

계측에 의한 콘크리트 슬래브가 없는 강박스거더의 상하 온도차 연구

이성행*

¹부산대학교 토목공학과

Study of the Temperature Difference between the Top and Bottom Web of Steel Box Girder without Concrete Slab by using Gauge Measurement

Seong- Haeng Lee^{1*}

¹Department of Civil Engineering, Pusan National University

요 약 합리적인 온도 설계기준을 검토하기 위하여 콘크리트 슬래브가 없는 강박스거더 모형 시험체를 제작하고, 박스거더교의 웹과 다이아프램에 높이별로 온도계지를 부착하고 일년 중 최고 기온에서 온도를 측정하였다. 또한 실 교량에서 온도를 측정하고 모형시험체의 온도를 비교, 검증하였다. 콘크리트 슬래브가 없는 교량 시험체 박스거더의 웹과 다이아프램의 높이에 따른 온도차를 분석하고, 온도경사 모델을 제시하였다. 제시된 모델은 Euro Code와 95.8%의 상관관계를 보였으며, 국내 온도설계의 기본 자료로 제공될 수 있다.

Abstract To study the reasonable design thermal loads, a steel box girder bridge specimen, which has no concrete slab, was manufactured with real size dimensions. The temperature data was obtained at the web and diaphragm using thermo gauges that were attached according to height. In the hottest day, the temperature differences between the top and bottom of the bridge model were calculated. The temperatures in the actual bridge were measured and the temperature of the bridge specimen was compared. The temperature gradient models were proposed in both the web and the diaphragm. The proposed models showed a correlation of approximately 95.8% compared to the Euro code. This study can provide basis data for temperature-load design in the nation.

Key Words : Euro code, Steel box girder specimen, Temperature difference, Temperature gradient model, Web and Diaphragm.

1. 서 론

국내 토목구조물에 대한 선진 설계 기법의 개정 필요성이 대두되면서, 신뢰도에 기반을 둔 하중저항계수설계법(LRFD)와 한계상태설계법(LSD)이 도입된다[1]. 기존 도로교 설계기준[2]에서 적용되어온 설계법은, 강교의 허용응력설계법, 콘크리트교에서는 강도설계법이 기준이 되어 왔다. 그러나 온도하중과 같은 환경적 영향을 받는

설계항목은 AASHTO LRFD[3]나 EURO Code[4]의 규정을 시공환경이 전혀 다른 국내에 그대로 적용하는 것은 부적절할 것으로 예상되므로, 국내 실측자료를 기반으로 한 타 설계코드의 검증이 필요한 상황이다. 이를 위하여 실 교량에서 주형의 높이에 따른 각 지점에서 온도분포를 측정하고, 온도하중을 산정하여 국내외 설계규정을 서로 비교, 검토하는 과정이 필요하다. 선진 설계기법들에서 제시하고 있는 온도하중은 4계절 변화에 따른 온

본 논문은 교육과학기술부 2011년도 일반연구자지원사업(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 July 11, 2014

Revised (1st August 7, 2014, 2nd August 26, 2014)

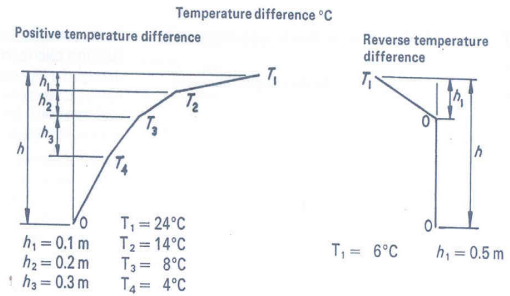
Accepted December 11, 2014

도승강과 밤낮의 일교차 또는 직사여부에 따른 상하연의 온도차를 고려하고 있다[3,4]. 국내의 온도하중을 반영하는 설계기준[2]은 콘크리트교와 강교, 한랭지역과 보통지역 정도로만 나누어져 있어 도입하고자하는 선진 설계법과 같은 체계적이고 세분화된 온도하중에 대한 규정 마련이 시급한 상황이다. 박스거더 교량의 단면내 온도분포는 계절, 일사조건, 풍향 및 풍속 등에 따라서 다르게 되고, 온도분포는 복사열뿐만 아니라 전도, 대류 등에 의해 영향을 받게 됩니다.

