

폴리머폼의 압력종속항복조건에 관한 연구

김영민* · 이희봉* · 강신일**

Pressure-Dependent Yield Criterion for Polymeric Foams

Y. Kim, H. Lee, and S. Kang

Abstract

Polymeric foams are excellent energy absorber and have found a wide range of applications, especially in the automotive industry. The purpose of the present study is to develop experimental and theoretical methodology to characterize the pressure dependent yield behavior of polymeric foams. For the compression test in a triaxial stress state, a specially designed device was placed in a press machine to produce and control oil pressure. From the experiment results, it was observed that the size of Mohr circles is changed with mean normal stress in contrast to general metal. Then, the Coulomb-Mohr criterion was applied to the data.

Key Words : Pressure-dependent behavior, Polymeric foams, Mean normal stress, Coulomb-Mohr criterion

1. 서 론

폴리머 폼 재료는 내부에 많은 기공을 가지고 있어서 일반적인 재료와는 다른 특성을 가지게 된다. 특히, 흡음성이나 충격흡수성이 뛰어나고 다른 재료에 비해 부피에 비해 무게가 상대적으로 가볍기 때문에 여러 응용분야에서 많이 응용되고 있다. 최근 들어 자동차 사고시 승원의 안전을 위한 내장재 설계가 중요한 문제가 되면서 이와 관련하여 충격흡수성이 뛰어난 폴리머 폼 재료의 사용이 증대되고 있다. 북미교통안전협회에서 내장재 충격

에 관한 승원 보호에 대해서 규정한 자동차안전법규(FMVSS)에서는 자동차 사고 발생시 승원이 받는 충격치에 관한 규정하고 있다. 이러한 규정들을 충족시키기 위해서는 승원의 신체부위와 내장재의 충돌시 승원의 충격을 최대한 흡수할 수 있는 방법이 필요하게 되고 폴리머 폼 재료를 사용함으로써 이 문제를 해결할 수 있다.

폴리머 폼 재료에서 초기 항복응력을 예측할 수 있다는 것은 그 재료가 흡수할 수 있는 에너지의 정도를 계산할 수 있는 기초자료가 되므로 큰 의미를 갖는다.

현재까지 폼 재료의 역학적 특성에 관한 연구는 여러

* 연세대학교 대학원 기계공학과

** 연세대학교 기계·전자 공학부

가지 방법에 의해 진행되어왔다. Gibbon⁽¹⁾ 등은 폼 내부의 하나의 cell의 기하학적인 형상을 단순화하여, 그 형상에 걸리는 응력 값을 기하학적으로 계산하여 항복조건을 유도하기도하고, Sinha⁽²⁾ 등은 폼 재료의 특성을 관찰하기 위해 폼 재료가 가지는 고유의 응력-변형률 곡선을 가지도록 스프링과 댐퍼들을 이용한 기계적 시스템을 구현하기도 하였다. 그리고 Chang⁽³⁾ 등은 폼을 점탄성모델에 적용하여 strain rate의 영향을 고려하기도 하였다. Rehkopf⁽⁴⁾ 등은 폼 재료의 압축거동시 폼 내부의 유체와 폼 자체의 역할을 분리하여 실험적으로 연구하기도 하였다. 하지만 폼 재료의 항복거동시 정수압의 영향을 받는 항복응력에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 시편에 3축응력을 발생시킬 수 있는 실험장치를 고안하였고, 실험을 통해 폼에 대한 압력종속 항복조건을 정립하였다.

2. Coulomb-Mohr 항복조건

Coulomb-Mohr 항복조건은 항복거동에 평균수직응력의 영향을 고려하기 위해 Coulomb-friction law에 Fig. 1과 같이 평균수직응력에 따라 그 크기가 변하는 Mohr 원의 기하학적 관계를 적용시켜 정리한 것으로 식 (1)과 같다⁽⁵⁾.

$$\frac{1}{3} J_1 + \sqrt{J_2'} [\sin(\theta + 60^\circ) + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \phi \cos(\theta + 60^\circ)] = C \cos \phi \quad (1)$$

