

제주월드컵경기장 지붕구조물의 시공

Construction of Roof Structure for Jeju Worldcup Stadium

이 주 영* 김 찬 수**
Lee, Ju-Young Kim, Chan-Soo

요 약

케이블로 지지되는 제주월드컵경기장의 지붕구조물이 구조적으로 안정한 거동을 하기 위해서는 케이블의 시공시 구조설계자가 요구하는 정확한 초기장력을 케이블에 부여해야 한다. 본 연구에서는 케이블의 시공을 위하여 장력도입 절차와 절차에 따른 장력의 계산을 기하학적 비선형을 고려한 유한요소해석을 통하여 수행하여 그 유효성을 평가하고 적용하였다. 지붕구조물을 지지하는 케이블에 장력을 도입하는 작업은 정확한 장력의 계산뿐 아니라, 각 작업을 진행 중 구조적으로 안정성을 확보해야 하며, 작업공정을 최소로 줄이고 후속공정에 영향을 미치는 요인을 분석하여 최소한 공기와 효율적인 장비의 운용되도록 계획하여야 한다. 본 연구에서는 현장의 여건과 기술적 오류를 보완하기 위한 작업 절차의 변경 등을 고려하여 제주월드컵경기장의 지지케이블의 장력을 허용오차범위내에서 조정할 수 있었다.

키워드: 케이블 지지 구조, 초기장력, 장력계측

1. 서 론

1.1 개요

제주월드컵경기장의 지붕구조물은 반달모양으로 경기장의 한쪽면을 덮는 형상을 하고 있다. 지붕구조물의 구성요소는 강관파이프로 구성된 래디얼트러스(radial truss)와 프론트트러스(front truss), 레어트러스(rear truss)로 구성되어 있으며, 변단면을 가진 마스트(mast)와 이 마스트와 연결된 스테이케이בל(stay cable), 타이백케이בל(tie back cable)로 구성되어 있다.

지붕구조물은 프론트트러스와 레어트러스를 지지하는 매스앵커(mass anchor)와 마스트에 연결되어 프론트트러스를 지지하는 스테이케이בל 및 타이백케이בל이 지붕구조물에 작용하는 주요한 힘을 지지하게 설계되어 있다(그림 1, 그림 2 참고).

지붕구조물이 주요한 하중을 케이블에 부담시키므로 지붕구조물에서 케이블이 설계자가 의도한 정확한 구조성능을 발휘하여 안정적인 구조물이 되기 위해서는 케이블에 정확한 초기장력의 도입과 함께 지붕구조물의 각 절점이 정확한 기하학적 좌표에 위치하도록 하는 것이 필요하다.

본 연구에서는 제주월드컵경기장의 지붕구조물을 지지하는 케이블의 시공시 설계자가 요구한 초기 장력을 각 케이블에 도입하기 위하여 필요한 케이블 장력도입 절차와 절차에 따른 장력의 계산을 기하학적 비선형을 고려한 유한요소해석을 통하여 수행하여 그 유효성을 평가하고 적용하

였다.

지붕구조물을 지지하는 케이블에 장력을 도입하는 작업은 정확한 장력의 계산뿐 아니라, 각 작업의 진행 중 구조적으로 안정성을 확보해야 하며, 작업공정을 최소로 줄이고 후속공정에 영향을 미치는 요인을 분석하여 최소의 공기와 주요 장비를 효과적으로 사용할 수 있도록 계획하여야 한다. 또한, 각 공정의 수행 중 발생하는 기술적인 오류를 신속히 파악하고, 오류를 제거하거나 수정하기 위한 새로운 작업절차의 수립이 필요하게 된다.

1.2 구조검토조건

제주월드컵경기장 지붕구조물에 사용된 재료는 다음과 같으며, 케이블의 설계계원은 표 1과 같다.

(1) 재료

- SWS490 재질의 강관파이프, 플레이트
- F11T 재질의 고장력 볼트
- EXX70에 준한 용접
- ASTM A603의 구조용 와이어로프

(2) 검토하중

본 연구는 시공 중 지붕구조물의 케이블 장력 및 안정성을 검토할 목적으로 수행하였으므로 지붕구조물의 자중과 케이블의 초기장력만을 고려하였다.

