

영전식 Magnetic Lifter의 최적 설계

천장성 · 정현교

서울대학교 전기공학과 전기역학 연구실
서울특별시 관악구 신림동 56-1, 151-742

최승덕 · 양충진

산업과학기술연구소 전자소재 연구팀
경북 포항시 효자동 산 32, 790-330

(1995년 12월 6일 받음, 1996년 3월 5일 최종수정본 받음)

본 논문에서는 영전식 magnetic lifter의 최적 설계 방법을 제시하였다. 등가 자기회로법으로 흡착시와 탈착시의 자장 해석 및 전자역 계산을 행하였고, 최적 설계를 위해 등가 자기회로법으로 해석된 흡착시의 전자력을 최대화 하는 lifter의 치수를 구하였다. 또한 흡착시의 전자력을 제한 조건으로 하여 lifter 전체의 부피를 최소화 하는 치수를 찾았다. 위의 최적 설계를 위한 최적화 알고리즘으로는 (1 + 1) Evolution Strategy(ES)를 이용하였다. 또한 상용 자장해석 프로그램(MAXWELL)을 사용하여 얻은 결과와 위의 최적화 결과를 비교하여 본 논문의 최적화 방법의 타당성을 검증하였다.

I. 서 론

자성체를 들어올리기 위한 lifting 시스템으로 지금까지는 전동식 또는 유압식으로 구동되는 형태의 시스템이 주로 사용되어졌다. 그러나, 최근에 선진 외국에서는 영구자석과 전동식을 이용한 영전식 시스템이 개발되어 사용되고 있다. 영전식 magnetic lifter는 전동식이나 유압식 시스템에 비해 기구적으로 소형, 경량화가 가능하고, 전기적으로는 전력 소모 감소와 무정전대비의 장점이 있다.

본 논문에서는 이러한 특징을 가지는 영전식 magnetic lifter를 등가 자기회로법을 이용하여 정확한 자장 해석을 하고, 이를 바탕으로 하여 전자력을 계산한다. 또한 본 모델의 최적 설계를 위해 최적화 기법 중의 하나인 (1 + 1) evolution strategy (ES)을 이용하여 사용자의 목적에 맞는 최적의 lifter를 설계하는 방법을 제시한다.

뿐만 아니라, 본 최적 설계의 타당성을 검증하기 위하여 상용 자장 해석 유한요소 프로그램(MAXWELL)을 이용하여 동일 모델에 대해 자장 해석 및 전자력 계산을 하고, 이를 등가 자기회로법에 의한 결과와 비교하여 본 논문이 제시한 방법의 타당성을 확인한다.

II. 영전식 Magnetic Lifter

영전식 시스템은 일반적으로 시스템 내의 모든 자석이 일정한 방향의 자속만을 만들어 내는 자석을 사용하는 것

이 아니라 흡착(물체를 들어올리는 동작), 탈착(물체를 떼어내는 동작)이라는 lifting 시스템의 기본 운전을 행하기 위하여 일정 방향의 자속을 만드는 고정 영구자석과 착자에 의해 자화 방향이 바뀌는 가변 영구자석 등 크게 두 종류의 영구자석이 사용되고 있다. Fig. 1에 본 논문에서 해석한 모델의 평면도를 나타내었다.

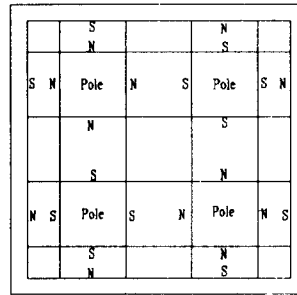


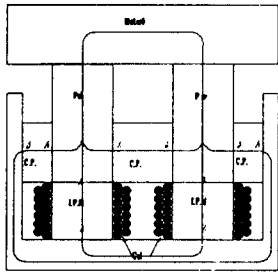
Fig. 1. Plane figure of permanent magnet type lifter

영전식 magnetic lifter의 동작은 크게 흡착시의 동작과 탈착시의 동작으로 나눌 수 있다. 흡착시에는 고정 영구자석과 가변 영구자석의 자속이 한데 모아져서 철심을 통하기 때문에 적절한 계산에 의해 설계된 '공극'(철심과 물체가 맞닿는 부분)에서의 자속 밀도를 철심의 포화 자속 밀도까지 이르게 한다면 최고의 전자력을 나타내게 된다. 이러한 흡착 동작시 물체 및 lifter 외곽은 자속의 통로가 된다. Fig. 2(a)는 흡착시의 자속의 흐름을 나타내

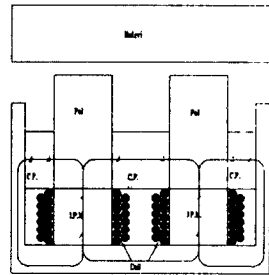
고 있다.