본 연구에서는 온도 설계기준의 온도차를 검토하기 위하여 콘크리트 슬래브가 없는 강박스거더 모형시험체를 제작하고 박스거더교의 양측웨브와 다이아프램에 높이별로 온도계지를 부착하고 일년 중 최고 기온에서 온도를 측정하였다. 또한 시공중인 실교량의 다이아프램부에 높이별로 온도 계지지를 설치하여 콘크리트 타설 전에 온도를 측정하였다. 먼저 교량 시험체와 실교량에서 다이아프램부의 온도측정 결과를 비교하여 교량 시험체 측정결과와 신뢰성을 검증하였다. 교량 시험체 박스거더의 양측웨브와 다이아프램의 높이에 따른 온도차를 분석하고, Euro Code에서 제시하는 상하연 온도차와 비교 검토하였다. 이를 통하여 국내 온도설계기준의 온도차 모형을 제시하고, 온도설계의 기본자료를 제공하고자 한다.

2. Euro Code 온도차 설계기준

AASHTO LRFD[3]와는 달리 Euro code[4]에서는 온도하중을 정의하기 위하여 각 그룹별 상하 온도차는 상부구조물의 상면을 통하여 일사와 다른 여타의 효과들로 인하여 열량증가가 발생될 때에 정(+)의 온도차가 발생된다. 반대로 부(-)의 온도차는 복사 및 여타 효과들로 인하여 교량상판의 상면으로부터 열량을 잃는 조건에서 발생된다. 온도차는 표면처리의 두께에 민감하게 된다. Fig. 1은 바닥판의 피복 두께가 40mm인 강박스거더교의 강상판에서 Euro code의 온도차 기율기를 보인다. Table 1은 피복의 두께가 40mm가 아닌 경우 보정 기준을 나타내며, Euro code의 부록에 수록되어 있다.



[Fig. 1] Temperature difference for Group 1, Steel deck on steel box girders with 40mm surfacing (Euro Code)[4]

[Table 1] Values of T for groups 1[4]

Surfacing thickness mm	Positive temperature difference				Reverse temperature difference
	T_1 °C	T_2 °C	T_3 °C	T_4 °C	T_1 °C
Unsurfaced	30	16	6	3	8
20	27	15	9	5	6
40	24	14	8	4	6

3. 온도 측정

3.1 교량 시험체

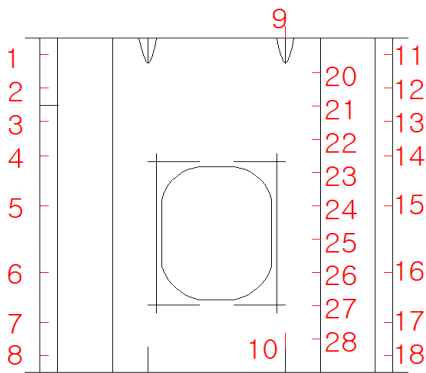
온도 측정은 온도에 의해 가장 민감하게 반응할 것으로 판단되는 콘크리트 슬래브가 없는 강상판에 대하여 측정하여야 하나, 이와 유사한 온도분포가 예상되는 강박스거더에 콘크리트 상부슬래브가 없는 Fig. 2와 같은 교량 시험체를 제작하였다. 교량 시험체의 크기는 폭 2.0m × 높이 2.01m의 박스형이고 길이는 3m로 구성되며, 다이아프램은 1.5m간격으로 3개소, 현장설치는 바닥면으로부터 200mm의 공간을 확보하였다. 측정위치는 Fig. 3과 같이 상, 하부플랜지는 각각 1개씩, 웨브부분은 하부플랜지를 기준으로 좌, 우측으로 100mm, 300mm, 600mm, 1000mm, 1300mm, 1500mm, 1700mm, 1900mm의 높이에 각 1개씩 총 16개소에 설치하였다. 또한 중앙 다이아프램부에 200mm간격으로 높이에 따라 9개소에 온도 계지지를 부착하였다.

측정 장비는 Data Logger(TDS-303) 1set, Switching Box (IHW-50H) 1set를 사용하였고, 18개소에 Thermo-couple을 부착하여 온도를 측정하였다. Data

Logger의 Time interval 기능을 사용하여 30분 단위로 온도를 측정하였다.



