

온도와 변위 데이터를 이용한 사장교의 온도신축거동 평가

박종철*

Park, Jong Chil*

Evaluation of Thermal Movements of a Cable-Stayed Bridge Using Temperatures and Displacements Data

ABSTRACT

Because cable-supported bridges have long spans and large members, their movements and geometrical changes by temperatures tend to be bigger than those of small or medium-sized bridges. Therefore, it is important for maintenance engineers to monitor and assess the effect of temperature on the cable-supported bridges. To evaluate how much the superstructure expands or contracts when subjected to changes in temperature is the first step for the maintenance. Thermal movements of a cable-stayed bridge in service are evaluated by using long-term temperatures and displacements data. Displacements data are obtained from extensometers and newly installed GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers on the bridge. Based on the statistical data such as air temperatures, each sensor's temperatures, average temperatures and effective temperatures, correlation analysis between temperatures and displacements has been performed. Average temperatures or effective temperatures are most suitable for the evaluation of thermal movements. From linear regression analysis between effective temperatures and displacements, the variation rate's of displacement to temperature have been calculated. From additional regression analysis between expansion length's and variation rate's of displacement to temperature, the thermal expansion coefficient and neutral point have been estimated. Comparing these parameters with theoretical and analytical results, a practical procedure for evaluating the real thermal behaviors of the cable-supported bridges is proposed.

Key words : Cable-stayed bridge, Structural health monitoring, Thermal movement, Effective temperature, Neutral point

초 록

케이블교량은 교량길이가 길고 규모가 크기 때문에 온도에 의한 이동량과 형상변화는 일반교량보다 훨씬 크다. 따라서 공용 중 온도영향을 분석, 평가하는 것이 중요하며, 온도영향은 온도변화에 따라 교량 상부구조체가 늘어나거나 줄어드는 온도신축거동을 평가하는 것이 가장 기본이다. 이에 공용 중인 사장교에서 장기간 계속된 온도와 이종 변위 데이터를 활용하여 실제적인 온도신축거동을 평가하고자 하였다. 변위 데이터는 기존 신축변위계와 함께 새롭게 도입된 GNSS(Global Navigation Satellite System) 수신기에서 계속된 데이터를 활용하였다. 먼저 외기 온도, 개별온도, 평균온도, 유효온도의 다양한 온도 조합에 대한 신축거동의 상관성을 분석하여 부재의 평균온도나 유효온도를 사용하는 것이 합리적임을 확인하였다. 부재 유효온도와 신축량의 선형회귀분석으로부터 단위온도신축량을 산정하고, 추가적으로 신축길이와 계속 단위온도 신축량의 선형회귀분석으로부터 선폭창계수와 중립점의 위치를 산정할 수 있었다. 이를 이론과 해석 결과와 비교함으로써 케이블교량의 실제 온도신축거동의 건전성을 평가할 수 있는 방안을 제시하였다.

검색어 : 사장교, 구조건강성모니터링, 온도신축, 유효온도, 중립점

* 정회원 · 교신저자 · 한국도로공사 도로교통연구원 책임연구원, 공학박사 (Corresponding Author · KECRI · picseven@ex.co.kr)

Received April 14, 2015/ revised June 21, 2015/ accepted July 2, 2015

1. 서론

2000년대 들어 서해대교, 영종대교, 광안대교와 같은 케이블교량에 구조건강성모니터링시스템(Structural Health Monitoring System)이 본격적으로 적용된 이후, 장기적인 운영을 통해 축적된 데이터를 토대로 다양한 거동 분석이 수행되었다(Park et al., 2004; Kim et al., 2006; Bae et al., 2013). 2000년 서해대교 개통과 더불어 운영된 SHMS는 계측기와 통신설비의 노후화로 인하여 2009년에 재구축사업이 수행되었으며, 지난 9년간의 운영 경험과 축적된 데이터 분석결과를 토대로 계측센서에 대한 선별작업 및 개선방안이 이뤄졌다(Gil et al., 2010). 이를 통해 장기적인 관점에서 효율성이 떨어지는 센서는 줄이거나 제외하였으며, 교량의 전체적인 형상관리가 가능하고 안개나 강우와 같은 측정 방해 요소에 의한 제약이 적은 GNSS(Global Navigation Satellite System)를 새롭게 도입하였다. 또한 케이블교량의 상시 거동 응답에 영향을 미치는 지배적인 작용하중이 온도와 같은 환경요인이기 때문에 보강거더, 케이블, 주탑에 기설치된 14개 온도계 외에 콘크리트 바닥판에 4개의 온도계를 추가 설치하였다.

케이블교량은 교량길이가 길고 규모가 크기 때문에 온도에 의한 이동량과 형상변화는 일반교량보다 훨씬 크다. 따라서 케이블교량은 SHMS를 통해 설계 시에 가정한 다양한 설계변수의 검증과 함께 공용 중 온도영향을 분석, 평가하는 것이 무엇보다 중요하다. 온도영향은 온도변화에 따라 교량 상부구조체가 늘어나거나 줄어드는 온도신축거동을 평가하는 것이 가장 일반적이다. 즉, SHMS를 통해 계측된 총 신축량이 설계 허용범위 또는 관리기준 이내에 있는지의 여부와 온도변화에 의한 신축의 변화량이 적정함을 공학적으로 판단하는 것이다. 온도변화에 의한 신축의 변화량은 두 변수 간의 회귀분석을 통해 단위온도신축량을 산정하고 이를 이론적으로 계산한 값과 비교하는 방법이 많이 활용된다. 이 때 사용되는 온도는 관리주체나 분석자에 따라 외기온도, 개별온도, 평균온도, 유효온도(Effective Temperature) 등 다양하다. 신축량은 대부분의 케이블교량이 주로 보강거더 양단에 설치된 신축변위계를 활용하며, 일부 교량에서는 GPS(Global Positioning System)나 측량기기를 활용하기도 한다.

Naoaki(2003)는 세계 최장경간 현수교인 일본 Akashi Kaikyo Bridge의 보강거더 신축변위계 3개와 외기 온도계 1개를 활용하여 두 변수 간의 회귀식과 단위온도신축량의 3년간 경시변화를 추적하였다. 하지만 측정간의 온도신축은 설계와 유사하지만 주경간의 온도신축은 일부 차이가 발생하였고, 이를 센서 이상으로 추정할 뿐 제한된 계측으로 인해 명확히 설명하지는 못했다. Ni et al.(2007)은 홍콩 Ting Kau Bridge에 설치된 다수의 온도계와 보강거더 양단의 신축변위계 2개를 활용하여 유효온도와 단위온도신축량을

산정하여 건전성을 평가하였다. 또한 온도와 신축량으로부터 선행창계수를 산정하였는데, 그 값은 신축길이가 575m와 602m인 양단에서 각각 $14.1 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$, $11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 로 산정되었다. 이는 설계값인 $12.0 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 와 유사한 결과라고 평가하였지만 선행창계수는 재료에 따라 정해지는 값이고, 온도는 유효온도를 사용하였음을 고려할 때 18% 차이는 큰 것으로 판단된다. 한편 Xu et al.(2010)은 신축변위계 대신 GPS를 활용하여 홍콩 Tsing Ma Bridge의 측정간 1/2지점, 주경간 1/4, 1/2, 3/4지점에서의 단위온도신축량을 산정하였다. 국내 케이블교량의 경우 해외 교량과 유사한 방식으로 온도신축거동을 평가하고 있는 것으로 분석되었다. 즉 온도는 온도계의 개별 또는 평균온도를 사용하고, 신축량은 신축변위계를 사용하고, 건전성평가는 총 신축량과 단위온도신축량을 산정해 평가하고 있다(KISTEC, 2015; Park, 2015). 한편 Bae(2011)는 신축변위계 대신 GPS를 활용하여 영종대교 보강거더 신축량을 분석하였고, Kang(2008)은 평균온도 대신 유효온도를 사용하여 삼천포대교 보강거더의 단위온도신축량을 산정한 바 있다.

