

자기회로의 불평형을 고려한 MC-LOA의 설계 및 특성 해석

엄상준\*, 김덕현\*\*, 강규홍\*, 홍정표\*, 김규택\*  
 \* 창원대학교 전기공학과 \*\* 안동정보대학 전기과

Design and Characteristic Analysis of MC-LOA taking into account the Magnetic Circuit unequivalence

Sang-Joon Eum\*, Duk-Hyun Kim\*\*, Gyu-Hong Kang\*, Jung-Pyo Hong\*, Gyu-Tak Kim\*  
 Dept. of Electrical Engineering, Chang-won Univ.,  
 \*\* Dept. of Electrical, Andong Information Technical College

**Abstract** - A voice type Moving Coil Linear Oscillatory Actuator(MC-LOA) has unbalanced magnetic circuit structure. Its asymmetric magnetic flux distribution along the mover directions causes shifting of displacement center to one side. Therefore, this paper analyzes both thrust and displacement characteristics and settles the unbalanced flux problem by performing shape optimization. The propriety of the improved design model has been verified by dynamic analysis based on the coupling of kinetic and electric equations.

여기서  $A, J_0, J_m$  은 각각  $\vec{A}, \vec{J}_0, \vec{J}_m$  의 z방향 성분이 다.  $J_m$ 은 영구자석의 등가자화전류의 형태로 표현한 식이다.

1. 서 론

소변위 왕복운동을 필요로 하는 시스템의 동력원으로 효율을 개선의 한계나 속응성 및 구조의 복잡성 때문에 선형 액추에이터의 요구가 증가하고 있다. 이러한 액추에이터 중 보이즈 코일형태의 가동 코일형 리니어 액추에이터(MC-LOA)는 구조가 간단하고 가동자의 관성이 적어 고속의 소 변위 왕복운동에 적합하다.[1]

보이즈 코일형 MC-LOA는 구조적으로 자기불평형을 가지기 때문에 자기회로 설계시 양단부의 누설을 고려하여 가동코일의 면적을 설정한다. 그러나 이러한 방법으로는 무부하 상태의 자기회로 불평형은 개선 가능하나, 왕복운동시의 인가전류의 방향에 따른 공극자속의 불평형 문제는 해결하기 어렵다.

일반적인 전기기기의 자기회로의 설계시 자속의 경로를 형성하는 철심의 폭은 포화가 발생하지 않도록 설계하고 있다. 그러나 보이즈 코일형 MC-LOA는 전류의 방향에 따른 자속의 불평형으로 이동 변위의 중심이 한쪽으로 이동하는 현상이 발생하여 시스템의 특성을 저하한다. 따라서 본 논문에서는 부하상태에서의 가동자의 이동방향에 따른 자속 및 추력의 불평형을 유한요소 해석으로부터 정밀하게 분석하여 추력 리플을 최소화하기 위해 요크부의 자속밀도가 포화되도록 형상설계를 수행하였다. 해석 및 설계의 타당성은 기계적 운동방정식과 전압방정식의 결합으로부터 동특성 해석을 수행하여 왕복 변위 특성이 향상됨을 입증하였다.

2. MC-LOA의 유한요소 해석

공극에서의 자속밀도 분포와 추력 특성을 유한요소 해석을 통하여 분석하였다. 보이즈 코일형 MC-LOA는 상,하 대칭의 구조를 가지므로 편축만을 해석 대상으로 정하였고 좌, 우의 자기회로 불평형에 의한 누설의 영향을 고려해서 해석영역을 설정하여 고정경계조건을 적용하였다. 2차원 해석을 위한 지배방정식은 식 1과 같고 해석 모델을 그림 1에 나타내었다.[2]

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{1}{\mu} \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -(J_0 + J_m) \quad (1)$$

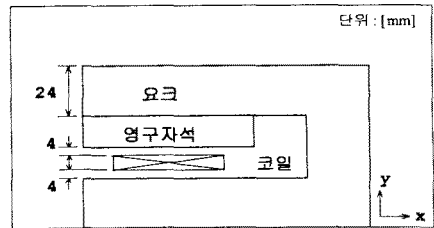


그림 1. 해석 모델(Half model)

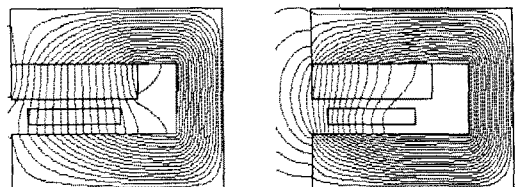
도체에 작용하는 추력 특성은 Lorentz force로 계산하였고 가동 coil의 위치에 따른 추력 특성을 분석하기 위해서 가동자를 진행방향으로 이동시켜 가면서 해석하였다. Lorentz force에 의한 추력 및 수직력은 다음과 같다.[2][3]

$$F_x = \sum_{e=1}^n f_x^{(e)} = \sum_{e=1}^n J_i^{(e)} \Delta_i^{(e)} B_y^{(e)} \quad (2)$$

$J_i^{(e)}$  와  $\Delta_i^{(e)}$ 는 요소(e)의 전류밀도와 면적이며, n은 도체를 구성하는 요소수이다.

