자기장 내의 위상최적화 방법에 대한 연구

- 밀도법과 균질화법의 비교 -

유 정 훈*

(2003 년 4 월 25 일 접수, 2003 년 12 월 16 일 심사완료)

A Study on the Topology Optimization in Magnetic Fields

– Comparisons Between the Density Method and the Homogenization Design Method

Jeonghoon Yoo

Key Words : Topology Optimization(위상최적화), Magnetic Fields(자기장), Finite Element Method(유한요소법), Density Method(밀도법), Homogenization Design Method(균질화법)

Abstract

The density approach and the homogenization design method are representative methods in topology optimization problems. In the topology optimization in magnetic fields, those methods are applied based on the results of the applications in elastic fields. In this study, the density method is modified considering the concept of the homogenization design method. Also, the results of the topology optimization in magnetic fields by the modified density method as well as the homogenization method are compared especially focusing the change of the penalization parameter in the density approach. The effect of the definition of the design domain such as global/local design domain is also discussed.

1. 서 론

위상최적설계(topology optimization)는 고정된 설계영역을 대상으로 이를 유한개의 요소로 이산화하여 각 요소의 밀도나 기타 특성을 설계변수로 하여 주어진 목적함수와 제한조건에 맞는 최종적인 설계위상을 도출하는 개념이며, 이는 변수최적설계, 형상최적설계와 더불어 구조물의 최적설계에 폭넓게 사용되고 있다. 위상최적화의 방법으로는 Bendsøe[1] 등에 의해 제안된 균질화법(homogenization design method, HDM)과 SIMP(Solid Isotropic with Penalization Method)[2] 또는 OMD(Optimal Material Distribution)[3]으로 불리기도 하는 밀도법이 널리 사용된다.

균질화법은 Cheng[4] 등에 의해 제시되었던 설계영역의 완화(relaxation)와 복합재의 필요성을 해결하기 위한 수학적 배경을 가지고 제시된 방법으로 설계영역을 이론적으로 무한개의 미소요소로 분할하고 그에 따른 균질화된 물성치를 구하여 설계에 적용한다. 밀도법의 경우 설계 변수는 분할된 요소 각각의 밀도가 되며 균질화법보다 이론적 개념이 단순하여 많은 연구자들이 이 방법을 이용하고 있다. 그러나 연속체 문제를 유한개의 개체로 이산화하여 해석한 한계를 가지고 있으며 최근에는 이러한 한계를 극복하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다.[2,5]

이러한 위상최적화의 방법은 탄성영역 내의 정하중, 동하중, 좌굴하중을 받는 구조설계 문제에서부터[6~8] 컴플라이언트 메카니즘의 설계,[9] 자기장 내의 문제에까지 그 적용 영역이 확장되고 있다. 자기장내의 구조물의 위상최적화의 방법에서는 밀도법이 먼저 적용되어 왔으나[2,10,11] 최근에 와서 균질화법의 적용에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다.[12~14]

자기장 내의 구조물에 대하여 밀도법을 적용할 경우에 각 요소는 등방성(isotropic)의 재질로 간주되어 한 가지 대표값의 자기투과율(magnetic permeability)을 가지게 되므로 재질의 직교성(orthotropic)이 고려되는 문제에는 적용이 어렵게

* 회원, 연세대학교 기계공학부
E-mail : yoojh@yonsei.ac.kr
TEL : (02)2123-2859 FAX : (02)362-2736

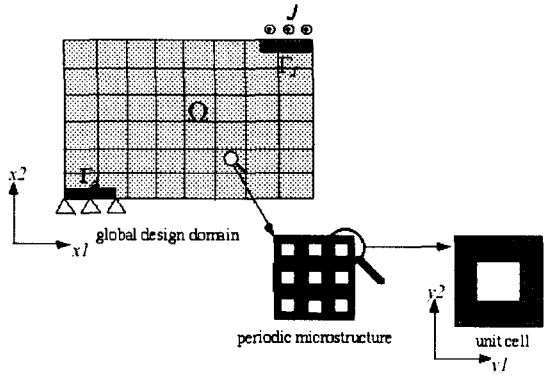


Fig. 1 Concept of the topology optimization

된다. 일반적인 등방성 재질로 최적화를 수행하는 경우에도 그 결과는 일반적인 탄성영역의 문제와 마찬가지로 벌칙변수(penalization parameter)의 값에 좌우되게 된다. 지금까지의 자기장 문제의 적용에서는 탄성영역 문제와 마찬가지로 2~4 정도로 벌칙변수의 값을 상정하여 최적화를 수행하여 왔다.[11]

본 연구에서는 자기장 내의 구조물의 위상최적화에 있어서 밀도법이 가진 방향성의 한계를 극복할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 또한 밀도법에 의한 위상최적화의 결과와 균질화법에 의한 위상최적화의 결과를 비교하여 자기장 내의 구조물의 최적화 문제가 탄성영역 내의 구조물의 최적화 문제와 유사한 특성을 갖는지를 확인해 보고자 한다.

