

고무재료의 이축 인장시험에 관한 연구

김동진[†]·김완두^{*}·김완수^{*}·이영신^{**}

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

Dong-Jin Kim, Wan-Doo Kim, Wan-Soo Kim and Young-Shin Lee

Key Words: Rubber(고무), Equi-biaxial tension(등이축 인장), Hyperelastic(초탄성)

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 perfect 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.

1. 서론

고무재료는 대변형 특성과 큰 변형률 범위에서도 탄성을 갖는 특성 때문에 많은 기계 산업 분야에서 중요한 요소부품으로 사용되고 있으며, 최근 기계류부품으로 사용이 증대됨에 따라 설계시 유한요소법을 많이 활용되고 있는 상황이다. 고무부품의 하중-변형 특성을 정확히 예측하기 위해서는 유한요소해석에서 물성을 정확히 사용하는 것이 중요하며, 단축인장, 단축압축 그리고 순수전단시험 등의 재료실험이 활용되고 있다.

고무시편의 단축압축시험에서 그림과 고무시편의 접촉면에 발생하는 마찰 때문에 순수한 압축 응력-변형률 관계를 얻기 불가능하며, 이 마찰 때문에 시편의 중간부분에 부풀어 오르는 현상이 나타난다. 마찰 면에 윤활제를 바르고 실험을 실시하면 이러한 현상을 줄일 수는 있지만, 압축하중의

증가에 의해 접촉면에 윤활 막 형성이 어려워지며 높은 하중에서 완전히 마찰력을 제거하기는 현실적으로 불가능한 실정이다. 그러므로 고무시편의 단축 압축시험에서 얻은 물성 값은 정확하다고 판단하기가 어렵다. 김완두[1]등은 단축 압축시험의 마찰계수 변화에 따른 유한요소해석을 수행하여 마찰계수가 응력-변형률 분포에 큰 영향을 끼치며, 작은 마찰계수인 경우에도 마찰계수가 영인 순수 압축 응력-변형률 상태와는 큰 차이를 나타냄을 밝혔다. 이러한 문제를 극복하기 위해 압축시험과 등가한 이축(equi-biaxial) 인장시험이 추천되고 있다[2].

본 연구에서는 원형판재로 제작된 이축 인장 시험편을 방사방향으로 신장시켜 이축 응력과 이축 변형률을 측정할 수 있는 장치를 설계·제작하였으며, 실험에서 얻어진 이축 응력과 이축 변형률을 압축 데이터로 변환하여 단축 압축 시험 값과 비교하여 단축압축시험에서 발생할 수 있는 마찰에 의한 오차를 분석하였다. 또한, 단순 압축시험시 압축그립의 접촉형상을 변화시켜 마찰에 의한 오차를 보상하는 방법을 제안하여 이축인장시험으로부터 구한 순수 응력-변형률 데이터와 비교 검토하였다.

[†] 책임저자, 회원, 한국기계연구원 고무역학연구실

E-mail : kimdj94@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7845 FAX : (042)868-7884

^{*} 회원, 한국기계연구원 고무역학연구실

^{**} 회원, 충남대학교 기계설계공학과

2. 이축 인장시험

2.1 시험기의 작동원리

이축 인장시험법은 Fig. 1의 (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 인장시험에 방사방향의 하중이 작용하면 시험편의 중심점이 변화되지 않고 일정한 위치를 유지하여야 하며, 변형중인 시험편의 형상이 진원을 유지해야 된다.

2.2 이축 인장시험기의 구성

원주방향으로 균일한 하중을 부가하기 위하여 16개의 그립을 고무시험편의 가장자리에 체결하였다. 각각의 그립은 동일한 체결력을 유지하며 고무판과 그립사이에서 미끄럼이 발생되지 않는 구조이다. 그립의 끝 부분은 금속와이어로 연결되어 있으며, 하중판(loading plate)에 고정되어 있다. 시험기의 액츄에이터(actuator)는 구동모터에 의해 상하작용으로 작동되며, 상단에 로드셀과 하중판이 고정되어 있다. 16개의 그립으로 연결된 금속와이어는 와이어 풀리를 통해 하중판에 등 간격으로 고정된다. 방사방향으로 작동하는 그립은 금속와이어와 풀리를 통해 수직방향으로 운동방향이 변환된다. 즉, 액츄에이터의 상하운동이 고무시험편의 방사방향 인장을 가능하게 한다. 고무시험편의 상단에 비접촉식 레이저엑스텐소메타가 장착되어 있으며 시험편의 변형률을 측정한다. Fig. 2는 이축 인장시험기의 구성을 나타낸다. Fig. 3은 방사형으로 체결된 그립과 시험편의 형상을 나타낸다.