(3) 설계기준

본 연구에서는 지붕구조물의 안정성을 평가하기 위하여 한국강구조설계기준의 허용응력설계법을 사용하였다.

* 일반회원, 현대건설(주) 엔지니어

** 일반회원, 현대건설(주) 선임엔지니어

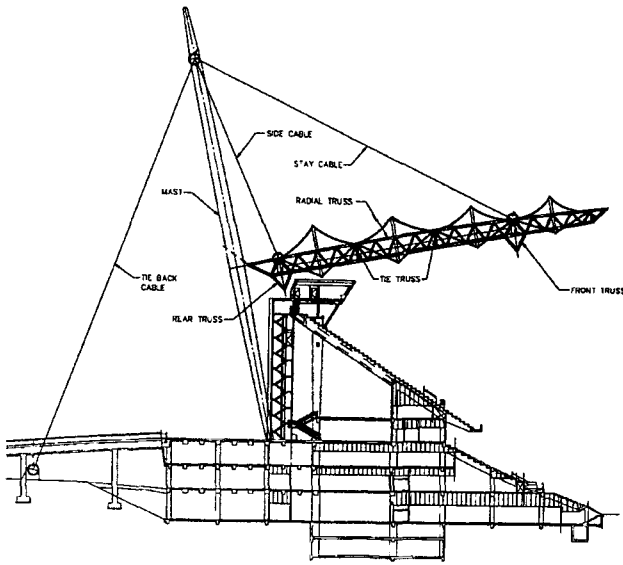


그림 1. 제주월드컵경기장 단면도

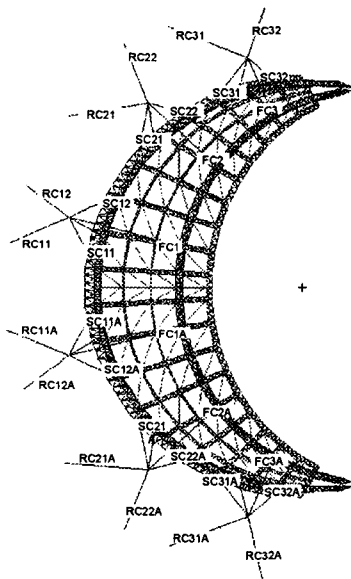


그림 2. 케이블 명칭

2. 구조해석모델의 검토

2.1 응력-변형해석

지붕구조물의 구조설계사인 Weidlinger Associates Inc.에서 구조물의 설계를 위해서 Birdair Inc.에서 개발한 케이블 및 막 구조전용프로그램인 BLD3D를 사용하여 해석과 설계를 수행하였다. 본 연구에서는 케이블의 장력계산과 지붕구조물의 안정성을 검토하기 위하여 Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.의 범용유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였다.

2.1 유한요소모델

제주월드컵경기장의 모델링을 위하여 사용한 요소는 3 node beam element(B32)와 2 node truss element(T3D2), 3 node membrane element(M3D3)를 사용하였으며, 케이블을 모델링하기 위하여 no compress material을 사용하였고, 벤트를 모델링하기 위하여 no tension material을 사용하였다. 해석방법은 기하학적 비선형성을 고려하여 Geometrically nonlinear static analysis를 사용하였다. 해석수행 시 ABAQUS는 비선형해석을 위하여 수정 뉴튼-랩슨법(modified Newton-Rapson method)을 사용한다.

