

<학술논문>

고온 고변형률속도에서 SM45C의 동적 거동

양 현 모* · 민 옥 기†

(2007년 6월 11일 접수, 2007년 9월 30일 심사완료)

Dynamic Behavior of SM45C at High Strain-rate and High Temperature

Hyunmo Yang and Oakkey Min

Key Words : Dynamic Behavior(동적 거동), SHPB(홉킨슨 압력봉), High Strain-rate(고변형률속도)

Abstract

A compressive split Hopkinson pressure bar (SHPB) technique is used to investigate the dynamic behavior of SM45C at high temperature. A radiant heater, which consists of one ellipsoidal reflector and one halogen lamp, is used to heat the specimen. Specimens are tested from 600°C to 1000°C at intervals of 100°C at a strain-rate ranging from 1100/s to 1150/s. A critical phenomenon occurs between 700°C and 750°C in SM45C. This phenomenon results in the drastic drop in a flow stress. In a modified Johnson-Cook constitutive equation, a reducer function is used to take into account for the effect of the drastic drop in a flow stress. A reducer function, which is dependant on the temperature as well as the strain, is introduced and the parameters of the modified Johnson-Cook constitutive equation are determined from test results.

기호설명

- A : 시편의 단면적
- A₀ : 압력봉의 단면적
- C₀ : 압력봉 내에서 탄성파의 전파속도
- E : 압력봉의 Young's modulus
- L : 시편의 길이
- ε_I : 입사파
- ε_R : 반사파
- ε_T : 투과파
- ε : 변형률
- ε̇ : 변형률속도
- σ : 응력

1. 서론

구조용 재료의 기계적 특성은 변형률속도(strain-rate)와 온도의 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 설계 및 해석에 있어서 보다 높은 정확성을 확보하기 위해서는 구조물이 받는 하중과 온도 조건에서 가장 근접한 재료의 물성을 적용할 필요가 있다.

홉킨슨 압력봉(SHPB : Split Hopkinson Pressure Bar)은 10²/s ~ 10⁴/s의 변형률속도 범위에서 시편의 유동응력을 구하기 위해서 많이 사용되는 시험 방법이다. 1949년 Kolsky⁽¹⁾에 의해서 두 개의 압력봉 사이에 하나의 작은 시편을 설치하는 시험 방법이 제시된 이후로 많은 연구가 이루어졌다.

상온 압축 시험 장치에 시편을 가열하는 장치를 설치하여 고온 고변형률속도에서의 연구가 시작되었다.⁽²⁾ 시편을 가열하기 위해서 열선을 내장한 전기로를 사용하는 방법⁽³⁾과 고출력의 램프의 복사열을 이용한 방법⁽⁴⁾이 제시 되었다.

† 책임저자, 회원, 연세대학교 기계공학부

E-mail : minokey@yonsei.ac.kr

TEL : (02)2123-2817 FAX : (02)362-2736

* 학생회원, 연세대학교 대학원 기계공학과

E-mail : stern74@nate.com

본 연구에서는 SHPB 시험 장치에 시편을 가열하기 위한 복사가열장치를 설치하여 기계구조용 탄소강 SM45C 에 대한 고온 유동응력 자료를 획득하고 이를 바탕으로 Johnson-Cook 구성방정식의 변수들을 결정하였다.

2. 이론 및 실험 장치

2.1 이론

SHPB 의 기본 이론은 정렬된 압력봉에서 발생하는 일차원 탄성파의 전파에 기초한다. Fig. 1 에 도시한 바와 같이 SHPB 압축시험은 두 개의 압력봉(pressure bars) 사이에 시편(specimen)을 설치하고, 충격봉(striker)으로 입력봉(incident bar)에 충격하중을 가하여 이루어진다. 충격하중으로 발생한 탄성파(elastic wave)는 입력봉을 따라 진행하여 시편과의 접촉면에서 일부는 반사되고 나머지는 시편을 통해 출력봉(transmitter bar)으로 전파된다. 입력봉과 출력봉에 부착한 스트레인 게이지로 반사파(reflected wave)와 투과파(transmitted wave)를 측정하고 이를 이용하여 시편의 진응력-진변형률(true stress-strain)관계를 구할 수 있다.

