

혼합형 고체 추진제의 비선형 구성방정식 개발 동향

정 규 동, 국방과학연구소

윤 성 기, 한국과학기술원 기계공학과

초 록

비선형 해석의 중요성이 증가하고 있는 혼합형 고체 추진제의 비선형거동중 재료비선형에 대한 거시적/미시적 현상을 설명하고, 그 주요한 원인으로 Mullin 효과와 결합제/충진미립자 사이의 접촉분리(Dewetting)를 주로 고찰하였다. 이를 응용한 지금까지의 비선형 구성방정식의 개발동향을 검토하여 비교하였으며 최근에 제시되고 있는 손상변수를 분석하였다. 여러 변형률 크기에 대한 응력이완 모듈러스 실험을 통하여 변형률 크기가 손상변수로서 적합하지 않음을 보였으며, 변형률 크기에 따라 모듈러스의 저하가 크기 때문에 비선형 점탄성 해석이 중요한 문제임을 제시하였다.

1. 서 론

혼합형 고체 추진제(Composite solid propellant)는 고충진된 점탄성 재료이며 고체 미립자로서는 산화제가 대부분(80 wt% 이상)을 차지하고 소량의 연료가 첨가되어 있다. 결합제는 약가교된 긴 사슬의 무정형 고분자이며, 점탄성 거동을 나타내는 고분자 결합제와 강체에 가까운 고체 미립자가 결합되어 복잡하고 심한 비선형 거동을 나타낸다고 알려져 있다.

이러한 고체 추진제는 그 변형의 정도가 크지 않을 경우에는 선형점탄성 이론을 적용할 수 있으나 변형률이 크고 회전량이 심한 경우에는 비선형 이론을 적용하여야 한다. 최근의 고체 추진제는 고충진을 위하여 대변형 추진제가 개발되고 있으므로 비선형 해석의 필요성이 증가하고 있다.

비선형 점탄성거동은 다음의 두가지 현상으로 대별할 수 있다.

- 기하학적 비선형 - 재료의 변형률 및 회전량이 커짐에 따라서 미소변형이론에서 무시되었던 변형률의 고차미분항 및 강체운동의 크기도 고려하여야 한다. 재료의 변형을 서술하는 방법에 따라 Lagrangian/Eulerian 방법으로 대별되며, 대변형이론을 적용하게 된다.

- 재료 비선형 - 점탄성 재료는 탄성재료와는 달리 온도에 따른 변화가 크며 변형에너지의 소산이 있기 때문에 이로 인한 시간-온도 변화효과에 비선형 거동이 존재하며, 추진제 재료의 분자사슬 구조로 인한 변형시의 연화효과(Mullin 효과), 고분자 결합제내의 결합으로 인한 비선형효과, 충전제 표면의 접촉분리(Dewetting)로 인한 비선형효

과 등등이 존재한다. 이러한 효과들은 모두 열역학적으로 비가역 과정으로서 손상으로 통칭하고 있으며, 선형이론으로 예측할 수 없는 재료비선형 거동이다.

고체 추진제의 비선형 거동은 특히 대변형시에 현저하게 나타나는데 다음과 같은 현상으로 표현할 수 있다.

- 대변형
 - 응력연화
 - 하중감소시의 급격한 응력감소
 - 반복하중시의 큰 히스테리시스
 - 열유변학적 복잡성
(Thermorheologically complex behavior)
 - 가압조건에서의 응력상승 (Elevation of stress due to the stiffening under pressure)
 - 비압축성거동에서 압축성거동으로의 변화
이러한 손상은 다음과 같은 추진제 재료의 미시적 현상에 기인한다.
 - 미소진공구의 생성과 성장
(Vacuole formation & Growth)
 - 결합제와 고체미립자 사이의 접촉분리 (Dewetting)
 - 고분자 사슬 절단(Molecular chain scission)
 - 주로 비가역적이지만 부분적으로는 회복되는 특성 (Healing)
- 혼합형 고체추진제의 경우 이러한 손상은 주로 응력연화 현상으로 나타나며, 진공구, 분자사슬 절단에 의한 크랙, 접촉분리는 경우에 따라 포함되는 양상에 차이가 난다.

비선형 특성중 기하학적 비선형은 대변형이론을 사용하여 나타낼 수 있으며 현재까지 점탄성 문제를 해석할 수 있는 상용화된 유한요소 프로그램(ABAQUS, TEXPAC등)에도 기하학적 비선형은 포함되어 있으나 재료비선형이 포함된 프로그램은 현재도 개발중에 있다. 따라서 변형량이 큰 추진제 그레이의 구조해석을 위하여는 사용 추진제의 특성에 따른 재료비선형을 특성화하여야 하며 본 논문에서는 현재까지의 혼합형 고체추진제에 대한 비선형 구성방정식의 개발동향을 설명하였다. 또한 손상변수로서 주로 고려되는 변형을 크기에 대하여 실험을 통하여 고찰하였다.

