

강박스거더교의 설계 유효온도 산정을 위한 실험적 연구

이성행^{1*} · 신호경² · 김경남³ · 정경섭⁴

¹교수, 부산대학교, 건설융합학부 토목공학전공, ²석사과정, 부산대학교, 사회환경시스템공학부,

³선임연구원, 충북대학교, 건설기술연구소, ⁴교수, 충북대학교, 토목공학부, 토목공학과

An Experimental Study for Estimation of Effective Temperature for Design in Steel Box Girder Bridge

Lee, Seong Haeng^{1*}, Shin, Hyo Kyoung², Kim, Kyoung Nam³, Jung, Kyoung Sup⁴

¹Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

²M.E. student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

³Senior researcher, Dept. of Institute Of Construction Technology, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

⁴Professor, Dept. of Civil Engineering, Chungbuk National University, Cheongju, 28644, Korea

Abstract - The temperature data were measured for two years in a bridge specimen and the bridge in service nearby in order to calculate the effective temperature for thermal loads in steel box girder bridge. The maximum and minimum effective temperatures were calculated in the bridge specimen and the bridge according to air temperature in 2014, 2015 and 2 years. The effective temperatures calculated in this study were compared the Euro code and the Highway Bridge Design Criteria. The coefficients of determination in the maximum effective temperature and the Euro code for 2 year were calculated from $R = 0.927$, $R = 0.894$ in a bridge specimen and the bridge respectively. Those of minimum temperature and the Euro code were analyzed from $R = 0.992$, $R = 0.813$ in two bridge respectively. Also, the results were evaluated as being very similar, or slightly increased as compared with the maximum temperature of the Korean Highway Bridge Design Code(Limit State Design)

Keywords - Maximum effective temperature, Minimum effective temperature, Bridge specimen, Thermal loads, Steel box girder bridge, Composite bridge.

1. 서론

국내 교량의 설계기준은 신뢰도에 기반을 둔 한계상태 설계법(LSD)이 도입되고 있으며, 교량의 온도 설계에 있어서도 좀 더 체계화되고, 세분화된 설계규정의 제정이 요망된다. 온도 하중은 여름의 최고 온도와 겨울의 최저 온도에 따라서 결정되는데, 이를 반영하기 위하여 EURO Code에서는 유효온도 개념이 도입된다. 유효온도는 교량전체의 평균온

도를 나타내는 개념으로, 최고 온도와 최저 온도를 결정하기 위하여 최고 유효온도, 최저 유효온도로 구분된다. 온도하중에 대한 현재의 도로교 설계기준(한계상태 설계법)은 교량 형식을 강교, 합성교, 콘크리트교로 구분하고, 온도구분을 한랭지역과 보통지역 정도로만 나누어 최고 온도와 최저온도 범위를 제시하고 있다. 반면 유럽의 EURO Code나 미국의 AASHTO LRFD에서는 좀 더 체계적이고 세분화된 온도 하중에 대한 규정을 제시하고 있다^{[1],[2],[3],[4],[5]}.

Shin *et al.*^[6]은 우리나라 각 지역별로 기상관측 데이터를 기반으로 한 50년빈도 재현확률의 지역별 최고, 최저 기온에 대한 Contour map을 제시하였으며, 콘크리트 상판이 없는 강바닥판과 유사한 상태의 강교에 대하여 유효온도에 대한 산정을 수행한바 있다. 이 Contour map과 관련하여 각 지역의 대기온도에 대한 교량 형식별 유효온도가 산정된다면, 국

Note.-Discussion open until June 30, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 16, 2016; revised November 1, 2016; approved on November 1, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-51-510-7645 Fax. +82-51-513-9596

E-mail. lsh77@pusan.ac.kr

내 교량 설계시 각 지역의 특성을 고려한 온도하중에 대한 설계기준이 확립될 수 있을 것이다. 또한 실측 데이터를 이용한 강박스거더교의 유효온도 산정은 한해 여름동안의 데이터를 이용하여 최고유효온도만을 도출한 연구가 있었다^[7].

본 연구에서는 강박스거더교의 시험체를 제작하여 2년간 (2014년 여름에서 2016년 겨울) 온도를 측정하였다. 또한 인근지역에 시험체와 유사한 방향으로 설치된 같은 형식의 실교량에서도 동일기간 온도를 측정하고, 이 시험체와 실교량의 온도 측정결과를 바탕으로 강박스거더교 대기온도에 의한 최고·최저 유효온도를 산정하였다. 본 연구에서 산정된 최고, 최저 유효온도와 EURO Code, 그리고 현행 도로교 설계기준에서 제시되고 있는 온도기준을 서로 비교 평가하였다.

2. 시험체 및 실교량

2.1 시험체 모형 제작

시험체 제작 및 측정은 가장 일반적으로 사용되고 있는 강박스거더교와 같은 시험체를 Fig. 1과 같이 제작 설치하였다. 모형의 크기는 폭 2.0m×높이 2.0m 박스형이고 길이는 3m로 구성된다. 다이아프램은 1.5m간격으로 3개소를 설치하고 종리브는 150mm폭으로, 수직보강재는中间的의 다이아프램 1개소 2열 양측배치하고 150mm폭으로 설치된다. 슬래브 두께는 170mm이며, 좌우로 1.0m씩 돌출되어 총 4m의 폭으로 설치되었다. 별도의 시험체를 통하여 온도측정을 실시하는 이유는 바닥판의 두께(오버레이 두께 포함) 등의 영향을 판단하기 위하여 기준이 되는 공통적인 조건이 가능한 시험체에서 측정이 필수적이며, 실 교량의 온도측정은 공용상황을 고려할 때, 여러 조건의 지속적인 데이터 축적이 불가능하다.



