

고감쇠면진고무베어링의 유한요소해석

전정배*, 김홍주*, 정경수**, 김계수**, 강범수***

Finite Element Analysis of High Damping Rubber Bearing for Seismic Isolation

J. B. Juhn*, H. J. Kim*, K. S. Jung**, K. S. Kim** and B. S. Kang***

Key Words: High Damping Rubber Bearing, Seismic Isolation, Ogden Model

Abstract

The seismic isolation technology has appeared to be increasingly necessary for highway bridges, LNG tank, nuclear power plant, and building structures in view of earthquake vibrations. Also high-technology industries require effective seismic protection. The Seismic Isolation Bearing - High Damping Rubber Bearing - system has been counted as the most effective way for seismic isolation, which is now under development and widely used in industries. Here, the commercial FEM software for nonlinear analysis, MARC, has provided force-displacement curves on the rubber system. The analyses have been carried out about fourteen cases; 25%, 50%, 75%, 100%, 125% and 150% horizontal displacements with a different frequency - 0.01Hz and 0.50Hz - and 100% horizontal displacement with four different frequency - 0.01Hz, 0.16667Hz, 0.33333Hz and 0.50Hz. The unknown constants of the strain energy function of Ogden model have been obtained by a tension test and planar shear test.

1. 서 론

최근 면진 장치에 대한 연구는 유연한 기초를 사용하여 구조의 진동주기를 늘려 지진 응답을 감소시키는 방법과 감쇠(Damper) 또는 에너지 소산장치를 이용하여 기초 또는 구조물의 상대변위를 적절하게 제어하는 방법 등의 황하중에 대한 적절한 강성을 유지하기 위한 방법에 집중되고 있다.

이와 같이 면진 장치에 대한 재료와 설계 및 해석 방법의 발전에 따라 세계적으로 이에 대한 관심이 고조되고 있으며 면진 장치의 재료 개발과 이를 사용한 구조의 설계 해석 기법에 대한 발전이 면진 장치의 사용을 증대시키고 있다.⁽¹⁾

기본적으로 면진 시스템의 설계 및 구성을 위해서는 면진 시스템의 주를 이루는 고무에 관한 연구와 해석이 요구된다. 고무유사재료는 대개 우수한 탄성 복원 특성과 진동 감쇄 특성, 에너지 흡수성 등으로 인해 재료의 거동을 수학적으로 구성하는데 많은 어려움이 따른다. 기술의 발전으로 이러한 재료의 거동을 수학적으로 나타낼 수 있는 구성방정식의 고찰 및 수치해석을 위한 여러 방법들이 제시되고 있다.⁽²⁻³⁾ 고무유사재료(rubber-like material)의 경우 재료 비선형(material nonlinearity)과 기하학적 비선형성(geometric nonlinearity)에 의해 구조해석 시 많은 어려움을 보인다. 또한 고무유사재료는 대변형, 대변형률의 거동을 보이므로 기존의 금속재료에서는 무시되었던 재료 비선형성 및 대변형률에 대한 언급이 필요하게 된다. 따라서 고무제품의 변형 해석을 위해서는 유한탄성론에 기인한 비선형 특성 모델화와 대변형 이론에 의한 구성식이 필요하며 구성식에 필요한 계수들은 여러 가지 재료시험으로부터 얻을 수 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

* 부산대학교 대학원

** 동일고무벨트(주)

*** 부산대학교 항공우주공학과

본 연구에서는 먼진고무 베어링의 주를 이루는 고무재료의 특성과 설계된 고무 베어링의 거동양상을 범용 유한요소 프로그램인 MARC를 사용하여 해석하고 실험을 통하여 이를 검증함으로써 세계적인 먼진 시스템의 성향에 부합하는 먼진고무 베어링의 형태와 그 효과에 관한 연구 및 먼진고무 베어링(Seismic Isolation Bearing)의 거동특성을 확인하고자 한다.

