

# 각종 리니어펄스모터(LPM)의 자기회로와 그 특성해석

김 일 중\*, 이 은 응\*\*, 김 종 겸\*\*  
 주성전문대 충남대학교 수자원공사

## Characteristics Analysis and Magnetic Circuits of Various Kinds Linear Pulse Motor

Kim, Il-Jung Lee, Eun-Woong Kim, Jong-Kyeom  
 Juseong Junior College Chungnam Univ. KOWACO

### Abstract-

Recently, in the industrial applications, the direct drive method with linear pulse motor(LPM) has been introduced and studied for practical use. This paper describes the analysis result of hybrid(HB), permanent magnet(PM), and variable reluctance(VR) type LPM. First, calculation of the flux density distribution in the air gap at these LPM by finite element method. And by mean of Maxwell's stress tensor with above magnetic flux density, calculated the static thrust force and normal force.

### I. 서론

현대 산업사회의 생활활동은 다기능화, 대량생산화와 함께 높은 정밀도와 고급화를 요구하고 있다. 공장자동화(FA), 사무자동화(OA)의 요소부품으로 매우 중요한 액츄에이터는 제어시스템과 일체형으로 제작 가능하고 정밀 구동 및 제어가 가능해야 하며 이와 같은 요구에 부응하는 액츄에이터로서 선형전동기의 일종인 리니어펄스모터에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다[1].

LPM은 운동방향 변환장치가 없어도 전기적 에너지로부터 직접 직선운동을 얻을 수 있기 때문에 부품을 줄일 수 있어 소형 경량화와 소음 저감화를 이룰 수 있고, 내구성과 신뢰성을 높일 수 있으며, 제어회로가 간단하면서도 제어가 용이한 높은 정밀도의 위치제어를 가능하게 한다[2].

LPM은 자기회로의 구성재에 따라 분류하면, 영구자석을 P, 전자석을 E, 공극 /, 유도자치(tooth)를 T라고 할때 (1)PE/T로 구성된 HB형(hybrid type), (2)EP/T로 구성된 PM형(permanent magnet type), (3)E/T로 구성된 VR형(variable reluctance type)으로 구분할 수 있다[3].

본 연구에서는 시작기로 제작된 HB형 LPM의 특성을 유한요소법으로 해석하고, 시작기와 동일한 치수를 가지면서 상기와 같이 분류되는 PM형, VR형 LPM에 대하여도 공극에서의 자속분포를 계산하고 맥스웰 스트레스 텐서를 이용한 정추력과 수직력 특성을 해석하였다.

### II. 자기회로의 자속분포

#### 2.1 영구자석을 포함하는 계의 특성해석

최소류나 페라이트 영구자석의 자속특성은 그림1(a)와 같고

동작점이 2상한에 있으므로 식(1), (2)가성립한다

$$\frac{H}{H_c} + \frac{B}{B_r} = 1 \quad (H < 0) \quad (1)$$

$$B = \mu_r H + B_r \quad (2)$$

여기서,  $B_r$  : 잔류자속밀도

$\mu_r$ : 직선부분의 투자율  $H_c'$ : 직선이 H축과 만나는 점

영구자석의 투자율은 일반적으로  $\mu_r = \mu_0$  이므로 최대 에너지적은

$$[BH]_{\max} = \frac{1}{4} B_r H_c' = \frac{B_r^2}{4\mu_r} \quad (3)$$

$$B = \mu_0 H + M, \quad M = B - \mu_0 H \quad (4)$$

의 관계로 부터  $M \approx B_r$ 로 되고 감자특성은 그림1(b)와 같다.

