

모형 현수선을 이용한 현수교 PPWS 형상관리를 위한 새그민감도의 실험적 검증

정 운* · 서주원** · 이성형***

Jeong, Woon*, Seo, Ju Won**, Lee, Sung Hyung***

Experimental Verification of Sag Sensitivities using Catenary Model for PPWS Configuration Control in a Suspension Bridge

ABSTRACT

PPWS, a large number of which a main cable of a suspension bridge consists of, must be precisely erected at a target location under construction considering the differences among design conditions. The absolute sag is measured for several PPWSs, which are reference strands and the relative sag is surveyed from them to other PPWSs, which are divided into several groups. And the adjustment of PPWS length is performed to erect it at target configuration. When PPWS is being under erection in a real bridge site, the procedures are as follows; evaluate sag sensitivities according to sag variation factors, calculate an adjustment length of PPWS corresponding to them and adjust a sag of PPWS by controlling the calculated amount of PPWS length. In this study, the differential-related equations of sag sensitivity were proposed for support movement of PPWS. Before site demonstration study of a series of them, we established a catenary model system and accomplished verification tests of them. From test results, the validation of them was done.

Key words : Suspension bridge, PPWS, Configuration control, Catenary model, Support movement, Sag sensitivity equation

초 록

현수교 주케이블은 다수의 PPWS로 구성되며 설계조건과의 차이를 고려하여 이들의 시공위치에 정확히 가설하는 작업이 필요하다. 이를 위하여 다수의 PPWS 중 수개의 PPWS는 절대 새그측량을 수행하며 이를 기준으로 나머지 PPWS를 몇 개의 그룹으로 나누어 상대 새그를 측량하여 목표로 하는 시공위치에 가설하기 위한 PPWS 길이 조정작업을 수행한다. 현장여건을 반영한 시공은 새그변화요인에 대하여 새그민감도를 산정하고 이에 해당하는 PPWS 길이 조정량을 계산하여 새그를 조정하는 순서로 진행된다. 본 연구에서는 PPWS 양단 지지점의 변위에 따른 새그민감도의 미분관계식을 도출하였다. 그리고, 일련의 연구수행으로 제안된 새그민감도 산정식의 현장 실증에 선행하여 모형 현수선 시스템을 구축하고 이에 대한 검증실험을 수행하였으며 실험결과로부터 도출된 새그민감도 산정식의 타당성을 확인하였다.

검색어 : 현수교, PPWS, 형상관리, 모형 현수선, 양단 지지점 변위, 새그민감도 산정식

* 정희원·교신저자·현대건설 연구개발본부 차장, P.E., 공학석사 (Corresponding Author·Hyundai E&C·maskwj@hdec.co.kr)

** 정희원·현대건설 토목환경사업본부 부장, 공학박사 (jwseo@hdec.co.kr)

*** 정희원·현대건설 연구개발본부 과장, 공학석사 (hlstl@hdec.co.kr)

Received May 24, 2013/ revised August 7, 2013/ accepted March 2, 2014

1. 서론

현수교 시공시 주케이블의 형상은 완성시 교량 목표형상에 영향을 미치는 가장 중요한 인자로서 시공관리의 핵심이다. 따라서, 주케이블을 구성하는 강선다발 묶음인 스트랜드들의 각각의 목표 위치에 시공하기 위하여 제어와 관리가 필수적이다. 이를 위해서 중앙 및 측경간은 새그측량에 의한 새그조절로 시공위치를 직접 조정하고 정착경간은 장력을 직접 측정함으로써 전체 현수교 주케이블의 형상을 관리하게 된다. 중앙 및 측경간의 케이블은 자유매달림 상태의 현수선 형상이며 정착경간은 거의 직선 형상이다. 따라서, 현수선에 대한 이해를 통해 중앙 및 측경간의 새그조정을 수행할 수 있으며 현장여건을 반영한 새그민감도를 산정해야 한다. 이에 관한 기술문헌으로 Jeong et al., 2012a를 살펴보면 현장여건을 고려한 이론적인 새그민감도 산정법을 도출하였으며 실현수교를 대상으로 수치적으로 새그민감도를 산정하였다. 향후 이에 대한 검증을 위하여 실제 현수교 시공현장에 적용하여 타당성을 검증할 필요가 있으며, 이보다 선행하여 본 연구에서는 실제 현수교 케이블을 모사하는 모형 현수선 시스템을 구축하고 새그민감도 산정법에 대한 매개변수 실험을 수행하였다.

2. 형상민감도

2.1 개요

현수교 PPWS 가설시 PPWS의 온도, 길이 및 양단의 변위가 주요 영향인자이며 이 영향인자의 설계 기준값과의 차이가 반영된 현재상태의 가설위치를 산정하고 시공하게 되는데 이를 “형상관리”라 한다. 현수교 PPWS의 형상관리를 수행하기 위해서는, 주요 영향인자의 변화량에 대한 새그 및 장력의 변화량을 나타내는 새그 및 장력민감도를 적용하여 Table 1과 같이 PPWS의 “형상민감도”를 산정해야 한다(Jeong et al., 2012b).

