

리니어펄스모터의 등가회로에 관한 연구

김 성 도^{}, 김 정 철^{*}, 임 태 빙^{**}, 조 윤 현^{*}

* 동아대학교 전기공학과

** 전자부품연구소

A Study for the Equivalent Circuit of Linear Pulse Motor

* Kim Sung Do^{*}, Kim Jung Chul^{*}, Im Tae Bin^{**}, Cho Yun Hyun^{*}

* Dept. of Electrical Engineering, Dong-A Univ.

** Korea Electronics Technology Institute

Abstract - This paper proposes the analysis method considered the eddy current which is induced by the speed of LPM.

To investigate reduction effect of thrust due to the eddy current, the magnetic equivalent circuit of LPM is modeled and its characteristics is analyzed according to the displacement of mover with the speed term when LPM is driven by the input of unit step and microstep.

1. 서 론

Linear Pulse Motor(LPM)은 입력펄스신호에 동기하여 일정스텝씩 직접 고속, 고추력의 직선왕복 운동이 가능한 폐루프 제어의 간편성으로 최근 OA 기기나 FA기기 특히, 범용의 가공·조립용 X-Y Table 등에 응용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 위치결정 정밀도의 한계, 기동, 주행 정지시의 특성의 불균일, 불필요한 공진의 발생과 진동, 탈조 등의 문제점으로 인해 그 사용범위가 제한받고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 LPM의 폐루프 제어가 행해지지만, 기존의 제어방식은 고속구동시 추력의 저하가 발생하는 점을 고려하고 있지 않다.[2]

추력의 저하가 발생하는 원인으로는 여자상의 절환에 의한 것, 부하 관성에 의해 기동시 발생하는 여자전류와 이동자 변위와의 위상차에 의한 것, 등속운동시 부하에 의해 발생하는 여자전류와 이동자 변위간의 위상차에 의한 것, 그리고 철손의 주파수의 존성에 의한 것 등이 있다.[3]

이 중 철손의 주파수의 존성에 의한 원인으로는 고속구동시 공극자속의 맥동에 의한 와류의 영향으로 히스테리시스 폭이 증가하고 주자속의 흐름을 방해하는 방향으로 기자력을 발생케 하여 추력이 저하되는 것으로 것으로 생각할 수 있다.

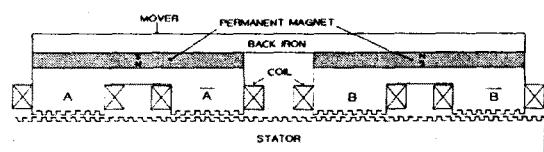
따라서, 본 논문에서는 시험제작된 2상 4극형

LPM의 기계·기구적 형상으로부터, 속도항에 의한 와류의 영향을 고려하여 자기등가회로를 모델링하고, 이것으로부터 속도항에 의한 추력 저하의 원인을 해석하는 방법을 제안한다. 자기등가회로로부터 이동자 변위에 따른 무여자시 코일의 쇄교자 속을 구하고, 역기전력을 계산하여 추력을 산정한 다음, 여기서 계산된 추력을 이용해 LPM의 상태방정식으로부터 운동속도를 구하고 속도항에 의한 와류의 영향을 고려하여 추력을 다시 산정한다. 이러한 과정을 반복하여 계산하고 그 결과 추력을 구동속도의 함수로 나타내면 고속구동시 추력이 저하됨을 확인할 수 있다.

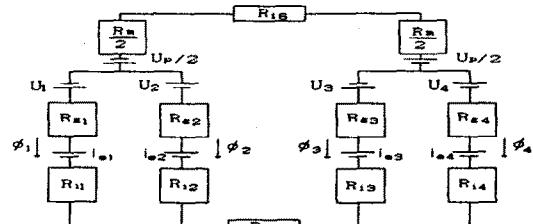
2. LPM의 등가모델 및 특성방정식

2.1 LPM의 등가모델

본 논문에 쓰인 2상4극형 LPM의 구조와 속도항에 의한 와류의 영향을 고려한 등가자기회로는 그림1과 같으며, LPM의 사양은 표1에 나타내었다



(a) LPM의 구조



(b) 와류의 영향을 고려한 자기등가회로
그림 1. LPM의 구조와 자기등가회로

표 1. LPM의 사양

	slot pitch	2 [mm]
mover	slot width	1 [mm]
	slot depth	1 [mm]
	stack length	50 [mm]
stator	slot pitch	2 [mm]
	slot width	1 [mm]
	slot depth	1 [mm]
	stator length	1,000 [mm]
	airgap length	0.5 [mm]
	number of pole	4
	number of pole	80 [TN/pole]
	diameter of coil	0.7 [mm]
	rated current	3[A]
	winding resistance	1.7 [Ω]
	winding inductance	17[mH]
	permanent magnet dimension	44 × 6 × 50 × [mm]

그림 1의 (b)에서 ϕ_n 은 자극 n을 지나는 자속을, U_n 은 자극 n의 전자석의 기자력을, U_p 는 영구자석의 기자력을, i_{en} 은 자극 n에서 외류에 의한 등가기자력을, R_{gn} 은 자극 n의 공극 자기저항을, R_{in} 은 자로 n에서 철심의 자기저항을 각각 나타낸다.

