

**철도차량용 회전형 축소모델 LIM 시험기의 공극조절시스템 모델링 연구**

박찬배\*, 이병송\*, 이형우\*, 박현준\*, 권삼영\*  
한국철도기술연구원\*

**Modeling analysis of air-gap control system of a rotary small-scale model of a Linear Induction Motor for a railway transit**

Chan-Bae Park\*, Byung-Song Lee\*, Hyung-Woo Lee\*, Hyun-June Park\*, Sam-Young Kwon\*  
Korea Railroad Research Institute\*

**Abstract** - 철도차량용 선형추진시스템에 있어서, 지상레일에 설치되는 선형유도전동기의 2차측의 리액션플레이트의 시공 공차에 의해서 발생하는 1차측과의 공극의 변화는 추진 시스템의 운행 시 승차감과 기기 효율을 떨어뜨리는 결과를 초래하기 때문에 선형유도전동기의 균일 공극 운전은 추진 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이다. 또한 경사구간에서의 선형유도전동기의 공극길이 조절을 통해서 선형유도전동기의 용량 변경 없이 추력을 증가시키는 것이 가능하다. 따라서 본 논문에서는 선형유도전동기의 공극 길이를 제어할 수 있으며, 공극 길이 제어를 통하여 추진 시스템의 성능 변화를 살펴볼 수 있는 축소 모델 선형유도전동기 성능시험기의 공극조절 시스템의 동적 모델링 및 특성 해석을 통하여 시스템을 구성하는 파라미터들의 특성 변화 분석 및 시스템 구현 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

**1. 서 론**

회전형 전동기를 이용하여 기계적인 추진력을 기어와 바퀴로 전달하여 레일 위를 달리는 기존의 철도 시스템에서 발생하는 여러 가지 문제점들을 개선하기 위하여 동력변환장치 없이 직선 추진력을 직접 얻을 수 있는 선형유도전동기(Linear Induction Motor, LIM)를 이용한 철도용 분야에 관심을 두고 지속적인 연구 및 상용화가 진행되고 있다. LIM을 추진시스템으로 채택한 대표적 철도용 분야는 자기부상열차와 리니어 지하철 및 경전철 분야이다. 지금까지 철도차량용 고효율, 고성능의 추진시스템 개발을 위해서 LIM에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 연구의 대부분은 LIM 모듈 자체의 1, 2차측 설계에 국한되어 있었다. 철도차량 추진시스템용 LIM에 있어서, 일반적으로, LIM의 1차측은 차량, 2차측은 선로 구축물에 취부되는 구조를 가지고 있으므로, 차량 주행 중 2차측 리액션플레이트의 시공 공차에 의해서 발생하는 1차측과의 공극의 변화에 따른 자화 인덕턴스 값의 변화는 추진 시스템의 안정된 승차감과 효율을 떨어뜨리는 결과를 초래할 수 있다[1]-[2]. LIM 시스템의 시공 시 선로구축물의 2차측에 해당하는 리액션플레이트는 공차범위를 5[mm]당 ±2[mm]의 허용 공차로 시공하지만, 실제로는 이보다 더 커질 수 있기 때문에 공극을 일정하게 유지하도록 하는 데에는 많은 어려움이 따른다[4]. 그러므로 LIM의 주행 중 2차측 리액션플레이트의 평면도에 무관하게 공극의 길이를 균일하게 제어할 수 있는 시스템의 도출은 LIM 추진 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이다. 또한 경사구간에서의 선형유도전동기의 공극길이 조절을 통해서 선형유도전동기의 용량 변경 없이 추력 증가 및 구동 전류 감소를 통한 효율적인 LIM 운전이 가능하다[5]. 이러한 다양한 이점에도 불구하고, 기술문제와 고비용의 이유로 LIM의 공극 길이 제어에 대한 연구가 활발히 진행되지 못했다. 따라서 본 논문에서는 철도차량용 LIM의 주행 중 2차측 리액션플레이트의 평면도에 따라 변화하는 공극의 길이를 제어할 수 있으며, 공극 길이 제어를 통하여 추진 시스템의 성능 변화를 살펴볼 수 있는 축소모델 회전형 LIM 성능시험기의 공극조절 시스템을 소개하고, 상기 공극조절 시스템의 동적 모델링 및 특성 해석을 통하여 시스템을 구성하는 파라미터(스프링상수, 댐핑계수, 변위, 가진력)들의 특성 변화 분석 및 시스템 구현 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

