

철도차량구동용 선형유도전동기의 2차측 방식선정

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

Secondary type selection of a Linear Induction Motor for a Lightweight Train

Hyung-Woo Lee*, Chan-Bae Park*, Byungsong Lee*, Sam-Young Kwon* and Hyun-June Park*
Korea Railroad Research Institute*

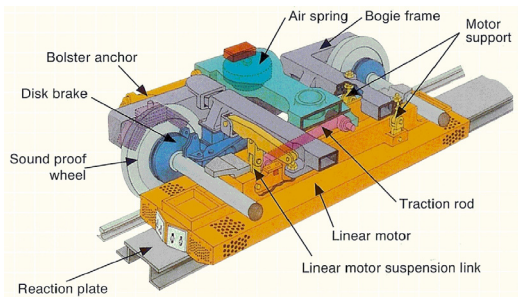
Abstract - 본 논문에서는 국내 경전철에 사용되는 선형유도전동기의 성능 분석을 통하여 지상 2차측의 방식을 선정하고자 한다. 일반적으로, 등가회로를 이용한 해석적 방법은 선형전동기의 커다란 공극, 단부효과, 횡방향 효과, 3차원 형상, 회전에 비해 상대적으로 큰 누설 등으로 인하여 성능을 정확히 예측할 수 없다. 또한, 수치해석적 방법은 고용량의 메모리와 해석시간을 요구한다. 그러나 본 논문에서는 등가회로법과 수치해석법을 혼용하여 좀 더 빠르고 정확한 성능 분석을 수행하였으며 제안된 방법을 통하여 도시철도차량용 선형유도전동기에 적합한 2차측 방식을 선정하였다.

1. 서 론

경제적이고, 날씨의 변화에 무관하게 상시 운행하는 교통수단에 대한 수요가 증가함에 따라, 지난 20세기 말부터 리니어 전철에 대한 관심이 늘어나고 있다. 리니어 전철은 기존의 회전기와 달리 선형전동기로부터 추진력을 얻는 시스템으로서 바퀴와 레일사이의 마찰력에 의한 점착구동이 아닌 전자기적 비점착 구동방식을 이용한다. 따라서 추진을 위한 기어, 베어링 등 기계적 구조물이 필요하지 않다.

리니어 전철시스템은 비점착구동방식을 사용하므로 (1)탁월한 급가감속, (2)저가의 건설비, (3)우수한 급구배 등판능력, (4)뛰어난 급곡진 주행능력, (5)날씨에 무관한 높은 가용성, (6)저소음, (7)낮은 유지보수비용 등 많은 장점을 가지고 있다. 따라서 현재 전 세계적으로 널리 상용화되고 있으며, 그 수요는 날이 증가할 것으로 예상하고 있다.

선형유도전동기(또는 리니어유도모터, LIM)의 구동원리는 회전형 유도기와 동일하다. 그러나 선형유도전동기는 1차측(Primary side) 또는 2차측(Secondary side)이 유한한 길이를 가지고 있으므로 태생적으로 단부효과를 수반한다. 게다가 기계적 충격을 피하기 위한 커다란 공극은 효율 및 역률을 저하시키는 주원인이다. 하지만 앞서 제시한 여러 장점들로 인하여 직선운동을 하는 철도차량에서는 회전형 모터보다 우수한 성능을 나타낸다. 그림 1은 철도차량에 사용되어지는 리니어 모터의 실제 적용 예이다.

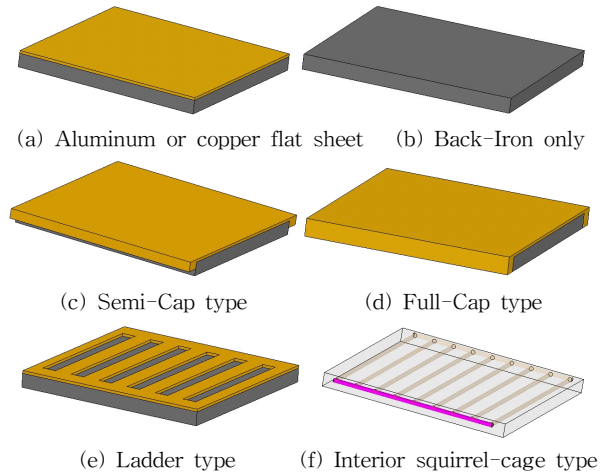


〈그림 1〉 철도차량용 선형유도전동기 실시 예[4]

2. 본 론

2.1 선형유도전동기의 특성분석

철도차량의 경우 건설비 등을 고려하여 일반적으로 계자부분이 대차에 연결되는 차상 1차 방식을 사용한다. 따라서 동일한 1차측에 대하여 리니어 모터의 성능은 절대적으로 2차측의 구조와 재질에 영향을 받는다. 다시 말해서 자속의 경로와 2차측 와전류의 경로 및 도체판의 도전율에 크게 의존한다. 그러므로 리니어 모터의 설계에 있어서 2차측의 설계는 신중히 고려되어야 한다. 그러나 다양한 경우의 성능을 분석하기 위하여 모든 경우를 제작할 수 없으므로 일반적으로 해석적 방법 및 수치적 방법을 이용한 모의실험이 수행되어진다.



