

고무재료의 등 이축 인장시험에 관한 연구

김 완 두^{*1)} · 김 동 진¹⁾ · 김 완 수¹⁾ · 이 영 신²⁾

한국기계연구원 고무역학연구실¹⁾ · 충남대학교 기계설계공학과²⁾

A Study on the Equi-biaxial Tension Test of Rubber Material

Wan-Doo Kim^{*1)} · Dong-Jin Kim¹⁾ · Wan-Soo Kim¹⁾ · Young-Shin Lee²⁾

¹⁾Rubber Mechanics Lab., Korea Institute of Machinery and Materials, 171 Jang-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-343, Korea

²⁾Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 7 March 2003 / Accepted 4 July 2003)

Abstract : The material properties of rubber was determined by the experiments of uniaxial tension, uniaxial compression, planer tension, equi-biaxial tension and volumetric compression. In compression test, it is difficult to obtain the pure state of compression stress and strain due to friction force between the specimen and compression platen. In this study, the stress and strain data from the equi-biaxial tension test were converted to compression stress and strain and compared to a pure state of simple compression data when friction was zero. The compression test device with the tapered platen was proposed to overcome the effect of friction. It was turned out that the relationship of the stress and strain using the tapered platen was in close agreement with the pure compressive state.

Key words : Rubber(고무), Equi-biaxial tension(등이축 인장), Compression test(압축시험), Strain energy function(변형률 에너지 함수), Mullins effect(물린스 효과), FEM(유한요소법)

1. 서론

고무재료는 대변형 특성과 큰 변형률 범위에서 높은 탄성을 갖는 특성 때문에 여러 산업 분야에서 중요한 요소부품으로 사용되고 있으며, 최근 기계류 부품으로 사용이 증대됨에 따라 설계 시 유한요소법을 많이 활용되고 있는 상황이다.¹⁻³⁾ 고무부품의 하중-변형 특성을 정확히 예측하기 위해서는 유한요소해석에서 물성을 정확하게 사용하는 것이 중요하며, 단순인장, 단순압축 그리고 순수전단시험 등의 재료시험이 활용되고 있다.⁴⁾ 고무시편의 단순압축시험에서 그림과 고무시편의 접촉면에 발생하는 마찰 때문에 순수한 압축응력-변형률 관계를 얻기

불가능하며, 중간부분이 부풀어 오르는 현상이 나타난다. 마찰 면에 윤활제를 바르고 실험을 실시하면 이러한 현상을 줄일 수는 있지만, 압축하중이 커지면 접촉면의 윤활 막 형성이 어려워지며 높은 하중에서 완전히 마찰력을 제거하기는 현실적으로 불가능하다. 그러므로 고무시편의 단순압축 시험에서 얻은 물성 값은 정확하다고 판단하기 어렵다.⁵⁾ 김완두 등⁶⁾은 단순압축 시험의 마찰계수 변화에 따른 유한요소해석을 수행하여 마찰계수가 응력-변형률 분포에 큰 영향을 끼치며, 작은 마찰계수인 경우에도 마찰계수가 영인 순수압축 응력-변형률 상태와는 큰 차이를 나타냄을 밝혔다.⁶⁾ 이러한 문제를 극복하기 위해 압축시험과 등가한 이축(equi-biaxial) 인장시험이 추천되고 있다.⁷⁾

*To whom correspondence should be addressed.
wdkim@kimm.re.kr

본 연구에서는 원형판재로 제작된 이축 인장시편을 방사방향으로 신장시켜 이축응력과 이축변형률을 측정할 수 있는 장치를 설계·제작하였다. 실험에서 얻어진 이축응력과 이축변형률을 압축 데이터로 변환하여 단순압축 시험 값과 비교하여 단순압축 시험에서 발생할 수 있는 마찰에 의한 오차를 분석하였다. 또한, 단순압축 시험 시 압축그립의 접촉형상을 변화시켜 마찰에 의한 오차를 보상하는 방법을 제안하여 이축 인장시험으로부터 구한 순수응력-변형률 데이터와 비교 검토하였다.

2. 이축 인장시험

2.1 시험기의 작동원리

이축 인장시험법은 Fig. 1 (a), (b)와 같은 두 가지 방법이 제안되고 있다. 본 연구에서 중심점을 기준으로 원주방향으로 동일한 하중을 부여하는 Fig. 1(b)와 같은 방법을 사용하였다. 이축 인장시편에 방사방향의 하중이 작용하면 시편의 중심점이 변화되지 않고 일정한 위치를 유지하며, 변형중인 시편의 형상이 진원을 유지해야 된다.

