폴리프로필렌 폼 밀도가 충격에너지 흡수에 미치는 영향에 대한 실험적 연구

이윤기 · 성원석[†*] · 임동진[**] · 선신규[***]
조선이공대학 자동차과 · [*]조선대학교 BK사업단 · [**]한국차량공업(주) · [***]순천대학교 산학협력단
(2008. 9. 1. 접수 / 2008. 11. 20. 채택)

An Experimental Study for the Effect of the Density of Polypropylene Foams on the Absorption of Impact Energy

Yoon-Ki Lee · Won-Suk Sung[†*] · Dong-Jin Lim[**] · Shin-Kyu Sun[***]
Department of Automobile, Chosun College of Science & Technology
[*]BK21 Education Center of Chosun University
[**]Kovico(Korea vehicle corperate)
[***]Industry-Academic Cooperation Foundation, SCNU
(Received September 1, 2008 / Accepted November 20, 2008)

Abstract : Polypropylene(PP) foams are widely used as protective materials such as automotive bumper and safety helmet, but whose dynamic behaviour are not well defined. In this paper, the compression tests by Split Hopkinson Pressure Bar were conducted to obtain the stress-strain curve and to investigate the effect of density on the absorption of impact energy in the PP foams. Three kinds of foams were chosen depending upon the density. The result of the experiment has revealed that the stiffness of the low-density PP foam is remarkably increased at high strain rate compared with that of the high-density PP foam. And it is also shown that the absorption of impact energy are greatly influenced by the density of PP foam. These results are expected to be utilized for the development of a protective structure with polymer foams.
Key Words : compression test, impact energy, polypropylene, foam, split hopkinson pressure bar

1. 서 론

현대 사회에 있어서 충격하중을 받는 재료의 거동에 관한 연구는 공학의 많은 분야에 깊은 관계를 갖고 있다. 기계의 성능이 향상됨에 따라서 기계의 작동속도가 높아지게 되었고, 따라서 각 부재는 충격하중을 견디면서 그 기능을 수행하도록 설계되는 것이 필수 조건이 되어 왔다. 뿐만 아니라 자동차에서는 충돌에 관한 안전성의 확보 및 에너지 관련기기, 항공기 등의 내충격성에 대한 안전설계가 중요한 문제로 되고 있다. 그러나 충격하중을 받을 때 하중은 응력파[1]의 형태로 고체 속을 전파하고, 응력파에 의한 응력장은 정적인 경우에 비해 현저히 다른 거동을 하고 있고, 아직 정량적으로 충분히 규명하지 못하고 있는 부분이 많다. 특히 환경공해가 적으면서 자동차 범퍼 및 안전헬멧에 사용되고 있는 폴리프로필렌 폼에 대한 충격 연구는 아직까지 미비한 상태이다.

충격실험방법은 1914년 Hopkinson[2]에 의해 처음으로 소개된 홉킨스 압력봉(SHPB, Split Hopkinson Pressure Bar)을 이용한 실험방법이 있다. SHPB는 그 이후 Kolsky와 Davies[3]가 압력봉에서의 변위를 측정하기 위한 콘덴서를 설계함으로써 충격시험기술이 많은 발전을 이루었으며, 1941년 Kolsky에 의해 처음으로 2개의 압력봉 사이에 시편을 설치하는 SHPB가 소개되었다. 일반적인 실험 방법으로는 10^3/sec 이상의 고변형률 속도를 얻는 것이 어렵기 때문에, 이러한 고변형률 속도를 얻기 위해 SHPB가 비교적 널리 이용되고 있다.

충격하중을 받는 플라스틱 재료의 거동에 대한

[†] To whom correspondence should be addressed.
boramesung@naver.com

연구를 위해서도 SHPB가 사용되었으나[4,5], 상대적으로 낮은 임피던스의 재료인 폴리머 폼 재료의 실험을 기존의 SHPB로 하기에는 무리였다. 이런 문제점을 해결하기 위하여 1990년대 후반 이후 나일론 봉을 이용하여 SHPB를 구성한 실험장치가 선보이게 되었다. 나일론 봉은 인코넬의 임피던스에 비하여 상대적으로 낮기 때문에 입력봉의 충격파를 출력봉으로 전달하는데 적당하다[6]. 또한 기존의 SHPB와 비교하여 나일론 봉의 크기가 폼 재료의 충격 실험시 중요한 인자라 생각하여 세 종류의 봉의 크기를 연구하기도 하였다.

