

공작기계용 고출력 리니어모터 개발 II

정재한⁺, 박재한^{*}, 정시욱⁺

Development of High Thrust Linear Motor for Machine Tool II

J. H. Joung⁺, J. H. Park^{*} and S. U. Joung⁺

Abstract

Due to various advantages over the conventional linear motion device such as ball-screw, linear motors have been used in wide variety of industrial applications for years. Driven by increased demand for precision machine tools, the importance of high positioning accuracy, high stiffness and high thrust are greatly increasing. The merits of linear motor are high speed, high acceleration and good positioning accuracy. In addition, Linear motor for high quality machine tool call for high thrust, high stiffness. In this paper, thrust ripple, detent force and thermal behavior are considered for the development of high performance linear motor whose thrust is up to 1,900N. This paper presents a comprehensive study for an iron core type linear motor characteristics that include the influence of PM position on thrust, thrust ripple by detent force and motor dynamics as well.

Key Words : Linear DC Motor(리니어 직류 모터, LDM), Machine Tool(공작기계), Thrust(추력), Thrust Ripple(추력 리플), Iron Core(철심), Permanent Magnet(영구자석), Detent Force(디텐트력)

1. 서론

공작기계, 반도체 장비 및 자동화 분야에서의 고속, 초정밀, 고추력 이송장치의 필요성이 증대됨에 따라 기존의 볼나사를 대체하는 리니어모터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 기구학적 변환 장치를 사용하지 않는 리니어모터의 직접 구동 방식은 기존의 볼나사 방식의 단점 극복을 가능케 했을 뿐만 아니라, 가속도, 속도에 있어서 우수한 동특성을 가지며, 스트로크에 제약이 없고, 동일 고정자에 다수의 이동자를 부착하여 다양한 구동이 가능한 유니트를 구성할 수 있다는 등의 장점을 제공한다.

현재 국내에서는 반도체 장비 등에 소형의 리니어모터 적용을 통한 도입 단계에 있으나, 고추력, 고강성이 요구되는 공작기계에까지 적용되지 못하고 있는 실정이다.

공작기계의 가혹한 사용 환경에서의 원활한 동작을 위해서는 방열, 이물질 배제, 외부 충격 방지등과 같은 많은 사항이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 공작기계용 리니어모터를 설계하기 위해 전자기적, 기계적 특성에 관련된 설계 변수를 선정하고 해석, 설계하였다. 또한 설계된 시제품을 제작하여 위치정밀도와 반복능, 미소이송분해능, 역기전력 및 디텐트력을 측정하는 성능평가를 실시하였다.

* 박재한, 삼익LMS주식회사 기술연구소(hans@samicklms.co.kr)

주소: 704-900 대구광역시 달서구 갈산동 100-76

+ 삼익LMS주식회사 기술연구소

2. 고추력 리니어모터 특성해석

2.1 설계사양

공작기계에 리니어모터를 적용하여 고속, 고가속 운동 및 고위치정도를 얻기 위해서는 운동방향으로의 힘인 추력이 가감속시 이송부하의 관성을 이겨낼 수 있도록 충분히 큰 값을 가져야 하는 동시에 소형의 크기가 요구된다. 아울러, 안정된 운전 및 위치결정정도 향상 및 정지 위치에서의 고강성을 위해 추력리플 및 디텐트력의 분포특성 등을 FEM 해석을 통해서 설계에 반영하였다. 제작하고자 하는 리니어모터의 종류는 철심형 리니어직류모터(Iron Core type Linear DC Motor)로써, 기존 시제품과 권선사양을 집중권으로 변경하였다.

철심의 치 한 개당 한 상의 권선이 시행되어 있으며 한 슬롯에는 2상의 권선이 반대인 권선 방향으로 시행되어 있다. 이와 같은 집중권선법은 분포권선법에 비해 적용 코일이 한가지로 구성되므로 제작비용을 절감할 수 있고, 제작성이 용이해진다. 전기적으로는 엔드코일의 길이 저감에 따른 권선 저항 저감을 통한 효율 상승효과와 엔드코일 누설저감 효과가 있다. 또 임피던스 저감에 따른 가속도와 속도의 증가를 가져오고, 동일전압에서 출력상승 효과를 기대할 수 있는 장점이 있다.

