

# 왕복운동 리니어 액추에이터의 가동자 형태에 따른 전자기적 특성해석 및 비교

論 文

53B-4-1

## Comparison and Analysis of Linear Oscillatory Actuator According to Mover Type

張錫明\* · 崔璋英\*\* · 鄭相燮\*\*\* · 李成浩§ · 趙漢旭§§

(Seok-Myeong Jang · Jang-Young Choi · Sang-Sub Jeong · Sung-Ho Lee · Han-Wook Cho)

**Abstract** - In the machine tool industry, direct drive linear motor technology is of increasing interest as a means to achieve high acceleration, and to increase reliability. The advantages of such a motor are that it has a good linearity and has no need of such mechanical energy conversion parts, which change rotary motion into linear motion, as screws, gears, chains etc. In this paper, two structures of LOA are analyzed. One is the moving-coil type LOA and the other is moving-magnet type LOA. Two types of LOA are analyzed, with reference to the following parameters as variables: magnetic field, flux linkage, motor thrust and back emf. These variables are derived by the use of analytical method in terms of two-dimensional rectangular coordinate system. The maximum values of thrust according to such design parameters as air-gap length and magnet height for each model is also represented. The results are validated extensively by comparison with finite element method. In particular, we experiment moving-coil LOA which is already manufactured and confirm that the experimental results are shown in good agreement with analysis through the comparison of between analytical and experimental results

**Key Words** : moving-coil type LOA, moving-magnet type LOA, magnetic field, flux linkage, motor thrust and back emf

### 1. 서 론

영구자석기기는 산업 자동화, 사무 자동화 그리고 로봇 산업과 같은 분야의 직선운동 시스템에 응용을 하기 위한 연구개발이 늘어가는 추세이다. 실제로, 이러한 영구자석 직선형 모터들은 속도제어, 추력제어, 정밀위치제어, 무게 그리고 효율 측면에서 많은 장점을 갖고 있을 뿐만 아니라, 직선형 구동시스템에 리니어 모터를 이용하는 경우 스크류, 체인, 기어 시스템 등의 기계적 에너지 변환장치가 필요하지 않아 부품 수와 공간이 적어지며 에너지 손실이나 소음을 발생하지 않고 운전 속도에서도 제한을 받지 않는다는 장점 역시 갖고 있다. 따라서 산업의 발전에 따라 짧은 스트로크의 선형왕복운동이 요구되는 스텔링 엔진, 공작기 및 냉장고 컴프레서, 컴퓨터의 디스크 저장장치, 진동발전기, 섬유기기, 연료 펌프, 인공심장 장치, 능동제어, 초정밀 위치제어에 전자기력 직선왕복 액추에이터(이하 LOA)가 광범위하게 응용되고 있다[1-9].

전자기력 직선형 왕복 액추에이터는 가동체의 재질에 따

라 가동코일형, 가동철심형, 가동자석형 등으로 구분되는데 성능이 각각 다르므로 응용분야에 따라 적당한 종류를 선정해야만 한다. 가동코일형 LOA는 영구자석에 의해 공극과 철심에서 일정한 자속을 가지므로 철손이 매우 작아, 고정자 요크를 성층 철심으로 하지 않아도 되며 구조가 간단하고 가동자의 관성이 작아 고속의 소 변위 왕복운동에 적합할 뿐만 아니라 가동자에 자성체를 사용하지 않으므로 고정자와 가동자 사이에 자기흡인력이 발생하지 않는 장점을 가지고 있다. 반면에 전원을 공급하는 코일이 가동되므로 전원 리드선의 피로, 유지보수 등을 수반하고 이것을 대용량의 산업용으로 확대 사용할 경우에는 운전주파수의 제한이 뒤 따르는 단점을 가졌다. 가동 철심형 LOA는 리드 선이 없고 가동자 구조가 단순하고 튼튼하여 유지보수나 제작비 등에서 매우 유리한 장점을 가진 반면, 고정자와 가동자 사이에 공극이 불균일하면 강한 흡인력이 발생하므로 가동자의 지지에 유의해야만 하는 단점이 있다. 마지막으로 가동자석형 LOA는 전원 공급 리드 선이 고정부에 위치하므로 전선의 피로나 유지보수 와 열손실 측면에서 가동코일형보다 유리한 반면, 영구자석이 고속운동 하므로 가공 시 부착에 크게 유의해야하고 가동자와 고정자사이에 흡인력이 발생하는 단점을 가졌다. 가동자석형 LOA는 스트로크의 피크투피크가 주파수 20Hz과 60Hz의 범위에서 4mm에서 8mm를 요구하는 사양에 가장 적당한 액추에이터로 알려져 있다[7-12].

LOA로 구동되는 시스템을 고성능화 하고자 하는 경우 가동코일형 또는 가동자석형 중 어느 것이 유리한지를 아는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 논문에서는 동일체적을 갖는

\* 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

\*\* 準 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 碩士課程

\*\*\* 正 會 員 : LG電子 DA研究所 COMP그룹 先任研究員

§ 正 會 員 : LG電子 DA研究所 要素技術그룹 先任研究員

§§ 準 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2003年 8月 27日

最終完了 : 2003年 2月 2日

가동코일형과 가동자석형 LOA의 특성을 해석하고 비교하고자 한다. 자계특성식은 전자기적 전달관계를 이용해 2차원적인 해석방법으로 유도했고, 이로부터 추력, 쇄교자속, 역기전력 특성식을 도출했다. 또한, 각 모델에 대한 자석체적 당 추력특성을 비교하였고, 공극길이 및 자석높이와 같은 설계변수에 따른 추력 특성 역시 제시했다. 해석결과는 유한요소결과와 비교하여 해석결과의 타당성을 입증했고, 특히 이미 제작되어진 가동코일형 LOA의 부하 각에 따른 그리고 추력이 최대가 되는 부하 각에서의 전류에 따른 추력특성을 실험한 결과와 실험에 사용된 가동코일형 LOA의 치수변수를 가지고 해석한 결과와 잘 부합함을 확인했다. 이로써 고성능 시스템을 구성하는데 사용되는 직선형 액추에이터의 전자기적 특성 예측 및 더 나아가 이들 특성으로부터의 제어정수 도출에 중요한 자료로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

## 2. LOA의 모델 설정 및 특성 방정식

### 2.1 가동코일형 LOA

#### 2.1.1 구조 및 해석모델

그림 1은 가동코일형 LOA의 구조를 보여준다. 가동코일형 LOA는 가동자 코일과, 고정자 영구자석, 가동자와 고정자사이의 일정한 공극 그리고 자속 흐름을 위한 iron으로 구성되어 있으며, 자속 경로는 그림1에 표시한바와 같다. 그림 2는 그림1에 제시된 가동코일형 LOA 모델의 단순화된 해석 모델을 보여주며 (a)~(h)는 각 영역의 경계 면을 표현한 것이다. 해석 시 iron의 투자율과 수평 방향 길이는 무한이라 가정하며, 영구자석과 코일의 비 투자율은 1이라 가정한다.

#### 2.1.2 영구자석에 의한 자계특성식

영구자석에 의한 자계특성 해석 시 코일부분의 투자율을  $\mu_0$ 라 하면, 코일부분을 공기영역으로 볼 수 있기 때문에, 영구자석에 의한 자계만을 구할 수 있다. magnet 부분의 경계 (b)와 (c)에서의 전달관계는 식 (1)로 주어진다. [13].

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(b)} \\ B_{zn}^{(c)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n \Delta & \frac{-1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{1}{\sinh k_n \Delta} & -\coth k_n \Delta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(c)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\cosh k_n \Delta - 1}{\sinh k_n \Delta} \\ \frac{-\cosh k_n \Delta + 1}{\sinh k_n \Delta} \end{bmatrix} j\mu_0 M_{zn} \quad (1)$$

코일을 포함한 공극부분의 (d)와 (g) 경계에서의 전달 관계는 식 (2)로 주어진다. 여기서  $x_0$ 는 그림 2에서의  $x_0$ 에 코일 높이  $\Gamma$ 를 포함시킨 것이다.

