현수교 PPWS 가설중 형상관리를 위한 PPWS 새그 및 장력민감도 산정법 개발

Development of Sag and Tension Sensitivity Estimation Method for Configuration Control under PPWS Erection in a Suspension Bridge

정 운* · 서주원** · 이원표***

Jeong, Woon · Seo, Ju Won · Lee, Won Pyo

Abstract

Main cable of a suspension bridge is the important member which shows the overall structure integrity at bridge completion. Configuration of main cable is a free hanging state at cable erection completion and is different from that at bridge completion supporting the dead loads such as hanger, girder, and so on. Accordingly, the configuration control under cable erection is considerably significant because the configuration at cable erection completion has direct influence on that at bridge completion. That is performed by sag adjustments at center, side span and tension adjustments at anchor span. The former needs the sag sensitivity which represents the control quantity of strand length corresponding to that of sag. The latter requires the tension sensitivity which shows the change of strand tension according to that of strand temperature. In this study, the fundamental equations of cable were derived with the assumption of either catenary or parabola shape, the differential-related equations using chain rule on horizontal tension were drawn from those and finally the estimation methods of the sag / tension sensitivity were proposed from both those. The nonlinear numerical analysis flow charts of sag sensitivity based on the catenary equations were proposed and the sag sensitivities grounded on the differential-related equations were compared with the results using them for various parameters of sag change. Also, considering the combinations of sag change parameters, the calculation method of the final variation for the cable sag was suggested. For the real suspension bridge under construction with PPWS method, the sag/tension sensitivity were estimated considering the construction conditions like the change of PPWS length, PPWS temperature, bridge span, etc.. We hope that this study will be a systematic guideline for the configuration control under main cable erection and improved highly by field verification in the real bridge site.

Keywords : suspension bridge, main cable, configuration control, sag sensitivity, tension sensitivity, PPWS

요 지

현수교 주케이블은 완성시 교량의 구조적 건전성을 나타내는 중요한 지표이다. 주케이블은 가설완료시 자유 매달림(free hanging) 상태의 형상이 되며 교량완성시 행어, 보강형 등의 고정하중을 지지하여 가설완료시 형상과는 차이가 발생한다. 따라서, 주케이블의 가설완료시 형상이 교량완성시 형상에 직접적인 영향을 미치므로 가설중 형상관리가 매우 중요하다. 주케이블의 가설중 형상관리는 중앙 및 측경간은 새그조정으로, 정착경간은 장력조정으로 수행된다. 새그조정은 새그조절량에 대한 스트랜드 길이 조절량을 나타내는 산정값인 새그민감도가 필요하며 장력조정은 온도변화에 대한 장력변화량을 나타내는 장력민감도가 필요하다. 이에 본 연구에서는 케이블 형상가정에 따라 유도된 기본식과 이로부터 도출된 미분 관계식으로부터 새그 및 장력민감도를 산정하는 방법을 제안하였다. 그리고, 다양한 새그변화 요인에 대해 현수선 기본식을 사용한 비선형 수치해석 새그민감도 계산 흐름도를 제안하여 미분관계식을 적용한 새그민감도 결과와 비교하였다. 또한, 각 새그변화 요인이 복합적으로 발생함으로써 이를 고려하여 케이블의 최종 새그변화량을 산정하는 방법을 제안하였다. PPWS 공법으로 시공 중인 실교량을 대상으로 PPWS의 길이변화 및 온도변화, 경간장변화 등의 다양한 시공여건의 변화에 따른 새그 및 장력민감도를 산정하였다. 본 연구내용이 주케이블 가설중 형상관리 방법에 대한 체계적인 지침이 되기를 바라며, 향후 실교 현장 적용 및 실증에 의해 완성도를 높일 것이다.

핵심용어 : 현수교, 주케이블, 형상관리, 새그민감도, 장력민감도, PPWS

*정회원 · 교신저자 · 현대건설 토목건축연구개발실 초장대교량연구팀 차장 · P.E. (E-mail : maskwj@hdec.co.kr)

**정회원 · 현대건설 토목건축연구개발실 초장대교량연구팀 부장 · 공학박사 (E-mail : jwseo@hdec.co.kr)

***정회원 · 현대건설 토목건축연구개발실 초장대교량연구팀 부장 · 공학박사 (E-mail : wplee@hdec.co.kr)

1. 서 론

최근 교량분야의 설계 및 구조해석 기술이 발전함과 동시에, 고강도 재료를 사용한 강선 및 강재 개발에 힘입어 메시나해협대교와 같이 중앙경간이 3,300 m에 이르는 초장대 현수교의 건설이 가능한 시대가 되었다. 이러한 초장대 현수교 건설에는 고정밀도의 시공관리기술이 반드시 필요하며 그 중에서 주케이블 가설을 위한 스트랜드 형상관리는 시공관리의 핵심적인 기술이다. 더우기 주케이블 가설 완료시점부터는 형상을 재조정하기는 매우 어렵고 스트랜드 형상관리의 정밀도에 따라 최종 교량종단 선형에 대한 설계 정밀도 요건의 충족여부가 결정되며 더 나아가서는 교량 전체 구조계의 내력 평형상태에 직접적인 영향을 미친다. 그러므로, 스트랜드 형상관리에 대한 요구정밀도가 상당히 높다고 할 수 있다.

주케이블 가설중 형상관리는 기준스트랜드를 기준으로 수행하며 기준스트랜드의 새그조정 정밀도가 주케이블의 가설 정밀도를 결정하기 때문에 기준스트랜드에 대한 형상 정밀도를 엄격히 관리해야 한다. 스트랜드의 가설에 따라 본래 기준스트랜드가 기타 스트랜드에 의해 눌러져 위치가 변할 수 있어, 주케이블의 스트랜드를 여러 그룹으로 나누는 것이 필요하다. 각 그룹에는 하나의 기준스트랜드를 선택하며 새그조정시 기준스트랜드는 일반적으로 여러 차례 조절하는 것이 필요하다. 따라서, 이것은 새그조정량에 대한 정보를 주는 새그민감도를 사용하여 기준스트랜드의 조절을 신속하고 높은 정밀도로 완성하는 것을 요구한다.

국내 현수교 역사를 살펴보면 1970년 남해대교를 시초로 2000년 영종대교, 2002년 광안대교, 2008년 소록대교가 완공되어 공용중에 있으며 이들 교량 건설을 위한 가장 핵심적인 공정인 주케이블 가설이 모두 일본의 기술진에 의해 수행되었다(최현석, 2010). 그 이후 2011년 현재 시공중인 이순신대교는 국내 기술진에 의해 주케이블 가설이 이루어졌으며 향후 적금대교, 단등교, 새천년대교, 제2남해대교의 주케이블 가설이 예정되어 있다. 주케이블 가설공법적인 측면으로 보면 이미 완공된 소록대교와 현재 시공중인 울산대교는 PPWS(Prefabricated Parallel Wire Strand)공법을 적용하고 있고 그외 모든 현수교가 AS(Aerial Spinning) 공법으로 시공되었거나 예정하고 있다. 또한, 최근 시공중인 중국의 테조대교는 PPWS 공법을 적용하고 있다. 가설공법에 따른 주케이블 가설방법은 차이는 있으나 정밀한 가설을 위한 목표형상관리기술은 동일하다. 목표형상관리를 위해 양공법 모두 스트랜드의 형상관리가 반드시 필요하며 중앙 및 측경간은 반복시준에 의한 새그조정으로, 정착경간은 장력조정에 의해 수행된다. 새그조정을 하기 위해서는 스트랜드의 길이를 조절해야하며 이에 대한 합리적인 산정값인 새그민감도가 필요하다. 장력조정에 있어서는 온도변화에 따른 장력변화량을 나타내는 장력민감도가 필요하다.

