

하이브리드형 선형 펄스 모터와 마이크로스텝 드라이버 설계 A Design of Hybrid Type Linear Pulse Motor and Microstep Driver

김 문 환

M. H. Kim

(접수일 : 2009년 5월 28일, 수정일 : 2009년 7월 10일, 채택확정 : 2009년 8월 17일)

Key Words : Linear Pulse Motor(선형 펄스 모터), Microstep(마이크로스텝), Microprocessor Control(마이크로 프로세서 제어), Pull-in(풀-인), Pull-out(풀-아웃), Thrust Force(추력)

Abstract : In this paper we designed a prototype hybrid type linear pulse motor (HLPM) with single side stator structure for low cost. The measurement system which can get the motor characteristics of the HLPM was suggested. The static and dynamic characteristics of the thrust force are measured analyzed. And the microstep drive method is adopted and tested to the drive of prototype HLPM. The thrust waveform is measured respectively to know the differences of the thrust waveform between the microstep drive method and rectangular wave. From the experimental results, it can be confirmed that the repetitive ripple of the thrust force of the prototype HLPM is reduced by taking the microstep drive method.

1. 서 론

공장에서 생산시설의 직선운동의 경우, 현재까지 대부분 회전기기에, 회전운동에서 직선운동으로 변환하는 변환기를 부착, 사용한다. 이러한 변환기로 랙 앤 피니언, 볼 스크류 등을 들 수 있다. 이러한 변환기는 자동화 기구에 사용할 경우 백러쉬로 인하여 반복된 사용에는 필수적으로 누적 위치 오차가 크지는 단점이 있다. 이러한 단점을 보완하는 방법으로 선형모터의 사용이 있다. 선형모터의 경우, 선형 직류 모터, 선형 유도 모터, 선형 동기 모터 등은 직선위치검출기와 피드백제어로 비교적 정밀한 위치제어가 가능하다⁹⁾. 본연구의 대상인 선형 펄스 모터의 경우, 위치 피드백 제어가 어려운 바, 기존의 볼 스크류 등에 버금가는 위치 제어 정밀도를 얻으려면 직선운동부의 가공에 매우 정밀한 기술이 필요하다. 선형모터의 고정자에 해당하는 솔리드의 가공은 가동자 전운동범위내에서 가공정밀도를 일정하게 유지하여야한다. 밀링과 연삭 등 전체 공정에서 온도분포, 습도 등 환경 분위기의 변화에 따른 가공오차를 막아야한다. 즉 가공기와 피가공

물체인 솔리드의 가공 전공정에서의 환경 분위기를 허용 오차내로 제어해야 할 필요가 있다. 이는 가공기가 매우 고가의 전용장비가 되며, 유지보수가 어려운 가공공정이 됨을 말한다. 특히 운동범위가 긴 선형모터의 경우는 더욱 가공이 어려워진다고 할 수 있다. 이에 본 연구에서는 전용의 솔리드가공에 비하여 저렴한 전기 강판을 사용, 치 구조를 금형 가공하여 이를 적층구조로 고정자를 구성하는데 착안하여 가공한 전기 강판을 적층한 코어구조로 고정자를 구성하였다. 이는 전용 가공기와 가공공정을 거치지 않는 것으로 범용기를 대상으로 한 저가형의 선형 펄스 모터의 제작을 가능하게 한다. 시제품으로는 가동자에 영구자석을 사용하여, 가동자의 위치제어에 영구자석과 여자전류의 자속들을 사용할 수 있는 하이브리드형 선형 펄스 모터(HLPM, Hybrid Linear Pulse Motor)를 개발하였다. 제작에는 필요한 기계, 전기 파라미터값을 결정한 후, 수치모델에서 모터의 정추력을 계산하였다. 그리고 완성된 시제품의 정추력과 비교하였다. 모터의 중요특성인 정특성과 동특성을 실험으로 측정하였다. 범용기로서의 기능을 확인하기 위하여 마이크로컴퓨터 시스템으로 구동시스템을 구성하여 구형파와 마이크로스텝으로 구동제어 시험을 하였으며 각각의 구동방식에서의 추력의 변화를 관찰하였다. 그리고 모

김문환(책임저자) : 신라대학교 자동차기계공학과
E-mail : mhkim@silla.ac.kr, Tel : 051-999-5701

터의 한 피치에서 위치제어 가능성을 확인하기 위하여 마이크로스텝에 의한 위치제어의 재현성을 확인하였다.

