

한강 예술섬 구조설계



김종수 대표이사
(주) C.S구조엔지니어링

들어가며

한강 예술섬의 구조설계를 소개하면서 우리가 작성, 제출하는 구조계산서의 양식을 생각해 보았다. 구조설계사무소가 해야 할 구조도면 작성을 건축사사무소가 하게 되면서 구조설계사무소가 납품하는 구조계산서에 너무 심혈을 기울인 것이 아닌가 생각된다.

최근에 국제적 흐름에 맞춰 구조도면을 구조설계사무소에서 진행하게 되면서 구조계산서의 양식도 외국처럼 구조계획서를 통해 관련 기술자에게 구조설계의 개념을 좀 더 상세히 설명을 필요가 있고, 좀 더 전문적인 해석 관련자료는 관련파일을 이용하면 될 것이다. 이번 기술기에서는 한강예술섬의 구조설계에 포함되는 “구조계획서”의 일부를 소개하고자 한다.

1. 소개 및 구조설계의 목표

1.1 소개

한강예술섬은 서울을 가로지르는 노들섬에 위치하며, 이 프로젝트는 서울을 대표하는 문화와 상징의 중요한 건물이 될 것이다. 전체 건축설계는 DMP건축사사무소에서 수행했으며, 구조설계는 크게 지붕구조와 하부구조로 구성된다. 상부지붕구조는 ARUP, Hong Kong에서 기본설계를, 실시설계는 CS구조에서 수행했다. 풍동실험은 RWDI, Toronto에서 수행했으며, 하부구조는 전체 구조 설계를 CS구조에서 수행했다. 전체 구조설계의 책임은 CS구조엔지니어링 기술사사무소에 있으며 책임 구조기술자는 CS구조의 김종수(구조기술사)대표이사이다.

1.2 목표

- 지역조건 특색의 고려 및 건축계획에 연계한 최적의 구조 형식 선정
- 3차원 동적해석을 통한 구조계획의 합리성 검토 및 구조 안전성 확보
- 관련법규, 기준의 일관된 적용 및 공인 해석프로그램 사용으로 객관적인 설계
- 경제성, 시공성을 고려한 사용재료 및 설계기준강도 적용
- 대안 비교를 통하여 공기단축, 시공성 향상에 유리한 시스템 선정
- 건축계획에 연계한 유연성을 확보할 수 있도록 구조계획

2. 구조설계기준

2.1 설계하중

2.2 구조재료

2.3 성능고려조건

2.4 설계기준과 참고자료

3. 상호간섭을 고려한 설계조건

3.1 건물외벽과 지붕의 상호작용

3.2 지붕배수계획

3.3 부식방지

3.4 조인트 계획과 지붕의 변위

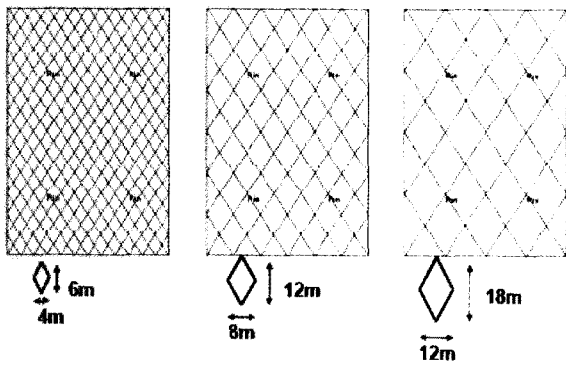
4. 지붕형상

자유곡면의 경사진 형태의 복잡한 지붕은 형상을 결정해가는 과정이 매우 어려웠다. 계획 설계 기간동안 논리적이고 시공성을 고려한 구조형태가 되도록 많은 연구가 수행됐으며, 이 연구에는 좀 더 평탄하고 반복되는 부재가 많아지게 하는 노력 등이 포함됐다.

최종 구조형상은 건축설계와 협력사 확인을 통해 완성되었다.

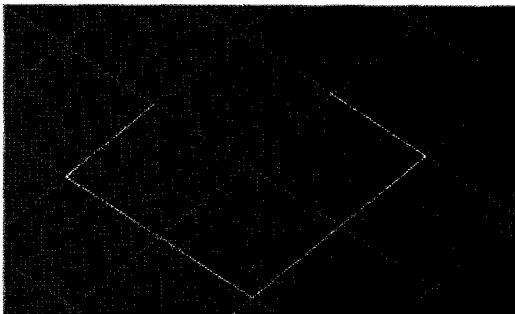
4.1 지붕 다이아몬드형 격자의 크기

건축설계는 전 지붕에 다이아몬드형 격자의 형태를 원했다. 일반 건축문양의 크기는 4m x 6m 다이아몬드이며 건축문양에 맞추기 위해 8m x 12m와 12m x 18m가 고려되었다.



