

응력연화거동을 고려한 고무 재료의 변형을 에너지 함수 결정

김 완 수[†] · 홍 성 인^{*}

충남대학교 기계공학과 대학원, *충남대학교 기계공학과
(2007년 8월 2일 접수, 2007년 9월 13일 수정 및 채택)

Determination of Strain Energy Function of Rubber Materials Considering Stress Softening Behavior

W. S. Kim[†] and S. I. Hong^{*}

Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University Graduation School,
220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 135-080, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Chungnam National University,
220 Gung-dong, Yuseong-gu, Daejeon 135-080, Korea

(Received August 2, 2007, Revised & Accepted September 13, 2007)

요약 : 카본블랙이나 실리카 등으로 보강된 고무 가황체는 순수한 초기상태에서 하중(부하)를 가하고 제거하는 반복과정에서 응력은 점점 연화되어 초기상태에서 얻어진 응력보다 작게 나타난다. 이러한 응력 연화 현상을 Mullins 효과라고 부른다. 이러한 응력 연화 거동을 이론적으로 표현하기 위하여 Ogden-Roxburgh 등이 손상 파라미터를 이용하여 제안한 pseudo-elastic 개념을 적용하여 보강제가 함유된 고무 가황체의 변형을 에너지 함수를 구하였다. 카본블랙으로 보강된 NR 가황체를 이용하여 준정적 반복 부하 시험을 실시하였으며, pseudo-elastic 모델에서의 손상 파라미터가 재하 및 재 부하 시 응력-변형을 곡선에 어떠한 영향을 주는가와 더불어 손상 파라미터의 두 가지 변수인 γ 과 m 의 물리적 의미를 파악하였다. 또한 보강제 함량을 달리하여 제작한 고무 가황체의 응력연화 변형을 에너지 함수를 결정하고 비교하였다.

ABSTRACT : When the rubber vulcanizates reinforced with carbon black or silica are subjected to cyclic loading from its virgin state, the stress required on reloading is less than that on the initial loading. This stress softening phenomenon is referred to as the Mullins effect. The strain energy function of rubber vulcanizates was investigated using theory of pseudo-elasticity incorporated damage parameter that Ogden and Roxburgh have proposed to describe the damage-induced stress softening effect in rubber-like solids. The quasi-static cyclic loading test was performed using the NR-SBR vulcanizates reinforced with carbon black, and then the effect of a damage parameter to stress-strain curve in reloading and subsequent reloading paths was studied. The strain energy function of the rubber vulcanizates with a different filler content was also evaluated.

Keywords : Rubber, Stress softening, Mullins effect, Pseudo-elastic, Finite element analysis

[†] 대표저자(e-mail : wansoo74@never.com)

I. 서 론

일반적으로 고무재료는 금속과는 달리 큰 변형에서도 탄성을 유지하며, 하중과 변형이 비선형 관계를 보이는 초탄성 (hyperelastic) 특성과 더불어 감쇄 거동으로 진동을 제어하는 곳에 널리 적용되고 있다.¹ 고무 부품의 설계를 위한 유한요소해석 과정에서는 고무 부품과 동일한 배합조건을 갖는 시편의 물성 시험뿐만 아니라 시험으로부터 얻어진 응력-변형을 관계를 가장 적절히 표현할 수 있는 변형을 에너지함수를 찾는 일이 매우 중요하다. 지금까지 고무재료의 비선형 대변형 거동에 대한 여러 가지 수학적 이론들이 제안되었으며, 유한요소해석 프로그램에도 적용되고 있다. 고무는 배합성분에 따라 큰 차이를 나타내는데 강도와 같은 특성을 향상시키기 위하여 카본블랙과 같은 보강제를 사용하게 되면 응력 연화 현상 (stress softening), 영구변형 (permanent set), 히스테리시스 (hysteresis), 주파수의존 응답현상이 나타나는 비탄성 (inelastic) 특징을 보이게 되는데 기존의 초탄성 모델은 이러한 현상을 재현할 수 없는 단점이 있다. 특히, 하중을 가하고 제거하는 과정이 반복될 때 응력은 초기 하중을 가한 것에 비해 작아지게 되는 응력 연화현상, 이른바 Mullins 효과라는 현상을 표현하는데 한계가 있다.²

이렇게 실험적으로 밝혀진 Mullins 효과에 대하여 그동안 이론적으로 접근하려는 연구가 최근 시도되고 있으며 이러한 연구는 크게 현상학적인 거동을 모델링하는 접근방법과 분자구조역학에 기초를 둔 접근방법으로 구분될 수 있다.