2. 고체추진제의 재료비선형 특성

2.1 선형 점탄성 재료

선형점탄성 특성은 재료내부의 점성, 즉 분자사슬의 상대적인 내부운동에 대한 저항에 의하여 야기되며 시간효과가 가역적이기 때문에 소멸기억(Fading memory)으로도 불리고 있다. 반면 하중이력의 효과가 남게되는 영구기억(Permanent memory)은 재료내 점성이외의 효과에 의하여 야기되며 시간효과가 가역적이지 않고 영구히 남아 영향을 준다. 추진제의 경우는 재료내 미소구조에서의 비가역적인 파손에 의하여 야기된다.

2.2 재료 비선형의 주원인

작은 변형에서는 Mullin 효과, 큰 변형에서는 미소진공구 생성에 따른 부피팽창(Vacuole dilatation)특성 때문이며 이외에도 비선형적인 점성과 장시간에서 나타나는 노화에 의한 소성효과가 있다.

1) Mullin 효과

- 강체에 가까운 충전미립자를 갖게 됨으로서 생기는 국부적인 응력 불균일에 의하여 분자 수준에서 고분자의 시간종속적인 파손이 발생하며, 이 결과 응력연화(즉 모듈러스 저하)현상이 나타난다(그림 1 참조).
- 감지할만한 미소진공구에 의한 부피팽창이 없는 작은 변형률에서도 발생하며 미소진공구를 형성하게 하는 전단계가 된다.
- 작은 변형률에서 Mullin 효과에 의한 추진제의 히스테리시스는 충전률이 낮고, 큰 가교결합을 갖는 고분자가 큰 변형률에서 나타내는 히스테리시스와 같다.
- 하중제거후 장시간 경과되면 초기 모듈러스가

일부 또는 전부 회복되며 이는 온도와 시간에 따른 복잡한 함수가 된다.

- Mullin 효과는 시간의 함수가 되며 응력이완 중 일부에서는 사슬절단이 발생하여 실제 평형(Equilibrium)상태는 얻을 수 없다.
- 충전제가 많을수록 시간효과가 커지며 충전제 양/가교결합 밀도가 Mullin 효과를 좌우한다.
- Mullin 효과는 주로 하중이력 동안의 최대 변형률에 좌우된다고 알려져 있다.

2) 미소진공구에 의한 부피팽창 (Vacuole dilatation)

- 큰 변형률에서 충분한 미시구조적 손상이 일어난 후 그림 1 과 같이 고분자나 고분자-결합제 계면에서 미소진공구가 형성되기 시작하며, 이에 따라 연화현상이 심화된다.
- 미소진공구는 손상이 가장 큰 부위에서 발생하며 이 부위는 국부적인 고분자 조직/접착강도/충전형상 특성(Packing characteristics)/고분자 사슬길이 분포/기타의 미확인 요소들에 좌우된다.
- 추진제의 응력-변형률 거동에서의 항복점과 같은 특성은 미소진공구 생성 현상과 일치한다.
- 미소진공구에 의한 부피팽창은 온도가 높을수록, 변형 부가율이 낮을수록, 압력이 높을수록 감소한다.

3) 가역적인 비선형성(Reversible nonlinearity)

- 재료내부의 점성에 의한 경우, 화학결합이 같은 비율로 분해/재결합 되는 경우 등이 원인이며 모듈러스가 저하되는 결과로 나타난다. 주로 큰 변형률에서 비선형성을 나타내나, 작은 변형률에서도 고체 미립자에 의한 응력집중때문에 결합제에 큰 변형률이 발생하고 비선형성이 발생한다.
- 증가하거나 일정한 변형률에서 가역적인 효과는 작으나, 감소하는 변형률이거나 회복(Recovery) 동안에는 중요한 효과를 나타낸다.

4) 소성효과

- 장기간 저장 등에서는 노화(Aging)에 의하여 소성효과가 나타나며 영구변형이 남는다.

2.3 추진제의 손상/회복 기구

전술한 바와 같은 기계적 손상은 미시적 현상으로서 다음과 같이 분류될 수 있다.

- 변형에 의한 분자사슬의 절단
- 결합제내의 미소진공구 생성, 미세크랙 생성/

성장

· 결합제와 고체충전 미립자 사이의 접촉분리 (Dewetting)

이러한 손상은 주로 비가역적이나 하중을 제거시킨후 시간이 지나면 이러한 손상은 기계적 의미에서의 열로 발산되며 일부 또는 전부가 회복된다. 회복(Healing)은 무부하 시간(Rest time)의 함수이며 다음과 같은 기구로 설명된다.

· 표면 전위(Surface rearrangement): 새로 형성된 미세 크랙 표면의 분자운동은 다음 단계에 영향을 미치는 새로운 입체배열(Configuration)을 야기한다. 따라서 손상이력의 개념은 중요하며 심각한 전위가 일어나면 회복반응은 제지될 수 있다.

· 침지(Wetting): 미세 크랙 표면은 침지될 수 있으며, 육안상 크랙은 사라지나 강도는 일부만 회복된다.

· 확산(Diffusion): 접촉면의 분자사슬이 상호확산하여 상호침투된 사슬의 새로운 입체배열이 생성되며 강도의 회복이 뒤따른다. 이 단계는 가장 느린 반응이며 대부분의 강도가 회복되는 과정이다.