탈착시에는 먼저 물체가 lifter에 고정되어 있는 상태에서 가변 영구자석 주위에 권선된 코일에 전류를 흘려 가변 영구자석의 자화 방향을 흡착시와는 반대로 만든다. 이렇게 되면 철심을 통하여 흐르던 자속은 Fig. 2(b)에 보여지는 것처럼 고정 영구자석, 가변 영구자석, lifter 외곽으로만 흐르게 되어 물체는 떨어지게 된다.

따라서, 위의 흡, 탈착시의 동작을 반복함으로써 원하는 물체의 이동이 가능하게 된다.



(a) flux flow at gripping operation



(b) flux flow at releasing operation

Fig. 2. Operation of permanent magnet type lifter

Ⅲ. 해석 이론

3. 1. 영구자석의 동작점 결정

영구자석 자기회로의 계산은 감자 특성 또는 recoil 선상에 대한 자석 동작점의 결정이 기본이 된다. 따라서, 자석 외부의 자기회로의 자기저항 또는 퍼미언스를 알면 자석 동작점을 결정할 수 있다. 외부 자로의 퍼미언스를 P , 자석의 평균 단면적 및 자화 방향길이를 각각 a_m 및 l_m 이라 하면, 등가 회로의 퍼미언스계수 p 는,

$$p = \frac{l_m}{a_m} P \quad (1)$$

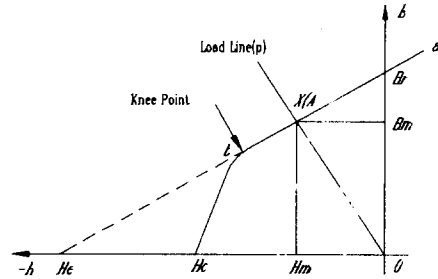


Fig. 3. Determination of operating point

이 값을 알면 자석 동작점을 결정할 수 있다. 자석의 동작은 항상 제 2상한에서 이루어지며, 퍼미언스계수 p 를 주면, 퍼미언스분석(부하선)이 결정된다. Fig. 3은 영구자석의 동작점이 결정되는 방법을 도식적으로 나타낸 것이다. op 가 직선의 동작점 결정의 퍼미언스선이며 점 A 또는 X 가 동작점이 된다.

3. 2. 등가 자기회로법

영구자석이 포함된 자기회로의 자장 해석에는 오래 전부터 자기회로법이 사용되어 왔다. 이 방법은 영구자석을 기자력원으로, 자속의 통로를 자기저항으로 등가화하여 자기회로의 자속을 계산하는 방법이다.

영구자석이 포함된 가장 간단한 형태의 자기회로를 생각하자. (Fig. 4) 이 회로에서 다음과 같이 관계식이 성립한다.

$$\phi_m = B_m \cdot A_m = \sigma \cdot B_g \cdot A_g \quad (2)$$

$$H_m \cdot l_m + f \cdot H_g \cdot l_g = 0 \quad (3)$$

여기에서

ϕ_m : 영구자석에서 나오는 자속 [Wb]

B_m : 자석에서의 자속밀도 [Wb/m²]

B_g : 공극에서의 자속밀도 [Wb/m²]

A_m : 자석에서 자속이 통과하는 단면적 [m²]

A_g : 공극의 단면적 [m²]

l_m : 자석의 자화방향 길이 [m]

l_g : 공극의 길이 [m]

σ : 자속 누설 계수 (leakage factor) ($\sigma \geq 1$)

f : 자기 저항 계수 (reluctance factor) ($f \geq 1$)

위에서 자속 누설 계수 σ 는 공극에서의 유효 자속과 자석에서 나오는 전자속과의 비이고 자기 저항계수 f 는 공

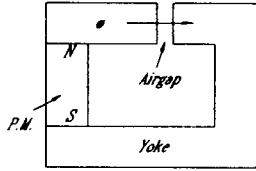


Fig. 4. Simple magnetic field system

극의 자기저항과 요크의 자기저항의 비에 의해 결정된다. Fig. 3의 ab 구간에서는 다음 식이 성립한다.

