

기능경사 내열 복합재의 체적분율 최적화에 관한 연구

조진래* · 하대율*

(2000년 9월 19일 접수, 2001년 3월 10일 심사완료)

Study on the Volume Fraction Optimization of Functionally Graded Heat-Resisting Composites

Jin-Rae Cho and Dae-Yul Ha

Key Words: Functionally Graded Material(기능경사재), Interior Penalty Function Method(내부 벌칙 함수 기법), Golden Section Method(황금분할법), Modified Rule of Mixtures(수정된 혼합법칙), Schapery's Estimate(Schapery 평가기법), Volume Fraction(체적분율)

Abstract

Functionally graded materials(FGMs) are highlighted to be suitable for high temperature engineering due to their continuous distribution of material properties. In this paper, an optimal design is executed for determining the optimal material volume distribution pattern that minimizes the steady-state thermal stress of FGM heat-resisting composites. The interior penalty function method and the golden section method are employed as optimization techniques while the finite element method is used for thermal stress analysis. Through numerical simulations we suggest the volume fraction distributions that considerably improve initial thermal stress distributions.

1. 서론

고온의 열하중에 적용하기 위한 구조물로서 기존에는 적층식 복합구조를 사용하여 왔다. 즉, 열하중에 대한 저항성이 우수한 세라믹 재료를 열이 가해지는 곳에, 상온을 유지하면서 기계적 강도가 요구되는 곳에 금속 재료를 bi-material식으로 접합시키는 방식이었다. 하지만 이러한 적층 복합재는 접합면에서의 본질적인 물성치 불연속으로 인하여 치명적인 구조적 결함, 즉 응력집중, 소성변형, 혹은 층간 분리등의 영구적 손상을 야기하곤 하였다.⁽¹⁻³⁾

이러한 치명적인 문제점을 해결하기 위한 신소재로서 기능경사재료(FGM: Functionally Graded Material)가 1980년대 중반 일본을 중심으로 소개

되었고, 현재 일본, 미국, 유럽 등지에서 실용화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.⁽⁴⁾ 기능경사재료는 서로 다른 두 구성물질 입자의 체적분율(volume fraction) 분포를 한 쪽면에서 다른 면으로 연속적/기능적으로 변화시켜 물성치의 불연속을 제거하여, 종래 적층복합재가 안고있는 구조적 결함들을 완화시키고자 하는 것이다. 또한 물질의 체적분율 분포양상을 변화시킴으로써 다양한 열응력 결과들이 나타나고 이는 선행연구⁽¹⁻³⁾의 매개변수적 수치해석을 통하여 확인한 바 있다. 따라서, 주어진 열하중 조건하에서 최적의 성능을 확보하기 위해서는 체적분율 최적화가 절실히 요구되고 있다. 현재 이를 위한 연구도 활발히 추진되고 있다.⁽⁵⁻⁷⁾ 아울러, 두 물질로 구성된 입자복합재의 정교한 열·기계적 물성평가에 관한 연구도 병행 진행되고 있다.⁽⁸⁻¹⁰⁾

본 논문에서는 기능경사 내열 복합재의 열응력 분포를 최소화시키는 최적의 체적분율 분포를 구하기 위한 효율적인 최적설계 절차를 제시하고자 한다. 체적분율과 영응력은 복잡하고 내연적(implicit)인 관계에 있기 때문에 전통적인 직접

* 책임저자, 회원, 부산대학교 기계기술연구소

E-mail : jrcho@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2467 FAX : (051)514-7640

** 부산대학교 대학원 기계설계공학과

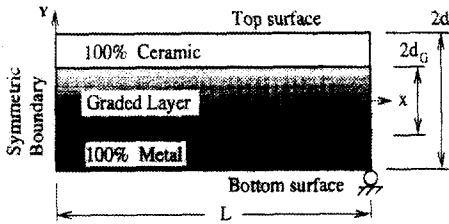


Fig. 1 Three-layered FGM composite beam

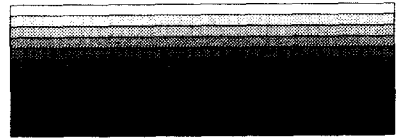


Fig. 2 Discretization into homogenized material layers

민감도 해석기법을 적용할 수 없다. 따라서, 유한차분법이나 다른 변형된 민감도 해석기법을 적용하여야 한다. Tanaka 등⁽⁷⁾은 중분반복 FEM 해석기법을 적용한 수정된 직접 민감도 해석기법을 채용하였는데, 이 경우 체적분율을 특정 함수형태로 가정해야 하기 때문에 체적분율의 유연성을 상실하게 된다. 한편 Ootao 등⁽⁵⁾은 유한차분법 적용시 필요한 FEM 해석의 과도한 회수를 탈피하기 위하여 신경회로망을 사용하여 민감도해석을 대체하였다.

