

유동응력의 비선형 속도 민감도에 대한 모델링

호 광 수*

(2003년 5월 9일 접수, 2004년 4월 14일 심사완료)

Modeling on the Nonlinear Rate Sensitivity of Flow Stress

Kwangsoo Ho

Key Words : Constitutive Equations(구성방정식), Rate Sensitivity(변형률 속도민감도), Dynamic Strain Aging(동적 변형시효), Flow Stress(유동응력), Dynamic Plasticity(동 소성)

Abstract

Most metallic materials and alloys show rate independence or negative rate sensitivity in some temperature region when dynamic strain aging occurs. It is generally recognized that negative rate sensitivity is an essential feature of dynamic strain aging that can depend on strain and/or strain rate. The unified viscoplasticity theory based on overstress is applied to reproduce a change of rate sensitivity type that depends on strain or strain rate. This is accomplished through the introduction of a single new term in the growth law of the equilibrium stress, which is a tensor valued state variable of the model. It is also shown that the new term can be used to reproduce a dramatic increase of rate sensitivity in dynamic plasticity.

기호설명

- $\dot{\varepsilon}_{ij}$: 변형률속도 ($\dot{\varepsilon}_{ij} = \dot{\varepsilon}_{ij}^{el} + \dot{\varepsilon}_{ij}^{in}$)
 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{el}$: 탄성 변형률속도
 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{in}$: 비탄성 변형률속도
 σ_{ij} : 진응력
 g_{ij} : 상태변수인 평형응력
 f_{ij} : 상태변수인 동응력
 X_{ij} : 과응력 ($X_{ij} = \sigma_{ij} - g_{ij}$)
 ϕ : 유효 비탄성 변형률속도 ($\phi = \sqrt{2/3 \dot{\varepsilon}_{ij}^{in} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in}}$)

1. 서 론

재료의 비탄성적인 변형 거동은 일반적으로 고온뿐만 아니라 상온에서도 하중의 속도에 의존적인 특성을 보인다. 이러한 변형 거동은 속도에 독립적인 전통적 소성학(plasticity)의 체계에서는 설명될 수 없는 재료의 특성이다. 따라서 속도에 의존적인 비탄성 변형 거동을 설명할 수 있는 점소성(viscoplasticity) 이론에 대한 연구는 기계류의 성

능에 대한 예측성, 신뢰성 및 경제성에 근거한 설계과정 그리고 이의 생산 공정에서 수행되는 종합적인 해석을 위해 필요 되는 응력과 변위를 산출해 낼 수 있는 응력 해석법의 근간이 되는 중요성을 갖는다.

재료과학 분야의 연구자들은 실험 및 이론적인 방법으로 동적 변형시효 현상과 관련된 미시적인 구조를 확립하여 왔으며, 미시적인 거동에 대한 이해를 바탕으로 거시적으로 측정될 수 있는 현상을 설명하여왔다. 동적 변형시효는 Portevin-LeChatelier(PLC) 효과로 알려진 톱니 모양의 응력-변형률 곡선, 중성(zero) 또는 음성(negative)의 속도민감도, 온도의 상승에 따른 강도의 증가 및 연성의 감소 등으로 관찰된다. 재료의 동적 변형시효는 특정한 온도 영역에서만 나타나게 되며, 하중 속도가 증가함에 따라 유동응력이 감소하는 것을 의미하는 음성의 속도민감도는 변형률 또는 (그리고) 변형률 속도에 의존하는 톱니형 유동의 필요조건으로 인식된다.⁽¹⁻⁴⁾

톱니형 유동에 대한 연구는 Cottrell⁽⁵⁾이 용질 원자의 확산과 움직이는 전위와의 상호작용에 기초한 모델을 제시한 이후 활발히 수행되어왔다. 동적 변형시효는 일반적으로 전위의 고착에 의해 발생하는 것으로 이해되며, 이러한 전위의 고착은 움직이는 전위가 활주 경로 상에 있는 장애물들에

* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부,

E-mail : hok@kmu.ac.kr

TEL : (053)580-5546 FAX : (053)580-6285

의해 순간적으로 억류되거나 전위의 속도가 충분히 작을 때 발생하는 것으로 이해되어 진다.^(6,7)

재료는 일반적으로 변형률 속도가 10^3 s^{-1} 보다 크게 될 때 유동응력의 급격한 증가를 경험하게 된다.⁽⁸⁻¹⁰⁾ 따라서 매우 큰 변형률 속도에서의 비탄성 거동은 동적 파손 구조를 이해하는데 중요하며, 고속 가공 및 안전성과 관련된 충돌현상 등과 같은 여러 응용 분야에서 점차적으로 그 중요성이 인식되어지고 있다.

