

## 콘크리트 주탑의 온도분포 계측 및 설계규정 제안

황의승\* · 심재수\*\* · 김도영\*\*\*

Hwang, Eui-Seung\*, Shim, Jae-Soo\*\*, Kim, Do-Young\*\*\*

### Measurement and Proposed Design Specification of Temperature Distribution in the Concrete Pylon

#### ABSTRACT

This paper deals with monitoring and analysis of temperature measurement data in concrete pylon of long span cable bridges. During the construction of Geoga Bridge in Busan-Geoje Fixed Link Project, temperature sensors were installed in several sections of hollow box type concrete pylon and temperatures along the depth of the four sides of the section have been recorded along with ambient temperature. Effects of temperature distribution on the pylon are analysed using actual measured data and results are compared with the design guideline. It was found that the temperature load model for concrete girder can be applied to box type concrete pylon. Structural analysis of the pylon due to variation of temperature distribution during the construction is performed using 3D modelling and FE program and the maximum displacements of east-west and north-south side were calculated as 0.056m and 0.121m, respectively.

**Key words :** Temperature distribution, Concrete pylon, Cable bridge, Design guideline

#### 초 록

이 논문에서는 장경간 케이블 교량의 콘크리트 주탑에 대한 온도 측정과 분석을 다루고 있다. 부산거제연결도로의 거가대교의 시공 중에 주탑의 여러 단면에 온도센서가 설치되었으며 주탑 4면의 두께방향의 온도와 주탑 주위의 대기온도가 계측되었다. 1년간의 계측자료를 바탕으로 주탑 단면내의 온도분포가 분석되었으며 이 분석결과를 국내외의 온도분포에 대한 설계기준과 비교하였다. 그 결과 주탑 단면의 평균온도와 단면 내 온도분포는 콘크리트 거더의 평균온도와 수직온도분포의 기준을 적용할 수 있음을 확인하였다. 이러한 온도특성에 대한 주탑의 거동을 3차원 유한요소 모델링을 사용하여 해석하였으며 거가대교 주탑의 경우 온도에 의한 주탑 상부 최대변위는 동서, 남북 방향으로 각각 0.056m, 0.121m 인 것으로 나타났다.

**검색어 :** 온도분포, 콘크리트 주탑, 케이블교량, 설계지침

## 1. 서론

최근 국내외적으로 장대교량의 건설이 증가하고 있다. 국내의 장대교량에 대한 설계기준은 2005년에 제정된 케이블 강교량 설계지침이 있으며 이 지침에 케이블 교량에 적용해야 할 여러 가지 하중에 대한 규정이 포함되어 있다. 교량에 작용하는 하중은 그 작용빈도에 따라 지속적인 하중과 변동적인 하중, 우발적인 하중으로 나눌 수 있다. 지속적인 하중은 교량의 수명기간 동안에 시간에 따른 변동성이

\* 정희원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 (eshwang@khu.ac.kr)

\*\* 정희원 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 교수 (jsshim@khu.ac.kr)

\*\*\* 정희원 · 교신저자 · 경희대학교 사회기반시스템공학과 박사과정 (Corresponding Author · Kyunghee University · ddang0127@khu.ac.kr)

Received December 6, 2012/ revised May 20, 2013/ accepted October 22, 2013

거의 없는 하중으로 대표적으로 고정하중이 있다. 변동적인 하중은 시간에 따라 그 크기가 변하는 하중으로 차량 활하중, 풍하중, 온도하중 등이 있다. 우발적인 하중은 교량의 수명기간 동안 발생할 확률이 매우 작은 하중으로 지진이나 선박충돌하중 등을 포함한다. 이 중에서 본 논문에서는 온도하중을 다루고 있다. 교량의 여러 부재의 온도는 태양복사, 대기온도, 바람에 의해 변하며 이러한 온도변화는 교량부재에 수축과 팽창을 일으켜 응력과 변형을 유발하며 이는 교량 전체의 거동에도 영향을 준다.

교량의 설계기준 또는 지침에서 온도변화의 효과는 평균온도변화와 부재내의 깊이에 따른 온도 경사로 나누어진다. 또한 사장교와 현수교 같은 케이블 교량에서는 부재간의 온도차, 즉 케이블, 거더와 주탑 사이의 온도 차가 고려된다.

기존 진행된 연구는 온도에 따른 신축량, 온도변화에 따른 주탑의 거동 분석(Park et al., 2004)과 주탑의 온도영향 평가(Park et al., 2005)로 콘크리트 주탑인 서해대교의 계측결과를 이용한 사장교의 실제 거동 분석이었다. 또한 소록대교와 삼천포대교의 계측시스템을 활용한 콘크리트 주탑과 교량전체계의 장기거동 분석(Kang et al., 2011)으로 완성계의 경사와 온도와의 관계, 구조거동 평가에 관한 연구가 진행되어 왔다.

본 논문의 목적은 기존의 연구와는 다르게 케이블 교량의 콘크리트 주탑에 대한 온도 관련 규정을 정립하는 데 있다. 이를 위하여 부산 거제 연결도로의 거가대교의 시공 중에 중공형 콘크리트 주탑의 여러 단면에 설치된 온도센서로부터의 계측자료를 수집하고 이를 분석하여 단면평균온도 및 부재 내 온도분포를 구하였으며 이를 설계지침의 규정과 비교하였다. 또한 서해대교의 각 부재에서 공용중 측정된 온도자료를 이용하여 분석한 결과를 바탕으로 온도 특성에 대한 주탑의 거동을 3차원 유한요소 모델링을 사용하여 해석하여 시공 중 주탑의 최대변위를 해석하였다.

