

과응력에 기초하여 일반화된 점소성 이론

호 광 수*

(2001년 3월 2일 접수, 2002년 7월 26일 심사완료)

A Generalized Viscoplasticity Theory Based on Overstress

Kwangsoo Ho

Key Words : Viscoplasticity Theory(점소성 이론), Overstress(과응력), Strain Rate Sensitivity(변형률 속도민감도), Dynamic Strain Aging(동적 변형시효), Flow Stress(유동응력)

Abstract

The viscoplasticity theory based on overstress, one of the unified state variable theories, is generalized to model zero (no influence of loading rate) and negative (flow stress decreases with loading rate) as well as positive (flow stress increases with loading rate) rate sensitivity in a consistent way. On the basis of the long-time asymptotic solution the different types of rate sensitivity are classified with respect to an augmentation function that is introduced in the evolution law for a state variable equilibrium stress. The theory predicts normal relaxation and creep behaviors even if unusual rate sensitivity is modeled. The constitutive model for the behavior of a modified 9Cr-1Mo steel at various temperatures is then compared with experimental data found in the literature.

1. 서론

재료의 속도 의존적인 거동(rate-dependent deformation)을 설명하는 구성방정식은 기계 구조물의 안전성과 경제성을 증가 시키기 위하여 꾸준히 연구되어 왔다. 소성과 크리프(creep)에 대한 전통적인 모델링 방법들은 그들이 하중(loading), 해중(unloading), 재하중(reloading)의 이력(history)들을 경험하는 재료의 거동에 적용되어질 때 주요한 해석적 결함들을 보여왔음은 주지의 사실이다. 재료에 대한 시험 결과들로부터 이전에 경험된 소성 변형은 현재의 크리프 거동에 영향을 주며, 또한 경험된 크리프는 바로 다음에 진행되는 소성 변형에 작용함을 알 수 있다. 그러나 전통적인 소성 및 크리프 이론들은 서로 독립적으로 제안되었으므로 이들의 상호 작용들을 효과적으로 설명할 수 없었다. 이러한 사실에 근거하여, 소성 및 크리프 거동을 서로 분리된, 독립적인 재료의 거동 양상

으로 고려하지 않는 통합된 상태변수 이론(unified state variable theory)들이 개발되었다.⁽¹⁾

상태변수 이론들에서는 재료의 비탄성 거동(inelastic deformation)을 지속적으로 변화하는 재료의 내부구조(internal structure)에 의하여 야기되는 것으로 고려한다. 따라서 재료의 미세구조(microstructure)에 대한 특징들과 변형에 따른 이들의 변화를 상태변수 및 이의 성장식들로 표현한다 지금까지 이러한 이론들은 상온이나 고온에서 재료의 비탄성 거동에 대한 모델링에 적용되어 왔으며, 특히 이들의 대부분은 양성의 속도민감도(positive rate sensitivity), 즉 유동응력이 하중 속도가 증가함에 따라 증가하는 재료의 거동 양식에 국한되어 적용되어 왔다. 그러나 재료는 동적 변형시효(dynamic strain aging) 영역에 해당되는 특정한 온도 영역에서 양성의 속도민감도 및 중성(zero) 또는 음성(negative)의 속도민감도를 보이므로, 이 영역에서의 특이한 거동 양상에 대한 설명이 구성 방정식을 통해 이루어져야만 한다. 여기서 동적 변형시효 현상은 텅니 모양의 응력-변형률 곡선, 중성 또는 음성의 속도민감도 그리고 온도의 증가에 따른 연성의 감소를 동반한 인장 강

* 회원, 계명대학교 기계자동차공학부
E-mail : hok@kmu.ac.kr
TEL : (053)580-5546 FAX : (053)813-3703

도의 증가 등으로 특징 지워진다.^(2,3) 동적 변형시효의 관점에서 볼 때, 음성의 속도민감도는 재료가 톱니 모양의 응력-변형을 곡선을 보이기 위한 선행 조건으로 인식되어 진다.^(3,4)

본 연구의 목적은 통합된 상태변수 이론의 하나로써 Krempl 등⁽⁵⁾이 개발하여온 과응력(overstress)에 기초한 점소성 이론을 바탕으로, 모든 종류의 속도 민감도들과 일반적인 비탄성 거동들을 일관성 있게 설명할 수 있었던 이전의 점소성 이론^(6,7)을 단순화하고 일반화 시키는 데에 있다. 이러한 일반화는 구성방정식이 열역학의 제 2 법칙을 만족시키도록^(5,8) 평형응력(equilibrium stress)의 성장식에서 응력률(stress rate)의 항을 제거 함으로써 이루어진다. 그러나 평형응력은 성장식의 동적 회복 항에 도입된 강화함수에 의하여 속도 의존적이 되기 때문에 제안된 구성방정식은 재료에서 관찰되는 릴랙세이션(relaxation) 거동을 잘 설명할 수 있게 된다.

