

Pulse Shaper를 이용한 SHPB 실험 응력과 제어 효과의 해석 및 실험적 검증

김용희¹ · 우민아¹ · 강범수¹ · 김 정[#]

Numerical and Experimental Verification of Stress Wave Control Effect in SHPB Experiment using Pulse Shaper

Y. H. Kim, M. A. Woo, B. S. Kang, J. Kim

(Received August 23, 2017 / Revised September 12, 2017 / Accepted September 12, 2017)

Abstract

In the high-speed forming analysis, dynamic material properties considering a high strain rate are required. The split Hopkinson pressure bar (SHPB) experiment was performed for measuring dynamic material properties under high strain rate. The pulse shaping method was used to improve the accuracy of the SHPB experiment. A pulse shaper attached to the front of the incident bar was used for specimen dynamic stress equilibrium through stress wave control. Numerical analysis and SHPB test were performed to verify whether the pulse shaper affects the dynamic stress equilibrium in copper and Al6061 specimens. The results of SHPB test and numerical analysis show that the pulse shaper contributes to the dynamic stress equilibrium. Based on the improved stress equilibrium using a pulse shaper, the flow stress curves for copper and Al6061 materials were obtained at strain rates of 1344.4/sec and 1291.6/sec, respectively.

Key Words : Dynamic Material Properties, Split Hopkinson Pressure Bar, Pulse Shaper, Stress Wave Control

1. 서 론

항공기나 자동차 등의 첨단 산업에서는 차체나 동체 등 금속 소재의 생산성 향상을 위해 여러 가지 성형방법이 제안되었다. 제안된 여러 성형 방법 중, 1000/sec 이상의 고 변형률 속도로 소재를 성형하는 전자기 성형이나 액중 방전 성형 등의 공정은 고압 및 고속 충격 조건으로 기존의 성형 공정보다 소재의 성형성을 향상시킬 수 있다[1].

전자기 성형 등의 고속 성형 해석 시, 소재의 물성은 기존의 정적 시험에서의 물성과 다른 경향을 나타내기 때문에 변형률 속도를 고려한 물성이 요구된다. 이러한 고 변형률 속도 하($10^2 \sim 10^4$ /sec)에서 소재의

동적 물성을 획득하기 위해 Split Hopkinson pressure bar(SHPB) 실험이 제안되었다[2, 3]. SHPB 실험은 실린더 형상의 소재를 압력봉 사이에 위치시킨 후 충격을 가하여 소성변형 시킨 다음, 충격에 의한 응력과 변형을 분석하여 동적 물성을 획득하는 기법이다.

SHPB 실험에서 시편의 응력 및 변형률에 관한 식은 시편의 일정한 변형률 속도와 동적 평형이 이루어진다는 가정 하에서 도출된다[4]. 일반적인 SHPB 실험에서는 응력파의 진동하는 폭이 크기 때문에 시편의 변형률 속도가 일정하지 않고, 동적 응력 평형이 이상적으로 이루어지기 어렵다. 위와 같은 단점들을 극복하기 위해 펄스 조정 기법(pulse shaping method)이 제안되었으며, 이를 통해 시편의

1. 부산대학교 항공우주공학과
Corresponding Author : Department of Aerospace engineering, Pusan National University, E-mail:greatkj@pusan.ac.kr

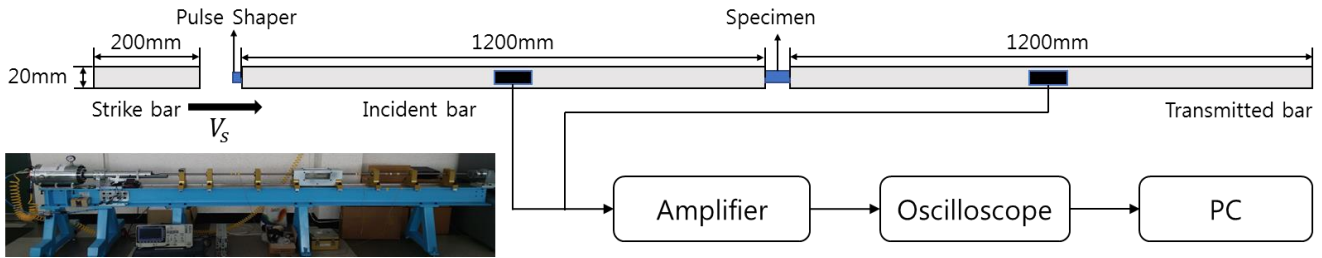


Fig. 1 Schematic diagram of SHPB apparatus with pulse shaper and SHPB apparatus in Pusan national university[6]

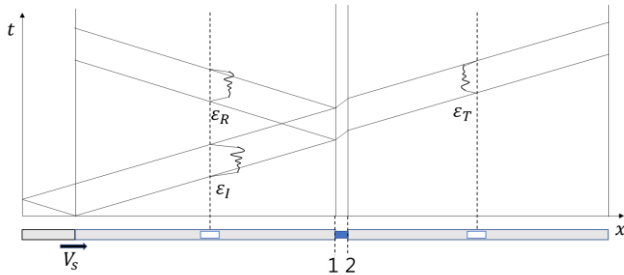


Fig. 2 Time-distance diagram of stress wave propagation at SHPB test

동적 응력 평형이 이루어질 수 있도록 하여 SHPB 실험의 정확도를 향상시킬 수 있다[5]. 여러 가지 펄스 조정 기법 중, 펄스 조정기(pulse shaper)를 입력봉에 부착하여 응력파를 제어하는 방법이 있다. 구리 소재의 디스크를 압력봉에 부착하는 간단한 방법으로 응력파를 제어할 수 있다.

