

# 부드러운 경계 위상 최적설계기법을 이용한 유전체 형상 및 위상 최적설계

논문  
58-10-15

## Optimal Design of Dielectric shape and Topology using Smooth Boundary Topology Optimization Method

정기우\*·최낙선\*·김남경\*·김동훈\*  
(Gi-Woo Jeung · Nak-Sun Choi · Nam-Kyung Kim · Dong-Hun Kim)

**Abstract** - This paper deals with a new methodology for topology optimization in which the topology of the design domain may change during the shape optimization process. To achieve this, the concept of the topological gradient is introduced to compute the sensitivity of an objective function when a small hole is drilled in the domain. Based on shape and topological sensitivity values, the shape and topology of the design domain may be simultaneously changed during design iterations if necessary. To verify the advantages and also to facilitate understanding of the method itself, two electrostatic design problems have been tested by using 2D finite element analysis: the first is the inverse problem of a simple dielectric model and the second is the rotor design of a MEMS actuator.

**Key Words** : Electrostatic analysis, Inverse problem, Shape optimization, Topology optimization

### 1. 서론

최근 세계적으로 에너지 자원의 고갈, 환경오염 등 여러 사회적인 이슈로 효율적인 에너지 소비에 관심이 커지고 있을 뿐만 아니라 시장의 요구 또한 높아지고 있다. 이에 따라 산업 및 일반 가정에서 사용하고 있는 전기기기의 효율 향상을 위한 최적설계기법에 대한 연구개발이 절실히 요구된다. 특히, 최적설계기법 중 기존 기기 및 소자의 위상과는 전혀 다른 새로운 위상을 제공할 수 있는 위상 최적설계에 대한 관심이 증대되고 있다. 지금까지 수행된 기존의 위상 최적설계기법은 이산적인 민감도해석 방식을 토대로 직사각형 요소로 분할된 설계영역 내에서 최적의 매질 분포를 탐색하는 방법으로 진행되었다[1]-[4]. 그러나 기존 방법은 실제 설계문제를 다루는 데 있어 크게 두 가지 문제점을 안고 있다. 첫째, 기본적으로 직사각형 요소를 이용하여 매질 분포를 표현함으로써 최적설계 후 매질경계가 매끄럽게 표현되지 못한다. 이를 보완하기 위해서 직사각형 요소를 보다 작게 하거나 추가적인 수치기법을 동원해야만 한다. 둘째, 기존 방식은 밀도법을 기반으로 하고 있기 때문에 실제 사용되는 매질의 특성값이 아닌 중간 단계의 가상 매질이 필요하다. 따라서 실제 매질의 위상 정보를 얻기 위해서는 벌칙 함수를 추가적으로 사용하여야 하며 이러한 벌칙 함수의 사용은 설계문제 자체를 국소 최적해에 수렴하게 하는 부수적인 문제를 발생하기도 한다.

따라서 본 논문에서는 기존의 최적설계 방식이 가지는 단

점들을 극복하고자 부드러운 경계를 이용한 위상 최적설계 (Smooth Boundary Topology Optimization; 이하 SBTO) 방법을 제안한다[5]-[7]. SBTO는 B-spline 곡선을 이용하여 매질 경계를 표현하므로 매질 경계에 각이 지는 직사각형 요소를 사용할 필요가 없다. 또한 연속체민감도해석법 (Continuum Design Sensitivity Analysis; 이하 CDSA)을 기반으로 하는 위상 민감도(topological sensitivity)을 도입함으로써 설계대상의 자유로운 위상변화를 고려 하였다. 제시된 위상 민감도는 이산적 위상 민감도와 동일하게 매질의 위상 변화에 따른 목적함수의 일차 미분 정보를 제공하기 때문에 설계 변수에 제약이 없으며 최적해에 빠르게 수렴한다. 또한 시스템 행렬에 대한 직접적인 미분을 취할 필요 없이 신뢰성과 정확성이 검증된 상용 전자장 해석 도구와 연계가 용이하며 이를 통해 최적설계 결과의 신뢰성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다.

본 논문에 제시된 SBTO는 B-spline 곡선을 이용한 설계 변수 매개화, 위상 민감도, 선택지수(Selection Criterion), 형상 민감도(Shape sensitivity) 및 상용 전자장 해석 도구 등이 유기적으로 통합되어 최적설계가 수행된다[6], [7]. 제안한 기법은 간단한 유전체 역문제 해석과 MEMS 액츄에이터 설계에 적용하여 신뢰성과 타당성을 검증하였다.

