

## 강상자형교의 설계온도하중을 위한 최고 유효온도 산정

이성형  
부산대학교 토목공학과

### Evaluation of Maximum Effective Temperature for Estimate Design Thermal Loads in Steel Box Girder Bridges

Seong- Haeng Lee

Department of Civil Engineering, Pusan National University

**요 약** 합리적인 설계 온도하중을 산정하기 위하여, 강상자형교의 시험체가 실물 규모로 제작되었다. 박스단면의 크기는 폭 2.0m, 높이 2.0m, 길이 3.0m이며, 슬래브의 두께는 17 cm이다. 온도 계지를 사용하여 1년간 온도를 측정하였다. 또한 인근에 시험체와 유사한 방향으로 설치된 같은 형식의 실교량에서도 같은 기간에 온도를 측정하였다. 교량시험체는 21지점, 실교량에서는 19지점에서 온도를 측정하고 각 측정에서 측정온도를 통계 처리하여 추세선과 표준 오차를 산정하고, Euro code에서 제시한 대기온도 24°C~38°C에서 각 지점의 유효온도를 산정하였다. 교량시험체 모형에서는 35°C 이상에서 Euro code와 실교량과 비교하여 유효온도가 2~3°C 정도 높게 산정되었다. 제시된 시험체와 실교량에서 Euro code에 대한 유효온도의 상관계수는 87.4%, 93.2%로 계산되었다. 국내 도로교설계기준에 따르면 합성교에서 최고기온은 40°C로 규정하고 있는데 이는 본 연구에서 산정된 실교량과 Euro code의 유효온도와 거의 근접하는 것으로 평가된다. 각 지역별 최고 온도에 대한 Contour map에서 산정한 대기온도별 최고온도와 본 연구에서 제시한 유효온도를 접목하면 국내 교량 설계 시 각 지역의 특성을 고려한 설계기준이 확립될 수 있을 것이다.

**Abstract** In order to obtain a reasonable value for the thermal load to use in designs, a bridge specimen of a full-size steel box girder (bridge) was manufactured. The temperature data were measured at 21 points in the bridge specimen and 19 points in the steel box bridge. The steel box bridge specimen was installed in a similar direction to a nearby real one. The maximum effective temperatures in the bridge specimen and bridge were calculated for air temperatures in the range of 24°C~38°C. The maximum effective temperature of the bridge specimen and bridge showed correlations of approximately 93.2% and 87.4%, respectively, compared with the Euro code. The maximum effective temperature calculated in this study was very close to the Euro code and the maximum temperature of the Highway Bridge Design Criteria. When the effective temperature obtained in the study is combined with the highest temperature calculated from the Contour map for each region, the design criteria for the thermal load in domestic bridge design, taking into consideration the characteristics of each region, can be established.

**Keywords** : Steel box girder bridge specimen, Steel box girder bridge, Maximum effective temperature, Euro code, Temperature measurement.

### 1. 서론

교량의 설계에 있어서 온도하중의 영향은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째로 온도 증강은 4계절의 영

향으로 인하여 여름에 팽창하고 겨울에 수축하는 현상이며, 또 다른 하나는 직사광선을 받는 상판부와 간접 광을 받는 하판부의 온도증강이 달라 변형불일치로 발생하는 휨응력이다. 온도 증강은 여름의 최고온도와 겨울의 최

본 논문은 교육과학기술부 2011년도 일반연구지원사업(2011-0023229)의 지원으로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Seong-Haeng Lee(Pusan Nat'l Univ.)

