

초탄성 재료의 변형률에너지함수를 이용한 LRB받침의 유한요소해석

조성국* · 박웅기** · 윤성민***

Cho, Sung Gook*, Park, Woong Ki**, Yun, Sung Min***

Finite Element Analysis of Lead Rubber Bearing by Using Strain Energy Function of Hyper-Elastic Material

ABSTRACT

The material property of the rubber has been studied in order to improve the reliability of the finite element model of a lead rubber bearing (LRB) which is a typical base isolator. Rubber exhibits elastic behaviour even within the large strain range, unlike the general structural material, and has a hyper-elastic characteristics that shows non-linear relationship between load and deformation. This study represents the mechanical characteristics of the rubber by strain energy function in order to develop a finite element (FE) model of LRB. For the study, several strain energy functions were selected and mechanical properties of the rubber were estimated with the energy functions. A finite element model of LRB has been developed by using material properties of rubber and lead which were identified by stress tests. This study estimated the horizontal and vertical force-displacement relationship with the FE model. The adequacy of the FE model was validated by comparing the analytical results with the experimental data.

Key words : Isolation bearing, Lead Rubber Bearing (LRB), Hyper-elastic, Strain energy function, Finite element model

초록

이 연구는 대표적인 면진장치인 납고무베어링(LRB)의 유한요소모델의 신뢰성을 향상시키기 위하여 주재료인 고무의 재료특성에 대하여 연구하였다. 고무는 일반적인 탄성재료와는 달리 대변형, 비선형특성을 가지는 초탄성 재료이다. 본 연구에서는 고무를 초탄성 재료로 가정하고 그의 재료특성을 변형률에너지함수로 표현하여 LRB의 유한요소모델을 개발하였다. 연구를 위하여 여러 변형률에너지함수 중 몇 가지를 선별하고 이를 이용하여 고무의 재료특성을 예측하였다. 변형률에너지함수를 이용하여 결정된 고무의 재료특성과 표준적인 납의 재료특성을 이용하여 LRB의 유한요소모델을 개발하고, 수평방향과 수직방향의 힘-변위 관계를 해석하였다. LRB의 유한요소모델을 통하여 해석으로 예측한 수평과 수직방향 강성을 실험결과와 비교함으로써 개발된 유한요소모델의 적합성을 검증하였다.

검색어 : 면진장치, 납고무베어링, 초탄성, 변형률에너지함수, 유한요소모델

1. 서론

납고무베어링(lead rubber bearing : LRB)은 고무의 탄성과 납의 소성 성질이 상호작용을 이루며 역학적 기능을 유지하는 면진받침(seismic isolation bearing)의 한 종류이다. LRB는 건물이나 대형 구조물에서 소형 설비에 이르기까지 폭넓게 사용되는 면진장치이다. 면진구조물의 설계를 위하여 외부하중에 대하여 LRB받침의 특성 및 한계상태를 분석하는 것이 필요하다. 특히 LRB받침의 해석에 대한 신뢰성을 확보하기 위하여 주재료인 고무의 비선형 역학특성을 규명(identification)하는 것은 중요한 선결문제이다. LRB를 유한요소

* 중신회원·이노스기술(주) 대표이사 (Innose Tech·sgcho@innose.co.kr)

** 교신저자·이노스기술(주) 과장 (Corresponding Author·Innose Tech·wkpark@innose.co.kr)

*** 이노스기술(주) 대리 (Innose Tech·smyun@innosetech.com)

Received May 13, 2015/ revised December 21, 2015/ accepted April 3, 2016

델로써 정확하게 표현할 수 있다면, 고비용의 어려운 실험을 대신하여 장치의 역학특성의 표현이 가능하므로 실무적인 차원에서 많은 잇점을 얻을 수 있다. 이러한 잇점에 기대어 설계의 경제성 측면에서 LRB의 유한요소(finite element)모델 개발이 좀 더 필요해진다.

LRB받침의 한계상태를 분석하기 위해서는 먼저 고무와 납의 비선형재료 특성을 정확하게 규명하여야 한다. 이것은 실험을 통한 연구에 의존되어야 하고 많은 노력과 시간이 요구되며 규모가 커지면 실험을 수행하는 것에 어려움이 상승한다. 이러한 환경을 극복하기 위하여 해석을 통한 방법이 필요하다. 해석결과의 신뢰성을 높이기 위하여 재료의 비선형 특성분석에 보다 많은 노력이 요구된다. 고무는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이며 대변형 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성(hyperelastic) 특성과 시간에 따라 재료의 물성치가 변하는 점탄성(viscoelastic) 특성을 나타내는 특수한 재료이다. 그러므로 LRB의 유한요소해석에서는 고무의 특성을 합리적으로 구현할 수 있는 정확한 구성방정식의 결정이 중요하다.

과거에 국내의 기계분야 연구로서 고무에 대한 재료실험을 수행하고 변형률에너지함수에 대한 계수를 산정하여 자동차용 부품에 대한 유한요소해석을 수행한 사례(Kim et al., 1993)가 발표되었다. 고무의 실험데이터를 통하여 변형률에너지함수의 계수를 결정하고 이를 이용하여 고무와 알루미늄이 적층된 구조물의 변형 거동을 분석한 연구(Park et al., 2000)가 제시된 바 있다. 그리고 Kim et al. (2004)은 고무에 대한 유한요소해석의 정확성을 높이기 위하여 여러 종류의 재료실험을 수행하고 해석결과와의 비교를 통하여 고무의 전단탄성계수에 대한 공식을 제시하였다.

해외에서는 Seki et al. (1987)을 비롯하여 여러 연구자들이 고무가 주재료인 면진받침의 초탄성 유한요소모델을 개발하였다. Yoshida et al. (2004)은 고감쇠 고무받침의 구성방정식을 정식화하고 유한요소모델을 작성하여 3차원 유한요소 해석을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 그 결과 작성된 유한요소모델은 실험결과와 잘 일치함을 확인하였으며, 비틀 및 회전변형과 같은 복잡한 변형을 유한요소모델로 구현하였고, 이러한 거동에 대한 설계식이 제안되었다.

LRB에서 주재료는 고무이지만 고무에 삽입되는 납봉(lead plug) 역시 지진의 에너지를 흡수하는 중요한 재료이다. Satoshi et al. (2007)은 온도에 따라 거동이 변하는 납의 재료적 특성을 고려하여 온도에 따른 복원특성을 반영하여 유한요소모델을 개발한 바 있다. Warn et al. (2006)은 LRB에 대한 유한요소모델의 검증에 위하여 납이 삽입된 탄성고무받침의 유한요소모델을 작성하고 유한요소모델의 강성 특성을 전단 및 압축강성시험으로 검증하였다. 그 결과 설계기준의 수평과 수직강성 계산식을 검토함으로써 설계기준에서 제시하는 강성 공식에 대한 신뢰성을 입증하였다.

면진장치는 일반적으로 수직방향 강성이 수평방향 강성에 비해 상대적으로 크고 선형 강성의 특성을 보인다. Warn et al. (2007, 2008)은 탄성받침과 LRB받침의 수직강성에 대한 수평변위의 영향을 파악하기 위하여 수직강성 계산식을 제안하고 장치의 설계에서 수직 응답에 대한 검토의 중요성을 언급하였다. 또한, 원전과 같이, 구조물 자체의 내진성능과 함께 내부에 설치된 기기에 대한 내진성능의 확보도 중요하게 취급되어야 하는 경우, 수직방향 지진 응답에 대한 영향이 필수적으로 검토되어야 한다(Zhou, 2013). Furukawa (2013)는 3차원 진동대 실험을 통하여 수평면진이 적용된 구조물의 내부 기기들이 수직진동에 취약하다는 사실을 확인하였다.

면진받침에 대한 유한요소해석에서 보다 신뢰성 있는 결과를 위해서는 고무에 대한 정확한 구성방정식의 선택이 요구된다. 그리고 납과 삽입철판을 포함하여 전체 LRB에 대한 유한요소모델 개발이 필요하다. 또한, LRB로 인하여 구조물의 수직지진응답의 변화를 분석하기 위해서 LRB의 수직강성에 대한 정확한 계산이 필요하다. 이 연구에서는 유한요소해석을 통하여 LRB장치의 특성을 분석하였다. 연구를 위하여 고무에 대한 여러 연구자들의 변형률에너지함수를 조사하고 몇 개의 방정식을 선택하여 고무의 특성에 부합하는 각 함수의 계수를 결정하였다. 그리고 LRB 시편을 대상으로 비선형 정적해석을 수행한 후 수평 및 수직 강성을 산출하였다. 해석으로 산출된 강성과 시편의 성능실험결과를 비교하여 해석의 신뢰성을 검토하였다.

2. 고무의 재료비선형

LRB 면진받침을 구성하는 재료는 고무와 철판 그리고 납이다. 그 중에서도 고무는 LRB의 특성과 기능을 지배하는 주재료이다. 고무는 큰 변형상태에서도 탄성을 유지하며, 힘-변형의 관계가 비선형적인 특성을 보이는 초탄성재료(hyperelastic material)이다. 고무가 포함된 물체를 유한요소법으로 해석할 때는 실험에서 얻은 응력-변형률 관계를 가장 적절히 표현할 수 있는 적합한 구성방정식(constitutive equation)을 결정하는 것이 중요하다.

