

# 충격에너지 흡수에 미치는 폴리프로필렌 폼 밀도의 영향

박남훈\*, 고영호, 문기석(전남대대학원), 윤희석(전남대 기계과)

Effect of the density of PolyPropylene foams on the absorption of the impact energy

N. H. Park, Y. H. Ko, K. S. Moon(Mech. Eng. Dept., CNU), H. S. Yoon(Mech. Eng. Dept., CNU)

## ABSTRACT

Recently, The PolyPropylene(PP) Foam used as Bumper and Helmet is well known as a protective material for products. In this paper, the effect of the density of PP foams on the absorption of the impact energy is implemented. The result of the experiment has revealed that the effect of the high-density PP foams is remarkably increased compared with that of the low-density PP foams.

And it also shows that the absorption of the impact energy of PP foams are greatly influenced by the density in impact velocity(220cm/s). These results are expected to be utilized for the technique of manufacturing a optimum impact structure.

**Key Words** : Impact Energy(충격에너지), PolyPropylene(PP, 폴리프로필렌), Foam(폼), Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB, 홉킨스바)

## 1. 서론

충격하중을 받는 재료의 거동에 관한 연구는 공학의 넓은 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 교통기관에서는 충돌에 관한 안전성의 확보가 중요한 과제로 대두되고 있으며, 에너지 관련기기, 항공기 등의 안전설계에는 내충격성이 중요한 문제로 되고 있다. 그러나 충격하중을 받을 때 하중은 응력파로 되어서 고체속을 전파하고, 응력파에 의한 응력장은 정적인 경우에 비해 현저히 다른 거동을 하고 있으며, 아직 정량적으로 충분히 규명하지 못하고 있는 부분이 많다. 일반적인 실험 방법으로는  $10^2$ /sec 이상의 고변형률 속도를 얻는 것이 어렵기 때문에 이러한 고변형률을 얻기 위해 여러가지 시험방법이 고안되어 왔는데, 비교적 널리 이용되는 방법이 Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 시험방법(Fig. 5)이다.[2]

본 연구에서는 충격완화재료로 널리 쓰이는 폴리프로필렌(PP) 폼의 밀도(Fig. 1)에 따른 충격에너지 흡수를 고찰하였다. 충격 실험은 SHPB를 이용하여  $10^2 - 10^3$ /sec의 고변형률 속도범위 안에서 실시되었으며, 충격 실험결과를 비교, 분석하였다.

PP폼 시편은 밀도에 변화를 주어서 힘-변형, 응력-변형률 선도 및 에너지 흡수율의 변화를 살펴본다. 실험 결과 PP폼의 응력과 변형률 및 에너지 흡수율은 밀도에 영향을 받는다는 사실을 실험적으로 확인할 수 있었다. 그리고 응력감쇠와 충격에너지흡수에 밀도의 변화가 효과적임을 알 수 있었다.

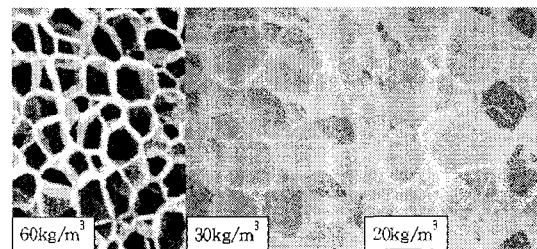


Fig. 1 SEM pictures for the Polypropylene foam(X 40)

## 2. 홉킨스바 실험

### 2.1 측정원리[7]

스트레인게이지에서 응력과 측정결과에 따른 응력-변형률 관계식을 정리하면 다음과 같다. 먼저  $v_0$  속도의 Striker bar가 Incident bar에 충격을 주게 되면 Incident bar에서는 Fig. 2과 같은 형태의 초기 응력파가 발생하게 된다.

