

인천문학경기장 지붕공사 시공과정



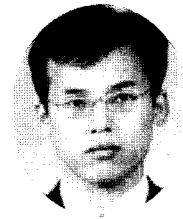
황보석*



이덕우**



윤광재***



유용주****

1. 머리말

근래에 들어 사회적인 욕구에 따라 장스팬 구조물이 건설되고 있다. 장스팬 구조물은 내력의 흐름을 자연스럽게 하고 휨모멘트의 영향을 가능한 저감시켜 인장과 압축으로 구성되는 축력과 면내력으로 외부하중을 저항하게 하는 역학적개념을 기초로 구조시스템의 효율성을 극대화 시킨 형태저항구조물로서 구성된다. 2002년 월드컵 개최도시인 인천에 건설된 인천문학경기장의 지붕구조시스템은 케이블을 사용한 인장 막구조와 이를 지지하는 철골구조로 구성되어 있다. 지붕구조는 3차원 케이블네트를 이용하여 초기장력을 도입함으로써 역학적으로 안정된 구조체를 형성하고 이를 지지점으로 지붕면을 형성하는 인장막구조가 설치되었다. 구조체를 형성하는 케이블과 막은 유연한 재료이므로 초기장력 도입시 응력이 상호유기적으로 작용하여 시공과정해석을 통하여 공사과정에 대한 상황을 사전에 시뮬레이션 하였다.

또한 시공시 지붕구조의 횡반력이 하부구조에

최소한으로 전달되도록 하기 위하여 지점부 이동식 공법이 사용되었다. 본고에서는 문학경기장의 지붕구조시스템에 대하여 간략히 설명하고 시공과정을 소개한다.

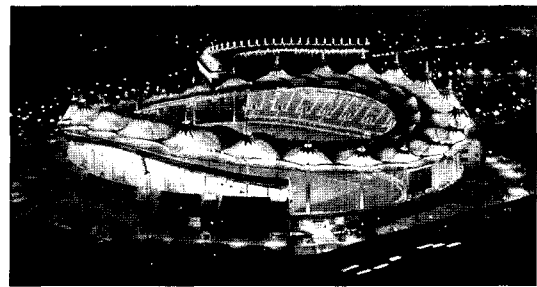


그림 1 인천문학경기장 야경

2. 구조계획

2.1 개요

인천문학경기장은 약 52,000명의 관객을 수용할

* 정회원 · (주)ES건축구조엔지니어링 대표 건축구조기술사
 ** (주)ES건축구조엔지니어링 기술지원실 차장
 *** (주)ES건축구조엔지니어링 구조실 과장
 **** (주)ES건축구조엔지니어링 구조실 대리

수 있으며 객석의 약 90%를 덮고 있는 지붕 면적은 약 38,000㎡로 동서구간은 높고 남·북 구간은 낮게 설치되어 전체적으로 범선이 파도를 가르고 나가는 역동적인 항구도시 인천의 이미지를 표현하고 있다. 지붕막은 24개의 패널로 구성되어 있으며 케이블구조로 지지하게 되어있다. 케이블은 24개의 Mast와 이를 연결하는 Ring Truss로 지지하게 된다. Mast의 하부는 3차원Pin구조로 구성되어 지붕구조의 변위를 모멘트 작용 없이 흡수하게 된다. 또한 수평력에 대한 저항구조로써 남북측에 Brace Cable를 배치하여 횡력에 저항하도록 고려되었다.

2.2 구조재료

지붕구조에서 사용된 구조재료는 크게 3가지로 나누어 질 수 있다. 우선 Mast와 Ring Truss등을 구성하는 철골재와 Cable구조를 구성하는 Cable재, 그리고 지붕면을 구성하는 막구조재로 구분할 수 있다.