또한 앞으로 모든 건축물에 지반과 구조물을 격리시키는 먼진 고무의 개발과 이에 상응하는 LNG 탱크 등 기본 산업설비에 사용될 수 있는 먼진 시스템 및 일반주택에도 적용될 수 있는 먼진시스템을 개발하고자 한다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소모델

시험과 해석에 사용된 모델은 전체 모델의 1/4 모델이 사용되었다. Table.1과 Fig.1은 실험에 사용된 베어링의 치수, 형상 및 해석에 사용되어진 모델링 형상과 재질 구성을 보여 주고 있다. 베어링에 사용된 강판은 SS-400을 사용하였다. 강판의 물성치는 Table.2와 같이 주어졌다. Fig.1에서 보는 바와 같이 수평 왕복 실험에 사용되어진 베어링은 중심홀을 가지고 있는 경우이다. 해석에 사용되어진 모델링된 형상의 총 요소 수는 1960개이고 절점 수는 2736개이다. 해석에서는 8 절점 3차원 입체 요소를 사용하였다. 고무 재질의 요소 타입은 Full & Herrmann Formulation Hex84 이며, 강판 재질의 요소 타입은 Full Integration Hex7을 사용하였다.^(7,9)

본 해석에서는 실험에 사용되어진 고무 베어링 형상의 실측 치수대로 형상을 모델링하였으며, 해석모델의 요소 생성시 해석시간 단축을 위해 전체 형상의 절반만을 모델링하고 1사이클만을 해석하였다. 고무모델의 경우 3회 이상의 왕복 사이클에 대한 해석결과의 평균값을 구하여야 타당하지만, 고무 시편 실험장치의 제약과 모델구성의 어려움 등으로 인해 1사이클 해석만을 하였다.

2.2 고무 재료 시험 및 재질 상수 결정

본 연구에서 베어링에 사용된 고무 재질 상수는 그림에 나타나 있는 시편의 단축 인장시험과

해석상 전단변형을 특성을 고려해야 하므로 단축 인장시험 및 평면 전단 시험을 수행하여 구해진 응력-변형률 데이터를 이용하여 재질의 특성을 나타내는 상수들을 변형률 에너지 함수로 구하였다. Fig.2는 고무 시편의 단축 인장시험과 평면 전단 시험 결과 데이터 및 고무재료의 변형률 에너지 함수에 이용하기 위해 MARC의 커브 피팅(Curve fitting) 프로그램으로 피팅한 그래프를 나타낸다. 이렇게 단축 인장 시험과 평면 전단 시험의 데이터를 통해 구해진 재질 상수를 이용한 유한 요소 해석 결과는 실제 베어링의 실험 결과와 다소 오차를 보이고 있으나 거의 유사한 양상을 나타내고 있다. Table.3은 이번 해석에 적용된 3항 Ogden model을 이용한 고무 재질의 계수들이다.

2.3 경계조건

2.3.1 구속조건

베어링에 적용되어진 구속 조건은 Fig.3에 나타난 바와 같다. 해석 시 적용되는 수평 변위가 베어링의 횡단면의 중심축(z축)에 대해 대칭이기 때문에 해석시간 단축을 위해 전체 형상의 절반만을 이용해 요소를 생성하였다. 모델링된 베어링의 중간면은 실제 실험에서 유압 실린더가 부착되는 부위로 Fig.3에서와 같이 x방향으로의 수평 변위만을 허용하고 나머지 방향은 자유상태로 둔다. 수직 하중이 가해지는 베어링의 윗면은 수직 하중에 의한 y축 변위를 허용하고 나머지 방향의 변위는 고정되어진다. 실제 실험에서의 여러 번의 강제 수평 변위 사이클 중 전체 베어링이 z축에 대한 약간의 회전이 일어나지만 유한요소해석에서는 1회의 왕복 사이클만 수행하므로 베어링에 하중이 가해지는 면 윗면과 구속된 아랫면에서 z방향으로의 회전이 없이 고정되어 있다고 가정되었다.⁽¹⁰⁾