구조트러스의 격자크기의 선택사양

설계강도, 원가, 부재의 수, 연결상세, 제작 및 설치를 고려하여 기본형태는 구조설계에 가장 적합한 8m x 12m가 결정되었다. 구조격자의 치수는 지점부근 또는 응력이 집중되는 곳 등 필요시에는 4m x 6m로 보강이 되었다.



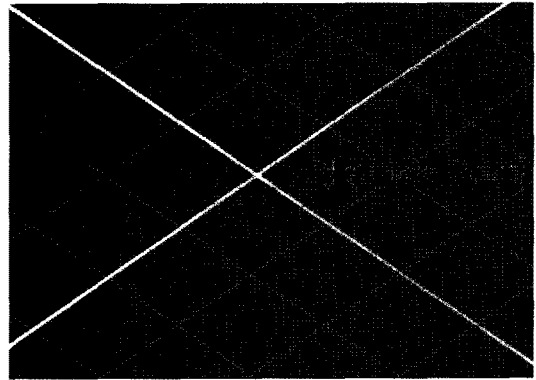
구조격자 단위
8m x 12m

건축문양
4m x 6m

선택된 구조트러스 격자

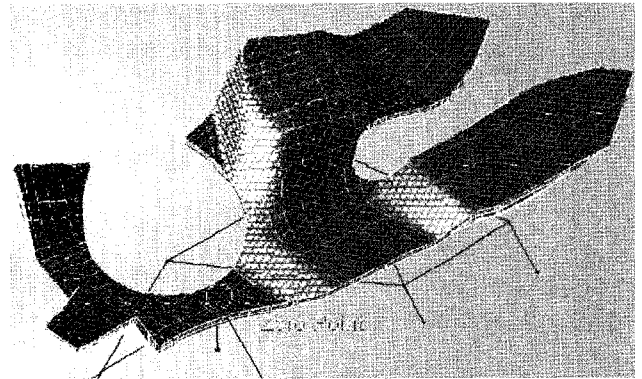
4.2 건축 격자의 생성

지붕 다이아몬드 문양의 생성에 사용된 라이노(Rhino)의 "Offset curve on surface" 명령어이다. 기본선은 "영점"이다. 명령된 기본지점에 위치한다. 이 영점은 건축과 구조 양쪽의 기준이 되는 연결점이다.



격자 생성을 위한 기본점

아래 그림은 지붕의 건축에서 생성된 격자이다. 구조트러스 격자는 마감을 고려한 수치를 고려하여 같은 방법으로 이루어진다.

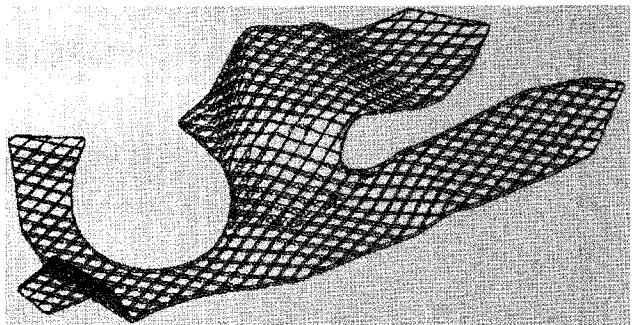


생성된 건축격자

지붕면의 유기체 같은 이중곡을 때문에 최종격자 단위는 정확히 4m x 6m가 되지 않고, 각 다이아몬드 격자는 약간 다른 치수를 갖는다.

4.3 구조격자의 생성

한강예술섬 지붕은 25000㎡가 넘으며, 구조트러스 요소를 모델링하는 것은 엄청난 시간을 필요로 한다. 이 문제를 해결하기 위해 라이노에 연결된 "Grasshopper"라는 자동 모델링 작업이 사용됐다. 생성된 3D 모델은 구조해석 모델로 전환되며 건축과의 설계 협업에도 유용하게 사용된다.



생성된 건축격자

구조설계를 위해 다음 원칙들을 적용하였다.

