

직선 왕복 액추에이터의 구조에 따른 설계 및 특성 검토

Design and Characteristic Analysis of Linear Oscillating Actuator with Structure

김해중* · 이충성* · 홍정표†
 (Hae-Joong Kim · Choong-Sung Lee · Jung-Pyo Hong)

Abstract - This paper provided two types of design method on moving core type LOA and one type of design method on moving coil type LOA, and compared and examined each of its characteristics. In order to conduct parametric design process, voltage equation was used to schematize Lmin/K and L/M map, and the schematized map was used to determine Lmin, K or L, M. In order to meet requirements such as thrust force and input voltage and to satisfy the target values of Lmin, K or L, M, the types and sizes of each type were designed using geometry design process. 2-FEA was conducted for each of the designed model. After examining thrust force based on the location of the mover, Type-1 showed radical change in thrust force as movers moved, and Type-2 and Type-3 showed constant appearance of thrust force. The total volume of the designed LOA model was compared to select the model with highest thrust force density. Also, the weight of the mover for each model was compared in order to select the model that was predicted to have highest mechanical responsiveness and stroke characteristics.

Key Words : Oscillating, Linear motor, Moving core, Moving coil, actuator

1. 서론

오늘날 압축펌프, 진동기, 로봇 등과 같은 많은 산업분야에서 구조가 간단하고, 출력밀도 및 효율이 높은 단상 리니어 진동 액추에이터(Linear Oscillatory Actuator, LOA)의 사용이 점점 더 늘어나고 있다[1-4]. 직선왕복운동이 필요한 분야에 일반적으로 사용되는 회전형 액추에이터를 사용할 경우 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위해 각종기어, 벨트나 체인, 캠 등의 기계적 변환기구가 필요하고, 이것은 시스템의 부피증가로 이어진다. 그러나 리니어 진동 액추에이터는 이러한 추가 장치가 필요하지 않기 때문에 시스템 부피가 감소하고, 기어나 캠 등에서 발생하는 기계손이 없기 때문에 시스템 효율을 증가시킬 수 있다. 또한 기계적 소음을 줄일 수 있고, 운전 속도에서도 제한을 받지 않는 장점을 갖는다[5-8]. 리니어 진동 액추에이터는 가동자의 구성에 따라 가동 철심형, 가동 코일형, 가동 자석형 등으로 나눌 수 있다[9]. 본 논문에서는 가동 철심형과 가동 코일형 LOA에 대한 설계 및 검토를 수행하였다. 두 가지 타입의 가동 철심형 액추에이터와 한가지 타입의 가동 코일형

액추에이터에 대해 등가자기회로를 적용하여 역기전력 및 인덕턴스를 산정하고, 전압방정식을 이용하여 L/K 파라미터 맵을 작성하였으며, 이것을 통하여 액추에이터 설계를 진행하였다. 설계된 모델에 대해 특성을 확인하기 위해 2D-FEA를 이용하여 자속밀도 분포 및 추력을 계산하였으며, 각 타입의 무게 및 추력특성을 비교하였다.

2. Stator Equivalent Magnetic Circuit를 이용한 tooth폭 /yoke폭 결정

본 논문에서는 가동철심형과 가동코일형 LOA에 대해 설계 및 검토를 진행하였다. 가동철심형 LOA는 가동자에 리

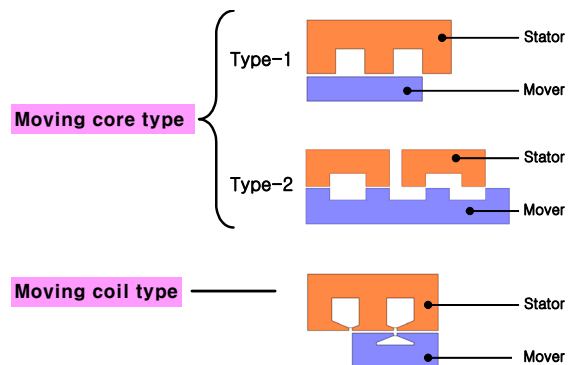


그림 1 직선 왕복 액추에이터의 검토 모델

Fig. 1 Examination model of LOA

† Corresponding Author : Dept. of Automotive Engineering, Hanyang University, Korea.

E-mail: hongjp@hanyang.ac.kr

* Dept. of Automotive Engineering, Hanyang University, Korea.

Received : January 16, 2015; Accepted : March 30, 2015

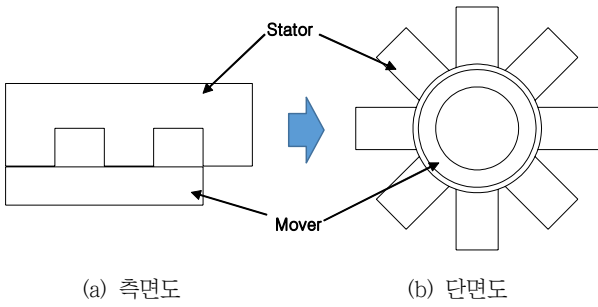


그림 2 직선 왕복 액추에이터의 측면도 및 단면도
 Fig. 2 Lateral and cross-sectional view of LOA

드선이 필요하지 않고, 구조가 간단하다. 또한 튼튼하기 때문에 유지보수가 쉽고, 고장에 강한 장점을 갖으며, 제작이 쉽기 때문에 제작비용이 저렴하다. 그러나 고정자와 가동자 사이의 강한 흡입력을 고려해 지지에 유의하여야 한다. 또한 고정자의 권선 수가 많고, 인덕턴스가 높기 때문에 전기적 시정수가 크고, 역률이 나쁜 단점을 갖는다.

