

합성 박스형 교량의 온도 예측

The Prediction of Temperature in Composite Box Girder Bridges

장 승 필¹⁾ · 임 창 균²⁾
Chang, Sung Pil Im, Chang Kyun

요 약 : 본 논문에서는 교량 단면 내의 시간 종속적 온도 분포를 결정하기 위해, 기존의 열 전달 이론 및 태양 에너지 전달에 대한 이론을 바탕으로 기상관측소 및 현장에서 측정된 기상 자료로부터 교량 온도의 예측에 관한 이론적 모델에 대해 기술하였다. 특히 이 모델에서는 주간 교량의 온도 상승에 지배적인 영향을 미치는 태양일사(solar radiation)에 대해 태양 에너지 관련 분야의 여러 실험적 연구 결과를 바탕으로 태양일사량의 계산에 대해 기존에 연구되어 있는 식들 중에서 가장 적합한 식을 제시하였다. 이 해석 모델의 타당성은 사당 고가차도의 장기 측정된 온도 측정 결과와 비교 검토되었다. 또한 장기간 측정된 온도 결과로부터 교량 온도 예측에 대한 해석적 기준(analytical criteria)을 제시하기 위해, 교량의 축 방향 신축의 원인이 되는 단면평균온도, 그리고 곡률 변형을 유발하는 단면온도차 등 교량 단면의 온도 분포와 관련된 변수들과 대기온도, 일사량 등 기상 자료와 관련된 변수들 간의 선형 상관관계(linear correlation)에 대해 기술하였다.

ABSTRACT : The paper describes a theoretical model for the prediction of bridge temperatures from meteorological data measured at bridge site and local meteorological center together with existing finite element heat transfer theory and solar radiation transfer theory to determine the time dependent temperature distribution of bridge. In this analytical model, the most adequate equation for the calculation of solar radiation on the bridge surface, which is dominant in day time is described based on the results of several experimental studies for the solar energy. The validity of this model is tested against field data obtained from long term experimental program on Sadang Viaduct in Seoul. Also, this paper describes the linear correlation between design variables and meteorological data to establish analytical criteria for the prediction of the average temperature, which are responsible for the longitudinal deformation of the bridges and of the vertical differential

1) 정회원, 서울대학교 토목공학과 교수
2) 서울대학교 토목공학과 박사과정

본 논문에 대한 토의를 1997년 12월 30일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

temperature profiles, which are responsible for the bending deformations from the long term experimental results.

핵심용어 : 열전달, 온도예측, 전체태양일사량, 온도분포, 선형상관계수

KEYWORDS : heat transfer, prediction of temperature, global solar radiation, temperature distribution, linear correlation coefficient

1. 서론

시간에 따라 변화하는 기상 상태에 노출된 교량 단면 내의 시간 종속적 온도 분포를 결정하기 위한 2차원 유한 요소 해석에 대해 많은 연구 결과가 발표되었다^(3.5.7.12.15). 교량온도해석에 관한 유한요소법의 정식화 및 사용된 시간적분법 등에 대해서는 앞의 연구결과들에 자세히 설명되었으므로 본 논문에서는 언급하지 않겠다. 교량의 온도 분포 해석을 위한 요건으로는 교량의 위치, 방향 및 재료 성질 그리고 환경 요소로서 대기온도, 태양일사, 풍속 등을 들 수 있는데, 교량의 위치, 방향 및 재료 성질은 비교적 결정이 쉽고, 다른 연구 결과에서의 인용이 가능한 반면 대기온도, 태양일사 및 풍속과 같은 환경 변수들은 고려하는 지역 및 시간에 종속적으로 변화하는 값들이므로 비교적 결정하기가 쉽지않다. 특히 태양일사는 주간에 지배적인 영향을 미치는데, 주로 이용되는 관측소의 태양일사량 측정치는 수평면에 대해 전체태양일사량(global solar radiation), 혹은 줄여서 전체일사량(global radiation)이 관측되는 것이 보통이다. 따라서 교량이 받는 전체일사량에 대한 이론적 모델은 수평면에서 관측된 시간별 전체일사량 혹은 일별 전체 일사량으로부터 태양 에너지에 대한 이론 및 태양과 경사면과의 기하학적 관계로부터 경사면에 작용하는 전체일사량으로 전환 되어야 한다. 일반적으로 지금까지의 연구 결과에서는 경사면에 대한 일사량은 대기권 밖의 수직면에 작용하는 전체일사량에 대기혼탁도(atmospheric turbidity)를 고려해서 지표면 상

의 수직면에 작용하는 전체일사량을 구하고, 일사를 받는 경사면에 대한 태양 광선과의 기하학적 관계를 고려해서 경사면에 대한 전체일사량을 구하였다^(3.5.15.18).

