

## 2차원 유한요소해석에 의한 선형 스텝핑 전동기의 추력 및 수직력 특성에 관한 연구

(A Study on the Thrust force and Normal force Characteristics of Linear Stepping Motor  
by 2D Finite Element Analysis)

원규식\* · 노재균 · 김동희 · 이상호 · 오홍석

(Kyu - Shik Won · Chae - Gyun Ro · Dong - Hee Kim · Sang - Ho Lee · Hong - Seok Oh)

### 요 약

최근 자동제어 시스템의 다양한 분야에서 선형운동용 디지털 액츄에이터인 하이브리드형 선형 스텝핑 전동기(HLSM)의 필요성이 증대되고 있다. HLSM은 기계적인 운동변환기구가 필요하지 않는 직접 구동방식이기 때문에 효율과 경제적인 측면에서 회전형 스텝핑 전동기에 비해 매우 유리한 장점이 있다. 본 논문에서는 현재 가장 많이 연구되고 있는 자속종방향(LFM)형 HLSM의 개발을 위하여 2차원 유한요소법(FEM)으로 최적의 치 형상을 설계하고 추력과 수직력을 계산하였다. 그리고 직접 LFM형 HLSM의 시작기를 제작하고, LFM형 HLSM의 추력 특성을 실험하였다.

### Abstract

In the recently, the necessity of the hybrid type linear stepping motor(HLSM) of linear motion digital actuator has been increased in the various fields of the automatic control system. The HLSM is directly performed without any converting mechanism.

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 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 characteristics of it.

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

### 1. 서 론

공업전반에 이용되는 전동력 응용기술분야는 고

효율·고신뢰성 그리고 실용성 및 경제성 등을 고려하여 오늘날까지 끊임없이 연구개발 되어지고 있다. 스텝핑 전동기는 가동부가 회전운동을 기본으로 하는 회전형 스텝핑 전동기(Rotary Stepping Motor, RSM)와 가동부가 선형운동을 기본으로 하는 하이브리드형 선형 스텝핑 전동기(Hybrid type Linear Stepping Motor, HLSM)로 대별 할 수 있다.

일반적으로 위치제어용 전동기로 RSM을 사용하

\* 주저자 : 대구기능대학 전기계측제어과 교수  
Tel : 053-560-3162, Fax : 053-566-2532  
E-mail : wks@kopo.ac.kr  
접수일자 : 2003년 7월 31일  
1차심사 : 2003년 8월 5일  
심사완료 : 2003년 9월 3일

2차원 유한요소해석에 의한 선형 스텝핑 전동기의 추력 및 수직력 특성에 관한 연구

므로 선형위치제어를 위해서는 기어와 벨트 및 볼스크류(Ball screw)와 랙과 피니언(Rack & pinion) 등과 같은 별도의 운동 변환 기구가 필요하다. 따라서 위치제어 시스템의 구조가 복잡하고 소음과 진동 때문에 위치 정밀도가 떨어지는 단점을 갖고 있을뿐 아니라, 또한 경제적인 측면에서도 대단히 불리하였다[1][2].

이에 비해 최근 선진 각 국에서 개발된 선형 운동용 디지털 액츄에이터(Digital actuator)인 HLSM은 상기와 같은 운동 변환기구를 요하지 않는 다이렉트 드라이브(Direct Drive) 방식이므로 효율이 우수하고, 변위 오차가 누적되지 않기 때문에 정도가 높은 선형운동이 요구되는 모든 분야에 응용할 수 있다. 더욱이 HLSM을 사용한 위치제어 장치는 저 소음화 및 소형 경량화가 가능하므로 RSM을 사용한 위치제어 장치에 비해 유리한 장점을 가지고 있다[3]-[5].

이러한 우수성 때문에 PCB 조립공정과 자동반송장치 및 레이저 가공시스템을 비롯한 OA, FA 등에 응용되고 있다[6][7].

그러나, 일본을 비롯한 미국, 영국 등 선진 각국에서 개발된 기존의 HLSM은 다음과 같은 문제점이 있다. 첫째 HLSM의 추력 부족으로 인해 다양한 산업응용이 곤란하며, 둘째 HLSM의 추력에 비해 매우 큰 흡인력이 작용함으로써 미소 갭 지지와 소형 경량화의 장애요소가 되고 있다는 단점이 있다[8]-[10].

