

고 변형률 속도에서 폴리프로필렌 및 열가소성 올레핀 소재의 압축 거동에 대한 연구

이세민* · 김덕중* · 한인수** · 김학성****†

Study of the Compressive Behavior of Polypropylene-low Glass Fiber Compound and Thermoplastic Olefin under High Strain Rate

Se-Min Lee*, Dug-Joong Kim*, In-Soo Han**, Hak-Sung Kim****†

ABSTRACT: In this study, the strain rate dependent tensile and compressive properties of PP-LGF and TPO was investigated under the high strain rate by using the Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB). The SHPB is the most widely used apparatus to characterize dynamic mechanical behavior of materials at high strain rates between 100 s^{-1} and $10,000 \text{ s}^{-1}$. The SHPB test is based on the wave propagation theory which was developed to give the stress, strain and strain rate in the specimen using the strains measured in the incident and transmission bars. In addition, to verify the strain data obtained from SHPB, the specimen was photographed with a high-speed camera and compared with the strain data obtained through the Digital Image Correlation (DIC).

초 록: 고 변형률 속도에서 폴리프로필렌-유리 장섬유 복합재료(PP-LGF)와 열가소성 올레핀(TPO) 소재의 동적 압축 특성을 얻기 위해 홉킨슨바(Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB))를 이용하여 실험을 진행하였다. SHPB는 변형률 속도 100 s^{-1} ~ 10000 s^{-1} 범위에서 재료의 동적 기계적 물성을 확인할 수 있는 장치이다. SHPB 시험은 입력봉과 전달봉에서 측정된 탄성파를 이용하여 시편의 응력, 변형률 및 변형률 속도를 얻을 수 있는 탄성파 전달 이론을 기반으로 한다. 또한 SHPB에서 얻은 변형률 데이터의 검증을 위해 시편을 초고속카메라로 촬영하여 DIC 기법을 통해 얻은 변형률 데이터와 비교 진행하였다.

Key Words: 스플릿 홉킨슨 바(Split Hopkinson pressure bar), 디지털 이미지 기법(Digital image correlation), 폴리프로필렌(PP)

1. 서 론

최근 자동차 산업에서 환경규제로 인한 차량 무게 절감이 중요한 이슈로 대두되고 있다. 이를 위해 자동차 내장재 소재로 폴리프로필렌(PP)과 같은 열가소성 올레핀(TPO)와 폴리프로필렌 유리장섬유 복합재(PP-LGF)이 사용되고 있

다. 열가소성 복합재료는 특히 간단한 제조 공정, 낮은 재료 비용, 우수한 충격력으로 자동차 소재에 적용되는 사례가 늘어나고 있다[1]. 이러한 재료의 장점은 낮은 비중에 기인하는 차량의 경량화로 인한 연료를 절감할 수 있다는 점이다. 이러한 TPO와 PP-LGF에 대해 신뢰성 있는 자동차 경량화 제품을 개발하려면 충격 하중에서의 재료의 물성을

Received 10 December 2021, received in revised form 8 February 2022, accepted 21 February 2022

*Department of Mechanical Convergence Engineering, Hanyang University, Seongdong, Seoul

**Hyundai Motor Group R & D Division, Gyeonggi 18280, Korea

***Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, Seongdong, Seoul

†Corresponding author (E-mail: kima@hanyang.ac.kr)

예측하는 것이 매우 중요하다. 차량 충돌 시 재료가 빠르게 변형되는데 일반적으로 재료는 변형률 속도가 증가함에 따라 강도와 강성이 커지는 경향을 보인다. 특히 차량 충돌 시 자동차 내장재 소재에 1000 s^{-1} 이상의 높은 변형률 속도로 진행되므로 정확한 동적 물성의 확보는 필수적이다[2]. 따라서 차량 충돌 시 동적 물성을 고려한 충돌해석을 바탕으로 정확한 차체설계가 이루어져야 한다.

