

실측에 의한 강박스거더교의 상하 온도차에 대한 연구

이성행^{1*}, 박영춘²

¹부산대학교 토목공학과

²한국철도시설공단 영남본부 울산포항PM부

A Study on the Vertical Temperature Difference of Steel Box Girder Bridge by Field Measurement

Seong-Haeng Lee^{1*}, Young-Chun Park²

¹Department of Civil Engineering, Pusan National University

²Department of Ulsan-Pohang Line PM, Korea Rail Network Authority

요약 외국 설계기준에서 제시하고 있는 단면 온도 경사모델의 국내적용을 위하여, 강상자형 교량 시험체를 폭 2.0m, 높이 2.0m, 길이 3.0m, 상부슬래브 두께 0.2m로 제작하고, 2016년 여름동안 시험체의 온도를 측정하였다. 측정 데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 측정된 대기기온과 기상청의 대기기온을 비교 검토하였다. 측정된 24개의 온도 측정 게이지 중 Euro code와 온도차를 비교 할 수 있는 4개의 온도 게이지를 선정하고, 측정온도의 분포를 분석하였다. 각 지점에서 최대 온도차를 선정하기 위한 기준 대기온도를 결정하여, 최대 최저 온도를 계산하고, 이를 바탕으로 온도차(경사)를 산정하고 온도차 모델을 제시하였다. 제시된 온도차 모델은 Euro code의 온도분포와 비교할 때 슬래브 최상단에서 0.9°C, 중앙 경사부에서 0.3 ~ 0.4°C의 온도차를 보여 Euro code와 유사한 결과를 보였다. 산정한 표준오차 계수는 표준오차의 2.71~2.84배로 산정되었고, 일정한 범위의 값을 보였다. 제시된 온도차 모델은 국내 온도설계의 온도차 산정 시 기본 자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

Abstract For domestic application of the temperature gradient model proposed by foreign design standards, a specimen of steel box girder bridge was fabricated with the following dimensions: 2.0 m width, 2.0 m height and 3.0 m length. Temperature was measured using 24 temperature gauges during the summer of 2016. The reliability of the measured data was verified by comparing the measured air temperature with the ambient air temperature of the Korea Meteorological Administration. Of the measured gauges, four temperature gauges that can be compared with the temperature difference of the Euro code were selected and used to analyze the distribution of the measured temperatures at each point. The reference atmospheric temperature for the selection of the maximum temperature difference was determined by considering the standard error. Maximum and minimum temperatures were calculated from the four selected points and the resulting temperature difference was calculated. The model for the temperature difference in the steel box girder bridge was shown by graphing the temperature difference. Compared to the temperature distribution of the Euro code, the presented temperature difference model showed a temperature difference of 0.9°C at the top and of 0.3° to 0.4° C at the intermediate part. These results suggested that the presented model could be considered relatively similar to the Euro code The calculated standard error coefficient was 2.71 to 2.84 times the standard error and represents a range of values. The proposed temperature difference model may be used to generate basic data for calculating the temperature difference in temperature load design.

Keywords : Temperature difference, Steel box girder specimen, Temperature measurement, Euro code, Temperaturegradient model

이 논문은 한국연구재단(NRF-2015-RID1A1A01060616)의 지원으로 수행되었음.

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

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

Received May 2, 2018

Revised (1st June 5, 2018, 2nd June 8, 2018)

Accepted August 3, 2018

Published August 31, 2018

1. 서론

교량은 온도변화로 팽창하고 수축한다. 이러한 변동은 받침과 신축이음, 교각과 교대의 변형으로 수렴된다. 강박스거더에서 온도 경사는 매일 가열과 냉각이 반복되는 기상조건에 의해 발생한다. 양의 온도경사는 박스표면의 온도가 복부의 평균 온도보다 높을 때 발생한다. 단면에서 최소 온도는 플랜지 하부에서 주로 발생한다. 하루 동안 구조에 도달하는 태양복사에너지 총량이 증가할 때 온도 경사는 더 커진다. 세계기후 온난화의 영향으로 매년 기온이 높아지고 있는 상황에서 교량의 온도를 실측하여 온도하중의 영향을 재평가 하는 것이 요망된다. 국내 도로교설계기준[1]의 구조물 단면에서 온도경사 모델은 미국 AASHTO 온도기준 중 특정 지역의 것을 준용하여, 단일 온도 경사 모형을 제시하고 있다. 미국의 온도경사 모델[2],[3]은 미국 전역을 네 개의 구역으로 나누어, 지역별로 상·하연 설계기준 온도를 제시하고 있다. Euro code 온도경사 모델[4]은 구조물이 가설되는 위치와 가설 시 예상 온도로부터 교량의 형식을 구분하여 상·하연 온도차를 결정하고, 온도 상승에 대하여도 지역별 온도를 별도로 제시하고 있다. 국내 규정은 외국에 비하여 교량형식별, 지역별 세부 온도 경사 모형이 제시되어 있지 않다. 온도설계 기준과 관련한 국내 연구는 강박스거더에 대한 유효온도에 대한 실험적 연구결과[5],[6],[7]가 있으며, 온도차에 대해서는 상판 콘크리트가 없는 강박스거더에서 실험적 연구[8]가 진행되었으며, 강박스거더교의 온도차에 대한 실험 연구는 거의 없는 실정으로 이에 대한 온도측정 데이터의 분석과 연구가 요망되어진다.