## 2. 온도하중 관련 규정

국내의 케이블 강교량 설계 지침(KSCE, 2006)에서는 평균온도의 경우, 보통기후의 지역에서는  $-10^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ , 추운 지역에서는  $-30^{\circ}\text{C} \sim +50^{\circ}\text{C}$ 로 규정되어 있는데 이는 일반교량에 대한 설계기준인 도로교 설계기준(MLTM, 2010)의 강교에 대한 규정과 같다. 콘크리트교에 대해서는 온도승강  $\pm 15^{\circ}\text{C}$ , 최소치수가 700mm 이상이면  $\pm 10^{\circ}\text{C}$ 로 되어있다. 부재간의 온도 차는 사장교에서 바닥판과 케이블, 주탑과 케이블의 온도차는 밝은 색으로 도장된 케이블인 경우  $8^{\circ}\text{C}$ , 어두운 색인 경우  $22^{\circ}\text{C}$ 이다. 현수교에서 행어와 주케이블의 온도 차는  $\pm 10^{\circ}\text{C}$  이고 거더와 주케이블의 온도 차는  $\pm 25^{\circ}\text{C}$ , 행어와 거더의 온도 차는  $\pm 15^{\circ}\text{C}$ 로 규정되어 있다. 반면에 부재내의 온도차는 실제 분포는 Fig. 1(a)와 같지만 이를 단순화하여 Fig.

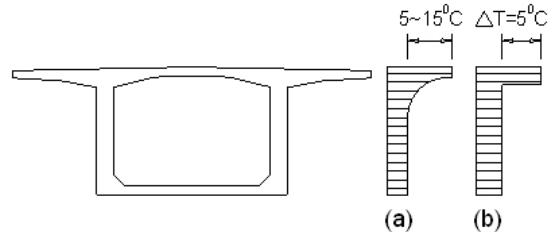


Fig. 1. Distribution of Temperature in Box Girder in Korea Bridge Design Code

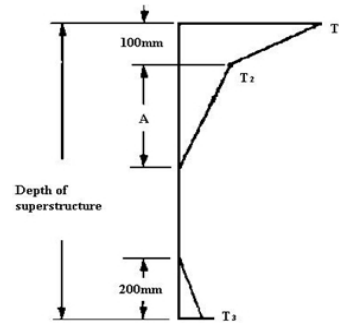


Fig. 2. Positive Vertical Temperature Gradient in Korea Bridge Design Code (LSD) and AASHTO LRFD

1(b)와 같이 규정하고 있다. 그러나 콘크리트 주탑의 온도경사에 대해서는 규정되어 있지 않다. 반면에 2012년에 새로 제정된 도로교 설계기준(한계상태설계법) (MOLIT, 2012)과 AASHTO LRFD 설계기준(2007)에서는 Fig. 2와 같이 실제 온도분포에 가까운 분포로 규정하고 있다. 그러나 이 설계기준들에도 케이블 교량의 콘크리트 주탑에 대한 온도경사 기준은 규정되어 있지 않다.

## 3. 온도 측정 자료 수집 및 분석

거가대교는 두 개의 사장교(Lot 1과 Lot 2)와 접속교로 구성되어 있다. Lot 1은 3주탑 사장교이고, Lot 2는 2주탑 사장교이다. 온도센서는 Lot 1의 주탑 Py. 9과 Lot 2의 주탑 Py. 5에 설치되었으며 각 주탑에는 상부, 중간부, 하부의 각각 3개의 SEG에, 한 SEG에는 양쪽 기둥의 두 단면에, 각 기둥에는 4면에 각각 두께방향으로 3개의 센서가 설치되었다(Fig. 3(a)). 즉 한 SEG에는 24개의 센서가 설치되었으며 각 주탑에는 72개, 총 144개의 센서가 설치되고 계측되었다. 또한 대기온도를 측정하기 위한 센서도 설치되었다. 각 센서의 온도는 10분간격으로 저장되었으며 시공되는 동안 계속되었지만 본 논문에서는 1년(2008년10월~2009년 10월) 동안의 자료만을 수집하였다. 서해대교의 온도센서는 박스형 주탑 단면의 외부에 각 방향별로, 내부에 부착되어있다. 센서의 온도는 매 10분마다 수집하여 1시간의 평균값을 사용하였다. 본 논문에서는 2011년의

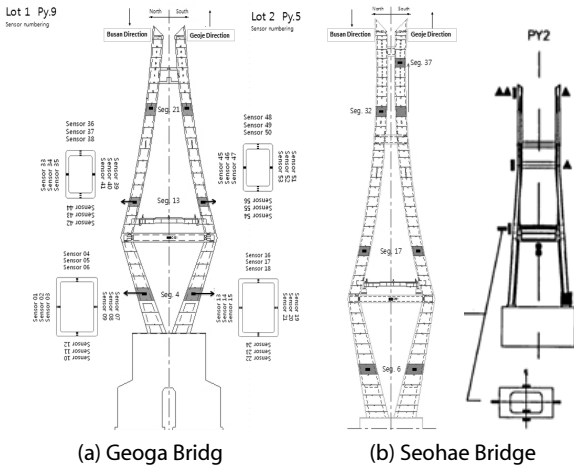


Fig. 3. Location of Temperature Sensors

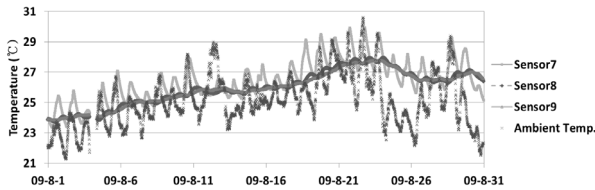


Fig. 4. Typical Measured Temperature at Each Sensor (Geoga Bridge, Lot1, SEG 4, Sensor 7, 8, 9)

자료를 수집하였다. 이 자료를 이용하여 주탑의 평균온도, 주탑 각 방향 벽체의 평균온도를 계산하였고 기존의 설계기준과 비교하였다. 또한 수평방향의 온도경사를 분석하고 비교하였다. 그러나 거가대교의 거더와 케이블의 온도는 측정되지 않았기 때문에 본 논문에서는 주탑의 온도효과만을 연구하였다.

