Composites Research

Vol. 27, No. 4, 130-134 (2014)
DOI: http://dx.doi.org/10.7234/composres.2014.27.4.130
ISSN 2288-2103(Print), ISSN 2288-2111(Online)

Paper

변형률 속도가 고려된 발포 폴리프로필렌의 구성방정식

김한국* · 전성식**†

A Constitutive Equation Including Strain Rate Effect for the Expanded Polypropylene

Han-Kook Kim*, Seong S. Cheon**†

ABSTRACT: The purpose of this paper is to build DB in order to Propose new constitutive equations by redefining constitutive equations for Polyurethane presented by Jeong *et al.* [12] based on Quasi-static test and Impact test DB of Expanded polypropylene using cylindrical specimens with 4 different densities presentsd by Kim *et al.* [7] for EPP foam and combining the impulse-momentum theory.

초 록: 본 논문에서는 Kim 등[7]이 제시한 4가지의 다른 밀도를 갖는 원통형 시험편으로한 EPP(Expanded polypropylene)의 준정적(Quasi-static test) 및 충격 시험(Impact test) DB를 바탕으로 Jeong 등[12]이 제시한 폴리우레탄(Polyurethane)에 대한 구성방정식을 EPP 폼에 대하여 다시 정의 하여 충격량-운동량 이론을 접목시켜 새로운 구성방정식을 제안하기위한 DB 구축을 목표로 하였다.

Key Words: 발포 폴리프로필렌(Expanded polypropylene), 준정적 시험(Quasi-static test), 계장화 충격시험(Instrumented impact test), 충돌 운동량(Impulse momentum), 구성방정식(Constitutive equations)

1. 서 론

복합재료는 유리섬유 강화 플라스틱이 처음 개발된 이후 현재까지 여러 기술 분야에서 주목을 받았으며, 다양한 산업 분야에 적용되어 왔다. 높은 기계적 성능을 가진 섬유 개발과 그에 적합한 기지재의 발달로 인하여 우주 항공, 자동차등 운송체 분야, 건물 다리 등 기간산업 분야, 골프용품, 보트 외판 등의 스포츠 산업 분야까지 여러 분야에서 꾸준히 응용이 이루어지고 있다. 최근에는 전자기, 열, 생체 분야 등에 적용하기 위하여 다양한 성질을 동시에 가지는 기능성 복합재료에 대한 연구 또한 활발히 진행되고 있다[1-3]. 특히 발포기술의 발전과 함께 EPP(Expanded polypropylene) 및 EPS(Expanded polystyrene)에 대한 사용이 증대되면서 자동차 범퍼를 구성하는 부품은 강철재료 대신 플라스틱 또는 비철 재료로 대체 되어가고 있는 추세이다[4,5].

EPP는 기본적으로 발포체이기 때문에 발포체가 갖는 특성 외에도 독특한 특성을 보이고 있다. 먼저 구조적인 특성으로는 표면의 셀(Cell)이 작고 내부로 갈수록 셀이 커지기 때문에 표면은 매우 부드럽지만 내부에서는 강한 기계적 물성을 가진다고 알려져 있다[6].

Kim 등[7]은 EPP 및 EPS의 구성방정식 결정을 위한 체계적인 DB를 구축하는 것을 목표로 하였다. 이를 위해 각 발포고분자에 대하여 4가지의 다른 밀도를 갖는 원통형 시편으로 0.001 s^{-1}와 0.1 s^{-1}의 준정적 압축시험과 충격 압축시험을 통해 기본 입력 데이터로 활용될 수 있도록 하였다.

Received 7 July 2014, received in revised form 18 August 2014, accepted 26 August 2014

*Department of Mechanical Engineering, Kongju National University
**†Division of Mechanical and Automotive Engineering, Kongju National University, Corresponding author (E-mail: sscheon@kongju.ac.kr)

Bouuix 등[8-11]은 소재의 고속변형특성을 연구하기 위하여 홉킨스 바 시험기 및 중고속 인장 시험기를 개발하여 자동차용 강판의 변형률속도 효과를 시험적으로 구하여 충돌해석의 기본 입력 데이터로 활용될 수 있도록 하였으며, Jeong 등[12]은 폴리우레탄(Polyurethane) 폼(Foam)에 대한 변형률 속도에 따른 응력-변형률 관계를 설명하기 위해 구성방정식을 제안하였다.