### 2. 부드러운 경계를 이용한 위상 최적설계

B-spline 곡선으로 표현되는 설계대상의 경계는 목적함수가 수렴하면서 새로운 경계의 생성과 분리과정을 포함한다. 또한 위상 민감도와 선택지수 개념을 이용하여 설계 영역 상에 작은 구멍(hall)의 도입을 결정하게 되며 이를 통해 위상을 변화시킨다.

전체적인 최적 설계 과정 중에 형상민감도, 위상 민감도 및 선택지수에 의해 설계 영역에 다수의 영역이 존재할 수

\* 준 회원 : 경북대학교 전기공학과 석사과정  
† 교신저자, 정회원 : 경북대학교 전기공학과 조교수 · 공박  
E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr  
접수일자 : 2009년 6월 22일  
최종완료 : 2009년 9월 10일

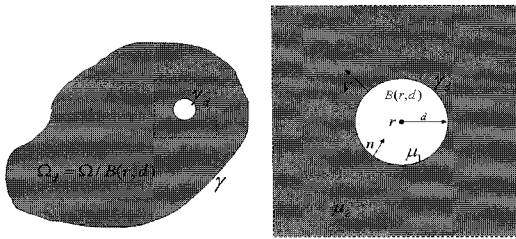
있으며 두 개 이상의 영역들이 서로 만날 경우 한 개의 영역으로 합쳐진다.

2.1 위상 민감도

그림 1과 같이 설계 영역 내의 중심  $r$ , 반지름  $d$ 를 갖는 작은 원의 영역  $B(r,d)$ 을 도입하였을 때 목적함수의 변화량은 식 (1)로 정의된다[5]-[7].

$$G(r) = \lim_{d \rightarrow 0} \frac{\Psi_{obj}(\Omega/B(r,d)) - \Psi_{obj}(\Omega)}{\delta(\Omega)} \quad (1)$$

여기서,  $\Psi_{obj}$ 는 목적함수,  $\Omega/B(r,d)$ 는 설계 영역  $\Omega$ 에 새로이 도입된 영역  $B(r,d)$ 를 포함한 영역 그리고  $\delta(\Omega)$ 는 구멍이 생기기 전후의 영역의 차이를 나타낸다. 식 (1)과 같이 정의된 위상 민감도는 설계 영역에 도입된 작은 구멍으로 기인한 목적함수의 변화를 나타낸다.



(a) 설계 영역 -  $\Omega/B(r,d)$       (b) 작은 영역

그림 1 설계 영역에 도입된 매질

Fig. 1 A design domain after cutting a small hole.

기존 형상 민감도와 위상 민감도의 연관성을 조사하기 위하여  $\Psi_{obj}$ 와  $d$ 로 정의되는 새로운 스칼라 함수  $J$ 는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$J(d) = \Psi_{obj}(\Omega/B(r,d)) \quad (2)$$

설계영역의 외곽 경계가 변하지 않으면서 새롭게 도입된 작은 영역의 반경  $d$ 가 증가한다고 가정하면,  $J$ 의 민감도 정보는 기존 형상 민감도 공식을 이용하여 전위  $\phi$ 와 이에 대응하는 보조변수(adjoint variable)  $\lambda$ 에 의해 표현된다[8].

$$J(d) = - \int_{\gamma_d} L(\phi_1, \lambda_1) d\gamma \quad (3)$$

$$L(\phi_1, \lambda_1) = (\epsilon_1 - \epsilon_2) \left[ \frac{\epsilon_1}{\epsilon_2} p(\phi_1) p(\lambda_1) + q(\phi_1) q(\lambda_1) \right]$$

여기서  $p \equiv \frac{\partial}{\partial n}, q \equiv \frac{\partial}{\partial t}$ ,  $\epsilon_1$ 와  $\epsilon_2$ 는 각각 서로 다른 매질의 유전율을 의미한다. 도입된 작은 영역  $B(r,d)$ 의 주위에서 변수  $\phi$ 와  $\lambda$ 에 대한 미소변위에 대한 다항식 전개를 이용하면 식 (3)은 식 (4)와 같이 1차 근사화 된다.

$$J(d) = -4\pi d L(\phi_1(r), \lambda_1(r)) + o(d) \quad (4)$$

여기서  $o(d)$ 는 다항식 전개에 따른 오차항을 나타낸다.

