'00 추계학술발표회 논문집
한국원자력학회

KALIMER 원자로건물의 면진베어링 및 상부기초매트의 지진응답해석

Seismic Response Analysis for Isolators and Upper Basemat of KALIMER Reactor Building

이재한, 유 봉, 구경회

한국원자력연구소
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

원자로건물의 중량분포에 따라 원자로건물 상부매트를 지지하는 면진베어링 각각이 받는 축하중에는 불균형이 발생할 수 있어, 적절한 면진베어링 배치설계에 의해 상부기초매트의 변형과 응력의 불균형을 줄여야 한다. 이를 위하여 원자로건물과 면진베어링에 대한 유한요소모델을 작성하고, 건물자중과 지진하중에 대해 면진베어링에 작용하는 축력과 응답특성을 계산하였다. 또한 건물의 편심에 의한 비틀림 변위와 면진베어링과 상부기초매트의 구조건전성을 평가하였다.

Abstract

The axial loads on the isolators supporting the upper basemat of KALIMER reactor building are changeable according to the weight distribution of the reactor building, so the unbalances of deflections and stresses on upper basemat should be reduced by optimal arrangement of isolators. For evaluating the phenomena, the axial forces on the isolators and the stresses on the upper basemat induced by dead weight and seismic loads are calculated using the finite element modeling of the reactor building and the isolators properly arranged. The torsional displacement and the structural integrity of upper basemat are also evaluated.

1. 서론

면진 원자로건물의 중량분포와 강성을 갖는 지반을 고려한 경우 건물 상하부기초매트 사이에 설치되는 개개 면진베어링이 받는 축하중에는 편차가 생기고, 상하기초매트에는 변형과 응력의 불균형이 발생될 수 있다. 이들 현상은 원자로건물의 건전성과 면진베어링의 수명에 나쁜 영향을 주기 때문에 KALIMER 원자로건물 자중에 대한 면진베어링 배치설계 및 상하기초매트 건전성평가를 수행한 바 있다[1,2]. 본 연구에서는 원자로건물 설계가 일부 바뀐 경우에 대하여 첫째로,

KALIMER 건물 면진에 사용될 면진베어링에 대한 특성을 분석하고, 원자로 건물 내력벽을 기준으로 면진베어링 배치설계를 수정하였다. 둘째로 원자로건물에 대한 수정된 구조해석 모델링 자료를 이용하여 면진에 의한 건물의 면진 고유진동 모드를 확인하고, 건물 무게의 편심에 따른 추가적인 비틀림 변위를 예측하였다. 세째로 자중 및 지진하중에 의한 면진베어링이 받는 축력과 상부기초판에 발생하는 변위 및 응력분포를 조사하고 구조건전성을 평가하였다.

2. 면진베어링 특성 및 배치설계

KALIMER 원자로 건물 및 내력벽 위치는 그림 1과 그림 2와 같다. 바닥면적은 장축과 단축이 52m x 39m로 초기 장축 길이가 4m 단축되었다. 상부기초매트와 하부기초매트가 1.5m 두께로 설치되며, 상하부기초매트 사이에는 건물의 면진주파수가 0.5Hz 되도록 면진베어링을 그림 3과 같이 면진베어링 받침대 위에 설치한다. 직경이 1.2m되는 면진베어링을 받침대 위에 한 개씩 독립적으로 배치할 경우 면진베어링의 교체 및 유지보수를 위하여 면진베어링 사이의 간격이 최소 2.0m는 되어야 한다. 한편 면진베어링의 수직설계하중이 320톤이고, 건물 무게가 5만 3천톤 정도 되어 KALIMER 원자로 건물에 필요한 면진베어링은 최소한 166개이다. 이로부터 166개 이상의 면진베어링 배치를 위해서는 면진베어링 한쪽 면만이 2.0m의 공간이 되도록 계획하였으며, 이러한 요구조건을 충족시키는 면진베어링의 배치모델을 그림 4에 나타냈다. 면진베어링 배치특성은 몇 번의 시행착오를 통하여 이루어진 것으로 원자로건물 내력벽 하단에 174개의 면진베어링을 집중적으로 배치한 구조이다.

