

리니어 진동액튜에이터(LOA)의 설계 및 특성 해석법

장석명*, 박찬일**, 박희창**, 손영수**, 김형규*, 서진호*
 *충남대학교 전기과, **한국기계연구원

Design and Characteristic Analysis Method of LOA

S.M. Jang*, C.I. Park**, H.C. Park**, Y.S. Son**, H.G. Kim*, J.H. Seo*
 *Chungnam Nat'l Univ., **Korea Institute of Machinery & Metals

Abstract

The hybrid type LOA is electric machine which reciprocates the mover by thrust force produced by interaction of flux between coil current and permanent magnet. In this paper, the shape of LOA is designed conceptually and calculating algorithm of leakage inductance in the stator slot and magnetizing inductance between stator and mover is obtained. Using the conceptually designed LOA, the change of flux distribution is studied in consideration with movement of a mover.

1. 서 론

리니어 진동 액튜에이터(LOA)는 고정자 코일에 정현파 또는 구형파의 전압을 교번적으로 인가하여 가동자를 왕복직선운동을 시키는 장치로 스틸링 엔진, 콤프레사, 가진기등의 산업용 기기에서 인공 심장의 박동 장치 등의 의학용에 이르기까지 널리 이용되고 있으며, 이의 응용은 더욱 확대될 전망이다. LOA는 가동자의 형상에 따라 원통형과 디스크형으로 분류되며, 사용하는 재질에 따라 코일 가동형, 철심 가동형, 영구자석 가동형 및 철심과 영구자석을 병용한 하이브리드형으로 분류된다.

본 논문에서 채택한 LOA는 하이브리드형 LOA로 자기회로 해석에 의하여 하이브리드형 LOA의 고정자 슬롯내에서의 누설 인덕턴스의 일반식과 고정자와 가동자 사이의 자화인덕턴스 계산 알고리즘을 구성하였다. 또한, 영구자석의 누설자속을 계산함으로써 영구자석의 자속밀도와 누설계수와의 관계식을 구하였다.

2. 하이브리드형 LOA

LOA의 추력은 자속에 의해 결정되므로 특성해석을 위해서는 전류, 권선수, 인덕턴스, 누설계수등이 고려되어야 한다. 따라서 1차 권선의 전류에 의한 인덕턴스를 구하고, 영구자석의 누설계수를 계산하여 전체 자속, 추력을 구하고자 하였다.

2.1 구조

그림1은 하이브리드형 LOA의 구조이다. 2개의 고정자 권선과 가동자 및 가동자에 부착된 3개의 영구자석으로 구성되어 있다. 코일 1과 코일 2에 교번적으로 전원을 인가하면 코일에 의한 자속과 영구자석에 의한 자속의 상호작용으로 가동자는 좌우로 직선왕복운동을 하게 된다.

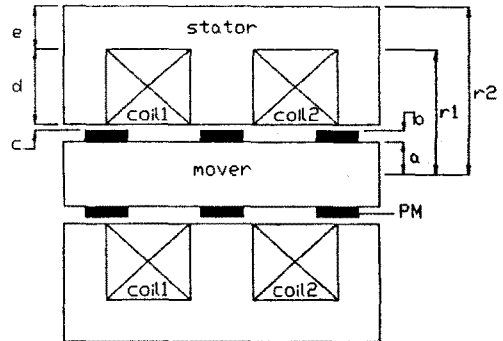


그림 1. 하이브리드형 LOA의 구조

2.2. 전류에 의한 인덕턴스 계산

고정자 권선에 전류를 인가하면 고정자 슬롯내의 누설 인덕턴스 및 고정자와 가동자 사이에 자화 인덕턴스가 발생한다. 자기회로 해석법을 이용하여 누설 인덕턴스 및 자화 인덕턴스의 계산 알고리즘을 구한다.

2.2.1. 슬롯내의 누설 인덕턴스

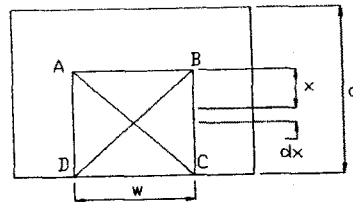


그림 2. 고정자 슬롯의 형상

1개의 슬롯내에서의 누설 인덕턴스를 계산하기 위하여 다음과 같이 가정한다.

- 1) 코일의 전류 밀도는 균일하다.

2) 슬롯내의 누설자속은 평행하다.

3) 철심의 투자율은 공기와 비교하여 매우 크다.

그림 2는 슬롯의 형상을 나타낸 것으로 코일의 권수를 N , 인가전류를 I 라면 슬롯내에서의 누설자속 ϕ_σ 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \phi_\sigma &= \int_0^d d\phi_\sigma \\ &= \int_0^d (N\frac{x}{d})^2 2\pi(r_2-x) \frac{\mu_0 I}{w} dx \\ &= \frac{\mu_0 \pi N^2}{w} (\frac{2}{3} r_2 d - \frac{1}{2} d^2) \end{aligned} \quad (1)$$

따라서, 누설 인덕턴스는 식 (1)로부터 아래와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} L_\sigma &= \frac{\phi_\sigma}{I} \\ &= \frac{\mu_0 \pi N^2}{w} (\frac{2}{3} r_2 d - \frac{1}{2} d^2) \end{aligned} \quad (2)$$

2.2.2. 자화 인덕턴스

그림 3은 권선에 전류를 인가하였을 때 고정자와 가동자 사이의 자속 분포를 나타낸 그림이다. 자기회로에 대하여 Ampere의 주회적분 법칙을 적용하면 식 (3)과 같다.

