

자기부상 열차용 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기 설계에 관한 연구

論 文

49B-2-4

A Study on the Design of Transverse Flux Linear Motor in Combination with the Magnetic Levitation and Guidance

姜道鉉* · 金文煥**

(Do-Hyun Kang · Moon-Hwan Kim)

Abstract - The magnetically levitated system technology is highly expected to contribute the new transportation system of the 21st century with its high velocity operation, better riding comforts, friendliness to environment and saving of maintenance labour. Its development has been completed in low speed and in high speed application. In 2005, the Transrapid with 430 km/h speed will go into operation between Berlin and Hamburg[1]. In the year 2000, the realization of JR-Maglev will be basically evaluated for commercial operation[2]. In Korea, maglev test vehicle with magnet for levitation and single sided linear induction motor for propulsion is under test at 1 [km] test track in KIMM.[3,4] Here , a transverse flux linear motor in combination with the levitation and the guidance leads to a considerable high power density and high efficiency simultaneously. The designed and measured performance of transverse flux linear motor for maglev system revealed a great potential of system mass reduction.

Key Words : Maglev system, Transrapid, JR-Maglev, Transverse flux linear motor, High power density, High efficiency

1. 서 론

기존의 지하철과 고속 전철을 대신할 21세기의 새로운 교통수단으로 자기부상열차가 적합한 것으로 각광 받으면서 독일, 일본, 한국등을 중심으로 연구개발이 활발히 진행되어 왔다. 400km/h 속도 이상의 초고속 경우 독일은 추진과 부상이 결합된 선형 동기전동기를 사용한 Transrapid를 개발하여 Berlin과 Hamburg사이에 2005년 운항을 목표로 하고 있으며, 일본은 저온 초전도 전자석으로 부상·안내·추진이 결합된 JR-Maglev를 개발하였다[1,2]. Transrapid의 추진과 부상을 위한 선형 동기전동기 1차 권선은 선로에 설치되어 있으며, 안내를 위한 안내 전자석과 추진과 부상을 동시에 수행하는 전자석이 차량에 부착되어 있다. 차량이 진행함에 따라 1차 권선에 구간 전원을 공급하고 있으므로 고가의 권선비가 요구된다. JR-Maglev는 100km/h 속도이상에서 부상력을 발생시키므로 출발시 별도의 보조지지 장치가 필요로 하며, 차량에 초전도 전자석이 설치되어 있으며 Transrapid와 마찬가지로 선형 동기전동기의 1차 권선은 선로에 설치되어 있다. 현재 야마나시 track에서는 기술적 검증을 위한 운행 시험을 매일 정기적 실시하고 있다.

100km/h급의 중저속 자기부상열차는 전자석으로 부상과

안내를 하고 선형 유도전동기로 추진하는 차량이 일본 HSST와 한국기계연구원(KIMM)에서 개발하고 있으나 추진과 부상시스템에 큰 중량이 요구되고 효율이 낮다. 한국기계연구원(KIMM)에서 운행중인 자기부상열차의 경우 추진시스템으로 채택된 선형유도 전동기는 주어진 공극에 비해 극간격이 매우 적기 때문에 출력밀도가 낮고 효율 또한 60[%]이하이다[3,4].

이상과 같은 기술동향을 검토하면 출력밀도와 효율이 높은 중저속의 부상 및 안내 결합형 추진시스템의 필요성이 있으며, 이는 새로운 전기기기 관련 재료(예 : 희토류 영구자석, 초전도체, 비정질 자성재료)의 발전과 새로운설계 개념을 도입한 전동기의 개발에 의해서 가능하게된다. 횡축형 전동기는 높은 출력을 얻을 수 있기 때문에 특히 적은 전동기 중량이 요구되는 전기자동차, 철도관련 차량, 자기부상 열차와 같은 교통수단의 추진장치로 매우 적합하며 영구자석 여자 횡축형 전동기를 지하철 차량 혹은 경전철 차량의 선형 추진 시스템에 적용시킬 경우 일반 선형 유도전동기에 비해 3배 이상 높은 출력밀도를 얻을 수 있는 가능성을 증명하였다[5].

본 논문에서는 출력비가 높은 영구자석여자 횡축형 선형 전동기로 추진·부상·안내가 결합된 복합 시스템을 설계하여 중저속 자기부상열차에서 요구되는 차량의 경량화와 고 효율 추진 시스템의 가능성을 제시하고 있다.

2. 자기부상용 부상 및 안내 결합형 추진 시스템

자기부상 열차에서 필요한 추진력, 안내력, 부상력의 비는 1:3:10으로 전자석 단위 길이당 필요한 부상력은 1 ton/m,

* 正 會 員 : 韓國電氣研究所 産業電氣研究團 메카트로닉스 연구그룹 그룹장

** 正 會 員 : 新羅大學 自動車工學科 專任講師 · 工博

接受日字 : 1999年 8月 6日

最終完了 : 1999年 12月 21日

전자석의 무게에 대한 부상력은 10배이며, 부상력에 대한 소비 전력은 1 [kW/ton]이 필요하다[7]. 이상의 자기부상 시스템에서 요구되는 기본 사양은 다음 표 1과 같다.

