

〈論 文〉

# 변형률 속도와 온도가 금속의 소성변형에 미치는 영향

金琪泰\* · 曹允昊\*\* · 白應律\*\*\*

(1991년 3월 18일 접수)

## The Effect of Strain Rate and Temperature on Plastic Deformation of a Metal

K.T. Kim, Y.H. Cho and E.R. Baek

**Key Words :** Alloy Steel(합금강), Uniaxial Compression(일축압축), Strain Rate(변형률속도), Thermo-viscoplastic(열-점소성)

### Abstract

The effect of strain rate and temperature on plastic deformation of alloy steel is investigated. Plastic flow stress decreases as temperature increases and increases as strain rate increases. A strain rate and temperature dependent strain hardening law is proposed to describe stress-strain-strain rate-temperature relations. The formulation is purely empirical, based on experimental data for uniaxial compression of alloy steel. Agreement between the proposed strain rate-temperature dependent strain hardening law and experimental data is very good over a wide range of strain rates and temperatures.

### 1. 서 론

금속의 성형은 소성 유동응력에 크게 영향을 받으며, 때때로 빠른 변형률 속도와 고온하에서 큰 변형을 수반한다. 회복, 재결정 및 결정성장은 온도상승에 따라 진행되는 과정으로 유동응력을 감소하게 하고, 한편 소성변형의 속도가 증가하면 금속의 유동응력은 증가하게 된다. 이렇게 상반되는 변형률 속도와 온도의 두 영향을 동시에 고려하기는 쉽지 않다.

최근에는 분말단조로 제조한 부품이 기계가공이나 통상적인 단조공정으로 제조한 부품보다 생산단가가 더 낮고, 기계적 성질이 우수하며 대량생산도 용이하므로 많은 연구가 되고 있다<sup>(1,2)</sup>. 분말단조 공정에서는 금형의 설계, 예비성형체의 형상 및 마

찰등의 세부적인 사항뿐 아니라 예비성형체가 최종 부품으로 변형되는 복잡한 소성변형 거동을 이해하는 것도 아주 중요한 일이다. 이러한 분말단조 공정의 해석을 위한 다공질 예비성형체의 모재의 열-점소성 거동을 나타내기 위한 변형률 속도와 온도의 영향을 동시에 고려할 수 있는 구성방정식이 필요하다<sup>(3)</sup>.

Carroll 등<sup>(4)</sup>은 구리분말의 폭발성형을 해석하기 위해 온도의 영향을 고려한 점-소성재료의 구성방정식에 온도에 대하여 선형관계를 갖는 항복강도를 사용하였다. 또한, Baines<sup>(5)</sup>는 열소성 구성이론을 형성하는데 온도의 영향을 고려하였다. Kim<sup>(6)</sup>은 잘 알려진 Voce<sup>(7)</sup>와 Palm<sup>(8)</sup>의 포화경화 법칙을 수정하여 온도의 영향을 고려한 변형경화 법칙을 제안하였다. 또한, Naghdi<sup>(9)</sup>는 변형률 속도를 고려한 이상적인 탄성-점소성재료의 구성방정식을 제안하였고, Stout 등<sup>(10)</sup>은 변형률 속도를 고려한 여러 가지 식들을 실험치와 비교하여 설명하였다. Johnson 등<sup>(11,12)</sup>은 여러 종류의 금속에 대하여 변

\* 정회원, 포항공과대학 기계공학과  
\*\* 정회원, 포항공과대학 대학원  
\*\*\* 산업과학기술연구소 신소재부문

형률 속도에 따른 비틀림 응력-변형률 관계를 실험적으로 조사하였다.

본 논문에서는 분말단조 공정의 유한요소 컴퓨터 시뮬레이션<sup>(3)</sup>을 위한 기초연구로 다공질에비성형체의 기지(matrix)인 합금강의 변형률 속도와 온도에 따른 일축 압축하의 열-점소성 거동을 조사하였다. 변형률 속도와 온도의 영향을 동시에 고려하기 위하여 변형률 속도  $\dot{\epsilon}=10^{-4}$ ,  $10^{-2}$  및  $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 과 온도범위 800~1200°C에 대하여 실험하였다.

끝으로, 응력-변형률-변형률 속도-온도의 관계를 나타내기 위하여 열-점소성 변형경화 법칙을 제안하였다. 이 법칙은 Kim<sup>(6)</sup>이 제안한 온도에 의존하는 변형경화 법칙과 Naghdi<sup>(9)</sup>가 제안한 점소성 반응식 및 합금강의 일축압축 실험치로부터 경험적으로 형성되었다. 또한, 이 법칙은 변형경화 현상과 변형률 속도 및 온도의 영향을 동시에 고려할 수 있으며 여러온도와 변형률 속도에 대하여 실험치와 잘 일치하였다.

