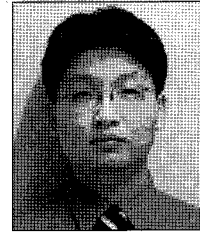


# Hyunstay를 이용한 사장교의 시공단계 해석 및 선형관리

## Construction Stage Analysis and Geometry Control of Cable Stayed Bridge by Using Hyunstay



임 현 태\*

\*현대건설 기술연구소 선임연구원

### 1. 사장교의 역사

사장교는 역사적으로 1784년 독일의 Loscher에 의해 목재만으로 이뤄진 사장교 형태가 제안되었으며, 19세기 들어와서 강재 사장교가 건설되었다. 초기의 사장교는 역학적 특성분석, 케이블 재료의 강도, 제작기술 등의 한계성 때문에 풍하중에 의한 진동붕괴와 균중하중에 의한 붕괴를 경험하였다. 초기의 사장재 케이블은 현수교에서 보조적인 역할로 케이블 시스템의 강성을 보강하기 위하여 사용되었다. 1854년 강풍에 의해 붕괴된 Wheeling교(현수교, 중앙경간 308m)의 영향을 받은 Brooklyn교가 대표적이며 재가설된 Wheeling교 또한 사장케이블로 보강되었다. 근대적인 사장교는 1956년 개통된 스웨덴의 Strömsund교(중앙경간 182m)이며, 20세기 후반 세계 최장 콘크리트 사장교인 Luna교가 완공됨으로써 사장교도 중앙경간 400m가 넘는 장대 교량의 한 축을 담당하게 되었다.

사장교는 교차의 부정정 구조이므로 그 해석에 있어서 전자계산기의 발전과 함께 발전하였다. 1950년대 등장한 Strömsund교는 8차 부정정 구조이며, 부정정 차수를 줄임으로써 4차까지 줄일 수 있고 그 정도의 계산은 기계식 계산기를 이용하여 해석할 수 있었다. 1960년대 후반부터 컴퓨터를 사용한 해석방법이 발전하면서 최초의 멀티 케이블을 가진 Friedrich교(1967년, 중앙경간 280m)가 건설되었다. 그

후 교량 해석에 있어서 컴퓨터가 사용되고 매트릭스 구조해석이 발전됨에 따라 보다 고차 부정정의 해석이 가능해 지고 사장교 또한 지간이 길어지고 케이블 간 거리가 짧은 멀티 케이블을 가진 사장교가 건설되고 있으며, 중앙경간이 1km가 넘는 다수의 초장대 사장교가 계획 또는 건설되고 있다.

### 2. 사장교의 수치적 해석 기법

사장교(Cable Stayed Bridge)는 사장 케이블(Stay Cable)의 인장 강도와 주탑 및 보강형의 휨압축강도를 효과적으로 결합시켜 구조적 효율성을 극대화시킨 교량 형식이다. 일반적으로 사장교 형식은 현수교 형식에 비해 비틀림강성이 상대적으로 크며, 거더교와 현수교의 중간적인 응력 개념을 가지고 있다고 볼 수 있다. 사장교는 단순지지 또는 연속지지된 주거더의 지점 사이를 케이블의 인장력으로 받치는 구조로써, 케이블과 거더의 접속점에서 처짐변형이 발생하고 이 처짐에 비례한 반력을 케이블과 거더가 지지한다. 따라서 사장교는 다경간 연속보로 치환할 수 있다. 또한 사장교는 비선형 거동을 하며 비선형 거동은 다음과 같은 3가지이다.

#### 2.1 케이블의 Sag

임의의 장력 상태에서 케이블은 그 자중으로 인하여 처

지게 된다(sag). 때문에 케이블 장력과 신장량은 선형관계에 있지 않다. 케이블의 sag를 고려하는 방법으로는 등가탄성계수를 이용하여 케이블을 직선의 탄성부재로 대체하는 방법, 포물선으로 가정하는 방법, 탄성현수선으로 가정하는 방법이 있다. 실제 케이블을 가장 근사적으로 모사하는 방법은 탄성현수선이다. 등가탄성계수, 포물선 그리고 탄성현수선에서 고려하는 케이블의 sag는 케이블의 길이가 길수록 장력이 작을수록 그 차이가 크다. 그림 1은 제2진도대교 케이블 중 가장 긴 케이블(L=174m, Tension Force=170tonf)에 대하여 각각의 방법에서 산정한 sag량을 검토한 것이다.

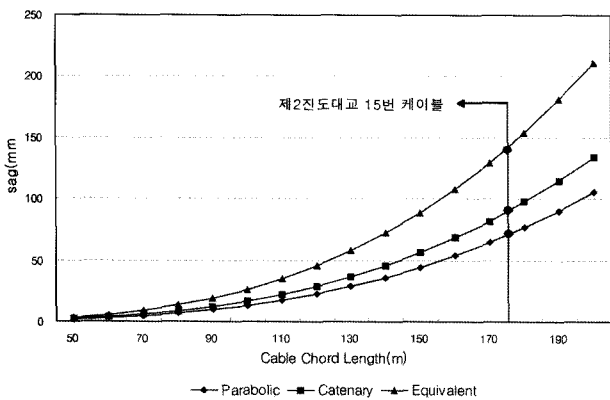


그림 1 포물선, 탄성현수선, 등가탄성계수의 케이블 길이 별 Sag량(Cable Force=170tonf)

### 2.2 P-Δ 효과

사장교의 주탑이나 상부구조는 상당한 크기의 압축력이 가해지므로 이들 부재가 변형하면 기하비선형성에 의한 추가의 2차모멘트가 발생한다. 일반적으로 이들 효과에 의한 비선형/선형해석 결과 차이는 8%~15% 정도이다.

