

계측에 의한 강거더교의 온도분포 특성

Characteristics on the Temperature Distribution in Steel Girder Bridge by using Gauge Measurement

이 성 행¹⁾ · 정 진 환²⁾ · 김 경 남³⁾ · 함 형 길⁴⁾ · 정 경 섭⁵⁾

Lee, Seong Haeng · Cheung, Jin Hwan · Kim, Kyoung Nam · Hahm, Hyung Gil · Jung, Kyoung Sup

요약 : 강계 거더교의 다이어프램 상·하부 플랜지에 부착된 온도게이지의 값을 측정하여, 온도 분포와 시간적 변화를 검토하고, 도로교 설계기준과 비교하였다. 또한 측정 자료를 기초로 하여 일일 기온, 일 최고기온, 일 최저기온에 대한 교량 부재온도와의 상관관계를 각각 분석하여 회귀분석식과 신뢰도를 나타내는 상관계수를 산정하였다. 구조해석에서는 대상교량을 3차원 전체모델링을 수행하고, 실제의 온도 측정 자료를 기반으로 한 온도 하중을 부과하여 계산된 온도 응력값과 시방 규정상의 온도하중에 의한 단면력을 서로 비교·분석한다. 본 연구에서 구해진 대기 온도분포와 강교량 부재 온도 상관관계로부터 상하 플랜지의 온도차를 예측할 수 있고 이 결과를 이용하면 설계 시 신뢰성 있는 부재의 온도하중을 산정할 수 있어, 추후 강합성교량의 온도 영향 평가에 있어서 기초적 자료가 될 것이라 기대한다.

ABSTRACT : The variation of temperature in the steel girder bridge by air temperature is measured. A correlation between the daily temperature range, the maximum and minimum temperatures of the day, and the temperature of the bridge are analyzed. With the statistical data from the Korea Meteorological Administration, the temperature correlations analyzed in this study is able to predict temperature variations between the upper flange and the lower flange which calculates the realistic displacement values of a movable support and an expansion joint in design.

핵심용어 : 온도분포, 최고·최저기온, 강거더교, 회귀분석

KEYWORDS : temperature distribution, maximum/minimum temperature, steel girder bridge, regression analysis

1. 서론

교량에 발생하는 온도변화는 교량이 놓인 지리적 위치, 교축의 방향, 단면형상, 열전달에 관련된 상수 그리고 대기온도, 태양 일사, 풍속 등 여러 매개변수의 영향을 받는다(장승필, 1997). 이런 매개변수를 통하여 나타나는 시간 의존적인 온도 분포에 대해 교량 거동의 평가가 필요하며, 이를 위해 건설 중에 있는 강상자거더교를 대상으로 시공 단계별 시간에 따른 온도 및 변형률과의 관계를 파악하는 것이 요망된다. 이러한 자료를 바탕으로 측정 지역별 교량부재의 온도변화와 기온과의 상관관계를 분석하고 타당성을 입증할 수 있다면, 기상청의 기온 자료를 이용하여 교량부재의 설계온도 기준을 산정할 수 있을 것이다. 일교차, 일 최고·최저기온에 대한 교량

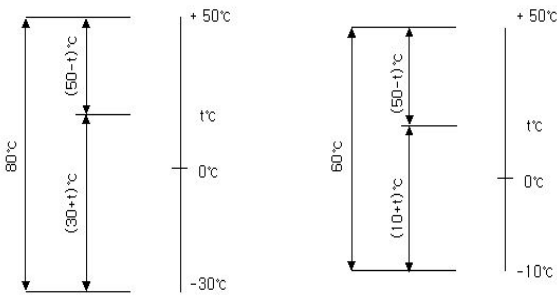
의 온도변화를 측정하고 서로 간에 연관성을 검증함으로써 설계 온도하중을 결정할 때, 현재의 도로교설계기준(대한토목학회, 2008)을 보완하는 것이 가능할 것이다. 또한 실제에 근접한 상하연 온도차 응력과 가동받침의 이동량 산정 및 신축 이음설계에 이용할 수 있어 좀 더 신뢰성 있는 교량설계에 기여할 수 있을 것이다.

도로교 설계기준·해설은 설계 시 온도변화의 승강 및 상·하연 온도차를 규정하고 있으며, 특히 강구조물에 대한 온도의 승강이 그림 1과 같이 구조물이 위치되는 지역에 따라 기후가 한랭 또는 보통인 경우로 구분하고 있다. 또한 2010년 개정된 도로교 설계기준(국토해양부, 2010)은 사용강재 선정을 위하여 측정지역인 충북지방을 온도 구역 III로 구분하여 한랭한 지방으로 간주하고 있으므로, 그림 1(a)에 의거 상하 플랜

1) 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사(ish77@pusan.ac.kr)
2) 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사(cheung@pusan.ac.kr)
3) 교신저자. 충북대학교 건설기술연구소 연구원, 공학박사
(Tel: 043-264-2408, Fax: 043-261-2408, E-mail: kkn74@hanmail.net)
4) 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수, 공학박사(hghahm@pusan.ac.kr)
5) 충북대학교 구조시스템공학과 교수, 공학박사(ksjung@cbnu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

지의 온도승강 범위는 80℃로 볼 수 있다. 그리고 한랭한 지방에서의 가동받침 이동량 산정을 위한 온도변화에 대하여, 강교(상로교)와 강교(하로교 및 강바닥판교)에 공통적으로 -20℃~40℃의 온도변화를 고려하도록 하고 있다. 이러한 규정에 의거한다면, 상부콘크리트를 타설한 경우와 타설하지 않고 강박스거더만 있는 상태에 대하여 공통적으로 가동받침 이동량 산정을 위한 온도변화는 -20℃~40℃가 될 것으로 생각된다. 그리고 강교에서 직사부분과 그늘부분의 온도차를 15℃로 가정하고 있으며, 추후 콘크리트 타설후에는 콘크리트와 강거더 사이에 10℃의 온도차이가 발생하는 것으로 가정하고 있다(대한토목학회, 2010). 그러나 상기와 같은 온도구역 구분은 교량에 사용되는 강재의 인성요구조건을 위한 것으로, 아직까지는 그림 1에 보이는 바와 같은 단순한 구분으로 온도하중이 정의되고 있으므로, AASHTO, Eurocode와 같은 각 지역별 최대, 최소 설계온도가 정의되어 사용되지 않는 실정이다(AASHTO, 2007; BSI, 1999).



(a) 기후가 특히 한랭한 지방 (b) 기후가 보통인 지방
 그림 1. 강구조물의 온도 승강범위 (대한토목학회, 2008)

국내 다양한 연구 결과들에 따르면, 강박스에 발생하는 온도응력이 균일한 온도분포를 가정하는 현재의 설계기준에 의거한 응력보다 다섯배가 넘게 발생될 수 있음을 확인하기도 하였으며(장승필 등, 1997), 수직방향 온도분포 뿐 아니라 수평방향 온도분포에 대한 응력 검토가 필요함을 보고하여(장승필 등, 1998), 현 설계기준의 문제점을 지적하기도 하였다. 또한 PSC교에 대하여서도 수직방향 온도차에 있어서 설계기준의 2.2배정도로 차이가 발생함을 확인한 바 있다(황의승 등, 2002). 곡선 강상자형교에 대하여 일사조건에 따라 반력의 변화가 발생하며(김상호 등, 2005), 일사를 고려함으로써 교축, 교직, 연직방향 등에 대한 반력의 변화가 발생할 수 있음을 보고한 바 있다(조광일 등, 2008).

이상과 같이, 여러 연구자들에 의하여 강교에서 발생하는 온도의 영향이 기존 설계기준에 의거한 응력해석만으로는 충분치 않음을 지속적으로 지적하고 있으므로, 본 연구에서는 실제 시공되는 강상자형교량에 온도계이저를 부착하고, 다이어프램과 상·하부 플랜지에 대한 온도 분포와 변화를 검토하

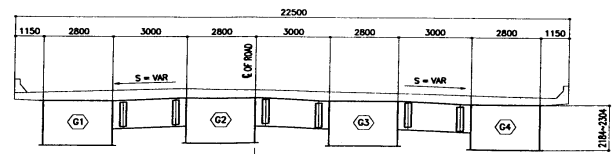
고, 도로교 설계기준과 비교하였다. 또한 측정 자료를 기초로 하여 일교차, 일 최고·최저기온에 대한 교량 부재온도와 상관관계를 각각 분석하여 회귀분석식과 신뢰도를 나타내는 상관계수를 산정하였다.