표 1. 케이블의 설계 제원

Cable Designation	Diameter (mm)	Length (mm)	Prestress (kN)	
Stay Cable	FC1	101.6	65,324	1,000
	FC2	101.6	49,514	1,000
	FC3	101.6	30,670	1,000
	FC1A	101.6	65,324	1,000
	FC2A	101.6	49,514	1,000
	FC3A	101.6	30,670	1,000
Tie Back Cable	RC11	88.9	88,839	1,000
	RC12	88.9	85,064	1,000
	RC21	88.9	72,076	1,000
	RC22	88.9	65,218	1,500
	RC31	88.9	54,888	1,000
	RC32	88.9	42,600	1,000
	RC11A	88.9	89,338	1,000
	RC12A	88.9	87,783	1,000
	RC21A	88.9	77,036	1,000
	RC22A	88.9	72,659	1,500
	RC31A	88.9	60,456	1,000
	RC32A	88.9	53,537	1,000
Side Cable	SC11	88.9	48,628	1,000
	SC12	88.9	50,613	1,000
	SC21	88.9	41,056	1,000
	SC22	79.38	41,696	1,000
	SC31	88.9	30,292	1,000
	SC32	88.9	27,671	1,000
	SC11A	88.9	48,628	1,000
	SC12A	88.9	50,613	1,000
	SC21A	88.9	41,056	1,000
	SC22A	79.38	41,696	1,000
SC31A	88.9	30,292	1,000	
SC32A	88.9	27,671	1,000	

모델링 시 모든 부재의 좌표와 속성은 Weidlinger Associates Inc.에서 작성한 BLD3D용 입력화일의 값을 동일하게 사용하였고, 적용하중도 동일하게 구조부재의 자중과 케이블의 인장용력을 사용하였다. (케이블 장력 계산을 위하여 SC22, SC22A 케이블은 변경된 단면($\phi 79.38$)을 사용하였다.)

2.3 ABAQUS와 BLD3D의 비교

본 연구에서 사용한 제주월드컵경기장의 유한요소모델

과 해석프로그램의 적합성을 검토하기 위하여 고정하중과 케이블의 초기장력 상태에서 두 프로그램에서 계산한 케이블의 장력을 비교한 결과 최대 3%정도의 오차가 발생하여 비교적 동일한 결과를 보여 주었다.

3. 케이블의 장력도입 및 벤트해체 절차

3.1 개요

지붕구조물의 벤트해체 및 케이블의 장력도입은 밀접한 관계를 가지기 때문에 이들을 분리하여 시공을 진행할 수 없다. 또한 케이블의 장력을 도입하는 시점에서 해석시 과정과 동일하게 벤트가 지지 되어야 각 단계별 장력을 정확하게 도입할 수 있게 된다.

케이블의 장력도입은 목표장력의 37.5%, 50% 100%를 도입하는 3차의 작업을 통하여 이루어 졌다. 케이블의 장력도입 작업은 2개의 유압장치를 사용하여 중앙을 중심으로 대칭으로 작업이 이루어 지도록 계획하였다. 단계별로 각각의 케이블에 필요한 장력은 유한요소해석을 통하여 산출하였다.

3.2 케이블의 장력도입 절차

지붕구조물을 지지하는 케이블에 장력을 도입하고, 시공 중 지붕구조물을 지지하고 있는 가설 벤트를 해체하는 절차는 지붕구조물의 구조적인 안정성과 선후행 작업의 공정을 고려하여 다음과 같이 결정하였다.

(1) 1단계 : 6개 벤트 잭다운

지붕구조물의 모든 강관트러스의 용접이 완료된 후 레어트러스의 메인 래디얼트러스 하부의 6개 벤트의 잭다운을 수행하였다. 벤트의 해체는 잭다운이 완료되면 후속 작업과 동시에 수행을 할 수 있다(그림 3 참조).

(2) 2단계 : 케이블 초기위치 거치

케이블의 초기위치 거치 작업을 수행하였다. 케이블 거치 작업은 매스앵커가 2주이상 양생되어 압축강도가 설계강도의 80%에 도달하고, 마스트하부의 고정을 제거한 후 수행하였다.

(3) 3단계 : 14개 벤트 잭다운

케이블의 초기 상태로 거치가 완료되면 4단계로 레어트러스 하부의 14개 벤트를 잭다운 한다.

(4) 4단계 : 케이블 1차 장력도입

케이블의 1차 장력도입은 그림 6과 같이 진행하였다. 먼저 FC1, FC1A 케이블에 목표 장력의 50%를 도입하고, 나머지 케이블은 37.5%의 장력을 도입하였다. SC21, SC21A, SC22, SC22A 케이블은 SC22, SC22A 케이블의 제작오류가 발생하여 재 제작을 고려하여 모든 인장 작업이 끝난 후에 추가 설치하도록 계획하였다. 작업의 진행은 그림과 같이 중앙에서부터 매스앵커 방향으로 장력도입 작업을 진

행하였다. 장력도입 작업은 두 개의 유압장치를 사용하여 중앙을 기준으로 대칭이 되는 위치에서 동시에 수행하였다.

