

공작기계용 철심형 리니어모터 기술 개발

정재한*, 박재완*, 이상룡**

Development of Iron Core Type Linear Motor for Machine Tool

Jae Han Joung*, Jae Wan Park* and Sang Ryong Lee**

ABSTRACT

There is an intensifying demand for linear motors in vast range of industry applications such as in factory automation and semi-conductor manufacturing equipment due to their high positioning accuracy, high static stiffness, high thrust and excellent dynamic characteristics. This paper presents an iron core type linear motor for machine tool whose rated thrust is up to 6000N. For electromagnetic field and dynamic analysis, finite element method (FEM) is implemented to predict motor performance. Various design parameters are considered to reduce thrust ripple and to improve dynamic performance with the least sacrifice of effective thrust. Experimental results on thrust and static stiffness are also followed to confirmed the validity of the analysis.

Key Words : Linear motor(리니어모터), Machine tool(공작기계), Thrust(추력), Thrust ripple (추력 리플)
Iron core(철심), Permanent magnet(영구자석), Detent force(디텐트력), FEM(유한요소법)

1. 서론

최근 들어 고속·정밀 가공에 대한 관심이 높아지면서 고속·고정도를 얻기 위해 기존의 서보모터와 볼나사와 같은 변환장치를 사용하지 않고 직접 구동에 의한 직선 운동이 가능한 리니어모터로 대체하기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 리니어모터는 백래쉬가 없고, 마찰이 적으며, 속도 및 가속도가 높고 스트로크의 구애를 받지 않으면서도 한 축에 다수의 이동자를 탑재하여 다양한 구동이 가능한 유니트를 구성할 수 있다는 등의 장점을 제공한다. 국내에서는 반도체 장비 등 일부에서 반송용으로 적용되고 있으나, 공작기계에 적용하여 실

용화한 사례는 찾아볼 수가 없다. 공작기계에 적용하기 위해서는 고강성 및 고추력과 아울러 발열에 의한 정도 열화 방지, 절삭 칩과 같은 외부 이물질 배제 및 전원 공급 차단시 이동자의 자연 낙하 방지 등 가혹한 운전 조건에 대한 대책이 요구된다.⁽¹⁻²⁾

본 연구에서는, 공작기계 이송계용 리니어모터의 고추력, 저추력 리플을 실현하기 위해 유한요소법을 통한 전자기장 해석을 하였으며, 동적인 상태의 특성을 검토하기 위해 동특성 해석을 수행하였다. 끝으로 실제 시제품을 제작하여 성능 평가를 실시한 후 일부 성능 사양에 대하여 이론 해석과 실험의 결과를 비교하였다.

접수 2002년 1월 10일
* 삼익LMS 기술연구소
** 경북대학교 기계공학과

2. 공작기계용 리니어모터 특성해석

2.1 설계사양

큰 부하를 가지는 공작기계용 리니어모터를 적용하여 고속, 고가감속 운동 및 높은 위치 정도를 얻기 위해서는 운동방향으로의 힘인 추력이 가감속시 부하 관성을 이겨낼 수 있도록 충분히 커야 한다. 또한 안정적인 정속 운전과 위치 결정 정도 향상을 위해 추력 리플 및 디텐트력의 특성을 해석하고 설계시 고려해야 한다. 본 연구에서 개발하고자 하는 리니어모터는 철심형 리니어 직류 모터 (Iron core type linear DC motor, 이하 “철심형 LDM”)로서, 목표하는 정격 추력은 6,000N이며 상세 설계 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specifications of LDM

Property		Value	Unit	
Primary	Number of slots	74	-	
	Number of poles	24	-	
	Core material	S18	-	
	Conductors/slot	131	-	
	Core height	10.0	mm	
	Number of phase	3	-	
	Width	220.0	mm	
Secondary	Permanent magnet	Material	Nd-Fe-B	-
		Remanence	1.33	T
		Width	24.0	mm
		Thickness	5.0	mm
	Length	50.0	mm	
	Material of back iron	S45C	-	
Width	220.0	mm		
Air gap length		0.5	mm	
Driving type		Square wave	-	

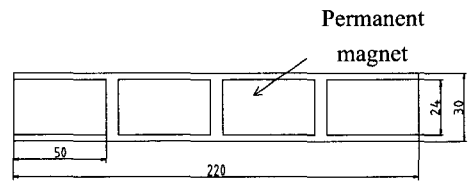
2.2 구형과 구동방식 전동기 특성해석

철심형 LDM이 구형과 구동 방식의 경우에 대하여 영구자석 배열, 슬롯당 도체수 변화, 슬롯의 깊이(슬롯의 단면적) 변화, 코어의 높이에 따른 특성 등의 해석을 수행하였으며, 영구자석 배열에 따른 디텐트력 특성에 대해서도 알아보았다.