$$B = \mu_0 \cdot [H + M \cdot (H)] \quad (4)$$

여기서

$$M \cdot (H) \cong M_r + x \cdot H \quad (5)$$

따라서

$$\begin{aligned} B &= \mu_0 \cdot M_r + \mu_0 \cdot (1 + x) \cdot H \\ &= B_r + \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다. 이때 μ_r 은 1.05 ~ 1.1이다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음 식이 성립한다.

$$\begin{aligned} B_m &= \frac{\sigma \cdot A_g}{A_m} \cdot B_g \\ &= \mu_0 \cdot \frac{\sigma}{f} \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{l_m}{l_g} \cdot (-H_m) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)은 직선의 방정식이고 이것을 Fig. 3에 표시하면 직선 op (부하선)가 된다. 따라서 직선 op 와 감자 곡선 ab 의 교차점 $X(A)$ 가 동작점이 된다. 동작점 $X(A)$ 가 결정되면 Fig. 3에서 B_m 과 H_m 이 결정되고 식 (2)로부터 B_g 를 구할 수가 있다.

Fig. 3의 동작점 $X(A)$ 에서 아래의 식들이 성립한다.

$$\begin{aligned} \mu_0 \cdot M_r + \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H \\ = -\mu_0 \cdot \frac{\sigma}{f} \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{l_m}{l_g} \cdot H_m \end{aligned} \quad (8)$$

$$H_m = \frac{-M}{\mu_r + \frac{\sigma}{f} \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{l_m}{l_g}} \quad (9)$$

$$B_m = \frac{\mu_0 \cdot \frac{\sigma}{f} \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{l_m}{l_g}}{\mu_r + \frac{\sigma}{f} \cdot \frac{A_g}{A_m} \cdot \frac{l_m}{l_g}} \cdot M_r \quad (10)$$

$$\phi_m = A_m \cdot B_m = \frac{\frac{l_m}{\mu_r} \cdot M_r}{\frac{l_g}{\mu_0 \cdot \sigma \cdot A_g} + \frac{l_m}{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot A_m}}$$

$$= \frac{l'_m \cdot M_r}{\frac{l'_g}{\mu_0 \cdot A'_g} + \frac{l'_m}{\mu_0 \cdot A'_m}} + \frac{F'_m}{R'_g \cdot R'_m} \quad (11)$$

식 (11)을 등가 회로로 표시하면 Fig. 5와 같이 된다. 여기서 F'_m 는 등가 기자력으로써 다음식으로 표현된다.

$$F'_m = \frac{l_m}{\mu_r} \cdot M_r = l'_m \cdot M_r \quad (12)$$

마찬가지로 R'_g 는 등가 공극자기저항으로

$$R'_g = \frac{l'_g}{\mu_0 \cdot A'_g} \quad (13)$$

의 관계를 만족하고 등가 영구 자석 자기저항은

$$R'_m = \frac{l'_m}{\mu_0 \cdot A'_m} \quad (14)$$

이다.

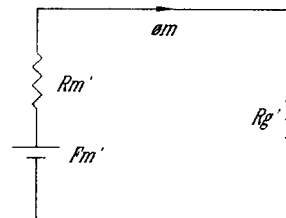


Fig. 5. Equivalent magnetic circuit of a simple magnet field system

3. 3. 등가 회로의 구성 및 시스템 행렬의 계산

3. 2절의 자기회로 해석 방법을 본 연구의 대상 모델에 적용할 때, 회로 각 부의 파라미터는 3. 2절의 식으로부터 결정된다. 이렇게 구성된 등가 자기회로는 이미 전기회로화 되었으므로 전기회로의 해석 방법을 그대로 적용하면 쉽게 계산이 가능하다. 우선 등가 자기회로에서 각 절점 (node) 별로 마디 방정식을 구성한다. 즉, ‘한 절점으로 들어오는 전류(자속)의 총량과 나가는 전류(자속)의 총량은 동일하다.’는 관계로부터 각 절점에 대해 하나씩의 방정식이 구성되게 된다. 이렇게 구성된 각 방정식을 전 절점에 대해 표현하게 되면

$$[] [] [] \quad (15)$$

이 된다. 여기에서, $[P]$: 퍼미언스 행렬
 $[F]$: 기자력 행렬
 $[F_m]$: 가자력원 행렬
 을 나타낸다.

