

# 면진베어링 유한요소해석

## Finite Element Analysis of Seismic Isolation Bearing

이재한\*, 유 봉\*\*, 구경희\*  
Lee, Jae-Han Yoo, Bong Koo, Gyeong-Hoi

---

### ABSTRACT

The combined shear and compression behaviors of seismic isolation rubber bearings are analyzed using the hyperelasticity material option of the ABAQUS computer program. The purpose of the analysis is to predict the behavior of laminated rubber bearing before the several tests. Some kinds of strain energy density functions are used as constitutive law for rubber itself having the hyperelasticity. The results are compared with test data performed in Italy. The analysis results show a little different with experimental results depending on the constitutive model and the refinement of finite element. The high order form of strain energy density functions results in good agreements and the mesh refinement above two for one rubber layer is enough to get good results.

---

### 1. 서론

큰 지진 시에 상구조물로의 지진에너지의 전달을 차단하는 면진베어링은 얇은 가황고무판과 강판의 반복된 적층으로 구성되며 이들 사이는 화학적 접착이 되어 있다. 면진베어링에 사용되는 고무는 비선형이 크고, 큰 변형에 견디는 등방성 과탄성 재료로서 일반 탄성론에 근거한 유한요소로는 그 거동을 표현하기가 어렵다[1,2]. 본 연구에서는 전단강성이 비교적 작은 고무재료에 대하여 수평 및 수직변형을 해석하기 위한 ABAQUS의 과탄성재료(hyperelastic material) 이론에 근거한 유한요소 해석절차를 정립하고, 해석결과의 신뢰성 검토를 위하여 면진베어링 성능시험결과와 비교하였다. 해석모델은 Italy ALGA에서 제작하고 ENEA에서 시험을 수행한 면진베어링으로 하였다.

### 2. 과탄성고무의 변형에너지함수

수직하중과 큰 전단변형을 받는 면진베어링의 거동을 해석하기 위하여 ABAQUS 유한요소해석 프로그램을 사용하였다. ABAQUS 이용 시에 두 방법이 유효한데, 첫째는 고무시험 data를 입력으로 주는 방법이며, 두 번째는 고무시험 data로부터 변형에너지함수(strain energy density function)를 구하고 ABAQUS 사용자정의 부프로그램(user subroutine)에 이를 입력하는 방법이다. 고무 소재에 대한 시험은 단축인장(uniaxial), 등이축(equibiaxial), 순수전단(planar)시험 중에서 최

---

\* 한국원자력연구소 선임연구원

\*\* 한국원자력연구소 책임연구원

소한 2가지 이상의 시험자료가 변형에너지함수를 구하는데 요구되며, 수직방향으로의 변형 특성을 정확히 알기 위해서는 압축시험(volumetric test)자료가 필요하다.

특히 고무는 큰 변형률을 갖기 때문에 이의 정확한 모델링은 면진베어링의 거동을 예측하기 위해 매우 중요하며, 등방성을 갖는 고무재료의 변형에너지함수(U)를 변형도 텐서의 불변값인  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  및  $J$ 의 함수로 표현하는 재료모델은 다음과 같다.

## 2.1 다항식(polynomial) 변형에너지 함수

고무거동의 지배방정식을 유도하기 위하여 고무의 변형에너지함수(U)를 다음과 같이 다항식 형태로 정의한다[3].

$$U = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1-3)^i (\bar{I}_2-3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el}-1)^{2i}$$

여기서  $\bar{I}_1$ 과  $\bar{I}_2$ 는 편차(deviatoric)변형의 1차 및 2차 불변값(invariant)으로 다음과 같이 주신장(principal stretch)값으로 나타난다.

$$\bar{I}_1 = \bar{\lambda}_1^2 + \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_3^2$$

$$\bar{I}_2 = \bar{\lambda}_1^2 \bar{\lambda}_2^2 + \bar{\lambda}_2^2 \bar{\lambda}_3^2 + \bar{\lambda}_3^2 \bar{\lambda}_1^2, \text{ 그리고}$$

$J$ 는 탄성 체적비,  $C_{ij}$ 와  $D_i$ 는 변형에너지함수의 상수 그리고  $N$ 은 에너지함수의 차수이며,  $D_i$ 는 고무의 압축성을 나타낸다. 그리고  $C_{ij}$ 는 변형과 응력분포가 단순한 상태를 경계조건으로 갖는 다음의 고무시험자료와 변형에너지함수의  $\bar{I}_1, \bar{I}_2$  및  $J$ 에 대한 미분식과의 관계로부터 구할 수 있다[3].

