

## 해안 구조물의 기하형상과 변위 해석

문두열<sup>1\*</sup> · 백태경<sup>2</sup> · 이탁곤<sup>3</sup> · 이성수<sup>1</sup>

### Analysis of Geometric Shape and Displacement in Coastal Structure

Do-Yeoul MUN<sup>1\*</sup> · Tae-Kyung BAEK<sup>2</sup> · Tack-Gon LEE<sup>3</sup> · Sung-Su LEE<sup>1</sup>

#### 요 약

본 연구는 국내에 시공이 완료되어 공용중인 해안 구조물 중 현수교를 대상으로 그 기하형상을 결정하고, 이를 이용하여 공용 이후의 대상 현수교의 변위를 결정함으로써, 케이블 교량의 안정성을 평가하는데 그 목적을 둔다. 이를 위해 공용 이후 시기별 주경간의 길이, sag, sag 비, 그리고 주탑의 변위를 산정하였다. 이는 대상 현수교 주탑의 거동에 따른 단계별 관리기준과 비교해 볼 때, 대상 현수교가 유지관리기준 범위 내에서 안정적으로 거동하고 있음을 알 수 있었다. 이상과 같이 현수교의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 그 기하형상의 결정이 우선시된다. 따라서 공용기간 및 교통량의 증가에 따른 주기적인 실측형상모델의 결정이 필요하며, 이는 현수교 유지관리에 있어서 그 안정성 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

주요어 : 해안 구조물, 현수교, 기하형상, 변위

#### ABSTRACT

This study is aimed to assess the stability of cable bridge by determining the geometric shape of the suspension bridge among the domestic coastal structures in public use after their completion of construction and the displacement of the target suspension bridge after public use. For this purpose, this study calculated the length between pylon piers for each period, sag, sag ratio and the displacement of pylon. Compared to the management standards for each step across different pylon behaviors of the target suspension bridge, this study found that the target suspension bridge behaves stably within the maintenance standards. To identify the behaviors of a

2012년 10월 10일 접수 Received on October 10, 2012 / 2012년 11월 30일 수정 Revised on November 30, 2012 / 2012년 12월 12일 심사완료 Accepted on December 12, 2012

1 동의대학교 토목공학과 Department of Civil Engineering, Dong-Eui University

2 동의대학교 도시공학과 Department of Urban Engineering, Dong-Eui University

3 부산시설관리공단 Busan Infrastructure Corporation

\* Corresponding Author E-mail : dymun@deu.ac.kr

suspension bridge accurately, the priority is put on the determination of geometric shape. Therefore, it is required to determine the surveyed shape model on a regular basis across public use period and increased traffics, which is expected to contribute considerably to ensuring the stability of the suspension bridge in its maintenance.

**KEYWORDS** : Coastal Structure, Suspension Bridge, Geometric Shape, Displacement

## 서론

최근 우리나라의 급속한 경제성장과정에서 교량, 터널, 항만, 공항, 발전소와 댐 등 대형 사회간접자본 시설물의 건설이 급증하였다. 이들 대형 구조물들은 설계 및 시공과정에서의 결함이나 설계 당시에 고려되지 않았던 조건들과 환경요인으로 인해 구조손상 발생의 위험성에 노출되어 있다(박재선, 2007). 이로 인해 1994년 성수대교의 붕괴사고와 뒤이은 당산철교의 조기철거 사태, 1995년에 발생한 삼풍백화점 붕괴 사고 등 대형 시설물 사고가 연달아 발생하였다. 이와 같은 대형 안전사고들은 시설물의 계획, 시공단계에서의 품질관리의 중요성은 물론이고, 시설물 건설 후 유지관리의 중요성을 일깨워주는 계기가 되었다. 특히 해안에 소재하고, 현재 공용 중인 해안 구조물은 연안 침식, 부식, 쓰나미 등과 같은 자연적, 인공적 요인 등으로 구조물에 대한 유지보수 및 모니터링에 대한 중요도와 사회적 관심이 증대되고 있다(이형석, 2005).

최근 초대형 해상 특수교량 건설이 진행되고 있고, 이러한 추세에 따라 해상에 건설된 교량에 대한 계측 및 유지관리를 통해 효율적인 이용을 위한 연구가 진행 중이다. 케이블에 의해 지지되는 사장교나 현수교와 같은 장대교량의 경우 설계단계 후 시공단계에서는 지속적인 부재의 변위가 발생한다. 이는 교량 구조물의 내력에 큰 영향을 줄 수 있기 때문에 각 시공단계별로 케이블의 기하형상을 측정하여 설계 형상을 유지하도록 수정할 필요가 있다. 그러나 케이블의 기하형상을 아무리 정밀하게 측정하고 이에 따라 가설관리를 하

더라도 완공 후의 교량 형상은 설계 형상과 미소한 차이를 보인다. 뿐만 아니라 공용 이후에도 여러 가지 요인에 의해 케이블의 장력이 변화하게 되며, 이로 인해 케이블의 기하형상이 변화하게 된다. 따라서 케이블의 기하형상 변화는 케이블 교량의 유지관리에 있어서 그 안정성을 평가하기 위한 매우 중요한 요소이다.

