

동일 에너지 조건하에 충격체 질량과 속도변화에 따른 발포 고분자의 흡수 에너지에 관한 실험적 연구

김병준* · 김한국* · 전성식*†

An Experimental Study on the Absorbed Energy of Polymeric Foam According to Different Mass and Impact Velocity Based on the Constant Impact Energy

Byeong-Jun Kim*, Han-Kook Kim*, Seong S. Cheon*†

ABSTRACT: In the present study, impact tests were carried out to investigate the crashworthy behaviour of the expanded polypropylene under the constant incident energy (100 J and 200 J) with five different combinations of striker mass and velocity. Also, preliminary quasi-static test was performed to obtain basic characteristics of the expanded polypropylene. MTS 858 and Instron dynatup 9250 HV were used for the quasi-static test and impact tests, respectively. In consequence, it was found that the impact energy absorption characteristics of the expanded polypropylene was more influenced by the striker mass instead of the velocity of the striker.

초 록: 본 연구에서는, 발포 폴리프로필렌의 충격에너지 흡수특성이 충격체 질량과 속도중 어느 변수에 더 많은 영향을 받는 지 고찰해 보기 위하여, 충격체 질량과 속도에 변화를 주어 5개의 조합을 만들고, 이 조합들이 동일한 초기 충격에너지 조건(100 J 및 200 J)이 될 수 있도록, 값을 선정한 뒤, 충격시험을 수행하여, 충격에너지 흡수 특성을 실험적으로 규명하였다. 또한 발포 폴리프로필렌의 기본적인 특성을 파악하기 위하여, 준정적 시험(Quasi-static test)도 수행되었다. 준정적 시험은 MTS 858을 이용하였고, 충격시험을 위해, Instron dynatup 9250 HV가 사용되었다. 충격시험결과, 발포 폴리프로필렌은 충격체 속도에 비해 질량에 더 많은 영향을 받는 것으로 나타났다.

Key Words: 발포 폴리프로필렌(expanded polypropylene), 충격에너지 흡수(impact energy absorption), 충격체 질량(striker mass), 충격체 속도(striker velocity)

1. 서 론

외부로부터 작용하는 충격하중을 흡수하기 위해, 발포고분자가 사용되고 있다. 특히 폴리에틸렌(PE, Polyethylene), 폴리프로필렌(PP, Polypropylene), PVC(Polyvinyl Chloride), 폴리우레탄(PU, Polyurethane)과 같은 고분자는 충격에너지 흡수 뿐 아니라, 전자기 차폐, 흡음 및 소음진동 방지 등

의 목적으로 자동차, 전자제품 등 여러 분야에서 응용되고 있다[1]. 그 중에서도 발포 폴리프로필렌은 충격에너지 흡수가 뛰어난 것으로 알려져 있으며, 이에 따라 자동차 충격 흡수 부재로 범퍼나 도어 빔, 자동차 루프 등 여러 부분에서 적용되어 쓰이고 있다[2,3].

발포 폴리프로필렌을 포함하여, 발포고분자의 충격특성에 대해서는 국내외적으로 많은 연구가 있어왔다.

Received 27 June 2013, received in revised form 27 March 2014, accepted 2 April 2014

*국립공주대학교 기계공학과

*†국립공주대학교 기계공학과, Corresponding author (E-mail: sscheon@kongju.ac.kr)

Avallé 등은 압축 충격하중을 받는 발포 고분자에 대해 에너지 흡수능도를 구하였다[3]. Zhang 등은 충격하중을 받는 발포고분자의 구성방정식을 제시하였다[4]. Gilchrist와 Mills는 발포고분자의 충격변형에 대해 유한요소해석과 실험을 통하여 규명하였다[5]. Landro 등은 보호용 헬멧에 내장된 발포 폴리스타이렌의 에너지 흡수에 관한 연구를 수행하였다[6]. Ouellet 등은 발포 고분자의 압축거동에 대한 연구를 수행하였다[7]. Subhash 등은 발포고분자의 압축거동에 대한 연구를 수행하였다[8]. 최기상 등은 변형률 속도에 따른 EPP Foam의 대변형 동적 압축 특성에 관한 연구를 진행하였다[9]. Viot은 발포 폴리프로필렌의 정수압 압축특성을 분석하였다[10]. Ozturk와 Anlas는 다중압축을 받는 발포고분자에 대한 유한요소해석을 수행하고, 에너지 흡수를 계산하였다[11,12]. Yang 등은 발포고분자의 에너지 흡수능력에 대한 응력연화거동의 영향을 분석하였다[13]. Machado 등은 발포고분자의 대변형거동을 유한요소모델링으로 표현하였다[14]. Zhou 등은 발포고분자가 내장된 샌드위치 판의 저속 충격특성을 분석하였다[15]. Daniel 등은 발포고분자의 변형률속도에 따른 특성을 해석적으로 분석하였다[16]. Maheo와 Viot은 여러점으로 구성된 발포 폴리프로필렌의 충격특성을 분석하였다[17]. Rajaneesh 등은 발포고분자가 내장된 샌드위치판의 저속 충격특성을 연구하였다[18].