이에 본 연구에서는 스트랜드 형상관리를 위하여 PPWS 공법의 가설단위인 PPWS를 대상으로 케이블 형상가정에 따라 유도된 기본식과 이로부터 도출된 미분 관계식으로부터 새그 및 장력민감도를 산정하는 방법을 제안하였다. 또한, 현수선 기본식을 사용한 비선형 수치해석 새그민감도 계산 호

름도를 제안하였으며 실교량을 대상으로 미분관계식에 의한 방법과 산정 결과를 비교 분석하였다. 새그민감도의 매개변수는 새그변화 요인으로 PPWS의 길이변화 및 온도변화, 경간장변화 등이며 장력민감도의 매개변수는 온도변화이다. 각 새그변화 요인은 복합적으로 발생하며 이를 고려하여 스트랜드의 형상조정을 위한 최종 새그변화량을 산정하는 방법을 제안하였다.

2. PPWS 형상관리

일반적으로 현수교 주케이블은 수십개의 PPWS로 구성되며, 각 PPWS는 미국의 New Port교(1969), 일본의 관문교(1973), 인노시마대교(1983)와 같이 각각 61, 91, 127개 강선이 정육각형 형태의 배열로 평행 배치되어 있다(그림 1). 이러한 다수의 PPWS는 하층부터 상층으로 가설되며 주케이블 가설완료시 목표형상이 되도록 체계적인 시공관리가 필요하다.

2.1 개요

PPWS 형상관리의 가장 핵심적인 시공관리 대상은 각 경간의 PPWS에 대한 새그 측량 및 조정작업이다. 그리고, 부수적으로 정착경간 PPWS 장력 및 주탑의 변위도 시공관리의 대상이 된다.

2.1.1 새그측량

다수의 PPWS 새그 측량을 위해, 상층에 배치된 PPWS가 하층에 배치된 PPWS에 걸쳐져서 하층 PPWS의 응력이 증가하고 완성시에도 잔류응력이 발생하지 않도록 PPWS군을 몇 개의 그룹으로 나눈다. 그리고, 각 그룹마다 절대새그를 측량하는 한 개의 기준 PPWS를 선택하면 그 외의 PPWS는 상대새그를 측량하는 상대 PPWS가 된다. 새그의 측정을 위하여 각 경간 중앙점의 캐뉼상에 반사경을 설치하여 광파측량기로 기준 PPWS의 절대새그를 측량하며 상대 PPWS의 기준 PPWS와의 상대새그는 전용 측정자(vernier calipers)를 사용하여 측정한다. PPWS 가설완료시 목표형상은 PPWS 온도가 표준상태(보통 20°C)일 때를 나타내며 가설중에는 온도차가 발생하므로 이에 대한 위치보정이 필요하다. PPWS의 종합적인 평균온도를 정확하게 측정하기 위해서 각 경간마다 1 단면(새그점) 혹은 다수의 온도측정 단면을 분산하여

그림 1. PPWS의 구성(127강선)

배치하는 것이 필요하다. 각 단면은 여러 개(보통 상하좌우 4개)의 측정개소를 배치하며 각 경간 측정단면의 평균값을 해당경간 PPWS의 종합적인 온도로 사용한다.

2.1.2 새그조정

새그조정은 “중앙경간, 측경간, 정착경간” 순서대로 진행하며, 기온이 일정하고 일조의 영향이 거의 없는 심야에서 새벽에 걸쳐 수행하는 것이 일반적이다. 새그조정은 위치마킹법과 새그조절법의 양 방법을 병행하여 수행되며, 위치마킹법은 PPWS를 공장에서 조립 제작할 때 공장의 정밀측량설비를 이용하여 PPWS에 각 새들자리 중심의 대응하는 위치마크를 표시하고 주간에 가설할 때 이 마크를 새들자리 중심과 서로 일치시킨다. 새그조절법은 온도가 안정적인 야간에 기준 PPWS와 비교 대조하여 새그와 온도 측정을 진행하고, 온도보정을 통해 새그를 조절한다. 새그조정에서 주요 중점사항은 각 PPWS 간격을 완전히 0으로 하지 않고 각 PPWS 간격을 가능한 한 작게 하는 것이다(이승우, 2003). 이를 위하여 새그조절시 새그를 측량하는 것 외에도 PPWS 온도를 측정해야 한다. 그리고, 실측 PPWS 온도와 상대새그량에 따라 새그조절을 진행한다. 실측한 PPWS간 고도편차에 따라 새들부에서 경간의 PPWS 길이조절 방법을 통해 PPWS의 형상을 신속히 조절한다. 중앙경간, 측경간의 PPWS 형상은 현수선이므로 상기의 새그조정에 의한 형상을 관리함으로 설계장력을 도입하고 정착경간 PPWS의 형상은 거의 직선이므로 새그보다는 장력을 조정해야 한다.

2.2 새그민감도

PPWS 새그조정의 핵심은 조절하려는 새그량에 해당하는 PPWS 길이 조절량이며 이것을 “새그민감도”라 칭한다. 실제 PPWS 가설현장에서 새그 조절을 위한 기준값인 새그민감도의 계산이 반드시 필요하며, 본 연구에서는 이를 계산하기 위해서 적용한 케이블 기본식과 미분 관계식에 대해 설명한다.

그림 2. 케이블 응력장에 대한 기호정의

2.2.1 케이블 기본식

상기 그림 2에서 케이블(self-weight: W)의 좌측 끝점을 원점으로 수평방향을 x 축, 수직방향을 y 축으로 하는 직각좌표계를 생각한다.

상기 그림의 케이블의 형상을 현수선(Catenary) 혹은 포물선(Parabola)이라 가정하면 다음 표 1의 식이 유도된다(Irvine, 1981; Steinman, 1929). 이를 살펴보면, 모두 수평장력의 함수이므로 이를 구하면 각각의 값을 산정할 수 있다.

다음 표 1에서 포물선 응력장의 경우, 다음 식 (1)에 의해 계산시 보통 편의를 위하여 식 (2)와 같은 먹급수 형태로 전개하여 계산하며, 표 1에서는 3번째 전개항까지 취하여 계산하였다.

$$S = \int_0^L dS = \int_0^L \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \quad (1)$$

$$\sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} = \sqrt{1 + (y')^2} = 1 + \frac{(y')^2}{2} - \frac{(y')^4}{8} + \frac{(y')^6}{16} - \frac{5(y')^8}{128} + \frac{7(y')^{10}}{256} - \frac{21(y')^{12}}{1024} + \frac{33(y')^{14}}{2048} - \frac{429(y')^{16}}{32768} + \frac{715(y')^{18}}{65536} + O(y')^{19} \quad (2)$$

실제 가설시 PPWS는 현수선의 형상을 나타내므로 본 연구에서는 현수선 형상의 기본식을 적용하여 비선형 수치해석법으로 정확한 새그민감도를 구한다. PPWS의 길이변화에

