

청도 투우장 지붕돔 구조설계와 시공

Structure Design and Construction of Domed Roof Truss



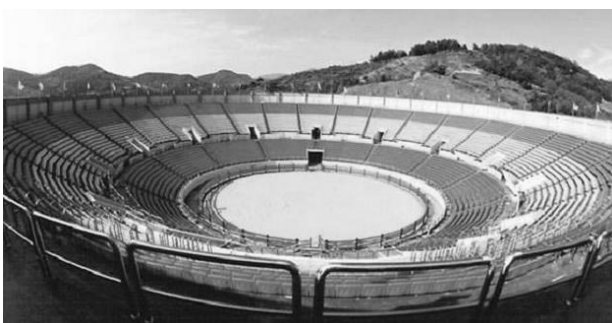
김석구 부회장
(주)쓰리디구조 대표



문석용
(주)쓰리디구조 소장

1. 서언

경북 청도군 화양읍 삼신리에 위치한 청도 상설소싸움 경기장은 1만 2천석 규모의 관람객을 수용하는 경기장, 광장, 주차장, 우사, 운영시설 등을 포함하는 전천후 경기장으로, 오랜 전통을 가진 우리 고유의 민속놀이인 소싸움을 한국을 대표하는 문화관광축제로 발전시키고자 매년 개최되는 청도 국제소싸움 축제가 열리는 곳이다. 설계초기에는 지방재정 확보의 어려움으로 지붕구조물은 구체적 설계안이 확정되지 않은 상태에서 어렵게 건설공사가 착수되었다가 청도군의 노력과 민자유치 성공으로 하부구조 마무리공사가 빠른 속도로 진행되면서 2003년 초 지붕구조물 건설공사가 턱키(Turn-Key)로 발주되었다. 지붕막 전문제작/ 시공업체인 (주)타이가사는 초기단계에서 하부경기장 구조실시 설계에 참여한 (주)쓰리디구조와 협력하여 테프론코팅(PTFE) 지붕막을 적용하고 중앙 원형 개구부가 개폐되는 트러스돔 설계안을 제출하여 당선되었다. 본 고에서는 지붕구조물 설계안에 대한 구조계획과 주요 특징 및 시공방안에 대하여 소개하고자 한다.



〈그림 1〉 경기장 전경 (지붕돔 설치전)

2. 구조계획

2.1 주요 설계 고려사항

지붕구조계획은 건축적인 기능/외관과 구조물의 안전성, 사용성, 경제성 및 효율적 공간확보를 위하여 하기의 항목에 주안점을 두어 구조계획을 수립하였다.

- 1) 건축외관 및 간섭영향
- 2) 지붕작용 하중분석
- 3) 구조물의 동적거동 분석
- 4) 하부구조물의 영향 분석
- 5) 지붕트러스 시공단계 분석
- 6) 지붕배수
- 7) 지붕마감관련 (방수, 긴결성 및 막의 고정, 마감외관)
- 8) 지붕트러스 설치방법 및 유지관리 측면



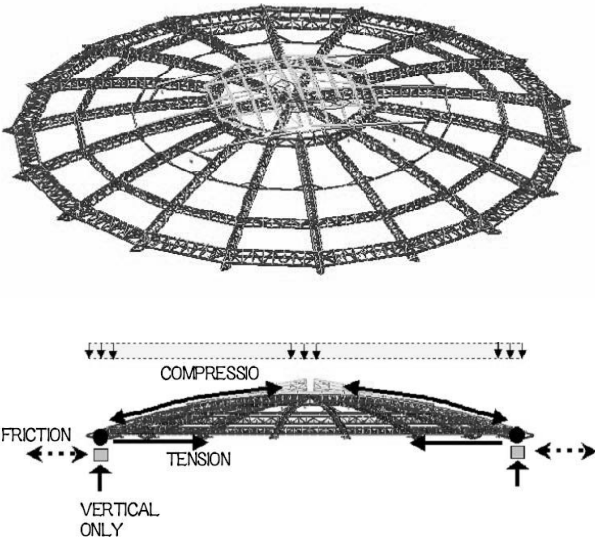
〈그림 2〉 경기장 전경 (지붕돔 설치후)

2.2 구조형식의 선정

지붕구조시스템은 추가 지붕하중을 지탱하게 될 기 시공된 관람석

상부 외곽기둥과 테두리보의 강성 및 기초시스템 안전성을 우선하여 검토되었다. 여기에 현장 시공성, 경제성 및 공기를 최대한 앞당길 수 있으며, 또한 지붕 중앙부에 일정 개구부의 개폐가 가능하고 장기적 측면에서 유지관리가 용이한 구조시스템 선정이 필요하였다.