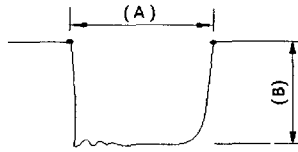


Fig. 2 Initial stress wave

$$(A) \rightarrow \Delta t = \frac{2L_s}{c_0} \quad (B) \rightarrow \bar{\varepsilon} = \frac{v_0}{2c_0}$$

$\Delta t$ 는 하나의 응력파가 발생하여 지속되는 시간이며,  $\bar{\varepsilon}$ 는 bar의 변형률을 나타내고,  $L_s$ 는 Striker bar의 길이,  $c_0$ 는 Acryl의 Wave Speed,  $v_0$ 는 Striker bar의 속도이다.

본 연구의 시험장치로써 구성된 각 봉의 재질은 Acryl로서 재료 상수는 다음 Table 1과 같다.

Table 1 Material Properties of Acryl

Acryl	Material Property
Young's modulus(E)	600 kg <sub>f</sub> /cm <sup>2</sup>
Density( $\rho$ )	1.19 × 10 <sup>-3</sup> kg/cm <sup>3</sup>
Wave Speed( $c_0$ )	2.224 × 10 <sup>4</sup> cm/sec

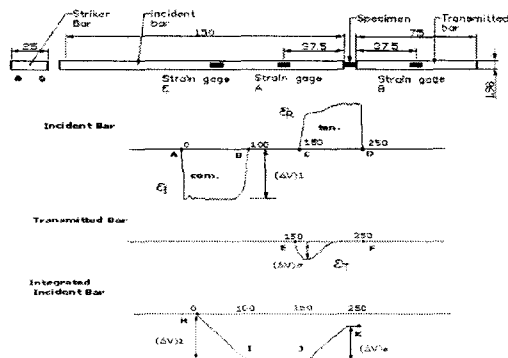


Fig. 3 Typical pulse shape

Fig. 3에서 초기에 발생한 압축 응력파는 Incident bar에 있는 스트레인게이지A에 의해서  $(\Delta V)_1$ 의 크기를 갖는 압축파  $\varepsilon_I$ 를 검출되고, 시편부분에서 이 응력파의 일부는  $(\Delta V)_2$ 의 크기를 갖는 인장파  $\varepsilon_R$ 의 형태로 반사되어서 다시 Incident bar에 있는 스트레인게이지A에 의해 검출되게 된다. 동시에 시편부분에서 반사되고 남은 일부의 압축파는 시편을 통과하여 스트레인게이지B에 의해  $(\Delta V)_3$ 의 크기를 갖는 압축파  $\varepsilon_T$ 의 형태로 검출된다. 이렇게 검출된 응력파 중 Incident bar에서의  $\varepsilon_I$ 와  $\varepsilon_R$ 은 시편에서의 변형률을 구하기 위해 Incident Bar와 Transmitted Bar의 전압을 H-I-J-K와 같이 응력파의 지속 시간에 대해 적분하게 된다.

Fig. 3의 B와 C사이의 시간 Dwell Time (DT)은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$L_2 = 2L_s + c_0 \cdot DT \quad (L_2 : \text{Output bar의 길이})$$

$$DT = \frac{(L_2 - 2L_s)}{c_0} \quad (1)$$

본 시험에서는 반사봉의 길이( $L_2=750\text{mm}$ )와 타격봉의 길이를 이용하면 DT는 약 50 $\mu\text{sec}$  정도이다. 시편에 작용하는 응력은 응력파 전파이론에 따라 식 (2), (3)과 같이 표현된다.

$$\sigma_s = f_\sigma (\Delta V)_\sigma \left( \frac{A_b}{A_s} \right) \quad (2)$$

$$f_\sigma = \frac{E v_0}{2c_0 (\Delta V)_1} \quad (3)$$

$f_\sigma$  : Stress Calibration Constant

여기서  $A_b$ 는 bar의 단면적,  $A_s$ 는 시험편의 단면적이다. 또한, 시편에서의 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon_s = f_\varepsilon (\Delta V)_\varepsilon \quad (4)$$

$$f_\varepsilon = \frac{2L_s v_0}{c_0 L_0 (\Delta V)_2} \quad (5)$$

$L_0$  : 시편길이

$f_\varepsilon$  : Strain Calibration Constant

위의 식(4)과 (5)에 의해 충격하중에 대한 시편의 응력-변형률의 응답은 SHPB시험에서 각 봉의 응력파를 측정함으로써 산출할 수 있다.