위의 (15)식의 계산은 간단한 수치 계산 방법에 의해 쉽게 계산된다. 본 논문에서는 Gauss Elimination Method를 사용하여 계산하였다. 우선 식 (14)를 계산하면 각 절점의 전위(기자력)가 계산된다. 이것은 어떤 기준에 대한 상대적인 기자력을 표시하는 값이 되며, 이 기자력의 차와 자기 퍼미언스의 곱이 그 통로를 통과하는 자속이 된다.(전류) 또한 이렇게 계산된 자속을 통과 단면적으로 나누게 되면 이 값이 바로 자속밀도이다. 본 연구의 해석에서 가장 중요한 핵심 부분은 전자력의 계산인데, 이는 다음 식으로 계산될 수 있다.

$$F = \frac{B^2}{2 \cdot \mu_0} \quad (16)$$

여기서, A 는 총단면적을 의미한다.

즉, 공극에서의 자속밀도를 구하고 철심의 총단면적을 계산하면 식 (16)에 의해 흡착시의 총 전자력을 알 수 있다.

IV. (1 + 1) Evolution Strategy

ES는 비결정론적 최적화 기법(확률 개념의 최적화 기법) 중의 하나로 자연의 진화 과정을 모사한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)과 금속의 구조가 안정화되는 과정(금속 재련 과정 중의 풀림 과정)을 모사한 Simulated Annealing(SA)을 결합한 것이다.

이 방법을 구성하는 세 가지 과정은 재생산, 변이 및

annealing이다. 재생산은 부모 세대로부터 자식 세대가 형성되는 과정을 모사한 것이고, 변이는 돌연변이의 과정을 응용한 것이다. 그리고 annealing은 주어진 온도(환경)에서 가장 안정된 분자구조를 형성하는 과정을 나타낸 것이라 할 수 있다.

본 논문에서는 부모 세대와 자식 세대의 집합이 각각 1개씩인 (1 + 1) ES를 사용하였다. 적당히 선정된 부모 세대의 모델 변수 벡터 x_p 로부터 자식 세대의 모델 변수 벡터 x_c 가 생성되는 과정은 다음과 같다.

$$X_{ci} = X_{pi} + \alpha_i \cdot R_i \quad (17)$$

여기에서, R_i 는 평균값이 0이고 (-1, +1)에서 균등 분포를 가지는 확률 밀도함수에 의해 발생되는 난수이며, α_i 는 X_{pi} 를 중심으로 한 변화가능폭(step size)을 나타낸다.

부모 세대의 X_p 와 자식 세대의 X_c 에 해당하는 목적함수값을 각각 F_p 와 F_c 라 하면 다음 부모 세대 X_p 는

$$X_p = \begin{cases} X_c & : F_c < F_p \\ X_p & : F_c \geq F_p \end{cases} \quad (18)$$

로 정해지는데 이 과정은 변이를 모사한 것이다.

한편 annealing의 기능은 최적화 과정에서 변화가능폭 α 를 적절히 조절함으로써 반영될 수 있는데, 본 연구에서는 현 세대로부터 이전 10세대 동안의 재생산 과정에서 변이가 일어난 회수($F_c < F_p$ 가 발생한 회수)를 계산하여 다음과 같이 조절하였다.

$$X_p = \begin{cases} \alpha \cdot 0.85 & : N_{10} > 10 \cdot N/5 \\ \alpha/0.85 & : N_{10} \geq 10 \cdot N/5 \end{cases} \quad (19)$$

여기서 N 은 설계 변수의 개수이다.

위의 같은 (1 + 1) ES 알고리즘을 본 연구 대상 모델에 적용할 때, 최적화하려는 lifter의 치수가 최적화의 독립변수가 된다. 본 논문에서는 자석의 치수, 철심의 치수만을 독립변수로 하였다. 그리고, 전자력과 부피를 최적화의 목적값으로 하였다.

V. 최적화 결과

본 절에서 행하는 최적 설계는 가변 영구자석을 Alnico로, 고정 영구자석을 Sm_2Co_{17} 로 사용한 모델을 대상으로 하였다. 그리고, 두 가지 경우에 대해 최적화를 하

였다. 그 하나는 일정 크기의 lifter 내에서 전자력을 최대한으로 하는 최적화이고, 또다른 하나는 전자력의 제한 조건을 가지면서 전체 부피를 최소로 하는 최적화이다.