## 2. 실험 및 실험결과

### 2.1 시 편

본 실험에서 사용한 시편재료는 분말 단조용으로 개발된 합금강 분말(mannesman HF4)과 같은 조성을 가진 합금강을 사용하였고, 그 화학적 성분은 Table 1에 있다. 시편은 외경  $10.95 \pm 0.05\text{mm}$ 와 길이  $13.95 \pm 0.05\text{mm}$ 의 원주형으로 기계가공을 하였고 가공중 생긴 잔류응력을 제거하기 위해 650°C의 수소 분위기에서 약 30분간 어닐링하였다.

### 2.2 실험장치 및 조건

본 연구의 실험에서는 온도, 하중 및 변형률 속도 등을 조합하여 컴퓨터에서 자동으로 제어할 수 있는 Gleeble 1500 고온 재료시험기를 사용하였다. 본 연구에서는 고온 일축압축 실험을 하였으며 고온에서 시편의 산화를 방지하기 위하여 진공상태 ( $10^{-3}\text{torr}$ )를 실험중에 유지하였다.

시편의 중간부분에 1mm 간격으로 두개의 열전대를 용접·접합 하였고, 측정된 온도와 프로그램된 온도의 차이를 보정하는 온도-서보장치를 통하여 자동으로 실험온도가  $\pm 1^\circ\text{C}$ 의 정확도로 제어되었다. 또한, 압축실험시 발생하는 압반과 시편사이의 고온접합을 방지하고, 마찰을 줄이기 위하여 탄탈(tantalum) 박판을 압반과 시편사이에 삽입하였

**Table 1** Chemical compositions of low carbon alloy steel

C	Mn	S	O	Ni	Mo
0.2	0.21	0.012	0.18	1.96	0.43

다. 시편은 압반을 통한 전기저항 가열장치에 의해 가열되었으며, 고온 열팽창에 의한 시편의 소성변형이 무시될 수 있도록 가열중에 시편이 축방향으로 자유로이 변형할 수 있게 설계된 공기램(air ram)을 사용하였다. 본 실험에서의 시편에 가한 가열속도는 800~1200°C/min 범위이며 가열 속도가 열 및 기계적 성질에 미치는 영향은 무시하였다. 실험중의 하중, 변위 및 온도 등의 값은 x-y recorder로 시간에 대해 연속적으로 기록하거나 data acquisition 장치를 통하여 컴퓨터에 자동으로 입력되었다. 또한, 진변형률 속도는 컴퓨터의 프로그램을 통하여 자동으로 제어 되었다.

본 실험에서는 변형률 속도  $\dot{\epsilon}=10^{-4}$ ,  $10^{-2}$  및  $10^{-1}\text{s}^{-1}$ 와 온도범위 800~1200°C에 대하여 100°C 간격으로 실험하였다. 실험치는 2회 이상의 반복실험을 통하여 구하였으며, 실험 오차는 평균 5%이하로 실험치의 재현성이 좋음을 알 수 있다.

### 2.3 진응력과 진변형률

원주 시편을 축방향으로 압축하게 되면 초기의 작은 변형률 범위에서는 시편전체에 걸쳐 비교적 균일하게 변형이 일어난다. 압축력을 증가하여 축변형률이 커지면 시편의 양단은 실험장치의 압반(platen)과의 마찰에 의해 변형에 제약을 받으며, 시편의 중간부분에서는 자유경계면을 가지므로 자유로이 변형하여 배불림(barrelling) 현상이 나타난다. Fig. 1은 열간압축에 의한 합금강의 변형률에 따른 배불림 현상을 나타낸다.

배불림이 일어나면 시편내부의 응력의 분포가 불균일하게 되므로 진응력-진변형률의 관계를 정확히 구할 수 없게 된다. 따라서, 유한변형률(finite strain) 범위에서의 배불림 현상을 고려한 진응력-진변형률의 관계를 합금강의 일축압축 실험치에 기초하여 다음과 같이 구하였다.

일축압축에서의 진변형률(true strain)은  $\epsilon = \ln(h_0/h)$ 로 나타낼 수 있다. 여기서 편의상 압축변형률을 양의 값으로 나타내며,  $h$ 와  $h_0$ 는 임의의 변형률에서 압축된 시편의 높이와 그 초기치를 나

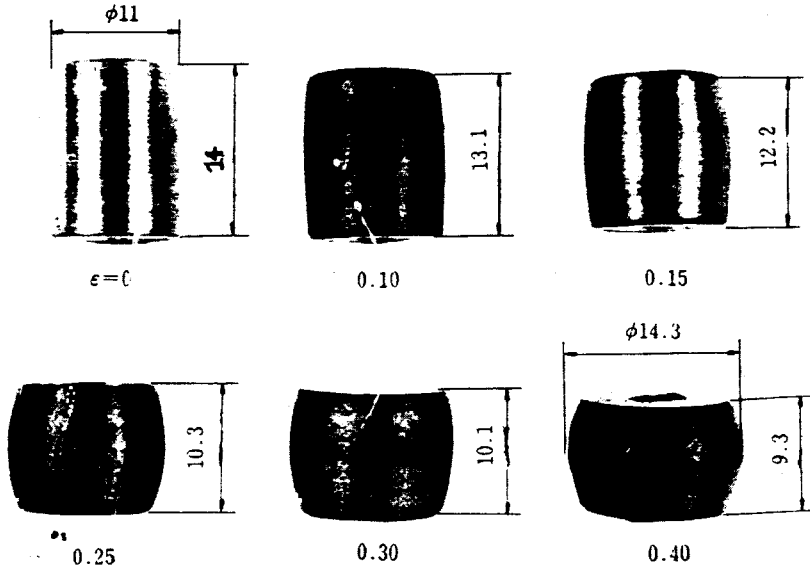


Fig. 1 Barrelled specimens of alloy steel at various strains after uniaxial compression(unit : mm)