가동 코일형 LOA는 가동자에 리드선이 필요하기 때문에 리드선의 피로로 인한 유지보수가 필요하다. 또한 가동자에 코일이 감기기 때문에 가동철심형 LOA에 비해 가동자의 무게가 증가하고, 기계적 시정수가 나쁜 단점을 갖는다. 그러나 고정자의 권선 수가 가동철심형 LOA에 비해 적기 때문에 전기적 시정수가 작고, 역률이 좋은 장점을 갖는다.

그림 1은 본 논문에서 검토한 두가지 타입의 가동철심형 LOA와 한가지 타입의 가동코일형 LOA를 보여주고 있다. Type-1은 가동철심형 LOA이다. 가동철심형 LOA는 가동자 위치에 따른 자기인덕턴스변화가 커야하기 때문에 tooth tip이 제거되며, 오픈 슬롯 형태를 갖는다. Type-1은 3개의 tooth로 고정자가 이루어져 있고, 가동자는 원통형으로 이루어져 있다. 고정자에 형성되어 있는 두 개의 슬롯은 DC 코일이 위치하는데, 한쪽 코일이 on일 때 다른 쪽 코일은 off상태가 된다. Type-2 역시 가동철심형 LOA이다. Type-2는 2개의 tooth를 갖는 2개의 고정자로 이루어져 있고, 가동자는 4개의 tooth를 갖는다. 독립된 두 개의 고정자에 감겨있는 DC코일은 한쪽 코일이 on상태 일 때 다른 쪽 코일은 off상태가 된다. Type-2의 가동자 위치에 따른 인덕턴스 변화 양상은 Type-1과 다르며, 그러므로 가동자 위치에 따른 토크파형이 다를 것으로 예상할 수 있다. Type-3은 가동코일형 LOA이다. 3개의 tooth로 고정자가 이루어져 있고, 2개의 tooth로 가동자가 이루어져 있다. 가동자에 감겨 있는 DC 코일에는 가동자의 위치에 따라 +, -전류가 흐른다. 고정자에는 서로 반대방향의 DC 전류가 흐르는 코일이 감겨있다. Type-3은 자기인덕턴스의 변화보다는 고정자 코일과 가동자 코일의 상호 인덕턴스 변화가 추력을 발생시키는 주 요인이기 때문에 추력의 리플을 줄이기 위해 슬롯은 semi-closed slots 형태를 갖는다. 고정자 코일은 Type-1, 2와 마찬가지로 한쪽 코일이 on상태 일 때 다른 쪽 코일은 off상태가 된다.

그림 2는 LOA의 측면도와 단면도를 보여주고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 가동자는 원통형태이고 고정자는 적층철심으로 이

루어진 여러 개의 고정자로 이루어진다. 그러므로 고정자와 가동자에 감기는 코일은 토로이드(toroid) 형태를 이룬다. 그림 3은 각 타입에 대한 가동자 위치에 따른 자속분포도를 보여준다.

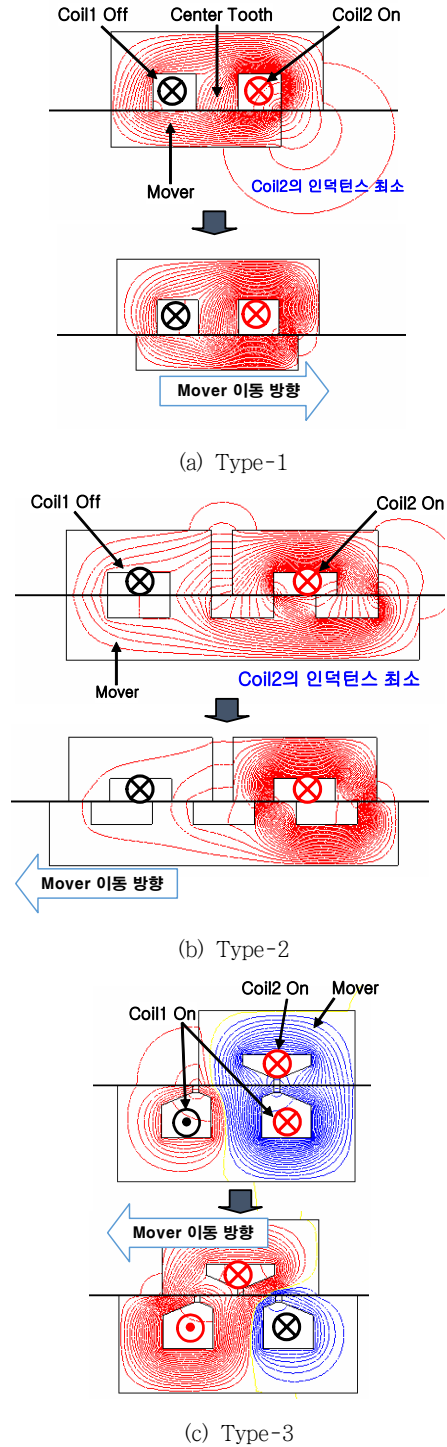


그림 3 직선 왕복 액추에이터의 동작원리
 Fig. 3 Operating principle of LOA

Type-1, Type-2는 그림에서 오른쪽 코일이 on 되었을 경우 가동자가 왼쪽에 위치할 때 가장 낮은 인덕턴스를 갖게 되고, 자기인덕턴스가 증가하는 방향인 오른쪽 방향으로 이동하게 된다. Type-2는 가동자 위치에 따른 추력의 파형을 개선한 형태이고 뒤에서 자세히 다룬다. Type-3은 가동자가 오른쪽에 위치할 경우 가장 낮은 상호인덕턴스를 갖게 되고, 왼쪽으로 이동함에 따라 상호인덕턴스가 증가한다.