표 1. 가정된 케이블 형상에 따른 기본식

구분	현수선(Catenary)	포물선(Parabola)
케이블 자중 W	케이블 길이 방향으로 일정(W)	각 경간내에서 수평방향으로 일정 $W_{eq} = \frac{W \cdot S_0}{L}$
응력장 S (Strained length)	$S = C \left(\sinh\left(\frac{L}{C} + K_1\right) - \sinh K_1 \right)$	$S = -\frac{h^4}{8L^3} + \frac{h^2}{2L} + L - \frac{h^2 L W_{eq}^2}{16H^2} + \frac{L^2 W_{eq}^2}{24H^2} - \frac{L^5 W_{eq}^4}{640H^4}$ $= -\frac{32f^4}{5L^3} - \frac{4f^2 h^2}{L^3} - \frac{h^4}{8L^3} + \frac{8f^2}{3L} + \frac{h^2}{2L} + L$
탄성신장 ΔS (Elastic elongation)	$\Delta S = \frac{H}{4EA} \left[2L - C \sinh(2K_1) + C \sinh \left[2 \left(K_1 + \frac{L}{C} \right) \right] \right]$	$\Delta S = \frac{H}{EA} \left(\frac{h^2}{L} + L + \frac{L^3 W_{eq}^2}{12H^2} \right)$
무응력장 S_0 (Strained length)	$S - \Delta S$	$S - \Delta S$
새그 f (Sag at $x=L/2$)	$f = \frac{h}{2} - \left[C \cosh\left(\frac{L}{2C} + K_1\right) + K_2 \right]$	$f = \frac{L^2 W_{eq}}{8H}$

대한 정확한 새그민감도는 상기 표 1의 현수선식을 이용하여 새그 f 의 변화에 따른 응력장(df/dS) 혹은 무응력장(df/dS_0)의 변화를 계산하여 산정할 수 있다. 온도변화에 대한 정확한 새그민감도(df/dT_{emp})는 표준상태와의 온도차만큼 무응력장의 길이가 변하므로 이를 이용하여 산정할 수 있다. 강재는 온도가 증가함에 따라 탄성계수가 감소하는 것으로 알려져 있으며 문헌(김상호 등, 2006)에 의하면 탄성계수의 변화를 선형으로 간주하여 온도가 100°C증가할 때 10%의 탄성계수가 감소하는 것으로 가정하여 적용하였다. 본 연구에서도 이를 적용하여 PPWS 온도변화시 탄성계수 감소율(α_E)을 0.1%/°C로 적용하여 새그민감도에 반영할 수 있다. 또한, 경간장변화(df/dL)는 주탑정부의 변위에 의해 발생하게 되며, 이에 따른 정확한 새그민감도는 무응력장이 불변임을 이용하여 산정할 수 있다. PPWS를 구성하는 강선의 제조시,

직경 및 탄성계수의 편차가 발생하며 무응력장은 불변임을 고려하여 PPWS의 단면적 및 겉보기 탄성계수 변화에 대한 정확한 새그민감도를 산정해 볼 수 있다. 그리고, 상기의 각 새그변화 요인별 새그민감도는 각각 독립적으로 발생하는 것이 아니라 상호 조합되어 실제 현장에서 발생됨으로 이에 대한 고려가 필요할 것으로 판단된다.

다음 표 2에는 상기에서 설명한 새그민감도를 산정하는 비선형 수치해석 계산 흐름도(flow chart)가 나타나 있다. 이 흐름도의 핵심은 표 1의 식들은 수평장력의 함수임에 착안하여 각 매개변수의 변화에 대한 수평장력을 계산하고 변화 전과 비교하는 것이다.

2.2.2 미분 관계식

상기 2.2.1절의 현수선 기본식에 의한 정확한 새그민감도

표 2. 현수선 기본식에 의한 비선형 수치해석 새그민감도 계산 흐름도

계산은 비선형 수치해석법 사용에 의해 상당한 계산시간이 필요하므로 다음과 같은 수평장력에 대한 미분 관계식(chain rule)을 이용하여 각 매개변수에 대하여 새그민감도를 간단히 산정할 수 있다. 상기 표 1을 살펴보면 응력장, 탄성신장, 새그 모두가 미지량인 수평장력 H의 함수임을 알 수 있으며 이를 이용하여 다음과 같이 미분 관계식을 구할 수 있다.

① PPWS 길이변화

• 무응력장 변화: 무응력장 S_0 는 $S-\Delta S$ 로 구할 수 있으며 새그민감도는 다음의 식 (3)과 같은 미분 관계식(chain rule)으로 구한다(부록 참조).

$$\frac{df}{dS_0} = \frac{df}{dH} \cdot \frac{dS_0}{dH} \quad (3)$$

• 응력장 변화(부록 참조)

$$\frac{df}{dS} = \frac{df}{dH} \cdot \frac{dS}{dH} \quad (4)$$

② PPWS 온도변화

• PPWS 온도변화는 다음 식 (5)와 같이 무응력장(unstrained length) 길이의 변화이며

$$dS_0 = \alpha \cdot S_0 \cdot dT_{emp} \quad (5)$$

식 (3)에 식 (5)를 대입하여 정리하면 온도변화에 대한 새그민감도를 구할 수 있다.

$$\frac{df}{dS_0} = \frac{df}{\alpha \cdot S_0 \cdot dT_{emp}} \rightarrow \frac{df}{dT_{emp}} = \alpha \cdot S_0 \cdot \frac{df}{dS_0} \quad (6)$$

문헌(김상효 등, 2006)을 참조하면 온도변화에 따른 탄성계수의 변화는 다음과 같이 표현할 수 있으며

$$E_T = E(1 - \alpha_E \Delta T_{emp}) \quad (7)$$

이를 적용하여 새그민감도를 산정할 수 있다.

③ PPWS 단면적 변화

단면적이 변화하면 단위중량이 동일비율로 변화하게 되므로 이를 반영하여 새그민감도를 계산한다. 그리고, 단면적 변화에 의한 PPWS의 가설시 새그변화량을 산정해보면 변화전후의 새그변화가 거의 없다는 것을 알 수 있다. 그러므로, 실제 현장에서는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

④ PPWS 겉보기 탄성계수 변화

강선의 탄성계수가 PPWS의 겉보기 탄성계수가 된다고 가정하고 탄성계수 변화에 의한 수평장력의 변화를 고려하여 새그민감도를 산정한다. 단면적과 마찬가지로 실제 PPWS 가설시 탄성계수 변화에 의한 새그변화량을 산정해보면 변

화전후의 새그변화가 거의 없음을 알 수 있으며, 각 강선의 배치 편차에 의한 응력편차, 각 강선의 기계적 성질 상이, 시간 경과에 따른 각 강선 사이의 접촉마찰 변화 등의 이유로 탄성계수의 변화가 발생하지만 고려하지 않아도 될 것으로 생각된다(이승우, 2003).

2.2.3 새그변화 요인 조합에 의한 새그변화량

케이블 형상의 변화요인을 살펴보면 온도와 지지점의 이동이 주요인이며 이에 따라 새그값이 변화하게 된다. 그러므로, 실제 현수교 케이블 시공현장에서는 온도변화에 의해 길이가 변화하고 탑정부 수평변위에 의해 경간장이 변화하며 탑정부 수직변위에 의해 케이블 양 지지점의 높이차가 변화하여 새그가 변화하게 된다. 탑정부 수직변위 변화량(Δh)은 케이블 시점의 수직변위 변화량(Δh_0)과 종점의 수직변위 변화량(Δh_1)의 합이며 각 수직변위 변화량은 중력반대방향일 때 양의 값을 취한다. 다음 표 3에는 이러한 새그변화 요인들이 복합적으로 작용할 때 각 새그민감도에 의한 새그변화값을 산정하는 방법이 제안되어 있으며 실제 현장에서 케이블 형상조정량으로 사용될 것이다. 표 3을 살펴보면 형상변화요인의 증감에 따라 새그의 증감(중력방향이 증가)이 결정되며 이에 따라 새그민감도의 부호를 결정하여 요인별 새그변화량을 산술적으로 더하면 최종 새그변화량(중력방향이 양의 값)을 산정할 수 있다.

