

## 차량 추진용 SLIM의 추력산정 및 수직력 경감에 대하여

임 달 호 · 조 윤 현 · 구 대 현\*

한양 대학교 · 한국전기연구소 · 한양 대학교

### On the Thrust Force Calculation and Normal Force Reduction of SLIM for Propulsion of Vehicles

Dal-Ho Im , Yun-Hyun Cho , Dae-Hyun Koo\*

Han Yang Uni. KERI Han Yang Uni.

#### ABSTRACT

This paper proposes the calculation method of the needed thrust force and the input current which are considered the end effect and the normal force effect of SLIM for the propulsion vehicles. To estimate the performance of SLIM, the thrust force, the normal force, the efficiency and the power factor are computed according to the variation of frequency and pole pitch.

#### 1. 서 론

현재 지하철이나 도심 교통수단의 추진장치로는 주로 회전형 전동기로 DC, AC Traction Motor 등이 사용되고 있으나 산업분야의 발달로 소음, 진동 등 환경문제와 고속성, 왜적성, 경제성 등의 면에서 직선형 전동기를 이용한 추진시스템의 연구개발이 여러 선진국에서 활발히 진행되고 있다.

본 연구는 이러한 중, 저속도형 도심 교통수단의 추진장치로서 편측식 선형유도전동기를 사용하는 경우, 차량 무게 용량에 따른 전동기의 정격입력전류 및 추력을 계산할 시에 선형유도전동기가 갖는 단부효과와 운행시에 1차속과 2차속 사이에 작용하는 Normal Force의 특성을 고려하여 계산하는 방법을 제안하였다.

또 운전시에 Normal Force가 차량에 미치는 영향을 보기 위하여 주파수와 극간격을 변화시켜 역률, 효율을 검토함으로써 Normal Force를 저감하는 방법을 제시하였다.

그 예로 최고속도 60km/h이며 전체 차량무게중 한대의 전동기가 감당할 수 있는 차체하중이 200, 400, 600kg일 때,

주파수 및 극간격의 변화에 따른 수직력의 특성을 고찰함으로써 설계시의 최적 극간격과 운전 주파수의 선정을 가능케 하였다.

#### 2. 전자계 이론을 기초로 한 특성방정식

##### 2.1 공극내 자속밀도 및 2차속 와전류밀도

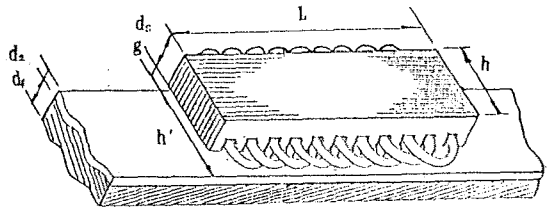


그림 1. 편측식 선형유도전동기

Fig. 1. Single Sided Linear Induction Motor

그림 1과 같은 편측식 선형유도전동기 해석모델에 대해 해석을 용이하게 하기 위해 1차속에 가해주는 입력전류를 Current Sheet로 놓고 단부효과의 영향을 고려한 Air Gap 내의 자속밀도를 구하기 위하여서 Maxwell의 전자방정식을 기초로 하여 정리하면 식 (1)과 같이 얻어진다.<sup>[1]-[7]</sup>

$$I_{zs} = J_m \text{EXP}_j(\omega t - KX) \quad (1)$$

$$J_m = \frac{\sqrt{2} k_w N_p h I_t}{Pr}$$

$$B_y = B_n \text{EXP}(-JKX) + A_2 \text{EXP}(K \gamma_1 (X-L)) + A_2 \text{EXP}(K \gamma_2 X) \quad (2)$$

$$A_1 = \frac{B_n (\gamma_2 + S \text{GE}) \text{EXP}(-JKX)}{(\gamma_1 - \gamma_2)} \quad (3)$$

$$A_2 = \frac{B_n (\gamma_1 + S \text{GE})}{(\gamma_2 - \gamma_1)} \quad (4)$$

$$B_n = \frac{j\mu_0 J_m}{g K (1 + JSGE)} \quad (5)$$

$$\gamma_1 = \frac{GE(1-S)}{2} \left[ \sqrt{\frac{b+1}{2}} - 1 + j \sqrt{\frac{b-1}{2}} \right] \quad (6)$$

$$\gamma_2 = \frac{-GE(1-S)}{2} \left[ \sqrt{\frac{b+1}{2}} - 1 + j \sqrt{\frac{b-1}{2}} \right] \quad (7)$$

$$b = 1 + 16 GE^{-2} (1-S)^{-4} \quad (8)$$

또 2차속 알루미늄 도체판에 유도된 와전류  $J_2$ 는  $J_2 \propto E_2$ 에 의해 정리하면 식(9)와 같다.

