

변형률 속도에 따른 EPP Foam의 대변형 동적 압축 특성에 관한 연구

최기상¹⁾ · 강우종²⁾ · 김기훈¹⁾ · 김성근³⁾

자동차부품연구원 내구기술연구센터¹⁾ · 경일대학교 기계자동차학부²⁾ · 호서대학교 자동차공학과³⁾

High Strain Rate Compression Behavior of EPP Bumper Foams

Kisang Choi¹⁾ · Woojong Kang²⁾ · Gihoon Kim¹⁾ · Seongkun Kim³⁾

¹⁾Structural Durability Research Center, Korea Automotive Technology Institute, 74 Yongjeong-ri, Pungse-myeon, Cheonan-si, Chungnam 330-912, Korea

²⁾School of Mechanical & Automotive Engineering, Kyungil University, Gyeongsbuk 712-701, Korea

³⁾Department of Automotive Engineering, Hoseo University, Chungnam 336-795, Korea

(Received 15 December 2008 / Accepted 11 February 2009)

Abstract : Bumper is designed to protect the automotive frame without damage at low velocity. Expanded polypropylene (EPP) foam is used in the bumper as an energy absorbing material. In order to exactly predict the energy absorbing performance of the foam material under impact loading condition, it is important to use high strain rate material properties. In this study, a new apparatus for dynamic compression tests was developed to investigate the high strain rate behavior of EPP foams. Three kinds of EPP foams which have different expansion ratios were tested to investigate the quasi-static and dynamic compression behavior. Quasi-static compressions were performed at low strain rates of 0.001/s, 0.1/s and 1/s. The dynamic compressions were carried out at high strain rates of 50/s and 100/s with the developed apparatus. It was observed that the EPP foam has significant strain rate effect as compared to quasi-static behavior.

Key words : Dynamic compression behavior(동적거동), Strain rate(변형률속도), EPP(Expanded polypropylene)

1. 서론

최근 자동차 산업은 에너지 절감과 강화된 환경 법규에 따라 보다 더 효율적이고 경제적인 차량 개발이 요구되고 있다. 이를 만족시키기 위하여 차량 경량화와 안전화가 중요한 목표가 되고 있으며, 차량용 범퍼의 설계에 있어서도 이러한 개념이 적용되어 범퍼를 구성하는 부품은 철강재료 대신 플라스틱 또는 비철재료로 대체 되어가고 있는 추세이다.^{1,2)}

차량용 범퍼는 저속 충돌 시 탄성적으로 변형하여 차량의 물리적 손상을 방지하고, 고속 충돌과 같

은 큰 충격에는 파손되면서 충돌에너지를 흡수하여 인명의 손상을 방지하는 기능을 담당하는 중요한 외장 부품 중 하나이다. 일반적으로 범퍼는 대부분의 충돌에너지를 흡수하는 범퍼 빔과 차량의 외관을 형성하는 범퍼 커버 그리고 충돌에너지를 일부를 흡수하는 EPP(expanded polypropylene) 폼으로 구성되어 있다. 현재 범퍼 빔의 경우 안전성과 경량화 측면의 연구가 많이 진행 되고 있으며,^{1,2)} 충돌에너지를 1차적으로 흡수하는 EPP 폼에 대한 연구도 점차 진행되고 있다.³⁻⁷⁾

차량 경량화와 안전성 관점에서 효과적으로 충돌에 대응할 수 있는 범퍼를 설계하기 위해서는 1차적으로 충돌에너지를 흡수하는 EPP 폼의 동적 재료특

