형상기억합금 상호작용 에너지의 유한요소 계산

양승용†

Finite element calculation of the interaction energy of shape memory alloy

Seung-Yong Yang

Key Words : Shape memory alloy (형상기억합금), Phase transformation(상변화), Interaction energy (상호작용 에너지), Finite element analysis (유한요소해석)

Abstract

Strain energy due to the mechanical interaction between self-accommodation groups of martensitic phase transformation is called interaction energy. Evaluation of the interaction energy should be accurate since the energy appears in constitutive models for predicting the mechanical behavior of shape memory alloy. In this paper, the interaction energy is evaluated in terms of theoretical formulation and explicit finite element calculation. A simple example with two habit plane variants was considered. It was shown that the theoretical formulation assuming elastic interaction between the self-accommodation group and matrix gives larger interaction energy than explicit finite element calculation in which transformation softening is accounted for.

기호설명

a_0 : reference strain rate

η_α : order parameter of α -th habit plane variant

τ_α : critical resolved shear stress of α -th habit plane variant

γ_c : strain of fully transformed state

1. 서 론

형상기억합금은 상변화(phase transformation) 하는 동안 각각의 헤비트 상(habit plane variant)들이 자기보완 그룹(self accommodation group)을 형성하여 집합체로 존재한다는 사실이 알려져 있다.(1) 각각의 상들이 모여서 그룹을 형성함으로써 그룹의 전체적인 변형률은 주위 값과의 차이가 줄어들게 되고 따라서 상변화에 수반되는 변형률 부접합(incompatibility) 및 응력이 줄어들고 상변화가 좀 더 수월하게 이루어질 수 있게 된다. Huang 과 Brinson (2) 은 형상기억합금의 기계적 거동을 예측하기 위하여 자기보완 그룹과 주위 사이의 기계적인 상호작용과 관련된 에너지인 상호작용 에너지(interaction energy)를 고려한 구성방정식을 제시하였다. 자기보완 그룹과 기지(matrix) 사이의 상호작용은 탄성적이라고 가정하여 상변화가 일어나는 속도에 대한 관계식을 유도하였다. 따라서 상호작용 에너지의 크기는 상변화가 일어나는 임계 응력 및 상변화 속도와 밀접한 관계를 가지게 된다.

본 논문에서는 상호작용 에너지의 크기를 계산하기 위하여 유한요소법을 이용하여 자기보완 그룹을 모델링 하였다. 자기보완 그룹과 주위 사이의 기계적인 상호작용을 유한요소해석을 이용하여 직접적으로 고려함으로써 탄성적인 상호작용뿐만 아니라 상변화에 수반되는 연화(softening)도 고려에 포함하였다. 자기보완 특성을 이해하기 위하여 단순화된 2 개의 헤비트 상을 가지는 상변화를 가정하였으며, 상변화 과정 동안의 상호작용 에너지의 변화를 조사하였다. 유한요소해석 결과와 Huang 과 Brinson 의 공식에 의한 결과를 비교하였으며, 유한요소해석의 경우 상호작용 에너지의 값이 낮아짐을 확인할 수 있었다.

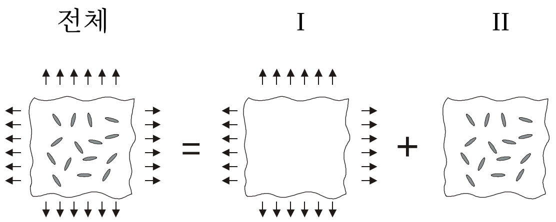
† 한국철도기술연구원
E-mail : yangsy@krri.re.kr
TEL : (031) 460-5115 FAX : (031) 460-5289

2. 상호작용 에너지에 대한 요약

본 절에서는 Huang 과 Brinson 의 논문(2)에 기술된 형상기억합금의 상호작용 에너지에 대하여 검토하고 그 내용을 요약하였다. Fig. 1 의 왼쪽에 나타낸 것과 같이, 여러 상의 마르텐사이트 결정이 공존하는 거시적인 영역에 외력이 작용하는 경우를 고려할 때, 물체의 탄성거동이 균일(homogeneous)하다고 가정하면 왼쪽의 문제는 중첩의 원리를 이용하여 오른쪽과 같은 두개의 문제로 분해할 수 있다. 오른쪽의 첫번째 문제(I)는 균일한 탄성 재질에 외력이 작용하는 경우이므로 국소적인(local) 상태는 전체적인(global) 상태와 동일하다.