2.3.2 하중조건

실제 사이클 실험에서 베어링에 가해지는 하중으로는 원형 단면의 수직하 방향의 하중과 베어링 아랫면의 유압실린더에 의한 강제 수평 변위가 있다. 해석에의 적용은 Fig.4에서 보여지는 바와 같다. 해석에서는 베어링에 가해지는 수직하중을 모델링 형상의 윗면을 구성하는 각 요소의 한쪽 면에 면압으로 가해졌다. 실제 실험에서 가

해지는 하중의 크기는 21.6 ton이다. 유압실린더에 의한 강제 수평 변위는 앞서 언급한 구속 조건과 함께 Fig.3에서 알 수 있듯이 모델링된 베어링의 중간면에 x축 방향으로 가해진다. 강제 수평 변위의 크기는 베어링의 수평변위에 대한 수평방향 유효강성을 확인하기 위해 유한요소해석 후 실험결과와 비교를 하였다. 유한요소 해석은 기본 변위 해석과 주파수의 변화에 따른 해석 총 14가지를 수행하였다. 변위는 시험의 조건과 맞추기 위하여 정현파의 형태로 입력하였다.

유한요소해석이 수행된 14가지 방법은 아래의 Table.4에 나타내었다. 시험에 사용된 전단 변형률의 계산식은 다음과 같다.⁽¹¹⁾

$$\text{Shear strain}(\gamma) = \frac{\text{수평 변위량}(\tan \gamma)}{\text{고무 총두께}(t_r)}$$

3. 유한요소해석결과

현재 국내에서는 먼진고무 베어링에 대한 시험 기준이나 평가기준이 없어 미국의 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 제공하는 시험방법과 시험후의 성능판단 기준을 참고로 하여 시험을 행한 후 그 데이터를 유한요소해석 결과를 비교하였다.

3.1 전단변위에 대한 해석(I) - 주파수 0.01Hz

먼진고무베어링의 시험에 의해 나타난 값을 살펴보면 초기의 경우와 2,3회를 거쳐면서 반복된 경우 유효강성 값에서 차이를 보인다. 유한요소 해석의 경우 유효 수평 강성과 반력은 아래의 Table.5에 나타나 있다.

Table.5에서 알 수 있듯이, 유한요소해석의 경우 변위가 커질수록 베어링의 유효수평강성은 조금씩 작아지는 경향을 보인다. 반면 실험결과만을 보면 전단변위가 0.2~0.6인 경우 조금씩 감소하다 전단변위가 0.7을 넘어서면서 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 이는 Fig.5(a)에서 확인할 수 있다. 유한요소해석에서는 반력의 증가에 비해 변위가 커서 유효강성이 감소하는 경향을 보이는 것으로 보인다. 변위에 대한 유한요소해석과 실험과의 오차는 1번째 사이클만 비교하였을 경우 15%정도이고 3번의 왕복사이클과 비교하였을 경우 13%정도이다. 각각의 경우에 대한 결과와 오

차는 Fig.5(b)에 나타나있다.

3.2 전단변위에 대한 해석(II) - 주파수 0.50Hz

주파수가 0.01Hz인 경우와 마찬가지로 유한요소해석의 경우 변위가 커질수록 베어링의 유효수평강성은 조금씩 작아지는 경향을 보인다. 반면 실험결과만을 보면 전단변위가 20%~60%에서 조금씩 감소하다 전단변위가 0.7을 넘어서면서 점차 증가하는 경향을 보인다. 이는 Fig.6에서 확인할 수 있다. 유한요소해석에서는 반력의 증가에 비해 변위의 증가가 커서 유효강성이 감소하는 경향을 보이는 것으로 보인다. 주파수가 서로 다름에도 불구하고 0.01Hz인 경우와 0.50Hz인 경우에 유한요소해석의 경우 최대 반력값이 동일하게 나타났다. 고무 재료의 경우 빠른 주파수 영역에서는 점탄성 효과를 무시할 수 없으므로 점탄성 효과를 고려한 해석을 수행하여야 하는데 고무재료의 점탄성시험의 문제점으로 인해 점탄성 시험을 수행하지 않아 유한요소해석시 점탄성효과가 고려되지 않은 해석이 수행됨으로써 이러한 결과가 나온 것으로 보인다.

