

폴리프로필렌 자기 보강 복합재의 동적 물성 구축을 위한 Split Hopkinson Pressure Bar의 설계 및 제작

강소영* · 김도형* · 김동현* · 김학성*†

Design and Fabrication of Split Hopkinson Pressure Bar for Dynamic Mechanical Properties of Self-reinforced Polypropylene Composite

So-Young Kang*, Do-Hyoung Kim*, Dong-Hyun Kim*, Hak-Sung Kim*†

ABSTRACT: The Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) has been 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 this study, the SHPB was directly designed and fabricated for the dynamic mechanical properties of fiber reinforced plastic (FRP) composites. In addition, this apparatus was verified for the validity by comparing the strain data obtained through the high speed camera and Digital Image Correlation(DIC) during the high strain rate compression test of the self-reinforced polypropylene composite (SRPP) specimen.

초 록: 변형률 속도 $100\text{ s}^{-1}\sim 10000\text{ s}^{-1}$ 범위에서 사용되는 홉킨스바(SHPB)는 재료의 동적 거동 특성을 확인하기 위해 가장 널리 사용되는 장치이다. SHPB 시험은 입력봉 및 전달봉에서 측정된 변형률을 사용하여 시험편의 응력, 변형률 및 변형률 속도를 얻을 수 있는 응력과 전달 이론을 기반으로 한다. 본 연구에서는 고 변형률 속도에서 폴리프로필렌 자기보강 복합재료(SRPP)의 동적 특성을 얻기 위해 직접 SHPB를 설계 및 제작하였다. 또한 본 연구를 통해 제작된 SHPB에서 얻은 변형률 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 Digital Image Correlation (DIC)를 통해 얻은 변형률 데이터와의 비교를 진행하였다. 이는 SRPP 시편의 고속 압축 시험을 통해 이루어 졌으며 SHPB를 통하여 얻은 데이터와 DIC를 통해 얻은 변형률 데이터의 유사함을 확인하였고 이를 통하여 장비의 신뢰성을 검증하였다.

Key Words: 홉킨스바(Split-Hopkinson Pressure Bar (SHPB)), 고 변형률 속도(High strain rate), 동적 압축 실험(Dynamic compression test), 디지털 이미지 기법(Digital Image Correlation (DIC)), 자기보강복합재(Self-reinforced Polypropylene (SRPP))

1. 서 론

최근 환경 오염문제가 대두되면서 자동차 환경에 대한 규제에 의해 연료 소비의 75%를 차지하고 있는 차량의 중량을 감소시키는 것이 자동차 산업에서 가장 중요한 문제

가 되었다[1]. 이를 위해 FRP는 일반적인 금속 재료와 비교해 보았을 때, 높은 강도 및 강성을 가지고 있고, 피로 및 부식에 대한 저항성 등을 가지고 있다는 점에서 자동차 경량화 부품에 널리 이용되고 있다.

이런 FRP에 대해 신뢰성 있는 자동차 경량화 부품을 개

Received 31 July 2018, received in revised form 15 September 2018, accepted 19 September 2018

*Department of Mechanical Engineering, Hanyang University

*†Institute of Nano Science and Technology, Hanyang University, Corresponding author (E-mail: kima@hanyang.ac.kr)

발하려면 충격 하중에서의 재료의 손상 거동을 예측하는 것이 매우 중요하다. 왜냐하면 충격 하중은 FRP 재료의 섬유 파손, 기지재 균열 등 다양한 파괴 모드가 복합적인 구조에 큰 손상을 줄 수 있기 때문이다[2,3]. 이러한 이유로 FRP 재료의 고 변형률 속도에서의 거동 특성에 대한 분석 및 고찰이 반드시 확보되어야 한다.

