

## 고조파 저감에 의한 하이브리드형 LPM의 위치 정밀도 개선

백 수현\*, 임태빈\*\*\*, 김철진\*\*, 윤신용<sup>0</sup>, 하근수\*\*\*

\* 동국대학교 전기공학과, \*\* 한라공과대학 전기공학과, \*\*\* KETI

### The performance improvement of hybrid type LPM position accuracy

S.H. Baek\*, T.B. Im\*\*\*, C.J. Kim\*\*, S.Y. Youn\*, K.S. Ha\*\*\*

\* DongGuk University, \*\* Halla Institute of Technology,

\*\*\* Korea Electronics Technology Institute

**Abstract** - This paper describes the position accuracy performance improvement of hybrid type LPM. The harmonics are included in the thrust force component of LPM, those are generated from the nonlinearity of intrinsic magnetic saturation characteristic and mechanical construction, and so on. In this paper, the performance improvable method is proposed for the better thrust force by the corrected exciting current injection, and precise position control is achieved.

### 1. 서 론

선형 펄스모터(Linear Pulse Motor : LPM)는 직선운동이 필요한 FA, OA 관련분야에 폭넓게 활용되며, 전자 제어장치와 결합하여 이용할 경우 보다 정밀한 위치제어 엑츄에이터로서 사용될 수 있다. 이를 실현하기 위한 방법으로 모터의 치피치 세분화 방법이 있으나, 가공상의 한계가 존재하므로 구동방식을 적용하여 정밀제어를 실현할 수 있다. 일반적으로 마이크로스텝 구동시 정추력을 발생하기 위한 여자전류는 정현파를 공급하나 고정자와 가동자의 치폭비, 가동자의 영구자석에 대한 전자석의 내외부극 기자력의 크기 및 자성체의 포화특성에 따라 LPM의 정추력에는 왜형 및 불균형을 야기하는 고조파 성분이 포함되며 이러한 경우 마이크로스텝 구동시 위치의 오차를 발생하게 된다.[2],[3]

따라서 본 연구에서는 추력의 왜형에 영향을 주는 고조파성분을 분석하고 이를 저감함으로써 추력특성을 개선하기 위한 고조파전류 보상을 기준으로 한 제어방안을 제안하고 이를 하이브리드형 LPM에 적용하여 구형파로부터 정현파에 근사한 마이크로스텝 구동에 이르기까지의 과정에 대한 여자전류의 고조파성분을 비교하며 실험에 의해서 정추력특성을 입증하고자 한다.[4]

### 2. LPM의 구조와 등가 모델

그림 1은 본 연구에 적용한 하이브리드형 LPM의 기본구조를 나타낸 그림으로 고정자(Platen)는 강철(M-22)로 되어있으며 가동자(Forcer)는 회토류 영구자석과 전자석으로 구성되어 있다. 권선은 모노필러 권선을 직렬로 연결하여 (A+, A-)상 및 (B+, B-)상으로 구성되어 있다. [1]

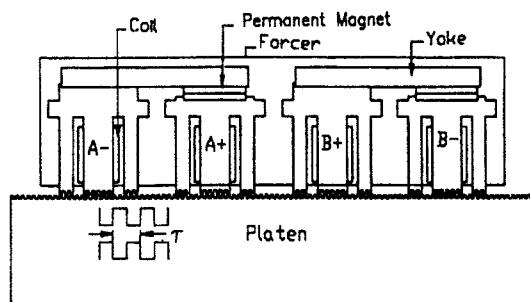


그림 1. LPM의 기본 구조

각 극간의 치피치 간격은  $1/4 z$  만큼의 변위를 유지하고 있다. 다음의 그림 2는 본 연구에서 제어대상으로 사용하는 LPM의 등가자기회로 모델을 나타낸 것이다.

