

# 공극 불균형이 경전철용 LIM의 특성에 미치는 영향

## The Effect of Airgap Unbalance on the LIM Performance for Light Rail Road

정인성\*                    이 주\*\*                    정락교\*\*\*                    이종우\*\*\*\*  
Jung, In-Sung\*        Lee, Ju\*\*                    Jung, Rak-Gyo\*\*\*        Lee, Jong-Woo\*\*\*\*

### ABSTRACT

The LIM can be used as a transport system with wheel structure. The structural tolerance cause the airgap unbalance and that effects on the LIM performance. The effect of airgap unbalance on the motor performance such as thrust force, velocity and armature current are investigated by using Finite Element Analysis (FEA). From this numerical works, it is known that the airgap unbalance almost does not effect on the motor performance and LIM for transport system is robust to the structural tolerance.

### 1. 서    론

선형유도전동기는 주로 자동운송장치와 자기부상시스템에 사용되고 있으며[1] 1985년 이후로 도시형철도 분야에서 많이 응용되고 있다. 선형유도전동기의 주용용 분야는 운송시스템으로 특히, 바퀴를 가진 선형유도전동기 운송시스템은 일반적인 운송시스템에 비해 가파른 경사의 코스에서도 운행 가능하다는 점과, 기존의 터널보다 그 크기를 줄일 수 있다는 점에서 매우 효율적이며 이로 인해 운송선로의 공사비용을 상당히 줄일 수 있어 경제성 면에서 큰 장점을 가지고 있다. 이와 같은 이유로 일본은 이미 1980년부터 선형유도전동기를 사용한 지하철을 운행하고 있으나 신뢰도나 안정성, 경험 등의 부족으로 선형유도전동기차량의 시험선로는 제한되어 있다. [2][3] 우리나라에서도 도시형 운송철도에 선형유도전동기를 적용하려는 검토가 진행되고 있으며, 이의 실용화를 위해서는 제조상의 구조적 공차에 따른 공극 불균형 효과가 선형유도전동기 특성에 미치는 영향이 연구되어야만 한다.

본 논문은 3종류의 선형유도전동기 공극 불균형 모델에 대하여 2차원 해석방법을 이용하여 정 특성 및 동특성 해석을 하였다. 시변계의 문제에 대한 해석방법중 그 정확성을 보장할 수 있는 유한요소법(FEM)을 사용하였으며 또한 동특성 해석을 위하여 이동요소법과 전압원해석 기술을 사용하였다. 본 연구로부터 추진력, 속도, 전기자 전류와 같은 모터특성에 대한 공극 불균형의 영향을 잘 알 수 있었다.

\* 한양대학교 전기공학과 박사과정

\*\*한양대학교 전자전기공학부 전임강사, 정회원

\*\*\* 철도기술연구원 주임연구원, 정회원

\*\*\*\* 철도기술연구원 책임연구원, 정회원

## 2. 해석 모델

### 2.1 실험 모델

그림 1은 해석모델로서 사용된 실험용 선형유도전동기를 나타내고 있다. 본 실험기는 특히 무한 캐도에서의 선형 특성을 시험하기 위하여 설계되었으며 표 1은 본 실험기의 사양을 나타내고 있다.

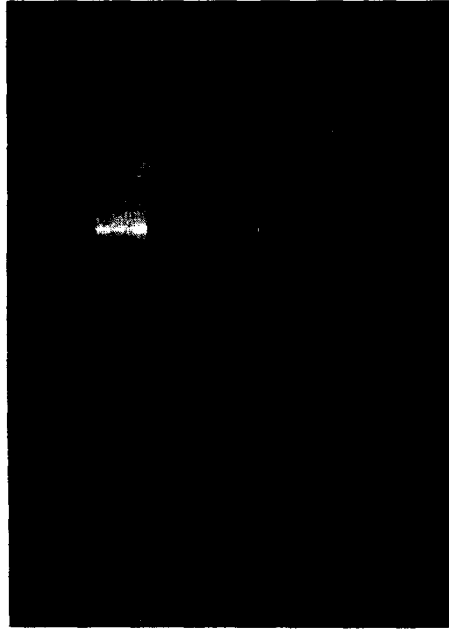


그림 1. 실험 모델

Fig. 1 Experimental model

표 1. 재원

Table 1. The specification of model

	전기적 사양	기계적 사양
1차측	형태 : 단 1차 SLIM 상수 : 3 극수 : 4 입력전압 : 220 [V] 입력 주파수 : 60 [Hz]	적층폭 : 175 [mm] 길이 : 908 [mm] 슬롯 두께 : 12[mm] 슬롯 간격 : 20 [mm] 극 간격 : 180 [mm] 매상 턴수 : 96 매극 매상 슬롯수 : 3
2차측	Reaction plate의 도전율 : $3.48 \times 10^7$ [mho/m] Back iron의 도전율: $0.9 \times 10^7$ [mho/m] Back iron의 투자율 : $300 \mu_0$	Reaction plate의 두께 : 5 [mm] back iron의 두께 : 50 [mm] 공극 길이 : 10 [mm]