일반적으로 재료의 기계적 물성을 결정하기 위한 실험은 ASTM(American Society of Testing and Materials) 표준에 따라 수행되며 동적 조건 보다는 주로 준정적 변형률 속도($0.0001 \text{ s}^{-1} \sim 0.001 \text{ s}^{-1}$)하에 수행된다. 그동안 고 변형률 속도에서의 거동 특성을 규명하기 위해서 여러 가지 시험 장치가 개발되어왔다. 그러나 최근까지 금속 재료에 대한 실험 기술 및 방법은 집중적으로 연구되고 잘 확립되었지만, FRP 재료에 대해서는 여전히 동적 물성을 규명할 수 있는 기계적 시험에 대한 포괄적인 실험 기준이 부족하다. FRP 재료의 섬유와 기지재 간의 복합적인 구조 및 상호작용에 따른 실험 기준 확립이 어렵기 때문이다.

Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) 실험은 고 변형률 속도($100 \text{ s}^{-1} \sim 10000 \text{ s}^{-1}$)에서의 거동 특성을 규명하기 위해 가장 널리 쓰이는 방법이다. SHPB 기법은 1949년에 Kolsky의 탄성파 전달 이론(Stress wave Theory)을 통해 제안되었으며, 장치 내의 입력봉 및 전달봉에서 측정된 변형률을 이용하여 시편의 응력, 변형률 및 변형률 속도를 얻을 수 있다[4]. 이처럼 SHPB 실험은 FRP재료의 동적 물성에 대한 특성을 규명할 수 있기 때문에 다양한 관련 연구가 이어지고 있다.

이에 따라 본 연구에서는 SHPB 시험 장비를 자체적으로 설계 및 제작하였다. SHPB 실험에 사용된 시편은 최근 저밀도, 고연신 특성으로 주목받고 있는 폴리프로필렌 자기보강 복합재(Self-reinforced polypropylene, SRPP)로, 이 소재를 이용하여 고 변형률 속도 하의 동적 물성을 분석하였다. 강도가 높으면서도 연신율이 좋은 SRPP는 이런 특성 때문에 최근 자동차 내 충격 부품으로 활발히 쓰이고 있다. 이에 따라 SRPP가 고속으로 하중을 받을 때 그 특성을 규명하는 것이 더욱 중요해지고 있다. 따라서 본 연구에서는 자체적으로 설계된 SHPB를 이용하여 이러한 SRPP의 고 변형률 속도에서의 거동을 살펴보았다. 또한 본 연구에서 설계된 SHPB 장비의 데이터 타당성 검증에 위해 초고속 카메라 및 Digital Image Correlation (DIC) 기법을 통해 얻어낸 변형률 데이터와의 비교를 진행함으로써 이 장비에 대한 신뢰성을 확보하였다.

2. 기본 이론

SHPB 장치는 크게 충격봉(Striker), 입력봉(Incident bar), 그리고 전달봉(Transmission bar)으로 구성되어 있다(Fig. 1). 가스 건을 통해 발사된 충격봉이 입력봉에 강하게 충돌하게 되면 입력봉과 전달봉 사이에 위치한 시편이 압축하게

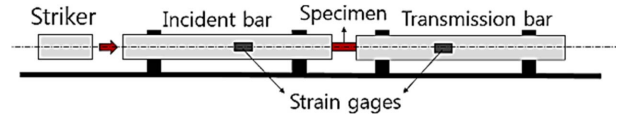


Fig. 1. Schematic of Split Hopkinson Pressure bar

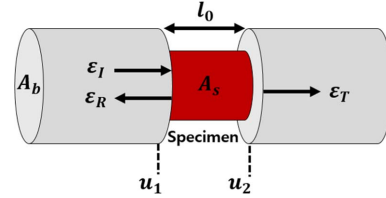


Fig. 2. The specimen between the incident bar and transmission bar

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. 이러한 실험에서 기본 선형 탄성파 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. 2에서 볼 수 있듯이 두 봉 사이에 위치한 시편의 초기 길이를 l_0 , 시편의 양쪽 끝 변위를 u_1 , u_2 라고 할 때, 시편의 평균 변형률은 다음과 같이 표현될 수 있다.

