

Ni/Al₂O₃ 기능경사 내열복합재의 열-탄소성 해석

Thermo-Elastoplastic Analysis of Ni/Al₂O₃ Heat-Resisting Functionally Graded Composites

조진래* 김병국** 하대율**

Cho, Jin-Rae Kim, Byung-Kuk Ha, Dae-Yul

(논문접수일 : 1999년 12월 2일 ; 심사종료일 : 2001년 3월 27일)

요지

기능경사재(FGM)는 구성 물질의 체적분율(volume fraction)이 복합재 전체에 걸쳐 연속적 그리고 기능적으로 분포되어 있어, 기존의 이중물질 접합식(bi-material-type) 복합재보다 현저히 우수한 열기계적 특성을 가진다. 하지만, 기능경사 내열복합재의 열-탄소성 거동은 체적분율의 분포형태와 경사층이 차지하는 상대두께비에 따라 절대적으로 좌우된다. 본 연구는 기능경사 내열복합재의 열-탄소성 특성의 이들 두 설계인자에 대한 파라메트릭 FEM 해석을 다룬 것이다. 열-탄소성 이론과 유한요소 근사화에 따라 연구용 2차원 FEM 프로그램을 개발하고, 대표적인 3층 구조의 2차원 기능경사 내열복합재의 열-탄소성 특성을 설계변수의 다양한 조합에 따라 분석하였다.

핵심용어 : 응력집중, 기능경사 내열복합재, 열-탄소성, 유한요소해석, 적층구조, 체적분율

Abstract

Compared to classical bi-material-type composites, functionally graded materials(FGM) exhibit superior thermo-mechanical performances thanks to the continuous and functional distribution of constituent volume fractions. However, thermo-elastoplastic behavior of FGM heat-resisting composites is strongly influenced by two design parameters, the volume fraction pattern and the relative thickness of the graded layer. This paper is concerned with the parametric FEM analysis of thermo-elastoplastic characteristics of FGM heat-resisting composites. According to the theoretical work for thermo-elastoplasticity and finite element approximations we develop a test FEM program, with which we investigate thermo-elastoplastic characteristics of representative two-dimensional FGM heat-resisting composites with respect to various combinations of the two design parameters.

Keywords : Stress Concentration, Functionally Graded Material, Thermo-Elastoplasticity, Finite Element Analysis, Lamination Structure, Volume Fraction

1. 서론

다양하고 혹독한 열적 작용하에서 단일 물질구조물로는 주어진 역할을 제대로 만족할 수 없었다. 따라서,

우수한 내열강도와 고 creep 저항성을 가진 세라믹과 우수한 파괴인성과 고열충격 저항성을 가진 금속의 서로 다른 기계적/열적 특성을 조합한 이중 적층복합재료를 사용하게 되었다.

* 정희원 · 부산대학교 기계기술연구소, 조교수

** 부산대학교 기계설계공학과 대학원

• 이 논문에 대한 토론을 2001년 6월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2001년 9월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

하지만 종래의 이중물질 접합식 적층복합재(bimaterial laminated composites)에서는 서로 다른 물질의 적층화에 따라 접합면에서 물성치의 예리한 불연속이 필연적으로 존재하고, 이에 따라 잔류응력과 응력집중 등의 심각한 문제들이 발생하곤 하였다.^{1),3)-5)}

이러한 급격한 물성치 변화를 갖는 접합면에 한 물질에서 다른 물질로 연속적으로 물성이 변하는 중간 기능경사층을 삽입하면 종래의 문제점을 해결할 수 있다는 주장에 따라 개발된 것이 바로 기능경사재(FGM: Functionally Graded Material)이다.

본 연구의 목적은 적층구조 및 두께방향 물성함수에 따른 내열 FGM의 열-탄소성 특성을 분석하는 것이다. 연구는 크게 FGM내의 체적비에 따른 물성치 변화와 열-탄소성 이론 및 이를 기초로 한 유한요소 근사화, 그리고 적층구조 및 물성함수에 대한 parametric simulation 및 해석결과에 대한 고찰로 구성되어 있다.

2. FGM 물성치 변화함수

Fig. 1은 전체 두께가 2c인 대칭 내열 FGM을 도시하고 있다. 아래층은 Ni 단일층이고 중간에 삽입되어 있는 층이 Ni와 Al₂O₃가 혼합된 중간 FGM층으로 두께가 2a이다. 그리고 윗층은 단일 Al₂O₃층이다.

Ni/Al₂O₃ FGM은 Ni와 Al₂O₃의 체적비율의 변화에 따라 열/기계적 성질이 변화한다. 두 물질의 체적비율이 특정 함수형태로 두께방향(y)으로 변화한다. Ni와 Al₂O₃의 체적비를 각각 V_m과 V_c로 나타내면, V_m + V_c = 1의 관계가 성립한다. 따라서 어느 한 체적비만 정의하면 충분하다. 본 연구에서는 Ni의 체적비를 사용한다.

$$V_m(y) = \begin{cases} 1, & (-c \leq y \leq -a) \\ F(y), & (-a \leq y \leq a) \\ 0, & (a \leq y \leq c) \end{cases} \quad (1)$$

여기서 F(y)는 중간 기능경사층에서의 Ni성분의 체적비(volume fraction) 변화를 나타내는 함수이다. 본 논문에서는 체적비 함수를 선형 함수 $F(y) = 0.5(1 - \frac{y}{a})$, 2차 및 1/2차 함수 $F(y) = [(1 - \frac{y}{a})^2]$, $[0.5(1 - \frac{y}{a})]^{1/2}$ 그리고 3차 함수 $F(y) = 0.5[1 - (\frac{y}{a})^3]$ 의 네가지 경우

