

고무 알루미늄 적층 구조물의 유한요소 해석

박성한* · 이방업* · 홍명표* · 류백능*
*국방과학 연구소

FEM Analysis of alternatively laminated structure constructed of rubber and reinforced aluminium layers

Sung-Han Park, Bang-UP Lee, Myung-Pyo Hong and Back-Reung Ryu

Key Words: compressibility, biaxial tension, bulk modulus, elastomeric bearing.

Abstract

Strain energy function of the isoprene rubber was accurately determined by the experiments of uniaxial tension, planar tension, biaxial tension and volumetric compression. Deformation behavior of alternatively laminated structure of elastomer and reinforced aluminium layers, was analysed by Finite Element method. As a result, Ogden strain energy function obtained from the experiments describes the hyperelastic characteristics of the rubber very well. The compressibility of the rubber reduces axial stiffness of the structure. The axial stiffness of alternatively laminated structure being larger than shear stiffness, Which enables the structure to be shear-deformed easily.

1. 서론

고무는 일반 금속과 달리 500% ~ 900%의 큰 변형을 범위에서도 탄성거동을 나타내는 초탄성(hyperelastic) 성질을 갖고 있다. 이러한 특성 때문에 자동차 산업 및 건축산업 등의 민수용 과 군수용으로 확대 적용되고 있다. 국내에서도 최근에 고무의 실험 및 해석 양면으로 체계적인 연구가 진행되고 있다(1,2,3). 적층 베어링과 같은 구조물은 진동 흡수용 받침 구조물, 배관 설비용 Flexible joint 및 헬리콥터 로타용 flexible elastomeric bearing 등에 적용되고 있다(4). 고무와 강재를 교대로 접착하여 적층된 고무 베어링은 형상 계수를 변경함으로써 구조물의 강도를 방향에 따라 다르게 설계할 수 있다. 이 고무 베어링은 고무(pad)와 강재 또는 복합재(shim) 층이 교대로 적층된 형상이며 두 재료의 계면에 접착제를 도포한 후 가압 및 가열하여 성형된다. 이 베어링은 축방향 하중과 토오크를 받는 구조물이며 설계 요구 조건은 구동공간을 크게 하기 위하여

축방향 강성이 크고 회전이 용이하도록 전단강성이 작아야 한다는 것이다. 이러한 복잡한 응력하에 놓이는 고무 부품을 구조 해석하기 위해서는 변형 에너지 함수(strain energy function)를 정확하게 결정해야한다. 고무 재료의 특성은 비선형 특성을 나타내는 변형 에너지 함수의 계수값으로 표현되고 이들을 결정하기 위한 기본 시험들로는 일축 인장, 일축 압축, 순수 전단(planar tension), 단순 전단, 이축 인장(biaxial tension) 및 체적 시험 등이 있다. 압축시험은 마찰 및 barrelling 등에 의해 시험 결과를 신뢰하기 어려우며 압축시험과 등가한 이축 인장 시험이 추천되고 있다. 이축 인장(biaxial tension) 시험은 시험장치나 시험 과정이 어려워 수행하기 어렵다. 고무 베어링과 같은 이중 적층 구조물은 제작시 고무내부에 기포가 존재할 가능성이 크고 운용시 고무가 많이 구속된다. 이와 같은 구속하의 고무 부품을 해석할 경우 고무의 압축성이 인장 및 압축 응력에 영향을 주므로 bulk modulus를 결정하기 위한 체적 시험이 필수적이다.

고무의 비선형 대변형 유한요소 해석 코드로는 ABAQUS 와 MARC 등이 있으며 ABAQUS 에서는 변형 에너지 함수의 계수결정을 위하여 단순

* 국방과학연구소

인장, 이축 이장, 순수 전단 시험을 추천하고 있다. 이축 인장은 전단 응력이 걸리지 않도록 두 개의 동일한 인장 응력을 가한 상태로 압력에 의한 응력이 중첩되면 비압축성인 경우 일축 압축 시험과 동일한 하중 상태가 된다.

본 논문에서는 가황 고무(Isoprene rubber)의 일축인장, 이축 인장, 순수전단을 실시하여 고무의 응력-변형을 거동을 잘 나타내는 Ogden 변형 에너지 함수를 정확하게 결정하였고 체적시험을 수행하여 고무의 bulk modulus를 결정하였다. ABAQUS VER.5.8를 이용하여 인장 및 압축 전단 하중을 받는 고무 베어링과 유사한 형상을 갖는 고무와 알루미늄이 교대로 적층된 구조물의 수치 해석에 이 결과를 적용하여 그 구조물의 압축, 인장 및 전단 변형 거동을 분석하였다. 또한 재료의 압축성(compressibility)이 압축강성 및 인장강성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 재료 시험

2.1. 시편제작

시편용 고무는 천연고무의 특성을 지니도록 합성한 가황 고무로서 인장 응력 100~120 kg/cm², 연신율 800~900%인 연한 고무 성질을 갖고 있다. 가황 고무는 기본 고무로 Isoprene 100phr (part per hundred resin)을 기준으로 충진제로서 CaCO₃ 40phr, TiO₂ 7phr, 가소제로서 DOA 7phr을 적용하고 2 roll mill을 사용하여 배합되었다.