경사면에 작용하는 일사량 추정에 관한 앞의 이론은 대기중의 미소 입자에 의한 분산 효과 또는 지면의 반사 효과에 의해 교량에 작용하는 분산일사(diffuse radiation)가 그늘진 부분에 작용된다는 것을 간과 하고 있다. 이러한 점을 보완하기 위해, 본 논문에서는 수평면에 대한 전체일사를 직접일사(beam radiation) 및 분산일사 그리고 지표면에 반사되는 일사(reflected radiation)의 항들로 구분하여 경사면에 대한 전체일사를 추정하여 시간 종속적 온도 해석을 수행하였다. 이 이론적 결과의 타당성은 최근에 완공된 사당고가차도의 온도 측정 결과에 의해 검토되었다.

참고문헌(2)에서는 콘크리트 교량에 대해 수년간의 온도 측정을 통해 얻은 자료와 일사량, 대기온도 등의 기상 자료들과의 선형상관관계에 대한 연구 결과를 발표하였다. 이 연구결과는 콘크리트 교량에서의 온도 영향 평가에 해석적 기준을 제시하는 데 상당히 유용한 자료로 활용될 수 있다.

본 논문에서는 합성 박스형 교량의 교축방향신축과 관련된 교량평균온도 및 폭물과 관련된 단면내온도차를 예측하기 위한 해석적 기준(analytical criteria)을 제시하고자 하였다. 이를 위해 실험 대상 교량으로부터 장기간에 걸쳐 연속적으로 측정된 온도 값을 이용하여 단면평균 온도, 단면내온도차 등의 교량 단면 온도 분포와

관련된 매개변수들과 대기온도, 일사량 등의 기상 자료와 관련된 매개변수들 간의 선형상관관계 해석을 수행하여 교량의 온도 추정에 대한 기준을 제시하였다.

2. 교량의 온도해석 모델

2.1 열전달 방정식

교량의 2차원 온도 해석을 위한 잘 알려진 열 전달 방정식^(1,16)으로부터 어느 시간, t 에서 교량 단면 온도, T 의 변화는 식(1)과 같다.

$$k\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2}\right) = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서 k 는 등방열전도계수(Isotropic thermal conductivity coefficient)를 ρ 는 밀도를 그리고 c 는비열이다.

식(1)과 관련된 경계조건식은 다음과 같다.

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial x} n_x + \frac{\partial T}{\partial y} n_y\right) + q = 0 \quad (2)$$

교량의 표면에서의 에너지전달율, q 은 식(3)과 같이 태양일사에 의한 유입, q_s 과 대류에 의한 전달, q_c 및 장주기와 일사에 의한 전달, q_r 의 합이다. 본 논문에서는 태양일사에 의한 전달, q_s 의 추정 관한 내용에 국한해서 기술하였다. 그 이외의 사항은 참고문헌(5) 및 (15)의 연구 결과에 기초하였다.

$$q = q_s + q_c + q_r \quad (3)$$

여기서 q_s 는 태양광 흡수도(solar absorptivity), a 와 경사면에 대한 전체 일사량, I_t 의 곱으로 표현된다. 태양광 흡수도, a 는 태양 광선을 받는 면의 표면조도와 색깔에 따라 대략 0.2에서

0.95의 값을 갖는다. 경사면에 대한 전체 일사량, I_t 는 태양상수, 대기혼탁도, 태양의 고도 및 경사면에 대한 태양광선의 방향 등으로 표현되는데, 다음절에서 자세히 유도 될 것이다. 온도해석을 하기 위한 유한요소정식화 및 시간적분의 기법 등은 참고문헌(5) 와 (15)의 연구 결과에 자세히 수록 되었다.

2.2 태양일사에 의한 열전달 모델

참고문헌(15)의 연구 결과에서 식(3)의 경사면에 대한 전체일사량은 다음식으로 표현되는데,

$$I_t = I_{sc} \cos \phi (0.9^{k_a t_u / \sin(\theta+5)}) \quad (4)$$

여기서, I_{sc} : 태양상수(solar constant, 1353 W/m²),

ϕ : 태양 광선의 입사각, 즉 경사면에 수직인 선분과 태양 광선이 이루는 각,

k_a : 수평면에 대한 기압의 비(3),

t_u : 대기혼탁도,

θ : 태양고도, 수평면과 태양광선이 이루는 각.

