

매개화된 민감도 해석에 의한 비선형 전자소자의 3차원 형상최적화

論 文

53B-8-2

3D Shape Optimization of Nonlinear Electromagnetic Device Using Parameterized Sensitivity Analysis

柳在燮* · 姚纓英** · 高彰燮***

(Jae Seop Ryu · Yingying Yao · Chang Seop Koh)

Abstract - In this paper, a 3D shape optimization algorithm which guarantees a smooth optimal shape is presented using parameterized sensitivity analysis. The design surface is parameterized using Bezier spline and B-spline, and the control points of the spline are taken as the design variables. The parameterized sensitivity for the control points are found from that for nodal points. The design sensitivity and adjoint variable formulae are also derived for the 3D non-linear problems. Through an application to the shape optimization of 3D electromagnet to get a uniform magnetic field, the effectiveness of the proposed algorithm is shown.

Key Words : Shape Optimization, Sensitivity Analysis, Parameterization, Nonlinear

1. 서 론

최근의 전기 기기 및 전자소자는 단순히 필요한 성능을 갖도록 설계하는 것으로 목적을 달성하는 것이 아니라, 필요한 성능을 가지면서도 최소의 비용 또는 최대 효율을 갖도록 하는 최적 설계를 요구하고 있다. 일반적으로 최적설계는 목적함수(object function)의 값을 최대 또는 최소화하는 것을 목적으로 하지만, 사용목적에 따라 부가적으로 주어지는 제약조건(constraint condition)을 갖게 된다. 특히, 형상최적 설계 문제에서는 목적함수의 값을 최적화 시키는 것뿐만 아니라, 실제 현장에서 제작될 수 있는 설계가 되어야 하기 때문에 형상에 관한 제약 조건이 주어지게 된다.

여러 가지 최적화 방법 중에서, 설계 민감도 해석(design sensitive analysis)을 이용한 최적화 기법은 설계변수의 수가 계산시간에 미치는 영향이 적기 때문에 유한요소법과 결합되어 형상 최적화 문제에 널리 적용되어왔다[1,2,3,4]. 그러나 실제 응용에서는 매질의 비선형성을 고려해야 함에도 불구하고, 그 동안의 연구들은 대부분 선형문제 또는 2차원 비선형 문제에 국한되어 적용된 경우가 대부분이고, 비선형성을 고려한 3차원 해석에 관한 연구는 거의 없는 실정이다[1,2,3,4].

유한요소법과 민감도 해석을 이용한 형상 최적화 문제에서는, 일반적으로 설계변수가 최적화 대상 표면에 놓인 절점들로 구성되고, 각각의 절점들은 계산된 민감도로부터 변위가 결정되어 다른 절점들과는 독립적으로 이동하여 새로운 형상을 구성하게 된다. 이 경우에는 목적함수의 값은 충분히 작

아지나 최적화 된 형상이 톱니모양과 같이 실제로 제작하기 어려운 경우가 종종 발생하게 된다[5,6]. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 2차원 문제에서는 설계변수로 선정된 각각의 절점들 사이의 관계에 선형 제약조건(linear constraint)을 주거나, 보간 함수(spline function)를 이용하는 방법들이 연구되어 왔다[5,6,7,8]. 이때 사용되는 보간 함수에는 큐빅 스플라인(cubic spline), Bezier 스플라인(Bezier spline), B-스플라인(B-spline) 등이 있다. 이들 방법에서는 최적화 하고자 하는 표면을 표현하기 위하여 제어점(control point)이 도입되고 설계변수로 설정된다. 설계변수로 설정된 제어점의 설계민감도는 각 절점의 설계 민감도로부터 각 절점과 제어점의 관계를 정의하는 블렌딩 함수(blending function)를 이용하여 계산된다. 최근에는 3차원 특성을 고려한 최적화 문제가 많이 연구되고 있기 때문에, 3차원 형상최적화 문제에서도 이러한 방법들에 관한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 매질의 비선형성을 고려한 3차원 유한요소법과 매개화된 설계 민감도 해석(parameterized design sensitive analysis)을 이용한 3차원 전자소자의 형상최적화 알고리즘을 제시하였다. 설계 민감도 계산에서는 계산시간의 단축을 위하여 보조변수(adjoint variable)를 이용하였고, 민감도와 보조변수에 관한 식을 변요소를 이용한 3차원 비선형 유한요소해석에 적용할 수 있도록 유도하였다. 최적화 하고자 하는 표면은 Bezier 스플라인과 B-스플라인을 이용하여 보간 하였으며, 두 가지 방법에 의한 형상 최적화 결과를 비교하였다. 최적화 과정 중에서 요소의 재구성은 탄성체의 구조변형 해석(structural deformation analysis)에 기초한 요소망 변형법(mesh relocation method)을 이용하였다[9,10,11].

2. 비선형성을 고려한 설계민감도 해석

전자장 문제의 지배방정식은 맥스웰 방정식으로부터 다음

* 正 會 員 : 忠 北 大 大 學 院 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
** 學 生 會 員 : College of EE, Zhejiang University, CHINA
*** 正 會 員 : 忠 北 大 電 氣 電 子 計 算 機 工 學 副 教 授
接受日字 : 2004年 3月 4日
最終完了 : 2004年 7月 2日

과 같이 얻어진다.

$$\nabla \times \nu (\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (1)$$

여기서 \vec{A} 는 자기벡터 포텐셜이고, ν 는 자기 저항률 그리고 \vec{J} 는 입력 전류밀도이다. Galerkin 법을 이용하여 근사화한 후 변요소를 이용한 유한 요소법을 적용하면 i 번째 변에서의 잔차 G_i 는 다음과 같이 된다.

$$G_i = \sum_{e=1}^{Nel} G_i^e = \sum_{e=1}^{Nel} \left\{ \sum_{k=1}^6 \nu^e K_{ik}^e A_i^e - Q_i^e \right\}, \quad i=1, 2, \dots, N \quad (2)$$