본 연구에서는 상용 프로그램 LS-DYNA를 사용하여 해석적으로 펄스 조정기의 응력과 제어 효과를 확인하였다. 또한, 펄스 조정기가 구리와 Al6061 두 가지 소재에 대해 시편의 동적 응력 평형에 기여하는지 SHPB 실험을 통해 확인하였다. 펄스 조정기를 부착하였을 때 시편이 응력 평형 상태에 근접하였음을 해석 및 실험을 통해 검증하였다. 이를 바탕으로 구리와 Al6061 두 소재의 변형률 속도가 각각 1344.4 /sec와 1291.6 /sec일 때의 유동응력 선도를 도출하였다.

2. 기본 이론

2.1 SHPB 실험

2.1.1 SHPB 이론 및 실험 순서

SHPB 실험 장비의 개략도와 사양을 Fig. 1에 나타내었다[6]. SHPB 실험 장비는 입력봉(incident bar), 출

Table 1 Material properties of SNCM439

Elastic modulus	Yield strength	Density	Poisson's ratio
196 GPa	1550 MPa	7850 kg / m ³	0.3

력봉(transmitted bar), 충격봉(strike bar)으로 구성된다. 입력봉과 출력봉, 그리고 충격봉은 동일한 축(1차원)으로 직선 병진운동을 한다. 반경 방향의 파형 분산을 최소화하기 위해 정렬 유지 장치(alignment guide)가 각 압력봉을 지지하여 직진도를 유지한다. 내부 응력파의 1차원 진행을 위해 압력봉의 길이 대 직경 비율을 높게 설정하였으며, 비율의 값은 60이다.

입력봉 및 출력봉 사이에 시편을 부착한다. 공압식 발사장치를 이용하여 충격봉에 운동에너지를 가하면 충격봉이 임의의 속도에 도달하게 되고, 도달한 속도로 입력봉에 충돌한다. 충격봉과 입력봉이 충돌하면 탄성 압축 응력파가 발생한다. 발생한 응력파는 입력봉을 지나 시편과 출력봉까지 전파된다. 입력봉과 출력봉, 그리고 충격봉을 구성하고 있는 소재는 Table 1과 같이 높은 항복 응력을 지닌 SNCM439 소재로서 탄성 변형 거동이 발생하며, 시편은 상대적으로 항복 응력이 낮아 소성 변형 거동이 발생한다.

입력봉과 시편의 경계면에서 봉 소재와 시편 소재 간 임피던스(impedance) 차에 의해 탄성파의 일부는 시편과 출력봉으로 투과하고, 일부는 입력봉으로 반사된다. 입사파와 반사파, 투과파는 Fig. 2와 같이 입력봉과 출력봉에 부착한 스트레인 게이지의 미세한 저항 변화로 나타나며, 이에 따른 전압 변화가 발생한다. 게이지의 저항 변화는 휘트스톤 브리지(Wheatstone bridge)를 통해 측정할 수 있으며, 본 연구에 사용된 브리지의 종류는 쿼터(quarter) 타입 브리지이다. 휘트스톤 브리지에 연결된 증폭기

(amplifier)는 전압 변화를 증폭시켜 오실로스코프(oscilloscope)에 전달하고, 오실로스코프에서 시간에 따른 전압 변화 데이터를 얻을 수 있다.

2.1.2 압력봉의 변형률 측정

오실로스코프에서 시간에 따른 전압 데이터를 통해 봉의 길이방향(축 방향) 변형률을 도출할 수 있다.

$$\varepsilon_b = \frac{4 \times V_o}{V_i \times G_F \times A_G} \quad (1)$$

식 (1)은 쿼터타입 브리지의 전압과 봉의 변형률 관계를 나타낸 식으로, V_o 는 오실로스코프에 출력되는 전압이다. V_i 와 G_F , 그리고 A_G 는 각각 입력 전압(input voltage), 스트레인 게이지 상수(gauge factor) 및 증폭기 게인(gain)이며 본 연구에서 사용된 상수의 값은 각각 2V, 2.13, 1000이다.

2.1.3 시편의 응력 및 변형률, 변형률 속도 측정

시편과 입력봉(Fig. 2의 1번) 간, 시편과 출력봉(Fig. 2의 2번) 간 1차원 응력과의 크기는 각각 식 (2)와 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma_1 = E_b \frac{A_b}{A_s} (\varepsilon_l + \varepsilon_r) \quad (2)$$

$$\sigma_2 = E_b \frac{A_b}{A_s} (\varepsilon_T) \quad (3)$$

식 (2)와 (3)의 E_b 와 A_b , 그리고 A_s 는 각각 압력봉의 영률과 단면적, 시편의 단면적이다. 이상적인 동적 응력 평형 상태일 경우 시편의 전면 및 후면의 응력 분포는 동일해야 한다[7]. 시편의 전면 및 후면 응력이 평형할 때 다음 식을 만족한다.