- Uniaxial mode :  $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_U, \bar{\lambda}_2 = \bar{\lambda}_3 = \bar{\lambda}_U^{-1/2}, \bar{\lambda}_U = 1 + \epsilon_U$
- Equibiaxial mode :  $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_2 = \bar{\lambda}_B, \bar{\lambda}_3 = \bar{\lambda}_B^{-2}, \bar{\lambda}_B = 1 + \epsilon_B$
- Planar(pure shear) mode :  $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_S, \bar{\lambda}_2 = 1, \bar{\lambda}_3 = \bar{\lambda}_U^{-1}, \bar{\lambda}_S = 1 + \epsilon_S$
- Volumetric mode :  $\bar{\lambda}_1 = \bar{\lambda}_2 = \bar{\lambda}_3 = \bar{\lambda}_V, J = \bar{\lambda}_V^3$

그림 1에는 Italy ENEA에서 수행한 고무시험자료를 나타냈으며,  $N=2$ 인 변형에너지함수의 다항식 모델을 사용했을 경우에 계산된 함수의 계수 값은 다음과 같다.

$D_1$	$C_{10}$	$C_{01}$	$C_{02}$
0.00125	0.1552	0.0053	
0.00004	0.0075	0.000088	-0.00056

그리고  $N=1$ 인 변형에너지함수의 다항식 모델을 사용했을 경우에는 Mooney-Rivlin모델이 되며, 이 때의 계수 값은 다음과 같다.

$D_1$	$C_{10}$	$C_{01}$
0.00094	0.3695	-0.04942

## 2.2 Ogden 변형에너지 함수

고무거동의 지배방정식을 유도하기 위하여 고무의 변형에너지함수(U)를 다음과 같은 주신장(principal stretch)값의 함수형태로 정의한다.

$$U = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J_{el}-1)^{2i}$$

여기서  $\mu_i, \alpha_i, D_i$ 는 고무의 변형에너지함수를 구성하는 계수이고,  $N$ 은 에너지함수의 차수이다.

그리고  $D_i$ 는 고무의 압축성을 나타내며,  $\mu_i, a_i$ 는 변형과 응력의 단순상태를 경계조건으로 갖는 앞에서 나타낸 고무시험으로부터 정할 수 있다.

그림 1의 고무시험자료에 대하여 N=3을 갖는 Ogden 모델을 사용했을 경우의 변형에너지함수의 계수는 다음과 같다.

$i$	$\mu_i$	$a_i$	$D_i$
1	1.936	0.192	0.0012
2	0.049	4.269	0.000028
3	-1.557	-0.062	-0.000001

### 2.3 Seki's 모델[4]

앞의 변형에너지함수는 고무시험 결과를 표현할 때 작은 변형영역에서의 고무거동을 정확하게 표현하지 못한다. 이를 보완하기 위하여 Seki는 다음과 같은 지수항을 포함하는 변형에너지함수의 미분함수를 제안하였다[4].

$$\frac{\partial W}{\partial I_i} = a_i + b_i (I_i - 3) + c_i (I_i - 3)^2 + d_i \exp(e_i (I_i - 3)), i=1,2,3$$

여기서  $I_1$ 과  $I_2$ 는 편차(deviatoric) 변형의 1차 및 2차 불변값(invariant)이다. 이 함수의 계수를 구하기 위해서는 앞서의 시험자료 또는 biaxial 고무시험을 수행하여야 한다. 비압축성( $I_3=1$ )으로 가정하고, 제시된 시험자료에 대하여 변형에너지함수의 계수는 다음과 같이 계산된다.

