

## 영구자석 여자 횡자속 선형 전동기를 적용한 스토커 시스템 개발

장정환, 박건우, 김지원, 강도현, 방덕제\*

한국전기 연구원 메카트로닉스 그룹, \* (주) 신성 기술연구소

### Development of a Stocker System Using Transverse Flux Linear Motors with Permanent Magnet Excitation

Junghwan Chang, Gunwoo Park, Jiwon Kim, Dohyun Kang, Doekje Bang

Mechatronics Group, Korea Electrotechnology Research Institute(KERI), \* Research Institute Shinsung Eng Co., LTD

**Abstract** - 본 논문은 LCD 제조 공정라인에서 LCD 원판을 이송하기 위한 영구자석 여자 횡자속형 선형 전동기 개발에 관한 내용이다. 3차원 등가 자기 회로방법과 2차원 유한 요소법을 사용하여 이동자의 단부 효과를 고려하여 전동기 특성을 해석하였으며 정특성 실험을 통하여 설계 및 해석의 타당성을 검증하였다.

#### 1. 서 론

최근 공장 자동화 시스템에서는 기존의 벨트나 랙-피니언과 같이 회전 운동을 선형 운동으로 변환하는 부가 구조물 없이 직접 구동 방식의 선형전동기에 대한 요구가 증가하고 있다. 특히 자동화 제조 장비 중 20m~100m 길이의 LCD 제조 공정 라인에서 LCD용 원판(glass)를 다른 여러 공정으로 이송하는 필수 모듈인 Stocker의 경우 현재는 기계적 변환장치인 랙-피니언 구조에 의해서 회전운동을 선형 운동으로 변환하고 있지만 기계적 마찰에 의해 발생하는 미세 입자로 인해 정정도를 유지하기 어렵고 잦은 유지 보수가 필요하기 때문에 새로운 선형 구동 시스템의 개발이 절실했던 상황이다.

영구자석 여자 횡자속형 전동기는 높은 에너지 밀도의 영구자석과 3차원적으로 자속의 흐름을 제어하면서 자속을 집중할 수 있는 자기 회로 설계를 결합한 것으로 기존의 전동기에 비해 몇 가지 장점을 가지고 있다[1]~[3]. 그중에서도 특히 높은 공극 자속 밀도로 인하여 기존의 선형 유도 전동기나 선형 동기 전동기에 비해 단위 체적 당 높은 출력 밀도를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있으므로 고출력을 필요로 하는 반도체 웨이퍼 및 LCD 이송 장치에 확실한 이점을 가지고 있다.

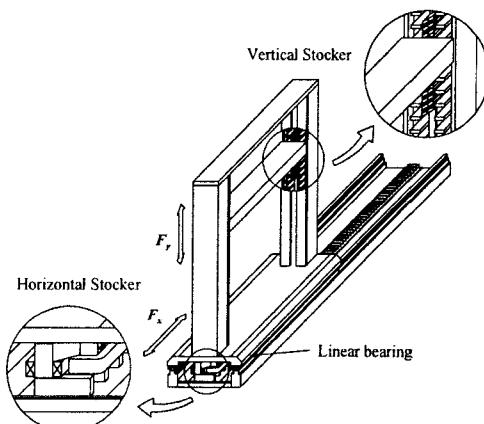


그림 1 Stocker 시스템

본 논문은 그림 1과 같이 LCD 원판을 다른 공정으로 이송하기 위해서 수직 이송 시스템과 수평 이송 시스템을 결합한 Stocker용의 횡자속형 선형 전동기의 개발에 관한 것이다. 3차원 등가자기 회로방법과 2차원 유한 요소법을 사용하여 단부 효과를 고려한 특성해석을 수행하였으며 정특성 실험 결과와 비교하여 설계 및 해석의 타당성을 확인하였다.

#### 2. 영구자석 여자 횡자속형 전동기 개발

##### 2.1 영구자석 여자 횡자속형 전동기 원리

가장 간단한 횡자속형 전동기는 그림 2와 같이 이동자와 고정자 모두 돌극 구조를 가지고 있으며 자기 저항이 최소로 되는 위치로 이동하려고 하는 선형 릴리펀스 전동기와 동일한 원리로 동작한다. 발생하는 추력은 이동자와 고정자의 상대 위치에만 의존하며 전류 방향과는 무관하다. 그러므로 한 방향으로 연속적인 운동을 하기 위해서는 3상 이상을 필요로 한다. 그림 3은 영구자석 여자 횡자속형 전동기를 나타낸 것으로 차자 방향이 교번하는 영구자석이 철심에 삽입되어 공극에 자속을 집중할 수 있는 구조로 되어 있다. 또한 고정자 치를 극간격 만큼 엇갈리게 배치하여 위치에 따른 전류 극성의 변화로 전 영역에서 동일한 방향의 추력을 발생할 수 있다. 자기 포화와 누설 자속을 무시하면 1차원 등가 자기 회로방법에 의해 추력 밀도는 다음과 같이 표현할 수 있다 [4].

