

論文

동일 충격 에너지 조건하에서 다공질 고분자의 충격거동에 관한 연구

정광영*, 전성식*+

Crashworthy behaviour of cellular polymer under constant impact energy

Kwang Young Jeong*, Seong Sik Cheon*+

ABSTRACT

Characterisation of the stress-strain relationship as well as crashworthiness of cellular polymer was investigated under constant impact energy with different velocities, considering inertia and strain rate effects simultaneously during the impact testing. Quasi-static and impact tests were carried out for two different density (64 kg/m^3 , 89 kg/m^3) cellular polymer specimens. Also, the equations, coupled with the Sherwood-Frost model and the Impulse-Momentum theory, were employed to build the constitutive relation of the cellular polymer. The nominal stress-strain curves obtained from the constitutive relation were compared with results from impact tests and showed to be in good agreement.

초 록

본 연구에서는 충돌속도가 다르지만, 총 충돌에너지는 동일하게 유지한 상태에서 충돌을 가했을 때 발포 고분자의 응력-변형률 관계와 충돌에너지 흡수 특성에 관하여 고찰하였다. 이는 충돌시 관성과 변형률 속도에 변화를 주어 재료의 반응거동 및 특성을 파악하기 위함이다. 두가지 다른 밀도(64 kg/m^3 , 89 kg/m^3)를 갖는 발포고분자시편에 대한 준정적시험과 충돌시험이 수행되었다. 또한 Sherwood-Frost 모델과 임펄스 모멘텀 이론의 두가지가 연성된 방정식을이용하여 발포고분자의 구성방정식으로 제안하였다. 제안된 구성방정식을 이용하여, 응력변형률 선도를 구하고, 충돌시험결과와 비교하여, 본 구성방정식이 우수하게 결과를 예측할 수 있는 것으로 나타났다.

Key Words : 충돌에너지흡수(crashworthiness), 다공질 고분자(cellular polymer), 구성방정식(constitutive model), 충격 에너지(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 다공질 고분자는 주로 반응사출성형(RIM, Reaction Injection Moulding)으로 제조된다. 특히 공업적으로 다양하게 활용되고 있는 발포폴리우레탄 (Polyurethane Foam)

은 아이소시아네이트 (isocyanate)와 폴리올 (polyol)의 반응시 생겨나는 발포반응에 의해 제조되며 역시구조에 따라 개방형과 폐쇄형으로 나눌 수 있다. 발포 폴리우레탄은 대부분이 두 가지 형이 공존하며, 개방형이 많이 분포되면 플렉서블 (flexible) 발포우레탄이라 일컬어지고, 폐쇄형이 상대적으로 많이분포하게되면, 리지드 (rigid) 발포 우레탄이라 불려지고 있다[1]. 다공성 고분자는 특성상 충격흡수부재로 이용되고 있으며, 자동차 범퍼와크래시패드, 시트 및 내장 트림, 전자제품 패키징 등 다분야에 널리 사용되고 있다. Shim 등[2]은 2-4 m/s의 범위에서 발포 폴리우레

* 국립공주대학교 공과대학 기계자동차공학부

*+ 국립공주대학교 공과대학 기계자동차공학부, 교신저자(E-mail:sscheon@kongju.ac.kr)

