

X-Y테이블 구동용 리니어 펄스모터의 설계와 특성해석

박 창 순\* 권 태 군\*  
한국기술교육대학교 정보기술공학부\*

Design and The Characteristic Analysis of the linear pulse motor for X-Y table

Chang-Soon Park\* Tae-Gun Kwon\*  
Korea University of Technology and Education\*

**Abstract** - Linear pulse Motor(LPM) are used a field where smooth linear motion is required, and it's position accuracy higher than that of a lead. According to the advantage such as simplicity of mechanical frame, high reliability, precise open\_loop operation, low inertia etc. LPM is applied largely where it have made motor of this kind more and more attractive in many application areas such as factory automation and high speed positioning. This paper is researched to analyze for thrust force characteristic of hybrid LPM. Both the thrust and normal force are very sensitive to the airgap and tooth pitches of the force and platen. To find the optimal design parameter on the hybrid LPM for the embroidery machine.

For the field analysis, the finite element method(FEM) is employed for calculating the force. The reluctance models will be used the magnetic permeance of airgap under static-conditions. The forces between forcer and platen have been calculated using the virtual work method.

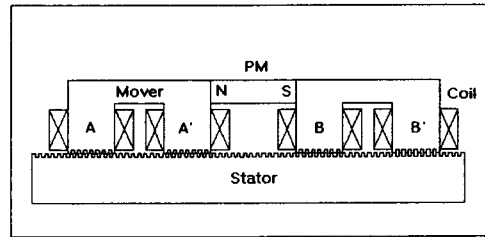
1. 서론

산업기기의 발달에 따라 공장자동화(FA), 사무자동화(OA) 및 통신 주변기기에서 직선운동이 가능한 선형 기기의 필요성이 대두되고 있다. 리니어 모터(Linear Motor)는 기존의 회전형 모터에 보조 변환기구를 연결하여 선형운동을 얻는 것에 비해 직접 선형운동이 가능하며 구동원리는 회전형 스텝모터와 동일하다. 리니어 모터중 고정밀도의 제어성능을 가지는 리니어 펄스 모터는 반도체 제조장비, 프린터, X-Y 플로터, 자동반송장치, 자동 카드검출장치, 자기헤드 구동장치, 고분해능 이미지 스캐너, 고속팩시밀리, 인공심장용 액츄에이터 및 혈액순환 펌프용 등 많은 분야에서 적용되어지고 있다. Hybrid 리니어 펄스모터는 VR(Variable Reluctance)형과 PM(Permanent Magnet)형을 결합한 복합구조를 가지고 있어서 다른 형태의 LPM에 비해서 입력펄스당 발생추력이 크다. 본 연구에서는 우수한 특성을 지니고 있고 디텐트력을 감안하여 HB(Hybrid Type)형을 선정하였다. HB형에서는 공극과 영구자석, 여자전류 등이 LPM의 추력과 수직력에 민감한 영향을 미치고 있다. 따라서 이러한 여러 가지 복합적인 요소를 고려하여 최적으로 설계하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구의 취지는 전량 수입에 의존하고 있는 자수기에 들어가는 위치결정장치인 회전형 스텝모터를 리니어 펄스모터를 이용, 대체하고자 하는 것으로 LPM을 설계하고, 그 특성을 해석, 최적의 설계시양을 찾고자 하였다. 설계한 리니어 모터 해석을 위해선 비선형성을 고려한 유한요소법을 이용하였다. 상용패키지를 이용한 해석 결과를 바탕으로, 연구를 진행해 나가면서 시작기까지 만들어 봄으로써 설계된 파라미터의 타당성을 찾고, 적용하는 것이 최종 목표이다.

2. 본론

2.1 리니어 펄스모터의 구조 및 자기동가회로

본 연구에서 설계하려고 하는 리니어 펄스모터의 용도는 자수기에 들어가는 X-Y 위치결정장치이다. LPM의 형상은 바로 아래의 그림2.1에 도시하였듯이 2상 4극형이고 영구자석은 두 상 사이에 들어가 있다.