이에 대하여 새그민감도의 영향인자인 PPWS 길이, 온도변화 및 탑정부 수평변위변화(경간장차)의 요인들의 조합에 의한 새그민감도 산정방법이 Jeong et al., 2012a에 제안되어 있다. 실제 현수교

Table 1. Outline of Configuration Control

Control Item	Required Parameter	Influence Factor	Application Span
Sag	Sag Sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> Length & Temperature change of PPWS Vertical & Horizontal of Tower top 	Main & Side span
Tension	Tension Sensitivity	<ul style="list-style-type: none"> Temperature change of PPWS 	Anchor span

PPWS 시공 현장에서는 설계시 가정한 영향인자의 기준값과 차이가 발생하는 영향인자들의 조합에 의한 설계 새그점의 위치변화량을 산정하고 이를 반영한 시공위치에 각 경간의 새그점이 위치하도록 PPWS의 길이를 조절하면서 전체 PPWS의 형상을 관리하게 된다. 이 공정에서 필요한 것이 형상민감도이며 이 중에서 새그민감도는 미분관계식이나 케이블 간략해석에 의해 산출할 수 있으며 PPWS 가설시 시공위치에 대한 합리적인 예측값을 제공해준다.

2.2 새그민감도 미분관계식

본 절에서는 기존 Jeong et al., 2012a의 새그민감도 산정법 연구의 후속 연구로서 탑정부 수평 및 수직변위 변화(경간장 및 높이차)에 대한 새그민감도 미분관계식을 도출하였다. 기본적으로 각 경간의 응력장은 불변이며 경간장차와 주탑의 높이차가 발생하면 새그의 기준이 되는 현이 이동함으로 새그값(f)보다는 새그점의 연직좌표(y_f)에 대한 민감도를 계산해야 한다. 이로부터 Fig. 1과 Jeong et al., 2012a의 기호 정의를 참조하여 케이블 형상을 현수선으로 가정하고 새그민감도 미분관계식을 유도하면 다음과 같다.

Eq. (1)과 같이 새그점의 연직좌표는 케이블의 수평장력(H), 경간장(L), 양단 높이차(h)의 함수이며

$$y_f = fn(H, L, h) \tag{1}$$

이에 대한 전미분은 다음 Eq. (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$dy_f = \frac{\partial y_f}{\partial H} dH + \frac{\partial y_f}{\partial L} dL + \frac{\partial y_f}{\partial h} dh \tag{2}$$

Eq. (3)과 같이 무응력장(S_0)은 케이블의 수평장력(H), 경간장(L), 양단 높이차(h)의 함수이고 각 경간마다 불변이므로 다음 Eq. (4)와 같이 고려할 수 있다.

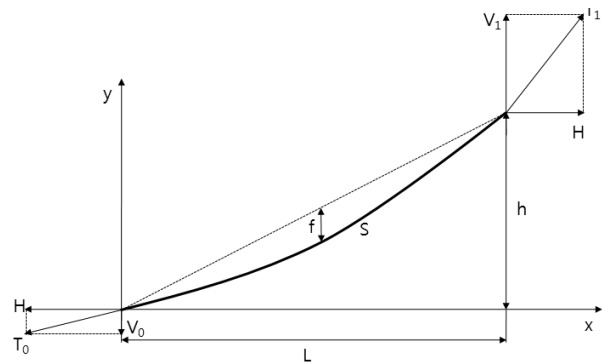


Fig. 1. Symbol Definition of Cable Stressed Length

$$S_0 = S - \Delta S = f_n(H, L, h) \quad (3)$$

여기서, 기호는 부록 참조(Jeong et al., 2012b, 2013)

$$dS_0 = dS - d(\Delta S) = \frac{\partial S_0}{\partial H} dH + \frac{\partial S_0}{\partial L} dL + \frac{\partial S_0}{\partial h} dh = 0 \quad (4)$$

2.2.1 경간장변화에 대한 새그민감도

케이블의 경간장변화에 대해 Eq. (2)를 미분하면 다음 Eq. (5)와 같으며

$$\frac{dy_f}{dL} = \frac{\partial y_f}{\partial H} \frac{dH}{dL} + \frac{\partial y_f}{\partial L} + \frac{\partial y_f}{\partial h} \frac{dh}{dL} \quad (5)$$

경간장변화에 대하여 양단 높이차는 불변이므로 Eq. (4)는 다음 Eq. (6)과 같이 유도된다.

$$\frac{dH}{dL} = - \frac{\frac{\partial S_0}{\partial L}}{\frac{\partial S_0}{\partial H}} \quad (6)$$

또한, 경간장과 양단 높이차는 서로 독립적인 관계이므로 Eq. (5)는 다음 Eq. (7)의 관계가 성립한다.

$$\frac{dy_f}{dL} = \frac{\partial y_f}{\partial H} \frac{dH}{dL} + \frac{\partial y_f}{\partial L} \quad (7)$$

Eq. (7)에 Eq. (6)의 관계식을 대입하면 다음 Eq. (8)과 같이 경간장변화에 대한 새그점 연직좌표의 변화량의 미분관계식이 도출된다.

$$\frac{dy_f}{dL} = \frac{A' + B'}{A'' + B''} \quad (8)$$

2.2.2 탑정부 높이변화에 대한 새그민감도

케이블의 양단 높이차 변화(현수교에서는 탑정부의 높이변화)에 대하여 경간장이 불변이고 경간장과 높이차는 서로 독립적인 관계이므로 상기 2.2.1에서와 같은 전개에 따르면 다음의 Eq. (9)가 성립된다.

$$\frac{dh}{dh} = - \frac{\frac{\partial S_0}{\partial h}}{\frac{\partial S_0}{\partial H}} \quad (9)$$

$$\frac{dy_f}{dh} = \frac{\partial y_f}{\partial H} \frac{dH}{dh} + \frac{\partial y_f}{\partial h} \quad (10)$$

