

論文

EPS Foam의 변형률속도효과에 대한 연구

강우중^{*,†}, 전성식^{**}, 이인혁^{***}, 최선웅^{****}, 민제홍^{****}, 이상혁^{****}, 배봉국^{****}

Investigation of the Strain Rate Effects of EPS Foam

Woo-Jong Kang^{*,†}, Seung-Sik Cheon^{**}, In-Hyeok Lee^{***}, Seon-Ung Choi^{****}, Je-Hong Min^{****},
Sang-Hyeok Lee^{****}, Bong-Kook Bae^{****}

ABSTRACT

Expanded polystyrene(EPS) foams are often used in packaging to protect electrical appliances from impact loads. The energy absorbing performances of the EPS foams depend on several parameters such as density, microstructure and strain rate. Thus, the effects of the parameters on the strength of the EPS foams need to be investigated for an optimized packaging design by FEM. In this study, various EPS foams which have different densities were quasi-statically and dynamically loaded in order to obtain the stress-strain curves. EPS foams of various densities from 18.5 to 37.0kg/m³ were considered in the experiments. A drop-mass type apparatus was developed for the intermediate strain rate tests up to several hundreds/second. It was found from the experimental results that the strength of the EPS foams increase about 170% as the strain rate increases from 0.06/s to 60/s. Experimental results also showed that the strain rate sensitivity increases as the strain increases.

초 록

EPS 폼은 충격하중으로부터 전자제품의 파손을 방지하기 위하여 포장재로 많이 사용되는 경량소재이며 밀도, 미세구조, 변형률 속도에 따라 에너지 흡수능력이 달라진다. 본 연구에서는 변형률속도와 밀도의 변화에 대한 EPS 폼의 에너지 흡수능을 평가하기 위하여 18.5 ~ 37.0kg/m³의 밀도를 갖는 EPS 폼의 압축시험을 수행하였다. 중고속 압축시험을 위하여 낙하방식의 시험기를 개발, 사용하였으며 변형률 속도 0.06/s ~ 60/s에서의 압축시험을 통하여 EPS 폼의 변형률속도 효과를 분석하였다. 시험 결과 변형률 속도가 0.06/s에서 60/s로 증가할 경우 EPS 폼의 강도는 약 1.7배 증가하는 것으로 관찰되었다. 또한 변형률 속도에 따른 소재의 민감도는 변형률이 증가할수록 커지는 것으로 관찰되었다.

Key Words : EPS(expanded polystyrene), 변형률속도효과(strain rate effects), 동적압축(dynamic compression)

1. 서 론

EPS는 화학명으로 Expanded Polystyrene(발포폴리스티렌)이라하며 폴리스티렌수지에 펜탄이나 부탄과 같은 발포제를 첨가시켜 가열 경화시킴과 동시에 기포를 발생시켜 제조되는

경량소재이다. EPS 폼(foam)을 제조하는 과정은 몇 단계로 구성되는데 크게 발포, 숙성, 건조, 성형의 과정을 거치게 된다. 발포 과정 중 폴리스티렌 입자에 함유되어 있던 펜탄 가스는 수증기에 의한 열에 의하여 팽창을 하게 되고 이 때 닫힌 셀(closed cell)을 갖는 폼으로 변화하게 된다. 다음 공

*† 경일대학교 기계자동차학부, 교신저자(E-mail:wjkang@kiu.ac.kr)

** 국립공주대학교 공과대학 기계자동차공학부

*** (주)한국이에스아이

**** (주)삼성전자

정으로 숙성과정을 거치게 되는데 이때 발포과정 중 폴리스테렌 입자에 흡수된 수증기와 발포제로 사용된 가스의 잔류물을 내어보내고 동시에 대기 중의 공기를 흡수하게 된다.