본 연구에서는 충격완화재료로 널리 쓰이는 폴리프로필렌 폼(PP foam)의 밀도에 따른 충격에너지 흡수를 고찰하였다. 충격 실험은 아크릴 봉으로 구성된 SHPB를 이용하여 $10^3 \sim 10^4$/sec의 변형률 속도범위 안에서 실시되었으며, 충격 실험결과를 비교·분석하였다. 또한 폴리프로필렌 폼 시편은 밀도에 변화를 주어서 응력-변형률 선도 및 에너지 흡수율의 변화를 살펴보았다. 그리고 응력감쇠와 충격에너지 흡수가 밀도와 어떤 관련이 있는지에 대하여 연구하였다. 이러한 실험 결과를 바탕으로 폴리프로필렌 폼을 이용한 제품 설계시 유용한 데이타를 제공하는데 궁극적인 목적이 있다.

2. SHPB 실험장치의 구성 및 원리

2.1. SHPB 실험장치

본 연구를 위해 사용한 SHPB의 구성은 Fig. 1의 개략도에서 보는 바와 같이 크게 입력봉(Incident Bar)과 출력봉(Transmitted Bar) 사이에 시편을 갖는 두 개의 탄성 압축봉과 입력봉에 충격을 가하는 충격봉(Striker Bar)으로 이루어진 실험장치이다. 이들 봉의 재료는 아크릴을 사용하여 재료의 임피던스 값을 낮춰 데이타 측정을 용이하게 하였다. 봉의 임피던스 값이 높고 시편의 임피던스 값이 상대적으로 낮으면 충격파가 전달될 때 데이타 측정이 어려워진다.

이들 봉의 길이는 충격봉은 26cm, 입력봉은 160 cm, 출력봉은 75cm로 하였으며, 봉의 직경은 1.85 cm로 일정하게 하였다. 그리고 봉을 전파하고 있는 응력파를 검출하기 위한 주변 장치들은 시편으로부터 입력봉와 출력봉 양쪽으로 같은 거리에 위치하고 있는 스트레인게이지와 스트레인 게이지에서 검출한 응력파를 증폭하기 위한 증폭기(Dynamic Amplifier)가 있으며, 증폭된 신호를 디스플레이하기 위한 A/D 보드가 내장된 컴퓨터를 이용하였다. 충격봉은 질소가스를 사용하는 가스총에 의해서 발사된다. 시편에 가해지는 압축파의 크기를 파악하기 위해서는 충격봉의 속도를 측정해야 하기 때문에, 그 속도는 2조의 광센서 속도측정장치에 의해 계측하였다.

충격봉의 타격으로 인해 각각의 봉에 전달되는 신호를 검출하기 위한 센서는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 스트레인게이지 E, A, B의 순서로 설치하였다. 각각은 시편으로부터 양쪽 봉으로 37.5cm 떨어진 거리에 스트레인게이지 A와 B를 부착하고 스트레인게이지 E는 외부용으로 스트레인 게이지 A보다 37.5cm 앞쪽에 설치하여 최초 발생되는 응력파의 검출시점을 미리 지정하여 이 응력파를 놓치지 않도록 부착하였다.

또한 각 부분의 스트레인 게이지는 굽힘의 영향을 제거하기 위해 1축용 스트레인게이지를 반경방향으로 축대칭이 되도록 90도 간격으로 4개를 사용했으며, 연결은 센서의 민감도를 증가시키고 충격파 이외의 신호를 보정이 가능하도록 Full-Bridge 방식으로 결선하였다.

본 연구에서 사용된 스트레인게이지는 Tokyo Sokki Kenkyujo Co.의 GFLA-6-350-70-1을 사용했으며, 측정저항은 350Ω, 입력 전압은 10V로 하였다. 기존의 스틸용 120Ω 스트레인게이지를 이용할 경우 아크릴 표면에서 발생하는 열을 발산할 수 없기 때문에 아크릴 봉의 변질은 물론 스트레인게이지 자체에서 노이즈를 발생시킬 수 있다. 또한 1축방향의 스트레인게이지보다 2축방향의 스트레인게이지의 국부적인 발열양이 심하므로 1축 스트레인게이지를 사용하는 것이 실험데이타의 오차를 줄일 수 있다. 이러한 이유 때문에 플라스틱용 스트레인게이지를 사용해야 한다. 또한 내열선이 있어 스트레인게이지 부착시 기존의 스트레인게이지보다 더 편리하다.

