

온도분포 역해석 프로그램을 이용한 PSC 박스거더 교량 단면의 온도 분포 해석

박민석 · 조병완* · 이명규^{†**}

한국도로공사 도로교통기술원(한양대학교 토목공학과) · *한양대학교 토목공학과 · **전주대학교 토목환경공학과
(2006. 6. 12. 접수 / 2006. 8. 7. 채택)

Temperature Analysis of PSC Box-girder Bridges Using Inverse Thermal Analysis Program

Park, Min-Seok · Jo, Byung-Wan* · Lee, Myung-Kue^{†**}

Korea Highway & Transportation Technology Institute(Department of Civil Engineering, Hanyang University)

^{*}Department of Civil Engineering, Hanyang University

^{**}Department of Civil & Environmental Engineering, Jeonju University

(Received June 12, 2006 / Accepted August 7, 2006)

Abstract : It is well known that the thermal load in PSC(prestressed concrete) box-girder bridge is the principal cause of detrimental crack. The longitudinal stress caused by the lateral stress from the temperature gradient in slab of PSC box-girder bridge has a considerable influence on the durability and economy of bridge structures. As the basic study for the rational consideration of thermal load and the derivation of design guide, the inverse thermal analysis program for PSC box-girder bridges using field measurement data is developed. In this paper, thermal analyses are performed using field monitoring data for the sample PSC box-girder bridge. It is proposed that the link between monitoring program and the inverse analysis program is available.

Key Words : temperature analysis, temperature gradient, field measurement data, bridge

1. 서 론

1950년대 이후 유럽을 중심으로 개발되어온 PSC 박스거더교는 지형 조건에 따라 다양한 공법을 적용할 수 있고 기계화 시공이 가능하게 됨에 따라 국내외적으로 적용사례가 증가되는 추세이다. 국내에서도 1981년에 대형교량으로는 처음으로 원효대교가 Dywidag 공법을 사용하여 PSC 박스거더교로 건설된 이후 급격한 건설 증가추세를 보이고 있으며 현재까지 고속도로에 건설된 PSC 박스거더 교량 수만 해도 2004년 기준으로 212개에 이르고 있다. 교량에 작용하는 하중은 교량 상부구조에 변형을 일으키는데 공용중에는 주로 활하중에 의한 원인이 대부분이다. 차량하중, 온도하중, 풍하중, 지진하중 등이 있는데 이중 본 연구에서는 온도하중에 의한

영향을 다루고자 한다. 여러 문헌들에서 실 교량의 온도하중 추정을 위해 기상자료 혹은 실제 교량단면 상에서 측정된 온도자료에 Extrapolation 기법을 적용하고 있다. 이중 황의승 등³⁾은 열전달 해석을 통한 장기온도분포자료를 이용하여 설계온도하중을 추정하였고 실제 PSC 박스거더교에서 온도계측을 실시하여 장기간의 온도자료를 수집한 후 극치해석을 통해 교량 수명기간 동안의 최대값을 예측하기도 하였다.

본 연구는 교량계측 모니터링시스템이 설치된 PSC 박스거더교량에서 실제 온도분포 및 온도응력을 측정하여 단면내의 온도분포 특성과 온도하중에 의한 거동을 규명하고, 기존의 도로교 설계기준에 규정하고 있는 설계온도하중과 비교 분석하여 설계온도하중의 적정성 분석을 수행하고자 하였다.

[†] To whom correspondence should be addressed.
concrete@jj.ac.kr

2. 온도분포 역해석 프로그램

Table 1. General outline of Jukmoon bridge

Classify	Contents		Classify	Contents
Bridge Detail	Super Structure	PSC Box Girder(MSS)	Name	Jukmoon
	Sub Structure	Steel Pipe Pile, Shallow Foundation	Length	50 @ 20 = 1,000m
	Number of lane	4 lane in both direction	Width	24.3m
Construction Company	Samho Co.	Authorities	Korea Highway Cooperation	

2.1. 대상교량

본 연구에서는 대전-통영 고속도로상에 위치한 적문교(MSS)를 주 대상으로 하여 분석 검토를 수행하였다. 적문교의 일반현황은 다음과 같다.

