[논문] 한국소성가공학회지(2002), 제11권 제1호
Transactions of Materials Processing **Vol. 11, No. 1, (2002)**

폴리머 폼 재료의 정수압 종속 항복조건 결정에 관한 연구

김영민* · 강신일**

(2001년 10월 19일 접수)

Determination of Pressure-Dependent Yield Criterion for Polymeric Foams

Y. Kim and S. Kang

Abstract

In addition to lightweight and moldable characteristics, polymeric foams possess an excellent energy absorbing capability that can be utilize for a wide range of commercial applications, especially in the crashworthiness of the automobiles. The purpose of the present study is to develop experimental methodology to characterize the pressure dependent yield behavior of the energy absorbing polymeric foams. For the compression test in a triaxial stress sate, a specially designed device was placed in a hydraulic press to produce and control oil pressure. For the test material, the polyurethane foams of two different densities were used. The displacement of the specimen, the load subjected to the specimen, and oil pressure applied to the specimen were measured and controlled. Stress strain curves and yield stresses for the four different oil pressure were obtained. It was found from the present experiments that the polyurethane foams exhibited significant increases in yield stress with applied pressure or mean normal stress. Based on this observation, a yield criteria which included the effect of the stress invariant were established for the polymeric foams. The obtained experimental constants which constituted the pressure-dependent yield criterion were verified.

Key Words : Pressure-Dependent Yield Criterion, Polymeric Foams, Mean Normal Stress, Coulomb-Mohr Criterion

1. 서 론

최근 자동차 사고시 승원의 안전을 위한 차량의 내장재 설계가 중요한 문제로 대두되고 있다. 북미교통안전협회(NHTSA)가 제정한 자동차안전법규에서는 자동차 사고 발생시 승원이 받는 충격치의 최대값을 규정하면서 자동차 내장재 설계에 대한 규제를 가하고 있고,[1] 유럽

* 연세대학교 대학원 기계공학과
** 연세대학교 기계 · 전자공학부

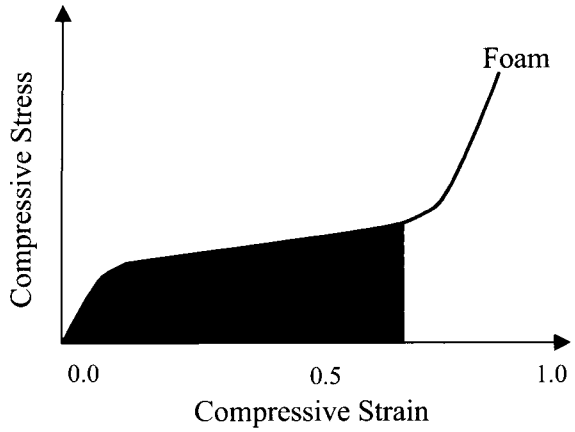

Fig. 1 Sress-strain curve for polymeric foams associated compressive loads

이나 일본에서도 이와 유사한 규정들이 제정되어 있으며 이와같은 제한들은 더욱 강화되고 있는 실정이다. 이러한 요구사항들을 충족시키기 위해서는 승원의 신체부위와 내장재의 충돌시 승원의 충격을 최소화할 수 있는 방법이 필요하게 되었고 그 해결방안으로 제시된 방법들 중 하나가 충격 흡수능이 뛰어난 폴리머 폼 재료를 이용하는 것이다.폴리머 폼 재료는 내부의 기공 때문에 역학적으로 다른 일반재료와는 다른 특성을 가진다. 특히, 흡음성이나 충격흡수성이 뛰어나고 다른 재료에 비해 단위부피당 무게가 상대적으로 적기때문에 폴리머 폼 재료의 다양한 분야에 적용될 수 있으며 그중에서도 자동차 내장재에 많이 이용되고 있다. Fig. 1은 압축하중을 받는 일반적인 폴리머 폼재료의 응력 · 변형률곡선을 나타낸 것이다. 이 곡선으로부터 압축하중을 받는 일반적인 폴리머 폼재료의 응력 · 변형률곡선은 세개의 구간으로 구분된다는 사실을 확인할 수 있다. 첫번째는 탄성구간으로서, 응력과 변형률의 관계가 선형적으로 나타난다. 두번째 구간은 탄성영역을 벗어나면서 나타나는데 이 구간내에서는 하중이 증가함에따라 탄성구간을 벗어나 하중의 변화는 거의 나타나지 않은 상태에서 변형률이 급격히 증가한다. 여기서 하중이 더욱 증가하여 특정값보다 커지게 되면 일반 재료와 같이 변형률의 증가에 대해 응력이 급격히 증가하는 세 번째 구간이 나타난다. 이중에서 폴리머 폼 재료 내부의 cell의 붕괴가 일어나는 두 번째 구간에서 외부 충격에 대한 흡수가 대부분 일어난다. 그렇기 때문에 폴리머 폼 재료에서 초기 항복응력을 예측할 수 있다는 것은 그 재료가 흡수할 수 있는 에너지의 정도를 계산할 수 있는 기초자료를 제공할 수 있다는 의미를 가지게 된다. 현재까지 폼 재료의 역학적 특성에 관한 연구는 여러 가지 방법에 의해 진행되어왔다. Gibson[2] 등은 폼 내부의 하나의 cell의 기하학적인 형상을 단순화하여, 그 형상에 걸리는 응력값을 기하학적으로 계산하여 항복조건을 유도하기도하고, Sinha[3] 등은 폼 재료의 특성을 관찰하기 위해 폼 재료가 가지는 고유의 응력-변형률 곡선을 가지도록 스프링과 댐퍼들을 이용한 기계적 시스템을 구현하기도 하였다.