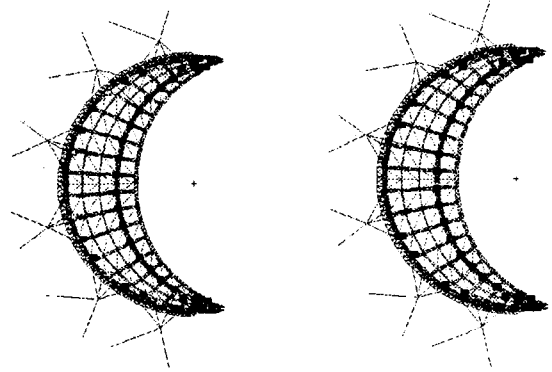


그림 3. 6개 벤트 잭다운

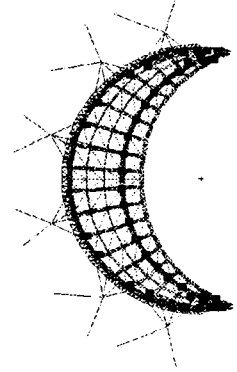


그림 4. 케이블 초기위치 거치

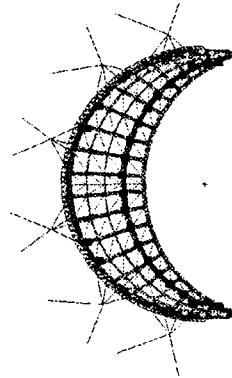


그림 5. 14개 벤트 잭다운

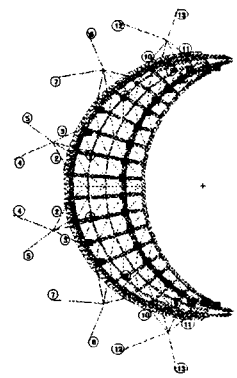


그림 6. 케이블 1차 장력도입

(5) 5단계 : 16개 벤트 잭다운

케이블에 1차 장력도입 작업이 완료된 후 16개 벤트 잭다운 작업을 수행을 하였다.

(6) 6단계 : 케이블 2차 장력도입

케이블의 2차 장력도입은 그림 8과 같은 순서로 전체 케이블에 목표 장력의 50%를 도입하였다. 2차 장력도입도 1차 장력도입과 마찬가지로 중앙에서 매스앵커쪽으로 2개의 유압장치를 사용하여 중앙에서 대칭이 되는 위치에서 동시에 수행하였다.

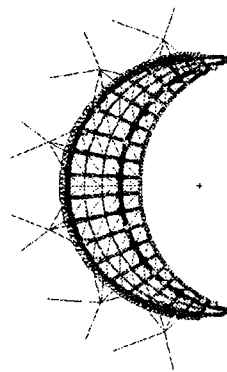


그림 7. 16개 벤트 잭다운

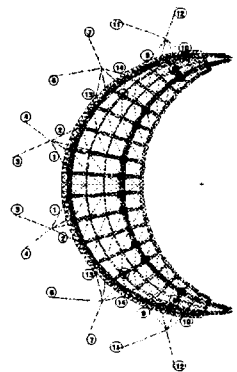


그림 8. 케이블 2차 장력도입

(7) 7단계 : 케이블 3차 장력도입

케이블 3차 장력도입은 그림 9와 같은 순서로 전체 케이블에 목표 장력의 100%를 도입하도록 계획하였다.

(8) 8단계 : 10개 벤트 잭다운

케이블의 3차 장력도입이 완료된 후 나머지 10개의 벤트의 잭다운을 수행하여 모든 케이블에 장력도입 작업을 완료하였다.

