

Nylon 66 의 무비례 하중에 대한 과응력 모델

호 광 수*

(2001년 3월 17일 접수, 2001년 9월 14일 심사완료)

An Overstress Model for Non-proportional Loading of Nylon 66

Kwangsoo Ho

Key Words : Viscoplasticity Theory(점소성 이론), Overstress(과응력), Relaxation(릴렉세이션), Flow Stress(유동응력), Polymer(폴리머)

Abstract

Non-proportional loading tests of Nylon 66 at room temperature exhibit path dependent behavior and plasticity-relaxation interactions. The uniaxial formulation of the viscoplasticity theory based on overstress (VBO), which has been used to reproduce the nonlinear strain rate sensitivity, relaxation, significant recovery and cyclic softening behaviors of Nylon 66, is extended to three-dimensions to predict the response in strain-controlled, corner-path tests. VBO consists of a flow law that is easily written for either the stress or the strain as the independent variable. The flow law depends on the overstress, the difference between the stress and the equilibrium stress that is a state variable in VBO. The evolution law of the equilibrium stress in turn contains two additional state variables, the kinematic stress and the isotropic stress. The simulations show that the constitutive model is competent at modeling the deformation behavior of Nylon 66 and other solid polymers.

1. 서 론

전통적으로 선형 또는 비선형 적분 표현 방법들이 고체 폴리머 거동에 대한 구성방정식으로 사용되어왔다.⁽¹⁻³⁾ 점탄성(viscoelasticity) 이론의 구성방정식은 독립 변수로서 응력 또는 변형률을 사용하는 합성 적분(convolution integral)의 형태로 표현된다. 이러한 구성방정식에서는 응력(변형률)을 독립 변수로 하는 적분 형태에서 변형률(응력)을 독립 변수로 하는 적분 형태로의 역환(inversion)이 일반적으로 매우 힘들다.

서보-유압식 시험기를 사용하여 하중 또는 변위 제어에 대한 재료의 거동을 측정하는 것은 매우 용이하며 그들의 결과는 서로 상이하게 나타난다. 재료의 구성방정식은 이러한 실험적 결과들을 표현할 수 있으며, 또한 구조물에 대한 다양한 조건에서의 응력 해석에 용이하게 사용될 수 있도록

표현되어야 한다. 이러한 목적에서 살펴보면 역환이 매우 용이하거나 필요로 되지 않는 미분 형태의 구성방정식이 적합하다.

고체 폴리머인 Nylon 66, PEI(Polyetherimide), PEEK (Polyetheretherketone)에 대한 실험적 결과⁽⁴⁻⁶⁾들은 금속 재료와 유사한 속도 의존성의 비탄성적 거동을 나타낸다. 따라서 그 실험 결과들로부터 금속 재료의 점소성 해석을 위하여 Krempl⁽⁶⁾ 등에 의해 개발된 미분 형태의 구성방정식으로, 통합된 상태변수 이론(unified state variable theory)의 하나인 과응력(overstress)에 기초한 점소성 이론(VBO)이 고체 폴리머의 거동을 설명하는데 유용하게 사용될 수 있음을 알 수 있다.

일축 하중(uniaxial loading) 하에서의 Nylon 66에 대한 실험⁽⁴⁾은 비선형적인 변형률 속도 민감도, 비선형성의 해중(unloading) 거동, 크리프, 릴렉세이션, 반복 하중에서의 연화 그리고 뚜렷한 변형률 회복 등을 보여주는데, 이러한 비탄성적 거동들은 과응력에 기초한 점소성 이론에 의해 잘 모델링된 바 있다.⁽⁷⁾

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

본 논문의 목적은 고체 폴리머에 대하여 저자와 Krempl 에 의해 개발된 일축 하중 하에서의 구성 방정식⁽⁷⁾을 압축성의 비탄성적인 거동을 포함하는 3 차원 형태의 일반적인 구성방정식으로 확장하여, 무비례 하중(non-proportional loading) 시에 나타나는 경로 의존적인 거동, 소성과 릴렉세이션 효과의 상호작용을 모델링 함에 있다.