본 연구에서는 새로운 기후 환경에 맞는 구체적인 강박스거더교의 온도차 하중모형을 구축하기 위하여 강박스거더 모형 시험체를 제작하고 실험하였다. 콘크리트 슬래브내부와 강박스거더에 높이별로 온도계이저를 부착하여 여름기간 동안 온도를 측정하고 온도차를 분석하였다. 분석한 결과는 외국 설계기준(Euro code)에서 제시하는 상하연 온도차와 비교 검토되었다. 이를 통하여 국내 온도설계기준의 온도경사 모델을 제시하고, 온도설계 하중의 기본 자료를 제공하고자 한다.

2. 상하 온도차 설계기준

2.1 도로교설계기준 (온도경사 TG)

국내 도로교 설계기준(한계상태설계법)의 온도경사 설계기준은 Table 1과 Fig. 1과 같으며, 교량의 형식별로 구분되지 않는다. 여기서 T 는 온도 하중 계산 시 단면에 적용되는 구간별 온도 값이다. 상부의 온도가 높을 때의 T_1 과 T_2 의 값은 Table 1과 같다. 현장조사에 의하여 T_3 의 값을 정하지 않는 경우, T_3 의 값은 영(0°C)으로 하여야 한다. 온도경사를 고려할 때 양 또는 음의 온도변화에 의한 내부응력과 구조변형은 Fig. 1에 의하여 결정된다. 여기서 A의 길이는 강재로 된 상부 구조물에 대하여 300mm가 적용된다.

Table 1. Basis for temperature gradients

$T_1(^{\circ}\text{C})$	$T_2(^{\circ}\text{C})$
23	6

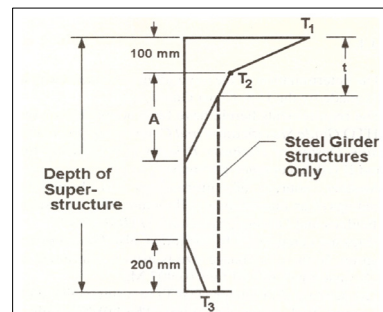


Fig. 1. Positive vertical temperature gradient[1]

2.2 Euro code

Euro code에서는 교량형식을 4 Group으로 구분하고, 각 형식별로 설계기준을 제시한다. Fig. 2는 강합성거더 형식(Group 3)의 설계기준을 보인다. 상부슬래브의 두께가 200mm이고, 상부 표면 아스팔트 두께가 100mm일 때 최상단의 온도(T_1)는 13°C 가 된다.

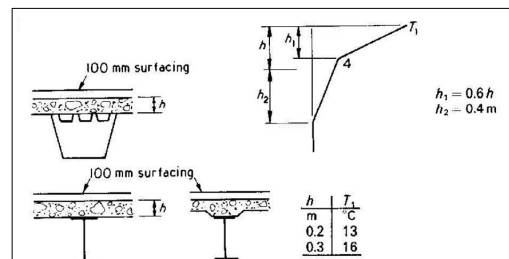


Fig. 2. Temperature difference for Group 3, Concrete deck on steel box with 100mm surfacing (Euro code)[4]

3. 모형제작 및 온도 측정

3.1 시험체 제작

대상 시험체 모형은 콘크리트 슬래브가 있는 강박스 거더로 상부 콘크리트에 별도의 피복처리는 하지 않았다. 강박스의 폭과 높이는 각각 2m이고 콘크리트 슬래브 폭은 4m, 두께는 0.2m이다.



