

## 공작기계용 고추력 리니어모터 개발 Development of High Thrust Linear Motor for Machine Tool

정재한, 박재완\*, 박재한, 정시욱(삼익LMS 기술연구소)

J. H. Joung, J. W. Park, J. H. Park and S. U. Chung(Samick LMS Technical Center)

### 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 4,000N. 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(리니어 직류 모터, LDM), Machine Tool(공작기계), Thrust(추력), Thrust Ripple(추력 리플), Iron Core(철심), Permanent Magnet(영구자석), Detent Force(디텐트력), FEM(유한요소법)

### 1. 서론

공작기계, 반도체 장비 및 자동차 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 공작기계용까지 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.

### 2. 공작기계용 리니어모터 2호기 특성해석

#### 2.1 설계사양

공작기계에 리니어모터를 적용하여 고속, 고가속 운동 및 고위치정도를 얻기 위해서는 운동 방향으로의 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, 정격추력 6,000 N의 1호기를 기준으로 실제 공작기계업체의 적용사양을 만족하는 정격추력 목표사양 4,000 N의 2호기로 설계 사양은 Table 1과 같으며, 공극 1.0, 2.0 mm 및 영구자석 두께 5.0, 6.0 mm에 따른 모터 특성을 비교해보았다.

Table 1 설계 사양

구분		값	단위
이동자	슬롯수	50	
	극수	16	
	재질	S18	
	슬롯당 도체수	149	
	요크 두께	10.0	[mm]
	상수	3	
	적층폭	206.0	[mm]
고정자	영구자석	종류	Nd-Fe-B
		잔류자속밀도	1.30 [T]
		폭	24.0 [mm]
		두께	5.0, 6.0 [mm]
		길이	45.0 [mm]
	재질	S45C	
	폭	206.0 [mm]	
자기 공극		1.0, 2.0	[mm]

2.2 추력 특성

먼저, 목표 추력인 4,000 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.

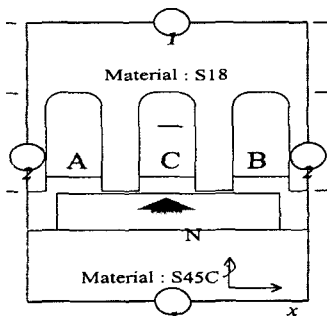


Fig. 1 해석모델

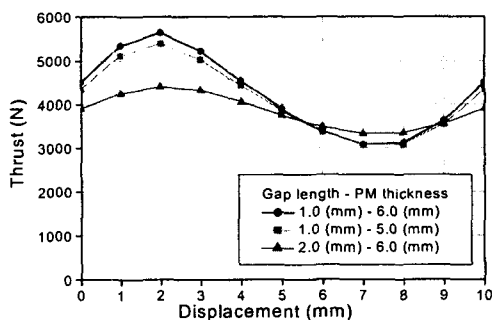


Fig. 2 추력 특성 비교(Non-skew)

공극의 변화에 따른 FEM해석에서 4,000 N을 얻기 위한 입력전류량은 자기공극이 1mm일 경우, 코일당 4.5 A로 나타났다. 영구자석 Skew가 없는 경우 공극 및 영구자석 두께 변화에 따른 추력 특성을 변위에 따라 나타내면 Fig. 2와 같다.

2.3 추력 리플의 최소화

추력리플을 저감시키는 방법으로 주로 철심 치형의 슬롯개구폭 조정, 영구자석에 Skew 부여, 자석형상 변형 등이 주로 사용되어진다. 본 해석에서는 영구자석에 Skew를 주고 배치하는 방법을 사용하여 추력리플을 없애는 방법을 연구하여 Fig. 3과 같은 영구자석 배치 형상을 최적값으로 선택하게 되었다.

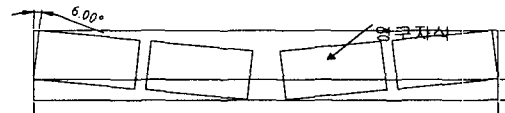


Fig. 3 영구자석 배치 형상

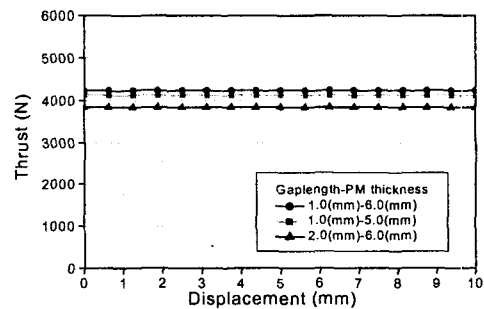


Fig. 4 변위에 따른 추력의 변화(6° Skew)