**2. 본 론**

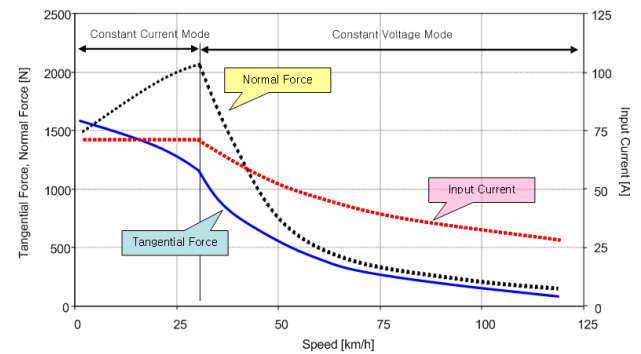
**2.1 회전형 축소모델 LIM의 설계 및 특성**

회전형 축소모델 LIM 성능시험기 제작에 앞서서 축소모델 LIM을 설계하였다. 정격용량은 10[kW]이고, 4극 모델로 설계하였으며, 설계 결과의 도표 1에서 보는 바와 같다. 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM의 특성 해석을 위하여 2D FEM과 3D FEM을 혼합한 방법을 이용하였다. 우선 1.2 오버행을 갖는 Semi-CP 타입의 2차측 알루미늄 리액션플레이트의 횡단부효과를 고려한 등가도전율을 계산하기 위해서 3D

FEM을 이용하여 2차측 리액션플레이트에서의 등가 와전류량을 계산하였다. 3D 해석을 통해 계산한 횡단부효과에 의한 보정계수를 고려한 2차측 알루미늄 리액션플레이트의 등가도전율을 2D FEM 해석모델에 적용하여 LIM 모델의 동적 특성을 얻었다[3]. 그림 1은 설계된 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM 모델의 속도, 주파수 변화에 따른 각각의 Tangential Force, Normal Force, Input Current 특성 결과를 보여준다.

**<표 1> 회전형 축소모델 LIM 사양 및 특성**

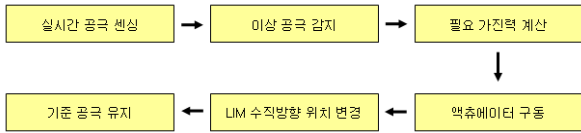
Item	Specification
Continuous Rated Output Power	10 [kW]
DC-link Voltage / Rated Frequency	445 [V] / 37 [Hz]
Rated Slip / Rated Speed	0.2 / 8.5 [m/s]
Phase / Poles	3 / 4
Slots/Pole/Phase	4
Air-gap	5 [mm]
Primary Resistance / Primary Reactance	0.32 [Ω] / 1.97 [Ω]
Primary Core Length / Stack Width	676.5 [mm] / 170 [mm]
Primary Unit Weight	56 [kg]
Al-Sheet Thickness	5 [mm]