$$F_{xd} = B_0 \frac{\Theta_a}{2\tau_p} \quad [N/m^2] \quad (1)$$

추력밀도는 공극에서의 자속밀도  $B_0$ 와 인가 기자력  $\Theta_a$ 에 비례하고 극간격  $\tau_p$ 에 반비례한다.

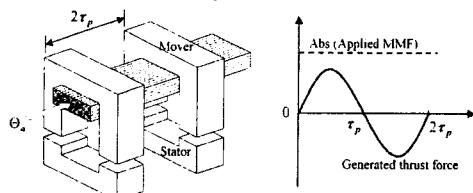


그림 2. 횡자속형 전동기의 기본 구성 및 기자력과 추력과의 관계

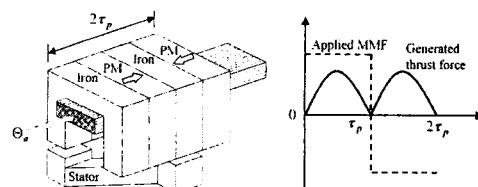


그림 3. 영구자석 여자 횡자속형 전동기의 기본 구성 및 기자력과 추력과의 관계

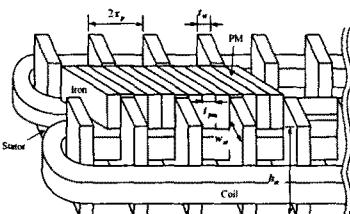
## 2.2 디자인 변수

그림 4는 설계한 영구 자석 여자 횡자속형 전동기 1상을 나타낸 것이다. 수평형 전동기와 수직형 전동기 모두 편측식이고, 자속 집중 형태를 가지고 있으며 이동자에 영구 자석을 포함하고 있다. 하지만 수직형 전동기의 경우는 이동자 내부 삽입형으로 흡인력을 서로 상쇄할 수 있지만 수평형 전동기는 흡인력이 존재하는 차이점이 있다. 횡자속형 전동기의 특성에 영향을 미치는 설계 변수들은 여러 가지가 있지만 철도 차량용 횡자속형 전동기의 선행 연구에서 제시한 것처럼 최대 추력밀도를 얻기 위해서는 극 간격  $\tau_p$ 와 고정자 치두께  $t_{st}$  그리고 영구 자석 두께  $t_{pm}$ 은 다음과 같은 조건을 만족해야 한다 [5]-[6].

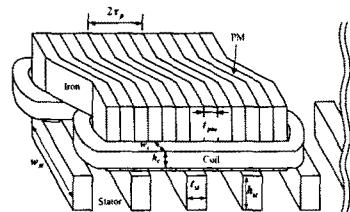
$$t_{st}/\tau_p \approx 0.7$$

$$t_{pm}/\tau_p \approx 0.43$$

식 (1)에서 알 수 있듯이 극 간격을 반으로 줄이면 추력 밀도를 2배 올릴 수 있지만 누설 자속의 증가로 인해 극 간격을 줄이는 데는 한계가 있다. 철도 차량에 비해 공극의 길이가 작은 점을 감안하여 본 연구에서는  $t_{st}/\tau_p$  와  $t_{pm}/\tau_p$ 를 각각 0.7과 0.5로 결정하였으며 세부적인 사양은 표 1과 같다.



