

2상8극 HB형 리니어 펄스 모터의 정추력 해석

김성현°, 이은웅*, 이동주*, 임수생*, 오영웅*
 천안공업대°, 충남대*

The Static thrust force characteristics
 for 2 phase 8 poles HB type Linear Pulse Motor

Kim, Sung-Hun°, Lee, Eun-Woong*, Lee, Dong-Ju*, Lim, Su-Saeng*
 Chonan technical college°, Chungnam National University*

Abstract -In this paper, we evaluated the effect the tooth shape influenced against the thrust force which then was confirmed by experimentation. We analyzed the effect of by measuring static thrust force of the phases of A and B. With this result, we found that there is an area where the thrust force abruptly decreases because the variance of the airgap permeance is very small following the positions of the stator and the mover. And the unbalance among phases showed almost equal, which means that static thrust force of the phases of A and B is very small because magnetic path of the 2-phase 8-pole HB-type is almost equal.

변위에 관하여 수치적으로 미분하여 치형상에 따른 추력을 얻었다.

본 연구에서는 2상8극형 HB형 LPM의 가동자의 위치 변화에 따른 정추력 특성을 해석하여 치형상이 추력에 미치는 영향을 검토하고, 이를 실험을 통하여 확인하려 한다. 또한 상 절환시에 자로길이의 변화가 일어나는 정도는 LPM을 1상여자 상태에서 A상 여자시와 B상 여자시의 정추력을 각각 측정하여 여자상에 의한 자로길이의 차이를 분석하려한다. 즉, 이러한 결과를 통하여 2상 8극 HB형 LPM은 상절환시에 자기회로의 평형이 유지됨을 입증하려 한다.

1. 서 론

리니어 펄스 모터(LPM : linear pulse motor)는 직접 직선운동이 가능한 스텝핑 모터의 일종으로 개루프 제어(open-loop control)에 의해서 정밀한 위치제어가 가능하여 여러분야에 응용이 되고 있다. 특히 하이브리드형 LPM은 단위 입력당 추력이 매우 커서 큰 부하를 저속으로 운전하는 분야에 적합하다. 또한 마이크로스텝 구동(microstep drive)에 의해서 위치 정밀도를 향상시킬 수 있으며 저속영역에서 발생하는 진동 및 소음을 줄일 수 있다.[1][2][3]

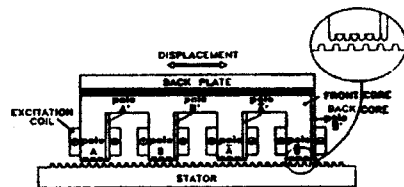
2. 시작기 LPM의 구조 및 특성

2상 8극 HB형 LPM은 그림 1(a)와 같이 치 피치 r 가 3.5[mm]인 2개의 2상 4극 HB형 LPM을 z축방향으로 1/2 피치 어갈리게 결합시킨 구조를 하고 있으며 앞쪽철심(front core)과 뒤쪽철심(back core)의 한 극씩 쌍을 이루어 N (turns)이 감은 자기회로를 구성하게 된다. 그러므로 A, A'극에는 권선 A, B, B'극에는 권선 B, A, A'극에는 권선 A, B, B'극에는 권선 B가 감겨져 있고 바이폴라 구동을 위해서 권선 A와 권선 A, 권선 B와 권선 B가 직렬로 결선되어 각각 A상 권선, B상 권선을 이루고 있어 2상 8극형태를 취하고 있다. 그림 1(b)는 유한요소 해석에 적용한 등가의 2차원 모델이다.

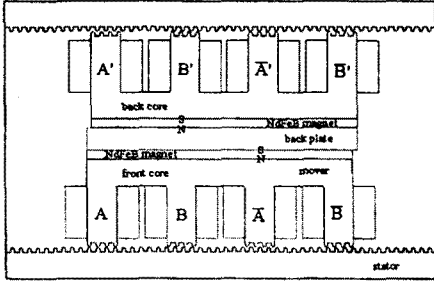
본 실험실에서 선행연구된 2상8극HB형 LPM은 횡자속형(Transverse Flux Machine : TFM)구조를 하고 있기 때문에 상 절환시에 자로길이의 변화가 작아서 종자속형(Longitudinal Flux Machine : LFM)에 비해 구동시에 발생하는 소음 및 진동이 적고 마이크로스텝 구동에 의한 위치제어에 적합한 구조를 하고 있기 때문에 위치 정밀도를 향상시키고자 각 상의 인가전류를 정현파에 가깝도록 제어하는 마이크로스텝 구동을 수행하여 위치정밀도를 향상시키고, 이때 발생하는 고조파 성분의 영향에 의한 추력특성의 왜형을 보상하기 위한 기법에 관한 연구를 진행하여왔다.[4]