본 논문의 목적은 동적 변형시효에서 나타나는 음성의 속도민감도 및 매우 큰 변형률 속도의 재료 거동과 관련된 미시역학적 구조를 설명하고자 함이 아니라, 이들을 모델링 할 수 있는 구성방정식을 제안하여 궁극적으로 전산화된 비탄성 응력 해석에 이용될 수 있도록 함에 있다. 모델링은 과응력에 기초한 통합된 절소성 이론에 근거하여 수행되어 진다. 지난 30년 동안 개발되어온 소위 통합된 이론들⁽¹¹⁾은 비탄성과 크리프 거동을 서로 개별적인 것으로 분리하지 않고 단지 경계조건이 다른 동일한 재료의 거동 형태로 인식한다.

일반적으로 비탄성 거동은 속도에 의존적인 것으로 고려되며 재료 내부 구조의 지속적인 변화에 의해 영향 받는 것으로 이해되어진다. 따라서 현재의 비탄성 거동은 재료 내부 구조 및 하중 조건의 현재 상태에 의해 결정된다 하겠다. 이러한 내부 구조의 현재 상태 및 변화는 구성방정식에서 상태변수와 일차 비선형 미분방정식의 형태로 표현되는 그들의 성장식에 의해 반영된다. 본 이론에서 유동응력은 속도에 의존적인 절성의 영향과 속도에 독립적인 소성 영향의 합으로 표현되며, 이러한 분리가 동적 변형시효 및 매우 큰 변형률 속도 하에서의 급격한 유동응력의 증가를 모델링 하는 것을 가능하게 한다.

2. 과응력에 기초한 절소성 이론

과응력에 기초한 절소성 이론(VBO)은 항복 조건, 하중 및 해중 조건들을 사용하지 않는 통합된 상태변수 이론이다. 이 이론은 하나의 유동 법칙과 3개의 상태변수인 평형응력(equilibrium stress), 동응력(kinematic stress) 그리고 등방응력(isotropic stress)의 성장식들로 구성된다. 평형응력은 경지 상태에서 지지 될 수 있는 경로에 의존적인 응력을 나타내며, 동응력은 응력-변형률 곡선의 최종 경화 속도 및 바우инг거(Bauschinger) 효과를 모델링하기 위하여 도입된다. 등방응력의 도입은 전통적인 소성 이론에서와 같이 유동응력의 속도에 독립적인 성분과 반복강화 또는 반복연화 현상을 설

명하기 위함이다. 유동 법칙에서 비탄성의 항은 응력과 평형응력의 차로 정의되는 과응력(overstress)의 함수로 표현되며, 이 과응력은 유동응력의 속도에 의존적인 절성 성분을 구성하는 역할을 수행하게 된다.

미소변형, 등방성 그리고 비압축성의 비탄성 거동이 등온의 조건 하에서 가정될 때의 유동 법칙은 전체 변형률 속도를 탄성 변형률 속도와 비탄성 변형률 속도의 합으로 정의 함으로써 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{ij}^{el} + \dot{\epsilon}_{ij}^{in} \quad (1)$$

탄성 및 비탄성 변형률 속도는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \dot{\sigma}_{ij} - \frac{\nu}{E} \delta_{ij} \dot{\sigma}_{kk} \quad (2)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{in} = \frac{3}{2Ek} X_{ij} - \frac{1}{2Ek} \delta_{ij} X_{kk} \quad (3)$$

여기서 σ_{ij} 는 진응력, ϵ_{ij} 는 진변형률, E 는 탄성 계수, ν 는 프와송비, δ_{ij} 는 크로넥커 멘타 그리고 과응력은 $X_{ij} = \sigma_{ij} - g_{ij}$ 이다. 비탄성 변형률 속도는 과응력 불변체(overstress invariant)인 Γ 의 함수로 정의되는 절성함수(viscosity function) $k = k[\Gamma] > 0$ 를 사용하여 정의된다. 과응력 불변체는 다음과 같이 정의된다.

$$\Gamma^2 = \frac{3}{2} X_{ij} X_{ij} - \frac{1}{2} X_{ii} X_{jj} = \frac{3}{2} X_{ij}^d X_{ij}^d \quad (4)$$

여기서 X_{ij}^d 는 편차 과응력(deviatoric overstress)으로 $X_{ij}^d = \sigma_{ij}^d - g_{ij}^d$ 이다.