타낸다. 한편, 임의의 변형률에서 마찰저항이 없는 이상적인 경우의 균일한 변형에 의한 단면적과 진응력을  $A$ 와  $\sigma$ 로 나타낼때, 진응력  $\sigma$ (Cauchy 또는 true stress)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = \frac{P}{A} \quad (1)$$

여기서  $P$ 는 압축하중을 나타낸다. 또한, 소성변형 중 체적의 변화를 무시하면 단면적  $A$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$A = \frac{A_0 h_0}{h} \quad (2)$$

여기서  $A_0$ 는 초기 단면적을 나타낸다. 따라서, 압축실험시 배불림을 고려한 진응력은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma = \frac{Ph}{A_0 h_0} \quad (3)$$

#### 2.4 초기 항복 및 소성-변형경화 거동

Fig. 2는 여러온도와 변형률 속도에 대하여 합금강의 일축압축 실험에서 구한 진응력과 진변형률의 관계를 나타낸다. 여기서, 탄성변형을 제외한 소성 변형만을 고려하였으며, 0.2% 율셋항복강도를 택하였다. 또한, 실험치는  $x$ - $y$  recorder 등을 통하여 연속곡선으로 기록 되었으나, 경험식과 비교하기 위하여 실험치를 data point로 나타내었으며 각 point는 실선으로 연결하였다.

Fig. 3은 온도  $900^{\circ}\text{C}$ 의 일축압축 실험에서 구한 합금강의 진응력과 진소성 변형률의 관계에 미치는 변형률 속도의 영향을 나타낸다. 여기서, 고정된 온도에서 변형률 속도가 증가함에 따라 항복강도와 소성 유동응력이 증가함을 알 수 있다. 또한, 변형률 속도의 증가에 따라 변형경화 속도도 증가함을 알 수 있다.

Fig. 4 (a) (b)는 각각 고정된 변형률 속도  $\dot{\epsilon} = 10^{-1}$ 과  $10^{-4}\text{s}^{-1}$ 에 대하여 일축압축 실험에서 구한 합금강의 진응력과 진소성 변형률의 관계에 미치는

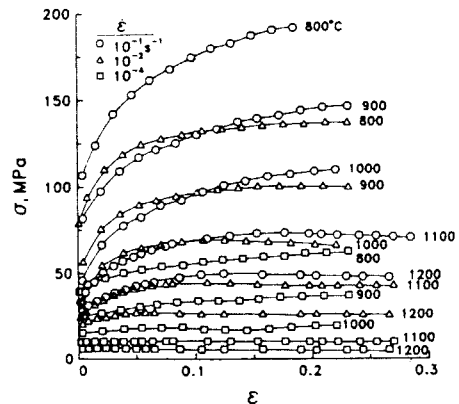


Fig. 2 True stress-true plastic strain curves for alloy steel at various strain rates and temperatures

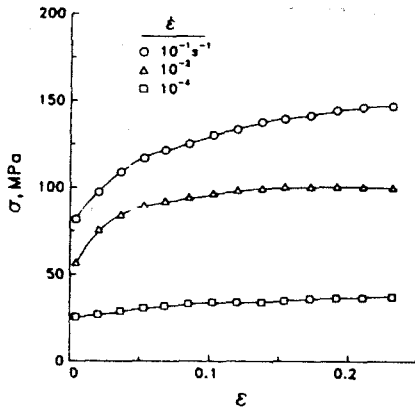


Fig. 3 Effect of strain rate on stress-plastic strain responses for alloy steel at  $T=900^{\circ}\text{C}$

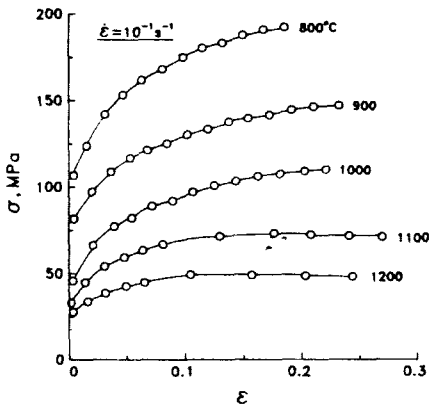


Fig. 4(a) Effect of temperature on stress-plastic strain responses for alloy steel at  $\dot{\epsilon}=10^{-1}\text{s}^{-1}$

