

자기등가회로 모델링법에 의한 LPM 정추력 해석

김동희, 김광현, 김영민*, 황종선*

전남대학교 전기공학과, 전남도립담양대학 컴퓨터응용전기시스템과*

Calculating the static thrust of LPM by magnetic equivalent circuit modelling method

Dong-Hee Kim, Kwang-Heon Kim, Yeong-Min Kim*, and Jong-Sun Hwang*

Dept. of Electrical Engineering, Chonnam National University,

Dept. of Computer Applied Electric system, Provincial College of Damyang*

Abstract

Usually, the thrust of a Linear Pulse Motor(LPM) is calculated by magnetic equivalent circuit modelling method. Analytical thrust deviation exists to calculating magnetic flux density by using Permeance Modelling Method, Finite Element Method, and Velocity Electric Motive Force Method. For calculating accuracy thrust by using these every method, the thrust is calculated and compared by Lorentz Force Method, Magnetic Coenergy Method, and Maxwell correspondence force Method. And that becomes important factor at the comparison of each capacity and parameter of motor. So this study wants to compare and analyze measurement data and calculating data of the static thrust of LPM. and then we can get more accuracy method, calculating the static thrust of LPM.

Key Words : Static thrust, Linear Pulse Motor(LPM), Magnetic equivalent circuit modelling method

1. 서론

지금까지 산업계에서 속도 및 위치결정을 위해 사용되는 각종 모션장치는 대부분 직선운동을 한다. 이러한 직선운동을 구현하기 위해서 종래에는 구동원으로서 회전형 서보모터를 채용하고 이 회전력을 볼 스크류나 캠 등을 사용하여 직선운동으로 변환하고 있다. 이런 메카니즘은 속도를 증가시키는데 있어서 한계성을 가지며, 위치결정정도는 이들 직선변환기구에 의해 결정되므로 초정밀 위치결정을 위해서는 직접 직선운동을 할 수 있는 리니어 모션계가 절실히 필요하다.

이런 직선운동을 위해 리니어 모터가 사용될 수 있는데, 리니어 모터에는 LIM(Linear Induction Motor), LDM(Linear DC Motor), LSM(Linear Synchronous Motor), LPM(Linear Pulse Motor) 등이 있다. LIM은 고속·대추력에 적합하고, LDM은 저추력·정밀위치 제어에, LPM은 고추력·정밀위치제어·개루프제어특성 등에서 우수한 리니

어 모터이다. LPM은 동력전달 및 변환 장치를 부착하지 않고 가동자 출력을 직접 부하에 전달하는 직접구동 방식으로 구동시킬 수 있으며, 짧은 스트로크의 정밀한 위치와 속도 제어에 적합하므로 그 활용 및 연구가 기대되고 있다.

그러나 LPM은 구동시 구조적으로 큰 진동이 발생됨으로써 위치 오차가 발생할 수 있다. 이러한 진동으로 인한 미소변위를 설계시 가동자의 치와 슬롯의 형태를 변형하여 저감할 수 있는데, 가공상의 한계가 존재한다. 또한, 미세 스텝여자시 정추력에는 기본파 이외에 고조파 성분이 포함되어 있어 추력리플과 진동 및 위치오차를 발생시킨다. 이 추력에 지배적인 영향을 미치는 고조파 성분을 제거하기 위한 방법으로 정추력 고조파 성분과 정확히 역상의 추력이 발생하도록 여자전류를 인가한다. 이러한 방법은 정확한 파라미터와 모델링이 필요하다. 그리고 모델링시에 여러 가지 가정에 의하여 유추된 것이므로 위치오차가 생길수 있다.

그러므로, LPM의 제어 성능향상을 위해 정확한

정추력의 해석이 필요하다. 이것은 추력 리플 감소를 위해서 선행되어야 할 숙제이다. 정추력 해석의 기존의 방법들은 Lorentz Force Method, 자기수반 에너지법, Maxwell 응력법 등이 있다. 위와 같은 방법들은 각각 장단점이 있기 때문에 그 가운데 하나의 기법으로 모든 기기를 해석하는 것은 바람직하지 않으며, 해석 대상 기기의 기계적 형상을 고려하여 해석방법을 적용하는 것이 바람직하다. 보통 위의 방법들을 조합해서 '자기등가회로 모델링법'으로 정추력을 주로 계산한다. 이때 기기마다 구조와 형상, 재질이 각기 다르므로 기기의 정확한 구조도 및 그에 따른 정확한 등가자기회로도 작성이 필요하다.