*Corresponding author, E-mail: wjkang@kiu.ac.kr

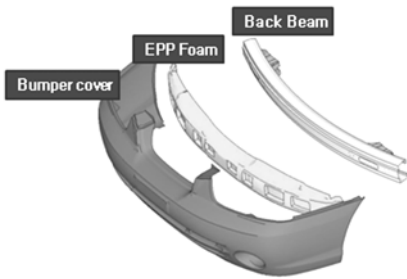


Fig. 1 Components of an automotive front bumper

성을 고려하는 것이 필수적이다. 동적 특성을 고려하기 위해서는 차량 충돌과 같은 고속 대변형, 즉 높은 변형률과 변형률 속도가 발생했을 때 소재의 변형거동이 어떻게 달라지는지 알 수 있어야 한다. Huh^{3,4,8,9)} 등은 소재의 고속변형특성을 연구하기 위하여 흡킨슨 바 시험기 및 중고속 인장시험기를 개발하여 자동차용 강판의 변형률속도 효과를 시험적으로 구하여 충돌해석의 기본 입력데이터로 활용될 수 있도록 하였다. 많은 소재들이 변형률 속도에 따라 강도 및 재료 특성의 변화가 발생하므로 변형률 속도에 따른 동적 물성치를 고려하는 것이 보다 신뢰할 수 있는 설계 결과를 제시할 수 있다. 소재의 동적거동에 관한 많은 연구들이 있으며 Kim¹⁰⁾ 등은 자동차용 인스트루먼트 패널(instrument panel)에 사용되는 폴리프로필렌(polypropylene) 복합재의 온도와 변형률 속도에 따른 인장시험 결과를 제시하였다. 본 연구에서는 높은 변형률 속도에서 소재의 동적 압축특성을 분석할 수 있는 하중 낙하 시험 장치를 개발하여 동적 압축 물성치 측정 방법을 연구하였으며, 범퍼 에너지 흡수재인 EPP 폼에 대하여 변형률 속도에 따른 응력-변형률선도의 변화에 대하여 비교 분석하였다.

2. 동적 압축 시험 장비 구축

높은 변형률 속도에서 EPP 폼의 동적 압축 특성을 분석하기 위하여 하중 낙하 시험 장치를 개발하였다. 본 시험기는 시편의 고속 변형 시 발생하는 하중과 변형량을 분석할 수 있도록 설계되었다.

2.1 임팩터(impactor) 낙하장치 설계

개발된 시험기는 임팩터(impactor)를 시편 상부로

자유 낙하시키는 기본 원리로 설계되었으며 시편 소재의 종류 및 얻고자 하는 변형률 속도에 따라 임팩터의 중량과 낙하 높이가 조절 가능하도록 설계되었다. 수직 높이가 약 3m이며 큰 충격에 대한 안전성을 고려하여 설계하였다. 임팩터에는 가이드 베어링이 설치되었으며 가이드 레일을 따라 낙하할 수 있도록 하였다. 전동 모터와 마그네틱 자석을 사용하여 시험 시 수동으로 임팩터를 견인해야 하는 불편함을 최소화하였다. 가이드 레일의 흔들림을 방지하기 위하여 상단에 구조물을 제작하여 벽면에 고정할 수 있도록 설계하였다. 다음 Photo. 1은 설계를 바탕으로 제작된 동적 압축 시험기를 보여주고 있다.

2.2 측정 장치 구성

EPP 폼의 응력-변형률 선도를 구하기 위해서는 시편이 변형하면서 발생하는 하중과 변형량을 정밀하게 측정할 수 있어야 한다. Photo. 1과 같이 로드셀(load cell)을 이용하여 시편에 가해지는 충격하중의 크기를 측정하였으며, 이때 사용된 로드셀의 용량은 500kN으로 시험기 하단부에 장착되어 충격하중을 측정하게 된다.

시험 대상 시편의 크기가 작기 때문에 시편 자체의 변위를 측정하기가 쉽지 않다. 따라서 시편 자체의 변위를 측정하는 방법보다 임팩터의 초기 위치

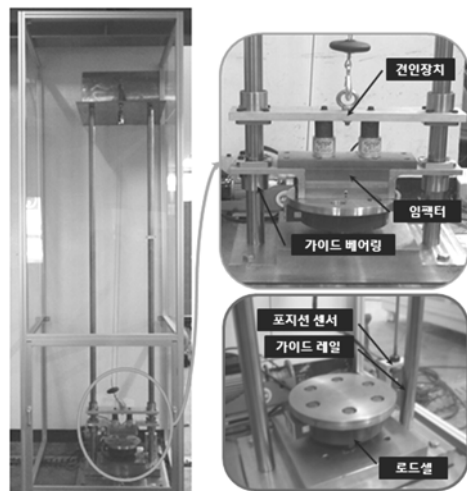


Photo. 1 Developed dynamic compression test apparatus

를 설정 후 임팩터의 변위를 측정하는 방법을 이용하여 시편의 변위를 간접적으로 측정하였다. EPP 폼에 비하여 임팩터의 강도가 크기 때문에 임팩터의 변형은 없는 것으로 가정하였다.