2.2.1 강재

구분	기호	설계강도(N/mm ²)	
		인장강도	항복강도
Mast, Ring Truss	SM490YB	490	355
Base Plate	SM490YB	490	355

2.2.2 Cable

가. 종류 : Locked Coil Cable

나. 기계적 성질

탄성계수 : 160000N/mm²

인장강도 : 1570N/mm²

크리이프 : 1.5×10⁻⁴

초기신율 : 5.0×10⁻⁴

2.2.3 막재

가. 사용자재 : Teflon Coated Fiber Glass

나. 물리적 성질

인장강도 : 113.4kg/cm×98.2kg/cm

인열강도 : 11kg/cm

투과율 : 11%

반사율 : 70%

2.3 구조시스템

지붕구조의 구성은 크게 막, 케이블, 철골구조로 분류될 수 있다. 지붕구조를 형성하는 것은 케이블 구조로 중앙의 Tension Ring Cable을 방사형의 URC와 LRC가 잡아당겨 순수한 인장력으로 지지하게 된다. URC와 LRC사이에는 SC로 연결하여 일종의 케이블 트러스 효과를 갖고 전체적인 케이블구조의 강성을 증가시킬 수 있다. URC는 철골 Mast상단에 연결되어 여기에서 발생하는 반력은 Mast와 Stay Cable를 통하여 각 지점부로 전달된다.

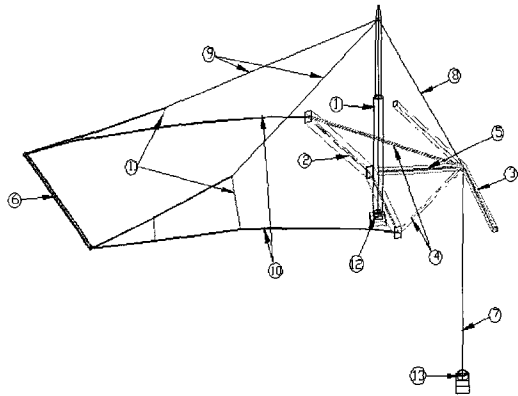


그림 2 주요부재구성도

표 1 주요부재

	부재명칭	부재크기
1	Mast	φ 1200(하부) φ 800(상부)
2	Inner Compression Ring	□-1400X600
3	Outer Compression Ring	□-600X600
4	Diagonal Truss	□-600X600
5	Post Truss	□-600X600
6	Inner Tension Ring	72(6개)
7	Vertical Back Stay	φ 103~φ 72
8	Diagonal Back Stay	φ 114~φ 82
9	Upper Radial Cable	φ 62~φ 54
10	Lower Radial Cable	φ 94~φ 72
11	Suspender Cable	φ 30
12	Spherical Bearing	700X700X300
13	Rock Anchor	φ 50

한편 LRC는 ICR에 연결되어 지지하게 된다.

Mast는 24개로 구성되어 있으며, 지점부는 3차원 현지 베어링으로 지지되고 Compression Ring으로 연결되어 횡력에 저항한다. Comp. Ring은 기동접합부를 제외하고는 모두 편집합 되어 절점부위에서의 모멘트는 작용하지 않는다.

막 패널은 아치에 의해 2 또는 3조각으로 분할되어 외력에 의해 발생하는 막 응력을 최소화하였다. 막 상부의 콘 부분에서는 풍하중 등에 의해 과도한 응력이 발생하여 별 모양의 이중막으로 보강하였다.

3. 구조설계

3.1 구조설계 개요

일반적으로 철골구조 또는 콘크리트구조의 해석에서는 변위량이 매우 작아 선형해석을 수행하지만 케이블 막구조의 경우에는 변위량이 크므로 비선형해석이 요구된다. 따라서 본 구조해석에서는 기하학적 비선형이 고려된 유한요소법을 사용하여 해석되었고 검증하였으며, 재료는 선형으로 고려되었다.

3.2 설계하중

3.2.1 프리스트레스

가. 막 : 5.0kg/cm

나. 케이블 : 240ton~100ton

3.2.2 고정하중

고정하중으로 자중을 포함하여 조명, 스피커, Catwalk등을 고려하여 전체적으로 약3230여Ton이 고려되었다.

3.2.3 온도하중

온도하중은 약 70℃가 고려되었다.

3.3 주요하중조합

구조설계시에는 63개의 하중조합이 고려되었다.