2. 이론

2.1 구성방정식

본 논문은 등은 조건하에서 인장 또는 압축을 경험하는 1 차원 문제의 재료 거동을 그 대상으로 한다. 또한 미소변형, 등방성 그리고 비압축성의 비탄성 거동이 가정되어 진다. 여기서 제안되는 1 차원의 구성방정식은 단지 텐서(tensor) 구조를 검토함으로써 일반적인 3 차원 문제, 즉 복합하중 조건하에서 사용될 수 있는 구성방정식으로 확장되어질 수 있다.^(5,6)

제안되는 구성방정식은 항복 조건, 하중 및 해중 조건들을 사용하지 않는, 일련의 비선형적으로 결합된 상미분 방정식들로 구성된다.

전체 변형률 속도는 탄성과 비탄성 변형률 속도의 합으로 다음과 같이 가정된다.

$$\dot{\epsilon} = \dot{\epsilon}^e + \dot{\epsilon}^m = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{(\sigma - g)}{Ek[\Gamma]} \quad (1)$$

여기서, σ 는 진응력, ϵ 는 진변형률, E 는 탄성계수이다. 과응력은 응력과 평형응력의 차, $\sigma - g$ 로 정의되며, 비탄성 변형률 속도를 형성하는데 사용되는 응력을 의미한다.

식 (1)로부터 $\sigma = g$ 일 때 $\dot{\epsilon}^m = 0$ 임을 알 수 있다. 그러므로 평형응력 g 는 재료에 존재하는 장애 강도(obstacle strength)의 정도를 나타내는 것으로 해석되며, 정지 상태에서 지지 될 수 있는 응력으로 해석된다. 점성함수(viscosity function) $k[\Gamma]$

는 재료의 비선형 속도 의존성을 야기시키는 역할을 수행하며, 과응력 불변체(overstress invariant) $\Gamma = |\sigma - g|$ 의 연속 함수로 정의된다.

상태변수인 평형응력, 동응력(kinematic stress)의 성장식은 각각 다음과 같다.

$$\dot{g} = \psi \left[\frac{(\sigma - g)}{Ek} - \frac{(g - f)}{A_c + |A + \beta|} \left| \frac{\sigma - g}{Ek} \right| \right] + \dot{f} - rg \quad (2)$$

$$\dot{f} = E_t \frac{(\sigma - g)}{Ek} \quad (3)$$

여기서, A_c 은 양의 재료 상수이며 r 은 고온에서의 발산 효과에 의해 야기된 재료의 연화(softening)를 설명하기 위하여 도입된다. 비탄성 변형률에 기초한 E_t 는 $\dot{E}_t = E_t / (1 + E_t / E)$ 의 관계식을 통하여 전체 변형률 속도에 기초한 탄젠트 계수(tangent modulus) \dot{E}_t 와 관련되는 재료상수이다.

양의 형상함수(shape function) ψ 는 초기 준탄성(quasi-elastic) 영역으로부터 완전히 진전된 비탄성 유동 영역으로의 천이 거동을 설명하기 위해서 도입되는 재료상수이다. $A_c + |A + \beta| > 0$ 의 항은 구속 조건 없이 양성, 중성 그리고 음성의 속도민감도를 일관성 있게 모델링하기 위하여 평형응력에 대한 성장식의 동적회복 항에 도입되어 지며, 평형응력을 속도 의존적인 상태 변수로 만든다. 이러한 성질에 의해 일반적으로 관찰되는 이전에 경험된 변형률 속도에 비선형적으로 의존하는 릴랙세이션 거동을 모델링 하는데 응력률의 항이 제거된 평형응력의 성장식이 사용될 수 있게 된다. 속도 독립적인 동응력의 주요 목적은 응력-변형을 곡선의 최종 경화 속도를 설명하는 데에 있다.

강화함수 β 는 상수로 정의되어 사용될 수 있고, 또한 변형률, 변형률 속도, 온도등과 같은 특별한 변수 또는 그들의 함수로 정의되어지는 경우에는 변수들의 변화에 따른 속도민감도의 변화, 속도 의존적인 반복강화(cyclic hardening)를 동반하는 반복연화(cyclic softening) 또는 그 반대, 동소성(dynamic plasticity)의 관심인 매우 큰 변형률 속도에서의 급격히 증가된 강화 현상, 3 차 크리프 등의 모델링에 매우 효과적으로 사용될 수 있다.⁽⁶⁾

상태변수인 등방응력(isotropic stress)은 속도 독립적인 반복강화 또는 반복연화를 설명하기 위하여 초기치 $A(t=0) = A_0$ 와 함께 다음과 같은 성장식을 갖는다.

$$\dot{A} = A_t (A_f - A)^p \quad (4)$$

여기서, $p = \int |\dot{\epsilon}|^m dt$ 는 누적된 비탄성 변형률, A_f 는 등방응력의 포화치 그리고 A_c 는 등방응력의 성장 속도를 조절하는 재료상수 이다.