해안 구조물의 유지관리에 있어서 자정식 현수교 모델을 중심으로 차세대 건설 구조물의 유지관리시스템을 위한 기대와 전망을 예측한 연구가 수행되었고(허광희 등, 2005), 현수교 유지관리를 위한 계측기반의 해석모델에 관한 연구가 수행된 바 있다(김영호, 2006). 해안 구조물 기하형상 결정에 관련해 국내의 경우, 교량의 거동 측정에 있어서 GPS OTF 측위기법을 활용한 연구와 현수교의 주탑 모니터링을 위해 GPS와 관성장치인 IMU 조합의 측위기법이 제시된 바 있다(최병길 등, 2000; 이재원, 2006). 또한, 현수교를 대상으로 한 측량데이터를 이용하여 대상 현수교의 형상오차 원인을 추정하였고(박용명 등, 2007), 디지털 화상처리기법을 이용한 현수교의 형상결정기법을 개발한 연구도 수행된 바 있다(정진환 등, 2009). 국외의 경우, 현수교 형식인 Humber 교량의 변형 관측을 위해 GPS 측위에 의한 결과와 유한요소 모델링에 의한 결과간의 비교 및 분석에 관련된 연구와 현수교의 동적 거동을 모사하기 위한 시간대별 분석이 이루어졌다(Robert *et al.*, 1999; Erodođan and Glal, 2007).

또한 전반적으로 국내·외의 해안 구조물의 전반적인 기하형상 및 주요 구조물의 위치 결정에 관련한 연구가 많이 부족한 실정이다.

따라서, 본 연구는 실제 국내에 시공이 완료되어 공용중인 해안 구조물 중 현수교를 대상으로 그 기하형상을 관측하고, 관측된 기하형상을 이용하여 공용 이후의 대상 현수교의 변위를 결정함으로써, 케이블 교량의 안정성을 평가하는데 그 목적을 둔다.

### 해안 구조물 기하형상 결정방법

해안 구조물의 기하형상을 결정하기 위한 방법으로는 GPS 측량에 의한 방법, 토탈스테이션 측량에 의한 방법, 계측 센서에 의한 방법 등이 있으며, 최근에는 TLS(terrestrial laser scanning)도 보급되고 있다. GPS 측량에 의한 방법은 기준점의 설치와 유지관리, 우물통 등과 같은 교량 하부 구조물의 위치결정뿐만 아니라, 최근에는 측정 지점에서 연속 관측하여 이를 실시간 및 후처리 기법을 이용한 시간대별 측정점의 변위량을 분석하는 기법이 많이 활용되어오고 있다. 그러나 이는 대부분 장대교량의 주탑의 변위를 모니터링하기 위해 주로 활용되고 있으며, 그 이외의 보강형 또는 현수교 케이블의 변위를 관측하기에는 경제적인 면에서 어려움이 많은 실정이다. 토탈스테이션(total station) 측량에 의한 방법은 전자식 테오도라이트의 측각기능과 EDM의 거리 측정기능을 동시에 가지고 있는 토탈스테이션을 이용한 측량을 의미한다. 토탈스테이션 측량은 공사 측량과 같이 비교적 정밀하고 복잡하며 신속한 측량 등에 많이 활

용된다. 또한 영상을 이용하여 교량주요 부분을 추출하는 연구가 되었다(서동주, 2008). 이러한 계측센서에 의한 방법은 변위량 파악이 우선시되기 때문에 방향 및 절대좌표 성과로의 변환에 어려움이 많으며 전체적인 계측시스템의 유지관리에 어려움이 많고, 유지관리를 위한 비용이 많이 소요되는 단점을 지닌다. 끝으로, 최근에 많이 시도되고 있는 TLS의 경우 근접한 경우 매우 높은 정밀도의 자료를 취득하여 그 형상을 구현할 수 있는 장점을 지니고 있지만, 해상에 주로 건설되는 해안 구조물 관측 시 주사거리에 따른 점 간격이 매우 커지며, 이로 인해 교량의 형상을 제대로 구현할 수 없다. 본 연구에서는 3차원 위치결정에 주로 활용되고 있는 토탈스테이션 측량에 의한 방법을 이용하여 해안 구조물 중 현수교의 기하형상을 결정하였다.

### 기하형상 자료 취득 및 결과분석

현수교는 장대교량 중에서 시공성, 안전성, 내구성이 뛰어나며 경관이 미려하여 최근 해상 교량에 많이 적용되는 방식이다. 본 연구를 위한 연구대상교량은 그림 1과 같이 부산광역시 소재하는 현수교로써 전체 교량연장 7,420m 중 현수교는 그 연장이 900m이고, 약 3만 톤의 복층 강교를 직경 60cm 케이블 2본으로 지지하는 형태로 구성되어 있으며, 국내 최장 복층 현수교이다.

