진화론적 방법을 이용한 누설자속이 큰 부상용 전자석 설계

임형우, 차귀수
순천향대학교

Design of a levitation magnet with large flux leakage by using evolution strategy

Hyoungwoo Lim, Gueesoo Cha
Soonchunhyang University

Abstract - This paper shows the design of a levitation magnet for an OLED system which has a large air gap. Evolution strategy was adopted for the optimization of the magnet system. During the optimization process, interpolation of levitation force was used to reduce the computation time which was needed to calculate the levitation force. Object function for optimization was total weight of the magnet system

1. 서 론

근래에 들어 산업과 기술이 발달함에 따라 기존의 기계력을 이용했던 부분들이 정밀 및 제품의 불량률을 줄이기 위해 전자력을 이용하는 방향으로 노력하고 있다. 그 중 한 부분으로 OLED(Organic Light-Emitting Diode)를 들 수 있다. 기존의 증착 시스템은 기계적인 힘에 의존하여 마스크 프레임과 글래스 프레임이 운송되고 증착 위치를 정하므로 기계적 접촉으로 인해 미세한 먼지, 마모, 진공 누설 등의 문제를 발생 시킨다. 따라서 기계적 접촉이 없는 자기 시스템을 이용하여 OLED 마스크 패턴 등의 증착을 할 경우 먼지로 인한 제품의 불량을 줄일 수 있고 진공의 누설역시 감소시킬 수 있으며, 또한 기계적인 마모가 없으므로 유지보수가 필요하지 않다.[1]

본 연구에서는 공극이 20mm인 OLED 제작시스템에서 패턴 증착을 시키기 위해서 사용되는 유리를 싸고 있는 프레임과 마스크를 싸고 있는 프fp임을 들어올리는데에 사용되는 프로토타입 부상용 전자석을 진화론적 방법을 사용하여 최적화 설계를 하였다. 등가회로법을 이용해서 개략적인 초기설계를 수행하였고 이로부터 필요한 부상력을 발생시키는 조건하에서 전자석의 무게가 최소가 되도록 최적설계를 수행했다. 설계변수로는 전자석 각의 폭과 코일의 단면적을 설정하고 프레임을 부상시키기 위해서 일정한 값 이상의 부상력이 발생하도록 했다.

2. 초기설계 결과

본 연구에서 설계하는 OLED 제작시스템용 프로토타입 부상용전자석은 무게가 4.0kg인 프래임을 자기적으로 부상시키기 위한 것으로 전자석과 프레임 사이의 공극이 20mm로 유사한 규모의 전자석에 비해서 대단히 큰 것이 특징이다. 전자석에 의해서 부상되는 프레임의 높이, 폭 그리고 z방향 길이는 각각 30mm, 210mm 그리고 80mm이다. 전자석의 전체적인 크기는 폭, 높이, z방향 길이가 각각 130mm, 59.4mm, 40mm이고 기자력은 4375AT이다. 그림 1은 부상용 전자석 시스템의 구조이고 등가회로법을 이용해서 설계를 수행해서 얻은 초기 사양은 표 1과 같다. 무게를 계산할 때에 철심의 비중과 구리의 비중은 각각 7.8과 8.9로 잡았다. 설계하고 있는 부상용 전자석 시스템은 공극이 대단히 커서 $B^2/2\mu_0$에 철심의 단면적을 곱해서 부상력을 계산하면 오차가 크기 때문에 유한요소법을 사용해서 등가회로법으로 설계된 전자석시스템의 부상력을 계산한 결과 부상력은 47.6N이었다.

그림 2의 a는 전체 자속 밀도 분포이고 b는 프레임 바로 위 부분 공극에서의 자속밀도를 보인 것으로, 프레임의 왼쪽 끝에서 오른쪽 끝까지를 따라 가면서 프레임의 위쪽으로 0.1mm 올라온 공극 부분에서의 자속밀도의 y방향 성분을 나타낸 것이다. 그림에서 굵은 선으로 표시된 두 부분이 철심의 왼쪽 각(40mm ~ 65mm)과 오른쪽 각(145mm ~ 170mm)이 위치하는 곳이다. 공극이 크기 때문에 자속이 퍼지는 프린징 현상 역시 증가되어 자속이 철심각의 아래에 집중되지 않고 퍼지는 것을 볼 수 있다. 프레임의 양쪽 끝부분에서 자속밀도의 변화가 심한 것은 프레임의 밖에서 안으로 들어오는 자속 때문이다. 공극부분에서의 최대자속밀도는 178mT로 철심에서의 최대자속밀도의 25% 밖에 되지 않아 누설자속이 상당히 많은 것을 알 수 있다.