## 2.2 정특성 해석모델

실제 시스템에서, 선형유도전동기의 공극은 여러 가지 이유로 불균형상태에 놓이게 된다. 공극 불균형의 주요 요인은 기기 성능에 영향을 미치는 구조적 공차와 곡선선로상의 주행이다. 그림 2는 실제 시스템에서 발생하는 공극불균형으로서 2-D 정특성 해석을 위한 모델이다. 그림 2(a)는 레일의 중앙이 굽은 경우를 보여준다. 그림 2의 (b), (c)는 대칭적인 구조를 보여주고 있으나, 선형 유도전동기의 입구와 출구에서의 단부효과가 같지 않으므로 그 특성은 다르게 나타난다.

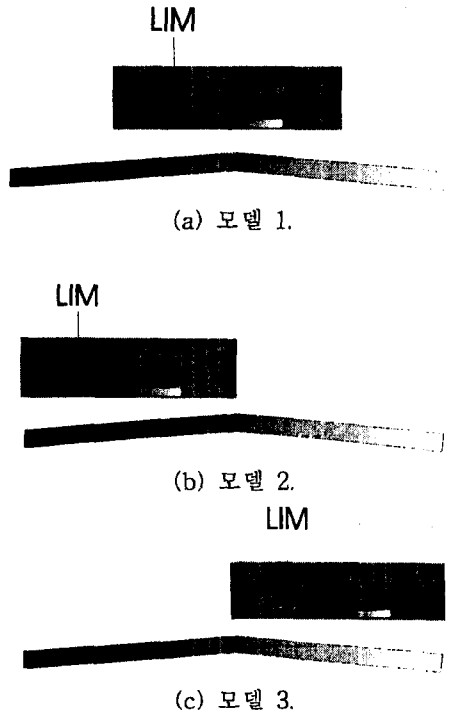


그림 2. 정특성 해석 모델

Fig. 2. Static analysis model

## 2.3 동특성 해석모델

동특성 해석을 위하여 그림 3과 같이 불균형 공극 모델을 사용하였다. 그림에서처럼 불균형 공극길이 ( $\Delta y$ )가 각각 5 (mm), 3 (mm)인 두 가지 경우를 고려하여 이동요소기법과 전압원 해석을 하였다. 이 때 정격 슬립은 0.26를 기준으로 하였다. 그림 4는 유한요소 분할도이며  $y$ 축으로 주기 경계조건이 사용되었다.



그림 3. 동특성 해석 모델

Fig. 3. Dynamic analysis model

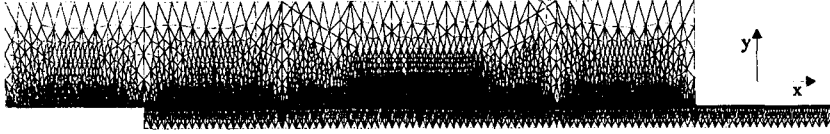


그림 4. 동특성 시뮬레이션을 위한 유한요소 분할도  
 Fig. 4. Finite element mesh for the dynamic simulation

### 3. 유한요소해석의 정식화

자기벡터 포텐셜을 이용한 시변계의 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J + \sigma \left( \frac{\partial A}{\partial t} + v \times \nabla \times A \right) \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 자기벡터 포텐셜이고,  $v$ 는 선형유도전동기의 이동속도이다.

위의 방정식을 풀기 위하여 Galerkin법을 적용하면, 1차 삼각요소에 대한 방정식을 식(2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\int_S \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) + J - \sigma \left( \frac{\partial A_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) \right] N_j dx dy = 0 \quad (j=1, 2, 3) \quad (2)$$

여기서  $N_j$ 는 삼각요소에 대한 보간함수이다.

각 상에 대한 회로방정식은 식(3)과 같다.

$$\frac{d\Phi_p}{dt} + R_p i_p + L_o \frac{di_p}{dt} = V_p \quad (3)$$

여기서  $p$ 는 각상을,  $R$ 과  $L_o$ 는 각각 1차측 코일의 상저항과 코일 엔드부의 누설 인덕턴스를 나타낸다.

