

액체금속로용 면진베어링의 구조해석
Structural Analysis of Seismic Isolation Bearings
for Liquid Metal Reactor

김 종 인*
Kim, Jong-In

유 봉**
Yoo, Bong

ABSTRACT

Proto-type seismic isolation rubber bearings are investigated through nonlinear hyperelasticity finite elements using the ANSYS general purpose structural analysis code. The purpose of the analysis was to determine the maximum horizontal strain range which can be obtained with a 250KN hydraulic actuator. A Mooney-Rivlin strain energy density function was used as a constitutive law for rubber. The results are compared with the test data available in the literature and found to in good agreement only in the higy strain range. The analysis results can be used with conservatism to predict the necessary force required to a specified displacement such as the purpose of this analysis. However, more precise constitutive model will be required to simulate the bearing behavior with accuracy in the mid-range strain.

1. 서 론

면진설계는 구조재가 지진하중에 견디도록 설계하는 내진설계와는 달리 보다 능동적으로 전달되는 지진하중을 감소시키는 방법이다. 액체금속로와 같이 고온에서 운전되는 구조물은 열응력이 크게 발생하기 때문에 지진하중에 견디도록 하기 위하여 구조물을 두껍게 할 수 없다. 따라서 액체금속로는 지진하중에 민감하며, 면진설계를 적용하면 지진에 의한 지반운동의 불확실성에 따른 구조물의 민감도를 줄일 수 있고 발전소의 부지조건에 의존하지 않는 표준원전의 설계를 가능하게 하기 때문에 기존의 가압경수형 원자력 발전소에 비해 가격경쟁력을 부여할 수 있는 가장 효과적인 대안으로 대두되고 있다. 원자력 선진국인 미국, 일본, 프랑스는 면진설계를 적용한

* 한국원자력연구소 선임연구원
** 한국원자력연구소 책임연구원

액체금속로 PRISM, MDP, SPX2를 각각 개발하고 있으며 국내에서도 원자력기술 증장기개발의 일환으로 액체금속로를 개발하고 있으며 면진설계의 적용을 고려하고 있다[1]. 본 논문에서는 액체금속로용 면진베어링의 국내개발을 위하여 시제품 면진베어링의 구조해석을 수행하였다.

2. 면진베어링의 설계

면진계통(seismic isolation system)은 면진장치를 사용하여 지진발생시 구조물에 대한 지반 거동의 영향을 최소화하기 위한 것으로서 유연성, 에너지 분산능력, 저하중에 대한 강성, 미끄럼 면진장치의 경우 복원 능력, 들뜸(uplift) 저항기기 및 파손안전 기구(fail-safe mechanism) 등의 필수적인 기능을 가지고 있어야 한다.

에너지 분산장치(energy dissipator)에 대해서는 많은 연구와 개발이 이루어져 왔으나 현재 가장 개발이 진전되고 널리 사용되는 면진장치는 고감쇠 적층고무 베어링(high damping laminated rubber bearing)이다. 미국의 Foothill Communities Law and Justice Center에 최초로 사용된 고감쇠 고무 면진베어링은 높은 고유 감쇠특성을 가지고 있으며 바람 또는 약한 지진하중에 대해서는 큰 강성을 나타내고 하중이 증가함에 따라서 강성이 감소하다가 수평하중이 아주 커지게 되면 강성이 다시 아주 커지는 파손안전 기구 특성을 가지고 있다.

액체금속로용 면진요소 재료의 성능변수로는 적당히 큰 감쇠비(임계 감쇠의 10% 이내), 온도의존 전단탄성계수 및 면진요소 혼합물의 허용온도 민감도, 형상계수가 큰 면진요소에 대한 허용 크리프량, 고무 강도보다도 더 큰 강철판과의 일관성 있는 결합력과 발전소의 수명과 함께할 수 있는 내구성이 요구되고 있다.

국내개발 중인 액체금속로의 면진장치로는 최근 고무합성기술의 발달로 감쇠값이 큰 고무를 만들 수 있기 때문에 추가적인 감쇠장치의 부착이 필요없는 고감쇠 적층고무 면진베어링의 사용이 가장 좋은 것으로 판단된다. 따라서 이의 국내개발을 위하여 제조공정의 개발 및 예비 특성시험 수행을 위한 시제품을 설계하였으며, 그림 1은 개략적인 구조를 나타내고 있다.

