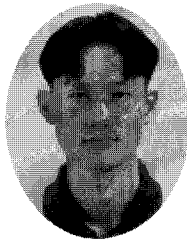


튀니스 올림픽 주경기장 케이블 장력 추정

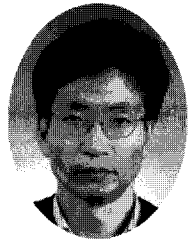
- Estimation of Cable Tension on Olympic Main Stadium in Rades, Tunis -



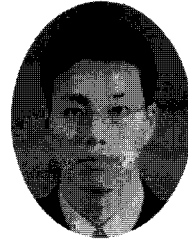
김 남 식*
Kim, Nam-Sik



정 윤**
Jeong Woon



남 재 우***
Nam, Jae-Woo



박 찬 혁****
Park, Chan-Hyuk

1. 서 론

근래에 들어와 건설산업 분야에서는 케이블 소재 및 정착장치(anchorage device)의 발전으로 케이블 지지구조물(cable supported structure)의 수요가 증가하고 있다. 특히, 사장교(cable-stayed bridge), 현수교(suspension bridge), 공간구조(space structure) 등의 케이블 지지구조물에서는 케이블의 장력도입과 장력조정이 매우 큰 중요성을 갖는다. 이런 케이블 지지구조물 건설시 설계장력과 구조물의 형상을 얻기 위하여 현장에서 케이블의 장력을 측정해야 하며 또한 완공된 후에도 구조물의 유지관리 측면에서 케이블의 장력을 측정해야 한다. 케이블의 장력을 측정하는 방법은 케이블 하중계를 이용하여 장력을 측정하는 직접적인 방법과 케이블의 진동수를 측정하여 케이블의 장력을 추정하는 간접적인 방법이 있다. 전자는 시공 상에 어려움이 따를 뿐만 아니라 센서 이상시 교체 및 수리가 어려운 단점이 있다. 그래서 일반적으로 단순하고 신속하며 경제적인 방법으로 케이블의 진동수를 측정하여 케이블의 장력을 추정하는 진동법(vibration method)이 많이 사용되고 있다. 케이블 진동수로부터 케이블 장력을 추정하는

공식은 여러 가지가 있으며 케이블의 진동수를 측정하기 위해서 일반적으로 가속도계를 많이 사용하고 있다. 또한 본 고에서는 간접적인 방법의 하나로 측정된 케이블 진동수를 기준 물성치로 하여 FEM 역해석(inverse analysis)에 의한 케이블 장력 추정법도 제안한다.

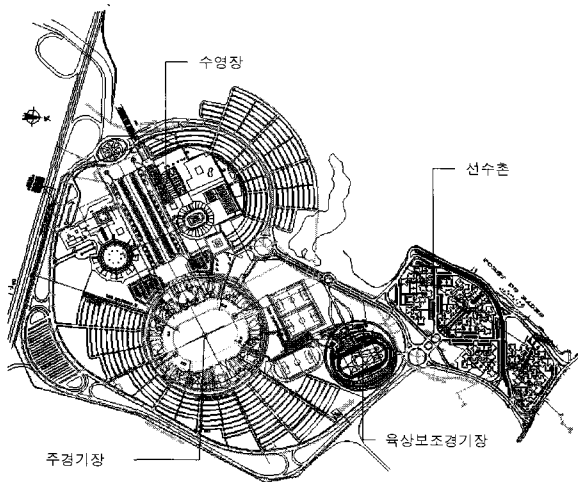
튀니스 올림픽 주경기장의 지붕 구조물은 트러스와 케이블로 구성되어 적절한 힘의 분배를 통해 구조를 지탱하는 부정정 구조물이며 케이블의 장력은 전체적인 구조물의 형상관리와 안전성에 매우 중요한 역할을 함으로 케이블의 장력관리가 필수적이다. 따라서 본 고에서는 케이블 지지 공간 구조물인 튀니스 올림픽 주경기장의 8개의 Back Stay 케이블의 장력을 간접적인 방법인 진동법과 FEM 역해석으로 추정하여 설계장력과 비교함으로써 이 케이블 지지구조물의 시공오차와 안정성을 확인하고자 한다.

