

동일 충격 에너지 조건에서의 발포 폴리우레탄의 충격특성에 관한 연구

M. B. Munshi* · 정광영* · 최영종** · 전성식†

Crashworthy behaviour of rigid polyurethane foam under constant impact energy

Mahbubul Basit Munshi, Kwang Young Jeong, Young Jong Choi and Seong Sik Cheon

Key Words : Crashworthiness (충돌에너지 흡수), Polyurethane foam (발포폴리우레탄), Constitutive model (구성방정식)

Abstract

Based on experimental impact testing data, due to changing of velocity and mass of the impactor simultaneously under constant impact energy, crashworthiness of polyurethane foam has been observed. Dynamic tests were carried out in an instrumented impact-testing machine. Also, modified Sherwood-Frost model was proposed to investigate the crashworthy behaviour of rigid polyurethane foam under the condition of constant impact energy.

1. 서 론

다공성 재료는 충격시 에너지 흡수, 전자기 차폐, 흡음 및 소음 진동 방지 등의 목적으로 자동차, 전자제품 등 여러 분야에서 응용되고 있다. 현재 다공성 재료는 크게 금속형과 고분자계로 나눌 수 있으며, 금속형은 제조방법에 따라 개방형과 폐쇄형으로 이루어져있다. 이에 반해 고분자계 다공성 재료는 주로 반응사출성형(RIM, Reaction Injection Moulding)으로 제조된다. 특히 공업적으로 다양하게 활용되고 있는 발포 폴리우레탄 (Polyurethane Foam)은 isocyanate 와 polyol 의 반응시 생겨나는 발포반응에 의해 제조되며 역시 구조에 따라 개방형과 폐쇄형으로 나눌 수 있다. 발포 폴리우레탄은 대부분 이 두가지 형이 공존하며, 개방형이 많이 분포되면

flexible 이란 표현을 붙여서 flexible 발포 우레탄이라 일컬어지고, 폐쇄형이 상대적으로 많이 분포하게되면, rigid 발포 우레탄이라 불려지고 있다 [1]. Shim 등 [2]은 2-4 m/s 의 범위에서 발포 폴리우레탄에 대한 충격시험을 수행하였고 Meguid 등 [3]은 발포 알루미늄에 대한 통계적 유한요소모델을 제시하였다. Kim 등 [4,5]은 nano-indentation 과 유한요소해석을 수행하여 발포 금속 구조의 물성에 대해 고찰하였다. Avallé 등 [6]은 에너지흡수선도와 효율선도를 이용하여 발포고분자의 에너지 흡수특성을 분석하였다. Rusch [7]는 압축응력과 변형률의 관계를 다공구조의 초기 압축강성과 변형률 함수로 나타내는 방법을 제시하였다. Meincke 과 Schwaber [8] 는 다항식을 이용하여 변형률함수를 제안하고, 다공구조의 초기 강성을 변형률과 변형률 속도를 고려한 함수로 제안하였다. Sherwood 와 Frost [9]는 발포 폴리우레탄의 압축 특성을 나타내는 구성방정식의 수정된 형상함수를 제안하였다. Su 등 [10,11]은 Tam 과 Calladine 의 시험 [12] 을 이용하여 충격현상에 있어서 주요한 두개의 인자, 즉 관성의 영향과 변형률 속도

† 교신저자, 국립공주대학교 기계자동차공학부

E-mail : sscheon@kongju.ac.kr

TEL : (041)550-0261 FAX : (041)550-9123

* 국립공주대학교 기계자동차공학부

** (주) 이노윌

영향에 관하여 고찰하였다. Langseth 등 [13]은 알루미늄 압출재에 관하여 충격체의 질량을 고정하고 속도에 변화를 가하는 또한 그 반대의 충격시험을 수행하였다. 본 연구에서는 발포 폴리우레탄의 구성방정식을 결정하기 위하여 기존의 Sherwood-Frost 모델에 Impulse-momentum 이론[14]을 접목시킨 새로운 수정 모델을 제시하였다. 또한 동일 충격 에너지 조건에서의 발포 폴리우레탄의 충격시험을 수행하고, 새로운 모델의 결과와 비교, 분석하였다.