현수교의 유지관리를 위해서는 계측자료에

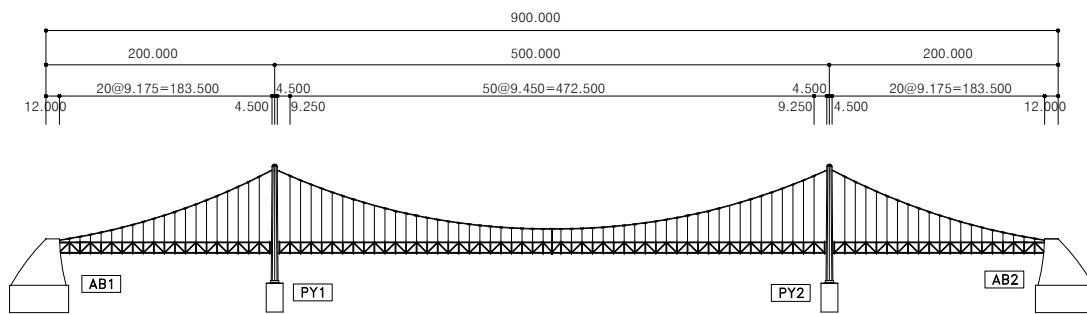


FIGURE 1. 대상 현수교의 설계 형상 치수

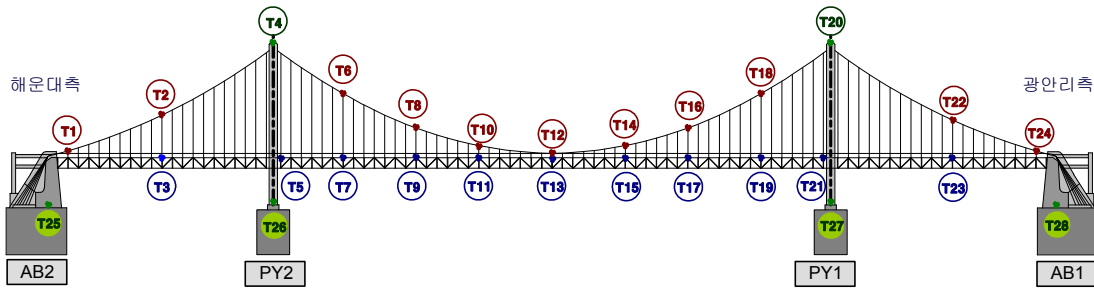


FIGURE 2. 프리즘 타겟 설치 위치도

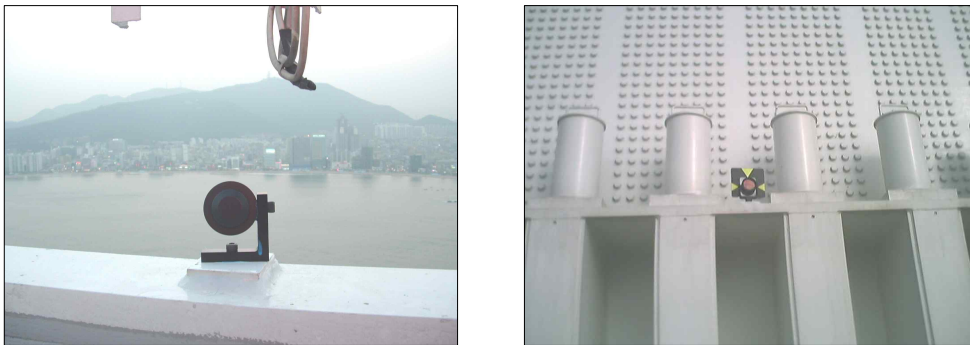


FIGURE 3. 선정된 위치에 설치된 타겟의 모습

의한 주탑의 거동 분석, 행어로프의 장력측정, 현수교 형상측량을 통한 기하 형성 결정 등이 주기적이고 체계적으로 이루어져야 하며, 이러한 자료는 현수교 주케이블의 장력을 결정하는데 매우 중요한 요소로 작용한다. 따라서 주기적으로 현수교 형상측량을 실시하기 위해서는 현수교의 주요 지점에 영구 표지를 설치하고, 이를 관측함으로써 각 지점에서의 변위를 결정할 수 있다. 본 연구에서 현수교의 기하형상 결정을 위해 그림 2와 같이 토탈스테이션으로 시준이 용이하고 구조물의 형상을 대표할 수 있는 위치를 선정하였으며, 설계도면을 통해 실제 설치 위치와 보정이 가능한 위치를 고려하여 결정하였다. 또한 그림 3은 선정된 위치에 설치된 타겟의 모습을 나타낸다.

현수교의 기하형상은 여러 가지 요인들에 의한 주케이블의 장력 변화로 인해 설계 당시의 형상과 차이를 나타내며, 이는 유지관리

측면에서 매우 중요한 요소이다. 본 연구에서는 설계 당시, 공용 이전, 그리고 공용 이후의 대상 교량의 기하형상의 변화를 분석하기 위해 총 2회에 걸쳐 현수교 기하형상을 측량하였다. 기하형상 결정을 위해 Leica사에서 제조한 TCRA1201 모델을 사용하였고, 이는  $\pm(2\text{mm} \pm 2\text{ppm} \times \text{거리})$ 의 정확도로 관측이 가능하다.