시편과 압력봉의 접촉면 1, 2 의 속도를 각각 V_1 , V_2 라고 하면, 시편은 압축상태이므로 속도는 $V_1(t) > V_2(t)$ 이다. 시편의 변형률속도는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{V_1(t) - V_2(t)}{L} \quad (1)$$

접촉면 1, 2 의 속도는 아래의 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} V_1 &= C_0(\epsilon_I - \epsilon_R) \\ V_2 &= C_0\epsilon_T \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)를 이용하면 시편의 변형률 속도를 아래와 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d\epsilon}{dt} = \frac{C_0}{L}(\epsilon_I - \epsilon_R - \epsilon_T) \quad (3)$$

시편의 응력(stress)은 다음과 같이 계산할 수 있다. 시편의 양쪽 접촉면에 가해지는 하중은 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_1(t) &= A_0 E_0 (\epsilon_I + \epsilon_R) \\ P_2(t) &= A_0 E_0 \epsilon_T \end{aligned} \quad (4)$$

시편에 작용하는 응력은,

$$\sigma = \frac{P_1(t) + P_2(t)}{2A} \quad (5)$$

시편이 균일한 변형을 일으킨다면, $P_1(t) = P_2(t)$ 이므로, $\epsilon_I + \epsilon_R = \epsilon_T$ 이 된다.

시편의 변형률속도, 변형률, 응력을 다시 쓰면,

$$\dot{\epsilon}(t) = -\frac{2C_0}{L} \epsilon_R(t) \quad (6)$$

$$\epsilon(t) = -\frac{2C_0}{L} \int_0^t \epsilon_R dt \quad (7)$$

$$\sigma = \frac{A_0 E_0}{A} \epsilon_T(t) \quad (8)$$

위 관계식으로부터 압력봉에 부착된 스트레인 게이지에서 측정되는 반사파와 투과파를 이용하여 시편의 응력-변형률 관계를 구할 수 있다.

2.2 실험 장치

2.2.1 가열 장치

시편을 가열하기 위하여 1 개의 할로젠 램프와

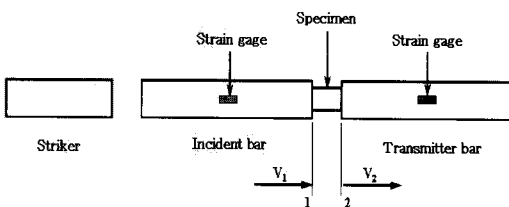


Fig. 1 The schematic of the SHPB

1 개의 반사경으로 구성된 복사가열장치를 사용하였다.⁽⁶⁾ 복사가열장치의 가열 원리는 Fig. 2에 나타난 것과 같이, 타원면으로 가공된 반사경의 한 초점에 650W 할로겐 램프를 장착하고 다른 한 초점에 시편을 설치한다. 타원의 한 초점에서 방출된 할로겐 램프의 복사에너지는 반사경의 타원면에 반사되어 다른 한 초점에 설치된 시편으로 집중되어 시편을 가열 시키게 된다.

2.2.2 온도 측정

시편의 온도 측정에는 비접촉식 적외선 온도계(Raytek Raynger 3i LTCL3)를 사용하였다. 적외선 온도계는 대상으로부터 방사되는 적외선을 측정하여 온도를 측정하므로 대상의 방사계수(emissivity value)를 필요로 한다. 대상의 방사계수는 재료, 형상, 표면상태, 온도 등의 여러 가지 조건의 영향을 받으므로, 실제 실험과 가장 근접한 조건에서 시편의 방사계수를 결정하여야 한다.

시편의 방사계수를 결정하기 위해서, 시편의 내부에 열전대를 설치하고, 적외선 온도계와 동시에 시편의 온도를 측정하여 방사계수를 결정하였다.⁽⁶⁾

Table 1 은 실험에 사용된 SM45C 시편의 방사계수를 나타낸다.

2.2.3 압력봉 및 시편

SHPB 시험은 압력봉의 탄성파를 측정하여 시편의 유동응력을 구하는 것이므로, 압력봉은 항상 탄성 한계 내에 있어야 한다. 입사파의 크기는 충격봉의 충돌속도에 비례하고 반사파의 크기가 시편의 변형률속도와 변형률을 결정하므로 압력봉은 시편에 비해서 충분히 큰 임피던스를 가져야 한다.