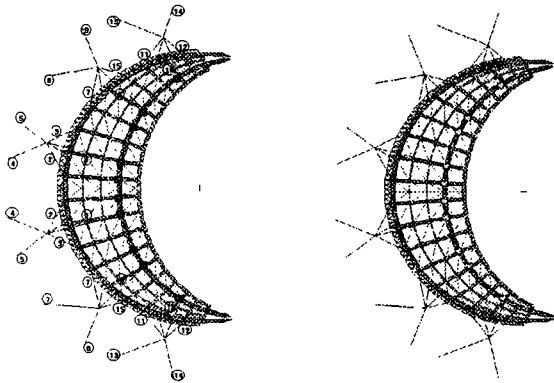


그림 9. 케이블 3차 장력도입 그림 10. 10개 벤트 잭다운

3.3 각 단계별 지붕구조물의 안정성 검토

각 단계별의 작업 수행의 안정성을 검토하기 위하여 모든 단계별로 구조해석을 수행하고 부재의 안정성을 검토하였다. 또한, 케이블 장력도입 작업은 각 장력도입단계에서 케이블에 필요한 장력을 구하기 위하여 각 단계별로 해석과 지붕구조물 및 벤트의 안정성을 검토 하였다.

그림 11은 5단계의 16개 벤트 잭다운 후 변형의 모습이고, 그림 12는 케이블의 장력도입이 완료되고 모든 벤트의 잭다운이 완료된 후의 변형을 나타내고 있다.

4. 케이블의 장력 계측 및 보정

4.1 개요

케이블의 장력 도입이 완료된 후 각 케이블에 정확한 장력의 도입 여부를 평가하기 위하여 케이블의 고유진동수를 측정하는 방법에 의해 장력을 계측하였다. 케이블에 도입된 정확한 장력을 측정하기 위해서는 케이블 장력도입시 설치한 유압장치와 보조철물 등을 설치하여 직접적으로 측정하는 방법이 가장 정확하나 이와 같은 방법은 많은 시간과 비용 및 증장비가 소요되기 때문에서 케이블의 고유진동수를 측정하는 방법에 의한 간접적인 방법을 사용하였다.

4.2 계측방법

케이블의 고유진동수를 측정하는 방법에 의해서 케이블의 장력을 계측하기 위해서는 먼저 가속도센서의 설치위치를 결정하여, 가속도를 계측하고, 측정신호를 분석한 후 장력을 계산하게 된다.

가속도센서의 설치위치는 케이블의 유효길이와 동특성을 분석하여 가급적 많은 고차모드의 케이블 고유진동수를 얻을 수 있는 위치로 결정하였다. 칠골구조물의 경우는 일조량과 대기온도에 따라 신축의 변화가 심하게 나타나므로 이를 고려하여 주간과 심야에 측정을 하여 온도에 의한 보정량을 결정하여 케이블의 장력을 평가하였다.

일반적으로 해안에 위치한 케이블구조물은 상시진동(ambient vibration)상태에서 비교적 분석이 가능한 양호한 진동신호를 얻을 수 있으므로 상시 진동상태에서 가속도신호계측을 수행하였다.