최적의 기하형상을 결정하기 위해서는 기구에 의한 영향, 대상 교량을 이용하는 교통량 등을 감안해야 하기 때문에 각각 시간대별로 12회 관측을 실시하고 각각을 그룹으로 지정하여 분석을 실시하였다. 현수교 형상의 경우 교통량 등과 같은 요인들에 의해 그 위치가 빈번히 변화하기 때문에 1차 형상측량 시 9 그룹의 경우 교축방향(X)으로  $\pm 0.60\text{cm}$ , 교축직각방향(Y)으로  $\pm 0.12\text{cm}$ , 연직방향(Z)으로  $\pm 0.62\text{cm}$ 의 가장 양호한 표준편차의 평균

값을 나타내었고, 이는 9 그룹의 결과가 1차 형상측량 당시 현수교의 형상과 가장 잘 대비됨을 설명해준다. 또한, 2차 형상측량의 경우 4 그룹에서 가장 낮은 정확도를 나타내었고, 11 그룹의 경우 2차 형상측량 당시의 현수교의 형상을 가장 잘 표현하는 것으로 나타났다.

현수교를 대상으로 1, 2차 형상측량에 따른 각 시간대별 그룹의 표준편차 평균을 분석한 결과, 1차 형상측량의 경우 교축방향으로 최대  $\pm 3.69\text{cm}$ , 교축직각방향으로 최대  $\pm 0.77\text{cm}$ , 연직방향으로 최대  $\pm 4.51\text{cm}$ 의 다소 큰 차이를 나타내었다. 또한 그룹별 표준편차 분포를 시간대별로 분석한 결과, 주로 교통량이 많은 출퇴근 시간대에 관측한 그룹에서 비교적 큰 표준편차를 나타내었다. 따라서, 형상측량 시 각 그룹별 교통량을 조사하여 그 표준편차 분포와의 상관성을 분석하였다.

동일한 그룹의 동일한 프리즘 타겟의 성과 일지라도 미소한 차이를 나타낸다. 따라서 본 연구에서는 1차 및 2차 형상측량 그룹 중 측량 시 현수교의 형상을 가장 잘 표현하는 그룹을 선정하기 위해 표 1과 같이 각 그룹별로 각 측정점의 표준편차 및 그 평균을 산정하였다.

1차 형상측량 시 각 그룹별 교통량 조사 결과와 그 분포는 그림 4와 같다. 6, 9 그룹에서의 교통량이 다른 그룹에 비해 현저히 줄어

든 것으로 나타났으며, 앞선 표 1의 표준편차의 평균 분포와 비교해보면 교통량이 적은 시간대의 형상측량 결과가 더 양호한 것을 알 수 있다.

그림 5는 2차 형상측량 시 각 그룹별 교통량 조사 결과와 그 분포를 나타낸 것으로써, 1차 형상측량과 마찬가지로 교통량이 적은 시간대에 관측한 결과값이 양호한 분포를 나타내었다. 또한 1차 형상측량에 비해 2차 형상측량의 경우 양호한 결과를 나타내었으며, 이는 1차 형상측량의 결과를 감안하여 비교적 교통량이 적은 시간대를 선정하여 2차 형상측량을 수행한 결과로 판단된다.

실제적인 현수교의 기하형상 결정은 현수교를 구성하는 구조물의 도심의 교축방향, 교축직각방향, 연직방향 위치를 결정하는 것이다. 그러나 그림 6과 같이 현수교 형상측량에 있어서 각 방향별 구조물 도심의 위치에 프리즘 타겟을 설치하는 것은 불가능할 뿐만 아니라, 프리즘 자체의 방향별 이격거리로 인해 정확한 도심의 위치를 결정하기는 어렵다. 따라서 주탑 주케이בל, 앵커 블록, 탐정 새들 등에 설치된 프리즘 타겟의 중심과 각 구조물의 도심과의 이격거리를 관측하고, 형상측량 결과에서 도심거리를 보정하였다. 또한, 그림 7과 같이 도심보정을 마친 형상측량 결과를 XY 평

TABLE 1. 1차 및 2차 형상측량 시 각 그룹별 표준편차의 평균 비교 (단위 : cm)

그룹	1차 형상측량 시 각 그룹별 표준편차의 평균			2차 형상측량 시 각 그룹별 표준편차의 평균		
	X	Y	Z	X	Y	Z
1	$\pm 2.26$	$\pm 0.40$	$\pm 1.27$	$\pm 0.70$	$\pm 0.39$	$\pm 0.66$
2	$\pm 4.29$	$\pm 0.89$	$\pm 5.13$	$\pm 0.51$	$\pm 0.28$	$\pm 0.70$
3	$\pm 2.62$	$\pm 0.65$	$\pm 2.23$	$\pm 1.69$	$\pm 0.50$	$\pm 1.69$
4	$\pm 1.26$	$\pm 0.32$	$\pm 1.86$	$\pm 1.52$	$\pm 0.57$	$\pm 2.32$
5	$\pm 2.09$	$\pm 0.58$	$\pm 2.05$	$\pm 0.87$	$\pm 0.29$	$\pm 0.67$
6	$\pm 0.64$	$\pm 0.13$	$\pm 0.82$	$\pm 0.64$	$\pm 0.32$	$\pm 0.58$
7	$\pm 1.44$	$\pm 0.60$	$\pm 1.26$	$\pm 0.68$	$\pm 0.44$	$\pm 0.92$
8	$\pm 2.02$	$\pm 0.72$	$\pm 0.99$	$\pm 1.38$	$\pm 0.49$	$\pm 0.99$
9	$\pm 0.60$	$\pm 0.12$	$\pm 0.62$	$\pm 0.61$	$\pm 0.27$	$\pm 0.73$
10	$\pm 1.46$	$\pm 0.36$	$\pm 1.34$	$\pm 0.50$	$\pm 0.18$	$\pm 0.55$
11	$\pm 0.90$	$\pm 0.38$	$\pm 1.14$	$\pm 0.42$	$\pm 0.10$	$\pm 0.47$
12	$\pm 0.80$	$\pm 0.19$	$\pm 0.69$	$\pm 0.58$	$\pm 0.20$	$\pm 0.67$