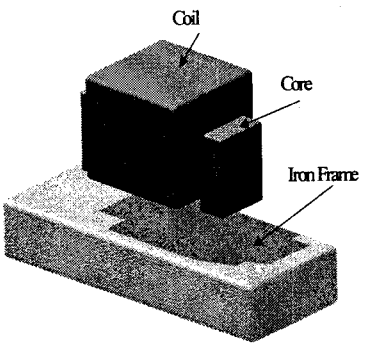
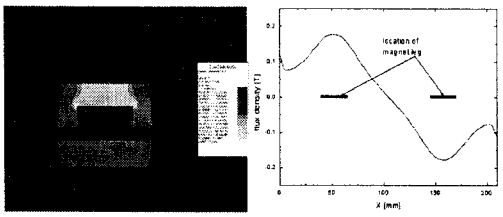


그림 1. 부상용 전자석 시스템

표 1 최적화 설계 전의 전자석 사양

창의 폭	80mm
창의 높이	18.8mm
각의 높이	25mm
코일의 높이	15.6mm
코일의 점적률	0.7
철심의 폭	130mm
철심의 높이	43.7mm
철심의 Z방향 길이	40mm
권선수	649turn
코일의 무게	2.15kg
철심의 무게	1.31kg



(a) (b)

그림 2. 초기 사양의 자속밀도 분포

3. 진화론적 방법

최적화 설계에 많이 사용되는 비 결정론적 최적화 기법으로는 genetic algorithm, simulated annealing, evolution strategy 등을 들 수 있다. genetic algorithm은 환경의 변화에 적응하여 생존하는 생명체의 적응 진화과정을 모사한 방법이고, simulated annealing은 금속의 제련과정 중 풀림 과정을 통해 금속이 최대한 안정된 에너지 상태가 되는 과정을 본 뜬 방법이다. evolution strategy는 genetic algorithm과 simulated annealing을 합성한 방법으로 비결정론적 방법 중에서는 수렴특성이 가장 빠르다.[2][3]

본 연구에서는 여러 변수에 대해서 수학적인 규명이 잘 되어 있고 알고리즘이 간단하면서도 수렴속도도 빠른 편인 (1+1) 진화론적 방법을 사용해서 최적설계를 수행했다. (1+1) evolution strategy에서는 임의로 선정된 부모세대의 모델 변수 벡터 X_p에서 자식 세대의 모델 변수 X_c를 발생시키는 데 이 과정은 식(1)에 의해서 이루어진다.

$$X_c(i)=X_p(i)+\alpha(i)\times R(i) \tag{1}$$

여기서 $R(i)$는 평균값이 0이고 (-1, 1)에서 균등분포를 갖는 확률밀도 함수에 의해 발생되는 난수이며, $\alpha(i)$는 $X_p(i)$를 중심으로 한 변화 가능폭을 나타낸다. 그리고 i는 세대이다. 부모세대 변수인 $X_p(i)$와 자식세대 변수인 $X_c(i)$에 대한 목적함수 값을 각각 $F_p(i)$와 $F_c(i)$라 하면 다음 부모세대인 $X_p(i+1)$는 다음과 같이 정해진다.

$$X_p(i+1)=\begin{cases} X_c(i), & \text{if } F_c(i)<F_p(i) \\ X_p(i), & \text{if } F_c(i)\geq F_p(i) \end{cases} \tag{2}$$

이 과정은 재생산과 변이과정이고 풀림과정을 묘사한 과정은 변화폭에 따라서 큰 차이가 있으므로 변화폭을 적절히 조정해야 한다. 목적함수의 값이 크게 변하는 부분에서는 변화폭을 증가시켜 수렴속도를 빨리하는 것이 유리하고 최소값 근처에 도달해서 목적함수의 변화가 적은 부분에서는 변화폭을 감소시켜 최소값을 정확히 찾아야 한다. (1+1) evolution strategy에서는 현세대로부터 이전 10세대 동안의 재생산 과정에서 변이가 일어난 회수 K를 계산하여 다음과 같이 변화폭을 변화시킨다.[4]

$$\alpha=\begin{cases} \alpha(i)/0.85, & \text{if } K>10\times N/5 \\ \alpha(i)\times 0.85, & \text{기타} \end{cases} \tag{3}$$

여기서 N은 설계변수의 수이다. 그림 3는 진화론적 방법의 흐름도로서 현세대로부터 이전 10세대 동안의 재생산 가정에서 변이가 일어난 회수 K를 계산하여 다음과 같이 변화폭을 변화시키고 있다.