2.3 센서와 신호(이축응력, 이축변형률)측정

이축 인장시험기에 사용되는 센서는 로드셀과 레이저엑스텐소메타로 구성된다. 시험기에 사용된 로드셀(load cell)은 MTS 사의 strain gage 형 2.5 kN을 사용하였으며, 레이저엑스텐소메타는 FOG사의 0.1 μ m의 분해능을 갖는 P-50을 사용하였다.

이축 변형률(biaxial strain)은 레이저엑스텐소메타를 이용하여 측정한다. 고무시험편 상단에 laser 신호를 반사시키는 반사테이프가 접착되어 있으며, 시험편중심을 기준으로 20 mm의 간격으로 접착되어 있다.

이축 응력(biaxial strain)은 로드셀에 의해 측정된다. 로드셀은 하중판에 고정되어 있으며, 하중판은 16개의 그립으로부터 발생된 하중을 조

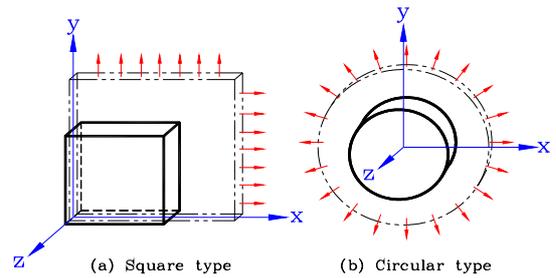


Fig. 1 The principle of equi-biaxial extension method

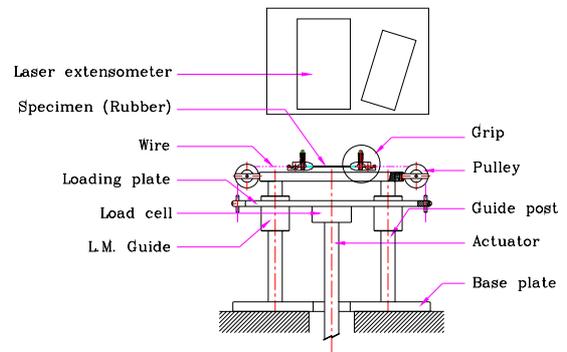


Fig. 2 The shape of equi-biaxial tension tester

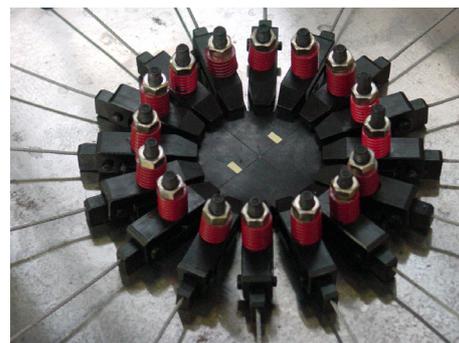


Fig. 3 The photograph of specimen and grips

합하는 역할을 한다. 이축 응력은 식(1)과 같이 계산된다[2].

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

식(1)에서 그립에 작용하는 하중의 합(F)을 구멍사이의 직경(D_i)에 대한 면적으로 나눈 값이 이축 응력이다. t 는 고무시험편의 초기 두께를 나타낸다.

2.4 고무시편과 그림

고무재료의 이축 인장에 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[3]. 16개의 그림은 동일한 토크로 체결되어야 하며, 시편의 두께변화에 따라 일정한 하중이 연속적으로 작용해야 된다.

