

광명 경륜 경기장 돔 구조설계

Structural Design of Domed Roof

김 중 수* 김 동 환** 박형석*** 김 용 남**** 신 창 훈*****
Kim, Jong-Soo Kim, Dong Hwan Park, Hyung Suk Kim, Yong-Nam Shin, Chang-Hoon

Abstract

광명시 경륜 경기장은 국민 체육진흥공단에서 턴키(Turn key)공사로 발주하였고, CS구조 + 공간건축 + 대우건설, 삼성건설, 태영건설의 제출안이 당선되어 현재 시공중에 있다. 경기장의 저층부는 PC로 설계되었고, 지붕은 철골 트러스를 사용한 Dome 형상으로 이루어져 있다. 돔 지붕의 개념은 지붕에 물을 부었을 때 가장 흘러가기 쉬운 방향으로 트러스를 배치하여 유연한 힘의 흐름을 유도하는 것이다. 143.6m(폭) × 183.5m(길이) × 21m(높이)의 지붕엔 지붕의 개념인 Flow Truss를 물이 흐르는 방향의 방사형으로 배치하고, 내부에 압축링(Compression Ring Truss)과 외부에 인장링(Tension Ring Truss)를 설치하여 힘의 흐름을 단순화시켰고, 실내에서 보기에 플로우 트러스의 간격을 넓게 유지함으로써 개방감을 극대화시켰다. 또한 Flow Truss는 동일한 곡률과 길이로 설계하여 표준화시킴으로써 시공성과 경제성을 동시에 만족토록 하였다. 현재 저층부 시공은 거의 완료된 상황이고, 곧 지붕을 설치할 예정이다. 본 고에서는 돔 지붕의 형성 개념과 설계 과정을 살펴보고, 접합상세 등의 해결에 대해 살펴보겠다.

Key Words : 돔(Dome), Flow Truss, 인장링(Tension Ring Truss), 압축링(Compression Ring Truss)

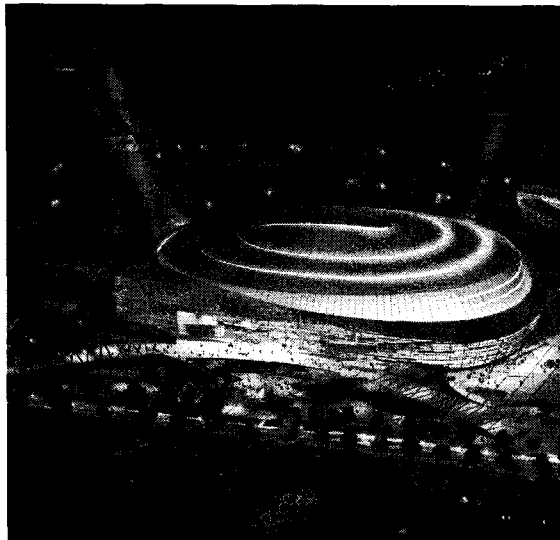


그림 1 광명시 경륜돔 조감

1. 서 론

광명시 경륜장은 국민 체육진흥공단에서 턴키(Turn-Key)공사로 발주하였고, 2002년 4월부터 6월말까지 약 75일간 일정으로 기본설계를 제출하여 CS구조 + 공간건축 + 대우·삼성건설 안이 당선되었다.

돔 지붕의 전체 규모는 143.6M(폭)×183.5M(길이)×21M(높이) 철골 트러스 구조이다. 지붕구조의 특징은 자전거의 바퀴에서 평면적인 이미지를 찾아 이를 돔으로 입체화시켰다. 힘의 흐름을 물 흐르듯 유도하여 Flow Truss를 만들고, 지붕 내부에 압축링과 지붕 외부에 인장링을 설치하여, 힘의 흐름을 단순화 하여 하부구조에 전달시켰다. 곡선형 천장면을 이루는 부재의 Shell Action을 유도하고, Flow Truss의 개소를 최소화하여 개방감을 극대화 시켰으며, Flow Truss는 동일한 곡률과 길이로 설계하여 표준화시킴으로써 시공성과 경제성을 동시에 만족토록 하였다.

현재 저층부 시공은 거의 완료된 상황이고, 곧 지붕

* (주) C·S구조엔지니어링 대표이사 건축구조 기술사
** (주) C·S구조엔지니어링 이사 건축구조 기술사
*** (주) C·S구조엔지니어링 실장
**** (주) C·S구조엔지니어링 실장 건축구조 기술사
***** (주) C·S구조엔지니어링 과장

을 설치할 예정이다. 본 고에서는 돔 지붕의 형성 개념과 설계 과정을 살펴보고, 접합상세 등의 해결에 대해 살펴보겠다.

2. 지붕형상결정

돔 형상의 구조물을 구현하는데 있어 초기에 가능한 시스템들을 분석하는 것이 아주 중요하다고 할 수 있다. 이 초기의 시스템들의 분석결과에 의해 지붕의 형상이 결정된다고 해도 과언이 아닌 것이다. 또한 초기 시스템들을 분석하는 과정에서 건축설계자들과 시공자, 그리고 구조설계자들이 한자리에 모여 서로의 의견을 공감하는 자리가 꼭 필요하다.

본 프로젝트는 앞서도 언급했듯이 턴키에 의한 초기 설계 진행이었기 때문에 이러한 의견 공감의 자리는 자연스럽게 형성될 수 있었고, 여러 가지 대안들에 대해서 각자의 의견을 충분히 토론할 수 있는 시간이 있었던 것이 중요했었다.