그림 1은 부상력, 추진력 및 안내력을 발생시키는 영구자석 여자 횡축형 선형 전동기를 나타내고 있다. 그림 1의 부상 시스템은 공극에 대해 불안정한 특성 즉, 공극이 증가함에 따라 부상력이 감소하고 공극이 감소함에 따라 부상력이 증가하는 특성을 나타내고 있다. 공극 센서를 이용한 전류 제어로 일정한 공극을 유지할 수 있다. 추진력은 다음 절에 나타난 전동기의 원리에 의해 발생하고, 부상력은 Track의 고정자와 차량의 이동자 사이의 흡인력에 의해 발생한다. 한편, 수평방향의 안내력은 U-형태의 철심이 공극을 사이에 두고 일치하려는 힘에 의해서 안정된 안내력을 발생시킨다. 여기서 hk 는 트랙의 철심 높이이며 δ 는 공극이다.

표 1 자기부상 시스템의 기본 사양

Table 1 Basic specification of the maglev system

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

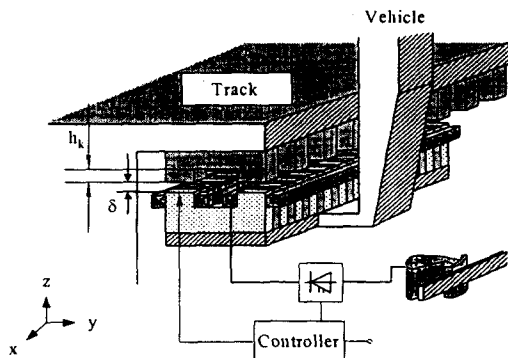


그림 1 부상 및 안내 결합형 시스템

Fig. 1 Maglev system in combination with the magnetic levitation and guidance

3. 전자력 계산

3.1 선형전동기 기본 설계

그림 2는 부상 및 안내 결합 선형 전동기 상세 해석모델로 차량에 1차 권선을 포함한 선형 전동기가 설치되고 선로에 back iron이 설치된 형태로, 영구자석은 공극자속을 집중시키기 위해서 자화방향이 같은 영구자석을 마주보게 하여 철심사이에 부착하였다. 또한 전동기의 좌우측이 같은 방향의 힘이 발생할 수 있도록 극간격 τ_p 만큼 back iron을 비틀어 설계하였다.

영구자석여자 횡축형 전동기의 발생가능 힘밀도 F_{xd} 는 다음 식 (1)과 같다[5].

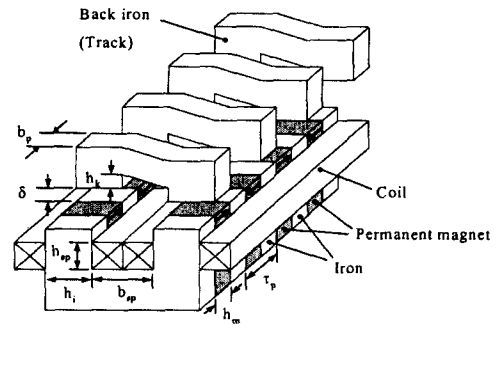


그림 2 부상 및 안내 결합형 선형 전동기 모델

Fig. 2 Transverse flux linear motor in combination with the magnetic levitation and guidance

$$F_{xd} = kB_0 \frac{\theta_a}{2\tau_p} \quad (1)$$

여기서 k , B_0 , θ_a , τ_p 는 각각 설계상수, 무부하 공극자속 밀도, 기자력 및 극간격이다. 설계상수 $k=0.4$, 공극자속밀도 $B_0=0.6[T]$, 기자력 $\theta_a=12 [kA]$ 로 가정하면 $F_{xd}=36[kN/m^2]$ 이 된다.

공극 $\delta=10[mm]$, 전동기 힘발생 폭 $h_i=40[mm]$ 로 두면 전동기 단위 길이당 발생하는 힘 $F_x=2.88[kN/m]$ 로 된다. 이때 단위길이당 전동기 무게는 약 $130[kg]$ 이 된다.

한편 표 2는 상세설계시 주어진 재료 사양이며 표 3은 기본설계 결과이다.

표 2 전동기 재료 사양

Table 2 Material specification of the linear motor

	사양	비고
영구자석재료	NdFeB ($B_r=1.2[T]$, $\mu_r=1.05$)	
철심재료	Dyanmblech 360-50[A]	
영구자석밀도	$\rho_{pm}=7.9[g/cm^3]$	
철심밀도	$\rho_{Fe}=7.9[g/cm^3]$	
동 밀도	$\rho_{cu}=8.9[g/cm^3]$	

표 3 전동기 기본 설계 결과(단위길이당)

Table 3 Basic design specification of the linear motor per unit length

	사양	비고
추진력 F_{xd}	2.88[kN]	
기자력 θ_a	12[kA]	
공극 δ	10[mm]	
극간격 τ_p	40[mm]	
pole 폭 h_i	40[mm]	
권선창 높이 h_{sd}	40[mm]	
권선창 폭 b_{sd}	80[mm]	
길이	1[m]	
무게	130[kg]	
추력비(추력/전동기무게)	22.14[N/kg]	

3.2 부상 및 안내 결합형 선형 전동기 설계상수 결정

자기부상열차의 부상 및 안내결합형 추진 시스템의 설계 시 표1에 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 치높이 h_k 의 값들을 힘 발생시키는 전동기 단위 면적당 최대 추력을 발생시키도록 최적화시켰다. 레일 치폭 b_p , 전자석 두께 h_m 의 변화에 대한 추진력과 부상력을 우선 계산하였는데 b_p/τ_p 와 h_m/τ_p 의 비를 $0.6 \leq b_p/\tau_p \leq 0.9$ 와 $0.15 \leq h_m/\tau_p \leq 0.5$ 범위에서 변화시켰다[6].