$$J_2 = \frac{E}{d_2} \left[ \frac{A_1 K \gamma_1 \text{EXP}(K \gamma_1 (X-L)) + A_2 K \gamma_2 \text{EXP}(K \gamma_2 X)}{B_n K S GE \text{EXP}(-j K X)} \right] \quad (9)$$

2.2 특성 방정식

1차속 고정자 철심길이가 L, 폭이 h인 1차속과 2차속 사이의 유효영역내의 발생하는 추력과 Normal Force는 식(10), 식(11)과 같이 쓸수있으며, 식(11)에서  $F_{na}$ 는 1차속과 2차속사이에 작용하는 흡인력 성분이며  $F_{nr}$ 은 1차속 전류와 2차속 와전류사이에 작용하는 반발력을 나타낸다.

또 1차속에서 2차속으로 전달된 유효전력 P2 및 무효전력은 식(12), 식(13)이 되며, 2차속의 역률,효율은 식(14), 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{추력: } F_x &= h\mu_0 \text{Re} \left[ \int_0^L I_{2s} B_y^* dx \right] \\ &= \frac{h\mu_0 J_m}{K} \text{RE} \left[ A_1^* \text{EXP}(-K \gamma_1^* L) (\text{EXP}(\gamma_1^* - j) KL - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2^*}{(\gamma_2^* - j)} (\text{EXP}((\gamma_2^* - j) KL - 1) + B_n^* KL) \right] \quad (10) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{수직력: } F_n &= F_{na} + F_{nr} \\ F_{na} &= \frac{h\mu_0}{K} \left[ \frac{A_1 A_1^* \text{EXP}(-(\gamma_1 + \gamma_1^*) KL) (\text{EXP}(\gamma_1 + \gamma_1^*) KL - 1)}{(\gamma_1 + \gamma_1^*)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2 A_2^*}{(\gamma_2 + \gamma_2^*)} (\text{EXP}((\gamma_2 + \gamma_2^*) KL - 1) + B_n B_n^* KL) \right. \\ &\quad \left. + \text{RE} \left( \frac{A_1 A_2^* \text{EXP}(-K \gamma_1 L)}{(\gamma_1 + \gamma_2^*)} (\text{EXP}(\gamma_1 + \gamma_2^*) KL - 1) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1 B_n^* \text{EXP}(-K \gamma_1 L)}{(\gamma_1 + j)} (\text{EXP}(\gamma_1 + j) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1^* A_2 \text{EXP}(-K \gamma_1^* L)}{(\gamma_1^* + \gamma_2)} (\text{EXP}(\gamma_1^* + \gamma_2) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1^* B_n \text{EXP}(-K \gamma_1^* L)}{(\gamma_1^* - j)} (\text{EXP}(\gamma_1^* - j) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_2 B_n^*}{(\gamma_2 + j)} (\text{EXP}(\gamma_2 + j) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_2^* B_n}{(\gamma_2^* - j)} (\text{EXP}(\gamma_2^* - j) KL - 1) \right) \right] \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{nr} &= h\mu_0 g J_m \text{RE} \left[ \frac{A_1 \gamma_1 \text{EXP}(-K \gamma_1 L)}{(\gamma_1 + j)} (\text{EXP}(\gamma_1 + j) KL - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2 \gamma_2}{(\gamma_2 + j)} (\text{EXP}(\gamma_2 + j) KL - 1) - I_n L \right] \end{aligned}$$

$$[ I_n = \frac{-JSGE J_m}{g(1+JSGE)} ]$$

2차속 유효 전력;