본 연구에서는 원칙적으로 유한차분법을 적용하고 과도한 FEM 해석 회수를 억제하기 위한 방안으로, 기능경사 복합재 영역을 다수의 유한요소 이산화된 균질 재료층으로 분할한다. 이렇게 되면, 이산화된 균질층의 개수가 설계변수의 개수가 된다.

한편 두 물질로 구성된 FGM층의 정교한 열기계적 물성치를 예측하기 위하여, 선행연구를 통하여 열하중을 받는 FGM구조물에서 가장 적합하다고 제시한 M-S 물성평가기법⁽¹⁰⁾을 적용한다. 이 기법은 Tamura 등이 제안한 수정된 혼합법칙(modified rule of mixtures)⁽¹¹⁾과 Schapery기법⁽¹²⁾을 적절히 조합한 신뢰성 높은 평가기법이다.

제시한 최적설계 절차의 유용성과 효율성을 검증하기 위하여 두 개의 대표적인 모델 문제에 대한 최적설계 시뮬레이션을 수행하고 그 결과를 제시한다.

2. FGM 내열 복합재와 등가 물성치

2.1 FGM 내열 복합재의 구조

Fig. 1은 전형적인 3층 구조의 FGM 내열 복합재를 나타내고 있다. 위층과 아래층에 100%의 세라믹과 금속을 각각 배치시키고 그 사이에 기능경사층(functionally graded layer)을 삽입함으로써 물성치의 불연속을 제거한 것이다.

금속과 세라믹의 체적분율을 각각 V_m 과 V_c 로 나타내면, 복합재 전체 영역에서 $V_m + V_c = 1$ 을

만족한다. 삽입된 경사층의 체적분율 변화형태에 따라서 전체 FGM 내열 복합재의 열-기계적 거동은 달라지게 된다. 본 연구에서는 경사층의 상대두께비 $\chi = d_c/d$ 는 고정시키고, 체적분율 분포만을 최적화하는 경우를 고려한다. 더욱이 열하중 조건이 x 방향으로 불변이라고 가정한다. 그러면 Fig. 1과 같이 단순지지된 FGM 내열 복합재는 우측 끝단의 매우 지협적인 부분을 제외하고는 x -불변의 열응력 특성을 나타내는 y -방향 일차원 최적설계 문제로 차원이 축소된다. 그리고 목적함수로는 정상상태에서의 지배적인 열응력의 최대값으로 설정한다.

2.2 기능경사층의 등가 물성치

이산화되어 있는 균질층들의 체적분율은 최적 설계 과정에서 변하게 되고, 그 때마다 열-기계적 거동을 해석해야 한다. 이를 위해서는 변화된 체적분율에 해당하는 적합한 열-기계적 물성치 예측기법이 정확한 해석과 설계를 위해서 대단히 중요하다. 본 연구에서는 유한요소 이산화 모델링기법을 적용하여, 금속-세라믹 이중 FGM 내열 복합재의 열기계적 물성치를 평가하는 M-S 물성평가기법을 적용한다. 이 기법에 대한 상세한 내용은 인용문헌⁽¹⁰⁾을 참고하고, 여기서는 본 연구와 관련되는 결과 공식만을 요약하기로 한다.

먼저, 등가 탄성계수 \bar{E} 는 기본적으로 Tamura 등이 제시한 식 (10)의 수정된 혼합법칙을 사용하는데, 이 경우 식중에 포함된 응력-변형률 전달계수(stress-strain transfer ratio) q 의 선정이 절대적으로 중요하다.

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

이 계수는 대상이 되는 FGM의 종류에 의존하기 때문에 일정한 값이 아니다. 선행연구를 통해

금속-세라믹 이중 FGM을 위해서는 q 로 500GPa 이 가장 적합함을 확인하였다.