3. KALIMER 원자로건물 해석모델링

원자로 건물의 해석모델은 그림 5에 나타난 바와 같이 ANSYS 구조해석 프로그램으로 작성했으며, 전체 해석모델에는 면진베어링 및 원자로건물을 포함한다[3].

표 1. 건물 모델의 요소 및 절점 정보

	Number	Description
AREA	1-120	건물 종단 내력벽 및 층
	121-134	SG 보호벽
	135-170	건물 횡단 내력벽
NODE	1-3058	원자로 건물
	4001- 4238	면진베어링 하단
ELEMENT	1-104	원자로 건물 참조 빔요소 (STIF4)
	105-399	상부기초매트(SHELL63)
	400-578	원자로 지지벽(SHELL63)
	578-2392	원자로건물 내벽(SHELL63)
	2393-3208	원자로건물 외벽(SHELL63)
	3901-3916	원자로 구조물 집중질량(MASS21)
	4001-4221	하부기초매트 참조 빔요소(STIF4)
	4301-5082	면진베어링(COMBIN14)

면진베어링은 상하 좌우방향 모두를 선형스프링(COMBIN14)으로 모델링하고, 배치 계획에 따라 각각의 요소를 독립된 스프링으로 하였다. 스프링 강성은 면진베어링에 대한 설계 수직하중 320 톤을 반영하여 수평강성은 3,166KN/m, 수직강성은 5584,824KN/m으로 하였다[4].

상부기초매트는 쉘요소로 모델링하고 면진베어링 배치 위치점에 절점이 위치하도록 하였으며, 가능한 균형된 사각형으로 모델링 하였다. 상부건물은 건물벽과 슬라브를 쉘요소로 모델링하였다. 모델에 사용된 유한 요소수는 3234 개, 절점수는 4325 개 이다. 요소 및 절점 정보는 표 1과 같다. 하부기초매트와 지반에 대해서는 본 논문에서 고려하지 않았다.

하중으로는 기기하중을 포함하는 건물자중과 설계지진하중을 각각 고려하였다. 원자로 구조물 적재하중은 약 2400 톤으로써 모델에서는 절점 집중하중을 이용하였다[5].

4. 건물 고유진동수 해석

표 2와 그림 6은 고유진동수 해석결과로써 1,2,3 차 고유진동수는 면진베어링의 변형에 의한 모드로 원자로 건물은 강체운동을 한다. 1차 모드는 0.51Hz 로 장방향 전단 모드와 회전 모드가 혼합된 형태를 나타내며, 2차는 0.52Hz 로 수평 단축방향 면진모드가 나타났다. 그리고 3 차는 0.53Hz 로 1차 모드와 유사형 형태로 면진건물의 회전모드가 나타났다. 이후로는 원자로건물 벽면의 국부모드와 건물의 굽힘모드가 발생되었다.

표 2. KALIMER 원자로건물 면진 주파수

MODE	FREQUENCY	EFFECTIVE MASS (X)	EFFECTIVE MASS (Y)	EFFECTIVE MASS (Z)
1	0.511	**0.3178E+08**	0.4182E+06	Small
2	0.519	0.6557E+06	**0.5072E+08**	Small
3	0.533	0.1984E+08	0.2376E+06	Small