Eq. (10)에 Eq. (9)의 관계식을 대입하면 다음 Eq. (11)과 같이 케이블 양단 높이차 변화에 대한 새그점 연직좌표의 변화량의 미분관계식이 도출된다.

$$\frac{dy_f}{dh} = \frac{\dot{A} + \dot{B} + \dot{C}}{\dot{A} + \dot{B}} \quad (11)$$

여기서, 기호는 부록 참조(Jeong et al., 2012b, 2013)

2.2.3 실제 계산예

Jeong et al., 2012a에서의 울산대교를 적용대상으로 경간장 변화에 대한 수치해석 계산 흐름도를 참조하여 수치해석에 의한 새그민감도의 평균값과 비교해 보면 다음 Tables 2 and 3과 같으며 본 연구에서 도출된 미분관계식에 의한 새그민감도값과 거의 일치함을 알 수 있다(Jeong et al., 2013).

Table 2. Sag Sensitivity for Cable Span Change(dy_f/dL)

Span difference (m)	Side span(left)		Main span		Side span(right)	
	Basic eq.(Catenary)	Differential-related eq.	Basic eq.(Catenary)	Differential-related eq.	Basic eq.(Catenary)	Differential-related eq.
0.1	6.866	6.772	1.862	1.860	6.023	5.930
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	
Avg.	6.745		1.860		5.933	

Table 3. Sag Sensitivity for Cable Height Change (dy_f/dh)

Span difference (m)	Side span(left)		Main span		Side span(right)	
	Basic eq.(Catenary)	Differential-related eq.	Basic eq.(Catenary)	Differential-related eq.	Basic eq.(Catenary)	Differential-related eq.
0.1	4.447	4.412	0.500	0.500	2.109	2.128
0.2	4.481		0.500		2.089	
0.3	4.510		0.500		2.070	
-0.1	4.374		0.500		2.147	
-0.2	4.335		0.500		2.167	
-0.3	4.296		0.500		2.187	
Avg.	4.407		0.500		2.128	

3. 새그민감도 모형검증실험

3.1 현수선 형상

현수선(懸垂線, Catenary)은 밀도가 균일한 사슬이나 케이블 따위가 양끝 부분만이 고정되어 그 자체 무게만으로 드리워져 있을 때 나타나는 곡선이다. 쌍곡코사인 함수로 나타낼 수 있으며, 수학적으로는 상당히 다르지만 포물선과 비슷해 보여 혼동될 수 있다. 갈릴레이도 이 곡선을 포물선이라고 생각했으며 Jungius (1669)에

의해서 포물선이 아님이 증명되었다(Lockwood, 1661). Fig. 2는 주위에서 찾아볼 수 있는 현수선 형상의 예를 보여주고 있다 (Wikipedia).

실제로 시공된 현수교의 경우 보강형의 무게에 비해 케이블의 무게가 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 완성계의 현수교 케이블은 포물선이라 할 수 있다. Fig. 3과 같이 주탑에 시공된 케이블의 경우는 자유매달림 상태의 현수선 형상이며 단순지지 구름다리도 현수선 형상이다(Wikipedia).



Fig. 2. Catenary Shape Example(from left side Chain, Web, Power line)



Fig. 3. Catenary Shape Example (from left side Cable of Jeokgeum-Youngnam Bridge, Simply supported Skybridge)

3.2 모형 현수선 시스템

PPWS 가설시 새그민감도에 대한 모형검증을 위하여 PPWS에 대한 실험모형은 다음의 조건이 만족되도록 구축하여야 한다.

- ① 자중만으로 현수선 형상을 구현해야 한다.
- ② 휨강성을 무시할 수 있어야 한다.

상기 조건에 부합하는 실험모형으로서 Fig. 2의 체인을 참고하여 주위에서 흔히 볼 수 있는 자전거 로울러체인을 선택하였다. 이것은 소규모 실내실험을 위한 매우 이상적인 실험모형으로서 형상측량이 나 양단 지지점에서의 장력측정으로 현수선 형상여부를 판단할 수 있다. 실험모형의 형상변화 영향요인 중 실험여건상 수미터 길이의 실험모형의 온도에 의한 길이변화량은 무시할만큼 작음으로 온도요인은 고려하지 않았다. 로울러체인을 이용하여 양단 지지점의 이동에 의해 모형 현수선의 경간장이나 높이치를 조절할 수 있도록 시스템을 구축하였다. 이를 위하여 수직부재의 상하부에 이동 로울러를 부착하고 모형 현수선의 양단을 지지하여 경간장이나 높이치를 변경할 수 있도록 제작하였다. 그리고, 이 수직부재를 지지하는 지지프레임을 제작하였으며 모형 현수선의 양단 지지점에 로드셀을 설치하여 양단부 장력의 수직성분을 측정할 수 있게 하였다. 또한, 지지프레임의 수직, 수평부재에 테이프줄자를 부착하여 이동거리를 직접 측정할 수 있게 하였다. 다음 Fig. 4는 제작된 모형 현수선 시스템의 제작도와 실제 모습을 보여주고 있다. Fig. 5는 모형 현수선으로 사용된 로울러 체인의 모습과 Table 4는 제원을 나타내고 있으며 Table 5에 모형 현수선 시스템의 구성요소가 제시되어 있다(Jeong et al., 2012b).