식(4)는 태양광선과 일사를 받는 경사면의 기하학적 관계로부터 유도되었으며, 식(3)에서 q_s 는 웹브 등의 그늘진 면에서는 0으로 고려되고 있다.

전체일사량은 태양광선이 대기권내에서 산란되지 않고 지표면에 도달되는 부분인 직접일사와 산란 되어 도달되는 분산일사의 합으로 분다. 직접일사는 대기에 의해 산란 되지않고 태양으로부터 도달되는 일사를 의미하며, 분산일사는 대기에 의한 산란으로 방향이 변화되어 도달되는 일사를 의미한다⁽¹⁾. 따라서 식(3)과 식(4)에서의 참고문헌(15)의 연구 결과에서는 그늘진 웹브의 경사면에서도 분산 효과에 의해 전체일사 중의 일부분, 즉 분산일사가 작용한다는 것파, 식(4)에서와 같이

경사면에서의 일사를 기하학적 관계식으로부터 계산할 수 있는 것은 직접일사 부분에 국한되며 분산일사의 경우는 이와 다르다는⁽⁵⁾ 것을 간과하고 있다.

따라서 경사면에 작용하는 전체태양일사량을 구하기 위해서는 직접일사와 분산일사에 대해 개별적으로 고려하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 수평면에 대한 시간별 전체 일사량, I_h 이 주어진 경우, 참고문헌(8)의 연구 결과로부터, 식(3)의 경사면에 작용하는 전체일사량, I_t 은 식(5)와 같이 고려하였다.

$$I_t = I_b \frac{\cos \phi}{\sin \theta} + I_d (k_c \frac{\cos \phi}{\sin \theta} + 0.5(1 - k_c)(1 + \cos \beta)) + I_r \quad (5)$$

여기서, I_t : 경사면에 작용하는 전체일사(W/m²)

I_b : 수평면에 작용하는 직접일사(W/m²)

I_d : 수평면에 작용하는 분산일사(W/m²)

$I_r = \alpha_s(I_b + I_d) \frac{1 - \cos \beta}{2}$: 수평면에서 반사되는 일사가 인접 경사면에 반사되는 일사(W/m²)

α_s : 반사도, 참고문헌(4)로부터 눈이 없는 경우 0.2, 눈 온 직후 0.7.

β : 경사도, 즉 수평면이 일사를 받는 면의 반대면과 이루는 각.

k_c : Clearness index

식(5)에서 수평면에 대한 직접일사, I_b 와 분산일사, I_d 와 의 비율은 고려하는 장소와 그때의 기상상태 및 위도(latitude) 등에 영향을 받는다. 따라서 지속적으로 변화하는 기상 상태로부터 매순간 정확한 값을 추정하기는 매우 어려운 문제지만, 장기간의 분산일사 및 직접일사의 동시 측정 자료를 바탕으로 시간당 전체일사량에 대한 분산일사량의 비율을 나타내는 경험적 관계식이 제시되었다⁽¹³⁾. 참고문헌(13)의 연구 결과를 수정하

여 참고문헌(17)의 연구 결과에서 호주 대륙에 대해 위도의 영향을 고려한 경험적 관계식을 제시하였으며, 참고문헌(10)의 연구 결과에서는 대기밀도(air mass) 및 지표와 대기의 상호반사효과를 고려한 일반식으로 확장되었다. 위의 식(5)에서는 참고문헌(10)의 연구 결과를 적용하여 식(6)과 같이 분산일사를 계산하였다.

$$I_d = k_c \cdot f_d \cdot I_e \quad (6)$$

$$\text{여기서, } f_d = \frac{-b + \sqrt{(b^2 - 4 \cdot a \cdot c)}}{(2 \cdot a)}$$

$$a = k^2(k\rho - \tau_u)$$

$$b = k[k\tau_u\rho - 2k^2\rho + \tau_u^2(1 + 2/B)]$$

$$c = k(k^2\rho + k\tau_u(1 - \rho) - \tau_u^2)$$

$$B = 42.2(k/\tau_u)^{-0.547}$$

$$\tau_u = 0.212 \exp(-0.804m) + 0.788$$

$$m = \frac{1}{\cos \phi}$$

I_b 는 단순히 I_h 에서 I_d 를 뺀 값으로부터 구해지며, 수평면에 대한 시간당 전체일사량, I_h 는 수평면에 대한 일일전체일사량, I_{day} 으로부터 아래와 같이 구해진다⁽⁴⁾.