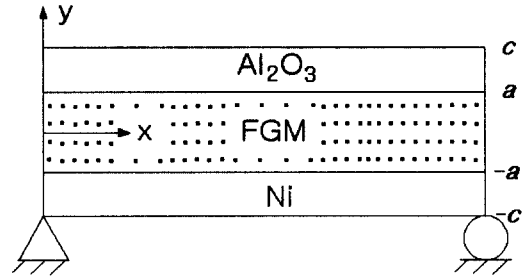


Fig. 1 A heating-resisting FGM

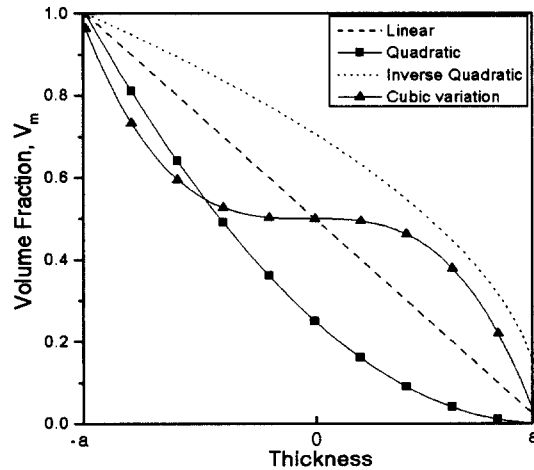


Fig. 2 Variations of Ni volume fractions

에 대해 살펴 보고자 한다. 이 함수의 선택에 따라 두께방향으로 Ni의 체적비 변화양상이 Fig. 2에 나타나 있다.

온도분포 계산에 관여하는 밀도 ρ, 비열 c, 열전도 계수 κ와 탄소성 해석을 위해 사용되는 Poisson's ratio ν 및 열팽창계수 α는 다음의 선형 혼합식(linear rule of mixture)을 이용한다.

$$P_{FGM} = V_m P_m + (1 - V_m) P_c \quad (2)$$

여기서, 하첨자 m, c는 각각 금속과 세라믹 성분의 물성치를, 그리고 P는 임의 물성치를 나타낸다.

반면에 탄성계수 E와 항복응력 σ_y, 탄소성 점선계수 E_T를 계산하기 위해서는 수정된 혼합법칙(modified rule of mixture)¹⁾을 채택했으며, 이에 따라 중간 FGM 층의 E, σ_y, E_T는 다음과 같이 표현된다.

$$E = \frac{\left\{ V_m E_m \frac{(q + E_c)}{(q + E_m)} + (1 - V_m) E_c \right\}}{\left\{ V_m \frac{(q + E_c)}{(q + E_m)} + (1 - V_m) \right\}} \quad (3)$$

$$\sigma_y = \sigma_{ym} \left[V_m + \frac{(q + E_m)}{(q + E_c)} \frac{E_c}{E_m} (1 - V_m) \right] \quad (4)$$

$$E_T = \frac{\left\{ V_m E_{Tm} \frac{(q + E_c)}{(q + E_{Tm})} + (1 - V_m) E_c \right\}}{\left\{ V_m \frac{(q + E_c)}{(q + E_{Tm})} + (1 - V_m) \right\}} \quad (5)$$

여기서 q 는 응력-변형을 전달비(transfer ratio)로서 임의의 dual-phase 복합재에서 4.5 GPa의 값이 적당한 것으로 알려져 있다.¹⁾

3. 해석모델 및 외부 가열조건

내열 FGM의 구성물질인 니켈(Ni)과 알루미늄 옥사이드(aluminum oxide; Al₂O₃)의 물성치를 Table 1과 2에 기록하였다.

본 연구의 열-탄소성해석을 위하여 다음의 기본 가정을 설정한다.

- (1) Ni, Al₂O₃ 및 FGM층은 완전히 접착.
- (2) 내열 복합재는 초기에 stress-free 상태.
- (3) 좌우 양 끝단의 온도구배는 없음.
- (4) 세라믹 층은 선형탄성, 금속층과 FGM 층은 선형탄성-선형경화.

초기에 290°K의 균일한 온도를 유지하고 있는 내열

Table 1 Thermomechanical properties

Material \ Properties	Ni	Al ₂ O ₃
ρ (kg/m ³)	8900.0	3970.0
c (J/Kg · °K)	444.0	775.0
k (W/m · °K)	90.7	30.1
E (GPa)	199.5	393.0
ν	0.3	0.25
α (°K × 10 ⁻⁶)	13.4(293°K) 17.8(1110°K)	5.4(293°K) 9.4(111°K)

Table 2 Temperature-variation in material properties of Ni

온도(K)	σ_Y (MPa)	σ_U (MPa)	ϵ_U (%)
293	148	462	47
400	153	459	46
500	140	459	44
600	138	462	46
700	115	328	64
800	110	245	68
900	69	176	72
1000	59	121	82
1100	45	83	95

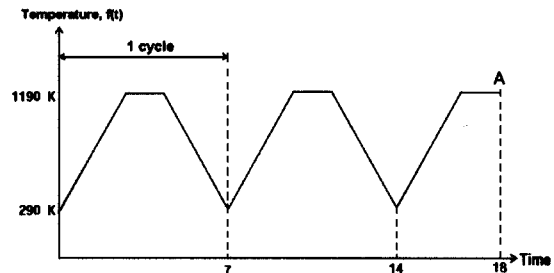


Fig. 3 Heating cycle

FGM의 윗 층에 Fig. 3에 도시한 온도 cycle $f(t)$ 가 외부 열하중으로 작용한다.