2. 위상최적설계의 개념

Fig. 1은 균질화법을 사용할 경우의 자기장내 구조물의 위상최적설계의 개념을 나타내고 있다. 설계영역 Ω의 경계영역 Γ_J에 J의 전류밀도가 가해지며 Γ_d에는 Neumann이나 Dirichlet 경계조건이 적용된다. 설계영역 Ω는 그림에서 보여지는 것처럼 유한개의 유한요소로 이산화(discretized)되며 각각의 요소는 무한개의 단위셀(unit cell)로 분할된다. 좌표 $x(x1,x2)$는 매크로 영역에서의 좌표축을 나타내며 $y(y1,y2)$는 마이크로 영역에서의 좌표축을 표시한다. 균질화법에서는 각각의 단위셀은 Fig. 1에 나타난 것처럼 중앙에 구멍(hole)을 가지며 이 구멍의 크기와 각도가 설계변수가 되므로 이론적인 설계변수의 갯수는 무한개이다. E^0_{ijkl} 와 ρ_0 를 각각 원재질의 탄성계수와 밀도라 할 때 균질화 이론에 따른 설계영역 Ω를 구성하는 각각의 유한요소의 탄성계수와 밀도는 다음의 식으로 표시된다.[6]

$$E^H_{ijkl} = \frac{1}{|Y|}\int_Y \left(E^0_{ijkl} - E^0_{ijkl}\frac{\partial \chi^{kl}_p}{\partial y_q} \right) dy \tag{1}$$

$$\rho^H = \frac{1}{|Y|}\int_Y \rho_0 dy \tag{2}$$

E^H_{ijkl} 와 ρ^H 는 각각 균질화된 탄성계수와 밀도를, Y 는 단위셀을 표시하며 $|Y|$는 그 부피를 나타낸다. χ 는 단위셀의 변위를 나타내는 특성함수이다.

자기장내 구조물의 위상최적화에 있어서는 탄성계수 대신 자기투과율의 값을 균질화시켜서 설계에 적용한다. μ_{ij} 를 원재질의 자기투과율이라고 할 때 균질화된 자기투과율 μ^h 은 다음의 식으로 계산된다.[12]

$$\mu^h = \int_Y \mu_{ij} dy + \int_Y \mu_{ij} \frac{\partial \gamma_i}{\partial y_j} dy \tag{3}$$

자기장의 경우 특성함수 γ 는 단위셀의 자기장 강도(magnetic field strength)를 나타낸다.

밀도법을 사용할 경우에는 단위셀의 개념이 적용되지 않으며 설계변수는 매크로한 설계 영역을 구성하는 유한요소 각각의 밀도가 된다. 원재질의 탄성계수를 E_0라 할 때 각 요소의 탄성계수 E 는 요소의 밀도를 고려하여 다음의 식으로 나타낸다.

$$E = E_0 f(\rho^p) \tag{4}$$

여기서 f는 설계변수에 따른 함수이며 p는 벌칙변수를 나타낸다. 명확한 위상최적화의 결과를 얻기 위해서 p의 값은 일반적으로 2~4로 설정한다.[2] 밀도법을 이용한 자기투과율은 다음의 식을 이용해 계산된다.[11]

$$\mu = \mu_0 \left[1 + (\mu_r - 1)\rho^p \right] \tag{5}$$

여기서 μ_0, μ_r 은 각각 자유공간에서의 자기투과율과 상대자기투과율(relative permeability)를 나타낸다. 벌칙변수의 값은 탄성영역과 비슷한 2~4 정도의 값이 일반적으로 사용되고 있다.[11]

