공극 공차가 선형유도전동기에 미치는 영향

Influence of the airgap tolerance on performance of a Linear Induction Motor

이형우*†	이성구**	박찬배*	권삼영*	이병송*	이주**	박현준*
Lee, H-W	Lee, S-G	Park, C	Kwon, S-Y	Lee, B-S	Lee, Ju	Park, H-J

ABSTRACT

This paper presents the influence of the airgap tolerance on performance of a linear induction motor. Construction tolerance of the plate affects directly to the cost and performance of the Linear metro. LIM has around 10[mm] large airgap with many restrictions such as construction tolerance, thermal expansion and bend of the reaction plate, abrasion of the wheel, and so on. In order to have steady performance, the airgap should be uniform. But it is impossible to maintain the secondary reaction plate be flat along with the long track. Therefore the influence of the flatness on performance of a LIM should be investigated.

1. 서 론

선형유도전동기(Linear Induction Motor)는 회전형 견인전동기에 달리 부가적인 동력전달 장치가 필요 없으며 비점착 구동방식을 통한 열차의 저상화가 가능하고, 경사 등판능력이 좋으며 Self-Steering 보기에 적용할 수 있는 장점이 있어서 이미 자기부상차량이나 일부 철도차량 등에서 회전형 견인전동기를 대신하고 있다. 하지만 선형유도전동기는 회전형 유도전동기에 비해 공극이 크고, 1차 측(2차 측)이 유한하여 효율과 역률이 낮다는 단점과 더불어 회전기에서는 존재하지 않는 단부효과(End effect)로 인해 해석 및 설계에 어려움이 존재한다. 뿐만 아니라 구동원리 상 그림 1과 같이 지면에 취부되는 2차 측 리액션 플레이트가 이동하는 전 구간에 걸쳐서 가설되어야 한다는 제약이 있어 시공 시나 유지 보수 시 적지 않은 비용이 소요된다. 특히 이 2차 측 리액션 플레이트와 1차 측 사이에 물리적인 접촉을 방지하기 위해 존재하는 공극은 일정하게 유지되어야만 선형유도전동기의 효율과 성능이 저하되는 것을 막을 수 있다. 이 같은 제약 조건은 주행선로 시공 시 상당한 어려움을 초래하며 또한 주행선로 전 구간에 걸쳐 지면에 시공되는 2차측은 장거리에 걸쳐 시공되기 때문에 모든 지점에서 일정한 높이를 유지하는 것은 불가능하다. 이는 필연적으로 운전 중 공극에서의 공차를 발생시키게 되어서 전체 시스템의 성능에 악영향을 미치게 된다. 하지만 이와 같은 악영향을 막기 위해 공극 공차가 작은 값을 갖도록 정밀하게 시공하게 되면 건설비용이나 유지보수 비용이 급격하게 상승하여 경제적인 면에서 불리하다. 공극 공차에서 발생하는 이와 같은 문제들을 해결하기 위해서는 우선적으로 공극 공차가 선형유도전동기의 성능 특성에 어떤 영향을 어느 정도 미치는가에 대한 정성적이고 정량적인 해석이 선행되어야 한다. 표 1은 공극 공차의 영향 분석을 위해 사용된 선형유도전동기의 사양이다.

† 책임저자 : 정회원, 한국철도기술연구원, 초고속열차연구실, 선임연구원
E-mail : krhwlee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5426 FAX : (031)460-5459
* 정회원, 한국철도기술연구원
** (비)회원, 한양대학교 전기공학과

표 1. 선형유도전동기의 사양

항 목	값	항 목	값
정격 추력	18.4 kN	공극	9 mm
정격 속도	8.333 m/s	매극매상 슬롯수	4
극 수	8	2차측 리액션 플레이트의 두께	5 mm
극 피치	252 mm	2차측 리액션 플레이트의 재질	aluminum

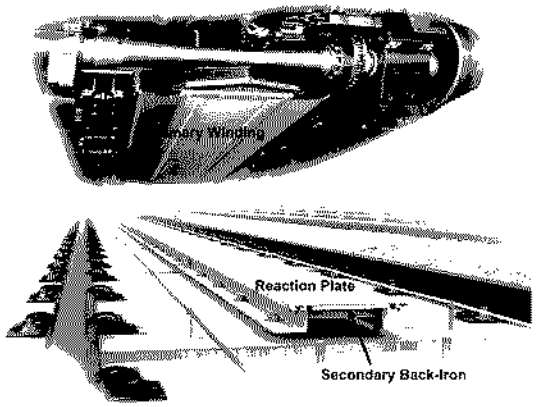
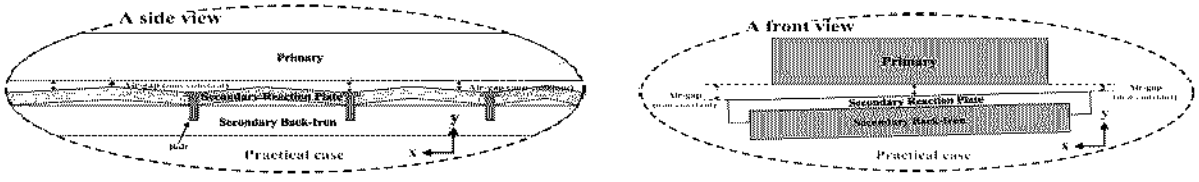