$$I_h = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - (2\pi\omega_s/360) \cos \omega_s} \quad (7)$$

$$\text{여기서, } a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60)$$

$$\omega : \text{Hour angle in degrees}$$

$$\omega_s : \text{Sunset hour angle}$$

그림1에서는 기상관측소에서 측정한 수평면의 전체일사로부터 식(5)를 이용해서 경사면에 작용하는 전체일사 중의 직접일사 와 분산일사 부분을

경사각, β 가 0° 및 90° 인 경우에 대해 구하였다. 그림 1에서 수평축은 태양이 관측자의 자오선 상에 왔을 때를 정오로 보는 태양시(solar time)로 나타냈다.

3. 측정값과 해석값의 비교

본 논문에서 제안된 교량의 온도해석 모델의 타당성을 검증 하기 위해서 최근에 건설된 사당고가차도에 온도 측정 센서(thermocouple)와 진동식 변형도계(vibrating wire type strain gage)를 설치하였다. 실험은 단순히 해석 결과의 검증 뿐만 아니라 장기간의 측정을 통해 환경변수와의 상관관계를 밝히고자 1997년 1월 이후 1997년 5월 까지 분기별로 10분 혹은 30분을 간격으로 매 분기마다 약1개월간 연속적으로 수행되었다. 그림 2에 사당고가차도의 전경과 그 대표 단면을 그리고 그림 3에 온도측정을 위해 설치한 Thermocouple의 위치 및 번호를 도시하였다. 본 논문이 온도 추정에 국한하였으므로 Thermocouple 과 같이 설치된 변형도계의 측정 결과는 언급하지 않겠다. 온도측정 당시의 환경매개변수, 즉 전체일사량 및 시간별 풍속은 교량이 위치한 곳에서 약20km북쪽에 위치한 기상청 서울 관측소의 자료를 이용하였으며, 대기 온도는 그림 3의 28번 Thermocouple의 결과를 이용하였다.

본 연구에서 사용된 해석 프로그램의 원시 형태는 Elbadry 와 Ghali에 의해 1984년에 개발된 FETAB (finite element thermal analysis of bridges)⁽⁶⁾서 기상상태와 관련된 자료로부터 임의 형태를 갖는 일반적인 교량단면에 대해 시간종속적 온도분포 해석을 수행할 수 있는 프로그램이다. 본 연구에서는 이 프로그램에서 일사량 관련 부분을 식(5)를 이용하여 수정하였다. 해석 단면의 유한요소모델은 그림 4와 같다. 또한 수평면 일일전체일사량으로부터 시간당 일사량을 계산하도록 수정되었다. 프로그램 내에서 대기온도,

$T_a(t)$ 는 Sine함수를 이용하여 식(8)과 같이 계산되도록 하였다.

$$T_a(t) = A \sin\left(\frac{2\pi(t-\xi)}{24}\right) + B \quad (8)$$

여기서, t = 시간(ST : solar time)

$$A = (T_{max} - T_{min})/2$$

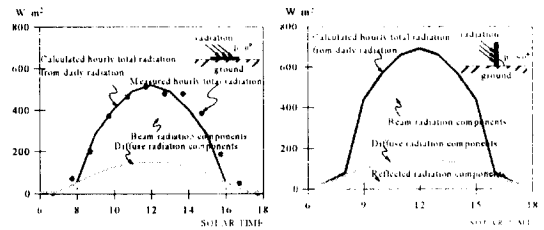
$$B = (T_{max} + T_{min})/2$$

T_{max} = 일최고기온

T_{min} = 일최저기온

ξ = 지연계수

식(8)에서 지연계수, ξ 는 실제 측정치와 비교해본 결과 그림 5와 같이 10에서11.5의 값을 사용하는 것이 가장 근접한 결과를 보였다.

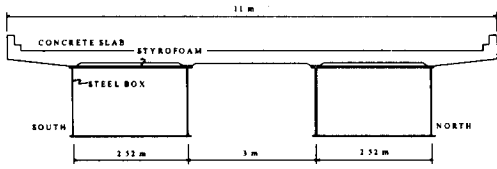


(a) 수평면에 작용하는 일사 (b) 경사면에 작용하는 일사

그림 1. 환경 변수의 시간별 변화(1997년 2월 8일, 서울)



