

HLSM의 치 형상에 따른 추력 및 수직력 특성에 관한 연구

論 文
53B-5-6

A Study on the Thrust and Normal force Characteristics by Tooth Shapes of HLSM

李相鎬* · 吳鴻錫**
(Sang-Ho Lee · Hong-Seok Oh)

Abstract - In the recently, the necessity of linear position control motors have been increased in the various fields of the automatic control system. In this paper, we have designed the tooth models of the hybrid type linear stepping motor(HLSM); rectangular type(RT), triangle type(TrT), round type(RdT) and wedge type(WT), and proposed the optimum tooth shape of the HLSM by simulating(Flux2D) the thrust and normal force characteristics with the finite element method(FEM) and the virtual work method. And we have manufactured the prototype HLSM with the optimum tooth, and measured the various values by using experimental system. Thus, we have confirmed the justice of theory because the computed and the experimental results almost coincide with.

Key Words : linear stepping motor, finite element method, tooth shape, HLSM, FEM

1. 서 론

오늘날 자동제어 시스템의 다양한 분야에서 선형 위치 제어용 전동기의 필요성이 증가되고 있다. 일반적으로 위치 제어용 전동기는 회전기를 사용하므로 선형 운동을 위해서는 기어와 벨트 및 볼 스크류(Ball screw)와 랙과 피니언(Rack & pinion)등과 같은 별도의 운동 변환 기구가 필요하다. 따라서, 위치제어 시스템의 구조가 복잡하고 소음과 진동 때문에 위치 정밀도가 떨어지며, 또한 경제적인 측면에서도 대단히 불리하였다.[1]-[3]

최근 선형 운동용 디지털 액츄에이트(Digital actuator)인 하이브리드형 선형 스텝핑 전동기(Hybrid type Linear Stepping Motor : 이하 HLSM이라 한다.)는 펄스파에 의해 구동이 용이할 뿐만 아니라, 개루프로도 정확한 위치 제어가 가능하므로 디지털 IC를 이용한 구동기술에 대해 많은 연구가 선진 각국에서 활발히 진행되고 있다.[4]-[7]

HLSM은 제어회로의 구성이 용이하고, 신뢰도가 높을 뿐만 아니라 단위 체적당 고출력을 발생하고 있는 특징도 있다. 또한, 입력 펄스 신호에 따라 선형적인 변위를 발생시키는 다이렉트 드라이브(Direct Drive) 방식이므로 상기와 같은 운동 변환기구가 필요 없으므로 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 가능

하므로 회전형 스텝핑 전동기를 사용한 위치제어 장치에 비해 유리한 장점을 가지고 있다.[8]-[11]

그러나, 일본을 비롯한 미국, 영국 등 선진 각국에서 개발된 기존의 HLSM은 산업응用に 있어서 필요한 추력이 부족하고, 또한 추력에 비해 매우 큰 수직력(흡인력)이 작용함으로써 미소 갭 지지와 소형 경량화의 장애요소가 되고 있으며, 특히 높은 흡인력의 작용으로 인해 전력 손실이 매우 큰 단점이 있다. 따라서 HLSM의 추력과 수직력 특성은 가동자와 고정자의 치 형상에 의하여 크게 영향을 받음으로써 성능이 우수한 치 형상 설계가 절실히 요구되어 지고 있는 실정이다.[12]

따라서 본 논문에서는 HLSM의 치 형상 모델을 방형(Rectangular Type, 이하 RT라 한다.), 삼각형(Triangle Type, 이하 TrT라 한다.), 곡선형(Round Type, 이하 RdT라 한다.) 및 쐐기형(Wedge Type, 이하 WT라 한다.)으로 설정하여 추력과 수직력특성을 유한요소법(Finite Element Method, 이하 FEM이라 한다.)과 가상변위법[13]-[14]을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)함으로써 성능이 우수한 치 형상 모델을 제시하였다. 그리고, 상기에서 제시한 성능 개선 모델을 바탕으로 직접 HLSM의 시제품을 제작하고, 제작된 HLSM의 여러 가지 제 특성을 실험함으로써 유한요소해석의 타당성을 입증하였다.

2. HLSM의 기본구조

그림1(a)는 HLSM의 구조를 나타내고, 그림1(b)는 가동자극 피치와 고정자 치 피치와의 관계를 나타낸다.