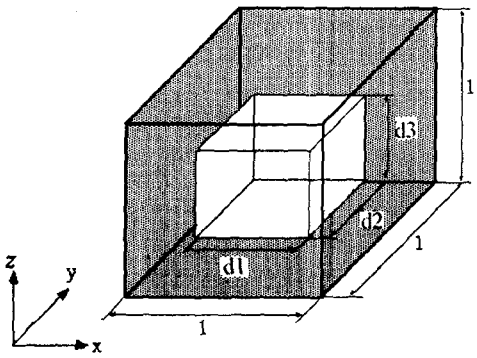


Fig. 2 Concept of the modified density method

3. 수정된 밀도법의 제시

3.1 수정된 밀도법의 수식화

자기장내 구조물의 위상최적화의 경우에 있어서 기존의 밀도법을 사용할 경우 등방성의 재질만을 가정하게 되어 도파관(wave-guide) 문제에서와 같이 재료의 직교성이 고려되는 경우 즉, x, y, z 방향으로 서로 다른 자기투과율이나 전기허용율(electric permitivity)를 고려하는 경우의 적용이 곤란해진다. 또한 경우에 따라 이러한 구멍의 각 방향의 크기를 사전에 지정함으로써 자속밀도의 방향을 조절함이 가능할 것으로 판단된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 요소의 중앙에 구멍을 가정하고 그 크기를 설계변수로 설정하는 균질화법의 개념을 적용하여 밀도법을 수정한다. Fig. 2는 수정된 밀도법에 의한 요소의 모습을 보여주고 있다. 설계변수는 x, y, z 방향으로의 구멍의 크기인 d_1, d_2, d_3가 되며 이에 따른 요소의 밀도는 다음과 같이 표시된다.

$$\rho = \rho_0(1 - d_1 d_2 d_3) \tag{6}$$

여기서 ρ_0는 원재질의 밀도를 나타낸다. 식 (6)을 고려하여 구멍의 크기가 0 일 때의 원재질의 밀도를 1 이라고 할 때 식 (5)로 표현되는 요소의 자기투과율은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mu &= \mu_0\left[1 + (\mu_r - 1)\rho^p\right] \\ &= \mu_0\left[1 + (\mu_r - 1)(1 - d_1 d_2 d_3)^p\right] \end{aligned} \tag{7}$$

3.2 밀도법과 균질화법에 의한 재질의 특성비교

앞에서 언급한 바와 같이 밀도법을 이용할 경우의 벌칙변수는 대략 2~4의 값을 사용하고 있다.

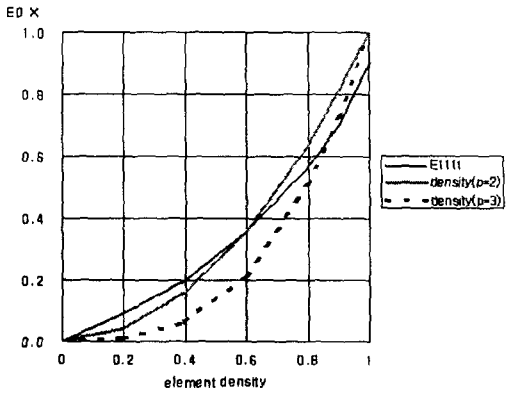


Fig. 3 Elastic moduli according to the element density

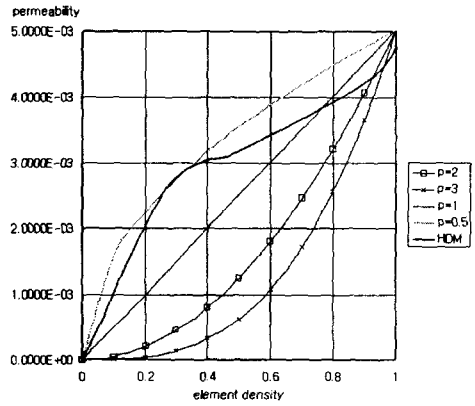


Fig. 4 Magnetic permeability according to the element density

Fig. 3은 밀도법과 균질화법에 따른 탄성계수 값의 변화를 요소의 밀도변화에 따라 표시한 그래프이다. 밀도법을 이용한 경우 벌칙변수는 2와 3으로 설정되었고 균질화법을 이용한 경우 주응력 방향에 따라 다른 값을 갖는 탄성계수 중 E_{1111}의 값만을 표시하고 있다. 그래프에 표시된 것처럼 탄성계수의 경우에는 밀도법에 따른 결과와 균질화법에 의한 결과가 비슷한 결과를 보여주고 있다.