상태변수인 평형응력, 동응력 및 등방응력의 성장식은 각각 다음과 같다.

$$\dot{g}_{ij} = \psi \left(\frac{X_{ij}}{Ek} - \frac{g_{ij} - f_{ij}}{A_c + |A + \beta\Gamma|} \phi \right) + \dot{f}_{ij} \quad (5)$$

$$\dot{f}_{ij} = E_t \frac{X_{ij}}{Ek} \quad (6)$$

$$\dot{A} = A_r (A_f - A) \phi \quad (7)$$

본 논문에서 새로이 제안된 평형응력의 성장식은 이전에 제안된 평형응력의 성장식⁽¹⁵⁾에서 탄성 변형률속도의 항을 제거 시킴으로써, 평형응력은 완전히 진전된 비탄성 영역에서의 릴렉세이션 시험으로부터 측정 가능하게 되는 장점⁽¹⁴⁾을 갖게 되며, 상태변수인 평형응력의 성장식이 비탄성 변형률속도만의 함수로 정의되어 재료과학 분야의 일반적인 견해^(17,18)와 일치하는 형태를 갖게 된다.

식 (5)에서 평형응력과 동응력의 차는 변형률 강화(strain hardening)와 동적 회복(dynamic recovery)

효과의 합으로 표현되는데, 이 때 동적 회복 효과에 포함된 강화함수(augmentation function) β 의 항에 의해 평형응력은 완전히 진전된 유동응력의 영역에서 속도에 의존적이 된다. 이러한 평형응력의 속도 의존성에 의해 동적 변형시효 현상에서 나타나는 중성 또는 음성의 속도민감도를 모델링하는 것이 가능하게 된다.^(13,14)

유효 비탄성 변형률 속도 $\dot{\phi}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\phi}^2 = \frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in} \dot{\varepsilon}_{ij}^{in} = \left(\frac{\Gamma}{Ek} \right)^2 \quad (8)$$

재료상수 ψ 는 초기 준탄성 영역으로부터 완전히 진전된 비탄성 유동 영역으로의 전이에 영향을 주며, E_t 는 전체 변형률 속도에 기초한 탄젠트계수 $\hat{E}_t = E_t / (1 + E_t/E)$ 와 관련되는 재료상수이며, A_r 은 등방응력이 정상 상태인 $A_r > 0$ 에 도달하는 속도를 조절하는 재료상수이다. 본 논문의 모델링에서는 $A_r = 0$ 이 사용되어 등방응력은 초기치 A_0 로 일정하게 유지되도록 가정된다.^(13,14) 점성함수 $k = k[\Gamma]$ 의 정의는 다음과 같다.

$$k = k_1 \left(1 + \frac{\Gamma}{k_2} \right)^{-k_3} \quad (9)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 은 재료상수이다.

구성방정식의 특징들에 대한 이해를 바탕으로 재료의 비탄성 거동을 모델링하기 위하여 일축 하중에 대한 수학적으로 무한 시간에서의 재료 거동에 해당하는 점근 거동(asymptotic behavior)을 살펴보는 것은 유익하다. 이러한 점근 거동은 재료가 유동응력 영역에 도달하였을 때에 실질적으로 적용되어지며, 구성방정식의 미분 형태로부터 변환된 적분 형태의 방정식들로부터 얻어진다.^(12,13,16)

일축 하중의 조건 하에서 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\varepsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - g)}{Ek} \quad (10a)$$

$$\dot{g} = \psi \left[\frac{(\sigma - g)}{Ek} - \frac{(g - f)}{A_c + |A + \beta\Gamma|} \left| \frac{\sigma - g}{Ek} \right| \right] + \dot{f} \quad (10b)$$

$$\dot{f} = E_t \frac{(\sigma - g)}{Ek} \quad (10c)$$

여기서 표현의 편의를 위하여 $\dot{\varepsilon}_{11} = \dot{\varepsilon}$, $\sigma_{11} = \sigma$, $g_{11} = g$, $f_{11} = f$ 이 사용되었으며, 과응력 불변체와 유효 비탄성 변형률 속도는 각각 $\Gamma = |\sigma - g|$, $\dot{\phi} = |\dot{\varepsilon}^{in}|$ 이 사용되었다. 일정한 변형률 속도 하에

서식 (10a, b, c)에 대한 적분 형태의 표현은 다음과 같다.

$$(\sigma - g) = (\sigma_0 - g_0) \exp \left[- \int_{t_0}^t \frac{1}{k} d\zeta \right] + \int_{t_0}^t E \left(\dot{\varepsilon} - \frac{\dot{g}}{E} \right) \exp \left[- \int_{\zeta}^t \frac{1}{k} ds \right] d\zeta \quad (11)$$

$$(g - f) = (g_0 - f_0) \exp \left[- \int_{t_0}^t \frac{\psi |\dot{\varepsilon}^{in}|}{A_c + |A + \beta\Gamma|} d\zeta \right] + \int_{t_0}^t \psi \dot{\varepsilon}^{in} \exp \left[- \int_{\zeta}^t \frac{\psi |\dot{\varepsilon}^{in}|}{A_c + |A + \beta\Gamma|} ds \right] d\zeta \quad (12)$$

$$A = A_f + (A_0 - A_f) \exp \left[- \int_{t_0}^t A_r |\dot{\varepsilon}^{in}| d\zeta \right] \quad (13)$$