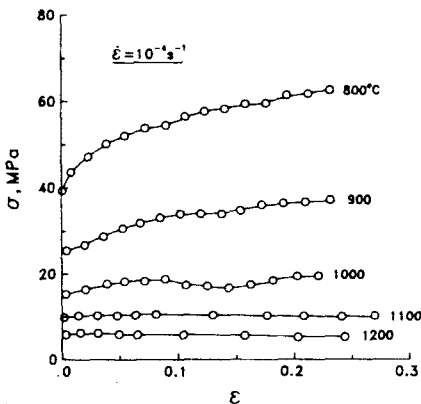


Fig. 4(b) Effect of temperature on stress-plastic strain responses for alloy steel at  $\dot{\epsilon}=10^{-4}\text{s}^{-1}$

온도의 영향을 나타낸다. 여기서, 고정된 변형률 속도에서 온도의 상승에 따라 항복강도와 소성 유동응력이 감소함을 알 수 있다. 또한, 온도상승에 따라 변형경화의 상승률이 감소함을 알 수 있고 실험 온도  $T > 1100^{\circ}\text{C}$ 와 변형률  $\epsilon > 0.15$  범위에서는 거의 포화경화가 일어남을 보이고 있다. Fig. 4(b)에서는 Fig. 4(a)와 같이 온도의 하강에 따라 초기 항복강도와 소성유동 응력이 증가함을 볼 수 있으나, Fig. 4(a)와 비교하여 변형률 속도가 감소함에 따라 변형경화가 작게 일어나며 Fig. 4(a)에서 보다 낮은 온도와 작은 변형률에서도 포화경화 현상을 볼 수 있다.

금속의 재결정 현상은 일반적으로 변형률 속도와 변형량, 온도 및 합금원소의 성분이나 조성에 따라 차이가 있다. 본 실험에 사용한 합금강의 경우에는 Fig. 4(b)와 같이  $1000^{\circ}\text{C}$ 에서는 변칙적인 기계적 거동을 관찰할 수 있는데 이는 이 온도와 하중상태(하중시간 약 1시간)에서 재결정이 일어났음을 알 수 있고, 미세조직의 관찰과 경도시험으로부터 실제 재결정이 일어났음을 확인할 수 있었다. 또한, 소성변형률 0.1 이상에서는 변형연화(strain softening) 현상이 관찰된다. 이러한 변형연화 현상은 Cook<sup>(13)</sup>의 실험에서도 찾아볼 수 있다.

### 3. 해 석

분말단조와 같은 성형공정을 해석하기 위해서는 비교적 빠른 변형률 속도와 높은 온도에서의 소성 거동을 동시에 고려한 열-점소성 구성방정식이 필요하다. 기존의 응력-변형률의 관계식들은 대부분 변형률 속도와 온도의 영향을 각각 따로 취급하고 있으며<sup>(14)</sup> 이 두영향을 함께 고려한 식은 문헌상에서 찾아보기 어렵다. 따라서, 본 논문에서는 변형률 속도와 온도의 영향을 동시에 고려한 변형률 속도와 온도에 의존하는 소성 변형경화법칙을 새로 제안하고 실험치와 비교하고자 한다. 이 법칙은 Kim<sup>(6)</sup>이 제안한 온도에 의존하는 소성경화법칙과 Naghdi<sup>(9)</sup>가 제안한 점-소성 구성방정식 및 본 논문에서 구한 합금강의 실험치에 근거하여 경험적으로 구하고자 한다.

#### 3.1 응력-온도의 관계

Fig. 5는 고정된 변형률 속도와 변형률에서 구한 일축압축하의 합금강의 응력과 무차원 온도(실험

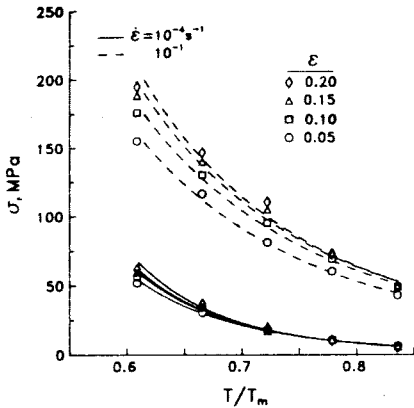


Fig. 5 Stress-temperature relations for alloy steel at various fixed strains

온도(K)/용점(K)의 관계를 나타내는 실험치이다. 이 관계는 넓은 온도범위에서 멱수법칙으로 잘 나타낼 수 있다<sup>(6)</sup>. 또한, 이 관계는 금속공학자들이 널리 사용하는 아르베우스(Arrhenius)식으로 나타낼 수도 있으나, 실용적인 관점에서 본 논문에서는 실험치와 비교적 잘 일치하며 간단한 형태를 갖는 멱수법칙을 사용하기로 한다. 따라서, 고정된 변형률과 변형률 속도에서 응력과 온도의 관계는 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$\sigma(\epsilon, T) = A(\epsilon) \left(1 - \frac{T}{T_m}\right)^{n_s} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma$ ,  $\epsilon$  및  $T$ 는 각각 진응력, 진소성변형률(true plastic strain)과 온도를 나타낸다. 또한,  $n_s$ 과  $T_m$ 은 각각 양의 상수와 용점을 나타낸다.