3.3 형상측량

모형 현수선의 형상측량은 Fig. 4와 같이 총 31개소의 측점에 2 cm × 2 cm 크기의 시트프리즘을 부착하고 이로부터 측정거리 14 m에 광과기를 설치하여 수행하였다. 또한, 케이블 양단부의 수직장력 측정으로 형상을 추정하려고 계획하였으나 로드셀에 수평장력의 영향으로 인한 왜곡현상이 일어나 측정값을 신뢰할 수 없었다. 실험변수인 Table 1의 영향인자(온도 제외)의 변화에 따른 실험 수행 방법은 다음과 같다.

- ① 본 연구에서 구현한 모형 현수선의 새그비는 일반적인 현수교의 중앙경간과 측경간의 값을 사용하였다. 다음 Table 6에 구현한 형상값이 나타나 있다.
- ② 모형 현수선의 형상측량을 위하여 시트프리즘을 다수의 측량 측점에 부착하였으며 양단 지지점의 좌표와 새그점의 수평방향 좌표는 정해진 고정위치가 되도록 한다.
- ③ 측량측점당 3회의 좌표측량을 수행하고 그 평균을 측량값으로 사용한다.

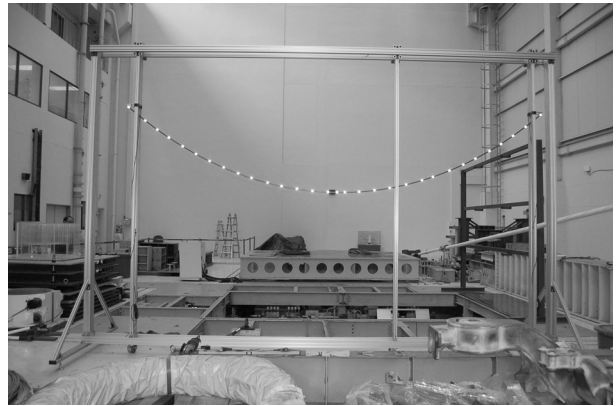


Fig. 4. Real View of Catenary Model System



Fig. 5. Real View of Catenary Model (Roller Chain)

Table 4. Characteristics of Catenary Model

Characteristics	Roller chain
Unit weight	1.0276 kgf/m
Equivalent section area	0.00013 m ²
Elastic Modulus	2.04 E + 10 kgf/m ²

Table 5. Components of Catenary Model System

Part name	Specification	Function
Roller chain	Length 6.1m	■ Structure making Catenary shape by self-weight
Support frame	Height 3.5m, Width 5.8m	■ Supporting both ends of Roller chain
Load cell	Capacity 50kgf	■ Measuring tension of both ends of Roller chain
Tape ruler	Length 5m	■ Added to Support frame ■ Horizontal length between both ends and Sag of Roller chain
EDM	-	■ Measuring the 3D coordinate of Sheet prism
Sheet prism	Height 20mm, Width 20mm	■ Measuring points of Roller chain

Table 6. Outline for Shape Setting of Catenary Model

Basic setting	Main span	Side span
Span length	5.5305m	5.1638m
Height length	-0.0007m	2.3019m
Non-stressed length	5.6765m	5.6765m
Sag ratio	0.1	0.05
df/dS_0	1.936	5.269
dy_j/dL	1.880	4.338
dy_j/dh	0.500	2.411

- ④ 실험변수는 모형 현수선의 길이, 경간장 변화, 양단 높이차 변화와 이 변수들의 조합에 따른 새그점의 연직좌표 변화값을 측정한다.
- ⑤ 각 변수의 변화에 따른 새그민감도를 산출한다.

3.4 실험결과

PPWS의 새그변화요인에 의한 새그변화량을 예측할 수 있으면 가지값인 df/dS_0 로부터 PPWS 길이 조정량을 산정할 수 있다. 그러므로, 새그변화요인에 대한 새그변화량의 이론적 산정값의 신뢰도를 확인하여야 한다.

3.4.1 현수선 형상 검증

로울러체인으로 구현되는 형상의 현수선 여부를 시트프리즘 부착 위치의 형상 측정값과 가정된 현수선 및 포물선 방정식으로터의 계산값을 비교분석하여 검증하였다. Figs. 6 and 7을 살펴보면 측정형상(▲)이 현수선(□)과 거의 일치하고 있으며 형상오차(-■-)가 중앙경간은 최대 2 mm, 측경간은 최대 4 mm로 나타났다. 포물선(-○-)의 경우는 새그점에 가까이 갈수록 오차가 증가하여 전체형상이 측량값에 비해 더욱 아래로 볼록하게 나타났으며 형상오

