

횡자속 선형전동기를 적용한 수평형 스톡 시스템의 설계 및 해석

장정환, 정수진, 강도현, 이지영*, 홍정표*

한국전기 연구원 메카트로닉스 그룹, 창원대학교 전기공학과*

Design and analysis of horizontal stocker using transverse flux linear motor

Jung-Hwan Chang, Soo-Jin Jung, Do-Hyun Kang, Ji-Young Lee*, Jung-Pho Hong*

Mechatronics group, KERI, Dept. of Electrical engineering, Changwon national university*

Abstract - 본 논문은 LCD 제조 공정 라인에서 LCD 용 원판을 다른 여러 공정으로 이송하는데 사용하기 위한 수평형 스톡 시스템의 설계 및 제작에 관한 연구이다. 구동원으로 제작된 영구 자석 여자 횡자속형 전동기는 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있는 구조로 일반 선형 유도 전동기나 선형 동기기에 비해 단위 체적당 높은 출력 밀도를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. 3차원 동가 자기 회로방법을 사용하여 기자력 변화에 따른 추력 및 흡인력과 같은 특성을 해석하였으며 정특성 실험을 통하여 설계 및 해석의 타당성을 검토하였다.

1. 서 론

최근 일반 산업용 전동기는 물론이고 적은 중량이 요구되는 선형 수송 기관과 큰 기동 토크가 요구되는 선형 구동 시스템에 새로운 설계 개념을 도입한 고효율 및 고풍출력 전동기의 필요성이 대두되고 있다. 특히 자동화 제조 장비 중 20m ~ 40m 길이의 LCD 제조 공정 라인에서 LCD용 원판(Glass)를 다른 여러 공정으로 이송하는 필수 모듈인 Stocker의 경우 현재는 기계적 변환 장치인 랙-피니언 구조에 의해서 회전운동을 선형 운동으로 변환하고 있는데 청정도나 백 슬래쉬에 의한 위치 정밀도의 한계로 인해 새로운 선형 구동 시스템의 개발이 절실한 상황이다.

횡자속형 전동기는 자속의 이동 방향과 전동기의 이동 방향이 같은 종축형 전동기와 달리 그림 1에서와 같이 자속의 방향이 전동기의 이동 방향과 횡방향인 경우로 전기 회로와 자기 회로가 서로 분리되어 있으며 링 형태의 권선으로 end-winding에 의한 손실을 저감할 수 있다. 특히 영구 자석 여자 횡자속형 전동기의 경우 높은 공극 자속 밀도에 의해 일반 선형 유도 전동기나 선형 동기기에 비해 단위 체적당 높은 출력 밀도를 얻을 수 있으므로 반도체 웨이퍼 및 LCD용 원판 이송과 같은 반송 시스템에 확실한 이점을 가지고 있다.

본 논문은 1000×1200mm의 LCD용 원판을 운반하는 5세대 cell stocker용의 LCD 원판 이송 시스템에 적용하기 위한 횡자속형 선형 전동기의 설계 및 특성 해석과 관련한 것으로 3차원 동가 자기 회로방법을 사용하여 기자력 변화에 따른 추력, 흡인력과 같은 특성을 파악하였으며 정특성 실험을 통하여 설계 및 해석의 타당성을 검토하였다.

2. 영구자석 여자 횡자속형 선형 전동기 설계

2.1 횡자속형 전동기 이론

횡축형 전동기는 기본적으로 릴럭턴스 전동기의 동작 원리와 동일하다. 그림 1은 횡축형 전동기의 기본 형상으로 권선 전류에 의한 기자력 Θ_a 에 의하여 자속 Φ_a

발생할 때 이동자는 자기 저항이 최소화 되는 방향 즉 고정자의 치와 일치하는 방향으로 움직이게 된다. 그림 1의 기본 형상에서 발생 가능한 단위 면적 당 발생 추력 F_{zd} 는 식 (1)과 같으며 전동기 설계시 기본식으로 이용되고 있다 [1].

$$F_{zd} = \frac{\mu_0}{32\delta\tau_p} \Theta_a^2 \quad [N/m^2] \quad (1)$$

여기서 μ_0 는 공기의 투자율, δ 은 공극, τ_p 는 극간격이다. 한편 그림 1의 경우 $0 \sim \tau_p$ 구간에서는 (+)방향의 힘을 발생시키지만 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 인가 전류의 방향과 무관하게 (-) 방향의 힘을 발생시키므로 일정 방향의 힘을 얻기 위해서는 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 전류를 인가하지 말아야 한다. 그러므로 한방향으로 연속적인 동작을 하기 위해서는 그림 1과 동일한 시스템을 위상차를 두고 배치하여야 한다.

