

공극변화를 고려한 철도차량용 선형 유도전동기 특성 연구
**Thrust Force Characteristics Analysis of Linear Induction Motor Considering
Airgap variation for Railway Transit**

이병송*
Byung-Song Lee

ABSTRACT

This paper presents a characteristics of linear induction motor considering airgap variation for railway transit in order to achieve high performance of the vehicle. The operating principle of a LIM(Linear induction motor) is identical to a rotary induction motor. Space-time variant magnetic fields are generated by the primary part across the airgap and induce the electro-motive force(EMF) in the secondary part, a conducting sheet. This EMF generates the eddy currents, which interact with the airgap flux and so produce the thrust force known as Loren's force. Even though the operating principal is exactly same as a rotary motor, the linear motor has a finite length of the primary or secondary parts and it causes static and dynamic end-effect which is the discontinuous airgap flux phenomenon. This end-effect causes the deterioration of the system performance, especially in high-speed operation. Another problem is that construction tolerance restricts the minimum airgap in order to prevent a collision between the primary part and the secondary reaction plate. More over, as the airgap length is getting smaller, the attraction force between the primary part and secondary parts is getting larger dramatically and the attraction force would be another friction against propulsion. Therefore, it is necessary to figure out the characteristics of linear induction motor considering airgap variation in order to achieve high performance of the vehicle. The dynamic model of LIM taking into account end-effects is derived. Then the modified mechanical load equation considering the effect of the attraction and thrust force according to the airgap variation is analyzed. The simulation results are presented to show the effect of the LIM according to the airgap variation.

1. 서론

본 논문은 철도 교통 시스템용 고성능 철도차량을 실현하고자 공극의 변화를 고려한 선형 유도 전동기(LIM: Linear induction motor)의 특성을 제시한다. 선형 유도전동기에 의해서 구동되는 LIM 차량은 얼음, 눈, 비등의 환경적 조건에 절대적으로 유리하며, 비점착 구동으로 탁월한 등판능력이 있음은 물론, 부가적인 기계적 동력전달 장치가 불필요하여, 저상화가 가능 하므로 지하구간 건설시 터널의 단면적이 축소되어 건설비의 저감을 꾀할 수 있다. 현재 LIM 차량은 속도범위가 100Km/h 이내의 도시교통 시스템으로 일본 및 캐나다 등에서 영업운전이 진행되고 있다. 최근에는 동남아시아와 우리나라에도 운행 중이거나, 도입 건설이 진행 중인 철도시스템이다.

그러나, 선형 유도전동기를 구동력으로 하는 철도차량은 회전형 전동기를 적용한 철도차량 시스템에 비하여, 구조적 구동 특성에 의해 효율이 나빠지는 단점이 있다.

* 한국철도기술연구원, 전기신호연구본부, 정희원
E-mail : bslee@krri.re.kr
TEL : (031)460-5404 FAX : (031)460-5299

이러한 저 효율을 개선하여, 고성능의 철도차량을 구현하기 위하여 기존의 회전형 전동기에 적용되고 있는 다양한 제어기법이 적용되고 있고 [1], LIM의 형상에 의해 구조적인 특징으로 발생하는 속도 및 가변공극에 따른 전기, 기계적 특성을 고려한 제어기법이 제안되고 있다.

따라서 본 논문에서는 단부효과를 고려한 LIM의 동적모델을 구성하여, 공극의 변화에 대한 흡입력과 추력의 효과를 고려하여 기계적 부하 방정식을 정립하고, 공극 변화에 대한 LIM의 특성을 분석한 시뮬레이션 결과를 제시한다.

2. LIM 특성 및 등가모델

2.1 LIM 특성

LIM의 구동원리는 회전형 유도 전동기와 동일하다. 시변자계는 1차 측에 의해 공극을 통과하여 발생되어 2차 측 도체에 전자기적 힘(EMF: electro-motive force)을 발생시킨다. 이 전자기적 힘은 와전류를 발생시키며, 이 와전류는 공극의 자속과 교차되어 우리가 로렌츠 힘이라 알고 있는 추력을 발생시킨다. 또한, LIM의 동작원리는 회전형 기기와 동일하지만, 1, 2차의 길이가 유한하여 불연속적인 공극 자속 영향으로 인한 정적, 동적 단부효과를 일으킨다. 이러한 단부효과는 특히 고속 추진에 있어 시스템 특성의 악영향을 준다.