Fig. 1. Front view of bridge specimen

2.2 실교량

강합성교 실험체의 신뢰성을 검증하기 위하여 실험체 모형과 직선거리 1.2km의 거리에 위치하고, 유사한 입사각을 갖는 강박스거더 교량을 선정하여 실교량에서 온도를 측정하고 유효온도를 산정, 비교하였다. 측정단면이 있는 교량의 지간은 60m이며, 상하행선 3거더씩, 6개의 거더로 구성된다. 이 교량은 10경간 총 600m이며, 하천, 고속도로, 전철을 횡단한다. 박스단면의 크기는 폭 2.5m, 높이 2.5m이며, 슬래브의 두께는 30cm이다. Fig. 2는 측정교량의 온도게이지 부착 현황을 보인다.

햇빛의 영향 등 모형과 유사한 조건을 고려하여 6개 거더 중 남쪽의 최외측 거더를 선택하였다. 교대지점에서 25m 지점에 온도게이지를 부착하여 온도를 지속적으로 측정하고, 그 결과를 실험체 모형과 비교, 검증하였다.



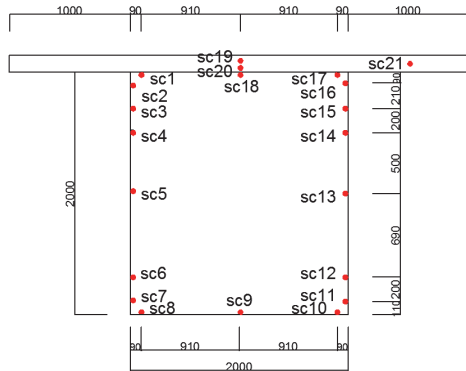
Fig. 2. Gauge location of the box girder in the measured bridge

2.3 측정 장비 및 측정 위치

Table 1과 같이 온도게이지를 실험체에 21개소, 실교량에 19개소씩 부착하였다. 데이터로거와 온도게이지는 일본 Tokyo Sokki사 제품을 사용하였다. 교량 실험체의 측정위치는 Fig. 3과 같이 양측 웹에 높이에 따라 6개소씩 총 12개와 상·하부 플랜지에 각각 3개소씩 6개, 그리고 콘크리트 내부에 3개의 온도게이지를 설치하여 온도변화를 측정하였다. 실교량에서도 Fig. 3과 같은 번호와 같은 개수로 강박스단면에 게이지를 설치하였고, 공용중인 상태를 고려하여 콘크리트 슬래브의 중앙단면 하면에 1개소의 게이지를 설치하였다.

Table 1. Measuring equipment

Equipment	Set	Remarks
Data Logger(TDS-303)	2	bridge specimen, a measured bridge
Thermo-couple	21	bridge specimen
Thermo-couple	19	measured bridge

**Fig. 3.** Gauge location and numbers in bridge specimen

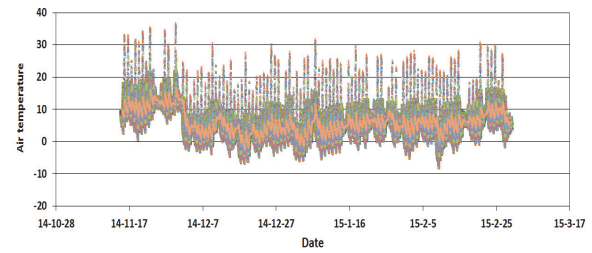
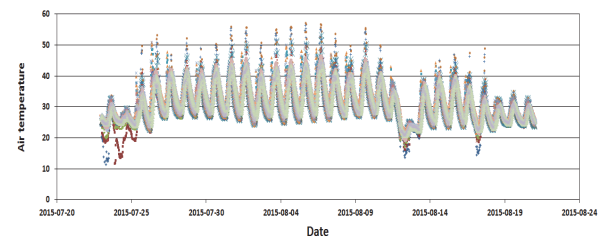
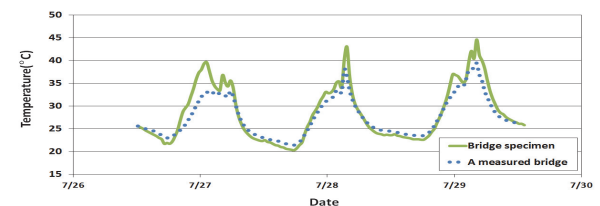
2.4 실험 방법

실험체에서는 장기간의 온도를 안정적으로 측정하기 위하여 실험체로부터 20m거리에 있는 실험실 안에 데이터로거를 설치하였고, 실험교량에서는 강박스거더의 내부에 데이터로거를 설치하였다. 각 교량의 설치된 측정 지점에서 데이터로거의 자동 Time interval 기능을 사용하여 30분 간격으로 온도를 연속으로 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 온도 측정

2014년 7월부터 23일부터 2016년 2월 28일까지 교량 실험체와 실험교량에서 온도를 측정하였다. 최고 유효온도는 2014년, 2015년의 7월 23일에서 8월 20일까지, 최저 유효온도는 2014~2016년의 11월 15일에서 02월 28일까지 측정된 자료를 실험체와 실험교량에서 분석하였다. 측정된 온도 데이터 중 2014년 겨울기간의 실험교량 온도측정 결과를 Fig. 4에, 2015년 여름기간의 교량 시험체 온도측정 결과를 Fig. 5에 도시하였다. 일교차에 의해 반복적인 곡선 형태의 온도변화를 확인할 수 있으며, 여름철에는 58도까지, 겨울철에

**Fig. 4.** The measured temperature data in winter at a measured bridge (2014)**Fig. 5.** The measured temperature data in summer at bridge specimen (2015)**Fig. 6.** The temperature data of the bridge specimen and the measured bridge (2015)

도 강박스의 햇빛을 직접받는 부분에서 37도까지 온도가 올라감을 볼 수 있다. Fig. 6은 교량시험체와 실험교량의 측정온도를 동시간에 비교한 그래프이다. 이는 2015년 7월 27일부터 3일간 교량시험체 SC 6지점(Fig. 3)과 이에 같은 위치의 실험교량 지점에서 측정된 온도 데이터이다. 이 지점은 직사광선을 직접 받는 지점으로 밤시간은 두지점의 온도가 거의 같고 한 낮에도 거의 같은 온도분포 경향을 보이고 있다. 교량 시험체는 경상남도 양산시 물금읍에 위치한 부산대학교 양산 캠퍼스에 설치하고 온도를 측정하였다. 실험교량은 교량 시험체와 1.2km의 거리에 위치한다.

