

비선형이 고려된 이극성 자기베어링의 최적설계

김제실*, 이재환**, 박종권***

Optimal Design for a Heteropolar Magnetic Bearing Considering Nonlinearities

Chaesil Kim*, Jaewhoan Lee**, Jong-Kweon Park***

ABSTRACT

Although the design of magnetic bearing needs a systematic optimization due to several design variables, constraints, geometric limitations, nonlinearities, and so on, the present designs for magnetic bearings have been conducted in the linear region of the characteristics for magnetic materials by trial and error considering design constraints. This article, therefore, provides the possibility of a genetic algorithm(GA) based optimization with two dimensional-nonlinear finite element magnetic field analysis for design of a radial heteropolar magnetic bearing. The magnetic bearing design by GA based optimization makes good agreements with that by a commercial optimization software DOT using the sensitivity analysis.

Key Words : Optimization(최적화), Genetic algorithm(유전자 알고리즘), Magnetic bearing(자기 베어링)

1. 서 론

자기베어링은 자기장에 의해 발생하는 힘을 변화시켜 회전체를 부양하고 그 위치를 제어하는 일종의 전자석으로써, 적용되는 전자석 재료의 특성이 전형적인 비선형성을 나타내며 다양한 기하학적 제한조건을 만족시켜야 하는 등 설계과정이 복잡하고 다른 베어링에 비해 고가이지만 능동적인 진동제어, 반영구적 수명, 윤활장치의 불필요, 광범위한 온도 범위에서의 사용, 동작중 회전시스템 상태 모니터링(Monitoring), 질량 불균형에 대한 자동 밸런싱 등 많은 우수한 장점을 가지고 있어 최근 들어 자기베어링을 고속 회전

체 시스템에 응용하는 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{(1)~(4)} 지금까지 자기베어링의 설계는 전자석 재료의 선형특성으로 가정되는 영역에서 1차원 자기장회로 해석법에 의해 기하학적 조건에 부합하도록 시행착오적으로 이루어지고 있어 최대 자기력을 얻기가 어려웠다. 또한 비선형성에 의해 발생하는 오차는 제어기 설계시에 고려하여 보상하고 있지만 제어전류가 포함될 때 과도한 오차가 발생한다면 많은 제어력 및 복잡한 제어 알고리즘이 요구된다. 그러므로 비선형성을 고려한 정확한 자기력 계산이 필요하다. 아울러 제한 조건을 만족시키는 동시에 선형영역이 확보되면서 자기력 또는 베어링 강성을 최대로 하는 설계 변수를 도출하기 위하여 체계적인 최적설계가 필

* 창원대 기계공학과

** 창원대 기계공학과 대학원

*** 한국기계연구원

요하다. 일반적으로 사용되는 최적설계의 해법인 1차, 2차의 접근법(1st, 2nd order method)^{(7),(8)}은 수학적인 어려움과 국부적인 최적치에 대한 문제를 안고 있다. 따라서 본 논문에서는 초고속 동작기계 주축용의 8극형 이극성(Heteropolar) 반경방향 자기 베어링의 설계를 위하여 최적화문제를 정립하고 자연선택과 유전학에 근거한 병렬적이고도 전역적인 탐색 방법인 0차(zero-order)의 유전자 알고리즘과 2차원 비선형 유한요소 자기장해석을 통한 정확한 자기력 계산과정을 접목하여 최적설계를 수행하였고 그 결과를 1차 민감도 해석법을 적용한 상용 최적설계 소프트웨어인 DOT의 결과와 비교하였다.

2. 이론 해석

2.1 유전자 알고리즘

유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)은 자연적 유전학을 인위적 전산학에 적용한 것으로 생물진화의 원리인 선택도태, 교차, 돌연변이에 착상을 얻은 알고리즘으로 확률적 탐색, 학습, 최적화의 1가지 방법으로 볼 수 있다.^{(5),(9),(10)}

유전자 알고리즘에 의해 생성되는 설계조건들은 상당부분 불용설계의 정보를 가지고 있어, 제약 최적설계문제를 유전자 알고리즘에 적용하기 위해서는 각 개체의 제약조건 만족여부와, 불만족시 그 벗어남의 정도를 평가해야할 필요성이 있다. 본 연구에서는 제약조건의 만족여부를 적합도(Fitness)의 일부로 처리하여, 불용영역에서의 탐색을 수행하는 동시에 유용영역으로의 유도를 겸하는 벌칙함수 방법을 채택하였다.⁽¹¹⁾ 이 방법은 제약 최적화문제에서, 제약조건을 벗어나는 경우에 벌칙항(Penalty term)을 부가하여, 그 평가를 정하는 것이다. 이 때 제약문제는 비제약문제(Unconstrained problem)로 전환하게 된다.