### 3.1 각 센서의 계측온도

Fig. 4에서는 거가대교 Lot 1-SEG 4의 Sensor 7, 8, 9에서 측정된 1개월 동안의 온도를 대기온도와 같이 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전체적으로 콘크리트의 온도는 대기온도와 유사하게 변화하나 특히 콘크리트 외부표면에 가까운 센서의 경우

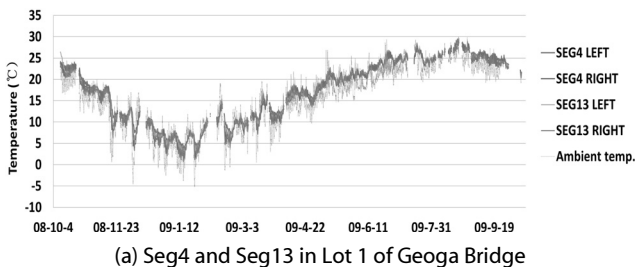
에 태양의 일사량과 풍속에 따라 대기온도보다 더 높게 나타남을 알 수 있다. 반면에 박스 안쪽의 온도는 하루의 온도변화는 거의 없으나 일 평균기온에 따라 변화함을 보여주고 있다.

### 3.2 단면의 평균온도

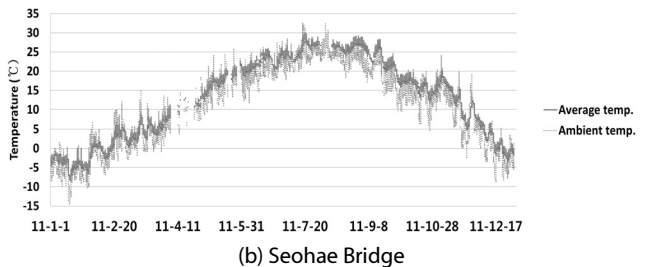
Fig. 5(a)에서 거가대교의 SEG4와 SEG13의 주탑 단면의 평균 온도를, Fig. 5(b)에서는 서해대교의 주탑 단면의 평균온도를 계산하여 대기온도와 함께 나타내었다. Table 1에서는 거가대교의 Lot1, Lot 2와 서해대교의 각 단면의 최대와 최소 평균 온도를 정리하였다. 각 단면 별로 최대 평균 온도와 최소 평균 온도를 나타내는 날은 거의 일치하였으며 각 단면의 평균온도는 각 단면 별로 큰 차이가 없었다. 거가대교에서 단면 평균 온도의 최대 범위는 0.74°C에서 30.73°C로 나타났고 대기온도는 -5.15°C에서 30.5°C로 나타났다. 서해대교에서는 단면 평균 온도의 범위가 -8.7°C에서 30.2°C로 나타났고, 대기온도는 -14.7°C에서 32.6°C로 나타났다. 이는 유로코드(CEN, 2003)에서 콘크리트 단면인 경우 단면 평균 온도를 대기온도보다 최대의 경우 2°C, 최소의 경우 8°C 정도 높게 규정하는 것과 유사한 결과를 보이고 있다. 서해대교는 센서가 외부에 부착되어 있기 때문에 오차가 발생한 것으로 판단된다. 한편 도로교 설계기준에서 규정한 범위는 단면치수를 고려할 때  $\pm 10^\circ\text{C}$ 로 전체 변동범위는 이 값을 초과하는 것으로 나타났다. 이 기준의 가동받침의 이동량 산정시 사용하는 기준은  $-5^\circ\text{C}\sim 35^\circ\text{C}$ 로 도로교설계기준(한계상태설계법)의 규정과 같으며 이 규정과는 비교적 잘 맞는 것으로 판단된다.

### 3.3 벽체의 평균온도

일반적으로 수평으로 놓인 콘크리트 거더의 경우에는 태양의 일사가 거의 상부에만 작용하여 상하부의 온도경사가 주로 발생한다. 반면에 수직으로 가설되는 주탑의 경우에는 주탑면의 방향에 따라 온도경사가 발생하는 방향이 다르게 된다. 이를 분석하기 위하여 본 연구에서는 주탑 단면의 4개의 벽체에 대한 평균온도를 구하였다. Fig. 6은 거가대교 Lot 1과 서해대교에서의 4면의 평균온도와 대기 온도 변화를 나타낸 것이다. 거가대교와 서해대교에서