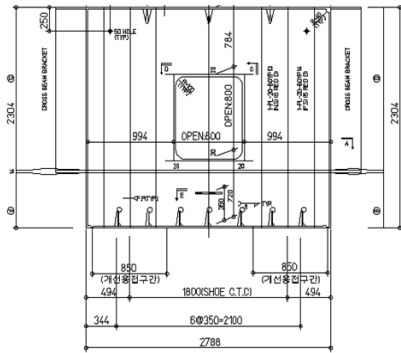
[Fig. 2] Side photo of steel box girder model



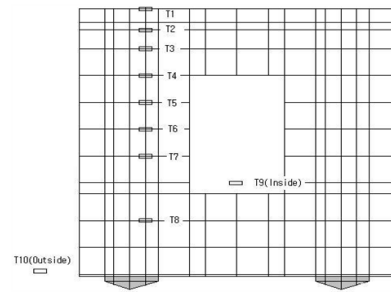
[Fig. 3] Plan of thermo-gauge locating

3.2 측정교량

측정 교량은 4경간 연속교로서, 상부구조는 강상자형 식이며 총연장 190m(45 + 2@50 + 45)의 교량이다. 교폭은 22.5m, 종단구배 5.75%이며 교량의 다이아프램의 구조 상세는 Fig. 4(a)와 같다. 현장 측정의 여건상 측정 가능한 두 번째 경간 중앙부를 대상으로 하였다. 온도계 위치는 Fig. 4 (b)와 같이 다이아프램의 높이별로 온도계 위치 7개(T2~T8)를 부착하였고, T1은 상부플랜지에 부착하였다. T2~T8의 위치는 다이아프램 하단으로부터 높이가 2050mm, 1800mm, 1550mm, 1300mm, 1050mm, 800mm, 400mm에 각각 위치한다.



(a)



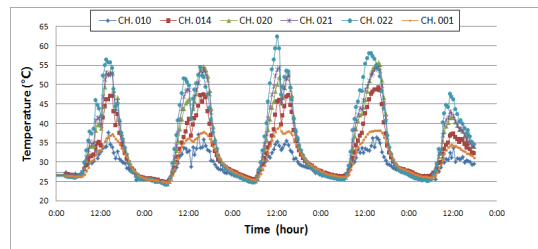
(b)

[Fig. 4] Section plan and thermo-gauge locating in the diaphragm of target bridge (a) Section Plan of the diaphragm (b) Plan of thermo-gauge locating

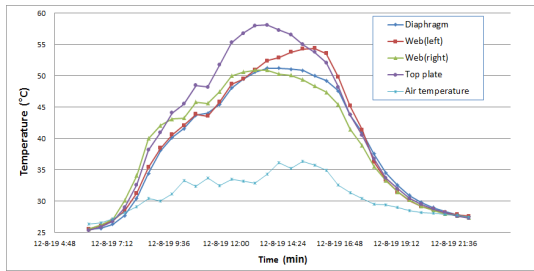
4. 측정 결과 및 분석

4.1 교량 시험체 온도측정

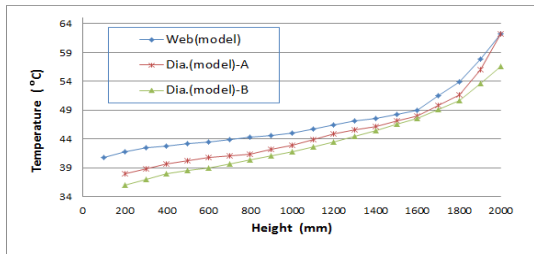
측정 기간 중 높은 온도를 기록한 8월 15일부터 8월 20일까지 일별 온도 분포를 시간에 따라 Fig. 5에 도표화 하였다. 기온의 일변화에 따라서 각부재의 온도가 측정되었으며, 8월 18일에 상판에서 62.3도의 최고온도가 측정되었다.



[Fig. 5] Temperature variation at the girder model



[Fig. 6] Temperature variation at measured points



[Fig. 7] Temperature according to the height at the web and diaphragm of girder model

Fig. 6은 기온에 따른 상판, 상판에서 100mm 떨어져 있는 좌, 우측 복부판(하부플랜지로부터 1900mm 높이) 그리고 다이아프램부에서 온도를 동시에 보인다. 시험체 모형은 오전에 우측부, 오후에는 좌측에 각각 직사를 받게 설치되어 있으며, 이러한 이유로 오전에는 햇볕을 받는 우측부가 먼저 온도가 높아지고, 오후 1시 이후에는 햇볕을 받게 되는 좌측부가 높게 온도가 올라감이 확인되었다. 또한 좌측 최고온도는 대기온도가 최고에 도달한 일정한 시간 후에 측정됨을 알 수 있었다. 다이아프램부 온도는 오전에는 우측부와 거의 같거나 약간 작게 측정되나 좌측부가 태양을 받게 되면 온도가 증가하여 좌우측 복부판 온도의 중간정도가 되나 비교적 우측 온도에 가깝다.