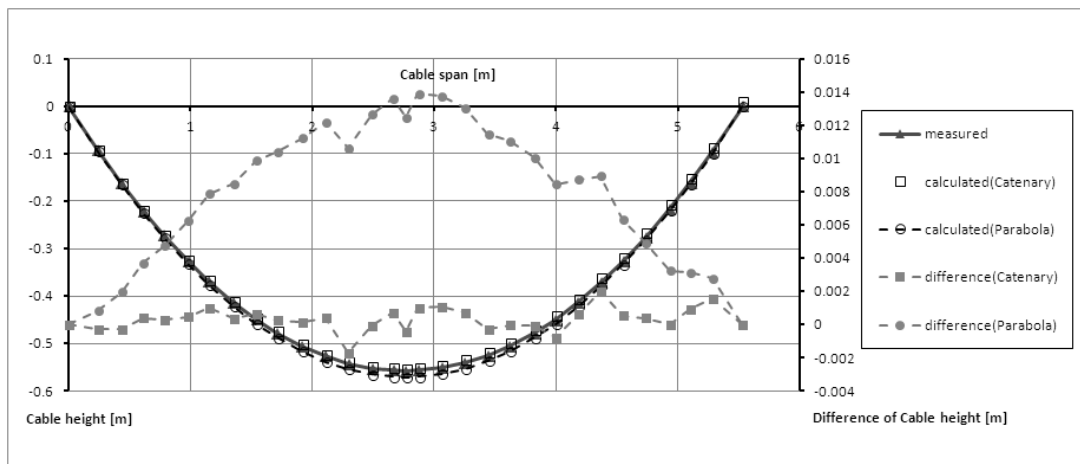


Fig. 6. Comparison of Shape for Main Span Model with Sag Ratio 1/10

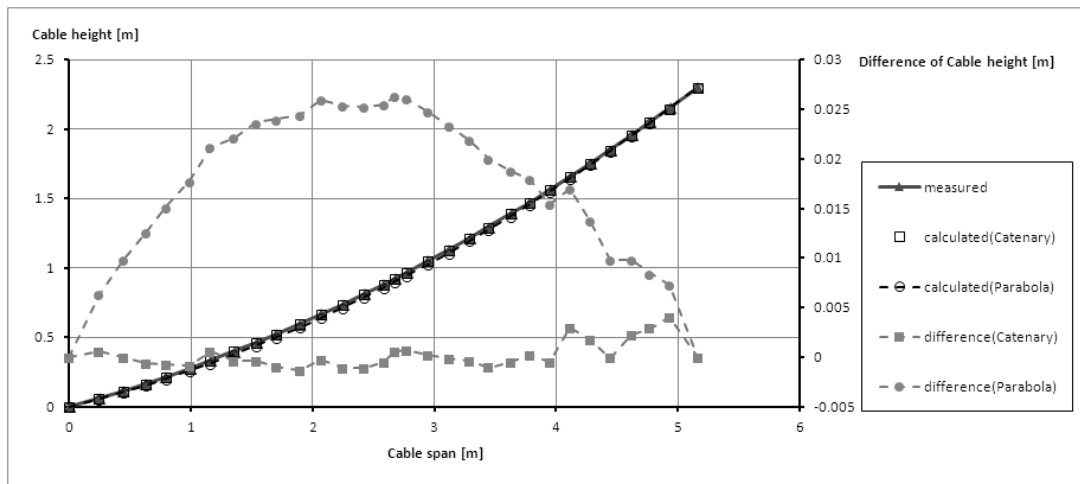


Fig. 7. Comparison of Shape for Side Span Model with Sag Ratio 1/20

차(-●-)는 중앙경간 최대 14 mm, 측경간 최대 24 mm의 오차가 발생하고 있다. 이로부터, 로울러체인으로 구현된 형상은 현수선임을 알 수 있다.

3.4.2 경간장 변화에 대한 새그민감도 검증

1) 중앙경간

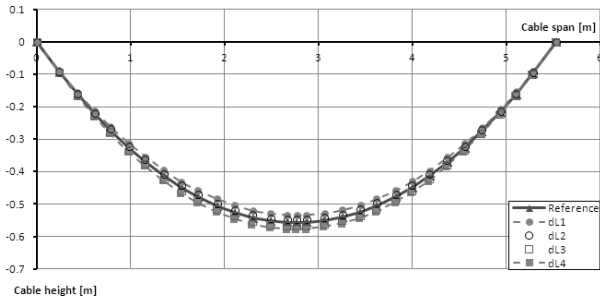


Fig. 8. Comparison of Shape for Span Change of Catenary Model (Main Span)

Table 7. Comparison of Sag Variation for Span Change of Catenary Model (Main Span)

Symbol		dL1	dL2	dL3	dL4	Remark
Span change dL (mm)		+11.0	+4.8	-5.9	-11.8	+: Span increase -: Span decrease
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	+22.60	+10.12	-10.70	-20.49	+: Variation upward -: Variation downward
	Calculated	+20.99	+9.41	-11.22	-21.89	
Error	mm	1.61	0.71	0.52	1.40	Based on the measured value
	%	7.1	7.0	4.9	6.8	

2) 측경간

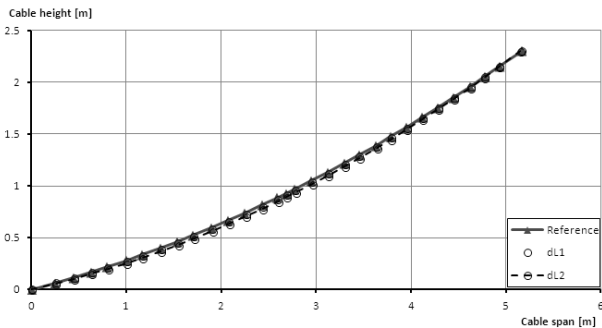


Fig. 9. Comparison of Shape for Span Change of Catenary Model (Side Span)

Table 8. Comparison of Sag Variation for Span Change of Catenary Model (Side Span)

Symbol		dL1	dL2	Remark
Span change dL (mm)		-4.4	-10.5	-: Span decrease
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	-19.58	-43.59	-: Variation downward
	Calculated	-19.36	-46.45	
Error	mm	0.22	2.86	Based on the measured value
	%	1.1	6.6	

