

## 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계 및 해석

**김해중, 손 도, 권선오, 김용호, 홍정표**  
한양대학교 자동차공학과

### Design and Performance analysis of Moving-coil type Linear Actuator

Hae-Joong Kim, Tao Sun, Soon-O Kwon, Yong-Ho Kim, Jung-Pyo Hong  
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

**Abstract** - 본 논문에서는 압축기용 리니어액추에이터 중 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계 및 해석에 관한 연구를 다룬다. 가동코일형 중에서 가동자에 철심을 포함하지 않고, 코일만을 포함하여 이동자의 무게를 줄일 수 있는 공심형 모델에 대해 설계 및 해석을 수행하였다. 본 논문에서 다루는 모델은 두 개의 치를 갖는 철심 개방형 모델이다. 전압방정식을 이용하여 Parameter를 산정하고, 기계적 특성을 고려하기 위해 운동방정식이 결합된 액추에이터의 동특성 해석을 실시하였다.

#### 1. 서 론

압축기용 회전형 액추에이터는 현재까지 많은 발전을 거듭해왔지만 직선 운동을 얻기 위해 각종 기어, 벨트, 체인, 캠 등의 기계적 변환기구를 이용하여 회전운동을 직선운동으로 변화시켜야 하므로 시스템이 복잡해지고 기계손이 증가하며, 부피 및 중량이 커지는 문제점을 안고 있다. 그러나 리니어 액추에이터는 회전운동을 직선운동으로 변환하기 위한 기계적 장치가 필요치 않고, 전원 주파수를 스프링과 가동자 질량의 고유주파수에 맞추어 공진현상을 발생 시켜서 변위를 증폭 시키고, 기계적 손실을 줄여서 효율을 개선하는 등, 액추에이터의 압축 성능을 향상 시킬 수 있다. 가동코일형 리니어 액추에이터는 가동자 철심에 코일을 감아 철심과 코일이 동시에 왕복운동을 하게 하거나 혹은 코일만 왕복운동을 하도록 공심형으로 설계하고, 고정자는 영구자석을 사용하거나 계자 코일을 설치하여 계자 자속을 형성하게 한다. 가동자 코일에 전류가 흐르게 되면 가동자 전류와 계자 자속 사이에 로렌즈 법칙에 의한 힘이 작용하게 된다.

본 논문에서 다루는 모델은 두 개의 치를 갖는 철심 개방형 모델로서 각 치 하단에는 권선 방향이 서로 다른 두 개의 장 코일(long coil type)을 갖는다. 전압방정식을 이용하여 요구되는 성능을 만족하는 Parameter를 산정하고, 등가자기회로를 이용하여 산정된 Parameter를 만족하는 모델의 형상 및 치수를 결정하였다. 유한요소법을 통하여 이동자의 각 위치 별 추력을 산정하였다. 리니어 액추에이터의 기계적인 특성을 고려하기 위해 전압방정식과 운동방정식이 결합된 액추에이터의 동특성 해석을 실시하였고, 기계방정식을 통하여 MK 공진을 적용하기 위한 기계적 parameter를 계산하고, MK 공진이 적용된 경우 액추에이터의 성능 및 특성을 고찰하였다[1].

#### 2. 본 론

##### 2.1 설계 정수 산출

제한된 전압과 전류 내에서 요구 성능을 만족하기 위해서는 제한된 범위내에서 인덕턴스와 역기전력을 결정해야 한다. 전압방정식을 이용하여 인덕턴스와 역기전력을 결정하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

- ① 고정자의 코일에는 직류전류가 여자되고, 가동자 코일에는 정현적인 교류전압이 인가되며, 교류전류가 여자된다.
- ② 가동자의 위치 변화에 대해 인덕턴스는 일정하다.
- ③ 가동자 코일의 역기전력과 입력전류는 동상이다.

가동자 코일에 정현적인 교류전압이 인가된 것으로 가정하였으므로 페이저를 이용하여 전압방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\vec{V} = R\vec{I} + j\omega L\vec{I} + \vec{E} \quad [V] \quad (1)$$

여기서 V는 입력전압, I는 입력전류, R은 권선저항, L은 인덕턴스, E는 역기전력, ω는 전기각속도이다.