스트레인게이지로부터 검출된 응력파에 대한 신호는 증폭기로 약 300~500배 정도로 증폭시켰으며, 여기에서 검출된 충격파는 아주 빠른 시간에 지나가므로 Sampling Rate가 매우 큰 오실로스코프를 사용해야만 한다. 따라서 본 실험기에서는 50MHz 정도의 Sampling Rate를 갖는 A/D 보드를 컴퓨터에 설치하였고 별도의 소프트웨어를 사용하여 스트레인게이지에서 나오는 응력파를 한눈에 쉽게 알아볼 수 있도록 모니터링 하였다. 측정된 응력파에 대한 데이타는 프로그램을 이용하여 시편에서의 응력-변형률선도를 구하였다.

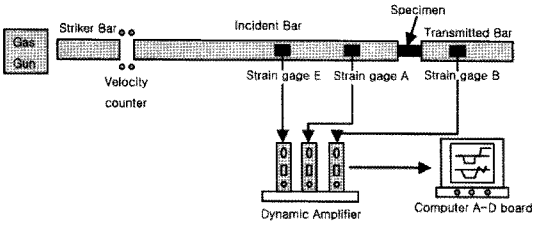


Fig. 1. Schematic diagram of SHPB.

2.2. SHPB 실험장치의 원리

충격봉가 입력봉에 충돌될 때 그 충격 면에서는 사각형 형태의 초기 탄성 압축파가 생성되며 그 압축 응력파는 입력봉쪽으로 전파되기 시작한다. 이러한 최초에 발생된 초기 압축 응력파 $\varepsilon_I(t)$는 시편이 위치하고 있는 지점으로부터 입력봉쪽으로 1/4 만큼 떨어진 곳에 위치하고 있는 스트레인게이지 A에 의해 처음으로 측정된다. 입력봉을 통과한 탄성 압축파는 시편이 위치한 부분에서 압축파의 지속시간 동안 시편에 변형을 준 후, 일부가 탄성 인장파의 형태로 반사되어 입력봉의 스트레인게이지 A에 의해 다시 $\varepsilon_R(t)$로 측정된다. 동시에 반사되고 남은 일부의 탄성 압축파는 시편을 통과하게 된다. 이러한 통과 탄성 압축파는 출력봉의 중간지점에 위치한 스트레인게이지 B에 의해 $\varepsilon_T(t)$로 측정된다. 본 실험에 쓰인 봉의 재료인 아크릴의 압축파 전달속도는 4.2233×10^5cm/s이므로 반압축파의 길이는 26cm로서 봉에서 37.5cm 떨어진 스트레인레이지에 간섭의 영향을 주지 않는다.

시험편의 변형률은 반사된 응력파의 진폭에 직접적으로 비례하며 또한 시편의 응력은 시편을 통과한 응력파의 진폭에 직접적으로 비례한다. 따라서 스트레인게이지 A와 스트레인게이지 B로써 시편 양단에서의 반사 응력파와 통과 응력파, 이들 두개의 신호를 정확히 측정할 수 있다면 시편에서의 응력과 변형률 값을 정확히 산출해 낼 수 있다.

3. 충격에너지 이론

먼저, 스트레인게이지에서 응력파 측정결과에 따른 응력-변형률 관계식을 정리하면 다음과 같다.

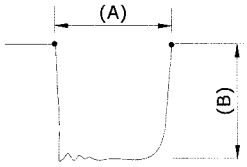


Fig. 2. Initial stress wave.

먼저 v_0의 속도로 충격봉가 입력봉에 충격을 주게 되면 입력봉에서는 Fig. 2와 같은 형태의 초기 응력파가 발생하게 되는데, 충격봉의 길이 및 속도에 따라 응력파가 식 (1)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned}(A) &\rightarrow \Delta t = \frac{2L_p}{c_0} \\ (B) &\rightarrow \bar{\varepsilon} = \frac{v_0}{2c_0}\end{aligned} \tag{1}$$

여기서, Δt는 하나의 응력파가 발생하여 지속되는 시간이며, $\bar{\varepsilon}$는 봉의 변형률을 나타내고, L_p는 충격봉의 길이, c_o는 아크릴의 응력파 속도, v_0는 충격봉의 속도이다.