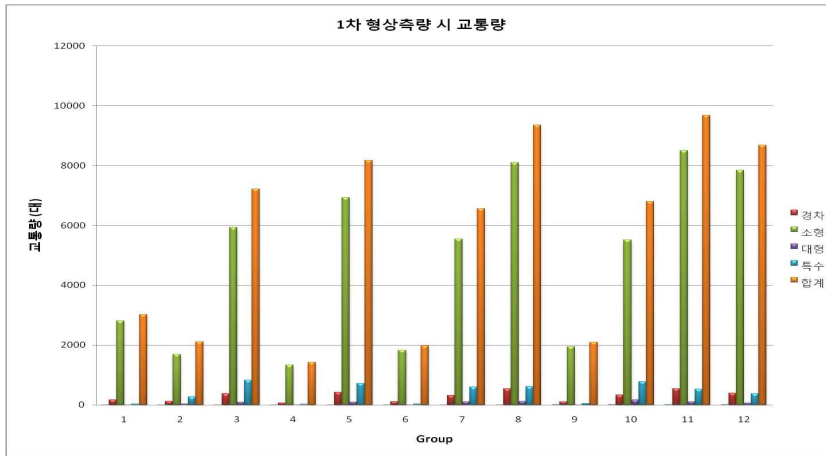


FIGURE 4. 1차 형상측량 시 차종별 교통량 분포

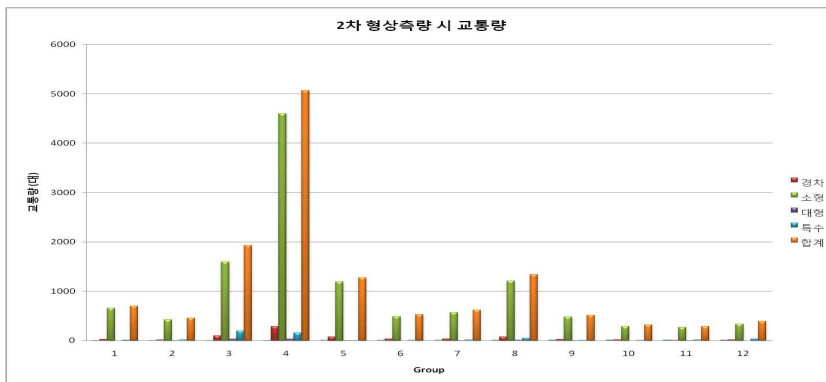


FIGURE 5. 2차 형상측량 시 차종별 교통량 분포

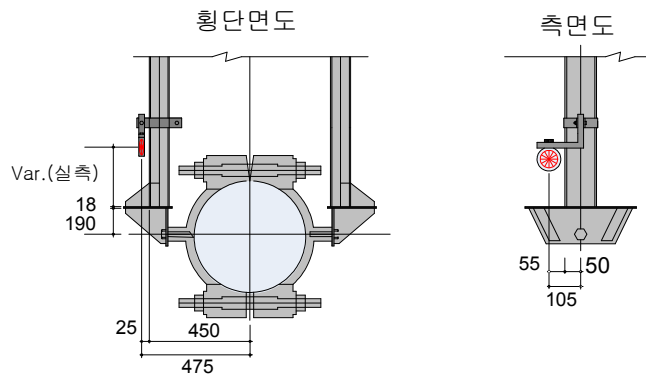


FIGURE 6. 프리즘 타깃의 위치모습

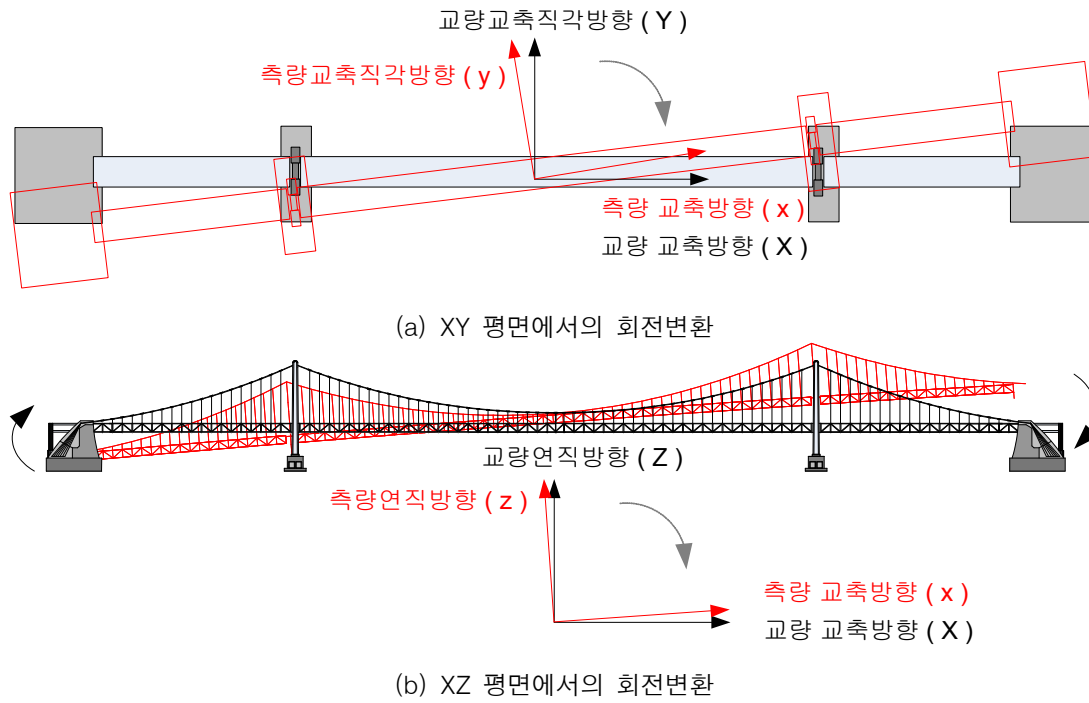


FIGURE 7. 도심보정을 마친 형상

면과 XZ 평면에서의 회전변환을 실시하였다.

이상과 같이 도심거리 보정 및 회전변환을 통한 형상측량 결과는 앵커블록 새들 도심점이나 주탑 정부 새들 도심점의 좌표는 생략된 형상이므로 완벽한 형상 좌표라고 할 수 없다. 따라서 이들 좌표를 기존 측정 좌표값과 설계 당시의 좌표값을 이용하여 생성하였고, 이 과정을 통해 대상 교량의 시기별 기하형상을 구

현한 결과는 그림 8 및 그림 9와 같다.

### 현수교 기하형상과 변위 해석

현수교는 주형의 하중을 행어(hanger)를 통해 케이블에 전달하고 이 힘을 주탑과 앵커리지(anchorage)에 의해 지반으로 전달하는 구조형식이다. 주 구성요소로는 주케이블, 주