3. 면진베어링의 구조해석

국내개발한 시제품은 현재 KAIST에 있는 실험시설을 이용하여 예비 특성시험을 수행할 예정이다. 이 실험시설은 2 대의 유압식가력기(hydraulic actuator)를 사용하고 있으며 가력하중 및 변위는 수직방향이 각각 500KN, 150mm이며, 수평방향이 각각 250KN, 250mm이다[2]. 본 논문에서는 시제품을 이 시설로 실험할 때 최대 어느 정도까지의 변형을 가할 수 있을 것인지를 평가하기 위하여 범용 유한요소 구조해석 코드인 ANSYS를 사용하여 응력해석을 수행하였다.

3.1. 과탄성(hyperelastic) 유한요소를 이용한 응력해석

고무는 일반적으로 비압축성 등방 과탄성 재료로 알려져 있다. 고무의 해석은 응력상태가 변

형률에 따라 변하고 변형률도 수백 퍼센트에 달하기 때문에 재료 및 형상 비선형해석이 필요하다. 면진베어링의 유한요소해석은 원통형상 및 작용하중의 대칭성을 고려하여 그림 2와 같이 반대칭 모델링을 하였으며, 고무층은 8 절점 3-D 과탄성 유한요소로, 강철층은 3-D 고체요소로 각각 모사하였다. 고무의 응력-변형도 관계는 다음의 Mooney-Rivlin의 변형에너지 밀도함수 모델을 사용하였다[3, 5].

$$W = A(I-3) + B(II-3) + C(1/III^2 - 1) + D(III-1)^2$$

여기서 I, II, III 은 오른쪽 Cauchy-Green 변형도 텐서의 불변값(invariants)이며,

W = 변형에너지 밀도함수

$$C = A/2 + B$$

$$D = \frac{1}{2} \left[\frac{A(5\nu-2) + B(11\nu-5)}{1-2\nu} \right]$$

ν = Poisson 비이다.

응력은 변형에너지 밀도함수로부터 다음과 같이 구해진다.

$$S = 2 \frac{\partial W}{\partial C}$$

여기서 S = 2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서,

C = 오른쪽 Cauchy-Green 변형도 텐서이다.

응력해석은 세종류의 베어링에 대하여 수행하였으며 각 베어링의 주요사양은 표 1과 같고 해석에 사용된 고무 및 강철보강판의 재료물성치는 표 2에 나타내었다. 하중조건은 Kelly 교수가 수행한 실험조건과 동일하게 하기 위하여 베어링의 윗면에 일정한 압력(0.7031 Kg/mm²)을 가해주고 서로 다른 수평변위에 대하여 계산을 하였다. 경계조건으로는 베어링의 밑면의 모든 절점을 고정시키고 윗면은 U_z 가 동일한 값을 갖도록 제한하였다. 표 3은 베어링 종류별로 동일한 수평변위를 가했을 때의 고정된 밑면에서의 수평반력을 나타낸 것이다. 이 수평반력은 곧 각 베어링에 이러한 수평변위를 일으키기 위하여 가해주어야 하는 힘이 된다. Type 1과 Type 2의 결과를 비교하면 총고무층의 두께를 동일하게 할 경우 고무층의 수는 베어링의 수평강성에 영향이 없음을 알 수 있다. 그림 3.은 수평변위 203.2mm를 가했을 때의 변형된 결과를 나타낸 것이다.

3.2. 모우드해석

면진베어링의 모우드해석은 과탄성 요소와 같은 비선형 유한요소를 사용할 수 없기 때문에 고무층 및 강판층 모두 3-D 고체요소로 모사하여 수행하였다. Type 1 베어링에 대하여 모우드해석을 수행하였으며, 수직하중이 가해지지 않은 상태로 베어링의 밑면을 고정시켰으며 고유치는 subspace iteration option을 사용하였다. 주자유도(master DOF)는 원통좌표계의 0, 90, 180,

270 °상의 모든 절점의 U_x 와 U_y 자유도를 택하였다. 그림 5.는 모드해석 결과의 처음 여덟 모우드를 나타낸 것이다.