$$\sigma_{ij}^{I} = \Sigma_{ij}^{I} = \Sigma_{ij}$$
$$\varepsilon_{ij}^{I} = E_{ij}^{I} = E_{ij}^{e}$$

두번째 문제(II)는 외력이 작용하지 않는 자유 상태 물체의 내부에 마르텐사이트 상들이 존재하는 경우이다. 이 경우 국소 변형률은 상변화에 의한 성분과 탄성 성분의 합이고, 국소 응력은 상변화 거동에 대한 응력-변형률 관계에 의해 구해진다. 외력이 없으므로 전체 응력은 0 이며, 전체 변형률은 상변화 성분만을 갖는다.



Σ_{ij}	$\Sigma_{ij}^{I} = \Sigma_{ij}$	$\Sigma_{ij}^{II} = 0$
$E_{ij} = E_{ij}^{e} + E_{ij}^{p}$	$E_{ij}^{I} = E_{ij}^{e}$	$E_{ij}^{II} = E_{ij}^{p}$
σ_{ij}	$\sigma_{ij}^{I} = \Sigma_{ij}^{I}$	σ_{ij}^{II}
$\varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{p}$	$\varepsilon_{ij}^{I} = E_{ij}^{I}$	$\varepsilon_{ij}^{II} = \varepsilon_{ij}^{IIe} + \varepsilon_{ij}^{IIp}$

Fig. 1 Decomposition of total problem.

I 과 II 의 전체 및 국소적인 응력과 변형률을 합하면

$$\Sigma = \Sigma^{I}$$
$$E = E^{e} + E^{p}$$
$$\sigma = \sigma^{I} + \sigma^{II} = \Sigma + \sigma^{II}$$
$$\varepsilon = \varepsilon^{I} + \varepsilon^{II} = E^{e} + \varepsilon^{IIe} + \varepsilon^{IIp}$$

탄성 변형률 에너지 밀도(elastic strain energy density)는 다음과 같다.

$$W_{el} = \frac{1}{2V}\int_{V} \sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^{e} dV$$

각 항의 값을 대입하면

$$\begin{aligned} W_{el} &= \frac{1}{2V}\int_{V} \left(\Sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{II}\right)\left(E_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{IIe}\right) dV \\ &= \frac{1}{2V}\int_{V} \left(\Sigma_{ij} + \sigma_{ij}^{II}\right)\left(E_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{II} - \varepsilon_{ij}^{IIp}\right) dV \\ &= \frac{1}{2V}\int_{V} \Sigma_{ij} E_{ij}^{e} dV - \frac{1}{2V}\int_{V} \sigma_{ij}^{II}\varepsilon_{ij}^{IIp} dV \\ &\quad + \frac{1}{2V}\int_{V} \Sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^{IIe} dV + \frac{1}{2V}\int_{V} \sigma_{ij}^{II}\left(E_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{II}\right) dV \end{aligned}$$

마지막 두 항에 대하여,

$$\int_{V} \Sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^{IIe} dV = \Sigma_{ij}\int_{V} \varepsilon_{ij}^{IIe} dV = 0$$

이고,

$$\begin{aligned} &\int_{V} \sigma_{ij}^{II}\left(E_{ij}^{e} + \varepsilon_{ij}^{II}\right) dV \\ &= \int_{V} \sigma_{ij}^{II} E_{ij}^{e} dV + \int_{V} \sigma_{ij}^{II}\varepsilon_{ij}^{II} dV \\ &= 0 + \int_{\partial V} \sigma_{ij}^{II} n_{j} u_{i}^{II} dV - \int_{V} \sigma_{ij,j}^{II} u_{i}^{II} dV \\ &= 0 \end{aligned}$$

위 식에서 평형방정식을 이용하였고 문제 II 의 경계에서 traction 이 0 임을 이용하였다. 따라서 변형률 에너지는

$$W_{el} = \frac{1}{2}\Sigma_{ij} E_{ij}^{e} - \frac{1}{2V}\int_{V} \sigma_{ij}^{II}\varepsilon_{ij}^{IIp} dV$$