표 2 하중조합

하중조합	조합수
P+D	2
P+D+S	4
P+D+W	10
P+D+T	4
P+D+S+W	10
P+D+S+T	2
P+D+W+T	20
P+D+S+W+T	11

P : 프리스트레스, D : 고정하중, S : 적설하중, W : 풍하중, T : 온도하중

3.4 주요 처짐 형상

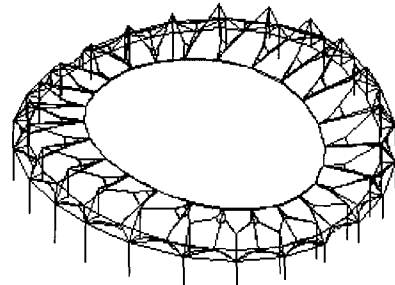


그림 3 프리스트레스+고정하중

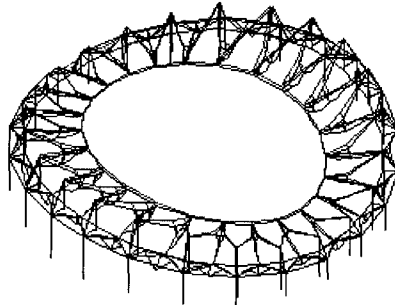


그림 4 프리스트레스+고정하중+적설하중

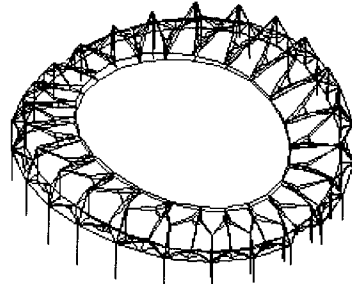


그림 5 프리스트레스+고정하중+풍하중(상향)

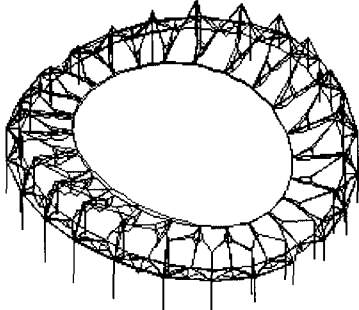


그림 6 프리스트레스+고정하중+풍하중(하향)

4. 시공과정

4.1 개요

인천문학경기장의 지붕철골 트러스는 3차원의 타원형으로 설계되어 그림 7과 같이 케이블의 장력 도입에 따라 Mast의 지점부가 이동하여 점차 원형으로 되어가는 지점이동식공법이 사용 되었다. 지점이동식공법은 초기 설치위치에 Mast를 고정 시키고 케이블 인장 시 압축부재는 길게 인장부재는 짧게 제작된 Compression Ring Truss 설치 후 Upper & lower Cable을 단계별로 양중 및 인장 하여 최종위치로 Mast의 지점부를 이동시키는 공법이다.

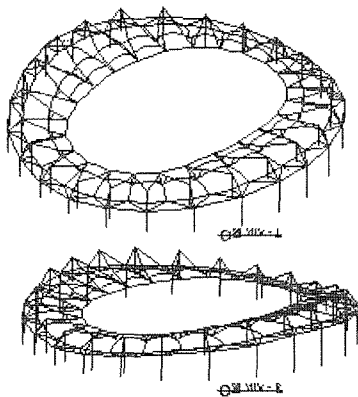


그림 7 지붕구조 3D 도면

4.2 철골제작

철골부재의 제작길이는 케이블 인장후 최종 길이와 다르다. Compression Ring 제작길이는 최종

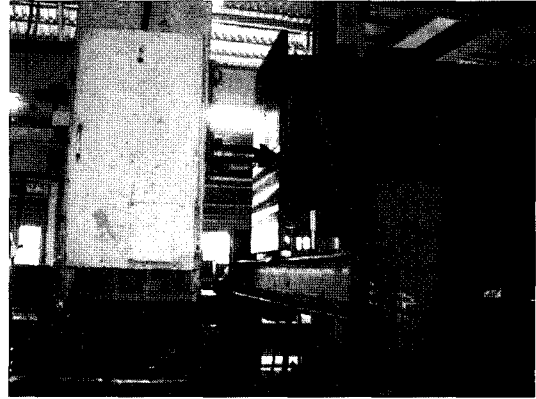


그림 8 Inner Compression Ring 밀링

길이와 다르지만 밀링 각도는 최종과 같게 유지하여 조립하는 동안 어느 문제도 일으키지 않게 하는 미소의 구속력을 발생 시킨다.