표 3에서 케이블 양단의 높이차 변화에 대한 새그민감도(df/dh)는 표 2의 경간장 변화에 대한 새그민감도 수치해석 계산 흐름도에서 “경간장변화 ΔL ”과 “L대신 L+ ΔL ”을 “높이차 변화 Δh ”와 “h대신 h+ Δh ”로 대체하여 적용하면 된다.

2.3 장력민감도

현수교의 중앙경간 및 측경간은 현수 주케이블에 목표장력을 도입하기 위해서 상술한 바와 같이 목표형상에 일치되도록 새그를 조정하면 된다. 정착경간은 주케이블을 구성하는 PPWS가 방사형으로 정착되며 각각의 형상이 거의 직선이므로 새그보다는 정착단에서 직접적으로 장력을 조정하면 된다. 장력조정시 온도에 매우 민감하므로 다음 식과 같이 온도에 대한 장력민감도를 구하여 관리한다.

$$\begin{aligned} dF &= \varepsilon \cdot E \cdot A = \frac{dS_0}{S_0} E \cdot A = \frac{\alpha \cdot S_0 \cdot dT_{emp}}{S_0} E \cdot A \\ &= \alpha \cdot dT_{emp} \cdot E \cdot A \rightarrow \frac{dF}{dT_{emp}} = \alpha \cdot E \cdot A \end{aligned} \quad (8)$$

표 3. 케이블 형상변화요인 조합에 의한 새그변화량 산정방법

형상변화요인	증감	부호	무응력장 증감	새그 증감	새그민감도 부호
케이블 온도(기준설계온도에 대한 온도차)	증가	$\Delta T_{emp}>0$	증가	증가	$(df/dT_{emp}) > 0$ $(df/dS_0) > 0$
	감소	$\Delta T_{emp}<0$	감소	감소	
지지점 수평변위에 의한 경간장	증가	$\Delta L>0$	불변	감소	$(df/dL) < 0$
	감소	$\Delta L<0$		증가	
지지점 수직변위에 의한 높이차	증가	$\Delta h>0$	불변	감소	$(df/dh) < 0$
	감소	$\Delta h<0$		증가	
새그변화량					
$(df/dT_{emp}) \cdot \Delta T_{emp}+(df/dL) \cdot \Delta L+(df/dh) \cdot \Delta h$ $\Delta h=\Delta h_0+\Delta h_1$					

3. PPWS 새그 및 장력 민감도 계산 실례

PPWS 형상관리를 위한 새그조정시 새그 및 장력민감도 계산의 실례로 현재 시공중인 울산대교를 적용대상으로 선택한다. 각 경간에 대하여 2절에서 제시한 케이블 이론식 및 미분 관계식을 이용하여 새그 및 장력민감도를 산정하고 상호 비교 분석한다.

울산대교는 완성시 경간장이 300 m+1150 m+350 m의 단경간 현수교이며 주케이블에 적용되는 PPWS 제원은 다음 표 4와 같다.

실시설계시 계산된 울산대교 주케이블 가설완료시점에서의 형상은 다음 그림 3에 나타나있다(울산하버브릿지주식회사, 2010). 이 목표형상에 따라 PPWS 1본을 가설했을 때, 설계 새그값에 대해 케이블 기본식에 의한 각 경간의 무응력장과 수평장력을 구하면 다음 표 5와 같다. 무응력장은 전경간에 대해 케이블 형상가정에 관계없이 거의 유사한 값을 나타내고 있다. 수평장력은 측경간의 경우 케이블 형상가정과 관계없이 거의 동일하며 중앙경간은 1.3%의 차이가 발생하고 있다. 그러므로, 중앙경간의 경우는 정해로 알려져 있는 현수

그림 4. 타정새들부에서의 PPWS 길이조절 방법

선 형상가정으로 가설시 케이블 형상을 파악해야 할 것으로 판단된다.

일반적으로 새들부에서 PPWS 길이조절시 PPWS는 무응력장에 대한 새그민감도가 현장 실측값과 잘 일치하는 것으로 되어있다. 그러나, 그림 4와 같이 PPWS에 클램프를 부착하고 스트랜드책으로 끌어 당겨 새그를 조절한다면 타정새들과 클램프 사이의 PPWS는 응력장과 무응력장의 중간상태일 것으로 예측되므로, 실제 현장에서 반복조절을 통하여 새그민감도의 수정이 필요할 것으로 판단된다.

표 4. 울산대교 PPWS 제원

구 성	보증인장강도 (GUTS)	면 적	탄성계수	단위길이당 중량
Φ5.4 mm × 127EA	1960 MPa	0.002909 m ²	2.0 × 10 ⁵ MPa	0.223966 kN/m

그림 3. 울산대교 주케이블 가설완료시 형상

표 5. 울산대교 주케이블 가설완료시 무응력장 및 수평장력

항 목	측경간(좌)			중앙경간			측경간(우)		
	(a) 현수선	(b) 포물선	(b)/(a)	(a) 현수선	(b) 포물선	(b)/(a)	(a) 현수선	(b) 포물선	(b)/(a)
무응력장 S_0 (m)	345.245	345.176	1.000	1183.487	1183.080	0.999	381.609	381.532	1.000
설계새그 f (m)	8.842	좌동	-	116.176	좌동	-	11.430	좌동	-
수평장력 H (kN)	326.217	326.290	1.000	324.900	328.980	1.013	325.198	325.387	1.000

표 6. PPWS 무응력장 변화에 대한 새그민감도(df/dS_0)

구 분	측경간(좌)				중앙경간				측경간(우)			
	수치 해석 (현수선)	미분 관계식			수치 해석 (현수선)	미분 관계식			수치 해석 (현수선)	미분 관계식		
새그차 (m)	현수선	오차 (%)	포물선	오차 (%)	현수선	오차 (%)	포물선	오차 (%)	현수선	오차 (%)	포물선	오차 (%)
0.1	7.864		-0.23	-0.24	1.913		-0.04	-0.21	6.528		-0.26	-0.35
0.2	7.881		-0.45	-0.46	1.914		-0.08	-0.25	6.545		-0.52	-0.61
0.3	7.898	7.846	-0.66	-0.68	1.914	1.912	-0.12	-0.29	6.562	6.511	-0.78	-0.87
0.4	7.915		-0.87	-0.89	1.915		-0.16	-0.33	6.579		-1.03	-1.12
0.5	7.931		-1.08	-1.09	1.916		-0.19	-0.36	6.596		-1.29	-1.37

표 7. PPWS 응력장 변화에 대한 새그민감도(df/dS)

구 분	측경간(좌)					중앙경간				측경간(우)					
새그차 (m)	수치 해석 (현수선)	미분 관계식				수치 해석 (현수선)	미분 관계식				수치 해석 (현수선)	미분 관계식			
		현수선	오차 (%)	포물선	오차 (%)		현수선	오차 (%)	포물선	오차 (%)		현수선	오차 (%)	포물선	오차 (%)
0.1	9.833	9.777	-0.57	9.781	-0.52	1.932	1.931	-0.04	1.928	-0.20	7.534	7.501	-0.44	7.495	-0.52
0.2	9.889		-1.13		-1.09	1.932		-0.08		-0.24	7.567		-0.87		-0.95
0.3	9.946		-1.70		-1.65	1.933		-0.12		-0.28	7.601		-1.31		-1.39
0.4	10.00		-2.26		-2.22	1.934		-0.16		-0.32	7.634		-1.75		-1.82
0.5	10.06		-2.83		-2.78	1.935		-0.20		-0.36	7.668		-2.18		-2.26

