

# 철도차량용 선형유도전동기 성능시험기의 공극조절 시스템 특성 연구

## Characteristic Analysis of Air-gap Control System in Performance Test Machine of a LIM for Railway Transit

박찬배\*      이형우\*      이병송\*      박현준\*      권삼영\*      한경희\*\*  
Chan-Bae Park   Hyung-Woo Lee   Byung Song Lee   Hyunjune Park   Sam-young Kwon   Kyung-Hee Han

---

### ABSTRACT

A lot of researches on a linear induction motor(LIM) have been advanced to realize a traction system with high efficiency and performance for railway transit for a long time. However, most of them are limited in design of a LIM part such as Primary and Secondary. At a LIM which is traveling, the change of an air-gap(It occurs by a construction tolerance of a secondary reaction plate) becomes the cause which decreases a smoother ride and the efficiency of railway transit system. Therefore, uniform air-gap operation of LIM is important issue to improve the system efficiency. However, the researches which control the air-gap length of the LIM with technical and high-cost problem have been not advanced a lot. Therefore, in this research, it is introduced an air-gap control system for performance test machine of a scale-downed LIM which is able to control the air-gap length of the LIM and monitor a variety of performance changes of the propulsion system, and conducted a research on feasibility of the system based on characteristic analysis.

---

### 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)를 이용한 철도응용 분야에 관심을 두고 지속적인 연구 및 상용화가 진행되고 있다. LIM을 추진시스템으로 채택한 대표적 철도응용 분야는 자기부상열차와 리니어 지하철 및 경전철 분야이며, 그림 1은 철도차량의 대차 하부에 부착된 LIM을 보여준다. 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, 차량주행 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[m]당 2[mm]의 허용 공차로 시공하지만, 실제로는 이보다 더 커질 수 있기 때문에 공극을 일정

---

\* 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부, 정희원

E-mail : cbpark@krii.re.kr

TEL : (031)460-5427 FAX : (031)460-5459

\*\* 동국대학교, 전기공학과, 학생회원

하게 유지하도록 하는 데에는 많은 어려움이 따른다 [3]. 또한, 공극의 길이가 작아지면서 1차측과 2차측 사이의 흡인력이 커지기 때문에 증가된 수직력이 추진력에 대한 또 하나의 마찰력으로 작용하는 전기, 기계적 특성을 가지고 있다 [4]. 그러므로 LIM의 주행 중 2차측 리액션플레이트의 평편도에 무관하게 공극의 길이를 균일하게 제어할 수 있는 시스템의 도출은 LIM 추진 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이다. 그럼에도 불구하고, 기술문제와 고비용의 이유로 LIM의 공극 길이 제어에 대한 연구가 활발히 진행되지 못했다. 따라서 본 논문에서는 철도차량용 LIM의 주행 중 2차측 리액션플레이트의 평편도에 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 시스템의 동적 특성 해석을 통하여 시스템 구현 가능성에 대한 연구를 수행하였다.

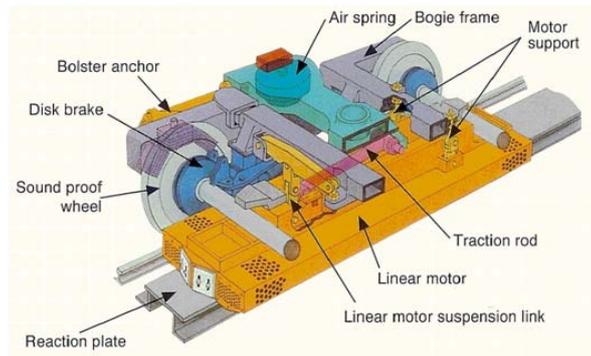


그림 1. 철도 차량에 적용한 선형유도전동기 [5]