그림1(a)에서 화살표 방향은 영구자석에서 발생하는 자속

* 正 會 員 : 삼척대학교 방재기술전문대학원 부교수 · 工博

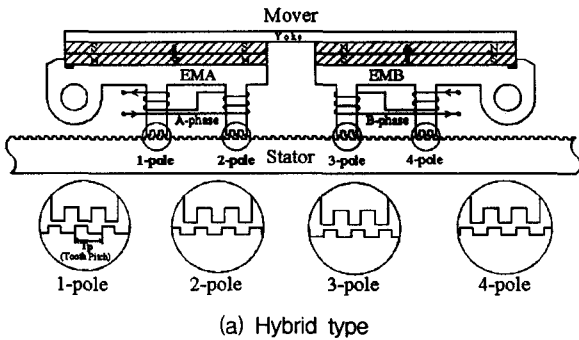
** 正 會 員 : (주)이맥스하이테크 대표이사 · 工博

接受日字 : 2003年 11月 4日

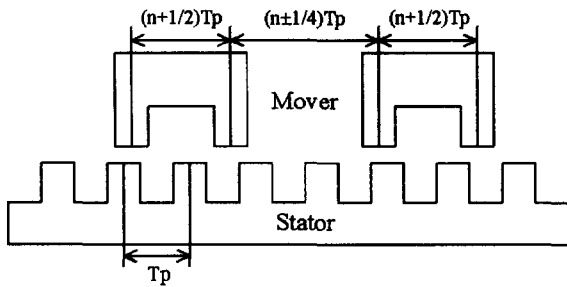
最終完了 : 2004年 3月 7日

의 방향을 나타내고, 가동자는 전자석 EMA와 EMB가 이동 방향의 전후로 배치되며, 각각의 전자석에는 두 개의 자극극, (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.

그림1(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) Hybrid type



(b) Mover pole and stator tooth pitches

그림 1 HLSM의 구조

Fig. 1 Structure of the HLSM

3. HLSM의 추력 및 수직력 해석

3.1 HLSM의 FEM 해석

영구자석을 포함하는 정자계의 지배방정식은 식(1)과 같이 주어진다.

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

여기서 μ' 는 일반적으로 정의되는 자성체의 투자율 $\mu (= \mu_0 \mu_r)$ 와 차원은 같으나, 성질이 다르므로 겉보기 투자율로 정의하고, A 는 자기벡터포텐셜, B_r 은 자성체의 잔류자속밀도, J 는 전류밀도이다.

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

$$\begin{aligned} \chi = & \iint_S \frac{1}{2\mu'} \{ (\nabla \times A) \cdot (\nabla \times A) \} dx dy \\ & - \iint_S \frac{1}{\mu'} \{ (\nabla \times A) \cdot B_r \} dx dy \\ & - \iint_S J \cdot A dx dy \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)의 범함수를 최소로 하는 조건인 식(3)으로 부터 미지의 자기 벡터포텐셜이 구해진다.

$$\frac{\partial \chi}{\partial A_{ie}} = \sum \frac{\partial \chi^{(e)}}{\partial A_{ie}} = 0 \quad (3)$$

본 논문에서는 추력 및 수직력 특성을 해석하기 위하여 가상변위법을 이용하였으며, 전체자기수반 에너지는 식(4)와 같다.

$$W_{co} = \int_v \frac{1}{2} B \cdot H dv = \int_s \frac{1}{2\mu} B^2 ds \quad (4)$$

따라서, HLSM의 추력 및 수직력은 자기 수반 에너지 W_{co} 의 변화량으로 주어지므로 식(5)와 같다.

$$F = \frac{\partial W_{co}}{\partial x} \quad (5)$$

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

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

그림2는 HLSM의 2차원 유한요소해석 기본모델을 나타내고 있으며, 모든 경계조건에서의 포텐셜을 Zero(0)로 가정하였다.

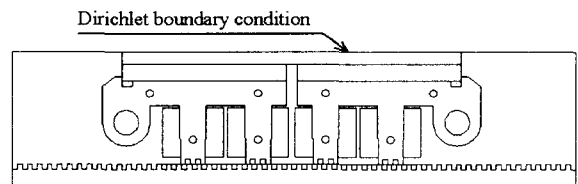


그림 2 HLSM의 2차원 유한요소 해석 기본모델

Fig. 2 2D FE-analysis fundamental model of HLSM

그림3은 HLSM 가동자와 고정자의 치 형상모델들을 나타낸다. 그림3(a)는 방형(RT) 모델이고, 그림3(b) 삼각형(TrT) 모델이며, 그림3(c)는 곡선형(RdT)이다. 또한 그림3(d)는 쉘기형(WT) 모델을 나타낸다.

