

자수기에 맞는 LPM의 설계와 구동 특성에 관한 연구

박창순 · 권태근  
한국기술교육대학교 전기·전자공학과

The Study on Design and Dynamic Operation Characteristics of Linear Pulse Motor for Embroidery Machine

Chang-soon Park · Tae-gun Kwon  
Korea University of Technology and Education

**Abstract**-Linear pulse Motors(LPM) are widely used in fields where smooth linear motion is required, and their position accuracy is higher than other motors. Hybrid linear pulse motors(HLPM) are regarded as an excellent solution to positioning problems that require high accuracy, rapid acceleration and high-speed. The LPM has low mechanical complexity, high reliability, precise open-loop operation and low inertia etc. In many application areas such as factory automation speed positioning, computer peripherals and numerically controlled machine tools, LPM can be used. This motor drive system is especially suitable for machine tools the high position accuracy and repeatability.

This paper describes about that need of the embroider machine. we want to design position-scanning device for the embroidery machine. At first, to be analysed characteristics of the machine and next designed the LPM. we used the field analysis program, The finite element method(FEM) program tool is employed for calculation the force. The reluctance models will be used the magnetic permeance of air gap by static- conditions. The forces between forcer and platen have been calculated using the virtual work method. And we used the simulink to know the dynamic characteristics of LPM.

1. 서 론

산업기술 발달에 따라서 전기적 에너지를 기계적인 에너지로 변환하여 주는 변환장치의 개발에 관한 기술연구가 중요시되고 있다. 모터 중에서 특히 선형모터는 각종 교통수단이나 정밀기기 응용분야에서 각광받고 있으며, 지속적인 연구개발이 이루어지고 있다. 본 연구도 그러한 application의 일종으로 자수기에 들어가는 위치결정 장치에 선형펄스모터를 이용하고 자하는 목적을 가지고 있다. 전량 수입에 의존하고 있는 자수기 위치결정장치인 회전형 스텝모터를 리니어 펄스모터를 이용하여 개발함으로써, 수입대체 효과를 노리는 동시에 소형정밀 모터의 설계 및 제어 기술 노하우를 축적하는 것을 목적으로 하고 있다. 본 연구에서는 LPM 설계에 있어서 형상의 변화가 추력과 수직력에 미치는 변화를 2차원 FEM으로 시뮬레이션 한 후에 서로의 결과를 비교 분석하였다. 그리고 LPM의 운동 특성을 시뮬레이션하기 위하여 MATLAB의 simulink를 이용하여 동특성을 살펴보았다.

2. 본 론

2.1 자수기의 간단한 개요

자수기의 동작원리를 간단하게 살펴보면 다음과 같다. 자수기는 크게 구분하면 시스템 제어부와 물리적인 구동 장치로 나뉘어 질 수 있다. 시스템 제어부에는 자수기에

들어가는 유도전동기의 제어회로, 위치결정 장치에 쓰이는 스텝핑 모터 제어회로, 그리고 부수적 기능을 위한 센싱회로 등으로 이루어져 있다. 물리적인 구동장치는 간단하게 말하면 자수기가 동작할 때 바늘의 위치를 원하는 위치로 이동시켜주는 장치를 말한다. 따라서 자수의 정밀도를 향상시키기 위한 중요한 장치이기 때문에 물리적인 구동부의 정밀도가 곧 자수기의 정밀도를 좌우하게 되는 것이다.

2. 3 위치결정 장치 사양에 맞는 LPM설계요구사항

지금 사용되고 있는 자수기의 위치결정장치용 테이블 사양을 보면 표1과 같다.

표-1

종 류	맘 폭	자 수 범 위
물 리 량	0.1-12.7[mm]	200*90(X*Y[mm])

여기서 우리가 설계 기준으로 하는 사양을 고려해 보면 표-2와 같다.