한편, 열팽창 계수 $\bar{\alpha}$ 는 다음의 Schapery 예측 공식⁽¹²⁾을 적용하는데,

$$\bar{\alpha} = \alpha_m V_m + \alpha_c V_c - \frac{1/K_L - 1/\hat{K}}{1/K_m - 1/K_c} (\alpha_m - \alpha_c) \quad (2)$$

여기서 K 는 bulk modulus를 나타낸다. 선행연구를 통해 두 개의 미지계수를 다음과 같이 계산하는 것이 금속-세라믹 FGM 내열복합재에 가장 적합하였다.

$$\frac{1}{K_L} = \frac{V_m}{K_m} + \frac{V_c}{K_c}, \quad \hat{K} = V_m K_m + V_c K_c \quad (3)$$

마지막으로, 등가 푸아송비 $\bar{\nu}$ 는 선형 혼합법칙에 따라 $\bar{\nu} = \nu_m V_m + \nu_c V_c$ 로 계산한다.

3. 유한요소 정식화

FGM 내열 복합재의 열응력 거동을 위한 유한요소 해석 정식화는 다음의 가상일의 원리로부터 유도된다.

$$\int_{\Omega} \epsilon_{ij}(\mathbf{v}) \sigma_{ij}(\mathbf{u}) d\Omega = \int_{\Omega} f_i v_i d\Omega + \int_{\partial\Omega_N} t_i v_i dS \quad (4)$$

본 문제에서는 자중을 무시하고, 기계적 외부하중이 없으므로 위 식의 우변은 0이 된다. 한편, 열변형에 의해 발생하는 총 응력성분은 다음식과 같다.⁽³⁾

$$\sigma_{ij} = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} - \alpha \delta_{ij} (3\lambda + 2\mu) [T - T_0] \quad (5)$$

여기서, μ, λ 는 Lamé 상수이고, T_0 는 초기온도를 의미한다. 위 응력을 다음과 같이 두 성분으로 분류한다.

$$\sigma_{ij}^S = 2\mu \epsilon_{ij} + \lambda \delta_{ij} \epsilon_{kk} \quad (6)$$

$$\sigma_{ij}^T = \alpha \delta_{ij} (3\lambda + 2\mu) [T - T_0]$$

그러면, 위 변분공식 (4)는 다음 식으로 귀착된다.

$$\int_{\Omega} \epsilon_{ij}(\mathbf{v}) \sigma_{ij}^S(\mathbf{u}) d\Omega = \int_{\Omega} \epsilon_{ij}(\mathbf{v}) \sigma_{ij}^T d\Omega \quad (7)$$

유한요소 근사화를 위해 변위장 \mathbf{u} 와 가상 변위장 \mathbf{v} 를 형상함수 행렬 \mathbf{N} 과 절점변위 벡터 $\bar{\mathbf{u}}, \bar{\mathbf{v}}$ 의 곱으로 근사화한다.

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{N}} \bar{\mathbf{u}}, \quad \mathbf{v} = \bar{\mathbf{N}} \bar{\mathbf{v}} \quad (8)$$

위 근사식을 변위-변형률 정의 편미분행렬 \mathbf{B} 를 도입하고, 물성행렬 \mathbf{E} 를 이용하여 응력장을 표현할 수 있다. 이렇게 표현한 변형률과 응력장을 식 (7)에 대입하면 다음 행렬식에 도달한다.

$$[\mathbf{K}]\{\bar{\mathbf{u}}\} = \{\mathbf{F}\} \quad (9)$$

여기서, 강성행렬과 하중벡터는 각각 다음과 같이 정의되는데, \mathbf{I} 는 항등행렬을 의미한다.

$$[\mathbf{K}] = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{E} \mathbf{B} d\Omega \quad (10)$$

$$\{\mathbf{F}\} = \int_{\Omega} \mathbf{B}^T \mathbf{I} d\Omega \frac{\alpha E}{(1-2\nu)} (T - T_0) \quad (11)$$

4. 최적설계 기법

앞서 언급한 바와 같이 본 연구에서는 정상상태에서 지배적인 열응력 성분의 최대값 $\sigma_{axial}^{max}(\mathbf{x})$ 을 최소화하고자 한다. 이를 위해 FGM의 경사층을 여러개의 균질층으로 이산화하고 각 층의 금속 체적분율 V_m 분포를 결정하는 것을 목표로 한다. 또한 제약조건으로는 V_m 이 0과 1 사이의 값이 되어야 하므로, 최적설계의 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Find } \mathbf{X} = \{(V_m)_i\}, \quad i=1, \dots, NDV$$

$$\text{Minimize } \sigma_{axial}^{max}(\mathbf{x})$$

$$\text{Subject to } [\mathbf{K}]\{\bar{\mathbf{u}}\} = \{\mathbf{F}\}$$

$$(g_1)_j = -(V_m)_j \leq 0, \quad j=1, \dots, NDV$$

$$(g_2)_k = (V_m)_{k-1} \leq 0, \quad k=1, \dots, NDV$$

여기서, NDV 는 설계변수의 수, 즉 이산화된 균질층의 수를 나타낸다.