3.3 주파수의 변화에 대한 해석

유한요소해석의 경우 고무의 점탄성 효과와 반복이력에 따른 파손효과(damage effect)를 고려하지 않아서 유효 수평 강성값이 동일하게 나타났다. 유한요소해석과 실험치의 비교된 값과 오차를 Fig.7(a)에 나타내었다. 주파수의 변화에 따른 실험과 유한요소해석과의 오차는 1번째 사이클의 경우 8%정도이고 3회 왕복사이클의 경우 11% 정도로 나타난다. 1회 사이클과 3회 왕복 사이클의 오차는 왕복 변위에 따른 고무내부의 분자사슬 결합의 파괴 등으로 인한 고무 재료의 피로증가에 의한 것으로 보여진다.

4. 결론

먼진고무 베어링의 수평 변위에 따른 해석과 주파수의 변화에 따른 각각의 경우의 해석을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 베어링 아랫면 액추에이터의 수평 변위 속도에 따라 수평 강성이 달라짐을 확인하였다. 즉, 주파수가 빠를수록 고무의 점탄성효과에 의해 베

어링의 수평 반력이 더 크게 작용함을 알 수 있다.

• 유효 수평 강성이 전단변형률이 증가함에 따라 실험의 경우 감소하다 다시 증가한 반면 유한요소 해석의 경우 점차 감소하는 경향을 보임을 알 수 있다. 실험과 유한요소해석과의 오차는 13%~15%정도이다.

• 주파수의 변화에 따라 실험의 경우 고무의 점탄성효과와 반복하중에 따른 파손효과 등으로 서로 값이 차이를 보이지만 유한요소해석에서는 동일한 결과를 보였다. 이 문제의 해결을 위해서는 고무재료의 점탄성 시험과 반복하중에 의한 파손효과를 고려한 파손시험이 이루어져 2가지 실험 결과를 유한요소해석에서 고려하여야 함을 알 수 있다. 주파수의 변화에 따른 실험과 유한요소해석과의 오차는 8%~11%정도로 나타난다.

이상의 결론에서 알 수 있듯이 설계된 면진고부 베어링은 실험 및 유한요소해석상에서 설계범위 내에서는 충분한 강성을 가지고 거동함을 알 수 있다. 좀더 정밀하고 세부적인 설계를 위해서는 정확한 고무재료의 여러 가지 성능 시험과 고무의 재료시험시 점탄성효과와 파손효과가 시험항목에 추가되어야 하며 유한요소해석 시에도 이러한 특성을 모두 고려한 해석이 요구된다는 것을 알 수 있었다

후기

이 논문은 1999년도 두뇌한국21사업 핵심분야에서 지원받아 수행된 연구임.

참고문헌

- (1) 유철수, 1997, "한반도의 지진특성과 내진설계", 대한토목학회'국제내진학술세미나'.
- (2) 김완두, 우창수, 한승우, 1997, "자동차 Strut Rubber Insulator의 유한요소해석 및 피로 수명 평가." 대한 기계학회 '고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집, pp.44-49.
- (3) 김현영, 최중윤, 김중재, 1997, "고무·포움 부품의 변형거동 예측과 형상 설계." 대한 기계학회 '고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집, pp.14-24.