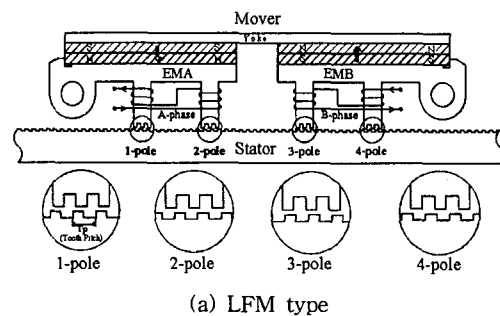
상기와 같은 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서는 현재 가장 많이 연구되고 있는 자속종방향(Longitudinal Flux Machine, LFM)형 HLSM을 선정 한 후, 2차원 유한요소법(Finite Element Method, FEM)으로 LFM형 HLSM의 치 형상 최적모델을 설계하고 추력과 수직력을 계산하고자 하며, 상기의 설계된 파라미터를 바탕으로 직접 LFM형 HLSM의 시 작기를 제작하고 LFM형 HLSM의 추력 특성을 실험 함으로써 상기 설계기술의 정당성을 입증하고자 한다.

## 2. LFM형 HLSM의 구조

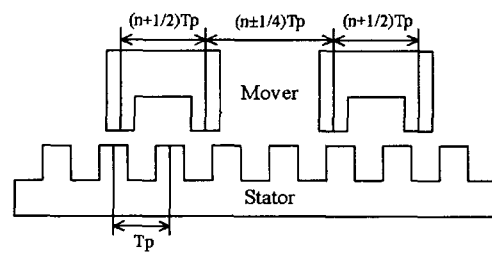
그림 1(a)는 LFM형 HLSM의 구조를 나타내고, 그림 1(b)는 가동자 극 피치와 고정자 치 피치의

관계를 나타낸다. 그림 1(a)에서 화살표 방향은 영구자석에서 발생하는 자속의 방향을 나타내고, 가동자는 전자석 EMA와 EMB가 이동방향의 전후로 배치되며, 각각의 전자석에는 두 개의 자극 즉, (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) LFM type



(b) Mover pole and stator tooth pitches

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

## 3. LFM형 HLSM의 설계 및 해석

### 3.1 2차원 FEM의 지배방정식

영구자석을 포함한 정자계에서 지배방정식을 도출

하기 위한 맥스웰 방정식 및 보조 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$B = \mu_0(H + M) \quad (2)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (3)$$

여기서  $H$ 와  $B$ 는 각각 자계의 세기 및 자속밀도이고,  $J$ 는 전류밀도이며,  $M$ 은 자성체의 자화의 세기이다. 자기벡터 포텐셜  $A$ 는 식(4)의 관계로부터 정의되고, 자화의 세기  $M$ 은 식(5)의 자화율로 표시된다.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

$$M = \chi' H + M_0 \quad (5)$$

여기서  $M_0$ 는 자화의 세기이고,  $\chi'$ 는 자화율이다. 식(5)를 식(2)에 대입하면 식(6)으로 표시된다.

$$\begin{aligned} B &= \mu_0(1 + \chi')H + \mu_0 M_0 \\ &= \mu' H + B_r \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\mu'$ 는 일반적으로 정의되는 자성체의 투자율 ( $\mu = \mu_0 \mu_r$ )와 차원은 같으나, 성질이 다르므로 겉보기 투자율로 정의하며,  $B_r$ 은 자성체의 잔류 자속밀도이다.

상기 식을 정리하면, 영구자석을 포함하는 정자계의 지배방정식은 식(7)과 같이 주어진다.

$$\nabla \times \frac{1}{\mu'} (\nabla \times A - B_r) = J \quad (7)$$

2차원장의 정자계를 해석하기 위해서 변분원리에 의한 FEM을 적용하는 경우, 우선 2차원 영역  $S$ 에서 식(8)과 같은 범함수를 구해야 한다.

$$\chi = \int \int_S \frac{1}{2\mu'} \{(\nabla \times A) \cdot (\nabla \times A)\} dx dy$$

$$\begin{aligned} & - \int \int_S \frac{1}{\mu'} \{(\nabla \times A) \cdot B_r\} dx dy \\ & - \int \int_S J \cdot A dx dy \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)의 범함수를 최소화 하는 조건인 식(9)로부터 미지의 자기 벡터포텐셜이 구해진다.