### 2.2 시편

본 실험에 사용된 시험편은 밀도가 다른 3종 (Table 2)의 한화 종합화학(주) Expanded PolyPropylene Foam을 사용하였으며, 시험편의 크기는 19(D) × 30(H)mm로 원통형(Fig. 4)으로 제작하였다.

Table 2 The material property of the specimen

\* Test Method : JIS-K6767

Specimen	I (15)	II(30)	III(45)
Density (kg/m <sup>3</sup> )	60	30	20
Tensile strength(kg/cm <sup>2</sup> )	7.8	4.3	2.4
Compressive strength( ")	2.5	1.4	0.8
Quantity	6	6	6

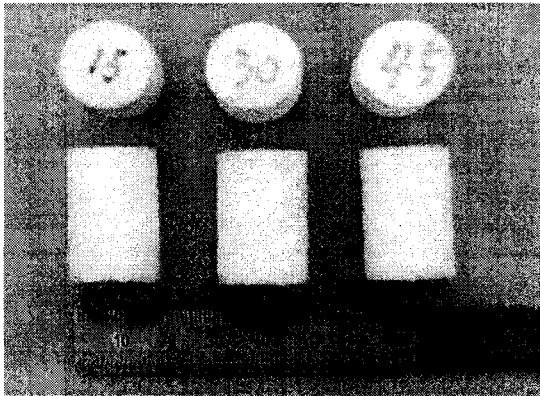


Fig. 4 The picture of the specimen

### 2.3 SHPB 시험장치의 구성

본 연구를 위해 사용한 SHPB의 구성은 크게 Incident bar와 Transmitted bar사이에 시편을 갖는 두 개의 탄성 압축봉과 Incident bar에 충격을 가하는 Striker bar로 이루어진 실험장치이다. 이들 봉의 재료는 아크릴을 사용하였으며 각각의 길이는 Striker bar : 250mm, Incident bar : 1500mm, Transmitted bar : 750mm이고, 봉의 직경은 19.5mm로 일정하게 하였다. 그리고 봉에서 전파하고 있는 응력파를 검출하기 위하여 주변 장치들을 Fig. 5와 같이 구성하였다.

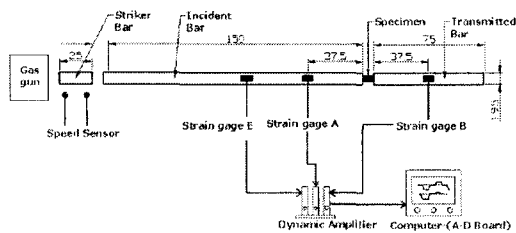


Fig. 5 Schematic Diagram of SHPB

또한 Striker bar의 속도를 측정하기 위한 속도센서가 Gas gun 앞쪽에 위치해 있다. Striker bar가 Incident bar에 충돌될 때 그 충격 면에서는 사각형 형태의 초기 탄성 압축파가 생성되며 그 압축 응력파는 Incident bar쪽으로 전파되기 시작한다. 이러한 최초에 발생된 초기 압축 응력파,  $\epsilon_I(t)$ 는 시편이 위치하고 있는 지점으로부터 Incident bar쪽으로 1/4만

큼 떨어진 곳에 위치하고 있는 스트레인게이지A에 의해 처음으로 측정된다. Incident bar를 통과한 탄성 압축파는 시편에 변형을 준 후, 일부가 탄성 인장파의 형태로 반사되어 Incident bar의 스트레인게이지A에 의해 다시  $\epsilon_R(t)$ 로 측정된다. 동시에 반사되고 남은 일부의 압축파는 시편을 통과 하게 된다. 이러한 통과 압축파는 Transmitted bar의 중간지점에 위치한 스트레인게이지B에 의해  $\epsilon_T(t)$ 로 측정된다.