2. 이론

과응력에 기초한 점소성 이론(VBO)은 소성과 크리프를 분리하지 않고 통합된 비탄성 거동으로 해석하는 상태변수 이론의 하나로서, 1 개의 유동 법칙과 응력의 단위를 갖는 3 개의 상태변수들에 대한 성장식(evolution law)들로 구성된다. 그리고 이들은 항복 조건, 하중 및 해중 조건들을 사용하지 않는, 일련의 비선형적으로 결합된 상미분 방정식들로 구성된다.

본 논문의 구성방정식은 일축 하중에 적용되었던 구성방정식⁽⁷⁾을 3 차원 형태로 일반화한 것으로서 등온 조건 하에서의 재료 거동을 대상으로 미소변형, 등방성 그리고 압축성의 비탄성적 거동을 가정한다.

전체 변형률 속도는 탄성 변형률 속도($\dot{\epsilon}_{ij}^{el}$)와 비탄성 변형률 속도($\dot{\epsilon}_{ij}^{in}$)의 합으로 다음과 같이 가정된다.

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

후크 법칙(Hooke's law)의 속도 형태로 표현되는 탄성 변형률 속도는

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

이다. 여기서 E 는 탄성계수, ν 는 탄성 프와송비, δ_{ij} 는 크로벡커 델타(Kronecker delta), $\dot{\sigma}_{ij}$ 는 응력률(stress rate)이다. 비탄성 변형률 속도는 과응력의 함수로 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 η 는 비탄성 프와송비를 의미하고, 과응력 X_{ij} 는 응력과 평형응력(equilibrium or back stress)의 차인 $\sigma_{ij} - g_{ij}$ 으로 정의된다. 점성함수 k 는 재료의 비선형 속도 의존성을 야기시키는 역할을 수행하며

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

으로 정의되는 과응력 불변량(overstress invariant)인

Γ 의 연속 함수로 정의된다. 일반적인 금속 재료의 비압축성 소성 변형($\eta=0.5$)에서의 식 (4)는 응력과 평형응력의 편차(deviator)에 의해 정의되는 편차 과응력($X_{ij}^d = \sigma_{ij}^d - g_{ij}^d$)의 항을 사용하여 $\Gamma^2 = 1.5 X_{ij}^d X_{ij}^d$ 으로 표현된다.

완전히 진전된 비탄성적 거동 영역에서의 경화 속도를 설명하기 위하여 도입되는 동응력(f_{ij} , kinematic stress)의 성장식은 다음과 같다.

$$\dot{f}_{ij} = \left(\frac{\sigma_{eff}}{g_{eff} + \Gamma} \right) E_i \frac{X_{ij}}{Ek} \quad (5)$$

여기서 σ_{eff} 와 g_{eff} 은 유효 응력과 유효 평형응력을 각기 나타내며 식 (4)의 과응력 불변체와 같은 방법으로 정의된다. 비탄성 변형률에 기초한 E_i 는 $\hat{E}_i = E_i / (1 + E_i / E)$ 의 관계식에 의해 전체 변형률에 기초한 탄젠트계수(tangent modulus) \hat{E}_i 와 관련된 재료상수 이다.