여기서 하첨자 “0”은 시간 $t = t_0$ 에서 변수의 초기값을 나타낸다. 식 (11), (12), (13)은 무한 시간의 극한에 대하여 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\{\sigma - g\} = \left(E - \left\{ \frac{dg}{d\varepsilon} \right\} \right) \{\dot{\varepsilon}\} \quad (14)$$

$$\{g - f\} = \left(1 - \frac{1}{E} \left\{ \frac{df}{d\varepsilon} \right\} \right) \left\{ \frac{A_c + |A_f + \beta\Gamma|}{|\dot{\varepsilon}^{in}|} \right\} \dot{\varepsilon} \quad (15)$$

$$\{A\} = A_f \quad (16)$$

여기서 기호 {}은 각각의 점근치를 나타낸다. 식 (11), (12), (13)을 미분하고 $t \rightarrow \infty$ 에 대한 극한을 취하면 다음을 얻는다.

$$\left\{ \frac{d\sigma}{d\varepsilon} \right\} = \left\{ \frac{dg}{d\varepsilon} \right\} = \left\{ \frac{df}{d\varepsilon} \right\} \quad (17)$$

$$\{A\} = 0 \quad (18)$$

점근 상태에서의 과응력을 식 (10a), (10c), (17)을 사용하여 다음과 같이 표현된다.

$$\{\sigma - g\} = \frac{E}{1 + E_t/E} \{k[\Gamma]\} \dot{\varepsilon} \quad (19)$$

위의 식은 과응력이 점성함수 $k[\Gamma]$ 을 통해 변형률 속도에 비선형적으로 비례하고 있음을 나타내고 강화함수에 의해 영향 받지 않음을 보여준다. 따라서 식 (10a)와 식 (19)로부터 구성방정식이 중성 또는 음성의 속도민감도를 나타내는 재료의 크리프($\dot{\sigma} = 0$)와 릴랙세이션($\dot{\varepsilon} = 0$) 거동에서도 양성의 속도민감도의 거동들과 마찬가지로 크리프 변형률과 이완된 응력이 경험된 하중 속도에 비선형적으로 비례하게 되는 정상적인 거동을 모델링할 수 있음을 알 수 있다.⁽¹³⁻¹⁵⁾ 동응력은 식 (10c)와 식 (19)에 의해 점근 상태에서 속도에 독립적인 특성

을 갖게 된다.

식 (10a), (17), (19)를 사용하면 식 (15)는 다음과 같이 표현된다.

$$\{g-f\} = \left\{ A_c + |A_f + \beta\Gamma| \right\} \left\{ \frac{\sigma-g}{\Gamma} \right\} \quad (20)$$

$\beta=0$ 일 때 평형응력은 속도에 독립적인 상태변수가 되어 경험된 변형률 속도에 의존하는 릴렉세이션 거동을 설명할 수 없게 되므로 강화함수는 실제적인 릴렉세이션 거동을 모델링하기 위하여 $\beta < 0$ 의 조건을 만족하여야 한다.⁽¹⁴⁾ 완전히 진전된 비탄성 영역에서의 응력과 동응력의 차에 대한 표현은 위 식으로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\{\sigma-f\} = \left\{ A_c + |A_f + \beta\Gamma| + \Gamma \right\} \left\{ \frac{\sigma-g}{\Gamma} \right\} \quad (21)$$

$A_f + \beta\Gamma < 0$ 인 경우에 속도 의존적인 항의 유동응력에 대한 기여는 항상 양성적이 되므로 유동응력은 양성의 속도민감도만을 나타내게 되며, $A_f + \beta\Gamma \geq 0$ 의 경우는 유동응력이 강화함수의 값에 의존하여 양성, 중성 또는 음성의 속도민감도를 나타내게 된다.⁽¹⁴⁾ 이론의 이러한 기본적인 특성을 이용하여 동적 변형시효에서 발생하는 변형률 또는 변형률 속도에 의존하는 음성의 속도민감도를 모델링하고, 평형응력의 성장식에 있는 동적 회복 항의 기여를 조절함으로써 매우 큰 변형률 속도 하에서의 급격한 유동응력의 증가를 모델링하는 것이 가능하게 된다.