구조해석에서는 대상교량을 3차원 전체모델링을 수행하고, 실제의 온도 측정 자료와 설계기준에 따른 온도 하중을 각각 부과하여 계산된 단면력을 서로 비교·분석하고, 일반적인 설계방법에 따른 단면력과 변위를 계산하여 서로 비교·검토하였다. 여기서 분석된 대기 온도분포와 강교량 부재의 온도 상관관계로부터 상하 플랜지의 온도차를 예측할 수 있기 때문에 설계 시 신뢰성 있는 부재의 온도하중을 산정할 수 있어, 추후 강합성교량의 온도 영향 평가 기준에 있어 기초적 자료가 될 것이라 기대한다.

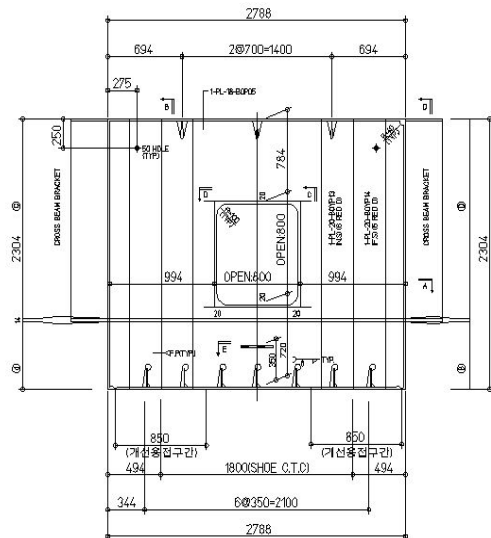
2. 교량 현황 및 실측

2.1 대상 교량

현장 측정 대상 교량은 충북 괴산군에 위치하며, 4경간 연속 강상자형으로 이루어진 총연장 190m(45+2@50+45)의 직선 교량으로 폭은 22.5m이며 종단구배는 5.75%이다. 대상 교량의 횡단면도와 다이어프램의 구조 상세는 그림 1과 같이 중복식이며, 교량받침은 강상자형 하단에 2개소 설치된다.



(a) 횡단면도



(b) 다이어프램부 일반도

그림 2. 교량 단면 형상 (대우건설(주), 2002)

2.2 측정 위치

2.2.1 Pier 1 부분

측정 위치는 대상 교량의 두 번째 거더(G2)이며, 그림 2와 같이 Pier 1의 지점부에서 다이아프램의 높이별로 온도게이지 7개(T2~T8)를 부착하였고, 실내·외 온도 측정을 위한 온도게이지 2개(실내: T9, 실외: T10)를 설치하였다. T1은 상부플랜지의 온도, T2~T8은 다이아프램 하단으로부터 높이가 205cm, 180cm, 155cm, 130cm, 105cm, 80cm, 40cm에 각각 위치한다.

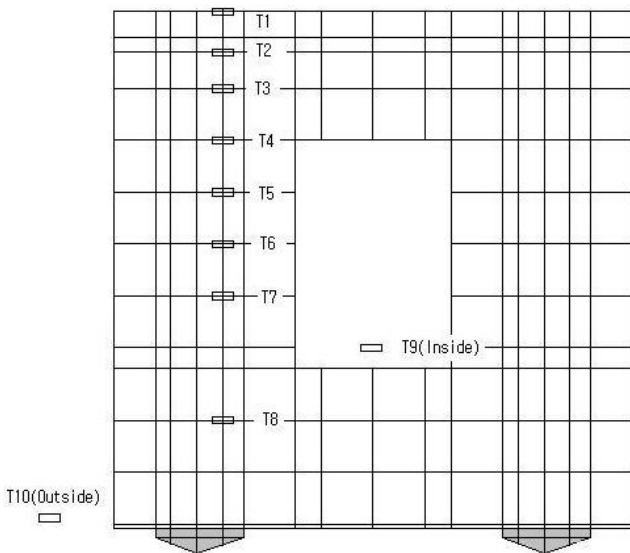


그림 3. 다이아프램(Pier1)에서 온도게이지의 위치와 번호

2.2.2 2경간 중앙부분

2경간 중앙 부분에는 그림 4와 같이 온도게이지를 상부(T13(좌), T14(우))와 하부(T11(좌), T12(우))에 각각 2개씩 부착하였다.

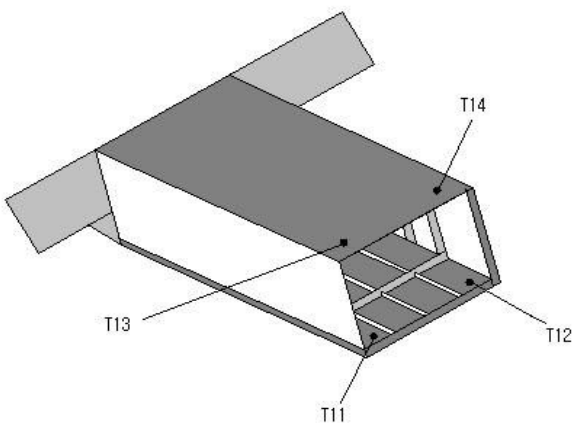


그림 4. 경간 중앙 온도게이지의 위치와 번호

2.3 측정 방법 및 기간

현장 측정의 주된 목적은 강상자형교의 각 시공단계에 따른 일별, 계절별 온도 변화가 강상자형의 구조적인 거동에 미치는 영향을 파악하기 위한 것으로, 측정데이터는 20분 간격으로 연속 측정하였다. 측정기간은 강재가 현장 가설 된 이후부터 상판 콘크리트 및 아스팔트 타설까지 약 9개월간 온도 변화를 측정하였다. 7월 25일에 강재를 거치하였고, 10월 21~23일에 상판 콘크리트를 타설하였으며, 다음해 5월초까지 게이지 부착지점에서 부재의 온도를 측정하였다.

3. 측정 결과 및 분석

3.1 시간에 따른 온도 분포

3.1.1 콘크리트 타설 전 온도변화

강재거치 후 콘크리트 타설 전 다이아프램 부위에서 측정 시간에 따른 다이아프램 높이별 온도분포를 그림 5에 나타내었고 중앙 경간 상·하부 플랜지의 온도 분포를 그림 6에 나타내었다. 교량의 온도 분포는 대기온도 변화에 따라 24시간을 주기로 뚜렷하게 반복되는 형상으로 나타났다.

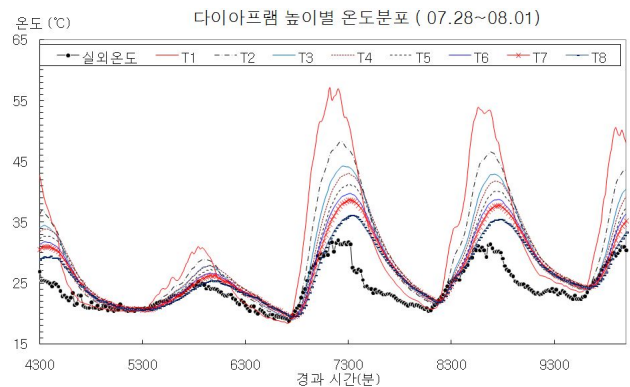


그림 5. 콘크리트 타설 전 다이아프램부의 온도 이력

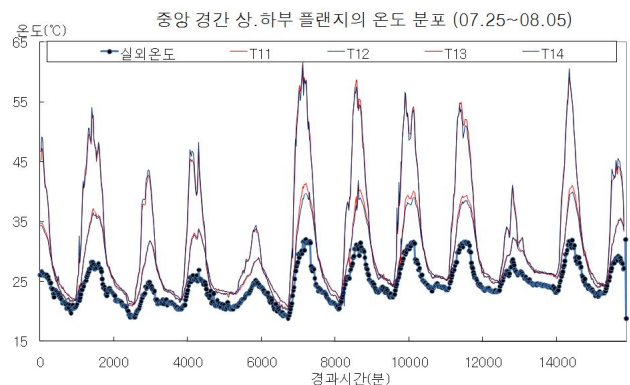


그림 6. 콘크리트 타설 전 상·하부 플랜지부의 온도 이력

그림 5와 그림 6의 온도승강 구간을 정리하여 강재거치후 6 일간의 부재 높이별 온도 분포를 나타낸 것이 그림 7이다(김종열, 2004). 대기 온도가 32~18.8℃로 온도차가 13.2℃이며, 동 기간내 다이아프램 상부의 온도(T2)는 48.2~18.8℃로 온도 차는 29.4℃이며, 실외 대기 온도범위보다 최고 온도가 16.2℃ 높은 것을 알 수 있다. 중앙경간 상부플랜지 온도(T13)의 최대값은 61.7℃로 기록되었고 온도 차는 41.3℃로 매우 크게 나타났다. 반면에 하부플랜지에서의 온도(T11) 분포는 상부플랜지의 최고온도와 온도 차보다는 20℃ 정도 낮은 수준으로 나타났다. 강상자형의 높이에 따라 최고 온도는 상부로부터 선형적으로 감소되다가 하부 플랜지 부근에서 다시 상승하고 있었으며, 최소 온도의 분포도 거의 유사한 경향을 나타내었다.