### 2.3 재료 비선형성

대부분의 재료는 비선형성이 있으나, 설계하중 이내에서는 선형이라고 가정한다.

초기 사장교는 케이블의 재료적인 문제와 정착장치 및 가설방법이 충분히 개발되지 않았고 고차 부정적 수치적 해석에서도 한계가 있었으므로 소수의 한정된 케이블만을 사용하였으며, 비선형 문제를 고려하여 해석하지 못하였다.

컴퓨터의 발달은 유한요소법을 이용한 구조해석을 보편화 시켰으며, 그에 따라 구조해석을 위한 범용프로그램이 개발되었다. 케이블 교량 또한 범용해석프로그램을 사용하여 해석이 가능하나 많은 제약이 따른다. 그러므로 케

이블 교량을 해석을 수행할 수 있는 전용 해석프로그램의 필요성이 대두되었다. 케이블 교량 해석프로그램에 필요한 요소는 다음과 같다.

- 1) 케이블 요소를 해석하기 위한 비선형 케이블 요소가 필요하다. 일반적으로 완성계에서는 케이블의 장력이 크므로 등가탄성계수에 의한 트러스 요소의 사용도 가능하나, 가설 중 케이블의 도입 장력이 크지 않을 경우 트러스 요소는 많은 오차를 발생시킬 수 있다. 그러므로 엄밀한 해석을 위해서는 비선형 케이블 요소(탄성현수선)가 필요하다.
- 2) 케이블 교량은 시공 중 변위가 크며 완성계보다 불안정한 구조이므로, 시공 중 안정성 검토 또한 필수적이다. 또한 완성계에서의 목표 선형을 이루기 위해서는 시공 단계별 선형관리가 필수적이며, 시공 단계에 따라 최종 완성계의 응력이 변화하므로 정확한 시공 단계 해석이 가능하여야 한다.
- 3) 일반적으로 케이블 교량은 지간이 길어 처짐이 비교적 크고 특히 사장교의 경우 시공 중 보강형의 처짐이 크므로 대변형에 대한 기하비선형을 고려할 수 있어야 한다.

## 3. Hyunsus와 Hyunstay 개발과정 및 배경

1973년 우리나라 최초의 현수교인 남해대교가 준공되었고, 1984년에는 진도대교와 돌산대교가 준공되었다. 당시 케이블 교량의 설계와 시공 엔지니어링은 모두 외국에 기술에 의존하였다. 90년대 이후 영종대교(1993년~2000년), 서해대교(1993년~2000년), 평안대교(1994~2003년)등 다수의 장대 케이블 교량이 계획 시공되었고, 우리나라도 본격적인 장대교량 보유국가가 되었지만, 당시에도 장대교량 설계 등의 분야에서 외국에 대한 기술의존도가 높았다. 따라서 국내 기술의 장대 교량에 대한 기술경쟁력을 확보할 수 있는 전용 해석프로그램의 필요성이 대두되었다.

### 3.1 HyunSus와 HyunStay 개발 및 특징

1993년 현대건설과 서울대학교는 강현수교 해석프로그램인 Hyunsus를 개발하였다. Hyunsus는 현수교의 정적, 동적 해석 그리고 시공단계 해석이 모두 가능했다. 따라서 임의의 시공 상태에서 자유진동 해석, 차량 하중 해석, 지진 하중 해석 및 풍하중 해석을 수행할 수 있으며, 풍하중 해석에 필요한 인공 변동 풍속 생성이 가능했고, 또한 차량 하중 해석에 필요한 인공 노면 조도 생성도 가능하였다.

1994년 SPCFRAME을 기본으로 Hyunsus를 확대하여 사장교의 시공단계 해석 시스템, 사장교의 계측, 예측 및 보정 시스템, 사장교의 전처리 및 후처리 시스템을 갖춘 Hyunstay를 개발하였다.

1996년 Hyunstay를 업그레이드하여 Hyunstay2.0을 개발하였고, 이는 LRB와 감쇠기를 모델링하기 위하여 비선형 스프링 요소와 감쇠 요소를 추가하였고, 관심 물리량에 대해서 영향선을 쉽게 구할 수 있도록 하였다. 또한 전후 처리 시스템도 보완하였다.

2001년도에는 합성형 사장교와 콘크리트 사장교 해석이 가능하도록 재료 비선형성 및 프리스트레스 모드를 추가한 HyunPSC를 개발하였다.