Table 1 Design Parameter

구 분		값	단위
이 동 자	슬롯수	12	
	극수	16	
	재질	S18	
	슬롯당 도체수	115	
	요크 두께	9.0	[mm]
	상수	3	
	적층폭	145.0	[mm]
고 정 자	영구 자석	종류	Nd-Fe-B
		잔류자속밀도	1.36 [T]
		폭	26.0 [mm]
		두께	6.0 [mm]
		길이	70.0 [mm]
	재질	S45C	
	폭	145.0 [mm]	
자기 공극	1.5	[mm]	

그러나 정현파 구동을 할 경우, 분포권선에 비해 역기전력의 파형이 정현적이지 못하며 고조파에 의한 토크 리플 및 소음, 진동을 증가 시킬 수 있는 단점도 있다.

실제 공작기계업체의 적용사양을 만족하는 정격추력 사양 1,900 N의 시제품으로서 설계 사양은 Table 1과 같다.

2.2 추력 특성

먼저, 목표 추력인 1,900 N을 얻기 위한 입력전류량을 결정하기 위한 FEM 해석 모델은 Fig. 1과 같이 경계조건(1: 고정경계, 2:주기경계조건)을 주었고, 해석시 단부효과 및 영구자석 Skew는 무시하였다.

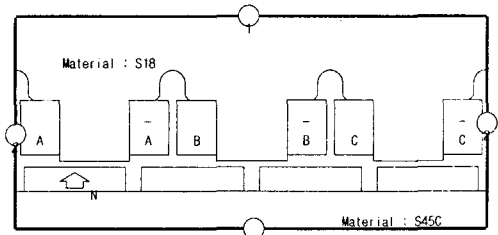


Fig. 1 FEM Model

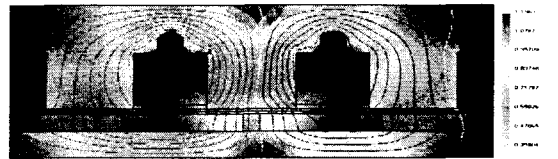


Fig. 2 Distribution of Equi-Potential & Flux Density

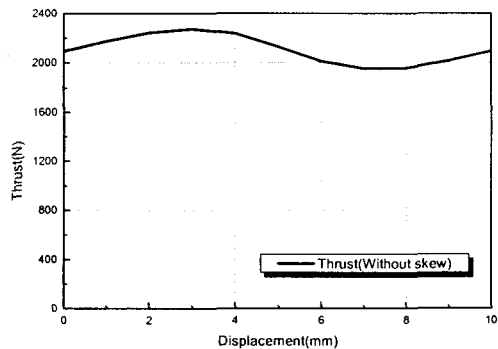


Fig. 3 Thrust Distribution(Non-Skew)

자기공극 1.5 mm에서 1,900 N을 얻기 위한 입력전류량은 코일당 9.34 A로 나타났다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 자속이 포화되는 영역은 없는 것으로 나타났다. 영구자석 Skew가 없는 경우에 대한 추력의 특성을 변위에 따라 나타내면 Fig. 3과 같다.

2.3 추력리플의 최소화

추력리플을 저감시키는 방법으로 주로 철심 치형의 슬롯 개구폭 조정, 영구자석에 Skew 부여, 자석형상 변형 등이 주로 사용되어진다. 본 해석에서는 영구자석에 Skew를 주고 배치하는 방법을 사용하여 추력리플을 없애는 방법을 연구하여 Fig. 4와 같은 영구자석 배치 형상을 최적값으로 선택하게 되었다.

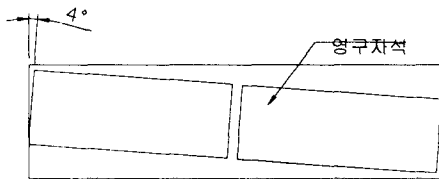


Fig. 4 Permanent Magnet Array

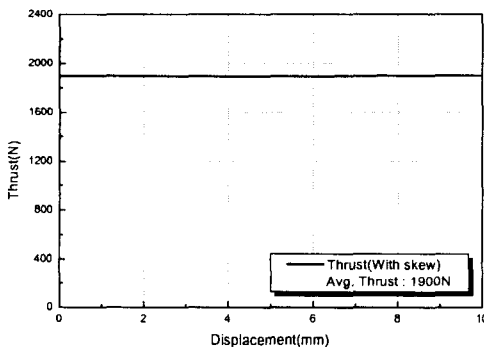


Fig. 5 Thrust Distribution(4°-skew)

Fig. 5는 영구자석을 4° Skew 시켰을 때의 추력변화값을 나타낸 것으로 추력리플은 3%이내이다. 평균 추력 1900 N에 대하여 추력상수는 193.08 N/A로 계산되었다.