- (4) 임세영, 1997, "대변형을 수반하는 고무류의 탄성 구성방정식 모델링." 대한 기계학회 '고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집, pp.56-61.
- (5) 허훈, 이형욱, 김세호, 1997, "셸 형상의 고무 구조물에 관한 유한요소 변형해석." 대한 기계학회 '고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집, pp.25-33.
- (6) 한국기계연구원, "초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술개발", 과제 보고서
- (7) MARC Vol.A User Information. MARC Analysis Research Corporation, 1994.
- (8) MARC Vol.B Element Library. MARC Analysis Research Corporation, 1994.
- (9) Alan N. Gent "Engineering with Rubber." Oxford Univ., 1992.
- (10) Mineo TAKAYAMA and Keiko MORITA, 1998, "Finite Element Analysis of Rubber Bearings including Flanges and Bolts." '98일본 지진공학 심포지움.
- (11) James M. Kelly, Farzad Naeim, 1999, "DESIGN OF SEISMIC ISOLATED STRUCTURES From Theory to Practice" John Wiley & Sons.

		Dimension(mm)
Specification		Φ150×Φ15×84.5T
End Plate		12.5T×2EA
Steel Plate		2T×10EA
R u b b e r	Layers of Rubber	Φ135×3.5T×11EA
	Outer Rubber layer	0.5T×2EA
	Thickness of Rubber	38.5

Table.1 Dimension of the experimental model and FE Model(1/4 Scale)

	E[N/m]	ν	σ_y [N/m ²]
Steel	2.0×10^{11}	0.285	5.25×10^6

Table.2 Material Properties - SS-400

	E[N/m]	ν	σ_y [N/m ²]
Steel	2.0×10^{11}	0.285	5.25×10^6

Table.2 Material Properties - SS-400

	Ogden model (ogden control parameter)		
Number of terms	3		
Bulk modulus	6.58875E+10		
Moduli	13121.5	-4.25595E+7	-8.78546E+7
Exponents	6.23891	-0.358254	0.125503

Table.3 Constants of rubber material by Ogden control parameters

γ	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
Frequency						
0.01Hz	○	○	○	○	○	○
0.5Hz	○	○	○	○	○	○
0.1667Hz				○		
0.3333Hz				○		

Table.4 FEM Simulation cases

unit(Force = kN, Stiffness = kN/m)

γ	Test (1 st Cycle)			Test (3 rd Cycle)			FEM (1 st Cycle)		
	Max. F _R	Min. F _R	K _{eff}	Max. F _R	Min. F _R	K _{eff}	Max. F _R	Min. F _R	K _{eff}
0.25	9.65	-6.42	416.78	9.99	-6.47	426.59	9.25	-9.25	481.57
0.5	15.54	-12.92	372.65	15.68	-12.91	373.63	17.81	-17.81	463.84
0.75	21.59	-19.46	357.94	21.71	-19.64	359.90	24.57	-24.57	425.17
1.0	31.04	-26.49	376.58	30.81	-26.15	372.65	31.69	-31.69	411.57
1.25	40.30	-37.48	407.96	39.19	-36.28	395.21	36.69	-36.69	381.34
1.5	47.99	-47.67	417.76	45.85	-45.76	400.11	40.10	-40.10	346.91