이와 같은 2상 8극 HB형 LPM은 영구자석에 의한 기자력과 권선전류에 의한 기자력이 평형을 유지하도록 정격전류를 가지고 구동된다면 한 상당 4개의 극을 가지고 있으나 2개의 극은 기자력이 서로 상쇄되어 동작하지 않게 되므로 실제로는 한 상당 2개의 극만이 동작하므로 본 시작기 LPM은 구동시에는 등가의 2상 4극형 LPM으로 변환하여 해석이 가능하다.

그런데 이러한 구동특성은 주로 LPM의 정추력곡선의 형상에 의해서 결정되므로 정추력특성에 관한 상세한 해석이 필요하다. LPM의 정추력은 가동자와 고정자사이의 공극 피어미언스 분포에 의해서 결정되므로 2상 8극 하이브리드형 LPM의 구동특성에 직접적인 영향을 미치는 공극 피어미언스 분포를 얻고자 유한요소법을 이용하였다. 즉, 고정자와 가동자의 상대적인 위치를 변화시키면서 유한요소해석을 반복적으로 수행하여 가동자 위치에 따른 공극 피어미언스 분포를 얻는다. 그리고 이를



(a) 정면도



(b) 2차원 등가모델

그림 1. 2상 8극 하이브리드형 리니어펄스모터

3. 공극 퍼어미언스분포 해석

3.1 퍼어미언스법(가정자료법)

먼저 해석적인 방법으로 공극 퍼어미언스 분포를 구하고자 그림 2와 같은 퍼어미언스 모델을 선정하고 자료 ($P_1 \sim P_5$)를 가정하자.

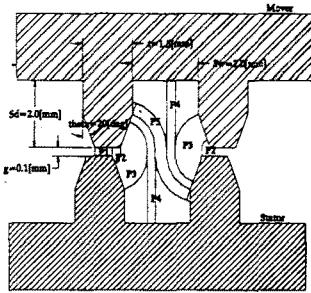


그림 2. 퍼어미언스 모델

일반적인 자료의 단위 길이당의 퍼어미언스는 식(1)과 같은 식으로 표현된다.

$$P = \mu_0 \int \frac{dA}{\ell} \quad [\text{H/m}] \quad (1)$$

여기서, dA = 자료의 미소 단면적 [m^2]

ℓ = 자료의 길이 [m]

μ_0 = 공기의 투자율 ($4\pi \times 10^{-7}$ [H/m])

그림 2의 퍼어미언스 모델에서 경로길이 $\ell_1 = g$ 이고 적분범위가 $0 \sim (t-x')$ 인 P_1 자료의 퍼어미언스는 식(2)로 구해진다.

$$\begin{aligned} P_1 &= \mu_0 \int \frac{dA}{\ell_1} \\ &= \mu_0 \int_0^{t-x'} \frac{dx}{g} \\ &= \mu_0 \frac{t-x'}{g} \end{aligned} \quad (2)$$

같은 방법으로 자료 P_2 는 경로길이 $\ell_2 = \theta x + g$ 이고 적분범위가 $0 \sim x'$ 인 퍼어미언스를, 자료 P_3 는 경로길이 $\ell_3 = 2\theta x + g - \theta x$ 이고 적분범위가 $x' \sim (s_d/2) / \cos \theta$

인 퍼어미언스를, 자료 P_4 는 경로길이 $\ell_4 = s_d + g + x\theta$ 이고 적분범위가 $s_d/2 \cos \theta - x' \sim (s_d/2) / \cos \theta$ 인 퍼어미언스를 구할 수 있으며, 그리고 경로길이 $\ell_5 = 2s + g$ 이고 적분범위가 $0 \sim s_d + t - s_d \cos \theta - x'$ 인 P_5 자료의 퍼어미언스는 식(3)으로 구해진다.

