

2014 인천아시아경기대회 주경기장



정 광 랑 대표
(주)동양구조안전기술



장 정 용 이사
(주)동양구조안전기술



차 순 실 실장
(주)동양구조안전기술



윤 종 현 실장
(주)동양구조안전기술

1. 건물 개요

지난 2014년 10월 45억 아시아인의 드라마 제 17회 인천 아시아 경기대회가 성황리에 막을 내렸다. 인천아시아경기대회의 개막식과 폐막식을 개최한 주경기장을 소개하고자 한다.

6만여 명의 관중을 수용할 수 있는 인천 아시아경기대회 주경기장은 인천 서구 봉수대로 806번지에 위치하고 있다. 연면적 113,620㎡으로 지상 5층 규모의 건물로 총 61,818석의 좌석은 고정석 29,304석, 가변석 32,514석으로 구성되어 있다. 11년 6월 착공하여 14년 4월 준공된 대형 프로젝트다.

주경기장은 빛과 바람과 춤을 모티브로 디자인하였다. 바



[준공 전경]

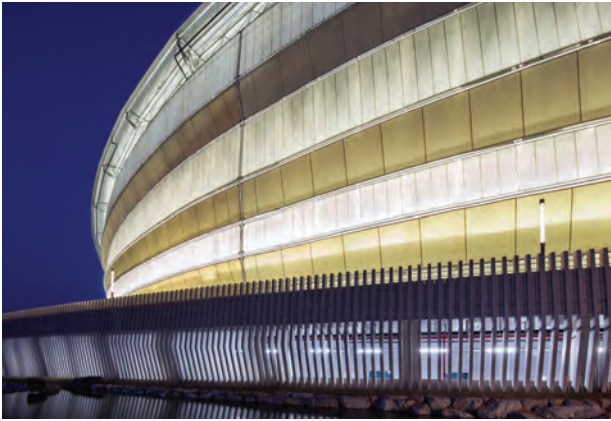


[공사 전경]



[주경기장 디자인 컨셉]

람이 물결치듯 남북으로 길게 뻗은 동서측 지붕은 하얀 장삼

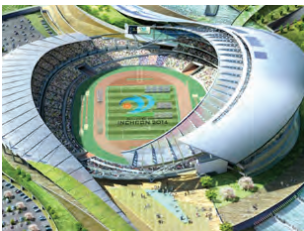


[파사드(façade)]

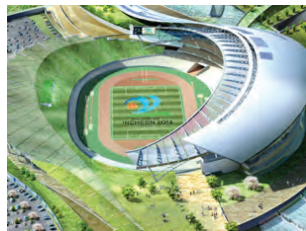
을 걸친 무원의 소맷자락을 연상시키며 정중동의 정수를 드러내고 있다. 파사드(façade)는 PTFE Membrane 이라는 신소재를 이용하여 흡사 장삼의 옷자락에 달빛이 스며들며 비치듯 은은하고 부드러운 빛을 담고 있다.

주경기장은 대회 기간에는 개회식·폐회식 및 육상 경기장 등으로 사용된다. 대회 종료 후에는 3만 2514석의 가변형 관람석을 철거하고 대형 영화관, 할인점, 아울렛, 연회장, 뷰티클리닉, 스포츠센터 등을 갖춘 복합 편의시설로 활용된다.

EVENT



LEGACY



[가변형 관람석 설치 및 철거]

2. 구조 일반 사항

2.1 설계 기준

설계에 적용된 기준을 아래 표에 정리하였다.

구분	설계방법 및 적용기준
설계 방법	철근콘크리트조: 극한강도 설계법
	철골조: 한계상태 설계법
적용 기준	건축구조설계기준 (2009)
관련 법규	건축법 및 동 시행령/시행규칙(국토해양부) 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙(국토해양부)

2.2 설계 하중

2.2.1 중력 하중

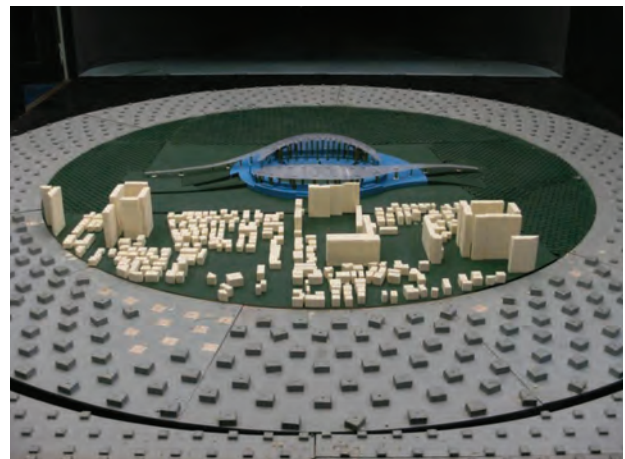
중력하중은 구조부재크기, 마감두께, 벽체 두께 등을 고려하여 산정하였으며, 아래는 대표적인 중력하중을 표로 정리하였다.