이와 같이 기존 연구들은 대부분 온도신축거동 평가에 신축변위계나 GPS처럼 단일 종류의 계측센서를 사용하였다. 하지만 신축변위계는 연속교 거더의 양단에만 설치되고 GPS는 경간 중간이나 탐정부에만 설치되는 경향이 있기 때문에 이들 센서를 개별적으로만 활용한다면 제한된 수량으로 인해 통계적 신뢰성이 떨어질 수 있고 교량 전체길이에 걸친 온도신축거동 특성을 정확하게 평가하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 기존 신축변위계와 함께 새롭게 도입된 GNSS의 이중 센서 데이터를 융합하여 공용중인 사장교의 온도신축거동을 분석, 평가하고자 하였다. 또한 유효온도를 포함한 다양한 온도 조합에 대한 신축거동의 상관성을 분석하여 합리적인 온도 조합을 제시하였다. 온도신축거동 평가방법에 관해서는 다수의 연구가 수행된 바 있으나 본 연구와 같이 이중 센서 데이터를 활용하여 단위온도신축량을 구하고, 추가적인 회귀분석 기법을 적용해 통계적으로 선행창계수와 중립점(Neutral Point)의 위치를 산정하는 연구는 아직 확인된 바 없다.

2. 이론적 배경

2.1 유효온도 산정방법

케이블교량의 온도는 사용 재료에 따라 다르게 나타나며, 동일한 재질이라 하더라도 거더, 바닥판, 주탑, 기초, 앵커리지, 케이블과 같이 부재에 따라 서로 다르게 나타난다. 부재의 단면온도는 유효온도와 온도차(Differential Temperature)로 구분할 수 있다. 유효온도는 단면에 분포된 온도의 평균값으로서 부재의 온도신축을 일으킨다. 반면, 온도차는 단면 상하 또는 좌우의 온도 차이값으로서 구속조건에 따라 부가적인 단면력을 야기하게 된다. 유효온도 T_e 는

다음의 Eq. (1)과 같이 정의된다(Ni et al., 2007).

$$T_c = \frac{1}{A} \iint_A T(x,y) dx dy \quad (1)$$

여기서, A 는 단면적, $T(x,y)$ 는 단면의 2차원 온도분포를 의미한다. 보강거더와 같이 부재 단면에서 온도를 계측하는 경우, 온도계는 동일 단면 내의 여러 위치에 적절히 분포시켜 설치하는 것이 일반적이다. 따라서 한 단면을 여러 개의 부단면(Sub-areas)으로 나누고 각 부단면에서의 온도는 동일하다고 가정하면, 유효온도는 Eq. (2)와 같이 모든 부단면에서 계측된 온도의 가중평균에 의해 구할 수 있다. 여기서 가중은 한 단면의 전체 단면적에 대한 각 부단면의 비를 의미한다.

$$T_c = \sum_{i=1}^k \frac{A_i}{A} \bar{T}_i \quad (2)$$

여기서, A_i 는 i 번째 부단면, A 는 전체 단면적, \bar{T}_i 는 i 번째 부단면에서 계측된 온도, k 는 부단면의 수를 의미한다.

일반적인 사장교에서 발생 가능한 온도효과 메커니즘은 크게 다섯 가지로 케이블 온도(CT), 보강거더 온도(GT), 주탑 온도(TT), 보강거더 온도차(GDT), 주탑 온도차(TDT)를 고려할 수 있다. 이 중 보강거더 온도(GT)가 온도에 의한 보강거더의 길이 변화와 주탑의 거리 변화에 가장 지배적인 요소이며, CT, TT, GDT, TDT의 민감도 영향은 매우 작은 것으로 나타났다(Zhou and Sun, 2014). 따라서 본 연구에서는 온도에 의한 신축거동 변화를 분석, 평가하는데 보강거더 온도만을 대상으로 한다.

2.2 온도신축거동 평가방법

교량 부재의 온도변화에 의한 신축량 ΔL_T 는 다음의 Eq. (3)과 같이 계산된다.

$$\Delta L_T = \alpha \times \Delta T \times L \quad (3)$$

여기서, α 는 재료의 선팽창계수($^{\circ}\text{C}$), ΔT 는 온도변화($^{\circ}\text{C}$), L 는 신축길이(mm)를 의미한다. Eq. (3)에서 α 와 L 는 각각 사용된 재료, 부재 길이와 경계조건에 의해 결정되는 값이므로 신축량과 온도는 직관적으로 선형의 관계에 있음을 알 수 있으며, 다음의 Eq. (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$\Delta L_T / \Delta T = \alpha \times L = S_T \quad (4)$$

여기서, S_T 는 온도변화에 의한 신축의 변화량 즉, 단위온도신축량($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)으로 정의한다. 두 변수가 선형관계이므로 임의의 초기치가 있는 n 개의 계측 신축량과 온도에 대해 두 변수의 관계를 단순선형회귀모형(Simple Linear Regression Model)으로 설정할 수 있으며, 그 수학적 모형은 다음의 Eq. (5)와 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

여기서, y_i 는 i 번째 계측된 종속변수의 값, β_0 와 β_1 은 회귀계수로 모집단에 대한 회귀식의 절편과 기울기, x_i 는 i 번째 계측된 독립변수의 값, ϵ_i 는 i 번째 계측된 오차를 각각 나타낸다. 이 모형에 적합한 선형회귀식은 다음의 Eq. (6)과 같다.

$$y = \beta_0 + \beta_1 x \quad (6)$$

Eq. (6)을 구하기 위해서는 두 변수의 계측값으로부터 회귀계수 β_0 와 β_1 의 값을 추정하여야 한다. 이 때 일반적으로 많이 사용되는 방법이 최소제곱법(Method of Least Squares)이다. 최소제곱법은 오차 ϵ_i 즉, 계측값 y_i 와 이의 기대값 $\beta_0 + \beta_1 x_i$ 간의 차이를 최소화 하는 β_0 와 β_1 의 추정법을 말한다. 그러나 오차들의 합 $\sum \epsilon_i$ 는 항상 0이 되므로 최소제곱법에서는 오차들을 제곱하여 합한 $\sum \epsilon_i^2$ 을 최소화 하는 β_0 와 β_1 을 추정하게 된다. 기울기 β_1 의 최소제곱추정은 다음의 Eqs. (7)-(9)와 같다.

$$\hat{\beta}_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} \quad (7)$$

$$S_{xy} = \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i) / n \quad (8)$$

$$S_{xx} = \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2 / n \quad (9)$$