우선 초기에 여러 가지 구조시스템들의 특징들을 비교하여 지붕 구조형식에 대한 접근 방법을 결정하였고, 몇 가지 대안들에 대해서 실제 적용될 구조물로 형상화시키는 작업들이 진행되었다. 최종적으로 서로 한자리에 모여앉아 최적의 지붕구조시스템을 선정하였다.

그림 4는 지붕 구조 시스템 선정에 대한 대안들과의 비교를 나타낸 것으로 초기 구조계획의 대부분이었다고 할 만큼 중요한 단계라고 할 수 있다.

3. 지붕 구조 시스템

3.1 지붕 구조의 개요

본 건물에 사용된 지붕 구조시스템은 앞서 설명한 과정을 통하여 FLOW TRUSS DOME으로 결정되었다. 이 시스템은 외부하중에 대해 내부 압축링 트러스와 방사형으로 형성된 Flow Truss, 그리고 Flow Shell의 Shell Action으로 저항하고, 이렇게 외부로 펼쳐나가는 하중에 대해 인장링 트러스가 지지하여 돔을 형성하는 트러스의 강성으로 전체 지붕이 지지되는 시스템이다. 이 시스템은 인장링 트러스를 중

력방향으로만 지지시키고 횡방향에 대해서는 인장링 트러스의 강성에 기인한 만큼의 횡변위를 허용한다. 그래서 중력 방향의 부가하중들(온도하중, 풍하중, 적재하중 등)에 대해 변위가 허용되는 시스템이다. (그림 2,3,4)

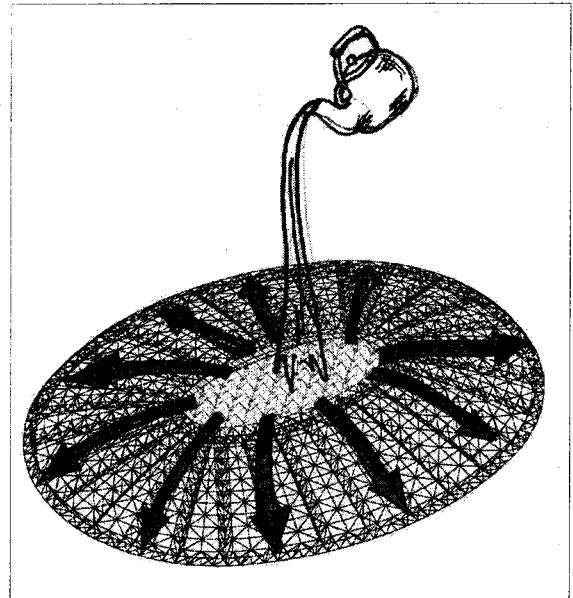


그림 2 지붕 구조 형상 개념

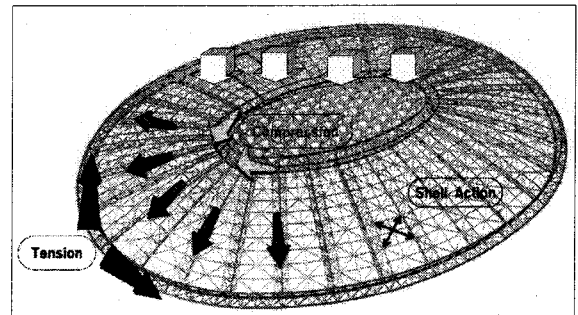
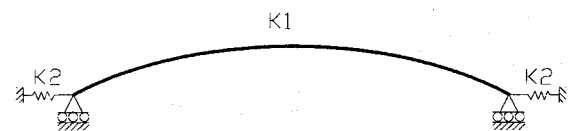


그림 3 지붕의 하중 저항 매커니즘



K1 : Roof Truss Stiffness
K2 : Tension Ring Truss Stiffness

그림 4 구조시스템 개념도

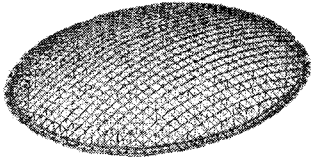
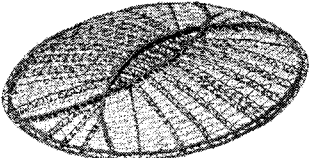
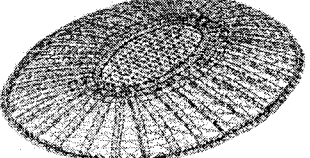