표-2

종 류	맘 폭	자 수 범 위
물 리 량	0.25[mm]	500*500(X*Y[mm])

여기서 고려한 사양은 최소한의 사양을 나타낸 것이다. 따라서 다른 부가적인 요구사항은 일차적으로 무시하였다. 여기서 설계시 맘폭은 LPM의 한 펄스당 움직인 거리로 하면 되므로 치의 피치는 0.5[mm]로 하면 된다.

2. 3. 1 LPM의 형상

LPM의 구조는 여러 가지 형태가 있으나 본 연구에서 사용한 구조는 그림 1과 같다. HB타입의 2상 모터로 가동자(mover)는 4개의 극을 가지며 각 극은 여러개의 치로 이루어져 있는 구조이다.

각 상의 치구조는 A상과 B상 사이는 서로 90도의 위상차를 갖도록 되어 있으며 권선의 방향을 서로 반대로 함으로써 A상과 A'상 그리고 B상과 B'상이 서로 180도 위상차를 갖고 있고 가동자 극의 권선이 순방향으로 여자되었을 때 영구자석의 자속방향과 동일한 한 방향으로 여자 되도록 권선 방향이 결정되어 있다. 또한 고정자의 치는 가동자의 치 피치와 동일한 크기로 구성되어 있다.

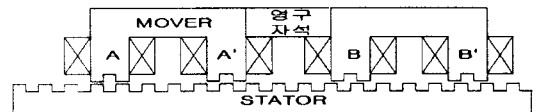


그림.1 설계하고자 하는 LPM의 형상

2. 4 LPM의 치 형상에 따른 유한요소 특성해석

먼저 LPM의 형상을 결정하고 나서 설계 파라메타 중에서 고정자와 가동자의 치형상에 변화를 주어 LPM의 퍼미언스의 변화에 따른 추력과 수직력의 변화를 시뮬레이션하였다.

위에서 우리가 요구하는 사양은 치 피치가 0.5(mm)여야 하지만 일단 치형상 파라메타의 변화에 따른 수직력과 추력의 변화특성을 관찰하고자 간단한 형태의 LPM의 간이모델을 설계하고 그 형상을 가지고 유한 요소법을 적용하여 시뮬레이션 하였다.

유한 요소법에 의한 힘의 계산은 에너지 분포를 지배하는 편미분 방정식을 설정하여 계산결과 오차가 최소가 되도록 하여 구할 수 있다. 형상에 따른 추력과 수직력을 동일한 조건에서 서로 비교하여 보았으며 치와 슬롯의 비율에 따른 특성도 살펴보았다. 여기에서 공극을 일정하게 하고 치 피치( $\tau$ )가 일정한 시뮬레이션용 간이 LPM 모델을 만들고 형상변화에 따른 특성에 대하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션에 사용한 모델은 그림 2에 나타나 있다.

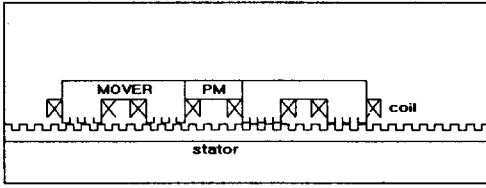
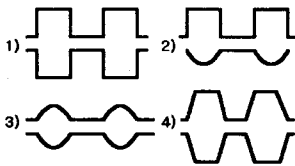


그림 2 시뮬레이션을 위한 LPM 형상

해석영역의 경계조건은 고정자와 가동자의 상하단은 자연경계조건으로 하고 좌우를 고정경계조건으로 하여 해석을 수행하였으며 해석영역의 자기포텐셜을 이용하여 공극의 자속분포를 계산하였고 이로부터 구한 자속밀도를 이용, 추력과 수직력을 계산하였다. 고정자와 가동자의 한 Pole을 살펴보면 치의 배열이  $x = \tau/4$ 인 위치에서 자속밀도  $B_x$ 성분이 최대가 되고 추력이 가장 크며 치의 구조는 비정렬 상태이다. 이와 유사하게 수직력은 자속밀도  $B_y$ 성분이 최대일 때 가장 크게 나타나고 고정자와 가동자 사이의 치 배열은 거의 완전히 정렬된다. 다음으로 치형상에 따른 시뮬레이션을 위한 stator (고정자)와 mover(가동자)의 슬롯과 치의 형상이 그림 3에 나타나 있고 각각에 대한 공극의 자속밀도를 비교해 놓은 그래프가 그림 4로 표현 되어 있다.



