

SHPB 기법을 사용한 고온에서의 Al 7075-T6 의 동적 변형 거동[§]

이억섭* · 박진수** · 최혜빈* · 김흥민*

* 인하대학교 기계공학부

Characterization of Dynamic Deformation Behavior of Al 7075-T6 at High Temperature by Using SHPB Technique

Ouk Sub Lee*, Jin Su Park**, Hye Bin Choi* and Hong Min Kim*

* School of Mechanical Engineering, Inha Univ.

(Received December 29, 2009 ; Revised June 23, 2010 ; Accepted June 24, 2010)

Key Words: Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB), High Strain Rate(고변형률 속도), Dynamic Deformation Behavior (동적 변형 거동), High Temperature(고온), Al 7075-T6(알루미늄 7075-T6)

초록: Split Hopkinson Pressure Bar(SHPB) 실험기법은 고변형률 하중 조건하에서 변형하는 여러 가지 공업 재료의 변형 거동 특성을 규명하는데 가장 널리 사용되는 실험 방법 중의 하나이다. 본 논문에서는 봉을 통하여 전파하는 응력파의 모양과 라이징 시간을 제어할 수 있는 pulse shaper를 사용하는 수정 SHPB 실험기법을 이용하였다. 수정 SHPB 실험 장치에 고온 장치를 부착하고 알루미늄 합금 7075-T6의 고변형률 하에서의 고온 변형거동에 대한 연구를 수행하였다. 고온 수정 SHPB 실험 장치를 이용하여 알루미늄 합금 7075-T6의 온도와 변형률속도에 따른 기계적 특성을 규명하고, 실험적으로 얻어진 데이터를 Johnson-Cook 구성방정식을 적용하여 알루미늄 합금 7075-T6의 동적 거동을 모델 하는 변수를 결정하였다.

Abstract: The split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique is extensively used to characterize material deformation behavior under high strain rate condition. In this study, the dynamic deformation behavior of aluminum 7075-T6 under a high strain rate and at a high temperature is investigated by using a modified SHPB set-up with the pulse shaper technique. The parameters used in the Johnson-Cook constitutive equation are determined by using the SHPB experimental results including the data on the effects of strain rate, temperature, strain hardening, and thermal softening of the material.

- 기호설명 -

- $\dot{\epsilon}$: 변형률 속도
- A : 압력봉의 단면적
- A_s : 시편의 단면적
- C_0 : 압력봉에서의 탄성파의 전파 속도
- E : 압력봉의 탄성계수
- L : 시편의 길이
- ϵ_I : 입사 변형률
- ϵ_R : 반사 변형률

- ϵ_T : 투과 변형률
- $\epsilon_{specimen}$: 시편의 변형률
- $\sigma_{specimen}$: 시편의 응력
- R : 봉의 반경
- λ : 응력파의 파장

1. 서론

산업의 발전과 함께 고도화된 기술을 응용하는 현대 사회에서 활용되는 기계구조물은 다양한 외부 경계조건과 환경에 노출되는 경우가 많다. 이와 같은 기계구조물을 설계 및 해석함에 있어 보다 정확성을 높이기 위해서 그 구조물을 구성하는 재료는 실제 사용 환경에서의 강도 설계 데이

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, suzoolove@naver.com

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

터가 필요하다.⁽¹⁾ 그러나 재료의 거동 특성에 대한 연구는 주로 정적인 하중 조건에서 많이 수행되었으며 동적인 하중을 받는 재료의 변형 거동 특성에 대한 연구는 아직까지 미흡하다.