여기서, J_1 은 Cauchy 응력 텐서의 1차 불변량이고 J_2' 은 편차응력 텐서의 2차 불변량이다. 그리고 ϕ 는 internal friction의 angle을 의미한다. 그리고 θ 는 편차 평면상에서 응력값의 orientation을 의미하고 식(2)와 같이 정의된다.

$$\cos \theta = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{S_1}{\sqrt{J_2'}} \quad (2)$$

여기서 S_1 은 편차응력 성분을 의미한다. 이번 실험에서의 응력상태는 절대값은 다르지만 경향이 항상 같으므로 식 (2)를 이용하면, θ 값은 항상 60° 임을 알 수 있다.

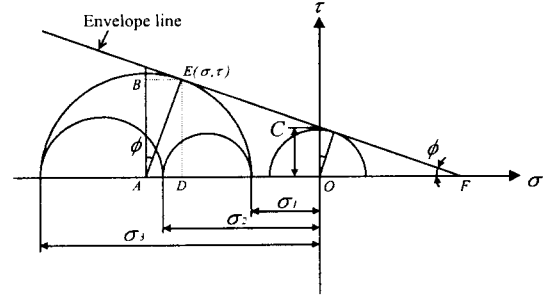


Fig. 1 Coulomb-Mohr criterion

식 (1)을 J_1 , J_2' 에 대해 정리하면, 다음과 같이 표현된다.

$$(3C \cos \phi - J_1) = 3\zeta \sqrt{J_2'} \quad (3)$$

여기서, ζ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\zeta = [\sin(\theta + 60^\circ) + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \phi \cos(\theta + 60^\circ)] \quad (4)$$

식(3)의 양변을 제곱하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$J_2' = \beta_0 + \beta_1 \cdot J_1 + \beta_2 \cdot J_1^2 \quad (5)$$

$$\beta_0 = \frac{C^2 \cos^2 \phi}{\zeta^2}, \quad \beta_1 = \frac{-2C \cos \phi}{3\zeta^2}, \quad \beta_2 = \frac{1}{9\zeta^2}$$

본 연구에서는 실험결과를 바탕으로 β_0 , β_1 , β_2 를 구함으로써 폴리머 재료에 대한 압력종속 항복조건을 정립하였다.

3. 실험

3.1 실험장치

위에서 정리한 식을 적용시키기 위해서 Fig. 2와 같은 실험장치를 고안하였다. 이번 실험에 사용되는 실험장치는 기존의 프레스 기기에 시편에 3축 응력을 가하기 위해 특수 제작된 유압가압장치를 설치한 후 시편의 변위를 측정하기 위해서 wire potentiometer, 유압가압장치 내부의 유압을 측정하기 위해서 압력계, 프레스가 시편에 가해주는 힘을 측정하기 위해 로드셀을 장착하고 데

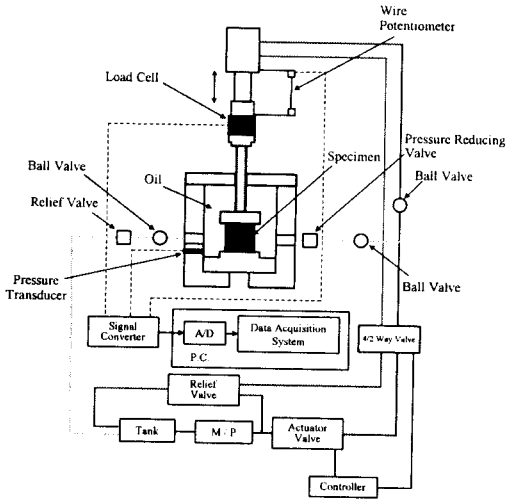


Fig. 2 A schematic of experimental apparatus

이러한 취득시스템을 구성하여 실험 데이터들을 얻어낼 수 있도록 구성하였다. 각 센서들에 의해 얻어진 데이터들은 A/D Board를 거쳐 저장된다.