기존의 진행된 연구내용을 보게되면, 발포 고분자에 대한 충돌에너지 흡수라든지, 구성방정식 결정, 유한요소해석을 통한 충돌하중시 변형거동 분석 및 샌드위치 구조로 이용되었을 때 충돌 변형거동 등에 대부분 초점이 맞추어져 있다. 그러나, 충격에너지는 충격체의 질량과 속도라는 두가지 변수에 좌우되며, 따라서, 동일한 충격에너지를 가하였다 하더라도, 발포 고분자의 재질에 따라, 충격체 질량의 변화에 민감할 수도 있고, 아니면 충격체의 속도에 민감하게 반응할 수도 있다. 그러나, 발포 고분자에 대한 이 두 변수의 영향에 대한 분석은 현재까지 제한적으로만 진행되었다[19].

따라서 본 연구에서는, 발포 폴리프로필렌에 대하여, 초기 충격에너지가 100 J 및 200 J이 될 수 있는 충격체 질량과 속도에 대한 5개의 조합 조건에 따른 충격에너지 흡수를 실험적으로 규명하였고, 충격체 질량과 속도중 어느 것이 충격에너지 흡수에 더 중요한 인자인가를 분석하였다. 또한 발포 폴리프로필렌의 기본적인 특성을 파악하기 위하여, 준정적 시험(Quasi-static test)도 수행되었다. 준정적 시험은 MTS 858을 이용하였고, 충격시험을 위해, Instron dynatup 9250 HV가 사용되었다.

2. 발포 폴리프로필렌 시편

발포 폴리프로필렌 시편((주)엠피아이씨)은 폴리프로필렌을 약 15배 정도 부피를 증가시켜 제조된 것으로, 시편의



Fig. 1. Specimen of the expanded polypropylene (EPP)

Table 1. Properties of unfoamed bulk polypropylene [8]

Density (ρ_s)	Young's modulus (E_s)	Yield strength (ρ_{ys})
910 kg/m ³	1,200 MPa	30-70 MPa

Table 2. Dimension and density of EPP specimen

Material	Diameter	Thickness	Density
EPP	50 mm	50 mm	58-62 kg/m ³

변형거동을 1차원으로 단순화하기 위해, Fig. 1에서 보이는 바와 같이 실린더형으로 시편을 가공하였다.

Table 1에서는 발포되기 전 폴리프로필렌의 물성이 나타나 있고, Table 2에서는 시편으로 가공된 발포 폴리프로필렌의 측정된 치수 및 밀도가 나타나 있다. 균일하게 발포되어, 60 kg/m³을 기준으로 밀도오차는 약 3.3% 이하인 것을 확인하였다.

3. 준정적 시험

발포 폴리프로필렌의 기본적인 응력-변형률 특성을 파악하기 위해, 준정적 압축시험이 진행되었다. 준정적 실험은 MTS 858을 이용하여 60 kg/m³의 밀도를 갖는 발포 폴리프로필렌 시편을 0.001 s⁻¹의 변형률 속도 조건으로 수행되었다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 시편의 덴시피케이션이 시작 되는 변형한계점(Onset of densification, ϵ_D)은 접선법[19]을 적용하여 60~63%의 변형률 사이에 존재하는 것으로 볼

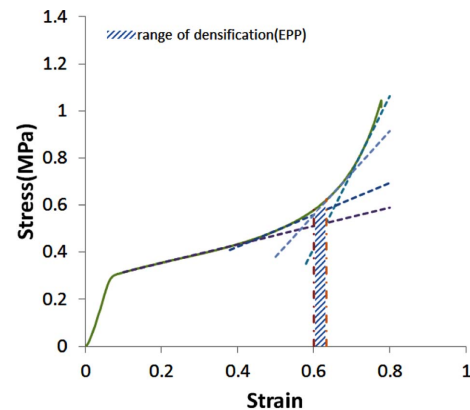


Fig. 2. The result of quasi-static test ($\dot{\epsilon} = 0.001$)

수 있었다. 참고로, 변형한계점 이상의 변형이 생기면 발포 프로필렌은 다공성이 아닌 벌크 재질처럼 변형거동을 보이게 된다.