2.1 특성방정식

LPM의 4개의 자극에 걸은 권선은 각 상에 대해 직렬로 접속되어 있으므로 A상에 대한 전기회로 방정식은 다음과 같다.

$$v_A = R_A i_A + L_A \frac{di}{dt} i_A + e_A \quad (1)$$

여기서 R_A 는 A상 권선저항이고, L_A 는 자극 1과 자극 2의 권선에 대한 누설인덕턴스, 자기인덕턴스, 상호인덕턴스를 포함한 값이다. L_A 는 식 (2)로 표현되는 이동자 변위의 함수이지만 치폭/공극의 비가 25이하이고, Hybrid type motor에서는 이동자변위에 무관한 것으로 취급해도 무방하다.[1][4]

$$L_A = \overline{L_A} + \sum_{n=1}^{\infty} L_{A(2n)} \cos \frac{2\pi}{\tau} x \quad (2)$$

$\overline{L_A}$: 인덕턴스의 평균치

n: 고조파 차수

식 (1)에서 마지막 항인 역기전력 e_A 는 식 (3)과 같이 나타내어 진다.

$$e_A = -N \frac{dx}{dt} \frac{d}{dx} \phi_{Apn}(x) \quad (3)$$

위 식 (3)에서 $\phi_{Apn}(x)$ 는 무여자시 영구자석에 의해 A상 권선에 셰교되는 자속은 다음 식 (4)와 같다.

$$\phi_{Apn}(x) = \{\phi_{1pn}(x) - \phi_{2pn}(x)\} - \{\phi_{el}(x) - \phi_{el}(x)\} \quad (4)$$

무여자시 영구자석에 의한 공극을 지나는 자속을 자기등가회로에서 구하면 다음과 같다.

$$\phi_{1pn} = \frac{R_2}{R_A^2} U_P, \quad \phi_{2pn} = \frac{R_1}{R_A^2} U_P \quad (5)$$

$$\text{여기서, } R_n = R_{in} + R_{gn} \quad (n=1\dots4)$$

$$R_A^2 = R_1 R_2 + (R_1 + R_2) R_5$$

$$R_5 = R_m + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4}$$

A상 권선의 발생추력 F_A 는 다음과 같다.

$$F_A = -e_A i_A / \frac{dx}{dt} = N i_A \frac{d}{dx} \phi_{Apn}(x) \quad (6)$$

같은 방법으로 B상권선에서의 발생추력 F_B 는 다음과 같다.

$$F_B = -e_B i_B / \frac{dx}{dt} = N i_B \frac{d}{dx} \phi_{Bpn}(x) \quad (7)$$

따라서 LPM의 합성추력은 식 (8)과 같이 된다.

$$F = F_A + F_B \quad (8)$$

이동자 질량을 M이라 하고, 감쇄계수를 γ라 하면 이동자의 운동방정식은 식 (9)로 주어진다.

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + 2M\gamma \frac{dx}{dt} = F \quad (9)$$

식 (1)에서 식 (9)를 이용한 LPM의 상태방정식을 구성하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} X(t) = AX(t) + BU(t) \quad (10)$$

$$y = CX(t)$$

$$X^T = [i_A(t) \quad i_B(t) \quad \frac{d}{dt} x(t) \quad x(t)]$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_A}{L_A} & 0 & \frac{N}{L_A} \phi_{Apn}'(x) & 0 \\ 0 & -\frac{R_B}{L_B} & \frac{N}{L_B} \phi_{Bpn}'(x) & 0 \\ \frac{N}{M} \phi_{Apn}'(x) & \frac{N}{M} \phi_{Bpn}'(x) & -2\gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$B^T = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_A} & \frac{1}{L_B} & 0 & 0 \end{bmatrix}, C = [1 \ 1 \ 1]$$

$$U(t) = [v_A(t) \ v_B(t) \ 0 \ 0]$$

3. 특성 고찰

본 논문에서는 식 (5)로 표현되는 이동자 변위에 따른 영구자석에 의한 공극의 자속분포를 자기등가회로로 부터 구하였다. 그 결과를 자극 1과 자극 2에 대해 도시 하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 실선으로 나타난 부분은 그림 1의 자기등가회로에 의해 구한 값이고, 점으로 나타난 부분은 유한요소해석에 의해 구한 값이다.