$$\varepsilon_l + \varepsilon_r = \varepsilon_T \quad (4)$$

식 (4)의 왼쪽 항은 시편의 전면(입사파와 반사파)에 대한 변형률을 나타내고 오른쪽 항은 시편의 후면(투과파)에 대한 변형률을 나타낸다. 동적 응력 평형을 만족하는 경우 시편의 응력 및 변형률 속도, 그리고 변형률을 압력봉의 변형률에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

Table 2 Johnson-Cook parameters of copper used in FEM analysis[10]

	A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\varepsilon}_{ref}$ (/sec)
copper	90	292	0.31	0.025	1

$$\bar{\sigma}_s = E_b \left(\frac{A_b}{A_s} \right) \varepsilon_T \quad (5)$$

$$\bar{\dot{\varepsilon}}_s = -\frac{2C_0}{L_s} \varepsilon_T \quad (6)$$

$$\bar{e}_s = -\frac{2C_0}{L_s} \int_0^t \varepsilon_T dt \quad (7)$$

식 (5) ~ (7)은 평균 공칭 응력과 공칭 변형률 속도, 평균 공칭 변형률을 나타낸다. C_0 는 탄성과 전파 속도($\sqrt{E_b / \rho_b}$)이며, L_s 는 시편의 길이이다.

2.2 펄스 조정 기법

충격봉이 입력봉에 충격을 가할 때 발생하는 응력과의 형태는 일반적으로 사다리꼴 형태이다. 펄스 조정 기법은 응력과의 형태를 제어하여 시편의 전면 및 후면의 동적 응력 평형이 가능하게 하며, 시편이 변형할 때의 변형률 속도를 일정하게 해주는 효과가 있다[8].

여러 펄스 조정 기법 중 구리 등 무른 소재의 얇은 디스크를 입력봉에 부착하여 응력파를 제어하는 방법이 있다. 충격봉이 입력봉과 충돌하기 전에 디스크의 소성 변형으로 응력파가 충분한 상승 시간(rising time)을 갖게 되고, 응력파의 지속 시간이 증가한다. 응력파의 상승 시간을 길게 하면 시편이 동적 응력 평형상태에 도달하는 데 필요한 충분한 시간을 제공할 수 있다[9].

3. 유한요소해석

3.1 유한요소해석 모델 및 해석 조건

펄스 조정기가 시편 전후면의 동적 응력에 어떤 영향을 미치는지 판단하기 위해 상용 해석 프로그램 LS-DYNA를 이용하여 유한요소 해석을 수행하였다. 펄스 조정기를 적용한 SHPB 모델과 적용하지 않은 모델을 Fig. 3과 같이 각각 모델링하였다. 시편

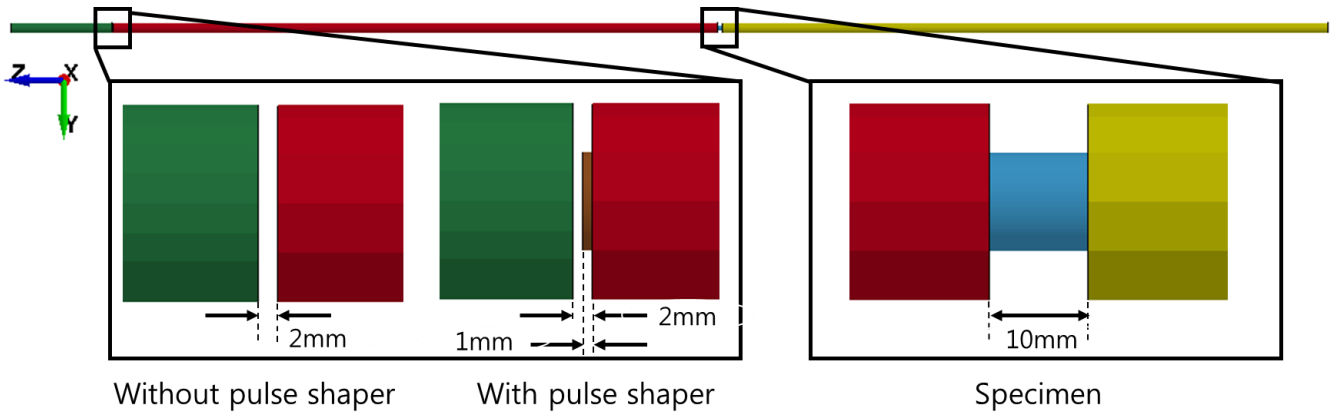


Fig. 3 Comparison of SHPB finite element model with pulse shaper and without pulse shaper

은 실린더 형태이며 지름 및 두께는 실험에서 사용되는 시편과 동일한 10mm로 모델링하였다. 충격봉의 충돌 속도 또한 실험과 동일하게 발사장치에 2 bar를 입력하였을 때의 속도인 24 m/sec를 적용하였다. 해석에 사용된 펄스 조정기의 소재는 소성 변형 에너지가 상대적으로 적은 소재인 순수 구리로 선정하였다. 펄스 조정기의 변형 에너지가 클 경우, 시편의 변형 에너지가 감소하여 획득하고자 하는 변형률 속도에 도달하지 못할 수 있다. 따라서 두께를 1mm로 설정하여 적절한 변형 에너지를 유지하였다. 해석시간은 1msec이며, 해석의 효율을 위해 초기 충격봉과 입력봉의 간격은 2mm로 설정하였다.