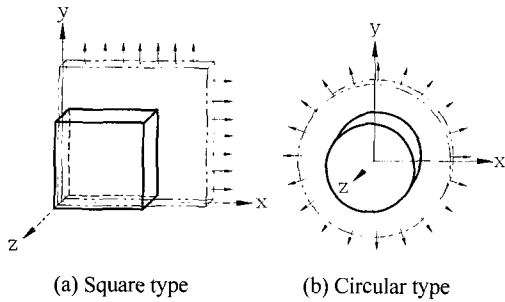


Fig. 1 The principle of equi-biaxial extension method

2.2 이축 인장시험기의 구성

원주방향으로 균일한 하중을 부가하기 위하여 16개의 그립을 고무시편의 가장자리에 체결하였다. 각각의 그립은 동일한 체결력을 유지하며 고무판과 그립사이에 미끄럼이 발생되지 않는 구조이다. 그립의 끝 부분은 금속와이어로 연결되어 있으며, 하중판(loading plate)에 고정되어 있다. 시험기의 액추에이터(actuator)는 구동모터에 의해 상하방향으로 작동되며, 상단에 로드셀과 하중판이 고정되어 있

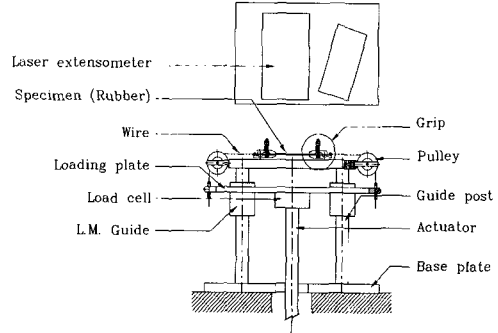


Fig. 2 The shape of equi-biaxial tension tester

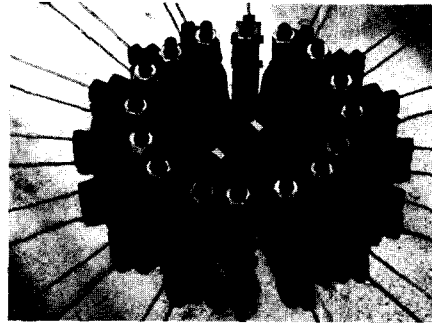


Fig. 3 The photograph of specimen and grips

다. 16개의 그립으로 연결된 금속와이어는 와이어 풀리를 통해 하중판에 등 간격으로 고정된다. 방사방향으로 작동하는 그립은 금속와이어와 풀리를 통해 수직방향으로 운동방향이 변환된다. 즉, 액추에이터의 상하운동이 고무시편의 방사방향 인장을 가능하게 한다. 고무시편의 상단에 비접촉식 레이저 신장계가 장착되어 있으며 시편의 변형률을 측정한다. Fig. 2는 이축 인장시험기의 구성을 나타낸다. Fig. 3은 방사형으로 체결된 그립과 시편의 형상을 나타낸다.

2.3 이축응력과 이축변형률 측정

이축 인장시험기에 사용되는 센서는 로드셀과 레이저 신장계로 구성된다. 시험기에 사용된 로드셀(load cell)은 MTS 사의 strain gage 형 2.5 kN을 사용하였으며, 레이저 신장계는 FOG사의 0.1 μm 분해능을 갖는 P-50을 사용하였다. 이축변형률(biaxial strain)은 레이저 신장계를 이용하여 측정한다. 고무시편 상단에 레이저 신호를 반사시키는 반사테이프가 접촉되어 있으며, 시편중심을 기준으로 20 mm의

간격으로 접착되어 있다.

이축응력(biaxial stress)은 로드셀에 의해 측정된다. 로드셀은 하중판에 고정되어 있으며, 하중판은 16개의 그림으로부터 발생된 하중을 조합하는 역할을 한다. 이축응력은 식 (1)과 같이 계산된다.⁷⁾

$$\sigma = F/(\pi D_i t) \quad (1)$$

식 (1)에서 그림에 작용하는 하중의 합(F)을 구멍 사이의 직경(D_i)에 대한 면적으로 나눈 값이 이축응력이다. t는 고무시편의 초기 두께를 나타낸다.

2.4 고무시편과 그림

고무재료의 이축인장에 사용되는 시편의 형상은 Fig. 4에서와 같이 시편의 가장자리에 16개의 그림이 체결될 수 있도록 그림 체결부위가 돌출되어 있다. 16개의 그림 체결부위는 방사방향으로 동일한 각도를 유지하고 있다. 고무재료는 신장률이 높기 때문에 시험과정에서 시편의 두께가 얇아진다. 시편의 두께가 얇아지면 그림의 초기 체결력이 유지되지 않는다. 즉, 시험과정에서 시편이 그림으로부터 이탈되거나 미끄러짐이 발생된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 시편의 두께가 얇아져도 동일한 체결하중이 작용하도록 그림을 제작하였다.⁸⁾ Fig. 5는 고무시편 체결용 그림의 형상을 나타낸다. 16개의 그림은 동일한 토크로 체결되어야 하며, 시편의 두께변화에 따라 일정한 하중이 연속적으로 작용해야 된다.