## 2. 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM 설계 및 특성 분석

회전형 축소모델 LIM 성능시험기 제작에 앞서서 축소모델 LIM을 설계하였다. 정격용량은 10[kW] 이고, 4극 모델로 설계하였으며, 설계 결과는 도표 1에서 보는 바와 같다. 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM의 특성 해석을 위하여 2D FEM과 3D FEM을 혼합한 방법을 이용하였다. 우선 1.2 오버행 을 갖는 Semi-cap 타입의 2차측 알루미늄 리액션플레이트의 횡단부효과를 고려한 등가도전율을 계산하기 위해서 3D FEM을 이용하여 2차측 리액션플레이트에서의 등가 와전류량을 이용하였다. 3D 해석을 통해 계산한 횡단부효과에 의한 보정계수를 고려한 2차측 알루미늄 리액션플레이트의 등가도전율을 2D FEM 해석모델에 적용하여 LIM 모델의 동적 특성을 얻었다. 그림 2는 회전형 축소모델 LIM의 2D FEM 해석 결과(LIM Core에서의 자속밀도 분포와 공극자속밀도)를 보여준다. 그림 3은 설계된 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM 모델의 속도, 주파수 변화에 따른 각각의 Tangential Force, Normal Force, Input Current 특성 결과를 보여준다.

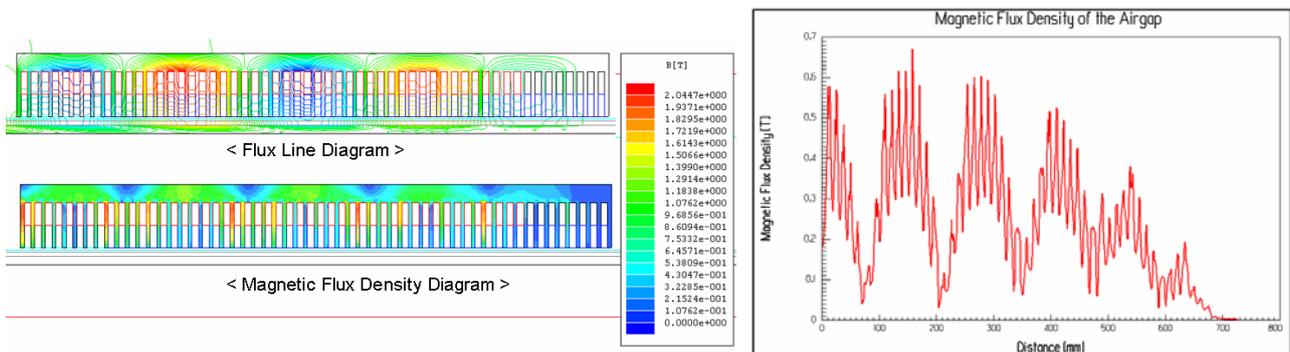
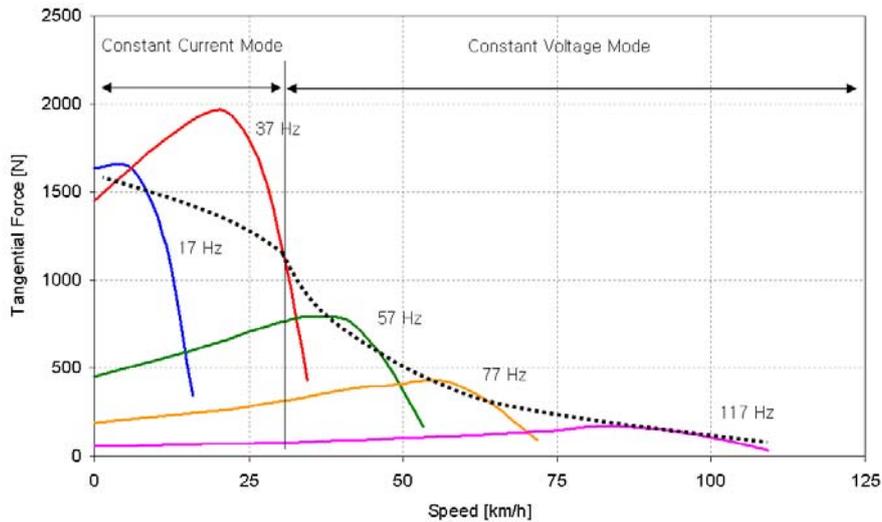


