

LPM의 정추력 정량화 및 측정 분석

김동희, 배동관, 김광현, 박현수*
 전남대학교 전기공학과, *(주)넥스타테크놀로지

Formulation, Measurement and Analysis for the Static Thrust of LPM

D.H. Kim, D.K. Bae, K.H. Kim, and H.S. Park*

Dept. of Electrical Engineering and RRC/HECS, Chonnam National University

*Nexstar Technology Co., LTD.

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.

1. 서론

LPM의 제어 성능향상을 위해 정확한 정추력의 해석이 필요하다. 이것은 추력 리플 감소를 위해서 선행되어야 할 숙제이다. 정추력 해석의 기존의 방법들은 Lorentz Force Method, 자기수반에너지법, 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. 이따으로 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,

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

(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.

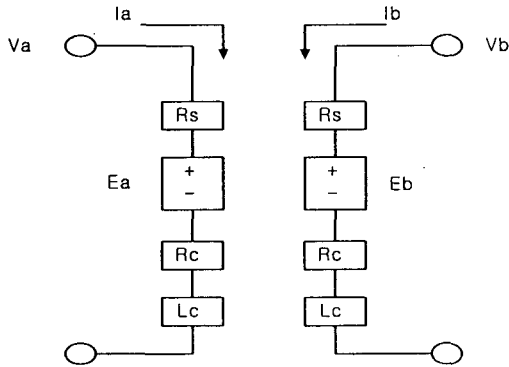


그림 1. LPM의 등가 회로

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.

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

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

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

이 때 권선 기자력이 다음과 같다면,

$$F_1 = N(I_1 - I_3), \quad F_2 = N(I_2 - I_4) \quad (5)$$

추력식은 다음과 같다.

$$F_T = K_t [-(I_1 - I_3) \sin \theta + (I_2 - I_4) \cos \theta] \quad (6)$$

$$\left(\text{단, } K_t = \frac{2\pi N_r}{\tau} N B_0 A_m \frac{P_{(1)}}{P_{(0)}} \right)$$

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

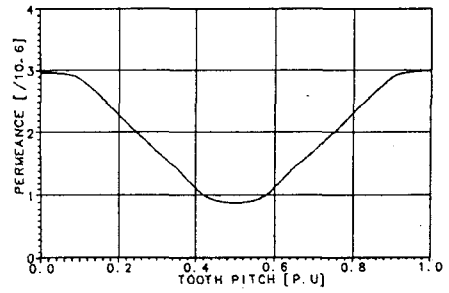


그림 2. 공극의 퍼미언스

Fig. 2. Permeance of air gap

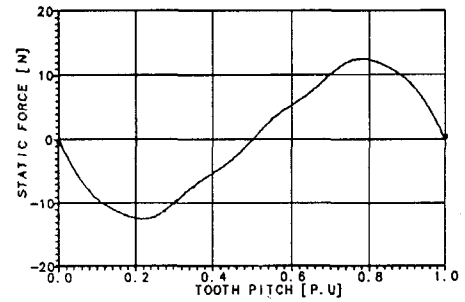


그림 3. 합성 여자 추력

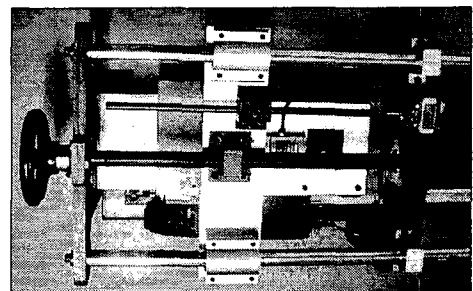
Fig. 3. Total excited thrust

따라 발생한 추력을 합성하면 전체 합성발생추력은 그림 3과 같이 왜형이 발생하여 고조파가 존재하게 된다.

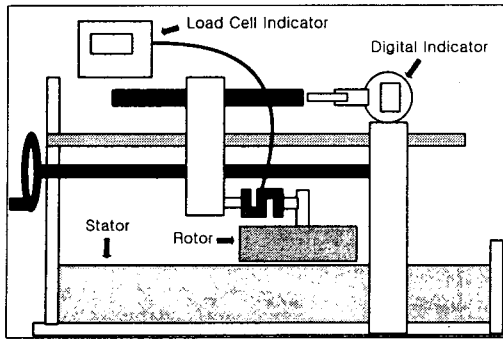
3. 정추력 측정 시스템

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 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. 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

그림 4. 측정설비의 구성요소

Fig. 4. 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
이동적진도	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 5에서 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 미

