

올림픽 펜싱경기장의 보수·보강설계

Maintenance And Reinforcement Design Of Olympic fencing Stadium

황 보 석
Hwang Bo, Suk

윤 광 재**
Yoon, Kwang-Jae

한 상 을***
Han, Sang-Eul

Abstract

Maintenance and reinforcement are very important especially in the case of the hybrid structures. In this paper, we introduce the maintenance and reinforcement design method of cable dome structures. In the case of the Olympic fencing stadium, structural system has the stiffness in dependence of the initial tension force. Therefore, the verification of this phenomenon is very important. The result shows that the final tension force which is measured is almost reached to the calculated aim tension force after the maintenance and reinforcement works is confirmed.

Keywords : Hybrid structure, Cable dome, Olympic fencing stadium, Maintenance and Reinforcement

1. 서 론

1985년 서울올림픽을 유치하기 위해 서울 송파구 방이동 올림픽 공원 내에 건설된 서울올림픽 제1체육관(올림픽 체조경기장)과 제2체육관(올림픽 펜싱경기장)은 세계최초의 케이블 돔구조물이다. 케이블 돔구조는 케이블, 포스트, 막요소 의해 3차원 공간상으로 부재의 구성이 이루어지며, 초기에는 불안정하지만 케이블에 장력을 도입함에 따라 전체 구조시스템이 불안정에서 안정화되어 구조적 특성을 발휘하는 인장복합구조시스템(Hybrid structural system)이다.

일반구조물과 마찬가지로 인장구조물의 경우에도 사후 유지관리가 필요하며 일정 수명이 경과하면 보수보강이 요구된다. 대공간구조의 경우 작용하

는 응력과 변형이 상대적으로 크므로 보수보강시 상당한 주의를 기울여야 하고 보수보강시 발생될 수 있는 구조적인 불안정 문제를 엔지니어링을 통하여 사전에 시뮬레이션 할 필요가 있다. 특히 올림픽 펜싱경기장의 경우 초기장력에 의해 구조물의 강성이 발현되는 시스템이므로 이에 대한 검증이 매우 중요하다. 또한 오랜 시간의 경과로 구조물의 강성에 큰 영향을 미치는 케이블의 초기장력이 많이 변하였으므로 케이블 장력을 조정하는 작업이 병행되어야 하며, 보수보강공사에 대한 해석을 통하여 이에 대한 계획을 수립하여야 한다.

이 글에서는 대공간을 구성하는 여러 가지 구조시스템 중 올림픽 펜싱경기장의 케이블 돔구조에 대한 시스템과 이에 대한 보수보강기법을 소개하고자 한다. 2장에서는 케이블 돔구조의 구조시스템에 대하여 기술하며 3, 4장에서는 보수보강공사를 위하여 수행한 구조설계 및 해석 과정 등 보수보강공사에 필요한 기술적 근거를 기술한다.