또한 고온 실험에서는 압력봉의 온도가 상승할

수 있는데, 이러한 변화는 압력봉의 Young's modulus 값의 변화를 가져온다. 압력봉의 Young's modulus 는 시편의 유동응력 계산과 압력봉에서의 탄성파의 전파속도와도 관련이 있으므로, 그 값의 변화가 최소화 될 수 있도록 하여야 한다. 본 연구에서는 온도에 따른 기계적 성질의 변화가 적은 것으로 알려져 있는 Inconel 718 합금을 사용하였다.⁽⁶⁾

실험에 사용된 시편은 산업 현장에서 그 사용빈도가 높은 기계구조용 합금강 SM45C 를 사용하였으며, 적외선 온도측정계의 최소 측정반경 8mm 를 고려하여 지름 8mm, 길이 8mm 의 원통형 시편으로 가공하였다.

시험 결과가 신뢰성을 확보하기 위해서는 가열 시 시편내부의 온도편차 및 압력봉과 접촉후에 시편의 온도변화가 얼마나 발생하는지에 대한 자료가 필요하다. 이를 확인하기 위하여 시편을 1000℃까지 가열한 후 탄성봉과 접촉시켜 그 온도변화를 측정하였다. 시편은 상온에서 가열을 시작하여 약 60 초가 경과하면, 온도편차가 10℃이내로 줄어들었으며, 탄성봉과 접촉후 약 1 초가 경과하면 15℃정도의 온도 변화를 나타내었다.⁽⁶⁾

3. 실험결과 및 구성방정식

3.1 실험 결과

시편의 온도는 600℃에서 1000℃까지 100℃ 간격으로 변화시켰다. 고온에서의 실험은 온도의 영향을 확인할 수 있도록 변형률속도를 1100/s ~ 1150/s 를 유지하였다. 변형률속도의 영향을 파악하기 위해서 상온에서 500/s ~ 1000/s 의 변형률속도 범위에 대한 시험도 수행하였다.

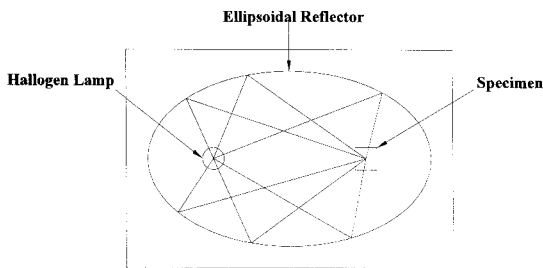


Fig. 2 The schematic diagram of a radiant heater

Table 1 The emissivity value of SM45C specimen

| 온도 | 방사 계수 |
|-------|-------|
| 600℃ | 0.75 |
| 700℃ | 0.75 |
| 800℃ | 0.75 |
| 900℃ | 0.76 |
| 1000℃ | 0.72 |

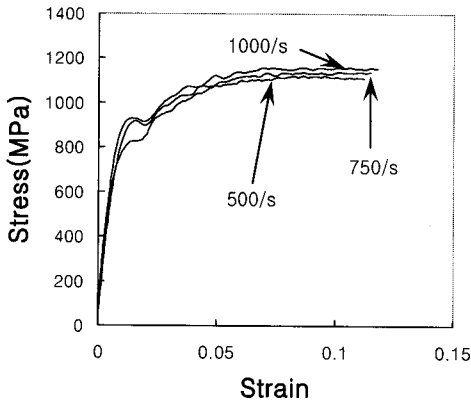


Fig. 3 The stress-strain relation of SM45C with the variation of a strain-rate at a room temperature ($\dot{\epsilon}=500/s$, $\dot{\epsilon}=750/s$, $\dot{\epsilon}=1000/s$)