구분	고정하중	적재하중
경기장 지붕	알루미늄시트: 0.25 폴리카보네이트: 0.1 (골조자중제외)	적재하중:0.60 Cat-Walk 적입하중
관람석	10.83	4.00
경기장 운영시설	9.09	5.00
미디어 라운지	9.49	5.00

2.2.2 풍하중 및 적설하중

형태가 비정형인 대공간 구조물 또는 진동하기 쉬운 세장하고 유연한 건축물의 설계에 있어, 변동풍압이나 변동풍력의 시간적 혹은 공간적인 변동성상 및 이러한 요소들이 건축물에 미치는 영향뿐만 아니라 진동의 성상 등을 정확하게 파악하지 않으면 안 된다. 따라서 합당한 내풍설계를 위해 풍동실험 업체인 BMT Fluid Mechanics에서 적절한 풍동실험을 실시하였다.

풍동실험에 적용한 기본 풍속은 100년 재현주기 10분간 평균풍속 30 m/s를 적용하였다. 또한 인천 및 김포 기상대



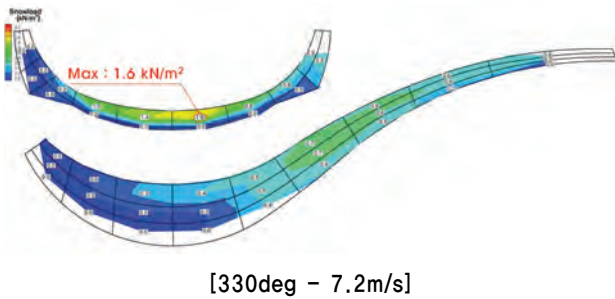
[풍동실험 전경 (1:400 scale, 반경 600m)]

로 부터 받은 계절풍 풍속을 분석 하고 몬테카를로 시뮬레이션을 통한 태풍경로를 예측하고 이 결과를 실험에 적용하였다. 위에서 언급한 풍속은 모든 방향의 바람에 대한 초과 위험성을 고려한 방향성 계수를 포함하고 있다.

풍동실험 결과 풍하중의 방향(36방향)과 시간을 고려하여 구조물에 가장 불리한 시나리오(scenario)에 대하여 데이터를 분석하였다. 지붕의 동적효과를 고려하기 위해 풍진동 검토(Study of Wind Vibration, Dynamic Effect Analysis)를 수행 하였다. 풍진동에 의한 효과는 정적 하중의 1.1배 이하로 평가되었으며, 이를 구조해석 및 설계에 반영하였다.

곡면 혹은 경사가 있는 지붕에서는 바람에 의해 불균형 적설하중이 발생 할 수 있다. 바람 또는 지붕형상에 의한 불균형 적설하중은 국부적인 하중증가로 건물에 심각한 손상을 가져 올수 있다. 더욱이, 본 프로젝트와 같이 지붕의 형상 및 경사도가 일정하지 않을 경우 일반적인 불균형 적설하중에 관한 기준을 적용하기 쉽지 않다. 때문에, 적합한 설하중을 결정하기 위해 풍동실험 업체인 영국의 BMT Fluid Mechanics 에서 설동하중 시험을 수행하였다. 이를 통해 Snow Drift Effect를 고려한 Snow Drift Simulation 거동을 분석하여 구조해석에 반영하였다.

Snow Drift Simulation 분석 결과 서측지붕 단차부위의 최대값은 1.6 kN/m²으로 대략 1.1m의 적설량에 해당한다. 이는 평지붕적설하중 0.98 kN/m²의 1.7배에 해당하는 국부 적설하중이며, 이러한 결과를 구조해석에 반영하였다.



2.2.3 지진하중

경기장 하부의 기본 지진력 저항 시스템은 건물골조 시스템의 철근콘크리트 전단벽 시스템으로 설계하였다. 지붕은 캔틸레버(Cantilever) 구조로 잉여력(Redundancy)이 없음을 감안하여 반응수정계수에 대한 안전율은 두 배로 설정하

여 탄성설계 수준(R=1.5)의 지진하중을 적용하였다.

KBC2009에는 조합골조의 경우 계수(반응수정, 초과강도, 변위증폭)는 불리한 값을 적용하도록 명시되어있다. 예외적으로 상부구조의 중량이 전체건물 중량의 10% 이하일 경우, 각기 다른 계수를 적용할 수 있다. 예외 항에 근거하여 해당건물은 지붕구조와 하부구조에 각기 다른 지진계수를 적용하였다.