첫째, 현상학적으로 접근한 방법은 매우 활발하게 연구되고 있으며, 그 중에 한가지로 고무재료의 초기 상태를 고상 (hard phase)과 연상 (soft phase)의 무정형 미세구조로 혼합되어 있다가 부하를 받으면 연상영역에서 대부분의 부하가 발생하고, 고상영역은 다만 변형에 의해 약해지게 되는데 이를 손상의 정도로 보는 접근방법이다.³ 이외에도 연속체 손상 역학 (continuum damage mechanics)에 기초를 둔 구성방정식 접근법,⁴ 준정적 현상에 기초한 pseudo-elastic 개념 등이 있다.^{5,6} 둘째, 분자구조역

학에 기초를 둔 방법으로는 Boyce와 Arruda가 분자물리학에 기초를 응력-변형을 관계를 개발하였다.⁷

본 연구에서는 카본블랙으로 보강된 고무 가황체의 재료시험 결과를 가지고 Ogden과 Roxburgh가 제안한 pseudo-elastic 개념에 적용하여 응력 연화 거동을 나타낼 수 있는 변형을 에너지 함수를 결정하고 보강제 함량에 따른 영향을 비교하고자 한다.

II. 기본 식

1. 초탄성 거동

유한요소해석에서 초탄성 재료 모델은 변형을 에너지 함수 (strain energy function)로 표현되고, 다음과 같은 관계를 가진다.

$$\tau = \frac{\partial W}{\partial \gamma_{ij}} \quad (1)$$

여기서, τ 는 2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서, W 는 변형을 에너지 함수, γ_{ij} 는 Green-Lagrange 변형률 텐서이며 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma_{ij} = \frac{1}{2}(F^T F - I) = \frac{1}{2}(C - I) \quad (2)$$

여기서, F 는 변형 구배 텐서 (deformation gradient tensor)로 $F_{ij} = \partial x_i / \partial X_j$ 이며 이 때 x_i 와 X_j 는 각각 변형 전과 변형 후의 선 요소 벡터이며, C 는 right Cauchy-Green 변형률 텐서, I 는 단위 텐서이다.

재료가 비압축성이라 하면, Cauchy 응력 텐서(진 응력) σ 와 제 2차 Piola-Kirchhoff 응력 텐서 τ 의 관계는 다음과 같다.

$$\sigma = F \tau F^T \quad (3)$$

변형을 불변량과 변형률 텐서 사이의 관계로부터 Cauchy 응력 텐서 및 공칭응력 S 와 변형을 에너지 함수와의 관계는 각각 다음과 같다.

$$\sigma = F \frac{\partial W}{\partial F} - pI \quad (4)$$

$$S = \frac{\partial W}{\partial F} - pF^{-1} \quad (5)$$

고무의 거동을 표현한 변형률 에너지 함수는 여러 형태가 연구되었으며, 일반적으로 주 변형률 불변량과 주 연신율의 형태로 표현된다. Neo-Hookean 모델이나 Mooney-Rivlin 모델 등은 주 변형률 불변량으로 변형률 에너지 함수를 표현하였으며, Ogden은 주 연신율로 변형률 에너지 함수를 표현하였다.^{8,9} Mooney-Rivlin 재료 및 Ogden 재료에 대해 변형률 에너지 함수는 각각 식 (6), (7)과 같다.

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = C_1(I_1 - 3) + C_2(I_2 - 3) \quad (6)$$

여기서, I_1 과 I_2 는 각각 1차, 2차 불변량으로서 $I_1 = \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2$, $I_2 = \lambda_1^2\lambda_2^2 + \lambda_2^2\lambda_3^2 + \lambda_3^2\lambda_1^2$ 이며, λ_i 는 연신율(stretch ratio)을 나타낸다.

$$W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3) = \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda_1^{\alpha_i} + \lambda_2^{\alpha_i} + \lambda_3^{\alpha_i} - 3) \quad (7)$$

여기서, α_i 와 μ_i 는 재료상수를 의미한다.