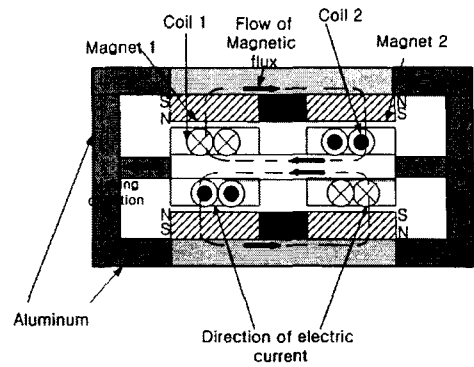


그림 1 가동코일형 LOA의 구조  
Fig. 1 Structure of moving-coil LOA

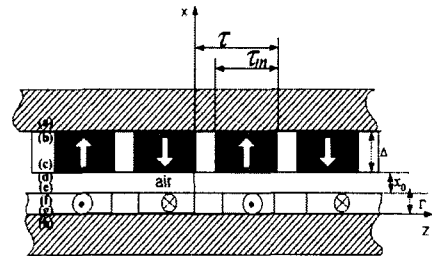


그림 2 단순화된 2차원 해석모델  
Fig. 2 Simplified 2-d analytical model

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(d)} \\ B_{zn}^{(g)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n x_0 & \frac{-1}{\sinh k_n x_0} \\ \frac{1}{\sinh k_n x_0} & -\coth k_n x_0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(d)} \\ A_{yn}^{(g)} \end{bmatrix} \quad (2)$$

iron의 투자율이 무한대라고 가정하면 식 (3)과 같은 경계 조건이 도출된다.

$$\begin{cases} B_{zn}^{(b)} = 0 \\ B_{zn}^{(g)} = 0 \end{cases} \quad (3)$$

또, 자석 경계 면의 등가전류밀도는 0이므로 식 (4)와 같은 경계조건이 도출된다.

$$\begin{cases} -B_{zn}^{(a)} + B_{zn}^{(b)} = 0 \\ -B_{zn}^{(c)} + B_{zn}^{(d)} = 0 \end{cases} \quad (4)$$

경계 면에서의 벡터자위 연속성에 의해 경계면에서의 경계조건은 식 (5)로 주어진다.

$$\begin{cases} A_{yn}^{(a)} = A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(c)} = A_{yn}^{(d)} \end{cases} \quad (5)$$

식 (1)~식(5)에 의해  $A_{yn}^{(d)}$  는 식 (6)으로 정리된다.

$$A_{yn}^{(d)} = \frac{-j\mu_0 M_{xn}}{2k_n} \cdot \left[ 1 + \frac{(e^{2k_n \Delta} - 1)e^{-k_n x_0} + (e^{-2k_n \Delta} - 1)e^{k_n x_0}}{(e^{2k_n \Delta} - 1)e^{k_n x_0} + (e^{-2k_n \Delta} - 1)e^{-k_n x_0}} \right] \quad (6)$$

식 (6)과 자기벡터 포텐셜의 정의  $B = \nabla \times A$ 로부터 도출된  $B_{xn} = -\frac{\partial}{\partial z} A_{yn}$ ,  $B_{zn} = \frac{\partial}{\partial x} A_{yn}$  인 관계로부터 경계면 (d)에서의 수직방향 및 수평방향 자속밀도가 식 (7)과 식 (8)로 유도된다.

$$B_{xn}^{(d)} = \frac{\mu_0 M_{xn}}{2} \cdot \left[ 1 + \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0}}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right] \quad (7)$$

$$B_{zn}^{(d)} = \frac{-j\mu_0 M_{xn} \gamma_n}{2k_n} \cdot \left[ \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} - e^{-2\gamma_n \Delta})^2 (e^{\gamma_n x_0} - e^{-\gamma_n x_0})}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right] \quad (8)$$

다음으로 공극에서의 일반화된 자계특성식을 도출한다. 그림 3은 영구자석에 의한 공극 자계특성식 일반화를 위한 모델을 보여준다. X는 임의의 경계면의 위치로 공극영역의 자계특성식 일반화를 위한 상대 좌표로써 문자 A, B와 C는 각각 자석 표면, 공극과 iron 표면에서의 위치를 보여준다.

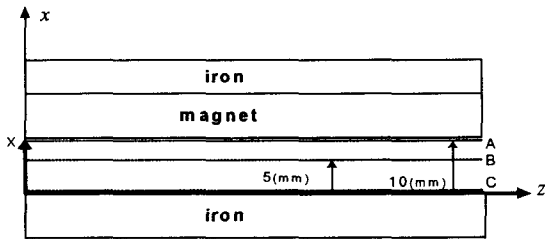


그림 3 영구자석에 의한 공극자계 특성의 일반화를 위한 모델

Fig. 3 Model for generalization of air-gap field due to permanent magnets

공극영역의 자계특성식 일반화는 특정한 위치의 경계면 A와 C 사이의 벡터자위로부터 구해질 수 있고, 결과는 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$B_{xn} = \frac{\mu_0 M_{xn}}{2} \cdot \left[ \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} + e^{-2\gamma_n \Delta} - 2)(e^{\gamma_n x_0} e^{-\gamma_n X} + e^{-\gamma_n x_0} e^{\gamma_n X})}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right] \quad (9)$$

$$B_{zn} = \frac{-j\mu_0 M_{xn} \gamma_n}{2k_n} \cdot \left[ \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} + e^{-2\gamma_n \Delta} - 2)(e^{-\gamma_n x_0} e^{\gamma_n X} - e^{\gamma_n x_0} e^{-\gamma_n X})}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right] \quad (10)$$

### 2.1.3 코일에 의한 자계 특성식

고정자 코일에 의한 자계특성식 유도과정은 영구자석에 의한 자계특성식 유도 과정과 동일하며, 영구자석의 비 투자율을 1이라 하면, 영구자석영역을 공극영역으로 간주 할 수 있다. 고정자 코일 영역에서의 전달관계는 식 (11)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(f)} \\ B_{zn}^{(g)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n \Gamma & \frac{-1}{\sinh k_n \Gamma} \\ \frac{1}{\sinh k_n \Gamma} & -\coth k_n \Gamma \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(f)} \\ A_{yn}^{(g)} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \frac{\cosh k_n \Gamma - 1}{\sinh k_n \Gamma} \\ \frac{-\cosh k_n \Gamma + 1}{\sinh k_n \Gamma} \end{bmatrix} \frac{\mu_0}{k_n} J_{yn} \quad (11)$$

공극영역의 전달관계는 식 (12)로 주어진다. 여기서  $x_{00}$ 는 자석영역의  $\Delta$ 를 포함한 공극영역을 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} B_{zn}^{(b)} \\ B_{zn}^{(e)} \end{bmatrix} = k_n \begin{bmatrix} \coth k_n x_{00} & \frac{-1}{\sinh k_n x_{00}} \\ \frac{1}{\sinh k_n x_{00}} & -\coth k_n x_{00} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_{yn}^{(b)} \\ A_{yn}^{(e)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

각각의 경계면에 대한 경계조건은 영구자석에 의한 경계조건인 식 (3), 식 (4)와 식(5)와 마찬가지로 식 (13)으로 주어진다.

$$B_{zn}^{(b)} = 0 \quad (13.a)$$

$$A_{yn}^{(e)} = A_{yn}^{(f)} \quad (13.b)$$

$$-B_{zn}^{(e)} + B_{zn}^{(f)} = 0 \quad (13.c)$$

$$B_{zn}^{(g)} = 0 \quad (13.d)$$

식 (11)~식(13)에 의해 경계면 (e)에서의 벡터자위가 식 (14)으로 주어진다.