가동코일 저항의 전압강하와 인덕턴스의 전압강하는 90°의 위상관계를 갖고 있으므로 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

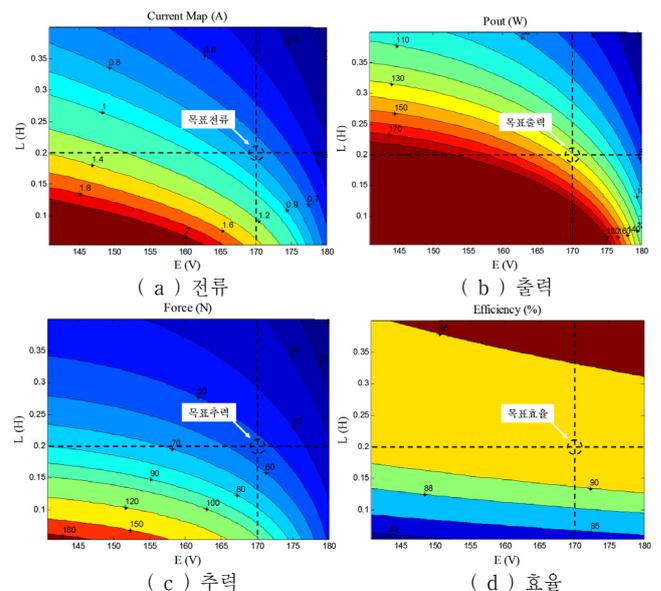
$$V^2 = (\omega LI)^2 + (E + RI)^2 \quad [V] \quad (2)$$

식 (2)를 이용하면 가동 코일의 입력전류는 식(3)과 같이 표현된다.

$$I = \frac{-2ER \pm \sqrt{(2ER)^2 - 4(\omega^2 L^2 + R^2)(E^2 - V^2)}}{2(\omega^2 L^2 + R^2)} \quad [A] \quad (3)$$

식 (3)을 이용하면 인덕턴스와 역기전력 변화에 따른 입력전류의 변화를 알 수 있다. 단, 코일 저항은 가정값을 사용한다.

인덕턴스와 역기전력그이 변화에 따른 입력전류, 출력, 추력, 효율 맵을 도식하면 다음 그림과 같다. 두개의 점선이 교차하는 점은 요구출력 및 제한전류 등 요구사항을 만족하므로 목표 파라미터를 결정할 수 있다. 효율은 철심은 무시하고 동손만을 고려하여 산정하였다.



〈그림 1〉 전류와 출력 E-L map

##### 2.2 등가자기회로법을 이용한 형상 및 치수 산정

이제 앞에서 제시한 전류, 출력, 추력 맵으로 결정된 인덕턴스와 역기전력을 만족하는 자기회로의 설계가 필요하다. 등가자기회로법을 이용하여 자기회로를 설계하기 위해 다음과 같이 가정하였다.

- ① 철심의 투자율은 무한한 값을 갖는다.
- ② 자속의 Fringing effect는 무시한다.
- ③ 고정자 슬롯에서의 누설자속은 무시한다.

공극에서의 자속밀도는 철심의 B-H 특성을 고려하여 포화되지 않는 범위내에서 선택되어야 한다. 공극에서의 자속밀도는 코일의 기자력과 자기저항으로 산정 가능하며, 철심의 적층길이가 무관한 값을 갖는다. 자속밀도는 단위면적당 자속량이므로 다음과 같이 표현 할 수 있다[2].

$$B_g = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{2g_0} \quad [Wb/m^2] \quad (4)$$

여기서 μ<sub>0</sub>는 진공 중 투자율이고, g<sub>0</sub>는 내고정자와 외고정자 사이의 공

극길이,  $N_1$ 과  $I_1$ 은 DC코일의 권선 수와 전류이다.