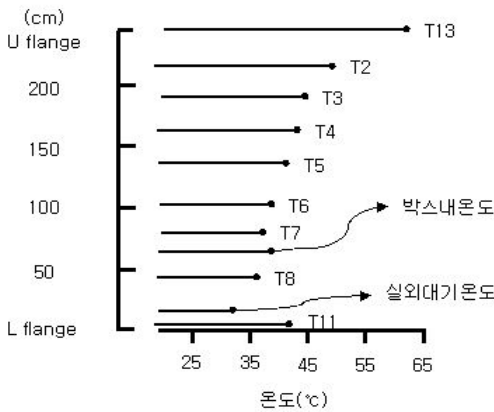


그림 7. 높이에 따른 온도변화

3.1.2 콘크리트 타설 직후 온도변화

그림 8은 콘크리트 타설 직후 온도변화를 나타내는데, 대기 온도에 상관없이 수화열로 인한 온도상승이 나타난다. 따라서 이후 온도와외의 상관관계를 분석하는데 있어 수화열에 의한 영향이 존재하는 부분의 데이터는 배제하였다.

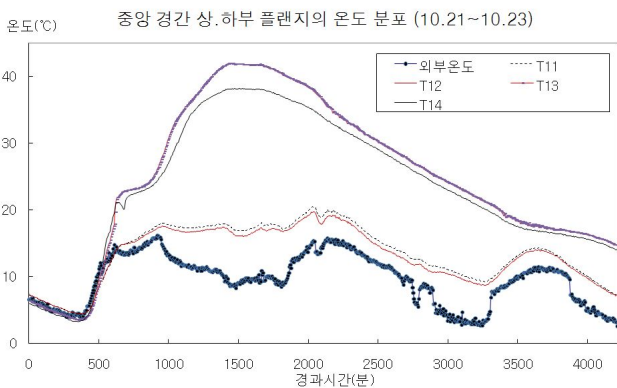


그림 8. 콘크리트 타설 시 상·하부 플랜지의 시간에 따른 온도 변화

3.1.3 콘크리트 타설 후 온도변화

그림 9는 콘크리트 타설 후 약 6개월이 지난 시점에 측정된 강재단면의 온도변화로서, 콘크리트 슬래브 타설 이전과는 달리 대기온도에 의한 영향이 강재단면에 미치는데 약간의 시간차가 발생하고 있다. 이는 콘크리트 슬래브의 거치로 인하여 열복사, 전도에 차이가 발생하기 때문이다. 그러나 대기온도와 교량의 온도 승강 주기는 동일하게 나타난다.

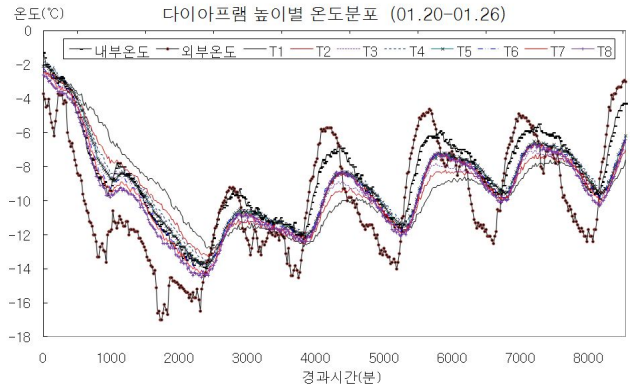


그림 9. 콘크리트 타설 후 다이아프램의 시간에 따른 온도 변화

3.1.4 측정 전체기간내 온도승강

그림 10에 다이아프램부와 중앙 경간 상·하부 플랜지의 측정기간 동안 최고온도와 최저온도의 범위를 도시하였다.

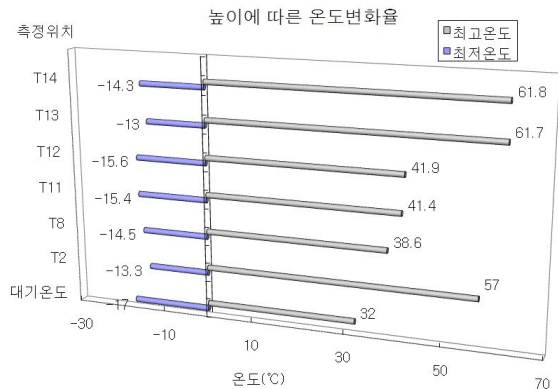
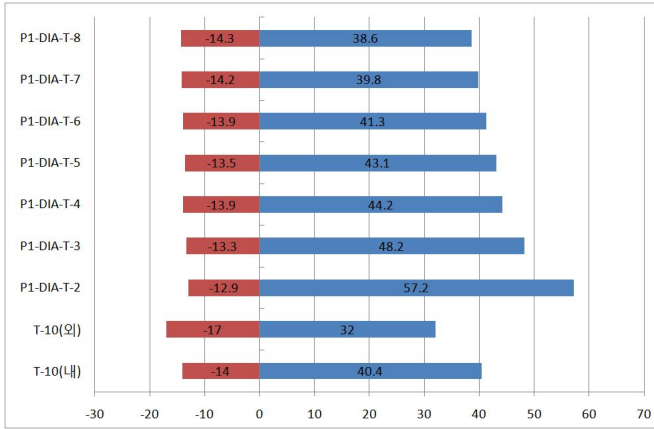


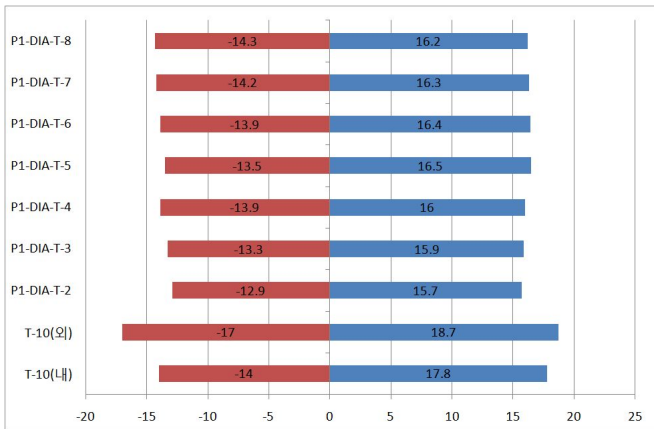
그림 10. 측정 위치 별 온도 변화 범위

실측된 자료 그림 10에서 상부플랜지의 최대온도는 61.8℃로서, 이는 한여름에 콘크리트가 타설되기 전의 강재거치만 거치된 상태의 결과이며 최저온도는 -14.3℃로, 이는 한겨울에 콘크리트가 타설된 이후의 측정데이터를 각각 정리한 것이다. 온도변화가 크게 발생하는 강재거치만 있는 상태라고 가정하더라도 온도승강은 76.1℃가 되어, 설계기준에 의거한 가동받침의 이동량 산정시의 온도변화에 대한 승강범위를 만족하지 않는 것으로 확인된다. 그러나 실제 단면의 온도승강은

단면 평균 온도로 생각할 수 있으며, 이를 단면내 측정 온도의 높이를 고려하여 평균 온도승강을 고려한다면 실측 온도 승강의 범위는 더 작게 된다.



(a) 전체기간



(b) 상부슬래브 타설후 (동절기)

그림 11. 높이에 따른 온도변화

그림 11에는 측정 전체기간과 콘크리트 타설 후에 대하여 각각 다이어프램부의 높이별 온도 범위를 나타낸다. 그림 6의 콘크리트 타설 전의 결과와 비교하면, 콘크리트가 타설된 이후를 포함하는 데이터에서는 상,하연의 온도차가 상당히 감소되는 것이 확인되고 있다. 그리고 최저기온이 대부분 부재에서 -15°C에 근접하여, 한겨울에는 각 부재간의 최저 온도는 거의 유사한 것으로 판단할 수 있었다. 또한 최고온도는 상부(T13)과 하부(T11)에서 약 20.3°C의 온도차가 발생되고 있었으며, 이러한 결과는 상부콘크리트가 타설되기 전에 강재만이 거치되어 있을 경우의 태양 직사부분과 그늘부분과의 온도 차이로 판단하면 될 것이다. 설계기준에 따르면, 강교에서 직사에 따른 온도차는 15°C를 기준으로 하는 것에 비하여 실측에서는 더 큰 차이가 발생되고 있음이 확인된다.