탄에 대한 충격시험을 수행하였고 Meguid 등[3]은 발포 알루미늄에 대한 통계적 유한요소모델을 제시하였다. Kim 등[4,5]은 나노압입 (nano-indentation)과 유한요소해석을 수행하여 발포 금속 구조의 물성에 대해 고찰하였다. Avelle 등[6]은 에너지흡수선도와 효율선도를 이용하여 발포고분자의 에너지 흡수특성을 분석하였다. Rusch [7]는 압축응력과 변형률의 관계를 다공구조의 초기 압축강성과 변형률 함수로 나타내는 방법을 제시하였다. Meincke와 Schwaber[8]는 다항식을 이용하여 변형률함수를 제안하고, 다공구조의 초기 강성을 변형률과 변형률 속도를 고려한 함수로 제안하였다. Sherwood와 Frost[9]는 발포 폴리에탄의 압축특성을 나타내는 구성방정식의 수정된 형상함수를 제안하였다. Su 등[10,11]은 Tam과 Calladine의 시험[12]을 이용하여 충격현상에 있어서 주요한 두 개의 인자, 즉 관성의 영향과 변형률 속도 영향에 관하여 고찰하였다. Langseth 등[13]은 알루미늄 압출재에 관하여 충격체(Striker)의 질량을 고정하고 속도에 변화를 가하는 또한 그 반대의 충격시험을 수행하였다. 본 연구에서는 발포 폴리에탄의 구성방정식을 결정하기 위하여 기존의 Sherwood-Frost 모델에 충격량-운동량 (Impulse-momentum) 이론[14]을 접목시킨 새로운 수정 모델을 제시하였다. 또한 동일 충격 에너지 조건에서의 발포 폴리에탄의 충격시험을 수행하고, 새로운 모델의 결과와 비교, 분석하였다.

2. 수정된 Sherwood-Frost 모델

2.1 Coupled equation

Sherwood-Frost model은 온도에 따른 특성과 상대밀도에 따른 특성을 고려하여 변형률이 덴시피케이션 (densification)에 도달하지 않았을 선형 및 플래토 (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 형상함수 (Shape function)의 계수값들이 된다. a 및 b 는 재료상수이고, $\dot{\epsilon}_0$ 는 가장 낮은 상태의 변형률 속도 (Strain rate)를 나타낸다. 특히 고분자의 경우 철강재에 비해 상대적으로 변형률속도에 민감한 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 변형률속도가 가장 낮을 때 응력-변형률 선도를 기준으로 선정하는 것이 필요하다. 다음 식에서는 변형률 속도와 충격체의 속도와의 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 과도속도 (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 충격량-운동량이론을 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.

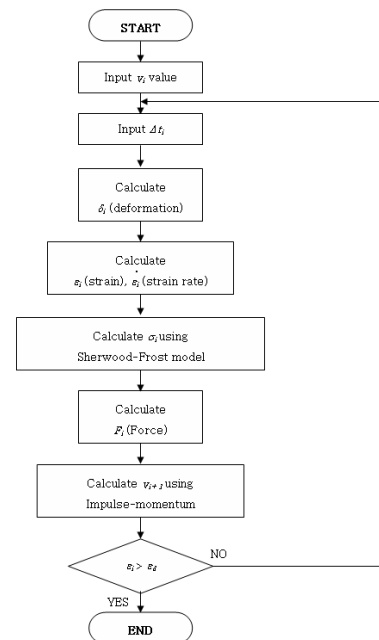


Fig. 1 Flowchart of solving coupled equation.

식 (1)과 (3)은 연성 (couple)되어 있으며, 따라서 매 순간마다 식 (1)을 풀어서, 응력을 구하고, 구해진 응력을 식 (3)에 넣고 다음단계의 충격체 속도를 구한다음, 식 (2)를 이용하여 변형률 속도를 구한다음, 다시 식 (1)에 대입하여 다음단계의 응력을 구하는 계산이 필요하다. 이와 같이 반복적인 과정을 거치게 되면, 시편의 충돌파괴시 응력-변형률 선도를 구할수 있게 된다. 일련의 본 과정이 Fig. 1에 요약되어 있다.

2.2 준정적 시험을 통한 계수의 선정

MTS 810 (최대 하중: 100 kN)을 이용하여 상온에서 준정적 압축시험을 수행하였다.

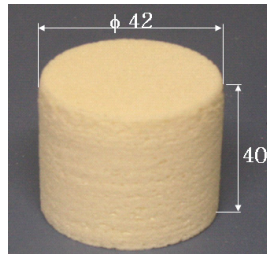


Fig. 2 Polyurethane foam specimen.

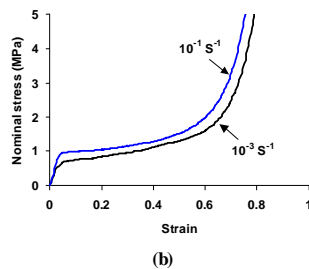
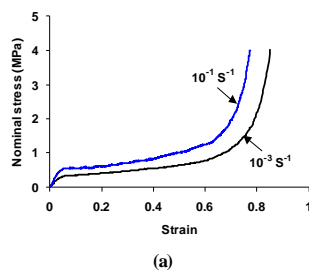


Fig. 3 Stress-strain curves of PU foam under quasi-static test: (a) Density: 64kg/m³, (b) 89 kg/m³.

