

고감쇠 면진베어링 고무시편의 유한요소 전단해석

Finite Element Shear Analysis of 3-bar Lap Rubber Specimen for High Damping Rubber Bearing

이 재 한* 유 봉* 박 기 수**

Lee, Jae-Han Yoo, Bong Park, Ki-Su

ABSTRACT

The shear modulus of 3-bar lap rubber shear dynamic test specimen is investigated through incremented shear strain tests. The shear force-strain relation of rubber specimen is also calculated by ABAQUS using hyper-elastic material properties of high damping rubber. The analysis results are compatible with shear dynamic tests of 3-bar lap rubber specimen and 1/8 reduced-scale laminated rubber bearing.

1. 서론

지진 시에 구조물과 지반 사이에 설치되어 구조물로의 지진에너지 전달을 차단하는 면진베어링은 얇은 가황고무판과 강판의 반복된 적층구조로 고무와 강판은 화학적으로 접착되어 있다. 면진베어링 성능특성을 파악하기 위한 면진베어링의 직접적인 시험은 많은 노력과 시설이 요구되며, 특히 규모가 커지는 경우는 시험을 수행하는 것이 매우 어렵다. 이런 경우에 간접적으로 면진베어링의 특성을 파악하는 방법 중에서 실험적 방법으로는 그림 1과 같이 축소규모 면진베어링을 제작하여 이에 대한 전단시험을 수행하거나 그림 2와 같이 특수 제작된 전단동적시험시편에 대한 시험을 이용한 성능 분석을 수행할 수 있으며, 해석적 방법으로는 과탄성고무의 재료특성을 밝히는 단순인장, 등이축, 순수전단 시험용 고무시편에 대한 시험자료를 이용한 유한요소해석 방법을 이용할 수 있다[1,2].

본 연구에서는 면진베어링 제작과 동일한 공정과 온도조건으로 제작된 전단동적시험시편에 대한 시험결과를 모의하는 해석방법 개발을 위해 이의 전단거동을 ABAQUS[3]의 과탄성 재료(Hyperelastic Material) 이론에 근거한 비선형해석법으로 계산하였다. 해석에 사용한 고무재료의 변형에너지 밀도함수는 한국원자력연구소에서 개발한 면진베어링에 사용하는 고무시편에 대하여 이루어진 단순인장, 순수전단, 압축 등 시험자료로부터 얻어진 값을 사용하였다.

* 한국원자력연구소 책임연구원, 정회원

** 한국과학기술원 토목공학과, 석사과정

전단동적시험시편에 대한 유한요소해석은 3종류의 변형에너지 밀도함수를 이용하여 수행하고, Ogden 모델에 대하여는 고무시편 두께 방향으로 모델링 요소 수를 바꾸면서 이의 영향을 분석하였다. 해석결과는 첫째로 기존에 수행되어 있는 면진베어링에 대한 유한요소 전단해석결과[4]와 비교하여 해석결과를 평가하였으며, 둘째로 1/8 축소규모 면진베어링 전단시험 및 전단동적시험시편의 시험결과[5]와 비교하였다.



그림 1. 축소규모 면진베어링

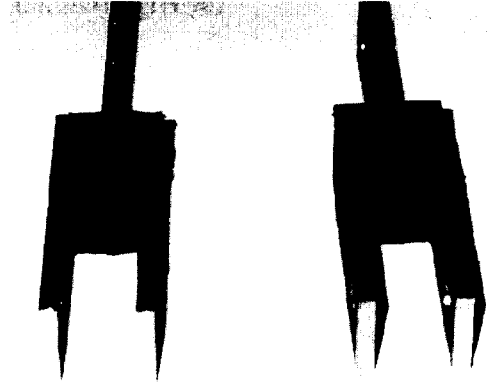


그림 2. 전단동적시험시편

2. 과탄성고무의 변형률에너지함수

면진 시험시편의 거동을 해석하기 위하여 ABAQUS 유한요소해석 프로그램을 이용 시에 두 방법이 유효한데, 첫째는 고무시험자료를 입력으로 주는 방법이며, 두 번째는 고무시험 자료로부터 변형률에너지밀도함수(strain energy density function)를 구하고 ABAQUS 사용자정의 부프로그램에 이를 입력하는 방법이다. 고무시편에 대한 단축인장(uniaxial), 등이축(equibiaxial), 순수전단(pure shear) 시험 중에서 최소한 2가지 이상의 시험자료가 변형률에너지함수를 구하는데 요구되며, 수직방향으로의 변형 특성을 정확히 알기 위해서는 압축시험자료가 필요하다. Mooney-Rivlin 및 Polynomial의 변형률에너지밀도함수 다음과 같은 식으로 표현된다[3].

