

다권선 리니어 직류 전동기의 전기자 형상 개선에 관한 연구

이승명* 백수현* 맹인재* 우영수* 김일남**
* 동국대학교 ** 동서울대학

Improvement of Armature shape of multi-winding type LDM

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

Abstract - In this paper, we present the optial design and analysis of a novel brushless dc linear motor, which can operate as a soltless linear stepping motor, with two armature cores and two back iron and five high energy product magnets. We used Maxwell program package for computing the flux distribution and static force. The assessment of the analytical and measured values shows a very good correlation among them. The result are presented in this paper

$$F = 3 \frac{w_m N}{l_t} I_a l_1 B_g \tag{4}$$

여기서, N : armature 권선의 전체 턴수
 w_m : 자석 폭, l_t : 구동 길이
 I_a : armature 전류
 l_1 : 각 코일변에 대한 유효도체 길이
 B_g : 공극에서의 자계 자속 밀도

1. 서 론

최근에는 선형 운동이 요구되는 시스템의 발달과 함께 변환 장치에 의한 에너지 손실이나 비효율성을 제거할 수 있는 선형 기기를 이용한 직접 직선 추력을 얻으려는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 그 응용 분야도 확대되고 있다. 특히 가동 자석형 Linear DC Motor(이하 LDM)은 가동부를 영구 자석으로 대체함으로써 전력 공급을 위한 전기적 연결과 동손에 의한 발열이 없으며, 가동부의 자석을 강자성체로 사용할 경우 공극이 큰 구조에서도 높은 자속밀도를 얻을 수 있으므로 슬롯리스 전기자를 사용할 수 있다. [1][2][3]

본 논문에서는 대추력 및 정추력화를 위해 가동자의 형상을 개선하고 이를 통해 추력 및 응답특성을 개선하고자 한다. 대추력을 얻기 위해 2개의 아마추어 철심과 5개의 고 에너지적을 갖는 NdFeB계 자석을 2개의 back iron에 설치한 양측식 구조로 큰 추력을 얻기 위해서는 가동자의 질량이 커지므로 추력 대 체적비를 고려하여 back iron 부분의 체적을 감소시킴으로써 추력을 향상시켰다.[4][5][6] 또, 정추력을 얻기 위해 권선부를 다권선화함으로써 전 구동 영역에서 일정 추력을 발생시키도록 하였다. 이 최적화 과정의 결과를 상용 자계 해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션 및 시작기를 제작하여 얻은 실험 결과를 통해 비교하였다.

2. 본 론

2.1 모터의 설계

1) 추력정수 산정

일반적으로 LDM의 추력은 식(1)과 같이 나타낼 수 있으며, 전기자 코일의 유효 도체부와 고정자로 결정된 영구자석의 자속밀도와 유효 자계의 길이에 영향을 받는다.

$$F = BI_a n = \Phi N I_a \tag{1}$$

$$\Phi = B_g l_1 w_m \tag{2}$$

$$n = \frac{N}{l_t} \tag{3}$$

(1)-(3)으로부터 추력식을 구하면 다음과 같다.

2) 자석 재료의 선정

리니어 모터 설계에 있어서 중요한 요소 중의 하나가 영구자석의 선택과 설계이다. 자석 재료는 소모전력과 기계적인 응답성에 직접적인 요인으로 작용한다. 모터의 추력 향상과 소모 전력을 최소화하기 위하여 최대 에너지 적이 큰 것을 선택하는 것이 좋다. 본 논문에서는 단위 체적당 축적 에너지가 큰 NdFeB계열 희토류 자석을 선정하여 소모전력을 극소화하고 최소의 공간 배치를 이루도록 하였다

3) Back iron의 최적화 단계

가동자 철심의 자속 밀도는 철심 위쪽 모서리 부분에서는 무시할 정도로 작고, 중심 부분에 가까울수록 증가한다. 그래서, 3가지의 가정으로부터 가동자 철심의 자속 분포를 해석하여 선형화 특성범위내의 최소체적이 되는 가동자 철심의 형태를 구하였다. 가정은 다음과 같다.