5. 1. 전자력 최대화의 치수 최적화

최적화를 위한 제한 조건은 다음과 같다.

1. lifter 전체의 크기는 일정하다.
2. lifter 각 부의 형상은 모두 동일한 직사각형의 형상이다.
3. 들 물체의 크기는 일정하다.
4. 철심에서의 포화 자속 밀도는 1.9 T 이다.
5. lifter 외곽의 철의 포화는 무시한다.

또한 최적화의 설계변수는 다음과 같다. 각 방향은 Fig. 1의 오른쪽이 x, 왼쪽이 y, 들어가는 방향이 z이다.

1. 철심의 x, y, z 방향 길이 (x[1], x[2])
2. 가변 영구자석의 x, y 방향 길이 (x[3])
3. 고정 영구자석의 y, z 방향 길이 (x[4])

최적화시의 초기해 및 초기 전자력을 달리하여 세 가지 경우에 대해 해석한 결과는 다음과 같다.

A. 초기해 및 전자력을 각각 0.17 m, 0.23 m, 0.12 m, 0.11 m, 10 ton으로 준 경우에 설계변수 x[1]과 전자력과 최적화 과정을 Fig. 6, 7에 나타내었다. 이렇게 하여 얻어진 치수의 최적화 결과는 0.1514 m, 0.1927 m, 0.1204 m, 0.12 m이고, 이 때의 전자력은 13.4391 ton으로 해석되었다.

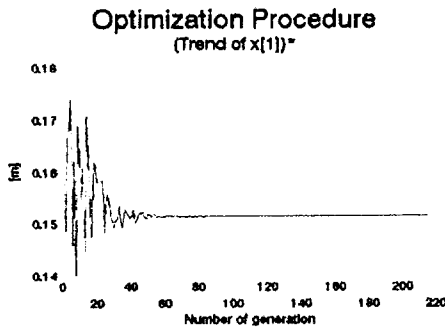


Fig. 6. Optimization procedure of design variable x[1]

B. 초기해 및 전자력을 각각 0.14 m, 0.16 m, 0.09 m, 0.06 m, 10 ton으로 준 경우에 설계변수 x[2]와 전자력의 최적화 과정을 Fig. 8, 9에 나타내었다. 이렇게 하여

얻어진 치수의 최적화 결과는 0.1503 m, 0.1928 m, 0.0951 m, 0.12 m이고, 이 때의 전자력은 13.2368 ton으로 해석되었다.

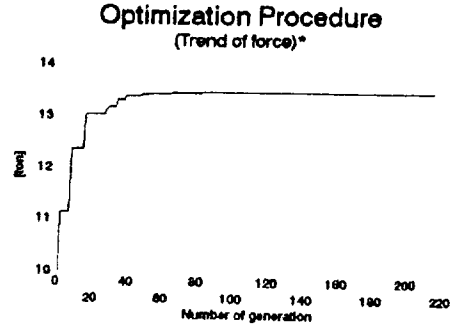


Fig. 7. Optimization procedure of electromagnetic force

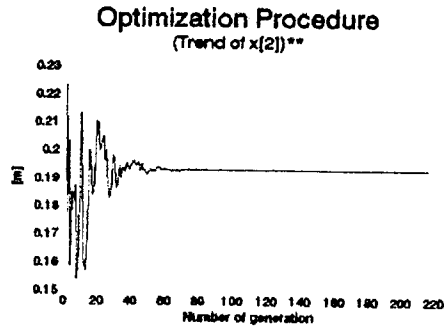


Fig. 8. Optimization procedure of design variable x[2]

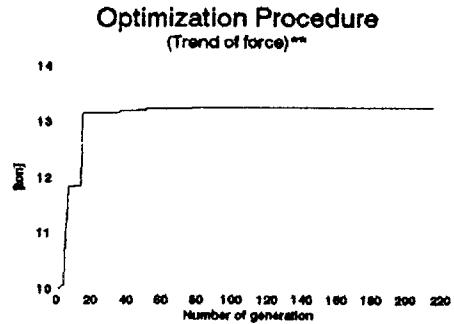


Fig. 9. Optimization procedure of electromagnetic force

C. 초기해 및 전자력을 각각 0.15 m, 0.20 m, 0.11 m, 0.09 m, 10 ton으로 준 경우에 설계변수 x[3]과 전자력의 최적화 과정을 Fig. 10, 11에 나타내었다. 이렇게 하여 얻어진 치수의 최적화 결과는 0.1506 m, 0.1818 m,

0.0934 m, 0.12 m이고, 이 때의 전자력은 13.2937 ton으로 해석되었다.

