인천문학경기장 지붕구조의 설계와 시공

A Technical Report on the Design and Construction of Hybrid Tension Roof Structure of Incheon Munhak Stadium

황 보 석*
Hwangbo, Seok

요 약

대공간 구조시스템은 일반적으로 자중을 최소화하고 부재내력의 효과적인 사용이 매우중요하다. 따라서 준공후의 외력에 대한 구조적 거동에 대한 파악도 중요하지만 시공중의 거동에 대한 파악도 매우 중요하다. 특히 케이블 막구조의 경우 시공초기에 구조물이 불안정하지만 케이블에 장력이 도입되면서 점차적으로 구조물의 강성이 높아져 구조물이 안정화를 이루게 되므로 시공과정 해석 즉 안정화 이행과정해석이 시공계획을 설정하는 부분에서 매우 중요한 요소가 된다. 본고에서는 케이블 막구조의 실례로써 최근 완공된 인천문학 경기장 지붕구조를 대상으로 시공과정과 안정화 이행과정해석에 대한 소개를 한다. 인천문학경기장 지붕구조는 케이블에 장력을 도입하는 과정에서 발생되는 변형과 내력을 흡수하고 하부구조에 대한 영향을 최소화하기 위하여 마스트 지점의 회전과 이동이 가능한 특수공법을 채택하였으며 시공과정해석(안정화이행과정해석)을 통하여 제시된 단계별 목표장력 및 변위에 따라 시공과정이 계획되고 제어되었다. 특히 외국의 기술로 설계된 자료를 근거로 일방적으로 공사를 수행한 다른 구조물과는 다르게 국내의 기술력에 바탕한 구조 해석 등을 통하여 검증하여 최종 시공방법을 결정하였고 이러한 과정을 통하여 대공간 구조에 대한 기술력을 확보하고 확인할 수 있었으며, 그 결과 향후에는 국내의 기술력으로 이와 같은 대규모의 케이블 막구조의 설계와 시공이 가능할 것이라고 판단된다.

1. 머리말

근래에 들어 기둥이 없는 넓은 공간에 대한 사회적인 욕구가 증가함에 따라 대공간 구조물이 널리 건설되고 있다. 대공간 구조물은 내력의 흐름을 자연스러우며, 구조시스템의 효율성을 극대화시킨 형태저항형 구조물이다. 2002년 월드컵 개최도시인 인천에 건설된 인천문학경기장의 지붕구조시스템은 케이블을 사용한 케이블 막구조와 이를 지지하는 철골구조로 구성되어 있다. 구조체를 형성하는 케이블과 막은 유연한 재료이므로 초기장력 도입시 응력이 상호유기적으로 작용하게 되며, 시공과정해석을 통하여 공사과정에 대한 상황을 사전에 시뮬레이션 하여야 한다. 또한 시공시 지붕구조의 횡반력이 하부구조에 최소한으로 전달되도록 하기 위하여 지점부 이동식공법이 사용되었다.

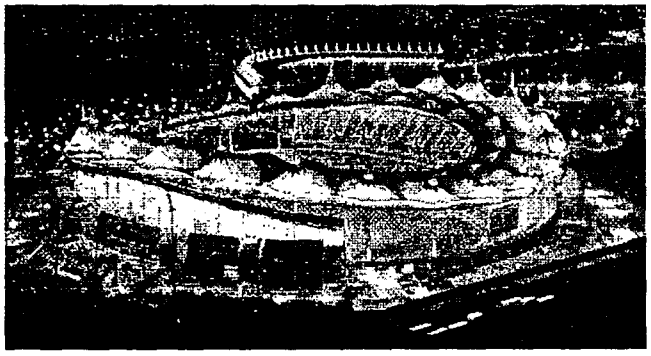

그림 1.1 인천문학경기장 야경

본고에서는 인천문학경기장의 지붕구조시스템과 시공과정에 대하여 설명하고 시공과정해석을 수행하여 이를 비교함으로써 대공간 구조물의 시공에 대한 엔지니어링 기법을 소개하도록 한다.

2. 인천문학경기장 지붕구조시스템

인천문학경기장은 52,000여명의 관객을 수용할 수 있으며 객석의 90%를 덮고 있는 지붕면적은 약 38,000㎡로 동서쪽은 높고 남북쪽은 낮게 설치되어 전체적으로 범선이 파도를 가르고 나가는 역동적인 항구도시 인천의 이미지를 표현하고 있다. 지붕을 이루는 막구조는 24개의 패널로 구성되어 있으며, 케이블구조가 이를 지지하고 있다. 또한 케이블구조는 24개의 Mast와 이를 연결하는

* 일반회원, (주)ES건축구조엔지니어링 대표이사, 건축구조기술사

Ring Truss로 지지된다. Mast의 하부는 수평이동이 가능한 3차원 Pin으로 구성되어 하부구조에 모멘트가 전달되지 않는다.

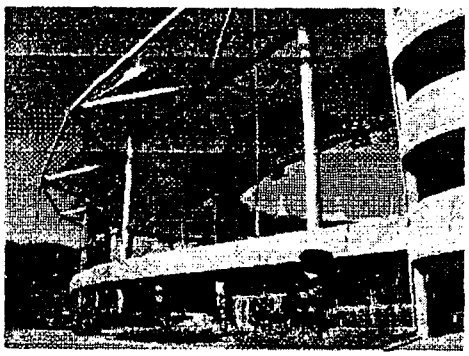

그림 2.1 인천문학경기장의 지붕구조

2.1 지붕구조 평면 및 단면

인천문학경기장의 지붕구조는 그림 2.2에서와 같이 동서방향으로 249m, 남북방향으로 257m에 이르는 거의 원형에 가까운 철골 트러스가 외주부를 구성하며 내부에는 동서방향으로 141m, 남북방향으로 176m에 이르는 타원형의 케이블 네트가 철골 트러스에 케이블 막을 이루며 연결된다.