최종적으로 도입된 작은 영역의 도입으로 인한 목적함수의 변화는 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

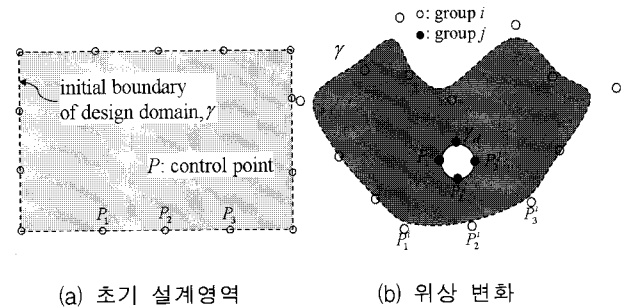
$$J(d) - J(0) = \int_0^d J'(p) dp = -2\pi d^2 L(\phi_1(r), \lambda_1(r)) + o(d^2) \quad (5)$$

위상 민감도를 정의한 식 (1)과 식 (5)의 비교를 통해서 위상 민감도는 기존 형상 민감도와 2배 차이가 남을 유추할 수 있다.

$$G(r) = 2L(A_1(r), \lambda_2(r)) \quad (6)$$

2.2 부드러운 경계면 도입과 매질의 합체 과정

그림 2(a)와 같이 설계영역의 초기 외곽 경계면을 B-spline 곡선을 이용하여 나타내고 반복되는 설계 과정에서 계산되는 형상 민감도 정보를 통해 곡선의 제어점  $P_i$ 의 위치를 변경하여 외곽 형상의 최적설계를 수행한다[9]. 따라서 설계 전 과정에서 설계영역의 외곽은 항상 부드러운 경계면을 유지한다. 이러한 형상의 변화와 함께 위상 민감도 값에 따라 설계영역 내부에 작은 원으로 표현되는 새로운 매질영역을 생성하여 설계영역의 위상을 변경할 수도 있다. 새로 생성된 매질의 외곽 경계면은 그림 2(b)와 같이 설계영역의 외곽 경계면과 더불어 B-spline 곡선으로 표현되며, 형상 민감도에 의해 최적의 형상을 찾아가게 된다.

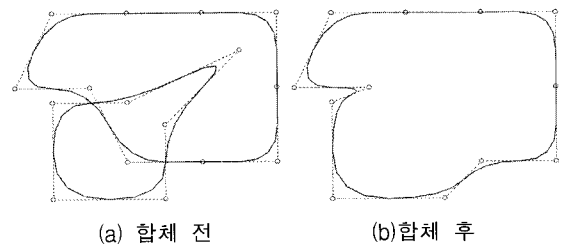


(a) 초기 설계영역      (b) 위상 변화

그림 2 SBTO의 부드러운 경계 변화

Fig. 2 Smooth boundaries of SBTO.

설계영역에 내에 도입된 작은 새로운 매질 영역 및 외곽 경계면은 반복 설계를 통해 성장하게 되며 특정 단계에서는 서로 다른 매질 영역이 중첩될 수 있다. 이러한 중첩현상은 상용 전자기 해석 도구에서 유한요소 생성 시에 기하학적인 오류 메시지를 발생시키므로 두 매질을 하나의 매질영역으로 재 정의하여야 한다. 그림 3에서는 두 매질 영역이 상호 겹치는 경우, 두 매질의 외곽을 결정하는 곡선의 제어점들을 이용하여 하나의 새로운 매질영역으로 합쳐지는 과정을 도시하였다.



(a) 합체 전      (b)합체 후

그림 3 매질 합체 과정

Fig. 3 Illustration of a material merging process.

2.3 선택지수

우선, 선택지수의 개념을 설명하기 위하여 설계영역이 유한요소로 분할되어 있다고 가정한다. 영역에 대한 구속조건을 고려하여 설계영역과 새로 생성된 작은 영역의 경계면에 해당하는 제어점  $P_i$ 에 대한 선택지수는 식 (7)과 같이 정의된다.

$$SC_i^{shape} = -\frac{\Psi'_{obj}}{\Psi'_{const}} \tag{7}$$

여기서  $\Psi'_{obj}$ 와  $\Psi'_{const}$ 는 각각 구속함수와 목적함수의 형상 민감도를 의미한다. 이와 유사하게 분할된  $m$  번째 요소에 대한 위상 민감도에 기초한 선택지수는 다음과 같다.

$$SC_m^{topo} = -\frac{G}{\Psi'_{const}} \tag{8}$$

식 (7)과 (8)은 각각 외곽 경계면의 제어점이 이동할 경우와 새로운 작은 영역이 생성될 경우 구속함수의 변화에 대한 목적함수의 변화량에 대한 정보를 제공한다. 최소화 설계문제에서는 선택지수의 수치가 적을수록 구속함수의 변화에 대한 목적함수의 감소에 더 큰 기여를 한다.