$$A_{yn}^{(e)} = A_{yn}^{(f)} = \frac{\mu_0}{2\gamma_n^2} J_{yn} \frac{(e^{2\gamma_n \Gamma} - 1)(e^{2\gamma_n x_{00}} + 1)}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \quad (14)$$

식 (14)와 자기벡터 포텐셜의 정의  $B = \nabla \times A$ 로부터 도출된  $B_{xn} = -\frac{\partial}{\partial z} A_{yn}$ ,  $B_{zn} = \frac{\partial}{\partial x} A_{yn}$ 인 관계로부터 경계면 (e)에서의 수직방향 및 수평방향 자속밀도가 식 (15)와 식 (16)으로 유도된다.

$$B_{xn}^{(e)} = \frac{j\mu_0}{2k_n} J_{yn} \frac{(e^{2\gamma_n \Gamma} - 1)(e^{2\gamma_n x_{00}} + 1)}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \quad (15)$$

$$B_{zn}^{(e)} = -\frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn} \frac{(e^{2\gamma_n \Gamma} - 1)(1 - e^{2\gamma_n x_{00}})}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \quad (16)$$

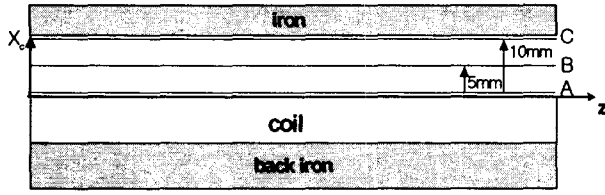


그림 4 코일에 의한 공극자계 특성의 일반화를 위한 모델  
Fig. 4 Model for generalization of air-gap field due to coil

다음으로 공극에서의 일반화된 자계특성식을 도출한다. 그림 4는 코일 면으로부터 공기중의 높이  $x_{00}$  까지의 거리에 따른 자속밀도를 구하기 위한 모델이다. 공기중의로의 높이가  $X_c$ 로 변해가므로  $0 \leq X_c \leq x_{00}$ 의 범위를 가지며 coil 면의 자속밀도를 구했으므로 각각의 공기 면에서의 전달 관계를 이용하여  $X_c$ 값의 변화에 따른 공기 중의 일반화가 이루어진다. 공극에서의 일반화된 벡터자위가 식 (17)로 주어진다.

$$A_{yn}^{X_c} = \frac{\mu_0}{2k_n^2} J_{yn} (e^{2r_n \Gamma} - 1) \frac{(e^{\gamma_n X_c} + e^{2\gamma_n x_{00}} e^{-\gamma_n X_c})}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \quad (17)$$

식 (17)과 자기벡터 포텐셜의 정의  $B = \nabla \times A$ 로부터 공극 중에서의 수직방향 및 수평방향 자속밀도가 각각 식 (18)과 식 (19)로 유도된다.

$$B_{xn}^{X_c} = j \frac{\mu_0}{2k_n} J_{yn} (e^{2r_n \Gamma} - 1) \frac{(e^{\gamma_n X_c} + e^{2\gamma_n x_{00}} e^{-\gamma_n X_c})}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \quad (18)$$

$$B_{zn}^{X_c} = -\frac{\mu_0}{2\gamma_n} J_{yn} (e^{2r_n \Gamma} - 1) \frac{(e^{\gamma_n X_c} - e^{2\gamma_n x_{00}} e^{-\gamma_n X_c})}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \quad (19)$$

### 2.1.4 힘 특성식

맥스웰 응력법에 의해 2차측 영구자석에 작용하는 힘을 계산할 수 있으며, 2차원 해석에서 응력  $T_{ij}$ 는 Korteweg-Helmholtz 힘 밀도와 관련하여 식 (20)으로 표현된다.

$$T_{ij} = \mu H_i H_j - \delta_{ij} \frac{\mu}{2} H_k H_k \quad (20)$$

여기서 Kronecker delta  $\delta_{ij}$ 는  $i \neq j$ 일 때 0이며,  $i = j$ 일 때 1이다. 힘이 작용하는 면적  $S$ 에 대해 식 (20)을 면적 적분하여 2차측 영구자석에 작용하는 추력  $F_z$ 을 식 (21)로 계산할 수 있다.

$$F_z = -S \langle T_{zz}^d \rangle_z = -S \mu_0 \langle H_x^d H_z^d \rangle_z \quad (21)$$

여기서  $S$ 는 영구자석의 표면적이며  $S = 2\pi r w$ 로 구해진다.  $\rho$ 는 굵기,  $r$ 은 영구자석 너비이며,  $w$ 는 안쪽 길이이다. 코일 여자 및 영구자석에 기인한 수직방향 및 수평방향 공극 자계의 세기  $H_x^d$ 와  $H_z^d$ 는 식 (22)와 같다.

$$H_x^d = \frac{j}{2k_n} J_{yn} \frac{(e^{2r_n \Gamma} - 1)(e^{2\gamma_n x_{00}} + 1)}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} e^{-jk_n z} + \frac{M_{xn}}{2} \left[ 1 + \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0}}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right] \quad (22.a)$$

$$H_z^d = -\frac{1}{2\gamma_n} J_{yn} \frac{(e^{2r_n \Gamma} - 1)(1 - e^{2\gamma_n x_{00}})}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} e^{-jk_n z} - \frac{jM_{xn}\gamma_n}{2k_n} \left[ \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} - e^{-2\gamma_n \Delta})^2 (e^{\gamma_n x_0} - e^{-\gamma_n x_0})}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right] \quad (22.b)$$

여기서  $z_0$ 는 코일부분의 움직임에 기인한 영구자석 부분에 대한 상대적 위치를 표현한다. 또한  $n = \pm 1$ 인 기본파 성분만을 고려하면, 식 (22)에서  $J_{yn}$ ,  $M_{xn}$ 은 식 (23)과 같다.

$$J_{y,\pm 1} = J_a \pm jJ_b \quad (23.a)$$

$$M_{x,\pm 1} = \pm \frac{\sqrt{2}M_0}{\pi} \quad (23.b)$$

식 (23)을 식 (22)에 대입한 후 다시 식 (21)에 대입하여 정리하면 추력특성식이 식 (24)로 표현된다.

$$F_z = -S \mu_0 H_{x1}^d H_{z1}^d = \frac{w l^2 \rho \sqrt{2} M_0}{2\pi^2} C (J_a \cos k_1 z_0 + J_b \sin k_1 z_0) \quad (24)$$

여기서  $l$ 은 한 주기이며,  $C = \frac{(e^{2r_n \Gamma} - 1)}{(e^{2\gamma_n(x_{00} + \Gamma)} - 1)} \left[ 1 + \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0}}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right]$ 이다.