온도 cycle은 그림과 같이 3sec 동안 290°K에서 1190°K으로 상승하다가 1sec 동안 유지한다. 그리고 다시 3sec 동안 1190°K에서 290°K으로 하강하는 형태이다.

Fig. 1을 참고하여, 해석모델은 길이 100mm, 두께 10mm인 단순 지지된 대칭보이다. 본 연구에서는 층 구성에 따라 세 유형의 해석 모델을 선정한다. 우선, 중간 FGM층이 없는 Ni-Al₂O₃층의 종래 이중접합 적층복합재(bimaterial)와 Ni-FGM-Al₂O₃층으로 구성된 3층 내열 복합재(N/F/A) 그리고 Al₂O₃층이 없이 Ni과 Al₂O₃의 2층으로 구성된 모델(N/F)이다.

4. 열 탄소성 이론

4.1 열-탄소성 이론

기능경사 복합재의 한 점의 응력상태가 항복응력에 도달하면 항복현상이 시작되며 항복조건은 아래의 일

반적인 형태로 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} F(s, \tau) &= f(s) - k^2(\tau) = 0 \\ k(\tau) &= k(\bar{\epsilon}_p; T) = k_0(\bar{\epsilon}_p) - k_1(T) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

여기서, s 는 Cauchy stress의 편차 응력텐서이고 $\bar{\epsilon}_p$ 는 등가 소성변형률이다. 그리고, τ 는 일-경화 매개변수를, T 는 온도를 나타낸다. 본 논문에서 FGM이 등방성 경화법칙과 von Mises 항복조건을 따른다고 가정하면,

$$\left. \begin{aligned} f(s) &= J_2 = s : s / 2 \\ k(\tau) &= \sigma_Y / \sqrt{3} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

여기서 J_2 는 편차응력의 제2불변량을, σ_Y 는 단축인장하의 항복응력을 의미한다.

Creep의 영향을 무시하면 전 편차변형률 증분은 탄성과 소성 변형률의 증분의 합으로 표현되고, 소성 변형률 증분은 Prandtl-Reuss식을 따른다고 가정한다.

$$d\mathbf{e} = d\mathbf{e}^e + d\mathbf{e}^p \quad (8)$$

$$d\mathbf{e}^p = d\lambda \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial \mathbf{s}}, \quad d\lambda \sim \text{스칼라승수} \quad (9)$$

다음으로 아래의 기본적인 관계식으로부터 등가 응력 $\bar{\sigma}$ 와 등가 소성변형률 $\bar{\epsilon}_p$ 를 얻을 수 있다.^{4),7)}

$$\left. \begin{aligned} \bar{\sigma} &= \sqrt{3/2 \mathbf{s} : \mathbf{s}} = \sqrt{3J_2} \\ d\bar{\sigma} &= \sqrt{3/2} \frac{\mathbf{s} : d\mathbf{s}}{\sqrt{\mathbf{s} : \mathbf{s}}} = \sqrt{3/4 J_2} \mathbf{s} : d\mathbf{s} \\ \bar{\sigma} d\bar{\sigma} &= \frac{3}{2} \mathbf{s} : d\mathbf{s} \\ d\bar{\epsilon}_p &= -\frac{2\bar{\sigma}}{3A} \left[\frac{2}{3} \bar{\sigma} d\bar{\sigma} + \frac{2}{\sqrt{3}} \beta dT \right] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

여기서 $A = \frac{\partial F}{\partial \mathbf{s}} : \frac{\partial F}{\partial \mathbf{e}^p}$, β 는 항복거동의 온도 의존성을 나타내는 변수로 다음과 같이 정의된다 ($c \sim$ 상수).

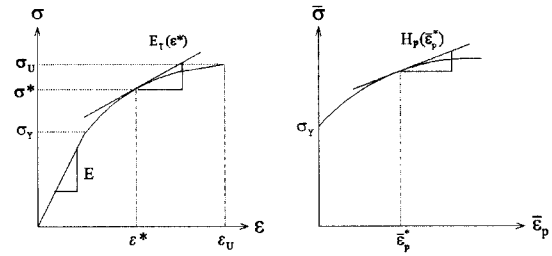


Fig. 4 Elastoplastic and plastic moduli

$$\beta = \begin{cases} c, & \Delta T > 0 \\ 0, & \Delta T \leq 0 \end{cases} \quad (11)$$

Fig. 4는 탄소성 계수 E_T 와 소성계수(plastic modulus) H 를 도식적으로 나타내고 있는데, H 는 다음과 같이 정의되며,

$$H(\bar{\epsilon}_p; T) = \frac{\partial \bar{\sigma}}{\partial \bar{\epsilon}_p} = \frac{EE_T}{E - E_T} \quad (12)$$

식(6)의 $k(\tau)$ 정의로부터 다음 결과를 얻을 수 있다.

$$d\bar{\epsilon}_p = \sqrt{3} dk_0 / H = (d\bar{\sigma} + \sqrt{3} \beta dT) / H \quad (13)$$

그러면, 식(10)과 식(13)으로부터 다음 관계식을 구할 수 있다.