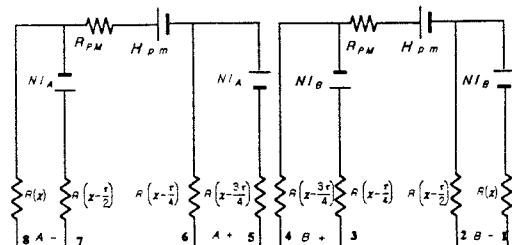


그림 2. LPM의 등가자기회로

그림에서 좌우의 등가 자기회로는 동일한 형태이다. 영구자석의 기자력(MMF)원은 자기저항  $R_{pm}$ 에 대해

$H_{mm}$ 으로 모델화할 수 있다. 전자석의 기자력원은 코일에 공급된 전류로서 나타낼 수 있으므로 그림 1의 구조를 갖는 LPM은 그림 2와 같이 등가자기회로로 표현 가능하게 된다.

### 3. 고조파 분석과 추력특성의 개선

LPM의 정밀도를 향상 하기 위해서는 추력성분에 포함되는 고조파를 분석하여 이를 저감함으로써 정추력 특성을 개선할 수 있다. LPM의 추력은 공극의 자기저항  $R$ 과 변위  $x$ 에 대한 자계에너지  $W_f$ 의 상관관계로부터 가상변위의 원리를 적용함으로써 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. [1]

$$\begin{aligned} F(x) &= - \left( \frac{dW_f}{dx} \right) \\ &= - \frac{\phi^2}{2} \frac{dR}{dx} \\ &= - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi_n(I, x)^2}{2} \frac{dR_n}{dx} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $n$  : 자기경로의 수 (그림2)

$$\phi_1 = \sqrt{\phi_{1,B+}^2 + \phi_{1,B-}^2 + \phi_{PM}^2}$$

그림 2의 자기등가회로와 식 (1)으로부터 합성 추력을 계산하면 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F(x) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\phi_n(I, x)^2}{2} k \sin \frac{2\pi}{\tau} x \quad (2)$$

실제 LPM 추력의 고조파 성분 중 6차 이상의 고조파 성분은 매우 작으므로 그림 3의 실험파형과 같이 무시할 수 있다.

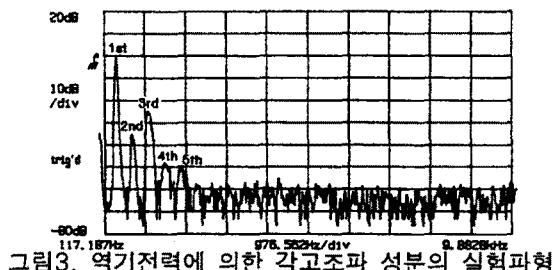


그림3. 역기전력에 의한 각고조파 성분의 실험파형

추력의 제 3, 5고조파 성분은 전자력에 의해서 발생되는 고조파 성분이며 제 4 고조파 성분은 영구자석의 한 디센트 추력에 관계되는 성분으로서 이러한 고조파 성분이 추력에 포함되면 추력의 왜곡과 리플을 발생한다. 실질적으로 정추력에 큰 영향을 주는 각각의

고조파 성분을 포함한 추력은 Fourier 급수 전개로부터 다음의 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.[2]

$$\begin{aligned} F(x) &= I_m \left( k_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} x + k_2 \sin \frac{4\pi}{\tau} x + k_3 \sin \frac{6\pi}{\tau} x \right. \\ &\quad \left. + k_4 \sin \frac{8\pi}{\tau} x + k_5 \sin \frac{10\pi}{\tau} x \dots \dots \right) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (10)에서  $k_1, k_2, k_3, k_4, k_5$ 는 각각 기본파 및 제 2, 3, 4, 5 고조파의 추력비례정수를 의미하며, 기본파 이외의 고조파 성분을 억제하고 양호한 추력특성을 얻기 위하여 본연구에서는 발생된 각 고조파 성분의 크기에 해당하는 역상분전류를 공급하며 이에 대한 각 여자전류의 수식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$I_m(x) = I_0 - I_2(x) - I_3(x) - I_4(x) - I_5(x) \dots \quad (4)$$