점성함수 $k[\Gamma]$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$k = k_1 \left(1 + \frac{\Gamma}{k_2} \right)^{-k_3} \quad (5)$$

여기서, k_1, k_2, k_3 는 재료상수 이다.

2.2 점근해(asymptotic solution)

일정 변형률 속도 시험에 대하여 구성방정식은 수학적으로 무한 시간에서의 해에 해당하는 점근해들을 갖는다. 이러한 해들은 비탄성 변형이 완전히 진전되었을 경우, 즉 재료가 유동응력 영역에 도달 하였을 때 실질적으로 적용 되어 진다. 이들은 구성방정식의 미분 형태로부터 변환된 적분 형태의 방정식들로부터 얻어지며, 제안된 이론의 기본적인 특징들을 이해하는데 도움이 된다.^(6,9)

제안된 구성방정식에 대해 정적회복이 없는 경우에($r=0$) 다음의 관계식들^(5,6)이 얻어 진다.

$$\left\{ \frac{d\sigma}{d\epsilon} \right\} = \left\{ \frac{dg}{d\epsilon} \right\} = \left\{ \frac{df}{d\epsilon} \right\} \quad (6)$$

$$\{\sigma - g\} = \frac{E}{1 + E_f/E} k[\Gamma] \dot{\epsilon} \quad (7)$$

$$\{g - f\} = \left\{ A_c + |A_f + \beta \Gamma| \right\} \left\{ \frac{\sigma - g}{\Gamma} \right\} \quad (8)$$

$$\{\sigma - f\} = \left\{ A_c + |A_f + \beta \Gamma| + \Gamma \right\} \left\{ \frac{\sigma - g}{\Gamma} \right\} \quad (9)$$

여기서, 기호 $\{ \}$ 은 각각의 점근치를 나타낸다. 식 (6)은 응력, 평형응력 그리고 등방응력이 완전히 진전된 비탄성 유동 영역에서 모두 같은 속도로 성장함을 보여준다. 과응력이 점성함수 $k[\Gamma]$ 에 의해 전체 변형률 속도에 비선형적으로 관계되고 있음을 식 (7)로부터 알 수 있다. 또한 점성함수 $k[\Gamma]$ 는 연속적으로 감소하는 양의 함수이므로 과응력은 전체 변형률 속도가 증가함에 따라 증가 하게 된다. 앞에서 언급된 바와 같이 동응력은 속도에 독립적이기 때문에, $\beta=0$ 인 경우에 속도 의존적인 항은 사라져 평형응력은 속도에 독립적이 된다.

식 (9)은 $|A_f + \beta \Gamma|$ 의 부호를 고려하여

$$\{\sigma - f\} = \left\{ \left\{ A_c + A_f \right\}_p + \left\{ (1 + \beta) \Gamma \right\}_v \right\} \left\{ (\sigma - g) / \Gamma \right\} \quad (10a)$$

for $A_f + \beta \Gamma \geq 0$

$$\{\sigma - f\} = \left\{ \left\{ A_c - A_f \right\}_p + \left\{ (1 - \beta) \Gamma \right\}_v \right\} \left\{ (\sigma - g) / \Gamma \right\} \quad (10b)$$

for $A_f + \beta \Gamma < 0$

으로 표현된다. 유동응력의 점근치는 식 (10a,b)에서 보는 바와 같이 각각 속도 독립적인 소성

(plastic) 항과 속도 의존적인 점성(viscous) 항의 합으로 표현되어 진다. $A_f + \beta \Gamma \geq 0$ 인 경우에 속도 민감도는 강화함수에 관계되어 다음과 같이 구별되어 진다.

$$\begin{aligned} \beta < -1 & ; \text{ Negative rate sensitivity} \\ \beta = -1 & ; \text{ Zero rate sensitivity} \\ \beta > -1 & ; \text{ Positive rate sensitivity} \end{aligned} \quad (11)$$

식 (10a)에서 보는 바와 같이, $\beta = -1$ 이면 속도의 의존적인 점성 항의 기여는 사라지게 되어 재료의 유동응력은 속도에 독립적인 중성의 속도민감도를 나타내게 된다. 또한 $\beta < -1$ 과 $\beta > -1$ 의 조건은 유동응력에 대한 속도 의존적인 항의 기여가 각각 음성, 양성적으로 되는 것에 상응하여 결과적으로 유동응력은 음성, 양성의 속도민감도를 나타내게 된다. 한편, 변형률 속도가 충분히 커서 $A_f + \beta \Gamma < 0$ 이 되는 경우에 속도 의존적인 항은 유동응력에 항상 양성적인 기여를 하게 되어 양성의 속도민감도만이 나타난다. 이러한 성질을 이용하여 변형률 속도에 의존적인 동적 변형시효 현상을 원리적으로 모델링 할 수 있게 된다.