Fig. 4는 상대자기투과율이 4000인 강자성체에 대해 자기투과율 값의 변화를 요소의 밀도변화에 따라 밀도법과 균질화법으로 나타낸 그래프이며 밀도법에 사용되는 벌칙변수는 0.5, 1, 2, 3이다. 균질화법의 경우는 등방성 재질을 가정하여 자기투과율을 계산하였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 탄성계수의 경우와는 다르게 벌칙변수가 1 또는 0.5일 때 균질화법의 결과와 비슷한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

4. 최적화 과정

4.1 최적화 문제의 정식화

위상최적화의 문제는 주로 에너지의 항으로 표현되는 목적함수와 최대부피의 설정 등의 제한조건으로 구성된다. 설계 영역내의 자기에너지의 값은 재료의 포화현상(saturation effect)를 고려하여 다음의 식으로 구한다.

$$W_m = \frac{1}{2}\int_V \int_0^B \frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\boldsymbol{B}d\boldsymbol{B}dv = \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T \frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\boldsymbol{B}dv \tag{8}$$

위에서 $\mu(\boldsymbol{B})$ 는 포화현상을 고려하여 자속밀도(magnetic flux density)의 함수로 표현된 자기투과도이다. 균질화법에 의한 설계에서 이 값은 식 (3)에 의해 계산되며 수정된 밀도법에 의한 경우는 각 요소의 밀도에 따라 식 (7)에 의해 계산되게 된다. 코일의 감김수 N, 전류 I, 자속 ψ 을 이용하면 자기에너지는 다시 다음의 식으로 표현될 수 있다.

$$W_m = \frac{1}{2}NI\psi \tag{9}$$

자기장내 구조물의 위상최적화를 위하여 설계의 목적함수를 설계영역의 자기에너지를 최대화하는 것으로 규정하고 설계영역의 부피제한 조건을 고려하여 최적화 문제를 다음과 같이 나타낸다.

$$\underset{\boldsymbol{D}}{\text{maximize}}\ \ l_{MMC} = NI\psi \quad \text{subject to} \sum_{e=1}^{N} v_e \le V \tag{10}$$

위의 식에서 $\boldsymbol{D}$는 설계변수 벡터를 표시하며 l_{MMC}는 자기평균 컴플라이언스(magnetic mean compliance)를 나타낸다. 식 (10)으로 나타난 최적화 문제를 수행하는 경우 N과 I는 고정된 값이므로 설계영역 내의 자속이 최대가 되는 구조물을 얻게 되며 이는 자속밀도의 최대화로 연결된다.

4.2 민감도의 계산

최적설계의 과정에서 설계변수의 값은 계속적으로 변화하므로 목적함수의 값도 변하게 된다. 본 연구에서 사용한 순차적 선형계획법(Sequential linear programming)으로 최적의 설계 변수를 효과적으로 찾기 위해서는 설계변수의 변화량에 따른 목적함수와 제한조건의 변화량을 나타내는 민감도 계산이 필수적이다.

민감도의 계산은 다음의 식으로 표시되는 총 위치에너지(total potential energy)를 이용해 구한다.

$$T_m = \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T \frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\boldsymbol{B}dv - NI\psi = -\frac{1}{2}l_{MMC} \tag{11}$$

식 (11)에 나타난 것처럼 자기평균 컴플라이언스를 최대화하는 목적함수는 총 위치에너지를 최소화하는 것과 같은 의미를 가진다. 총 위치에너지의 설계변수의 변화에 따른 민감도를 구하면 다음과 같다.

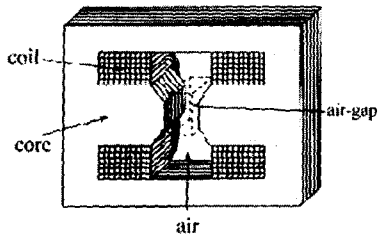
$$\frac{\partial T_m}{\partial \boldsymbol{D}} = \int_V \boldsymbol{B}^T \frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial \boldsymbol{D}}dv + \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{D}}\left(\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\right)\boldsymbol{B}dv - NI\frac{\partial \psi}{\partial \boldsymbol{D}} \tag{12}$$

식 (12)의 첫째 항과 셋째 항은 식 (8)과 (9)의 관계에 의해 없어지므로 최종적인 민감도는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

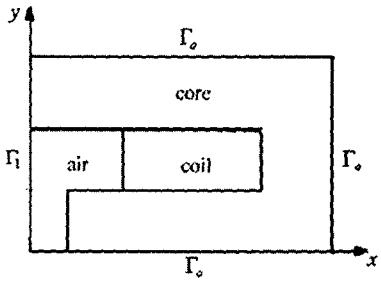
$$\frac{\partial T_m}{\partial \boldsymbol{D}} = \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{D}}\left(\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\right)\boldsymbol{B}dv = \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T\left[\frac{\partial}{\partial \boldsymbol{D}}\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{B}}\left(\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\right)\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial \boldsymbol{D}}\right]\boldsymbol{B}dv \tag{13}$$

수정된 밀도법을 이용한 설계에서 자기투과율은 식 (7)과 같이 표시되며 설계변수는 각 요소의 구멍의 크기를 표시하는 d_1, d_2, d_3가 된다. 이 경우에 식 (13)으로 표시된 민감도를 계산하면 다음과 같다.

