

# 사장교의 선형 관리와 시공 중 안정성 확보

Article 07

Geometry Control and Secured Constructional Stability of Cable Stayed Bridge

서주원 \* 공학박사 / 현대건설 기술연구소 책임연구원  
정지만 \*\* 공학박사 / 현대건설 기술연구소 책임연구원  
김모세 \*\*\* 공학석사 / 현대건설 기술연구소 책임연구원  
임현태 \*\*\*\* 공학석사 / 현대건설 기술연구소 책임연구원  
이정환 \*\*\*\*\* 공학석사 / 현대건설 기술개발원 과장

## 1. 서론

사장교나 현수교와 같은 케이블로 지지되는 장대교량은 구조적 간결함과 미적 우수성으로 오랜 역사를 두고 그 나라 혹은 지역의 대표적인 상징물이 되고 있다. 특히 국내에서 1990년대 말부터 도입된 턴키 및 대안설계의 입찰제도로 교량설계 기술이 발전하고, 연육교 가설에 경제적인 시간장에 적합한 사장교의 채택이 눈에 띄게 증가했고, 현재 다수의 사장교가 시공 중에 있다.

위의 교량들은 최근에 현대건설에 의해 완공되고 가설 중인 사장교들로, 영흥대교는 2001년에, 제2진도대교와 아무나 교량은 2004년에 완공되어 공용중이고, 마창대교는 현재 가설이 진행되고 있다.

본 기고에서는 아래 [표 1]에 나

타난 바와 같이 최근 현대건설이 수행한 사장교들에 대한 시공계획과 선형관리 등의 사례와 시공중 안정성 확보를 위한 시공사례를 정리하였다. 사장교에 대한 기술 축적 및 향후 국내의 사장교 시공에 있어서 좋은 사례가 되기를 기대한다.



[그림 1] 최근 현대건설에 의해 시공된 사장교 (영흥대교, 제2진도대교, 아무나교, 마창대교)

[표 1]. 사례 사장교의 제원

교량		영흥대교	제 2 진도대교	아무나교	마창대교
위치		인천광역시 선제도와 영흥도를 연결하는 연육교	전라남도 해남군과 진도군을 연결하는 연육교	인도 Yamuna강 Allahabad 와 Naini 사이 지역	경상남도 마산과 창원 사이 마산만
경간 구성		110m +240m +110m	70m +344m +70m 비대칭 사장교	60m + 115m +260m + 115m+60m	170m +400m +770m
케이블 배치		Semi-Harp 타입 2면 케이블	Semi-Harp 타입 2면 케이블	Semi-Harp 타입 2면 케이블	Fan Type 2면 케이블
주형	형식	강상자형교	강상자형교	콘크리트 거더교	합성형교
	전폭	17.6m	12.55m	26m	21m
	높이	2.5m	2.73m	1.5m	2.5m
주탑	형상	다이아몬드형(강재)	다이아몬드형(강재)	수정 A형(콘크리트)	H형(콘크리트)
	높이	77.4m	69m	90m	164m
	단면	2.8m × 3.5m	2.0m × 2.8 m	4.0m × 5.0m - Lower Leg	7.0m × 9.0m - Lower Leg
케이블	형식	Parallel 강선 타입	Prefabricated Wire Cable	Locked Coil Wire Rope	Prefabricated Wire Cable
	소선규격	φ15.7mm	φ7mm	-	φ7mm
	수량	총 64개 21가닥: 16개, 24가닥: 32개 45가닥: 12개, 51가닥: 4개	총 60개 73가닥: 12개, 109가닥: 16개 139가닥: 8개, 151가닥: 24개	총 104개 φ81mm, φ92mm φ103mm, φ116mm	총 120개 121가닥: 16개, 127가닥: 8개 139가닥: 4개, 163가닥: 16개 187가닥: 28개, 199가닥: 16개 241가닥: 16개, 253가닥: 8개 337가닥: 8개
정착구 주탑	상부	Fixed Type(Anchor Girder 형식의 정착구)	Bearing Plate에 의한 고정단	Pin Type 고정단	Nut Type 고정단 (설치전 조정가능)
	하부 Deck	Adjustable Type(긴장단)으로 Pipe Anchor형식	Bearing Plate와 Shim Plate 의한 긴장단	Nut Type 긴장단	Nut Type 긴장단
부반력 제어장치		Link Shoe (350ton)	측경간 일부 구간 콘크리트 타설 Tie-down Cable(PWS) φ7mm × 233가닥 × 4개	-	측경간 일부 구간 콘크리트 타설 Tie-down Cable(PWS) φ7mm× 2가닥×4개(460tonf) φ7mm×31가닥×4개(1460tonf)
가설 공법		대블럭 가설 공법	Derrick Crane을 이용한 FCM	Form Traveler를 이용한 FCM	Derrick Crane을 이용한 FCM
특징		Jackup Barge를 이용한 대 블럭 가설공법 적용	주탑 기초는 육상에 위치한 비대칭 사장교(1:5) 주탑은 LP(Longitudinally Profiled)를 적용하여 강재 사용량 및 용접량 감소 기존 진도대교와 쌍둥이 교량	주형이 주탑 가로보에 놓여지지 않고 케이블에 메달려 있는 구조	Floating Crane에 의한 주탑 주두부 비대칭 시공 형하고 64m



(이해성, 2003) 등의 여러 방법이 있다.

