

## 304 스테인리스강의 점소성 특성에 관한 연구

호광수<sup>#</sup>

# The Rate Dependent Deformation Behavior of AISI Type 304 Stainless Steel at Room Temperature

Kwangsoo Ho

(Received October 18, 2006)

### Abstract

Uniaxial displacement controlled tests were performed on annealed Type 304 stainless steel at room temperature. A servo-controlled testing machine and strain measurement on the gage length were employed to measure the response to a given input. The test results exhibit that the flow stress increases nonlinearly with the strain rate and the relaxed stress at the end of the relaxation periods depends strongly on the strain rate preceding the relaxation test. The rate-dependent inelastic deformation behavior is simulated using a new unified viscoplasticity model that has the rate-dependent format of nonlinear kinematic hardening rule, which plays a key role in modeling the rate dependence of relaxation behavior. The model does not employ yield or loading/unloading criteria and consists of a flow law and the evolution laws of two tensor and one scalar-valued state variables.

**Key Words :** Viscoplasticity, Rate Dependence, Relaxation, Constitutive Equations

### 1. 서 론

오스테나이트 스테인리스 강은 가스 터빈, 열교환기, 원자력 발전소, 비행기, 자동차 부품과 같이 고강도, 연성 및 내식성이 요구되는 다양한 산업 분야에 많이 사용된다. 기계요소 및 생산공정에 대한 설계 그리고 이들의 신뢰성 평가를 위해서는 재료의 비탄성 거동(inelastic deformation) 특성에 대한 시험적 고찰이 필요하고, 재료시험에 근거한 구성적 모델의 개발이 필요 된다.

AISI 304는 오스테나이트 스테인리스 강의 대표적인 강으로서 고온 및 상온에서 속도 의존적인 (rate-dependent) 비탄성 거동의 특성을 나타낸다. 여러 연구자들에 의해 AISI 304 강에 대한 단순 및 반복 하중 하에서의 하중속도 민감도/loading rate sensitivity), 응력이완(relaxation), 크리프(creep),

반복경화(cyclic hardening), 하중이력/loading history)의 영향 그리고 일축 및 다축 라쳇팅(ratcheting), 특정 온도 영역에서 나타나는 동적 변형시효(dynamic strain aging) 및 저주기 피로 등의 시험을 통한 재료의 특성 연구와 이에 대한 구성적 모델링의 연구가 수행되어왔다[1~9]. 이러한 연구들의 수행 결과로 재료의 비탄성 거동에 대한 이해가 상당히 진척되었으나 아직도 응력이완 현상에서 이완 이전에 경험된 변형률속도의 영향에 대한 구성적 모델링은 미흡하여 체계적인 연구가 더 필요한 실정이다.

본 연구의 목적은 AISI 304에 대한 유동응력의 변형률속도 민감도, 응력이완에 대한 경험된 변형률속도의 영향, 변형률속도 변화 시험에 근거한 구성방정식을 새로이 제안하고, 구성적 모델링에서 사용되는 상태변수 성장식의 속도 독립성과

# 교신저자: 계명대학교 기계·자동차공학부, hok@kmu.ac.kr

의존성의 상호 비교를 통하여 응력이완 현상을 체계적으로 고찰하고자 한다.

## 2. 본론

본 연구에 사용된 시험편은 AISI 304 스테인리스 강을 재료로 ASTM에 의거하여 환봉(rod) 형상으로 유효길이는 40mm, 유효직경은 6mm로 가공되었으며, 상온에서 서보-유압 시험기를 사용하여 변형률 제어에 의한 단순 인장시험, 변형률 속도 변화시험 및 응력이완 시험을 수행하였다.

이러한 속도에 의존적인 재료의 비탄성 거동을 설명하기 위하여 전통적인 속도에 독립적인(rate-independent) 소성 거동과 속도에 의존적인 크리프 등의 재료 거동을 개별적으로 분리하여 고려하지 않고, 오직 하나의 비탄성 변형률만을 사용하는 통합된 점소성 이론(unified viscoplasticity theory)의 체계 하에서 구성적 모델링을 수행하고자 한다. 일반적으로, 비탄성 거동은 재료에서 미세구조의 특성과 변형에 따른 이들의 변화에 의해 특징지어진다. 따라서 구성적 모델링에서는 상태변수들(state variables)과 이들의 성장식에 의해 이를 반영한다.