* 정회원 · (주) ES 건축구조 엔지니어링 대표이사

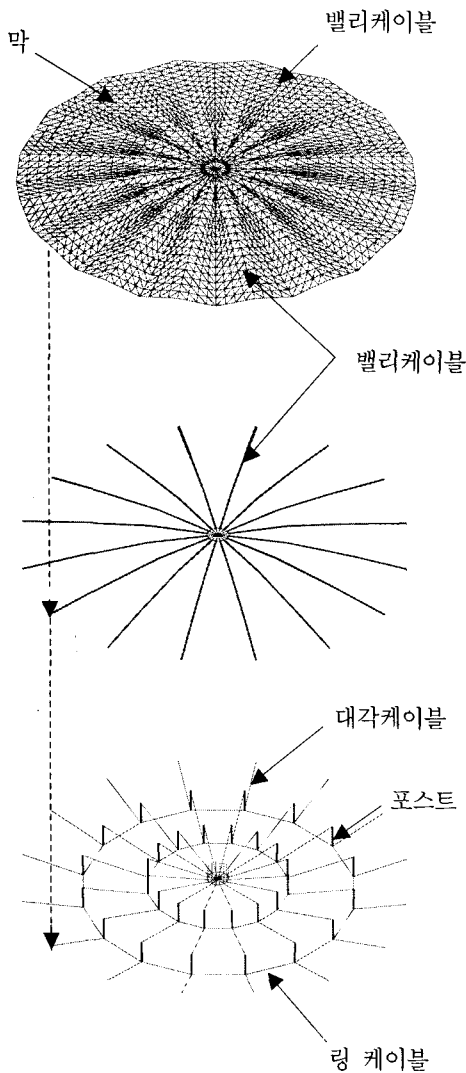
** 정회원 · (주) ES 건축구조 엔지니어링 차장

*** 정회원 · 인하대학교대학교 건축학부 교수

2. 펜싱경기장 케이블 돔 구조시스템

2.1 구조개념

케이블 돔구조와 같은 경량인장구조물은 일반구조물과 달리 대변형을 수반하며 부재의 인장력으로 구조물을 지지하게 되므로 어느 부재에도 압축이 발생하지 않아야 한다.



[그림 2.1] 케이블 돔구조의 개념

올림픽 펜싱경기장의 케이블 돔 지붕은 [그림 2.1]과 같이 지름 93m의 원을 16개의 리지 케이블로 분할하고 각각의 리지 케이블은 2개의 포스트의 압축력으로 지지한다. 포스트의 하부는 리지 케이블로 연결되는 다이아고날 케이블과 링 케이블이 3차원

으로 지지하게 된다. 포스트와 리지 및 다이아고날 케이블은 삼각형을 형성하면서 압축과 인장으로 평형화된다. 상부의 막구조는 리지 케이블을 경계구조로 지지되고 리지 케이블 사이에 밸리 케이블을 설치하여 장력을 도입함으로써 막구조를 형성하게 된다.

케이블 돔구조는 하중방향에 따라 하중저항부재가 달라지는데 수직하중방향에 대해서는 링 케이블과 다이아고날 케이블이 지지하게 되고 상하에 대해서는 밸리 케이블과 리지 케이블이 저항하게 된다. 시공시 구조물이 안정화되기 위해서는 케이블에 초기장력이 도입되어야 하며, 케이블이 적설이나 바람 등의 설계하중에 대하여 압축력이 발생하지 않아야 한다.

3. 올림픽 펜싱경기장 케이블 돔 구조의 보수보강공사

3.1 보수보강범위

올림픽 펜싱경기장 케이블 돔구조의 보수보강은 다음과 같이 구분할 수 있다.

- 1) 케이블구조 보수보강
- 2) 막구조 보수보강
- 3) 노후시설 보수보강

다시 이를 세분화하면 케이블구조 보수보강에는 케이블 웨지 교체, 케이블 장력측정 및 조정, 캣워크, 포스트 및 캐스팅 보수 등이 포함되며, 막구조 보수보강에는 노후화된 외막의 교체, 마지막으로 노후시설 보수보강에는 관람석 의자 교체 및 승강식 무대 설치 등이 포함된다. 구조물의 보수보강은 구조적 위험요소를 제거하는 것을 목적으로 하며 노후시설 보수보강은 사용성 증대를 통한 경기장의 가치를 증대시키는 것을 목적으로 한다.

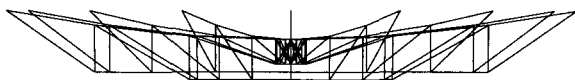
4. 올림픽 펜싱경기장 케이블 돔구조의 보수보강설계

앞에서 언급한 바와 같이 케이블 돔구조는 도입된 장력에 의해 구조물의 강성이 발휘되는 형태저항

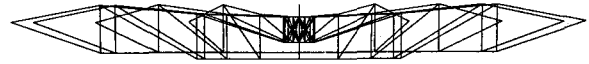
형 구조시스템이다. 따라서 이 구조시스템은 공사 중, 즉 장력이 도입되기 전에는 불안정구조로서 장력이 도입된 후에야 비로소 안정화되는 장력안정구조이다. 케이블 돔구조의 보수보강시에는 일부 케이블의 장력을 해제하고 작업하며 최종적으로 장력재 도입을 수행하여 공사를 완료한다. 케이블 돔구조 보수보강설계시에는 그동안 조사되었던 문제점을 해결하기 위하여 형상변경이 요구되며 이것은 결국 초기의 형태와는 다른 형태를 갖는 구조물로서 완성되게 된다. 따라서 보수보강설계시에는 이러한 문제점을 해결하기 위한 구조해석을 실시하게 되며, 특히 초기설계와 관련한 자료가 매우 부족하여 현재의 문제점을 구조적으로 파악하기에 어려움이 있으므로, 설계초기의 조건으로 해석을 수행하고 한편으로는 초기 시공과정에 대한 시뮬레이션을 수행하여 현재상태를 역추적하였다.