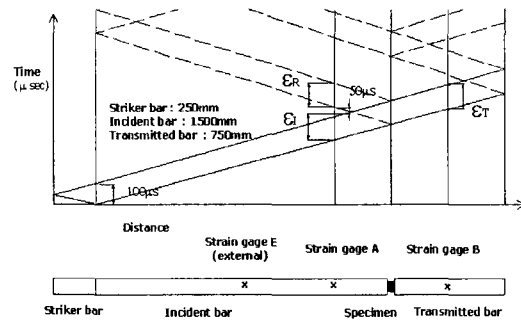


Fig. 6 Lagrangian diagram in compression mode

Fig. 6는 본 실험에 사용한 SHPB의 Lagrangian diagram으로서 봉에서의 시간에 따른 응력파의 전파 양상을 도식적으로 보여주고 있다. Striker bar가 Incident bar에 충격을 가하면 100 μsec 시간동안의 압축 응력파가 발생하고 이 응력파는 Incident bar의 길이 방향으로 전파되어 시편에서 임피던스의 차로 인해 일부는 다시 Incident bar쪽으로 반사되고 나머지는 Transmitted bar로 전파된다. 이 응력파는 양쪽 Bar 사이에 위치한 시편을 기준으로 평형상태에 이를 때까지 반복적으로 왕복 전파함을 보여주고 있다.

여기서 스트레인게이지를 설치할 때 주의해야 할 점은 초기에 발생된  $\epsilon_I(t)$ 와 시편에서 반사된  $\epsilon_R(t)$ 을 구분하여 검출하는 것이다. 따라서 스트레인게이지A는 Incident bar의 3/4지점에 설치해야 한다. 만약 Incident bar와 시편의 경계 부근에 매우 근접하여 스트레인게이지가 위치하고 있다면, 반사된 응력파의 첫 부분이 초기 Incident wave의 끝 부분과 상호 간섭될 수 있기 때문이다.

본 실험에 쓰인 봉의 재료인 Acryl의 압축파 전달속도는  $2.224 \times 10^4$  cm/s이므로 반압축파의 길이는 250mm로서 봉에서 375mm 떨어진 스트레인게이지에 간섭의 영향을 주지 않는다. 시편에 가해지는 압축파의 크기를 파악하기 위해서는 Striker bar의 속도를 측정해야 하기 때문에, 그 속도는 2조의 광센서 속도 측정장치에 의해 계측된다.

또한 각 부분의 스트레인 게이지는 1축용 스트레인 게이지를 반경방향으로 대칭이 되도록 4개를 사용했으며, 연결은 센서의 민감도를 증가시키고 충격파

이외의 신호를 어느 정도 보정이 가능하도록 하기 위해 Full Bridge 방식으로 설정하였으며, 측정저항은 350R, 입력 전압은 2V로 하였다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 SHPB 실험

본 실험에서는 총 18개(3종류, 각 6개)의 시편을 가지고 충격실험을 하였다. 그 결과 Incident bar에서 발생한 반사파는 시편의 밀도에 따라 차이를 보이지 않았다. 하지만 시편의 밀도가 높으면 높을수록 Transmitted bar에 전달되는 충격파 에너지의 양이 증가함을 볼 수 있었다. Transmitted bar에서 발생한 응력과 양상은 아래 Fig. 7과 같다.