여기에서 Nel 과 N 은 각각 전체 요소 수와 변의 수이고, 첨자 (e)는 (e)번 요소에 대한 물리량임을 뜻하고, A_i^e 는 요소 (e)의 1 번째 변에서 정의된 자기벡터 포텐셜이고, 사면체 변요소를 이용하는 경우에 요소 (e)에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$K_{ii}^e = \frac{1}{18^2 V_e^3} \sum_{k=x,y,z} S_{ki} S_{ki} \quad (3)$$

$$Q_i^e = \frac{1}{36 V_e} \sum_{k=x,y,z} N_{ki} J_k \quad (4)$$

여기서 V_e 는 요소 (e)의 체적, J_k 는 입력 전류의 k 방향 성분을 나타낸다. S_{ki} 와 N_{ki} 는 형상함수로부터 다음과 같이 계산된다[2].

$$S_{xi} = c_m d_n - c_n d_m \quad (4-a)$$

$$S_{yi} = d_m b_n - d_n b_m \quad (4-b)$$

$$S_{zi} = b_m c_n - b_n c_m \quad (4-c)$$

$$N_{xi} = (a_m b_n - a_n b_m) + (c_m b_n - c_n b_m) \bar{y} + (d_m b_n - d_n b_m) \bar{z} \quad (4-d)$$

$$N_{yi} = (a_m c_n - a_n c_m) + (b_m c_n - b_n c_m) \bar{x} + (d_m c_n - d_n c_m) \bar{z} \quad (4-e)$$

$$N_{zi} = (a_m d_n - a_n d_m) + (b_m d_n - b_n d_m) \bar{x} + (c_m d_n - c_n d_m) \bar{y} \quad (4-f)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 x_i, \quad \bar{y} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 y_i, \quad \bar{z} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 z_i \quad (4-g)$$

여기에서 계수 a, b, c, d 는 요소(e)의 네 절점의 좌표 (x, y, z)로부터 구해지며, 첨자 m 과 n 은 변 i 의 시작점과 끝점을 나타낸다.

매질의 비선형성을 고려하기 위하여 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson)을 적용하면, (n+1)번째의 반복계산에서 얻어지는 포텐셜은 다음 식으로 구해진다.

$$[A]^{n+1} = [A]^n + [\delta A]^n \quad (5)$$

여기서, $[\delta A]^n$ 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$[K]^n [\delta A]^n = [f]^n \quad (6-a)$$

$$[K]^n = \frac{\partial [G]^n}{\partial [A]} = \sum_{e=1}^{Nel} \frac{\partial [G^e]^n}{\partial [A^e]} \quad (6-b)$$

$$[f]^n = - \sum_{e=1}^{Nel} [G^e]^n \quad (6-c)$$

요소 (e)에서의 자기 저항률 ν^e 을 요소 (e)의 자속밀도의 함수 $\nu^e = f(B^e)$ 라고 하면 식 (6-b)의 상태변수에 대한 미분항은 다음과 같이 된다[12].

$$\frac{\partial [G^e]^n}{\partial [A^e]} = \nu^e [K^e]^n + \frac{\partial \nu^e}{\partial B_e^2} \cdot \frac{\partial B_e^2}{\partial [A^e]} [K^e]^n [A^e] \quad (7)$$

여기에서 $[A_i]$ 는 이전 단계에서 계산된 포텐셜이다.

정자계 문제의 형상 최적화를 다루는 경우에 목적함수는 일반적으로 설계변수 $[p]$ 와 상태변수 $[A]$ 의 함수로 정의되며, 다음과 같이 표현할 수 있다[1-5].

$$F = f([p], [A(p)]) \quad (8)$$

설계변수가 요소분할 과정에서 발생된 절점으로 구성되는 경우, 설계 민감도는 설계변수에 대한 목적함수의 변화율로서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{dF}{d[p]^T} = \frac{\partial F}{\partial [p]^T} \Big|_{A=const.} + \frac{\partial F}{\partial [A]^T} \cdot \frac{\partial [A]}{\partial [p]^T} \quad (9)$$

여기에서 설계변수의 변화에 대한 상태변수의 변화를 $\partial [A] / \partial [p]^T$ 는 식 (2)를 설계변수 $[p]$ 에 대하여 미분함으로써 얻을 수 있다.

$$\frac{d[G]}{d[p]^T} = \frac{\partial [G]}{\partial [p]^T} \Big|_{A=const.} + \frac{\partial [G]}{\partial [A]^T} \cdot \frac{\partial [A]}{\partial [p]^T} \quad (10)$$

식 (10)에서 우변의 첫 항은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial [G]}{\partial [p]^T} &= \sum_{e=1}^{Nel} \left\{ \nu^e \frac{\partial [K^e]}{\partial [p]^T} [A^e] - \frac{\partial [Q^e]}{\partial [p]^T} \right\} \\ &+ \sum_{e=1}^{Nel} [K^e] [A^e] \frac{\partial \nu^e}{\partial B_e^2} \cdot \frac{\partial B_e^2}{\partial [p]^T} \\ &= [M]_{Linear} + [M]_{Nonlinear} \end{aligned} \quad (11)$$

여기에서 $[M]_{Linear}$ 는 선형일 때의 민감도해석에서 얻어지는 것과 같은 결과이고, $[M]_{Nonlinear}$ 는 매질의 비선형성을 고려함으로써 생겨나는 항이다. 그리고 $[A]$ 는 비선형 해석에서 얻어진 최종 해를 의미한다. 식 (10)의 우변에서 두 번째 항의 상태변수에 대한 미분은 식 (7)에서 구한 시스템 행렬과 같기 때문에 추가적인 계산 없이 비선형 해석의 최종 단계에서 얻어진 시스템 행렬을 그대로 사용하면 된다. 설계변수에 대