또한, Chang[4] 등은 폼을 점탄성모델에 적용하여 변형속도의 영향을 고려하기도 하였다. Rehkopf[5]등은 폼 재료의 압축거동시 폼 내부의 유체와 폼 자체의 역할을 분리하여 실험적으로 연구하기도 하였다. 현재 폼 재료의 응력-변형률 곡선에 영향을 주는 요소들 중에는 온도, 변형속도, 정수압 등이 있다고 실험적으로 보고되고 있다.[6] 하지만 정수압의 영향을 받는 폼 재료의 항복거동에 관한 연구는 미비한 실정이다. 이에 본 연구에서는 폴리머 폼 재료의 소성거동에서 정수압이 미치는 영향을 알아보기 위해 시편에 3축응력을 발생시킬 수 있는 실험장치를 고안하여 압축실험을 수행하였고 여기서 얻어진 실험결과를 정수압의 영향을 포함하는 항복조건식인 Hu와 Pae[7]에 의해 제시된 실험식을 적용시킴으로써 폴리머 폼 재료의 항복조건을 실험적으로 결정할 수 있는 방법론을 개발하였다.

2. 정수압이 포함된 항복조건식

일반 금속의 경우 항복거동에 정수압의 영향이 고려되지 않는다. 다시말하면 어떠한 값의 정수압이 재료에 가해지더라도 항복은 일어나지 않음을 의미한다. 그러나 재료 내부에 많은 기공들을 가지는 콘크리트나 암석, 폼 등과 같은 재료들은 항복거동시 평균수직응력의 영향을 받는다. 그러므로 이와 같은 재료들의 항복조건식에는 당연히 정수압의 영향을 나타내는 항이 들어가야만 한다. 이에 Hu와 Pae[7]는 일반 재료의 항복거동에 J_1, 즉 정수압의 영향을 고려하기 위해서 다음과 같은 항복조건식을 제안하였다.

$$J_2' = \sum_{i=0}^{n} a_i J_1^i \tag{1}$$

식(1)에서 정수압의 영향을 고려하기 위해서는 항복조건식에 J_1이 포함되어야하고 이를 위해서는 i가 적어도 1이상이 되어야함을 알 수 있다. 그 중에서 i가 2인 경우의 항복조건식를 고려하면 다음과 같이 표현된다.

$$J_2' = \alpha_0 + \alpha_1 \cdot J_1 + \alpha_2 \cdot J_1^2 \qquad (2)$$

폴리머 폼재료에 대한 수회의 압축실험을 바탕으로 식 (2)의 계수인 $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$의 값을 계산할 수 있고 이를 통해 폴리머 폼재료에 대한 항복조건식을 결정할 수 있다.