### 2.1 실험결과

변형률 속도가 증가함에 따라 유동응력이 증가하는 양성(positive)의 변형률 속도 민감도에 대한 시험 결과가 Fig. 1에 나타나 있다. 응력-변형률 곡선은 초기 탄성 영역, 비탄성 영역으로의 천이 과정 그리고 탄성계수보다 매우 작은 크기의 비탄성 계수(inelastic modulus)에 의해 특징지어지는 유동응력의 비탄성 영역에 대한 특성을 잘 보여준다. 시험은  $10^5\text{s}^{-1}$ 에서  $10^2\text{s}^{-1}$  사이의 4개의 변형률 속도에 대하여 각각 일정한 변형률 속도 제어 하에서 2%의 변형률까지 수행되었다. 변형률 속도가 10배씩 증가함에 따라 동일한 변형률에서의 유동응력은 10배 보다 매우 작게 증가하는, 유동응력과 변형률 속도에 대한 비선형적 관계를 응력-변형률 곡선으로부터 알 수 있다.

Fig. 2는 변형률 속도 변화 시험에 따른 응력-변형률 곡선을 보여준다. 변형률 속도는  $10^4\text{s}^{-1}$ 에서 시작하여 1%의 변형률이 증가되는 시점마다 변형률 속도를 변화시키는 시험이 반복적으로 5%의 변형률 까지 수행되었다. 변형률 속도가 감소할 때의 응력은 초기에 순간적인 급격한 감소를 거쳐 정상 상태로 회복되는 일반적인 경향을 잘 나타내고 있다.

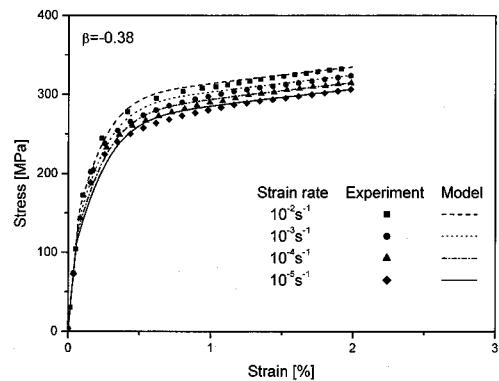


Fig. 1 Uniaxial tensile stress-strain curves at constant strain rates

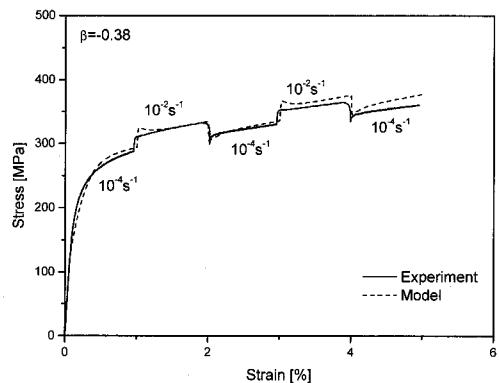


Fig. 2 Stress-strain curve; the strain rate alternates between  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  and  $10^{-2}\text{s}^{-1}$

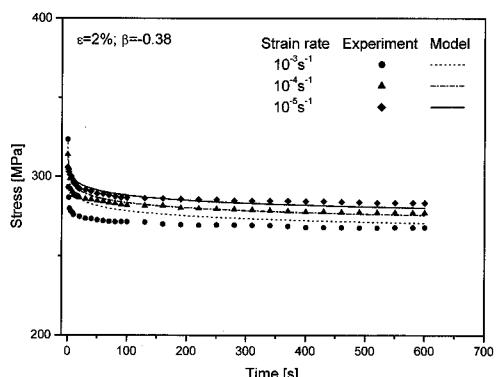


Fig. 3 Relaxation behavior at 2% strain

응력이완 거동의 이완 시험 이전에 경험된 변형률 속도에 대한 의존성을 살펴보기 위하여, 변형률 제어 하에서 일정한 변형률 속도에 대하여 2%의 변형률 까지 단순인장 하중을 가하고 2%의 변형률

을 600초 동안 일정하게 유지하는 응력이완 시험의 결과가 Fig. 3에 나타나 있다. 응력이완 시험의 종점에서 이완된 응력의 크기는 응력이완 시험 이전에 경험된 변형률속도에 따라 다르게 나타난다. 즉, 경험된 변형률속도가 클수록 이완된 응력의 크기는 작은 값을 갖는다.

## 2.2 구성적 모델링

재료의 비탄성 거동을 비압축성으로 가정하면 유동법칙은 다음과 같이 정의된다.

