2001년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2001.7.18-20

여자 방식에 따른 다권선 LDM의 특성 해석

김재필*, 백수현*, 맹인재*, 우영수*, 김일남**
동국대학교*, 동서울대학**

Characteristics Analysis of multi-separated winding LDM by Excitation Mode

J.P.Kim*, S.H.Baek*, I.J.Maeng*, Y.S.Woo*, I.N.Kim**
Dongguk University*, East seoul college**

Abstract - In this paper, by designing ratio width of the permanent magnet versus the stator coil, double excitation LDM with multi-separated winding which is possible to obtain the constant thrust force is propsoed. Using Empulse, this paper has explained a various excitation mode to analyze the thrust force of multi-separated winding LDM. The simulation results show single-phase excitation mode have low thrust force ripple.

1. 서 론

영구자석의 발달에 의하여 고속, 고추력 운전이 가능한 가동 자석형 선형전동기는 회전기로부터 직선 운동을 얻을 때와는 달리 별도의 변환 장치가 필요없이 직선 추력이 가능하므로 산업 현장에서 물류반송 시스템이나 공작기계 및 리니어 앨리베이터 등의 선형 서보 시스템에 이용되고 있다.

LDM(Linear DC Motor)은 비교적 구조가 간단하고, 추력/질량 비가 커 고속운전이 가능하다는 장점을 지니고 있으나, 모터 자체의 위치결정 능력이 떨어지는 단점도 가지고 있다. 특히 가동자석형 LDM의 경우 큰 추력과 빠른 응답특성을 얻기 위해서는 가동자의 질량이 커지므로 속도응답 특성이 나빠지며, LDM의 고정자 권선을 단일권선으로 성층할 경우에는 고정자 철심 중앙부분에서 자기 포화로 인해 정추력 발생이 힘들다는 단점을 가지고 있다.

따라서, LDM 자체 무게의 증가없이 고정자 철심 중앙부의 자기 포화를 억제하면서 일정 추력을 발생시키기 위해 고정자 권선을 분할 권선으로 설계된 LDM을 대상으로 추력 리플이 적은 특성을 가지기 위한 가장 적합한 여자방식을 찾기 위하여 상용자계해석 프로그램을 이용하여 여러 형태의 여자 방식으로 구동전원을 인가하여 시뮬레이션을 통하여 다권선 LDM에 가장 적합한 여자 방식을 찾으려 한다.

2. 본 론

2.1 다권선 LDM의 구조와 동작원리

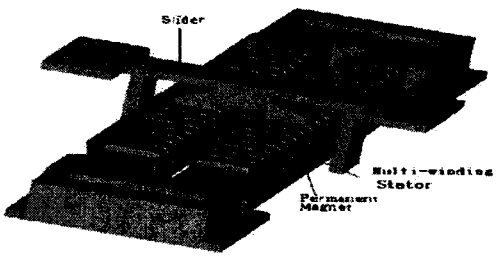


그림1 양측 여자형 LDM

그림 1은 본 논문에서 제안된 다권선 LDM의 구조로써, 고정자는 양측 여자(Double Sided)를 취할 수 있는 구조의 연철로 된 2개의 직사각형 모양으로 구성되고 비자성체를 자기적인 특성을 고려하여 고정자 철심과 짧은 보조 철심 사이 및 주 자석과 Back iron의 사이에 삽입하였다. 또한, 가동부는 고추력을 발생시키기 위해 6개의 N_dF_eB계열 자석으로 구성하였다. 정추력에 의한 등속도이동을 실현하기 위하여 고정자 권선을 고정자 철심에 대하여 같은 비율로 다분할하였고 독립권선에 여자 전류를 인가함으로써 가동자가 이동하게 되어 있다.

LDM의 추력은 영구자석에 의한 자속밀도 B_g내에 위치한 길이 l_c, 턴수 N인 고정자 권선에 전류 i를 흘리면 자석에서 발생되는 자속과 고정자 권선에서 발생하는 자속과의 상호작용으로 전자력이 발생하며 이 전자력의 크기를 로렌쯔의 법칙을 이용하여 구하면 식(2.1)과 같다.

$$\vec{F} = -\int_0^{3l_c} \vec{B_g}\left[\frac{N\omega_m}{l_t}\right] \times i\, d\vec{l_c} \tag{2.1}$$

$\vec{F}$: 전자력 벡터 N : 고정자 전체턴수
ω_m : 자석 폭 l_t : 코일 길이
$\vec{l_c}$: 유효도체 길이 i : 여자 전류
$\vec{B_g}$: 공극에서의 자속밀도 벡터