선형구간(Linear region)의 기울기는 4.11 MPa, 플래토 구간에서의 기울기는 0.61 MPa로 나타났다.

본 준정적 시험결과를 토대로, 향후 발포 폴리프로필렌의 충격시험시, 시험기의 충격치 측정기에 과도한 압축력이 발생하지 않도록, 압축변형량 한계값을 약 65%로 선정하여 진행하였다.

4. 충격 시험

4.1 시험 조건

시험에 가해지는 충돌 에너지는 운동에너지의 정의를 이용하여 식 (1)와 같이 나타낼 수 있고, 충격체질량 및 충격체 속도가 운동에너지의 크기에 영향을 미칠 수 있다.

$$E = \frac{1}{2} m_i v_i^2 \tag{1}$$

여기서 m_i 는 충격체의 질량 값을 나타내며 v_i 는 충격체의 속도를 나타낸다. 충격시험은 Instron dynatup 9250 HV를 이용하여 실험을 수행하였다. 초기 충격에너지(Incident impact energy)는 100 J과 200 J을 선택하였다. 충격체는 Fig. 3에서 보이는 바와 같이 직육면체모양의 질량을 장착하거나 탈착할 수 있는 부분과, 센서가 장착된 부분, 그리고 시험에 직접 충격을 가하는 충격부로 이루어져 있다. 참고로 충격부는 STS 304의 스테인레스 강 재질로 가공되었고, 지름 100 mm, 두께 10 mm의 원판형 형상을 갖고 있다.

충격체의 질량은 시험기의 충격체 내부에 무게를 장착하는 것으로 변화시켰으며, 본 시험기에서는, 충격체의 질량을 5가지로, 즉 7 kg, 11 kg, 16 kg, 21 kg 및 26 kg으로 변화시켜서 시험을 수행하였다. 100 J의 경우 충격체 속도는 각각의 충격체 질량에 대해 5.21 m/s, 4.26 m/s, 3.49 m/s, 3.06 m/s 및 2.74 m/s로 정하여, 5가지 경우 모두 초기 충격에너지가 100 J로 동일하게 진행될 수 있도록 하였다. 200 J

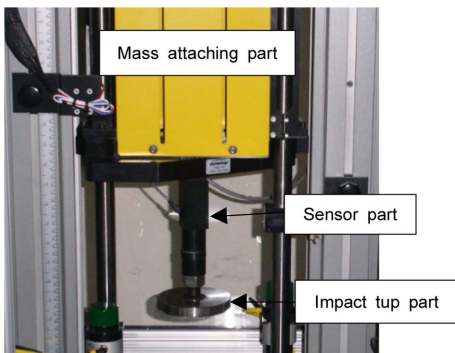


Fig. 3. Impact striker

Table 3. Condition of impact tests about EPP material

Striker mass	Incident velocity		Strain
	100 J	200 J	
Case I	7.38 kg	5.21 m/s	7.36 m/s
Case II	11.01 kg	4.26 m/s	6.04 m/s
Case III	16.44 kg	3.49 m/s	4.93 m/s
Case IV	21.42 kg	3.06 m/s	4.32 m/s
Case V	26.59 kg	2.74 m/s	3.88 m/s

의 경우는 각각의 충격체 질량에 대해 7.36 m/s, 6.04 m/s, 4.93 m/s, 4.32 m/s 및 3.88 m/s로 정하여 5가지 경우 모두 초기 충격에너지가 200 J로 동일하게 진행될 수 있도록 하였다. Table 3에 실험조건이 정리되어 있다.

충격시험을 통하여, 시험으로부터 충격체에 가해지는 반력과 충격체의 충격직전 초기속도가 측정된다. 또한, 충격이 가해지는 동안의 시간이 측정된다. 또한 측정된 반력을 통해, 환산된 가속도와, 충격체의 속도 및 이동한 거리(또는 시험의 변형량)이 자동적으로 환산되어 출력되고 시험이 흡수한 에너지도 출력된다.