$i$	$a_i$	$b_i$	$c_i$	$d_i$	$e_i$
1	0.1952	0.01617	-0.000074	0.1616	-0.2159
2	0.00859	-0.02571	0.001105	-0.0791	-0.6383

## 3. 유한요소해석 결과

### 3.1 면진베어링 치수 및 모델링

해석에 사용된 면진베어링의 치수는 직경이 125mm, 형상계수 12이고, 고무층이 12개로, 각 고무층의 두께가 2.5mm이다. 고무의 전단탄성계수는 0.4GPa로 유연한 고무재질로 이루어졌으며, 고무층 사이에 존재하는 철판의 두께는 1.0mm이고, 상하단 철판(end plate)의 두께는 10mm, 직경은 120mm이다. 이로부터 면진베어링의 총 높이는 61mm가 되며, 이 중에서 고무층의 전체 높이는 30mm 이다.

유한요소해석을 위해 원통형상 및 작용하중의 비대칭특성에 따라 그림 2와 같이 면진베어링의 절반을 모델링 하였으며, 3차원요소를 사용한 경우 반경방향으로의 요소 수는 5개를, 원주방향으로는 19개를 사용하였다. 경계조건으로 면진베어링 하단의 변위를 구속하고, 상단의 수직방향 변위는 그림 3과 같이 균일한 변형이 되도록 상호 연계시켰다.

수직방향의 하중은 설계하중인 100kN을 8.84MPa의 분포압력으로 상단 표면에 가했으며, 하중의 적용순서는 먼저 수직방향으로 설계하중을 가한 상태에서 수평방향으로 최대 400% 전단변위를 증분하중 또는 변위형태로 가했다. 해석에는 비축대칭 하중을 갖는 2차원 축대칭요소와 3차원 고체요소를 사용하였다.

### 3.2 2차원 축대칭요소 사용

본 요소는 해석시간의 단축을 위해 수평방향의 전단변위해석에 비축대칭 하중을 갖는 2차원 축대칭요소(CAXA41)를 사용하였다. 수직설계하중을 먼저 가한 상태에서 수평 전단하중을 가한 해석결과는 그림 4에서 보는 바와같이 수평방향의 변위는 각 고무층에 대하여 두께방향으로 사용된 요소의 개수에 따른 차이가 크지 않았다. 그러나, 고무재료의 모델링 방법에 따라서는 그림 5

와 같이 해석결과가 선형성을 보이는 Mooney Rivlin 모델은 시험결과와 차이가 발생되나 Polynomial 및 Ogden 방법 모두 수평방향의 전단변위는 시험결과와 비교적 잘 일치하였다.

### 3.3 3차원 고체요소 사용

해석의 정확성을 얻기 위하여 3차원 고체요소(C3D8H)를 사용하였다. 먼저 면진베어링의 각 고무층에 대하여 두께방향으로 1개의 요소만을 사용한 경우 수평방향의 변형량은 그림 6(a),6(b)에 나타낸 바와 같다. 그림 6(a)에서 보는 바와같이 Polynomial과 Ogden 두 모델이 Mooney Rivlin 모델 및 Seki's 모델에 비하여 시험결과의 비선형 특성과 잘 일치하였으며, Seki's 모델은 Mooney Rivlin 모델과 반대로 200% 전단변형 시까지 시험결과와 비교하여 강성이 낮게 평가되었으며, 수평방향으로 60 증분을 사용한 본 해석 조건에서는 전단변형 200% 이상에서는 수렴하지 못 하였다. 그리고 각 방법에 대하여 수평방향 해석시 면진베어링의 각 고무층에 대하여 두께방향으로 2 또는 3개의 요소를 사용하고 하중 증분 수를 증가 시켰으나 전단변형이 50% 이하에서 모두 수렴하지 못하였다.

수직방향의 변형해석시 그림 7에 나타난 바와같이 면진베어링의 고무층에 대하여 최소한 2개 이상의 요소를 두께방향으로 사용해야 해석의 정확성을 갖는 것이 확인되었으며, Polynomial과 Ogden 두 모델이 Mooney Rivlin 모델에 비하여 시험결과와 잘 일치하였으며, Seki's 모델은 압축 시험결과를 반영하지 않았기 때문에 압축변형이 Mooney Rivlin 모델보다도 작게 나타났다.