2.4 수직력 및 디텐트력 특성

전류를 인가하지 않을 경우 이동자와 고정자 사이에 발생하는 디텐트력은 Fig. 6과 같이 나타나며, 이 결과로부터 디

텐트력은 영구자석에 Skew를 부여하지 않은 경우 최대 161N까지 나타났으나 4° Skew를 부여하여, 디텐트력을 0 N에 가깝게 제거됨을 알 수 있었다.

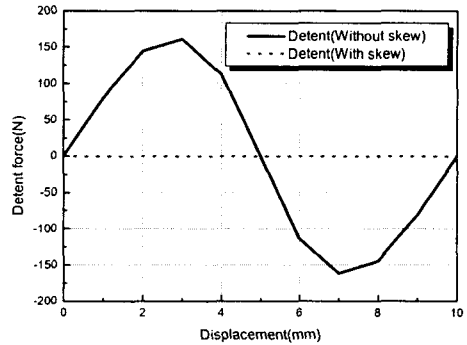


Fig. 6 Comparison of Detent Force

이동자와 고정자 사이의 자기 수직력은 Fig. 7과 같이 나타난다. 수직력의 경우도 Skew가 없는 경우 최대치와 최소치의 차이가 263.5 N에서 Skew를 부여한 후 수직력의 리플 역시 제거되었음을 확인할 수 있었다.

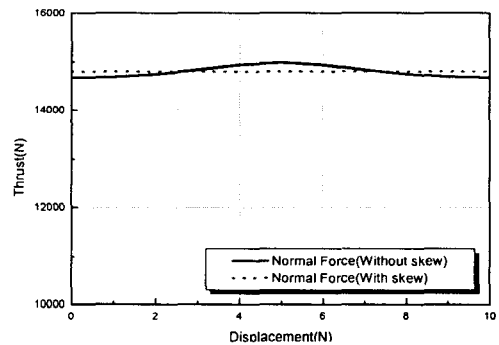


Fig. 7 Comparison of Normal Force

3. 방열 특성해석

3.1 방열 모델링 및 해석

앞서 전자장해석을 통해 설계한 모델의 이동자부분에 대한 방열해석을 실시하였다. 본 방열해석은 모든 입력 전류가 코일부에서 발열한다고 가정하였으며 이동자 폭 방향의 온도변화는 일정한 것으로 가정하고 2차원 해석을 실시하였다. Fig.8에 이동자 부위의 해석모델을 제시하였다. 코일

부위의 냉각배관을 통해 강제냉각(수냉)이 이루어진다. 실제 공작기계에 장착되는 이동자는 상면이 이송체와 접촉하게 되어 열전도가 이루어지지만 재질이나 열전도체의 크기를 확인 할 수 없으므로 모든 면이 공기에 의한 자연대류가 이루어지는 것으로 가정하였다.

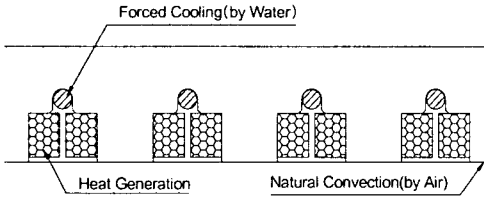


Fig. 8 Heat Analysis Model

방열해석의 결과를 Fig.9에 나타내었다. 냉각수 유량이 5 l/min.이고, 코일당 전류 9.34A를 2상 인가시 최대 온도는 코일부에서 59.6℃로 나타났다.

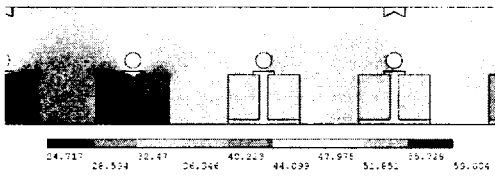


Fig. 9 Distribution of Temperature

4. 속도/추력 특성해석

4.1 동특성 모델링

설계, 제작할 리니어모터와 적용 드라이버를 선정했을 때, 제작 후 실험을 실시하기 이전에 이론적으로 계산한 리니어모터의 역기전력상수 값과 드라이버의 최대 전압, 전류 값을 이용하여 요구 직류링크전압(Vdc)과 추력-속도 선도를 구할 수 있다. 동기좌표계에서 리니어모터의 전압방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ds}^e = r_s i_{ds}^e + L_s \frac{di_{ds}^e}{dt} - \frac{\pi}{\tau} VL_s i_{ds}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + L_s \frac{di_{qs}^e}{dt} + \frac{\pi}{\tau} VL_s i_{ds}^e + \frac{\pi}{\tau} V\lambda_{PM} \quad (2)$$