$$\begin{aligned} P_2 &= \frac{h g^2}{\sigma d_2} \left[ \frac{K A_1 A_1^* \gamma_1 \gamma_1^* \text{EXP}(-(\gamma_1 + \gamma_1^*) KL)}{(\gamma_1 + \gamma_1^*)} \right. \\ &\quad \left. \frac{(\text{EXP}(\gamma_1 + \gamma_1^*) KL - 1)}{(\gamma_2 + \gamma_2^*)} + \frac{K A_2 A_2^* \gamma_2 \gamma_2^* \text{EXP}((\gamma_2 + \gamma_2^*) KL - 1)}{(\gamma_2 + \gamma_2^*)} \right. \\ &\quad \left. + I_n I_n^* L + \text{RE} \left( \frac{A_1 I_n^* \text{EXP}(-\gamma_1 KL)}{(\gamma_1 + j)} (\text{EXP}(\gamma_1 + j) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{K A_1 A_2^* \gamma_1 \gamma_2^* \text{EXP}(\gamma_1 KL)}{(\gamma_1 + \gamma_2^*)} (\text{EXP}(\gamma_1 + \gamma_2^*) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{K A_1^* A_2 \gamma_1^* \gamma_2 \text{EXP}(-\gamma_1^* KL)}{(\gamma_1^* + \gamma_2)} (\text{EXP}(\gamma_1^* + \gamma_2) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1^* \gamma_1^* I_n \text{EXP}(-\gamma_1^* KL)}{(\gamma_1^* - j)} \text{EXP}(\gamma_1^* - j) KL - 1 \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2 \gamma_2 I_n^*}{(\gamma_2 + j)} (\text{EXP}(\gamma_2 + j) KL - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2^* \gamma_2^* I_n}{(\gamma_2^* - j)} (\text{EXP}(\gamma_2^* - j) KL - 1) \right) \quad (12) \end{aligned}$$

2차속 무효전력;

$$\begin{aligned} Q_2 &= \frac{w g h \mu_0}{K} \left[ \frac{A_1 A_1^* \text{EXP}(-(\gamma_1 + \gamma_1^*) KL) (\text{EXP}(\gamma_1 + \gamma_1^*) KL - 1)}{(\gamma_1 + \gamma_1^*)} \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2 A_2^*}{(\gamma_2 + \gamma_2^*)} (\text{EXP}((\gamma_2 + \gamma_2^*) KL - 1) + B_n B_n^* KL) \right. \\ &\quad \left. + \text{RE} \left( \frac{A_1 A_2^* \text{EXP}(-K \gamma_1 L)}{(\gamma_1 + \gamma_2^*)} (\text{EXP}(\gamma_1 + \gamma_2^*) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1 B_n^* \text{EXP}(-K \gamma_1 L)}{(\gamma_1 + j)} (\text{EXP}(\gamma_1 + j) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1^* A_2 \text{EXP}(-K \gamma_1^* L)}{(\gamma_1^* + \gamma_2)} (\text{EXP}(\gamma_1^* + \gamma_2) KL - 1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{A_1^* B_n \text{EXP}(-\gamma_1^* KL)}{(\gamma_1^* - j)} (\text{EXP}(\gamma_1^* - j) KL - 1) \right) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2 B_n^*}{(\gamma_2 + j)} (\text{EXP}(\gamma_2 + j) KL - 1) \right. \\ &\quad \left. + \frac{A_2^* B_n}{(\gamma_2^* - j)} (\text{EXP}(\gamma_2^* - j) KL - 1) \right) \quad (13) \end{aligned}$$

$$\text{2차속 효율: } \eta_2 = \frac{F_x V_x}{F_x V_x + P_2} \quad (14)$$

$$\text{2차속 역률 } \cos 2\phi = \frac{F_x V_x + P_2}{\sqrt{(F_x V_x + P_2)^2 + Q_2^2}} \quad (15)$$

3. 선형 유도전동기의 필요한 추력, 입력전류 산정식

선형 유도 전동기가 차량 추진장치의 구동원으로 사용될 경우 차량의 부하용량에 따른 필요한 정격추력이 산정되어야 하므로 부하로서 차량전체질량 M(kg)을 가지며 가속도  $\alpha$  (m/s<sup>2</sup>), 정격속도 Vn(km/h)일때 선형유도전동기가 필요한 추력은 식(16)로 주어지며 [8]-[9]

$$F_o = M \alpha + R \quad (16)$$

$$R = (24.23 + 0.04Vn)(M + F_n') + 0.225Vn^2 \quad (16')$$

여기서 R(N)은 주행저항, M는차체중량(ton),  $F_n'$ 는 주행시의 흡인력(ton)이다.