3.2 유효온도 분석 방법

유효온도는 교량전체의 평균온도를 나타내는 개념으로 Euro code에서 제시되어 있다. 이 유효온도를 산정하기 위

Table 2. Each part area of the bridge specimen and the measured bridge (m²)

	Web	Flange	Concrete deck	Σ
Bridge specimen	4.00	4.00	68.09	76.09
A measured bridge	6.00	12.50	150.0	168.5

해서는 각 측정점에서 전체측정 데이터를 통계 분석하여 추세선을 구하고 이를 바탕으로 대기온도에 따른 각 지점의 온도를 산정한다. 산정된 온도 데이터를 사용하여 교량 단면 내 유효온도를 산정하기 위해 식 (1)과 같은 티센가중법(Thiessens weighting method)이 사용된다.

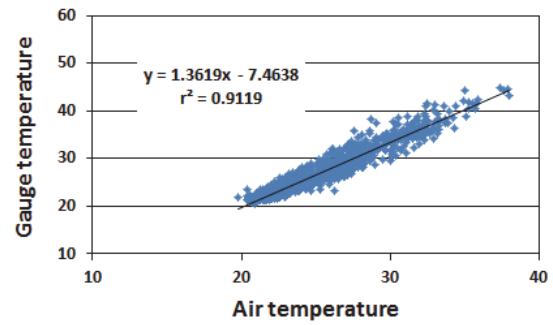
$$t_m = \frac{a_1 t_1 + a_2 t_2 + a_3 t_3 + \dots + a_n t_n}{a_1 + a_2 + a_3 + \dots + a_n} = \frac{\sum_{i=1}^n a_i t_i}{\sum_{i=1}^n a_i} \quad (1)$$

여기서 t_m 는 교량 단면내 유효온도, a_i 는 각 게이지의 온도 데이터가 대표하는 교량내 단면적, t_i 는 게이지 부착지점의 온도이다. 각 측정 지점에서의 산정된 온도를 식 (1)와 같이 면적가중평균법을 이용하여 유효온도를 산정한다. Table 2는 실험체와 실교량에서 좌우 웹, 상하 플랜지, 상부 콘크리트로 구분하여 단면의 면적을 제시하였다.

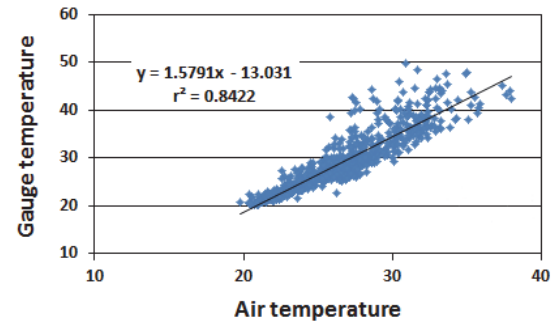
3.3 각 지점별 온도 측정결과 분석

3.3.1 최고 기온

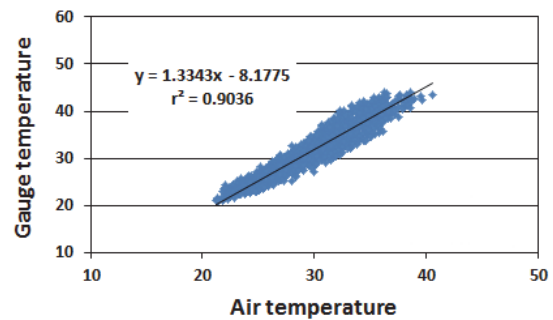
2014년, 2015년의 7월 23일서 8월 20일까지 측정된 데이터에 대하여 각 측정지점별로 회귀분석을 수행하여 대기온도에 따른 지점온도의 관계식을 도출한다. 이 식은 온도게이지가 붙어 있는 수에 따라서, 시험모형체에서는 21개, 실교량에서는 19개의 상관식이 2년 여름동안 분석된다. Fig. 7, 8은 2014년과 2015년에 측정된 교량 시험체의 21개 지점 중 햇볕을 받는 측면의 상단(SC 3)과 하단(SC 7)의 온도 분포와 회귀분석에 의한 추세선을 보인다. 측정된 21개의 지점에서 대부분의 온도는 SC 3과 유사한 분포를 보이며, SC 7은 햇볕의 수평 입사광이 직접 미치는 부분이다. SC 3은 비교적 일정하게 온도가 분포되어 상관관계가 높게 분석된다. SC 7은 측면 입사광으로 인한 온도 상승효과로 온도가 높게 측정되고 온도 편차가 심하여, 상관관계가 상대적으로 낮게 분석



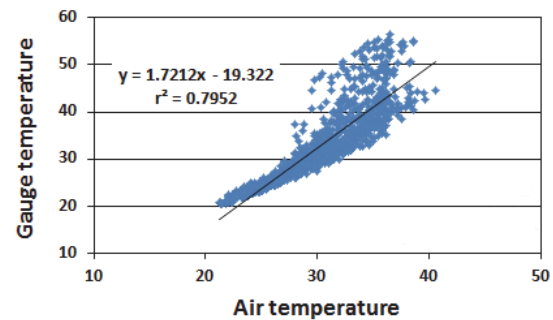
(a) SC 3 gauge



(b) SC 7 gauge

Fig. 7. The measured temperature distribution and regression line (2014)

(a) SC 3 gauge



(b) SC 7 gauge

Fig. 8. The measured temperature distribution and regression line (2015)