본 연구의 실험장치로써 구성된 각 봉의 재질은 아크릴이며, 재료 상수는 압축시험을 통해서 구하였으며, Table 1에서 보는 바와 같다. 이 탄성계수 값과 밀도를 이용하여 응력파 속도를 구하기 위하여 다음 식을 사용하였다.

$$c_0 = \sqrt{\frac{E}{\rho}} = \sqrt{\frac{2.20\times10^5}{1.21\times10^{-3}}} = 4.22\times10^5 cm/\sec$$

Fig. 3은 충격시험에 의해 입력봉 및 출력봉에서 얻어지는 대표적인 응력파 형상을 보여주고 있다. 초기에 발생한 압축 응력파는 입력봉에 있는 스트레인게이지 A에 의해서 (ΔV)의 크기를 갖는 압축파 ε_I을 검출되고, 시편부분에서 이 응력파의 일부는 $(\Delta V)_\sigma$의 크기를 갖는 인장파 ε_R의 형태로 반사되어서 다시 입력봉에 있는 스트레인게이지 A에 의해 검출되게 된다.

동시에 시편부분에서 일부의 압축파는 시편을 통과하여 스트레인게이지 B에 의해 $(\Delta V)_\sigma$의 크기를 갖는 압축파 ε_T의 형태로 검출된다. 이렇게 검출된 응력파 중 입력봉에서의 ε_I와 ε_R은 시편에서의 변형률을 구하기 위해 입력봉과 출력봉의 전압을 H-I-J-K와 같이 응력파의 지속 시간에 대해 적분하게 된다.

Fig. 3의 B와 C사이의 체재시간(DT, Dwell Time)은 식 (2)과 같이 쓸 수 있다.

Table 1. Material properties of acryl bar

Acryl	Property
Young's modulus(E) : kg_f/cm^2	2.20×10^5
Density(ρ) : kg/cm^3	1.21×10^{-3}
Wave Speed(c_o) : cm/sec	4.22×10^5

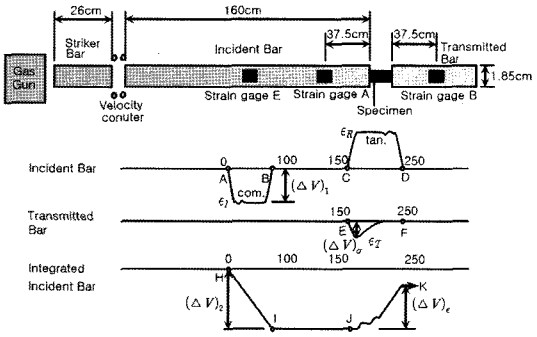


Fig. 3. Typical pulse shape.

$$DT = \frac{(L_2 - 2L_p)}{c_0} \tag{2}$$

본 실험에서는 출력봉의 길이($L_2 = 75$cm)와 입력봉의 길이를 이용하면 체재시간은 약 125μsec 정도이다. 시편에 작용하는 응력은 응력 전파이론에 따라 식 (3), (4)과 같이 표현된다.

$$\sigma_s = f_\sigma (\Delta V)_\sigma (\frac{A_b}{A_s}) \tag{3}$$

$$f_\sigma = \frac{E v_0}{2c_0 (\Delta V)_1} \tag{4}$$

여기서 f_σ는 응력보정계수, A_b는 봉의 단면적, A_s는 시험편의 단면적이다.

또한, 시편에서의 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon_s = f_\varepsilon (\Delta V)_\varepsilon \tag{5}$$

$$f_\varepsilon = \frac{2L_p v_0}{c_0 L_0 (\Delta V)_2} \tag{6}$$

여기서 f_ε는 변형보정계수이다.

위의 식 (3)과 (5)에 의해 충격하중에 대한 시편의 응력-변형률의 응답은 SHPB실험에서 각 탄성봉의 응력파를 측정함으로써 산출할 수 있다.

이상과 같은 방법으로 구한 응력-변형률 곡선을 이용하여 충격흡수 에너지를 계산하기 위해서, 응력-변형률 선도를 적분하여 구해지는 변형 에너지 밀도(SED, Strain Energy Density)를 사용하였다. 변형 에너지 밀도 U라 하고 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$U = \int_o^{\varepsilon_1} \sigma d\varepsilon \tag{7}$$