3.4.3 양단 높이차 변화에 대한 새그민감도 검증

1) 중앙경간

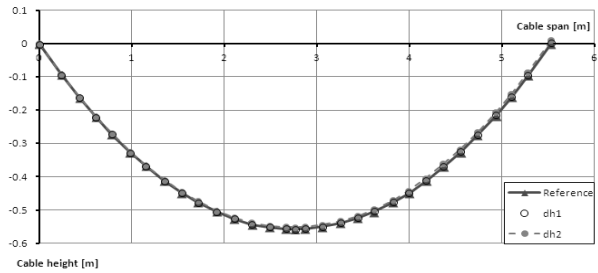


Fig. 10. Comparison of Shape for Height Change of Catenary Model (Main Span)

Table 9. Comparison of Sag Variation for Height Change of Catenary Model (Main Span)

Symbol		dh1	dh2	Remark
Height change dh (mm)		+4.6	+11.0	+: Height increase
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	+2.31	+5.59	+: Variation upward
	Calculated	+2.28	+5.51	
Error	mm	0.03	0.08	Based on the measured value
	%	1.5	1.4	

2) 측경간

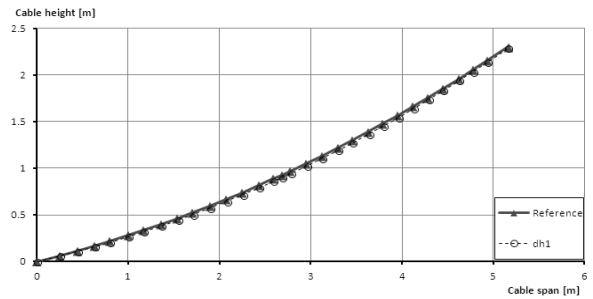


Fig. 11. Comparison of Shape for Height Change of Catenary Model (Side Span)

Table 10. Comparison of Sag Variation for Height Change of Catenary Model (Side Span)

Symbol		dh1	Remark
Height change dh (mm)		-11.7	-: Height decrease
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	-29.23	-: Variation downward
	Calculated	-30.82	
Error	mm	1.59	Based on the measured value
	%	5.4	

3.4.4 3.4.2와 3.4.3의 조합에 대한 새그민감도 검증

1) 중앙경간

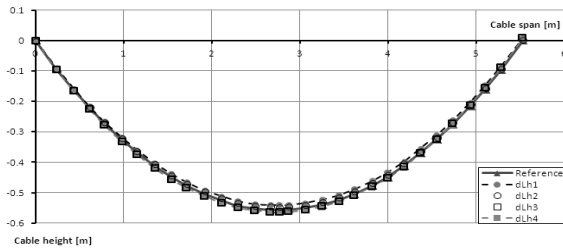


Fig. 12. Comparison of Shape for Span and Height Change of Catenary Model (Main Span)

Table 11. Comparison of Sag Variation for Span and Height Change of Catenary Model (Main Span)

Symbol		dLh1	dLh2	dLh3	dLh4	Remark
Span change dL (mm)		+4.9	+4.8	-6.1	-5.9	+: Span increase -: Span decrease
Height change dh (mm)		+10.7	+5.1	+11.2	+6.4	+: Height increase
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	+15.76	+12.33	-4.94	-6.93	+: Variation upward
	Calculated	+14.51	+11.58	-5.88	-7.95	-: Variation downward
Error	mm	1.25	0.75	0.94	1.02	Based on the measured value
	%	7.9	6.0	18.9	14.6	

2) 측경간

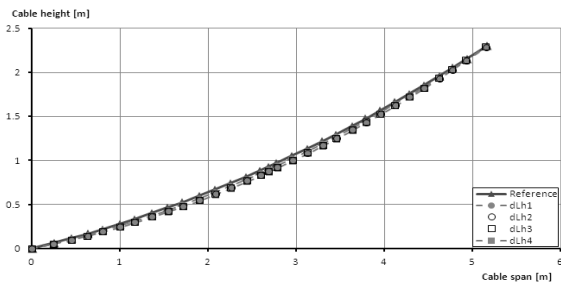


Fig. 13. Comparison of Shape for Span and Height Change of Catenary Model (Side Span)

Table 12. Comparison of Sag Variation for Span and Height Change of Catenary Model (Side Span)

Symbol		dLh1	dLh2	dLh3	dLh4	Remark
Span change dL (mm)		-7.0	-6.0	-11.8	-10.3	-: Span decrease
Height change dh (mm)		-5.1	-11.6	-4.5	-12.2	-: Height decrease
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	-34.83	-48.87	-50.48	-67.93	-: Variation downward ■ When calculated, applying Sag sensitivity ($dy_j/dL, dy_j/dh$) of the changed shape of Catenary model
	Calculated	-38.14	-47.00	-52.70	-61.20	
Error	mm	3.31	1.87	2.22	6.73	Based on the measured value
	%	9.5	3.8	4.4	9.9	

3.4.5 길이 변화에 대한 새그민감도 검증

1) 중앙경간

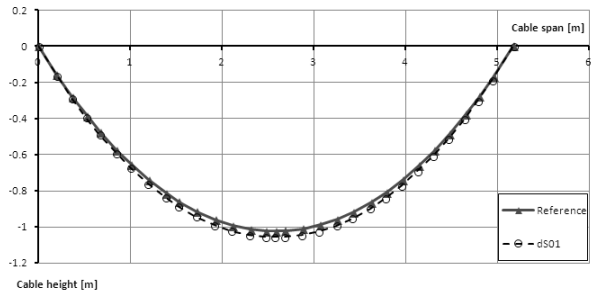


Fig. 14. Comparison of Shape for Length Change of Catenary Model (Main Span)