제작의 정밀도는 길이에 대하여 $\pm 1\text{mm}$, 각도에 대하여 $1/1000\text{mm}$ 를 유지하여야 한다.

4.2 공장가조립

ICR의 접합 Plate가 3차원 형상으로 밀링 가공시 편평도 및 정확한 각도가 요구되었기 때문에 현장에서의 정밀시공 및 공기 단축을 위하여 그림 9와 같이 10차에 걸쳐서 가조립이 실시되었다.



그림 9 공장 가조립

4.2.2가조립 방법

가. Installation Position을 바닥에 마킹하여 3부분의 철골 Truss를 설치한 후 레벨 및 수직

도를 검측하고 철골좌표를 측량 한다.

나. 가조립하는 동안 기계 가공된 Head Plate는 최소 4개의 서비스 볼트로 단단히 조이고 드래프트 핀을 사용하여 조인트의 정확한 위치를 확보한다.

다. 1차 가조립의 3 부분 중 한 부분을 남겨서 2차 가조립 시 반드시 중복하여 좌표 및 수직도, 레벨 등을 체크한다.

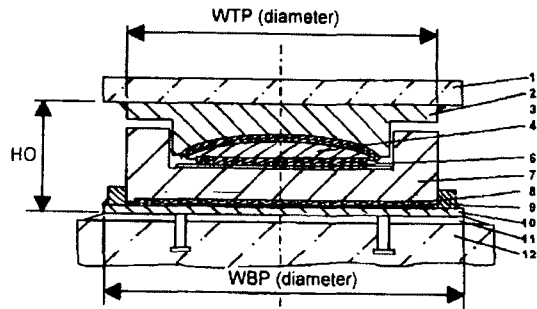


그림 11 Spherical Bearing

1차가조립

1	2	3
---	---	---

2차가조립

3	4	5
---	---	---



그림 10 가조립 측량

4.4 철골 설치 순서

공장 가조립을 통해 현장에 반입된 철골 부재들은 현장 검수를 받은 후 초기설치위치에 Mast를 설치하고 Inner, Post, Outer, Diagonal Compression Ring 순으로 1차~5차 분은 동측 구간, 6차~10차 분은 서측 구간에 설치되었다

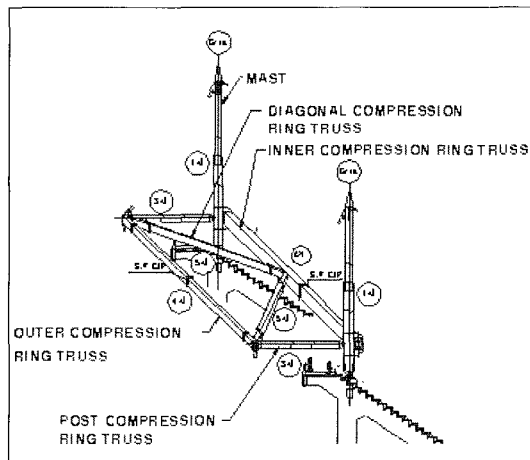


그림 12 철골 조립 순서도

4.4 Mast지점부: Spherical Bearing

4.4.1 양단고정 Type

동서측 Mast A 4개소 및 남북측 Mast F 4개소에 설치 되었으며 철골트러스의 거동에 대처할 수 있도록 상부 Body와 하부 Body 사이의 원형 베어링에 의하여 Mast가 회전이 가능하게 설계되었다.

4.4.2 교축 직각 이동 Type

Mast B, C, D, E 각 4개에 설치 되었으며 경기장 중심 축에 대하여 직각방향으로 Sliding이 가능하고 트러스의 거동에 대처할 수 있도록 상부 Body와 하부 Body 사이의 원형 베어링에 의하여 Mast가 회전이 가능하게 설계되었다.