- 1) 케이블 정착부 위치에서의 처짐을 0으로 가정한 후 이를 지점으로 하는 연속보로 교량을 모델링한 후 여기서 얻어지는 지점반력을 케이블의 수직성분이 라 가정한 후 케이블 장력을 구한다.

$$T_i = \frac{R_i}{\sin \alpha_i}$$

$T_i$  = 케이블 장력,  $R_i$  = 지점반력,  $\alpha_i$  = 케이블각도

- 2) 위에서 구한 장력을 바탕으로 케이블의 무응력장 길이를 계산한다.

$$S_{ri} = Lichord \left( 1 + \frac{G_i^2 \cos^2 \alpha_i}{24T_i^2} \right)$$

$S_{ri}$  = 무응력장 길이,  $G_i$  = 케이블 전체 중량,  $\alpha_i$  = 케이블각도

- 3) 2)에 구해진 무응력장을 이용하여 해석한 결과를 검토한 후 측정간 케이블의 길이를 조정하여 주탑의 변위가 0에 가깝게 되도록 한다.
- 4) 해석한 결과를 검토한 후 전구간의 케이블의 길이를 조정하여 보강형의 변위가 0에 가깝게 되도록 한다.
- 5) 3)~4) 과정을 통하여 주형 및 주탑의 변위는 0에 가깝게 수렴하며 만족하는 결과를 얻을 때까지 3)~4)의 과정을 반복한다.

### 2.2.2 제작캠버 산정을 위한 초기평형상태 해석

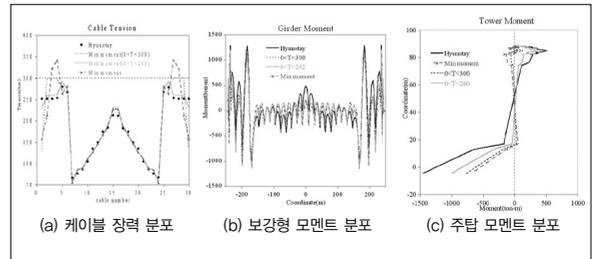
위와 같은 반복법은 다소 번거롭기 때문에 최적화 기법을 이용한 모멘트 최소화 방법은 초기평형상태 해석

을 위하여 주탑과 보강형의 모멘트를 최소화하는 케이블 장력을 구하는 방법으로 보강형의 최종좌표를 기하학적 구속조건으로 Newton-rapsen 반복계산으로 해를 구할 수 있다. 모멘트 최적화를 목표로 구한 케이블 장력은 과도하게 변화하는 결과를 얻게 되는 문제점이 있기 때문에 다음 (식 1)과 같이 일정한 장력범위를 제한 조건하여 해를 구할 수 있다.

(식 1)

$$\text{Min}_{T_i} \Pi = \frac{1}{2} \int_V \frac{1}{EI} (M_{self} + \sum_{i=1}^{nch} T_i M_i^0)^2 dv$$

*subject*  $(T_{min})_i < T_i < (T_{max})_i$



[그림 5] 모멘트 최적화 기법에 의한 초기평형 해석 결과 비교

## 2.3 케이블 설계

### 2.3.1 케이블 종류 및 특성

사장교 케이블은 그 종류에 따라 정착형식과 시공방법 등이 다르므로 시공성과 경제성이 충분히 고려되어야 한다.

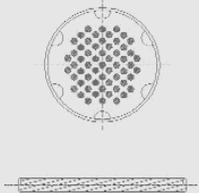
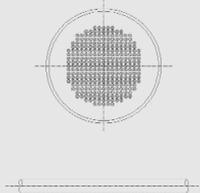
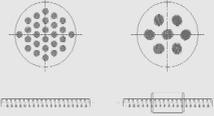
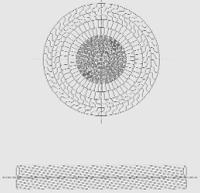
현장제작으로 설치되는 Parallel Stranded Cable은 강도가 높고 평행 강연선(parallel strand)의 운반과 긴

장장비가 소규모로 경제적으로 시공이 가능하다. 상당수의 국내 사장교가 국산화된 소재의 Parallel Stranded Cable을 채택하고 있다. 사장교의 케이블은 그 제작과정에서 피로시험이나 강도시험에 오랜 시간이 소요되고, 시험을 완전히 통과한 후에야 제작이 가능하므로, 철저한 준비가 없을 경우 공정에 지대한 영향을 미칠수 있다. 따라서 계획과정에서 소요기간에 대한 치밀한 검토가 필수적이다.

사장교 케이블 정착구는 Socket방식, Hi-Am방식,

Wedge방식, Anchor Bolt방식 등이 있으며 최근에는 Hi-Am방식과 Wedge방식이 대부분 채용되고 있다. Hi-Am방식은 독일의 Leonhardt에서 개발된 정착구로서 주로 Parallel Wire Cable에 적용된다. Wedge방식은 독일과 일본을 제외한 대부분의 나라에서 보편적으로 채택되고 있으며 국내의 사장교에서 MS(Multi-strand) 케이블 형식은 Fressinet Type의 Wedge방식을 주로 택하고 있으며 이것은 Iso-tensioning의 공법으로 케이블 장력을 도입한다.