Hyunsus와 Hyunstay는 케이블 교량인 현수교와 사장교의 전용 해석프로그램으로 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

- 1) 뒀을 고려한 7 자유도의 뼈대요소를 기본으로 하고 있으므로 3차원 해석이 가능하며, 케이블 요소는 탄성현수선의 비선형성을 고려할 수 있다. 케이블의 경우 장력과 케이블 길이로 입력할 수 있어서 현장 선형관리 시 유용하게 사용할 수 있다.
- 2) 합성형 보강형의 경우 강재와 콘크리트 바닥판이 가설단계에 따라 비합성, 합성을 반복하므로 단면의 강도변화 및 합성에 따른 응력변화 등을 해석하고 이를 자동으로 구현할 수 있도록 되어있다. 또한 콘크리트의 재령에 따른 강도, 건조수축, 크리프의 재료 비선형성을 고려하도록 되어있다.
- 3) 케이블 교량은 경간이 길며 유연한 구조로 처짐량이 비교적 크다. 또한 완성계보다 시공 중 단계에 따라 더 큰 변위가 발생하므로 대변위에 의한 기하비선형성이 발생한다. Hyunsus와 Hyunstay는 기하비선형을 고려하여 해석을 수행하도록 되어있다.
- 4) 케이블 교량은 완성 단계에서 목표 선형을 이루기 위해서는 가설 단계 해석이 중요하며, 시공 중 구조물은 완성계보다 불안정한 구조로 단계별 안정성 검토가 필수적이다. Hyunsus와 Hyunstay는 이러한 시공단계를 모사할 수 시공 명령어들을 가지고 있다.
- 5) 케이블 교량은 고차의 부정정 구조로써 무수히 많은 해를 가지고 있다. 그 무수한 해 중에 부재력, 변위 등을 최소화하는 해를 구하는 초기 형상 해석을 수행할 수 있다.
- 6) 동적해석 모듈로 구조물의 고유진동수, 풍하중 해석

및 지진하중 해석 기능과 차량의 이동하중 해석을 통하여 교량의 동적 거동을 파악할 수 있다.

- 7) 보강형과 주탑 또는 교각간의 연결부는 무한경계를 가정한 일면 스프링요소로는 표현하기 어려우므로 절점간에 경계조건을 도입할 수 있는 Connect 요소를 가지고 있다.

구조해석 프로그램의 경우 프로그램 개발뿐만 아니라 실제 구조물에 적용하여 해석 결과의 타당성을 검증하는 것도 중요하다. Hyunsus 경우 프로그램 개발 후 실제 프로젝트에 적용할 만한 기회가 없었지만, 사장교의 경우 프로그램 개발 이후 현대건설이 많은 사장교 시공 실적을 가지고 있으며, 각 프로젝트에 Hyunstay를 적용하여 계속적인 검증과 업그레이드를 하고 있다.

### 3.2 HyunStay의 Cable 요소 선언 및 시공 명령어

사장교의 해석 및 시공단계 해석프로그램은 일반적인 시공단계 해석프로그램에서 사용하는 거더의 시공, 지점 조건 등에 관한 시공단계 명령어를 가지고 있으며 추가적으로 케이블 시공에 관련된 명령어를 가지고 있다. HyunStay에서 케이블 요소를 선언하고 케이블 긴장 및 재조정 등에 관한 시공 명령어는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{CABLE ELEMENT TY} &= \text{type I} = \text{ii,rxj,ryj,rzj J} \\ &= \text{jj,rxj,ryj,rzj} \end{aligned}$$

케이블 요소의 선언에서 케이블을 비선형 또는 선형으로 해석할지 선택할 수 있다. 케이블 요소의 타입은 등가 트러스, 탄성현수선, 일반트러스 요소를 선택하여 사용할 수 있으며, 일반적으로 정확한 해석을 위하여 탄성현수선 요소를 사용하지만 비선형 해석만 수행할 수 있으므로 온도영향 검토 등에는 선형 해석이 가능한 등가트러스 요소를 사용할 수도 있다. 일반적으로 케이블 정착구의 위치는 주탑과 보강형의 단면 중심과 일치하지 않는다. 그러므로 케이블의 작용점과 단면 중심의 offset값(I,J)을 선언하여 모사한다. 케이블의 시공 명령어로는 케이블의 긴장, 재긴장, 제거를 위한 명령어가 있다.

STRESS CABLE : 케이블의 긴장을 위한 명령어로 맨 처음 케이블이 설치될 때 적용된다.

CHANGE CABLE : 케이블의 재긴장 또는 장력 조정을 할 경우 사용되며, 기설치된 케이블에만 적용할 수 있다.

REMOVE CABLE : 케이블 제거시 사용한다. 가설을 위한 임시 케이블을 제거하는데 사용된다.

위의 명령어에서 케이블의 긴장력은 장력(P) 또는 케이블의 무응력장(L)으로 입력할 수 있다. 케이블을 장력과 무응력장으로 입력할 수 있는 옵션은 선형관리에 유용하게 적용된다. 결과물은 케이블의 I단과 J단의 장력과 케이블의 총길이, 케이블의 신장량을 제외한 무응력장 등이 출력된다. 케이블 양단의 장력에서 주탑측 장력은 최대장력으로 안정성 검토에 사용되며, 보강형측 장력은 보강형에서 긴장 시 긴장 장력으로 그리고 두 값의 평균값은 케이블 진동법등의 간접적인 장력 측정 시 기준값으로 사용된다. 또한 무응력장은 케이블 제작길이 산정에 사용되며 공장제작 케이블의 경우 매우 중요하다.

