2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

철도 차량용 고출력 고효율 선형 추진시스템 설계

강 도 현*
(*한국전기연구원)

A Design of Linear Motor with High Power Density and High Efficiency for Railway and Magnetic Levitation System

D.H.KANG*
(K.E.R.I)

Abstract - According to the development of power electronic element(GTO, IGBT) and material for electrical machines(permanent magnet, super conductor), the technology for electrical machines is now a day rapidly developing. Here with, a novel electrical machine, based on the new conception of transverse flux configuration leads to a considerable increase in power density and enables simultaneously high efficiency.

The transverse flux machine with PM excitation will be applied to gearless direct drives for railway traction system and magnetic levitation system.

The designed and measured performance of transverse machine for railway traction system and magnetic levitation system revealed a great potential of system improvements to reduce linear motor mass and increase efficiency.

Key Words : Novel electrical machine, Transverse flux, Machine with PM excitation, Railway traction system, Gearless direct drives, Magnetic Levitation system, High power density, High efficiency.

1. 서 론

전력용 반도체(예:GTO, IGBT)와 새로운 전기기기 관련 재료(예:희토류 영구자석, 초전도체, 비정질 자성재료)의 발전에 따라 전기기기 기술이 비약적으로 발전되고 있다. 여기에 더불어 새로운 설계 개념을 도입한 새로운 형태의 횡축형 전동기가 개발되고 있다.

횡축형 전동기는 자속의 방향이 이동자의 이동 방향에 대해 횡방향을 나타내고 있으며, 또한 이동자와 같은 방향으로 전류자 흐른다. 횡축형 전동기는 극간격(τ_p)의 크기를 적게 설계가능 하므로 높은 출력밀도를 얻을 수 있고, 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동의 양을 절약함으로 효율이 높다[1]. 횡축형 전동기는 높은 출력을 얻을 수 있기 때문에 특히 적은 전동기 중량이 요구되는 전기자동차, 철도관련 차량, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치로 매우 적합하다[1].

특히 영구자석 여자 횡축형 전동기를 지하철 차량 혹은 경전철 차량의 선형 추진 시스템에 적용시킬 경우 일반 선형 유도전동기에 비해 3배 이상 높은 출력밀도를 얻을 수 있기 때문에 차량의 경량화, 지지구조의 경량화는 물론이고, 터널의 면적을 50 % 정도 절감 가능하고, 부상 및 안내 결합형 영구자석여자 고출력 선형 전동기를 자가부상 시스템에 적용할 경우 기존의 흡인식 자기 부상 열차에서 채택된 선형유도 전동기보다 약 2배 높은 추진력비(추진력/전동기무게)를 나타내고 있으며 효율 또한 30%정도 높게 설계되었다.

본 논문에서는 철도 차량용과 자기부상용 고출력 선형 전동기를 설계하였고, 전자계 system의 설계 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험 모델을 제작하여 추진력, 안내력, 흡인력을 검증하였다.

2. 영구자석여자 횡축형 전동기 이론

그림 1의 영구자석 여자 횡축형 전동기는 출력밀도를 증가시키기 위해서 회전자에 영구자석을 삽입한 형태로, 영구자석에서 발생하는 자계는 공극에서 자계를 집중시킴으로 높은 공극 자속밀도를 얻을 수 있다.

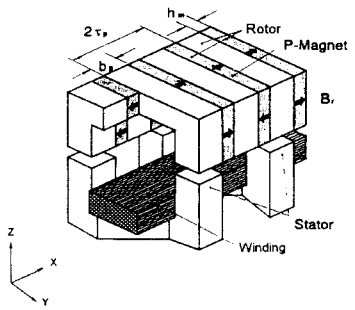

그림 1. 영구자석 여자 횡축형 전동기 형상

회전자에 설치된 영구자석의 자극을 교대로 자속을 일정한 방향으로 발생시키며, 양측 극면에서 일정한 방향으로 추진력을 얻기 위해 권선이 있는 철심은 τ_p만큼 엇갈리게 설계되었다. 물론 권선을 그림 1의 회전자에 설치하여도 무방하다.