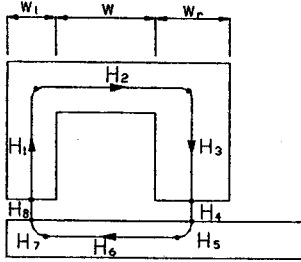


그림 3. 자화자속의 분포

$$\begin{aligned} H_1(d + \frac{e}{2}) + H_2(w_s + \frac{w_l + w_r}{2}) \\ + H_3(d + \frac{e}{2}) + H_4(b+c) + H_5(\frac{a}{2}) \\ + H_6(w_s + \frac{w_l + w_r}{2}) + H_7(\frac{a}{2}) \\ + H_8(b+c) = NI \quad (\text{A turn}) \end{aligned} \quad (3)$$

그런데, 그림 3의 모델에서 $H_1=H_3$, $H_4=H_8$, $H_5=H_7$ 의 조건이 성립되므로 식 (3)은 식 (4)와 같이 간략하게 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_1(2d + e) + H_2(w_s + \frac{w_l + w_r}{2}) \\ + H_4(2(b+c) + H_5 a + H_6(w_s + \frac{w_l + w_r}{2})) \\ = NI \end{aligned} \quad (4)$$

각 영역의 경계면에서 자속의 연속성을 적용하여 공극에서의 자속을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\phi_m = NB_{gap} \pi a (w_l + w_r) \quad (5)$$

따라서 자화 인덕턴스 L_m 은 식 (6)과 같이 표현된다.

$$L_m = \frac{\phi_m}{I} = \frac{N^2 B_{gap} \pi a (w_l + w_r)}{F} \quad (6)$$

2.3. 영구자석의 누설계수

영구자석의 누설계수는 가동자의 구조에 따라 다르다. 본 논문에서 채택한 LOA의 영구자석의 누설자속 분포는 그림 4에 나타나 있다. 그림 4는 고정자극 근방에서의 누설자속 분포로서 영역 ABC, CDEF, GHI, IJKL의 4영역으로 세분하여 고찰하며, 각 영역에서의 누설자속을 $\Phi_{\sigma m1}$, $\Phi_{\sigma m2}$, $\Phi_{\sigma m3}$, $\Phi_{\sigma m4}$ 라 하면 아래와 같이 구한다.

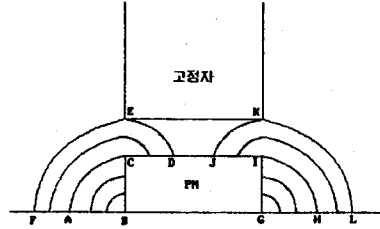


그림 4. 영구자석의 누설자속 분포

1) 영역 ABC에서 누설자속 ($\Phi_{\sigma m1}$)

영구자석의 자계의 세기를 H_m 이라하면, 기자력 F_m 은 다음의 식으로 표현된다.

$$F_m = -H_m l \quad (7)$$

누설자속은 기자력과 자기저항과의 관계식으로부터 식 (9)와 같다.

$$d\Phi_{\sigma m1} = \frac{F_m}{dR} \quad (8)$$

$$= -2H_m \mu_0 (2a+b) dl$$

$$\Phi_{\sigma m1} = \int_0^b d\Phi_{\sigma m1} \quad (9)$$

$$= -2H_m \mu_0 (2a+b)b$$

$2a+b$: 자로의 평균반경

2) 영역 CDEF에서 누설자속 ($\Phi_{\sigma m2}$)

영역 CDEF에서의 자기저항은

$$dR = \frac{b+2l}{2\mu_0(2a+b+c)dl} \quad (10)$$

으로 표현된다. 따라서 영역 CDEF에서의 누설자속은 식 (12)와 같다.

$$d\Phi_{\sigma m2} = \frac{-2H_m \mu_0 (2a+b+c)b}{b+2l} dl \quad (11)$$

$$\Phi_{\sigma m2} = \int_0^c d\Phi_{\sigma m2} \quad (12)$$

$$= -H_m \mu_0 (2a+b+c)b \ln \frac{b+2c}{b}$$

$\Phi_{\sigma m1} = \Phi_{\sigma m2}$, $\Phi_{\sigma m3} = \Phi_{\sigma m4}$ 이므로 전 영역에서의 누설자속 ($\Phi_{\sigma m}$)은 식 (13)과 같다.

$$\Phi_{\sigma m} = 2(\Phi_{\sigma m1} + \Phi_{\sigma m2})$$

$$= -H_m \mu_0 [4(2a+b) - 2(2a+b+c) \ln \frac{b+2c}{b}] b \quad (13)$$

$$= -KH_m$$

식 (13),(14)는 영구자석의 누설자속은 자계의 세기와 비례하므로, 영구자석의 자속밀도가 증가하면 누설자속이 감소함을 나타낸다.