Fig. 3. Figure of the steel box girder specimen

시험체는 지열로 인해 발생할 수 있는 오차를 최소화 하기 위하여 지면에서 약 1m정도 이격하여 설치하였다. 시험체의 온도 측정을 위해 총 24개의 온도센서를 부착하였다. 시험체는 경상남도 양산시 물금읍에 위치한 부산대학교 양산캠퍼스에 설치하여 온도를 측정하였다.

3.2 측정위치

온도계이지는 Fig. 4와 같이 높이별로 강박스 좌·우 측면에 각각 6개(SC6~SC11, SC12~SC17)를 부착하였고, 상·하면 플랜지에 각각 2개(SC18~SC21), 내부에 1개(SC22)를 부착하여 강박스에 17개의 온도계이지를

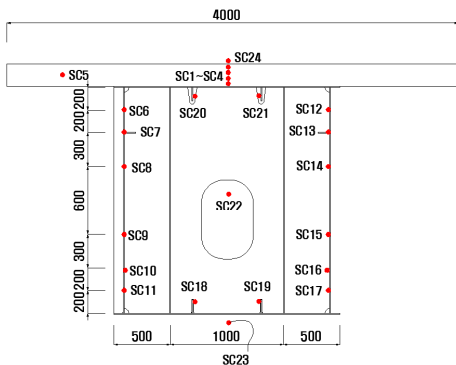


Fig. 4. Section and gauge numbers of specimen

부착하였다. 콘크리트 슬래브에는 6개(SC1~SC5, SC24)의 온도계이지를 부착해 높이별 위치별 온도측정을 가능하게 하였다. 또한, 시험체 외부에 별도로 대기온도를 측정하기 위한 온도계이지(SC23)를 설치하였다.

3.3 데이터 측정

Thermo-couple 온도계이지를 이용하여 2016년 06월 30일에서 2016년 09월 02일까지 총 64일간 매 30분 단위로 데이터를 측정하였다. 데이터는 64일간 총 3062개의 데이터가 측정되었다. Table 2는 30분 간격으로 측정된 샘플데이터를 보인다.

Table 2. Examples of measured temperature (SC1~SC7)

Time	SC1	SC2	SC3	SC4	SC5	SC6	SC7
18:44	32.7	32.1	30.6	32.7	32.0	30.6	27.5
19:14	32.0	31.6	30.2	32.5	31.5	29.6	27.1
19:44	31.4	31.3	29.7	32.0	30.6	29.0	25.7
20:14	31.2	31.0	29.5	32.3	30.4	28.7	26.0

4. 측정 결과 및 분석

4.1 시험체의 온도 계이지 선정

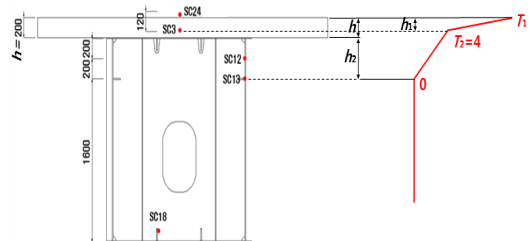


Fig. 5. Connection of the cross section of a specimen with the Euro code

온도차(온도경사)를 계산하기 위하여 측정된 24개의 계이지 중 Fig. 5와 같은 4개의 온도계이지가 선택된다. 좌·우측의 온도 계이지중 온도차가 더 크게 측정되는 우측 부분의 계이지를 선택하였다. 콘크리트 슬래브의 두께(h)는 200mm이다. 선택된 온도계이지는 콘크리트 슬래브 최상부에 1개(SC24)와, 120mm 내려온 지점(h1)에 1개(SC3)이고, 강박스거더 우측면 200mm 내려온 지점에 1개(SC12) 다음 400mm 내려온 지점(h2)에 1개

(SC13)이다. 이는 Euro code의 온도차 산정 기준이 되는 지점과 같은 높이에 있는 온도계이기를 선택하여 Fig. 5와 같이 매칭 하였으며, 결과를 Euro code와 비교할 수 있다. Fig. 2의 Euro code에 따르면 온도 T_1 은 상부 아스팔트 등의 피복이 100mm일 때 13°C 이지만, 제작 측정된 모형과 같이 상부 아스팔트가 없는 경우에는 Euro code[3]의 상부 아스팔트에 따른 조건에 따라 16.5°C 가 된다. 최상단에서 120mm만큼 내려온 곳(h_1)의 온도는 4°C 이다. 또한 콘크리트 슬래브 하단부에서 400mm 내려온 곳(h_2)은 온도차가 없는 것으로 간주하여 온도차를 0°C 하고, 그 이하 지점도 모두 0°C 로 본다.