구분	적용기준(KBC2009)
지역계수	0.176
지반종류	Sc
중요도계수, Ie	1.2
반응수정계수, R	하부:5.0 지붕(탄성설계적용):1.5

(KBC 2009, 0306.6.4.1 참조)

3. 구조시스템과 설계

3.1 지붕구조 시스템

경기장의 지붕구조 시스템은 건축가의 컨셉 디자인을 반영하고, 경기관람이라는 특수한 목적에 맞게 계획되었으며 마감 없이 사용자들의 시야에 노출되기 때문에 구조미를 고려하였다. 또한, 구조적 안전성과 경제성을 고려하여 구조시스템이 선정되었다.

통상적인 트러스 해석은 2D로 진행되며, 3D해석의 경우에도 정방의 트러스 이외에 특히 본 프로젝트와 같이 형상이 복잡한 경우 트러스간 상호작용뿐만 아니라 형상에 의해 힘의 흐름이 복잡하게 변화하기 때문에 3D모델을 통한 구조해석이 반드시 필요하다. 이러한 작업을 2D도면을 통해 구현하기란 쉽지 않은 일이다. 더욱이 접합부의 오류 및 구조체 혹은 비구조체간의 상호 간섭을 찾아내는 것은 불가능에 가깝다. 따라서 본 프로젝트는 설계초기단계에서부터 BIM 3D Design을 적용하여 원활한 구조해석을 진행할 수 있었다. 특히 접합부설계에 있어 BIM을 통한 검증 및 오류 수정을 통하여 시공 상세도 작성단계에서는 설계오류가 거의 발견되지 않았다.



Roof Structure Summary

East Roof Truss

Planar Truss + Mast
+ Tension bar + Back stay Column
(Truss Span 15m)

Ring Truss
(Resistance to
Progressive Collapse)

Ring Truss
(Resistance to
Progressive Collapse)

Strut Bracing
(Strut for Arch Reaction)

Prop
(Control Deflection)

West Roof Truss

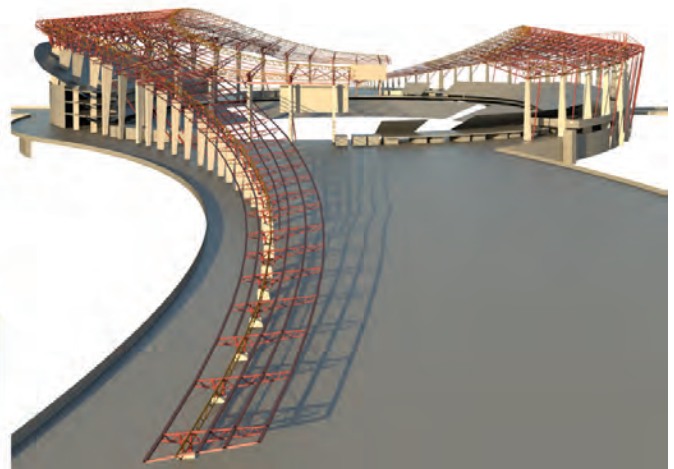
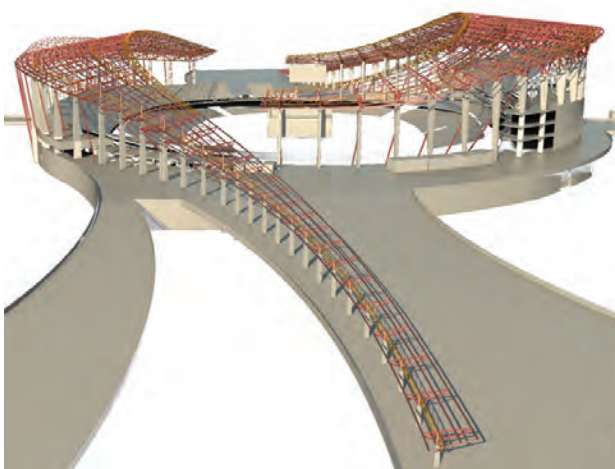
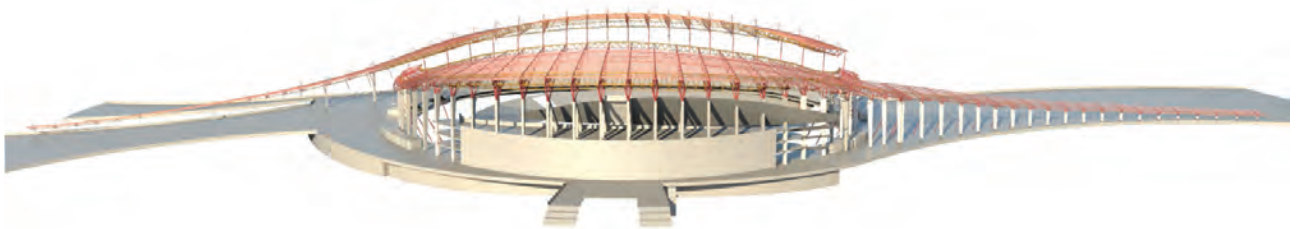
Planar Truss+Prop
(Truss Span 15m)

Raker RC Frame
(Control Deflection)

West Roof Truss

Space Truss + Raker Frame
(Truss Span 15m)

Roof Brace
(For Structure Stability)



3.1.1 지붕 주트러스 치올림(Camber) 적용 및 추가응력 검토

지붕 주트러스 처짐에 대하여 치올림을 적용하였으며, 초기 치올림은 트러스 변형형상과 일치한 값을 적용하였으나, 시공 및 제작 상 어려움이 있어 수정된 직선의 치올림 값을 적용하였다.