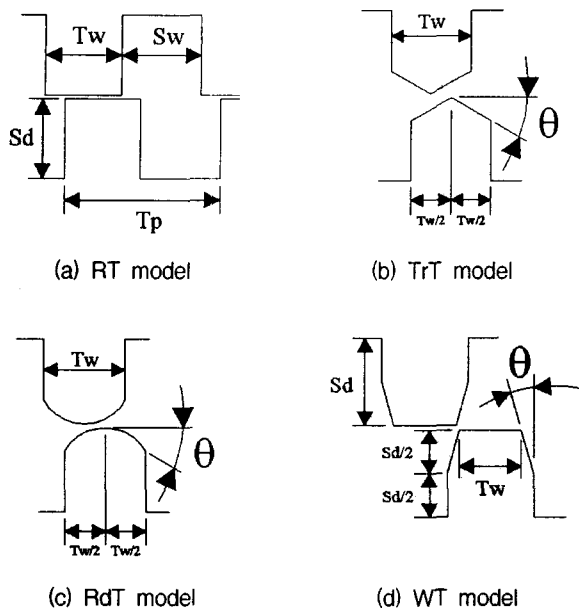


그림 3 HLSM의 치 모델
Fig. 3 Tooth models of HLSM

3.2 치 형상에 따른 HLSM의 추력 및 수직력특성 해석
표1은 본 논문에서 치 형상에 따른 HLSM의 추력 및 수직력 계산에 필요한 HLSM의 기본사양을 나타내고 있다.

표 1 HLSM의 기본사양
Table 1 Brief specifications of 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-p, 2-p Ex.
Number of pole	4	
Number of tooth	3[ea/pole]	
Tooth width(Tw)	1.95[mm]	Rectangular type
Slot width(Sw)	2.05[mm]	
Slot depth(Sd)	2.05[mm]	
Tooth pitch(Tp)	4.00[mm]	
Stack length	50[mm]	
Air gap	0.1[mm]	
Turns of coil	300[T/pole]	
Resistance of coil	1.5[Ω/ph.]	25[°C]
Magnet type	67×7×50 1.0~1.2[T]	NdFeB

그림4는 치 형상에 따른 HLSM의 추력 및 수직력 계산을 위한 자속분포도를 나타내고 있다.

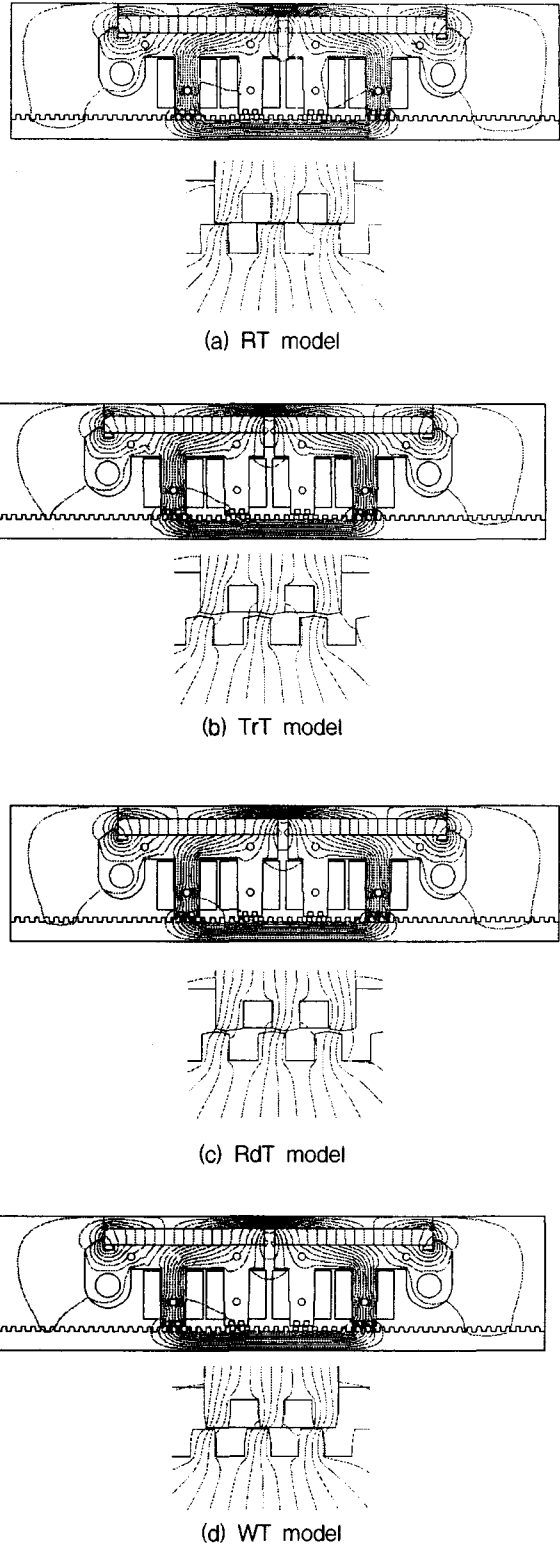
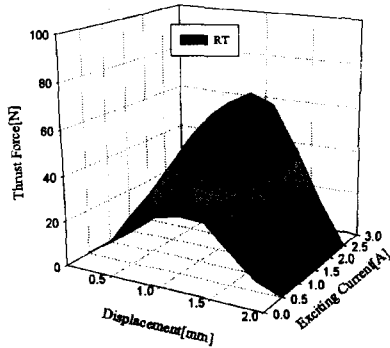