반복설계 과정 중에서 설계 영역 내에 새로운 매질을 생성할 것인지, 아니면 단순히 매질의 외곽 형상을 변화시킬 것인지를 결정할 필요가 있으며 이를 위해서 다음 두 가지 경우에 대해 최소 선택지수의 비교가 요구된다.

$$SC_{min}^{shape} = \min(SC_i^{shape}, i=1, \dots, j) \tag{9}$$

$$SC_{min}^{topo} = \min(SC_m^{topo}, m=1, \dots, n)$$

여기서  $j$ 와  $n$ 은 각각 제어점과 설계영역의 유한요소의 총합을 나타낸다.

설계과정 중에  $SC_{min}^{topo}$ 의 값이  $SC_{min}^{shape}$ 의 값 보다 작을 경우 새로운 작은 원형 매질이  $SC_{min}^{topo}$ 의 값에 해당하는 요소의 중심 위치에 생성된다. 이는 다음 설계 단계에서 새로 도입된 매질영역으로 말미암아 새로운 위상 및 설계변수의 증가를 가져온다. 만약 구속조건을 고려하지 않는다면 식 (7)과 (8)에서  $\Psi'_{const}$ 의 값은 상수로 취급된다.

2.4 설계 절차

제안된 위상 최적화 설계기법은 기본적으로 새로 생성된 매질영역의 경계와 설계영역의 외곽 경계면의 형상을 최적화하면서 선택지수에 따라 설계영역 내에 새로운 작은 원형 매질을 도입함으로써 위상변화를 도모한다. 또한 제안된 기법은 주 시스템(primary system)과 보조 시스템(adjoint system)으로 구성된 듀얼 시스템(dual system)을 해석하여 설계민감도 정보를 구하는 연속체 민감도법을 기반으로 하기 때문에 상용 전자장 해석도구와 쉽게 연동이 가능하다. 본 논문에서는 상용 전자장 해석도구로 MagNet이 사용되었다[10].

그림 4에서 보여주는 제안된 SBTO의 반복설계 과정을 요약하면 다음과 같다[11].

1단계 : 제어점과 B-spline 곡선을 이용하여 초기 설계 영역을 표현한다.

2단계 : 목적함수, 설계변수 및 구속조건을 정의한다.

3단계 : 주 시스템과 보조 시스템을 해석한다.

4단계 : 형상 민감도 및 위상 민감도를 계산하고 형상 최적설계를 수행한다.

5단계 : 선택지수를 계산하고 필요할 경우 새로운 작은 원형 매질을 생성한다.

6단계 : 만약 설계영역 내부에 두 매질의 영역이 겹칠 경우, 두 영역을 합쳐서 하나의 영역으로 정의한다.

7단계 : 목적함수 수렴도를 계산하고 불만족 시 3단계로 돌아간다.

8단계 : 구속조건 만족여부를 판단하고 불만족 시 2단계로 돌아간다.

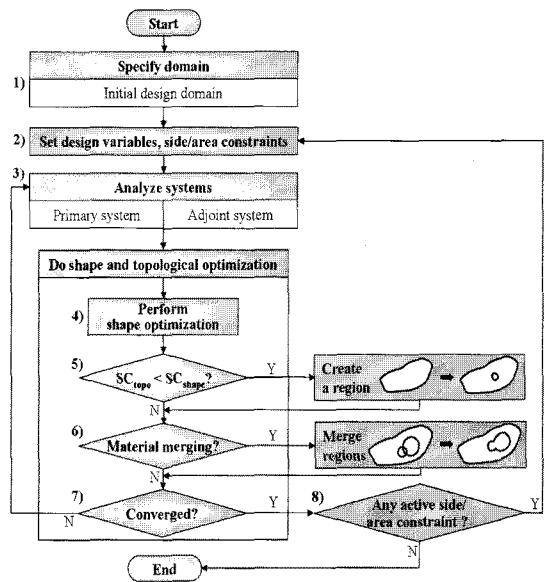


그림 4 SBTO 설계 순서도  
Fig. 4 Flowchart of SBTO process.