3.2 시편

Woodbridge사에서 만든 open cell 타입의 충격흡수용 폴리우레탄 폼으로 제작된 E-175, E-345P3를 사용하여 높이 70mm, 지름70mm의 봉형상으로 시편을 제작하였다. E-175는 자동차 내장재 중에서 패널부분에 삽입되어 정면충돌시, E-354P3는 필라부분에 삽입되어 승원의 두부 충돌시 그 충격을 흡수하는데 이용되고 있다.

3.3 측정결과

본 실험에서 측정하는 것은 Fig. 2에서 알 수 있듯이 프레스에 의해 시편에 가해지는 힘이다. 이 값을 기준으로 하는 응력값은 effective stress가 아니라 초기 항복의 시점을 알 수 있는 기준이 되는 값이다. 이 값을 이번 연구에서는 s_y 값이라 하고 0.002 offset 방법을 적용하여 계산하였다.

E-175로 제작된 시편에 각각 유압을 0, 30, 50, 60 kPa을, E-354의 경우엔 0, 50, 100, 150kPa의 유압을 가한 후 실험을 실시하였다. Fig. 3과 Fig. 4가 나타내고 있는 결과는 같은 조건의 실험을 3회 반복 실시하여 그 평균값을 표시한 것이다. 이렇게 구해진 응력-변형률 곡선을 기준으로 E-175의 경우 유압이 0, 30, 50, 60 kPa을 준 경우 s_y 값이 각각 51.43, 80.71, 102.93, 108.86 kPa

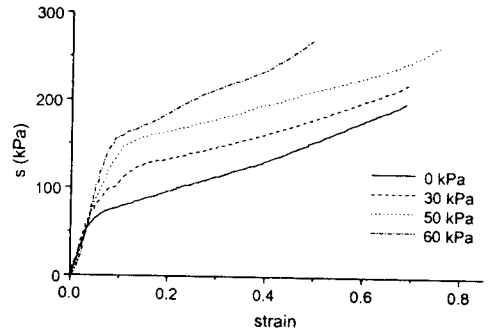


Fig. 3 The variation of the stress-strain curve of E-175 with oil pressure

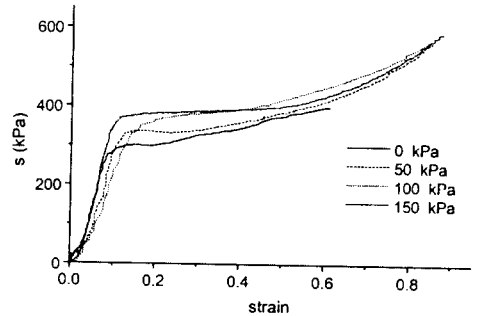


Fig. 4 The variation of the stress-strain curve of E-354P3 with oil pressure

으로 측정되었다. 같은 방법으로 E-354P3의 경우, 유압을 0, 50, 100 kPa 준 경우에는 각각 270.59, 296.77, 323.53, 355.59 kPa의 s_y 값이 계산되었다.

4. Coulomb-Mohr 항복조건의 적용

같은 모델에 대해 서로 다른 네 개의 실험조건을 고려하면, 네 개의 Mohr 원을 그릴 수 있다. 이 네 Mohr 원 중에 두원에 동시에 접하는 직선을 찾아내면 모두 6개의 직선의 방정식을 구할 수 있다. 그러면 네 개의 원과 여섯 개의 직선으로부터 12개의 점점에 대한 정보를 얻을 수 있다. 이 점들을 기준으로 최소자승법을 이용하여 envelope 직선을 구하면 그 직선의 기울기로부터 ϕ , τ 절편으로부터 C 를 계산할 수 있다.

본 실험에서는 응력이 x방향, 즉 시편의 축방향으로는 프레스에 의해 발생하는 응력과 유압에 의해 발생하는 응력이 복합적으로 발생하여 주응력 σ_3 이 되고 그 값은 $-q$ 로 정의하고 식(6)과 같이 나타났다.