상태변수의 하나로서, 정지 상태에서 지지 될 수 있는 응력으로 정의되는 평형응력의 성장식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{g}_{ij} = \psi \left[\frac{\dot{\sigma}_{ij}}{E} + \frac{X_{ij}}{Ek} - \frac{(g_{ij} - f_{ij})}{A} \dot{\phi} + \frac{\dot{X}_{ij}}{E} \right] + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{f}_{ij} \quad (6)$$

여기서 A 는 상태변수인 등방응력(isotropic stress)을 나타내고, 유효 비탄성 변형률 속도 $\dot{\phi}$ 는

$$\dot{\phi}^2 = \frac{1}{1+2\eta^2} \dot{\epsilon}_{ij}^{in} \dot{\epsilon}_{ij}^{in} = \left(\frac{\Gamma}{Ek} \right)^2 \quad (7)$$

에 의하여 정의된다. 양의 형상함수(shape function) ψ 는 초기 준탄성(quasi-elastic) 영역으로부터 완전히 진전된 비탄성 유동 영역으로의 천이 거동을 설명하는데 있어서 중요한 역할을 수행하며, 조건 $\hat{E}_i < \psi < E$ 을 만족하도록 정의되는 함수로서 다음과 같이 표현된다.

$$\psi = C_1^* + \frac{C_2 - C_1^*}{\exp(C_3 q)} \quad (8)$$

여기서 $C_1^* = C_1 [1 + C_4 \{g_{eff} / (A + f_{eff} + \xi \Gamma^2)\}]$, f_{eff} 는 식 (4)와 같은 방법으로 정의되는 유효 동응력, $q^2 = (\epsilon_{ij}^{in} \epsilon_{ij}^{in}) / (1 + 2\eta^2)$ 이며 C_1, C_2, C_3 는 재료상수이다. 일반적인 금속 재료와는 상반되게 고체 폴리머는 해중 시에 비선형 거동을 보이는데 형상함수는 이러한 곡률을 모델링 하는데 중요한 역할을 하게 된다.

상태변수인 등방응력은 반복강화 또는 반복연화

를 설명하기 위하여 도입된 상태변수로서 $A(t=0) = A_0$ 의 초기치를 가지며, 다음과 같은 성장식을 갖는다.

$$\dot{A} = A_c (A_f - A) \dot{\phi} \quad (9)$$

여기서 A_f 는 등방응력의 포화치 그리고 A_c 는 등방응력의 성장 속도를 조절하는 재료상수이다.

점성함수의 정의는 다음과 같다.

$$k = k_1 \left[1 + \left(1 + \frac{A_0 - A}{A_0 - A_f} \right) \frac{\Gamma}{k_2} \right]^{-k_3} \quad (10)$$

여기서 k_1, k_2, k_3 는 재료상수이다.

3. 수치해석

3.1 일축 하중

일축 하중의 조건에서 응력, 평형응력 그리고 동응력의 성분들은

$$[\Omega_{ij}] = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (11)$$

으로 가정된다. 여기서 Ω_{ij} 는 σ_{ij}, g_{ij} 또는 f_{ij} 를 대표한다. 표현의 편의를 위하여 $\Omega_{11} = \Omega, \dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}$ 을 사용하면, 일축 하중 하의 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{\epsilon} &= \dot{\epsilon}^{el} + \dot{\epsilon}^{in} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{X}{Ek} \\ \dot{g} &= \psi \left[\frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{X}{Ek} - \frac{(g-f)}{A} \dot{\phi} + \frac{\dot{X}}{E} \right] + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{f} \\ \dot{f} &= \left(\frac{\sigma_{eff}}{g_{eff} + \Gamma} \right) E, \frac{X}{Ek} \\ \dot{A} &= A_c (A_f - A) \dot{\phi} \end{aligned}$$

여기서 과응력 불변량은 $\Gamma = |X| = |\sigma - g|$, 유효 비탄성 변형률 속도는 $\dot{\phi} = |\dot{\epsilon}^{in}|$ 으로 식 (4), 식 (7)로부터 각각 유도된다.

고체 폴리머인 Nylon 66에 대한 일축 하중 하에서의 시험 결과들을 모델링하기 위하여 사용되는 재료상수들은 Table 1에 나타나있다.