(a) 사당고가차도



(b) 대표 단면

그림 2. 사당고가차도

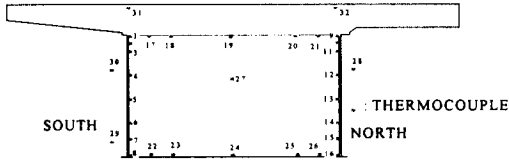


그림 3. Thermocouple(32개) 위치 및 번호

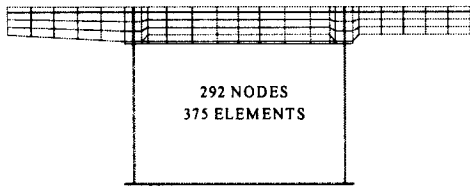


그림 4. Finite Element Mesh

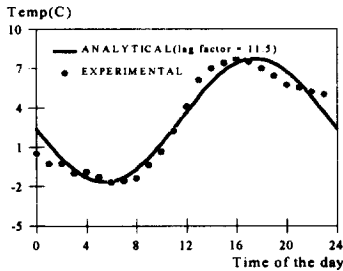


그림 5. 대기 온도의 이상화

시간 종속적 해석을 위한 시간 적분의 초기 조건으로서 유한요소모델링의 각 절점에 대한 초기 온도는 해석을 하는 날의 최저기온을 택했다. 시간증분을 1시간으로 하여 72시간 동안 시간종속적 해석을 수행하여 마지막 24시간의 결과를 이용하였다. 참고문헌(15)에 의하면 초기 조건을 다

르게 선택하더라도 해석을 72시간 이상 수행하면 결과에는 큰 영향을 미치지 않는다. 온도 해석에 사용된 재료상수 들은 표1에 나타났다.

교량의 온도 해석의 결과에 큰 영향을 미치는 변수 중의 하나인 열전달계수를 정확히 추정하는 것은 상당히 어려운 문제지만, 주로 풍속에 관련이 있으며, 이에 대한 실험식이 여러 연구 결과에서 발표되었다^(3,11). 특히 참고문헌(14)에서는 다양한 크기의 풍속에 대한 실험 결과를 바탕으로 실험식을 제안 하였다. 본 연구에서는 참고문헌(14)로부터 열전달계수, $h(W/m^2 \cdot ^\circ C)$ 를 다음과 같이 고려하였다⁽¹⁴⁾. 이때, v 는 풍속(m/sec)이다.

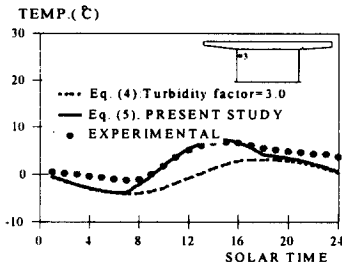
$$h = 5.58 + 3.95v \quad (9)$$

그림6에서는 남쪽 웨브의 3, 5 및 7번 Thermocouple(그림3참조)의 시간별 온도 분포를 나타냈다. 3번 Thermocouple은 항상 플랜지에 의해 직접일사가 차단되는 부분이고 5번 Thermocouple은 주간의 일부분이 그리고 7번 Thermocouple은 항상 직접일사에 노출되어 있다. 3번 및 5번 Thermocouple의 온도 측정값과 이에 해당하는 해석 결과를 비교하면 직접일사가 가리워지는 부분에서 본 연구의 결과와 참고문헌(5),(15)등의 결과는 큰 차이를 보이고 있다. 해석값과 측정값의 차를 보다 객관적으로 나타내고자 표2에서 두 해석 온도값들과 실측값과의 상관 계수 및 평균오차를 계산하였다.

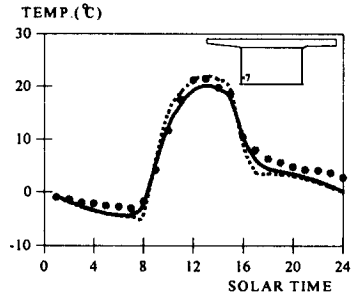
그림7에서는 단면내의 온도차가 가장 적은 오전 8시와 가장 큰 정오를 택해, 수직방향 온도분포에 대한 해석값 과 실험값을 비교하였다. 직접일사의 영향으로 그림7(a)의 남쪽웨브는 오전 8시에 비해 정오의 경우 최고 20 °C 이상의 차이를 보이고 있다. 그림7(b)에서 열의 유입은 주로 상부 슬래브를 통해 전달되고 대기온도의 영향으로 정오의 경우에도 수직방향에 대한 웨브의 온도분포 형태가 일정한 편이다. 태양일사의 영향을 받는