다른 측면에서 LIM은 1, 2차 구조가 회전기와 같이 독립적이지 않고, 1차 측은 차량, 2차 측은 선로 구축물에 취부 되는 특성을 가지고 있으므로, 전체 시스템 건설시 시공공차가 1차와 2차 리액션 플레이트 사이의 충돌을 막을 수 있는 최소한의 공극을 유지하여 주행하여야 하는 한계점을 가진다. 이러한 점은 주행선로 시공의 어려움을 초래하며, 차량주행 중 일정치 않은 공극의 변화에 의해서 발생하는 승차감 및 시스템 효율의 저하를 초래할 수 있다. 또한, 공극의 길이가 작아지면서 1차와 2차 사이의 흡인력이 급격하게 커지기 때문에 추진력에 대한 또 하나의 마찰력으로 작용하는 전기, 기계적 특성을 가지고 있다.

2.2 LIM 등가모델

선형유도전동기의 등가모델은 그림 1.과 같이 단부효과를 포함한 전기적인 d-q 모델로 나타낼 수 있다.[1]

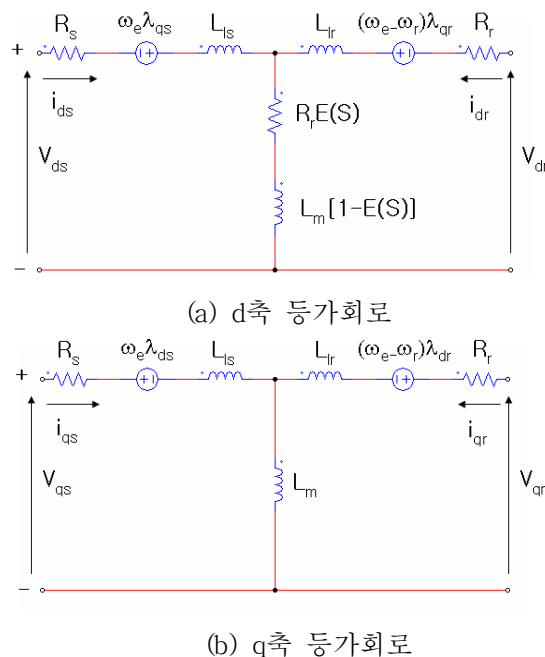


그림1. 선형유도전동기의 등가회로모델

그림1. 의 (a)는 자화성분이 유도전동기와 다른 형태로 구성된 d축 등가회로 이고, 그림1. 의 (b)는 유도전동기와 동일한 q축 등가회로를 나타낸다.

선형유도전동기의 q축 등가회로는 회전형 유도전동기의 q축 등가회로와 동일하게 표현될 수 있으므로, 등가회로 상의 관련 파라미터들은 단부효과에 따라 변하지 않는다. 그러나 d축 유입부 와전류는 회전자 쇄교자속(λ_{dr})을 감소시키는 영향으로 공극자속에 영향을 미친다. 그러므로 회전형 유도전동기의 d축 등가회로는 단부효과를 고려할 경우 q축 등가회로와 달리 선형 유도전동기에 동일하게 적용될 수 없다.

그림1. (a), (b)의 등가회로로부터 동기 좌표계로 나타나는 1차, 2차 전압방정식은 다음 식(1)~(4)와 같다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + R_r E(S)(i_{ds}^e + i_{dr}^e) + p\lambda_{ds}^e - \omega_e \lambda_{qs}^e \quad (1)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + p\lambda_{qs}^e + \omega_e \lambda_{ds}^e \quad (2)$$

$$v_{dr}^e = R_r i_{dr}^e + R_r E(S)(i_{ds}^e + i_{dr}^e) + p\lambda_{dr}^e - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr}^e = 0 \quad (3)$$

$$v_{qr}^e = R_r i_{qr}^e + (\omega_e + \omega_r) \lambda_{dr}^e + p\lambda_{qr}^e = 0 \quad (4)$$

이때의 쇄교자속은 식(5)~(8)과 같다.

$$\lambda_{ds}^e = L_{ls} i_{ds}^e + L_m (1 - E(S))(i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (5)$$

$$\lambda_{qs}^e = L_{ls} i_{qs}^e + L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (6)$$

$$\lambda_{dr}^e = L_{lr} i_{dr}^e + L_m (1 - E(S))(i_{ds}^e + i_{dr}^e) \quad (7)$$

$$\lambda_{qr}^e = L_{lr} i_{qr}^e + L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) \quad (8)$$