### 2.1.5 쇄교자속 특성식

쇄교자속은 자속밀도가 이루어지는 극 면적을 적분하여 구할 수 있다. stoke's 정리에 의하여 식 (25)로 자속은 표현된다.

$$\Phi = \int_S B \cdot da = \int_S (\nabla \times A) \cdot da = \oint_C A \cdot dl \quad (25)$$

식 (25)를 정리하면 식 (26)으로 표현된다.

$$\Phi = \sum_{n=-\infty, odd}^{\infty} (2A_{yn(x)} e^{-jk_n z}) w \quad (26)$$

쇄교자속은 단위 면적에 대한 것이므로 쇄교자속  $\lambda = N \Phi$ 에 의해 구해진다. 여기서 코일턴수  $N$  대신 식 (27)과 같은 단위면적당 턴수  $\eta_0$ 를 도입한다.

$$\eta_0 = \frac{N(\text{turns})}{\text{코일길이} \times \text{코일높이}} \quad (27)$$

따라서 쇠교자속 특성식은 식 (26)과 식(27)에 의해 식 (28)로 주어진다.

$$\lambda = w \eta_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_0^r 2e^{-jk_n z} dz \int_0^r A_{yn}^{(X_c)} dx \quad (28)$$

식 (17)을 식 (28)에 대입하면 쇠교자속 특성식은 식 (29)로 쓸 수 있다.

$$\lambda = w \eta_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\mu_0}{jk_n^3 \gamma_n} J_{yn} [1 - e^{-jn\pi}] \cdot \frac{e^{2\gamma_n r} - 1}{e^{2\gamma_n(x_0 + r)} - 1} [e^{\gamma_n r} - e^{2\gamma_n x_0} e^{-\gamma_n r} - 1 + e^{2\gamma_n x_0}] \quad (29)$$

한편, 쇠교자속은  $\lambda = L_s i_s$  식으로도 표현가능 하므로, 식 (29)에 의해 코일에 의한 인덕턴스가 식 (30)으로 표현된다.

$$L_s = w \eta_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} \frac{\mu_0}{jk_n^3 \gamma_n I_s} J_{yn} [1 - e^{-jn\pi}] \cdot \frac{e^{2\gamma_n r} - 1}{e^{2\gamma_n(x_0 + r)} - 1} [e^{\gamma_n r} - e^{2\gamma_n x_0} e^{-\gamma_n r} - 1 + e^{2\gamma_n x_0}] \quad (30)$$

### 2.1.6 역기전력 특성식

역기전력 특성식은 식 (31)로 주어진다.

$$V_{emf} = \oint_C \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = \oint_C (\mathbf{u} \times \mathbf{B}) \cdot d\mathbf{l} \quad (31)$$

한 상에 대한 역기전력은 식 (31)에 의해 식 (32)로 표현된다.

$$V_{emf} = \oint_C u_z B_{xn} dl \quad (32)$$

식 (9)를 식 (32)에 대입해서 정리하면, 식 (33)과 같은 역기전력 특성식이 유도된다.

$$V_{emf} = \frac{2w\eta_0 C}{jk_n} [1 - e^{-jn\pi}] \cdot [e^{-\gamma_n x_0} e^{-\gamma_n r} - e^{-\gamma_n x_0} e^{\gamma_n r} - e^{\gamma_n x_0} + e^{-\gamma_n x_0}] \quad (33)$$

여기서  $C = \frac{\mu_0 M_{xn}}{2} \left[ \frac{(e^{2\gamma_n \Delta} + e^{-2\gamma_n \Delta} - 2)}{(e^{2\gamma_n \Delta} - 1)e^{\gamma_n x_0} + (e^{-2\gamma_n \Delta} - 1)e^{-\gamma_n x_0}} \right]$ 이다.

### 2.2. 가동자석형 LOA

그림 5는 가동자석형 LOA의 구조를 보여준다. 가동자는 내부의 자석 부분이고, 고정자는 외부의 코일 부분이 차지한다. 가동자와 고정자사이에는 일정한 공극이 있으며, 자속패스를 위한 철심으로 구성 되어있다. 즉 가동자석형 LOA는 가동코일형과 비교하여 볼 때 가동자와 고정자가 바뀐 구조

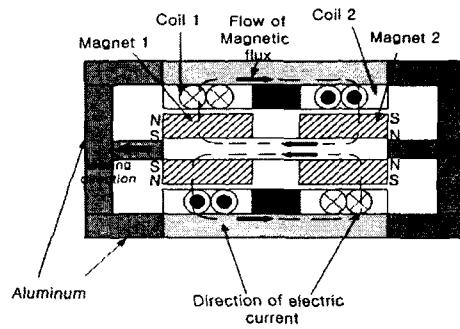


그림 5 가동자석형 LOA의 구조  
Fig. 5 Structure of moving-magnet LOA

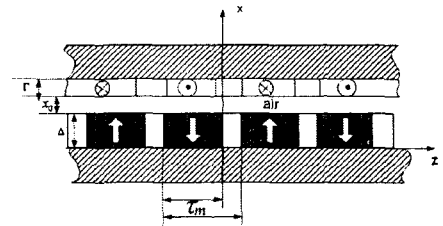


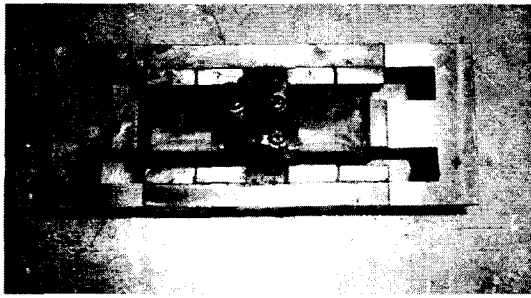
그림 6 단순화된 2차원 해석모델  
Fig. 6 Simplified 2-d analytical model

를 하고 있으며 자속 경로는 그림 5에 표시한바와 같다. 그림 6은 그림 5에 제시된 가동자석형 LOA 모델의 단순화된 해석모델을 보여주며 해석 모델에서 가동코일형과 같은 가정을 한다. 가동자석형 LOA는 가동 코일형 LOA의 자체 특성식, 힘 특성식, 쇠교자속 특성식과 역기전력 특성식 모두의 유도과정과 동일한 방법이 적용되며, 경계 면에서의 자속밀도 및 공극영역에서의 일반화된 자속밀도 역시 가동코일형 LOA와 같은 특성식을 갖는다. 다만, 코일과 자석 부분이 달라져서 코일영역과 영구자석 영역의 체적 변화에 의한 자속밀도 크기의 차 및 힘 특성을 볼 수 있다.

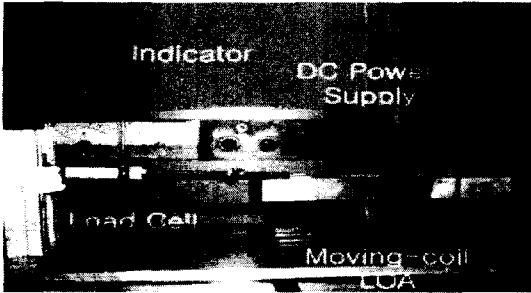
### 3. 추력 특성실험 및 결과

#### 3.1 실험 시스템 제작 및 구성

그림 7 (a)는 가동코일형 LOA의 실제 제작된 모습을 보여준다. 그림 7(b)는 실험 구성사진을 보여주는데, 정지추력을 측정하기 위한 Load Cell 및 Indicator, 코일을 DC여자 시키는 DC Power Supply 와 가동코일형 LOA로 구성되어 있다. 그림 8 (a)는 일정 부하 전류에서 부하 각에 따른 힘 분포의 해석 결과, 실험결과 및 유한요소 결과와의 비교를 보여주는데, 실험결과와 해석결과의 오차는 약 7%이다. 그림 8 (b)는 최대추력 부하 각에서 부하전류에 따른 힘 특성의 해석결과, 실험 결과와 유한요소 결과의 비교를 보여준다. 부하전류가 증가할수록 해석 결과에 비해 실험값의 감소를 볼 수 있는데, 이는 자기회로의 포화 때문인 것으로 사료된다. 한편 실험결과가 추력뿐인데 그 이유는 추력을 포함한 해석 결과특성식이 모두 자속밀도를 기본으로 포함하고 있고 추력 실험결과와 해석결과가 맞다면 이는 해석결과의 타당성을 뒷받침하기에 충분하기 때문이다. 한편, 가동자석형 모델의 경우 실제



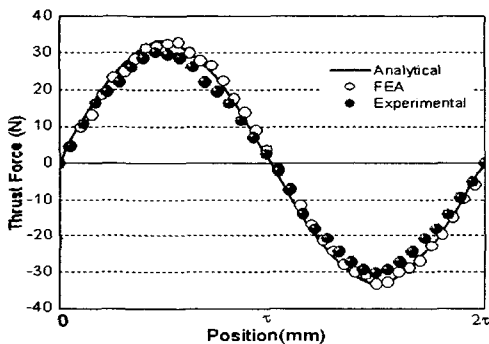
(a)



