한국공작기계학회 2004 추계학술대회 논문집 pp.363~368

공작기계용 고추력 리니어모터 개발

정재한+, 박재한*, 정시욱+

Development of High Thrust Linear Motor for Machine Tool

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 accurcy. 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 10,000N. 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, Machine Tool, Thrust, Thrust Ripple, Iron Core, Permanent Magnet, Detent Force

1. 서 론

리니어모터는 회전형 모터의 기본 구조를 직선상으로 전개하여 전기에너지를 직접 직선 운동에너지로 변환하는 장치이다. 공작기계, 반도체 장비 및 자동화 분야에서의 고속, 초정밀, 고추력 이송장치의 필요성이 증대됨에 따라 기존의 볼나사를 대체하는 리니어모터에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 직접 직선형의 구동력을 발생시키므로 동력 변환장치의 부가에 따른 손실, 소음, 진동 등을 제거한다. 리니어모터의 장점으로는 백래시가 없고, 마찰이 적으며, 속도 및 가속도에 기계적 재한이 없으며, 스트로크의 구애를 받지 않고, 한 축에 복수의 가동자 탑재 등 다양한 유니트 구성이 가능하다는 점을 들 수 있다. 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 방지 등과 같은 많은 사항이 고려되어야 한다.

본 논문에서는 공작기계용 리니어모터를 설계하기 위해 전자기적, 기계적 특성에 관련된 설계 변수를 선정하고 해석, 설계하였다. 또 설계된 시제품을 제작하여 위치정밀도와 반복능, 미소이송분해능, 정격추력 및 최대추력을 측정 등 성능평가를 실시하였다.

+,* 삼익LMS주식회사 기술연구소

2. 고추력 리니어모터의 정특성 해석

2.1 설계사양

머시닝 센터나 금형가공기와 같은 일반 공작기계에서 최대추력은 주로 가감속시에 발생하며 4,000N 이상의 추력이 필요하다. 실제 선진업체의 리니어모터 제품들은 공작기계용도로 정격추력 1,200 N ~ 8,000 N까지 제품이 있으며 최대추력을 기준으로는 3,000 N ~ 20,000 N 정도라고 볼 수 있다. 이러한 사양을 만족시키면서 안정된 운전 및 위치결정정도 향상 및 정지 위치에서의 고강성을 가지도록 하기 위해 추력리플 및 디텐트력의 분포특성 등을 FEM 해석을 통해서 설계에 반영하였다. 제작하고자 하는 리니어모터의 종류는 철심형 리니어직류모터(Iron Core type Linear DC Motor)로써, 권선사양을 집중권으로 적용하였다. 철심의 치 한 개당 한 상의 권선이 시행되어 있으며 한 슬롯에는 2상의 권선이 반대인 권선방향으로 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 누설 저감 효과가 있다. 또 임피던스 저감에 따른 가속도와 속도의 증가를 가져오고, 동일전압에서 출력상승 효과를 기대할 수 있는 장점이 있다. 설계를 진행한 시제품은 정격추력 10,000 N, 최대추력 21,900 N을 낼 수 있는 사양을 목표로 설계를 진행하였다. 가동자는 기존 시제품에 적용하였던 이중냉각구조와 모터코어 위부분으로 알루미늄 플레이트를 배치하여 구성하였다. Fig. 1. 1차측 코어의 형상을 나타내었다.

설계된 시제품의 가동자 크기는 폭 270 mm, 두께 63.5 mm, 길이 1,020 mm로 유사한 성능을 내는 선진제품과 비교하였을 때 폭은 좁고, 길이가 긴 특징을 가지고 있다.

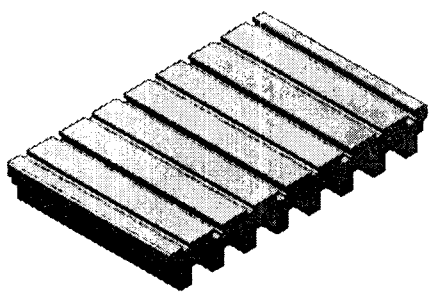


Fig. 2. Modeling of Moving Part

Table 1. Design Parameter

구 분			값	단위
가동자	슬롯수		24	-
	극수		32	-
	재질		S18	-
	슬롯당 도체수		186	-
	상수		3	-
	축방향 길이		200.0	mm
고정자	영구자석	종류	Nd-Fe-B	-
		자속밀도	1.30	T
		폭	24.0	mm
		두께	6.0	mm
		길이	45.0	mm
		스큐각	6	deg.
	재질		S45C	-
	축방향 길이		206.0	mm
기구/자기 공극			1.0/1.5	mm
구동방식			정현파 구동방식	

2.2 추력특성

먼저, 목표 추력인 10,000 N을 얻기 위한 입력전류량을 결정하기 위해 FEM 해석 모델을 구성하였는데 Fig. 2.와 같다. 해석시 단부효과 및 영구자석 Skew는 무시하였다.