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

입사파, 반사파, 투과파를 각각 ϵ_p , ϵ_R , ϵ_T 로 표현할 때 변위는 다음과 같이 표현된다.

$$u_1 = C_b \int_0^t \epsilon_I dt + (-C_b) \int_0^t \epsilon_R dt = C_b \int_0^t (\epsilon_I - \epsilon_R) dt \quad (2)$$

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

여기서 C_b 는 봉에서의 탄성파 속도이고, 시편의 양쪽 부분에 가해진 힘은 다음과 같이 표현된다.

$$P_1 = E_b A_b (\epsilon_I + \epsilon_R) \quad (4)$$

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

E_b 와 A_b 는 각각 봉의 영률과 봉의 단면적을 의미한다. 또한 시편은 길이가 짧기 때문에 변형 중에 평형 상태에 있다는 가정에 따라 시편을 가로지르는 응력은 일정하다고 할

수 있다.

$$P_1 \cong P_2 \text{ or } \varepsilon_I + \varepsilon_R \cong \varepsilon_T \quad (6)$$

최종적으로, 평형을 가정하여 시편의 평균 응력, 변형률 및 변형률 속도는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_s = \frac{P_1 + P_2}{2A_s} = \frac{1}{2} \frac{E_b A_b (\varepsilon_I + \varepsilon_R + \varepsilon_T)}{A_s} \cong \frac{E_b (A_b)}{A_s} \varepsilon_T \quad (7)$$

$$\varepsilon_s = \frac{u_2 - u_1}{l_0} = \frac{C_b}{l_0} \int_0^t (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T) dt \cong \frac{C_b}{l_0} \int_0^t \varepsilon_R dt \quad (8)$$

$$\dot{\varepsilon}_s = \frac{C_b (\varepsilon_I - \varepsilon_R - \varepsilon_T)}{l_0} = \frac{C_b}{l_0} \varepsilon_R \quad (9)$$

3. 실험

3.1 실험 재료 및 시편

본 연구에서 SHPB 실험을 위한 시편으로는 섬유와 기지재가 모두 폴리프로필렌(Polypropylene)으로 구성된 폴리프로필렌 자기보강 복합재(Self-reinforced polypropylene composite, SRPP)를 사용하였다. 실험에 사용된 이 SRPP는 서로 다른 제조 공정을 사용하는 두 가지 유형의 폴리프로필렌으로 구성되었다. 폴리프로필렌 섬유는 한국 ENT사에서 단일 중합체 폴리프로필렌을 용융 방사하여 원사를 제조한 후 평직 형태로 제직되었으며, 기지재 역시 한국 ENT사에서 공중합 폴리프로필렌을 원료로 한 무연신 필름을 사용하여 제조하였다. 이 필름은 섬유 소재보다 30도 이상 낮은 녹는점을 갖고 있어서 두 가지 소재를 이용하여 자기보강 복합소재로 잘 구성할 수 있었다. 또한 본 연구에서는 SRPP의 합지를 위해 핫프레스 장비를 사용하였다. 합지 과정은 자기보강 복합소재의 시편 제조를 위해 PP 섬유 사이에 필름 형태의 기지재를 삽입하였고, 최적 합지 온도를 145°C로 선정하여 핫프레스로 5 bar의 압력과 함께 가열하였다. 이때 시편에 열전대를 부착하여 실시간으로 시편의 온도를 관찰하였으며 목표 온도에서 3분의 체류시간을 가진 후 분당 20°C의 속도로 냉각하여 시편을 제조하였다.

홉킨슨바의 동적 압축 실험의 경우 압축 시편은 Fig. 1에 서와 같이 입력봉과 전달봉 사이에 위치해야 한다. SRPP의 동적 압축 시험의 경우, ASTM D695를 참고하여 20 × 10 × 4.5 mm³ 크기의 시편으로 결정하였다.

Fig. 3과 같이 이 시편 크기에 맞추어 직사각형 형태의 홈이 있는 고정 지그를 사용하였고, 시편의 끝 표면에서 에지 효과(edge effects)에 영향을 받지 않는 더 균일한 변형장을 얻기 위해 면대 중횡비를 2로 선택했다. 이 형상의 고정 지그는 FRP의 고 변형률 속도 실험에서 많은 연구에 성공적으로 사용되었다[5-7].