본 연구에서는 해석대상인 LPM에 가장 적합한 방법으로 정추력식을 전개하였고, 이 식의 타당성을 검증하고자 정추력 실측이 반드시 필요하였다. 이에 새로이 보완된 정추력 측정 시스템을 개발하여, 해석대상인 LPM의 정추력을 측정하였다. 이따라서 이론적으로 전개한 정추력식과 실측한 정추력값을 비교·분석함으로써 제안하는 LPM 정추력 해석의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 제안하는 LPM 정추력 해석

2.1 정추력(Static Thrust)

2.1.1 1상 여자인 경우

$$F_T = -\frac{1}{2} \frac{2\pi N_r}{\tau} \left(\frac{F F_m P_m P_{(1)}}{P_{(0)}} \right) \times \left(\sin\theta - \frac{F P_{(1)}}{F_m P_m} \sin 2\theta \right) + \Delta F_T \quad (1)$$

(단, ΔF_T : 4차 이상의 고조파 추력항)

2차 고조파 힘의 항이 무시 안될 때, 식 (1)을 정규화 하면,

$$F_{Tm} = -(\sin\theta - K_a \sin 2\theta) \quad (2)$$

(단, $K_a = \frac{N I P_{(1)}}{B_0 A_m}$)

2.1.2 2상 여자인 경우

$$F_T = -\frac{\sqrt{2}}{2} \frac{2\pi N_r}{\tau} \left(\frac{F F_m P_m P_{(1)}}{P_{(0)}} \right) \times \left[\sin(\theta - 45^\circ) - \frac{F P_{(1)}}{F_m P_m} \sqrt{2} \sin 2(\theta - 45^\circ) \right] + \Delta F_T \quad (3)$$

2.2 2상 여자시의 추력

2.2.1 대상 모델 회로

그림 1은 해석대상인 LPM의 가동자에 A상 및 B상에 전류 여자 시, 각각의 회로 성분을 나타낸 것이다.

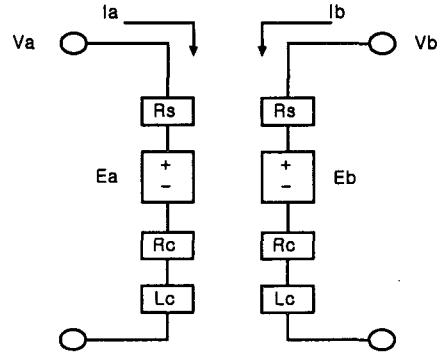


그림 1. LPM의 등가 회로.

Fig. 1. The modelling circuit of target LPM.

V_a, V_b : 공급 전압

R_s : 직렬 저항

I_a, I_b : 상전류

E_a, E_b : 역기전력

R_c, L_c : 모터저항, 인덕턴스

2.2.2 추력

4차 고조파를 무시한 경우에 추력식은 다음과 같다.

$$F_T = -2 \frac{2\pi N_r}{\tau} P_{(1)} F_0 (F_1 \sin\theta - F_2 \cos\theta) \quad (4)$$

(단, $F_0 = \frac{1}{4 P_{(0)}} [2 P_{(1)} F_1 \cos\theta + 2 P_{(1)} F_2 \sin\theta + P_m F_m]$)

F_1 과 F_2 가 시간에 따라 변한다고 가정함으로써 동적인 경우(Dynamic Case)로 확대가 가능하다.