2.2. 프로그램 개요

본 연구에서 사용한 프로그램은 기존의 연구^{1,2)}에서 개발한 교량온도해석 프로그램인 BTAP(Bridge Thermal Analysis Program)를 개선한 모델로서 주변 대기 온도, 태양복사강도, 풍속 등 외부 환경적 조건을 합리적으로 모델링하여 교량 단면내의 온도분포를 구한 후 실제 온도센서에서 측정된 값과 비교를 통하여 프로그램의 신뢰도를 향상시킨 후 단면내의 온도분포 해석 및 열응력 해석 등을 수행할 수 있도록 개발되었다. 주변 대기 온도는 교량 격실 내부와 외부 대기 온도 계측결과를 주로 활용하였다.

2.2.1. 계측데이터 수집

해석하려는 시간이 정해지면 기존의 계측데이터로부터 필요한 단면의 온도자료를 입수하여 온도해석프로그램에 적합한 형태로 변환한다. 필요한 자료는 해석단면내의 온도 측정치, 내·외부 온도, 풍향 풍속, 일조량 등의 자료이다. 계측데이터는 내·외부 온도의 경우에 프로그램 입력에 사용되도록 일차원 배열형태로 변환되고, 내·외부 측정온도의 평균값을 초기온도로 하여 해석을 수행한다. 단면내의 온도측정치는 해석 수행 후 후처리 프로그램에서의 비교를 위해서 배열형태로 변환되어 작성되게 된다.

2.2.2. 사전해석

해석을 수행하는 초기의 온도조건이 실제 온도분포와 다르므로, 해석 초기의 온도조건을 실제 온도분포와 유사하게 하기 위하여 정해진 해석 시간의 두 배의 시간에 대하여 해석을 수행하게 된다. 즉, 단면내의 초기온도를 단면내 온도 측정 자료의 평균

값으로 설정하고, 주어진 경계조건을 이용하여 결정된 해석시간만큼 사전해석을 수행하여 단면온도를 가능한 범위내에서 초기화한다. 즉, 7월 17일에서 20일까지 4일간의 온도 해석시간이 정해지면 이 기간에 측정된 단면내 평균온도를 초기 값으로 하여 7월 13일부터 경계조건(7월17~7월20일까지의 주변 온도이력 등)을 같게 하여 사전해석을 수행하게 되면, 7월 17일 해석시작 단계에서 단면내의 온도가 유사하게 분포할 것으로 사료된다. 이는 측정값과 사전해석결과를 비교하여 판단하게 된다. 이러한 방법으로 초기조건이 실제 온도분포에 근접하는 것으로 판단되면 측정된 여러 가지 경계조건을 고려하여 본 해석을 수행하게 된다.

2.2.3. 해석결과의 표시

해석된 결과를 활용하기 위하여 단면내의 온도 분포에 대한 자료처리가 필요하게 된다. 즉, 단면내의 온도분포도를 평면상에 표시하여 온도분포경향을 파악하고, 단면의 높이에 따른 온도분포를 설계에서 고려하도록 하는 온도구배를 구하기 위한 과정이 필요하다. 기존에는 상용프로그램을 활용하여 이러한 작업을 수행할 수도 있으나 본 연구를 통하여 이용 가능한 후처리 프로그램을 개발하였다. 이를 이용하는 경우 모니터링프로그램과 연계함으로써 단면내의 온도분포와 높이에 따른 온도구배를 손쉽게 구할 수 있게 되었다. 개발된 온도 역해석 프로그램은 평면 변형 4절점 요소를 사용하였다.

3. 교량단면내의 온도분포해석

개발된 PSC 박스거더교량의 온도 역해석 프로그램을 이용하여 적문교에 대한 온도분포 해석 및 열응력 해석을 수행하였다.