한 상태변수의 미분항 $\partial[A]/\partial[p]^T$ 는 식(7)과 (11)을 식 (10)에 대입하면 다음 식으로 된다.

$$\frac{\partial[A]}{\partial[p]^T} = -[K]^{-1} \cdot \{[M]_{Linear} + [M]_{Nonlinear}\} \quad (12)$$

이것을 식(9)에 대입하면, 민감도 식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} \frac{dF}{d[p]^T} &= \frac{\partial F}{\partial[p]^T} \Big|_{A=const.} \\ &\quad - \frac{\partial F}{\partial[A]^T} [K]^{-1} \{[M]_{Linear} + [M]_{Nonlinear}\} \end{aligned} \quad (13)$$

계산을 간단히 하기 위하여 보조변수(adjoint variable) $[\lambda]$ 를 다음과 같이 정의하고,

$$[\lambda]^T = \frac{\partial F}{\partial[A]^T} [K]^{-1} \quad (14)$$

시스템 행렬이 대칭인 조건을 이용하면 보조변수 $[\lambda]$ 는 다음 식으로부터 계산된다.

$$[K][\lambda] = \frac{\partial F}{\partial[A]^T} \quad (15)$$

따라서 설계 민감도는 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{dF}{d[p]^T} = \frac{\partial F}{\partial[p]^T} \Big|_{A=c} - [\lambda]^T \{[M]_{Linear} + [M]_{Nonlinear}\} \quad (16)$$

3. 매개화된 설계민감도 해석

전기 기기의 형상최적 설계에 있어 최적으로 설계하고자 하는 표면의 형상은 수치 제어 기기(NC Machine) 등을 이용하여 충분히 가공할 수 있어야 한다. 이러한 이유로 최적화하고자 하는 표면의 형상을 제어점(control points)을 이용하여 스플라인한다. 이 경우 설계변수는 유한요소법의 적용을 위하여 발생한 절점의 좌표로 정의되지 않고 형상을 결정짓는 제어점의 좌표로 정의된다. 따라서, 형상을 매개화하는 경우에는 설계변수인 제어점에 대한 설계 민감도를 유도하여야 한다.

3.1 Bezier Spline

Bezier spline을 이용하는 경우 표면에 위치한 점 $P(x_k, y_k, z_k)$ 에 대응하는 국부 좌표를 (u_k, v_k) 라고 하면($0 \leq u_k, v_k \leq 1$) 다음 관계식이 성립하고

$$z_k = S(u_k, v_k) = \sum_{i=0}^N \sum_{j=0}^M B_{i,N}(u_k) B_{j,M}(v_k) C_{ij} \quad (17)$$

여기서, N 과 M 은 각각 u 와 v 방향으로의 Bernstein 기저함수의 차수를, C_{ij} 는 u 와 v 의 방향으로 각각 i 및 j 번째 제어점을 나타내고, 차수 N 인 Bernstein 기저함수 $B_{i,N}(u_k)$ 는 다음과 같이 정의된다 [7,8,13].

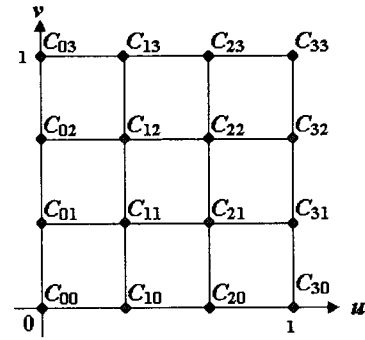


그림 1 4x4 Bezier 표면을 위한 제어점의 다각형 망
Fig. 1 Schematic of the polygon net for a 4x4 Bezier surface

$$B_{i,N}(u_k) = {}_N C_i u_k^i (1-u_k)^{N-i} \quad (18)$$

여기서, ${}_N C_i$ 는 조합(combination)을 나타내며, 기저함수의 차수는 그 방향으로의 제어점의 수보다 1만큼 작은 값이다. 그림 1은 u 와 v 의 방향으로 각각 3차의 Bernstein 기저함수를 사용하는 경우 일반적인 제어점의 위치를 나타내고 있다.

3.2 B-spline

Bezier spline의 경우 제어점의 개수와 기저함수의 차수가 직결되어 있으므로, 복잡한 형상의 곡면을 생성하기 위해서는 차수가 높아져야 하고, 이로 인하여 계산 량이 증가할 뿐만 아니라 경우에 따라서는 곡면의 형상이 진동하게 된다. 이는 모든 제어점이 곡면의 형상에 영향을 주기 때문이다 [14]. Bezier spline 보다 자유로운 곡면을 얻기 위한 방법으로 사용되는 B-spline에서 표면 위의 절점 $S(u_p, v_p)$ 와 제어점의 관계는 다음과 같이 정의되며,

$$S(u_p, v_p) = \sum_{i=1}^{n+1} \sum_{j=1}^{m+1} N_{i,k}(u_p) N_{j,l}(v_p) C_{ij} \quad (19)$$

여기에서 u 와 v 방향으로의 제어점의 개수는 각각 $(n+1)$, $(m+1)$ 이며, B-spline 기저함수의 차수는 각각 k 와 l 이다. 차수가 k 인 B-spline 기저함수 $N_{i,k}(u)$ 는 다음의 식으로 정의된다[13,14].

$$N_{i,1}(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } x_i \leq u < x_{i+1} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} N_{i,k}(u) &= \frac{(u-x_i)N_{i,k-1}(u)}{x_{i+k-1}-x_i} \\ &\quad + \frac{(x_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{x_{i+k}-x_{i+1}} \end{aligned} \quad (21)$$

이 때, knot vector x_i 는 다음식에 의해서 정의된다.

$$x_i = \begin{cases} 0 & 1 \leq i \leq k \\ i-k & k+1 \leq i \leq n+1 \\ n-k+2 & n+2 \leq i \leq n+k+1 \end{cases} \quad (22)$$

이와 같은 방법들에 의해서 최적화하고자 하는 표면을 스플라인 하는 경우, 설계변수인 제어점의 좌표 [C]와 유한요소법의 적용과정에서 설정된 절점의 좌표 [P] 사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$[p] = [J][C] \quad (23)$$

여기서 [J]는 자코비안(Jacobian) 행렬로써 매개화 방법에 따라 식 (18) 또는 식 (21)을 이용하여 계산된다.