- 1) Spherical Bearing 설치(그림13)
- 2) Mast를 초기좌표에 설치(그림14)
- 3) ICR을 양중하여 Mast와 Mast 사이에 설치 (그림 15)
- 4) 양쪽 Mast에 Post Compression Ring, OCR 순으로 조립 하고 대각을 체크하여 간격을 정확히 조정한 후에 Diagonal Compression Ring을 설치후 Mast지점부 초기좌표 확인

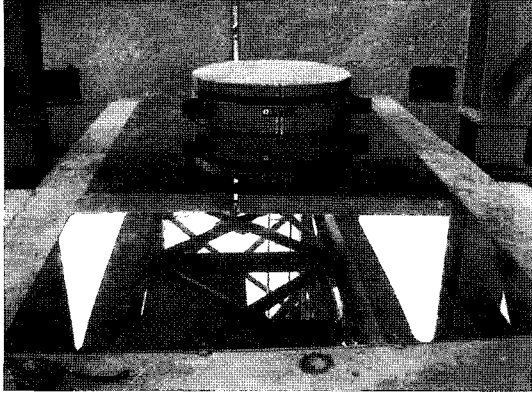


그림 13 Spherical Bearing 거취

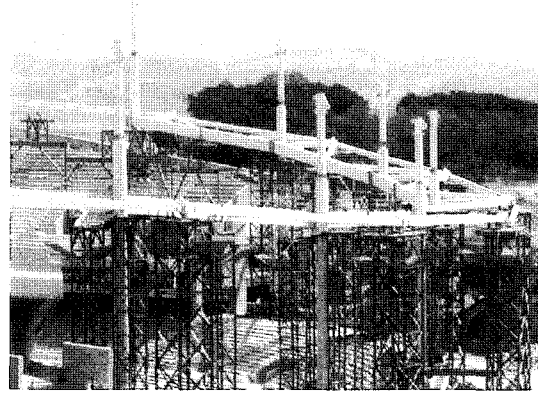


그림 16 철골설치 전경

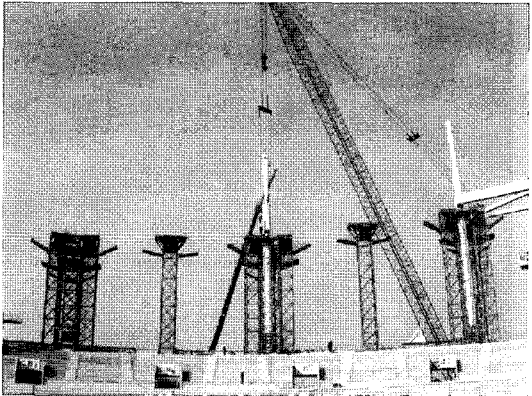


그림 14 Mast 설치



그림 17 Diagonal Backstay Cable 설치

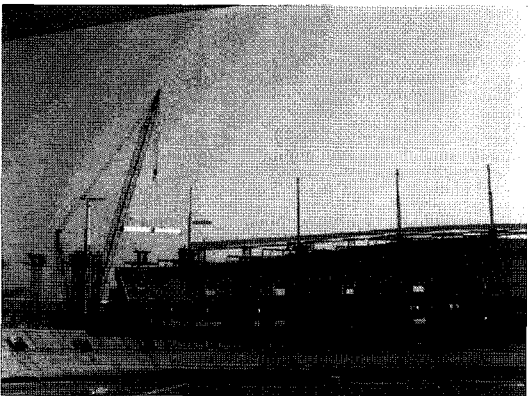


그림 15 Inner Compression Ring 설치

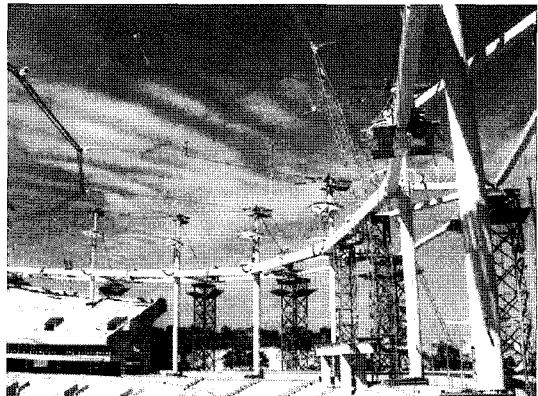


그림 18 U.R.C 인장

4.5 Cable 인장 단계별 순서

1) Stage 0 - Mast Bearing을 포함한 철골구조물 설치(그림16)