· 불규칙화정(Randomization): 미묘한 마지막 단계로서 장시간의 불규칙한 분자운동에 의하여 손상기억(Damage memory)이 완전히 소거될 수도 있다.

3. 비선형 구성방정식 개발동향

추진제는 그 재료자체의 불균질성, 시간/온도/하중이력등의 복합된 점탄성효과로 인하여 정확한 응력예측이 매우 어렵다. 응력예측시 목표로 하는 정확도는 손상이력이 없는 추진제의 경우 오차 < 10%, 손상이력이 있는 추진제(Pre-damaged propellant)의 경우는 오차 < 15% 정도이다.

3.1 현상학적인 접근방법(Phenomenological approach)

추진제 손상은 다음과 같은 두가지 접근방법으로 접근할 수 있다.

1) $\sigma(t) = \sigma_m(t) - \sigma_1(t)$ ex) Farris Model

2) $\sigma(t) = c(\epsilon_{max}, \dots) \sigma_1(t)$

ex) Swanson Model, Schapery Model

여기서 $\sigma_1 = E_{\infty}\epsilon + \int_0^t \Delta E(t-z) \frac{d\epsilon}{dz} dz$

:선형점탄성 구성방정식

3.1.1 다중적분법(Multiple integral representation)

'60년도에 Christensen 등이 제안하였으며, 응력-변형률 관계를 다항식(Polynomials)으로 설정한 후 다중 convolution 적분식으로 표현한 방법으로서 사용변수가 많고 계산이 복잡하여 실제 공학적 적용이 어렵다.

3.1.2 Schapery 모델 (I)

'67년에 제시되었으며 비평형상태에 대한 열역학 원리를 사용하여 미시구조적 손상을 열역학적으로 고찰한 모델이다. 자유에너지(Free Energy)의 큰변화는 주로 계면의 접촉파괴, 엔트로피의 큰변화는 국소부위의 파괴에 따른 분자사이의 큰 상대운동에 관련됨을 이용하여 비선형 Fading memory 효과를 특성화하였으며, 비교적 간단하지만 재료비선형성을 가정사함없이 일반적으로 유도한 식이다. 그 결과식은 다음과 같다.

$$\sigma = h_0\epsilon + h_1 \int_0^t \Delta E(x-x') \frac{dh_2\epsilon}{dz} dz$$

여기서 $x \equiv \int_0^t dt/a_\epsilon, x' \equiv \int_0^z dt/a_\epsilon,$

$a_\epsilon, h_0, h_1, h_2 = \text{fn}(\text{Strain, Temp})$: 비선형 함수

3.1.3 Farris 모델

'73년도에 Farris 가 제안하였다. 선형 점탄성 이론에 시간종속적인 Mullin 효과를 L_p norm 으로 특성화하였으며 미소진공구 생성에 의한 모듈러스의 저하를 별도로 고려하였다. 불변량(Invariants)의 형태를 실험 결과에 비추어 잘 규명하였으며, 부피팽창과 비틀림변형(Distortion) 사이의 결합(Coupling)도 고려하여 구성방정식을 나타낸 것이 특징이다.

3.1.4 Swanson 모델

'83년에 Swanson 이 선형 점탄성 Convolution 적분을 일반화시켜 구성 방정식을 제안한 것으로서, 비선형거동중 Mullin 효과는 최대변형률(또는 최대 변형불변량)의 함수인 연화함수(Strain softening fn), g 로 나타내고 있다. 이 모델은 대표적인 현상학적인 접근방법으로서 변형률 50% 이내에서 잘 맞는 것으로 알려져 있으며 함수 g 를 결정하는 것이 간단한 장점이 있다. 반면 g 함수를 여러하중 조건에 대하여 따로 설정하여 구하였으며 따라서 실험결과에 보다 잘 맞을 수도 있으나 통합된 구성방정식은

되지 못한다. 그 결과식은 다음과 같다.

$$\sigma_{kk}/3 = f(\sqrt{III C} - 1)$$

$$S'_{ij} = A_F g(\epsilon) \int_0^t 2 G_r(t-\tau) \frac{\partial E'_{ij}}{\partial \tau} d\tau$$

여기서

$$S'_{ij} = S_{ij} - (S_{kk}/3) I$$

: Deviatoric 2nd P-K stress

$$E'_{ij} = E_{ij} - (E_{kk}/3) I$$

: Deviatoric Green strain

A_F = Thermo-mechanical coupling factor

$III C$ = 3rd Invariant of Right Cauchy
- Green strain tensor

여기서 $g(\epsilon)$ 은 최대변형률(또는 최대 변형률변량)을 기준으로 고찰하였으며 다음과 같다.