두 가지 밀도, 즉 64 kg/m³, 89 kg/m³에 대한 리지드형 발포 폴리우레탄(L社 공급)에 재료로 높이 40mm, 지름 42mm의 원통형상의 시편을 준비하였다 (Fig. 2참조). Table 1에 본 시편에서 사용된 발포되지 않은 고체상태의 폴리우레탄의 기계적 물성을 보여주고 있다. 본 발포 폴리우레탄은 약 5% 정도내에서 상대밀도의 불균일이 존재하는 것을 확인할 수 있었다. 본 시험은 변형률이 0.9에 도달할 때까지 압축을 가하였고, 0.001 s⁻¹ 및 0.1 s⁻¹의 두 변형률 속도에 대하여 수행하였다. 시험결과는 Fig. 3에 나타나 있다. Fig. 3을 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. 또한 두 종류의 발포 폴리우레탄이 있으나, Sherwood-Frost의 제안으로 두 개중 낮은 밀도의 시편과 낮은 변형률속도를 기준으로, 계수값을 선정하였으며, 형상함수의 계수값은 준정적 시험결과에 가장 잘 맞도록 회기(regression)를 수행하였다[9]. 이에 따라, 밀도 (ρ)는 67 kg/m³,

Table 1 Properties of unfoamed polyurethane[15]

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

Table 2 Coefficients of the shape function

n	A_n	n	A_n
0	0.01	6	-57375
1	13	7	73827
2	-197	8	-55839
3	1687	9	21937
4	-8656	10	-3089
5	27942	-	-

기준변형률속도는 10⁻³ s⁻¹으로, $H(T)$ 는 1, $D(\rho)$ 는 밀도가 60에서 97사이일 때 0.046 ρ -2.059으로 정하고 이에 따른 a 와 b 는 각각 0.05173과 0.00155로 선정하였다. Table 2에서는 선정된 형상함수의 계수값을 나타내고 있다.

3. 충격시험

낙하식 충격시험기 (Instron Dynatup 9250 HV)를사용하여 시험을 수행하였다. 시험은 두개의 초기충격에너지 수준, 즉 100 J과 200 J을 선택하였다. 또한 각각 동일한 에너지 수준에서 충격체의 질량과 속도에 변화를 세가지로 주어 시험을 수행하였다. 이에 따라, 충격체의 질량은, 7 kg, 16.5 kg, 26.5 kg이 사용되었고, 100 J의 경우, 각각 충격체의 속도는 순서대로 5.35 m/s, 3.50 m/s와 2.75 m/s가 되었다. 또한, 200 J의 경우, 충격체의 속도는 같은 질량에 대해 7.60 m/s, 5.00 m/s와 3.85 m/s로 맞추었다. Table 3에 시험결과가 정리되어져 있다. 시편의 ID에 있어서, 처음 세자리 수자는 초기입력에너지를 의미하고, 가운데 기호는 L의 경우 64kg/m³, H는 89 kg/m³의 밀도를 나타내며, 마지막 한자리 숫자는 충격체의 속도수준을 나타낸다.

Fig. 4는 충격시험으로부터 구한 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 입력에너지가 같은 경우 플레토응력은 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 ODS의 결정을 위해 접선을 그어 접선의 교차점을 선택하는 방법을 따랐다[16,17]. 그러나, 접선을 긋는 방법이 연구자에 따라 달라질 수 있으며, 이에 따라 같은 결과에 대해서도 다른 ODS를 선택할 가능성이 있다. 따라서, 상대적으로 객관적인 ODS값을 선택하기 위하여 Fig. 5와 같이 ODS의 최소 및 최대를 찾아서 그 평균을 취하였다[18].