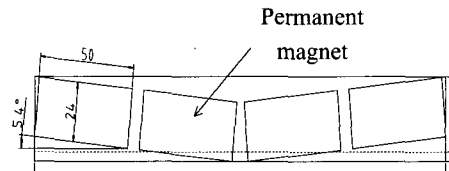
2.2.1 영구자석 배열에 따른 특성해석

영구자석을 이용한 철심형 LDM에서 영구자석과 슬롯 사이에 발생하는 디텐트력은 발생 추력의 리플로 작용하며 진동, 소음 및 위치 정도 열화의 원인이 된다. 신뢰성을 가진 리니어모터 설계에 있어서 변위에 따라 일정한 추력을 유지할 수 있도록 하는 것이 무엇보다 필요하다. 철심형 리니어모터의 경우 철심과 영구자석 사이에는 추력의 약 5~10배 정도에 해당하는 흡인력인 수직력(Normal force)이 작용하며, 철심 치형 및 영구자석의 형상에 의해 발생하는 불안정한 힘인 디텐트력은 추력 리플에 큰 영향을 미치게 된다.⁽³⁻⁴⁾

추력 리플을 저감시키는 방법으로 철심 치형의 슬롯 개구폭 조정, 영구자석 배열에 스큐(Skew) 부여와 자석 형상 변경 등이 주로 사용 되어진다. 일반적으로는 영구자석을 경사지게 배열하는 스큐 방식이 많이 사용되는데⁽⁵⁾, 본 연구에서도 취부의 용이성을 고려하여 영구자석을 V자 형상으로 스큐 배열하는 구조를 채택하였다. 스큐 각은 추력 리플이 최소가 되는 1 슬롯 피치 스큐(One slot pitch skew, 이하 “스큐(가) 있는”)를 적용하였는데, 코어의 1 슬롯 피치가 10mm 임으로 스큐 각은 기하학적으로 5.4°가 된다. Fig. 1에서와 같이 영구자석 4개를 스큐 없이 일렬로 형태와 영구자석이 2개씩 스큐 있는 경우에 대해서 발생 추력의 양상과 그 크기를 비교하였다.



(a) Non-skew



(b) One slot pitch skew (5.4° skew)

Fig. 1 Configuration of permanent magnet array

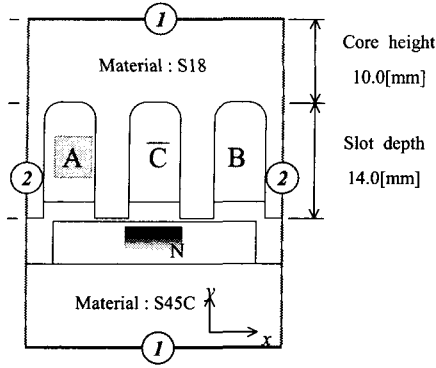


Fig. 2 FEM analysis model

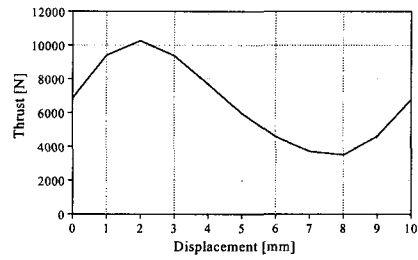
먼저, 목표 추력인 6,000N을 얻기 위한 입력 전류량을 6A, 슬롯당 도체수는 131개로 설정하였고 단부 효과는 무시하고 유한요소해석을 수행하였으며 해석 모델은 Fig. 2와 같다.

본 논문에서 사용한 유한요소해석 프로그램은 CMS Technologies, Inc.에서 제공하는 EMF (Electromagnetic field)이며, DC/AC를 소스로 하는 정자계 및 시변자계 문제, 정상상태 및 과도상태, 동특성 문제 등을 해석할 수 있다.