본 논문에서는 홉킨슨바(SHPB) 장치를 통해 동적 변형률 속도($100 \text{ s}^{-1} \sim 10000 \text{ s}^{-1}$)에서 진행되는 동적 물성을 측정하였다. 홉킨슨바 기법은 1949년에 Kolsky의 탄성과 전달 이론(Stress wave Theory)을 통해 제안되었으며, 장치 내의 입력봉 및 전달봉에서 측정된 변형률을 사용하여 시편의 응력, 변형률 및 변형률 속도를 얻을 수 있다[3]. 최종적으로 TPO와 PP-LGF 소재의 변형률 속도에 따른 압축 거동을 홉킨슨바 장치를 이용하여 얻어내었다.

2. 이론 전개

SHPB 장치는 Fig. 1에서 볼 수 있듯이 크게 충격봉(Striker), 입력봉(Incident bar), 그리고 전달봉(Transmission bar)으로 구성되어 있다. Fig. 2와 같이 가스 건을 통해 발사된 충격봉이 입력봉에 강하게 충돌하게 되면 입력봉과 전달봉 사이에 위치한 시편이 압축하게 되는 구조이다. 충격봉이 입력봉에 매우 높은 속도로 충돌할 때 압축성 탄성파가 생성되고, 이 탄성파는 입력봉을 통해 전달된 후 입력봉과 시편의 경계에 도달하면 입력봉과 시편의 임피던스 차이에 의해 일부는 반사되어 입력봉을 통해 나가고 일부는 시편을 투과하여 전달봉으로 전해진다[4]. 이러한 실험에서 기본 선형 탄성과 전파 이론을 사용하면 입력봉과 전달봉의 스트레인 게이지로부터 시간에 대한 응력, 변형률, 변형률 속도를 얻을 수 있다. 이 이론에 기초하여 시편의 변형률은 반사된 탄성파의 시간 적분에 직접적으로 비례하고, 응력은 전달된 탄성파의 진폭에 직접적으로 비례한다.



Fig. 1. Schematic of Split Pressure Hopkinson Bar

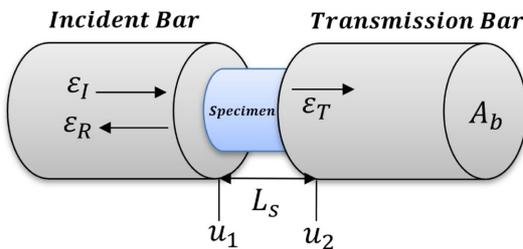


Fig. 2. Testing section of Split Pressure Hopkinson Bar

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 두 봉 사이에 위치한 시편의 초기 길이를 L_s , 시편의 양쪽 끝 변위를 u_1, u_2 (수식으로)라고 할 때, 시편의 평균 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\varepsilon_s = \frac{u_2 - u_1}{l_0} \quad (1)$$

$$u_1 = C_b \int_0^t \varepsilon_I dt + (-C_b) \int_0^t \varepsilon_R dt = C_b \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R) dt \quad (2)$$

$$u_2 = C_b \int_0^t \varepsilon_T dt \quad (3)$$

C_b 는 봉의 탄성과 속도를 말한다. 시편에 양단에 형성된 힘은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$P_1 = E_b A_b (\varepsilon_I + \varepsilon_R) \quad (4)$$

$$P_2 = E_b A_b \varepsilon_T \quad (5)$$

E_b 는 봉의 영률, A_b 는 봉의 단면적을 의미한다. 짧은 시편은 변형이 발생하는 동안 동적평형 상태에 있다고 가정하므로 시편에 통과하는 응력은 일정하다. 따라서, $P_1 \approx P_2$ 또는 $\varepsilon_I + \varepsilon_R \approx \varepsilon_T$ 로 표현된다.