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

$$\dot{e}_{ij}^{el} = \frac{1+\nu}{E} \dot{s}_{ij} \quad (2)$$

$$\dot{e}_{ij}^{in} = \frac{3}{2} B \left[ \frac{J(\sigma_{ij} - G_{ij})}{D} \right]^m \frac{(s_{ij} - g_{ij})}{J(\sigma_{ij} - G_{ij})} \quad (3)$$

여기서  $\dot{e}_{ij}$ 은 전체 변형률속도  $\dot{e}_{ij}$ 의 편차(deviator) 성분,  $s_{ij}$ 는 편차응력,  $E$ 은 탄성계수,  $\nu$ 은 프와 송비이다. 비탄성 변형률속도의 정의에 사용된  $B$ ,  $D$  및  $m$ 은 재료 상수이며, 응력  $\sigma_{ij}$ 와 역응력  $G_{ij}$ 의 편차 성분으로 정의되는 과응력의 불변량  $J(\sigma_{ij} - G_{ij})$ 은 다음과 같다.

$$J(\sigma_{ij} - G_{ij}) = \sqrt{\frac{3}{2}(s_{ij} - g_{ij})(s_{ij} - g_{ij})} \quad (4)$$

식 (3)에서 비탄성 변형률속도는 응력과 역응력의 차로 정의되는 과응력(overstress)의 함수로 표현되며, 비탄성 변형이 충분히 진전된 유동응력의 영역에 근사적으로 적용되는 점근 해석(asymptotic analysis)을 통해 과응력을 변형률속도에 비선형적으로 비례하게 됨을 알 수 있다[10~12].

재료의 비탄성 거동을 모델링하기 위하여 역응력( $G_{ij}$ ; back stress), 이동응력( $H_{ij}$ ; kinematic stress), 등방응력( $A$ ; isotropic stress)으로 정의되는 3개의 상태변수가 사용되며, 이들의 성장식은 각각 다음과 같다.

$$\dot{g}_{ij} = \psi \left[ \frac{2}{3} \dot{e}_{ij}^{in} - \frac{(g_{ij} - h_{ij})}{R} \dot{\phi} \right] + \dot{h}_{ij} \quad (5)$$

$$\dot{h}_{ij} = \frac{2}{3} E_t \dot{e}_{ij}^{in} \quad (6)$$

$$\dot{A} = A_r (A_f - A) \dot{\phi} ; \quad A(t=0) = A_0 \quad (7)$$

여기서  $g_{ij}$ 와  $h_{ij}$ 는 각각 역응력과 이동응력의 편차 성분이다.  $E_t$ 는 비탄성 변형률에 근거한 비탄성계수이고, 유효 비탄성 변형률속도는  $\dot{\phi} = \sqrt{(2/3)\dot{e}_{ij}^{in}\dot{e}_{ij}^{in}}$ 으로 정의된다. 식 (6)에 정의된 바와 같이 이동응력은 속도에 독립적인 특성을 갖는다. 역응력에 대한 성장식의 동적 회복항에 포함된 변수  $R$ 은

$$R = r_c + \sqrt{\frac{3}{2} r_{ij} r_{ij}} \quad (8a)$$

$$r_{ij} = [A + \beta J(\sigma_{ij} - G_{ij})] \frac{(s_{ij} - g_{ij})}{J(\sigma_{ij} - G_{ij})} \quad (8b)$$

으로 정의된다.  $\beta$ 는 다양한 속도 의존성의 비탄성 거동을 설명하기 위하여 도입되어 누적 비탄성 변형률 또는 유효 비탄성 변형률속도의 함수로 정의되나, 본 연구에서는 재료상수로 가정된다. 이의 값은 두 개의 서로 다른 변형률속도를 경험한 응력이완 시험으로부터 결정된다[11]. 등방응력  $A$ 는 반복 하중에서 유동응력의 경화(hardening) 및 연화(softening)를 설명하기 위하여 도입된 상태 변수로서, 단순 하중 하에서의 비탄성 거동을 대상으로 하는 본 연구에서는 상수로 정의된다. 따라서 등방응력의 성장속도를 조절하는데 사용되는  $A$ 의 값은 본 연구에서 0이다.

과응력의 불변량은 하중 속도에 비선형적으로 비례하므로, 식 (8a)와 식 (8b)에 나타난 바와 같이 변수  $R$ 은 속도 의존성의 특성을 갖게 된다. 따라서 역응력은 하중 속도에 따라 다르게 성장하는 속도 의존성의 거동을 보이게 된다. 즉, 유동응력의 영역에서 역응력은  $\beta = 0$  일 때 하중 속도에 독립적인,  $\beta < 0$  일 때 하중 속도가 증가함에 따라 감소하는,  $\beta > 0$  일 때 하중 속도에 따라 증가하는 경향을 나타낸다.