$$\left. \begin{aligned} d\lambda &= 3(d\bar{\sigma} + \sqrt{3} \beta dT) / (2H\bar{\sigma}) \\ d\mathbf{e}^p &= 3s(d\bar{\sigma} + \sqrt{3} \beta dT) / (2H\bar{\sigma}) \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

한편, $d\mathbf{e} = d\mathbf{s} / 2G + d\mathbf{e}^p$ 의 기본식과 식(10), (13)을 사용하면,

$$s : d\mathbf{e} = \bar{\sigma} d\bar{\sigma} / 3G + 2\bar{\sigma}^2 d\lambda / 3 \quad (15)$$

식(10)의 $d\bar{\sigma}$ 를 위 식에 대입하면

$$s : d\mathbf{e} = S d\lambda - Q dT \quad (16)$$

$$S = \frac{2\bar{\sigma}^2}{9G} (H + 3G), \quad Q = \frac{\beta \bar{\sigma}}{\sqrt{3}G} \quad (17)$$

이 되고, 소성변형이 비압축성 조건에 따라 다음의 기본적인 관계식을 적용할 수 있다.

$$d\theta = (d\Delta - 3adT)K \quad (18)$$

여기서, $\Delta = \varepsilon_{kk}$ 이고 $K(=\lambda - 2G/3)$ 는 bulk modulus이다. 이제 위의 관계식들을 이용하여 응력증분에 관한 식을 구할 수 있다.⁷⁾

$$\begin{aligned} d\sigma &= ds + 1d\theta \\ &= 2G(d\mathbf{e} - d\mathbf{e}^p) + 1d\theta \\ &= 2G[d\mathbf{e} - s\mathbf{d}\lambda - QsdT/S] + 1d\theta \\ &= 2G[d\mathbf{e} - s(\mathbf{s} : d\mathbf{e}/S) - QsdT/S] \\ &\quad + (d\Delta - 3adT)1K \end{aligned} \quad (19)$$

여기서 1은 $\{1, 1, 1, 0, 0, 0\}^T$ 를 나타내며, 선형탄성 재료의 재료상수 관계식으로부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$2Gd\mathbf{e} + d\Delta 1K = D_e d\boldsymbol{\varepsilon} \quad (20)$$

여기서, D_e 는 Lamé 상수로 구성된 (6×6) 탄성계수 행렬이다. 그리고, 소성계수 행렬 D_p 와 탄소성계수 행렬 D_{ep} 는 다음과 같이 주어진다.

$$\left. \begin{aligned} D_p &= \frac{2G}{S} \mathbf{s} \mathbf{s}^T \\ D_{ep} &= (D_e - D_p) \end{aligned} \right\} \quad (21)$$

위의 두 물성치 행렬을 이용하면 열-탄소성 행렬식을 얻을 수 있고, 2차원 평면응력 기능경사 복합체에 대하여 평면(in-plane) 성분($d\boldsymbol{\sigma}^n$)과 횡단면(transverse) 성분($d\boldsymbol{\sigma}^r$)으로 분리하여 재 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} d\boldsymbol{\sigma}^n \\ d\boldsymbol{\sigma}^r \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} D_{ep}^{nn} & D_{ep}^{nr} \\ D_{ep}^{rn} & D_{ep}^{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} d\boldsymbol{\varepsilon}^n \\ d\boldsymbol{\varepsilon}^r \end{Bmatrix} \\ &\quad - \begin{bmatrix} D_e^{nn} & D_e^{nr} \\ D_e^{rn} & D_e^{rr} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \boldsymbol{\alpha}^n \\ \boldsymbol{\alpha}^r \end{Bmatrix} dT - 2G \frac{Q}{S} \begin{Bmatrix} \mathbf{s}^n \\ \mathbf{s}^r \end{Bmatrix} dT \end{aligned} \quad (22)$$

여기서 $\boldsymbol{\alpha}^n = \{1, 1, 0\}^T$, $\boldsymbol{\alpha}^r = \{1, 0, 0\}^T$ 이다. 그러면, $d\boldsymbol{\sigma}^r = 0$

조건과 static condensation기법을 사용하여 다음의 관계식을 얻는다.

$$\begin{aligned} d\boldsymbol{\sigma}^n &= (D_{ep}^{nn} - D_{ep}^{nr} D_{ep}^{rr^{-1}} D_{ep}^{rn}) d\boldsymbol{\varepsilon}^n \\ &\quad - 2GQ(\mathbf{s}^n - D_{ep}^{rr^{-1}} \mathbf{s}^r) dT/S \\ &\quad - \{ (D_e^{nn} - D_{ep}^{nr} D_{ep}^{rn}) \boldsymbol{\alpha}^n + (D_e^{nr} - D_{ep}^{rr^{-1}} D_e^{rn}) \boldsymbol{\alpha}^r \} dT \end{aligned} \quad (23)$$

4.2 유한요소 근사화

기능 경사재의 열-탄소성 거동은 열확산 방정식과 정적 평형 방정식의 두 방정식에 의해 표현되고, 미소 변형을 가정할 수 있는 열-탄성해석⁵⁾과는 달리 위 두 방정식의 연계성을 무시할 수 없다. 아울러, Table 1과 2에 나타난 것과 같이, 일부 물성치는 온도에 의존하는 파라미터이다.