여기서  $I_0$  : 기본파 전류

$I_2, I_3, I_4, I_5$  : 제 2, 3, 4, 5 고조파의 전류성분

보상전류를 나타내는 식(4)를 식(3)에 대입하여 정리함으로써 다음의 식(5)와 같이 보상된 형태의 정추력특성을 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} F(x) &= \{T(x)\}I_0 - \{T(x)\}I_2(x) - \{T(x)\}I_3(x) \\ &\quad - \{T(x)\}I_4(x) - \{T(x)\}I_5(x) \dots \end{aligned} \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned} T(x) &= \left\{ k_1 \sin \frac{2\pi}{\tau} x + k_2 \sin \frac{4\pi}{\tau} x + k_3 \sin \frac{6\pi}{\tau} x \right. \\ &\quad \left. + k_4 \sin \frac{8\pi}{\tau} x + k_5 \sin \frac{10\pi}{\tau} x \right\} \end{aligned}$$

식 (5)에 대한 각고조파 역상분 전류  $I_2 - I_5$ 는 다음과 같다

$$I_2(x) = \frac{k_2 I_0 \sin \frac{4\pi}{\tau} x}{\{T(x)\}}, \quad I_3(x) = \frac{k_3 I_0 \sin \frac{6\pi}{\tau} x}{\{T(x)\}}$$

$$I_4(x) = \frac{k_4 I_0 \sin \frac{8\pi}{\tau} x}{\{T(x)\}}, \quad I_5(x) = \frac{k_5 I_0 \sin \frac{10\pi}{\tau} x}{\{T(x)\}}$$

따라서 식(5)에 제시한 바와 같이  $I_2 - I_5$ 에 해당하는 전류를 보상함으로써 이동시 변위의 오차를 야기하는 추력의 왜곡과 불균형을 억제함으로써 고정도의

정밀한 위치제어를 실현할 수 있다. 이러한 보상전류의 시뮬레이션 결과를 제시하면 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

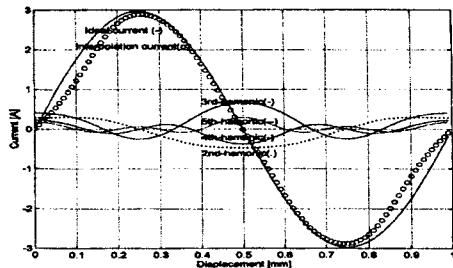


그림4. 각 고조파 전류에 의한 보상된 전류의 파형

#### 4. 실험 및 고찰

고조파가 포함된 추력특성의 이론식을 근거로하여 다음에 제시한 제어대상 LPM에 실험을 통하여 제안한 정추력특성의 타당성을 입증하고자 하였다. 적용대상 LPM의 사양은 다음 표.1과 같이 제시한다.

표.1 LPM의 기계적, 전기적인 사양

사양		
기계적	전기적	
치와 슬롯 폭	0.55[mm]	최대 전류
치 피치 ( $z$ )	1[mm]	60[N]
고정자의 길이	700[mm]	잔류자속 밀도
고정자의 폭	50[mm]	여자형태
자석의 높이	2.54[mm]	제어 방식
스텝 변위	0.256[mm]	스위칭 주파수
정 추력	9.8[kg f]	구동 방식
		bipolar

다음의 그림 5는 식 (5)의 추력식으로부터 각 고조파 성분의 크기와 변위에 대한 추력의 특성을 나타낸 것으로 풀스텝 구동시 이동변위 1[mm]에 대해서 제 3, 2, 4, 5 고조파가 크기 순으로 포함된 추력의 왜형을 나타낸 것이다.

