

# 자기부상열차용 선형유도전동기의 회생 제동 특성 해석

## Regenerative Braking Characteristics of Linear induction Motor for MAGLEV

박승찬\*      이원민\*\*      김정철\*\*\*      박영호\*\*\*  
Park, Seung-Chan    Lee, Won Min    Kim, Jung-Cheol    Park, Yeong-Ho

---

### ABSTRACT

In this paper, electric braking performances of linear induction motor(LIM) designed for propelling the MAGLEV are presented. Regenerative braking is carried out from 110km/h to 20km/h, and plugging which converts the direction of travelling magnetic field is carried out in the low speed region below 20km/h. It is important to reduce attractive force which can affect the magnetic levitation load during regenerative braking or plugging operation mode. So in this paper the braking performances are analyzed by finite element method. As a result, braking force, attractive force, phase current, voltage to frequency patterns and its magnetic fields of braking LIM are presented.

---

### 1. 서 론

도시형 자기부상 열차는 제동시 4.0km/h/sec의 감속도가 필요하며 고속 운전시에는 회생제동을 실시하고 있다. 자기부상열차 추진용 선형유도전동기(LIM)은 회전형 유도전동기와는 달리 회생제동시에 흡인력이 과다하게 발생할 수 있으므로 전압-주파수 패턴 및 슬립주파수의 결정이 매우 중요하다.

본 논문에서는 우리나라 도시형 자기부상열차 추진용으로 설계된 선형유도전동기(차량당 4S-2P 결선)의 회생 제동 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 해석결과로부터 슬립주파수 제어를 통한 회생제동시의 제동력, 흡인력, 전류, 전압-주파수 패턴, 전차선 회생 전력 및 전차선 전류, 자속 분포 특성을 제시한다. 시속 20km/h 이하에서는 역상제동 실시를 위한 전압-주파수 패턴을 결정하고 제동 특성 해석 결과를 보인다.

---

\* 동양대학교 철도운전제어학과 부교수, 정회원

E-mail : scpark@dyu.ac.kr

TEL : (054)630-1106 FAX : (054)630-1106

\*\* 동양대학교 철도운전제어학과 전기기기시스템 연구실, 정회원

\*\*\*(주)현대로템

## 2. 유한요소해석

그림 1은 자기부상열차 추진용으로 설계된 선형유도전동기의 해석모델이다. 최대정격 출력은 47.1kW, 극수는 8극이며 모터길이는 약 1.8 [m]이다. 그림 2는 유한요소해석을 하기위한 2차원 모델의 개략도이며, 이동자계가 오른쪽으로 발생하여 선형유도전동기의 1차측은 왼쪽으로 이동하는 것으로 가정하였다.