Table 4에는 시험결과를 본 방법에 의거하여 결정된 ODS가 정리되어져 있다. 같은 충격에너지를 입력하였더라도, 충돌속도가 Level 1에서 Level 3으로 높아질수록 ODS가 증가하는 것을 볼 수 있었다.

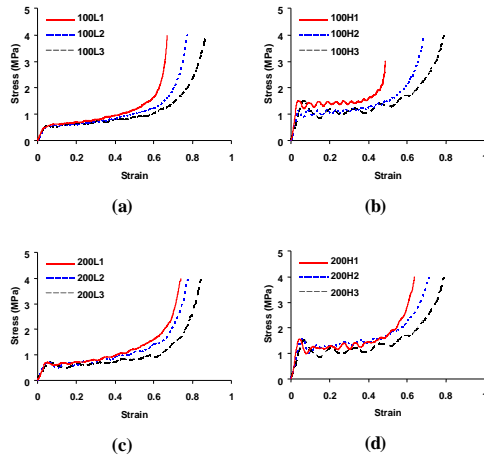


Fig. 4 Stress-strain curves of impact tests: (a) Incident energy: 100J, specimen density: 64kg/m³, (b) 100J, 89 kg/m³, (c) 200J, 64 kg/m³, (d) 200J, 89 kg/m³.

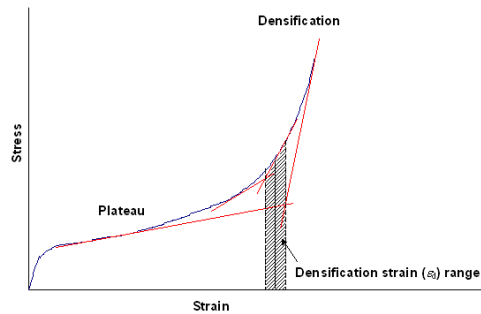


Fig. 5 Determination of ODS.

Table 3 Summarisation of impact test

Specimen ID	Incident velocity (m/s)	Specimen density (kg/m ³)	Absorbed energy (J)
For 100 J of incident impact energy			
100L1	2.75	67	27.78
100L2	3.52	63	29.37
100L3	5.40	61	31.12
100H1	2.73	97	34.39
100H2	3.52	84	37.24
100H3	5.60	93	45.36
For 200 J of incident impact energy			
200L1	3.88	67	31.09
200L2	4.98	64	32.48
200L3	7.73	60	33.12
200H1	3.86	88	41.61
200H2	5.00	94	44.22
200H3	7.71	78	45.90

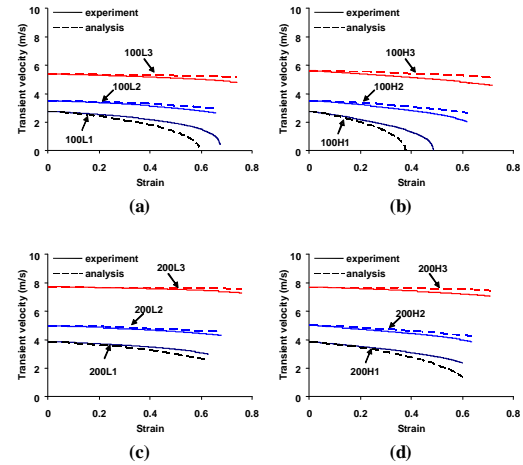


Fig. 6 Transient velocity curves of impact tests: (a) Incident energy: 100J, specimen density: 64kg/m³, (b) 100J, 89 kg/m³, (c) 200J, 64 kg/m³, (d) 200J, 89 kg/m³.

Table 4 Onset of densification strain

Incident energy (J)	ODS (%)		
	Level 1	Level 2	Level 3
64 kg/m ³	100	60.2	64.5
	200	61.5	66.1
89 kg/m ³	100	44.9	56.7
	200	54.9	58.8