### 3.2 응력-변형률의 관계

실험치로부터 고정된 온도에서 응력과 변형률의 관계는 Voce-Palm 포화경화 법칙<sup>(15)</sup>으로 잘 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 즉,

$$\sigma = Y_0 [1 + \kappa_s (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_s})] \quad (5)$$

여기서,  $\kappa_s = Y_\infty / Y_0 - 1$ 이며  $Y_\infty$ 와  $Y_0$ 는 포화강도와 초기 항복강도를 각각 나타낸다. 식(5)는 초기 항복강도  $Y_0$ 에서 포화강도  $Y_\infty$ 까지의 변형경화 현상을 특성변형률 상수  $\epsilon_s$ 에 의해 정의된 비로 나타낸다. 식(5)로부터 유추하면, 고정된 온도에 대하여 식(4)의 함수  $A(\epsilon)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A(\epsilon) = Y_1 [1 + \kappa_s (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_s})] \quad (6)$$

여기서,  $Y_1$ 은 양의 상수이다.

### 3.3 응력-변형률-온도의 관계

식(4)와 (6)으로 부터 고정된 변형률 속도에서 응력-변형률-온도의 관계는 다음과 같이 쓸 수 있다<sup>(6)</sup>.

$$\sigma(\epsilon, T) = Y_1 [1 + \kappa_s (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_s})] \left(1 - \frac{T}{T_m}\right)^{n_s} \quad (7)$$

Fig. 6은 변형률 속도  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$ 에서의 고온 일축압축 실험으로부터 구한 합금강의 응력-변형률-온도의 관계를 나타내는 실험치와 식(7)과 Table 2의 상수들로부터 구한 계산치(실선)의 비교를 나타낸다. 여기서, Table 2의 상수들은 식(7)과 실험치로부터 BMDP 통계 소프트웨어<sup>(16)</sup>를 사용하여 구하였다. 또한, 합금강의 용점으로  $T_m = 1763K$  (1490°C)가 사용되었다. 실험치와 계산치는 1100와 1200°C의 작은 변형률 범위를 제외한 여러온도에 대하여 비교적 잘 일치함을 알 수 있다. 본 논문에서는 변형률 속도  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$ 에서의 변형을 준정적

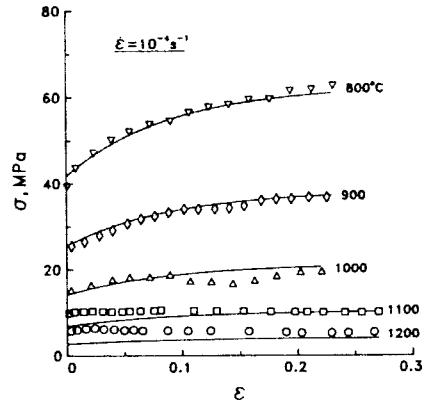


Fig. 6 Comparison between experimental stress-strain data for alloy steel at  $\dot{\epsilon} = 10^{-4} s^{-1}$ (data points) and (7), with parameters in Table 2 and  $T_m = 1763K$ (solid)

Table 2 Estimates and asymptotic standard deviations of parameters in (7)

	Estimate	Asymptotic standard deviations
$Y_1(MPa)$	807.83	30.487
$\kappa_s$	0.49	0.025
$\epsilon_s$	0.09	0.012
$n_s$	3.16	0.034

변형상태라고 가정한다.

3.4 응력-변형률-온도-변형률 속도의 관계

Naghdi<sup>(9)</sup>는 온도의 영향과 변형경화를 포함하지 않는 이상화된 탄성-점소성재료에서 변형률 속도의 영향을 고려하기 위하여 다음과 같은 구성방정식을 제안하였다.

$$\sigma_d = \sigma_s + L \dot{\epsilon} \quad (8)$$

여기서,  $\sigma_d$ ,  $\sigma_s$  및  $\dot{\epsilon}$ 는 각각 동적변형과 준정적 변형에서의 응력텐서 및 소성변형률 속도텐서를 나타낸다. 또한,  $L$ 은 4차텐서로 소성변형률  $\epsilon$ 과 가공경화 계수의 함수로 나타낼 수 있다.

이제, 식(8)로부터 고정된 온도에서 동적상태의 응력  $\sigma_d$ 는 준정적 상태의 응력  $\sigma_s$ 와 변형률과 변형률 속도의 함수  $f(\epsilon, \dot{\epsilon})$ 의 합으로 나타낼 수 있음을 이용하여 일축응력 상태에서의  $\sigma_d$ 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma_d(\epsilon, \dot{\epsilon}) = \sigma_s(\epsilon) + f(\epsilon, \dot{\epsilon}) \quad (9)$$

이제, 식(7), (9)와 동적 및 준정적 상태의 일축압축 실험치로부터 응력-변형률-온도의 관계에 변형률 속도의 영향을 다음과 같이 고려할 수 있다.