2. HLPM 설계 및 제작

적층 코어 저가격의 HLPM 설계 및 제작을 목표로 하고 시제품은 고정자, 가동자를 적층 코어 구조로 하여 하이브리드형으로 설계를 하였다. 전 가동 구간에서 지지기구에 의하여 공극을 0.1mm로 균등하게 유지될 수 있도록 하였다. 그림 1은 제작한 HLPM의 설계 단면도를 나타낸다. 그림에서 forcer는 가동자, platen은 고정자를 나타낸다. 그림에서 가동자는 고정자위에서 지면에 평행한 방향으로 좌우로 이동한다.

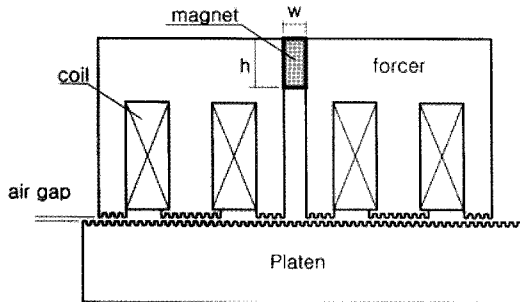


Fig. 1 Schematic diagram of Hybrid type HLPM

제작한 HLPM은 2상이다. 가동자의 재질은 두께 1mm의 전기강판, 고정자에도 같은 전기강판을 사용하였다. 추력의 계산에는 재질에 맞추어 $B-H$ 특성곡선의 알려진 값을 사용하였다. 영구자석은 희토류의 NEOMAG35를 사용하였으며 $B_r = 1.13 \text{ Wb/m}^2$, $\mu_r = 1.05$ 로 가정하여 사용하였다. 다음 표 1은 Prototype HLPM의 설계값을 나타낸다.

Table 1 Designed Dimensions of Prototype HLPM

Parameter	Platen	Forcer
Tooth Width [mm]	1	1
Slot Width [mm]	1	1
Slot Depth [mm]	1	1
Vertical Thickness [mm]	16	—
Pole Height of Forcer [mm]	—	22
Horizontal Breadth [mm]	50	50
Total Length in Moving Direction [mm]	2000	69
Tooth Number in a Pole of Forcer	—	8
Distance between Two Poles in Forcer [mm]	—	22.5
Number of Turn per Pole	—	120

가동자와 고정자의 공극은, 가동자와 고정자를 각각 다른 비자성체의 틀에 고정시킨 후 두 틀 간의 간격을 휠에 의한 지지기구로 유지하도록 하였다.

일반적으로 자계내 전기 기계 결합계에서 이동 거리 x 에 대한 힘 f_x 는 자기수반에너지 W_m' 으로 다음과 같이 표현된다,

$$f_x = \frac{\partial W_m'(i, x)}{\partial x} \quad (1)$$

그림 1의 HLPM의 자기등가회로를 구하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 ϕ_1, ϕ_2, ϕ_3 는 LPM 구동시의 자속을 나타낸다. ϕ_1, ϕ_3 는 그림 1에서 권선이 감겨 있지 않은 부분의 자로가 두개로 나누어져 있는 부분을 1개의 자로로 등가 표시한 것이다. 그림 2에서 위에 있는 점선은 영구자석을 구분하여 나타낸다, 아래에 있는 점선에서 위로는 가동자, 아래 부분은 고정자 부분을 나타낸다. U_1, U_2 는 가동자 각상의 전원에 의한 기자력이다. $R_{i1}, R_{i2}, R_{i3}, R_{i4}$ 는 가동자 축 자로의 자기저항을 그리고 $R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4}$ 는 각각 가동자와 고정자간의 공극 자기저항이다. R_{i5} 는 고정자 축 자로의 자기저항이다. U_p 는 영구자석에 의한 기자력, R_m 은 영구자석의 내부 자기저항을 나타낸다.