- ① 자기회로는 선형이다.
- ② 가동자 철심에 부착된 영구자석의 면적은 일정하다.
- ③ 가동자 철심 재질은 포화되지 않는다.

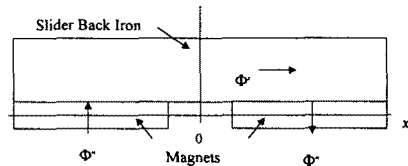


그림1. 직사각형 가동자 철심

자속밀도는 영구자석과 가동자 철심내에서 일정하므로 그림1의 대칭성을 고려하여 가동자의 1/2부분을 해석하였다. 이 때의 자속 Φ_s 는 다음과 같다.

$$\Phi_s(x) = B_m [A_m - \omega_m(x - l_{gm}/2)] \tag{5}$$

여기서, B_m : 가동자 철심의 최대 자속밀도
 A_m : 영구자석 단면적

l_{gm} : 자석간의 간격

Φ_s 가 l_{gm} 에 걸쳐 일정하다고 하면 가동자 철심의 포화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_{sat} > \frac{d\Phi_s}{dA} \quad (6)$$

$$dA = \omega_m dL \quad (7)$$

여기서, A : x 축에 대한 가동자의 면적

L : 가동자의 두께

B_{sat} : 포화 자속밀도

식(5)-(7)으로부터 포화가 발생하지 않는 가동자의 최소 두께는 다음과 같다.

$$L(x) = \int_{t_c + l_{gm}/2}^x \left(\frac{1}{\omega_m B_{sat}} \right) \frac{d\Phi_s}{dx} dx \quad (8)$$

$$= \frac{B_m}{B_{sat}} [t_c + (l_{gm}/2) - x]$$

여기서, t_c : 영구자석의 길이 [mm]이다.

최적화 된 형태는 그림2와 같다.

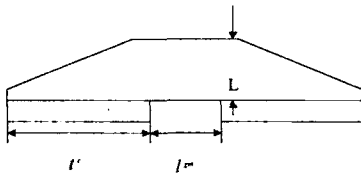


그림2. 최적화 된 가동자 철심

4) 권선 설계

코일의 단면적을 S_u 라 하면 선의 직경 C_d 일때, 턴수 N 은 식(9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$t = f_c \cdot S_u \left\{ \pi \cdot (C_d + a_c) \cdot \frac{2}{4} \right\} \quad (9)$$

단, f_c : 점적율 (보통 : 0.75, 정렬권 : 0.9)

a_c : 피막의 두께 (0.003 - 0.01 /mm)

본 논문에서는 최대 허용 전류는 5[A]이하로 설정하였고 시작품에서의 에나멜 동선의 직경은 0.5[mm]로 하고 각 권선부는 6층으로 149회 14부로 권선하였다 또한 단부효과를 방지하기 위해 2개의 아마추어 철심에 권선을 7.5[mm]씩 이긋나게 설치하였다. 권선부를 다 권선화 시킴으로써 인덕턴스값을 단권선의 경우와 비교시 현저하게 줄일수 있으며 이를 통해 전기적 시정수를 개선하였다.

2.2 LDM의 사양

지금까지의 과정으로부터 도출해 낸 최적화 된 LDM의 형상은 권선부는 각각 절연된 14부로 되어 있고 양측의 권선을 7.5[mm] 엇갈리게 배치하고 보조 철심과의 사이에 공극을 설치함으로써 구동구간의 양단에서 발생하는 단부효과를 개선하도록 하였다. 가동자는 자계 변화를 방지하기 위해 비자성체 지지구조물을 사용하였고 지지구조의 양단에 리니어 가이드레일을 설치하였다. 그림3은 시작기의 형상을 나타낸다. 시뮬레이션과 시작기에 대한 실험치의 결과를 비교하였다.