2. 튀니스 올림픽 스포츠 센터

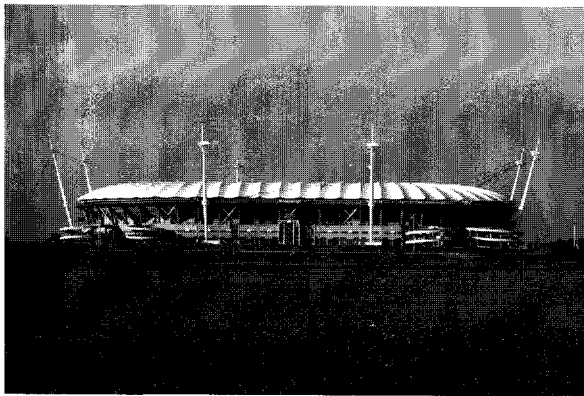
2.1 스포츠 센터 개요

튀니스 올림픽 스포츠 센터는 위치하고 있다. 튀니스 올림픽 스포츠 센터 건립공사의 계약형태는 턴키(turn-key)이고 공사기간은 1997년 7월 1일부터 2001년 6월 30일에 걸쳐 건립되었고 총공사비는 USD111백만이었다. 위치는 튀니지아 수도 튀니스

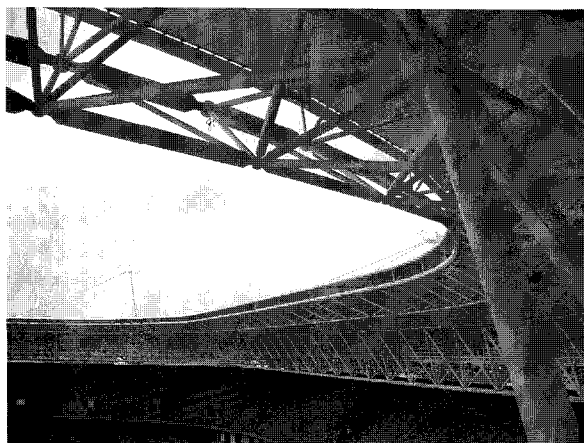
* (주)현대건설 기술연구소 책임연구원
** (주)현대건설 기술연구소 주임연구원
*** (주)현대건설 광진구민회관신축현장 소장
**** (주)현대건설 TUSPO현장 대리



<그림 1> 튀니스 올림픽 스포츠 센터 평면도



<그림 2> 튀니스 올림픽 주경기장



<그림 3> 튀니스 올림픽 주경기장 지붕 트러스

남동방향 근교의 Rades에 있으며 2001년 9월 지중해 연안국가 국제경기대회(Mediterranean Games) 개최를 위해 건설되었다. 설계사는 네덜란드의 ARCADIS 사, 시공사는 현대건설과 스페인의 FERROVIAL사

공동도급이었다. 이 스포츠 센터는 <그림 1>과 같이 6만석 수용규모의 주경기장과 육상보조경기장, 수영장, 선수촌으로 구성되어있다.