Fig. 4는 영구자석을 6° Skew시켰을 때의 추력 변화값을 나타낸 것으로 추력리플이 5 %이내이다. 공극 1.0 mm, 영구자석 두께 6.0 mm일 경우, 평균 추력 4,233.17 N에 대하여 추력 상수는 665.18 N/A가 되어 제 1호기에 비하여 약 26.7 % 감소하였으며, 공극 1.0 mm, 영구자석 두께 5.0 mm일 경우, 추력 4,123.70 N에 대하여 추력 상수는 647.98 N/A로서 영구자석의 두께 6.0 mm에 비하여 약 2.59 % 감소하였다. 공극 2.0 mm, 영구자석 두께 6.0 mm일 경우는 평균 추력 3,840.00 N에 대하여 추력 상수는 603.40[N/A]로 목표정격추력을 위해 코일당 4.7A의 입력전류가 필요하다. Fig. 5는 각 경우의 평균 추력 변화를 비교해서 나타내었다.

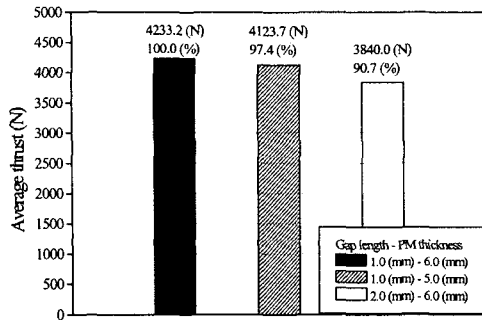


Fig. 5 평균추력 비교

## 2.4 수직력 및 디텐트력 특성

전류를 인가하지 않을 경우 이동자와 고정자 사이에 발생하는 디텐트력은 Fig. 6과 같이 나타나며, 이 결과로부터 디텐트력은 영구자석의 두께보다는 공극의 길이의 변화에 따라서 현저하게 변화함을 알 수 있다. 자기공극이 1mm인 경우, 자석의 두께에 큰 차이 없이 최대값 차이가 12 N정도 나타나며, 자기공극이 2 mm인 경우, 4 N으로 1/3정도 감소됨을 알 수 있다.

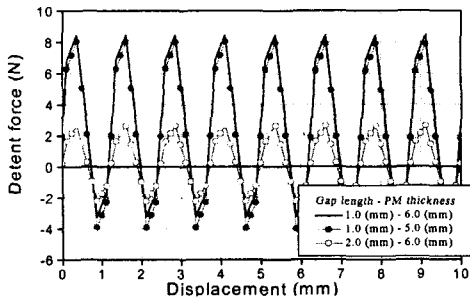


Fig. 6 디텐트력 변화 특성

이동자와 고정자 사이의 자기 수직력은 Fig. 7과 같이 나타난다. 수직력의 경우도 공극에 따라 큰 차이를 보여주는데, 공극 1 mm, 자석 두께 6 mm인 경우 최대 수직력이 22,730 N이며, 공극 2 mm, 자석 두께 5 mm인 경우는 21,363 N으로 나타난다. 공극 2 mm, 자석두께 6 mm일 경우 17,070 N으로 공극 1 mm에 비해 22 %이상 줄어들음을 알 수 있다.

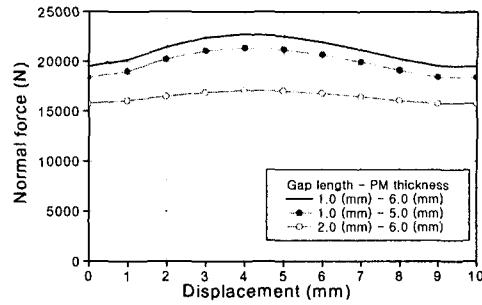


Fig. 7 수직력 변화 특성

공극 및 자석 두께의 변화에 따라 FEM 해석을 살펴본 결과, 약간의 추력손실이 발생하더라도 수직력 및 디텐트를 줄여 운전 안정성을 얻고, 또한 제작 및 조립상의 보완점을 감안해서 자기공극 2mm(기계적 공극 1mm), 영구자석 두께 6mm로 설계사양을 확정했다.