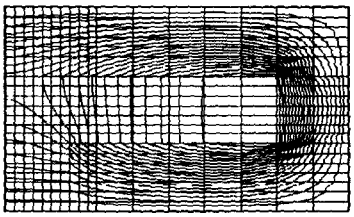
$$\begin{aligned}\frac{\partial T_m}{\partial d_i} &= \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T\left[\frac{\partial}{\partial d_i}\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{B}}\left(\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\right)\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial d_i}\right]\boldsymbol{B}dv \\ &= \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T\left[-\frac{\partial \mu(\boldsymbol{B})/\partial d_i}{\mu^2(\boldsymbol{B})} + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{B}}\left(\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\right)\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial d_i}\right]\boldsymbol{B}dv \\ &= \frac{1}{2}\int_V \boldsymbol{B}^T\left[-\frac{\mu_0(\mu_r - 1)}{\mu^2}p(1 - d_i d_j d_k)^{p-1}\left(-d_j d_k\right)\right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial}{\partial \boldsymbol{B}}\left(\frac{1}{\mu(\boldsymbol{B})}\right)\frac{\partial \boldsymbol{B}}{\partial d_i}\right]\boldsymbol{B}dv \\ &\qquad i, j, k = 1,2,3 \ \text{and} \ i \ne j \ne k\end{aligned} \tag{14}$$



(a) Cross sectional view of an H-magnet



(b) Quarter model for analysis and design



(c) Contour of vector potential

Fig. 5 Shape and analysis of an H-magnet

여기서 μ 는 식 (7)에 의해 계산된 자기투과도이며 $\mu(B)$는 포화현상을 고려하여 식 (7)에 의해 계산된 μ 와 자속밀도의 관계를 함수로 표시한다. 식 (11)에 표시된 목적함수와 총 위치에너지의 관계를 고려하여 목적함수에 대한 민감도를 다음의 관계로 구할 수 있다.

$$\frac{\partial l_{MMC}}{\partial D} = -2\frac{\partial T_m}{\partial D} \tag{15}$$

5. 위상최적화의 적용

5.1 적용대상 및 결과

본 연구에서 제시된 수정된 밀도법과

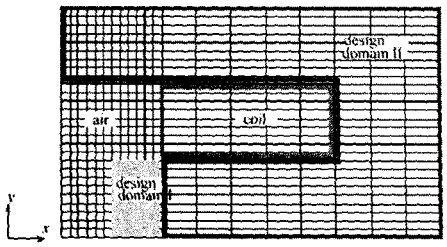


Fig. 6 Design domain for the optimal design

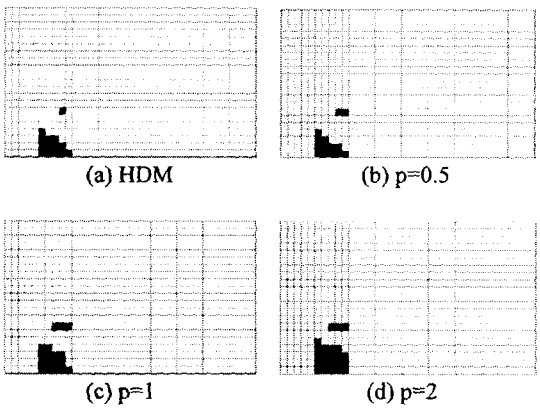


Fig. 7 Optimization results by HDM(a) and the density method for design domain I (b~d)

균질화법을 Fig. 5(a)에 나타난 H-magnet에 적용한다. 코일 부분에는 $5\times10^6(A/m^2)$ 의 전류밀도가 가해지고 코어 부분의 상대 자기투과도는 4000이다. 유한요소 해석 및 최적화의 과정은 Fig. 5(b)에 표시된 ¼ 모델에 대해서 실시한다. Γ_0 에는 Dirichlet 경계조건이 Γ_1 에는 Neumann 경계조건이 작용한다. 유한요소 모델은 3차원으로 z 방향으로 3개의 층을 갖는 구조로 구성되었다. Fig. 5(c)는 원래의 구조물에 대하여 유한요소 해석에 따른 자기포텐셜의 분포를 보여주고 있다.