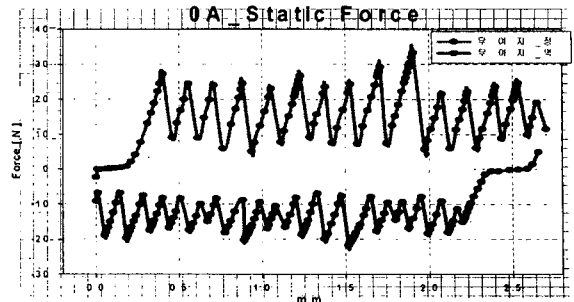


그림 5. 무여자시 정, 역 정추력

Fig. 5. Forward, backward static thrust of 0A

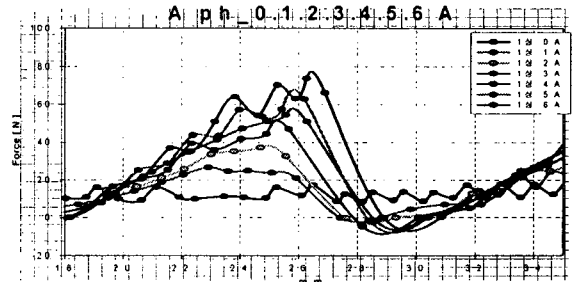


그림 6. 1상 여자시 정추력

Fig. 6. Static thrust of one phase exciting

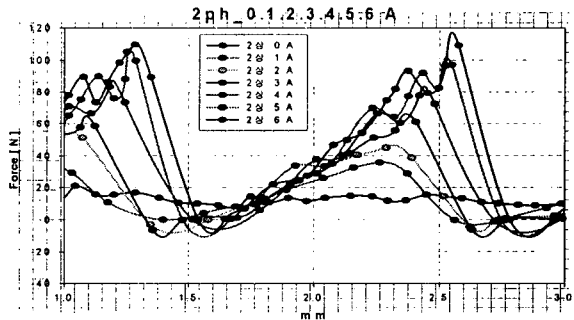


그림 7. 2상 여자시 정추력

Fig. 7. Static thrust of two phase exciting

친다고 가정한다면, 12개의 모듈이 기계적으로 가공 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 5, 1상여자 그림 6, 2상여자 그림 7 참조)

그림 7에서 식 (6)의 K_f (추력 상수)를 계산 및 측정할 수 있다. 2상 6A 여자 시에는 $K_f = 120/6 = 20$ (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 8과 그림 9에서 그림 3과 유사한 곡선의 반복을 갖는다. 이는 측정의 신뢰성 향상을 위해 4치 간격 이상 반복 측정한 것이다. 수식 (2),(3),(4),(6)이 모두가 실측한 그래프(그림 8와 그림 9)와 유사하다. 그림 8와 그림 9에서는 무부하일 때의 정추력

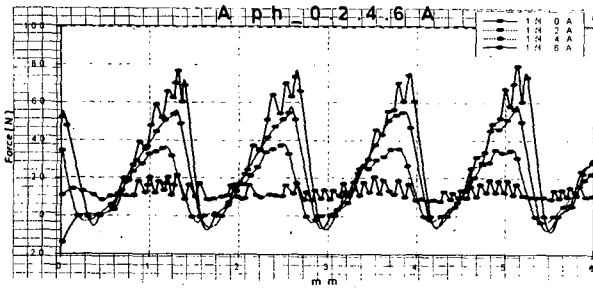


그림 8. 1상 여자시 4주기 정추력
Fig. 8. Four cycle static thrust of one phase exciting

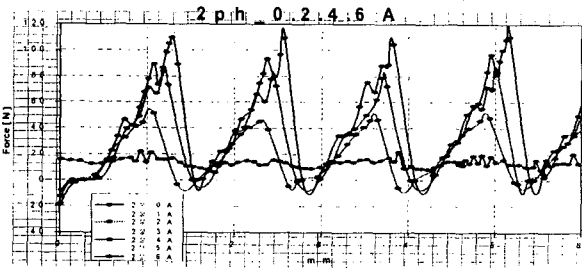


그림 9. 2상 여자시 4주기 정추력
Fig. 9. Four cycle static thrust of two phase exciting

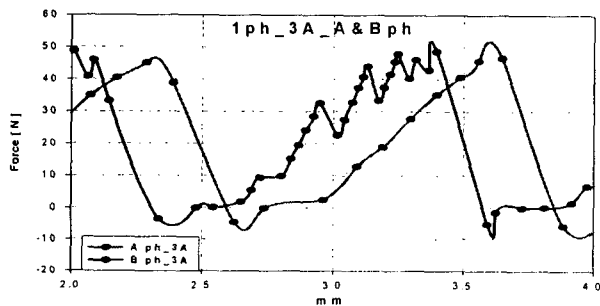


그림 10. A상과 B상의 정추력 비교
Fig. 10. Static thrust comparison of A phase and B phase

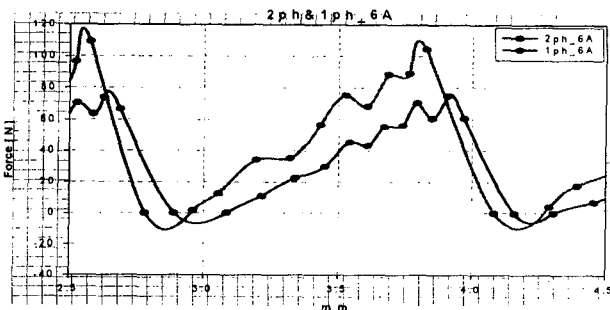


그림 11. 6A에서 1상과 2상여자의 정추력 비교
Fig. 11. Static thrust comparison of one phase and two phase at 6A

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 10에서는 권선 여자 시 A상과 B상은 90°의 위상차를 갖게 됨을 보여준다.

식 (1)과 식 (3)을 통하여 1상과 2상 여자 추력식이 $F \rightarrow \sqrt{2}F, \theta \rightarrow \theta + 45^\circ$ 가 됨을 그림 11을 통해 알 수 있다.

그림 6에서부터 그림 11을 보면 고정자의 1차 간격은 1.28mm가 됨을 알 수 있다.

5. 결론

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

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

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

셋째는 K_f 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.

이 논문은 한국과학재단 지정 전남대학교 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] 김동희, "리니어 펄스모터의 추력산정 비교분석", 2002년도 전력전자학술대회 논문집, pp. 133-137, 2002년 7월.
- [2] 박경빈, "LF2407을 이용한 LPM의 미세스텝별 실시간 위치오차 저감 제어법", 전남대학교 석사학위논문, 2002년 2월.
- [3] 김일중, "자기회로의 평형을 고려한 하이브리드형 리니어 펄스 모터의 특성해석", 충남대학교 박사학위논문, 1994년 10월.
- [4] Syed A. Nasar & I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc. 1987.