최종적으로, 시편에 가해지는 응력, 변형률, 변형률 속도는 동적평형상태라는 가정에서 아래와 같은 표현으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{P_1 + P_2}{2A_s} = \frac{A_b}{A_s} E_b \varepsilon_T \quad (6)$$

$$\varepsilon_s = \frac{u_1 - u_2}{l_0} = \frac{C_b}{l_0} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (7)$$

$$\dot{\varepsilon}_u = \frac{C_b}{l_0} \varepsilon_R \quad (8)$$

3. 실험 방법

3.1 실험재료 및 시편

본 연구에서는 경량부품으로 자동차 산업에서 널리 사용되는 TPO(열가소성 올레핀)와 PP-LGF(폴리프로필렌 유리 장섬유 복합재료)를 대상재료로 선택하였다. PP-LGF는 PP 50%와 Long glass fiber 50%로 혼합 사출된 시편을 실험에 사용하였다. GF 함유량에 따른 재료의 기본 물성 정보는 Table 1에 명시하였다. 홉킨슨바의 동적 압축 실험의 경우 압축 시편은 Fig. 2에서와 같이 입력봉과 전달봉 사이에 위치해야 한다. PP-LGF의 동적 압축 시험의 경우, ASTM D695를 참고하여 $20 \times 10 \times 4.5 \text{ mm}^3$ 크기의 시편으로 결정하였다. TPO의 경우 ASTM D575를 참고하여 지름 10 mm, 두께 4.5 mm의 실린더 형상의 시편으로 결정하였다.

Table 1. Mechanical Properties according to GF contents

	Tensile Strength (MPa)	Elongation at Break (%)	Density (g/cm ³)
Test Condition	5 0 mm/min, ASTM D638		
PP	19	222	0.95
PP + GF10%	63	6	1.11
PP + GF15%	76.3	4.2	1.001
PP + GF20%	90	3.5	1.03
PP + GF35%	110	2.5	1.18
PP + GF50%	153	2.3	1.34

3.2 실험 장비 구성 및 사양

1차원 선형 탄성과 이론을 사용하기 위해 SHPB에서 입력봉과 전달봉은 탄성파가 전파되는 동안 탄성이 유지되어야 한다. 또한 입력봉과 전달봉은 1차원 탄성과 이론을 충족시키면서, 입력봉의 스트레인 게이지를 통해 측정되는 입사파와 반사파가 중첩되지 않을 만큼 충분히 길어야 한다. 이러한 이유로 봉의 지름에 대한 봉의 길이의 비는 20보다 커야 한다. 이 SHPB 장비의 두개의 봉은 고강성 소재로 지름 20 mm, 길이 2 m로 제작되었다. Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 실험 도중 실시간으로 입사파, 반사파, 투과파 신호를 측정할 수 있도록, 양쪽 봉에 모두 스트레인 게이지를 부착하였다. 이 때 사용 한 스트레인 게이지는 저항이 350 Ω 표점 간 거리(gage length)가 3 mm인 UFLA-3-350-11-3LT (TML, Japan) 모델을 사용하였다. 이 스트레인 게이지는 입력봉에서 입사파와 반사파가 서로 중첩되지 않도록 봉의 가운데에 부착하였다. 또한 스트레인 게이지는 스트레인 앰프로 연결되어 신호를 증폭시킨다. 이렇게 나온 출력전압 신호는 데이터 수집 장치(PXIe-1082, PXIe-5105 digitizer card, National Instruments, USA)를 통해 기록 및 저장된다. PXIe-5105는 최대 샘플링 속도가 60 MS/s이고, PXIe-1082 컨트롤러는 데이터 수집 카드에 접속하기 위해 NI-DAQ 및 LabVIEW 소프트웨어가 있는 컴퓨터에 연결되었다. 또한 100 ms 미만의 짧은 시간 내에 전체 테스트를 수행하기 때문에 데이터 수집 시스템에 전기 신호를 제공할 수 있는 마이크로 스위치가 사용되었다. 마이크로 스위치는 가스 건의 밸브에 의해 가동되어 5V 신호를 데이터 수집 시스템으로 출력한다. 실험 후 데이터가 수집되면 실험을 완료한 후 사후 처리를 위해 Excel 파일에 저장된다.

