

# 제어-영구자석형 자기부상열차의 특성해석에 관한 연구

## The Study on the Characteristic Analysis of Controlled-PM LSM for Maglev Vehicle

이 주\* 전연도\* 이관섭\*\*

Lee, Ju Chun, Yon Do Lee, Kwan Seop

한양대학교 공과대학 전자전기공학부\*

한국철도기술연구원\*\*

---

**Abstract** - Linear Synchronous Motor has a large airgap comparing with rotary-type motor and especially, Permanent Magnet Linear Synchronous Motor(PM-LSM) which uses permanent magnet as a magnetic field, has a very large effective magnet airgap owing to permanent magnet structure. Accordingly, in case of 2-D analysis of the motor, the analysis error becomes large because leakage flux by which normal direction of the analysis region can not be considered. In this paper, the characteristic of PM-LSM for Maglev vehicle is analyzed exactly by 3-D Finite Element Method(3-D FEM). As the result, the effect of lateral-direction airgap magnetic flux density distribution on the analysis precision has been investigated and the motor characteristics according to primary motor parameter have been also made clear quantitatively. The accuracy of 3-D FEM has been confirmed by comparing the calculated results with the experimental results.

---

### 1. 서 론

선형전동기를 이용한 자기부상열차는 넓은 속도범위에서 응용이 가능한 신교통시스템으로 국내·외에서 활발한 연구가 이루어지고 있다. 자기부상기술은 여러방식이 제안되어 있으나 전자석의 흡인력을 이용한 상전도부상(Electromagnetic Suspension : EMS) 방식과 초전도를 이용한 동적자기부상(Electrodynamic Suspension : EDS) 방식이 주로 이용되고 있다[1]. 최근에는 종래의 상전도부상 방식을 개량한 제어-영구자석형 부상방식이 제안되어 연구되고 있다. 본 방식은 이상적인 경우 부상에 필요한 부상전력을 제로로 할 수 있다는 장점을 가지고 있어 앞으로 많은 분야에 응용될 것으로 기대된다[2],[3]. 부상방식으로 제어-영구자석형을 사용하고 추진방식으로 선형동기전동기를 사용한 기기를 제어-영구자석형 선형동기전동기라고 한다.

자기부상열차용 선형전동기는 기계적인 공극이 크고 영구자석을 계자로 사용할 경우 영구자석의 투자율이 공기와 거의 같기 때문에 자기적 유효공극은 더욱 커진다. 이와 같이 자기적 유효공극이 큰 기기의 해석은 유효공극이 작고 축방향의 길이가 긴 회전기기와는 달리 2차원 해석만으로는 해석정밀도가 충분히 보장되지 않으므로 정확한 해석을 위해서는 3차원 해석이 필요하다[4]. 선형기기의 2차원 해석에서 해석의 정밀도가 떨어지는 것은 해석단면에 수직인 방향(횡방향)의 누설자속이 크게 나타나게 되나 이 횡방향 누설자속을 고려할 수 없기 때문이다.

본 논문에서는 자기부상열차용 제어-영구자석형 선형동기전동기의 특성을 정확하게 해석하기 위하여 3차원 유한요소법을 이용하여 해석을 하였다. 3차원 해석에 의해 얻어진 공극자속밀도 분포를 2차원 해석에서 얻어진 것과 비교하여 횡방향 누설자속의 영향을 정량적으로 검토하였다. 또한 2차원 해석과 3차원 해석에서 계산된 부상력을 비교하므로써 두 해석법에 의한 부상력의 차이를 정량적으로 고찰하였다. 또한 제어전류, 1차 전류와 같은 주요 파라미터에 대한 선형동기전동기의 특성을 상세하게 검토, 분석하여 실용기기의 설계 및 제어시뮬레이션에 필요한 데이터를 확보하였다[5]. 또한 계산결과를 가능한 실측데이터와 비교하여 해석의 정밀도를 검토하였다.