Fig. 6에서는 연성방정식을 이용하여 과도속도를 구한 결과를 시험치와 비교하였고, 결과가 상당히 잘 일치하는 것을 볼 수 있었다. Fig. 7에서는 수정된 Sherwood-Frost 모델과 충격시험결과로부터 얻은 응력-변형률 선도를 비교하였다. 본 해석결과와 준정적 상태의 응력-변형률 선도를 기준으로 변형률 속도가 증가되는 상태의 응력-변형률 선도를 예측하기 때문에 플레토 구간에서 진동이 나타나지 않으나, 충돌시험에서는 응력파의 전달과 반사 등에 의해 진동이 보여진다. 그러나, 진동 성분을 뺀 그래프의 개형은 충돌시험이나 본 해석에서 나온 그래프가 근사적으로 우수하게 일치하는 것으로 사료되었다. 그러나, 낮은 충격속도에서의 경우, 변형률이 증가할수록 실험과 본 해석간의 과도속도 차이가 커지는 것을 볼 수 있었다. 특히 시편의 상대밀도가 작을수록 그 차이는 최대 약 20% 정도 나타났다. 본 해석에 사용되는 알고리즘은 한번 에러가 발생하면, 계속 그 차이가 축적되는 방식이어서, 에러가 커질 수 있으며, 향후 이에 따른 보완이 필요한 것으로 사료되고 있다. 충돌속도가 높아질수록 시험에서는 진동이 더 크게 발생하는 것으로 나타났다. 그러나, 본 해석은 시험결과를 우수하게 예측할 수 있는 것으로 볼 수 있었다. Fig. 8에는 응력-변형률 선도로부터 에너지 흡수율을 계산한 결과가 나타나있다.

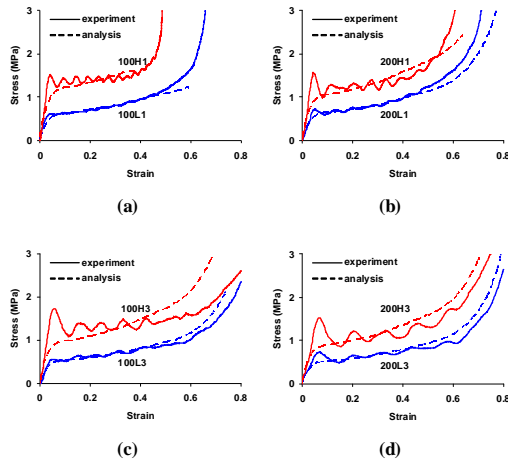


Fig. 7 Calculated and experimental stress-strain response of PU foam under impact loading: (a) Incident energy: 100J, low velocity, (b) 200J, low velocity, (c) 100J, high velocity, (d) 200J, high velocity.

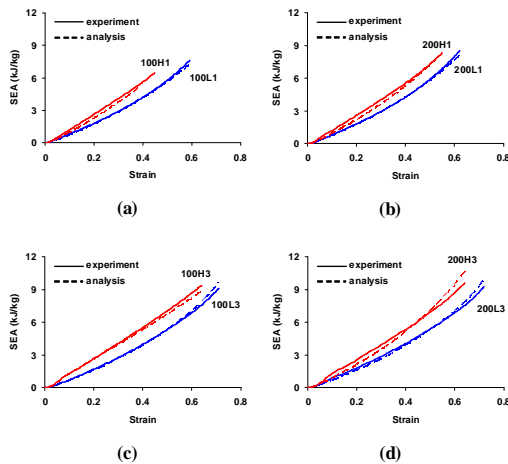


Fig. 8 Comparison between calculated and experimentally obtained specific energy absorption (SEA) vs. strain curves: (a) Incident energy: 100J, low velocity, (b) 200J, low velocity, (c) 100J, high velocity, (d) 200J, high velocity.

이와 같이 과도속도, 응력-변형률 선도 및 에너지 흡수 선도에 대한 실험값과 해석값을 비교해 보면, 본 연구에서 새롭게 제시된 수정된 Sherwood-Frost 모델이 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 발포 폴리우레탄의 충돌시 거동특성을 이해하기 위하여 충격량-운동량 이론을 접목한 수정된 Sherwood-Frost

모델을 제시하였다. 이를 통하여 충돌시 시편의 변형거동을 시간에 따라 예측 가능 하였고, 시험치와 비교한 과도속도, 응력-변형률 선도 및 에너지 흡수 선도가 우수하게 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 낮은 상대밀도를 갖는 시편에 대해서 과도속도가 변형률이 증가할수록 최대 약 20% 정도의 오차를 보이고 있으며, 향후 이러한 오차를 줄이는 것이 요구되고 있다. 또한 발포 우레탄은 초기 입력되는 충격에너지는 같다 하더라도, 충격 속도가 높아지면, ODS가 증가하여 에너지 흡수를 높이는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 2007년 공주대학교 학술연구지원사업의 연구지원비에 의하여 연구되었습니다.