경간중앙부의 상,하부 플랜지에서 측정된 전체기간의 온도대

이터를 이용하여, 최저·최고온도에 대한 각 단면 평균온도를 고려하였다. 그림 9에 보이는 바와 같이 상부(T13)와 하부(T11)에서 측정된 최저, 최고온도의 평균을 취하게 되면, $-14.2^{\circ}\text{C}(\frac{-13-15.4}{2}) \sim 51.55^{\circ}\text{C}(\frac{61.7+41.4}{2})$ 가 된다.

이로부터 강재단면의 평균 온도승강은 65.75°C 정도로 볼 수 있고, 설계기준에 의거한 가동받침의 이동량과 측정결과에 의한 이동량을 계산, 비교하면 표 1과 같다.

표 1. 가동받침의 이동량 산정 비교 (바닥판 부재시, 강상판교 가정)

구분		신축량	비고
설계기준	최저온도 (-20°C)	-79.8mm	가설시 온도 : 15°C, 열팽창계수 : 1.2×10 ⁻⁵ , 경간 : 190m 적용
	최고온도 (40°C)	57.0mm	
측정결과	최저온도 (-14.2°C)	-66.6mm	
	최고온도 (50.68°C)	81.4mm	

그러나 그림 11(b)에 보이는 바와 같이, 콘크리트 슬래브 타설후의 결과만을 분석한다면, 해당 결과가 늦겨울로부터 익년 봄까지만을 포함하고 있어 실제로 단면내의 온도가 최고로 상승하게 되는 한여름을 포함하고 있지는 않지만, 여타 기간에 대하여 발생되는 최고온도에 대한 상하연의 온도차는 거의 발생되지 않는 것으로 판단된다.

그림 11에 따르면, 콘크리트 슬래브가 있는 경우에는 상하연의 온도차가 크게 감소하는 경향이 있으므로, 설계기준에 의거한다면 콘크리트 슬래브가 있을 경우에는 충분한 안전여유를 갖을 것으로 예상된다. 그러나 상부슬래브 타설후의 하절기의 측정결과가 부재하기 때문에 정확한 데이터로부터의 판단은 불가능하다. 그러므로 이러한 부재내의 온도변화에 대한 장기적인 측정이 필요로 되고, 이로부터 좀 더 명확한 온도하중을 결정할 수 있을 것이다.

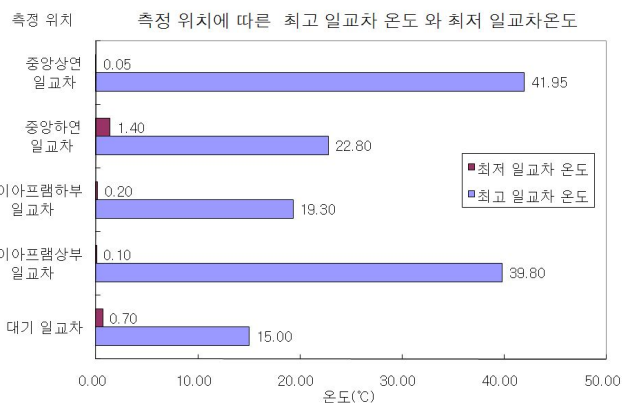
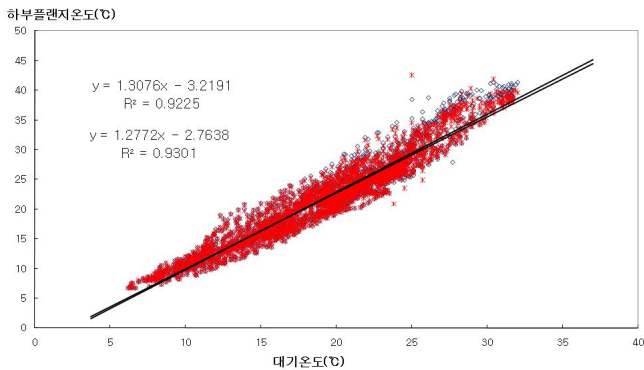


그림 12. 측정 위치 별 최고·최저 일교차 온도

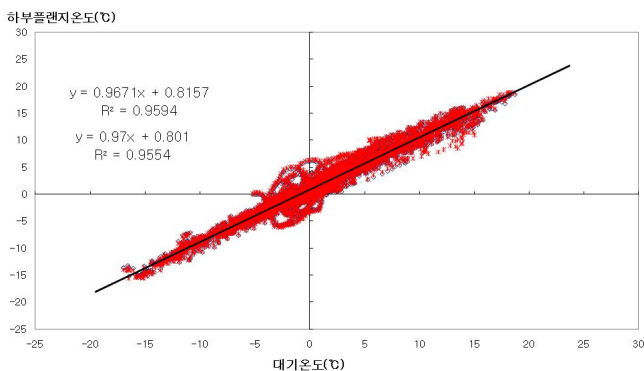
그림 12에 따르면, 다이아프램 상부와 중앙 경간 상부플랜지의 최고 일교차 온도가 매우 높게 측정되었다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 강상관과 같이 콘크리트 슬래브가 타설되지 않은 상태에서, 상부의 강재가 낮 시간동안 급격히 온도 상승하고 야간시간대에 급격히 온도가 하락하여 다이아프램 상부에서 최대 39.8℃(53.9℃~14.1℃)의 일교차가 발생하게 되기 때문이다. 반면 다이아프램 상부의 최저 일교차 온도는 0.1℃(4.2℃~4.1℃)로서, 늦가을 또는 초봄의 흐리고 강우가 있는 경우에 발생하게 된다.

3.2 대기온도에 대한 부재내의 온도변화

대기온도 변화에 의하여 상부콘크리트가 타설되기 전에는 부재내의 온도변화가 민감하게 되며, 온도승강 및 상하연 온도차가 크게 발생하는 것을 확인하였다. 그리고 상부콘크리트 슬래브 타설 이후에는 이러한 영향이 크게 감소하게 된다.



(a) 콘크리트 슬래브 타설전

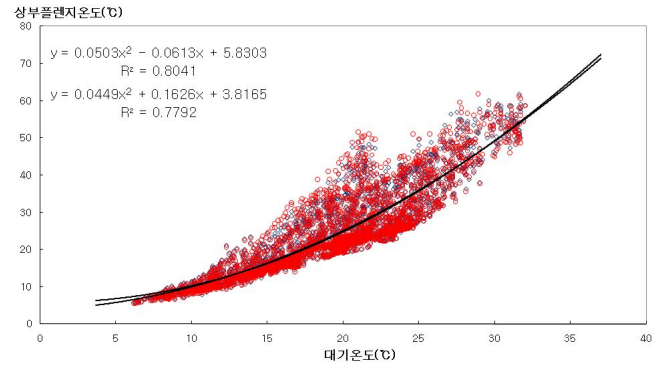


(b) 콘크리트 슬래브 타설후

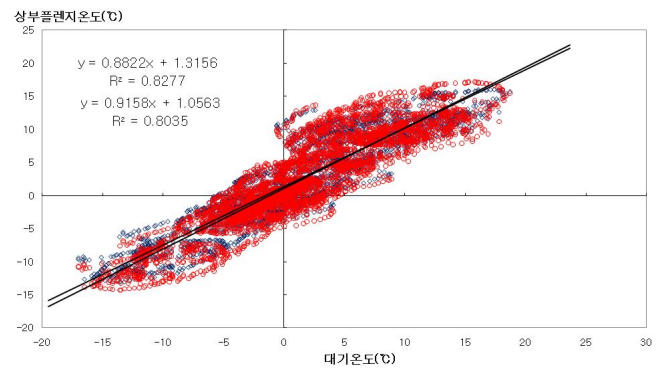
그림 13. 대기온도에 의한 하부플랜지 온도

대기온도와 상·하플랜지 온도의 상관관계를 분석하여 그림 13과 그림 14에 나타내었다. 그림 14(a)에서와 같이, 콘크리트 슬래브 타설전에는 상부 플랜지 온도가 태양의 직사로

인하여 대기온도의 상승보다 급격히 변화하기 때문에 곡선 형태의 관계를 갖게 된다. 반면 하부 플랜지의 온도 변화는 선형적인 모습을 나타내고, 상관계수 역시 1에 근접하여 대기온도와 하부플랜지의 온도가 매우 연관성이 높으며, 하부플랜지의 온도변화에 외부 기온을 제외한 타 인자들은 거의 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 여기서 콘크리트 타설 직후의 상하플랜지 온도는 수화열에 의해 크게 영향을 받으므로, 이때의 자료는 분석데이터에서 배제하였다.



