

Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계에 관한 연구

論 文
49B-3-3

A Study on the Design of PM Exited Transverse Flux Linear Motor for Ropeless Elevator

姜道鉉* · 方德濟** · 金鍾武** · 鄭然鎬** · 金文煥***
(Do-Hyun Kang · Deok-Je Bang · Jong-Moo Kim · Yeon-Ho Jeong · Moon-hwan Kim)

Abstract - The topological investigations regarding magnetic circuit geometry and winding form of the transverse flux machine have brought up a variety of constructable arrangements with different features for several types of application[1, 2]. Here with, a novel PM-exited linear motor with inner mover, based on the transverse flux configuration leads to a considerable increase in power density for moving part.

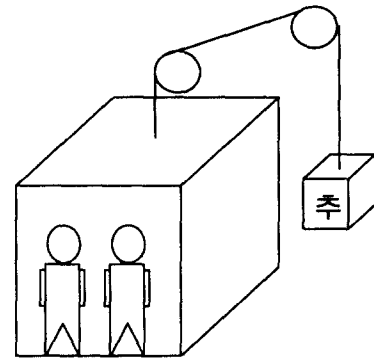
In this study we designed PM-exited transverse flux linear motor for ropeless elevator, whose output power density is higher and weight is lighter than conventional linear synchronous motors. When the designed motor in this study is applied to ropeless elevator, it is possible to increase power density more than 400% comparing with PM exited linear synchronous motor. The result of this study can be utilized for ropeless elevator or gearless direct linear moving system with high output[3].

Key Words : Novel electrical machine, Transverse flux, Synchronous motor, Ropeless elevator, PM

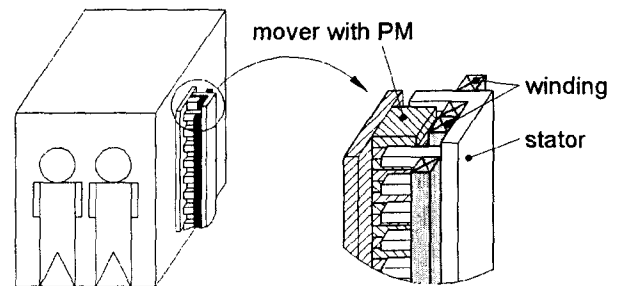
1. 서 론

최근에는 건물의 대형화, 고층화로 인해 고속·대용량 승강기의 개발이 요구되고 있으며 현재까지는 로프(rope)식 승강기가 널리 보급되어 사용되고 있다. 로프식 승강기는 이송량이 많을 경우에 승강기의 대수가 증가하게 되고 이로 인해 승강로가 차지하는 면적이 커지게 되어 건물의 유효면적의 감소를 초래하게 되므로 하나의 승강로에 여러 대의 설치가 가능한 Ropeless 승강기가 제안되고 있다[4].

Ropeless 승강기는 기존의 승강기에 사용되는 로프, 추 등 직선운동으로 변환하기 위한 기계적 장치를 사용하지 않고 선형전동기에 의해 직접 직선운동을 하므로 승강기의 구조를 간략화할 수 있는 장점을 가지고 있으며 승강기의 상승시에는 전력을 소비하고 하강시에는 회생하는 동작으로 운전되기 때문에 사용전력을 줄이는 것이 가능하다. 그리고 Ropeless 승강기는 전동기에 의해 승강기가 지지되기 때문에 추에 의해 전동기의 부하가 경감되는 로프식 승강기에 비해 큰 추력이 요구된다. 최근에는 전동기 관련 재료와 전력용 반도체의 발전으로 인해 새로운 설계개념을 도입한 선형전동기가 개발되고 있는 추세이며 본 연구에서는 단위무게당 발생추력이 영구자석여자 선형 동기전동기[5]에 비해 4배 이상 높은 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기를 설계하였다.