잘 알려진 바와 같이 열확산식은 아래의 초기치-경계치 문제로 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} \nabla \cdot (x \nabla T) + \dot{q} &= \rho c \dot{T}, \quad \text{in } (0, t^*] \times \Omega \\ T &= T_0, \quad \text{at } t=0 \\ T &= T_0, \quad \text{on } y=-c \\ T &= f(t), \quad \text{on } y=+c \end{aligned} \right\} \quad (24)$$

여기서, x 는 열전도율, ρ 는 밀도, c 는 비열, q 는 단위 체적당 에너지 발생율, $f(t)$ 는 외부 하중 경계조건으로 주어지는 열하중 사이클을 표현하는 주기함수이며 t^* 는 해석 고려시간을 나타낸다. 위 편미방의 수치해석 근사화를 위해서 잘 알려진 Crank-Nicolson기법을 적용한다.

체적력이 무시된 FGM의 열-탄소성 거동의 평형 방정식 및 구성관계식은 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{ij}(\mathbf{u}), j &= 0, \quad \text{in } \Omega \\ u_i &= 0, \quad \text{on } \partial\Omega_D \\ t_i &= \sigma_{ij}n_j, \quad \text{on } \partial\Omega_N \end{aligned} \right\} \quad (25)$$

$$d\boldsymbol{\sigma} = D_{ep} d\boldsymbol{\varepsilon} - D_e adT - 2GQsdT/S \quad (26)$$

여기서 $\partial\Omega_D$ 는 Dirichlet 경계영역, $\partial\Omega_N$ 은 Neumann 경계영역, t_i 는 외력, n_j 는 경계에서의 단위 법선벡터를 나타낸다.

열하중만이 작용하는 경우에 대한 열-탄소성 변형에 대한 변분공식은 다음과 같다.⁶⁾

$$\int_{\Omega} \epsilon(\mathbf{v}) : [D_{ep} \epsilon(\mathbf{u})] d\Omega = - \int_{\Omega} \epsilon(\mathbf{u}) : \sigma^T(\mathbf{u}) d\Omega \quad (27)$$

여기서, $\sigma^j = -D_e \alpha T - 2GQ_s T/S$ 이다.

이 변분공식에 대한 유한요소 근사화는 다음의 비선형 행렬식으로 귀착된다.⁶⁾

$$K_{ep} \bar{\mathbf{u}} = \mathbf{f} \quad (28)$$

$$\left. \begin{aligned} K_{ep} &= \int_{\Omega} \mathbf{B}^T D_{ep} \mathbf{B} d\Omega \\ \mathbf{f} &= - \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \sigma^j d\Omega \end{aligned} \right\} \quad (29)$$

여기서, $\mathbf{B} = \mathbf{D}\Phi$ 로 \mathbf{D} 는 변형률을 정의하는 미분행렬을, Φ 는 유한요소 기저함수로 구성된 행렬이다. 비선형계의 반복적인 유한요소 해석에서 잔여하중 벡터 \mathbf{F} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{F} = K_{ep} \bar{\mathbf{u}} - \mathbf{f} \quad (30)$$

Newton-Raphson기법에 따라 위 비선형 행렬식을 증분 $\Delta \mathbf{u}^k$ 를 구하는 반복행렬식으로 전환하여 순차적으로 푼다.

$$\Delta \mathbf{F}^k = 0 ; K_{ep}^{k-1} \Delta \bar{\mathbf{u}}^k = \Delta \mathbf{f}^k \quad (31)$$

본 연구에서 온도 및 열-탄소성 변형증분을 수치해석 하기위한 유한요소 프로그램의 흐름도를 Fig. 5에 도시하였다.

수치해석을 위하여 지금까지의 이론결과에 따라 테스트용 FEM 프로그램을 개발하였다. 이 프로그램의 신뢰성은 참고문헌 [1]에 나와 있는 모델문제를 benchmarking함으로써 확인하였다.

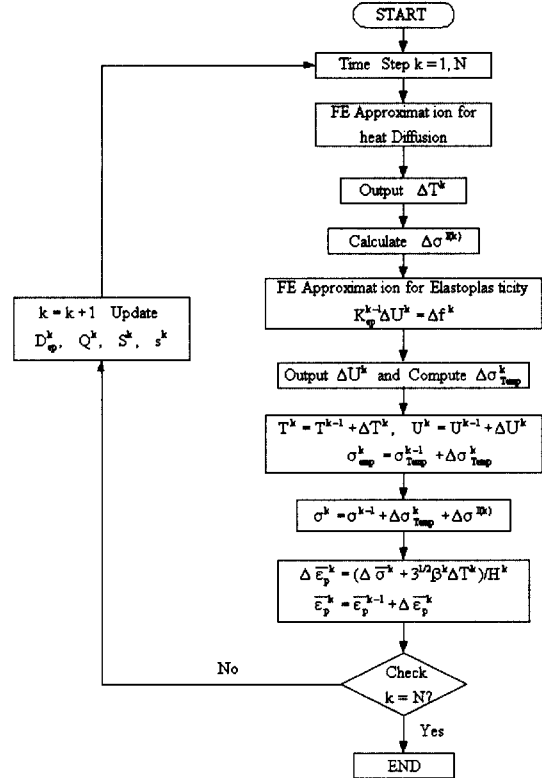


Fig. 5 Flowchart for the incremental analysis of thermo-elastoplastic FGM

5. 수치해석 결과

두 적층구조(N/F/A, N/F)에서 체적비의 변화양상에 따른 열-탄소성 특성을 알아보기 위해 각 적층구조에 앞에서 설명한 네가지 유형의 체적비 함수를 적용하였고 비교를 위해 기존 bimaterial도 해석하였다.