그림 1. 선형유도전동기를 이용한 철도차량 시스템

2. 본 문

공극 공차 또는 공극 틀림은 종축 방향과 횡축 방향으로 나눌 수 있다. 종축 방향으로 상당한 길이에 걸쳐 시공되는 2차측은 기구적으로 여러 가지 문제를 발생시켜 선형유도전동기의 성능 특성에 악영향을 미칠 수 있다. 2차측은 back-yoke의 역할을 수행하는 강자성체 철심 위에 비자성체 재질인 알루미늄과 같은 리액션 플레이트를 얹는 형식으로 제작된다. 강자성체인 철심과 비자성체인 알루미늄은 모두 도체들로써 각기 고유의 열팽창 계수를 가지고 있다. 따라서 2차측은 열차의 선로와 더불어 주위 기후 환경에 그대로 노출되어 기후 변화에 따라 상당한 기온 변화를 경험하게 된다. 이로 인해 2차측 리액션 플레이트는 휘어지게 된다. 또한 열팽창으로 인한 2차측 리액션 플레이트의 휘어짐을 방지하기 위해 종축을 따라 볼트와 너트 등으로 철심에 고정하게 되는데 각 볼트 사이에는 어느 정도의 거리가 벌어진다. 이는 아래 그림 2(a)와 같이 볼트와 너트로 고정되어 있는 지점들은 리액션 플레이트가 철심과 이격되지 않는 반면 그 외의 지점에서는 리액션 플레이트가 철심과 이격되는 현상을 유발한다.

앞서 언급한 종축 공극 틀림 외에도 2차측에서 발생하는 건설 공차에는 횡축 방향으로의 공극 틀림이 존재한다. 그림 2(b)에 나타나 있듯이 횡축 공극 틀림은 선형유도전동기의 진행 방향에 대해 수직인 단면에서 살펴보았을 때 좌우의 공극의 길이가 서로 상이한 값을 가지게 되는 것을 의미한다. 선형유도전동기에서 공극의 크기는 여자전류의 크기를 결정할 뿐만 아니라 입구단과 출구단에서 발생하는 단부효과에도 영향을 미쳐 전체 시스템 성능에 영향을 줄 수 있다.



(a) 종축 공극 틀림 (b) 횡축 공극 틀림

그림 2. 선형유도전동기의 2차측에서 발생하는 공극 틀림

2.1 유한요소법을 이용한 LIM 해석

종축 공극 틀림은 선형유도전동기의 흡인력, 기후변화에 따른 열팽창 등 그 영향에 미치는 인자들이 다양하고 지배방정식이 복잡하여 상당히 불규칙한 경향을 나타낸다. 따라서 2차원 유한요소법을 이용하여 이를 해석하기 위해서는 실제의 종축 공극 틀림과 동일한 형상으로 모델링하여야 하나, 좀 더 명확한 영향을 보기위하여 가장 극심한 변동을 보이는 사례를 모델링하는 것이 효과적이다. 그림 3은 실측 데이터를 기초로 한 종축 공극 틀림의 모델링 과정을 보여준다. 최종 모델은 종축을 따라 1200[mm] 진행함에 따라 4[mm]의 높이변화가 발생함으로 기울기는 1/300 이다.

