

## 비선형 유한요소법을 사용한 고무 마운트의 정특성 해석에 있어서 체적 탄성 계수의 역할

최윤홍 · 여태인  
기계 · 자동차 공학부

### <요약>

고무 스프링의 정 스프링 상수를 해석하기 위해 비선형 유한요소법을 사용할 때, 고무의 구성 방정식은 초탄성 재료 모델로 표현한다. 일반적으로 엔진 마운트의 설계를 위한 초탄성 모델의 재료 상수들은 일축 압축 시험과 단순 전단 시험 결과만을 이용하여 구해진다. 그러나 체적 시험을 생략하고 고무를 비압축성으로 가정한 비선형 유한 요소 해석 결과는 매우 부정확한 결과를 가져올 수 있다. 본 연구는 수치 해석 결과에 미치는 체적 탄성 계수의 영향을 조사하여, 엔진 마운트의 형상 계수가 클 때는 체적 변형율의 정확한 측정이 다른 두 물성치의 측정과 마찬가지로 중요하다는 것을 보이고 있다.

## Implication of Bulk Modulus in Nonlinear Finite Element Analysis for the Static Stiffness of a Rubber Mount

Choi Yoonhong, Yeo Taein  
Department of Mechanical and Automotive Engineering

### <Abstract>

When a nonlinear finite element analysis is used to find the static spring constants of a rubber spring, the constitutive equations of the rubber are represented by a hyperelastic model, of which material constants are determined from the different types of material tests. Uniaxial compression and simple shear tests are usually chosen due to their experimental conveniences, while volumetric test is often underestimated and

omitted. But the hyperelastic model obtained from the two kinds of tests alone can result in rather poor performance for a certain engine mount when the rubber is assumed to be incompressible in the finite element procedure. This study investigates the influences of bulk modulus, which are found to be as equally important as other two material properties, on the numerical results when the form factor of the mount becomes large.

## 1. 서 론

고무 재료는 작은 응력하에서도 큰 변형을 일으키고 500~700%의 변형율에서도 탄성 복원될 뿐만 아니라 적절한 감쇠 특성으로 인하여 엔진 마운트에 적합한 재료이다. 이러한 고무 엔진 마운트는 엔진에서 발생되는 진동이 차체로 전달되는 것을 절연시키고, 노면에서의 가진력에 의한 차체의 요동을 감소시키는 진동흡수기의 역할을 동시에 하도록 설계되어 있다.

고무 엔진 마운트의 설계 및 개발 단계에서는 정 스프링 상수 및 주파수에 따라 변화하는 동 스프링 상수의 해석이 필요하다. 그러나 엔진 마운트는 큰 초기 변형으로 인한 기하학적 비선형과 구성방정식의 비선형성을 가지고 있으므로, 그 형상이 단순한 경우에는 간단한 이론적 해석이 가능하나 형상이 단순하지 않은 경우에는 해석이 어렵다[1]. 따라서, 최근에는 비선형 유한요소 해석법을 사용하여 고무 부품을 설계하는 방법에 대한 연구가 진행되고 있으며[2,3], 자동차 산업체에서도 비선형 해석이 가능한 상용 유한요소 프로그램들을 도입하여 엔진 마운트의 해석에 널리 사용하고 있다[4-6].

유한 요소 해석 단계에 있어서 고무 재료의 비선형 거동을 묘사하기 위해서는 고무를 초탄성 재료(Hyperelastic Material)로 가정한 변형에너지 함수로 표현하는 방법이 주로 사용된다. 따라서 특정한 고무의 구성 방정식은 변형 에너지 함수의 상수들을 종류가 다른 여러 가지 시험에 의해 결정함으로서 구해진다.

고무의 시험 모우드에는 일반적으로 일축 인장시험, 이축 인장시험, 일축 압축시험, 단순 전단시험, 순수 전단시험, 체적시험등이 있는데 가능한 서로 다른 여러가지 시험을 수행하고 그 결과들을 사용하여 곡선 맞추기(Curve Fitting)를 하여야만 적절한 변형 에너지 함수의 계수들을 구할 수 있다. 일반적으로 엔진 마운트의 비선형 유한 요소 해석에는 인장 시험/압축시험/전단시험에서 구해진 계수를 사용하고 있다.

한편 산업체에서 사용하고 있는 상용 유한요소 프로그램들은 비압축성(Incompressible Material) 재료에 대한 유한요소 해석법을 따로 제공하지 않고, 거의 비압축성 재료(Nearly Incompressible Material)의 해석이 가능하도록 Penalty법을 채택하여 재료의 압축성을 하나의 구속 조건으로 취급하는 기능을 제공하고 있다. 그러므로, 변형 해석시 고무를 비압축성(Incompressible Material)으로 가정하여 매우 큰 Penalty Number에 해당하는 체적 탄

성계수  $K$ 를 사용하거나 수치적으로 불안정을 일으키지 않은 범위 내에서 0.5에 가까운 포아송비를 사용하도록 추천하고 있다[7-9].

그러나 고무를 비 압축성으로 가정한 엔진 마운트의 변형 해석은 그 형상에 따라서 매우 큰 오차를 가져올 수 있다. 이 경우 체적 변형 시험을 통하여 구해진 고무의 압축성이 유한요소 해석에 정확히 고려되어야 한다. 따라서, 본 연구에서는 모양이 서로 다른 두 마운트에 대하여 유한요소 해석을 함으로서 고무의 압축성이 정적 변형에 미치는 영향을 보이고자 한다. 또한 해석값이 압축성에 따라 민감하게 변화하는 마운트를 판단하기 위한 객관적인 기준을 위해 형상비(Shape Factor)의 사용을 도입하고자 한다.