## 2. 해석 모델

그림 1은 본 연구의 대상인 1/2스케일의 자기부상열차용 영구자석형 선형동기전동기의 실험기와 구성도이고, 그림2는 제어-영구자석형 선형동기 전동기의 횡단면도이다. 본 실험기는 4개의 모서리에 10극의 제어-영구자석(Controlled-PM: CPM)이 배치되어 있어 부상제어시 영구자석의 발생 부상력과 차량의 자중이 일치하는 점에서 안정된 부상을 한다. 또한 장 1차, 가동 2차형으로 1차측은 반폐로 슬롯으로 되어 있고 권선법은 파권을 적용하였다. 1차측 슬롯의 크기가 크므로 자기적 유효공극이 크고 또한 차량이 주행시 디텐트 힘을 발생하게 되어 차량의 승차감이 떨어진다. 본 기기를 해석적인 차원에서 살펴보면 동기기의 경우 단부효과가 작고 다극기이며 또한 저속운전시 단부효과를 무시할 수 있다. 따라서 종축(x)의 주기성과 횡축(y)의 대칭성을 고려하면 1/2극의 해석만으로 기기의 특성을 정확하게 해석할 수 있다.

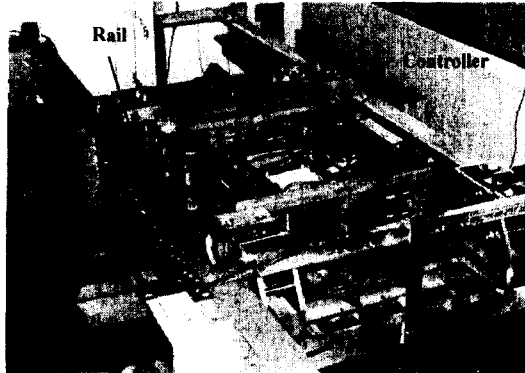


그림 1. 제어 PM LSM Maglev vehicle의 실험기  
Fig.1 Experimental model of controlled-PM LSM Maglev vehicle

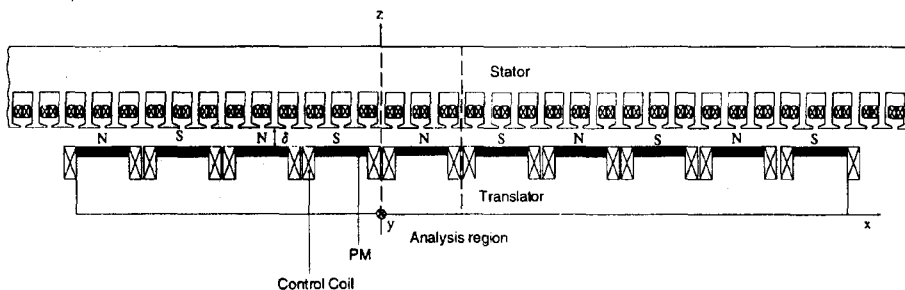


그림 2. 제어 PM LSM의 횡방향 단면도  
Fig. 2 Longitudinal cross section of controlled-PM LSM

### 3. 유한요소 정식화

스칼라포텐셜( $\Omega$ )을 계변수로 사용하여 자계의 세기를 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\vec{H} = \vec{T} - \nabla\Omega \quad (1)$$

여기에서  $\vec{T}$ 는 전류밀도  $\vec{j}$ 를 표현하는 임의의 함수로 식(2)로 표현된다.

$$\nabla \times \vec{T} = \vec{j} \quad (2)$$

따라서 맥스웰 방정식으로부터  $\Omega$ 와  $\vec{T}$ 를 사용하여 지배방정식을 유도하면 식 (3)으로 된다.

$$\nabla \cdot [\mu(\vec{T} - \nabla\Omega) + \mu_o \vec{H}_c] = 0 \quad (3)$$

여기서 자계의 세기  $\vec{H}$ 와 자속밀도  $\vec{B}$ 와의 관계는 식 (4)와 같다.

$$\vec{B} = \mu\vec{H} + \mu_o \vec{H}_c \quad (4)$$

식 (4)에서 보자력  $\vec{H}_c$ 는 자화용이방향으로 자화되어 있고 영구자석 외부에서는 0이다. 식 (3)에 Galerkin법을 적용하여 유도하면 1개의 요소에 대한 잔차  $G_{ei}$ 는 식 (5)로 표현된다.

$$\begin{aligned} G_{ei} &= \int_v N_i \nabla [\mu(\vec{T} - \nabla\Omega) + \mu_o \vec{H}_c] dV \\ &= \int_s N_i [\mu(\vec{T} - \nabla\Omega) + \mu_o \vec{H}_c] \cdot \vec{n} dS \\ &\quad - \int_v [(\mu(\vec{T} - \nabla\Omega) + \mu_o \vec{H}_c) \cdot \nabla N_i] dV = 0, \quad (i=1, 2, 3, 4) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)의 우변의 첫 번째 항은 경계조건을 적용하면 0이 된다.

