열전달작용으로 설명되어진다.

그림 14(a)에서 대류열전달계수가 낮을수록 일최대 양의곡률은 증가하여  $h_v=5.58(W/m^2\text{ }^\circ\text{C})$ 인 경우  $35.4 \times 10^{-6}(m^{-1})$ 까지 증가하였으며, 이 값은 표1에 나타난 전체 매개변수 해석의 결과들 중에서 최대값을 나타낸다. 그림 14(b)의 일최대 축방향변형량은 대류열전달계수가 낮을수록 증가하여  $h_v=5.58(W/m^2\text{ }^\circ\text{C})$ 인 경우  $79.05 \times 10^{-6}$ 까지 증가하였으며, 이 값은 표 1에 나타난 매개변수 해석의 결과들 중에서 최대값이다.

그림 14(c)에서 일최대 고유응력은 대류열전달계수가 낮은 경우  $-50.32(MPa)$ 까지 증가하였으며 이 매개변수해석에서 고려한 기상조건이 실제로 관측된 자료라는 것을 고려하면, 합성 박스형 교량의 경우 이와 같이 복부에 발생하는 압축응력에 대해 반드시 고려해야한다. 특히 연속교의 경우 연속체응력은 앞의 고유응력을 더욱 증가시키는 쪽으로 발생한다. 그림 14(d)에서 콘크리트 슬래브에 발생하는 인장고유응력의 일최대값은 대류열전달계수가 낮을수록 증가하였으며,  $h_v=5.58(W/m^2\text{ }^\circ\text{C})$ 일 때  $2.32(MPa)$ 까지 증가하였다.

#### 4. 사하중 및 활하중과의 비교

합성 박스형 교량의 열응력(thermal stresses)의 최대값은 태양의 직접일사(direct radiation)의 영향으로 일조시간에 발생한다. 최대값을 나타내는 시간에 대해서, 단순교나 연속교의 지점 중앙부에서 온도변화에 의해 발생하는 열응력은 사하중 및 활하중에의해 발생하는 응력을 감소시키는 반면, 연속교의 지점부 단면에서는 열응력이 사하중 및 활하중에의한 응력을 더욱 증가시킨다. 특히, 강박스의 복부가 태양의 직접일사에 노출되는 경우, 연속교량의 지점부 단면에서는 온도에의한 강박스의 열응력이 활하중에의한 응력보다 더 높게 나타날 수 있다.

표 4는 6경간 연속인 대상교량의 설계 사하중(dead load) 및 활하중(live load)에의해 발생하는 지점부 단면의 슬래브와 하부 플랜지에서 발생하는 종방향 응력<sup>(2)</sup>, 온도해석 결과로부터 구해지는 열응력(thermal stress)이다. 대상교량의 단면은 복부높이가 2m인 것을 제외하고는 그림2의 기준단면과 같다. 표4에서 사하중이 작용할 때 단면은 비합성으로 가정하였으며, 활하중은 3차선 DL하중을 고려하였다. 온도해석을 위한 재료특성치는 표2와 같으며, 표3의 겨울철 기상조건을 이용하였다. 매개변수 해석에서 보인 바와

같이 강박스의 열응력에 큰 영향을 미치는 슬래브 내민부 길이는 1.5m로 가정하였고, 대류열전달계수는 풍속이 0(m/sec)일 때 값인 5.58(W/m<sup>2</sup>°C)로 가정하였다. 사하중, 활하중 및 온도에 의해 강박스 하부 플랜지에 발생하는 압축응력은 각각 -113.2(MPa), -58.7(MPa) 및 -26.76(MPa)이다. 그러나, 강박스의 복부에 발생하는 온도에 의한 응력은 그림15와 같이 포물선 분포를 하며, 최대값은 그림의 종좌표=2.336m에서 발생하는 -59.1(MPa)으로 활하중에 의해 하부 플랜지에서 발생하는 응력(-58.7MPa)보다 크게 나타난다.