해석 모델은 FGM층의 두께를 전체 두께의 1/2로 지정하였고, y축에 대해 대칭이므로 1/2보 모델을 유한요소 해석하였다. 2차원 8-node 사각형 유한요소를 적용하여 해석 모델의 x축을 따라 150개의 요소로, 두께 방향으로 60개의 요소로 균등 분할하였다.

Fig. 3에서 A로 표시된 시점에서의 두께방향 온도분포를 나타낸 Figs. 6~7을 살펴보면, 먼저 기존의 bimaterial의 경우 두 물질의 경계층에서 급격한 온도구배가 발생하는 것을 알수 있다. 이에 반해 Fig. 6의 N/F/A 경우, 1/2차 및 3차 함수일 때 FGM-Al₂O₃의 왼쪽 경계부근에서 온도구배가 발생하지만, 그 정도가

bimaterial에 비해 미약하고 경계층에서 어느 정도 떨어진 위치에서 발생하는 것을 알 수 있다. 선형 및 2차 함수의 경우엔 매우 완만한 온도분포를 이룬다.

N/F 경우인 Fig. 7에선 체적비 함수가 2차 함수일 때 FGM층내의 물성치가 경계층 부근에서 급속히 Al_2O_3

의 특성으로 변하여 온도구배가 발생한다. 1/2차 함수 일때는 반대로 FGM층내의 물성치가 열하중을 받는 상단면을 제외한 FGM층내의 상당영역에서 Ni의 특성을 지녀, 해석모델이 전 체적으로 Ni 단일물질처럼 되어 선형화된 온도 분포를 나타낸다.

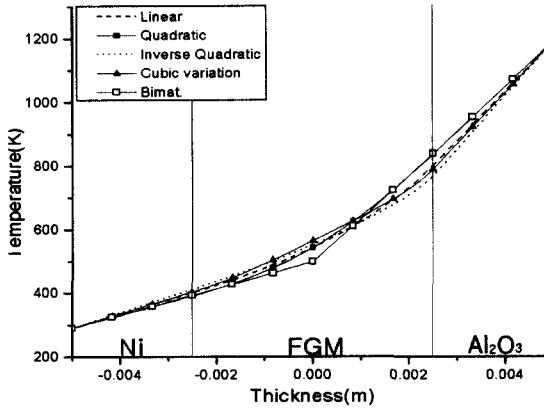


Fig. 6 Temperature distribution(N/F/A)

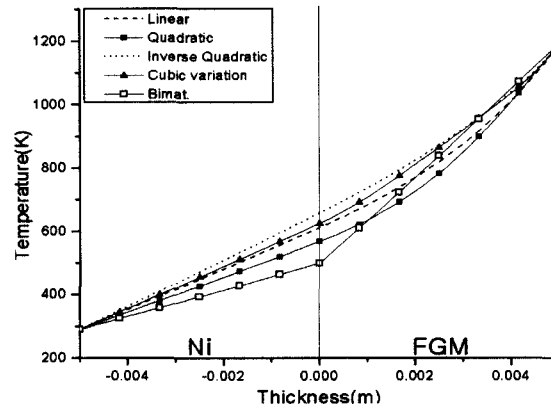


Fig. 7 Temperature distribution(N/F)

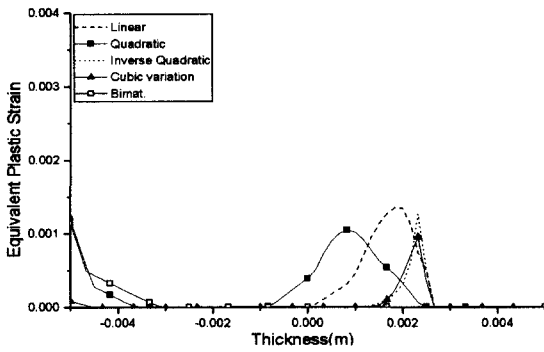


Fig. 8 Equivalent strain distribution(N/F/A)

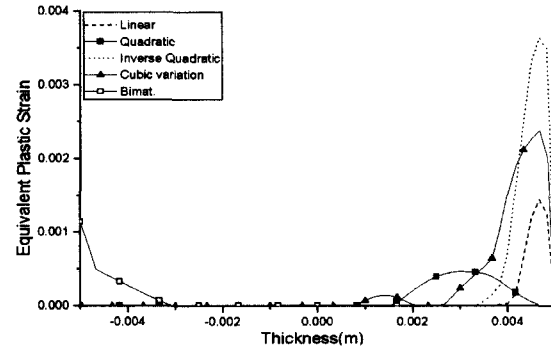


Fig. 9 Equivalent strain distribution(N/F)

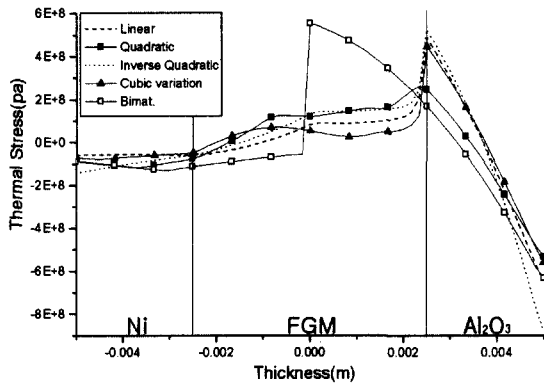


Fig. 10 Thermal stress distribution(N/F/A)