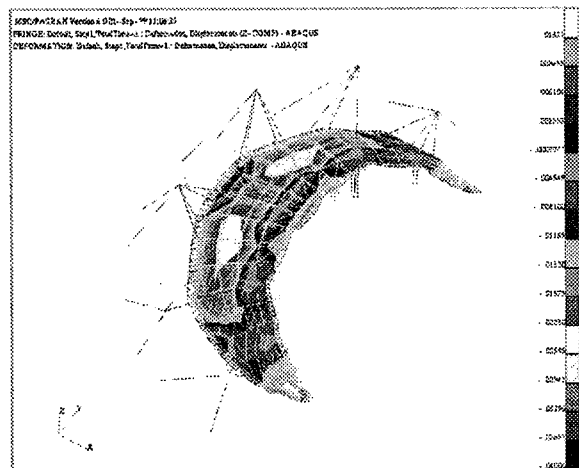


그림 11. 16개 벤트 잭다운 후 변형

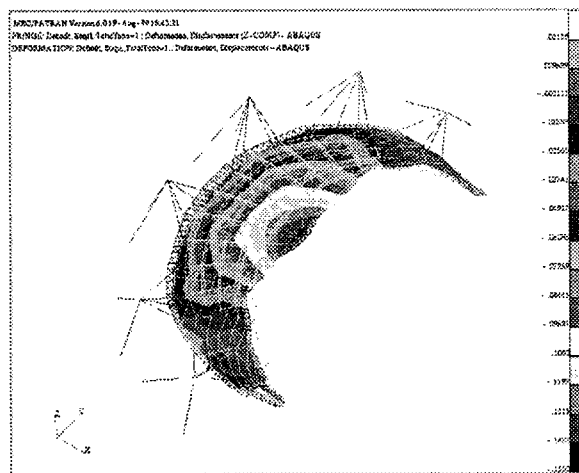


그림 12. 케이블 장력도입이 완료된 후 변형

가속도가 계측되면 계측신호로부터 FFT (fast fourier transform)을 이용하여 주파수 영역에서 PSD (power spectral density)함수를 구하여 케이블의 고차모드의 고유진동수를 얻는다. 그리고, 케이블의 진동신호의 분석으로부터 얻어진 고차모드의 고유진동수를 근거로 다음의 산정식을 이용하여 케이블의 장력을 산정한다. 식(1)은 케이블의 고유진동수와 장력과의 상관관계를 나타내는 산정식이며 식(2)는 케이블의 횡강성을 고려한 경우이다. 여기서 케이블의 고차모드를 많이 획득함으로써 더욱 정확한 장력산정이 가능하다.

$$f = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{Tg}{W}} \quad \text{식(1)}$$

$$\left(\frac{f_n}{n}\right)^2 = \frac{Tg}{4WL^2} + \frac{EI\pi^2g}{4WL^4} n^2 = b + an^2 \quad \text{식(2)}$$

$$\text{케이블의 장력} : T = \frac{4WL^2}{g} b$$

$$\text{케이블의 강성} : EI = \frac{4WL^4}{\pi^2} a$$

4.3 장력계측 및 보정

(1) 1차 장력계측 및 1차 장력보정

모든 케이블의 장력도입이 완료된 후 1차 장력계측을 수행하였다. 그림 13과 그림 14는 1차 장력계측 후 계측값과 계산값 및 오차를 보여 주고 있다.

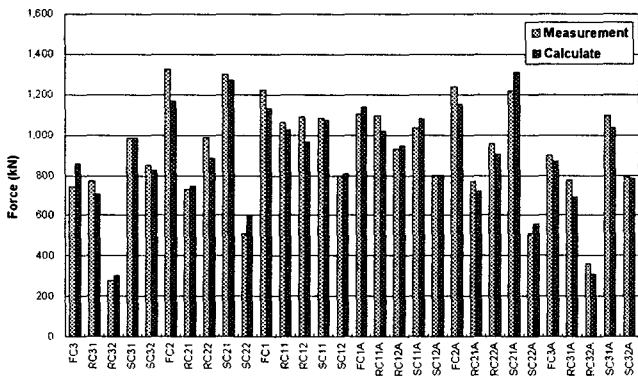


그림 13. 1차 장력계측 결과

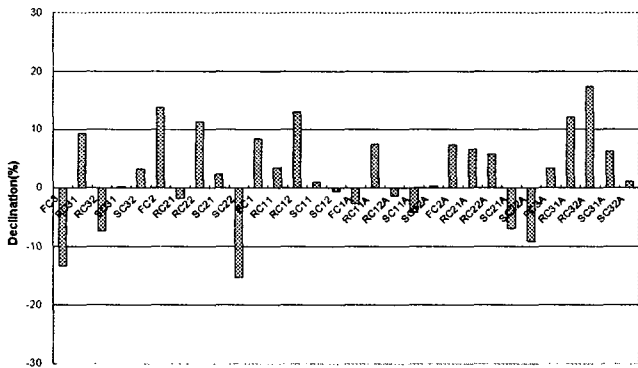


그림 14. 1차 장력계측값과 계산값의 차이

1차 장력보정은 오차를 줄이기 위하여 케이블의 길이가 긴 중앙부의 케이블을 먼저 조정하고 나중에 매스앵커쪽의 케이블을 조정하는 것을 원칙으로 순서를 계획하여, 현장에서 장비의 효율적인 운용을 고려하여 조정작업에 필요한 유압장비 및 지그의 설치를 위하여 크레인에 의한 고소작업이 필요한 사이드케이블의 조정을 먼저 수행하고 다음으로 지상에서 조정작업이 가능한 타이백 케이블의 조정을 수행하는 것으로 계획하였다. 케이블의 조정은 전체 30개의 케이블 중 27개의 케이블 조정하여 전체 케이블의 장력이 허용오차내에 들어오도록 계획하였다.