(a) 콘크리트 슬래브 타설전



(b) 콘크리트 슬래브 타설후

그림 14. 대기온도에 의한 상부플랜지 온도

그림 13에서 온도변화율이 타설전에는 약 1.3에서 타설후에 0.97로 떨어지며, 그림 14에서는 타설전에는 2차함수로 나타나고 타설후에는 1차함수로 온도변화가 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 콘크리트 슬래브 타설로 인하여 대기온도에 대한 부재내의 온도변화가 둔화됨을 나타내며, 그림 14(b)에서와 같이 콘크리트 슬래브 타설후에는 상부플랜지의 온도변화에 지연현상이 발생하는 것이 확인된다. 그림 13과 그림 14의 회귀분석식을 표 2에 나타내었다. 여기서의 결과를 이용하여 교량이 가설되는 지역의 온도로부터 상·하플랜지의 온도가 예측 가능할 것이다.

표 2. 대기 온도에 대한 상하플랜지 온도변화

측정 위치	회귀분석식	결정 계수(R2)	표준오차	비 고	
T11	$y = 1.3076x - 3.2191$	0.9225	1.944	하부 플랜지	타설 전
T12	$y = 1.2772x - 2.7638$	0.9301	1.803		
T13	$y = 0.0503x^2 - 0.0613x + 5.8303$	0.8041	4.408	상부 플랜지	
T14	$y = 0.0449x^2 + 0.1626x + 3.8165$	0.7792	4.715		
T11	$y = 0.9671x + 0.8157$	0.9594	1.270	하부 플랜지	타설 후
T12	$y = 0.9700x + 0.8010$	0.9554	1.801		
T13	$y = 0.8822x + 1.3156$	0.8277	4.408	상부 플랜지	
T14	$y = 0.9158x + 1.0563$	0.8035	4.715		

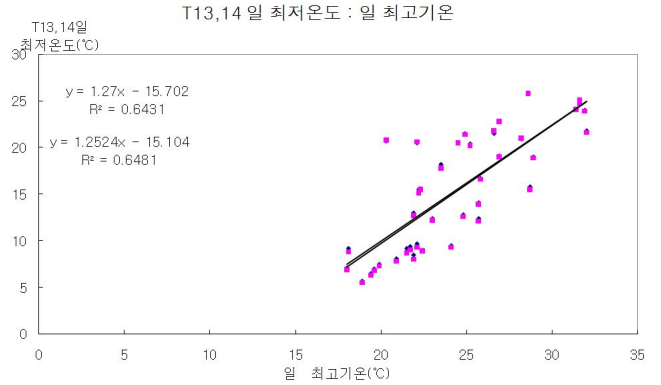
실제 대상교량에서는 측정된 대기온도가 -17℃~32℃일 때, 각 부재 내에서 측정된 온도승강과 이를 회귀분석식에 의하여 계산한 온도를 정리하면 표 3과 같다. 실측과 계산결과 사이에 약간의 오차가 발생하게 되는데, 이러한 원인은 직사광을 받게 되는 교량단면 상단부에서 온도가 상승할 때 그림 14와 같이 기하급수적 온도 상승이 발생하기 때문에 대기온도가 최대로 상승할 경우의 측정데이터는 비교적 오차도 크게 발생된다.

표 3. 실측과 회귀분석식의 비교 (단위 : ℃)

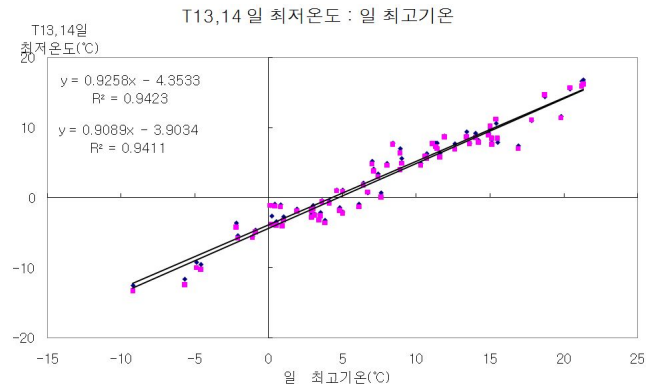
	실측	회귀분석식	표준오차 적용
T13	61.3 ~ -13.0	55.38 ~ -13.68	59.78 ~ -18.09
T14	61.8 ~ -14.3	55.00 ~ -14.51	59.72 ~ -19.23
T11	41.4 ~ -15.4	38.62 ~ -15.63	40.56 ~ -16.90
T12	41.9 ~ -15.6	38.11 ~ -15.69	39.91 ~ -17.49

3.3 일 최고기온과 부재온도의 상관관계

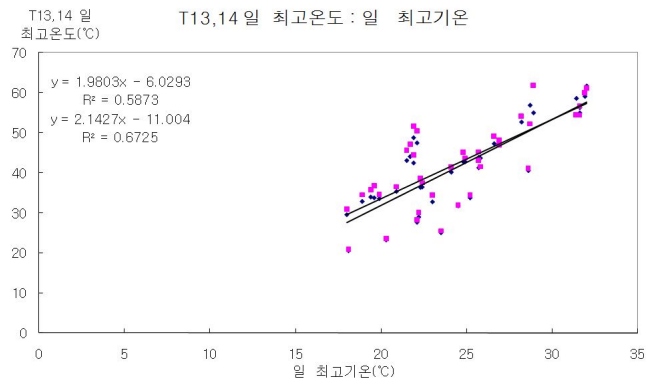
하부플랜지의 온도변화와 대기온도와의 관계는 타설전 그리고 타설후에 대하여 각각 상관계수가 0.9이상이 확보되는 관계식을 3.2절에서 도출하였다. 그러나 상부플랜지의 경우에는 관계식의 상관계수도 하부플랜지에 비하여는 상대적으로 낮을 뿐 아니라 타설전·후에 대하여 분포형상도 차이가 발생하는 것을 확인하였다. 그러므로 상부플랜지의 온도변화에 대하여서는 다양한 파라미터에 따른 관계를 파악할 필요가 있다. 여기서는 일 최고기온과 중앙 경간 상부 플랜지의 최고·최저 온도 관계를 분석하였다. 그림 15는 중앙 경간 상부 플랜지의 온도변화와 대기 최고온도와의 관계를 나타내고 있다.



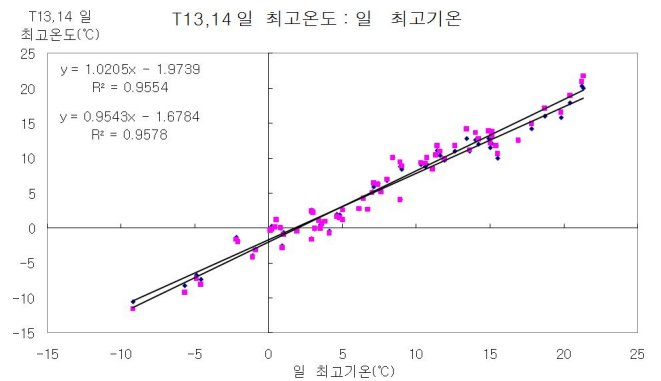
(a) 일 최고기온과 부재내 일 최저온도 (타설전)



(b) 일 최고기온과 부재내 일 최저온도 (타설후)



(c) 일 최고기온과 부재내 일 최고온도 (타설전)



(d) 일 최고기온과 부재내 일 최고온도 (타설후)

그림 15. 중앙 경간 상부 플랜지의 온도변화와 대기 최고온도 관계

콘크리트 슬래브 타설전에는 그림 14(a)에서와 같이 그림 15(a), (c)에서도 동일하게 비선형적인 관계를 갖고 있지만, 콘크리트 타설후에는 그림 14(b)에서보다 좀 더 선형적인 영향으로 그림 15(b), (d)에 나타나고 있다. 이 경우의 상관계수는 약 0.95에 근접하는 선형적인 관계이다.