#### 4. Hyunstay의 현장 적용

현대건설은 90년대 이후 영흥대교(1997~2001년), 야무나교(2004년 준공), 제2진도대교(2001~2006년), 거금도연도교(2001~), 마창대교(2004~) 등 다수의 사장교를 시공하였고 현재 시공 중에 있다. Hyunstay는 영흥대교 시공부터 현장 선형관리에 적용하여 해석 결과의 타당성을 검증하였다. 야무나교에서는 콘크리트 사장교에 대한 적용성을 검토하고 콘크리트 재료 비선형 해석에 대한 업그레이드를 하였으며, 제2진도대교는 초기치해석에서 현장선형관리의 모든 부분을 Hyunstay를 적용하여 시공하였고, 현재 마창대교 선형관리를 수행하고 있다.

표 1 Hyunstay를 적용한 사장교 개요

교 량	영흥대교	야무나교	제2진도대교	마창대교
경간구성 (사장교 구간)	110m+240m +110m =460m	60m+115m+ 260m+115m +60m=610m	70m+340m +70m =480m	170m+400m +170m =740m
거더형식	강박스	콘크리트 거더	강박스	합성형
주탑	강주탑	콘크리트 주탑	강주탑	콘크리트 주탑
상부 시공 적용 공법	Jackup Barge를 이용한 대블럭 가설	Formtraveler를 이용한 FCM공법	Derrick Crane을 이용한 FCM공법	Derrick Crane을 이용한 FCM공법
케이블 형식	Multi-Strand	Locked Co	PWS	PWS
케이블 개수	64개	104개	60개	120개

#### 4.1 영흥대교

영흥대교는 Jackup Barge를 이용한 대블럭 가설 공법을 적용하여 가설하였다. 대블럭 가설 공법은 보강형을 일괄로 먼저 가설하고 케이블을 설치 긴장하므로 케이블 가설 중 보강형의 처짐이 극히 미소하여 케이블 긴장 시 선형 관리가 불가능하다. 그러므로 최종적으로 Jackup Barge가 제거된 후 선형을 검토하여 케이블 장력을 재조정하고 keysegment 폐합 전후로 케이블 장력을 조정하여 선형을 보정하게 된다. 시공과정에 있어서 Hyunstay는 교량해석 범용프로그램과 병행 사용되었고, 주로 선형 보정을 위한 케이블 재긴장량 산정에 주로 사용하였으며, 현장 제작되는 케이블의 무응력 길이 산정에도 적용되었다.

표 2는 당시 재긴장량 산정 시 선형이론에 바탕을 둔 케이블 요소를 사용한 범용해석프로그램과 비선형성을 고려할 수 있는 탄성현수선 요소를 사용한 Hyunstay의 결과를 비교한 것이다. 범용해석프로그램에서는 비록 재긴장 길이를 101mm로 입력하였으나 케이블의 비선형성을 고려하지 못하는 이유로 실제 나온 결과는 109mm이다. 그러나 비선형성을 고려하는 경우 입력값과 같은 결과가 나왔으며, 이는 약 8%정도의 재긴장 길이의 오차가 발생하게 된다.

최종 단계에서의 케이블 장력 조정은 단순히 케이블 장력 조정 위치에서의 변위만이 보정되는 것이 아니라 전체 케이블의 장력, 주탑의 변위, 전체 보강형 변위에 영향을 준다. 그러므로 각각에 케이블에 대한 장력과 주탑 및 보강형의 변위에 대한 영향 매트릭스를 구성하고 최적의 장력 조정량을 산정해야 한다.

그림 4는 최종 장력 조정 후 보강형과 케이블 장력의 최종 결과이다. 최종 선형 오차는 보강형은 최대 3.5cm의 오차를

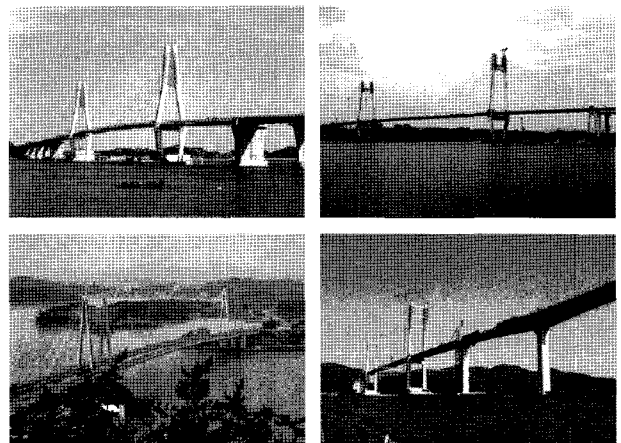


그림 2 영흥대교, 야무나교, 제2진도대교, 마창대교 현장사진

표 2 Hyunstay와 범용해석 프로그램 결과 비교

Case	입력 재긴장 길이(mm)	재긴장전 Chord Length(m)	재긴장전 장력 (tonf)	재긴장전 Reference Length(m)	강성(tonf/mm)	
					보강형	0.587
범용해석프로그램	101	119.057	122.5	118.965	보강형	0.587
Hyunstay	101	119.050	128.3	118.950	보강형	0.556
Case	강성을 고려한 재긴장후 예상 Chord Length(m)	재긴장후 목표장력 (tonf)	재긴장후 Reference Length(m)	출력 재긴장길이 (mm)		
범용해석프로그램	119.013	185.3	118.856	109		
Hyunstay	119.007	185.6	118.850	101		

