

자속종방향 HB형 선형 스텝핑 전동기의 시작기 제작 및 특성해석

論 文
52B-10-5

Manufacturing Prototype and Characteristics Analysis of HB Type Linear Stepping Motor with Longitudinal Flux Machine

元奎植* · 金東熙** · 李相鎬*** · 吳鴻錫[§]
(Kyu-Shik Won · Dong-Hee Kim · Sang-Ho Lee · Hong-Seok Oh)

Abstract - Nowadays, the necessity of linear position control motors have been increased in the various fields of the automatic control system. In the recently, the position control motor have disadvantaged in the efficiency and economical view since it require a conversion equipments such as belt and gear in order to convert rotary to linear motion. On the contrary, the hybrid linear stepping motor(HLSM) of linear motion digital actuator has a direct drive method that do not need mechanical conversion equipments. Therefore, the HLSM is better advantaged in the efficiency and economical view than a rotary stepping motor. In this paper, we have designed an optimum tooth shape and a permanent magnet value between the mover teeth by the 2D finite element method(FEM) to develop the HLSM with longitudinal flux machine(LFM) type, and calculated the thrust force and normal force. And we have manufactured the prototype of it, and have experimented the thrust force and the dynamic thrust characteristics of it.

Key Words : hybrid linear stepping motor, HLSM, longitudinal flux machine, LFM, FEM

1. 서 론

선형 스텝핑 전동기(Linear Stepping Motor : 이하 LSM이라 칭함)는 회전형 스텝핑 모터 (Rotary Stepping Motor)와 같이 개루프 제어(Open loop control)로도 정확한 위치제어가 가능하다. 특히, 운동 변환 기구 없이 입력신호에 따라 선형적인 변위를 발생시키는 다이렉트 드라이브(Direct Drive)방식의 전동기이다. 따라서 LSM은 자동반송장치, 의료기기, OA, FA 응용 등에 다양하게 사용되고 있다.[1]-[5]

LSM은 자기회로의 구성에 따라 가변 리럭턴스형(Variable Reluctance type, VR)과 영구자석형(Permanent Magnet type, PM) 및 하이브리드형(Hybrid type, HB)으로 분류되어진다. VR형 LSM은 구조가 간단하고 운전시 소음이 낮은 장점이 있지만 추력이 작은 단점이 있다. PM형 LSM은 영구자석을 형성하기 위해 다극으로 얇게 착자하여 극에 접촉해야 함으로써 제작상에 어려움이 있으나, 단위 면적당 최대추력이 VR형과 HB형에 비해 높은 이점이 있다. HB형 LSM(이하 HLSM이라 칭함)은 VR형과 PM형의 장점을 결합한 복합구조로써 VR형 LSM에 비하여 발생 추력이 크고, 소비 전력이 작으며, 구조적으로 바이폴라 구동방식을 채택함으로써 권선 이용률이 높은 특징이 있기 때문에 실제 산업에서

가장 많이 사용되고 있다.[6]-[9]

그리고 HLSM을 영구자석에 의해 발생하는 자속 방향에 따라 자속종방향형(Longitudinal Flux Machine, LFM)과 자속횡방향형(Transverse Flux Machine, TFM)으로 구분되어진다. LFM형 HLSM은 가동자 이동방향 전후에서 자속의 경로가 이루어지는 구조이며, LFM형 HLSM에서 여자전류의 극성을 바꾸면 자로 길이의 변화가 일어남으로써 추력 변동이 크게 되어 진동과 소음이 발생하지만, 구조가 간단하여 가공이 용이한 장점이 있다. 반면, TFM형 HLSM은 가동자 이동방향의 좌우에서 자속의 경로가 이루어지며, TFM형 HLSM에서 여자전류의 극성이 바뀌어도 자로 길이의 변화가 거의 없어 추력 변동이 작기 때문에 진동과 소음을 줄일 수 있으며 위치 결정 정밀도를 높일 수 있는 장점이 있지만, 구조가 복잡한 단점이 있다.[10] 그러므로 현재 일본을 비롯한 미국, 영국 등 선진 각 국에서는 LFM형 HLSM을 개발하여 실제 산업에서 많이 응용하고 있는 실정이다. [11]-[13] 그러나, 기존의 LFM형 HLSM은 다양한 산업응용에 있어서 추력이 매우 부족하고, 또한 추력에 비해 매우 큰 흡인력이 작용함으로써 미소 갭 지지와 소형 경량화의 장애요소가 되고 있다.[14][15]