보편적으로 변위를 측정하는 센서로는 LVDT (linear variable differential transformer)가 많이 사용되고 있으며 본 연구에서도 비접촉식 LVDT를 이용하여 변위 측정을 시도하였으나 빠른 속도로 낙하하는 물체의 변위 측정에 정밀도가 매우 떨어지는 현상이 발생하였다. 따라서 리니어 포지션 센서를 시험기에 장착하여 임팩터의 변위를 측정할 수 있도록 하였다. 리니어 포지션 센서(linear position sensor)는 임팩터에 결합되어 있는 자석 고리의 위치에 따라 변위를 측정하게 된다.

이상과 같이 하중, 변위 측정을 위한 계측 장치를 구성하였으며 EPP 폼의 변형거동을 시각적으로 관찰하기 위하여 시험장면을 고속카메라로 촬영하였다. 1초당 1,200장을 촬영하였으며 임팩터에 관측점을 설정 후 임팩터의 운동이 잘 관찰될 수 있도록 하였다. 로드셀과 리니어 포지션 센서로부터 계측된 신호는 증폭기를 거친 후 25kHz의 데이터 속도로 분석되었다. 특히 동적시험의 경우 하중이 진동하는 경향이 크기 때문에 약 1kHz이상의 데이터는 필터링이 요구된다.

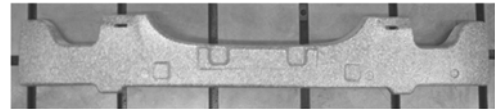
3. EPP 폼의 압축 시험

시험에 사용된 EPP 폼은 자동차용 완충제로 많이 사용되는 15배, 30배 및 40배율의 범퍼폼이다. 시편의 형상은 블록(block)형태로써 단면은 50×50mm, 높이는 30mm로 제작하였다.

Photo. 2는 시편 제작에 사용된 범퍼 EPP 폼과 제작된 시편을 나타내고 있다. 압축 시험은 변형률 속도에 따라 준정적 시험과 고속 변형 시험으로 구분하여 실시하였다. 준정적시험은 UTM(universal testing machine)을 이용하였으며, 고속 변형 시험은 개발된 고속 압축시험기를 이용하여 변형률 속도 50/s, 100/s에 대하여 수행되었다.

3.1 EPP 폼 특징 및 물성치

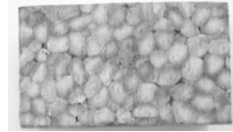
EPP는 범용 플라스틱인 폴리프로필렌을 물리적



(a)



front view



side view

(b)

Photo. 2 EPP bumper foam and a specimen: (a) automotive bumper foam; (b) specimen

으로 발포한 구형체의 입자를 말하며 우수한 완충성과 가공성을 가지고 있다. EPP 폼은 발포 배율에 따라 5배, 8배, 10배, 15배, 30배, 40배 등으로 나뉘지며, 15배, 30배, 40배의 경우 자동차용 범퍼의 완충재로 사용되고 있다. Table 1은 EPP 폼의 기본 물성치를 나타내고 있다.

Table 1 Basic mechanical properties of EPP foams

	Unit	Expanding ratio			
		15P	30P	45P	
Density	g/cm ³	0.06	0.03	0.02	
Tensile	Strength	kg/cm ²	9.6	4.3	2.7
	Elongation	%	38.3	40	38
Compression strength	kg/cm ²	2.9	1.4	0.8	
Hardness	Shore A scale	62	53	32	
Permanent compression strain	%	6.9	7.9	9.8	
Heat conductivity	Kcal/mhr °C	0.035	0.034	0.033	

3.2 EPP 폼의 준정적 및 고속시험

준정적 시험은 Photo. 3에 나타난 바와 같이 UTM에 시편 압축을 위한 지그를 장착하여 수행하였다. 준정적 시험의 경우 UTM의 변위와 속도를 조절하여 일정한 변형률 속도에 대한 시편의 특성을 파악할 수 있다. 변형률 속도는 0.01/s, 0.1/s, 1/s에 대하여 실시하였으며 각 EPP 폼의 배율별로 실시하여 준정적 압축 상태의 응력-변형률 선도를 구하였다.