지붕골조 지지점이 될 콘크리트 외곽기둥과 이를 연결하는 테두리보에 대한 내력 검토 결과, 수직력에 대한 충분한 여력은 확보하고 있었으나 수평력에 대한 강성은 약한 것으로 검토되었다. 따라서 지붕구조는 고정하중이 적고 풍하중을 제외한 구조시스템으로 기인되는 추가 수평력이 발생되지 않는 구조형식으로 트러스돔(Truss Dome) 구조가 선정되었다.



〈그림 3〉 트러스돔 하중흐름도

지붕마감은 외관이 미려하고 관람석에 그늘을 주면서 자연광이 재료를 투과하여 아늑한 느낌을 줄 수 있는 반투명의 테프론(PTFE) 막으로 설계하였다. 또한 돔 중앙부에는 자연적 환기시스템에 의한 쾌적한 관람환경이 조성되도록 국내최초로 개폐지붕(Retractable Opening)설치하여 전동장치에 의해서 동시 개폐가 가능토록 하였다.

2.3 일반사항

1) 설계기준

- 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙(1999)
- 건축물 하중 기준 (2000)
- 강구조 계산규준 및 동해설(1983)
- AISC ADS 1989
- AWS D1.1

2) 사용재료의 강도

- 파이프: KS D 3515 STK400 ($F_y=2,400 \text{ kgf/cm}^2$)
- Plate: KSD 3503 SS400 ($F_y=2,400 \text{ kgf/cm}^2$)

2.4 설계하중

스팬(Span)이 장대한 대 경간 구조물은 적은 설계하중 패턴 변화에도 구조물 거동에 많은 변화가 나타난다. 따라서 적절한 설계하중 산정은 구조물 안정성 확보에 가장 중요한 요소로 작용하게 된다. 지붕 돔 설계하중에는 고정하중을 기본으로 풍하중, 적설하중, 온도하중이 중요 요소로 고려되었으며, 특히 적설하중은 균형하중과 바람에 의한 불균형 패턴하중을 분리 적용하여 구조물의 비대칭거동에 대한 안정성이 확보되도록 하였다.

1) 고정하중

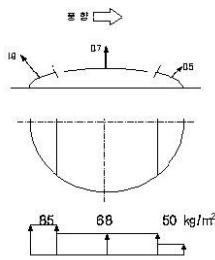
트러스 및 개폐지붕골조 자중과 기타 마감재료, 스피커, 조명설비 등의 하중을 적용하였다. 개폐지붕은 충격계수를 고려하여 이동시 충격하중을 반영하였으며, 압축링 부위에는 향후 경기장내 행사를 고려하여 시설물 부착에 따른 추가하중을 고려하였다.

2) 적재하중

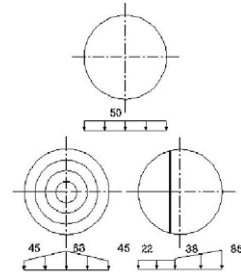
지붕막 또는 개폐지붕의 시설관리에 필요한 최소하중으로 지붕전면에 50 kgf/m^2 적용하였다.