표 8. PPWS 길이변화에 대한 새그민감도비(응력장/무응력장)

구 분	측경간(좌)				중앙경간				측경간(우)			
새그차(m)	수치해석 (현수선)	미분 관계식		수치해석 (현수선)	미분 관계식		수치해석 (현수선)	미분 관계식		수치해석 (현수선)	미분 관계식	
		현수선	포물선		현수선	포물선		현수선	포물선		현수선	포물선
0.1	1.250	1.246	1.247	1.010	1.010	1.010	1.154	1.152	1.152	1.152	1.152	1.152
0.2	1.255			1.009								
0.3	1.259			1.010								
0.4	1.263			1.010								
0.5	1.268			1.010								

3.1 PPWS 길이변화

각 경간의 PPWS의 길이가 감소한다면 무응력장, 응력장 모두 감소하게 되고 결국 새그도 앞의 그림 3의 목표형상 보다 상향되어 감소하게 된다. 이때 표 6, 표 7은 각각 무응력장, 응력장 변화에 대한 새그민감도를 나타낸다. 또한, 표 8은 응력장 변화의 새그민감도를 무응력장 변화의 새그민감도로 나눈 값이며, 중앙경간은 1% 정도의 차이가 발생하나 측경간은 15~25%의 상당히 큰 차이가 발생한다. 따라서, 측경간 새그조정시 PPWS의 응력상태에 대한 정확한 평가에 따라 새그민감도를 수정하여 적용해야 할 것으로 생각되며 실제 현수교 PPWS 가설현장에서 확인하여 실증해야 할 것이다.

3.2 PPWS 온도변화

PPWS 온도변화시 탄성계수 변화의 반영 여부를 나누어서 비교분석하며 탄성계수 감소율은 $0.1\%/^{\circ}\text{C}$ 를 적용한다. PPWS 온도변화에 따른 새그민감도는 중앙경간 및 측경간은 표 9~11과 같으며 정착경간은 식 (8)에 의하여 PPWS 1본의 온도변화에 따른 장력민감도(dF/dT_{emp})는 $-6.982 \text{ kN}/^{\circ}\text{C}$ 이다.

3.2.1 탄성계수 변화를 무시한 경우

표 9에 새그민감도가 나타나 있다.

3.2.2 탄성계수 변화를 고려한 경우

표 10에 새그민감도가 나타나 있으며, 미분 관계식의 경

표 9. PPWS 온도변화에 따른 탄성계수 변화를 무시할 경우의 새그민감도(df/dT_{emp})

구 분	측경간(좌)					중앙경간					측경간(우)				
온도차 (°C)	수치 해석 (현수선) mm/°C	미분 관계식				수치 해석 (현수선) mm/°C	미분 관계식				수치 해석 (현수선) mm/°C	미분 관계식			
		현수선 mm/°C	오차 (%)	포물선 mm/°C	오차 (%)		현수선 mm/°C	오차 (%)	포물선 mm/°C	오차 (%)		현수선 mm/°C	오차 (%)	포물선 mm/°C	오차 (%)
1	32.48	32.504	0.07	32.500	0.06	27.15	27.155	0.01	27.109	-0.16	29.79	29.817	0.08	29.790	-0.01
10	32.26		0.75		0.74	27.13		0.09		-0.08	29.59		0.77		0.86
15	32.14		1.14		1.13	27.12		0.14		-0.03	29.47		1.16		1.07
20	32.01		1.54		1.53	27.11		0.19		0.01	29.36		1.55		1.46
30	31.76		2.35		2.34	27.08		0.28		0.11	29.14		2.33		2.24
-1	32.53		-0.07		-0.09	27.16		-0.01		-0.18	29.84		-0.08		-0.17
-10	32.74		-0.71		-0.72	27.21		-0.09		-0.26	30.05		-0.77		-0.86
-15	32.85		-1.05		-1.06	27.19		-0.14		-0.31	30.16		-1.15		-1.24
-20	32.96		-1.37		-1.38	27.23		-0.19		-0.36	30.28		-1.53		-1.62
-30	33.16		-1.96		-1.97	27.16		-0.28		-0.45	30.51		-2.28		-2.36

표 10. PPWS 온도변화에 따른 탄성계수 변화 고려할 경우의 새그민감도(df/dT_{emp})

구분	측경간(좌)					중앙경간					측경간(우)				
온도차 (°C)	수치 해석 (현수선) mm/°C	미분 관계식				수치 해석 (현수선) mm/°C	미분 관계식				수치 해석 (현수선) mm/°C	미분 관계식			
		현수선 mm/°C	오차 (%)	포물선 mm/°C	오차 (%)		현수선 mm/°C	오차 (%)	포물선 mm/°C	오차 (%)		현수선 mm/°C	오차 (%)	포물선 mm/°C	오차 (%)
1	34.23	32.504	-5.05	32.500	-5.06	28.45	27.155	-4.56	27.109	-4.72	31.31	29.817	-4.78	29.790	-4.87
10	33.95		-4.25		-4.26	28.44		-4.51		-4.67	31.06		-4.02		-4.10
15	33.79		-3.80		-3.81	28.43		-4.48		-4.64	30.93		-3.59		-3.68
20	33.63		-3.34		-3.36	28.42		-4.45		-4.61	30.79		-3.17		-3.26
30	33.31		-2.42		-2.43	28.40		-4.39		-4.55	30.53		-2.33		-2.42
-1	34.30		-5.23		-5.24	28.46		-4.57		-4.73	31.37		-4.95		-5.04
-10	34.58		-5.99		-6.01	28.47		-4.62		-4.79	31.63		-5.72		-5.80
-15	34.73		-6.41		-6.42	28.48		-4.65		-4.82	31.77		-6.14		-6.23
-20	34.88		-6.81		-6.82	28.49		-4.69		-4.85	31.91		-6.57		-6.65
-30	35.17		-7.58		-7.59	28.51		-4.75		-4.91	32.21		-7.42		-7.50

표 11. PPWS 탄성계수 변화에 따른 새그민감도비(변화고려/변화무시)

구분	기본식(현수선)								
	측경간(좌)			중앙경간			측경간(우)		
온도차 (°C)	탄성계수 변화무시 (mm/°C)	탄성계수 변화고려 (mm/°C)	새그 민감도비	탄성계수 변화무시 (mm/°C)	탄성계수 변화고려 (mm/°C)	새그 민감도비	탄성계수 변화무시 (mm/°C)	탄성계수 변화고려 (mm/°C)	새그 민감도비
1	32.48	34.23	1.054	27.15	28.45	1.048	29.79	31.31	1.051
10	32.26	33.95	1.052	27.13	28.44	1.048	29.59	31.06	1.050
15	32.14	33.79	1.051	27.12	28.43	1.048	29.47	30.93	1.050
20	32.01	33.63	1.051	27.11	28.42	1.048	29.36	30.79	1.049
30	31.76	33.31	1.049	27.08	28.40	1.049	29.14	30.53	1.048
-1	32.53	34.30	1.054	27.16	28.46	1.048	29.84	31.37	1.051
-10	32.74	34.58	1.056	27.21	28.47	1.046	30.05	31.63	1.053
-15	32.85	34.73	1.057	27.19	28.48	1.047	30.16	31.77	1.053
-20	32.96	34.88	1.058	27.23	28.49	1.046	30.28	31.91	1.054
-30	33.16	35.17	1.061	27.16	28.51	1.050	30.51	32.21	1.056
평균	-	-	1.054	-	-	1.048	-	-	1.051

우 탄성계수 변화는 고려하지 않았다.