4.2 측정결과

4.2.1 기상청 대기온도와와의 비교

Fig. 6은 대상 기간 내의 기상청 대기온도와 측정 대기온도의 비교이다. 점선 그래프는 기상청에서 제시한 양산관측소의 대기온도 값이고, 실선 그래프는 측정기간 내 시험체내에서 측정한 대기온도이다. 두 그래프는 상당히 유사한 분포를 보이며 이는 측정 대기온도에 신뢰성이 있다는 것을 알 수 있다.

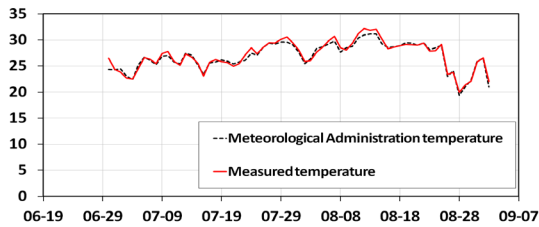
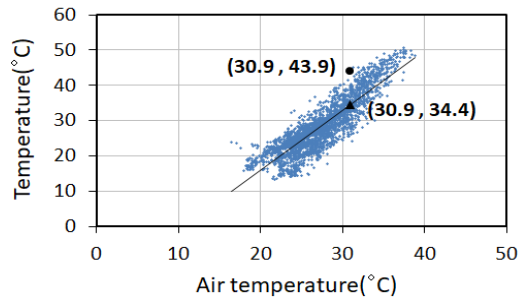


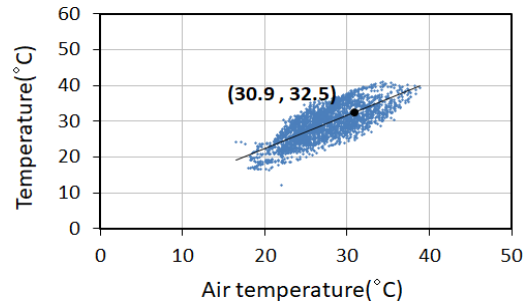
Fig. 6. Comparison of measured temperature with the Meteorological Administration temperature

4.2.2 온도계이지 온도분포

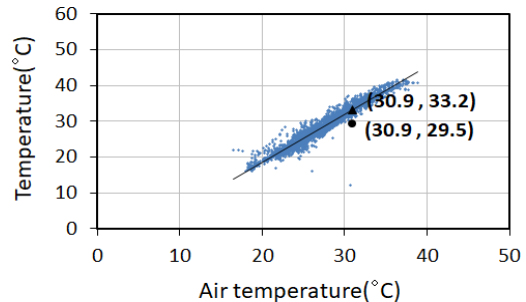
Fig. 7은 선택된 4개의 온도계이지에서 측정된 온도 분포를 나타낸다. 여기서 가로축은 측정 대기온도, 세로 축은 대상 계이지의 온도 값이다. 또한 콘크리트에 설치된 SC24와 SC3지점에서 온도분포가 비교적 넓게 분산되어있는 것을 알 수 있고, 강박스에 설치된 SC12, SC13 지점에선 온도분포가 상대적으로 좁게 분포하는 것이 확인된다.



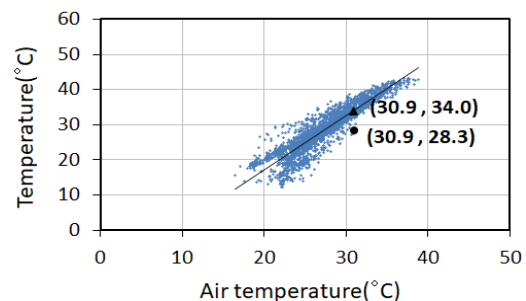
(a) 2200mm(SC24)



(b) 2080mm(SC3)



(c) 1800mm(SC12)



(d) 1600mm(SC13)

Fig. 7. Distribution of temperature and maximum and lowest temperature at each point