위의 식 (5)에 기초를 둔 계행렬에서 계변수  $\Omega$ 를 구하고 힘  $\vec{F}$ 는 식 (6)의 맥스웰 응력법을 이용하여 계산하였다.

$$\vec{F} = \int_s \frac{1}{2} \mu_o (H_n^2 - H_t^2) \vec{u}_n dS + \int_s \mu_o H_n H_t \vec{n}_t dS \quad (6)$$

여기서,  $H_n$ 과  $H_t$ 는 각각 법선 방향의 자계의 세기와 접선방향의 자계의 세기이고,  $\vec{u}_n$  과  $\vec{n}_t$  는 각각 법선 방향과 접선 방향의 단위벡터이다.

그림 3은 1/2해석모델의 요소분할도로서 86,400개의 사면체 요소와 16,562개의 절점으로 구성되어있다. 그림에서와 같이 Y-Z해석단면에는 주기경계조건을 주었으며 나머지 경계면에 대해서는 자연경계조건을 주어 해석하였다.

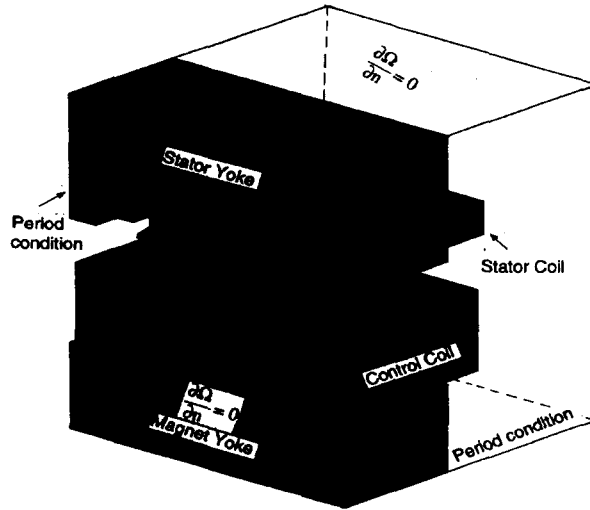
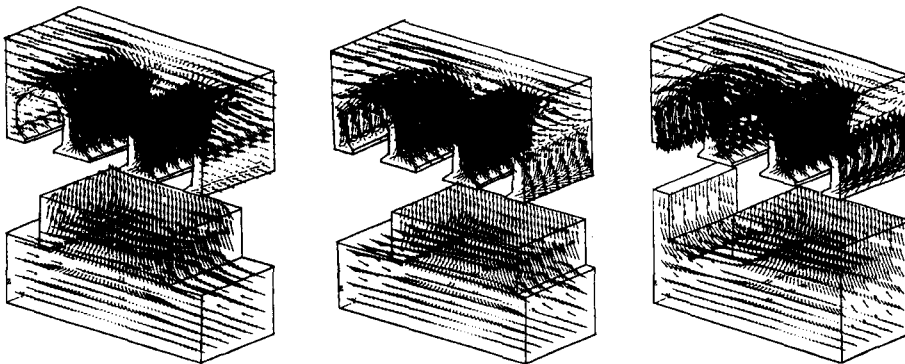


그림 3. 해석 영역과 요소분할도

Fig. 3 Analysis region and finite element mesh of the model

#### 4. 해석 결과

그림 4 (a)는 공극길이  $\delta$ 가 10mm인 경우, 전기자 전류  $I_1$ 과 제어코일전류  $I_2$ 가 제로일 때 2차측의 이동에 따른 1차측과 2차측에서의 자속밀도의 벡터분포도이다. 그림 4 (b)-(d)는 영구자석의 윗단으로부터  $\delta_z = 1$  mm에서의 공극자속밀도 분포를 나타내고 있다. 자속은 영구자석과 고정자 슬롯 사이의 상대적 위치에 따라 변한다.  $B_x$ 는 종단면 영역에서 매우 큰 값을 가지며 영구자석의 중심에서는 거의 0이다. 2차원 유한요소해석에서 0인  $B_y$ 는 횡방향단에서 매우 크고 영구자석의 중심부분에서 거의 0이다.  $B_z$ 는 영구자석영역에서 일정하지만 그 값은 횡단면과 종단면에서 누설자속이 증가함에 따라 점차 피크치에서 0으로 변하게 된다. 따라서  $B_z$ 의 평균값은 2차원 유한요소해석과 비교하여 감소한다.