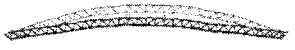
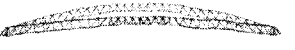
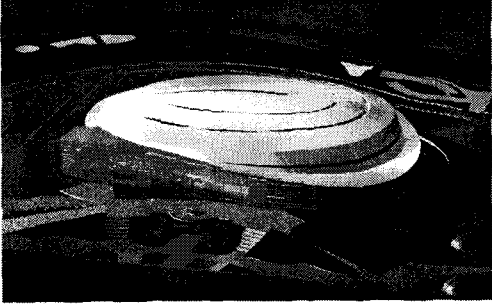
비 교	Double Layer Grid Dome	Super Truss Dome	Flow Truss Dome
개 요	<ul style="list-style-type: none"> 상부 격자와 하부 격자를 주요 부재로 하며, 상 하 층을 포스트와 사재를 이용하여 구성한 시스템 다른 각도의 레이어를 형성하여 형상의 단조로움과 복잡함을 최대한 배제 	<ul style="list-style-type: none"> 대형 아치를 구조물 전체에 관통시키고, 힘의 흐름에 따라 트러스를 배치하는 시스템 힘의 전달 관계가 직관적이며, 인장링 트러스와 아치의 접합부에 국부적인 응력이 집중될 우려가 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 하부에 인장링 상부의 압축 링을 형성한 후, 이를 Flow Truss로 연결하고 대각부재로 Shell Action을 유도하여 트러스의 간격을 확장시키는 시스템
건축미의 표현	<ul style="list-style-type: none"> 유선형 돔의 이미지 표현 내부에서 전체 그리드가 모두 보여 복잡해 보일 수 있음 	<ul style="list-style-type: none"> 유선형 돔의 이미지 표현 내부에서 강한 시각적 집중력을 가짐 	<ul style="list-style-type: none"> 유선형 돔의 이미지 표현 내부에서 트러스 하현재의 생략으로 인한 공간감 표현
시공성 경제성	<ul style="list-style-type: none"> 연결 절점 각각의 위치를 3차원으로 시공해야하므로, 고소 용접이 불가피하여 시공성, 경제성 저하 공간상 부재간의 접합 정밀성 확보가 품질 좌우 	<ul style="list-style-type: none"> Super Truss에 부재력 집중화로 인한 외부 인장링 트러스에 과도한 응력이 집중 Super Truss와 인장링 트러스의 부재크기가 과도하게 커져야 함 	<ul style="list-style-type: none"> 힘의 흐름에 따른 적절한 Flow Truss의 분배 장 단변의 Flow Truss가 동일한 곡률을 가지게 함으로써 부재의 규격화를 통해 균일한 시공 품질 확보 가능 시공성, 경제성이 뛰어남
투시도			
구조해석			
구조 시스템 선정	<ul style="list-style-type: none"> 구조설계의 기본방침, 건축적 요구의 수용, 시공성, 경제성 등의 평가를 통해 Flow Truss Dome을 지붕 구조 시스템으로 선정함 곡선형 천장을 Flow Shell에 표현 		

그림 5 지붕 구조의 선정

3.2 지붕 구조의 형성

전체 지붕은 방사형 Flow Truss를 주 구조체로 하는 타원형상으로 구성되어 있다. 지붕은 3/180의 경사를 가지고 있는데, 이 경사각을 고려하여 구조체

를 형성시키게 되면, 제작과 시공이 어렵게 된다. 그래서 구조 부재의 제작을 위해서 대칭성이 확보되는 Local Axis를 설정하였고, 이 축을 회전시켜 최종 형상이 되도록 계획하였다. (그림 6, 7)

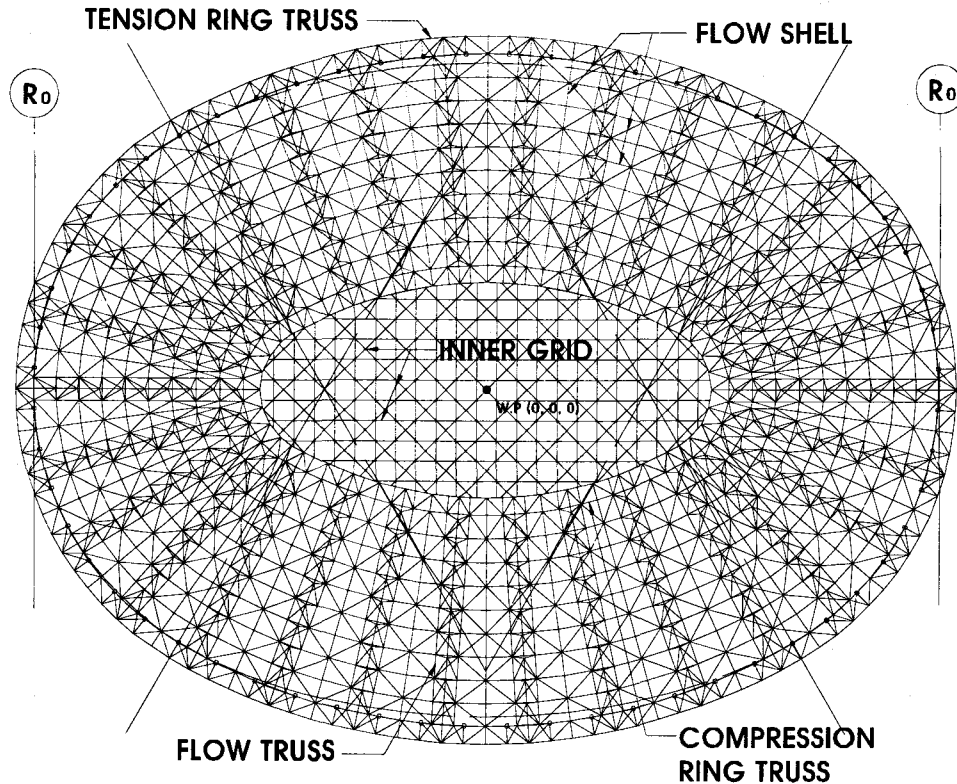


그림 6 지붕구조의 형성 (평면)