Table 13. Comparison of Sag Variation for Length Change of Catenary Model (Main Span)

Symbol		dS01	Remark
Length change dS_0 (mm)		+30.0	+: Length increase
Vertical variation of Sag dy_j (mm)	Measured	-34.06	-: Variation downward
	Calculated	-34.81	
Error	mm	0.75	Based on the measured value
	%	2.2	

2) 측경간

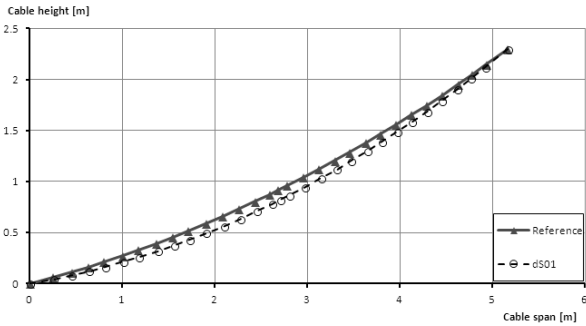


Fig. 15. Comparison of Shape for Length Change of Catenary Model (Side Span)

Table 14. Comparison of Sag Variation for Length Change of Catenary Model (Side Span)

Symbol		dS01	Remark
Length change dS_0 (mm)		+30.0	+: Length increase
Vertical variation of Sag dy_f (mm)	Measured	-104.43	<ul style="list-style-type: none"> ■ -: Variation downward ■ When calculated, applying Sag sensitivity (df/dS_0) of the changed shape(after increasing the length) of Catenary model
	Calculated	-100.05	
	Error		
	mm	4.38	
	%	4.2	

3.4.6 미분관계식에 의한 새그민감도 변화비

모형 현수선의 길이변화, 경간장 및 양단 높이차에 대한 측경간과 중앙경간의 새그민감도 변화에 대한 비가 다음 Table 15에 나타나 있다. 이를 살펴보면 측경간은 동일한 경간장 변화에 대하여 중앙경간에 비해 평균 15배 정도 새그가 민감하게 변화하였으며 동일한 양단 높이 변화에 대하여는 평균 63배 정도 새그가 민감하게 변화하였다. 또한, 동일한 길이변화에 대하여 평균 89배 정도 새그가 민감하게 변화함을 알 수 있다. 이를 반영하듯 경간장과 양단 높이차의 조합이나 길이변화에 대한 새그민감도 검증실험의 결과분석 Tables

Table 15. Variation Ratio of the Differential-related Sag Sensitivities (Ratio=Side Span/Main Span)

dL (m)	dy_f/dL	dh (m)	dy_f/dh	dS_0 (m)	dy_f/dh
-0.01	11.80	-0.01	55.01	-0.01	113.11
-0.005	12.95	-0.005	58.32	-0.005	97.11
0.005	16.61	0.005	66.53	0.005	76.91
0.01	19.87	0.01	71.70	0.01	70.05
Avg.	15.31	Avg.	62.89	Avg.	89.30

12 and 14를 살펴보면 측경간의 경우에 변화후 형상에 대한 새그민감도를 적용해야 합리적인 오차의 범위에서 새그변화량이 산정됨을 알 수 있다.

3.4.7 소결론

광파기의 정확도는 확고하게 고정된 상태에서 2.0ppm(Leica TPS1200+ User Manual)이므로 관측자의 실수에 의한 인위적 오차를 무시하면 실제 측량거리 1 km에서 최대 2.0 mm의 측량오차가 발생할 수 있다. 본 연구에서는 광파기와 측점인 시트프리즘간의 측정거리가 14 m로 최대 측정오차는 0.028 mm이어서 무시할만큼 작으므로 실험결과에 대한 광파기의 기계오차의 영향은 없다고 할 수 있다. 따라서, 이를 고려하면 실험결과는 대부분이 10%미만의 오차로 상당히 신뢰할만 하다.

새그민감도 산정 이론식 적용시, 새그변화요인의 동일 변화량에 대해 측경간은 중앙경간에 비해 새그가 수십배 이상으로 상당히 민감하게 변화함을 알 수 있으며 이로부터 실제 현수교 시공현장 적용시 측경간은 새그조정에 미세조정이 필요하여 조정시간이 더 많이 소요될 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그리고, 이에 대한 해결방안으로는 변화후 형상에 대한 새그민감도를 적용해야 새그변화량을 정확히 예측 가능함을 알 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 Jeong et al., 2012a에 제안된 새그민감도 산정식에 추가하여 PPWS의 경간장변화 및 주탑의 높이변화에 대한 새그민감도 미분관계식을 도출하여 제안하였다. 새그민감도 산정식에 대한 검증을 위하여 현수교 PPWS 가설중 PPWS의 현수선 형상을 모사하는 모형 현수선 시스템을 구축하였다. 그리고, 실험변수로 새그민감도 변화요인들을 조합하여 검증실험을 수행하였다. 이로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 본 연구에서 도입한 모형 현수선인 로울러체인으로 PPWS의 자유매달림 상태인 현수선 형상을 모사할 수 있음을 확인하였다.
- (2) 본 연구 및 Jeong et al., 2012a에 제안된 현수선 방정식으로부터 도출 미분관계식에 의한 새그민감도 산정식에 대하여 모형 현수선 검증실험을 통해서 이론 산정식의 타당성을 확인하였다. 간단한 이론 산정식으로부터 새그조정을 위하여 현장여건을 반영한 PPWS 길이 조정량을 산정할 수 있다.
- (3) 현수교의 중앙경간은 이론 산정식을 적용하여 새그변화요인에 의한 PPWS 길이 조정량을 매우 정확하게 산정할 수 있음을 확인하였다.
- (4) 현수교의 측경간은 중앙경간에 비해서 새그변화요인의 동일

변화량에 대하여 수습배 이상으로 매우 민감하게 새그가 변화함을 확인하였고, 이에 대한 해결방안은 형상변화후 PPWS 형상에 대한 새그민감도를 적용하면 PPWS 길이 조정량을 정확하게 산정할 수 있음을 알 수 있었으며 이는 현수교 시공현장 실증을 통하여 재확인해 볼 필요가 있다고 판단된다.