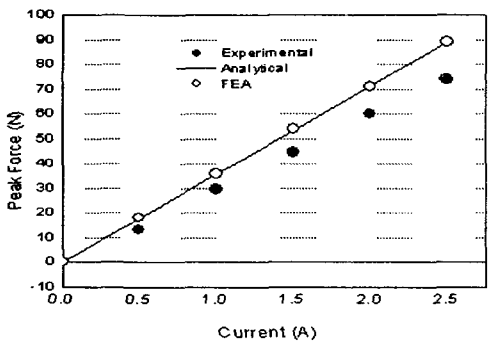
(b)

그림 7. 가동코일형 LOA의 (a) 실제 제작 사진 및 (b) 실험 시스템구성사진

Fig. 7 Moving-coil LOA : actual fixture model (a) and testing apparatus (b)



(a)



(b)

그림 8 가동코일형 LOA의 (a) 가동자 위치에 따른 및 (b)부하 전류에 따른 추력 특성 해석결과와 실험결과와의 비교

Fig. 8 Comparison of between analysis and experimental results for thrust characteristics of moving-coil LOA according to mover position (a) and coil current (b)

제작하고 본 논문에 실험결과를 포함시켜야하나 시간적 이유로 이는 향후 제어정수를 도출해서 동특성 해석 시 운전 성능을 비교할 때 제작할 예정이고, 추력 특성은 이미 가동코일형 LOA에서 검증되었으므로 가동코일형 LOA와 특성식이 같고 단지 코일과 영구자석의 위치만 바뀐 가동자석형 LOA의 추력결과 역시 해석결과와 잘 부합할 것임을 예측할 수 있다.

#### 4 해석결과와 유한요소해석결과와의 비교

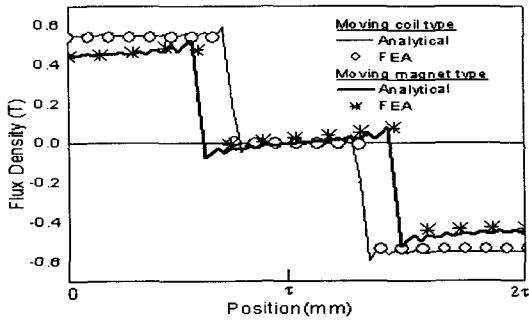
##### 4.1 자계특성 해석결과

표 1은 각각 해석에 사용된 가동코일형 LOA와 가동자석형 LOA의 치수변수를 보여준다. 가동코일형 LOA의 대략적인 제원은 영구자석 극 간격 70(mm), 영구자석 너비 50(mm), 영구자석 높이 10(mm), 공극길이 2(mm), 코일 극 간격 70(mm), 코일높이 8(mm) 및 코일 턴 수 700턴이고, 가동자석형 LOA의 대략적인 제원은 가동코일형의 영구자석과 코일부분을 바꾼 것과 같다. 그림 9, 그림 10과 그림 11는 각각 자석표면, 공극, iron 표면에서의 영구자석에 의한 자속밀도의 해석결과와 유한요소결과와의 비교를 보여준다. 해석 결과는 유한요소결과와 매우 잘 일치함을 볼 수 있으며, 가동코일형 LOA가 가동자석형 LOA에 비해 자석 체적이 크므로 자속밀도 역시 큼을 확인할 수 있고, 자석표면에서 iron 쪽으로 갈수록 파형의 변화를 확인할 수 있다. 그림 12, 그림 13과 그림 14는 각각 코일표면, 공극 iron 표면에서 코일에 의한 자속밀도의 해석결과와 유한요소결과와의 비교를 보여준다. 해석 결과는 유한요소결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있으며, 가동자석형이 가동코일형에 비해 코일 턴 수가 많으므로 자속밀도 역시 큼을 확인할 수 있다.

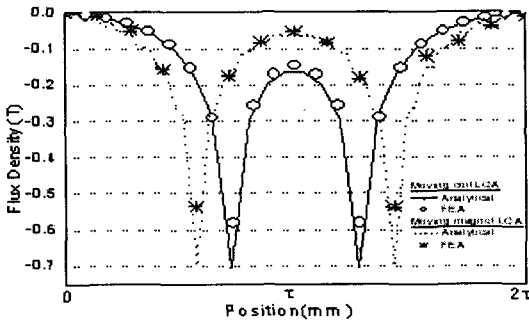
표 1 해석에 사용된 LOA의 치수변수

Table 1 Specifications of LOA used in analysis

사양 모델	항 목	치 수	항 목	치 수
가동코일형 LOA	영구자석극간격 ( $\tau$ )	70(mm)	코일극간격	70(mm)
	영구자석너비 ( $\tau_m$ )	50(mm)	코일높이 ( $\Gamma$ )	8(mm)
	영구자석높이 ( $\Delta$ )	10(mm)	턴 수 ( $N$ )	700
	공극 길이 ( $x_0$ )	2(mm)	전류 ( $i$ )	1(A)
가동자석형 LOA	영구자석극간격 ( $\tau$ )	70(mm)	코일극간격	70(mm)
	영구자석너비 ( $\tau_m$ )	40(mm)	코일높이 ( $\Gamma$ )	10(mm)
	영구자석높이 ( $\Delta$ )	8(mm)	턴 수 ( $N$ )	1100
	공극 길이 ( $x_0$ )	2(mm)	전류 ( $i$ )	1(A)



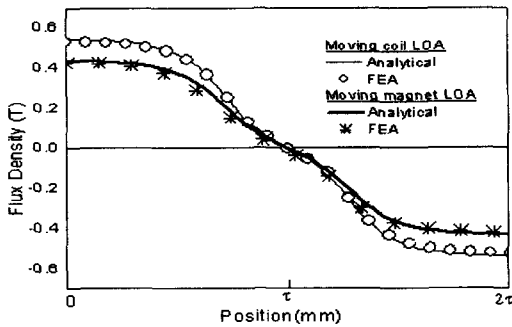
(a)



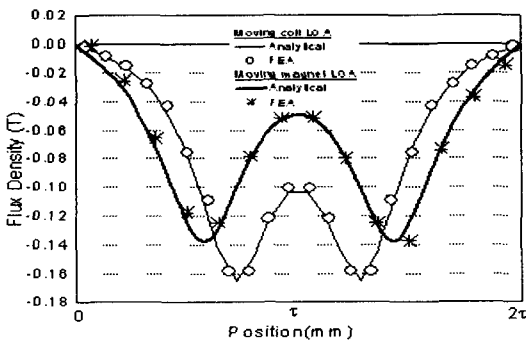
(b)

그림 9 자석표면에서의 영구자석에 의한 자속밀도 분포 : (a) 수직 성분 (b) 수평성분

Fig. 9 Field distributions on the magnet surface due to permanent magnets: normal (a) and tangential (b) component



(a)



(b)

그림 10 공극에서의 영구자석에 의한 자속밀도 분포 : (a) 수직 성분 (b) 수평성분

Fig. 10 Field distributions in the air-gap due to permanent magnets : normal (a) and tangential (b) component