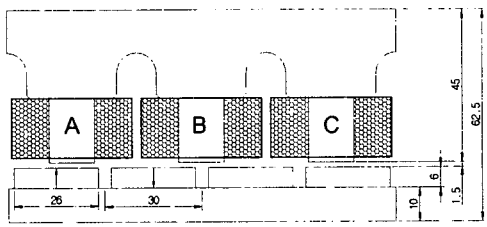


Fig. 3 FEM Model

자기공극 1.5 mm에서 10,000 N을 얻기 위한 입력전류량은 코일당 6.86 Apeak로 나타났다. Fig. 3.에 나타낸 바와 같이 자속이 포화되는 영역은 없는 것으로 나타났다. 영구자석 Skew가 없는 경우에 대한 추력의 특성을 변위에 따라 나타내면 Fig. 4-(a)와 같다. 전류를 인가하지 않을 경우 가동자와 고정자 사이에 발생하는 디텐트력은 Fig. 4-(b)와 같이 나타나며, 이 결과로부터 디텐트력은 영구자석에 Skew를 부여하지 않은 경우 최대 740N까지 나타났으나 6。 Skew를 부여하여, 디텐트력이 0 N에 가깝게 제거됨을 알 수 있었다.(Fig. 5-(a))

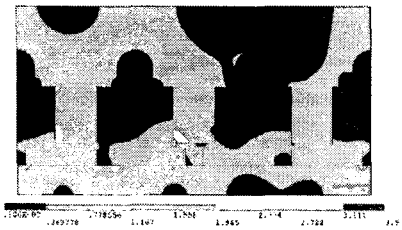
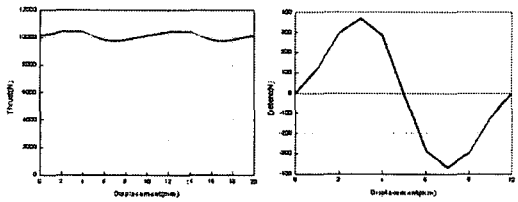
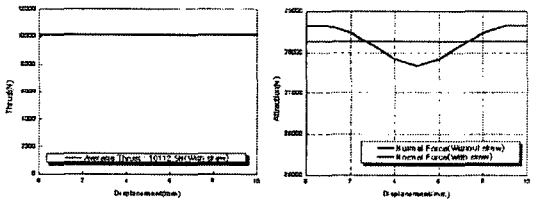


Fig. 4. Distribution of Flux Density



(a) Thrust Distribution(No Skew) (b) Detent Distribution(No Skew)

Fig. 5. A thrust characteristic(No Skew)



(a) Thrust Distribution(6° Skew) (b) Normal Force Distribution (No Skew & 6° Skew)

Fig. 6. A thrust characteristic(6。 skew)

가동자와 고정자 사이의 자기 수직력은 Fig. 5-(b)와 같이 나타난다. 수직력도 Skew가 없을 때 최대치와 최소치의 편차가 970 N에서 Skew를 부여한 후 수직력의 리플 역시 제거되었음을 확인할 수 있었다.

3. 속도/추력 특성 해석

3.1 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.

$$v^e_{ds} = r_s i^e_{ds} + L_s \frac{di^e_{ds}}{dt} - \frac{\pi}{\tau} VL_s i^e_{ds} \quad (1)$$

$$v^e_{qs} = r_s i^e_{qs} + L_s \frac{di^e_{qs}}{dt} + \frac{\pi}{\tau} VL_s i^e_{ds} + \frac{\pi}{\tau} V\lambda_{PM} \quad (2)$$

v^e_{ds} , v^e_{qs} [V] : 동기좌표계 d, q축 전압

i^e_{ds}, i^e_{qs} [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 유기된 자속

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

$$v^e_{ds} = -\frac{\pi}{\tau} VL_s i^e_{ds} \quad (3)$$

$$v^e_{qs} = r_s i^e_{qs} + \frac{\pi}{\tau} V\lambda_{PM} = r_s i^e_{qs} + \frac{2}{3} VK_f \quad (4)$$

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 Vdc / $\sqrt{3}$으로 주어지고, 모터를 제어하기 위해서는 인버터에서 출력할 수 있는 상전압이 모터의 상전압보다 커야 하므로 다음과 같은 조건이 만족되어야 한다.