여기서, \sum 는 $\sum_{i=1}^n$, \bar{x} 은 x_i 의 평균, \bar{y} 은 y_i 의 평균을 의미한다. 한편 절편 β_0 의 최소제곱추정은 다음의 Eq. (10)과 같다.

$$\hat{\beta}_0 = \frac{\sum y_i - \hat{\beta}_1 \sum x_i}{n} = \bar{y} - \hat{\beta}_1 \bar{x} \quad (10)$$

만일 종속변수 y_i 는 계측 신축량(ΔL_{T_i}), 독립변수 x_i 는 계측 온도(ΔT_i)를 Eq. (5)에 대입한 후, 선형회귀분석을 통해 추정된 기울기 $\hat{\beta}_1$ 는 계측 온도변화에 대한 신축의 변화량 즉, 계측 단위온도신축량($\text{mm}/^{\circ}\text{C}$)을 의미하게 된다. 이를 $S_{T,m}$ 으로 정의하기로

한다. 이와 같이 추정된 $S_{T,m}$ 을 Eq. (4)에 α 와 L 을 대입하여 계산한 이론 $S_{T,t}$ 와 비교하면 계측과 이론에 의한 교량의 온도신축 거동을 평가할 수 있다.

한편 Eq. (4)로부터 α 는 다음의 Eq. (11)과 같이 정리할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\Delta L_T}{\Delta T} \frac{1}{L} = \frac{S_T}{L} \quad (11)$$

앞서 설명한 신축량과 온도의 선형관계와 마찬가지로 Eq. (11)에서 단위온도신축량과 신축길이는 직관적으로 선형의 관계에 있음을 알 수 있다. 따라서 이들 두 변수의 관계도 Eq. (5)와 같이 단순선형회귀모형으로 설정할 수 있다. 즉 p 개의 계측 단위온도신축량과 신축길이에 대해 두 변수의 관계식은 다음의 Eq. (12)와 같다.

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 x_i + \epsilon_i, \quad i = 1, 2, \dots, p \quad (12)$$

만일 부재의 한 위치가 아니라 부재의 길이방향에 걸쳐 여러 위치에서 신축량을 계측한 경우, 종속변수 y_i 는 계측 단위온도신축량($S_{T,mi}$), 독립변수 x_i 는 신축길이(L_i)를 Eq. (12)에 대입한 후, 선형회귀분석을 통해 추정된 기울기 $\hat{\beta}_1$ 는 계측 선폭창계수 α_m ($^{\circ}\text{C}$)를 의미하게 된다. 이를 이론적인 α 와 비교하면 교량의 온도신축거동을 평가할 수 있는 또 하나의 방법이 된다. 한편 선형회귀식에서 x 축은 신축길이이므로 y 가 0이 되는 x 절편은 온도신축에 대한 중립점의 위치를 의미한다. 즉, x 절편은 온도변화에 의한 신장과 수축이 일어나는 원점이다. 참고로 중립점 위치는 신축거동에 대해 교량받침과 하부구조의 상대 저항을 고려하여 선정하도록 되어 있다(AASHTO, 2012). 즉, 탄성받침을 사용하는 교량이나

하부구조와의 경계조건이 복잡한 케이블교량의 경우에는 중립점은 받침 설치 위치가 아닌 곳에 위치할 수 있다. 따라서 계측 단위온도신축량과 신축길이에 대한 선형회귀식에서 x 절편을 구하게 된다면 실제 교량의 온도신축이 어디에서부터 시작되는가를 평가할 수 있는 것이다.

3. 대상교량 및 계측 현황

3.1 대상교량

대상교량은 총연장 7.31km인 서해대교 사장교 구간으로 2000년에 준공된 교량이다. 사장교는 5경간 연속(60+200+470+200+60m) 강합성거더 교량이다(Fig. 1). 보강거더는 간격이 34m인 두 개의 강거더(Steel Girder)를 가로보(Floor Beam)가 4.1m 단위로 연결하고 있으며, 이들 강거더와 가로보 위에 프리캐스트 콘크리트 바닥판이 놓여 있다. 주탑은 높이 182m의 H형 콘크리트 주탑이며, 케이블은 멀티 스트랜드(Multi Strands)로 12.3m 간격으로 배치되어 있다. 온도신축에 대한 상부구조의 경계조건으로는 PY2를 고정단으로 하고 있으며, P39, P40, PY1, P41, P42에서는 교축방향으로 가동단이다.

3.2 계측데이터 수집

사장교의 신축량(또는 변위) 계측에 활용되는 센서로는 GNSS 수신기 6개를 포함하여 레이저변위계 1개, 신축변위계 2개, 경사계 6개가 설치되어 있다(Fig. 2). 장기적인 온도신축거동 분석을 위해 온도계, 신축변위계 및 GNSS 데이터의 수집기간은 SHMS 재구축이 완료된 이후인 2010년부터 2013년까지 4년으로 하였으며, 데이터는 매 10분 단위로 통계처리된 값을 사용하였다. 이들 데이터의 계측위치 및 표시기호 등은 Table 1과 같다. GNSS 데이터는 정북(N), 정동(E), 연직(Z)의 세 방향 성분을 포함하고 있으며,