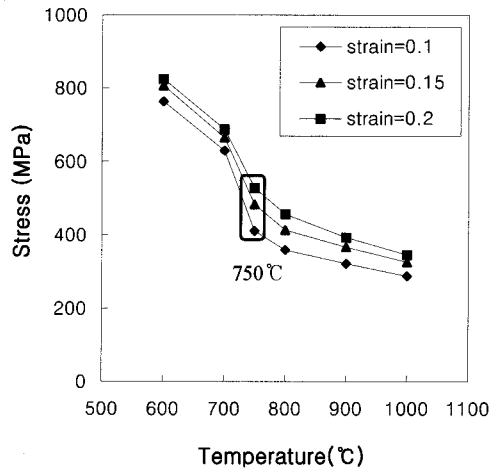


Fig. 5 The change of the flow stress with temperature at strains of 0.1, 0.15, and 0.2 ($\dot{\epsilon}:1100/s\sim1150/s$)

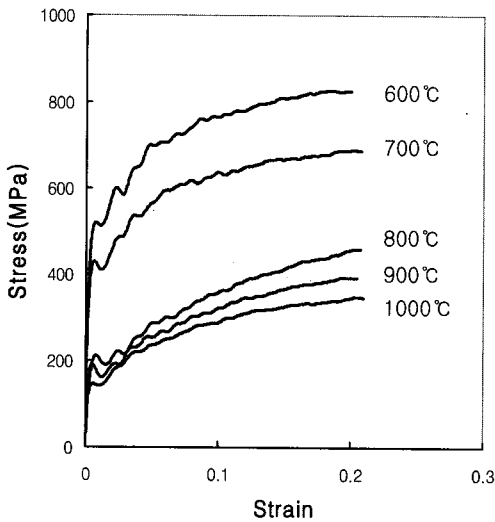


Fig. 4 The stress-strain relation of SM45C at high temperatures (strain-rate range : 1100/s~1150/s)

3.1.1 상온실험

변형률속도의 영향을 파악하기 위한 상온시험의 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 변형률속도는 500/s, 750/s, 1000/s에 대하여 실험을 수행하였다. 유동응력이 가장 낮은 그래프가 변형률속도가 500/s인 경우를 나타내고 있으며, 가장 높은 그래프가 1000/s인 경우를 나타낸다.

3.2

3.2.1 고온실험

600°C에서 1000°C까지 SM45C 시편에 대한 고온 실험 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험 결과는 온도가 증가함에 따라서 유동응력이 감소함을 보여 주고 있다. 특히 700°C와 800°C사이에서의 감소 폭이 다른 온도에 비해서 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 유동응력이 급격한 변화를 보이는 700°C에서 800°C사이의 구간에 대한 추가 실험을 실시하였으며, 그 결과는 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5는 변형률이 0.1, 0.15, 그리고 0.2인 경우에 대하여 SM45C 시편의 온도에 따른 응력의 변화를 나타낸 그래프이다. 가장 낮은 응력상태를 보이는 그래프가 변형률이 0.1인 경우를 나타내며, 가장 높은 응력을 보이는 그래프가 변형률이 0.2인 경우이다. 추가 실험을 실시한 온도는 750°C이며, 700°C와 750°C사이의 구간에서 나타나는 응력의 강하가 다른 온도 영역에서의 응력 강하 현상과 뚜렷이 구별되는 것을 볼 수 있다.

3.3 구성 방정식

실험으로 구한 응력-변형률 자료를 이용하여 SM45C 시편의 고온 구성방정식을 얻을 수 있다. 구성방정식 모델은 금속 재료에 일반적으로 많이 적용되는 Johnson-Cook⁽⁷⁾ 모델을 사용하였다.

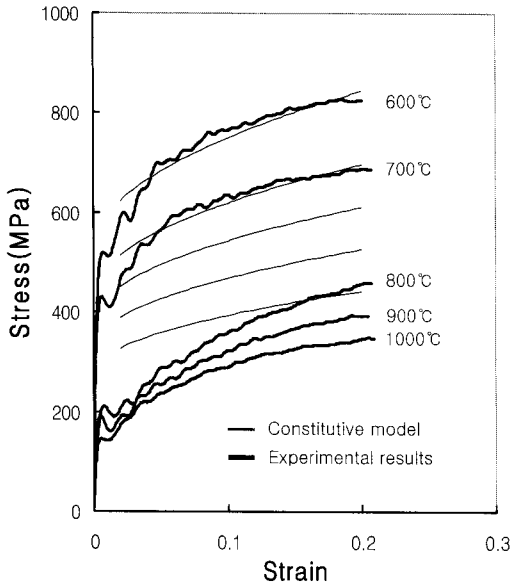


Fig. 6 The comparison of the flow stress of SM45C for experimental results with the Johnson-Cook constitutive model ($\dot{\epsilon}$: 1100/s~1150/s)