3) 풍하중

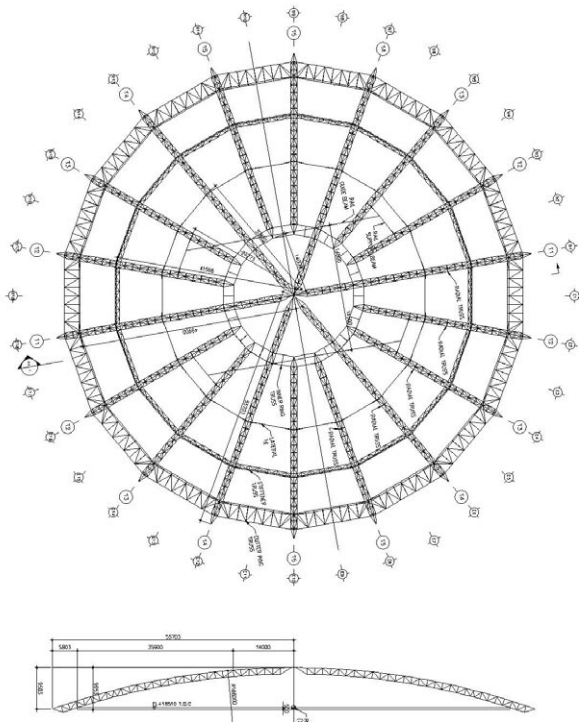
바람에 의한 부압(Wind Suction)이 중요한 하중요소로 작용하는 돔 지붕 설계 풍하중은 코드에서 규정한 곡면지붕 외압계수를 적용하여 상향 풍하중을 산정하였다. 특히 구조설계 단계에서는 동적거동에 대한 진동주기와 모드분석을 통하여 저차모드에서 풍하중 패턴과 유사한 불균형거동이 발생되지 않도록 하였다.



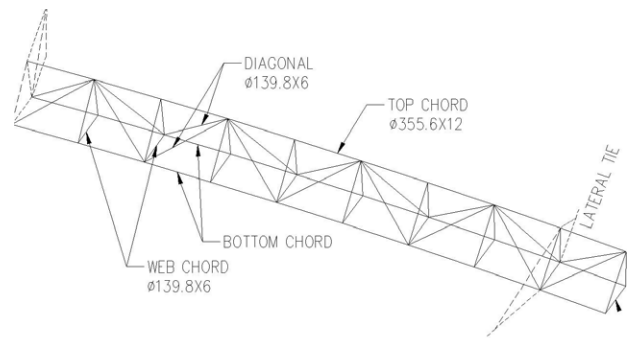
〈그림 4〉 풍하중 분포



〈그림 5〉 적설하중 분포



〈그림 6〉 트러스돔 평면과 입면



〈그림 7〉 방사트러스

4) 적설하중

지역의 최심적설하중을 기본으로 하는 균등, 불균등하중 패턴을 적용하였다.

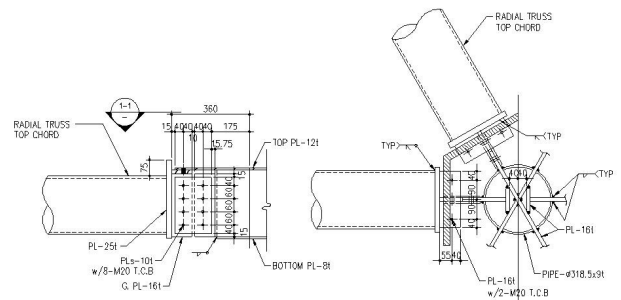
2.5 구조시스템의 특징

1) 지붕형상

지붕구조물은 반투명 테프론 인장막으로 덮인 원형의 트러스돔으로 트러스 최대직경은 110m, 외곽지점 직경 100m, 그리고 트러스 중앙부의 높이가 10.2m로 설계되어 있으며, 테프론 막으로 덮인 전체면적은 약13,740m²에 이른다. 돔 곡률은 설계최대설하중 재하시 지붕막 하단부에 수직처짐에 의한 Snow Ponding이 발생하지 않도록 약15도 이상의 경사가 확보되도록 하였다. 지붕 중앙부에는 직경 30m 원형개구부를 덮는 개폐지붕을 설치하였다.