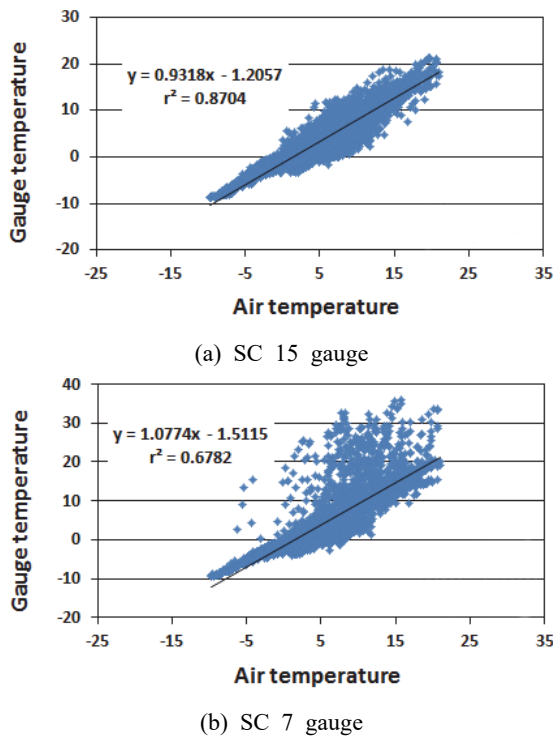


Fig. 9. The measured temperature distribution and regression line in a bridge specimen (2015)

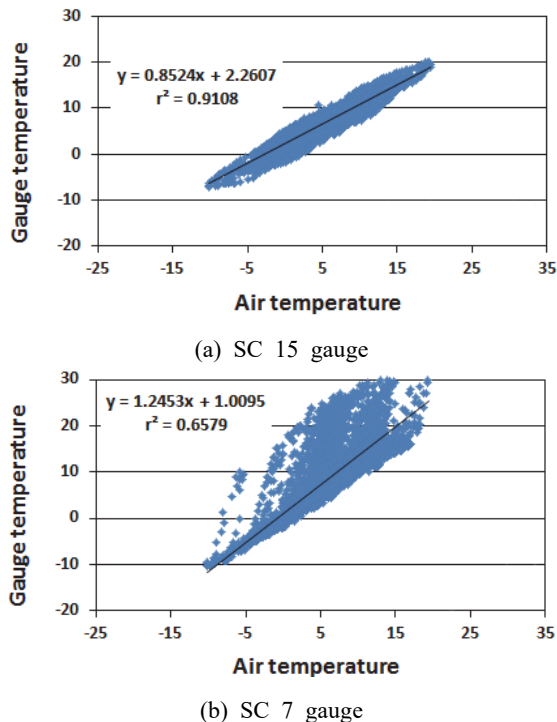


Fig. 10. The measured temperature distribution and regression line in the measured bridge (2015)

된다. 대기온도에 대한 지점의 유효온도는 추세식으로 산정된 값에 표준오차를 고려하여 확률적으로 산정하였다. Fig. 7, 8에서 2015년도의 기온은 2014년도 보다 40도에 가까이 온도가 더 많이 분포되어 더운 날이 더 많음을 알 수 있으며, 이에 따라 유효온도도 더 높게 분석됨을 예측할 수 있다. 각 지점에서 대기온도 36도에서 40도 구간과 같이 높은 기온은 재현확률이 낮아 측정 온도데이터가 드물게 나타나는 것이 확인된다.

3.3.2 최저 기온

최저 유효온도는 11월 15일에서 02월 28일까지 측정된 자료를 실험체와 실교량에서 분석하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 교량시험체와 실교량에서 2015년 겨울동안의 온도 분포와 추세선으로, 분석 결과의 한 예시로 나타내었다. SC 15는 우측 상단부로 온도의 편차가 크지 않으며, SC 7은 좌측 하단부로 입사광을 직접 받으므로 겨울임에도 불구하고 30도 이상의 온도가 분포됨을 알 수 있다. 측정지역이 경상남도 양산시로 Fig. 9과 같이 최저기온이 영하 10도임을 볼 수 있다. 최저 유효온도를 구하기 위하여 영하 24도까지를 추세선식으로 구함으로 겨울철 최저 유효온도는 상대적으로 신뢰성이 높지 않을 수 있다.

4. 유효온도 산정

4.1 최고온도

4.1.1 교량 시험체

교량 시험체는 21지점에서 온도를 측정하고 각 측정점에서 추세선과 표준 오차를 산정하고, Euro code에서 제시한 대기온도 24°C~38°C에서 각 지점의 온도를 산정하였다. 산정된 온도를 식 (1)에 대입하여 각 지점의 2014년 여름(2014), 2015년 여름(2015), 2년간 여름(2 year)의 3가지 경우로 나누어 유효온도를 산정하였고, 표와 그림에서는 괄호안의 숫자를 사용하였다. 2년간 여름(2 year)은 2014년 여름과 2015년 여름 측정값을 합한 데이터를 분석한 것이다. Table 3은 2015년 최고 기온에서 유효온도의 산정 예를 보인 것으로 21개 지점 중 4개 지점의 산출값을 정리하였다. 유효온도는 Euro code에서 교량형식별로 대기온도에 따라 지정되며, 이 지정된 값은 교량상판의 표면 피복상태에 따라서 Table 4와 같이 보정되어야 한다^[2].