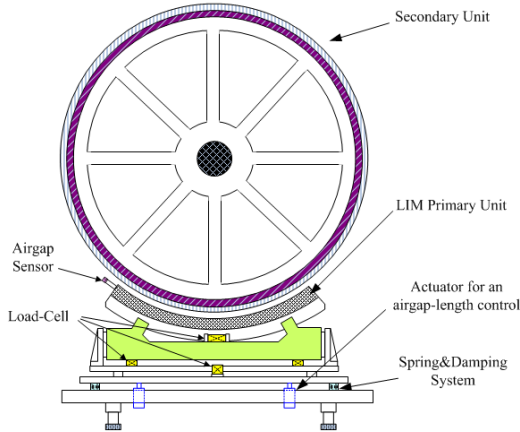
**<그림 1> 회전형 축소모델 LIM의 특성 해석 결과**

**2.2 LIM 공극 조절 시스템의 개념**

LIM의 균일 공극길이 제어는 추진시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이다. 그림 2는 LIM 추진시스템에서의 공극조절 시스템의 개념도를 보여준다. 그림 3은 회전형 축소모델 LIM 성능시험기에 공극조절 시스템을 포함시킨 개념도를 보여준다. 축소모델 LIM의 공극조절 시스템은 이상공극을 감지하기 위한 갭센서, 수직방향 위치제어를 위한 액츄에이터, 액츄에이터를 제어하기 위한 드라이브 시스템, 그리고 스프링&댐퍼 시스템으로 구성된다. 그림 3에서 보는바와 같이 LIM의 1차측 전면에 고정된 갭센서가 이상 공극(기준공극에서 벗어날 경우)을 감지하면, LIM의 수직방향 위치제어를 위해서 액츄에이터 제어신호에 의해 액츄에이터가 동작되어 LIM의 공극이 조절된다. 이러한 공극조절 시스템은 LIM의 수직방향위치를 실시간으로 제어하기 위해서 빠른 응답특성을 가져야만 한다. 철도차량이 80 [km/h]의 속도로 주행한다면, 1 [m]를 이동하는데 걸리는 시간은 45 [msec]가 된다. 따라서 공극조절 시스템이 정상적으로 동작한다면, 갭센서가 LIM 1차측 전방 0.5 [m]에서 이상공극을 감지한 후 LIM 수직방향위치를 제어하기 위한 액츄에이터 동작을 완료시킬 때까지 약 20 [msec] 정도의 시스템 응답시간이 요구된다.



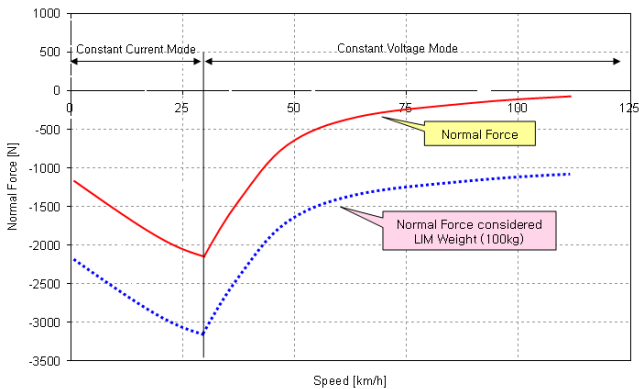
〈그림 2〉 LIM 공극조절 시스템 개념도



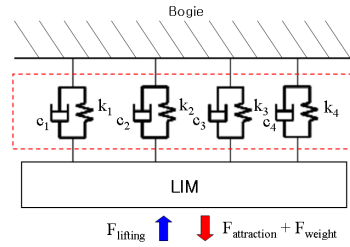
〈그림 3〉 회전형 축소모델 LIM 시험기에 포함된 공극조절 시스템

### 2.3 LIM 공극 조절 시스템의 모델링 및 동적 특성 분석

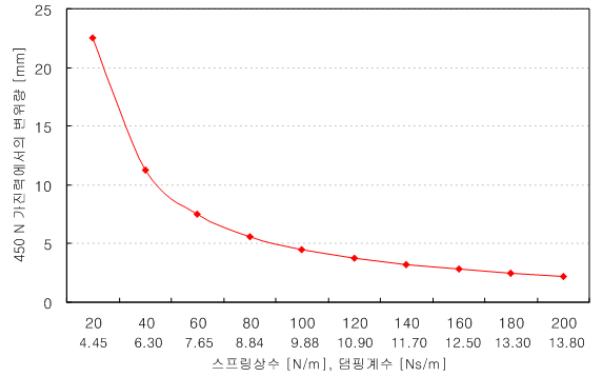
주행 중인 LIM에 있어서, 공극의 길이가 변하면 1차측과 2차측 사이의 흡인력 변화가 생기기 때문에, 결국은 LIM 1차측의 수직방향 위치제어를 위한 액츄에이터의 용량 결정 시, 부하로 1차측의 질량 뿐만 아니라 LIM의 주행 중 최대 흡인력이 고려되어야 한다. 그림 4는 축소모델 LIM의 주행속도 변화에 따른 Normal Force 특성 변화를 보여준다. 공극조절 시스템은 4개의 스프링&댐퍼 시스템과 공극길이 조절용 액츄에이터로 구성되며, 그림 5는 공극조절 시스템 설계를 위한 시스템 모델을 보여준다. 시뮬레이션에서 LIM의 1차측 질량은 프레임에 포함하여 100 [kg]이며, 최대 흡인력을 고려하면 약 320 [kg]이 된다. 그림 6은 450 [N]의 외부가진력 상태에서 공극조절 시스템의 스프링 상수와 댐핑계수 변화에 따른 공극 변위 특성을 보여준다. 공극의 변위를 3[mm] 이하로 맞추기 위해서는 공극조절 시스템의 스프링 상수 값은 150 [N/m] 이상이어야 한다. 그림 7은 3 [mm] 공극변위를 위한 공극조절 시스템의 스프링 상수와 댐핑계수 변화에 따른 필요 가진력 및 공극조절 시스템의 응답특성 변화를 보여준다. 분석 결과에서 알 수 있듯이, 스프링 상수와 댐핑계수가 커질수록 공극조절 시스템의 필요 가진력은 커지는 반면에 시스템의 응답 특성은 좋아지는 것을 알 수 있다. 그림 7의 결과에서 알 수 있듯이, 스프링 상수가 200 [N/m], 댐핑 계수가 13.8 [N.s/m] 인 스프링&댐핑 시스템을 갖춘 공극조절 시스템의 경우에 시스템의 응답 요구 시간이 0.21[sec]이기 때문에, 80[km/h]로 운행 중인 LIM의 전방 0.5[m]에서 공극 센싱을 한다면 600[N]급의 액츄에이터를 이용하여 실 시간 공극제어가 가능해진다. 결국은 주행 중인 축소모델 LIM의 실시간 공극제어를 위한 공극조절 시스템을 효과적으로 설계하기 위해서는 시스템의 필요 응답특성에 부합되는 최적 스프링 상수, 댐핑 계수 및 액츄에이터용 가진력 계산이 선행되어야 한다.