Fig. 7은 8월 18일에 상판에서 62.3도의 최고온도가 측정될 때, 측정된 우측웹부(Web(model))와 다이아프램(Dia.(model-A))에서의 높이별 온도를 보인다. 이때의 대기 기온은 35.4도이다.

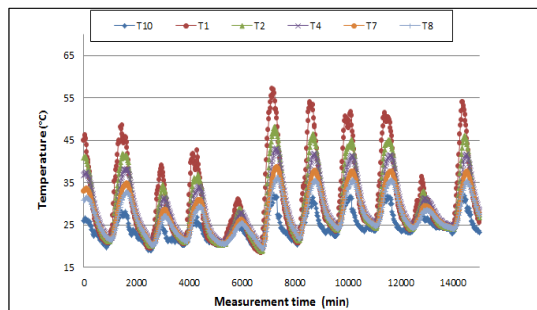
Dia.(model-B)는 대기기온이 32도일 때 측정된 높이별 다이아프램부의 온도를 나타내며, 4.2절의 측정교량에서의 값과 비교하기 위하여 같이 도시하였다. Fig. 7을 살펴보면 Web(model)에서 온도가 더 높게 측정되며 높이가 낮아짐에 따라서 Dia. (model-A)보다 온도 차가 커진

다. Dia.(model-B)에서는 거의 비례적으로 Dia.(model-A)보다 온도가 하락하며, 특히 상판을 포함하는 최상부에서 온도 경사가 작아짐을 볼 수 있다. 게이지 부착 위치가 다르기 때문에 하단에서 측정 구간이 다르다.

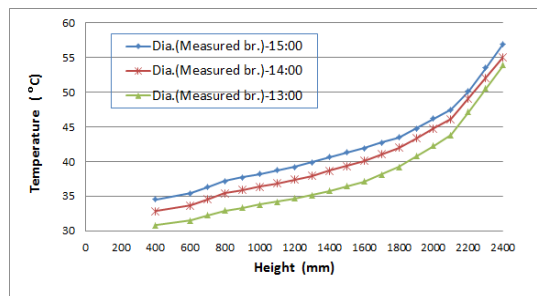
4.2 실교량의 온도측정

Fig. 4와 같은 단면을 갖는 실교량에서 강재거치 후 콘크리트 타설 전 다이아프램 부위에서 높이별 온도분포를 Fig. 8에 나타내었다. 교량의 온도 분포는 대기온도 변화에 따라 24시간을 주기로 뚜렷하게 반복되는 현상으로 나타났다. 측정결과에 따르면, 대기온도의 변화범위가 12.7°C(32°C~19.3°C)이며, 같은 기간에서 부재내 온도변화는 상부플랜지(T1)에서 38.5°C(57.2°C~18.7°C)로서, 부재내의 온도가 3배 정도 더 민감하게 반응하게 된다.

Fig. 9는 상부플랜지의 온도가 최고로 측정되었을 때 측정된 다이아프램부의 높이별 온도를 보인다. 오후 1시부터 온도가 증가되어 오후 3시에 최고 온도가 되었으며 다이아프램부의 높이에 따라 온도가 내려감을 볼 수 있었다. 오후 3시의 대기기온은 32°C이었다.