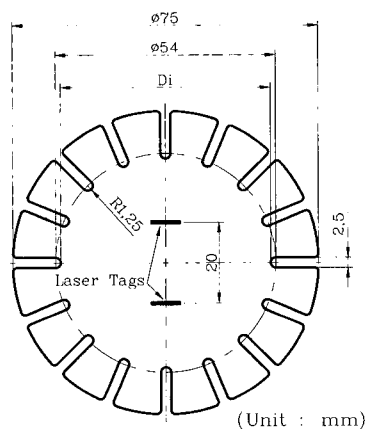


Fig. 4 The dimensions of rubber specimen

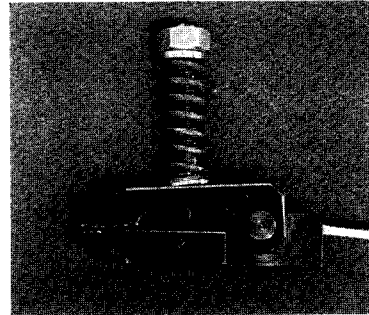


Fig. 5 The photograph of grip

2.5 표점거리

이축 인장시편의 변형률은 시편표면에 접착된 레이저 반사테이프의 거리를 측정하여 변형률을 계산한다. 고무재료의 특성상 큰 신장률이 발생되므로 높은 변형률을 측정할 수 있는 비접촉식 레이저 신장계를 사용하였다.

표점거리의 결정은 시편의 최대 신장이 이루어지는 영역에서 균일한 변형률이 나타나는 부분을 결정해야 된다. 이축 인장시편의 표점거리를 결정하기 위해 유한요소법(ABAQUS/Standard)을 이용하였다. 해석결과 시편의 중심점으로부터 직경 41 mm 내에서 100 % 신장에 따른 변형률값은 일정하게 나타나는 결과를 얻었다. 변형률 해석결과는 4장의 "이축 인장시편의 유한요소해석"에서 자세히 언급하였다.

3. 이축 인장과 압축의 관계

비압축성 소재(incompressible materials)에서 이축 인장 시 발생하는 변형률 상태는 마찰력이 없는 압축시험 시 발생하는 변형률 상태와 동일하다.⁶⁾ 단순 압축 시험은 시편두께가 두꺼워서 두께 및 공정의 영향을 받을 수 있으나, 이축 인장시험의 경우에는 인장시편 및 순수전단 시편과 동일한 고무판에서 시편을 채취할 수 있으므로 시편에 의한 오차를 줄일 수 있는 장점이 있다. 이축 인장과 단순압축의 경우 주연신률(λ)은 식 (2)와 같이 표현된다.

$$\lambda_1 = \lambda_c, \quad \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_b \quad (2)$$

비 압축성 조건은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 λ_i 는 각 방향의 연신률(stretch ratio)을 나타

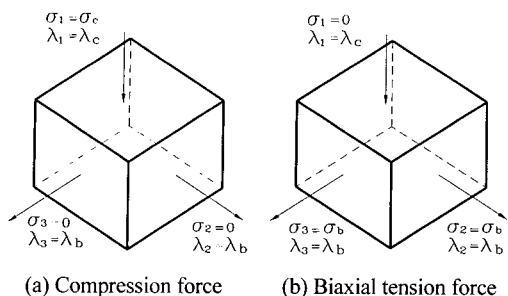


Fig. 6 The free body diagram of uniaxial compression and equi-biaxial tension state

낸다.

$$\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1 \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)에서 식 (4)를 얻을 수 있다.

$$\lambda_1 = \frac{1}{\lambda_2 \lambda_3} = \frac{1}{\lambda_b^2} = \lambda_c = 1 + \epsilon_c \quad (4)$$

식 (4)에서 이축 인장상태에서 압축과 변형률관계를 압축하중 상태의 변형률로 표현하면 식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\epsilon_c = \frac{1}{\lambda_b^2} - 1 = \frac{1}{(1 + \epsilon_b)^2} - 1 \quad (5)$$

여기서

ϵ_c : nominal strain in compression state

ϵ_b : nominal strain in equi-biaxial tensile state

Fig. 6은 압축과 이축 인장의 응력-변형률 상태를 보여준다. Fig. 6(a)와 같이 단순압축의 경우, 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\sigma_1 = \sigma_c, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = 0 \quad (6)$$

Strain energy density (dW)에 식 (6)의 조건을 대입하면 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며, 압축응력 σ_c 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} dW &= \sigma_i \cdot d\epsilon_i \\ &= \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 + \sigma_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_3 \\ &= \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 \end{aligned} \quad (7)$$

$$\therefore \sigma_1 = \frac{dW}{d\epsilon_1} \Rightarrow \sigma_c = \frac{dW}{d\epsilon_c} \quad (8)$$

Fig. 6(b)의 이축 인장에서, 응력상태는 식 (9)와 같이 나타낸다.

$$\sigma_1 = 0, \quad \sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_b \quad (9)$$

dW 에 식 (9)의 조건을 대입하면 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} dW &= \sigma_i \cdot d\epsilon_i \\ &= \sigma_1 \cdot d\epsilon_1 + \sigma_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_3 \\ &= \sigma_2 \cdot d\epsilon_2 + \sigma_3 \cdot d\epsilon_3 \\ &= \sigma_b \cdot d\epsilon_b + \sigma_b \cdot d\epsilon_b \\ &= 2 \sigma_b \cdot d\epsilon_b \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)에서 이축 응력은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \frac{dW}{d\epsilon_b} \quad (11)$$