제어점에 대한 설계민감도는 식(16)과 식 (23)을 이용하여 다음과 같이 계산된다 [7,8].

$$\frac{dF}{d[C]^T} = \frac{dF}{d[p]^T} \frac{d[p]}{d[C]^T} = \frac{dF}{d[p]^T} [J] \quad (24)$$

계산된 제어점의 민감도에 의하여 각각의 제어점의 위치는 경사법(gradient method)을 이용하여 계산되고[2], 이로부터 최적화하고자 하는 표면의 절점들의 위치가 계산된다.

4. 해석사례

3차원 비선형 유한요소해석과 제안된 설계민감도 해석, 경사법(gradient method), 그리고 요소망 변형법을 결합하여 매질의 비선형을 고려한 3차원 형상최적화 알고리즘을 개발하였다. 그림 2는 개발된 알고리즘의 전체적인 흐름도를 나타낸다.

개발된 알고리즘을 공극 중심에서의 자속밀도의 분포를 일정하게 만들기 위한 3차원 전자석의 형상최적화 문제에 적용하였다. 그림 3에는 해석모델의 형상 및 치수를 보이고 있으며, 해석 영역은 전자석의 대칭성을 고려하여 전체 영역의 1/2만 해석하였다. 입력전류는 12240 [A]이고, 비선형성을 고려하기 위한 자성체의 B-H 곡선과 비투자율 μ_r 을 그림 4에 나타내었으며, 초기 비투자율은 수렴속도를 고려하여 자기포화가 발생하기 직전의 1500으로 설정하였다. 계산에 사용된 컴퓨터는 CPU P-4, 1.8GHz, RAM 1.0 GB를 사용하였다.

목표 영역에서의 설계 목표 값은 2400[Gauss]이고, 목적함수는 다음과 같이 정의하였다.

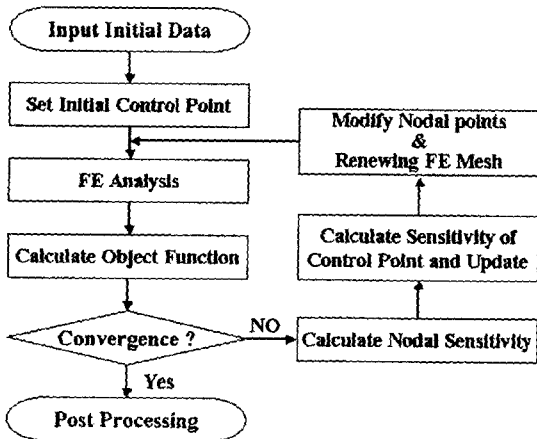
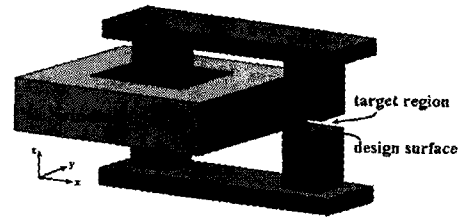
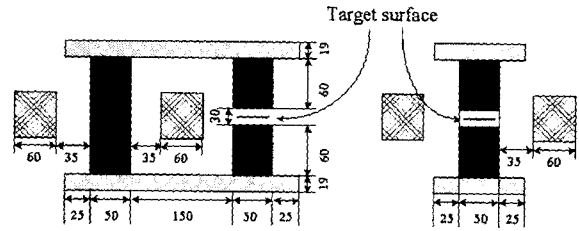


그림 2 최적화 알고리즘의 흐름도
Fig. 2 Flowchart of optimization algorithm



(a) 3D shape



(b) front view

(c) side view

그림 3 3차원 전자석 모델의 형상[단위 : mm]
Fig. 3 Shape of 3D electromagnetic model

$$F = \sum_{n=1}^{Np} (B_n^z - B_t)^2 \quad (25)$$

여기에서 B_n^z 는 목표영역의 sampling point k에서의 자속밀도 B_z 값이고, B_t 는 설계 목표 값이며, Np 는 목표 영역에서 선택된 절점의 개수로 158개의 절점을 선택하여 사용하였다.

최적화 과정에서 전자석의 상부표면에 발생된 절점 248개가 z 방향으로 움직이도록 하였다. 이들 절점에 대한 설계민감도는 다음과 같이 된다.

$$\frac{dF}{d[p]^T} = \sum_{n=1}^{Np} 2(B_n^z - B_t) \frac{\partial B_n^z}{\partial [p]^T} + \sum_{n=1}^{Np} 2(B_n^z - B_t) \frac{\partial B_n^z}{\partial [A]^T} \cdot \frac{d[A]}{d[p]^T} \quad (26)$$

여기에서 우변의 첫 번째 항은 설계변수가 목표영역에서 떨어진 위치에 있으므로 설계변수에 대한 자속밀도의 변화율은 0이 된다. 그리고 두 번째 항에서 상태변수(자기 벡터포텐셜)에 대한 자속밀도의 변화율은 다음과 같이 계산한다.