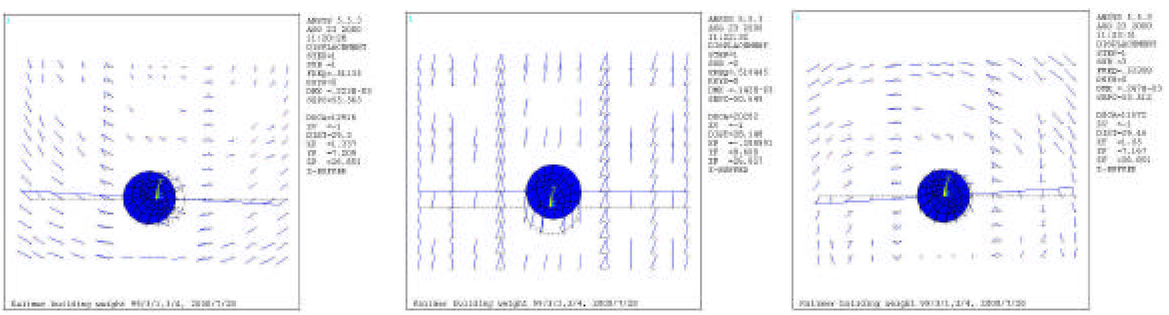


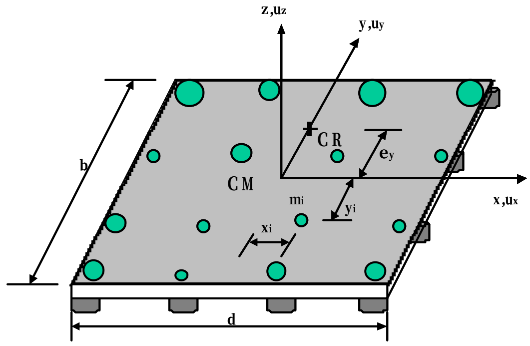
그림 6. 면진 원자로건물 고유진동수 모드형태

면진 건물의 1차와 3차 고유진동수에서 회전모드가 나타난 것은 원자로가 원자로건물 중심에서 약간 편심되어 위치하여, 면진베어링의 배치가 x 축 방향으로 비대칭적이고 상대적으로 바깥쪽

보다 중앙에 많이 존재하는 것에서 기인한다.

해석모델에서 원자로건물의 무게중심은 원자로 중심에서 건물 중심쪽으로 6.15m 떨어져 있어서 건물 중심과는 1.345m의 편심이 존재한다. 수직방향으로의 무게 중심은 19.6m로 계산되었다. UBC (Uniform Building Code,[6])에 나타난 편심(e)에 의한 면진층 상의 한 위치(y)에서의 최대 변위 (D_{TM})는 다음과 같이 계산된다.

$$D_{TM} = D_M \left(1 + y \frac{12e}{b^2 + d^2} \right)$$



KALIMER 원자로건물의 경우(y=31,e=1.345), D_{TM}

$$= D_M \left(1 + 31 \frac{12(1.345)}{50^2 + 39^2} \right)$$
$$= D_M (1 + 0.124)$$

편심에 대한 평가결과는 건물 구석에서 면진베어링 변위가 12.4%의 증가하는 것으로 나타났다.

5. 자중에 의한 구조해석 결과

자중 해석결과 면진베어링을 그림 4와 같이 배치한 경우는 전체 면진베어링에 작용하는 축력 및 크기분포가 그림 7과 같이 나타났다. 전체 174개 면진베어링 중에 축력의 최소값은 184톤, 최대값은 390톤으로 최대 최소 하중 차이는 약 2배가 되었다. 그리고 320톤 ±60톤의 범위에 137개(78%)가 속하고 있고, 이를 벗어나는 것이 37개 이다. 이중 5개는 과대하중이 작용하고, 32개는 저하중이 걸리고 있다. 현재 면진베어링 축력에 관하여 허용치는 설정되어 있지 않지만 면진베어링 특성시험결과 수직설계하중이 50%(160톤)과 200%(600톤) 범위 내에서 강성 및 감쇠값이 30% 정도의 변화를 보이고 있어[4] 기초매트 변형이나 면진베어링의 크립(creep) 및 지진시 거동 영향 등을 이후 종합적으로 평가할 필요가 있는 것으로 판단된다.

원자로 건물 자중에 대한 상부기초매트 변형 및 응력 변형 상태를 보면, 상부기초매트의 최대 변위는 1mm 정도 되고, 최대 압축응력은 원자로지지벽과 인접한 기초매트에서 6.28Mpa로 전체 분포는 그림 8에 나타냈다. RC 콘크리트의 강도는 압축시 24MPa (240kg/㎠)로 최대 응력 6.28 MPa은 압축상태로 허용응력 범위 내에 있다.

해석결과에서 외각 내력벽 하단에 있는 면진베어링에 축력이 전반적으로 높게 나타났고, 외부 면진베어링 바로 안쪽에 있는 면진베어링에는 낮은 축력이 작용하고 있다. 이는 외각 벽면 밑에는 내부 벽면과는 달리 두 개의 면진베어링을 벽면에 가깝게 배치할 수 없는 문제에서 원인이 있다. 이를 해결하기 위하여는 외벽을 따라 면진베어링을 좀더 조밀하게 배치하든지 또는 외벽 바로 밑에 면진베어링의 중심이 위치할 수 있도록 면진베어링을 밖으로 약간 돌출 시킬 필요가 있다.