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

여기서, \bar{I}_1 과 \bar{I}_2 는 편차변형의 1차와 2차 불변값이며, J_{el} 는 체적탄성비, C_{ij} 와 D_i 는 구해야 할 계수이다. 여기서 N=1이면 Mooney-Rivlin 모델이 된다. Ogden 모델은 다음과 같다.

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

여기서 μ_i, α_i, D_i 는 시편 시험조건과 결과에 의해서 구해야 할 계수이고, N은 함수의 차수이다.

이들 변형에너지 밀도함수의 계수는 한국원자력연구소 먼진베어링용 고무시험에 대하여 수행한 시험자료로부터 제시된 값을 사용하여 표 1, 표 2 및 표 3과 같이 계수를 구하였다[4].

표 1. Mooney-Rivlin 변형률에너지 함수의 계수(N=1)

D_1	C_{10}	C_{01}
0.0009	0.5816	0.1464

표 2. Polynomial 변형률에너지 함수의 계수(N=2)

D_1	D_2	C_{10}	C_{01}	C_{20}	C_{11}	C_{02}
0.00115	0.00004	0.3578	0.3054	0.0369	-0.0441	-0.0069

표 3. Ogden 변형률에너지 함수의 계수(N=3)

I	μ_i	α_i	D_i
1	-488.3	1.903	0.00114
2	235.3	2.063	0.000025
3	254.6	1.729	-0.0000007

3. 전단동적시험시편의 전단변형해석

전단동적시험시편의 형상은 그림 2와 같이 3개의 철판사이에 표 4에 나타난 바와같이 두께가 0.686cm이고 단면적이 2.54cm x 2.54cm인 고무시편이 두 층이 있는 구조이다. 고무시편의 재료특성으로 앞에서 계산한 ABAQUS 프로그램의 변형률에너지 밀도함수를 입력하였고, 철판의 탄성계수는 200GPa, 포아송비는 0.3으로 하였다. 유한요소모델은 고무시편과 철판에 대하여 모두 3차원 고체요소를 사용하였고, 고무시편은 두께방향으로 4개 요소로 분할하여 고무시편의 총 요소 수는 한 쪽이 900개로 양쪽에 1800개이다. 고무에 사용한 요소종류는 C3D8H, 철판의 경우 C3D8 요소를 각각 사용하였다. 상세 해석모델은 그림 3에 나타났다.

이러한 요소 수는 실제 먼진베어링 유한요소해석을 위해 필요한 요소 수와 비교하여 크게 줄어든 것으로 계산시간에서 이점을 갖는다.

표 4. 전단동적시험시편 제원

Steel Bar Thickness(cm)	0.445 x 3개
Rubber Area (cm ²)	2.54 x 2.54
Rubber Thickness(cm)	0.686

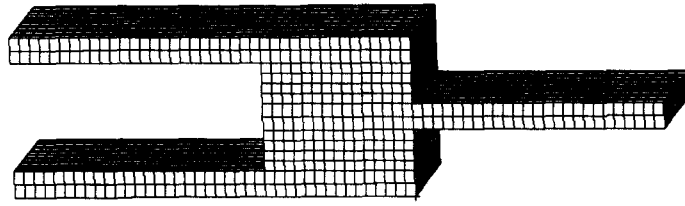
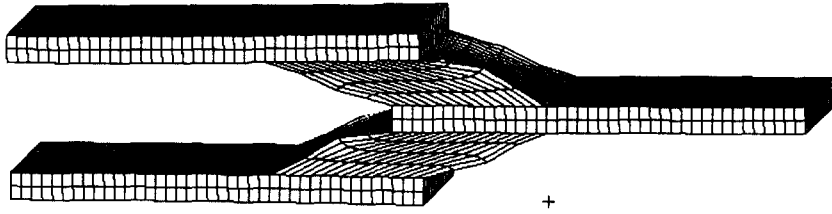
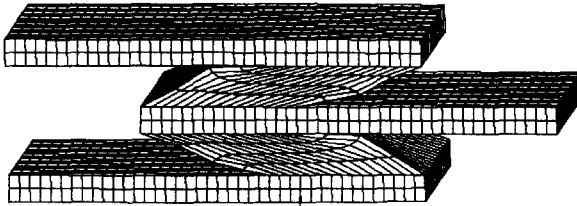


그림 3. 전단동적시험시편의 유한요소모델

해석모델의 경계조건으로 고무시편에서 떨어져 있는 왼쪽 철판 끝단 변위가 완전 구속되어 있는 것으로 하고 반대쪽으로는 고무 두께의 최대 300% 전단변형률까지 필요한 변위를 인장 및 압축방향으로 가하였다.