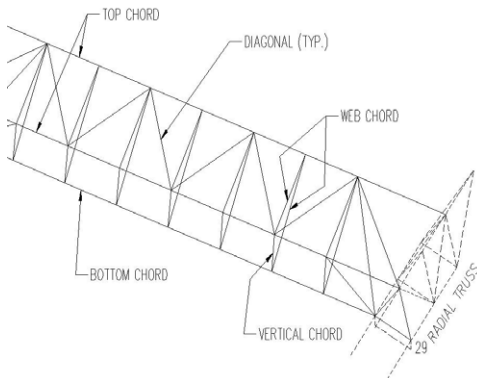
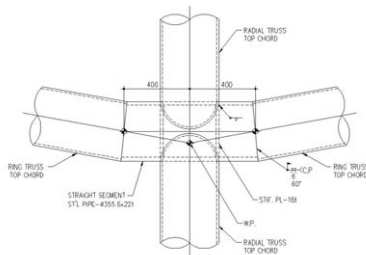
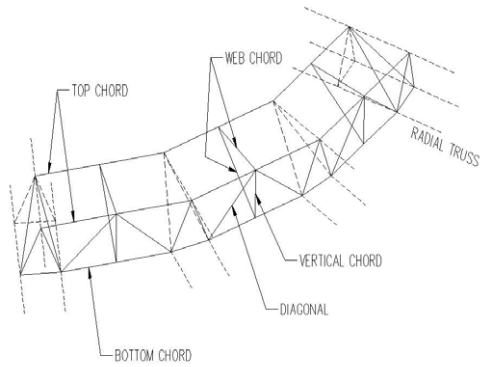
2) 트러스 구성

트러스돔은 부채꼴 평면의 테프론 인장막 패널로 연결되는 18개의 방사트러스(Radial Truss)와 2개의 링트러스(Ring truss) 및 2개의 연결트러스(Tie Truss)로 구성되며 부재는 접합이 용이하도록 방향성이 없는 원형단면의 파이프(Pipe) 부재를 사용하였다.



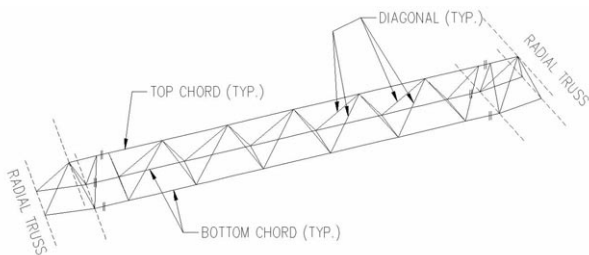
〈그림 8〉 방사트러스 정점 상세

링트러스는 중앙부와 외곽에 각각 배치되어 방사트러스의 면내축력을 압축과 인장으로 저항하면서 지붕의 안정성을 유지한다. 특히 방사트러스의 주부재가 연결되는 부위는 많은 축력으로 파이프 부재의 뚫림과 국부변형이 발생됨으로 연결부위는 접합이 단순화되도록 후판의 롤벤딩강관(Roll Bending Pipe)을 사용하고 강관 내부는 Diaphragm Plate를 보강하여 접합강성을 크게 하였다.



〈그림 9〉 링트러스

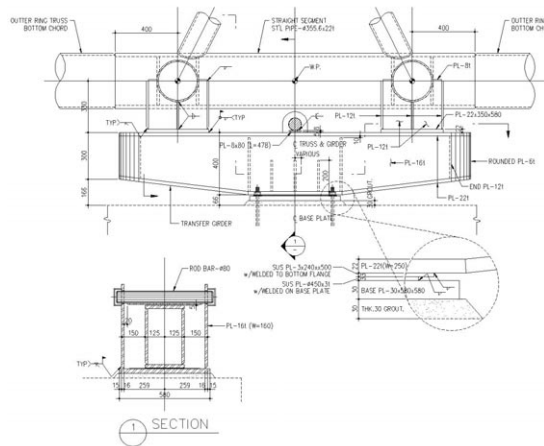
타이트트러스는 방사트러스 경간의 3등분 지점에 각각 원주방향으로 배치하며, 방사트러스의 횡변위를 구속하여 압축강성을 크게한다. 특히 하부에 위치한 타이트러스(Stiffener Truss)는 상,하로 연속되는 지붕막을 고정시켜 막의 처짐과 바람에 의한 떨림(Fluttering)현상을 감소시킨다.