(a) elevator with rope



(b) ropeless elevator

그림 1 기존의 승강기와 Ropeless 승강기
Fig. 1 Elevator with rope and ropeless elevator

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究Group長 · 工博

** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 Mechatronics研究Group 研究員

*** 正 會 員 : 新羅大 自動車工學科 傳任講師 · 工博

接受日字 : 1999年 8月 6日

最終完了 : 2000年 1月 24日

Ropeless 승강기는 그림 1에 나타난 바와 같이 승강기에 이동자가 설치되고 가이드레일부분에 고정자가 설치되므로 부하로 작용하는 이동자의 경량화가 요구된다. 본 연구에서 설계된 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 이동자 무게는 같은 공극 크기에서 영구자석여자 선형 동기전동기의 1/3정도였으며, 이동자 무게당 추력비는 206.9 [N/kg]으로 나타났다. 그리고 본 연구에서는 설계사양의 타당성을 검증하기 위해 설계모델의 축소형으로 영구자석여자 횡자속 선형전동기를 제작하여 정추력을 시험하고 해석치와 비교·검토하였다.

선형전동기를 Ropeless 승강기에 적용할 경우, 상승·하강 운전시와 비상정지, 정전시 등에 대한 제어시스템과 전력변환 장치 등의 구성은 차후 고려되어야 할 사항이다.

2. 영구자석여자 횡자속 선형전동기 이론

횡자속 선형전동기는 자속의 이동방향이 이동자의 이동방향에 대해 횡방향이며 전류가 이동자와 같은 방향으로 흐르는 것이 특징이다[6]. 횡자속 선형전동기의 출력밀도를 증가시키기 위해 영구자석을 삽입한 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 형상은 다양하지만 본 연구에서는 그림 2와 같은 내부이동자형을 대상으로 하였다[7].

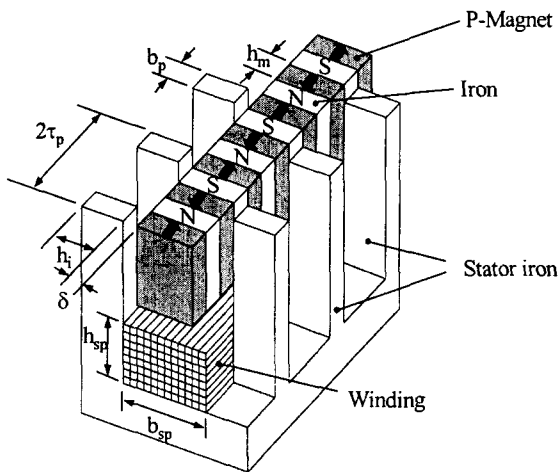


그림 2 내부이동자형 영구자석여자 횡자속 선형전동기
Fig. 2 PM-excited transverse flux linear motor with inner mover

영구자석에서 발생하는 자계는 공극에서 자계를 집중시킴으로 높은 공극 자속밀도를 얻을 수 있다. 이동자에 설치된 영구자석의 자극을 교대로 설치하여 양측 극면에서 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 감겨 있는 철심은 τ_p 만큼 엇갈리게 설계하였다. 이때 단위면적당 발생가능 힘밀도 F_{xd} 는 식 (1)과 같다[8].

$$F_{xd} = kB_0 \frac{\theta_a}{2\tau_p} \quad [\text{kN/m}^2] \quad (1)$$

여기서, k 는 설계상수, B_0 는 무부하 공극자속밀도, θ_a 는

기자력, 그리고 τ_p 는 극간격이다. 설계상수 k 는 철심의 비선형 특성과 1차원 해석모델과 3차원 해석모델의 차이를 고려하여 $k=0.6$, 기계적 공극은 비교대상인 영구자석여자 선형 동기전동기의 공극과 같은 $\delta = 5$ [mm], 최대 추력밀도를 발생시킬 수 있는 공극과 극간격의 비 $\tau_p/\delta \approx 10$ 에서 극간격은 $\tau_p=50$ [mm], 그리고 공극과 기자력의 비 $\theta_a/\delta \approx 1,000$ [AT/mm]에서 기자력은 $\theta_a=10,000$ [AT], 영구자석의 잔류자속밀도는 $B_r=1.2$ [T], $h_m/\tau_p=0.4$, 무부하 공극자속밀도는 $B_0=1.0$ [T]로 선정할 경우, 본 연구에서 설계할 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 F_{xd} 를 식 (1)을 이용하여 계산하면 60 [kN/m²]로 된다.