3.3.1 Johnson-Cook 구성방정식

Johnson-Cook 구성방정식은 식 (9)~(10)과 같이 표현되며, 결정해야 할 변수는 5개(σ_0 , B, n, C, m)이다. σ_0 는 항복응력을 나타내며 $\dot{\epsilon}_0$ 는 기준 변형률속도, T_m 은 재료의 용융점, T_r 은 기준 온도이다. T_r 은 σ_0 와 $\dot{\epsilon}_0$ 가 측정된 온도로 본 연구에서는 상온 실험에서 항복응력을 결정하였으므로 기준 온도는 상온으로 하였다. 기준 변형률속도는 1/s로 가정하였으며,⁽⁸⁾ 재료의 용융점은 1515°C로 설정하였다.⁽⁹⁾

$$\sigma = (\sigma_0 + B\epsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})[(1 - (T^*)^m)] \quad (9)$$

$$T^* = \frac{T - T_r}{T_m - T_r} \quad (10)$$

실험자료를 토대로 결정한 변수를 Table 2에 나타내었으며, Fig. 6은 시험 결과와 구성방정식을 비교한 그래프이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 유동응력의 급격한 강하 현상이 생기는 800°C~1000°C 온도구간에서 실험값과 차이를 보이는 것을 확인

Table 2 The parameters of the Johnson-Cook equation

| 온도 | σ_0 (MPa) | B(MPa) | n | C | m |
|------------------|------------------|--------|-------|--------|------|
| 600°C | 557.2 | 777.3 | 0.488 | 0.0661 | 1.04 |
| 700°C ~1000°C | 557.2 | 777.3 | 0.488 | 0.0661 | 0.92 |

할 수 있다.

3.3.2 Modified Johnson-Cook 구성방정식

700°C와 800°C사이에서의 유동응력 변화를 적절하게 묘사하기 위해서 modified Johnson-Cook 구성방정식을 적용하였다. Modified Johnson-Cook 구성방정식은 식 (11)과 같이 표현된다. Modified Johnson-Cook 구성방정식은 재결정, 상변화등과 같은 임계 현상 이후의 유동 응력 강하를 표현하기 위하여 함수H(T) (reducer function)를 도입하였다.⁽¹⁰⁾

식 (11)에서 $(\sigma_f)_{rec}$ 와 $(\sigma_f)_{def}$ 는 각각 재료의 임계현상 이전과 이후의 유동응력을 나타내며, T_c 는 임계현상이 일어나는 온도를 의미한다. 식 (11)을 다시 쓰면 식 (12)~(13)과 같이 쓸 수 있다. T_c 이전의 온도 범위에서는 Johnson-Cook 구성방정식과 같은 형태이며, T_c 이후의 온도 범위에서는 H(T)가 나타난다.

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

$$H(T) = \frac{1}{1 - [1 - \frac{(\sigma_f)_{rec}}{(\sigma_f)_{def}}]u(T)}$$

$$u(T) = \begin{cases} 0 & \text{for } T < T_c \\ 1 & \text{for } T > T_c \end{cases} \quad (11)$$

$T < T_c$ 일 때;

$$\sigma = (\sigma_0 + B\epsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0})[(1 - (T^*)^m)] \quad (12)$$

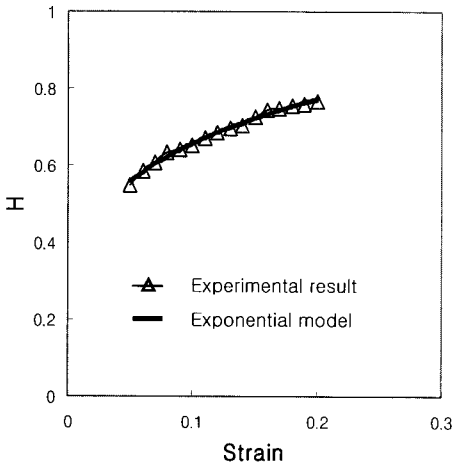


Fig. 7 The value of a reducer function H

$T > T_c$ 일 때;