이와 같이 EPP에 대한 실험적 규명은 광범위 하게 이루어 졌으나 구성 방정식에 대한 내용은 찾아보기 힘들었다. 따라서 본 논문에서는 Kim 등[7]이 제시한 4가지의 다른 밀도를 갖는 원통형 시편((주)엠피아이씨)으로한 EPP의 준정적 및 충격 시험 DB를 바탕으로 Jeong 등[12]이 제시한 폴리우레탄에 대한 구성방정식을 EPP 폼에 대하여 다시 정의 하여 충격량-운동량 이론을 접목시켜 새로운 구성방정식을 제안하기 위한 DB 구축을 목표로 하였다.

2. 구성 방정식

2.1 EPP의 밀도별 시편

Kim 등[7]은 EPP/EPS 각각 4종류의 다른 밀도를 갖는 원기둥형 시편을 준비하여 실험을 하였다. 그중 EPP만을 선택하여 Table 1에 나타내었다.

실험 데이터중 EPP만 선정한 이유는 플래토 구간의 응력이 EPS보다 EPP가 약 10% 높은 것을 보였다[7]. 이는 EPS보다 EPP가 에너지 흡수율이 좋다는 것을 알 수 있다[14]. Fig. 1은 시험에 사용된 시편을 나타내었다.

Table 1 Density of the EPP

ID	Diameter (mm)	Length (mm)	Density (kg/m^3)	Standard deviation (kg/m^3)
EPP_1	49	50	23	0.52
EPP_2	49	48	28	0.55
EPP_3	49	50	61	0.44
EPP_4	49	51	146	5.02

Fig. 1. Foam specimen of EPP

2.2 구성 방정식

다음의 식은 Jeong 등[12]이 제시한 발포 폴리우레탄의 구성방정식이다.

$$\sigma_d = \sigma(\varepsilon)\left\{1+(\alpha+d\varepsilon)\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right\}$$

$$=\left\{A\left(1-e^{-(E/A)\varepsilon(1-\varepsilon)^m}\right)+B\left(\frac{\varepsilon}{1-\varepsilon}\right)^n\right\}\left\{1+(a+b\varepsilon)\ln\left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0}\right)\right\} \quad (1)$$

위의 식 (1)에서는 총 7개의 매개변수가 있으며, 먼저 첫 번째 항의 5개의 변수 A, B, E, m, n은 응력-변형률 데이터에 의해 결정된다. 여기서, A는 plateau 구간의 시작점을, B는 densification 구간의 시작점, E는 elastic 구간의 기울기, m은 densification 구간의 시작점이 낮아지며 기울기 또한 낮아지며, n은 plateau 구간의 시작점이 작아진다.

다음으로, 두 번째 항의 나머지 두 개의 변수 a와 b는 첫 번째 항과 다른 변형속도에 의해 응력-변형률 데이터에 근사화 함으로써 알 수 있다. 대부분의 매개변수들은 소재, 밀도에 따라 달라지는 것으로 판단된다.

2.3 매개 변수 결정

식 (1)의 변수를 결정하기 위해 Newton Raphson method for simultaneous nonlinear equations을 이용하여 계산의 편의를 위해 Microsoft Excel을 사용하였다. 행렬을 통해 첫 번째 항의 변수 5개를 구하였으며, 먼저 각 밀도별 압축시험(Quasi-static test)을 하였으며, 및 의 두 변형률 속도에 대하여 수행하였다[12,13]. 먼저 행렬식을 세우기 위해 첫 번째 항의 변수들의 편미분을 통해 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$F_1=\frac{\partial C}{\partial A}=2\Sigma[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]\left[1-\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)e^{f_i}\right]=0 \quad (2)$$

$$F_2=\frac{\partial C}{\partial B}=2\Sigma[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]\left(\frac{\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}\right)^n=0 \quad (3)$$

$$F_3=\frac{\partial C}{\partial E}=-2A\Sigma[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]e^{f_i}\frac{\partial f_i}{\partial E}=0 \quad (4)$$

$$F_4=\frac{\partial C}{\partial m}=-2A\Sigma[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]e^{f_i}\frac{\partial f_i}{\partial m}=0 \quad (5)$$

$$F_5=\frac{\partial C}{\partial n}=2B\Sigma[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]\left(\frac{\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}\right)^n\ln\left(\frac{\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}\right)=0 \quad (6)$$