첫번째 항은 외력에 의해 저장된 변형률 에너지이고, 두번째 항은 상변화에 의해 추가된 에너지로서 상호작용 에너지(interaction energy)로 지칭된다.

$$W_{\mathrm{int}} = -\frac{1}{2V}\int_{V} \sigma_{ij}^{II}\varepsilon_{ij}^{IIp} dV \qquad (1)$$

형상기억합금의 상변화 특징 중의 하나는 자기보완 그룹(self accommodation group)을 형성하는 것이다. 즉 여러 개의 마르텐사이트 상이 동시에 생성됨으로써 각각의 상들이 가지는 고유한 변형률이 상쇄되어 전체적인 변형률은 주위 변형률과 차이가 없게 되는 현상이다. 이러한 과정에 의해 전체적인 변형률 에너지는 낮아지게 된다. 만약 전체적으로 N 개의 가능한 마르텐사이트 상(habit plane variant)이 있고, V 개의 상이 모여 한 개의 자기보완 그룹을 형성하며, 모두 G 개의 그룹이

존재한다면, N = G x V 이다. α 번째 상의 전체 체적에 대한 비율을 η_α 라 하면, α 가 속한 k 번째 자기보완 그룹의 체적비, $\overline{\eta}_k$, 는

$$\overline{\eta}_k = \sum_{\alpha=1}^{V} \eta_\alpha$$

이다. α 번째 상이 완전히 상변화 했을 때의 변형률을 $\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 라 하면

$$\varepsilon_{ij}^{\alpha} = \frac{1}{2}\gamma_c\left(m_i^\alpha n_j^\alpha + n_i^\alpha m_j^\alpha\right)$$

여기서 γ_c 는 변형률의 크기이고, m_i^α, n_i^α 는 헤비트 면(habit plane)의 전단 벡터 및 수직 벡터이다. k 번째 자기보완 그룹의 평균 상변화 변형률, $\overline{\varepsilon}_{ij}^{k}$,은 다음의 체적 평균을 이용하여 계산한다.

$$\begin{aligned}\overline{\varepsilon}_{ij}^{k} &= \frac{1}{V_k}\int_{V_k}\varepsilon_{ij}^{\alpha}dV \\ &= \frac{1}{V_k}\left(\varepsilon_{ij}^{1}v^1 + \varepsilon_{ij}^{2}v^2 + \cdots + \varepsilon_{ij}^{V}v^V\right) \\ &= \frac{1}{\overline{\eta}_k}\sum_{\alpha=1}^{V}\eta_\alpha\varepsilon_{ij}^{\alpha}\end{aligned}$$

여기서 V_k 와 v^α 는 k 번째 그룹과 α 번째 상의 체적이며, 미시적으로(microscopically) v^α 이외의 영역에서는 $\varepsilon_{ij}^{IIP} = 0$ 이고 $\overline{\eta}_k = V_k / V$ 이다. k 번째 그룹의 평균 응력을 $\left\langle\sigma_{ij}\right\rangle_k$ 또는 $\overline{\sigma}_{ij}^{k}$ 라 하면 전체응력은 평균응력과 변동응력의 합이다.

$$\sigma_{ij}^{II} = \left\langle\sigma_{ij}^{II}\right\rangle + \delta\sigma_{ij}^{II}$$

위 식들을 이용하고 고차항을 무시하면 식 (1)의 상호작용 에너지는 다음과 같다.

$$\begin{aligned}W_{\text{int}} &= -\frac{1}{2V}\int_V \sigma_{ij}^{II}\varepsilon_{ij}^{IIp}dV \\ &= -\frac{1}{2V}\sum_{k=1}^{G}\int_{V_k}\sigma_{ij}^{II}\varepsilon_{ij}^{IIp}dV \\ &= -\frac{1}{2V}\sum_{k=1}^{G}\int_{V_k}\left(\left\langle\sigma_{ij}^{II}\right\rangle + \delta\sigma_{ij}^{II}\right)\left(\left\langle\varepsilon_{ij}^{IIp}\right\rangle + \delta\varepsilon_{ij}^{IIp}\right)dV \\ &\approx -\frac{1}{2V}\sum_{k=1}^{G}\int_{V_k}\left\langle\sigma_{ij}^{II}\right\rangle\left\langle\varepsilon_{ij}^{IIp}\right\rangle dV \\ &= -\frac{1}{2V}\sum_{k=1}^{G}\left\langle\sigma_{ij}^{II}\right\rangle_k\left\langle\varepsilon_{ij}^{IIp}\right\rangle_k V_k \\ &= -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{G}\overline{\sigma}_{ij}^{k}\overline{\varepsilon}_{ij}^{k}\overline{\eta}_k\end{aligned}$$