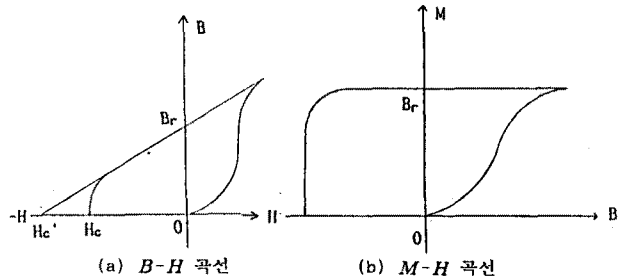


그림 1. 최소류영구자석의 감자특성

따라서  $M = B - \mu_0 H$  에서  $H=0$  일때  $M = B_r$  이므로 영구자석의 등가자화전류 밀도  $J_{pm}$ 은 보자력  $H_c$ 와 영구자석의 형태에 따라 변한다. 그림 2와 같이 영구자석은 z방향으로 무한히 길고 x,y평면으로는 균일하게 여자되었다고 하면 y축으로 여자된 직사각형 영구자석에서는  $H_c = j H_c$  이므로  $J_{pm}$ 은 식(5)가 된다[4].

$$J_{pm} = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times M = \nu_0 \left( \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (5)$$

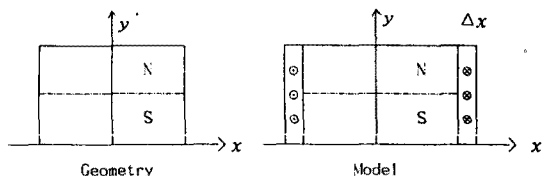


그림 2. 영구자석의 등가자화전류밀도

근사화 하면

$$J_{pm} = \frac{\partial H_c'}{\partial x} \approx \frac{\Delta H_{cm}}{\Delta x} \quad (6)$$

로 되며 여기서  $H_{cm}$ 은 영구자석 내부에서는  $H_c'$ 이고 외부에서는 "영"인 계단함수이고  $\Delta x$ 는 매우 작은 값이지만 "영"은 아니다. 자기저항  $v$ 는 등방성비선형 함수  $v(B)$ 로

$$v(B)B = H + H_c \quad (7)$$

이고, 맥스웰방정식에서

$$\nabla \times H = J \quad (8)$$

$$\nabla \times (v(B)B) = J_o + \nabla \times H_c' \quad (9)$$

이 성립한다. 영구자석의 등가자화전류는 식(6)에서

$$J_{pm} = \nabla \times H_c' \quad (10)$$

이다. 영구자석과 자성체의 혼합된 영역의 지배방정식은

$$\nabla \times (v(B)\nabla \times A) = J_o + J_{pm} \quad (11)$$

이며, 비선형 Poisson방정식이 되고 비선형 자기저항  $v(B)$ 는 철심에서는

$$v(B) = \frac{H}{B} \quad (12)$$

이며, 영구자석과 자성체가 혼합된 영역에서는

$$v(B) = \frac{H + H_c}{B} \quad (13)$$

이 된다. 식(11)이 지배하는 LPM의 각 영역을 분할하여 유한요소법을 적용한다. HB형 LPM은 영구자석을 포함한 자기회로에서 영구자석의 자화세기  $M$ 이 자속밀도  $B$ 의 함수이다. 그리고  $B=0$ 에서  $H_c(=v_o M) \neq 0$ 이므로 최대에너지 분포를 구할 수 있는 변분법을 사용할 수 없고 잔차가 최소로 되는 포텐셜(potential)분포를 구하는 가중잔차법을 적용해야 한다. 잔차에 가중함수를 곱하여 전체적영역을 적분했을때 잔차를 최소로 하는 Galerkin법을 적용하며 가중함수로는 해석영역 내의 삼각요소의 각절점의 벡터포텐셜이 요소 내의 벡터포텐셜에 기여하는 정도를 나타내는 보간함수를 사용한다.

2차원 해석 영역 중 어느 한 삼각요소의 절점  $i$ 에 대한 보간함수  $N_i$ 를 식(11)에 곱한 잔차  $G_i^{(e)}$ 는

$$G_i^{(e)} = \int_s v \left( \frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial A}{\partial y} \right) dx dy - \int_s N_i J dx dy - \int_s N_i J_{pm} dx dy \quad (14)$$

가중잔차법으로 구한 식(14)는 변분법으로 구한 최소화 식에 자화의 항을 첨가한 해법임을 알 수 있다.