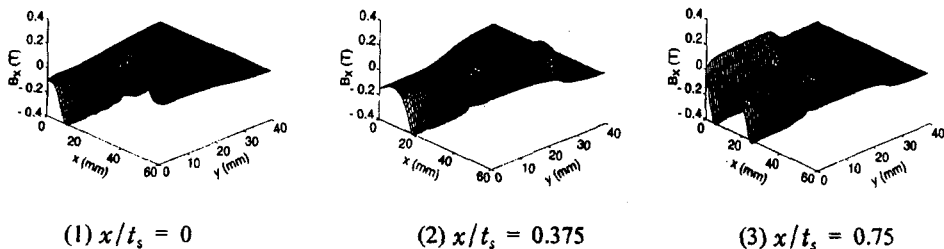


(1)  $x/t_s = 0$

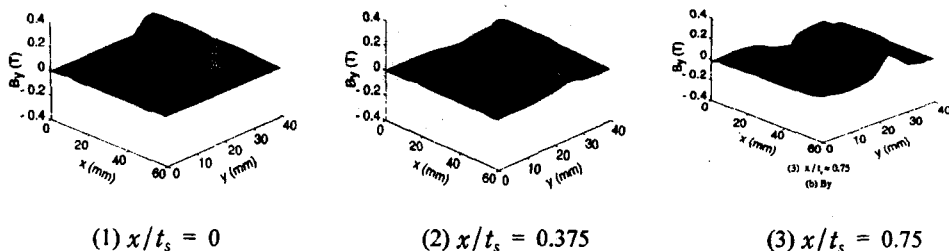
(2)  $x/t_s = 0.375$

(3)  $x/t_s = 0.75$

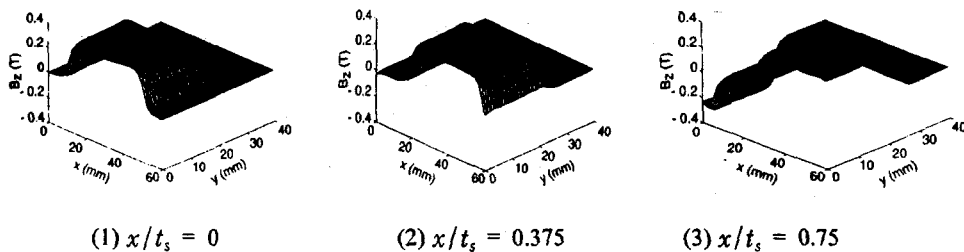
(a) Flux density vector distribution



(b) The x-component of airgap flux density  $B_x$



(c) The y-component of airgap flux density  $B_y$



(d) The z-component of airgap flux density  $B_z$

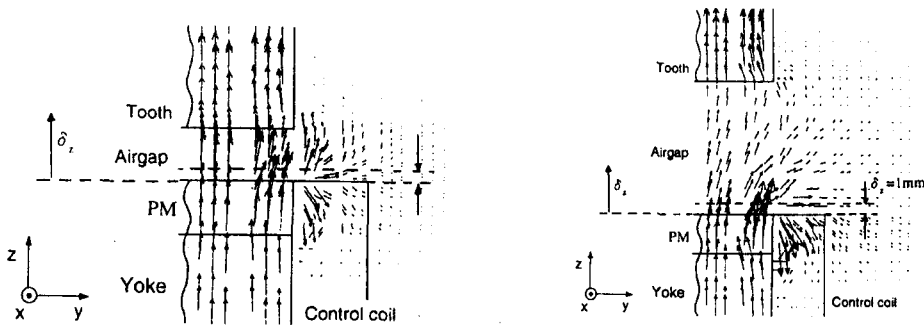
그림 4.  $\delta_s=1\text{mm}$ ,  $\delta=10\text{mm}$ 시의 고정자 치에서 영구자석의 위치에 따른 공극자속밀도의 공간분포  
Fig. 4 Space distribution of airgap flux density three different position of PM

