

## 유한요소법을 이용한 2상8극형 LPM의 구동방식에 따른 정추력해석

이운웅\*, 조현길\*, 김성현\*\*, 김일중\*\*\*, 임수생\*  
충남대학교\*. 천안공업전문대\*\*. 주성대학\*\*\*

### Analysis for The Characteristic Thrust Force in 2 Phase 8 Pole LPM Using Finite Element Method

Lee Eun-Woong\*, Cho Hyun-kil\*, Kim Sung-Heon\*\*, Kim Il-Jung\*\*\*, Lim Su-Saeng\*  
Chung Nam Univ\*, Cheon An Junior College\*\*, Ju Soungh College\*\*\*

#### Abstract.

In two case, LPM driving by full step or microstep, we simulated the thrust force in LPM using finite element method and measured the force by experimental equipment. And We analyze the harmonics of thrust force by Fast Fourier Transform. We proposed the method, which can reduced harmonic force by microstep driving.

#### 1. 서 론

2상 8극 HB형 LPM을 동일 여자전류로 인가하는 경우 순차적으로 여자되는 자로의 위치가 LPM내에서 바뀌기 때문에 추력 특성이 서로 차이가 있을 수 있고 발생추력이 불균일할 수도 있어 추력의 맥동과 이로 인한 소음, 진동 등을 유발하여 LPM의 위치 결정도에 영향을 주게 된다.[1] 이와 같은 문제점을 보안하기 위하여 LPM의 여자권선에 정현과 혹은 삼각과 전원을 인가하게 되면 원활하게 마이크로스텝으로 구동될 수 있게 되어 소음, 진동 등의 문제를 대폭 경감시킬 수 있다. 뿐만 아니라, 구동회로의 분해능을 충진시킬 수 있는 잇점을 가지고 있다.[2] 그러나, 마이크로 스텝구동을 하는 경우에 있어 여자전류의 지령값의 설정이 영구자석의 영향을 고려하지 않아 영구자석의 영향에 의한 추력의 맥동이 존재하게 된다. 따라서 본 연구에서는 LPM을 1상 여자시의 정추력과 마이크로스텝 구동시의 정추력을 각각 유한요소법의 시분할법(Time-Step)을 이용하여 해석하고 이를 실험결과와 비교하였다. 이 정추력 곡선들을 푸리에 변환에 의해서 고조파를 해석하였다. 그리고 고조파 추력을 제거하여 정추력 특성을 개선하기 위한 알고리즘을 제안하였다.

#### 2. LPM의 특성해석

##### 2.1 동작 특성해석

공극의 자기저항이 최고가 되는 방향으로 가동자와 고정자의 치가 서로 안정점으로 이동하는 것이 LPM의 구동원리이다. 이때, 영구자석에 의한 각 극에서의 자속분포는 식(1)~(8)과 같다.

$$\phi_1 = \phi_0 + \Delta\phi \cos \frac{2\pi}{\tau} X \quad (1)$$

$$\phi_2 = \phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} + \frac{\pi}{4\tau} \right) X \quad (2)$$

$$\phi_3 = \phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} + \frac{2\pi}{4\tau} \right) X \quad (3)$$

$$\phi_4 = \phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} + \frac{3\pi}{4\tau} \right) X \quad (4)$$

$$\phi_5 = -\phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} + \frac{\pi}{4\tau} \right) X \quad (5)$$

$$\phi_6 = -\phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} + \frac{2\pi}{4\tau} \right) X \quad (6)$$

$$\phi_7 = -\phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} + \frac{3\pi}{4\tau} \right) X \quad (7)$$

$$\phi_8 = -\phi_0 + \Delta\phi \cos \left( \frac{2\pi}{\tau} \right) X \quad (8)$$

여기서,  $\phi_0$  : 자속의 평균치,

$\Delta\phi$  : 치가 안정적으로 이동하는 자속

$\Delta\phi$ 가 가장 작은 경우, 1극에 가해지는 영구자석의 영향은 치의 위치에 따라 여자전류와 간섭하여, 이때의 여자전류와 영구자석에 의한 자기수반에너지를 유한요소법을 통하여 산출하고, 이 에너지로부터 가상변위의 원리를 이용하여 발생추력  $F(x)$ 를 식(9)로부터 구한다.