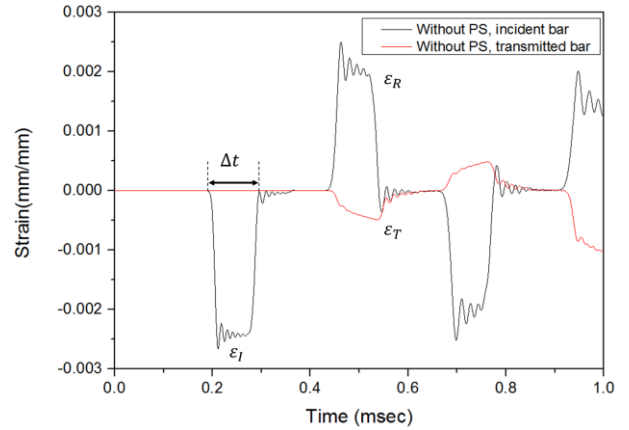
입력봉과 출력봉, 충격봉은 탄성 거동이 발생하므로 탄성 물성을, 시편과 펄스 조정기는 소성 거동 및 고 변형률 속도 효과를 고려하기 위해 식 (8)과 같이 온도 경화 항을 제외한 Johnson-Cook 구성방정식을 적용하여 물성을 부여하였다. 해석에 사용된 소성 변형 물성은 Table 2와 같다[10].

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n) \left\{ 1 + C \left(\frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_{ref}} \right) \right\} \quad (8)$$

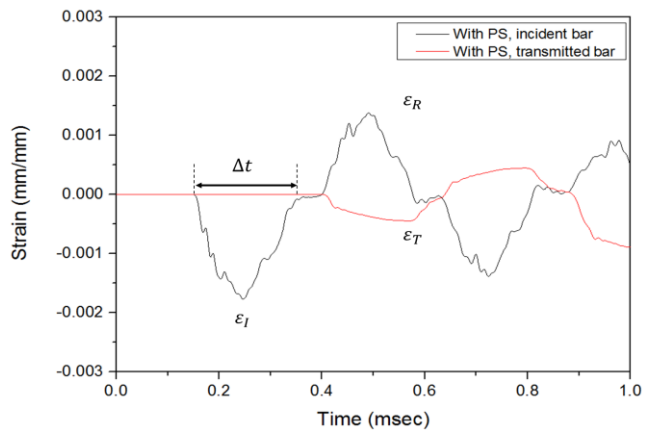
식 (8)의 A와 B, 그리고 n은 변형률 경화 계수이다. C는 변형률 속도 민감도 계수이며 $\dot{\varepsilon}$ 와 $\dot{\varepsilon}_{ref}$ 는 유효 변형률 속도와 참조 변형률 속도이다.

3.2 유한요소해석 결과

유한요소해석을 수행하여 얻은 각 모델 압력봉의



(a) Without pulse shaper model



(b) With pulse shaper model

Fig. 4 Strain of incident bar and transmitted bar

축 방향 변형률을 Fig. 4에 나타내었다. 펄스 조정기를 부착하지 않은 모델의 응력과 형태는 사다리꼴이며 응력과 지속시간(Fig. 4의 Δt)은 약 107 μ sec이다. 펄스 조정기를 부착하였을 때의 응력과 파형은

삼각형으로 변화하였으며, 지속시간은 약 212 μ sec로 2배 가까이 증가하였다. 상승 시간 또한 20 μ sec에서 98 μ sec까지 크게 증가하였다. 따라서 상승 시간 및 지속시간이 증가함에 따라 시편이 동적 응력 평형 상태에 도달한 것으로 판단하였다.

펄스 조정기를 부착하였을 때 응력파의 최대값은 감소하였다. 이는 펄스 조정기의 소성 변형 에너지가 발생하여 압력봉 내 변형률이 감소한 것으로 판단하였다. 압력봉의 변형률을 바탕으로 식 (2)와 (3)을 이용하여 Fig. 5와 같이 시편의 전면 및 후면의 응력을 도출하였다. 펄스 조정기의 유무에 따른 시편 전후면 응력의 일치도를 정량적으로 비교하기 위해 root mean square error(RMSE)를 이용하였다.

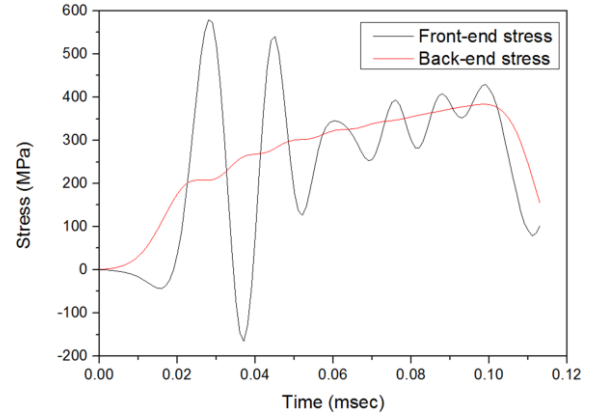
$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_{front,i} - y_{back,i})^2}{n}} \quad (9)$$

식 (9)의 y_{front} 와 y_{back} , n 은 전면 및 후면의 응력, 그리고 데이터의 개수이다. 펄스 조정기를 부착하지 않은 모델(Fig. 5(a))과 부착한 모델(Fig. 5(b))의 RMSE의 값은 각각 140.2와 42.3으로 약 70% 감소하였다. RMSE의 값이 작을수록 두 데이터 간 오차가 작다고 판단할 수 있다. 펄스 조정기를 사용하였을 때의 RMSE 값이 작은 것으로 보아 시편의 전후면 응력 일치도가 증가한 것을 확인하였다.