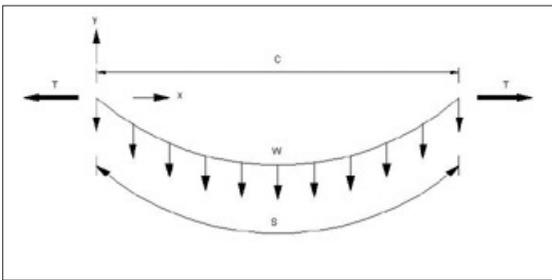
[표 2]. 케이블의 종류 및 특징

구 분	STRANDED CABLE	PARALLEL WIRE CABLE	PARALLEL BAR CABLE	LOCKED COIL CABLE
형 태				
구 조	7-WIRE STRAND φ12.7, φ15.2, φ15.7, φ17.8mm	7WIRE φ6mm, φ7mm	BAR φ16, φ26.5, φ32, φ36mm	WIRE(여러단면형태) φ2.9~φ7mm
기 계 적 성 질	인장강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	180	165	100 ~ 150
	탄성계수 E(kg/cm <sup>2</sup> )	2.00×10 <sup>6</sup>	2.05×10 <sup>6</sup>	2.10×10 <sup>6</sup>
	피로강도 (kg/mm <sup>2</sup> )	30	35	8
사용예	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Brotonne (프랑스)</li> <li>• Rande,</li> <li>• Barrios De Luna (스페인)</li> <li>• Coarzacalcos (멕시코)</li> <li>• Sun shine Skyway (미국)</li> <li>• 서해대교</li> <li>• 영흥대교</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• SHUERO (일본)</li> <li>• ZARATE-BROZO-LARGO BRIDGE(아리헨티나)</li> <li>• PASCO-KENNEWICK BRIDGE(미국)</li> <li>• Luling Bridge(미국)</li> <li>• 제2진도대교</li> <li>• 마창대교</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• HOECHST BRIDGE (독일)</li> <li>• DONAU METTEN BRIDGE(독일)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ST.SEVERIN (독일)</li> <li>• ST.NAZAIRE (프랑스)</li> <li>• MARACAIBO LAKE (베네주엘라)</li> <li>• CHACO-CORRIENTES (아리헨티나)</li> <li>• 제1진도대교</li> <li>• 야무나교</li> </ul>

### 2.3.2 케이블 무응력장 산정

케이블 무응력장 산정은 최종장력을 목표로 PWS 케이블의 장력조절을 위한 길이를 포함한 제작 길이를 결정하는 과정이다. PWS 형식의 케이블은 Multi-strand 형식의 케이블과 달리 현장에서 제작되지 않고 공장에서 사전에 제작되기 때문에 정확한 무응력 길이의 산정이 매우 중요하다.

반면에 소켓을 이용하여 일괄긴장하기 때문에 장력도입과 보정이 용이하며, 단면적이 작아서 바람에 의한 와류진동에 덜 민감한 장점을 가지고 있다.



[그림 6] 케이블 무응력장 산정을 위한 개념도

사장교의 기본설계시 케이블은 새그(sag)의 효과와 대변위 등의 영향을 고려한 기하학적 비선형이 반드시 고려되어야 한다. 또한, 케이블의 정밀한 시공관리를 위한 장력과 긴장량의 산출을 위해서도 비선형 해석이 필수적이다.

사장교의 케이블의 비선형성을 보정하기 위해서 많은 방법이 제안되어 왔으며 이 중의 하나가 케이블의 등가탄성계수를 이용하여 선형화하는 방법이다. Ernst가 제안한 등가탄성계수식을 사용하여 선형화하는 방법과 Catenary cable의 거동을 그대로 적용한 비선형 요소로 케이블을 모델링할 수도 있다.

HyunPSC<sup>®</sup>는 이와 같은 케이블의 비선형성을 모두

고려할 수 있도록 구성되어 있다. 케이블 무응력장 산정은 초기평형 해석을 완료하여 최종 긴장력 및 형상 결정이 끝나면, 이를 바탕으로 케이블 장력도입 및 보정시 기준이 되는 케이블의 무응력장 길이 및 케이블 제작시 절단을 위한 기준이 되는 응력장 길이를 다음과 같이 계산한다.

케이블 곡선 길이(응력장 길이) S와 변형량 ΔS (식 2)와 같이 표현된다.

(식 2)

$$s = \int_b^c \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \cong \frac{2T}{W} \sinh\left(\frac{W \cdot C}{2T}\right)$$

$$\Delta S = \frac{T}{EA} \int_b^c \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx \cong \frac{T^2}{2EAW} \left[ \sinh\left(\frac{W \cdot C}{T}\right) + \frac{W \cdot C}{T} \right]$$

케이블의 최종상태의 장력하에서의 Chord Length를 이용하여 최종단계의 케이블 응력장 길이 S를 구하고, 무응력장 길이 S<sub>r</sub>를 (식 3)과 같이 구한다.

(식 3)

$$S_r = S - \Delta S$$

케이블 제작장은 케이블의 무응력장 길이에 추가적인 장력보정과 길이오차를 고려하여 설계된다. 케이블 장력은 설치시 도입장력과 최종단계의 장력이 다른 값을 가지므로 가설시 1.2배를 적용한 0.56fy를 기준으로 검토하되, 주탑과 보강형 정착구의 허용력을 함께 고려하여 검토된다.