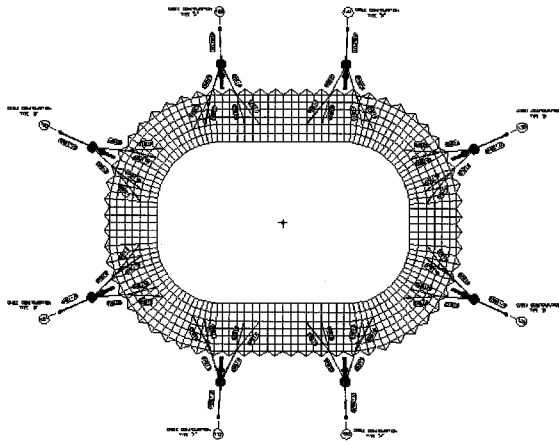
2.2 주경기장 케이블 제원 및 설계장력

튀니스 올림픽 주경기장의 지붕 구조물은 <그림 4>와 같이 8개의 파일론(pylon)으로 지지되는 트러스와 케이블로 되어 있으며 각 파일론은 <그림 5, 6>과 같이 한 개의 Back Stay 케이블과 2개의 Front Stay 케이블로 구성되어 있다. 각 Front Stay 케이블은 다시 2개의 케이블로 지지된다. Back Stay 케이블은 <그림 7>과 같이 케이블과 조립연결부재로 되어 있으며 케이블의 길이는 60.603m로 일정하고 조립연결부재의 길이에 따라 약간씩 전체길이에 차이가 있다. 이 조립연결부재는 Eye bolt, Pre-tension ring, Turnbuckle, Thread rod, Fork로 구성되어 있다. 주경기장의 8개 Back Stay 케이블이 장력추정대상이며 제원 및 설계장력이 다음 <표 1>에 나타나 있고 케이블의 중량은 조립연결부재를 제외한 케이블만의 중량이다.

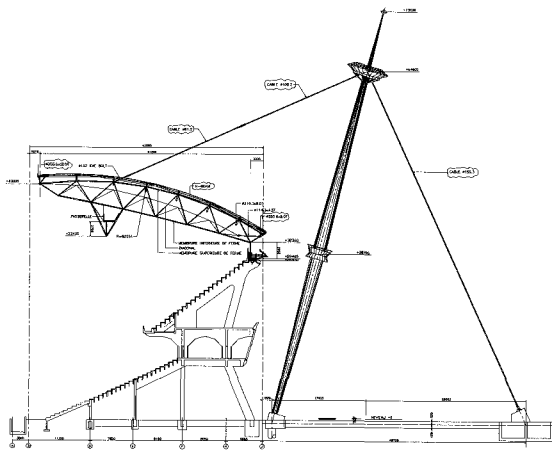
<그림 7>에서 보면 Back Stay 케이블은 3개의 힌지로 되어있는데 양끝단은 면내(in-plane)방향으로 회전하고 중간에 있는 힌지는 면외(out of plane)방향으로 회전하게 되어있다. <표 1>에 중간 힌지(mid-hinge)의 면내방향과 수직인 면외방향에서부터의 회전각도가 나타나 있으며 <그림 8>은 C1/A-152 케이블의 중간 힌지의 회전을 보여준다.

<표 1> 주경기장 케이블 제원 및 설계장력

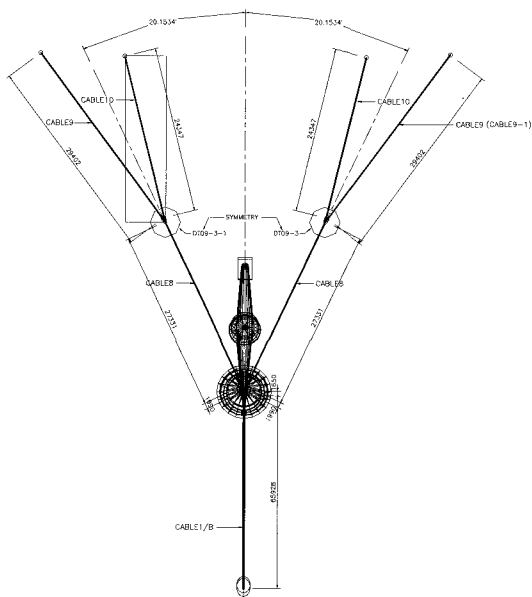
Cable ID	Cable Length [m]	Cable Weight [kN/m]	Rotation Angle of Mid-hinge [°]	Design Tension [ton]
C1/A-112	65.901	0.96687	0	457.0
C1/A-120	65.937		0	456.0
C1/A-144	65.915		0	459.0
C1/A-152	65.917		22	461.0
C1/B-104	65.971		10	506.0
C1/B-128	65.957		15	518.0
C1/B-136	65.923		15	516.0
C1/B-160	65.981		5	509.0