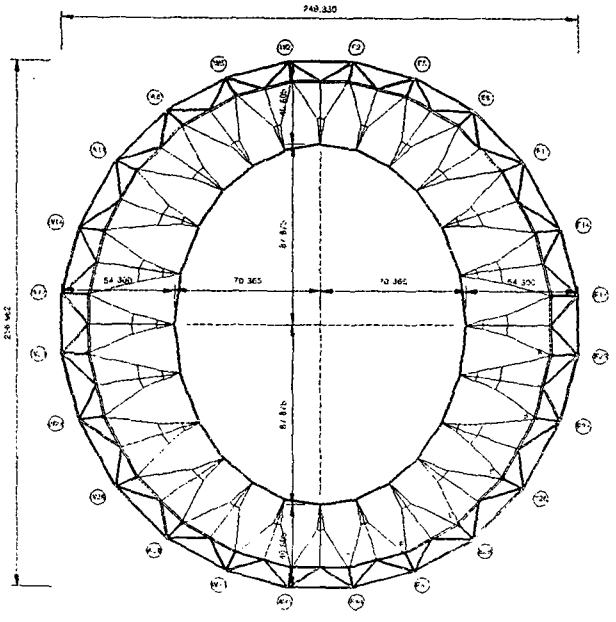

그림 2.2 인천문학경기장 평면도

그림 2.3과 그림 2.4는 지붕구조의 입면과 단면을 나타낸 것으로 지붕구조는 24개의 마스트를 통하여 하부구조로 연결되며, Vertical Back stay Cable을 통하여 지반으로 연결된다. 이중 마스트 지점은 기둥의 회전과 이동이 가능한 지점을 형성하며, Vertical Back stay Cable의 지점은 힌지단을 형성한다.

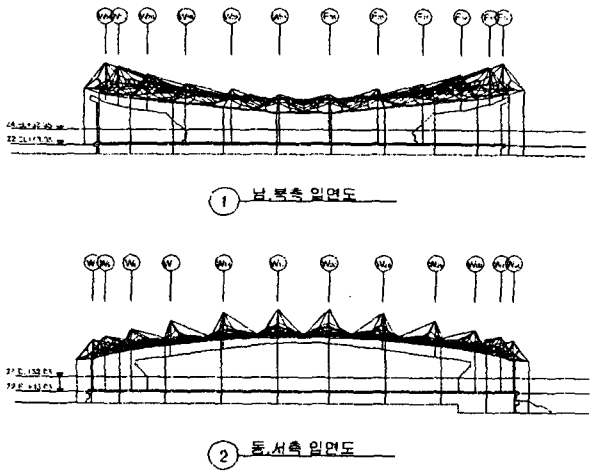

그림 2.3 인천문학경기장 입면도

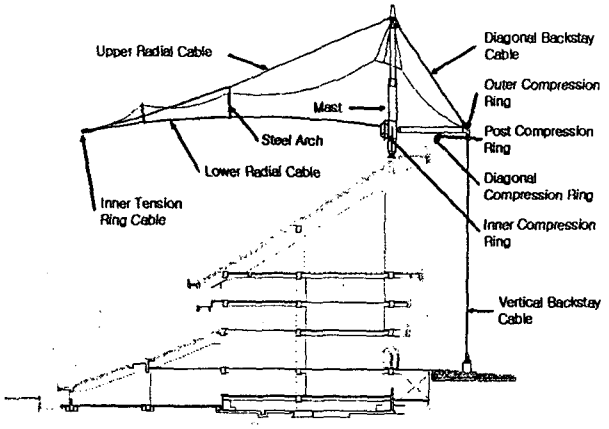

그림 2.4 지붕구조 단면도

2.2 구조재료

지붕구조에서 사용된 구조재료는 크게 3가지로 나누어 질 수 있다. 우선 Mast와 Ring Truss 등을 구성하는 강재와 케이블 막구조를 구성하는 케이블과 막재로 구분할 수 있다.

1) 강재 : SM490YB
2) 케이블:Fully Locked Coil Cable(Fu= 1570N/mm^2)
3) 막재 : PTFE(Teflon Coated Fiber Glass)

2.3 구조시스템

케이블 막구조는 중앙에 타원형으로 6개의 Φ72mm Tension Ring Cable(RC)과 48개의 Upper Radial Cable(URC), 24개의 Lower Radial Cable(LRC) 그리고 지붕구조에 흐르는 힘의 균형을 잡기 위하여 Mast 상부에서 Post Compression Ring까지 연결된 Diagonal Backstay Cable과 Post Compression Ring에서 Rock anchor 기초까지 연결된 Vertical Backstay Cable이 서로 연결되어 모든 케이블은 인장력을 받고 철골은 압축력을 받도록 설계되어 있다. 그림 2.5에 구조시스템의 힘의 흐름을 도식화하였다.