3. 실 험

3.1 실험장치

위에서 정리한 식을 적용시키기 위해서 Fig. 2와 같은 실험장치를 고안하였다. 기존의 프레스 기기에 시편에 3축 응력상태를 발생시키기 위해 특수 제작된 유압가압장치를 설치하였다. 시편에 걸리는 응력을 계산하기 위해 유압가압장치 내부의 압력을 측정하기 위한 압력센서를 설치하였고 응력·변형률 곡선을 얻어내기 위하여 변위센서와 로드셀을 Fig. 2처럼 장착하여 시편의 변위와 프레스에서 가해주는 하중을 측정하였다. 또한 각 센서들에 의해 얻어진 데이터들은 A/D board를 거쳐 컴퓨터에 기록하였다.

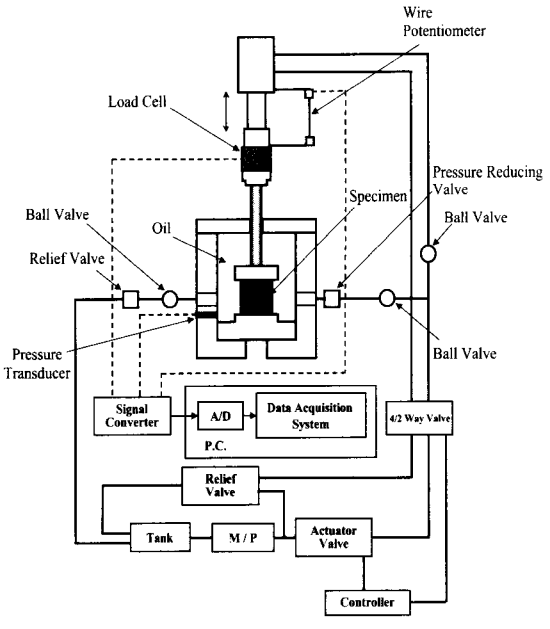

Fig. 2 A schemetic of experimental apparatus

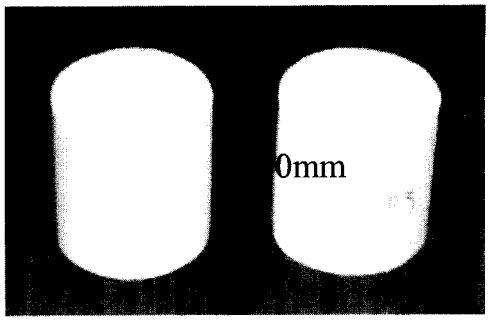

Fig. 3 The shape of the specimens

3.2 시편

Woodbridge사에서 제작된 충격흡수용 폴리우레탄 폼, E-175, E-345P3를 사용하여 높이 70 mm, 지름70 mm의 봉형상으로 시편을 제작하였다. Fig.3은 이번 실험에 사용된 시편의 사진이다. E-175는 자동차 내장재 중에서 패널부분에 삽입되어 정면충돌시, E-354P3는 성분 필라부분에 삽입되어 승원의 두부 충돌시 충격을 흡수하는데 이용되고 있다.

3.3 측정결과

본 실험에서는 측정하는 것은 Fig.2에서 나타낸 것처럼 로드셀로부터 측정되는 프레스에 의해 시편에 가해지는 하중이다. 그러나 이번 실험에서는 유압가압장치 내부의 시편에 발생하는 응력상태는 Fig.4에서 나타낸 것처럼 유압에 의해 3차원으로 발생한다. 즉, x방향으로는

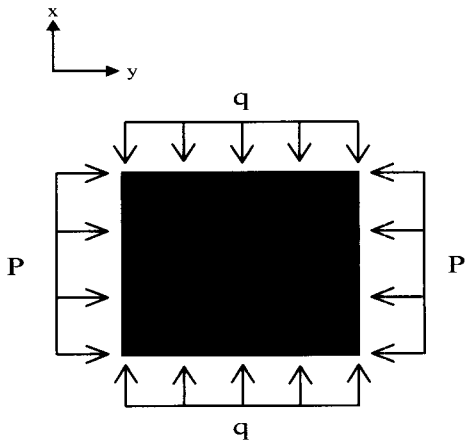

Fig. 4 Stress state subjected to the specimen

유압과 프레스의 복합적인 하중에 의한 응력이 발생하고 시편의 측면 방향인 y와 z방향으로는 유압가압장치 내부의 유압에 의한 응력만이 발생하게된다. 그러므로 로드셀을 이용하여 측정한 값을 기준으로 하는 응력값은 유효응력이 아니라 초기 항복의 시점을 알 수 있는 기준이 되는 값임을 알 수 있다. 이 값을 이번 연구에서는 s_y값이라 하고 실험에서 측정된 응력 · 변형률 곡선에 0.002 offset 방법을 적용하여 계산하였다.[8]