따라서 상기의 문제점을 해결하기 위하여, 본 논문에서는 LFM형 HLSM의 치형상 최적모델을 2차원 유한요소법(Finite Element Method, FEM)으로 설계하고[15][16], 또한 LFM형 HLSM의 치와 슬롯에서 발생하는 누설자속을 제거하며 자속이 치 부분에 집중되도록 하여서 최대추력을 증가시키는 방법 즉, 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입하는 구조를 제안하고자 한다. 상기의 설계된 파라미터를 바탕으로 직접 LFM형 HLSM의 시작기를 제작하고 LFM형 HLSM의

* 正 會 員 : 大邱技能大 電氣計測制御科 教授 · 博士修了

** 正 會 員 : 嶺南大 工大 電子 · 情報工學部 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 三陟大 工大 消防防災學部 副教授 · 工博

[§] 正 會 員 : 三陟大 工大 消防防災學部 兼任教授 · 工博

接受日字 : 2003年 7月 30日

最終完了 : 2003年 9月 4日

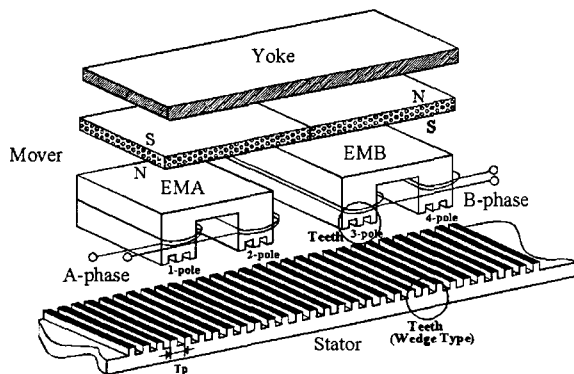
추력 특성을 실험함으로써 상기 설계기술의 정당성을 입증하고자 한다.

2. LFM형 HLSM 구조 및 자기등가회로

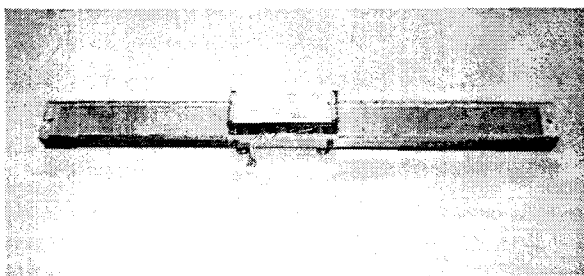
2.1 LFM형 HLSM 구조

그림 1은 본 논문에서 제작한 LFM형 HLSM의 시작기 구조를 나타낸다. 그림 1(a)는 시작기의 구성도를 나타내며, 그림 1(b)는 제작된 LFM형 HLSM을 나타낸다. 그림 1(a)에서 가동자는 전자석 EMA와 EMB가 이동방향의 전후로 배치되며, 각각의 전자석에는 두 개의 자극 축, (1-pole)과 (2-pole) 및 (3-pole)과 (4-pole)로 되어 있다. 인접한 치 사이의 거리를 치 피치(Tooth pitch, T_p)라고 부르며, (1-pole)과 (2-pole) 및 (3-pole)과 (4-pole)는 각각 $(n+1/2)T_p$ 만큼 엇갈리고, (1-pole)과 (3-pole) 및 (2-pole)과 (4-pole)는 서로 $(n\pm 1/4)T_p$ 만큼 엇갈려 배치되어 있다.

그림 1(a)에서 가동자 철심 EMA의 (1-pole)과 (2-pole)에 감긴 여자권선은 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있다. 또한 가동자 철심 EMB에 감긴 여자권선도 극성이 서로 반대가 되도록 감겨져 있다.



(a) Structure of LFM type HLSM

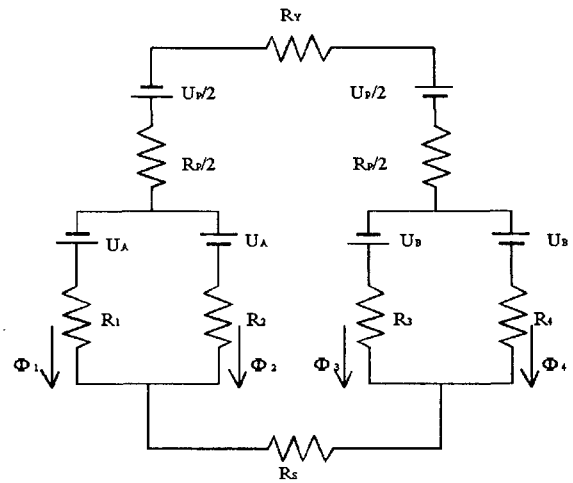


(b) Manufactured LFM type HLSM

그림 1 LFM형 HLSM의 시작기 구조
Fig. 1 Prototype Structure of LFM type HLSM

2.2 LFM형 HLSM의 자기등가회로

그림 2는 LFM형 HLSM의 자기등가회로를 나타내고 있다.



