

주행 집전계 시험기의 주행 대차용 선형 유도전동기 설계에 관한 연구

논 문
60-4-14

A Study on Design of Linear Induction Motor in Dynamic Tester for Catenary-current Collection

함 상 환* · 조 수 연* · 이 주†
(Sang-Hwan Ham · Su-Yeon Cho · Ju Lee)

Abstract - This paper presents design process of linear induction motor in dynamic tester for catenary-current collection. To minimize length of rail for dynamic tester for catenary-current collection, accelerating performance of the linear induction motor is very important. So the design process of linear induction motor considered in this paper is different with general design process of linear induction motor, because dynamic tester has three type driving region, as accelerating region, constant speed region, and braking region. Considering accelerating performance of motor, distance and time from starting point to constant speed region were concerned for load condition of motor. Designed linear induction motor was analyzed by 2-dimensional finite element method. Using mechanical dynamics simulation with analysis result of 2-dimensional finite element method and accelerating performance of designed motor was proved.

Key Words : Linear induction motor, Catenary current collection, Accelerating performance

1. 서 론

선형 유도전동기는 레일과 바퀴 간의 마찰에 의한 추력이 아닌, 선형 구조의 유도전동기에서 발생하는 추력을 직접적으로 이용하므로 기구적인 마찰과 소음이 적은 장점을 가진다. 바퀴는 가이드로서의 역할만을 하기 때문에 대차의 부피를 감소시킬 수 있고, 그로 인해 공사비가 절약된다. 또한 유지보수 주기를 길게 가져갈 수 있기 때문에 추가적인 이득이 있다. 이런 이유들로 최근 들어 중·저속형 이동 및 운송수단으로 각광받고 있으며 특히 도시형 경전철에 대한 적용이 가시화되고 있다.

이렇듯 전철형 이동수단에 대한 관심이 높아지면서 전력 공급의 안정성을 높이기 위해서 전차선로와 집전계에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 집전성능을 향상시키기 위해서는 집전계에 대한 여러 운행조건 하에서의 시험 및 분석이 수행되어야 한다[1]. 집전계 시험기의 경우, 주행 대차의 운행 패턴은 초반 가속 이후의 정속도 운행, 그리고 감속 운행의 3단계로 구분된다. 집전계 시험 레일의 설치 공사비 감소를 위해서는 빠른 시간 안에 가속을 하여 정속도 운행까지의 도달거리를 짧게 하는 것이 유리하다. 즉, 집전계 시험기의 주행 대차에 대한 선형 유도전동기 설계에 있어서는 가속 성능이 중요한 설계 목표가 된다.

본 논문에서는 주어진 가속 성능을 고려하여 부하조건을 계산하였다. 계산된 부하조건을 고려하여 선형 유도전동기

를 설계하였으며 설계된 선형 유도전동기의 추력 특성은 2차원 유한요소해석법을 이용하여 계산되었다. 이 때, 2차원 유한요소해석을 용이하게 하기 위해 원형으로 등가화한 해석모델을 고려하였다. 계산된 추력 특성은 운동계 방정식을 이용한 시뮬레이션을 수행하여 주어진 가속 성능을 만족하는지 검증하였다.

2. 본 론

2.1 설계 목표 사양 및 출력 특성, 부하 조건 산정

본 논문에서 설계되는 선형 유도전동기의 설계 목표는 원하는 구간 내에서 최대 목표속도에 도달할 수 있도록 하는 가속 성능이다. 따라서 선형 유도전동기의 설계 시 거리 대 속도 프로파일과 출력 곡선, 부하 조건이 동시에 고려되어야 한다. 그림 1은 주행 집전기 시험 대차에서 요구되는 속도 대 거리 프로파일을 보여준다. 주행 집전기 시험을 위하여 도달하고자 하는 최대 목표속도는 100km/h이며, 최대 목표속도까지의 도달거리는 200m이며 최대 목표속도에 도달한 후 50m동안 정속 주행을 하고 다시 200m에 걸쳐서 감속운행을 한다. 따라서 본 주행 집전기의 주행 프로파일을 만족시키기 위해서는 선형 유도전동기의 성능은 200m의 거리 내에서 15초 이하의 가속시간 안에 최대 목표속도 100km/h에 도달할 수 있도록 해야 한다. 속도 대 거리 프로파일을 이용하여 최대 목표속도와 최대 목표속도까지의 도달거리를 이용하여 가속도를 계산하였다. 이동거리, 가속도 및 초기속도와 종속도를 이용한 속도 방정식을 이용하여 계산된 가속도는 200m의 거리 내에서 0km/h에서 100km/h까지 도달하기 위한 평균 가속도로 볼 수 있다. 그러나 실제 경전철의 주행 프로파일을 고려하여 최적의 용량을 산정하기 위하여