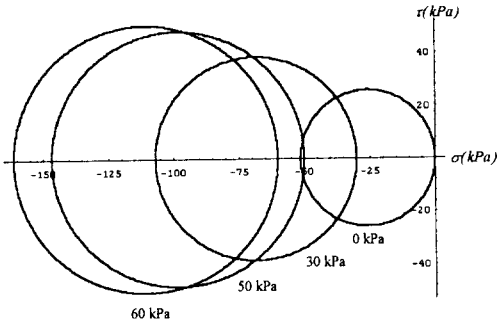


Fig. 5 Mohr circles of E-175 with oil pressure

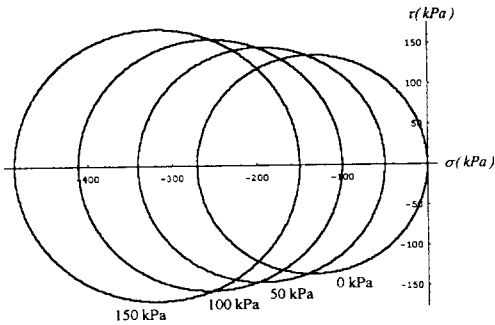


Fig. 6 Mohr circles of E-175 with oil pressure

$$q = s_y + \frac{p \cdot (d_2^2 - d_1^2)}{d_2^2} \quad (6)$$

여기서, d_1 과 d_2 는 각각 램과 피스톤의 직경이다. 그리고 나머지 y , x 방향, 즉 시편의 측면방향으로는 유압에 의해서만 응력이 발생하게 되고 그 값은 $-p$ 가 되고 이는 각각 그 방향의 주응력, σ_2 , σ_3 이 된다.

E-175의 경우, 유압, p 가 0, 30, 50, 60 kPa인 경우의 q 값은 각각 51430, 106880, 146550, 161210 kPa으로 계산되었다. E-354P3의 경우에는 유압, p 가 0, 50, 100, 150 kPa인 경우의 q 값은 각각 270590, 340390, 410770, 486460 kPa으로 계산되었다. 이를 바탕으로 E-175와 E-354P3의 Mohr원들을 그려보면 Fig. 7, Fig. 8과 같이 나타났다. 그리고, 이 원들을 바탕으로 E-175, E-354P3의 envelope 직선은 식(7), 식(8)과 같이 계산되었다.

$$\tau = -0.31196 \sigma + 19003 \quad (7)$$

$$\tau = -0.18187 \sigma + 112380 \quad (8)$$

위에서 구해진 envelope 직선을 식(5)에 적용시키면 β_0 , β_1 , β_2 를 계산할 수 있다. E-175의 경우, β_0 , β_1 , β_2 는 각각 $2.3905 \times 10^8 \text{ Pa}^2$, -43458 Pa , 0.19751 로 계산되었고, 마찬가지로 E-354P3의 경우에는 각각 $1.8433 \times 10^{10} \text{ Pa}^2$, -111150 Pa , 0.16754 로 계산되었다.

5. 결론

본 연구에서는 폴리머 폼 재료에 대한 압력중속 항복 조건을 실험적으로 결정하는 방법론이 개발되었다. 본 연구에서 고안된 실험장치를 이용하여 폴리머 폼 재료의 항복응력이 정수압이 증가함에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있었고, Coulomb-Mohr 항복조건에 계수들을 결정하였다. 본 연구결과는 폼 재료의 에너지 흡수능을 예측하는데 도움이 되리라 판단된다.

후 기

본 연구는 미국 Woodbridge사의 지원을 받아 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- (1) L.J. Gibson, M.F. Ashby, J. Zhang, and T.C. Triantafillou, 1989, "Failure surfaces for cellular materials under multiaxial loads - I. Modelling", International Journal of Mechanical Science, Vol. 31, No. 9, p. 635.
- (2) S.C. Sinha and J.O. Mitchell, 1994, "Constitutive modeling of energy absorbing foams", SAE Paper, No. 940880.
- (3) Fu S. Chang, Y. Song, D.X. Lu, and C.N. DeSilva, 1998, "Unified constitutive equations of foam materials", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 120, p. 212.
- (4) J.D. Rehkopf, G.W. Brodland, and G.M. McNeice, 1996, "Experimentally separating fluid and matrix contributions to polymeric foam behavior", Experimental Mechanics, p. 1.
- (5) Khan, 1995, "Continuum theory of plasticity", John Wiley & Sons p. 82.