(a) Seg4 and Seg13 in Lot 1 of Geoga Bridge



(b) Seohae Bridge

Fig. 5. Sectional Average and Ambient Temperature

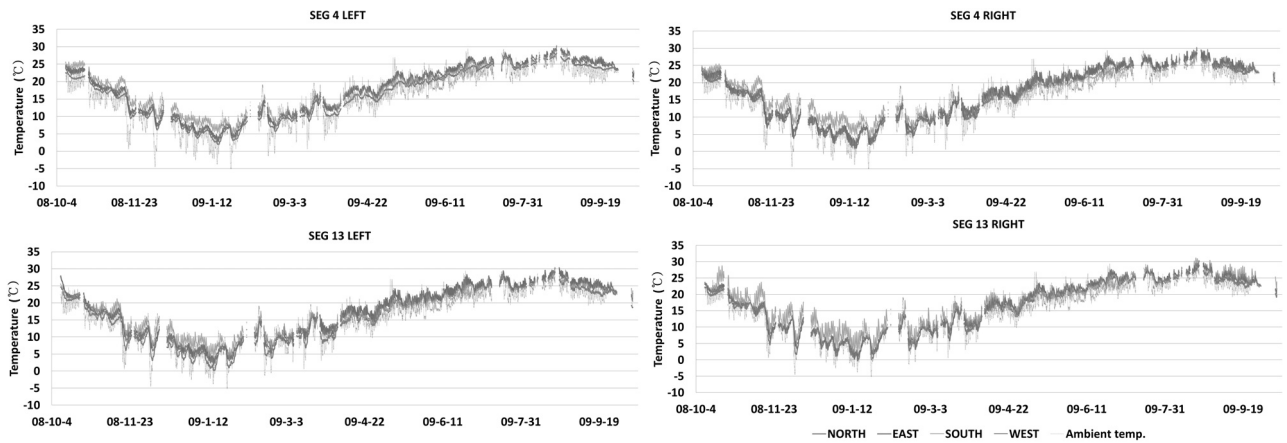
Table 1. Minimum and Maximum of Whole Sectional Average Temperature

(a) Lot 1 and 2 in Geoga Bridge

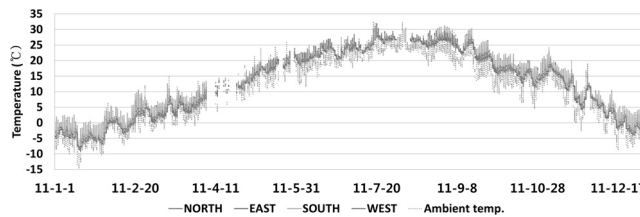
Lot1	SEG4		SEG13		SEG4 (Avg)	SEG13 (Avg)	Ambient temperature
	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT			
MIN	3.37 °C (09-1-15)	2.08 °C (09-1-15)	2.15 °C (09-1-15)	0.74 °C (09-1-15)	2.74 °C (09-1-15)	1.47 °C (09-1-15)	-5.15 °C (09-1-24)
MAX	29.17 °C (09-8-21)	28.95 °C (09-8-21)	29.44 °C (09-8-21)	29.64 °C (09-8-21)	29.02 °C (09-8-21)	29.54 °C (09-8-21)	~ 30.06 °C (09-8-21)
Lot2	SEG6		SEG17		SEG6 (Avg)	SEG17 (Avg)	Ambient temperature
	LEFT	RIGHT	LEFT	RIGHT			
MIN	2.96 °C (09-1-16)	2.52 °C (09-1-15)	1.80 °C (09-1-15)	2.73 °C (09-1-15)	2.8 °C (09-1-16)	2.22 °C (09-1-15)	-4.84 °C (09-1-24)
MAX	27.75 °C (09-8-22)	28.65 °C (09-8-22)	29.42 °C (09-8-22)	30.73 °C (09-8-22)	28.20 °C (09-8-22)	30.07 °C (09-8-22)	~ 30.5 °C (09-8-22)

(b) Seohae Bridge

Average temperature	MIN	-8.74 °C	11-1-17	Ambient temperature	MIN	-14.70 °C	11-1-16
	MAX	30.17 °C	11-7-20		MAX	32.59 °C	11-7-18



(a) Geoga Bridge



(b) Seohae Bridge

Fig. 6. Average and Ambient Temperature in 4 Side Walls

온도의 최대값과 최소값은 Tables 2 and 3에 각각 나타냈다. 거가대 교에서 평균온도의 최대값은 남쪽 벽면에서 나타나고 그 값은 32.15°C이다. 그리고 최소값은 북쪽 벽면에서 -0.3°C이다. 서해대 교는 동쪽에서 31.9°C, 북쪽에서 9.2°C로 각각 최대값과 최소값을

갖는다.

4면의 온도로부터, 평균온도의 차이는 계산되었고 Table 4에 정리하였다. 모든 단면에서 온도 차는 남북방향에서 가장 높고 최대의 온도 차는 약 8°C이다.