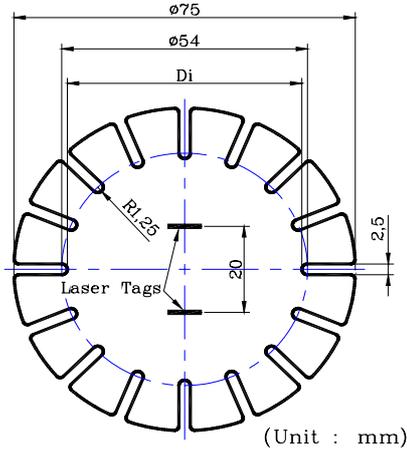


Fig. 4 The dimensions of rubber specimen

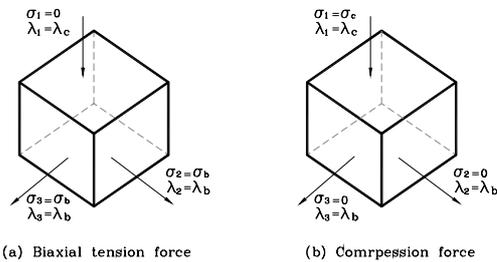


Fig. 5 The free body diagram of uniaxial compression and equi-biaxial tension behavior

3. 이축 인장과 압축의 관계

비압축성 소재(incompressible materials)에서 이축 인장 시 발생하는 변형률 상태는 마찰력이 없는 압축시험 시 발생하는 변형률 상태와 동일하며[2], 단축 압축 시험은 시편두께가 두꺼워서 두께 및 공정의 영향을 받을 수 있으나 이축 인장시험의 경우에는 인장시험, 순수전단 시험과 같은 두께의 고무판에서 시편을 제작할 수 있으므로 시편 두께의 영향을 받지 않는 장점이 있다. 이축 인장과 단축 압축의 경우 주 연신률은 식 (2)와 같이 표현된다.

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

비 압축성 조건은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

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

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 인장 상태에서 압축과 변형률 관계를 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 equal biaxial tensile state

이다. Fig. 5(a)의 이축 인장상태에서 $\sigma_1 = 0$, $\sigma_2 = \sigma_3 = \sigma_b$ 이며, 이축 응력(σ_b)은 변형률 에너지 함수(W)를 이용하여 식 (6)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_b = \frac{1}{2} \frac{\partial W}{\partial \lambda_b} \quad (6)$$

Fig. 5(b)에서 압축하중 상태에서 $\sigma_1 = \sigma_c$, $\sigma_2 = \sigma_3 = 0$ 이며, 압축 응력(σ_c)은 변형률 에너지 함수(W)를 이용하여 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_c = \frac{\partial W}{\partial \lambda_c} \quad (7)$$

식(7)과 식(4)에서 이축 인장상태에서의 응력과 압축하중 상태에서의 응력관계를 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \sigma_c &= \frac{\partial W}{\partial \lambda_c} = \frac{\partial W}{\partial \lambda_b} \cdot \frac{1}{\frac{\partial \lambda_c}{\partial \lambda_b}} \\ &= -\sigma_b \cdot (\epsilon_b + 1)^3 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서

σ_c : nominal stress in compression state

σ_b : nominal stress in equal biaxial tensile state

이다. 이축 인장시험에서 얻어진 이축 응력(σ_b)과 이축 변형률(ϵ_b)을 식 (5)와 식 (6)을 통해 압축응력(σ_c)과 압축변형률(ϵ_c)을 계산할 수 있다.