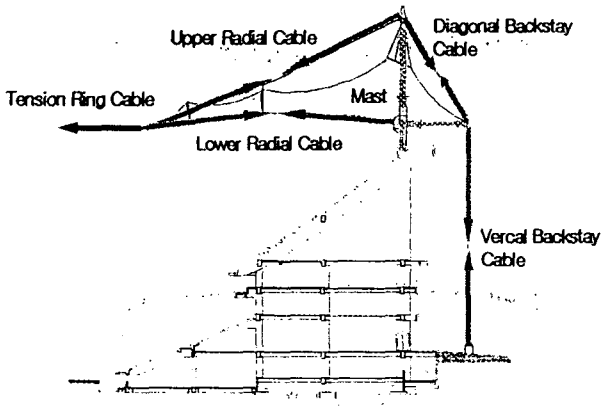

그림 2.5 힘의 흐름도

철골 프레임은 24개의 Mast에 기둥과 기둥을 연결시켜주는 Inner Compression Ring(ICR), Outer Compression Ring(OCR), Diagonal Compression Ring(DCR), Post Compression Ring(PCR)의 Truss로 형성되어 있으며, 하부구조의 거동에 대처할 수 있도록 각 Mast 하부에 3방향 힌지(Spherical Bearing)가 설치되어 있어 Mast의 회전을 자유롭게 한다.(그림2.6)

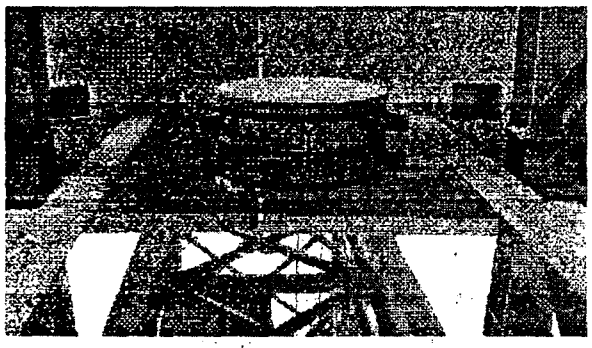

그림 2.6 Spherical Bearing 시공

마스트 이동공법을 적용함으로써 최초 철골 트러스의 설치는 그림 2.7의 점선과 같이 타원형태로 설치한다. Lower Radial Cable에 인장력을 도입하면 철골 트러스는 케이블 장력으로 인하여 원형으로 변형을 일으킨다. 철골 트러스의 변형이 자유롭게 발생하도록 철골 마스트의 하단부는 양방향 이동-힌지단으로 시공한다. 또한 마스트가 이동함에 따라 철골 트러스에 발생되는 힘의 흐름을 원활히 유지하기 위하여 그림 2.8에서와 같이 남북쪽의 Inner Comp. Ring의 중간을 힌지로 하고, 이에 상응하는 Outer Comp. Ring은 더미 부재로 하여 케이블 막구조의 안정화가 완료된 후 설치하도록 하였다.

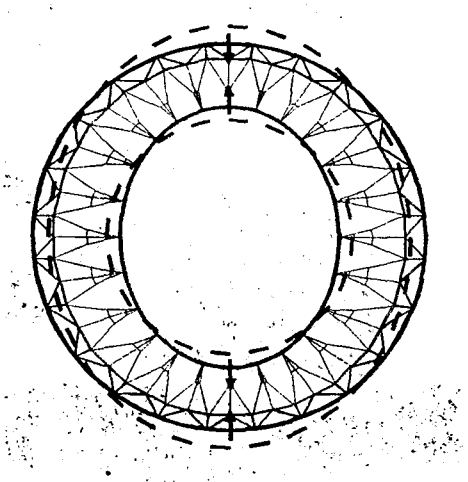

그림 2.7 컴프레션 링과 링 케이블의 변형

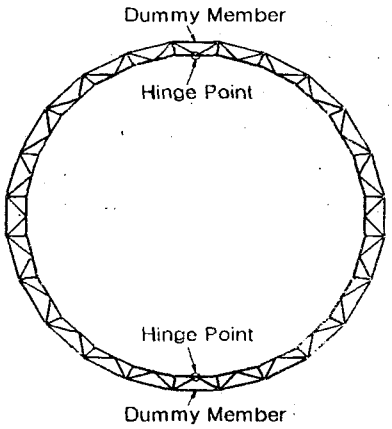

그림 2.8 힌지 및 더미 부재

2.4 시공 정밀도

1) 직선도 : 전체 길이의 ±0.1%
2) 각도오차: ±0.5/1000
3) 부재길이 오차범위: ±1mm
4) 케이블 길이의 오차 :1:10,000 (0.01%)
5) 케이블 허용직경오차 : 2%

3. 인천문학경기장 시공과정

인천문학경기장의 케이블 막구조의 시공은 구조물이 안정화되기 이전에 이를 지지할 수 있는 가설구조물을 먼저 설치한후 철골 프레임을 설치하고 이후 케이블 네트를 설치한후 막 패널을 케이블 네트에 고정시키는 순서로 진행되었다. 앞에서 언급한 바와 같이 케이블 인장시 마스트가 이동하므로 최초 설치위치에 마스트를 설치한후 케이블 인장을 여러 단계로 나누어 마스트가 최종위치에 이르기까지 정밀한 시공과정에 따라 진행되도록 하였다. 인천문학경기장의 시공과정을 간략하게 기술하면 다음과 같다.