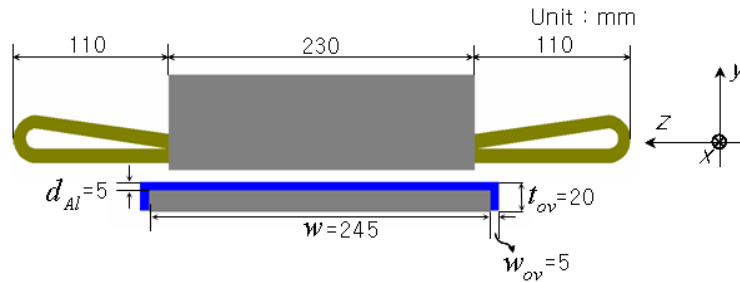


그림 1. 자기부상열차용 선형유도전동기 해석모델

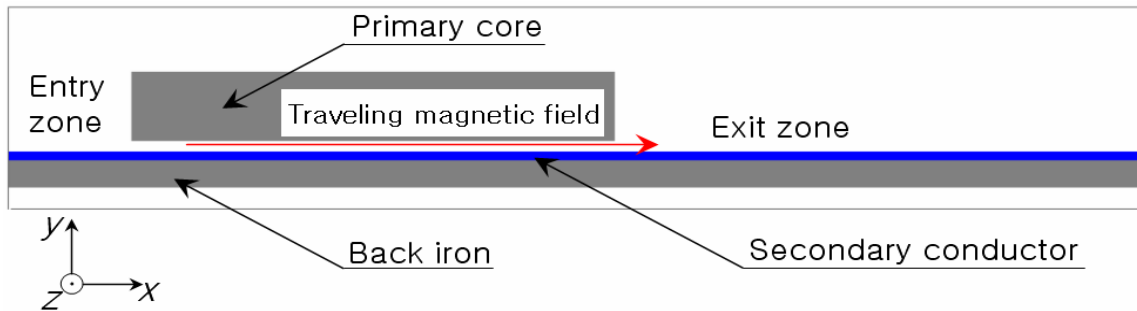


그림 2. 유한요소해석을 위한 2차원 모델

식 (1)은 그림 2에 제시된 모델의 지배 방정식이다. 식(1)은 유한요소 정식화 과정을 통하여 외부 회로방정식과 결합되어 해석영역의 자기벡터 포텐셜, 상전류를 미지수로 하고 전압원을 입력으로 하는 식(2)의 시스템 방정식으로 변환된다[1].

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{1}{\mu} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = -\mathbf{J}_0 + \sigma_c \left( j\omega \mathbf{A} + v \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) \quad (1)$$

여기서,  $\mathbf{A}$ 는 벡터 포텐셜,  $\mathbf{J}_0$ 는 전류밀도,  $\sigma_c$ 는 2차 도체판의 보정된 도전율,  $v$ 는 속도를 나타낸다.

$$\begin{bmatrix} [H] & [M] \\ [Q] & [Z] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{\mathbf{A}\} \\ \{\mathbf{I}_s\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} [0] \\ [\mathbf{V}_s] \end{Bmatrix} \quad (2)$$

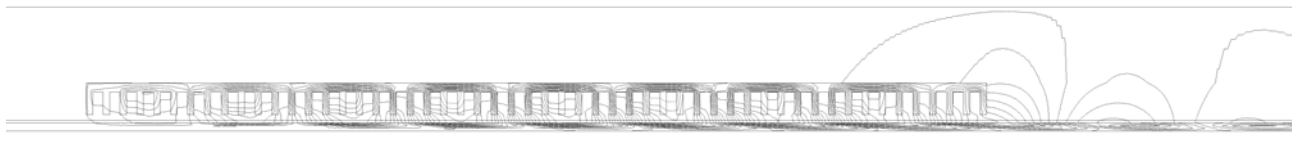
여기서,  $\{\mathbf{A}\}$ 는 미지 절점의 벡터 포텐셜 벡터,  $\{\mathbf{I}_s\}$ 는 상전류 페이지 벡터,  $[\mathbf{V}_s]$ 는 전압 페이지 벡터이다. 식 (2)의 해를 구하여 벡터포텐셜과 상전류를 얻게 되고 Maxwell stress tensor 법을 이용하여 추력 및 수직력을 계산하게 된다. 또한, 전압 및 전류 페이지를 이용하여 선형유도전동기의 회생제동시의 회생 전력량을 계산할 수 있다.

### 3. 제동 특성 해석

그림 3은 유한해석결과 회생제동시 속도별 자속분포를 보여준다. 최고속도에서 20 km/h까지는 회생제동을 하게 되며, 20km/h ~ 5km/h까지는 역상제동을 실시한다. 제동시 인버터의 주파수  $f_{inv}$ 는 식(3)에 의하여 결정하였으며, 슬립주파수는 흡인력 및 제동력 크기를 함께 고려하여 13.2 [Hz]로 하였다.

$$f_{inv} = \frac{V}{2\tau} - f_s \quad (3)$$

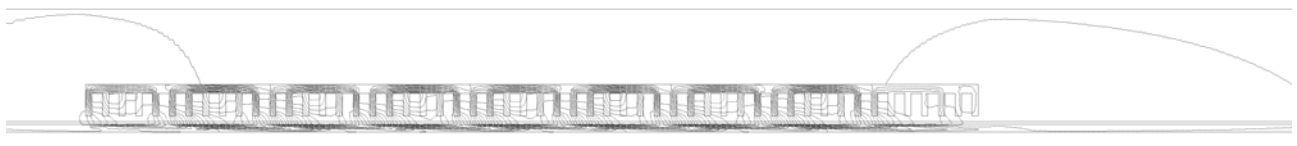
여기서,  $V$ 는 차량속도[m/sec],  $\tau$ 는 극간격[m],  $f_s$ 는 슬립주파수이다.