Table 2. Maximum and Minimum Temperature of 4 Walls in Geoga Bridge

Lot1		N (°C)	E (°C)	S (°C)	W (°C)	Ambient temperature	
SEG4 LEFT	MIN	1.91 (09-1-16)	2.73 (09-1-16)	4.77 (09-1-25)	3.00 (09-1-15)	-5.15 (09-1-24) ~ 30.06 (09-8-21)	
	MAX	28.2 (09-8-21)	29.37 (09-8-24)	29.28 (09-8-20)	30.31 (09-8-21)		
SEG4 RIGHT	MIN	0.88 (09-1-15)	1.65 (09-1-15)	3.93 (09-1-24)	0.75 (09-1-15)		
	MAX	28.64 (09-8-21)	29.52 (09-8-24)	28.17 (09-8-21)	30.24 (09-8-21)		
SEG13 LEFT	MIN	0.09 (09-1-15)	2.44 (09-1-15)	3.35 (09-1-25)	1.69 (09-1-15)		
	MAX	29.42 (09-7-19)	30.34 (09-8-24)	29.11 (09-8-21)	30.37 (09-8-21)		
SEG13 RIGHT	MIN	-0.30 (09-1-15)	0.74 (09-1-15)	0.28 (09-1-24)	0.16 (09-1-15)		
	MAX	29.01 (09-8-21)	29.42 (09-8-24)	31.19 (09-8-19)	30.34 (09-8-21)		
Lot2		N (°C)	E (°C)	S (°C)	W (°C)		Ambient temperature
SEG6 LEFT	MIN	1.21 (09-1-16)	3.11 (09-1-16)	3.92 (09-1-25)	2.82 (09-1-16)		-4.84 (09-1-24) ~ 30.6 (09-8-22)
	MAX	26.53 (09-8-21)	28.50 (09-8-22)	28.38 (09-8-22)	28.78 (09-8-24)		
SEG6 RIGHT	MIN	1.07 (09-1-16)	2.17 (09-1-15)	4.32 (09-1-25)	1.05 (09-1-15)		
	MAX	27.76 (09-8-21)	30.36 (09-8-22)	28.39 (09-8-21)	29.07 (09-8-23)		
SEG17 LEFT	MIN	-0.55 (09-1-15)	2.51 (09-1-16)	2.07 (09-1-25)	2.07 (09-1-15)		
	MAX	29.02 (09-7-19)	30.33 (09-8-22)	29.47 (09-8-22)	30.50 (09-8-23)		
SEG17 RIGHT	MIN	0.81 (09-1-15)	3.57 (09-1-15)	1.65 (09-1-24)	2.19 (09-1-15)		
	MAX	29.65 (09-8-21)	30.71 (09-8-22)	32.15 (09-8-22)	30.55 (09-8-23)		

Table 3. Maximum and Minimum Temperature of 4 Walls in Seohae Bridge

	N (°C)	E (°C)	S (°C)	W (°C)	Ambient temperature
MIN	-9.17 (11-1-17)	-8.67 (11-1-17)	-8.38 (11-1-17)	-8.94 (11-1-17)	-14.70 (11-1-16)
MAX	30.23 (11-7-20)	31.89 (11-7-20)	31.29 (11-8-31)	30.19 (11-7-21)	32.59 (11-7-18)

Table 4. Lot 1 – Temperature Difference of the Four Directions

			S-N	S-E	S-W	N-E	N-W	E-W
Geoga Bridge	SEG4 LEFT	High on the left	5.68 °C (09-1-3 17)	4.20 °C (09-1-3 18)	3.87 °C (09-1-3 16)	0.11 °C (09-8-14 6)	-	2.14 °C (09-3-1 13)
		High on the right	0.24 °C (09-8-13 14)	1.79 °C (09-6-1 11)	1.63 °C (09-6-6 21)	3.59 °C (09-5-1 13)	3.34 °C (09-4-10 19)	1.77 °C (09-9-9 21)
	SEG4 RIGHT	High on the left	7.40 °C (09-1-3 17)	5.82 °C (09-1-3 17)	6.20 °C (08-12-19 13)	0.90 °C (09-6-5 19)	1.48 °C (09-6-23 12)	4.17 °C (09-2-17 12)
		High on the right	3.01 °C (09-6-25 19)	4.46 °C (09-6-26 11)	4.49 °C (09-6-25 19)	3.82 °C (09-3-26 11)	3.29 °C (09-3-28 18)	2.24 °C (09-9-9 17)
	SEG13 LEFT	High on the left	7.69 °C (09-1-3 17)	5.25 °C (09-1-3 17)	5.56 °C (09-1-3 16)	0.84 °C (09-6-10 19)	1.61 °C (09-7-19 15)	4.22 °C (09-2-17 12)
		High on the right	2.04 °C (09-6-8 17)	3.94 °C (09-6-1 11)	3.17 °C (09-6-16 19)	6.67 °C (09-2-17 12)	4.37 °C (09-3-25 18)	1.97 °C (09-9-9 18)
	SEG13 RIGHT	High on the left	7.96 °C (09-1-15 18)	7.64 °C (09-1-3 18)	7.20 °C (09-1-3 17)	1.53 °C (08-12-11 11)	1.52 °C (09-1-19 0)	2.97 °C (09-2-17 12)
		High on the right	0.75 °C (09-5-16 21)	2.67 °C (09-5-31 10)	2.33 °C (09-5-31 6)	4.54 °C (09-2-17 12)	3.62 °C (08-12-6 17)	2.20 °C (09-9-9 18)
	Seohae Bridge	High on the left	7.34 °C (11-1-13 13)	5.63 °C (11-1-13 12)	6.98 °C (11-1-13 14)	0.82 °C (11-7-28 15)	1.40 °C (11-5-27 18)	4.96 °C (11-11-1 16)
		High on the right	1.29 °C (11-5-27 18)	3.44 °C (11-8-22 18)	2.02 °C (11-5-17 9)	4.96 °C (11-11-1 16)	3.90 °C (11-5-17 10)	3.85 °C (11-5-17 10)

