

면진 LRB (Lead Rubber Bearing) 시스템의 유한 요소 해석 및 설계

정정배*, 송우진**, 정경수***, 김계수***, 강변수****

*부산대학교 대학원 **정밀정형 및 금형가공 연구소 ***(주)동일고무벨트 ****부산대학교 항공우주공학과

Finite Element Analysis and Design of a Lead-Rubber-Bearing System for Seismic Isolation

J.B.Juhn , W.J.Song , K.S.Jung , G.S.Kim , B.S.Kang

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 recent frequent earthquake vibrations in Korea. Also high-technology industries require effective seismic protection. The LRB (Lead 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 analysis has been carried out about four cases; 29.5mm and 59mm horizontal displacements with/without a center hole. The unknown constants of the strain energy function of Ogden model have been obtained by a tension test.

1. 서론

20세기 이후 전 세계적으로 강한 지진들의 발생빈도가 증가하고 있으며 한반도 또한 지진 안정지대가 아닌 것으로 판명되어 교량이나 구조물의 면진 시스템의 구축이 요구되고 있다. 1997년까지는 한반도내에 지진으로 인한 큰 재앙이 없었기 때문에 면진 시스템에 대한 연구가 활발히 진행되지 않아 국내의 면진 연구에 대한 기술수준은 매우 낙후되어 있다. 건교부에서는 1998년부터 교량·철도·건물등의 중요 시설물등의 전체 구조물에 내진 설계 기준을 구체적으로 발표하여 중요성이 한층 높아졌다. 현재 국내 기술력으로 면진고무를 이용한 면진 시스템의 적용실적은 한국가스공사의 평택과 인천의 LNG TANK이지만, 근본적인 지진에 대한 기초해석 연구가 되지 아니하여 면진 시스템에 대한 설계는 외국 엔지니어링 회사에 전담하였고, 또한 기존의 국내업체 면진고무의 성능수준은 8%로 비교적 낮은 수준이다.

LNG TANK에 이용된 면진고무는 천연고무계 면진고무로 제조된 일반적인 면진고무에 지나지 않고, 면진 시스템에 대한 구조 연구는 전혀 이루어지지 않았다. 기본적으로 면진 시스템의 구성을 위해서는 면진 시스템의 주를 이루

는 고무에 관한 연구와 해석이 요구 된다. 고무 유사 재료(rubber-like material)의 경우 재료 비선형(material nonlinearity)과 기하학적 비선형성(geometric nonlinearity)에 의해 구조해석 시 많은 어려움을 보인다. 대부분의 금속재료들의 재료 거동은 미소 변형을 상태에서 파손되기 때문에 탄성범위 내에서는 선형 응력-변형을 관계를 이용하여 묘사된다. 그러나 고무유사 재료는 대변형, 대변형률의 거동을 보이므로 기존의 금속재료에서는 무시되었던 재료 비선형성 및 대변형률에 대한 언급이 필요하게 된다. 따라서 고무제품의 변형 해석을 위해서는 유한 탄성론에 기인한 비선형 특성 모델화와 대변형 이론에 의한 구성식이 필요하며 구성식에 필요한 계수들은 여러 가지 재료시험으로부터 얻을 수 있다.

이에 본 연구에서는 기존의 천연고무계 면진 고무보다 감쇠 성능이 우수한 LRB(Lead Rubber Bearing)의 유한요소해석을 통해 개발 중인 고무재료의 거동을 확인하고자 한다.

2. 유한 요소 모델링 및

고무 재료의 특성

실제 실험에 사용되어진 베어링의 유한 요소 해석을 위해서는 먼저 정확한 치수에 근거를 둔 형상에 대한 모델링이 선행되어야 한다. 본 장에서는 시뮬레이션에 사용되어진 형상의 요소 생성에 대한 것과 고무의 재질 상수에 대해서 서술하였다. 그리고, 베어링에 사용된 고무의 강판 재질의 물성치인 탄성계수는 $1.9981 \times 10^{11} [kg/m^2]$ 으로 ν 값은 0.33으로 입력되어졌다.