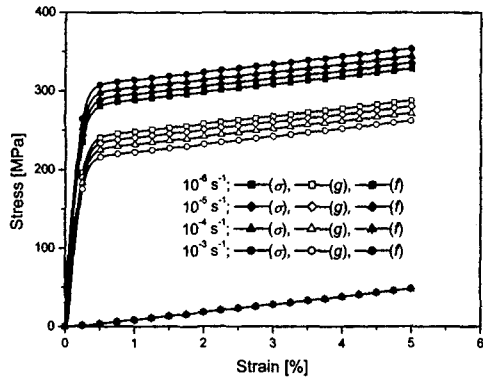
완전히 진전된 비탄성 유동 영역에서의 과응력은 식 (7)에서 나타나듯 전체 변형률 속도에 따라 비선형적으로 증가될 뿐 강화함수에 의해 영향 받지 않는다. 따라서 크리프와 릴렉세이션 거동은 재료가 어떤 형태의 속도민감도를 나타내든 항상 강화함수에 의해 직접적으로 영향 받지 않게 된다. 즉, 재료의 속도민감도에 관계없이 크리프 변형률의 크기는 이전에 경험된 응력 속도가 증가함에 따라 증가하고, 릴렉세이션 응력 감소의 크기는 이전에 경험된 변형률 속도가 증가함에 따라 증가한다. 이러한 성질들은 일반적으로 관찰된 재료의 거동과 일치됨^(6,10,11)을 보여준다.

3. 수치해석

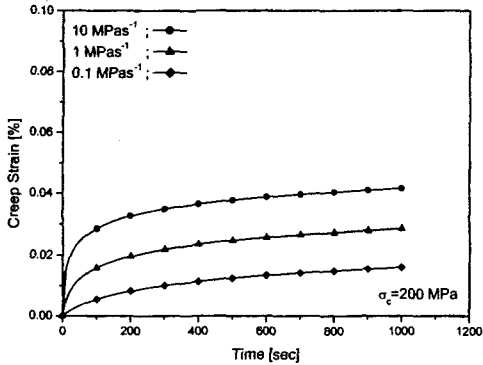
수치해석은 단순 인장 하중(monotonic tensile loading) 하에서 구성 방정식의 정성적인 성질들을 살펴보기 위하여 임의로 선택된 재료상수들을 갖는 가상 재료(hypothetical material)에 대하여 먼저 수행되어 진다. 그 다음에 제안된 모델의 타당성을 검증하기 위하여 9Cr-1Mo 강의 모델링에 적용되어 진다. 대부분의 수치해석에서 등방응력은 성장하지 않고 일정하도록 유지된다. 등방응력의 성장식은 반복 강화 또는 연화 현상을 설명하기 위하여 도입된 것으로서 성장하기 위해서는 상당히 긴 비탄성 변형률의 궤적 길이를 필요로 하기 때

Table 1 Material constants

| | Hypothetic Material | Modified 9Cr-1Mo | | |
|--------------------------|---------------------|------------------|--------|--------|
| | | 200°C | 400°C | 550°C |
| E [MPa] | 200000 | 200000 | 190000 | 165000 |
| E_i [MPa] | 1000 | 4000 | 3000 | 500 |
| A_0 [MPa] | 250 | 575 | 513 | 227 |
| A_c [s ⁻¹] | 10 | 10 | 10 | 10 |
| r [s ⁻¹] | 0 | 0 | 0 | 3.0E-7 |
| β | Defined | -1.15 | -1 | -0.45 |
| ψ | 300000 | 900000 | 600000 | 150000 |
| k_1 [s] | 300000 | 200000 | 200000 | 200000 |
| k_2 [MPa] | 70 | 60 | 180 | 250 |
| k_3 | 16 | 12 | 12 | 12 |



(a) Stresses versus strain



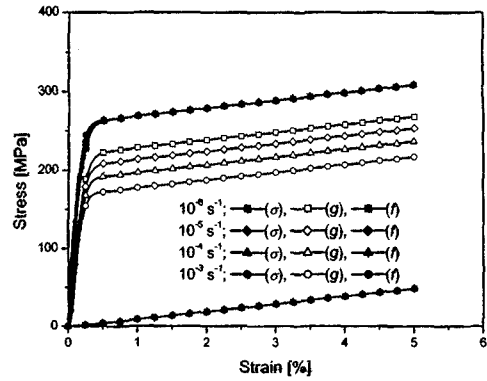
(b) Creep strain versus time

Fig. 1 Positive rate sensitivity with $\beta = -0.5$

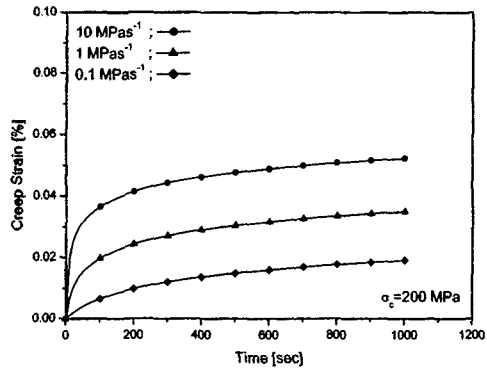
문이다. 한편, 반복 하중 하의 재료에 대한 거동을 모델링하기 위하여 등방응력이 성장하게 되는 경우에도 단순 하중에서 이의 성장은 매우 작으므로 일정한 것으로 간주될 수 있다.