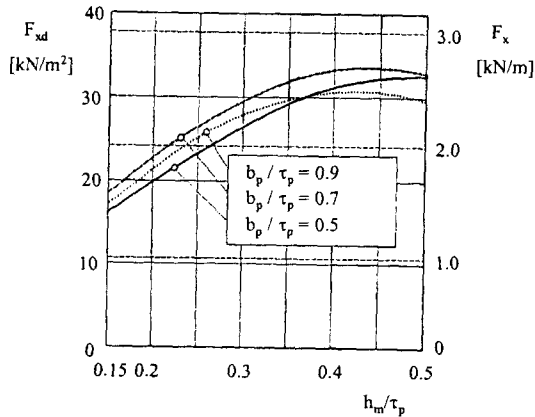


그림 3 레일 치폭 b_p 와 전자석 두께 h_m 에 대한 추진력 밀도 F_{xd} 와 단위길이당 추진력 F_x

Fig. 3 Traction force density F_{xd} and traction force per unit length F_x according to the rail teeth width b_p and the magnet width h_m

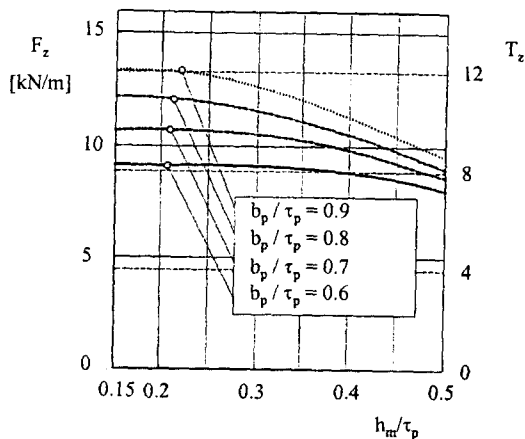


그림 4 레일 치폭 b_p 와 전자석 두께 h_m 에 대한 단위 길이당 부상력 F_z 와 부상력비 T_z (부상력/자중)

Fig. 4 Levitation force per unit length F_z and the levitation force ratio T_z subjected to the rail teeth width b_p and the magnet width h_m

그림 3에서 $b_p/\tau_p \approx 0.7$, $h_m/\tau_p \approx 0.425$ 일 때 최대의 추진력을 얻을 수 있다. 그림 4는 단위길이당 부상력 F_z , 부상력비(부상력/자중) T_z 를 나타내고 있는데 레일 치폭 b_p 가 증가함에 따라 부상력이 증가하고, 영구자석 두께 h_m 의 값이 증가함에 따라 부상력이 감소한다. $b_p/\tau_p \approx 0.8$, $h_m/\tau_p \approx 0.2$ 값에서 부상력 $F_z=12$ [kN/m], 부상력비 $T_z=10$ 의 값을 가진다.

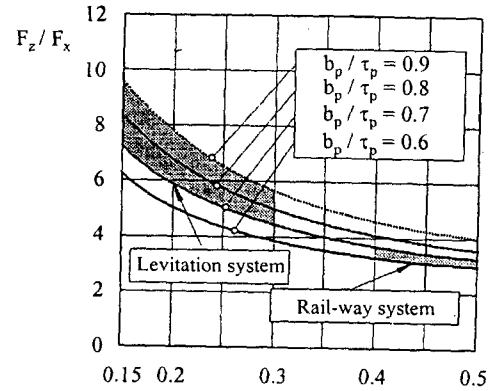


그림 5 레일 치폭 b_p 와 전자석 두께 h_m 에 대한 부상력 F_z /추진력 F_x 의 비

Fig. 5 Ratio of the levitation force F_z / the traction force F_x subjected to the rail teeth width b_p and the magnet width h_m

자기부상 시스템에서 부상력 F_z /추진력 F_x 의 비는 약 10 정도 필요하므로 $b_p/\tau_p \approx 0.9$, $h_m/\tau_p \approx 0.2$ 의 값이 필요하다. 식(1)에서 추진력 발생밀도 F_{xd} 는 극간격 τ_p 에 반비례하므로 τ_p 가 매우 적을 때 F_{xd} 는 무한대가 되나, 실 모델에서는 철심의 포화나 누설에 의해 추진력 발생밀도 F_{xd} 는 한계가 있다. 따라서 그림 6에서 $F_{xd}=f(\tau_p, \delta, \theta_a)$ 의 관계를 조사하였다.