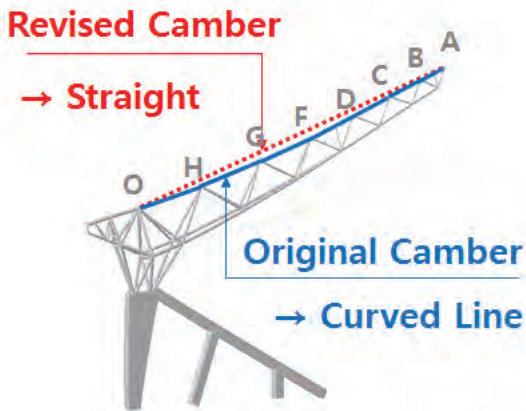
수정된 치올림 값에 따라 트러스 자중에 의한 초기변형이 발생한다. 이러한 초기변형에 의해 추가적으로 발생하는 2차응력을 고려하기 위해 자중에 의한 초기변형을 적용 후 추가되는 하중에 대하여 2차 구조해석을 수행하였으며, 이를 부재설계에 반영하였다.

3.1.2 서측지붕

서측지붕은 캔틸레버 스페이스 트러스 시스템으로 지붕의 캔틸레버 모멘트는 RC Racker 보를 지점으로 캔틸레버 모멘트를 메가 기둥으로 전달하는 시스템이다.

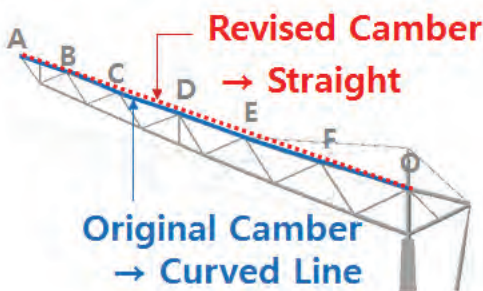
원 설계안은 공사비 절감 및 메가 기둥에 발생하는 과도한 응력 집중을 피하기 위해 인장재를 활용하여 캔틸레버의 안전성을 확보한 Front & Back Stay Bar 형식이었으나 Front Stay Bar는 관람석 쪽에 설치되어 관중의 시야를 가리고 통행에 불편을 주게 되므로 공사비가 증가 되더라도 Front Stay Bar를 제거하는 안으로 변경되었다.

Front & Back Stay Bar 제거에 따라 캔틸레버 지붕 전체 모멘트가 메가 기둥과 지붕 접합부에 집중된다. 특히 철골인 지붕트러스의 모멘트를 철근콘크리트인 메가 기둥으로 원활히 전달하기 위한 Embedded Plate의 안전성 검증은



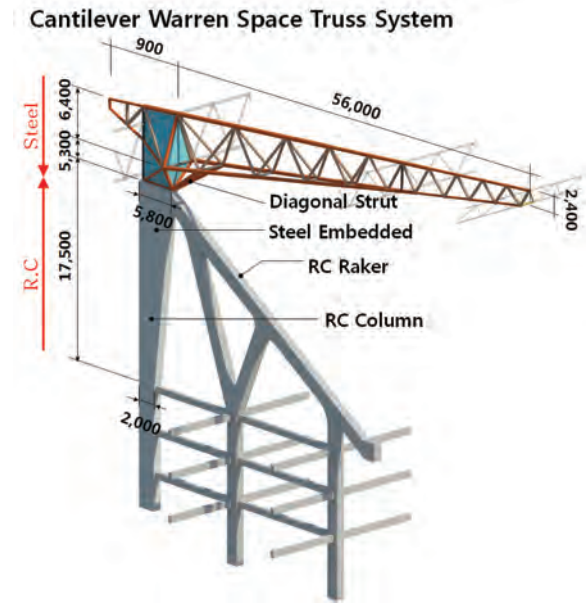
CAMBER		A	B	C	D	F	G	H	O
W MT1	origin	162	145	124	99	73	47	21	0
	revised	162	148.9	132.6	113.3	90.8	64.3	33.1	0
	차이	0	3.9	8.6	14.3	17.8	17.3	12.1	0
W MT2	origin	157	140	120	96	71	46	22	0
	revised	157	144.4	128.5	109.7	88.2	63.5	34.4	0
	차이	0	4.4	8.5	13.7	17.2	17.5	12.4	0
W MT3	origin	148	133	113	90	67	44	21	0
	revised	148	135.9	120.8	103	82.7	59.7	32.4	0
	차이	0	2.9	7.8	13	15.7	15.7	11.4	0