3. 수치해석

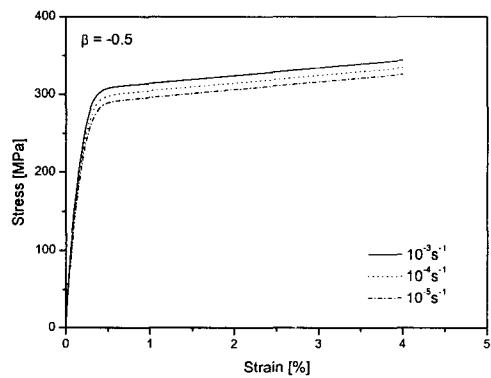
제안된 이론의 정성적인 성질들을 살펴보기 위하여 가상 재료(hypothetic material)에 대하여 Table 1에 주어진 임의로 선정된 재료상수를 사용하여 수치해석은 수행되어 진다. 일정한 온도에서 발생하는 동적 변형시효의 변형률 또는 변형률 속도에 대한 의존성을 모델링하기 위하여 강화함수는 누적 비탄성 변형률(accumulated inelastic strain) 또는 유효 비탄성 변형률 속도(effective inelastic strain rate)로 각각 정의된다. 동 소성의 기본적인 특성 중의 하나인 매우 큰 변형률 속도에서의 급격하게 증가된 속도민감도를 설명하기 위하여 유효 비탄성 변형률 속도의 함수로 정의되는 강화함수는 사용되어 Stout 와 Follansbee⁽⁸⁾에 의해 수행된 304L 스테인레스 강의 거동에 적용된다.

3.1 동적 변형시효

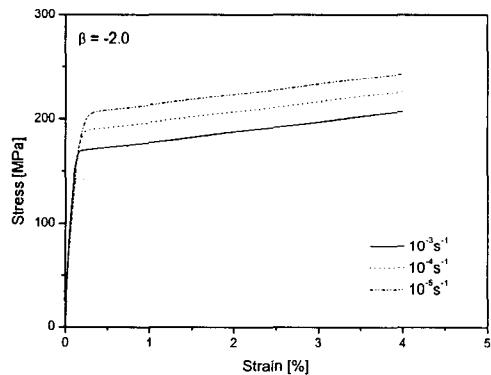
동적 변형시효에 대한 시험들^(2,3,4)은 이 현상이 일정한 변형률 범위에서 발생하는 것을 보여준다. 이러한 거동을 모델링하기 위하여 강화함수는 다

Table 1 Material constants

	Hypothetic Material	304L
$E [MPa]$	200000	195000
$E_t [MPa]$	1000	2300
$A_0 [MPa]$	250	200
$A_c [MPa]$	10	5
β	Defined	Defined
$\psi [MPa]$	300000	100000
$k_1 [s]$	300000	100000
$k_2 [MPa]$	70	100
k_3	16	18



(a) Positive rate sensitivity



(b) Negative rate sensitivity

Fig. 1 Stress-strain diagram when the augmentation function is kept constant

음과 같이 누적 비탄성 변형률의 함수로 정의된다.

$$\beta = \beta_1 \exp(-\beta_2 p) + \beta_3 \quad (22)$$

여기서 누적 비탄성 변형률의 정의는 $p = \int_0^t |\dot{\epsilon}^m| d\zeta$

이며, 강화함수는 초기치인 $\beta[0] = \beta_1 + \beta_3$ 부터 종료치인 $\beta[\infty] = \beta_3$ 까지 변형률에 따라 연속적으로 변하게 된다. 상수 β_1 과 β_3 를 적절하게 선택함으

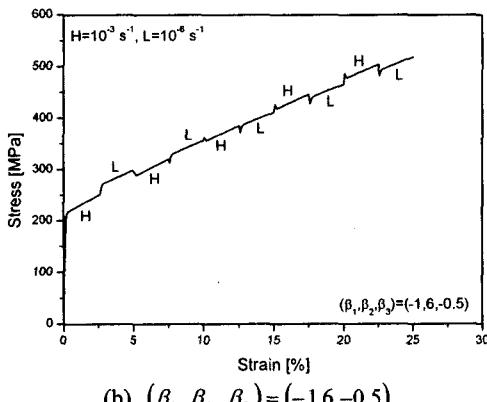
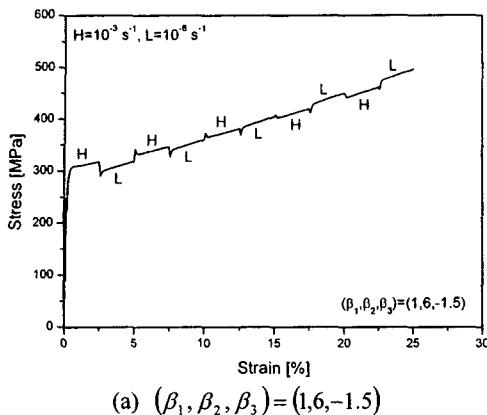


