

선형 유도 전동기의 회전형 시험기가 추력 특성에 미치는 영향

Effect on characteristics of thrust force using arc type tester in linear induction motor

함상환*, 이성구*, 이형우**, 이주†
Sang-Hwan Ham, Sung-Gu Lee, Hyung-Woo Lee, Ju Lee

ABSTRACT

This paper is analyzed the effect on characteristics of thrust force of linear induction motor(LIM) by arc type tester. Many kinds of tester have a rotational shape because of a finite length of railroad. Whereas effects by using rotational type tester are generally unknown. For reason of that, this paper is analyzed the effect on characteristics by rotational type tester using 2D finite element method(FEM), and then is compared a thrust force between linear type tester and rotational type tester. Analysis model is decided by numerical modeling for fitting the LIM for propulsion system of light rail, and it is changed to proper arc model. And then we analyzed the arc and the linear model. Consequently, arc type tester is not only useful experiment but also efficient simulation method, and small error is occurred between linear and arc model.

1. 서 론

선형유도전동기(Linear Induction Motor)를 사용한 경전철 시스템은 휠과 레일 사이의 마찰력이 아닌 선형유도전동기의 1차 축과 2차 축 사이의 로렌츠 힘에 의해 발생하는 추력을 가지고 직접적으로 추진력을 얻는 시스템이다. 이러한 이유로 LIM을 사용한 시스템은 기어와 같은 별도의 동력전달장치가 필요하지 않아 진동, 소음 측면에서 우수하며, 상대적으로 큰 추진력을 얻을 수 있기 때문에 등판능력, 가속 및 제동 등과 같은 여러 성능에서 우수한 특성을 나타낸다. 하지만 특성 연구를 위해 시험기를 제작하는 경우, 선형 운동의 특성 때문에 회전형 전동기와는 달리 무한한 길이의 선로를 설치하여 성능을 시험할 수 있는 시험기를 제작하는 것은 불가능하다. 그렇기 때문에, 회전기 타입의 주행 시험기가 성능 평가에 주로 이용된다(그림 1). 따라서 본 논문에서는 선형 타입의 시험기를 대신하는 회전기 타입의 시험기를 2차원 모델링을 통한 유한요소법(FEM)을 이용하여 선형 타입의 해석 결과와 비교를 통해 회전형 타입의 시험기가 특성에 미치는 영향을 검토한다.

2. 본 문

2.1 수학적 모델링

본 논문에서는 경전철용 추진시스템에 사용될 LIM의 설계 사양을 도출하기 위해 2차원의 수학적 모델링을 수행하였다. x축 방향으로의 변화만을 고려한 LIM의 수학적 모델의 공극자속밀도의 계 방정식은 다음과 같다.

† 책임저자 : 이주, 한양대학교, 전기공학과, 교수
E-mail : julee@hanyang.ac.kr
TEL : (02)2220-0342 FAX : (02)2295-7111
* 함상환, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정
* 이성구, 한양대학교, 전기공학과, 박사과정
** 이형우, 한국철도기술연구원, 초고속열차 연구실, 선임연구원

$$\frac{g}{\mu_0} \frac{\partial^2 b}{\partial x^2} - \frac{v}{\rho_s} \frac{\partial b}{\partial x} - \frac{1}{\rho_s} \frac{\partial b}{\partial t} = \frac{\partial j_1}{\partial x}$$

1차측에 시간, 공간적으로 정현적인 전류가 흐른다고 가정하면

$$j_1 = J_1 \exp[j(\omega t - \frac{\pi}{\tau} x)] = J_1 \exp[(j \frac{\pi}{\tau} (v_s t - x))]$$

와 같이 나타낼 수 있다.

여기에서, $J_1 = \frac{2\sqrt{2}mw_1Ik_w}{P\tau}$ 이며 각 파라미터들은 다음과 같다.

I : 1차 입력전류의 실효치

k_w : 권선계수

P : 극수

τ : 극간격

m : 상수

w_1 : 1상당 직렬 턴수

정상상태 해는 공극자속밀도가 동기속도, v_s 에서 정현파로 유지되는 해를 의미하며 그 해는 다음과 같다.

$$b_s = B_s \exp[j(\frac{\pi}{\tau} v_s t - \frac{\pi}{\tau} x + \delta_s)]$$

여기에서

$$B_s = \frac{J_1}{\sqrt{(\frac{\pi g}{\tau \mu_0})^2 + [\frac{1}{\rho_s}(v_s - v)]^2}}, \delta_s = \tan^{-1} \frac{\pi \rho_s g}{\mu_0 \tau (v_s - v)} \text{과 같다.}$$

B_s : 동기속도로 이동할 때의 자속밀도의 크기

δ_s : B_s 파의 위상각

ρ_s : 2차 도체판의 표면 저항율을 나타낸다.