2.2 자기베어링의 설계식

Fig. 1은 8극형(N-S-N-S-N-S-N-S배열)의 이극성 자기 베어링(Heteropolar Magnetic Bearing)의 반경방향 단면을 나타내고 있다. 설계변수인 코어 다리의 폭 W_1 , 코어다리의 높이 H_1 및 코어의 축방향 폭 B_1 은 각각의 제한된 설계범위 내에서 유전자 알고리즘의 난수 발생에 의해 정의된다.

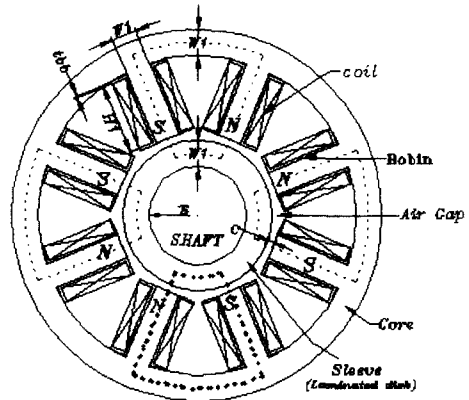


Fig. 1 Schematics of heteropolar magnetic bearing

8극형 자기베어링의 극과 극이 이루는 설계각(Design Angle) α 은 45° 이고, 1극에 감기는 코일의 수 N 은 다음과 같이 정의된다.

$$N = e_f \times nh_1 \times nd_1 \quad (1)$$

여기서 e_f 는 패키징요소(Packing factor)로 0.7로 정하였으며, 보빈의 높이에 쌓을 수 있는 권선수 nh_1 과 보빈의 폭에 쌓을 수 있는 권선수 nd_1 은

$$nh_1 = \frac{H_1 - 2 \cdot t_{bb}}{2 \cdot r_w} \quad (2)$$

$$nd_1 = \frac{1}{2 \cdot r_w} \left\{ (r_s + W_1 + c) \tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) - t_{bb} - \frac{W_1}{2} \right\} \quad (3)$$

으로 정해지고 여기서 t_{bb} 는 보빈과 보빈 사이의 간섭방지 틈새고, r_w 는 코일의 반경을 나타낸다. 그리고 베어링의 외경, OD 는 다음과 같다.

$$OD = 2 \times \{ r_s + (2 \cdot W_1) + c + H_1 \} \quad (4)$$

상·하부에 적용되는 바이어스 전류 I_{bT} 와 I_{bb} 는 Fig. 2의 B-H 곡선에서 직선부의 자장밀도 B_T 와 B_B 를 적용하여 계산되어 진다.

$$I_{bT} = \frac{C_f c B_T}{\mu_0 N}, \quad I_{bb} = \frac{C_f c B_B}{\mu_0 N} \quad (5)$$

여기서 c 는 공기간극, C_f 는 손실계수(=1.2) 및 μ_0 는 자유공간의 투자율이다.

자기베어링의 총 동력손실, P_T 은 공기마찰에 의한 손실과 철심손실에 의해 발생하며 다음과 같다.

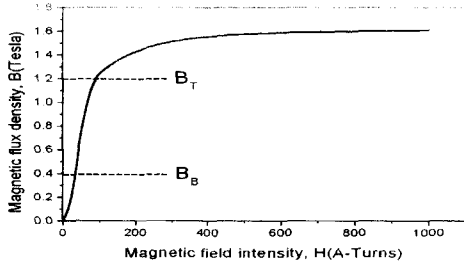


Fig. 2 The B-H curve for silicon steel

$$P_T = P_e + P_{ha} + P_{hr} + P_W \quad (6)$$

여기서 P_e 는 와전류 손실, P_{ha} 는 교번자속에 의한 히스테리시스 손실, P_{hr} 은 회전에 의한 히스테리시스 손실, 그리고 P_W 는 공기마찰에 의한 손실을 나타낸다. 각각의 동력손실은 Kasarda가 제시한 식⁽¹⁴⁾을 사용하였다. 코일의 저항에 의해 발생하는 열은 코일표면의 대류에 의한 열과 같으므로 코일에서 발생하는 온도 T_s ⁽¹⁵⁾는

$$T_s = \frac{(I_{bT} + I_{bB})^2 R}{2hA_{coil}} + T_\infty \quad (7)$$

여기서 h 는 공기의 대류계수, A_{coil} 는 코일의 표면적, R 은 코일의 저항, 그리고 T_∞ 는 대기온도이다.