고무층의 두께방향으로 2개 이상의 요소를 사용할 경우 전단변위가 커짐에 따라 수렴성 문제를 해결하기 위해서는 전제 전단하중에 대하여 300 증분 이상의 매우 좁은 해석시간 간격(step size)을 사용하였으나 좋은 결과를 얻지 못 하였다. 계산시간에 크게 제한이 없다면 좀더 작은 시간 간격의 사용이 필요하다.

## 4. 결론

면진베어링의 유한요소 해석결과로부터 적절하게 격자구조가 형성될 경우 유한요소해석으로 면진베어링의 수평 및 수직거동을 예측할 수 있었다.

3차원 유한요소를 사용한 해석결과와 2차원 축대칭요소를 사용한 결과는 큰 차이가 없으나 해석 시간은 3차원 요소를 사용한 경우가 10배 이상 소요되었으며, 수렴성도 좋지 않았다. 수직방향의 변형해석시에는 면진베어링의 각 고무층에 대하여 두께 방향으로 2개 이상의 요소를 사용해야 좋은 결과를 얻을 수 있다. 그러나 수평방향의 변형해석시에는 사용요소의 수가 적어도 시험결과와 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 적용하중의 증분 수가 작아도 수렴이 잘 되었다.

국내 제작한 KAERI 면진베어링에 대한 유한요소해석은 아직까지 수행하지 못하였는데, 이는 고무 시험자료를 아직 얻지 못 하였기 때문이다. 고무시험자료가 확보되는 대로 면진베어링에 대한 유한요소해석을 수행할 계획이다. 또한 고감쇠 및 납삼입형 면진베어링의 감쇠특성이나 이력에 따른 강성의 변화 등을 예측하는 유한요소해석도 시도할 계획이다.

## 5. 참고 문헌

- [1] IAEA Research Co-ordination Meeting(RCM) on "Intercomparison of Analysis Methods for Seismically Isolated Nuclear Structures," St. Petersburg, Russian Federation,27-31 May 1996.
- [2] 김종인, 유봉, "액체금속로용 면진베어링의 구조해석," 한국전산구조공학회 학술발표회논문집, 1993년 10월.
- [3] ABAQUS User's Manual for Revision 5.5, Hibbit, Karlson & Sorenson Inc.,1996.
- [4] Wataru Seki, et al., "A large-deformation Finite Element Analysis for Multilayer Elastomeric Bearings," 133th American Chemical Society, Montreal, Canada (May 26-29, 1987).