여기서, v_{dqs}^e, i_{dqs}^e 는 동기좌표계로 표현되는 1차측 전압, 전류 v_{dqr}^e, i_{dqr}^e 는 동기좌표계로 표현되는 2차측 전압, 전류를 나타내며, $\lambda_{dqs}^e, \lambda_{dqr}^e$ 은 동기좌표계로 표현되는 1차, 2차측 쇄교자속을 의미한다. 또한, L_{ls} , L_{lr} 은 1차, 2차측 누설 인덕턴스 및 L_m 은 자화 인덕턴스를 나타낸다.

그리고, d축 유입부 와전류는 회전자 쇄교자속(λ_{dr})을 감소시키는 영향으로 공극자속에 영향을 미치므로, 단부효과를 고려할 경우 선형 유도전동기의 d축 등가회로는 선형 유도전동기의 속도 v [m/s]와 길이 l [m]의 함수인 다음 식(9)~(11)을 적용하여 속도에 따른 자화 인덕턴스 L_m' 의 변화를 고려하여야 한다.

$$S = \frac{lRr}{vLr} \quad (9)$$

$$E(S) = \frac{1 - e^{-s}}{S} \quad (10)$$

$$L_m' = L_m(1 - E(S)) \quad (11)$$

2.3 공극 변화에 대한 LIM특성

철도차량용 LIM의 시변자계는 1차측에 의해 공극을 통과하여 발생되어 2차측 도체에 전자기적 힘(EMF: electro-motive force)을 발생시키는 구조로 동작한다. 1차 측은 차량, 2차 측은 선로 구축물에 취부 되는 특성을 가지고 있으므로, 차량주행 중 공극의 변화에 따른 자화 인덕턴스(L_m) 값의 변화는 승차감 및 시스템 효율의 저하를 초래할 수 있으며, 그림 2와 같은 변화 특성을 가진다. LIM 시스템의 시공시 선로구축물의 2차측에 해당하는 리액션 플레이트는 공차범위를 5[m]당 2[mm]의 공차로 시공하지만, 실제로는 이보다 더 커지거나 작아질 수 있기 때문에 공극을 일정하게 유지하도록 하는 것은 많은 어려움이 따른다.

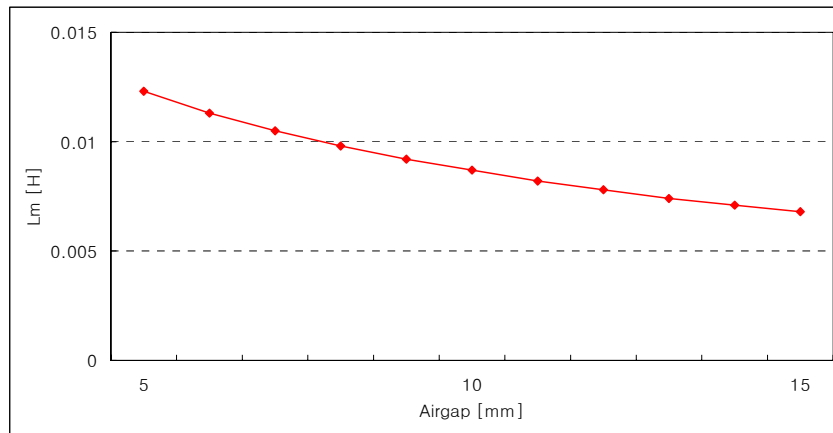


그림 2. 공극의 변화에 따른 자화 인덕턴스(L_m)

본 논문에서는 그림 2와 같은 공극의 변화에 따른 자화 인덕턴스(L_m) 값의 변화에 따라 시뮬레이션을 시행하여, 시스템의 효율 및 토크 특성에 크게 영향을 주는 유입전류 및 추력특성의 변화를 고찰하였다.

3. 공극변화에 따른 LIM 시뮬레이션

3.1 LIM 시뮬레이션 모델

시뮬레이션 모델은 그림 3과 같으며, 정격전압, 정격주파수를 급전전압으로 공급하고, 동일한 부하조건에서 공극만을 변화 시켜 선형 유도전동기를 구동하는 방식으로 시행하였다. 시뮬레이션에 적용된 파라미터는 현재 개발이 진행 중인 750[V] D.C 경량전철용 선형 유도전동기로 설계 시 제시된 값을 적용하였다.