4. 실험 재료

4.1. 시편의 일반특성

본 실험에 사용된 시편은 밀도가 서로 다른 3개의 올레핀계수지인 발포 폴리프로필렌(EPP, Expanded PolyPropylene) 폼을 사용하였다. 이 재료는 충격흡수 성질이 우수하고 PET병의 재료인 Random PP 수지의 영향으로 유연성이 우수하다는 것이다. 스티로폼에 비하여 환경오염이 적고 특히 외력을 가할 경우 발포 폴리스티렌(EPS, Expanded Poly-Styrene)과는 다르게 발포체 비드간의 분리가 어려우며, 최종적으로 찢어지는 현상이 발생된다. 또한 환경적인 측면에선 상업화된 범용 플라스틱 제품 중에서 발포 폴리프로필렌의 발포체는 외형상 또는 소각시에 환경오염 물질의 배출을 최소화할 수 있어 각국의 환경규제에 대응할 수 있다는 점이 우수한 장점이다. 특히 발포 폴리스티렌 제품의 문제가 되는 입자간 분리 및 깨짐성에 의하여 발생되는 외형적인 환경공해가 거의 발생되지 않는다.

4.2. 시편의 물성측정

폴리프로필렌 폼의 밀도는 계측한 결과, Table 2와 같다.

4.3. 시편의 조직사진

SEM에 의한 조직사진은 발포된 성형물을 파단하여 그 파단면을 조사하였다. 이때 확대 배율은 60배이다. 촬영결과는 Fig. 4에서 보는 바와 같이 구조는 독립구조형 조직(Closed Cell)으로 형성되어 있다. 표면 및 내부형태는 Fig. 4와 같다.

Table 2. The material property of the specimen

※ Test Method : JIS-K6767

Specimen	I(15times)	II(30times)	III(45times)
Density(kg/m^3)	60	30	20
Tensile strength(kgf/cm^2)	7.8	4.3	2.4
Compressive strength(kgf/cm^2)	2.5	1.4	0.8

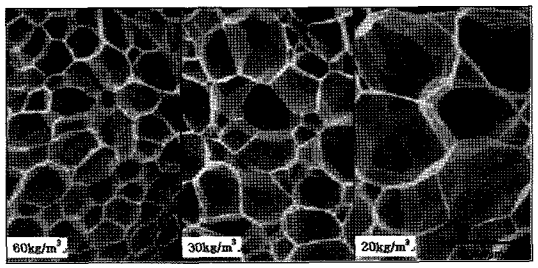


Fig. 4. The SEM pictures for the Polypropylene foam(×60).

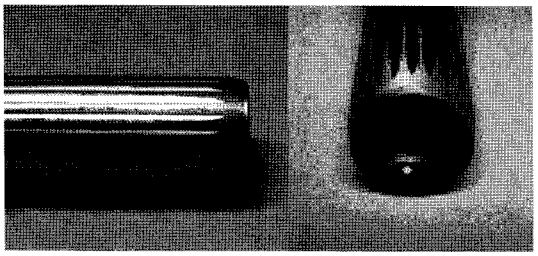


Fig. 5. The instrument cutting the foam.

4.4. 시편의 제작

열선을 이용하여 시편을 제작할 경우 제작시편의 유체로 변한 폴리프로필렌의 표면에 경화된 변질층이 생겨나게 되며 칼을 이용하여 시편을 제작할 경우 시편표면에 버풀이 발생하여 시험데이타에 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 이러한 문제를 해결하기 위해서 Fig. 5와 같이 알루미늄 관 내부에 면도날을 접합시켜 일정한 크기로 시편을 얻을 수 있는 절단기를 제작하였다.

5. 정적실험 및 결과

5.1. 실험 방법

3종류의 시편에 대하여 상온에서 정적 압축실험을 수행하였다. 압축 속도는 0.2mm/s에서 20mm/s의 변위 제어를 하였다. 정적 실험시 변위 제어를 하지 않을 경우 폼의 특성상 하중의 감소로 이어진다. 그러므로 하중 변위 제어가 가능한 인장시험기를 이용하여 응력-변형률 선도를 구하였다.