Tel: +82-51-510-7645 email: lsh77@pusan.ac.kr

Received May 24, 2016

Revised (1st July 15, 2016, 2nd August 2, 2016)

Accepted August 11, 2016

Published August 31, 2016

저 온도에 따라서 결정되는데, 이와 관련하여 본 연구에서는 유효온도를 계산하고 비교 분석하였다. 유효온도는 교량전체의 평균온도를 나타내는 개념으로 측정된 지점의 온도에 그 지점이 차지하는 면적을 곱하여 전체를 더하고, 이 값을 전체면적으로 나누어 계산되어 진다. 온도 하중에 대한 현재의 도로교 설계기준(한계상태 설계법, Ministry of Land, [1])은 교량형식을 강교, 합성교, 콘크리트교로 구분하고, 온도구분을 한랭지역과 보통지역 정도로만 나누어 최고 온도와 최저온도 범위를 제시하고 있다(Table 1). AASHTO LRFD [2]이나 Euro code [3]와 같은 선진 설계법은 좀 더 체계적이고 세분화된 온도 하중에 대한 규정을 가지고 있는 실정으로, 국내에서도 이러한 온도규정을 제정하는 것이 요망된다. 온도하중에 대한 효율적인 설계를 위하여 우리나라의 각 지역별로 대기온도에 따른 교량형식별 교량 유효온도 제시가 요망된다. 본 연구에서는 가장 보편적으로 사용되고 있는 강상자형교의 시험체를 제작하여 1년간 온도를 측정하였다. 또한 인근에 시험체와 유사한 방향으로 설치된 같은 형식의 실교량에서도 온도를 1년간 측정하고, 이 시험체와 실교량의 온도 측정결과를 바탕으로 대기온도에 의한 교량 단면 내 여름철의 최대 유효온도를 산정하였다. 국외 규정인 Euro code와 측정된 유효온도를 비교 검토하고, 현행 설계기준에서 제시되고 있는 온도기준과 비교 평가 하였다.

## 2. 유효온도 설계기준

도로교 설계기준(한계상태 설계법)은 교량형식을 강교, 합성교, 콘크리트교로 구분하여 Table 1과 같이 최고 온도와 최저온도 범위를 제시하고 있다. Euro code[3]에서는 유효온도를 교량의 상부구조 형식에 따라서 Table 2와 같이 3가지 그룹으로 분류하여 24℃~38℃의 대기 온도에서 설정하고 있다.

Table 1. Temperature ranges (°C)

Climate	Steel bridge	Composite bridge	Concrete bridge
Moderate	-10~50 °	-10~40 °	-5~35 °
Cold	-30~50 °	-20~40 °	-15~35 °

Table 2. Maximum effective temperatures (°C)

Maximum air temperature	Group 1, 2	Group 3	Group 4
24	40	31	27
25	41	32	28
26	41	33	29
27	42	34	29
28	42	34	30
29	43	35	31
30	44	36	32
31	44	36	32
32	44	37	33
33	45	37	33
34	45	38	34
35	46	39	35
36	46	39	36
37	46	40	36
38	47	40	37

Table 3은 바닥판의 상부표면처리에 따른 유효 교량 온도의 조정 기준을 나타내며, Euro code의 부록에 수록되어 있다. 여기서 그룹 1, 2는 플레이트 거더형식으로 개단면을 갖는 교량형식이고, 그룹 4는 콘크리트 교량이며, 그룹 3이 본 연구 모형과 같은 강박스거더 구조 형식이다.

Table 3. Correction of Effective temperature according to upper surface treatment of bridge deck

Upper deck	Group 1, 2	Group 3	Group 4
-	+4	0	0
Waterproofing	-	+4	+2
40mm overlay	0	+2	+1
100mm overlay	-	0	0
200mm overlay	-	-4	-2

## 3. 온도 측정

### 3.1 교량시험체

모형 제작 및 측정은 가장 일반적으로 사용되고 있는 강상자형교 형식의 시험체를 Fig. 1과 같이 제작 설치하였다. 실험체의 측정위치는 Fig. 2의 중앙부에 위치한 A-A 단면에 웨브의 높이에 따라 6개씩 양면에 12개와 상·하부 플랜지에 6개씩, 그리고 콘크리트 내부에 3개의 온도계지를 Fig. 3과 같이 설치하여 온도를 측정하였다. 박스단면의 크기는 폭 2.0m, 높이 2.0m이며, 슬래브의 두께는 17 cm이다. 상부 콘크리트에는 슬래브 높이