4.1 최초 시공시 시공과정해석

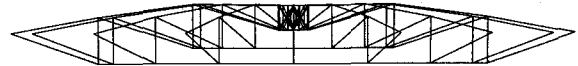
현재 구조물의 문제점 중 일부는 준공 이후 지속적으로 발생되었던 것으로 예상된다. 이것을 해결하기 위하여 시공 당시의 상황을 추정해 볼 필요가 있다. 따라서 최초 시공시의 시공과정해석을 수행하여 최초 시공과정해석 결과를 당시에 제시되었던 시공과정해석 결과 및 현재 구조물의 조사자료와 비교하여 원인을 역추적하였다. 최초 공사시 센터링에 폰딩이 발생하지 않도록 하기 위해 도면보다 상향조정하였다는 청문조사 결과가 있었으며, 실측자료에 의해 형상해석을 수행한 결과 도면보다 약 54cm정도 높게 시공된 것으로 확인되었다. 따라서 센터 다이아고날 케이블에 추가적인 장력이 발생되어 케이블의 도입장력이 설계장력보다 높아진 상태가 되었을 것으로 사료된다. 이러한 상이점은 케이블 장력 불균형, 최종형상의 오차 등이 발생하는 원인이 될 수 있다.



[Step0] 케이블 인장력 도입전



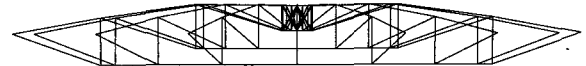
[Step1] 아우터 다이아고날 케이블 인장 완료



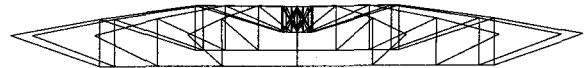
[Step2] 이너 다이아고날 케이블 인장 완료



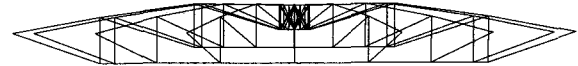
[Step3] 센터 다이아고날 케이블 인장 완료



[Step4] 막 설치 완료



[Step5] 캐트워크 및 각종 장비 설치 완료

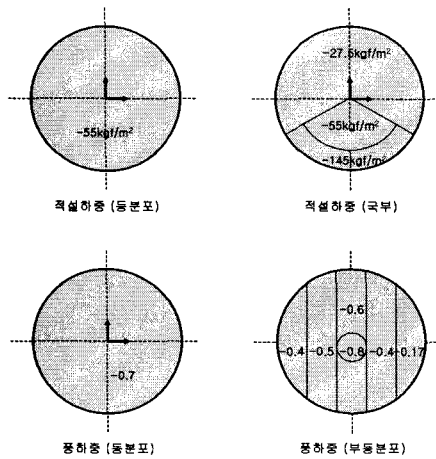


[Step6] 밸리 케이블 인장 완료

[그림 4.1] 케이블 돔구조의 시공과정 해석

4.3 케이블 돔 구조해석

케이블 돔 구조해석에 적용된 하중은 [그림 4.2]에서 보는 바와 같으며, 적용된 하중에 대하여 기하학적 비선형해석을 수행한 결과 각 부재에 발생하는 부재력을 나타내면 [표 4.1]와 같다.