추력 Fo를 내는데 필요한 입력전류밀도는 식 (10)과 식 (16)으로 부터 식(17)과 같이 얻어진다.

$$J_m = \left[ \frac{FoK}{h \mu_o} RE \left[ \frac{gK(1-JSGE)(\gamma_2^*-\gamma_1^*)(\gamma_2^*-j)}{j(\gamma_2^*+SGE)(\gamma_2^*-j)EXP(-\gamma_1^*KL)} \right. \right. \\ \left. \left. \frac{(\gamma_1^*-j)}{(EXP(\gamma_1^*-j)KL-1) - j(\gamma_1^*+SGE)(\gamma_1^*-j)(EXP(\gamma_2^*-j)KL-1)} \right. \right. \\ \left. \left. - \frac{JKL(\gamma_2^*-\gamma_1^*)(\gamma_2^*-j)(\gamma_1^*-j)}{(\gamma_1^*-j)} \right] \right]^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

또, 식 (17)을 식(2)에 대입하면 추력 Fo를 내는데 필요한 Air Gap 내의 공극자속밀도를 구할 수 있다.

따라서 선형 유도 전동기의 설계시에 공극내의 자속밀도는 Normal Force(흡인력) 영향등으로 인하여 정격용량, 정격속도에서 보통 0.3 (T)-0.5(T)정도로 설계되며, 1차속 Stator의 극수는 End-Effect의 영향을 적게하기 위하여 4극이상 설계되어야 하므로 설계에 있어서 선형 유도전동기의 용량을 결정하는 주요치수의 선정은 식(12)에서 h, L, d<sub>2</sub>의 값으로 차량의 폭과 길이를 고려하여 이들의 영향이 최소가 되도록 설계되어야 한다.

4. 특성비교 및 검토

4.1 무게에 따른 입력전류 및 자속밀도

그림(2)와 그림(3)은 차량의 무게에 대해 한대의 선형 유도전동기가 감당하는 무게가 200, 400, 600(kg)일때 각각 동일출력을 발생하는데 필요한 입력전류와 자속밀도 분포곡선으로서 슬립 변화에 따라 나타난 그림이다.

그림(2)에서 슬립이 감소하면 전류밀도값이 차츰 감소하다가 슬립이 0.35정도의 범위에서 최소값이 되며 다시 동기속도 근방에서는 상당히 증가함을 볼수 있는데 이는 무효전력성분이 상당히 증가하는 현상으로 흡인력이 급격히 증가하게된다.

자속밀도값은 그림(3)과 같이 슬립이 감소함에 따라 증가함을 보이고 있는데 일반적으로 선형유도전동기의 정격추력의 선정은 정격속도에서 공극내의 자속밀도가 0.3-0.5(T)정도로서 그림(2)의 입력전류곡선과 비교해서 최소의 입력으로 최대의추력을 발생하는 부분을 택하여 설계하면 최대효율을 얻을수 있으므로 중량이 200kg에서 600kg범위내에서의 운전영역은 빗금친 부분의 영역이 된다.

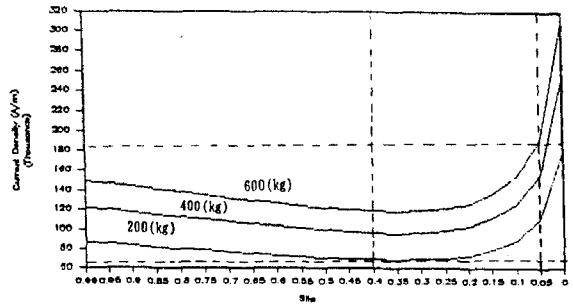


그림 2. Slip 변화에 따른 입력전류밀도  
Fig. 2. Primary Current Density according to the variation of Slip