Fig. 1은 해중 시의 변형률 속도의 크기가 하중 시의 것과 같게 유지되는 4개의 서로 다른 변형률 속도들($10^{-6}, 10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} s^{-1}$)에 대한 시험 결과와 모델링을 보여준다. 응력-변형률 곡선의 변형률 속도에 대한 비선형 속도민감도가 분명하게 나타나며, 응력-변형률 곡선들은 변형이 진행됨에

Table 1 Material constants

$E = 3700$ [MPa]	$k_1 = 1500$ [s]
$E_f = 305$ [MPa]	$k_2 = 30$ [MPa]
$\nu = 0.39, \eta = 0.4$	$k_3 = 15$
$\xi = 1$ [MPa ⁻¹]	$C_1 = 740$ [MPa]
$A_0 = 60$ [MPa]	$C_2 = 2670$ [MPa]
$A_c = 3$	$C_3 = 100$
$A_f = 53$ [MPa]	$C_4 = 2$

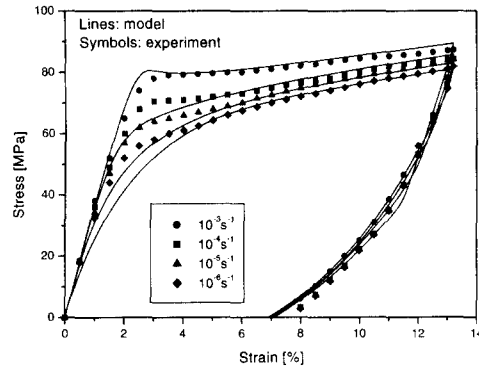


Fig. 1 Stress-strain curves at various strain rates; experiment by Bordonaro⁽⁴⁾(symbols), model(lines)

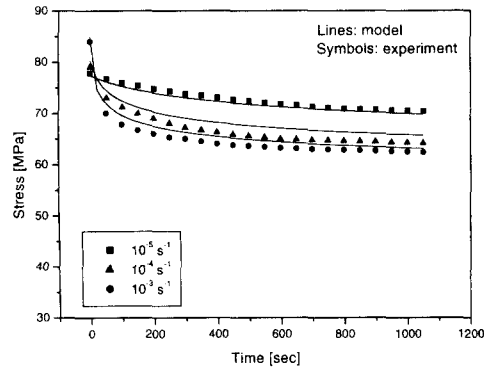


Fig. 2 Stress drop versus time during relaxation period; experiment by Bordonaro⁽⁴⁾(symbols), model(lines)

따라 점차적으로 서로 합쳐지면서 정상 상태에 이르는 거동을 보여준다. 또한 일반적인 금속 재료와 대별되는 것으로서, 고체 폴리머 거동 특징 중의 하나인 해중 시의 비선형 거동이 나타난다.

서로 다른 변형률 속도($10^{-5}, 10^{-4}, 10^{-3} s^{-1}$)의 이력(history)을 갖는 $\epsilon = 9.5\%$ 에서 수행된 릴렉세이션 시험은 Fig. 2에 나타나있다. 릴렉세이션 시험의

종료 점에서 가장 빠른 이전의 경험된 변형률 속도와 관계되는 응력이 가장 작은 크기를 나타낸다. 즉, 릴렉세이션에 의한 응력 감소의 크기는 경험된 변형률 속도의 크기가 클수록 커지게 된다. 이러한 릴렉세이션의 변형률 속도 의존성은 일반적인 금속 재료에서도 관찰되는 현상이다.^(9,10)

3.2 인장-비틀림 하중

압축성의 비탄성 재료 거동을 보이는 Nylon 66 에 대한 인장-비틀림 하중의 조건에서 응력, 평형 응력 그리고 동응력의 성분들은 다음과 같이 가정되어 진다.

$$[\Omega_{ij}] = \begin{bmatrix} \Omega_{11} & \Omega_{12} & 0 \\ \Omega_{12} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (12)$$