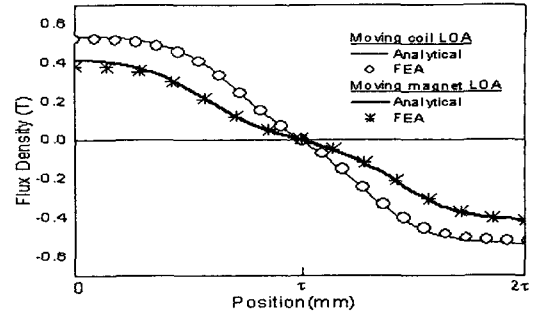
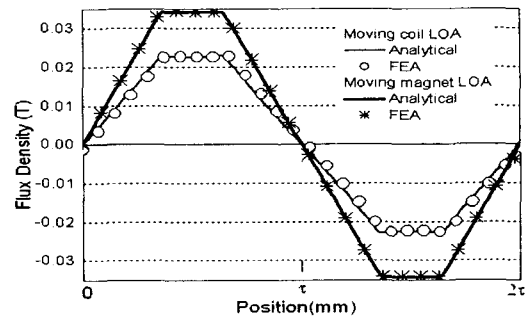
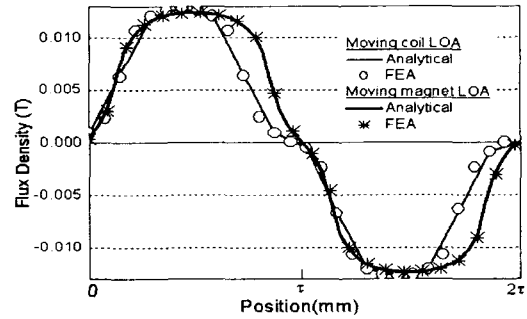


그림 11 고정자 안쪽 면에서의 영구자석에 의한 수직성분 자속밀도 분포

Fig. 11 Normal component field distributions on the inside surface of the stator due to permanent magnets



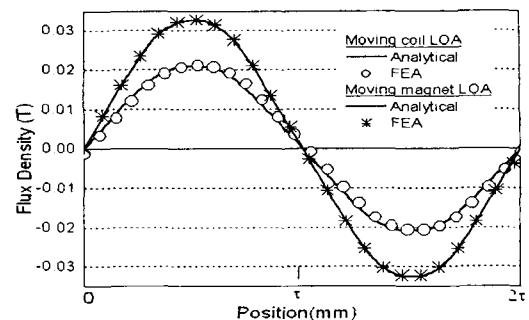
(a)



(b)

그림 12 코일 표면에서의 코일에 의한 자속밀도 분포 : (a) 수직 성분 (b) 수평성분

Fig. 12 Field distributions on the coil surface due to coil: normal (a) and tangential (b) component



(a)

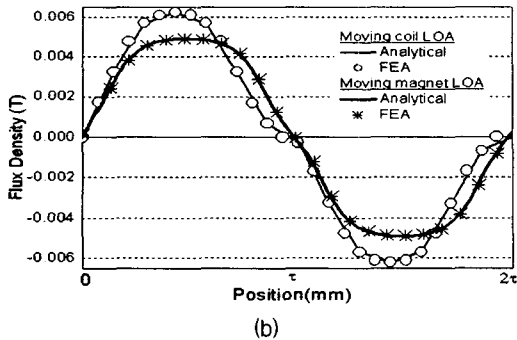


그림 13 공극에서의 코일에 의한 자속밀도 분포 : (a) 수직 성분 (b) 수평성분

Fig. 13 Field distributions in the air-gap due to coil : normal (a) and tangential (b) component

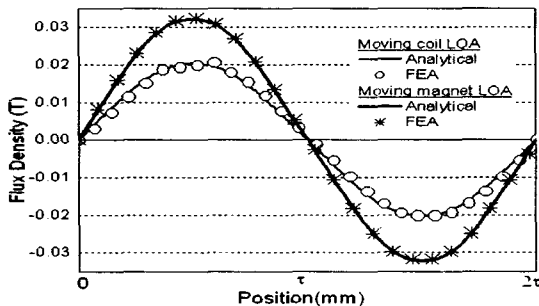


그림 14 가동자 축 안쪽 면에서의 코일에 의한 수직성분 자속밀도 분포

Fig. 14 Normal component field distributions on the inside surface of shaft due to coil

4.2 힘 특성 해석결과

그림 15 (a)와 (b)는 각각 변위에 따른 추력 분포와 자석체적 당 추력분포의 해석결과와 유한요소결과와의 비교를 보여 주며 해석 결과는 유한요소결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있다. 그림 16은 가동자석형 LOA와 가동코일형 LOA의 최대 추력, 자석체적 당 추력 특성 및 가동자 무게를 백분율로 비교한 것이다. 즉 각각의 항목에 대해 큰 값을 100%라 하고 작은 값을 100에 대한 비율로 표시한 것인데, 가동자 무게의 경우 Cu 와 NdFeB의 밀도가 각각 8.9 g/cm<sup>3</sup>와 7.3~7.5g/cm<sup>3</sup>임을 이용해 비교하였다. 그림 16에서와 같이, 가동자석형과 가동코일형의 최대추력은 거의 같지만, 자석체적 당 최대추력은 37%나 큼을 확인할 수 있다. 또한, 가동자의 무게 역시 가동자석형이 더 작기 때문에 제어적 측면에서 좀더 좋은 특성을 기대할 수 있다.

4.3 설계변수에 따른 힘 특성 해석결과

4.3.1 공극길이 증가에 따른 추력특성 분포

그림 17 (a)와 (b)는 각각 가동코일형과 가동자석형 LOA 모델에 대해 고정된 코일 높이 Γ에 대한 Δ/Γ 변화 및 공극 길이 x<sub>0</sub>/Γ의 변화에 대한 추력 최대값의 변화를 보여준다, 공극 길이가 증가할수록 추력은 지수 함수적으로 감소하며, 자석 높이가 증가할수록 자석체적 당 추력이 작아짐을 알 수 있다.

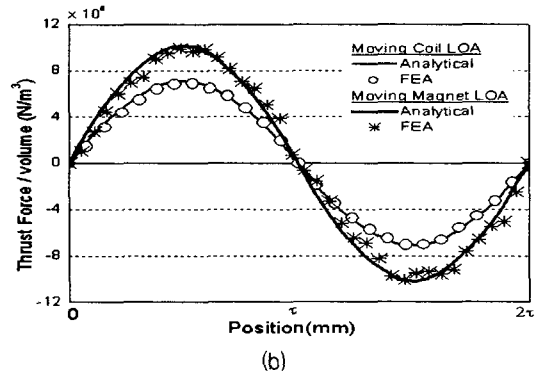
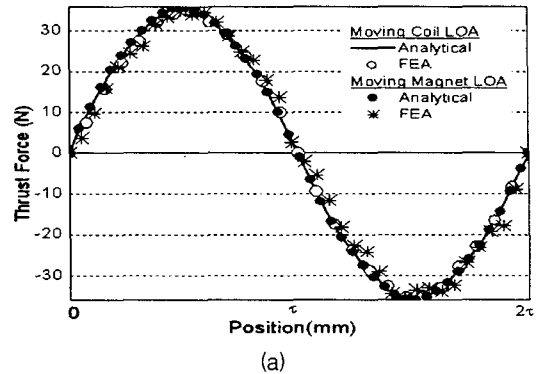


그림 15 해석결과와 유한요소해석결과와의 비교 : (a) 변위에 따른 (b) 자석체적당 변위에 따른 추력분포

Fig. 15 Comparison of between analytical and FEA results : thrust (a) and thrust per magnet volume (b) according to mover position

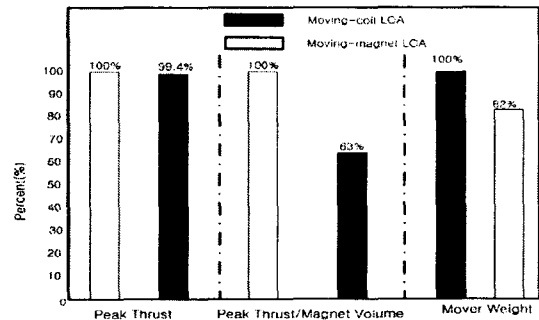
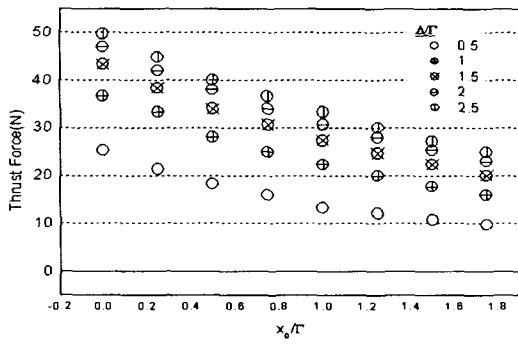