[그림 4.2] 적용된 적설하중 및 풍하중

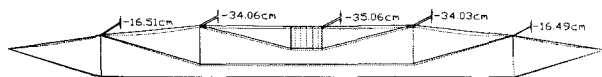
부재 번호	Case-1		Case-2		Case-3		Case-4		Case-5		판정
	P+D		P+D+S1		P+D+S2		P+D+W1		P+D+W2		
	부재력	응력비	부재력	응력비	부재력	응력비	부재력	응력비	부재력	응력비	
1	23.0	0.54	21.0	0.45	30.6	0.65	37.8	0.81	36.5	0.78	O.K.
2	31.3	0.57	29.4	0.49	36.1	0.60	40.7	0.68	42.6	0.71	O.K.
3	62.0	0.60	76.6	0.68	79.1	0.70	63.9	0.56	68.4	0.60	O.K.
4	5.8	0.08	2.1	0.03	8.8	0.11	70.9	0.89	63.6	0.80	O.K.
5	7.6	0.63	8.7	0.66	10.4	0.78	9.7	0.56	10.4	0.78	O.K.
6	30.3	0.63	47.0	0.89	44.2	0.83	27.6	0.73	28.5	0.54	O.K.
7	74.9	0.62	123.0	0.93	118.7	0.89	49.4	0.52	58.1	0.44	O.K.
8	74.3	0.61	114.5	0.86	107.6	0.81	66.7	0.37	69.4	0.52	O.K.
9	121.1	0.50	179.0	0.67	172.9	0.65	89.7	0.50	100.2	0.38	O.K.
10	61.1	0.25	119.0	0.45	112.9	0.42	29.7	0.11	40.2	0.15	O.K.
11	-1.4	0.06	-1.8	0.04	-1.9	0.05	-1.69	0.04	-2.1	0.05	O.K.
12	-7.2	0.14	-13.4	0.18	-13.0	0.17	-7.0	0.09	-7.1	0.10	O.K.
13	-20.1	0.43	-37.4	0.54	-40.1	0.58	-12.4	0.18	-15.4	0.22	O.K.

- 상기의 응력에서 음의 부호는 압축력을 나타낸다
- 응력비 = 부재응력/허용응력 < 1.0

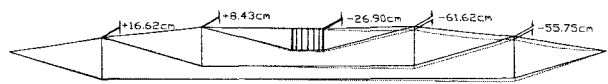
[표 4.1] 부재력 요약

상기의 부재력은 모두 케이블의 허용응력 이내에 있으며, 결과적으로 현재의 지붕구조의 부재는 적절한 부재가 사용되었다고 판단된다. 포스트의 경우에는 허용응력에 대한 안전율이 0.58 정도에 이르지 않지만, 케이블의 경우 허용응력에 거의 도달한 것을 볼 수 있다. 이 설계에서 적용된 과단하중에 대한 허용하중의 안전율은 설계 당시에 적용된 안전율인 단기 2.0, 장기 2.2가 사용되었다.

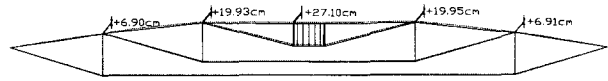
적용된 하중에 의한 케이블 돔구조의 처짐결과를 [그림 4.3]~[그림 4.6]에 나타내었다.



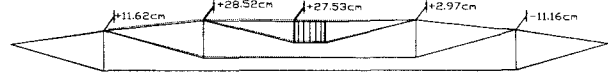
[그림 4.3] 고정하중+등분포 적설하중에서의 처짐형상



[그림 4.4] 고정하중+국부 적설하중에서의 처짐형상



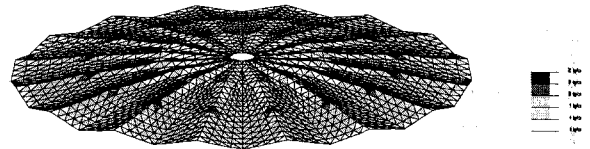
[그림 4.5] 고정하중+등분포 풍하중에서의 처짐형상



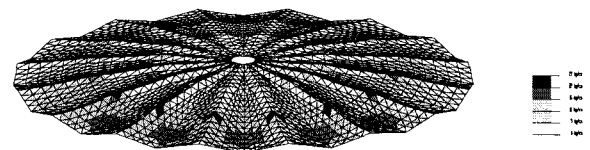
[그림 4.6] 고정하중+부등분포 풍하중에서의 처짐형상

4.4 막 패널해석

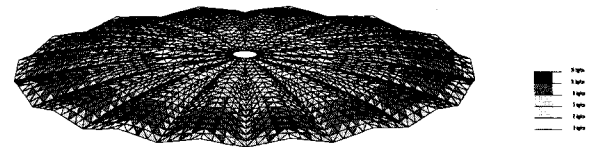
보수보강공사시 교체될 막재는 성능이 우수한 PTFE 코팅 막재를 사용하도록 한다. 케이블 돔구조의 막 해석결과를 [그림 4.7]~[그림 4.10]에 나타내었다. 해석결과에 따르면 막 응력은 모두 허용응력을 만족하는 것으로 나타났다. 막구조 설계에서 사용한 과단하중에 대한 허용하중의 안전율은 장기 8.0, 단기 4.0을 적용하였다.