3.3 해석결과의 분석

ANSYS에 의해 해석한 결과를 Kelly 교수가 실험한 Bridgestone사의 면진베어링 실험결과[4]와 비교하여 그림 4.에 나타내었다. 가해진 수평변위에 대하여 베어링 종류별 계산된 수평반력의 크기는 표 3에 보인 바와 같이 큰 차이가 없으나 수평변위 203.2mm의 경우를 제외하고는 실험결과와는 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 고무의 응력-변형률 관계를 구하는데 사용된 Mooney-Rivlin의 변형에너지 밀도함수가 면진베어링의 거동을 묘사하는데는 부적절한 것으로 보이며 보다 정확한 모델의 개발이 필요하다. 그러나, 여기에서 계산된 결과는 시제품 면진베어링의 실험시 현 실험설비로 구할수 있는 최대 변형률 범위를 구하는 데는 소기의 목적을 달성하였다. 현 실험설비로 시제품의 정적실험은 수평가력 250KN으로 약 200mm(공칭변형률 455%)의 수평변위를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

모우드해석 결과의 각 모우드 형상에 따르는 고유진동수는 사용된 고무의 탄성계수에 따라 다소 차이는 있을 것이나 모우드 형상에는 영향이 없을 것이다. 차후 보다 정확한 해석을 위해서는 시제품 제작에 사용된 고무의 인장, 압축 및 이축인장(biaxial tensile) 실험이 필요하며 이를 토대로 새로운 변형에너지 밀도함수의 개발이 절실히 요구된다.

4. 결 론

액체금속로 또는 원자력 관련 구조물의 면진계통 및 면진설계 기술개발은 면진계통의 신뢰성과 안전성 및 경제성 문제가 가장 큰 연구의 초점이 되고 있다. 액체금속로의 경제성 및 안전성 확보는 면진계통을 갖춘 구조물의 설계/해석 및 검증시험 기술을 확보함으로써 가능하다. 본 연구에서는 이러한 종합적인 면진기술 개발의 첫 단계로서 면진베어링 시제품의 개발을 위하여 응력 및 모우드해석을 수행하였다. 응력해석 결과의 신뢰도를 확인하기 위하여 문헌의 실험결과와 비교하였으며 고변형률 영역에서는 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으나 가공경화가 일어나는 중간 변형률 영역의 거동은 Mooney-Rivlin 모델이 적합하지 않은 것으로 나타나 새로운 모델을 개발할 필요성이 대두되었다.

5. 참고문헌

- [1] B. Yoo, J.I. Kim, Y.S. Choun and D.G. Lee, "Prospects for the Use of Seismic Isolation on Nuclear and Non-nuclear Industrial Facilities in Korea", 12th SMiRT Post Conf. Seminar on Isolation, Energy Dissipation and Control of Vibrations of Structures, Capri, Italy, August 23-25, 1993.
- [2] 김남식, 유춘화, 이동근, "Base Isiator의 제작 및 특성실험", 전산구조공학, 제5권

제4호, 1992.12, pp.41-45.

- [3] J.T. Oden, "Finite Elements of Nonlinear Continua", McGraw-Hill, 1972.
- [4] J.M. Kelly, "Mechanical and Failure Characteristics of High Damping, Natural Rubber Isolation Bearings from Four Different Test Programs", 11th SMiRT Post Conf. Seminar on Seismic Isolation of Nuclear and Non-nuclear Structures, Nara, Japan, August 26-27, 1991.
- [5] P. Kohnke, "ANSYS User's Manual for Revision 5.0", Swanson Analysis Systems, Inc., 1992.
- [6] J.M. Gere and S.P. Timosenko, "Mechanics of Materials", 3rd Edition, PWS-KENT Publishing Company, 1990.