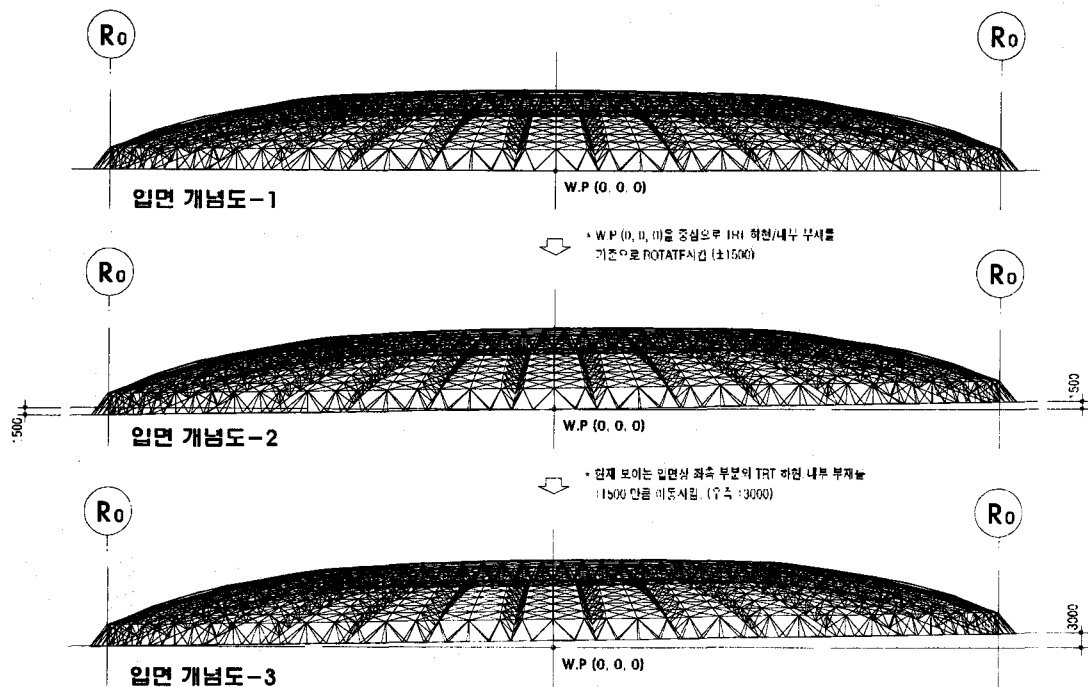


그림 7 지붕구조의 형성 (입면)