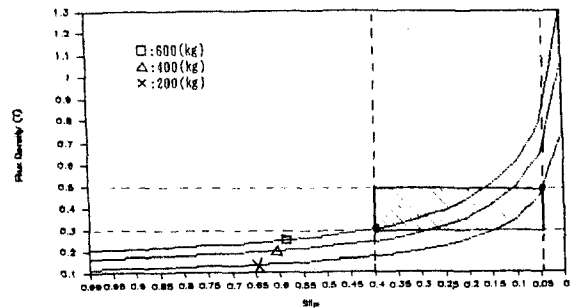


그림 3. Slip 변화에 따른 자속밀도  
Fig. 3. Flux Density according to the variation of Slip

4.2 주파수 변화에 따른 특성

그림(4), (5), (6)은 차량무게 400(kg)을 감당하는데 필요한 추력곡선이며 그때 선형유도전동기가 발생하는 Normal Force 및 효율, 역률곡선으로 주파수를 20, 40, 60, 80(Hz)로 변화시켰을 때 양상을 나타낸 것이다.그림(4)

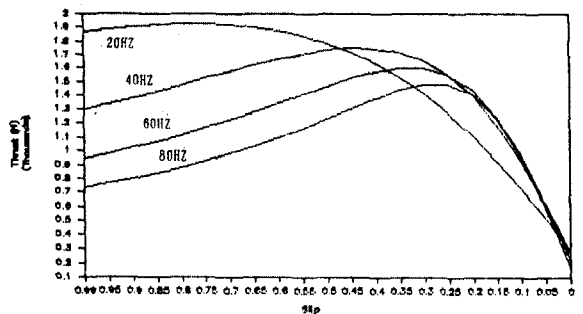


그림 4. 주파수 변화에 따른 추력특성곡선  
Fig. 4. Thrust force curve according to the variation of frequency

(5)에서 주파수를 증가시키면 추력이 떨어지나 Normal Force가 추력에 비해 더욱 큰폭으로 감소하기 때문에 그림(6)에서와 같이 전체역율은 오히려 증가함을 볼 수 있는데, 본 해석 모델과 같이 저속도용 전동기에서 극간격이 짧을 경우 주파수가 높은 범위에서 운전하는 것이 좋은 역률을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

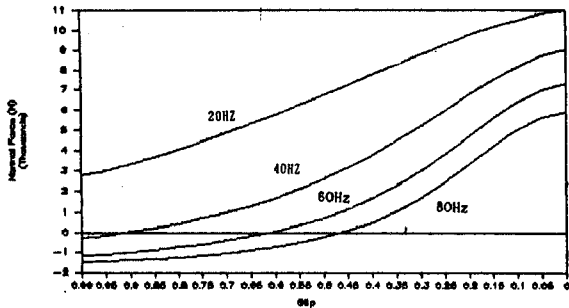


그림5. 주파수 변화에 따른 Normal force 곡선  
Fig.5 Normal force curve according to the variation of frequency

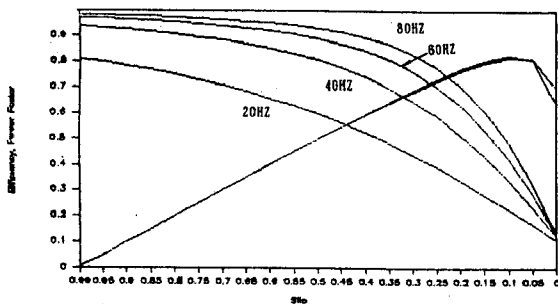


그림6. 주파수 변화에 따른 2차측 역률, 효율 곡선  
Fig.6 the secondary efficiency, power factor according to the variation of frequency

#### 4.3 극간격 변화에 따른 특성

그림(7), (8)은 선형유도전동기의 용량이 식(10)에서와 같이  $(L, h, d_2)$ 의 함수이므로 그림에서 전체 전동기의 유효단면적을 일정하게 두고 1차측의 길이  $L=Pr$ 에서 극간격  $\tau$ 를 변화시켰을 때 추력, 수직력곡선과 효율, 역률곡선을 각 주파수에 따른 특성을 나타낸 것이다.

그림(7)에서 주파수가 증가하면 추력과 흡인력은 감소하나 최소흡인력이 발생하는 지점은 극간격이 작아지는 쪽으로 이동함을 알 수 있다. 그러나 어느 지점 이하의 극간격에서는 오히려 Normal Force(흡인력)가 증가하는 현상을 볼 수 있다. 따라서 설계시의 극간격의 선택은

추력곡선과 normal force곡선이 만나는 범위내에서 설계가 되도록 하여야만 그림(8), (9)와같이 높은 역률과 효율을 얻을 수 있다.