한편 Eshelby 의 이론으로부터, 변형률과 응력이 0 인 무한히 큰 물체에 삽입된 탄성 구형 함유물(inclusion) 내부의 응력은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\overline{\sigma}_{ij}^{k} &= C_{ijmn}\left(S_{mnpq} - I_{mnpq}\right)\left(\overline{\varepsilon}_{pq}^{k} - E_{pq}^{II}\right) \\ &= \hat{\sigma}_{ij}^{k} - C_{ijmn}\left(S_{mnpq} - I_{mnpq}\right)\sum_{l=1}^{G}\overline{\eta}_l\,\overline{\varepsilon}_{pq}^{l} \\ &= \hat{\sigma}_{ij}^{k} - \sum_{l=1}^{G}\overline{\eta}_l\,\hat{\sigma}_{ij}^{l}\end{aligned}$$

단, $\hat{\sigma}_{ij}^{k} = C_{ijmn}\left(S_{mnpq} - I_{mnpq}\right)\overline{\varepsilon}_{pq}^{k}$ 이고 중복된 첨자는 합의 법칙(summation convention)이 적용된다. S_{ijkl} 은 Eshelby 텐서이다. 따라서 상호작용 에너지는

$$\begin{aligned}W_{\text{int}} &= -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{G}\overline{\sigma}_{ij}^{k}\overline{\varepsilon}_{ij}^{k}\overline{\eta}_k \\ &= -\frac{1}{2}\sum_{k=1}^{G}\left(\hat{\sigma}_{ij}^{k} - \sum_{l=1}^{G}\overline{\eta}_l\,\hat{\sigma}_{ij}^{l}\right)\overline{\varepsilon}_{ij}^{k}\overline{\eta}_k\end{aligned} \tag{2}$$

3. 상변화의 구성방정식

깁스 자유에너지(Gibbs free energy) Φ 를 이용하여 보 자유에너지(complementary free energy) Ψ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.(2)

$$\Psi(\Sigma, T, \eta_\alpha) = -\left(\Phi(\Sigma, T, \eta_\alpha) - \Sigma_{ij}E_{ij}\right)$$

응력과 온도가 일정할 때, 소산에너지(dissipative energy)의 변화는 보 자유에너지의 변화와 같다.

$$d\Psi\big|_{\Sigma,T} = dW_d \tag{3}$$

소산에너지를 다음과 같이 정의할 때

$$W_d = \sum_{\alpha=1}^{N}\left(\int_S \beta\dot{\eta}_\alpha d\eta_\alpha\right) \tag{4}$$

β 는 점성 마찰력과 관련된 계수이며 S 는 η_α 공간에서의 상변화 경로이다. 식 (3)과 (4)를 이용하여 상변화 속도에 대한 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\beta\dot{\eta}_\alpha = -\frac{\partial\Phi}{\partial\eta_\alpha} + \Sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^\alpha$$
$$= -\frac{\partial W_{chem}^\alpha}{\partial\eta_\alpha} - \frac{\partial W_{el}}{\partial\eta_\alpha} + \Sigma_{ij}\varepsilon_{ij}^\alpha$$
$$= -\tau_c\gamma_c - \frac{\partial W_{\mathrm{int}}}{\partial\eta_\alpha} + \tau_\alpha\gamma_c$$
$$= \gamma_c(\tau_\alpha - \tau_c) - \frac{\partial W_{\mathrm{int}}}{\partial\eta_\alpha}$$

또는

$$\dot{\gamma}_\alpha = a_0\left\{\gamma_c(\tau_\alpha - \tau_c) - \frac{\partial W_{\mathrm{int}}}{\partial\eta_\alpha}\right\} \qquad (5)$$