본 연구에서는 설계영역의 차이에 따른 결과를 비교하기 위해 Fig. 6에 보여지는 바와 같이 두 개의 설계영역을 설정하고 체적 제한조건을 설계영역의 60%로 설정한다. 설계영역 I (design domain I)은 코어의 끝단 부분만을 고려하며 설계영역 II (design domain II)에서는 설계영역 I을 포함한 코어 전체를 설계영역으로 설정한다. 이러한 설계 영역에 식 (10)으로 표시된 최적화 문제를 적용시키면 설계영역의 자속밀도가 최대가 되는 구조를 얻을 수 있으며 이는 또한 Fig 5(a)에 표시된 공기간극 (air-gap) 부분의 자속밀도를 최대로 높일 수 있다.

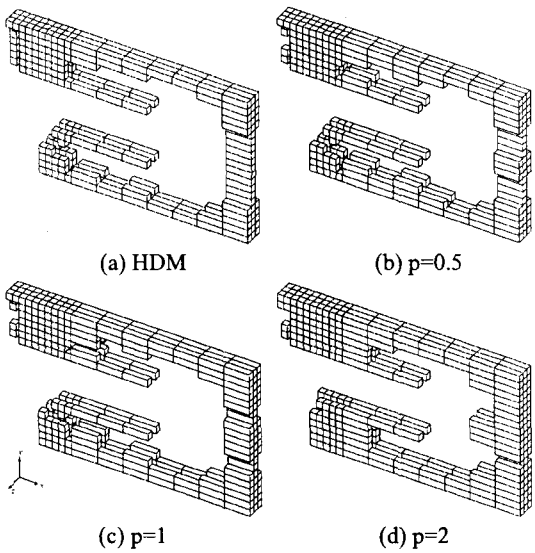


Fig. 8 Optimization results by HDM(a) and the density method for design domain II (b~d)

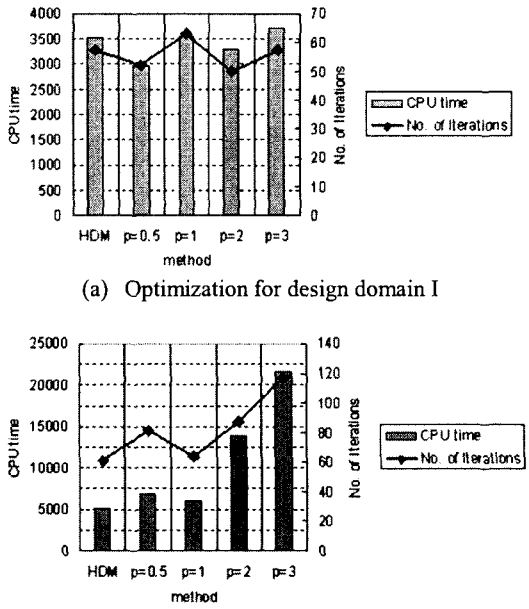


Fig. 9 Comparisons of CPU time and number of Iterations

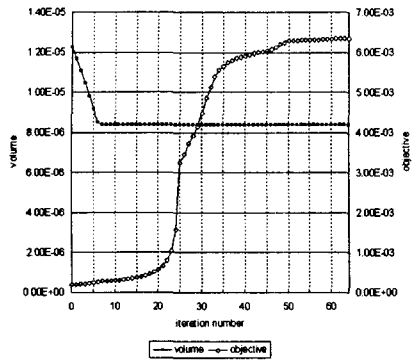
Fig. 7은 설계영역 I에 대하여 균질화법과 수정된 밀도법에 따른 결과를 나타내고 있다. 위의 결과는 3개의 유한요소층 중 첫 번째 층에 대한 결과이다. 위상최적화의 결과에 따라 그림 7(a)의 경우에서와 같이 구조물 부분과 연결되지 않는 요소가 높은 밀도를 가질 수 있으며 이럴 경우에의 기존 구조물과의 연결 여부는 최적화 형상의 시뮬레이션 결과에 의해 목적함수에 따른 전체 구조물의 성능을 향상시키는 방향으로 결정될 수 있다. 밀도법에 의한 결과에서는 탄성영역에서의 경우와는 달리 벌칙변수의 값이 커질수록 균질화법에 의한 결과와 조금씩 다른 형상을 보여주고 있다.

Fig. 8은 설계영역 II에 대한 균질화법과 수정된 밀도법에 따른 위상 최적화의 결과를 나타내고 있다. 그림에 표시된 부분은 최적화의 결과 밀도가 원재질의 50% 이상이 되는 부분의 구조만을 표시한 것이다. 설계영역 I에 의한 결과와 마찬가지로 벌칙변수의 값이 커질수록 특히 코어의 끝단 부분에서 균질화법에 의한 결과와의 차이가 커짐을 알 수 있다.