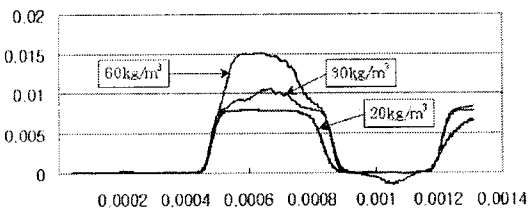


Fig. 7 The pulse shape of the Transmitted bar

#### 3.2 고찰

Incident bar에서 충격파와 반사파의 양의 차이는 미비하다. 본 실험에서는 Incident bar의 충격량에서 Transmitted bar의 충격량을 뺀 값이 에너지감소량과 같다. 에너지 흡수는 Foam의 흡수, Bar의 운동소리 에너지 등으로 분류할 수 있는데 대부분의 흡수는 Foam의 변형에너지이다. 세부 수치는 Table 3에서 보는 바와 같다.

Table 3 Difference of impact energy of each bar

	I (15)	II (30)	III (45)
Incident bar	288.0	261.5	228.9
Transmitted bar	67.8	54.8	42.9
Difference	220.2	206.7	186.0

### 4. 결론

본 실험의 결과로 밀도가 3배로(20→60kg/m<sup>3</sup>) 증가함에 따라 Transmitted bar에서 충격파의 발생량이 약 2배로 증가함을 볼 수 있다(Fig. 7). 즉 20~30 kg/m<sup>3</sup>에서는 충격파 발생량의 변화량이 적으나 30kg/m<sup>3</sup>를 넘어가면 충격량 증가율이 크다. 따라서 Transmitted bar에서 충격발생량을 줄이기 위해서는 Foam의 밀도를 30kg/m<sup>3</sup> 내외로 설정하여 제작해야 한다.

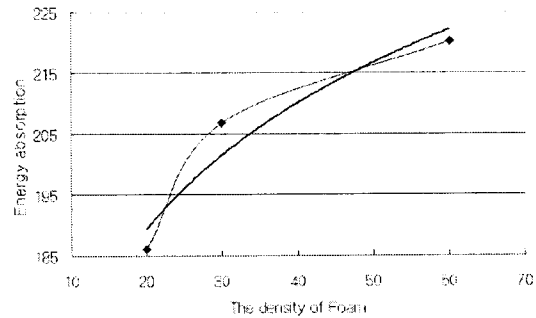


Fig. 8 The relation of the energy absorption and density of Foam

또한 Table 3에서 보는 바와 같이 밀도 증가에 따라 충격에너지 흡수율이 증가함을 볼 수 있다. 본 논문에서는 시편의 밀도를 3가지로 제한하여 실험하였기 때문에 다른 밀도에서의 충격에너지 흡수율을 예측하기가 곤란하다. 추가실험을 통해 밀도와 충격에너지 흡수의 관계를 예측할 수 있을 것으로 판단된다. 이러한 결과는 자동차 범퍼 및 안전헬멧 제작에 유용하게 활용될 수 있다.

### 후기

본 연구는 전남대 BK21 지역대학 육성 사업단의 지원을 받아 수행되었습니다.

### 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, 1914, pp.437.
3. R. M. Davies, A Critical Study of the Hopkinson Pressure Bar, Phil. Trans. A, Vol. 240, 1948, pp.375.
4. Bijak-Zochowski, M and Wass, A. Reduction of Contact By Use of Relief Notches, Experimental Mechanics, pp. 271-275.
5. H. Zhao, Testing of Polymeric Foams at High and Medium Strain Rates, Polymer Testing 16, 1997, pp. 507-516.
6. 이익서, 황시원, 응력이완 노치부근에서의 응력해석.
7. 양동률, 충격공학, 1992, 원창출판사, pp.6-14.
8. H. Zhao, G. Gary and J. R. Klepaczko, On the use of a viscoelastic split Hopkinson pressure bar, Impact engineering Vol. 19, No.4, 1997, pp. 319-330.