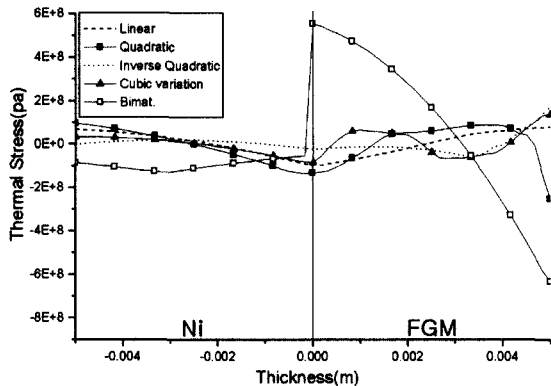


Fig. 11 Thermal stress distribution(N/F)

Figs. 8~11은 두께방향으로의 등가 소성변형 $\bar{\epsilon}_p$ 및 열응력 σ_{xx} 분포를 보여주고 있다. 특히, 여기에선 적층 구조와 체적비 함수의 변화에 따른 등가 소성변형률 및 열응력 분포 추이가 관심이 된다. 기존의 bimaterial의 경우 Ni단일층 하단면에서 광범위한 소성변형 분포가 발생한다.

N/F/A 경우를 도시한 Fig. 8을 살펴보면 앞서 살펴본 온도분포에서 예상되듯이 1/2차 함수의 경우 FGM-Al₂O₃ 경계 우측영역에서 소성집중변형이 발생하며, 2차 함수의 경우 1/2차 함수에 비해 경계영역에서 FGM층내로 소성변형분포가 이동함과 동시에 그 발생 범위가 넓어지며, 또한 Ni 단일층의 아래쪽에서도 소성변형이 발생한다. 3차 함수의 경우엔 2차 함수와 1/2차 함수의 특징을 모두 포함하여 FGM-Al₂O₃ 경계 우측영역 및 Ni 단일층 아래에서도 소성변형이 발생하지만 상대적으로 그 크기가 감소 하였다. 한편, 선형 함수의 경우는 FGM-Al₂O₃ 경계 왼쪽영역을 중심으로 집중적인 소성변형을 보인다.

N/F의 경우인 Fig. 9을 보면 열하중을 직접적으로 받는 FGM층 상단면에서 체적비 함수가 1/2차 함수일 때 매우 과도한 소성변형 집중이 발생하고 2차 함수인 경우엔 소성변형 분포가 FGM층 내로 이동하면서 그 크기가 감소하는 양상을 보인다. 3차 함수의 경우 FGM층 상단면 및 내부영역에서 소성변형이 발생한다. 선형 함수에서는 FGM층 상단면에서만 소성변형이 보이고 그 크기는 1/2차 및 3차 함수보다 상대적으로 작다.

N/F/A 경우의 열응력 분포를 도시한 Fig. 10에서 선형, 1/2차 및 3차 함수의 경우, FGM-Al₂O₃ 경계

영역에서 극심한 응력집중이 발생하지만 2차 함수의 경우 그 크기가 상당히 감소함을 볼 수 있다.

N/F의 경우인 Fig. 11에선 2차 및 1/2차 함수의 경우 FGM층 상단면에서 상당한 응력구배가 발생하며, 3차 함수의 경우 FGM층 상단면과 함께 FGM층 내부에서도 현저한 응력구배가 발생한다. 이에 반해 선형함수가 경우 전체적으로 매우 완만한 응력 분포를 나타낸다.

Figs. 12~15는 체적비 함수가 2차 및 3차 함수일 때 시간에 따른 소성변형분포 등고선을 나타낸 것이다. 체적비 함수가 2차 함수인 Fig. 12의 N/F/A의 경우는 첫 번째 열하중 사이클 내의 1초 부근에서 FGM층 내에서 발생이 시작된 소성변형은 2.5초 부근에서부터는 Ni 단일층에서도 발생하여 사이클이 반복되면서 점점 추가적인 소성변형이 축적되는 것을 알 수 있다. Fig. 13의 N/F 경우 1.5초 부근에서 FGM층 내에서 발생된 소성변형이 사이클이 반복될수록 증가 양상을 보이고 있다.

3차 체적비 함수를 갖는 N/F/A 경우를 나타낸 Fig. 14를 살펴보면, 소성변형은 2초 부근에서 FGM-Al₂O₃ 경계층 부근에서 그리고 3초 부근에서는 Ni 단일층 내부에서 시작됨을 볼 수 있다. Fig. 12와 비교할 때, 유사한 경향을 보이지만, 소성영역이 상대적으로 협소함을 확인할 수 있다.

Fig. 15의 N/F의 경우, 소성변형은 1초 부근에서 FGM층 상단면 근처에서 그리고 2.5초 부근에서 FGM층 내부에서 시작하고, 사이클 반복과 더불어 추가 발생함을 알 수 있다.

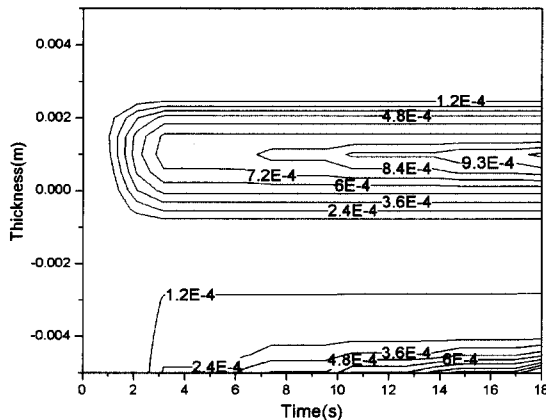


Fig. 12 Plastic strain contour(N/F/A, quad.)

