

# 자기부상열차용 추진시스템의 개발

조 윤 현  
한국전기연구소 전력기기 연구실

## The development of a propulsion system for MAGLEV vehicle

Yun-Hyun Cho  
KERI Power Apparatus Lab.

### ABSTRACT

This paper presents a fundamental method to analyze and design a Single-sided Linear Induction Motor(SLIM) as a propulsion system for magnetic levitation vehicles of DAEJEON EXPO'93 in Korea.

The performance characteristics of the designed SLIM are examined by the thrust force, the normal force, the efficiency and the power factor according to the change of input frequency.

The dimension of the SLIM is 1792mm long × 200mm width × 58mm high and the rated thrust is 1300 Newtons at the operating speed of 40 Km/h.

### 1. 서론

최근 차세대 교통수송 시스템으로서 자기부상 열차와 Linear motor car가 산업명명의 발달과 더불어 환경문제가 대두되면서 소음 및 공해저감, 경제성, 쾌속성이 요구되므로 독일, 일본등 선진국에서 연구가 활발히 진행되고 있다.

대표적인 연구로 20여년 전부터 자기부상열차 개발을 위해 연구를 해온 독일은 선형유도전동기를 추진장치로 한 Transpoid와 일본의 선형유도전동기를 추진장치로 한 HSST 계열의 자기부상열차가 현재 실용화를 위하여 신뢰성과 승차감의 향상을 위하여 실험트랙에서 모의 실험과 연구를 계속하고 있다. [1]-[3]

그러나 국내에서는 1989년부터 자기부상열차 개발을 위한 연구를 시작하여 현재 산. 학. 연에서 계속 활발히 연구중에 있으며, 기본 전자기시스템의 구성은 부상용 및 횡측향 상전도 전자석과 추진을 위한 편축식 선형유도전동기를 채택하고 있다. [3]

본 연구에서도 이와 같은 전자기 시스템을 갖는 자기부상 열차로 차량 module당 총무게 12ton, 길이 14m, 폭 3m인 열차의 추진시스템의 개발을 위한 연구의 일환으로 자기부상

열차 국제사업단의 주관하에 개발되고 있는 2nd module의 자기부상열차의 추진장치로 SLIM을 설계, 제작하고, 특성을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

특성고찰을 하기 위해서는 Maxwell 전자기방정식으로 부터 공극자속밀도를 구하고 추력, 수직력, 효율 및 역률등의 특성 계산식과 설계과정을 제시하였다.

또한, 주파수 변화에 따른 특성을 고찰함으로써 EXPO'93 자기부상열차의 운전시의 운전특성 및 pattern의 결정을 가능하게 하였다.

### 2. EXPO'93용 자기부상열차의 추진시스템

#### 2.1 자기부상열차 추진용 SLIM 모델

93년 대전 EXPO 전시용으로 개발중인 자기부상열차의 기본 구성도는 그림 1과 같이 추진장치로는 편축식 선형유도전동기의 1차측 고정자 철심을 양측 레일의 상측 차상에 설치하고, 2차측 알루미늄 도체판과 Back iron은 지상의 트랙에 고정하여 1차측과 2차측사이에 이동자계를 발생하여 추력이 발생하게끔 구성하였다. 부상장치로는 트랙의 하측에 상전도 흡인식 방식으로 차량의 진행방향에 대해 횡방향으로 자극이 구성되는 횡측향 부상방식을 택하였다.

따라서 추진장치로 사용되는 SLIM은 기존의 회전형 유도전동기를 중심축방향으로 잘라 길게 펼쳐놓은 형태로서 그림 2의 SLIM 설계치수산정 및 특성해석을 위해 본 연구에서는 다음과 같은 가정을 두었다. [1]

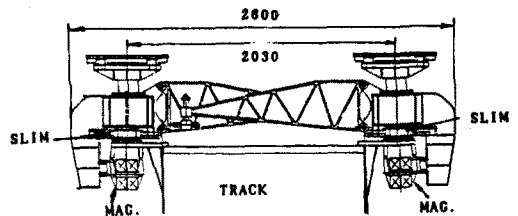
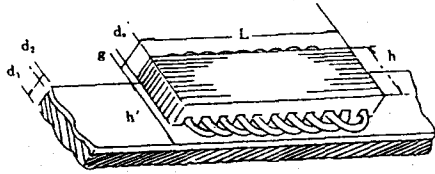