3. 적용 사례

본 논문에 제시된 부드러운 경계 위상 최적설계법과 상용 전자장 해석 도구인 MagNet을 연계하여 두 가지 설계 문제에 적용하여 제시된 기법의 타당성과 신뢰성을 검증하였다.

3.1 유전체 역문제 해석

첫 번째 모델은 그림 5와 같이 타원 형태의 유전체 내부에 50 mm 반경을 가지는 원 모양의 빈 공간이 있으며 설계 영역의 최대 반경은 100 mm로 원주 상에는 15° 간격으로 전극이 위치한다. 비유전율 10인 타원형 유전체의 장축과 단축 길이는 각각 80 mm 와 60 mm이다. 원주 상에 위치한 서로 마주보는 한 쌍의 전극에 전압을 순차적으로 인가하면서 공간에 저장된 전기에너지의 변화를 추정한다. 추정된 에너지 변화를 이용하여 목적함수를 정의하고 그림 6(a)와 같이 90 mm의 반경을 가진 원형 유전체를 초기 유전체로 설정한 후 그림 5에 제시된 타원형 유전체를 찾는 역문제를 해석한다.

그림 5에서 제시된 타원형 유전체와 동일한 에너지 분포

를 가지는 유전체의 형상 및 위상을 탐색하기 위하여 식(5)와 같이 목적함수와 면적에 대한 구속조건을 정의하였다.

$$\Psi_{obj} = \sum_{j=1}^{13} (W_j - W_{jo})^2 \quad (10)$$

$$\Psi_{const} = (A_k - A_{ko})^2 \leq \delta \quad (11)$$

여기서  $W_j$ 는  $j$ 번째 전극 쌍에서 측정된 전기에너지,  $W_{jo}$ 는 목표값,  $A_k$ 는 유전체 영역의 면적,  $A_{ko}$ 는 목표 면적으로  $7225.66 \text{ mm}^2$ ,  $\delta$ 은 15%의 면적차를 나타내는 상수를 의미한다. 또한 반복설계 시 B-Spline 곡선으로 이루어진 외곽경계가 반경 90 mm를 초과하지 못하도록 치수 구속조건을 추가하였다.

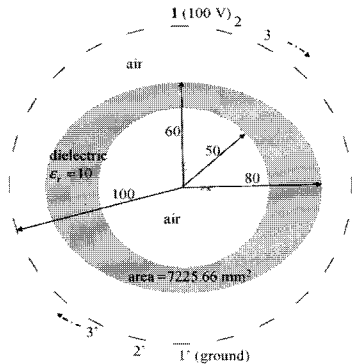


그림 5 둥근 띠 모양의 유전체 모델  
Fig. 5 Setup for a numerical example.

제시된 SBTO기법을 이용한 역문제 해석에 따른 시험모델의 위상 및 형상의 변화 과정을 그림 6에 나타내었다. 그림 6(b)~(e)에서와 같이 반복설계 횟수가 4회 이내에서는 유전체 외각 형상의 변화와 내부 위상 변화가 동시에 이루어지고 있다. 그림 6(f)~(g)에서는 내부에 도입된 구멍이 확정되면서 서로 합쳐지는 과정을 볼 수 있다. 최종적으로 26번의 반복 계산을 통해 그림 6(j)와 같은 결과가 도출되었다. 그림 7은 그림 6(j)의 최종 도출된 유전체의 전기에너지 변화를 목표값과 비교한 결과이며 에너지 분포가 서로 유사함을 볼 수 있다.

### 3.2 MEMS 액츄레이터

그림 8는 설계 대상인 MEMS용 정전기 액츄레이터 주요 구조 및 치수를 나타내고 있다. 액츄레이터는 서로 마주보는 양극과 음극의 전극 쌍에 전압을 인가하여 구동되며 총 16개의 전극으로 구성된다. 그림 8에서와 같이 고정자 전극의 반경은  $100 \mu\text{m}$ 이고 공극의 최소길이는  $5 \mu\text{m}$ 이다.