Split Hopkinson pressure bar(SHPB) 실험기법은 변형률속도가 $10^2/s \sim 10^4/s$ 인 변형률 속도 범위에서 재료의 동적 변형 거동을 규명하기 위해서 많이 사용 되는 시험 방법이다. 이상적인 SHPB 실험기법을 통한 압축실험에서 믿을 만한 데이터를 추출하기 위해서는 (1) 시편 내의 동적 응력의 평형상태가 이루어져야 하며 (2) 시편의 변형은 일정한 변형률 속도 하에서 이루어져야 한다. 그러나 실제 실험에서는 이와 같은 이상적인 상태에서 시편을 동적으로 변형시키기가 쉽지 않다.^(2,3)

본 연구에서는 이러한 실험상의 문제를 해결하기 위해 소개된 수정 SHPB 실험기법을 사용하였다. 그리고 이 실험 기법을 이용하고 본 논문의 저자가 고안, 설계한 고온 장치를 사용하여⁽⁴⁾ 고온에서의 Al 7075-T6의 동적 압축 변형 거동을 실험적으로 관찰하면서 얻어진 결과를 바탕으로 동적 고온 압축 거동을 Johnson-Cook 구성방정식으로 모델링하기 위한 변수들을 결정 하였다.

2. 기본 이론

2.1 기본가정 및 이론

SHPB 실험에서 봉끼리 완전 접촉된 시편에서의 길이 방향과 반경 방향의 관성 효과 등에 대한 운동방정식의 해는 이미 Pochhammer 와 Chree 등에 의해서 구해졌다. 그 결과는 SHPB 실험기법에 응용되었고, 응력파가 파장이 λ 순수 코사인파(cosine wave)라면 $R/\lambda \ll 1$ 일 때 응력파에 의한 축 변위와 응력은 봉의 단면에 걸쳐 균일하다는 사실이 알려졌다. 그리고 SHPB 실험을 수행할 때 입력봉 내에서 전파하는 응력파의 전파속도가 그 파장(wavelength)에 따라 변한다는 사실을 알 수 있고 파장은 파의 분산(wave dispersion)과 밀접한 관계가 있으며, 결과적으로 시편의 동적 변형 거동에 큰 영향을 끼치게 되므로 유의 하여야 한다.^(5,6)

2.2 시편의 균일 단면 변형

입력봉 내에서의 탄성파 전파이론이 수학적으로 예견될 수 있음에 반해 시편의 변형은 소성과

전파와 마찰에 의한 영향을 고려해야 하기 때문에 해석에 어려움이 따른다. 따라서 마찰의 영향은 점성이 있는 윤활제를 사용하여 최소화하였으며, 시편재료의 기계적인 특성 값에 따라서 기하학적인 형상을 조정하여 SHPB 실험기법을 이용한 고변형률 속도에서 일어날 수 있는 갑작스러운 입자들의 가속화에 의한 시편의 길이 방향이나 반경 방향의 관성을 최소화하였다.

2.3 SHPB 실험기법에서 응력과 변형률 측정

SHPB 실험기법은 기본적으로 충격봉(Striker bar), 입력봉(Incident bar)과 출력봉(Transmitted bar)으로 이루어져 있다. 각각의 봉은 같은 재질로 이루어져 있으며 직경이 동일하다. 각각의 봉을 전파하는 응력파를 1차원으로 만들고 높은 변형률 속도로 시편을 변형 시킬 수 있도록 입력봉과 출력봉의 길이가 충격봉의 길이에 최소 2배가 되어야 하고, 봉의 길이와 직경의 비율이 100으로 하여 1차원 탄성파가 발생하도록 하였다. 시편은 중력의 영향과 관성의 영향을 최소화하기 위한 기하학적인 형상으로 입력봉과 출력봉 사이에 위치하게 된다. 본 연구에서는 탄성파를 조정하기 위하여 pulse shaper를 이용하였으며 충격봉과 입력봉 사이의 충격면에 pulse shaper를 위치 시켰다.⁽⁷⁾

Fig. 1은 SHPB 실험에서 발생한 압축 탄성파가 입력봉과 출력봉을 통하여 전파하는 거동을 나타낸 것이다. 압축공기에 의해 충격봉이 입력봉에 충돌하게 되면 압축 응력파가 발생되고 이 응력파는 시편이 위치하고 있는 곳까지 입력봉을 통해서 전파하게 된다. 시편의 위치까지 전파된 응력파의 일부는 입력봉과 시편의 임피던스(impedance) 차이에 의해서 일부는 입력봉과 시편의 계면(interface)에서 반사되고, 출력봉과의 계면을 통과 하여 출력봉 끝단까지 전파하게 된다.