## 3. 동특성 해석

### 3.1 모델링

과도상태의 거동을 해석하기 위해서는 인덕턴스에 의한 역기전력을 고려한 전압방정식과 기계적 운동방정식의 모델링으로부터의 해석이 필요하다. 전압방정식은 (1)식으로, 기계적 운동방정식은 (2)식으로 나타낼 수 있다.

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

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

here,

$K_e$ : 역기전력상수,  $K_f$ : 추력상수

$v(t)$ : 속도,  $\frac{dv}{dt}$ : 가속도

$M$ : 이송부하,  $D$ : 마찰계수,  $F_l$ : 부하

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

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

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

$$v(t) = \frac{H}{(H-1)} A e^{mt} + \frac{1}{(1-H)} A e^{mt} - A \quad (4)$$

here,

$$A = \frac{K_f R - K_f V}{DR + K_f K_e}, B = \frac{DR}{LM} + \frac{K_f K_e}{LM}, C = \frac{D}{M} + \frac{R}{L}$$

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

### 3.2 동특성 해석 결과

동특성 해석 파라메타값은 Table 3과 같으며, 최종 설계 적용값인 공극 2.0 mm, 영구자석 두께 6.0 mm일 경우의 동특성 해석을 실시하였다.

Table 2 동특성 해석 파라메타

항목	값	항목	값
정격속도(v)	2 m/s	가속도	2 G
이송부하(M)	200 Kgf	마찰계수	0.1
부하(F)	0	병렬회로수	1
역기전력상수 ( $k_e$ , 1상)	665.15 V/m/s	추력상수 ( $k_f$ , 3상)	603.4 N/A
상당 저항	44.0 $\Omega$	코일당 인덕턴스	189.0 mH

이동자 내부의 코일 배선(병렬회로수)을 다양하게 변경해 가면서 시간에 대한 동특성 해석을 실시한 결과, 목표 속도와 가속도를 얻기 위한 전압과 전류의 전기적 사양 및 속도, 추력변화는 Fig. 8~11과 같다.

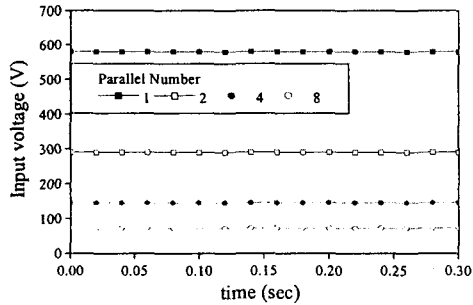


Fig. 8 시간에 따른 전압 특성

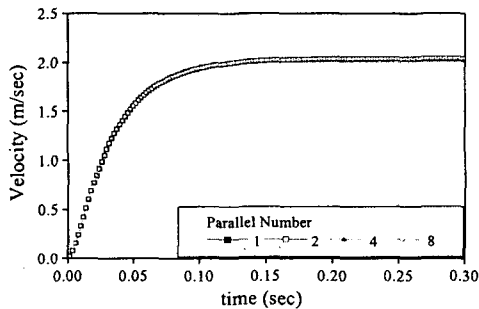


Fig. 9 시간에 따른 속도 특성

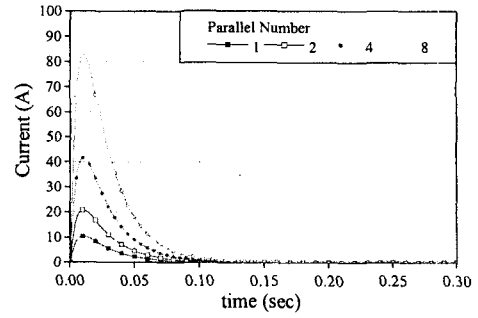


Fig. 10 시간에 따른 전류 특성

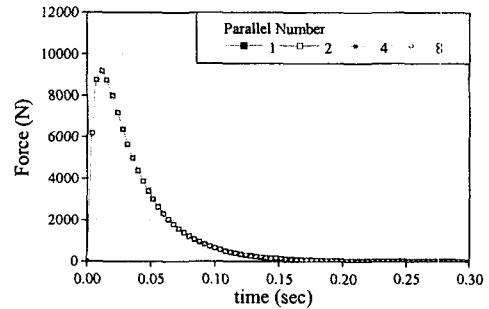


Fig. 11 시간에 따른 추력 특성

위 결과에서 병렬회로수 4개일 경우 최대 상전류가 41.6 A, 상전압이 145 V로 실제 적용가능한 드라이브의 사양을 고려할 때 제작에 반영할 수 있는 최적의 값으로 선정하였다.