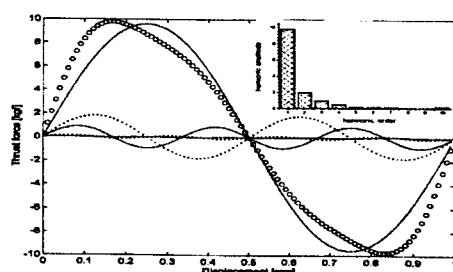
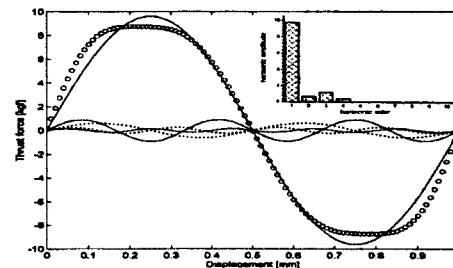
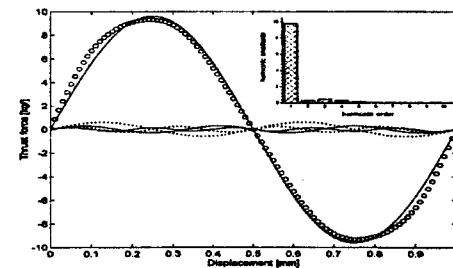


그림5. 변위에 대한 추력특성 및 고조파성분(풀스텝)

그림 6은 125 마이크로스텝으로 구동시킨 경우 미소고조파 성분이 포함된 추력곡선을 나타낸 것이다.



(a) 마이크로스텝 구동시(고조파 저감전)



(b) 마이크로스텝 구동시(고조파 저감후)

그림6. 변위에 대한 추력특성 및 고조파성분

다음의 그림 7, 8은 LPM을 풀스텝과 마이크로스텝으로 구동시 추력의 왜형을 야기하는 고조파 성분이 포함된 여자전류의 실험 과정이다. 이에 대한 실험조건은  $A=0.5[m/s^2]$ ,  $V=0.05[m/s]$ ,  $I=2.7[A]$ ,  $x=1[mm]$ 를 적용하였다. 실험 결과 풀스텝 구동시 여자전류에 대한 고조파 성분은 기본파에 대해서 제 2, 3, 4, 5의 순으로 고조파가 존재함을 알 수 있다. 마이크로스텝 구동시에는 감소된 제 2, 3 고조파 성분이 존재하지만 여기에 제안한 보상전류 기법을 적용할 경우 그림 9와 같이 제 3고조파 성분이 더욱더 저감됨을 알 수 있다.

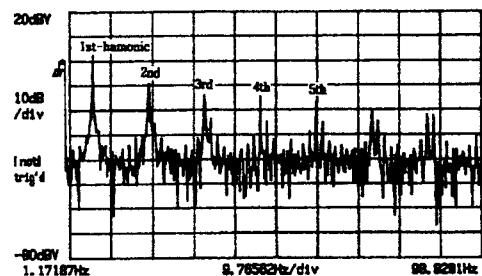


그림7. 풀스텝 구동시 여자전류에 대한 고조파성분의 실험파형

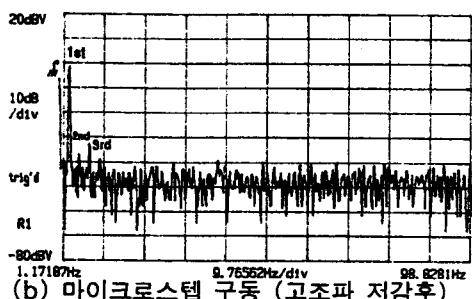
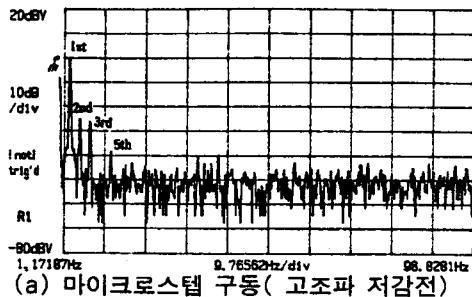