3. 해석 결과

보이즈 코일형 MC-LOA는 영구자석에 의한 공극자속밀도가 일정하게 분포하더라도 가동자의 왕복운동을 위한 전류의 방향에 따라 자속밀도의 분포현상은 달라진다. 해석 모델에서 영구자석만 여자한 경우와 전류만 인가했을 때의 등 포텐셜도를 그림 2에, 자속밀도의 분포는 그림 3, 4에 각각 나타내었다. 전류의 방향에 따라 공극 자속이 증가 및 감소됨을 알 수 있다.



a. 영구자석만 여자한 경우 b. 전류만 여자한 경우

그림 2. 등 포텐셜 분포

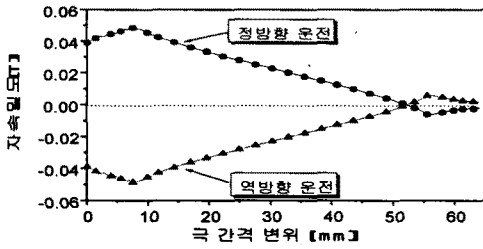


그림 3. 코일만 여자한 경우 공극자속밀도 분포

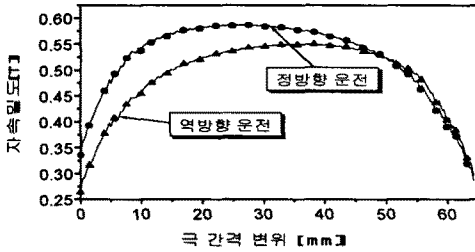


그림 4. 진행 방향별 공극자속밀도 분포

자기회로의 불평형에 의해 전류의 방향에 따라 공극에서의 자속 방향이 변하여 자속밀도의 좌, 우 불평형이 발생할 뿐만 아니라 자속밀도의 크기도 다르게 나타난다. 이러한 자속밀도의 차이는 왕복 운동시 진행방향에 따른 추력의 차를 발생하여 가동자가 편측으로 진행되는 현상을 발생한다. 진행방향에 따른 추력 특성을 그림 5에 나타내었다. 초기 모델에서는 전류의 방향에 따라 추력의 편차가 5(N) 정도 발생하여 자기적 불평형의 영향이 시스템에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 여기서 요크 내부로 진행되는 방향을 정방향으로, 반대 방향을 역방향 운동으로 설정하였다.

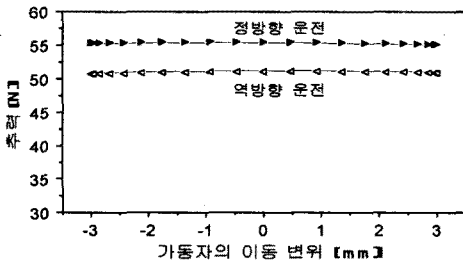


그림 5. 추력 특성

#### 4. 형상설계

진행방향에 따른 추력의 불평형은 소변위 왕복운동 시스템에 적용하기는 곤란하다. 따라서 본 논문에서는 왕복운동 시스템에 적용하기 위해 진행 방향에 따른 추력 불평형 최소화를 목적함수로 설정하여 형상 설계를 수행하였다. [4][5] 초기 모델에서 진행 방향에 따른 추력의 불평형은 영구자석에 의한 자속밀도의 분포 특성보다는 전기자의 전류의 인가 방향에 따른 자속의 불평이 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 즉 자기회로가 좌, 우 불평형 상태로써 전류에 의한 자속이 공극에 집중하기 때문에 나타나는 현상이다. 따라서 전류에 의한 자속의 영향을 줄이기 위해 구조적인 자기 불평형 상태의 철심부에 자기포화 현상을 발생시켜 자기회로 불평형을 해소하였다.