1. 건축설계로부터 지붕의 표면치수를 받았다. 구조 형상은 건축의 표면형상을 따르며, 지붕 하부 건축면과는 상관이 없다.
2. 트러스 상현재의 중심선은 건축 상부 표면에서 700mm 떨어짐(offset)을 적용했으며, 떨어짐의 방향은 면과 직각이다.
3. 구조트러스의 높이는 2.5m, 3.5m, 5m 세 종류이다.
4. 건축 외곽선에서 구조부재까지의 떨어짐은 500mm이다. 이 선이 구조부재의 외곽선이다.

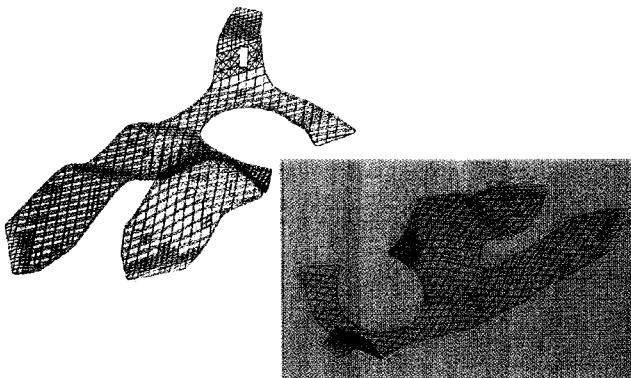
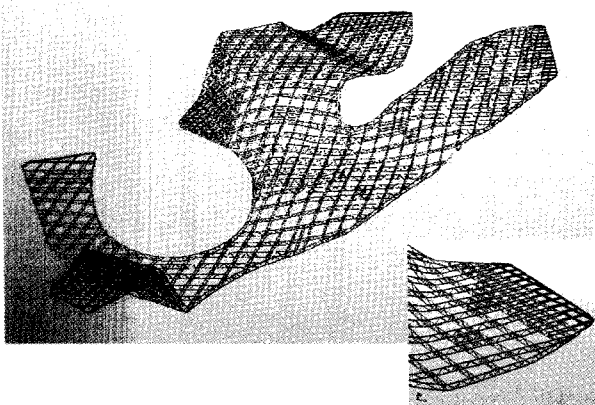
5. 지붕구조 시스템

5.1 지붕구조 시스템

한강예술섬의 지붕은 건축의도를 반영한 역동적인 자유곡면이다. 캔틸레버와 긴 경간 때문에 거더와 같은 단일부재는 시스템에서 배제되었고, 자유곡면의 형태 때문에 셸 구조 또는 마스트를 이용한 인장구조와 막구조 등도 배제됐다.

따라서 지붕구조는 건축마감의 격자문양을 고려하여 트러스 시스템을 채택했다.

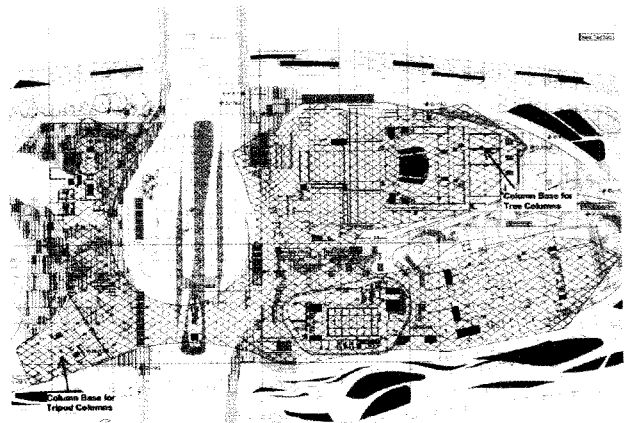
- 지붕은 건축의 다이아몬드 격자 문양과 일치하는 평면트러스이다.



- 트러스는 와렌형(Warren-type)구조이다.
 - 트러스 모듈은 4m x 6m로 보강이 가능한 기본형이 8m x 12m의 격자이다.
 - 다이아몬드의 방향은 동서방향으로 긴 다이아몬드격자이다.
- 선택된 지붕구조시스템은 아래와 같은 장점이 있다.
- 건축 형태나 문양에 일치하는 구조 효율이 높은 트러스
 - 제작, 상세와 조립이 간편한 구조부재수의 최소화
 - 지붕마감과 서비스의 다음 작업이 용이
 - 표준화와 대량생산이 쉬운 간편한 상세 적용
 - 강재물량을 100kg/m² 이내로 경량화

5.2 지붕지지 시스템

한강예술섬의 지붕은 오페라 하우스, 심포니 홀, 강당, 타워 및 카페지역을 덮고 있다. 지붕의 지점은 각실의 상부구조에 의해 지지된다. 상부구조의 기둥, 콘크리트코어 등의 위치와 강성에 따라 지지된다.