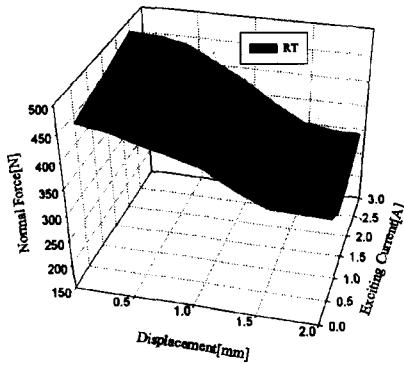
그림 4 HLSM의 치 형상에 따른 자속분포도
Fig. 4 Flux distributions by tooth shapes of HLSM

그림5는 HLSM의 치 형상이 RT 모델인 경우, 이동변위와 여자전류에 따른 추력과 수직력 특성을 나타내고 있다. 표2는 RT 모델의 여자전류에 따른 최대추력과 수직력 값

및 비율을 나타내고 있다. 전류가 증가함에 따라 최대추력과 수직력의 증가율은 점점 줄어드는 것을 알 수 있으며 이것은 철심의 자기포화 현상 때문으로 생각되어진다.



(a) Thrust force



(b) Normal force

그림 5 RT 모델의 이동변위와 여자전류에 따른 추력 및 수직력 특성

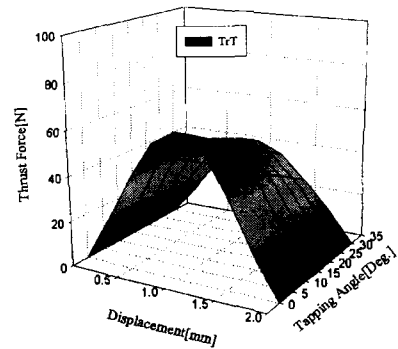
Fig. 5 Thrust force and Normal force characteristics by displacement and exciting currents of RT model

표 2 RT 모델의 여자전류에 따른 최대추력 및 수직력
Table 2 Maximum thrust force and normal force by exciting currents of RT model

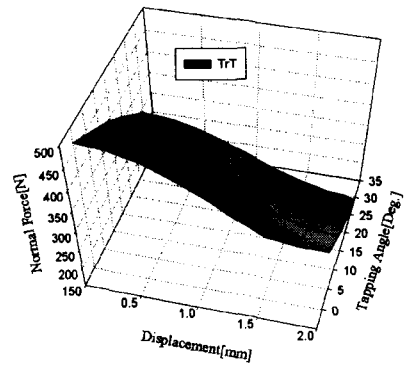
Ex. currents [A]	Max. thrust force		Normal force		Ref.
	Value[N]	Ratio[%]	Value[N]	Ratio[%]	
0.5	25.4	40.1	378.7	97.0	
1.0	45.6	72.0	369.0	94.5	
1.5	57.4	90.7	375.9	96.3	
2.0					
2.5	65.1	102.8	406.9	104.3	

그림6은 HLSM의 치 형상이 TrT 모델인 경우, 이동변위와 텡핑각도(θ)에 따른 추력과 수직력 특성을 나타내고 있다. 표3은 TrT 모델의 텡핑각도에 따른 최대추력과 수직력 값 및 비율을 나타내고 있다. 텡핑 각도의 증가에 따라 최대추력과 수직력 값이 감소하였으며, TrT 모델의 최대추력

과 수직력 값은 RT 모델일 때의 최대추력과 수직력 값 보다 낮음을 알 수 있었다.