최적설계를 수행하기 위한 알고리즘으로는 고

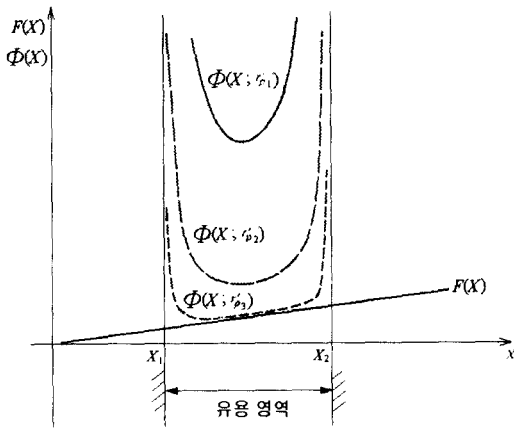


Fig. 3 Schematic representation of interior penalty function method

전적 방법인 내부 벌칙 함수법(interior penalty function method)⁽¹³⁾을 사용하였다. 이 알고리즘에 대한 기본 개념을 Fig. 3에 1차원 간략화로 나타내었다. 그림에서와 같이 비제약 목적함수(unconstrained objective function) $F(X)$ 와 제약조건을 이용하여 유용영역(feasible region)에서 함수값을 갖는 단일의 가 목적함수(pseudo-objective function) $\Phi(X)$ 로 변환한 것이다. 수치적 안정성을 위해 내부 벌칙 매개변수(interior penalty parameter) r'_p 를 점진적으로 감소시키면서 유용영역내에서 최소값을 찾아나간다. FGM의 체적분율은 물리적인 측면에서 제약조건을 조금이라도 벗어날 수 없기 때문에, 이 최적화 기법을 채택하였다.

FGM 내열 복합재의 열응력 최소화를 위한 가 목적함수 Φ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\Phi(X) = \sigma_{axial}^{max}(X) + r'_p \sum_{i=1}^{NDV} \left[\frac{-1}{(g_1)_i} + \frac{-1}{(g_2)_i} \right] \quad (12)$$

본 최적설계에서의 목적함수 즉 σ_{axial}^{max} 의 값은 $10^7 \sim 10^8$ 정도의 값을 가지며, 제약함수는 $-1 \sim 0$ 사이의 값을 가진다. 따라서 가 목적함수에서 목적함수와 제약조건의 영향을 균등하게 반영하기 위하여 정규화(normalization) 인자를 계산한다.

$$c_j = \frac{|\nabla F(X^0)|}{|\nabla g_j(X^0)|}, \quad j = 1, \dots, m \quad (13)$$

여기서, X^0 는 초기 설계변수를 의미한다.

FGM 체적분을 최적설계에서의 정규화 인자는 다음과 같이 계산된다. 즉,

$$(g_1)_i^0 = -(V_m)_i^0, \quad (g_2)_i^0 = (V_m)_i^0 - 1 \quad (14)$$

이고, 설계변수 X_j 에 대한 $(V_m)_i$ 의 구배와 그 절대값은

$$\nabla_j (g_1)_i^0 = -\delta_{ij}^0 \Rightarrow |\nabla (g_1)_i^0| = 1 \quad (15)$$

$$\nabla_j (g_2)_i^0 = \delta_{ij}^0 \Rightarrow |\nabla (g_2)_i^0| = 1 \quad (16)$$

이 되고, $|\nabla F(X^0)| = |\nabla \sigma_{axial}^{max}(X^0)|$ 을 이용하면 정규화 인자는 최종적으로 다음과 같다.

$$c_j (= c) = |\nabla \sigma_{axial}^{max}(X^0)|, \quad j = 1, \dots, NDV \quad (17)$$

따라서 가목적함수 Φ 는 다음과 같이 정규화된 형태로 표현된다.

$$\Phi(X) = \sigma_{axial}^{max}(X) + cr'_p \cdot \sum_{i=1}^{NDV} \left[\frac{1}{(V_m)_i} - \frac{1}{(V_m)_i - 1} \right] \quad (18)$$