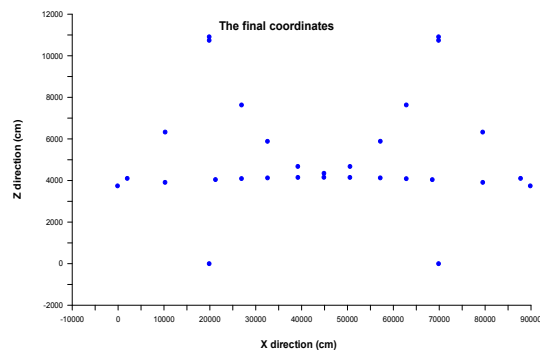


FIGURE 8. 1차 형상측량 최종 성과(X-Z 방향)

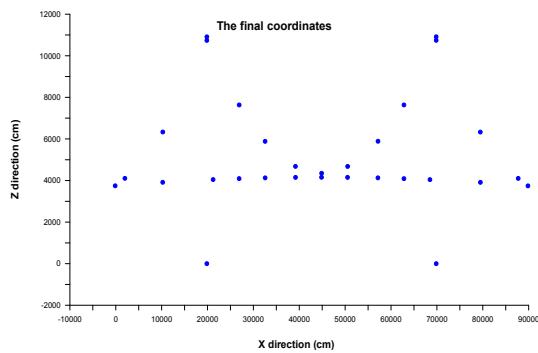


FIGURE 9. 2차 형상측량 최종 성과(X-Z 방향)

TABLE 2. 설계 형상 및 각 시기별 실측형상 비교

구 분	설계	공용전	1차	2차
주경간의 길이(m)	500.010	500.029	499.939	499.973
sag(m)	63.755	63.413	63.957	63.931
sag 비	0.1275	0.1268	0.1279	0.1279

탑, 행어, 앵커리지, 보강형 등이 있으며 그 외에 신축장치, 새들(saddle) 받침 등으로 구성되어 있다. 특히 현수교의 sag는 현수교의 거동을 해석하는데 중요한 해석 변수 중 하나이므로 이를 결정하는 것은 매우 중요하다. 따라서 주경간의 길이(L)와 보강형에서 주탑상부까지의 길이(f) 비인 sag비(f/L)의 결정은 현수교의 거동을 판단하는데 매우 중요하며, 이는 현수교의 기하형상 결정에 의해 결정될 수 있다. 일반적으로 현수교의 Sag비는 1/8~1/13 정도이며, 본 연구를 위한 대상 현수교의 sag비는 설계 당시 1/8로 계획되었다.