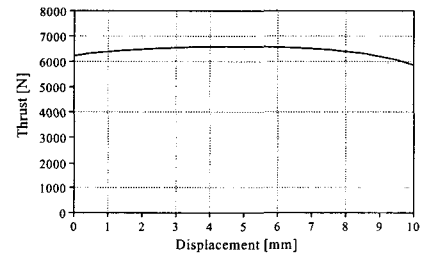
유한요소해석 모델은 크게 이동자(Primary part)와 고정자(Secondary part)와 공극(Air gap)으로 구성되며, 이동자는 S18 재질의 철심과 철심의 슬롯 사이에 삽입된 A, C, B의 전기 코일로 구성되고, 고정자는 S45C의 재질의 평판과 그 위에 부착된 영구자석으로 구성되어 있다. 유한요소해석은 반주기를 경계 영역으로 하여 수행하였으며, 영구자석 배열 방법에 따른 추력 특성은 Fig. 3과 같다. 스큐가 없는 경우는 평균 추력이 6613.6N이고 추력 리플이 크게 나타나며, 스큐가 있는 경우 평균 추력은 6422.01N으로 스큐가 없는 경우에 비해 2.8% 정도 감소되지만 추력 리플은 거의 제거할 수 있다. 이는 Table 2에서와 같이 전류를 공급하지 않은 상태에서 고정자와 이동자간에 생기는 불균형 힘인 디텐트력에서도 확인할 수 있다. 전류가 인가된 구동 상태에서도 디텐트력의 크기는 추력에 그대로 반영되므로, 추력 리플을 저감하기 위해서는 영구자석에 스큐를 부여하여 배열하는 것이 효과적임을 알 수 있다. Fig. 4는 자속밀도 분포를 보여주고 있으며, 이동자와 고정자 사이인 공극에서 최대 자속 밀도는 1.2T이다.

Table 2 Variation of detent and normal force

	Detent force[N]	Normal force[N]
Non-skew	2191.44	48984.00
5.4° skew	52.59	48268.32



(a) Non-skew array



(b) One slot pitch skew array (5.4° skew)

Fig. 3 Variation of thrust with respect to displacement

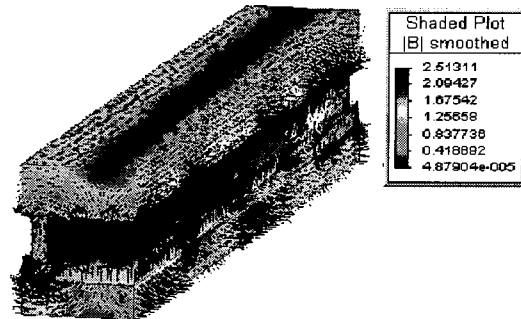
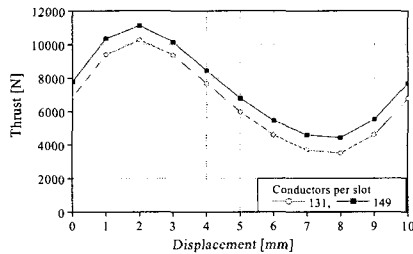


Fig. 4 Distribution of magnetic flux density of LDM (1/24 Model)

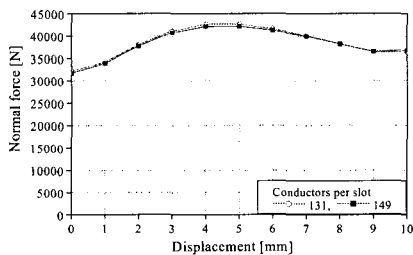
2.2.2 슬롯당 도체수 변화에 따른 특성해석

슬롯의 도체수 증가가 가능하다면 도체는 전류 밀도가 낮아져 단위 면적당 더 큰 전류를 인가할 수 있어 추력을 증가시킬 수 있다. 본 논문에서는 슬롯당 도체수를 131개와 149개의 2가지 경우에 대해 추력 특성의 변화를 분석하였다.

이동자의 단부 효과는 무시하고 철심 높이는 10mm, 입력 전류 6A의 조건하에서 스큐가 있는 경우와 스큐가 없는 경우에 대해 추력과 흡인력은 각각 Fig. 5와 Fig. 6과 같으며, 슬롯당 도체수가 증가함에 따라 추력은 증가하지만 흡인력에는 거의 변화가 없음을 확인할 수 있다. 스큐가 있는 영구자석 배열에서 도체수의 증가에 따라 발생 추력 또한 11.56% 가량 증가하였다. 따라서 슬롯당 도체수를 131에서 149로 변경할 경우 입력 전류는 약 11.56% 정도 감소된 5.3A 정도의 입력 전류로도 동일한 기자력 확보가 가능하여 6000N의 추력을 확보할 수 있으며, 이때 전류밀도는 $21.22A/mm^2$ 에서 $18.74A/mm^2$ 으로 낮아질 것으로 예상된다. 상기 해석 결과를 정리하면 Table 3과 같다.