그림 1. EXPO'93용 자기부상열차의 기본구성도



L: length of primary, h: width of primary, h': width of secondary, g: air gap, d<sub>1</sub>: height of primary, d<sub>2</sub>: depth of AL, d<sub>1</sub>: depth of back iron

그림 2 편축식 선형유도전동기의 모델

1. 자계는 준정상자계로 변위전류를 무시하고 시간에 대해 정현적으로 변한다.
2. 2차측은 1차측의 중심축에 대하여 좌우 대칭으로 위치하고 공극내의 자속은 z축방향 성분만 존재하며 y축 변위는 무시한다.
3. 자속진행방향에 대하여 2차측 도체판은 충분히 길고 2차 도체판의 표피효과는 무시한다.
4. 1차측 고정자의 부자속은 무한대이며 도전율은 영(zero)이다.
5. 1차측 고정자 전류의 분포는 면전류(current sheet)로 아래의 식과 같으며

$$J_{y1} = J_m \exp(j(\omega t - \pi x / \tau)) \quad (1)$$

$$J_m = 2\sqrt{2} m K_w N_{ph} I_1 / \tau P$$

여기서  $\tau$ : 극간격,  $K_w$ : 권선계수  
 $N_{ph}$ : 상당 1차측 직렬 권선수  
 $I_1$ : 1차측 전류의 실효치  
 $K = \pi / \tau$ ,  $P$ : 극수,  $m$ : 상수

### 2.3 공극자속밀도와 특성식

이상의 가정하에서 SLIM의 특성해석을 하기위해 Maxwell 전자방정식을 기초로 하여 1차원 해석모델에 대해 식 (1)의 등가표면전류에 의해 발생하는 공극내의 자속밀도에 대한 지배방정식을 유도하면 다음 식(2)과 같이 얻을 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$\frac{\partial^2 B_z}{\partial x^2} - \frac{\mu_0 \sigma_2 d_2 V_x}{g_0} \frac{\partial B_z}{\partial x} - \frac{j \mu_0 \sigma_2 \omega d_2}{g_0} B_z = -j \frac{\mu_0}{g_0} \frac{\partial J_{y1}}{\partial x} \quad (2)$$

식 (2)에서 유효공극  $g_0$ 는 슬롯의 영향을 고려한 Carter 계수  $K_c$ 를 이용하여 보정한것으로 식 (3)과 같으며

$$g_0 = K_c g \quad (3)$$

$\sigma_0$ 는 2차측 등가도전율로 2차측 알루미늄 도체판에 흐르는 와전류가 2차측 폭  $h' = h + 2c$ 에 제약되며, Russell-Norsworthy보정식 식 (4)로부터 보정하여 구할 수 있다.

$$\frac{\sigma_0 z}{\sigma_2} = 1 - \frac{\tanh(\pi h / 2\tau)}{\pi h / 2\tau (1 - \tanh(\pi h / 2\tau) \tanh(\pi c / \tau))} \quad (4)$$

여기서  $\sigma_2$ : 2차측 알루미늄의 도전율  
 $c$ : 2차측 over hang 길이

식 (2)에 Goodness factor  $G_0$ <sup>[1]</sup>를 적용하여 단부효과와 영향을 고려한 공극내의 자속밀도는 식 (5)와 같이 얻어진다. (단, 슬립  $S = (V_n - V_x) / V_n$ )

$$B_z = B_n \exp(-jKX) + A_2 \exp(K\gamma_1(X-L)) + A_3 \exp(K\gamma_2 X) \quad (5)$$

여기서,

$$B_n = \frac{j\mu_0 J_m}{g_0 K (1 + jSG_0)} \quad (6)$$

또한,  $A_2, A_3, K, \gamma_1, \gamma_2$ 의 계수는 부록과 같으며, 2차측 알루미늄 도체판에 유도된 와전류  $J_{y2}$ 는 오옴의 법칙으로 부터 식 (7)과 같이 얻을 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$J_{y2} = \frac{g_0}{d_2} [A_1 K \gamma_1 \exp(K\gamma_1(X-L)) + A_2 K \gamma_2 \exp(K\gamma_2 X) - B_n K S G_0 \exp(-jKX)] \quad (7)$$