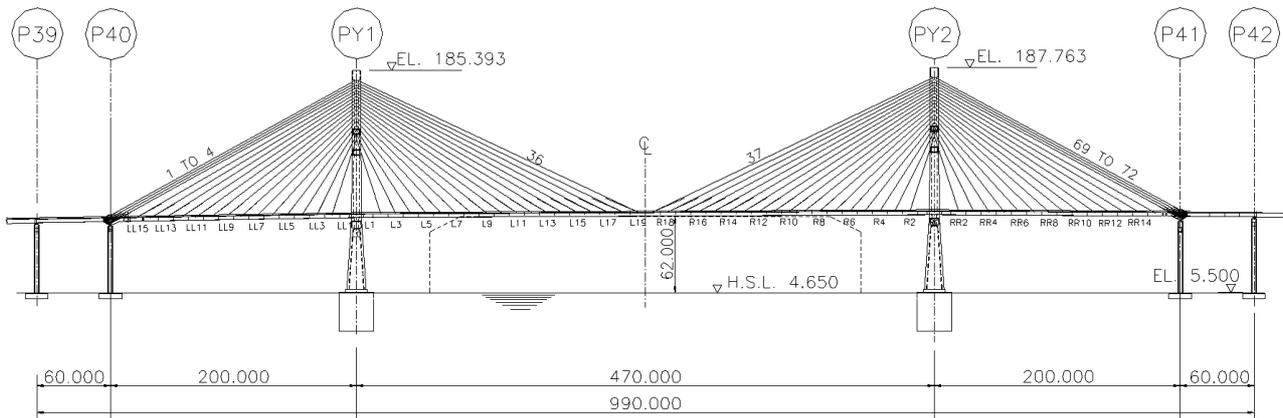


Fig. 1. Elevation Drawing of Seohae Cable-Stayed Bridge

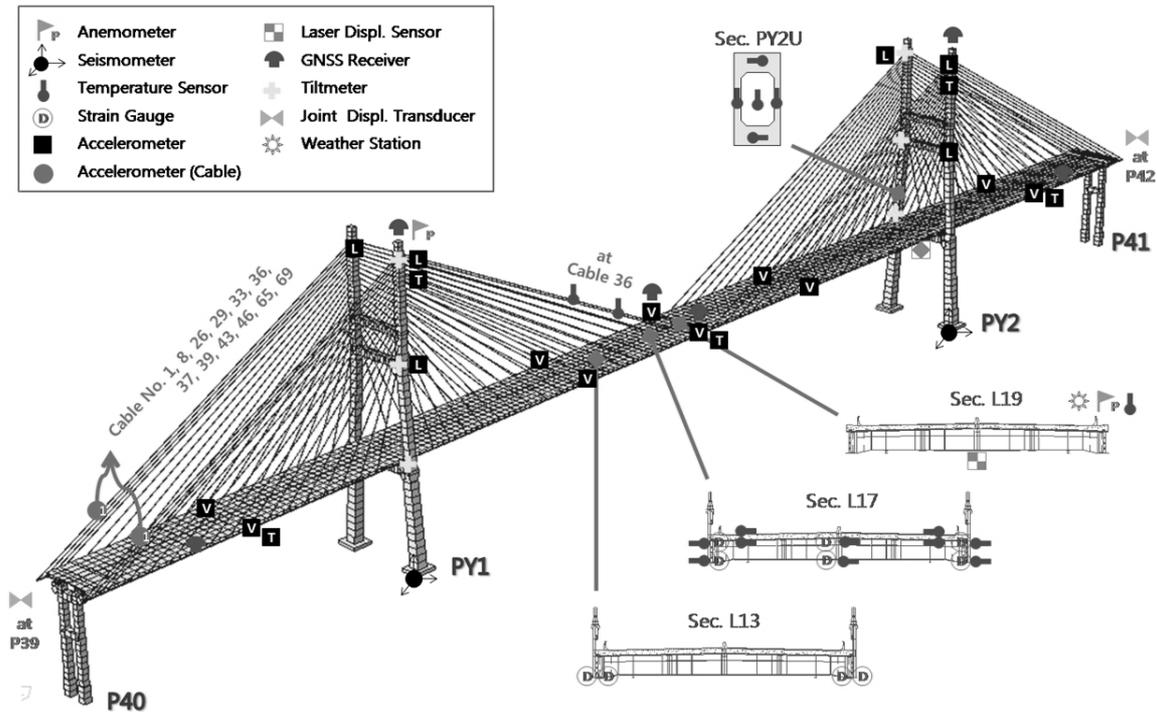


Fig. 2. Sensors Layout

Table 1. Sensors Location and Notation

Sensor Type	Location	Notation	Description
Temperature Sensor	Steel Girder at Section L17	T-L17U-UF T-L17U-LF T-L17F-UF T-L17F-LF T-L17D-UF T-L17D-LF	U : Upstream Direction F : Floor Beam D : Downstream Direction UF : Upper Flange LF : Lower Flange
	Concrete Deck at Section L17	T-L17U-US T-L17U-LS T-L17D-US T-L17D-LS	U : Upstream Direction D : Downstream Direction US : Upper Slab LS : Lower Slab
	Air Temperature	T-L17U-Air	U : Upstream Direction
Joint Displacement Transducer (Extensometer)	End of Girder at P39 End of Girder at P42	EXP-P39 EXP-P42	
GNSS Receiver	North Span (P40~PY1) Top of PY1 East Side of Mid-Span West Side of Mid-Span Top of PY2 South Span (PY1~P41)	NSWE-L NPWE-L MSEA-L MSWE-L SPWE-L SSWE-L	L : Longitudinal Direction T : Transverse Direction Z : Vertical Direction

직교 좌표계를 사용한다. 대상교량의 교축은 정북을 기준으로 시계 방향으로 약 61° 가량 회전하여 있기 때문에 계측된 세 방향 GNSS 데이터로는 교량의 형상변화를 직관적으로 파악하기 어렵다. 따라

서 회전좌표계에 따른 좌표변환식을 사용하여 좌표를 변환하므로써 교량의 교축(L), 교축직각(T), 연직(Z)의 방향 성분을 추출할 수 있으며, 이를 온도신축거동 분석 시 활용하였다.

4. 온도신축거동에 대한 평가

4.1 계측데이터 시간이력

Fig. 3은 2010년부터 2013년까지 강거더에 설치된 6개의 온도 계에서 계측된 10분 평균 온도 데이터에 대해서 이상신호에 대한 일차적인 전처리를 수행한 후의 시간이력을 나타낸 것이다. 마찬가지로 Fig. 4는 콘크리트 바닥판에서 계측된 온도 데이터와 외기온도 데이터의 시간이력을 나타낸 것이다. 부재 온도는 계절변화에 따라 주기적으로 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 보강거더의 양단에 설치된 신축변위계에서 계측된 10분 평균 신축 데이터에 대해서 이상신호에 대한 일차적인 전처리를 수행한 후의 시간이력을 나타낸 것이다. 계측기기 이상으로 인해 일부 결측 데이터가 발생하였으나 계절변화에 따라 신장과 수축이 주기적으로 발생함을 확인할 수 있다. 참고로 신축량은 PY2를 기준으로 P39 방향으로 움직이는 것을 양의 기울기(+), P42방향은 움직이는 것을 음의 기울기(-)로 정의하였다. Fig. 6은 북측경간 하행, 각 주탑 정부, 주경간 상하행,

남측경간 하행에 설치된 GNSS 수신기에서 계측된 교축방향 10분 평균 변위 데이터의 시간이력을 나타낸 것이다. 신축변위계와 마찬가지로 계절변화에 따라 유사한 경향을 보이는 것을 알 수 있다. 즉, 보강거더 양단의 신축과 GNSS 수신기의 교축방향 변위는 온도변화에 따라 선형의 관계를 보이고 있으며, 10분 평균 데이터를 사용하였기 때문에 활하중에 의한 효과나 풍하중에 의한 효과는 충분히 상쇄된 것으로 판단된다.

4.2 온도와 신축의 상관성

케이블교량의 신축거동은 온도와 매우 밀접한 관계를 보이는 것으로 알려져 있다. Table 2는 국내의 대표적인 케이블교량의 온도신축거동을 비교 분석한 것이다. 이론 단위온도신축량 $S_{T,t}$ 는 공개된 교량정보와 Eq. (4)를 적용하여 산정하였으며, 계측 단위온도신축량 $S_{T,m}$ 은 SHMS로부터 추출된 장기 온도 및 신축 데이터에 대해 Eq. (7)를 적용하여 산정된 $\hat{\beta}_1$ 값을 활용하였다. 사용된 온도는 교량에 따라 외기온도(T_{air}), 개별온도(T_{each}), 평균온도(T_{ave}),