## 2. 초탄성 모델(Hyperelastic Model)

일반적으로 고무와 같이 큰 탄성 변형을 하는 물질의 해석을 하기 위해서는 재료의 구성 방정식을 표현하기 위해 초탄성 이론에 근거한 변형을 에너지 함수를 사용한다. 초탄성 이론은 단위 체적당 변형을 에너지 함수(Strain Energy Function)의 변화율이 응력에 의한 일을과 같다는 원리를 이용하여 탄성체의 거동을 표현하는 것이다. 실제 많은 연구와 시험을 통하여 변형을 에너지 함수가 고무 재료의 탄성거동을 잘 묘사한다고 입증되었고, 현재 고무의 기계적 거동 해석에 널리 사용되고 있다[10].

변형율 에너지 함수에 의한 응력과 변형율의 관계는 식(1)과 같이 나타내어 진다.

$$S_{ij} = \frac{\partial W}{\partial \varepsilon_{ij}} \quad (1)$$

여기서  $W$  는 변형율 에너지 함수(Strain Energy Function),  $S_{ij}$ 는 second Piola-Kirchhoff 응력 텐서이며,  $\varepsilon_{ij}$ 는 Green Lagrangian 변형율 텐서이다.

이때, 변형에너지 함수는 변형에만 관련된 스칼라 양이므로 Cauchy 변형 텐서(Cauchy Deformation Tensor)의 불변량(Invariants)의 함수로만 나타낼 수 있다. 따라서  $W(I_1, I_2, I_3)$ 와 같이 표현할 수 있으며  $I_1, I_2, I_3$ 는 다음과 같이 주신장율(Principal Stretch)로 나타낼 수 있다.

$$I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \quad I_2 = \lambda_1^{-2} + \lambda_2^{-2} + \lambda_3^{-2}, \quad I_3 = \lambda_1^2 \lambda_2^2 \lambda_3^2 \quad (2)$$

비 압축성인 경우  $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$  즉,  $I_3 = 1$  이므로  $W$ 는  $I_1, I_2$  만의 함수가 된다.

고무의 변형 해석에는 주로 다항식 형태의 Mooney-Rivlin 계의 함수

$$W = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M C_{ij} (I_1 - 3)^M (I_2 - 3)^N \quad (3)$$

가 사용되어져 왔다. 본 연구에는 이 중 다음의 3가지 초탄성 모델을 사용하였다.

1. Neo-Hookean Model :  $W = C_{11}(I_1 - 1)$  (4)

$$2. \text{ Mooney(2) Model : } W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) \quad (5)$$

$$3. \text{ Mooney(3) Model : } W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{01}(I_2 - 3) + C_{11}(I_1 - 3)(I_2 - 3) \quad (6)$$

그러나 최근 측정 기술의 발달로 인하여 Mooney-Rivlin 유형의 모델은 변형이 클 때 응력-변형률 관계를 잘 나타내지 못함이 밝혀져 변형률 700% 까지 잘 묘사할 수 있는 Ogden 모델이 널리 사용되어지고 있으며 이는 다음과 같이  $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 의 지수 형태로 표현된다.

$$W = \sum_{n=1}^N \frac{\mu_n}{\alpha_n} (\lambda_1^{-\alpha_n} + \lambda_2^{-\alpha_n} + \lambda_3^{-\alpha_n} - 3) \quad (7)$$

식(4)-(7)으로 모델링된 초탄성 재료의 Cauchy 주응력 텐서  $T_i$ 는 다음과 같이 주신장을  $\lambda_i$ 로 나타내어진다.

$$T_i - T_k = 2(\lambda_i^2 - \lambda_k^2) \left( \frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_i^2 \frac{\partial W}{\partial I_2} \right) \quad (8)$$

Ogden 모델의 시험계수를 결정함에 있어 식(7,8)에서 보는 바와 같이 응력과 변형률의 관계식은  $\alpha_n$ 와  $\mu_n$ 에 대한 비선형 연립 방정식이 된다. 이러한 이유로 결정해야 할 계수가 식의 수보다 많게 되고 더 이상 선형 최소자승법을 이용할 수 없게된다. 이러한 경우에 초기에는 시험자료의 관찰에 의하거나 반복 작업을 통해 Ogden 모델의 시험계수를 결정하였으나 최근 최적화 방법이 개발되면서 Levenberg-Marquart Algorithm[11]을 이용하여 보다 체계적으로 구할 수 있게 되었다. 본 연구에는  $N=3$ 인 Ogden(3) 모델을 사용하였다.

### 3. 형상계수

거의 비압축성 재료(Nearly Incompressible Material)인 고무를 비압축성(Incompressible Material)으로 가정한 유한요소 해석은 마운트의 형상에 따라서 매우 심각한 해석 오차를 가져올 수 있다. 이 경우 고무는 더 이상 비압축성 재료로 볼 수 없으며, 변형 해석에 있어서 압축성이 큰 영향을 미치게 된다. 고무의 압축성이 변형에 미치는 효과를 살펴보기 위해 그림(1)과 같이 매우 넓은 두 평판 사이에서 압축되고 있는 고무를 생각하자. 이때, 그림(1)에 표시된 임의의 원통형의 고무 부분은 인접한 다른 고무 원통과의 적합성(Compatibility)에 의해 단면적의 변화는 거의 없고 높이만 줄어들 것이다. 그러므로 이 경우와 같이 주어진 임의의 변위를 받고 있는 평판 사이의 압력은 체적 탄성계수  $K = \frac{E}{3(1-2\nu)}$ 에 비례한다. 고무의 경우 포아송비가  $\nu=0.5$ 에 가까운 값을 가지므로  $K$ 는  $\nu$ 의 값에 따라 매우 민감하게 변한다. 따라서, 그림(1)과 같이 큰 정수압(Hydrostatic Pressure)을 받고 있는 엔진 마운트의 해석에는 단순히 0.5에 가까우면서 수