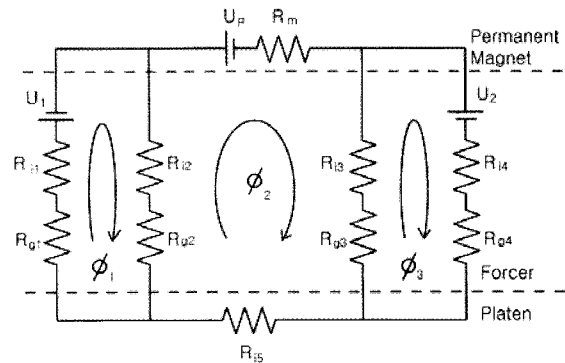


Fig. 2 Magnetic equivalent circuit of the hybrid type HLPM

그림 2의 자기등가회로에서 각 자로에 따라 자기 등가방정식을 구하면 다음과 같다¹⁻³⁾.

$$f_1(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) = (R_{g1} + R_{i1})\phi_1 + (R_{g2} + R_{i2})(\phi_1 - \phi_2) + U_1 \quad (2)$$

$$f_2(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) = (R_{g2} + R_{i2})(\phi_2 - \phi_1) + (R_{g3} + R_{i3})(\phi_2 - \phi_3) + (R_{i5} + R_m)\phi_2 + U_p \quad (3)$$

$$f_3(\phi_1, \phi_2, \phi_3, x) = (R_{g3} + R_{i3})(\phi_3 - \phi_2) + (R_{g4} + R_{i4})\phi_3 + U_2 \quad (4)$$

(2)~(4)식은 위치에 따라 값이 변하는 비선형방정식이다. 이 비선형 방정식의 해는 주어진 $B-H$ 곡선, 전류값을 사용, Newton Raphson 법으로 구하였다³. (2)~(4)식의 해에서 수렴된 쇄고 자속값을 이용하여 구해진 자기수반에너지의 값으로 식 (1)에 의하여 가동자의 위치변화에 대한 정추력의 변화값을 구하였다. 변위는 정추력의 대칭성을 고려하여 반 피치에 해당하는 1mm를 총변위로 주었다. 여자 전류를 1.5A 흘렸을 경우, 계산된 정추력의 값들을 그림 3에 보인다. 그림 3으로부터 HLPM의 구형과형의 치 구조로 인한 가동자의 정추력의 분포가 비선형적임을 확인할 수 있으며 가동자 진행 방향으로 자기저항이 불안정한 0.8mm 이후의 지점에서 매우 급격한 변화를 보임을 알 수 있다.

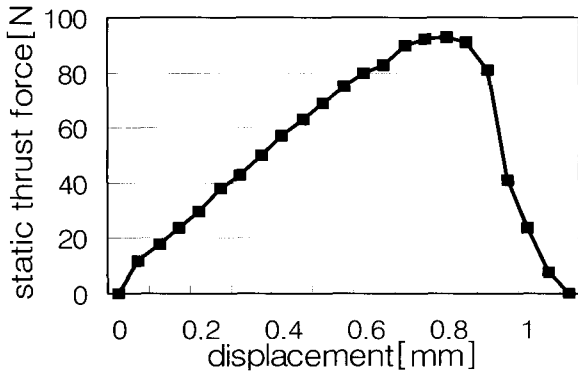


Fig. 3 Calculated values of static thrust force (exciting current = 1.5A)

3. HLPM의 특성시험

모터를 새롭게 제작하였을 경우 모터의 토크 혹은 추력의 정특성과 동특성을 기본적으로 반드시 확인 하여야 한다. HLPM의 경우 추력의 측정시험 기법이 아직 정착되어 있지 않다. 이에 본 연구에서는 특성시험 장비를 고안하여 시제품 HLPM의 추력 정특성과 동특성을 측정하였다.