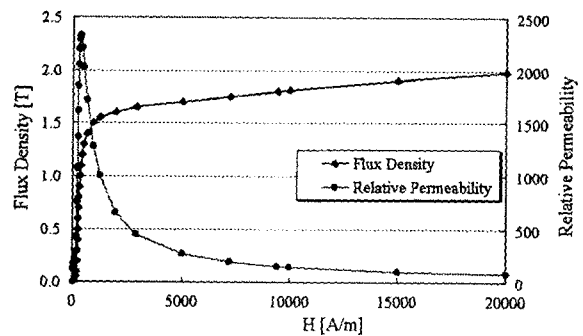


그림 4 자성체의 B-H 곡선과 비투자율
Fig. 4 B-H curve and relative permeability of magnetic material

$$\frac{\partial B_n^2}{\partial [A]^T} = \frac{1}{\sum_i \gamma_i} \sum_i \gamma_i \frac{\partial B_i^2}{\partial [A]^T} \quad (27)$$

여기에서 i 는 n 번째 목표절점을 포함하는 요소를 나타내고, γ_i 는 요소 i 에서 절점 n 의 입체각을 나타낸다.

본 논문에서는 최적화 과정에서 요소의 재구성을 위하여 요소망 변형법(Mesh deformation method)을 이용하였으며, 이것은 초기 요소망으로부터 절점의 위치만을 변화시켜 요소를 재구성하는 방법으로 변형된 요소망이 초기 요소망과 동일한 토폴로지를 유지하게 한다[2,4,10].

전자석 표면의 형상 최적화 과정을 매개화 하지 않은 경우와 Bezier spline 및 B-spline을 이용하여 매개화한 경우의 결과를 비교하였다. 그림 5는 Bezier spline과 B-spline을 이용하는 경우의 제어점의 위치를 나타내고 있다.

그림 6은 최적화 과정에서 목적함수의 변화를 나타낸다. 일반적으로 매개화 하지 않은 경우의 목적함수가 매개화한 경우의 목적함수보다 작게 나타나며, 목적함수의 크기는 반복회수 15회 이후에는 거의 변화 없이 수렴함을 보이고 있다. 그리고 Bezier spline을 이용한 경우보다 B-spline을 이용한 경우의 목적함수가 더 작게 나타만을 알 수 있다.

그림 7에는 전자석 표면의 초기 형상과 매개화를 하지 않은 경우의 최적 형상, 그리고 매개화를 한 경우의 최적 형상을 보이고 있다. 그림 7(b)의 매개화를 사용하지 않은 경우의 최적 형상은 전자석 표면의 절점이 각각 독립적으로 이동하였기 때문에 매우 불규칙한 형상을 하고 있으며, 이러한 경우에는 앞서서도 언급한 바와 같이 실제 제작이 불가능하다. 반면에 그림 7(c)와 (d)의 최적 형상은 매개화를 하지 않은 경우와 비교하여 매우 완만한 형상을 하고 있다. Bezier spline을 이용하여 매개화한 경우에는 모든 제어점이 각각의

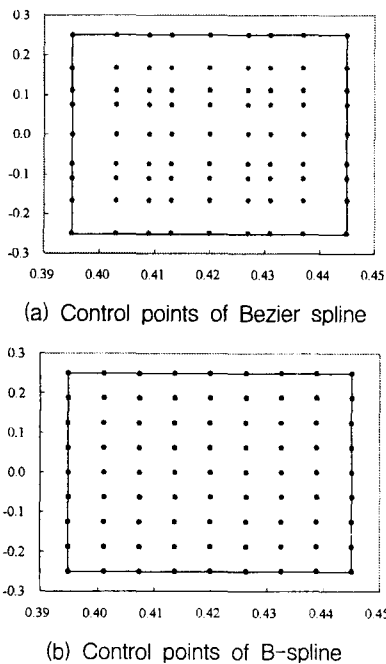


그림 5 표면의 매개화를 위한 제어점의 위치
Fig. 5 Position of control points for surface parameterization

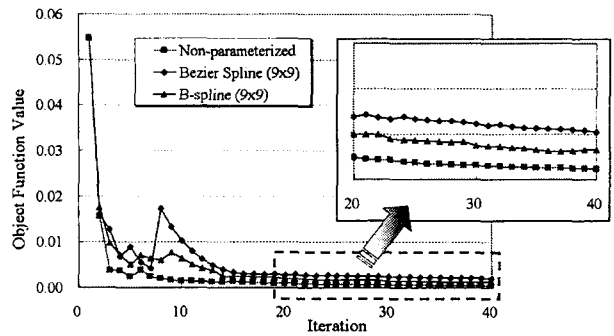


그림 6 목적함수의 변화
Fig. 6 Variation of the objective function

절점의 변화에 영향을 미치지 않기 때문에, 제어점의 위치와 개수가 최종형상에 많은 영향을 미친다. 이로 인하여 Bezier spline을 이용한 경우의 최종형상은 그림 7(b)와 같이 매개화를 하지 않았을 때 나타나는 중앙이 볼록한 형상을 갖지 못한다. 따라서 Bezier spline을 이용하는 경우 적절한 최종형상을 얻기 위해서는 더 많은 제어점이 필요하나 이는 기저함수들의 차수를 높게 되고 진동을 유발하게 된다.

한편, 그림 7(d)는 균등하게 분포한 (9x9) 제어점을 갖는 B-spline을 이용하여 매개화를 한 경우에 얻어진 최적형상으로, 매개화를 하지 않은 경우와 유사하면서도 제작이 가능한 완만한 형상이 얻어짐을 알 수 있다.

그림 8은 매개화를 하지 않은 경우, 그림 9는 Bezier spline을 이용한 경우, 그리고 그림 10은 B-spline을 이용하는 경우 최적화 과정에서 형상의 변화를 나타내었다. 최적화 과정에서 형상의 변화에 따른 요소망의 재분할은 초기 요소망의 토폴로지를 그대로 유지할 수 있는 요소망 변형법을 이용하였다. 형상이 변화에도 불구하고 요소망의 토폴로지가 잘 유지되고 있음을 그림을 통해서 확인할 수 있다.