표 1. 해석에 사용된 면진베어링의 사양

면진베어링 사양	Type 1	Type 2	Bridgestone
총고무 두께(mm)	44	44	44
고무층(두께x층수)	4 x 11	2 x 22	2 x 22
강철판(두께x층수)	1.6 x 10	1.6 x 21	0.8 x 21
유효높이(active height)	60	77.6	60.8

표 2. 해석에 사용한 고무 및 강철판의 물성치

재료물성	고무	강철판
Poisson 비 [6]	0.49	0.3
탄성계수 [6] (Kg/mm ²)	0.2398	20408
질량밀도 [6] (Kg. sec ² /mm ⁴)	1.1523E-10	8.0049E-10
Mooney-Rivlin 상수 A(Kg/mm ²) [3] B(Kg/mm ²) [3]	0.05625 0.014	N/A

표 3. 베어링 종류별 밑면에서의 수평반력

수평변위 (mm)	수평반력 (Fx : tons)		
	Type 1	Type 2	Bridgestone
50.8	7.27	7.24	6.96
101.6	14.36	14.27	13.74
152.4	20.54	20.33	19.67
203.2	25.58	24.96	24.21

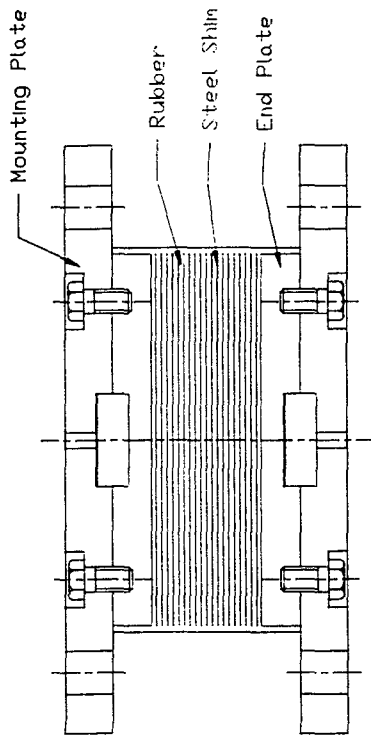


그림 1. 편진베어링의 구조

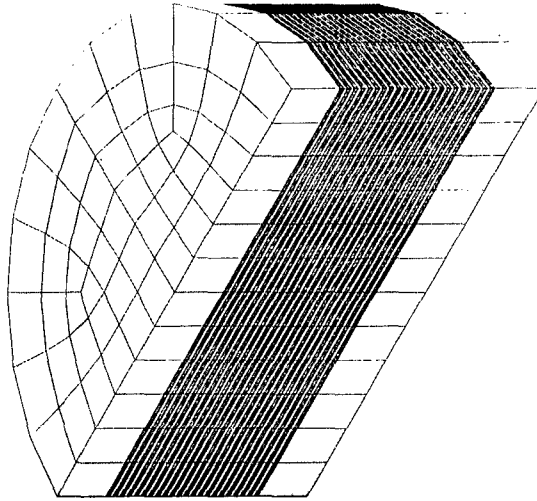


그림 2. Type 2 편진베어링의 유한요소 해석모델

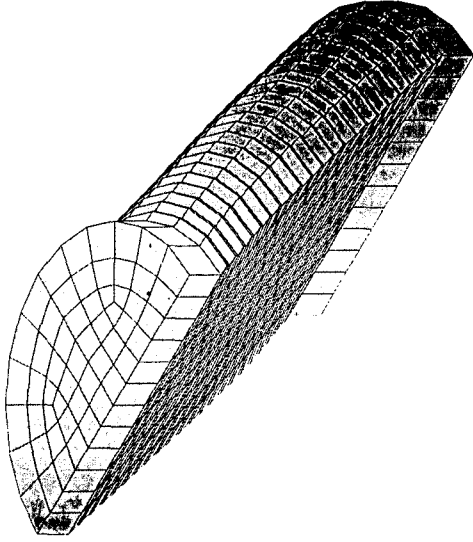


그림 3. Type 2 편진베어링의 유한요소 해석결과
(수평변위 203.1mm 때의 변형된 모양)