(2) 2차 장력계측 및 2차 장력보정

1차 장력보정 완료 후 2차 장력계측을 수행하였다. 그림 15와 그림 16은 2차 장력계측 후 계측값과 계산값, 오차를 보여주고 있다. 그림 16을 보면 계측값과 계산값의 차이가 30%까지 발생하여 다소 크게 나타났다. 여기서, 10%이상의 오차가 발생한 케이블은 대부분이 사이드케이블이다. 이들 사이드케이블에서 오차가 크게 발생한 것은 사이드케이블의 길이가 28m - 50m로 비교적 짧고 여기에 오픈브리지 형태의 2m정도 크기를 가진 정착구가 달려있어 케이블의 정확한 고유진동수를 얻는데 많은 어려움이 있는 것으로 판단된다.

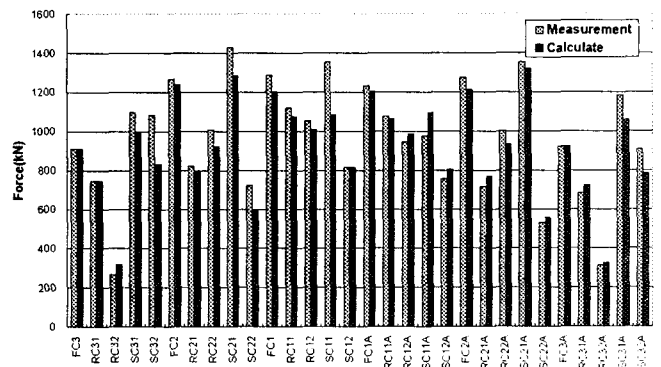


그림 15. 2차 장력계측 결과

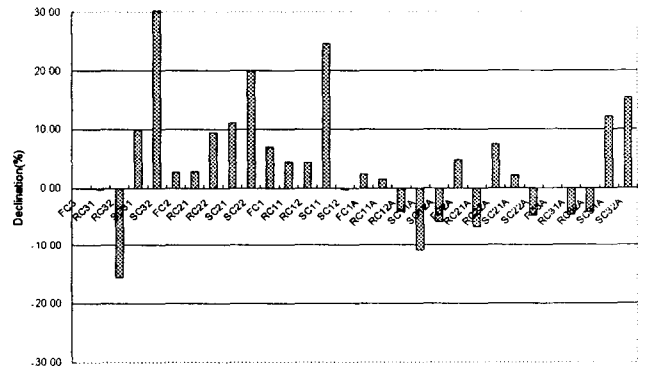


그림 16. 2차 장력계측값과 계산값의 차이

2차 장력조정도 1차 장력조정과 동일하게 케이블의 길이가 긴 중앙부의 케이블을 먼저 조정하고 나중에 매스앵커쪽의 케이블을 조정하는 것을 원칙으로 순서를 계획하여, 현장에서 장비의 효율적인 운용을 고려하여 사이드케이블의 조정 후, 타이백 케이블의 조정을 수행하는 것으로 계획하였다. 케이블의 조정은 전체 30개의 케이블 중 14개의 케이블을 조정하여 전체 케이블의 장력이 허용오차내에 들어오도록 계획하였다.

(3) 3차 장력계측

2차 장력보정 완료 후 3차 장력계측을 수행하였다. 그림 17과 18은 장력계측 결과를 보여주고 있다. 3차 장력계측 결과 그림 18과 같이 모든 케이블이 허용오차범위내로 조

정된 것을 확인할 수 있었다.