3.3 Digital Image Correlation (DIC)

본 연구에서는 SHPB를 통해 얻은 변형률 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 Digital Image Correlation (DIC)를 통해 얻은 변형률 데이터와의 비교를 진행하였다. DIC 기법은 스펙클 무늬의 디지털 이미지를 분석하여 변형 과정에서 시편의 변형율을 얻을 수 있는 비접촉 측정방법이다. DIC 기

법은 GOM사의 Aramis Professional 소프트웨어로 진행되었다. 스펙클 무늬의 시편 표면으로부터 평면 내 균일한 변형장을 얻기 위해, 초고속카메라의 이미지 해상도는 256×128 pixel²에, 프레임 속도는 100000 fps로 설정하였다. 또한 시편 표면의 변형으로 인한 면내 변형장을 보장하기 위해 흡킨슨바를 통한 고속 압축 시험 동안 동시에 DIC기법을 위한 초고속 카메라 동영상 촬영이 진행되었다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 흡킨슨바 실험 결과

SHPB 실험을 통하여 기록된 시간에 따른 전압 변화 결과는 오실로스코프를 통해 얻을 수 있고, 이 결과를 시간에 따른 변형률로 바꾸는 과정에는 휘트스톤 브릿지 공식을 이용하였다. 입력봉과 출력봉에서 얻은 전압 신호를 탄성파 전달 이론에 적용하여 PP-LGF와 TPO 시편의 응력-변형률 선도를 나타내었다. PP-LGF 시편의 경우, 변형률 속도 $1100 \text{ s}^{-1} \sim 2000 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 실험을 진행하였다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 변형률 속도가 증가함에 따라 파단 강도는 커지고 파단 변형률은 작아지는 경향을 보였다. 이러한 결과는

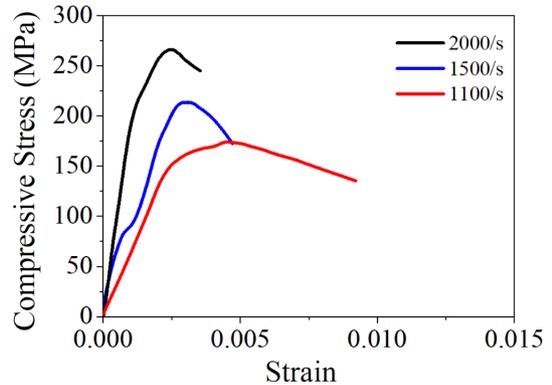


Fig. 3. Stress-strain curve of PP-LGF compression test at varying strain rates

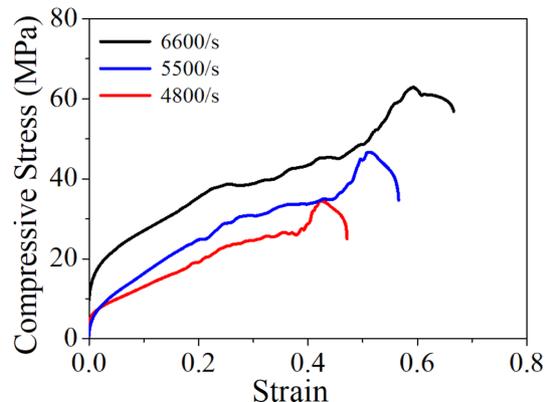
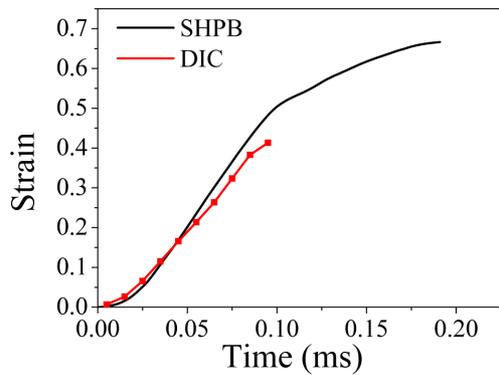
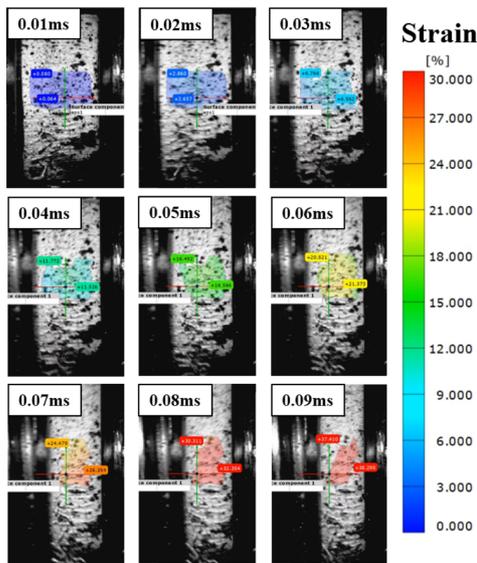