## 2.2 하이브리드(HB)형 LPM

시작된 HB형 LPM의 형태는 그림 3과 같으며, 해석모델을 작성하기 위한 자기회로는 그림 4와 같다.

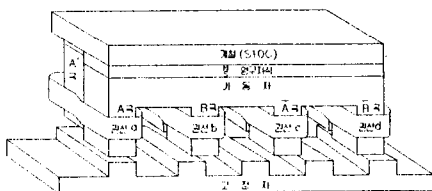


그림 3. HB형 LPM의 구조도

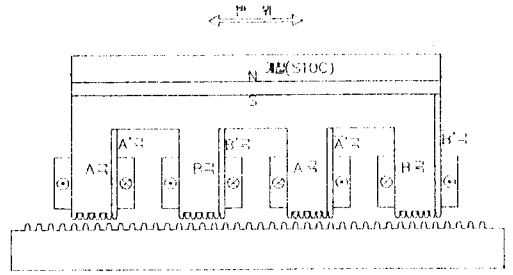
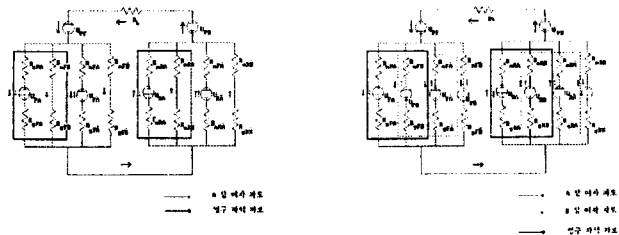


그림 4. HB형 LPM의 자기회로

4개의 자극으로된 철심 F와 철심 R을 비자성체 사이에서 두고 1/2 피치 어긋나게 앞뒤로 배치하므로써 1상, 2상 또는 1-2상 여자시 자로의 길이 변화가 거의 없게된다. 본 연구에서 다루고 있는 PM형과 VR형 LPM은 HB형 LPM과 비교하여 극수, 상수 그리고 극피치 등은 구동원리상 상이하지만 기본적인 구조는 그림 3과 유사하다. 즉, 치피치, 극당 치수, 자기회로의 크기가 같다.

본 LPM시작기의 구동추력은 가동자와 고정자 치의 상대적 위치에 따른 공극 페리먼스(permeance)의 변화로 발생하므로 자기동가회로를 이용하여 구할 수 있으나 누설자속과 비선형 자화특성을 고려할 수 없다[5,6].

특히 본 HB형 LPM시작기는 자로구성 요소로 소요자속의 1/2을 담당하는 영구자석과 자로 형성을 위한 계철판이 VR형 LPM 보다 더 있어 자기동가회로가 매우 복잡하다. 더구나 자기적 간섭을 줄이기 위해 2상 4극형 LPM의 복합형 구조인 2상 8극 TFN형으로 구성하였기 때문에 자기동가회로가 더욱 복잡하다. 따라서 공극에서의 자기저항이 최소가 되는(리턴스가 최대인) 위치로 가동자 치와 고정자 치가 정렬한다는 기본적인 LPM의 구동원리와 각 극에서 영구자석과 여자권선에 의한 자속의 방향에 따라 자속이



- $U_{PF} U_{PR}$  : 영구자석 기자력
- $U_{FA} U_{FR} U_{RA} U_{RR}$  : 각 극의 코일기자력(1상여자시)
- $R_0$  : 계철판(back plate) 자기저항
- $R_{FA} R_{FB} R_{FA'} R_{FB'}$ ,  $R_{RA} R_{RB} R_{RA'} R_{RB'}$  : 가동자 철심 각 극의 자기저항
- $R_g$  : 공극의 자기저항