Table 3. Sample of highest effective temperature in 2015

Air temperature (°C)	Web		Flange	Slab	$\sum_{i=1}^N A_i T_i$	Effective temperature (T_m)
	SC3	SC7	SC9	SC19		
38	42.5	46.1	39.6	39.39	32,334,173	42.5
37	41.2	44.4	38.4	38.40	31,557,379	41.5
36	39.9	42.6	37.2	37.40	30,780,586	40.5
35	38.5	40.9	36.1	36.40	30,003,792	39.4
34	37.2	39.2	34.9	35.40	29,226,998	38.4
33	35.9	37.5	33.7	34.41	28,450,205	37.4
32	34.5	35.8	32.5	33.41	27,673,411	36.4
31	33.2	34.0	31.3	32.41	26,896,617	35.4
30	31.9	32.3	30.1	31.41	26,119,824	34.3
29	30.5	30.6	28.9	30.42	25,343,030	33.3
28	29.2	28.9	27.7	29.42	24,566,236	32.3
27	27.8	27.2	26.5	28.42	23,789,443	31.3
26	26.5	25.4	25.3	27.42	23,012,649	30.2
25	25.2	23.7	24.1	26.43	22,235,856	29.2
24	23.8	22.0	22.9	25.43	21,459,062	28.2
23	22.5	20.3	21.7	24.43	20,682,268	27.2
22	21.2	18.5	20.5	23.43	19,905,475	26.2
21	19.8	16.8	19.3	22.44	19,128,681	25.1
20	18.5	15.1	18.1	21.44	18,351,887	24.1

Table 4. Correction of the maximum and minimum effective temperature according to upper surface treatment of composite bridge deck (°C)^[2]

Upper deck	Minimum effective temperature	Maximum effective temperature
-	-3	0
Waterproofing	-3	+4
40mm overlay	-2	+2
100mm overlay	0	0
200mm overlay	-3	-4

교량 시험체에서의 2014년, 2015년, 그리고 연속 2년 동안을 측정 자료로 분석한 유효온도를 Euro code와 같이 Table 5에 정리하였다. 또한 양산지방의 2014년, 2015년 7월, 8월의 평균기온과 월중 일 최고기온 3일간의 기온을 Table 6에 비교하였다. 대기 기온을 반영하여 2015년 여름의 유효온도는 2014년 보다 최상위 온도인 38°C에서 0.3°C 정도 높게 분석된다. 교량 시험체 상부 슬래브는 피복이 없으므로 Table 4에서 유효온도의 조정은 없다. 2014년, 2015

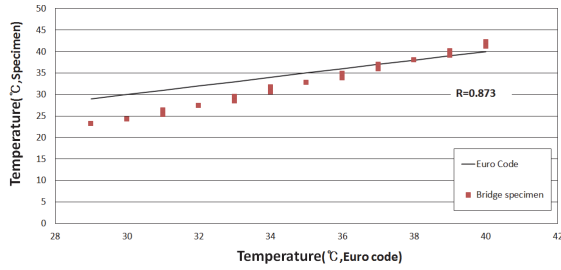
Table 5. Maximum effective temperature in bridge specimen (°C)

Air temperature	Bridge specimen (2014)	Bridge specimen (2015)	Bridge specimen (2 year)	Euro Code
38	42.2	42.5	42.3	40
37	41.2	41.5	41.3	40
36	40.1	40.5	40.3	39
35	39.1	39.4	39.2	39
34	38.0	38.4	38.2	38
33	37.0	37.4	37.2	37
32	35.9	36.4	36.2	37
31	34.8	35.4	35.1	36
30	33.8	34.3	34.1	36
29	32.7	33.3	33.1	35
28	31.7	32.3	32.1	34
27	30.6	31.3	31.0	34
26	29.5	30.2	30.0	33
25	28.5	29.2	29.0	33
24	27.4	28.2	28.0	32
23	26.4	27.2	26.9	31
22	25.3	26.2	25.9	31
21	24.3	25.1	24.9	30
20	23.2	24.1	23.8	29

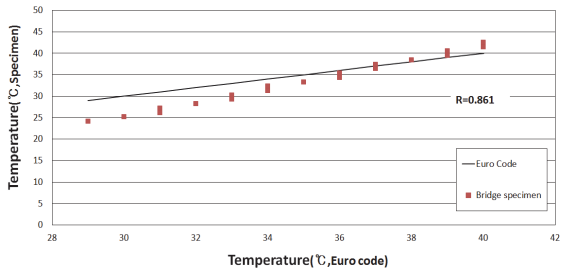
Table 6. Summer temperatures in 2014 and 2015 (°C)

	July				August			
	Average	Highest (3 day)			Average	Highest (3 day)		
2014	30.4	34.0	34.5	36.9	28.3	31.9	32.1	32.4
2015	29.1	34.6	34.8	35.6	31.5	36.3	36.5	37.4

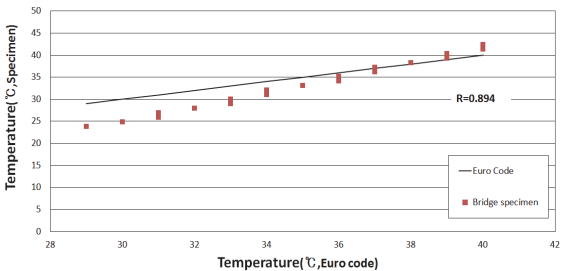
년, 그리고 연속 2년의 산정된 유효온도와 Euro code의 유효온도를 같이 도표화 하면 Fig. 11과 같다. Fig. 11은 Euro code의 유효온도를 가로축과 세로축을 1:1의 직선으로 잡고, 교량시험체에서의 유효온도를 함께 도시한다. 가로축은 Euro code의 유효온도를, 세로축은 교량시험체에서의 유효온도를 나타낸다. 연속 2년(2 year)의 산정된 유효온도와 Euro code의 유효온도와의 결정계수(상관계수의 제곱값, $r^2 = R$)는 $R=0.894$ 로 분석된다. 결정계수는 추세선 모형에 의해 종속변수의 변동이 89.4%가 된다는 의미이며, 결정계수가 높을수록 추세선이 변수간의 관계와 잘 일치한다는 의미이다. 참고로 2014년도와 2015년 여름의 측정결과 중 콘크리트 슬래브 온도는 2016년도 여름에 콘크리트 슬래브 내부(4



(a) 2014



(b) 2015



(c) 2 year

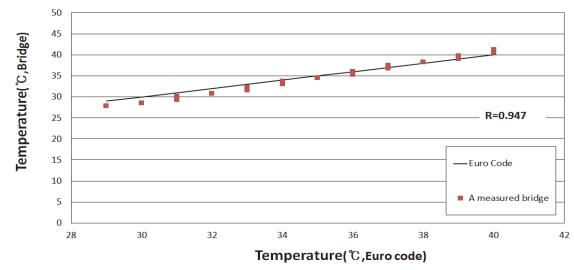
Fig. 11. Comparison of the maximum effective temperature between the bridge specimen and Euro code

온도센서 설치)에서 측정된 높이에 따른 온도 프로파일을 참고로 하여 보정하였다.