개발된 고속 압축 시험기를 이용하여 각 배율별



Photo. 3 Quasi-static test of EPP foam

EPP 폼의 고속 변형 시험을 실시하였다. 시험은 변형률 속도 50/s와 100/s에 대하여 실시하였으며 준정적 압축 시험을 통하여 파악된 EPP 폼의 저속 압축 특성과 비교 분석하였다. 변형률 속도를 설정하기 위하여 임팩터의 질량과 낙하 높이를 조절하였으며 각 EPP 폼에 대한 예비 시험을 진행한 후 본 시험을 수행하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 시험에 의하여 측정된 각 배율별, 변형률 속도별 하중선도와 시편의 변위 선도를 나타내고 있다. 또한 Fig. 4는 측정 데이터를 이용하여 계산된 시편의 평균적인 변형률 속도의 변화를 나타내고 있다. 고속 변형 시험에서는 준정적 시험과는 달리 임팩터의 속도가 일정하게 유지되지 않으므로 일정한 변형률 속도를 유지할 수 없다. 따라서 변형하는 동안 평균값을 취하여 대표 변형률 속도로 사용하였다.

이와 같이 측정된 데이터를 바탕으로 각 배율별 EPP 폼의 응력 및 변형률을 계산하였다. EPP 폼의

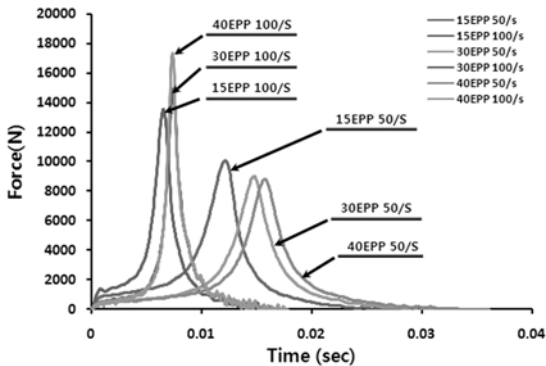


Fig. 2 Load histories of specimens obtained from the dynamic compression tests

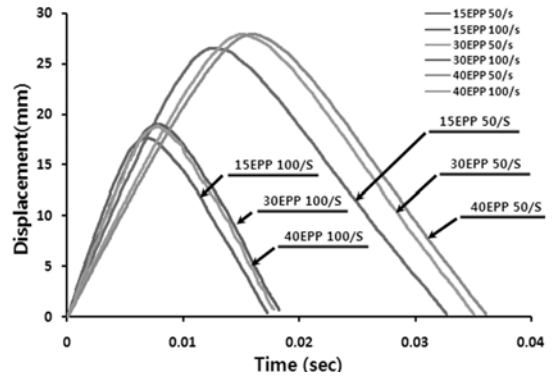


Fig. 3 Displacements of the impactor obtained from the dynamic compression tests

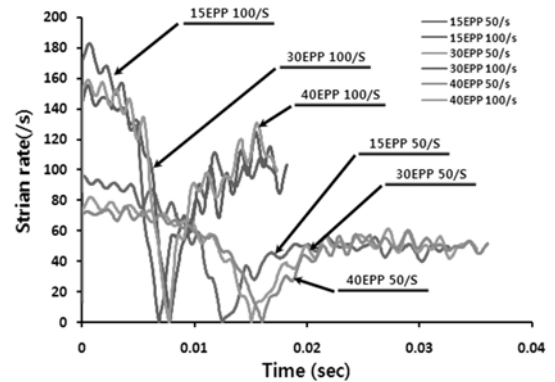


Fig. 4 Strain rate histories obtained from the dynamic compression tests

고속 변형 시험에서 시편의 단면적의 변화를 알아보기 위하여 다음 Photo. 4와 같이 고속카메라를 이용하여 시험과정 중 시편의 변형을 측정하였다.

Photo. 4의 경우 초당 1,200프레임으로 측정한 것으로 낙하한 임팩터는 시편과 충돌하여 ⑥에서 시편의 최대 변형과 최대 하중을 발생시킨다. 위 사진을 바탕으로 고속카메라 틀을 이용하여 각 상황에서 시편의 단면적 변화를 계산하여 보았다. Fig. 5는 고속 변형 중 시편의 횡방향 길이변화를 나타낸 것으로 최대 약 0.02 정도로 EPP 폼의 수직방향 변형률에 비하여 아주 작은 것으로 나타났다. 이것은 변형하는 동안 EPP 폼의 포와송비가 거의 0에 가깝다는 것을 의미한다. 따라서 초기 단면적을 이용한 공칭응력을 계산하여 각 배율별 EPP 폼의 응력-변형률 선도를 생성하였다.