3. stator tooth/yoke 폭에 따른 유한요소 해석

본 논문에서 LOA의 수학적 모델링은 정상상태에서의 전압방정식과 선형조건을 가정한 등가자기회로법을 이용하게 되는데, 등가자기회로법을 통하여 공극자속밀도 및 인덕턴스 등의 파라미터와 코일의 턴 수 및 목표파라미터를 만족하는 액추에이터의 size가 결정된다. 등가자기회로는 main flux path와 fringing flux path를 이용하여 구성할 수 있다. 그림 4는 Type-1의 각 부분에서의 flux path를 보여준다. 각 부분의 flux path에 대한 permeance는 그림과 같이 4가지 형태로 나눌 수 있다. permeance 1은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_1 = \mu_0 l \frac{2}{\pi} \tag{1}$$

여기서 l 은 고정자의 적층길이이고, μ_0 는 진공의 투자율이다. permeance 2는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_2 = \frac{2\mu_0 l}{\pi} \ln \left(\frac{\delta + \frac{\pi W}{2}}{\delta} \right) \tag{2}$$

여기서 W 는 고정자의 tooth 폭이고, δ 는 공극의 길이이다. permeance 3는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_3 = \mu_0 l \frac{4}{\pi} \tag{3}$$

Permeance 3의 길이는 permeance 2의 절반이기 때문에 permeance의 크기는 두 배가 된다.

$$P_4 = \mu_0 l \frac{W}{\delta} \tag{4}$$

제한된 전압과 전류조건과 요구되는 출력조건을 만족하는 파라미터를 산정하기 위해 전압방정식을 이용한 입력전류와 출력, 추력 등의 수학적 모델링이 필요하다. 가동철심형 LOA의 수학적 모델링을 위한 전압방정식은 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$V = Ri + L(x) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(x)}{dx} \tag{5}$$

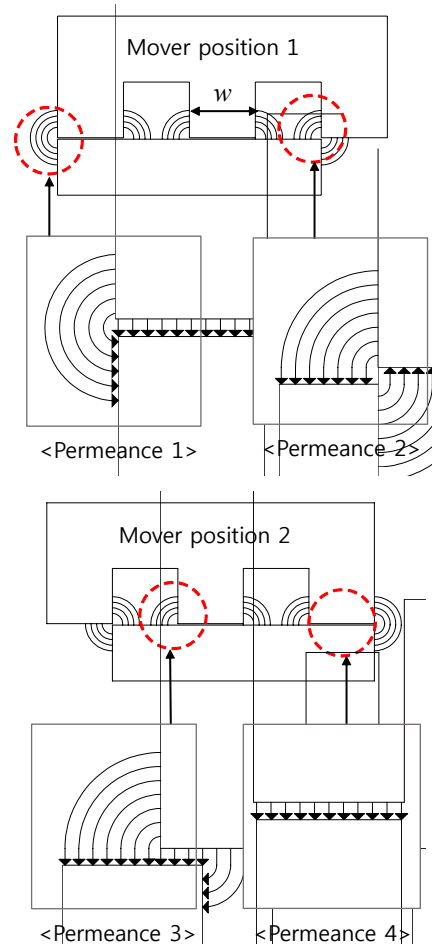


그림 4 Fringing flux path에 대한 permeance
Fig. 4 Permeance on fringing flux path

여기서 V 는 입력전압이고, R 은 권선저항, i 는 입력전류, L 은 자기인덕턴스, v 는 가동자 속도이다. 식(5)을 이용하여 다음과 같은 입력전류 수식을 유도할 수 있다.

$$I = \frac{V}{R + 2fL_{\min}(K-1)}, \quad K = \frac{L_{\max}}{L_{\min}} \tag{6}$$

여기서 L_{\max} 는 자기인덕턴스의 최대치이고, L_{\min} 는 자기인덕턴스의 최소치이고, K 는 자기인덕턴스 최대치와 최소치의 비율이다. LOA의 추력은 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$F = \frac{1}{2} I^2 \frac{(K-1)L_{\min}}{X_{\max}} \tag{7}$$

여기서 X_{\max} 는 가동자의 최대변위이다. LOA의 추력은 자기인덕턴스의 최대치와 최소치의 비율을 이용하여 산정하였다. LOA의 출력과 가동자의 속도는 다음과 같이 표현된다.

$$P = Fv, \quad v = 2fX_{max} \quad (8)$$

여기서 ω 는 입력전압의 주파수이다.