(a) 수직형 Stocker



(b) 수평형 Stocker

그림 4. 설계한 횡자속형 선형 전동기 형태

표 1. 설계 파라미터

구분	사양	
	수직형	수평형
DC 링크 전압	300 [V]	300 [V]
턴수	244 turns	288 turns
정격 기자력	3200 [A·T]	5000 [A·T]
공극	1.5 [mm]	2.0 [mm]
고정자	$\tau_p$	20 [mm]
	$t_{st}$	14 [mm]
	$\omega_{st}$	30 [mm]
	$h_{st}$	100 [mm]
이동자	$t_{pm}$	10 [mm]
	$\omega_c$	22 [mm]
	$h_c$	22 [mm]
영구 자석	NdFeB	

$$(B_r = 1.2[T], \mu_r = 1.05)$$

## 2.3 횡자속형 전동기 해석

회전형 전동기와 달리 선형 전동기의 경우는 이동자의 양 끝부분에 개방된 자기회로에 의해 단부 효과가 존재한다. 그러나 횡자속형 전동기의 경우 3차원적인 자기회로 특성으로 인해 이와 같은 이동자 단부 효과를 고려하기 위해서는 모델 전체를 3차원으로 해석해야 하는데 이는 매우 어려울 뿐 아니라 비실용적인 방법이다. 본 논문에서는 그림 5와 같이 2차원으로 간략화한 등가 자기 회로를 구성하고 이동자 단부 효과를 고려할 수 있는 보정 계수를 구하였다. 모델 A의 이동자는 영구자석 7개와 철심 8개로 구성되어 있으며 모델 B는  $2\tau_p$ 에 해당하는 이동자 길이(주기 경계 조건을 적용한 3차원 등가 자기 회로방법의 해석 대상)만큼을 제외한 영구자석 5개와 철심 6개로 구성되어 있다. 그러므로 표 2에서와 같이 모델 A의 추력에서 모델 B의 추력을 뺀 값은 단부 효과가 없는 경우 이동자  $2\tau_p$ 에 해당하는 추력값으로 간주할 수 있고 모델 A의 추력값으로 나눈 나머지는 이동자 단부 효과의 영향으로 인한 것이며 각각의 기자력에 대해서 이동자 단부가 전체 추력에 기여하는 정도는 해석 대상  $2\tau_p$ 의 추력값에 대해 0.65배 정도임을 알 수 있다. 그러므로 횡자속형 전동기의 추력값은 우선 주기 경계조건을 적용한 3차원 등가 자기 회로방법에 의해 이동자  $2\tau_p$ 에 해당하는 추력을 구하고 이동자의 길이 및 단부 효과를 고려한 보정계수를 사용해서 전체 추력값을 계산하였다. 수평형 전동기 또한 수직형 전동기와 동일한 보정계수를 사용하였다.

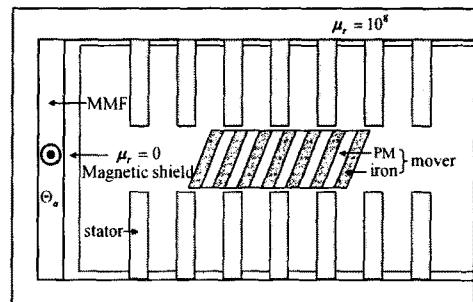
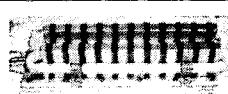


그림 5 수직형 전동기의 간략화한 2차원 등가 자기 회로

표 2. 단부 효과를 고려한 보정 계수

인가 기자력 [A·T]	800	1600	2400	3200
† 모델 A (PM=7, 철심=8)	5.07	9.98	14.65	18.96
‡ 모델 B (PM=5, 철심=6)	3.69	7.25	10.64	13.77
§ 모델 A-모델 B (PM=2, 철심=2)	1.38	2.73	4.01	5.19
보정 계수	나머지 (1/§)	0.66	0.65	0.65



(a) 고정자



(b) 이동자

그림 6 수직형 전동기 고정자 및 이동자



(a) 고정자  
그림 7 수평형 전동기 고정자 및 이동자

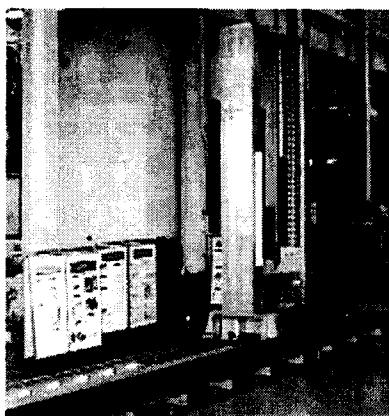
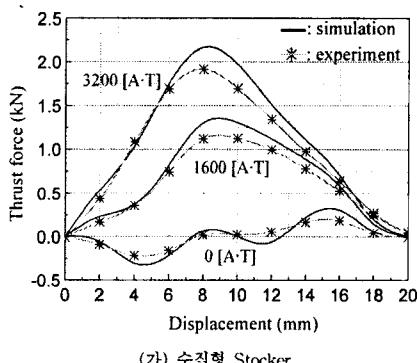


