



서울월드컵경기장 지붕구조물 설계와 시공

The Roof Canopy for Seoul World Cup Stadium



글 / 文碩庸* · David. M. Campbell** · 金亨暎***
 (Moon Suk Yong · David. M. Campbell · Kim Hyung Young)
 * 선임기술자 삼성엔지니어링.
 ** CEO, Geiger Engineers.
 *** 선임기술자 삼성중공업(주).
 E-mail: moonstr@samsung.co.kr

This paper summarizes the design and construction of the roof canopy structure for the SEOUL 2002 World Cup Main Stadium with a design inspired by Korean traditional beauty emphasizing images of the Pangpae kite. The stadium has also been designed for maximization of its post-World Cup utility to be used on as every basis by the citizens. The stadium canopy is a unique spatial network of truss members with a tensile membrane roof suspended from 16 masts. The canopy covers 40,950 m², which is clad with a pre-stressed tensile membrane of PTFE coated fiberglass fabric and the glass.

1. 서론 (Preface)

서울월드컵경기장의 미려한 지붕구조물은 반투명의 테프론막을 사용하여 관람석에 그늘을 주면서 자연광이 재료를 투과하여 확산됨으로 관중들에게 아늑한 느낌이 들도록 하였다. 경기장 안쪽으로 내밀고 있는 천창(天窗)은 투명한 안전강화유리로 덮여있어 그 밑에 있는 관람석을 풍우로부터 보호하고 지붕으로 드리워진 그늘선을 부드럽게 하면서 잔디에 일조량을 더해주는 역할을 하게 한다.

21세기에 들어 처음 개최되는 월드컵축제의 중심무대가 될 서울월드컵경기장 설계/시공을 일괄 턴키방식으로 1998년 삼성엔지니어링 컨소시엄은 수주하였으며, 2001년 말 준공을 목표로 기념비적인 건축물 건설에 매진하고 있다.

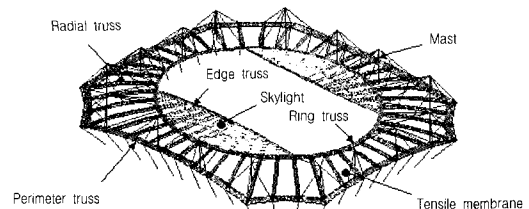
분야별 설계관계자는 다음과 같다.

- 건축설계 : 이공건축
- 지붕구조설계 : Geiger Engineers(미국)
- 컨소시엄 대표 및 시공회사 : 삼성엔지니어링(주)



〈그림 1〉 Aerial view of Seoul Stadium, Sep. 2001

2. 지붕구조물 (Structural System)

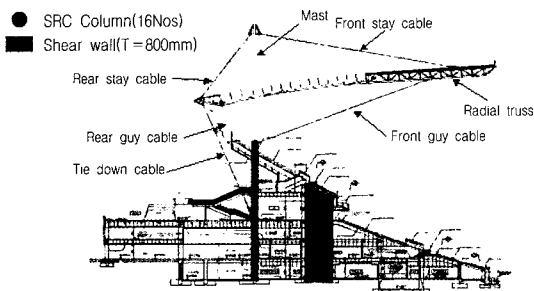


〈그림 2〉 지붕구조의 컴퓨터 모델



〈그림 2〉는 지붕트러스 구성시스템을 입체적으로 보여주고 있다. 지붕구조물은 길이가 40~90m에 이르는 44개의 Radial트러스가 16개의 마스트로 지지되는 트러스돔구조물이라 할 수 있으며 테프론막과 천창 등으로 덮인 전체 면적은 약 41,000m²에 이른다. 개개의 Radial트러스는 내측에 위치한 Ring트러스와 외곽부위에 설치된 높이 6m의 Perimeter트러스로 연결되어 입체골조를 형성하면서 수평강성이 증대되도록 하였다. Radial트러스는 수직면에 대하여 등골게 변화를 주어 여기에 테프론막은 연결하였으며, 트러스간의 중앙부위에는 Valley케이블을 설치하여 막을 눌러 줌으로서 전체적인 지붕면에 아름다운 골이 형성되도록 하였다.

지붕트러스 전체 무게는 Stay케이블로 연결되어 마스트로 지지되며, 외측에 위치한 Stay케이블은 다시 하부구조물에 정착되어 있는 Tiedown 케이블에 연속되게 함으로써 구조적 안정성이 확보되도록 하였다.



〈그림 3〉 표준횡단면도

〈그림 3〉은 경기장의 대표적 수직단면을 나타내고 있으며, 각 마스트마다 내측에 전단벽을 설치하여 지붕트러스에서 발생하는 횡력을 효과적으로 지지되도록 하였다. Radial트러스 하단부에는 안쪽 끝단과 마스트하부로 연결되는 내측Guy 케이블을 마스트마다 설치하여 지붕 전면에서 발생 예상되는 부압과 풍하중에 의한 횡력에 저항하도록 하였다.