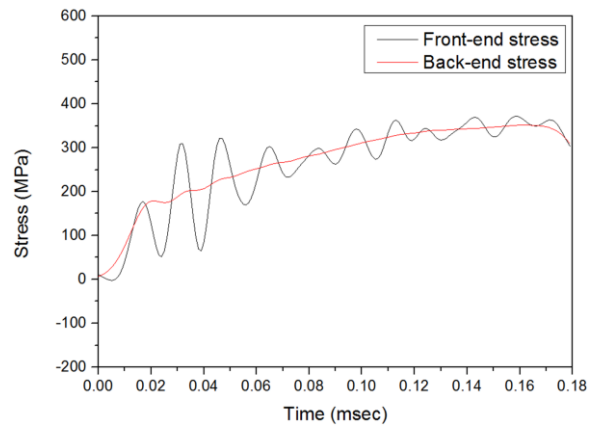
4. SHPB 실험

4.1 SHPB 실험 조건

유한요소해석 결과를 통해 펄스 조정기가 시편의 전후면 응력 일치도를 증가시켜 주는 것을 확인하였다. 실제 SHPB 실험에서 응력과 제어 효과가 있는지 확인하기 위해서 Fig. 6과 같이 펄스 조정기의 유무에 따라 실험을 수행하였다. 시편은 구리와 Al6061 두 가지 소재를 사용하였다. 시편과 펄스 조정기의 크기, 충격봉의 속도 등의 실험 조건은 해석 조건과 모두 동일하게 설정하였다. 충격봉의 속도를 측정하기 위해 포토 게이트 시스템을 이용하였다. 포토 센서의 거리는 17cm이며 측정된 시간은 0.0068 sec에서 0.0072sec로 측정하여 충격봉의 속도를 약 24m/sec로 도출하였다.



(a) Without pulse shaper model



(b) With pulse shaper model

Fig. 5 Front-end and back-end specimen stress wave

4.2 SHPB 실험 결과

SHPB 실험 결과, 펄스 조정기와 시편은 Fig. 7과 같이 소성 변형이 발생하였다. 구리와 Al6061 소재에 대해 펄스 조정기의 유무에 따른 압력봉의 변형률은 각각 Fig. 8과 Fig. 9와 같다. 오실로스코프에서 출력된 시간에 대한 전압 데이터를 식 (1)을 이용하여 압력봉 내 변형률에 대한 그래프로 변환하였다. 펄스 조정기를 부착하였을 경우, 해석과 동일하게 응력파의 상승시간과 유지시간이 증가한 것을 볼 수 있다. 또한 상승시간과 유지시간은 증가하였으나 입사파의 최대값은 감소한 것을 확인하였다.

구리와 Al6061 소재 시편의 전면 및 후면부의 시간에 따른 응력파는 Fig. 10 및 Fig. 11과 같다. 펄스 조정기를 사용하였을 때의 응력과 형태는 대체로 진동 폭이 작고 후면 응력파의 크기와 유사한 것을 확인하였다. 전면 및 후면 응력파에 대한 RMSE 값은 Table 3과 같으며, 구리와 Al6061 소재에 대해

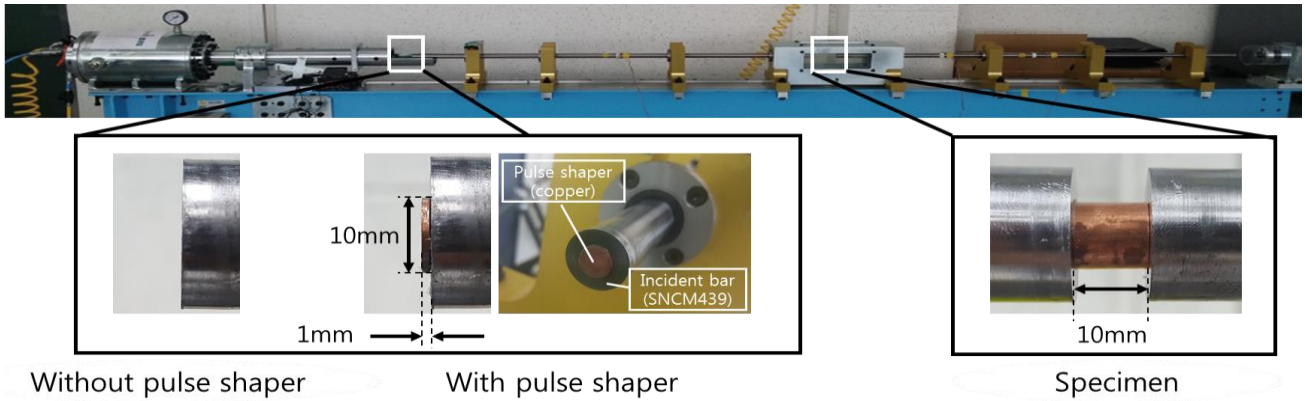
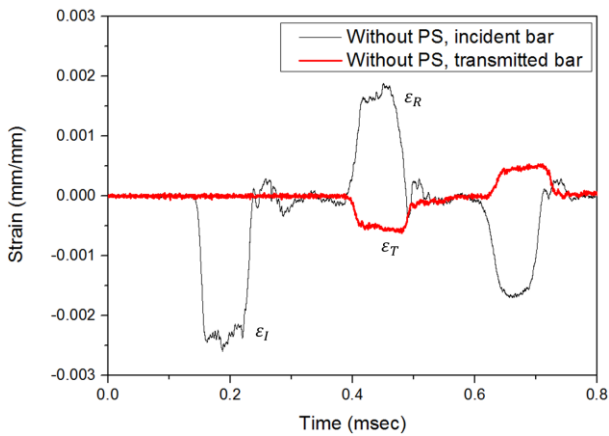