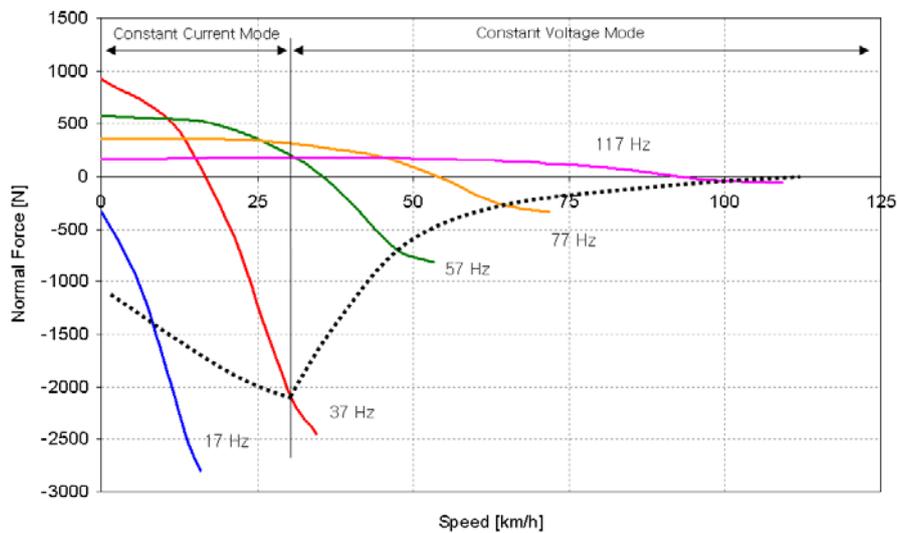
그림 2. 축소모델 LIM의 2D FEM 해석 결과

도표 1. 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM 설계 결과

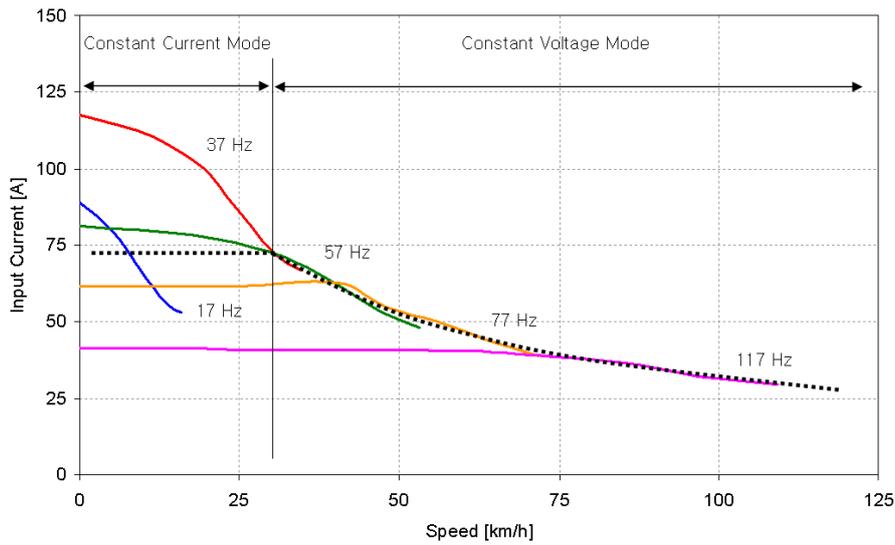
Item	Specification
Continuous Rated Output Power	10 [kW]
DC-link Voltage	445 [V]
Rated Frequency	37 [Hz]
Rated Slip	0.2
Rated Speed	8.5 [m/s]
Phase / Poles	3 / 4
Slots/Pole/Phase	4
Air-gap	5 [mm]
Pole Pitch / Slot Pitch	144 / 12 [mm]
Series Turns per Phase	160
Primary Resistance / Primary Reactance	0.32 / 1.97 [ $\Omega$ ]
Primary Core Length / Stack Width	676.5 / 170 [mm]
Primary Unit Weight	56 [kg]
Al-Sheet Thickness	5 [mm]



(a) 속도, 주파수 변화에 따른 Tangential Force 특성



(b) 속도, 주파수 변화에 따른 Normal Force 특성



(c) 속도, 주파수 변화에 따른 Input Current 특성  
 그림 3. 회전형 축소모델 LIM 성능시험기용 LIM의 특성 해석 결과

### 3. LIM 공극 조절 시스템의 개념

LIM의 균일 공극길이 제어는 추진시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이다. 그림 4는 철도차량용 실 모델 LIM 추진시스템에서의 공극조절 시스템에 대한 개념도를 보여주며, 그림 5는 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 5에서 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.