표현의 편의를 위하여 $\Omega_{11} = \Omega$, $\Omega_{12} = \Omega_s$, $\dot{\epsilon}_{11} = \dot{\epsilon}$, $2\dot{\epsilon}_{12} = \dot{\gamma}$ 을 사용하고, 식 (12)를 적용하게 되면 제 2 절에서 설명된 일반적인 3 차원의 구성방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{X}{Ek} \quad ; \quad X = \sigma - g$$

$$\dot{\gamma} = \frac{\dot{\sigma}_s}{G} + \frac{X_s}{K_C k} \quad ; \quad X_s = \sigma_s - g_s$$

$$\dot{g} = \psi \left[\frac{\dot{\sigma}}{E} + \frac{X}{Ek} - \frac{(g-f)}{A} \dot{\phi} + \frac{\dot{X}}{E} \right] + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{f}$$

$$\dot{g}_s = \psi \left[\frac{\dot{\sigma}_s}{E} + \frac{X_s}{Ek} - \frac{(g_s - f_s)}{A} \dot{\phi} + \frac{\dot{X}_s}{E} \right] + \left(1 - \frac{\psi}{E} \right) \dot{f}_s$$

$$\dot{f} = \left(\frac{\sigma_{eff}}{g_{eff} + \Gamma} \right) E_t \frac{X}{Ek}$$

$$\dot{f}_s = \left(\frac{\sigma_{eff}}{g_{eff} + \Gamma} \right) G_t \frac{X_s}{K_C k}$$

$$\dot{A} = A_t (A_f - A) \dot{\phi}$$

여기서 탄성 전단계수는 $G = E/2(1+\nu)$, 비탄성 전단계수는 $K_G = E/2(1+\eta)$, 전단 탄젠트계수는 $G_t = E_t(K_G/E)$ 이다. 위의 방정식에서 사용된 과응력 불변량 Γ 와 유효 비탄성 변형률 속도 $\dot{\phi}$ 는 식 (4)와 식 (7)로부터 하중 조건을 고려하여 각각 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{\phi} = \left[(\dot{\epsilon}^{in})^2 + \frac{1}{2(1+2\eta^2)} (\dot{\gamma}^{in})^2 \right]^{0.5}$$

$$\Gamma = \left[(X)^2 + \frac{2(1+\eta)^2}{(1+2\eta^2)} (X_s)^2 \right]^{0.5}$$

고체 폴리머인 Nylon 66 의 비탄성 거동에 대한

하중 경로의 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 3 에서와 같이 직각 경로(corner path)를 구성하는 분리된 인장, 비틀림 하중이 연속적으로 적용된다. 이때 나타나게 되는 릴렉세이션과 소성의 상호작용을 살펴보기 위하여 Fig. 6 에서와 같이 2097 s 동안의 릴렉세이션 시험을 도입한다. Bordonaro 에 의한 시험⁽⁸⁾은 그립(grip)을 위한 금속봉이 삽입되어 접착된 튜브형 시험편(외경 1 in, 두께 0.0625 in, 유효길이 1.75 in)을 사용하였다.

직각 경로의 하중에 대한 시험에서 유효 변형률과 변형률 속도는 각각 전체 변형률에 기초한 프와송비 μ 를 통한 $\epsilon_{eff} = \sqrt{\epsilon^2 + \gamma^2/2(1+2\mu^2)}$ 과 전체 변형률 속도에 기초한 프와송비 $\bar{\mu}$ 를 통한 $\dot{\epsilon}_{eff} = \sqrt{\dot{\epsilon}^2 + \dot{\gamma}^2/2(1+2\bar{\mu}^2)}$ 으로 정의되며, 0.4 의 값이 μ 와 $\bar{\mu}$ 에 사용되었다.⁽⁸⁾

인장(전단) 응력-변형률 곡선에 대한 전단(인장) 응력의 존재가 주는 영향을 살펴보기 위하여 Fig. 3 에서 보는 바와 같이 두 종류의 경로 Path OAC, Path OBC 가 고려된다. Path OAC 는 점 A 까지의 인장 하중과 그 점에서의 인장 변형률을 일정하게 유지하며 가해지는 점 C 까지의 비틀림 하중으로 구성되며, Path OBC 는 점 B 까지의 비틀림 하중과 그 점에서의 전단 변형률을 일정하게 유지하며 가해지는 점 C 까지의 인장 하중으로 구성된다. 이때 두 경로의 종점인 점 C 에서의 유효 변형률은 모두 6.6% 이다.