향후에는 본 연구 및 Jeong et al., 2012a의 새그민감도 산정법은 현대건설이 시공중인 울산대교 현장 실증에 적용될 것이다. 실 현장에서는 PPWS의 형상측량시 지구곡률, 대기굴절 등을 고려하여 계산된 형상측량값을 적용해야 하며 이에 대한 연구도 완료단계에 있다. 그리고, 이러한 일련의 연구수행에 의한 새그민감도 산정 이론과 현장 측량기술의 통합적용을 통하여 기술의 실효성을 확인할 필요가 있다.

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.

References

- Jeong, W., Seo, J. W. and Lee, S. H. (2012b). "Verification test of sag sensitivity using catenary model for configuration control under PPWS erection in a suspension bridge." *Proc. of 2012 Annual Conference & Civil Expo*, KSCE, pp. 1419-1422 (in Korean).
- Jeong, W., Seo, J. W. and Lee, S. H. (2013). "Estimation of sag variation by support movement of catenary cable." *Proc. of COSEIK*, COSEIK, pp. 381-382 (in Korean).
- Jeong, W., Seo, J. W. and Lee, W. P. (2012a). "Development of sag and tension sensitivity estimation method for configuration control under PPWS erection in a suspension bridge." *J. of Civil Eng.*, KSCE, Vol. 32, No. 5A, pp. 255-266 (in Korean).
- Leica Geosystems. *Leica TPS1200+ user manual*.
- Lockwood, E. H. (1961). *A book of curves*, Cambridge University Press.
- Wikipedia.

기호

$$A' = -64EAH^2 \cosh\left[\frac{LW}{4H}\right]^2 \sqrt{4 + \frac{h^2 W^2 \operatorname{csch}\left[\frac{LW}{2H}\right]^2}{H^2}} \sinh\left[\frac{LW}{4H}\right]^4$$

$$B' = 4H \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right]^2 \left(2H^2 + h^2 W^2 + 2H \left(-2H \cosh\left[\frac{LW}{2H}\right] + H \cosh\left[\frac{LW}{H}\right] + LW \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right]\right)\right) + 2h^2 LW^3 \tanh\left[\frac{LW}{4H}\right]$$

$$A'' = 16EAH \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right]^2 \left(-LW \cosh\left[\frac{LW}{2H}\right] + 2H \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right]\right)$$

$$B'' = \sqrt{4 + \frac{h^2 W^2 \operatorname{csch}\left[\frac{LW}{2H}\right]^2}{H^2}} (LW(3H^2 - 2h^2 W^2)) + H^2 \left(LW \left(-4 \cosh\left[\frac{LW}{H}\right] + \cosh\left[\frac{2LW}{H}\right]\right) + 4H \sinh\left[\frac{LW}{H}\right] - 2H \sinh\left[\frac{2LW}{H}\right]\right)$$

$$\dot{A} = 4hLW^2(H-hW)(H+hW) + 2H^2LW(-2EA+hW) \cosh\left[\frac{LW}{2H}\right] - 4hH^2LW^2 \cosh\left[\frac{LW}{H}\right] - 2H^2LW(-2EA+hW) \cosh\left[\frac{3LW}{2H}\right]$$

$$\dot{B} = h^3LW^4 \operatorname{sech}\left[\frac{LW}{H}\right] + 4H^3(6EA+hW) \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right] - 8hH^3W \sinh\left[\frac{LW}{H}\right] + 4H^3(-2EA+hW) \sinh\left[\frac{3LW}{2H}\right]$$

$$\dot{C} = H \sqrt{4 + \frac{h^2 W^2 \operatorname{csch}\left[\frac{LW}{2H}\right]^2}{H^2}} (LW(-3H^2 + 2hW(-2EA+hW)) + 4EAhLW^2 \cosh\left[\frac{LW}{2H}\right] + H^2(4LW \cosh\left[\frac{LW}{H}\right] - LW \cosh\left[\frac{2LW}{H}\right] - 4H \sinh\left[\frac{LW}{H}\right] + 2H \sinh\left[\frac{2LW}{H}\right]))$$

$$\ddot{A} = -32EAH^2 \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right]^2 \left(-LW \cosh\left[\frac{LW}{2H}\right] + 2H \sinh\left[\frac{LW}{2H}\right]\right)$$

$$\ddot{B} = 2H \sqrt{4 + \frac{h^2 W^2 \operatorname{csch}\left[\frac{LW}{2H}\right]^2}{H^2}} \left(LW(-3H^2 + 2h^2 W^2) + H^2 \left(4LW \cosh\left[\frac{LW}{H}\right] - LW \cosh\left[\frac{2LW}{H}\right] - 4H \sinh\left[\frac{LW}{H}\right] + 2H \sinh\left[\frac{2LW}{H}\right]\right)\right)$$