(각 pole의 치 배열)



그림 2.1 LPM 의 형상

가동자의 권선은 모노필러(monofiler) 권선 두 쌍을 직렬로 연결한 2상, (A+/A-) 와 (B+/B-) 구조이다. LPM 의 고정자(Platen)는 미세한 치형상을 갖는 강철을 일렬로 펼쳐놓은 상태이다. 가동자(Forcer)는 하나의 회토티영구자석(NdFeB)과 4개의 모노필러 권선으로 구성되어져 있다. A 상과 B상의 위상차는 1/4 치피치를 지니고 있다. LPM의 추력은 한 치 피치에 대해서 1상 여자시 한 스텝당 1/4 피치씩 이동함에 따라 4개의 폴 스텝당 고정자의 한 극피치를 이동한다. HB형 LPM의 구조에서 공극과 영구자석의 자기저항, 영구자석과 기차력으로 구성된 LPM의 간이 등가회로가 그림 2.2에 나타나 있다. 먼저 자속이 지나가는 Path의 자기저항은 식(1)과 같이 된다.

$$R = \frac{l}{\mu_0 A} \tag{1}$$

여기서 l은 자속이 지나가는 Path의 길이이고 A는 면적이다. 영구자석의 동작점은 그림 2.3과 같이 감자곡선으로부터 결정한다.

자속밀도  $B_m$ 과 자계세기  $H_m$ 의 관계는 식(2)와 같다.

$$B_m = B_r + \mu_r H_m \tag{2}$$

여기서  $\mu_r$  은 recoil 투자율이며, Permeance P는 영구자석의 단면적  $A_m$ 과 높이  $l_m$ 로 나타내면 식(3)과 같다.

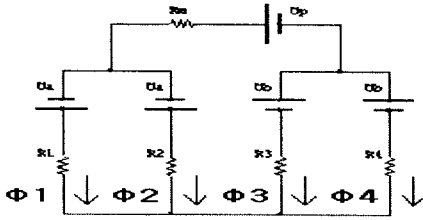


그림 2.2 LPM 의 등가회로

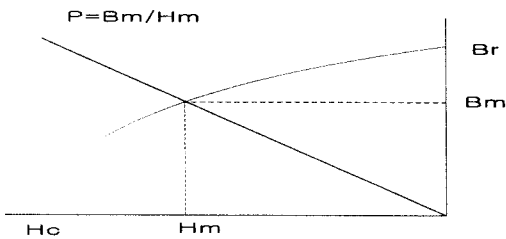


그림 2.3 영구자석의 감자곡선

$$P = \frac{1}{R_g} = \frac{A_m B_m}{l_m H_m} \quad (3)$$

위의 식을 정리해보면 식(4)와 같이 된다.

$$B_m = B_r + \mu_r \frac{A_m B_m}{P l_m}$$

$$B_m = \frac{B_r}{1 - \mu_r \frac{R_g A_m}{l_m}} \quad (4)$$

위 식에서  $R_g$ 는 LPM의 자기 리액턴스로 자기등가회로로부터 구할 수 있다. 그림 2.2에 나타낸 것과 같이 선형 범위에서 간략하게 할 수 있다. 1차축 mover와 2차축 고정자사이의 공극저항을  $R_{g1}, R_{g2}, R_{g3}, R_{g4}$ 로 자기에너지가 거의 공극에 축적되는 것으로 생각할 수 있으며, 철심의 자기저항은 공극에 비해 매우작으므로 무시한다.  $R_m$ 은 영구자석의 자기저항을 나타낸다. 먼저 영구자석의 기자력은 자기저항  $R_m$ 에 대해서  $H_m$ 으로 나타내고 식(5)와 같이 영구자석의 세기  $B_r$ 과 크기의 함수  $l_m$ 으로 나타내며 자기저항  $R_m$ 은 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$H_m = \frac{B_r l_m}{\mu_0 \mu_r} \quad (5)$$

$$R_m = \frac{l_m}{\mu_0 \mu_r A} \quad (6)$$

여기서 A는 자석의 면적,  $l_m$ 은 자석의 높이를 나타낸다. 2상여자로 기전력  $V_A, V_B$ 에 의한 자속  $\Phi_i$ 는 식(7)과 같다.

$$\Phi_i = \Phi_{ip} + \Phi_{iA} + \Phi_{iB} \quad (7)$$

$$R_g = \frac{R_{g1} R_{g2}}{R_{g1} + R_{g2}} + \frac{R_{g3} R_{g4}}{R_{g3} + R_{g4}} \quad (8)$$

$$H_m l_m = (2 \cdot \frac{R}{3} + 1.6R) \phi = 2.2667 \cdot \frac{l_g \cdot B_m}{\mu_0} \quad (9)$$

영구자석의 감자곡선에서 읽은 최적 동작점이 되는 부분의 자계 세기 및 자속밀도 값을 이용, 식(8),(9)에 적용하였다.