가동코일형 리니어 액추에이터의 전압방정식을 이용한 수학적 모델링을 위해 자기인덕턴스는 일정하고, 상호인덕턴스는 선형적으로 변화하고, 역기전력과 입력전류는 동상이라고 가정한다. 가동코일형 리니어 액추에이터의 수학적 모델링을 위한 전압방정식은 다음과 같은 수식으로 표현된다.

$$V = R_1 i_1 + L_{11} \frac{di_1}{dt} + e \quad (9)$$

여기서 R_1 은 가동자 코일의 권선저항, L_{11} 은 가동자 코일의 자기인덕턴스, e 는 역기전력이다. 식 (10)의 전압방정식을 이용한 입력전류는 다음 식과 같다.

$$I_1 = \frac{-2eR_1 \pm \sqrt{(2eR_1)^2 - 4(\omega^2 L_{11}^2 + R_1^2)(e^2 - V^2)}}{2(\omega^2 L_{11}^2 + R_1^2)} \quad (10)$$

여기서 ω 는 전기각속도이다.

그림 5와 6은 가동철심형과 가동코일형 LOA의 설계과정을 보여주고 있다. 그림 5는 parametric design process를 보여주는 데, 이 단계를 수행함으로써 Lmin/K 혹은 L/M map을 도식화할 수 있다. 가동철심형 LOA에 대해서는 Lmin/K map을 도식화하

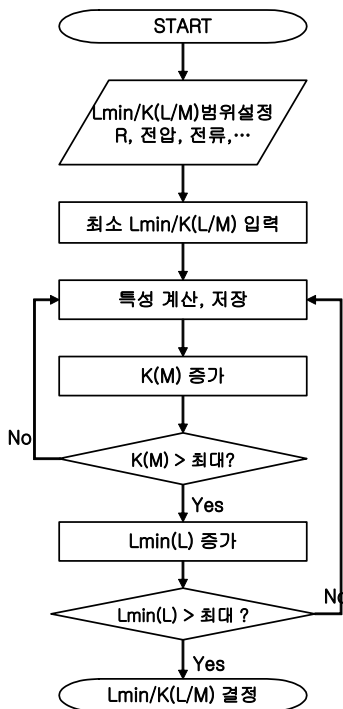


그림 5 Parametric design process
Fig. 5 Parametric design process

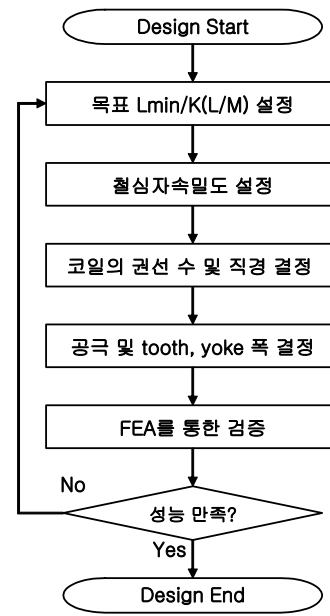


그림 6 Geometry design process
Fig. 6 Geometry design process

고, 가동코일형 LOA에 대해서는 L/M을 도식화한다. Lmin/K map을 도식화하기 위해서는 우선 Lmin, K의 범위를 선정하고, 제한전압과, 전한전류를 입력한다. 그리고 최소 Lmin과 K에 대해 액추에이터 특성해석을 수행하고 추력이나, 전류 등의 데이터를 저장한다. Lmin과 K를 증가시켜가며 반복 수행한다. 이와 같은 과정을 거치게 되면 Lmin과 K의 변화에 따른 추력이나 입력전류 등의 characteristic map을 도식화할 수 있다. 마지막으로 도식화된 characteristic map을 이용하여 사양을 만족하는 Lmin과 K를 결정하게 된다.

앞에서 Lmin/K 혹은 L/M map을 도식화하여 액추에이터의 특성을 확인하고, 사양을 만족하는 Lmin, K 혹은 L, M를 결정한 후에는 결정된 Lmin, K 혹은 L, M를 만족하는 액추에이터 형상 설계를 수행한다.

그림 6은 액추에이터의 geometry design process를 보여주고 있다. 우선 Lmin, K 혹은 L, M를 결정과 철심에서의 자속밀도의 결정이 필요하다. 철심에서의 자속밀도는 높게 설정할 경우 실제 제작 시에 철심의 포화로 인하여 출력특성이 설계결과에 미치지 못할 수 있으므로 철심 자속밀도의 적절한 선택이 중요하다. 목표 인덕턴스를 결정했기 때문에 필요한 권선 수와 공극 및 tooth, yoke폭 등을 결정할 수 있다. 액추에이터의 연속정격운전을 위해서 코일의 전류밀도는 약 5A/mm² 정도에서 결정되어야 한다. 코일의 전류밀도가 결정되면 코일 직경을 결정할 수 있고, 권선수와 권선직경이 결정되었으므로 슬롯면적을 결정할 수 있다. 이와 같은 과정을 통하여 액추에이터의 형상/치수 및 권선 수 등이 결정되면 목표 인덕턴스 및 목표 성능을 만족하는지 확인하기 위해 FEA를 수행한다. 본 논문에서는 2D-FEA를 수행하였다.

4. stator tooth/yoke 폭에 따른 유한요소 해석

가동철심형 LOA의 Lmin/K map과 가동코일형의 L/M map은 요구되는 전류, 전압, 출력 등의 특성을 만족하는 파라미터를 결정하기 위한 방법으로서 이러한 map을 통하여 파라미터가 결정되면 요구되는 특성을 만족하는 형상 설계가 가능하다.

