

PCB판의 위상 최적화를 위한 재료혼합법의 개발

한석영⁺, 김민수⁺⁺, 황준성⁺⁺, 최상혁⁺⁺, 박재용⁺⁺, 이병주^{*}

(논문접수일 2006. 10. 18, 심사완료일 2006. 12. 5)

Development of a Material Mixing Method for Topology Optimization of PCB Substrate

Seog Young Han⁺, Min Sue Kim⁺⁺, Joon Sung Hwang⁺⁺, Sang Hyuk Choi⁺⁺,
Jae Yong Park⁺⁺, Byung Ju Lee^{*}

Abstract

A material mixing method to obtain an optimal topology for a structure in a thermal environment was suggested. This method is based on Evolutionary Structural Optimization(ESO). The proposed material mixing method extends the ESO method to a mixing several materials for a structure in the multicriteria optimization of thermal flux and thermal stress. To do this, the multiobjective optimization technique was implemented. The overall efficiency of material usage was measured in terms of the combination of thermal stress levels and heat flux densities by using a combination strategy with weighting factors. Also, a smoothing scheme was implemented to suppress the checkerboard pattern in the procedure of topology optimization. It is concluded that ESO method with a smoothing scheme is effectively applied to topology optimization. Optimal topologies having multiple thermal criteria for a printed circuit board(PCB) substrate were presented to illustrate validity of the suggested material mixing method. It was found that the suggested method works very well for the multicriteria topology optimization.

Key Words : Material mixing method(재료혼합법), Topology optimization(위상 최적화), Multiple thermal criteria(다중 열 조건), Printed circuit board(PCB) substrate(인쇄회로기판)

1. 서론

위상 최적화 기법은 초기설계단계에서 주어진 조건을 만

족하는 최적의 위상을 구하는 방법으로 MEMS 분야의 발전과 더불어 활발히 적용되고 있다. 그 예로 열 액츄에이터(thermal actuator)의 하나인 마이크로 그립퍼(microgripper)

* 교신저자, 한양대학교 전자컴퓨터공학부 (bj@hanyang.ac.kr)

주소: 426-791 경기도 안산시 상록구 사1동 1271

+ 한양대학교 기계공학부

++ 한양대학교 일반대학원 기계공학과

에 대한 위상 최적화가 밀도분포법을 이용하여 열변형률이 다른 두 재료로 혼합된 구조(bimorph structure)⁽¹⁾로 수행된 바 있다.

최근에는 진화적 구조 최적화 기법(ESO법, Evolutionary Structural Optimization method)⁽²⁾의 개념을 이용하여 정하중 문제에 대해 주어진 질량제한 조건 하에서 다중재료로 구성되는 구조물이 최대의 강성을 갖는 구조를 얻는 재료혼합법⁽³⁾이 개발되었다. 이것은 다중재료로 혼합된 최적 위상을 얻기 위해 구조물에서 낮은 응력을 받는 부분의 요소를 강도가 적은 재료로 변환하고, 변환된 재료 중에서도 더 낮은 응력을 받는 부분의 요소들을 점차 제거해 나가는 개념에 기반을 두고 있다. 그러나 다중 열 최적화 문제에 있어서는 ESO법을 적용한 재료혼합법이 개발된바 없다.

본 연구에서는 ESO법을 기반으로 한 열 환경하에서 다중 열 조건(multiple thermal criteria)을 가진 다중재료 구조물의 최적 위상을 얻기 위한 재료혼합법을 제안하였다. 제안된 기법의 타당성을 확인하기 위해 PCB(printed circuit board)판을 선정하여 위상 최적화를 수행하였다. PCB판의 열 기능은 열응력(thermal stress)과 열유량(heat flux)의 영향을 크게 받으므로, 가중치에 따른 다중목적 최적화(multiobjective optimization)를 통해 파레토 위상해(Pareto topology solution)를 구하였다. 세 가지 이상의 재료를 혼합시키는 방법은 두 가지 재료를 혼합하는 방법에서 크게 벗어나지 않으므로 두 가지 재료를 혼합하는 기법에 대해서만 논하였으며, 세 가지 재료를 혼합한 경우에 대한 위상 최적화도 수행하였다.