그림 2는 회전자 위치에 따른 기자력-발생추력으로 영구자석여자 횡축형 모델은 $\tau_p \le x \le 2\tau_p$구간에서는 $0 \le x \le \tau_p$구간에 인가된 전류 방향과 반대방향의 전류를 흘려야 된다. 발생가능 힘밀도 F_{xd}를 구하면 다음과 같다[5].

$$F_{xd} = B_o \frac{\Theta_a}{2\tau_p} \qquad (1)$$

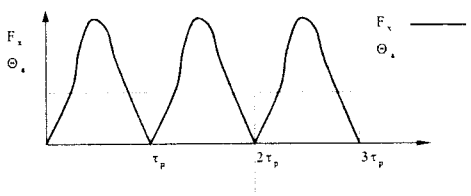

그림 2. 회전자 위치에 따른 기자력(Θ_a)-발생 추력(F_x)

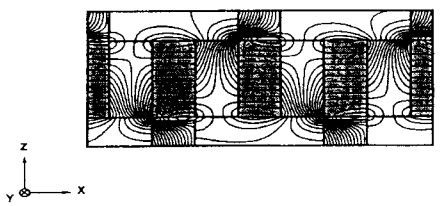

그림 3. 횡축형 전동기 자속 분포

그림 3의 경우 영구자석과 전기자 전류에 의한 자속 때문에 이동자의 이동에 따라 많은 자기에너지가 변화됨을 예상할 수 있다.

3. 철도차량용 횡축형 전동기 설계

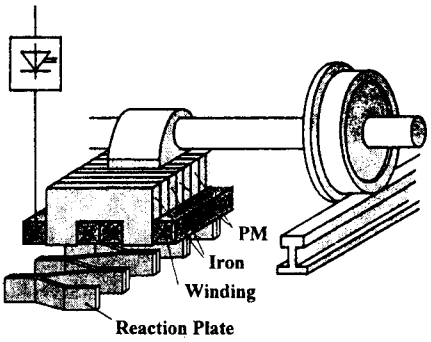

그림 4. 철도차량용 선형 횡축형 전동기

횡축형 전동기의 형태는 전기자 권선의 위치, 회전자와 고정자의 형상에 따라 다양하게 설계가능하며, 그림 4는 철도차량에 적용 가능한 선형 횡축형 전동기의 기본형태로 일반 재래식 차량에 비하면 기어 없이 직접 구동되기 때문에 기계적 부품을 줄이므로 경량화 가능하며 추진과 제동시 바퀴의 마찰계수에 영향을 받지 않으므로 가속과 감속 성능이 좋고 지하철에 적용할 경우 터널의 면적을 50% 정도 감소시킬 수 있으며 건설비 30% 이상 경감시킬 수 있는 장점이 있다. 선형 유도전동기 추진 철도 차량은 오오사카 지하철 12호선에서 이미 운행중이다[2]. 선형 전동기를 철도차량에 적용시킬 경우 기계적 공극이 적으면 유리하나 기계적 구조를 생각하여 일반적으로 공극 δ =10[mm]로 설계를 하며 공극이 큰 경우 극간격 τ_p를 크게할 수 있는데 본 연구에서는 50[mm] 내외로 정했다.

표 1은 설계된 철도차량용 영구자석여자 횡축형 전동기 사양으로 최적 설계시 주요 고려사항은 다음과 같다.

- 높은 추진력 $F_{xd} = f(\tau_p, b_p, h_m, \Theta_a)$
- 낮은 흡인력 F_z
- 영구자석 재료 최소화

표 1. 철도 차량용 선형 전동기 설계 전동기 사양

	설계 결과
속도	100 km/h
전동기 출력	189 kW
기자력	12 kA
추진력	6.8 kN
전동기 무게	306 kg
추력밀도 F_{xd}	42.7 kN/m^2
추진력/전동기 무게	22.2 N/kg
공극 δ	10 mm
극간격 τ_p	60 mm
극폭 b_p	36 mm
전자석 높이 h_m	24 mm
극길이 h_i	80 mm
권선창 폭 b_{sp}	80 mm
권선창 높이 h_{sp}	40 mm
전동기 길이	1 m
점적율 k_{cu}	0.65
전류밀도 J	5.8 A/mm^2
효율 η	0.97

그림 5의 특성에서 검토하면 선형 유도전동기는 큰 기계적 공극과 2차 도체 두께에 의해 약 15 [mm]의 전기적인 공극 때문에 낮은 추력비, 효율, 역율을 가지고 있으며, 영구자석 여자 횡축형 전동기의 추력비가 4배 이상됨을 알 수 있다[3,4].