이 때 권선 기자력이 다음과 같다면,

$$\begin{aligned} F_1 &= N(I_1 - I_3) \\ F_2 &= N(I_2 - I_4) \end{aligned} \quad (5)$$

추력식은 다음과 같다.

$$F_T = K_t [-(I_1 - I_3) \sin\theta$$

$$+ (I_2 - I_4) \cos \theta] \quad (6)$$

$$\left(\text{단, } K_t = \frac{2\pi N_r}{\tau} N B_0 A_m \frac{P}{P_{(0)}} \right)$$

K_t : 추력 상수(Thrust Constant)

2.3 합성 발생 추력

구형 치의 구조를 갖는 LPM에 대해 치 간격의 1[pu] 변위에 따라 그림 2의 퍼미언스 분포가 정현파에 가까움을 알게 되었다. 그러나, 자석과 코일에 따라 발생한 추력을 합성하면 전체 합성발생추력은 그림 3과 같이 왜형이 발생하여 고조파가 존재하게 된다.

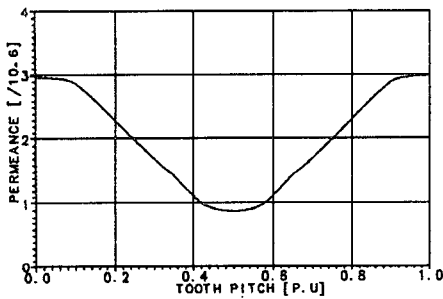


그림 2. 공극의 퍼미언스.

Fig. 2. Permeance of air gap.

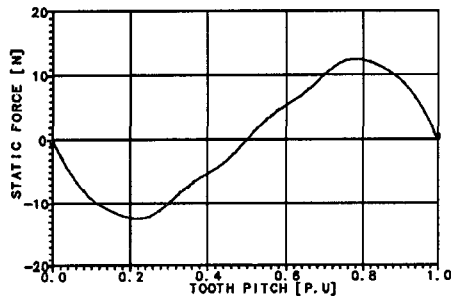


그림 3. 합성 여자 추력.

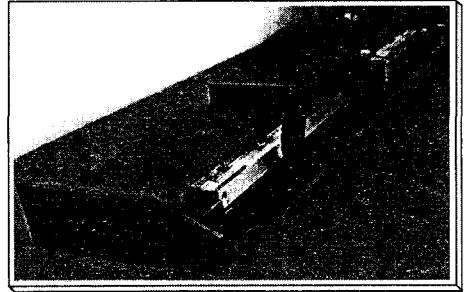
Fig. 3. Total excited thrust.

3. 정추력 측정 시스템 개발

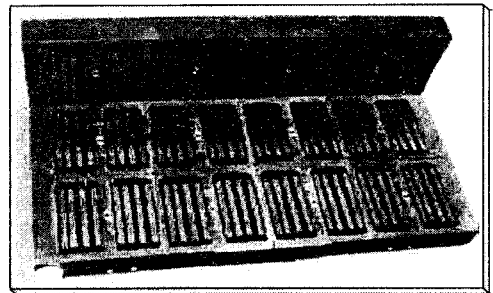
앞에서 제안한 LPM의 정추력식 전개가 타당한지 증명하기 위하여, 정추력 측정 시스템이 필요하다. 이에 본 연구에서는 새로이 개선된 정추력 측정 시스템을 개발하였다.

그림 4의 (a)는 해석대상인 LPM의 모습을 보여준다. 가동자와 고정자(Stator) 사이에 공기압(5기

압 이상)이 투입될 때 20 μ m 공극을 유지한다. (b)는 가동자의 반대편을 뒤집어 본 모습이다. A,B상으로 형성된 1개 모듈이 가로 4개, 세로 3개로서 모두 12개 모듈로 형성되어 있고, 모듈마다 중간에 공기 노즐이 존재한다.