Step 0. 자재제작 및 가조립
Step 1. 철골 마스트 설치
Step 2. Compression Ring 조립
Step 3. Ring Cable 펼치기 케이블 조립
Step 4. Upper Radial Cable 양중 (Ring Cable 양중)
Step 5. Vertical Back Stay Cable 1차 인장
Step 6. Lower Radial Cable 인장 (구조물 안정화)
Step 7. Arch Tube 설치
Step 8. 막 패널 및 캣워크 설치
Step 9. Vertical Back Stay Cable 2차 인장

그림 3.1 MAST HEAD 밀링

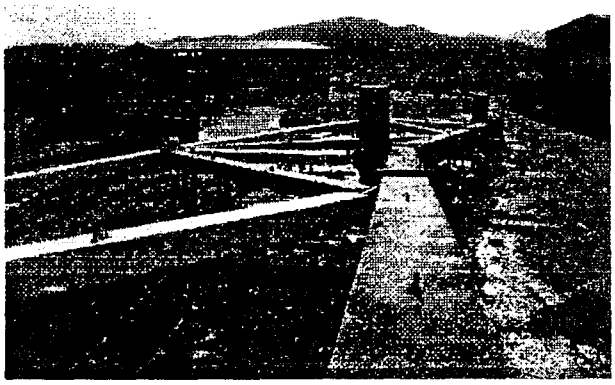

그림 3.2 공장 가조립

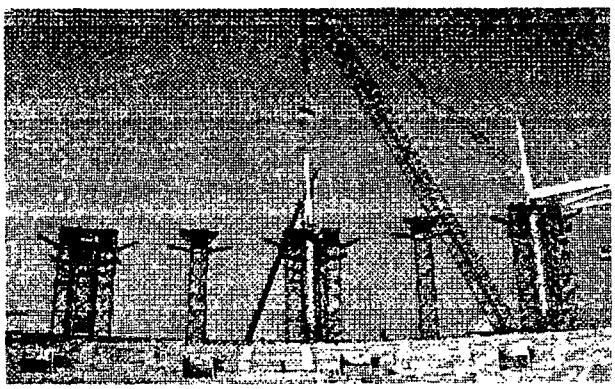

그림 3.3 철골 Mast 설치

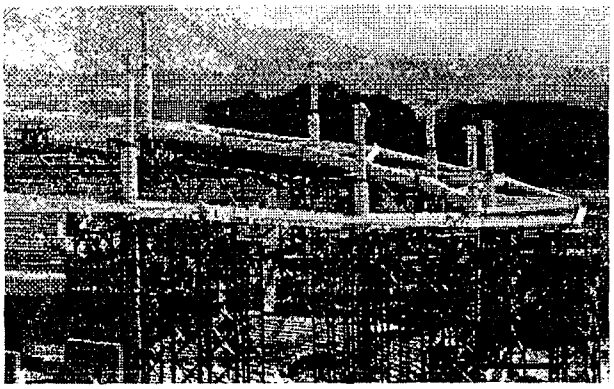

그림 3.4 Compression Ring 조립

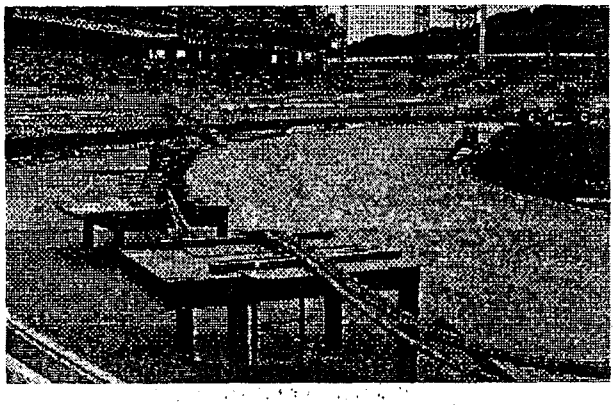

그림 3.5 RING CABLE 포설

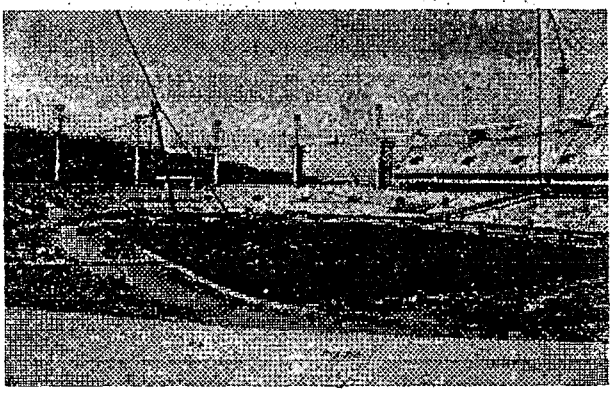

그림 3.6 Upper Radial Cable 인장

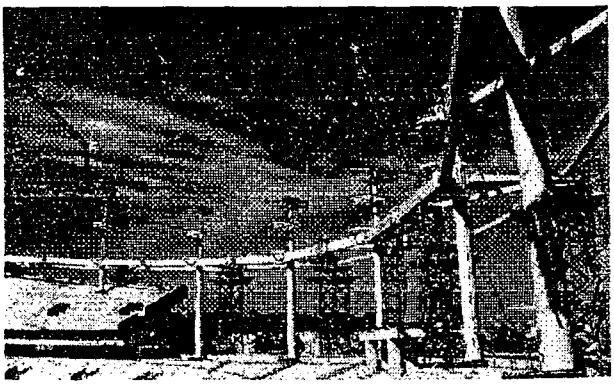

그림 3.7 Upper Radial Cable 인장

그림 3.8 Vertical Back Stay Cable 1차 인장

그림 3.9 Lower Radial Cable 인장

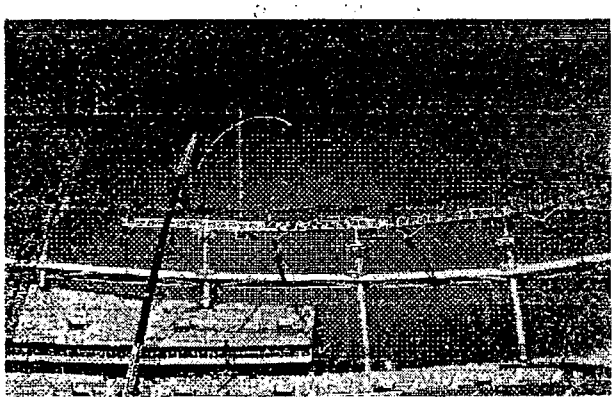

그림 3.10 Arch Tube 설치

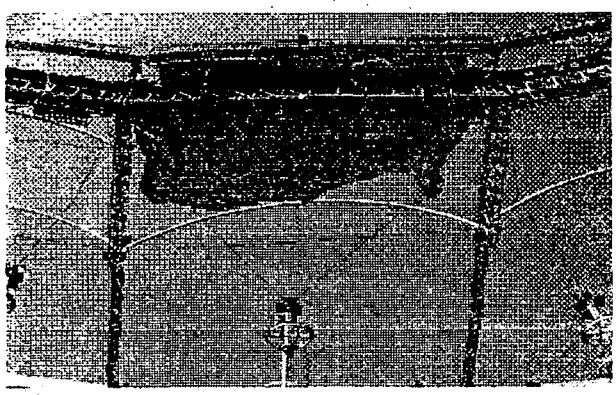

그림 3.11 막 펼치기 작업

그림 3.12 막 펼치기 완료 및 막 클램핑

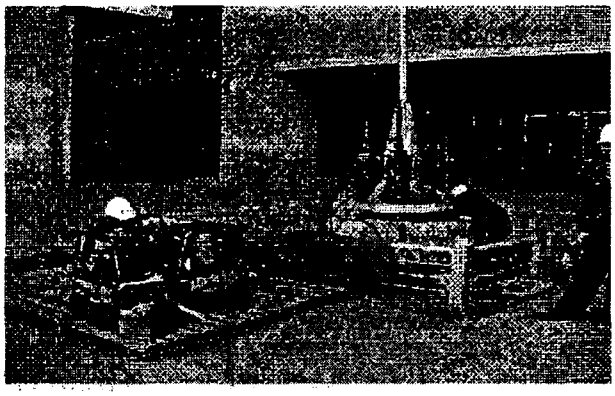

그림 3.13 Vertical Back stay Cable의 최종 인장

4. 인천문학경기장 안정화 이행과정해석

인천문학경기장의 시공과정은 3장에서와 같은 순서로 진행되며, 이중에서 Lower Raidal Cable을 인장하여 구조물의 안정화를 획득하게 된다. 구조물의 안정화가 이루어지는 과정을 안정화 이행과정해석을 통하여 시뮬레이션함으로써 시공계획을 수립하게 되고, 시공이 진행됨에 따라 해석결과와 시공과정에 따른 구조물의 거동을 비교분석할 수 있었다.

4.1 Lower Radial Cable 인장력 도입과정