E-175로 제작된 시편에 각각 0, 30, 50, 60 kPa의 유압을, E-354의 경우엔 0, 50, 100, 150 kPa의 유압을 가한 후 실험을 실시하였다. 또한, 본 실험에서는 변형속도의 영향을 줄여주기 위해 6mm/s로 그 값을 고정하여 시편을 준정적상태로 압축하였다. Fig. 5와 Fig. 6이 나타내고 있는 결과는 같은 조건의 실험을 3회 반복 실시하여 그 평균값을 표시한 것이다. 이렇게 구해진 응력-변형률 곡선을 기준으로 E-175로 제작된 시편에 각각 0, 30, 50, 60 kPa의 유압을 가한 상태에서 측정된 s_y값은 51.43, 80.71, 102.93, 108.86 kPa이었다. 동일한 방법으로 E-354P3으로 제작된 시편에 0, 50, 100 kPa의 유압을 준 경우에는 s_y값이 각각 270.59, 296.77, 323.53, 355.59 kPa으로 측정되었다.

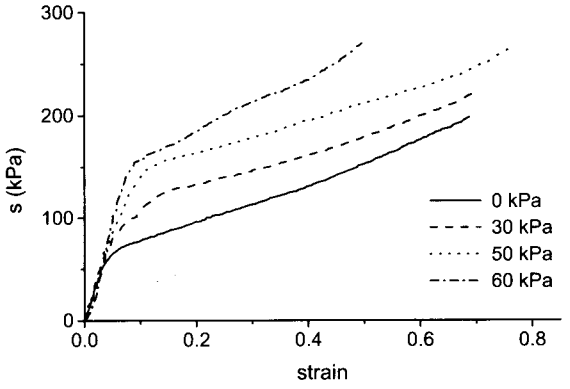

Fig. 5 The variation in the stress-strain curve of the E-175 under the oil pressure as designated in the graph

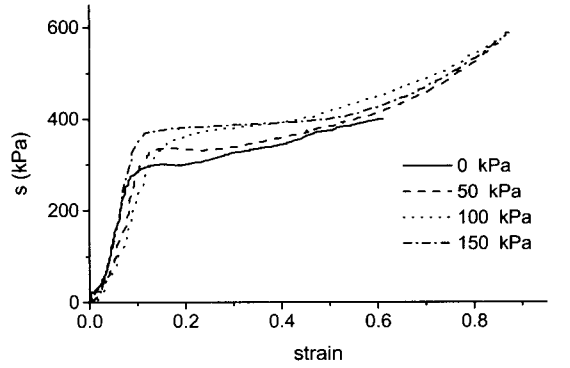

Fig. 6 The variation in the stress-strain curve of the E-354P3 under the oil pressure as designated in the graph

4. 폴리머 폼 재료에 대한 항복조건식 결정

4.1 시편의 응력상태

정수압이 고려된 항복조건인 식(2)의 상수값을 실험적으로 결정하기 위해서는 시편에 작용하는 응력상태를 알아야 한다. 앞에서 설명한 것 처럼 유압가압장치 내부에서의 시편의 응력상태는 유압에의해 3차원으로 존재한다. 이와 같은 응력상태는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_x = -q,\ \sigma_y = -p,\ \sigma_z = -p,$$

$$\tau_{ij} = 0 \tag{3}$$

여기서 q는 프레스에의해 발생하는 압축하중, F 와 유압가압장치 내부의 압력, p에의해 복합적으로 발생하는 응력을 의미한다. 또한, 시편의 윗면에 작용하는 응력, q는 시편 윗면에 닿는 피스톤의 형상을 고려하여 식(4)와 같이 정의할 수 있다.

$$q = s + \frac{p \cdot (d_2^2 - d_1^2)}{d_2^2} \tag{4}$$

여기서, s는 다음과 같의 정의된다.

$$s = \frac{F}{\frac{\pi}{4} d_2^2} \tag{5}$$

d_2는 시편을 압축하는 피스톤의 지름을 나타내며 d_1은 피스톤에 이어진 봉의 지름을 나타낸다. 본 실험에 사용된 수치는 각각 70 mm, 25 mm이다. 또한, s는 식(5)에서 알 수 있듯이 프레스 기기가 시편에 가해주는 힘, F를 시편의 단면적으로 나누어준 값이다. 위의 응력상태를 통하여, J_1과 J_2'는 정의에 의해 다음과 같이 계산된다.

