콘크리트 슬래브가 없는 강재주형에서 상하연 온도차에 대한 실험연구

An Experimental Study on the Temperature Difference between the Top and Bottom Flange in Steel Girder without Concrete Slab

신 동 욱¹⁾ 김 경 남²⁾ 정 경 섭³⁾ 이 성 행^{4)*}
Dong-Wook Shin Kyoung-Nam Kim Kyoung-Sup Jung Seong-Haeng Lee

Abstract

In order to study the reasonable design thermal loads, the steel box girder bridge specimen which have no concrete slab was manufactured with the real size dimension. The temperature data were measured for 5 month at the 18 thermo gauges which were attached according to height. The temperature differences between the top and bottom flange in steel box girder specimen were calculated and the temperature gradient models were proposed by the probabilistic method. This proposed model showed a correlation of approximately 97% when compared with the similar model of Euro Code. Thus, the temperature gradient models which were suggested in this study may be used as the basis data in calculating the design load temperature.

Keywords : Temperature difference, Steel deck of steel girder, Temperature measurement, Euro code, Temperature gradient model

1. 서 론

국내 도로교 설계기준이 강교에서는 허용응력설계법, 콘크리트교에서는 강도설계법이 적용되어 왔다. 그러나 선진설계 기법의 개정 필요성에 의하여 신뢰도에 기반을 둔 하중저항 계수설계법 (LRFD)과 한계상태설계법 (LSD, Ministry of Land, 2012) 로의 전환시점에 있다. 외국의 선진 설계 기법을 국내에 적용하기 위해서는 설계법과 구조해석 방법 등은 이론적인 내용이기 때문에 쉽게 사용이 가능하나, 구조재료와 설계하중 등은 국내환경과 서로 상이하기 때문에 외국 설계기준의 것을 그대로 가져올 수는 없다. 교량의 설계에 있어서 온도의 영향은 크게 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째로 온도 승강은 4계절의 영향으로 인하여 여름에 팽창하고 겨울에 수축하는 현상이며, 또 다른 하나는 직사광선을 받는 상판부와 간접 광을 받는 하판부의 온도승강이 달라 변형불일치로 발생하는 휨응력을 고려할 수 있다.

최근 발생하는 이상 기후로 인하여, 교량 단면내의 설계시 고려되지 못한 응력 발생은 중요 사회간접자본인 교량 및 구조물의 여유분 (Redundancy)을 감소시켜 잠재적으로 간접적인 사회적 비용을 증가시킬 수 있는 요인이 된다. 온도하중을 반영하는 설계기준 (Ministry of Land, 2010)은 콘크리트교와 강교, 한랭지역과 보통지역 정도로만 나누어져 있어 도입하고자하는 선진 설계법과 같은 체계적이고 세분화된 온도하중에 대한 규정 마련이 시급한 상황이다.

AASHTO (AASHTO, 2007), Euro Code (British Standards Institution, 2004)와 같이 외국규정에서는 교량가설지역의 대기온도를 통해 교량내의 유효온도를 교량의 형식별로 규정해 놓고 있으며, 특히 설계에 반영할 온도차를 교량 형식별로 규정해 놓고 있다. Fig. 1은 40mm 피복을 갖는 강상판의 온도차 (Group1)를 보인다. 그러나 이러한 규정을 시공환경이 다른 국내에 적용하는 것은 무리가 있으므로, 국내 실측자료를 기반으로 외국 설계 코드와의 비교, 검증이 필요한

1) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 박사과정
2) 정회원, 충북대학교 건설기술연구소 연구원
3) 정회원, 충북대학교 토목공학부 교수
4) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학부 교수, 교신저자

* Corresponding author : lsh77@pusan.ac.kr

• 본 논문에 대한 토의를 2014년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2014년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

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

상황이다.