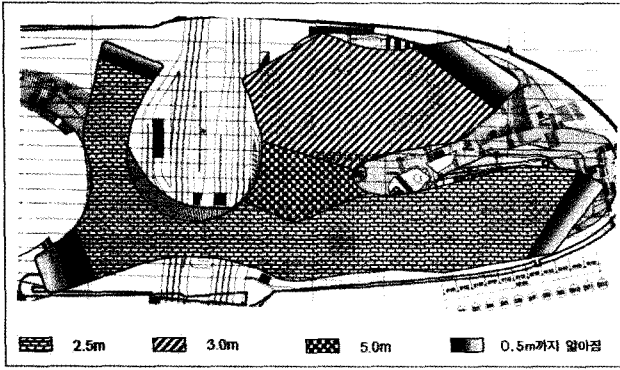


지붕지지점 배치도

지붕의 횡강성은 지붕과 연결된 계단, 승강기 등의 코어에 의해 확보된다. 기둥은 높고 세장비가 크며 축하중 지지용으로 사용된다.

5.3 지붕구조의 높이

지붕구조의 높이는 건축에서는 독특하고 가벼운 느낌을 강조하기 위해 끝부분을 향해서는 낮아지지만 처짐과 강성에 의해 결정된다. 강도와 강성에 균형을 맞춘 적정높이와 부재크기가 정해진다. 이러한 건축과 구조의 요구사항에 맞춰 지붕구조 높이는 5.0m~2.5m로 결정되었다.



위 구조높이는 상현재와 하현재의 중심 간격간 거리이다.
 지붕구조의 높이
 총구조높이 = 트러스높이 + 원형강의 지름(269mm~406mm)
 + 연결강판(100mm)

6. 하부구조 시스템

- 6.1 기초
- 6.2 오페라 하우스
- 6.3 심포니 홀
- 6.4 강당
- 6.5 기타

7. 구조용 풍동실험과 설계 풍하중

7.1 소개

여기는 RWDI(Guelph, Canada)에서 수행한 풍동실험의 결과를 정리한다. 풍하중은 시간에 따라 변하는 풍압분포와 구조설계

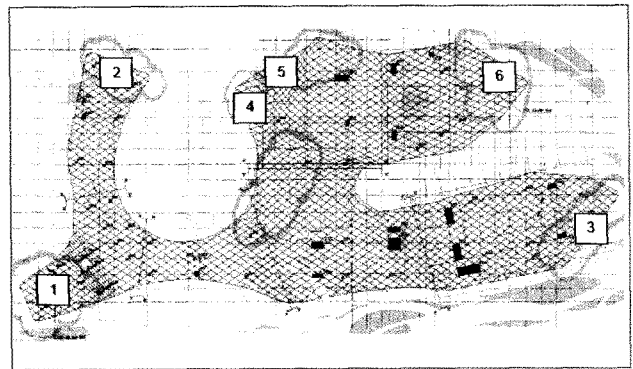
팀에서 수행한 지붕의 동적특성과 연계하여 수행되었다. 최대 정적하중과 최대 동하중이 각 경우의 하중조건으로 정리되었다.

7.2 풍하중을 위한 동시 풍압 해석

7.2.1 하중 효과 분석

RWDI 풍동실험은 지붕 전면 500개소 이상에서 동시에 풍압 측정을 했다. 중요한 구조요소 즉 구획하중의 영향을 받는 곳과 동적특성을 고려하여 최대 하중조건을 구하였으며, 모두 21가지의 하중조건이 지붕구조설계에 적용되었다.

아래 그림은 지붕구조가 비틀어짐, 연직 및 수평하중에 예민한 곳을 나타낸다.



연직하중에 영향을 미치는 지붕구역

7.2.2 동적특성

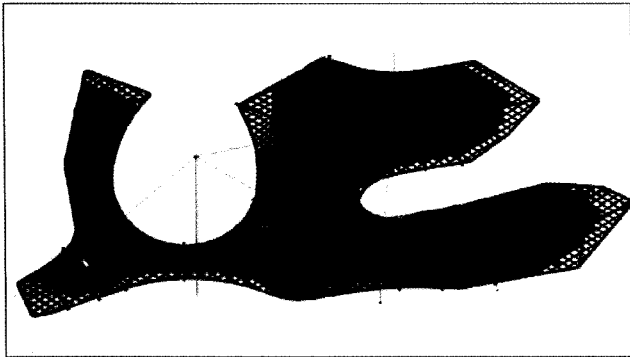
풍동모델은 강해서 동적 특성을 표현하지 못한다. 그러나 실제지붕은 돌풍효과에 의해 영향을 받는다. 아래 표는 RWDI에서 적용한 최대 25%까지 증폭되는 동적증폭계수(DAF)를 나타낸다.