시편 내에서 발생하는 동적 응력, 동적 변형률 그리고 동적 변형률 속도는 각 봉에 부착된 스트레인 게이지 출력값을 통해 다음 식을 사용하여 산정하였다.

$$\sigma_{specimen} = E \left(\frac{A}{A_s} \right) \epsilon_T \quad (1)$$

$$\epsilon_{specimen} = \frac{-2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{specimen} = \frac{d\epsilon(t)}{dt} = \frac{-2C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (3)$$

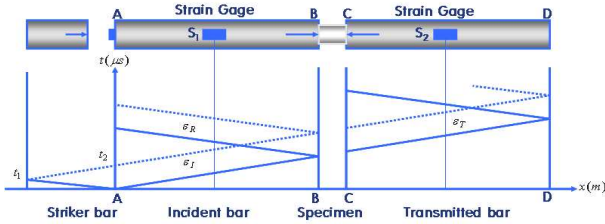


Fig. 1 Schematic diagram of specimen and elastic stress wave propagation for a modified compressive SHPB test

2.4 Pulse shaper를 이용한 SHPB 실험기법

Pulse shaper를 사용하지 않는 기존의 SHPB 실험기법에서는 입력봉과 시편의 계면(Front end)과 시편과 출력봉과의 계면(Back end)에 작용하는 응력의 크기가 다르게 되는 경우가 많다. 즉, 시편이 동적 응력의 평형상태가 되지 못하고, 일정하지 않은 변형률 속도로 변형하여 정확한 실험 결과를 얻을 수 없게 된다. 이러한 실험 오차를 줄이기 위하여 Fig. 2에서 보이는 바와 같이 입력봉의 충격면에 pulse shaper를 부착하여 SHPB 실험기법을 개선하였다. 압축 공기에 의해 발사된 충격봉이 입력봉의 충격면에 있는 pulse shaper에 충격 하중을 주게 되면, pulse shaper는 소성변형하게 되고, 응력파는 입력봉을 향하여 전파된다. 이때 입력봉에서는 측정되는 입사파의 진폭이 급격하게 신장되는 부분의 시간(Rising time)이 길어지게 된다. 따라서 Pulse shaper에 의해 개선된 SHPB 실험기법에서는 시편 내에서 동적 응력 상태가 평형상태가 되고, 우리가 원하는 일정한 변형률 속도에 의한 변형상태를 얻을 수 있다.⁽⁸⁾

3. 실험 장치

3.1 하중장치 및 충격봉

$10^2/s \sim 10^4/s$ 의 변형률 속도를 발생시키기 위해서 충격하중을 발생시켜야 한다. 본 연구에서는 충격봉, 입력봉과 출력봉의 재질은 모두 Inconel 718을 사용 하였으며 이 재료의 기계적인 특성은 Table 1에 나타내었다.

본 연구에서 사용된 충격봉의 길이는 300mm, 직경은 16mm이다. 충격봉에 빠른 하중을 가하기 위해 gun barrel을 설치하여 고압을 받는 충격봉을 빠른 속도로 직진으로 유도하도록 하였으며,

Table 1 Mechanical properties of bar material Inconel 718

Density	8190Kg/m ³
Yield Stress	1036MPa
Elastic Modulus	211GPa
Elastic bar wave velocity	5076m/s
Impedance	41.57Kg/m ² s

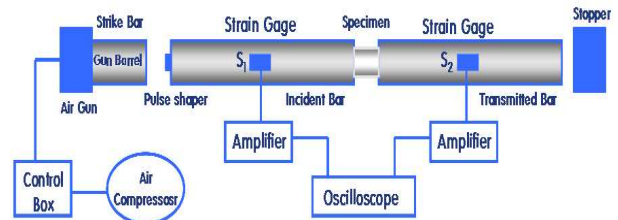


Fig. 2 Experimental setup of a modified SHPB technique

입력봉에 균일하고 정확한 충격하중이 작용되도록 직진도 유지 장치를 설치하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 SHPB 실험장치의 구성을 보이고 있다.