[서측지붕 revised camber]

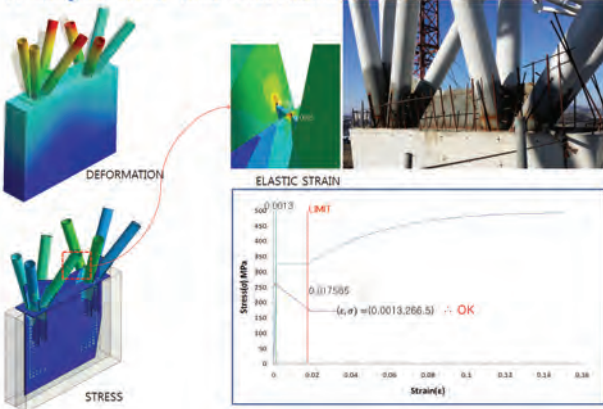


CAMBER		A	B	C	D	E	F	O
E MT1	origin	166	143	117	88	-	30	0
	straight	166	145.9	123.7	97.8	-	37.4	0
	차이	0	2.9	6.7	9.8	-	7.4	0
E MT2	origin	164	140	114	87	-	29	0
	straight	164	143.2	121.8	97.1	-	37	0
	차이	0	3.2	7.8	10.1	-	8	0
E MT3	origin	160	138	114	85	-	28	0
	straight	160	141.7	120.8	95.6	-	36.5	0
	차이	0	3.7	6.8	10.6	-	8.5	0

[동측지붕 revised camber]



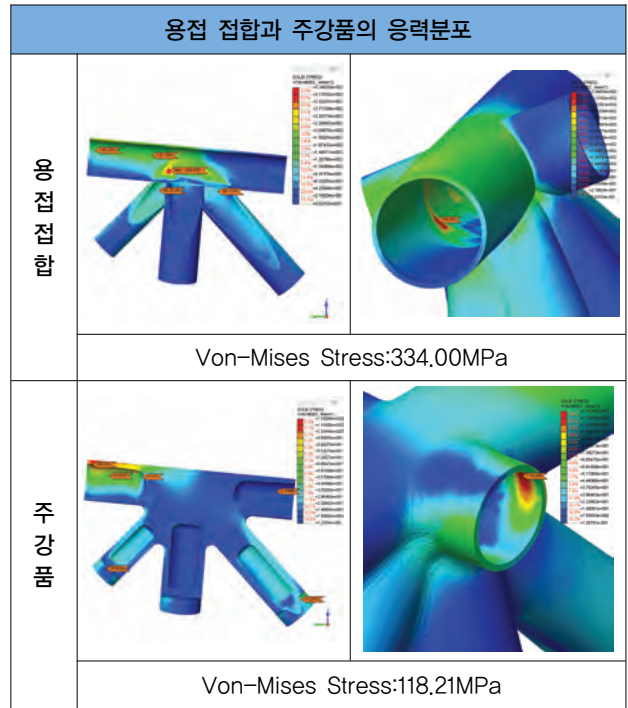
FE Analysis – West Roof Truss Embedded Plate



위하여 상세해석을 수행하였다.

서측지붕은 여러 개의 강관들로 이루어진 스페이스 트러스구조이다. 지붕구조를 이루는 트러스는 일반적으로 직선의 강관부재 그리고 강관들끼리 상호 용접하여 연결되는 강관 접합부로 이루어져 있다.

그러나 용접 등으로 제작되는 강관 접합부는 형상이 복잡하여 겹치기 용접이 발생한다. 이러한 용접부에는 잔류응력 및 열 영향에 의해 모재가 취약해질 수 있으며, 접합부재의 형상이 예리하여 응력집중이 발생된다. 이러한 여러 개의 강관이 모여지는 복잡한 형태의 접합부는, 제작성 및 용접성을 개선하고자 주강품을 사용하여 일체로 제작하였고 주강에 사용된 재료는 SY600($F_u=600N/mm^2$, $F_y=400N/mm^2$)이다. 주강의 안전성을 확인하기 위해 유한요소해석을 실시하였으