(a) LPM of analysis target

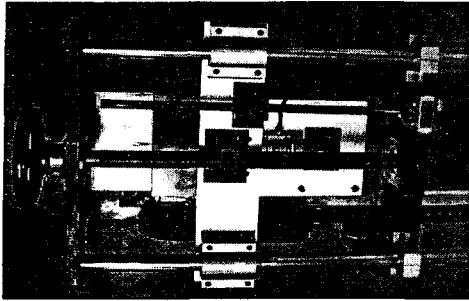


(b) Mover

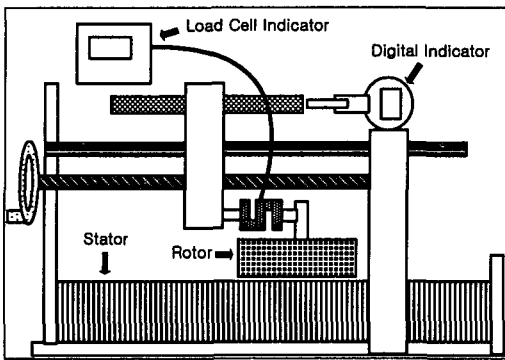
그림 4. LPM과 가동자의 사진.

Fig. 4. Photo of LPM and mover.

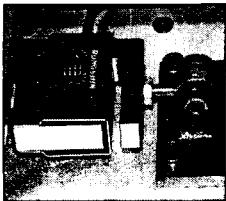
그림 5의 (a)는 개발한 정추력 측정 시스템의 사진이다. 저렴한 가격으로 정밀하게 정추력을 측정할 수 있도록 (b)와 같이 고안하여, 시스템을 제작하였다. (b)는 (a)의 모습을 이해하기 쉽게 표현한 것이다. (c)는 로드셀의 모습을, (d)는 압력계의 모습을 보여준다. 보유하고 있는 LPM 시스템은 별도의 공기 콤프레샤가 필요하다. 현재 압력계는 5기압을 표시하고 있다. 이런 압력의 공기는 가동자의 공기 배출 노즐들을 통하여, 가동자를 고정자로부터 20 μ m 공극을 유지하며, 부상시키는 동력이 된다. (e)는 디지털 지시계로서 핸드드릴을 전 방향으로 돌릴 때, 기준으로부터의 위치 변위를 표시한다. 한 치의 간격이 1.28mm이므로, 정밀도가 0.001mm인 계측기를 사용하였다. 표 1은 해석대상인 LPM의 사양을 나타낸다.



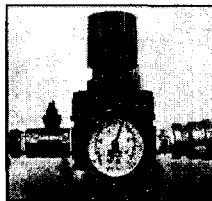
(a) Measurement system for the static thrust of LPM



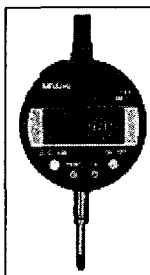
(b) Design of measurement system for the static thrust of LPM



(c) Load cell



(d) Pressure meter



(e) Digital indicator

그림 5. 측정설비의 구성요소.
Fig. 5. Assembly of measurement system.

표 1. LPM 설비의 사양.

Table 1. Spec. of LPM system.

항 목	단 위	LPM
이동거리	mm	1,000
절연저항	Mohm	>400
저항/코일	ohm	1.13
인덕턴스/코일	mH	4.7
전류/상	A	6
최소스텝명령길이	μm	0.17
위치정밀도	μm	± 2.5
스텝위치정도	μm	6
반복위치정도	μm	1.5
이동직진도	μm	2.7
최대속도	mm/s	1,000
최대가속도	g	3.4~4
연속추력	kgf	25
정추력	kgf	28
응답시간	ms	10
공기압	기압	5
전원	V/Hz	220/60
코일상수	상	2
가반중량	kg	10

4. 측정 결과

이 논문에서의 정추력 측정시스템은 추력을 얻기 위한 로드셀과 변위를 표시하기 위한 지시계로 구성하고, 이를 계측하여 Sigma-Plot으로 나타내었다.

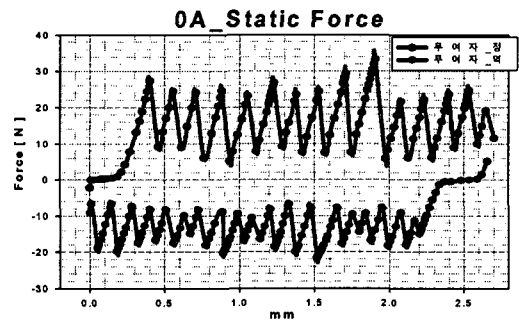


그림 6. 무여자시 정, 역 정추력.
Fig. 6. Forward, backward static thrust of 0A.