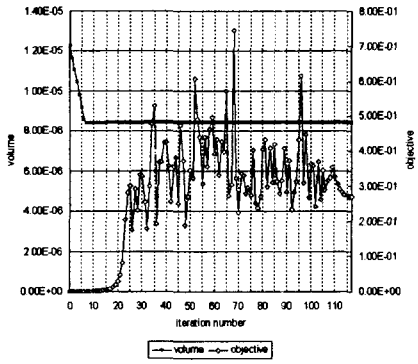
5.2 최적화 결과의 검토

Fig. 9는 설계영역 I과 II에 대한 균질화법과 수정된 밀도법에 의한 위상최적화의 과정에서 소요된 CPU time에 의한 계산시간(sec) 및 수렴할 때까지의 반복횟수를 비교한 그래프이다. 설계영역을 구조물의 일부로 한정했을 경우인 설계영역 I의 경우에서는 Fig. 9(a)에 나타난 바와 같이 최종적인 결과가 균질화법이나 벌칙변수의 값을 달리한 밀도법을 이용한 경우에 있어 계산시간 및 수렴을 위한 계산횟수에서 큰 차이를 보이고 있지 않다. 그러나 설계영역 II를 대상으로 수행한 최적화의 결과에서는 Fig. 9(b)의 경우에서처럼 벌칙변수의 값이 커질수록 계산시간과 반복횟수가 급격히 증가함을 볼 수 있다. Fig. 10은 설계영역 II에 대해 수정된 밀도법을 수행했을 경우에 벌칙변수의 값이 1과 3일 때의 수렴경력(convergence history)을 보여주고 있다. 부피의 제한 조건의 경우에는 두 가지 경우 모두 양호한 수렴성을 보여주고 있으나 목적함수의 수렴성에 있어서는 벌칙변수의 값이 1인 경우에 더 좋은 수렴성을 보여주고 있으며 이 결과로 인해 Fig. 9(b)에 보여지는 바와 같은 계산시간의 차이가 생김을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8의 결과에서 나타난 바와 같이 벌칙변수의 값이 2일 때의 결과를 균질화법의 결과 및 벌칙변수의 값이 0.5 또는 1인 경우와 비교해 볼 때 특히 코어의 끝단 부분에서 상이한 결과를 보여주고 있음을 알 수 있다. Table 1은 Fig. 8에 나타난 결과에 대해 Fig. 7(a)에 표시된 공기간극 부분에서의 자속밀도의 평균값을 비교한 결과이며 균질화법과 0.5와 1의 벌칙변수값을 가진 밀도법



(a) p=1



(b) p=3

Fig. 10 Convergence history for design domain II by the modified density method

Table 1 Comparisons of the results by HDM and the *modified density approach* (unit : Wb/m^2)

		B_x	B_y
HDM		-1.221E-01	8.246E-02
Modified density method	p=0.5	-1.221E-01	8.246E-02
	p=1	-1.221E-01	8.246E-02
	p=2	-1.209E-01	8.161E-02
	p=3	-9.736E-02	6.573E-02

에 의한 결과가 2와 3의 벌칙변수값을 가진 밀도법의 결과보다 더 큰 자속밀도의 값을 나타내고 있다.

위의 결과에서 나타난 바와 같이 자기장 내 구조물의 위상최적화의 경향은 탄성영역하의 구조물의 위상최적화 경향과는 다름을 알 수 있다. 밀도법을 이용할 경우 자기장 내 구조물의 최적화 과정에서는 0.5 또는 1의 벌칙변수를 가졌을 때 균질화법의 결과와 유사한 결과를 보이며 계산시간, 수렴도, 최종결과에서 2 또는 3의 벌칙변수에 의한 결과보다 더 좋은 결과를 보여주고 있다.

이러한 결과는 요소밀도에 따른 자기투과도를 나타내는 Fig. 4의 경향에서 예측이 가능한 결과이다. 탄성영역에서의 위상최적화의 경우는 정하중을 받는 경우에 있어서 구조물의 변위를 최소화시키는 즉, 구조물의 변형율(strain)을 최소화시키는 목적함수를 추구한다.[6] 자기장 영역의 경우, 자속밀도를 최대화시키는 목적함수를 가지고 위상최적화를 추구한다. 유한요소 이론에서 탄성영역에서의 변형율은 자기장 내의 자속밀도와 비슷한 특성을 가지고 있음을 고려할 때 두 가지 경우의 위상최적화의 목적함수가 서로 반대되는 개념을 가지고 있으며 이러한 점이 위와 같은 결과를 가져오는 원인의 하나로 예측된다.