(a) 1상 여자시 (b) 2상 여자시

그림 5. 시작기의 자기동가회로

그림5와 같은 자기동가회로는 매우 복잡하며 더구나 누설자속과 비선형을 고려하여 수치해석을 하려면 매우 복잡하고 어렵다. 따라서 LPM 시작기의 구동원리와 물리적 정수는 변하지 않으면서 2차원 수치해석이 가능하고, 권자석과 영구자석이 만드는 합성자속의 흐름을 확인할 수 있도록 시작기를 그림6과 같은 간이 해석 모델을 작성하였다. 이와 같은 간이해석 모델은 여자전원에 의해 각 자극이 자화될때 가동자의 앞쪽 철심 F와 뒤쪽 철심 R 사이에 자기적 간섭이 없다는 본 시작기의 특징을 명료하게 나타내는 것이다.

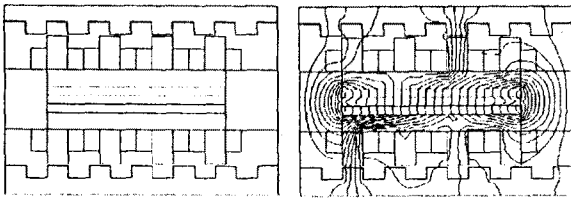


그림6. HB형 LPM의 간이 해석 모델      그림7. 자속분포도

합성자속의 자기회로 해석을 위한 간이 해석 모델에서는 각 자극의 치를 무시하였으며 가동자와 고정자 치가 일치하고 있을 때에 공극이 가장 좁고, 나머지 극의 치들은 어긋나 있기 때문에 공극이 긴 것으로 표현하기 위해 흠이 있는 것으로 가정하였다.

그림6을 마디(node)수 2544, 요소(element)수 4990으로 삼각요소 분할하고 등방성 자성체 ( $B_x = B_y = B$ )인 시작기를 y방향으로 1상여자 시켰을때 주기적인 해석영역의 자연경계조건 ( $-\frac{\partial A}{\partial n} = 0$ ), 고정경계조건 ( $A=0$ )을 적용하고  $J=1.0[A/mm^2]$ ,

$B=0.8[T]$ 에서 지배방정식을 유한요소법으로 해석하여 그림7과 같은 자속 분포도를 얻었다.

그림7은 그림5(a)와 일치하는 자기동기회로를 형성하고 있음을 확인할 수 있다. 또한 가동자와 고정자 치의 상대적인 위치에 따른 자속 흐름을 확인하고 정추력 특성의 해석을 위해 한 자극만을 해석 모델로 하여 마디수 2193, 요소수 4309개로 삼각요소 분할하였다. 자연경계조건, 반주기경계조건을 적용하여 가동자의 이동에 따른 가동자 치와 고정자 치의 위치별 자속분포도인 그림8을 얻었다. 그림 8.9는 가동자의 변위에 따른 자속의 분포도.

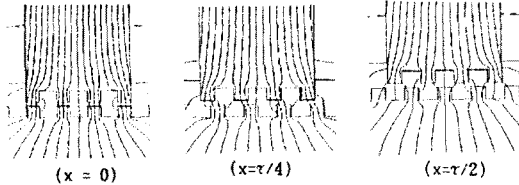


그림8. 가동자의 변위별 자속분포도

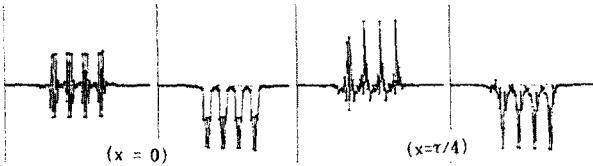
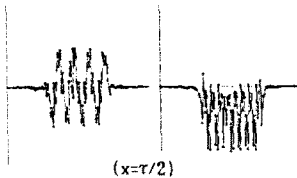


그림9. HB형 공극에서의 정추력 및 수직력 분포



맥스웰 스트레스 텐서에 의해 계산된 힘의 분포를 각각 나타내고 있다. 가동자와 고정자가 1/4 치피치 어긋났을때 정추력이 최대가 되며 가동자와 고정자 치가 완전히 일치된 위치에서 수직력이 최대가 됨을 알 수 있다. 1극에 대하여 계산된 값으로부터 8개 극에 대하여 조합하면 구하고자 하는 HB형 LPM의 정추력과 수직력은 표 1과 같다.