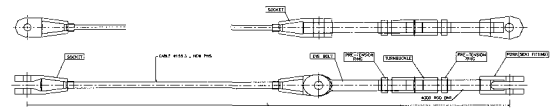
〈그림 4〉 주경기장 지붕 구조물의 평면도



〈그림 5〉 주경기장 지붕 구조물의 측면도



〈그림 6〉 파일론과 케이블의 평면도



〈그림 7〉 Back Stay 케이블의 측면 및 평면도



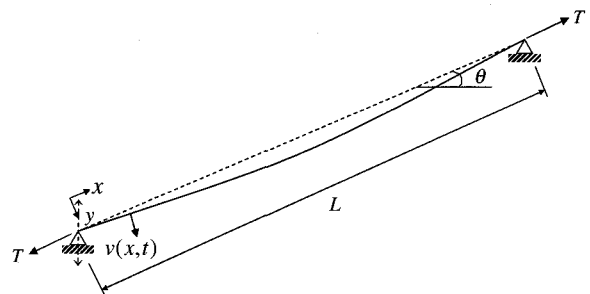
〈그림 8〉 C1/A-152 케이블의 mid-hinge의 회전

3. 케이블 장력추정

케이블의 장력을 추정하기 위한 공식은 여러 가지가 있으며, 본 고에서 사용한 공식에 대한 유도는 다음과 같다. <그림 9>와 같은 일반적인 케이블의 동적 운동방정식을 유도하기 위해서 다음과 같은 가정을 한다.

- i) 케이블의 면내진동만을 고려한다.
- ii) 케이블의 새그(sag)량이 길이에 비해 무시할 만큼 작다.
- iii) 케이블의 기하학적 형상이 2차 포물선으로 표현되어진다.

상기 가정으로부터 시간 t , 거리 x 만큼 떨어진 지점에서 케이블 현의 수직방향 동적변위 $v(x, t)$ 에 대



〈그림 9〉 일반적인 케이블 모델

한 운동방정식은 다음의 식(1)과 같이 구성할 수 있다.

$$T \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial x^2} + h(x, t) \frac{d^2 y(x)}{dx^2} - EI \frac{\partial^4 v(x, t)}{\partial x^4} = m \frac{\partial^2 v(x, t)}{\partial t^2} \quad (1)$$

여기서 T 는 케이블의 초기도입장력, $h(x, t)$ 는 케이블의 동적장력, $y(x)$ 는 케이블의 정적평형상태 형상, EI 는 케이블의 휨강성, m 은 케이블의 단위길이당 질량이다. 동적변위를 $v(x, t) = \bar{v}(x)e^{i\omega t}$ 라 놓고 식(1)의 운동방정식의 해를 구한다. 면내진동모드(in-plane mode)에 대해서는 역대칭(antisymmetric) 모드와 대칭(symmetric)모드로 구분해서 운동방정식의 해를 구하는데 역대칭모드일때는 동적장력이 0이며, 대칭모드일때는 동적장력이 0이 아니므로 $h(x, t) = \bar{h}(x)e^{i\omega t}$ 라 가정하고 가정 iii)에 의해 $\frac{d^2 y}{dx^2} = -\frac{mg}{T}$ 가 된다. 여기에 양단고정힌지의 경계조건을 적용하면 다음의 식(2)와 같은 진동수 방정식이 유도된다.