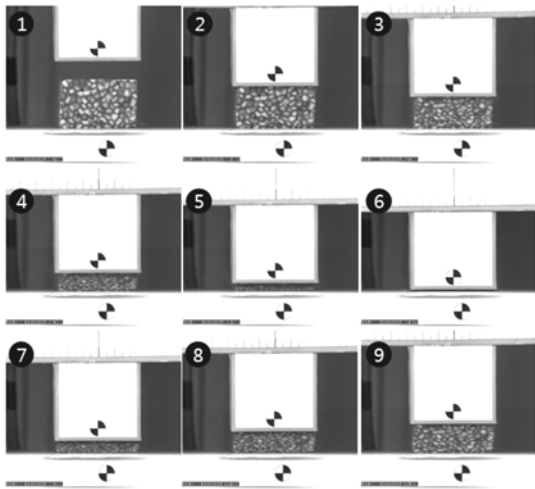


Photo. 4 Series of pictures captured by a high speed camera

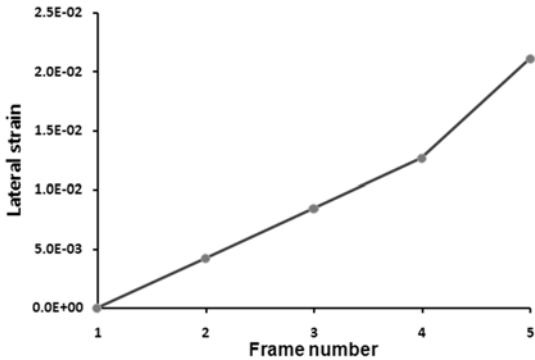


Fig. 5 Lateral strains calculated with pixels in Photo 4 as the foam specimen compressed

4. 시험 결과

앞서 제시한 시험 방법에 따라 각 배율별 EPP 폼의 준정적 시험 및 고속 압축 시험을 실시하여 각 변형률 속도에 대한 압축 특성을 비교 분석하였다.

4.1 15배 EPP 폼

Fig. 6은 시편의 크기에 따른 응력-변형률 선도의 차이를 보기위한 것으로 변형률 속도 50/s에서 시편의 단면적을 변경하였을 경우의 응력-변형률 곡선이다. 시편의 단면적은 시편의 기본 크기인 50×50mm인 경우와 30×30mm의 두 가지 경우에 대하여 시험을 실시하였다. 부하과정에서의 측정된 응력-변형률 선도를 확대한 결과 시편의 단면적 차이에

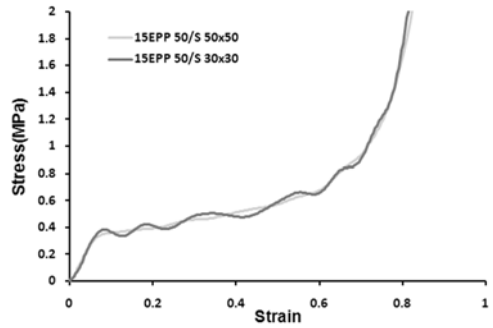


Fig. 6 Effect of the sectional areas of the foam specimens

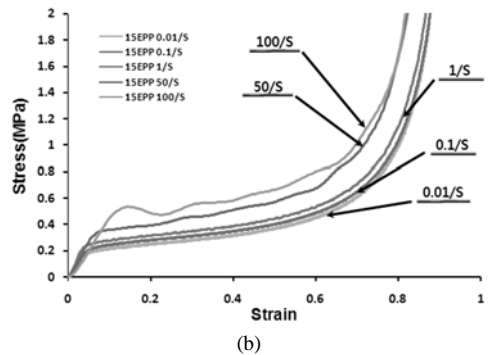
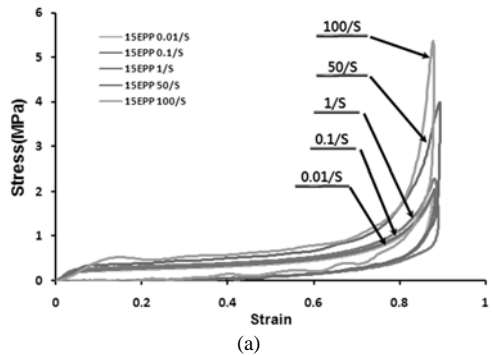


Fig. 7 Stress-strain curves of 15P EPP at the indicated strain rates: (a) loading and unloading behavior; (b) magnification of the loading curves

상관없이 유사한 결과를 보이고 있다. 따라서 시험이 수행된 단면적 범위 내에서는 단면적 변화에 대한 영향이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있다.