- U_p : 영구자석에 의해 생성된 기자력(mmF)
- U_A, U_B : 전류 I_A 및 I_B 에 의해 생성된 기자력(mmF)
- R_i : 공극에서의 자기저항 (i : 극수)
- R_p : 영구자석에서의 자기저항
- R_v : 요크에서의 자기저항
- R_s : 고정자에서의 자기저항
- Φ_i : 극에서의 자속

그림 2 자기등가회로
Fig. 2 Magnetic equivalent circuit

그림 2에서, 여자전류와 자속사이에는 히스테리시스가 없는 선형 관계라고 가정하고, 극에서의 자속을 근사적으로 보면 다음과 같다.

$$\begin{cases} \Phi_i = \Phi_{iP} + \Phi_{iA} \quad [Wb] \\ \quad (i = 1, 2) \\ \Phi_i = \Phi_{iP} + \Phi_{iB} \quad [Wb] \\ \quad (i = 3, 4) \end{cases} \quad (1)$$

단,

$$\begin{aligned} \Phi_{1P} &= \Phi_P + \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \Phi_{2P} &= \Phi_P + \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \Phi_{3P} &= -\Phi_P - \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \\ \Phi_{4P} &= -\Phi_P - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \Phi_{P(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \\ \Phi_{1A} &= \Phi_A + \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \Phi_{2A} &= -\Phi_A - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \Phi_{A(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} nx \\ \Phi_{3B} &= \Phi_B + \sum_{n=0}^{\infty} \Phi_{B(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \\ \Phi_{4B} &= -\Phi_B - \sum_{n=0}^{\infty} (-1)^n \Phi_{B(n)} \cos \frac{2\pi}{T_p} n(x - \frac{T_p}{4}) \end{aligned}$$

여기서, Φ_p 와 $\Phi_{p(n)}$ 은 각각 영구자석에 의해 생성된 자속의 평균값과 n차 고조파 자속의 크기를 나타낸다. Φ_A 와 Φ_B 는 각각 전류 I_A 와 I_B 에 의해서 생성된 자속의 평균값이다. 또한, $\Phi_{A(n)}$ 와 $\Phi_{B(n)}$ 은 n 고조파 자속의 크기를 나타낸다.

A상이 여자될 때, 자기수반 에너지 W_{mcA} 는 다음과 같이 주어진다.

$$W_{mcA} = \int_0^{I_A} \Psi dI_A = N_A \int_0^{I_A} (\Phi_1 - \Phi_2) dI_A = \frac{1}{2} N_A I_A (\Phi_1 - \Phi_2) \quad (2)$$

여기서 $N_A I_A$ [AT]는 극당 기자력을 나타낸다.

그리고, 추력 F_A 는 자기수반 에너지의 변화에 의해서 주어지며, x 를 변위라고 할 때, 추력 F_A 는 식(3)과 같다.

$$F_A = \frac{dW_{mcA}}{dx} = -\frac{4\pi N_A \Phi_{p(1)}}{T_p} I_A \sin \frac{2\pi}{T_p} x = -K_f I_A \sin \frac{2\pi}{T_p} x \quad (3)$$

단, K_f 는 추력상수[N/A]이고, $\Phi_{p(1)}$ 은 영구자석에 의해 생성된 제 1고조파 자속의 크기를 나타낸다.

위와 같은 방법으로 B상이 여자될 때, 추력 F_B 는 식(4)와 같다.

$$F_B = \frac{dW_{mcB}}{dx} = -\frac{4\pi N_B \Phi_{p(1)}}{T_p} I_B \cos \frac{2\pi}{T_p} x = -K_f I_B \cos \frac{2\pi}{T_p} x \quad (4)$$

따라서, 전체 추력 F 는 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F = F_A + F_B \quad (5)$$

3. LFM형 HLSM의 추력 및 수직력 특성해석

3.1 LFM형 HLSM의 2차원 유한요소해석 모델

본 논문에서는 2차원 FEM 소프트웨어인 Flux2D를 이용하여 LFM형 HLSM의 추력 및 수직력을 해석하였으며, 아래와 같은 가정을 하였다.

- 1) 벡터포텐셜은 축방향 성분인 A_z 만 존재하며, 따라서 전류밀도도 Z성분만 존재한다.
- 2) 전류밀도는 도체내에서 일정하다.
- 3) 철심은 등방성이고 자화의 특성은 비선형이다.
- 4) 히스테리시스 손실과 와전류손은 무시한다.

표 1은 본 논문에서 제작한 LFM형 HLSM의 시작기 사양을 나타내고 있다. 그림 3은 시작기 LFM형 HLSM의 2차원 유한요소해석 기본모델을 나타내고 있으며, 모든 경계조건에서의 포텐셜을 Zero(0)로 가정하였다.