요크 철심의 변화에 따른 포화 자속밀도를 그림 6에 나타내었다. 철심의 폭을 줄이면 요크 자속밀도는 증가

하여 15(mm)에서는 2(T)정도로 포화되어 전류의 방향에 따른 자속밀도의 차이가 줄어들어 자기회로 불평형이 해소됨을 알 수 있다. 그러나 철심의 포화는 자기저항의 증가로 공극자속이 줄어들어 추력이 저하하는 문제점이 있다. 따라서 추력을 보충하기 위해요크 폭은 15(mm)로 결정하고 공극의 변화에 따른 추력 특성을 그림 7에 나타내었다. 해석 결과 공극이 줄어들면 발생 추력은 증가한다. 따라서 자기 불평형을 개선된 모델로써 요크 폭은 15(mm)로, 공극은 1(mm)로 선정하여 자기회로 해석을 한 결과 진행 방향에 따른 공극자속밀도의 편차가 급격하게 줄어드는 현상을 그림 8에 나타내었다. 개선 모델의 진행 방향에 따른 추력 특성을 그림 9에 나타내었다. 철심의 포화에 의한 추력은 다소 줄어들었지만 진행방향에 따른 추력의 리플은 완전히 제거하여 왕복운동 특성을 만족할 수 있었다.

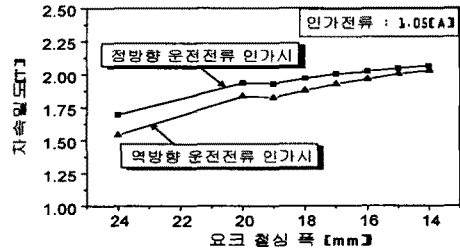


그림 6. 요크 자속밀도

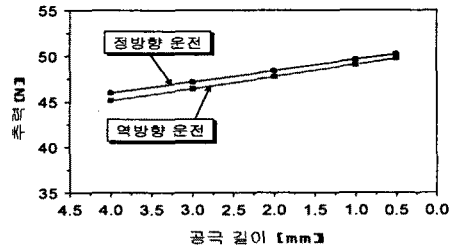


그림 7. 공극의 변화에 따른 추력

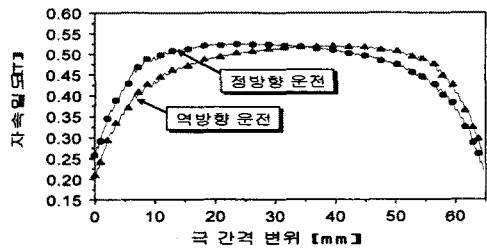


그림 8. 개선모델의 공극 자속밀도 분포

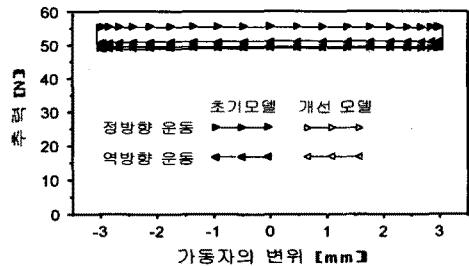


그림 9. 진행방향에 따른 추력 특성

## 5. 동특성 해석

MC-LOA는 1자유도 운동을 한다는 가정 하에 운동 방정식을 구성하였다. 과도상태 및 정상상태에서의 동특성을 해석하기 위해서 운동방정식과 전압방정식을 결합으로부터 해석하였다.[5]

$$V = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} + \alpha v(t) \quad (3)$$

$$F = M \frac{dv(t)}{dt} + F_f = k_f i(t) \quad (4)$$

여기서  $\alpha$ 는 전자 유도계수로서 공극자속밀도와 도체수의 곱으로 표현되어지고  $k_f$ 는 추력상수,  $M$ 은 가동자 질량,  $F_f$ 은 부하를 나타낸다.

동특성 방정식을 구성하는 회로정수는 유한요소법으로부터 산정하였고 시간의 따른 속도 및 변위특성은 시간차분법으로부터  $i_s$ 를 구하여 동특성 해를 구하였다. 시간차분법 적용시 시간과 전류에 대한 식은 다음과 같다.

$$t_\theta = t + \theta \Delta t \quad (0 \leq \theta \leq 1) \quad (5)$$

$$\frac{di_\theta}{dt} = \frac{i_{t+\theta} - i_t}{\Delta t} \quad (6)$$

$$i_s = i_t + \theta(i_{t+\theta} - i_t) \quad (7)$$

동특성 해석결과 개선 모델은 요크 철심 자속의 포화에 의해 초기 모델보다 추력이 다소 저하하였다. 따라서 이동 변위의 특성을 만족하기 위해서 전류는 증가하고 전압도 초기 모델보다는 증가하였으며 속도는 다소 저하하였다. 그러나 변위 특성은 자기회로의 불평형에 의한 진행방향별 추력의 편차로부터 초기 모델은 일정변위 왕복 운동을 하지는 못하고 정방향으로 계속 진행하고 있지만 개선 모델은 자기회로 불평형을 줄여 LOA의 기본 특성인 왕복운동을 하고 있다. 따라서 자기회로 불평형에 의한 추력의 편차를 줄이는 것이 LOA 시스템 특성을 결정함을 알 수 있다. 동특성 해석의 결과를 아래 그림에 나타내었다.