3. 2차원 해석에 의한 h_m/τ_p 와 b_p/τ_p 의 결정

유한요소 해석프로그램 Flux2D를 이용한 2차원 정자계해석을 수행하여 공극 $\delta=5$ [mm]인 3[kW]급 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 단위면적당 발생 힘 F_{xd} 가 최대인 영구자석두께와 극간격의 비(h_m/τ_p), 그리고 Pole폭과 극간격의 비(b_p/τ_p)를 결정하였다. 이때 극간격은 $\tau_p/\delta \approx 10$ 비율을 적용하여 $\tau_p=50$ [mm]로 선정하였으며 기자력(θ_a)은 $\theta_a/\delta \approx 1,000$ [AT/mm]비율을 적용하면 정격이 10,000[AT]이지만 과부하 운전시를 고려하여 기자력을 $\theta_a=15,000$ [AT]으로 적용하였으며 h_m 과 b_p 를 설계변수로 하여 h_m/τ_p 을 0.2~0.5, b_p/τ_p 을 0.5~1.0까지 변화시키며 해석을 수행하였다.

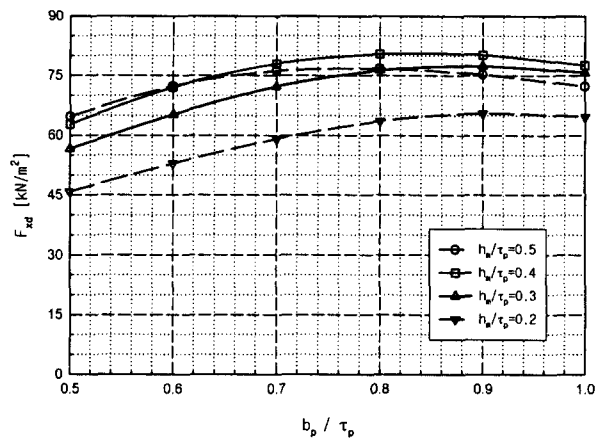


그림 3 h_m 과 b_p 의 변화에 따른 F_{xd} 의 변화
Fig. 3 Force density due to h_m and b_p

해석결과는 그림 3과 같으며, $h_m=20$ [mm], $b_p=40$ [mm]일 때의 추력밀도 F_{xd} 가 80.6 [kN/m²]로 최대치를 보여 최적설계사양은 $h_m/\tau_p=0.4$, $b_p/\tau_p=0.8$ 임을 파악할 수 있었다.

4. 3[kW]급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 설계

설계전동기를 평가하기 위해 일본 지하개발이용연구센터에서 제작한 3[kW]급 영구자석여자 선형 동기전동기의 사양과 모델을 표 1과 그림 4에 나타내었으며[5], 영구자석여자 선형 동기전동기와 공극길이와 같은 3[kW]급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기를 2차원으로 설계하여 사양을 표 2에 나타내었다. 공극이 $\delta=5[\text{mm}]$ 이므로 최대 추력밀도를 발생시킬 수 있는 $\tau_p/\delta \approx 10$ 의 비율을 적용하여 $\tau_p=50[\text{mm}]$ 로 결정하였으며 2차원 정자계해석을 통하여 3장에서 최적사양으로 결정된 $h_m/\tau_p=0.4$, $b_p/\tau_p=0.8$ 의 비율을 적용하여 $h_m=20[\text{mm}]$, $b_p=40[\text{mm}]$ 로 결정하였다. 그리고 공극과 기자력의 비 $\theta_a/\delta \approx 1,000[\text{AT}/\text{mm}]$ 를 고려하여 기자력은 $10,000[\text{AT}]$ 로 결정하였다.