III. 응력 연화 모델

1. 응력연화효과

카본블랙이나 실리카 등으로 보강된 고무에 반복하중이 가해질 때의 거동은 매우 복잡하게 나타나는데, 이때의 응력-변형률 관계는 전 단계에서 받은 최대 부하 정도에 영향을 받는다. 즉, 초기 부하 또는 주 부하 (primary loading)과정에서의 강성 (stiffness)에 비해 연속적으로 제하-재부하 (unloading-reloading)를 반복할 경우의 강성은 점점 연화된다.

Figure 1은 W.D. Kim 등¹⁰이 실험한 결과로서 3가지 수준의 변형률을 갖도록 부하를 가할 경우 전형적인 부하-제하-재부하 응력-변형률 곡선을 나

타낸다. 일정 변형률 구간에서의 부하-제하 사이클의 형태는 한 가지 곡선으로 나타나지 않고 일정량의 히스테리시스가 나타나며, 몇 사이클을 반복하게 되면 이러한 현상은 안정화 된다. 또한 작용하는 하중을 제거할 때 변형률은 0으로 회귀하지 않는 영구 변형률이 발생한다. 이러한 Mullins 영향을 구조적으로 설명하면 카본블랙 등의 보강제 입자와 고무 분자 사슬 사이에서의 접합 (entanglement)이 영구적으로 손상되거나 일시적인 절단 후 재형성되는 과정에서 발생하는 것으로 알려져 있다.¹¹ 따라서 응력 연화는 첫 번째 부하 상에서 임의의 점에서 제하할 때 나타나고 손상은 그러한 경로 상에서 변형률의 크기가 커질수록 증가한다.

2. Pseudo-elastic 이론

Ogden과 Roxburgh는 고무재료의 손상으로 인한 응력 연화 현상을 표현하기 위하여 pseudo-elastic 개념을 제안하였다.⁶ Figure 1의 응력 연화 현상을 모델로 구현하기 위하여 Figure 2와 같이 영구 변형 및 히스테리시스와 관련된 비탄성효과가 없다고 가정하여 단순화 하였다.

일반적인 이축상태에서 Mullins 효과를 모델링하기 위하여 기존의 변형률 에너지 함수에 손상정도를 나타내는 손상 변수를 도입하여 변형률 에너지 함수를 다음과 같이 표현하였다.

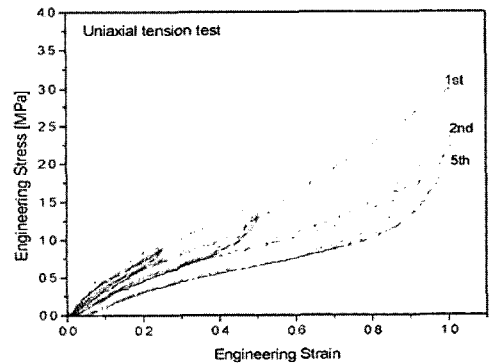


Figure 1. Stress-Strain curve obtained from quasi-static cyclic loading.¹⁰

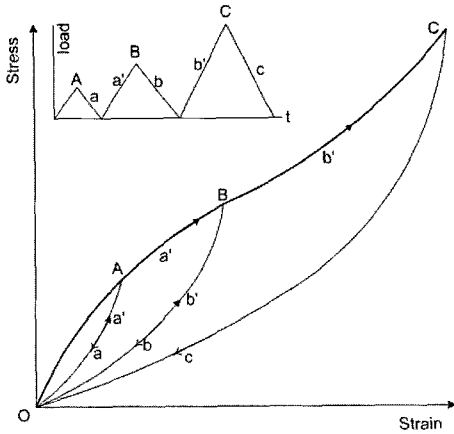


Figure 2. Idealization of Mullins effect.

$$W(F, \eta) = \eta W_0(F) + \phi(\eta) \tag{8}$$

여기서, η 는 손상변수로서 변형하는 동안에 $0 < \eta \leq 1$ 까지 변화한다. $W_0(F)$ 는 손상되지 않은 탄성재료의 변형률 에너지 함수를 의미하며 $\phi(\eta)$ 는 손상함수라 한다.