2. 다중목적 최적화

PCB판의 열 기능은 열응력과 열유량의 영향을 크게 받으므로, 가중치에 따른 다중목적 최적화(multiobjective optimization) 기법을 적용하였다. ESO법에서의 각 요소 당 상대적인 효율을 측정하기 위해 위의 두 가지 인자만을 고려하였다.

$$\text{stress efficiency factor} : \alpha_s^e = \frac{\sigma^e}{\sigma^{\max}} \quad (1)$$

$$\text{flux efficiency factor} : \alpha_f^e = \frac{J^e}{J^{\max}} \quad (2)$$

여기서, σ^e 와 σ^{\max} 는 e 번째 요소의 열응력과 최대 열응력을 의미한다⁽⁴⁾. 또한 J^e 와 J^{\max} 는 이에 대응하는 요소의 열유량과 최대 열유량을 나타낸다⁽⁵⁾.

본 연구에서는 열응력과 열유량 조건을 고려해야 하므로

다중목적 최적화를 위한 e 번째 요소의 효율계수(민감도 수)는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha^e = w_s \alpha_s^e + w_f \alpha_f^e \quad (3)$$

여기서, w_s 와 w_f 는 열응력과 열유량 조건의 가중치를 나타낸다. 가중치는 두 조건의 주어진 각각의 중요도 비율을 의미한다.

3. 재료혼합법

재료혼합법은 ESO법을 기반으로 하여 주어진 제한조건 하에서 두 가지 이상의 재료가 혼합된 상태의 구조물의 최적 위상을 구하는 방법이다.

열전도율이 크고 밀도가 큰 재료를 재료 1, 열전도율이 작고 밀도가 작은 재료를 재료 2로 설정한다. 먼저 설계영역이 재료 1로만 이루어졌다고 가정하고 각 요소에 변환선과 제거선의 두 단계를 적용한다. 매 반복 시 첫 단계에서는 변환선보다 낮은 열응력과 열유량 값을 가지는 요소를 재료 2로 변환하고, 두 번째 단계에서는 첫 번째 단계와 같은 방법으로 제거선보다 작은 열응력과 열유량 값을 가지는 요소를 제거한다. 이 과정을 Fig. 1에 나타내었다.

3.1 변환선과 제거선

3.1.1 변환선(Transformation Line)

변환선은 식 (4)와 같이 표현된다.

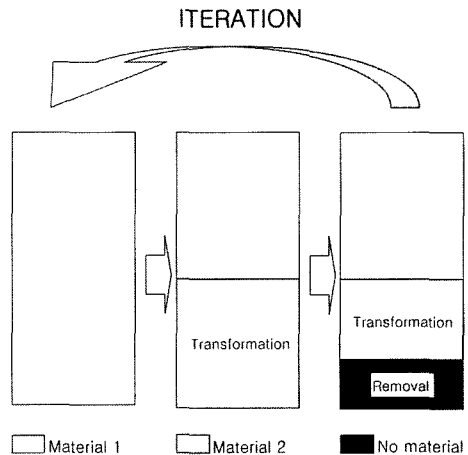


Fig. 1 Procedure of material transformation and element removal

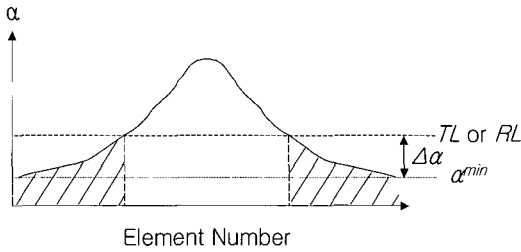


Fig. 2 Transformation and removal lines

$$TL = \alpha^{min} + \Delta\alpha \quad (4)$$

식 (3)과 같이 각 요소 당의 효율계수 α 는 열 해석 후, 열응력과 열유량의 효율계수 값을 이용하여 나타낸다. 만약 e 번째 요소의 α 값이 변환선보다 낮아 식 (5)를 만족할 경우 그 요소는 재료 1에서 재료 2로 변환시킨다.

$$\alpha^e \leq TL \quad (5)$$

여기서, 임계비 $\Delta\alpha$ 는 변환되어야 할 요소의 범위를 조절하기 위한 값으로써 문제에 따라 충분히 작은 값으로 선정할 수 있다. Fig. 2에서 보듯이 최소 영역에 임계비를 더해줌으로써 빗금 친 만큼의 요소가 변환된다. 이 개념은 제거선에도 동일하게 적용된다.