고정자와 이동자의 철심재질은 포항종합제철(주)에서 생산되는 35PN380으로 선정하였으며 영구자석은 잔류자속밀도 $B_r=1.2[\text{T}]$, 비투자율 $\mu_r=1.05$ 인 희토류 영구자석으로 선정하였다.

표 1 영구자석여자 선형 동기전동기 설계사양
Table 1 Spec. of PM-excited linear synchronous motor

구분	사양	비고	
추력[N]	3,000	속도 1[m/s] 가속도 1[m/s ²]	
출력[kW]	3	-	
전동기 무게[kg] (고정자+이동자)	469	단위길이당무게	
중량[kg]	270	수송중량:140kg 대차중량:130kg	
고정자 (전기자)	철심길이 [mm]	3,055	-
	철심폭 [mm]	150	-
	철심높이 [mm]	90	-
이동자 (계자)	무게 [kg]	36	-
	극수	16극	-
	길이 [mm]	1,000	-
	높이 [mm]	150	-
추력/무게	전동기 [N/kg]	6.4	-
	이동자 [N/kg]	83.3	-
공극 [mm]	5	-	
효율	0.62	-	
역률	0.91	-	
추력밀도 [kN/m ²]	10	-	

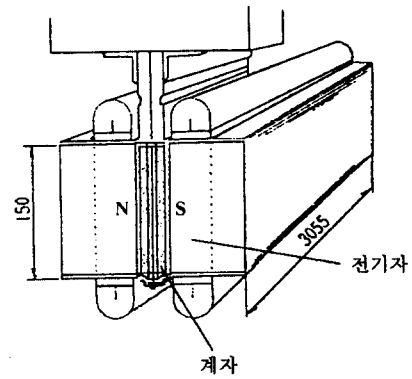


그림 4 영구자석여자 선형 동기전동기
Fig. 4 PM-excited linear synchronous motor

표 2 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계사양
Table 2 Spec. of PM-excited transverse flux linear motor for ropeless elevator

구분	사양	비고	
추력[N]	3,000	속도 1[m/s] 가속도 1[m/s ²]	
출력[kW]	3	-	
전동기 무게[kg] (고정자+이동자)	107.84	단위길이당무게	
중량[kg]	270	수송중량:140kg 대차중량:130kg	
고정자 (전기자)	철심길이 [mm]	3,055	-
	철심폭 [mm]	215	-
	철심높이 [mm]	200	-
	τ_p [mm]	50	-
	b_p [mm]	40	-
	h_{sp} [mm]	40	-
이동자 (계자)	b_{sp} [mm]	65	-
	무게 [kg]	10.3	-
	길이 [mm]	317	-
	높이 [mm]	75	-
추력/무게	폭 [mm]	55	-
	h_m [mm]	20	-
추력/무게	전동기 [N/kg]	27	-
	이동자 [N/kg]	291	-
공극 [mm]	5	-	
기자력 [AT]	10,000	-	
추력밀도 [kN/m ²]	63	-	

표 2에 나타난 3[kW]급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 설계치에 대한 유한요소 2차원 해석결과에 의하면, 전동기 전체(이동자+고정자)무게당 추력비는 영구자석여자 선형 동기전동기의 약 4.2배, 이동자 무게당 추력비는 영구자석여자 선형 동기전동기의 약 3.5배 정도로 나타났다. 전동기 무게는 영구자석여자 선형 동기전동기의 약 23%정도로 나타나 횡자속 구조에 의해 70%이상 경량화할 수 있는 것으로 파악되었다.