설계변화에 따른 Φ 의 구배, 즉 민감도(sensitivity)가 계산되어야 한다. 목적함수 $\sigma_{axial}^{max}(X)$ 는 설계변수 V_m 에 대한 명확한 함수꼴로 나타나지 않으므로 유한차분법을 이용하여 계산한다. 제약조건에 대한 민감도는 위에서 정의하였으므로 $\nabla \Phi$ 는 다음식과 같이 된다.

$$\frac{\partial \Phi(X)}{\partial X_i} = \frac{\partial \sigma_{axial}^{max}(X)}{\partial X_i} + cr'_p \cdot \left[\frac{-1}{((V_m)_i)^2} + \frac{1}{((V_m)_i - 1)^2} \right] \quad (19)$$

한편, 체적분을 최적설계에서의 설계변수 업데이트 과정은 다음식을 따른다.

$$(V_m)_i^{k+1} = (V_m)_i^k + \alpha (S)_i^{k+1} \quad (20)$$

여기서, $(S)_i^{k+1}$ 은 설계변수의 변화 방향을, α 는 그 방향으로의 이동거리를 의미한다. 식 (19)에서

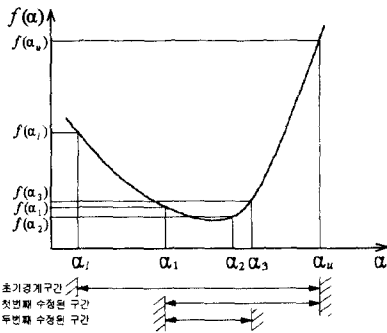


Fig. 4 Schematic representation of golden section method

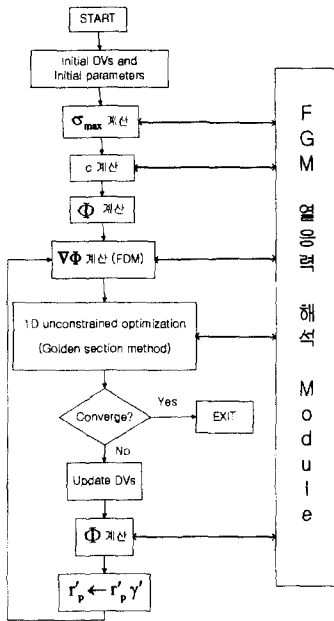


Fig. 5 Flowchart of the volume fraction optimization

정의된 $\partial\Phi(\mathbf{X})/\partial X_i$ 가 $(S)_i$ 가 되며, α 를 구하는 과정은 1차원 최적화 문제로 볼 수 있고, 이를 위하여 Fig. 4에 도시한 전통적인 황금분할법(golden section method)을 적용한다. 이 기법에 대한 상세한 내용은 인용문헌⁽¹³⁾을 참고한다.

FGM 내열 복합재 열응력 최소화를 위한 체적분을 최적설계 흐름도를 Fig. 5에 도시하였다. 그림에서 FGM 내열 복합재의 열응력 해석은 ANSYS⁽¹⁴⁾를 사용하였다.

5. 수치실험 및 결과

Table 1 Thermo-mechanical properties of Ni and Al_2O_3 ⁽¹⁵⁾

항목	재료	Ni	Al_2O_3
탄성계수 E (GPa)		199.5	393.0
푸아송 비 ν		0.3	0.25
열 팽창 계수 α ($10^{-6}/K$)		15.4	7.4

수치실험을 위한 금속과 세라믹 재료로, Ni과 Al_2O_3 를 각각 채택하였다. 재료의 물성치는 온도에 독립적이며, 선형 탄성 거동을 한다고 가정한다. Ni과 Al_2O_3 에 대한 물성치는 Table 1에 나타내었다. 최적설계를 위한 모델로는 보(beam)형상 및 실린더형태의 두 가지 내열복합재 모델을 설정하였다(Fig. 6과 Fig. 10참조). 윗 면과 아래면은 각각 일정두께의 Al_2O_3 와 Ni의 단일재료 층으로 하고, 그 사이의 경사층을 10개의 균질층으로 균일간격으로 이산화 시켰다.