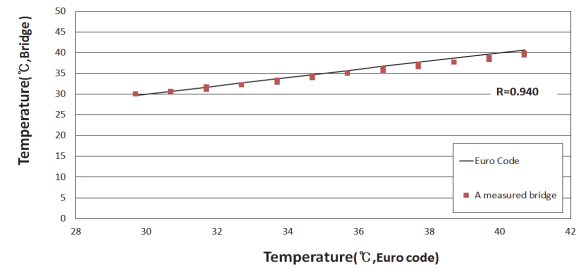
4.1.2 실 교량

실 교량에서도 19지점에서 2014년, 2015년, 그리고 연속 2년(2 year) 동안의 측정 자료를 바탕으로 유효온도를 분석하였다. 분석한 3개의 유효온도를 Euro code와 같이 Table 7에 정리하였다.

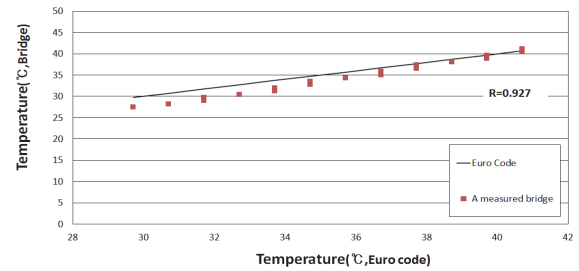
실교량은 아스팔트 피복이 80mm이므로 Table 4에 따라 0.7°C 온도를 상승시켜 Euro code 값을 보정하였다. 산정된 유효온도와 Euro code의 유효온도를 같이 도표화 하면 Fig. 12와 같다. 이 그림에서 세로축은 실교량의 유효온도가 된다. 실교량에서 연속 2년간 산정된 유효온도와 Euro code의 유효온도와의 결정계수는 $R=0.927$ 로 분석된다.



(a) 2014



(b) 2015



(c) 2 year

Fig. 12. Comparison of maximum effective temperature between the measured bridge and Euro code

4.2 최저 온도

교량 시험체와 실교량의 각각 21지점과 19지점에서 겨울 기간동안 온도를 측정하고 각 측정점에서 추세선과 표준 오차를 산정하였다. 이를 적용하여 Euro code에서 제시한 대기 온도 $-6^{\circ}\text{C} \sim -24^{\circ}\text{C}$ 에서 각 지점의 온도를 산정하였다. 교량 시험체와 실교량에서 각각 2014년, 2015년의 2년동안 겨울 기간에 측정된 자료를 적용하여 유효온도를 산정하고, 각각을 Table 8, 9에 정리하였다. 이때 교량 시험체 상부 슬래브 피복에 따른 Euro code의 보정은 Table 4에 따라 교량 시험체에서는 -3°C , 실교량에서는 -0.7°C 가 산정된다. 보정된 Euro code의 값들과 교량 시험체와 실교량에서 산정된 유효온도를 도표화 하면 Fig. 13, Fig. 14와 같다. 이때의 산정된 값과 Euro code의 결정계수는 교량 시험체와 실교량에서 각각 $R=0.992$, $R=0.813$ 으로 산정된다.

Table 7. Maximum effective temperature in measured bridge (°C)

Air temperature	Bridge (2014)	Bridge (2015)	Bridge (2 year)	Euro code	Euro code (correction)
38	39.8	40.9	41.1	40	40.7
37	39.0	39.4	40.4	40	40.7
36	38.3	38.8	39.2	39	39.7
35	37.5	38.3	38.8	39	39.7
34	36.8	37.7	38.1	38	38.7
33	36.0	37.2	37.3	37	37.7
32	35.3	36.6	36.6	37	37.7
31	34.5	36.1	35.8	36	36.7
30	33.8	35.5	35.0	36	36.7
29	33.0	35.0	34.3	35	35.7
28	32.3	34.4	33.5	34	34.7
27	31.6	33.9	32.7	34	34.7
26	30.8	33.3	32.0	33	33.7
25	30.1	32.8	31.2	33	33.7
24	29.3	32.2	30.5	32	32.7
23	28.6	31.7	29.7	31	31.7
22	27.8	31.1	28.9	31	31.7
21	27.1	30.6	28.2	30	30.7
20	26.3	30.0	27.4	29	29.7

Table 8. Minimum effective temperature in bridge specimen (°C)

Air temperature	Bridge specimen (2 year)	Euro Code	Euro Code (correction)
-24	-23.2	-19	-22
-23	-22.4	-18	-21
-22	-21.6	-18	-21
-21	-20.8	-17	-20
-20	-20.0	-17	-20
-19	-19.1	-16	-19
-18	-18.3	-15	-18
-17	-17.5	-15	-18
-16	-16.7	-14	-17
-15	-15.9	-13	-16
-14	-15.0	-12	-15
-13	-14.2	-11	-14
-12	-13.4	-10	-13
-11	-12.6	-10	-13
-10	-11.7	-9	-12
-9	-10.9	-8	-11
-8	-10.1	-7	-10
-7	-9.3	-6	-9
-6	-8.5	-5	-8