4.2 충격시험 결과

Fig. 4는 충격실험으로부터 얻은 응력-변형을 선도이다. 응력은 측정된 외력을 시험의 면적으로 나눈 값으로 환산

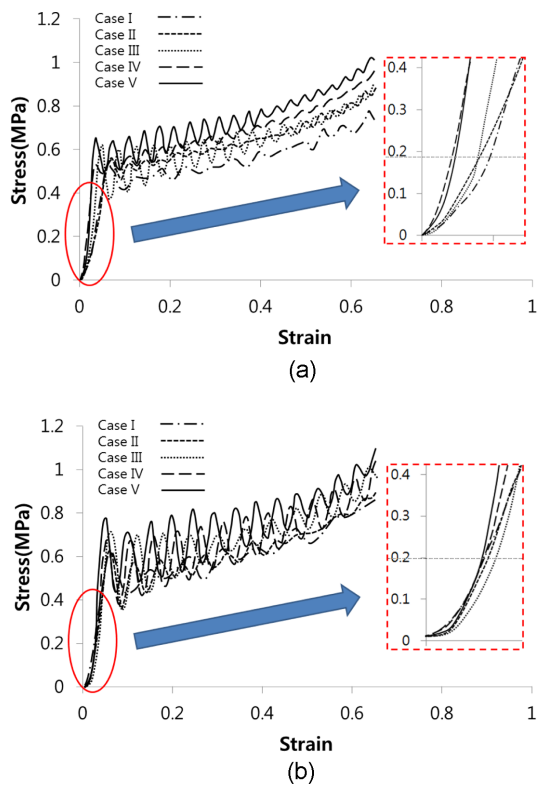


Fig. 4. The result stress-strain curve of impact test, (a) 100 J test, (b) 200 J test

되었고, 변형률은 시험기로부터 출력된 시편의 변형량을 시편의 초기 높이로 나누어 환산되었다. 100 J일 경우에는 충격체 질량이 증가할수록 시편의 탄성 구간 기울기가 최대 220% 높게 나타났다. 반면 정체 구간의 5가지 경우에는 모두 유사한 기울기 값을 갖는 것을 확인하였다. 200 J 경우에도 마찬가지로 충격체의 질량이 증가할수록 탄성 구간 기울기가 최대 160% 크게 나타났으며 정체 구간 기울기도 100 J과 마찬가지로 유사한 값을 갖는 것으로 확인되었다. Table 4는 충격 실험 결과 그래프에 대한 내용을 보여주고 있다.

준정적 시험에서 보여진 선형구간과 플래토 구간의 기울기는 3장에서 기술된 바와 같이 4.11 MPa, 0.61 MPa로, Table 4의 Case I에서의 값에 비해 낮은 것을 확인하였다. 응력-변형을 선도에서 변형한계점까지의 면적은 발포 폴리프로필렌의 단위 질량당 흡수 에너지(Specific energy

absorption, u)가 되고, 다음 식과 같이 정의될 수 있다[3].

$$u = \frac{1}{\rho} \int_0^{\epsilon_D} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여, 각 시편에 대한 충격에너지 흡수율의 대한 결과는 Fig. 5에 나타나 있다. 변형한계점값은 각 시편에 대하여 60~63% 사이에 비슷하게 존재하였고 변형한계점까지 흡수한 에너지를 각 시편에 대해 계산하였다. 100 J의 입력에너지로 시험했을 경우 Case V일 때 에너지 흡수율이 7.45 kJ/kg으로 가장 높았으며, Case I일 때 에너지 흡수율이 6.18 kJ/kg으로 가장 낮게 측정되었다. 200 J 동일 에너지로 실험한 결과 역시, Case V일 때에 7.58 kJ/kg으로 가장 큰 값이 측정되었으며, Case I일 때에 6.57 kJ/kg으로 가장 작은 에너지 흡수율이 측정되었다.

동일 에너지 조건하에서 질량과 속도의 비율에 의해 에너지 흡수량에 차이가 나타나게 된 이유는, 충격체 질량이 증가할수록 정체 구간 기울기는 유사하지만 탄성역역 구간 기울기가 증가하며, 정체구간의 평균값을 높였기 때문인 것으로 사료되고 있다. 정체구간 기울기는 100 J의 경우 최대 220%, 200 J의 경우에는 160% 차이를 보이고 있다.