2.1 유한 요소 모델링

베어링의 형상은 고무층의 수와 강판, 고무판의 두께에 따라 몇가지 경우가 있으나, 이번 해석에 사용되어진 면진베어링의 치수는 다음의 표와 같다.

[mm]

		Type2
제품 규격		Ø150*Ø24*84T
End Plate		13T*2EA
보강 철판		2T*11EA
고무	고무 층수	Ø145*3T*12EA
	고무 총두께	30

여기서, 제품 규격은 베어링의 총 외경이 150mm이고, 차후에 납이 채워질 중심홀의 직경이 24mm인 것을 의미한다.

원통형 베어링을 이용한 수평 왕복 사이클 실험의 유한요소 해석으로, 제품의 요소생성시 해석시간 단축을 위해 전체 형상의 절반만 모델링하고 1사이클만을 해석하였다.(그림 3) 이때, 그림 1을 살펴 보면 알 수 있듯이, 납이 없는 경우의 수평 왕복 실험에 사용되어진 베어링은 중심홀을 가지고 있다. 그러나, 이번 시뮬레이션에서는 실제 실험에 사용된 중심홀을 가진 것과 그렇지 않은 것을 각각 모델링하여 해석을 수행하였다. 각각의 해석에 사용되어진 형상의 총 요소 수와 절점 수는 아래의 표에서 알 수 있다.

	요소수	절점수
중심홀이 있는 경우	3952	4602
중심홀이 없는 경우	3648	4563

해석에서는 8절점 3차원 입체 요소를 사용하였다. 고무 재질의 요소 타입은 Full & Herrmann Formulation Hex84이며, 그 이외의

강판 재질의 요소 타입은 Full Integration Hex7을 사용하였다.

2.2 고무 재료 시험 및 재료 상수 결정

유한 요소 해석시, 고무 재질의 특성은 변형을 에너지 함수를 이용해서 나타낼 수 있다. 이때, 변형을 에너지 함수의 상수를 결정하기 위해서는 사용되어지는 고무에 대한 몇 가지 시험이 수행되어야 한다. 시험 시험의 종류에는 단축 인장, 단축 압축, 2축 인장, 그리고 단순 전단 시험 등이 있다. 이번 해석에는 베어링에 사용된 고무 시험의 단축 인장시험을 통해 구해진 응력-변형률 데이터를 이용하여 고무 재질의 특성을 나타내는 변형을 에너지 함수의 물질 상수를 구하였다. 이렇게 단축 인장 시험 데이터로 구한 재질 상수를 이용한 유한 요소 해석 결과는 실제 베어링의 실험 결과와 다소 오차를 보여 준다. 그래서 실제 베어링의 실험 결과와의 오차를 줄이기 위해 고무 재료 시험의 다양한 시험을 계획하고 있다.

다음은 이번 해석에 적용된 3항 Ogden model을 이용한 고무 재질의 변형을 에너지 함수의 상수들이다.

[kg/cm²]

	Ogden model (ogden control parameter)		
Num. of terms	3		
Bulk modulus	454772		
moduli	-13.503	-29.5318	-29.1702
exponents	1.94064	-4.10579	1.1811

3. 유한 요소 해석

본 장에서는 실험에 사용된 베어링의 모델링된 형상을 이용한 정해석 수행시 요구되어지는 각각의 경계 조건·하중 조건과 해석으로부터 얻어진 하중-변위 선도(이력 곡선-Hysteresis curve)에 대한 내용이 기술되어져 있다. 해석은 베어링 아랫면 수평 변위의 1/4이 각각 59, 29.5mm 인 두 가지 경우의 1사이클(사이클 속도 : 120sec/cycle)만이 수행되었다. 그리고 각각의 경우에서 베어링이 중심홀을 가지는 것과 그렇지 않은 것의 해석 결과도 비교하였다.