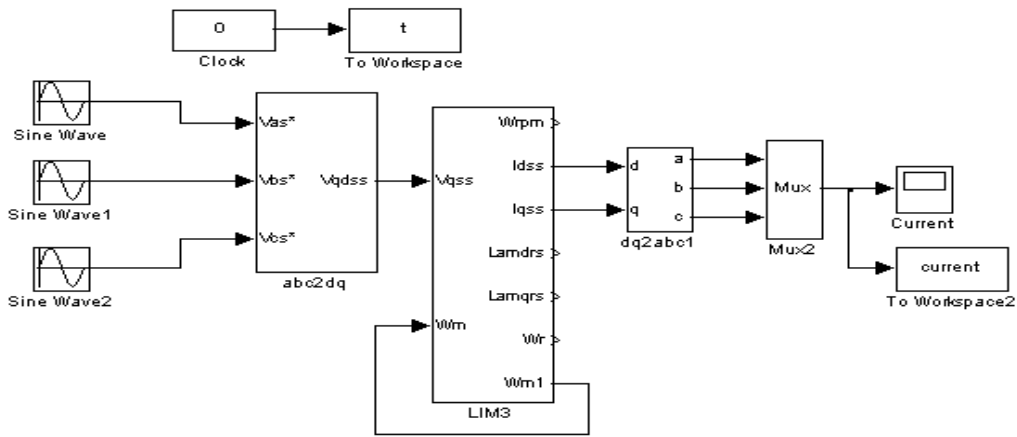


그림 3. 선형 유도전동기 시뮬레이션 모델

3.2 LIM 시뮬레이션 결과

그림 4. 는 선형 유도전동기의 공극을 5[mm]와 12[mm]로 변화 시켰을 경우의 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