Fig. 2 The augmentation function is a function of the accumulated inelastic strain given by Equation (22). The strain rate alternates between high ($H = 10^{-3} s^{-1}$) and low ($L = 10^{-6} s^{-1}$)

로써 응력-변형률 곡선의 속도민감도는 변형이 진행함에 따라 양성에서 음성 또는 음성에서 양성으로 중성의 속도민감도를 수반하며 변하게 되며, 이 때의 변화 속도는 상수 β_2 에 의해 조절된다.

Figure 1(a, b)는 $10^{-3} - 10^{-5} s^{-1}$ 의 변형률 속도에서 강화함수가 일정할 때의 응력-변형률 곡선을 보여준다. $\beta = -0.5$ 은 유동응력이 하중속도가 증가함에 따라 증가하는 양성의 속도민감도, $\beta = -2.0$ 은 유동응력이 하중속도가 증가함에 따라 감소하는 음성의 속도민감도를 나타낸다.

Figure 2는 변형률 속도가 $10^{-3} s^{-1}$ 과 $10^{-6} s^{-1}$ 사이에서 주기적으로 변하는 수치 해석의 결과를 보여준다. Figure 2(a)에서 강화함수는 양성의 속도민감도를 모델링하기 위한 조건($\beta > -1$)인 $\beta = -0.5$ 에서 시작하여 음성의 속도민감도에 대한 조건($\beta < -1$)을 만족하는 $\beta = -1.5$ 까지 변형이 진행함에 따라 변하게 된다. 따라서 변형 초기에는 양성

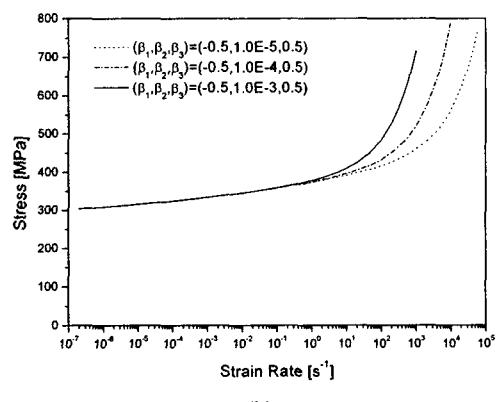
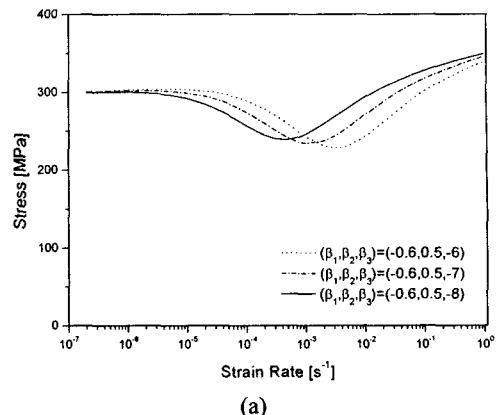


Fig. 3 Stress at 3% strain versus strain rate. The augmentation function of (a) and (b) is the function of the effective inelastic strain rate given by Eq. (23) and Eq. (24), respectively

의 속도민감도를 갖게 되고 변형이 진행되면서 중성의 속도민감도(조건은 $\beta = -1$)를 통하여 음성의 속도민감도를 갖게 된다. Figure 2(b)에서는 재료의 비탄성 거동이 진행함에 따라 강화함수가 $\beta = -1.5$ 에서 $\beta = -0.5$ 까지 연속적으로 증가하는 상태를 나타낸다. 따라서 응력-변형률 곡선은 양성의 속도민감도를 수반하는 초기 음성의 속도민감도를 보여준다.

다음으로, 변형률 속도에 의존적인 동적 변형시효 현상이 고려된다. 변형률에는 독립적이며 변형률 속도에만 의존적인 발생 가능한 거동을 모델링하기 위하여 강화함수는 유효 비탄성 변형률 속도의 함수로 다음과 같이 정의된다.

$$\beta = \beta_1 - \sec h(\beta_2 (\ln |\dot{\epsilon}'^m| - \beta_3)) \quad (23)$$

여기서 $\beta[0] = \beta[\infty] = \beta_1$ 이다. 정의된 강화함수의 상수인 β_1 , β_2 그리고 β_3 는 비탄성 변형률 속도의 어떤 범위에 대하여 음성의 속도민감도 조건인