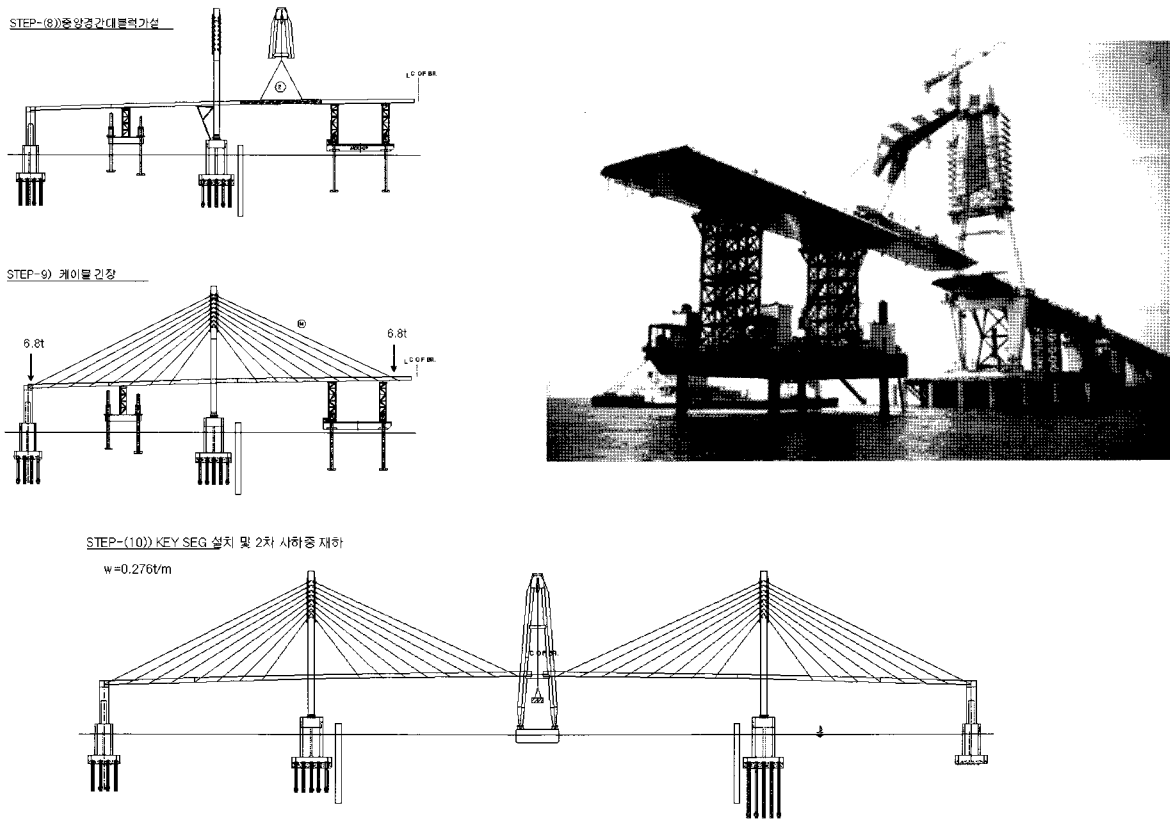


그림 3 Jackup Barge를 이용한 영흥대교 대블럭 가설 순서

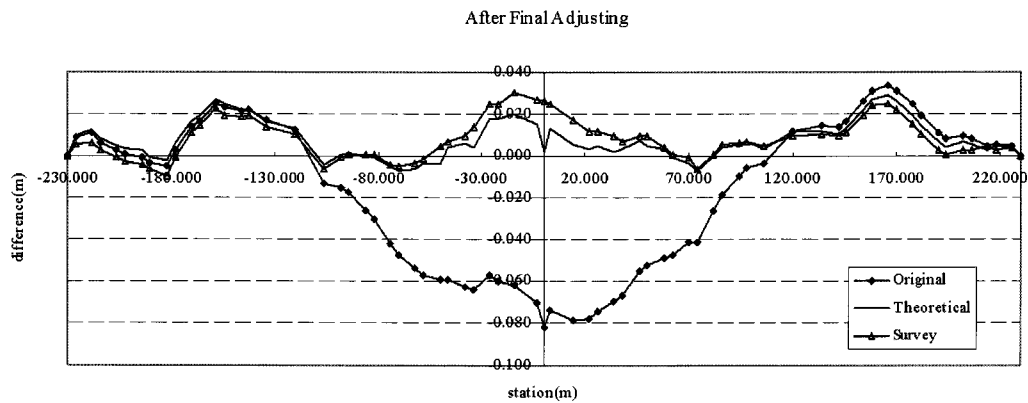


그림 4 영흥대교 최종 케이블 장력 보정 후 최종 선형 오차

나타냈으며 관리 목표치인 7.5cm이내의 값을 나타내었다.