가동철심형 LOA의 Lmin/K map은 전압방정식을 만족하기 위한 파라미터인 최소인덕턴스와 인덕턴스비를 산정한다. 입력전류, 추력, 출력은 최소인덕턴스와 인덕턴스비의 함수이므로 이것들의 변화에 대해 각 각의 map산정이 가능하다. 가동코일형 LOA의 L/M map은 전압방정식을 만족하기 위한 자기인덕턴스와 상호인덕턴스를 산정하는데, 이것 역시 입력전류, 추력, 출력에 대해 map산정이 가능하다.

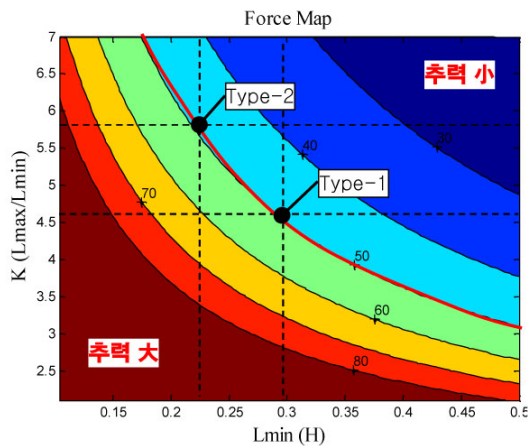
표 1 Lmin/K map, L/M map의 산정 조건

Table 1 Conditions for calculating Lmin/K map and L/M map

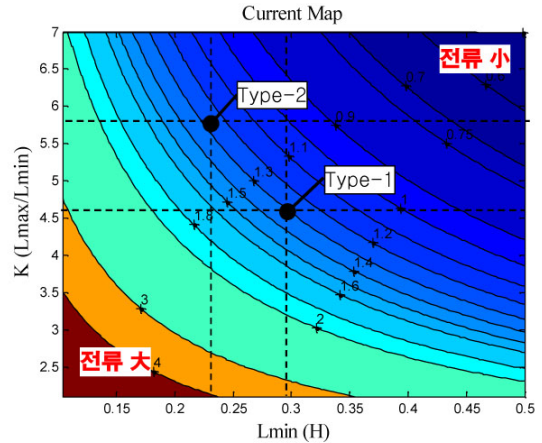
항목	값
입력전압[Vrms]	200
추력[N]	50
출력[W]	120
입력주파수[Hz]	60

표 1은 Lmin/K map과 L/M map은 산정조건을 나타낸다. 설계모델은 개별 구조가 아닌 전체 구조로 해석하고, 고정자 직류 전류는 1A를 인가한다. 추력은 50N이고, 입력전압은 200V, 입력주파수는 상용주파수 60Hz이며, 최대 stroke는 36mm이다. 철손과 계손은 무시한다.

가동 철심형은 가동자에 source가 없으므로 가동 코일형에 비해 높은 입력전류가 필요하고, 동일 최소인덕턴스에서 인덕턴스비가 증가할수록 리액턴스 증가로 인해 입력전류 및 추력이 감소한다. 그림 7은 가동철심형 LOA의 Lmin/K map을 보여준다.



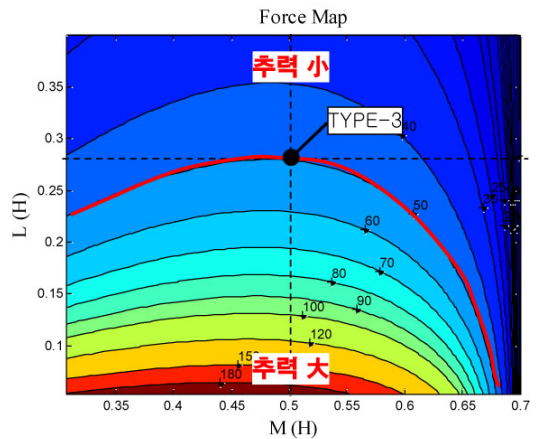
(a) 추력



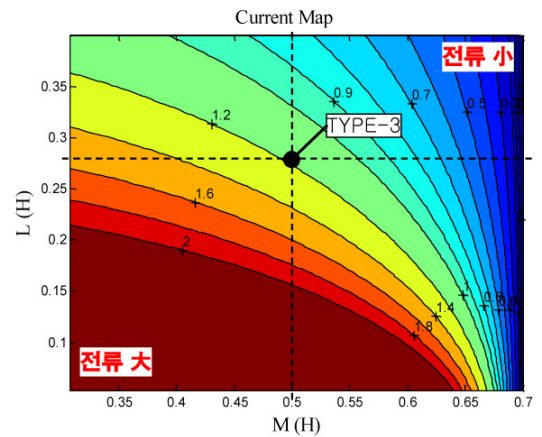
(b) 입력전류

그림 7 가동 철심형 LOA의 Lmin/K map

Fig. 7 Lmin/K map of moving core type LOA



(a) 추력



(b) 입력전류

그림 8 가동 코일형 LOA의 L/M map

Fig. 8 L/M map of moving coil type LOA

그림 7 (a)는 가동철심형 LOA의 추력 map이고 (b)는 전류 map이다. 추력 map에서 빨간 곡선으로 표기된 부분이 목표 추력이고 검정색 점으로 표기된 부분이 Type-1과 Type-2에 대해 Lmin과 K가 결정된 값이다. 그림 7 (a)에서 알 수 있듯이 추력은 K가 감소함에 따라 증가하게 되는데, 이것은 K가 자기인덕턴스의 최대치와 최소치의 비율이고, 입력전압이 일정한 상태에서 K가 감소하면 입력전류가 증가하게 되는데, 추력은 입력전류의 공급에 비례하기 때문이다. 또한 K가 일정한 조건에서 Lmin이 감소하면 추력이 증가하는데, 이것 또한 마찬가지로 Lmin이 감소하면 입력전류가 증가하고 추력은 입력전류의 공급에 비례하기 때문이다. 그림 7 (b)는 입력전류의 양상을 나타내는데, 입력전류는 추력과 비슷한 양상을 보인다. 이것은 입력전류가 증가하면 추력이 증가하기 때문이다. 그림 8은 가동코일형 LOA의 L/M map을 보여준다. 그림 8 (a)는 가동코일형 LOA의 추력 map이고 (b)는 전류 map이다.