Table 1 J_1 **and** J_2' **of E-175 with oil pressure**

p	0 kPa	30kPa	50kPa	60kPa
J_1[Pa]	-80710	-166880	-246550	-281210
J_2'[Pa^2]	8.82×10^8	1.97×10^9	3.11×10^9	3.41×10^9

Table 2 J_1 **and** J_2' **of E-354P3 with oil pressure**

p	0 kPa	50kPa	100kPa	150kPa
J_1[Pa]	-270590	-440390	-610770	-786460
J_2'[Pa^2]	2.44×10^{10}	2.81×10^{10}	3.22×10^{10}	3.77×10^{10}

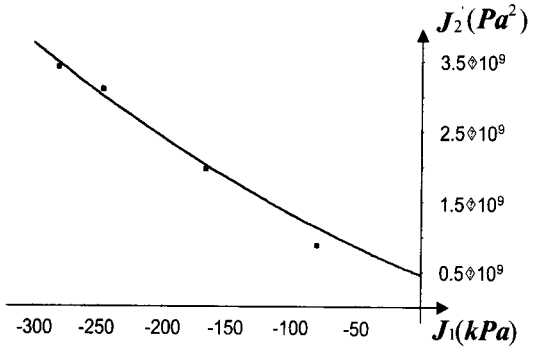

Fig. 7 The least square fit for the data in table 1

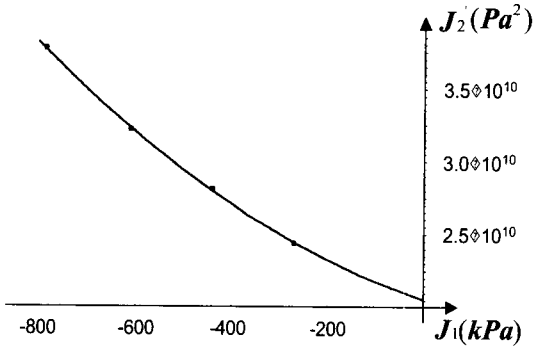

Fig. 8 The least square fit for the data in table 2

$$J_1 = \sigma_x + \sigma_y + \sigma_z = -\{(2+A)p + s\} \tag{6}$$

$$J_2' = \frac{1}{6}[(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 = \frac{1}{3}\{(1-A)p - s\}^2 \tag{7}$$

여기서, $A = \dfrac{(d_2^2 - d_1^2)}{d_2^2}$ 이다. 위의 결과를 식 (2)에 대입해서 정리하면 다음과 같은 식을 얻어 낼 수 있다.

$$\{(1-A)p - s\}^2 = 3\alpha_0 - 3\{(2+A)p + s\}\alpha_1 + 3\{(2+A)p + s\}^2\alpha_2 \tag{8}$$

4.2 정수압이 포함된 항복조건식 결정

4.2.1 시편 E-175의 항복조건식

유압, p가 각각 0, 30, 50, 50 kPa인 경우에 측정한 s_y값을 식(6)과 식(7)에 대입하면 네 가지 경우 각각의 J_1, J_2'값들을 구할 수 있다. Table 1은 이 결과들을 정리한 것이다.

위에서 구한 결과를 J_1-J_2' 평면에서 생각하면 각각 네 개의 서로 다른 점으로 표현된다. 따라서 최소자승법을 이용하여 그 점을 대표하는 2차 곡선을 구할 수 있고 이로부터 실험상수 값을 결정할 수 있게된다. 계산한 결과 E-175의 경우 α_0는 4.5869×10^8 Pa^2, α_1는 -7.4056×10^3 Pa, α_2는 1.1822×10^{-2}임을 알 수 있고, 이를 식으로 나타내면 식(9)와 같다. Fig.7은 이와 같이 구해진 항복조건을 J_1-J_2' 평면에 2차원으로 나타낸 것이다.

$$J_2' = 4.5869\times10^8 - 7.4056\times10^3 J_1 + 1.1822\times10^{-2} J_1^2 \tag{9}$$

4.2.2 시편 E-354P3의 항복조건식

E-175에서 적용한 방법과 동일한 방법으로써 실험상수 값들을 계산하였다. E-354 는 유압이 0, 50, 100, 150 kPa인 경우에서 실험이 수행되었으므로 Table 2와 같이 정리할 수 있다. 이로부터 α_0, α_1, α_2는 각각 2.0546×10^{10} Pa^2, -1.0575×10^4 Pa, 1.4272×10^{-2}임을 알 수 있었다. 또한 이를 수식의 형태로 나타내면 식(10)과 같다.