Fig. 7은 측정된 데이터를 바탕으로 생성한 15배 EPP 폼의 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. Fig. 7(b)와 같이 준정적 압축 시험에서는 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도가 거의 유사한 것으로 나타나지만 고속 변형의 경우 준정적

시험결과와 상당한 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이는 변형률 속도 효과가 크게 발생하고 있음을 의미하며 변형률 속도 50/s에서의 시험결과와 준정적 압축시험 결과를 비교하였을 때 약 0.1MPa 이상의 응력이 증가한 것을 볼 수 있다. 50/s로 변형하는 경우 변형률 0.4에서 약 25%의 응력 증가가 관찰되었으며 100/s의 경우 준정적인 경우에 비하여 약 50% 정도 응력이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 일정한 변형률에서 변형률 속도가 증가함에 따라 응력이 증가하는 변형률 속도 경화효과^{3,11)}로 파악되었다.

4.2 30배 EPP 폼

15배 EPP 폼과 동일한 방법을 이용하여 30배 EPP 폼에 대하여 시험 결과를 비교 분석하였다. Fig. 8은 30배 EPP 폼의 변형률 속도에 따른 응력-변형률 선도를 나타내고 있다. 15배 폼에 비하여 50/s와 100/s의 응력-변형률 선도는 차이가 없는 것으로 나타났다.

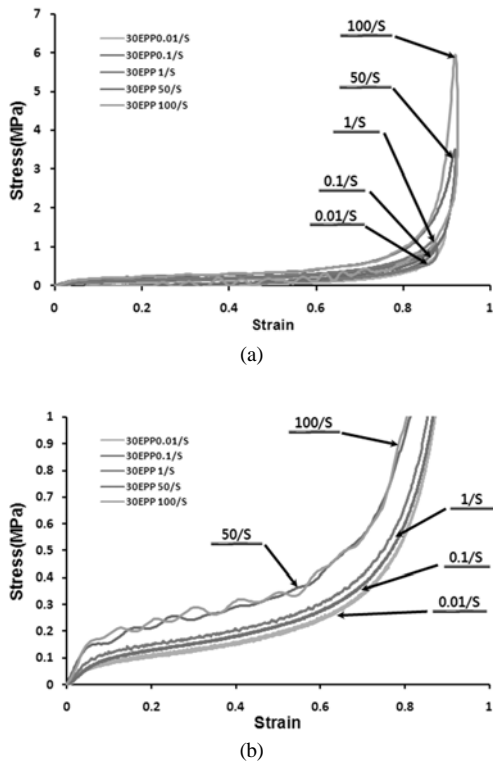


Fig. 8 Stress-strain curves of 30P EPP at the indicated strain rates: (a) loading and unloading behavior; (b) magnification of the loading curves

4.3 40배 EPP 폼

40배 EPP 폼의 시험결과는 Fig. 9와 같다. 다른 폼과 같이 고속 변형시 변형률 속도 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 3종류의 EPP 폼 중 동일한 변형률 조건에서 가장 낮은 응력수준을 보이고 있다.

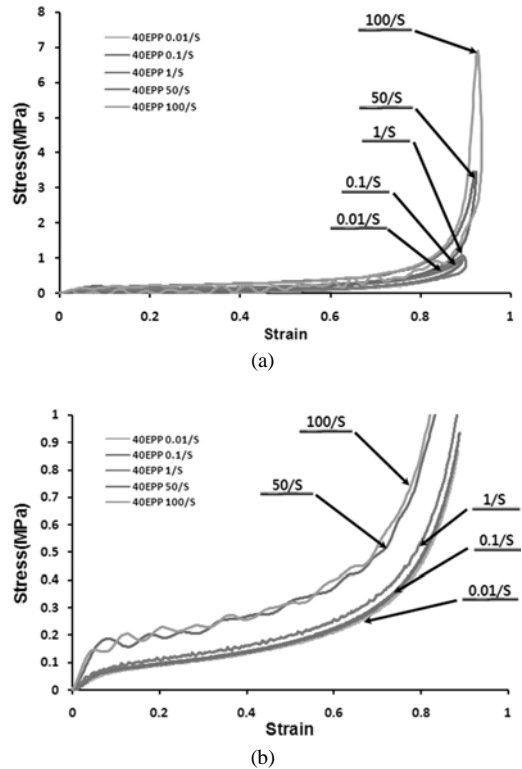


Fig. 9 Stress-strain curves of 40P EPP at the indicated strain rates: (a) loading and unloading behavior; (b) magnification of the loading curves