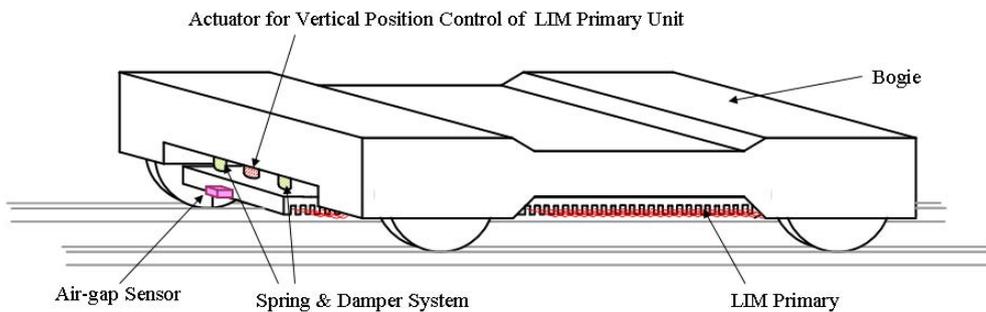


그림 4. 철도차량용 LIM 추진시스템에서의 공극 조절 시스템 개념도

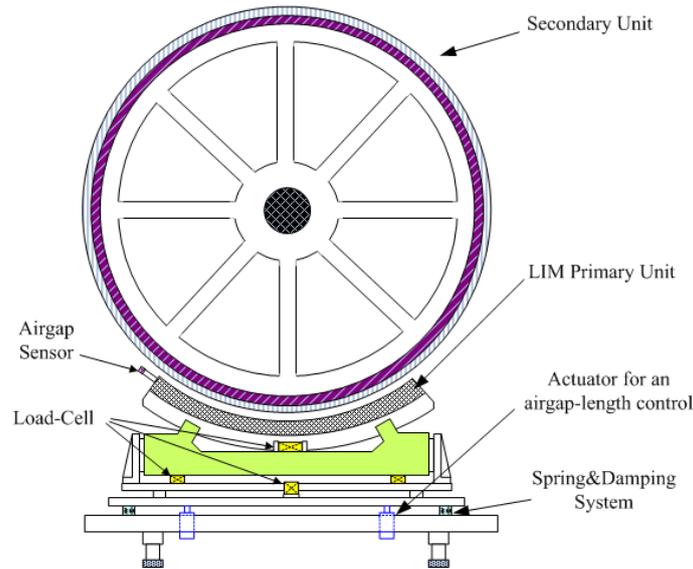


그림 5. 회전형 축소모델 LIM 성능시험기에 포함된 공극조절 시스템

#### 4. 공극 조절 시스템의 동적 특성 분석

주행 중인 LIM에 있어서, 공극의 길이가 작아지면 1차측과 2차측 사이의 흡인력이 커지게 된다. 그러므로 LIM 1차측의 수직방향 위치제어를 위한 액츄에이터의 용량 결정 시, 부하로 1차측의 질량 뿐만 아니라 LIM의 주행 중 최대 흡인력이 고려되어야 한다. 그림 6는 축소모델 LIM의 주행속도 변화에 따른 Normal Force 특성을 보여준다. 그림 7는 공극조절 시스템의 동적 특성 분석을 위한 모델링을 보여준다. 공극조절 시스템은 4개의 스프링&댐퍼 시스템으로 구성된다. 그림 8는 공극조절 시스템의 동적 특성 분석 결과를 보여준다. 시뮬레이션에서 LIM의 1차측 질량은 프레임을 포함하여 100 [kg]이며, 최대 흡인력을 고려하면 약 320 [kg]이 된다. 공극조절 시스템의 응답특성을 개선시키기 위해서 스프링&댐퍼 시스템을 설계하였으며, 스프링 계수와 댐핑 계수는 각각 45 [N/mm], 6.8 [N.sec/mm]이다. 그림 8의 동적 특성 시뮬레이션 결과에서 보듯, 약 450 [N]의 힘으로 주행 중 축소모형 LIM의 수직방향 위치를 약 3 [mm] 정도 변화시킬 수 있음을 알 수 있다. 도표 2는 공극조절 시스템의 설계 결과를 보여준다.