3.2 입력봉과 출력봉

변형률 속도를 결정하는 봉의 직경이 작을수록 좀 더 높은 변형률 속도로 시편을 변형시킬 수 있다. 또한 봉 내부에서 발생하는 응력파는 1차원에 가까울수록 오차가 적다. 이러한 조건을 만족시키기 위해서 봉의 길이는 봉에서의 응력파-길이(stress wave-length)의 최소 두 배가 되어야한다. 이러한 조건과 시편 재료가 25% 이상으로 변형될 것으로 예상하여 봉의 길이(L)에 대한 직경(D)의 비율을 100으로 하였다. 이들 입력봉과 출력봉의 재질은 임피던스를 동일하게 유지시키기 위하여 충격봉과 같은 재질로 하였으며, 직경도 충격봉과 같이 16mm로 하였다. 입력봉과 출력봉의 끝 단의 면에는 시편과의 완전한 평면접촉이 되도록 정밀 연삭하였다.⁽⁹⁾

3.3 직진도 유지 장치

SHPB 실험 장치에서 가장 중요한 요소 중의 하나는 봉을 서로 접촉시켰을 때 직진도를 거의 완

벽하게 유지시켜 응력파가 일차원적으로 정확하게 전파되어야 한다는 점이다. 따라서 I-beam을 정밀 평면 연삭 가공하고, 그 위에 정밀 베어링을 설치하여 완벽한 직진도가 유지되도록 하였다.

3.4 응력과 측정 장치

응력파는 봉에 부착된 스트레인게이지로부터 미세한 저항으로 작용하며 이 저항은 휘트스톤-브리지(Wheatstone-bridge)회로에 의해 전압변화로 나타나게 된다. 이러한 전압의 미세한 변화는 회로가 부착된 증폭기(amplifier)를 거쳐 오실로스코프(oscilloscope)에 기록되게 하였다.

3.4 가열 장치 및 온도 측정

시편을 가열하기 위하여 고주파 유도가열장치를 사용하였으며, 온도 측정은 가열된 시편과 압력봉을 접촉 시킨 후 1초 후에 실험이 이루어진다고 가정을 하여 시편 가열이 끝나고 압력봉을 접촉시킨 후 1초 후의 온도를 K-type thermal couple을 이용하여 시편의 중앙 부분의 온도를 측정하였다.

3.4 시편(specimen) 및 Pulse shaper

시편의 형상은 중력의 영향과 관성의 영향을 최소화하기 위한 기하학적인 형상으로 입력봉과 출력봉 사이에 접촉 고정시켜야 한다. 본 연구에서 사용된 시편의 길이(L)는 5mm, 직경(D)은 10mm로 하였다.

Pulse shaper는 직경이 10mm이고 두께가 1.0mm인 copper-1100를 사용 하였다.