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

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 출력전압에 손실이 발생한다. 그러므로, 이 제어 여분은 최소 10% 이상, 보통 20% 이상이 되는 것이 타당하다. 상전압 최대값 기준 역기전력 상수는 다음과 같다.

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

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

선간전압과 상전압의 관계를 적용하면 다음의 관계가 성립된다.

$$K_f = \frac{3}{2}\frac{\pi}{\tau}\lambda_{PM} = \frac{3}{2}K_{e\ phase\ peak} = \frac{3}{2}\frac{K_{e\ line\ to\ line\ peak}}{\sqrt{3}} \quad (9)$$

3.2 동특성 해석

Vdc 계산식을 이용하여 15 kW 신규개발 드라이버를 적용하였을 때 추력-속도선도를 Fig. 6과 같이 나타내었다. Fig. 6에서 점 B는 정격 전류를 인가하여 정격추력 10,000 N을 발생시키면서 리니어모터가 움직일 수 있는 최고 속도점이며, 점 A는 최대 인가 전류(정격의 250%)를 인가하여 최대추력 21,900 N을 발생시키면서 움직일 수 있는 최고 속도점을 나타낸다. 이때 Table 2에서 계산된 직류링크전압은 제어여분을 위해 20%의 여유를 둔 것이다.

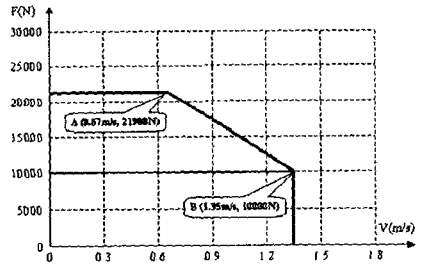


Fig. 7. Velocity-Thrust Graph of Prototype

Table 2 Electric Specification of Prototype

항 목	단위	정격사양	최대사양
상저항(Rs)	Ω	0.26	0.26
인덕턴스(Ls)	mH	6.00	6.00
역기전력상수(Ke)	V/m/s	105.77	105.77
인가전류(Ir)	Apeak	109.7	239.1
속도(V)	m/s	1.35	0.67
Vdc	V	299.7	300.0
발생추력(F)	N	10,000	21,900

4. 시제품의 제작 및 성능평가

4.1 시제품의 기구부 설계/제작

앞에서 해석한 내용을 바탕으로 정격추력 10,000 N의 리니어모터를 설계하였다. 집중권 형태의 코일배치로 제작공정은 단순화되었고, 냉각능력을 강화시키기 위해 격자형태로 구성된 2중 냉각배관 외에도 측면 전열블록을 적용하였다. 이 측면 방열블록 및 플레이트를 장착하여 상부로의 열전달이 원활하게 이루어지도록 유도하고, 열전도계수가 낮은 에폭시의 점유비율을 낮추는 간접적인 효과까지 얻을 수 있도록 하였다.

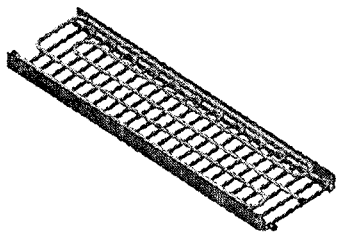


Fig. 8 Structure of Cooling Pipe

Fig. 7에 방열구조도를 나타내었다. 기존 시제품에서 하부냉각배관은 모터코어 상부에 위치하였으나 본 시제품에는 코일 바로 위에 설치하여 냉각효율을 극대화 할 수 있도록 하였다. 또 가동자의 강성을 향상시키기 위해서 모터코어의 치형에는 모터의 길이방향으로 일정간격으로 홈을 부여해서 용접처리를 하였고, 코어 위쪽의 알루미늄 플레이트는 초초 두랄루민으로 제작하여 강성을 향상시켰다. 고정자의 경우 칩, 절삭유 등으로부터 영구자석을 보호하기 위해 에폭시코팅을 실시하였다. 모터부 제작 후 Fig. 8과 같이 유니트에 장착을 완료하였다.