치적인 불안정성을 유발하지 않는 포아송비의 값 - 예를 들면  $\nu=0.4999$  - 을 사용하거나, 임의의 큰 체적 탄성 계수의 값 - 예를 들면  $K=1.0 \times 10^6$  - 의 사용은 고무에 비압축성이라는 구속 조건을 가하게 되므로 적절하지 않다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 엔진 마운트의 모양에 따라 고무의 압축성이 정적 변형에 미치는 영향을 조사하기 위해 형상 계수

$$k_f = \frac{A_c}{A_f} \quad (9)$$

를 도입한다[1]. 여기서  $A_c$ 는 고무와 금속판의 접촉 면적을,  $A_f$ 는 고무의 자유 표면적을 각각 나타낸다. 식(9)와 같이 정의된 형상계수가 큰 마운트의 경우 정수압이 커지게 되고 마운트의 변형은 체적 변화와 직접적으로 연관된다는 것을 알 수 있다. 따라서, 형상계수가 작은 마운트는 체적탄성계수의 변화에 따른 변형량이 많은 차이를 보이지 않으므로 유한요소해석에 있어서 체적 탄성계수의 값을 0.5에 가까운 임의의 값을 사용하여도 비교적 정확한 해석결과를 얻는 것이 가능하지만, 마운트의 형상계수가 커짐에 따라 변형량이 체적탄성계수에 따라 민감하게 변화하므로 체적시험 결과를 유한요소해석시에 반드시 사용하여야 함을 예상할 수 있다.

#### 4. 초탄성 모델의 물질 상수 결정

엔진 마운트 용 고무의 인장 시험 시편은 일축 하중 상태를 위해서 충분히 길어야 하며, 마운트의 운전 영역의 변형률에서 보통의 로드 셀(5 ton)을 사용하여 신뢰성 있는 힘을 측정하기 위해서는 시편의 단면적이 커야 하므로, 인장 시험 시편의 제작이 어렵다. 또한 엔진 마운트는 운전 특성상 주로 압축 하중에 의한 변형이 지배적이므로 마운트 변형 해석에 있어서 인장 시험보다는 압축시험에 적절하다. 본 연구에서는 그림(2)의 시편을 Instron 사의 만능 재료 시험기 Model 4469에서 압축 시험하였다. 이 때, 시편 양면에서의 마찰력을 줄이기 위해 시편 양면에 랩(Wrap)을 씌우고 그 위아래에 윤활유를 칠하여 일축 응력 상태가 되도록 하였다. 실제 시험시 변형을 50%까지 배불림 현상(Bulging out)이 없음을 확인 할 수 있었다.

그림(3)은 단순 전단시험에 사용된 시편과 시험 장치를 나타내고 그림(4)는 압축시험과 단순전단 시험결과를 나타낸다. 그림(5.a)는 체적 변형 시험장치를, 그림(5.b)는 그 결과를 나타낸다. 체적변형 시험시 작은 초기 하중하에서도 체적이 급격하게 변하였는데 이것은 고무 시편과 금속 용기(Steel Container) 사이의 작은 공간을 메우기 위한 것이고, 그림(5.b)에서는 그 이후의 완전한 정수압 상태의 거동만 나타내었다.

표(1)은 압축시험/전단시험/체적시험 결과를 앞에서 언급한 4 종류의 초탄성 재료 모델로 곡선 맞추기(Data Fitting)한 결과이다.

## 5. 엔진 마운트의 정적 변형 시험

그림(6)은 압축 재료 시험에 사용된 시편을 이용하여 제작한 마운트 A로서 윗면의 일부분과 아래면 전체가 금속 평판에 접착되어 있다. 그림(7.a)는 같은 재료로 만들어진 부시형 마운트 B로서  $\pm P$  방향의 하중에 대해 서로 다른 강성값을 가진다. 이 마운트는 특히  $-P$  방향으로 힘을 가하면 형상계수가 커지기 때문에 심한 체적 변형을 일으키는 특징이 있다. 식(9)에 정의된 형상계수는 마운트 A의 경우  $k_f = 0.40$ 이고 마운트 B의 경우  $k_f = 1.65$ 이다.

## 6. 엔진 마운트의 정적 변형 해석

유한요소 해석시 마운트의 형상계수의 변화에 따라 체적 탄성계수의 중요성을 연구하기 위하여 형상계수가 서로 다른 마운트 A, B에 대하여 비선형 유한요소 해석을 수행하였다. 이를 위해 비선형 유한요소 해석 프로그램으로 특히 고무의 해석에 편리한 MARC를 사용하였으며 대칭성을 고려하여 마운트 A는 축 대칭 요소를, 마운트 B는 그림(7.b)와 같이 1/4의 3-D 모델을 사용하였다. 한편, 고무와 같이 거의 비압축성인 재료의 해석을 위해 변위에 기초한 유한 요소(Displacement Based Element)의 사용은 요소의 잠김 현상(Spurious Zero-energy Mode)등 수치적인 불안정 문제가 발생하여 신뢰할 수 없는 결과를 가져온다. 그러나, 압력과 변위에 기초한 혼합요소(Mixed Element)의 사용은 이러한 문제를 피할 수 있으므로 Hermann Formulation Element를 사용하였다[12]. 표(2)에 본 연구에 사용된 요소의 종류와 수가 나타나 있다.