(a) 300% 전단변형 (인장)



(b) 300% 전단변형 (압축)

그림 4. 전단동적시험시편의 300% 전단변형형상

전단동적시험시편에 대한 전단변형해석을 수행한 결과에서 300% 전단변형 형상은 그림 4와 같이 철판 끝단부와 접하는 부위에 있는 요소가 큰 변형을 받는 것으로 나타났다. Ogden 모델의 계산 결과로부터 철판 끝단에서는 300% 인장시 0.647mm 벌어지는 변형이 발생하고, 300% 압축시에는 안쪽으로 0.122mm 변형이 일어나는 것으로 계산되었다. 이의 영향을 확인하기 위해 철판의 강성을 3배로 높여 철판의 변위를 줄인 결과에서도 고무시편에 대한 해석결과에는 거의 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.

각 변형률에너지밀도함수에 따른 전단력-전단변형률에 대한 관계는 그림 5에 나타난 바와 같이

Polynomial의 경우에는 수렴에 문제가 발생하였지만 다른 두 함수는 300% 전단변형률까지 수렴하였다. 시편에 대한 해석결과를 보면 문헌[4]에서 제시한 그림 6에 나타난 1/8 축소규모 면진베어링의 유한요소해석결과와 비교할 때 유사한 경향을 나타내고 있다.

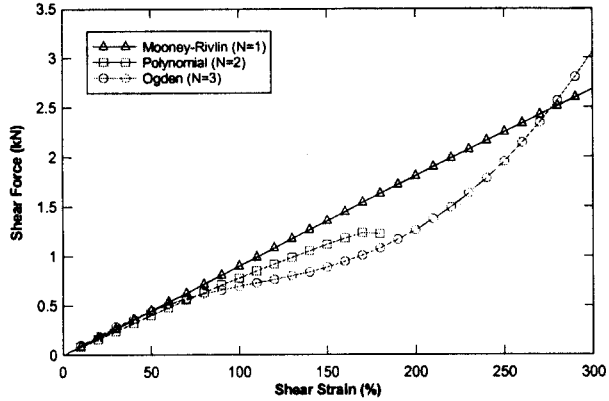


그림 5. 시험시편 전단력-전단변형률 (고무두께방향 4요소)

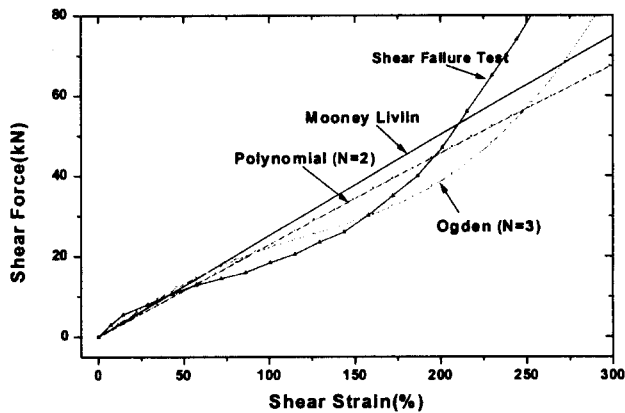


그림 6. 1/8 축소규모 면진베어링 전단력-전단변형률 (고무두께방향 1요소)[4]

Mooney-Rivlin, Polynomial, Ogden 등 변형률에너지 밀도함수 중에서 비교적 고무재료 시험특성을 잘 표현하고 유한요소해석에서 수렴성이 우수한 Ogden 모델을 이용하여 고무시편의 두께방향으로 사용하는 요소 수를 1에서 4개까지 변화시키면서 전단변형해석을 수행하였다.

그림 7의 전단력과 전단변형률 관계를 나타낸 해석결과는 고무 두께방향으로 사용하는 요소 수의 영향을 조사한 것으로 이의 영향이 작은 것을 보여주고 있다. 그림 8의 결과는 고무층당 1에서 4까지 사용 요소수에 따른 할선전단탄성계수의 변화 정도는 나타난 것으로 탄성계수는 100% 전단변형률에서 요소수에 따라 1.238, 1.135, 1.097, 1.077(MPa)로 각각 나타나 사용 요소수에 따라서 계수값이 최대 15% 정도 차이가 발생하고 있다.

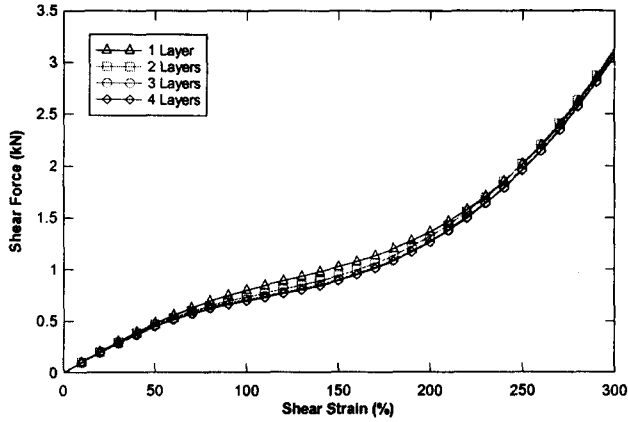


그림 7. 고무의 두께방향 요소 수에 따른 전단력-전단변형률 관계(Ogden, N=3)