LRC(Lower Radial Cable) 장력도입은 총 10단계로 구분하여 수행하도록 계획되었다. 표 4.1은 LRC 인장에 따른 RC(Ring Cable)과 LRC의 목표장력값을 나타낸 것으로 목표장력값은 당초 설계시 설계자에 의해 제시된 값을 말한다. 최초의 1단계는 URC(Upper Radial Cable)의 양중으로 자중에 의한 장력값을 나타낸다. 이후 각 단계에서 위치별로 장력을 도입한다. 여기서, 동서쪽의 마스트 A 사이의 LRC는 1번 열로 지정하고 순차적으로 남북쪽의 마스트 F 사이의 LRC을 7번 열로 지정한다. 표 4.1에서 색칠이 된 값은 각 단계에서 LRC의 목표장력값이며 기타의 값은 장력이 도입되는 케이블 이외의 케이블에서 발생하는 장력값이다.

표 4.1 각 단계별 케이블 도입 목표장력값 (tf)

인장 단계	RC 1	RC 7	LRC 1	LRC 2	LRC 3	LRC 4	LRC 5	LRC 6	LRC 7
1	133	137	4	3	4	3	4	5	5
2	260	272	19	23	22	12	9	51	62
3	371	398	31	38	32	44	43	72	89
4	503	551	47	58	89	64	57	133	144
5	567	627	54	65	50	107	59	151	161
6	669	751	63	70	92	112	107	172	186
7	821	940	81	91	116	139	122	261	256
8	957	1,095	78	142	112	212	131	300	288
9	1,013	1,164	80	138	163	212	138	318	302
10	1,100	1,272	121	141	174	216	209	330	322

4.2 인천문학경기장 안정화 이행과정해석

인천문학경기장의 안정화 이행과정해석은 앞에서 언급한 바와 같이 시공과정중 Step 6의 LRC 인장시를 대상으로 하여 실측된 자료와 비교 검토하였다.

1) 해석모델

해석모델은 막을 제외한 철골 마스트, 철골 트러스, 케이블로 이루어진 전체구조물을 대상으로 모델링하였으며, LRC 인장단계에 따라 해석을 수행하였다. 그림 4.1은 해석모델을 도식화한 것이며 LRC 인장단계에서의 고정하중을 적용한 것이다.

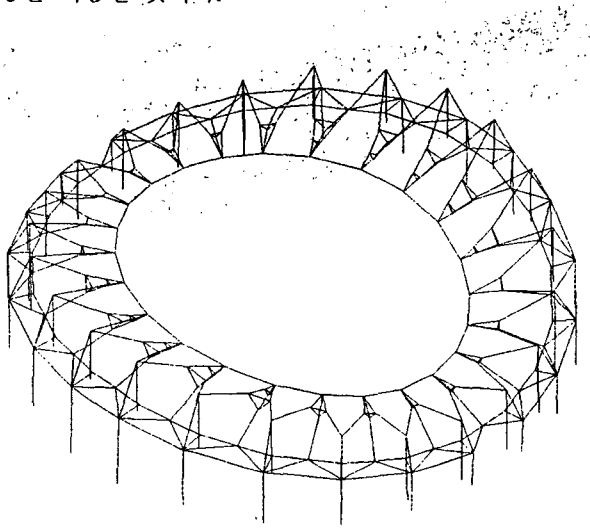

그림 4.1 지붕구조 해석모델

2) 해석결과 및 실측자료와 비교

인천문학경기장 지붕구조의 시공과정에 있어서 구조물이 안정화되는 가장 중요한 단계는 LRC 인장단계이므로, 구조물 안정화 과정의 제어 대상인 LRC 인장력과 이 구조물의 가장 큰 특징이 마스트 이동에 대해서 비교분석하였으며, 아울러 Ring Cable의 설계값과 해석결과도 비교하였다.