## 2.2 설계한 LPM의 사양

stator측 치폭	1.0mm
가동자측 치폭	1.0mm
stator 치슬롯 깊이	1.0mm
가동자 슬롯 한극의 폭	15.0mm
공극의 길이	0.18mm
stator 유효 폭	80.0mm
가동자 유효 폭	80.0mm
가동자 높이	24.0mm
가동자 한극 치의 수	8
영구자석	28.0*8.0*80.0mm
가동자의 극 피치	31.0mm
stator의 길이	120mm
coil rating current	2A

## 2.3 리니어 펄스모터의 유한요소 해석 (2D)

유한요소법에 의한 힘의 계산은 에너지 분포를 지배하는 편미분방정식을 설정하여 계산결과와 오차가 최소화 되도록 하여 구할 수 있다. 그림 2.4은 LPM 전체 해석모델에 대한 삼각요소분할도이다. 자체해석시 여자방식에는 1상 여자방식과 2상 여자 방식 2가지가 있는데, 본 연구에서는 2상 여자방식을 사용하였다.

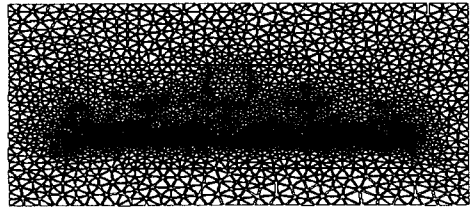


그림 2.4 LPM 형상의 mesh 분할도

해석영역의 경계조건은 고정자와 가동자의 상하단을 자연 경계 조건으로 하고, 좌우를 고정경계 조건으로 하여 해석하였고, 해석영역은 자기 포텐셜을 이용하여 공극의 자속분포를 계산하였으며 이로부터 구한 자속밀도를 이용하여 수직력과 추력을 계산하였다. 고정자와 가동자의 한 극에 있어서 치 배열이  $x = \tau/4$ 인 위치에서 추력이 최대이며 이 위치에서 자속밀도  $B_x$ 성분이 최대이고, 치 구조는 비정렬된다. 수직력은 자속밀도  $B_y$ 의 성분이 최대일 때 가장 크며 고정자와 가동자 사이의 치 배열은 거의 완전히 정렬된다. 치 피치가 완전히 정렬된 후의 공극의 자속밀도의 크기를 그림2.5에 나타내었다.

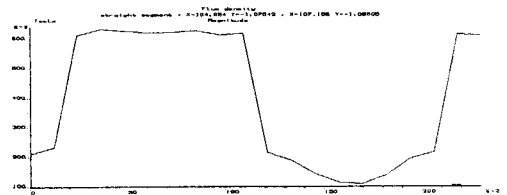


그림 2.5 치완전 정렬시 자속밀도

## 2.3 LPM 의 추력과 수직력 특성해석

본 연구에서는 추력과 수직력의 특성을 해석하기 위해서

유한 요소법과 가상변위법을 이용하였다. 아래의 그림은 자기포화곡선을 나타내고 전체 자기수반에너지(coenergy)는 식(10)과 같다.

$$W_{co} = \int_0^H \left( \int_0^B B dH \right) dv = \int_0^H \frac{1}{2} B H dv \quad (10)$$

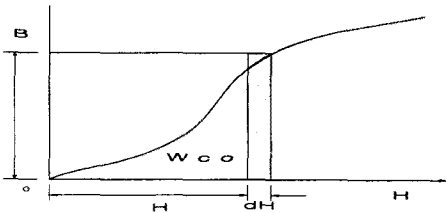


그림 2.6 자기포화곡선

위의 식에서 차원을 2차원으로 한다면 다시 식(11)과 같이 된다.

$$W_{co} = \int_s \frac{1}{2\mu} B^2 ds \quad (11)$$

따라서 힘 F는 자기 수반에너지(coenergy) Wco의 변화량으로 주어지므로 식(12)와 같이 된다.

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial x} \quad (12)$$

우리는 위에서 제시한 자속에 대한 비선형 방정식을 풀기 위해서 Newton-Raphson 알고리즘을 이용하였다. magnetic force F는 실제적인 거리의 변화 x에 대한 변화율로 구해질 수 있다.

LPM의 추력과 수직력을 계산하기 위해서 유한요소 해석프로그램 Fulx2D를 사용하였으며, 그림2.7과 그림2.8은 추력과 수직력 계산을 위한 자속분포도이다. 그림2.7은 영구자석만에 의한 자속 분포이고 그림2.8은 코일에 전류를 흘렸을 때의 자속분포이다.