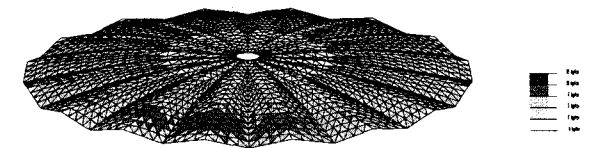
[그림 4.7] 고정하중+등분포 적설하중에서의 막 응력



[그림 4.8] 고정하중+국부 적설하중에서의 막 응력



[그림 4.9] 고정하중+등분포 풍하중에서의 막 응력

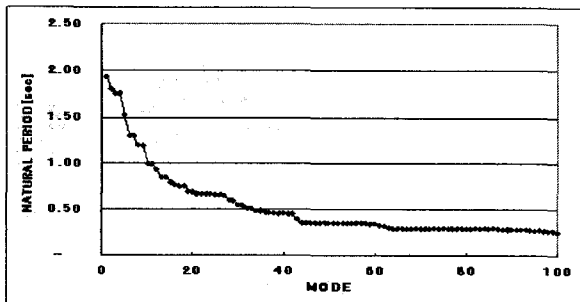


[그림 4.10] 고정하중+부등분포 풍하중에서의 막 응력

막응력은 그림에서 보는 바와 같이 포스트가 있는 부분에서 주로 높게 분포되어있다. 이는 막 패널의 케이블 경계 부분보다 포스트가 연결된 부분에서 강성이 높아 연직하중 작용시 응력이 집중되는 것으로 판단된다. 따라서 하중이 반복적으로 작용하여 피로에 의한 강도저하, 국부파손 등이 염려되므로 이에 대한 고려가 필요하다. 벨리 케이블에 의해 보강된 막구조의 경우 국부파손이 발생하면 벨리 케이블의 장력이 소실될 때까지 연속적으로 막의 파단이 발생하므로 이에 대한 배려가 매우 중요하다.

4.5 고유치해석

일반구조물과는 달리 케이블 돔구조와 같은 경량인장구조물은 그 동적특성을 파악하기에는 매우 어려우며 현재에도 많은 부분이 연구중에 있다. 비감쇠 고유치해석을 수행하여 1차부터 100차에 이르는 고유주기를 [그림 4.11]에 나타내었다.



[그림 4.11] 고유주기(1차~100차)

1차, 2차, 5차 및 15차 모드는 마스트 상부의 전도 모드이다. 마스트 전도에 대한 강성이 부족하면 적설하중에 의하여 이들 모드가 발생되어 부재가 좌굴할 수 있다. 여기서는 구조물의 좌굴하중을 구하고 적설하중에 대한 응답이 좌굴하중에 대하여 어느 정도의 안전율을 갖는지 확인한다.

16차(고유주기 0.77sec)모드는 벨리 케이블 및 센터 링의 상하이동을 포함하는 모드로서 풍하중시 변동풍력에 의하여 발생될 수 있으나 막재의 감쇠계수는 매우 작으므로 이와 같은 모드가 발생될 가능성은 낮다고 사료된다.

7차 모드 이상은 리지케이블과 다이아고날 케이

블의 변위모드가 2차 이상이 되는 고차모드이며, 막재의 감쇠가 크므로 막면의 진동이 지붕전체의 진동에 대하여 지배적인 영향을 미칠 우려가 없다고 사료된다. 따라서 설계상은 20차 까지를 고려한다.