설계 목적은 최대 토크를 발생할 수 있는 유전체로 구성된 회전자 구조를 찾는 것으로써 회전자의 최대반경은  $95 \mu\text{m}$ 로 설정하였다. 그림 8와 같이 원형의 설계영역 전체에 유전체가 채워진 회전자의 경우에는 토크가 발생하지 않는다. 이웃한 전극 사이의 에너지 차를 이용하여 설계목적을 표현한 목적함수와 회전자 면적에 대한 구속조건은 다음식과 같다.

$$\Psi_{obj} = (W_A - W_{Ao})^2 + (W_B - W_{Bo})^2 \quad (12)$$

$$\Psi_{const} = (A_k - A_{ko})^2 \leq \delta \quad (13)$$

여기서 활성화되는 전극의 위치를 표시하는 아래첨자  $A, B$

는 서로  $22.5^\circ$ 의 간격을 가지고 있으며,  $W_{Ao}$ 는 초기설계영역이 공기로 가득 채워져 있을 때의 에너지,  $W_{Bo}$ 는 초기설계영역이 모두 유전체로 채워져 있을 때 에너지를 의미한다. 그리고  $A_k$ 는 반복설계 과정 중 유전체 영역의 면적,  $A_{ko}$ 는 설계자가 원하는 유전체 면적을 나타내며  $\delta$ 은 사용된 유전체 면적과 설정된 유전체 면적의 차이가 4.5%이내에 범위에 들도록 설정한 상수 값이다.

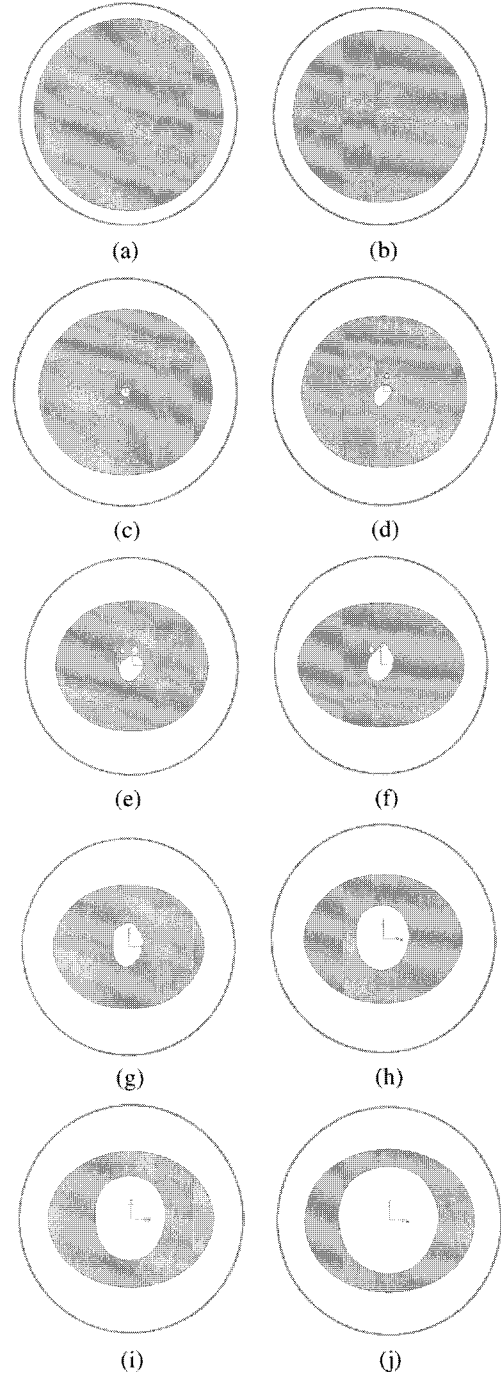


그림 6 반복 계산에 따른 형상 및 위상 변화: (a) 초기 형상, (b) 1회, (c) 2회, (d) 3회, (e) 4회, (f) 5회, (g) 6회, (h) 10회, (i) 15회, (j) 26회

Fig. 6 Shape and topological changes during the optimization processes.

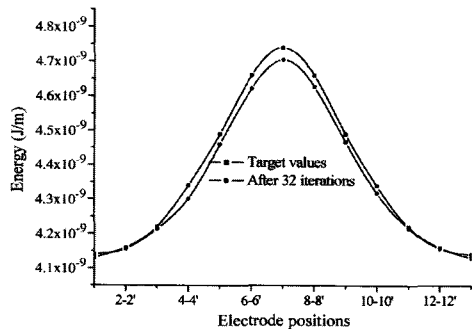


그림 7 전극 위치에 따른 에너지 비교  
 Fig. 7 Comparison of stored energies versus different electrode positions.