단순 인장의 조건 하에서 Table 1에 주어진 재료 상수들을 사용하여 모델링한 결과가 Fig. 1~3에서 시험 결과와 비교되었다. 다양한 변형률속도에서의 유동응력, 변형률속도 변화 거동 및 응력이완

Table 1 Material constants

	AISI 304
$B[s^{-1}]$	$1 \times 10^{-3}$
$D[MPa]$	140
$m$	20
$\beta$	-0.38
$\psi[MPa]$	$100 \times 10^3$
$E[MPa]$	$196 \times 10^3$
$E_t[MPa]$	$2.1 \times 10^3$
$r_c[MPa]$	1
$A_0[MPa]$	198

에 대한 모델링 결과는 시험 결과와 정량적으로 잘 일치함을 보여준다.

점근 해석에 의한 유동응력 영역에서의 역응력은 다음과 같이 표현된다[10].

$$\{G\} = \{H\} + \{r_c + A + \beta|\sigma - G|\} \quad (9)$$

이동응력  $H$ 는 속도에 독립적이고,  $r_c$ 와  $A$ 는 상수이다. 그리고 변형률속도에 비선형적으로 비례하는 과응력  $|\sigma - G|$ 은 유동응력 영역에서 일정 하며, 사용된  $\beta$ 의 값은 "-0.38"이므로 역응력은 변형률속도가 증가함에 따라 감소하게 된다. 이러한 특성이 서로 다른 변형률속도에 대하여 Fig. 4(a)에 나타나 있다.

Fig. 4(b)에서 보는 바와 같이, 2%의 변형률에서 600초 동안 수행된 응력이완 시험에서 역응력은 각각 일정하게 유지된다. 식 (1)~(3)에  $\dot{\varepsilon}=0$ 의 응력이완 시험 조건을 적용하면 응력이완은  $\sigma = G$ 가 만족될 때 멈추게 된다. 따라서 응력이완 시험의 끝에서 이완된 응력의 크기는 응력이완 시험 이전에 경험된 변형률속도가 클수록 작은 값을 갖게 된다. 또한 응력이완 시험에서 응력의 변화량은 Fig. 4(c)에서 나타난 바와 같이 경험된 변형률속도에 비례한다.

재료에서 나타나는 응력이완 거동의 특성은 시험의 종점에서 이완된 응력의 크기는 경험된 변형률속도가 클수록 작은 값을 갖고, 시험 동안 응력의 변화량은 경험된 변형률속도에 비례하는 것이다[13]. Figs. 5와 6은  $\beta \geq 0$ 의 조건에서 서로 다른 변형률속도를 경험한 2% 변형률에서의 응력이완 거동에 대한 수치해석 결과를 보여준다.

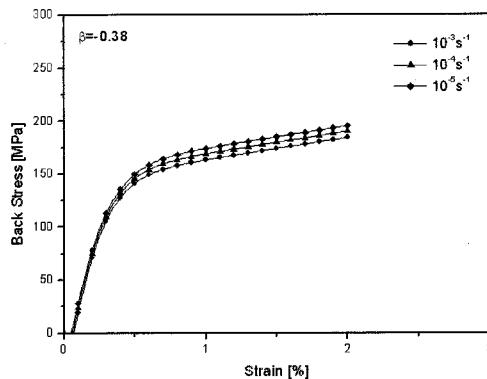


Fig. 4(a) Back stress-strain curves for three strain rates under monotonic loading;  $\beta = -0.38$