## 7. 결과 및 고찰

그림(8)-(11)은 마운트 A의 압축하중에 대한 해석 결과이다. 형상계수가 작은 마운트 A의 경우 그림(8)과 (9) 또는 그림(10)과 (11)를 비교해 보면 압축/전단 시험 결과에 더하여 체적 시험 결과의 사용은 해석 결과에 영향을 거의 못 미친다는 것을 알 수 있다. 오히려 그림(8)과 (10) 또는 그림(9)과 (11)의 비교에서 알 수 있듯이 전단 시험 결과가 압축 시험 결과와 함께 초탄성 재료의 물리적 성질을 정확하게 결정하는데 훨씬 유용하다는 것을 알 수 있다.

한편 일축 압축 시험 결과만 가지고 초탄성 재료를 선택할 때는 간단한 Neo-Hookean 모델이 Mooney 또는 Ogden 모델과 같이 복잡한 모델보다 좋은 해석 결과를 가져다주는 것을 알 수 있다. 그리고 예상한 바와 같이 마운트의 변형량이 작을 때(15%)에는 마운트의 힘과 변위가 선형인 관계를 보이고 이때는 4개의 초탄성 모델 전부가 시험 결과와 비교적 잘 맞는 해석 결과를 가져다주는 것을 알 수 있다.

형상계수가 매우 큰 마운트 B의 경우에는 그림(12)-(15)의  $-P$ 방향의 하중에 대한 해

석 결과에서 나타난 바와 같이 압축/전단 시험 결과만으로는 마운트의 거동 해석이 불가능함을 보여주고 있다. 즉, 그림(15)에 나타난 바와 같이 압축/전단/체적 시험을 수행하고 그 결과를 모두 이용하여 구해진 초탄성 모델을 사용하여야만 올바른 해석 결과가 얻어진다는 것을 알 수 있다. 또한, 그림(12)-(15)의 결과에서 나타난 바와 같이 형상 계수가 큰 마운트에 대해서는 압축, 전단, 체적 시험들 모두가 비슷한 비중으로 중요한 요소임을 알 수 있다.

또한, 마운트 B와 같이 형상계수가 클 수록 약간의 변형에도 체적 탄성계수를 사용하지 않은 해석 결과는 매우 큰 비선형성을 보이고, 따라서 시험 결과와의 오차가 매우 커짐을 알 수 있다. 또한, 마운트 A의 경우와 유사하게, 형상계수가 작은 경우에도 일축 압축 시험 결과만을 가지고 해석할 때에는 Neo-Hookean 모델과 같이 간단한 모델이 가장 정확한 해석치를 가져다준다는 것을 알 수 있다.

## 8. 결론

비선형 유한요소법을 이용한 고무의 변형 해석을 할 때 시험상의 어려움으로 인해 종종 생략되고 있는 체적 변형시험의 중요성을 알아보기 위해 일축압축/전단/체적시험을 하였다. 이 시험 결과들의 조합인 1)일축압축 2)일축압축+체적변형 3)일축압축+전단 4)일축압축+전단+체적시험 결과들을 이용하여 1)Neo -Hookean 2)Mooney(2), 3)Mooney(3), 4)Ogden(3) 의 4가지의 초탄성 모델을 구하였다. 이 초탄성 모델들을 사용하여 형상비가 서로 다른 2 개의 엔진 마운트에 대하여 비선형 유한요소 해석을 하였으며, 그 결과로서 다음의 결론을 얻었다.

- 변형량이 작은 경우에는 형상비에 관계없이 고무를 비압축성으로 가정하고 압축 시험 결과만을 사용한 초탄성 모델으로도 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다.
- 변형량이 크고 형상비가 작은 엔진 마운트의 해석에는 체적 시험결과가 중요하지 않다. 따라서 이 경우에는 고무를 비압축성으로 가정하고 압축과 전단 시험 결과만을 사용한 초탄성 모델으로도 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다.
- 변형이 크고 형상비가 큰 엔진 마운트의 해석에는 체적 시험 결과가 매우 중요하다. 이 경우에는 체적 시험 결과를 포함한 최소한 3개의 서로 다른 시험 결과를 이용하여 구해진 초탄성 모델을 사용하여야만 충분히 정확한 해석 결과를 얻을 수 있다.

## 9. 참고문헌

- [1] E.F.Gobel, Rubber Springs Design, 1974
- [2] Shu H. Peng and Wenji V. Chang, "A Compressible Approach in Finite Element Analysis of Rubber-Elastic Materials," Computers & Structures, Vol.62, No.3,

pp.573-593

- [3] Hirohisa Noguchi and Toshiaki Hisada, "Integrated FEM Formulation for Total/Updated-Lagrangian Method in Geometrically Nonlinear Problems," JSME International Journal, Series A, Vol.38, No.1, pp.23-29, 1995
- [4] 여태인 "유한 요소법에 의한 엔진 마운팅 고무 형상 설계 기술의 개발" 울산 대학교 산업 기술 연구소, 1996
- [5] 김중재,김현영 "고무 재료의 초탄성 거동과 유한 요소법을 이용한 부시형 엔진 마운드의 대변형 해석" 대한 금속 학회지 제31권 ,10 호 pp.1324~1330, 1993
- [6] J.E. Bernard and J.M. Starkey, "Engine Mount Optimization," SAE Paper 830257, 1983
- [7] MARC "Theory & User's Manual", MARC Corp., 1998
- [8] MSC/NASTRAN V68 Reference Manual
- [9] NISAII User's Manual
- [10] Treloar, L.R.G. "The Phisics of Rubber Elasticity" Oxford University Press, 1975
- [11] Twizell, E.H. and Ogden, R.W. "Nonlinear Optimization of The Material Constants in Ogden's Stress-Deformation Function for Incompressible Isotropic Elastic Material" Journal of Australian Mathematical Society SeriesB Vol24 pp424~434, 1983
- [12] Klauss-Jurgen Bathe "Finite Element Procedures" Prentice Hall, Inc ,1996