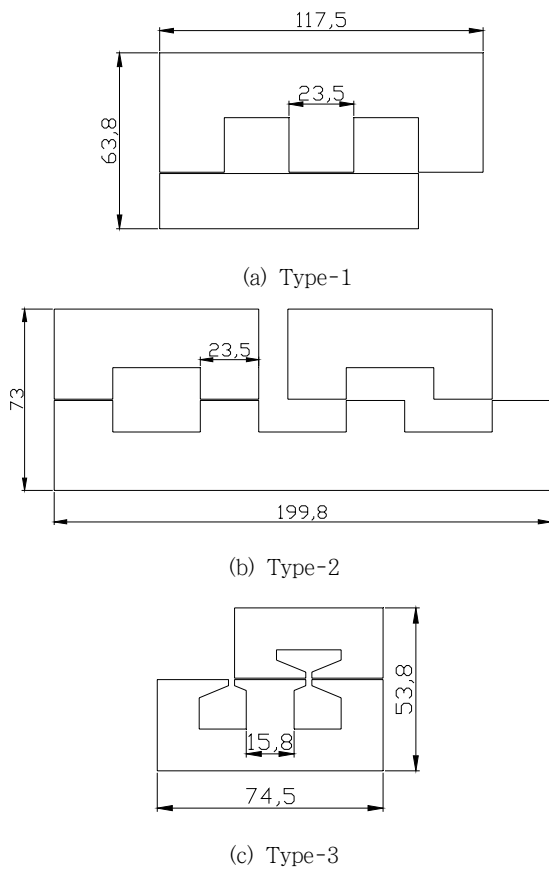


그림 9 설계 모델의 형상 및 치수
 Fig. 9 The structure and the size of the design model

그림 8 (a)에서 알 수 있듯이 추력은 자기인덕턴스가 증가함에 따른 빠르게 감소하고, 상호인덕턴스의 변화에 대해서는 변화 양상이 일정 지점까지 느리게 나타나다가 일정 지점 이후에는 빠르게 감소한다. 그림 8 (b)에서 입력전류는 추력과 비슷한 양상을 보이지만 좀 더 완만한 곡선을 이룬다. 그림 9은 앞에서 제시

한 parametric design process와 geometry design process을 이용하여 설계된 가동 철심형 LOA와 가동 코일형 LOA의 형상 및 치수를 보여준다. Type-2는 가동자에 tooth가 존재하기 때문에 높이 즉 액추에이터의 반경이 Type-1에 비해서 더 크게 설계 된다. Type-1과 Type-2는 한쪽 코일이 on되어 있을 때 다른 한쪽 코일은 off된다. 그러나 Type-3은 모든 코일은 on상태를 유지한다. 이러한 이유로 Type-3의 권선이용률이 Type-1이나 Type-2보다 높게 나타나고, 결국 Type-3의 체적이 다른 타입에 비해 작게 설계된다. 표 2는 설계된 3가지 모델의 치수 및 권선수, 인덕턴스 등의 설계결과를 보여준다. 표에서 알 수 있듯이 적층길이는 Type-2가 다른 타입에 비해 가장 작지만 액추에이터의 높이 즉 반경은 가장 크다. 그리고 Type-3의 적층길이가 다른 타입에 비해 가장 길지만 액추에이터의 높이는 가장 작다. Type-3은 고정자와 가동자에서 권선 수를 나누어 갖기 때문에 고정자의 권선수가 가장 작다. EMC를 이용하여 계산한 인덕턴스와 FEA를 이용하여 계산한 인덕턴스를 비교한 결과 큰 오차를 보이지 않음을 알 수 있다. 즉 EMC를 이용한 설계의 신뢰성을 확인할 수 있다.

표 2 검토모델의 설계 결과 및 인덕턴스

Table 2 The design result and inductance of the examined model

항목	Core type		Coil type	
	Type-1	Type-2	Type-3	
적층길이[mm]	98.04	95.75	205.20	
공극[mm]	0.5			
권선수	679	655	203/411	
점적률(나선)[%]	40			
전류밀도[A/mm ²]	5			
자기인덕턴스 (EMC/FEA) [mH]	최소치	0.28/0.30	0.21/0.22	0.27/0.27
	최대치	1.34/1.42	1.2/1.2	
상호인덕턴스 (EMC/FEA) [mH]	최소치	-	-	0.50/0.48
	최대치	-	-	

그림 10은 2D-FEA를 이용하여 산정한 가동 철심형 LOA와 가동 코일형 LOA에 대한 각 모델의 철심 자속밀도 분포를 보여 준다. 각 모델의 설계 시에 고정자와 가동자의 tooth 및 yoke에서의 자속밀도는 1.3T로 가정하고 설계를 진행하였는데, FEA결과 각 모델의 각 부분에서 가정한 자속밀도와 약간의 오차를 보임을 알 수 있다. 오차의 원인은 철심의 비선형성을 고려하지 않았고, fringing flux path를 정확히 반영하지 못하였기 때문으로 생각된다.