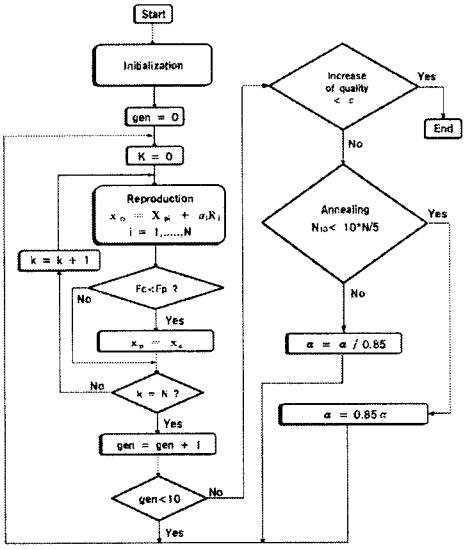


그림 3. evolution strategy의 흐름도

4. 유한요소법을 이용한 목적함수 계산

부상용 전자석의 최적화 과정에서 부상력을 계산할 필요가 있기 때문에 계산시간을 줄이기 위해서 초기설계치 근처에서의 부상력을 미리 유한요소법으로 그림 4와 같이 일정한 간격마다 구했다. 최적화 과정에서 필요한 격자점 이외에서의 부상력은 격자점에서 구한 부상력으로부터 식(4) - 식(6)을 이용해서 구했다.

$$f_1=f(i,j)+\frac{f(i+1,j)-f(i,j)}{x_{step}}\times\Delta x \tag{4}$$

$$f_2=f(i,j+1)+\frac{f(i+1,j+1)-f(i,j+1)}{x_{step}}\times\Delta x \tag{5}$$

$$F(x,y)=f_1+\frac{f_2-f_1}{y_{step}}\times\Delta y \tag{6}$$

여기서 x_{step}는 x방향 격자점 사이의 거리이고 y_{step}은 y방향 격자점 사이의 거리이다.

5. 부상용 전자석의 최적 설계

OLED 제작시스템에서 부상용 전자석은 시스템의 특성상 지지하는 것이 어려우므로 가능한 한 무게가 가볍도록 해야 한다. 본 설계에서는 이를 고려하여 전자석의 무게를 목적함수로 설정하고 이것이 최소가 되도록 했다. 설계변수로는 철심 각의 폭과 코일의 단면적을 설정하였고, 전자석 부상력은 프레임을 부상시키는데 필요한 부상력 이상으로 잡아서 초기 부상력 47.6N 이상의

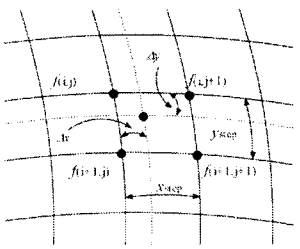


그림 4 격자점의 부상력으로부터 임의 점의 부상력을 구하는 방법

부상력이 발생하는 경우만 선택했고 철심의 단면적은 초기단면적보다 커지지 않도록 철심각의 z방향 길이를 조절했다. 또 최적화과정에서 창의 폭은 80mm로 고정했고 프레임 밖에는 전자석 구조물을 설치할 수 없다는 제약요건 때문에 전자석 코일의 단부권선을 포함한 전자석 코일의 z방향 길이가 프레임의 z방향 길이인 80mm를 넘지 않도록 했다. 위와 같은 부등호 제약조건을 정리하면 다음과 같다.