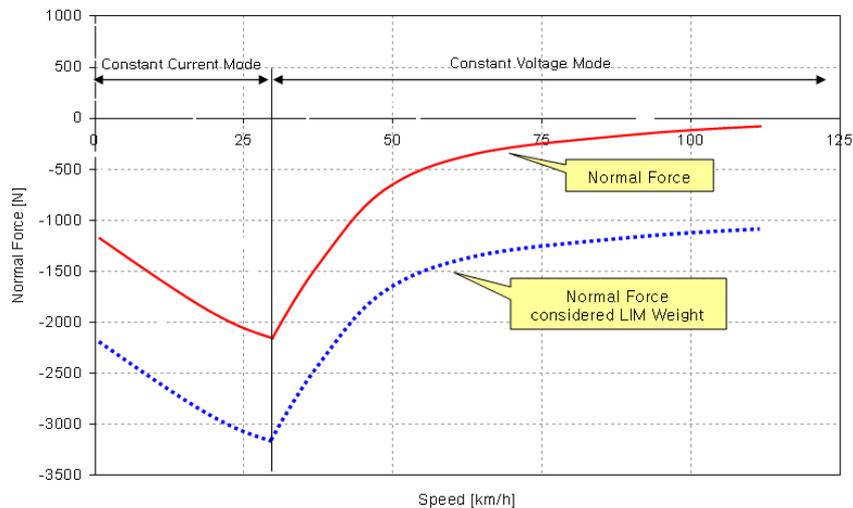


그림 6. 축소모델 LIM의 주행속도 변화에 따른 Normal Force 특성 분석

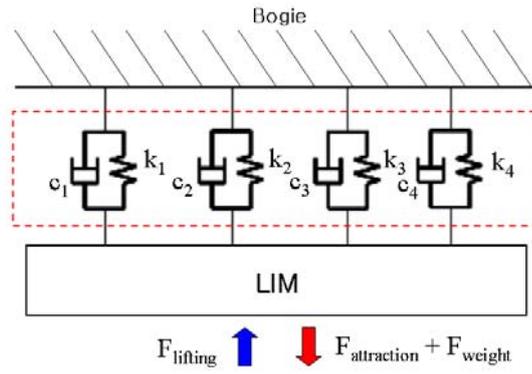
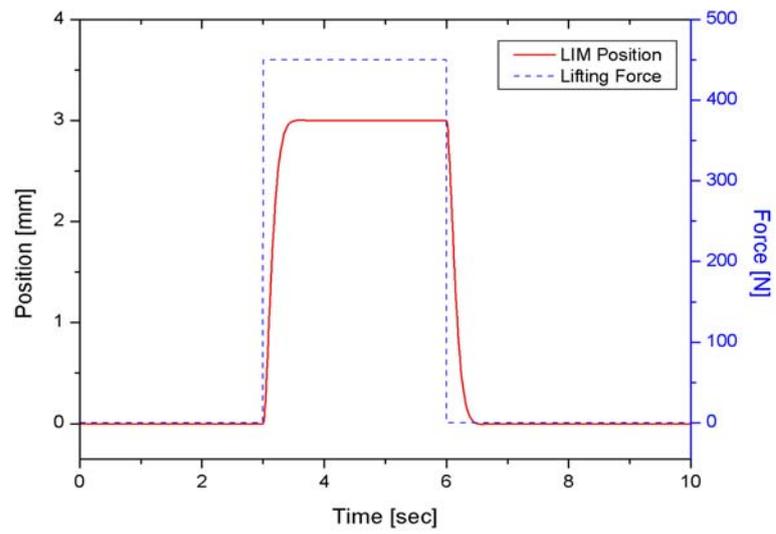
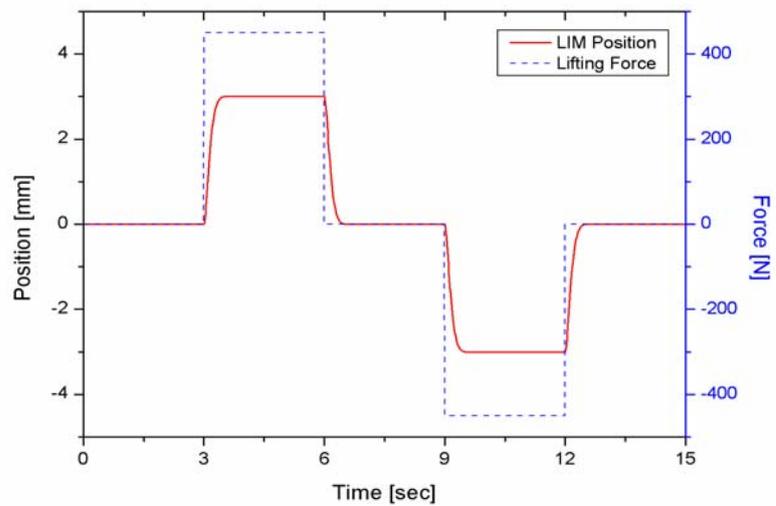