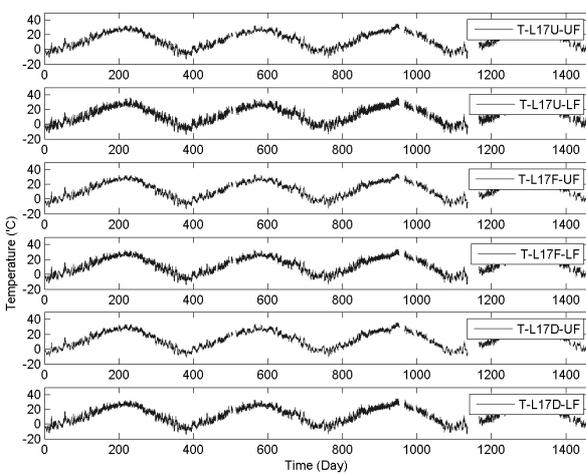


Fig. 3. Temperatures of Steel Girder Section

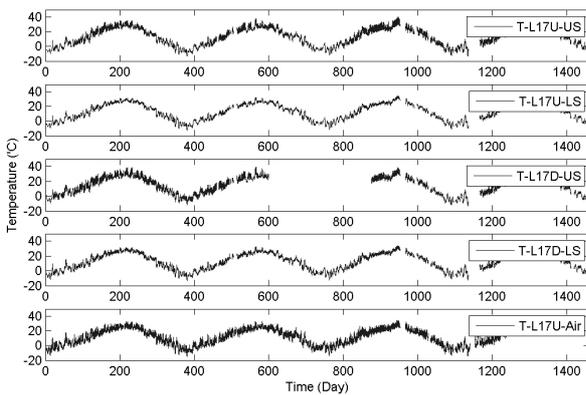


Fig. 4. Temperatures of Concrete Deck and Air

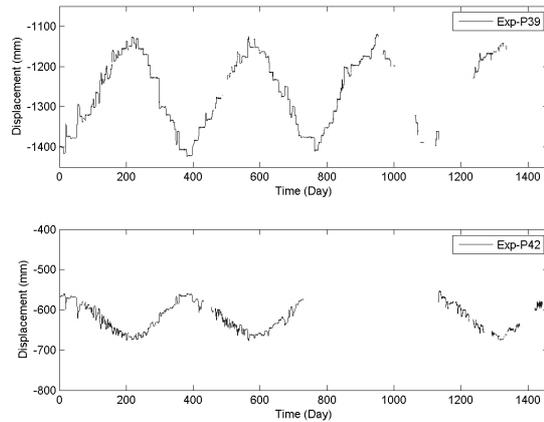


Fig. 5. Displacements by Extensometers

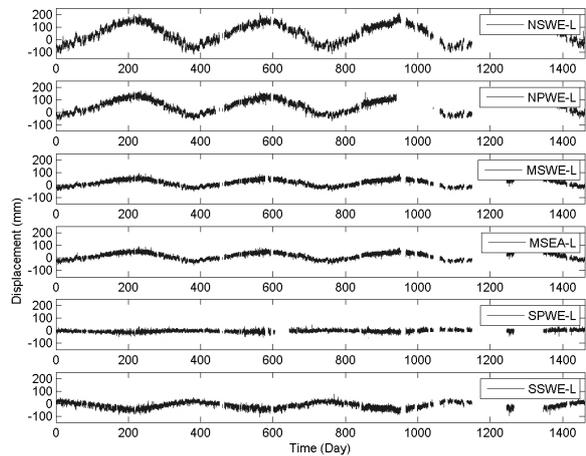


Fig. 6. Displacements by GNSS Receivers

Table 2. Comparison of Variation Rate of Displacement to Temperature (S_T) in Cable-Supported Bridges

Bridge Notation	Open Year	Structural Type	Country	Main Span (m)	L (m)	Sensor	$S_{T,t}$ (mm/°C)	$S_{T,m}$ (mm/°C)	$\frac{S_{T,m}}{S_{T,t}}$ (%)	T	Measurement Period
BR01	1962	SB	UK	335	369.0	TPS	4.43	4.32	97.6	T_{each}	2009 ~ 2010
					286.0	TPS	3.43	3.52	102.6		
					204.0	TPS	2.45	2.59	105.8		
BR02	1997	SB	China	1385	692.5	EXT	8.31	10.90	131.2	T_e	1 year
					692.5	EXT	8.31	9.89	119.0		
BR03	1997	SB	China	1377	1183.5	GPS	14.20	15.50	109.1	T_e	2003 ~ 2005
					2072.0	GPS	24.86	26.11	105.0		
BR04	1998	CSB	China	475	575.0	EXT	6.90	8.13	117.8	T_e	1999
					602.0	EXT	7.22	7.08	98.0		
BR05	1998	SB	Japan	1991	995.5	EXT	11.95	13.42	112.3	T_{air}	1998 ~ 2001
					960.0	EXT	11.52	10.36	89.9		
BR06	1973	SB	S. Korea	404	202.0	EXT	2.42	2.12	87.7	T_{each}	2010 ~ 2014
					202.0	EXT	2.42	2.18	90.0		
BR07	1995	CSB	S. Korea	120	160.0	EXT	1.92	1.96	102.3	Not Known	2011 ~ 2012
					220.0	EXT	2.64	2.38	90.2		
BR08	2000	CSB	S. Korea	470	730.0	EXT	8.03	7.49	93.3	T_e	2010 ~ 2013
					613.0	GNSS	6.74	6.25	92.7		
					143.0	GNSS	1.57	1.95	124.2		
					260.0	EXT	2.86	2.98	104.3		
BR09	2000	SB	S. Korea	300	275.0	GPS	3.30	3.35	89.1	T_{air}	2011
					275.0	GPS	3.30	2.94	101.5		
BR10	2003	SB	S. Korea	500	245.7	EXT	2.95	2.95	100.0	T_{ave}	2003 ~ 2013
BR11	2003	CSB	S. Korea	230	218.0	EXT	2.62	2.60	99.2	T_e	1 year
					218.0	EXT	2.62	2.36	90.0		
BR12	2006	CSB	S. Korea	344	242.0	EXT	2.90	3.04	104.7	T_{ave}	2009 ~ 2014
					242.0	EXT	2.90	3.05	105.0		2012 ~ 2014
BR13	2009	SB	S. Korea	250	235.0	EXT	2.82	2.56	90.6	T_{ave}	2010 ~ 2014
					235.0	EXT	2.82	2.38	84.3		
BR14	2009	CSB	S. Korea	100	230.0	EXT	2.30	2.36	102.6	T_{ave}	2011 ~ 2014
					230.0	EXT	2.30	2.24	97.4		
BR15	2012	CSB	S. Korea	480	558.0	EXT	6.70	6.86	102.4	T_{ave}	2013
BR16	2012	CSB	S. Korea	327	221.0	GPS	2.54	2.32	91.4	T_{each}	2014
					221.0	GPS	2.54	2.21	87.2		
Average									100.6		
Standard Deviation									11.1		

SB: Suspension Bridge, CSB: Cable-Stayed Bridge, TPS: Total Positioning System, EXT: Extensometer, GPS: Global Positioning System

유효온도 (T_e) 등 다양하였으며, 신축량은 대부분 교량이 신축변위 계에 의해 계측되었다. 전체 교량에 대해 이론 단위온도신축량에 대한 계측 단위온도신축량의 비인 $S_{T,m}/S_{T,t}$ 의 평균은 100.6%로

분석되었다. 이는 실제 케이블교량의 온도신축거동이 설계 시에 가정된 조건과 매우 유사함을 의미한다. 하지만 각 교량별로 살펴보면 $S_{T,m}/S_{T,t}$ 의 비는 최소 84.3%에서 최대 131.2%까지 변화범위