먼저 개발된 프로그램의 적절성을 평가하기 위하여 적문교에서 측정된 온도이력과 해석으로 구한 온도이력을 비교하였다. 측정단면은 적문교 P13과 P14사이의 지간 중앙단면으로 해석에서 사용한 측정 기간은 1월 23일부터 1월 24일까지 48시간이다. 해석에서는 주변온도에 대한 기상자료는 측정값을 온도해석의 경계조건으로 사용하였다.

다음으로 해석대상교량의 대표적 단면으로 선정한 두 단면(상행선 P13과 P14의 중앙경간부와 상행선 P17 지점부 단면)에 대하여 인근지역인 충북 보은 지방을 대상으로 한 주변온도 모델을 이용하여 교

량내의 온도해석 및 열응력 해석을 수행하여 단면 내의 온도이력과 교량의 높이에 따른 온도구배 분포 및 종방향 응력구배 분포도를 구하였다. 여기서 해석시 주변 대기온도를 모델링하기 위하여 해당교량의 위치와 유사한 위도의 보은지방 27년 관측 자료에 기초한 일일 최고 및 최저 온도모델을 구성하였다. 일일최고 기온 모델은 식 (1)으로 구해졌으며 7월 20일 오후 3시에 최고기온 33.2℃에 도달하는 것으로 모델링 한 것으로 온도이력을 Fig. 1에 나타내었다. 일일 최저기온 모델의 경우 식 (2)으로 나타낼 수 있으며 1월 17일 새벽 3시에 최저기온 -16.36℃가 발생하는 것으로 연간 온도이력은 Fig. 2와 같다.

$$T_{\max} = 4.3 \times \sin \frac{2\pi \times (h-9.0)}{24} + 11.1 \times \sin \frac{2\pi \times (d-110 + \frac{h}{24})}{365} + 17.6 \quad (1)$$

여기서, T_{\max} = 일일최고기온
 d = 일년중날수
 h = 그날의시각

예를 들면, 1월 1일 09시 = ($d=0$ 일, $h=9$ 시)
 7월 20일 12시 = ($d=200$ 일, $h=12$ 시)

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

여기서, T_{\min} = 일일최저기온
 d = 일년중날수
 h = 그날의시각

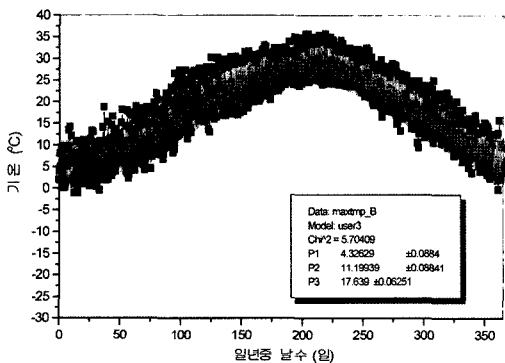


Fig. 1. Daily maximum temperature variation of Boeun Province, ROK and the model in the analysis program.

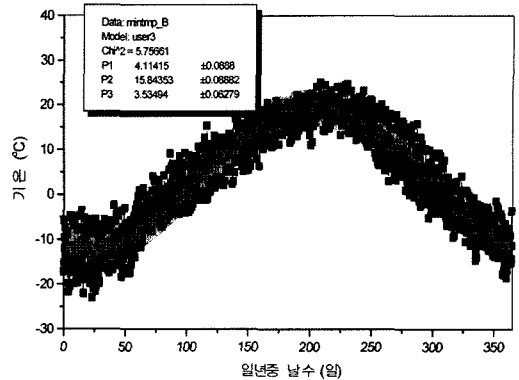


Fig. 2. Daily minimum temperature variation of Boeun Province, ROK and the model in the analysis program.

3.1. 계측치 및 해석치의 온도이력비교

온도측정 및 해석 단면은 적문교 상행선(대전방면) P13과 P14 중앙단면으로 다음 Fig. 3과 같다. 적문교는 교축방향이 남쪽에서 북쪽을 향하고 있으므로 박스거더의 북부의 한면은 동쪽을 향하고 있으며 반대면은 서쪽을 향하게 된다. 해석에서 사용한 유한 요소는 다음 Fig. 4와 같다.