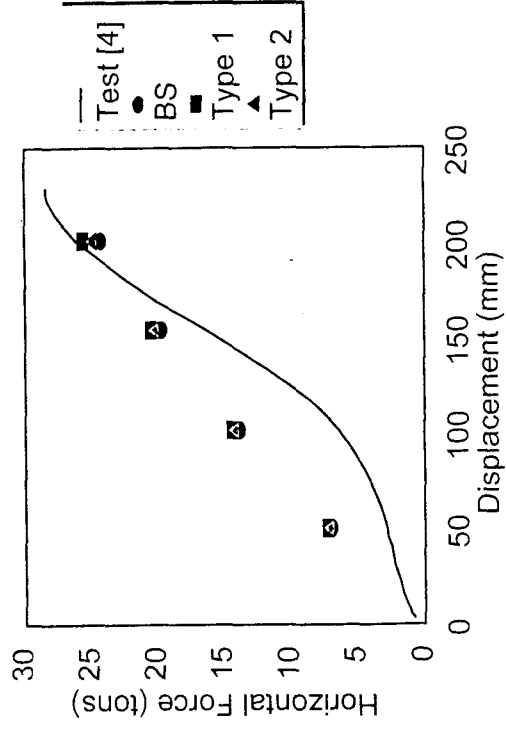
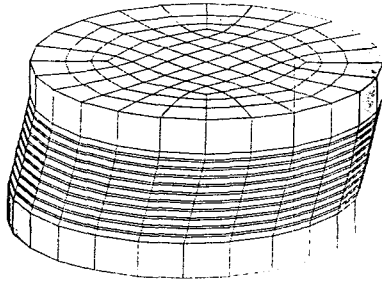
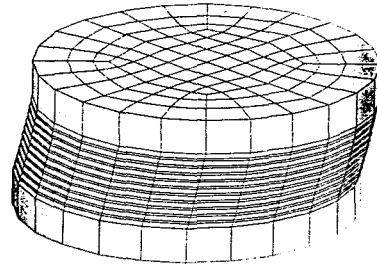


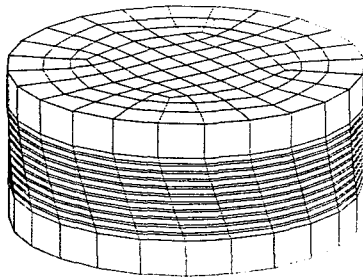
그림 4. 실험결과와 유한요소 해석결과와의 힘-변위 비교



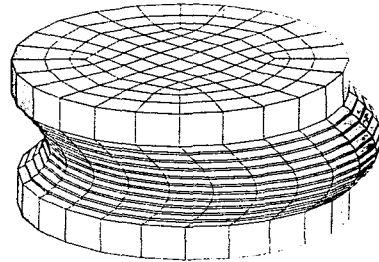
Mode No. 1 41.8 Hz, X 방향 전단



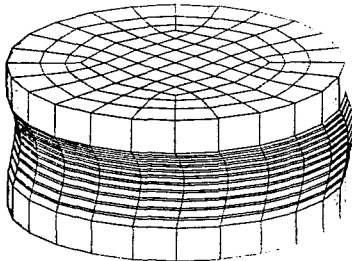
Mode No. 2 41.8 Hz, Y 방향 전단



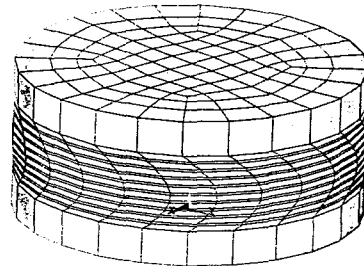
Mode No. 3 42.1 Hz Z 축 비틀림



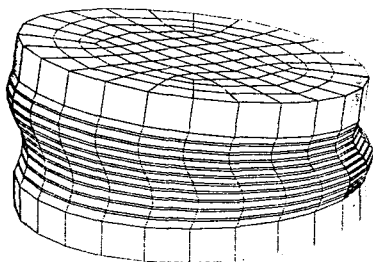
Mode No. 4 166.9 Hz, 2차 X 방향 전단



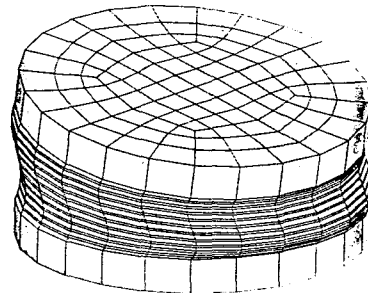
Mode No. 5 166.9 Hz, 2차 Y 방향 전단



Mode No. 6 167.9 Hz, 2차 Z 방향 비틀림



Mode No. 7 297.8 Hz, X 축 비틀림



Mode No. 8 297.8 Hz, Y 축 비틀림

그림 5. Type 1 면진베어링의 모드 해석 결과