$$\begin{aligned} P_5 &= \mu_0 \int \frac{dA}{\ell_5} \\ &= \mu_0 \int_0^{s_d + t - s_d \cos \theta - x'} \frac{dx}{2\theta x + \frac{\theta s_d}{\cos \theta} + g} \\ &= \frac{\mu_0}{2\theta} \log \left[\frac{2\theta \cos \theta}{\theta s_d + g \cos \theta} \cdot (s_w - s_d) \cdot \left(\frac{1}{\cos \theta} - \tan \theta \right) - x' \right] \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, s_w 는 슬롯의 폭이다.

그리고 한 개의 치에 존재하는 합성 퍼어미언스 분포는 식(4)로 표현된다.

$$P_T = P_1 + P_5 + 2(P_2 + P_3 + P_4) \quad (4)$$

위식(4)은 단지 안정점 근방($0 < x < x'$)에서 유효한 값이고 그 범위를 벗어나면 성립하지 않은 식이다.

해석적인 방법인 퍼어미언스법(가정자료법)으로 얻은 퍼어미언스 분포함수는 단지 안정점 근방에서만 성립하는 식이다. 그것은 공극부분에 가정한 자료가 공극전체를 지나지 않고 있어 퍼어미언스 분포가 부정확하다. 이는 해석적인 방법으로 퍼어미언스를 구하기 위해서 적분이 비교적 간단한 호나 직선의 자료를 가정했기 때문이다.

3.2 유한요소해석

보다 상세한 퍼어미언스분포를 얻기 위해서는 유한요소법과 같은 수치해법을 이용한 해석이 유효하다. 그래서 그림 3와 같이 유한요소모델을 가정한다. 유한요소모델에서 고정자나 가동자 철심의 투자율은 공극에 비해서 매우 크므로 치 면에 따라 분포하는 자위(magnetic potential)은 같다고 가정할 수 있다.

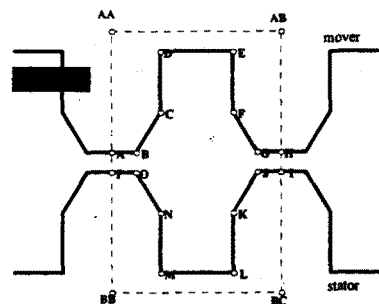


그림 3. 유한요소모델

그림 3의 유한요소모델에서는 전류원($J=0$)이 존재하지 않고 단지 자계 H 만이 존재하므로 그 지배 방정식을 식(5), (6)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \quad (5)$$

$$\mathbf{H} = -\nabla \Omega \quad (6)$$

여기서, Ω : 자기 스칼라 포텐셜 함수

그리고 해석영역 S에 분포하는 자기 에너지 W_s 는 식(7)으로 표현할 수 있다.

$$W_s = \frac{1}{2} \overline{P} \mathcal{F}^2 = \int \frac{1}{2} \mu_0 H^2 \ell dS \quad (7)$$

식(7)으로부터 단위길이당 ($\ell = 1[\text{m}]$)의 표준화된 퍼미언스(normalized permeance) P는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{P} = \frac{P}{\mu_0} = \frac{\int H^2 dS}{\mathcal{F}^2} \quad (8)$$

따라서 식(5)의 지배방정식을 유한요소법으로 이산화하여 자계 H의 분포를 구하고 식(8)의 연산을 통하여 공극전체에 분포하는 퍼미언스를 얻을 수 있다.

이와 같은 방법으로 그림 3의 유한요소모델을 가동자의 위치를 변화시키면서 퍼미언스 분포를 구하면 해석에 필요한 시간과 노력을 줄일 수 있다.

유한요소 해석 결과, 가동자의 위치에 따른 공극부분의 자속분포는 그림 4과 같다.