EPS 폼은 열전도율이 매우 낮기 때문에 단열재로 사용되기도 하지만 충격하중에 대한 완충효과가 매우 뛰어나서 포장재로 매우 유용한 소재이다. EPS 폼은 다양한 외부 충격 조건에서 최적의 충격에너지를 흡수하여 제품에 전달되는 최대하중을 낮춰야 하므로 사용된 폼의 변형특성을 정확히 파악할 필요가 있다. 특히 폼의 강도는 밀도에 따라 달라지기 때문에 제품에 전달이 허용되는 최대하중의 크기와 충격에너지 흡수 정도에 따라 적절한 밀도를 결정하는 것이 중요하다 [1]. Avalle 등 [2]은 EPS, EPP(expanded polypropylene)와 같은 폼의 준정적인 거동을 Gibson, Rusch 등의 모델로 나타내었으며 수정된 Gibson 모델을 제시하여 폼의 강도가 밀도의 함수로 나타내어질 수 있음을 보였다.

EPS 폼의 셀 안에는 공기가 함유되어 있어서 변형률이 작은 경우에는 셀 안의 공기의 거동이 폼의 강도에 영향을 미치게 되지만 공칭변형률 0.6 이상의 대변형 조건에서는 셀과 셀의 외벽이 서로 맞닿아 접촉 변형하면서 폼의 경화가 발생하는 것으로 알려져 있다[3,4].

폼 소재는 변형률 속도에도 민감한 것으로 알려져 있기 때문에 동적거동을 측정하기 위하여 다양한 시험방법이 사용되고 있다. 고속시험은 변형률 속도의 대역에 따라 낙하방식이나 split Hopkinson bar 시험기가 사용된다. 수 백/s이내의 변형률 속도대역에서는 낙하방식의 시험기를 사용하며 수천/s의 변형률 속도 대역에서는 split Hopkinson bar 시험기를 사용하는 것이 일반적이다[5-8]. Split Hopkinson bar를 이용할 경우 폼의 탄성계수와 시험장치에 사용되는 탄성봉의 탄성계수를 비슷하게 하는 것이 중요하기 때문에 나일론(nylon) 섬유를 이용한 탄성봉을 사용하기도 한다.

Kim 등 [9]은 중고속인장시험기를 이용하여 폴리프로필렌(polypropylene)의 고속변형특성을 연구하였으며 이때 시편 온도의 증가에 따른 소재의 열화 특성을 시험적으로 측정하였다. 낙하방식의 시험기를 이용하여 자동차용 범퍼에 사용되는 EPP 폼이나 폴리우레탄폼의 고속압축시험이 수행되었으며 변형률 속도에 따른 소재거동 및 에너지 흡수 특성이 연구되었다.[10, 11].

EPS 폼은 일반적으로 반복적인 충격에 대한 복원력이 좋지 않은 것으로 나타나지만 에너지 흡수 능력은 다른 폼에 비하여 우수한 것으로 나타난다. Ozturk 등 [12]은 EPS의 반복적인 일축 압축하중 조건에서의 에너지 흡수특성을 분석하기 위한 구성방정식을 제시하였으며, 반복적인 하중 및 제하 조건에서 응력, 변형률, 흡수된 에너지 및 에너지 흡수 효율을 계산하였다.

준정적인 조건에서 복합재료 폼의 탄성계수, 항복강도 그리고 파단까지의 최대응력과 변형률은 밀도가 증가할수록 증가하는 것으로 알려져 있으며, 동적하중 조건에서의 파괴강

도는 변형률 속도와 더불어 증가하지만 파괴도달 변형률은 감소하는 것으로 보고되었다. 파괴강도의 변형률속도 민감도는 폼의 밀도가 증가할수록 커지는 것으로 보고되었다 [12,13].

본 연구에서는 낙하 시험기를 이용하여 포장재로 사용되는 EPS 폼의 변형률 속도에 따른 압축시험을 수행하였다. 시험에 사용된 폼의 밀도는 $18.5 \sim 37.0\text{kg/m}^3$ 의 것으로서 준정적인 조건과 중고속변형 조건에서 EPS 폼의 응력-변형률 선도를 구하였다. 시험 결과 준정적인 경우에 비하여 고속 변형 시 상당한 강도증가가 나타나는 것이 관찰되었다. EPS 폼의 밀도 변화에 대한 정적 및 중고속 압축변형거동을 측정하였으며 특히 변형률 속도 민감도 분석을 통하여 폼의 압축 거동에 대한 변형률속도 효과를 분석하였다.