2.1 고무의 구성방정식

일반 탄성론에서는 물체에 하중이 가해지면 변형이 발생하게 되고, 이후 하중을 제거하면 원래 상태로 복원되며 하중과 변형과의 관계는 선형으로 나타낼 수 있다. 반면에, 고무재료는 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 구간에서도 탄성 거동을 나타낸다. 고무재료의 유한변형(finite deformation) 혹은 대변형의 탄성거동에 대하여 단위체적당 변형률에너지(strain energy)의 변화율이 응력에 의한 일률과 같다는 개념을 이용하여 설명할 수 있다. 변형률에너지함수의 계수 값들은 재료실험을 통하여 구해진 응력변형률의 실험데이

터를 응력-변형률 관계의 함수식으로 곡선적합(curve fitting)하여 실험 값과의 차이를 최소화하는 과정을 통하여 결정된다.

유한요소해석에서 재료의 초탄성모델은 변형률에너지함수(strain energy function)로 표현되고, 다음과 같은 관계를 가진다(Rivlin, 1948).

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial W}{\partial E_{ij}} \quad (1)$$

여기서, σ_{ij} 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력텐서(stress tensor), W 는 변형률에너지함수, E_{ij} 는 Green-Lagrange 변형률텐서이며 다음과 같이 표현된다.

$$E_{ij} = \frac{1}{2}(F^T F - I) \quad (2)$$

여기서, F 는 변형구배텐서(deformation gradient tensor)이고, F^T 는 F 의 변환행렬이다. $F_{ij} = \partial x_i / \partial X_j$ 이며, x_i 와 X_j 는 각각 변형 전과 후의 선요소 벡터이다. I 는 단위텐서(unit tensor)이다.

고무의 거동은 여러 형태의 변형률에너지함수로 표현될 수 있는데, 일반적으로 주변형률불변량(principal invariant)의 함수로 표현한다(Rivlin, 1948). 이 때, 고무의 변형에서 재료의 거동은 ①

탄성적이고 ② 등방성이며 ③ 비압축성으로 가정한다. ①과 ②의 가정으로부터 변형률에너지함수 W 는 변형률불변량(strain invariant)의 함수로 표현될 수 있다.

$$W = W(I_1, I_2, I_3) = W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) \quad (3)$$

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2 \quad (4a)$$

$$I_2 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_1^2 \lambda_3^2 \quad (4b)$$

$$I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (4c)$$

여기서, W 는 단위부피당 변형률에너지밀도(strain energy density)이며 I_1, I_2, I_3 는 Eqs. (4a)-(4c)에서와 같이 주연신률 $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 에 대한 불변량들이다. 고무는 비압축성 재료이므로 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ 즉, $I_3 = 1$ 이며, $I_2 = 1/\lambda_1^2 + 1/\lambda_2^2 + 1/\lambda_3^2$ 이 된다.

2.2 다항식 변형률에너지함수

재료의 초탄성 특성을 표현하는 변형률에너지함수의 기본적인 형태는 다항식으로 구성할 수 있다(ABAQUS, 2012).

Table 1. Modified Strain Energy Functions with the Polynomial Form

Proposer	Strain Energy Functions
Mooney-Rivlin (1948)	$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{01}(\bar{I}_2 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^e - 1)^2$ Where, C_{10}, C_{01}, D_1 : temperature-dependent material parameters \bar{I}_1, \bar{I}_2 : first and second deviatoric strain invariants
Neo-Hookean (1948)	$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + \frac{1}{D_1}(J^e - 1)^2$ Where, C_{10}, D_1 : temperature-dependent material parameters \bar{I}_1 : first deviatoric strain invariant
Ogden (1972)	$W = \sum_{i=1}^N \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\bar{\lambda}_1^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_2^{\alpha_i} + \bar{\lambda}_3^{\alpha_i} - 3) + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^e - 1)^{2i}$ Where, μ_i, α_i, D_i : temperature-dependent material parameters N : material parameter $\bar{\lambda}_i$: deviatoric principal stretches
Polynomial (1951)	$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^e - 1)^{2i}$ Where, C_{ij}, D_i : temperature-dependent material parameters N : material parameter
Yeoh (1993)	$W = C_{10}(\bar{I}_1 - 3) + C_{20}(\bar{I}_1 - 3)^2 + C_{30}(\bar{I}_1 - 3)^3 + \frac{1}{D_1}(J^e - 1)^2 + \frac{1}{D_2}(J^e - 1)^4 + \frac{1}{D_3}(J^e - 1)^6$ Where, C_{10}, D_i : temperature-dependent material parameters \bar{I}_1 : first deviatoric strain invariant

$$W = \sum_{i+j=1}^N C_{ij} (\bar{I}_1 - 3)^i (\bar{I}_2 - 3)^j + \sum_{i=1}^N \frac{1}{D_i} (J^e - 1)^{2i} \quad (5)$$

여기서, \bar{I}_1 과 \bar{I}_2 는 편차변형(deviatoric)의 1차 및 2차 불변량으로 주신장량(principal stretch) 값으로 나타낸다. J^e 는 탄성체적비, C_{ij} 와 D_i 는 온도의존성 재료상수, N 은 에너지함수의 차수이다. D_i 는 고무의 압축성을 나타내는 상수로서 D_i 가 0이라면 재료는 완전히 비압축성으로 간주된다.

변형률에너지함수는 제안자들에 따라 약간씩 다른 형태의 식으로 개발되었다. 기존의 여러 선행연구자들에 의해서 실용성과 신뢰성이 높게 알려진 변형률에너지함수는 Mooney-Rivlin (1948), Neo-Hookean (1948), Polynomial (1951), Ogden (1972), Yeoh (1993)가 제안한 함수이다. 이들 함수의 형태를 Table 1에 정리하였다.

2.3 변형률에너지함수의 비교

표준적인 고무의 특성을 대상으로 앞서 조사된 변형률에너지함수를 이용하여 재료의 특성을 추정하고, 실험자료와 비교하였다. 고무시편에 대한 재료특성은 1축인장(uniaxial), 2축인장(equibiaxial),

순수전단(pure shear) 및 체적실험에 의해 규명된다. 변형률에너지함수를 구하는데 있어 1축인장, 2축인장, 순수전단실험 중 최소한 2가지 이상의 실험 자료가 필요하다. 거기에 수직방향으로의 변형 특성을 정확히 알기 위해서는 체적실험 자료가 더 필요하다. 이 연구에서는 표준적인 고무의 재료특성을 얻기 위하여 Italy ENEA (1996)에서 수행한 실험 자료를 인용하였으며, Fig. 1에 나타내었다. 고무의 재료실험 데이터에 대하여 Table 1에 나타난 함수식으로 곡선적합(curve fitting)을 반복 적용하여 재료상수를 산출하고 Table 2에 나타내었다.

Table 2와 Figs. 2-6은 Fig. 1에 보인 고무의 실험자료를 대상으로 Table 1에서 언급한 변형률에너지함수를 적용하여 구한 응력-변형률 곡선과 각각의 식에 대한 계수를 나타낸 것이다. 변형률에너지함수를 비교하면, Mooney-Rivlin 식과 Neo-Hookean 식은 초기부터 실험결과와 다소 많은 차이를 보인다. 다항식, Ogden 식, Yeoh 식이 대변형 구간에서도 실험결과를 잘 추정하고 있음을 알 수 있다. 수직강성에 연관된 체적실험 자료에서는 다항식함수와 Ogden 함수 모델이 실험결과를 매우 근접하게 추정하고 있으나 Mooney-Rivlin 식은 좀 더 큰 오차를 보인다.