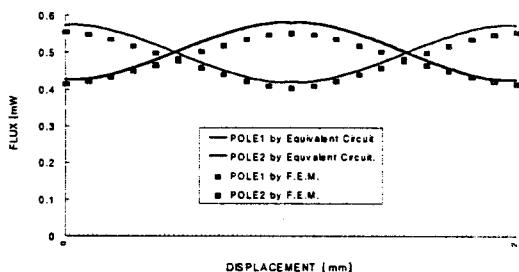


그림 2. 변위에 따른 공극의 자속분포 (무여자시)

그림 3은 LPM의 1상 여자시 변위-속도 응답파형으로 LPM 고유의 진동특성을 잘 보여주고 있다. 또한 그림 4는 마이크로스텝구동시 응답으로 이동자의 변위가 진동없이 거의 직선적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

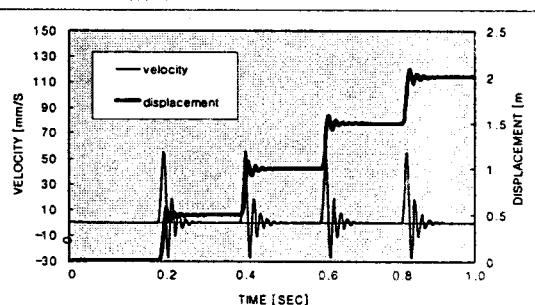


그림 3. 변위-속도 응답파형 (1상 여자)

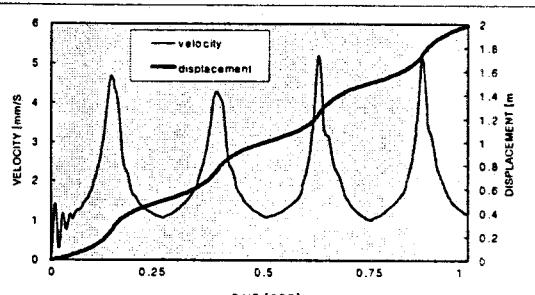


그림 4. 변위-속도 응답파형 (마이크로스텝구동시)

식 (10)의 상태방정식에서 정현파정전류구동이 되도록 구동전압을 조정하여 구한 매 순간의 상태변수로 부터 추력을 산정한다. 그 결과 와류의 영향을 고려한 LPM의 추력-속도 곡선을 그림 5에 나타낸다.

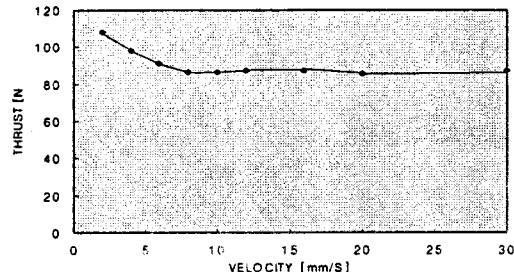


그림 5. LPM의 추력-속도 곡선

3. 결 론

본 논문에서는 LPM의 고속 구동시 와류에 의한 추력의 감소를 고찰하기 위해, 와류의 영향을 고려한 LPM의 자기등가회로를 제안하였다. 자기등가회로로 부터 무여자시 코일의 쇄교자속을 구하였으며, 이것으로부터 역기전력을 구하고 추력을 산정하였다. 또한, LPM의 상태방정식을 구성하여 매 순간 이동속도를 구하고, 이동속도에 따라 와류에 의한 추력의 감소를 계산하였다.

따라서 LPM의 운전시에 와전류에 의한 추력저하의 원인을 규명할 수 있으며 또한 동특성해석의 정도를 증가시킬 수 있었다.

【참 고 문 헌】

- [1] Yukio YAMAMOTO, Hajume YAMADA, "Analysis of Magnetic Circuit and Starting Characteristics of Flat Type Linear Pulse Motor with permanents.", T.IEE Japan, Vol. 104-B, No. 59, pp.265-271, 1984.
- [2] Muneaki Ishida, Shintarou Okamoto, "Equivalent Circuit of Linear Pulse Motor", T.IEE Japan, Vol.110-D, No. 12, pp.1257-1265, 1990
- [3] H.Yamada, K.Kobayashi, M.Yamaguchi, A.Watarai, Y.Yamamoto, "Kinetic Thrust Calculation of a PM Type Linear Pulse Motor by Detected Voltage Using Serach Coil", LD-92-24, pp.1-8, 1992
- [4] Yun-Hyun Cho, Jae-Bong Lee, "The Static Thrust Calculation of Hybrid Type Double-Sided Linear Pulse Motor", Trans.KIEE, Vol.43, No.5, pp.753-760. 1994.
- [5] Takashi Kenjo, "Stepping Motors and their Microprocessor Controls", Oxford Science Publications, 1984.