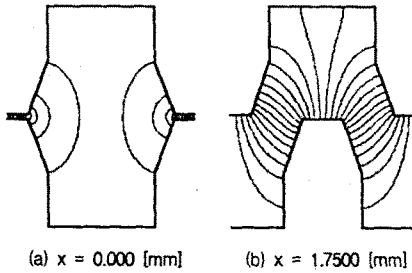


그림 4. 공극자속분포

해석적인 방법으로 구한 퍼미언스 분포와 유한요소해석에 의한 퍼미언스 분포를 나타내면 그림 5와 같다. 그림 5에서 가정자로법에 의한 퍼미언스 분포가 유한요소해석에 의한 퍼미언스 분포보다 전체적으로 작은 값을 갖는 것은 가정자로법에 가정한 자로가 그림 2에서 처럼 공극전체를 포함하지 못하고 있기 때문으로 생각된다. 따라서 유한요소해석에 의한 퍼미언스 해석이 보다 실제값에 근접한 결과임을 예상할 수 있다.

4. 정추력 특성

본 시작기 LPM은 한 극당 4개의 치를 가지고 있으므로 한 극당의 자기저항은 식(9)으로 표현되고 각 극들 사이의 자기저항분포는 단지 $\frac{1}{2}$ 치 피치의 위상차를 가지고 분포하게 된다.

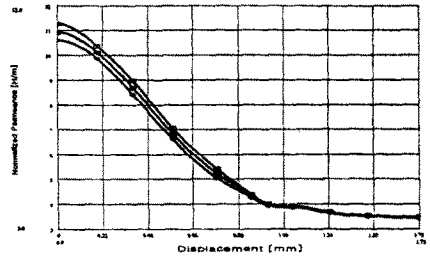


그림 5. 공극 퍼미언스

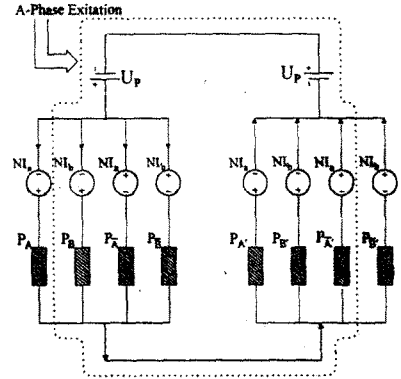


그림 6. 자기동기회로

$$R = \frac{1}{n \cdot P} \quad (9)$$

여기서, n : 한 극당 치의 개수 ($n=4$)

P : 한 치당의 퍼미언스 [$\text{H/m} \cdot \text{tooth}$]

위의 그림에서 A상 권선을 여자시에 한 극에서 발생하는 정추력은 식(10), (11)를 이용해 표현된다.

$$F = \frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{dx} = -\frac{1}{2n} \phi^2 \cdot \frac{1}{P^2} \cdot \frac{dP}{dx} \quad (10)$$

$$\phi = 2(U_p + NI_s) \cdot \frac{P_A P_{\bar{A}}}{P_A + P_{\bar{A}}} \quad (11)$$

여기서, ϕ : 한극을 통과하는 자속 [Wb/pole]

P_A : 극 A의 공극 퍼미언스 [$\text{H/m} \cdot \text{pole}$]

$P_{\bar{A}}$: 극 \bar{A} 의 공극 퍼미언스 [$\text{H/m} \cdot \text{pole}$]

앞에서 구한 퍼미언스 분포와 식(10), (11)을 이용하면 LPM의 정추력 특성을 그림 7과 같이 얻을 수 있다.

5. 정추력 특성측정

그림 8에서 보이는 정추력 측정시스템에서는 측정범위를 $1/2$ [pitch](1.75[mm])하고 측정범위내에서 가동자를 마이크로미터를 사용하여 특정위치에서 눈금을 3.5[mm]로 맞춘 후 3[RPM]의 싱크로너스모터를 이용하여 일정속도로 마이크로미터를 보내면서, 리니어포텐쇼미터(24[V]/5[k Ω])에 나타나는 전압강하를 가동자 변위로

나타내고, 로드셀 증폭기의 아날로그 출력값을 추력으로 하여 X-Y 기록기로 처리하였다.