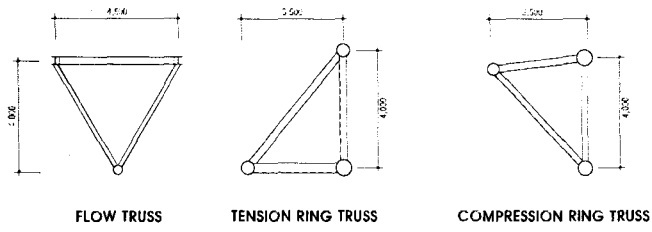


그림 8 주요 구조부재 단면 형상

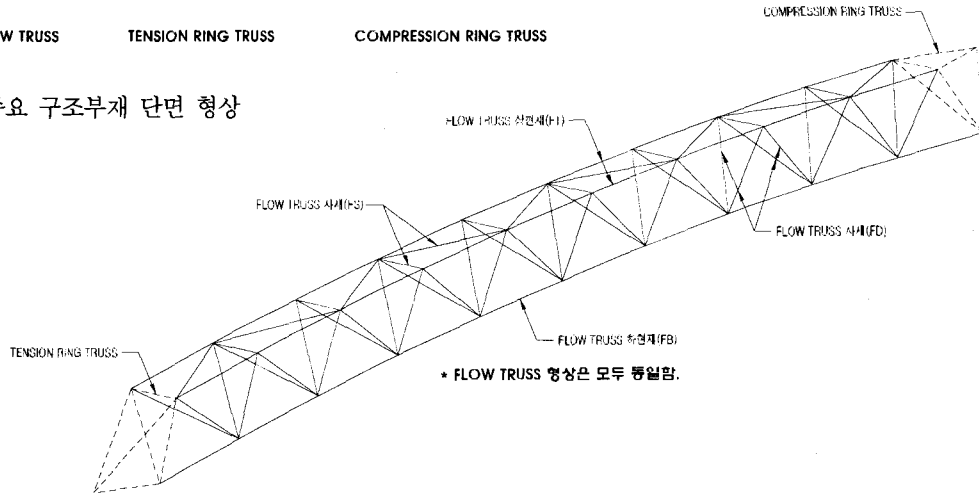


그림 9 Flow Truss 형상도

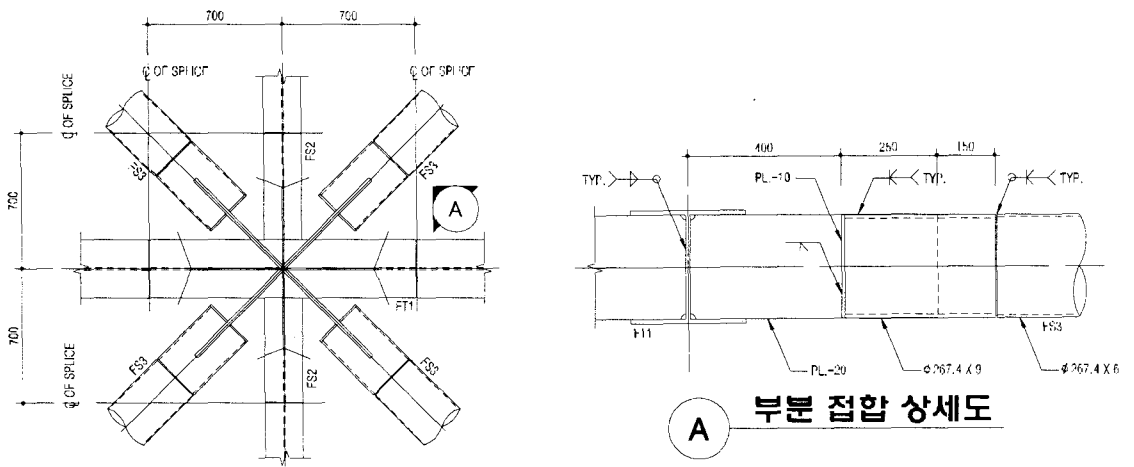


그림 10 Flow Truss 상현재 접합상세

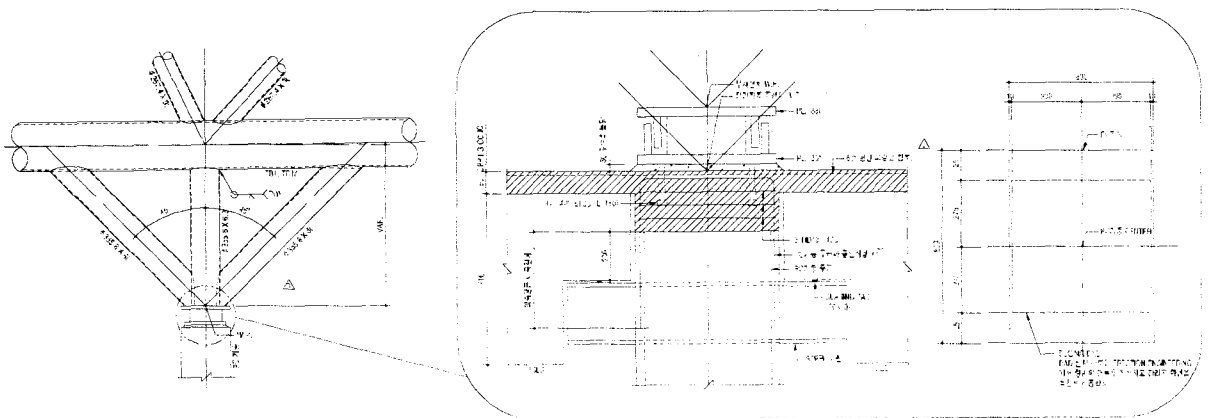


그림 11 탄성받침 상세

지붕 구조는 크게 Flow Truss, 압축링 트러스 (Compression Ring Truss), 인장링 트러스(Tension Ring Truss), Flow Shell, Inner Grid 등으로 형성되어 있다. (그림 6) 이 중에서 Flow Truss는 구조 시스템의 중심에 있는 부재로서 역삼각형의 단면으로 형성되어 있다. (그림 8)

3.3 지붕 구조 적용 상세

총 30개의 방사형으로 형성된 Flow Truss의 부재 형성은 구조적인 부분뿐만 아니라, 시공성에도 영향이 큰 부재이다. 본 건물에 적용된 Flow Truss는 동일한 부재형상을 유지함으로써 부재의 제작에 대한 시공성 개선을 도모하였다. 또한 접합부를 복잡한 형상을 최대한 단순화시킴으로써 현장 조립에 대한 시공성 개선에도 주의를 기울여 설계하였다.(그림 9)

인장링 트러스 하부에는 수직 방향의 지지점을 형성시키고, 수평방향으로는 변위를 허용하기 위하여 탄성 받침을 사용하였다. (그림 11) 이 탄성받침에서 상부 인장링 트러스에 지지되는 기둥은 인장링을 따라서 가새 지지되도록 하여 전체 횡하중에 대해서 저항할 수 있도록 하였다.

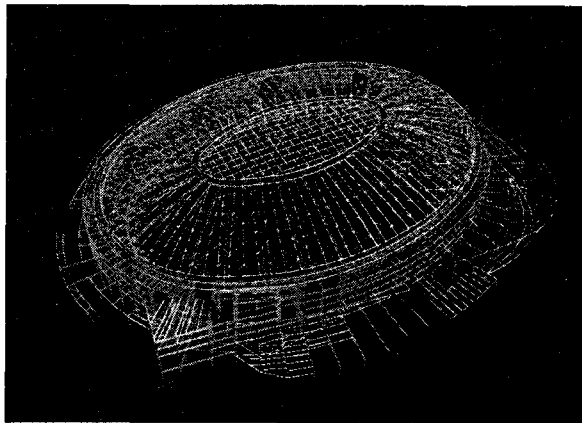


그림 12 구조해석 모델링

4. 구조해석

4.1 구조해석 개요

구조 해석은 상용화되어 있는 범용 3차원 유한요소해석 프로그램인 MIDAS GEN을 사용하여 수행하

였다.

전체 구조물을 모형화하는데 있어서 정확한 형태를 3D-CAD에 의하여 형상화한 후 이것을 구조해석 파일에서 읽어 들여 적용함으로써 오차발생을 최소화하였고, 모델링 시간을 단축하였다.

지붕 부재설계를 위해서 지붕을 이루는 모든 구조 요소를 모형화하였고, 지붕에 적용되어지는 하중을 요소별로 실제 위치에 집중하중 또는 부재의 직접 작용하는 선하중으로 입력함으로써 실제 거동에 대한 예측에 접근할 수 있도록 하였다.

지붕을 지지하는 받침은 탄성받침으로 외부로 향하는 변위를 허용하여야 하므로 이와 같은 조건을 모델링에 형상화하였다.