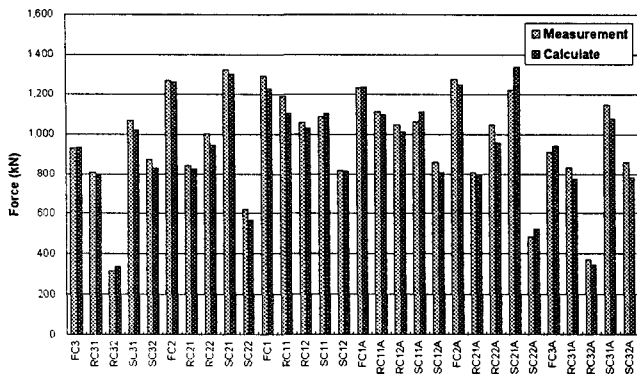


그림 17. 3차 장력계측 결과

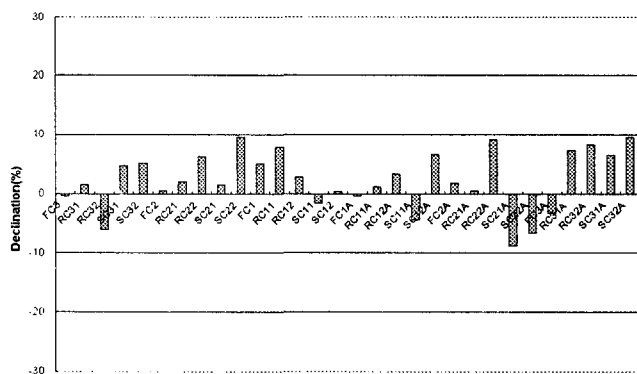


그림 18. 3차 장력계측값과 계산값의 차이

5. 결론

제주월드컵경기장의 지붕구조물은 철골트러스와 마스트에 스테이케이בל, 사이드케이בל, 타이백케이בל로 보강된 형태를 가지고 있다. 이와 같이 케이블로 지지되는 구조물이 작용하는 하중에 안정적인 거동을 하기 위해서는 케이블에 정확한 장력의 도입이 필요하며, 시공 중 지붕구조물과 가설구조물의 안정성의 검토가 필요할 뿐 아니라, 정확한 장력을 도입하기 위한 각 단계별 케이블의 작업에 따른 장력

의 계산이 필요하며, 장력의 정확한 도입 여부를 평가하기 위한 장력의 계측이 필요하다.

본 연구에서는 현장의 여건과 기술적 오류를 보완하기 위한 작업절차의 변경 등을 고려하고, 기하학적인 비선형을 고려한 해석과 고유진동법에 의한 장력계측을 통하여 제주월드컵경기장의 지지케이בל의 장력을 허용오차범위내에서 조정할 수 있었다.

그러나 제주월드컵경기장과 같이 케이블로 지지되는 구조물에 보다 정확한 장력을 도입하기 위해서는 이와 같은 철골구조물이 대기와 일조에 의한 온도의 영향에 민감하므로 일조에 의한 온도의 영향이 적은 야간에 장력조정작업을 수행하고, 고유진동수 계측에 의한 방법보다 정확한 계측방법 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. H. A. Buchholdt, "An introduction to cable roof structures", Thomas Telford, 1999
2. 김승덕, 서일교, 최옥훈, 서삼열, 한상을, "대공간 구조물의 해석 및 설계", 한국전산구조공학회, 1997
3. 정해교, 이주영, "대공간구조 지붕시스템의 설계 및 해석 기술", 현대건설(주) 기술연구소, 1999
4. 유상현, 이주영, 오명호, "부산종합운동장 주경기장 케이블 지붕구조물 시공", 현대건설(주) 기술연구소, 2001
5. 현대건설기술연구소 성능평가팀, "제주월드컵경기장 케이블 장력측정 결과", 2001
6. Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. "ABAQUS User's Manual", Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc.

Abstract

The cable stayed roof structure of Jeju worldcup stadium is erected with correct prestressed force that is required by the structural engineer who designs this structure. This study evaluated and adapted the erection process of cable, the erection force and the measurement of cable force for Jeju worldcup stadium. The process of erection is required not only to calculate erection force but also to check structural stability, post process, construction period and using cranes. Considering the site conditions and technical problems, this study can attain successfully the erection of cable stayed roof structure of Jeju worldcup stadium with allowable errors.

Keywords : cable stayed structure, prestressed force, measurement of cable force