3.2.3 비교분석

상기 표 11에서 현수선 기본식에 대하여 온도변화에 따른 탄성계수 변화시 평균 5%정도 새그민감도가 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 경간장 변화

경간장을 변화시키는 요인은 주탑정부의 수평변위이며 울산대교의 주탑은 콘크리트이므로 탑주의 온도변화가 완만하기 때문에 기온이 변화할 때 주탑정부의 실제적인 고도 변화는 이론값에 비해 훨씬 적다(이승우, 2003). 현수선 기본식에 대한 비선형 수치해석법으로 ± 0.3 m의 경간장 변화에 대한 정확한 새그민감도를 산정하면 표 12와 같다.

3.4 미분 관계식에 의한 새그민감도 비교

다음 표 13은 케이블 형상(현수선 혹은 포물선)에 따라 미분 관계식에 의한 새그민감도를 비교한 결과를 나타낸다.

표 12. 현수교 경간장 변화에 대한 새그민감도(df/dL)

경간장차 (m)	수치해석(현수선)		
	측경간(좌)	중앙경간	측경간(우)
0.1	6.866	1.862	6.023
0.2	6.948	1.863	6.115
0.3	7.003	1.864	6.208
-0.1	6.664	1.858	5.838
-0.2	6.552	1.857	5.749
-0.3	6.437	1.855	5.664

새그민감도비를 살펴보면 케이블 형상에 따른 차이가 최대 0.17%정도로 아주 미미한 것을 알 수 있다. 이것은 포물선의 경우, 수평장력은 현수선 형상으로 구한 값을 사용하며, 응력장(식 (1)) 계산시 편리를 위하여 먹급수(식 (2))로 전개하여 앞의 몇 항을 취하여 적분하게 되는데, 이때 취하는 전개항수를 증가시킬수록 현수선에 더 근접하게 되기 때문으로 판단된다.

표 13. 케이블 형상에 따른 새그민감도비(포물선/현수선)

새그민감도 비교항목	측경간(좌)			중앙경간			측경간(우)		
	현수선	포물선	새그민감도비	현수선	포물선	새그민감도비	현수선	포물선	새그민감도비
무응력장 변화(df/dS_0)	7.846	7.845	0.9999	1.912	1.909	0.9984	6.511	6.505	0.9991
응력장 변화(df/dS)	9.777	9.781	1.0004	1.931	1.928	0.9984	7.501	7.495	0.9992
온도변화(df/dT_{emp}) (mm/°C)	32.504	32.500	0.9999	27.155	27.109	0.9983	29.817	29.790	0.9991

그림 5. 먹급수 전개항수에 따른 새그민감도 비교

표 14. PPWS 단면적 변화에 대한 새그민감도(df/dS)

구 분	측경간(좌)				중앙경간				측경간(우)			
	수치 해석 (현수선)	미분 관계식			수치 해석 (현수선)	미분 관계식			수치 해석 (현수선)	미분 관계식		
		현수선	증감율 (%)	포물선		현수선	증감율 (%)	포물선		현수선	증감율 (%)	포물선
-2	9.777	9.977	2.04	9.981	1.931	1.969	1.95	1.964	7.501	7.654	2.04	7.648
-1	9.777	9.876	1.01	9.880	1.931	1.950	0.96	1.946	7.501	7.577	1.01	7.571
0	-	9.777	0.00	9.781	-	1.931	0.00	1.928	-	7.501	0.00	7.495
1	9.777	9.680	-0.99	9.684	1.931	1.913	-0.94	1.910	7.501	7.427	-0.99	7.421
2	9.777	9.585	-1.96	9.589	1.931	1.895	-1.87	1.893	7.501	7.354	-1.96	7.348

표 15. PPWS 단면적 변화에 대한 현수선 기본식의 응력장 및 새그 변화량

구 분	측경간(좌)		중앙경간		측경간(우)	
	수치해석(현수선)		수치해석(현수선)		수치해석(현수선)	
	ΔS (m)	Δf (m)	ΔS (m)	Δf (m)	ΔS (m)	Δf (m)
-2	1.58E-06	1.54E-05	-7.76E-07	-1.50E-06	2.16E-06	1.62E-05
-1	4.57E-06	4.46E-05	-3.84E-07	-7.41E-07	6.76E-06	5.07E-05
0	-	-	-	-	-	-
1	1.84E-06	1.80E-05	3.76E-07	7.27E-07	-1.20E-07	-8.71E-07
2	3.86E-07	3.78E-06	7.45E-07	1.44E-06	2.30E-07	1.73E-06

그림 5는 포물선 형상의 케이블 길이변화(응력장, 무응력장)에 대한 새그민감도를 먹급수 전개항수(식 (2))에 따라 도시한 결과이며 대체로 6항까지 취하여 적분하면 그 이상의 고차항($O(y')$) 모두를 취하여 적분한 결과와 거의 차이가 없음을 알 수 있다.

3.5 PPWS 단면적 변화

문헌(장승필 등, 2008)에 의하면 강선 제조사의 강선 직경 허용오차를 ± 0.05 mm로 규정하고 있으며 면적으로 환산하면 $\pm 1.8\%$ 정도 된다. PPWS 단면적 변화전후의 무응력장의 길이는 불변이며 단면적이 변화하면 단위중량도 동일 비율로 변화한다는 사항을 고려하여 계산한다. 표 14는 단면적

이 $\pm 2\%$ 까지 변한다고 가정하여 산정해본 새그민감도 및 단면적 변화전(0%)에 대한 증감율을 나타내며 표 15는 이에 따른 응력장과 새그변화량을 나타낸다. 표 15를 살펴보면, 단면적 변화에 대한 실제 새그변화량이 거의 없음으로 단면적 변화에 대한 새그민감도는 고려하지 않아도 될 것으로 판단된다.

3.6 PPWS 결보기 탄성계수 변화

문헌(장승필 등, 2008)에 의하면 강선 제조사의 강선 탄성계수 허용오차를 $\pm 2.4\%$ 로 규정하고 있다. 이는 온도변화와는 무관한 강선 제조시 물성치의 범위를 나타내며 단면적과 마찬가지로 실제 PPWS 가설시 새그변화 요인은 아니다.

표 16. PPWS 겹보기 탄성계수 변화에 대한 새그민감도(df/dS)

구 분	측경간(좌)					중앙경간					측경간(우)				
탄성계수 변화 (%)	수치 해석 (현수선)	미분 관계식				수치 해석 (현수선)	미분 관계식				수치 해석 (현수선)	미분 관계식			
		현수선	증감율 (%)	포물선	증감율 (%)		현수선	증감율 (%)	포물선	증감율 (%)		현수선	증감율 (%)	포물선	증감율 (%)
-3	9.747	9.718	-0.61	9.722	-0.61	1.931	1.930	-0.03	1.927	-0.03	7.486	7.471	-0.41	7.465	-0.41
-2	9.757	9.738	-0.40	9.742	-0.41	1.931	1.930	-0.02	1.927	-0.02	7.491	7.481	-0.27	7.475	-0.27
-1	9.767	9.757	-0.20	9.761	-0.21	1.931	1.931	-0.01	1.928	-0.01	7.496	7.491	-0.14	7.485	-0.14
0	-	9.777	0.00	9.781	0.00	-	1.931	0.00	1.928	0.00	-	7.501	0.00	7.495	0.00
1	9.787	9.796	0.20	9.801	0.20	1.931	1.931	0.01	1.928	0.01	7.506	7.511	0.13	7.505	0.13
2	9.796	9.815	0.39	9.820	0.39	1.931	1.931	0.02	1.928	0.02	7.511	7.521	0.26	7.515	0.26
3	9.806	9.835	0.59	9.839	0.59	1.931	1.931	0.03	1.928	0.03	7.516	7.531	0.39	7.524	0.39