고유응력 및 연속체응력의 합으로 구해지는 온도에 의한 응력은 고유응력이 지배적이다. 그림15에서 온도에 의한 응력 -59.1(MPa)을 나타내는 위치(종좌표=2.336m)에서 비선형 온도분포에 의한 고유응력,  $\sigma_s$ 은 -50.0 (MPa)으로 85%를 차지하는 반면, 지점구속에 의한 연속체응력은 -9.1(MPa)로 15%에 불과하다. 대부분의 합성형교의 설계에서와 같이 바닥판 콘크리트와 강재들보의 온도차를 10°C로하고 온도분포를 강재들보와 바닥판 콘크리트 각각이 일정하게 분포한다고 가정하여 구하는 경우에는 온도에 의한 응력을 과소평가할 수 있다. 바닥판 콘크리트와 강박스의 균일한 온도분포로부터 구해지는 하부플랜지의 온도에 의한 응력은 -13.2(MPa)로, 본 연구의 결과로부터 그림15에서 하부 플랜지에 발생하는 -26.76(MPa)의 50%에 불과하며, 최대값인 -59.1(MPa)에는 22%에 불과한 값이다. 앞의 온도해석의 결과는 기상자료에 대한 극값을 이용하는 경우 더욱 높아질 수 있다.

## 5. 결 론

합성 박스형 교량의 온도분포 및 이로부터 발생하는 변형 및 응력은 교량이 놓인 위치 및 방향, 교량의 단면형상, 열전달에 관련된 재료특성

치, 계절의 변화 등에 영향을 받는다. 본 연구에서는 이 변수들의 변화가 온도분포에 의해 유발되는 곡률, 축방향변형 및 고유응력에 미치는 영향에 대해 고찰하였으며, 이 매개변수해석을 수행하기 위한 온도해석모델에 대해서 간략히 설명하였다. 매개변수로는 계절 및 교축방향, 슬래브내민부길이, 아스팔트표면과 강박스표면의 태양일사흡수도 그리고 대류열전달계수를 고려하였다.

강박스 복부에 발생하는 압축고유응력(compressive eigen stresses)은 여름보다 태양고도가 낮은 겨울 더 크게 나타났으며, 대류열전달계수가 낮은 맑은날의 경우 -50.3(MPa)까지 증가하였다. 연속교의 경우 지점부단면에서 온도변화에 의한 응력은 -59.1(MPa)까지 증가하였다. 콘크리트 슬래브에서 발생하는 인장응력은 대류열전달계수가 감소함에 따라 2.3(MPa)까지 증가하였으며, 최대값은 슬래브 표면보다는 내부에서 발생하였다. 실교량에 대한 예로부터 온도변화에 의한 응력은 설계활하중에 의한 응력보다 더 크게 나타났으며, 바닥판 콘크리트와 강박스의 온도분포를 균일하다고 가정하는 일반적인 설계에 의한 열응력보다 다섯배가 넘는 결과를 나타냈다. 기상자료의 극값을 이용하는 경우 더욱 높아질 수 있다. 이와 같은 온도변화에 의한 영향은 슬래브내민부의 길이를 증가하거나 강박스 표면을 밝은 색으로 칠하여 태양일사흡수도를 낮추는 것을 통해 온도변화에 의한 응력 및 변형을 현저히 감소시킬 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- (1) 장승필, 등: 1997, 합성 박스형 교량의 온도 예측, 한국강구조학회, 제9권, 제3호, pp.43 1~440.
- (2) 冠岳區廳: 1993, 舍堂로타리 高架車道設置工事 實施設計 構造計算書
- (3) Branco, F. A. et al.: 1993, Thermal actions for concrete bridge design, Journal of Structural Engineering,

- ASCE, Vol. 119, No. 8, pp.2313-2331.
- (4) Dilger, W. H. et al.: 1983, Temperature stresses in composite box girder bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 9, pp.1460-1478.
- (5) Elbadry, M. M. et al.:1983, Temperature variation in concrete bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 109, No. 10, pp.2355-2374.
- (6) Fu, H. C. et al.:1990, Thermal behavior of composite bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 12, pp.3302-3323
- (7) Mirambell, E. et al.: 1990, Temperature and stress distributions in concrete box girder bridges, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 116, No. 9, pp.2388-2409.
- (8) Moorty, S. et al.:1990, Thermal response of skewed bridges, Development in short and medium span bridges engineering '90, Canadian Society for Civil Engineering, Toronto, Canada, pp. 343-353.
- (9) Saetta, A. et al.: 1995, Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads, Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 121, No. 3, pp.446-457
- (접수일자 : 1997. 10. 17)