Figure 2에서 주 부하 곡선(ABC)은 손상이 발생하지 않은 곡선으로 이때의 변형률 에너지 함수는 $W_0(F)$ 로 표현된다. 이때의 손상변수 η 는 비활성화되어 1로 표현되며, 손상함수는 $\phi(1) = 0$ 을 만족한다. 따라서 식(8)은 다음과 같이 단순화 된다.

$$W(F, 1) = W_0(F) \tag{9}$$

그런데, 만일 η 가 활성화 될 때, 손상은 변형에 수반되므로 변형률 에너지 함수는 변형 구배 텐서 F 에 의존하게 되어, 다음과 같이 가정할 수 있다.⁶

$$\frac{\partial W}{\partial \eta}(F, \eta) = 0 \tag{10}$$

식 (8)을 (10)에 대입하면 다음을 얻을 수 있다.

$$-\phi'(\eta) = W_0(F) \tag{11}$$

식 (11)로부터 유도할 수 있는 η 는 주 부하 경로상에서 변형값에 의존한다. 제하가 시작하는 시점의 주 부하 경로상에서는 $\eta = 1$ 이므로 W_m 은 다음과 같이 정의 된다.

$$-\phi'(1) = W_0(F_m) = W_m \tag{12}$$

$W_0(F)$ 의 특성에 따라 W_m 은 주 부하 경로를 따라 증가한다. 제하되는 재료가 제하경로상의 어느 점에서 다시 재 부하될 때 특성은 η 가 1이 될 때 까지 식 (8)에 지배를 받는다. 이 점에서 제하가 반복되거나 주부하가 시작될 때는 식 (9)에 지배를 받는다. 이러한 손상조건식은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

$$W \begin{cases} \geq W_m : W = W_0 = W_m \\ < W_m : W = \eta W_0 + \phi \end{cases} \tag{13}$$

손상함수 ϕ 는 식(10)을 통하여 변형의 상태의 향으로 손상변수 η 를 결정할 수 있도록 도와준다. 함수 ϕ 의 선택은 $0 < \eta \leq 1$ 를 만족하는 η 를 갖는 식(12)와 $\phi(1) = 0$ 에 따라 임의적이다. Ogden-Roxburgh는 손상함수 ϕ 를 다음과 같이 선택하였다.

$$-\phi'(\eta) = m \times \text{Erf}^{-1}(r(\eta-1)) + W_m \tag{14}$$

여기서, m 과 r 은 양수로 재료 상수를 의미하며, Erf^{-1} 는 에리함수의 역함수이다. 에리함수는 $\text{Erf}[x] = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ 로 정의되며, Figure 3과 같은 형태이다. 식 (14)을 식(11)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 손상변수 η 를 얻을 수 있다.

$$\eta = 1 - \frac{1}{r} \text{Erf} \left(\frac{1}{m} (W_m - W_0(F)) \right) \tag{15}$$

Figure 3은 η 의 의미를 응력-변형률 곡선을 이용하여 나타낸 것으로 제하에 대한 부하의 비로 설명할 수 있다. 다음 장에서는 pseudo-elastic 모델을 이용하여 카본블랙으로 보강된 고무 재료의 변

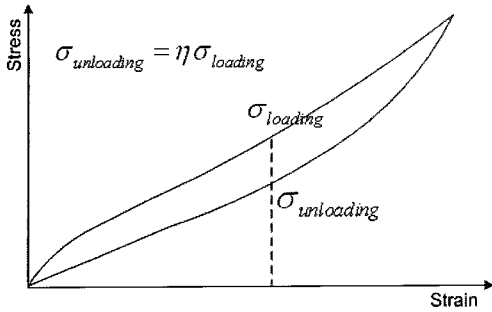


Figure 3. The damage parameter η defines the ratio of the unloading stress to primary loading stress.

Table 1. Formulations of the compounds (phr*)

Compound No.	1	2
SMR CV60	100	100
N220	55	32
Stearic acid	1.0	1.0
ZnO	5.0	5.0
Sulfur	1.8	1.8

*phr: part per hundred

형률 에너지 함수를 결정하고자 한다.

IV. 실험 및 모델상수 결정

1. 실험재료 및 실험방법

본 연구에서 사용된 재료는 천연고무이며 보강제로는 카본블랙을 사용하였고, 공정조제로 파라핀계 오일을 사용하였다. 가황 활성제로는 ZnO와 스테아린산을 사용하였으며, 가교제로 황을 이용하였다. 본 연구에서 사용된 고무 컴파운드의 조성비는 Table 1과 같으며, 카본블랙 함량을 각각 55와 32 phr 두 종류로 배합하였다. 가황시킨 고무 컴파운드를 배합, 밀링과정을 거친 후 금형을 이용하여 고무판의 크기가 150×150 mm가 되도록 168℃에서 10분간 가압하여 제작하였다. 가황 후 고무판에서 시편 커터를 이용하여 Figure 4와 같이 KS M6518의 아령 3호형을 사용하였으며, 시편은 시험 전에 25℃에서 최소 24시간 이상 유지시켰다. 고무재료의 점탄성 특성으로 인하여 기계적 특성은 변형률