5. 시작품 제작 및 시험

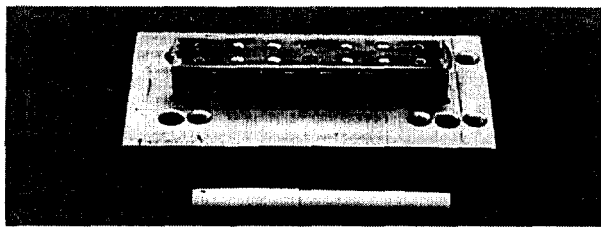
5.1 시작품 제작

표 2에 나타낸 3kW급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 설계사양에 대한 타당성을 검증하기 위해 축소형 모델로 시작품을 제작하여 시험을 수행하였다. 시작품에 대한 해석 및 시험 결과의 차이는 표 2에 나타낸 설계치의 실제 특성을 예측하는 기본 자료로 이용된다. 시작품의 사양은 표 3과 같으며, 제작된 시작품의 이동자와 고정자를 사진 1에 나타내었다.

표 3 시작품의 사양

Table 3 Spec. of the prototype

구분	사양	비고
공극(δ)	1mm	-
극간격(τ_p)	20mm	-
영구자석 두께(h_m)	10mm	$h_m/\tau_p = 0.5$
Pole폭(b_p)	14mm	$b_p/\tau_p = 0.7$
극길이(h_i)	20mm	-
권선창 높이(h_{sp})	20mm	-
권선창 폭(b_{sp})	30mm	-
1차(고정자) 치수	70mm×65mm×800mm	-
2차(이동자) 치수	28mm×20mm×150mm	-
권선 치수	1mm×3mm	-
권선수	78×2	-
접적율(k)	0.6	-



(a) 이동자
(a) Mover



(b) 고정자
(b) Stator

사진 1 영구자석여자 횡자속 선형전동기 시작품
Photo 1 The prototype of PM-excited transverse flux linear motor

5.2 시험 및 추력특성

1) 시험

선형전동기 시험장치에 사진 2, 그림 5와 같이 시작품을 설치하여 추력시험을 수행하였다. 이동자의 변위를 변화시키면서 추력을 측정할 수 있도록 시작품의 2차부분은 리니어 베어링을 따라 이동이 가능하도록 하였으며, 파워 서플라이를 이용하여 시작품의 인가전류를 조절함으로써 기자력의 변화에 따른 특성시험을 수행할 수 있도록 하였다. 그리고 리니어 베어링위에 설치되어 있는 1차부분 알루미늄 평판의 측면에 정격용량 500[kgf]인 로드셀을 설치하여 시작품의 추진력을 측정할 수 있도록 하였다.

