

## 횡자속 선형전동기 추진모듈 개발

방덕제\* , 김호종\* , 강도현\*\*

\*썬신성이엔지 기술연구소, \*\*한국전기연구원 메카트로닉스 연구그룹

### 초록

현재 반도체 및 LCD 제조분야에 적용되는 공정장비, 이송시스템에는 고성능, 고생산성이 요구되고 있는 추세이다. 기존의 선형이송시스템은 구동원으로 서보모터(Servo Motor)를 사용하고 있으며, 기계적 동력전달장치를 사용하여 직선운동을 하는 구조로 되어있어 마찰소음, Position Error 등의 발생요인이 많은 단점을 가지고 있다. 반면에 선형전동기(Linear Motor)를 이송시스템의 구동원으로 사용하면 기계적 동력전달장치가 생략되어 기존의 선형이송시스템이 가지고 있는 단점들의 개선효과가 크며 유지보수 면에서도 유리한 점이 많다. 본 연구에서는 2,500[N]급 영구자석 여자 횡자속 선형전동기를 설계, 개발하였으며, 이를 적용한 추진모듈을 개발하였다. 본 연구에서 개발된 횡자속 선형전동기 적용 추진모듈은 LCD 제조분야의 Stocker, RGV, Index, OHS, OHT 등을 비롯하여 타 산업분야의 선형이송시스템으로의 가능하다.

### 1. 서론

반도체, LCD 산업 및 공장자동화, 공작기계 분야 등의 생산설비는 고성능화가 요구되고 있으며, 이송장비 부분에서도 고정도화, 고속화, 고효율화가 요구되고 있다. 서보 모터를 구동원으로 사용하고 있는 일반적인 선형이송시스템은 직선운동을 위해 감속기, Rack-Pinion, Belt, Chain, Ball Screw, Crank 와 같은 기계적 동력전달장치가 필요하여 구조가 복잡하고 마찰소음, 분진(Particle), Backlash 에 의한 Position Error 및 주기적인 유지보수 발생 등의 단점을 가지고 있다.

반면에 이송시스템의 구동원으로 선형전동기를 적용하면 기계적 동력전달장치가 생략되어 고속, 고가속의 직선운동이 가능하여 생산성을 높일 수 있으며 소음, 분진, 진동 등의 발생이 현저하게 감소된다. 그리고 동력전달장치에서 나타나는 변형이나 Backlash 가 없어지기 때문에 고속 운전시에도 고정도의 효과를 얻을 수 있으며, 동력전달장치의 유지보수가 필요 없어 긴 수명을 가진다.

이와 같이 선형전동기가 가진 많은 장점들 때문에 반도체 및 LCD 산업분야에서도 공정장비를 비롯하여 이송시스템에 선형전동기가 일부 적용되어 사용되고 있다. 그러나 기존의 선형전동기는 고가격, 저추력밀도 등의 문제로 대형, 중하중, 장거리 이송시스템에 적용하기에는 많은 제약이 따른다. 따라서 선형전동기를 적용하여 선형이송시스템의 고성능화를 실현하기 위해서는 현재

선형전동기가 가지고 있는 이러한 제약들을 개선하여 대형, 중하중, 장거리 이송에 적합한 고효율 선형전동기의 개발, 적용이 필요하다.

본 연구에서는 단위체적당 고효율이 가능한 횡자속 전동기의 기본모델과 영구자석여자 모델의 자속형상과 발생 힘밀도를 비교, 검토하였다. 그리고 2,500[N]급 영구자석여자 횡자속 선형전동기와 이를 적용한 추진모듈을 설계, 시작품을 제작하여 특성시험을 실시하였다

## 2. 횡자속 전동기 이론

### 2.1 횡자속 전동기 기본모델

횡자속 전동기의 원리는 기본적으로 릴럭턴스 전동기와 같다. 그림 1 에서 권선 전류에 의한 기자력이  $\theta_a$  [AT]일 때, 자속  $\Phi_a$  가 발생하여 자기저항이 최소화되는 방향으로, 즉 고정자와 이동자의 치가 일치할 때까지 힘을 발생시키게 된다. 이때, 자속  $\Phi_a$  의 진행방향과 전동기의 이동 방향  $x$  는 횡방향(전류의 방향과 전동기의 진행방향이 같음)이 된다.