3.1 정특성 측정

HLPM의 정특성측정을 하였다. 그림 4에 본 연구에서 개발한 정추력 측정장치를 보여 준다. 틀(그림에서 Base plate)의 중앙 가동 철편부에 스트레인 게이지형의 load cell의 본체를 고정 시킨다. load

cell의 센서 부에는 직경 7 mm의 원통형 강철봉을 이용하여 HLPM의 가동자에 접촉 시키는 구조이다. 틀은 HLPM의 고정자에 고정시킨다. load cell의 본체가 부착된 중앙 가동 철편부를 틀의 다른 쪽면에 고정된 마이크로 메타를 사용하여 밀면 load cell의 센서부에 부착된 강철봉이 가동자를 밀어 가동자의 미세 변위를 마이크로미터로, 가동자에서 발생하는 추력의 변화값을 load cell에서 읽을 수 있도록 하였다. 가동자가 여자 혹은 여자되지 않은 두 상태에서 각각 가동자의 변위와 추력의 관계를 측정할 수 있다.

직류여자 전류를 각각 1A, 1.5A 씩 흘리는 2번의 실험을 하였다. 여자된 가동자에 마이크로 메타를 사용하여 가동자를 밀어서 미소변위를 주었다. 이때 가동철편에 고정되어있는 load cell로 정추력의 일부인 holding force를 측정하였다. HLPM의 반 피치에서 추력의 변화는 대칭을 이루므로 가동자 변위의 최대치는 시뮬레이션과 같이 HLPM의 반 피치에 해당하는 1mm로 하였다. 그림 5에 실험결과를 나타낸다.

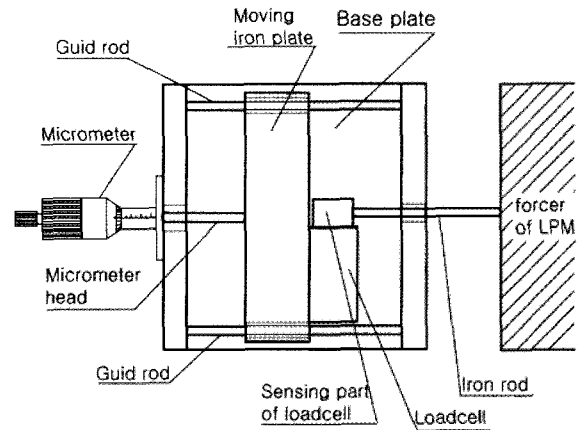


Fig. 4 Measurement system of the static thrust force

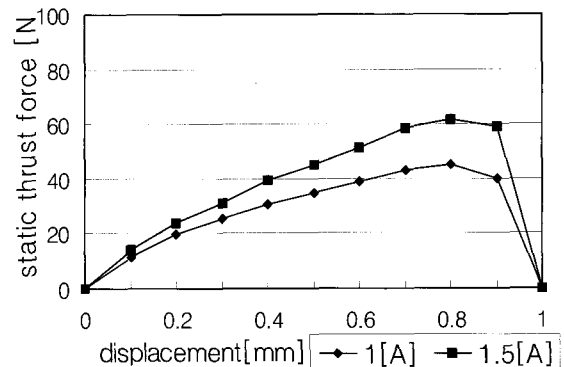


Fig. 5 Measurement results of the static thrust force

여자전류가 1.5A의 경우, 그림 3의 시뮬레이션결과와 비교하여 가동자의 변위에 대한 정추력값의 변화양상이 유사하며, 특히 자기저항이 매우 불안정한 지점인 0.8mm 이후, 시뮬레이션 결과와 같이 급격한 변화를 보여주었다. 다만 정추력의 최대값에서 실험치가 계산치의 약 70%밖에 못 미치는 것은 가동자와 고정자 사이의 공극 간격을 시뮬레이션 설정치인 0.1mm로 유지하기 어려움으로 인한 기계적인 오차문제가 가장 영향을 미쳤다고 생각된다. 그 외, 가동자 이동시 발생하는 기계적 오차범위, 수치모델에서 파라미터값과 사용한 재료 특성치의 오차, 가동자와 고정자 표면의 가공정밀도의 한계에 따른 자기저항값의 변화 등에 기인한 오차로 생각되어진다.

3.2 동특성 측정

HLPM의 경우 동특성으로는 일정한 크기의 구형파의 펄스전원을 인가하여 정지된 상태의 가동자가 구동되기 시작하는 구형파의 최소 주파수(Hz)와 그때의 추력을 구하는 pull in 특성과, 출발과 정지시의 가감속시간을 제외하고 일정한 속도로 구동되는 주파수인 slewing 주파수에서의 추력의 최대값을 측정하는 pull out 특성을 들 수 있다.