2. EPS 폼의 압축 시험

2.1 준정적 및 중고속 압축시험 장치

준정적인 변형거동은 MTS858 시험기를 이용하였으며 고속 변형 거동은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 낙하 시험기를 제작하여 측정하였다. 시험기의 양측에 가이드 레일을 설치하고 임팩터를 베어링으로 연결하여 시편 상부에 수직으로 충격이 가해지도록 하였다. 시험기는 최대 5m/s의 충격속도로 시편을 변형시킬 수 있으며 낙하 질량은 15 ~ 100kg을 사용할 수 있도록 하였다. 원하는 변형률 속도에서 시편이 80%이상 압축될 수 있도록 낙하하는 물체의 중량과 초기 높이를 결정하였다. 시편의 고속 변형 중 발생한 하중과 변형량은 각각 로드셀(load cell)과 리니어 포지션 센서(linear position sensor)를 이용하여 측정하였다.

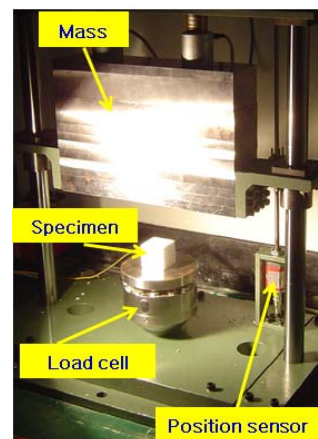


Fig. 1 Drop mass type apparatus developed for high strain rate material testings.

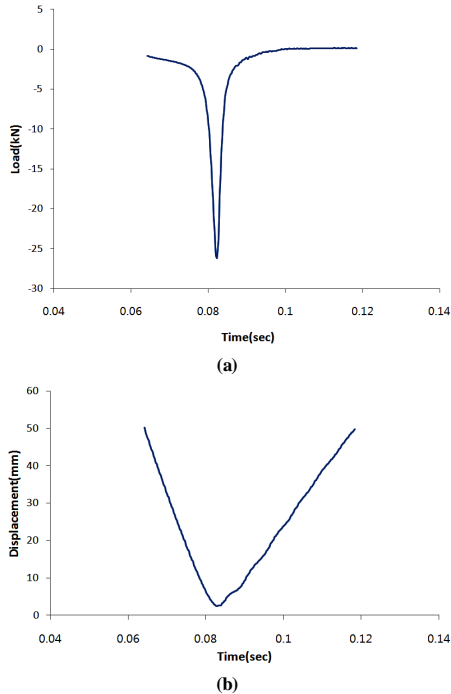


Fig. 2 A set of load and displacement curves measured from the sensors: (a) load history; (b) displacement history.

2.2 EPS 폼의 준정적 및 중고속시험

시험에 사용된 EPS 폼은 전자제품의 포장용으로 사용되는 것으로서 폼의 밀도에 따른 특성을 측정하기 위하여 30P (37.0kg/m³), 40P(27.8kg/m³), 50P(22.2kg/m³), 60P(18.5kg/m³)의 폼이 시험에 사용되었다. 시편의 형상은 단면 50×50mm, 높이 50mm의 블록(block)형태로 제작하였다.

포장재 안의 EPS 폼은 전자제품의 충격시험이 표준시험 방법에 따라 진행되는 동안 최대 수십/s의 변형률 속도로 변형을 하기 때문에 해당 변형률 속도 범위에서의 응력-변형률 선도를 얻을 필요가 있다. 본 연구에서는 준 정적인 시험을 통하여 0.06/s와 1/s에 대한 응력-변형률 선도를 구하였으며, 중고속 시험에서는 25/s와 60/s의 변형률 속도에 대한 응력-변형률 선도를 구하였다. Fig. 2는 30P 폼의 60/s 시험 시 측정된 충격하중과 시편 상부의 압축변위를 보여주고 있다. 이 때 발생한 최대 충격하중은 약 -25kN, 시편 상부의 최대 압축변위는 약 47.56mm로 시편 높이의 약 95%가 압축되었다.