이와 같이 횡자속 전동기의 장점은 자기회로와 전기회로가 분리되어 있기 때문에 단위 체적당 높은 출력과 높은 효율이 가능하다는 점이다.

그림 2 는 기본형 횡자속 전동기 모델에 대해 전류( $\theta_a$ )와 발생 추력( $F_x$ )의 관계를 이동자의 위치에 따라 나타내고 있다.  $0 \sim \tau_p$  구간에서는 한쪽 방향으로 힘을 발생시키고  $\tau_p \sim 2\tau_p$  구간에서는 다른 방향으로 힘을 발생시키므로 일정한 방향의 힘을 얻기 위해서  $\tau_p \sim 2\tau_p$  구간에서는 전류를 흘리지 않는다.

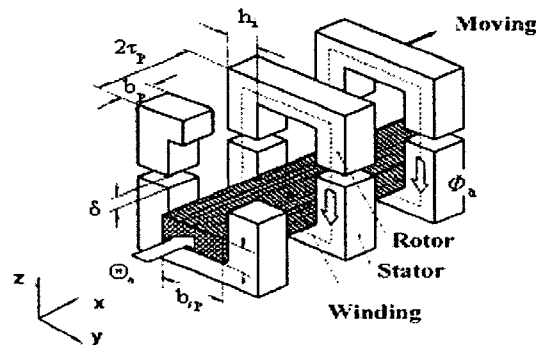


그림 1 횡자속 전동기의 기본형상

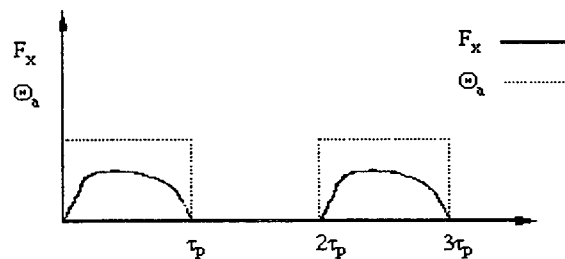


그림 2 횡자속 전동기 기본모델의 이동자 위치에 따른 기자력( $\theta_a$ )-발생추력( $F_x$ )

그림 1의 기본형상에서 발생 가능한 단위 면적당 추력  $F_{xd}$ 는 다음 식 (1)과 같다.

$$F_{xd} = \frac{\mu_0}{32\delta\tau_p} \Theta_a^2 \quad (1)$$

여기서,  $\mu_0$ 는 공기의 투자율,  $\Theta_a$ 는 기자력,  $\delta$ 는 공극,  $\tau_p$ 는 극간격이다. 이상의 식 (1)은 횡자속 전동기 힘발생 밀도로 전동기 설계시 기본식으로 이용하고 있다.

발생 힘 밀도  $F_{xd}$ 는 공극과 극간격에 반비례하고 기자력의 자성에 비례함을 알 수 있다. 고효율 전동기를 설계시 공극은 기계적인 구조 때문에 한정되어 있고 기자력은 자기회로의 포화와 권선의 온도상승 때문에 제한을 받고 있다. 따라서, 주어진 이동자의 크기에서 극간격을 적게 설계하면 발생 힘 밀도를 증가시킬 수 있는 가능성을 가지고 있다. 식 (1)에서  $\Theta_a=2,000[\text{AT}]$ ,  $\delta = 0.5[\text{mm}]$ ,  $\tau_p = 10[\text{mm}]$  일 경우 발생 가능한 힘 밀도는  $31.4[\text{kN/m}^2]$ 이다.

## 2.2 영구자석여자 횡자속 전동기 모델

횡자속 전동기의 다른 형태로 이동자에 영구자석을 삽입하여 출력밀도를 증가시킨 영구자석 여자 횡자속 전동기가 있다. 구조적으로 그림 3과 같이 영구자석에서 발생하는 자계가 공극에서의 자계를 집중시키므로 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있다.