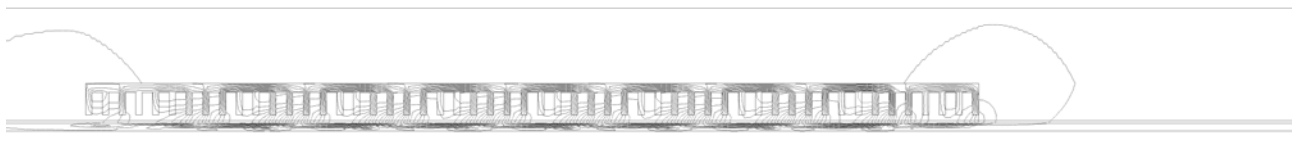
(a) 속도 110 km/h ( $f=62.81$  Hz)



(b) 속도 70 km/h ( $f=35.17$  Hz)



(c) 속도 20 km/h ( $f=0.62$  Hz)



(d) 속도 5km/h ( $f=-9.75$  Hz)

그림 3. 제동시의 자속분포도( $f_s = 13.2$ Hz)

그림 4는 차량의 만차시 전차선 전압이 1,650 V 인 조건에서 선형유도전동기 1대에서 발생하는 제동력과 흡인력, 전압, 전류 특성곡선이다. 100km/h 에서 5km/h 영역까지 제동력과 흡인력이 큰 변화없이 발생하고 있다. 만일 전체 속도영역에서 정전류 구동을 하면 거의 일정한 제동력을 얻을 수 있음을 알 수 있다.

그림 5는 전차선에 회생되는 회생 전류와 회생 전력 특성을 보여준다. 최고속도에서 20km/h 까지는 회생 제동 구간이지만 30km/h ~ 20km/h 의 저속영역에서는 전력 회생이 이루어지지 않고 제동에 필요한 기본적인 전력을 소비하게 된다. 20km/h ~ 5km/h 구간에서는 역상제동을 실시한다. 그림 5에서 (-) 값은 회생전력을 (+)는 소비전력을 표현한다. 전차선의 회생전류는 식 (4)에 의하여 계산하였다.

$$I_L = \frac{LIM \text{회생전력} \times LIM \text{총대수} \times \text{컨버터 효율}}{\text{전차선 전압}} \quad [A] \quad (4)$$

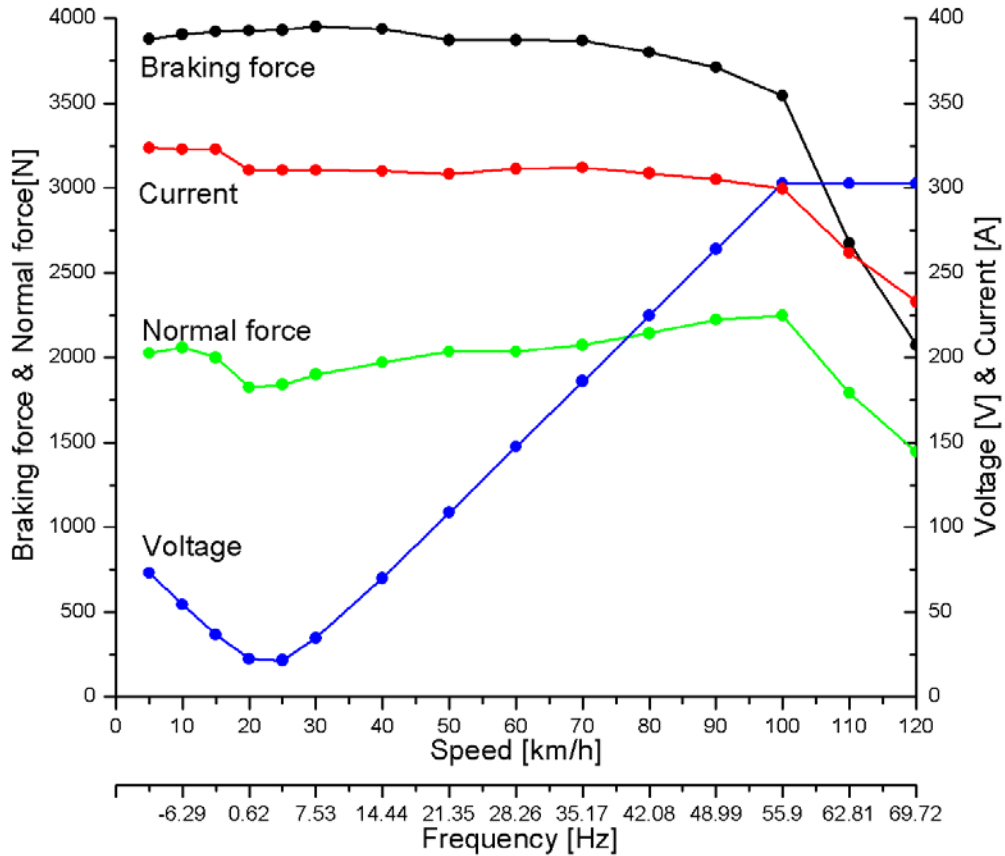


그림 4. 제동 특성(선형유도전동기 1대)