본 연구에서는 1, 2차 형상측량에 의한 대상 현수교의 최종 기하형상을 결정하기 위해 각각의 형상측량에 따른 주경간의 길이와 sag를 결정하였다. 또한 이를 대상 현수교의 설계 당시의 형상과 완공 후 공용전에 관측 결과에 의한 형상과 비교, 분석하였으며, 그 결과는

표 2와 같다. 각 시기별로 결정된 주경간의 길이는 공용전의 경우 500.029m, 1, 2차 형상측량의 경우 각각 499.939m와 499.973m로 결정되었다. 이상과 같이 1, 2차 형상측량에 의한 결과가 설계 및 공용전 주경간 길이에 비해 약 0.056~0.090m 범위 내에서 차이를 보임을 알 수 있었다. 이는 관측 당시의 교통량 및 풍속 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 발생하는 대상 현수교 자체의 변위를 포함한 결과로 판단된다. 또한 1, 2차 형상측량 결과에 있어서 주경간의 길이가 2차 형상측량 결과에서 0.034m 더 증가한 것으로 나타났다. 1차 형상측량 당시의 평균기온(32℃)이 2차 형상측량 당시의 평균기온(12℃)에 비해 약 20℃ 높은 것을 고려해 볼 때, 이로 인한 길이의 증가를 포함한 결과로 판단된다.

공용전의 형상 중 주경간의 길이는 1, 2차 형상측량 결과에 비해 설계 형상에 잘 일치하

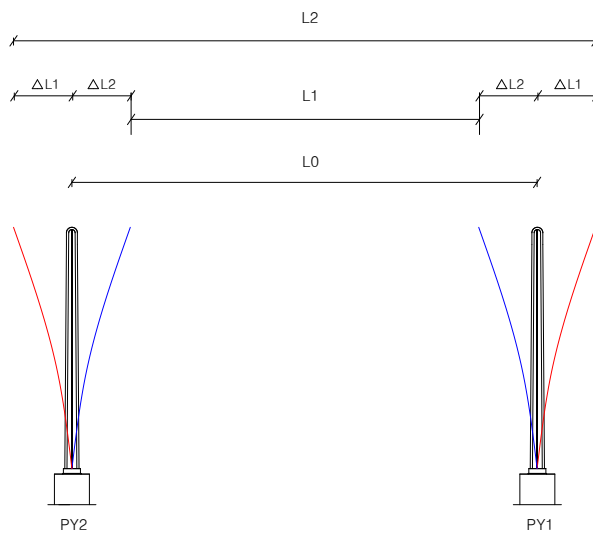


FIGURE 10. 주경간의 길이와 주탑변위의 관계



TABLE 3. 대상 현수교 주경간 길이의 허용 한계범위

구분	설계 (L0)	공용전 (L2)	1차 (L1)	2차 (L1)
L	500.010	500.029	499.939	499.973
변위	$\Delta L1$	0.000	0.010	-
	$\Delta L2$	0.000	-	0.036

TABLE 4. 주탑의 거동에 따른 단계별 관리기준

변위	단 계		
	1단계	2단계	3단계
$\Delta L1$ (mm)	57.8	98.7	150.8
$\Delta L2$ (mm)	36.4	63.1	95.4

고 있으나, sag의 경우 설계 형상에 비해 0.536% 감소함을 알 수 있었고, 이는 1, 2차 형상측량 결과보다 매우 큰 비율이다. 이러한 결과는 공용전의 sag 길이 결정에 있어서 착오 등의 문제점을 내포하고 있는 것으로 판단된다. 이렇게 결정된 주경간의 길이를 이용하여 대상 현수교의 각 시기별 주탑 변위를 결정하였다. 현수교 주경간의 길이와 주탑 변위의 관계는 그림 10과 같다.

설계 당시의 주탑 변위는 존재하지 않지만, 시공 중, 시공 완료 후, 공용 후에는 여러 가지 요인에 의해 주탑이 거동하게 되며, 이로 인해 변위가 발생하게 된다. 이러한 주탑의 변위는 설계 시 그 최대 허용 한계치를 규정하고 있으며, 공용 후에는 이러한 허용 한계치를 단계별로 구분하여 현수교를 유지관리하고 있다. 표 3은 각 시기별로 결정된 주경간의 길이를 이용하여 주탑의 변위를 산정한 결과이다. 본 연구를 위한 대상 현수교의 설계 당시 최대 허용 한계치는 외측방향으로 0.267m, 내측방향으로 0.329m로 규정하고 있으며, 각 시기별로 결정된 주탑 변위는 이 한계치 내에 충분히 포함되고 있음을 알 수 있다.

또한 대상 현수교 주탑의 거동에 따른 단계별 관리기준은 표 4와 같다. 공용전과 1, 2차 형상측량에 의한 결과에서와 같이 대상 현수교 주탑의 거동은 각 단계별 관리기준 내에 포함되고 있으며, 이는 대상 현수교가 유지관

리기준 범위 내에서 안정적으로 거동하고 있음을 설명해준다.