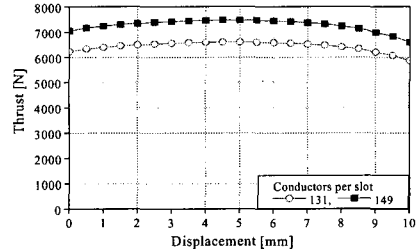


(a) Thrust

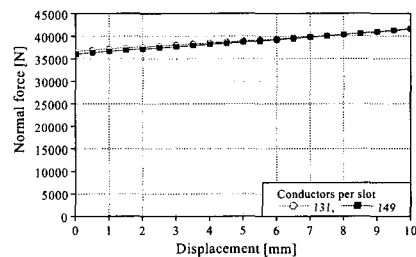


(b) Normal force

Fig. 5 Thrust and normal force of non-skew array



(a) Thrust



(b) Normal force

Fig. 6 Thrust and normal force of one slot pitch skew array (5.4° skew)

Table 3 Comparison of thrust and normal force according to number of conductors

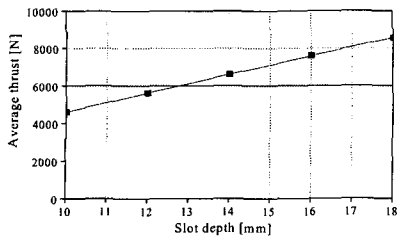
Conductors/slot	Thrust[N]		Normal force[N]	
	131	149	131	149
Non-skew	6613.60	7490.16	38523.95	38304.15
5.4° skew	6422.01	7261.21	38991.13	38763.04

2.2.3 슬롯의 깊이 변화에 따른 특성해석

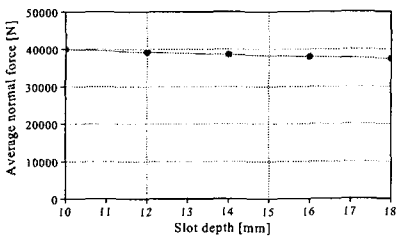
슬롯의 깊이를 증가시키면 슬롯당 도체수는 슬롯 단면적의 증가에 비례하여 증가하고, 상대적으로 철심의 높이는 감소하여 자속밀도가 높아진다. 철심의 높이가 감소함에 따른 자속밀도의 변화를 고려하였으며, Table 4의 5가지 경우에 대한 평균 추력과 수직력을 Fig. 7에 나타내었다.

Table 4 Variation of slot depth

Slot depth[mm]	10	12	14	16	18
Core height[mm]	14	12	10	8	6
Conductors	87	109	131	153	175



(a) Average thrust



(b) Average normal force

Fig. 7 Average thrust and normal force according to slot depths

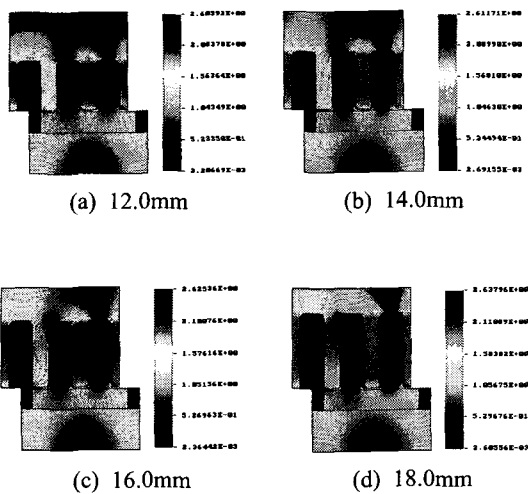


Fig. 8 Distribution of equi-potential and energy density according to slot depths

결과에서 나타난 바와 같이 슬롯의 깊이가 깊어짐에 따라 추력 특성도 거의 비례하여 증가하므로 요크 부분의 포화가 심하게 발생하지 않음을 알

수 있다. 실제 Fig. 8에서와 같이 등포텐셜 분포 및 에너지 밀도 분포에서도 코어의 높이가 감소함에 따라 자속밀도가 조금씩 증가하고 있음을 보여주는데, 최대 슬롯 깊이가 18mm일 경우에 코어의 높이가 6.0mm 정도 감소하지만 코어 부분의 포화는 그다지 심하지 않음을 알 수 있다. 그러나 도체수가 많으면 코일의 제작이 어려워지고 조립에 있어서도 간섭이 생기므로 본 연구 모델에서는 슬롯 깊이를 14mm를 선정하였다.