〈그림 10〉 타이트러스

3) 트러스돔 주각

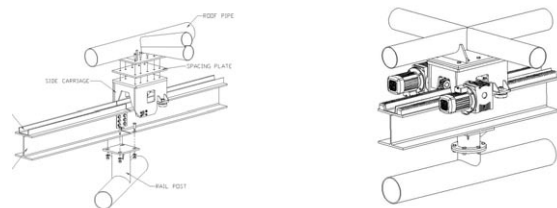
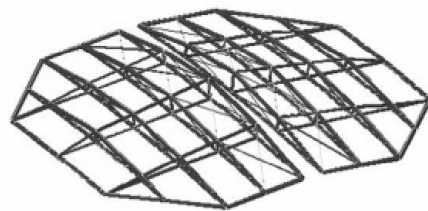
돔트러스는 인장링트러스 하단부재 교차점에 박스형태의 주각을 설치하여 콘크리트 기둥 상단에 지지되도록 하였다. 주각과 지판에는 각각 3mm 두께의 스테인레스(Stainless) 강판을 부착하여 마찰력을 적게 하면서 동시에 전체구조물의 수평안전성이 유지되도록 하였다. 테프론 패드(Teflon Pad)는 마찰계수가 매우 적어 수평력을 최소화 할 수 있으나 트러스 시공도중 안전에 위해를 가하는 문제 발생이 예상되어 사용하지 않았다. 지판 양단부에는 U형의 Clamping Bar를 설치하여 하중에 의한 부압 발생시 저항토록 하였다.



〈그림 11〉 트러스 주각 상세

4) 개폐지붕(Retractable Opening)

개폐지붕은 하부에 15m 간격으로 일정 곡률로 제작 설치된 3개의 레일거더에 지지되도록 하였다. 특히 개폐지붕 구조물은 유연성이 확보되도록 설계하여 트러스돔의 처짐과 작은 불균형 거동 발생시에도 레일거더에 밀착되어 운행장애가 야기되지 않도록 하였다.



〈그림 12〉 개폐지붕 구조모델

3. 구조설계

3.1 구조해석

설계하중은 해석의 정확도를 높이기 위하여 별도의 지붕막 해석결과를 직접 입력하였다. 지점의 경계조건은 모든 수평변위는 허용하고 수직변위는 구속하여 부재응력이 최대가 되도록 하였다. 타이트리스(Tie & Stiffener Truss)는 부재 단부는 축력에 대한 경계조건을 풀어 방사트리스의 횡변위가 구속되지 않도록 하였다.

3.2 부재설계

지붕구조물은 대부분 원형강관(Pipe Section)으로 되어있으며 부재설계는 탄성설계법 적용하였다. 지붕돔은 일반구조물과 달리 구조적 거동이 풍하중과 설하중에 장기적으로 지배됨과 동시에 민감하게 반응함으로 부재설계시 모든 설계하중조합에 대해서 허용응력 중대라는 단기적인 효과를 고려하지 않았다.

불균등 적설하중이 부재설계에 가장 많은 영향을 미쳤으나 발생빈도는 매우 희박한 것으로 판단된다. 원형강관은 일반형강(H형부재)과 달리 내부가 밀실하지 않아 접합강성이 취약한 결점이 있다. 따라서 국부적인 응력에 대한 부재 안정성이 확보되도록, 특히 축력이 큰 접합부위에는 모재를 관통하는 Plate를 삽입하는 대신에 절점부위의 강관을 두껍게 하고 동시에 내부에 Diaphragm Plate를 삽입하여 국부변형과 국부응력이 발생하지 않도록 하였다.

4. 시공 계획(Election Planning)

4.1 일반사항

시공계획은 가설(Bent)구조물의 제작/설치, 장비운용계획과 현장조립 상황을 기본으로 검토하였다. 시공정도 확보를 위해서는 추가적으로 현장설치 누적오차와 최종폐합부재의 공차흡수 방안이 세부적으로 검토되어야 한다. 완성 단계시 방사형트리스의 부재응력은 주로 트리스 굽힘보다는 면내 압축에 의해 작용하게 되나 시공단계에서는 트리스 양단부의 수평변위 허용으로 단순보 거동을 하게 되며 또한 국부적으로는 단부에 위치한 사재에 많은 전단력이 발생하게 된다. 그러므로 공사 각 단계별로 부재의 설치과정을 분석하여 부재응력 변화에 따른 안전성을 확보한다.

4.2 지붕구조물 세우기 계획(Election Planning)

1) 가설지주(Bent) 설치

- 가. 경기장 바닥 다짐작업 실시
- 나. 가설지주 하부 지판 설치

- 다. 가설지주 설치 및 상단부 스쿠루 잭 설치
- 2) 지붕트리스 설치

가. 트리스 지조립:

공장에서 제작 운반된 소조립 트리스 및 단품 부재는 경기장 외곽 지조립장으로 운반, 전체조립을 실시.