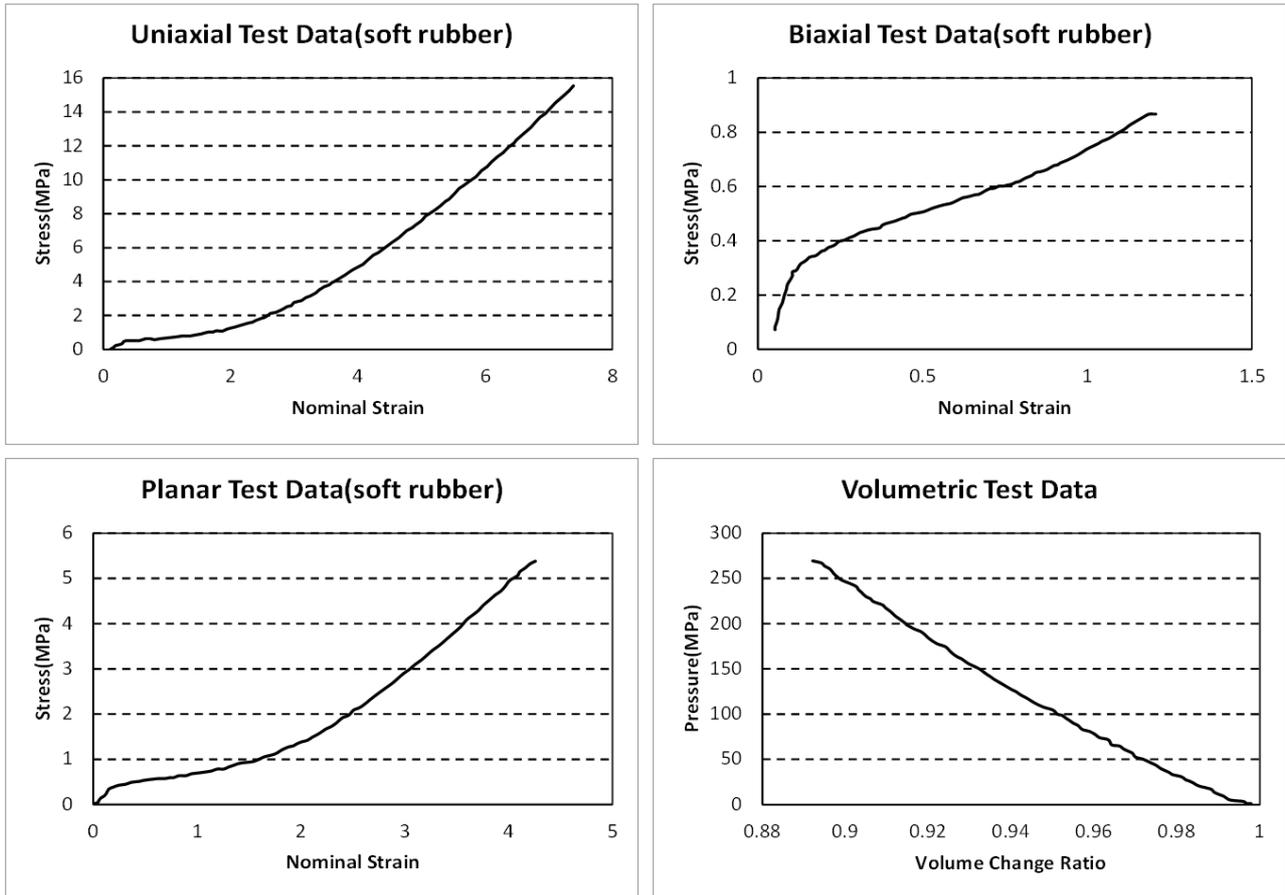


Fig. 1. Soft Rubber Compounds Material Properties (ENEA HDRB)

Table 2. Coefficients of Selected Strain Energy Functions

Proposed formula	Symbol	Temperature-dependent Material Parameters						
				C_{10}	C_{01}		D_i	
Mooney-Rivlin	MR	-0.08159		0.440317		0.00092		
Neo-Hookean	NH	μ				D		
		0.45283				0.001466		
Ogden	OG	i	μ_i	α_i	D_i			
		1	2.647	-0.098	0.00132			
		2	0.087	3.797	0.0000198			
		3	-2.326	0.2387	-0.0000006			
Polynomial	PN	D_1	D_2	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}
		0.001164	0.175008	-0.00736	0.000049	0.005972	0.001298	-0.00052
Yeoh	Y	C_{10}	C_{20}	C_{30}	D_1	D_2	D_3	
		0.178831	-0.004491	0.0000247	0.001325	0.00001987	-0.00000057	