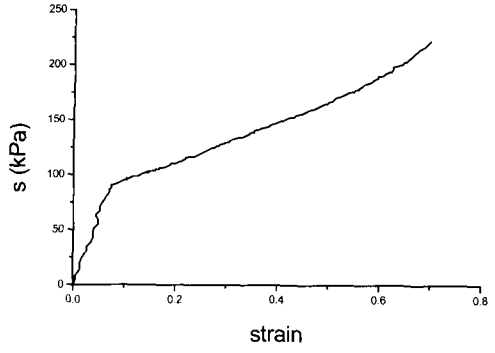

Fig. 9 The stress-strain curve of E-175 under the oil pressure of 40 kPa

Fig.8은 이렇게 구해진 항복조건을 J_1-J_2' 평면에 나타낸 것이다.

$$J_2' = 2.0546\times10^{10} - 1.0575\times10^{4} J_1 + 1.4272\times10^{-2} J_1^{\,2} \quad (10)$$

4.2.3 정수압이 포함 된 항복조건식의 검증

앞에서 계산한 항복조건식을 검증하기위해 E-175로 제작된 시편을 가지고 유압을 40 kPa을 가한후 실험을 수행하였고, 그 결과 Fig.9와 같은 응력-변형률 곡선을 얻어낼 수 있었다. 이러한 실험결과로부터 측정된 s_y값은 90.84 kPa이었다. 또한 같은 조건을 식(9)에 적용시켜 계산한 s_y값은 91.56 kPa로 계산되었다. 이는 앞에서 제시한 폼재료의 항복조건을 결정하기 위한 방법이 타당함을 의미한다.

5. 결 론

본 연구에서는 폴리머 폼의 정수압 종속 항복조건을 실험적으로 구하는 방법론이 제시되었다. 이를 위해 3축 압축응력상태를 유발시킬 수 있는 실험장치를 고안하였고 이것을 이용하여 대표적인 폴리머 폼 재료 중의 하나인 폴리우레탄 폼 재료에 유압을 이용한 3축응력 압축실험을 수행하였다. 정수압을 변화시켜가면서 압축실험을 수행한 결과를 이용하여 정수압이 포함된 항복조건식의 계수를 구할 수가 있었다. 또한 추가실험를 통해 이번 실험에서 결정된 항복조건식을 검증하였다. 온도나 변형속도 등의 인자들의 항복에 미치는 영향을 고려하면 더욱 정확한 폴리머 폼 재료의 항복거동 예측이 가능할 것으로 기대된다.

후 기

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

참 고 문 헌

(1) C.C. Chou, Y. Zhao, L. Chai, J. Co, and G.G. Lim, 1995, "Development of Foam Models as Applicatio ns to Vehicle Interior", SAE Technical Paper, No.952733.

(2) 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.

(3) S.C. Sinha and J.O. Mitchell, 1994, "Constitutive modeling of energy absorbing foams", SAE Paper, No. 940880.

(4) Fu S. Chang, Y. Song, D.X. Lu, and C.N. DeSilva, 1998, "Unified constitutive equations of foam mate -rials", Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 120, p. 212.

(5) J.D. Rehkopf, G.W. Brodland, and G.M. McNeice, 1996, "Experimentally separating fluid and matrix contributions to polymeric foam behavior", Experi- mental Mechanics, p. 1.

(6) J. Zhang, Z. Lin, A. Wong, N. Kikuchi, V.C. Li, A.F. Yee, and G.S. Nusholtz, 1997, "Constitutive Modeling and Material Characterization of Polymer ic Foams", Journal of Engineering Materials and Technolory, Vol. 119, p.284.

(7) L.W. Hu, and K.D. Pae, 1963, "Inclusion of the Hydrostatic Stress Component in Formulation of the Yield Condition", Journal of Franklin Institute, 275, p. 491.

(8) J.A. Sauer, D.R. Mears, and K.D. Pae, 1970, "Effects of hydrostatic pressure on the mechanical behavior of polyetrafluoroethyene and polycarbonat -e", European Polymer Journal, Vol. 6, p. 1015.