그림 16 가동자석형 LOA와 가동코일형 LOA의 추력 특성 및 가동자 무게 백분율

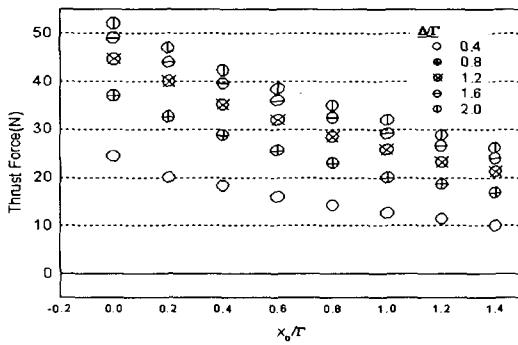
Fig. 16 Percentage for mover weight and maximum thrust of moving-coil and moving-magnet LOA

극길이가 증가할수록 추력은 지수 함수적으로 감소하는데, 특히 코일높이 대 공극길이의 비가 1.2 이후의 감소 폭이 이전보다 훨씬 둔화됨을 확인할 수 있다. 자석 높이가 증가할수록 추력이 커짐을 알 수 있다. 그림 18 (a)와 (b)는 각각 가동코일형과 가동자석형 LOA 모델에 대해 고정된 코일 높이 Γ에 대한 Δ/Γ 변화 및 공극 길이 x<sub>0</sub>/Γ의 변화에 대한 자석체적 당 추력 최대값의 변화를 보여준다, 공극 길이가 증가할수록 추력은 지수 함수적으로 감소하며, 자석 높이가 증가할수록 자석체적 당 추력이 작아짐을 알 수 있다.





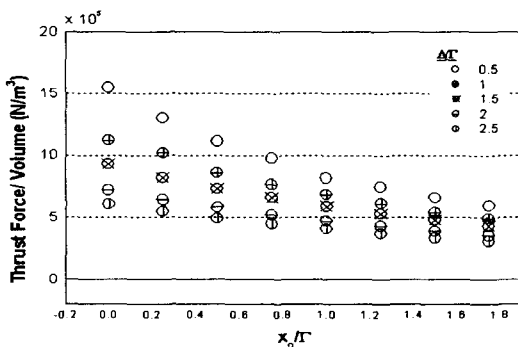
(a)



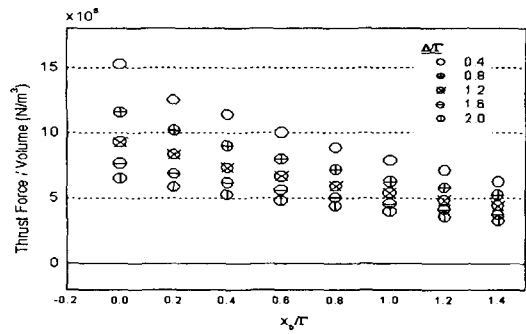
(b)

그림 17 다양한  $\Delta/l$ 에 대한 공극길이 변화에 따른 최대 추력 분포: (a) 가동코일형 LOA 및 (b) 가동자석형 LOA

Fig. 17 Peak thrust acting on mover vs. air-gap length for various values of  $\Delta/l$  : moving-coil LOA (a) and moving-magnet LOA



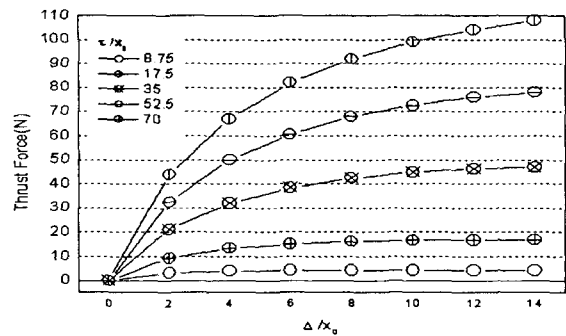
(a)



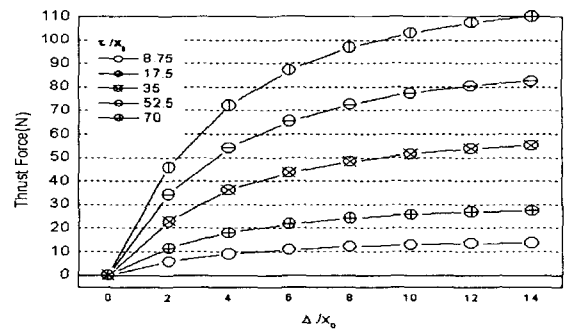
(b)

그림 18 다양한  $\Delta/l$ 에 대한 공극길이 변화에 따른 영구자석 체적 당 최대 추력 분포: (a) 가동코일형 LOA 및 (b) 가동자석형 LOA

Fig. 18 Peak thrust per magnet volume acting on mover vs. air-gap length for various values of  $\Delta/l$  : moving-coil LOA (a) and moving-magnet LOA



(a)



(b)

그림 19 다양한  $\tau/x_0$ 에 대한 자석 두께 변화에 따른 최대 추력 분포: (a) 가동코일형 LOA (b) 가동자석형 LOA

Fig. 19 Peak thrust acting on mover vs. permanent magnet thickness for various values of  $\tau/x_0$  : moving-coil LOA (a) and moving-magnet LOA

### 4.3.2 자석두께 증가에 따른 추력특성 분포

그림 19 (a)와 (b)는 각각 가동코일형과 가동자석형 LOA 모델에 대해 고정된 공극길이  $x_0$ 에 대한  $\tau/x_0$ 를 변수로 공극길이와 자석높이 비에 따른 추력 최댓값의 변화를 도시한 것이다. 자석 높이가 증가할수록 추력이 비선형적으로 증가됨을 알 수 있는데, 특히 공극길이 대 자석높이의 비가 6일 때까지 추력의 증가가 두드러지며, 6 이후에는 증가폭이 둔화되어 자석두께를 효율적으로 결정할 수 있다. 또한 고정된 공극길이에 대한 자석 너비의 비에서도 17.5보다 35이상이 비약적 증가를 보이는 것을 확인함으로써 자석너비 역시 효율적으로 결정할 수 있게 된다.

### 4.4 쇄교자속 및 역기전력 특성해석결과.

그림 20과 21은 각각 가동코일형과 가동자석형 LOA 모델에 대한 쇄교자속 및 역기전력 특성식의 해석결과와 유한요소결과와의 비교를 보여 준다. 해석 결과는 유한요소 해석결과와 매우 잘 일치함을 확인할 수 있고, 가동자석형이 가동코일형에 비해 역기전력 및 쇄교자속이 큼을 알 수 있다.