4. 이축 인장시험과 압축해석의 비교

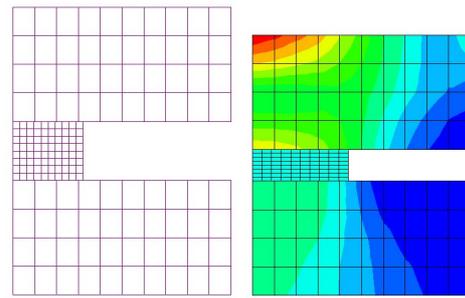
4.1 유한요소모델 및 경계조건

이축 인장시험의 목적은 상기에서 제시한 것과 같이 정확한 압축물성을 찾기 위한 것이다. 즉, 압축실험 시 발생하는 마찰계수의 영향으로부터 발생하는 오차를 이축 인장시험을 통해 찾아내는 것이 중요하다. 유한요소해석을 통해 압축시편의 시험을 모사하였다. 유한요소 해석은 비 선형 해석에 많이 사용되는 상용 유한요소해석 프로그램 (ABAQUS/Standard 6.1)을 활용하였다. 모델의 형상은 Shell형상으로 구성하였으며, 해석에 사용된 요소는 S4R을 사용하였다. 해석에 사용된 요소 수는 182개이며, 절점 수는 253개이다. 해석 시간을 단축시키기 위해 축대칭 솔리드 형상으로 모델링을 구성하였다[4]. 모델의 중심점은 축대칭 구속을 하였다. 상단 그림의 윗면의 절점에 수직방향으로 하중을 부여하였다.

이축 인장시험의 결과와 비교하기 위해 고무시편과 압축그립의 접촉면 마찰계수가 작용하지 않는 것으로 해석하였다. 이축 인장시험에서 얻은 결과와 압축해석으로부터 얻은 결과가 일치하는가를 분석하였다.

4.2 해석결과와 이축인장 실험의 비교

Fig. 6은 마찰계수가 고려되지 않은 압축시편의 유한요소해석 결과를 나타낸다. 마찰계수를 고려하면 고무시편의 가장자리부분에서 부풀어오르는 현상이 발생되나 마찰계수가 고려되지 않은 해석이므로 부풀어 오르는 현상이 발생되지 않았다. Fig. 7은 마찰계수를 고려하지 않은 압축해석결과와 이축 인장시험으로부터 얻은 변환된 압축결과를 비교한 것이다. 이축 인장시험으로 계산된 압축결과 값이 마찰계수가 고려되지 않은 압축해석 값과 낮은 변형률 범위에서 유사하게 일치됨을 알 수 있었다.



(a) FE model (b) compressed

Fig. 6 FE model and stress contour of uniaxial compression analysis

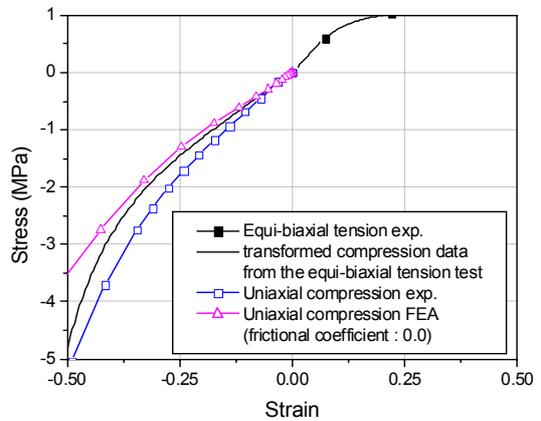


Fig. 7 The comparison of uniaxial compression test and transformed equi-biaxial tension results

5. 경도변화에 따른 이축 응력과 변형률

본 연구에 사용된 고무 시편은 가황 처리된 천연고무 판재를 사용하였다. 시험에 사용된 고무판의 재료는 쇼어 경도 45, 55, 65의 고무재료를 사용하였다. Fig. 8은 경도 55를 갖는 고무시편을 4회 이상 반복 실험한 결과이다. Fig. 9는 경도 45, 55, 65재료의 시험결과를 비교한 것이다. 동일 시편에 시험 횟수가 증가할수록 강성이 낮아지는 경향을 볼 수 있으며 이는 고무조직 내부의 분자구조 변화에 따른 물린스 효과(Mullins effect)의해 강성(stiffness)이 낮아지는 것이며, 4회 및 5회 이상 반복실험에서 안정화 되는 경향이 나타났다[5]. 쇼어경도 45, 55, 65인 고무재료의 이축 인장시험 결과는 단축 인장시험 및 순수 전단시험 결과와 같이 초탄성(hyperelastic)