동일에너지 조건하에 충돌시 발포 폴리프로필렌의 흡수 에너지량은 충격체의 질량과 속도 중에서, 충격체의 질량에 더 많은 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 다시 말하면, 동일에너지 조건하에서 충돌시 변형률 속도의 영향보다는 관성의 영향이 충돌에너지 흡수에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 참고로, 충격시험결과 그래프들이 진동하는 모습을 보이는 것은 응력이 시편에 파동(Wave)의 형식으로 전달되고, 또한 전달된 응력파는 반사되어 되돌아오는 현상이 발생하기 때문이다[20].

5. 결론

본 연구에서는 충격체 초기값과 동일한 질량과 변형율에 따라 변하는 속도에 관하여 15배 발포된 폴리프로필렌의 충돌에너지 흡수에 대한 연구가 진행되었다.

이를 위해, 실린더형 발포 폴리프로필렌 시편을 준비하고, 준정적 시험과 충격시험을 수행하였다. 준정적 시험을 통하여, 발포 폴리프로필렌의 텐시피케이션 시작 구간은 60~63%로 확인되었다. 충격시험은 동일한 초기 충격에너지 2가지 경우(100 J 및 200 J)를 기준으로 충격체의 질량과 속도에 변화를 주어 5가지 cases를 수행하였다. 초기 충격에너지가 100 J과 200 J인 경우, 모두 충격체의 질량이 증가할수록 탄성구간의 기울기 값이 증가함을 보였고, 반면에 충격체 질량의 증가에 상관없이 정체구간 기울기는 모두 유사하게 나타남을 볼 수 있었다. 100 J의 경우 최소 6.18 kJ/kg에서 최대 7.45 kJ/kg로 에너지 흡수율이 나타났으며 최대 20% 에너지 흡수율 편차를 보였다. 200 J의 경우에는 최

Table 4. The analysis of impact test graph

Striker	Slope of linear region		Slope of plateau region	
	100 J	200 J	100 J	200 J
Case I	8.76	10.88	0.67	0.81
Case II	8.94	11.92	0.74	0.92
Case III	13.2	11.45	0.89	0.97
Case IV	16.4	14.27	0.79	1.04
Case V	19.5	17.57	0.84	1.07

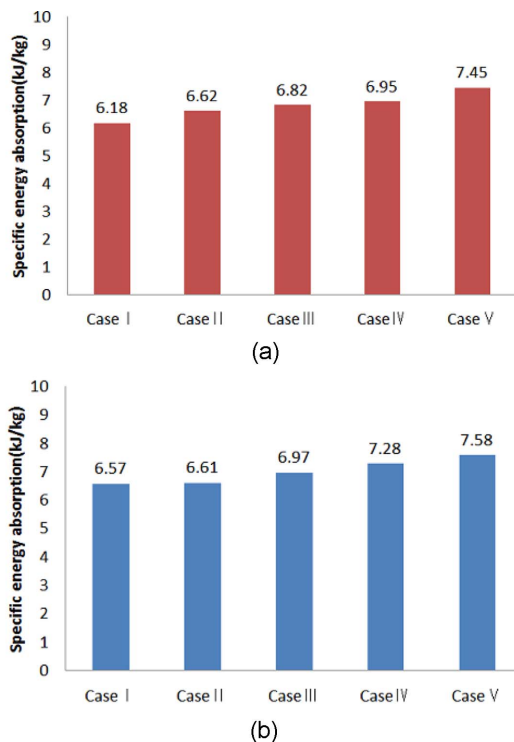


Fig. 5. The result of absorbed energy (a) 100 J test, (b) 200 J test

소 6.57 kJ/kg, 최대 7.58 kJ/kg의 에너지 흡수율이 측정되었으며 최대 15% 에너지 흡수율 편차가 나타났다.

동일 에너지 조건하에서 충격체 질량이 증가할수록 발포 폴리프로필렌 재료의 탄성 영역 기울기와 정체구간의 평균 응력이 높아져서 흡수 에너지가 더 증가되는 것을 확인할 수 있었다.

후 기

이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2012R1A1A2008823).