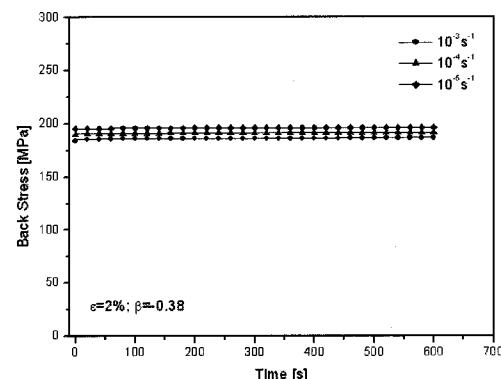


Fig. 4(b) Back stress versus time for relaxation behavior;  $\beta = -0.38$

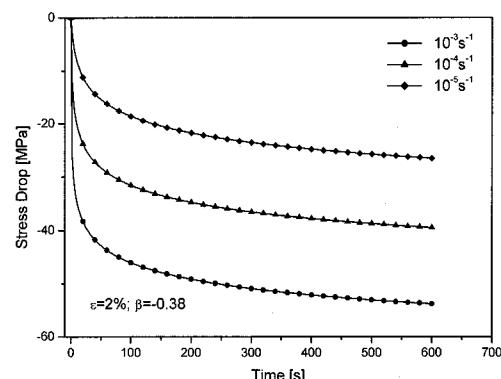


Fig. 4(c) Stress drop versus time;  $\beta = -0.38$

$\beta = 0$  일 때 응력이완의 특성이 Fig. 5에서 보여진다. 이 경우에 역응력은 식 (9)에서 보는 바와 같이 변형률속도에 독립적이 된다. 따라서 하중 속도에 독립적인 상태변수의 성장식을 사용하는

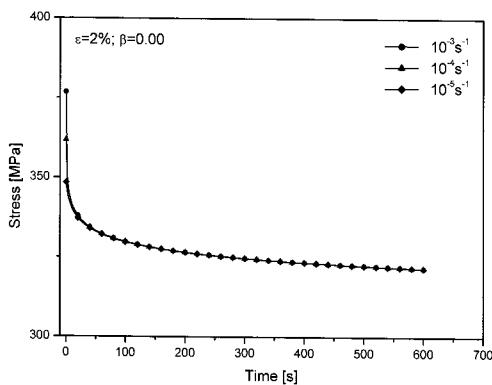


Fig. 5(a) Stress versus time during relaxation behavior when  $\beta = 0.0$

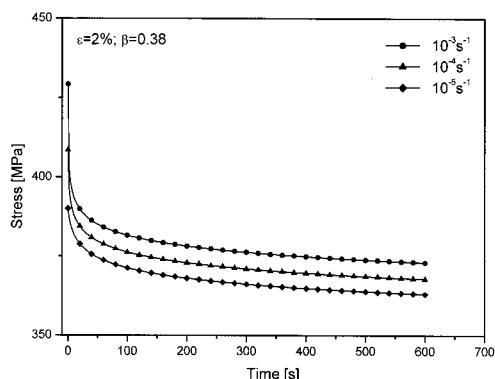


Fig. 6(a) Stress versus time during relaxation behavior when  $\beta = 0.38$

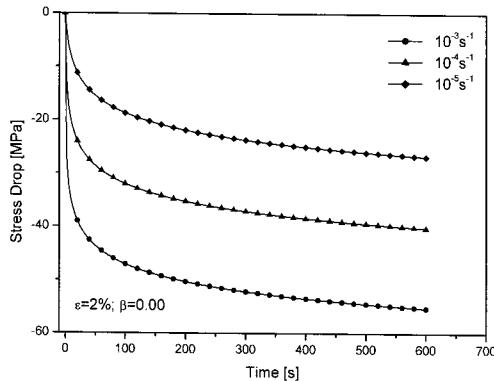


Fig. 5(b) Stress drop versus time during relaxation behavior when  $\beta = 0.0$

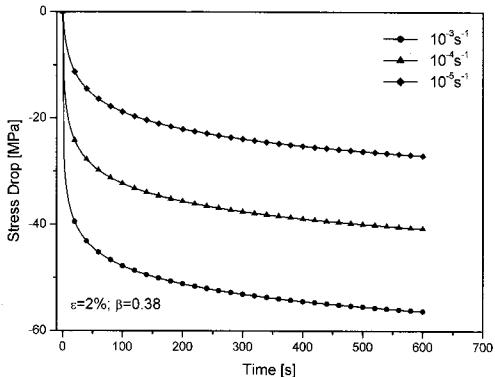


Fig. 6(b) Stress drop versus time during relaxation behavior when  $\beta = 0.38$

Armstrong-Frederick의 비선형 이동경화 모델(NLK) 및 이들의 중첩을 사용하는 모델(decomposed NLK)은 Fig. 5(a)에 보여진 바와 같이 시험의 종점에서 이완된 응력은 경험된 변형률속도에 상관없이 항상 같은 크기를 갖는다[14].