해석에서는 단면의 위치에 따라 태양복사에너지를 다르게 받는 것을 모델링 하였다. 경계조건 b1은 교량상판으로 일출에서 일몰까지 태양의 복사에너지를 받고 있는 것으로 모델링 하였으며, 플랜지의 측면을 나타내는 b2와 b7은 면의 기울기가 90°인 것으로 볼 수 있다. 박스내부에서는 정지해 있는 공기와 열교환에 의해 온도가 변하는 것으로 모델링 하였다.

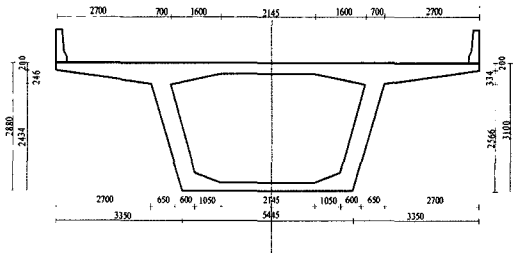


Fig. 3. Cross section (upstream of Jukmoon bridge :P13-P14).

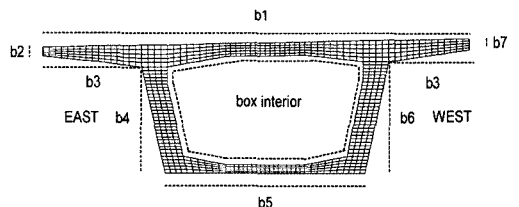


Fig. 4. Finite Element Model.

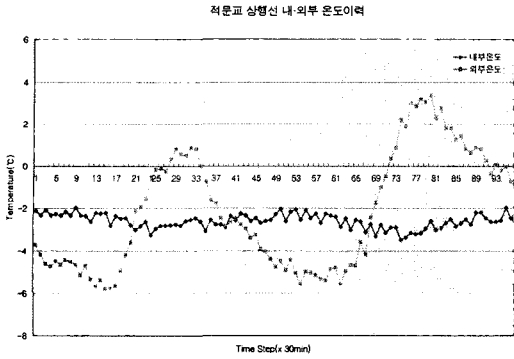


Fig. 5. Temperature history of ambient air and interior of box.

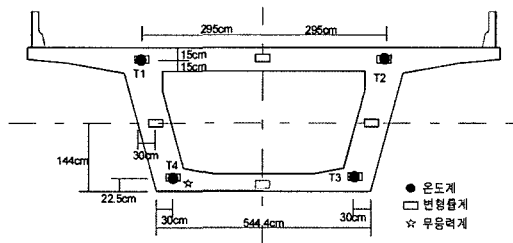


Fig. 6. Sensor location.

온도측정은 1월 23일 00:00부터 1월 24일 23:30까지 온도 측정을 수행하였다. 다음 Fig. 5는 주변대기와 박스내부에서 측정된 온도이력이며, Fig. 6은 센서 설치 상세도이다. 주변대기온도는 최고 3.356°C에서 최저 -5.774°C로 약 8°C의 차이를 보였으며, 박스내부온도는 최고 -1.972°C에서 최저 -3.476°C로 차이는 약 2°C로 주변대기온도에 비하여 큰 차이를 보이지 않았다.

각 지점의 측정 온도이력 및 해석 온도이력을 Fig. 7과 Fig. 8에 나타내었다. 측정시 교량 온도해석에서 중요한 요인인 태양복사에너지량은 측정되지 않았으나 기상상태로부터 추정할 수 있는 값을 사용하여 해석에 반영하였다. 즉, 공기의 혼탁도를 안개와 흐린 날씨로 가정하여 해석을 수행하였다. 측정된 주변 대기온도이력으로부터 단면내의 온도분포에 대한 유사한 경향을 얻기 위해서 해석에서는 콘크리트 열전도(k)값을 2.0W/m°C로 사용하였다. 보통 콘크리트의 열전도도는 수분함량에 따라 다르지만 1.5에서 2.5W/m°C값을 보이는 것으로 알려져 있다. 해석에서 사용한 콘크리트의 비열은 850J/kg°C로, 보통 콘크리트의 비열 840-1200J/kg°C범위에 있는 것을 고려하면 적은 값을 보이고 있다. 콘크리트표면의 복사능(ε)은 0.88, 흡수율(α)은 0.7로 하였다. 해석에서 콘크리트표면의 에너지 흡수율을 0.5로 하는 경우에