그림 6에서 영구자석에 의한 추력(Detent Thrust)은 1치 간격 당 8~9개의 극값을 갖는다. 또한 극간 간격도 일정하지 않다. 같은 조건에서 역방향으로 계측한 결과 1치 간격 당 11~12개의 극값을 갖는다. 이것은 가동자가 12개의 모듈로 존재함으로 각 모듈이 당 극값의 원인으로 영향을 미친다고 가정한다면, 12개의 모듈이 기계적으로 가공상 오차가 존재할 것임을 알 수 있다.

영구자석은 15~20N의 멈춤 추력을 갖고 있음을 그림을 통해 알 수 있다. 여기서 나머지 추력값은 코일이 감긴 각 상에서 충당한다. (무여자 그림 6, 1상여자 그림 7, 2상여자 그림 8 참조)

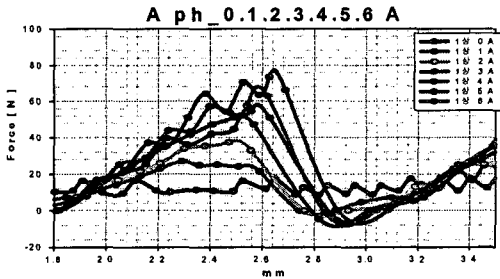


그림 7. 1상 여자시 정추력.
Fig. 7. Static thrust of one phase exciting.

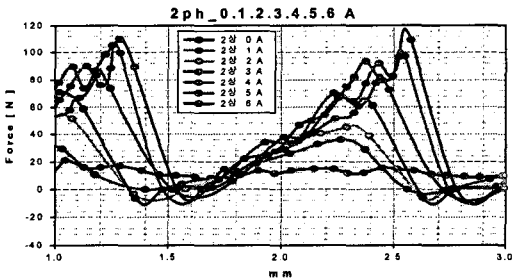


그림 8. 2상 여자시 정추력.
Fig. 8. Static thrust of two phase exciting.

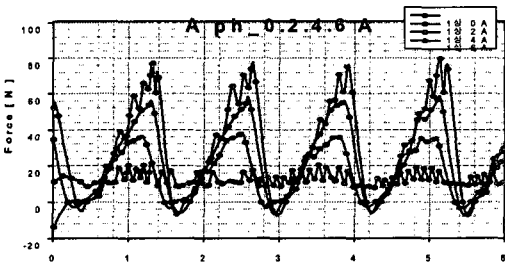


그림 9. 1상 여자시 4주기 정추력.
Fig. 9. Four cycle static thrust of one phase exciting.

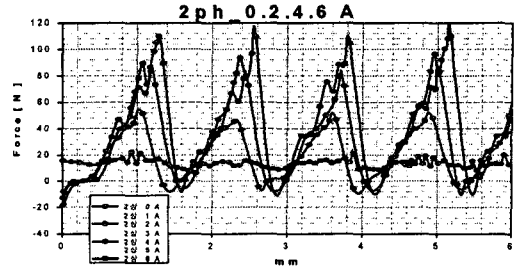


그림 10. 2상 여자시 4주기 정추력.
Fig. 10. Four cycle static thrust of two phase exciting.

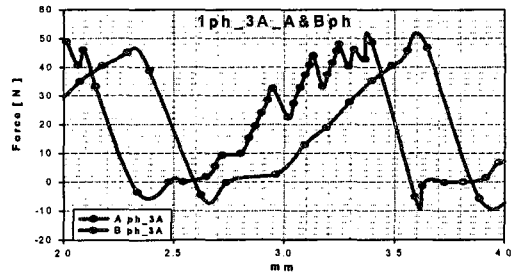


그림 11. A상과 B상의 정추력 비교.
Fig. 11. Static thrust comparison of A phase and B phase.