변형율 에너지 함수	시험계수 $kg/mn$	압축 시험결과	압축 및 전단시험 결과	압축 및 체적변형시험결 과	압축, 단순전단 및 체적변형시험
Neo-Hookean Model	$C_{10}$	0.043	0.041	0.043	0.041
Mooney(2) Model	$C_{10}$	0.04651	0.0335	0.04651	0.0335
	$C_{01}$	-0.00283	0.0066	-0.00283	0.0066
Mooney(3) Model	$C_{10}$	0.0948	0.017361	0.0948	0.017361
	$C_{01}$	-0.04684	0.0222	-0.04684	0.0222
	$C_{11}$	0.01455	-0.007	0.01455	-0.007
Ogden Model	$\mu_1$	0.00487	0.0835294	16.5872	-0.229244
	$\alpha_1$	-7.41523	2.285	-0.0096	-0.7
	$\mu_2$	0.022755	0.216755	0.06056	-0.00025219
	$\alpha_2$	10.3218	0.92531	1.2818	-0.0664732
	$\mu_3$	1.64527	-0.0942803	0.0568163	-0.018
	$\alpha_3$	0.005849	2.4555	4.8838	0.707
	$K$	비압축성	비압축성	91.94	91.94

&lt;표 1.&gt; 초탄성 재료 모델의 상수

Mount Type	# of Elements	Element Type
Mount A	120	2-D Axisymmetric Quadrilateral 8 Node Herrmann(Imcompressible) Formulation with Reduced Intergration
Mount B	700	3-D 8 Node Herrmann Formulation with Reduced Integration