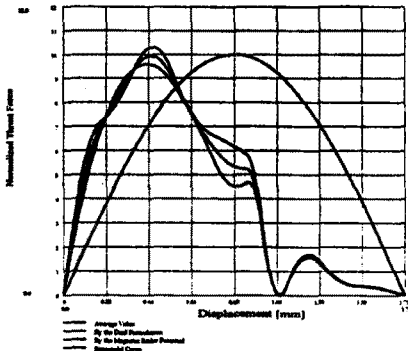


그림 7. 퍼어미언스 분포에 의한 정추력

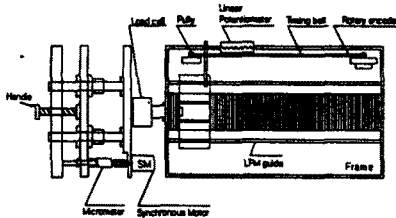


그림 8. 정추력 측정시스템

6. 실험결과와 분석 및 검토

그림 9는 정추력 측정장치를 이용하여 1상여자 구동시에 변위에 따른 정추력을 측정하였다. 1상여자시 여자전류를 1 [A]로 가동자의 위치 $x=0$, $x=r/4$, $x=r/2$ 에서 측정된 정추력 값이 각각 0, 7.43, 0 [kg·f] 이었고, 1상여자 및 에 가동자는 0.19[mm]부근에서 추력이 발생하지 않아 이동하지 못하고 그 위치에서 심한 맥동이 일어났는데 이는 가동자와 고정자의 치의 위치에 따라 공극 퍼어미언스 변화량이 매우 적어서 추력이 급격히 감소되는 영역이 존재하기 때문이다.

2상8극 HB형 LPM의 자로길이는 상절환시에도 같게 나타나는 것을 확인하기 위하여 1상여자상태에서 A상과 B상의 정추력을 각각 측정하였다. 그림 10은 A상과 B상의 정추력 특성으로 A상은 7.41[kg·f]이고 B상은 7.43[kg·f]였다. 따라서 상 절환시의 자로길이는 같게되고 A상과 B상의 상간불평형은 적게 나타났으며 이는 정지오차가 매우 적다는 것을 의미한다.

7. 결론

본 연구에서는 2상8극 HB형 LPM의 가동자의 위치

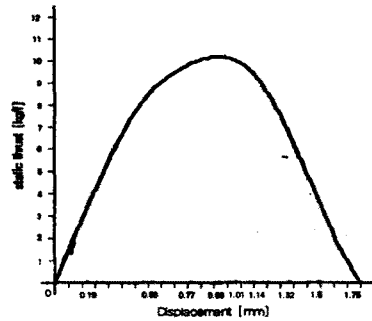


그림 9. 정추력특성 곡선

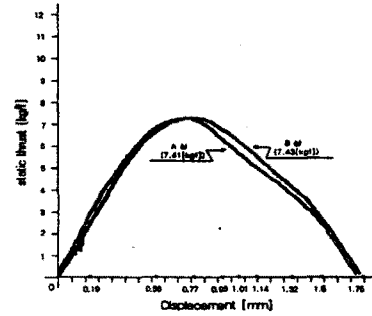


그림 10. A상-B상간 정추력특성 비교

변화에 따른 정추력 특성을 해석하여 치형상이 추력에 미치는 영향을 검토하고, 이를 실험을 통하여 확인하였다. 또한 상절환시에 자로길이의 변화를 1상여자 구동하여 A상과 B상의 정추력을 각각 측정하여 상간 불평형에 대한 영향을 분석하였다.

그 결과 가동자와 고정자의 치의 위치에 따라 공극 퍼어미언스 변화량이 매우 적어서 추력이 급격히 감소되는 영역이 존재함을 발견하였다. 그리고 A상과 B상의 정추력은 거의 같게 나타났는데 이는 2상8극 HB형 LPM의 자로길이는 상절환시에도 같기 때문에 상간불평형은 매우 적다는 것을 알았다.

[참고 문헌]

- [1] Benjamin C. Kuo, "Theory and Application of Motors", West Publishing Co., 1974
- [2] P.P. Acarnley, "Stepping motors : a guide to r theory and practice (3rd Edition)", Published Peter Peregrinus Ltd., London, United Kingdom.
- [3] Takashi Kenjo and Akira Sugawara, "Stepping and Their Microprocessor Controls", Oxford Univ Press, 1994
- [4] 김일중, "자기회로의 평형을 고려한 하이브리드형 리니어 펄스 모터의 특성해석", 박사학위논문, 충남대, 1995