- 증가하는 하중시

$$g_L = g(\epsilon_{max}, \dot{\epsilon}) = g(\sqrt{II E'_{max}}, \sqrt{II \dot{E}'_{max}})$$

- 감소하는 하중시.

$$g_U = g(\epsilon/\epsilon_{max}) = g(\sqrt{II E'_{max}})$$

$$= [1 - c(1 - \sqrt{II E'}/\sqrt{II E'_{max}})]$$

- 응력이완 과정시

$$g_R = g_R(t-t_0), t_0 = \text{응력이완 시작시간}$$

- 무부하시, 또는 부분적 하중제거후의 응력이완시

$$\hat{g}_R = \frac{1}{g_R(t-t_0)}$$

- 하중 재부가시: 상대적인 변형률의 선형함수

여기서 $II E'$: 2nd Invariant of Green strain

3.1.5 Simo 모델

'87년에 Simo가 제안한 3-D, 유한변형률, 이방성 모델로서 손상은 Mullin 효과로 고려하고 있다. 제한조건없이 사용할 수 있는 장점이 있으나 변수들을 결정하는 것이 쉽지 않다. 손상을 제외한 기하학적 비선형만을 고려한 다음과 같은 식이 현재 TEXPAC, ABAQUS의 구성방정식으로 사용될 만큼 일반적으로 인정받고 있는 모델이라 할 수 있다.

$$S(t) = 2J^{-2/3} DEV \left[\int_0^t G(\xi(t) - \xi(\tau)) \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} DEV \left[\frac{\partial u}{\partial C} \right] d\tau \right] + pJC^{-1}$$

3.1.6 Ozupek, Becker 모델

Swanson 모델과 Simo 모델의 장점만을 취하여 '90년에 제안되었으며, Simo 모델에

Swanson 모델의 연화함수, g 를 포함시킨 것으로서 근본적으로는 Simo 모델과 거의 같다고 볼 수 있다.

3.1.7 Burke 모델

Colemann-Noll의 고전 비선형 점탄성 이론을 수정하여 '90년에 제안된 모델로서 일반기억함수(General memory fn)를 사용하여 비선형 효과를 표현하도록 한 방법이다. 일반적이고 실제적인 많은 변수(변형률 크기 효과, 습도효과 등)를 포함하여 나타낼 수 있는 장점이 있으나 결정해야 할 변수가 많은 것이 단점이다.

3.1.8 G. Ravichandran, C. T. Liu 모델

미소진공구 생성이나 계면접착분리에 의한 손상효과에 대하여 손상변수를 부피 팽창량(Volume dilatation)으로 고려한 최초의 시도로서 연화함수를 다음과 같이 부피변화/뒤틀림변화로 나누어 고려한 것이 특징이다. 아직은 탄성모델의 수준이다.

$$\sigma_{ij} = K_0 g(\varphi_p) \Theta \delta_{ij} + 2\mu h(\varphi_s) e_{ij}$$

여기서 K_0 : Bulk modulus, μ : Shear modulus

g, h : isotropic damage fn,

φ_p, φ_s : internal variables,

$\Theta = \epsilon_{kk}$: Vol. dilatation

Single internal Var.

$$\varphi_p = \varphi_s = \varphi^m = \text{Max.} \{ \Theta \}$$

3.2 미시구조학적 접근방법(Micromechanical approach)

3.2.1 Schapery 모델 (II)

'70년에 Schapery가 제시하였다. 재료의 손상을 충전 미립자 부근의 크랙으로 모사하여 점탄성 파괴역학을 사용하여 접근하고 있다. 이 이론은 대표적인 미시구조학적 접근방법으로서 비교적 낮은 변형에서 잘 맞는다고 알려져 있으며 현재도 계속 개선되어 복합재의 비선형점탄성 해석 모델로 확장중이나, 결정해야 할 변수가 많은 것이 단점이다.

3.2.2 Anderson 모델

'89년에 제안된 모델로서 재료의 비선형거동을 결합제와 고체충전 미립자 사이의 접촉분리(Dewetting)의 영향으로 간주하였으며, 미소진공구 생성에 의한 모듈러스 감소로서 재료비선형을 접근하고 있다. 접촉분리 시작점을 크랙

전파시의 Griffith 이론과 유사한 에너지 평형식으로 구하는 방법을 사용하고 있다. 아직까지는 탄성모델 수준이나 접착분리 시작점을 미시구조적으로 제시한 장점이 있다. 즉 접착분리가 일어나는 미소증분에서 열역학 제 1 법칙은

$$\delta U = \delta U_{\text{strain}} + \delta U_{\text{surface}} = \delta W + \delta Q$$

$$\text{여기서 } \delta U_{\text{strain}} = \frac{1}{2} V_0 (\sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} + \epsilon_{ij} \delta \sigma_{ij}),$$

$$\delta W = V_0 \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij},$$

$$\delta U_{\text{surface}} - \delta Q = G_c \times \delta A$$

G_c : 단위면적을 분리시키는 에너지
= γ 이며,

이로부터 접착분리 발생점은

$$\frac{2 G_c \delta A}{V_0} = \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij} \delta \sigma_{ij} \text{ 가 된다.}$$

- 일축상태인 경우

$$9\epsilon^2 \left[\frac{dE}{dc} \right] + 6 \left[\frac{P}{K} \frac{dE}{dc} - \frac{PE}{K^2} \frac{dK}{dc} \right] \epsilon + \frac{P^2}{K^2} \left[(9-2E/K) \frac{dK}{dc} + \frac{dE}{dc} \right] = 108 \frac{\gamma}{R}$$

(at $P \neq 0$)

$$\epsilon^2 \left[\frac{dE}{dc} \right] = 12 \frac{\gamma}{R} \quad (\text{at } P=0.)$$

윗식으로부터 충전미립자 크기가 큰 것부터 접착분리가 시작된다.