영흥대교 현장 적용에서 Hyunstay는 실제 사장교 해석에 적합하다는 사실이 입증되었으며, 범용프로그램보다도 일부 더 뛰어난 해석 결과를 보여주었다.

#### 4.2 야무나교

야무나교는 콘크리트 사장교로써 상부는 Formtraveler를 이용한 현장타설 FCM(Free Cantilever Method)공법을 사용하였다. 콘크리트 사장교는 케이블의 비선형성 외에도 강사장교와 달리 콘크리트의 시간 의존적 특성인 크리프, 건조수축 그리고 텐던의 영향까지 고려해야하므로 구조적인 난위도가 매우 높고 고도의 시공관리가 요구된다.

야무나교의 선형관리는 범용프로그램과 HyunPSC를 적용하였으나, HyunPSC에서 콘크리트 모델의 해석 결과가 실제 교량의 거동과 차이를 보여서 현장 적용을 하지 못하였다. 그 후 HyunPSC의 콘크리트 모델을 ACI92, CEB / FIP 90의 규정에 맞게 수정하였으며, 콘크리트 모델의 입력방식 등 콘크리트 해석부분에 대한 전반적인 업그레이드가 이루어졌다.

#### 4.3 제2진도대교

제2진도대교는 영흥대교와 같은 형식의 강사장교이며, Derrick Crane을 이용한 FCM공법을 적용하였다. 주탑은 모두 육상에 있어서 측경간과 중앙경간의 비가 1:4.9 정도의 비대칭이며, 중앙경간 케이블 수가 9개, 측경간 케이블 수가 6개이다. 영흥대교 시공엔지니어링 적용에 있어서 강사장교에 대한 프로그램의 검증은 성공적으로 수행한 경험을 바탕으로 시공 엔지니어링 전반을 Hyunstay를 적용

하여 수행하였다. 설계 시 시공단계는 32단계로 해석을 수행하였으나 비대칭성에 의하여 측경간 케이블 긴장 시 발생하는 주탑의 과도한 변위를 방지하기 위하여 긴장 단계를 보다 세분화하였으며, 실제 현장 선형관리를 위해서는 보강형 인양전과 후, 케이블 긴장 시 그리고 시공 중 안전성 검토를 위하여 작업하중의 변화하는 경우도 고려하여 총 117단계로 단계로 시공단계 해석을 수행하였다. 시공 엔지니어링은 크게 세가지로 완성계에 대한 초기형상해석, 제작캠버 및 케이블 제작 길이 산정을 위한 초기치 해석, 가설단계 해석 및 현장 선형관리로 이루어진다.

초기형상해석은 실시 설계를 재검토하고 설계 시 장력을 기준으로 완성계를 모델링하여 부재력과 주탑의 변위가 최소가 되도록 하는 장력을 재 산정하는 것이다. 초기치 해석은 초기형상 해석의 최종단계 장력을 기준으로 각 케이블의 도입 장력을 결정하고 가설단계 해석을 수행하여 가설 전 보강형의 제작 캠버, PWS(Prefabricated Wire System) 케이블의 제작길이를 산정하는 중요한 과정이다. 이때 정해진 보강형 캠버와 케이블 길이는 시공 중 변경할 수 없으며, 작업 순서 변경 또는 자중의 변화에 의한 수정은 케이블 장력을 수정하여 보정한다.

가설 단계 해석 및 현장 선형관리는 초기치 해석에서 결정된 제작 캠버와 변경된 작업하중 등을 해석 모델에 반영하고 가설 단계를 보다 세분화하여 시공 단계별 안정성 검토 및 실제 현장에서 사용할 선형관리 작업서를 작성하게 된다. 현장 선형관리는 선형관리 작업서를 기준으로 단계별 케이블의 긴장량과 장력 변화량, 보강형과 주탑의 변위를 허용 관리치 이내로 관리하고 오차 발생 시 오차 원인을 분석하여 최소화하도록 하는데 목적이 있다. 이때 케이블 장력 조정은 케이블 장력과 보강형 및 주탑의 변위에 대한 영향 매트릭스를 작성하여 사용된다. 영향 매트릭스