2. 수정된 Sherwood-Frost 모델

2.1 Coupled 방정식

Sherwood-Frost model 은 온도에 따른 특성과 상대밀도에 따른 특성을 고려하여 변형률이 densification 에 도달하지 않았을 선형 및 plateau 구간에 대한 구성방정식을 다음과 같이 제시하였다.

$$\sigma = H(T)D(\rho) \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right)^{(a+b\epsilon)} \left(\sum_{n=0}^{10} A_n \epsilon^n \right) \quad (1)$$

여기서 $H(T)$ 는 온도에 따른 함수, $D(\rho)$ 는 시편의 상대밀도에 따른 함수로 정의된다. A_n 은 형상함수의 계수값들이 된다. a 및 b 는 재료상수이고, $\dot{\epsilon}_0$ 는 가장 낮은 상태의 변형률 속도 (Strain rate)를 나타낸다.

식 (2)에서 변형률 속도와 충격체의 속도와와의 관계를 보여주고 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{1}{L} \frac{d\delta}{dt} = \frac{v}{L} \quad (2)$$

여기서 L 은 시편의 높이, δ 는 시편의 변형량, v 는 충격체의 transient velocity 를 나타낸다. 식 (1)은 정적 시험과 같이 변형률 속도가 알려진 경우에는 적용이 용이하지만, 충돌과 같이 시험중 변형률 속도가 계속 변화하는 경우에는 사용하기 곤란하다. 이에 따라, 본 연구에서는 식 (3)과 같은 Impulse-momentum 이론을 새롭게 접목시켜, 충돌시 매 시간마다 변화하는 변형률 속도를 예측하였다.

$$mv_i + \sum (\sigma_i S) \Delta t = mv_{i+1} \quad (3)$$

여기서 m 은 충격체의 질량, S 는 시편의 단면적을 나타낸다. 식 (1)과 (3)은 couple 되 있으며, 따라서 매 순간마다 식 (1)을 풀어서, 응력을 구한 다음, 구해진 응력을 식 (3)에 넣고 다음단계의 충격체 속도를 구한 다음, 식 (2)를 이용하여 변형률 속도를 구한 후, 다시 식 (1)에 대입하여 다음단계의 응력을 구하는 계산이 필요하다. 이와 같이 iterative 한 과정을 거치게 되면, 시편의 충돌과괴시 응력-변형률 선도를 구할 수 있게 된다. 본 과정이 Fig. 1 에 요약되어져 있다.

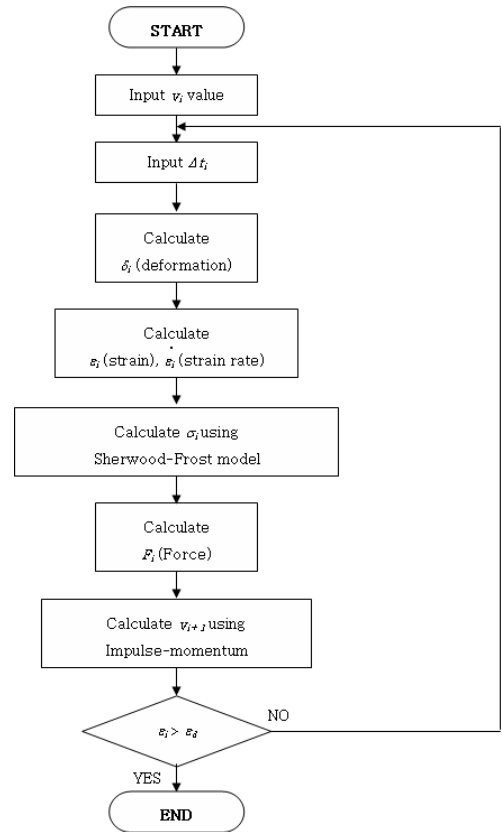


Fig. 1 Flowchart of solving coupled equation

2.2 준정적 시험을 통한 계수의 선정

MTS 810 (최대 하중: 100 kN)을 이용하여 상온에서 준정적 압축시험을 수행하였다. 밀도가 64 kg/m^3 이고, rigid형의 발포 폴리우레탄(주식회사 라컴텍에서 공급)에 대하여 높이 40mm, 지름 42mm의 원통 형상의 시편을 준비하였다. Table 1에 본 시편에서 사용된 발포되지 않은 고체상태의 폴리우레탄의 기계적 물성을 보여주고 있다.