고유 모드	고유주기(s)	모드형상	중요도
1	1.93	Inner Ring Cable의 회전, Inner Post의 전도	◎
2	1.80	Outer Ring Cable의 회전, Outer Post의 전도	◎
3-4	1.75	Ring Cable의 강체변위(수평방향)	
5	1.52	Inner Ring Cable의 회전, Inner Post의 전도	◎
6-11	0.99-1.29	Ring의 변형(2차모드)	
12	0.93	Ring Cable의 수평이동	
13-14	0.85	Ring Cable의 상하이동	
15	0.80	Post의 전도	◎
16	0.77	Ring Cable의 상하이동	○
17-20	0.69-0.75	Ring Cable의 변형	

[표 4.2] 고유모드의 분석

4.6 하중초기불완전에 의한 좌굴의 검토

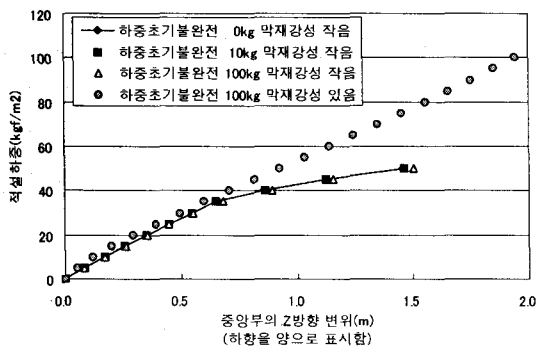
고유치해석의 결과로부터 마스트 상부의 전도모드가 적설하중에 의하여 발생될 수 있고 케이블구조 전체가 비틀림 좌굴이 발생될 가능성이 있다는 것을 알 수 있다. 여기에서는 정적해석에 의해 좌굴하중을 구한다. 해석모델은 고유치해석에 사용된 것과 동일한 모델로 한다. 비틀림 모드를 발생시키기 위하여 하중초기불완전(Load Imperfection)을 마스트 상부에 부여한다. 각 개소당 0kgf(초기불완전 없음), 10gkf, 100kgf의 3가지로 한다. 또한 막재의 강성을 무시한 경우와 고려한 경우 2가지로 하여 좌굴하중에 미치는 영향을 검토하고, 막재의 강성을 [표 4.3]와 같이 실제보다 작게 (실제의 약 1/100 강성) 가정한다.

	인장강성	면내전단강성
Warp	900 kgf/m	
Fill	900 kgf/m	
		50kgf/m

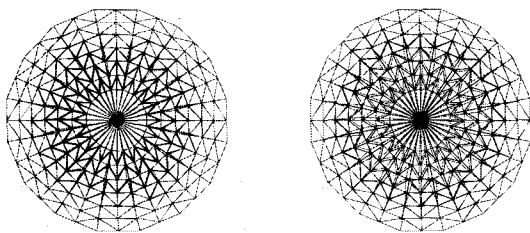
[표 4.3] 하중초기불완전에 의한 좌굴 검토용 막재의 탄성계수

이들 모델에 등분포적설하중을 부가했을 때의 지붕 중앙부 Z방향 변위를 [그림 4.12]에 나타낸다. 막재의 강성을 고려하지 않은 경우[그림 4.13]에는 3가지 모델 모두 40kgf/m²에서 지붕의 중앙을 축으로 하는 비틀림 모드가 발생하고 55kgf/m²에서 해석이 발산하였다. 막재의 강성을 고려한 경우에는 막재가 비틀림에 의한 전단변형에 저항하기 때문에 설계하중의 거의 2배인 100kgf/m²에도 비틀림 모드를 발생하지 않고 안정적으로 해가 얻어졌다.

이상으로부터 마스트 사이에 브레이스를 설계하는 등의 전단보장을 하면 비틀림 좌굴에 대한 안전성은 향상하는 것을 알 수 있으나, 케이블 돔구조의 경우에는 막재에 의한 구속효과를 충분히 기대할 수 있으므로 설계하중 55kgf/m² 정도로는 비틀림 좌굴을 발생할 우려가 없다고 판단된다.



[그림 4.12] 초기불완전에 대한 좌굴 검토



(그림 4.13) 막재의 강성을 고려하지 않는 경우의 변형

4.7 케이블 목표장력

케이블 돔구조에 대한 실측자료와 보수보강해석을 토대로 보수보강공사시 다이아고날 케이블에 도입되어야 할 케이블 목표장력을 산출하였다. 실측자료에 의하면 다이아고날 케이블 장력은 각 위상별로

고르지 못하며, 센터 다이아고날 케이블과 이너 다이아고날 케이블은 장력이 다소 높게 측정되었다. 해석결과 다이아고날 케이블의 목표장력은 각 다이아고날 케이블에서 PC Strand 당 7.0~8.8tf 범위에 있으며, 장력 조정폭을 작게하여 케이블 돔구조에 미치는 영향이 최소화 되도록 다이아고날 케이블에 7.5tf을 도입하도록 하였다. 도입된 목표장력을 근거로 응력해석을 수행하여 구조물이 안전함을 확인하였다.