3.1 가상 재료

Table 1 에 주어진 재료상수를 사용하여 각각의 속도 민감도에 대한 수치해석을 수행하였다.



(a) Stresses versus strain



(b) Creep strain versus time

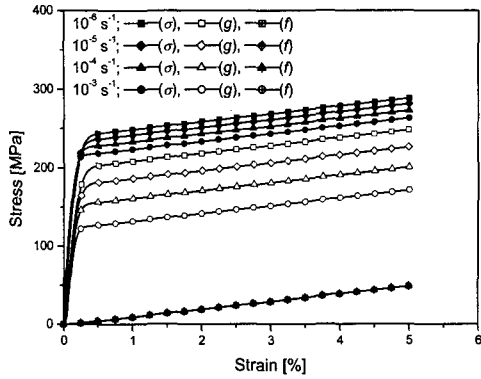
Fig. 2 Zero rate sensitivity with $\beta = -1$

$\beta = -0.5$ 에 대한 Fig. 1(a)는 유동응력이 양성의 속도민감도를 나타냄을 보여주며, 또한 식 (7)에서 예측되듯 과응력은 변형을 속도에 따라 비선형적으로 증가함을 보여준다. 응력, 평형응력 그리고 동응력은 식 (6)에서 표현된 바와 같이 완전히 진전된 유동응력 영역에서 같은 속도로 성장하며, 동응력은 변형을 속도에 독립적이다.

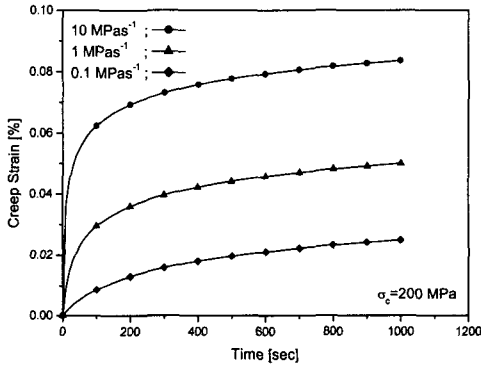
$\beta = -1$ 에 대한 Fig. 2(a)와 $\beta = -1.5$ 에 대한 Fig. 3(a)는 각기 중성(유동응력은 변형을 속도에 상관 없이 일정), 음성(유동응력은 변형을 속도가 증가함에 따라 감소)의 속도민감도를 보여준다.

Figs. 1(b), 2(b), 3(b)는 $\sigma_c = 200MPa$ 의 일정 응력 조건에서 이전에 경험된 하중 속도의 영향을 보여준다. 앞에서 언급된 바와 같이 과응력은 하중 속도에 비선형적으로 비례하기 때문에 단지 과응력에만 의존하는 크리프 변형률의 크기는 유동응력의 속도민감도에 상관 없이 경험된 하중 속도에 비례하여 증가한다.

식 (1)에서 예측되는 바와 같이, 릴렉сей션 시험 동안 응력은 평형응력에 지속적으로 접근하여

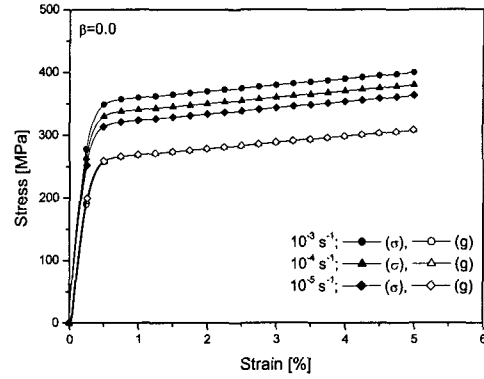


(a) Stresses versus strain

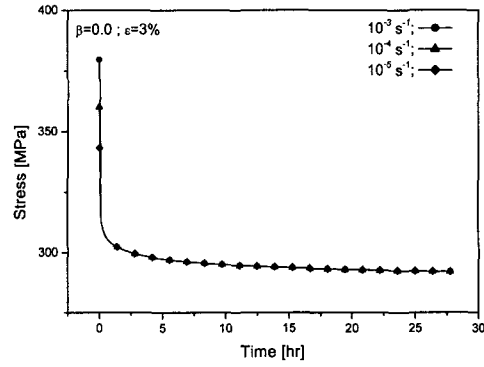


(b) Creep strain versus time

Fig. 3 Negative rate sensitivity with $\beta = -1.5$



(a) Stresses versus strain



(b) Stress versus time

Fig. 4 Relaxation behavior for $\beta = 0$

궁극적으로 같아지게 될 때에 릴렉세이션은 종료된다. Figs. 4, 5, 6은 유동응력이 양성의 속도 민감도를 보일 때($\beta > -1$), 릴렉세이션 거동의 경향에 대한 강화 함수의 영향을 보여 준다.