v_{ds}^e, v_{qs}^e [V] : 동기좌표계 d, q축 전압

i_{ds}^e, i_{qs}^e [A] : 동기좌표계. d, q축 전류

r_s [Ω] : 코일 저항

L_s [H] : 코일 인덕턴스

τ [m] : 자극주기

V [m/s] : 이송 속도

λ_{PM} [Wb] : 영구자석에 의해 유지된 자속

일정 추력 영역에서 단위 전류당 최대 추력을 얻기 위해, d축 전류는 '0'으로 제어되고, 정상상태에서 q축 전류의 변화가 미미하다고 가정하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_{ds}^e = -\frac{\pi}{\tau} VL_s i_{ds}^e \quad (3)$$

$$v_{qs}^e = r_s i_{qs}^e + \frac{\pi}{\tau} V\lambda_{PM} = r_s i_{qs}^e + \frac{2}{3} VK_f \quad (4)$$

위 식에서 다음의 추력상수 조건을 사용하였다.

$$K_f = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} \quad (5)$$

따라서, 자극주기, 이송 속도, 부하, 저항, 인덕턴스 및 추력상수로 정상상태에서 리니어모터의 상전압을 계산할 수 있다.

공간 전압 PWM방식을 사용할 경우, 선형적으로 얻을 수 있는 최대 상전압은 $V_{dc} / \sqrt{3}$ 으로 주어지고, 모터를 제어하기 위해서는 인버터에서 출력할 수 있는 상전압이 모터의 상전압보다 커야 하므로 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

$$\frac{V_{dc}}{\sqrt{3}} \geq V_s = \sqrt{v_{ds}^e{}^2 + v_{qs}^e{}^2} \quad (6)$$

실제로는 원활한 전류제어를 위해서는, 인버터에서 출력할 수 있는 인버터 출력 상전압이 리니어모터의 역기전력과 임피던스 강하를 고려한 상전압보다 어느 정도 여유가 있어야 한다. 아울러, 스위칭 소자의 데드타임으로 인하여 출력 전압에 손실이 발생한다. 그러므로, 이 제어 여유분은 최소 10% 이상, 보통 20% 이상이 되는 것이 타당하다.

상전압 최대값 기준 역기전력 상수는 다음과 같다.

$$K_{e \text{ phase peak}} = \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} \quad (7)$$

$$K_f = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} = \frac{3}{2} K_{e \text{ phase peak}} \quad (8)$$

선간전압과 상전압의 관계를 적용하면 다음의 관계가 성립된다.

$$K_f = \frac{3}{2} \frac{\pi}{\tau} \lambda_{PM} = \frac{3}{2} K_e \text{ phase peak} \quad (9)$$

$$= \frac{3}{2} \frac{K_e \text{ line to line peak}}{\sqrt{3}}$$

4.2 동특성 해석

Vdc 계산식을 이용하여 5 kW 신규개발 드라이버를 적용하였을 때 추력—속도선도를 Fig. 10과 같이 나타내었다.

Table 2 직류링크전압 계산

항 목	단위	정격추력 기준	최대추력 기준
상저항(Rs)	Ω	0.3	0.3
인덕턴스(Ls)	mH	3.97	3.97
역기전력상수(Ke)	V/m/s	58.72	58.72
인가전류(Ir)	A/coil	37.36	94.4
속도(V)	m/s	3.0	2.5
Vdc	V	242.27	296.15
발생추력(F)	N	1900	4750