표 1. Material Property

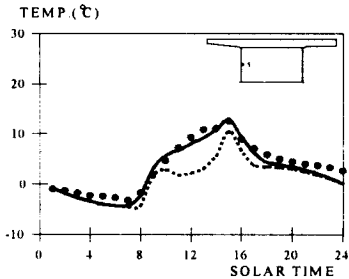
Material property	Concrete	Steel	Asphalt	Styroform
Thermal conductivity, k (W/m °C)	0.93	45	0.74	0.036
Specific heat, c (J/kg °C)	960	500	920	1256
Solar absorptivity, a	0.5	0.8	0.9	
Emissivity, e	0.8	0.7	0.92	
Coefficient of thermal expansion, α (1/ °C)	10×10^{-6}	12×10^{-6}	10×10^{-6}	10×10^{-6}
Density, ρ (kg/m ³)	2400	7800	2100	50
Modulus of elasticity, E (MPa)	26,700	205,800	10	≈ 0



(a) 3번 Thermocouple



(c) 7번 Thermocouple



(b) 5번 Thermocouple

그림 6. 교량 온도 변화(1997년 2월8일)

는 남쪽웨브와 그렇지않은 북쪽웨브는 최고 22 °C의 온도차를 보였다. 수직방향에대한 웨브의 비선형온도분포는 내적평형응력(self-equilibrated stress)⁽¹¹⁾을 유발한다.

표 2. 해석값과 측정값(3, 5및 7번)의 상관계수 및 오차계수

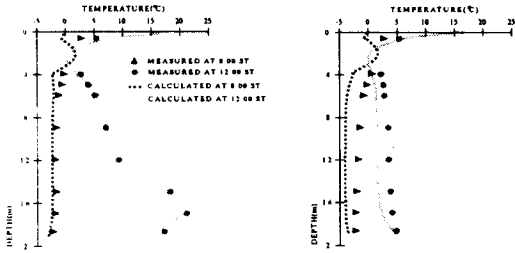
	3번 Thermocouple		5번 Thermocouple		7번 Thermocouple	
	식(4)	식(5)	식(4)	식(5)	식(4)	식(5)
상관계수, γ	0.886	0.959	0.920	0.984	0.985	0.993
오차계수, ϵ	3.34	1.42	2.48	1.0	1.73	1.28

여기서,
$$\gamma = \frac{n \sum T_i t_i - \sum T_i \sum t_i}{\sqrt{n \sum (t_i)^2 - (\sum t_i)^2} \times \sqrt{n \sum (T_i)^2 - (\sum T_i)^2}}$$
 그리고
$$\epsilon = \frac{\sum |T_i - t_i|}{n}$$

T_i : 해석 온도값, t_i : 측정 온도값

* : 일사량 계산을 위해 앞의 식(4)를 이용한 경우

** : 일사량 계산을 위해 앞의 식(5)를 이용한 경우, 본 연구의 결과



(a) 남쪽 웨브 온도 분포 (b) 북쪽 웨브 온도 분포
그림 7. 단면 온도분포

4. 환경 변수와의 상관관계 해석

콘크리트 교량에 대해 장기적으로 연속 측정된 교량 단면 내의 온도값과 대기온도 및 일사량 등 환경변수들과의 선형상관관계(linear correlation)에 대한 연구 결과가 참고문헌(2)등에 의해 발표되었다. 이러한 연구 결과들은 장기적인 관점에서 교량 온도 예측에 유용한 해석적 기준(analytical criteria)을 제공하고있다. 본 연구에서는 5개월 간의 사당고가차도에 대한 온도 측정 결과로부터 합성 박스형 교량의 온도값과 환경변수와의 선형상관관계 해석을 통해 교량 온도 예측의 해석적 기준을 제공하고자 한다. 상관관계해석을 하기에 앞서 그림5에서 보는 바와 같이 일반적인 교량단면의 비선형 온도분포를 교량의 축 방향 신축과 관련된 단면평균온도, T_m 수직 방향의 곡률변화와 관련된 단면내온도차, T_a 그리고 계절별 평균 온도 값과 관련된 단면최저온도, T_b 와 같은 세가지 매개변수로 그림8에서와 같이 정의하였다.