Fig. 3은 동일 시편에서 공칭변형률과 공칭변형률 속도의 관계를 나타내고 있다. 동적인 하중상태에서 시편이 진동하며 변형을 하기 때문에 변형률속도가 진동하는 경향을 보이게 된다. 또한 시편이 압축되면서 공칭변형률속도는 어느 정도 줄어드는 것이 보이지만 평균적으로 일정한 수준에서 유지되는 것을 볼 수 있다. 변형률 속도의 저하는 낙하하는 임팩터의 운동에너지가

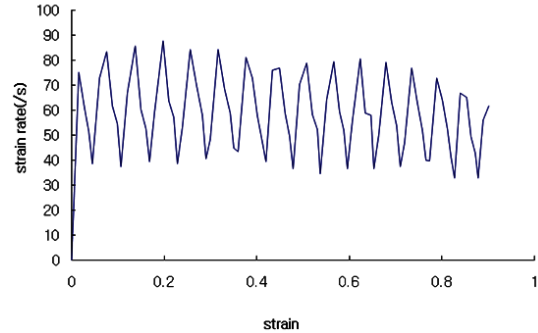


Fig. 3 Engineering strain rate history with respect to engineering strain.

감소하기 때문에 발생하는 현상으로 자유낙하 방식의 시험에서는 공통적으로 발생하게 된다. 이와 같은 변형률 속도의 저하를 최소화하기 위하여 가능한 무거운 중량을 사용하여 시험을 수행할 필요가 있으나 그 영향은 크지 않은 것으로 관찰되었다.

3. 시험 결과

Fig. 4는 30P EPS 폼의 준정적 시험과 고속 압축 시험을 통해 얻어진 응력-변형률 선도를 변형률 속도 0.06/s, 1/s, 25/s, 60/s에 대하여 나타내고 있다. 폼은 변형 초기에 변형률의 증가와 더불어 가파른 강도의 증가를 보이지만 곧바로 셀 벽의 좌굴이 발생하면서 변형률이 크게 증가함에도 재료의 강도는 크게 변하지 않는 완만한 구간을 보인다. 이와 같은 특성으로 인하여 폼 소재가 완충소재로 활발히 사용되고 있다. 그러나 폼이 변형률 0.7이상으로 압축되면 폼의 밀도가 3배 이상 증가하게 되고 강도도 급격하게 증가하여 폼으로 발포되기 전의 원소재 특성과 유사하게 된다.

폼의 발포 배율이 낮을수록, 즉 밀도가 클수록 강도가 커지는 것으로 나타났으며 변형률속도가 0.06/s에서 60/s로 증가할 때 재료의 강도는 변형률 0.4에서 약 1.7배 정도 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 폼의 정확한 충격에너지 흡수 능력을 고려하여 포장 구조물을 설계할 시에는 변형률 속도에 따른 재료의 경화효과를 반드시 고려해야 할 것으로 판단된다.

폼은 압축 변형이 진행되는 동안 밀도가 증가하게 되며 포와송비는 거의 0에 가까운 변형특성을 보이기 때문에 압축에 따른 밀도의 변화는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho(\epsilon, \rho_o) = \frac{\rho_o}{1 - \epsilon} \quad (1)$$

여기서 ρ 는 변형 중 폼의 밀도, ρ_o 는 폼의 변형전 밀도, ϵ 는 공칭변형률을 나타낸다.

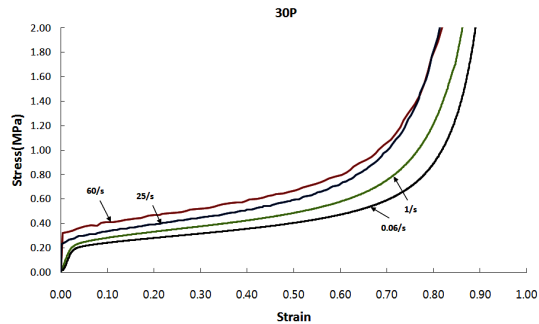


Fig. 4 Stress-strain curves of 30P foam at the indicated strain rates with respect to the foam expansion ratios.

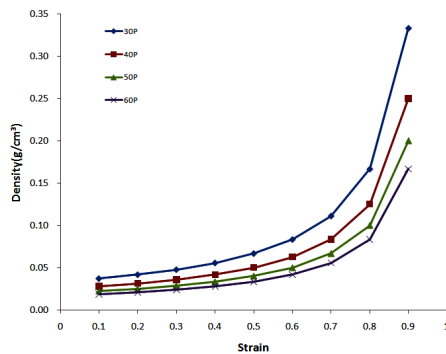


Fig. 5 Variation of density during the compression of specimens at the indicated foam expansion ratios.