표 1 LFM형 HLSM의 시작기 사양

Table 1 Prototype specification of LFM type HLSM

Item	Value/Unit	Ref.
Input voltage	DC 24 [V]	Bipolar Driving
Input current	2[A/phase]	Constant Current
Holding force	80[N]	2-phase Ex.
Step displacement	1[mm/pulse]	1-phase Ex. 2-phase Ex.
Number of pole	4	
Number of tooth	3[ea/pole]	
Max. stroke length	600[mm]	
Max. starting frequency	150[pps]	No load 2-phase Ex.
Tooth width(Tw)	1.40[mm]	Wedge type, $\theta = 15^\circ$
	1.95[mm]	
Slot width(Sw)	2.05[mm]	Rectangular type
Slot depth(Sd)	2.05[mm]	
Tooth pitch(Tp)	4.00[mm]	
Stack length	50[mm]	
Mover length	151.55[mm]	
Stator length	954[mm]	
Air gap	0.1[mm]	
Turns of coil	300[T/pole]	
Resistance of coil	1.5[Ω/phase]	25[°C]
Magnet type	67×7×50[mm] 1.0[T]~1.2[T]	NdFeB

Dirichlet boundary condition

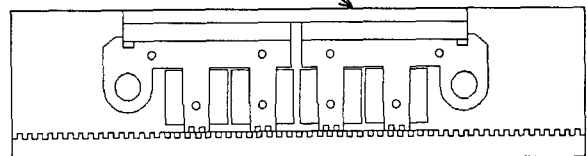


그림 3 LFM형 HLSM의 2차원 유한요소해석 기본 모델

Fig. 3 2D FE-analysis fundamental model of LFM type HLSM

그림 4는 기존 LFM형 HLSM의 치 형상인 방형(Rectangular type, RT)에 대한 2차원 유한요소해석 모델이고, 그림 5는 본 논문에서 제작한 시작기인 LFM형 HLSM의 치 형상인 쐐기형(Wedge type, WT)에 대한 2차원 유한요소해석 모델을 나타내고 있다.

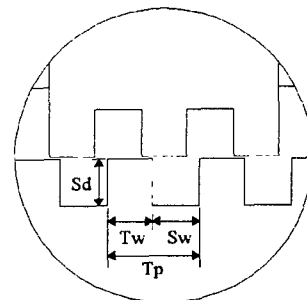


그림 4 기존 LFM형 HLSM의 RT 모델

Fig. 4 RT model of typical LFM type HLSM

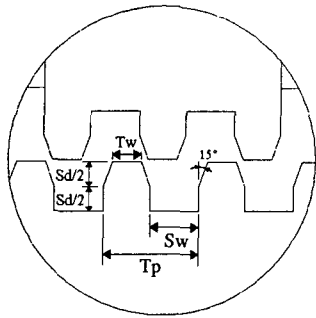
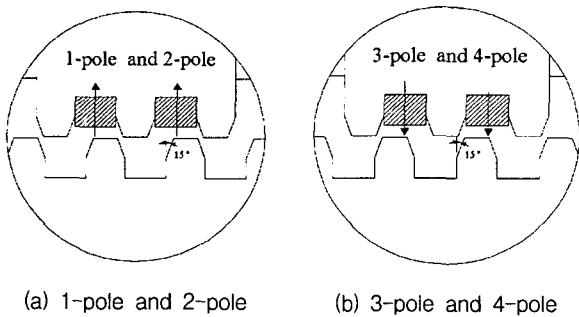
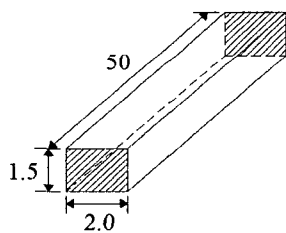


그림 5 시작기 LFM형 HLMS의 WT 모델
Fig. 5 WT models of prototype LFM type HLMS

그림 6은 본 논문에서 제안한 LFM형 HLMS의 가동자 슬롯에 영구자석(Permanent Magnet, PM)을 삽입한 WT 모델을 나타내고 있다. 그림 6에서 화살표의 방향은 슬롯에 삽입한 영구자석의 자화방향을 나타내고 있다.



(a) 1-pole and 2-pole (b) 3-pole and 4-pole



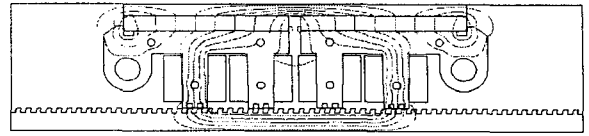
(c) Size of PM inserted

그림 6 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입한 WT 모델
Fig. 6 WT model with PM inserted into the mover slot

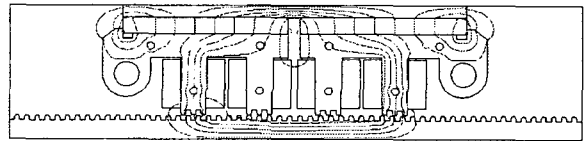
3.2 LFM형 HLMS의 추력 및 수직력 해석

그림 7은 LFM형 HLMS의 치 형상 모델, 즉 RT, WT에 따른 추력 및 수직력 계산을 위한 자속분포도이다.