가동자의 변위가 Zero인 위치는 가동자 코일과 한 치의 중심이 일치할 때이다. 가동자의 한쪽 코일에서 자기저항이 증가할 때 다른 한쪽 코일에서는 감소한다. 그러므로 퍼미언스는 일정한 값을 갖게 된다. 평균 퍼미언스는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$L_{avg} = \frac{\mu_0 L_{stk} N_2^2}{g_0 \left[ w_t \left\{ \left( \frac{w_t}{2} \right)^2 - X_{max}^2 \right\}^{-1} \right]} \quad [H] \quad (5)$$

여기서  $X_{max}$ 는 최대변위이다.

가동자의 추력과 AC코일의 역기전력은 플레밍의 왼손법칙과 오른손법칙에 의하여 다음과 같이 표현된다.

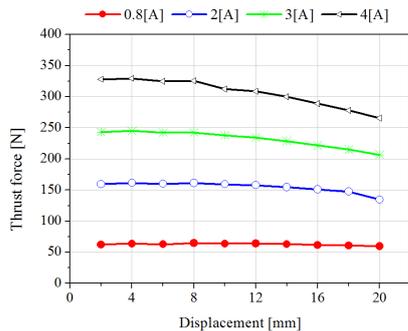
$$F_{em} = B_g L_{stk} N_2 I_2 m \quad [N] \quad (6)$$

$$E_m = B_g L_{stk} N_2 x_m \omega \quad [V] \quad (7)$$

여기서  $N_2$ 와  $I_2$ 는 AC코일의 권선 수 및 AC전류를 나타내고,  $L_{stk}$ 는 적층길이를 나타낸다[3],[4].

### 2.3 유한요소법을 이용한 추력해석

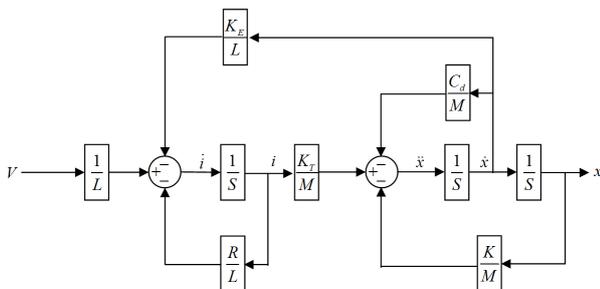
정확한 추력을 산정하기 위하여 유한요소 해석을 수행하였다. 추력은 가동자의 각 위치 별 저장에너지를 산정하고, 가동자의 위치 변화에 대한 저장에너지 변화율로 계산하였다. 그림 2는 가동자의 위치 별 추력을 나타낸다. 등가자기회로를 이용한 평균 추력 계산 결과 가동자 코일에 0.8[A]의 전류를 인가할 경우 추력이 54[N]이었으나 유한요소법 해석 결과 평균 추력은 62[N]로 계산되었다. 등가자기회로를 이용한 평균 추력 계산 시 fringing effect를 무시하여 치 폭보다 긴 가동자 코일 부분에서 추력이 계산되지 않았기 때문에 이와 같은 13[%]의 오차가 발생하였다.



〈그림 2〉 가동자의 위치 별 추력

### 2.2 운동방정식을 결합한 동특성 해석

그림 3은 전압방정식과 운동방정식을 이용하여 리니어 액추에이터의 동특성 해석을 하기 위한 블록선도이며, 입력전압과 속도기전력, 권선저항의 전압강하 합을 이루는 블록들과 자기력과 스프링력, 가동자운동력의 합을 이루는 블록들로 구성된다. 가동자의 마찰은 무시하고, 부하는 가동자의 질량만을 고려하였다. 입력전압은 정현적인 것으로 가정하였다.