1) $F \geq 47.6$ N
2) 코일을 포함하는 전자석의 z방향 길이 ≤ 80mm
3) 철심의 단면적 ≤ 초기단면적

최적설계 시에 목적함수로 잡은 전자석의 전체 무게는 6.7% 감소했으며, 부상력은 초기부상력 47.6N과 차이가 없었다. 표 2는 최적설계의 결과이다. 전자석을 구성하는 철심의 무게는 30.5% 감소했으나 코일의 무게는 7.9% 증가하여 철심을 줄이고 코일을 증가시키는 방향으로 최적화가 진행되었다. 그림 5은 목적함수로 설정한 전자석의 무게가 변화하는 과정을 나타낸 것이고 그림 6은 전자석을 구성하는 철심의 무게와 코일의 무게가 변화하는 과정을 보인 것이다. 그림 7는 부상력이 변화하는 과정이고 그림 8는 철심의 z방향 길이가 변화하는 과정이다. 철심의 z방향 길이는 40mm에서 37.6mm로 6.0% 감소해서 전자석의 무게를 줄이는 데 기여를 했다.

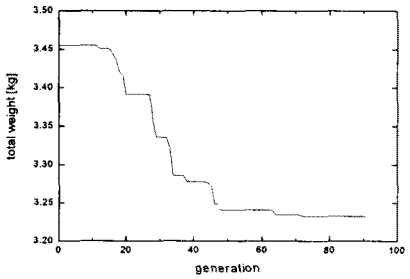


그림 5. 목적함수가 변화하는 과정

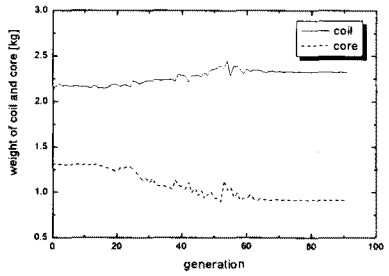


그림 6 철심과 코일의 무게가 변화하는 과정

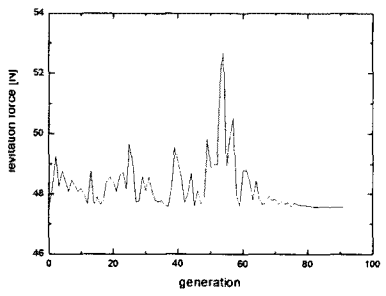


그림 7 부상력이 변화하는 과정

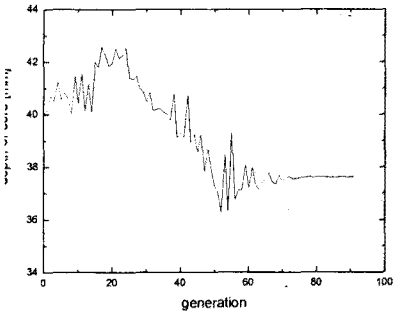


그림 8 철심의 z방향 길이가 변화하는 과정

표2 최적화설계 후의 전자석 사양

창의 폭	80mm
창의 높이	21.2mm
각의 높이	19.3mm
코일의 높이	17.7mm
코일의 점적률	0.7
철심의 폭	118.5mm
철심의 높이	40.4mm
철심의 Z방향 길이	37.6mm
권선수	767turn
코일의 무게	2.32kg
철심의 무게	0.91kg

6. 결 론

공극이 큰 부상용 전자석에서는 누설자속이 많기 때문에는 등가회로법을 사용하면 오차가 많이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 진화론적 방법을 사용해서 공극이 큰 부상용 전자석의 최적설계를 수행했다. 최적설계 결과에 의하면 초기설계에 비해 전자석시스템의 무게가 6.7% 감소했다. 본 연구를 통해서 제시한 최적설계 과정은 공극이 큰 부상용 전자석을 설계할 때에 도움을 줄 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 지방기술혁신사업 (RTI04-01-02) 지원으로 수행되었음

[참 고 문 헌]

1. Zenken, Hirotake kajii, Yutaka Ohmori, "Pattering of organic loght-emitting diodes utilizing a sputter deposited amorphous carbon nitride buffer layer," Thin Solid Films, 499, 2006, pp. 392-395.
2. K. Preis, C. Magele, and O. Biro, "FEM and Evolution Strategies in the Optimal Design of electromagnetic Devices," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.27, No.5, pp.2181-2183, 1990.
3. D. Jeon, D. Kim, S. Hahn, and G. Cha, "Optimal Design of a Linear Synchronous Motor using Evolution Strategy Combined with Stochastic FEM," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.35, No.3, pp.1734-1737, 1999.
4. M. Kasper, "Shape Optimization by Evolution Strategy," IEEE Trans. on Magnetics, Vol.28, No.2, pp.1556-1559, 1992.