그림 8은 본 논문에서 제안한 LFM형 HLMS 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입한 WT 모델의 추력 및 수직력 계산을 위한 자속분포도이다. 그림 8에서 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입함으로써 LFM형 HLMS의 치와 슬롯에서 발생하는 누설자속을 제거하고, 또한 자속이 치 부분에 집중되어서 최대추력이 증가됨을 알 수 있었다.



(a) RT model



(b) WT model

그림 7 LFM형 HLMS의 치 형상 모델에 따른 자속분포도
Fig. 7 Flux distributions by tooth shape models of LFM type HLMS

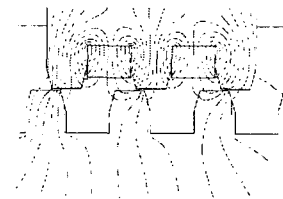
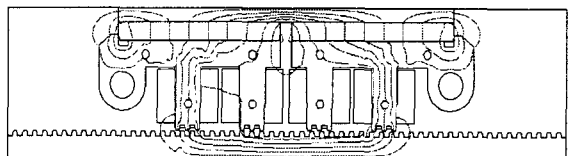


그림 8 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입한 WT 모델의 자속 분포도

Fig. 8 Flux distributions of WT model with PM inserted into the mover slot

그림 9와 그림 10은 각각 LFM형 HLMS의 치 형상 모델, 즉 RT, WT에 따른 추력과 수직력 특성을 나타내고 있다. 해석결과, LFM형 HLMS의 WT 모델이 RT 모델에 비하여 최대추력이 약 35% 증가되었으며, 반면에 수직력 값은 약 12% 감소함으로써 LFM형 HLMS의 WT 모델이 RT 모델에 비해 매우 우수할 것으로 사료된다.

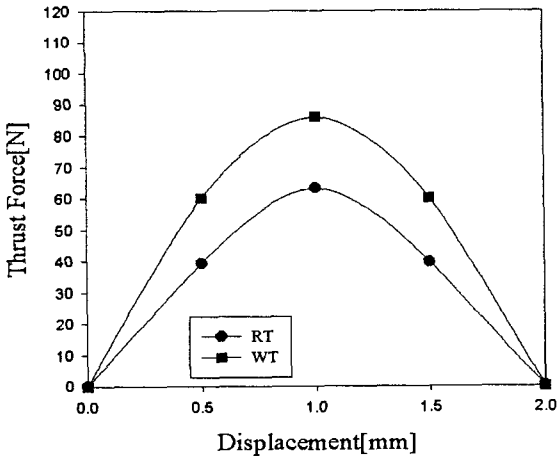


그림 9 LFM형 HLSM의 모델에 따른 추력 특성
Fig. 9 Thrust force characteristics by models of LFM type HLSM

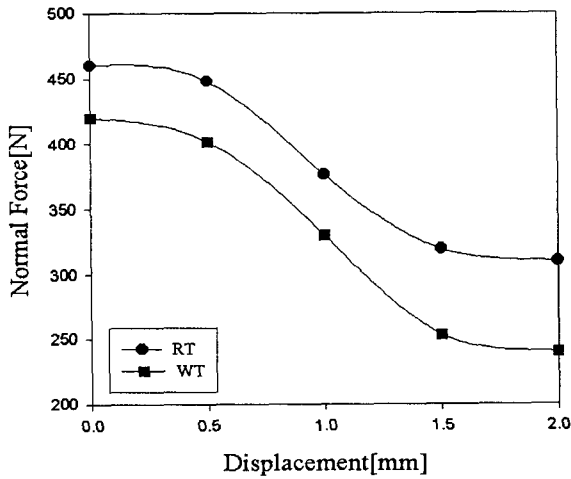


그림 10 LFM형 HLSM의 모델에 따른 수직력 특성
Fig. 10 Normal force characteristics by models of LFM type HLSM