1차측 고정자 철심길이가 L, 폭이 h인 1차측과 2차측 사이의 유효영역내의 발생하는 추력은 Lorentz법칙에 의해 식 (8)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{추력: } F_x &= h/2 \cdot \text{Re} \left[ \int_0^L J_{y1} B_z^* dx \right] \\ &= \frac{hJ_m}{2K} \text{Re} \left[ \frac{A_1^* \exp(-K\gamma_1^* L)}{(\gamma_2^* - j)} (\exp(\gamma_1^* - j)KL - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2^*}{(\gamma_2^* - j)} (\exp((\gamma_2^* - j)KL) - 1) + B_n^* KL \right] \quad (8) \end{aligned}$$

SLIM이 발생하는 수직력  $F_n$ 은 식 (9)과 같이 1차측 고정자 철심과 2차측 back iron사이에서 작용하는 흡인력  $F_{na}$ 과 1차측 권선에 흐르는 전류와 2차측 알루미늄 도체판에 유도되는 와전류 사이에 작용하는 반발력  $F_{nr}$ 의 합으로 식 (9),(10)와 같이 얻을 수 있다.

식 (9)에서 흡인력  $F_{na}$ 은 SLIM이 차상 1차측의 자기부상 열차의 추진장치로 사용할 경우에 차량의 중량을 증가시켜 부상용 마그네트의 용량을 증가케 하며, 입구단과 출구단의 흡인력밀도의 불평형으로 돌핀현상을 야기시켜 외란을 발생한다.

$$F_n = F_{na} + F_{nr} \quad (9)$$

$$F_{na} = h/2\mu_0 \cdot \text{Re} \left[ \int_0^L B_z B_z^* dx \right] \quad (10)$$

$$F_{nr} = h\mu_0 g_0 / 2 \cdot \text{Re} \left[ \int_0^L J_{y1} J_{y2}^* dx \right] \quad (11)$$

또, 2차측 유효전력  $P_2$ 와 무효전력  $Q_2$ 는 식 (12),(13)으로 표현할 수 있으며 2차측효율과 역율은 식 (14)과 식(15)로 표현된다.

유효 전력;

$$P_2 = hd_2/2\sigma_0 \cdot \operatorname{Re} \left[ \int_0^L J_{y2} J_{y2}^* dx \right] \quad (12)$$

2차측 무효 전력;

$$Q_2 = hg_{02}/2\mu_0 \cdot \operatorname{Re} \left[ \int_0^L B_z B_z^* dx \right] \quad (13)$$

2차측 효율;

$$\eta_2 = \frac{F_x V_x}{F_x V_x + P_2} \quad (14)$$

2차측 역률;

$$\cos\phi_2 = \frac{F_x V_x + P_2}{\sqrt{(F_x V_x + P_2)^2 + Q_2^2}} \quad (15)$$

### 3. EXPO'93 자기부상열차용 SLIM의 설계

선형 유도전동기가 교통수단의 추진시스템으로 사용할 경우 추력산정이나 설계치수를 결정할때에는 반드시 차량의 무게, 주행시의 가감속도, 전동기의 중량, 효율 및 역을 뿐만 아니라 열차의 운전조건등을 고려하여 설계되어야 한다.

본 절에서는 EXPO'93 자기부상용 SLIM의 기본설계치수를 산정하기 위하여 기본 특성식을 적용하고, 전기장하와 자기장하의 개념을 도입하여 주요 설계치수를 산정하고자 한다.

#### 3.1 SLIM의 설계사양 및 제약조건

2.2절에서 구한 SLIM의 기본 특성식으로 부터 식 (9)에서 발생하는 흡인력을 최소로 하는 기본설계 치수를 선정하기 위한 기본사양으로는 다음과 같다.

- 1) 자기부상열차의 가속도는 승차감 및 운전조건을 고려하여 0.65(m/s<sup>2</sup>)이하로 한다.
- 2) 입력주파수는 VVVF 방식의 인버터의 최대 주파수에 의해 결정되며, 120(Hz)이하로 한다.
- 3) 동기속도는 전사용 자기부상열차의 track길이 제한등으로 60(Km/h)이하의 저속도용으로 설계한다.
- 4) 정격추력은 정격운전속도 40(Km/h)으로 운전할때에 필요한 추력으로 1st module에서는 2000(N), 2nd module에서는 1300(N)이며, 최대추력은 정격추력의 125-200% 내외로 설계한다.