최적 설계 단계에 의해 얻어진 Back iron의 제원과 LDM의 제원을 표1과 표2에 나타내었다.

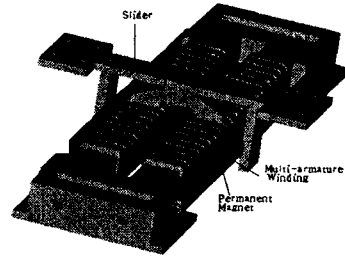


그림3. 최적화 된 LDM의 형상

표1. Back iron의 사양

B_{sat}	B_m	B_r	t_c	w_m	l_{gm}
1.59	1.32	1.219	24	27.6	20.8
[T]	[T]	[T]	[mm]	[mm]	[mm]

표2. LDM의 기계적, 전기적 사양

발생 추력[N]	17
고정자 치수[mm]	24×235×24
자석 치수[mm]	24×27.6×5.2(NdFeB)
공극 자속 밀도[T]	0.28
입력 전류[A]	4
코일 턴수[Turn]	149×14
공극 [mm]	5.2
인덕턴스[mH]	0.27/권선당
코일 저항[Ω]	1.7
철심 재질	S45C
가동자 질량[g]	373
코일 직경 [mm]	0.5

2.3 시뮬레이션 및 실험 결과

1) 최적화에 의한 추력 특성

가동자를 최적화함으로써 직사각형 가동자 체적 22,787[mm³]에 대해 16,163[mm³]으로 약 29[%]정도 감소하였으며 가동자의 질량 역시 30[%]정도 개선함으로써 추력은 10[%]이상의 향상을 얻을 수 있었다.

그림4는 추력정수에 대한 실험치로서 계열1과 계열2는 각각 최적화 된 Back iron과 직사각형의 Back iron의 추력정수 변이로 계열1은 4[A]에서 4.2, 계열2는 3.8의 값을 가진다. 이는 예상치 5.5에 대해 각각 23[%] 및 31[%]의 오차를 가진다.

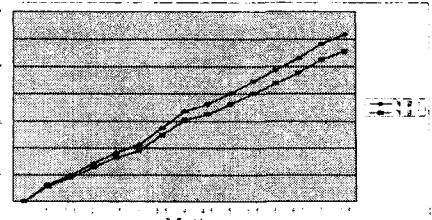


그림4. 추력 정수 측정

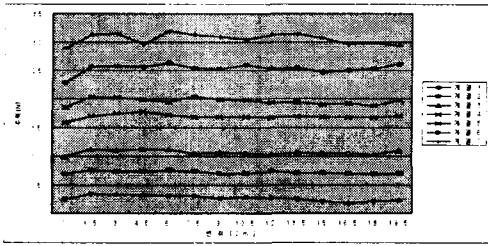


그림 5. 전류에 따른 추력 분포

그림5은 전류에 따른 추력 분포로서 변위 15(mm), 전류 1(A)당의 실험치이다. 그림5로부터 최초 예상 전류값 4(A)가 본 LDM에 있어 정격의 전류치임을 알 수 있다.

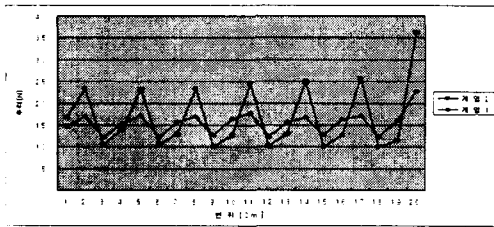


그림 6. 4(A)에서의 시뮬레이션 및 실험치 비교

그림6은 4(A)에서의 시뮬레이션과 실험치의 비교로 계 열1은 실험값을, 계열2는 시뮬레이션값을 나타낸다.

2) 최적화에 대한 응답 특성

그림7 - 그림10은 본 논문에서 제안한 다권선 LDM의 응답 시뮬레이션 결과이다.