6. 지진하중 의한 구조해석 결과

ASCE RG 1.6에 규정된 수평방향 0.3g 입력지진스펙트럼 하중에 대한 면진원자로 건물의 층응답스펙트럼 해석결과 전체 면진베어링에 작용하는 축력분포 및 빈도분포를 그림 9와 같이 나타

났다. 전체 174개 면진베어링 중에 축력의 최소값은 26톤, 최대값은 528톤으로 최대 최소 하중 차이가 20배로 매우 크게 되었다. 그리고 320톤 ±60톤의 범위에 불과 33개(18%)가 속하고 있고, 이를 벗어나는 것이 141개 이다. 이중 15개는 과대하중이 작용하고, 126개는 저하중이 걸리고 있다. 이러한 면진베어링 축력분포는 지진하중에 의한 현상으로 자중에 의한 면진베어링 축력분포와 비교하여 원자로건물 외벽에 높은 하중이 작용하는 것을 알 수 있다.

지진하중에 의해 상부기초매트 변형 및 응력 변형 상태를 보면, 상부기초매트의 최대 변위는 1mm 정도 되고, 최대 압축응력은 5.67Mpa로 전체 분포는 그림 10에 나타냈다. 면진베어링 최대 수평전단변위는 60cm로, 이는 면진베어링의 200% 전단변형에 해당하는 값이다. 지진응답변위가 과대 평가된 것은 면진베어링의 12% 감쇠특성을 스펙트럼입력에 반영하지 않은 결과로 판단된다.

7. 결론

원자로건물 자중 및 설계지진하중에 의해 면진베어링이 받는 축력 해석결과는 원자로지지벽과 원자로건물 외곽벽 하단에 있는 면진베어링에 축력이 전반적으로 높게 나타났고, 외곽벽 바로 안쪽에 있는 면진베어링에는 낮은 축력이 작용하고 있다

건물 자중만을 고려한 경우 전체 174개 면진베어링 중에 최대 축력은 390톤이고, 최소 축력은 184톤으로 나타나 자중에 의한 면진베어링 축력의 최대 차이는 2배로 나타났으나, 입력지진 스펙트럼 하중에 의한 대한 축력의 최대와 최소는 528톤과 26톤으로 최대와 최소 차이는 20배로 크게 나타났다.

원자로건물 자중에 대한 상부기초매트 변형 및 응력 변형 상태를 보면, 상부기초매트의 최대 변위는 1mm 정도 되고, 최대 압축응력은 6.28 MPa로 원자로지지벽 하부에서 발생했으며, 지진하중에 의한 최대 응력은 5.62Mpa로 건물 외벽 밑에서 발생되었다.

앞으로, 원자로건물 지반과 면진베어링 감쇠영향을 반영한 해석을 수행할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. 이재한, 유 봉, 구경회, “KALIMER 원자로건물의 면진베어링 배치설계 및 상부기초매트의 구조분석,” 한국원자력학회 ’99 춘계학술발표회, 1999.
2. 이재한, 유 봉, 구경회, KALIMER 원자로건물의 면진베어링 배치설계 및 3차원 입체 모델링, KAERI/TR-1539/2000, 한국원자력연구소, 2000.
3. 유봉, 이재한, 최인길, KALIMER 원자로건물 지진해석 모델링 및 지진응답해석, KAERI/TR-1062/98, 한국원자력연구소, 1998.
4. 유봉, 이재한, 구경회, 액체금속로용 축소규모 고감쇠 및 납삽입 면진베어링의 특성시험 결과분석, KAERI/TR-809/97, 한국원자력연구소, 1997.
5. C.K. Park, et. al. KALIMER Design Concept Report, KAERI/TR-888/97, KAERI, 1997.
6. R.S. Jangid, and J.M. Kelly, “Torsional Displacements in Base-Isolated Buildings,” Earthquake Spectra, Vol. 12 No.2,May 2000.