$$\frac{\partial \chi}{\partial A_{ie}} = \sum \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial A_{ie}} = 0 \quad (9)$$

또한, 각 요소에서의 자속밀도  $B^{(e)}$ 는  $B = \nabla \times A$ 에 의하여 식(10)과 같이 주어진다.

$$B^{(e)} = \frac{\partial A^{(e)}}{\partial y_x} - \frac{\partial A^{(e)}}{\partial x_y} \quad (10)$$

따라서, 요소내의 자속밀도의 크기는 식(10)으로부터 식(11)과 같다.

$$B^{(e)} = \sqrt{\left(\frac{\partial A^{(e)}}{\partial y_x}\right)^2 + \left(\frac{\partial A^{(e)}}{\partial x_y}\right)^2} \quad (11)$$

본 논문에서는 추력 및 수직력 특성을 해석하기 위하여 가상변위법을 이용하였으며, 전체자기수반 에너지는 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} W_{co} &= \int_v \left( \int_0^H B dH \right) dv \\ &= \int_v \frac{1}{2} B \cdot H dv \end{aligned} \quad (12)$$

식(12)에서 해석 영역을 2차원으로 제한하면 식(13)이 된다.

$$W_{co} = \int_s \frac{1}{2\mu} B^2 ds \quad (13)$$

따라서, LFM형 HLSM의 추력 및 수직력은 자기 수반 에너지  $W_{co}$ 의 변화량으로 주어지므로 식(14)와 같다.

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial \chi} \quad (14)$$

### 3.2 LFM형 HLSM의 2차원 해석모델

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.

그림 2는 LFM형 HLSM의 2차원 유한요소해석 기본모델을 나타내고 있으며, 모든 경계조건에서의 포텐셜을 Zero(0)로 가정하였다.

그림 3은 LFM형 HLSM 가동자와 고정자의 치(Tooth)가 방형(Rectangular type, RT)인 2차원 유한요소해석 모델이고, 그림 4는 가동자와 고정자의 치가 쐐기형(Wedge type, WT) 모델이며, 치의 텅핑(Tapping) 위치에 따라서 3가지 모델을 설정하였다. 그림 5는 가동자 치가 RT이고 고정자 치가 다이아몬드형(Diamond type, DMT) 모델이고, 또한 그림 6은 가동자 치가 WT이고 고정자 치가 DMT로 모델 설정하였다.

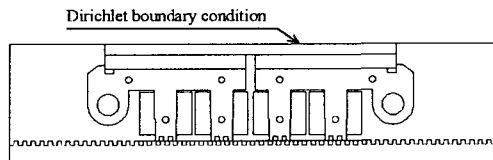


그림 2. LFM형 HLSM의 2차원 유한요소해석 기본 모델  
Fig. 2. 2D FE-analysis fundamental model of LFM type HLSM

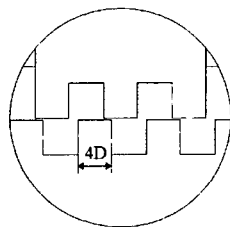
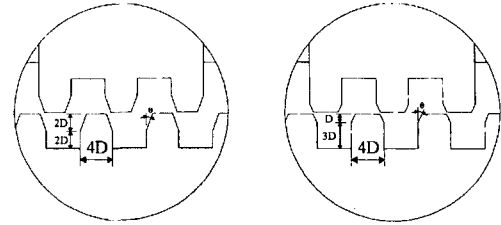
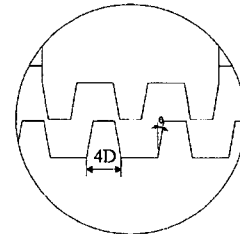