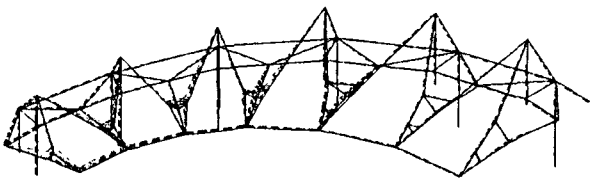

그림 4.2 LRC 인장에 따른 구조물의 거동 변화

그림 4.2는 LRC 인장에 따른 구조물의 거동 변화에 대한 해석결과를 전체구조에 대하여 1/4 만을 표현한 것으로서, LRC 인장에 따라 케이블 막구조에 하향의 처짐이 발생하고 있음을 보이고 있다. 또한 마스트의 이동이 현저하게 나타나며, Suspension Cable에 의하여 URC가 이루는 각도도 점차적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그림4.2의 거동 변화에서 알 수 있듯이 안정화 이행과정시의 변화량은 전체구조물의 크기에 비하여 상당한 변화량을 나타내고 있다.

3) LRC 인장력

지붕구조의 시공시 LRC 인장은 설계값을 기준으로 인장하였으며, 이중 동서쪽의 LRC와 남북쪽의 LRC 해석결과와 실제 인장력과의 비교한 결과를 그림 4.3과 그림 4.4에 나타내었다.

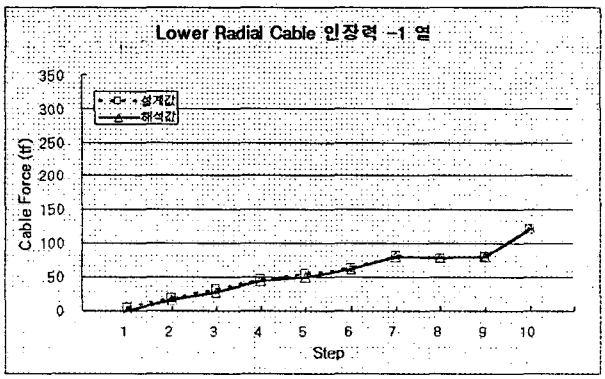

그림 4.3 1열 LRC 인장력

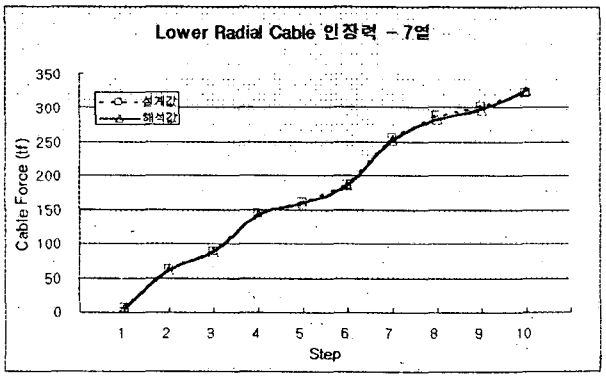

그림 4.4 7열 LRC 인장력

그림에서 LRC 인장력의 기울기가 큰 구간은 인장력이 직접 도입되고 있는 구간임을 나타낸다. 즉 1열의

LRC는 마지막 10단계에서만 인장력이 도입되며, 이는 10단계 사이의 기울기가 다른 것보다 훨씬 큰 것으로 나타남을 보이고 있다. 마찬가지로 7열의 LRC는 2, 4, 7단계에서 인장하게 되며, 그림의 해석결과도 이와 일치하고 있다.

4) Ring Cable 인장력

Ring Cable의 인장력 검토는 LRC 인장력의 실측값과 해석값이 유사한 것에 근거하여 Ring Cable의 설계값과 해석값을 비교검토하였다. 그림 4.5와 그림 4.6에 LRC 인장에 따른 Ring Cable의 인장력의 변화를 나타내었다.

해석결과에서 Ring Cable의 인장력은 설계값과 해석값이 거의 유사함을 나타내고 있으며, 설계값과 해석값은 최대 8%의 오차를 보이고 있다. LRC의 설계값과 해석값에서 발생한 오차와 마찬가지로 Ring Cable에서도 실제 구조물과 해석모델 간의 미소한 좌표의 차이의 의한 것으로 사료된다. 또한 1열 LRC 부근의 Ring Cable 인장력보다 7열 LRC 부근의 Ring Cable 인장력이 약 16% 정도 더 높음을 나타내고 있다. 이는 앞에서 언급한 것과 같이 초기의 타원형이었던 철골 트러스를 원형으로 변형시키고 Ring Cable을 점차 타원형으로 자리잡게 하기 위하여 6열과 7열의 LRC에 인장력을 가장 많이 도입하였기 때문이다. 이와 같은 LRC 인장력의 변화와 Ring Cable의 인장력 변화는 다음의 마스트 이동과 같은 양상을 나타내고 있다.