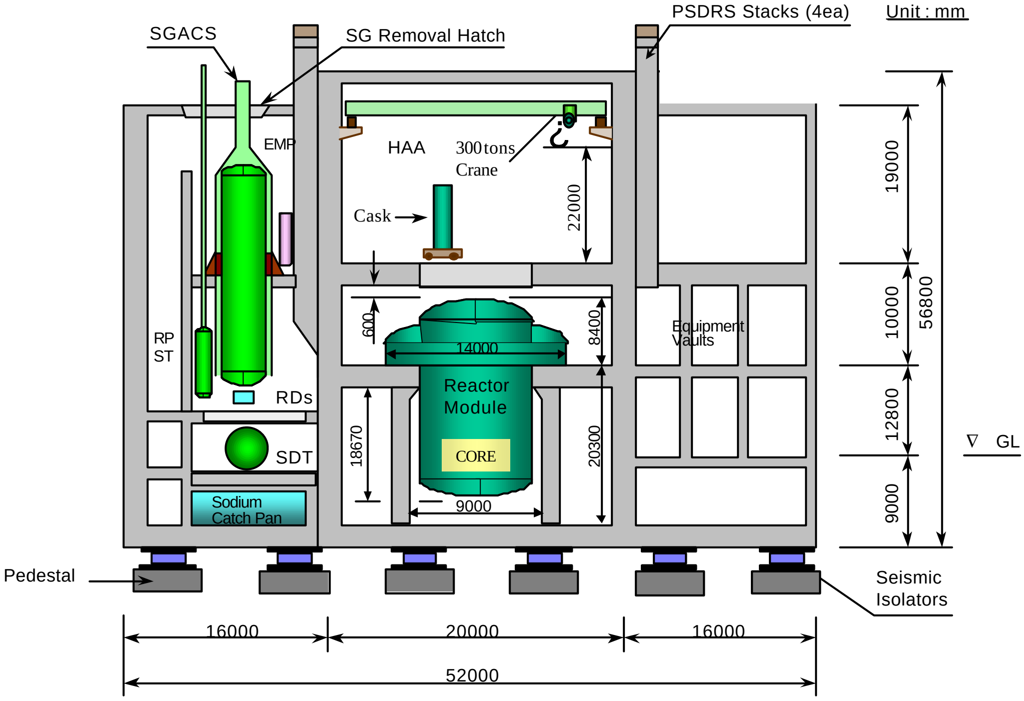


그림 1. KALIMER 원자로건물 정면도

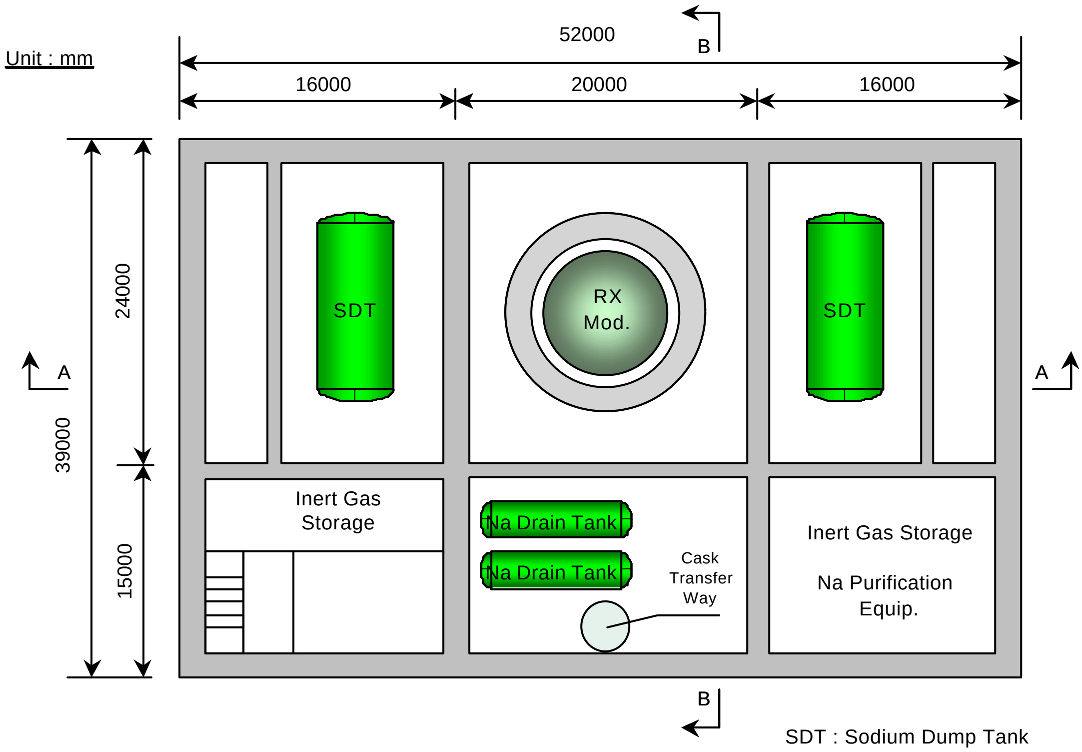


그림 2. KALIMER 원자로건물 평면도