각 모델에 있어 열 하중조건으로서 구조물 전체의 온도를 균일하게 감소시킨다. 초기 설계변수값은 경사층 전체에 $(V_m)_i = 0.5$ 로 균일하게 설정하고 수렴조건은 다음과 같이 정의하였다.

$$\frac{(\sigma_{axial}^{max})^{k+1} - (\sigma_{axial}^{max})^k}{(\sigma_{axial}^{max})^{k+1}} < \epsilon = 0.01(1\%) \quad (21)$$

여기서, k 는 최적설계 반복회수를 의미한다.

5.1 Model I 문제

첫 번째 최적설계 대상은 Fig. 6와 같은 단순지 지된 보 형상의 FGM 내열복합재이다. 길이는 50mm이고, 총 두께는 10mm이며, 삽입된 경사층은 8mm를 차지하고 있다. 변위경계 조건으로 $x=0$ 인 면은 $u_x=0$, $x=50mm$, $y=-5mm$ 인 지점에 $u_y=0$ 를 부여하고, 하중조건으로 초기 구조물의 온도 300K를 균일하게 100K으로 감소시키는 경우를 고려한다.

최적설계상의 주요 결과를 Table 2에서 정리하였다. 표에서 알 수 있듯이 최적설계 후 $\sigma_{axial}^{max}(\mathbf{X}^*)$ 값은 초기값에 비해 상당히 감소한 것을 확인할 수 있다.

Table 2 Numerical results from the optimization

초기목적함수값, $\sigma_{axial}^{max}(X^0)(Pa)$	1.2497×10^8
최적해, $\sigma_{axial}^{max}(X^*)(Pa)$	0.4312×10^8
최적설계 반복회수	5
FEM 열응력해석 수행회수	225

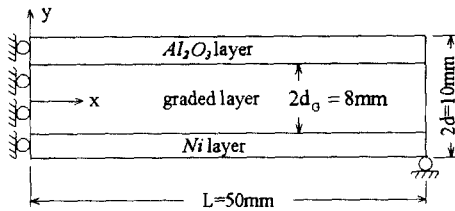


Fig. 6 Simply supported beam-like heat-resisting FGM composite

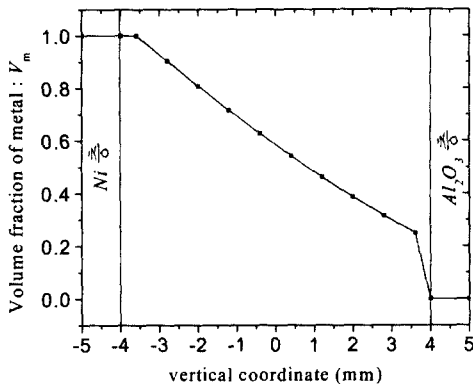


Fig. 7 Optimum volume fraction (Model I)

최적화 후 층별로 불연속인 금속 체적분율 V_m 을 선형보간법을 이용하여 평탄화(smoothing) 후처리를 수행하였는데, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림에서 보듯이 경사층 내에서 최적의 V_m 분포는 거의 선형적인 변화 양상을 가짐을 알 수 있다.

Fig. 8은 경사층의 초기상태, 즉 $(V_m)_i=0.5$ 일 때의 축응력 분포와 최적설계 후의 축응력 분포를 비교한 것이다. Fig. 9에서는 최적설계 반복회수에 따른 목적함수 σ_{axial}^{max} 의 감소경향을 보여 준다. 표에서 확인한 바와 같이 초기설계에 비해 최대 축 응력값이 현저히 그리고 일률적으로 감소한 것을 알 수 있다.

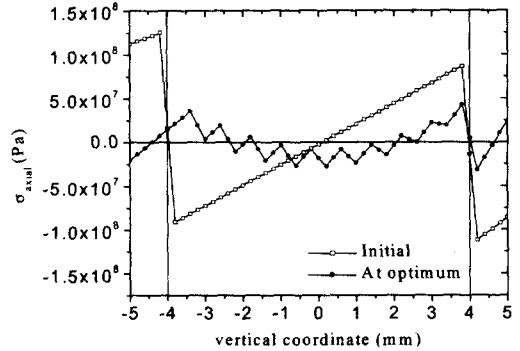


Fig. 8 Axial stress distributions for initial and optimum volume fractions

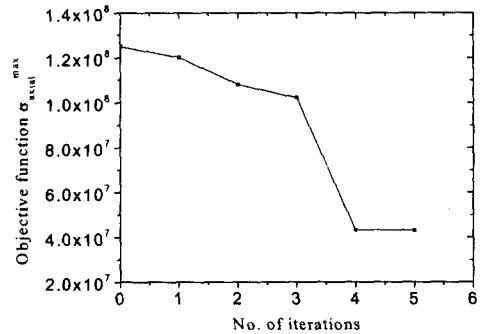


Fig. 9 Reduction trend of the objective function (Model I)