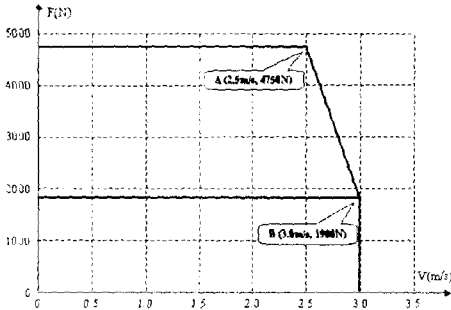


Fig. 10 1,900N급 시제품 F-V선도

정격추력 발생시의 속도값과 최대추력 발생시의 속도값의 계산값을 Table 2에 나타내었다. Fig. 10에서 점 B는 정격 전류를 인가하여 정격추력 1,900 N을 발생시키면서 리니어모터가 움직일 수 있는 최고 속도점이며, 점 A는 최대 인가 전류(정격의 250%)를 인가하여 최대추력 4,750 N을 발생시키면서 움직일 수 있는 최고 속도점을 나타낸다. 이때 Table 2에서 계산된 직류링크전압은 제어여분을 위해 20%의 여유를 둔 것이다.

5. 시제품 제작 및 성능평가

5.1 시제품의 제작

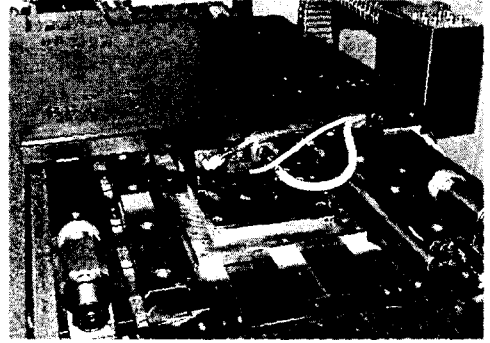


Fig. 11 Photograph of Prototype

앞에서 해석한 내용을 기준으로 해서 정격추력 1,900 N의 리니어모터를 설계하였다. 새롭게 적용된 집중권 형태의 코일배치는 제작공정은 단순화되었고, 제작시간이 30% 이상 절감되었다. 시제품의 두께를 줄이기 위해 단층 냉각구조를 채택하였으나 냉각배관의 위치를 발열부인 모터코일과 가깝게 배치하여 냉각효율을 향상 시켰다. 고정자의 경우 칩, 절삭유 등으로부터 영구자석을 보호하고 불순물 배출의 편의성을 위해 에폭시코팅을 실시하였다. Fig. 11은 전용유닛에 장착된 시제품을 보여주고 있다.

5.2 위치결정정도

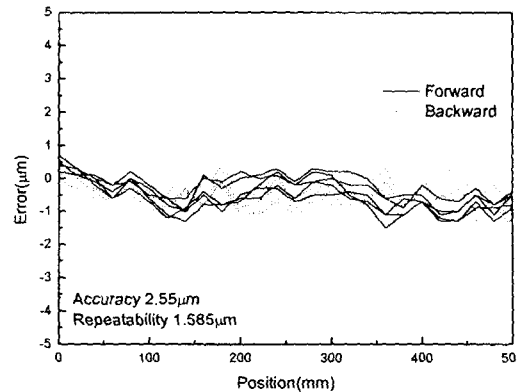


Fig. 12 Position accuracy and repeatability

Fig. 12에 위치결정정도와 반복능을 평가한 결과를 보였다. ISO 230-2규격에 따라 실험을 실시하였으며, 피치오차 보정을 실시한 상태이며 위치결정정도가 $2.55 \mu\text{m}$, 반복능이 $1.585 \mu\text{m} (= \pm 0.793 \mu\text{m})$ 로 나타남을 보여준다. 반복능은 개발목표사양인 $\pm 1.0 \mu\text{m}$ 을 초과 달성하였다.

5.2 미소이송분해능

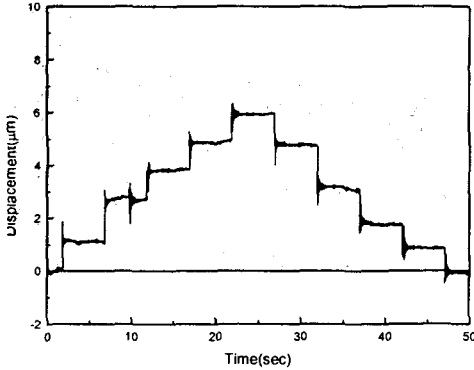


Fig. 13 Infinitesimal motion accuracy

레이저간섭계로 미소이송분해능 실험을 한 결과가 Fig. 13에 나타나 있다. 이송계에 부착되어 있는 리니어스케일의 최소분해능이 $1 \mu\text{m}$ 인 것을 감안하면 $1 \mu\text{m}$ 의 스텝에 대해서도 계단이 선명하게 보이므로 이송계의 최소분해능은 위치검출의 최소단위인 $1 \mu\text{m}$ 까지 가능하다고 할 수 있다.