- 1) 사각형의 이동자와 사각형의 고정자
- 2) 사각형의 이동자와 둥근슬롯의 고정자
- 3) 둥근형의 이동자와 둥근슬롯의 고정자
- 4) 사다리꼴의 이동자와 사다리꼴 고정자

그림 3 Stator와 Mover의 형상

아래에 나타난 그림 5는 각 형상에 대한 추력과 수직력을 비교한 것을 보여주고 있다. 그리고 그림 6에는 고정자와 가동자의 치폭과 슬롯의 폭 변화에 따른 추력의 특성 변화를 나타내고 있다. 여기에서는 각형(사각형)의 것만 대표적으로 살펴보았으며 고정자와 가동자의 치폭은 동일한 비율로 가변되는 것으로 한다. 시뮬레이션을 위한 LPM의 간이모델에서 치와 슬롯의 폭은 각각 5(mm)이다. (즉  $\tau = 10$ (mm)) LPM의 치폭과 슬롯폭의 비를 최적화하여 최대추력을 얻을 수 있는 구조를 찾아내고자 하였다.

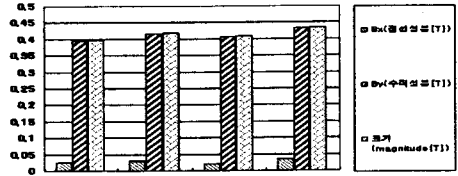


그림 4 LPM 형상에 따른 자속밀도 비교

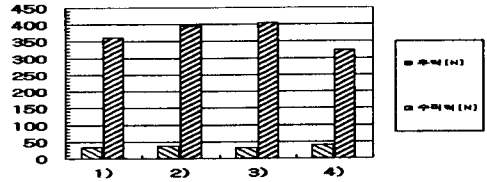


그림 5 LPM 형상에 따른 힘특성 비교

실제적인 실험과 시뮬레이션 결과에 따르면 피치( $\tau$ )에 대한 치폭의 비율은 약 0.4~0.42정도가 적합한 것으로 볼 수 있다. 시뮬레이션 결과 치폭이 5(mm)일 때보다 4(mm)일 때 더욱 추력 특성이 좋은 것으로 나타났다. 즉 치의 형상을 변화 시키면 퍼미언스의 변화가 생긴다. 따라서 이러한 퍼미언스의 변화는 LPM의 구동능력과 밀접한 관계가 있다. 위의 그림 4와 그림 5에서 보이듯이 가동자와 고정자의 슬롯의 형태는 가동자의 추력과 가동자와 고정자 사이에 작용하는 수직력 특성을 결정하는 중요한 파라미터가 된다. 사다리꼴 치형상의 경우 x축이나 y축 방향의 자속밀도가 증가하여 추력과 수직력 둘다 증가한 것은 사실이지만 다른 모델과 비교해 볼 때 상대적으로 수직력의 증가비율이 보다 작아진다는 점이다. 따라서 우리가 원하는 수직력의 감소와 더불어 지지기구의 부담을 줄이고, 추력은 높이는 효과를 얻을 수 있다.