(sc6, Fig. 3, 5 참조)에서 8월 1일의 최고 기온은, 모형 실험체에서 57℃, 실교량에서 48℃로 차이는 있으나 온도 분포는 서로 상당히 유사했다. 모형 실험체에서는 좌측 상단부(sc4), 우측 최상단부(sc16), 바닥면 중앙부(sc9)순으로 온도가 높게 측정되었고, 실교량에서는 다주형 교량이므로 우측 최상단부의 온도가 가장 낮았다.

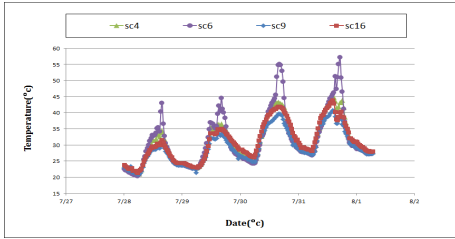


Fig. 6. Temperature variation at the girder model

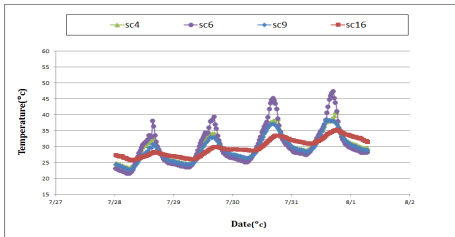


Fig. 7. Temperature variation at the target bridge

#### 4.2 유효온도 분석 방법

유효온도는 교량전체의 평균온도를 나타내는 개념으로 Euro code에서 개념이 도입되었다. 이 유효온도를 산정하기 위해서는 2가지 방법이 적용될 수 있다. 첫 번째는 각 측정에서 전체측정 데이터를 통계 분석하여 추세선을 구하고 이를 바탕으로 유효온도를 구하는 방법이고, 두 번째 방법은 각 측정된 전체지점의 온도에 대하여 부분 유효온도를 측정하고, 이 분석된 부분 유효온도를 통계분석 하여 추세선을 구하고 전체 유효 온도를 분석하는 방법이다. 본 연구에서는 첫 번째 방법을 이용하여 유효온도를 분석하였다. 이 방법은 각 측정에서의 온도 분포를 알 수 있다. 대기온도에 따른 유효온도를 산정하기 위해서 각 지점에서 측정된 온도데이터와 그 지점의 면적가중을 사용하는 티센가중법이 사용되었다[4].

$$T_m = \frac{A_1 T_1 + A_2 T_2 + A_3 T_3 + \dots + A_n T_n}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_n} = \frac{\sum_{i=1}^N A_i T_i}{\sum_{i=1}^N A_i} \quad (1)$$