Fig. 6은  $\beta = 0.38$  일 때의 특성을 보여준다. 사용된 양(positive)의  $\beta$  값에 의해 역응력은 하중 속도가 증가함에 따라 증가하는 속도에 의존적인 특성을 나타내게 되고, 결과적으로 이완된 응력의 크기는 경험된 변형률속도가 클수록 큰 값을 갖게 된다.

$\beta \geq 0$  일 때, 응력이 완 시험의 종점에서 이완된 응력의 크기는 실제적인 재료 시험과 다른 경향을 나타낸다. 그러나 Figs. 5(b), 6(b)에서 보는 바와 같이, 응력의 변화량은 경험된 변형률속도에 비례하는 실제적인 거동을 보여준다.

### 3. 결론

제안된 점소성 이론의 구성방정식은 AISI 304 스테인리스 강에 대하여 수행된 하중 속도에 의존적인 비탄성 거동의 특성을 정량적으로 잘 모델링하였다.

일반적으로, 통합된 점소성 이론은 상태변수의 성장식으로서 변형률 경화와 동적회복의 두 항으로 구성된 Armstrong 과 Frederick 이 제안한 비선형 이동경화 모델을 사용한다. 그러나 상태변수로 사용된 역응력의 성장식이 하중 속도에 의존적인 특성을 갖도록 정의될 경우에만 응력이 완에 대한 경험된 변형률속도의 영향을 실체적으로 모델링 할 수 있게 된다. 특히  $\beta$ 의 값이 음수로 정의될 때, 이완 시험의 종점에서 이완된 응력이 경험된 변형률속도가 클수록 작은 크기를 갖게 되는 실제적인 거동을 설명할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] K. Tsuzaki, T. Hori, T. Maki, I. Tamura, 1983, Dynamic strain aging during fatigue deformation in Type 304 austenitic stainless steel, Mater. Sci. & Eng., Vol. 61, pp. 247~260.
- [2] D. J. Kim, S. W. Nam, 1988, Strain-rate effect on high temperature low-cycle fatigue deformation of AISI 304L stainless steel, J. Mater. Sci., Vol. 23, pp. 1024~1029.
- [3] M. D. Ruggles, E. Krempl, 1989, The influence of test temperature on the ratcheting behavior of Type SS304 stainless steel, J. Eng. Mater. Tech., Vol. 111, pp. 378~383.
- [4] N. Ohno, Y. Tabahashi, K. Kuwabara, 1989, Constitutive modeling of anisothermal cyclic plasticity of 304 stainless steel, J. Eng. Mater. Tech., Vol. 111, pp. 106~114.
- [5] M. B. Ruggles, E. Krempl, 1990, The interaction of cyclic hardening and ratcheting for AISI Type 304 stainless steel at room temperature: I. Experiments, J. Mech. Phys. Solids, Vol. 38, pp. 575~585.
- [6] F. Yoshida, 1990, Uniaxial and biaxial creep-ratcheting behavior of SUS304 stainless steel at room temperature, Int. J. Pressure Vessels & Piping, Vol. 44, pp. 207~223.
- [7] E. Krempl, S. H. Choi, 1992, Viscoplasticity theory based on overstress: The modeling of ratcheting and cyclic hardening of AISI Type 304 stainless steel, Nucl. Eng. Des., Vol. 133, pp. 401~410.
- [8] L. H. de Almeida, I. Le May, P. R. O. Emegdio, 1998, Mechanistic modeling of dynamic strain aging in Austenitic stainless steel, Materials Char., Vol. 41, pp. 137~150.
- [9] G. Kang, Q. Gao, L. Cai, Y. Sun, 2002, Experimental study on uniaxial and nonproportionally multiaxial ratcheting of SS304 stainless steel at room and high temperatures, Nucl. Eng. Des., Vol. 216, pp. 13~26.
- [10] 호광수, 2004, 점소성 이론에 의한 변형률 속도 민감도에 대한 연구, 한국소성가공학회지, 제 13 권, 7 호, pp. 600~607.
- [11] K. Ho, 2001, Modeling of nonlinear rate sensitivity by using an overstress model, Comp. Model. Eng. Sci., Vol. 2, pp. 351~364.
- [12] K. Ho, E. Krempl, 2001, The modeling of unusual rate sensitivity inside and outside the dynamic strain aging regime, J. Eng. Mat. Tech., Vol. 123, pp. 28~35.
- [13] E. Krempl, 2001, Relaxation behavior and modeling, I. J. Plasticity, Vol. 17, pp. 1419~1436.
- [14] J. Lemaitre, 2001, Materials behavior models, Academic Press, San Diego, USA.