식 (8)과 식 (11)에서 이축 인장상태에서의 응력과 압축하중 상태에서의 응력관계를 나타내면 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{\partial W}{\partial \lambda_c} = \frac{\partial W}{\partial \lambda_b} \cdot \frac{1}{(\partial \lambda_c / \partial \lambda_b)} \\ &= 2 \sigma_b \cdot \frac{1}{(\partial \lambda_c / \partial \lambda_b)} \\ &= 2 \sigma_b \cdot \frac{1}{(-2 \lambda_b^{-3})} \\ &= -\sigma_b \cdot \lambda_b^3 \\ &= -\sigma_b \cdot (1 + \epsilon_b)^3 \\ \therefore \sigma_c &= -\sigma_b \cdot (1 + \epsilon_b)^3 \end{aligned} \quad (12)$$

여기서,

σ_c : nominal stress in compression state

σ_b : nominal stress in equi-biaxial tensile state

이축 인장시험에서 얻어진 이축응력(σ_b)과 이축 변형률(ϵ_b)은 식 (5)와 식 (12)을 통해 압축응력(σ_c)과 압축변형률(ϵ_c)로 계산할 수 있다.

4. 이축 인장시험의 유한요소해석

4.1 유한요소모델 및 경계조건

이축 인장시험과 동일한 조건의 해석을 모사하기 위해 상용 유한요소해석(ABAQUS/Standard 6.1) 프로그램을 활용하였다. ABAQUS/Standard는 고무와 같은 재질 비선형 문제에 우수한 성능을 갖는 프로그램이다.¹⁰⁾ 해석에 사용된 모델의 형상은 실험에

사용된 시편형상의 1/4로 형성하였다. 모델의 형상은 Shell형상으로 구성하였으며, 해석에 사용된 요소는 S4R을 사용하였다. 해석에 사용된 요소 수는 1610개이며, 절점 수는 1506개이다. 시편의 x, y축은 대칭으로 경계조건을 구성하였으며, 시편의 중심점의 절점에 x, y, z 좌표의 변위를 구속하였다. 모델형상에서 그림이 체결되는 부분은 그림체결에 의한 형상변화가 없으며 신장 시 어떠한 영향을 미치지 않는 부분이므로 금속으로 고려하였다. 그림 부분과 고무시편 부분의 절점을 공유하였다. 하중조건은 16개의 와이어에 의해 신장되는 것으로 고려하여 그림부분을 방사방향으로 신장되도록 하였다. Fig. 7은 해석에 사용된 유한요소 형상을 나타낸다. 해석에 사용된 이축 인장물성은 쇼어경도 55인 고무시편을 사용하였으며, 5회 이상 반복실험으로 얻은 안정화된 응력과 변형률 값을 해석물성으로 사용하였다.

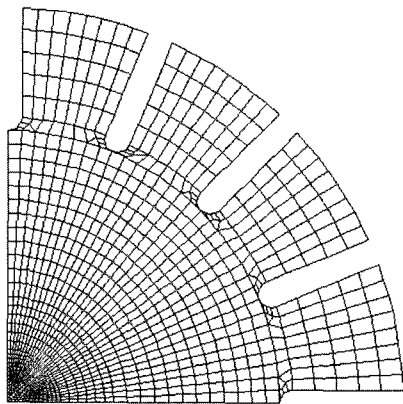


Fig. 7 FEA model of equi-biaxial tension test specimen

4.2 응력 해석결과

Fig. 8은 유한요소해석 결과와 실험결과를 나타낸다. 그림부분에서 하중이 증가될수록 그림과 그림사이의 원형부분 직경이 증가되고 응력이 집중되는 현상을 볼 수 있다. 그러나 시편안쪽의 대부분 영역에서 일정한 응력이 분포됨을 알 수 있다. Fig. 9는 이축 인장시편의 해석과 실험결과를 나타낸다. 실험으로부터 얻은 물성을 이용하여 해석하였으며 실험 값과 유한요소해석 결과가 잘 일치됨을 알 수 있다.

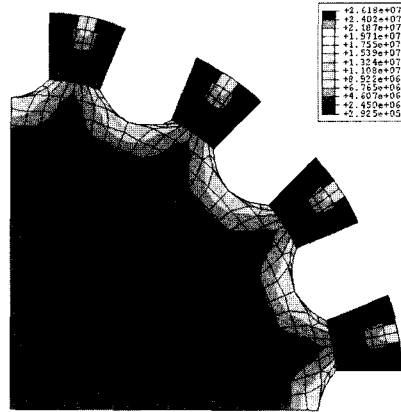


Fig. 8 Von-Mises stress contour of equi-biaxial tension test specimen

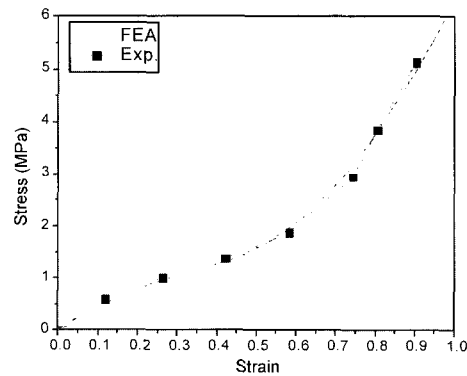


Fig. 9 Experimental and predicted stress-strain curves in equi-biaxial tension test