$$\sigma = (\sigma_0 + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \frac{\dot{\varepsilon}}{\dot{\varepsilon}_0})[(1 - (T^*)^m)H(T)]$$

$$H(T) = \frac{(\sigma_f)_{def}}{(\sigma_f)_{rec}} \quad (13)$$

시편은 700℃와 750℃사이에서 임계현상을 나타내고 이에 따라서 다른 온도 구간과 상이한 유동응력 강하를 보인다. 그러므로 750℃ 이후의 유동응력을 나타내는 구성방정식에는 H(T)를 적용할 필요가 있다. Fig. 7은 실험 값을 통해서 계산한 H ($= (\sigma_f)_{def} / (\sigma_f)_{rec}$)를 도시한 그래프이다.

온도만의 함수인 H(T)를 $(\sigma_f)_{def} / (\sigma_f)_{rec}$ 의 평균 값을 계산하여 구성방정식에 적용하였다. 결과는 식 (14)~(15)와 Fig. 8에 나타내었다. H(T)를 적용한 구성방정식 모델은 800℃ ~ 1000℃의 구간에서 유동응력이 실험 값에 더 근접하였으나, 변형률의 증가에 따른 가공 경화(strain - hardening)현상을 적절하게 묘사하기에는 한계가 있었다.

600℃ :

$$\sigma = (557.2 + 777.3\varepsilon^{0.488})(1 + 0.0661 \ln \dot{\varepsilon}) [(1 - (T^*)^{1.04})] \quad (14)$$

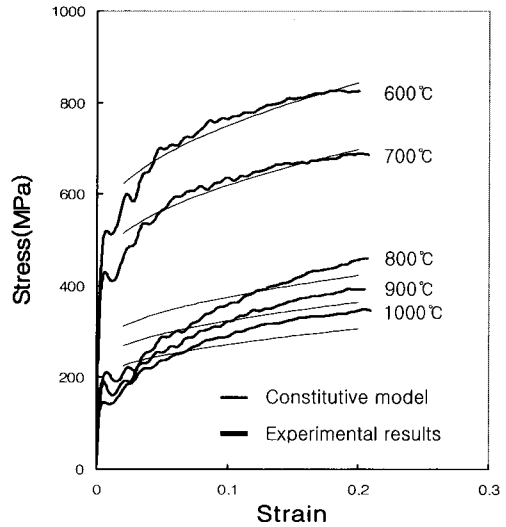


Fig. 8 The comparison of the flow stress of SM45C for experimental results with modified Johnson-Cook constitutive equations where a reducer function H is dependant on the temperature ($\dot{\varepsilon}$: 1100/s~1150/s)

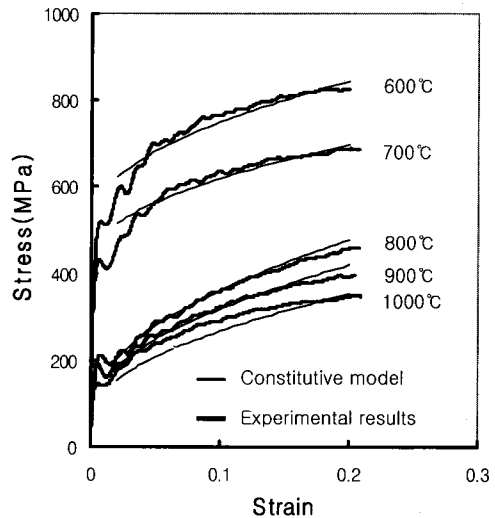


Fig. 9 The comparison of the flow stress of SM45C for experimental results with modified Johnson-Cook constitutive equations where a reducer function H is dependant on the temperature and the strain ($\dot{\varepsilon}$: 1100/s~1150/s)

700°C ~ 1000°C :

$$\sigma = (557.2 + 777.3\varepsilon^{0.488})(1 + 0.0661 \ln \dot{\varepsilon})$$

$$[(1 - (T^*)^{0.92})] \frac{1}{1 + 0.446u(T)} \quad (15)$$

3.3.3 Reducer function H(T, ε)

H가 변형률의 함수이므로 실험값을 적절하게 묘사할 수 있는 함수를 결정하여 재료의 구성모델에 적용하여야 한다. 본 연구에서는 H(T, ε)를 지수함수모델로 묘사하였으며, Fig. 7에 지수함수모델을 비교하여 나타내었다. SM45C 시편에 대해서 H(T, ε)를 적용한 modified Johnson-Cook 구성방정식을 식 (16)에 나타내었으며 실험값과의 비교결과를 Fig. 9에 나타내었다.