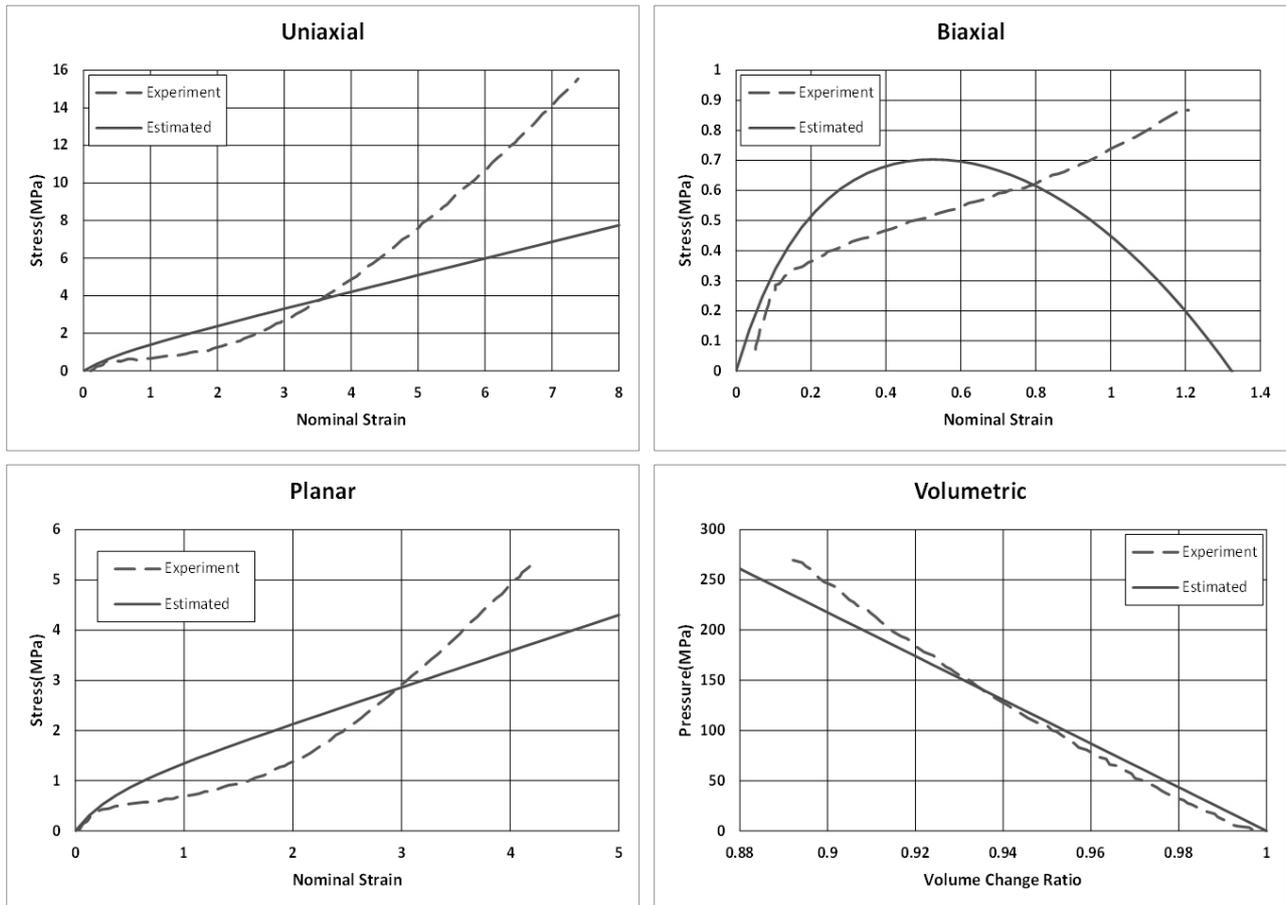


Fig. 2. Properties Estimated by Mooney-Rivlin's Equation

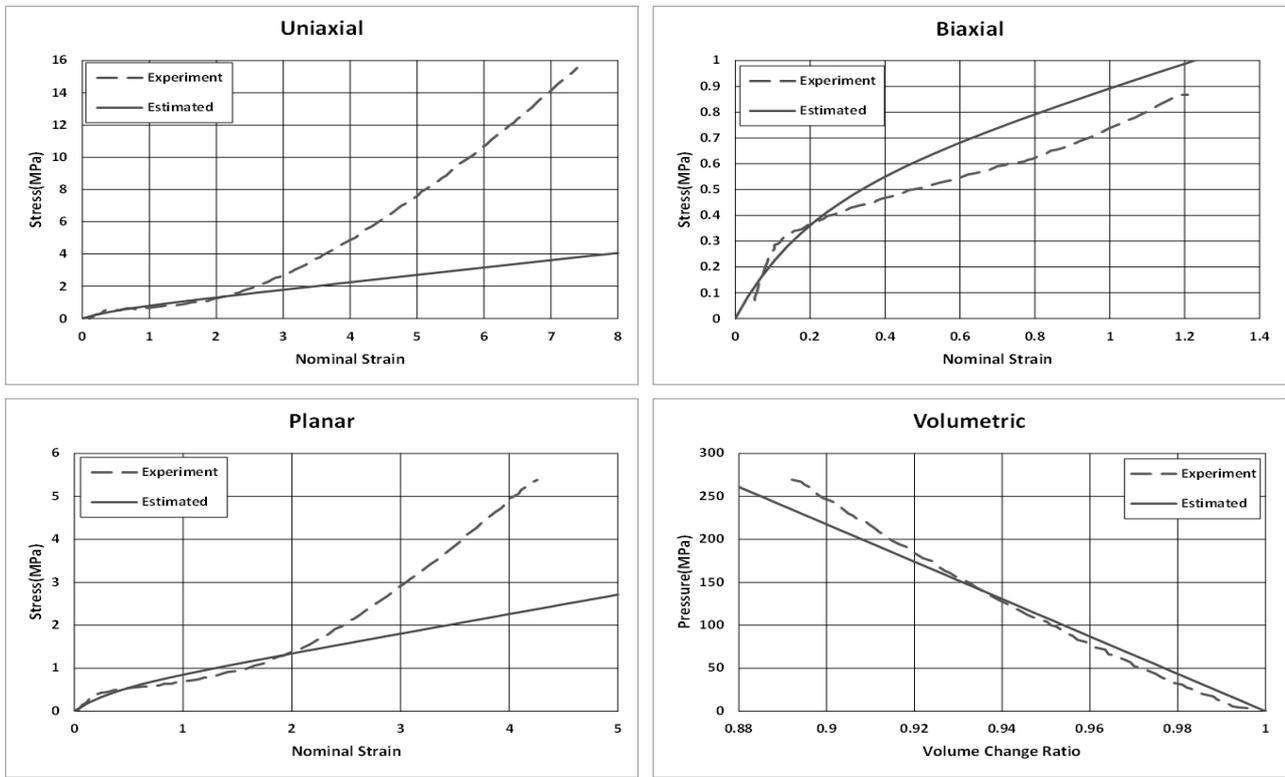


Fig. 3. Properties Estimated by Neo-Hookean's Equation

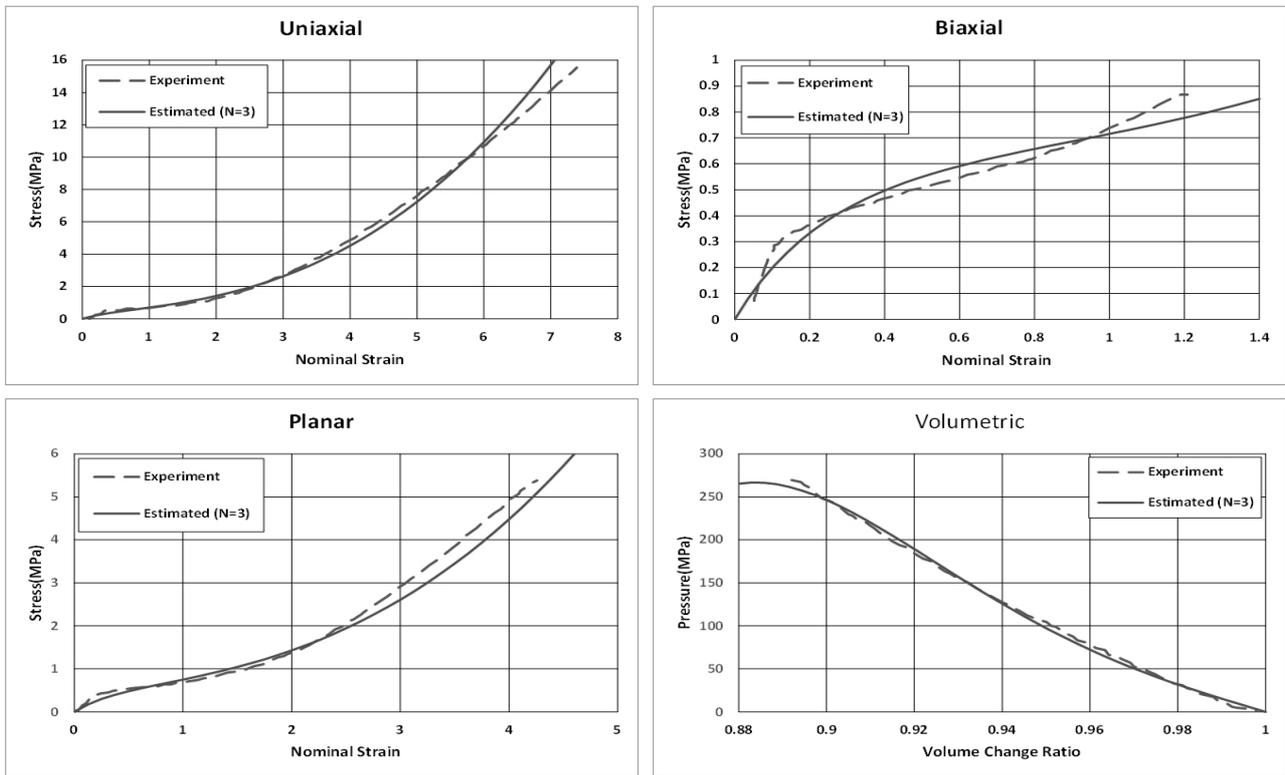


Fig. 4. Properties Estimated by Ogden's Equation

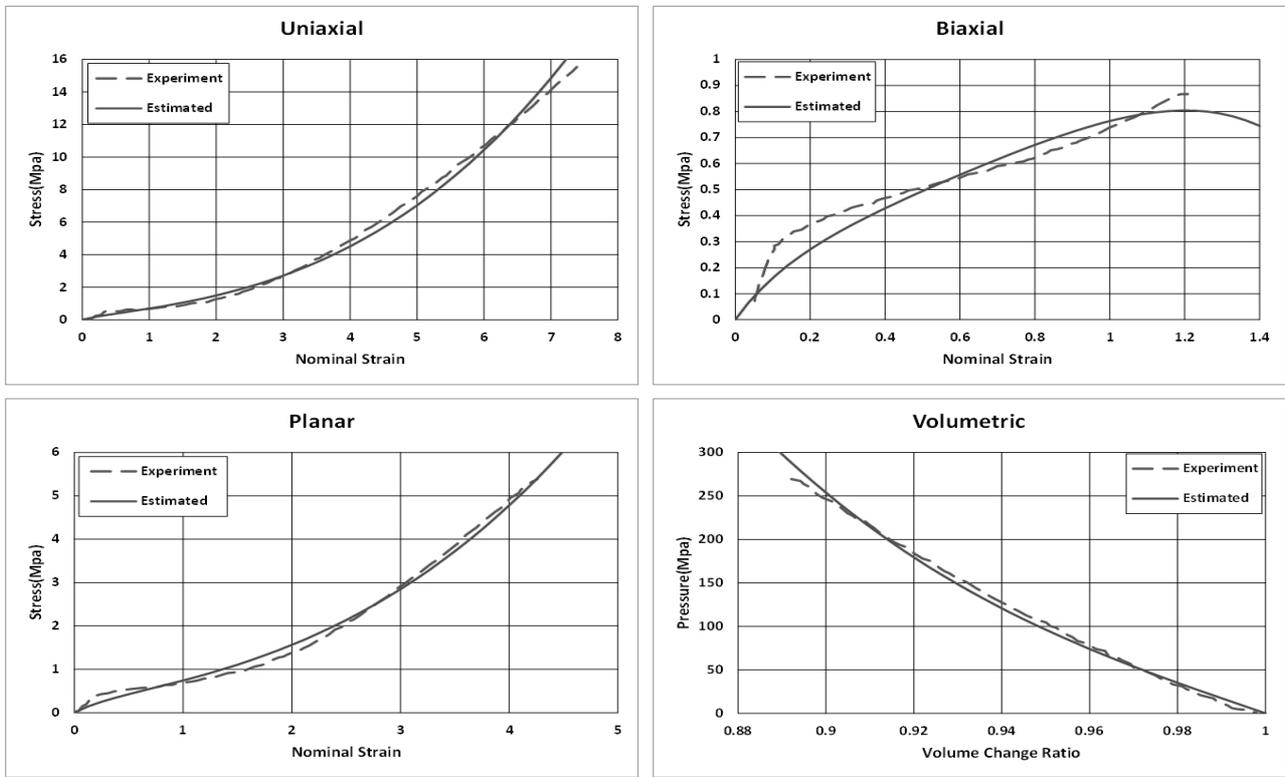


Fig. 5. Properties Estimated by Polynomial Equation

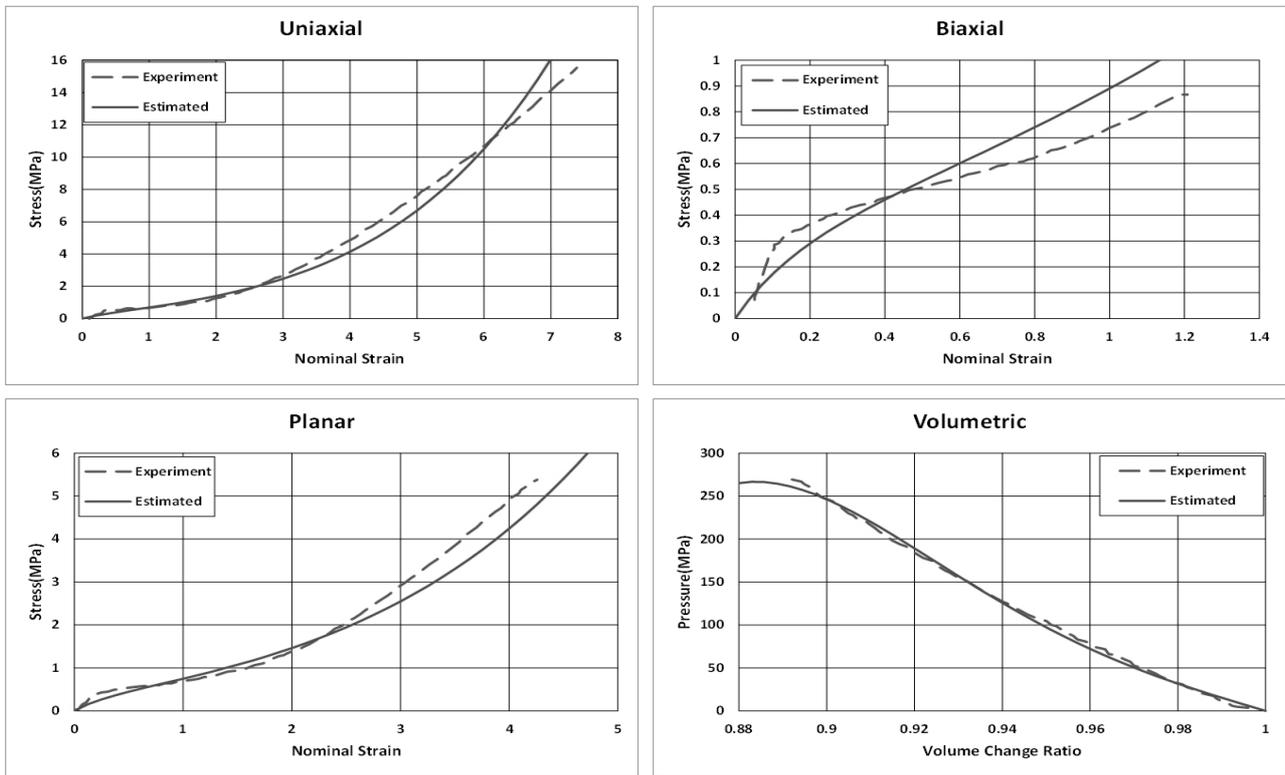
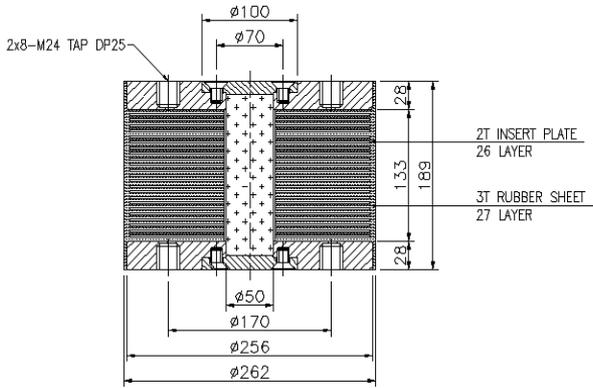