시편은 형상에 맞는 금형에 미가황고무를 넣고 프레스를 이용하여 150℃, 150kg/mm²에서 20분 동안 성형하였다. 일축 인장 시험 시편은 KS M 6513(5)에 규정된 아령 3호로서 두께가 2.3mm, 표점거리가 20mm이고, 순수 전단 시편은 W74×L12×t1.0 mm인 평판이며 이축 시험 시편도 W140×W140×t1.0mm인 평판시편이다. 고무는 비압축성으로 가정하지만 실제 제작시 고무내부에 기포가 유입되므로 compression bulk modulus를 확인하기 위하여 체적시험을 수행하였으며 시편은 ϕ 17.8×L25.3 mm 이다.

2.2. 시험방법

일축 인장, 순수 전단 및 체적 시험은 인장 시험기에서 수행되었다.

이축 인장 시험기를 Figure 1에 나타내었다.

평판 시편의 4군데 모서리는 32개의 척에 의해 구속되어 있다. 그 척은 sliding wedge가 있는 자체 조임 기구(self-tightening mechanism)가 있고 시편이 신장 될 때 힘을 측정하는 bar상에서 자유롭게 움직이는 볼 베어링으로 지지된다.

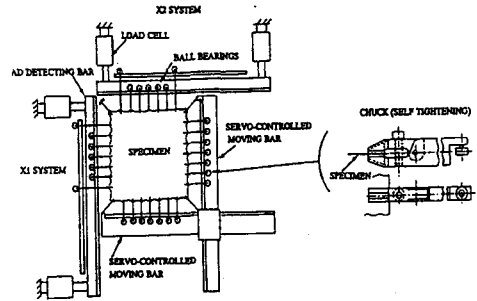


Figure 1. 이축 인장 시험기

두 방향의 인장력은 로드 셀로 측정된다. 두 방향으로 신장은 두 개의 움직이는 bar로 적용되고 bar의 위치는 서어보 벨브로 제어된다. 본 실험에서는 W140×W140×t1.0mm인 평판시편을 두 개의 서로 수직된 방향으로 5.0mm/min의 신장 속도로 신장을 λ_1 및 λ_2 가 2.5가 되도록 동시에 신장하였다.

4가지 시험의 시험온도는 20℃이며 변형속도는 5mm/min., 시험수량은 각 시험당 5개이다.

2.3 유한요소 해석

2.3.1 시편 해석

일축 인장, 단순 전단 및 등 이축 인장 시험모드를 모델링하여 Ogden 상수를 결정하였다. 모델링에 사용된 유한요소는 ABAQUS 3차원 2차 hybrid 요소인 C3D20H 요소이고 각 요소당 자유도는 절점당 변위가 3개씩이고 추가로 요소내의 일정압력을 자유도로 가지므로 총 61이다. 시편에 하중이 가해질 때 변위 및 응력이 전체 모델에 대하여 균일하게 분포되도록 경계조건을 적용하였다.

2.3.2 적층 구조물 비선형 해석

Figure 2는 고무와 알루미늄이 교대로 적층된 구조물을 모델링한 것이다. 모델링과 결과분석은 PATRAN 9.0을 사용하였고 해석 프로그램은 ABAQUS 5.8을 적용하였다. 이 구조물은 t1×

W20× W20mm의 5층의 고무 판(pad)과 t2× W20 × W20mm의 6층의 알루미늄 판(shim)이 교대로 적층되어 있다. 이 적층 구조물은 압축, 인장 및 전단 하중이 중첩된 복잡한 응력을 받는다. 해석에 사용된 고무는 가황 고무로 비압축성 과 압축성의 두가지 경우로 가정하였으며 3가지 시험 모드를 종합한 Ogden 함수를 사용하였다. 알루미늄 shim의 경우 탄성계수는 7408kg/mm² 이며 프아송 비는 0.3이다. 고무모델링시 사용된 유한요소는 3차원 solid 요소인 C3D20H hybrid 요소이다.