$$F(x) = \frac{\partial W_m}{\partial x} = \frac{1}{2} (NI_g)^2 \frac{\partial P_g(x)}{\partial x} \quad (9)$$

단,  $W_m$  : 자기수반에너지,  $P_g(x)$  : 공극의 퍼어미언스  
 $I_g$  : 여자전류       $NI_g$  : 공극의 인가기전력

식 (1)~(9)에서 에너지는 상호영향을 주기 때문에 이들에 의한 힘을 수작업으로 구하는 것은 어렵다. 또한 영구자석에 의한 영향을 퍼어미언스법을 통해서 구하는 것은 매우 어렵다. 그래서, 본 연구에서는 유한요소법을 이용하여 그 영향을 구하고자 한다.

## 2.2 유한요소법의 정식화

2차원으로 모델링하기 위하여 우선 영구자석은 Z방향으로 무한히 길고, XY평면에 균일하게 차자되었다고 가정하면, 영구자석에 의한 자계는  $H_e = jH_c$ 임으로 영구자석에

의한

$$\begin{aligned} J_{PM} &= \frac{1}{\mu_0} \nabla \times M \\ &= \nu_0 \left( \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (10)$$

전류밀도  $J_{PM}$ 는 식(10)과 같이 주어진다.

맥스웰 방정식으로부터 전류밀도의 합은 식(11)과 같다.

$$\nabla \times (\nu(B) \nabla \times A) = J_0 + J_{PM} \quad (11)$$

영구자석이 포함되어 있는 영역의 해석에는 잔차가 최소가 되는 포텐셜 분포를 구하는 Galerkin법을 적용하였다

삼각요소의 보간함수  $N_i$ 를 곱한 잔차  $G_i$ 는 식(12)와 같고 식(11)과 식(12)를 만족하는 해를 구하면 각 절점에서의 포텐셜분포를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} G_i^{(e)} &= \int_s \nu \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) dx dy \\ &- \int_s N_i J dx dy - \int_s N_i J_{PM} dx dy \end{aligned} \quad (12)$$

1피치에 대하여 32 step으로 분할하고, 이때에 인가되는 전류의 시변을 시작에 따라 입력하므로서 해를 얻는 시분법[time step method]을 이용하여 자계중에 저장되는 에너지를 구한다. 그리고 자계에 저장되는 에너지의 변화량과 자기수반에너지의 변화량이 같으므로 가상변위의 원리를 적용하여 발생토오크를 구할 수 있다.

1상여자시의 여자전류(구형파)와 마이크로 스텝구동시 여자전류(정현파)를 각각 나타내면 다음과 같다.

(1) full step 구동시

I       $0 \leq x \leq \tau$

(2) Micro step 구동시

A 상  $I \sin \frac{2\pi}{\tau} x$        $0 \leq x \leq \tau$

B 상  $I \cos \frac{2\pi}{\tau} x$        $0 \leq x \leq \tau$

## 3.1 해석모델 및 해석결과

표1. 해석모델

	가동자	고정자
치피치	3.5[mm]	3.5[mm]
치폭	1.5[mm]	1.5[mm]
슬롯폭	2[mm]	2[mm]
극피치	32.375[mm]	-
여자권선	260[회]	-
극수	8극	-

해석모델의 사양은 표1과 같고, 8극중에서 1극을 모델링하여, 상단 및 하단에는 자연경계조건을 적용하고, 측면에는 주기경계 조건을 적용하여 해석하였다. 총 절점수는 1213로 하였고, 요소는 2427로 하였다. 그림1에 해석모델의 요소분할도를 나타내었다. 각 step에서의 자기에너지  $W_m$ 이고, step의 공간적 변위는  $\frac{\tau}{32}$ 이며, 시간적 분할량은 T/32가 된다.