## 2.4 시공단계해석 및 선형관리

### 2.4.1 선형관리를 위한 관리치 설정

주경간의 가설은 cantilever 공법에 의하여 단계별로 보강형의 인양과 연결, 케이블 가설 및 긴장의 순서로 시공이 진행되며 시공오차에 대하여 매단계 보정 여부를 판단할 필요가 있다.

시공오차 관리치로 [표 3]과 같이 국내의 사장교의 보강형과 주탑에 대하여 길이에 비례한 허용기준이 제시되어 있다.

### 2.4.2 영흥대교 시공사례

영흥대교는 중앙경간을 중심으로 대칭이므로 교량 1/2 모델을 사용하였으며 주탑 및 보강형을 설치하고 케이블 설치 직전의 상태를 첫단계로 하여 2차 사하중이 재하되는 최종 단계까지 모두 20단계로 나누어 시공단계해석이 수행되었다.

영흥대교는 보강형을 Jack-Up Barge에 의해 대블럭으로 가설한 후 연속교 형태에서 케이블을 가설하므로



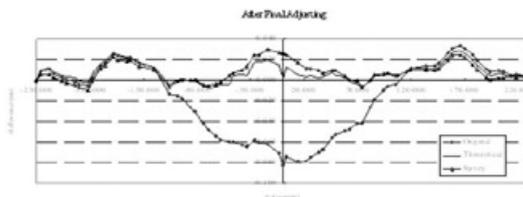
[그림 7] Jackup Barge를 이용한 대블럭 가설 공법

[표 3]. 주경간 가설중 시공오차 관리

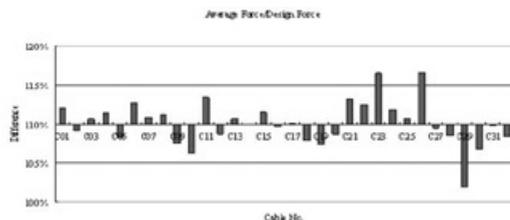
Bridge	Center span length	처짐오차(span-mm)		Tower Height	기울기 오차(tower-mm)	
		기준	최대값		기준	최대값
Tatara	890m	$\pm(25+0.25(L-50))$	$\pm 235\text{mm}$	220m	$\pm(H/2000)$	$\pm 110\text{mm}$
Meiko center	590m	$\pm(L/2000)$	$\pm 295\text{mm}$	195m	$\pm(H/1500)$	$\pm 130\text{mm}$
Meiko east	410m	$\pm(L/2000)$	$\pm 205\text{mm}$	150m	$\pm(H/1500)$	$\pm 100\text{mm}$
Tsurumi	510m	$\pm(25+0.5(L-40))$	$\pm 248\text{mm}$	180m	$\pm(H/2000)$	$\pm 90\text{mm}$
서해대교	470m	$\pm 250\text{mm}$	$\pm 250\text{mm}$	182m	-	-
영흥대교	240m	$\pm(L/480)$	$\pm 250\text{mm}$	77m	-	-
제2진도대교	344m	$\pm(L/2000)$ Min.25	$\pm 110\text{mm}$	69m	$\pm(H/1500)$	$\pm 50\text{mm}$

Jack-Up Barge가 제거되기 전인 마지막 4개 케이블을 남겨 놓은 14단계 이전까지는 보강형의 처짐이 극히 미소하여 케이블 긴장에 의한 보강형의 거동을 파악하는 것이 무의미하다.

설계 시 하중은 도면을 기초로 하여 산정하였으나 보강형 하부에서 긴장하는 이유로 De-stressing을 위한 Multi-Jack을 사용하기 용이하지 않다. 그러므로 최종 조정 단계에서 De-stressing을 배제하기 위하여 정확



[그림 8] 오차 보정후 보강형의 선형오차



[그림 9] 최종단계에서 케이블 장력오차 분포

[표 4]. 영흥대교 단계별 시공관리 계획

STEP	작업명	작업내용 및 과정
1	초기상태 결정 (Stage 1, No Stay)	보강형 및 주탑 초기 변위, Jack 반력 측정
2	케이블의 무응력장 길이 보정	C(Correction Factor) = $L_{chord}(AS - Built) - L_{chord}(Design)$
3	HDPE Pipe 용접및 강선절단	
4	케이블 긴장 전	- 케이블 설치 위치의 Chord Length 측량 및 Master 강선 온도측정 - Master 강선 긴장력 결정
5	케이블 긴장작업	- Master 강선을 SMP Position을 기준으로 긴장 - Master 강선 긴장력 확인 및 추가 조정량 결정 (제한 : 강선 당 최종 긴장력 > 20KN, < 0.5 GUTS) $\Delta L(Additional\ Correction) = F(\Delta T, K_{eff})$ $\Delta T(Additional\ Tension) = T_{design} - T_{as-built}$ $K_{eff} = \frac{T_{as-built}}{\Delta S}$ $\Delta S = F(T, E_{eq}, A, W)$ $E_{eq} (Equi.Elastic\ modulud) = F(E, W, C, A, T)$ - 나머지 강선 긴장
6	측량 및 케이블 장력 측정 : 온 야간 도경사가 없다고 판단되는 때	보강형 수직변위, 주탑 수평변위, Jack 반력 측정, Cable 장력 측정(최근 긴장된 4쌍)
7	데이터 분석 각 오차가 허용범위를 초과할 경 우 케이블의 조정여부를 판단하 고 설계 강성과 실제 강성과의 편차가 클 경우 오차의 원인 분 석 및 예측을 위한 SI를 수행	주탑 수평변위차(실제 변위-설계변위) < 주탑 허용변위 보강형 수직변위차(실제 변위-설계 변위) < 보강형 허용변위 케이블 긴장력(실제 장력-설계 장력) < 설계장력의 ± 10 %
8	1차 보정 (Restressing량 결정)	Force Control Method : 케이블의 긴장력으로 케이 블 조정량 산정 Pylon Displacement Control Method: 주탑의 변 위로 케이블 조정량 산정 Deck Displacement Control Method : 보강형의 변위로 케이블 조정량 산정
9 Stage 17	2차보정(케이블 16쌍 가설 후) 보정 방법 : 각 케이블에 대한 영향 행렬을 구성한 후 오차 보 정량을 계산한다	- 모든 케이블(16쌍) 장력 측정, 보강형 수직변위 및 주탑 수평변위 측정 - 2차 보정량을 산정한다 : Step 7과 동일
10 Stage 18	최종단계 보정 (Key Segment 폐합 후)	2차 보정과 동일