1) pull in 특성: HLPM의 속도 0~170 mm/sec에 해당하는 0~85Hz의 구형파 전류를 1.5~2.5A까지 전류의 크기를 바꿔 주며 각각 인가한 결과, 속도범위 내에서 인가되는 펄스값에 관계없이 가동자가 구동되기 시작했다. 이때의 여자전류의 값과 pull in 추력의 변화를 측정한 결과를 그림 6에 나타낸다. 실험결과 두 값의 관계가 선형적인 관계에 있음을 확인할 수 있었다.

2) pull out 특성: pull in 특성에서 확인된 펄스의 값 중 30Hz를 pull out 특성측정에 있어서, 구동가속 시작 펄스의 값으로 하였다. 가속시간은 1초로 일정한 가속도로 가속하도록 하였다. 가속 후 일정속도로 구동되는 slewing 주파수로 100, 150, 200, 250, 500Hz로 하였다. 여자전류를 변수로 하여 1.5~2.5A까지 전류의 크기를 바꿔 주며 pull out 특성을 확인하였다. 측정은 가동자 가속 후, 속도가 slewing 주파수에 도달한 순간의 추력을 측정하였다. 그림 7에 측정결과를 나타낸다. pull in 특성처럼 여자전류의 크기와 추력의 크기가 선형적인 관계가 있음을 확인하였다.

3) 가속시간: Pull out 특성 측정에서는 가속시간

간격을 1초로 일정하게 하여 slewing 주파수까지 구동 후 추력측정을 하였으나 모터의 시동과 속도 변화의 특성을 알기 위하여 최저 가속시간의 확인이 필요 하다. 정지상태에서 구동시작 주파수를 30Hz로 하고 slewing 주파수를 각각 100, 150, 200, 250Hz로 하였을 때 slewing 주파수까지 도달하는데 걸리는 최소 가속시간을 측정하였다. 그 결과를 그림 8에 나타낸다. 대체로 여자전류의 크기와 가속시간의 감소 사이에는 비례관계가 있음을 확인하였으나 100, 150Hz처럼 비교적 낮은 속도에서는 여자전류의 변화가 가속시간의 감소에 크게 영향을 미치지 못함을 확인하였다.