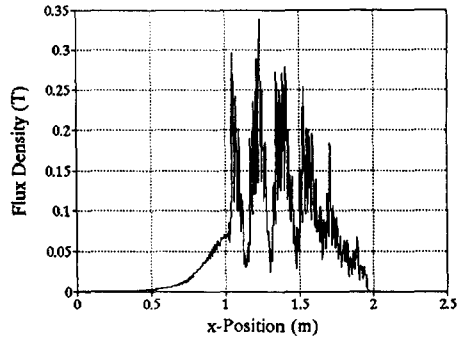
## 4. 해석 결과

### 4. 1 정특성 해석결과

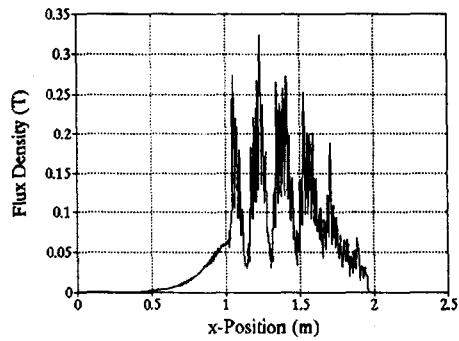
그림 5는 세 모델의 자속밀도 분포를 보여준다. 자속분포가 단부효과로 인하여 입구단과 출구단에서 비대칭적임을 알 수 있다. 자속밀도 분포의 형태와 크기는 균일한 공극을 가지는 선형유도전동기와 비교하여 거의 변화하지 않음을 알 수 있다.

그림 6은 세 가지 모델과 균일한 공극을 가지는 모델에 대해서 슬립의 변화에 대한 추진력을 보여준다. 첫 번째 모델의 최대 추진력 값은 누설리액턴스의 감소로 인하여 증가하고 있으며, 두 번째와 세 번째 모델은 입구단과 출구단의 영향이 달라서 두 모델사이의 추진력은 근소한 차이를

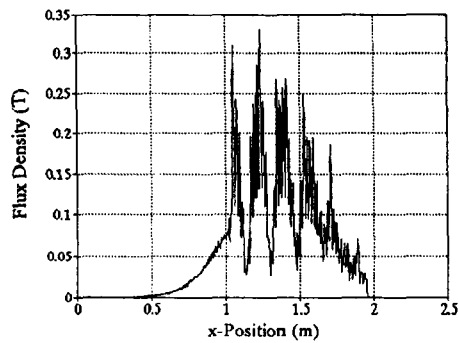
보이고 있다. 최대 추진력에 있어서 각 모델간의 약간의 차이가 있음을 알 수 있으나, 동작 슬립 영역에서는 별로 문제가 되지 않는다. 또한, 균일한 공극을 가지는 모델에서 측정된 실험치를 그림 6에 나타내었다.



(a) 모델 1



(b) 모델 2



(c) 모델 3

그림 5. 자속 밀도 분포

Fig. 5. Flux density distribution

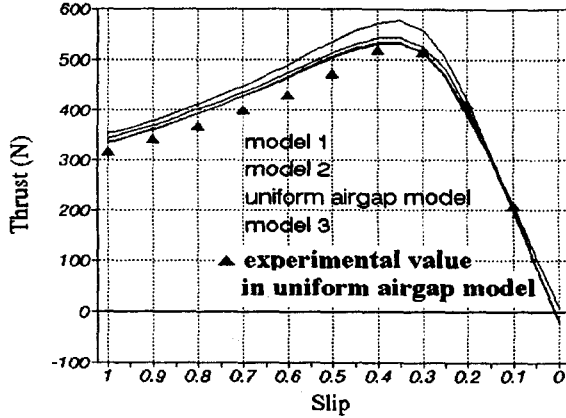


그림 6. 각 모델에 있어서의 속도에 따른 추진력의 변화

Fig. 6. The variation of thrust force with the velocity at the various models

그림 7은 세 가지 모델에 대해 슬립의 변화에 따른 수직력의 변화를 보여준다. 그림에서 첫 번째와 두 번째 모델은 수직력이 증가하나, 세 번째 모델의 수직력은 균일한 공극을 가지는 모델과 거의 같음을 알 수 있다. 수직력은 동작 슬립영역에서 흡인력으로 작용하므로, 구조지지시스템의 설계에 있어서 반드시 고려되어야만 한다.