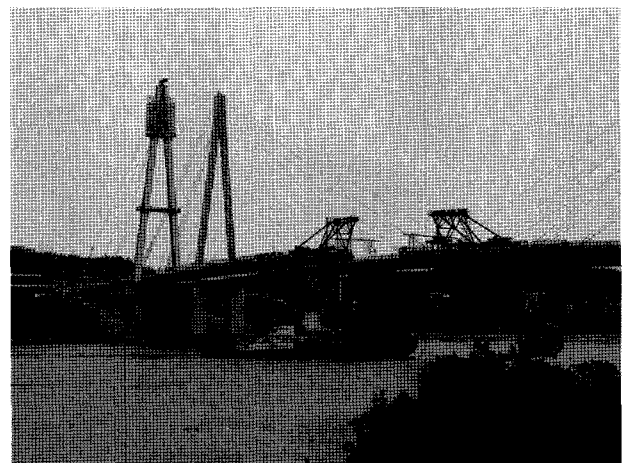
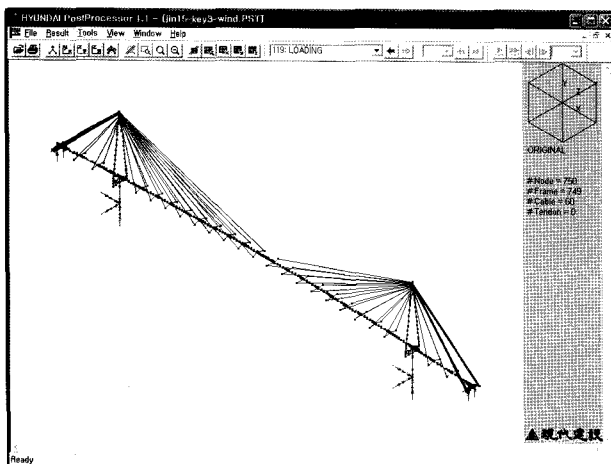
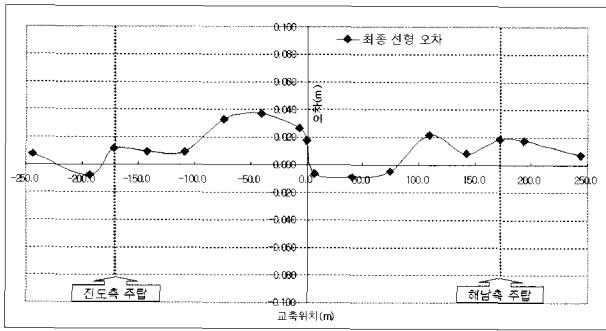
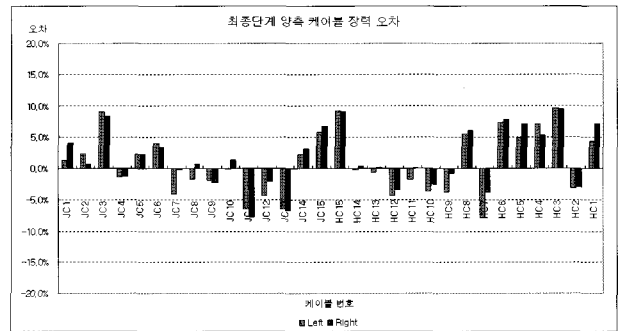


그림 5 Hyunstay를 이용한 제2진도대교 모델링 및 현장 시공 사진



(a) 보강형 최종 선형 오차



(b) 케이블 최종 장력 오차

그림 6 제 2 진도대교 원공 후 보강형 선형 및 케이블 장력 오차

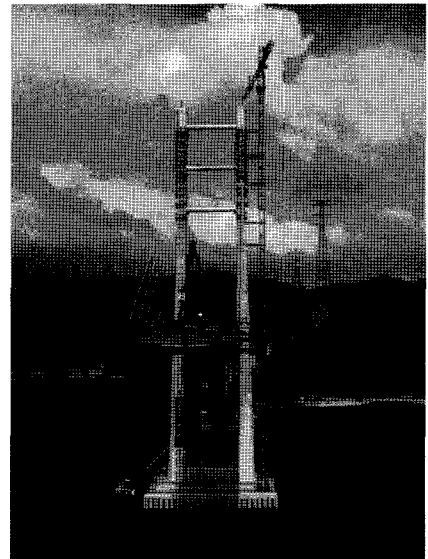
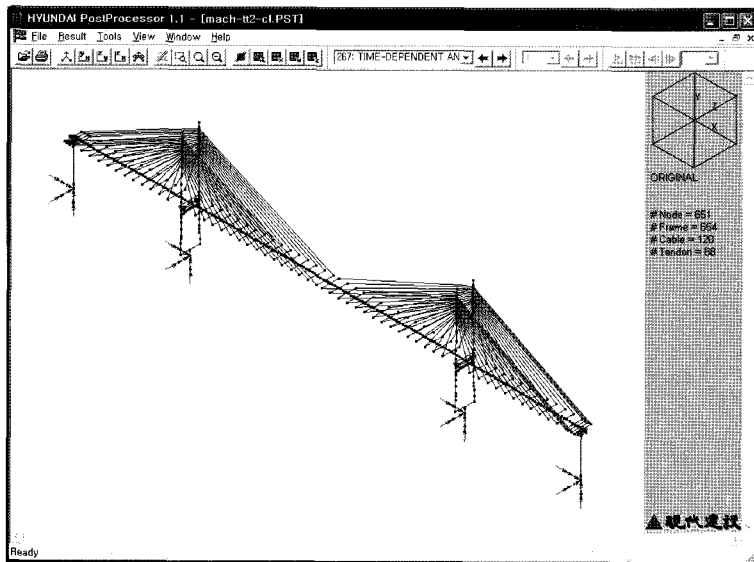


그림 7 HyunPSC를 이용한 마창대교 모델링 및 현장 시공 사진

는 각 단계별로 도입된 장력에서 단위장력 또는 단위길이 만큼 변화시켜서 해석을 수행한 결과를 정리하여 사용한다. 제2진도대교의 경우 케이블 장력을 보강형에서 도입하며, Shim Plate를 이용하여 조정하였다. 장력 도입 시 장력을 기준으로 일차적으로 목표 장력까지 도입하고 보정을 위한 장력 수정은 Shim Plate 두께를 조정한다. 그러므로 해석프로그램에서 케이블을 장력과 길이로 도입할 수 있는 옵션은 매우 유용하게 사용되었다.