그림 3. LFM형 HLSM의 RT 모델  
Fig. 3. RT model of LFM type HLSM



(a) Type I

(b) Type II



(c) Type III

그림 4. LFM형 HLSM의 WT 모델  
Fig. 4. WT models of LFM type HLSM

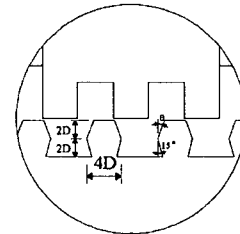


그림 5. LFM형 HLSM의 RDMT 모델  
Fig. 5. RDMT model of LFM type HLSM

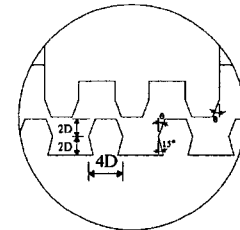


그림 6. LFM형 HLSM의 WDMT 모델  
Fig. 6. WDMT model of LFM type HLSM

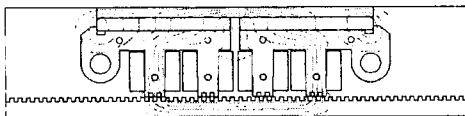
### 3.3 LFM형 HLSM의 추력 및 수직력 해석

표 1은 본 논문에서 시자기 설계와 추력 및 수직력 계산에 필요한 LFM형 HLSM의 설계사양을 나타내고 있다.

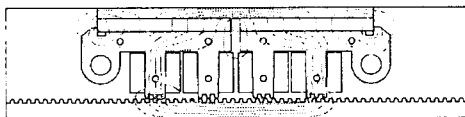
표 1. LFM형 HLSM의 설계사양  
Table 1. Design specification of LFM type HLSM

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]	

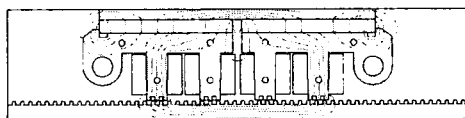
그림 7은 LFM형 HLSM의 치 형상 모델, 즉 RT, WT, RDMT 및 WDMT에 따른 추력 및 수직력 계산을 위한 자속분포도이다.



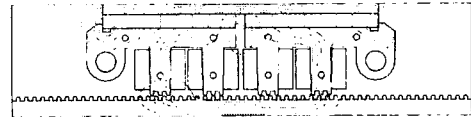
(a) RT



(b) WT(Type I,  $\theta = 15^\circ$ )



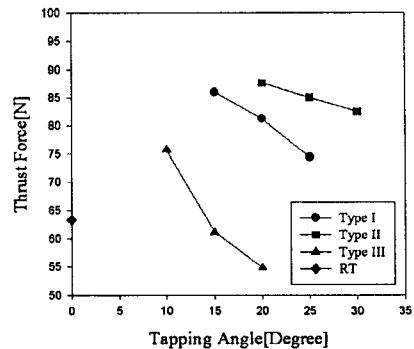
(c) RDMT



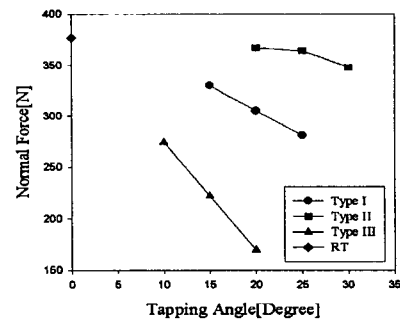
(d) WDMT

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

그림 8은 LFM형 HLSM의 WT 모델에 따른 최대 추력과 수직력 특성을 나타내고 있다. 그림 8(a)와 그림 8(b)에서 최대추력은 Type I의 텡핑 각도  $15^\circ$  일 때와 Type II의 텡핑 각도  $20^\circ$  일 때이지만, 수직력 값이 Type I의 텡핑 각도가  $15^\circ$  일 때가 훨씬 낮기 때문에 WT 모델에서는 Type I의 텡핑 각도가  $15^\circ$  일 때 가장 적합할 것으로 사료된다.



(a) Maximum thrust force



(b) Normal force

그림 8. LFM형 HLSM의 WT 모델에 따른 최대추력과 수직력  
Fig. 8. Maximum thrust force and normal force by WT model of LFM type HLSM

2차원 유한요소해석에 의한 선형 스텝핑 전동기의 주력 및 수직력 특성에 관한 연구

그림 9와 그림 10은 각각 LFM형 HLSM의 치 형상 모델, 즉 RT, WT, RDMT 및 WDMT에 따른 주력과 수직력 특성을 나타내고 있다.