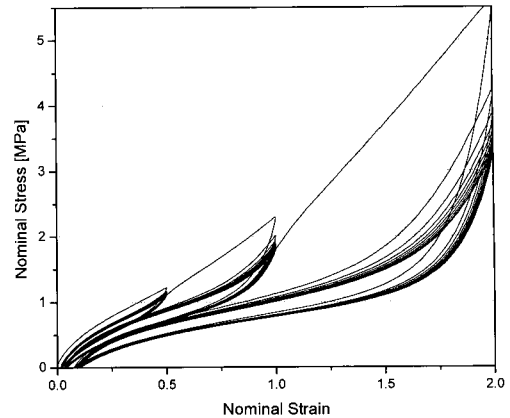


Figure 4. Uniaxial tension tests of a dumbbell specimen with maximum strains of 0.5, 1.0 and 2.0.

속도의 영향을 받는다. 일반적으로 변형률 속도가 클수록 재료의 응력은 증가하며, 작을수록 응력완화 (stress relaxation) 현상으로 인하여 상대적으로 응력이 감소한다. 준-정적 물성을 얻기 위하여 0.01/s의 동일한 변형률 속도로 시험을 수행하였다.¹⁰ 변형률은 50%, 100%, 200% 까지 각각 5회씩 부하-제하를 반복하면서 인장시험을 수행하였다. Figure 4는 단축 인장시험 결과로 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다.

2. 단축인장결과를 이용한 모델상수 결정

실험 결과로부터 변형률 에너지 함수의 모델 상수를 얻기 위하여 다음과 같은 방법을 취하였다. 등방성 재료에서 pseudo 에너지 함수는 오직 주 신장을 λ_i 를 통한 변형에 영향을 받는다. 이러한 의존성으로 pseudo 에너지 함수를 $W(\lambda_i, \eta)$ 로 쓸 수 있다. Cauchy 응력의 주응력 σ_i 는 다음과 같다.

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i}(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \eta) - p \quad (16)$$

여기서 p 는 정수압 (hydrostatic pressure)을 의미한다. 비압축성 재료의 경우 $\lambda_1 \lambda_2 \lambda_3 = 1$ 이므로 λ_3 는 λ_1 과 λ_2 로 나타낼 수 있다. 따라서 $W(\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \eta)$ 는 $W(\lambda_1, \lambda_2, \eta)$ 가 되며, 식 (16)으로부터 σ_i 는 각

각 $\sigma_1 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - p$, $\sigma_2 = \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} - p$, $\sigma_3 = -p$ 가 되며, p 를 소거하기 위하여 정리하면 다음과 같다.

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} \quad (17a)$$

$$\sigma_2 - \sigma_3 = \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} \quad (17b)$$

식 $\mathcal{W}(F, \eta) = \eta W_0(F) + \phi(\eta)$ 을 식(17a, 17b)에 대입하여 정리하면 각각 (18a, 18b)와 같이 된다. 여기서 W_0 는 주-부하 경로 상의 변형률 에너지 함수를 나타내며, λ_1, λ_2 는 주신장률이다.

$$\sigma_1 = \eta \lambda_1 \frac{\partial W_0}{\partial \lambda_1}, \quad \sigma_2 = \eta \lambda_2 \frac{\partial W_0}{\partial \lambda_2} \quad (18a,b)$$

변형률에너지함수로 식 (6)의 Mooney-Rivlin 모델과 식 (7)의 Ogden 모델을 이용하여, 단순인장에서는 $\lambda_1 = \lambda, \lambda_2 = \lambda_3 = \lambda^{-1/2}$ 이므로 주 부하에 대한 변형률 에너지 함수는 각각 다음과 같이 된다.