4.4 각 배율별 EPP 폼 비교

각 배율별 EPP 폼의 시험 결과 중 준정적 시험 0.1/s와 고속변형 50/s의 시험 결과를 종합해 보면 다음 Fig. 10, Fig. 11과 같다. 준정적 시험의 경우 각 배율의 응력-변형률 곡선은 확연한 차이를 보이고 있다. 특히, 15배 EPP 폼의 경우는 다른 폼에 비하여 강한 것으로 나타났지만 복원력은 거의 비슷한 수준인 것으로 나타났다. 30배 폼과 40배 폼을 비교할 경우 30배 폼이 다소 높은 강도를 갖고 있으며 압축률이 커질수록 그 차이가 더욱 증가하는 것으로 나타났다. 고속 압축시험의 경우에도 15배 폼이 다른

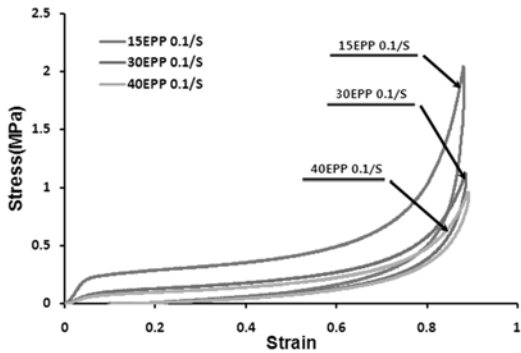


Fig. 10 Comparison of stress-strain curves between various foams under a quasi-static loading compression condition

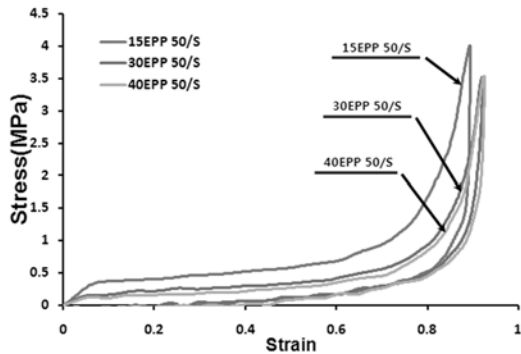


Fig. 11 Comparison of stress-strain curves between various foams under a dynamic compression loading condition

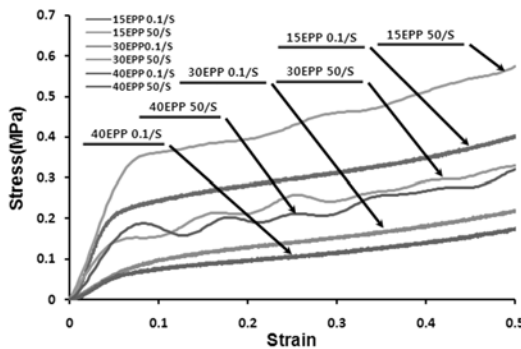


Fig. 12 Comparison of stress-strain curves between various foams

배율의 폼에 비하여 강도가 큰 것으로 파악되었으나, 준정적 시험과 다르게 30배와 40배 폼의 경우 유사한 응력-변형률 선도를 나타내는 것으로 파악되었다.

Fig. 12는 Fig. 10과 Fig. 11의 결과를 종합하여 확대한 응력-변형률 곡선으로 변형률 속도 0.1/s와 50/s의 응력의 차, 즉 변형률 속도 경화효과를 비교할 수 있다. EPP폼의 변형률 속도 경화효과는 배율 즉 밀도에 따라 차이가 있으며 밀도가 높은 저 배율의 EPP폼일 수록 변형률 속도 경화효과가 큰 것으로 나타났다. 이것은 폼의 밀도가 높아질수록 각 셀의 관성이 증가하기 때문에 충격하중에 대하여 강도가 증가하는 micro-inertia 효과에 기인하는 것으로 알려져 있다.³⁾

이러한 EPP 폼 시험 결과는 범퍼 설계에서 중요하게 이용될 수 있다. 준정적인 시험을 통하여 얻어진 EPP 폼의 물성을 적용하여 충돌문제를 해석할 경우 실제보다 범퍼 폼의 강도를 크게 저평가하게 된다. 따라서 충돌해석 및 보행자 해석을 수행할 경우 범퍼 폼의 변형률 속도 효과를 정확하게 고려할 수 있는 본 연구에서 얻어진 물성치를 활용하는 것이 타당하다고 할 수 있다. 고속 압축 시험을 통하여 얻어진 응력-변형률 선도는 준정적인 경우와는 달리 진동하는 특성을 보이게 된다. 따라서 유효요소 해석에 그대로 적용할 수는 없으며 데이터의 후처리 과정이 필요할 것으로 판단된다.^{3,5,7)}