표 17. PPWS 겹보기 탄성계수 변화에 대한 새그민감도(df/dE)

구 분	측경간(좌)			중앙경간			측경간(우)		
탄성계수변화 (%)	수치해석(현수선)			수치해석(현수선)			수치해석(현수선)		
	ΔS (m)	Δf (m)	$\Delta f/\Delta E$ (m/MPa)	ΔS (m)	Δf (m)	$\Delta f/\Delta E$ (m/MPa)	ΔS (m)	Δf (m)	$\Delta f/\Delta E$ (m/MPa)
-3	0.006	0.054	9.02E-06	0.021	0.040	6.69E-06	0.006	0.047	7.83E-06
-2	0.004	0.036	8.99E-06	0.014	0.027	6.63E-06	0.004	0.031	7.78E-06
-1	0.002	0.018	9.08E-06	0.007	0.013	6.55E-06	0.002	0.015	7.75E-06
0	-	-	-	-	-	-	-	-	-
1	-0.002	-0.017	-8.70E-06	-0.007	-0.013	-6.40E-06	-0.002	-0.015	-7.50E-06
2	-0.004	-0.034	-8.60E-06	-0.013	-0.025	-6.40E-06	-0.004	-0.030	-7.50E-06
3	-0.005	-0.052	-8.60E-06	-0.020	-0.038	-6.30E-06	-0.006	-0.045	-7.40E-06

PPWS를 구성하고 있는 강선의 탄성계수가 PPWS의 겹보기 탄성계수가 된다고 가정하고, $\pm 3\%$ 내의 겹보기 탄성계수 변화에 따른 무응력장은 불변이며 이를 고려한 응력장의 새그민감도를 산정하면 표 16과 같다.

탄성계수 변화에 의해 새그민감도가 거의 변화가 없으며 중앙경간의 경우 현수선에 대한 비선형 수치해석법과 미분 관계식으로 구한 새그민감도값이 동일하다. 표 17을 살펴보면 현수선 기본식에 의한 응력장 및 새그변화량(양의 값은 새그증가를 의미함)의 최대값은 각각 중앙경간에서 2.1 cm, 측경간(좌)에서 5.4 cm 정도로 작아서 단면적변화와 마찬가지로 새그민감도를 고려할 필요가 없을 것으로 판단된다.

4. 결 론

현수교의 주케이블의 가설 완료시 목표형상은 현수교 완성시 설계형상에 직접적인 영향을 미치므로 고정밀도의 시공 관리가 반드시 필요하다. 이를 위해서 주케이블에 대한 형상 관리를 수행하며 주로 새그와 장력을 관리하게 된다. 중앙경간 및 측경간은 주케이블 자체의 장력은 측정할 수 없으므로 형상측량에 의해 장력을 정확히 추정하며 정착경간은 장력을 직접 측정한다. 형상측량의 주요 측정점은 각 경간 새그점과 새들부이며 새그점의 경우, 본 연구의 대상으로 케이블 가설단위인 PPWS의 반복 시주에 의해 조정하여 형상을 조절한다. 또한, 정착경간의 정착단에서 장력측정 시스템을 설치하고 측정하여 장력을 조정한다. 이 때 반드시 필요한 정보가 새그 및 장력민감도이며 본 연구에서는 이를 산정하

는 방법과 이를 이용하여 PPWS의 형상조정량인 새그변화량을 산정하는 방법을 다음과 같이 제안하였다.

1. 새그민감도는 케이블 형상(현수선, 포물선)에 따른 기본식들이 수평장력의 함수임을 이용하여 수평장력에 대한 미분관계식(chain rule)을 이용하여 산정하는 방법을 제안하였다. 또한, 장력민감도 산정방법도 제안하였다.
2. 상기 1)의 제안방법과 비교하기 위해 현수선 기본식에 대하여 비선형 수치해석법을 적용하여 새그변화요인의 변화에 대한 새그민감도를 산정하는 수치해석 흐름도를 제안하였다.
3. 상기 1), 2)의 방법을 토대로 실제 현장에서는 다양한 새그변화 요인들이 복합적으로 발생함으로 이를 고려하여 형상조정을 위해 필요한 케이블의 최종 새그변화량을 산정하는 방법을 제안하였다.

자유 매달림 상태의 PPWS는 현수선 형상이며 이를 기초로 하는 현수선 기본식으로부터 비선형 수치해석반복법으로 PPWS 길이변화 및 온도변화, 경간장 변화, PPWS 단면적 및 겹보기 탄성계수의 변화에 대한 새그민감도를 산정하였다. 장력조정을 위한 온도변화에 따른 장력민감도를 산정하였으며 또한, 케이블 기본식(현수선, 포물선)은 수평장력의 함수이므로 이에 대한 미분 관계식을 유도하여 앞의 각 매개변수에 대하여 새그민감도를 평가하고 현수선 기본식에 대한 비선형 수치해석 흐름도를 사용한 새그민감도값과 비교하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기지의 무응력장 혹은 새그값에 대한 케이블의 수평장력 산정시 현수교의 중앙경간은 현수선 기본식을 적용해야하며

측경간은 현수선이나 포물선 기본식을 적용할 수 있다. 중앙 경간의 경우 동일 새그값에 대해 현수선과 포물선 기본식에 의해 산정된 수평장력이 1%이상 차이가 발생하며 마찬가지로 동일 수평장력에 대해 산정된 새그값이 1%이상 차이가 발생함으로 포물선을 적용하면 형상 오차가 발생한다.

2. 현수선 기본식을 이용한 비선형 수치해석 새그민감도 산정법보다 케이블 기본식(현수선, 포물선)의 수평장력에 대한 미분관계식을 이용한 새그민감도 산정법이 더욱 간편한 계산방법으로 실제 현장에서 적용하기 적합하며 케이블 형상 가정에 따른 새그민감도 차이도 거의 없다.
3. 현재 시공중인 울산대교를 대상으로 실시설계시 산정된 주케이블 가설원료 형상에 대하여 현수선 기본식의 비선형 수치해석 및 미분관계식의 새그민감도 결과를 비교하면 다음과 같다.

- ① PPWS 길이변화시, 중앙경간은 양 응력상태(무응력장 혹은 응력장)에 대하여 새그민감도가 1%의 차이로 미소하여 양 값을 적용 가능하나, 측경간은 차이가 15~25%이므로 새들부에서 길이조절시 PPWS의 응력상태에 대한 면밀한 검토후 새그민감도를 수정하여 적용해야 할 것으로 판단된다. 그리고, 이는 현장 가설시 실증해야 할 것이다.
- ② PPWS 온도변화시, 일반적으로 탄성계수의 온도변화를 반영하지 않으나 본 연구에서는 이를 고려하여 중앙 및 측경간의 새그민감도를 산정하였다. 온도변화에 따른 탄성계수 감소율을 0.1%/°C로 적용한 후 새그민감도가 5%정도 증가함을 알 수 있었다. 정착경간은 새그가 거의 없는 직선형상이므로 온도에 대한 장력민감도를 산정하였다. 온도변화에 대한 새그 및 장력민감도에 대한 실증 또한 현장 가설시 이루어져야 할 것이다.
- ③ 경간장의 변화에 대해, 강주탑의 경우 온도에 의한 탑변위가 상당히 발생하므로 반드시 고려해야하며, 대상교량은 콘크리트주탑이므로 탑변위가 미소할 것으로 생각되어 ±0.3 m의 작은 경간장 변화에 대해 새그민감도를 산정하였다.
- ④ PPWS 단면적 변화에 의해 새그는 발생하지 않으며, 시간에 따른 결보기 탄성계수 변화에 의해 새그민감도는 변화가 거의 없다.