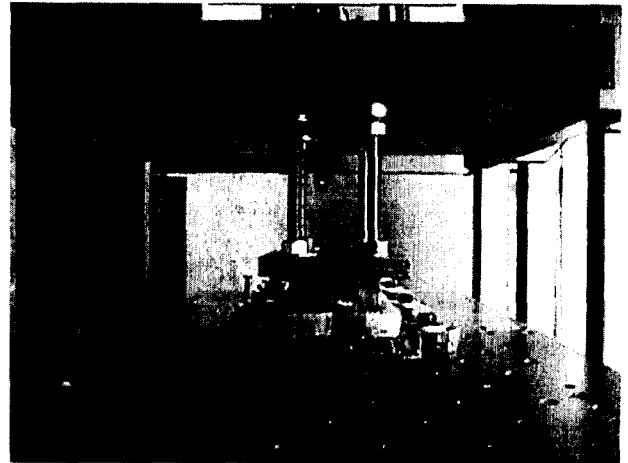


사진 2 시작품이 설치된 선형전동기 시험장치
Photo 2 Experimental apparatus with the prototype

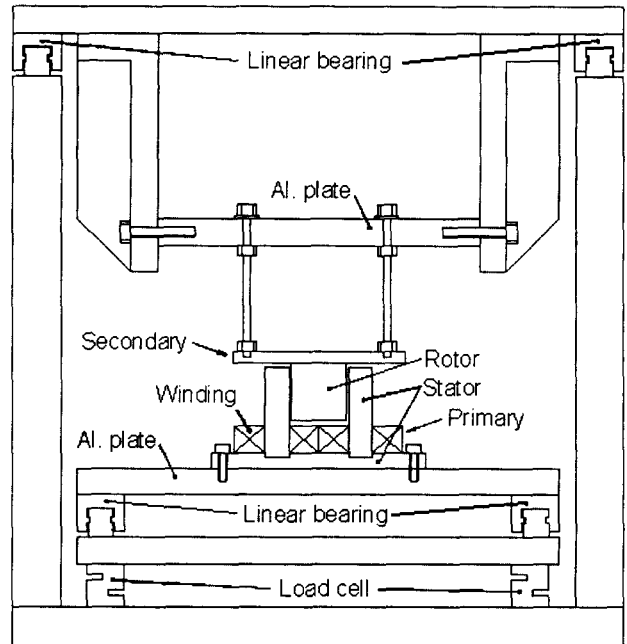


그림 5 시작품과 선형전동기 시험장치의 조립도
Fig. 5 Schematic diagram of experimental apparatus with the prototype

2) 추력특성

시작품의 3차원 해석모델을 그림 6과 같이 모델링하고 3차원 유한요소 해석프로그램인 Magnet-5를 이용하여 이동자를 극간격(τ_p)만큼 이동시키며 추력을 계산하였다. 그림 7에 3차원 해석결과를 시험결과와 기자력별로 비교하여 나타내었으며, 기자력에 따른 최대 추력값은 1,000[AT]인 경우에 23.6[%], 2,000[AT]인 경우에 23.4[%], 3,000[AT]인 경우에 20.4[%] 그리고 4,000[AT]인 경우에 14.4[%]정도 3차원 해석결과가 시험결과에 비해 크게 나타났다.

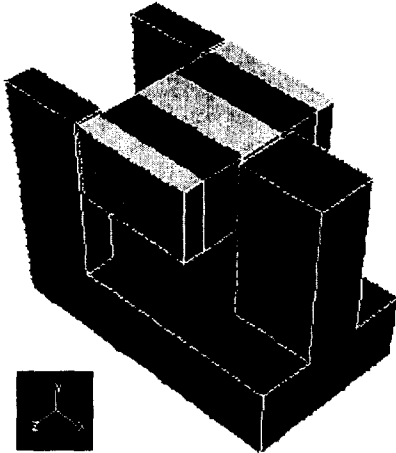


그림 6 시작품의 3차원 해석모델
Fig. 6 3D simulation model of the prototype

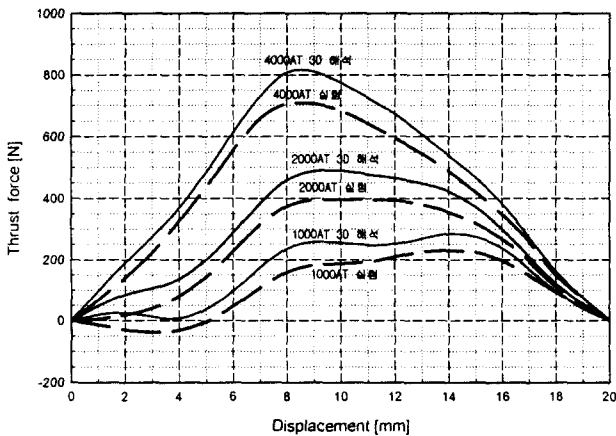


그림 7 시작품 추력의 3차원 해석결과와 시험결과와의 비교
Fig. 7 3D simulated and measured thrust force of the prototype

그림 8은 기자력의 변화에 따른 시작품 추력밀도 F_{xd} 의 시험결과와 2차원 및 3차원 해석결과를 비교하여 나타낸 것으로 기자력이 1,000[AT]일 때 시험결과에 비해 2차원 해석결과는 39.7[%], 3차원 해석결과는 28.8[%]정도 크게 나타났다. 기자력이 2,000[AT]인 경우는 2차원이 41.1[%], 3차원이 24.6[%], 3,000[AT]인 경우는 2차원이 42.8[%], 3차원이 19.6[%] 그리고 4,000[AT]인 경우는 2차원이 44.5[%], 3차원

이 14.4[%]정도 시험결과에 비해 크게 나타났다. 전동기 시작품의 제작시 영구자석과 철심 그리고 고정자 철심과 치의 부착과정에서 미세한 공극이 생기게 되고 가공과정에서 철심의 B-H특성이 약간 변하게 되기도 하는데 해석과정에서는 이를 고려하지 않았기 때문에 시험결과와 해석결과 사이에 오차가 발생한 것으로 판단된다. 이상의 결과를 통해 기자력이 정격인 2,000[AT]일 때, 설계전동기의 축소형인 시작품의 추력특성 시험결과는 2차원 해석결과의 약 71[%], 3차원 해석결과의 약 80[%]정도임을 파악할 수 있었다.