하였으며 또한 외측에도 Guy케이블을 추가하여 변동풍하중에 대한 동적안정성이 증대되도록 하였다.

Guy케이블 제외한 지붕의 모든 케이블은 안전도 증대와 교체 가능성을 고려하여 두 가닥으로 설계하였다. 지붕트러스의 모든 부재는 Pipe단면을 사용하였으며, 마스트는 원형으로 단면의 크기가 트러스 연결부위에서 최대가 되도록 변화를 주었다.

3. 구조해석(Structural Analysis)

지붕구조물의 해석은 대공간 케이블구조물의 특성이 충분히 고려되도록 서로 다른 3개의 해석 모델을 사용하였으며, 또한 장스팬의 비선형효과가 적절하게 반영되도록 각 하중조합별과 모델을 만들었다. 좌측의 처음 두 해석모델은 장스팬 케이블구조물의 동적안정성 평가와 케이블 설계를 목적으로 모든 트러스를 등가의 선형단면으로 치환하여 ADINA와 BEAM(Geiger개발) 프로그램 해석용으로 만들었다.

ADINA모델은 케이블구조물의 고유치해석 및 응답스펙트럼해석이 효과적으로 수행되도록 케이블의 Prestress을 Strain요소로 변화시켜 적용하였으며, BEAM모델은 ADINA모델에 추가적으로 막의 요소를 등가의 선형으로 입력하여 막에 발생하는 최대 응력이 정확히 산정 되도록 하였다. 마지막 모델은 트러스 부재의 단면설계를 목적으로 범용프로그램(STAAD) 이용하여 실제구조물과 동일하게 모델화하였다.



〈그림 4〉 3가지 다른 컴퓨터 해석모델

4. 하중 모델실험 및 동적 안정성평가 (Wind, Snow Load & Aeroelastic Check)

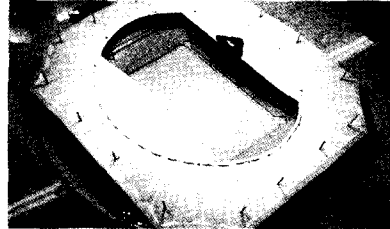
지붕구조물은 기하학적 형상으로 인하여 설계 지배하중인 풍하중 및 설하중 패턴이 매우 복잡하고 다양하여 이의 정확한 평가를 위하여 RWDI 사에 의뢰하여 모델실험을 실시하였다. 지붕면에 작용하는 풍하중 평가를 위한 정적풍동실험은 1/400축척의 강체모델을 이용하여 경계층 풍동설비 내에서 수행되었다. 실험용 설계기본풍속은 과거 기록된 한반도 기상자료를 Monte-Carlo Simulation을 이용하여 분석한 결과, 하중재현주기를 100년으로 가정할 시 건축법에서 규정한 35m/sec가 적절한 것으로 평가되었다.

예상 최대 골조설계용 풍압은 평균적으로 면적당 80kg 정도이며 국부적으로 최대 140kg까지 작용하였다. 설동실험은 동일모델을 이용하여 인공수조설비 내에서 실시되었으며 하중 재현주기를 100년으로 가정시 지표면적설하중은 면적당 67kg으로 분석되었다. 실험결과, 적설하중은 눈의 표류, 미끄럼 및 적체 등의 영향으로 링트러스에 면한 부위에서 면적당 360kg로 가장 크게 나타나 높이로 환산시 약 1.6m의 눈이 여기에 쌓이는 것으로 분석되었다.

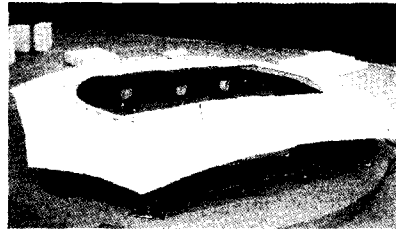
풍하중에 대한 동적안정성평가는 장스팬 구조물설계에서 가장 중요한 평가부분으로 실험모델 또한 강체모델과는 달리 변위측정이 가능하고 지붕구조물의 동적특성이 반영된 1/175축척의 탄성모델을 사용하여 실험하였다. 실험결과, 정적풍동 실험으로 산출된 설계풍압은 풍하중에 대한 동적응답 분석결과 타당한 것으로 분석되었으며, 또한 난기류 풍하중 작용시 트러스 내측 끝단의 최대변위는 약 620mm로 측정되었으며, 결론적으로 지붕구조물은 풍하중에 대해서 안정적인 것으로 검토되었다.