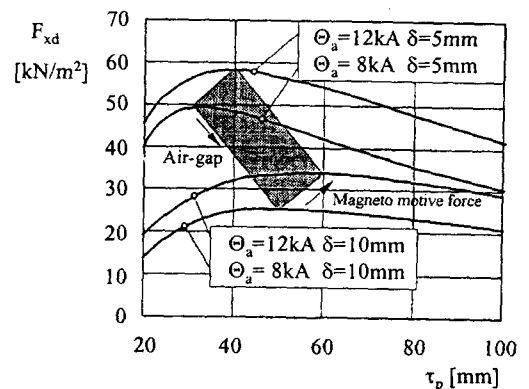


그림 6 극간격 τ_p 에 대한 추진력 발생밀도 F_{xd}

Fig. 6 Traction force density F_{xd} subjected to the pole pitch τ_p

최적 극간격 τ_{opt} 는 공극 δ 과 기자력 θ_a 가 증가함에 따라 커지고 τ_{opt} 는 $5[\text{mm}] \leq \delta \leq 10[\text{mm}]$, $8[\text{kA}] \leq \theta_a \leq 12[\text{kA}]$ 범위에서 다음 식과 같다

$$40 \leq \tau_{opt} \leq 60[\text{mm}], 4\delta \leq \tau_{opt} \leq 6\delta \quad (2)$$

안내력은 그림 2의 레일 철심과 전동기 철심이 측면으로 일치하려는 특성에 의해 나타나는데 일본의 자기부상열차 HSST에서도 이와 같은 원리에 의해 안정된 안내력을 얻고 있다. 안정된 안내력은 측면 변위가 증가함에 따라 안내력이 증가함을 의미하며 측면 변위가 pole 폭과 같을 때 즉, $\Delta y = h_i$ 일 때 가장 큰 값의 안내력을 가진다.

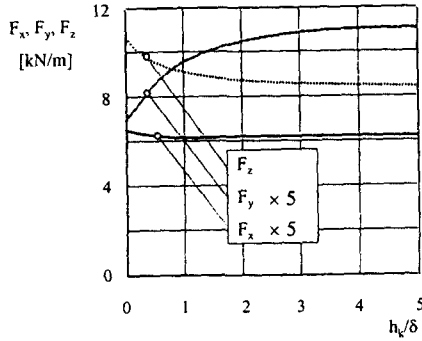


그림 7 레일의 치 높이 h_k 에 따른 추진력 F_x , 안내력 F_y , 부상력 F_z
 Fig. 7 Traction force F_x and the guidance force F_y , the levitation force F_z according to the rail teeth height h_k

그림 7은 레일의 치 높이 h_k 를 결정하기 위해 $\Delta y = 0.5h_i$ 일 때 치 높이에 대한 추진력 F_x , 안내력 F_y , 부상력 F_z 를 나타내고 있다. 치 높이 $h_k = 2\delta = 20[\text{mm}]$ 까지 안내력이 약 50%정도 증가하고 추진력과 부상력은 각각 5.6%, 18.4% 감소한다. 따라서 레일의 최적 치 높이는 다음 식(3)과 같다.

$$2\delta \leq h_k \leq 3\delta \quad (3)$$

이때 부상력은 약 20%정도 감소한다.

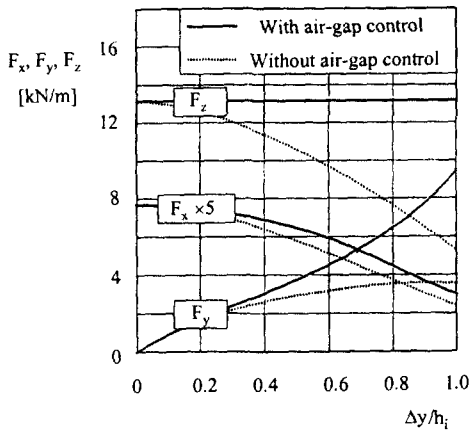


그림 8 측면 변위 Δy 에 대한 추진력 F_x , 안내력 F_y , 부상력 F_z
 Fig. 8 Traction force F_x and the guidance force F_y , the levitation force F_z subjected to the side displacement Δy

그림 8은 측면 변위 Δy 에 대한 추진력, 안내력, 부상력으로 공극제어를 하지 않는 경우, Δy 가 증가됨에 따라 추진력과 부상력은 감소되고 안내력은 증가된다. $\Delta y > 0.5h_i$ 경우 안내력은 완만하게 증가하지만 자기저항의 증가로 인하여 추진력과 부상력이 급격히 감소한다. 따라서 최대 측면 변위 Δy 를 식 (4)와 같이 한정한다.

$$\Delta y = 0.5h_i \quad (4)$$

측면변위 Δy 에 따른 부상력 감소는 부상제어기에서 전류를 증가시켜 보상하여야 하는데 그림 8의 실선은 일정한 부상력을 가질 때 추진력과 안내력을 나타내고 있으며 그림 9는 이 때 요구되는 기자력을 나타내고 있다.

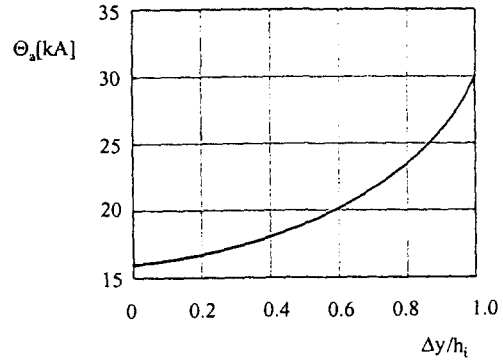


그림 9 측면변위 Δy 에 대한 일정부상력을 발생시키기 위한 기자력
 Fig. 9 Magneto motive force (MMF) for the constant levitation force subjected to the side displacement Δy

그림 9에서 측면변위 $\Delta y = 0.5h_i$ 인 경우 일정 부상력을 발생시키기 위해 필요한 기자력은 기본 설계 결과로부터 나온 기자력 $12[\text{kA}]$ 와 비교해서 1.19배, $\Delta y = h_i$ 인 경우 1.88배가 필요하다. 따라서 측면변위에 따른 적은 기자력으로 부상력과 안내력을 얻기 위해 필요한 측면변위 $\Delta y = 0.5h_i$ 로 한정시킨다.