Fig. 4. Stress-strain curve of TPO compression test at varying strain rates



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Comparison of strain data from SHPB experiment and DIC (b) The images of TPO specimen by high speed camera and DIC

하중이 증가함에 따라 재료내에서 손상이 진전되는 속도가 이를 따라가지 못하여 재료가 더 높은 하중까지 견디게 되며, 또한 이로 인해 재료는 더욱 강한 거동을 나타낸다[5].

TPO 시편의 경우, 변형률 속도 $4800 \text{ s}^{-1} \sim 6600 \text{ s}^{-1}$ 조건에서 실험을 진행하였다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 변형률 속도가 증가함에 따라서 파단 변형률이 증가하고 파단강도 또한 증가하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 폴리프로필렌, 비닐 에스터와 같은 다른 열가소성 폴리머 재료와 비슷한 거동을 보였다[6].

4.2 DIC를 통한 신뢰성 검증

흡킨슨바 실험을 통해 얻은 시간에 따른 변형률 데이터와 초고속 카메라로 촬영된 영상을 DIC기법으로 분석한 결과 Fig. 5와 같이 파단 전 변형률 데이터에서 두 데이터가 거

의 유사한 것을 확인할 수 있다. 0.10 ms 이후로는 초고속 카메라로 촬영된 스펙클 이미지가 많이 왜곡되어 분석 영역이 소실되었다. 이를 통해 시간에 대한 변형 및 파괴가 DIC와 흡킨슨바 장치에서 비슷하게 측정된 것을 알 수 있고, 두 데이터의 신뢰성을 검증하였다.

5. 결론

본 연구에서는 고 변형률 속도에서의 TPO 소재와 PP-LGF 소재의 동적 물성을 흡킨슨바 장비를 이용해서 얻었다. 고 변형률 속도에서 압축 강도 및 압축 강성이 증가하는 경향을 보인다. 따라서 차량 설계 시, TPO와 PP-LGF의 동적 물성을 고려한 기계적 특성을 활용하여야 한다. 또한 SHPB 장치의 변형률 데이터의 신뢰성 검증을 위해 초고속카메라를 통해 얻은 변형률을 DIC 분석을 통해 진행하였으며, 결과적으로 두 데이터의 유사성을 통해 흡킨슨바의 데이터에 대한 신뢰성을 확보하였다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국에너지기술평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (20202020800360, 기존 공공건물 에너지 효율 진단 및 리모델링 기술 개발 실증).

REFERENCES

- Friedrich, K., and Almajid, A.A., "Manufacturing Aspect of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications," *Applied Composite Materials*, Vol. 20, 2013, pp. 107-128.
- Kim, D.H., Kang, S.Y., Kim, H.J., and Kim, H.S., "Strain Rate Dependent Mechanical Behavior of Glass Fiber Reinforced Polypropylene Composites and Its Effect on the Performance of Automotive Bumper Beam Structure," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 166, 2019, pp. 483-496.
- Chen, W.W., and Song, B., *Split Hopkinson (Kolsky) Bar : Design, Testing and Applications*, Springer Science & Business Media, 2010.
- Al-Mousawi, M.M., Reid, S.R., and Deans, W.F., "The Use of the Split Hopkinson Pressure Bar Techniques in High Strain Rate Materials Testing," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C*, Vol. 211, No. 4, 1997, pp. 273-292.
- Abrate, S., "Behavior of Composite Materials under Impact: Strain Rate Effects, Damage, and Plasticity," *ASME Appl Mech Div-Publ-AMD*, Vol. 250, 2001, pp. 41-50.
- Kapoor, R., Pangeni, L., Bandaru, A.K., Ahmad, S., and Bhatnagar, N., "High Strain Rate Compression Response of Woven Kevlar Reinforced Polypropylene Composites," *Composites Part B: Engineering*, Vol. 89, 2016, pp. 374-382.