Fig. 4 에서 보는 바와 같이 Path OAC 의 OA 부분에 대한 전단 응력의 영향이 없는 $\epsilon = 5\%$ 에서의 순수 인장 응력은 Path OBC 의 BC 부분에 대한 전단 응력의 영향이 존재하는 $\epsilon = 5\%$ 에서의 인장 응력보다 큰 값을 갖는다. 마찬가지로, Fig. 5 는 $\gamma = 7\%$ 에서의 순수 전단 응력(Path OBC 의 OB 부분)이 인장 응력의 영향이 존재하는 경우의 전단 응력(Path OAC 의 AC 부분)보다 큰 값을 갖는 것을 보여준다. 이들로부터 인장(전단) 응력은 전단(인장) 응력의 영향에 의해 그 크기가 감소한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4 에서 Path OAC 의 AC 부분에 대한 인장 응력은 변형률 $\epsilon = 5\%$ 에서 비틀림 하중이 가해지는 동안 지속적으로 감소하며, Fig. 5 에서 Path OBC 의 BC 부분에 대한 전단 응력은 $\gamma = 7\%$ 에서 인장 하중이 가해지는 동안 감소하게 된다.

Figs. 4, 5 에서 나타난 바와 같이 Nylon 66 은 경로에 의존적인 비탄성 거동을 보여주며, 인장과 비틀림 거동에 대한 동일한 정성적 양상을 보여준다. 이러한 거동들은 속도에 독립적인 소성 이론

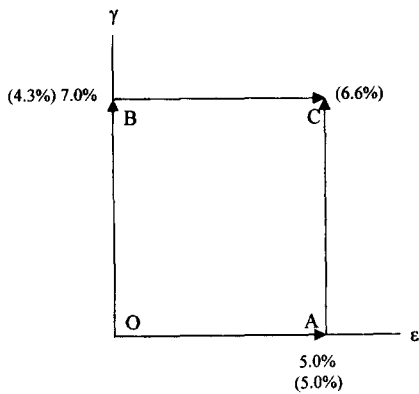


Fig. 3 Corner paths in strain space with no hold-time. Tests are performed at an effective strain rate of $10^{-3} s^{-1}$. ϵ = engineering axial strain and γ = engineering shear strain. Numbers in parenthesis denote effective strain

Test 1-A	Path OBC : 2097 hold at B
Test 1-B	Path OBC : 2097 hold at C
Test 2-A	Path OAC' : 2097 hold at A
Test 2-B	Path OAC' : 2097 hold at C'

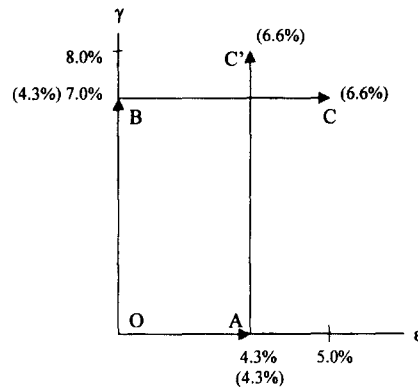


Fig. 6 Corner paths in strain space with hold-time. Tests are performed at an effective strain rate of $10^{-3} s^{-1}$. ϵ = engineering axial strain and γ = engineering shear strain. Numbers in parenthesis denote effective strain