(a) Thrust force



(b) Normal force

그림 6 TrT 모델의 이동변위와 텡핑각도에 따른 추력 및 수직력 특성(정격전류 : 2[A])

Fig. 6 Thrust force and Normal force characteristics by displacement and tapping angles of TrT model(Rating Current : 2[A])

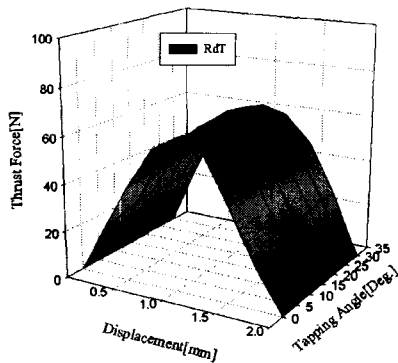
표 3 TrT 모델의 텡핑각도에 따른 최대추력 및 수직력 (정격전류 : 2[A])

Table 3 Maximum thrust force and normal force by tapping angles of TrT model(Rating Current : 2[A])

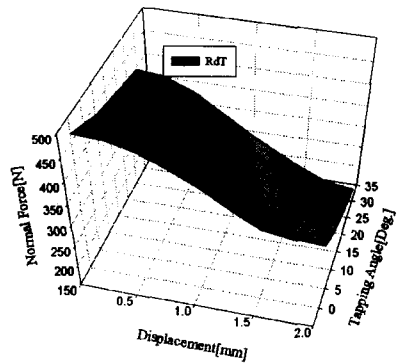
Tapping Angle [Deg.]	Max. thrust force		Normal force		Ref.
	Value[N]	Ratio[%]	Value[N]	Ratio[%]	
0	63.3	100.0	390.3	100.0	RT
10					
15	51.9	82.0	302.0	77.4	
20	49.0	77.4	271.9	69.7	
25	45.5	71.9	244.1	62.5	
30	42.0	66.4	218.4	56.0	

그림7은 HLSM의 치 형상이 RdT 모델인 경우, 이동변위와 텡핑각도(θ)에 따른 추력과 수직력 특성을 나타내고 있다. 표4는 RdT 모델의 텡핑각도에 따른 최대추력과 수직력 값 및 비율을 나타내고 있다. 텡핑 각도의 증가에 따라 최대추력은 거의 동일하였으나 수직력 특성은 감소하였으며,

RdT 모델의 최대추력과 수직력 값은 RT 모델일 때의 최대 추력과 수직력 값 보다 낮음을 알 수 있었다.



(a) Thrust force



(b) Normal force

그림 7 RdT 모델의 이동변위와 탭핑각도에 따른 추력 및 수직력 특성(정격전류 : 2[A])

Fig. 7 Thrust force and Normal force characteristics by displacement and tapping angles of RdT model (Rating Current : 2[A])

표 4 RdT 모델의 탭핑각도에 따른 최대추력 및 수직력 (정격전류 : 2[A])

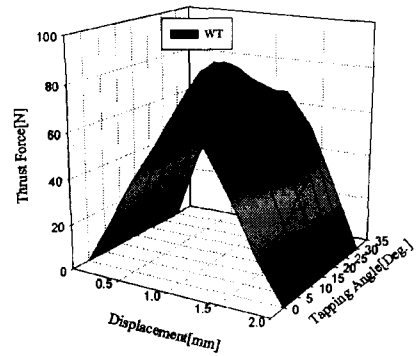
Table 4 Maximum thrust force and normal force by tapping angles of RdT model(Rating Current : 2[A])

Tapping Angle [Deg.]	Max. thrust force		Normal force		Ref.
	Value[N]	Ratio[%]	Value[N]	Ratio[%]	
0	63.3	100.0	390.3	100.0	RT
10	61.4	97.0	334.7	85.8	
15	62.1	98.1	322.4	82.6	
20					
25	62.0	97.9	296.2	75.9	
30	62.1	98.1	286.7	73.5	