표 4. 대기 최고온도와 상부플랜지 온도의 관계식

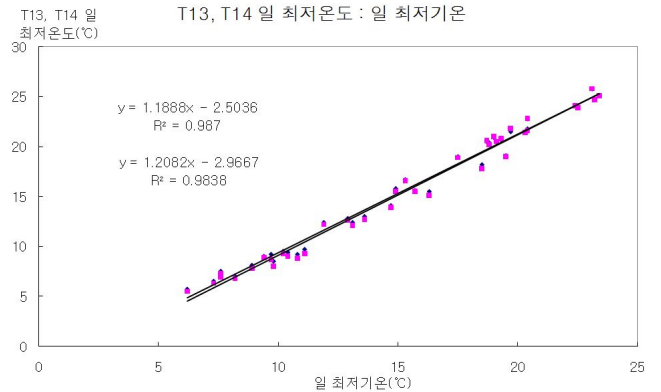
측정 위치	회귀분석식	결정 계수(R2)	비 고	
T13	$y = 1.2700x - 15.702$	0.6431	최저 온도	타설전
T14	$y = 1.2524x - 15.104$	0.6481		
T13	$y = 1.9803x - 6.0293$	0.5873	최고 온도	
T14	$y = 2.1427x - 11.004$	0.6725		
T13	$y = 0.9258x - 4.3533$	0.9423	최저 온도	타설후
T14	$y = 0.9089x - 3.9034$	0.9411		
T13	$y = 1.0205x - 1.9739$	0.9554	최고 온도	
T14	$y = 0.9543x - 1.6784$	0.9578		

표 4에 따르면 콘크리트 슬래브 타설후에는 회귀분석식의 상관계수(R2)가 1에 근접하여 대기 최고온도와 상부플랜지의 일 최고·최저 측정 온도의 관계가 선형적인 비례관계로 나타난다. 또한 타설전에는 최고온도의 온도변화율이 약 2.0이며, 타설후에는 약 1.0으로 관찰되었다. 이는 강제만 있는 거더교가 콘크리트 슬래브가 있는 강-콘크리트 합성교에 비하여 대기온도 상승에 따른 강제거더(상연)의 온도가 2배 정도 더 민감하게 반응하게 됨을 나타내는 것으로 판단된다.

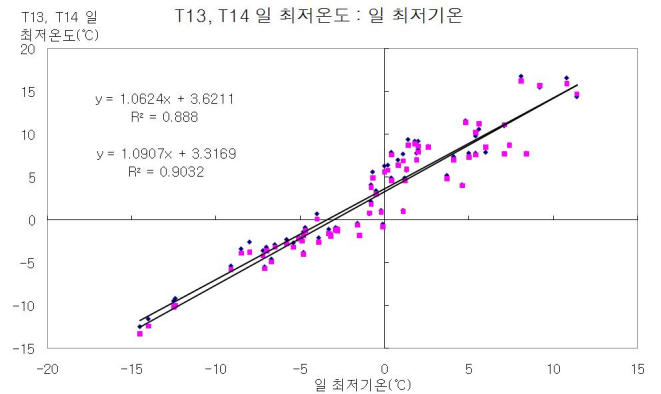
3.4 최저기온과 부재온도의 상관관계

일 최저 기온과 상부플랜지의 최고·최저 온도관계를 3.3절과 같이 분석하였다. 그림 16에 중앙 경간 상부 플랜지의 온도변화와 대기 최저 온도와의 관계 나타내었다.

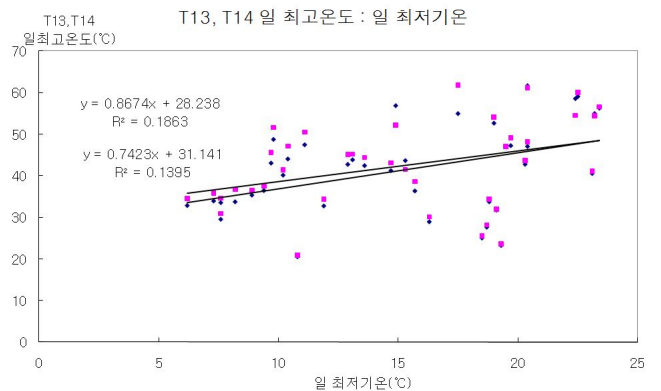
3.3절의 경우와는 다르게, 콘크리트 슬래브 타설전에는 일 최저기온과 상부플랜지의 일 최저기온은 상관관계가 크게 나타났으며, 온도변화율은 약 1.2정도로 나타나고 있다. 그러나 슬래브 타설전의 일 최저기온과 상부플랜지의 일 최고온도 사이에는 관련성이 없는 것으로 판단되었다. 그리고 슬래브 타설전에 비하여 슬래브 타설후에는 상부 콘크리트 슬래브의 영향으로 인하여 부재내 최저온도에 있어서도 온도변화율이 그림 16(a)의 약 1.2에서 그림 16(b)의 약 1.07 정도로 감소되는 것이 확인되었다.



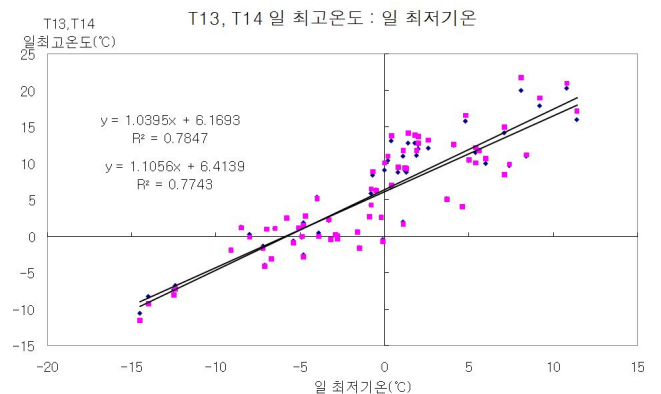
(a) 일 최저기온과 부재내 일 최저온도 (타설전)



(b) 일 최저기온과 부재내 일 최저온도 (타설후)



(c) 일 최저기온과 부재내 일 최고온도 (타설전)



(d) 일 최저기온과 부재내 일 최고온도 (타설후)

그림 16. 중앙 경간 상부 플랜지의 온도변화와 대기 최저온도 관계

표 5. 대기 최저온도와 상부플랜지 온도의 관계식

측정 위치	회귀분석식	결정 계수(R2)	비 고	
T13	$y = 1.1888x - 2.5036$	0.9870	최저 온도	타설전
T14	$y = 1.2082x - 2.9667$	0.9838		
T13	$y = 0.8674x + 28.238$	0.1863	최고 온도	
T14	$y = 0.7423x + 31.141$	0.1395		
T13	$y = 1.0624x + 3.6211$	0.8880	최저 온도	타설후
T14	$y = 1.0907x + 3.3169$	0.9032		
T13	$y = 1.0395x + 6.1693$	0.7847	최고 온도	
T14	$y = 1.1056x + 6.4139$	0.7743		

표 5에 따르면 대기 최저온도와 상부플랜지의 부재 최저 온도는 선형적으로 변화되고 있음을 알 수 있다. 그러나 콘크리트 슬래브 타설전의 상부슬래브 최고온도는 상관성이 거의 없는 것으로 판단되었다. 즉, 강재주형만 거치되었을 경우 또는 강상판으로 이루어진 강교에서는 상부플랜지의 최고온도를 결정하는데 있어서 측정자료만을 이용하여 판단하는 데는 한계가 있는 것으로 판단된다. 다만, 3.2절에서 대기온도에 따른 상부플랜지의 온도측정결과에서 표준오차를 적용하게 될 경우에는 표 3과 같이 부재내 최고온도를 어느정도 맞추는 것이 가능하였다. 이 외의 부재내 온도변화는 측정데이터로부터 얻은 회귀분석식을 이용하게 된다면, 기존 단순한 방법에 의하여 결정되는 온도하중(온도승강 및 상하연 온도차)을 좀 더 신뢰성있게 결정하는 것이 가능할 것으로 판단되었다.