한 값보다 조금 낮게 산정할 필요가 있다. 케이블 가설시의 선형관리는 Jackup Barge의 설치여부에 따라 3가지 단계로 분류하여 각기 다른 선형관리 방법이 적용되었다.

보강형은 중앙경간이 설계치보다 약80mm 정도 낮았고 주탑은 약50mm, 장력은 최대 22% 오차가 발생하였다. 이에 대하여 오차원인을 분석하였고 그리고 조정을 실시하였다. 케이블의 특성상 De-tension을 하지 않고 Re-tension의 경우에도 10mm이상의 케이블 조정량을 가지도록 하였다.

영흥대교의 시공은 당시의 국내 타 교량과는 달리 해석 시스템 개발에서부터, 가설단계 해석, 가설시 안정성 검토, 사장교의 선형관리 등 사장교의 기술적인 영역의 모든 부분을 현대건설의 자체적인 기술력으로 수행되어졌다는 부분에서 큰 의미를 가진다. 또한 자체 개발한 사장교 전문 해석 프로그램인 HYUNStay를 실제 사장교 교량에 병행하여 적용함으로써 프로그램의 검증과 우수성을 입증하였다.

### 2.4.3 제2진도대교 시공사례

가설시 선형관리는 HyunPSC® 프로그램을 이용하여 시공단계해석 및 선형관리를 수행하였다. 실제 구조계의 거동을 정확히 모사하는 것은 선형관리의 핵심으로 HyunPSC®의 시공명령어를 이용하여 효과적으로 구조계의 변화를 나타낼 수 있었다. 주경간 가설은 Barge로 해상 운반한 보강형을 데릭크레인으로 인양을 하였으며, 보강형 좌표 검측과 케이블 장력보정은 온도의 영향을 고려하여 야간에 수행되었다.

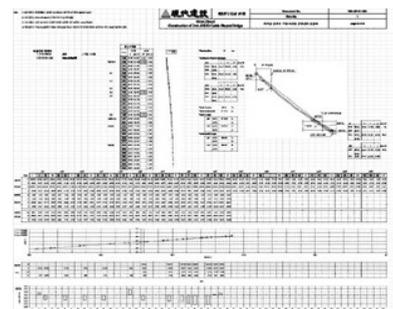
선형관리를 위한 관리차트는 매 단계마다 케이블의 장력이 도입된 후 시공오차를 검토하여 보정여부를 결정한다. 장력보정은 각 단계에서 보강형의 처짐오차와 장력오차를 보정하는 것으로 매 시공단계별로 바뀐 구조계에 대하여 각 케이블의 장력 변화에 대한 다른 케이블의 장력, 보강형과 주탑의 변위에 대한 영향매트릭스를 구하고, 이를 이용하여 오차를 최소화하는 보정량을 산정한다.

제2진도대교의 상부구조 가설은 측경간이 Full Staging공법으로 먼저 가설되고 중앙경간은 데릭 크레인을 이용하여 캔틸레버 공법으로 가설되었다. 경간구성이나 케이블 배치에서 측경간과 중앙경간의 비대칭성이 커서 시공 중 측경간과 중앙경간의 장력 균형을 유지하여 주탑의 모멘트와 변위를 줄이도록 측경간 케이블의 긴장력을 분할하여 도입하였다. 사전에 segment단위로 제작되어 가설되는 강보

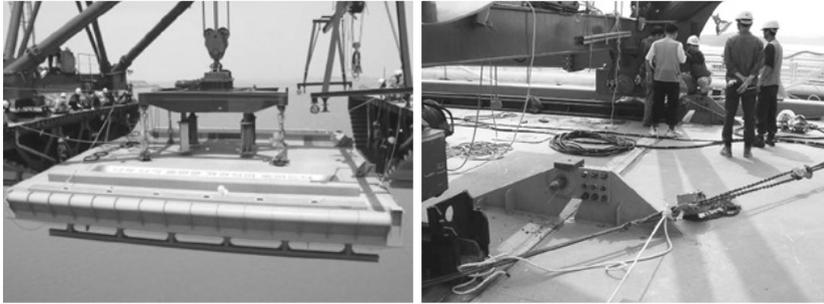
강형의 특성상 제작캠버가 정확히 계산되어야 하며, 정착부까지 사전에 제작되어 반입되는 PWS방식 케이블의 특성상 무응력 길이 또한 정확히 계산되어야 하므로 초기치 해석의 중요도가 높았다.