Table 1 Properties of unfoamed polyurethane[15]

Density (kg/m^3)	Young's modulus (MPa)
1200	45

본 발포 폴리우레탄은 약 5% 정도내에서 상대 밀도의 불균일이 존재하는 것을 알 수 있었다. 본 시험은 변형률이 0.9에 도달할 때까지 압축을 가하였고, 시험은 변형률 속도가 0.001 s^{-1} 및 0.1 s^{-1} 의 두가지에 대하여 수행하였다. 시험결과는 Fig. 2에서 나타나 있다.

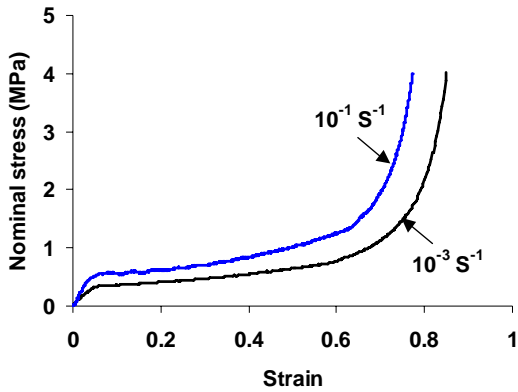


Fig. 2 Stress-strain curves under quasi-static test

Fig. 2 를 통하여, 본 발포 폴리우레탄의 경우에 변형률 속도에 따른 기계적 특성이 변화되는 것을 확인할 수 있었으며, 이에 따라 식 (1)에서 필요한 계수값 및 함수의 형태를 다음과 같이 결정하였다. 형상함수의 계수값은 준정적 시험결과에 가장 잘 맞도록 regression 을 수행하였다[9].

$$\rho = 67 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{\epsilon} = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$$

$$H(T) = 1, \text{ 단 } T = 23^\circ\text{C}$$

$$D(\rho) = 0.046\rho - 2.059, \text{ 단, } 60 \leq \rho \leq 97$$

$$a = 0.05173$$

$$b = 0.001553$$

3. 충격 시험

3.1 논문의 각 절 제목

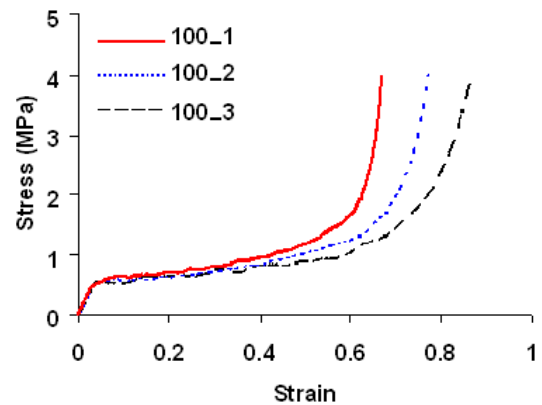
낙하식 충격시험기 (Instron Dynatup 9250 HV)를 사용하여 시험을 수행하였다. 시험은 두개의 초기 충격에너지 수준, 즉 100 J 과 200 J 을 선택하였다. 또한 각각 동일한 에너지 수준에서 충격체의 질량과 속도에 변화를 세가지로 주어 시험을 수행하였다. 이에 따라, 충격체의 질량은, 26.5 kg, 16.5 kg 와 7 kg 이 사용되었고, 100 J 의 경우, 각각 충격체의 속도는 순서대로 2.75 m/s, 3.50 m/s 와 5.35 m/s 가 되었다. 또한, 200 J 의 경우, 충격체의 속도는 같은 질량에 대해 3.85 m/s, 5.00 m/s 와 7.60 m/s 로 맞추었다. Table 2 에 시험결과가 정리되어져 있다. 시편

의 ID 에 있어서, 처음 3 자리 수자는 초기입력에너지를 의미하고, 마지막 한자리수는 충격체의 속도수준을 나타낸다.