Fig. 6. Properties Estimated by Yeoh's Equation



(a) Dimension



(b) Shape

Fig. 7. LRB Specimen

3. LRB받침의 가력실험

3.1 장치의 제원

이 연구에서는 LRB의 수평강성과 수직강성을 평가하기 위하여 LRB의 시편을 제작하고 가력실험을 실시하였다. LRB장치의 수직 방향 면압은 5 MPa로 설계하였다. LRB의 제원 및 설계값은 JEAG 4614 (Japan Electric Association, 2013)의 기준을 적용하여 반복 과정을 거쳐 결정하였다. 실험에 사용된 LRB받침의 설계도면과 제작된 시편의 형상을 Fig. 7에 나타내었다. 고무에 삽입된 강관의 탄성계수는 200 GPa, 포아송비는 0.3, 납의 탄성계수는 16 MPa, 포아송비는 0.44이다. 장치의 설계도표를 Tables 3 and 4에 나타내었다.

3.2 수평방향 가력실험

LRB 특성시험은 ISO 22762 기준(International Organization

Table 3. LRB Isolator Design Data

Bearing Stress	σ	5.0 MPa
Shear Modulus	G	0.4418 MPa
Diameter	D_o	250 mm
Lead Diameter	D_p	50 mm
Shear Strain Ratio	γ	100% ratio
Displacement	δ	81.0 mm
Rubber Thickness	t_r	3.0 mm
Rubber Layer	n_r	27 EA
Steel Plate Thickness	t_s	2.0 mm
End Plate Thickness	t_e	28 mm

Table 4. LRB Isolator Design Stiffness Parameters

Horizontal Characteristics		$\gamma=100\%$
1st Stiffness	K_u	26.47 kN/mm
2nd Stiffness	K_d	0.268 kN/mm
Characteristic Strength	Q_d	15.65 kN
Equivalent Stiffness	K_{eq}	0.461 kN/mm
Equivalent Damping	h_{eq}	0.251
Vertical Characteristics		$\sigma=5 \text{ MPa}$
Vertical stiffness	K_v	418 kN/mm
Design load	P_u	236 kN
	$P_u+30\%$	306.8 kN
	$P_u-30\%$	165.2 kN
Deformation	δ_v	0.564 mm

for Standardization, 2010)에 따라 수행하였다. 실험동안, 면진받침의 설계하중인 236 kN을 수직방향으로 재하한 상태에서 목표변위인 81 mm에 도달할 때까지 변위제어방법으로 수평하중을 점진 증가하였다. 수평방향 가력실험 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 최초 수평하중이 재하된 후, 반복실험을 하게 되면 강성저하가 발생하게 된다. 시편의 수평강성은 0.460 kN/mm로서 설계값에 대하여 -0.18%의 오차가 발생하였다.

3.3 수직방향 가력실험

수직방향 실험에서 설계하중 236 kN에 대하여 $\pm 30\%$ 의 하중에 해당하는 306.8 kN과 165.2 kN을 반복 재하하고 힘과 변위를 측정하였다. 시편의 강성은 최대 하중과 최소 하중에서의 하중과 변위 차이를 계산하여 Fig. 8에 나타내었다. 실험에서 측정한 시편의 수직강성은 494.53 kN/mm로서 설계값에 대하여 +18.31%의 차이가 발생하였다.

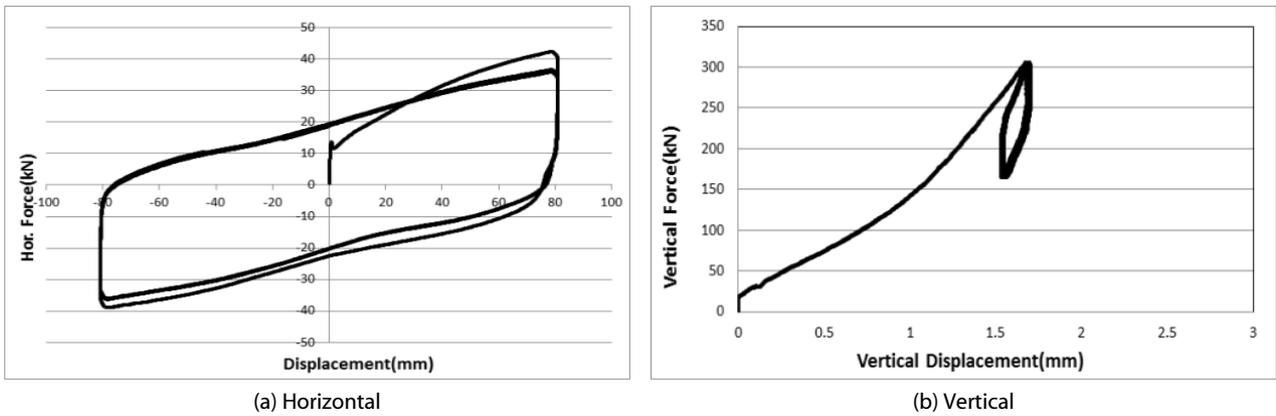


Fig. 8. Load-Displacement Curves of LRB Specimen

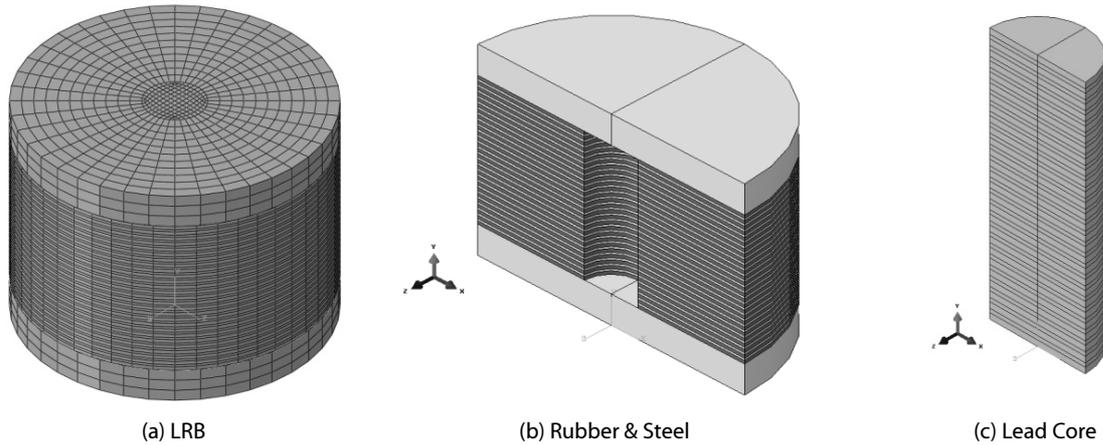


Fig. 9. FE Model of LRB Specimen

4. LRB받침의 유한요소해석

4.1 모델링방법

유한요소모델은 상용프로그램인 ABAQUS (ABAQUS, 2012) 를 사용하여 작성하였으며, Fig. 9와 같이 3차원으로 구성하였다. 시편을 구성하는 재료는 고무, 납, 삽입철판, 마감철판의 총 4종류로서 모두 3차원 고체요소(solid)로 표현하였다. 모델의 직경은 LRB의 외부 피복을 제외하여 $\phi 250$ mm으로 모델링하였으며, 내부의 납봉 직경은 50 mm, 높이는 189 mm로 모델링하였다.

모델의 고무부분은 비압축성으로 가정하고 금속판은 고무에 비해 변형이 매우 작지만, 탄성체로 가정하였다. 고무는 초탄성거동을 보이기 때문에 ABAQUS에서는 하이브리드요소(hybrid element)를 추가적으로 적용하여 변형을 제어하였다. LRB 받침 시편의 각 고무 층에 대하여 두께방향으로 2개의 요소로 분할하였다. 각 재료에 적용된 요소의 종류와 제원은 다음과 같다.