참고문헌

- 1) Szycher, M., *Szycher's Handbook of Polyurethanes Boca Raton*: CRC press, 1999.
- 2) Shim, V.P.W., Tu, Z.H. and Lim, C.T., "Two-dimensional Response of Crushable Polyurethane Foam to Low Velocity Impact," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 24, 2000, pp. 703-731.
- 3) Meguid, S.A., Cheon, S.S. and El-Abbasi, N., "FE Modelling of Deformation Localization in Metallic Foams," *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol.38, 2002, pp.631-643.
- 4) Kim, A., Hasan, M.D.A., Cheon, S.S. and Lee, H.J., "The Constitutive Behavior of Metallic Foams using Nanoindentation Technique and FE Modelling," *Key Engineering Materials*, Vol. 297-300, 2005, pp.1050-1055.
- 5) Kim, A, Tunvir, K., Jeong, G.D. and Cheon, S.S., "A Multi-cell FE-model for Compressive Behaviour Analysis of Heterogeneous Al-alloy Foam," *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*, Vol. 14, 2006, pp.933-945.
- 6) Avale, M., Belingardi, G. and Montanini, R., "Characterization of Polymeric Structural Foams under Compressive Impact Loading by Means of Energy Absorption Diagram," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 25, 2001, pp.455-472.
- 7) Rusch, K.C. "Load-compression Behaviour of Flexible Foams," *J. Applied Polymer Science*, Vol.13, 1969, pp. 2297-2311.
- 8) Meinecke, E.A. and Schwaber, D.M., "Energy Absorption in Polymeric Foams," *J. Applied Polymer Science*, Vol. 14, 1970, pp. 2239-2248.

- 9) Sherwood, J.A. and Frost, C.C., "Constitutive Modeling and Simulation of Energy Absorbing Polyurethane Foam Under Impact Loading," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 32, 1992, pp. 1138-1146.
- 10) Su, X.Y., Yu, T.X. and Reid, S.R., "Inertia-sensitive Impact Energy-absorbing Structures Part I: Effects of Inertia and Elasticity," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 16, 1995, pp. 651-672.
- 11) Su, X.Y., Yu, T.X. and Reid, S.R., "Inertia-sensitive Impact Energy-absorbing Structures Part II: Effect of Strain-rate," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 16, 1995, pp. 673-689.
- 12) Tam, L.L. and Calladine, C.R., "Inertia and Strain-rate Effects in a Simple Plate-structure Under Impact Loading," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 11, 1991, pp. 349-377.
- 13) Langseth, M., Hopperstad, O.S. and Berstad, T., "Crashworthiness of Aluminium Extrusions: Validation of Numerical Simulation, Effects of Mass Ratio and Impact Velocity," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 22, 1999, pp. 829-854.
- 14) Beer, F.P. and Johnston Jr., E.R., *Vector Mechanics for Engineers: Dynamics*, McGraw-Hill, 1981.
- 15) Gibson, L.J. and Ashby, M.F., *Cellular Solids: Structure and Properties*, Pergamon Press, 1998.
- 16) Paul, A. and Ramamurty, U., "Strain Rate Sensitivity of a Closed-cell Aluminium Foam," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 281, 2000, pp. 1-7.
- 17) Lopatnikov, S.L., Gama, B.A. and Gillespie Jr J.W., "Modeling the Progressive Collapse Behaviour of Metal Foams," *Int. J. Impact Eng.*, Vol. 34, 2007, pp. 587-595.
- 18) 전성식, "통계적 유한요소모델을 이용한 발포된 금속기지 복합재료의 인장특성," 한국복합재료학회지, 제17권, 2004, pp. 34-39.