향후에는 본 연구에서 제안된 새그 및 장력민감도 산정방법을 실교 PPWS 가설현장에 적용하여 실용성을 평가 및 검증해 보고 실교 현장의 시공 여건이 반영된 개선된 방법을 도출해야 할 것이며 이 일련의 과정이 우리나라 현수교 주케이블 가설기술 자립 및 고도화에 기여하리라고 기대해 본다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업 초장대교량사업단의 연구비 지원[과제명: 현수교 케이블 가설장비/공법 및 형상관리(PPWS), 과제번호: 08기술혁신E01]에 의하여 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- 김상효, 조광일, 박주양(2006) 일사에 의한 온도변화에 따른 강 사장교의 동적특성 변화. 한국전산구조공학회 학술발표논문집, 한국전산구조공학회, pp.1040-1047.
- 울산하버브릿지주식회사(2010) 울산대교 및 접속도로 민간투자사업 실시설계 구조계산서(II). 현대건설.
- 이승우(2003) 실무 현수교의 계획과 설계. 건설정보사.
- 장승필 등(2008) 장대교량용 케이블 소재 적용지침. 대한토목학회.
- 최현석(2010) 현수교 새들의 곡률 및 셋백을 고려한 주케이블의 목표형상 산정. 대림기술정보지.
- Irvine, H.M. (1981) *Cable Structures*. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
- Steinman, D.B. (1929) *A Practical Treatise on Suspension Bridges*. John Wiley & Sons, New York, USA.

기 호

- V_0 : 케이블 시점의 수직장력
 V_1 : 케이블 종점의 수직장력
 L : 케이블의 수평방향 길이
 h : 케이블의 수직방향 높이
 T_0 : 케이블 시점의 장력
 T_1 : 케이블 종점의 장력
 H : 케이블의 수평장력
 A : 케이블의 단면적
 E : 케이블의 결보기 탄성계수
 α : 케이블의 선팽창계수($1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$)
 T_{emp} : 케이블의 온도
 F : 정착경간 케이블의 장력
 $C = \frac{H}{W}$

$$K_1 = \sinh^{-1} \left(\frac{h}{2C \sinh \frac{L}{2C}} \right) - \frac{L}{2C}$$

$$K_2 = -C \cosh K_1$$

부록. 새그민감도 미분 관계식

(a) 현수선

$$\begin{aligned} \frac{df}{dS_0} &= \frac{df}{dH} \frac{dS_0}{dH} = \\ &\left(2AE \left(-LW \left(-2H^2 + h^2 W^2 + H^2 \left(-\cosh \left[\frac{LW}{2H} \right] + 2 \cosh \left[\frac{LW}{H} \right] + \cosh \left[\frac{3LW}{2H} \right] \right) \right) + 8H^3 \sinh \left[\frac{LW}{2H} \right] \right) \tanh \left[\frac{LW}{4H} \right] \right) / \\ &\left(H \left(\left(16AEH \sinh \left[\frac{LW}{2H} \right]^2 \left(-LW \cosh \left[\frac{LW}{2H} \right] + 2H \sinh \left[\frac{LW}{2H} \right] \right) + \sqrt{4 + \frac{h^2 W^2 \operatorname{csch} \left[\frac{LW}{2H} \right]^2}{H^2}} \right. \right. \right. \\ &\left. \left. \left(LW(3H^2 - 2h^2 W^2) + H^2 \left(LW \left(-4 \cosh \left[\frac{LW}{H} \right] + \cosh \left[\frac{2LW}{H} \right] \right) + 4H \sinh \left[\frac{LW}{H} \right] - 2H \sinh \left[\frac{2LW}{H} \right] \right) \right) \right) \right) \right) \right) \\ \frac{df}{dS} &= \frac{df}{dH} \frac{dS}{dH} = \\ &\frac{e^{\frac{3LW}{2H}} \left(-LW \left(-2H^2 + h^2 W^2 + H^2 \left(-\cosh \left[\frac{LW}{2H} \right] + 2 \cosh \left[\frac{LW}{H} \right] + \cosh \left[\frac{3LW}{2H} \right] \right) \right) + 8H^3 \sinh \left[\frac{LW}{2H} \right]^3 \right)}{ \left(-1 + e^{\frac{LW}{2H}} \right) \left(1 + e^{\frac{LW}{2H}} \right)^3 H^2 \left(-2H - LW + e^{\frac{LW}{H}} (2H - LW) \right) } \end{aligned}$$

여기서, e: 자연대수

(b) 포물선

$$\begin{aligned} \frac{df}{dS_0} &= \frac{df}{dH} \frac{dS_0}{dH} = \\ &\left(\frac{L^2 W}{8H^2} \right) / \left(\frac{1}{8LW} \left((-2hH + L^2 W) \sqrt{4 + \frac{(-2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} + (2hH + L^2 W) \sqrt{4 + \frac{(2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} + 4H^2 L^2 \right. \right. \\ &\left. \left. - \frac{\sqrt{4 + \frac{(-2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} \left(\ln[2] + \ln \left[2hH - L^2 W + \sqrt{4H^2(h^2 + L^2) - 4hHL^2 W + L^4 W^2} \right] \right)}{\sqrt{4H^2(h^2 + L^2) - 4hHL^2 W + L^4 W^2}} \right. \right. \\ &\left. \left. + \frac{\sqrt{4 + \frac{(2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} \left(\ln[2] + \ln \left[2hH + L^2 W + \sqrt{4H^2(h^2 + L^2) + 4hHL^2 W + L^4 W^2} \right] \right)}{\sqrt{4H^2(h^2 + L^2) + 4hHL^2 W + L^4 W^2}} \right) \right) - \frac{H \left(\frac{h^2}{L} + L + \frac{L^3 W^2}{12H^2} \right)}{EA} \right) \\ \frac{df}{dS} &= \frac{df}{dH} \frac{dS}{dH} = \\ &\left(L^3 W^2 \right) / \left(H \left((2hH + L^2 W) \sqrt{4 + \frac{(-2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} + (-2hH + L^2 W) \sqrt{4 + \frac{(2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} + \right. \right. \\ &\frac{4H^2 L^2 \sqrt{4 + \frac{(-2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} \left(1 + \ln[2] + \ln \left[2hH - L^2 W + \sqrt{4H^2(h^2 + L^2) - 4hHL^2 W + L^4 W^2} \right] \right)}{\sqrt{4H^2(h^2 + L^2) - 4hHL^2 W + L^4 W^2}} \\ &\left. \left. - \frac{4H^2 L^2 \sqrt{4 + \frac{(2hH + L^2 W)^2}{H^2 L^2}} \left(1 + \ln[2] + \ln \left[2hH + L^2 W + \sqrt{4H^2(h^2 + L^2) + 4hHL^2 W + L^4 W^2} \right] \right)}{\sqrt{4H^2(h^2 + L^2) + 4hHL^2 W + L^4 W^2}} \right) \right) \end{aligned}$$

여기서, W=W_{eq}, ln : 자연로그