4. 실험 결과 및 구성방정식

4.1 실험결과

4.1.1 상온 실험 결과

변형률 속도가 시편 재료의 동적 변형 거동에 미치는 영향을 규명하기 위한 상온 실험을 수행하였다. 변형률 속도가 0.0001s(quasi-static), 1300/s, 1700/s, 2000/s, 3000/s인 경우에 대한 동적 응력과 동적 변형률의 관계를 Fig. 3에 나타내었다. 준정적인 실험 결과와 비교하여 보면 변형률 속도가 증가함에 따라서 경화되는 현상을 볼 수 있었다.⁽¹⁰⁾

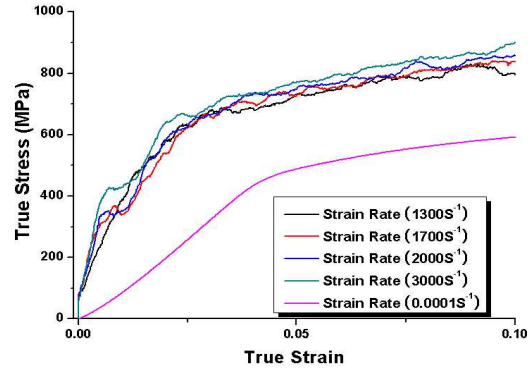


Fig. 3 Stress-strain curves of Al 7075-T6 under the varying strain-rates at room temperature

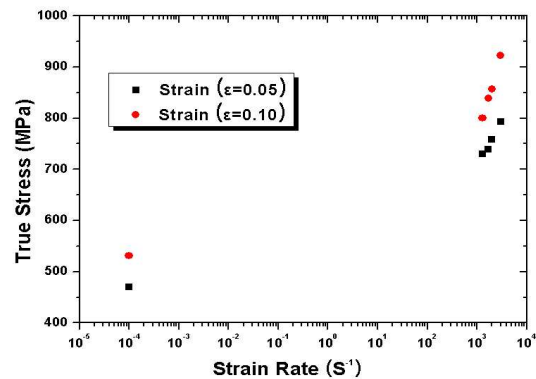


Fig. 4 Influence of the strain-rate on the true stresses at various true strains of 0.05 and 0.1

Fig. 4는 변형률 속도에 따라 응력이 변화하는 양상을 변형률이 0.05와 0.1일 경우에 대해 나타낸 것이다. 이와 같은 상온 시험의 결과로 등방성 균질 재료의 동적 변형 거동으로 알려져 있는, 동일한 변형률에서의 응력값이 변형률 속도가 증가함에 따라 상승하는, 특성을 확인할 수 있었다.

4.1.1 고온 실험 결과

변형률 속도를 3000/s~3200/s의 범위로 유지시키면서 온도를 200℃에서 370℃까지 변화를 시킨 고온 실험 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 사용한 알루미늄 재료의 크리프 실험 온도는 최고 500℃ 부근까지 이루어지는 것으로 조사되었으나 실험 장치의 한계로 370℃ 부근까지에서만 고온 실험을 수행할 수 있었다.⁽¹¹⁾ Fig. 6은 Fig. 5의 결과를 변형률 0.05, 0.10, 0.15에 대응시켜, 온도변화에 따른 응력 변화를 나타낸 것이다. 온도가 증가할수록 특수한 변형률에 대응하는 응력이 직

선적으로 감소하며 변형률이 높을수록 감소율이 높다는 사실을 규명하였다.

4.2 구성방정식

공업재료의 구성방정식은 일반적으로 변형률, 변형률 속도, 온도, 내부 상태변수 등의 함수로 표현된다.

본 연구에서는 여러 가지 문헌에 발표된 구성방정식 중 가장 널리 쓰이는 Johnson-Cook 모델을 이용하였다. Johnson-Cook 모델은 아래와 같은 식으로 표현된다.

$$\sigma = (\sigma_0 + B\epsilon^n) \left(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) [1 - (T^*)^m] \quad (4)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (5)$$