여기서 $W_{chem}^\alpha = \eta_\alpha\tau_c\gamma_c$, $\gamma_\alpha = \eta_\alpha\gamma_c$ 이고, $\tau_\alpha = \Sigma_{ij}m_i^\alpha n_j^\alpha$ 로서 헤비트 면에 대한 분력 (resolved shear stress)이다. 식 (5)에서 볼 수 있듯이 상호작용 에너지의 정확한 계산이 상변화 속도의 계산을 위해 중요함을 알 수 있다. 만약 자기보완 그룹과 기지 사이의 관계를 탄성적으로 가정한다면 상호작용 에너지는 과대평가 되게 되고 따라서 상변화 속도의 정확한 예측도 어렵게 된다. 본 논문에서는 상호작용 에너지의 크기를 계산하기 위하여 식 (5)에서 상호작용 에너지 항을 제외하고 상변화 속도를 계산하였으며 각 시간 단계에서의 상변화 정도 및 응력 상태를 이용하여 상호작용 에너지를 계산하였다.

4. 상호작용 에너지의 계산

본 절에서는 간단한 상변화 시스템에 대하여 상호작용 에너지의 크기를 계산하였다. 문제의 단순화를 위하여 오스테나이트 상이 2 개의 헤비트 상을 가지는 마르텐사이트로 상변화 하는 경우를 가정하였다. 실제의 형상기억합금은 NiTi 의 경우 24 개의 헤비트 상이 존재하며(1), 본 논문의 모델은 상변화 모델링의 이해를 돕기 위한 가상적인 재료에 해당한다. Fig. 2 에 헤비트 면의 수직 벡터 **n** 과 전단 방향 **m** 을 나타내었다. 벡터의 성분은 다음과 같다.

$$\mathbf{n}^1 = \left(\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0\right),\ \mathbf{n}^2 = \left(-\frac{1}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}, 0\right)$$
$$\mathbf{m}^1 = \left(-\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}, 0\right),\ \mathbf{m}^2 = \left(\frac{\sqrt{3}}{2}, \frac{1}{2}, 0\right)$$

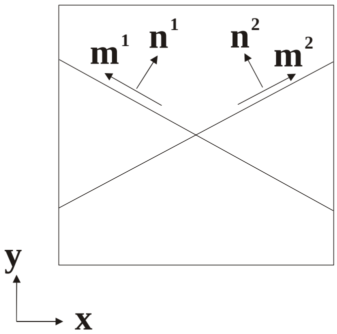


Fig. 2 Two transformation systems. In this model volumetric component of transformation strain is assumed zero.

Table 1 Material parameters

Young's modulus	47.9 GPa
Poisson's ratio	0.46
γ_c	0.13
τ_c	15 MPa
a_0	0.001 Pa^{-1} sec^{-1}
N	2

유한요소법을 이용하여 수치계산을 수행하였으며, 0.01m x 0.01m x 0.01m 크기의 시편을 1 개의 유한요소로 모델링 하였다. y 축 방향으로 단순인장 하중을 가하였으며, $\dot{E}_{yy} = 2000$ (1/s) 의 일정한 변형률 속도가 발생하였다. 2 개의 헤비트 상이 존재할 수 있으므로 N=2 이며 자기보완 그룹의 개수 G 는 1 또는 2 가 가능하다. G=1 인 경우 한 그룹에 속하는 헤비트 상의 개수 V 는 2 이며, G=2 인 경우 V 는 1 이다. G=1 인 경우와 G=2 인 경우에 대하여 상변화 과정을 따라가며 헤비트 상의 체적비 η_1 과 η_2 를 구하게 되며 이 값을 이용하여 상호작용 에너지의 값을 식 (2)를 통하여 계산하였다. 오스테나이트와 마르텐사이트의 탄성계수 및 포아송 비는 같다고 가정하였으며 상변화와 관련된 재료 상수는 Table 1 에 나열하였다.

Fig. 3 에 서 볼 수 있듯이 두개의 헤비트 상이 한 그룹 안에 속할 때(그림에서 1 group)는 자기보완 기능에 의해 상호작용 에너지의 값이 작게 되며 상변화에 수반된 변형률 에너지의 값이 작음을 확인할 수 있다. 한편 두개의 헤비트 상이 각각 다른 자기보완 그룹에 속할 때(그림에서 2 groups)는 변형률 에너지의 값이 증가함을 볼 수 있다.