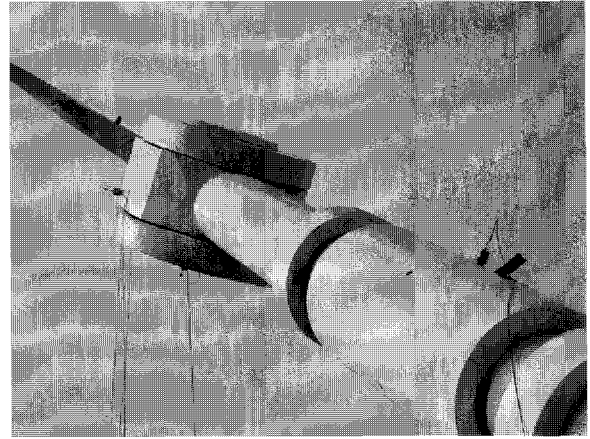
$$T = \frac{mL^2 \omega_n^2}{n^2 \pi^2} - \frac{n^2 \pi^2 EI}{L^2} \quad (2)$$

여기서 n 는 진동모드 차수, f_n 은 n 차 진동모드의 진동수이다.

이 진동수 방정식을 살펴보면 $\left(\frac{f_n}{n}\right)^2$ 과 n^2 이 1차의 선형관계로 회귀됨을 알 수 있다. 따라서, 케이블의 진동수와 진동모드차수의 1차 선형 회귀 특성을 이용하여 1차 선형회귀식의 y절편 b 를 구하여 장력을 추정할 수 있다.

실제 현장 측정은 <그림 10>과 같이 Back Stay 케이블의 케이블 부분과 Turnbuckle부분에 가속도계를 설치한 후 상시진동 및 고무충격해머로 케이블과 Turnbuckle을 가력하여 가속도 신호를 측정하고 이를 Fast Fourier Transform에 의해 분석하여 고유진동수를 추출한다. 이를 이용하여 1차 선형회귀식 선식을 구하고 다음의 식(3)을 적용하여 케이블 장력을 추정한다.

$$T = 4mL^2 \cdot b \quad (3)$$



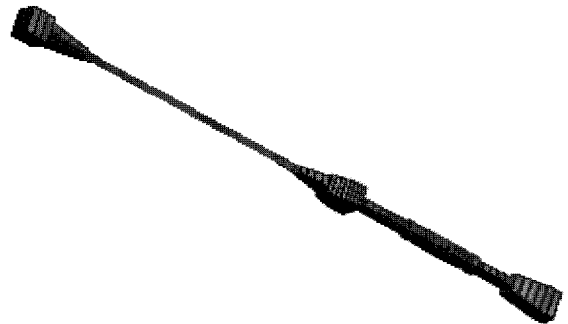
<그림 10> Back Stay 케이블에 설치된 가속도계

4. 케이블 FEM 역해석

케이블의 장력을 추정하는 간접적인 방법의 하나인 FEM 역해석은 기준 물성치를 나타내는 해석모델의 해석장력을 추정 장력으로 선택하는 방법이다.

Back Stay 케이블에 대한 FEM 해석모델이 <그림 11>에 나타나 있으며 케이블은 탄성 현수선 요소로 조립연결부재들은 beam요소로 모델링 한다.

FEM 해석은 Eigen Analysis이며 해석에 도입된 장력에 의한 진동수를 계산하고 이를 현장에서 측정된 진동수와 비교한다. 현장측정으로부터 추출된 진동수를 기준 물성치로 하여 이와 대략 유사하게 진동수가 나타나는 FEM 해석모델의 장력을 추정장력으로 선택한다.