* 정 회 원 : 한양대학교 전기공학과 박사과정
† 교신저자, 시니어회원 : 한양대학교 전기생체공학부 교수
E-mail : julee@hanyang.ac.kr
접수일자 : 2010년 12월 22일
최종완료 : 2011년 3월 14일

최대 가속도는 평균 가속도의 약 2배로 산정하였다. 가속 구간에서 선형 유도전동기는 순시 정격으로 운전되므로 연속 정격 대비 2배의 순시 정격을 산정하고, 순시 정격 운전 시간은 가속시간으로 가정하였다. 그 외의 주어진 나머지 설계 목표 사양은 아래의 표 1에 같이 나타내었다.

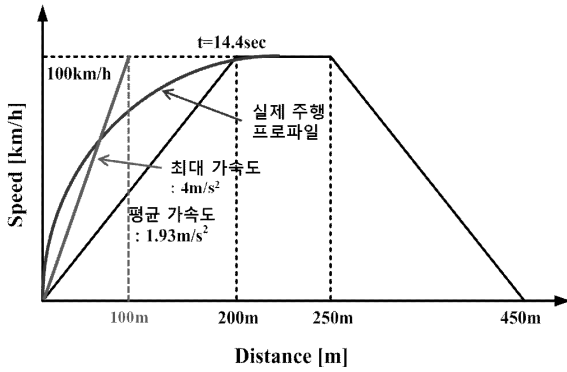


그림 1 집전계 시험기용 주행 대차의 속도 대 거리 프로파일
 Fig. 1 Speed vs. distance profile of dynamic Tester for catenary-current collection

표 1 선형 유도전동기의 설계 목표사항 및 제한 조건
 Table 1 Design goals and constraint conditions of LIM

설계 사양	값	단 위
목표속도	100	km/h
목표속도 도달거리 제한	200	m
목표속도 도달시간(산정)	14.4	s
평균 가속도(산정)	1.93	m/s ²
최대 가속도(산정)	4	m/s ²
LIM 총 무게(총 부하)	800(6000)	kg
연속 정격 출력 제한	240	kW
순시 정격 출력 제한	480	kW
순시 정격 구동 시간	15이하	s
역률	0.6이상	-
전압 제한	600	V _{rms}
전류밀도	6	A _{rms} /mm ²

2.2 출력 특성

선형 유도전동기가 부담하는 총 부하의 무게는 대차의 무게 및 실험 장비 및 선형 유도전동기의 자체 무게 등을 포함하여 6000kg으로 산정하였다. 따라서 최대 가속도를 고려하여 다음 식 (1)을 통해 최대 추력을 계산하였다.

$$F_E = M \times a_{max} \quad (1)$$

여기에서 F_E , M 및 a_{max} 는 각각 최대 추력, 총 부하 무게, 그리고 최대 가속도를 나타낸다.