여기서, $3\vec{l_c}$는 LDM의 1/2구조를 고려할 때, 가동자 자석 3개가 고정자 여자 코일과의 상호작용으로 추력을 발생시키게 되는 유효도체 길이이다. 식 (2.1)은 $\vec{B_g}$와 i가 수직으로 만나므로 식 (2.2)로 나타낼 수 있다.

$$F = 3\left[\frac{N\omega_m}{l_t}\right] B_g i\, l_c \tag{2.2}$$

2.2 수평력 및 수직력

자극과 코일 사이에 작용하는 힘(F)는 수직력(F_y)과 수평력(F_x)의 합이 된다. 이 때 수직력 F_y은 흡인력이며 수평력 F_x은 가동자를 이동시킬 수 있는 추력 성분이다. 추력을 크게 하기 위해서는 수평력 F_x을 크게 설계하여야 하며, 위치 정밀도를 크게 하기 위해서는 흡인력인 수직력 F_y를 크게 하여야 한다.

자계내에 도체가 놓여 있으면 이 도체에 작용하는 자기력 밀도는 전류밀도와 자속밀도에 의하여 식 (2.2.1)과 같은 로렌츠 힘으로 표현된다.

$$\vec{f} = \vec{J} \times \vec{B} \tag{2.2.1}$$

변위전류를 무시하는 준 정상 상태에서는 $\nabla\times\vec{H}=\vec{J}$ 이므로, 식 (2.2.1)은 다음과 같이 정리된다.

$$\vec{f}=\frac{1}{\mu_o}(\nabla\times\vec{B})\times\vec{B} \qquad (2.2.2)$$

그러므로, 체적 V인 물체에 작용하는 전자력 $\vec{F}$ 는 식 (2.2.3)과 같이 표현된다.

$$\vec{F}=\int_v\vec{f}\cdot d\vec{V}$$
$$=\frac{1}{\mu_o}\int_v(\nabla\times\vec{B})\times\vec{B}\,d\vec{V} \qquad (2.2.3)$$

식 (2.2.3)에 벡터 공식

$(\nabla\times\vec{B})\times\vec{B}=(\vec{B}\cdot\nabla)\vec{B}-\frac{1}{2}\nabla\vec{B}^2$를 대입해서 Green 공식을 적용하여 정리하면 식 (2.2.4)가 된다.

$$\vec{F}=\frac{1}{\mu_o}[\int_v(\vec{B}\cdot\nabla)\vec{B}\,d\vec{V}-\int_s\frac{1}{2}\nabla\vec{B}^2\,d\vec{S}]$$
$$=\frac{1}{\mu_o}[\int_v\vec{B}(\vec{B}\cdot n)d\vec{S}\,d\vec{S}]-\int_s\frac{1}{2}\nabla\vec{B}^2\,d\vec{S}$$
$$=\frac{1}{\mu_o}[\int_v\vec{B}(\vec{B}\cdot n)-\frac{1}{2}\nabla\vec{B}^2]d\vec{S}$$
$$=\int_s\vec{P}\,d\vec{S} \qquad (2.2.4)$$

여기서 $\vec{P}$는 Maxwell stress tensor, S는 체적 V의 표면적, $\vec{n}$은 S에 수직인 외향 단위법선 벡터이다.
식 (2.3.4)로부터 체적 V인 물체에 작용하는 힘은 그 물체를 둘러싼 표면 S에 작용하는 stress tensor $\vec{P}$의 면적분과 같음을 알 수 있다. 따라서 요소내에서 발생한 Maxwell stress tensor의 x,y성분인 P_x, P_y는 다음과 같이 주어진다.

$$P_x=\frac{1}{2\mu_o}[(B^2{}_x-B^2{}_y)n_x+2n_yB_xB_y \qquad (2.2.5)$$

$$P_y=\frac{1}{2\mu_o}[(B^2{}_y-B^2{}_x)n_y+2n_xB_xB_y \qquad (2.2.6)$$

여기서, 만일 적분경로를 x축에 수평으로 취하면, $n_x=0$이 되므로, 식(2.2.5)와 식(2.2.6)은 다음과 같이 된다.

$$P_x=\frac{1}{\mu_0}B_xB_yn_y \qquad (2.2.7)$$

$$P_y=\frac{1}{2\mu_0}(B_y^2-B_x^2)n_y \qquad (2.2.8)$$

따라서, LDM의 힘 F_x와 F_y는 식(2.2.9)과 식(2.2.10)로부터 계산할 수 있다.

$$F_x=\int_l\frac{h_e}{\mu_0}B_xB_yn_y\,dl \qquad (2.2.9)$$

$$F_y=\int_l\frac{h_e}{2\mu_0}(B_y^2-B_x^2)n_y\,dl \qquad (2.2.10)$$

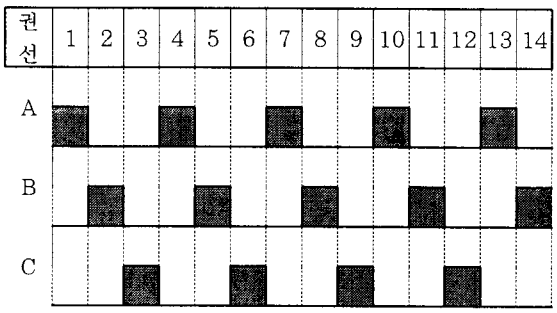
여기서, h_e는 철심의 유효적층폭이며, l은 적분경로이다.