한편 형상기억합금의 자기보완 작용을 앞 절에서 기술한 이론적인 접근법 대신 유한요소 모델링 기법을 써서 직접 고려하는 방법을 시도하였다.

이 경우 0.01m x 0.01m x 0.01m 크기의 시편을 64 개의 유한요소를 이용하여 모델링 하였으며, 2 개의 요소가 한 개의 상변화 시스템을 구성하도록 하였다. 즉 한 개의 요소는 오직 1 개의 헤비트 상만을 가지고 따라서 2 개의 요소가 짝을 이루어 완벽한 재료를 만들도록 하였다. Fig.4 는 전체 시편이 첫번째 헤비트 상을 가지는 영역과 두번째 헤비트 상을 가지는 영역으로 나누어져 있는 모습을 나타낸다. 이 경우 각각의 유한요소는 기지(matrix)에 내재된 상변화 하는 함유물(inclusion)로 볼 수 있으며, 자기보완 그룹과 기지 사이의 상호작용이 유한요소 해(solution)의 일부로서 자연스럽게 고려되는 것이다. 한편 상호작용 에너지는 식 (1)을 이용하여 계산하였다. 즉 σ_{ij}^{II} 는 유한요소의 응력에서 외력에 의한 평균 응력을 뺀 값이 되고, ε_{ij}^{IIp} 는 유한요소 적분점에서 $\sum_{\alpha=1}^{V}\eta_\alpha\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 값이다. 외력에 의한 평균응력은 단순 인장 문제이므로 Σ_{22} 성분을 제외하면 모두 0 이다. ε_{ij}^{IIp} 는 식 (2)를 유도하기 위하여 완전히 상변화한 상태의 변형률이지만 유한요소해석 값을 이용할 경우는 유한요소 체적에 대하여 체적비를 고려한 $\sum_{\alpha=1}^{V}\eta_\alpha\varepsilon_{ij}^{\alpha}$ 가 된다. 이와 같은 방법으로 구한 상호작용 에너지가 물체 내부의 한 유한요소에서 가지는 값을 Fig. 3 에 나타내었다. 상호작용 에너지는 단순 증가하는 경향을 보이며, 2 개의 자기보완 그룹이 존재하는 경우에 대하여 식 (2)를 이용하여 계산한 상호작용 에너지 값보다 작음을 볼 수 있다. 한편, 한 개의 자기보완 그룹 안에 모든 헤비트 상이 존재하는 경우 보다는 상호작용 에너지의 값이 작거나 비슷함을 볼 수 있다.

각각의 헤비트 상의 체적비가 시간에 따라 변화하는 모양을 Fig. 5 에 도시하였다. 한 유한요소 안에 모든 헤비트 상이 가능한 경우(그림에서 1 group 또는 2 groups)에는 두 상의 체적비의 합이 1 이 되는 순간 상변화가 멈추게 되며, 한 유한요소 안에 오직 1 개의 헤비트 상만이 가능한 경우(그림에서 finite element)에는 각각의 헤비트 상이 체적비 1 이 되는 순간에 상변화가 멈추게 됨을 확인할 수 있다. 전체 시편의 평균적인 응력-변형률 곡선을 Fig. 6 에 도시하였다. 두개의 헤비트 상을 가지는 가상적인 재료일 경우, 상변화 하는 과정 동안 응력은 현저히 증가함을 볼 수 있고, 로그 변형률 ε_{yy} 가 대략 0.075 근방에 도달했을 때 상변화가 완료되고 다시 탄성 거동으로 바뀜을 볼 수 있다.