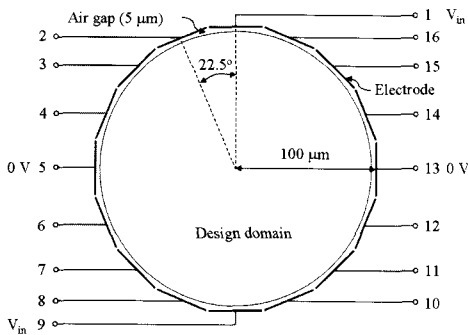


그림 8 액츄레이터 구조 및 설계영역  
 Fig. 8 Actuator layout and design domain.

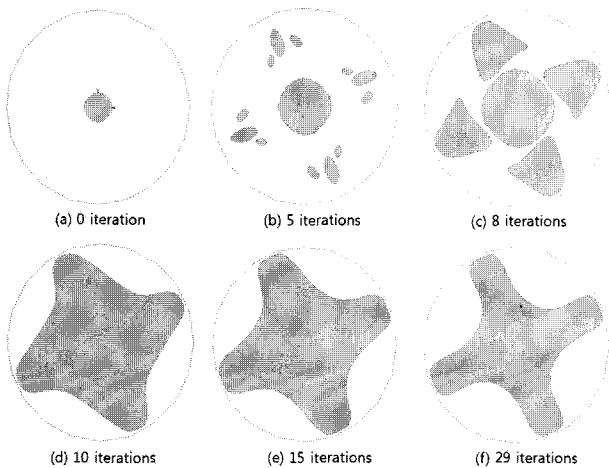
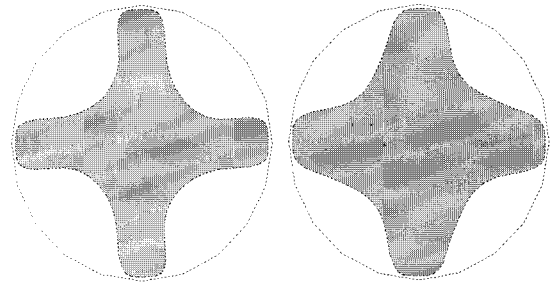


그림 9 반복 계산에 따른 형상 및 위상 변화  
 Fig. 9 Insertion and evolution of material regions while minimizing the objective function.

반경 20  $\mu\text{m}$ , 비유전율 10을 갖는 그림 9(a)의 원형의 유전체를 초기 위상 및 형상으로 설정하여 최적설계 과정을 수행하였다. 매 반복설계 시 제안된 설계기법에 따라 작은 원형 매질이 설계영역에 새로이 생성되어야 좋은지 또는 단순히 유전체 외곽 경계면을 변화시키는 것이 유리한지를 2.3절에서 언급한 선택지수 정보를 근거로 판별한다. 반복

설계가 진행되면서 나타나는 회전자 구조 즉 위상 및 형상의 변화를 그림 9에 도시하였다. 그림 9(b)에서는 5번째 반복설계 과정에서 유전체 외곽 경계면이 변화함과 동시에 새로운 유전체 영역이 설계영역 내부에 생성되는 것을 보여준다. 그림 9(c)와 (d)는 서로 인접한 유전체 영역이 서로 겹치는 영역이 발생할 경우, 이들이 합쳐져서 하나의 유전체 영역이 생성되는 과정을 보여주고 있다. 29번째 반복설계 후 그림 9(f)와 같은 최종 회전자 구조를 얻었다.

그림 10에서는 면적에 대한 구속조건의 유무에 따른 위상 최적설계 결과를 비교하고 있다. 면적 구속조건을 부여하지 않았을 경우에는 회전자의 면적이 커지고 이에 따라 회전자의 회전 위치에 따른 토크가 면적 구속조건이 적용된 결과에 비해 더 크다는 사실을 그림 11에서 확인할 수 있다.



(a) 면적 구속조건 포함 (b) 면적 구속조건 비포함

그림 10 구속조건에 따른 SBTO 결과 비교  
 Fig. 10 Comparison of optimized rotors between two constraints.