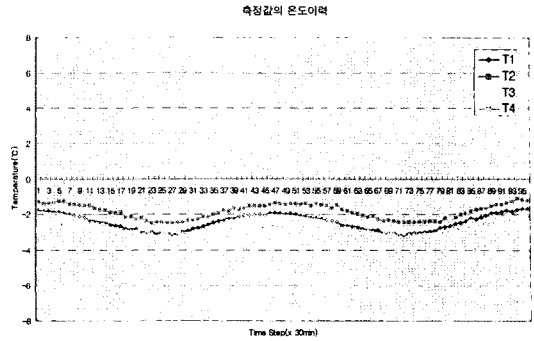


Fig. 7. Temperature history at T1,T2,T3,T4 (Measurement).

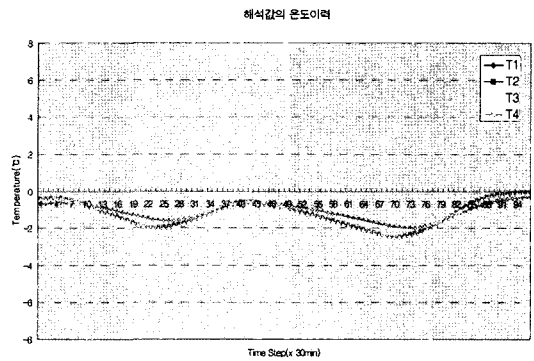


Fig. 8. Temperature history at T1,T2,T3,T4 (Analysis).

는 온도분포가 측정치와 유사한 경향을 보이나, 여러 문헌^{5,7)}에 의하면 콘크리트 표면의 복사에너지 흡수율은 0.65에서 0.8정도의 값으로 보이며 0.7로 해석한 경우가 가장 많아서 이 값을 해석에서 사용하였다.

3.2. 대표단면의 온도 해석

해석단면은 상행선 P13과 P14의 1/2 경간부 단면과 상행선 P17 지점부 단면 두 곳으로 하였다.

해석시간은 겨울철의 경우 1월 16일 0시부터 4일간, 봄철의 경우 4월 6일부터 4일간, 여름철의 경우 7월 11일부터 4일간, 가을철의 경우 10월 8일부터 4일간으로 하였다. 주변 대기온도는 앞에서 설명한 충북 보은 지역의 모델을 적용하였다. 태양의 복사 에너지는 앞에서 언급한 바와 같이 년중 변화, 태양의 고도변화에 따른 영향을 고려하여 내부 계산된 값을 사용하였으며, 날씨는 맑은 것으로 가정하여 혼탁도는 3.0으로 하여 해석을 수행하였다. 그 밖의 다른 열 특성 값과 기상자료 값은 앞에서와 같은 값을 사용하였다. 각 단면에 대하여 4계절에 대한 해석을 수행하였으며 앞에서 구한 단면의 온도이력을

구한 위치에서 온도이력을 구하였으며 복부의 높이에 따른 온도구배와 응력구배를 각각 구하였다. 이중 겨울철 지점부 단면 결과만을 수록하였다. 단면내의 온도해석을 위해서 교량에 적용한 주변 대기온도 이력 중 겨울의 경우는 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 10은 겨울철 상부슬래브 중앙부의 온도해석 결과를 보여주고 있다. 해석결과로부터 PSC 박스거더 교량의 단면내의 여름철 복부중심선을 따른 온도구배를 구하여 Fig. 11에 도시하였으며 겨울철에 발생하는 온도구배는 Fig. 12와 같다. 온도구배는 복부 중심선을 따라 하부슬래브표면에서의 높이의 함수로 구하였으며, 해석시간이 07시, 12시, 16시, 19시, 23시인 경우에 대하여 단면내의 온도구배를 구하여 비교하였다.