그림 5는  $\delta=4\text{mm}$ ,  $14\text{mm}$ 일 때  $y$ - $z$ 단면에서의 자속벡터 분포를 보여준다. 그림에서와 같이 공극이 커질수록 횡방향의 누설자속이 증가되어 2차축과 쇄교하지 않는 누설자속이 증가됨을 알 수 있다. 이러한 횡방향 누설자속의 영향은 2차원 해석에서는 고려할 수 없으므로 2차원 해석에서 발생하는 해석오차의 원인이 된다.

그림 6은 공극이  $10\text{mm}$ 일 경우 공극의 위치  $\delta_z$ 에서  $y$ 에 대하여  $\delta_z$ 를 파라미터로 하여 자속밀도  $B_y$ ,  $B_z$ 를 나타낸 것이다. 누설성분인  $B_y$ 는 영구자석부근 ( $\delta_z=1\text{mm}$ )에서 매우 크고 이 값은  $\delta_z$ 에 따라 감소하게 된다. 또한  $B_z$ 는 영구자석부근에서는 거의 구형파 형상을 하고 있으나 1차축의 치부근에서는 곡선형태로 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 영구자석의 내부( $\delta_z=-1, -2\text{mm}$ )에서는  $B_z$ 는  $0.75\text{T}$ 의 매우 높은 값을 가지게 된다.

그림 7은 공극길이가  $\delta=10\text{mm}$ 이고, 기계적 부하각  $x_0 = \frac{\pi}{2}$  일 때 추진력의 계산치와 실험치를 나타내고 있다. 그림에서 2차원 유한요소해석 오차는 20%이고, 3차원 유한요소해석 오차는 5.5%이다. 이러한 해석 오차는 그림 4에서 살펴본 바와 같이 본 기기처럼 공극길이가 큰 기기의 경우 횡방향의 누설자속이 무시할 수 없을 정도로 크기 때문에 나타나는 해석 오차라고 판단된다.

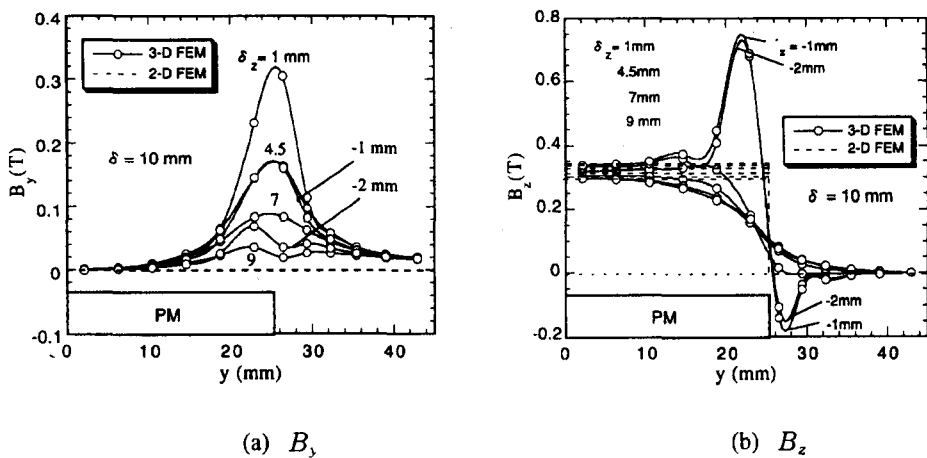
그림 8은 공극길이  $\delta=10\text{mm}$ 에서의 2차원과 3차원 유한요소해석에 의해 계산된 디텐트 힘  $F_{xD}$ 을 나타낸다. 디텐트 힘은 슬롯구조가 매우 큰 오픈 슬롯을 채택하였으므로 매우 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 2차원과 3차원 해석으로 계산된 값을 실험치와 비교한 결과 오차가 각각 22%와 5.3%였다. 본 결과에서도 알 수 있는 바와 같이 공극이 큰 기기는 계산의 정밀도를 확보하기 위하여 3차원 해석이 필요함을 알 수 있다.