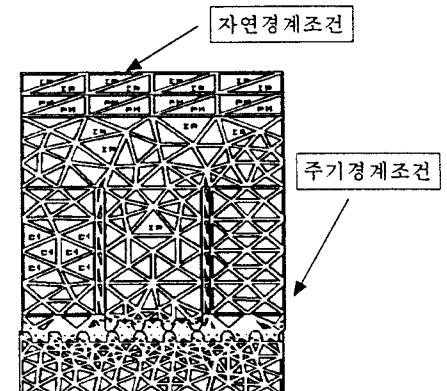
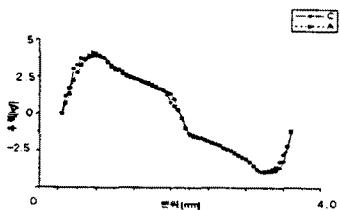
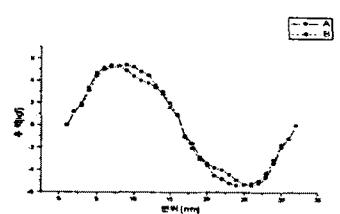


그림1. 해석모델의 요소분할  
과 경계조건



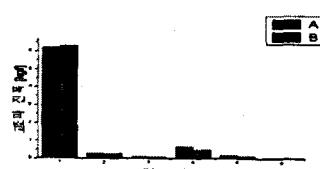
A : 실측치, C : 계산치  
그림 2. 1상 여자시 정추력 특성



A : 실측치, B : 계산치  
그림3. 마이크로스텝 구동시 정추력 특성



A : 실측치, B : 계산치  
(a) 1상 여자시



A : 실측치, B : 계산치  
(b) 마이크로스텝구동시  
그림4. 정추력 고조파 분석

### 3.2 제어 알고리즘

그림 2는 1상 여자시(구형파 여자전류)에 유한요소법에 의한 정추력과 실험을 통한 실측치를 비교한 것이다.

그리고 그림 3에는 마이크로 스텝구동시(정현파 여자전류)에 유한요소법에 의한 정추력과 실측한 정추력을 비교하여 나타내었다.

또한 1상 여자시와 마이크로스텝 여자시의 정추력을 푸리에 변환하여 고조파 성분을 분석한 결과는 그림 4와 같다. 실험을 통하여 실측한 결과와 유한요소법에 의해서 구한 결과, 그림4.(a)에서 알 수 있듯이 1상 여자시에는 기본파와 2, 3, 4고조파 성분이 현저하게 크게 나타났는데 이것은 LPM의 기학적 구조상 2상과 8극으로 되어 있어 2배수의 고조파가 나타나는 것으로 생각된다.

그림4.(b)는 마이크로 스텝시에는 추력의 고조파 성분을 나타내고 있다. 1상 여자시에 비하여 2, 3 고조파 성분이 크게 감소되었음을 알 수 있으나, 4고조파 성분이 아직 존재하고 있음을 나타낸다. 이 고조파를 제거하기 위하여 여자전류에 추력의 4고조파를 상쇄시키기 위한 고조파 전류를 합성하여 여자전선에 인가함으로써 4고조파 성분의 추력을 저감시킬 수 있음을 알 수 있다.

그래서 1상 여자시보다는 마이크로 스텝 구동을 하는 경우 맥동 및 진동이 감소하고, 위치 정밀도를 증가시킬 수 있다. 또한 마이크로 스텝구동시, 여자전류에 추력의 4고조파 성분을 상쇄시킬 수 있는 여자전류를 중첩시키므로써 점더 정밀한 제어가 가능함을 알 수 있다.

### 4. 결 론

LPM의 구동방식에 따른 추력특성을 해석하기 위해서 1상 여자시와 마이크로 스텝 여자시에 추력 특성을 유한요소법을 통하여 얻었고 FFT를 이용하여 추력곡선에 포함된 고조파 성분을 분석하였다. 전기회로와 자기에너지의 변화에 의하여 구동되는 LPM의 추력특성을 향상하기 위해서는 추력에 함유된 고조파 성분을 제거하기 위한 방법을 제안하였다.

앞으로 마이크로스텝 구동시, 점더 정현적이고 맥동이 없는 추력특성을 얻기 위한 구동 드라이브 설계가 필요하다.

### [ 참 고 문 헌 ]

- [1] Daiki Ebihara Syuji Moriya, Fumihiro Satoh, "Analysis for the Characteristic of Two-Phase Eight-Pole Type Linear Pulse Motor", Trans. on JIEE, Vol.108-D, No.1 PP.77-82, 1988.
- [2] 김성현, 이은웅, 김일중, 이동주, "2상8극 HB형 LPM의 구동방식에 따른 추력의 고조파 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문지(B), 1996.