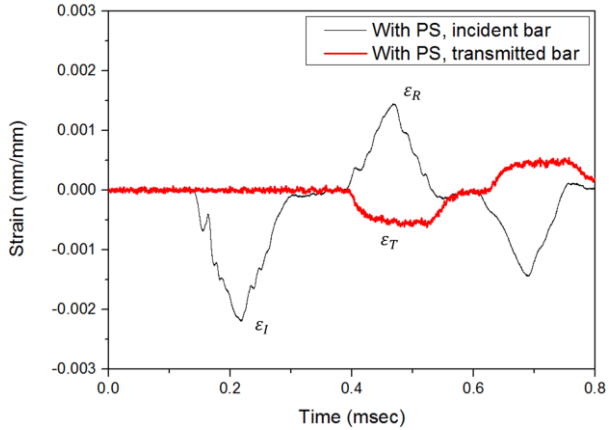
Fig. 6 Comparison of SHPB experiments with pulse shaper and without pulse shaper



Fig. 7 Shape before and after deformation of pulse shaper and specimen

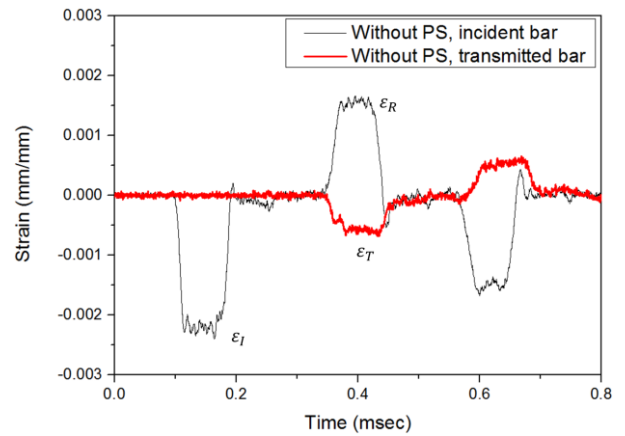


(a) Without pulse shaper

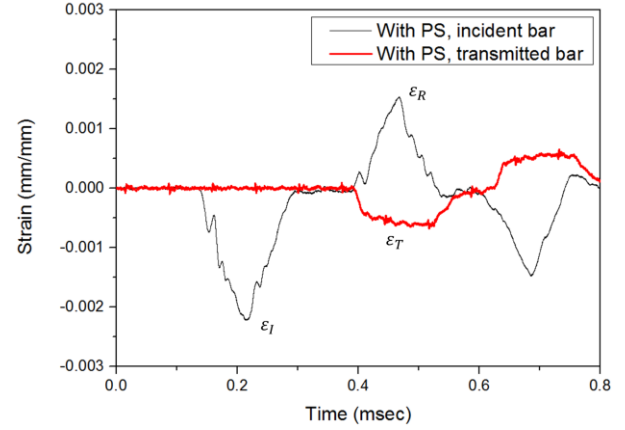


(b) With pulse shaper

Fig. 8 Strain of pressure bar in a copper specimen

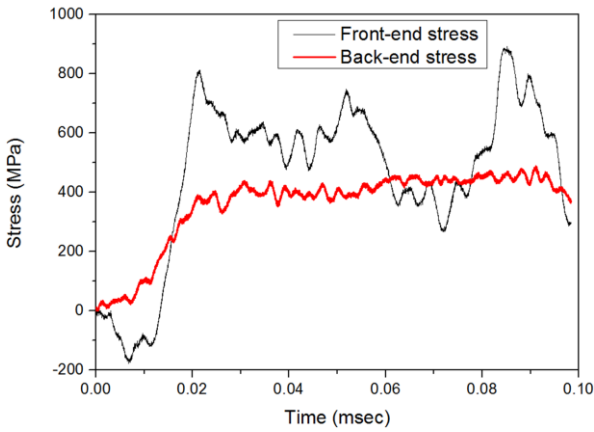


(a) Without pulse shaper

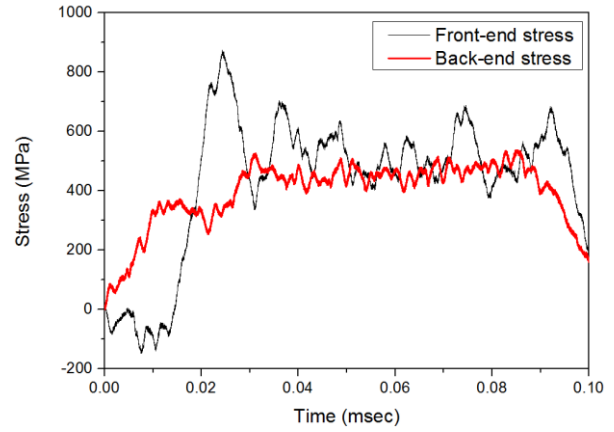


(b) With pulse shaper

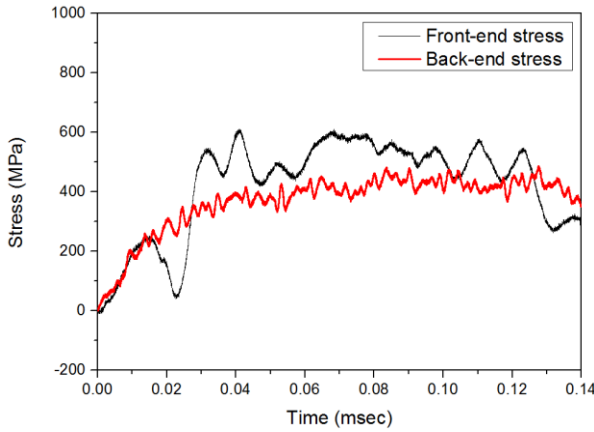
Fig. 9 Strain of pressure bar in an Al6061 specimen



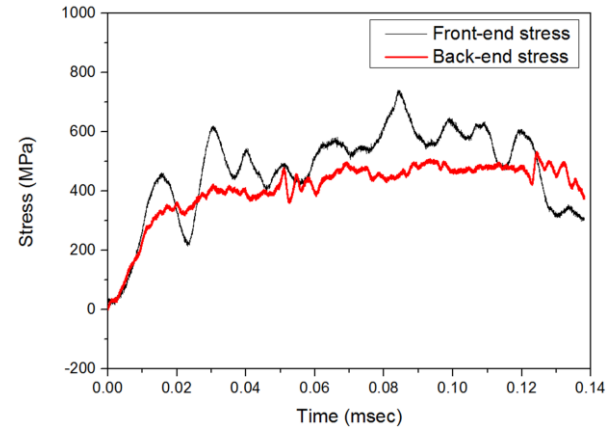
(a) Without pulse shaper



(a) Without pulse shaper



(b) With pulse shaper



(b) With pulse shaper

Fig.10 Front-end and back-end in a copper specimen stress wave

Fig.11 Front-end and back-end in an Al6061 specimen stress wave