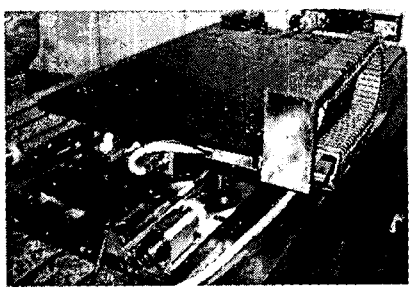


Fig. 9. The picture of Prototype Unit

4.2 시제품의 성능평가

4.2.1 추력상수 측정

당해연도 목표사양인 정격추력 10,000N의 달성여부를 확인하기 위해 추력상수를 측정하였다. Fig. 9에 측정결

과를 나타내었다. 추력상수는 가동자와 연결된 테이블의 끝단면에 로드셀을 접촉시킨 상태에서, 가동자의 전원에 정전류를 인가하여 단위전류당 모터의 힘을 측정하였다. 측정결과 94.24 N/Apk로 나타났고, 정격추력 10,000N의 힘을 내기 위해서 106.11 Apk가 필요함을 알 수 있다. 본 시제품에 적용할 15kW 드라이브의 정격전류가 107.5 Apk이므로 가동자의 방열성능만 뒷받침된다면 목표추력 10,000N은 충분히 달성할 수 있을 것으로 보여진다.

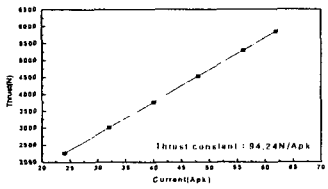


Fig. 10. Estimation of Thrust Constant

4.2.2 정격추력 평가

목표추력 달성여부를 확인하기 위해 정격추력 평가를 실시하였다. 측정방법은 유니트 테이블의 끝단면에 로드셀을 접촉시킨 상태에서 모터에 연결된 드라이브의 Open Loop로 이동 지령을 내려서 로드셀에 힘을 가하여 추력을 측정하였다. Fig. 10에 정격추력 측정상태의 사진을 보였으며, Fig. 11에 측정시 로드셀로부터 아날로그 데이터를 다운로딩한 데이터를 그래프로 나타내었다.

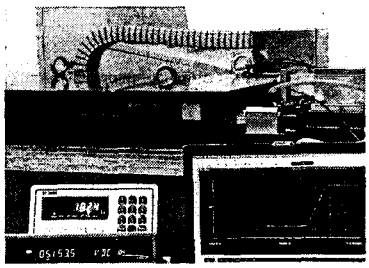


Fig. 11. Estimation of Continuous Thrust

측정결과 정격추력은 1,024 kgf (10,045 N)로 나타났다. 정격추력상태로 40초경과 후 모터 내부에서 측정된 모터 최고 온도는 70 ℃이하로 나타났으며, 이 결과로 미루어 본 개발 시제품은 과제 목표사양을 충분히 달성하였으며, 정격추력 10,000 N 사양으로 무리 없이 사용이 가능함을 확인하였다.

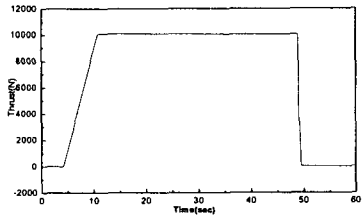


Fig. 12 Estimation Result of Continuous Thrust

4.2.3 위치결정정도 및 반복능 평가

제작된 시제품에 대한 위치결정정도와 반복능을 평가하였다. Fig. 12, 13에 그 결과를 나타내었고, 위치결정정도는 위치오차 보정 전 ±15.0㎛이었으나 위치오차 보정 후 ±0.92㎛으로 나타났다. 특히 반복능은 보정 전 ±0.68㎛, 보정 후 ±0.5㎛로 목표사양 ±1.0㎛을 초과 달성하였다.