3.1 경계 조건

3.1.1 구속 조건

베어링에 적용되어진 구속 조건은 중심홀의 유무에 상관없이 동일하다. (그림 2) 해석에서 적용되는 수평 변위가 베어링의 횡단면의 중심축에 대해 대칭이기 때문에 해석시간 단축을 위해 전체 형상의 절반만을 이용해 요소를 생성하였다. 이로 인해 적용되어지는 구속 조건으로 베어링의 대칭면의 모든 절점이 그림 2에서 볼수 있듯이 z축에 대해 고정되어진다. 모델링된 베어링의 아랫면은 실제 실험에서 유압 실린더가 부착되는 부위로 그림 2에서와 같이 x 방향으로의 수평 변위만을 허용하고 나머지 방향인 y, z축으로는 고정되어진다. 수직 하중이 가해지는 베어링의 윗면은 수직 하중에 의한 y 축 변위만을 허용하고 나머지 방향의 변위는 고정되어진다. 실제 실험에서의 여러 번의 강제 수평 변위 사이클 중 전체 베어링에 약간의 회전 발생하지만 해석에서는 무시하였다. 즉, 해석에서는 베어링의 윗면이 하중이 가해지는 면과 완전히 접촉되어 있다고 가정하였다.

3.1.2 하중 조건

실제 사이클 실험에서 베어링에 가해지는 하중으로는 원형 단면에 수직한 방향의 하중과 베어링 아랫면의 유압실린더에 의한 강제 수평 변위가 있다. 해석에서는 베어링에 가해지는 수직하중을 모델링 형상의 윗면을 구성하는 각 요소에 면압으로 가해진다. 실제 실험에서 가해지는 하중의 크기는 21680kgf이다. 해석에서는 압력으로 주어지기 때문에 크기는 4.26419MPa로 계산되어진다. 유압실린더에 의한 강제 수평 변위는 앞서 언급한 구속 조건과 함께 모델링된 베어링의 아랫면에 x축 방향으로 가해진다. (그림 2) 강제 수평 변위의 크기는 각각 최대 변위가 59, 29.5 인 두 가지경우가 있다. 그리고 변위 사이클은 sin파로 입력되었다.

3.2 해석 결과

해석은 수평 변위가 29.5mm, 59mm인 각각의 경우에 대해, 베어링의 중심에 중공이 있는 것과 없는 것에 대해 수행되었다. 네 가지의 해석 결과 중, 베어링에 중공이 없는 경우에 대한 이력 곡선은 그림 4에서 비교되어져 있다. 그림 4

를 살펴보면, 수평 변위가 59mm인 경우에는 변위 초기 속도가 더 크기 때문에 베어링의 초기 수평 강성이 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 중공의 유무에 따른 이력 곡선은 그림 5, 6에서 비교되었다. 해석 결과에서 구하여진 베어링의 유효 수평 강성과 반력은 아래의 표에 계산되어 있다. 표에서 알수 있듯이, 수평 변위가 29.5mm인 경우에는 베어링의 중심에 홀이 있는 경우의 최대 반력이 1.6kN 정도 크게 작용한다. 그리고, 수평 변위가 59mm인 경우에서도 마찬가지로 베어링의 중심에 홀이 있는 경우의 최대 반력이 대략 8.2kN 정도 더 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 이력 곡선을 비교한 그림 5, 6에서도 확인할 수 있다. 이것은 중공이 있는 경우의 수평 반력이 측정되어진 단면적이 중공이 없는 경우보다 작기 때문에 반력이 더 크게 작용함을 알 수 있다. 그러나, 그림 5, 6를 살펴보면 최대 반력차가 전체 반력 분포에 비해 그 값이 약 1/50 정도로 매우 작다. 그러므로, 중공의 유무에 따른 유효 수평 강성이나 반력 분포의 차이는 무시되어 질 수 있다.

	중공		비중공	
	29.5mm	59mm	29.5mm	59mm
최대반력 [kN]	39.6	205.6	38	197.4
유효 수평강성 [MN/m]	1.34	3.48	1.29	3.34

4. 결론

이상과 같이, 베어링에 중심홀이 있는 경우와 그렇지 않은 경우에 대해 수평 변위가 29.5mm, 59mm인 네가지 해석에서 다음의 결론을 얻을 수 있다.