나. 트리스 설치:

지조립조립이 완성된 방사트리스는 경기장내로 운반, 벤트구조물에 가설치한다. 단계별로 링 및 타이트리스도 연속적으로 가조립을 실시.

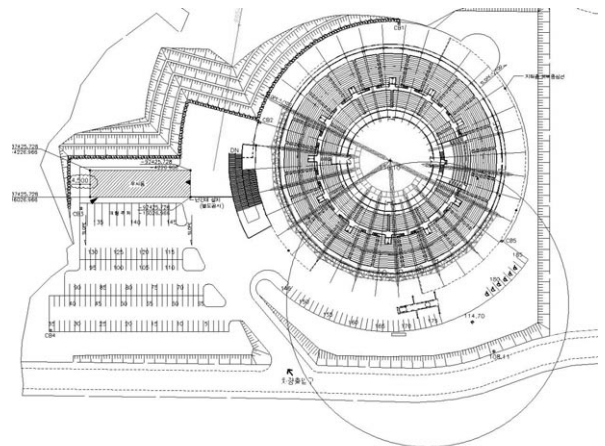
3) 지붕트리스 폐합용접

전체트리스의 가조립 완성후에는 링트리스의 용접을 실시.

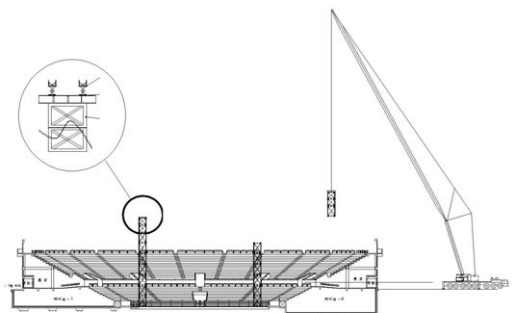
4) 벤트구조물 해체 및 좌표관리

5) 개폐지붕 트리스 설치

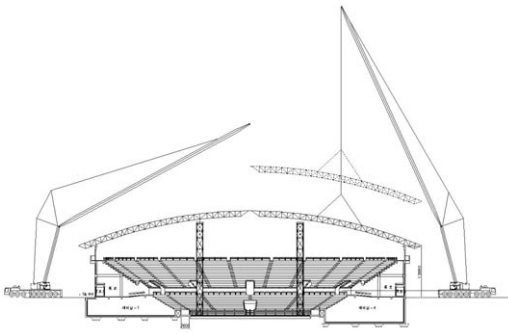
4.3 지붕구조물 설치과정도



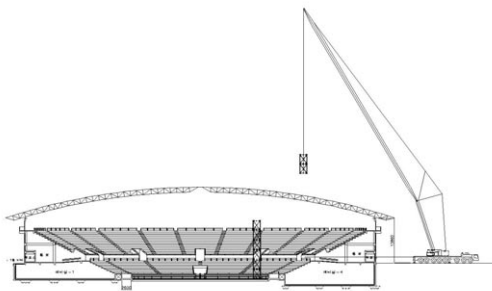
〈그림 13〉 양중계획



〈그림 14〉 가설지주 설치



〈그림 15〉 트리스 설치



〈그림 16〉 가설지주 해체

5. 현장시공사진



(a) 단품가공



(b) 입체조립



(c) 현장 지조립



(d) 가설지주 설치



(e) 방사트리스 양중



(f) 방사트리스 안착 점검



(g) 트리스 폐합 용접



(h) 트리스돔 설치 전경

6. 맺으면서

1965년 세계 최초의 돔구장으로 알려진 휴스턴의 에스트로돔 구장이 건설된 이후 미국과 일본에 14개에 달하는 많은 돔구장이 건설되었다. 일부 구장은 지붕을 여닫을 수 있는 개폐식 구장으로 설계되어 많은 관광객들이 방문하는 관광명소가 되고 있다.

우리나라에도 최근 설계가 마무리되어 공사가 활발히 진행되고 있는 광명시 경륜돔 경기장의 건설과 국내 최초로 지붕돔 일부가 개폐식으로 설계되어 준공 일을 앞두고 있는 청도소싸움경기장 건설은 향후 유사 프로젝트의 건설 및 지역경제발전에 많은 기여가 있을 것으로 기대된다.