〈그림 5〉 풍동시험



〈그림 6〉 적설하중시험



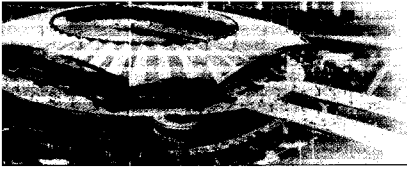
〈그림 7〉 Aero elastic Model

5. 재료(Materials)

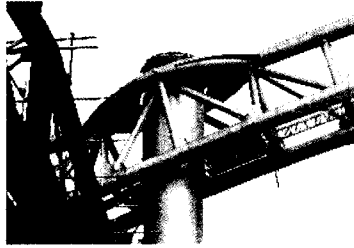
5.1 철골

지붕구조물에 사용된 철골은 피로에 대한 내구성확보를 위하여 SM490B 강재로 설계되었다. 지붕트러스 형성에 이용된 주요철골자재의 무게는 약 6,300톤으로 면적대비 155kg 정도의 강재가 사용되었다. 여기에 케이블/소켓, 마감재료와 설비시설에 포함하면 전체 중량은 7,500톤 정도가 된다.

지붕구조물의 부재설계는 비선형구조물의 적절한 판단을 위해서 탄성설계를 AISC Code를 적용하였으며, 구조물의 거동이 풍하중 및 설하중에 장기적으로 지배됨으로 모든 하중조합에 대해서 허용응력 증대라는 단기적인 효과를 고려하지 않았다. 특히 소켓 고정부위의 Plate는 케이블방향



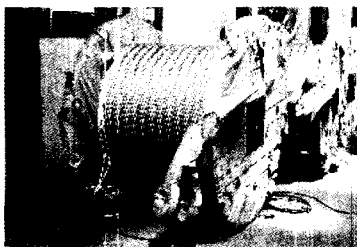
과 강판의 가공방향(Roll Direction)이 일치하도록 설계/제작하여 구조물 움직임에 대한 정착부위의 내구성 및 인성을 강화하였다.



〈그림 8〉 지주에 연결되는 트러스

5.2 케이블 및 소켓

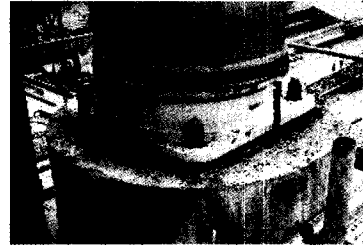
전체 중량이 7,500톤을 이르는 지붕구조물을 지지하는데 약 250톤의 케이블과 소켓이 사용되었다. 케이블을 ASTM A603에 규정된 구조용 와이어로프를 사용하였으며, 모든 단면의 케이블에 대하여 파괴시험을 실시하여 강도를 검증하였다. 케이블은 ASTM규정에 따라 파괴강도의 55%에 해당하는 사전장력(Prestretching)을 가하여 제작과정에서 발생할 수 있는 느슨함을 제거한 후 설계 길이로 절단하였다. 소켓 주강품 및 케이블과 소켓의 결합부위는 ISO 3189 규준을 적용한 실물시험을 통하여 소켓의 품질을 평가하였다.〈그림 9〉



〈그림 9〉 드럼에 연결되는 stay cable

5.3 마스트지지(Pot Bearing)

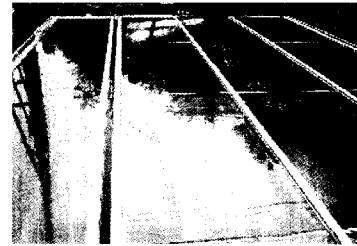
마스트하단 지지부는 회전에 대한 구속이 없도록 최대 2.3도까지 자유롭게 회전이 가능하며 최대 2,000톤의 수직력에 저항할 수 있는 Pot Bearing을 사용하였다. 〈그림 10〉



〈그림 10〉 Pot Bearing을 지주에 용접함

5.4 천창(Skylight)

천창에 사용되는 유리는 파손시 낙하물로 인한 안전사고 예방을 위하여 1.5mm 필름이 내부에 부착되어 있는 안전강화유리(T=11.5mm)로 설계하였다. 또한 안전성 검증을 위해서 4개 구간을 실 모델로 제작하여 Mock Up 실험을 하였으며 설계하중의 3배를 넘는 면적당 약 700kg의 부압에도 안전함이 확인되었다.



〈그림 11〉 Skylight 실물모형시험

6. 시공(Construction)

6.1 가설구조물

지붕트러스 설치의 가장 안정적이면서 현장 여건에 적합한 가설지주를 이용하는 공법으로 시공하였다. 가설구조물은 상, 하층으로 구분되며 전체적으로 약 2,300톤 철골이 소요되었다. 하층부의 지주는 장대한 길이로 세장하여 트러스의 수직력만 분담케 하였으며, 상층부위는 수직력과 동시에 수평력에 저항하도록 설계하였다.