사장교의 케이블 긴장 및 선형 조정은 온도의 영향이 적은 새벽 시간대에 이루어진다. 그러므로 오차 발생 시 빠른 시간 내에 오차 원인을 분석하고 엔지니어는 빠른 시간 내에 상황을 판단해야 한다. Hyunstay는 해석 파일의 수정이 용이하고 postprocessor를 통해 빠른 시간 안에 결과를 확인할 수 있어서 현장 상황에 효과적으로 대응할 수 있었다.

그림 6은 제2진도대교 최종 선형 결과이며, 보강형 선형 오차는 최대 4cm, 장력 오차는 목표장력 대비 10%를 넘

지 않는 것으로 나타났으며, 폐합 후 추가적인 장력 보정은 수행하지 않았다.

#### 4.4 마창대교

마창대교는 콘크리트 합성형 사장교 해석이 가능한 HyunPSC를 적용하여 제2진도대교와 마찬가지로 시공 엔지니어링 전 단계를 수행하고 있다. 합성형 사장교는 강사장교 보다 시공 단계가 복잡하다. 마창대교는 양측의 평형을 유지하며 가설하는 공법을 적용하여 실시 설계 시 시공 단계를 84단계로 구분하였으나, 실제 작업은 양측이 동시에 이루어질 수 없고 시간차를 두고 같은 작업이 이루어진다. 그러므로 가설 단계가 늘어나며 총 323단계로 구분하여 시공단계 해석을 수행하였다.

또한 합성형 사장교는 콘크리트 바닥판과 강거더의 합성과정에 의해 시공 중 작업 하중 및 순서가 전체 선형에 미치는 영향이 크다. 마창대교 제작 캠버 산정 시 실시설

계의 최대 캠버는 3m였으며, 상세 시공단계 해석을 수행한 후 산출된 제작 캠버는 2m로 50%의 차이를 보여주었다. 그러므로 시공 전 계획이 매우 중요하며, 시공단계 해석은 보다 실제 시공 상황에 일치하도록 모사하여야 한다.

케이블 장력 도입은 두 단계로 나누어 진행되는데 강거더 설치 및 1차 케이블 긴장을 한 후 PC 바닥판을 설치, 합성하고 2차 긴장을 수행하게 된다. 1차 긴장 시 케이블 긴장량은 2차 긴장량에 비해 매우 작으며 이때 케이블 sag에 의한 비선형성 영향이 크다.

마장대교에 적용된 HyunPSC는 야무나 교량에서 문제가 되었던 콘크리트 모델에 대하여 수정을 하였으며, 강재와 콘크리트 바닥판이 가설단계에 따라 비합성, 합성을 반복하므로 단면의 강도변화 및 합성에 따른 응력변화를 해석할 수 있다. 또한 탄성현수선을 이용한 비선형 케이블 요소는 1차 긴장 시 장력 도입에서도 케이블장력, 보강형과 주탑에 변위에 대하여 보다 정확한 해석 결과를 도출할 수 있었다.

## 5. 마치며

사장교는 현수교에 비하여 비교적 짧은 역사를 가지고 있다. 본격적인 사장교는 50년 정도의 역사를 가지며, 교차의 부정정을 계산할 수 있는 전자기기의 발달과 함께 발

진하였다. 최근 들어 세계적으로 중앙경간 1000m가 넘는 초장대 사장교가 계획되고 시공되는 것 또한 IT기술의 발전에 의한 것이라 할 수 있으며, 사장교 기술 발전에 있어서 해석프로그램이 차지하는 역할은 매우 크다. 우리나라의 IT기술은 세계 최고 수준이며, 조만간 중앙경간 800m가 넘는 초장대 사장교를 보유한 국가가 된다. 그러나 사장교의 설계 및 시공 엔지니어링에 대한 능력은 아직 세계적으로 인정받지 못하는 상황이며, 국내에서도 시공 엔지니어링 분야는 외국 기술에 의존하는 경향이 남아있다.

해석프로그램은 개발되는 순간에 완성되는 것이 아니라 프로그램을 직접 설계 또는 현장에 적용하고 계속적으로 발전시켜 나가야 하는 것이기 때문에 수많은 시간과 노력이 필요하다. 그러므로 해석프로그램의 발전과 활용은 장대교량 분야에서는 곧 기술의 발전을 뜻한다. Hyunstay는 아직 교량 설계 전 분야에 적용할 만큼 완벽하지는 않다. 그러나 시공 엔지니어링 분야에서는 지난 10년 동안 현장에 적용, 검증하고 계속적으로 수정을 거쳐 왔다. 현재는 독자적으로 사장교의 시공 엔지니어링을 수행할 수 있는 단계에 와 있으며, 또한 성공적으로 프로젝트를 수행하고 있다. 앞으로도 지속적인 현장 적용 및 수정을 거쳐 이 프로그램을 발전시키고 나아가 우리나라의 초장대 교량 발전에 기여할 수 있기를 바란다. 