4.2 적용하중

구조설계의 진행에 있어서 하중의 산정은 전체 구조물의 거동을 예측하는데 있어 중요한 요소로 인식되어진다. 본 구조물은 돔형상의 구조물로서 중력방향의 하중과 더불어 온도, 상하향으로 작용하는 풍하중, 적설하중 등이 적용되었고, 특히 풍하중의 경우는 풍동실험에 의한 하중을 함께 적용하였다.

1) 고정하중과 적재하중

지붕에 적용한 고정하중은 지붕을 형성하는 트러스 부재의 자중과 Purlin, 그리고 스피커, 조명, 멀티팬, Cat Walk 등의 실제 존재 고정하중을 적용하였다. 이러한 국부적으로 설치되는 부분하중들에 대해서는 집중하중과 Line 하중으로 해석에 적용하였다.

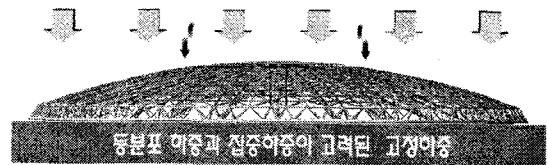


그림 13 고정하중의 적용

적재하중의 경우는 일반인의 접근이 곤란하나 보수 및 시설관리를 위한 접근이 가능한 지붕구조물로서 구배가 있는 구조물에 대한 적재하중을 적용하였다.

2) 적설하중

본 지역의 최고 적설량을 고려하여 하중을 산정하였고, 지붕 전면에 균일하게 적용되었을때의 경우 뿐만 아니라 불균등하게 적용되어지는 경우도 고려하여 구조해석에 적용하였다.

적설하중은 역사적으로 돔 구조물의 붕괴를 초래한 경우가 많아 적설 시뮬레이션을 통하여 적정성이 평가되었다.

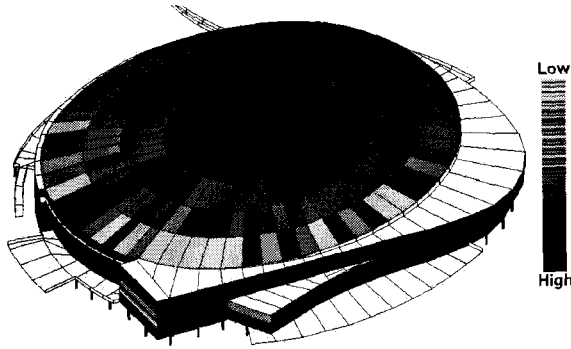


그림 14 적설 분포 시뮬레이션

3) 풍하중

본 경기장의 경우는 형태적으로 횡방향 하중보다는 상하 방향의 하중에 의해 지배되는 구조물이다. 그렇기 때문에 풍하중의 경우도 상 하향 하중에 대해서 고려되었다. 또한 풍동실험을 실시하여 실제 발생가능한 하중을 적용하고자 하였다.