3.1.2 제거선(Removal Line)

제거선은 식 (6)과 같이 표현된다. 다음과 같이 e 번째 요소의 효율계수 α 값이 제거선보다 작은 요소는 제거된다. 여기서도 변환선과 마찬가지로 임계비가 적용되며 그 크기를 조절함으로써 변환선보다 작은 폭의 제거선을 얻을 수 있다.

$$RL = \alpha^{min} + \Delta\alpha \quad (6)$$

만약 e 번째 요소의 α 값이 제거선보다 낮아 다음 식 (7)을 만족할 경우 그 요소는 제거된다.

$$\alpha^e \leq RL \quad (7)$$

여기서도 변환선과 마찬가지로 임계비가 적용되며, 그 크기를 조절함으로써 변환선보다 작은 폭의 제거선을 얻을 수 있다.

3.2 위상 최적화 과정

ESO법을 이용한 구조물의 최적 위상은 Fig. 3과 같이 유

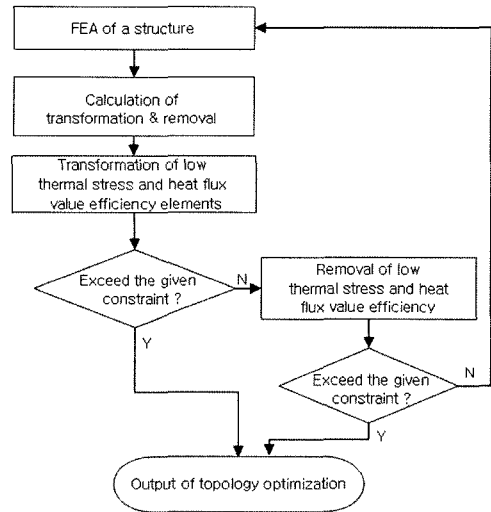


Fig. 3 Flowchart of the optimization process

한요소해석, 변환선을 이용한 재료의 변환, 제거선을 이용한 요소의 제거를 통하여 주어진 질량이나 변형량의 제한조건을 만족할 때까지 반복하여 구해진다.

4. 체커보드 패턴의 완화

유한요소법을 기초로 하는 많은 위상 최적화 기법에서는 요소가 제거될 때 대각선 방향의 요소가 제거되는 체커보드 패턴(checkerboard pattern)이 나타나게 된다. 체커보드 패턴은 위상의 경계선이 불분명하고 주변 값들의 오차를 일으키며 실제로 제작할 수 없는 위상을 만들게 된다. 이러한 현상을 제거 혹은 완화시키기 위하여 완화처리 기법⁽⁶⁾을 사용하였으며 그 과정은 다음과 같다.

- (1) 주변요소들과 중심요소에 각각 가중치를 부여한다.
- (2) 가중치가 부여된 요소들의 평균으로 새로운 요소 효율을 구한다.
- (3) 새로운 효율을 제거선 기준으로 한다.

각각의 요소에 부여하는 가중치는 다음의 Fig. 4와 같으며, 중심요소를 기준으로 주변층의 수에 따라 1차법과 2차법으로 구분된다. 주변의 8개 요소로 새로운 효율을 정하는 1차법은 계산과정이 2차법보다 적은 반면 체커보드 패턴의 억제력은 2차법에 비하여 다소 떨어진다. 완화처리 기법이 적용된 새로운 요소의 효율은 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$\alpha^e = \left(\sum_{i=1}^m w_i V_i \alpha_i \right) / \left(\sum_{i=1}^m w_i V_i \right) \quad (8)$$

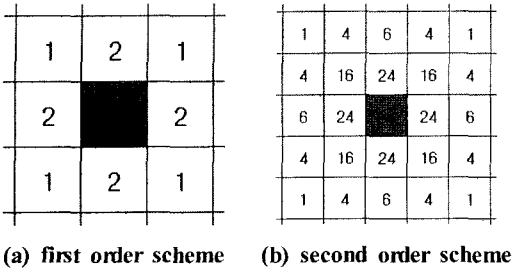


Fig. 4 The filter parameter for the checkerboard suppression

V_i 는 연결된 요소의 체적을 나타내고, m 은 연결된 요소의 변호를 나타낸다 (1차법의 경우, $m = 3^2$ 이 되며, 2차법의 경우 $m = 5^2$ 가 된다). 이 식에서 w_i 는 필터변수를 나타내며 w_i 의 합은 1이다.