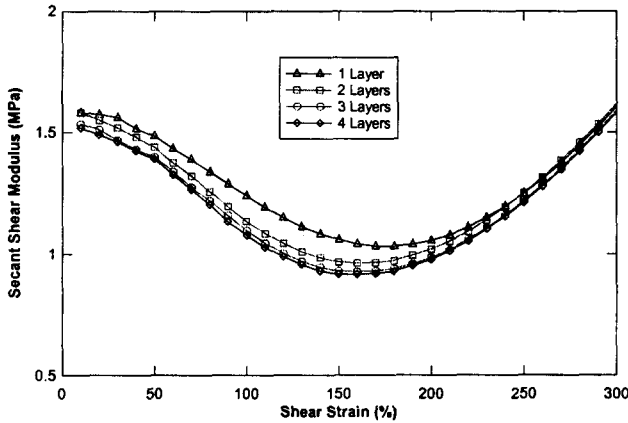


그림 8. 고무의 두께방향 요소 수에 따른 할선전단탄성계수(Ogden, N=3)

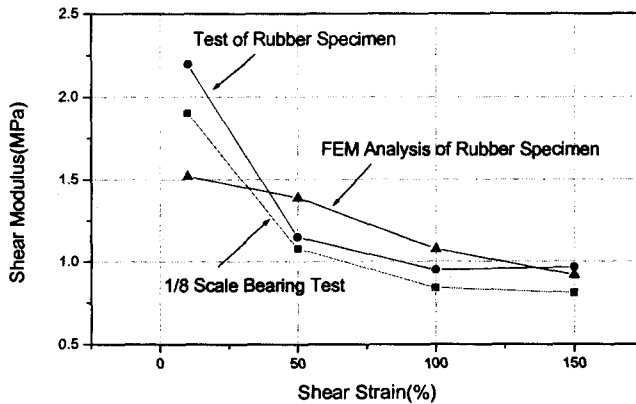


그림 9. 축소규모 면진베어링 시험 및 전단동적시험시편의 전단 시험/해석결과

그림 9는 전단동적시험시편의 변형량에 따른 할선전단탄성계수를 나타낸 그림 8로부터 일정 변형률(10%,50%,100%,150%)에 대하여 그 값을 발취하여 전단동적시험시편의 시험결과 및 실제 1/8 축소규모 면진베어링 시험결과와 비교한 것이다. 유한요소법에 의한 결과는 전단변형률이 낮은 지역에서 낮게 평가되었고, 50%에서 150% 전단변형률 범위에서는 시험결과를 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 첫째로 시험속도에 의한 영향이 해석에 반영되지 못하는 것과, 둘째로 유한요소해석을 위해 정의되는 변형률에너지밀도함수가 고무재료의 시험결과를 전단변위가 작은 지역에서 정확하게 표현하지 못하는 것에 원인이 있는 것으로 판단된다

4. 결 론

고무재료 특성이 주어지는 경우 전단동적시험시편에 대한 유한요소 해석결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

전단동적 고무시험시편에 대한 유한요소해석으로부터 계산한 전단력-전단변형률 관계는 1/8 축소규모 면진베어링에 대한 해석결과와 비교할 때 매우 유사한 관계를 주었다.

할선전단탄성계수-전단변형률 관계에 대한 해석결과를 전단동적시험시편 및 1/8 축소규모 면진베어링 전단변형 시험과 비교할 때 전단변형률이 50%에서 150% 범위에서 비교적 잘 예측할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 사업의 일환으로 수행되었기에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌

1. 이재한, 유 봉, 구경희 (1996), "면진베어링 유한요소해석," 한국전산구조공학회 '96가을학술발표회 논문집, pp.45-51.
2. B.Yoo, J.-H. Lee, G.H. Koo (1996), "Intercomparison of Analysis Methods for Seismically Isolated Nuclear Structures," 1st IAEA Research Co-ordination Meeting(RCM), St. Petersburg, Russian Federation.
3. ABAQUS User's Manual for Revision 5.8(1999), Hibbit, Karlson & Sorenson Inc.
4. B.Yoo, J.-H. Lee, G.H. Koo (1998), "Intercomparison of Analysis Methods for Seismically Isolated Nuclear Structures (KALIMER HLRB and CEIEPI Isolated Rigid Mass Mock-up)," 3rd IAEA RCM, UK May 26-27.
5. J.-H. Lee, B. Yoo, G.H. Koo (1999), "Characteristic Test of High Damping Rubber Shear Specimens for Seismic Isolators of KALIMER," 15th Int. SMiRT, Seoul, Korea.