식 (1)에 의하여 계산된 각 배율별 폼의 밀도변화는 Fig. 5에 나타난 바와 같다. 폼의 압축에 따른 밀도의 변화 특성은 Fig. 4의 응력-변형률 선도와 매우 유사한 형태를 보이는 것을 알 수 있다. 따라서 충격하중에 의한 EPS 폼의 압축거동은 변형률속도와 밀도의 변화에 따른 특성 변화가 복합적으로 작용하는 것으로 생각된다.

변형률속도에 따른 EPS 폼의 강도변화는 셀의 미세구조와 셀 안에 갇힌 공기의 거동에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 준정적인 변형거동에서는 셀 안에 갇힌 공기가 외부로 빠져나올 시간이 충분하여 공기의 영향은 크지 않은 반면 고속 변형거동에서는 진변형률이 0.3에 도달하기 전까지는 셀 내부의 공기가 밖으로 빠져나오지 못하는 것으로 보고되었다[3].

Fig. 6은 변형률 0.1에서 변형률 속도에 따른 응력을 폼의 배율별로 도시한 것이다. 이때 변형률 속도는 로그 스케일로 도시하였다. 그래프 상에서 추세선으로 표시한 직선의 기울기는 해당 폼의 변형률 속도에 따른 민감도를 나타내고 있다. Fig. 7은 이와 같은 방법으로 구한 EPS 폼의 변형률 속도에 대한 민감도를 다섯 구간의 변형률에 대하여 도시한 것이다.

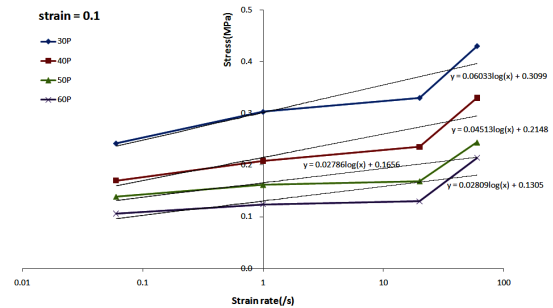


Fig. 6 Stresses-strain rate curves at strain of 0.1.

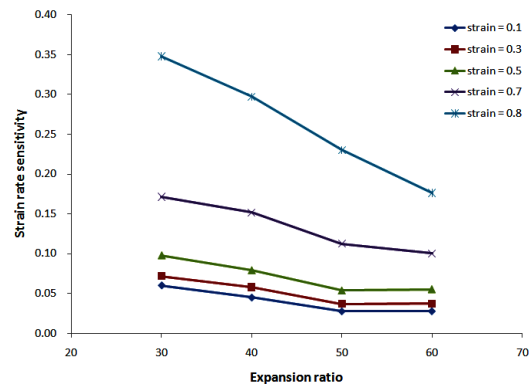


Fig. 7 Variation of strain rate sensitivity with respect to the foam expansion ratio at the indicated strains.

Fig. 7에서 보이는 바와 같이 폼의 배율이 작을수록 변형률 속도에 따른 민감도가 크게 나타나고 있으며, 같은 배율에서는 변형률이 클수록 변형률 속도 민감도가 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 특히 변형률이 0.7 이상으로 증가할 경우 변형률 속도에 따른 민감도는 큰 폭으로 증가하는 것으로 나타났다. 변형률이 클수록 EPS 폼은 원소재의 특성을 보이기 때문에 변형률 속도효과가 크게 나타나지만 작은 변형률에서는 공기의 유동이 주로 영향을 미치기 때문에 변형률속도 효과가 크지 않은 것으로 보인다.

Fig. 7은 밀도가 큰 EPS 폼일수록 변형률 속도 민감도가 크게 나타나는 것을 보여주고 있으며, 밀도에 따른 변형률 속도 경화 효과는 EPP의 micro-inertia 효과로 설명된 바 있다.[3] 즉 밀도가 높은 폼일수록 셀 벽의 관성효과가 크게 나타나게 되며, 이로 인한 강도의 증가가 변형률 속도 경화 효과로 나타나는 것이다. 따라서 EPS 폼의 변형률속도에 따른 구성방정식은 변형률의 증가, 밀도의 증가에 따라 큰 폭으로 증가하는 변형률속도 민감도 특성을 정확하게 표현할 수 있어야 한다.