계절별 해석결과 중앙부와 지점부에 대한 시간별 온도 차이는 둘 다 계절과는 상관없이 복부 내에서 온도변동 차는 약 1도 정도로 거의 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 특히, 지점부의 계절 시간별 온도차는 중앙부보다 더 작았다. 이는 지점부의 복부 폭이 중앙부보다 더 넓기 때문에 시간별 온도 변화에 덜 민감한 것으로 판단된다.

한편, 여름에 상부슬래브와 복부평균온도의 온도차는 중앙부와 지점부에서는 약 18℃ 정도 발생하였다. 이는 시방서에서 바닥판과 다른 부분과의 온도차를 최대 15℃로 한다는 시방서의 규정을 초과하는 결과로 장기간의 실측 실험에 의해 검토되어야 할 것으로 생각된다.

또한, 상부슬래브 표면에서의 하루 온도변화폭이 약 20℃ 범위에 있다는 것을 해석결과로부터 알 수 있다. 하부슬래브 표면의 경우 하루 온도변화폭이 약 6℃ 범위에 있는 것을 알 수 있다.

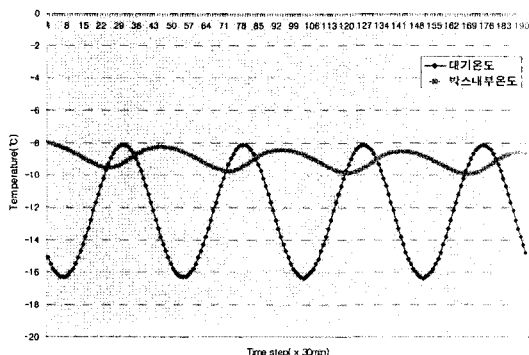


Fig. 9. Temperature history of ambient air and interior of box in winter(upstream P13-P14 §).

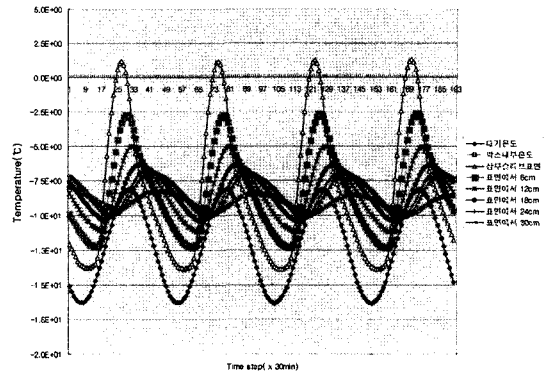


Fig. 10. Temperature history of center of top slab in winter.

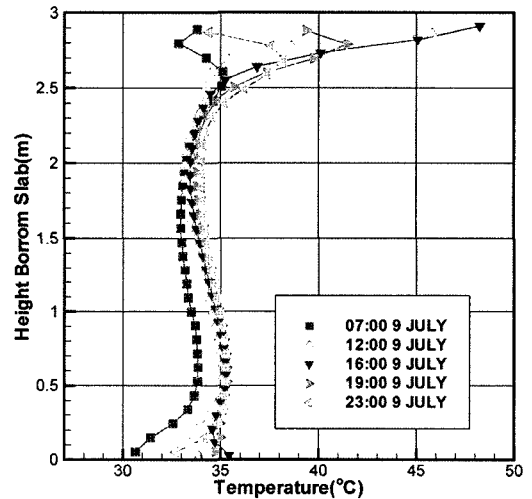


Fig. 11. Temperature gradient at the center of the span (P13-P14 §) in summer.