그림7은 최적화 과정을 통해 가동자의 체적을 약 30(%) 감소시킨 경우의 시간에 대한 전류의 특성을 나타낸 것으로, 가동자의 부피가 감소함에 따라 인가되는 여자 전류의 초기치의 크기는 작게 되고 응답 특성이 빨라짐을 알 수 있다.

그림8은 추력 특성으로서 초기치에서 빠르게 안정화되고 있다.

그림9와 그림10은 속도 및 가속도 응답 특성을 나타내고 있다.

따라서 최적화 된 가동자의 다권선 LDM은 제어측면에서도 매우 우수한 응답 특성을 지님을 확인할 수 있다.

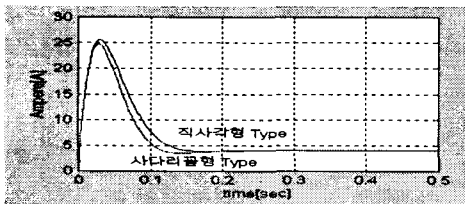


그림 7. 전류에 대한 응답 특성

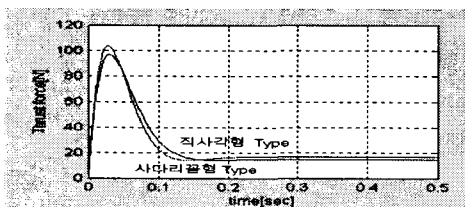


그림 8. 추력에 대한 응답 특성

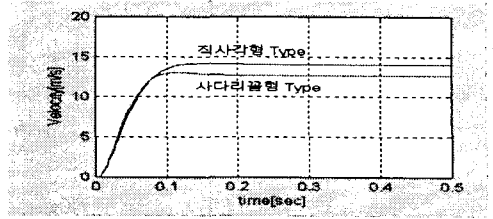


그림 9. 속도에 대한 응답 특성

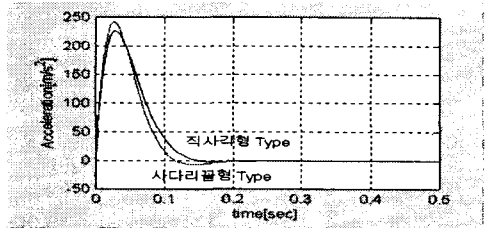


그림 10. 가속도에 대한 응답 특성

3. 결 론

본 논문에서는 대추력 및 정추력을 발생하는 LDM을 제작하고 기본적인 모터의 형태로부터 추력 대 체적비를 고려하여 가동자에 있어 실제 추력 발생에 영향을 미치지 않는 부분을 최적 형상화함으로써 추력을 개선하였다. 이러한 최적화를 시뮬레이션과 실험을 통하여 비교한 결과, 추력뿐만 아니라 LDM이 가지고 있는 응답 특성면에 있어서도 최적화 이전의 모델에 대해 매우 우수한 특성을 가짐을 알 수 있었다.

앞으로 구동회로를 통한 응답 특성의 시뮬레이션과의 비교를 통한 최적화 방법의 타당성을 검증할 필요가 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] 통상자원부 "고속정밀 리니어 브러시리스 직류모터 개발", 4-7, 1996
- [2] 편집부, "Linear Motor Application", 세화출판사, 1988
- [3] A.Basak, "Permanent magnet DC Linear Motor", Oxford, 1996
- [4] A.Basak and A.F.Flores Filho, "Investigation of a novel double armature brushless dc linear motor", IEEE, p789-795, 1995
- [5] T.Mizuno, T.Anzai, A. Nakamura, "Static Thrust Characteristics of a Moving Magnet-Type Linear DC Motor", 일본응용자기학회지, Vol.21, No 4.2, p837-840, 1997
- [6] H.Yajima and K.Minegishi, "Consideration on High-Response of a Linear DC Motor", IEEE, Vol.33, No. 5, p3880-3882, 1997