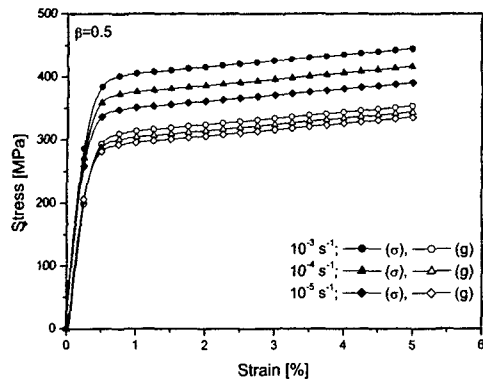
$\beta = 0$ 에 대한 Fig. 4(a)에서 평형응력은 완전히 진전된 비탄성 유동응력 영역에서 증성의 속도민감도를 나타내고, Fig. 4(b)는 일정 변형률 $\epsilon = 3\%$ 하에서의 릴렉세이션 시험을 보여준다. 평형응력은 시험 바로 전까지 속도에 독립적이고 시험 동안 거의 변하지 않기 때문에 이전의 경험된 변형률 속도에 대한 응력들은 Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이 시험의 종료 시 모두 한 점에서 만나게 된다.

Fig. 5는 $\beta = 0.5$ 에 대한 것으로, 평형응력은 양성의 속도 민감도를 나타내어 릴렉세이션 시험의 종료 점에서 가장 빠른 이전의 경험된 변형률 속도의 응력이 가장 큰 응력 값을 갖게 된다. 일반적으로 릴렉세이션 응력은 경험된 변형률 속도가 빠를수록 낮은 값을 가지므로^(5,6,12) 앞의 두 경우($\beta \geq 0$)는 관찰된 릴렉세이션 거동을 설명하는데 적당하지 못하다.

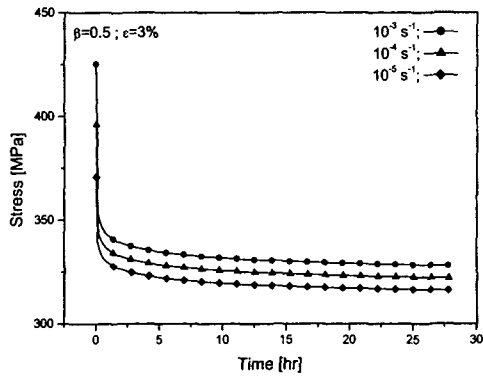
한편, $\beta = -0.5$ 에 대한 Fig. 6(a)에서 평형응력은

음성의 속도 민감도를 보여주므로, 경험된 가장 빠른 변형률 속도의 릴렉세이션 응력이 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 시험 종료 시에 가장 작은 값을 갖게 된다. 결론적으로, $\beta < 0$ 의 경우만이 상태변수의 성장식에 응력률의 항이 포함되지 않은 모델링에서 실제적인 릴렉세이션 거동을 설명하는데 사용될 수 있다. 이러한 실제적인 모델링 능력은 여러 통합된 상태변수 이론들 중에서 유일한 것⁽¹²⁾으로 유동 응력의 양성, 증성 그리고 음성의 속도민감도에 상관없이 항상 적용되어 질 수 있게 된다.

이전의 구성방정식^(6,7)에서는 평형응력의 성장식에 존재하는 응력률의 항에 의하여 평형응력은 릴렉세이션 시험 동안 크게 변하게 된다. 이러한 특성에 의해 속도에 의존적인 릴렉세이션 거동을 모델링 하는 것이 가능하였지만, 한편으로 릴렉세이션 시험에 의해 평형응력을 측정하지 못하는 단점을 갖게 되었다. 그러나 열역학 제 2 법칙에 근거하여 응력률의 항을 제거 시킨 제안된 구성방정식에서는 릴렉세이션 시험동안 평형응력은 거의 변하지 않으므로 평형응력을 측정하는 것이 가능하