그림 11에는 초기 형상과 최적화된 형상에 대하여 전자석

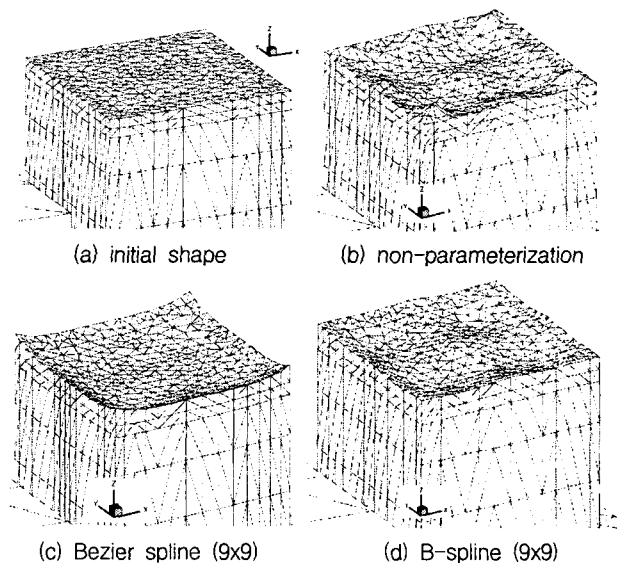


그림 7 매개화 방법에 따른 최적형상의 비교
Fig. 7 Comparison of the optimized shapes for different parameterizations.

의 공극의 중심에서의 자속밀도 분포를 비교하고 있다. 그림 7(a)에서와 같이 초기 형상에서의 자속밀도 분포는 단부 효과에 의하여 중앙 부근의 자속밀도가 더 높고, 끝단으로 갈수록 자속밀도가 낮아지는 분포를 보이고 있다. 최종 형상에서의 자속밀도 분포는 매개화를 사용하지 않은 경우나 매개화를 사용한 경우 모두 목표 값으로 설정한 자속밀도 2400 [Gauss] 부근에서 만족할 만한 분포를 나타내고 있다. 그러나 Bezier spline을 이용하여 매개화를 한 경우에는 중심 부근의 자속밀도가 바깥쪽 보다 비교적 낮게 나타나고 있으며, 이는 최적화된 형상에서 상대적으로 볼록한 가운데 부분을 잘 표현하지 못하였기 때문이다. 그러나 B-spline을 이용한 경우에는 동일한 수의 제어점으로도 최적형상을 잘 표현하고 있고 이로 인하여 자속밀도 분포 또한 훨씬 균등하게 되고 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 자성체의 비선형성을 고려한 유한요소법과 매개화된 설계민감도 해석을 이용한 3차원 전자소자의 형상 최적화 알고리즘에 대해서 연구하였다. 매개화를 하지 않은 경우에 설계 변수는 최적화 대상 표면의 절점으로 하지만, 매

개화를 이용한 경우에는 제어점이 설계 변수가 되어, 표면 절점의 민감도로부터 제어점의 민감도를 계산한 후 각 절점의 위치를 재 계산하였다. 최적화 결과로부터 제어점의 개수와 위치에 따라서 최종 형상이 변화함을 알 수 있었다. Bezier spline의 경우에는 모든 제어점이 표면의 형상에 영향을 주기 때문에 굴곡이 있는 최적화된 형상을 표현하기 어렵지만, B-spline을 이용한 경우에는 굴곡의 형상까지도 잘 표현된 표면을 얻을 수 있었다. 따라서 복잡한 형상의 매개화 방법으로는 B-spline이 보다 잘 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 매개화를 이용한 경우의 최종형상은 두 가지 경우 모두 실제 제작이 가능할 수 있을 정도로 완만한 형상을 가지며, 목적 함수는 매개화를 이용하지 않은 경우와 비교해서 조금 높아졌지만, 최종 자속밀도는 거의 비슷한 분포를 보이고 있다. 본 연구의 결과로부터 실질적인 산업현장에서 형상 최적설계가 응용되기 위해서는 설계변수의 매개화를 이용한 형상 최적화 방법이 매우 유용함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 2000년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었습니다. (KRF-2000-E2102-E00150)