2.3 동특성 해석

리니어모터는 전기에너지가 기계적 운동에너지로 직접 변환되기 때문에 동특성이 시스템의 성능을 결정하게 된다. 본 논문에서는 전압방정식과 기계 운동방정식을 연립을 통해 시간에 대한 속도 관계식을 유도하여 추력 및 속도, 가속도, 전류, 전압 등의 동특성 평가를 실시하였다.

2.3.1 모델링

과도상태의 거동을 해석하기 위해서는 인덕턴스 및 역기전력을 고려한 전압방정식과 기계 운동방정식으로부터 해석이 필요하며 전압방정식과 기계 운동방정식은 각각 식 (1), (2)와 같다.

$$V(t) = R \cdot i(t) + L \frac{di(t)}{dt} + K_e \cdot v(t) \quad (1)$$

$$F(t) = K_f \cdot i(t) = M \frac{dv(t)}{dt} + D \cdot v(t) + F_l \quad (2)$$

여기서,

- R :상당 저항
- L :상당 인덕턴스
- K_e :역기전력 상수
- K_f :추력 상수
- $v(t)$:속도
- $\frac{dv}{dt}$:가속도
- M :부하 질량
- D :마찰계수
- F_l :이송방향 외력
- i :인가 전류

(1)식과 (2)식에서 시간에 대한 전류방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$I = \frac{M}{K_f} \frac{dv(t)}{dt} + \frac{D}{K_f} v(t) + \frac{F_l}{K_f} \quad (3)$$

(3)식으로부터 전류를 구할 수 있고, 전류 변화량으로부터 (1)식을 사용하여 시간에 대한 속도방정식을 구하면 (4)식과 같이 표현된다.

$$v(t) = \frac{H}{(H-1)} Ae^{m_1 t} + \frac{1}{(1-H)} Ae^{m_2 t} - A \quad (4)$$

여기서,

$$A = \frac{K_f R - K_f V}{DR + K_f K_e}, \quad B = \frac{DR}{LM} + \frac{K_f K_e}{LM}$$

$$C = \frac{D}{M} + \frac{R}{L}, \quad H = \frac{m_2}{m_1}$$

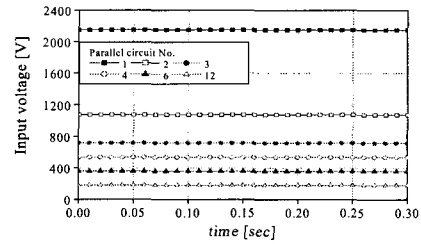
$$m_1 = \frac{-C + \sqrt{C^2 - 4B}}{2}, \quad m_2 = \frac{-C - \sqrt{C^2 - 4B}}{2}$$

2.3.2 동특성 해석 결과

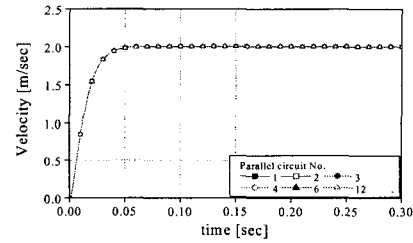
앞서 유도한 특성식을 사용하여 설계 목표인 속도 2m/s와 가속도 20m/s² (2G)을 얻기 위해 산정한 인자들은 Table 5와 같다. 이동자 내부의 코일 배선은 병렬 회로수를 변경하면서 시간에 대한 동특성 해석을 실시한 결과, 목표 속도와 가속도를 얻기 위한 전류와 전압의 전기적 사양을 Fig. 9와 같이 얻을 수 있었다. 여기서 추력 상수는 영구자석을 스쿠 배열하고, 코일의 병렬수가 1, 즉 상당 12개의 코일이 직렬로 연결된 상태에서 계산되었다. 입력 전류 6.0A에 대한 평균 발생 추력이 6422.01N이므로, 추력 상수 및 역기전력 상수는 1070.34N/A가 된다.