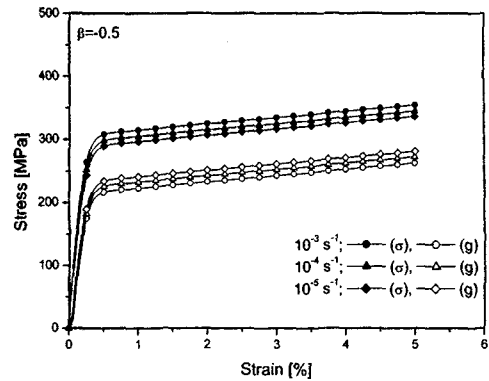


(a) Stresses versus strain

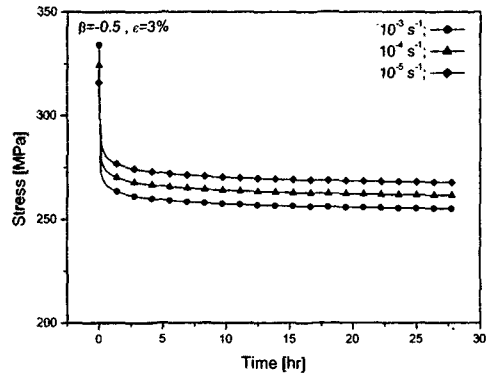


(b) Stress versus time

Fig. 5 Relaxation behavior for $\beta = 0.5$



(a) Stresses versus strain



(b) Stress versus time

Fig. 6 Relaxation behavior for $\beta = -0.5$

게 된다. 또한 $\beta = (\{\sigma_H\} - \{\sigma_L\}) / (\{\dot{\epsilon}_H\} - \{\dot{\epsilon}_L\}) - 1$ 에 의해 강화함수는 완전히 진전된 비탄성 영역에서 측정된 평형응력들을 사용하여 계산될 수 있게 된다. 여기서 하첨자 "H"와 "L"은 각각 빠르고 느린 변형률 속도에 대응하는 양을 나타낸다.

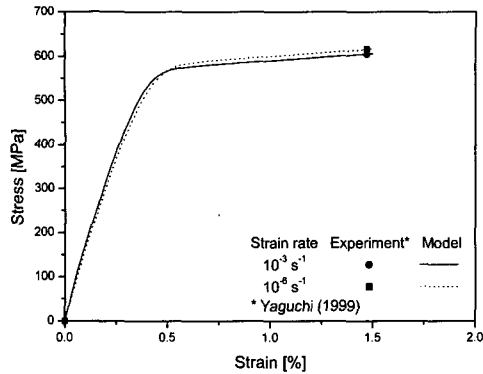
3.2 9Cr-1Mo 강

변화된 9Cr-1Mo 강에 대한 Yaguchi 와 Takahashi 의 시험⁽¹⁰⁾에서 재료의 유동응력은 500°C 이상의 온도에서 양성의 속도민감도를 보이고, 400°C 이하에서는 동적 변형시효의 한 증거인 중성 또는 음성의 속도민감도를 보인다.

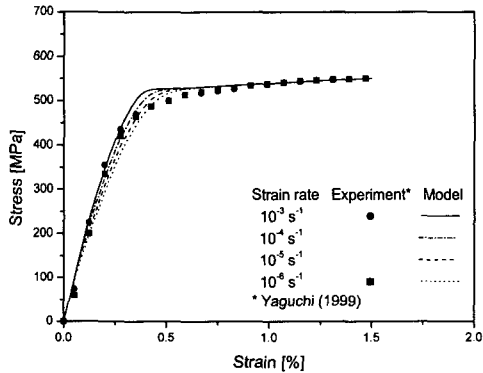
9Cr-1Mo 강에 대한 시험 결과들을 모델링하기 위하여 사용된 재료상수들은 완전히 진전된 비탄성 영역에서의 릴렉세이션 시험으로부터 측정된 평형응력에 기초한 점근해석의 결과 및 시행착오법⁽¹³⁾으로부터 얻어지며, 그 결과는 각각의 온도에 대하여 Table 1 에 나타나 있다. 응력-변형률 곡선에서 유동응력의 속도민감도는 강화함수의 값에 의해 판별되어짐을 보여주는 식 (11)에 근거하여, $\beta = -1.15$ 를 사용하여 200°C 에서 나타나는 음성

의 속도민감도, $\beta = -1$ 로 400°C 에서 나타나는 중성의 속도민감도, $\beta = -0.45$ 으로 550°C 에서 나타나는 양성의 속도민감도를 각기 모델링한다.

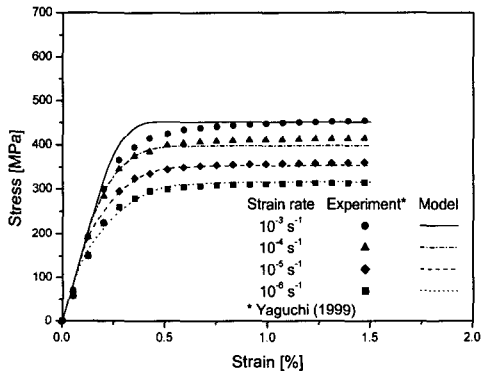
Fig. 7(a)에서 보여진 Yaguchi 와 Takahashi 의 시험은 $10^{-3} s^{-1}$ 과 $10^{-6} s^{-1}$ 에 대한 $\epsilon = 1.5\%$ 에서의 유동응력만을 나타낸다. 구성방정식이 음성의 속도민감도를 잘 모델링 함이 보여진다. Fig. 7(b)에서 유동응력은 비탄성 영역에서는 중성의 속도민감도를 보여주고, 완전히 진전된 비탄성 영역 이전의 초기 준탄성 영역에서는 응력이 양성의 속도민감도를 나타내고 있다. 유동응력이 양성의 속도민감도를 보이는 것은 Fig. 7(c)에 나타나 있는데, 이때 모델링을 수행함에 있어 고온에서의 발산에 의한 재료의 연화를 고려하여 $A_f = 2.6 \times 10^{-6} s^{-1}$ 과 $A_r = 100 MPa$ 이 사용되었다. Fig. 8 은 각각의 온도에서 두 변형률속도 $10^{-3} s^{-1}$ 과 $10^{-6} s^{-1}$ 에 대한 $\epsilon = 1.5\%$ 에서의 유동응력과 이들의 24hr 릴렉세이션 시험 후의 감소된 응력을 보여준다. 예측된 바와 같이 릴렉세이션 시험에 대한 모델링은 유동응력의 속도민감도에 상관없이 빠른 경험된 변형률