Mooney-Rivlin 모델 :

$$W_0 = C_1(\lambda^2 + 2\lambda^{-1} - 3) + C_2(\lambda^{-2} + 2\lambda - 3) \quad (19)$$

Ogden 모델 :

$$W_0 = \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i^2} (\lambda^{\alpha_i} + 2\lambda^{-\alpha_i/2} - 3) \quad (20)$$

식(19), (20)을 Cauchy 응력텐서 변환 식 (4) 및 공칭응력텐서 변환 식 (5)에 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

Mooney-Rivlin 모델 :

$$\sigma_1 = \lambda S_1 = 2\eta(\lambda - \lambda^{-2})(C_1 + C_2\lambda^{-1}) \quad (21a)$$

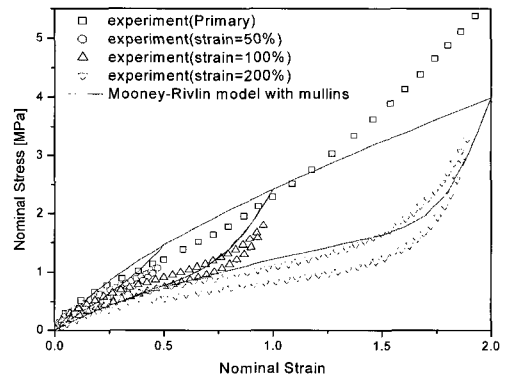
$$S_1 = 2\eta(1 - \lambda^{-3})(C_1 + C_2\lambda^{-1}) \quad (21b)$$

Ogden 모델 :

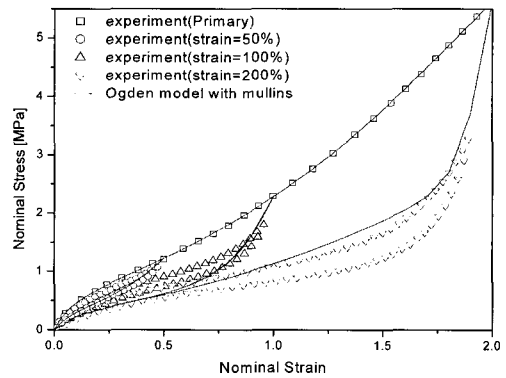
$$\sigma_1 = \lambda S_1 = \eta \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda^{\alpha_i} - \lambda^{-\frac{\alpha_i}{2}}) \quad (22a)$$

$$S_1 = \eta \sum_{i=1}^3 \frac{2\mu_i}{\alpha_i} (\lambda^{\alpha_i-1} - \lambda^{-\frac{\alpha_i}{2}-1}) \quad (22b)$$

Figure 5는 각각 Mooney-Rivlin 함수와 Ogden 함수로 피팅한 결과를 나타낸 것으로, Ogden 함수가 상대적으로 실험결과를 잘 묘사하고 있다. 즉, Ogden 모델이 비선형성을 더 잘 표현해주고 있기 때문에 이후의 과정에서는 Ogden 모델을 적용하기로 한다. 그러나, 응력이 연화되는 부분에 대해서는 Ogden 모델 또한 실험결과와 잘 일치하지 않고 있다. 이에 따라 손상 파라미터의 변수인 m 과 r



(a) Mooney-Rivlin model



(b) Ogden model

Figure 5. Plots of the stress-strain curve fitting result : (a) Mooney-Rivlin model; (b) Ogden model.

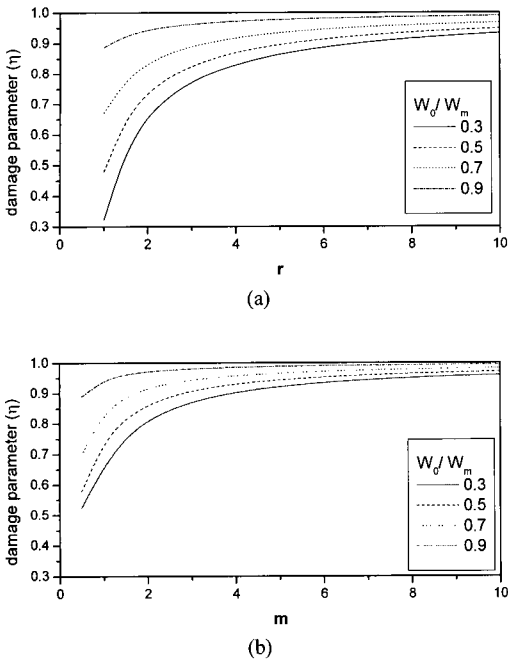


Figure 6. (a) Plot of the damage parameter(η) against r and m .

의 물리적 의미와 함께 응력 연화 곡선에 미치는 영향을 살펴보기로 한다.