Fig. 9 (b)의 속도 특성 선도는 0.1sec 이내에 정격 속도인 2.0m/s에 도달하여 정속 운전을 가능함을 보여 준다. 동일 인가 전압 조건에서 병렬 회로

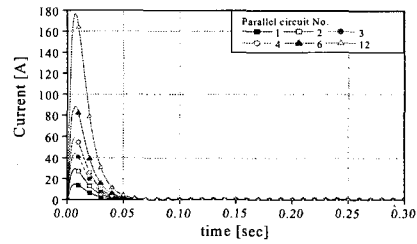
수에 따라 입력되는 전압은 감소하는 반면 전류값은 증가하여 추력은 동일함을 알 수 있으며, 이러한 구동 특성을 실현하기 위한 최대 전압, 전류로부터 드라이버의 용량이 약 32kVA 정도임을 알 수 있다.



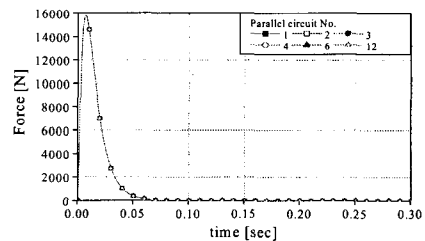
(a) Voltage (line to line)



(b) Velocity



(c) Current (line to line)



(d) Thrust

Table 5 Parameters for dynamic characteristic analysis

Item	Symbol	Value[Unit]
Resistance	R	54.864[Ω]
Inductance	L	167.4[mH]
Back-EMF	K_e	1070.34[V/m/sec]
Thrust factor	K_f	1070.34[N/A]
Pay load	M	1500[N]
Friction coefficient	D	0.1
Axal force	F_t	0[N]
Number of parallel	-	1

Fig. 9 Dynamic characteristics of LDM

3. 성능시험 및 분석

3.1 시제품 제작

상기 이론 해석 결과와 제작성을 고려하여 Table 1과 같은 사양으로 동작기계용 고추력 리니어모터는 제작하였다. 고정자는 Fig. 10과 같이 영구자석이 5.4° 스큐되어 있는 구조를 취하고 있다. 이동자의 코일 배선은 병렬 회로수가 4이고, 코일 발열에 대한 대책으로 이중의 냉각 배관 구조로 제작되어 있으며, Fig. 11은 완성된 이동자를 보여주고 있다. 리니어모터를 직선운동 가이드와 센서 등을 부착하여 이송계 형태로 제작한 최종 시제품은 Fig. 12와 같다.

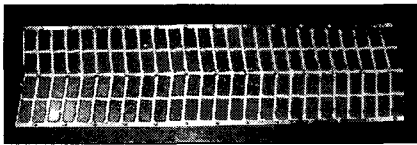


Fig. 10 Secondary part

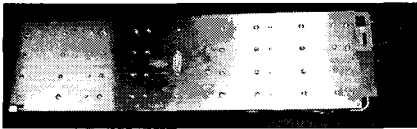


Fig. 11 Primary part

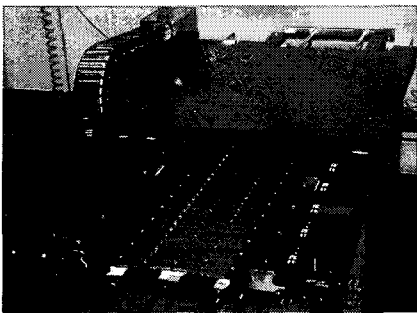


Fig. 12 Configuration of prototype

3.2 성능평가

제작된 시제품에 대하여 속도, 가속도, 위치 결정 정도는 Laser interferometer로 측정하였고, 추력과 강성은 Load cell과 변위 센서를 이용하여 측정하였으며, 구동에는 3상 220V 입력, 정격 전류

50A, 최대 전류 150A급의 3상 PWM 전류 제어 방식의 드라이버가 사용되었다. 본 연구의 목표는 동작기계용 고추력 리니어모터 개발이므로 본 논문에서는 추력 특성에 대한 결과만 비교 검토하였다. 개발 목표 사양인 정격 추력 6000N에 대한 검증은 보유하고 있는 정전류 공급 장치인 직류 전원 공급기의 용량이 충분하지 못하여 목표 하는 정격 전류까지 인가하여 실험하지는 못하였다. 그러나 추력 특성의 선형성을 근거한 추력 상수 비교를 통해 목표 추력 달성과 이론 해석의 신뢰성 검증은 가능하다.