&lt;표 2.&gt; 마운트의 해석에 사용된 유한요소

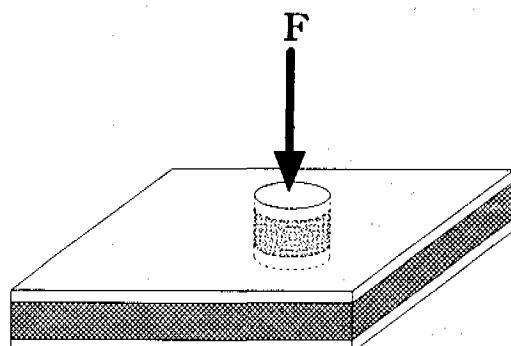


그림 1. 두 평판사이에서 압축되고 있는 고무

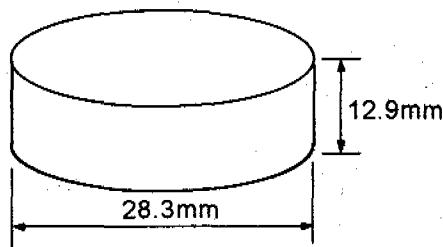


그림 2. 일축 압축 시편

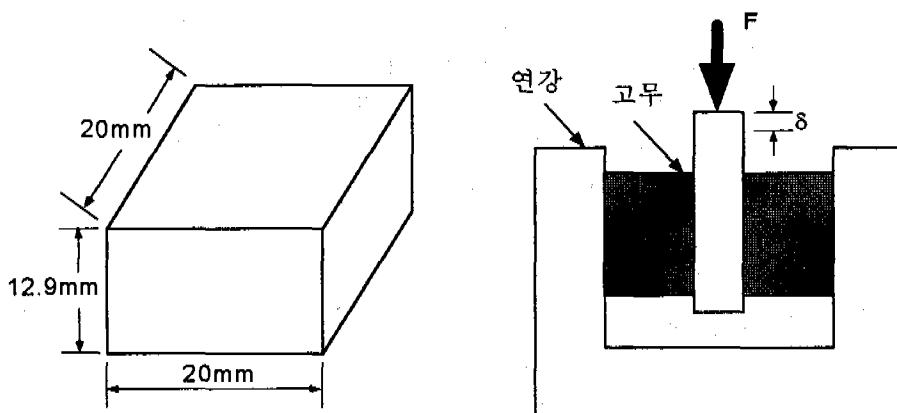


그림 3.a. 단순 전단 시험 시편

그림 3.b. 단순 전단 시험 장치

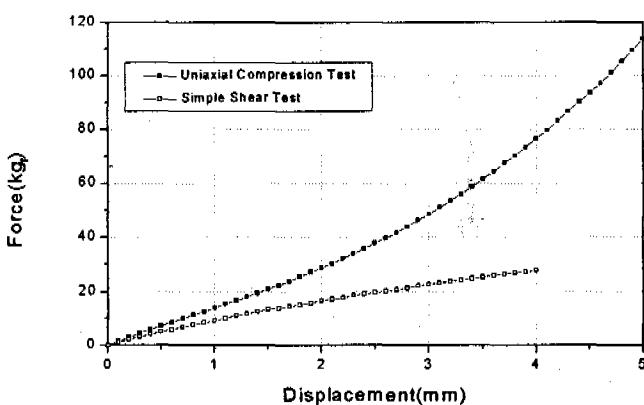


그림 4. 일축 압축 및 단순 전단 시험 결과

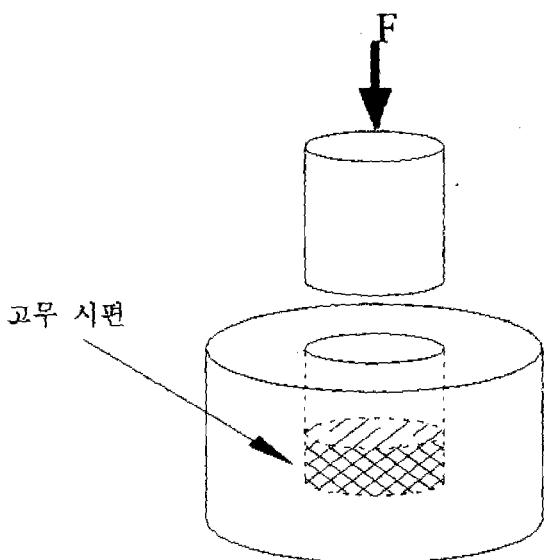


그림 5.a. 체적 변형 시험

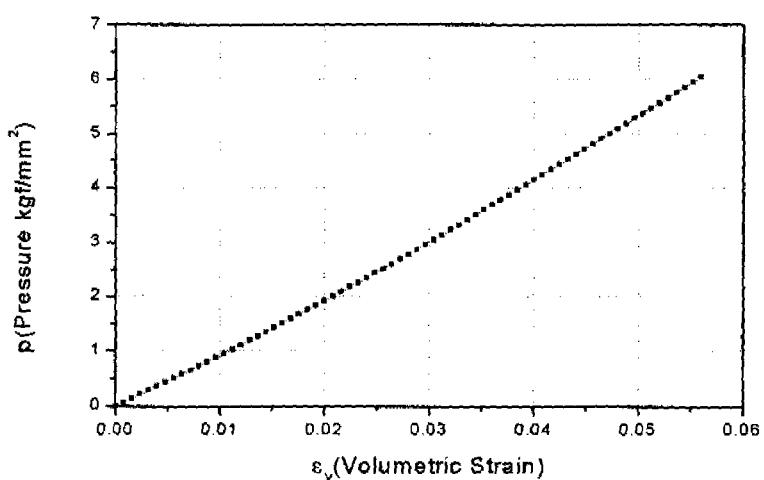


그림 5.b. 체적 변형 시험 결과

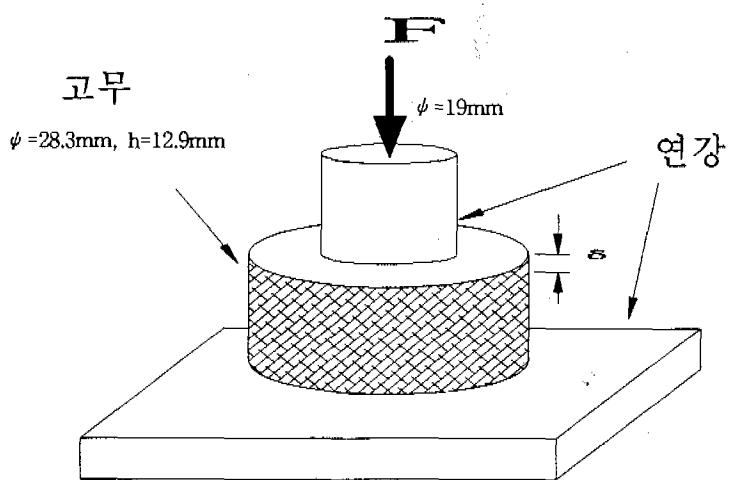


그림 6. 마운트 A

비선형 유한요소법을 사용한 고무 마운트의 정특성 해석에 있어서 체적 탄성 계수의 역할

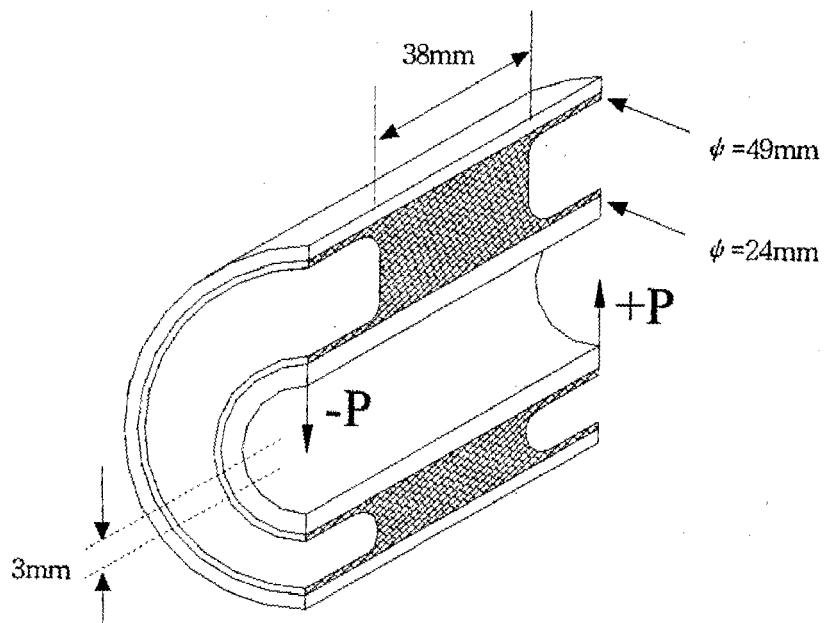