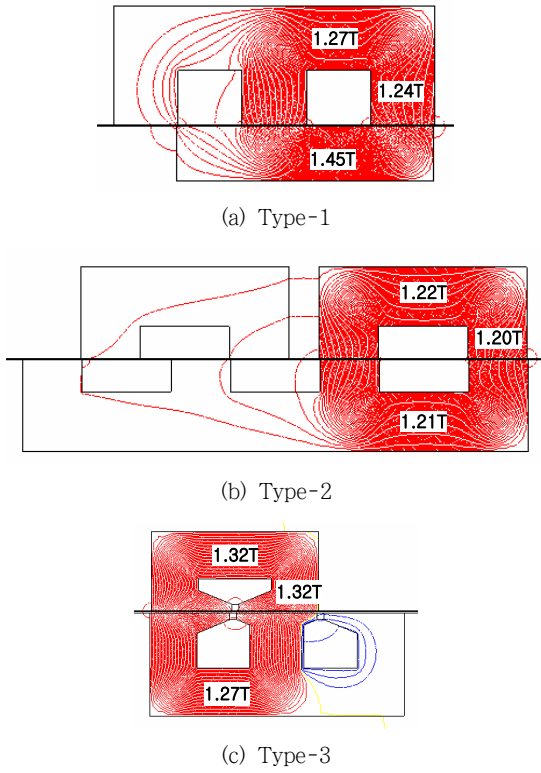


그림 10 고정자 및 가동자에서의 자속밀도 분포
 Fig. 10 Distribution of flux density in stator and mover

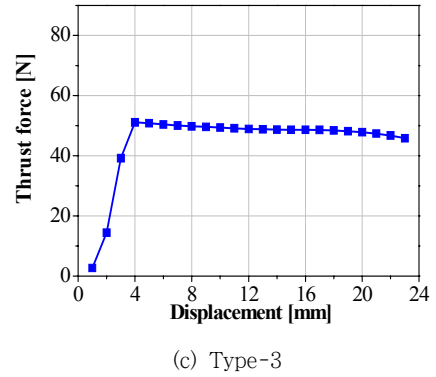
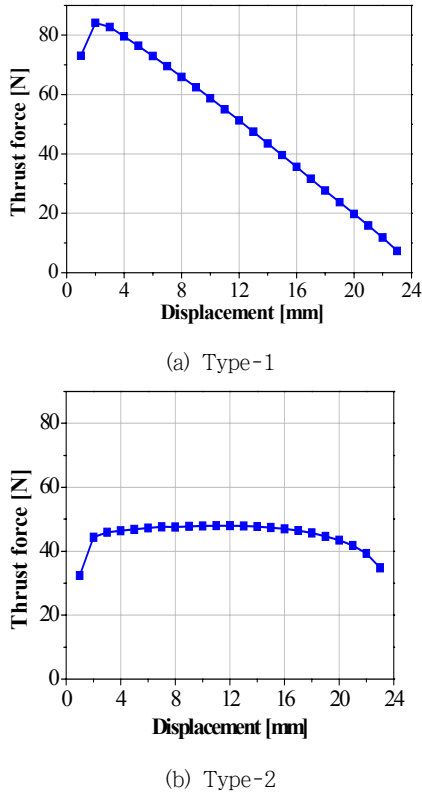


그림 11 가동자 위치에 따른 추력
 Fig. 11 Thrust force wave according to the location of the mover

그림 11은 2D-FEA를 이용하여 산정한 가동 철심형 LOA와 가동 코일형 LOA에 대한 각 모델의 가동자 위치에 따른 추력 계산결과를 보여준다. Type-1은 가동자가 초기 위치일 때 높은 추력을 나타내다가 인덕턴스가 증가하는 방향으로 이동함에 따라 추력이 선형적으로 감소하는 특성을 보인다. 이것은 고정자에서 두 개의 tooth가 자기회로적으로 병렬관계이고, 나머지 한 개의 tooth가 직렬관계이므로 나타나는 양상이다. 이러한 특성을 개선하기 위해 Type-2는 tooth의 자기적 병렬관계를 사용하지 않았다. Flux path를 이루는 두 개의 tooth는 직렬관계이기 때문에 가동자가 이동함에 따라 인덕턴스의 변화는 일정하다.

표 3 검토모델의 해석결과 및 설계 결과

Table 3 Results of analysis and design of the examined model

항목	Core type		Coil type
	Type-1	Type-2	Type-3
축방향길이[mm]	117.50	199.80	74.50
적층길이[mm]	98.04	95.75	205.20
가동자 반경[mm]	24.98	36.03	38.89
전체체적[m ³]	1.75E-3	3.26E-3	1.13E-3
입력전류[Adc]	1.3	1.3	1/1.2
평균추력(FEA)[N]	47.3	44.1	48.2
가동자 질량[kg]	1.30	3.98	1.70