주경간의 가설은 보강형의 인양과 용접, 케이블의 가설 및 긴장의 순서로 진행되며, 시공단계 해석에 의해 산출된 단계별 형상과 케이블 장력을 실측값과 비교하여 매 단계에서 장력조정을 통해 형상과 장력분포를 보정하였다. 케이블 장력과 보강형의 처짐, 주탑의 수평변위 및 케이블 장력 간의 상관관계를 얻기 위하여 영향행렬을 계산하여 장력보정에 이용하였다. 캔틸레버 가설시 시공오차의 관리치는 보강형 처짐의 경우 최대 160mm, 주탑 상단의 수평처짐은 최대 70mm로 제한하였다.

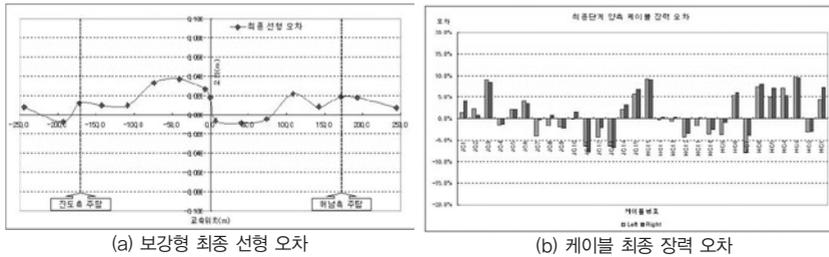
폐합시 Key segment의 길이는 12.2m이고, 폐합 직전의 key segment 양단의 캔틸레버 주경간은 인양장비의 간섭 문제로 비대칭적으로 작업 선형이 계획되어 최종단계 연결 및 선형오차 관리에 문제가 있었다. 따라서 폐합시 박스 상하 용접부의 오차를 최소화하기 위하여 상세한 시공과정을 분할계획하고, 각 단계별 해석을 통하여 최종 폐합시 오차를 최소화하며 오차관리가 가능하도록 폐합시 상하 연결부의 오차를 1/400~1/200



[그림 10] 데릭크레인을 이용한 주경간 가설 및 선형관리



[그림 11] Key segment 폐합작업



[그림 12] 제 2 진도대교 완공 후 보강형 선형 및 케이블 장력 오차

radian 범위에서 관리하고, 폐합위치 인근의 케이블 장력과 선형을 사전 검토하여 실제 시공시 매우 순조롭게 폐합이 완료될 수 있었다.

폐합후의 보강형 선형과 케이블 장력의 오차분포 결과는 앞서 보강형과 주탑의 선형관리 오차범위를 만족하였으며 케이블 장력의 오차도 일부 구간에서 10%를 약간 초과하는 값을 나타내었다.

완공 후 장력의 미세조정은 전체적인 선형에 대한 정보보다는 좌우비대칭이 상대적으로 큰 케이블에 대해서만 수행되었다.

완공후 보강형의 처짐오차는 최대 37mm, 주탑의 수평변위는 최대 16mm로 폐합 후 목한 관리 한계값인 75mm와 23mm를 만족하였다. 케이블 장력 또한 목표 장력과의 오차가 10%이내의 범위에 머물렀다.

### 2.4.4 아무나교 시공사례

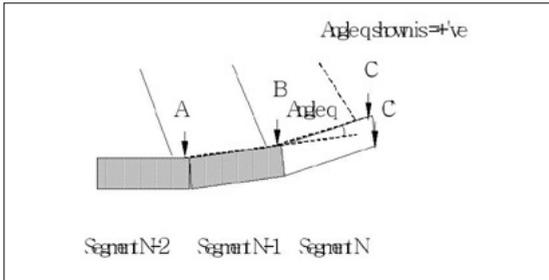
아무나 교량의 상부공 시공은 우선 교각과 주탑부가 시공이 완료된 상태에서 사장교 진입구간(End span) 60m를 Full staging공법으로 시공한 후 중앙 및 측경간은 주두부 시공을 시작으로 Form Traveller를 사용하여 10m를 단위로 하여 캔틸레버 공법으로 시공하였으며, 특히, 가설 중 내풍안정성과 주탑의 변위제어를 위해 내풍케이블을 접속구에 먼저 연결해서 시공안정

성을 확보했다. 기본 시공순서 및 작업스케줄은 [표 5]와 같다.

아무나 교량에서는 Camber값을 Level이 아닌 각도로 고려하였는데, 각도로 선형관리를 할 경우에는 계산에

[표 5]. 아무나 사장교의 시공계획

Step	시공내용
Step 1	하부 기초, 마지막 경간(60m) 및 주탑 시공
Step 2	주두부(15m) 시공 및 케이블 번호 1,2 긴장
Step 3	Balanced 캔틸레버 공법 시공 및 케이블 긴장 (케이블 번호 3,3',4,4')
Step 4	Back stay 설치 및 긴장 (최외측 케이블(케이블 번호 13'))
Step 5	Unbalanced 캔틸레버 공법 시공 및 케이블 긴장 (케이블 번호 5~13(주경간), 5'~12'(측경간))
Step 6	케이블 재긴장
Step 7	Key 세그먼트 빔 및 슬래브 시공
Step 8	포장 및 2차 사하중 시공



[그림 13] 단계별 가설과정에서 캠버관리 기준점

서 예측하지 못한 하중이 가해지더라도 하중 제거 후 동일한 각도를 유지하므로 Level로 선형을 관리하였을 때 발생할 수 있는 Camber값의 왜곡을 방지할 수 있다.