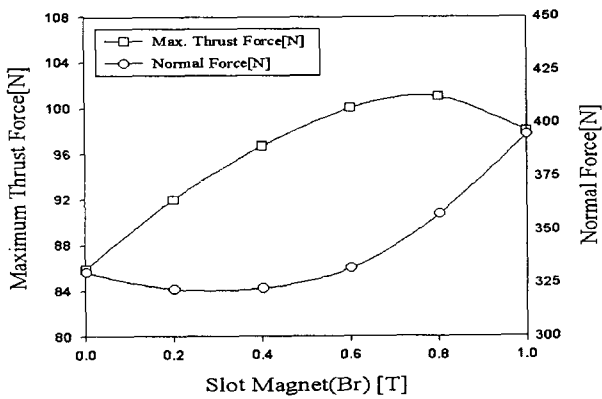


그림 11 삽입된 영구자석 값에 따른 최대추력 및 수직력 특성
Fig. 11 Max. thrust force and normal force characteristics by values of inserting PM

표 2 삽입된 영구자석 값에 따른 최대추력 및 수직력
Table 2 Max. thrust force and normal force by values of inserting PM

Values of inserting PM(Br) [T]	Max. thrust force		Normal force	
	Value[N]	Ratio[%]	Value[N]	Ratio[%]
0.0	85.9	100.0	330.2	100.0
0.2	92.0	107.1	322.2	97.6
0.4	96.7	112.6	322.7	97.7
0.6	100.1	116.6	332.1	100.6
0.8	101.1	117.7	357.3	108.2
1.0	98.2	114.3	394.6	119.5

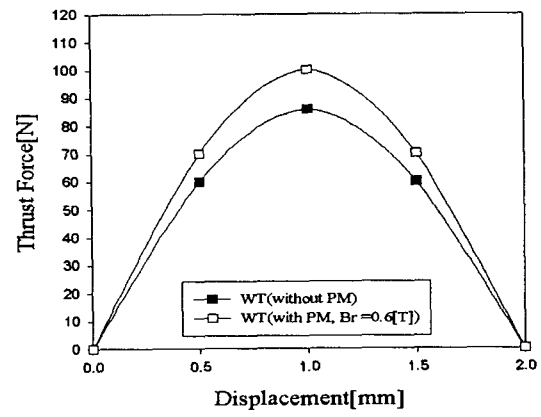


그림 12 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입한 WT 모델의 추력 특성
Fig. 12 Thrust force characteristics of WT model with PM inserted into the mover slot

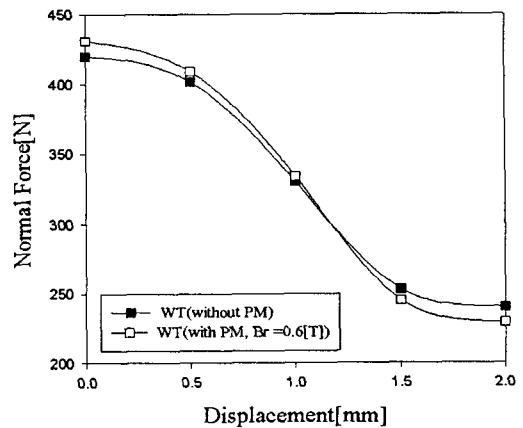


그림 13 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입한 WT 모델의 수직력 특성
Fig. 13 Normal force characteristics of WT model with PM inserted into the mover slot

그림 11은 WT 모델의 가동자 슬롯에 삽입한 영구자석 값을 변화시키면서 계산한 최대추력과 수직력 특성을 나타내고 있으며, 표 2는 WT 모델의 가동자 슬롯에 삽입한 영구자석 값 변화에 따른 최대추력과 수직력값 및 상대적인

비율을 나타내고 있다. 해석결과, 최대추력이 약 16.6%~17.7% 증가되고 수직력 값은 거의 변화되지 않은 0.6[T]~0.8[T]가 WT 모델의 가동자 슬롯에 삽입할 영구자석 값으로 가장 적절할 것으로 사료된다.

그림 12와 그림 13은 각각 LFM형 HLMS 가동자 슬롯에 영구자석(Br=0.6[T])을 삽입한 WT 모델의 추력과 수직력 특성을 나타내고 있다. 해석결과, 영구자석(Br=0.6[T])을 삽입한 WT 모델의 최대추력이 약 16.6% 증가되고 수직력 값은 영구자석을 삽입하지 않은 WT 모델과 거의 유사하기 때문에 LFM형 HLMS의 추력 특성이 매우 개선될 것으로 기대된다.

4. LFM형 HLMS의 특성실험

그림 14는 본 논문에서 제작한 LFM형 HLMS의 이동변위에 따른 추력 계산결과와 측정결과를 나타내고 있다. LFM형 HLMS의 이동변위는 레이저 측정기를 이용하여 정밀한 이동거리를 측정하였고, 추력은 Force Gauge를 사용하였다. 그림 14에서 추력 계산결과와 측정결과가 잘 일치함으로써 2차원 유한요소해석을 통한 LFM형 HLMS의 설계 및 해석이론의 정당성을 입증하였다.