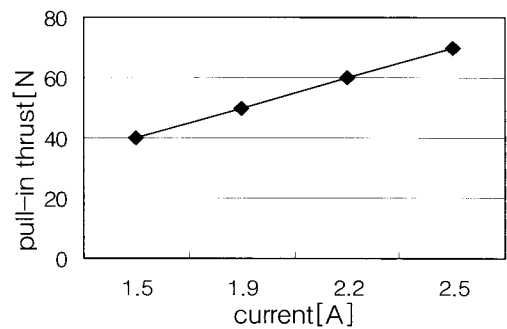


Fig. 6 Measurement results of pull in thrust force

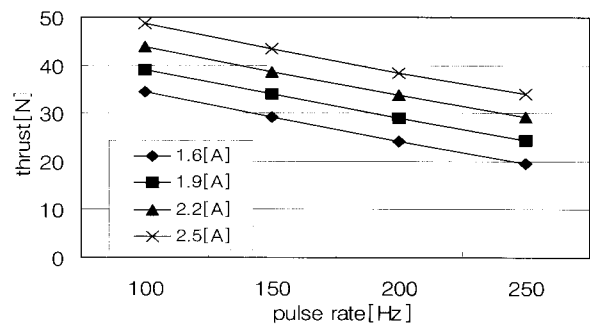


Fig. 7 Measurement results of pull out thrust force

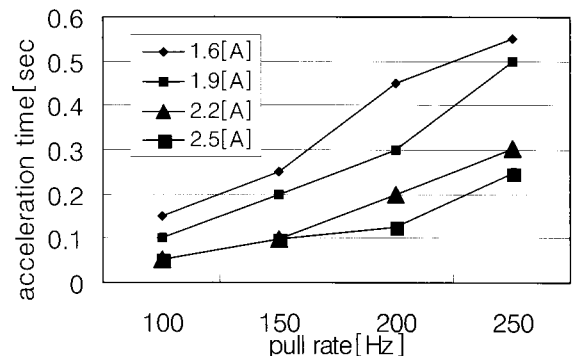


Fig. 8 Measurement results of minimum acceleration time

4. 마이크로스텝 방식에 의한 구동실험

HPLM 구동시 발생하는 고유의 추력리플을 저감하기 위하여 마이크로스텝방식을 적용하여 구동실험을 하였다. 그림 9는 제작한 마이크로스텝방식에 의한 제어기의 블록선도를 나타낸다. 16bit CPU(8097), 입출력부분, 메모리, 논리회로, 디지털 아날로그 변환부, 증폭기, 전류 센서부 그리고 HPLM으로 구성되어있다. 또한 소프트웨어로 HPLM의 이동거리, 가속속시간, 속도 등을 변화시킬 수 있게 하였다. 구형과 구동방식은 분해능이 1/4 피치인데 비하여 마이크로스텝 구동방식은 1/(수십~수백) 피치의 분해능이 가능하다. 또한 구형과 펄스를 인가하여 구동할 경우 스텝간의 이동에 있어서 진동이 크게 발생하는데 비하여 마이크로스텝 구동 방식은 진동이 비교적 줄어든다. 실험실의 리니어 스케일의 분해능을 고려하여 피치당 마이크로스텝 수를 100으로 하였다.

마이크로스텝과 구형과 구동 방식의 진동특성을 확인하기 위하여 동일 사양의 두 대의 HPLM의 가동자에 가속도 센서를 각각 부착하여 동시에 같은 속도로 정속도 운전하였다. 그 결과 가속도센서에서 얻어진 추력리플에 의한 진동의 변화 파형을 그림 10에 보인다. 그림 10에서 위의 파형은 마이크로스텝구동시 가동자의 진동의 변화를 나타내며 아래의 파형은 구형과 구동의 경우이다. 구형과 구동의 경우 리플이 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

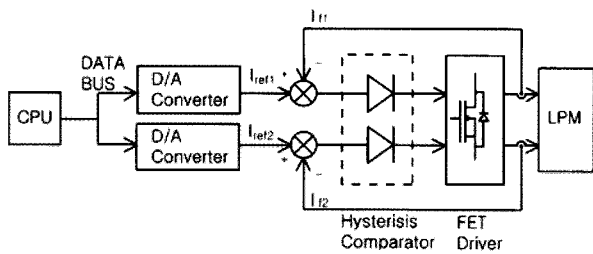


Fig. 9 Microstep driving system

HPLM의 경우, 펄스로 구동되며, 가동자, 고정자 모두 치구조가 구형과의 형태로 되어 있어 1, 1/2 피치 부근에서 비교적 안정된 자기저항 값을 갖고 1/8 피치 부근에서는 매우 불안정한 값을 갖는다. 이에 본 연구에서는 시제품 HPLM을 마이크로스텝으로 구동하여 각 구동 마이크로스텝 길이에 있어서의 가동자 이동거리의 재현성과 정밀성을 확인하는 실험을 하였다. HPLM의 한 피치 2mm에 대하여 마

이크로스텝 분해능을 100스텝, 이동시간을 4초로 하여 HPLM의 한 피치를 이동하는 위치 제어 실험을 하였다. 가동자의 변위는 리니어 스케일로 측정하였다. 실험결과를 그림 11에 나타낸다.

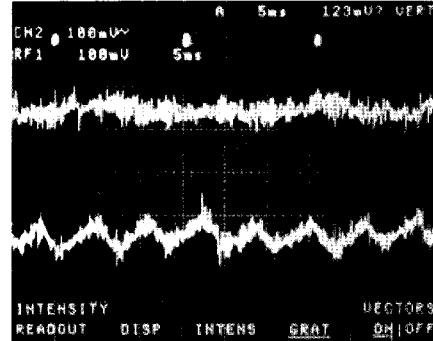


Fig. 10 Measurement results of the HPLM's vibration (upper: driven by microstep wave, down: driven by rectangular wave)