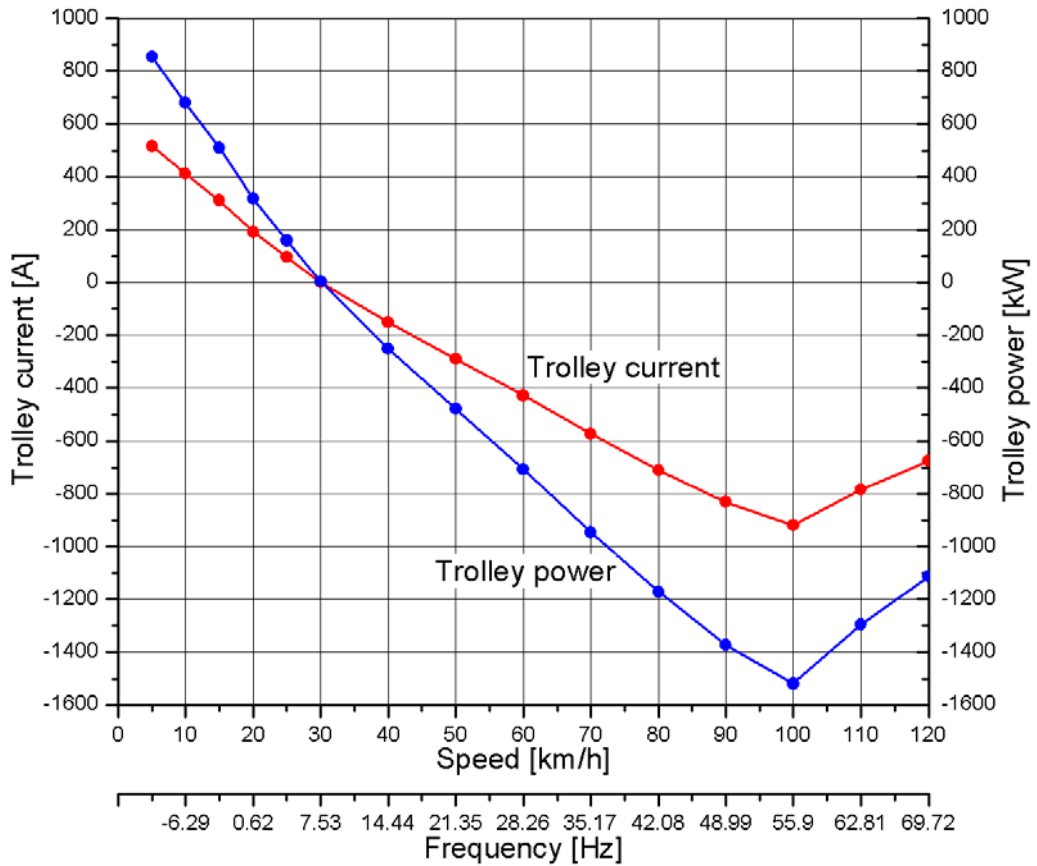


그림 5. 전차선 회생 전류 및 회생 전력 특성

#### 4. 결 론

본 논문에서는 1차량당 4직렬-2병렬(4S-2P)로 결선된 선형유도전동기의 회생 제동 특성을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 해석결과로서 제동력, 흡인력, 전동기 전류, 전차선의 회생 전류 및 회생 전력등을 제시하였다. 또한 회생제동 및 역상제동시의 전압-주파수 패턴은 자기부상열차의 전기제동을 위한 VVVF 인버터 제어에 직접 적용될 수 있다.

#### 참고 문헌

1. Seung-Chan Park, Won-min Lee, Kyung-Min Kim, Jung-Chul Kim and Yeong-Ho Park, "Analysis of Linear Induction Motors for MAGLEV According to the Secondary Conductor Structure", Proc. of ICEMS'07, 2007. 10. 16