앞 선 연구에서 바닥판이 없는 교량 모형을 대상으로 설계 온도 하중을 위한 유효온도를 산정하였다 (Shin et al., 2013). 본 연구에서는 신뢰도에 기반을 둔 상하연 온도차에 대한 1차 연구로서 강상판 단면을 대신하여 콘크리트 상판이 없는 강상형교의 교량 실험시편을 제작하고, 지속적인 온도변화를 측정하여 온도차를 검토한다. EURO code (British Standards Institution, 2004)에서 제시하는 온도 하중차를 국내조건에 적용·비교 하고, 국내 상황에 적합한 온도하중 모델 제시를 위한 기초 자료를 마련하고자 한다.

2. 시험체 제작 및 실험

2.1 시험체 제작

온도차를 측정하기 위하여 콘크리트 슬래브가 없는 강상형교 모형을 제작하고 각 지점에서 온도를 측정한다. Fig. 2,

Fig. 2 Side photo of steel box girder model

Fig. 3 Front view of steel box girder model

Fig. 4 Plan view of steel box girder model

Table 1 Measuring equipment

Equipment	Set	Remarks
Data Logger (TDS-303)	1	Tokyo Sokki (Japan)
Switching Box (IHW-50H)	1	
Thermo-coupler	18	

3, 4와 같이 모형의 크기는 폭 2.0m × 높이 2.01m 박스형이고 길이는 3m로 구성된다. 다이어그램은 1.5m간격으로 3개소를 설치하고 종리브는 150mm폭으로, 수직보강재는 중간 다이어그램 1개소 2열 양측배치하고 150mm폭으로 설치한다. 2012년 8월부터 2012년 12월까지 측정된 데이터를 바탕으로 대기온도에 따른 교량 단면의 온도를 측정하였다.

2.2 측정 장비

측정 장비는 Table 1과 같이 Data logger 1조와 여러 지점의 측정을 위하여 Switching box 1조가 사용되었고, 18개 지점에 Thermo-coupler을 부착, 연결하여 온도를 Interval 기능을 이용하여 지속적으로 측정하였다.

2.3 측정 위치 및 측정방법

측정위치는 중간 다이어그램 인접 웹에 높이별로 Fig. 5

Fig. 5 Plan of thermo-gauge locating

Fig. 6 Inner part of steel box girder model

Fig. 7 Thermo-coupler of steel box girder model

와 같이 8개씩 2개소에 16개의 온도 게이지를 부착하고, 상하부 플랜지에 2개의 온도 게이지를 설치하여 각 지점의 온도를 측정하였다.

측정 위치는 다이어그램 3개소 중 중간 다이어그램에 온도 게이지를 설치하였으며, Fig. 5와 같이 웹부분은 하부플랜지를 기준으로 100mm, 300mm, 600mm, 1000mm, 1300mm, 1500mm, 1700mm, 1900mm의 높이에 8개씩 온도 게이지를

좌우로 각각 부착하였고, 상하부플랜지에 각각 1개씩 부착하였고, 30분 단위로 연속해서 온도를 측정하였다. Fig. 6, 7은 모형 내부의 사진으로 게이지 부착 위치를 알 수 있다.

3. 실험 결과 및 분석

대기온도에 따른 시험체 각 위치의 최고 및 최저 온도 분포를 나타낼 것으로 예상되는 여름부터 그해 겨울까지 온도 데이터를 획득하여, 측정기간 동안 전체 온도측정 결과를 Fig. 8에, 여름철과 겨울철의 최대 및 최소 온도 측정결과를 Fig. 9와 Fig. 10에 도시하였다. Fig. 8에서 9월과 10월 사이에는 실험실 정비관계로 데이터가 빠진 구간이 있으나 분석에는 영향을 주지 않는다. 측정결과 2012년 8월 대기온도 36℃ 일 때 상부플랜지에서 62.3℃의 최고온도가 관측되었고 (Fig. 9), 2012년 12월 대기온도 -8℃ 일때 상부플랜지에서 -11℃

Fig. 8 All the measured temperature data

Fig. 9 The maximum temperature measured value

Fig. 10 The minimum temperature measured value

Table 2 Temperature at the each point according to high air temperature (°C)