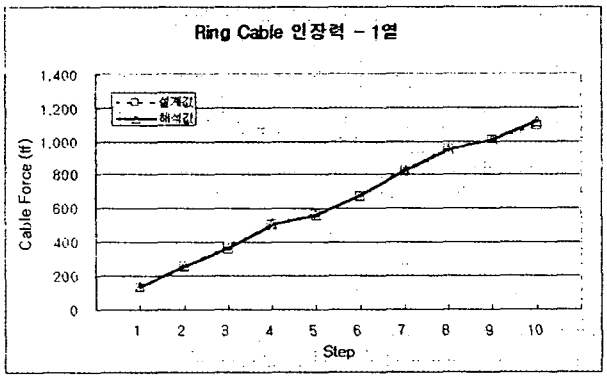

그림 4.5 1열 Ring Cable 인장력

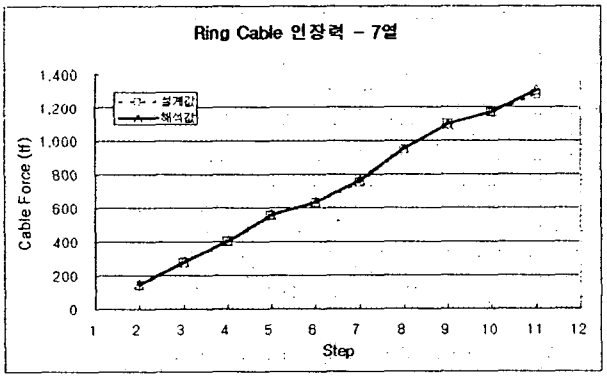

그림 4.6 7열 Ring Cable 인장력

4) 마스트 이동

인천문학경기장의 가장 큰 특징은 마스트가 이동게 되는 과정이며, 시공 당시에서도 LRC를 인장하면서 마스트가 최종위치로 수렴하는 과정을 각각의 마스트에 대하여 실측하였다. 마스트의 이동과정의 실측은 각 마스트의 최종위치(설계값)를 원점으로 하는 국부좌표계를 정하여 마스트의 이동을 설계값과 비교하는 방법으로 이루어졌으며, 그림 4.7에 각 마스트의 국부좌표계를 나타내었다.

여기서 국부좌표계 y축은 지붕구조의 중심을 향하는 방향이며, 국부좌표계 x축은 y축에 직각인 방향으로 한다. 그림에서 전체좌표계의 X축과 국부좌표계의 y축이 이루는 각도는 PCR(Post Compression Ring)이 이루는 각도로 정하였다. 마스트의 이동에 대해 주된 비교대상은 동서측의 A열과 남북측의 F열 마스트로서, 이들 마스트는 국부좌표계 y축을 따라서 각각 음의 방향 및 양의 방향으로 커다란 이동과정을 나타내게 된다. 그림 4.9는 A열의 마스트 이동거리를 나타내며, 그림 4.10은 F열의 마스트 이동거리를 나타낸다. 여기서 원점은 설계상의 최종좌표를 기준으로 한다.

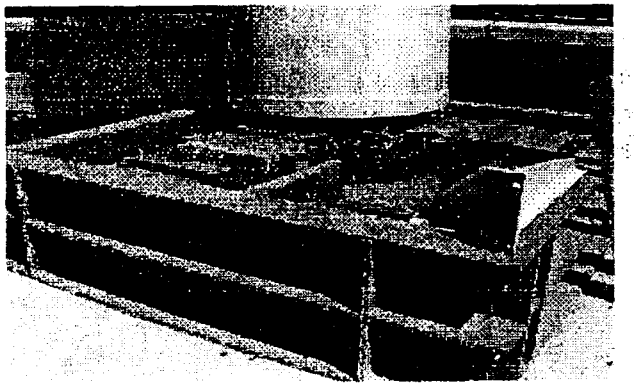

그림 4.8 마스트 이동

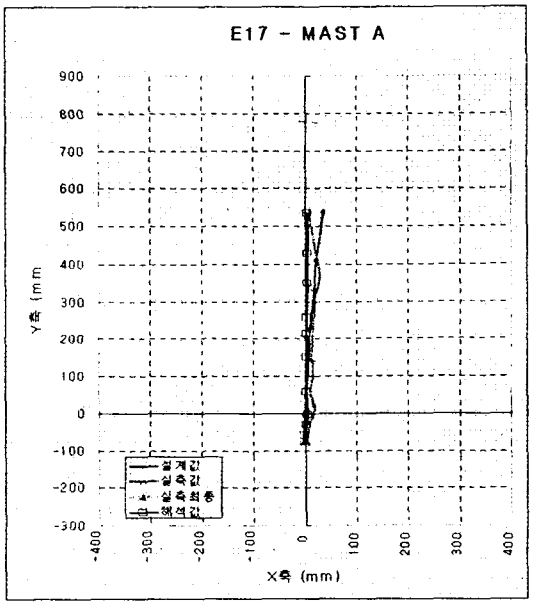

그림 4.9 마스트 A의 이동거리

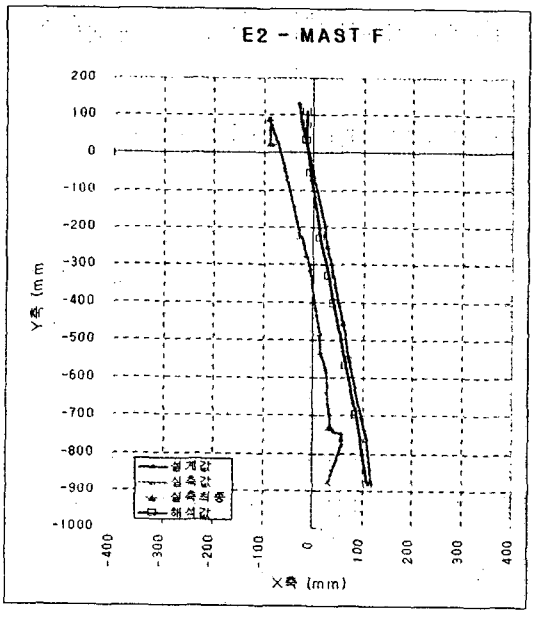

그림 4.10 마스트 F의 이동거리

그림에서 알 수 있듯이 설계값과 해석값은 거의 유사한 양상을 나타내고 있으며, 실측값은 초기 철골기둥의 위치가 80mm 정도의 오차가 있으나, 시공 중 거동의 형태는 해석값과 매우 유사하게 나타났다.