그림 7. 공극조절 시스템의 동적 특성 분석을 위한 모델링



(a) 단방향 Lifting Force에 대한 LIM 수직 변위량



(b) 양방향 Lifting Force에 대한 LIM 수직 변위량

그림 8. 공극조절 시스템의 동적 특성 분석 결과

도표 2. 공극조절 시스템의 설계 결과

Item	Value
LIM Primary Unit Weight (Only Primary)	100 [kg]
LIM Primary Unit Weight (Considered Normal Force)	319.2 [kg]
Damping Constant	6.8 [N.sec/mm]
Spring Constant	45 [N/mm]
Max. Lifting Force	450 [N]

## 5. 결론

LIM의 균일 공극 운전은 LIM 추진 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 중요한 사항이다. 그러므로 본 논문을 통해서 철도차량용 LIM의 주행 중 2차측 리액션플레이트의 평편도에 따라 변화하는 공극의 길이를 제어할 수 있으며, 공극 길이 제어를 통하여 추진 시스템의 성능 변화를 살펴볼 수 있는 축소모델 회전형 LIM 성능시험기의 공극조절 시스템을 소개하였으며, 상기 시스템의 동적 특성 해석을 통하여 시스템 구현 가능성에 대해 살펴보았다. 먼저 LIM 1차측의 수직방향 위치제어를 위한 액츄에이터의 용량 산정을 위해서 LIM의 속도 변화에 따른 Normal Force를 계산하였다. 다음으로, 주행 중 LIM의 최대흡인력을 고려한 공극 조절용 액츄에이터에 의한 LIM의 Lifting Force를 계산하였다. 제안된 공극조절 시스템의 동적 특성 모델 해석을 통하여 주행 중 LIM의 공극 길이 제어가 가능함을 보였다. 향후 공극조절 시스템을 적용한 축소모델 회전형 LIM 성능시험기를 제작한 후 동적 거동 시험을 통하여 공극조절 시스템의 동적 특성을 살펴볼 것이다.

## 참고문헌

1. I. Boldea and S. A. Nasar(2001), Linear motion electromagnetic devices, New York: Taylor & Francis, pp.64-69.
2. Jacek F. Gieras(1994), Linear induction drives, Tokyo: Oxford: Clarendon, pp.12-16.
3. Korea Railroad Research Institute(2007), Linear Electric Railway System, pp 1-8.
4. Y. Nozaki, T. Koseki and E. Masada(2005), "Analysis of Linear Induction Motors for HSST and Linear Metro using Finite Difference Method," Proc. LDIA2005, pp 168-171.
5. Japan Subway Association(2004), Linear Metro System, pp.1-28