5. PCB판의 위상 최적화

PCB판의 역할 중의 하나는 제한된 재료에서 최대한 많은 양의 열에너지를 발산시키고 동시에 발생하는 열응력을 견디어 내는데 있다.

5.1 두 가지 재료의 혼합

Fig. 5와 같이 네 면이 모두 0°C로 고정된 PCB판에 F_1 과 F_2, F_3, F_4 로 표시된 네 부분의 열원에서 열이 발생할 때, 단일 재료와 두 가지 재료로 구성되는 최적 위상을 재료혼합법에 의해 구하였다. 격자의 크기는 4변형(quadrilateral) 요소 53×33개로 나누어 계산하였다.

Table 1과 같이 재료 1의 열전도율과 밀도를 100%로 할 때, 재료 2는 70%의 밀도를 가지면서 열전도율은 각각 50%, 100%, 200%를 갖는다고 가정하였다.

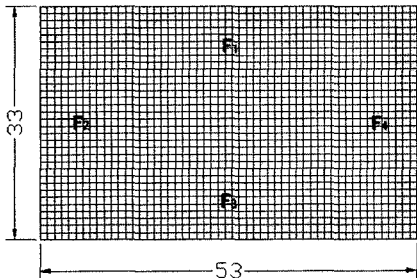


Fig. 5 Initial FEA model of the PCB substrate

두 재료가 혼합되면서 열전도율에 따른 위상 최적화가 이루어지는 과정을 살펴보기 위하여 초기에 재료 1로 된 초기 질량을 100%로 두고 최종질량이 초기 질량의 70%가 되도록 제한한 후 열응력과 열유량의 가중치를 변화시키며, Fig. 7과 같이 각각 다섯 가지 경우에 대한 최적 위상을 구하였다. 이를 $w_s : w_f$ 가 0.5:0.5일 때 하나의 재료로 이루어진 경우의 최적 위상인 Fig. 6과 비교했을 때 거의 흡사한 위상이 나오므로 해석적인 문제는 없음을 확인할 수 있었다.

이를 통해 동일한 열전도율 조건을 가진 상태에서 열응력과 열유량의 가중치에 따른 위상의 변화를 확인할 수 있었다. 열유량의 중요도가 클수록 열이 빨리 배출될 수 있도록 중앙부분의 구멍의 크기가 비례하여 크게 변화하였고, 열응력의 중요도가 클수록 열응력에 견딜 수 있도록 PCB판 중앙부분의 요소가 제거되지 않고 남아있는 것을 볼 수 있었다. 또한, 반대로 동일한 열응력과 열유량의 가중치를 가진 경우 열전도율에 따른 위상의 차이를 확인할 수 있었다.

두 가지 재료가 적절히 혼합된 Fig. 7의 결과로부터 열 조건을 가진 재료혼합법의 타당성을 확인할 수 있었다.

Table 1 Material properties

	Material 1	Material 2-1	Material 2-2	Material 2-3
Young's Modulus	210GPa	210GPa	210GPa	210GPa
Density	2.32kg/m ³	1.624kg/m ³	1.624kg/m ³	1.624kg/m ³
Heat Conductivity	0.045 W/mmK	0.0225 W/mmK	0.045 W/mmK	0.09 W/mmK
Thermal Expansion coefficient	1.2×10 ⁻⁵ /°C	1.2×10 ⁻⁵ /°C	1.2×10 ⁻⁵ /°C	1.2×10 ⁻⁵ /°C
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3	0.3