## 4. 2호기 방열해석

Table 3과 같은 입력 전류에 따른 철심형 시제품 2호기 이동자의 방열해석을 통해 이동자 철심 상/하부의 온도 변화를 살펴보았다.

Table 3 방열해석 입력 전원 조건

2호기	선간전류(A)	Q(W/m <sup>2</sup> )
1	4	56.21
2	8	224.83
3	12	505.88
4	16	899.34
5	20	1405.21
6	24	2023.51
7	28	2754.22
8	32	3597.34
9	36	4552.89
10	40	5620.85
11	44	6801.23
12	48	8094.02

본 방열해석은 모든 입력 전류가 코일부에서

발열한다고 가정하였으며 이동자 폭 방향의 온도 변화는 일정한 걸로 가정하고 2차원 해석을 실시하였다. Fig. 12는 FEM해석을 실시한 이동자 철심 부분으로 이동자 길이방향으로 냉각수 유량이 4 L/min일 경우에 TOP, BOTTOM부분의 온도변화는 Fig.13, 14와 같이 나타남을 알 수 있다. 그래프에서 온도의 단위는 절대온도(K)이다.

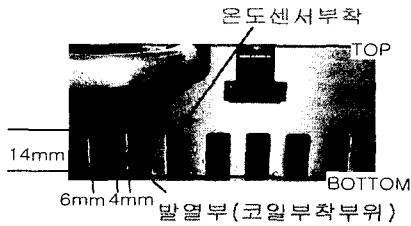


Fig. 12 FEM 방열해석 부분

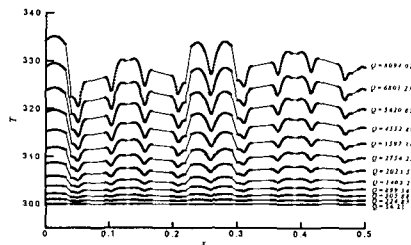


Fig. 13 TOP부 온도변화

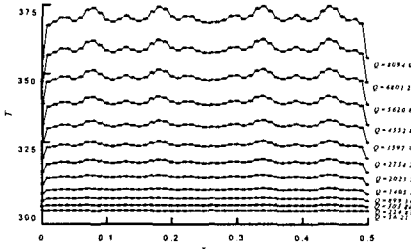


Fig. 14 BOTTOM부 온도변화

### 5. 2호기 제작 및 성능평가

앞에서 해석한 내용을 기준으로 해서 정격추력 4,000 N의 리니어모터를 설계하였다. 이동자부의 체적대비 추력향상을 위해 편평 및 성형된 정렬코일을 사용하여 중첩시켰으며, 2중 냉각구조를 적용하여 외부로의 방열을 최소화시켰다. 고정자의 경우 칩, 절삭유등의 불순물 배출의 편이성을 위해 몰딩 및 커버를 적용하였다. Fig. 15는 성능평가장

비에 장착한 2호기를 나타낸다.

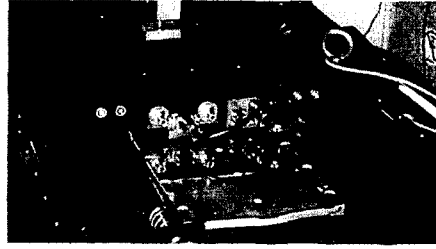


Fig. 15 시제품 2호기 모습

### 5.1 위치결정정도

Fig. 16에 위치결정정도와 반복능을 평가한 결과를 보였다. ISO 230-2규격에 따라 실험을 실시하였으며, 피치오차보정을 하지 않은 상태이며 위치결정정도가 43.2  $\mu\text{m}$ , 반복능이 3.92  $\mu\text{m}$ ( $\pm 1.96\mu\text{m}$ )로 나타남을 보여준다. 이는 피치오차보정 및 개인튜닝 등을 통해 충분히 향상시킬 수 있으리라 본다.

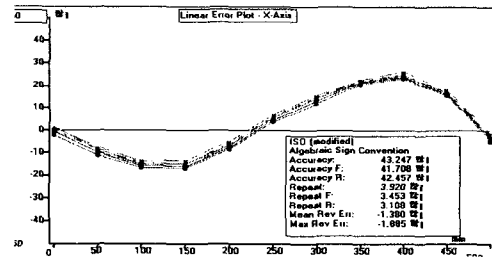


Fig. 16 위치결정정도와 반복능 평가 결과

### 5.2 미소이송 분해능

갭센서로 미소이송분해능 실험을 한 결과가 Fig. 17에 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.