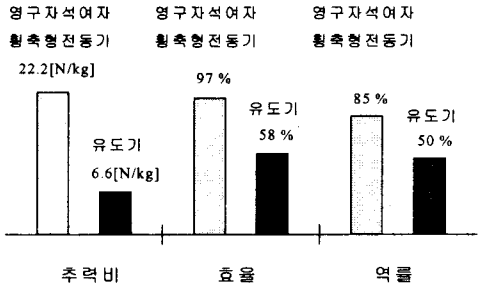

그림 5. 추력비, 효율, 역율 비교

4. 자기부상용 부상 및 안내 결합형 추진 시스템

자기부상 열차에서 필요한 추진력, 안내력, 부상력의 비를 1:3:10으로 전자석 단위 길이당 필요한 부상력은 1 ton/m, 전자석의 무게에 대한 부상력은 10배이며, 부상력에 대한 소비 전력은 1 [kW/ton]이 필요하다. 이상의 자기부상 시스템에서 요구되는 기본 사양은 다음 표 2와 같다.

그림 6은 부상력, 추진력 및 안내력을 발생시키는 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기를 나타내고 있다. 그림 9의 부상 시스템은 공극에 대해 불안정한 특성 즉, 공극이 증가됨에 따라 부상력이 감소하고 공극이 감소함에 따라 부상력이 증가하는 특성을 나타내고 있다. 전류제어로 일정한 공극을 유지할 수 있다. 수평방향의 안내력은 U-형태의 철심이 공극을 사이에 두고 일치하려는 힘에 의해서 안정된 안내력을 발생시킨다.

표 2. 자기부상 시스템 기본 사양

	사양	비교
추진력	2 [kN]	차량 단위 길이 당 필요 사양
안내력	6 [kN]	
부상력	20 [kN]	
부상력/전자석 자극	10 이상	
소비전력/부상력	1 [kW/ton]이하	

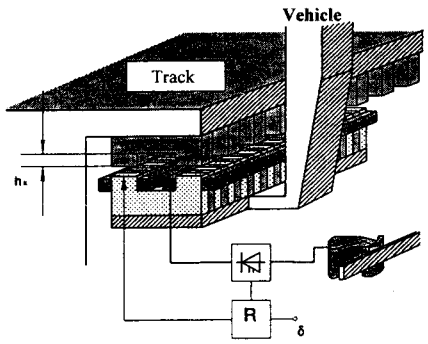

그림 6. 부상 및 안내 결합형 추진 시스템

4.1.1 선형 전동기 기본 설계

그림 7은 부상 및 안내 결합 선형 전동기 해석모델로 차량에 1차 권선을 포함한 선형 전동기가 설치되고 선로에 back iron이 설치된 형태로, 영구자석은 공극자속을 집중시키기 위해서 서로 같은 방향의 영구자석을 마주보게 하여 철심사이에 부착하였다. 또한 전동기의 좌우측이 같은 방향의 힘이 발생할 수 있도록 τ_p만큼 back iron을 비틀어 설계하였다.

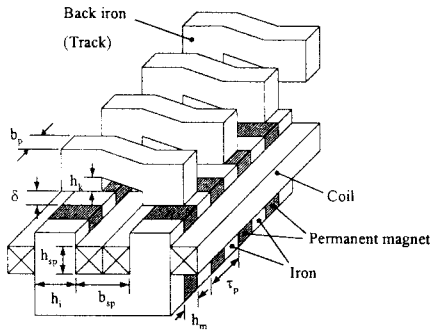

그림 7. 부상 및 안내 결합형 선형 전동기 모델

4.1.2 부상 및 안내 결합형 선형전동기 설계 상수 선정

자기부상열차의 부상 및 안내결합형 추진 시스템의 설계시 표2에 주어진 사양을 만족하면서 가능한 큰 부상력/전자석 자중의 비와 적은 소비전력/부상력의 비를 얻을 수 있도록 하여야 한다. 따라서, 본 연구에서는 3차원 유한요소법으로 전자석 두께 h_m, 극간격 τ_p, 레일 치폭 b_p, 레일 치 높이 h_k의 값들을 최적화시켰다. 레일 치폭 b_p, 전자석 두께 h_m의 변화에 대한 추진력과 흡인력을 우선 계산하였는데 b_p/τ_p와 h_m/τ_p의 비를 $0.5 \le b_p/\tau_p \le 0.9$와 $0.15 \le h_m/\tau_p \le 0.5$ 범위에서 변화시켰다. 표 3은 전자력 계산에서 초기부상을 고려한 추진력, 안내력 및 흡인력으로 부상 및 안내 결합형 선형 전동기의 사양이다.