5.3 디텐트력 및 역기전력 특성

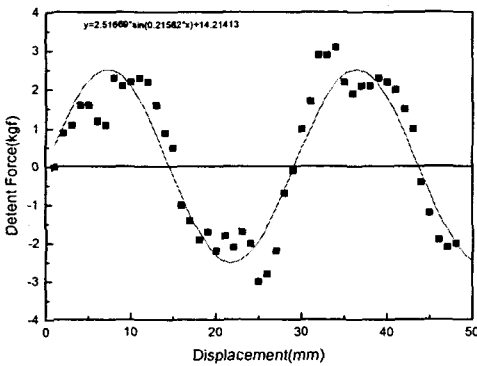


Fig. 14 Detent Force

디텐트력은 철심형 리니어모터의 특징으로 이동자 철심과 고정자 자석간의 자기인력으로 발생하는 자기회로 불균형에 의해 발생하는 힘이다. Fig. 14에서 디텐트력 주기는 크게 나타나지 않고 있고, 최대값이 2.5 kgf 정도임을 보여 주는데 가이드 설치향, 진직도의 영향으로 다소 크게 나온 것으로 보인다. 이는 저속에서의 정속주행이 중요한 경우 반드시 고려해야 할 사항이라고 볼 수 있다. 또한 30 mm 의 주기가 보이는 것은 단부효과로 생각된다.

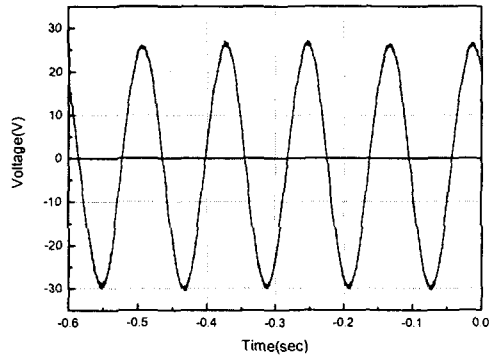


Fig. 15 Back-EMF(V = 0.5 %s)

본 시제품을 다른 독립된 구동기에 연결하여 역기전력(Back-EMF)를 측정하였다. 그 결과를 Fig. 15에 나타내었으며 그 값은 $56 \text{ Vpk}/\%s$ 로 계산되었다. 이 값은 설계단계에서 계산된 역기전력 값과 약 4.6% 의 오차를 보이고 있다.

6. 결론

공작기계 적용 테스트를 위한 고추력용 철심형 리니어모터 시제품의 해석, 설계를 통해 제작 및 성능평가를 실시하였다. 목표정격추력인 $1,900 \text{ N}$ 을 무난히 달성하였으며, 정속특성도 1% 이하로 제어를 실시하였으며, 최소분해능의 미소이송을 확인하였다. 본 시제품의 경우, 실제 공작기계 적용에 요구되는 칩 제거 및 방열부분을 반영하여 고정자 설계에 반영하였으며 이동자의 길이에 따른 세 가지 모델을 개발, 제작을 끝내고 화천기공과 성광정기에 적용 시운전을 앞두고 있다. 추후, 본격적인 Field test를 통해 단품 시운전에서 얻을 수 없는 다양한 문제점 및 보완사항을 파악하여 모터 설계 및 제어에 반영해 나가며, 또한 신뢰성 있는 상품으로 자리잡기 위해 모델의 다양화 및 내구성 확보에 주력할 예정이다.

참 고 문 헌

(1) Syed A. Nasar, 1996, "*Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications*, Prentice-Hall, Inc.

(2) J. H. Joung, J. W. Park, J. H. Park, 2002, "Development of High Thrust Linear Motor for Machine Tool(2)," *KSPE Spring Conference*, pp. 82-85

(3) S. Hwang, D. K. Lieu, 1994, "Design Techniques for Reduction of Reluctance Torque in Brushless Permanent Magnet Motors," *IEEE Trans. Magn.*, Vol. 30, no. 6, pp. 4287-4289

(4) Amitava Basak, 1996, *Permanent-Magnet DC Linear Motors*, Clarendon Press

(5) P. Van Den Bramembussche, 1996, "Accurate Tracking Control Of Linear Synchronous Motor Machine Tool Axes," *Mechatronics*, Vol. 6, No. 5, pp. 507-521