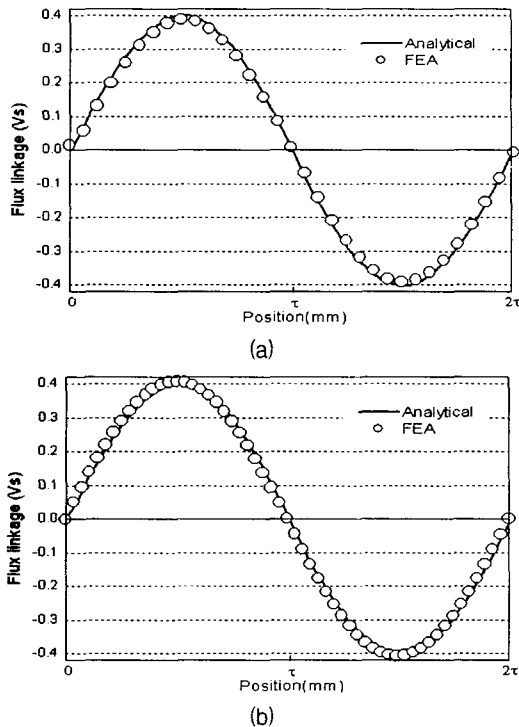


그림 20 쇠교자속 특성해석결과와 유한요소 결과와의 비교 : (a) 가동코일형 및 (b) 가동자석형 LOA

Fig. 20 Comparison of between analytical and FEA results for flux linkages : moving-coil (a) and moving-magnet LOA

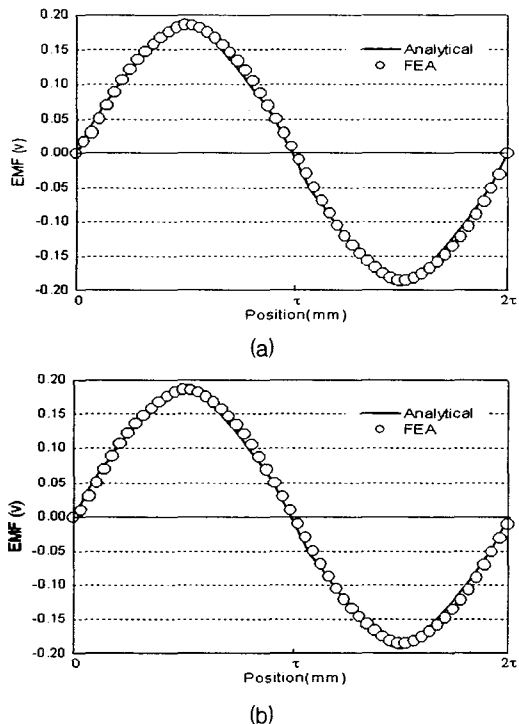


그림 21 역기전력 특성해석결과와 유한요소 결과와의 비교 : (a) 가동코일형 및 (b) 가동자석형 LOA

Fig. 21 Comparison of between analytical and FEA results for back emf : moving-coil (a) and moving-magnet LOA

### 5. 결 론

본 논문에서는 가동코일형과 가동자석형 LOA의 자계특성식을 전자기적 전달관계에 의하여 유도했다. 다음으로 자계특성식을 이용하여 추력, 쇠교자속 및 역기전력 특성식이 제시되었고, 공극길이 또는 자석두께와 같은 설계변수에 따른 힘 특성과 각각의 모델에 대한 자석체적 당 힘 특성을 도출함으로써, 가동코일형과 가동자석형 LOA의 최적 치수 변수와 특성을 해석하여 응용하기 위한 기본 자료를 확립하였다. 해석결과로 볼 때, 가동자석형과 가동코일형의 최대추력은 거의 같았으나 자석체적 당 힘은 가동자석형이 가동코일형에 비해 37% 큰 반면에 가동자의 무게는 가동자석형이 가동코일형에 비해 18%가 작음을 확인함으로써, 가동자석형이 가동코일형에 비해 자석체적 당 힘과 가동자의 무게 측면에서 우수함을 확인했다. 또한, 해석 결과는 유한요소법과 비교하여 매우 잘 부합함을 확인함으로써 해석결과의 타당성을 입증했고, 특히 이미 제작되어진 가동코일형 LOA는 정지 추력 실험을 실시하고 해석결과와 비교함으로써 해석방법의 타당성을 뒷받침했다. 이로써 본 논문은 LOA로 구동되는 시스템의 고성능화에 가장 중요한 자료가 될 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 본 논문에서 얻어진 역기전력, 코일 인덕턴스를 바탕으로 가동코일형 LOA의 동 특성을 해석하고, 구동실험을 통하여 동 특성을 검증해 나가기로 한다.

### 감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 정상섭 “진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석”, 충남대학교 기기 및 재료 전공, 박사학위논문, 2002. 2
- [2] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 박찬일, 정태영, “리니어 왕복운동 제어시스템 구동용 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계제작 및 제어정수 도출”, 전기학회 논문지 제 48-B권 5호, pp.241-248, 1999. 5
- [3] Jiabin Wang, Geraint W. Jewell and David Howe, “A general frame work for the analysis and design of tubular linear permanent magnet machines”, IEEE Trans. Magn., vol.35, no.3, pp.1986-2000, May 1999.
- [4] S.A. Nasar, Iboldea, “Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application”, Prentice-Hall, Inc., 1987
- [5] M. Watada, Y. Fukuya, D. Ebihara, T. Okada, T.Takura, “A Study on Kinetic characteristics of Cylindrical Moving Coil Linear DC Motor for a Vibrator”, IEEE Trans. Magn., vol.31, no.6, pp. 3725-3727, Nov 1995.
- [6] Richard E. Clark, David Howe, and Geraint W. Jewell, “The Influence of Magnetization Pattern on the Performance of a Cylindrical Moving-Magnet Linear

Actuator", IEEE Trans. Magn., vol.36, no.5, pp. 3571-3574, Sep 2000.

- [7] Seok-Myeong Jang and Sang-Sub Jeong, "Armature Reaction Effect and Inductance of Moving Coil Linear Oscillatory Actuator with Unbalanced Magnetic Circuit", IEEE Trans. Magn., vol.37, no.4, pp. 2847-2850, July 2001.
- [8] Richard E. Clark, S.Smith, P.H. Mellor, D. Howe, "Design Optimisation of Moving-Magnet Actuators for Reciprocating Electro-Mechanical Systems", IEEE Trans. Magn., vol.31, no.6, pp.3746-3748, Nov 1995.
- [9] 김덕현, 엄상준, 강규홍, 홍정표, 김규탁, "불평형 자기회로를 고려한 가동 코일형 리니어 진동 액추에이터의 설계 및 특성해석", 전기학회 논문지 제 49-B 권 6호, pp.403-410, 2000. 6
- [10] 장석명, 정상섭, 박희창, 문석준, 정종한, 박찬일, 정태영, "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용 효과를 고려한 가동코일형 리니어모터의 정특성", 전기학회 논문지 제 48-B권 1호, pp.19-26, 1999. 1
- [11] R.E Clark, D.S. Smith, P.H. Mellor, D. Howe, "Design optimization moving-magnet actuators for reciprocating electro-mechanical system," IEEE Trans. Magn., vol.31, no.6, pp. 3746-3748, 1995
- [12] 山田 一, "리니어 모터 응용핸드북", 일본공업조사회, 1985
- [13] David L.Trumper, Won-jong Kim, Mark E. Williams, "Design and Analysis Framework for Linear Permanent-Magnet Machines," IEEE Trans. IAS., vol.32, no.2, pp. 371-379, March/April 1996

저 자 소 개



**장석명 (張錫明)**  
 1949년 7월 3일생. 1986년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수), 1978년~현재 충남대 전기공학과 교수, 현재 당학회 부회장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부분회 회장  
 Tel : 042-821-5658  
 E-mail : smjang@ee.cnu.ac.kr  
 Homepage : http://iemechas.cnu.ac.kr



**최장영 (崔璋英)**  
 1976년 10월 20일생. 2003년 충남대 전기공학과 졸업. 2003년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
 Tel : 042-822-4933  
 E-mail : aramis76@cnu.ac.kr



**정상섭 (鄭相燮)**  
 1971년 1월 29일생. 1996년 충남대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 석사 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소 COMP그룹 선임연구원  
 Tel : 02-818-7961  
 E-mail : jsangsub@lge.com



**이성호 (李成浩)**  
 1971년 11월 1일생. 1997년 충남대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 석사졸업. 2003년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 LG 전자 디지털 어플라이언스 연구소 요소기술그룹 선임연구원  
 Tel : 02-818-7961  
 E-mail : iemechas@lge.com



**조한욱 (趙漢旭)**  
 1976년 12월 3일생. 2002년 충남대 전기공학과 졸업. 2002년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.  
 Tel : 042-822-4933  
 E-mail : hwcho@cnu.ac.kr