Figure 6은 Mullins 효과를 표현하기 위한 손상 파라미터 식(15)에서 m 과 r 의 변화에 따른 응력-변형률 곡선을 나타낸 것이다. 식(15)에서 r , m 값이 커질수록 손상변수 η 는 1에 가까워져 손상 발생은 줄어들며, 무제한으로 커질 경우 손상변수는 1에 가까워져 응력연화는 거의 발생하지 않는 것을 Figure 6에서 나타내고 있다 (단, $r < 1$ 인 경우는 본 연구에서 배제).

Figure 7(a)에서 보는바와 r 값이 작아질수록 주 부하곡선과 제하 곡선과의 현저한 차이를 보이고 있어 초기 상태에서 부하에 의한 손상의 정도를 잘 묘사하는 변수로 판단된다.

Figure 7(b)에서 보는 바와 같이 m 값이 작아질수록 제하가 시작될 때 급격한 응력감소가 나타나지만, 변형률이 작은 영역에서의 재료 거동은 m 값에 상관없이 비슷한 응력수준을 보이고 있다. 전반적으로 변수 m 에 비하여 변수 r 이 손상의 정

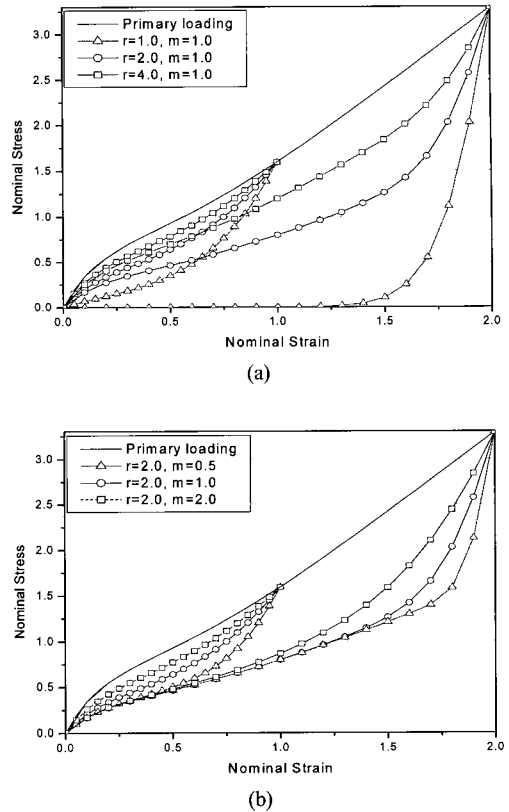


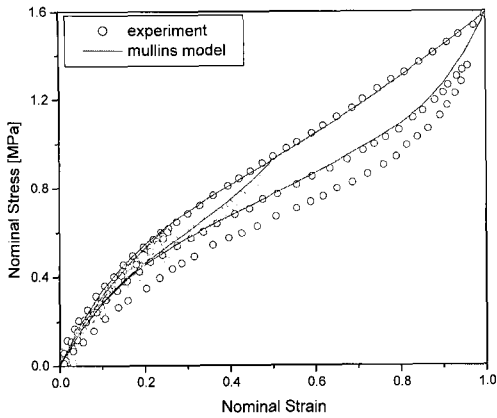
Figure 7. Plot of the nominal stress in uniaxial tension against the corresponding nominal strain for the Ogden model.

도를 주도적으로 묘사하고 있음을 알 수 있다.

3. 보강제 함량에 따른 변형을 에너지 함수 비교

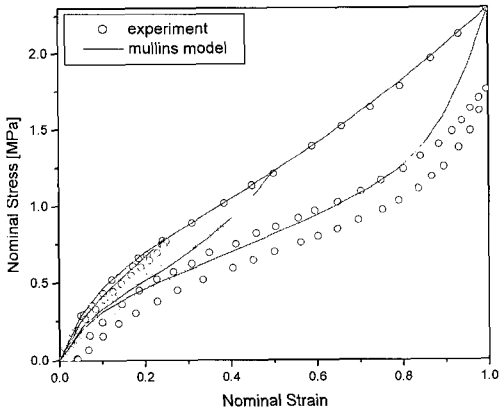
보강제 (filler) 함량에 따른 손상 파라미터 및 변형을 에너지 함수의 변화를 고찰해보기로 하자. Figure 8은 보강제인 카본블랙 (N220) 함량이 각각 32, 55인 천연고무 가황체의 실험결과와 변형을 에너지 함수를 비교한 그림이다. 두 그림을 비교하였을 때 보강제 함량이 많을수록 응력 연화가 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있으며, 이는 변형률이 커질수록 차이 또한 증가한다.