A열 마스트의 경우 국부좌표계 y방향의 양의 방향에서 원점으로 향하고 있으므로, A열 마스트는 구조물 내부에서 외부로 이동하고 있음을 설계값, 실측값, 해석값 모두 같이 보여주고 있다. 마찬가지로 F열 마스트는 국부좌표계 y방향의 음의 방향에서 원점으로 향하고 있으므로 외부에서 내부로 이동하고 있음을 보여주고 있다. 이는 처음에 언급한 것과 같이 남북방향으로 길게 설치된 타원형의 철골 트러스가 LRC를 인장하면서 점차 원형으로 이동하고 있음을 나타낸다.

상기 결과로부터 설계값, 실측값, 해석값 모두 매우 근접한 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

5. 결론

인천문학경기장의 지붕구조는 월드컵 개최도시로 확정된 후 FIFA 규정을 충족시키기 위해 케이블 막구조물의 반영구적인 구조물로 계획되었다. 설계 시에 지붕구조로 인한 하부구조물의 영향을 최소화하기 위해 최소한의 자중으로 지붕을 구성하도록 케이블 막구조 시스템이 적용되어 계획되었다. 이러한 조건에 의해 설계된 구조는 복잡한 시공과정을 통하여 현실화되었다. 설계와 시공이 동시에 진행되는 Fast Track 과정으로 진행되었으며 이것은 일반적으로 설계자, 감리자, 시공자가 많은 어려움에 노출되게 하지만, 설계 및 시공과정에서 감리자에 의한 설계 검토 역시 설계에 버금가는 수준으로 수행되어 문제점에 대한 설계자와 감리자, 시공자의 의견이 설계와 시공과정에서 충분히 반영되어 완성되었다. 그동안 국내에서도 많은 연구가 이루어 졌으나 실질적으로 대규모 케이블-막구조에 국내의 기술력을 적용 예는 많지 않았다. 대부분의 월드컵경기장의 지붕구조가 외국의 기술로써 설계되었고 인천문학경기장의 지붕구조 역시 외국에서 설계된 구조물이나, 시공과정에서 그동안 국내에서 개발된 프로그램 등을 이용하여 실질적인 검증이 이루어지고 확인함으로써 대규모의 케이블-막구조의 설계 및 시공기술 확보에 매우 중요한 계기가 되었다.

막구조는 이미 외국에서는 영구구조물로써의 내구성이 인정된 대공간 구조시스템이며 국내에서도 중소규모의 구조물이 건설되어 왔다. 특히 외국의 경우 매년 태풍 또는 허리케인이 발생하는 지역에서도 문제없이 사용되고 있다. 우리나라의 경우에도 90년대초에 부산지역에 상륙한 태풍으로 인하여 큰 피해가 있었으나 당시 수영만에 세워진 막구조물은 피해가 없었던 예가 있다. 이는 케이블 막구조 시스템이 연성구조시스템으로 구조물에 작용하는 하중에너지를 변위로 흡수하는 등의 효과적인 하중저항시스템을 갖고 있기 때문이라고 사료된다.

본 지붕구조의 설계 및 시공감리를 수행하며 얻은 시항에 대하여 다음의 제언을 하고자 한다.

첫째 케이블 막구조의 시공은 시공과정 시뮬레이션을 통하여 시공과정을 정립하고 시공단계에서 현장에 전문 기술자가 상주하여 이를 확인하고 보정하는 엔지니어링 작업을 수행하는 것이 필수적이다.

둘째 형태저항 구조시스템인 케이블 막구조는 일반구조와는 달리 케이블에 장력이 도입되어 구조물이 안정화되는 구조로써 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 구조기술자의 의견을 충분히 고려하여 반영하여준 설계자와 실질적인 기술적 검토가 가능하도록 하여 감리자의 역할을 해낼 수 있도록 도와준 자문님들과 어려운 과정에도 정밀시공에 애써준 시공관계자 여러분들에게 이글을 통하여 진심으로 감사드린다.

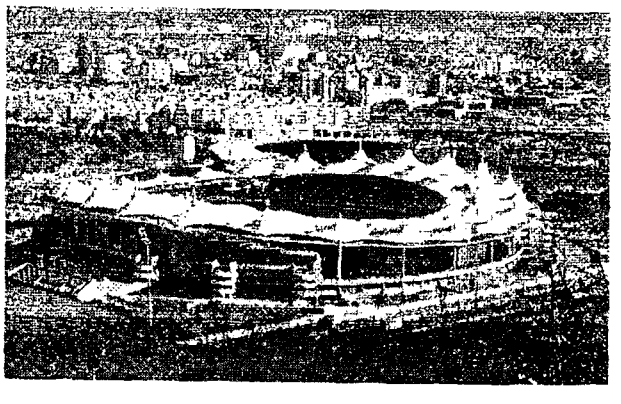

그림 5.1. 인천문학경기장 지붕공사 완료