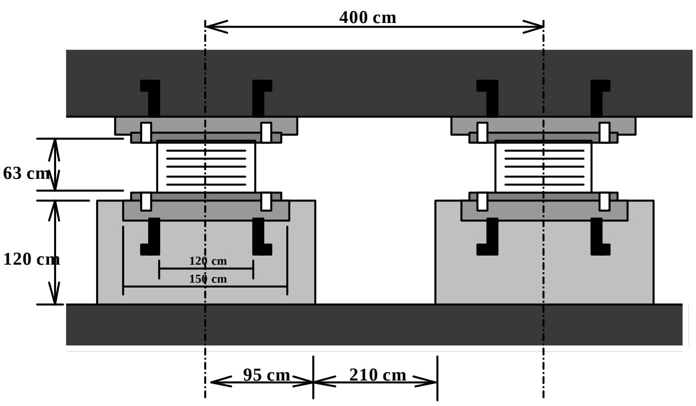


그림 3. 면진베어링 설치 개념도

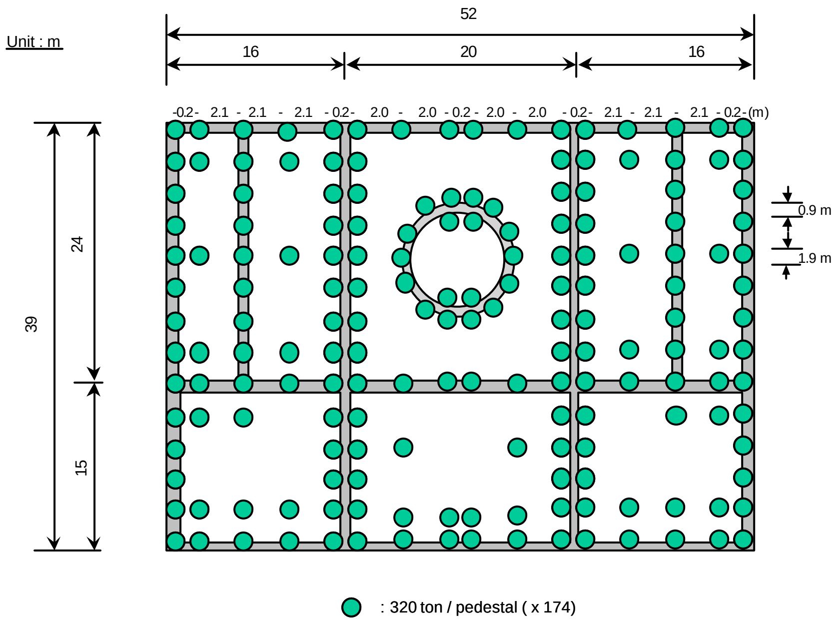


그림 4. 면진베어링 배치도

그림 5. 원자로 건물 해석 모델링