그림8. 마이크로스텝 구동시 여자전류에 대한 고조파성분의 실험파형

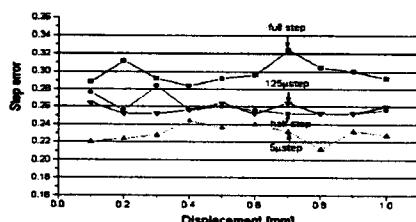


그림 9. 각 스텝별 변위 오차의 크기

그림 9는  $x=0.25[\text{mm}]$ 의 설정변위에 대해서 풀스텝으로부터 마이크로스텝에 이르는 각 스텝별 위치오차를 나타낸 실험 데이터로서, 비교결과 고조파 전류를 보상한 125 마이크로스텝 구동시 위치 정밀도가 가장 양호한 것을 알 수 있다.

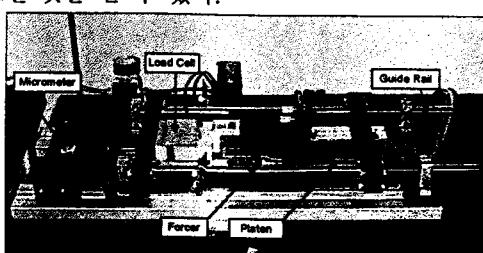
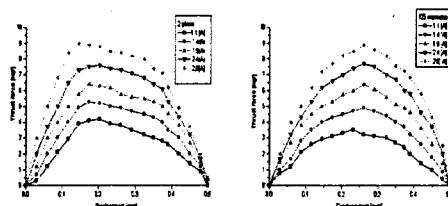
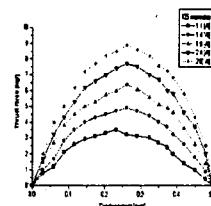


그림 10. LPM의 추력측정 시스템



(a) 풀스텝 구동



(b) 마이크로스텝 구동

그림 11. 풀스텝과 마이크로스텝 구동시 추력특성

## 5. 결 론

LPM은 정밀한 위치제어의 장치로서 활용가능하지만 추력에 고조파 성분이 포함될 경우는 추력의 왜곡으로 인해 정밀한 위치제어가 불가능하므로, 정밀도를 향상시키기 위한 방안으로 본연구에서는 제어기의 고조파 보상전류 기법으로 고조파 전류를 보상함으로써 정밀제어를 실현하도록 하였다.

이중에서 구동시 발생하는 고조파 성분중 제3고조파 성분이 가장 큼을 알 수 있었다. 추력의 고조파 성분을 저감을 위한 이론적 결과와 각 스텝별 여자전류의 고조파성분을 실측하여 비교 검토한 결과, 풀스텝 구동시 보다는 125 마이크로스텝 구동시 고조파성분이 저감되지만, 마이크로스텝 구동에 고조파 전류보상법을 적용할 경우에 더욱더 위치의 정밀도를 향상됨을 알 수 있었다.

## 참고문헌

- [1]. Scott Ellerthorp, John Blaney, " Force Estimation for Linear Step Motor with Variable Air Gap," IMCS, Pakar Hannifin Corp. Compumotor Division, 1996, pp327-335.
- [2]. Daiki Ebihara, Syuji Moriya, Morimasa Kajioka, Kazusi Yamaguchi, " The Drive of the Linear Pulse Motor by the Microstep Driver," pp 53-60. LD-90-24
- [3]. M. L. Patterson, " Analysis and Correction of Torque Harmonics in Permanent-Magnet Step Motors," IMCS, Hewlett-Packard, San Diego Division, California., 1977, pp 25-37
- [4]. Wen Wei Chiang, " Optimal Cogging Torque Compensation during Microstepping under Constant Load," IBM Almaden Research Center, San, Jose, California IMCS, pp349-355.