여기서, C는 식 (1)의 첫 번째 항을 나타내며 ε은 변형률, σ는 응력을 의미한다. 위와 같이 식 (2)부터 식 (6)까지 f_i는 $-\frac{A}{E}\varepsilon_i(1-\varepsilon_i)^m$ 을 치환하여 1차 편미분식을 얻을 수 있었다. 위에서 얻은 식을 각각 A, B, E, m, n으로 편미분을 진행하면 다음과 같은 식을 얻게 된다.

$$\frac{\partial F_1}{\partial A}=\frac{\partial^2 C}{\partial A^2}=2\Sigma\left[\left[1-\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)e^{f_i}\right]^2\right.$$
$$\left.-e^{f_i}[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]\left(2\frac{\partial f_i}{\partial A}+A\left(\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)^2+A\frac{\partial^2 f_i}{\partial A^2}\right)\right] \tag{7}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial B}=\frac{\partial^2 C}{\partial A\partial E}=2\Sigma\left(\frac{\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}\right)^n\left[\left[1-\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)e^{f_i}\right]^2\right] \tag{8}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial E}=\frac{\partial^2 C}{\partial A\partial E}=2\Sigma\left[\left(-A\frac{\partial f_i}{\partial E}e^{f_i}\right)\left[1-\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)e^{f_i}\right]\right.$$
$$\left.-e^{f_i}[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]\left[A\frac{\partial^2 f_i}{\partial A\partial E}+\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)\frac{\partial f_i}{\partial E}\right]\right] \tag{9}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial m}=\frac{\partial^2 C}{\partial A\partial m}=2\Sigma\left[\left(-A\frac{\partial f_i}{\partial m}e^{f_i}\right)\left[1-\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)e^{f_i}\right]\right.$$
$$\left.-e^{f_i}[\sigma(\varepsilon_i)-\sigma_i]\left[A\frac{\partial^2 f_i}{\partial A\partial m}+\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)\frac{\partial f_i}{\partial m}\right]\right] \tag{10}$$

$$\frac{\partial F_1}{\partial n}=\frac{\partial^2 C}{\partial A\partial n}=2B\Sigma\left(\frac{\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}\right)^n\ln\left(\frac{\varepsilon_i}{1-\varepsilon_i}\right)\left[1-\left(1+A\frac{\partial f_i}{\partial A}\right)e^{f_i}\right] \tag{11}$$

식 (7)부터 식 (11)까지 식에 대하여 총 5개의 식을 확인할 수 있었다. 이와 같이 또한 같은 방법으로 식을 나타낼 수 있다. 이를 진행하여 다음에 보이는 행렬과 같이 정리하여 나타내었다.

이것을 행렬식으로 계산하기 위해서는 Newton Raphson method for simultaneous nonlinear equations을 이용하여 식 (12)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{bmatrix}\frac{\partial F_1}{\partial A}&\frac{\partial F_1}{\partial B}&\frac{\partial F_1}{\partial E}&\frac{\partial F_1}{\partial m}&\frac{\partial F_1}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial B}&\frac{\partial F_2}{\partial B}&\frac{\partial F_2}{\partial E}&\frac{\partial F_2}{\partial m}&\frac{\partial F_2}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial E}&\frac{\partial F_2}{\partial E}&\frac{\partial F_3}{\partial E}&\frac{\partial F_3}{\partial m}&\frac{\partial F_3}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial m}&\frac{\partial F_2}{\partial m}&\frac{\partial F_3}{\partial m}&\frac{\partial F_4}{\partial m}&\frac{\partial F_4}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial n}&\frac{\partial F_2}{\partial n}&\frac{\partial F_2}{\partial n}&\frac{\partial F_4}{\partial n}&\frac{\partial F_5}{\partial n}\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}\Delta A\\ \Delta B\\ \Delta E\\ \Delta m\\ \Delta n\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}-F_1\\ -F_2\\ -F_3\\ -F_4\\ -F_5\end{Bmatrix} \tag{12}$$