추진제는 입자 강화 복합재(Particulate Composite)이므로 결합제와 고체충전 미립자 사이에 접착분리가 발생하면 미접착된 미립자는 충전 미립자의 농도 c 를 감소시키므로 모듈러스가 저하하며 이는 Farber & Farris 방법(미분방식)으로부터 다음식으로 계산할 수 있다.

$$\frac{dG}{dc} = \frac{-15 G(1+\nu) \left(1 - \frac{G_i}{G}\right)}{\left\{7 - 5\nu + 2(4-5\nu) \frac{G_i}{G}\right\} (1-c_{\text{eff}})}$$

$$\frac{dK}{dc} = \frac{K - K_i}{\left\{1 + \frac{K_i - K}{K + \frac{4}{3}G}\right\} (1-c_{\text{eff}})}$$

<B.C.> at $c=0$, $G = G_m$, $K = K_m$,
at $c=1$, $G = G_i$, $K = K_i$

3.3 손상회복(Damage healing) 연구

손상회복에 대한 연구는 많은 진전은 없으며 Wool에 의하면 회복과정은 다음과 같은 Arrhenius의 속도식으로 표현되고 있다.

$$\text{Damage } D : -\frac{dD}{dt} = kD^n$$

$$\text{Healing } H : H = 1 - \frac{1 - H_0}{(1 + Kt)^a}$$

여기서 k , H_0 는 상수, $K = K_0 e^{(-E/RT)}$,

E : 활성화 에너지, R : 가스상수

따라서 Master healing curve 가 W.L.F 식과 같은 방식으로 얻어진다.

3.4 결합제/충전미립자 접착분리 기준

1) G. H. Lindsey, J. E. Woods (1975)

소성변형 이론(Deformation theory of plasticity)과 유사한 방법으로 유도된 응력 불변량 기준(Stress Invariant criteria)으로서 다음과 같다.

$$f(I_1, J_2) = J_2 + \alpha I_1^2 - C \quad (\text{at } I_1 \geq 0) \\ = J_2 - C \quad (\text{at } I_1 < 0)$$

여기서 $\alpha = \frac{G^2}{9K^2} \frac{dK}{dG}$, $I_1 = \sigma_{ii}$,

$$J_2 = \frac{1}{2} s_{ij} s_{ij}, \quad C : \text{상수}$$

접착분리는 충전제-결합제 경계면 부근에서의 결합(cohesive & adhesive bonds)이 인장과 전단에 의한 파괴로 발생하는데 정수압만 작용하는 경우는 충전 미립자 주위에 이러한 응력분포를 만들지 못하므로 접착분리 시작에는 영향을 미치지 못한다.

2) Anderson 모델

Anderson의 구성방정식에서 유도된 변형률 기준으로서 다음과 같다.

$$\frac{2 G_c \delta A}{V_0} = \sigma_{ij} \delta \epsilon_{ij} - \epsilon_{ij} \delta \sigma_{ij}$$

3.5 압력과 습기의 영향

응력이완 모듈러스에 대한 압력의 효과는 실험에 의하면 저온에 의한 효과와 유사하다. 따라서 시간-온도 중첩과 유사하게 시간-압력 중첩으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Log } a_{T,P} = \frac{C_1 [T - T_0 - \Theta(P)]}{C_2 + T - T_0 - \Theta(P)}$$

여기서

$$\Theta(P) = C_3 \ln \left[\frac{1 + C_4 P}{1 + C_4 P_0} \right] - C_5 \ln \left[\frac{1 + C_6 P}{1 + C_6 P_0} \right]$$

또한 습기효과가 존재하는 경우 a_T 와 유사한 개념으로 습기이송인자, a_M 을 정의하여, 다음과 같이 환산시간(Reduced time), τ 를 구하여 사용

할 수 있다.

$$\tau = \int_0^t \frac{dt}{a_T [T(x, t)] a_M [M(x, t)]}$$

3.6 현 동향

현상학적인 접근방법의 경우 재료비선형을 경험적 손상변수에 의존하고 있으며 이는 쉽게 정량화(quantifiable)할 수 없다. 따라서 많은 설계 변수에 의한 비선형함수들이 사용되고 있으며, 실제로 실험으로 확인된 범위의에서 잘 맞지 않는 경우가 다수 보고되고 있다. 이 때문에 재료 비선형에 대하여 여러가지의 모델이 제시되고 있는 실정이다. 또한 기존의 방법들은 손상변수로서 최대변형률 또는 최대 변형률 불변량과 같은 변형률 크기를 적용하고 있는데 실제 추진체는 고체 미립자에 따라 국부적인 응력분포가 다르기 때문에 거시적인 변형률 크기로서 손상 정도를 나타내는 것은 오차가 클 것으로 판단된다. 또한 변형이 클 경우에는 미소진공구에 의한 부피팽창에 의하여 응력연화 정도가 다르고, 비압축성에서 압축성으로의 변화를 포함하기 위하여 G. Ravichandran, C. T. Liu 모델과 같이 손상변수를 미소진공구에 의한 부피 팽창량으로 고려하는 것이 보다 합리적일 것으로 평가되고 있다.