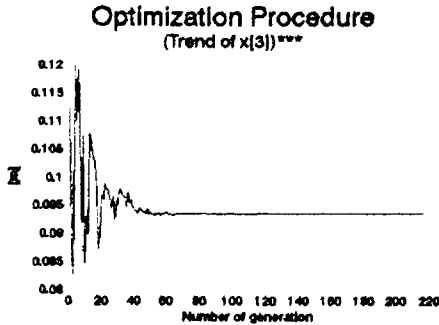


Fig. 10. Optimization procedure of design variable x[3]

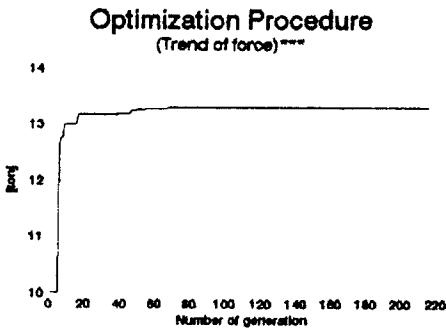


Fig. 11. Optimization procedure of electromagnetic force

5. 2. 부피 최소화의 치수 최적화

최적화를 위한 제한 조건은 다음과 같다.

1. lifter 각 부의 형상은 모두 동일한 직사각형의 형상이다.
2. 들 물체의 크기는 일정하다.
3. 철심에서의 포화 자속 밀도는 1.9 T이다.
4. lifter 외곽의 철의 포화는 무시한다.
5. 흡착시의 최소 전자력은 10 ton 이상이어야 한다.

또한 최적화의 설계변수는 다음과 같다.

1. 철심의 x, y, z 방향 길이(x[1], x[2])
2. 가변 영구자석의 x, y, z 방향 길이(x[3], x[5])
3. 고정 영구자석의 x, y, z 방향 길이(x[4], x[6], x[7])

초기해를 각각 0.15 m, 0.19 m, 0.12 m, 0.12 m, 0.07 m, 0.03 m, 0.05 m로 준 경우에 설계변수 x[1]과 부피의 최적화 과정을 Fig. 12, 13에 나타내었다. 이렇게 하여 얻어진 치수의 최적화 결과는 0.1306 m, 0.12 m, 0.1257 m, 0.1005 m, 0.06 m, 0.0381 m, 0.04 m이다.

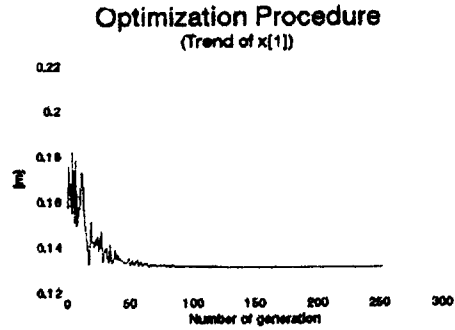


Fig. 12. Optimization procedure of design variable x[1]

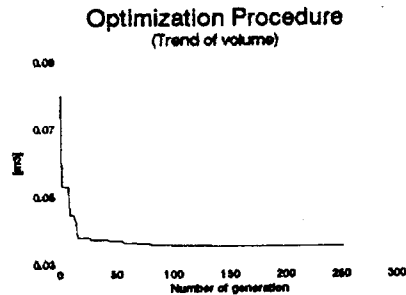


Fig. 13. Optimization procedure of volume

5. 3. 최적 설계 결과와 MAXWELL 결과의 비교

5. 1절의 전자력 최대화의 A 결과와 비교하기 위하여 유한요소법으로 해석하였다. 해석된 전자력은 약 12.893 ton인데 이는 등가 자기회로법의 결과인 13.4391 ton과 비교하여 상당히 유사한 결과이다. 그때의 해석 모델 및 자속 분포 등을 Fig. 14 ~ Fig. 16에 각각 나타내었다.