표 2는 치 형상 모델에 따른 최대추력과 수직력값 및 WT 모델에 대한 상대적인 비율을 나타내고 있으며, LFM형 HLSM의 최대추력은 WT 모델이 가장 높고, 수직력 특성은 WDMT 모델이 다소 낮은 특성을 나타내고 있지만, 본 논문에서는 LFM형 HLSM의 시작기 치 형상을 최대추력이 가장 높은 WT(Type I,  $\theta = 15^\circ$ ) 모델로 채택하였다.

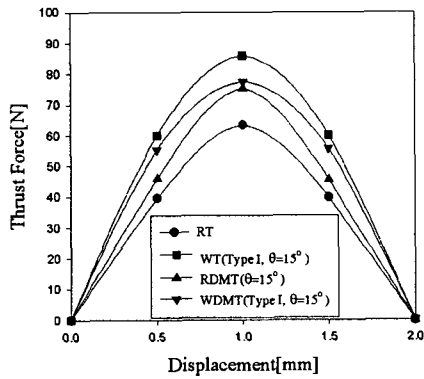


그림 9. LFM형 HLSM의 치 형상 모델에 따른 주력 특성  
Fig. 9. Thrust force characteristics by tooth shape models of LFM type HLSM

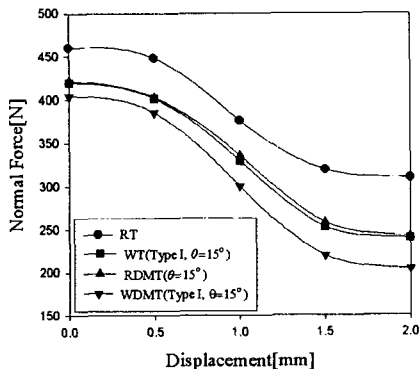


그림 10. LFM형 HLSM의 치 형상 모델에 따른 수직력 특성  
Fig. 10. Normal force characteristics by tooth shape models of LFM type HLSM

표 2. 치 형상 모델에 따른 최대추력과 수직력  
Table 2. Maximum thrust forces, normal forces by tooth shape models

Model	Max. thrust force		Normal force	
	Value [N]	Ratio [%]	Value [N]	Ratio [%]
RT	63.3	73.7	376.4	114
<b>WT</b>	<b>85.9</b>	<b>100</b>	<b>330.2</b>	<b>100</b>
RDMT	75.1	75.1	336.3	101.8
WDMT	77.4	90.1	300.1	90.8

#### 4. LFM형 HLSM의 시작기 제작 및 특성 실험

표 3은 앞장의 설계과정을 거쳐 산출한 설계파라미터를 바탕으로 본 논문에서 제작한 LFM형 HLSM의 시작기 사양을 나타내고 있다.

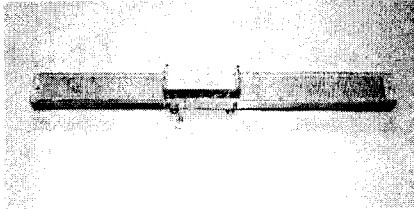
그림 11은 본 논문에서 제작한 LFM형 HLSM의 시작기를 나타낸다. 그림 11(a)는 LFM형 HLSM의 가동자와 고정자를 나타내며, 그림 11(b)는 완성된 LFM형 HLSM을 나타내고 있다.

표 3. LFM형 HLSM의 시작기 사양  
Table 3. Prototype specification of LFM type HLSM

Item	Value/Unit	Ref.
Tooth width	1.95[mm]	WT(Type I) $\theta = 15^\circ$
Slot width	2.05[mm]	
Slot depth	2.05[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[ $\Omega$ /phase]	25[ $^\circ$ C]
Magnet type	67 $\times$ 7 $\times$ 50[mm] 1.0[T]~1.2[T]	NdFeB



(a) Mover and Stator



(b) Manufactured LFM type HLSM

그림 11. LFM형 HLSM의 시작기  
Fig. 11. Prototype of LFM type HLSM

그림 12는 본 논문에서 제작한 LFM형 HLSM의 이동변위에 따른 추력 계산결과와 측정결과를 나타내고 있다. LFM형 HLSM의 이동변위는 레이저 측정기를 이용하여 정밀한 이동거리를 측정하였고, 추력은 Force Gauge를 사용하였다. 그림 12에서 추력 계산결과와 측정결과가 잘 일치함으로써 유한요소 해석을 통한 LFM형 HLSM의 설계 및 해석이론의 정당성을 입증하였다.