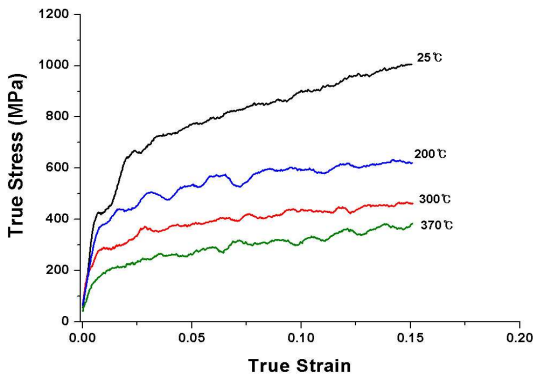


Fig. 5 Stress-strain relations of Al 7075-T6 under varying temperatures

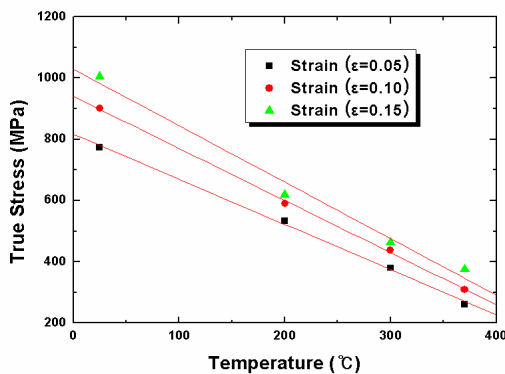


Fig. 6 Influence of the temperatures on the true stresses at various true strains of 0.05, 0.10 and 0.15

여기서 σ_0 은 초기항복응력, B 는 변형률 경화 상수, n 은 변형률 경화지수, C 는 변형률 속도 경화지수, m 은 재료의 열 연화지수, $\dot{\epsilon}_0$ 는 등가소성 변형률 속도, T 는 실험 온도, T_m 은 용융 온도, T_r 은 기준 온도이다. T_r 은 σ_0 와 $\dot{\epsilon}_0$ 가 측정된 온도로 본 연구에서는 298.15K인 상온으로 하였다. 등가소성 변형률 속도는 직경 10mm, 길이 20mm인 시편을 0.1mm/min 속도로 정적 압축 실험을 수행하였기 때문에 0.0001/s로 가정을 하였으며, 사용 재료의 용융온도는 903.15K이다.⁽¹²⁾

위 식 (4)에서 첫 번째 괄호부분은 재료의 변형률 경감효과를 나타내고, 두 번째 괄호부분은 변형률 속도 경화를 나타낸다. 변형률 경화 효과와 관련된 상수인 σ_0 , B , n 는 응력-변형률 선도를 이용하여 산출하고, 변형률 속도 경화를 나타내는 항의 상수 C 는 변형률 속도에 따른 응력에 관한 그래프를 이용하여 산출한다. 그리고 세 번째 괄호부분의 열 연화지수 m 은 고온 실험에 따른 응력에 관한 그래프를 이용하여 산출할 수 있다. 고온에서 실험한 결과로 결정할 수 있는 변수 5개(σ_0 , B , n , C , m)를 본 연구에서 사용한 Al 7075-T6에 대하여 산출한 내용을 Table 2에 정리 하였다.

Fig. 7은 상온에서의 실험 결과와 구성방정식의 결과를 비교한 것을 나타내었다. 변형률 속도변화에 따라 실험하여 얻은 결과와 구성방정식으로 산정되는 응력의 변화가 유사하게 접근되는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 변형률 속도를 3000/s~3200/s를 유지한 상태에서 온도 변화에 따라 실험하여 얻은 결과와 구성방정식으로 산정된 결과를 비교한 것을 나타내었다. 온도가 변화하는 경우 실험 결과와 구성방정식으로 산정되는 응력의 변화가 유사하