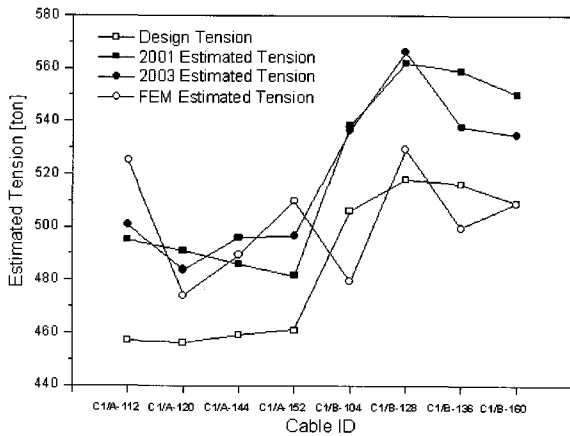
<그림 11> Back Stay 케이블에 대한 FEM모델

5. 추정 및 역해석 장력 결과비교

현장측정에 의한 케이블 장력 추정은 2001년과 2003년의 2차례에 걸쳐 수행되었으며 설계 장력과

<표 2> 설계, 추정 및 역해석 장력비교

Cable ID	Design Tension [ton]	2001 Estimated Tension [ton]	2003 Estimated Tension [ton]	FEM Estimated Tension [ton]
C1/A-112	457.0	495.1	500.9	525.2
C1/A-120	456.0	490.9	483.8	474.2
C1/A-144	459.0	486.0	496.0	489.5
C1/A-152	461.0	481.5	496.7	509.9
C1/B-104	506.0	538.3	536.7	479.3
C1/B-128	518.0	561.9	566.2	529.3
C1/B-136	516.0	559.0	538.0	499.7
C1/B-160	509.0	550.3	534.8	508.9



<그림 12> 설계, 추정 및 역해석 장력비교

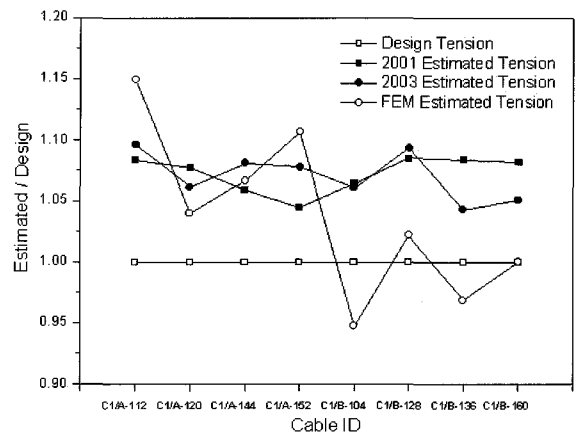
추정 장력, 역해석 장력을 <표 2>, <그림 12>에 나타내었다. 또한 설계 장력에 대한 추정 및 역해석 장력을 비교한 그래프가 <표 3>, <그림 13>에 도시되어있다. 대체로 장력오차는 <표 3>, <그림 13>에 나타난 바와 같이 추정 장력은 설계 장력의 10%이 내로 나타나며 역해석 장력은 15% 이내로 도출되었다.

6. 결 론

튀니스 올림픽 주경기장의 Back Stay 케이블의

<표 3> 설계장력에 대한 추정 및 역해석 장력차이 비교

Cable ID	2001 Estimated Difference [%]	2003 Estimated Difference [%]	FEM Estimated Difference [%]
C1/A-112	8.3	9.6	14.9
C1/A-120	7.7	6.1	4.0
C1/A-144	5.9	8.1	6.6
C1/A-152	4.4	7.7	10.6
C1/B-104	6.4	6.1	-5.3
C1/B-128	8.5	9.3	2.2
C1/B-136	8.3	4.3	-3.2
C1/B-160	8.1	5.1	0



<그림 13> 설계장력에 대한 추정 및 역해석 장력비교

장력은 간접적인 방법인 진동법과 FEM역해석에 의해 합리적으로 추정되며 그 신뢰성도 확인되었다. 다만, 본 고에서 고려한 Back Stay 케이블처럼 케이블 이외에 상당히 중량이 큰 강체로 연결된 경우에는 케이블-강체 시스템의 운동방정식 유도를 통한 케이블의 단위중량, 유효길이 등에 대한 검토와 FEM 역해석 모델의 최적화방법에 대한 연구가 향후에 더 이루어져야 할 것이다.