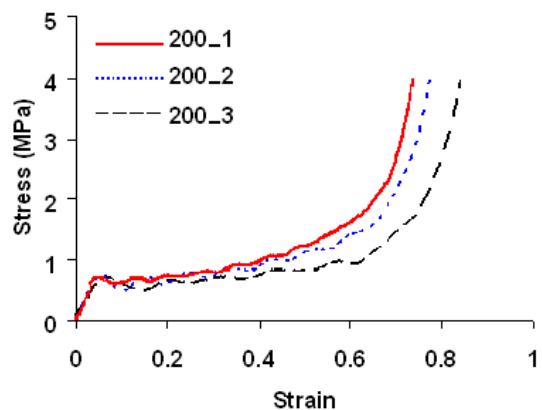
Table 2 Summarisation of impact test

ID	Incident velocity (m/s)	Specimen density (kg/m ³)	Absorbed Energy (J)
100_1	2.75	67	27.78
100_2	3.52	63	29.37
100_3	5.40	61	31.12
200_1	3.88	67	31.09
200_2	4.98	64	32.48
200_3	7.73	60	33.12

Fig. 3 은 충격시험으로부터 구한 응력-변형률 선도를 보여주고 있다.



(a)



(b)

Fig. 3 Stress-strain curves: (a) At 100J, (b) at 200J

입력에너지가 같은 경우 plateau 응력은 거의 변화하지 않는 것을 볼 수 있었으나, 충돌속도가 증가할수록 ODS (Onset of Densification Strain)가 늘어나는 것을 볼 수 있었고 이는 충격에너지 흡수량의 증가를 의미하게 된다. 본 연구에서는 ODS 의 결정을 위해 접선을 그어 접선의 교차점을 선택하

는 방법을 따랐다 [16,17]. 그러나, 접선을 긋는 방법이 연구자에 따라 달라질 수 있으며, 이에 따라 같은 결과에 대해서도 다른 ODS 를 선택할 가능성이 있다. 따라서, 상대적으로 객관적인 ODS 값을 선택하기 위하여 Fig. 4 와 같이 ODS 의 최소 및 최대를 찾아서 그 평균을 취하였다.

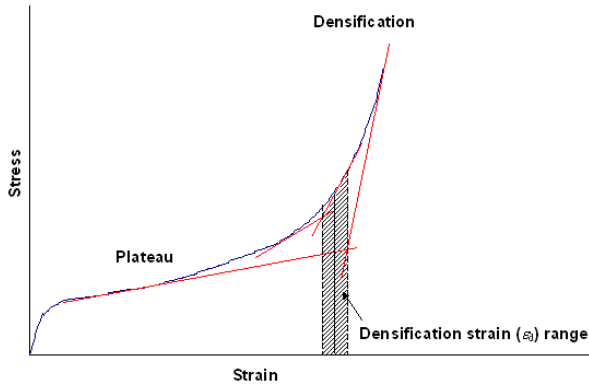


Fig. 4 Determination of ODS

Table 3 에는 시험결과를 본 방법에 의거하여 결정된 ODS 가 정리되어져 있다. 같은 충격에너지를 입력하였더라도, 충돌속도가 L1 에서 L3 로 높을수록 ODS 가 커지는 것을 볼 수 있었다.

Table 3 Onset of densification strain

Impact energy (J)	ODS (%)		
	L1	L2	L3
100	60.2	64.5	71.1
200	61.5	66.1	72.2

Fig. 5 에서는 couple 된 방정식을 이용하여 transient velocity 를 구한 결과를 시험치와 비교하였고, 결과가 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다.