그 결과 Type-2의 추력은 일정한 양상을 보인다. Type-3은 가동자가 이동함에 따라 상호인덕턴스의 변화가 일정하기 때문에 추력 역시 일정한 양상을 보인다. 표 3은 가동철심형 LOA와 가동코일형 LOA의 평균 추력 및 전체체적, 가동자 질량을 보여준다. 평균 추력이 EMC를 이용하여 계산한 결과와 오차가 발생하는 원인은 fringing flux path를 정확히 반영하지 못하였기 때문으로 생각된다. 액추에이터 전체체적은 코일 이용률이 높은 가동 코일형 LOA Type-3이 가장 작다. 그러나 응답성 및 stroke와 밀접한 관계가 있는

가동자의 질량은 Type-1이 가장 작은 것으로 나타났다. 즉 액추에이터의 추력밀도는 Type-3이 가장 높고, 기계적 응답성 및 stroke 특성은 Type-1이 우수할 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 논문에서는 두가지 타입의 가동 철심형LOA와 한가지 타입의 가동 코일형 LOA에 대해 설계 방법을 제시하고 각각의 특성을 비교 및 검토하였다. fringing flux path을 고려한 등가자기회로를 구성하여 퍼미언스(인덕턴스)를 산정한다. parametric design process을 진행하기 위해 전압방정식을 이용하여 Lmin/K과 L/M map을 도식화하였으며, 도식화된 map을 이용하여 Lmin, K 혹은 L, M을 결정하였다. 추력 및 입력전압 등의 요구사항을 달성하고, 목표치인 Lmin, K 혹은 L, M을 만족시키기 위해 geometry design process을 통한 각 타입의 형상 및 치수를 설계하였다.

설계된 각 모델에 대해 2-FEA을 수행하고, 가동자의 위치에 따른 추력을 확인한 결과 Type-1은 가동자가 이동함에 따라 추력이 급격히 변화하였고, Type-2와 Type-3은 일정한 추력양상을 보였다. 액추에이터의 추력밀도는 전체 체적이 작은 Type-3이 가장 높고, 기계적 응답성 및 stroke 특성은 가동자의 질량이 작은 Type-1이 가장 우수할 것으로 판단된다.

References

[1] Z. Q. Zhu, X. Chen, "Analysis of an E-Core Interior Permanent Magnet Linear Oscillating Actuator," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4384-4387, Oct. 2009.

[2] R. Redlich, "A Summary of Twenty Years Experience With Linear Motors and Alternators," *Sunpower Inc.*, 1995 [Online]. Available: <http://www.sunpower.com/>

[3] K. B. Park, E. P. Hong, and H. K. Lee, "Development of a linear motorfor compressors of household refrigerators," in Proc. 3rd Int. Symp. *Linear Drives for Industry*, pp. 283 - 286, Japan, 2001.

[4] T. Mizuno, Y. Bu, M. Ohkubo, F. Tsuchiya, and H. Yamada, "Static thrust analysis of a moving magnet linear oscillatory actuator for vibration cancel system," inProc. 5th Int. Symp. *Linear Drives for Industry Applications*, pp. 282 - 285, Japan, 2005.

[5] Sang-Baeck Yoon, In-Soung Jung, Ki-Chan Kim, Dong-Seok Hyun, "Dynamic Analysis of a Reciprocating Linear Actuator for Gas Compression Using Finite Element Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 33, no. 5, pp. 4113-4115, Sep. 1997.

[6] Sung-Ho Cho, Duk-Hyun Kim, Gyu-Tak Kim, "Design and Characteristic Analysis of Moving Magnet Type Linear Oscillatory Actuator with Spring Damper," *Trans. KIEE*, vol. 52B, no. 1, pp. 43-45, Jan. 2003.

[7] Duk-Hyun Kim, Sang-Joon Eum, Gyu-Hong Kang,

Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, "Design and Characteristic Analysis of Moving Coil type Linear Oscillatory Actuator Considering Unbalanced Magnetic Circuit," *Trans. KIEE*, vol. 49B, no. 6, pp. 145-147, Jun. 2000.

[8] K. Hae-Joong, Y. Myung-Hwan, H. Jung-Pyo, "Design and Performance analysis of Moving-coil type Linear Actuator," *Electrical Machines and Systems (ICEMS), 2011 International Conference on*, pp. 1-4, Aug. 2011.

[9] Daiki Ebihara, Masaya Watada, "Development of A single-winding Linear Oscillatory Actuator," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 28, no. 5, pp. 3030-3032, Sep. 1992.

저 자 소 개



김 해 중(Hae-Joong Kim)

1979년 1월 29일생, 2008년 서울산업대학교 전기공학과 졸업, 2010년 한양대학교 대학원 자동차공학과 졸업(석사), 2010년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학(박사과정)
E-mail : joong1979@hanyang.ac.kr



이 충 성(Choong-Sung Lee)

1973년 3월 20일생, 2000년 인하대학교 자동차공학과 졸업, 2002년 동경(일본)대학교 대학원 기계지능공학과 졸업(석사), 2013년~현재 한양대학교 자동차공학과 재학(박사과정)
E-mail : leecstar@hanyang.ac.kr



홍 정 표(Jung-Pyo Hong)

1959년 4월 17일생, 1983년 한양대학교 전기공학과 졸업, 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1985년~1990년 LG정밀(주) 중앙연구소 주임 연구원, 1990년~1992년 삼성전기(주) 종합연구소 선임 연구원, 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1996년~2006년 창원대학교 전기공학과 부교수, 2006년~2008년 한양대학교 기계공학부 부교수, 2008년~현재 한양대학교 미래자동차공학과 교수, 2002년~현재 IEEE Senior member
E-mail : hongjp@hanyang.ac.kr