2.3 특성 해석

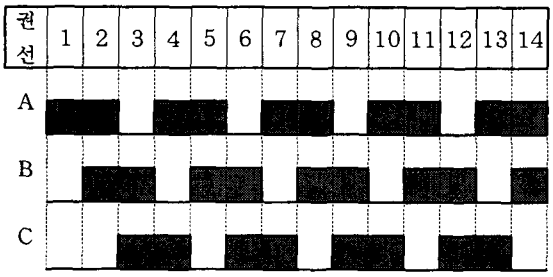
여기서 추력의 리플을 더욱 저감하기 위한 또 다른 방법으로는 양측 고정자의 여자권선을 가동자 진행 방향으로 지그재그 형태로 분할 성층하였고, 이는 한 코일이 여자될 때 다른 쪽 코일은 탈자되는 원리를 이용함으로써 결과적으로 고정자와 가동자 사이에 치(齒)없는 구조로 추력의 리플이 억제되면서 유연한 동작이 이루어지기 때문이다.
본 논문에서 사용된 가동 자석형 LDM은 가동자인 영구 자석의 폭을 기준으로 여자 코일 폭 비가 1 : 0.8로 다권선으로 설계되었으며, 여자 방식에 따라 가동자가 선형동작 구간내를 움직일 때 철심의 포화와 리플 없이 일정한 추력을 발생할 수 있도록 하여야 한다.
즉, 가동자 위치에 따라 일정 추력이 발생되어야 하며, 본 연구에서는 각각의 여자방식에 따라 나타나는 LDM의 추력특성을 분석하여 다권선으로 설계된 LDM의 최적의 구동전원을 찾는 데에 있다.
다권선 LDM에서는 여자 절환시에는 각 권선에 독립적인 전원이 인가되므로 발생추력에 리플성분이 필연적으로 포함되게 된다.
따라서, 다권선 LDM을 고정밀 위치제어용으로 이용하기 위해서는 이 추력의 리플성분을 최소화하면서 일정 추력을 발생시킬 수 있는 구동방식에 대한 연구가 필수적이다.
구동시스템의 성능을 최적화하거나 여자방식의 구성을 변화시키면서 각 해석모델에 대해 추력 리플을 최소화시킬 수 있는 가장 우수한 구동전원을 결정하기 위해서 1상 여자, 2상 여자, 1-2상 여자방식을 적용하여 각각의 특성을 해석한 후, 추력의 리플이 최소가 되는 최적의 여자방식을 선택하였다.
표2.1은 가동자인 영구 자석의 폭을 기준으로 여자 코일 폭 비가 1 : 0.8 일 때의 특성해석을 위한 LDM의 파라메타 값이며, 그림2는 각각의 여자 방식에 의한 각 권선에 인가되는 전원 시퀀스이다.

parameter	value
Input current I[A]	4
Inductance L[mH]	0.27
Mass [g]	373
Resistance R[Ω]	1.7
Thrust force constant k_f [N/A]	6.25
Back-EMF constant k_e [$V/(m/s)$]	5.25

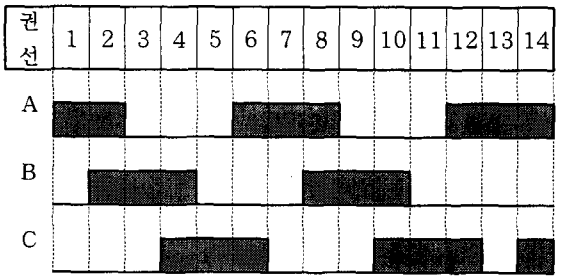
표.2.1 특성 해석을 위한 LDM의 파라메타



〈 1상 여자 방식 〉



〈 2상 여자 방식 〉



〈 1-2상 여자 방식〉

그림2 각 여자 방식에 의한 전원 시퀀스

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림3은 실험을 통하여 15[mm]당 전류를 가변하여 인가하였을 때 실험치로 전류가 4[A]일 때 다권선 LDM은 정추력을 가지는 것을 알 수 있다.