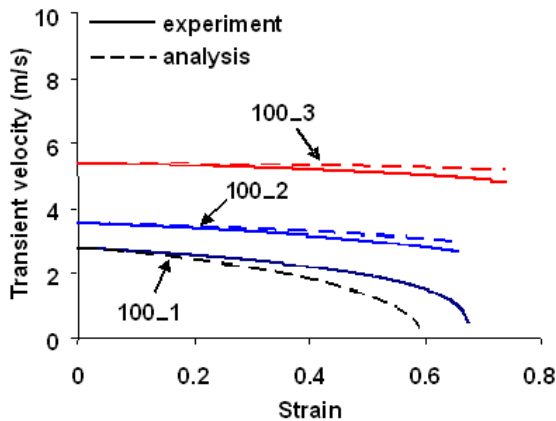


Fig. 5 Determination of ODS

Fig. 6 에서는 수정된 Sherwood-Frost 모델과 충

격시험결과로부터 얻은 응력-변형률 선도를 비교하였다.

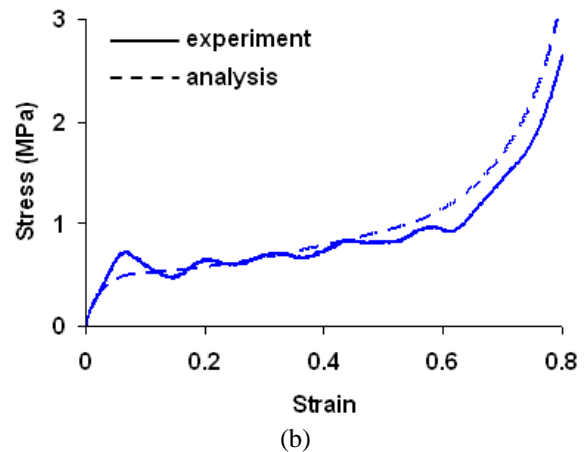
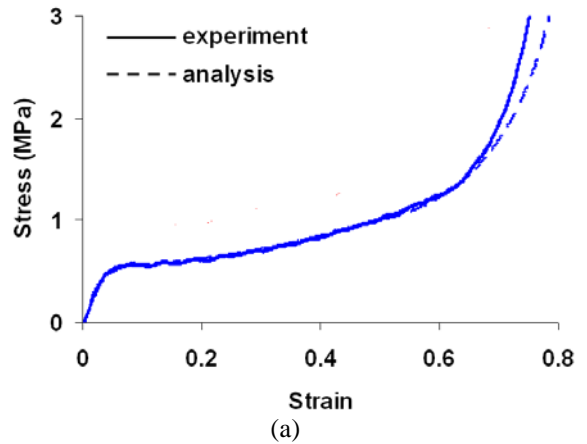


Fig. 6 Stress-strain curves: (a) 100_2, (b) 200_3

응력-변형률 선도도 상대적으로 우수하게 일치하는 것을 볼 수 있었다. 충돌속도가 높아질수록 시험에서는 oscillation 이 나타나지만, 해석상으로는 나타나지 않았다. 그러나, 값들은 근사적으로 일치하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 7 에는 응력-변형률 선도로부터 에너지 흡수율을 계산한 결과가 나타났다.

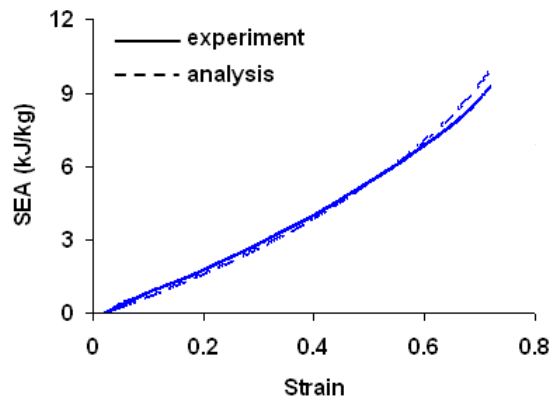


Fig. 7 Specific energy absorption curves (200_3)

이와 같이 transient velocity, 응력-변형률 선도 및

에너지 흡수 선도에 대한 실험값과 해석값을 비교해 보면, 본 연례서 새롭게 제시된 수정된 Sherwood-Frost 모델이 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다