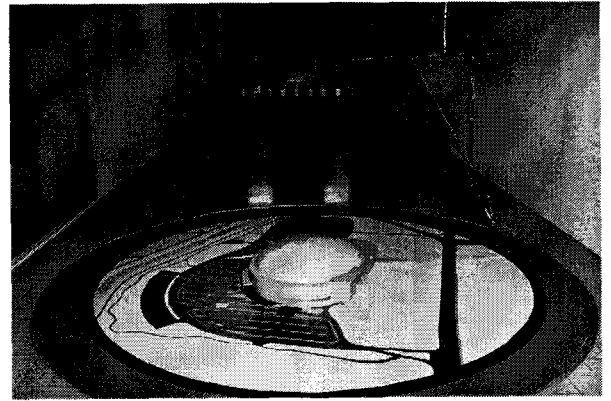


그림 15 풍동실험 전경

■ 구조해석에서 반영한 지붕 구조물의 설치 단계

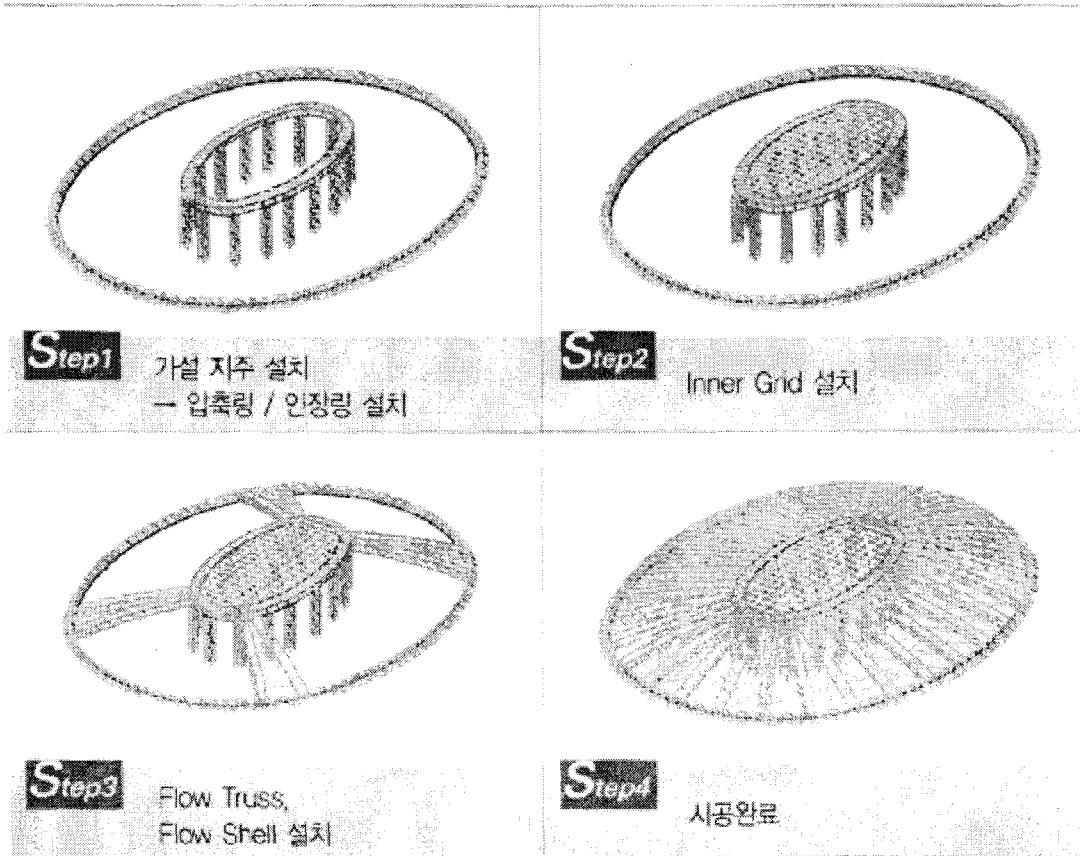


그림 16 지붕 설치 시공 단계 계획

4.3 시공단계를 고려한 구조해석

하부에서 상부로 순차적으로 설치되는 일반적인 구조물의 경우와는 달리 본 건물의 경우는 지붕에 대해 가설 지지대를 설치한 후 단부에 지지점을 설치하고, 가설 지지대를 제거함으로써 자중에 의한 변형을 유도하여 추후의 구조물의 형성에 외부 하중에 의한 변위만을 허용할 수 있도록 계획되었다.(그림 16)

그래서 구조해석에서 아래와 같은 방법을 적용하여 시공단계를 고려한 구조해석을 진행하였다.

- 1) 구조물 형성과 임시 가설지지 설치 후 자중에 의한 변형 유도
- 2) 자중에 의한 변형이 완료된 후 소정의 위치에 기둥 설치

이런 영향을 고려하지 않고 전체 구조물을 동시에 모델링하여 해석할 경우 등의 자중에 의한 변형에 대해 단부 기둥의 구속 정도가 커 실제로는 발생하지 않는 부가 응력이 기둥에 발생하게 된다. 특히 지붕을 지지하는 기둥의 하단에는 탄성패드가 설치되므로 기둥의 구속 정도를 시공 순서에 따라 달리 해석해야만 실제 조건에 부합하는 해석이 될 수 있다.

그래서 지붕의 해석 파일을 두가지로 나누어 자중에 의한 기둥에 작용하는 응력을 제거하고 설계를 진행하였다.

4.4 강관 접합부 상세 해석

본 구조물의 지붕은 철골강관으로 형성된 트러스가 주요 부재로 형성되어 있다. 각각의 트러스들은 여러개의 강관과 형강 부재들이 접합부를 형성하고 있고, 강관과 강관은 용접을 기본으로 하는 모멘트 접합으로 형성되어 있다.

트러스를 형성하는 Main 부재들의 접합부는 국부적으로 큰 응력이 발생할 수 있는 부분이다. 주 부재의 단면 성능에 대해서 발생하는 부재력에 저항하는 것은 쉽게 예측할 수 있으나, 이러한 국부적인 응력에 대해서는 거동을 예측하기가 쉽지는 않다.

그래서 이 부분은 FEM 상세 해석을 수행하여 국부적인 응력 집중에 의한 영향을 검토하고, 국부적

인 응력 초과에 대해 부분을 보강하는 상세를 적용하였다.

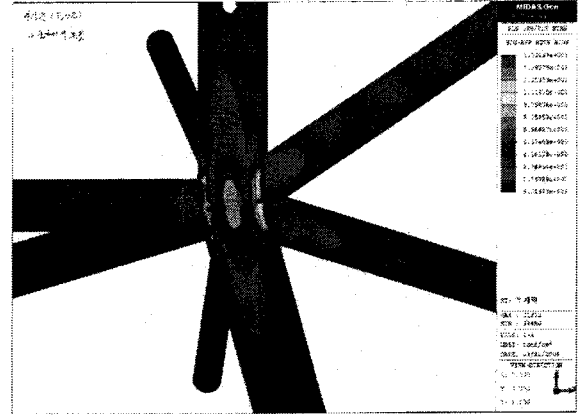


그림 17 강관 접합부 상세 해석(보강전)

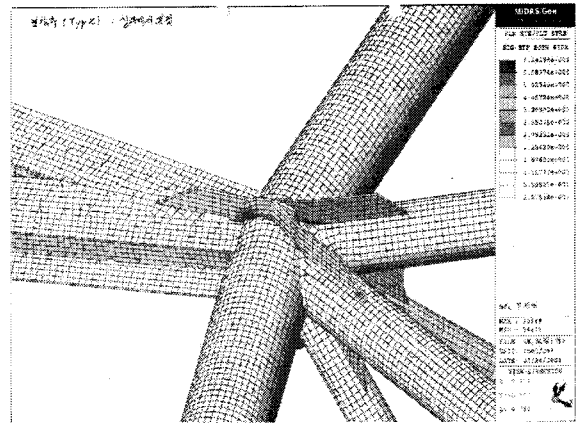


그림 18 강관 접합부 상세 해석(보강후)