2) Stage 1 - Backstay Cables의 설치(그림 17)

3) Stage 2 - Ring Cable 및 URC 양중(그림 18)

4) Stage 3 - Backstay Cable 1차 인장(그림 19)

5) Stage 4 - Lower Radial Cable 인장(그림 20)

- 6) Stage 5 - F-F' Hinge 용접, Mast 베어링 고정, Wind Bracing Cable 설치(그림 21)
- 7) Stage 6 - Arch, Fabric Ring, Catwalks Membrane 설치

- 8) Stage 7 - Backstay Cable의 최종 인장
- 9) Stage 8 - Base Plate의 그라우팅 및 각 Anchor Bars 인장



그림 19 Backstay Cable 1차 인장

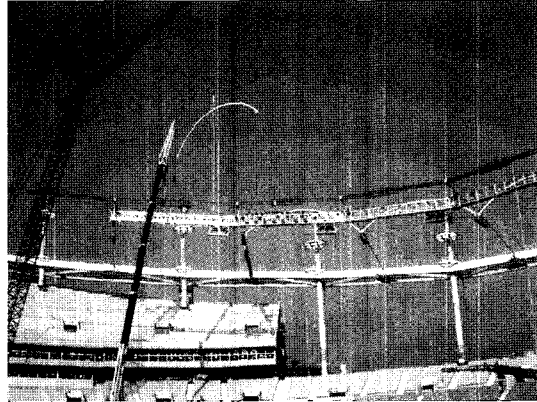


그림 22 Arch Tube 설치

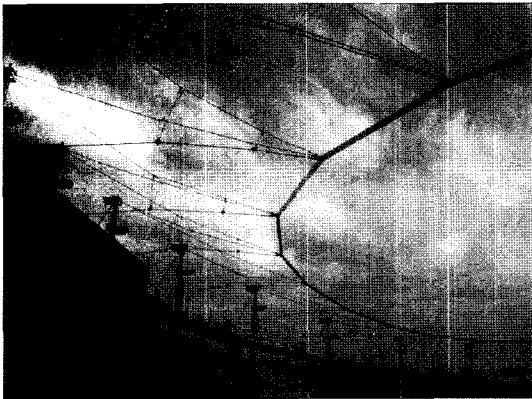


그림 20 Lower Radial Cable 인장

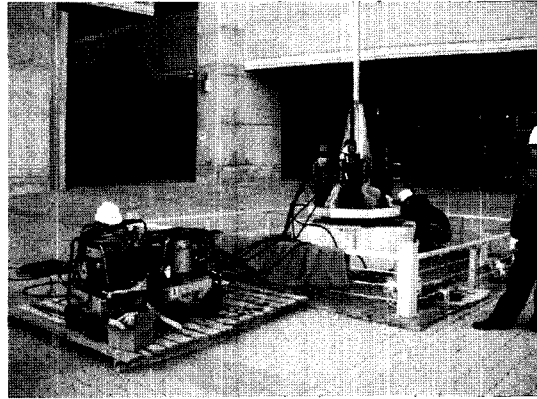


그림 23 Backstay Cable의 최종 인장

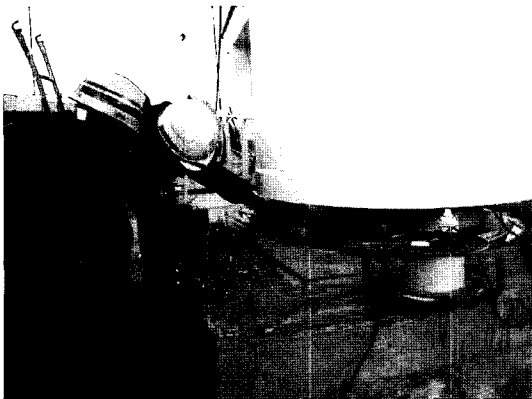


그림 21 Mast 베어링 고정

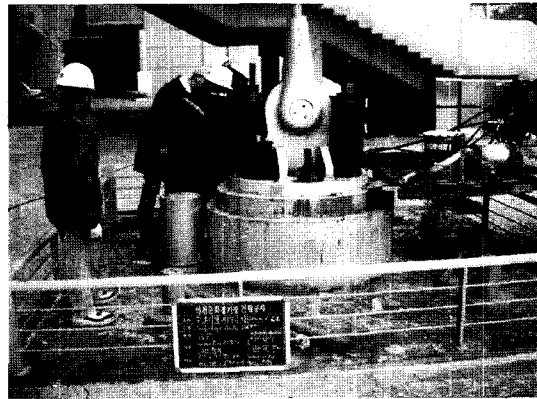


그림 24 Anchor Bars 인장

4.5 막 설치공사

- 1) 막 지조립
- 2) 막 양중
- 3) 막 펼치기