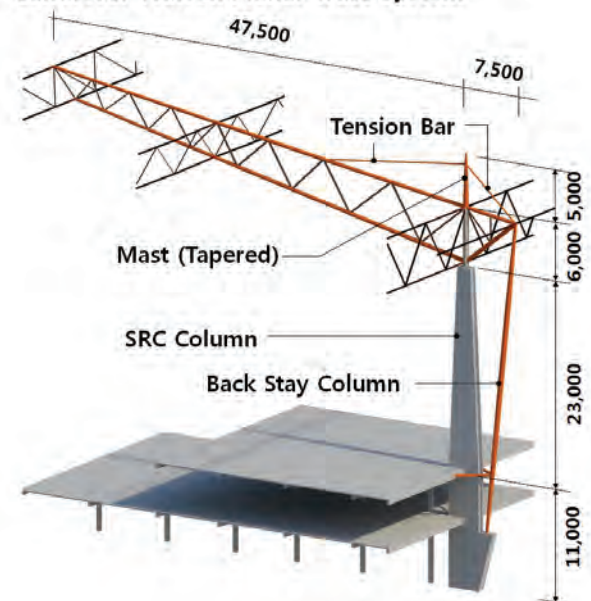


며 적용된 주강품과 용접접합을 비교 분석하였다. 그결과 용접을 통한 접합부에 발생한 응력 집중현상이 주강을 통해 개선되었음을 확인할 수 있다.

3.1.3 동축지붕

동축지붕은 캔틸레버 평면트러스 시스템으로, Mast 와 Back Stay Column으로 구조안전성을 확보하였다. 동축역

Cantilever Warren Planar Truss System



시 Front Stay Bar설치안을 배제하고 Back Stay Bar를 인장압축을 받는 원형강관으로 변경함과 동시에 Mast를 설치하여 캔틸레버의 안전성 및 사용성을 만족시켰다.

동측 지붕의 안전성 확보를 위해 설치된 back stay column의 양단부는 변단면 강관으로 적절한 좌굴강도 계산이 필요하다. 좌굴하중 이론은 국내외 여러 가지 문헌을 참고하였으며, 수정된 좌굴하중 값은 다음과 같이 산정하여 적용하였다.

$$P_{cr} = \frac{mEI_2}{l^2}$$

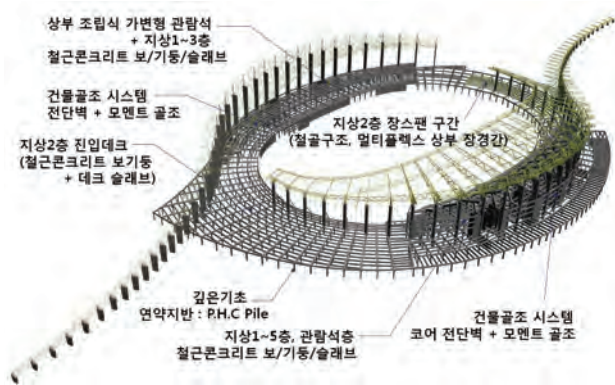
변단면의 단면2차모멘트 비에 따른 2축 변단면 부재의 좌굴하중 보정계수 m 은 아래와 같다.

l1/l2	0.7	0.2	0.3	0.4	0.5
m	1,202	1,505	1,710	1,870	2,002

l1/l2	0.7	0.7	0.8	0.9	1.0
m	2,116	2,217	2,308	2,391	$\pi^2/4$

여기서, I_1 : 변단면 부재에서 작은단면의 단면2차모멘트
 I_2 : 변단면 부재에서 큰단면의 단면2차모멘트

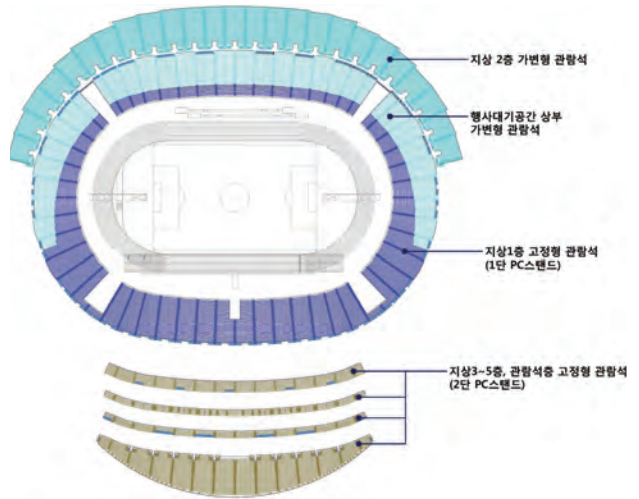
3.2 하부 구조 시스템



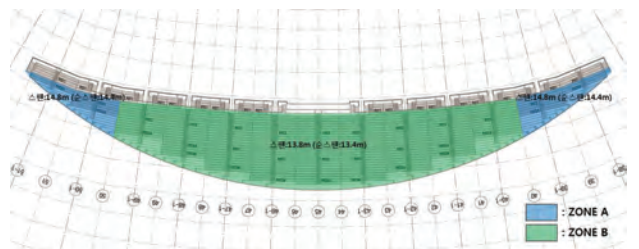
하부 구조는 건물골조 시스템 전단벽과 모멘트 골조 형식이다. 경기장 하부는 용도에 따라 경기장운영시설과 관람석으로 크게 구분 할 수 있다. 기초형식은 지질조사를 통해 깊은 기초로 선정하였고, P.H.C Pile을 사용하였다. Expansion Joint 계획은 크게 4구역으로 나누었고 Bracket Type을 적용하였다.