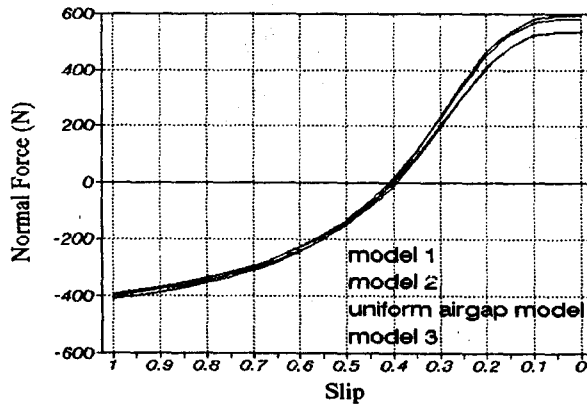


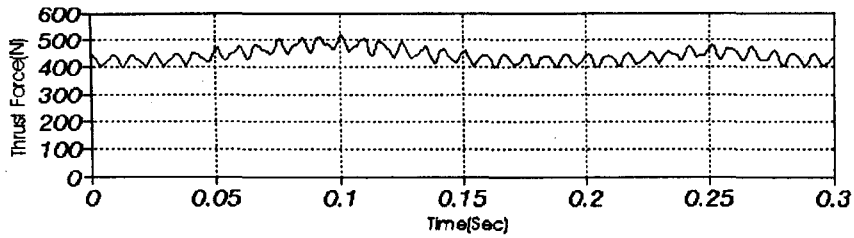
그림 7. 각 모델에 따른 수직력의 변화

Fig. 7. The variation of normal forces with the various models

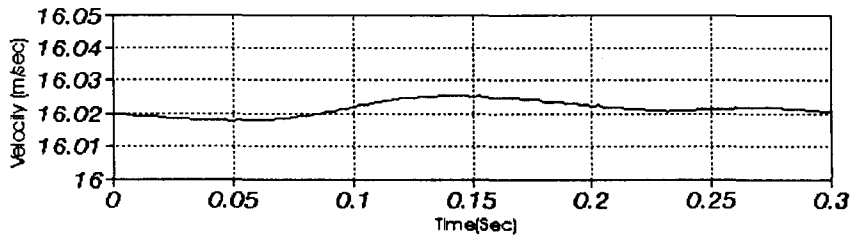
#### 4.2 동특성 해석결과

그림 8은 정격 슬립이 0.26이고 주파수가 60 Hz인 조건에서의 동특성 시뮬레이션 결과이다. 그림 8(a)는 추진력의 특성 결과로서 평균 추진력은 근소하게 변화하였고, 최대 추진력은 최저 추진력과 비교할 때 약 6% 증가하였다. 이러한 추진력 특성은 선형유도전동기의 이동속도에 영향을 미친다. 그림 8(b)는 속도에 따른 동특성 시뮬레이션 결과이다. 불균형 공극영역에서 아주 약간의 증가가 있으나, 이는 거의 무시할 수 있으므로, 속도는 거의 일정하다. 그림 8(c)는 시간에 따른 전류의 변화를 보여준다. 전류는 거의 변화하지 않았다. 그림 8(d)는 차량이 주행하는 기준레일이

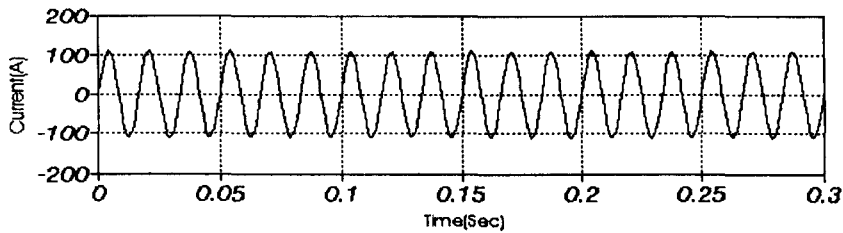
다.



(a) 추진력



(b) 속도



(c) 상전류



(d) 기준레일

그림 8. 동적 시뮬레이션 결과

Fig. 8 Dynamic simulation results

## 5. 결론

본 논문에서는 선형유도전동기에 대해서 구조적 공차에 의한 공극 불균형의 영향을 2-D 유한요소법을 이용하여 정특성, 동특성해석을 하였다. 본 연구의 결과로부터, 제안된 공극이 큰 불균형 모델에서 불균형 공극이 모터성능에 주는 영향은 거의 무시할 수 있다. 앞으로 3차원 시변계에서의 다른 공극 불균형 모델의 문제가 해석되어야 할 것으로 사료된다.

## 참고 문헌

1. I. Boldea and S. A. Nasar(1985), "Linear Motion Electromagnetic System", John Wiley & Sons.
2. Sakutaro Nonaka and Tsuyoshi Higuchi(1993), "Design of single-sided linear induction motors for urban transit", IEEE Trans. Magnetics, vol. 37, no.3, pp. 167-173.

3. W. J Ballantyne(1984), "LIM design for urban transit", International conference on Maglev Transport'84, pp. 105-107.
4. Kinjiro Yoshida, Ju Lee and Young Jung Kim(1997), "3-D FEM field analysis in controlled-PM LSM for maglev vehicle", IEEE Trans. Magnetics, vol. 33, no. 2, pp. 2207-2210.