또 시험용 자기부상열차의 설치 및 제작상의 구조적인 문제로 인한 제약조건으로는 다음과 같다.

- i) 최소의 기계적 공극길이: 11(mm)
- ii) 최대의 1차측 길이 L: 3(m)이하
- iii) 최소의 1차측 폭 h: 0.2(m)
- iv) 최대의 2차측 도체판의 폭 h': 0.23(m)
- v) 2차측 Al 도체판의 두께 dz: 5mm
- vi) 2차측 Back iron 두께 dz: 16mm
- vii) 공급 전압: 440(V)

#### 3.2 선형 유도전동기의 필요한 추력

선형유도전동기가 차량 추진장치의 구동원으로 사용될 경우 차량의 부하용량에 따른 필요한 정격추력이 산정되어야 하므로 부하로서 차량 전체질량 M(Kg)을 가지며 가속도 a (m/s<sup>2</sup>), 속도 V(m/s)로 주행할때 선형유도전동기가 필요한 추력은 식 (16)으로 주어지며

$$F_0 = Ma + T_a \quad (16)$$

여기서 T<sub>a</sub>는 기계 역학적 항력으로서 식 (17)과 같이 표현되며, 저속도용 자기부상열차의 경우는 비교적 무시할수 있으나 고속기 자기부상열차의 설계시에는 기계 역학적 항력이 속도의 자승에 비례하므로 시속 500(Km/H) 이상에서는 전력설비등 경제성 문제가 중요시 되고 있다.

$$T_a = C_{ax} A_f \rho V_x^2 / 2 \quad (17)$$

여기서 C<sub>ax</sub>: 기계 역학적 항력 계수 (=0.26)

A<sub>f</sub>: 차량 정면의 면적 (m<sup>2</sup>)

ρ: 공기저항 (=1.23(Kg/m<sup>3</sup>))

자기부상열차의 추진용으로 사용할 경우에는 마찰저항이 필요하지 않게 되나 Linear Motor Car 등 바퀴식으로 이용할 경우에는 마찰계수등이 반드시 고려되어야 한다.

#### 3.3 실험기의 기본설계 치수 산정

위의 제약조건을 만족하는 SLIM의 주요치수는 그림 2에서와 같이 1차측 길이 L, 1차측 폭 h, 기계적 공극 g, 2차측 알루미늄과 Back iron 두께 d 및 폭 h'로 단위면적당의 출력계수 C는 식 (18)와 같이 관계를 갖는다.

$$C = \frac{P_m}{V_s \tau Ph} = \sqrt{2} K_w K_r B_{sm} A_m \eta \cos\phi \cdot 10^{-3} \text{ [KW min/m}^2] \quad (18)$$

여기서 S<sub>g</sub> = P<sub>m</sub>/ηcosφ = mE<sub>1</sub>I<sub>1</sub>: 피상전력 (VA)

P<sub>m</sub>: 기계적 출력, η: 효율, cosφ: 역률

K<sub>w</sub>: 권선계수, K<sub>r</sub>: 파형률

A<sub>m</sub>: Ampere 도체수로서의 전기장하 (AT/m)

B<sub>sm</sub>: 공극내의 최대자속밀도로서의 자기장하(T)

V<sub>s</sub> = 2πf: 동기속도(m/min)

L' = (P + β) τ: 1차측 철심길이

식 (18)에서 알수 있다시피 SLIM의 출력은 공극자속밀도 (B<sub>sm</sub>), 변전류밀도(A<sub>m</sub>), 1차측 유효단면(L'h) 및 동기속도(V<sub>s</sub>)를 증가하면 따라 증가한다. 그러나 임정량의 동과 철의 양이 주어졌을 때 SLIM의 출력계수는 변전류 밀도나 공극 자속밀도의 곱에 비례하나 전기적, 자기적, 유전적, 열적 및 기계적 특성때문에 무한정 증가함수는 없으며 보통 단위면적당 추력은 4000-24000(N/m<sup>2</sup>)로 선정한다.