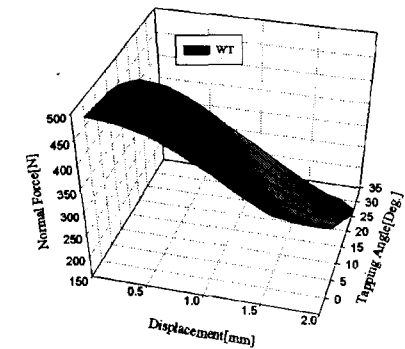
그림8은 HLSM의 치 형상이 WT 모델인 경우, 이동변위와 탭핑각도(θ)에 따른 추력과 수직력 특성을 나타내고 있으며, 그림8에서 알 수 있듯이, WT 모델의 최대추력은 RT 모델의 최대추력보다 높음을 알 수 있었고, 또한 WT 모델의 수직력 값은 RT 모델일 때의 수직력 값보다 낮음을 알

수 있었다.

표5는 WT 모델의 탭핑각도에 따른 최대추력과 수직력 값 및 비율을 나타내고 있으며, 탭핑각도 $\theta=15^\circ$ 에서 최대추력이 약 35.7%로 가장 많이 증가하였고, 수직력 값 역시 15.4% 감소함을 알 수 있었다. 따라서 HLSM의 치 형상 모델 가운데 탭핑 각도 $\theta=15^\circ$ 의 WT 모델이 가장 우수한 치 형상 모델인 것으로 사료된다.



(a) Thrust force



(b) Normal force

그림 8 WT 모델의 이동변위와 탭핑각도에 따른 추력 및 수직력 특성(정격전류 : 2[A])

Fig. 8 Thrust force and Normal force characteristics by displacement and tapping angles of WT model(Rating Current : 2[A])

표 5 WT 모델의 탭핑각도에 따른 최대추력 및 수직력 (정격전류 : 2[A])

Table 5 Maximum thrust force and normal force by tapping angles of WT model(Rating Current : 2[A])

Tapping Angle [Deg.]	Max. thrust force		Normal force		Ref.
	Value[N]	Ratio[%]	Value[N]	Ratio[%]	
0	63.3	100.0	390.3	100.0	RT
10	83.9	132.5	355.9	91.2	
15					
20	81.6	128.9	304.0	77.9	
25	74.5	117.7	281.9	72.2	
30	67.5	106.6	255.2	65.4	

4. HLSM의 시작기 제작 및 특성 실험

그림9는 본 논문에서 제작한 HLSM의 시작기를 나타낸다. 본 논문에서는 가동자를 금형 제작한 후 성층하여 조립하였으며, 고정자는 성층 후 와이어 절단을 통하여 제작하였다. 그림9(a)는 HLSM의 가동자와 고정자를 나타내며 그림9(b)는 완성된 HLSM을 나타내고 있고, 그림9(c)는 금형 제작된 가동자의 세부사진을 나타내고 있다.



(a) Mover and Stator



(b) Manufactured HLSM



(c) Teeth of Mover

그림 9 HLSM의 시작기
Fig. 9 Prototype of HLSM

그림10은 본 논문에서 제작한 HLSM의 이동변위에 따른 추력 계산결과와 측정결과를 나타내고 있다. HLSM의 이동변위는 레이저 측정기를 이용하여 정밀한 이동거리를 측정하였고, 추력은 Force Gauge를 사용하였다. 그림10에서 추력 계산결과와 측정결과가 잘 일치함으로써 FEM 해석결과의 타당성을 입증하였다.