여기서 구하고자 하는 값은 ΔA, ΔB, ΔE, Δm 및 Δn이기 때문에 식 (13)과 같이 식을 다시 정리하여 구할 수 있다. ΔA, ΔB, ΔE, Δm 및 Δn은 한 번에 구해지는 값이 아니기 때문에 '0'으로 수렴하는데 까지 계속적인 반복이 필요하다.

$$\begin{Bmatrix}\Delta A\\ \Delta B\\ \Delta E\\ \Delta m\\ \Delta n\end{Bmatrix}=\begin{Bmatrix}-F_1\\ -F_2\\ -F_3\\ -F_4\\ -F_5\end{Bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{\partial F_1}{\partial A}&\frac{\partial F_1}{\partial B}&\frac{\partial F_1}{\partial E}&\frac{\partial F_1}{\partial m}&\frac{\partial F_1}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial B}&\frac{\partial F_2}{\partial B}&\frac{\partial F_2}{\partial E}&\frac{\partial F_2}{\partial m}&\frac{\partial F_2}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial E}&\frac{\partial F_2}{\partial E}&\frac{\partial F_3}{\partial E}&\frac{\partial F_3}{\partial m}&\frac{\partial F_3}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial m}&\frac{\partial F_2}{\partial m}&\frac{\partial F_3}{\partial m}&\frac{\partial F_4}{\partial m}&\frac{\partial F_4}{\partial n}\\ \frac{\partial F_1}{\partial n}&\frac{\partial F_2}{\partial n}&\frac{\partial F_2}{\partial n}&\frac{\partial F_4}{\partial n}&\frac{\partial F_5}{\partial n}\end{bmatrix}^{-1} \tag{13}$$

위의 식 (13)을 통해 얻어진 결과를 다음 Table 2에 나타내었다.

Fig. 2는 식 (1)의 첫 번째 항에 대한 EPP 폼의 각각의 밀도별 그래프이다. 분석결과 값과 실험결과 값이 우수하게 일치하는 것을 볼 수 있다.

Jeong 등[12]이 제시한 식 (1)의 첫 번째 항에서 첫 번째 텀은 탄성구간과 플래토 구간을 의미하며 두 번째 텀은 고밀도화구간(Densification)을 의미한다.

식 (1)에서 다섯 개의 매개 변수는 0.001 s^{-1}의 변형 속도로 데이터의 최소제곱법에 의해 결정되었다. 나머지 두 개의 매개변수 a 및 b를 결정하는데 있어서 또 다른 변형속도의 데이터가 필요하여 0.1 s^{-1}의 변형속도로 진행하였다. 마찬가지로 최소제곱법에 의해 결정되었다. 최소제곱법을 사용하면 수식(2)~(6)과 같이 나열되는데 이를 사용하여 오차를 최소한으로 줄이기 위함이다. 이를 이용하여 Newton Raphson method for simultaneous nonlinear equations를 사용, 계산의 편의를 위해 Microsoft Excel을 이용하였다.

Fig. 2의 (c)의 데이터가 다른 데이터와 다르게 탄성구간의 기울기가 차이를 보이는데 이는 폼을 제조하데 있어서 상대적으로 가장 고르지 못하게 제조된 것을 볼 수 있었다. 다음에 보이는 Fig. 3 또한 같은 결과를 보인다.