6. 결 론

본 연구에서는 자기장 내 구조물의 위상최적화를 위해 수정된 밀도법을 제시하였으며 그 결과를 균질화법에 의한 결과와 비교하였다.

수정된 밀도법에 의한 결과는 직교성을 갖는 재료의 경우에 유용하게 적용될 수 있을 것으로 예측되나 이에 적절한 예가 될 수 있는 전자기파의 응용 부분까지는 위상최적화의 연구가 아직 진행되지 못한 관계로 일반적인 정적 자기장 내의 구조물에 대한 적용 예를 제시하였고 목적함수에 따른 민감도를 유도하였다.

균질화법에 의한 결과와의 비교에서는 기존의 탄성영역 내의 구조물의 위상최적화의 경우와는 달리 0.5 내지는 1 정도의 벌칙변수에 의한 밀도법의 결과가 우수함을 보여주고 있다. 본 연구에서의 적용은 전류에 의한 자기장의 영향만을 고려하고 영구 자석이나 다른 형태의 목적함수를 갖는 자기장 내 구조물의 위상최적화의 경우는 고려하지 않은 한계를 가지고 있으며 이 부분은 계속적인 연구가 요구된다. 그러나 본 연구의 결과는 탄성영역내의 위상최적화의 결과나 경향을 자기장이나 다른 물리적 영역내의 구조물의 위상최적화까지 확대 적용하는 경우에는 물리적인 차이점을 고려한 검증을 필요로 함을 보여주고 있다.

후 기

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-003-D00012).

참고문헌

(1) Bendsøe, M. P., Kikuchi, N., 1988, "Generating Optimal Topologies in Structural Design Using a Homogenization Method," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. Vol. 71, pp. 197~224.

(2) Bendsøe, M. P. and Sigmund, O., 1999, "Material Interpolation Schemes in Topology Optimization," *Archives of Applied Mechanics*, Vol. 69, pp. 635~654.

(3) Dick, D. N. and Lowther, D.A., 1996, "Automated Design of Magnetic Devices by Optimizing Material Distribution", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 32, No.3, pp. 1188~1193.

(4) Cheng, K. T. and Olhoff, N., 1981, "An Investigation Concerning Optimal Design of a Solid Elastic Plates", *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 16, No. 3, pp. 305~323.

(5) Mlejnik, H. P., Schirrmacher, R., 1993, "An Engineer's Approach to Optimal Material Distribution and Shape Finding," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 106, pp. 1~26.

(6) Suzuki, K. and Kikuchi, N., 1991, "A Homogenization Method for Shape and Topology Optimization," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 93, pp. 291~318.

(7) Díaz, A. and Kikuchi, N., 1992, "Solution to Shape and Topology Eigenvalue Optimization Problems Using a Homogenization Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 35, pp. 1487~1502.

(8) Neves, M. M., Sigmund, O. and Bendsøe, M. P., 2002, "Topology Optimization of Periodic Microstructures with a Penalization of Highly Localized Buckling Modes," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 54, pp. 809~834.

(9) Min, S., Nishiwaki, S. and Kikuchi, N., 1997, "Optimum Structural Design Based on Flexibility and Stiffness – Application to Compliant Mechanism System," *Journal of KSME*, Vol. 21, No. 9, pp. 1432~1440.

(10) Dick, D. N. and Lowther, D. A., 1997, "Composite Microstructure of Permeable Material for the Optimized Material Distribution Method of Automated Design," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 33, No.2, pp. 1828~1831.

(11) Byun, J., Hahn, S., and Park, I., 1999, "Topology Optimization of Electrical Devices Using the Mutual Energy and Sensitivity," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No.5, pp. 3718~3720.

(12) Yoo, J. and Kikuchi, N., 2000, "Topology Optimization in Magnetic Fields Using the Homogeniztion Design Method," *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. Vol. 48, Issue 10, pp. 1463~1479.

(13) Yoo, J., Kikuchi, N. and Volakis, J. L., "Structural Optimization in Magnetic Fields Using the Homogenization Design Method," *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.36, No.3, pp. 574~580.

(14) Yoo, J., 2001, "Topology Optimization of a Structure Under Harmonic Excitation Caused by Magnetic Fields," *Journal of KSME*, Vol. 25, No. 10, pp. 1613~1620.