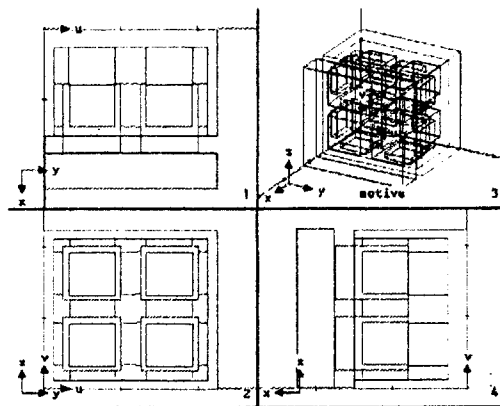


Fig. 14. Analysis model in MAXWELL

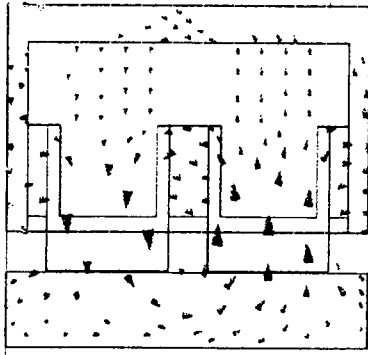


Fig. 15. Flux flow of the model A.

서 특히 영구자석의 동작점 결정은 해석의 정도를 보장하는 가장 중요한 요소였다. 이렇게 해석된 운전특성중 전자력과 부피를 각각 목적함수값으로 (1 + 1) ES를 이용하여 최적화를 행하였으며 그 결과를 MAXWELL의 해석 결과와 비교하여 검증하였다.

이러한 본 논문의 최적설계 방법은 영구자석 또는 전자석을 가지는 자기시스템의 최적 설계에 광범위하게 응용될 수 있으리라 본다.

감사의 글

본 논문은 산업과학기술연구소의 지원에 의해서 이루어진 연구의 결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참고 문헌

- [1] 大川光吉 著, 元鍾洙 譯, 페라이트 磁石回轉機의 設計, 東逸出版社, 1995.
- [2] 大川光吉 著, 永久磁石磁氣回路의 設計特性 計算法, 總合電子리서치, 1987.
- [3] Yang Qingxin, Yan Weili, "Inverse Problem In Electropermanent Lift Magnet", *COMPUAMG conf.*, PC1-8, 1995.
- [4] Zbigniew Michalewicz, *Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs*, Springer-Verlag, Berlin 1992.

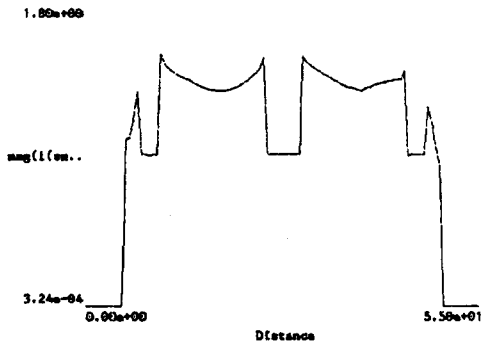


Fig. 16. Flux density at permanent magnet and pole

VI. 결 론

본 논문에서는 다음과 같은 과정을 통한 영전식 magnetic lifter의 최적 설계법을 제시하였다. 먼저, 등가회로 법으로 흡, 탈착시의 운전 특성을 해석하였다. 이 과정에

Optimal Design of Electropermanent Magnetic Lifter

J. S. Chun, H. K. Jung

Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University, Seoul Korea, 151-742

S. D. Choi, C. J. Yang

Research Institute of Science & Technology, P.O. Box 135, Pohang, 790-600, Korea

(Received 6 December 1995, in final form 5 March 1996)

In this paper, the optimal design method of the electropermanent magnetic lifter is proposed. The electromagnetic performances at the states of attraction and release are calculated by the means of the equivalent magnetic circuit method. The magnetic flux flow, the magneto-motive force and the amount of lifting force correspond to the electromagnetic performances. As the optimization algorithm, the evolution strategy(ES) is applied for the maximization of the electromagnetic force at the state of attraction and for the minimization of the volume within the allowable electromagnetic force range. [3] At this moment, the optimization satisfy the minimization of the electromagnetic force at the state of release. The validity of the proposed optimization method is verified by the comparison between the optimization result and the FEM result (this FEM result is obtained from MAXWELL).