Table 2. Five parameter calculated from regression

ID	A	B	E	m	n
EPP_1	0.089654	0.103454	2.3154	2.369541	1.168
EPP_2	0.13644	0.116544	4.5315	2.80151	1.1845
EPP_3	0.34515	0.25945	3.2154	3.4155	0.93841
EPP_4	1.19452	1.4215	45.6421	4.81215	1.1353

Table 3. Two parameter calculated from regression

ID	a	b
EPP_1	0.0347	0.001
EPP_2	0.0381	
EPP_3	0.0553	
EPP_4	0.0601	

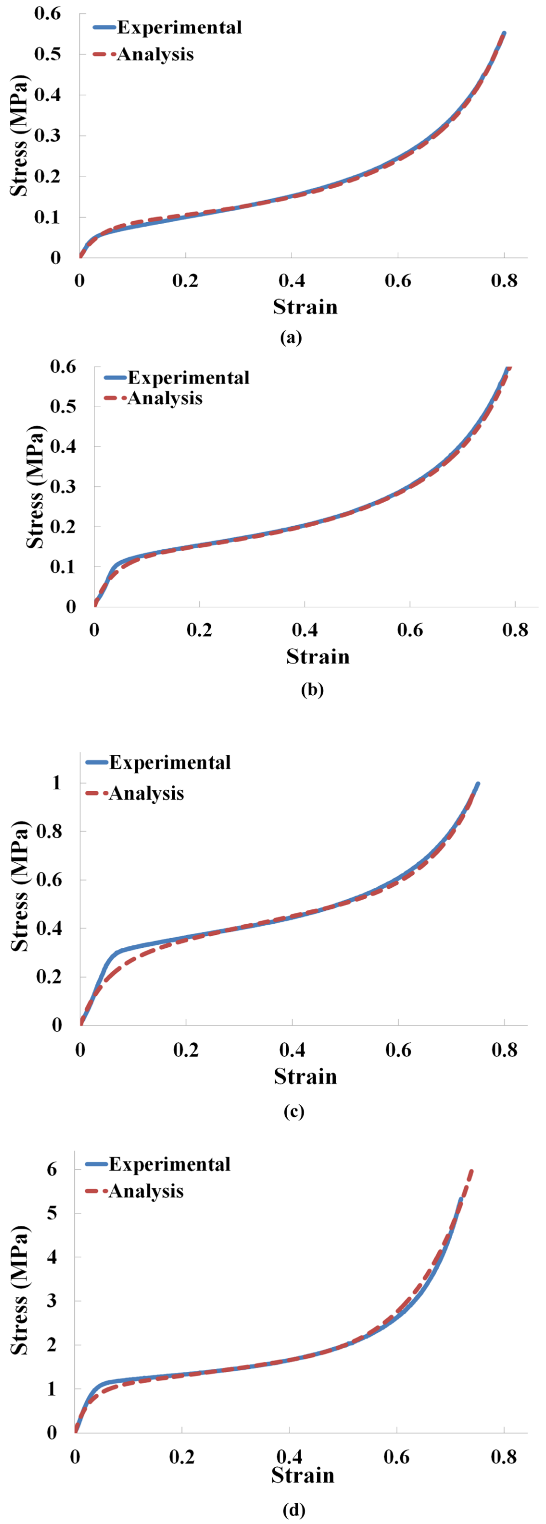

Fig. 2. Stress-strain relation: (a) EPP_1, (b) EPP_2, (c) EPP_3 and (d) EPP_4

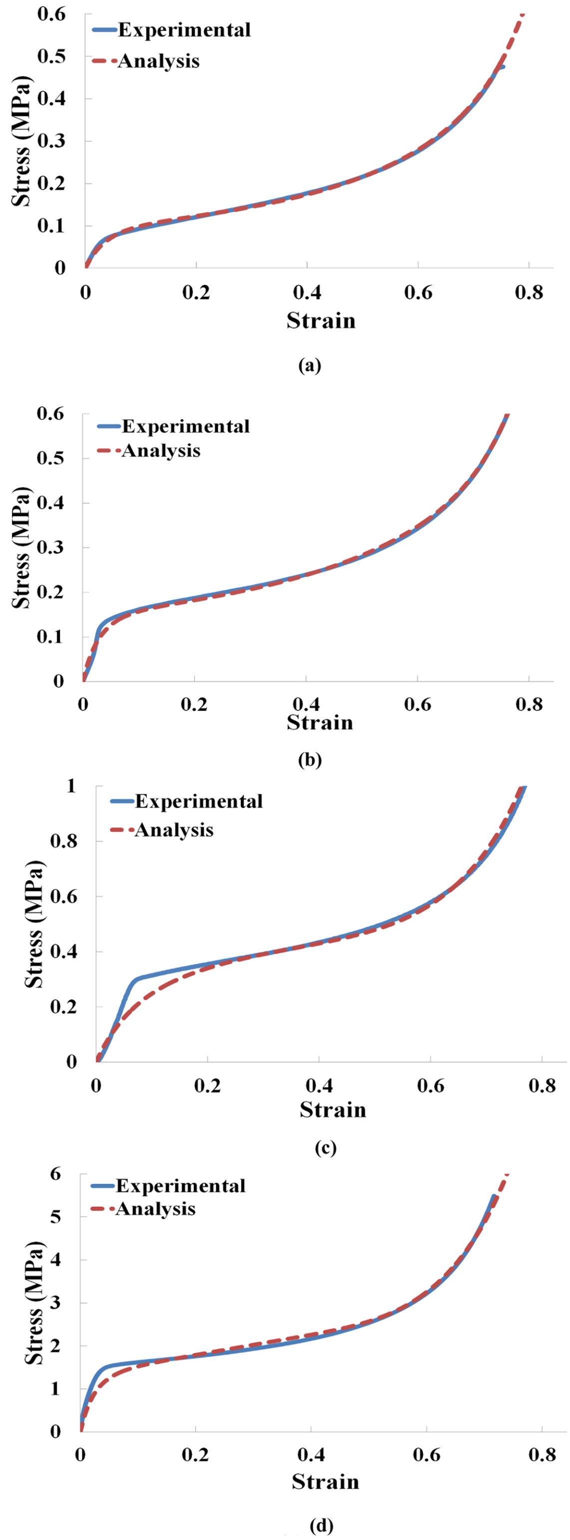

Fig. 3. Stress-strain relation: (a) EPP_1, (b) EPP_2, (c) EPP_3 and (d) EPP_4

Table 3은 식 (1)의 두 번째 항의 a, b의 결과 값을 나타내었다. Table 3에 나타난 바와 같이 b 값을 0.001로 통일시켰는데 이는 a 값에 의해 그래프가 결정되도록 하였으며, b 값을 통일 시키더라도 결과에는 무관한 것을 알 수 있었다. b 값이 일정하다고 무시하는 값은 아니며 b 값이 0.001 이하로 내려가게 되면 응력-변형률 곡선을 예측하는데 있어 0.1%