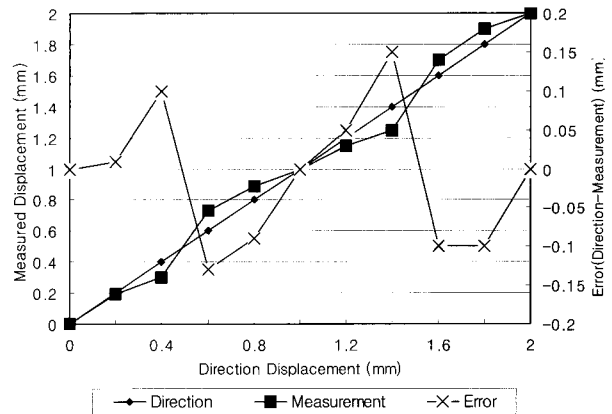


Fig. 11 Measurement results of position control error

그림 11에서 횡축은 가동자 이동 명령치, 왼쪽 종축은 가동자의 실제 변위의 실측치를 나타낸다. 오른쪽 종축은 명령치와 실측치의 차인 오차를 나타낸다. 실험결과, 자기회로의 안정점에 해당하는 1, 1/2피치에서 지령치와 실측치는 10 μ m 이내로 오차값이 최소가 되었다. 모터의 구조상에서 기인하는 자기회로의 비안정점 부근에서 오차값이 최대 150 μ m 부근 까지 매우 커짐을 확인하였다. 시제품 HPLM의 경우 자기안정점에서 최소10 μ m 이내로 안정된 위치제어 결과를 보여 오차허용범위가 비교적 큰 범용기에의 적용가능성이 보인다. 비안정점에서의 오차는 제작 정밀도와 직접적인 관계가 있다고 생각된다. 오차의 저감책으로는 가공정밀도향상과 자기저항의 비선형값에 따른 비선형보상의 제어기법이 필요하다.

5. 결 론

고정자를 적층 코어 구조로 하여 저가격을 목표로 한 HLPM을 설계 제작하였다. 자기등가회로를 이용한 수치모델에 의한 계산치와 제작실험기의 정추력의 변화를 확인하였다. 그 결과 정추력값의 실험치에서 계산치의 약 70%의 값을 보였으나 가동자의 변위에 따른 변화경향이 같음을 보였다. 실험기의 구동성능확인을 위하여 특성시험을 하였다. 그 결과 HLPM의 정, 동특성을 여자전류, 가속시간의 구체적인 수치로 확정지을 수 있었다. 또한 구형과 구동과 마이크로스텝 구동기법을 각각 적용하여 실험기의 구동을 확인하고 추력의 변화와 거리이동 재현성과 정밀도를 측정하였다. 자기회로의 안정점에서 $10\mu m$ 이내의 오차를 확인하였다.

참 고 문 헌

1. 楡井 外 4人, 1995, "리아파ルス모ータにおける磁器抵抗分布の形状依存性", 電気学会論文誌, Vol. 115-D, No. 3, pp. 217~222.
2. 山本, 山田, 1984, "平板状永久磁石形リニアモータの磁石回路と始動特性解析", 電気学会論文誌, Vol. 104-B, No. 5, pp. 265~272.
3. 조운현, 구대현, 이재봉, 1994, "서보 액츄에이터용 Hybrid형 LPM의 정추력 및 수직력 계산", 대한전기학회 하계학술대회 논문집 pp. 43~45.
4. 윤신용, 백수현, 김용, 1999, "리니어 펄스 모터의 추력 및 수직력에 대한 특성 해석", 조명전기설비학회논문지, Vol. 13, No. 4, pp. 142~151.
5. 설진수, 임경화, 2005, "선형 모터의 동특성 분석", 한국소음진동공학회 춘계학술대회, Vol. 1, pp. 258~263.
6. 真田, 森本, 武田, 1994, "マイクロステップ駆動を用いたリアパルスモータの力制御", 電気学会論文誌, Vol. 114-D, No. 2, pp. 214~215.
7. K. S. Kordik, 1976, "Dynamic Torque Measurements for Step Motors", Proceedings Fifth Annual Symposium Incremental Motion Control Systems and Devices, pp. E1~E21.
8. Takashi Kenjo, 1984, "Stepping Motors and their Microprocessor Controls", Oxford University Press.
9. 山田, 1981, "産業用リニアモータ", 工業調査会刊行.