T* (°C)		36	35	34	33	32	31	30	~	24
Left Web (m)	1.9	54	55	52	53	55	52	57	~	52
	1.7	55	56	51	52	54	51	57	~	52
	1.5	56	57	51	51	53	50	56	~	51
	0.1	49	49	45	45	46	44	48	~	44
Flange (m)	top	55	53	58	57	56	56	55	~	55
	low	37	36	36	34	34	33	33	~	31
Right Web (m)	1.9	49	48	51	50	49	49	49	~	47
	1.7	37	38	34	32	32	31	33	~	27
	1.5	39	38	35	32	32	31	33	~	29
	0.1	38	37	38	37	36	35	35	~	33

T* = Air Temperature

로 최저온도가 관측되었다 (Fig. 10). 온도 분포 양상은 Fig. 8과 같이 시간대별 태양광의 입사량에 따라 온도차가 반복적인 곡선 형태로 변화함을 확인할 수 있으며, 이는 태양광에 따른 구조물이 받는 입사량이 강상판에 직접적으로 전달되어 나타나는 열전달의 효과라 할 수 있다.

대기온도가 변화함에 따라서 부재의 높이별 각 지점에서 온도를 측정하였으며, 하부 플랜지로부터 각각 100mm, 1500mm, 1700mm, 1900mm의 높이의 웹 및 하부 및 상부플랜지에서 측정된 온도 데이터 값을 샘플로 Table 2, 3에 정리하였다. 이 때 분석방법은 최고 및 최저 온도가 측정된 각각의 일주일 데이터를 이용하여 극치해석 (Extreme value analysis) 방법으로 온도데이터를 분석하였다 (Im, 1999).

Table 3 Temperature at the each point according to low air temperature (°C)

T* (°C)		-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
Left Web (m)	1.9	-10	-10	-10	-7	-7	-5	-4	-4	-3
	1.7	-9	-9	-9	-7	-7	-5	-4	-3	-2
	1.5	-9	-9	-8	-6	-7	-5	-4	-3	-2
	0.1	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	-1
Flange (m)	top	-11	-11	-10	-8	-8	-7	-5	-5	-4
	low	-10	-10	-10	-8	-8	-6	-5	-1	0
Right Web (m)	1.9	-10	-10	-10	-8	-6	-6	-4	-4	-3
	1.7	-7	-6	-7	-3	-8	-3	-6	0	2
	1.5	-7	-7	-7	-4	-8	-4	-6	-1	1
	0.1	-9	-9	-8	-7	-6	-5	-4	-3	-1

T* = Air Temperature

Fig. 11 The central limit theorem

4. 확률에 의한 대푯값 산정

대기온도에 따른 부재 온도는 불규칙적으로 변한다. 따라서 이 불규칙적으로 변화하는 온도를 정량화 시키고, 다수의 많은 측정값으로 참값에 근접하는 온도값을 추론하기 위하여 통계에 의한 확률적 분석이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 측정된 온도값에 대한 평균 및 분산에 의한 중심극한정리 (Central limit theorem)의 개념을 적용하여 불규칙적으로 변화하는 측정 온도값을 정량화된 값으로 산출하였다. 중심극한정리는 Fig. 11과 같이 측정의 수를 늘릴수록 값은 더 참값에 근접한다는 논리이다 (Younggi munhaw publisher, 2000).

본 연구에서는 2012년 08월부터 2012년 12월까지 약 5개월 동안 30분에 1회의 측정으로 총 5,762회의 온도측정 데이터 세트를 기반으로 분석하였다. 이중 신뢰도가 높은 표본을 선정하기 위해 최고차 온도에서는 대기온도 30°C 이상, 11시 30분부터 15시에 측정된 온도값 등의 조건으로 총 94개의 온도측정치를 표본으로 선정하였다. 또한, 최저차 온도에서는 대기온도 -4°C 이하, 05시 30분부터 08시 30분의 온

도값 등의 조건으로 총 69개의 온도측정치를 표본으로 선정하였다. 선정된 표본 온도를 부재의 높이에 따른 각 온도측정 지점에 대하여 평균온도와 표준편차를 산출하고 정규분포 (Normal distribution) 산출식 (1)에 대입하여 정규분포화하였다.