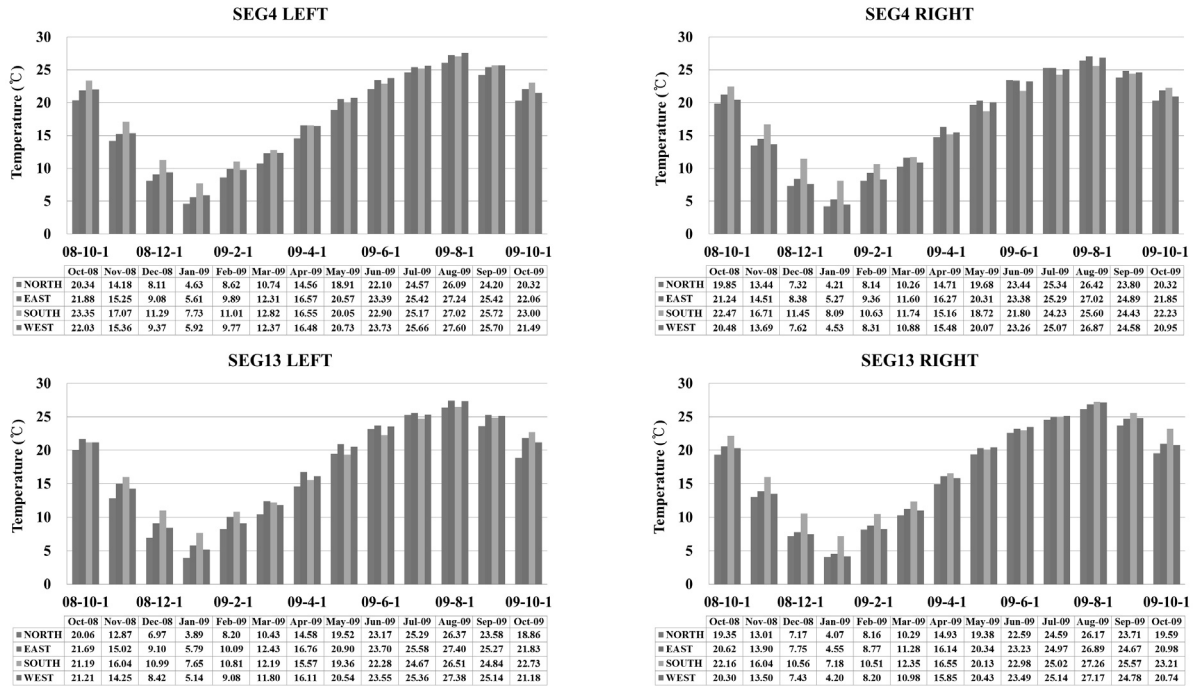


Fig. 7. The Monthly Temperature Difference (Lot 1)

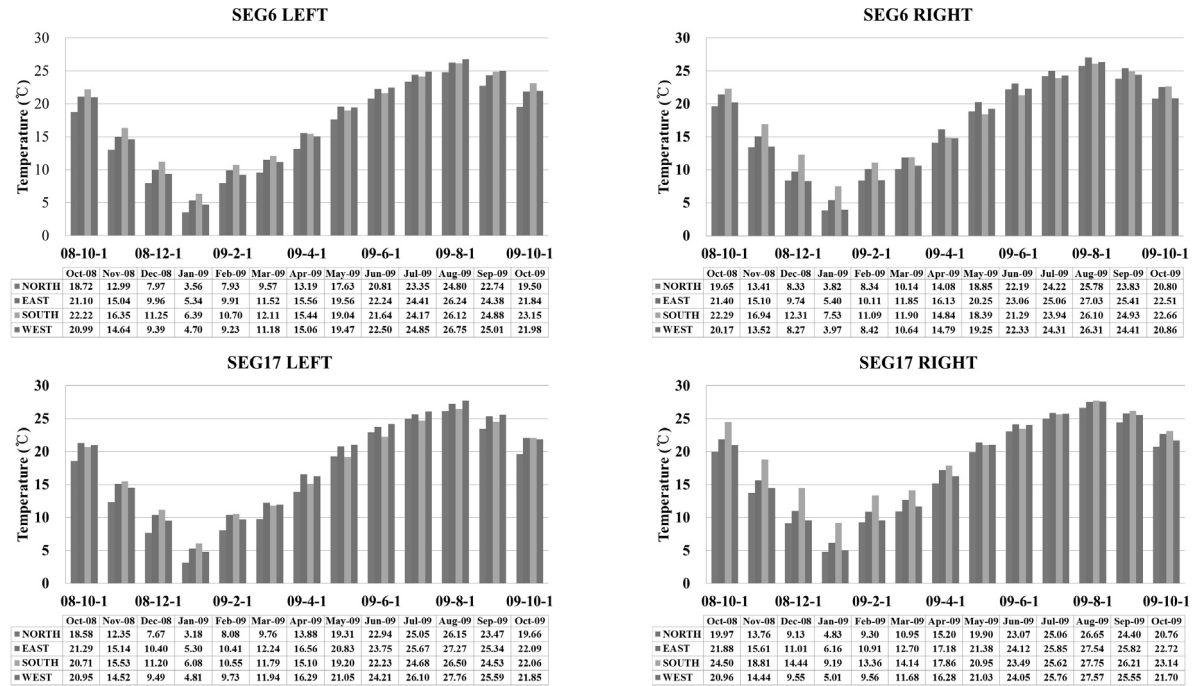


Fig. 8. The Monthly Temperature Difference (Lot 2)

거가대교의 주탑 4면의 평균온도를 월별로 비교하여 Figs. 7 and 8에서 정리하였다. 10월부터 3월에서 평균온도는 일반적으로 남쪽 벽면에서 가장 높고 북쪽 벽면에서 가장 낮다. 4월부터 9월까지

의 온도는 서쪽 또는 동쪽에서 가장 높고 북쪽 또는 남쪽에서 가장 낮게 나타난다. 이것은 태양 복사 및 입사각에 의한 영향으로 판단된다.