이 때의 추력은

$$F = \frac{DJ_1 B_s}{2} \left[L \cos \delta_s + \frac{\tau(1-s)}{\pi s} \left\{ \sin \delta_1 - \sin \left(\delta_1 - \frac{\pi}{\tau} \frac{s}{1-s} L \right) \right\} \right]$$

와 같이 구할 수 있다.[1]

회전기 타입에 있어서의 회전력은 토크로 표현되며,

$F = T/r$ 에 의해서 추력을 구할 수 있다.

2.2 설계 사양 및 2차원 해석 모델

본 논문에서는 경전철 구동 시스템에 사용하기 위해 앞서서의 수학적 모델링을 통해 18,000N의 추력을 만족하는 LIM의 설계 사양을 도출하였으며 다음의 도표 1.과 같다.

도표 1. LIM 설계 사양

항목	단위	값
LIM 연속 정격	kW	110.6
정격 주파수	Hz	21.2
정격 속도	m/s	8.333
정격 슬립	-	0.22
상수	-	3
극수	-	8
1차측 길이	mm	2191.5
1차 코어 적층폭	mm	250

회전기 타입의 시험기의 2D 모델링은 그림2와 같이 선형 운동을 등가적인 회전운동으로 변환하여 모델링 하였다. 선형의 경우 1차측의 상단과 하단의 길이가 2191.5mm로 동일함에 비해, 회전기는 1차측의 상단과 하단에 길이의 차이가 발생하게 된다. 1차측 하단에 치가 존재하고 있으며, 치의 포화가 전체적인 성능에 중요한 영향을 미치기 때문에, 하단의 길이를 2191.5mm로 고정하여 모델링을 하였다. 본 연구에서는 회전기 타입의 1차측 길이를 22.5°로 가정하여 모델링 하였으며 1/4 주기를 갖는 주기모델로 전체적인 디자인을 하였다. 이 때 상단의 길이는 하단의 길이에 비해 39mm가 길었으며, 전체길이에 비하여 약 2% 미만의 증가분을 보였다. 1차측의 상단부분은 자속이 지나가는 요크 부분으로 하단의 치에 비해 크기 증가분에 대한 영향이 미비하므로 상단의 증가한 길이는 전체적인 특성에는 크게 영향을 미치지 않을 것으로 판단된다.