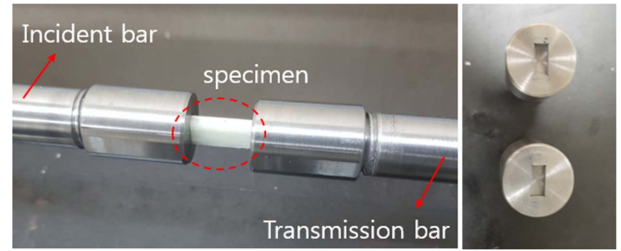


Fig. 3. Pictures of fixture and specimen design for Hopkinson bar

3.2 실험 장비 사양

SHPB에서 입력봉과 전달봉은 탄성파가 전파되는 동안 1차원 탄성과 이론을 사용하기 위해 탄성이 유지되어야 한다. 또한 두개의 봉은 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 [8]. 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 측정하기 위해 양쪽 봉에 모두 스트레인 게이지를 부착하였다. 이 때 사용한 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 중첩되지 않도록 봉의 끝에서 450 mm 떨어진 거리에 부착하였다. 또한 스트레인 게이지는 휘트스톤 브릿지(Wheatstone bridge)로 연결되며, 그 결과는 Burr-Brown INA129(Texas Instruments, USA) 증폭기를 통하여 증폭되었다. 이 증폭 장치는 휘트스톤 브릿지를 통해 나온 신호 결과를 150.7배 증폭시킨다. 이렇게 나온 출력전압 신호는 Fig. 4와 같이 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 마

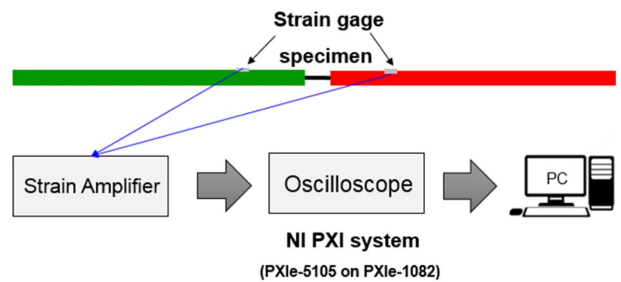


Fig. 4. Schematic of strain data acquisition system

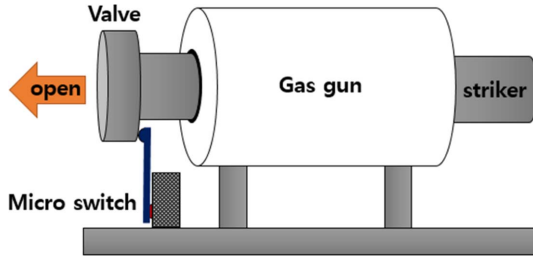


Fig. 5. Micro-switch on the valve in gas gun configuration

이크로 스위치가 사용되었다. 마이크로 스위치는 Fig. 5와 같이 가스 건의 밸브에 의해 가동되어 5 V 신호를 데이터 수집 시스템으로 출력한다. 실험 후 데이터가 수집되면 실험을 완료한 후 사후 처리를 위해 Excel 파일에 저장된다.

3.3 DIC를 통한 SHPB 데이터의 정합성 검증

본 연구에서는 SHPB를 통해 얻은 변형률 데이터의 신뢰성 확보를 위하여 Digital Image Correlation (DIC)를 통해 얻은 변형률 데이터와의 비교를 진행하였다. DIC 기법은 Mercury RT 소프트웨어의 비디오 신율계를 통하여 진행되었다. 스펙클 무늬의 시편 표면으로부터 평면 내 균일한 변형장을 얻기 위해, 초고속카메라의 이미지 해상도는 $320 \times 128 \text{ pixel}^2$ 에, 프레임 속도는 97107 fps로 설정하였다. 또한 표본 시편의 변형으로 인한 면내 변형장을 보장하기 위해 SHPB를 통한 고속 압축 시험 동안 동시에 DIC기법을 위한 초고속 카메라 동영상 촬영이 진행되었다. SHPB 실험에서 0.1 ms 동안 신호를 측정하였고, Fig. 6과 같이 이 시간 동안 SHPB 실험 결과로부터 9개의 변형률 데이터가 DIC 측정 변형률 데이터와 비교되었다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 SHPB 실험 결과