5.2. 실험 결과

Fig. 6은 3종류의 시편에 대하여 정적 응력과 변형률의 관계를 나타낸 그래프이다. 밀도가 클수록 재료의 탄성계수와 압축강도는 높았으며, 이는 Fig. 4의 폴리프로필렌 폼 미세구조 사진에서 알 수 있듯이, 단위 조직의 크기 및 조밀도 차이 등에 의해 나타나는 당연한 결과라 할 수 있다. 즉, 모든 조직 집합체의 탄성변형에 의해 구해지는 탄성계수는 조직의 크기 및 밀도 차에 따라 현저한 차이를 보이나, 이후 각 조직들의 소성변형에 따라 증가하는 유동응력의 증가 양상은 비슷하게 나타났다. Fig. 7은 시편 1의 하중속도에 따른 정적 응력-변형률선도를 나타낸다. 변형률이 적은($\varepsilon \leq 0.03$) 탄성영역에서는 폴리프로필렌 폼의 조직 구조가 붕괴되기 전까지의 하중변화이므로 탄성계수나 유동응력에서 큰 변화가 없었지만, 변형률이 큰 영역에서는($\varepsilon \geq$ 0.03)에서는 모든 조직이 붕괴되어 압축되기 전까지의 유동응력이 3N/cm^2(약 20%)의 증가를 보였다. 현재 폴리프로필렌 폼은 자동차 범퍼에 사용되고 있으며, 범퍼 규정상 2.2, 11m/s에서의 충격실험 데이터가 중요한 자료로 차지하고 있다.

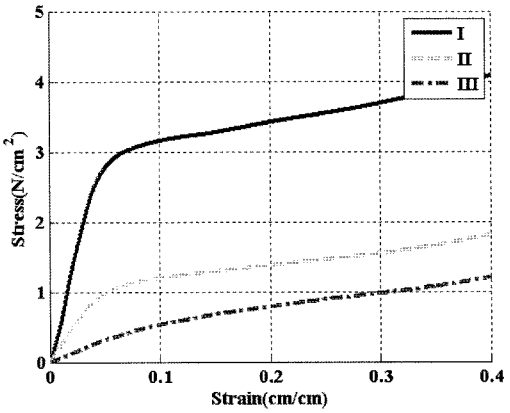


Fig. 6. The stress-strain curve of the PP foam.

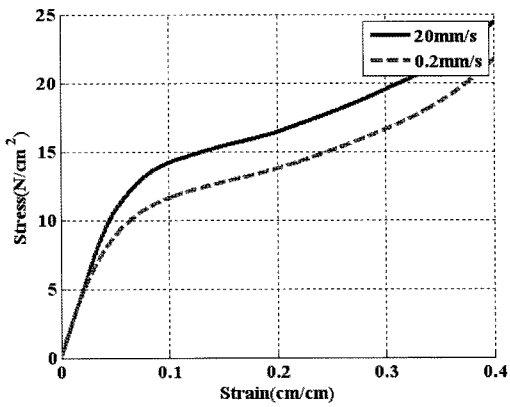


Fig. 7. The relation of compression velocity.

6. 동적실험 및 결과

6.1. 실험 방법

동적 SHPB 실험을 위한 시편의 크기는 직경 18 mm, 높이 30mm로 원통형으로 제작하였고, 봉과 접촉하는 시편양단을 연마하였다. 또한 표면의 마찰을 줄이기 위해 윤활제를 사용하였으며, 윤활 효과 및 자체의 점성만으로 시편이 고정되도록 하였다. 동적 실험에서는 3종류의 시편을 각 6개씩을 사용하여 SHPB 충격실험을 하였다. 가스총의 압력은 0.8kg/cm^{2}으로 조정하였으며, 이때 충격봉의 발사속도는 2.2m/s가 되었으며, 변형률 속도는 변형시간 동안 평균적으로 구한 결과 1857/s가 되었다.

6.2. 응력-변형률 선도

동적 SHPB 실험에서 구한 대표적인 응력파 형태를 Fig. 8에 보여 주고 있는데, 이는 시편 I의 입력봉와 출력봉의 스트레인게이지 A와 B에서 얻은 응력파이며, 압축응력파를 양(+)의 전압으로 표시한 것이다. 또한, 초기 압축파의 파형은 Fig. 3과 같은 직사각형 형태가 아님을 알 수 있는데, 이는 봉으로 사용된 아크릴 재료가 점탄성 재료이기 때문으로서, 이의 영향에 대해서는 무시하였고 평균값을 이용하여 계산하였다.