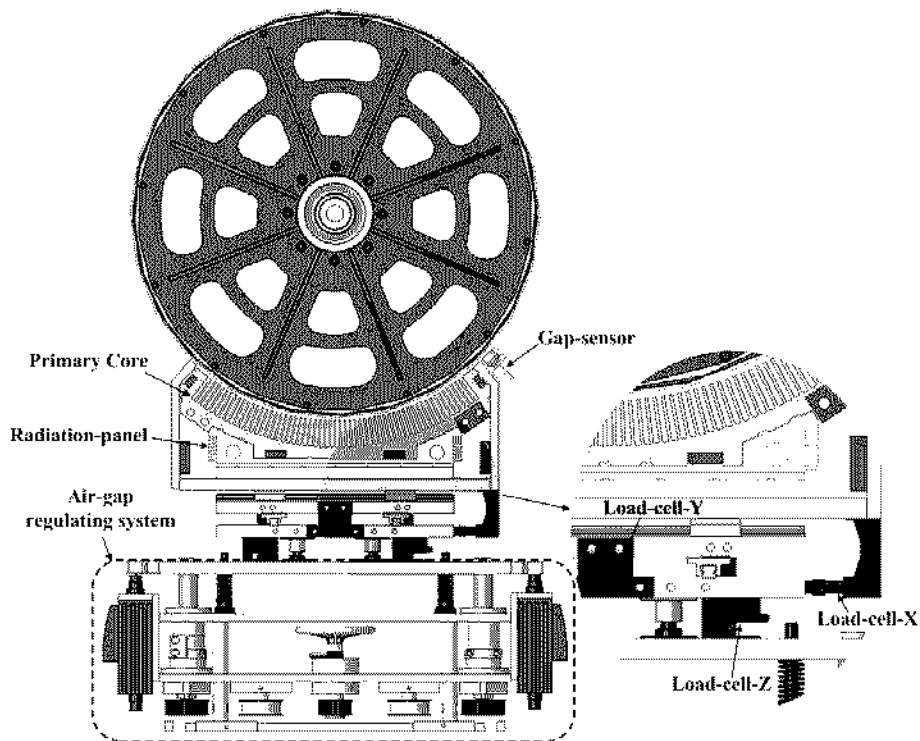


그림1. 회전기 타입 시험기 정면도

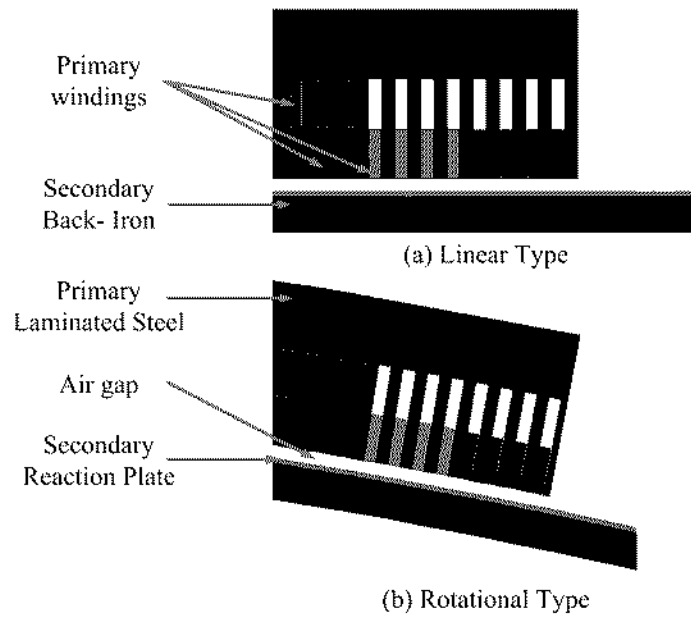


그림2. 선형타입과 회전기 타입 시험기의 2D 모델링

2.3 해석 결과

LIM의 경우 횡방향 효과와 단부효과의 영향을 동시에 보기 위해서는 3차원 FEM 해석이 필요하지만 3차원 해석을 위해서는 매우 파워풀한 컴퓨터가 필요하고 해석 시간 또한 오래 걸리는 단점이 있다. 따라서 본 연구에서는 횡방향 효과를 무시하고 상용 전자계해석 프로그램인 Maxwell 2D를 이용하여 선형 타입 및 회전기 타입의 특성을 해석하였다.

선형 타입과 회전기 타입 모두 동일한 조건 하에서 정상상태 특성을 해석하였으며 두 모델의 공극 자속밀도의 수직 방향 성분은 그림3.과 같다. 그리고 2차측 도체판에서의 와전류의 분포는 그림4.과 같다. 선형 타입과 회전기 타입의 공극 자속밀도의 공간적인 분포는 두 모델이 비슷한 경향과 크기를 보이고 있다. 하지만 와전류 분포는 비슷한 경향을 가지고 변화하지만 와전류의 크기는 선형기에서 더욱 크게 나타나고 있다.

그리고 그림5.에서 선형 타입과 회전기 타입의 추력을 해석한 데이터를 그래프로 나타내었다. 추력은 공극 자속 밀도와 와전류의 벡터곱으로 구해질 수 있으며, 두 타입의 시험기의 추력은 비슷한 추이를 가지고 변화하며, 선형 타입의 추력이 회전기 타입의 추력에 비해 크게 나옴을 알 수 있다.

