

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 충격을 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 모델 이론의 두가지가 연성된 방정식을 이용하여 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 나눌수 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 역기구조에 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) 발포우레탄이라 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. 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. Meincke과 Schwaber[8]는 다항식을 이용하여 변형률함수를 제안하고, 다공구조의 초기 강성을 변형률과 변형률 속도를 고려한 함수로 제안하였다. Sherwood와 Frost[9]는 발포 폴리우레탄의 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 폴리우레탄의 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 폴리우레탄의 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(ρ)는 시편의 상대밀도에 따른 함수로 정의된다. A_n은 형상함수 (Shape function)의 계수값들이 된다. a 및 b는 재료상수이고, ε̇₀는 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 L은 시편의 높이, δ는 시편의 변형량, v는 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 m은 충격체의 질량, S는 시편의 단면적을 나타낸다.

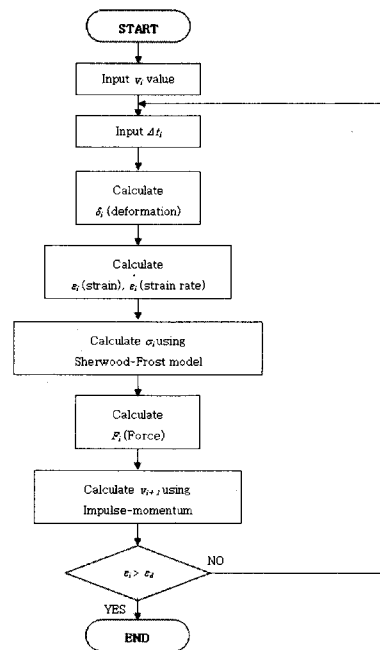


Fig. 1 Flowchart of solving coupled equation.

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.

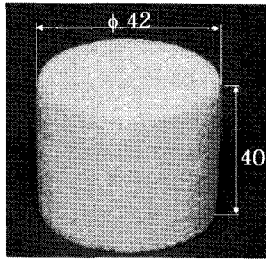


Fig. 2 Polyurethane foam specimen.

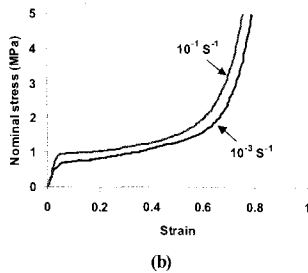
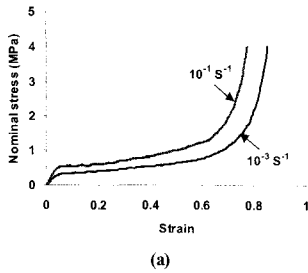


Fig. 3 Stress-strain curves of PU foam under quasi-static test: (a) Density: 64kg/m³, (b) 89 kg/m³.

두 가지 밀도, 즉 64 kg/m³, 89 kg/m³에 대한 리지드형 발포 폴리우레탄(L社 공급)에 재료로 높이 40mm, 지름 42mm의 원통 형상의 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. 시험결과와 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(ρ)는 밀도가 60에서 97사이일 때 0.046 ρ - 2.059로 정하고 이에 따른 a 와 b 는 각각 0.05173과 0.00155로 선정하였다. Table 2에서는 선정된 형상함수의 계수값을 나타내고 있다.

3. 충격시험

낙하시험 충격시험기 (Instron Dynatup 9250 HV)를 사용하여 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 플래토응력은 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 입력하였다더라도, 충돌속도가 Level 1에서 Level 3으로 높아질수록 ODS가 증가하는 것을 볼 수 있었다.

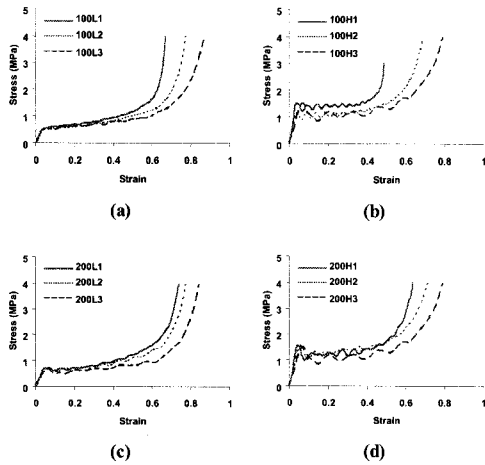


Fig. 4 Stress-strain curves of impact tests: (a) Incident energy: 100J, specimen density: 64kg/m³, (b) 100J, 89 kg/m³, (c) 200J, 64 kg/m³, (d) 200J, 89 kg/m³.