[Fig. 8] Temperature variation at the target bridge



[Fig. 9] Temperature according to the height at the diaphragm of target bridge

4.3 상하온도차 산정

온도 경사모델은 상부 플랜지와 하부플랜지의 온도차를 기준으로 산정된다. 본 교량 시험체의 하부 플랜지 측정값이 100mm 위쪽에 있는 웨브 지점의 온도보다 더 낮게 측정되었다. 이는 온도측정을 위해 제작한 모형실험체의 설치 조건이 지면에서 상부로 약 200mm 밖에 이격시키지 못하여 모형 실험체가 지면으로부터 영향, 복사열 등으로 측정값에 영향을 미친 것으로 평가된다[5]. 따라서 부재의 온도차 기준점을 하단으로부터 첫 번째 측정점인 높이 100mm 웨브지점으로 선정하여 온도차를 계산하였으며, 다이아프램부는 첫 번째 측정점인 높이 200mm 높이를 기준으로 온도차를 산정하였다. 또한 측정된 실교량에서는 첫 번째 측정점이 높이 400mm의 다이아프램부이므로 첫 번째 측정점을 기준으로 상판까지 2000mm 높이에서 온도차를 계산하였다. Euro Code[4]에서는 상하연 온도차에 대하여 강상판위의 피복 40mm를 기준으로 Fig. 1과 같이 규정하고 있다. 그러나 본 연구 실험체는 상판부 피복을 적용하지 않았으므로 Table 1의 규정 값을 적용하여 보정하였다. 위와 같은 조건에서 교량시험체의 웨브와 다이아프램부, 측정 교량의 다이아프램부, Euro Code에서 높이별 온도차를 산정하여 Table 2에 함께 정리하였다.

[Table 2] Temperature difference at the each point

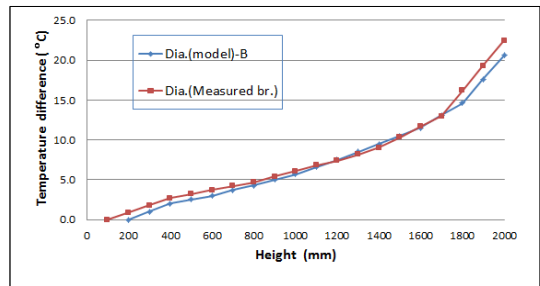
Height	Temperature difference				
	Web (mdl)	Dia. (mdl)-A	Dia. (mdl)-B	Dia. (Measured br.)	Euro Code
2000	21.5	24.3	20.6	22.5	30.0
1900	17.0	18.0	17.6	19.3	16.0
1800	13.1	13.6	14.6	16.2	11.0
1700	10.4	11.8	13.1	13.0	6.0
1600	8.2	10.0	11.5	11.7	5.0
1500	7.5	9.1	10.5	10.3	4.0
1400	6.8	8.2	9.5	9.0	3.0
1300	6.3	7.6	8.5	8.2	2.8
1200	5.6	6.9	7.5	7.4	2.6
1100	4.9	5.9	6.6	6.8	2.4
1000	4.2	4.9	5.7	6.1	2.1
900	3.8	4.2	5.0	5.4	1.9
800	3.5	3.4	4.3	4.7	1.7
700	3.1	3.1	3.7	4.2	1.5
600	2.7	2.8	3.0	3.7	1.3
500	2.4	2.3	2.5	3.2	1.1
400	2.0	1.7	2.0	2.7	0.9
300	1.7	0.9	1.0	1.8	0.6
200	0.9	0.0	0.0	0.9	0.4
100	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

여기서 Web(model), Dia.(model)-A는 대기온도가 35.4도, 상판온도가 최고인 62.3도 일 때 교량 시험체의 웨브와 다이아프램에서 측정된 값이며, Dia.(model)-B는 같은 시험체에서 대기온이 32도일 때 측정된 값이다. Dia.(Measured br.)는 실교량의 다이아프램부에서 측정값을 각각 나타냈다.

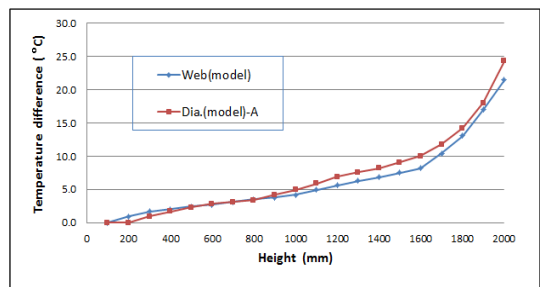
4.4 상하온도차 분석

4.4.1 다이아프램부의 온도차 비교

대기온도 32도의 같은 조건에서 교량시험체와 실교량에서 다이아프램의 온도차를 비교하여 Fig. 10에 보였다. 온도 구배는 1700mm이상 최상단부에서 실측 교량의 경사가 약간 크게 분석되나 거의 유사하였다. 또한 교량 시험체의 측정 온도와 실측 교량의 측정값을 선형 회귀 분석한 결과 상관계수가 0.99로, 측정모형은 신뢰성이 있는 것으로 평가된다.