자기베어링에서 Core 및 Sleeve의 재료인 규소강판의 투자율은 공기에 비해 매우 크므로 대부분의 리턴스는 공극에서 발생된다. 그러므로 1차원 자기장 해석시에 전자석 재질로 구성된 Core 및 Sleeve에서의 리턴스는 0이라고 가정하나, 실제로는 0이 아니므로 비선형 해석에 의한 최대힘은 선형 해석 결과보다는 일반적으로 작은값이 도출된다. 그리고 1차원 선형설계과정에서 최대힘을 얻기 위해서는 Fig. 2의 B_T 부근에서 선형 영역의 최대치를 선택하지만 그 B_T 부근이 B-H 곡선의 외관상으로 보이는 것보다는 상당한 비선형성이 존재하게 된다. 그러므로 B_T 부근 이상에서 제어력이 작용된다면 선형영역에서 보다 많은 제어 전류가 요구되어지게 될 수 있다.

2.3 자기장 해석(Magnetic Field Analysis)

2차원 자기장 경계치 문제의 해는 변분접근법

(variational approach)에 의해 범함수(functional) I 를 최소화시키는 자기벡터 A_z 이다.

$$I(A_z) = \int_\Omega \frac{1}{2\mu(B)} |\nabla A_z|^2 d\Omega - \int_\Omega A_z J_s d\Omega \quad (8)$$

여기서 $\mu(B)$ 는 전자석의 비선형 투자율이고 J_s 는 전류밀도를 나타낸다. 자기장 해석은 상용 소프트웨어 ANSYS, Rev.5.3을 이용, Plane13(4절점) 유한요소를 사용하여 비선형해석을 수행하였다. 그리고 자기력은 공기간극 주위의 자성체(Sleeve)의 절점에 가상 변위(Virtual displacements)를 적용하여 발생하는 가상일에 의해 ANSYS 후처리과정에서 국부 Jacobian 해석법으로 산출한다.

3. 유전자 알고리즘을 적용한 자기베어링 최적설계

3.1 최적화 문제 정립

본 연구에서 설정한 자기베어링의 최적화 문제는 자기베어링의 유한요소모델에 설계변수들의 다양한 조합을 적용하여 비선형 전자기장(Electro-magnetic Field) 해석을 수행하고 그 결과로 얻어진 자기력(Magnetic Force) $F_{M.F}$ 중에서 최대값을 가질 때의 설계변수를 찾는 것이다.

그리고 초고속 공작기계의 전체외경 및 베어링 지지부의 크기를 고려하여 자기베어링의 외경을 0.11m로 제한하였고, 에너지 손실이 최대 회전속도 60,000 rpm에서 750 W이 넘지 않도록 제한하였으며, 코일의 온도 상승은 코일 절연막을 손상시키므로 코일의 발열온도를 85℃로 제한하였다. 그리고 보빈의 크기와 코어 다리의 폭을 고려하여 보빈 밑부분에 5층 이상의 권선이 적층되도록 설계제한조건을 부여하였다. 따라서 본 연구에서 설정한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\text{Maximize } F_{M.F.}$$

$$OD \leq 0.110 (m), \quad P_T \leq 750 (W) \quad (9)$$

$$T_s \leq 85 (^\circ C), \quad n d_1 \geq 5$$

3.2 설계변수의 설정

자기력에 직접적인 영향을 미치는 3가지 인자, 즉 베어링의 축방향 길이(axial length), 코어 다리의 높이(leg height)와 코어다리의 폭(leg width)은

기하학적으로 상대적인 연관성을 가지고 있으므로 본 연구에서는 이 3개의 인자를 설계변수로 설정하였다. 초고속 공작기계 주축의 진장을 고려할 때 베어링의 축방향 길이 B_1 의 가용범위는 35~40.5mm로 제한되고, 코어 다리의 높이 H_1 은 축의 반경이 15mm임을 감안하여 15~21mm로 제한되며 그리고 코어 다리의 폭 W_1 은 8개의 극 배치와 보빈의 폭을 고려할 때 약 10mm 정도가 된다.