- 각각의 이력 곡선에서 알 수 있듯이 베어링 아랫면 액츄에이터의 수평 변위 속도에 따라 수평 강성이 달라짐을 확인하였다. 즉, 수평 변위의 속도가 클수록 고무의 점탄성 효과에 의해 베어링의 수평 반력이 더 크게 작용함을 알 수 있다.
- 수직하중이 작용하는 면진 베어링인 경우, 수평 변위에 대한 전체 유효 수평 강성은 중심홀의 유무에 상관없이 일정하게 나타나는 것을

알 수 있다.

지금까지의 면진 베어링에 대한 해석을 바탕으로 중심에 납이 존재하는 경우에 대한 해석과 해석에 이용된 각 베어링의 실제 실험결과와의 비교, 검토를 계획하고 있다. 그리고, 유한요소 해석결과와 실제 베어링의 강제 수평 변위 실험 결과와의 오차를 최소화하기 위해 사용되어지는 고무시편의 다양한 시험을 실시할 예정이다.

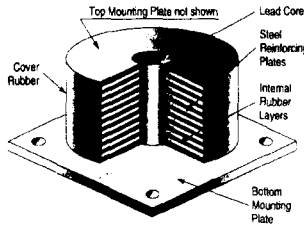
후 기

본 연구에 협조해 주신 (주)동일고무벨트와 정밀정형 및 금형가공 연구센터에 감사의 뜻을 표합니다.

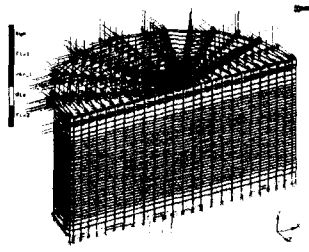
Reference

(1) Alan N. Gent "Engineering with Rubber." Oxford Univ. 1992.
 (2) Charles T. Lynch "Handbook of Materials Science." Volume II. CRC Press. 1987.

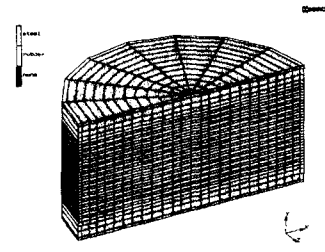
(3) MARC Vol.A User Information. MARC Analysis Research Corporation. 1994.
 (4) MARC Vol.B Element Library. MARC Analysis Research Corporation. 1994.
 (5) Mineo TAKAYAMA and Keiko MORITA "Finite Element Analysis of Rubber Bearings including Flanges and Bolts." '98일본 지진공학 심포지움.
 (6) 김완두, 우창수, 한승우 "자동차 Strut Rubber Insulator의 유한요소해석 및 피로 수명 평가." 대한 기계학회 '97고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집 pp.44-49.
 (7) 김현영, 최중윤, 김종재 "고무·포움 부품의 변형거동 예측과 형상 설계." 대한 기계학회 '97고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집 pp.14-24.
 (8) 임세영 "대변형을 수반하는 고무류의 탄성 구성방정식 모델링." 대한 기계학회 '97고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집 pp.56-61.
 (9) 허훈, 이형욱, 김세호 "셀 형상의 고무 구조물에 관한 유한요소 변형해석." 대한 기계학회 '97고체 및 고체역학부문 학술대회 논문집 pp.25-33.



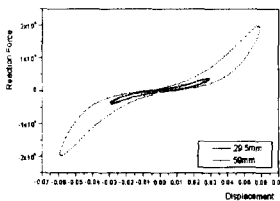
[그림 1] LRB의 개략도



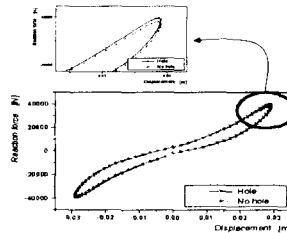
[그림 2] 경계 조건



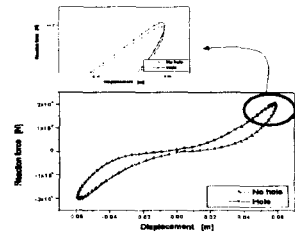
[그림 3] 재질 분류1



[그림 4] 이력 곡선 비교 (비중공)



[그림 5] 이력 곡선 비교 (수평 변위 : 29.5mm)



[그림 6] 이력 곡선 비교 (수평 변위 : 59mm)