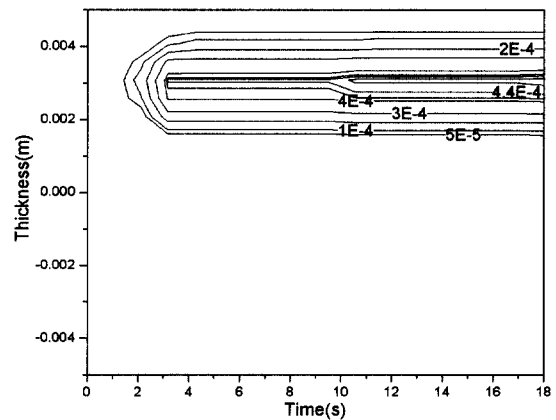


Fig. 13 Plastic strain contour(N/F, quad.)

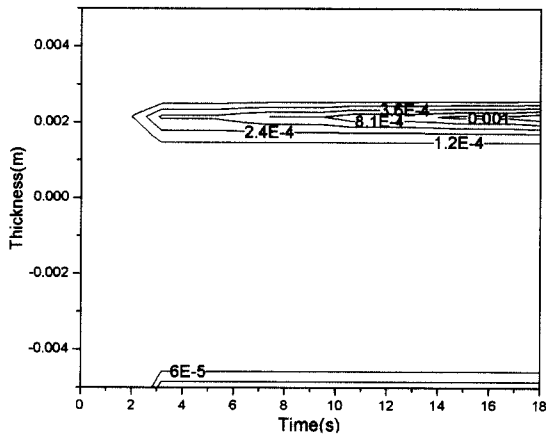


Fig. 14 Plastic strain contour(N/F/A, cubic.)

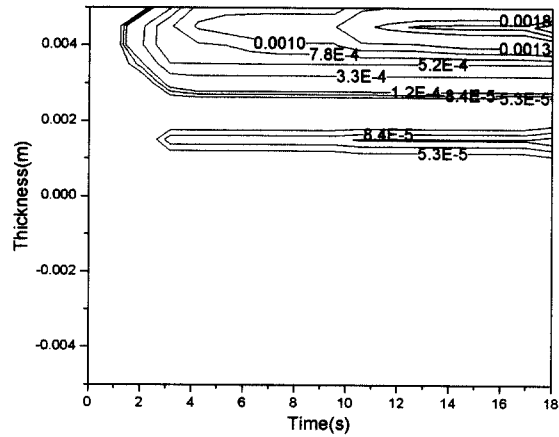


Fig. 15 Plastic strain contour(N/F, cubic)

6. 결 론

본 논문에서는 탄소성 이론과 유한요소 근사화의 연계를 기초로 하여 다양한 적층구조와 체적비 함수 변화에 따른 FGM의 탄-소성 거동해석을 실시 하였다.

열하중 사이클하의 해석모델은 체적비 함수가 1/2차 함수일 때 N/F/A 적층구조에선 Al₂O₃와 FGM층 사이의 경계층에서, N/F 적층구조에선 열적 하중을 직접 받는 FGM 끝단에서 과도한 응력집중으로 인해 소성변형이 집중적으로 발생하였다. 체적비 함수가 선형 및 2차 함수로 변하면서 1/2차 함수에서 보여지는 특정영역에서의 소성변형집중은 완화되고, 점차적으로 FGM층 내부 및 Ni층 영역에 걸친 완만한 소성변형 분포를 보였다. 또한 3차 함수의 경우, 2차 및 1/2차 함수이 특징을 동시에 나타내지만 소성변형의 크기는 상대적으로 감소하였다.

본 연구를 통한 수치결과들로부터 각각의 적층구조에서 체적비 함수의 적절한 선택으로 응력집중 현상이 완화와 동시에 소성변형분포의 최소화가 가능함을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. A. E. Giannakopoulos, S. Suresh, M. Finot and M. Olsson, "Elastoplastic Analysis of Thermal Cycling

: Layered Materials with Compositional Gradients," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 43, 1995, pp.1335~1354

2. R. B. Hetnarski, *Thermal Stress*, Elsevier Science Pub. Co., 1984

3. R. L. Williamson, B. H. Rabin and J. T. Drake, 1993, "Finite Element Analysis of Thermal Residual Stresses at Graded Ceramic-Metal Interface," *J. Appl. Phys* Vol. 74, 1993, pp. 1310~1326

4. J. R. Cho, B. G. Kim, D. Y. Ha and J. T. Oden,, "Thermo-Elastoplastic Characteristics of Functionally Graded Composites," *Proceedings of Fifth U.S. National Congress on Computational Mechanics, Colorado, USA*, 1999

5. J. R. Cho and J. T. Oden, "Functionally Graded Material: A Parametric Study on Thermal- Stress Characteristics using the Crank-Nicolson-Galerkin Scheme," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 188, No. 2, 2000, pp.17~38

6. D. R. J. Owen and E. Hinton, *Finite Elements in Plasticity : Theory and Practice*, Pineridge press, 1980

7. S. K. Ray and S. Utku, "A Numerical Model for the Thermo-Elastoplastic Behavior of a Material," *International J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 28, 1989, pp.1103~1114