5.1 Model II 문제

최적설계를 위한 두 번째 모델은 Fig. 10과 같은 실린더 형상의 FGM 내열복합재이다. 위 면과 아래 면에 각각 Al_2O_3 와 Ni 를 1mm씩 위치하고, 그 사이에 경사층이 삽입되어 있다. 총 높이는 6mm이며 직경은 8mm이다. 하중조건은 초기 1,000K의 온도에서 500K으로 균일하게 감소시켰으며, 2차원의 축대칭 문제로 해석하였다.

원주방향의 최대 열응력 σ_{θ}^{max} 을 최소화하기 위한 최적설계 수행 결과가 Table 3에 나타나 있다. Fig. 11에서는 최적화된 체적분율의 평탄화 작업 후의 분포형태를 보여준다. 그리고 초기 설계에 의한 원주방향 응력과 최적화 후의 원주방향 응력 분포를 Fig. 12에서 비교하였다. Model I과 마찬가지로 초기 설계에 비해 상당히 낮은 수치를 보이고 있다. Fig. 13은 최적화 반복회수에 따른 목적함수의 감소 경향을 보이고 있다.

Table 3 Numerical results from the optimization

초기목적함수값, $\sigma_{\theta}^{\max}(X^0)(Pa)$	1.4622×10^8
최적해, $\sigma_{\theta}^{\max}(X^*)(Pa)$	0.7342×10^8
최적설계 반복회수	5
FEM 열응력해석 수행회수	217

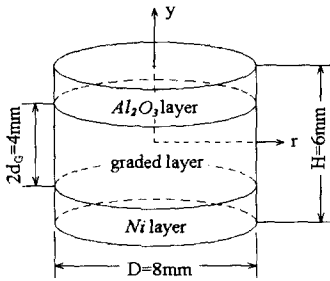


Fig. 10 Cylinder-type heat-resisting FGM composite

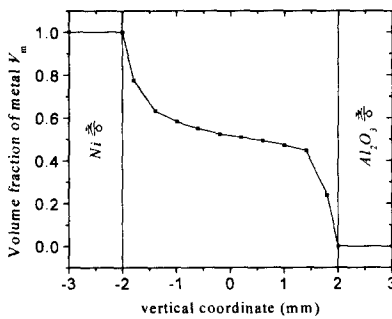


Fig. 11 Optimum volume fraction (Model II)

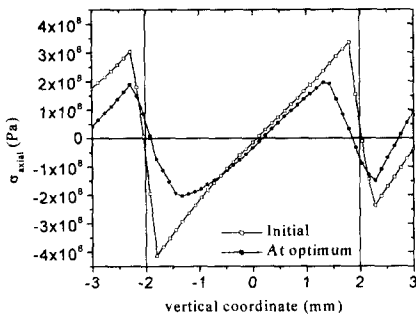


Fig. 12 Axial stress distributions for initial and optimum volume fractions

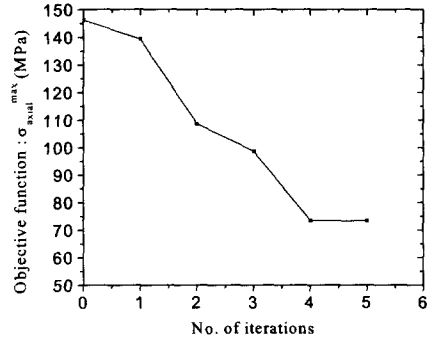


Fig. 13 Reduction trend of the objective function (Model II)

6. 결론

본 연구에서는 기능경사 내열 복합재의 정상상태 열응력을 최소화 시키는 체적분율 최적화 절차를 제시하였다. 최적설계 과정에서 FGM층을 유한개의 균질층으로 이산화함으로써, 유한차분법 적용에 따른 FEM 해석회수를 최소화 하였다. 하지만 최적화 후에 연속적인 체적분율 분포를 위하여 선형 보간법을 적용하여 평탄화하였다.

참고문헌⁽¹⁰⁾에서 제시한 M-S 물성평가 기법을 적용함으로써, FGM 내열복합재의 해석과 설계의 정확도를 추구하였다.