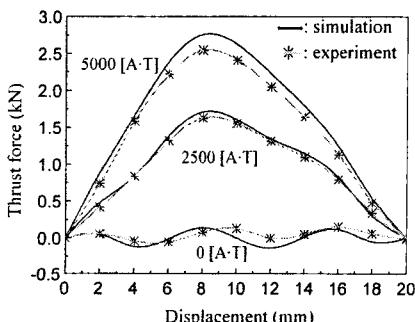
그림 8 전체 Stocker 시스템



그림 9 실험 장치



(a) 수직형 Stocker



(b) 수평형 Stocker

그림 10 인가 기자력 및 이동자 위치에 따른 추력 특성 비교

### 3. 해석 및 실험

그림 6과 7은 수직형 및 수평형 영구자석 여자 횡자속형 전동기의 이동자 및 고정자를 나타낸 것이다. 각각의 전동기는 2상으로 구성되어 있고 각각의 상은 전기각으로 90만큼 위상차를 두고 배치되어 있다. 그림 8은 수직형과 수평형을 결합한 전체 개발 시스템을 나타낸 것으로 수직형은 2.5m 수평형은 8m의 길이로 제작되었다. 그림 9는 인가 기자력 및 이동자 위치에 따른 전동기의 정추력을 측정하기 위한 장치로 3차원 로드셀을 사용하여 각 방향으로의 힘의 간섭을 배제할 수 있도록 하였다.

그림 10은 인가 기자력 및 이동자 위치에 따른 추력값을 해석값과 비교한 것이다. 각각의 전동기 이동자는 모두 15개의 영구 자석과 16개의 철심으로 구성되어 있으므로 27에 해당하는 3차원 등가 자기 회로망법에 의한 해석 결과에 이동자 길이 및 단부 효과를 고려한 보정계수를 곱해서 전체 추력을 계산할 수 있다. 각각의 기자력에서 해석값과 추력값은 10% 이내의 오차 범위내에서 서로 일치하고 있다. 정격 기자력에서 수직형 전동기의 경우 단위 면적당 4,000kg의 힘을 발생할 수 있는데 부가적인 구조물을 제외하면 이동자 자체 무게보다 8배 무거운 물체를 들어 올릴 수 있는 힘에 해당한다. 이는 향후 설계 개선을 통하여 ropeless 엘리베이트에 적용할 수 있는 가능성을 제시한 것이다. 또한 실험 및 해석 결과에서 횡자속형 전동기는 다른 영구자석 전동기에 비해 상대적으로 큰 디란트력을 가지고 있는데 이는 기본적으로 횡자속형 전동기의 퀼리던스 특성에 기인한 것으로 향후 누설자속과 추력밀도를 고려해서 이를 저감시키는 방안에 대한 연구가 진행되어야 할 것이다.

### 4. 결 론

본 연구는 LCD 이송 장치에 사용하기 위한 영구자석 여자 횡자속형 선형 전동기의 개발에 관한 것으로 기본적인 설계 사양을 제시하고 시제품 제작을 통하여 3차원 등가 자기 회로망법과 2차원 유한 요소법에 의한 해석 결과를 실험 결과와 비교하였다. 제작상의 어려움을 포함해서 횡자속형 전동기가 극복해야 할 문제점들이 여전히 남아 있지만 상대적으로 높은 추력 밀도에 의해 LCD 이송 장치를 포함하는 저속 고출력을 요구하는 여러 응용 분야에 적용할 수 있을 것으로 판단되며 이에 관한 향후 연구가 진행될 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] W.M Arshad, T. Backstrom, C. Sadarangani, "Analytical design and analysis procedure for a transverse flux machine", IEMDC 2001, pp. 115-121, 2001
- [2] Henneberger G., Bork M., "Development of a new transverse flux motor", IEEE Colloquium on New Topologies for PM Machines, pp 1-6, 1997
- [3] Waqas Mahmood Arshad, A low-leakage linear transverse flux machine for a free-piston generator, Doctoral dissertation, Royal Institute of Tech., Stockholm, 2003
- [4] 강도현, 방덕제, 김종무, 정현호, 김문환, "Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 49B권, 3호, pp. 145-151, 2000
- [5] 강도현, Herbert W도, "철도 차량용 고출력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 48B권, 6호, pp. 301-308, 1999
- [6] 강도현, 김문환, "자기부상 열차용 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 49B권, 2호, pp. 102-109, 2000