4.3 온도차 산정

4.3.1 기준 대기 온도의 설정

온도차 산정을 위하여 기준이 되는 온도를 선정하는데 그 온도는 다음과 같이 선정되었다. 측정기간 내 평균 대기온도는 27.1°C이고, 평균온도일 경우보다는 더 높은 대기온도 시에 더 큰 온도차가 기대된다. 측정기간 대기온도의 표준오차(σ)는 3.8°C이다. Table 3~4에서는 평균 대기온도에 표준오차의 0.5, 1.0, 1.5, 2.0배를 더하여 최고 온도차가 발생하는 위치를 산정하였다. Table 4에 따르면, 이 중 2 σ 를 고려한 값은 측정데이터의 수가 작아서 신뢰도가 낮은 것으로 판단되어, 0.5 σ , 1.0 σ , 1.5 σ 의 값을 더한 온도에서 온도차를 검토 한 결과 1.0 σ 에서 계산한 온도차가 최상단에서 최대치가 되었고, Euro code와 비교적 근접하였다. 따라서 이후로는 1.0 σ 를 더해준 대기온도(30.9°C)를 기준 대기온도로 선정하여 온도차를 산정하였다.

Table 3. Average and standard deviation of the measured air temperature

Classification	Atmospheric temperature(°C)
Average (T)	27.1
Standard deviation(σ)	3.8
T+0.5σ	29.0
T+1.0σ	30.9
T+1.5σ	32.8
T+2.0σ	34.7

Table 4. Calculation of temperature difference in at each reference air temperature

Classification	T+0.5 σ	T+ σ	T+1.5 σ	Euro code
2200	14.6	15.6	14.6	16.5
2080	5.4	4.3	2.4	4
1800	2.7	1.3	0.3	1.7
1600	0.0	0.0	0.0	0.0

4.3.2 온도차 산정

선정된 온도계이지의 온도차산정을 위하여, 최상단 계이지(SC24)에서는 기준 대기온도에서 가장 높은 온도를 산정하였고, 두 번째 계이지(SC3)에서는 기준 대기온도에서 평균온도를, 세 번째 이하에서는 기준 대기온

도에서 가장 낮은 온도를 산정하였다. 기준온도에서 선정된 최고 및 최저 온도가 Fig. 7 (a) ~ Fig. 7 (e)에서 원형(●)으로 표시되었으며, 평균온도는 삼각형(▲)으로 표시하였다. 이를 정리하면 Table 5의 2열과 같다. 일례로 최상단 SC24 온도계이지의 값은 Fig. 7 (a)에서 측정기간 동안 가로축인 기준 대기온도 30.9°C에서 세로축 평균 온도는 34.4°C, 최고 온도는 43.9°C가 산정된다.

Table 5의 3열과 4열에는 각 지점의 평균온도와 표준오차를 정리하였고, 산정된 온도와 평균온도의 차를 표준오차로 나눈 값을 5열에 정리하였으며, 본 연구에서는 이 값을 “표준오차 계수”로 정의하여 보았다. 이 계수는 측정 지점에서 온도차 측정 시 상하 최고온도, 최저 온도를 평균온도와 비교하여 얼마의 편차로 산정할 수 있는지를 나타내며, 표준오차의 몇 배 수준인가로 예측할 수 있고, 평가할 수 있다. 이 계수는 측정지점의 특성과 조건에 따라 영향되어진다. 본 연구에서는 이 계수(표준오차 계수)가 Table 5와 같이 2.71 ~ 2.84의 값으로 일정한 범위의 값으로 나타났다.

Table 5. Calculation of temperature difference in at each location

Classification	Calculation temperature (T)	Mean temperature	Standard deviation (σ)	Coefficient
2200 (SC24)	43.9	34.4	3.4	2.79
2080 (SC3)	32.5	32.5	-	
1800 (SC12)	29.5	33.2	1.3	-2.84
1600 (SC13)	28.3	34.0	2.1	-2.71

4.4 온도차 산정 및 결과 비교

Euro code에서 상판 아래에서 400mm이상 떨어진 부분의 온도차는 없는 것으로 보고 있으므로, 상판에서 400mm 떨어진 SC13의 값(강박스거더 바닥에서 1600mm)을 기준으로 온도차를 계산하여, Table 6의 2행에 정리하였고, 3행에 Euro code값을 제시하여 상호 비교하였다. Table 6의 최상위 높이(2200mm)에서 Euro code의 온도차는 16.5°C, 시험체의 온도차는 15.6°C로 0.9°의 차이로 5.45%의 오차를 나타냈다.