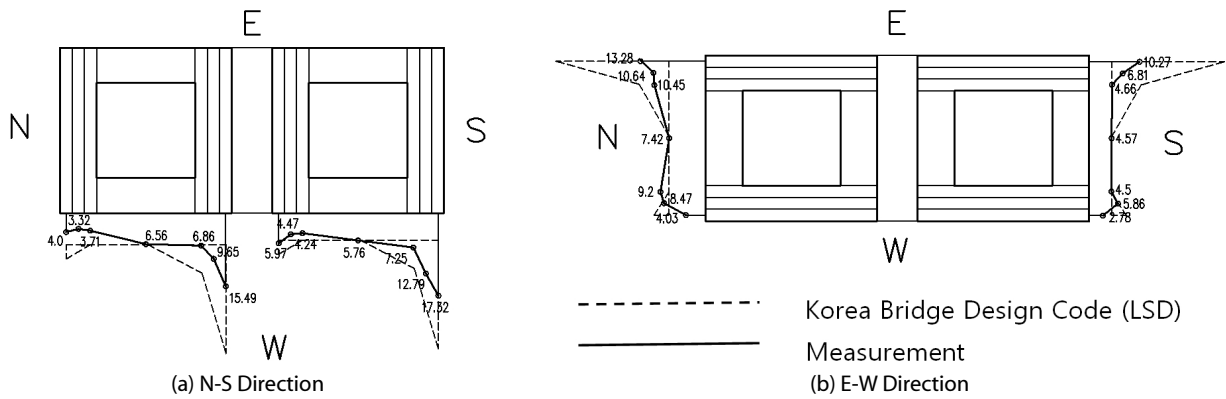


Fig. 9. Temperature Loading with MIDAS

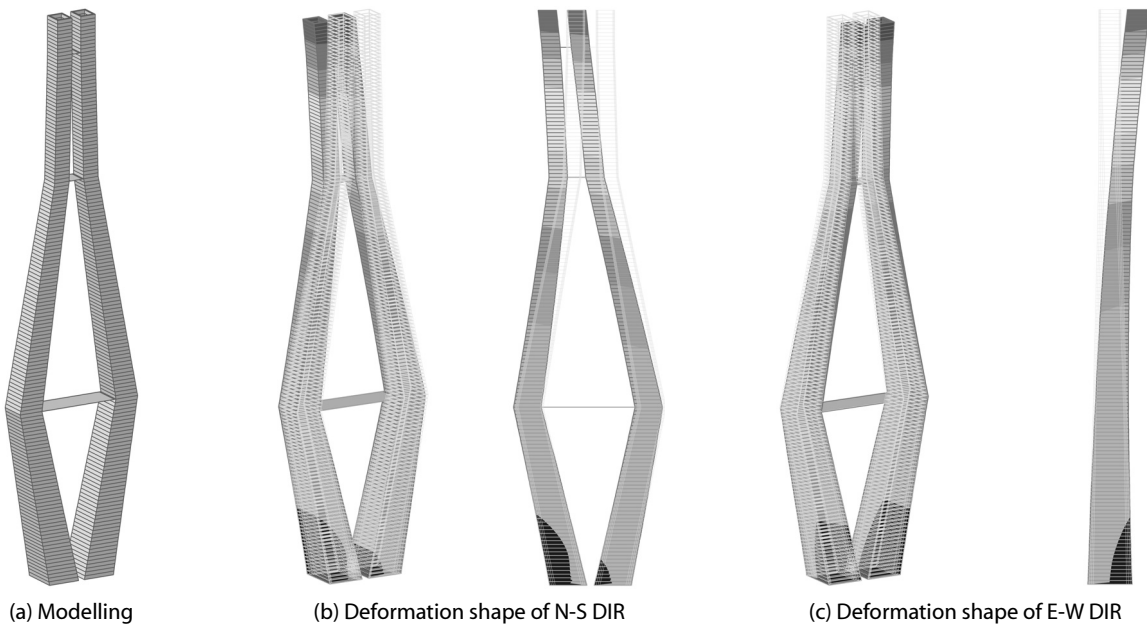


Fig. 10. Modelling and Analysis by MIDAS

### 3.4 주탑 단면의 온도경사

주탑 단면내의 온도 경사를 분석하기 위해 각 방향의 온도기록 중 가장 큰 온도차이를 나타내는 경우를 조사하였다. 거가대교에서 남쪽과 북쪽의 최대 평균온도 차는 Fig. 9(a)와 같고, 2009년 1월 15일 17시53분에 나타났다. 동쪽과 서쪽의 경우는 2009년 2월 17일 11시57분에 Fig. 9(b)와 같이 최대 온도 차가 나타났다. 점선은 도로교 설계기준(한계상태설계법)과 AASHTO LRFD에서 박스 거더에 대해 규정된 기준이다. 전체적으로 유사한 형상을 보이고 있어 주탑 단면의 온도경사를 상부구조 박스 거더의 온도경사규정을 적용해도 무리가 없을 것으로 판단된다. 다만 실제 온도는 설계규정의 값보다 작아 정확한 규정 값을 산정하기 위해서는 추가적인 연구가 필요한 것으로 판단된다.

### 4. 주탑 모델링과 거동 해석

온도변화에 의한 박스형 주탑의 거동을 조사하기 위하여 상용 프로그램을 사용하여 이론적인 해석이 수행되었다.