3.3 초기 부상

영구자석으로 여자된 선형 전동기는 공극 $\delta \approx 0$ 에서는 매우 큰 부상력을 가지고 정격 공극의 2배에서는 적은 부상력 때문에 차량을 부상시킬 수 없다. 따라서 영구자석으로 여자된 선형 전동기를 초기 부상시키기 위해서는 2가지 방법이 있는데 하나는 공극 $\delta \approx 0[\text{mm}]$ 에서 영구자석의 자속과 반대방향으로 전류를 인가하여 선로와 전자석 사이의 부상력을 줄여 정격 공극을 유지하는 방법이고, 다른 한 방법은 정격 공극의 2배에서 영구자석의 자속과 같은 방향으로 전류를 인가하여 선로와 전자석 사이의 부상력을 증가시켜 정격공극을 유지할 수 있다.

4상한 선형 전동기를 차량에 사용할 경우 1/4극 간격만큼 차이나게 배치할 수 있는데 $x/r_p = 0, 1/4, 2/4, 3/4$ 간격을 두고 설치할 경우 맥동이 적은 추력을 얻을 수 있다[5].

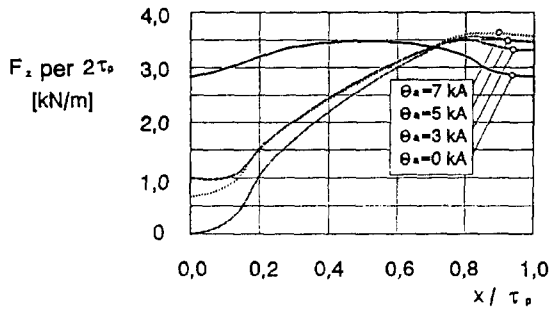


그림 10 공극 δ=1 [mm]의 경우 전동기 부상력
Fig. 10 Levitation force of the linear motor in the case of the airgap δ=1 [mm]

그림 10은 공극 δ=1 [mm]인 경우 부상력을 나타내고 있는데 x/τp=0인 경우 영구자석의 자속 방향과 전류에 의한 자속방향이 다른 경우이고, x/τp=1은 영구자석의 자속방향과 전류에 의한 자속방향이 일치하는 경우이다.

θa=5 [kA]인 경우 0 ≤ x/τp ≤ 0.5 범위에서 가장 낮은 부상력을 나타낸다. 4상한 선형 전동기가 공극 δ=1 [mm]에서 발생할 수 있는 부상력은 46.70 [kN/m]로 표 4의 부상력 설계기준 값인 부상력 13 [kN/m]보다 크므로 권선의 전류 변화로 정격 공극 δ=10 [mm]로 유지할 수 없다. 공극을 크게 함으로 부상력을 줄일 수 있는데 δ=2[mm], δ=3[mm]인 경우 각각 부상력은 11.9[kN/m], 9.7[kN/m]으로 δ=2[mm]에서 정격 공극 δ=10[mm]까지 제어할 수 있다. 마찬가지로 δ=20[mm], 25[mm]로 부상시키기 위한 기자력은 각각 θa=28 [kA], θa=36 [kA]가 필요하다. 초기 부상시 공극이 각각 δ=2[mm], δ=25[mm]가 필요하므로 운전시 정격공극 δ=12[mm]로 선정하였다. 한편 그림 11은 정격공극 δ=12[mm]에서 추진력과 부상력을 나타내고 있다.

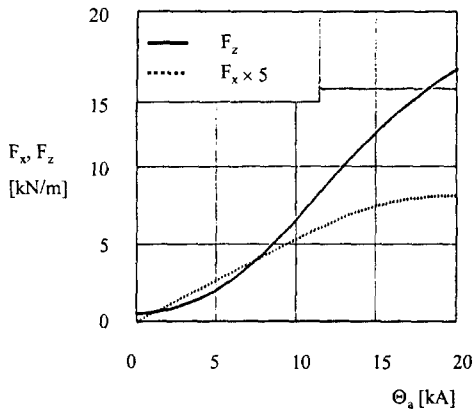


그림 11 정격공극 δ=12[mm]에서 추진력 Fx와 부상력 Fz
Fig. 11 Traction force Fx and the levitation force Fz in the case of the airgap δ=12[mm]

표 4 는 전자력 계산에서 초기부상을 고려한 추진력, 안내력 및 부상력으로 부상 및 안내 결합형 선형 전동기의 사양이다.