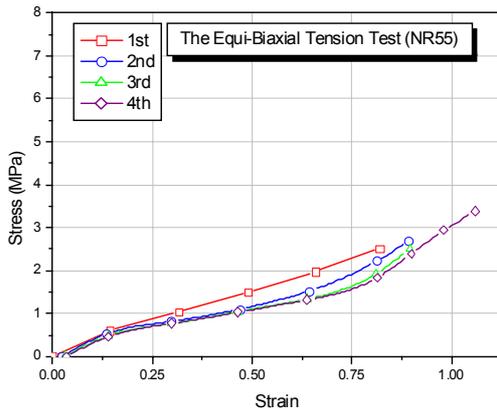


Fig. 8 Stress and strain curve for equi-biaxial tension test(hardness : 55)

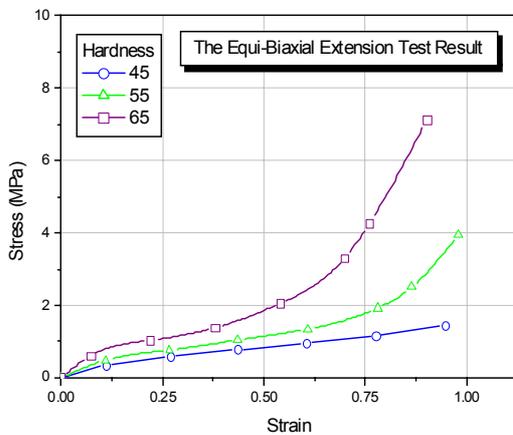


Fig. 9 Stress and strain curve of equi-biaxial tension test for various hardness

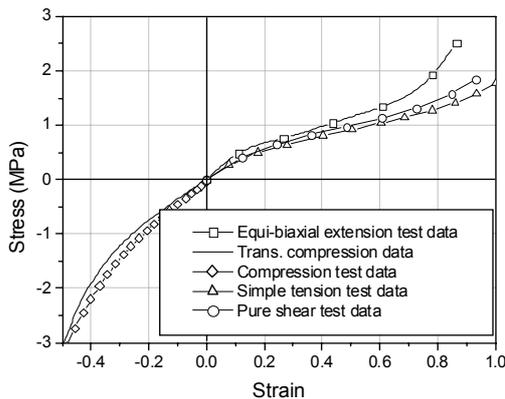


Fig. 10 Stress and strain curve for various materials test method (hardness:55)

특성을 나타내는 응력과 변형률곡선을 얻을 수

있었다. 고무재료의 경도가 높을수록 높은 강성을 나타내었다.

6. 압축 시험과 변환된 이축 인장시험결과의 비교

쇼어 경도 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. 10은 경도 55인 고무시편의 다양한 물성시험결과를 나타낸다. 이축 인장시험으로 얻어진 응력과 변형률 값을 식(5)와 식(8)을 이용하여 압축응력과 변형률 결과를 얻을 수 있었으며, 단순 압축시험 결과와 비교하였다. 경도가 작은 고무재료의 경우 압축시험 결과와 큰 차이가 없지만 경도가 큰 재료일수록 압축시험결과와 이축 인장시험으로 얻어진 결과의 차이가 크게 나타났다. 즉, 경도가 큰 고무재료를 압축시험으로 얻은 물성으로 하중과 변형률관계를 예측하면 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[6]. KS R 4026, ISO 7743, ASTM D575등에서 제시한 압축시험법에서 고무시편과 접촉되는 그립 면은 형상이 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. 11(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 발생됨을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 합력의 방향이 압축방향과 동일하도록 압축그립의 접촉면을 마찰계수 값만큼 기울인 상태를 보

여준다. 합력의 방향과 압축방향이 동일하므로 마찰계수가 “0” 인 상태와 유사한 하중과 변형 관계를 얻을 수 있다.