또한 혼합형 고체 추진체와 같은 복합재료의 경우는 충전 미립자의 농도, 크기분포, 형상에 따라서 그 물성의 변화가 다르기 때문에 보다 정확한 해석을 위하여는 Anderson 모델과 같은 미시 구조적인 접근방법을 적용하여야 할 것으로 판단된다.

4. 손상변수 확인시험

4.1 시험내용

손상이 부가된 추진체의 거동을 확인하기 위하여 여러 변형률 크기에서 응력이완 모듈러스를 측정하여 그 차이를 확인하였다.

HTPB 추진체의 Tab-ended 1축 시편 (단면적 $10 \times 10 \text{ mm}^2$, 길이 100 mm)을 사용하여 시험온도 -40, -20, 20°C, 변형률 $\epsilon=2, 5, 10, 15, 20, 30\%$ 에서 응력이완 모듈러스를 측정하였다.

4.2 결과

시험결과 그림 2 에서와 같이 부가되는 변형률 크기에 따라 모듈러스의 저하가 나타나고 있으며 이 현상은 모든 시험온도에서 유사한 경향을 나타낸다. 그 저하율은 그림 3 에서와 같이 2% 에

서의 모듈러스에 비하여 절반이하까지 나타나고 있으며 이 현상은 미소진공구 생성에 따라 미접착된 충전 미립자가 구조적인 역할을 하지 못하기 때문이다. 관련문헌에 의하면 접착분리는 최소 2% 정도의 변형률에서부터 발생한다고 알려져 있으며 본 실험에 적용된 추진체의 경우도 5%의 변형률에서 모듈러스의 저하가 나타나고 있다. 따라서 2%에서 측정된 모듈러스를 적용하고 있는 선형점탄성 해석방법은 작용변형률이 작은 경우로 제한되어야 한다. 반면 그림 2 의 -40°C에서의 실험결과에 따르면 변형률 15%와 20%에서의 모듈러스는 거의 유사하며 이는 그림 2 의 우측하단과 같은 부피변화 선도로 설명될 수 있다. 즉 이 그림은 혼합형 고체추진체의 경우 나타나는 전형적인 응력-변형률, 부피변화율-변형률 선도인데 -40°C시험의 경우 최대응력에서의 변형률 e_m 은 약 15% 정도이며 변형률이 e_m 에 도달하기 전에 모든 산화제 미립자에 접착분리가 발생한다. 이는 변형률에 따른 부피변화율이 일정한 것으로 알 수 있으며 따라서 변형률이 15% 이상에서는 더 이상의 모듈러스 저하는 발생하지 않는다. 그림 4 는 5%, 15% 변형률에서의 모듈러스를 시간-온도 중첩원리에 따라 수평이동하여 Master curve를 얻은 것이다. 이 결과 5% 변형률에서는 각온도에서의 모듈러스가 중첩이 잘 되었으나 15% 부터는 시간-온도 중첩원리가 적용될 수 없었다. 이는 변형률 수준이 손상의 기준으로서 부적합하다는 것을 나타내는 것이다. 이 현상은 각 온도별로 e_m 이 다르고 따라서 같은 변형률이라도 손상의 정도, 즉 접착분리 정도가 다르기 때문에 나타나는 결과라고 판단된다. 따라서 손상변수로서 최대 변형률 관련 양을 적용해왔던 기존의 구성방정식(Swanson 모델, Schapery 모델 등) 보다는 부피팽창량을 적용하고 있는 구성방정식 (Anderson 모델, G. Ravichandran, C. T. Liu 모델)이 보다 적합한 것으로 평가된다.

5. 결 론

- 1) 혼합형 고체 추진제의 재료비선형 요인 및 구조적 현상을 분석하였으며, 결합제와 고체충전 미립자 사이의 접착분리에 의한 부피팽창이 재료 비선형에 미치는 영향이 가장 큰 것을 알 수 있었다.
- 2) 고체 추진제에 대한 비선형 구성방정식 개발동향을 파악하고 비교하였다.
- 3) 추진제의 응력이완 모듈러스는 5% 변형률에서도 2% 변형률에서 시험된 값보다 저하가 나타났다으며, ϵ_m 이전까지는 적용변형률에 따라 저하율도 증가하였다. 따라서 추진제 구조해석의 경우 비선형 구성방정식의 적용이 필수적이다.
- 4) 재료비선형에 대하여 적용할 수 있는 손상변수로서 변형률 크기는 적합하지 않았으며, 미소진공구에 의한 부피팽창량을 적용하고 있는 구성방정식이 보다 적합할 것으로 평가되었다.