Fig. 6은 SHPB를 이용하여 측정한 SRPP 시편의 고속 압축 시험의 전압 신호 결과를 나타낸다. Incident 및 Reflected 신호는 입력봉에 부착된 스트레인 게이지에서 측정한 신호이고, Transmitted 신호는 전달봉에 부착된 스트레인 게이지에서 측정한 신호이다. 이렇게 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.

$$\epsilon_s = \frac{4 \times E_o}{E_I \times A_G \times G_F} \quad (10)$$

위의 공식을 이용하게 되면, Fig. 6과 같은 전압변화 결과(E_o)를 변형률(ϵ_s)로 바꿀 수 있다. 식 (10)에서 E 는 Input voltage, G_F 는 Strain gage factor를 의미하고, A_G 는 amplifier gain

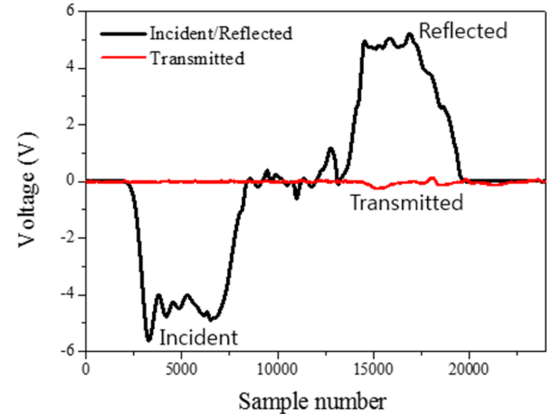


Fig. 6. Experimental signal of SRPP by SHPB

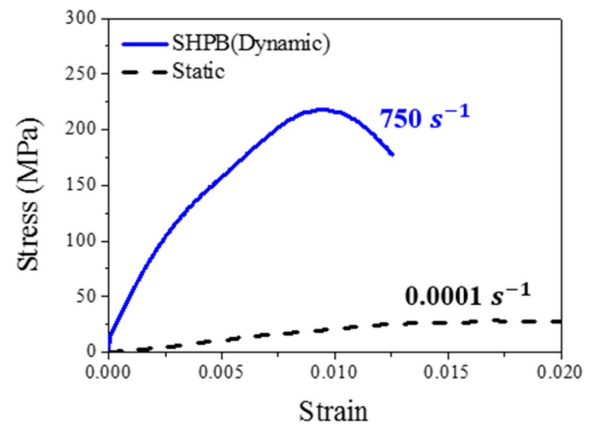


Fig. 7. Stress-strain curve of SRPP compression test at varying strain rates

값을 의미한다. 이렇게 얻은 변형률 값을 탄성과 전달 이론에 적용하면 SRPP 시편의 응력-변형률 선도를 얻을 수 있다. 이런 데이터 처리 과정을 통해 얻은 응력-변형률 선도를 Fig. 7에 나타냈다. 이 그래프를 보면 변형률 속도가 0.0001 s^{-1} 인 정적 압축 시험과 달리, SHPB를 이용한 고속 압축 시험에서는 변형률 속도가 750 s^{-1} 로 측정되었다. 변형률 속도에 대한 응력-변형률 선도는 Fig. 7에서 볼 수 있듯이 변형률 속도가 올라가면 파단 강도는 커지고 파단 변형률은 작아지는 경향을 보였다. 이는 일반적인 복합재료의 고속 물성 시험에서 볼 수 있는 경향으로, 하중에 의해 재료내에서 손상이 진전되는 속도와 관련이 있다. 하중 속도가 증가함에 따라 손상이 진전되는 속도가 이를 따라가지 못해, 특정 변형률에서 재료에 생성된 손상이 적어지기 때문에 재료가 더 높은 하중까지 견딜 수 있게 되고, 또한 이로 인해 재료는 더욱 강건한 거동을 나타내게 된다[9,10]. 또한 이러한 고 변형률 속도에서의 SRPP의 거동은 단순 폴리프로필렌 재료의 거동과도 차이점을 보인다. SRPP의 폴리프로필렌 섬유는 고도로 배향된 분자사슬을 가지고 있어 SRPP의 인장강도 및 강성을 더욱 높여주는 역할을 한다.