6.2 마스트/트러스설치 (Mast/Truss Erection)

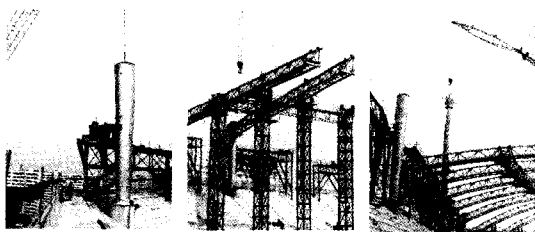
지붕구조물은 크게 마스트와 Radial/Ring/



Perimeter 및 Stiffener트러스로 구성된다. 모든 골조는 현장으로의 운송이 적합하도록 길이를 15m 이내로 제한하여 공장제작 한 후 현장에서 조립하였다. 따라서 트러스 단면이 크고 길이가 긴 Perimeter트러스는 소부재로 공장 가동한 후 현장에서 조립하였다.

가장 긴 Radial트러스의 무게는 125톤 정도이며, 전체 트러스는 시공의 편리를 위해서 4개 구역으로 구분하여 설치되었으며 양중에는 750톤 Ringer크레인이 이용되었다.

지붕트러스의 시공은 먼저 하부 마스트를 설치하고 여기에 Pin으로 고정되는 Radial트러스를 설치하는 순서로 시공하였다. Ring/Perimeter트러스는 Radial트러스 시공 후 바로 연결하여 입체적인 골조를 형성함으로써 시공중의 안정성을 확보하였고, Mast와 Radial트러스 주요지점 부위에는 측량용 표적을 부착하여 설계좌표대로 정확히 시공되도록 하였다. 각 구역의 시공이 완료되면, 연결부위의 좌표를 재차 확인한 후 적정 설계온도가 유지되는 시점에서 Ring과 Perimeter트러스를 체결하여 전체 트러스를 완성하였다.<그림 12>

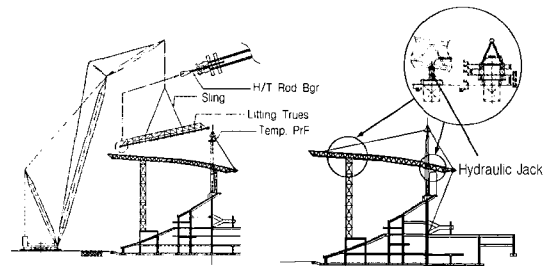


<그림 12> 지주와 트러스의 단계별 가설 장면

6.3 케이블

모든 케이블소켓은 유압잭을 설치가 용이하도록 소켓장착부위를 설계하였다. 케이블은 크게 양단이 Open소켓으로 체결되어 고정길이가 되어 있는 Stay케이블과 한쪽이 길이 조정이 가능한 Bridge소켓으로 되어있는 Tiedown/Guy케이블로 나누어진다. 케이블시공은 전체적으로 Stay-

>Tiedown->Guy케이블 순서로 설치하였다. 케이블 설치순서는 설치장력이 최대 150톤 이내에서 최소가 되도록 여러 설치순서를 분석하여 결정하였으며, 모든 케이블은 지붕트러스 완료후 경기장 중앙으로 이동한 Ringer크레인을 이용하여 시공되었다.



<그림 13> 케이블 설치의 단계

설치장력이 큰 Stay케이블은 부분적인 설치로 인한 지붕트러스의 뒤틀림을 방지하기 위해서 서로 대칭한 4개의 위치에서 설치장력을 분할하여 동시에 작업하였다. Stay케이블 설치가 완료되면 상층부 가설지주를 Jack-down시키면서 계획된 위치의 Tiedown케이블을 순차적으로 설치장력까지 도달되도록 조정/시공하였으며, 이어서 마스트에 위치한 Guy케이블을 시공하였다.

케이블은 시공시 각 하중단계별로 장력과 케이블의 진동수를 측정하여 케이블 설치 완료 후 케이블장력 파악이 용이하도록 하였다. 1차 모든 케이블의 설치가 종료되면 케이블 진동수를 이용하여 각 케이블의 작용되고 있는 장력을 측정후 이를 설계장력에 근접하도록 부분적으로 Tiedown케이블의 길이를 미세 조정하여 전체 케이블의 설치를 완성하였다.

마지막으로 지붕구조물이 제작 및 설치가 성공적으로 마무리될 수 있도록 참여해주신 많은 분들의 노고에 다시 한번 깊은 감사를 드립니다.

(원고 접수일 2001. 9. 24)