주거터의 콘크리트 타설과 양생이 끝나면 Form Traveller를 이동시키고 Cable을 설치하게 된다. Cable 긴장시에는 긴장전의 실측 레벨과 이론 레벨을 비교하여 긴장량을 결정한다.



[그림 14] Form Traveller를 이용한 보강형 시공

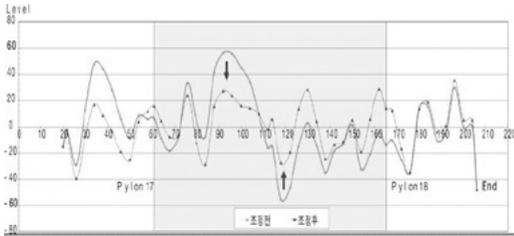
초기 긴장력 도입시 콘크리트의 응력 제한으로 인해 긴장력이 충분히 도입되지 않기 때문에 시공단계 해석 시 재긴장을 하는 단계가 포함되어 있으나, 재긴장 수행 직전 상태에서의 교량의 선형에 대한 오차를 재긴장 과정에서 추가로 보정해 주기 위하여 주경간의 마지막 캔틸레버 시공이 끝난 후 재긴장을 수행하였다.

이론적으로 최적화된 오차보정은 일반적으로 최소자승법으로 구하나, Kink에 따른 고려의 문제점 및 신속한 공정 진행을 위한 재긴장 케이블의 갯수의 최소화를 위해 시행착오법으로 추가보정량을 산정하였으며, 주요 목표치는 주탑의 변위를 이론치에 가깝게 조정하고 교량 주경간 상판레벨의 경우 Key 세그먼트 타설시 주탑 양쪽 끝단 상판의 레벨의 편차를 최소화 하는 방향으로 산정하였다.

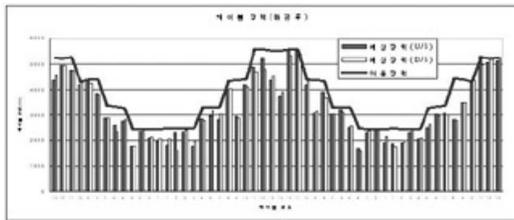
최종선형조정(Fine tuning)은 주경간 중앙의 Key세그먼트 타설이 완료된 후, 교량상판 및 주탑에 대한 전체적인 측량을 수행했으며, 가속도계를 이용하여 각 케이블의 긴장력을 측정하였다. 최종 미세조정을 위한 보정량을 산정하기 위하여 100KN의 케이블 긴장에 대해 교량 상판과 주탑의 변위에 대한 영향행렬 그리고 각 케이블 장력 변화에 대한 영향 행렬을 선형적으로 구하였다. 이렇게 구한 영향행렬을 이용하여 다음과 같은 조건을 기준으로, 교량의 선형 및 케이블 장력의 최적화를 위한 케이블 긴장량을 계산하였다.

i) 교량 상판의 오차량을 최소화 ⇨ ii) 주탑의 변위 오차량을 최소화 ⇨ 교량 완공시 및 기준시점(20년후)의 케이블의 장력은 0.45 fu 미만 ⇨ iii) Lock-Nut위치는 케이블의 재긴장을 위해 충분히 확보. 케이블 미세조정을 위한 조정 긴장력 및 긴장량과 조정량을 바탕으로 한 교량의 선형 및 장력은 다음 그림에 나타내었다.

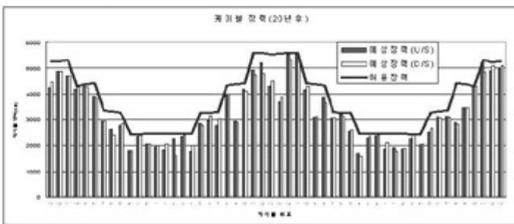
[그림 15~17]에 나타난 바와 같이 미세조정전에는 교량상판 레벨의 차이가 +/-60mm였으나 미세조정 후에는 측경간 끝부분을 제외하고는 대부분 +/-35mm내로 오차량이 줄어들었다. 케이블 장력의 경우에도 미세 조



[그림 15] 미세 조정 후 보강형 선형 오차분포



[그림 16] 케이블 장력분포 (완공후)

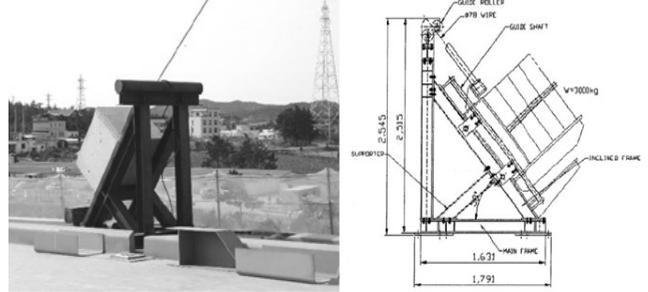


[그림 17] 케이블 장력분포 (20년후 예측치)

정후의 장력은 교량 완공시점 및 기준시점인 20년 후 모두 허용치내에 들어옴을 알 수 있다.