단면평균온도, T_m 는 각 Thermocouple의 온도값, T_i 와 그 위치에서의 단면폭, b_i 그리고 위아래 Thermocouple과의 간격의 반, y_i 로부터 식(10)과 같이 구한다.

$$T_m = T_b + \frac{\sum b_i \cdot T_i \cdot \Delta y_i}{Area} \quad (10)$$

매개변수들간의 상관관계 해석은 선형관계에 대해서만 고려하였다. 먼저 시간당 2 내지 6회 측정된 자료로부터 일최고단면내온도차(daily maximum differential temperature)

$T_{d,max}$ 일최고단면최저온도(daily maximum average temperature), $T_{b,max}$ 및 일최고단면평균온도(daily maximum average temperature), $T_{m,max}$ 를 구하고, 환경변수로서는 일최고기온(daily maximum ambient temperature), $T_{a,max}$ 과 일일전체일사량, I_{day} 을 구하였다. 일사량 자료는 서울 기상관측소로부터 측정된 값을 이용하였다.

4.1 대기온도와의 상관관계

그림9(a)에서 $T_{b,max}$ 와 $T_{a,max}$ 간의 상관관계를 보이고 있다. 두 매개변수간의 상관관계계수(correlation coefficient)의 최고치 0.979를 나타내는 관계식은 식(11)과 같다. 측정치의 95% 신뢰구간은 식(11)에 대하여 ± 1.22 의 범위에 있다.

$$T_{b,max} = -5.553 + 1.255 T_{a,max} \quad (11)$$

그림9(a)에서는 참고문헌(2)의 콘크리트 교량의 상관관계에 대한 연구 결과를 본 연구 결과와 비교하여 나타냈다. 그림에서 보듯이 대기온도로부터 단면최저온도의 추정에서는 단면형식에 별로 영향을 받지 않는다.

그림9(b)에서 $T_{m,max}$ 와 $T_{a,max}$ 간의 상관관계를 보이고 있다. 이들의 상관관계계수가 최고치 0.983을 갖는 경우의 관계식은 식(12)와 같다. 측정치의 95% 신뢰구간은 식(12)에 대하여 ± 0.99 의 범위에 있다.

$$T_{m,max} = -1.789 + 1.15 T_{a,max} \quad (12)$$

대기온도와 단면최저온도 및 단면평균온도는 앞의 식(11)과(12)에서 보듯이 상관계수가 0.97 이상으로 밀접한 상관관계를 보였다. 반면에, 대기온도와 단면내온도차는 상관계수가 0.1이하로 매우 낮았다.

4.2 일사량과의 상관관계

그림 10에서 단면내온도차, $T_{d,max}$ 와 일일총 일사량, I_{day} 대한 상관관계를 보이고 있다. 최대 상관관계계수값을 찾을때의 관계식은 식(13)과 같다.

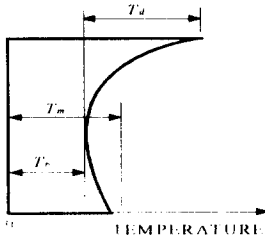
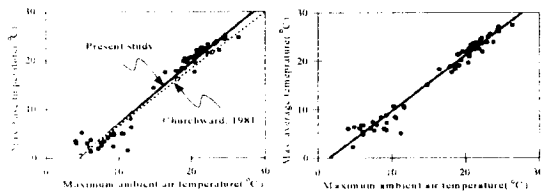


그림 8. 비선형 단면온도분포



(a) 일최고기온과 일최고단면최저온도
(b) 일최고기온과 일최고단면평균온도

그림 9. 교량 온도와 대기온도와의 상관관계

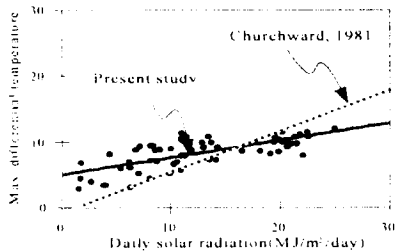


그림 10. 교량 온도와 일사량과의 상관관계

$$T_{d,max} = 6.572 + 0.247I_{day} \quad (13)$$

그림 10에서 참고문헌(2)의 콘크리트 교량에 대한 결과에 비해 합성형 단면에 대한 결과는 다소 높은 단면온도차를 보이고 있다. 이는 그림7에서 보듯이 강 박스 부분이 일사에 매우 민감하게 작용하기 때문이다. 단면평균온도, 단면최저온도 값과 일사량의 경우에는 매우 낮은 상관관계를 보이고 있다.