이로 인해 고 변형률 속도에서 강도 및 강성이 증가하는 비율도 단순 폴리프로필렌 재료보다 더욱 높은 경향을 보인다[11]. 따라서 이런 폴리프로필렌 섬유 구조의 장점을 살려 SRPP 재료를 자동차 충격 부품에 이용할 경우, SHPB 시험을 통해 얻어낸 SRPP의 고 변형률 속도에서의 우수한 특성을 잘 활용할 수 있다.

4.2 DIC를 통한 SHPB 데이터의 정합성 검증

Fig. 8은 SHPB 실험 결과와 DIC 실험 결과를 보여준다. 파괴 전 모든 변형률 데이터에서(Fig. 8 지점 1부터 지점 7까지) 두 데이터가 거의 유사한 것을 확인할 수 있고 반면 지점 7부터는 시편에 변형이 발생하기 시작하면서 시편 표면의 변형장이 왜곡되었다. 이는 Fig. 9와 같이 DIC 분석을 위해 초고속 카메라로 촬영한 SRPP 고속 압축 이미지를 통해서 더욱 명확히 확인할 수 있다. 지점 7까지는 DIC 해석 영역이 균일하게 유지되는 반면, 지점 7 이후로는 시편이 압축 및 손상되어 초고속 카메라가 포커스를 잃으면서 해석 영역이 일부 손상되었다. 따라서 지점 7 이후의 변형률 데이터에서 SHPB 결과와 DIC 실험 결과가 다소 차이를 보였다. 이를 통해 시간에 대한 변형 및 파괴가 DIC와 SHPB 장치에서 비슷하게 포착된 것을 알 수 있었고, DIC 해석 영역이 깨지기 전까지 SHPB의 변형률 측정이 DIC 데이터와 유사함을 통해 신뢰성 있다는 것을 확인할 수 있었다.