$T_m$  = 교량 단면 유효온도

$A_i$  = 면적

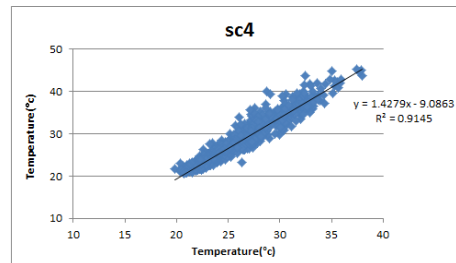
$T_i$  = 지점의 측정온도

#### 4.3 교량시험체의 유효온도 분석

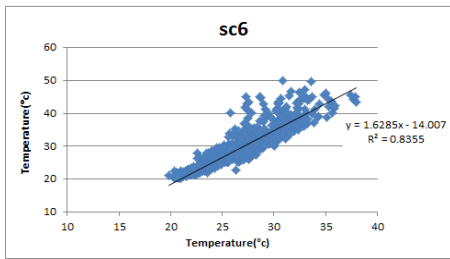
최고 유효온도를 산정하기 위하여 1년간 측정된 온도 데이터 중 2014년 07월 23일부터 2014년 08월 20일까지 총 1040개의 데이터를 분석하였다. 교량시험체는 21 지점에서 온도를 측정하고 각 측정에서 통계 처리하여 추세선과 표준 오차를 산정하고, Euro code에서 제시한 대기온도 24℃~38℃에서 각 지점의 온도를 산정하였다. Fig. 8은 분석된 21개 지점중 3곳에 대한 온도분포 및 추세선을 보인다(Fig. 6, 7에서 제시된 지점). sc4, sc6, sc16은 좌측 상단부, 좌측 하단부, 우측 최상부를 나타내며, 이들의 표준오차는 각각 1.46, 2.47, 1.26으로 분석되었다. sc4, sc16은 비교적 일정하게 온도가 분포되어 상관관계가 높게 분석되나 sc6은 측면 입사광으로 인한 온도 상승효과로 온도가 높게 측정된 부분이 많아, 상관관계도 상대적으로 낮은 편이다. 각 지점에서 대기 온도 35℃ 이상에서는 측정 온도가 많지 않기 때문에 추세선 분석으로 온도를 구하지만 이 구간의 중요도에 비하여 신뢰성은 높지 않은 것으로 판단된다. 대기온도에 대한 지점의 온도는 추세선 값에 표준오차를 더하여 산정하였다. Table 4는 모형과 실교량에서 좌우 웹, 상하 플랜지, 상부 콘크리트로 구분하여 각 면적의 합을 정리한 값이다.

Table 4. Total Area of girder model (  $cm^2$  )

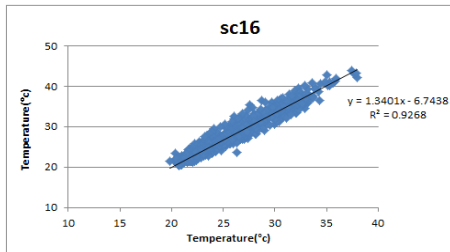
	Web	Flange	Slab	$\Sigma$
Bridge specimen	40,000	40,000	680,850	760,850
Bridge	60,000	125,000	1,500,000	1,685,000



(a)



(b)



(c)

Fig. 8. Temperature distribution and trend line

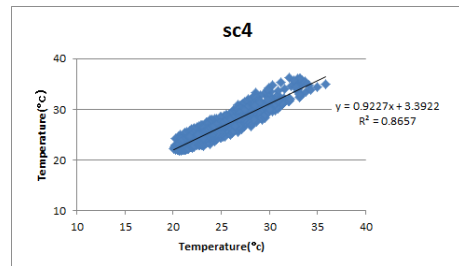
각 지점에서 추세선과 표준오차로부터 24℃~38℃에서 구해진 온도와 해당지점의 면적을 식 (1)을 사용하여 유효온도를 산정하였으며, 그 결과를 Table 5의 2행에 정리하였으며, Euro code값을 3행에 같이 정리하였다.

Table 5. Effective temperature in each model (°C)

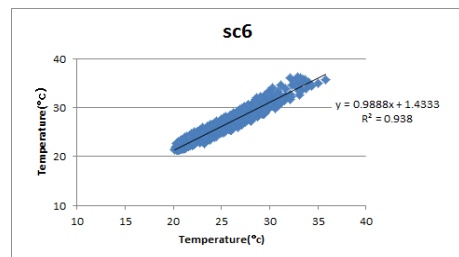
Air temperature	Bridge specimen		Bridge	
	This analysis	Euro code	This analysis	Euro code
38	43.8	40	39.8	40.7
37	42.6	40	39.0	40.7
36	41.4	39	38.3	39.7
35	40.2	39	37.5	39.7
34	39.0	38	36.8	38.7
33	37.8	37	36.0	37.7
32	36.6	37	35.3	37.7
31	35.4	36	34.5	36.7
30	34.2	36	33.8	36.7
29	33.0	35	33.0	35.7
28	31.8	34	32.3	34.7
27	30.6	34	31.6	34.7
26	29.4	33	30.8	33.7
25	28.2	33	30.1	33.7
24	27.0	32	29.3	32.7
23	25.8	31	28.6	31.7
22	24.6	31	27.8	31.7
21	23.4	30	27.1	30.7
20	22.2	29	26.3	29.7