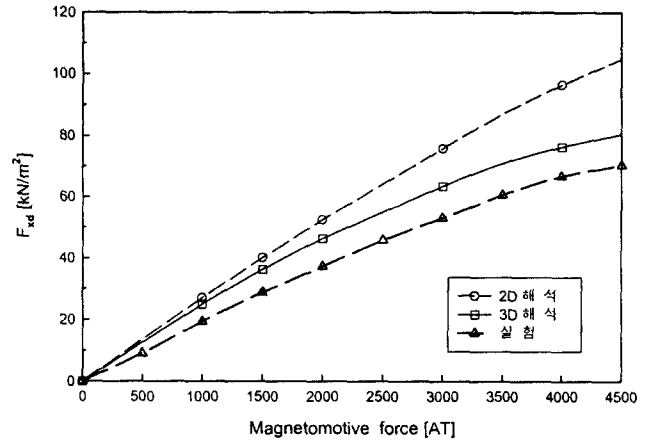


그림 8 기자력의 변화에 따른 추력밀도의 변화
Fig. 8 Force density due to magnetomotive force for the prototype

5.3 설계전동기의 최종 설계사양 결정

전 절에서 시작품의 시험을 통해 파악된 바와 같이 본 연구에서 2차원으로 설계한 전동기의 실제 추력은 2차원 설계치보다 약 30[%]정도의 감소가 예상되므로 이를 고려한 재설계를 수행하여 3[kW]급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 최종 설계사양을 결정하였으며, 이 결과 중 표 2의 설계사양에서 변경된 사양만 표 4에 나타내었다. 따라서 표 4에 나타낸 사양 이외의 사양은 표 2와 같으며, 설계전동기의 추력밀도 F_{xd} 는 영구자석여자 선형 동기전동기의 약 4.5배인 44.8 [kN/m²]로 나타났다.

표 4 설계전동기의 최종 설계사양
Table 4 Final spec. of the designed motor

구분	사양	비고	
전동기 무게[kg] (고정자+이동자)	112.04	단위길이당무게	
이동자 (계자)	무게 [kg]	14.5	-
	길이 [mm]	446	-
추력/무게	전동기 [N/kg]	26.8	-
	이동자 [N/kg]	206.9	-
추력밀도 [kN/m ²]	44.8	-	

이상과 같이 본 연구에서 최종설계된 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기와 영구자석여자 선형 동기전동기의 무게당 추력비를 비교하면 그림 9와 같다. 전동기 전체(이동자+고정자)무게당 추력비와 이동자 무게당 추력비는 설계모델인 영구자석여자 횡자속 선형전동기가 영구자석여자 선형 동기전동기에 비해 각각 약 4.1배, 약 2.5배 정도였다