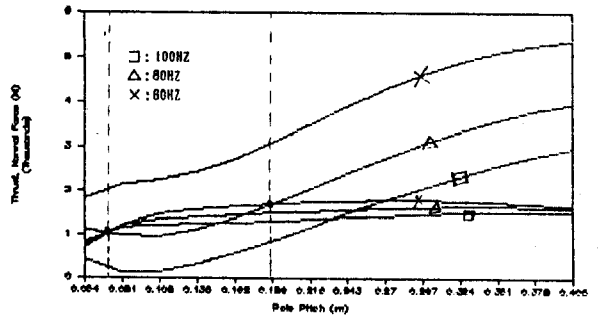


그림7. 극간격 변화에 따른 추력과 Normal force  
Fig.7 Thrust, Normal force according to the variation of pole pitch

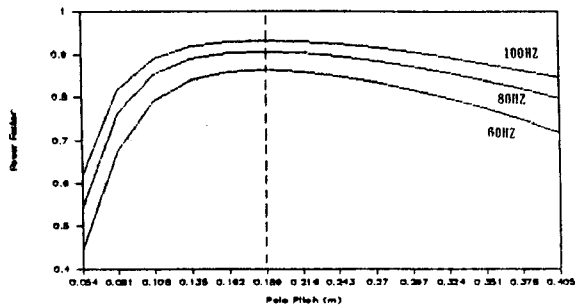


그림 8. 극간격 변화에 따른 2차측 역률곡선  
Fig.8 the secondary power factor according to the variation of pole pitch

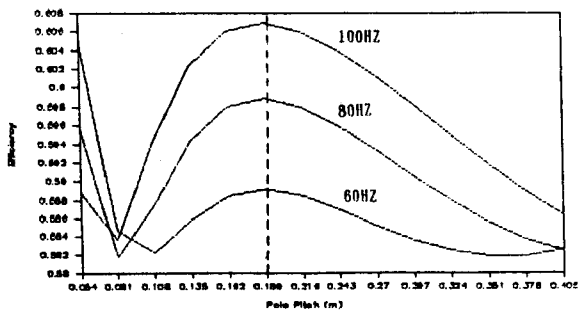


그림 9 극간격의 변화에 따른 2차측 효율곡선  
Fig.9 The secondary efficiency according to the variation of pole pitch

#### 5. 결 론

본 논문에서 차량무게의 변화에 따른 입력전류밀도 및 공극내에서 자속밀도를 구할 수 있으므로 설계단계에서

차량의 용량, 정격속도에 따라 필요한 추력을 얻을 수 있었다. 또 선형유도전동기의 흡인력은 Air Gap내의 공극자속밀도의 제곱에 비례하므로 극간격이 작은 저속기에서는 가능한 한 높은 주파수로 운전함으로써 수직력을 저감할 수 있음을 알았다. 따라서 본 논문에서 제안한 방법은 토대로 선형유도전동기의 설계시의 필요한 추력 산정과 운전시에 수직력 저감함으로 전동기의 효율을 증대시킬수 있을것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] I. Boldea, S. A. Nasar, "Linear Motion Electromagnetic Systems", John Wiley and Sons, 1985
- [2] Syed A. Nasar, I. Boldea, "Linear Electric Motors: Theory, Design, and Practical Applications", Prentice-Hall, Inc., 1985
- [3] Sakae Yamamura, "Theory of Linear Induction Motors", John Wiley and Sons, 1979
- [4] 野中, 吉田 : "리ニア모터의 등價回路定數と特性計算式", 電氣學會논문, 90-5, 890/899, 1970
- [5] I. Boldea, S. A. Nasar, "A Complete Equivalent Circuit of Linear Induction Motor with Sheet Secondary", IEEE, Vol. MAG-24, No.1, 1988
- [6] Johnk, "Engineering Electromagnetic Field and Waves", John Wiley and Sons, 1975
- [7] J. F. Gieras, G. E. Dawson, A. R. Eastham, "A New Longitudinal End Effect Factor", IEE Transactions on Energy Conversion, Vol. EC-2, No.1, 1987
- [8] S. Nonaka and T. Higuchi, "Elements of Linear Induction Motor Design for Urban Transit", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. MAG-23, No. 5, 1987
- [9] 野中, 桶口 : "車の運轉性能を考慮した新都市交通用 LIMの設計について", 리니아드라이브研究會資料, LD-90-12(1990-3)