Table 3. Cases of Temperature Combinations

Case No.	Notation	Description
Case 1 to 10	T-L17U-UF, ...	Each Temperature (1 ea.). Refer to Table 1
Case 11	T-L17U-Air	Air Temperature (1 ea.)
Case 12	T-L17Steel	Average Temperature of Steel Girder (6 ea.)
Case 13	T-L17Conc	Average Temperature of Concrete Deck (4 ea.)
Case 14	T-L17All	Average Temperature of Steel Girder and Concrete Deck (10 ea.)
Case 15	Te-L17Alln	Effective Temperature of Steel Girder and Concrete Deck (10 ea.) (No Considering Expansion Direction)
Case 16	Te-L17Ally	Effective Temperature of Steel Girder and Concrete Deck (10 ea.) (Considering Expansion Direction)

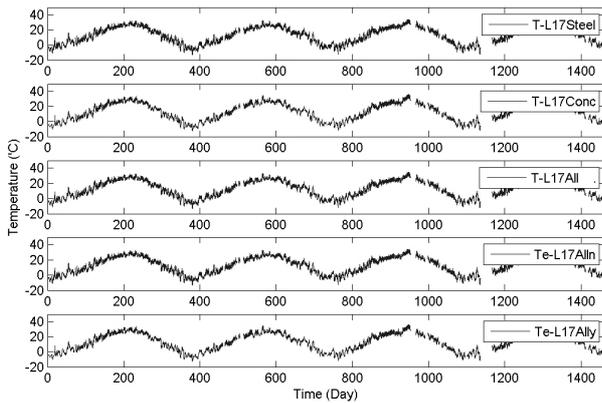


Fig. 7. Average and Effective Temperatures

가 상당히 넓고 표준편차는 11.1%로 큰 편이다. 또한 동일 교량이라 하더라도 $S_{T,m}/S_{T,t}$ 의 비는 계측위치에 따라서도 다른 것을 알 수 있다. 따라서 교량의 효율적 유지관리를 위해서는 각 교량의 온도신축거동을 명확히 평가할 필요가 있다.

케이블교량 계측에 사용되는 온도는 크게 외기온도, 콘크리트 부재 온도, 강 부재 온도로 구분할 수 있다. 케이블교량의 신축을 일으키는 열의 전달은 전도, 대류, 복사에 의해 복합적으로 이뤄지기 때문에 신축거동 분석에 외기온도나 부재 개별온도를 사용하는 것은 평가의 신뢰성을 떨어뜨릴 수 있다. 특히 서해대교 사장교와 같이 강과 콘크리트가 합성된 거더인 경우에는 세심한 주의가 필요하다. 이에 온도가 교량의 신축거동에 미치는 영향에 대한 상관분석을 수행하여 적합한 온도 데이터 및 그 조합을 찾아내고 온도신축거동 분석에 반영하고자 하였다.

먼저 온도 데이터는 Table 3과 같이 다양한 조합을 구성하였다.

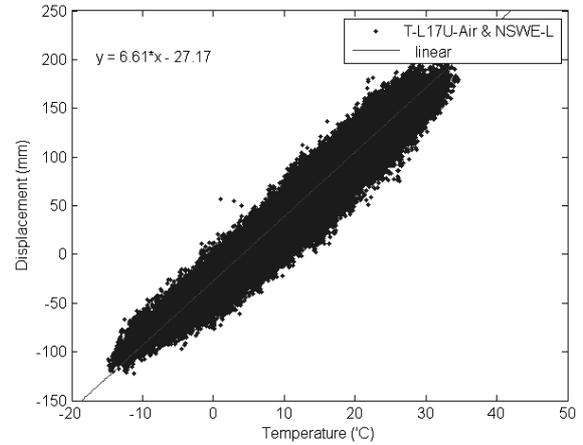


Fig. 8. Relationship between Air Temperatures and NSWE-L's

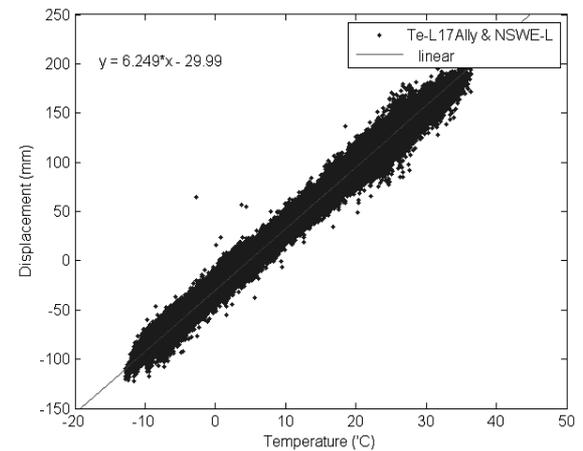


Fig. 9. Relationship between Effective Temperatures and NSWE-L's

부재 유효온도는 Eq. (2)를 사용하여 산정하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 부재 평균온도와 함께 나타냈다. 공학적 의미에서 부재 유효온도는 구조적 요소(Structural Components)에서 계측된 온도를 사용하고 신축거동의 방향을 고려하여 산정하는 것이 타당하다. 신축거동의 방향을 고려한다는 의미는 신축하는 방향(교축방향 또는 교축직각방향)으로 온도계가 설치된 부단면이 어떠한 역할을 하는지를 반영한다는 뜻이다. 가령 서해대교 사장교에 설치된 온도계 T-L17F-UF와 T-L17F-LF는 가로보에 설치되어 있기 때문에 교축방향으로의 신축에는 큰 영향을 미치지 않는다. 이에 Case 15는 신축방향을 고려하지 않고 모든 온도계를 사용하는 경우로 하고, Case 16은 교축방향 신축에 영향을 주는 온도계만을 사용하는 경우로 구분하여 상관분석을 수행하였다.

Fig. 8은 외기온도와 NSWE-L의 상관성, Fig. 9는 유효온도와 NSWE-L의 상관성을 대표적으로 나타낸 것으로 공통적으로 두 변수 간의 높은 선형의 상관성을 확인할 수 있다. 하지만 외기온도를

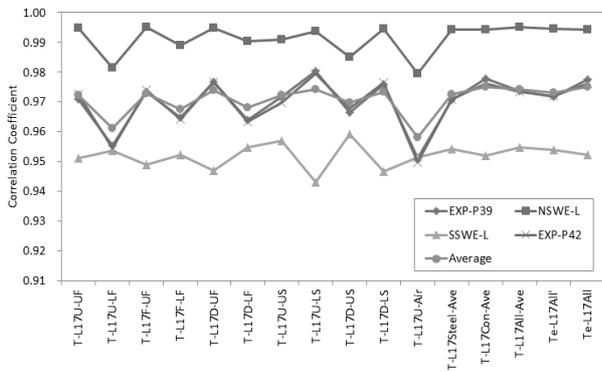


Fig. 10. Comparison of Correlation Coefficients

사용할 때의 산포(Scattering)가 유효온도를 사용할 때의 산포보다 훨씬 넓게 분포하고 있는 것을 알 수 있으며, 이는 외기온도보다 유효온도가 신축에 대해 관련성이 더 크고 상관계수가 더 높다는 것을 의미한다.