경계 조건으로 적층 구조물의 하부 알루미늄 판을 x,y,z방향으로 모두 구속하였으며 상부의 금속판에 인장하중, 압축하중, 전단하중, 압축 및 전단의 복합하중을 가하였다

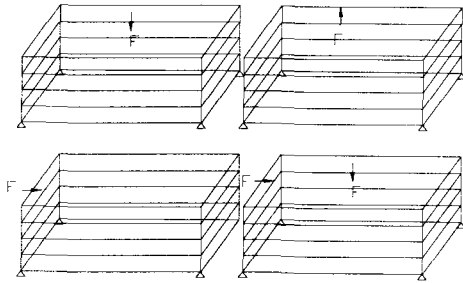


Figure 2. 압축, 인장, 전단 및 복합 하중을 받는 적층 구조물의 모델

3. 3장 실험 및 해석 결과 고찰

3.1. Ogden 상수 결정

Figure3 과 Figure4는 이축 인장 시험결과와 체적시험 결과를 나타낸 것이다. Figure 3에서 두 방향의 응력-변형률 곡선은 거의 유사하게 나타나 시험결과의 타당성을 확인할 수 있으며 신장률 250% 범위에서 sliding wedge 부위에서 고무가 파손되었다. Figure 4의 체적시험 결과는 고무의 압축성을 나타내며 시편제작시 상당량의 기포가 내재하였음을 알 수 있고 실제 이중 적층 구조물의 압축 성형(compression molding)시 기포가 유입될 수 있음을 간접적으로 알 수 있다.

compression bulk modulus(K)는 아래의 식으로 결정된다.

$$P=K(\Delta V/V_0), \Delta V:\text{체적변화}, V_0:\text{초기체적}$$

고무의 재료상수는 일축 인장, 순수 전단, 이축

인장 및 체적 시험을 통하여 얻어진 응력-변형률 데이터를 curve-fitting하여 구해진다. Table 1 과 Figure5~7은 재료시험결과로 구해진 Ogden 계수와 결정된 Ogden 함수를 이용하여 각 시편을 해석하여 얻어진 응력-변형률 곡선을 비교하여 나타낸 것이다. Ogden formulation에서 n=3일 경우 변형에너지 함수가 3가지 시험 모드에 대한 응력-변형률 특성을 잘 나타내었다. Figure 8은 이축 시험모드를 일축 시험으로 결정된 Ogden 함수와 이축 시험으로 결정된 Ogden 함수로 해석한 결과이며 이축 인장 거동이 나타나는 고무 부품의 해석시 이축 인장 시험이 반드시 필요함을 알 수 있다

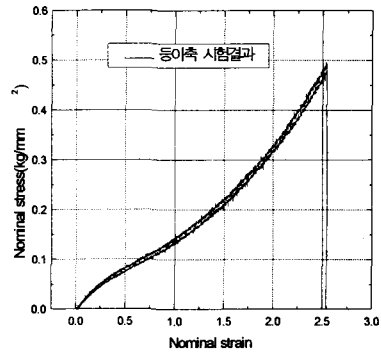


Figure 3. 이축 인장 시험 결과

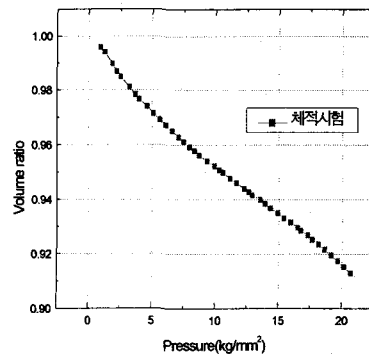


Figure 4. 체적시험 결과

Table1 가황고무 변형에너지 함수의 Ogden 상수

시험모드	μ	α
uniaxial test	2.30281e-04	3.76430
	3.344363e-07	8.62759
	6.594500e-02	-3.44653
biaxial test	0.5876e-01	2.673
	-0.6715e-01	9.774
	0.3360e-01	-4.887
combined test(using 3 tests)	3.569065e-02	1.42709
	9.005109e-06	6.81965
	3.939088e-03	-2.41737
volumetric test	D1:1.228e-02	
	D2:1.7258e-02	
	D3:-3.369e-05	