주 부하 곡선에 대해서는 비선형성을 잘 묘사하는 Ogden 변형을 에너지 함수를 선택하였다. 실험 결과에서 제하곡선을 잘 따라갈 수 있도록 r 과 m 값을 조절하여 최종적으로 응력연화거동을 표현



i	μ_i	α_i	damage parameter
1	-10.75	0.043	$\gamma = 5.898$ $m = 1.096$
2	3.750	1.364	
3	8.496	-1.593	

(a) Compound 1



i	μ_i	α_i	damage parameters
1	0.846	1.876	$\gamma = 2.981$ $m = 0.335$
2	-1.361	6.109	
3	2.966	-12.09	

(b) Compound 2

Figure 8. Determination of Ogden strain energy function considering mullins effect from experimental curve for compounds.

할 수 있는 변형을 에너지 함수를 구하였다. 보강제 함량이 적은 2번 컴파운드에 비해 보강제 함량

이 많은 1번 컴파운드에서 γ 및 m 값이 크게 나타났다. 이는 앞 절에서 설명한 결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.

V. 결 론

본 연구에서는, 고무재료의 응력 연화 현상인 Mullins 효과를 묘사할 수 있는 초탄성 변형을 에너지 함수 모델을 결정하기 위하여 고무 가황체를 이용하여 재료시험을 수행하고 응력 연화를 나타내는 손상 파라미터를 평가하는 과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 응력 연화 거동을 표현하기 위하여 기존의 변형을 에너지 함수에 손상 파라미터라는 새로운 변수를 추가한 Pseudo-Elastic 개념을 적용하였다.

(2) 손상 파라미터의 변수인 γ 과 m 의 변화에 따른 응력-변형을 곡선의 변화를 파악하여 각 변수에 물리적인 의미를 부여 하였다.

(3) 보강제의 함량을 달리한 고무 가황체의 단축 인장 시험결과를 이용하여 고무재료의 응력 연화 현상을 확인하였으며, 유한요소해석에 적용할 수 있는 변형을 에너지 함수를 결정하였다.

향후 본 연구 결과를 이용하여 압축 예하중을 받거나 반복하중을 받는 고무부품에 대한 유한요소해석 시 응력 연화 거동을 예측하는데 효과적이라 사료된다.

참고 문헌

1. W.D. Kim, C.S. Woo, K.S. Kim, and J.D. Kwon, "An experimental study on the dynamic characteristics of rubber isolator", *Elastomer*, **37**, 183 (2002).
2. L. Mullins, "Softening of rubber by deformation", *Rubber Chem. Tech.*, **42**, 339 (1969).
3. M.A. Johnson and M.F. Beatty, "The Mullins effect in uniaxial extension and its influence on the transverse vibration of a rubber string", *Continuum Mech. Thermodyn.* **5**, 83 (1993).
4. C. Miehe, "Discontinuous and continuous damage evolution in Ogden type large strain elastic ma-

- terials”, *Eur. J. Mech. A Solids*, **14**, 69 (1995).
5. G. Chagnon, E. Verron, L. Gornet, G. Marckmann, and P. Charrier, “On the relevance of continuum damage mechanics as applied to the Mullins effect in elastomers”, *J. Mech. Phys. Solids*, **52**, 1627 (2004).
 6. R.W. Ogden and D.G. Roxburgh, “A pseudo-elastic model for the Mullins effect in filled rubber”, *Proc. R. Soc. Lond.*, **455**, 2861 (1999).
 7. E.M. Arruda and M.C. Boyce, “A three dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials”, *J. Mech. Phys. Solids*, **41**, 389 (1993).
 8. M. Mooney, “A theory of large elastic deformation”, *J. Appl. Phys.*, **11**, 582 (1940).
 9. R. Ogden, “Recent advances in the phenomenological theory of rubber elasticity”, *Rubber Chem. Tech.*, **59**, 361 (1984).
 10. W.D. Kim, W.S. Kim, D.J. Kim, C.S. Woo, and H.J. Lee, “Mechanical testing and nonlinear material properties for finite element analysis of rubber components”, *Trans. of the KSME*, **28**, 848 (2004).
 11. S. Govindjee and J. Simo, “A micromechanically based continuum damage model for carbon black-filled rubber incorporating Mullins' effect”, *J. Mech. Phys. Solids*, **39**, 87 (1991).