[Fig. 10] Temperature difference according to the height at the diaphragm



[Fig. 11] Temperature difference according to the height at the testing bridge model

4.4.2 교량 시험체 온도차 비교

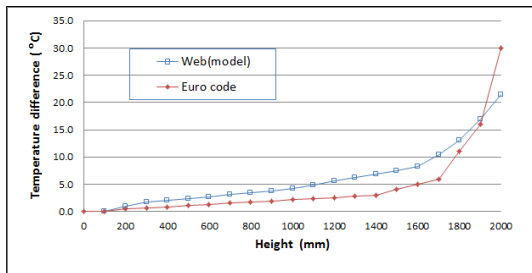
시험체 교량의 웨브와 다이아프램부의 온도차를 비교한다. Fig. 7과 같이 웨브에서의 온도가 다이아프램부보

다는 약간 높으나, 다이아프램부 최하단부의 온도가 웨브의 같은 위치보다 더 낮기 때문에, Fig. 11에서 온도차는 상대적으로 웨브에서 더 작게 나타나고 다이아프램부보다 더 아래쪽에 놓이게 된다. 상판을 포함하는 최상부에서 웨브와 다이아프램부의 온도 구배는 거의 유사하게 평가되었다.

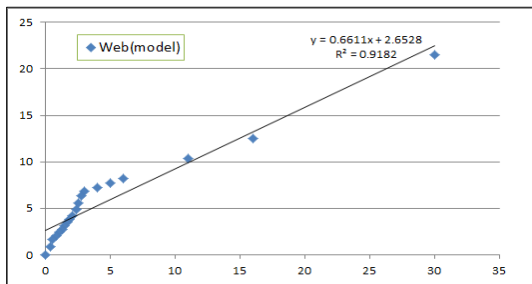
4.5 상하온도차 모형

4.5.1 시험체 교량의 온도차 모형

웨브에서 구한 시험체 교량의 온도차 모형을 Euro Code와 같이 Fig. 12에 도시하여, Euro Code[4]에서 제시하고 있는 온도구배와 직접 비교하였다. 1700mm 이상 상판을 포함하는 최상부에서 웨브의 온도 구배는 Euro code에 비하여 완만한 경사를 가지며 그 이후에는 시험체 교량의 온도 경사가 약간 더 큰 값을 나타낸다. 일년 중 최고 기온에서의 자료만 사용하였고, 확률적 분석이 도입 되지 않아 최상부에서 Euro code와 온도 경사 차이가 있는 것으로 판단된다. Euro code와의 상관관계를 선형 최소제곱회귀분석을 수행하여 분석하면 Fig. 13과 같이 상관계수 R이 0.958 ($R^2=0.9182$)로 계산되어, 신뢰성이 있는 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 강상관계의 온도하중 모형을 Fig. 14와 같이 제시되었다.



[Fig. 12] Temperature difference of the testing bridge model and the Euro code

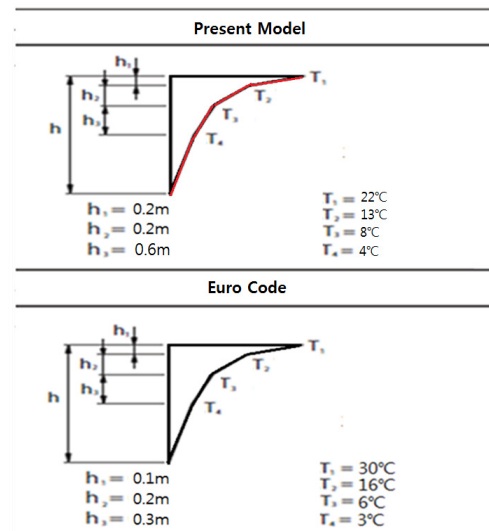


[Fig. 13] Correlation graph of the testing bridge model and the Euro code

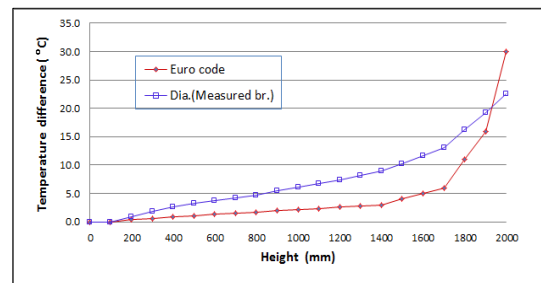
4.5.2 실측 교량의 온도차 모형

Fig. 15에서 실측 교량의 온도차를 Euro Code와 비교하였다. 비록 다이아프램부에서 측정되었지만 상관부는 웨브와 같기 때문에 어느 정도 비교는 가능할 것으로 판단된다. 1700mm 이상 상판과 연결된 부분에서 Euro Code의 온도 경사는 다이아프램부의 온도 경사에 비하여 훨씬 크며, 이후 완만한 경사를 보임을 확인할 수 있었다.