미만의 오차를 가지며 향후 충격량-운동량 이론을 접목하여 충격시험의 결과 데이터와 비교분석을 하는데 용이하게 쓰인다. 또한 a 값의 차이가 밀도의 크기에 따라 달라지는 것을 알 수 있었다. 이 준정적 시험으로 제안된 구성방정식의 매개 변수들을 얻을 수 있는데, 그리하여 임의의 변형 속도에 대한 응력-변형률 곡선을 얻는 것이 가능하다.

Fig. 3은 식 (1)을 적용하였을 경우 과 실험결과 값과 분석결과 값을 비교하여 EPP 폼의 밀도 별로 나타내었다.

이와 같이 응력-변형률 선도에 대한 실험결과 값과 분석결과 값을 비교해보면, 폴리우레탄에 적용하기 위하여 제안한 구성방정식도 재질이 다른 고분자에도 적용될 수 있다는 점을 보였으며, 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

3. 결 론

구조적 발포체를 설계하는 경우 발포체의 기계적 동작의 수학적인 설명이 필요로 하게 된다.

본 연구에서는 Kim 등[7]이 제시한 4가지의 다른 밀도를 갖는 원통형 시험편으로한 EPP의 준정적 및 충격 시험 DB를 바탕으로 Jeong 등[12]이 제시한 폴리우레탄에 대한 구성방정식을 EPP 폼에 대하여 다시 정의 하여 충격량-운동량 이론을 접목시켜 새로운 구성방정식을 제안하기 위한 DB 구축을 목표로 하였다. 구성방정식에 제안된 7개의 매개 변수는 두 번의 과정을 거쳐 생성된다.