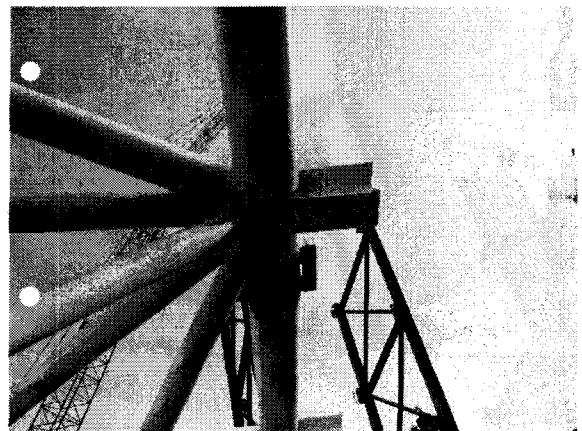


그림 19 강관 접합부 시공

4.5 돔 구조물의 Snapping 검토

기본적으로 돔 구조물은 형태 저항형 구조물로서 가볍고 얇게 대공간을 형성시키는 것이 가능하다. 본 경륜 경기장의 지붕도 돔 구조물로서 면외 방향 외력을 면내력으로 저항 가능케 한 Shell 형 구조이기 때문에 응력 및 변형에 대한 해석과 더불어 비선형 불안정 Snapping 검토가 필수적이라고 할 수 있다.

얇은 쉘형 돔은 Snap-through라는 현상을 일으키기 쉽고, 높은 쉘형 돔은 Bifurcation 현상을 일으키기 쉬워 두가지 경우 모두에 대한 검토가 필수적이었다. 본 경기장의 지붕은 이 두가지에 대해 검토하여 안전함을 확인하였다.

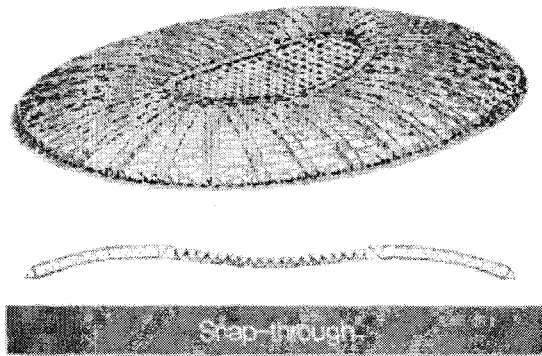


그림 20 Snap-through 검토

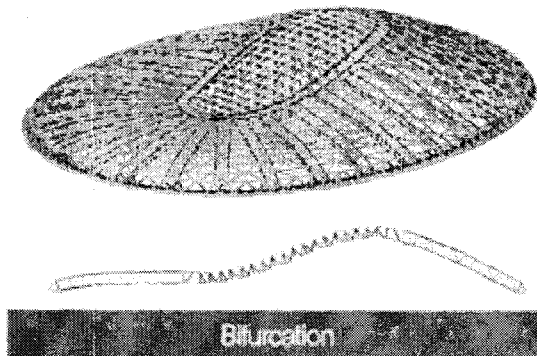


그림 21 Bifurcation 검토

5. 결 론

기본 설계를 진행하는 데 있어 턴키라는 특수한 조건에서 주어지는 짧은 시간으로 인해 건축설계자들 및 시공관계자들과 기능, 미관, 시공성, 그리고 경제성까지 고려한 설계를 진행하는 것은 쉬운 일이

아니었다. 특히 가능한 대안들에 대한 분석을 실시하여 최선의 결과를 얻어내기 위한 과정은 산고의 고통과 비견할 만 하다.

실시설계를 진행함에 이런 초기의 계획의 중요성이 다시 한번 강조된다. 실시설계에서는 기본 계획의 발전(Development)의 개념이 강하므로 기본계획에서 수립된 계획이 모든 조건들을 충분히 고려하지 못한 내용으로 진행되었다면, 실시설계에서 다시 그런 최적의 조건을 다시 찾아내야 하는 시간이 필요하다. 또한 이런 경우 설계 시간의 제한으로 인하여 비효율적인 내용임을 알고도 그냥 설계를 진행할 수도 있는 것이다.

어쨌든 돔 경기장이 일천한 국내의 환경에서 광명 경륜돔 경기장의 설계 및 시공은 신선한 충격으로 다가올 것이라는 기대다. 이 건물이 다른 구조물의 설계에 대한 좋은 보기가 되었으면 하는 바람이다.



그림 22 시공사진 1

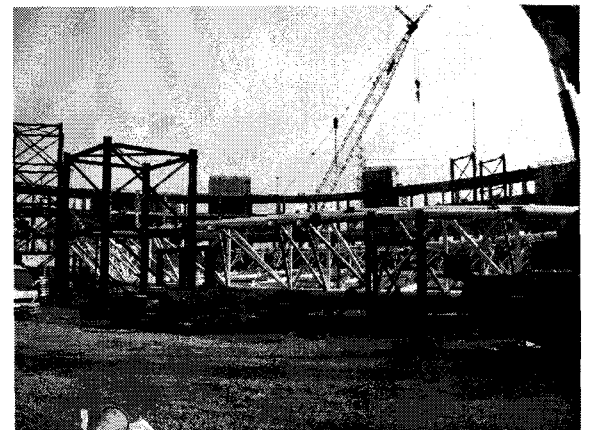


그림 23 시공사진 2