표 4 부상 및 안내 결합형 선형전동기 설계 사양
Table 4 Design specification of the linear motor in the combination of the levitation and guidance

사양	
속도	100[km/h]
차량무게	2000[kg/m]
전동기 출력	42.5[kW/m]
기자력	15.7[kA]
추진력	1.53[kN/m]
안내력(측면변위 Δy=0.5h1)	3.77[N/m]
부상력	13[kN/m]
추진력/stator무게	11.4[N/kg]
부상력/전동기무게	9.8[N/kg]
손실(철손포함)/부상력	3.9[kW/ton]
효율	0.89
정격 공극	12[mm]
초기부상공극	2[mm] 혹은 25[mm]
초기부상시 최대 기자력	36[kA] (공극 25[mm])
극간격 τp	40[mm]
pole 폭 bp	32[mm]
영구자석두께 hm	8[mm]
pole 길이 hi	40[mm]
권선창 폭 bsd	80[mm]
권선창 높이 hsd	50[mm]
레일 치 높이 hk	30[mm]
점접을 k	0.65
전류밀도 J	6[A/mm ²]

이상의 표 4에서 나타난 결과를 검토하면 표 2에서 주어진 사양을 만족하므로 차량의 추진 및 부상 system을 경량화 할 수 있으며 효율 또한 향상시킬 수 있다. 초기 부상공극 δ=2[mm]이므로 정격공극 δ=12[mm]로 선정하였으며 손실/부상력은 3.9[kW/t]로 전자석인 경우 1[kW/t]보다 큰 값을 가진다. 한편, 그림 12는 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기와 선형 유도전동기와의 단위 무게당 발생 추력비와 효율을 나타내고 있다. 부상 및 안내 결합형 횡자속 선형 전동기가 부상 전자석이 없음에도 불구하고 단위 무게당 2배 이상의 추력을 얻을 수 있고 효율 또한 30%이상 향상시킬 수 있다.[3,4]

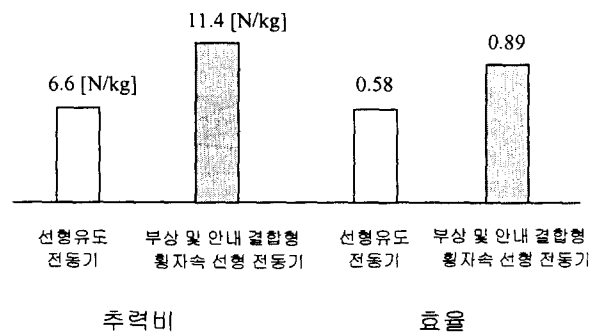


그림 12 추력비, 효율 비교
Fig. 12 Comparison of the thrust force ratio and efficiency for the linear induction motor

4. 일정 부상력 및 일정 추력 제어

부상 및 안내 결합형 선형 전동기의 제어 원리는 그림 13의 벡터 선도로 알 수 있다.

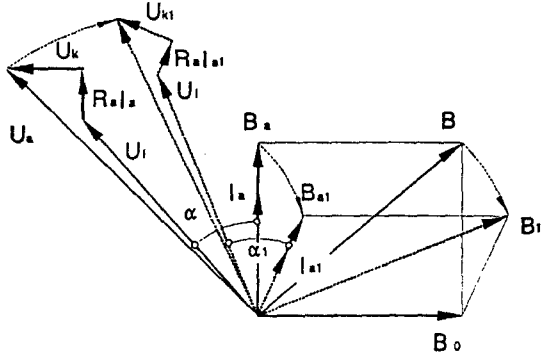


그림 13 일정 부상력 제어 선형 전동기 벡터도
Fig. 13 Vector diagram of the linear motor for the control of the constant levitation force

그림 13은 일정 부상력을 유지하면서 추진력 제어 원리를 나타내고 있는데 공극자속밀도 B는 권선 전류에 의한 자속 B_s와 영구자석에 의한 자속 B₀의 합성으로 이루어지며 공극자속밀도 B에 의해 90° 위상차이가 나는 유기기전력 U_i가 유기된다.

공극에서 발생하는 출력 P_{out}은 유기기전력 U_i와 전기자 전류 I_a와의 벡터곱으로서 식 (5)로 주어진다.

$$P_{out} = U_i I_a \cos \alpha \quad (5)$$

여기서 α는 전기자 전류와 유기기전력과의 위상차이다. 전력 변환 장치를 통해 전기자 전류를 제어하여 벡터선도에서 점선으로 나타난 바와 같이 I_{a1}을 선택하면 공극자속밀도 B는 B₁으로서 같은 크기를 가지고, 출력은 다음식 (6)과 같이 된다.

$$P_{out} = U_i I_{a1} \cos \alpha_1 \quad (6)$$

즉 전기자 전류 I_a의 위상과 크기를 변경시켜 일정한 부상력을 얻으면서 출력 P_{out}을 제어할 수 있다.

5. 전동기 제작 및 시험

설계된 자기부상용 부상 및 안내 결합형 선형 전동기의 전기적 설계 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험모델을 제작하여 추진력, 안내력, 부상력을 검증하였다.[5]

표 5는 제작 모델의 주요 치수를 나타내고 있고 그림 14는 형상을 나타내고 있다. 제작 전동기는 그림 2의 설계 전동기와 형상은 틀리지만 전자계 시스템의 계산 결과를 검증하기 위해 이미 제작된 전동기를 이용하여 추진력, 안내력, 부상력을 측정하였다.

그림 15는 측면변위 Δy=0.5h_i인 경우 이동자 위치에 따른 추진력, 안내력, 부상력의 계산값과 측정값으로 추진력 F_x의 측정값 최대치는 x/τ_p=0.4인 지점에 있으며 영구자석 부착작업, 치작업시 발생하는 미세공극등으로 측정값이 계산값보다 다소 낮게 나타났다.

그림 16은 공극과 기자력에 따른 추력밀도로 실험치는 계산치보다 8~10% 낮게 나타났다.