3.2.1 관람석

관람석은 서측 구간은 PC 스탠드형식이, 동측 구간은 추후 사용용도에 맞게 해체 및 조립이 용이한 가변형 관람석이 채택되었다.

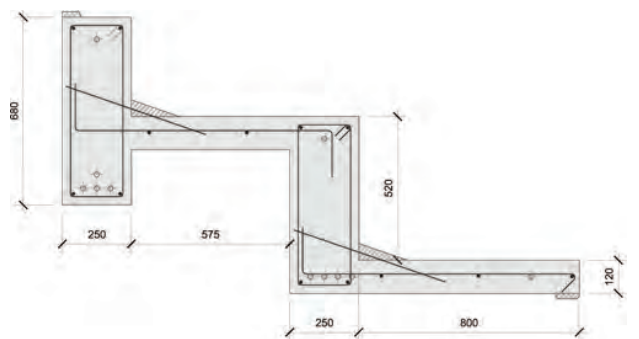


3.2.2 PC Stand 관람석

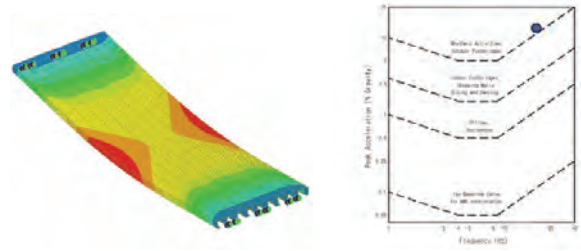
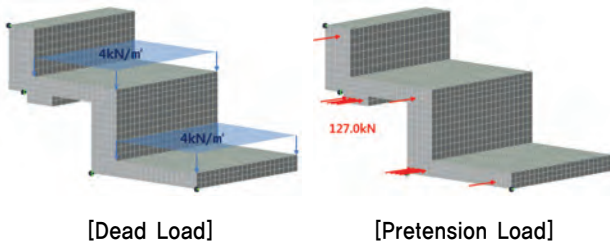


[스팬에 따른 영역 구분]

PC(Precast Concrete/Pre-stress)공법을 적용하여 14.8 m(Zone A)와 13.8 m(Zone B)의 스패를 가지는 PC Stand를 계획하였다. 아래와 같은 상세해석을 통하여 스패



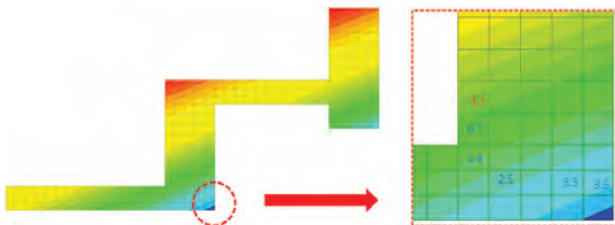
[적용단면]



1st mode : 22.2Hz > 5.0Hz

중앙부의 처짐량이 허용기준 처짐량에 만족하도록 PC 단면을 계획하였다.

구간	PT (24MPa)	PT (40MPa)	Self Weight	Live Load	Total (PT+SW+LL)
Zone A	16.0 mm	14.0 mm	-14.0 mm	-10.0 mm	-12.0 mm
Zone B	15.0 mm	13.0 mm	-14.0 mm	-9.0 mm	-10.0 mm



[PC Stand 중앙 하단부 인장응력]

$$\sigma_t < f_r (= \sqrt{f_{ck}} \cdot 0.63 = 3.98 \text{ N/mm}^2) \dots \text{O.K}$$

또한 상세해석을 통해 PC Stand의 중앙 하부의 인장응력을 검토한 결과, 허용기준 이하의 항복강도를 만족하도록 계획하였다.

3.2.3 가변형 관람석

가변형 관람석은 관람자들의 응원, 이동, 율동에 의한 진동, 충격하중 및 여러 가지 유형의 Pattern 하중 등 적용 가능한 모든 하중에 대해 검토하고 2~3배의 안전율을 적용하여 설계 하였다. 가변형 관람석은 기존사례 조사를 통하여 검증된 시스템을 사용하였다.

다음은 Aluminum profile의 율동하중에 대한 진동 검토 결과이다. 진동에 대한 제한 값은 ISO와 AISC를 참고하였으며, 가진 진동수는 22Hz, 최대가속도는 12.87(%중력)으

로 율동하중에 대한 허용 진동가속도이내로 기준에 만족하도록 계획하였다.