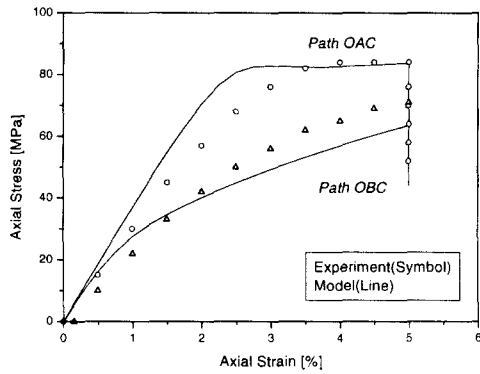


Fig. 4 Axial stress versus axial strain for *Path OAC* and *Path OBC*; model(lines), experiment by Bordonaro⁽⁴⁾(symbols)

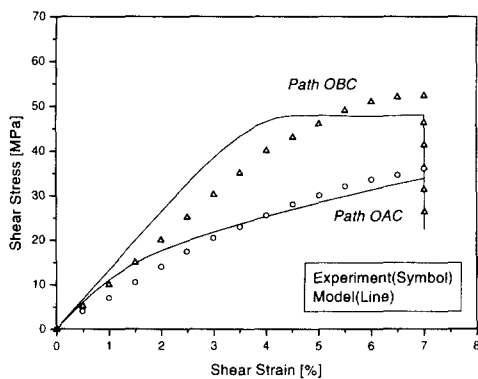


Fig. 5 Shear stress versus shear strain for *Path OAC* and *Path OBC*; model(lines), experiment by Bordonaro⁽⁴⁾(symbols)

에서의 소성 효과로 알려져 있으며, 일축 하중으로부터 결정된 Table 1의 재료 상수들을 사용하여 수행된 모델링은 관찰된 시험적 결과들을 잘 예측하고 있다.

Figs. 4, 5에서는 하중과 릴렉세이션이 동시에 시험되기 때문에 최대 변형률에서의 지속적인 응력의 감소가 릴렉세이션 효과에 기인한 것인지 아니면 소성 효과에 기인한 것인지 분명하지 않다. 따라서 릴렉세이션 시험 기간을 Fig. 6에서와 같이 도입함으로써 이들 각각의 효과 또는 이들의 상호작용에 대하여 살펴보기로 하겠다.

Fig. 6에서 *Path OBC*(*Path OAC'*)에 대한 시험은 2097s의 릴렉세이션 시험 기간이 점 B, 점 C(점 A, 점 C')에 도입되는 두 종류가 시행된다. 시간에 따른 인장 응력과 전단 응력의 변화가 Figs. 7, 8에 나타나있다.

Fig. 7에서 *Test 2-A*에 대한 인장 응력은 점 A에서 릴렉세이션 시험이 진행됨에 따라 완만하게 감소하며, 연이어 가해지는 비틀림 하중에 의해 급격히 감소하게 된다. 이 급격한 인장 응력의 감소는 이미 릴렉세이션 시험 기간의 도입에 의한 릴렉세이션 효과의 제거 후에 나타난 것이므로 단지 소성 효과에 의한 것으로 해석될 수 있다. 한편, *Test 2-B*에 대한 인장 응력은 점 A에서 비틀림 하중이 가해짐에 따라 릴렉세이션과 소성 효과의 상호작용에 의해 급격히 감소하며, 연이어 점 C'에

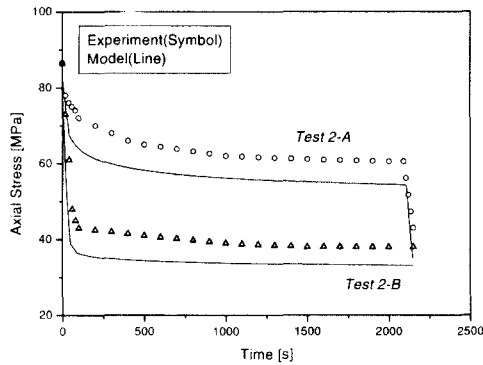


Fig. 7 Axial stress versus time for Test 2-A and Test 2-B; experiment by Bordonaro⁽⁴⁾(symbols), model(lines)