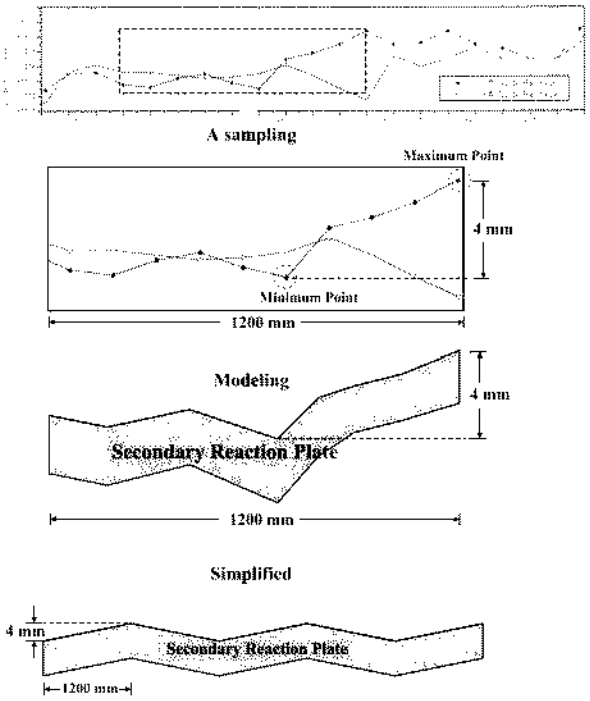
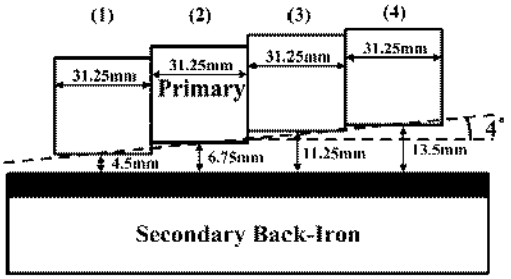


그림 3. 실측 자료로부터 종축 공극 틀림의 모델링 과정 그림



4. 횡축 공극 틀림의 모델링

횡축 공극 틀림은 열차가 운전되는 선로의 전 구간에 걸쳐 발생하는 종축 공극 틀림과 달리 곡선주행구간이나 혹은 건설 공차가 상대적으로 심각한 특정 구간에서만 나타나는 국소적인 현상이다. 횡축 공극 틀림은 1차측 적층폭의 가운데를 중심으로 수평에서 4o 기울어져 있는 것으로 가정하고 모델링 하였다. 그림 4는 횡축 공극 틀림의 모델링으로서 그림에서와 같이 여러 개의 구간으로 분할하고 그 구간 내에서는 유효공극으로 일정한 값을 가지는 것으로 해석하였다.

일반적으로 2차원 운동자계를 포함한 와전류 문제에서는 다음과 같은 가정을 전제로 한다.

1) 모든 전류는 z방향으로만 존재한다.
2) 변위전류를 무시한 준정상상태이다.
3) 1차측 철심의 도전율은 0이다.
4) 1차측 철심과 2차측 Back iron의 투자율은 일정하다.
5) 1차측의 운동은 길이방향 성분만 존재한다.

변위전류를 무시한 2차원 해석모델에 대한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{1}{\mu}\left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 A}{\partial y^2}\right)=-J_0+\sigma\left(\frac{\partial A}{\partial t}+v_x\frac{\partial A}{\partial t}\right) \quad (1)$$

여기서 A는 z방향 자기벡터 포텐셜을 나타내고, J_o는 여자전류밀도, σ는 도전율, μ는 투자율, v_x는 선형유도전동기의 x 방향으로의 이동속도이다.

2.2 해석 결과

공극 공차가 특성에 미치는 영향을 해석하기 위하여 상용 자계해석 프로그램인 Maxwell 2D를 이용하였다. 2차측 리액션 플레이트의 경우, Semi-cap 형을 사용하였으나, 2D의 특성상 모델링이 불가능하므로, Maxwell 3D를 이용하여 보정계수를 산출하고, 등가도전율을 구하여 본 2D 해석에 이용하였다[1].

그림 5에서 보는 바와 같이, 종축 공극 틀림이 있는 경우 추력은 기존 모델보다 1.2[%] 증가하였고, 수직력은 반발력이 7.8[%] 증가하고, 흡인력이 1.3[%] 감소하였다. 추력과 수직력 모두 시스템 입장에서는 오히려 이로운 현상이다. 이는 공극 틀림으로 인해 2차측 리액션 플레이트가 1차측과 상대적으로 가까워져 2차측 누설 리액턴스의 값이 기존 모델보다 감소하였기 때문이다.