(a) Stress versus strain at 200°C



(b) Stress versus strain at 400°C



(c) Stress versus strain at 550°C

Fig. 7 Simulations of the 200, 400 and 550°C data

속도와 관련된 시험 후의 응력이 항상 작은 값을 갖게 되는 것을 잘 보여준다.

4. 결론

평형응력의 성장식에 응력률의 항을 포함하지 않도록 일반화된 점소성 이론은 응력-변형을 곡선에서 유동응력이 갖는 양성, 중성 그리고 음성의 속도민감도를 일관성 있게 잘 설명한다. 이러한

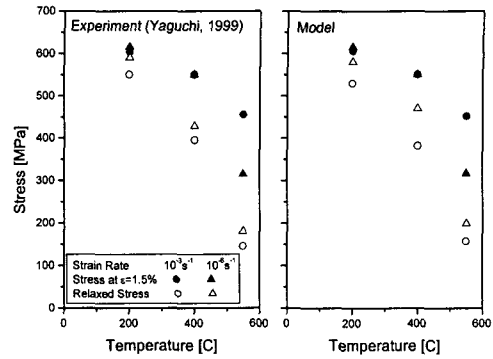


Fig. 8 Relaxation behavior

속도민감도는 강화함수의 값에 의해 구별되어지며, 크리프와 릴렉세이션 거동은 유동응력이 경험하는 속도민감도에 상관없이 항상 이전에 경험한 하중 속도률에 의존하는 동일한 양상을 나타낸다. 9Cr-1Mo 강에 대한 모델링은 제안된 구성방정식이 다양한 속도민감도를 보이는 재료의 비탄성 거동에 유용하게 이용될 수 있음을 잘 보여주었다.

후 기

본 논문은 2002 년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다(KRF-2002-003-D00002).

참고문헌

- (1) Krausz, A. S. and Krausz, K., 1996, "Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation," Academic Press, San Diego.
- (2) Mulford, R. A. and Kocks, U. F., 1979, "New Observation on the Mechanism of Dynamic Strain Aging and of Jerky Flow," *Acta Metallurgica*, Vol. 27, pp. 1125~1134.
- (3) Kishore, R., Singh, R. N., Sinha, T. K. and Kashyap, B. P., 1997, "Effect of Dynamic Strain Ageing on the Tensile Properties of a Modified 9Cr-1Mo Steel," *J. of Materials Science*, Vol. 32, pp. 437~442.
- (4) 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.
- (5) Krempl, E., 1996, "A Small Strain Viscoplasticity Theory Based on Overstress," in Krausz, A. S. and Krausz, K., Editors, "Unified Constitutive Laws of Plastic Deformation," Academic Press, San Diego, pp. 281~318.
- (6) 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.
- (7) Ho, K. and Krempl, E., 2001, "The Modeling of Unusual Rate Sensitivity Inside and Outside the Dynamic Strain Regime," *Journal of Engineering Materials and Technology*, Vol. 123, pp. 28~35.
- (8) Chaboche, J.-L., 1993, "Cyclic Viscoplastic Constitutive Equations, Part I: A Thermodynamically Consistent Formulation," *Journal of Applied Mechanics*, Vol. 60, pp. 813~821.
- (9) Cernocky, E. P. and Krempl, E., 1979, "A Nonlinear Uniaxial Integral Constitutive Equation Incorporating Rate Effects, Creep and Relaxation," *Int. J. Nonlinear Mechanics*, Vol. 14, pp. 183~203.
- (10) Yaguchi, M. and Takahashi, Y., 1997, "Inelastic Behavior of Mod. 9Cr-1Mo Steel and Its Description by Constitutive Model Considering Dynamic Strain Aging," SMIRT 14, Division L, Metallic Material Behavior and Damage, pp. 59~66.
- (11) Kujawski, D., Kallianpur, V. and Krempl, E., 1980, "An Experimental Study of Uniaxial Creep, Cyclic Creep and Relaxation of AISI Type 304 Stainless Steel at Room Temperature," *J. Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 28, pp. 129~148.
- (12) Krempl, E. and Nakamura, T., 1998, "The Influence of the Equilibrium Stress Growth Law Formulation on the Modeling of Recently Observed Relaxation Behaviors," *JSME International Journal A*, Vol. 41, pp. 103~111.
- (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.