[표] 내민지붕부분의 연직하중에 적용된 동적증폭계수

Load Case	DAF Overhang	DAF Roof	Overhang f(Hz)	Roof f(Hz)	Damping Ratio of critical
Overhang1+Rest of Roof	1.2	1.05	1.565	2	2%
Overhang2+Rest of Roof	1.25	1.05	1.565	2	2%
Overhang3+Rest of Roof	1.1	1.05	1.584	2	2%
Overhang4+Rest of Roof	1.25	1.05	1.407	2	2%
Overhang5+Rest of Roof	1.15	1.05	1.433	2	2%
Overhang6+Rest of Roof	1.25	1.05	1.127	2	2%

7.3 지붕에 적용된 풍하중

RWDI 풍동실험은 면의 형태로 21가지의 하중조건을 도출했다. 면의 풍압력은 면의 상부면과 하부면에서 측정된 앞의 시각 이력의 합을 포함한 순압력이다. 500개소 이상에서 측정된 압은 상부면에서 83개소 측면에서 57개소로 정리됐다. 상부면의 풍압력이 아래 표와 같이 정리된다.



상부면 풍압력 면구획

지붕구조에 적용된 절점하중은 21가지 하중조건으로 고려되었다.

8. 적설하중

9. 탄성지진하중

9.1 해석 소프트웨어 지진해석과 동적해석은 CSI(캘리포니아)사에서 개발된 상업용 건물해석 팩키지를 사용했다.

9.2 해석모델

3D모델은 지붕구조와 그 아래 지지조건을 모두 고려했다. 지붕구조는 가구 요소로 모델했으며 동적해석에서는 질량은 절점에 덩어리하중으로 작용시켰다.

9.3 모드해석

모드해석은 3D해석모델로 수행했으며 고유치 해석에서는 지붕의 동적 특성을 고려한 120모드를 사용했다. 구조체는 낮은 진동수범위의 국부모드 형태에 의해 지배된다. 질량으로는 고정하중은 100% 고려했고, 적재하중의 50%까지 고려했다. 총 지진질량은 300,000톤 미만이다.

지붕구조와 지지요소의 모드 형태는 위 표에서 나타난 것과 같이 지붕구조의 진동은 낮은 진동수 영역이다.

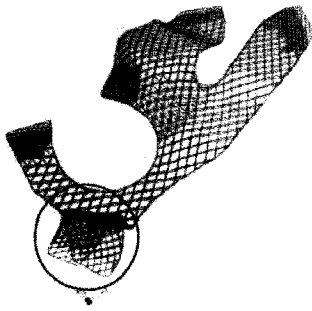
1차 모드에서는 서쪽 타워에서 수평방향으로 변형이 생기지만 15차 모드에서는 같은 곳에서 수직진동이 발생한다. 지붕이 아주 유연하기 때문에 전체 지붕이 한 방향으로 움직이는 모드는 발생하지 않는다. 2차 진동수에서는 건물의 진동이 어느 정도 한 방향으로 움직이고, 동시에 몇 개의 건물에서 꺾힘이 발생한다. 그러므로 건물의 진동에 따른 지붕구조의 영향은 반응응답해석에 포함되어 모두 고려되어진다. <다음그림 참조>

9.4 반응 스펙트럼 해석

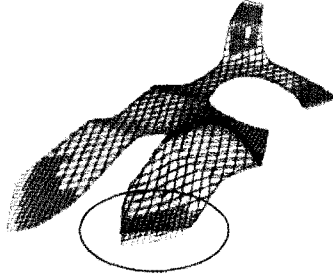
지붕의 지진응답 참여율이 95%를 넘기 위해 리츠(Ritz) 해법이 사용되었다. 실제 참여율은 X, Y, Z 방향으로 각 98%, 97%, 93.2%이다.