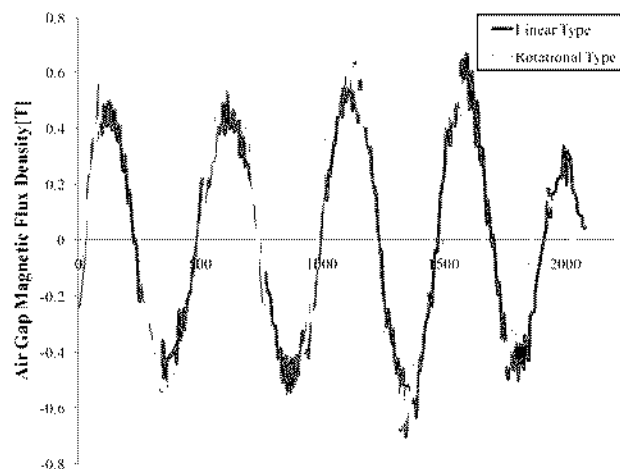


그림3. normal 방향의 공극 자속 밀도

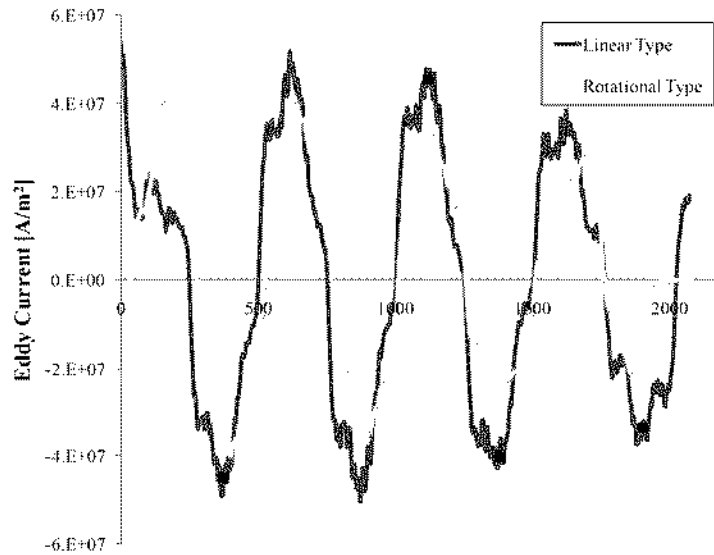


그림4. Secondary reaction plate에서의 Eddy Current

두 타입의 추력의 평균을 구해보면, 선형 타입은 21,973N, 회전기 타입은 20,989N으로 회전기 타입은 선형기 타입에 비해 약 4% 낮은 결과를 보이게 된다.

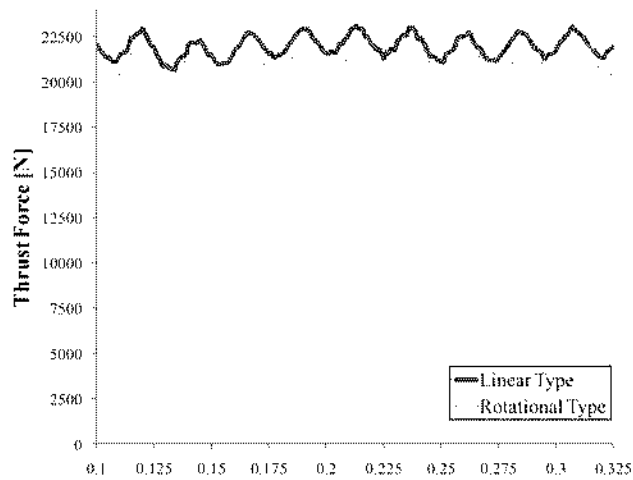


그림5. Thrust Force

3. 결 론

LIM의 선형 타입과 회전기 타입의 추력 특성을 비교해 보았다. 결과적으로 추력의 평균치에서 4%의 오차가 발생한 것을 알 수 있었다. 선형 타입과 회전기 타입의 추력 변화 추이는 거의 같으며 공극에서의 자속 밀도와 2차측 도체에서의 와전류 분포 역시 큰 차이가 없으나 덧붙여서 해석을 수행한 maxwell에서 두 타입 모델의 해석시간의 경우, 회전기 타입은 1/4 주기모델로 모델링하여 해석을 수행하였을 때, 선형기 타입에 비해 해석시간이 1/20 정도로 단축되었다. 따라서, 회전기 타입의 시험기는 실제의 시험에서 뿐만 아니라 유한요소법을 이용한 시뮬레이션에 있어서도 매우 효과적으로 적용될 수 있다는 것을 확인할 수 있다.

참고문헌

1. Sakae Yamamura, "Theory of Linear Induction Motors", John Wiley & Sons Inc, 1979
2. S.A.Nasar and I.Boldea, "Linear Motion Electric Machines", John Wiley & Sons, 1976
3. J. F. Gieras, A. R. Eastham, and G.E. Dawson, "Performance calculation for single-sided linear induction motor with a solid steel reaction plate under constant current excitation", Electric Power Applications, IEE Proceedings B, pp 185-194, July, 1985