Table 3 RMSE values of stress wave in SHPB test for copper and Al6061 specimens

		copper	Al6061
RMSE	Without pulse shaper	201.91	194.92
	With pulse shaper	114.73	109.86

각각 43.2%와 43.6% 감소하였다. 유한요소 해석의 결과와 마찬가지로 전면 및 후면 응력의 RMSE 값이 감소하는 것을 확인하였다. 그에 따라 펄스 조정기의 응력파를 제어함으로써 시편의 동적 응력 평형 효과가 나타나는 것을 확인하였다. 펄스 조정기를 이용한 SHPB 실험에서 구리와 Al6061 두 소재의 유동 응력 그래프는 각각 Fig. 12 및 Fig. 13과 같

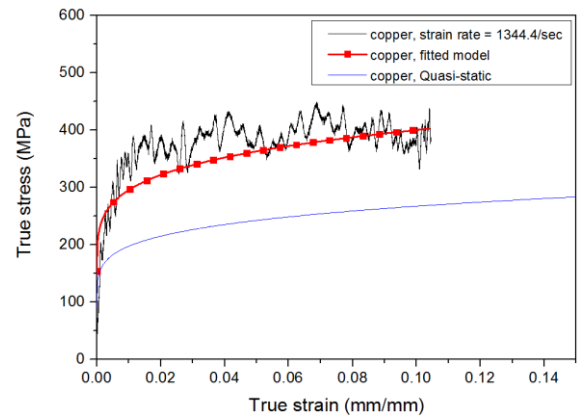


Fig.12 True flow stress diagram of copper along strain rate 1344.4/sec

다. 두 소재의 변형률 속도는 각각 1344.4/sec와 1291.6/sec이다. 각 변형률 속도에서 도출한 유동 응

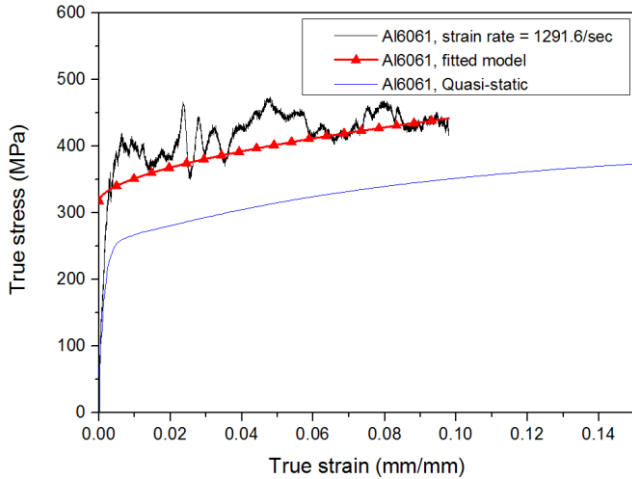


Fig.13 True flow stress diagram of Al6061 along strain rate 1291.6/sec

Table 4 Johnson-Cook parameters of copper & Al6061

	A (MPa)	B (MPa)	n	C	$\dot{\epsilon}_{ref}$ (/sec)
copper	90	292	0.31	0.1165	1
Al6061	258	375.5	0.565	0.0195	6.67e-4