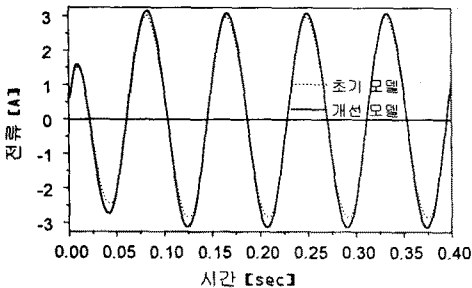


그림 10. 시간에 따른 전류 특성

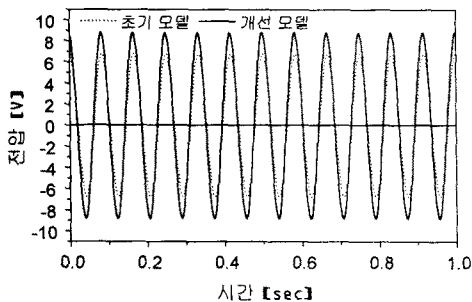


그림 11. 시간에 따른 전압 특성

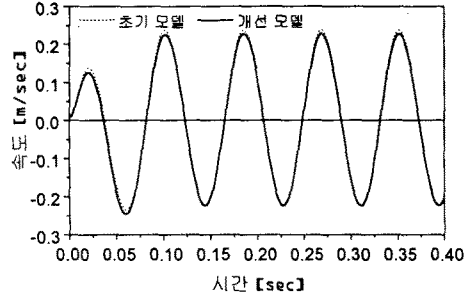


그림 12. 시간에 따른 속도 특성

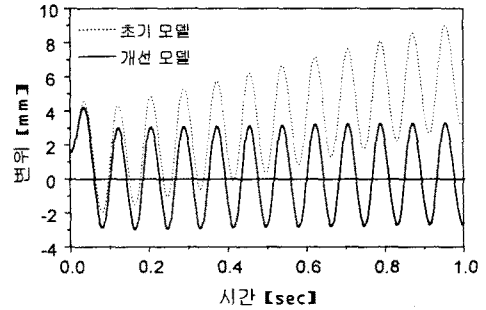


그림 13. 시간에 따른 변위특성

## 6. 결 론

본 논문에서는 보이스 코일형 MC-LOA의 구조적 자기회로 불평형에 기인한 공극자속 및 추력 특성을 왕복 운동 진행 방향별로 분석하였다. 분석결과 진행방향에 따른 추력의 편차는 전기자 전류에 의한 공극자속의 증, 감의 형태로 나타나 진행방향에 따른 추력의 편차가 크게 발생하였으며 이 또한 자기회로의 불평형에 기인한 것으로 판단되어진다.

따라서 좌, 우측의 자기회로 불평형을 해소하기 위해서 철심의 포화 현상을 유도하였고 그 결과 전류의 방향에 따른 자속의 불평형이 해소되어 진행방향별 추력의 편차를 최소화하였다. 초기 형상의 모델과 개선모델의 회로 정수로부터 운동방정식과 결합하여 동특성을 해석한 결과 개선 모델의 소변위 왕복 특성이 개선되어 동작 중에 왕복 변위의 중심이 이동하지 않음을 알 수 있어 만족스러운 결과를 얻었다. 향후 포화에 의한 추력의 저하의 문제는 다음과제로 삼는다.

### (참 고 문 헌)

- [1] BASAK, "PermanentMagnet DC Linear Motors", 1996
- [2] SALON, "FINITE ELEMENNT ANALYSIS OF ELECTRICAL MACHINES", 1995
- [3] Naila Mikhaei-Boules, "Design and analysis of linear actuator for active vibration cancellation", pp. 469-474, IEEE, 1995
- [4] H.wakiwaka, H.Yajima, S.Senoh and H.Yamada, "Simplified Thrust Limit Equation of Linear DC Motor", IEEE, vol. 32, pp.5073-5075,1996.
- [5] Sang-Baeck Yoon, Jin Hur, Yon-Do Chun, Dong-Seok Hyun, Dal-Ho IM and Jung-Pyo Hong, "Shape Optimization of Solenoid.", Procd. of SMIC'96, pp. 201-204, 1996.