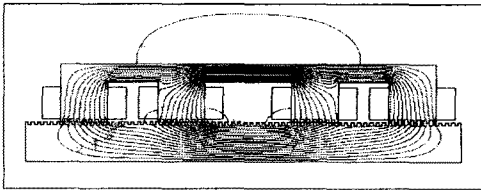


그림 2.7 LPM의 영구자석만에 의한 자속분포도

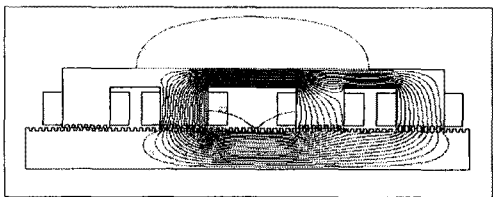


그림 2.8 LPM의 코일 여자시 자속분포도

이동변위에 따른 추력특성 곡선과 전류, 그리고 공극에 따른 힘의 특성을 살펴보면 그림2.9, 그림2.10, 그림2.11과 같다. 계산치와 FEM해석사이의 추력비교가 그림2.9에 나타나 있다. 특성 곡선들이 보여 주는 설계된 LPM의 사양을 가지고 검증하여 연구목적에 맞는 특성을 찾은 다음 시작기를 만들어 그 성능을 평가하고 비교해 보는 일이 남아 있다.

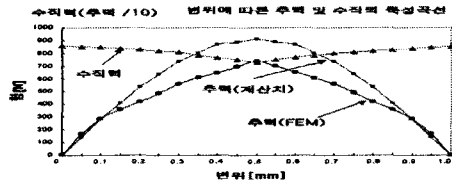


그림2.9 LPM의 변위에 대한 힘의 특성 곡선

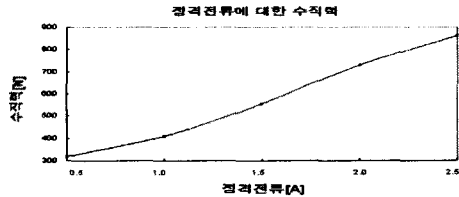


그림2.10 LPM의 정격전류에 대한 수직력 특성 곡선

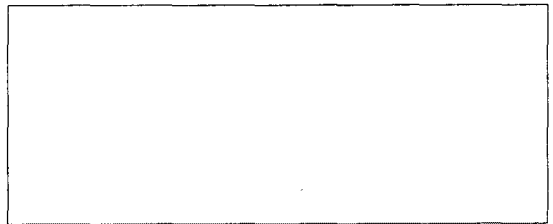


그림 2.11 LPM의 공극에 따른 힘특성 곡선

### 3. 결론

본 연구에서는 LPM을 설계하고 해석패키지를 가지고 계산하여 그 결과를 살펴보았다. 앞에서 말했던 바와 같이 공극이 작으면 작용수축 기계적인 한계와 오차가 있겠지만 추력은 증가하고 수직력이 경감되는 것을 볼 수 있고 정격전류의 증가와 더불어 수직력도 증가함으로써 정격전류 2(A)에 대해서 철심은 포화되지 않는다는 것이므로 정격전류로 적합함을 알 수 있다. VR형 LPM에 비해 HB형 LPM은 영구자석이 있어서 무여자시에도 디텐트력을 발생한다. HB형 LPM에서 디텐트력으로 안정된 동작이 가능하지만 부하로 작용할 경우 진동을 야기하게 된다. 따라서 이동시 진동이 적은 안정된 디텐트력의 발생이 중요하다. 본 연구에서는 디텐트력을 실제로 측정할 수는 없었지만 시작기가 만들어 진다면 측정기를 만들어서 측정이 가능하리라 본다. 이러한 분석결과 영구자석은 잔류자속밀도가 높은 희토류 자석이 필요하며, 다른 전동기와 마찬가지로 지속적인 관심을 가지고 연구함으로써 적용분야가 넓은 LPM의 설계에 대한 표준이 조속히 마련 되어야 할 것이다.

### 참고 문헌

[1]A.Nasar and Iboldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design and Practical Applications", Prentice-Hall,INC.,New Jersey, 1987  
 [2]Yunhyun Cho, Jaebong Lee, Daehyun Koo, "The analysis of the static thrust of a hybrid type Double-sided Linear pulse Motor", the sixth biennial IEEE conference on Electromagnetic field Computation, pp61, March 1994  
 [3]Junji Hirai, Tae-Woong Kim, Atsuo Kawamura, Position-Sensorless Driver of Linear Pulse Motor for Suppressing Torsional Vibration",IEEE Transaction on Industrial Electronics. VOL. 47,NO.2 April 2000  
 [5]A.Nasar and Iboldea, "Linear Motion Electric Machines",John Wiley & Sons,Inc. 1976