발열에 의한 실험 오차를 배제하기 위해 이동자를 수냉으로 냉각하면서 가능한 한 짧은 시간에 전류를 인가하여 추력값을 측정하였다. 선간 인가 전류에 의한 추력 측정 결과는 Fig. 13과 같으며, 결과에서와 같이 V-U, W-V, W-U 선간의 추력 상수의 평균은 263.88N/A가 된다. 이론 해석의 결과는 2.3.2항의 결과에서와 같이 1070.34N/A이며, 병렬 회로수가 4인 경우에는 267.58N/A가 되어 오차는 1.4%로 비교적 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.

외력과 외력에 대한 이동자 변위량과의 비로 정의 되는 정강성은 Fig. 14에서와 같이 559.4N/μm으로 측정되었다.

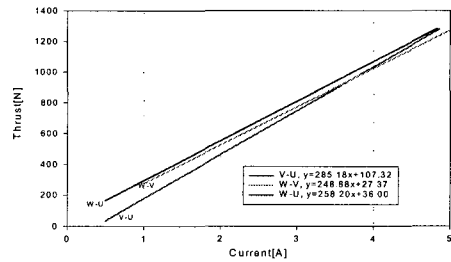


Fig. 13 Thrust according to input current

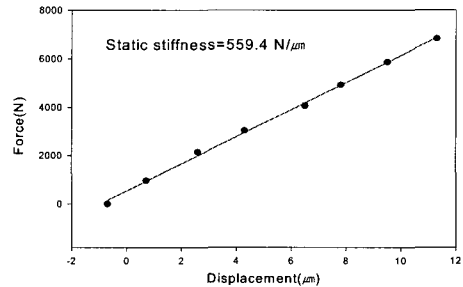


Fig. 14 Static stiffness

4. 결론

본 연구에서는 공작기계용 고추력 리니어모터 개발을 위해 유한요소법을 이용하여 이론 해석을 하였으며 제시된 설계 사양과 제작성을 고려하여 시작품을 제작한 후 성능 평가를 실시하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 영구자석의 배열에 따라 디텐트력이 크게 차이가 나며 이는 전류 인가시에도 그 영향이 그대로 반영된다. 스큐가 있는 경우가 없는 경우에 비해 발생 추력은 약 2.8% 감소하지만 디텐트력은 거의 제거할 수 있었다.

둘째, 슬롯당 도체수의 변화와 슬롯의 깊이 변화에 따른 특성 해석에서, 코어부의 자기 포화가 그다지 심하지 않아 슬롯당 도체수를 87, 109, 131, 153, 175개로 증가하여도 추력이 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다.

셋째, 동특성 해석을 통하여 최대속도 2m/s와 최대 가속도 20m/s²의 실현 가능성 및 코일의 병렬 회로수의 변화에 따른 특성을 통하여, 제시된 구동 특성을 실현하기 위한 드라이버의 최대 용량이 32kVA이고, 병렬 회로수가 1인 경우의 추력 상수는 1070.34N/A임을 알 수 있었다.

넷째, 실험으로 얻어진 추력 상수와 이론 해석의 결과를 비교하면 각각 263.88N/A와 267.58N/A로 오차는 1.4% 정도이며 해석의 결과가 신뢰성이 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 '99중기거점기술개발사업의 "고속지능형가공시스템 개발" 과제로 수행되었다.

참고문헌

1. Syed A. Nasar, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications," Prentice-Hall, Inc., 1987.
2. Amitava Basak, "Permanent-Magnet DC Linear Motors," Clarendon Press, 1996.
3. P. Van Den Bramembussche, "Accurate Tracking Control Of Linear Synchronous Motor Machine

Tool Axes," Mechatronics Vol. 6, No. 5, pp. 507-521, 1996.

4. E. Favre, L. Cardoletti and M. Jufer, "Permanent-magnet Synchronous Motors: A Comprehensive Approach to Cogging Torque Suppression," IEEE Trans. Ind. Applic, Vol. 29, pp. 1141-1149, 1993.
5. JAIME DE LA REE and NADY BOULES, "Torque Production in Permanent-Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. Ind. Applic, Vol. 25, pp. 107-112, 1989.