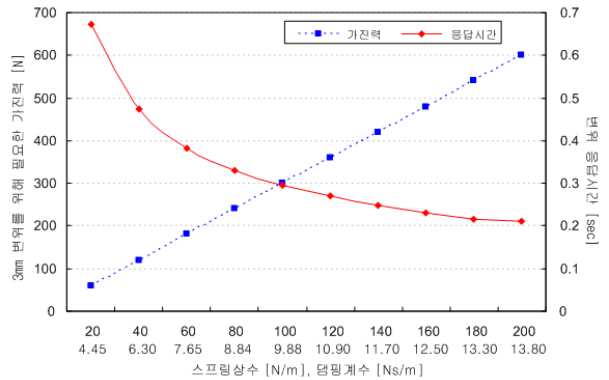
〈그림 4〉 축소모델 LIM의 주행속도 변화에 따른 Normal Force 특성



〈그림 5〉 공극조절 시스템 설계를 위한 시스템 모델



〈그림 6〉 공극조절 시스템의 외부가진력에 따른 변위 특성 변화



〈그림 7〉 3mm 공극변위를 위한 공극조절시스템의 필요 가진력 및 응답 특성 변화

### 3. 결 론

LIM의 균일 공극 운전은 LIM 추진 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이므로, 본 논문을 통해서 축소모델 회전형 LIM 성능 시험기의 공극조절 시스템을 소개하였으며, 상기 공극조절 시스템의 동적 모델링 및 특성 해석을 통하여 시스템을 구성하는 파라미터(스프링 상수, 댐핑계수, 변위, 가진력)들의 특성 변화 분석 및 실시간 공극제어 가능성에 대한 연구를 수행하였다. 주행 중인 축소모델 LIM의 실시간 공극제어를 위한 공극조절 시스템을 효과적으로 설계하기 위해서는 시스템의 필요 응답특성에 부합되는 최적 스프링 상수, 댐핑 계수 및 액츄에이터용 가진력 계산이 선행되어야 한다. 향후 공극조절 시스템을 적용한 축소모델 회전형 LIM 성능시험기를 제작한 후 동적 거동 시험을 통하여 공극조절 시스템의 동적 특성을 살펴볼 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea and S. A. Nasar, Linear motion electromagnetic devices, New York: Taylor & Francis, pp.64-69, 2001
- [2] Jacek F. Gieras, Linear induction drives, Tokyo: Oxford: Clarendon, pp.12-16, 1994
- [3] Korea Railroad Research Institute, Linear Electric Railway System, pp 1-8, 2007
- [4] Y. Nozaki, T. Koseki and E. Masada, "Analysis of Linear Induction Motors for HSST and Linear Metro using Finite Difference Method," Proc. LDIA2005, pp 168-171, 2005
- [5] 이병승, 이형우, 박찬배, 권삼영, 박현준, "공극변화를 고려한 철도차량용 선형유도전동기 특성 연구", 한국철도학회 추계학술대회논문집, pp.1599-1603, 2007