5. 유효온도의 비교 평가

5.1 최고 유효온도

2년간 분석한 자료를 기준으로 분석한 최고대기 기온 38°C에서 유효온도를 정리하면 Table 10과 같다. 실교량의 유효온도는 Euro code와 비교할 때 매우 근접함을 보인다. 그러나 교량단면 중 콘크리트의 지배면적이 상대적으로 큰데, 실교량에서는 공용중인 상태를 고려하여 콘크리트 슬래브 단면에 1개의 게이지만을 설치하고 분석하여 신뢰도는 높지 않은 것으로 평가된다. 교량시험체 모형에서는 최고 대기온도 38°C에서 실교량과 비교하여 유효온도가 1.2°C 높게 산정되었다. 이는 교량시험체 모형이 교량의 지간, 강재 및 콘크리트의 두께, 거더의 개수, 상판의 피복 두께 등에서 실교량과 차이가 있음으로 판단되며, 교량시험체가 강성과 규격이 작아 온도 상승이 높은 것으로 판단된다. 분석된 유효온도는 Euro code 그리고 도로교 설계기준(보통기후 지역의 합성교)과 비교할 때 거의 유사하거나 약간 상회하는 값을 보인다. 이러한 결과와 지역의 50년빈도 최고 기온이 38도를 넘는 지역^[4]도 있으므로 도로교 설계기준의 최대치보다 큰 최대 유효온도가 실교량에서 발생될 가능성이 있음이 예상된다.

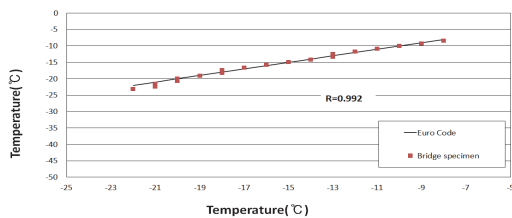


Fig. 13. Comparison of effective temperature between the bridge specimen and Euro code

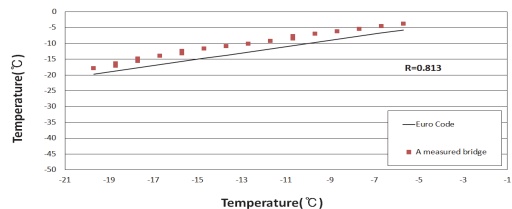


Fig. 14. Comparison of effective temperature between the bridge and Euro code

Table 9. Minimum effective temperature in measured bridge (°C)

Air temperature	Bridge (2 year)	Euro Code	Euro Code (correction)
-24	-17.9	-19	-19.7
-23	-17.1	-18	-18.7
-22	-16.4	-18	-18.7
-21	-15.6	-17	-17.7
-20	-14.8	-17	-17.7
-19	-14.0	-16	-16.7
-18	-13.2	-15	-15.7
-17	-12.4	-15	-15.7
-16	-11.7	-14	-14.7
-15	-10.9	-13	-13.7
-14	-10.1	-12	-12.7
-13	-9.3	-11	-11.7
-12	-8.5	-10	-10.7
-11	-7.7	-10	-10.7
-10	-7.0	-9	-9.7
-9	-6.2	-8	-8.7
-8	-5.4	-7	-7.7
-7	-4.6	-6	-6.7
-6	-3.8	-5	-5.7

Table 10. Maximum effective temperature at air temperature 38 (°C)

	This analysis	Euro code	Korean highway bridge design code
Bridge specimen	42.3	40	40
Measured bridge	41.1	40.7	40

5.2 최저 유효온도

최저 대기 기온 -24°C에서 유효온도(2년간)를 정리하면 Table 11와 같다. 온도 측정결과 분석된 유효온도는 Euro code 그리고 도로교 설계기준(합성교 한랭기후)과 비교할 때 상당히 근접함을 보이며, 교량시험체와 실교량은 여름철과는 반대로 강성과 규모가 작은 교량시험체의 온도는 Euro code보다 낮아지고, 실교량은 높아짐을 보인다. 양산지방의 최저기온은 50년빈도 통계자료 계산에 의하면 Table 12와 같다. 여기서 분석된 최저기온을 -14°C에서 유효온도를 산정하면 Table 13과 같이 교량시험체와 실교량에 대하여 -15.0°C, -10.1°C가 된다. 도로교 설계기준의 보통기후지역의 최저온도 -10°C와 비교하면 도로교 설계기준의 최저치보다 낮은 유효온도가 실교량에서 발생될 수 있다.

이상과 같이 최대, 최저 유효온도를 산정해 본 결과, 국내 도로교 설계기준의 최대치보다 큰 온도승강이 실교량에서 발생될 가능성이 있음의 확인된다.

Table 11. Effective temperature at air temperature -24°C

	This analysis	Euro code	Korean highway bridge design code
Bridge specimen	-23.2	-22	-20
Bridge	-17.9	-19.7	-20

Table 12. Maximum and minimum temperature in Yangsan area

	Maximum temperature	Minimum temperature
Frequency of 50 years	37.5°	-14°

Table 13. Effective temperature at air temperature -14°C in Yangsan area

	This analysis	Euro code	Korean highway bridge design code
Bridge specimen	-15.0	-15.0	-10
Bridge	-10.1	-13.7	-10

5.3 지역별 유효온도 산정(예)

우리나라 각 지역별로 기상관측 데이터를 기반으로 각 지역의 최고, 최저 기온에 대한 Contour map의 작성하고 교량 형식별 유효온도가 산정된다면, 국내 교량 설계 시 각 지역의 특성을 고려한 설계기준이 확립될 수 있을 것이다. 기상청 자료를 바탕으로 50년 빈도의 양산지역 최고, 최저 기온인 Table 12의 온도를 기준으로 본 연구에서 교량 시험체와 실교량에서 산정된 유효온도를 접목하여 양산지역의 유효온도를 계산하면 최고 42.0°C, 40.75°C, 최저 15.0°C, 10.1가 산정된다. 다른 지역과 다른 형식의 교량에 대하여도 이와 같은 방식으로 유효온도를 산정하여 지역의 최고, 최저 온도를 기준으로 유효온도에 대한 설계기준이 정립될 수 있고, 또한 지도에 등고선식으로 도표화 할 수 있을 것이다.