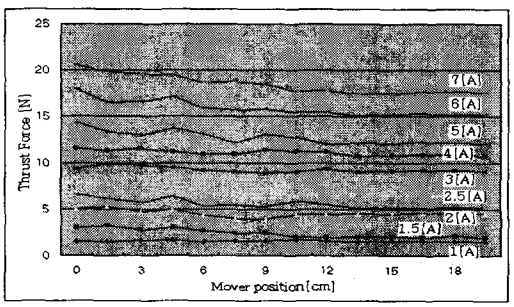
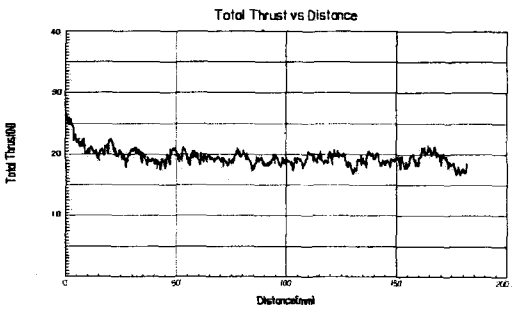
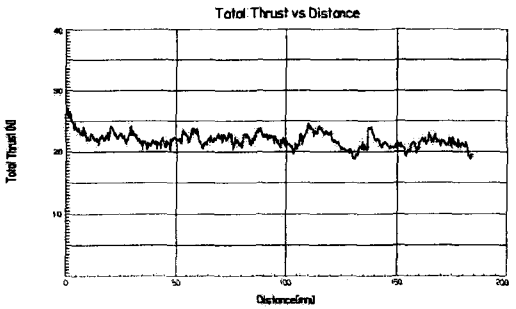


그림3 변위에 따른 추력 특성

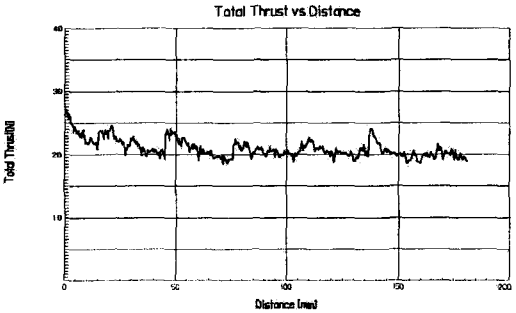
그림4는 EMpulse를 이용하여 전류 4[A]를 흘렸을 때 유한 요소법의 해석 결과로부터 정특성을 분석한 결과로써 변위에 따른 추력 특성을 분석하였다.



〈 1상 여자방식에 의한 추력 특성 곡선 〉



〈 2상 여자방식에 의한 추력 특성 곡선 〉



〈 1-2상 여자방식에 의한 추력 특성 곡선 〉

그림4 여자방식에 의한 추력 특성

4. 결 론

본 논문에서는 여자 절환시에 각 권선에 독립적인 전원이 인가되어 발생추력에 리플성분이 필연적으로 포함되는 다권선 LDM의 추력의 리플성분을 최소화하면서 일정 추력을 발생시킬 수 있는 최적의 여자방식을 선택하고자 여자방식을 바꾸어 가면서 LDM의 특성을 해석하였다. 각각의 여자방식에 대하여 설계된 LDM의 정추력에 관한 해석은 유한요소 이론에 의한 전자장 해석과 시스템 시뮬레이션을 결합시켜 전자장 시스템을 시간영역에서 해석할 수 있는 EMpulse를 이용, 제작된 LDM을 대상으로 변위에 따른 추력특성을 해석하였다.

시뮬레이션 결과 1상 여자방식으로 구동시킨 것이 추력은 조금 떨어지지만 리플이 적게 나타나는 것을 알 수 있다. 2상 여자방식과 1-2상 여자 방식에서의 추력은 여자 전류가 겹쳐지는 곳에서 1상 여자방식일 때의 추력보다 더 크게 발생되지만, 그만큼의 리플도 생기는 것을 알 수 있다. 실험을 통한 비교, 검토가 필요하다고 생각한다.

[참 고 문 헌]

[1] A Basak and A. F. Flores Filho, "Investigation of A Novel Double Armature Brushless DC Linear Motor," IEEE Trans. on Mag., Vol. 31, pp. 789~795, 1995.

[2] H. Wakiwaka, et al., "Consideration on High-speed Positioning of Linear DC Motor," T. IEE Japan, Vol. 119-D, No. 3, pp. 315~320, 1997.

[3] A Basak, "Permanent Magnet d.c. Linear motor " Oxford University Press, 1996.

[4] Takashi Kenjo, " Stepping Motors and Microprocessor Control", Oxford Science Publications, 1983.

[5] S.A.NASAR, "Liner Motion Electric Machines", John Wiley & Sons Inc. , 1976.