4.3 압축해석과의 비교

이축 인장시험의 목적은 상기에서 제시한 것과 같이 정확한 압축물성을 찾기 위한 것이다. 즉, 압축 실험 시 발생하는 마찰계수의 영향으로부터 발생하는 오차를 이축 인장시험을 통해 찾아내는 것이 중요하다. 유한요소해석을 통해 압축시편의 시험을 모사하였다. 유한요소해석은 비 선형 해석에 많이 사용되는 상용 유한요소해석 프로그램(ABAQUS/Standard 6.1)을 활용하였다. 모델의 형상은 축대칭을 고려하였으며, 해석에 사용된 요소는 CAX4R을 사용하였다. 해석에 사용된 요소 수는 182개이며, 절점 수는 253개이다. 모델의 중심점은 축 대칭 구속을 하였다. 상단 그림의 윗면 절점에 수직방향으로 하중을 부여하였다. 이축 인장실험의 결과와 비

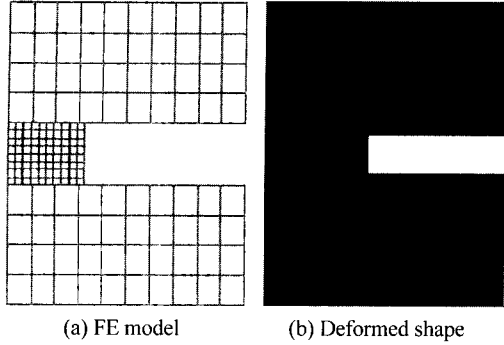


Fig. 10 FE model and deformed shape of uniaxial compression specimen

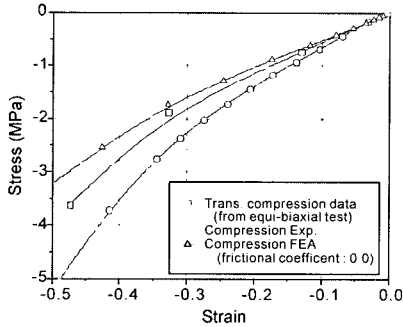


Fig. 11 The comparison of uniaxial compression test and transformed equi-biaxial tension results

교하기 위해 고무시편과 압축그립의 접촉면 사이에 마찰계수가 작용하지 않는 것으로 해석하였다. Fig. 10은 압축판과 압축시편 사이에 마찰계수가 없는 경우의 압축시편에 대한 유한요소해석 결과를 나타낸다. 마찰력이 존재하면 고무시편의 가장자리부분에서 부풀어오르는 형상이 발생되나 마찰력을 무시하면 부풀어 오르는 형상이 발생되지 않았다. Fig. 11은 마찰력을 무시한 압축해석 결과와 이축 인장 시험으로부터 변환된 값을 비교한 것이다. 이축 인장 시험의 응력-변형률 관계를 식 (12)를 이용하여 압축 응력-변형률로 변환한 결과를 비교한 것이다. 마찰력을 무시한 압축응력-변형률선도와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

4.4 표점거리 분석

이축 인장시험의 표점거리는 레이저 반사테이프가 접촉되는 위치를 나타낸다. 즉, 변형률을 측정하는 구간이다. 변형률을 측정하는 구간에서는 동일

한 변형률 분포를 나타내야 된다. 해석 모델에서 그림과 와이어가 연결되는 부분에 방사방향으로 100%를 신장하였으며, 4개의 반경구간(10.0 mm, 20.5 mm, 23.1 mm, 25.7 mm)에서 변형률을 분석하였다. 동일한 반경에서 9개의 점(A, B, C, D, E, F, G, H, I)을 등 간격으로 나누어 변형률을 비교하였다. Fig. 12는 유한요소모델의 형상과 변형률 측정구간을 나타낸다. Fig. 13은 100% 신장시 발생하는 변형률 분포를 나타낸다. 시편의 내부는 균일한 변형률을 나타내며, 그림과 그림 사이의 반원부분에서 변형률이 크게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 14는 Fig. 12에서 제시한 변형률 측정지점에서 측정된 변형률