(a)  $\delta = 4\text{mm}, I_1 = 0, I_2 = 0$

(b)  $\delta = 14\text{mm}, I_1 = 0, I_2 = 0$

그림 5. 그림 3의 가운데 치 ( $y$ - $z$  평면) 중심에서의 자속 벡터 분포  
Fig. 5 Magnetic flux distribution at the center ( $y$ - $z$  plane) of one of middle teeth in Fig. 3



(a)  $B_y$

(b)  $B_z$

그림 6.  $\delta_z$ 에 따른  $\delta$ 요소에 대한 자속밀도 분포  
Fig. 6. Flux density distribution vs.  $y$  for a parameter of  $\delta_z$

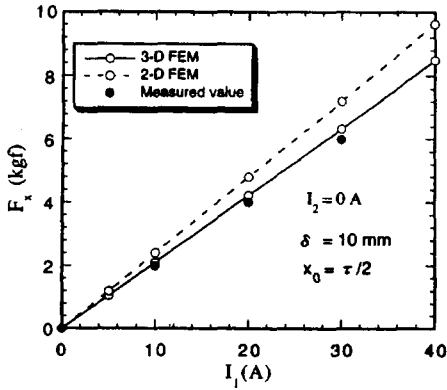


그림 7.  $I_1$ 에 따른 추진력  
Fig. 7. Thrust force vs.  $I_1$

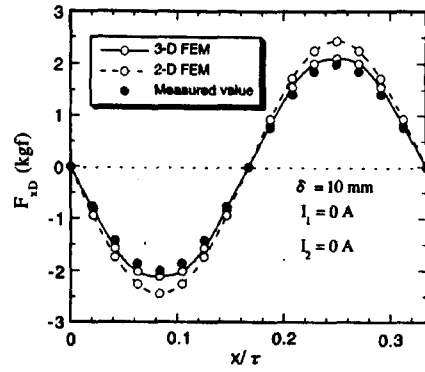


그림 8. x에 따른 detent force  
Fig. 8. Detent force vs. x

그림 9는 부상력의 계산결과이다. 그림에서와 같이 부상력은 공극의 길이가 작아짐에 따라 2차 함수의 형태로 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 10은 2차원 해석과 3차원 해석의 차이를 3차원 해석을 기준으로 나타낸 그림이다. 그림에서와 같이 2차원 해석은 횡방향 누설자속을 무시하기 때문에 힘이 크게 나타나게 되며 또한 그 차이는 공극이 커질수록 증가하게 된다. 그림에서와 같이 부상력의 차이는 공극의 크기에 따라 증가하여  $\epsilon_z$ 의 최대값은  $\delta=14\text{mm}$ 에서 19.6%이고, 최소값은  $\delta=4\text{mm}$ 에서 3%이다. 또한 추진력도 거의 부상력과 같은 양상으로 부상력과 비교하면,  $\epsilon_x$ 는  $\epsilon_z$ 보다 1-2%작다.

그림 11는 3차원 유한요소법으로 계산한 부하각에 대한 추진력이다. 그림에서와 같이 1차축의 전류의 크기에 따라서 추진력은 거의 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다.

그림 12는 부상개시 제어에서 중요한 파라메타인 제어전류( $I_2$ )와 공극에 대한 부상력곡선이다. 무전력 부상제어를 수행할 경우 제어전류가 제로일 때 차량의 자중과 부상력이 일치하는 점에서 공극길이가 결정된다.