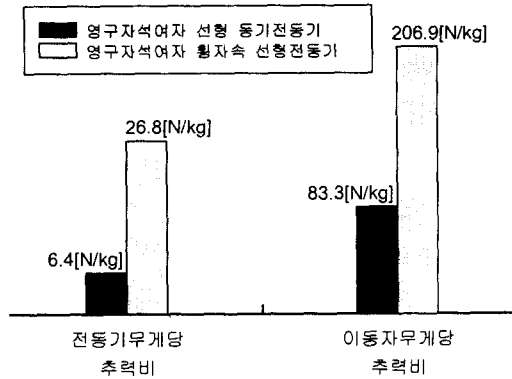


그림 9 무게당 추력비의 비교
Fig. 9 Comparison of the ratio of thrust force

6. 결론

본 연구에서 설계된 3[kW]급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 전동기 단위 무게당 추력은 약 26.8[N/kg]으로 단위 무게당 추력이 6.4[N/kg]인 영구자석여자 선형 동기전동기에 비해 4배 이상의 추력이 발생하였다. 그리고 3[kW]급 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 설계 타당성을 검증하기 위해 축소형으로 전동기를 제작하여 추력시험을 수행하였으며, 시험결과는 영구자석의 부착 등 제작과정에서 발생하는 문제를 고려하지 않은 3차원 해석결과와 약 80[%]로 나타났다.

앞으로 본 설계에서 제안된 Ropeless 승강기용 영구자석여자 횡자속 선형전동기의 운전조건에 따른 특성을 평가하기 위해 제어기, 전력변환장치를 구성해 운전시의 출력, 효율, 역률 등을 검증할 예정이다.

참고 문헌

[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, "Permanentmagneterrregte Synchronmaschinen hoher Kraftdichte nach dem Transversalflußkonzept", etzArchiv Bd. 10 (1988), H5, S.143-149.

[4] 木村 他, "ロープレスエレベータ用リニア同期モータの運パラメータに対する入出力, 効率の検討" 電氣學會リニアドライブ研究會資料, LD-97-95, 1997.
[5] "リニアモータによる垂直輸送システム" 財團法人 エンジニアリング振興協會 地下開發利用研究センター, 1992.
[6] Do Hyun Kang, "Transversalflussmaschinen mit permanenter Erregung als Linear antriebe im schienengebundenen Verkehr", Braunschweig University, 1996.
[7] 강도현, 방덕제, 김종무, "고출력 영구자석여자 횡자속 선형전동기 설계에 관한 연구", '99 대한전기학회 전기기기연구회 및 전기철도연구회 춘계합동학술발표회 논문집, pp. 53-58, 1999.
[8] 강도현, Herbert Weh, "철도 차량용 고출력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구", 대한전기학회 논문지 제 48권, 제 6호, B권, pp. 301-308, 1999.

저자 소개



강도현 (姜道鉉)

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 졸업(공학박). 1989년~현재 한국전기연구소 선임연구원(산업전기

연구단 Mechatronics 연구그룹장)

Tel : 0551-280-1480

Fax : 0551-280-1547

E-mail : dhkang@keri.re.kr



방덕제 (方德濟)

1971년 5월 17일 생. 1996년 부경대 공대 기계설계공학과 졸업. 1998년 부경대 대학원 냉동공학과 졸업(석사). 1998년~현재 한국전기연구소 연구원(Mechatronics 연구그룹)

Tel : 0551-280-1487

Fax : 0551-280-1547



김 종 무 (金 鍾 武)

1970년 1월 4일 생. 1992년 영남대 전기공학과 졸업. 1994년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994~현재 한국전기연구소 연구원(Mechatronics연구그룹)

Tel : 0551-280-1483

Fax : 0551-280-1547

E-mail : jmkim@keri.re.kr



김 문 환 (金 文 煥)

1956년 4월생. 1981년 2월 부산대 전기공학과 졸업. 1984년 3월 일본 케이오대학 이공학연구과 수료(석사). 1988년 3월 동대학 이공학연구과 수료(공학박). 1988년-1992년 일본 요코가와전기(주) 연구개발 제1연구부

근무, 1992년-1998년 한국전기연구소 책임연구원 1998년-1999년 위덕대 전기공학과 전임강사, 1999년-현재 신라대 자동차공학과 전임강사

Tel : 051-309-5701

Fax : 051-309-5652

E-mail : mhkim@silla.ac.kr



정 연 호 (鄭 然 鎬)

1968년 3월 10일 생. 1993년 충남대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996~현재 한국전기연구소 연구원(Mechatronics연구그룹)

Tel : 0551-280-1488

Fax : 0551-280-1547

E-mail : yhjeong@keri.re.kr