따라서 3개의 설계변수에 대한 설계제한구간을 식 (10)과 같이 정의하였다.

$$B_1 (m) : 0.035 \leq B_1 \leq 0.0405$$

$$H_1 (m) : 0.015 \leq H_1 \leq 0.021 \quad (10)$$

$$W_1(m) : 0.008 \leq W_1 \leq 0.014$$

설계변수의 구간이 정해지게 되면, 각 설계변수에 대한 정보를 가지는 염색체의 길이를 결정해야 한다. 염색체의 길이는 각 설계변수의 정보를 몇 개의 비트(Bit)로 나타내느냐의 문제이다. 본 연구에서는 3개의 설계변수에 대하여 B_1 , H_1 , W_1 에 각각 7, 7, 7의 비트(Bit)를 할당하여 전체 염색체 길이를 21로 하였다.

3.3 적합도 평가함수의 결정

유전자 알고리즘을 이용한 제약 최적설계문제 (Constrained optimization problem)의 경우, 제약조건 만족과 목적함수 최대화를 동시에 고려해야 한다. 이를 위해 본 연구에서는 정립된 최적화 문제로부터 적합도(Fitness)를 식 (11)과 같이 정의하고, 식 (12), (13), (14), 그리고 (15)와 같이 제약조건들이 한계를 벗어날 때, 그에 상응하는 벌칙계수(Pratio)를 가하므로 최적화가 이루어지도록 한다. 벌칙계수는 난수발생에 의해 생성된 30개의 설계변수들에 대한 제약조건 만족여부 및 자기력의 분포를 감안하여 결정한다. 여기서 *pratio*는 무차원 수로써 각 제한조건으로 설정된 값이 10% 벗어나는 것을 기준으로 연산결과로 얻어진 자기력을 1~15세대에는 -20%, 16~30세대에는 -50%, 31~45세대에는 -70%, 그리고 46세대 이상에서는 -80%를 감하게 하였다.

$$Fitness = F_{M.F} - P_1 - P_2 - P_3 - P_4 \quad (11)$$

$$P_1 = \left(\frac{OD - 0.11}{0.11} \right) \times pratio \quad \text{if } OD > 0.11 \quad (12)$$

$$P_2 = \left(\frac{P_T - 750}{750} \right) \times pratio \quad \text{if } P_T > 750 \quad (13)$$

$$P_3 = \left(\frac{T_S - 85}{85} \right) \times pratio \quad \text{if } T_S > 85 \quad (14)$$

$$P_4 = \left(\frac{5 - nd_1}{5} \right) \times pratio \quad \text{if } nd_1 < 5 \quad (15)$$

3.4 유전자 알고리즘을 이용한 최적 설계

유전자 알고리즘을 이용한 자기베어링 최적 설계는 Fig. 3과 같은 과정으로 벌칙함수가 0이 되면서 적합도가 수렴치를 나타낼 때까지 반복적으로 최적화를 수행한다.

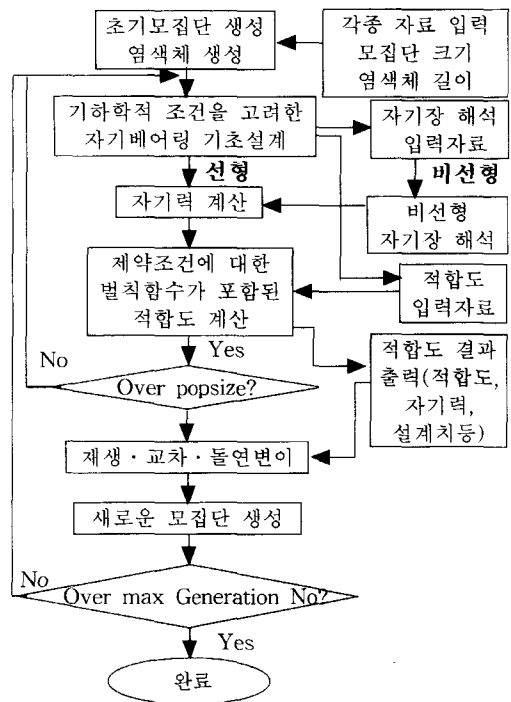


Fig. 3 Optimal design flow chart of the heteropolar magnetic bearing with G.A.