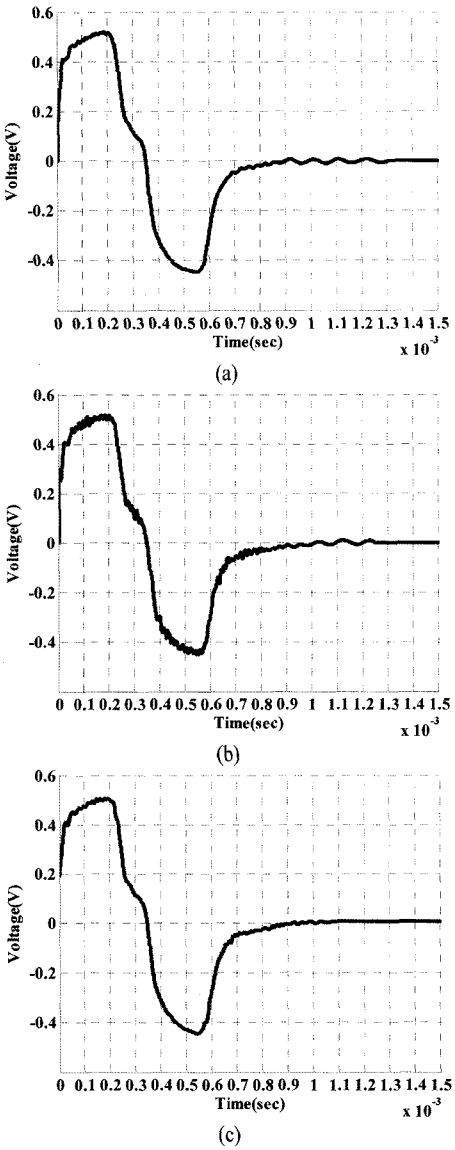


Fig. 8. Signal of specimen (a) Specimen I, (b) Specimen II, (c) Specimen III.

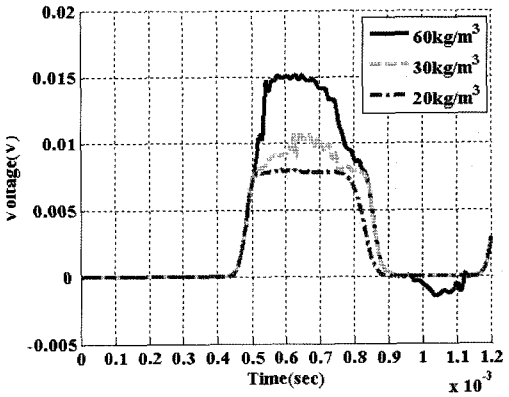
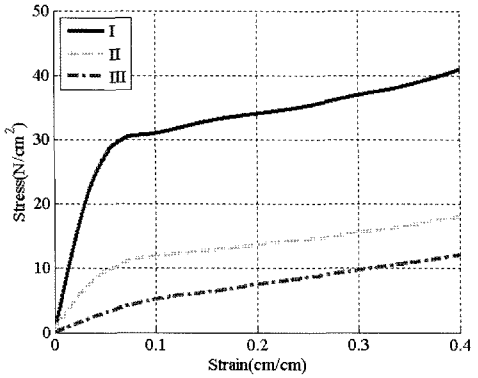


Fig. 9. The pulse shape of the transmitted bar.

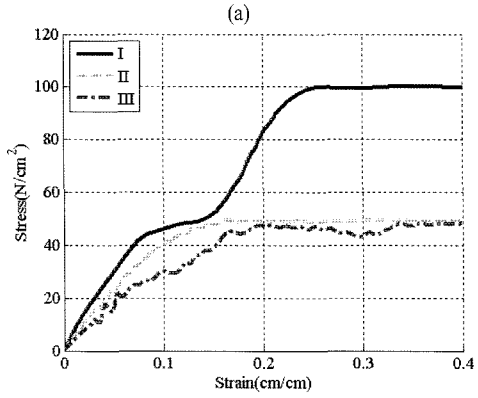
위의 3종류의 실험결과를 비교해 보면, 입력봉에서 발생한 반사파는 시편의 밀도에 따라 거의 차이를 보이지 않았으나 출력봉에 전달되는 충격파의 크기는 밀도에 따라 변하게 되는데, 이를 확인하기 위해 이 부분을 증폭한 그래프가 Fig. 9와 같다. 시편의 밀도가 높을수록 출력봉에 전달되는 충격파의 크기가 증가함을 알 수 있었다.

위의 충격실험 데이타를 바탕으로 응력 및 변형률에 관한 식 (3), (5)을 사용하여 각 시편에 대한 응력-변형률 선도를 그려보면 Fig. 10과 같이 된다. 각 선도는 밀도에 따라 구분되며, 정적실험결과와 동적실험결과를 비교하여 작성하였다. 변형률이 0.2인 위치에서 정적결과와 동적결과를 비교했을 때, 모든 시편에서 동적응력이 정적응력에 비하여 6배 증가함을 알 수 있다.