그림 3의 형상에서 이동자의 영구자석은 자속을 일정한 방향으로 발생시키도록 교대로 설치되며, 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 고정자 철심은 양측 극면에서  $\tau_p$ 만큼 엇갈리게 설계되었다. 물론 권선을 이동자에 설치하여도 무방하다.

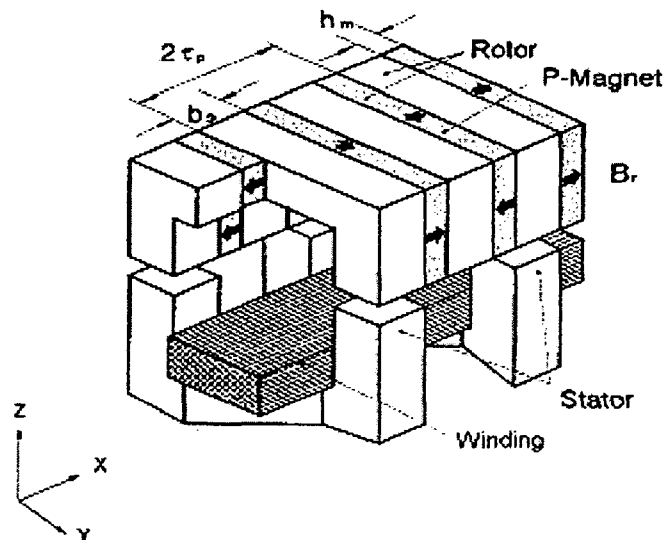


그림 3 영구자석여자 횡자속 전동기 형상

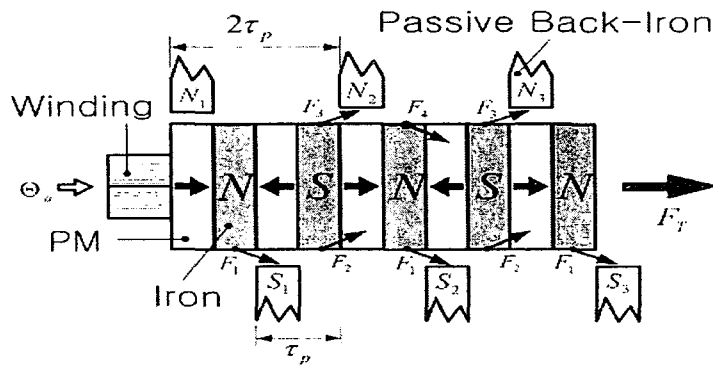


그림 4 영구자석여자 횡자속 전동기 힘 발생원리

그림 4 에 도시한 바와 같이 고정자 권선에  $\theta_a$  방향의 전류를 흘리면 암페어의 주회법칙에 의하여 고정자 철심의 위쪽 자극에는 N 극, 아래쪽 자극에는 S 극의 자속이 발생한다. 따라서, 고정자의 자극과 이동자의 자극 상호 작용에 의하여 자극의 방향이 같으면 반발력, 자극의 방향이 다르면 흡인력이 발생하며, 힘  $F_1, F_2, F_3, F_4$  가 생겨 우측 방향의 합성된 힘  $F_T$  가 발생한다.

이동자 위치에 따른 기자력-발생추력은 그림 5 와 같다. 일정한 방향으로 힘을 발생시키기 위해  $0 \leq x \leq \tau_p$  구간에서는 고정자의 자속이 영구자석의 자속방향과 같은 방향이 되도록 전류를 인가하고,  $\tau_p \leq x \leq 2\tau_p$  구간에서는 반대방향의 전류를 흘려야 된다.