## 결론

본 연구에서는 해안 구조물 중 현재 공용 중에 있는 현수교를 대상으로 기하형상을 결정하고, 결정된 시기별 기하형상과 설계형상 간 비교·분석을 통해 공용 이후의 케이블 교량의 안정성을 평가하였고, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

공용된 이후 시기별 대상 현수교의 기하형상을 결정하기 위하여 1, 2차 형상측량을 실시하였고, 이를 다시 시간대별 그룹으로 구분하여 각 그룹별 정확도를 분석하였다. 그 결과, 1, 2차 형상측량 시 각각 9 그룹과 11 그룹의 표준편차가 가장 양호하게 나타났다. 또한 형상측량 시 각 그룹별 교통량을 조사하고 그룹별 표준편차와의 상관성을 분석한 결과, 통행 교통량이 증가할수록 형상측량의 정확도가 낮아짐을 알 수 있었다.

각 시기별로 가장 양호한 결과를 보인 9 그룹 및 11 그룹의 형상측량자료를 토대로 프리즘 설치 지점과 구조물의 도심간 이격거리를 보정하고, 이에 교축직각방향 및 연직방향으로의 회전변환을 수행함으로써, 구조물의 도심을 정확히 모사한 현수교의 최종 형상을 결정할 수 있었다.


1, 2차 형상측량에 의한 대상 현수교의 최

중 기하형상을 결정하기 위해 각 시기별 형상 측량에 따른 주경간의 길이, sag 그리고 sag 비를 산정하였다. 그 결과, 주경간의 길이는 각각 499.939m와 499.973m로 결정되었고, 이는 설계 및 공용전 주경간 길이에 비해 약 0.037~0.090m의 차이를 나타내었다. 이는 관측 당시의 교통량 및 풍속 등과 같은 여러 가지 요인에 의해 발생하는 대상 현수교 자체의 변위를 포함한 결과로 판단된다. 또한 1, 2차 형상측량 결과에 있어서 주경간의 길이가 2차 형상측량 결과에서 0.034m 더 증가한 것으로 나타났다. 1차 형상측량 당시의 평균기온(32℃)이 2차 형상측량 당시의 평균기온(12℃)에 비해 약 20℃ 높은 것을 고려해 볼 때, 이로 인한 길이의 증가를 포함한 결과로 판단된다.

끝으로, 각 시기별로 결정된 주경간의 길이를 이용하여 주탑의 변위를 산정한 결과, 설계 당시 최대 허용 한계치인 외측방향으로 0.267m, 내측방향으로 0.329m 내에 충분히 포함되고 있음을 알 수 있었다. 또한 대상 현수교 주탑의 거동에 따른 단계별 관리기준과 비교해 볼 때, 대상 현수교가 유지관리기준 범위 내에서 안정적으로 거동하고 있음을 알 수 있었다.

이상과 같이 현수교의 거동을 정확히 파악하기 위해서는 그 기하형상의 결정이 우선시된다. 따라서 공용기간 및 교통량의 증가에 따른 주기적인 실측형상모델의 결정이 필요하며, 이는 현수교 유지관리에 있어서 그 안정성 확보에 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 2011년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(2011AA147). 

## 참고문헌

김영호. 2006. 현수교 유지관리를 위한 계측기반 해석모델 작성 기법. 목포대학교 대학원 박사학위논문. 43쪽.

박용명, 조현준, 정진환, 김남식. 2007. 측량데이터를 이용한 현수교의 형상오차 원인 추정. 한국강구조학회논문집 19(3):313-321.

박재선. 2007. 유비쿼터스 환경의 지능형 교량 모니터링 기술 실용화를 위한 연구. 건국대학교 대학원 석사학위논문. 27쪽.

서동주, 김가야. 2008. 영상을 이용한 교량 신축이음부의 신축량 추출. 한국지리정보학회지 11(4):139-149.

이재원. 2006. GPS와 IMU에 의한 현수교 주탑 모니터링에 관한 연구. 지구물리 9(2): 77-86.

이형석, 엄대용, 장은숙, 2005. 호안측량에 의한 해안침식 및 퇴적 변화량 모니터링. 한국지리정보학회지 8(2):186-195.

정진환, 강충현, 김남식, 박용명. 2008. 디지털 화상처리기법을 이용한 현수교의 형상결정기법 개발. 한국구조물진단학회지 12(1):117-126.

최병길, 김영근, 정진우. 2000. GPS의 OTF 측위기법에 의한 교량의 거동 측정에 관한 연구. 한국측량학회지 18(3):271-278.

허광희, 이진욱, 최만용, 김유식, 김광배. 2005. 차세대 건설 구조물의 유지관리시스템을 위한 기대와 전망 : 자정식 현수교 모델을 중심으로. 구조물진단학회지 9(3):3-11.

Erodođan, H., and E. Glal, 2007. The application of time series analysis to describe the dynamic movements of suspension bridges. Nonlinear Analysis: Real World Applications 10(2):910-927.

Robert, G.W., A.H. Dodson, V. Ashkenozi, C.V. Brown and R. Karuna. 1999. Comparison of GPS measurements and finite element modeling for the deformation measurements of the Humber Bridge. The 12th International Technical Meeting of the Satellite Division of the Institute of Navigation. Nashville, USA, September, 1999. pp.1-8. 