SLIM이 자기부상열차의 추진용으로 사용할 경우의 추력 F<sub>0</sub>를 내는데 필요한 입력 변전류밀도 J<sub>m</sub>은 식 (8)과 식 (16)으로부터 식 (19)과 같이 얻을수 있다.

$$J_m = \sqrt{\frac{F_o K}{h \mu_o} \operatorname{Re} \left[ \frac{g_o K (1 - j S G_o) \cdot R_{11}}{Y_{11} - Y_{12} - j K L \cdot R_{12}} \right]} \quad (19)$$

여기서 ;

$$R_{11} = (\gamma_2^* - \gamma_1^*)(\gamma_2^* - j)(\gamma_1^* - j)$$

$$Y_{11} = j(\gamma_2^* + S G_o)(\gamma_2^* - j) \operatorname{EXP}(-\gamma_1^* K L) (\operatorname{EXP}(\gamma_1^* - j) K L - 1)$$

$$Y_{12} = j(\gamma_1^* + S G_o)(\gamma_1^* - j) (\operatorname{EXP}(\gamma_2^* - j) K L - 1)$$

식 (19)에서 전류밀도 크기의 결정은 슬롯 내의 도체 저항 손 I<sup>2</sup>R에 의해 발생하는 열에 의한 온도상승등을 고려한 냉각 매체와 접연체질에 의해 결정되며 일반적으로 유도기에서는 3(A/m) - 5.5(A/m) 정도로 선정한다.

자기장하로서 공극내의 최대자속밀도 B<sub>gm</sub>는 사용하는 재료의 포화자속, 히스테리시스손, 와류손등에 의해 제한되며, 공극내의 자속밀도의 최대치는 식 (19)을 식 (5)에 대입하여 구할 수 있다.

일반적으로 설계시에 공극내의 자속밀도는 회전형유도전동기의 경우는 0.35(T) - 0.55(T)로 선정하나, 편축식 선형유도전동기는 식 (10)와 같이 수직력성분중 차쌍의 무게를 증가시키는 역할을 하는 흡인력이 자속밀도의 제곱에 비례하므로 0.2(T) - 0.5(T)로 낮은 범위내에서 선정하는 것이 좋다.

이상에서 전기장하와 자기장하를 고려한 SLIM이 필요로 하는 추력을 발생하기 위해서는 식 (18)에서 1차속 유효단면적 (τPh)과 동기속도 (V<sub>s</sub>)를 증가시켜야 한다.

극간격은 동기속도와 정격속도의 관계식  $V_x = 2\pi f(1-S)$ 으로 부터 결정되는데 정격속도의 설정은 대개 300(Km/H) 이상의 경우는 슬립이 0.05 - 0.1 정도로 선정하며, 100(Km/H) 정도의 중저속도에서는 슬립이 0.2 - 0.25로 설계되며, 40(Km/H)에서는 0.2 - 0.35 정도로 보통 선정한다.

슬롯 피치는 극간격과의 관계식  $\tau = m q Z_c$ 에서 구할 수 있으며, 치폭 T<sub>s</sub>은 치에서의 자기포화가 되지 않은 범위내로 선형영역에서 선택되어야 하며 식 (20)으로 부터 구할 수 있다.

$$B_t = Z_c B_{gm} / T_s' \quad (20)$$

슬롯의 깊이는 면전류 밀도 식 (1)로 부터, 하나의 슬롯 내의 전류밀도는 식 (21)의 관계식으로 부터 구할 수 있다.

$$A_m = f \sigma b W_o / Z_c \quad (21)$$

$$= 3\sqrt{2} K_m N_p h I_1 / \tau P$$

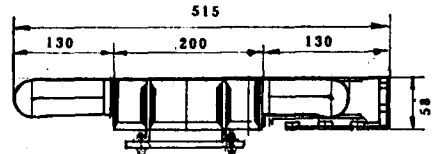
여기서, b는 슬롯깊이로 b를 증가하면 리엑턴스가 증가하고 역률, 효율, 전압변동률 및 동손에 의해 발생하는 열에 의한 온도 상승등의 문제로 일반적으로 낮게 설계한다.