### 3. 시공중 내풍 안정성 확보

사상교 가설 단계에서 케이블이 설치되기 전의 독립주탑은 세장한 구조물로 동적하중에 매우 민감하고, 특히 와류진동에 취약하게 된다. 와류진동은 구조적인 안정성에 있어서 국부적인 손상과 작업환경 등의 문제점이 나타나기 때문에 진동저감 대책이 요구된다. 이러한 문

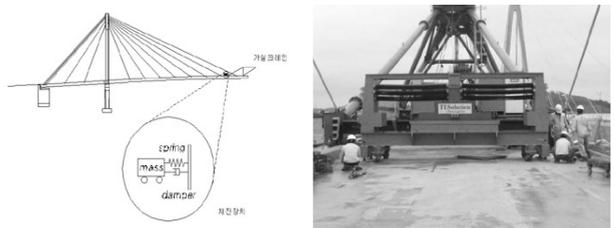


[그림 18] 제 2 진도대교 독립주탑 내풍안정성을 위한 슬라이딩 블록

제에 대응하기 위하여 주탑의 완공후 내풍케이블을 설치하게 되며, 제2진도대교의 경우 내풍케이블에 의한 진동감소효과를 향상하기 위하여 케이블 연단에 슬라이딩 블록을 설치하였다.

제2진도대교는 FCM공법을 사용하여 가설되므로, 가설단계 동안에 보강형은 쉐넬레버 상태로, 완성계에 비하여 상대적으로 풍하중에 취약한 구조이다.

특히 key segment 접합 직전에는 내풍 안정성이 가장 크게 요구되는 시기이나, 풍하중에 의한 수평방향의 정적/동적거동이 크게 나타날 것으로 예상되어 이에 대한 대책이 요구되었다. 수동형 제진장치는 아래의 그림과 같이 가설진행 선단에 위치하여, 부가 질량체와 강성체(스프링), 점성체(damper)에 의한 진동에너지를 흡수하도록 설계되었다.



[그림 19] 가설중 내풍안정성을 위한 TMD

## 4. 결론

지금까지 사장교의 제작과 단계별 가설을 위하여 초기 치 해석을 통한 보강형의 제작캠버와 케이블 무응력 길이를 산정하고, 선형관리를 위하여 시공단계해석 및 시공오차 관리 및 보정방법을 적용한 사례를 소개하였다. 사장교 선형관리의 핵심은 가설중 교량 구조계의 변화를 정확히 반영하고 이를 해석할 수 있어야 하며, 현장에서의 시공 데이터가 적절히 해석모델에 반영되어 보정될 수 있는 시스템의 구축이 필요하다. 현장과 연계한 지속적인 연구개발을 통하여 초기치 설계, 시공단계 계획 및 해석, 장력계측, 선형관리 측량 및 작업하중의 관리등 사장교 시공의 핵심 기술항목들의 관리 시스템을 구축하고, 적절한 시공중 안정성을 확보하여 성공적인 시공을 달성할 수 있었다. 특히, 사장교 전용 해석 및 선형관리 프로그램으로 현대건설이 수년간 지속적으로 개발한

HyunPSC<sup>®</sup>는 시공단계별 구조계의 변화를 잘 모사할 수 있을 뿐만 아니라 정밀한 폐합단계 검토에도 효과적으로 적용할 수 있음이 입증되었다.

향후 다양한 형태의 사장교가 설계되고, 다양한 재료의 부재가 이용될 것으로 예상된다. 또한 이를 실현하기 위한 다양한 공법의 적용이 요구될 것이다. 따라서 이를 이해하고 유효 적절히 현장에 적용, 응용할 수 있는 엔지니어의 판단이 시공에 있어서 매우 중요하며, 이것을 뒷받침할 수 있는 핵심기술의 지속적인 개발이 요구된다. 또한, 지금까지 국내외의 장대교량 시공과 설계경험을 살려서 무한경쟁의 해외시장을 진출함에 있어서, 기술적 유연성과 시공의 경제성 향상을 통한 경쟁력 확보가 매우 절실하며 이를 위한 핵심기술의 확보와 개선이 지속적으로 요구된다.

### 참고문헌

1. 영흥대교 공사지, 현대건설 2001
2. 제2진도대교 공사지, 현대건설 2006
3. Construction Design Report for YAMUNA Bridge, 현대건설 2001
4. 임현태, 서주원, 김모세, 조학연(2005), "제 2 진도대교 가설 선형관리", 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 5~8
5. 박찬수, 김태응, 임덕기, 이정현(2004), "인도 야무나 콘크리트 사장교의 선형관리 시스템 개발 및 적용에 관한 연구 (Form Traveler를 이용한 FCM공법)", 대한토목학회 정기 학술대회, pp. 5~10
6. HYUNDAI INSTITUTE OF CONSTRUCTION TECHNOLOGY, "The Development of Pre & Post-Processors as a part of Cable-Stayed Bridge Analysis Program", 98CSTR 05, Korea, 1999.
7. Karoumi, R.,(1999), "Some modeling aspects in the nonlinear finite element analysis of cable supported bridges", Computer & Structures Vol.71,pp.397-412
8. 김제춘, 장승필(1999), "초기부재력을 이용한 사장교의 초기형상 및 캠버량 결정", 대한토목학회 논문집, 제19권 1-3호, pp377-386