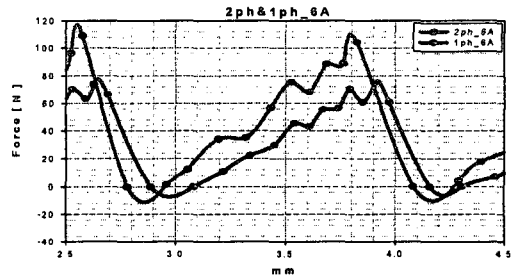


그림 12. 6A에서 1상과 2상여자의 정추력 비교.
Fig. 12. Static thrust comparison of one phase and two phase at 6A.

그림 8에서 식 (6)의 K_t (추력 상수)를 계산 및 측정할 수 있다. 2상 6A 여자 시에는 $K_t = 120/6=20$ (2상 5A일 때는 $100/5=20$, 4A일 때는 $80/4=20$, 3A일 때는 $60/3=20$, 2A일 때는 $40/2=20$)임을 알 수 있다. 여기서, 120은 2상 6A때의 진폭이다.

그림 9와 그림 10에서 그림 3과 유사한 곡선의 반복을 갖는다. 이는 측정의 신뢰성 향상을 위해 4

치 간격 이상 반복 측정된 것이다. 수식 (2),(3),(4),(6) 이 모두가 실측한 그래프(그림 9와 그림 10)와 유사하다.

그림 9와 그림 10에서는 무부하일 때의 정추력 값이다. 만약, 가동자에 각각의 부하를 인가하여 정추력을 위와 같은 방법으로 얻으면, 부하에 따른 정추력 값들의 파형을 얻을 수 있고, 그에 일치한 파형을 입력함으로 LPM의 진동을 최대한 억제시킬 수 있을 것이다.

그림 11에서는 권선 여자 시 A상과 B상은 90°의 위상차를 갖게 됨을 보여준다. 식 (1)과 식 (3)을 통하여 1상과 2상 여자 추력식이 $F \rightarrow \sqrt{2}F_m \sin(\theta + 45^\circ)$ 가 됨을 그림 12를 통해 알 수 있다.

그림 7에서부터 그림 12를 보면 고정자의 1치 간격은 1.28mm가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

새로운 정추력 측정 시스템을 가지고 LPM의 정추력을 측정할 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째는 가동자가 12개의 모듈로 존재함으로 각 모듈이 극값의 원인으로 영향을 미치고, 기계적으로 편차가 존재함을 알 수 있었다. 또한, 고정자의 1치 간격은 1.28mm임을 알 수 있었다.

둘째는 수학적으로 전개한 정추력식들과 실제 측정된 정추력값의 그래프가 일치함을 알 수 있었다. 또한, 1상과 2상 여자 추력식의 수학적 전개식과 실측값이 일치함을 알 수 있었다.

셋째는 K_t 값이 20임을 알 수 있고, 영구자석은 15~20N의 멈춤 추력을 갖는다. 또한, 권선 여자 시 A상과 B상은 90°의 위상차를 갖는다.

넷째는 무부하일 때의 정추력 값을 얻었고, 앞으로 부하에 따른 정추력 값들의 파형을 실험을 통하여 얻을 수 있고, 부하에 일치한 파형을 입력함으로 LPM의 진동을 최대한 억제시킬 수 있을 것으로 기대된다.

이상과 같이 해석대상 LPM에 대하여 제안한 정추력 해석 방법의 타당성이 실험을 통하여 여러 면으로 검증되었다.

감사의 글

이 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교 고품

질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의한 것으로 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 김동희, "리니어 펄스모터의 추력 산정", 한국 전기전자재료학회 2003춘계 학술대회논문집 기술교육전문연구회, p. 3, 2003.
- [2] 박경빈, "LF2407을 이용한 LPM의 미세스텝별 실시간 위치오차 저감 제어법", 전남대학교 석사학위논문, 2002.
- [3] 김일중, "자기회로의 평형을 고려한 하이브리드형 리니어 펄스 모터의 특성해석", 충남대학교 박사학위 청구논문, 1994.
- [4] Takashi Kenjo and Akira Sugawara, "Stepping Motors and their Microprocessor Controls SE", Oxford Science Publications, 1994.
- [5] Syed A. Nasar and I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc. 1987.