따라서 본 연구에서 자기부상열차에 필요한 정격추력은 1st module의 경우는 2000(N/대당), 2nd module의 경우는 1300(N/대당)으로 상호 연계운전을 하기 위하여 극간격은

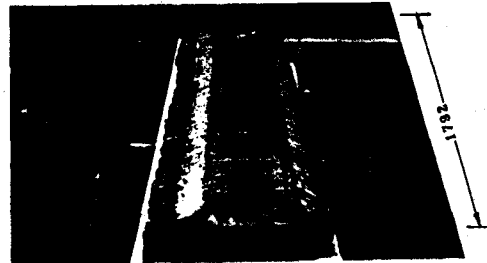
1,2차 모듈이 동일하게 설계하였다. 이에 대한 설계치수는 표 1의 제원과 같다.

표 1. SLIM의 제원

LIM DESIGN PARAMETER			
PARAMETER	SYMBOL	1st SLIM	2nd SLIM
Primary Voltage	V <sub>i</sub>	146	127
Frequency	f <sub>1</sub>	40	40
Line Primary Current	I <sub>1</sub>	238	165
Capacity	KVA	60	37
Rated Slip	S <sub>n</sub>	0.4	0.4
Thrust	F <sub>n</sub>	2000	1300
Synchronous Speed	V <sub>1</sub>	65.66	65.66
Primary Length (mm)	L	2894	1792
Number of Phase	m	3	3
Number of Poles	p	12	7
Pole Pitch (mm)	τ	228	228
Stack Height (mm)	h	200	200
Primary Depth (mm)	d <sub>a</sub>	70	61
Slots/Pole, Phase	q	4	4
Slot Pitch (mm)	t <sub>s</sub>	19	19
Slot Width (mm)	w <sub>s</sub>	13	13
Slot Depth (mm)	d <sub>s</sub>	50	41
Short Pitch Factor	β	8/12	10/12
Turns per Coil	N	4	4
Series Turns/Phase	N <sub>ph</sub>	192	112



a) SLIM의 측면도



b) 제작된 SLIM의 외형도

그림 3. 설계, 제작된 2nd Module의 SLIM

#### 4. SLIM의 특성 고찰

그림 4은 선간 입력전압 220(V)을 인가했을 때 주파수 변화에 따른 전류특성곡선으로 주파수가 30(Hz)일때 기동시의 입력전류는 285(A)가 흐르며, 주파수가 높을 수록 전류는 차츰 감소하는 현상을 보이며 50(Hz)에서는 210(A)가 흐름을 알 수 있다.

또한, 속도가 증가할수록 전류가 차츰 감소하여 정격속도 40(Km/h)근방에서는 165(A)로 2nd 모듈에서의 실험기의 슬롯내 권선굵기는 3.8 × 5.2(mm<sup>2</sup>)의 알루미늄 라선으로 2본 병렬결선하였으며 전류 밀도는 4.17(A/mm<sup>2</sup>)이다.

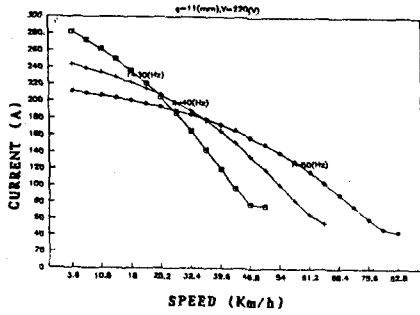


그림 4. 주파수 변화에 따른 전류 곡선

그림 5는 정전압원 구동시의 주파수를 30, 40, 50(Hz)로 변화했을 때 추력 특성곡선으로서, 주파수가 증가하면 최대추력 발생점은 슬립이 영(zero)인 동기속도쪽으로 이동하며 최대추력은 조금씩 감소하는 현상을 볼수 있다. 이는 주파수의 증가로 인하여 2차측 리액턴스의 증가하여 그림 4와 같이 1차 입력전류가 현저히 감소하기 때문이다.

또한, 슬립 S=0일때 정의 추력을 발생하는 것은 단부효과에 의해 동기속도에서도 2차측 알루미늄 도체판에 와전류가 유도되기 생기는 현상이다.

이상에서 설계된 SLIM은 정격속도 40(Km/h)에서의 정격추력은 필요한 정격추력보다 큰 1500(N)으로 충분한 기속력을 얻을 수 있음을 알수 있다.