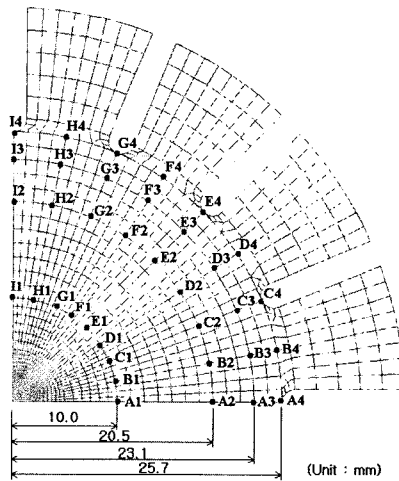


Fig. 12 Detecting position of equi-biaxial specimen for strain measurement

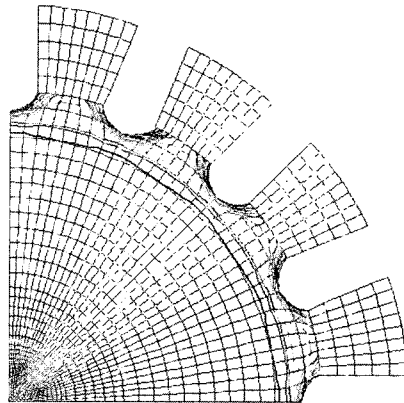


Fig. 13 Strain level of equi-biaxial specimen model with 100% elongation

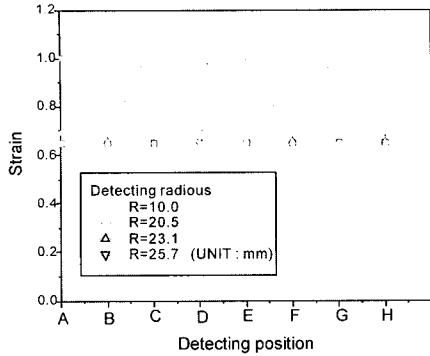


Fig. 14 Strain distribution in the various detecting positions

선도를 나타낸다. 반경 20.5 mm까지는 변형률 편차가 크게 발생되지 않는 것을 알 수 있었다. 그러나 반경 23.1 mm 부분에서는 4.3%의 변형률 편차가 같은 반경부분에서 발생하는 것이 나타났다. 또한 반경 25.7 mm 부분에서는 31.2%의 극심한 변형률 편차가 발생하는 것을 알 수 있다.

5. 경도변화에 따른 이축 응력과 변형률

이축 인장시험에 사용된 고무시편은 가황 처리된 천연고무 판재로서, 쇼어경도 45, 55, 65의 고무재료를 사용하였다. Fig. 15, 16, 17은 경도 45, 55, 65를 갖는 고무시편을 4회 이상 반복 실험한 결과이다. Fig. 18은 경도 45, 55, 65재료의 시험결과를 비교한 것이다. 동일 시편에 시험 횟수가 증가할수록 강성이 낮아지는 경향을 볼 수 있으며 이는 고무조직 내부의 분자구조 변화에 따른 몰린스 효과(Mullins effect)의 해 강성(stiffness)이 낮아지는 것이며, 4회 및 5회 이

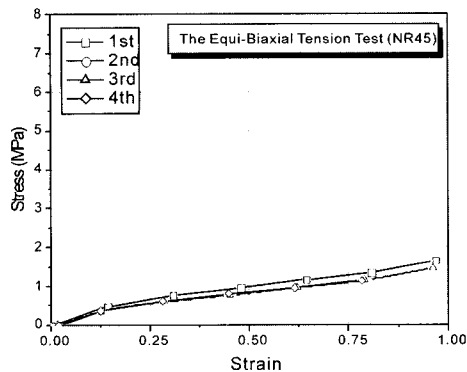


Fig. 15 Stress and strain curve of equi-biaxial tension test(hardness : 45)

상 반복실험으로 안정화 되는 경향이 나타났다.¹⁰⁾ 쇼어경도 45, 55, 65인 고무재료의 이축 인장시험 결과는 단순인장시험 및 순수전단시험 결과와 같이

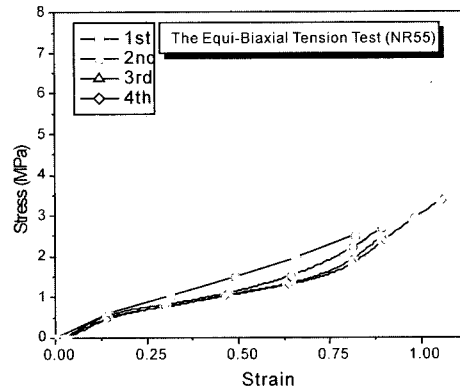


Fig. 16 Stress and strain curve of equi-biaxial tension test(hardness : 55)

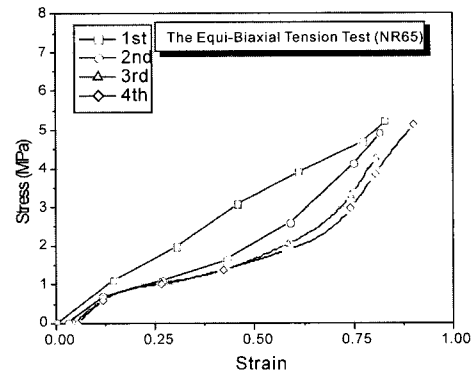


Fig. 17 Stress and strain curve of equi-biaxial tension test(hardness : 65)

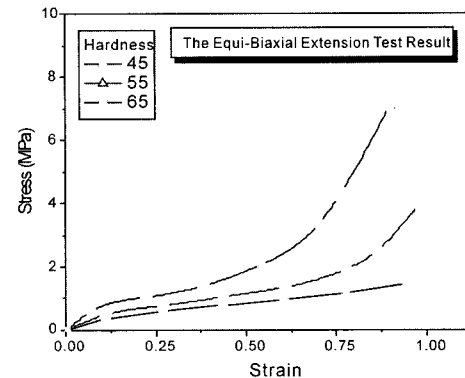


Fig. 18 Stress and strain curve of equi-biaxial tension test for various hardness

초탄성(hyperelastic) 특성을 나타내는 응력과 변형률곡선을 얻을 수 있었다. 고무재료의 경도가 높을수록 높은 강성을 나타내었다.