주탑의 변형은 전체 구조물의 안정성을 결정하고 케이블의 초기 변형을 제어하기 때문에 매우 중요하다. 온도에 의한 주탑의 거동을 분석하기 위해 본 연구에서 측정된 온도분포를 재하 하여야 하며 이를 위하여 3차원 모델링이 필요하다. 대상교량은 본 연구에서 온도자료를 수집한 거가대교로 정하였으며 거가대교의 주탑을 Fig. 10(a)와 같이 3차원 유한 요소로 모델링 하였다. 온도에 의해 발생된 최대 변위를 구하기 위해 매일 각 방향의 기록 중 가장 높은 온도차이를 온도 분포로 사용하였다. 주탑의 각 방향에는 최대 변형을 주는

온도를 재하 하였으며 3.4에서 언급한 Fig. 9의 온도분포를 적용하였다. 설계지침에 따라 초기온도는 20℃로 가정하였다.

Figs. 10(b) and (c)는 각각 남북방향과 동서 방향에서의 주탑의 변형형상을 보여준다. 해석 결과를 보면 남북의 최대 변위는 0.121m 이고 동서방향의 최대변위는 0.056m이다. 설계기준상의 온도(Fig. 9의 점선)를 재하 하였을 때 남북과 동서방향의 최대변위는 각각 0.2m, 0.1m이다. 이 교량의 동서방향이 종축이므로, 종 변위가 횡 변위보다 작다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결론

이 논문은 장경간 교량에서 콘크리트 주탑의 온도측정 데이터의 계측 및 분석을 다루고 있다. 부산과 거제를 연결하는 거가 대교의 시공 중, 중공형 주탑 단면 내부에 4면의 깊이에 따라 온도센서가 설치되었다. 센서에 의해 측정된 데이터를 월별, 단면 별로 분석하여 전체단면의 평균온도, 각 벽체의 평균온도 및 벽체간 차이, 단면내의 남북, 동서간의 온도분포를 구하였으며 이를 설계기준과 비교하였다. 실제 계측 데이터를 이용하여 주탑의 건설에 미치는 온도 분포의 영향을 분석하기 위해 시공 단계에서의 주탑을 3차원 모델링하여 해석하였다.

본 연구의 결과를 정리하면 아래와 같다.

- (1) 1년간의 측정 데이터를 바탕으로 콘크리트 단면의 평균온도는 0.74℃에서 30.73℃로, 도로교 설계기준에서 상부구조에 적용되는 -5℃에서 35℃ 범위와 잘 맞는 것으로 판단된다. 따라서 콘크리트 주탑의 경우에도 일반콘크리트 상부구조의 평균온도의 범위규정을 적용해도 무리가 없을 것으로 판단된다.
- (2) 주탑 단면의 온도경사는 도로교 설계기준의 콘크리트박스 거더에 대한 설계규정과 유사한 형태를 보이고 있어 이 규정을 주탑에도 적용할 수 있을 것으로 판단된다. 다만, 규정된 값과는 다소 차이가 있어 추가적인 연구가 필요하다.
- (3) 각 방향의 평균 온도차가 가장 큰 날의 온도를 MIDAS 프로그램을 이용하여 모델링한 박스형 주탑에 입력하여 각 방향 별 최대 변위를 알아보았다. 남북방향의 최대 변형은 0.121m 이었고, 동서 방향의 최대 변위는 0.056m였다.

본 연구의 결과는 향후 콘크리트 주탑 시공시의 거동 분석과 설계기준 작성에 활용될 수 있다. 그러나 좀더 정밀한 시공 중 및 공용중의 거동분석을 위해서는 장기간 측정 데이터, 통계적 해석 그리고 실제 변형과 온도 측정 시스템을 사용한 온도 사이의 관계에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 연구는 초장대교량 사업단 제1핵심과제를 통하여 지원된 국토해양부 건설기술혁신사업(08기술혁신E01)에 의하여 수행되었습니다. 연구 지원에 감사드립니다.

## References

- American Association of State Highway and Transportation Officials. (2007). *AASHTO LRF D bridge design specifications*, 4th ed., Washington, D.C., USA. pp. 3-99~3-104.
- CEN. (2003). *EN 1991-1-5:2003 (E)*, Section 6. Temperature Changes in Bridges, pp. 19-30.
- Kang, T. S., Lee, D. K., Kim, G. S., Ju, M. K., Ju, H. S. and Lee, S. C. (2011). "A study on long-term behavior of concrete pylon using monitoring data." *Korea Concrete Institute Conference-11*, KCI, Jeju, Korea, pp. 93-94 (in Korean).
- Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs. (2010). *Korea bridge design code*, Temperature changes of Chapter 2. DESIGN, Korea Road & Transportation Association (in Korean).
- Ministry of Land, Infrastructure, and Transport. (2012). *Korea bridge design code (limit state design)*, Temperature changes of Chapter 3. LOAD, Korea Road & Transportation Association (in Korean).
- Korean Society of Civil Engineers (KSCE). (2006). *Design guideline for cable steel bridge*, Korean Society of Civil Engineers, Seoul, Korea (in Korean).
- Park, J. C., Park, C. M. and Song, P. Y. (2004). "Evaluation of structural behaviors using full scale measurements on the seo hae cable-stayed bridge." *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, KSCE, Vol. 24, No. 2A, pp. 249-257 (in Korean).
- Park, J. C., Kim, Y. J., Choi, S. K. and Lee, C. P. (2005). "Evaluation of thermal effect on the concrete pylon of a cable-stayed bridge." *Korea Concrete Institute Conference-5*, KCI, Muju, Korea, pp. 355-358 (in Korean).