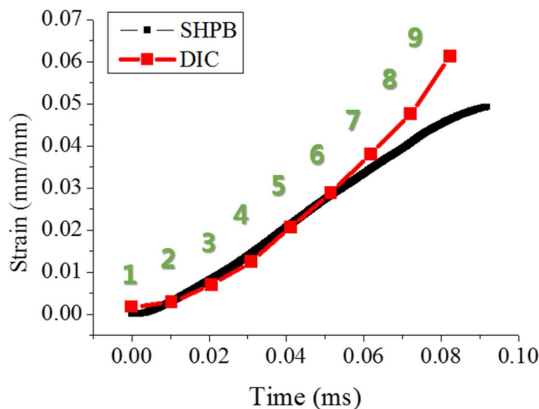


Fig. 8. Comparison of strain data from SHPB and DIC

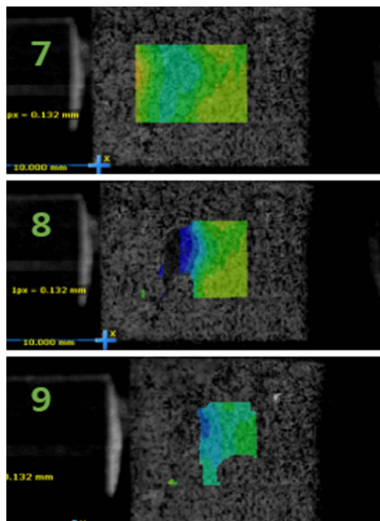


Fig. 9. The images of SRPP by the high speed camera and DIC

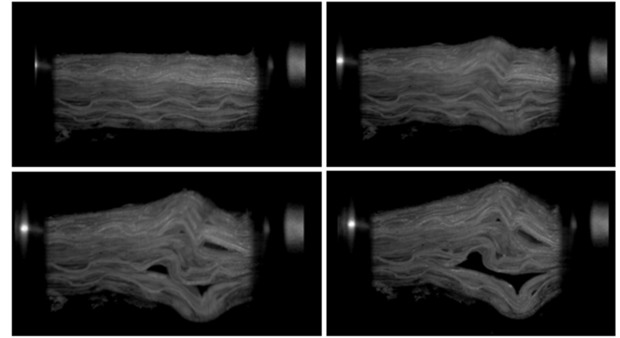


Fig. 10. Failure observation by high speed camera of SRPP

또한, Fig. 10과 같이 고 변형률 속도에서 SRPP 시편의 압축되는 모습의 옆면을 초고속 카메라로 찍어서 분석해 보았을 때 역시 시편이 파손되는 시점과 SHPB 및 DIC를 통해 나타난 파손 시점이 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 고 변형률 속도에서 재료의 동적 물성을 얻기 위해 SHPB 장비를 직접 설계 및 제작하였다. 또한 완성된 SHPB 장치의 변형률 데이터의 신뢰성 검증을 위하여 DIC 및 초고속카메라를 통한 변형률 측정과의 비교를 진행하였고, 결과적으로 두 데이터의 유사성을 통해 SHPB의 데이터에 대한 신뢰성을 확보하였다. 이 과정을 통해 제작된 SHPB 장비를 사용하여 섬유와 기지재 모두 폴리프로필렌으로 이루어진 SRPP 소재의 고속 압축 실험을 수행하였고, 도출된 전압 변화 결과에서 탄성과 전달이론을 통해 시편의 응력, 변형률, 변형률 속도를 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서 제작된 SHPB 장비를 통해 SRPP의 고 변형률 속도에서의 동적 물성을 획득하였고, 이 외에도 SHPB를 통해 다양한 재료의 시편에 대한 동적 물성을 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

This work was supported by the Industrial Strategic technology development program (10076562, Development of fiber reinforced thermoplastic nano-composite via fiber bundle spreading for high quality resin impregnation process and its application to the underbody shield component for protecting battery pack of an electric-vehicle) funded By

the Ministry of Trade, industry & Energy(MI, Korea). This research was also supported by a National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korean Government (MEST) (201800000350003).

REFERENCES

1. Friedrich, K., and Almajid, A.A., "Manufacturing Aspect of Advanced Polymer Composites for Automotive Applications," *Applied Composite Materials*, Vol. 20, 2013, pp. 107-128.
2. Hamerton, I., *Recent Developments in Epoxy Resins*, iSmithers Rapra Publishing, 1996.
3. Favaloro, M., *A Comparison of the Environmental Attributes of Thermoplastic vs. Thermoset Composite, Cell*, 978, 2009, pp. 270-6011.
4. Chen, W.W., and Song, B., *Split Hopkinson(Kolsky) Bar : Design, Testing and Applications*, Springer Science & Business Media, 2010.
5. Guedes, R., Moura, M., and Ferreira, F., "Failure Analysis of Quasi-isotropic CFRP Laminates under High Strain Rate Compression Loading," *Composite Structures*, Vol. 84, 2008, pp. 362-368.
6. Koerber, H., Xavier, J., and Camanho, P., "High Strain Rate Characterisation of Unidirectional Carbon-epoxy IM7-8552 in Transverse Compression and In-plane Shear Using Digital Image Correlation," *Mechanics of Materials*, Vol. 42, 2010, pp. 1004-1019.
7. Tarfaoui, M., Neme, A., and Choukri, S., "Damage Kinetics of Glass/epoxy Composite Materials under Dynamic Compression," *Journal of Composite Materials*, Vol. 43, 2009, pp. 1137-1154.
8. Follansbee, S., *The Hopkinson Bar in Metals Handbook*, Mechanical Testing American Society for Metals Park, 1978.
9. Williams, K.V., Vaziri, R., and Poursartip, A., "A Physically Based Continuum Damage Mechanics Model for Thin Laminated Composite Structures," *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pp. 2267-2300.
10. Ladeveze, P., and LeDantec, E., "Damage Modeling of the Elementary Ply for Laminated Composites," *Composites Science and Technology*, Vol. 43, 1992, pp. 257-267.
11. McKown, S., and Cantwell, W.J., "Investigation of Strain-rate Effect in Self-reinforced Polypropylene Composites," *Composite Materials*, Vol. 41, No. 20, 2007.