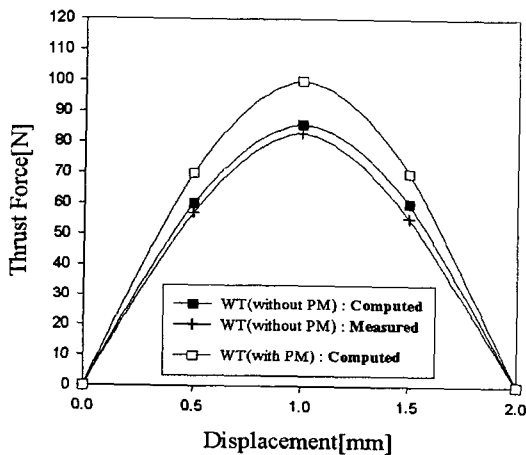


그림 14 LFM형 HLMS의 추력 특성
Fig. 14 Thrust force characteristics of LFM type HLMS

그림 15는 본 논문에서 제작한 LFM형 HLMS를 일정한 주파수로 구동하면서 서서히 부하를 증가했을 시, LFM형 HLMS가 동기 운전할 수 있는 최대추력인 동추력 특성을 나타내고 있다.

본 논문에서의 동추력 특성은 1상 여자 구동 시와 2상 여자 구동 시에 대하여, 구동 주파수별 여자전류 값을 2[A]로 일정하게 하고 구동회로의 인가주파수를 10[pps]에서 180[pps]내에서 10[pps] 간격으로 변화시키면서 측정하였다. 그림 15에서 알 수 있듯이, 본 논문에서 제작한 LFM형 HLMS의 안정 운전 주파수범위는 50[pps]에서 140[pps] 범위임을 알 수 있다. 또 그림 15에서 20[pps]에서 40[pps]영역에서 동추력 값이 현저히 낮아지는 현상이 나타나는 데 이것은 LFM형 HLMS의 특정 구동주파수와 고유 진동 주파수의 공진에 의한 것으로 판단된다.

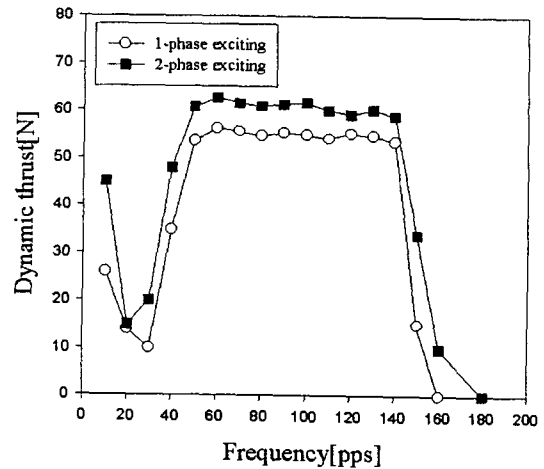


그림 15 LFM형 HLMS의 동추력 특성
Fig. 15 Dynamic Thrust characteristics of LFM type HLMS

5. 결 론

본 논문에서는 LFM형 HLMS의 치 형상 최적모델을 제시하였고, LFM형 HLMS의 치와 슬롯에서 발생하는 누설자속을 제거하여 자속이 치 부분에 집중되도록 함으로써 최대 추력을 증가시키는 방법, 즉 가동자 슬롯에 영구자석을 삽입하는 방법을 제시한 후, 2차원 FEM(Flux2D)으로 시뮬레이션 하였다. 또한 상기의 설계된 파라미터를 바탕으로 직접 LFM형 HLMS의 시작기를 제작하고 LFM형 HLMS의 추력 특성을 실험한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. LFM형 HLMS의 시뮬레이션 결과, WT($\theta=15^\circ$) 모델이 RT 모델에 비하여 최대추력이 약 35% 증가되었으며, 반면에 수직력 값은 약 12% 감소하였다. 또한, WT($\theta=15^\circ$) 모델의 가동자 슬롯에 삽입한 영구자석 값이 0.6[T]~0.8[T] 범위에서 최대추력이 약 16.6%~17.7% 증가되고 수직력 값은 거의 변화되지 않았다.
2. 시작기 LFM형 HLMS의 이동변위에 따른 추력 계산결과와 측정결과가 잘 일치함으로써 2차원 FEM을 통한 LFM형 HLMS의 설계 및 해석이론의 정당성을 입증하였다.
3. 시작기 LFM형 HLMS의 안정 운전 주파수범위는 50 [pps]에서 140[pps] 범위임을 알 수 있었고, 20[pps]에서 40[pps]영역에서 동추력 값이 현저히 낮아지는 현상이 나타나는 데 이것은 LFM형 HLMS의 특정 구동주파수와 고유 진동 주파수의 공진에 의한 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] J. P. Pawletko and H. D. Chai, "Linear Step Motor", IMCSD, pp.V-1~V-11, 1973.
- [2] Walter E. Hinds, Bernable Nocito, "The Sawyer Linear Motor", IMCSD, pp. W-1~W-10, 1973.
- [3] S. A. Nasar, "Linear Electric Motors : Past · Present and Future(KEYNOTE TALK)", IMCSD, pp.1~6, 1987.
- [4] Y. Yamamoto, H. Yamada, "Analysis of Magnetic

Circuit and Starting Characteristics of Flat Type Linear Pulse Motor with Permanent Magnets”, T. IEE Japan, Vol. 104-B, No.5, pp. 265~272, 1984.