- 삽입철판 : 고체요소(C3D8R), 외경 $\phi 250$ mm, 내경 $\phi 50$ mm, 두께 2 mm, 26장으로 구성
- 고무 : 고체요소(C3D8RH), 외경 $\phi 250$ mm, 내경 $\phi 50$ mm, 두께 3 mm, 27장으로 구성
- 마감철판 : 고체요소(C3D8R), 직경 $\phi 250$ mm, 높이 28 mm, 상·하 두 장으로 구성
- 납 : 고체요소(C3D8R), 직경 $\phi 50$ mm, 높이 133 mm로 구성

4.2 경계조건 및 하중조건

수평방향 해석 시 하단 강판을 구성하는 절점들의 경계조건은 3방향 고정이며, 상단 강판은 좌굴변형을 방지하고 균일한 변형이 발생하도록 수직방향 변위성분을 구속하였다. 납과 강판은 완벽하게 접촉되어 있으며 납과 고무, 강판의 경우에는 일체화 거동을 표현하기 위하여 강체 연결하였다. 수직방향 해석 시 경계조건은 하단 강판에 3방향 완전고정으로 구속하였다.

하중의 적용순서는 Table 5와 같이 먼저 수직방향으로 설계하중

을 가한 상태에서 수평방향으로 고무의 최대 전단변형률인 100%에 해당하는 81 mm의 변위를 수평 두 방향으로 가하였다. 수직방향의 하중은 면진장치의 설계하중인 236 kN을 고려하여 장치의 상단 표면에 분포압력으로 5 MPa를 가하였다. 수직방향은 설계수직하중의 ±30%인 165.2 kN과 306.8 kN을 반복 재하 하였다.

4.3 재료특성

고무의 재료특성은 초탄성재료로 가정하여 앞서 제시한 5가지 변형률에너지함수로 표현하였다. 삽입철관과 마감철관은 표준 강재의 재료특성을 적용하였다. LRB 받침으로 지시된 구조물은 지진 종료 후, 고무의 탄성 복원력으로 구조물을 원상태로 복구시키고 납은 상온에서 원래의 분자구조로 되돌아가게 된다. 납분자는 20°C일 때 원래의 분자구조로 재결정화가 일어난다.

고무는 제작 과정에서 변수가 많지만, 납은 배합이나 양생 등의 과정을 거칠 필요가 없는 순수한 물질로 그 특성을 보편화하여 적용할 수 있다. 납의 항복응력은 전단변형률에 따라서 변하게 된다. MCEER (Ioannis et al., 2008)에서 수행된 분석 자료에

의하면 납의 응력-변형률선도는 온도에 따라 Fig. 10과 같은 형태를 보인다. 이 연구에서는 MCEER자료의 20°C곡선을 납의 재료특성으로 적용하였다.

4.4 수평방향 해석결과

수평강성 해석 시 하중은 총 2단계로 가력하였다. 실험과 동일한 조건이 될 수 있도록 하중제어 방식으로 수직력 236 kN을 1단계로 가력한 후, 2단계는 고무의 변위제어를 통하여 고무층의 총 두께에 해당하는 81 mm로 수평방향변위가 발생하도록 반복하중을 가하였다. 실험조건과 동일한 조건으로 유한요소해석을 수행하여 수평방향의 거동 및 강성을 분석하였다. Fig. 11의 해석결과를 실험결과와 비교한 결과 Mooney-Rivlin식을 적용한 경우에 LRB의 수평방향 힘-변형 거동의 예측은 실험결과와 가장 큰 차이가 발생하였다. Figs. 2-6에서 1축 인장과 2축 인장의 특성을 잘 추정하는 Ogden식과 다항식 함수식이 LRB의 수평방향 힘-변형 거동을 비교적 잘 예측하고 있음을 알 수 있다.

Table 5. Load Condition for Experiment

	Horizontal Analysis		Vertical Analysis
	Vertical Load (kN)	Horizontal Load (mm)	Vertical Load (kN)
Step 1	236	-	306.8
Step 2	-	81	165.2
Step 3	-	-81	306.8
Step 4	-	81	165.2
Step 5	-	-81	306.8
Step 6	-	81	165.2
Step 7	-	-81	306.8

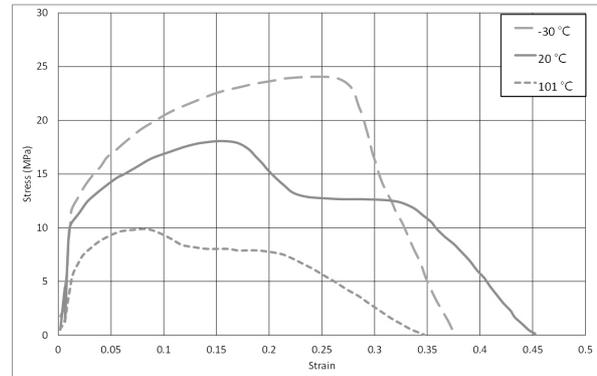
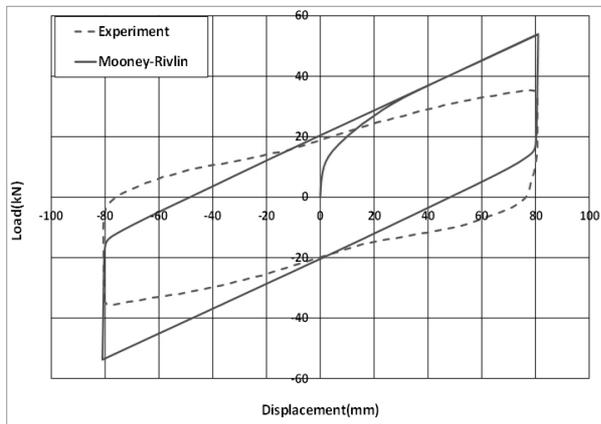
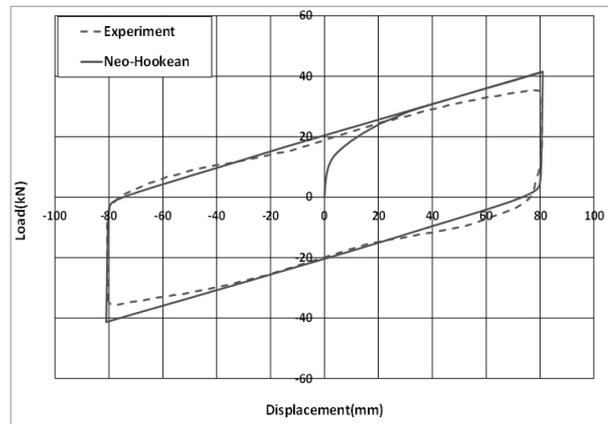


Fig. 10. Stress-Strain Relation of Lead at 0.0075/sec Strain Rate

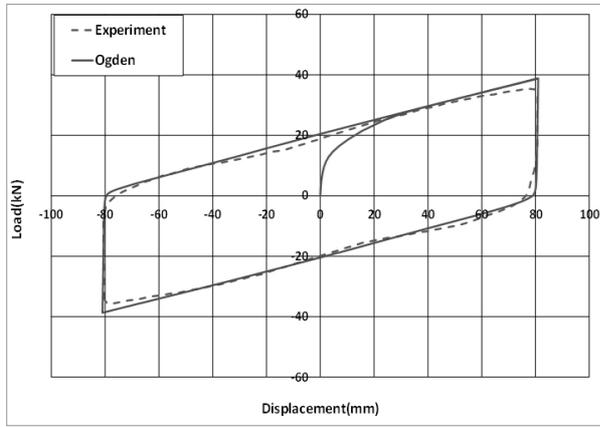


(a) Mooney-Rivlin

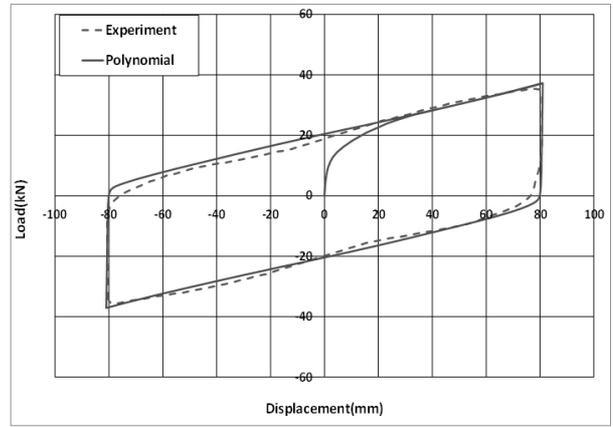


(b) Neo-Hookean

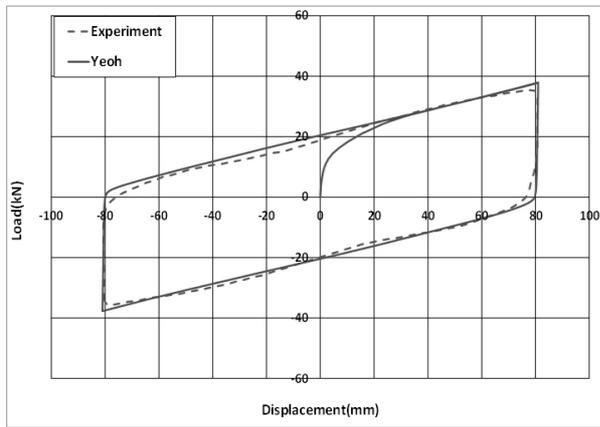
Fig. 11. Hysteresis Loops from Horizontal FE Analyses