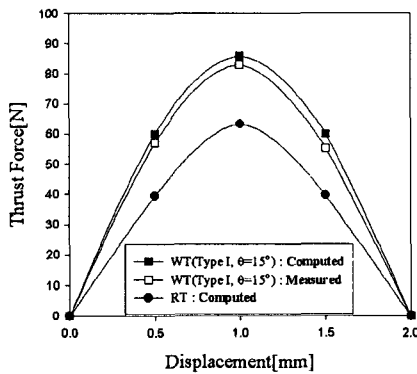


그림 12. LFM형 HLSM의 추력 특성  
Fig. 12. Thrust force characteristics of LFM type HLSM

## 5. 결 론

본 논문에서는 LFM형 HLSM의 치 형상 모델, 즉 RT, WT, RDMT 및 WDMT를 2차원 FEM 소프트웨어(Flux2D)를 사용하여 설계하고 추력과 수직력을 계산하였고, 상기의 설계된 파라미터를 바탕으로 직접 LFM형 HLSM의 시작기를 제작하였으며 LFM형 HLSM의 추력 특성을 실험한 결과, 다음과

같은 결론을 얻었다.

1. LFM형 HLSM의 최대 추력은 WT 모델이 가장 높고, 수직력 특성은 WDMT 모델이 다소 낮은 특성을 나타내고 있지만, 본 논문에서는 LFM형 HLSM의 시작기 치 형상을 최대추력이 가장 높은 WT(Type I,  $\theta = 15^\circ$ ) 모델로 채택하였다.
2. 제작한 LFM형 HLSM의 이동변위에 따른 추력 계산결과와 실험결과가 잘 일치함으로써 2차원 유한요소해석을 통한 LFM형 HLSM의 설계 및 해석이론의 정당성을 입증하였다.

## References

- (1) Z. X. Fu, S. A. Nasar, "Analysis of a Hybrid Stepper Motor", IMCSD. Proc., pp. 234~240, 1992.
- (2) Kenjo T., Sugawara A., "Stepping motor and their microprocessor controls", Oxford University Press, pp. 49~58, 1994.
- (3) Ding Zhi-Gang, "A Novel Electromagnetic Spiral Linear Step Motor", IEEE Trans. on IAS, vol. 1, pp. 329~336, 1994.
- (4) J. P. Pawietko, H. D. Chai, "Linear Step Motors", IMCSD. Proc., pp. V-1~V-11, 1973.
- (5) S. A. Nasar, "Linear Electric Motors", IMCSD. Proc., pp. 1~6, 1987.
- (6) T. Yokozuka, E. Baba, "Force-displacement characteristics of linear stepping motors", IEE proceeding-B, Vol. 139, No.1, pp. 37~43, 1992.
- (7) Walter E. Hinds, Bernabe Nocito, "The Sawyer Linear Motor", IMCSD, pp. W-1~W-10, 1973.
- (8) Hong-Seok Oh, Dong-Hee Kim, Sang-Ho Lee, "New Micro-stepping Drive of 2-Phase Linear Stepping Motor", FEMC'98, Vol 1, pp.3-189~3-192, 1998.
- (9) M. Karita, H. Nakagawa, M. Maeda, H. Yamada, K. Kawakatsu, "Development of Double Sided Linear Pulse Motor", IEEE Trans. on MAC, Vol. 25, No. 5, pp. 3257~3259, 1989.
- (10) Y. Takeda, S. Morimoto, K. Taniguchi, H. Takeda, "Optimum Tooth Design for Linear Pulse Motor", Conference Record of the IEEE IAS Annual Meeting, pp. 272~277, 1989.

◇ 저자소개 ◇

**원규식 (元奎植)**

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

**노채균 (盧采均)**

1938년 10월 7일생. 1961년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1978년 영남대 공대 전기공학과 졸업(공학박사). 1982년~1983년 미국 Kentucky 주립대 교환교수. 현재 영남대 공대 전자·정보공학부 교수.

**김동희 (金東熙)**

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1975년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe대학 졸업(박사). 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.

**이상호 (李相鎬)**

1959년 7월 13일생. 1982년 영남대 전기 공학과 졸업(학사). 1988년 영남대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 삼척대 제2공학부 소방방재학부 부교수.

**오홍식 (吳鴻錫)**

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