5. 결론

본 연구에서는 변형률 속도에 따른 동적 압축특성을 측정할 수 있는 시험 장비를 개발하였으며, 이를 이용하여 범퍼 구성 재료인 EPP 폼의 동적 재료특성에 대하여 연구하였다. UTM을 이용한 준정적 시험과 개발된 장비를 이용한 변형률 속도 50/s와 100/s의 고속 변형 시험을 실시하였다. 또한 EPP 폼의 배율에 따른 변형률 속도 효과를 비교 분석하였다. 배율별 EPP폼의 고속 변형 시험결과 50/s의 경우 약 25%의 변형률 속도 경화효과가 나타남을 관찰하였으며 100/s의 경우 50%의 응력이 증가하는 것으로 나타났다. 변형률 속도 경화 현상은 배율이 작고 밀도가 큰 15배 폼에서 가장 크게 발생하는 것으로 나타났다. 또한 준정적 시험의 경우 배율별 뚜렷한 재료특성을 보이고 있으나, 고속 압축시험의 경우에는 30배와 40배의 폼이 유사한 응력-변형률 선도를 나타내는 것으로 파악되었다. 이러한 EPP 폼의

시험결과는 보다 신뢰성 차량 범퍼 설계를 위하여 사용될 수 있다.

References

- 1) M. H. Kim, S. S. Cho and S. K. Ha, "Design and Structural Analysis of Aluminum Bumper for Automobiles," Transactions of KSAE, Vol.7, No.3, pp.217-227, 1999.
- 2) S. J. Lee, J. S. Park, D. H. Koo and B. H. Jung, "The Development of Material Technology Applied to Bumper Beam," Transactions of KSAE, Vol.10, No.4, pp.206-215, 2002.
- 3) R. Bouuix, P. Viot and J. Lataillade, "Polypropylene Foam Behaviour Under Dynamic Loading : Strain Rate, Density and Microstructure Effects," International Journal of Impact Engineering, Vol.36, Issue 2, pp.329-342, 2009.
- 4) S. Ouellet, D. Cornin and M. Worswick, "Compressive Response of Polymeric Foams Under Quasi-static Medium and High Strain Rate Conditions," Polymer Testing, Vol.25, No.6, pp.731-743, 2006.
- 5) M. Avallè, G. Belingardi and R. Montannini, "Characterization of Polymeric Structural Foam Under Compressive Impact Loading by Means of Energy-absorption Diagram," International Journal of Impact Engineering, Vol.25, No.5, pp.455-472, 2001.
- 6) U. E. Ozturk and G. Anlas, "Energy Absorption Calculation in Multiple Compressive Loading of Polymeric Foams," Materials and Design, Vol. 30, Issue 1, pp.15-22, 2009.
- 7) Z. Wang, Z. Li, J. Ning and L. Zhao, "Effect of Heat Treatment on the Crushing Behaviour and Energy Absorbing Performance of Aluminium Alloy Foams," Materials and Design, Vol.30, Issue 4, pp.977-982, 2009.
- 8) H. Huh, W. J. Kang and S. S. Han, "A Tension Split Hopkinson Bar for Investigating the Dynamic Behavior of Sheet Metals," Experimental Mechanics, Vol.42, No.1, pp.8-17, 2002.
- 9) H. Huh, S. B. Kim, J. H. Song and J. H. Lim, "Dynamic Tensile Characteristics of TRIP-type and DP-type Steel Sheets for an Auto-body," International Journal of Mechanical Sciences, Vol.50, pp.918-931, 2008.
- 10) J. S. Kim, H. Huh, K. W. Lee, D. Y. Ha, T. J. Yeo and S. J. Park, "Evaluation of Dynamic Tensile Characteristics of Polypropylene with Temperature Variation," Int. J. Automotive Technology, Vol.7, No.5, pp.571-577, 2006.
- 11) W. J. Kang and H. Huh, "Crash Analysis Auto-Body Structures Considering The Strain-Rate Hardening Effect," Int. J. Automotive Technology, Vol.1, No.1, pp.35-41, 2000.