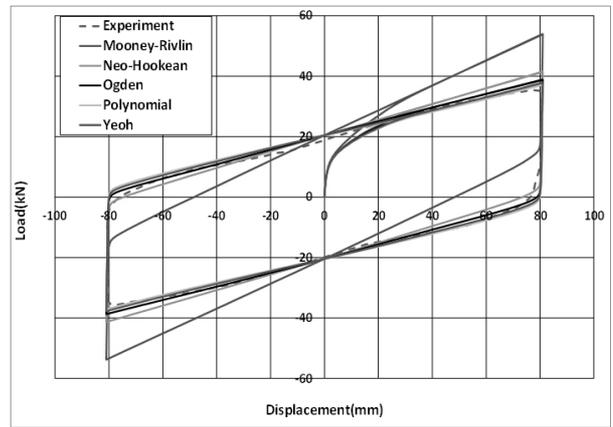
(c) Ogden



(d) Polynomial

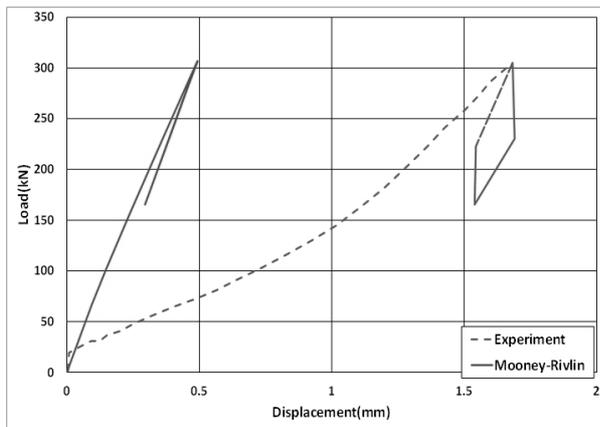


(e) Yeoh

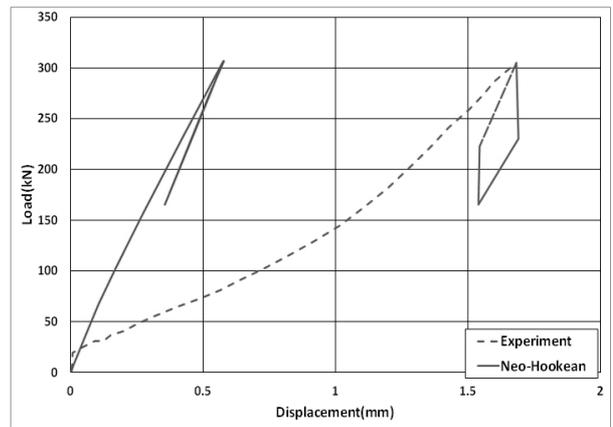


(f) Comparison All

Fig. 11. Hysteresis Loops from Horizontal FE Analyses (Continue)



(a) Mooney-Rivlin



(b) Neo-Hookean

Fig. 12. Hysteresis Loops from Vertical FE Analysis

4.5 수직방향 해석결과

수직강성에 대한 해석은 실험 방식과 같은 조건으로 설계하중의 $\pm 30\%$ 를 재하하는 방법을 적용하였다. 수평방향과 마찬가지로 동

일한 조건하에서 변형률에너지함수의 선정에 따른 수직방향 거동을 분석하였다. Fig. 13의 수직방향에 대한 강성은 Ogden식이 실험치의 평균값에 가장 가까운 강성을 추정하고 있음을 알 수

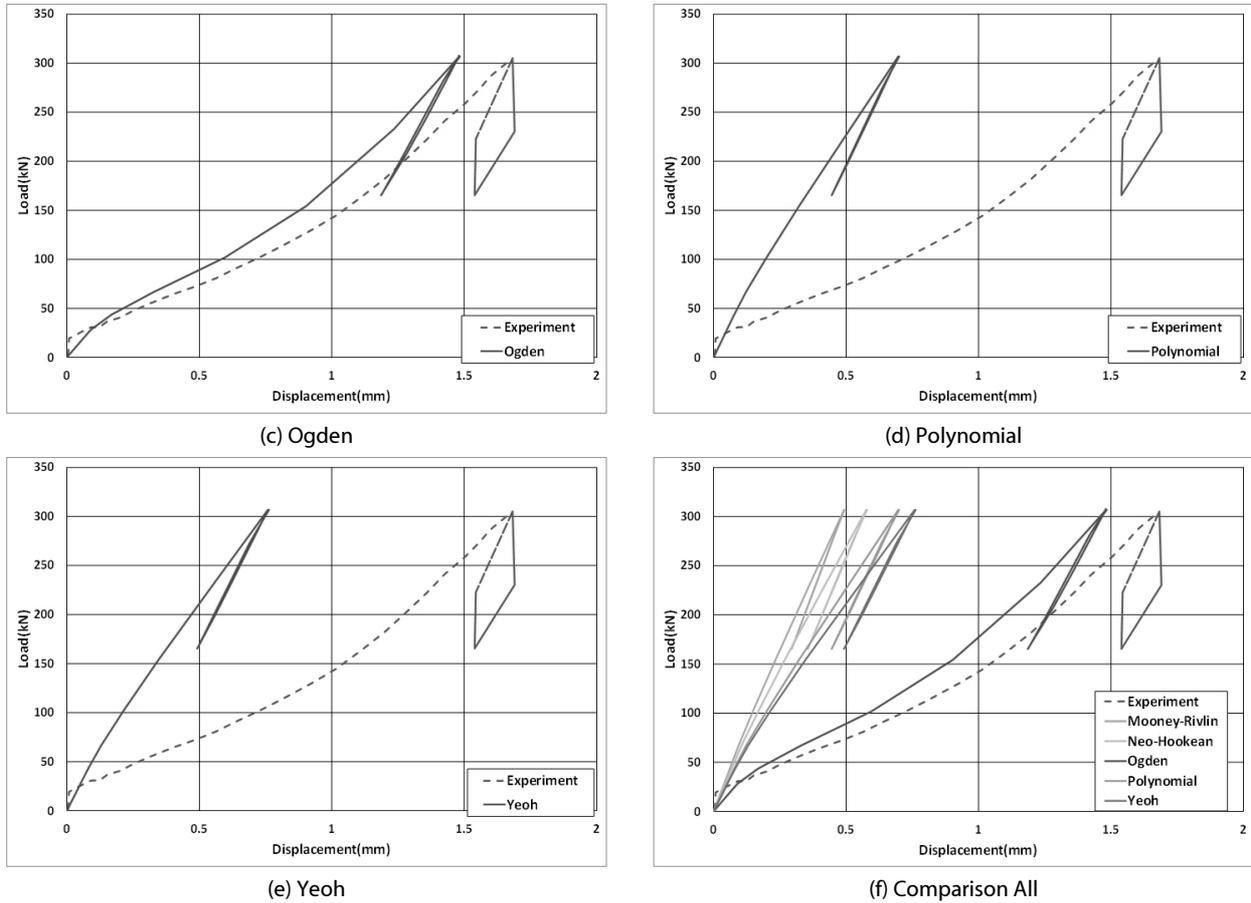


Fig. 12. Hysteresis Loops from Vertical FE Analysis (Continue)

Table 6. Comparison of Stiffness Values

	Stiffness (kN/mm)		(Design)/Exp. & Analysis		Experiment/Result of Analysis		
	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	Horizontal	Vertical	
Design	0.461	418	-	-	-	-	
Experiment	0.460	494.53	100.22%	84.52%	-	-	
Analysis	Mooney-Rivlin (MR)	0.665	710.80	69.33%	58.8%	69.17%	69.57%
	Neo-Hookean (NH)	0.511	634.40	90.22%	65.89%	90.02%	77.95%
	Ogden (OG)	0.479	475.73	96.24%	87.86%	96.03%	103.95%
	Polynomial (PN)	0.459	556.62	100.44%	75.10%	100.21%	88.85%
	Yeoh (Y)	0.468	522.77	98.5%	79.96%	98.29%	94.60%

있다. 이는 Figs. 2~6에서와 같이 Ogden식이 체적실험결과를 가장 근사하게 적합하고 있는 사실에 기인한 것이다. 곡선접합 결과의 차이는 미세하지만 실제 해석 시 거동 및 강성값은 많은 차이를 보임을 알 수 있다.