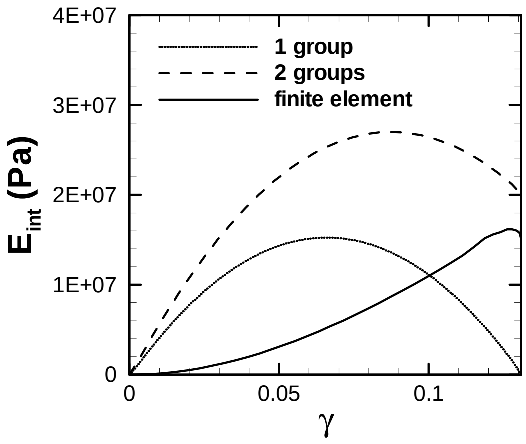


Fig. 3 Interaction energy. $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ for 1 group or 2 groups, and $\gamma = \gamma_1$ for finite element. For 1 group, two habit plane variants belong to one self accommodation group. For 2 groups, only one habit plane variant belongs to one group. For finite element, self accommodation groups are modeled by finite elements.

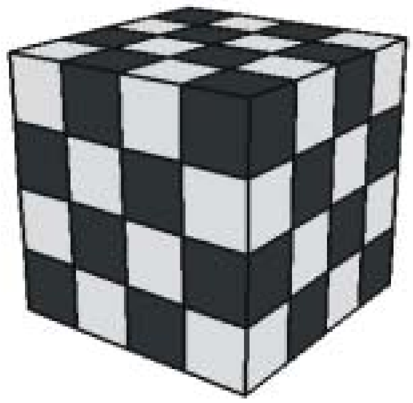


Fig. 4 Finite element model of self accommodation groups. Dark and light regions correspond to two self accommodation groups.

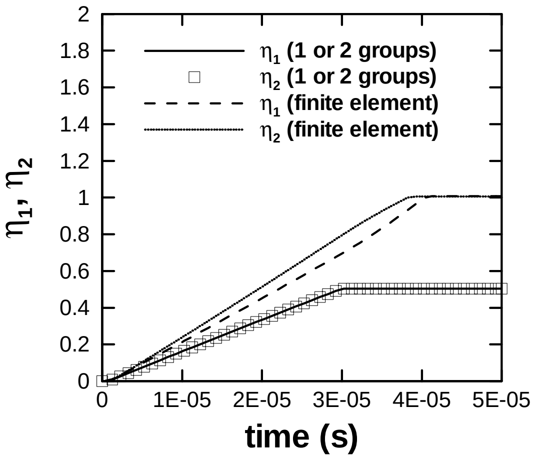


Fig. 5 Volume fraction of each habit plane variant with respect to time.

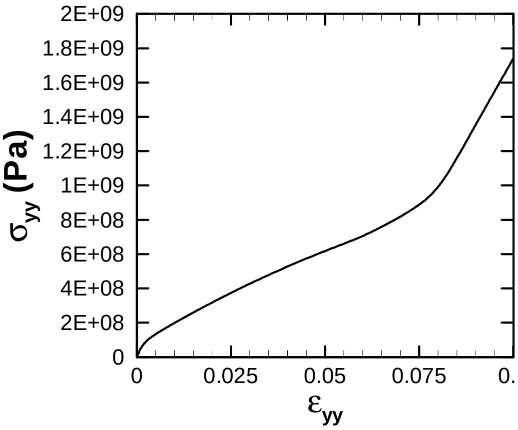


Fig. 6 Average tensile stress vs. strain in explicit finite element modeling of self accommodation groups.

5. 결 론

본 논문에서는 형상기억합금의 기계적 거동을 예측하는데 중요한 역할을 하는 상호작용 에너지의 값을 유한요소 모델링 기법을 이용하여 계산하였으며, 그 결과를 이론적으로 유도한 공식에 의한 결과와 비교하였다. 본 연구를 통하여 자기보완 그룹과 기지 사이에 탄성적인 상호작용을 가정하여 유도한 공식은 상호작용 에너지를 과대 평가한다는 것을 확인할 수 있었으며 상변화의 정확한 예측을 위해서는 자기보완 그룹과 기지 사이의 역학적인 상호작용을 유한요소법 또는 자기조화적인 (self-consistent) 방법 등을 이용하여 좀 더 정확히 고려할 필요가 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

(1) Madangopal, K. and Banerjee, S., 1990, The self-accommodating morphology of NiTi shape memory alloy martensite, *Scripta Metall. Mater.* V24, p. 2291.

(2) Huang, M.S. and Brinson, L.C., 1998, A multivariant model for single crystal shape memory alloy behavior, *J. Mech. Phys. Solids* V46, pp. 1379-1409.