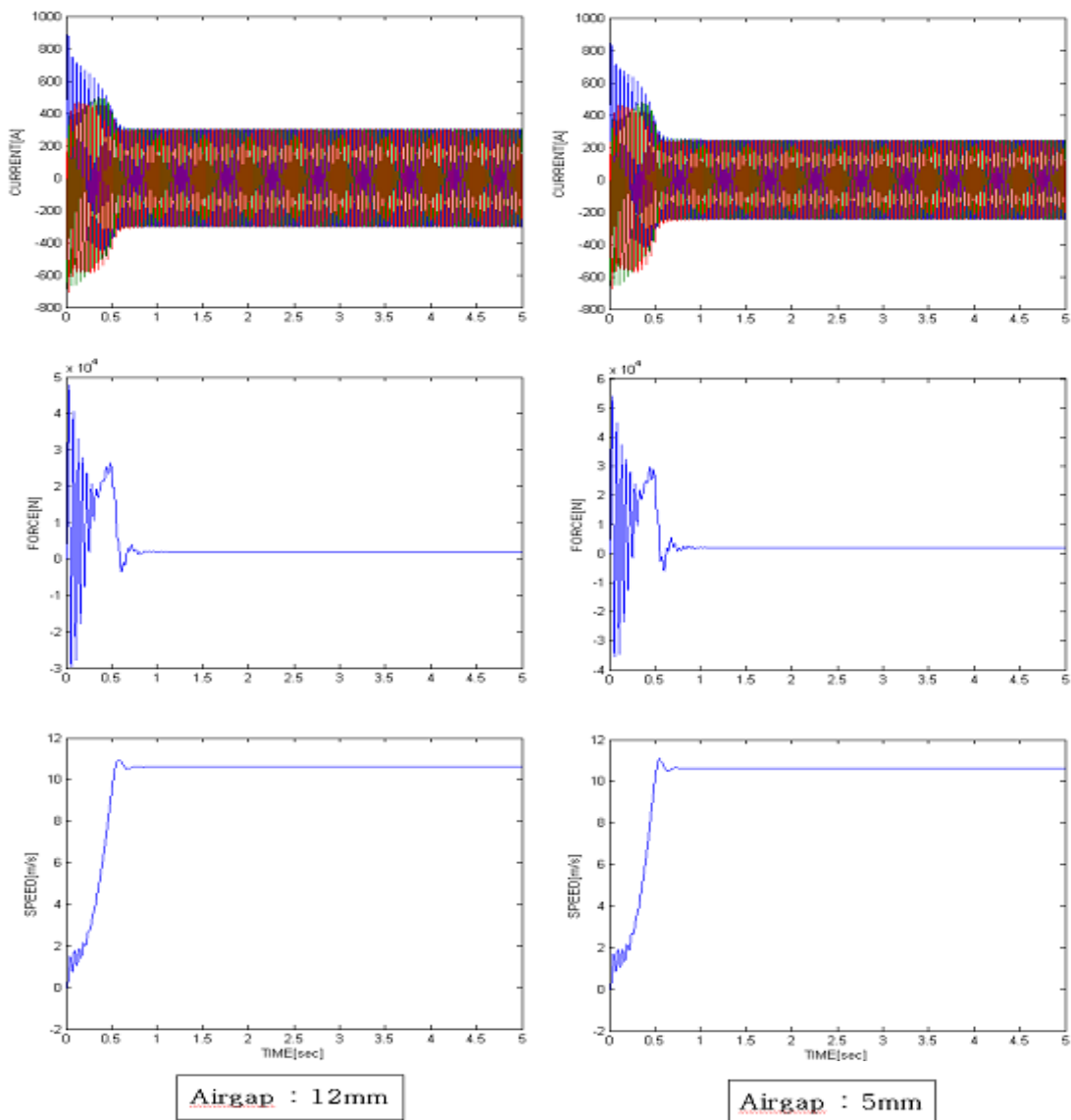


그림 4. 선형 유도전동기 시뮬레이션 결과

동일한 부하조건에서 공극이 12[mm]와 5[mm]인 경우를 비교해보면, 공극이 작은 경우 상대적으로 적은 과도전류 및 정상상태 전류가 유입됨을 알 수 있고, 정격속도에 도달하는 시간도 짧아지나 정상 상태에서 인가된 부하에 대한 추력은 동일하게 나타남을 확인 할 수 있다.

결과적으로, 선형 유도전동기로 구동되는 철도차량은 다른 변수들도 고려하여야 하지만 공극의 변화에 따른 특성도 고려하여, 주행 중 추력을 최대로 하는 공극을 유지하여야 양호한 효율 및 주행특성을 구현할 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 단부효과를 고려한 LIM의 동적모델을 구성하여, 공극의 변화에 대한 흡입력과 추력의 효과를 고려하여 기계적 부하 방정식을 정립하고, 공극 변화에 대한 LIM의 추력특성을 분석한 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 선형 유도전동기에 의해서 구동되는 LIM 차량은 얼음, 눈, 비등의 환경적 조건에 절대적으로 유리하며, 비점착 구동을 탁월한 등판능력이 있음은 물론, 부가적인 기계적 동력전달 장치가 불필요하여, 저상화가 가능 하므로 지하구간 건설시 터널의 단면적이 축소되어 건설비의 저감을 꾀할 수 있다. 그러나 회전형 전동기를 적용한 철도차량 시스템에 비하여, 큰 공극을 가지는 구조적 구동 특성에 의해 효율이 나빠지는 단점이 있다. 이를 설계단계에서부터 고려하여 주행 중 추력을 최대로 하는 공극을 유지함으로써 고효율, 고성능의 철도차량을 구현하기 위한 연구결과로 활용하고자 한다.

참고문헌

1. Jianqiang Liu, Fei Lin, Zhongping Yang and Trillion Q. Zheng, "Field Oriented Control of Linear Induction Motor Considering Attraction Force & End-Effects," Power Electronics and Motion Control Conference, 2006. IPEMC '06. CES/IEEE 5th International, Vol. 1, pp.1-5
2. Rathore, A.K., Mahendra, S.N., "Simulation of secondary flux oriented control of linear induction motor considering attraction force & transverse edge effect," Power Electronics Congress, 2004. CIEP 2004. 9th IEEE International, pp.158-163
3. Zheng Wang, Graham E. Dawson, and Tony R. Eastham(1994), "The Finite Solutions for Moving Conductor Eddy Current Problems Based on Triangular Elements," IEEE Transaction on Magnetics, Vol.30.No.6,Nov.,pp.4329-4331
4. I. Boldea and S. A. Nasar(2001), Linear motion electromagnetic devices, New York: Taylor&Francis
5. Japan Subway Association(2004), Linear Metro System, pp.1-28