이상의 표 3에서 나타난 결과를 검토하면 표2에서 주어진 사양을 만족하므로 차량의 추진 및 부상 system을 경량화 할 수 있으며 효율 또한 향상시킬 수 있다. 초기부상공극 δ=2[mm]이므로 정격공극 δ=12[mm]로 선정하였으며 손실/부상력은 3.9[kW/t]으로 전자석인 경우 1[kW/t]보다 큰 값을 가진다.

한편, 그림 8은 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기와 선형 유도전동기와의 단위 무게당 발생 추력비와 효율을 나타전자내고 있다. 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기가 부상 석이 없음에도 불구하고 단위 무게당 2배 이상의 추력을 얻을 수 있다.

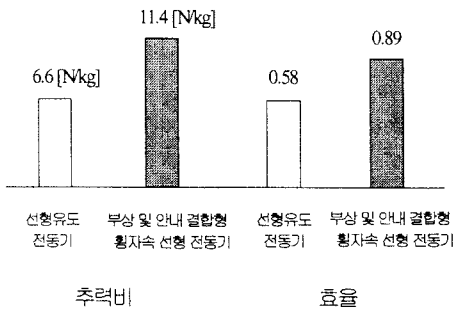

그림 8. 추력비, 효율 비교

표 3. 부상 및 안내 결합형 선형전동기 사양

	설계결과
속 도	100[km/h]
차량무게	2000[kg/m]
전동기 출력	42.5[kW/m]
기자력	15.7[kA]
추진력	1.53[kN/m]
안내력(측면변위△y=0.5h_i)	3.77[N/m]
부상력	13[kN/m]
추진력/stator무게	11.4[kN/kg]
부상력/전동기무게	9.8[kN/kg]
손실/부상력(철손포함)	3.9[kW/t]
효 율	0.89
정격 공극	12[mm]
초기부상공극	2[mm] 혹은 25[mm]
초기부상시 최대 기자력	36[kA] (공극 25[mm])
극간격 τ_p	40[mm]
pole 폭 b_p	32[mm]
영구자석두께 h_m	8[mm]
pole 길이 h_i	40[mm]
권선창 폭 b_{sp}	80[mm]
권선창 높이 h_{sp}	50[mm]
레일 치 높이 h_k	30[mm]
점적율 k	0.65
전류밀도 J	6[A/mm^2]

5. 전동기 제작 및 시험

설계된 영구자석 여자 횡축형 전동기의 전자기적 설계의 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험모델을 제작하여 추진력, 흡인력을 검증하였다. 표 4는 제작 선형모델의 주요치수를 나타내고 있고, 그림 9는 제작품과 제작품을 설치한 시험장치를 나타내고 있다.

표 4. 시험용 선형모델 주요치수

	치 수
공극 δ	3 mm
극간격 τ_p	17 mm
극폭 b_p	10 mm
전자석 높이 h_m	7 mm
극길이 h_i	24 mm
권선창 폭 b_{sp}	57 mm
권선창 높이 h_{sp}	27 mm
1차 치수	230mm(길이)×159mm(폭)×54mm(높이)
2차 치수	200mm(길이)×105mm(폭)×24mm(높이)
권선수	195×2
권선 치수	3.55mm(폭)×0.8mm(높이)

시험기 철심은 성층되지 않은 ST37을 사용하고, 아래에 있는 2차 부분의 영구자석은 희토류 자석(B_r=1.15T)을 사용하였다. 그림 9는 시제품이 설치된 시험장치를 나타내고 있다.