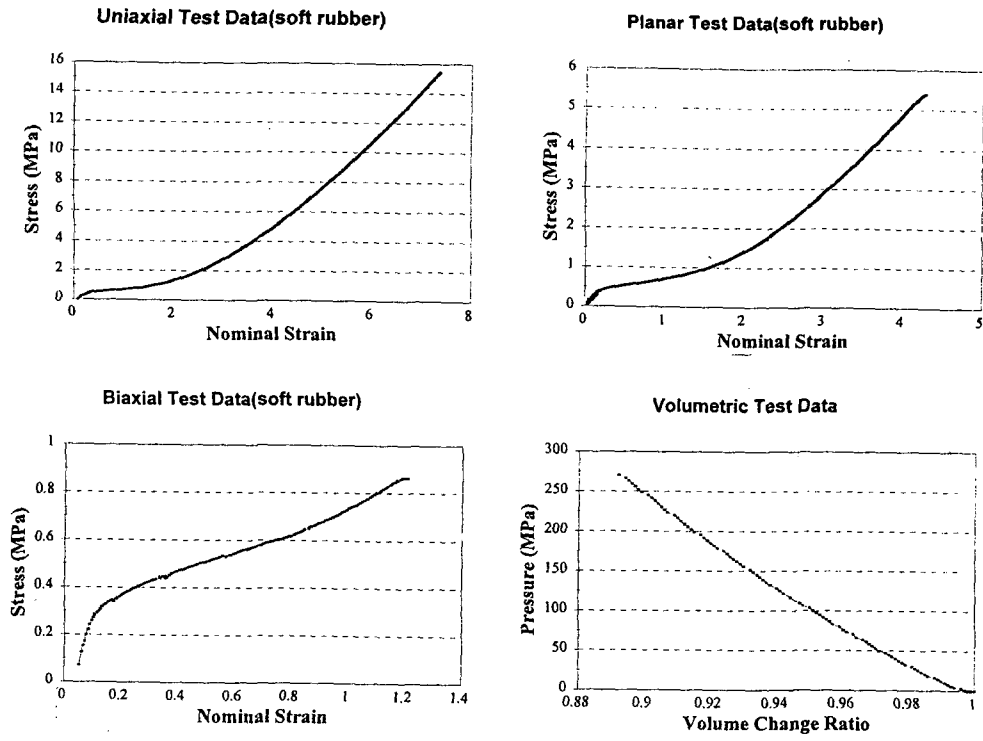


그림 1. Rubber Material Properties

## ABAQUS

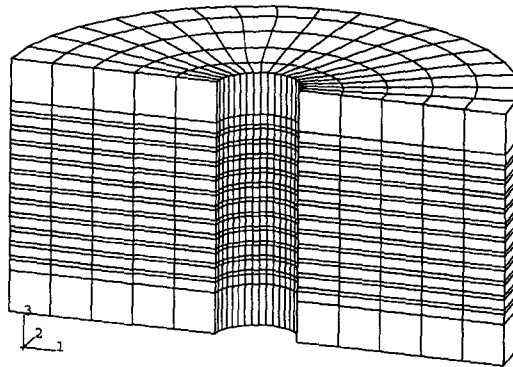


그림 2. Finite Element Mesh of Isolator

# ABAQUS

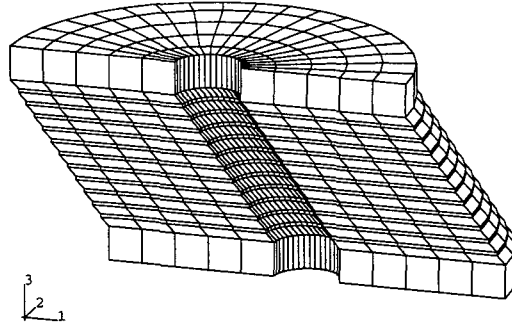


그림 3. Deformed Shape of Isolator under Shear Force

## Displacement for Horizontal Force (OGDEN (N=3))

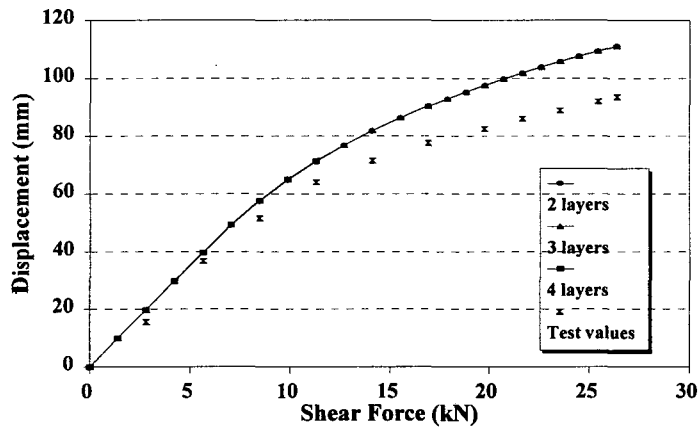


그림 4. Displacements of Isolator According to Element Layers

## Displacement for Horizontal Force (rubber with 3 layers)

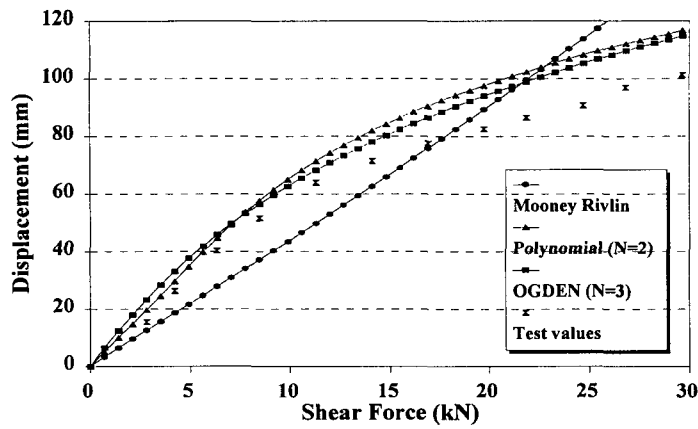


그림 5. Displacements of Isolator for Horizontal Force(Axisymmetric Element)