력 그래프를 Johnson-Cook 구성방정식 모델에 곡선 접합하였다. 구성방정식의 A와 B, 그리고 n은 참고 문헌 및 준정적 인장 시험에서 획득한 값을 사용하였다. 변형률 속도 민감도 계수 C는 상용 프로그램 Origin의 비선형 곡선 접합 기능을 이용하였고, 함수는 식 (8)과 동일하게 정의하였다. 도출한 구성방정식의 계수는 Table 4와 같다.

4.3 SHPB 실험을 통해 획득한 동적 물성의 적용

본 논문에서 획득한 동적 물성의 변형률 속도 범위는 1000/sec 이상으로, 전자기 성형이나 액중 방전 성형 등의 고속 성형 공정에서 국부적으로 발생하는 고 변형률 속도에서 소재의 거동을 파악하는 데 도움이 될 것으로 판단된다.

그러나 1000/sec 이상 그리고 10000/sec 이하의 변형률 속도 영역 외 중고속 영역이나 초고속 영역에서의 변형률 거동을 파악하는 데에는 SHPB 실험 외의 방법을 통하여 동적 물성을 획득하여야 할 것으로 예상된다.

5. 결론

펄스 조정기의 효과를 확인하기 위해 유한요소 해석과 SHPB 실험을 수행하였고, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) SHPB 실험과 동일한 모델을 해석적으로 구현하였고, 해석 결과 펄스 조정기를 사용하였을 경우 시편의 전면 응력과 후면 응력의 일치도가 증가하는 것을 확인하였다. 실제 SHPB 실험에서도 두 가지 소재의 시편에 대해 응력 일치도가 증가하는 것을 확인하였다.

(2) 향상된 시편의 동적 응력 일치도를 바탕으로 전자기 성형, 액중 방전 성형 등의 고속 성형에서 국부적으로 고 변형률 속도로 변하는 소재의 거동을 파악할 수 있을 것으로 예상된다.

(3) 펄스 조정기를 사용하여 도출한 동적 물성의 정확도를 확인하기 위해서는 SHPB 실험에서의 시편 변형률과 해석에서의 시편 변형률이 유사한지 검증되어야 할 것이다. 또한 변형률 속도의 크기에 따른 물성을 도출하기 위해 충격봉의 속도를 다양하게 입력하여 실험을 수행하여야 할 것이다.

후 기

이 논문은 2015 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 선도연구센터지원사업(No. 2012 R1A5A1048294)과 중견연구자지원사업(No. NRF-2014 R1A2A1A11054473)의 지원을 받아 수행된 연구임. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

REFERENCES

- [1] M. Seth, V. J. Vohnout, G. S Daehn, 2005, Formability of Steel Sheet in High Velocity Impact, J. Mater. Process. Technol., Vol. 168, No. 3, pp. 390~400.
- [2] B. Hopkinson, 1914, A Method of Measuring the Pressure Produced in the Detonation of Explosives or by the Impact of Bullets, Philos. Trans. R. Soc. London. Ser. A, Vol. 213, pp. 437~452.
- [3] H. Kolsky, 1963, Stress Wave in Solids, Brown University, Dover Publications, New York, pp. 87~91.
- [4] K. T. Ramesh, 2008, High Strain Rate and Impact

- Experiments, The Johns Hopkins University, Springer US, pp. 929~960.
- [5] W. Chen, B. Song, 2011, Split Hopkinson(Kolsky) bar Design, Testing and Applications, Springer US, pp. 50~62.
- [6] W. J. An, W. M. Woo, H. G. Noh, B. S. Kang, J. Kim, 2016, Design and Fabrication of Split Hopkinson pressure bar for Acquisition of Dynamic Material property of Al6061-T6, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 33, No. 7, pp. 587~594.
- [7] O. S. Lee, J. S. Park, 2011, Dynamic Deformation Behavior of Bovine Femur using SHPB, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 25, No. 9, pp. 2211~2215.
- [8] D. J. Frew, M. J. Forrestal, W. Chen, 2005, Pulse Shaping Techniques for Testing Elastic-plastic Materials with a Split Hopkinson Pressure bar, Exp. Mech., Vol. 45, No. 2, pp. 186~195.
- [9] O. S. Lee, Y. H. Han, S. H. Kim, 2005, Proc. Kor. Soc. Mech. Eng. Autumn Conf., Kor. Soc. Mech. Eng., Seoul, Korea, pp. 1527~1532.
- [10] G. R. Johnson, W. H. Cook, 1985, Fracture Characteristics of Three Metals Subjected to Various Strains, Strain rates, Temperatures and Pressures, Eng. Fract. Mech., Vol. 21, No. 1, pp. 31~48.