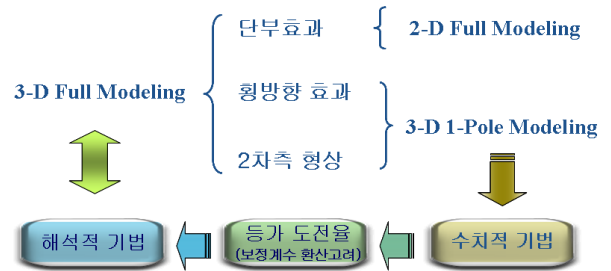
〈그림 2〉 2차측 도체판의 다양한 구조

그림 2는 다양한 2차측 도체판의 구조를 나타내며, 일반적으로 하나의 방식이 사용되어지거나 구간별로 여러 방식이 혼용되기도 한다.

전기기의 성능을 분석하는 방법은 여러 가지가 있으나, 선형유도전동기의 성능 분석은 기존의 회전형과 다르며 더욱 어렵다. 우선 철도차량용 리니어 추진시스템은 건설 공차, 온도 팽창, 도체판의 구부러짐 또는 휨, 바퀴의 마모 등과 같은 많은 제약으로 인해서 약 10[mm]의 커다란 공극을 가진다. 이러한 큰 공극은 회전기와 비교하여 많은 누설자속을 야기하며 결국 해석의 정확도를 크게 떨어뜨린다. 둘째, 1차측의 단부효과는 일반적으로 회전기의 수치해석에서 사용되는 1/4 모델 또는 1/2 모델의 사용을 어렵게 하여 Full-modeling을 하여야 한다. 셋째, 무한계도를 가지는 회전기와 달리 리니어 모터는 과도상태 해석을 위하여 긴 2차측 도체판의 모델링이 필수적이므로 커다란 해석모델, 긴 해석시간, 고용량의 메모리를 요구한다. 게다가 횡방향 단부효과 및 다양한 2차측 도체판의 구조는 3차원해석이 필연적이다. 결국 이러한 제약조건 및 고려사항들은 장시간, 고성능의 계산이 요구되고 해석의 정확도를 떨어뜨린다.

2.2 해석 기법

선형유도전동기의 성능분석을 위하여 3차원 해석이 필수적이거나, Full-modeling의 3차원 과도특성해석은 현실적으로 불가능하므로 본 논문에서는 그림 3과 같은 해석기법을 제시하였다. 제시한 해석기법은 다음의 여러 단계를 거친다.



〈그림 3〉 제안된 선형유도전동기 해석기법

첫째, 단부효과를 보정하기 위하여 2차원 전체모델과 한 극 모델을 이용하여 추력을 계산한다.

둘째, 횡방향 단부효과 및 다양한 2차측 형상을 고려하기 위하여 3차원 수치해석 모델을 이용한다.

셋째, 분석한 2차원 및 3차원 해석결과로부터 단부효과, 횡방향 효과, 2차측 형상을 고려한 등가도전율을 계산한다.

넷째, 2차측 도전율은 선형유도전동기의 성능에 직접적인 영향을 미치므로 계산한 등가도전율을 등가회로법의 파라미터로써 이용하여 Full-modeling의 3차원 과도특성해석을 대체한다.

식 (1)은 해석에 사용되는 2차측 등가도전율을 나타낸다.

$$\sigma_e = k_e k_c \sigma_2 \quad (1)$$

여기서, k_c 는 3차원 보정계수, k_e 는 단부효과 보정계수, σ_2 는 2차측 도체판의 순도전율이다.