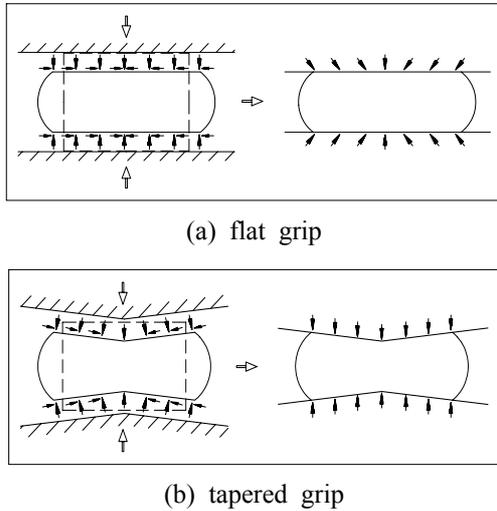


Fig. 11 Force distribution with flat and tapered compression grip

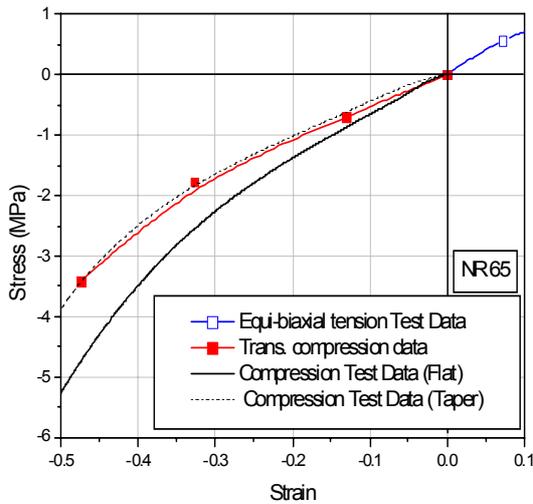


Fig. 12 The the comparison of compressive result for grip shapes and transformed equi-biaxial tension test result

Fig. 12는 고무시편(경도 65)의 이축 인장시험으로부터 계산된 압축응력과 변형률을 단순 압축 시험과 비교한 결과를 나타낸다. 단순압축시험은 압축그립의 평면형상과 테이퍼 형상으로 실험하였다. 시험결과 이축 인장시험으로부터 계산된 응력과 변형률 선도 값이 테이퍼진 형상의 압축 시험 값과 0.3 변형률 범위에서 유사하게 일치되는 것을 알 수 있었다.

8. 결 론

본 연구에서는 고무재료의 정확한 압축 물성을 구하기 위하여 이축 인장 시험기와 테이퍼진 압축판을 이용한 시험을 실시하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 이축 인장시험으로 얻은 이축 응력과 이축 변형률은 압축응력과 압축변형률로 변환할 수 있으며, 이축 인장시험 결과로부터 계산된 압축 응력 값과 압축 변형률 값은 마찰이 작용하지 않는 단순압축시험의 결과와 잘 일치하였다. 즉, 정확한 압축응력과 압축 변형률은 이축 인장시험으로 계산되어야 된다.
- (2) 고무재료의 압축시험 시 발생하는 마찰에 의한 오차는 고무재료의 경도가 증가될수록 크게 나타났다.
- (3) 이축 인장시험에서 안정적인 시험결과를 얻기 위해서는 Mullins 효과를 고려하여 5회 이상 반복적인 시험 후 구한 데이터를 사용해야 된다.
- (4) 테이퍼진 압축그립을 이용한 압축시험은 마찰력에 의한 시험 오차를 줄이는 효과가 있으며, 이축 인장시험으로부터 얻은 결과와 유사하게 나타났다.

후 기

본 논문은 국가지정연구실 사업비에 의해 연구 되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] 김완두 외, 1999, " 초탄성체 고무류 기계부품의 변형해석 및 설계기술 개발, " 과학기술부 연구보고서 98-NG-01-03-A-01.
- [2] J. Day and K. Miller, 2000, "Equibiaxial Stretching of Elastomeric Sheets, An Analytical Verification of an Experiment Technique," ABAQUS Users Conference Proceedings, June, Vol.35, No.4, pp.205~219.
- [3] 고무시편용 이축인장시험기 및 그립, 2002, 대한민국 특허 출원번호 68371
- [4] Habbitt, Karlsson and Sorensen, Inc., 1995, ABAQUS Theory Manual.
- [5] 김완두 외, 2001, "고무류 기계부품의 통합 설계 시스템 개발," 과학기술부 연구보고서 UCN323-902.M.
- [6] W. D. Kim, W. S. Kim and C. S. Woo, 2001, "Test method of rubber material model for finite element analysis," Proceedings of IRC 2001, pp.270 ~275.