5. 결 론

수정된 2차원 온도해석 모델을 통해 합성 박스형 교량의 단면온도분포를 추정하였다. 수정된 모델에서는 경사면이 받는 태양일사를 구하기 위해서 태양에너지에 관련된 연구결과들을 바탕으로 수평면에 작용하는 전체일사량으로부터 교량의 경사면에 작용하는 직접일사 및 분산일사를 계산하였다. 이론적 결과의 타당성을 검토하기 위해 최근에 완공된 합성 박스형 교량에서 측정된 온도값과 비교하였다. 교량이 받는 태양일사량의 계산에 관한 수정된 모델을 통해 그들에 가려진 웹에서 보다 정확한 온도 계산 결과를 얻을 수 있었다.

실험 대상 교량에서 장기간 측정된 온도 결과로부터 교량 온도 예측에 대한 해석적 기준을 제시하기 위해, 교량의 축 방향 신축의 원인이 되는 단면평균온도 곡률 변형을 유발하는 단면온도차 그리고 계절별 평균값과 관련된 단면최저온도 등 교량 단면의 온도 분포와 관련된 매개변수들과 대기온도, 일사량 등 기상 자료와 관련된 매개변수들 간의 선형상관관계에 대해 기술하였다. 각 매개변수들이 최대 상관관계계수를 찾을 때의 관계식을 제시하였다. 이 관계식에서 단면평균온도 및 단면최저온도는 대기온도만의 함수로, 그리고 단면내온도차는 일사량만의 함수로 표현될때 가장 높은 상관관계계수를 보였다. 본 연구결과에서 나타난 상관관계에 대한 결과식은 특정한 기후조건

및 합성 박스형 단면에 한정된 것이다.

감사의 말

사당고가차도에 대한 온도영향평가 실험을 도와주신 삼부토건(주) 사당고가차도 현장사무소 소장님을 비롯한 관계자 분들께 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) BATHE, K. J.: 1996, Finite element procedures, Prentice-Hall.
- (2) CHURCHWARD, A. et al.: 1981, Prediction of temperatures in concrete bridges, ASCE, Journal of the structural division, Vol. 107, No. ST11, pp. 2163-2176.
- (3) DILGER, W. H. et al.: 1983, Temperature stresses in composite box girder bridges, ASCE, Journal of structural engineering, Vol. 109, No. 6, pp. 1460-1478.
- (4) DUFFIE, J. A. et al.: 1980, Solar engineering of thermal processes, John Wiley & Sons, New York.
- (5) ELBADRY, M. M. et al.: 1983, Temperature variations in concrete bridges, ASCE, Journal of structural engineering, Vol. 109, No. 10, pp. 2355-2374.
- (6) ELBADRY, M. M. et al.: 1984, Users manual and computer program FETAB: finite element thermal analysis of bridges, Research report No. Ce82-10, Department of civil engineering, The University of Calgary.
- (7) EMANUEL, J. H. et al.: 1978, Temperature distributions in composite bridges, ASCE, Journal of structural division, Vol. 104, No. St1, pp. 65-78.
- (8) HAY, J. E. et al.: 1982, An assessment of the uncertainty in measurements of solar radiation, Solar energy, Vol. 29, pp. 271-278.
- (9) HIRST, M. J. S. et al.: 1989, Prediction Of Bridge Temperatures, IABSE Periodica 3/1989, pp.109-120.
- (10) HOLLANDS, K. G. T. et al.: 1983, An improved theory relating the diffuse fraction to the clearness index, Proceeding of the 10th national conference of the solar energy society of Canada, pp. 89-94.
- (11) MIRAMBELL, E. et al.: 1990, Temperature and stress distributions in concrete box girder bridge, ASCE, Journal of structural engineering, Vol. 116, No. 9, pp. 2388-2409.
- (12) MOORTY, S.: 1990, Thermal movements in bridges, PhD dissertation, University of Washington.
- (13) ORGILL, J. F. et al.: 1977, Correlation equation for hourly diffuse radiation on a horizontal surface, Solar energy, Vol. 19, pp. 357-359
- (14) SAETTA, A. et al.: 1995, Stress analysis of concrete structures subjected to variable thermal loads, ASCE., Journal of structural engineering, Vol. 121, No. 3, March
- (15) SANDEPUDI, K. S.: 1991, Thermal response in Florida bridges, PhD dissertation, Florida Atlantic University.
- (16) SEGERLIND, L. J.: 1976, Applied finite element analysis, John Wiley & Sons.
- (17) SPENCER, W.: 1982, A comparison of methods for estimating hourly diffuse solar radiation from global solar radiation, Solar energy, Vol.29, No.1, pp.19-32
- (18) WILKINSON, B. J.: 1981, An improved FORTRAN program for the rapid calculation of the solar position, Solar energy, Vol. 27, pp. 67-68.

(접수일자 : 1997. 6. 13)