또한, 시편 II와 III의 폼에서 발생하는 응력-변형률 곡선은 유사함을 알 수 있으나, 시편 I의 유동 응력은 시편 II와 III에 비하여 약 2배의 증가를 보여준다. 그리고 동적 하중에서 재료의 탄성계수의 변화도 관찰되었는데, 밀도가 높은 시편 I에서는 거의 변하지 않은 반면에, 밀도가 낮은 시편 II와 III에서는 급격한 증가를 보였다. 각 시편에서의 탄성계수를 구하여 충격흡수에너지와 함께 Table 4에 정리하였는데, 밀도가 20kg/m^{3}인 경우에는 5배, 밀도가 30kg/m^{3}인 경우에는 2배의 강성증가를 가져왔다. 따라서, 밀도에 따른 동적 탄성계수의 변화도, 밀도 20kg/m^{3}의 데이타를 기준으로 볼 때, 각각 1.4배와 2배가 되어 정적인 경우의 3배와 10배에 비해 현저하게 그 차이가 감소함을 알 수 있었다. 이는 밀도가 낮은 폼에서는 충격속도에 따라 충격흡수 양상이 급격히 변할 수 있음을 보여준다.



(a)



(b)

Fig. 10. The comparison between the static test and the dynamic test (a) Static test (b) Dynamic test.

Table 3. The strain energy density and the elastic modulus of the specimens according to the strain rate

unit : kN/m^2

Strain rate		Static (0.006/s)		Dynamic (1857/s)	
		SED	E	SED	E
Specimen	I	253.7	6000	510	6000
	II	112.8	2143	275	4286
	III	73.0	615.4	269	3077

6.3. 충격흡수에너지

본 실험에서 폴리프로필렌 폼의 에너지 흡수양상을 알아보기 위하여 식 (7)에서와 같이 응력-변형률 선도를 적분하여 구할 수 있는데, 정적실험과 동적실험의 변형 에너지 밀도를 구한 결과는 Table 3과 같다. 이 시험들은 압축실험 결과로서 데이타의 비교를 위해 변형률 0.5까지의 변형 에너지 밀도만을 고려하였는데, 밀도가 높을수록 변형 에너지 밀도도 높게 나타났다. 또한, 정적 변형 에너지 밀도에 비하여 동적 변형 에너지 밀도가 크게 나타나는데, 그 차이는 밀도가 높은 경우에는 약 2배였으나, 밀도가 적은 경우에는 약 4배로서 더 큰 증가를 보였다. 이와 같은 에너지 흡수는 폼의 변형으로 인한 에너지 흡수로서, 동하중에 의한 충격흡수 에너지를 이용하여 자동차 범퍼 및 안전헬멧 제작에 유용하게 활용될 수 있다고 본다.

7. 결 론

본 연구에서 서로 다른 밀도를 갖는 3종류의 독립구조형 폴리프로필렌 폼에 대하여 정적압축실험과 동적 SHPB 실험에 의한 응력-변형률 선도 및 흡수에너지를 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 밀도가 $20kg/m^3$에서 $60kg/m^3$으로 3배 증가함에 따라 동적 유동응력은 2배 정도로 증가함을 알 수 있었다.

2) 밀도가 $60kg/m^3$일 때는 동적 강성와 정적 강성이 일정하였으나, $20kg/m^3$에서는 동적 강성이 정적 강성에 비해 5배 증가하였다. 이는 밀도가 낮은 폼에서는 충격속도에 따라 충격흡수 양상이 급격히 변할 수 있음을 보여준다.

3) 폴리프로필렌 폼의 밀도가 높을수록 충격에너지 흡수도 커지며, 정적 하중보다는 동적 하중일 때 에너지 흡수량이 더 커진다.

감사의 글 : 이 논문은 2005년도 조선이공대학 학술연구비의 지원을 받아 연구되었음.

참고문헌

1) H. Kolsky, Stress Waves in Solids, New York, 1963.
2) B. Hopkinson, "A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets", Phil. Trans. A, Vol. 213, pp. 437~456, 1914.
3) R. M. Davies, "A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar", Phil. Trans. A, Vol. 240, pp. 375~457, 1948.
4) R. M. Lacey, "Fifth annual symposium on high speed testing introductions", Boston, J. of Applied Polymer Science, pp. 99~105, 1965.
5) R. K. Traegar, J. of Cellular Plastics, Vol. 12, pp. 403~418, 1976.
6) Han Zhao, "Testing of Polymeric Foams at High and Medium Strain Rates", Polymer Testing Vol. 16, pp. 507~516, 1997.