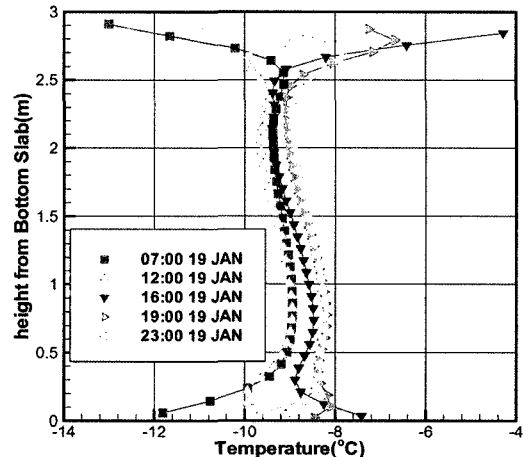


Fig. 12. Temperature gradient at the center of the span (P13-P14 §) in winter.

하루동안의 온도구배의 기울기는 아침에서 오후를 거쳐 밤이 되면 반대 방향으로 바뀌는 것을 해석 결과로부터 알 수 있다.

3.3. 대표단면의 온도응력 해석

복부 중심선을 따라 단면내에 발생하는 응력구배를 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다.

단면내의 비선형 온도분포에 의해 발생하는 응력구배는 해석에 의하면 중앙부에서는 겨울에 단면내에 발생하는 최대인장 응력은 약 1.6MPa이며, 여름인 경우 약 4.0MPa의 압축응력이 발생하는 결과를 보이고 있다. Fig. 13에서와 같이 복부의 중앙높이(약 2.7m)에서의 최대응력은 오후 12시경에 발생하며 오전에는 온도구배가 반대방향이므로 응력분포 양상도 반대 경향을 나타내고 있다. 그림에서 하부슬래브 표면에 발생하는 응력은 오후 23시에 약 -2.2MPa에서 오후 4시경에 -3.0MPa의 범위로 변하게 된다. 온도구배의 변화에 의해 복부중앙높이에서 응력은 하루에 약 2.0MPa(-1.8MPa에서 -3.8MPa)의 변동폭을 보이나, 표면에서는 단면의 종류에 관계없이 겨울과 여름에 약 2.0MPa정도의 큰 변동폭을 보이고 있으므로 이에 의한 영향 검토가 수행되어야 할 것으로 보인다.

교량에서의 비선형 온도구배에 의한 열응력은 구조물의 지점조건에 따른 구속작용에 의해 영향을 고려하여 계산되어야 하며, 실제로 구조물에 발생하는 응력은 사하중에 의한 응력과 활하중응력, 프리스트레스하중 등이 열응력과 합성된 형태로 작용하게 된다.

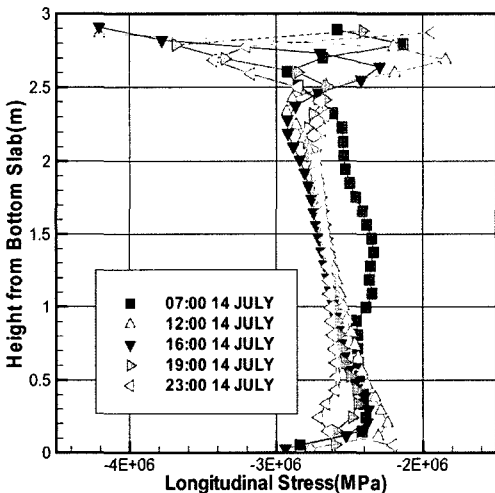


Fig. 13. Thermal stress gradient at the center of the span (P13-P14) in summer.

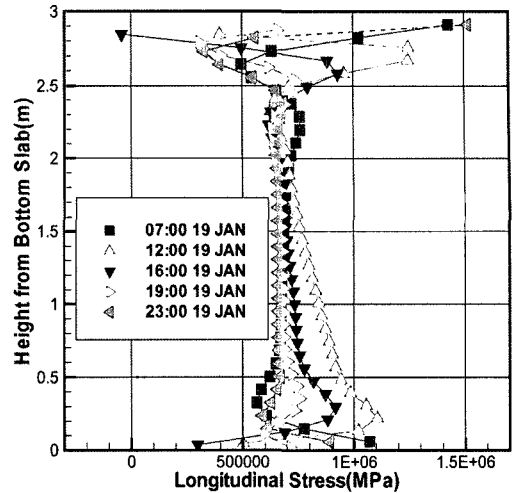


Fig. 14. Thermal stress gradient at the center of the span (P13-P14) in winter.