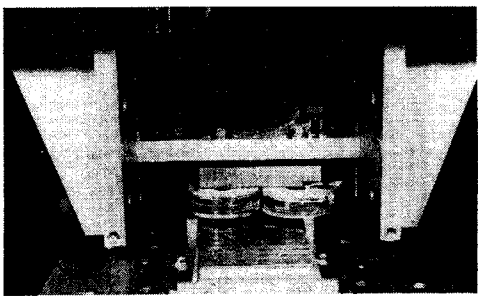

그림 9. 시제품 설치된 시험장치

표 5는 이상의 실험결과에서 얻은 추진력, 안내력과 흡인력의 단위면적당 값으로 안내력을 발생시키기 위한 측면변위가 없는 경우 △y=0.5hi이고 기자력을 일정하게 유지하였을 경우 Θa=3.6[kA]와 △y=0.5hi이고 부상력을 일정하게 유지하기 위해 Θa를 1.265배 한 경우에 대해 각각의 발생힘 밀도를 나타내고 있다. 각각의 경우에 대해 추진력과 흡인력은 계산값의 91~95% 범위에 있으며 안내력은 79~83%범위에 있다. 안내력의 차이가 큰 것은 2차부분의 측면 가공성의 정밀도에 의존하는 것으로 사료된다.

표 5. 계산값과 실험값 비교

	계산값 [kN/m^2]	실험값 [kN/m^2]	실험값/계산값[%]	비고
추진력 밀도 F_{xd}	37.84	34.93	92	Θ_a=3.6
흡인력 밀도 F_{zd}	185.34	175.81	95	[kA]
추진력 밀도 F_{xd}	30.17	27.54	91	Θ_a=3.6
안내력 밀도 F_{yd}	14.42	11.92	83	[kA]
흡인력 밀도 F_{zd}	146.85	139.1	95	$\triangle y=0.5h_i$
추진력 밀도 F_{xd}	37.44	34.5	92	Θ_a=3.6 [kA] ×1.265
안내력 밀도 F_{yd}	20.57	16.33	79	$\triangle y=0.5h_i$ F_{zd}=일정

6. 결 론

본 연구에서는 새로운 설계 개념을 도입한 횡축형 영구자석 여자 전동기의 이론을 소개하여 고출력화의 가능성을 제시하였으며, 고출력 전동기의 응용분야로 철도차량용 선형 전동기의 개념설계를 수행하여 기존 선형유도 전동기를 사용할 경우보다 약 75% 이상을 경량화 시킬 수 있고, 효율은 35%이상 향상시킬 수 있는 또한, 부상 및 안내 결합형 영구자석여자 고출력 선형 전동기의 전자계 system 경량화 설계를 제시하였으며 기존의 흡인식 자기 부상 열차에서 채택된 선형유도 전동기보다 약 2배 높은 추진력비(추진력/전동기무게)를 나타내고 있으며 효율 또한 30%정도 높게 설계되었다. 또한 부상력과 안내력이 자기부상 system의 사양을 만족시키고 있다. 공극 2[mm]와 25[mm]에서 초기 부상 공극을 설정하였으며 전력변환장치를 통해 일정 부상력 제어를 얻을 수 있는 개념을 제시하였다. 전자계 system의 설계 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험 모델을 제작하여 추진력, 안내력, 흡인력을 검증하였다.

앞으로 본 설계에서 제안된 부상 및 안내 결합형 영구자석여자 고출력 선형 전동기의 전력변환장치를 구성해 운전시 출력, 효율, 역률을 검증해야 하겠다.

[참 고 문 헌]

1. Weh, H : Linear Electromagnetic Drives in Traffic Systems and Industry. The First International Symposium on Linear Drive for Industry Applications, Nagasaki(Japan), 1995
2. Shoyama, Y., Ando, M. and Namikawa, H. : LIM driven subway railcar with small sectional area. International Conference on Maglev Transport '85, Yokohama, 1985
3. 김봉섭, 정현갑, 조홍제 : 선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(II), '97 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, 57~63page, 대한전기학회, 1997.
4. 김봉섭, 정현갑, 조홍제 : 도시형 자기부상열차 추진용 선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(IV), '98 대한전기학회 하계학술대회 논문집A, 152~154 page, 대한전기학회, 1998
5. 강도현, H. Weh: 철도 차량용 고출력 횡축형 전동기 설계에 관한 연구, 대한전기학회논문지 48권 6호, 1999년 6월