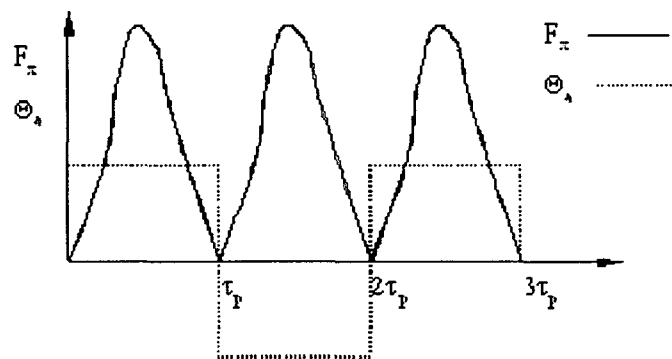
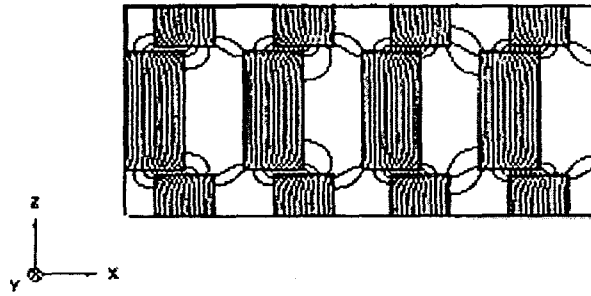


그림 5 영구자석여자 횡자속 전동기 모델의 이동자 위치에 따른 기자력( $\theta_a$ )-발생추력( $F_x$ )

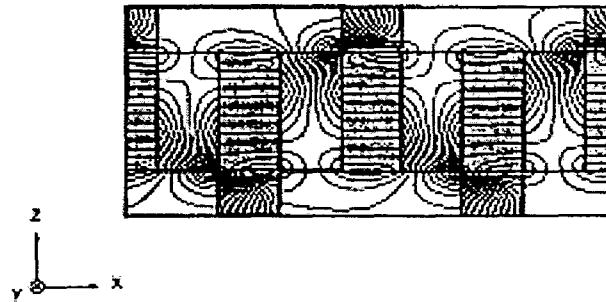
영구자석여자 횡자속 전동기의 발생 가능한 힘밀도  $F_{xd}$ 를 구하면 식 (2)와 같다.

$$F_{xd} = B_0 \frac{\theta_a (h_i - y)}{2\tau_p h_i} \quad (2)$$

영구자석 여자 횡자속 전동기에서 철심의 포화와 누설을 무시하고, 무부하 공극자속밀도  $B_0 = 1[T]$ , 기자력  $\theta_a = 2,000[AT]$ , 극간격  $\tau_p = 10[mm]$ , 안내방향 변위  $y=0$  인 경우 발생 가능한 힘 밀도를 계산하면  $F_{xd} = 100[kN/m^2]$ 로 된다. 이 값은 횡자속 기본모델 그림 1에서 발생하는 힘보다 약 3 배로 많이 됨을 알 수 있다.



(a) 그림 1의 횡자속 전동기 기본모델



(b) 그림 3의 영구자석 여자 횡자속 전동기 모델

그림 6 횡자속 전동기의 자속분포 비교

한편 그림 6은 각각의 2가지 해석모델에서 이동자와 고정자 사이 공극의 자속분포를 나타내고 있다. 그림 6(a)의 경우는 일반적인 릴럭턴스 전동기 자속 형상을 나타내고 있고, 그림 6(b)의 경우는 영구자석과 전기자 전류에 의한 자속 때문에 이동자의 이동에 따라 많은 자기에너지가 변화됨을 예상할 수 있다.

### 3. 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계

본 연구에서 설계된 2,500[N]급 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 사양은 표 1 과 같으며, 전동기의 발생 가능 힘밀도는 2장에서 언급한 바와 같이 다음과 같다.