$${}_nC_k P^k Q^{N-k} \approx \frac{1}{\sqrt{2\pi Npq}} e^{-\frac{(k-Np)^2}{2Npq}} \quad (1)$$

여기서, Np : 평균온도, $\sqrt{Npq}$: 표준편차,
 N : 표본의 크기, k : N 개의 표본중 성공수

Fig. 12 Regular distribution of the temperature at the each point in the high temperature

Fig. 13 Regular distribution of the temperature at the each point in the low temperature

Table 4 The mean and standard deviation temperature according to the each point at the high temperature

Location	Np (°C)	$\sqrt{Npq}$ (σ)
Top flange	50.6	4.2
1900mm	46.7	3.8
1700mm	46.4	3.8
1500mm	45.8	3.6
1300mm	44.7	3.9
1000mm	43.3	4.2
600mm	42.2	4.1
300mm	42.0	4.4
100mm	40.5	3.8
Lower flange	37.4	2.1

Table 5 The mean and standard deviation temperature according to the each point at the low temperature

Location	Np (°C)	$\sqrt{Npq}$ (σ)
Top flange	-8.0	1.5
1900mm	-7.7	1.4
1700mm	-7.1	1.4
1500mm	-6.8	1.3
1300mm	-6.6	1.3
1000mm	-6.5	1.3
600mm	-6.3	1.2
300mm	-6.1	1.2
100mm	-5.9	1.1
Lower flange	-6.5	1.4

Fig. 12, 13은 같은 부재높이별 정규분포 곡선을 나타낸다. 이 정규분포는 중심극한정리의 논리에 따라 곡선이 평균온도를 중심으로 좁게 분포될수록 참값에 근접한 값을 추출해낼 수 있다. 따라서 정규분포곡선의 제일 중심 값을 측정 온도값의 참값 즉, 대푯값으로 사용하였다. 이 값을 높은 온도일 때와 낮은 온도일 때로 구분하여 Table 4, 5에 부재의 높이별로 평균온도와 표준편차를 정리하였다.

5. 온도 경사모델

5.1 온도 경사모델 작성

온도 경사모델은 상부 플랜지와 하부플랜지의 온도차를 기준으로 산정된다. 본 시험체의 하부 플랜지 측정값이 100mm 위쪽에 있는 웹 지점의 온도보다 더 낮게 측정된다. 이는 온도측정을 위해 제작한 모형실험체의 설치 조건이 지면에서 상부로 약 200mm 밖에 이격시키지 못하여 모형 실험체

Table 6 Temperature difference at the each point in the high temperature (°C)

Height	Temperature difference		
	Measure	Model	Euro Code
2000	26.15	26.15	30.00
1900	13.84	13.84	16.00
1800	11.79	11.81	11.00
1700	9.74	9.77	6.00
1600	7.74	7.74	5.00
1500	5.74	5.70	4.00
1400	4.88	4.98	3.00
1300	4.01	4.26	2.79
1200	3.33	3.54	2.57
1100	2.73	2.82	2.36
1000	2.05	2.10	2.14
900	1.84	1.87	1.93
800	1.62	1.63	1.71
700	1.39	1.40	1.50
600	1.17	1.17	1.29
500	0.97	0.93	1.07
400	0.71	0.70	0.86
300	0.45	0.47	0.64
200	0.22	0.23	0.43
100	0.00	0.00	0.21
0	0.00	0.00	0.00

Table 7 Temperature difference at the each point in the low temperature (°C)

Height	Temperature difference		
	Measure	Model	Euro Code
2000	-7.39	-7.39	-8.00
1900	-5.42	-6.16	-4.80
1800	-4.40	-4.93	-3.60
1700	-3.38	-3.69	-2.40
1600	-2.56	-2.46	-1.20
1500	-1.74	-1.23	0.00
1400	-1.03	0.00	0.00
1300	-0.32	0.00	0.00
1200	-0.30	0.00	0.00
1100	-0.28	0.00	0.00
1000	-0.27	0.00	0.00
900	-0.23	0.00	0.00
800	-0.20	0.00	0.00
700	-0.18	0.00	0.00
600	-0.16	0.00	0.00
500	-0.11	0.00	0.00
400	-0.06	0.00	0.00
300	-0.02	0.00	0.00
200	-0.01	0.00	0.00
100	0.00	0.00	0.00
0	-1.43	0.00	0.00