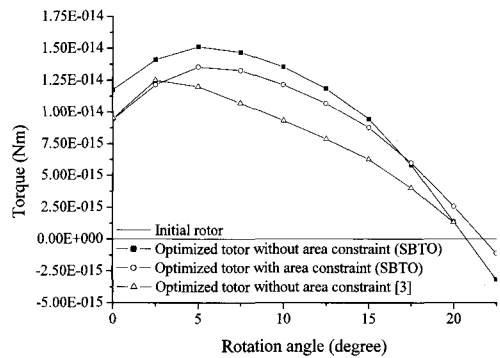


그림 11 SBTO에 따른 토크 비교  
 Fig. 11 Torque profile before and after optimization.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 부드러운 경계를 이용한 위상 최적설계법을 제시하였으며 두 가지 적용사례를 통해 제안된 기법의 신뢰성과 타당성을 검증하였다. 제시된 SBTO는 형상 최적화와 위상 최적화가 동시에 진행되므로 기존 위상 최적설계 기법과 달리 추가적인 설계 작업을 요구하지 않는다. 또한 제안된 기법은 연속체 민감도법을 기반으로 하고 있으므로 상용 전자장 해석 도구와 쉽게 연계할 수 있다. 따라서 제안된 기법은 향후 전기기기 및 소자 최적설계 분야에서 활용성이 크다고 판단된다.

**감사의 글**

이 논문은 2008년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-10522-0).

**참 고 문 헌**

[1] Dyck D.N., *et al.*, "A method of computing the sensitivity of electromagnetic quantities to changes in material and sources," IEEE Trans. Magn., 1994, 30, pp.3415-3418

[2] Dong-Hun Kim, *et al.*, "A Novel for Material Updating in Source Distribution Optimization of Magnetic Devices Using Sensivity Analysis," IEEE Trans. Magn., vol. 41, no. 5, pp. 1752-1755, 2005

[3] J.-K. Byun et al., "Topology optimization of electrical devices using mutual energy and sensitivity," IEEE Trans. Magn., vol. 35, no. 5, pp. 3718-3720, 1999.

[4] J.-H. Lee et al., "Faster calculation of sensitivity in the source current distribution problem using reciprocity theorem," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 5, pp. 3596-3599, 2001.

[5] CEA J., *et al.*, "The shape and topological optimisations connection," Comput. Methods Appl. Mech. Eng., 2000, 118, pp. 713-726

[6] J. Cea *et al.*, "The shape and topological optimizations connection," Elsevier Comput. Methods Appl. Mech. Eng., vol. 118, pp. 713-726, 2000.

[7] S. Garreau *et al.*, "The topological asymptotic for PDE systems: The elasticity case," SIAM J. Control Optim., vol. 39, pp. 1756-1778, 2001.

[8] KIM D., *et al.*, "Generalized continuum sensitivity formula for optimum design of electrode and dielectric contours," IEEE Trans. Magn., 39, pp. 1281-284, 2003.

[9] KIM C., *et al.*, "B-spline parameterization of finite element models for optimal design of electromagnetic devices," IEEE Trans. Magn., 35, pp. 3763-3765, 1999.

[10] MagNet User's Manual, Infolytica Corporation, 2009

[11] PARK I., *et al.*, "Implementation of continuum sensitivity analysis with existing finite element code," IEEE Trans. Magn., 29, pp. 1787-1790, 1993.

**저 자 소 개**



**정 기 우 (鄭 起 宇)**

1979년 7월 11일생. 2005년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2009년 동 대학원 전자전기컴퓨터학부 졸업(공학석사) 2009년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 박사과정

E-mail : jeunggw@ee.knu.ac.kr



**최 낙 선 (崔 洛 善)**

1979년 2월 15일생. 2006년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2007년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 석사과정

E-mail : nschoi@knu.ac.kr



**김 남 경 (金 南 暻)**

1983년 1월 8일생. 2007년 경북대 전자전기컴퓨터학부 졸업. 2008년~현재 동 대학원 경북대 전자전기컴퓨터학부 석사과정

E-mail : nkkim@ee.knu.ac.kr



**김 동 훈 (金 東 勳)**

1968년 2월 26일생. 1992년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1998년 동 대학원 전기동학과 졸업(공학박사), 1998.3~2001.2 LG전자 디지털어플라이언스 연구소 선임연구원, 2001.3~2002.2 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학부 연구교수, 2002.3~2002.8 기초전력원 특별연구원, 2002.9~2004.2 영국 Southampton대학 ECS Research Fellow, 2004.3~현재 경북대학교 전자전기컴퓨터공학부 조교수

Tel : 053-950-5603

Fax : 053-940-8503

E-mail : dh29kim@ee.knu.ac.kr