#### 4.4 실측 교량의 유효온도 분석

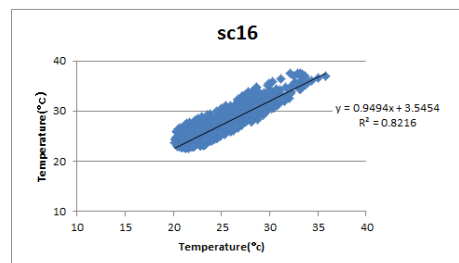
교량시험체와 같은 기간에 같은 시간 간격으로 측정된 온도데이터를 대상으로 하였기 때문에 온도데이터의 개수는 교량시험체와 같다. 실교량에서는 Fig. 5와 같이 19지점에서 온도를 측정하였다. 공용중인 교량이므로 콘크리트 상판에서의 온도 측정에 어려워서 중앙점 1지점에서만 온도를 측정하였다. 각 측정에서 측정된 온도 결과를 통계처리 하여 추세선과 표준 오차를 산정하고, Euro code에서 제시한 대기온도 24℃~38℃에서 각 지점의 온도를 산정하여 교량시험체와 같은 방법으로 유효 온도를 산정하였다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 9. Temperature distribution and trend line

Fig. 9에서 분석된 19개 지점중 3곳에 대한 온도 분포 및 추세선을 보인다. sc4, sc6, sc16은 Fig. 8에서와 같이 좌측 상단부, 좌측 하단부, 우측 최상부의 지점이며, 이들의 표준오차는 각각 1.18, 1.91, 1.56로 분석되었다. 19개 지점에서 교량시험체와 같은 방법으로 유효온도를 산정하여 Table 5의 4행에 정리하였다. 실교량의 상부 표층(아스팔트)의 두께는 80mm를 고려하면 Table 3을 기준으로 비례로 계산하면 유효온도를 0.7℃ 높이는 보정이 필요하므로 이를 반영하여 Table 5의 5행에 정리하였다.

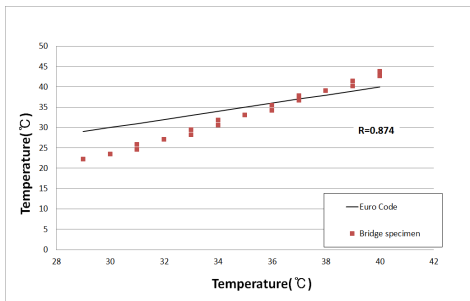


Fig. 10. Comparison of effective temperature between bridge specimen and Euro code

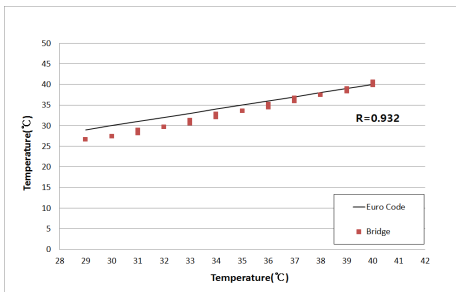


Fig. 11. Comparison of effective temperature between bridge and Euro code

Table 5의 유효온도를 교량시험체와 Euro code 관계, 실교량과 Euro code의 관계로 분석하여 Fig. 10, 11에 도시하였다. 교량시험체에 대한 Euro code의 상관계수는  $R=0.874$ 로 산정되었다. 교량시험체 모형에서는 35℃~37℃에서 Euro code와 실교량과 비교하여 유효온도가 2℃~3℃ 정도 높게 산정되었다. 이는 교량시험체 모형이 교량의 지간, 거더의 개수, 강재 및 콘크리트의 두께에서 실교량과 차이가 있으므로 판단된다.