1) 5개의 매개 변수는 기준 변형률 속도에 의해 결정된다.

2) 변형률 속도에 의해 결정되는 나머지 두 개의 매개 변수는 기준 변형률 속도와 다른 변형률 속도에 의해 결정된다.

그리하여, 폴리우레탄에 적용하기 위하여 제안한 구성방정식도 재질이 다른 고분자에 적용될 수 있다는 점을 보였으며, 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

향후 충격량-운동량 이론을 접목한 Munshi 등[15]이 제안한 수정된 Sherwood-Frost 모델을 접목시켜 충돌시 시편의 변형거동을 시간에 따라 예측 가능하며, 충격 시험결과 값과 분석결과 값을 비교 및 분석할 필요가 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Willinger, M., "Industrial Development of Composite Materials: Toward a Functional Appraisal", *Journal of Composite Science and Technology*, Vol. 34, 1989, pp. 53-71.
2. Wang, D.J., Qiu, J., Gui, Z.L., and Li, L.T., "Design for High-performance Functional Composite Thermister Materials by Glass/ceramic Composing", *Journal of Material Research*, Vol. 14, No. 7, 1999, pp. 2993-2996.
3. Moutos Franklin, T., Freed Lisa, E., and Guilak Farshid, "A Biomimetic Three-dimensional Woven Composite Scaffold for Functional Tissue Engineering of Cartilage", *Journal of Nature Materials*, Vol. 6, 2007, pp. 162-167.
4. Kim, M.H., Cho, S.S., and Ha, S.K., "Design and Structural Analysis of Aluminum Bumper for Automobiles," *Transactions of KSAE*, Vol. 7, No. 3, 1999, pp. 217-227.
5. Lee, S.J., Park, J.S., Koo, D.H., and Jung, B.H., "The Development of Material Technology Applied to Bumper Beam," *Transactions of KSAE*, Vol. 10, No. 4, 2002, pp. 206-215.
6. Choi, C.H., "Expanded Polypropylene and Packaging Materials," *Journal of the Monthly Packaging World*, No. 214, 1996, pp. 58-67.
7. Kim, H.K., Kim, B.J., Jeong, K.Y., and Cheon, S.S., "Experimental Study for the Impact Characteristics of Expanded EPP/EPS Foams", *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol.26, No. 6, 2013, pp. 343-348.
8. Bouuix, R., Voit, P., and Lataillade, J., "Polypropylene Foam Behaviour Under Dynamic Loading : Strain Rate, Density and Microstructure Effects," *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 36, Issue. 2, 2009, pp. 329-342.
9. 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.
10. Huh, H., Kang, W.J., and Han, S.S., "A Tension Split Hopkinsom Bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals," *Experimental Mechanics* , Vol. 42, No. 1, 2002, pp. 8-17.
11. Huh, H., Kim, S.B., Song, J.H., and Lim, J.H., "Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Steel Sheets for and Auto-body," *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 50, 2008, pp. 918-931.
12. 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.
13. Jeong, K.Y., Kim, B.J., and Cheon, S.S., "A Constitutive Equation for Expanded Polypropylene Foam under Dynamic Loading", *Proceeding of The Korean Society for Composite Materials, Korea*, No. 2013, pp. 149-150.
14. Kim, B.J., Kim, H.K., and Cheon, S.S., "A Study on the Absorbed Energy of Polymer material of Vehicles between Mass and Strain Rate Effect Velocity Value based on Constant Energy", *Proceeding of the Korean Society for Composite Materials*, Korea, May 2013, pp. 43-44.
15. Munshi, M.B., Jeong, K.Y., Choi, Y.J., and Cheon, S.S., "Crashworthy behaviour of Rigid Polyurethane Foam under Constant Impact Energy", *Proceeding of the 2007 Lecture and Paper Abstracts*, 2007, pp. 1776-1780.