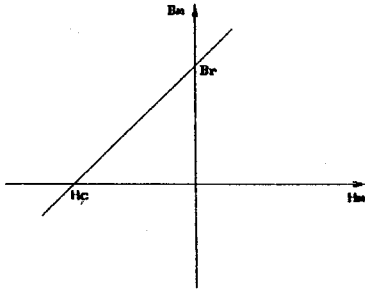


그림 5. 영구자석의 감자곡선

그림 5는 영구자석의 감자곡선으로서 식으로 표현하면 식 (14)와 같다.

$$H_m = H_c - \frac{H_c}{B_r} B_m \quad (14)$$

영구자석의 자속 Φ_m 과 자속밀도 B_m 과의 관계식은 다음의 식으로 표현된다.

$$\Phi_m = \pi(2a+b)r_m B_m \quad (15)$$

영구자석의 누설계수 (K_{om})는 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} K_{om} &= \frac{\Phi_m}{\Phi_m - \Phi_s} \\ &= \frac{1}{1 + KH_c \left[\frac{1}{\Phi_m} - \frac{1}{B_r \pi(2a+b)r_m} \right]} \\ &= \frac{1}{1 + KH_c \left(1 - \frac{B_m}{B_r}\right) \frac{1}{\Phi_m}} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (15),(16)으로부터 자속밀도가 감소하면 누설계수가 증가하므로 누설자속을 감소시키기 위해서는 자속밀도가 큰 영구자석을 선택하여야 한다.

2.4. 추력의 계산

주어진 해석모델의 현상을 고찰하기 위하여 원통좌표계의 $\nabla \times \vec{A}$ 를 적용하고, 축대칭을 고려해보면 식 (17)과 같은 지배방정식이 얻어진다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\theta) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_\theta}{\partial z} \right) = -\mu (J_\theta + J_m) \quad (17)$$

따라서 식 (17)에서 자속밀도 B_r 및 B_z 을 계산하고 다음의 식 (18)을 이용하여 공극에서의 축방향 힘을 구할 수 있다.

$$F_z = \frac{r}{\mu_0} \iint B_z B_r dr d\theta \quad (18)$$

B_z : 자속밀도의 축방향 성분

B_r : 자속밀도의 반경방향 성분

다음 그림 6은 LOA에서의 고정자와 가동자의 위치 변화에 따른 등 벡터포텐셜 선도를 나타낸 것이다.

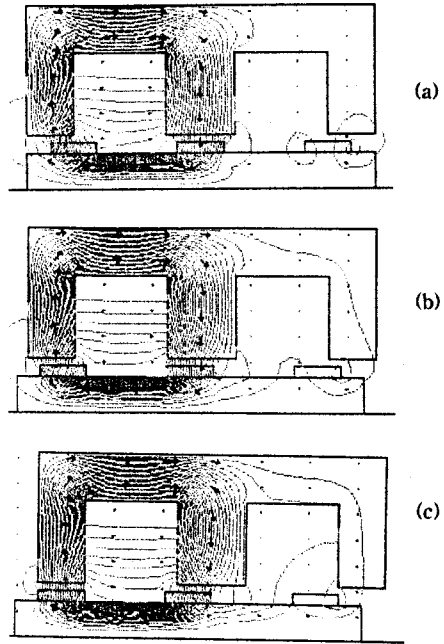


그림 6. 가동자의 이동에 따른 자속분포의 변화
(a) distance=0 (b) distance=-5[mm]
(c) distance=-10[mm]

3. 결론

본 연구에서는 자동화 시스템의 왕복운동계의 구동장치로 널리 쓰이는 LOA의 하이브리드형 LOA를 선택하였다. 하이브리드형 LOA의 설계 단계로서 형상을 결정하고 형상에 따른 특성을 해석하기 위하여 자기 회로 해석법에 의하여 슬롯내의 누설 인덕턴스와 고정자와 가동자의 자화 인덕턴스 계산 알고리즘을 구하였으며 유한 요소 해석을 통하여 가동자의 위치에 따른 자속분포의 변화를 고찰하였다.

이상의 결과를 토대로 요구 추력에 대한 하이브리드형 LOA의 치수를 결정하고, 실제 모델의 제작, 실험을 통하여 응용, 개발을 위한 연구를 하고자 한다.

참고 문헌

1. S.A. Nasar et al "Linear Electric Motors : Theory, Design, and Practical Application", Prectice-Hall, Inc. ,1987
2. "Linear Motor and Their Application", IEEJ Magnetic Actuator committee(book), 1983
3. D. Ebihara et al "Development and Design of Single-winding Linear Oscillatory Actuator", T.IEEJ, Vol.113-D, No. 1, 1993
4. S.A. Nasar et al "Inductance and the Leakage Field of a Tubular PM Linear Alternator", Electric Machines and Power Systems, 14:83-94, 1988