참고문헌

1. R. M. Christensen, "Theory of Viscoelasticity", 2nd ed., 1982
2. J. D., "Viscoelastic Properties of Polymers", 3rd ed., 1980
3. R. J. Farris, R. A. Schapery, "Development of a Solid Rocket Propellant Nonlinear Viscoelastic Constitutive Theory", AFRPL-TR-50,1973
4. E.C. Francis et al, "Solid Propellant Non-linear Constitutive Theory Extension", AFRPL-TR -83-071, 1984
5. L. A. Vratsanos & R. J. Farris, "A Predictive Model for the Mechanical Behavior of Particulate Composites, Part I: Model Derivation, Part II: Comparison of Model Predictions to Literature Data", Polym. Eng. Sci., 1993
6. G. Ravichandran, Int. J. Solids Structures, "Modelling Constitutive Behavior of Particulate Composites undergoing Damage", Int. J. Solids Structures, Vol. 32, 1995

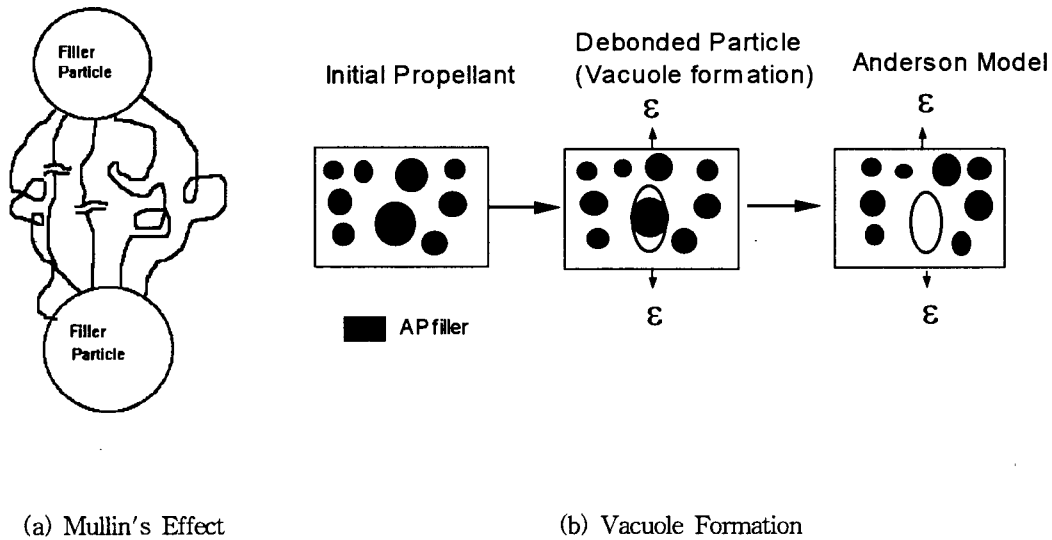


그림 1 혼합형 고체 추진제의 미시구조적 손상기구

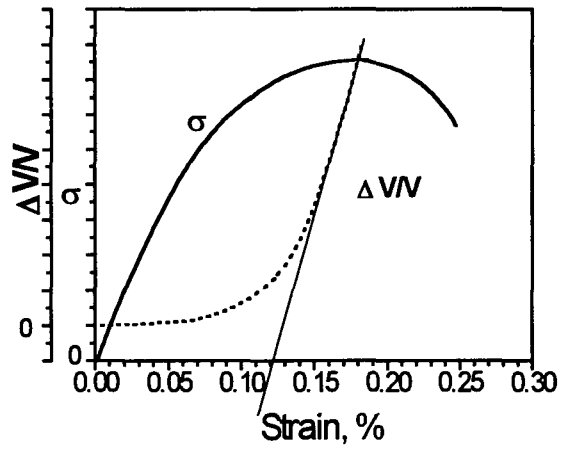
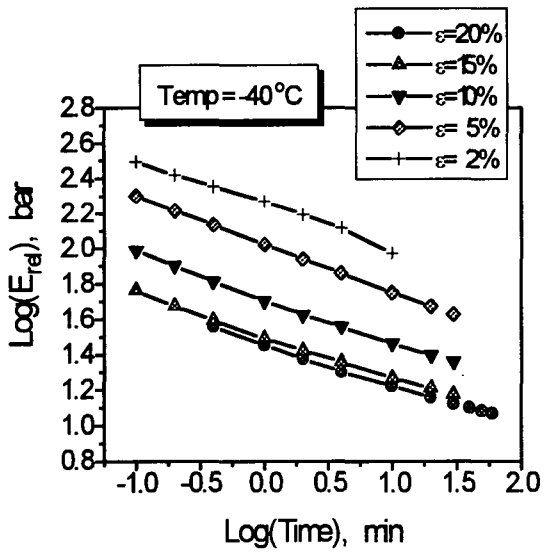
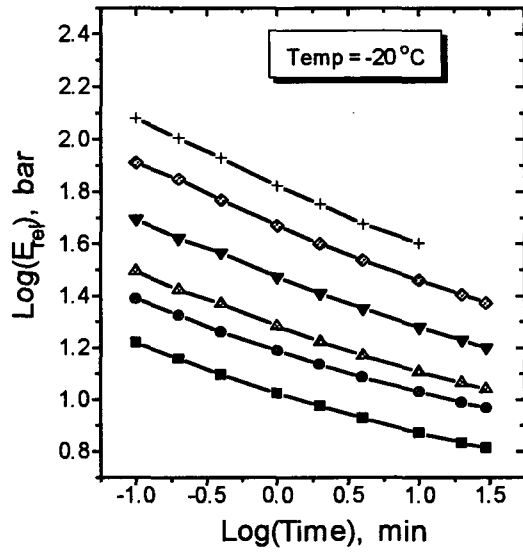
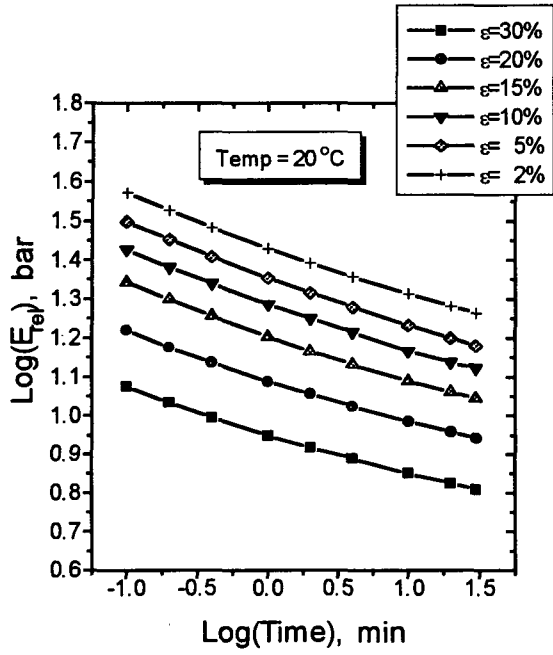