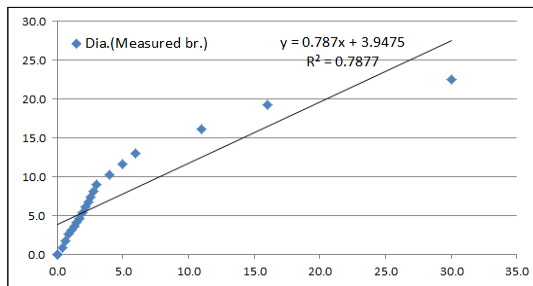
Euro code와의 상관관계를 선형 최소제곱회귀분석을 수행하여 분석하면 Fig. 16과 같이 상관계수 R이 0.888 ($R^2=0.7877$)로 계산되어, 약간의 편차는 있으나 근접한 온도차 경사를 보이는 것으로 판단되었다.



[Fig. 14] The models of temperature difference



[Fig. 15] Temperature difference of the measured bridge and the Euro code



[Fig. 16] Correlation graph of the measured bridge and the Euro code

5. 결론

본 연구에서는 온도 설계기준의 온도차를 검토하기 위하여 콘크리트 슬래브가 없는 강박스거더 모형시험체와 실험교량에서 주형 높이별로 최고 기온에서 온도를 측정하였다. 이를 통하여 박스거더교의 웨브와 다이아프램의 높이에 따른 온도차를 분석하여 Euro Code의 온도차와 비교 분석하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모형 제작한 교량을 실측한 온도 데이터를 분석하여 콘크리트 슬래브가 없는 강박스거더의 상·하연 온도차의 온도 경사 모델을 제시하였다. 1700mm 이상 상판을 포함하는 최상부에서 웨브의 온도 구배는 Euro code에 비하여 훨씬 완만한 경사를 가지며 그 이후에는 웨브의 온도 경사가 약간 더 큰 값을 나타냈다.
2. 상하연 온도구배에 대하여 강상관교와 같은 Euro Code의 Group 1에 대한 (+)온도 구배를 비교 검토한 바, 시험체 모형 최고 온도차에서 상관계수 R이 0.958의 유사함을 보였다. 실측 교량의 온도차 모형에서는 상관계수 R이 0.888로 계산되어, 약간의 편차는 있으나 비교적 근접한 온도경사를 보였다.
3. 교량 시험체와 실험교량에서 다이아프램부의 온도차를 비교한 결과 상관관계 0.99의 유사한 온도 경사를 보여 교량 시험체 모형은 신뢰성이 있는 것으로 평가되었다.

본 연구의 강상자형거더 실험체 모형에서 제안한 온도경사가 국내 교량 설계시 기본 자료로 활용 가능할 것으로 판단된다. 또한 신뢰성 있는 교량의 온도경사를 산정하기 위해서는 좀 더 긴 기간의 온도측정데이터 획득

하여, 확률 통계를 이용한 온도 경사 모델을 수립하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Highway Bridge Design Criteria(in Korea), 2010.
- [2] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Highway Bridge Design Criteria(in Korea)(Limit state design method), 2012.
- [3] AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), pp.3-99 ~ 3-104, 2007.
- [4] British Standards Institution, Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, appendix E. BS5400: Part2:1978, pp.20-23, 2004.
- [5] S. H. Lee, J. W. Cheung, K. N. Kim, H. G.Hahm, K. S. Jung, "Characteristics on the Temperature Distribution in Steel Girder Bridge by using Gauge Measurement", Journal of e korean Society of steel Construction, Vol, 23, No. 3, pp. 285-286, 2011.
- [6] D. W. Shin, K. N. Kim, S. H. Lee, "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. 6, pp. 077-087. 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.11112/jksmi.2013.17.6.077>

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>

장구조, 강교량 온도연구, 수문 진동