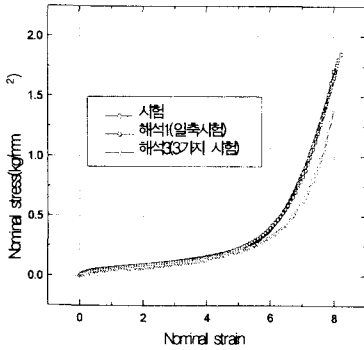


Figure 5. Ogden 함수(n=3)를 이용한 일축인장 시험모드의 Curve-fitting

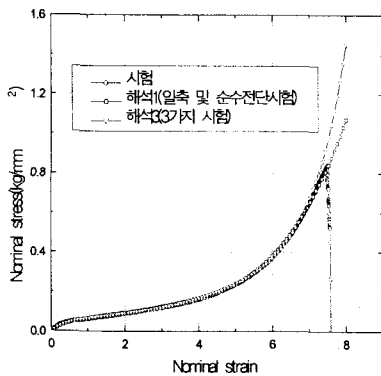


Figure 6. Ogden 함수(n=3)를 이용한 순수 전단 시험모드의 Curve-fitting

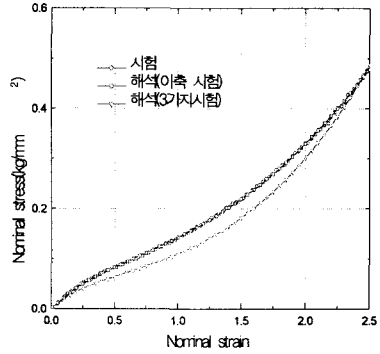


Figure 7. Ogden 함수(n=3)를 이용한 이축 인장 시험모드의 Curve-fitting

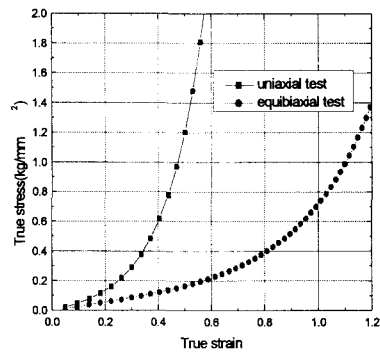


Figure 8. 일축 시험과 이축 인장시험 결과를 이용한 이축 시험모드의 응력 변형을 곡선 비교

3.2. 이중 적층 구조물의 거동

Figure 9은 이중 적층 구조물의 압축 및 인장 강성을 나타내고 있다. 고무에 내재된 기포로 인한 압축성이 압축 및 인장 강성을 감소시키는 것으로 나타났는데 이는 고무의 압축성에 의해 변형이 용이해지기 때문으로 판단된다. 압축 및 인장 하중 적용시 적층 구조물의 응력 집중부는 고무판의 모서리 부이며,

+ 인장 하중의 경우 압축보다 응력 집중부가 넓고 응력 값의 크기도 크며 인장 강성도 압축강성보다 작게 나타났다.

Figure 10은 적층 구조물의 전단 강성을 압축

및 인장 강성과 비교하여 나타낸 것이다. 적층 구조물은 전단 강성이 두 강성보다 훨씬 작게 나타났다으며 압축 및 인장 변형 보다 전단이 용이한 고무 베어링 등에 적합함을 알 수 있다.

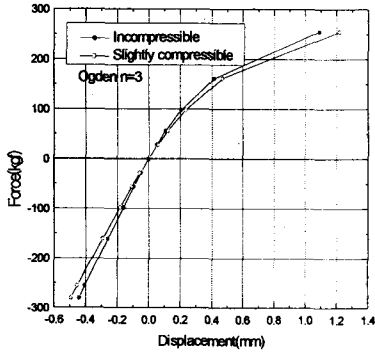


Figure 9. 이중 적층 구조물의 인장 및 압축 강성

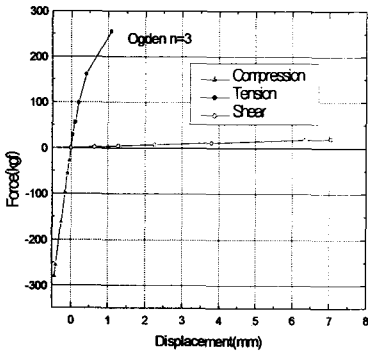


Figure 10. 이중 적층 구조물의 압축, 인장 및 전단 강성

4. 결론

가황고무의 일축 인장, 순수 전단, 이축 인장 및 체적 시험을 통하여 Ogden 변형에너지 함수를 결정하였고 그 결과를 이용하여 고무와 알루미늄이 교대로 적층된 구조물의 변형 거동을 해석하였다.

1. 일축 인장, 순수 전단, 이축 인장 및 체적 시험을 실시하여 가황고무의 특성을 잘 나타내는 Ogden 변형에너지 함수를 구하였다.

2. 고무의 압축성은 적층 구조물의 압축 및 인장 강성을 감소시키는 것으로 나타났으며 적층 구조물의 강성은 압축, 인장 및 전단 순으로 나타났다.

참고문헌

- (1) 김완두 등, " 초탄성체 고무류 기계 부품의 변형해석 및 설계 기술 개발 ", 한국 기계 연구원 보고서, 98-NG-01-03-A-01, 1999.
- (2) 이태수, " 고무의 기계적 특성과 시험법 ", 기계저널, VOL.38, NO.12, 1998.
- (3) 오광환, 이방업, 김성은 " 고체 추진기관용 밀봉용 오링의 거동해석 ", 제 8차 유도무기 학술대회, 1998.
- (4) United states patent, Patent Number 5042967, 1991
- (5) KS-M-6518, " Physical testing methods for vulcanized rubber".