그림 2 여러 변형률 크기에서 수행된 응력이완 모듈러스

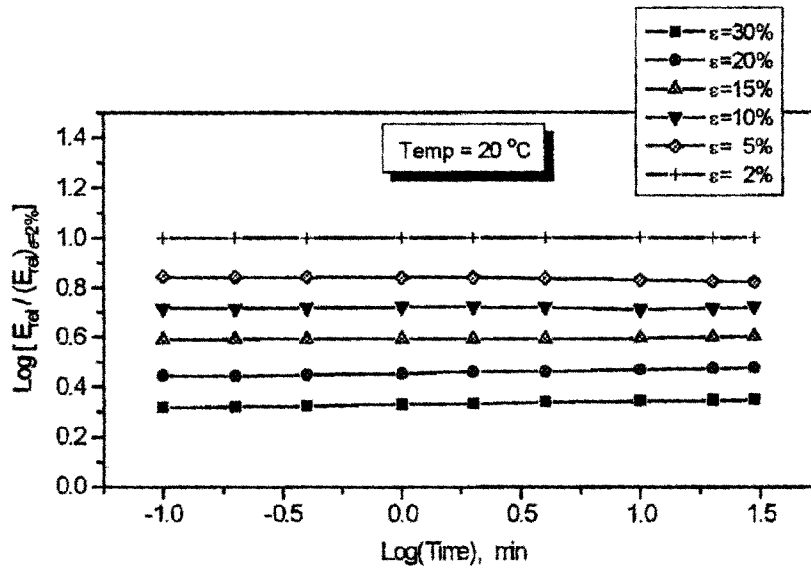


그림 3 20°C 에서 수행된 Relaxation Modulus 의 저하율

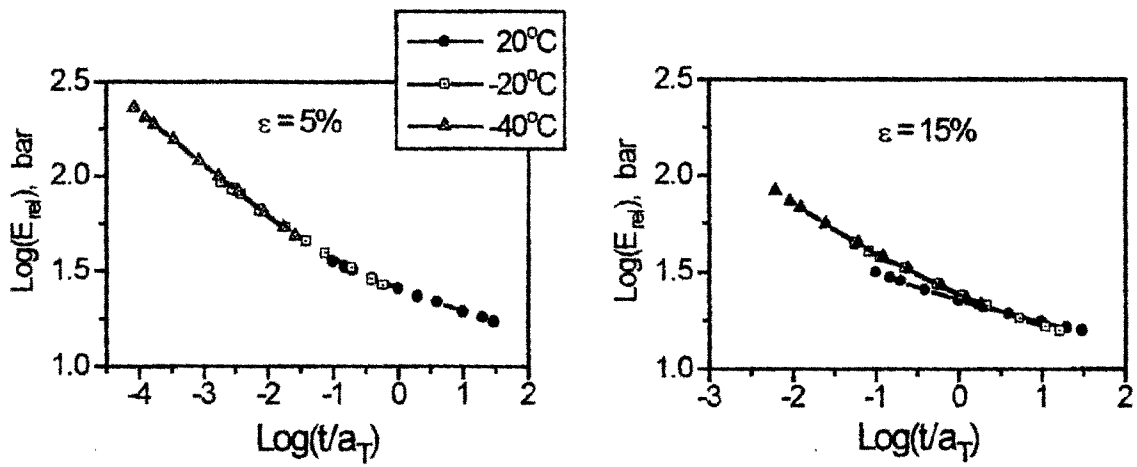


그림 4 변형률 5%, 15% 에서 수행된 응력이완 모듈러스의 중첩