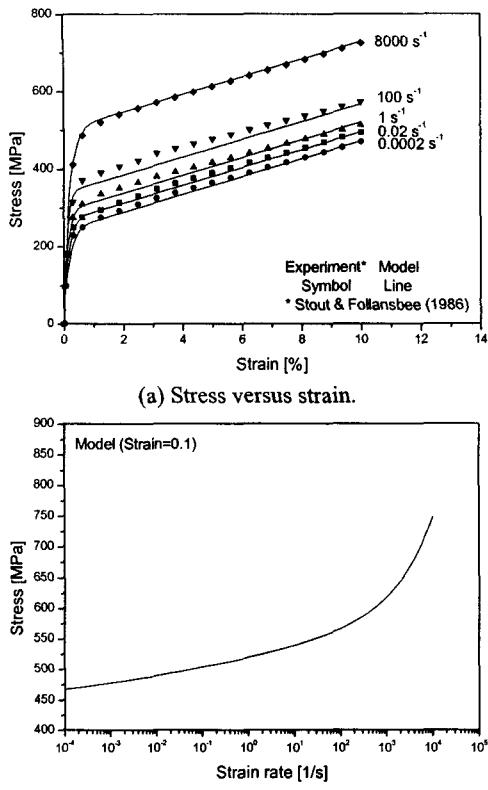


Fig. 4 Strain rate sensitivity of 304L stainless steel

$\beta < -1$ 을 만족하도록 선택되어진다. 따라서 이 범위를 벗어나는 비탄성 변형률 속도에서는 양성의 속도민감도가 발생하게 된다.

Figure 3(a)는 β_1 과 β_2 는 일정하게 유지하고 β_3 를 변화시킴으로써 음성의 속도민감도를 나타내는 변형률 속도의 영역이 변화될 수 있는 것을 보여준다. β_3 가 $\beta_3 = -6$ 에서 $\beta_3 = -8$ 으로 감소함에 따라 음성의 속도민감도를 나타내는 영역이 변형률 속도가 낮은 영역으로 이동하게 된다.

3.2 동 소성에서의 속도민감도

재료는 매우 큰 변형률 속도에서 급격한 유동응력의 증가를 나타낸다. 이러한 특성은 평형응력의 성장식을 구성하는 동적 회복 항의 기여를 변형률 강화 항의 것보다 상대적으로 작게 함으로써 모델링 되어진다. 따라서 강화함수는 다음과 같이 유효 비탄성 변형률 속도의 함수로 정의되어 변형률 속도가 매우 큰 경우에 동적 회복 항의 기여를 감소시키게 된다.

$$\beta = \beta_1 + (\beta_2 |\dot{\varepsilon}^m|)^{\beta_3} \quad (24)$$

Figure 3(b)는 변형률 속도에 따른 3% 변형률에

서 유동응력의 변화를 보여준다. β_2 가 증가함에 따라 급격한 유동응력의 증가 현상이 낮은 변형률 속도에서부터 시작된다.

다음으로, 위에서 설명된 모델링 능력을 Stout 와 Follansbee 에 의해 수행된 304L 스테인레스 강의 거동에 적용하여 보기로 한다. Figure 4 는 Table 1 에 주어진 재료상수를 사용하여 수행된 수치해석과 시험의 비교를 보여준다. Stout 와 Follansbee 에 의한 압축 시험은 0.1s^{-1} 보다 작은 변형률 속도에서는 등온의 조건에서 그리고 이보다 큰 변형률 속도에서는 단열의 조건에서 수행되었으므로 응력-변형률 곡선이 $\varepsilon = 10\%$ 이상의 변형률 영역에서는 서로 교차하게 되었다. 따라서 Stout 와 Follansbee 에 의해 언급되었듯이 시험 중에 온도의 상승이 무시될 수 있는 $\varepsilon = 10\%$ 까지의 변형률 영역에 대해서만 모델링이 수행되어 Fig. 4 에서 시험과 비교되었다.

Figure 4(a)에서 보는 바와 같이 급격한 유동응력의 증가는 100s^{-1} 이상의 변형률 속도에서 발생하고 있으며 모델링은 시험적인 결과와 잘 일치한다. 유동응력의 속도민감도를 표현하는 전통적인 방법은 일정한 변형률에서 응력을 로그 척도의 변형률 속도에 대하여 표현하는 것이다. Figure 4(b)는 이러한 방법을 사용하여 표현된 것으로 매우 큰 변형률 속도에서 유동응력의 급격한 증가 현상이 명확하게 나타난다.