Table.5 Test result - 0.01Hz

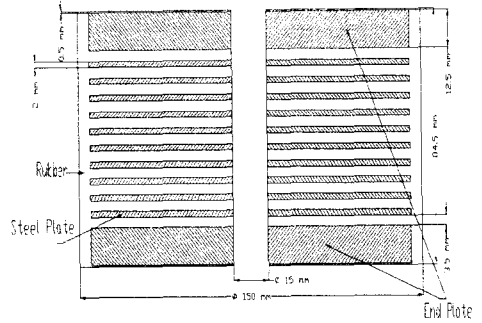


Fig.1 Schematic View of HDRB

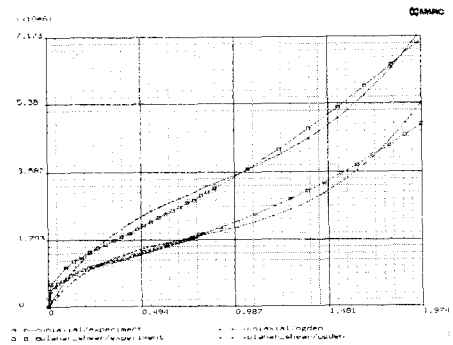


Fig.2 Rubber Material Data

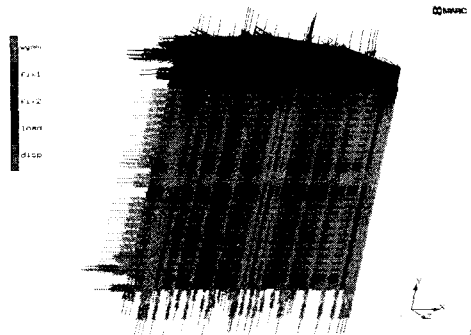


Fig.3 Boundary Condition of FE Model

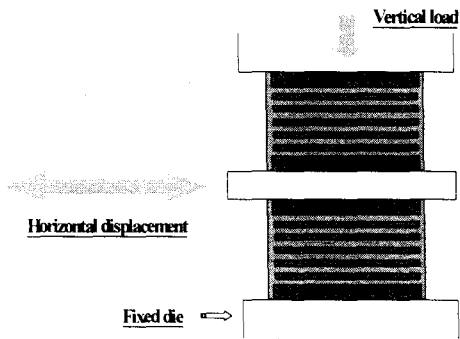


Fig.4 The Operation of FEM

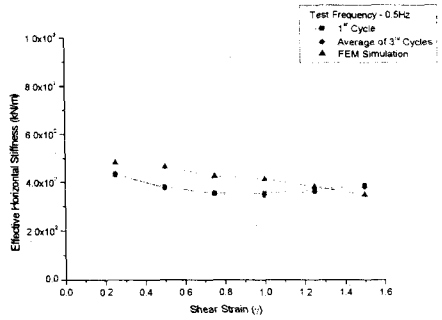


Fig.6 Effective Horizontal Stiffness Test vs. FEM

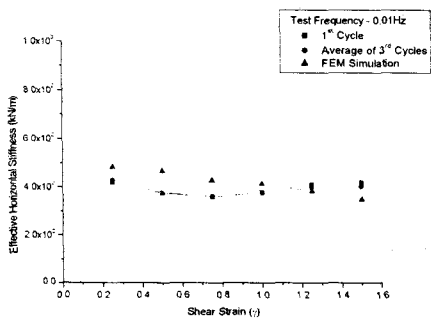


Fig.5 (a) Effective Horizontal Stiffness Test vs. FEM

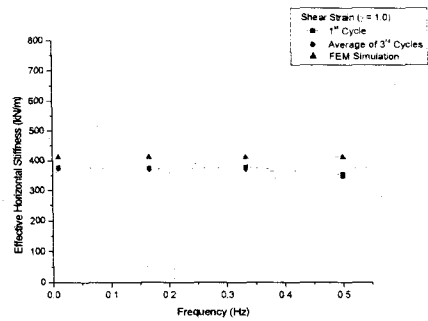


Fig.7 (a) Effective Horizontal Stiffness Test vs. FEM

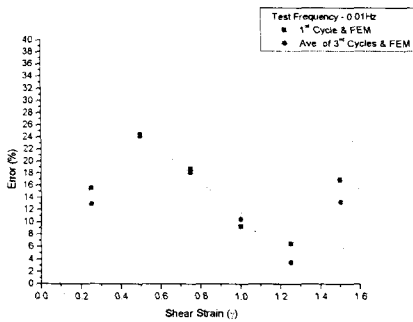


Fig.5 (b) Error of Effective Horizontal Stiffness Test vs. FEM

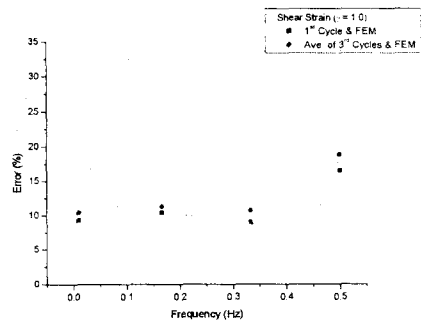


Fig.7 (b) Error of Effective Horizontal Stiffness Test vs. FEM