4. 결론

PSC 박스거더 교량에 횡방향 균열을 일으키는 것으로 알려진 온도하중의 영향을 평가하기 위하여 교량에 영향을 주는 열원을 모델링하여 온도해석을 수행하기 위해 기존의 연구를 통해 개발된 교량 단면내의 온도 분포 해석 프로그램인 BTAP를 개선하여 온도 역해석이 가능한 프로그램을 개발하였다.

온도 역해석 프로그램은 측정결과를 입력으로 하여 임의의 단면에서 임의의 위치에 대한 온도를 예측하는 기능을 가져야 하므로 가급적 계측 모니터링 프로그램과 연계하여 사용하는 것이 프로그램의 효용성 측면에서 유리하다고 보아 본 연구에서는 적문교의 계측 자료 데이터베이스에서 바로 온도 역해석 입력자료를 준비할 수 있는 프로그램을 작성하도록 하였으며 이로부터 해석을 수행할 수 있는 역해석 프로그램을 작성하였다.

해석대상인 적문교의 해석결과 여름에 상부슬래브와 복부평균온도의 온도차가 시방서에 규정인 바닥판과 다른 부분과의 온도차는 15°C이내야 한다는 규정을 초과하는 온도구배(약 18°C)가 발생하였다. 이러한 점을 고려하여 장기간의 실측 실험에 의해 온도하중의 적정성이 검토되어야 할 것으로 사료된다. 이를 위하여 각 지역의 대표 교량을 선정하고 이들 교량의 장기적인 온도계측 수행 및 계측된 데이터를 반영한 역해석을 통한 단면내 온도 분포 및 구배의 결정이 이루어져야 한다. 또한 계산된 온도 분포 및 구배에 대한 분석과 통계처리를 통한 교량의 온도

하중 형상결정, 지역별 온도하중 결정 등에 대한 체계적인 연구가 추진되어야 할 것으로 사료된다.

본 연구에서 제시된 방법을 통하여 교량의 기본 설계 및 유지관리에서 중요한 우리나라 고유의 온도하중을 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 박민석 등, 고속도로 교량활하중 정형화에 관한 연구, 연구보고서, 도로연 01-26, 한국도로공사 도로연구소, 2001.
- 2) 이명규, 이형준, 김성곤, 프리스트레스트 콘크리트 박스거더교량의 온도분포해석, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제19권, 1-5호, pp. 745~759, 1999.
- 3) 황의승, 임창균, 김병석, 모의해석에 의한 고속전철용 PSC 박스거더교의 설계온도하중, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제20권, 6-A호, pp. 927~935, 2000.
- 4) 황의승, 이정재, 실측치를 이용한 PSC 박스 거더교의 온도하중 추정, 대한토목학회 논문집, 대한토목학회, 제22권, 4-A호, pp. 707~716, 2002.
- 5) Churchwood, A., sokal, Y. J., Prediction of Temperatures in Concrete Bridges. Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 107, No. ST11, 1981.
- 6) Diger, W.H., Ghali, A., Ghan, M., Cheung, M.S., and Maes, M. A., Temperature-Induced Stresses in composite Box-Girder Bridges, Journal of the Structural Eng., ASCE, Vol. 109, No. 6, pp. 1460~1478, 1983.
- 7) Emanuel, J. H., Hulsey, J. L., Temperature Distributions in Composite Bridges, Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 104, No. ST1, 1978.
- 8) Elbadry, M. M., Ghali, A., Temperature Variations in Concrete Bridges, Journal of Structural Eng., ASCE, Vol. 109, No. 10, pp. 2355~2374, 1983.
- 9) Elbadry, M. M., Ghali, A., Thermal Stresses and Cracking of Concrete Bridges, ACI Journal, 1986.
- 10) Hunt, B., Cooke, N., Thermal Calculations for Bridge Design, Journal of the Structural Div., ASCE, Vol. 101, No. ST9, 1975.