그림 2는 영구자석 여자형 횡자속형 전동기를 나타낸 것으로 이동자에 설치된 영구자석의 자극을 교대로 배치하여 높은 공극 자속 밀도를 얻을 수 있도록 한 구조로 일정 방향의 추력을 발생시키기 위해서 고정자는 τ_p 만큼 엇갈리게 설계 되었다. 그러므로 $\tau_p \sim 2\tau_p$ 구간에서는 인가 전류의 방향을 반대로 하여 (+) 방향의 힘을 발생시킬 수 있다. 무부하에서 공극 자속 밀도를 B_0 라고 하면 추력 밀도는 식(2)와 같다 [3].

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

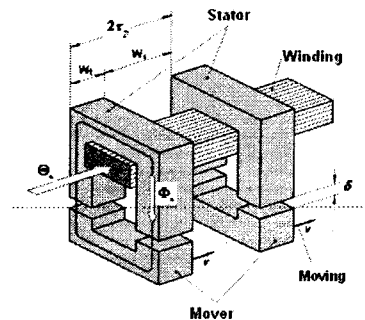


그림 1 횡축형 전동기의 기본 구조
Fig. 1 Basic structure of transverse flux machine

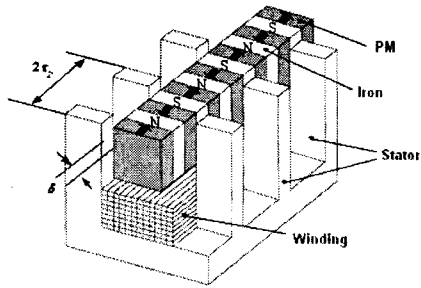


그림 2. 영구자석 여자 횡자속형 전동기
Fig. 2 Permanent magnet excited transverse flux machine

상의 결과를 전기각으로 90도(10mm) 이동하여 각상을 대수적으로 합한 결과와 같다.

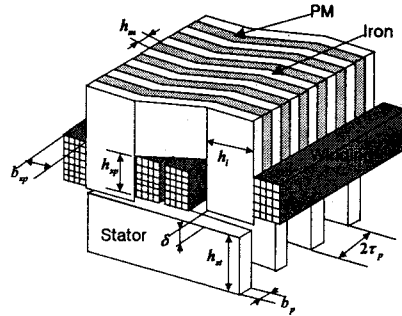


그림 3 Cell stocker용 선형 횡자속형 전동기
Fig. 3 Linear transverse flux machine for cell stocker

2.2 Stocker용 횡자속형 선형 전동기 설계

횡자속형 전동기는 이동자와 고정자의 형상 및 취부방법, 전기자 권선의 위치, 영구자석의 위치 및 취부 방법에 따라 다양한 형태의 설계가 가능하다. 그림 3은 본 연구에서 cell stocker용으로 설계한 선형 횡자속형 전동기이며 영구 자석에 의한 자속이 공극에 집중되어 높은 출력 밀도를 얻을 수 있는 영구 자석 여자 방식으로 이동자가 경사져 있으며 영구자석 축 일체형의 구조를 가지고 있다. 우선 현재 서보 모터에 의해 운행 중인 stocker에서 이동부 무게(1.2 ton) 및 주행시 필요한 가속도 ($2m/s^2$)를 고려하여 한 상당 평균 추력을 1250[N]으로 하여 두 상의 합성 추력을 2500[N]으로 설정하였다. 큰 흡인력으로 인한 기계적 마찰 손실 및 제작상의 문제를 고려하여 공극의 길이를 2mm로 하였으며, 최대 추력 밀도를 발생시킬 수 있는 공극과 극간격의 비 $\tau_p/\delta \approx 10$ 에서 극간격은 20 mm로 설정하였다[3]. 또한 영구자석 두께와 극간격의 비 (h_m/τ_p)와 고정자 치폭과 극간격의 비 (b_p/τ_p)는 발생 추력 및 흡인력을 고려하여 각각 0.5와 0.7로 설정하였다 [2-3]. 고정자 및 이동자의 철심 재질은 각각 S23과 S20C이며 영구자석은 잔류 자속 밀도가 1.2 [T]이며 비투자율이 1.05인 NdFeB 계열로 선정하였다. 표 1은 설계 전동기의 사양을 나타낸 것이다.