가 지면으로부터 영향, 복사열 등으로 측정값의 신뢰성이 낮은 것으로 평가된다 (Lee et al., 2011). 추후 모형교량의 온도 측정에서는 지면으로부터 충분한 이격거리를 확보하는 것이 요망된다. 따라서 부재의 온도차 기준점을 하단으로부터 높이 100mm 웹지점으로 선정하였다. 온도경사 모델로 산정하기 위하여 Table 4와, Table 5에서 각 위치별 대표 평균값 온도와 하단으로부터 100mm 위 지점의 대표 평균값 온도를 기준으로 온도차를 산정하였다.

정규분포에서 97.72% 신뢰도를 갖는 통계적 추론을 구하기 위하여 $Np \pm 2 \sqrt{Npq}$ (σ)를 적용하여 각 높이별 온도차를 Table 6, 7과 같이 정리하였다. 최고차 온도에서 산정시 온도차가 가장 클 것으로 예측되는 첫 번째 구간인 상판과 1900mm 구간에 2σ 를 적용하고, 다음 2개 구간에 σ 를 각각 적용하였다. 최저차 온도 구간에서는 특별히 증가되는 구간이 없는 것으로 판단되어 처음 4구간에 각각 σ 를 적용하였다. Table 6, 7에서 측정된 값은 진한 글자체로 표시하였으며, 해당 높이가 없는 구간은 보간법을 사용하여 높이별로 온도차를 산정한다. 온도 경사모델은 측정된 값을 기본으로 Fig. 14와 같이 온도 경사 기울기를 4구간으로 선정하여 제시하였으며, Table 6, 7

Fig. 14 Temperature difference Model

에서는 선정된 모델값이 소수점 두 번째 값까지 계산된다.

5.2 온도 경사모델과 Euro Code의 비교

본 논문에서 제시한 온도 경사모델의 신뢰성을 확인하기

위해 온도 경사모형을 Euro code와 Table 6, 7에서 비교하였다. Euro code의 Fig. 1에 규정된 값은 강판위의 피복이 40mm를 기준으로 한다. 본 연구 실험체는 상부 피복을 적용하지 않았으므로 이 규정 값을 보정하여야 한다. Euro code (British Standards Institution, 2004)의 부록에 있는 Table 8은 피복의 두께에 따른 보정 값을 나타낸다. 이 보정 값을

Table 8 Values of T for groups 1

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

Fig. 15 The temperature gradient of the measurement and the Euro Code during heating

Fig. 16 The temperature gradient of the measurement and the Euro Code during cooling

적용하여 Table 6, 7의 우측열에 Euro code의 온도차 값을 산정하여 진한 글자체로 표시였고, 해당 높이가 없는 구간은 보간법을 사용하여 온도차를 산정하였다. 이 값을 도표로 정리하면 Fig. 14의 아래 그림과 같다. Fig. 15, 16에서 본 논문에서 제시한 온도 경사모델과 Euro code의 경사모델을 같이 도시하였다. 두 모델은 거의 비슷한 형태를 갖고 있으나, Peak 값에서는 약간의 차이가 발생되고 있다.

제시 모델과 Euro Code와의 상관관계를 비교하기 위하여 Fig. 17, 18과 같이 Euro code의 제시 값을 수평 및 수직축으로 동일한 값으로 선정하여 직선화시키고, 본 연구에서 제시된 모델과 비교하였다. 그 결과 최고온도에 대한 온도경사와, 최저온도에 대한 온도경사는 모두 약97%의 일치함을 보인다. 따라서 본 연구에서 제시된 온도경사 모델은 국내 교량 설계 시 기본 자료로 충분히 활용 가능할 것으로 판단된

Fig. 17 Correlation graph of the present model and the Euro code during heating

Fig. 18 Correlation graph of the present model and the Euro code during cooling

다. 이전 연구 (Shin et al., 2013)에서 제시한 각 지역별 최저 및 최고 온도에 대한 contour map과 실험교량 시험체의 실험 온도데이터에 의해 산정한 슬래브 없는 강주형의 상·하연 온도차를 연계하면 국내 교량 설계시 각 지역의 특성을 고려한 안전하고, 경제적인 설계기준 확립을 위한 기초자료로 사용가능할 것이다.