6. 압축 시험과 변환된 이축 인장시험결과의 비교

쇼어경도 45, 55 및 65인 고무재료의 이축 인장(equi-biaxial tension), 단순인장 및 압축(uniaxial test) 그리고 순수전단(pure shear)시험을 수행하였다. 시험결과 이축 인장의 강성이 가장 크게 나타났으며 이어서 순수전단과 단순인장의 순서로 강성이 작아지는 결과를 알 수 있다. Fig. 19, 20, 21은 경도 45, 55, 65인 고무시편의 물성시험 결과를 나타낸다. 이축 인장시험으로 얻어진 응력과 변형률 값을 식 (5) 와 식 (8)을 이용하여 압축응력과 변형률 값으로 변환된 결과를 얻을 수 있었으며, 단순 압축시험 결과

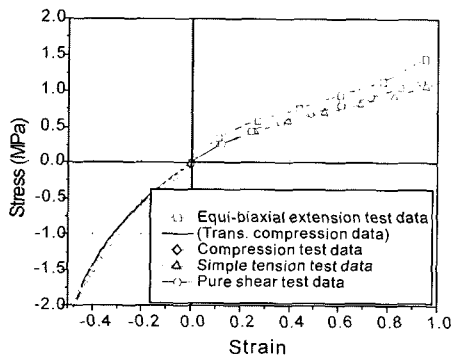


Fig. 19 Stress and strain curve for various material test method (hardness:45)

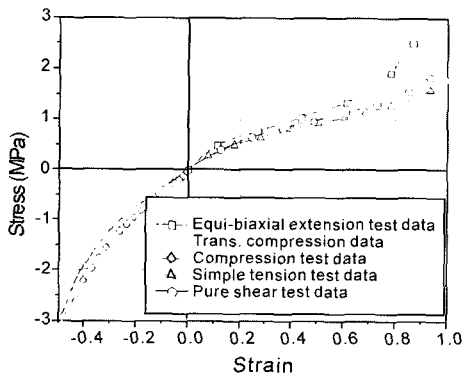


Fig. 20 Stress and strain curve for various material test method (hardness:55)

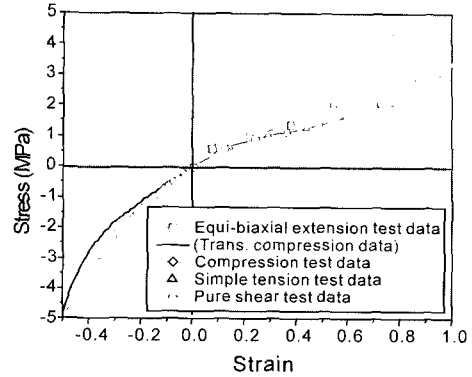


Fig. 21 Stress and strain curve for various material test method (hardness:65)

와 비교하였다. 경도가 작은 고무재료의 경우 압축 시험 결과와 큰 차이가 없지만 경도가 큰 재료일수록 압축시험 결과와 이축 인장시험으로 얻어진 결과의 차이가 크게 나타났다. 즉, 경도가 큰 고무재료를 압축시험으로 얻은 물성으로 하중과 변형률관계를 예측하면 더 큰 오차가 발생됨을 알 수 있었다.

7. 테이퍼 압축그립을 이용한 시험

이축 인장시험은 시험과정 및 시편제작에 많은 어려움이 발생되며, 고성능의 시험장비가 요구되는 단점이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 기존의 압축 실험방법에서 마찰에 의한 오차를 개선하려고 노력하였으며, 압축그립의 접촉형상을 테이퍼 형으로 제작하였다.¹¹⁾ KS R 4026, ISO 7743, ASTM D 575 등에서 제시한 압축시험법에서 고무시편과 접촉되는 그립 면의 형상은 평면이다. 평면그립과 고무시편은 표면에 작용하는 마찰력(F)에 의해 평면에 수직으로 작용하는 하중의 합력이 하중방향과 일치하지 않는다. 그러나 하중방향과 일치하기 위해 그립의 형상을 테이퍼 형으로 변형시키면 마찰에 의한 합력은 하중방향과 수직으로 만들 수 있다. 즉, 마찰계수 값만큼 기울어진 테이퍼 형 압축그립을 사용하면 마찰에 의한 오차를 줄일 수 있는 효과가 있다. Fig. 22(a)는 시편과 그립의 접촉면이 평면인 상태를 나타낸 것이다. 마찰력과 압축력의 합력방향이 고무시편의 변형을 억제하는 방향으로 작용되는 것을 볼 수 있다. 마찰력이 증가될수록 합력이 작용하는 방향이 하중을 작용하는 방향과 큰 차이가 발생됨

을 알 수 있다. Fig. 22(b)는 합력의 방향이 압축방향과 동일하도록 압축그립의 접촉면을 마찰계수 값만큼 기울인 상태를 보여준다. 합력의 방향과 압축방향이 동일하므로 마찰계수가 "0"인 상태와 유사한 하중과 변형관계를 얻을 수 있다. Fig. 23은 고무시편(경도 65)의 이축 인장시험으로부터 계산된 압축응력과 변형률을 단순압축 시험과 비교한 결과를 나타낸다. 단순압축 시험은 압축그립의 평면형상과 테이퍼 형상으로 실험하였다. 시험결과 이축 인장 시험으로부터 계산된 응력과 변형률 선도 값이 테이퍼진 형상의 압축시험 값과 잘 일치되는 것을 알 수 있었다.