Fig. 10은 Table 3의 온도 조합별 신축거동에 대한 상관계수 R 값을 나타낸 것이다. 외기온도를 사용하는 Case 11을 제외한 대부분 Case에서 R 값의 평균값(\bar{R})이 높게 나타났다. 또한 개별온도를 사용하는 Case 1~10보다 평균온도나 유효온도를 사용하는 Case 12~16이 \bar{R} 값이 대체로 더 높은 경향을 보였다. 개별온도 중에서는 직사광선에 의한 태양 복사 영향으로 인해 1형 강거더 하부플랜지나 콘크리트 바닥판 상부가 강거더 상부플랜지나 콘크리트 바닥판 하부보다 \bar{R} 값이 더 낮은 경향을 보였다. 모든 온도

조합 중에서 신축방향을 고려하고 유효온도를 사용하는 Case 16의 \bar{R} 값이 가장 높았으며, 콘크리트 부재의 평균온도를 사용하는 Case 13이 그 다음으로 \bar{R} 값이 높는데, 이는 합성 단면에서 콘크리트 부단면이 차지하는 비중이 강 부단면보다 훨씬 크기 때문인 것으로 판단된다. 결론적으로 기상조건에 따라 급격히 변하는 외기온도나 직사광선에 의한 영향이 큰 개별온도보다는 평균온도나 유효온도를 사용하는 것이 합리적이며, Case 16과 같이 신축방향과 부재 유효온도를 사용하여 신축거동을 평가하는 것이 가장 바람직하다. 따라서 서해대교 사장교의 온도신축거동 평가에는 신축방향을 고려한 부재 유효온도를 사용하였다.

4.3 온도신축거동 평가 결과

일반적으로 건전한 구조계인 경우 온도변화에 따라 신축거동은 강한 선형의 상관성을 보인다. Fig. 11은 신축방향을 고려한 유효온도와 각 계측위치에서 측정된 신축량(또는 변위)을 두 변수로 하여 산포도를 나타낸 것이다. 각 계측위치에서 두 변수 간 강한 선형의 상관성을 확인할 수 있다. 이러한 가정조건 하에서 두 변수 간에 Eq. (7)을 적용하면 계측에 의한 단위온도신축량($S_{T,m}$)을 구할 수 있다. 이를 Eq. (4)의 이론적인 단위온도신축량($S_{T,t}$)과 비교하여 건전성을 평가할 수 있으며, 이를 Table 4에 정리하였다. 참고로 Table 4에 2차원 유한요소해석모델에 설계 온도하중을 입력하여 산정한 해석 단위온도신축량($S_{T,a}$)도 함께 정리하였다. 각 계측위치에서 이론, 해석, 계측에 의한 단위온도신축량이 서로 유사한 것을 알 수 있다. 이처럼 두 변수 간에 높은 선형성과 유사한

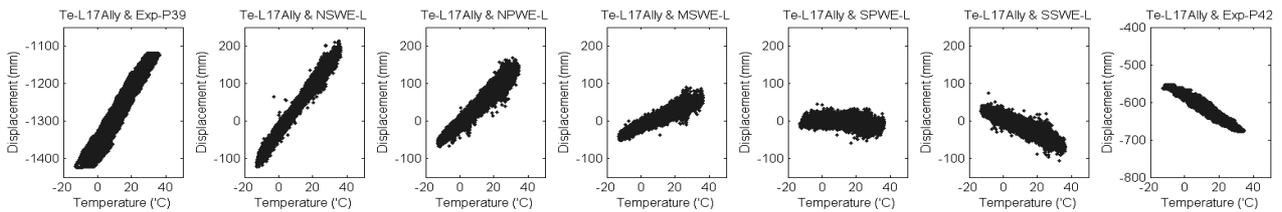


Fig. 11. Relationship between Effective Temperatures and Displacements

Table 4. Comparison of Variation Rate of Displacement to Temperature (S_T)

Location		EXP-P39 (P39)	NSWE-L (North Span)	NPWE-L (PY1)	MSWE-L (Mid Span)	SPWE-L (PY2)	SSWE-L (South Span)	EXP-P42 (P42)
L (mm)		-730,000	-613,000	-470,000	-235,000	0	143,000	260,000
S_T (mm/°C)	$S_{T,t}$ (Theory)	-8.030	-6.743	-5.170	-2.585	0	1.573	2.860
	$S_{T,a}$ (Analysis)	-7.827	-6.557	-5.000	-2.467	0.067	1.642	2.927
	$S_{T,m}$ (Measurement)	-7.489	-6.249	-4.430	-2.138	0.279	1.953	2.984
$(S_{T,m} - S_{T,t})/S_{T,t}$ for L (%)		-6.7	-7.3	-14.3	-17.3	·	24.2	4.3
$(S_{T,m} - S_{T,t})/S_{T,t}$ for L' (%)		-2.5	-2.3	-8.1	-4.4	·	1.6	-7.0

Note: Applying $\alpha=0.000011$ in case of theory and analysis

단위온도신축량의 분석결과로부터 서해대교 사장교의 온도신축거동은 건전하다고 평가할 수 있다.

한 가지 주목할 사항은 고정단 PY2 위치에서 $S_{T,m}$ 가 0이 아니며, PY2 좌측(P39 방향)의 $S_{T,m}$ 은 $S_{T,t}$ 와 $S_{T,a}$ 보다 절대값이 작고, PY2 우측(P42 방향)의 $S_{T,m}$ 은 $S_{T,t}$ 와 $S_{T,a}$ 보다 절대값이 큰 경향을 보이는 점이다. 이는 중립점 위치의 변화 가능성을 의미한다. 따라서 Eq. (12)에 신축길이와 계측 단위온도신축량을 대입한 후, 선형회귀분석을 통해 회귀계수를 산정하였다(Fig. 12). 선형회귀식에서 기울기 $\hat{\beta}_1$ 는 선폽창계수를 의미하는데, 계측에 의한 선폽창계수 $\alpha_m = 1.06E-05/^\circ C$ 로 나타나 이론에 의한 선폽창계수 $\alpha_t = 1.10E-05/^\circ C$ 와 유사한 결과를 보였다.

한편 선형회귀식에서 x 절편은 온도신축에 대한 중립점의 위치를 의미한다. Fig. 12에서 계측에 의한 선형회귀식 $y = 1.06E-05x + 3.34E-01$ 에서 $x = -31,734mm$ 을 얻을 수 있다. 즉, 교량의 실제 온도신축이 시작되는 중립점은 구조적 고정단인 PY2 위치에서 P39 방향으로 약 31.734m 떨어진 곳에 위치한다. 2차원유한요소해석모델에 설계 온도하중을 입력하여 해석한 결과에서도 PY2가 아닌 PY2 위치에서 P39 방향으로 약 8.440m 떨어진 곳에 위치한다. 이처럼 구조적 고정단에서 중립점이 형성되지 않는 것은 교량받침이 견고한 지반처럼 무한 강성체 위에 놓인 것이 아니라 주탑이라는 유한 강성체 위에 놓여 상대 저항이 발생하기 때문이며, 계측과 해석 중립점의 차이는 설계 시 고려한 구조계 강성과 실제의 강성에는 다소 차이가 있기 때문인 것으로 판단된다. 고정단 PY2로부터의 신축길이 L 대신 실제 중립점으로부터의 신축길이 L' 를

사용할 경우 계측과 이론의 단위온도신축량 오차 $(S_{T,m}-S_{T,t})/S_{T,t}$ 의 값은 줄어들며(Table 4), 그 표준편차도 15.3%에서 3.5%로 현저히 낮아지는 것을 알 수 있다.