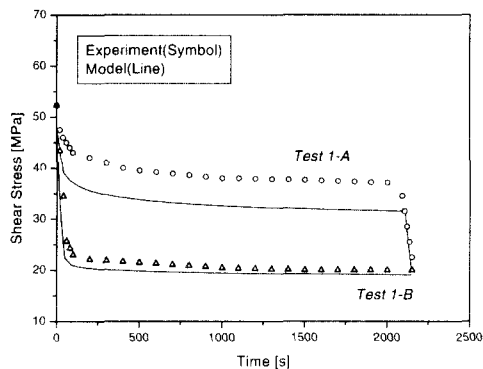


Fig. 8 Shear stress versus time for Test 1-A and Test 1-B; experiment by Bordonaro⁽⁴⁾(symbols), model(lines)

서의 릴렉세이션 기간에 의해 완만하게 감소한다. 시험의 종료 점에서 Test 2-B 의 인장 응력이 Test 2-A 의 인장 응력보다 조금 작은 크기를 갖는다. 따라서 릴렉세이션과 소성 효과의 상호작용이 전체적인 응력 감소에 미치는 영향은 매우 작음을 알 수 있다.

전단 응력에 대한 Test 1-A 와 Test 1-B 의 결과는 Fig. 8 에 나타나있으며, 인장 응력에 대한 거동과 같은 경향을 나타내고있다.

4. 결론

고체 폴리머의 비탄성 거동을 설명하기 위하여 과응력에 기초한 3 차원 형태의 구성방정식이 재료의 압축성을 포함하도록 일반적인 형태로 제안 되었으며, 그 유용성을 보이기 위하여 Nylon 66 에 대한 일축 하중과 인장-비틀림 하중의 경우에 적용되었다.

일축 하중에 대한 모델링은 응력-변형률 곡선의 비선형적인 변형률 속도 민감도, 해중 시에 나타나는 비선형성, 이전에 경험된 변형률 속도에 의존하는 릴렉세이션에서의 응력 감소를 잘 표현하였다. 또한 인장-비틀림 하중에서 나타나는 경로 의존적인 비탄성 거동과 릴렉세이션 및 소성 효과에 대한 예측도 실험적인 결과와 정성적으로 잘 일치함을 보여주었다.

참고문헌

- (1) McKenna, G.B. and Zappas, L.J., 1979, "Nonlinear Viscoelastic Behavior of Poly (Methyl Methacrylate) in Torsion," *Journal of Rheology*, Vol. 23, pp. 151~166
- (2) Knauss, W.G. and Emri, I., 1987, "Volume Change and the Nonlinear Thermo-Viscoelastic Constitution of Polymers," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 27, pp. 86~100.
- (3) Schapery, R.A., 1998, "Nonlinear Viscoelastic and Viscoplastic Constitutive Equations Based on Thermodynamics," *Mechanics of Time-Dependent Materials*, Vol. 1, pp. 209~240.
- (4) Bordonaro, C.M. and Krempl, E., 1992, "The Effect of Strain Rate on the Deformation and Relaxation Behavior of 66 Nylon at Room Temperature," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 32, pp. 1066~1072.
- (5) Bordonaro, C.M. and Krempl, E., 1995, "A State Variable Model for High Strength Polymers," *Polymer Engineering and Science*, Vol. 35, pp. 310~316.
- (6) 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.
- (7) 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, West Conshohocken PA, pp.118~137.
- (8) Krempl, E. and Bordonaro, C.M., 1999, "Non-Proportional Loading of Nylon 66 at Room Temperature," *International journal of Plasticity*, Vol. 14, pp. 245~258.
- (9) Krempl, E. and Nakamura, T., 1999, "The Influence of the Equilibrium Stress Growth Formulation on the Modeling of Recently Observed Relaxation Behaviors," *JSME International Journal/A*, Vol. 41, pp 103~111.
- (10) 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.