$$F_{xd} = kB_0 \frac{\Theta_a}{2\tau_p} \quad (3)$$

여기서  $k$  는 설계상수,  $B_0$  는 무부하 공극자속밀도,  $\Theta_a$  는 기자력 그리고  $\tau_p$  는 극간격이다. 설계상수  $k = 0.4$ ,  $B_0 = 1[T]$ ,  $\Theta_a = 5,000[AT]$  그리고  $\tau_p = 20[mm]$ 로 선정하면 발생 힘밀도는  $50[kN/m^2]$ 이 된다. 또한 전동기 힘 발생 폭  $h_i = 40[mm]$ 로 두면 전동기 단위 길이당 발생하는 힘은  $4[kN/m]$ 이 된다. 추력 리플이나 제작상의 이점을 고려하여  $h_m/\tau_p = 0.5$ ,  $b_p/\tau_p = 0.7$ 로 선정하여  $h_m = 10[mm]$ ,  $b_p = 14[mm]$ 로 선정하면 1 상당 1250 [N]의 힘을 발생시키기 위해서는 철심과 영구자석을 포함한 이동자 1 상당 전체길이는 310 [mm] 이어야 한다. 본 연구에서는 철심 16 개와 영구자석 15 개를 교번으로 적층하여 제작하였으며 설계 대상에 대한 정자계 해석 결과는 그림 7 과 같다.

표 1 영구자석여자 횡자속 선형전동기 사양

구 분		추진시스템용	비 고
발생힘	[N]	2,500	2 상분
출 력	[kW]	5.0	
기자력	[AT]	5,000	
$\tau_p$	[mm]	20	
$\delta$	[mm]	2.0	
전기자 (이동자)	길이	[mm]	310
	폭	[mm]	125
	높이	[mm]	75
	$h_i$	[mm]	40
	$b_p$	[mm]	10
	$h_m$	[mm]	10
	$b_{sp}$	[mm]	45
	$h_{sp}$	[mm]	35
	권선수	[turn]	288
계자 (고정자)	길이	[mm]	10,000
	폭	[mm]	125
	높이	[mm]	40
	철심두께	[mm]	14
$F_{xd}$	[kN/mm <sup>2</sup> ]	50	

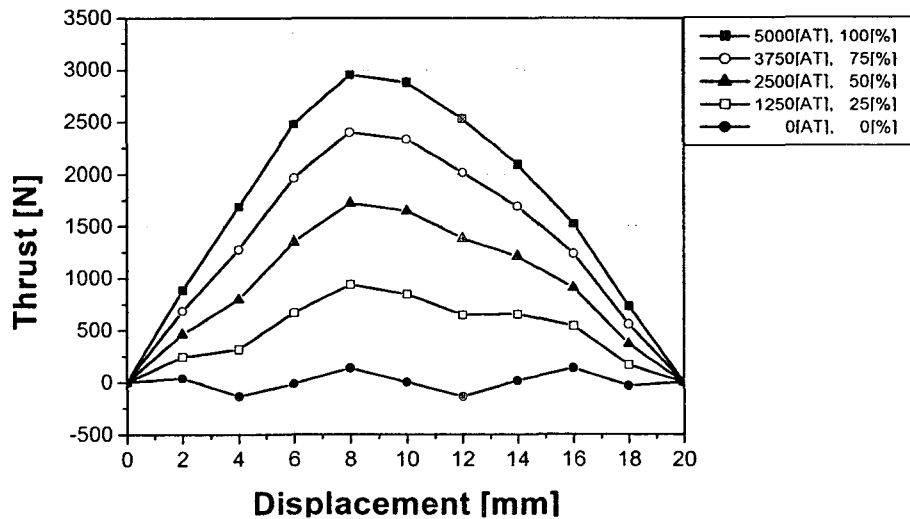


그림 7 이동자 위치에 따른 추력 해석결과

#### 4. 시작품 제작 및 시험

본 연구에서 설계, 제작된 2,500[N]급 영구자석여자 횡자속 선형전동기 및 추진모듈 시작품은 그림 8 과 같으며 고정자는 Bulk 형과 Lamination 형의 두가지 경우를 설치하였다. 시작품에 대한 추진시험과 위치정밀도 등 추진모듈에 대한 특성시험을 실시하였으며, 추진모듈의 가속도  $1[m/s^2]$ , 속도  $1.5[m/s]$ 에 대한 전류, Input Power 에 대한 실험결과를 그림 9, 10 그리고 표 2 에 나타내었다. 사용전류 및 Input Power 는 Bulk 형 고정자에 비해 Lamination 형 고정자가 특성이 양호함을 알 수 있으며 효율면에서도 Lamination 형이 약 10% 우수하였다.