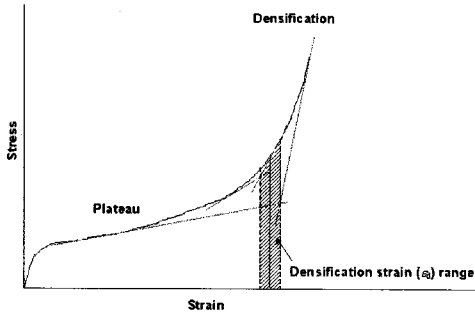


Fig. 5 Determination of ODS.

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

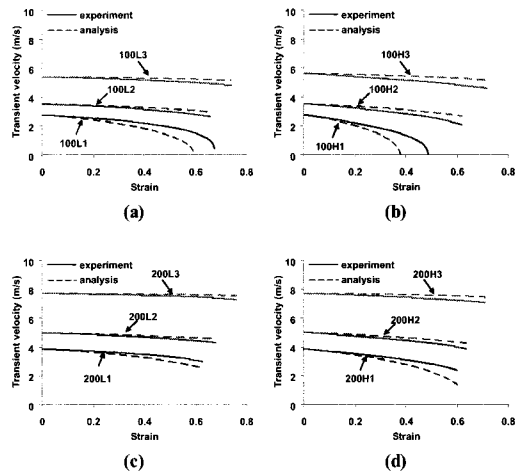


Fig. 6 Transient velocity curves of impact tests: (a) Incident energy: 100J, specimen density: 64kg/m³, (b) 100J, 89 kg/m³, (c) 200J, 64 kg/m³, (d) 200J, 89 kg/m³.

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 해석결과는 준정적 상태의 응력-변형률 선도를 기준으로 변형률 속도가 증가되는 상태의 응력-변형률 선도를 예측하기 때문에 플래토 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.

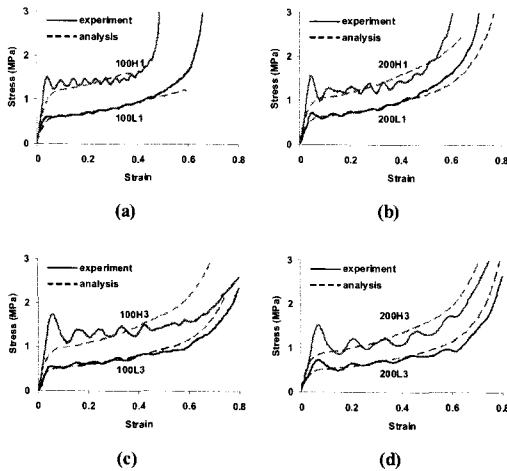


Fig. 7 Calculated and experimental stress-strain response of PU foam under impact loading: (a) Incident energy: 100J, low velocity, (b) 200J, low velocity, (c) 100J, high velocity, (d) 200J, high velocity.

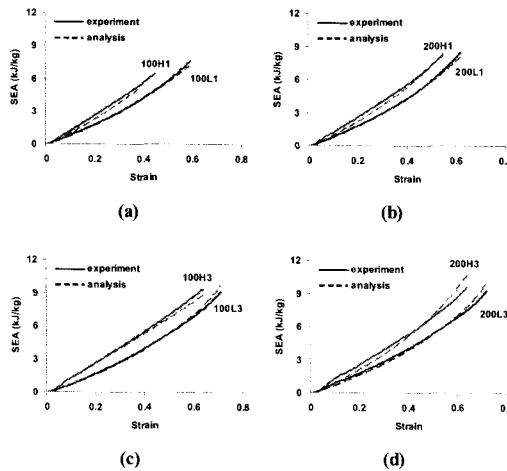


Fig. 8 Comparison between calculated and experimentally obtained specific energy absorption (SEA) vs. strain curves: (a) Incident energy: 100J, low velocity, (b) 200J, low velocity, (c) 100J, high velocity, (d) 200J, high velocity.

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. 결론

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.

후기

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) Avalle, 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.