고정된 변형률에서 합금강의 동적상태의 일축응력  $\sigma_d$ 와 준정적상태의 일축응력  $\sigma_s$ 의 차이( $\sigma_d - \sigma_s$ )와  $T/T_m$ 의 관계의 실험치를 Fig. 7에 나타내었다. 여기서, 실선은  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} s^{-1}$ 에 대한  $\sigma_d - \sigma_s$ 와  $T/T_m$ 의 역수관계를 나타내며, 점선은  $\sigma_s$ 와  $T/T_m$ 의 역수관계를 나타낸다. 따라서, 고정된 변형률에서  $\sigma_d - \sigma_s$ 와  $T/T_m$ 의 관계도 식(4)의  $\sigma_s$ 와  $T/T_m$ 의 관계(점선)와 같이 역수법칙으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

또한, 고정된 온도에서의  $\sigma_d - \sigma_s$ 는 식(9)를 이용하여 실험치와 비교하였다. 고정된 온도에서 합금강의  $\sigma_d - \sigma_s$ 와 변형률의 관계는 변형률 속도의 증가에 따라 초기 항복강도의 점프(jump)뿐 아니라 변형경화율도 증가함을 보였다. 따라서, 고정된 온도에서 변형률 속도에 대한  $\sigma_d - \sigma_s$ 와 변형률의 관계는 Voce-Palm의 포화경화 법칙과 변형률 속도의 역수항의 곱으로 비교적 잘 나타낼 수 있었다. 즉,

$$\sigma_d - \sigma_s = Y_2 \left[ 1 + \kappa_d (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_d}) \right] \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right)^{n_d} \dot{\epsilon}^m \quad (10)$$

여기서,  $Y_2$ ,  $\kappa_d$ ,  $\epsilon_d$ ,  $n_d$  및  $m$ 은 양의 상수들이다. 또한, 식(10)의  $\sigma_s$ 는 준정적 상태( $\dot{\epsilon} \approx 0$ )에서

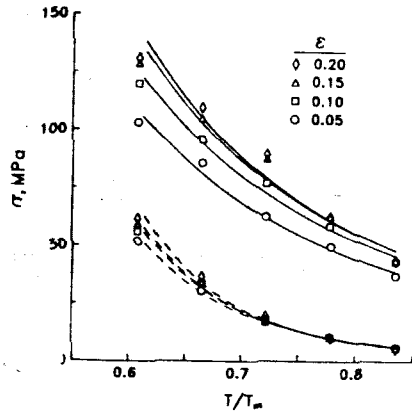


Fig. 7 Relationships of  $\sigma_d - \sigma_s$  vs.  $T/T_m$  (solid) for  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} s^{-1}$  and  $\sigma_s$  vs.  $T/T_m$  (dash) for alloy steel at various fixed strains

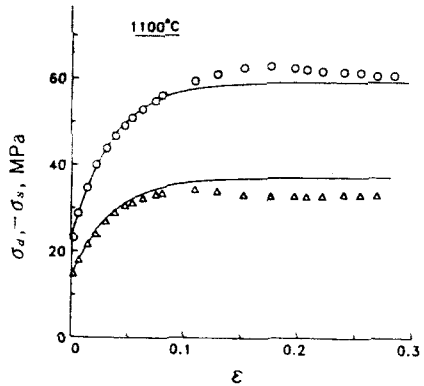


Fig. 8 Comparison between experimental  $\sigma_d - \sigma_s$  vs. strain data for alloy steel at a fixed temperature and (10). Data  $\circ$  denotes  $\sigma_d - \sigma_s$  vs. strain for  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} s^{-1}$  and data  $\triangle$  for  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$

의 응력-변형률-온도의 관계식, 식(7)을 나타낸다.

Fig. 8은 고정된 온도(1100°C)에서 합금강의 동적상태의 일축응력  $\sigma_d$ 와 준정적상태의 일축응력  $\sigma_s$ 의 차이와 변형률의 관계를 나타내는 실험치와 식(10)으로부터 구한 계산치의 비교를 나타낸다.

실험치  $\circ$ 는 변형률 속도  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} s^{-1}$ 에 대한  $\sigma_d - \sigma_s$ 와 변형률의 관계를 나타내며 실험치  $\triangle$ 는  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} s^{-1}$ 에 대한 관계를 나타낸다.

이제, 응력-변형률-온도-변형률 속도의 관계를 나타내는 열-점소성방정식은 식(10)과 (7)로부터 다음과 같이 쓸 수 있다.