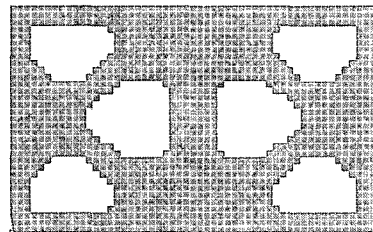


Fig. 6 Topology solution of a PCB substrate made of 1 material

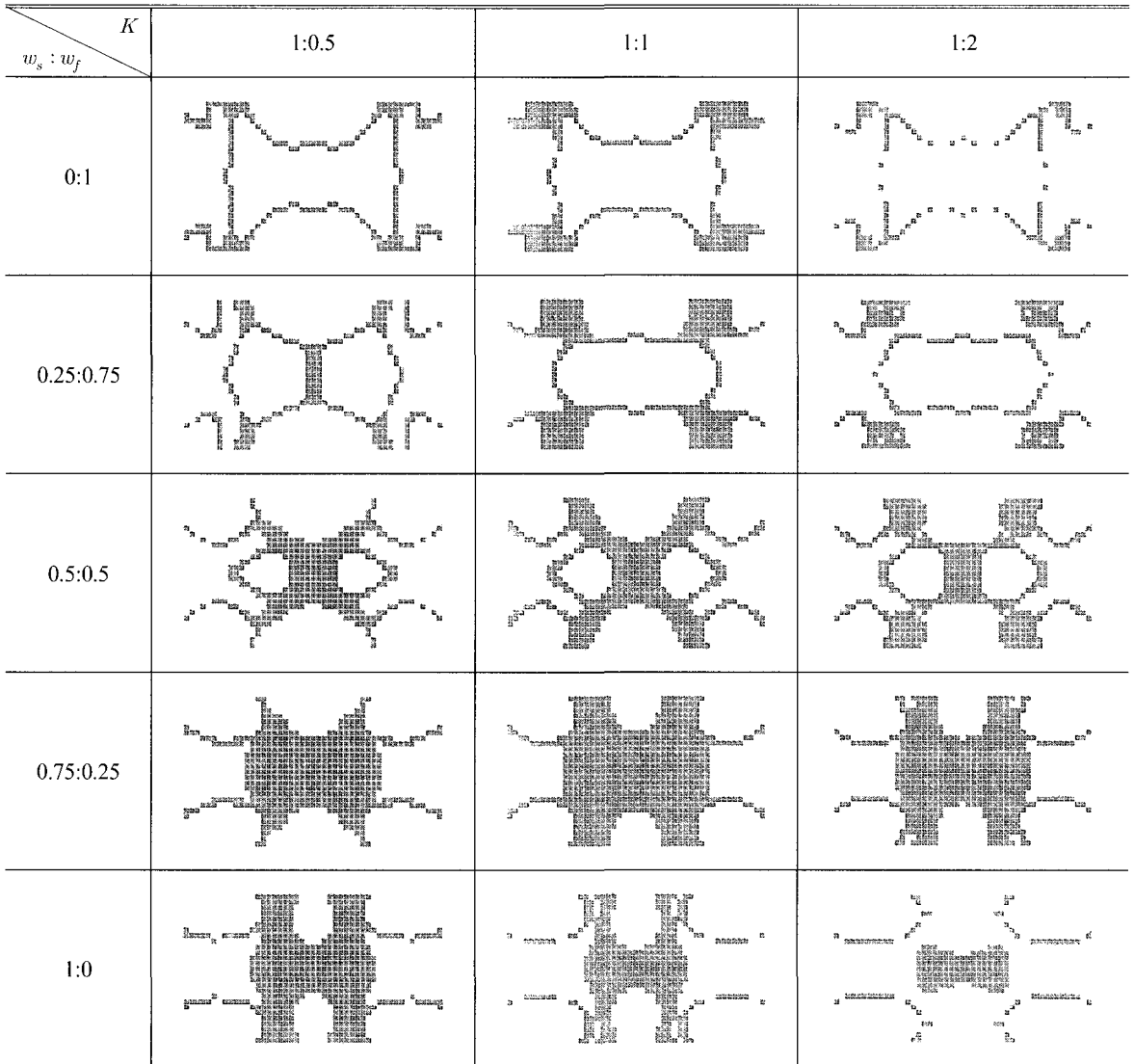


Fig. 7 A Pareto topology solution of a PCB substrate made of 2 materials

5.2 세 가지 재료의 혼합

두 가지 재료를 혼합할 때와 마찬가지로 Fig. 5와 같은 조건에서 세 가지 재료에 대한 재료혼합법을 수행하였다. Table 2와 같이 재료 1의 열전도율과 밀도를 100%로 할 때, 재료 2는 상대적으로 50%의 밀도를, 재료 3은 상대적으로 30%의 밀도를 가지며, 열전도율은 각각 100%, 80%, 60%를 갖는다고 가정하였다. 세 재료가 혼합되면서 열전도율에 따른 위상 최적화가 이루어지는 과정을 살펴보기 위하여 초기에 재료 1로 된 초기 질량을 100%로 두고 최종 질량이

초기 질량의 70%가 되도록 제한한 후, 열응력과 열유량의 가중치 비율을 변화시키며 Fig. 8과 같이 각각의 경우에 대한 최적 위상을 구하였다. 이를 통해 두 가지 재료를 혼합할 때와 마찬가지로 동일한 열전도율 조건을 가진 상태에서 열응력과 열유량의 가중치에 따른 위상의 변화를 확인할 수 있었고, 비슷한 조건의 두 재료로 이루어진 PCB판과 흡사한 위상을 가지며 세 재료가 적절히 혼합됨에 따라 열 조건을 가진 재료혼합법의 타당함을 확인할 수 있었다.