실험 결과와 modified Johnson-Cook 구성방정식의 비교를 통해서, 800°C ~ 1000°C 구간의 온도 영역에서 H(T, ε) 함수를 적용하면 가공경화 현상을 더 적절하게 묘사할 수 있음을 확인할 수 있었다.

700°C ~ 1000°C :

$$\sigma = (557.2 + 777.3\varepsilon^{0.488})(1 + 0.0661 \ln \dot{\varepsilon})$$

$$[(1 - (T^*)^{0.92})] \frac{1}{1 - \left[1 - \frac{1}{1.15\varepsilon^{0.23}} \right] u(T)} \quad (16)$$

4. 결론

본 논문에서는 SHPB 압축시험 장치에 복사 가열장치를 설치하여 고온-고변형률속도에서 SM45C의 구성방정식을 구하였다. 변형률속도의 영향을 파악하기 위하여 변형률속도를 500/s ~ 1000/s 까지 변화시키면서 시험을 수행하였고, 고온 영역에서 시편의 유동응력 자료를 확보하였다. 고온 실험은 온도의 영향을 확인할 수 있도록 변형률속도의 범위를 1100/s ~ 1150/s 내에서 유지하였다.

확보된 실험 자료를 바탕으로 SM45C의 고온 영역(600°C~1000°C)에 대한 구성방정식을 결정할 수 있었다. 적용한 모델은 임계 현상(dynamic

recrystallization, phase transformation, etc.) 이 후의 거동을 묘사할 수 있는 modified Johnson-Cook 구성방정식이다. 임계현상 이전과 이 후의 응력값의 비교를 통해서 가공경화 현상을 더 적절하게 묘사할 수 있는 reducer function H(T, ε)을 제안하였다.

후 기

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2005-041-D00037)

참고문헌

- (1) Kolsky H., 1949, "An Investigation of the Mechanical Properties of Materials very High Rates of Loadings," *Proc. Phys. Soc.(London)*, B63, pp. 676~700.
- (2) Chiddister JL, Malvern LE, 1963, "Compression-Impact Testing of Aluminum at Elevated Temperature," *Exp. Mech.*, Vol.3, pp. 81~90.
- (3) Follansbee P.S., 1985, "The Hopkinson bar," ASM handbook 9th Ed., *ASM international*, Vol. 8, pp. 198~203.
- (4) Macdougall D. A., Harding J., 1998, "The Measurement of Specimen Surface Temperature in High-speed Tension and Torsion Test," *Int. J. impact Eng.*, Vol. 21, pp. 473~478.
- (5) Ingyu Lee, Hyunmo Yang, Oakkey Min, 2006, "Dynamic Behavior of Aluminum 2024-T4 at High Temperature," *Proceedings of the KSME 2006 spring Annual Meeting*, Jejodo, Korea.
- (6) Songwon Seo, Oakkey Min, Hyunmo Yang, 2005, "Constitutive Equation for Ti-6Al-4V at High Temperatures Measured Using the SHPB Technique," *Int. J. impact Eng.*, Vol. 31, pp. 735 ~ 754.
- (7) G. R. Johnson, W. H. Cook, 1983, *Proc. 7th Intern. Symp. Ballistics*, Am. Def. Prep. Org, Netherlands.
- (8) M. A. Meyers, 1994, "Dynamic Behavior of Materials," *John Wiley & Sons*.
- (9) J. R. Davis, 1998, "Metals Handbook Desk Edition," *ASM International*, 2nd Ed.
- (10) U. R. Andrade, M. A. Meyer, K. S. Vecchio, A. H. Chokshi, 1994, "Dynamic Recrystallization in High-Strain, High-Strain-Rate Plastic Deformation of Copper," *Acta. Metall. Mater.*, Vol. 42, pp. 3183 ~ 3195.