5. 결 론

본 연구에서는 변형률 속도에 따른 동적 압축특성을 측정할 수 있는 낙하방식의 고속압축시험기를 개발하였으며, 이를 이용하여 전자제품의 포장재로 사용되고 있는 EPS 폼의 동적 재료 특성에 관하여 연구하였다. 준정적 시험과 변형률 속도 25/s, 60/s의 중고속 변형 시험을 실시하고 EPS 폼의 발포 배율과 압축 변형률에 따른 변형률 속도 효과를 비교 분석하였다. EPS폼은 0.06/s에서 60/s로 변형률 속도가 증가할 경우 주 충격에너지 흡수구간에서 약 1.70배의 강도 증가 효과가 관찰되었다. 변형률 속도의 민감도는 폼의 배율이 작을수록 그리고 변형률이 클수록 증가하는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2009년도 경일대학교 신입교원 정착연구지원으로 수행된 결과이며, 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

- 1) Saha M.C., Mahfuz H., Chakravarty U.K., Uddin M., Kabir Md.E. and Jeelani S., "Effect of density, microstructure, and strain rate on compression behavior of polymeric foams," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 406, 2005, pp. 328-336.
- 2) Avalle M., Belingardi G. and Ibba A., "Mechanical models of cellular solids: Parameters identification from experimental tests," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 34, Issue 1, 2007, pp. 3-27.
- 3) Bouix R., Viot P. and Lataillade J.-L., "Polypropylene foam behaviour under dynamic loadings: Strain rate, density and microstructure effects," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, 2009, pp. 329-342.
- 4) Mills N.J., Stampfli R., Marone F. and Bruhwiler P.A., "Finite element micromechanics model of impact compression of closed-cell polymer foams," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 46, 2009, pp. 677-697.
- 5) Ouellet S., Cornin D. and Worswick M., "Compressive response of polymeric foams under quasi-static medium and high strain rate conditions," *Polymer Testing*, Vol. 25, No. 6, 2006, pp. 731-743.
- 6) Avalle M., Belingardi G. and Montannini R., "Characterization of polymeric structural foam under compressive impact loading by means of energy-absorption diagram," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, No. 5, 2001, pp. 455-472.
- 7) Maea H., Omiyab M. and Kishimoto K., "Effects of strain rate and density on tensile behavior of polypropylene syntactic foam with polymer microballoons," *Materials Science & Engineering A*, Vol. 477, 2008, pp. 168-178.
- 8) Masso-Moreu Y. and Mills N.J., "Impact compression of polystyrene foam pyramids," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 28, Issue 6, 2003, pp. 653-676.
- 9) Kim J.S., Huh H., Lee K.W., Ha D.Y., Yeo T.J. and Park S.J., "Evaluation of dynamic tensile characteristics of polypropylene with temperature variation," *International Journal of Automotive technology*, Vol. 7, No. 5, 2006, pp. 571-577.
- 10) 최기상, 강우종, 김기훈, 김성근, "EPP 범퍼 폼의 고속대 변형 특성 연구," 한국자동차공학회는문집, Vol. 17, No. 4, 2009, pp. 118-125.
- 11) 정광영, 전성식, "동일 충격 에너지 조건하에서 다공질 고분자의 충격거동에 관한 연구," 한국복합재료학회지, 제22권 제4호, 2009, pp. 27-32.
- 12) Ozturk U.E. and Anlas G., "Energy absorption calculations in multiple compressive loading of polymeric foams," *Materials & Design*, Vol. 30, Issue 1, 2009, pp. 15-22.
- 13) Subhash G., Liu Q., Gao Xin-Lin, "Quasistatic and high strain rate uniaxial compressive response of polymeric structural foams," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, 2006, pp. 1113-1126.
- 14) Subhash G., "Quasistatic and dynamic crushability of polymeric foams in rigid confinement," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 36, 2009, pp. 1303-1311.