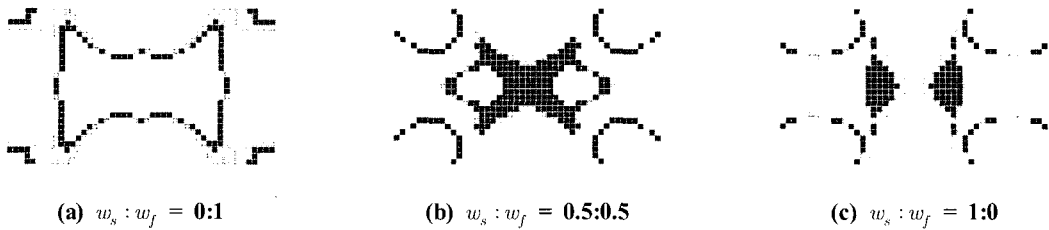


Fig. 8 A Pareto topology solution of a PCB substrate made of 3 materials

Table 2 Material properties

	Material 1	Material 2	Material 3
Young's modulus	210GPa	210GPa	210GPa
Density	2.32kg/m ³	1.16kg/m ³	0.696kg/m ³
Heat Conductivity	0.045W/mmK	0.036W/mmK	0.027W/mmK
Thermal Expansion coefficient	1.2×10 ⁻⁵ /°C	1.2×10 ⁻⁵ /°C	1.2×10 ⁻⁵ /°C
Poisson's ratio	0.3	0.3	0.3

6. 결론

본 논문에서는 ESO를 기반으로 제안한 재료혼합법을 다중 열 조건을 갖는 PCB판에 적용하여 위상 최적화를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 열유량의 가중치가 0에서 1로 변화함에 따라 그 천이과정이 최적 위상에 잘 나타나므로 제안한 재료혼합법이 타당함을 확인하였다.
- (2) 열유량의 중요도가 클수록 열이 빨리 방출될 수 있도록 중앙부분의 구멍의 크기가 비례하여 크게 변화하였고, 열응력의 중요도가 클수록 열응력에 견딜 수 있도록 PCB판 중앙부분의 요소가 많이 남아있는 위상이 얻어짐에 따라 위상 최적화가 타당함을 함을 입증하였다.
- (3) 세 가지 재료를 혼합하는 경우에도 두 가지 재료를 혼합하는 방법과 동일한 방법으로 타당한 위상이 얻어졌으므로 두 재료 이상의 재료를 혼합하는 경우에도 제안한 재료혼합법의 적용이 가능함을 확인하였다.

후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10238-0)와 학술진흥재단 BK21 사업의 지원으로 수행되었음.

참고 문헌

- (1) Yin, L. and Ananthasuresh, G. K., 2002, "A Novel Topology Design Scheme for The Multi-physics Problems of Electro-thermally Actuated Compliant Micromechanisms," *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 97~98, pp. 599~609.
- (2) Li, Q., Steven G. P., Querin, O. M. and Xie, Y. M., 2000, "Structural Topology Design with Multiple Thermal Criteria," *Engineering Computations*, Vol. 17, pp. 715~734.
- (3) Han, S. Y. and Lee, S. K., 2005, "Development of a Material Mixing Method Based on Evolutionary Structural Optimization," *JSME Int. J. Series A.*, Vol. 48, No. 3, pp. 132~135.
- (4) Li, Q., Steven, G. P., Querin, O. M. and Xie, Y. M., 1999, "Optimization of Thin Shell Structures Subjected to Thermal Loading," *Structural Engineering & Mechanics*, Vol. 7, pp. 401~412.
- (5) Li, Q., Steven, G. P., Querin, O. M. and Xie, Y. M., 1999, "Shape and Topology Design for Heat Conduction by Evolutionary Structural Optimization," *Int. J. of Heat and Mass Transfer*, Vol. 42, pp. 3361~3371.
- (6) Swan, C. C. and Kosaka, I., 1997, "Voigt-Reuss Topology Optimization for Structures with Linear Elastic Material Behaviours," *Int. J. for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 40, pp. 3033~3057.