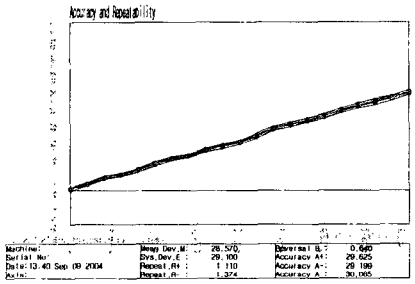


Fig. 13 Position Accuracy & Repeatability (before Compensation)

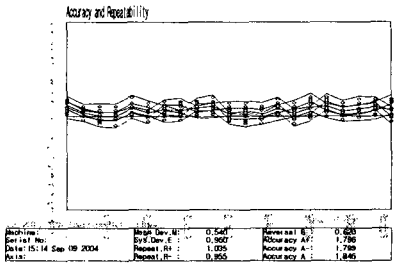


Fig. 14. Position Accuracy & Repeatability (after Compensation)

4.2.4 방열실험

철심형 리니어모터의 경우 방열문제는 추력과 직결된 부분일 뿐만 아니라, 공작기계에 장착되는 경우 설비자체의 열변형에도 직접적인 영향을 미치므로 방열테스트를 통해 본 시제품의 방열특성을 알아보았다.

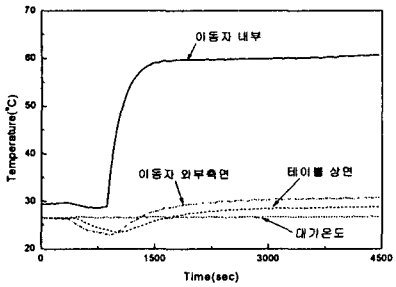


Fig. 15. The Result of Heat Experiment

파워서플라이의 전류공급한계가 60Apk이므로, U, W상에 전원을 연결하여 60 Apk로 정전류를 공급하였다. 그리고 이때 냉각수온도는 20℃, 유량은 9.8 ℓ/min. 로 설정하여 공급하였다. Fig. 14에 실험결과를 나타내었으며, 초기의 온도저하는 전원연결을 하지 않은 상태에서 냉각수를 먼저 공급하여 발생한 현상이다. 이후 전류를 인가한지 약 8분만에 60℃에 수렴하여 계속 일정온도를 유지하는 것을 볼 수 있다.(대기온도 26.6℃) 이 때 60℃는 리니어모터의 코일이 있는 가동자에서 가장 열이 많이 발생하는 부위인 코일의 엔드턴(밴딩부위)에 장착된 열전대센서를 통해 얻은 값이다. 이외 가동자 외부표면과 가동자가 연결된 테이블의 온도는 30℃이하로써 60 Apk까지는 외부적으로 안정적인 구동이 가능함을 보여주고 있다.

4.2.5 미소이송분해능 평가

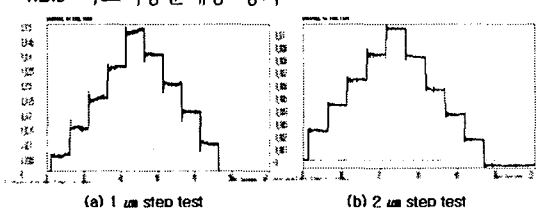


Fig. 16. Micro Step Test

이송계에 부착되어있는 리니어스케일의 최소분해능이 1㎛인데, Fig. 15-(a), (b)의 결과와 같이 1㎛의 스텝에 대해서는 선명한 계단을 보여주고 있다. 1㎛ 스텝이동시 일부 기울어진 파형을 보이고는 있으나, 충분한 게인튜닝이 이루어진다면 더 좋은 결과를 얻을 수 있을 것으로 생각되며, 본 이송계의 최소분해능은 위치검출의 최소단위인 1㎛까지 가능하다고 할 수 있다.

5. 결 론

공작기계 적용 테스트를 위한 고추력용 철심형 리니어모터 시제품의 해석, 설계를 통해 제작 및 성능평가를 실시하였다. 목표정격추력인 10,000 N을 무난히 달성하였으며, 레이져측정기를 이용한 위치정밀도 및 반복능도 목표사양을 초과 달성하였다. 향후에는 저속테스트를 통해 실제 공작기계 가공시 가공품질을 좌우하는 속도리플 특성을 파악하고, 가속성능 테스트까지 진행할 계획이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지원 중기거점과제 "고속 · 지능형 가공시스템 개발" 의 연구비로 수행되었으며 관계자 분들께 감사 드립니다.

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