4. 결과 및 고찰

4.1 유전자 알고리즘에 의한 최적화

Fig. 4는 유전자 알고리즘에 의한 최적화 결과로써 각 세대별 최대 적합도를 나타내는데 세대가 증가할수록 진화에 의해 일정한 방향으로 증가하여 36세대(Generation)부터 선형해석에 의한 적합

도가 428.136값으로, 비선형에 의한 적합도가 401.517값으로 수렴해 가는 모습을 보여주고 있다.

자기력을 최대로 하기 위한 설계인자들을 탐색하는 과정에서 설계제한조건을 만족시키는 유용정보 뿐만 아니라 설계제한조건을 만족시키지 못하는 불용정보까지도 전역적으로 탐색하게 된다. Fig. 4는 벌칙계수가 0이 되도록 벌칙함수를 정하였으므로 적합도가 자기력이 된다.

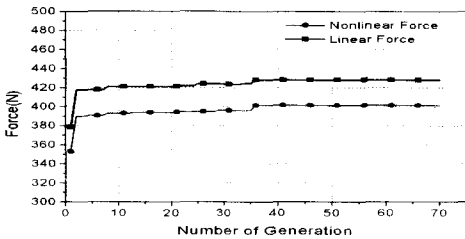
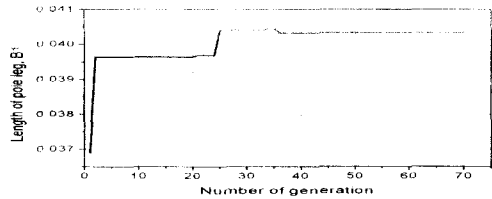


Fig. 4 Maximum fitness values in each generation

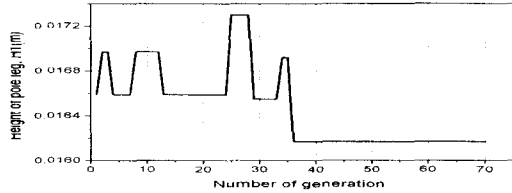
4.2 자기베어링 시스템의 최적구성

진화의 과정이 진행됨에 따라, 설계변수들의 값은 적합도를 증가시키는 방향으로 변화하게 된다. 주어진 세 가지 설계변수들이 점차 개선되어 최적값으로 수렴해 가는 과정을 Fig 5에 나타내었다. 설계변수들이 수렴해 가는 과정에서도 마찬가지로 해석초기에 불안정한 경향을 보이는 것은 초기세대에서 전영역을 탐색할 수 있도록 벌칙계수를 완화하였기 때문이다.

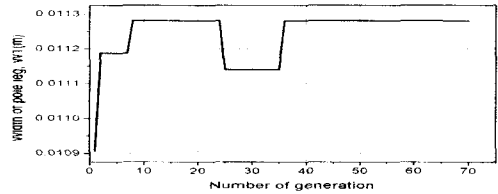
적합도가 수렴해 감에 따라 축방향 길이 B_1 은 자기력과 직접적인 연관을 가지는 극면의 면적을 최대로 하기 위하여 설계범위 내에서 최대값으로 수렴하는 경향을 보였고, 코어 다리의 높이 H_1 은 자기베어링의 외경 제한조건을 만족시키기 위하여 설계범위 내에서 최소값으로 수렴함을 보였다. 또한 코어 다리의 폭 W_1 은 자기베어링의 외경과 보빈의 폭에 대한 제한조건에 상당히 민감함을 나타내었다. Table 1은 최적설계라 인정되는 70세대에의 모집단에서 가장 높은 적합도에 대한 최적 설계변수 값이다. 이때 코일에서의 발열 온도는 79.5°C이고, 자기베어링에서의 총 동력손실은 741W이다.



(a) Changing of pole length



(b) Changing of pole height



(c) Changing of pole width

Fig. 5 Optimal design value in each generation

Table 1. Optimal design values for design variables

설계 변수	최적값(m)	설계 관련변수	최종치
축방향길이	0.04032813	코일 감긴 회수	112
코어다리높이	0.01617188	상부 바이어스 전류(A)	4.093
코어다리 폭	0.01128125	하부 바이어스 전류(A)	1.364
최종 적합도 (최대 자기력, N)	비선형해석 결과 : 401.517 선형해석 결과 : 428.136		