그림 7.a. 마운트 B의 1/2 형상

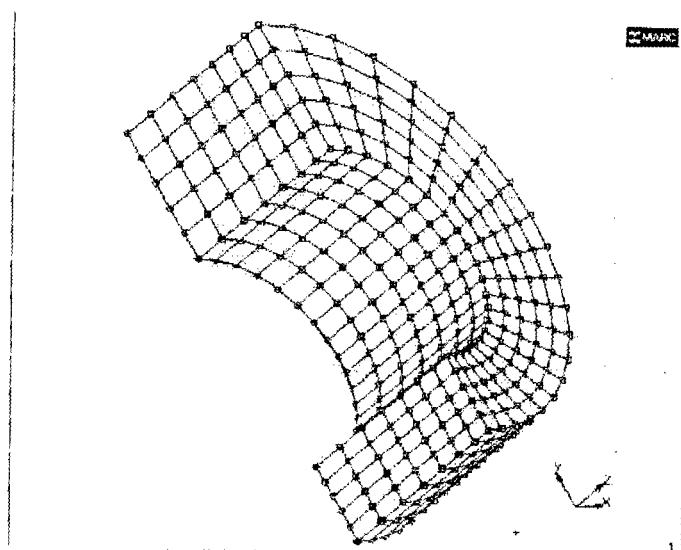


그림 7.b. 마운트 B의 유한 요소 모델

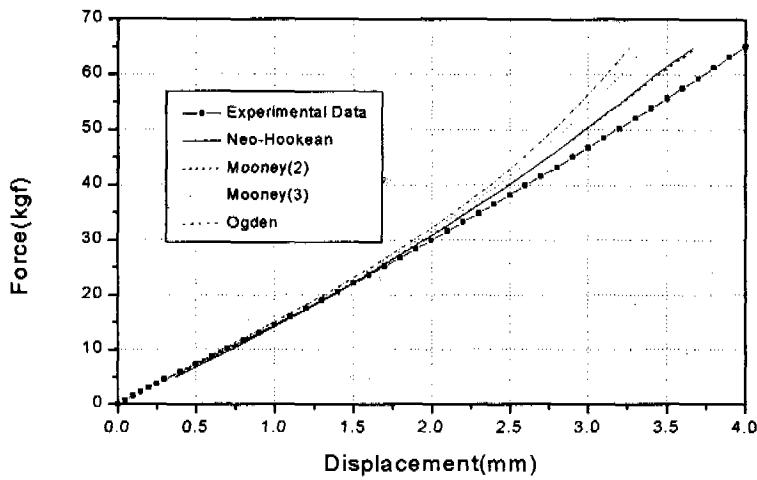


그림 8. 마운트 A의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험 결과만 사용,  $k_f = 0.40$ )

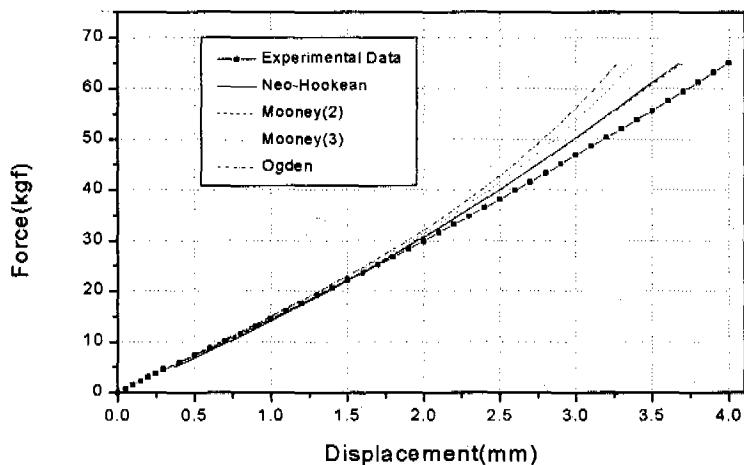


그림 9. 마운트 A의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험과 체적 시험 결과 사용)

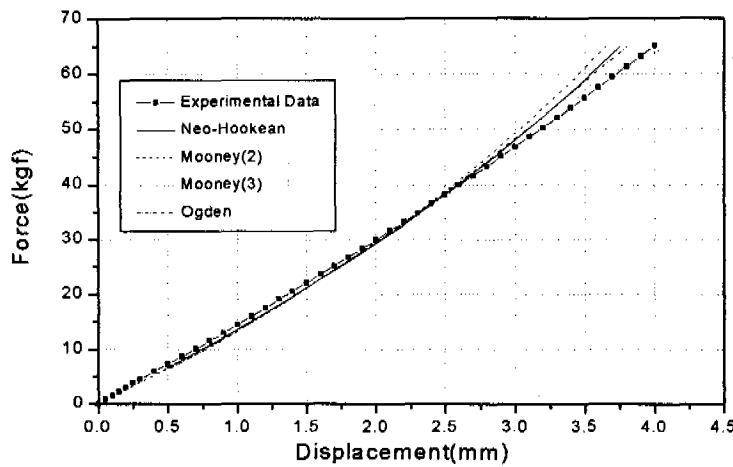


그림 10. 마운트 A의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험과 전단 시험 결과 사용)

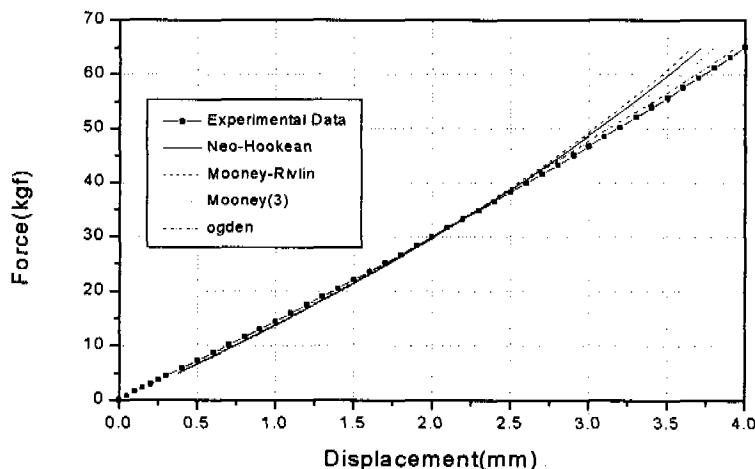


그림 11. 마운트 A의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험, 전단 시험, 체적 시험 결과 사용)