3.5 종합 평가

본 연구에서 구해진 대기 온도분포와 강교량 부재 온도 상관관계를 검토하기 위하여, 기존 연구자료로서 조광일 등(2008)의 측정결과를 이용하여 비교, 분석하였다. 본 연구에서 적용되는 온도 측정 및 분석 방식과는 다른 연구자료이지만, 10월중 일일 온도분포가 북부판 하단에서는 12°C~32°C, 북부판 상단에서 14°C~23°C, 박스내 온도는 12°C~21°C, 박스외 온도는 13.5°C~23°C 정도로 측정된 바 있다. 여기서, 북부판 하단의 경우에는 일사를 직접적으로 받는 부재부재로서 강상판의 상부플랜지의 온도와 같은 수준이 될 것으로 예상된다. 이 경우에 일교차는 9.5°C가 되고, 박스 상단에서는 9°C의 일교차가 발생되고, 직접 일사를 받는 강재인 하단에서는 20°C의 일교차가 발생하는 것이다. 박스의 온도인 최고온도 23°C와 최저온도 13.5°C를 표 2의 회귀분석식을 이용하여 분석하게 되면 표6과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 6. 기존 연구 자료에 대한 검토 (단위 : °C)

구분	회귀분석 결과		회귀분석 평균		기존 측정자료	
	상단	하단	상단	하단	상단	하단
최고 온도	21.61 T13(표2)	31.03 T13(표2)	21.87	31.17	23	32
	22.12 T14(표2)	31.31 T14(표2)				
최저 온도	13.24 T13(표2)	14.17 T13(표2)	13.33	14.18	14	12
	13.42 T14(표2)	14.19 T14(표2)				

표 6에서 북부판 상단의 경우는 표 2의 타설후 상부플랜지를 적용하였고, 북부판 하단의 경우에는 직사를 받는 부재이므로 표 2의 타설전 상부플랜지를 적용하였다.

조광일 등(2008)의 온도 측정결과를 이용하여 본 연구의 회귀분석식을 검증한 결과, 유사한 결과가 도출되었다. 추가적으로 3.4절에서 언급된 표 2의 표준오차를 고려하게 된다면, 실측 자료의 결과보다 더 큰 온도 범위가 도출되어 충분히 안전한 설계가 가능할 것으로 판단되었다. 또 다른 검토방법으로 표 3과 4의 결과를 추가로 활용하는 방법이 가능할 것이나, 일반적인 적용에서 표 2만을 적용하는 것이 결과를 도출하기 용이할 것이다.

기상측정 결과에 의하여 연교차가 -15°C~30°C에 해당하는 지역에 교량을 가설한다고 할 경우에, 표 2의 식을 적용하면 온도하중은 표 7 및 표 8과 같이 결정된다. 표 7과 표 8은 같은 조건에서 강교와 콘크리트 바닥판을 갖는 강상자형교에 대하여 각각 온도하중을 결정할 결과이다.

표 7. 강바닥판교의 온도하중 산정 (단위 : °C)

구분	회귀분석 결과		회귀분석 평균		온도하중	
	상단	하단	상단	하단	온도승강	온도차
최고 온도	49.26 (T13)	36.01 (T11)	49.18	35.78	-21.55 ~ 42.48	11.74
	49.10 (T14)	35.55 (T12)				
최저 온도	-20.34 표5(T13)	-22.83 (T11)	-20.72	-22.38		
	-21.09 표5(T14)	-21.92 (T12)				

표 7에서 상단의 최저온도의 경우에 적용되는 식은 2차함수로, 겨울의 측정데이터가 배제된 이유로 대기 최저온도로부터 부재내 최저온도를 계산하는 표 5의 분석식을 일부 대체 적용하였다. 그리고 상·하연 온도차는 상부플랜지의 온도변화폭과 하부플랜지의 온도변화폭의 차이로부터 구하였다.

표 8. 콘크리트 바닥판을 갖는 강상자형교의 온도하중 산정 (단위 : °C)

구분	회귀분석 결과		회귀분석 평균		온도하중	
	상단	하단	상단	하단	온도승강	온도차
최고 온도	27.78 (T13)	29.83 (T11)	28.16	29.87	-13.01 ~ 29.02	3.13
	28.53 (T14)	29.90 (T12)				
최저 온도	-11.92 (T13)	-13.69 (T11)	-12.30	-13.72		
	-12.68 (T14)	-13.75 (T12)				

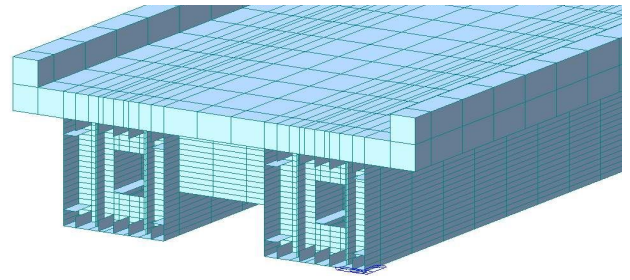


그림 17. 3차원모델링 상세 형상

표 9. 모델링에 사용된 재료 상수

물성치 구분	사용 유한요소	단위중량 (kN/m3)	탄성계수 (MPa)	프아 송비	열팽창 계수	비고
강상자형	3차원 General Shell	78.5	2.0594E5	0.3	1.2E-5	SM490 및 SM400
콘크리트 슬래브	Solid	24.5	2.4645E4	0.18	1.0E-5	27MPa급

표 7의 결과에 따르면, 직사를 받는 강교에서 상하연의 온도차는 설계기준에 따른 15°C 이내이며, 온도승강 역시 그림 1의 한랭한 지방의 -30°C에서 50°C 사이를 만족하는 것으로 나타났다. 콘크리트 바닥판을 갖는 표 8의 결과에 따르면, 상하연 온도차는 설계기준 10°C 이내를 만족하고 있었으며, 온도 승강의 경우에도 설계기준을 만족하는 것으로 판단되었다.

Eurocode에서는 대기온도에 의한 부재내의 온도를 산정할 수 있는 항목이 있다. 이를 표 7 및 표 8의 결과와 비교하면, 온도승강은 각각 -18°C~44°C, -13°C~36°C가 되어 거의 유사한 결과를 얻게 된다. 다만, Eurocode에서는 콘크리트 바닥판을 갖는 경우에, 실제 콘크리트의 온도가 강재보다 직사에 의하여 더 높은 온도로 올라가게 되는 것을 고려하기 때문에 온도승강의 최대값이 더 크게 나오는 것으로 판단되었다.

이상과 같이 온도하중을 산정한 결과, 교량 위치, 방향, 기상 조건 등에 따라 일부 차이는 발생하겠지만, 특정지역의 온도 측정 데이터가 있다면, 이를 활용하여 어느 정도의 신뢰 분포 구간을 갖는 온도승강, 온도차를 포함하는 온도 하중으로 가정하는 것이 가능할 것이다. 즉, 교량의 가설위치와 가설시기가 결정되면 기상청 온도 통계로부터 가설지점의 정보를 얻을 수 있고, 온도의 상관관계를 이용하여 실제 교량부재에서 발생될 온도 승강을 예측하고 교량설계에 적용함으로써 실제에 근접한 가동받침 이동량 산정 및 신축이음설계에 이용할 수 있다.

4.2 온도 하중

해석 및 계산에 고려되는 온도하중은 크게 온도 승강과 상하연 온도차이다. 3.5절에서 논의된 콘크리트 바닥판을 갖는 강상자형교량에 대하여 연교차가 -15°C~30°C에 해당하는 지역에서 최종적으로 계산된 표 8의 결과를 적용하면, 표 10과 같은 해석에 적용할 온도하중이 결정된다. 그리고 해석상에서 가설시의 기준온도는 15°C로 적용한다.

표 10. 구조 해석에 적용된 온도 승강 및 온도차 (단위 : °C)

구분	온도 승강				온도차	
	설계기준		검토자료		설계 기준	측정 자료 (평균치)
	최고 온도	최저 온도	최고 온도	최저 온도		
적용 온도	40	-20	29.02	-13.01	±10	3.13

4. 전산해석

4.1 모델링

3장에서 도출된 온도하중과 설계 기준에서 제시하는 온도하중을 비교 검토하기 위하여, 총연장 140m, 측경간 45m, 중앙경간 50m인 3경간 2연 강상자형교에 대하여 3차원 전체 모델링을 수행하였다. 해석에 사용된 프로그램은 MIDAS CIVIL 2009 (MIDASIT, 2001; MIDASIT, 2006)를 사용하여 그림 17과 같이 모델링하였으며, 구조해석에 사용된 유한요소의 재료상수는 표 9와 같다.

4.3 해석결과 검토

4.3.1 온도 승강

온도 승강에 의하여 계산된 3차원 해석 변위와 설계기준에 따르는 온도승강에 따른 신축이음부의 변위를 정리하면 표 11과 같다. 설계기준방법과 3차원 모델링에 의한 변위 결과 차이는 30% 정도 3차원 해석의 결과가 크게 계산되고 있다. 이러한 설계방법과 3차원해석의 결과차이는 표 9에 보인바와 같은 실제 콘크리트와 강재사이의 열팽창계수의 차이로 인한 휨발생 영향의 결과이다. 그리고 콘크리트 슬래브가 있는 강

상자형교에 대하여서는 설계기준과 검토자료와의 차이를 고려 하더라도, 설계 기준방법에 따른 설계 변위 범위 136.8mm 는 계산에 의거한 검토자료에 따른 3차원 해석 변위 범위 95.9mm에 비하여 충분히 안전여유를 갖고 있는 것으로 판단 되었다.