시공완료 후 안전성 검증을 위하여 재하 실험을 실시하였다. 하중은 계수하중에 안전율을 적용한 크기의 하중을 재하하였다. 자세한 재하시험계획은 다음과 같다.

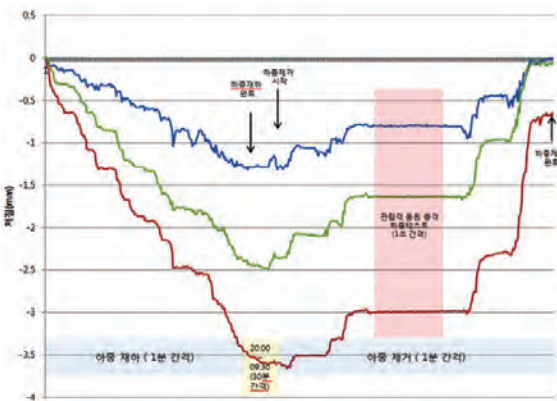
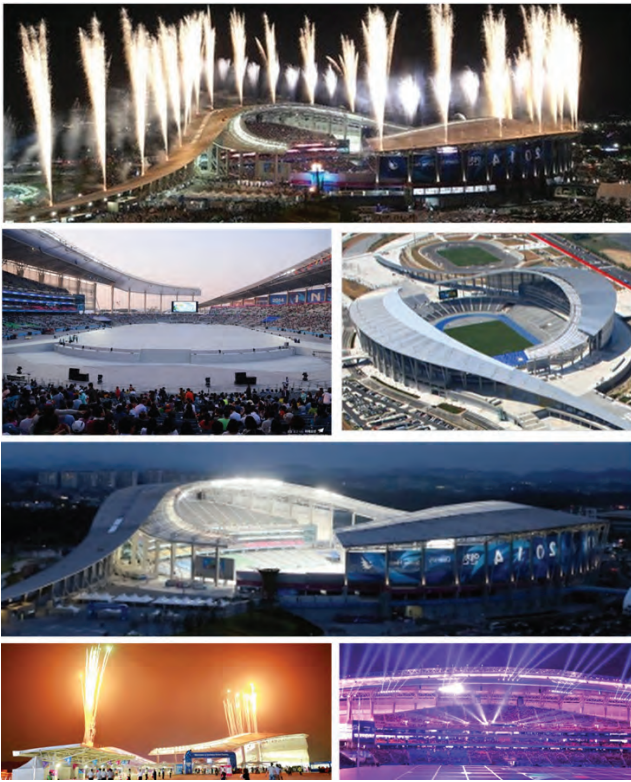
변위계 및 변형률계를 설치하여 처짐과 변형률 및 최대응력을 검토하였다. 변형은 탄성범위내 변형으로 하중제거 후 처짐이 원상회복되었다. 최대응력은 63.4MPa로 설계 값 235MPa의 27% 수준으로 가변형 관람석 구조는 안전한 것으로 평가되었다.

하중	설계하중(kgf/m ²)		재하하중 716(kgf/m ²) ■-300×300×60 블럭
	1.0LL	400	
	1.6LL	640	
	1.6LL/φ	711	

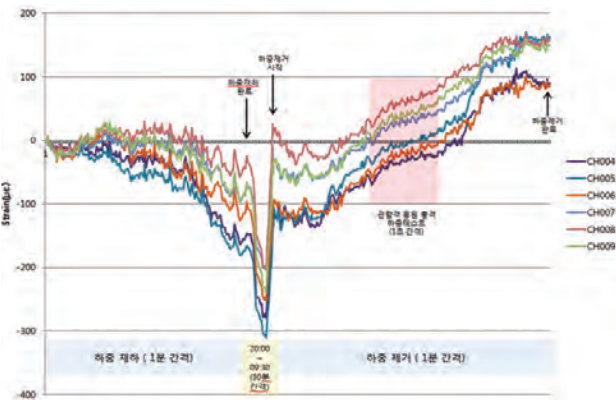
5.28 08:00~12:00	5.28~29 12:00~12:00	5.29 12:00~16:00	5.29 16:00~16:00
4시간	24시간	4시간	24시간
하중재하	처짐 및 응력측정	하중제거	처짐회복측정



[응원석 충격하중 테스트]



[재하시간에 따른 변위]



[재하시간에 따른 변형률]

4. 결론

본 경기장은 국내의 설계 및 건축기술이 집약되어 총체적으로 반영된 결정체라 할 수 있다. 45억 아시아인의 축제 2014 인천아시아경기대회를 치러낸 기념비적인 건물로써, 웅장함과 상징성, 역사성을 갖고 인천의 랜드마크로 자리매김하길 바라며 글을 마친다.