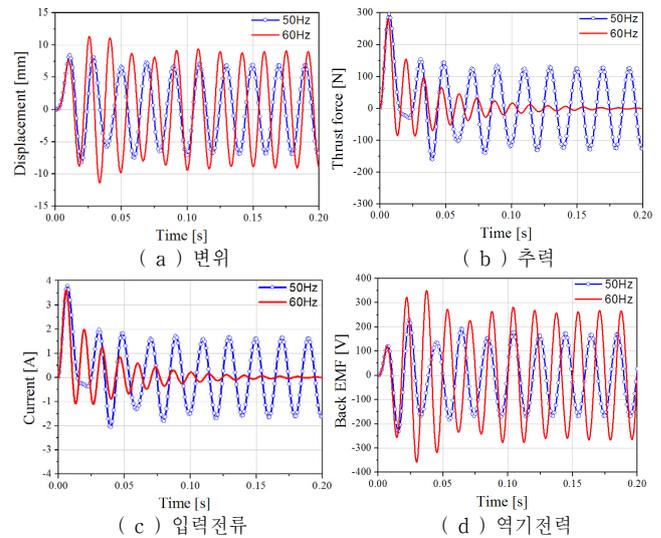
〈그림 3〉 동특성 시뮬레이션 블록선도

표 1은 동특성 시뮬레이션을 위한 파라미터를 나타낸다.

〈표 1〉 동특성 시뮬레이션 파라미터

제어정수	코일저항 [Ω]	인덕턴스 [mH]	가동자 질량 [g]	스프링 상수 [N/m]
값	25	0.175	424	60259

그림 4는 전원 주파수 50[Hz]와 60[Hz]에서의 가동자 변위, 추력, 가동자 코일의 역기전력, 입력전류파형을 보여주고 있다. 시스템의 최대변위는 10[mm]이고, 정현과 입력전압 실효치는 190[V]이다. 그림 4의 (a)는 시간변화에 따른 가동자의 변위를 보여주고 있으며, 60[Hz] 공진일 때 최대변위가 7[mm]에서 9[mm]로 증가함을 알 수 있다. 그림 (b), (c)는 가동자의 추력과 입력전류를 보여주는데, 가동자의 질량부하만 고려하였을 경우에도 공진이 적용되지 않는 경우에는 추력이 최대 130[N], 입력전류는 최대 1.7[A]가 필요하지만 공진일 때에는 마찰을 무시하였으므로 입력 전류 및 추력이 zero에 가까워지는 것을 알 수 있다. 그림 (d)는 공진현상 발생 시 가동자 변위의 증가로 역기전력이 증가하는 것을 보여준다.



〈그림 4〉 가동자의 위치 별 추력

## 3. 결 론

본 논문에서는 가동자가 전기자 코일과 코일을 지지하는 프레임으로 이루어진 가동코일형 리니어 액추에이터의 설계 및 해석 방법을 제시하고, 기계적 공진이 고려되었을 경우의 특성을 검토하였다. 전압방정식을 이용하여 요구되는 출력 및 전압과 전류제한을 만족하는 인덕턴스와 역기전력 범위를 산출하기 위하여 E-L map을 도식하였다. 등가자기회로법을 이용하여 철심이 포화되지 않는 범위에서 계자코일의 권선 수를 결정하고, 추력과 E-L map으로 산정된 역기전력을 만족하는 범위에서 전기자 코일의 권선 수를 결정하였으며, 이때, Fringing effect는 무시하고, 철심의 투자율은 무한한 것으로 가정하였다. 형상 설계 후 유한요소해석법을 이용하여 추력을 산정하고, 수식으로 계산한 추력과 비교하였다. 수식을 이용하여 추력 계산 시 Fringing effect를 무시하였기 때문에 유한요소해석 결과와 비교하여 13[%]의 오차가 발생하였다. 전압방정식과 운동방정식에 대한 상태방정식을 이용하여 시스템 블록선도를 꾸미고, 동특성 해석을 실시하여 공진이 고려되었을 경우 리니어 액추에이터의 특성을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 정상섭, "진동제어 시스템을 위한 리니어 왕복 액추에이터의 동특성 해석", 박사학위 논문집, 2002
- [2] 김기찬, "압력을 고려한 압축기용 리니어 액추에이터의 동특성 해석" 석사학위 논문집, 1979
- [3] S. S. Jeong and S. M. Jang, "Armature reaction effect and inductance of moving coil linear oscillatory actuator with unbalanced magnetic circuit", IEEE trans. Magn., Vol. 37, Issue 4, Part 1, July, 2001
- [4] 장석명 외 "영구자석 계자와 전기자 자속의 상호작용 효과를 고려한 가동코일형 리니어 모터의 정특성." 전기학회 논문지 vol. 48B, no. 1, pp19~26, 1999. 1.