표 1. HB형 LPM의 변위별 정추력과 수직력(1상여자)

변위	계산값[kgf]	실험값[kgf]	
x=0	정추력	-0.10597	0
	수직력	-142.8159	-56.25

x=τ/4	정추력	8.21818	7.73
	수직력	-119.2008	-
x=τ/2	정추력	-0.20869	0
	수직력	-110.8853	-

### 2.3 영구자석(PM)형 LPM

PM형 LPM의 기본적인 형태는 HB형 LPM과 같으나, 자로구성을 위한 계철판이 없으며 가동자의 치를 다극착자한 영구자석으로 대체하고 있는 점이 다르다. 수치해석 모델을 작성하기 위한 자기회로는 그림 10과 같다.

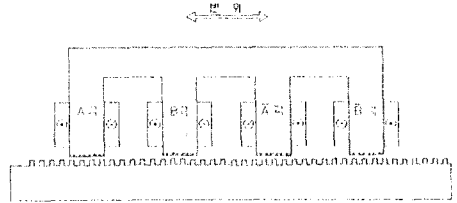


그림10. PM형 LPM의 자기회로

그림 11, 12는 HB형 LPM과 마찬가지로 방법으로 얻은 PM형 LPM의 가동자 변위에 따른 자속분포도, 힘의 분포를 각각 나타내고 있다.  $J=1.0[A/mm^2]$ ,  $B=0.5[T]$ 에서 정추력과 수직력의 계산결과는 표 2와 같다.

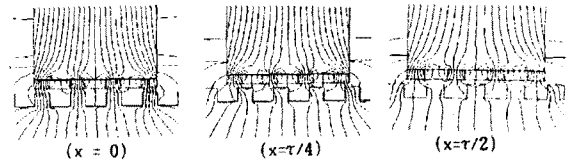


그림11. 가동자의 변위별 자속분포도

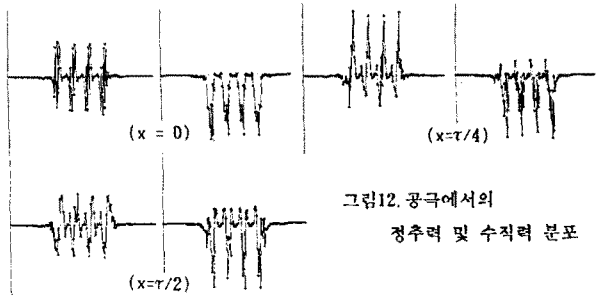


그림12. 공극에서의 정추력 및 수직력 분포

표 2. PM형 LPM의 변위별 정추력과 수직력(1상여자)

변위	계산값 [kgf]	
x=0	정추력	-0.01391
	수직력	-25.20886
x=τ/4	정추력	3.06319
	수직력	-19.05405
x=τ/2	정추력	-0.16703
	수직력	-10.22331

## 2.4 가변리턴스(VR)형 LPM

VR형 LPM의 기본적인 형태는 HB형 LPM과 같으나, 영구자석의 자로구성을 위한 계철판이 없으며 각 극에 여자권선만 있다. 또한 4상으로 구동되도록 가동자의 극피치가 각각 1/4피치 어긋나도록 구성된다. 이와 같은 VR형 LPM의 해석용 모델을 작성하기 위한 자기회로는 그림 13과 같다.

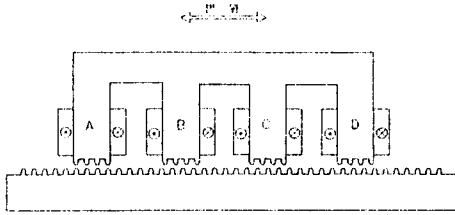


그림 13. VR형 LPM의 자기회로

그림 14, 15는 HB형 LPM과 마찬가지로 얻은 VR형 LPM의 가동자 변위에 따른 자속분포도, 힘의 분포를 각각 나타내고 있다.  $J=1.0[A/mm^2]$ 에서 정추력과 수직력의 계산결과는 표 3과 같다.