주행 대차에 대한 부하조건으로는 구름 저항력과 공기 저항력을 고려하였다. 구름 저항력의 경우, 레일과 바퀴 사이

의 마찰력이므로 주행 대차의 수직항력에 대해서 주행 방식과 레일 및 바퀴 재질에 대한 계수값을 곱한 형태이다. 집전기의 시험 선로는 구배를 고려하지 않으므로 이에 대한 구배 저항은 부하 조건에 포함되지 않았다.

$$F_R = C_{rr} \times M \times g \quad (2)$$

$$F_{air} = 0.5 \times C_d \times \rho \times v^2 \times A \quad (3)$$

여기에서 F_R , C_{rr} , g , F_{air} , C_d , ρ 및 A 는 각각 구름 저항력, 구름 저항 계수, 중력가속도, 공기 저항력, 공기 저항 계수, 공기 밀도, 그리고 대차 전면부 면적을 나타내고 있다. 철 재질의 레일과 바퀴 사이의 구름 저항 계수로는 0.001을 선정하였다. 공기 저항력은 주행 대차의 앞부분 형상에 따라 공기 저항계수가 바뀌게 된다. 공기 저항력은 또한 대차의 주행 속도의 제곱에 비례하고, 공기의 밀도에 영향을 받는다. 편평한 수직면 형상의 주행 대차 앞면에 대해서 공기 저항계수는 2.1로 선정하였으며, 대차 앞면적은 7.216m²로 계산되었다. 100km/h 도달 시 연속 정격으로 정속도 운전을 하는 주행 프로파일에 따라 목표 속도 100km/h에서의 부하는 약 7000N이므로 연속 정격의 출력은 194kW 이상이 되어야 한다.

최대 운전속도의 절반정도를 기저속도로 가정하고 정속도 운전 시의 속도를 최대 속도로 가정하여 기저속도는 50km/h로 결정하였다. 기저속도에서 계산된 최대 추력을 발생시키기 위해서는 출력이 약 333kW 이상이 되어야 하므로, 순시 정격 출력을 360kW로, 연속 정격 출력을 240kW로 결정하였다. 연속 정격 출력 및 순시 정격 출력에 대한 속도 대 추력 곡선, 그리고 부하 곡선을 그림 2에 표시하였으며 기저속도와 최대속도에서의 설계 포인트를 보여준다.

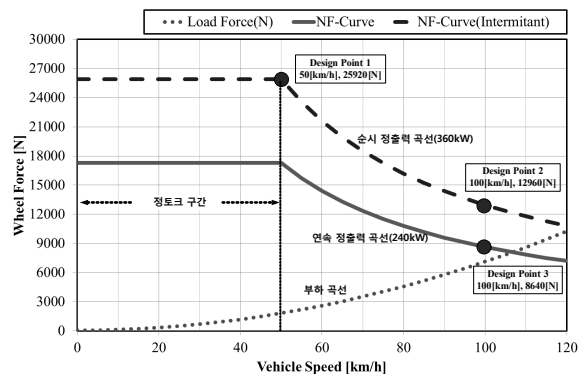


그림 2 선형 유도 전동기의 속도 대 추력 곡선 및 부하곡선
 Fig. 2 Speed vs. thrust force and load curve of LIM

2.3 선형 유도 전동기의 설계

선형 유도전동기의 설계 흐름도를 그림 3에 나타내었다. 설계 사양으로부터 사이즈 설계, 권선 설계, 1차측 고정자 설계, 2차측 리액션 플레이트 설계 순으로 진행되었다[2]. 설계된 선형 유도전동기의 치수 및 설계 제원은 다음의 그림