6. 결 론

본 연구에서는 콘크리트 슬래브가 없는 강재주형에서 대기온도에 의한 상·하연 온도차를 연구하기 위하여 콘크리트 슬래브가 없는 강상자형 거더 시험체를 제작하고 지속적으로 온도를 측정하여 강상형교의 상·하연 온도차에 의한 온도경사를 산정하고, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 모형 제작한 교량을 실측한 온도 데이터를 분석하여 강상형교의 상·하연 온도차의 온도 경사 모델을 제시 하였다.
- (2) 제시 모형을 Euro Code에서 제시한 온도경사와 비교한 결과 최고 온도차 모델에서 약 97%, 최저 온도차 모델에서도 약 97%의 유사함을 보였다. 이는 본 연구의 강상자형거더 실험체 모형에서 제안한 온도경사가 국내 교량 설계 시 기본 자료로 충분히 활용 가능할 것으로 판단된다.
- (3) Euro Code의 온도경사가 제시된 모델의 경사와 매우 유사하므로, Euro Code 온도경사의 국내 적용도 가능하다고 판단된다.

향후 상판의 피복두께에 따른 온도차 연구가 필요하고, 가장 보편적으로 사용되는 콘크리트 슬래브가 있는 강합성형과 콘크리트 슬래브를 갖는 콘크리트교에 대한 모형의 계측

을 실시하여 각 형식을 갖는 교량의 설계기준 확립을 위한 기준자료를 구축할 것이다.

감사의 글

본 연구는 교육과학기술부가 출연한 2011년도 일반연구자 지원사업 (2011-0023229)의 지원으로 이루어졌습니다.

References

1. AASHTO AASHTO LRFD (2007), Bridge Design Specifications (SI Units, 4th Edition), 3-104.
2. British Standards Institution Steel (2004), Concrete and Composite Bridges, Part 2. Specification for loads, appendix E. BS5400: Part2: 1978, 20-23.
3. Im, C. K. (1999), Thermal Effects and Design Thermal Loads on Composite Box Girder Bridges, Ph.D. thesis. Seoul National University.
4. Lee, S. H., Cheung, J. W., Kim, K. N., Hahm H. G., Jung, K. S. (2011), Characteristics on the Temperature Distribution in Steel Girder Bridge by using Gauge Measurement, *Journal of korean Society of steel Construction*, 23(3), 285-286 (in Korean).
5. Ministry of Land (2010), Highway Bridge Design Criteria (in Korean).
6. Ministry of Land (2012), Highway Bridge Design Criteria (Limit state design method) (in Korean).
7. Shin, D. W., Kim, K. N. (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*, 17(3), 077-087 (in Korean).
8. Younggi munhaw publisher (2000), Modern statistics, 127-149 (in Korean).

Received : 05/02/2014

Revised : 05/29/2014

Accepted : 06/02/2014

요 지

합리적인 온도 설계하중을 연구하기 위하여, 실제 크기의 콘크리트 슬래브가 없는 강상형 거더 교량 시험체를 제작하였다. 높이에 따라 부착된 18개의 온도 게이지에서 5개월 동안 온도 데이터를 측정하였다. 강상형 거더 교량 시험체의 상단과 하단 사이의 온도 차가 계산되고, 온도 구배 모형이 확률 방법으로 제안되었다. 본 연구에서 제시된 모형은 유로 코드에 의해 제안된 모델과 비교했을 때 약 97%의 상관관계를 보인다. 따라서, 본 연구의 결과로 제안된 온도 구배 모델은 온도 설계 하중 계산시 기초 자료로 활용될 수 있다.

핵심 용어 : 온도차, 강거더교의 강상판, 온도 측정, 유로코드, 온도 경사모델.