4.8 보수보강공사의 시공과정해석

올림픽 펜싱경기장 케이블 돔의 보수보강공사에서는 일련의 시공과정에서 발생할 수 있는 문제를 미리 예측하기 위하여 시공과정해석을 수행하게 된다. 시공시 주의해야 할 주요 단계는 케이블의 장력을 조정하기 위하여 일부 케이블의 장력을 해제한 경우와 막 교체를 위하여 막을 제거한 경우로 볼 수 있다. 또한 각 시공단계에 대한 장력의 변화를 예측하는 시공해석을 수행하여 적정장력이 도입되도록 하였으며, 구조물의 거동을 파악하여 현장에서 변위를 확인함으로써 정밀한 시공이 가능하도록 하였다.

일반적으로 케이블 구조물에서는 케이블을 지상에서 조립한 후 케이블을 양중 및 인장하면서 정해진 좌표점이나 정해진 케이블 프리스트레스에 도달하는 과정을 시뮬레이션하여 케이블 인장시의 케이블 프리스트레스 결정 및 시공시 문제점의 예측 등을 목적으로 시공과정해석을 수행하게 된다. 그러나 케이블 돔구조의 보수보강공사에서는 케이블 돔구조가 이미 완공되어 있으므로, 이와 같은 해석을 수행할 필요가 없다. 따라서 케이블 돔구조 보수보강공사시의 시공과정해석은 다음의 보수보강공사 순서에 맞추어 수행한다.

- 1단계 : 기존 벨리케이블 및 내막등 가능한 하중 제거
- 2단계 : 아웃터 다이아고날 케이블 장력조정(Group1)
- 3단계 : 아웃터 다이아고날 케이블 장력조정(Group2)
- 4단계 : 이너 다이아고날 케이블 장력조정(Group1)
- 5단계 : 이너 다이아고날 케이블 장력조정(Group2)
- 6단계 : 센터 다이아고날 케이블 장력조정(Group1)

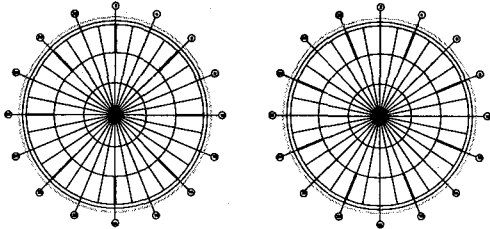
7단계 : 센터 다이아고날 케이블 장력조정(Group2)

8단계 : 외막 교체 및 내막설치

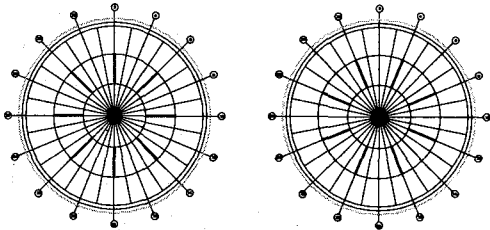
9단계 : 벨리케이블 인장(Group1)

10단계 : 벨리케이블 인장(Group2)

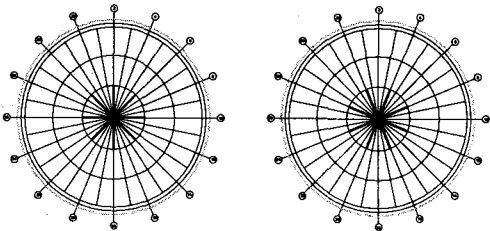
- 각 단계별 장력조정 Group



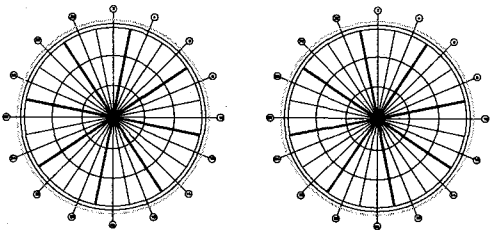
<아웃터 다이아고날>



<이너 다이아고날>



<센터 다이아고날>



<벨리 케이블>

[그림 4.14] 케이블 장력조정 그룹

5. 결론

이 글에서는 올림픽 펜싱경기장 케이블 돔구조의 보수보강설계를 소개하였다. 케이블 돔구조의 보수보강공사는 위에서 언급한 것과 같이 전체적인 구조해석과 이를 수행하기 위한 시공과정해석을 수행하