Table 2 Parameters in the Johnson-Cook model

Parameter	Values
σ_0 (MPa)	450.03
B (MPa)	1120.04
n	0.75034
C	0.018537
m	0.9

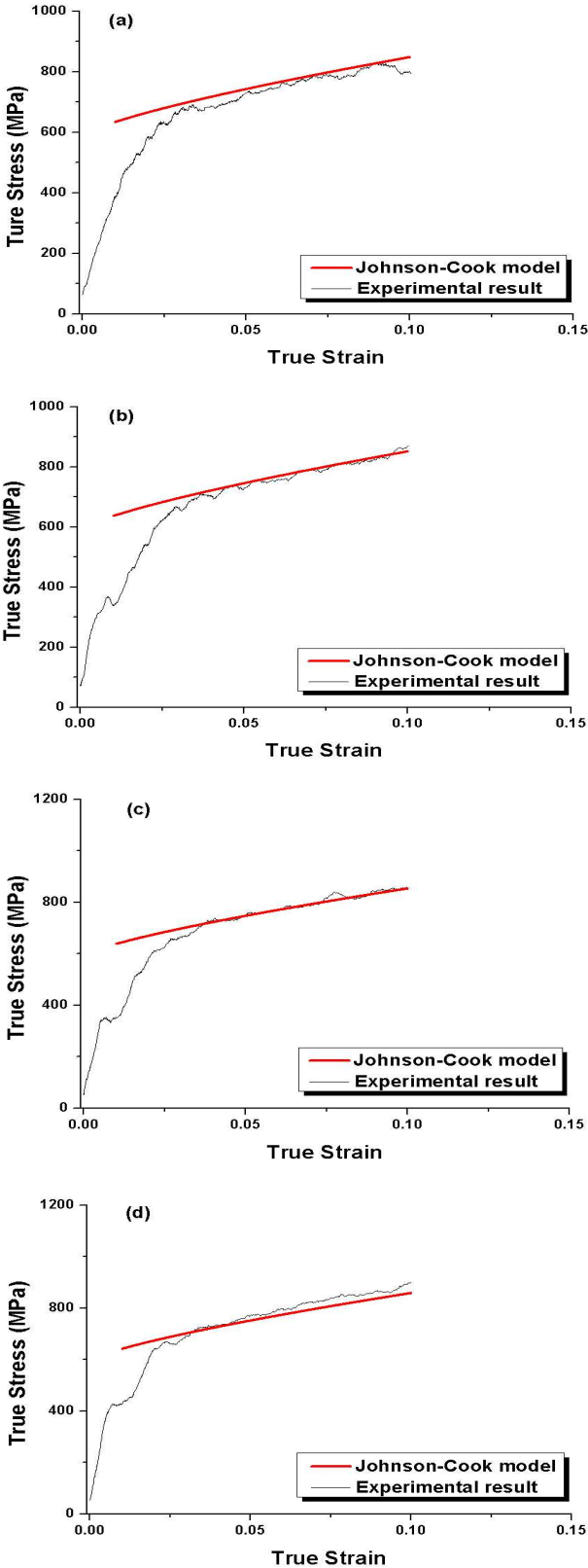


Fig. 7 Comparison of experimental true stresses and true strains to the Johnson-Cook model (Strain rates: (a) 1300/s, (b) 1700/s, (c) 2000/s, (d) 3000/s)

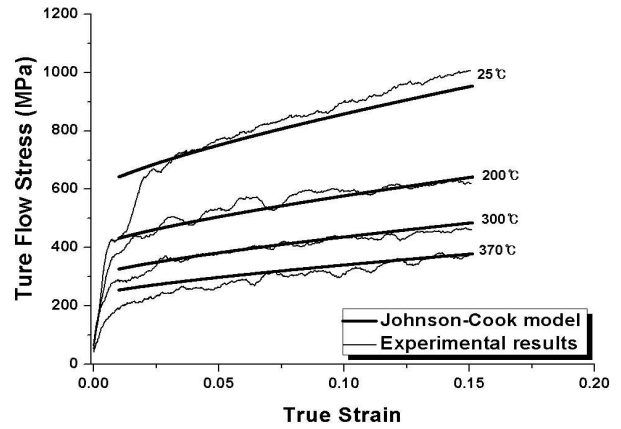


Fig. 8 Comparison of experimental true stresses and true strains to the Johnson-Cook model

게 접근되는 것을 확인하였다.