6. 결 론

합성교에 대한 유효온도를 산정하기 위하여 강박스 거더 교의 교량 시험체와 실교량에 대하여 2년간 온도데이터를 측정하였다. 이를 바탕으로 대기온도에 의한 유효온도를 산정하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 교량 시험체와 실교량에 대하여 2014년, 2015년, 2년간

(2 year)의 온도데이터를 바탕으로 Euro code에서 제시한 대기온도에 대하여 최대 유효온도와 최소 유효온도를 산정하였다. 2년간(2 year) 측정된 데이터 기준으로 최대 유효온도와 Euro code의 결정계수는 교량 시험체에서 $R=0.894$, 실교량에서 $R=0.927$ 이 산정되며, 최저 유효온도는 교량 시험체에서 $R=0.992$, 실교량에서 $R=0.813$ 이 산정되어, 실교량의 최저 유효온도를 제외하고 약 90%내외의 수준에서 유로코드의 온도하중은 실험결과와 부합되는 것으로 판단된다.

- (2) 교량 시험체 모형은 최고 대기온도 38°C 에서 실교량과 비교하여 유효온도가 1.2°C 높게 산정되었다. 이는 교량시험체가 강성과 규격이 작아 상대적으로 온도 상승이 높은 것으로 판단된다. 분석된 유효온도는 Euro code 그리고 도로교 설계기준(보통기후 지역의 합성교)과 비교할 때 거의 유사하거나 약간 상회하는 값을 보인다. 또한 지역의 50년빈도 최고 기온이 38°C 를 넘는 지역도 있으므로 본 연구의 값보다도 초과하는 유효온도에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.
- (3) 온도 측정결과 분석된 최저 유효온도는 Euro code 그리고 도로교 설계기준의 합성교(한량기후)에서 최저기온 -20°C 와 비교할 때 상당히 근접함을 보인다. 양산지방의 최저기온 -14°C 에서 유효온도를 산정하면 교량 시험체와 실교량에 대하여 -15.0°C , -10.1°C 가 된다. 도로교 설계기준(보통기후)의 최저온도 -10°C 와 비교하면 도로교 설계기준의 적용온도는 좀 더 낮게 선정됨이 요망된다.
- (4) 각 지역별 최저 및 최고 온도에 대한 Contour map과 5.3 절의 예와 같이 본 연구에서 산정된 강합성교를 포함한 교량형식에 따른 대기온도별 교량 단면 내 유효온도를 접목하면, 국내 교량 설계 시 각 지역의 특성을 고려한, 체계적인 온도 설계기준의 확립과 도표화가 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(NRF-2011-0023229, NRF-2015 R1D1A1A01060616)의 지원으로 이루어졌습니다.

요 약 : 강박스거더교의 온도하중을 위한 유효온도를 산정하기 위하여, 강박스거더교의 시험체와 실교량에서 온도 데이터가 2년간 측정되었다. 이 실험체와 실교량의 온도 측정결과를 바탕으로 대기온도에 대한 최고 및 최저 유효온도를 2014년, 2015년, 그리고 연속 2년간 산정하였다. 산정된 최고, 최저 유효온도는 EURO code, 그리고 현행 도로교 설계기준과 서로 비교 평가되었다. 2년간(2 year) 측정된 데이터 기준으로 최대 유효온도와 Euro code의 결정계수는 교량 시험체에서 $R=0.894$, 실교량에서 $R=0.927$ 이 산정되며, 최저 유효온도는 교량 시험체에서 $R=0.992$, 실교량에서 $R=0.813$ 이 산정되었다. 또한 연구 결과는 도로교설계기준(한계상태설계법)의 최고온도와 유사하거나 약간 초과하는 것으로 평가되었다.

핵심용어 : 최고 유효온도, 최저 유효온도, 교량 시험체, 온도 하중, 강박스거더교, 합성교

참고문헌(References)

- [1] American Association of State Highway and Transportation Officials (2007) *AASHTO LRFD Bridge Design Specifications* (4th Ed.), USA, pp.3-99-3-104.
- [2] British Standards Institution (1978) *Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2: Specification for Loads* (BS 5400-2: 1978), UK, pp.20-23.
- [3] 국토해양부(2012) 도로교설계기준(한계상태설계법). Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs (2012) *Highway Bridge Design Standard (Limit State Design)*, Korea (in Korean).
- [4] Roeder, C.W. (2002) *Thermal Movement Design Procedure for Steel and Concrete Bridges*, Report No. NCHRP 20-07/106, National Cooperative Highway Research Program (Transportation Research Board), USA.
- [5] Roeder, C.W. (2003) Proposed Design Method for Thermal Bridge Movements, *Journal of Bridge Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.8, No.1, pp. 12-19.
- [6] 신동욱, 김경남, 최철호, 이성행(2013) 강상자형교의 강 바닥판에서 설계온도 하중을 위한 유효온도 산정, 한국구조물진단유지관리공학회 논문집, 한국구조물진단유지관리공학회, 제17권, 제6호, pp.77-87.
Shin, D.-W., Kim, K.-N., Choi, C.-H., and Lee, S.-H. (2013) 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*, KSMI, Vol.17, No.6, pp. 77-87 (in Korean).
- [7] 이성행(2016) 강상자형교의 설계 온도하중을 위한 최고 유효온도 산정, 한국산화기술학회논문지, 한국산화기술학회, 제17권, 제8호, pp.133-138.
Lee, S.H. (2016) Evaluation of Maximum Effective Temperature for Estimate Design Thermal Loads in Steel Box Girder Bridges, *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, KAIS, Vol.17, No.8, pp.133-138 (in Korean).