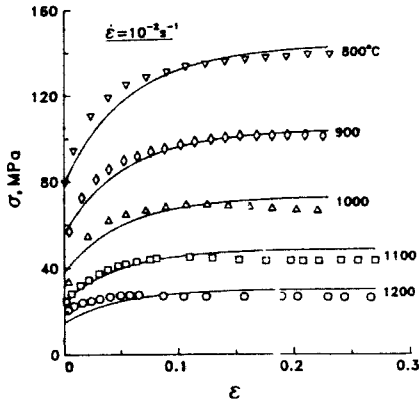


Fig. 9(a) Comparison between experimental stress-strain data for alloy steel at  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{s}^{-1}$  (data points) and (11), with parameters in Tables 2 and 3

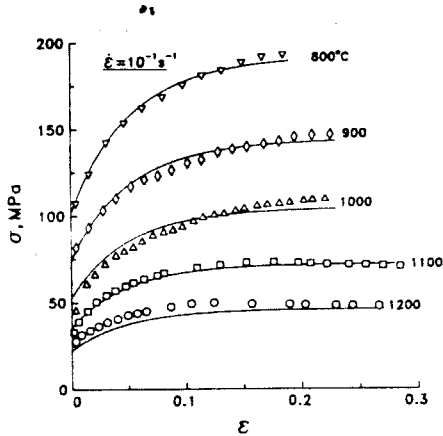


Fig. 9(b) Comparison between experimental stress-strain data for alloy steel at  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{s}^{-1}$  (data points) and (11), with parameters in Tables 2 and 3

$$\sigma_d = \sigma_s \left[ 1 + \beta \frac{1 + \kappa_d (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_d})}{1 + \kappa_s (1 - e^{-\epsilon/\epsilon_s})} \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right)^\gamma \epsilon^m \right] \quad (11)$$

여기서,  $\beta (= Y_2/Y_1)$ 와  $\gamma (= n_d - n_s)$ 은 각각 양과 음의 상수를 나타낸다.

Fig. 9 (a)와 (b)는 각각 변형률 속도  $\dot{\epsilon} = 10^{-2}$ 와  $10^{-1} \text{s}^{-1}$ 에서 일축압축 실험으로부터 구한 합금강의 응력-변형률-온도의 관계를 나타내는 실험치와 식(11)과 Table 3의 상수들로 부터 구한 계산치(실선)의 비교를 나타낸다. 여기서, Table 3의 상수들은 식(11), (7), Table 2의 상수들 및 실험치로부터 BMDP 통계 소프트웨어<sup>(16)</sup>를 사용하여

Table 3 Estimates and asymptotic standard deviations of parameters in (10)

	Estimate	Asymptotic standard deviations
$Y_2(\text{MPa})$	328.30	18.933
$\kappa_d$	1.67	0.126
$\epsilon_d$	0.05	0.003
$n_d$	1.30	0.025
$m$	0.21	0.005

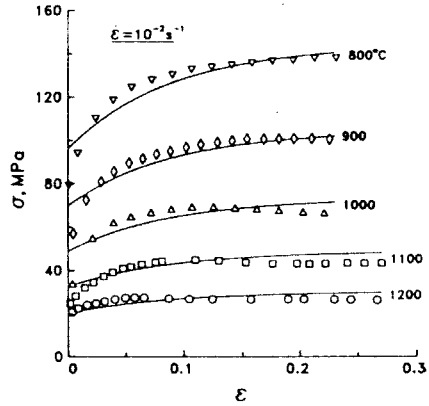


Fig. 10(a) Comparison between experimental stress-strain data for alloy steel at  $\dot{\epsilon} = 10^{-2} \text{s}^{-1}$  (data points) and (12), with parameters in Tables 2 and 4

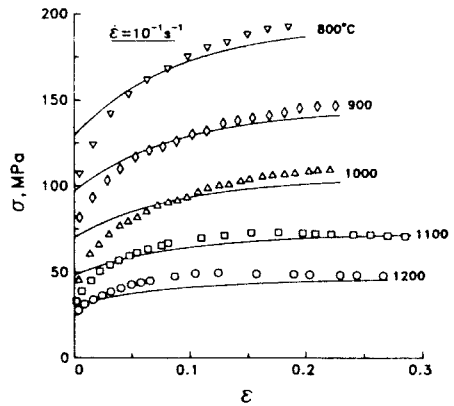


Fig. 10(b) Comparison between experimental stress-strain data for alloy steel at  $\dot{\epsilon} = 10^{-1} \text{s}^{-1}$  (data points) and (12), with parameters in Tables 2 and 4

**Table 4** Estimates and asymptotic standard deviations of parameters in (12)

	Estimate	Asymptotic standard deviations
$\beta$	0.60	0.035
$\gamma$	-1.84	0.049
$m$	0.21	0.009

구하였다. 변형률 속도와 온도의 영향을 고려한 식 (11)은 실험치와 잘 일치함을 알 수 있다.