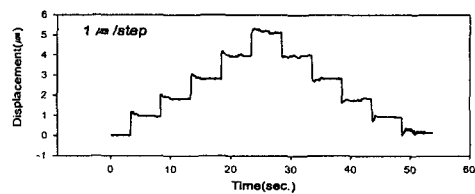


Fig. 17 미소 이송 분해능 평가 결과

### 5.3 추력, 강성 및 디텐트력 특성

실험은 3상제어 드라이브를 사용하여 open loop에서 analog output에 따라 전류의 양을 변화 시키면서 그때의 추력값을 로드셀을 사용하여 측정하였다. 입력전류에 대한 추력의 변화를 살펴 보면 Fig. 18과 같이 선형적으로 변함을 알 수 있다.

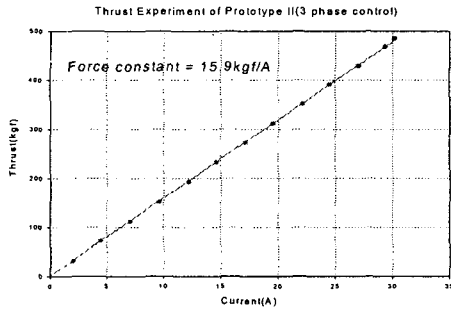


Fig. 18 시제품 2호기 추력 특성

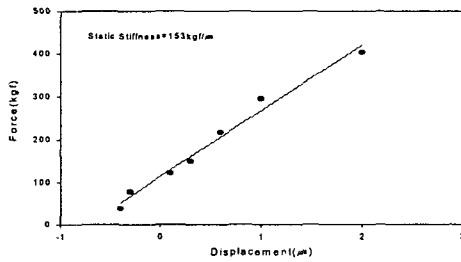


Fig. 19 시제품 2호기 정강성 특성

Fig. 19는 리니어모터의 정강성을 측정할 데이터로 모터의 이동자부에 스크류잭을 사용하여 변위를 발생시키고 그 때의 힘을 로드셀로 측정함으로써 153 kgf/μm 정도의 값을 얻을 수 있었다. 강성 실험의 경우 제어부의 게인값, 드라이브 사양의 영향을 많이 받음을 알 수 있었다.

디텐트력은 철심형 리니어모터의 특징으로 이동자 철심과 고정자 자석간의 자기인력으로 발생하는 자기회로 불균형에 의해 발생하는 힘이다. Fig. 20에서 디텐트력 주기에서 2.4 kgf정도임을 보여주는데 가이드 셀저항, 진직도의 영향으로 크게 나왔다. 이는 저속에서의 정속주행이 중요한 경우 반드시 고려해야 할 사항이라고 볼 수 있다.

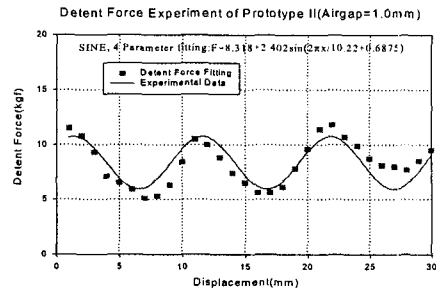


Fig. 20 디텐트력(기구적 공극=1.0mm)

## 7. 결론

1호기를 바탕으로 공작기계 적용 테스트를 위한 고추력용 철심형 리니어모터 시제품 2호기의 해석, 설계를 통해 제작 및 성능평가를 실시하였다. 목표정격추력인 4,000 N을 무난히 달성하였으며, 1500 N/μm의 고강성을 유지하였다. 정속특성도 1% 이하로 제어를 실시하였으며, 최소분해능의 미소이송을 확인하였다. 시제품 2호기의 경우, 실제 공작기계 적용에 요구되는 칩 제거 및 방열부분을 반영하여 고정자 설계에 반영하였으며 대우종합기계 금형센터 x, y, z축에 4set를 적용, 시운전하였다. 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.

## 참고문헌

1. 정재한 외, "고속·고강성 이송시스템 기술개발", 산업자원부, 중기거점과제 2차년도 연구보고서, 2001
2. 정재한, 박재완, 박재한, "공작기계용 철심형 리니어모터 기술개발(2)", 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 82-85, 2002.
3. S. Hwang, D. K. Lieu, "Design Techniques for Reduction of Reluctance Torque in Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Magn., vol. 30, no. 6, pp. 4287-4289, 1994
4. Amitava Basak, "Permanent-Magnet DC Linear Motors", Clarendon Press, 1996