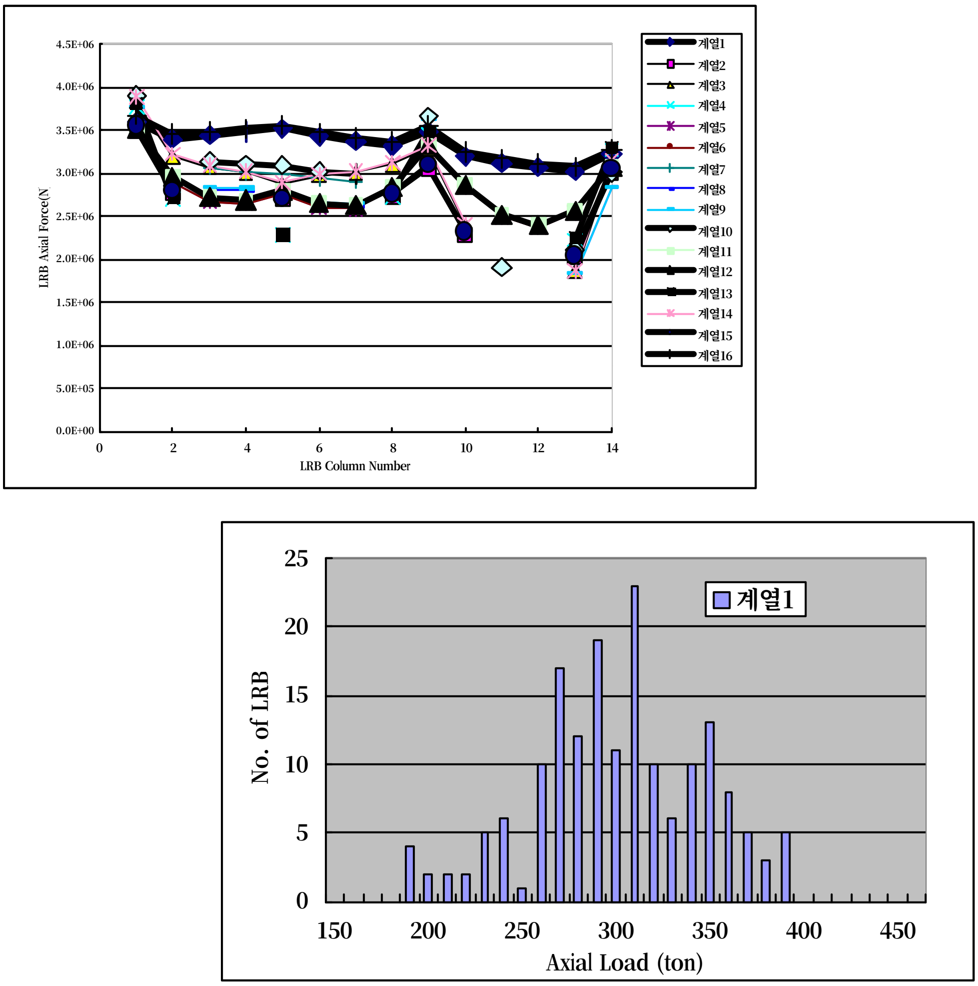


그림 7. 건물 자중에 의한 면진베어링 축력 분포

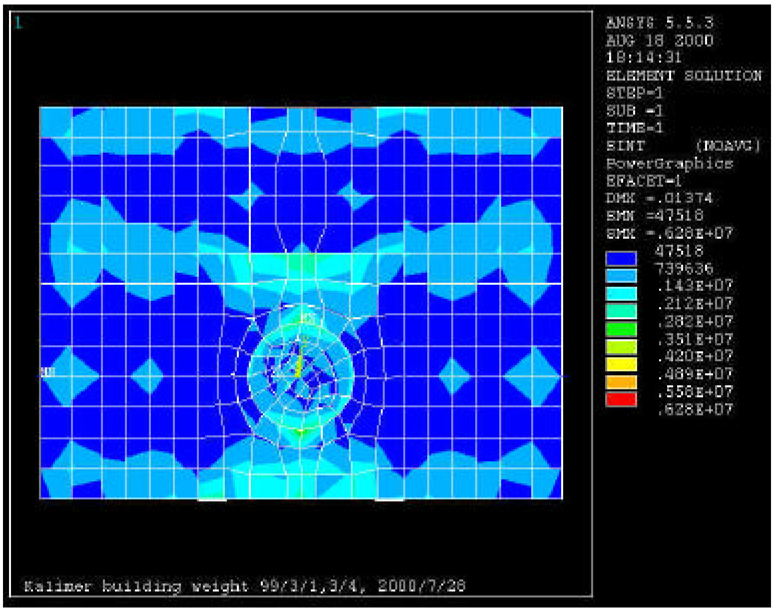


그림 8. 건물 자중에 의한 상부기초매트 응력강도분포