4.3 최적화 설계의 검증

Table 2 Several initial values for DOT

	B1 (m)	H1 (m)	W1 (m)
case 1	0.036	0.017	0.01
case 2	0.035	0.015	0.008
case 3	0.0405	0.021	0.014
case 4	0.03775	0.018	0.011

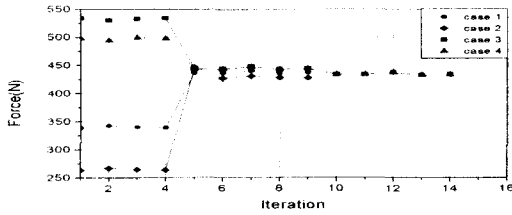


Fig. 6 DOT Optimal value at each case

1차원 자기장 회로해석에 의한 자기력 산출식과 민감도해석을 이용한 상용 최적화 프로그램인 DOT에 동일한 최적화 문제를 적용하여 최적설계를 수행한 결과, Fig. 6에서 보는 바와 같이 초기치가 다른 경우 자기력은 조금씩 다르게 수렴하지만 각 경우에 대하여 최대 수렴값이 약 430 N 정도로 유전자 알고리즘의 선형 결과와 거의 유사하므로 유전자 알고리즘을 적용한 최적화 프로그램을 검증할 수 있었다.

5. 결론

- (1) 유전자 알고리즘을 이용한 최적화 기법에 비선형 자기장 해석과정을 포함시켜 일반적인 8극형 이극성 반경 방향 자기베어링의 체계적인 최적설계를 수행하였고, 상용 소프트웨어 DOT와 비교함으로써 이를 검증하였다.
- (2) 민감도 해석에 의한 일반적인 최적 설계에서 발생하는 극부 최소화 문제를 0차 전역 탐색법인 유전자 알고리즘을 적용한 최적 설계법을 이용함으로써 극복할 수 있다는 가능성을 확인하였다.
- (3) 비선형성이 포함된 설계를 수행함으로써 지금까지의 선형영역에서의 설계에서 발생하는 오차를 어느 정도 줄일 수 있는 효과가 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

1. Bleuler, H., "Survey of Magnetic Levitation and Magnetic Bearings Type," J. of JSME III, Vol. 35, No.3, pp335~342, 1992.
2. 하영호, 이종원, "지능형 마그네틱 베어링," J. of KSME Vol. 34, No.10, pp. 742~755. 1994.

3. Brunet, M., "Practical Applications of the Active Magnetic Bearings to the Industrial World," Proc. of the 1st Int. Symp. on Magnetic Bearings, pp.225~244, 1988.
4. Dussaux, M., 1990, "Industrial Applications of the Active Magnetic Bearings Technology," Proc. of the 2nd Int. Symp. on Magnetic Bearings, pp.33~38, 1990.
5. 北野 宏明, "유전자 알고리즘," 대청정보시스템, 1996.
6. Kim, C., "Magnetic Bearing Eddy Current Effects on Rotordynamic System Response," Ph.D. Thesis, Mechanical Engineering, Texas A&M University, 1995.
7. Imlach, J., Allaire, P.E., Humphris, R.R., Baret, L.E., "Magnetic Bearing Design Optimization," IMechE, pp53~59, 1988.
8. Pang, D., Kirk, J. A. An and, D.K. and Huang, C., "Design Optimization for Magnetic Bearing," Proc. of the 26th IECEC, USA, Vol.35 No.4, pp186~191, 1991.
9. David E. Goldberg, "Genetic Algorithm in search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1989.
10. Zbigniew Michalewicz, "유전자 알고리즘," 도서출판 그린, 1996.
11. 황상문, "유전자 알고리즘을 이용한 동역학적 시스템의 최적설계에 관한 연구," 창원대학교 기계공학과 석사학위 논문, 1997.
12. Vanderplaats Research & Development, Inc., "DOT Users Manual version 4.20" 1995.
13. ANSYS, "Magnetics," User's Guide for Revision 5.0A, Swanson Analysis System, Inc., Vol. I, DN-S231, Houston, PA 15342, 1994.
14. Mary E.F. Kasarda, "The Measurement and Characterization of Power Losses in High Speed Magnetic Bearings," Ph.D. Thesis, Mechanical and Aerospace Engineering, Virginia University, pp. 21~26, 1997.
15. Shankar Jagannathan, "Analysis and Design of Magnetic Bearings," Master Thesis, Mechanical Engineering, Virginia University, pp. 27~30, 1991.