Table 6. Calculation of Temperature difference in the present model and the Euro code

Height(mm)	Present model (°C)	Euro code(°C)
2200	15.6	16.5
2080	4.3	4.0
1800	1.3	1.7
1600	0.0	0.0

Table 7과 같이 중간 경사부에서는 0.3°C~0.4°C 차이를 보이며 전체적으로 Euro code와 유사한 경향을 보인다. Fig. 8은 Table 5에서 산정된 값을 도표로 정리하여 온도차 모델을 제시하였다. 중간 경사부에서 Euro code와 비교하기 위하여 상판 아래 200mm위치(SC12)에서 T3의 값을 추가로 산정한 결과, Euro code와 유사하게 거의 직선에 가깝게 제시되었다.

Table 7. Comparison of Temperature difference between Euro code and the present model

Height	Temperature difference
Upper part of slab T1	0.9 °C
Middle slope	0.3 ~ 0.4 °C

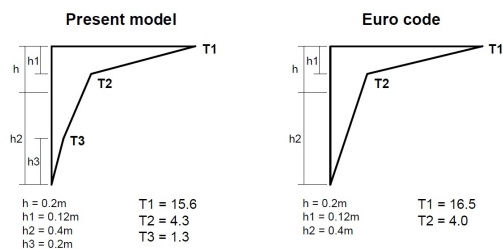


Fig. 8. The models of temperature difference (present model and Euro code)

5. 결론

강박스거더 시험체를 제작하여 여름기간 동안 온도측정 및 분석을 수행하고 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 강박스거더교 모형의 최상단의 온도차가 15.6 °C 이고, 3단계의 온도 경사를 갖는 여름 온도차 모델을 제시하였다.

- (2) 제시된 온도차 모델은 Euro code의 온도분포와 비교할 때 슬래브 최상단에서 0.9°C, 중앙 경사부에서 0.3 ~ 0.4°C의 온도차를 보여 Euro code와 유사한 결과를 보인다는 것을 확인하였다.
- (3) 산정된 온도와 평균온도의 차를 표준오차의 배수로 산정한 계수(표준오차 계수)는 2.71 ~ 2.84배의 값으로 일정한 범위에서 산정되었다.
- (4) 도출된 온도차 모델은 강박스거더교의 상하 온도차에 따른 단면응력 산정을 위한 온도설계기준의 자료로 활용이 기대된다.

본 연구는 경남 양산지역의 측정자료를 기반으로 한 분석으로 이를 고려한 전국적 자료의 구축이 필요하고, 겨울동안의 최저기온에 대한 온도차 기준도 연구가 요망되어진다. 또한 향후 콘크리트 상부의 아스팔트 두께를 고려한 온도차의 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Highway Bridge Design Criteria(in Korea)(Limit state design method), 2015.
- [2] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), pp. 3-99 -3-104, 2007.
- [3] Roeder, C. Proposed Design Method for Thermal Bridge Movements, *Journal of Bridge Engineering*, vol. 8, no. 1, pp. 12-19, 2003. DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0702\(2003\)8:1\(12\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0702(2003)8:1(12))
- [4] British Standards Institution, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, appendix E. BS5400: pp. 20-23, 2004.
- [5] Lee, S. H., Shin, H. K., Kim, K. N., Jung, k. S., An Experimental Study for Estimation of effective temperature for design in Steel Box Girder Bridge, *Journal of korean Society of Steel Construction*, vol. 28, no. 6, pp. 449-458, 2016. DOI: <https://doi.org/10.7781/kjoss.2016.28.6.449>
- [6] Lee, S. H., Evaluation of Maximum Effective Temperature for Estimate Design Thermal Loads in Steel Box Girder Bridges, *Journal of the korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 17, no. 8, pp. 133-138, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.8.133>
- [7] Lee, S. H., Calculation of Maximum Effective Temperature of Steel Box Girder Bridge Using Artificial Neural Network, *Journal of the korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol. 19, no. 3, pp. 96-103, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2018.19.3.96>
- [8] 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>

이 성 행(Seong-Haeng Lee)

[정회원]



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

<관심분야>

강교량, 교량 온도하중, 대형수문 진동실험

박 영 춘(Young-Chun Park)

[정회원]



- 1995년 2월 : 동아대학교 해양공학과 (공학사)
- 2017년 8월 : 부산대학교 토목공학과 (공학석사)
- 1996년 7월 ~ 현재 : 한국철도시설공단 차장

<관심분야>

교량 온도하중, 철도교 내진보강