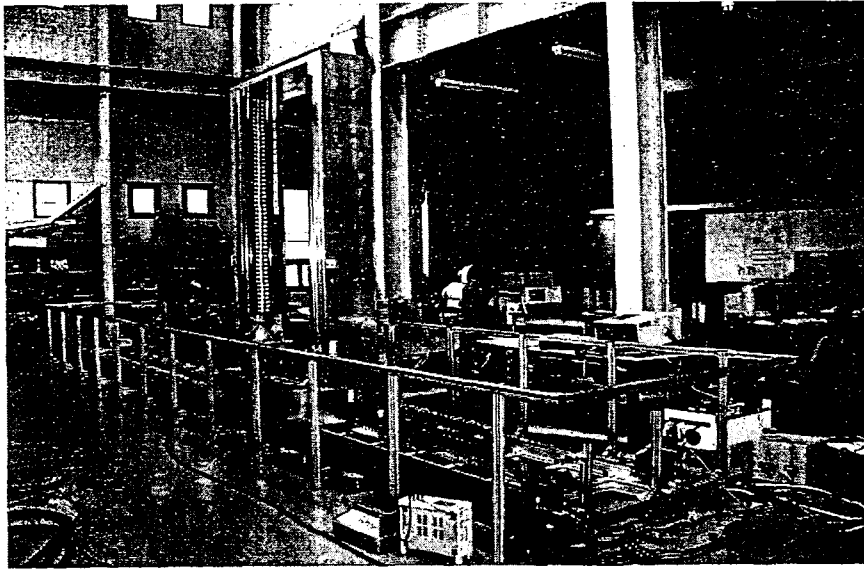


그림 8 2500N급 선형 추진모듈 제작 시작품

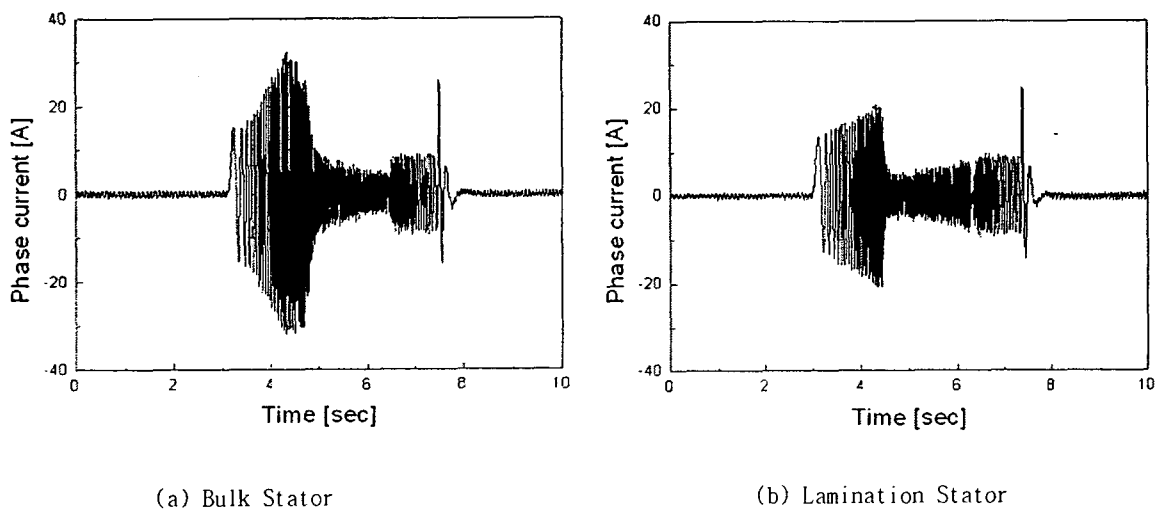


그림 9 전류파형

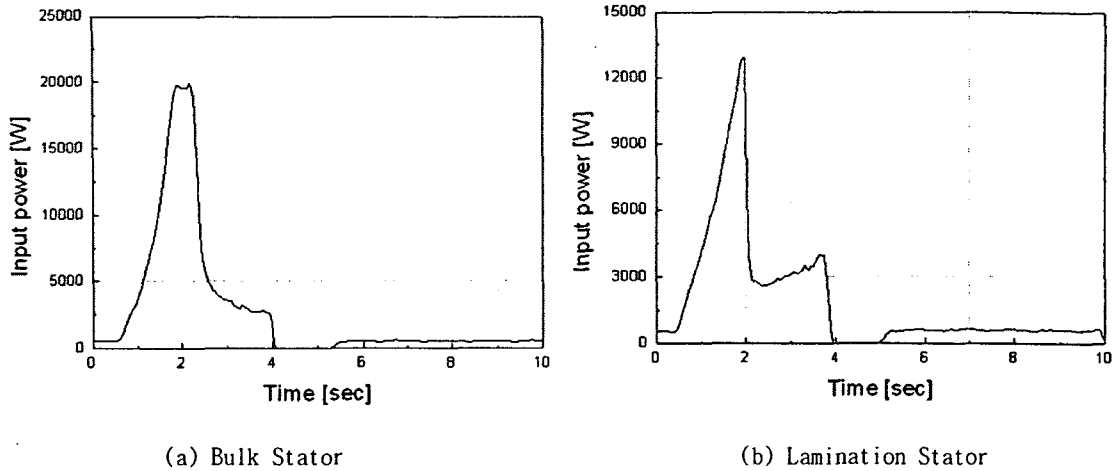


그림 10 입력전력 파형

표 2 시작품 특성 시험결과.

구 분	Bulk Stator	Lamination Stator
속도 [m/s]	1.5	1.5
가속도[m/s <sup>2</sup> ]	1	1
소음[dB]	72	72
효율[%]	19.8	30

### 5. 결론

본 연구에서는 선형이송시스템에 적용시 고효율화가 가능한 횡자속 전동기를 소개하고, 동일한 설계사양에서 횡자속 전동기의 기본모델과 영구자석여자 모델의 자속형상과 발생 힘밀도를 비교하여 고효율화 가능성을 검토하였다. 기자력  $\theta_s=2,000[AT]$ 인 경우 영구자석여자 모델의 발생 힘밀도는 기본모델에 비해 약 3 배정도 우수함을 알 수 있었다.

그리고 2,500[N]급 영구자석여자 횡자속 선형전동기 및 추진모듈을 설계, 시작품을 제작하여 추진시험, 위치정밀도 등 특성시험을 실시하였다. 가속도  $1[m/s^2]$ , 속도  $1.5[m/s]$ 인 조건의 특성시험 결과, 사용전류 및 Input Power 는 Bulk 형 고정자에 비해 Lamination 형 고정자가 특성이 우수하였으며, 효율은 Lamination 형이 10% 정도 우수하였다.

이상의 결과 외에 가속도, 속도, Bulk 형 고정자, Lamination 형 고정자, 전류, 전압 등에 따른 시험과 해석을 수행하여 영구자석여자 횡자속 선형전동기 추진모듈의 특성을 파악, 분석하여 선형이송시스템으로의 적용성을 검토할 예정이다.

### 참고문헌

[1] H. Weh, "Synchronous Machines with New Topologies", SM'100: Int. Conf. on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zurich, 1991.



- [2] H. Weh, "Drive Concepts with New Machines, Speedam'92, Positano, Italien.
- [3] H. Weh, "Permanentmagneterregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalfluß konzept", etzArchiv Bd. 10 (1988), H5, S.143-149.
- [4] 강도현, 방덕제, 김종무, " 고효율 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계에 관한 연구" , ' 99 대한전기학회 전기기기연구회 및 전기철도 연구회 춘계합동학술발표회 논문집, pp.53-58, 1999.
- [5] 강도현, 방덕제, 김종무, 정연호, 김문환, " Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계에 관한 연구" , 대한전기학회 논문집 49B 권 3 호, 2000.
- [6] Do Hyun Kang, "Transversalflussmaschinen mit permanenter Erregung als Linear antriebe im schienengebundenen Verkehr", Braunschweig University, 1996.