2.3 해석 결과

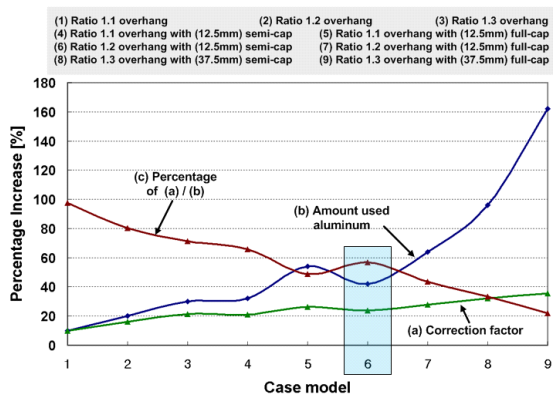
제안된 해석기법에 따라 2차원 및 3차원 해석을 수행하였다. 일반적으로 성능적 측면을 고려하여 (b)Back-iron only type을, 경제적 측면을 고려하여 (e)Ladder type, (f)Interior squirrel-cage type을 널리 사용하지 않으므로 본 해석에서 제외하였다. 따라서 2차측의 형상은 (a)Flat type, (c)Semi-cap type, (d)Full cap type 세 가지 경우를 고려하였다.

해석결과로부터 정격슬립에서 단부효과 보정계수는 0.842, 3차원 보정계수는 0.7086 이다. 그 외 여러 오버행의 경우에 대한 3차원 보정계수는 표 1에 제시하였다.

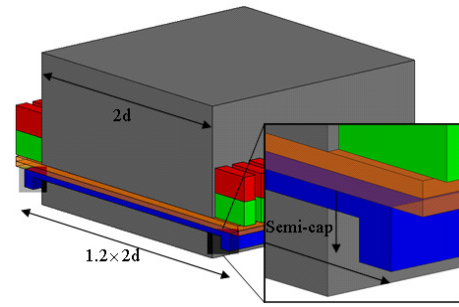
그림 4는 기준모델(No Overhang with no cap)과 비교한 보정계수의 증가율 및 사용되는 알루미늄의 양을 나타내었다. 표 1 및 그림 4에서와 같이 오버행이 증가할수록, Full cap을 사용할수록, 등가 도전율은 증가함을 알 수 있다. 그러나 알루미늄의 사용량 또한 기하급수적으로 증가한다. 모델 #1~#4는 적은 알루미늄의 사용에 의해 상대적으로 높은 성능 증가율을 보이거나 절대적인 추력값이 낮고, 모델 #8~#9는 절대적인 추력값은 높으나, 알루미늄 사용의 급증으로 인해 성능 증가율이 낮다. 따라서 모델 #6이 철도차량용으로 적합하다. 그림 5는 모델 #6을 나타낸다.

〈표 1〉 다양한 2차측의 3차원 보정계수

다양한 모델	3차원 보정계수
(0) No Overhang with no cap (Base model)	0.7086
(1) 1:1.1 Overhang with no cap	0.7777
(2) 1:1.2 Overhang with no cap	0.8224
(3) 1:1.3 Overhang with no cap	0.8604
(4) 1:1.1 Overhang with Semi-cap	0.8575
(5) 1:1.1 Overhang with Full-cap	0.8954
(6) 1:1.2 Overhang with Semi-cap	0.8776
(7) 1:1.2 Overhang with Full-cap	0.9059
(8) 1:1.3 Overhang with Semi-cap	0.9363
(9) 1:1.3 Overhang with Full-cap	0.9612



〈그림 4〉 각 경우의 등가도전율 및 기준모델에 대한 상대적 증가율



〈그림 5〉 모델 #6 : 오버행 1:1.2, Semi-cap type

3. 결 론

본 논문에서는 경전철에 사용되는 선형유도전동기의 해석기법을 정립하고 이를 통하여 2차측 방식을 선정하였다. 리니어 모터에서 중요한 현상 중 하나인 단부효과는 2차원 수치해석법을 통하여 고려되었고, 그에 따른 보정계수를 계산하였다. 또한 횡방향 효과 및 2차측의 3차원 형상은 3차원 수치해석법을 이용하여 고려하였으며, 각각의 경우에 대한 보정계수를 계산하였다. 수치해석 결과로부터 구한 2차측 도체판의 등가도전율을 해석적 기법에 대입하여 선형유도전동기의 다양한 형상에 따른 성능을 분석하였다.

구리판, Ladder type, Interior squirrel-cage type의 경우는 알루미늄 판에 비해 성능이 우수할 것으로 예상되나 건설비가 상대적으로 많이 요구되므로 철도시스템에 실제로 적용되기 어렵다. 따라서 도시철도차량용 리니어 전철시스템에 가장 적합한 모델은 1.2 오버행의 Semi-cap type 임을 분석을 통하여 알 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Sakae Yamamura, "Theory of linear induction motors," University of Tokyo Press, 1978
- [2] I. Boldea and S. A. Nasar, "Linear motion electromagnetic devices," Taylor & Francis, 2001
- [3] 리니어전철연구팀, "Linear Electric Railway System," 한국철도기술연구원, pp. 1-8, 2007
- [4] Japan Subway Association, "Linear Metro System," pp. 1-28, 2004