4. 결 론

본 연구에서는 발포 폴리우레탄의 충돌시 거동 특성을 이해하기 위하여 impulse momentum 이론을 접목한 수정된 Sherwood-Frost 모델을 제시하였다. 이를 통하여 충돌시 시편의 변형거동을 시간에 따라 예측 가능 하였고, 시험치와 비교한 transient velocity, 응력-변형률 선도 및 에너지 흡수 선도가 우수하게 일치하는 것으로 나타났다. 또한 발포 우레탄은 초기 입력되는 충격에너지는 같다 하더라도, 충격 속도가 높아지면, ODS 가 증가하여 에너지 흡수를 높이는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 NURI 사업으로 선정된 충남자동차·부품 산업 인력양성 사업단의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

(1) Szycher, M., 1999, *Szycher's Handbook of Polyurethanes Boca Raton*: CRC press.
 (2) Shim, V.P.W., Tu, Z.H. and Lim, C.T., 2000, "Two-dimensional Response of Crushable Polyurethane Foam to Low Velocity Impact," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.24, pp. 703-731.
 (3) Meguid, S.A., Cheon, S.S. and El-Abbasi, N., 2002, "FE Modelling of Deformation Localization in Metallic Foams," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.38, pp.631-643.
 (4) Kim, A., Hasan, M.D.A., Cheon, S.S. and Lee, H.J., 2005, "The Constitutive Behavior of Metallic Foams using Nanoindentation Technique and FE Modelling," *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, pp.1050-1055.
 (5) Kim, A, Tunvir, K., Jeong, G.D. and Cheon, S.S., 2006, "A Multi-cell FE-model for Compressive Behaviour Analysis of Heterogeneous Al-alloy Foam," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol.14, pp.933-945.
 (6) Avalle, M., Belingardi, G. and Montanini, R., 2001, "Characterization of Polymeric Structural Foams under Compressive Impact Loading by Means of Energy Absorption Diagram," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.25, pp.455-472.
 (7) Rusch, K.C. 1969, "Load-compression Behaviour of Flexible Foams," *J. Applied Polymer Science*, Vol.13,

pp.2297-2311.

(8) Meinecke, E.A. and Schwaber, D.M., 1970, "Energy Absorption in Polymeric Foams," *J. Applied Polymer Science*, Vol.14, pp.2239-2248.
 (9) Sherwood, J.A. and Frost, C.C., 1992, "Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam Under Impact Loading," *Polymer Engineering and Science*, Vol.32, pp.1138-1146.
 (10) Su, X.Y., Yu, T.X. and Reid, S.R., 1995, "Inertia-sensitive Impact Energy-absorbing Structures Part I: Effects of Inertia and Elasticity," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.16, pp.651-672.
 (11) Su, X.Y., Yu, T.X. and Reid, S.R., 1995, "Inertia-sensitive Impact Energy-absorbing Structures Part II: Effect of Strain-rate," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.16, pp.673-689.
 (12) Tam, L.L. and Calladine, C.R., 1991, "Inertia and Strain-rate Effects in a Simple Plate-structure Under Impact Loading," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.11, pp. 349-377.
 (13) Langseth, M., Hopperstad, O.S. and Berstad, T., 1999, "Crashworthiness of Aluminium Extrusions: Validation of Numerical Simulation, Effects of Mass Ratio and Impact Velocity," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 22, pp.829-854.
 (14) Beer, F.P. and Johnston Jr., E.R., 1981, *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, McGraw-Hill.
 (15) Gibson, L.J. and Ashby, M.F., 1998, *Cellular Solids: Structure and Properties*, Pergamon Press.
 (16) Paul, A. and Ramamurty, U., 2000, "Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminium Foam," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 281, pp.1-7.
 (17) Lopatnikov, S.L., Gama, B.A. and Gillespie Jr J.W., 2007, "Modeling the Progressive Collapse Behaviour of Metal Foams," *Int. J. Impact Eng.*, Vol.34, pp.587-595.