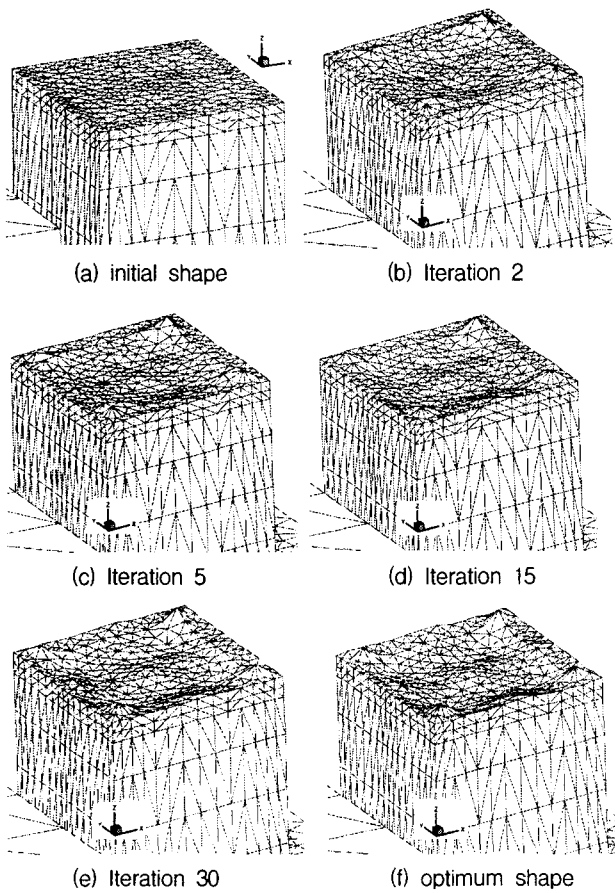


그림 8. 매개화를 하지 않은 경우 최적화 과정에서의 형상 변화

Fig. 8 Shape variations during the optimization process without parameterization

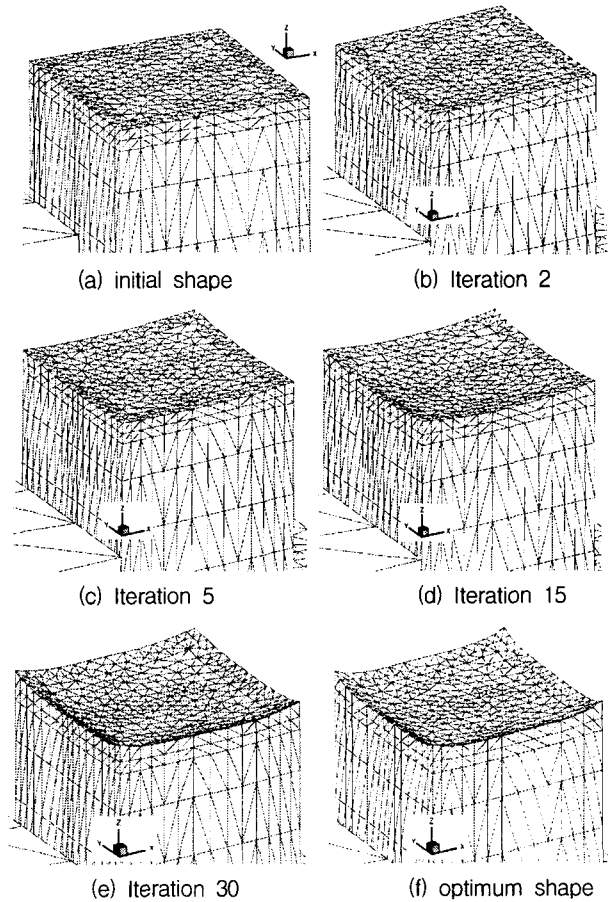


그림 9. Bezier spline을 이용한 경우 최적화 과정에서의 형상 변화

Fig. 9 Shape variations during the optimization process using Bezier spline parameterization

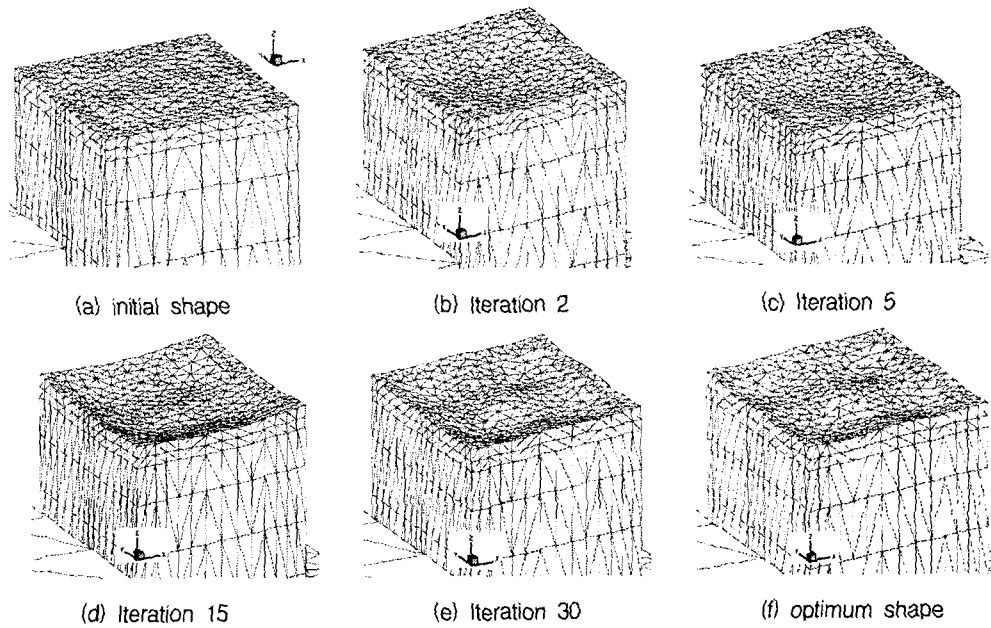
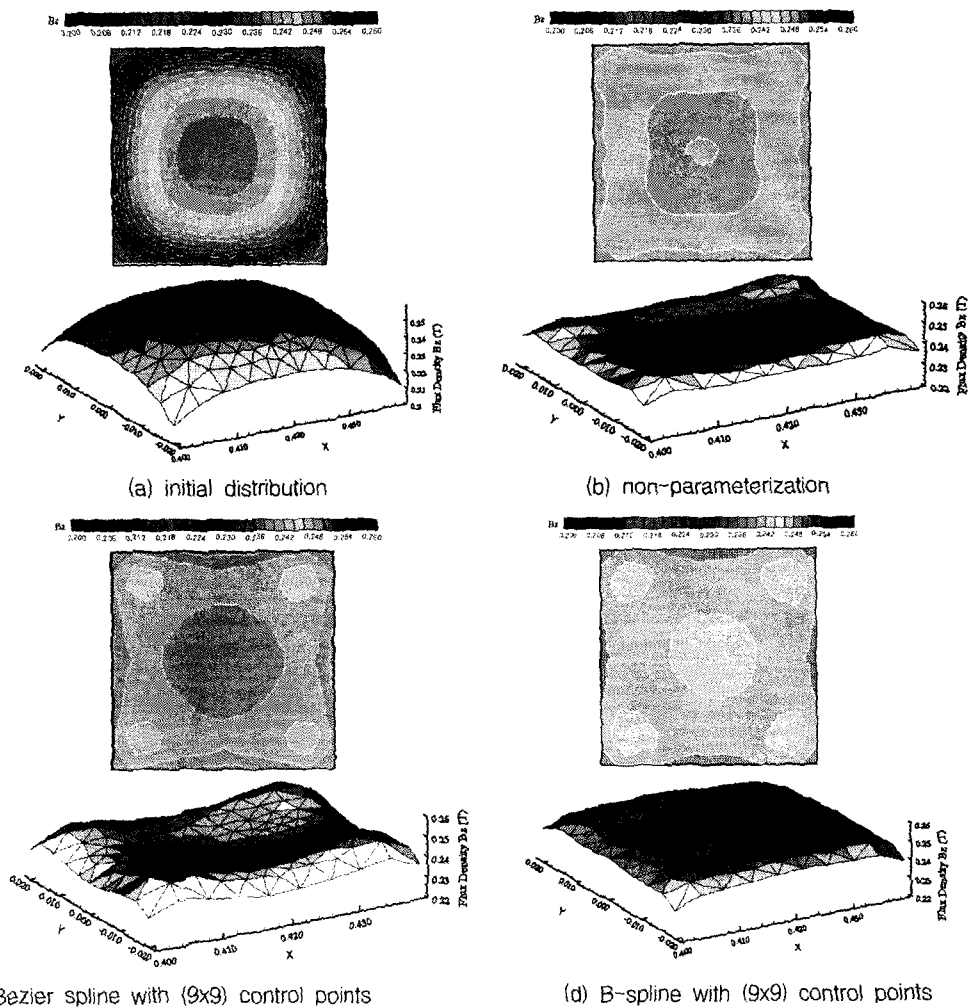