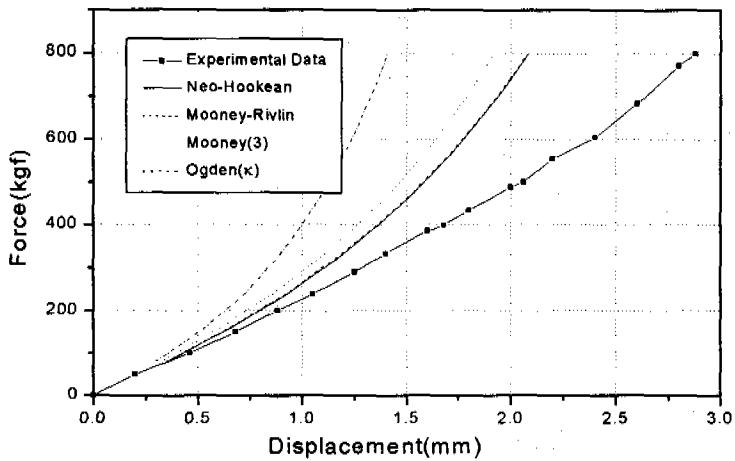


그림 12. 마운트 B의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험 결과만 사용,  $k_f = 1.65$ )

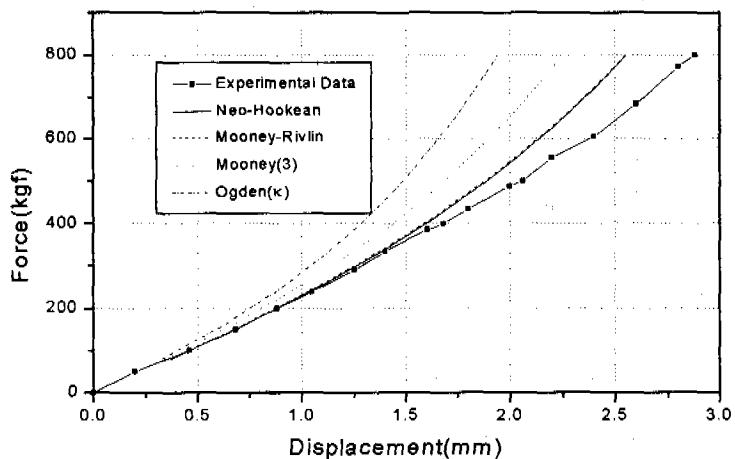


그림 13. 마운트 B의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험과 체적 시험 결과 사용)

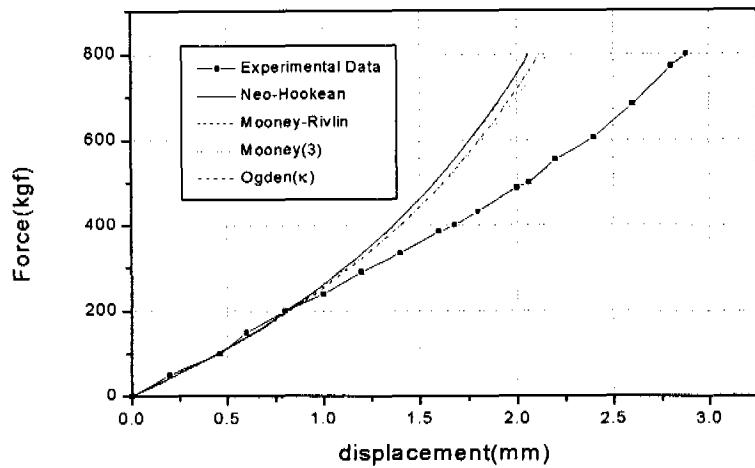


그림 14. 마운트 B의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험과 전단 시험 결과 사용)

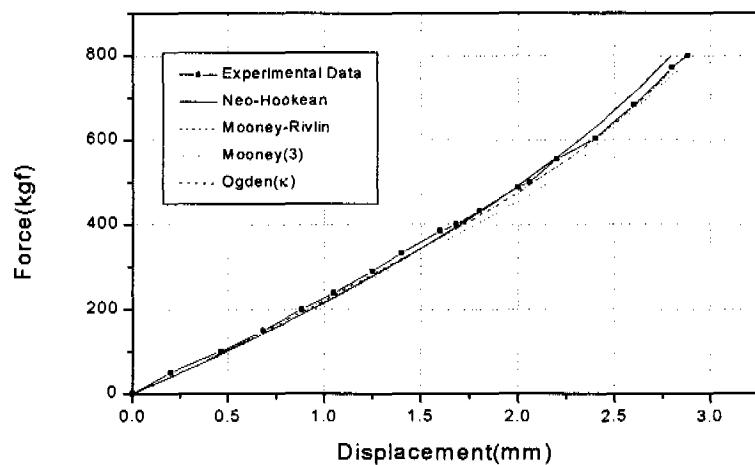


그림 15. 마운트 B의 비선형 유한요소 해석 결과  
(일축 압축 시험, 전단 시험, 체적 시험 결과 사용)