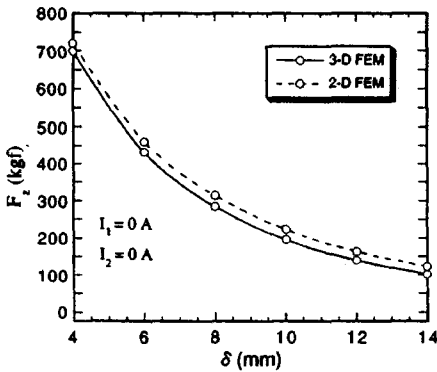


그림 9.  $x=0$ 에서의 공극에 따른 부상력  
Fig. 9. Lift force vs. airgap at  $x=0$  Fig

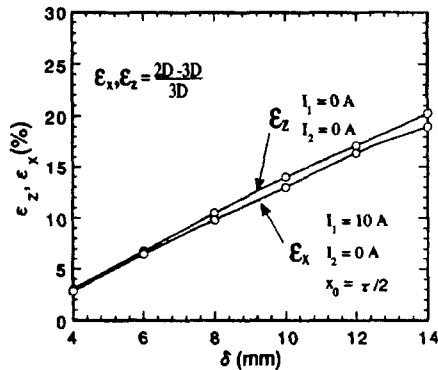


그림 10. 2차원 및 3차원유한요소해석의 차이  
Fig. 10. Difference between 2-D and 3-D FEA's

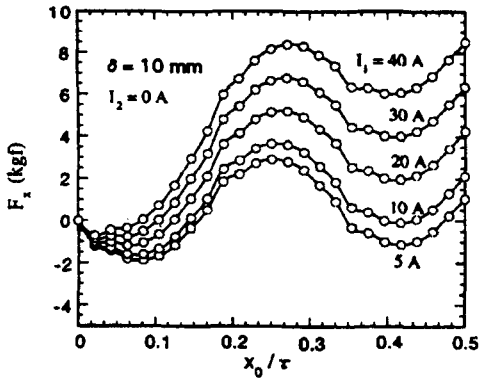


그림 11. 파라미터  $I_1$ 에서  $x_0$ 에 따른  $F_x$   
 Fig. 11.  $F_x$  vs.  $x_0$  for a parameter of  $I_1$

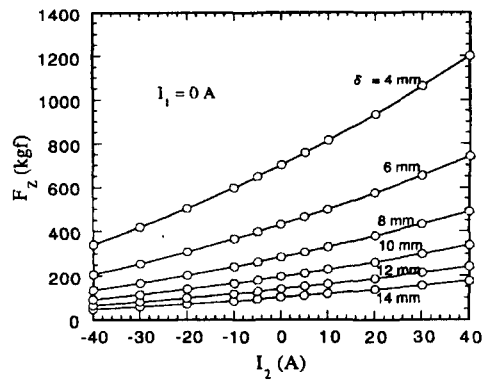


그림 12. 파라미터  $\delta$ 에서  $I_2$ 에 따른  $F_z$   
 Fig. 12.  $F_z$  vs.  $I_2$  for a parameter of  $\delta$

## 5. 결론

본 논문에서는 3차원 유한요소법을 이용하여 자기부상열차용 제어-영구자석형 선형동기전동기의 특성을 해석하였다. 본 연구의 결과 횡방향의 유한성과 자기적 유효공극이 큰 본 기기의 해석에서 2차원 해석과 3차원 해석의 차이를 공극의 자속분포를 검토함으로써 정량적으로 확인할 수 있었다. 즉 3차원 해석에 의해 계산된 부상력과 추진력은 횡방향누설자속의 영향으로 2차원 해석에 비해 적게 나타나고 그 효과는 공극이 커질수록 크게 나타남을 알 수 있었다. 본 연구의 해석 결과는 가능한 실험결과와 비교함으로써 3차원 해석의 정확성과 신뢰성을 확인하였다. 또한 주요한 모터 파라메타에 대한 정량적, 정성적 특성을 검토하여 실용기기의 설계에 필요한 설계데이터를 확보할 수 있었다.

## 참고문헌

- [1] 임달호, 전자기에너지변환기기의 해석과 응용(고 임달호박사 추모회 편저). 한양대학교 출판원, 1997.
- [2] K. Yoshida and H. Weh, "A method of modeling permanent magnets for analytical approach to electrical machinery," *Archiv für Electrotechnik*, 68, p. 229, 1985.
- [3] K. Yoshida and H. Weh, "Theory of a controlled-PM Linear Synchronous Motor," *Proc. of Inter. Conf. on Maglev'88 in Hamburg*, p. 295, 1988.
- [4] K. Yoshida, H. Takami, D. Yokoda, M. Nishitani and A. Sonoda, "Trajectory control of controlled-PM LSM Maglev vehicle," *Transactions on JIEE*, vol. 115-D, no. 3, p. 229, 1995.
- [5] K. Yoshida, J. Lee and T. Omura, "Performance analysis of controlled-PM LSM Maglev carrier with lateral displacement by 3-D FEM," *Proc. of LDIA'95*, p. 215, 1995.