5. 결론

SHPB 실험기법을 사용하여 Al 7075-T6의 고온, 동적 하중 하에서 변형거동의 특성을 규명하였다. 시편이 동적 응력의 평형상태에서 일정한 변형률 속도로 변형되도록 pulse shaper기법을 사용하였으며, 실험 결과를 이용하여 Johnson-Cook 구성방정식의 변수들을 산정하였다. 본 연구에서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 변형률 속도가 시편 재료의 동적 변형 거동에 미치는 영향을 규명하기 위한 상온 실험을 수행한 결과, 변형률 속도가 증가함에 따라 최종 응력과 변형률이 상승하는 사실이 나타났다.
- (2) 유동 응력은 직선적으로 증가하는 것을 알 수가 있었으며, 고변형률에서의 증가율이 저변형률에서의 증가율보다 높다는 사실이 나타났다.
- (3) 온도가 증가 할수록 유동응력이 직선적으로 감소하며 변형률이 높을수록 감소율이 높다는 사실이 나타났다.
- (4) 변형률 속도와 온도 변화에 따라 얻어진 실험 결과를 토대로 Johnson-Cook(JC) 구성방정식의 변수를 결정 하였으며 JC모델이 실험한 결과를 잘 모델링 할 수 있음을 밝혔다.

후기

본 연구는 인하대학교의 연구지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Shin, H.-S., 1999, "Experimental Investigation of Ceramic Behavior Under Impact Loading - Effect of High Temperature-," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 22, No. 5, pp. 921~928.
- (2) Kolsky, H., 1963, "*Stress In Solids*," Dover Publications Inc., New York, pp. 87~91.
- (3) Meyers, M. A., 1994, "Dynamic Behavior of Materials," John Wiley & Sons.
- (4) Lee, O. S., Hwang, S. W., Choi, H. B., Kim, H. M. and Kim, D. H., 2009, "Dynamic Deformation of Aluminum Alloys at High Temperature by Using SHPB Techniques," *DYMAT2009*, Vol. 1, pp. 443~448.
- (5) Pochhammer, L., 1876, "On the Propagation Velocities of Small Oscillation in an Unlimited Isotropic Circular Cylinder," *J. Reine Angewandte Math.*, Vol. 81, p. 324.
- (6) Chree, C., 1889, "The Equation of an Isotropic Elastic Solid in Polar and Cylindrical Coordinates," *Their Solutions and Application, Cambridge Phil. Soc. Trans.*, Vol. 14, p. 250.
- (7) Gray, G. T., 2000, "ASM Handbook," Mechanical Testing and Evaluation, ASM International, Vol. 8, pp. 462~476.
- (8) Lee, O. S., You, S. S., Chung, J. H. and Kang, H. S., 1998, "Dynamic Deformation Under a Modified Split Hopkinson Pressure Bar Experiment," *KSME International Journal*, Vol. 12, No. 6, pp. 1143~1149.
- (9) Lee, O. S., Kim, G. H. and Hwang, S. W., 2000, "Determination of Deformation Behavior of the Al 6061-T6 Under High Strain Rate Tensile Loading Using SHPB Technique," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 12, pp. 3033~3039.
- (10) Yang, H. and Min, O.-K., 2000, "The True Stress-Strain Relation of Aluminum Alloys in the SHPB Tension Test," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 24, No. 8, pp. 1917~1922.
- (11) Cho, Y.-Y. and Kim, H.-S., 1993, "State Dependence of Activation Energies for High Temperature Creep of Al7075 Alloy," *Trans. of the KSME*, Vol. 17, No. 1, pp. 131~140.
- (12) Lee, S.-M., Seo, S.-W., Park, K.-J. and Min, O.-K., 2003, "Temperature Dependence of Dynamic Behavior of Commercially Pure Titanium by the Compression Test," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 27, No. 7, pp. 1152~1158.