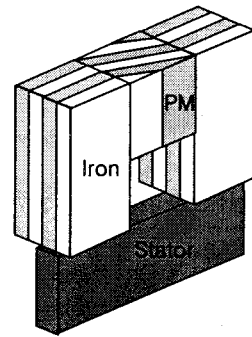


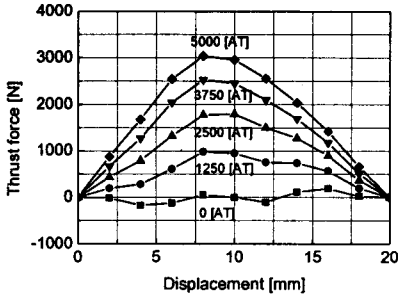
그림 4 3차원 해석 모델
Fig. 4 3-dimensional analysis model

2.3 Stocker용 횡자속형 선형 전동기 특성

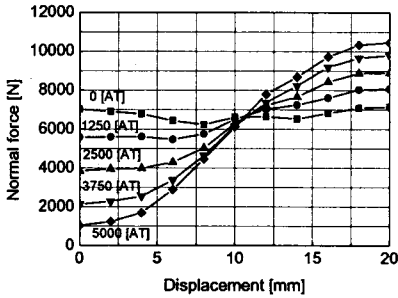
표1과 같은 사양으로 설계된 영구 자석 여자 횡자속형 전동기의 특성을 파악하기 위하여 3차원 등가 자기 회로 방법을 사용하였으며 주기 경계조건을 고려하여 해석 대상을 그림 4와 같이 모델링 하였다. 등가 자기 회로망법은 해석 대상 영역을 격자 형태의 자기 저항의 망으로 구성해서 대수 방정식으로 표현하는 방법으로 계변수인 자기 스칼라 포텐셜에 의해 필요한 물리량을 계산하는 방법인데 특히 선형 전동기에 적용할 경우 메쉬가 용이할 뿐 아니라 빠른 계산시간으로 유한 요소법에 비해 장점을 가지고 있다[4]. 회전기와 달리 선형기의 경우 본 논문에서와 같이 주기 경계 조건을 적용하여 해석할 경우 전체 해석 모델에 대한 값으로 환산하는 것이 용이하지 않다. Cell stocker용의 횡자속형 선형 전동기의 경우도 3차원 해석때의 모델링 영역은 이동자의 2극에 해당되지만 실제 모델의 경우 영구 자석이 15개, 자극에 해당하는 철심 영역이 16개로 이동부의 양 끝단에 철심이 위치하고 있다. 본 연구에서는 가정 자로를 이용한 2차원 등가 모델에 의해 이동자 전체에 대한 해석값을 기본 해석 모델의 7.5배로 산정하였다. 그림 5는 인가 기자의 변화에 따른 이동자 한 상의 추력 및 흡인력의 변화를 나타낸 것으로 이동자를 극간격 만큼 이동시키면서 계산한 결과이다. 실제 cell stocker의 경우는 a상과 b상이 4상한 동작이 가능한 대칭형 H 브리지 컨버터에 의해 독립적으로 제어되므로 합성 추력 및 흡인력은 한

표 1 Cell stocker용 영구자석여자 횡자속형 선형 전동기의 설계 사양
Table 1 Specifications of PM-excited transverse flux linear motor for cell stocker

구분	사양	비고	
추력[N]	2,500	속도 2[m/s] 가속도 2[m/s ²]	
출력[kW]	5	-	
정격 기자력[AT]	5000	-	
공극 [mm]	2	-	
고정자	전체길이 [mm]	8,000	-
	τ_p [mm]	20	-
	b_p [mm]	14	-
	h_{st} [mm]	40	-
	재질	S20C	-
이동자	길이 [mm]	310	PM:15개 Iron:16개
	h_m [mm]	10	-
	h_{sp} [mm]	40	-
	h_1 [mm]	20	-
	재질	철심 S23 PM NdFeB	-
턴수	288	-	
저항 [Ω]	1.6	-	
추력밀도 [kN/m ²]	66	-	