주요모드와 질량참여율

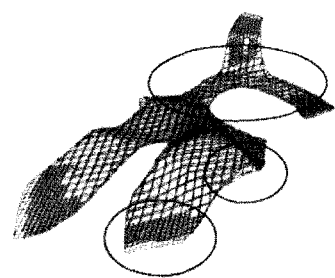
Mode	Frequency	Mode	Frequency
	(Hz)		(Hz)
1	0.941	23	1.848
2	1.011	24	1.864
3	1.136	25	1.899
4	1.149	26	1.906
5	1.201	27	1.911
6	1.327	28	1.928
7	1.345	29	1.937
8	1.399	30	1.955
9	1.474	31	1.965
10	1.485	32	2.005



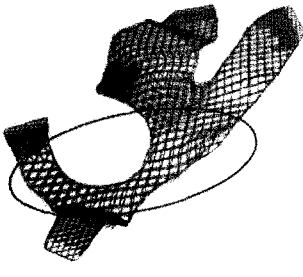
Mode 1 ($f_1=0.941$ Hz)



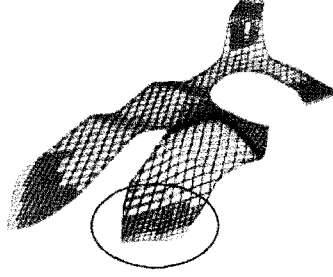
Mode 3 ($f_3=1.113$ Hz)



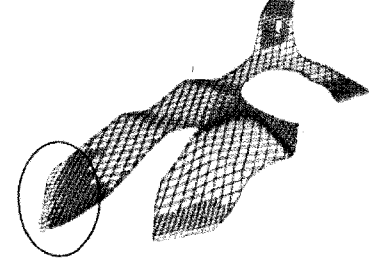
Mode 4 ($f_4=1.150$ Hz)



Mode 6 ($f_6=1.327$ Hz)



Mode 7 ($f_7=1.345$ Hz)



Mode 10 ($f_{10}=1.485$ Hz)

모드 댐핑은 탄성지진해석에서 2%로 고려되었다.
지진하중은 2개의 수평방향과 한개의 연직방향이 동시에 적용됐으며, 3방향의 가속도비는 X:Y:Z = 1.0:0.85:0.65 또는 0.85:1.0:0.65이다.

9.4.1 지진하중에 의한 변위 <아래그림 참조>

9.4.2 반력

3D 해석에 의한 지진하중에 따른 전체 반력은 다음 표와 같다.

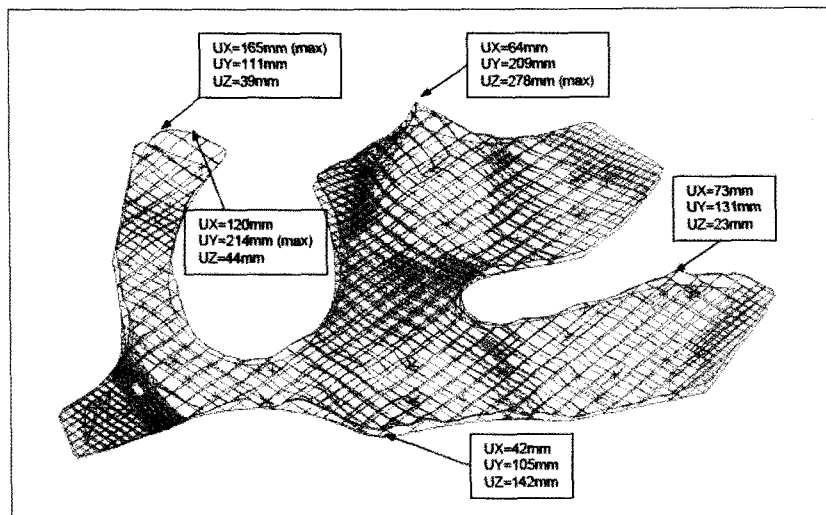
10. 좌굴해석

10.1 좌굴모드해석

10.2 비선형 탄성좌굴 검토

II. 피로파괴 검토

12. 처짐 해석



지붕구조의 변위 분포도

방향	지점반력	지점반력 대 지진매스 비
X	190.8	6.55%
Y	189.1	6.49%
Z	126.5	4.34%

13. 지점 반력

14. 부재설계

15. 접합부 설계

16. 접합부 FEM 해석

17. 시공을 위한 제안(Erection Engineering)

맺으면서

전체 분량관계로 자유곡면으로 구성되는 지붕관련 계획서 위주로 소개를 했다. 위와 같은 구조계획서가 이 프로젝트에 참여하는 해당 기술자들이 구조 설계에 대한 이해의 폭을 넓히고, 더 좋은 제안을 받는 기회가 됐으면 한다.