그림 10. B-spline을 이용한 경우 최적화 과정에서의 형상변화

Fig. 10 Shape variations during the optimization process using B-spline parameterization



(c) Bezier spline with (9x9) control points
그림 11 최적 형상에서의 자속밀도 분포

Fig. 11 Magnetic flux density distributions at the optimized shapes

참 고 문 헌

[1] J. A. Ramirez, E. M. Freeman, C. Cat-uthai, D. A. Lowther, "Sensitivity Analysis for the Automatic Shape Design of Electromagnetic Devices in 3D Using FEM," IEEE Trans. on Magn., vol. 33, pp. 1856-1859, 1997.

[2] 류재섭, 고창섭, 윤소남 "매개화된 민감도 해석에 의한 3차원 비선형 모델의 형상 최적화", 대한전기학회 하계학술대회논문집 B권, pp. 915-917, 2003.

[3] I. H. Park, B. T. Lee, S. Y. Hahn, "Design sensitivity analysis for nonlinear magnetostatic problems using finite element method", IEEE Trans. on Magn., Vol.28, No. 2, pp. 1533-1536, 1992.

[4] Y. Yingying, C. S. Koh, and X. Dexin, "3D shape optimization of electromagnetic devices including eddy currents by using design sensitivity analysis," IEEE CEFC 2002, Perugia, Italy, pp. 292, June 16-19, 2002.

[5] K. Weeber and S. R. H. Hoole, "Geometric Parameterization and Constrained Optimization Techniques in the Design of Salient Pole Synchronous Machines," IEEE Trans. on Magn., vol. 28, pp. 1948-1960, 1992.

[6] S. Subramaniam, A. A. Arkadan, and S. R. H. Hoole, "Optimization of a Magnetic Pole Face Using Linear Constraints to Avoid Jagged Contours," IEEE Trans. on Magn., vol. 30, pp. 3455-3458, 1994.

[7] 이항범, 박일한, 한송엽, "설계변수 매개화를 이용한 전기기기 최적설계," 대한전기학회 논문지, Vol, 50B, No. 11, pp. 546-555, 2001.

[8] H. B. Lee, I. H. Park, and S. Y. Hahn, "Optimum shape design of electro-magnetic devices by Bezier spline parameterization of sensitivity," IEEE CEFC 2002, Perugia, Italy, pp. 21, June 16-19, 2002.

[9] K. Weeber and S. R. H. Hoole, "A Structural Mapping Technique for Geometric Parameterization in the Optimization of Magnetic Devices", International Journal for Numerical Methods in Engineering, vol.33, pp. 2145-2179, 1992.

[10] Yingying Yao, 고창섭, Dexin Xie, "전자소자의 형상 최적화를 위한 3차원 요소의 재생성법", 대한전기학회 하계학술대회논문집 B권, pp. 841-843, 2002.

[11] O. C. Zienkiewicz, The Finite Element Method, McGraw-Hill, 1977.

[12] 강병길, 류재섭, 고창섭, "FEM을 이용한 3-D 비선형 정자계 모델의 해석", 대한전기학회 추계학술대회 논문집 B권, pp. 324-326, 2000.

[13] D. F. Rogers and J. A. Adams, Mathematical Elements for Computer Graphics, McGraw-Hill, 1990.

[14] David F. Rogers, An Intorduction to NURBS: With Historical Persopective, Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

저 자 소 개



류 재 섭(柳在燮)

1973년 12월 15일생. 1997년 충북대 전기공학과 졸업(공학사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1999~2002 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 2003~현재 한국기계연구원 첨단산업기술 연구부 위촉연구원

E-mail : jsryu@vod.chungbuk.ac.kr



Yao Yingying (姚 纓 英)

1983년 Heifei University of Technology 전기공학과 졸업(학사). 1987년 Chongqing University 전기공학과 졸업(석사). 2000년 Shenyang University of Technology 전기공학부 졸업(박사). 2001~2002 충북대학교 전기공학과 BK21 방문연구원. 현재 Zhejiang University 전기공학부 교수.

E-mail : yaoying62@hotmail.com



고 창 섭(高彰燮)

1986년 서울대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1993~1994년 미국 Florida International University 전기 및 컴퓨터 공학과 객원연구원. 1994~1996년 삼성전기(주) 종합연구소 선임연구원. 1996~현재 충북대 전기전자 및 컴퓨터 공학부 부교수. 2003~2004 Texas A&M University Dept. of EE 방문교수.

E-mail : kohcs@chungbuk.ac.kr