[5] Ding Zhi-Gang, “A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor”, IEEE IAS, Vol.1, pp.329-336, 1994.

[6] Nagahiko Nagasaka, “Experimental Results from the Trial of PM Type Linear Pulse Motor”, 일본전기학회 마그네틱연구회, MAG-85-130, pp. 97-106, 1985.

[7] Hideki Nihei, Syooichi Kawamata, Ryoichi Naganuma, Nobuyoshi Mutoh, “Ultra Thin PM Type LPM”, T. IEE Japan, Vol. 114-D, No.1, pp.64~70, 1994.

[8] 오홍석, 김동희, 이상호 “2상 하이브리드형 리니어 스텝핑 전동기의 미세스텝에 관한 연구”, 전기학회논문지, 제49권, 제5호 pp. 358~363, 2000.

[9] Hong-Seok Oh, Dong-Hee Kim, Sang-Ho Lee, Long-Nam Han, “A Study on The Improvement of Characteristics in 2-phase Linear Stepping Motor”, ICEIC'98, pp.II-93~II-97, 1998.

[10] Hazime Yamada, Yukio Ogata, Kiwamu Murata, Masami Nirei, “Performance comparison of Longitudinal Flux Machine Type and Transverse Flux Machine Type Linear Pulse Motor”, 일본전기학회 마그네틱연구회, MAG-85-129, pp. 87~96, 1985.

[11] T. Yokozuka and E. Baba, “Force-displacement characteristics of linear stepping motors”, IEE PROCEEDINGS-B, Vol. 139, No. 1, pp.37~43, 1992.

[12] Z. X. Fu and S. A. Nasar, “Analysis of a Hybrid Linear Stepper Motor”, IMCSD. Proc., pp. 234~240, 1992.

[13] Yasuhiro Ariga, Toshihisa Shimizu, “Novel Dual-Pitch Linear Pulse Motor and Its Operating Characteristics”, ISIE'2000, pp. 379~384, 2000.

[14] M. Karita, H. Nakagawa, M. Maeda, H. Yamada, K. Kawakatsu, “Development of Double Sided Linear Pulse Motor”, IEEE Trans. on MAG., Vol. 25, No. 5, pp. 3257~3259, 1989.

[15] Y. Takeda, S. Morimoto, K. Taniguchi, H. Takechi, “Optimum Tooth Design for Linear Pulse Motor”, Conference Record of the IEEE IAS Annual Meeting, pp. 272~277, 1989.

[16] B. C. Kuo, “Effect of Tooth Shapes on the Position Accuracy of Step Motors”, IMCSD, pp. 149~158, 1983.

저 자 소 개



원규식 (元奎植)

1949년 2월 16일생. 1987년 경일대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1992년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 박사수료. 1996년 CANADA NAIT 방문교수. 현재 대구기능대학 전기계측제어과 교수.

Tel : 053-560-3162, Fax : 053-566-2532
E-mail : wks@kopo.ac.kr



김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학석사). 1987년 Kobe대학 졸업(공학박사). 1987년~1989년 한국전기연구소 전력전자 연구부장. 1999년 5월~

2000년 4월 대한전기학회 전력전자연구회 간사장. 2000년 9월~2001년 2월 국립 Kyushu대 교환교수. 한국조명·전기설비학회 대구·경북지회 부지부장. 전력전자학회 경상지부장. 현재 영남대 공대 전자·정보공학부 교수.

Tel : 053-810-2488, Fax : 053-813-8230
E-mail : dohkim@yu.ac.kr



이상호 (李相鎭)

1959년 7월 13일생. 1982년 영남대 전기공학과 졸업(공학사). 1988년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 삼척대 제2공학부 소방방재학부 부교수.

Tel : 033-570-6811, Fax : 033-570-6819
E-mail : shlee@samcheok.ac.kr



오홍석 (吳鴻錫)

1969년 1월 9일생. 1992년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학사). 1994년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 삼척대 제2공학부 소방방재학부 겸임교수. (주)이맥스하이테크 대표이사.

Tel : 033-535-0593, Fax : 033-535-0594
E-mail : ohhong@dreamwiz.com