횡축 공극 틀림의 경우, 그림 6에서 보는 바와 같이 추력 및 수직력의 변화는 극히 미비하여 성능에 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

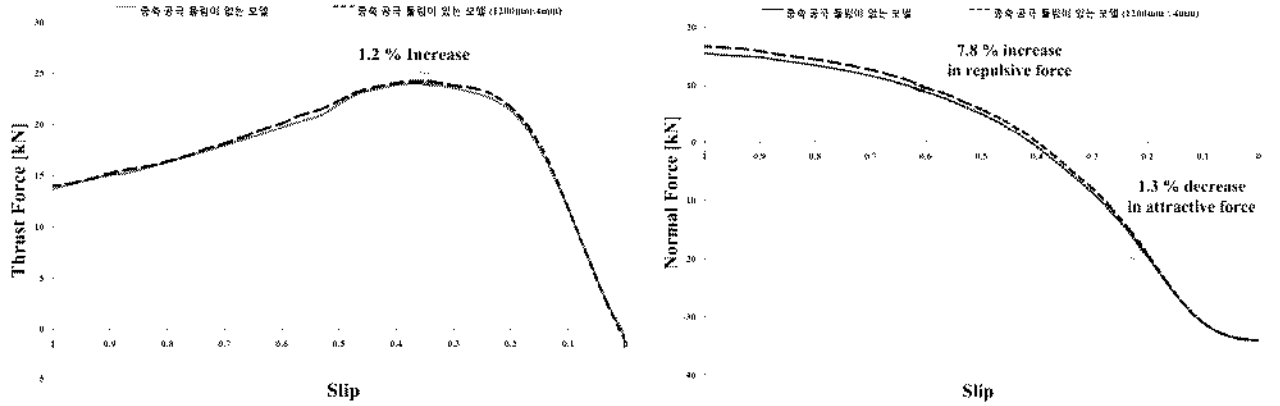


그림 5. 종축 공극 틀림의 유무에 따른 추력 및 수직력

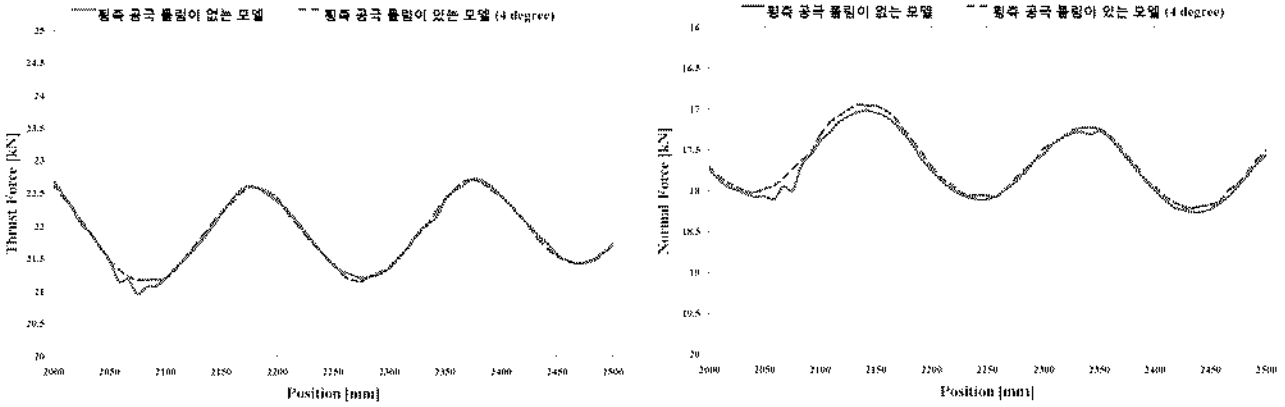


그림 6. 횡축 공극 틀림의 유무에 따른 추력 및 수직력

3. 결 론

선형유도전동기의 2차측 리액션 플레이트 상에서 발생하는 종축 공극 틀림과, 1차측이나 2차측의 상대적인 경사에 의해 발생하는 횡축 공극 틀림이 선형유도전동기의 추력과 수직력에 미치는 영향을 분석하였다. 해석 결과, 종축 공극 틀림은 전체 시스템 성능에 미소하나마 유익한 효과를 나타내었으며, 이에 반해 횡축 공극 틀림은 추력과 수직력에 별다른 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 따라서 종축 공극 틀림과 횡축 공극 틀림 모두 리니어 전철 건설에서 고려해야할 건설공차에서 제외하더라도 큰 문제가 없을 것으로 판단된다. 하지만 횡축 공극 틀림의 경우 본 연구에서 살펴본 추진력, 수직력 외에 횡방향의 안내력 등에 어떤 영향을 미칠 수도 있다고 보여지므로 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. H-.W. Lee, S. G. Lee, C. Park, J. Lee, and H-. J. Park, "Characteristic Analysis of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train According to Various Secondary Schemes," International Journal of Railway, Vol. 1, No. 1, pp. 6-11, March 2008.
2. Sakae Yamamura, "Theory of linear induction motors," University of Tokyo Press, 1978.
3. I. Boldea and S. A. Nasar, "Linear motion electromagnetic devices," Taylor & Francis, 2001.