표 5 부상 및 안내 결합형 축소 선형 전동기 주요 치수
Table 5 Specification of the small scaled linear motor in the combination with the magnetic levitation and guidance

	치 수
공극 δ	3 [mm]
극간력 τ _p	17 [mm]
극폭 b _p	17 [mm]
전자석 높이 h _m	7 [mm]
극길이 h _i	24 [mm]
권선창 폭 b _{sd}	57 [mm]
권선창 높이 h _{sd}	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)

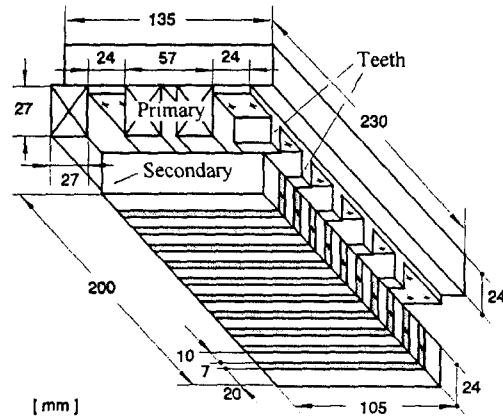


그림 14 제작 전동기 치수
Fig. 14 Specification of the manufactured motor

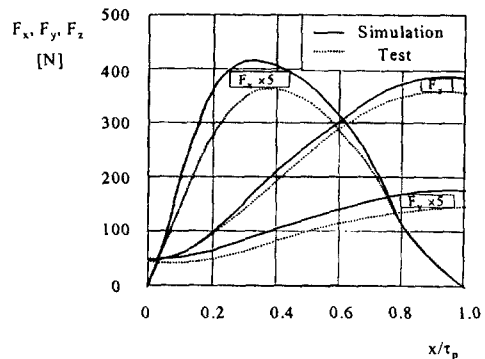


그림 15 이동자 위치에 따른 추진력, 안내력, 부상력의 계산값과 측정값

Fig. 15 Simulation and experimental data of the traction force, the guidance force and the levitation force according to the mover position

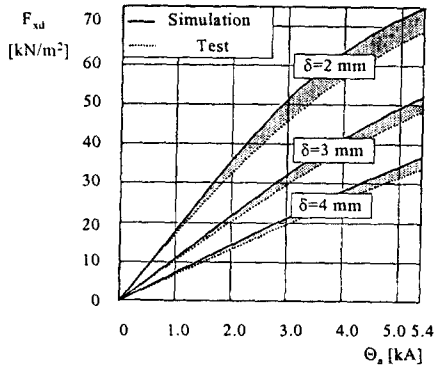


그림 16 공극과 기자력에 따른 추력 밀도
Fig. 16 Thrust force density according to the airgap and the MMF

그림 17은 일정 기자력 $\Theta_a=3.6[kA]$ 를 인가한 경우 측면 변위 Δy 의 변화에 따른 추진력, 안내력, 부상력을 나타내고 있으며 $\Delta y=0.5h_i$ 에서 측정 추진력, 안내력, 부상력은 계산치의 91%, 83%, 95%로 나타났다.

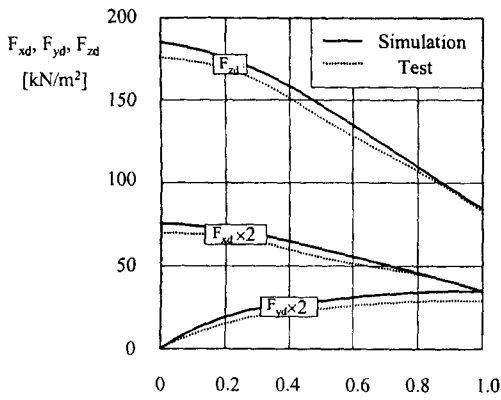


그림 17 일정한 기자력에 대한 추진력, 안내력, 부상력 밀도 ($\delta=3[mm]$, $\Theta_a=3.6[kA]$, $b_p=17[mm]$)
Fig. 17 The traction and guidance, levitation force density for the linear motor with the constant MMF ($\delta=3[mm]$, $\Theta_a=3.6[kA]$, $b_p=17[mm]$)

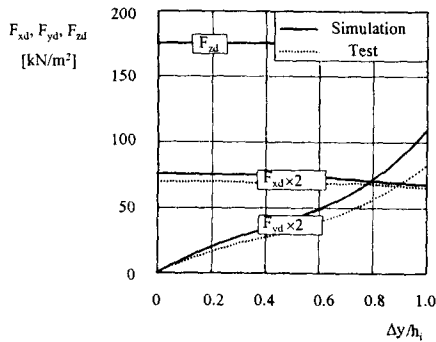


그림 18 일정 부상력 유지시 추진력, 안내력 밀도
Fig. 18 Traction force and guidance force at the constant levitation force

그림 18은 측면변위 Δy 의 값에 따라 부상력을 일정히 얻기 위해 기자력을 증가시킨 경우 추진력과 안내력을 나타내고 있으며 $\Delta y=0.5h_i$ 인 경우 측정 추진력과 안내력 계산치의 각각 92%, 79%가 된다.

그림 19는 일정한 부상력을 유지하기 위한 기자력의 계산치와 실험치를 나타내고 있다. 계산치와 실험치의 전류값은 거의 일치하고 있으며 $\Delta y=0.5h_i$ 인 경우 일정부상력을 유지하기 위한 기자력은 1.26배 필요하다.