그림 25 막 지상 조립

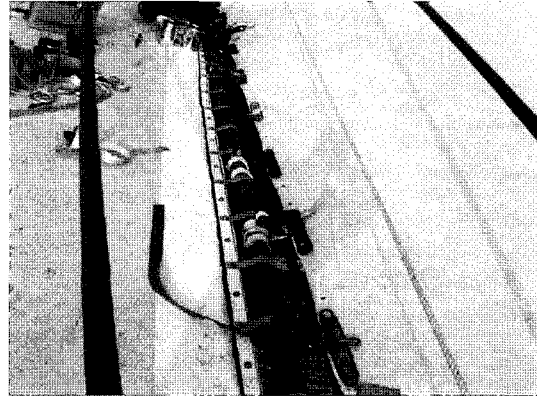


그림 28 막 클램핑 작업

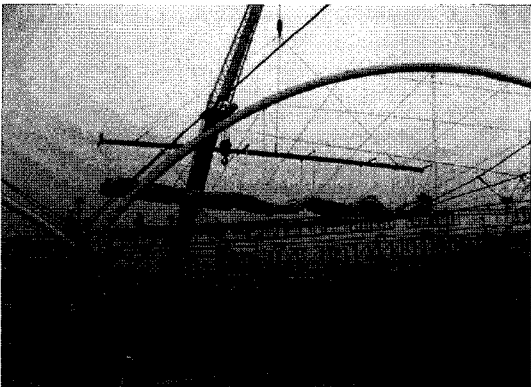


그림 26 막 양중

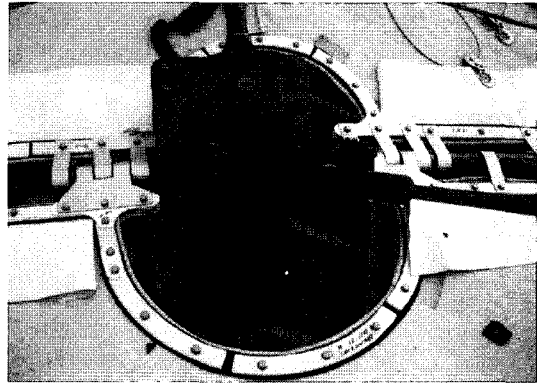


그림 29 LRC 부트 클램핑 작업

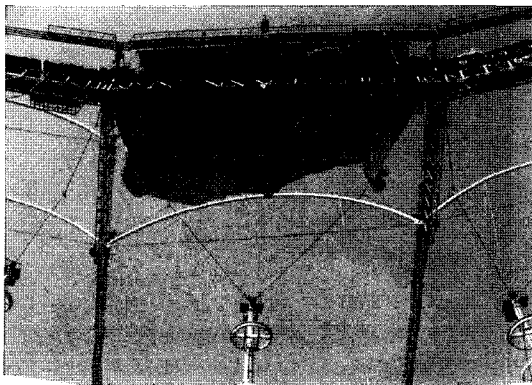


그림 27 막 펼치기 작업

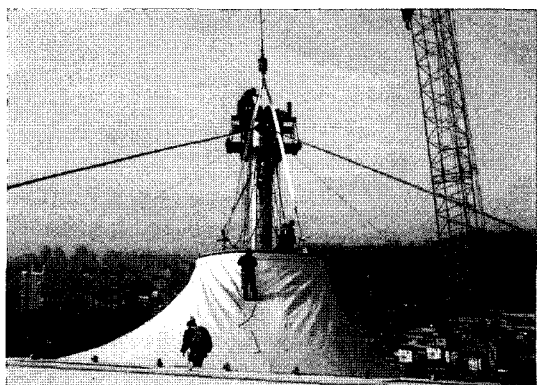


그림 30 막 인장

- 4) 막 클램핑 작업
- 5) 막 링 양중 및 막 인장
- 6) Hanger Cable 설치.
- 7) 막 용접
- 8) 막 조정 및 검수

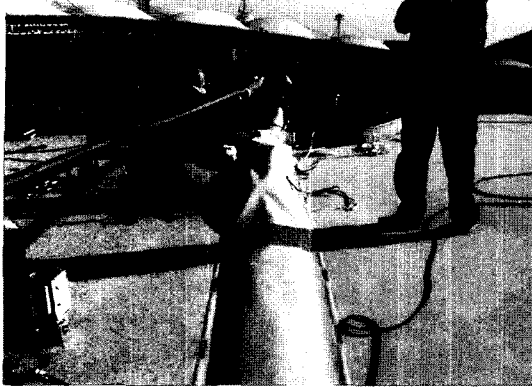


그림 31 막 디테일 용접



그림 32 지붕공사 완료

6. 맺음말

인천문학경기장의 지붕구조는 당초에 지붕이 없는 종합경기장으로 설계되었으나 인천이 월드컵 개최 도시로 확정된 후 FIFA 규정을 충족시키기 위한 지붕구조의 설계 변경이 이루어 지면서 케이블 인장 막구조물의 반영구적인 구조물로 계획되었다. 설계변경 당시에는 이미 하부구조물이 건설되고있는 상황이었으며 따라서 최소한의 자중으로 지붕을 구성하여야 했다. 이러한 조건에 의해 설계된 구조는 복잡한 시공과정을 통하여 현실화되었다. 