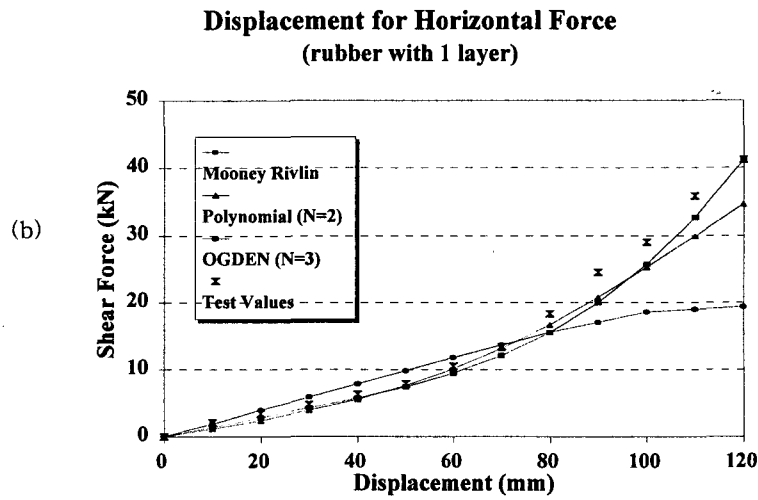
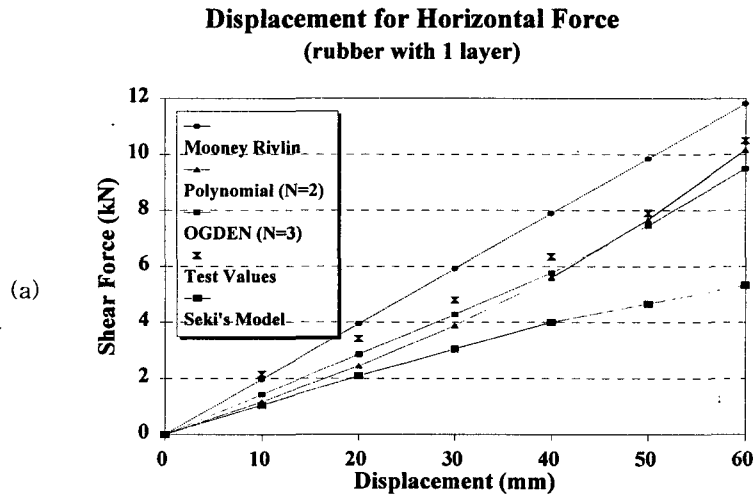


그림 6. Displacements of Isolator for Horizontal Force(3D Element)

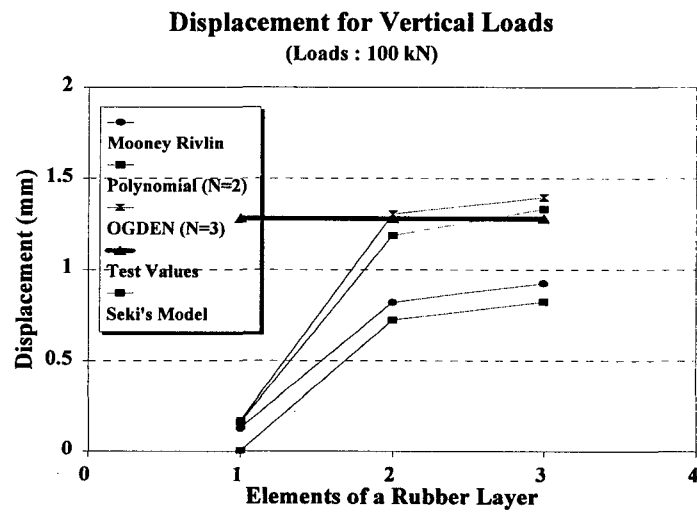


그림 7. Vertical Displacement of Isolator under Vertical Loads(3D Element)