여 공사중 구조물의 안전성을 충분히 검토하여 보수보강공사 계획을 수립하여야 한다. 특히 케이블 돔구조물에서의 보수보강은 일반구조물과 달리 장력조정에 의해 전체적인 형상의 변화가 일어나게 되므로 정밀구조해석 등을 통한 엔지니어링을 수행하여 구조물의 거동에 대한 검증과 장력변화와 형상변화에 따른 공사중, 공사후의 문제점을 예측하여 이에 대한 대책을 사전에 수립하는 것이 중요하다.

보수보강설계시에는 설계 당시와 시공시의 자료가 거의 전무한 상태에서 구조물의 초기 가정에 어려움이 있었으며, 현재의 상태를 면밀히 조사하여 초기상태를 유추하는 과정을 수행하였다. 따라서 보수보강해석에 있어서 해석모델은 실측된 자료를 근거로 작성되었으며, 해석결과로서 산출된 목표장력은 보수보강공사 완료후 측정된 최종실측장력과 거의 일치하는 유사성을 확인하였다. 또한 목표장력과 최종실측장력으로 응력해석을 수행한 결과 케이블 돔구조물은 보다 향상된 구조적 안전성을 확보하였다고 사료된다. 막재에 있어서도 당초 사용된 저급 막재인 실리콘 코팅막에 비하여 훨씬 우수하고 영구적인 자재인 테프론 코팅 유리섬유 막재를 사용함으로써 케이블 돔구조의 내구성을 향상시킬 수 있었다.

올림픽 펜싱경기장 케이블 돔의 보수보강공사는 구조물의 구조적인 안전성 확보 및 기능성 향상을 목적으로 수행되었으며, 보수보강공사 완료시에는 경기장의 역할 외에 공연장, 전시장 등의 다목적 공간으로써 활용도가 높아질 것이다. 또한 세계 최초의 케이블 돔구조라는 역사적 가치를 유지하기 위하여 많은 노력이 이루어졌으며, 그 결과 올림픽 펜싱경기장의 건축물로서의 역사적 가치를 계속 유지하게 되었다.

국내의 인장구조물의 경우 초기에는 단기구조물으로써 건설되어진 것이 많으나 최근에는 영구구조물으로써 건설되어지고 있으며, 이러한 인장구조물은 향후 노후화가 진행될 것이다. 올림픽 펜싱경기장의 케이블 돔구조를 통하여 인장구조물에 있어서는 무엇보다도 정기적이며 지속적인 유지관리가 중요하다는 사실을 확인할 수 있었다.

또한 인장구조물의 성능을 유지하고 안전성을 확

보하는 보수보강을 위해서는 시공시에 발생하는 자료를 정리하여 보관하는 것이 매우 중요하다. 특히 보수보강설계 및 검증자료와 유지관리에 대한 이력은 향후 구조물의 성능 판단시 매우 귀중한 자료가 되므로 이에 대한 관심이 중요하다고 사료된다. 아울러 이러한 사후관리는 전문적인 엔지니어링을 통하여 수행되고 관리되어야 하며, 필요시 구조적 안전성 및 내구성 등이 검증되도록 할 것으로 사료된다.

참고 문헌

1. Baron, F., and Venkatesan, M. S., "Nonlinear Analysis of Cable and Truss Structures," *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol. 97, No. ST2, 1971, pp. 679-710.
2. Crisfield, M. A., *Non-linear Finite Element Analysis of Solids and Structures*, John Wiley & Sons, New York, 1991.
3. Fuller, R. B., *Tensile-integrity Structures*, U.S.A., 1962.
4. Fried, I., "Large Deformation Static and Dynamic Finite Element Analysis of Extensible Cables," *Computers and Structures*, Vol. 15, 1982, pp. 315-319.
5. Gear, C. W., "Numerical Integration of Stiff Ordinary Differential Equations," Report No. 221, University of Illinois, 1967
6. Geiger, D. H., "The Design and Construction of Two Cable Domes for the Korean Olympics," IASS Symposium on Membrane Structures and Space Frames, 1986, pp. 265-272.