설계와 시공이 동시에 진행되는 Fast Track과정은 일반적으로 설계자, 감리자, 시공자가 많은 어려움에 노출되게 하지만, 설계 및 시공과정에서 감리자에 의한 설계에 대한 검토 역시 설계에 버금가는 수준으로 수행되어 문제점에 대한 설계자와 감리자의 의견이 설계와 시공과정에서 충분히 반영되어 건설되었다. 그 동안 국내에서도 많은 연구가 이루어 졌으나 실질적으로 대규모 케이블-막구조에 국내의 기술력을 적용 예는 많지 않았다. 대부분의 월드컵경기장의 지붕구조가 외국의 기술로써 설계 되었고, 인천문학경기장의 지붕구조 역시 외국에서 설계된 구조물이나 시공과정에서 그

동안 국내에서 개발된 프로그램등을 이용하여 실질적인 검증이 이루어지고 확인함으로써 대규모의 케이블-막구조의 설계 및 시공기술 확보에 매우 중요한 계기가 되었다.

본 지붕구조의 시공감리를 수행하며 얻은 다음의 제언을 하고자 한다. 첫째 케이블-막구조의 시공은 시공과정 시물레이션을 통하여 시공과정을 정립하고 시공단계에서 이를 확인하고 보정하는 엔지니어링 작업을 반드시 수행해야 한다. 둘째 케이블-막구조는 일반구조방식과는 다르게 장력도 도입되어 구조물이 안정되는 구조로써 각 부재의 길이가 확정되는 초기위치가 매우 중요하다. 따라서 시공의 정밀도 확보에 많은 노력을 기울여야 한다.

인천문학경기장에서 경험한 기술을 토대로 향후 대형 케이블-막구조물의 설계와 시공이 국내의 기술력으로도 가능케 하는 밑거름이 될 것이라 생각하며, 끝으로 감리자의 의견을 충분히 고려하여 반영하여준 설계자와 실질적인 기술적 검토가 가능하도록 하여 감리자의 역할을 해낼 수 있도록 도와준 자문님들과 어려운 과정에도 정밀시공에 애써준 시공관계자 여러분들에게 이 글을 통하여 진심으로 감사드린다. [2]