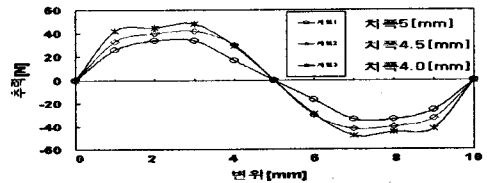


그림 6 LPM 치폭변화에 따른 추력 곡선

### 2.3.2 LPM의 수학적인 모델링

LPM의 구조에는 여러 가지 형태가 있으나 본 논문에서 설계하고자 한 것은 HLP(M(Hybrid Type))이었다. 즉 VR(Variable Reluctance)형과 PM(permanent Magnet)의 절충형이다. HLP의 움직여 가는 순서는 그림 7과 같다. 이때 한 펄스당 움직인 스텝 거리는 치 피치를 상수로 나눈 거리가 되며 식(1)과 같다.

$$X_s = \text{치피치} / \text{모터상수} (\text{phase}) \quad (1)$$

Hybrid형 LPM에서 영구자석에 의한 공극의 자속분포가 가동자의 치와 고정자의 여자되는 상의 치에 대한 상대적인 위치에 따라 정현적인 분포를 갖는다고 가정하면 공극에서의 자속의 분포는 식(2)로 표현 된다.

$$\Phi_a = \Phi_m \cos(Xe) \quad \Phi_m: \text{최대 자속} \quad (2)$$

$$\Phi_b = \Phi_m \sin(Xe) \quad Xe: \text{전기적인 변위}$$

$\Phi_a$ 와  $\Phi_b$ 는 a와 b상에서의 자속을 나타내며, Xe는 전기적인 변화 주기에 대한 정규화된 변위값이다. Xe는 고정자 치 피치의 두배 거리가 한 주기에 해당된다.

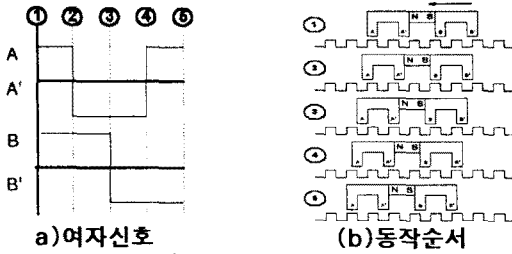


그림 7 LPM 동작원리

그러므로 기구적인 변위와 정규화된 전기적인 변위 사이에는 식(3)과 같은 관계가 성립된다.

$$X_e = 2\pi \left( \frac{X}{\tau_p} \right) \quad (3)$$

$\tau_p$ :치 피치, X:실제변위

그림1과 같은 구조를 갖는 LPM 시스템을 수학적 모델링으로 표현하면 식(4)과 같다.

$$L \frac{di_a}{dt} = e_a - Ri_a - \phi_m v \sin(x_e)$$

$$L \frac{di_b}{dt} = e_b - Ri_b - \phi_m v \cos(x_e)$$

$$f = i_a \phi_m \sin(x_e) + i_b \phi_m \cos(x_e)$$

$$M \frac{dv}{dt} = f - Bv - f_L \text{sgn}(v)$$

$$\frac{dx}{dt} = v \quad (4)$$

	입력		파라메타					상태변수				
표기	$e_a$	$e_b$	R	L	$\phi_m$	M	B	$f_L$	$i_a$	$i_b$	$v$	$X_e$
명칭	상전압	저항	인덕턴스	최대자속	관성계수	마찰계수	부하	상전류	속도	전기적 변위		

위의 식(4)에서 위로부터 3개의 식은 키르히호프 법칙에 의한 전기적인 식을 나타내고 있으며, 아래의 두 개의 식은 뉴턴 법칙에 의한 기계적인 식을 나타내고 있다. 여기서 f는 LPM의 추력을 나타내며,  $F_m$ 은 최대 추력의 크기를 나타낸다. 위의 수학적 모델링의 중요한 가정은 LPM의 전체적인 시스템은 자기적으로 선형적인 영역에서 동작한다는 것이다. 모터의 속도가 증가하면 역기전력의 증가로 인하여 전류의 최대치에 제한을 받게 되며, 공극의 변화에 따른 가동자의 위치에 대한 인덕턴스 또는 자기저항의 변화도 무시하였다. 수학적인 모델을 블록다이어그램으로 나타내면 그림8과 같다.