Fig. 11과 같이 실교량의 유효온도는 Euro code와 상당히 근접하게 계산되며 이때 상관계수  $R=0.923$ 로 산정되었다.

국내 도로교설계기준(Table 1 참조)에 따르면 합성교에서 최고기온은 40℃로 규정하고 있는데 이는 본 연구에서 산정된 실교량과 Euro code의 유효온도와 거의 근접하는 것으로 평가되며, 교량시험체 모형보다는 대략 3℃정도가 낮다.

실교량의 유효온도는 햇빛의 수평 입사광을 받는 거더에서 측정된 값으로 햇빛을 받지 않는 안쪽 거더에서는 유효온도가 낮을 것으로 예측되며, 실측 자료중 햇빛을 받으면(sc2~sc7)의 온도를 햇빛을 받지 않는면(sc16~sc11)으로 치환하여 유효온도를 계산하면 1℃정도 온도 하강이 산정되었다.

## 5. 결론

본 연구에서는 온도 설계기준의 유효온도를 검토하기 위하여 강박스거더 모형시험체와 실교량에서 온도를 측정하고 유효온도를 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 교량시험체에 대한 Euro code의 상관계수는  $R=0.874$ 로 산정되었다. 교량시험체 모형에서는 35℃ 이상에서 Euro code와 실교량과 비교하여 유효온도가 2~3℃ 정도 높게 산정되었다.
2. 실교량의 유효온도는 Euro code와 상당히 근접하게 계산되며, 이때 상관계수는  $R=0.932$ 로 산정되었다.
3. 국내 도로교설계기준에 따르면 합성교에서 최고기온은 40℃로 규정하고 있는데 이는 본 연구에서 산정된 실교량과 Euro code의 유효온도와 거의 근접하는 것으로 평가되며, 교량시험체 모형보다는 대략 3℃정도가 낮게 평가되었다.
4. 각 지역별 최고 온도에 대한 Contour map에서 산정한 대기온도별 최고온도와 본 연구에서 제시한 유효온도를 접목하면 국내 교량 설계시 각 지역의 특성을 고려한 설계기준이 확립될 수 있을 것이다. 향후 콘크리트교에 대한 모형 설치와 계측을 실시하여 설계기준을 확립을 위한 기준자료를 구축할 예정이며, 더 긴 기간의 온도데이터 획득하여 신뢰성 있는 온도 하중 데이터를 구축하는 것이 요망된다.

## References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Highway Bridge Design Criteria(in Korea)(Limit state design method), 2012.
- [2] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), pp. 3-104, 2007.
- [3] British Standards Institution, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, appendix E. BS5400: Part2:1978, pp. 20-23, 2004.
- [4] Shin, D. W., Kim, K. N., Evaluation of Effective Temperature for Estimate Design Thermal Loads in Steel Deck of Steel Box Girder Bridges, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 17, no. 3, pp. 077-087. 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2013.17.6.077>
- [5] Lee, S. H., Study of the Temperature Difference between the Top and Bottom Web of Steel Box Girder without Concrete Slab by using Gauge Measurement, Journal of the Korea Academia -Industrial cooperation Society, vol. 15, no. 12, pp. 7350-7356. 2014  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.12.7350>
- [6] Shin, D. W., Kim, K. N., An Experimental Study on the Temperature Difference between the Top and Bottom Flange in Steel Girder without Concrete Slab, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, vol. 18, no. 4, pp. 099-106. 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2014.18.4.099>

이 성 행(Seong-Haeng Lee)

[정회원]



- 1983년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학사)
- 1985년 2월 : 서울대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1997년 2월 : 충북대학교 토목공학과 (공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

강교량, 교량 온도하중, 수리구조물 진동