표 6은 이상의 실험결과에서 얻은 추진력, 안내력과 부상력의 단위면적당 값으로 안내력을 발생시키기 위한 측면 변위가 없는 경우, $\Delta y=0.5h_i$ 이고 기자력을 일정하게 유지하였을 경우, $\Delta y=0.5h_i$ 이고 부상력을 일정하게 유지하기 위해 Θ_a 를 1.26배 한 경우에 대해 각각의 발생힘 밀도를 나타내

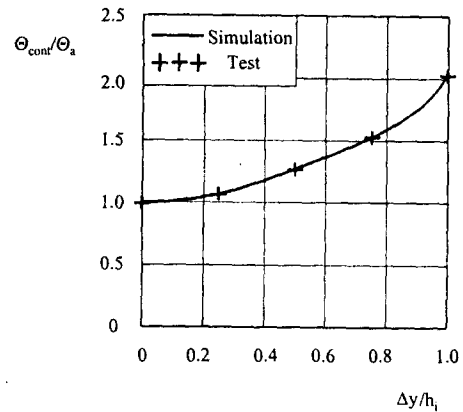


그림 19 일정 부상력 유지시 요구 기자력
Fig. 19 Required MMF for the constant levitation force

표 6 계산값과 실험값 비교

Table 6 Comparison of the simulation data and the experiment data

	계산값 [kN/m ²]	실험값 [kN/m ²]	실험값/ 계산값 [%]	비고
추진력 밀도 F_{xd} 부상력 밀도 F_{zd}	37.84 185.34	34.93 175.81	92 95	$\Theta_a=3.6[kA]$
추진력 밀도 F_{xd} 안내력 밀도 F_{yd} 부상력 밀도 F_{zd}	30.17 14.42 146.85	27.54 11.92 139.1	91 83 95	$\Theta_a=3.6[kA]$ $\Delta y=0.5h_i$
추진력 밀도 F_{xd} 안내력 밀도 F_{yd}	37.44 20.57	34.5 16.33	92 79	$\Theta_a=3.6[kA]$ $\times 1.26$ $\Delta y=0.5h_i$ $F_{zd}=\text{일정}$

고 있다. 각각의 경우에 대해 추진력과 부상력은 계산값의 91~95% 범위에 있으며 안내력은 79~83% 범위에 있다. 안내력의 차이가 큰 것은 2차부분의 측면가공성의 정밀도에 의존하는 것으로 사료된다.

6. 결 론

본 연구는 기존의 흡인식 자기 부상 열차에서 채택된 선형유도 전동기보다 약 2배 높은 추진력비(추진력/전동기무게)를 나타내고 있으며 효율 또한 30% 높은 부상 및 안내 결합형 영구자석여자 고효율 선형 전동기의 전자계 system 경량화 설계를 제시하였다. 또한 추진력, 안내력과 부상력이 자기부상 system의 사양을 만족시키고 있다. 공극 2[mm]와 25[mm]에서 초기 부상공극을 설정하였으며 전력변환장치를 통해 일정부상력 제어를 얻을 수 있는 개념을 제시하였다. 전자계 system의 설계 타당성을 검증하기 위해 축소형 시험 모델을 제작하여 추진력, 안내력, 부상력을 검증하였다.

참 고 문 헌

- [1] Heinisch and Roland, "DB AG-First Customer of the Transrapid in Germany", *The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Yamanashi, JAPAN, pp. 12~14, 1998.
- [2] Soejima and Hiroum, "Development of the Maglev system in JAPAN : Past, Present and Future.", *The 15th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives*, Yamanashi, JAPAN, pp. 8~11, 1998.
- [3] 김봉섭, 정현갑, 조홍제 "선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(II)," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp. 57~63, 1997.
- [4] 김봉섭, 정현갑, 조홍제 "도시형 자기부상열차 추진용 선형유도전동기의 동특성에 대한 실험적 연구(IV)," 대한전기학회 하계학술대회 논문집 A, pp. 152~154, 1998.
- [5] 강도현, Weh. H "철도차량용 고효율 횡축형 전동기 설계에 관한 연구," 대한전기학회 논문지 B, 제48권, 제6호, pp. 301~308, 1999.
- [6] Gao, H. *Numerisches Berechnungsverfahren für Synchronmaschinen in Transversalfuß-Bauweise*, Ph.D. Dissertation, TU Braunschweig, 1994.
- [7] J. Meins, *Elektromechanik*, B. G. Teubner, Stuttgart, 1997.

저 자 소 개



강도현 (姜道鉉)

1958년 9월 21일 생. 1981년 한양대 전기공학과 졸업. 1987년~1989 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년~1996년 독일 Braunschweig대 박사 졸업. 1989~현재 한국전기연구소 선임연구원(산업전기연구단 Mechatronics 연구그룹 그룹장)

Tel : 0551-280-1480, Fax : 0551-280-1406

E-mail : dhkang@keri.re.kr



김문환 (金文煥)

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

근무, 1992년~1998년 한국전기연구소 책임연구원 1998년~1999년 워터대 전기공학과 전임강사, 1999년~현재 신라대 자동차공학과 전임강사

Tel : 051-309-5701, Fax : 051-309-5652

E-mail : mhkim@silla.ac.kr