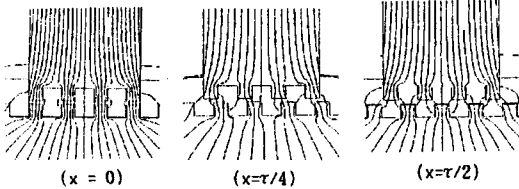


그림 14. 가동자의 변위별 자속분포도

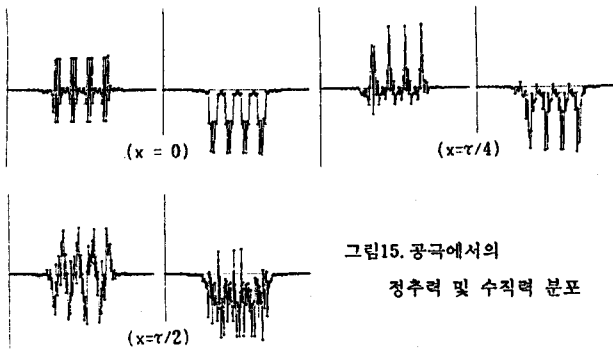


그림 15. 공극에서의 정추력 및 수직력 분포

표 3. VR형 LPM의 변위별 정추력과 수직력

변위		계산값[kgf]
x=0	정추력	-0.15659
	수직력	-49.23741
x=π/4	정추력	2.24387
	수직력	-30.78755
x=π/2	정추력	-0.25665
	수직력	-19.19505

## 3. 결론

다양한 응용분야에서 요구되는 직선왕복 운동을 직접구동 방식으로 얻을 수 있는 새로운 액츄에이터로서 활발히 연구 개발되고 있는 리니어펄스모터의 종류를 구성체별로 나누어 각각의 정추력특성과 수직력특성을 해석하였다. 특히 HB형으로 횡자속형 자기회로를 형성하며 가동자의 두 철심(F,R)이  $\pi/2$  어긋나게 조립된 새로운 형태의 2상 8극 LPM을 설계하여 제작하였고, 경험적으로 자기회로를 분석하여 시작기의 등가회로를 구성하였다. 회로류 영구자석의 기자력이 시작기 소요기자력의 1/2을 차지할때 비선형 자기회로 특성을 고려한 해석영역의 지배방정식을 세우고 경계조건을 적용하여 유한요소법으로 해석함으로써 자기동가회로의 타당성을 확인하고 정특성을 구하였다.

앞으로 시작기와 다른 자기회로로 구성된 LPM의 특성을 해석함으로써 시작기와 비교하는 과제가 남아있다.

## 참고문헌

- 이은용, 김일중, "直線形 펄스 電動機(Linear Pulse Motor)", 大韓電氣學會誌, 39권 9호, pp.39-45, 1990. 9.
- 大西, "메카트로닉스에서 새로운 서-보기술", 일본전기학회 논문지 D, Vol.107, NO.1, pp.83-86, 1987
- 長坂 外, "전자 액츄에이터의 분류와 그 성능 평가", 일본전기학회논문지 D, Vol.107, No.1, pp.42-49, 1987
- 김생수, "마이크로 DC브러시리스 모터의 토오크특성 개선에 관한연구", 한양대학교 박사학위논문, pp.22-27, 1988. 6.
- 이은용, 김일중, "LPM의 磁氣回路 解析을 위한 解析 方法", 大韓電氣 學會學術大會 proceedings, pp.32-36, 1990. 11.
- Hi-Dong Chai, "Permeance-based Step Motor Model Revisited", Proc. of Incremental Motion Control Systems and Devices(IMCSD), pp.399-410, 1985