실용적인 측면에서 식(11)보다는 실험치를 잘 만족하지는 않으나, 상수  $\kappa_a$ 와  $\epsilon_a$  대신에 상수  $\kappa_s$ 와  $\epsilon_s$ 를 사용하면 식(11)은 다음과 같은 간단한 형태로 쓸 수 있다.

$$\sigma_d = \sigma_s \left[ 1 + \beta \left( 1 - \frac{T}{T_m} \right)^\gamma \epsilon^m \right] \quad (12)$$

Fig. 10 (a)와 (b)는 고온 일축압축에서의 합금강의 실험치와 식(12)와 Table 4의 상수들로부터 구한 계산치(실선)의 비교를 나타낸다. 여기서, Table 4의 상수들은 식(7), (12), Table 2의 상수들 및 실험치로부터 BMDP 통계 소프트웨어<sup>(16)</sup>를 사용하여 구하였다. Fig. 10 (a)와 (b)는 Fig. 9 (a)와 (b)보다 실험치를 잘 만족하지는 않으나, 식(12)는 식(11)보다 적은 수의 상수를 사용하는 실용적인 장점이 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 합금강의 일축압축 실험치로부터 변형률 속도와 온도가 소성변형에 미치는 영향을 조사하였다. 또한, 응력-변형률-온도-변형률 속도의 관계를 나타내기 위하여 열-점소성 변형경화 법칙을 열-소성 변형경화 법칙과 점-소성거동식 및 합금강의 실험치를 기초로하여 경험적으로 구하였다. 본 논문에서 제안된 열-점소성 변형경화 법칙은 합금강의 일축응력의 실험치와 잘 일치하였으며 변형률 속도와 온도의 영향을 동시에 포함하므로 유한요소법에 의한 컴퓨터 시뮬레이션과 열응력 해석 등에 유용하게 사용될 것이다.

#### 후 기

본 연구는 학술진흥재단(H-90223)에서 지원된

연구비로 수행되었으며 이에 감사드립니다. 또한, 실험에 많은 도움을 주신 산업과학기술연구소의 후관연구실과 미분금속연구소의 여러분께 감사드립니다. 바입니다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Suh, S.K. and Kuhn, H.A., 1977, "Three Fracture Modes and Their Prevention in Forming P/M Preforms," in *Modern Developments in Powder Metallurgy*, Taubenblat, P.W. and Hausner, H.H., Eds., 9 MPIF, Princeton, NJ, p. 407.
- (2) Kuhn, H.A., 1976, "Effects of Porosity in Material Processing," in *The Effect of Voids on Material Deformation*, AMD-16 Cowin. S.C. and Carroll, M. M., eds., ASME, New York, p. 171.
- (3) 김기태, 조운호, 황상우, 김정모, 안상호, 1991, "분말단조 공정을 위한 이론 및 유한요소 모델," 제3회 분말야금 심포지움, 한양대학교.
- (4) Carroll, M.M., Kim, K.T. and Nesterenko, V.F., 1986, "The Effect of Temperature on Viscoplastic Pore Collapse," *J. Appl. Phys.*, Vol. 59, p. 1962.
- (5) Baines, B.H., 1964, "Thermoplasticity Theory and A Solution in Axial Symmetry," in *Thermal Stress*, Benham, P.P. and Hoyle, R., eds., Pitman and Sons, London, p. 54.
- (6) Kim, K.T., 1989, "A Temperature Dependent Strain Hardening Law," *Res Mechanica*, Vol. 26, p. 371.
- (7) Voce, E., 1955, "A Practical Strain-Hardening Function," *Metallurgia*, Vol. 51, p. 219.
- (8) Palm, J.H., 1949, "Stress-Strain Relations for Uniaxial Loading," *Appl. Sci. Res.*, Vol. A1, p.198.
- (9) Naghdi, P.M., 1984, "Constitutive Restrictions for Idealized Elastic-Viscoplastic Materials," *J. Appl. Mech.*, Vol. 51, p. 93.
- (10) Stout, M.G. and Follansbee, P.S., 1986, "Strain Rate Sensitivity, Strain Hardening, and Yield Behavior of 304L Stainless Steel," *J. Appl. Mech.*, Vol. 108, p. 344
- (11) Johnson, G.R., Hoegfeldt, J.M., Lindholm, U.S. and Nagy, A., 1983, "Response of Various Metals to Large Torsional Strains Over a Large Range of Strain Rates-Part 1: Ductile Metals," *J. Eng. Mat. Tech.-ASME*, Vol. 105, p. 42.
- (12) Johnson, G.R., Hoegfeldt, J.M., Lindholm, U.S. and Nagy, A., 1983, "Response of Various Metals to Large Torsional Strains Over a Large Range of



- Strain Rates-Part 2: Less Ductile Metals," *ibid*, Vol. 105, p. 48.
- (13) Cook, P.M., 1957, "True Stress-Strain Curves for Steel Compression at High Temperatures at Strain-Rates," Proc. Conf. Prop. at High Rates of Strain, Instn. Mech. Engrs., Vol. 86, No. 2.
- (14) Chakrabarty, J., 1987, "Theory of Plasticity," McGraw-Hill Book Co., p. 13.
- (15) Carroll, M.M. and Kim, K.T., 1984, "Pressure-Density Equations for Porous Metals and Metal Powders," Powder Metall., Vol. 27, p. 159.
- (16) Jennrich, R., 1985, "P3R-Nonlinear Regression," in BMDP Statistical Software, Dixon, W.J., ed., University of California Press, Berkeley, p. 289.