(a) 추력

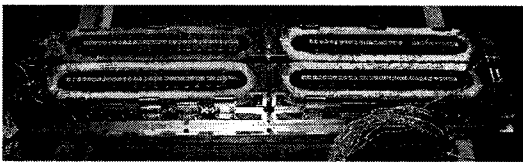


(b) 흡인력

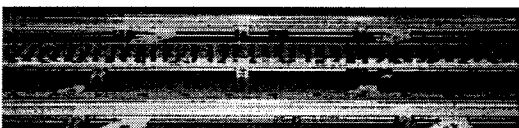
그림 5 기자력 변화에 따른 횡자속 선형 전동기의 특성 해석
Fig. 5 Characteristic analysis of transverse flux machine for the variation of magneto-motive force

3. 시작품 제작 및 실험

사진 1은 표 1의 설계 사양에 의해 제작된 이동자 및 고정자의 시작품이다. 그림 6은 정특성을 실험하기 위한 장치로 이동자의 위치를 변화시켜가며 추력 및 흡인력을 측정할 수 있도록 이동자는 리니어 베어링을 따라 이동이 가능하도록 하였으며 이동자의 뒷부분에는 정격 용량 1000[kgf]의 로드셀 4개를 병렬로 설치하여 흡인력을 측정할 수 있도록 하였다. 그리고 고정자가 설치되어 있는 평판의 측면에도 500[kgf] 로드셀을 부착하여 시작품의 추력을 측정할 수 있도록 하였다.



(a) 이동자



(b) 고정자

사진 1 영구자석 여자 횡자속형 선형 전동기 시작품
Photo 1 Prototype of permanent magnet excited transverse flux linear motor

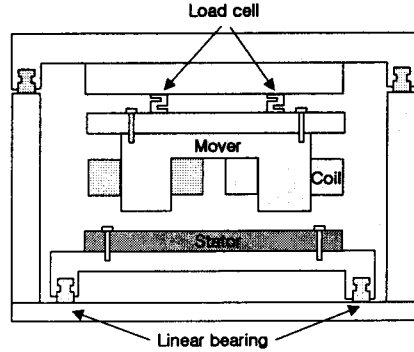


그림 6 선형 전동기 시험 장치
Fig. 6 Experimental setup for linear motor

표 2는 정격 기자력에서 추력 및 흡인력의 실험 평균값을 계산값과 비교한 것이다. 추력의 실험값은 계산값의 약 75%이고 흡인력의 실험값은 계산값의 약 84%이다. 흡인력에 비해 추력에서 상대적으로 차이가 크게 나타나는 것은 흡인력에 의한 리니어 베어링의 마찰력이 추력에 영향을 미친 것으로 판단된다.

표 2 계산값과 실험값의 비교

Table 2 Comparison of the simulated data and the measured data

	해석값	실험값	실험값/해석값
추력	1686 [N]	1260 [N]	75%
흡인력	5834 [N]	4917[N]	84%

4. 결 론

본 연구에서는 cell stocker-용의 영구 자석 여자 횡자속형 선형 전동기를 설계하고 시작품을 제작하였으며 정특성 실험을 통하여 추력 및 흡인력을 해석값과 비교하였다. 해석값과 실험값의 차이는 보다 엄밀한 해석 및 실험 절차에 의해 검증되어야 할 것으로 판단되며 향후에는 효율 및 역률을 포함하여 운전 형태에 따른 전류, 속도 응답과 같은 동특성에 대한 연구를 진행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] 강도현, Herbert W도, "철도 차량용 고효율 횡자속형 선형 전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 48B권, 6호, pp. 301-308, 1999
 [2] 강도현, 김문환, "자기부상 열차용 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 49B권, 2호, pp. 102-109, 2000
 [3] 강도현, 방덕제, 김종무, 정현호, 김문환, "Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구", 전기학회논문지, 49B권, 3호, pp. 145-151, 2000
 [4] 임달호, 홍정표, "3차원 등가자기회로방법에 의한 영구자석 모터의 자계해석", 대한전기학회논문지, 43권, 9호, pp. 1432-1439, 1994