4. 결 론

재료의 동적 변형시효에서 나타나는 응력-변형률 곡선에서 유동응력의 음성 및 중성의 속도민감도는 구성방정식의 상태변수인 평형응력의 성장식을 구성하는 동적 회복 항에 포함된 강화함수의 값에 대한 수학적 조건에 의하여 일관성 있게 설명된다. 이러한 구성방정식의 모델링 특성을 이용함으로써 강화함수를 누적 비탄성 변형률 또는 비탄성 변형률 속도의 함수로 정의하여 동적 변형시효의 변형률 또는 변형률 속도에 대한 의존적인 거동을 모델링 하였다. 또한 매우 큰 변형률 속도에서 나타나는 유동응력의 급격한 증가는 강화함수에 의해 동적 회복 항의 영향을 감소시켜 설명함으로써 304L 스테인레스 강의 거동에 적용되었다.

후 기

에 의하여 연구되었습니다(KRF-2002-003-D00002).

참고문헌

- (1) Penning, P., 1972, "Mathematics of the Portevin-LeChatelier Effect," *Acta Metallurgica*, Vol. 22, pp. 1169~1175.
- (2) Miller, A.K. and Sherby, O.D., 1978, "A Simplified Phenomenological Model for Non-Elastic Deformation: Prediction of Pure Aluminum Behavior and Incorporation of Solute Strengthening Effects," *Acta Metallurgica*, Vol. 26, pp. 289~304.
- (3) Mulford, R.A. and Kocks, U.F., 1979, "New Observation on the Mechanisms of Dynamic Strain Aging and of Jerky Flow," *Acta Metallurgica*, Vol. 27, pp. 1125~1134.
- (4) Kalk, A. and Schwink, CH., 1992, "On Sequences of Alternate Stable and Unstable Regions Along Tensile Deformation Curves," *Physica Status Solidi*, Vol. 172, pp. 133~144.
- (5) Cottrell, A.H., 1953, "A Note on the Portevin-LeChatelier Effect," *Philosophy Magazine*, Vol. 44, pp. 829~832.
- (6) McCormick, P.G., 1972, "A model for the Portevin-LeChatelier Effect in Substitutional Alloys," *Acta Metallurgica*, Vol. 20, pp. 351~354.
- (7) Kubin, L.P. and Estrin, Y., 1985, "The Portevin-LeChatelier Effect in Deformation with Constant Stress Rate," *Acta Metallurgica*, Vol. 33, pp. 397~407.
- (8) Stout, M.G. and Follansbee, P.S., 1986, "Strain Rate Sensitivity, Strain Hardening, and Yield Behavior of 304L Stainless Steel," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 108, pp. 344~353.
- (9) Clifton, R.J., 1990, "High Strain Rate Behavior of Metals," *Applied Mechanics Review*, Vol. 43, pp. S9~S22.
- (10) Bodner, S.R. and Rubin, M.B., 1994, "Modeling of Hardening at Very High Strain Rates," *Journal of Applied Physics*, Vol. 76, pp. 2742~2747.
- (11) Krausz, A. S. and Krausz, K., 1996, "Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation," Academic Press, San Diego.
- (12) Krempl, E. and Ho, K., 2000, "An Overstress Model for Solid Polymer Deformation Behavior Applied to Nylon 66," *Time Dependent and Nonlinear Effects in Polymers and Composites, ASTM STP 1357*, American Society for Testing and Materials, pp. 118~137.
- (13) Krempl, E. and Ho, K., 2001, "The Overstress Model Applied to Normal and Pathological Behavior of Some Engineering Alloys," *IUTAM Symposium on Creep in Structures*, S. Murakami and N. Ohno, Editors, Kluwer Academic Publishers, pp. 361~373.
- (14) Kwangsoo Ho, 2002, "A Generalized Viscoplasticity Theory Based on Overstress," *Trans. of the KSME(A)*, Vol. 26, No. 10, pp. 1953~1960.
- (15) Ho, K. and Krempl, E., 2000, "Modeling of Positive, Negative and Zero Rate Sensitivity by Using the Viscoplasticity Theory Based on Overstress (VBO)," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 4, pp. 21~42.
- (16) Ho, K. and Krempl, E., 2002, "Extension of the Viscoplasticity Theory Based on Overstress (VBO) to Capture Non-Standard Rate Dependence in Solids," *International Journal of Plasticity*, Vol. 18, pp. 851~872.
- (17) Sweeneengen, J.C., Lowe, T.C. and Lipkin, J., 1985, "Constitutive Equations for Rate-Dependent Plasticity," *Annual Review of Materials Science*, Vol. 15, pp. 249~270.
- (18) Freed, A.D., Chaboche, J.-L. and Walker, K.P., 1991, "On the Thermodynamics of Stress Rate in the Evolution of Back Stress in Viscoplasticity," NASA TM-103794.