참고문헌

1. Silva, A.L.N.D., Rocha, M.C.G., Coutinho, F.M.B., Bretas, R.E.S., and Farah, M., "Evaluation of Rheological and Mechanical Behavior of Blends Based on Polypropylene and Metallo-cene Elastomers," *Journal of Polymer Testing*, Vol. 21, 2002, pp. 647-652.
2. Jeong, K.Y., Cheon, S.S., and Munshi, M.B., "A Constitutive Model for Polyurethane Foam with Strain Rate Sensitivity," *Journal of Mechanical Science and Technology*, Vol. 26, No. 7, 2012, pp. 2033-2038.
3. Avallé, M., Belingardi, G., and Montanini, R., "Characterization of Polymeric Structural Foams under Compressive Impact Loading by Meas of Energy-absorption Diagram," *Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, 2001, pp. 455-472.
4. Zhang, J., Kikuchi, N., Li, V., Yee, A., and Nusholtz, G., "Constitutive Modeling of Polymeric Foam Material Subjected to Dynamic Crash Loading," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 21, 1998, pp. 369-386.
5. Gilchrist, A., and Mills, N.J., "Impact Deformation of rigid polymeric foams: Experiments and FEA Modelling," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 25, 2001, pp. 767-786.
6. Landro, L.D., Sala, G., and Olivieri, D., "Deformation Mechanisms and Energy Absorption of Polystyrene Foams for Protective Helmets," *Journal of Polymer Testing*, Vol. 21, 2002, pp. 217-228.
7. Ouellet, S., Cronin, D., and Worswick, M., "Compressive Response of Polymeric Foams under Quasi-static, Medium and High Strain Rate Conditions," *Polymer Testing*, Vol. 25, 2006, pp. 731-743.
8. Subhash, G., Liu, Q., and Gao, X.L., "Quasistatic and High Strain Rate Uniaxial Compressive Response of Polymeric Structural Foams," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 32, 2006, pp. 1113-1126.
9. Choi, K., Kang, W., Kim, G., and Kim, S., "High Strain Rate Compression Behavior of EPP Bumper Foams," *Journal of the Korean Society of Automotive Engineers*, Vol. 17, No. 4, 2009, pp. 118-125.
10. Viot, P., "Hydrostatic Compression on Polypropylene Foam," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, 2009, pp. 975-989.
11. Ozturk, U.E., and Anlas, G., "Energy Absorption Calculations in Multiple Compressive Loading of Polymeric Foams," *Materials & Design*, Vol. 30, 2009, pp. 15-22.
12. Ozturk, U.E. and Anlas, G., "Finite Element Analysis of Expanded Polystyrene Foam under Multiple Compressive Loading and Unloading," *Materials & Design*, Vol. 32, 2011, pp. 773-780.
13. Yang, X., Xia, Y., and Zhou, Q., "Influence of Stress Softening on Energy-absorption Capability of Polymeric Foams," *Materials & Design*, Vol. 32, 2011, pp. 1167-1176.
14. Machado, G.C., Alves, M.K., Rossi, R., and Silva Jr. C.R.A., "Numerical Modeling of Large Strain Behavior of Polymeric Crushable Foams," *Applied Mathematical Modelling*, Vol. 35, 2011, pp. 1271-1281.
15. Zhou, J., Hassan, M.Z., Guan, Z., and Cantwell, W.J., "The Low Velocity Impact Response of Foam-based Sandwich Panels," *Composites Science and Technology*, Vol. 72, 2012, pp. 1781-1790.
16. Daniel, I.M., Cho, J.M., and Werner, B.T., "Characterization and Modeling of Stain-rate-dependent Behavior of Polymeric Foams," *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 45, 2013, pp. 70-78.
17. Maheo, L. and Viot, P., "Impact on Multi-layered Polypropylene Foams," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 53, 2013, pp. 84-93.
18. Rajaneesh, A., Sridhar, I., and Rajendran, S., "Relative Performance of Metal and Polymeric Foam Sandwich Plates under Low Velocity Impact," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 65, 2014, pp. 126-136.
19. Jeong, K.Y., and Cheon, S.S., "Crashworthy Behaviour of Cellular Polymer under Constant Impact Energy," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 22, No. 4, 2009, pp. 27-32.
20. Lee, D.G., and Suh, N.P., *Axiomatic Design and Fabrication of Composite Structures: Applications in Robots, Machine Tools and Automobiles*, Oxford University Press, 2005.