이처럼 먼저 온도와 신축량의 선형회귀분석으로부터 단위온도신축량을 산정하고, 다음으로 신축길이 - 즉, 중립점으로부터 센서 설치위치까지의 거리 - 와 단위온도신축량의 선형회귀분석으로부터 선폽창계수와 중립점의 위치를 산정할 수 있으며, 이를 이론과 해석결과와 비교하므로써 케이블교량의 실제 온도신축거동을 평가할 수 있다. 아울러 본 연구와 같이 이중 변위 센서를 함께 사용하게 되면 통계데이터 수가 많아지는 효과가 더해지기 때문에 선형회귀분석의 통계적 신뢰성이 보다 높아진다.

5. 결론

공용 중 케이블교량에 있어서 온도는 중요한 작용하중이며, 온도영향은 온도변화에 따라 교량 상부구조계가 늘어나거나 줄어드는 온도신축거동을 평가하는 것이 가장 기본이다. 이에 공용 중인 사장교에서 장기간 계측된 온도와 이중 변위 데이터를 활용하여 온도신축거동을 평가하였으며, 본 연구를 통하여 도출된 주요 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 단면 내 여러 위치에서 계측된 온도 데이터에 대한 온도 조합을 구성하여 교축방향 신축량과의 상관분석을 수행한 결과, 외기 온도나 부재 개별온도보다는 부재 평균온도나 유효온도를 사용하는 것이 합리적인 것으로 분석되었다. 또한 교축방향 신축에 영향을 주는 온도계만을 사용하여 부재 유효온도를 산정하는 경우가 온도-신축거동 상관계수가 가장 높게 나타났다. 따라서 부재 유효온도 산정 시 사용되는 온도계는 분석하고자하는 신축거동의 방향을 고려하여 선택하는 것이 바람직하다.
- (2) 부재 유효온도와 신축량 간의 선형회귀분석을 수행하여 단위온도신축량을 구하고 이를 이론과 해석에 의한 값과 비교 분석하였다. 계측 신축량은 2개 신축변위계와 6개 GNSS 수신기로부터 계측된 이중 변위 데이터를 활용하였다. 두 변수 간에 높은 선형성과 함께 계측, 이론, 해석 단위온도신축량이 서로 유사한 결과를 보여 서해대교 사장교의 장기 온도신축거동은 건전한 것으로 평가되었다.
- (3) 신축길이와 계측 단위온도신축량에 대한 선형회귀분석을 수행하여 선폽창계수를 산정한 결과, 합성거더 교량인 서해대교 사장교의 계측 선폽창계수는 $1.06E-05/^\circ C$ 로 나타났다. 이는 콘크리트 선폽창계수 $1.00E-05/^\circ C$ 와 강제 선폽창계수 $1.20E-05/^\circ C$ 의 사이값으로 이론에 의한 선폽창계수와 유사하였다.
- (4) 선형회귀식의 x 절편으로부터 실제 교량의 온도신축 중립점을

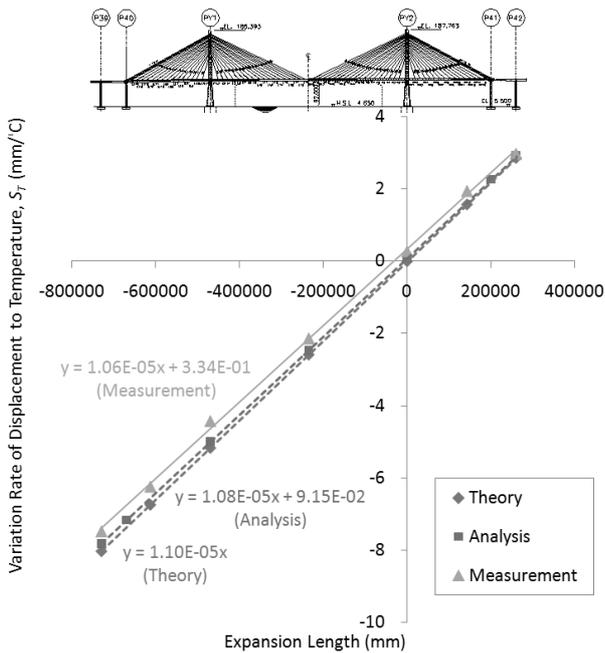


Fig. 12. Relationship between Expansion Length's and S_T 's

산정한 결과, 중립점은 구조적 고정단인 PY2 위치에서 P39 방향으로 약 31.7m 떨어진 곳에 위치하였다. 이러한 분석결과는 신축량 산정 및 유간관리, 교량 건진성평가에 유용한 정보로 활용될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단(08 기술혁신E01)의 연구비지원 및 한국도로공사 서해대교관리소의 현장지원에 의해 수행되었습니다.

References

- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2012). *AASHTO LRFD bridge design specifications*, Washington.
- Bae, I. H. (2011). "Measurement analysis and management of special bridges." *Annual Seminar on the Operation and Maintenance of Cable-Supported Bridges in Korea*, The New Airport Highway Corporation (in Korean).
- Bae, I. H., Choi, B. K. and Na, W. C. (2013). "Analysis of long-term behaviors and emergency measures of long span cable-supported bridge using the structural health monitoring system." *Proceedings of Korean Society of Civil Engineers 2013 Convention*, pp. 876-879 (in Korean).
- Gil, H. B., Park, J. C., Cho, J. S. and Jung, G. J. (2010). "Renovation of structural health monitoring system for Seohae Bridge." *Journal of the Transportation Research Board*, No. 2201, pp. 131-138.
- Kang, G. H. (2008). *A study on the condition assessment method of bridge joints using long-term displacement measurement data*, Master's Thesis, University of Seoul (in Korean).
- Kim, S. K., Koh, H. M., Lee, J. H. and Bae, I. H. (2006). "Signal analysis from a long-term bridge monitoring system in Yongjong Bridge." *Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea*, Vol. 10, No. 6, pp. 9-18.
- Korea Infrastructure Safety and Technology Corporation (KISTEC) (2015). *Final report on maintenance work of special bridges in national highway* (in Korean).
- Naoaki, S. (2003) "Long term monitoring in Akashi Kaikyo Bridge." *Bridge and Foundation*, Vol. 37, No. 6, pp. 21-25 (in Japanese).
- Ni, Y. Q., Hua, X. G., Wong, K. Y. and Ko, J. M. (2007). "Assessment of bridge expansion joints using long-term displacement and temperature measurement." *Journal of Performance of Constructed Facilities*, Vol. 21, No. 2, pp. 143-151.
- 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." *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 24, No. 2A, pp. 249-257 (in Korean).
- Park, J. H. (2015). *The optimum design of expansion joints by long-term monitoring data for the Diamond Bridge*, Master's Thesis, Pukyong National University (in Korean).
- Xu, Y. L., Chen, B., Ng, C. L., Wong, K. Y. and Chan, W. Y. (2010). "Monitoring temperature effect on a long suspension bridge." *Structural Control and Health Monitoring*, Vol. 17, No. 6, pp. 632-653.
- Zhou, Y. and Sun, L. (2014). "Temperature effects on performance of long-span cable-stayed bridges." *The 6th World Conference on Structural Control and Monitoring*, Barcelona, Spain, pp. 432-444.