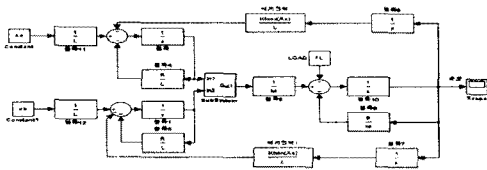


그림 8 LPM 전체 블록 구성도

그림8 나타낸 블록 다이어그램에서 앞부분은 전기적인 시스템을 나타내고 뒷부분은 기계적인 시스템을 나타낸다. 모터의 구동으로 인해서 발생하는 역기전력은 피드백으로 연결되어 진다. 다음의 그림9는 시뮬레이션한 블록다이어그램을 보여주

고 있다.

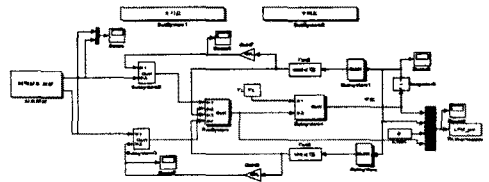


그림 9 LPM 전체 블록 구성도

그림10은 시뮬레이션한 결과를 나타낸다.



그림 10 LPM 변위 그래프(시스템응답)

시뮬레이션한 결과를 살펴보면 LPM이 움직일 때 마다 발생하는 진동이 나타나 있으면 그림10의 결과는 2상여자 방식일 때를 나타내고 있다. 선형 펄스모터의 구동시 자기 톨력턴스 변화로 인한 자기력의 불평형이 발생, 진동과 소음이 발생하게 된다. 선형 펄스모터의 고유 진동현상으로 시스템 고유주파수에서 진동, 공진현상이 발생하기 쉬우며, 가동자가 정지하는 경우 진동하면서 안정점에 정지한다. 이러한 진동은 모터의 고유진동수와 비슷한 주파수로 구동할 때나 고유진동수의 정수배의 주파수로 구동할 경우 발생하기 쉬우며 공진이 일어날 경우 톨크가 급격히 감소하여 탈조하게 된다. 따라서 선형펄스모터의 진동억제와 마이크로 스텝 구동에 대한 특성을 고찰하기 위해서는 이러한 LPM의 동특성을 알아야 만 한다. 그리고 앞으로 이러한 진동이나 소음을 줄일 수 있는 페루프 제어가 설계되어야 한다.

### 3. 결론

본문에서는 자수기에 들어가는 위치 결정 장치를 설계하기 위하여 LPM의 치폭비에 따른 힘의 특성을 유한 요소법을 이용하여 각각 형상의 차이를 그래프를 통하여 살펴보았으며, LPM의 운동 특성을 알아보기 위하여 수학적인 모델링을 이용하여 시스템을 구성, 시뮬레이션한 결과를 도시하였다. 결과에서 보듯이 LPM의 특성상 개루프제어에서도 누적 오차가 거의 없지만, 선형모터의 구동시 특유의 진동현상으로 인해서 시스템 고유주파수에서 진동, 공진현상이 발생하기가 쉽다. 따라서 이러한 것은 오차의 원인이 된다.

앞으로 이러한 현상을 방지하기 위해서 페루프제어가 제안되고 여자전류를 서서히 증가, 감소 시키는 마이크로 스텝 구동법이 필요하다고 본다. 본 연구에서는 형상과 운동특성에 관한 시뮬레이션을 실행하였다. 시뮬레이션을 통해서 얻어진 데이터는 실제 형상의 설계와 제어기의 설계에 있어서 기본이 될 것이다.

#### [참 고 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]Sung-Hun Kim, Eun-Wong Lee, Dong-Ju Lee, "The Static thrust force characteristics for 2 phase 8 Poles HBtype Linear Pulse Motor", Proceedings of the Small Motors & Servo Motors International Conference SMIC '99 TOKYO