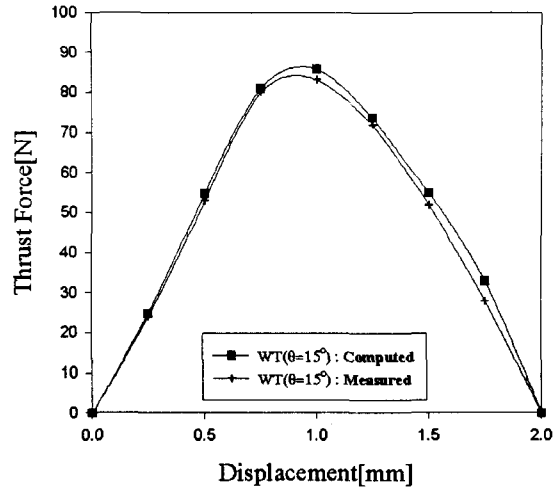


그림 10 HLSM의 추력특성
Fig. 10 Thrust force characteristics of HLSM

5. 결 론

본 논문에서는 HLSM의 치 형상 모델을 방형(RT), 삼각형(TrT), 곡선형(RdT) 및 썸기형(WT)으로 설정하여 추력과 수직력 및 진동특성을 유한요소법(FEM)과 가상변위법을 사용하여 컴퓨터 시뮬레이션(Flux2D)하였다. 그리고, 상에서 제시한 성능이 우수한 모델을 바탕으로 직접 HLSM의 시제품을 제작하고, 제작된 HLSM의 추력특성을 실험 및 분석한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. HLSM의 최대추력은 WT 모델이 가장 우수하였고, 특히 WT 모델의 텡핑각도 $\theta = 15^\circ$ 에서 최대추력이 약 35.7%로 가장 많이 증가하였고, 수직력 값 역시 15.4% 감소함으로써 HLSM의 치 형상 모델 가운데 텡핑 각도 $\theta = 15^\circ$ 의 WT 모델이 가장 우수한 치 형상 모델인 것으로 사료된다.

2. 제작한 HLSM의 이동변위에 따른 추력 계산결과와 실험결과가 잘 일치함으로써 2차원 FEM을 이용한 해석결과의 타당성을 입증하였다.

참 고 문 헌

[1] Leenhouts, A. C., "The art and practice of step motor control", Intertec Communications Inc., pp. 41~46, 1987.
 [2] Kenjo T., Sugawara A., "Stepping motor and their microprocessor controls", Oxford University Press, pp. 49~58, 1994.
 [3] Liyu Cao, Kazutaka Segawa, Akira Nabae, Kazuo Ohnishi, "Mid-Frequency Oscillation and High Frequency Stability in Stepping Motors", T. IEE Japan, Vol. 117-D, No. 9, pp. 1146~1153, 1997.

- [4] B. Nappi, "Output Stage Stabilization of a Microstepping Linear Step Motor Driver using the Wise-bode Method", IMCSD. Proc., pp. 249~256, 1980.
- [5] H. Dohmeki, H. Satomi, Y. Kuraishi, T. Iwasa, "Dynamic Performance Characteristics of New Type Cylindrical Linear Pulse Motors", SMIC, pp. 227~232, 1996.
- [6] Paul R. Emerald et al., "CMOS Step Motor IC and Power Multi-chip Module Combine to Integrate, Multi-mode PWM Operation and Microstepping", PCIM, pp. 22~35, 1996.
- [7] Sang-Ho Lee, Dong-Hee Kim, Hong-Seok Oh, etc. "New Micro-stepping Drive of 2-Phase Linear Stepping Motor", PEMC'98, Vol. 1, pp.3-189~3-192, 1998.
- [8] S. A. Nasar, "Linear Electric Motors", IMCSD. Proc., pp. 1~6, 1987.
- [9] Yokozuka, Baba, "Force-displacement Characteristics of Linear Stepping Motors", IEE proceeding-B, Vol. 139, No.1, pp. 37~43, 1992.
- [10] Z. X. Fu and S. A. Nasar, "Analysis of a Hybrid Linear Stepper Motor", IMCSD. Proc., pp. 234~240, 1992.
- [11] Sang-Ho Lee, Jin-Ho Bae, Do-Young Chung, "A Double 1-2Phase Exciting of Linear Stepping Motor", SMIC '93, pp. 179~182, 1993.
- [12] 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.
- [13] M. Kawabe, T. Narita, H. Nakagawa, Y. Maeda, Y. Shimomura, "Thrust Analysis of Linear Actuator", JIEE, RM-90-119, pp. 99~108, 1990.
- [14] K. Rechertert, H. Freun^ol, W. Vogt, "The calculation of forces and torques within numerical magnetic field calculation methods", Proc. of COMPUMAG, pp. 64~73, 1976.

저 자 소 개



이 상 호 (李 相 鎭)

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

Tel : 033-570-6811

Fax : 033-570-6819

E-mail : shlee@samcheok.ac.kr



오 홍 석 (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 (주)이맥스하이테크 대표이사.

Tel : 033-535-0593

Fax : 033-535-0594

E-mail : ohhong@dreamwiz.com