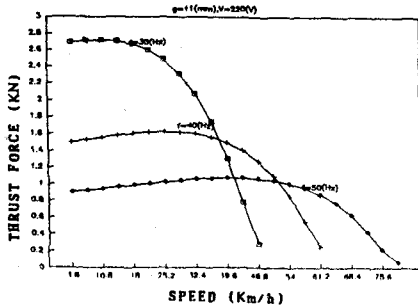


그림 5. 주파수 변화에 따른 추력 곡선

그림 6은 속도-수직력곡선으로 수직력  $F_n$ 은 1차측 권선에 흐르는 전류와 2차측알루미늄 도체판에 유도된 와전류에 의해 발생한 반발력과 1차측과 2차측 Back iron 사이에 Maxwell 용력에 의해 발생한 흡인력의 합성된 힘으로 나타난다. 그림 6에서 정의 힘은 1차측과 2차측을 끊어 당기는 흡인력으로 작용하며, 부의 힘은 서로 미는 반발력을 작용하는데, 저속도 영역에서 반인력으로 작용하나 속도가 증가하면 반발력은 차츰 감소하여 동기속도부근에서는 최대의 흡인력으로 작용함을 알수 있다.

또한 수직력이 영(zero)인 것이 주파수의 증가로 조금씩 슬립이 영(zero)이 되는쪽으로 이동함을 알수 있는데, 본 연구에서와 같이 자기부상열차의 시스템의 추진용으로 사

용할 경우 흡인력은 차량의 무게를 증가시키는 작용을 함으로 운전시에 흡인력을 최소화하면서, 또 일정 흡인력이 발생하도록 제어하여야만 부상제어가 안정하게 된다.

그림 7는 주파수가 30, 50, 60(Hz)일때 효율, 역률곡선을 나타낸 것으로 정격운전 영역에서 SLIM의 효율은 0.35, 역률 0.6정도를 나타내며 주파수가 증가하면 효율은 증가하고 역률은 조금씩 감소하는 현상을 나타낸다.

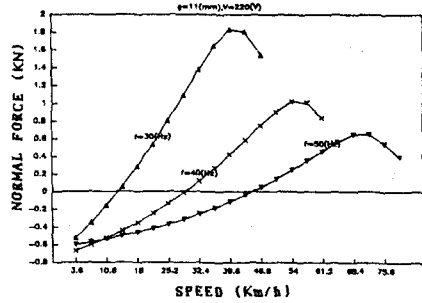


그림 6. 주파수 변화에 따른 수직력 곡선

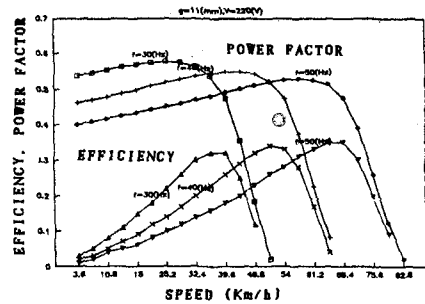


그림 7. 주파수 변화에 따른 효율, 역률

## 5. 결론

본 연구에서는 EXPO'93 자기부상열차용 추진시스템으로서 편축식 선형유도전동기의 설계 및 특성해석을 통하여 성능을 고찰하고 실제 운전시의 특성을 예측가능하게 하였다.

편축식 선형유도전동기의 특성해석은 Maxwell 전자방정식을 기초로 한 공극자속밀도 방정식과 특성식을 이용하여 분석하였으며, 전동기의 주요치수 설계는 선형유도전동기가 양단부가 존재함으로써 생기는 흡인력이 정격운전 속도 영역에서 최소로 발생하도록 설계하였다.

이상의 연구들 통하여 정격추력 1300(N)인 편축식 선형유도전동기로 길이 1792(mm), 폭 200(mm), 높이 58(mm)를 제작하였으며, 2nd 모듈 자기부상열차에 실장 실험한 결과 추진장치로서의 성능이 양호함을 알수 있었다.

## 6. 참고 문헌

- [1] S.A.Nasar, I.Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc., 1985
- [2] 野中, 吉川: "リニアモータの等価回路定数と特性計算式", 電氣學會論文, 90-5, 890/899, 1970
- [3] 조윤현, "유한요소법에 의한 자기부상열차 추진용 SLIM의 설계, 제작 및 3차원적 특성해석", 공학박사학위논문, 한양대학교, 1991