4.6 고찰 및 분석

LRB받침에 대한 수평 및 수직강성에 대한 설계값, 해석값을

Table 6과 Fig. 13에 나타내었다. 수평강성의 경우 1축인장과 2축인장의 특성을 정확하게 표현할 수 있는 변형률에너지함수를 적용한 경우에 LRB의 수평강성을 정확하게 예측할 수 있음을 알 수 있다. 수직강성은 변형률에너지함수의 종류에 따라 강성값에 많은 차이를 보인다. 수직방향에 대한 고무재료의 변형특성을 정확히 알기 위해서는 고무의 체적실험자료가 반드시 필요하며 제안된 변형률에너지함수의 곡선접합 결과 체적특성을 비교적 정확하게

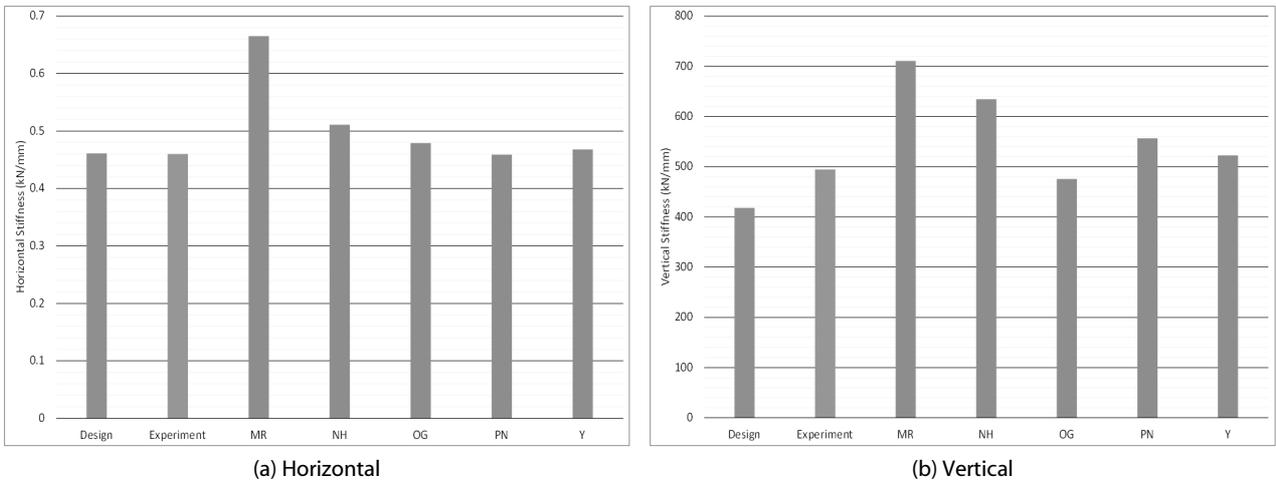


Fig. 13. Comparison of Stiffness Values

표현할 수 있는 Ogden식이 가장 유사하게 수직강성을 추정한다. 이 연구에서는 Ogden식으로 LRB의 고무특성을 표현한 경우에, 수평방향과 수직방향 강성을 모두 비교적 정확하게 예측할 수 있는 것으로 확인하였다.

5. 결론

LRB 먼진장치에 대한 유한요소해석의 신뢰성을 향상시키기 위하여 변형률에너지함수를 이용하여 각각 해석을 수행한 후 실험 값과 해석값을 비교하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 고무와 납 그리고 철판으로 구성된 납적층고무(LRB) 먼진받침에 포함된 고무의 비선형 역학 특성은 LRB 유한요소모델의 힘-변형 거동을 지배한다.
- (2) 고무의 역학특성은 초탄성재료의 특성을 보이고, LRB의 유한요소모델을 작성할 때, 고무의 초탄성변형 특성을 정확히 표현할 수 있는 변형률에너지함수의 종류와 함수의 계수를 결정하는 것이 중요하다.
- (3) 이 연구에서 표준고무의 특성에 대한 몇 가지 변형률에너지함수의 계수를 결정하고, 실험결과와 비교한 결과, Ogden함수식이 표준 고무의 특성을 가장 잘 나타내는 것으로 확인되었다.
- (4) 변형률에너지함수로 고무의 재료특성을 정확하게 표현한다면, 어떤 종류의 함수식을 사용하더라도 LRB의 수평방향 힘-변형 거동을 정확하게 추정할 수 있으므로 LRB의 유한요소해석에서 고무의 특성을 정확히 표현하는 것이 중요하다.
- (5) 유한요소해석을 통하여 LRB의 수직강성을 분석한 결과, 대부분의 변형률에너지함수식을 사용한 결과는 유사한 힘-변형 관계 곡선을 보였으나, 실험결과와는 큰 차이가 있다. 이 연구에

서 사용한 함수식 중에서 Ogden식은 LRB의 수직방향 거동을 표현하는데 있어서 실험결과와 가장 근접한 결과를 보인다.

- (6) 유한요소모델을 이용하여 LRB의 강성을 표현하는데 있어서, 장치의 수직방향 이력거동을 좀 더 정확하게 표현하기 위한 보완 연구가 필요하다.

감사의 글

본 논문은 2014년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 원자력융합원천기술개발사업의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다(No. 2014151010170A).

References

ABAQUS (2012). ABAQUS Analysis User's Manual Volume III : Materials, Hibbit, Karleson & Sorenson, Inc.

Arruda, E. M. and Boyce, M. C. (1993). "A three-dimensional Model for the large stretch behavior of rubber elastic materials." *Journal Mech. Phys. Solids*, Vol. 42, No. 2, pp. 389-412.

Baek, U. C., Cho, M. H. and Hawong, J. S. (2011). "Material properties for reliability improvement in the FEA results for rubber parts." *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 35, No. 11, pp. 1521-1528 (in Korean).

Furukawa, S., Sato, E., Shi, Y., Becker, T. and Nakashima, M. (2013). "Full-Scale shaking table test of a base-isolated medical facility subjected to vertical motions." *Earthquake Engineering & Structural Dynamics*, Vol. 42, pp. 1931-1949.

International Organization for Standardization (2010). Elastomeric seismic-protection isolator. ISO 22762, Geneva.

Japan Electric Association (2013). Seismic Design Guideline for Base-Isolated Structures of Nuclear Power Plant. JEAG-4614 (in

- Japanese).
- Kalpakkidis, I. V. and Constantinou, M. C. (2008). Effects of Heating and Load History on the Behavior of Lead-Rubber Bearings, Technical Report MCEER-08-0027, Multidisciplinary Center for Earthquake Engineering Research, University at Buffalo, State University of New York.
- Kim, H. Y., Choi, C., Bang, W. J. and Kim, J. S. (1993). "Large deformation finite element analysis for automotive rubber component." *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 15, No. 1, pp. 107-119 (in Korean).
- Kim, W. D., Kim, W. S., Kim, D. J., Woo, C. S. and Lee, H. J. (2004). "Mechanical testing and nonlinear material properties for finite element analysis of rubber components." *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, Vol. 28, No. 6, pp. 848-859 (in Korean).
- Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM) (2004). Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components, Chapter 2, No. M1-9911-00-0014 (in Korean)
- Lee, H. Y., Kim, D. W., Lee, J. H. and Nahm, S. H. (2004). "Software and hardware development of micro-indenter for material property evaluation of hyper-elastic rubber." *Journal of The Korean Society of Mechanical Engineers, A Book*, Vol. 28, No. 6, pp. 816-825 (in Korean).
- Lee, J. H., Yoo, B. and Koo, G. H. (1996). "Finite element analysis of seismic isolation bearing." *Journal of the Computational Structural Engineering Institute of Korea*, pp. 45-51 (in Korean).
- Ogden, R. W. (1972). "Large deformation isotropic elasticity ; On the Correlation of Theory and Experiment for Incompressible Rubberlike Solids." *Proc. of Royal Society of London, Series A. Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 326, No. 1567, pp. 565-584.
- Park, K. S. (2001). Finite Element Analysis of Seismic Isolation Rubber Bearing, Master's Thesis, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Korea (in Korean)
- Park, S. H., Lee, B. U., Hong, M. P. and Ryu, B. R. (2000). "FEM Analysis of alternatively laminated structure constructed of rubber and reinforced aluminium layers." *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers A*, pp. 402-406 (in Korean).
- Rivlin, R. S. (1948). Large elastic deformations of isotropic materials. I. Fundamental Concepts, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 240, No. 822, pp. 459-490.
- Rivlin, R. S. (1948). Large elastic deformations of isotropic materials. IV. Further developments of the general theory, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 241, No. 835, pp. 379-397.
- Rivlin, R. S. (1951). Large elastic deformations of isotropic materials. VII. Experimental on the Deformation of Rubber, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, Mathematical and Physical Sciences*, Vol. 243, No. 865, pp. 251-288.
- Satoshi, H., Keigo, M., Taichi, M., Takayuki, N. and Chiaki, O. (2007). "Dynamic and static restoration behaviors of pure lead and tin in the ambient temperature range." *Journal of Materials Transactions*, Vol. 48, No. 10, pp. 2665-2673.
- Seki, W., Fukahori, Y., Iseda, Y. and Matsunaga, T. (1987). "A large deformation finite element analysis for multilayer elastomeric bearings." *Transaction of the Meeting of the Rubber Division*, pp. 856-870.
- Warn, G. P. and Whittaker, A. S. (2006). "A study of the coupled horizontal-vertical behavior of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings." Technical Report MCEER-06-0011.
- Warn, G. P. and Whittaker, A. S. (2008). "Vertical earthquake load on seismic isolation systems in bridges." *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1696-1704.
- Warn, G. P., Whittaker, A. S. and Constantinou, M. C. (2007). "Vertical stiffness of elastomeric and lead-rubber seismic isolation bearings." *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1227-1236.
- Woo, C. S., Kim, W. D., Kim, K. S. and Kwon, J. D. (2002). "An experimental study on the dynamic characteristics of rubber isolator." *Journal of Elastomer*, Vol. 37, No. 3, pp. 183-191 (in Korean).
- Yeoh, O. H. (1993). "Some forms of the strain energy function for rubber." *Rubber Chemistry and Technology* (ISSN 0035-9475), Vol. 63, No. 5, pp. 754-771.
- Yoshida, J., Masato, A., Yozo, F. and Hiroshi, W. (2004). "Three-dimensional finite-element analysis of high damping rubber bearings." *Journal of Engineering Mechanics*, Vol. 130, pp. 607-620.
- Zhou, Z., Wong, J. and Mahin, S. (2013). "Vertical and 3D isolation system: A Review with Emphasis on Their Use in Nuclear Structures." *SMiRT-22*, San Francisco, California, USA, August 18-23.