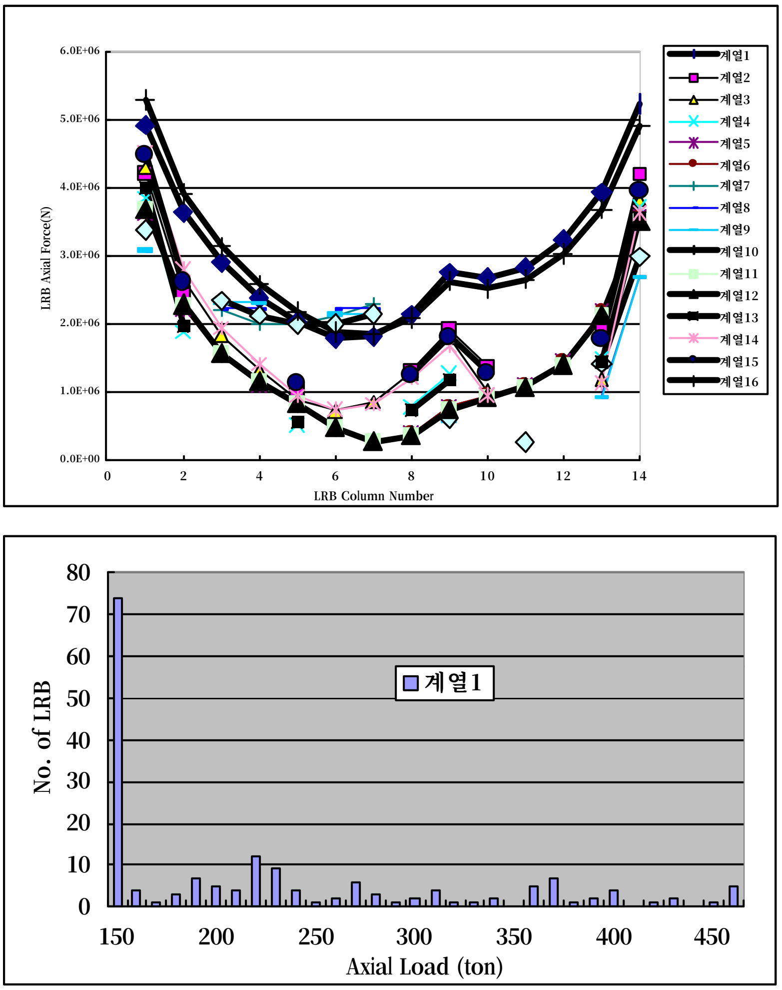


그림 9. 지진하중에 의한 면진베어링 축력 분포

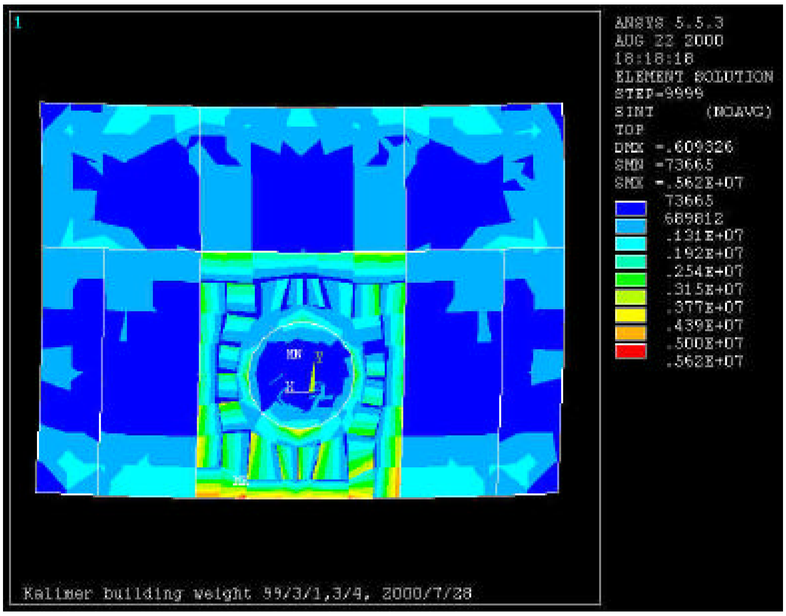


그림 10. 지진하중에 의한 상부기초매트 응력강도분포