표 11. 온도 승강에 의한 지점부 변위

온도 승강		설계기준방법 (mm)	3차원해석 (mm)	비고
설계기준최고	25℃ (40-15)	57.0	38.82	가설시 기준온도 15℃
설계기준최저	-35℃ (-20-15)	-79.8	-54.36	
검토자료 교량 최고	14.02℃ (29.02-15)	32.0	21.77	
검토자료 교량 최저	-28.01℃ (-13.01-15)	-63.9	-43.50	

4.3.2 상·하연 온도차

상·하연 온도차는 도로교설계기준에 따르면 콘크리트 슬래브가 있는 강교에서 슬래브와 강거더 사이에 ±10℃의 온도차가 발생하는 것으로 설계하였고 실측된 교량 단면의 상연과 하연의 온도차는 대기온도에 따라 달라지는 것으로 확인되었다. 본 해석에서는 콘크리트 슬래브가 있는 경우에 대하여 표 10과 같이 3.13℃의 상하연 온도차를 고려하였다.

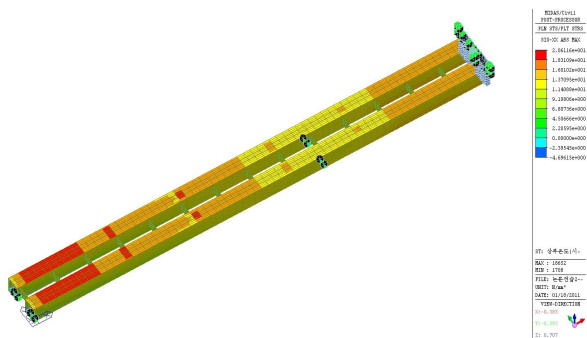


그림 18. 상·하연 온도차에 의한 응력

표 12. 상·하연 온도차 응력(3차원 구조해석)

측정위치		설계방법	3차원해석	비고	
상부플랜지	A1~P1	5.07	6.45	(단위: MPa)	
	P1	4.67	5.11		
	P1~P2	5.39	5.41		
하부플랜지	A1~P1	2.43	4.14		3.13℃ 적용
	P1	2.60	5.00		
	P1~P2	2.46	4.14		

표 12에 따르면 동일한 온도차 3.13℃를 고려하더라도, 설계 기준의 계산방법에 의한 온도 응력과 3차원 해석에 따른 온도 응력간의 차이는 거의 발생되지 않고 있다. 다만, 하부 플랜지에서는 설계기준에 의한 방법이 동일한 온도차에 대하여 발생응력이 적게 계산되는 것으로 확인되었다.

이상과 같이 온도하중을 산정하고, 산정된 온도하중을 이용하여 설계기준에 의한 방법과 3차원 정밀해석을 통한 방법으로 변위 및 응력을 계산, 검토한 결과, 기존의 설계방법이 충분한 안전여유를 확보한 것으로 판단되었다. 다만, 여기서는 추가로 검토되지 못하였으나, 콘크리트 슬래브가 없는 강상판형교와 같은 경우에는 온도하중이 더 크게 증가하게 되므로 이에 대한 추후 검토가 필요할 것으로 생각된다. 또한 온도승강 및 상·하연 온도차에 관여될 수 있는 여러 변수를 고려할 수 있는 좀 더 신뢰성 있는 설계하중을 산정하기 위한 측정 자료 기반의 일련의 작업이 추가적으로 필요할 것이다.

5. 결론

대기온도에 의한 교량의 온도변화를 측정하여 교량 상하 플랜지와 다이어프램의 온도 분포를 검토하였다. 일교차 온도, 일 최고기온, 일 최저기온에 의한 교량온도 승강의 상관관계를 분석하고 대기온도가 교량온도 승강에 미치는 주된 요인자를 분석하여, 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- (1) 콘크리트 타설 전 교량의 온도 변화는 대기온도에 비례하여 1일을 간격으로 뚜렷하게 구분되어 반복되며, 강상판형 상부로부터 하부쪽으로 내려갈수록 선형으로 감소하는 분포형상을 나타내고 하부 플랜지에 인근에서 강재의 온도가 다시 상승하는 양상을 확인할 수 있었다.
- (2) 대기온도와 하부 플랜지 온도의 관계는 거의 선형적인 관계를 나타내고, 콘크리트 타설전의 상부 플랜지의 온도와는 선형적이지 않는 곡선 형태의 모습으로 나타났다. 그러나 연구된 회귀분석식을 활용하면, 대기온도를 이용하여 상하 플랜지의 온도 승강을 예측할 수 있었다.
- (3) 일 최고기온에 따른 부재 상단의 최고온도는 콘크리트 슬래브가 없을 때가 콘크리트 슬래브가 있는 경우에 비하여 약 2배 정도 민감하게 온도변화가 발생하여, 강상판형교와 같은 교량에서는 온도승강 및 상하연 온도차가 더 크게 발생하는 것으로 확인되었다.
- (4) 연교차를 -15℃~30℃가 가정할 경우, 콘크리트 슬래브의 유무에 상관없이 두가지 교량형식의 온도하중(온도승강, 상하연 온도차)은 Eurocode에서 각각 정하는 값과 거의 유사하게 계산되는 것으로 나타났다.

- (5) 최고 대기온도와 최저 대기온도에 대한 부재의 온도에 대한 상관관계식을 사용하여 기상청의 다년간 온도 통계로부터 대기 최고온도, 최저온도, 일교차를 이용하여 상하 플랜지의 온도차를 예측할 수 있고, 이 결과를 설계시 온도하중에 의한 응력과 가동받침 이동량 산정 및 신축 이음설계에 이용할 수 있어 신뢰성 있는 교량설계에 기여할 수 있다.
- (6) 설계기준에 의한 계산방법과 3차원 정밀해석에 의한 결과를 비교한 결과, 온도승강에 의한 변위는 3차원 해석의 결과가 약 30%이상 적게 발생되어 충분히 안전한 설계가 되었으며, 응력계산 결과는 거의 유사한 수준으로 나타났다.

추후 본 연구에서 도출된 회귀분석식을 적용한 인공신경망 등의 시뮬레이션 툴을 이용하여 교량의 온도하중을 예측할 수 있는 전문가 시스템의 구축이 가능할 것으로 판단된다. 이를 위하여 급격히 변하는 기후 특성과 온도 분포 특성에 대한 다양한 측정이 추후 연구로 요구되며 이러한 시스템이 완성되어 적용될 경우 교량 설계 선진화와 함께 안전한 사회 기반 시설 확충에 큰 기여를 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

국토해양부(2010) 도로교설계기준.

김상효, 조광일, 홍주형(2005) 일사에 의한 곡선 강박스거더교의 온도하중 결정방법에 관한 연구, 한국강구조학회학술발표논문집, 한국강구조학회, pp.400-405.

김종열(2004) 온도에 의한 강박스교의 거동 분석, 충북대학교 대학원, pp.2-30.

대우건설(주)(2002) (중평도로) 중, 횡단 구배에 따른 강교의 구조적 문제점 검토보고서.

대한토목학회, 교량설계핵심기술연구단(2008) 도로교 설계기준·해설.

장승필, 임창균(1997) 합성 박스형 교량의 온도에 의한 응력 및 변형, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제9권, 제4호, pp.659-672.

장승필, 임창균(1998) 합성형교량의 설계온도하중, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제10권, 제3호, pp.537-551.

조광일, 원정훈, 김상효, 여영건(2008) 곡선 강박스거더교의 온도거동 분석을 위한 온도분포 예측기법에 관한 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제28권, 제1A권, pp.105-113.

조창욱(2010) 계측에 의한 강박스거더교의 온도분포 특성, 부산대학교 대학원, pp.18-23.

황희승, 이정재(2002) 실측치를 이용한 PSC 박스 거더교의 온도하중 추정, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제22권, 제4A권, pp.707-716.

AASHTO (2007) AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), pp.3-99, 3-104.

British Standards Institution (1999) *Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2*, Specification for loads, BS5400:Part2:1978, pp.20-23.

MIDASIT (2006) Analysis for Civil structure.

(접수일자 : 2011. 3. 3 / 심사일 2011. 3. 10 / 심사완료일 2011. 5. 30)