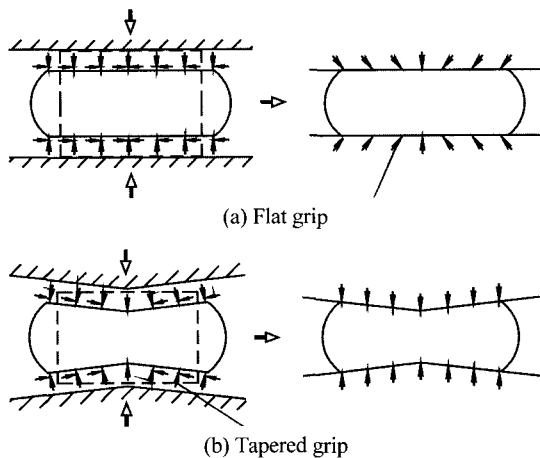


Fig. 22 Force distribution with flat and tapered compression grip

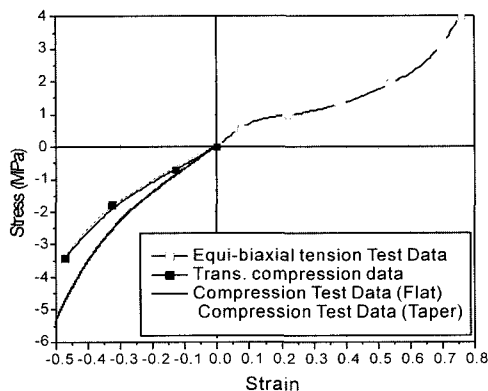


Fig. 23 The the comparison of compressive result for grip shapes and transformed equi-biaxial tension test result

8. 결론

본 연구에서는 고무재료의 정확한 압축물성을 구하기 위하여 이축 인장시험기와 테이퍼진 압축판을 이용한 시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이축 인장시험으로 얻은 이축응력과 이축변형률은 압축응력과 압축변형률로 변환할 수 있으며, 이축 인장시험 결과로부터 계산된 압축응력값과 압축변형률 값은 마찰이 작용하지 않는 단순압축시험의 결과와 잘 일치하였다.
- 2) 고무재료의 압축시험 시 발생하는 마찰에 의한 오차는 고무재료의 경도가 증가될수록 크게 나타났다.
- 3) 테이퍼진 압축그립을 이용한 압축시험은 마찰력에 의한 시험오차를 줄이는 효과가 있으며, 이축 인장시험으로부터 얻은 결과와 잘 일치하였다.

후 기

본 논문은 국가지정연구실 사업비에 의해 연구되었으며 이에 감사드립니다.

References

- 1) G. H. Koo, J. H. Lee, H. Y. Lee, B. Yoo, "Stability of Laminated Rubber Bearing and Its Application to Seismic Isolation," *KSME International Journal*, Vol.13, No.8, pp.595-604, 1999.
- 2) M. S. Joun, H. K. Moon, S. J. Kim, "A Simple Finite Element Method to Determination of Deformed Shape and Load-Displacement Curve of Elastomers," *Transactions of KSME A*, Vol.21, No.2, pp.217-222, 1997.
- 3) S. H. Kim, H. W. Lee, H. Huh, J. H. Lee, S. T. Oh, "Stress Analysis of C. V. Joint Rubber Boots by Finite Element Method and Application to Design Modification," *Transactions of KSAE*, Vol.6, No.3, pp.123-137, 1998.
- 4) S. J. Shin, T. S. Lee, S. I. Oh, "Three-dimensional Finite Element Analysis of Rubber Pad Deformation," *Transactions of KSME A*, Vol.22, No.1, pp.111-120, 1998.

- 5) J. Day, K. Miller, "Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, an Analytical Verification of an Experiment Technique," ABAQUS Users Conference Proceedings(June), Vol.35, No.4, pp.205-219, 2000.
- 6) W. D. Kim, Design and Analysis of the Hyperelastic Rubber Mechanical Components, KIMM Report, Korea, 98-NG-01-03-A-01, 1999.
- 7) GM Engineering Standard, GMN6814, "Standard Test Methods for Vulcanized Rubber and TPE for Use in Finite Element Analysis Modeling," Dec., 2002.
- 8) W. D. Kim, D. J. Kim, H. J. Lee, K. S. Kim, "The Equi-Biaxial Extension Tester," The Republic of Korea Patent 68371, 2002.
- 9) W. D. Kim, Development of Integrated Design System for Mechanical Rubber Components, KIMM Report, Korea, 98-NG-01-03-A-01, 1999.
- 10) Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., ABAQUS Theory Manual, 1995.
- 11) W. D. Kim, W. S. Kim and C. S. Woo, "Test Method of Rubber Material Model for Finite Element Analysis," Proceedings of IRC 2001, pp.270-275, 2001.