두 가지 수치실험 모델을 통하여 제시한 최적설계 절차의 유용성과 효율성을 검증하였다. 첫 번째 모델의 경우, 최적설계 후 거의 선형적인 체적분율 분포를, 그리고 초기설계에 비해 3배 정도 감소된 최대 축응력 값을 얻을 수 있었다. 한편, 두 번째 모델은 거의 삼차원 곡선형태의 체적분율 분포가 나왔으며, 최대 원주방향 응력은 약 2배 정도로 감소하였다.

따라서, 제시한 최적설계 절차에 따라 임의 하중 및 경계조건하의 FGM 내열복합재의 최적의 체적분율을 효율적 그리고 정확하게 설계할 수 있으리라고 확신한다.

본 연구에 추가하여 보다 일반적인 체적분율 최적설계 시스템 구축을 위하여, 유전자 알고리즘과 같은 효율적인 민감도해석 대체기법⁽⁵⁾의 접목, 2차원 체적분율 분포의 최적설계, 비정상 상태에서의 열응력 최소화 그리고 위상 최적설계 등과 같은 연구가 필요할 것으로 본다.

참고문헌

- (1) Cho, J. R. and Kim, B. G., 1999, "Finite Element Analysis of Thermal Stresses in Functionally Gradient Layered Composites," *KSME International Journal*, Vol. 13, No. 2, pp. 108 ~ 115.
- (2) Cho, J. R. and Oden, J. T., 2000, "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, pp. 17~38.
- (3) Cho, J. R. and Ha, D. Y., 2001, "Thermo-Elastoplastic Characteristics of Heat Resisting Functionally Graded Composites," *Structural Engineering and Mechanics*, Vol. 11, No. 1, pp. 36~49.
- (4) Koizumi, M., 1992, "Recent Progress of Functionally Gradient Materials in Japan," *Ceram. Engrg. Sci. Proc.*, Vol. 13, pp. 333~347.
- (5) Ootao, Y., Tanigawa, Y. and Nakamura, T., 1999, "Optimization of Material Composition of FGM Hollow Circular Cylinder under Thermal Loading : a Neural Network Approach," *Composites: Part B*, Vol. 30, pp. 415~422.
- (6) Chen, B. C. and Kikuchi, N., 1999, "Structure Topology Optimization of Functionally Gradient Materials," *Proceedings of Fifth U.S. National Congress on Computational Mechanics*, pp. 401~402.
- (7) Tanaka, K., Tanaka, Y., Enomoto, K., Poterasu, V. F. and Sugano, Y., 1993, "Design of Thermoelastic Materials using Direct Sensitivity and Optimization Methods: Reduction of Thermal Stresses in Functionally Gradient Materials," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 106, pp. 271~284.
- (8) Reite, T., Dvorak, G. J. and Tvergaard, V., 1997, "Micromechanical Models for Graded Composite Materials," *J. physics of Solids*, Vol. 45, pp. 1281~1302.
- (9) Grujicic, M and Zhang, Y., 1998, "Determination of Elastic Properties of Functionally Graded Materials using Voronoi Cell Finite Element Method," *Materials Science and Engrgineering*, Vol. 104, pp. 64~76.
- (10) Cho, J. R. and Ha, D. Y., 2001, "Averaging and Finite-Element Discretization Approaches in the Numerical Analysis of Functionally Graded Materials," *Materials Science and Engineering A*, Vol. 302, No. 2, pp. 187~196.
- (11) Tomata, Y., Kukori, K., Mori, K. and Tamura, K., 1976, "Tensile Deformation of Two-Ductile-Phase Alloys: Flow Curves of Fe-Cr-Ni Alloys," *Materials Science Engineering*, Vol. 24, pp. 85-94.
- (12) Schapery, R. A., 1968, "Thermal Expansion Coefficients of Composite Materials based on Energy Principles," *J. Computational Materials*, Vol. 2, pp. 380~404.
- (13) Vanderplaats, G. N., 1984, *Numerical Optimization Techniques for Engineering Design with Applications*, McGraw-Hill.
- (14) ANSYS Inc., 1999, *ANSYS User's Manual for Release 5.6*.
- (15) Giannakopoulos, A. E., Suresh, S. and Olsson, M., 1995, "Elastoplastic Analysis of Thermal Cycling: Layered Materials with Compositional Gradients," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 43, No. 3, pp. 1335~1354.