4와 표 2에서 나타내었다. 본 논문에서 설계하는 선형 유도전동기의 경우, 순시 정격 운전은 가속 운전구간에서만 이루어지므로 순시 정격 운전시간이 짧다. 따라서 선형 유도전동기의 설계는 연속 정격 출력에 대해 설계사양을 만족하도록 고려되었다. 선형 유도전동기의 특성을 검증하기 위한 방법으로 2차원 유한요소해석을 이용하였으며 선형기기의 특성상 과도상태를 거쳐 정상상태의 해석결과를 보기 위해서는 긴 해석시간이 요구된다. 회전기의 경우 회전경로 자체가 무한계도와 같으므로 해석상의 난점이 적으나 선형기의 경우 실제의 움직임을 고려하게 될 때 정상상태에 다다를 때 까지의 움직임을 고려하기 위해서는 2차측 리액션 플레이트의 해석 거리가 길어야 하므로 해석 모델의 크기가 커지게 되고 이는 해석 요소 수의 증가가 발생하게 되어 해석시간이 늘어나는 문제 뿐만이 아니라 해석에 요구되는 컴퓨터 자원이 많아진다는 단점을 갖는다. 이에 대한 해결방안으로 기존에 연구를 바탕으로 선형 타입과 원형 타입의 2차원 유한요소해석법을 통한 결과가 유사함을 이용하여 설계된 선형 유도전동기를 원형 모델로 근사화하여 추력 특성을 계산하였다[3]. 그림 2에서 보인 전동기의 속도 대 추력 곡선에 표시되었던 설계 포인트들에 대해서 특성 해석을 수행하였으며 추력 및 전류, 효율, 출력, 역률 등을 계산하였다. 해석 모델 및 해석결과는 그림 5와 표 3에 나타내었다. 설계된 선형 유도전동기의 경우, 100km/h의 최대 목표속도까지의 가속 운전 구간에서 순시 정격 출력을 내고, 목표 속도 도달 이후에는 연속 정격으로 운전하게 된다.

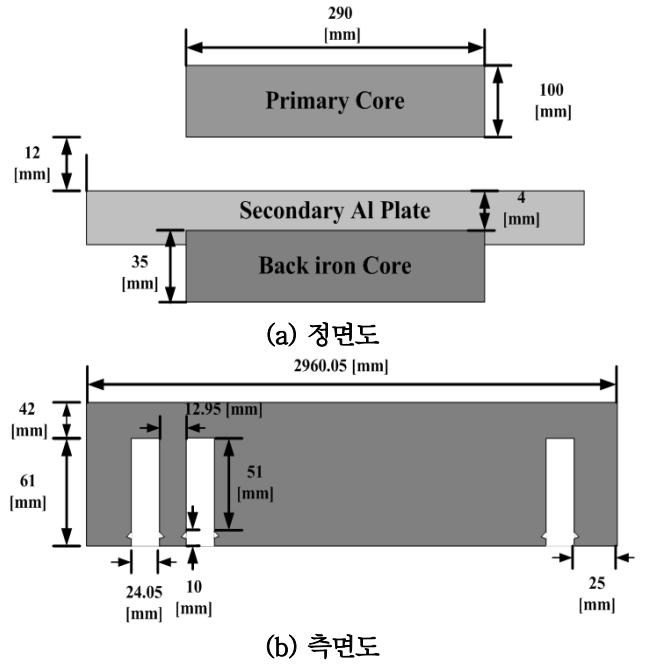


그림 4 자기 등가 회로를 이용한 기본 설계 모델
Fig. 4 Basic design model using magnetic equivalent circuit

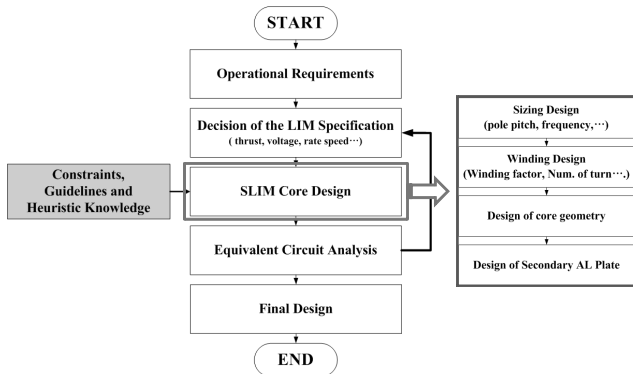
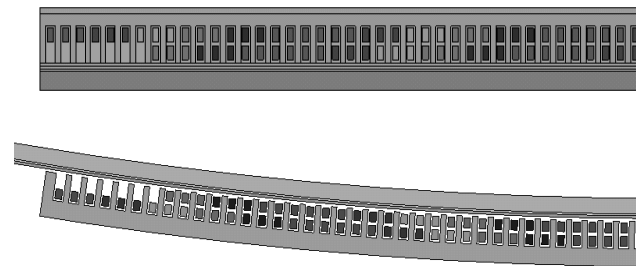


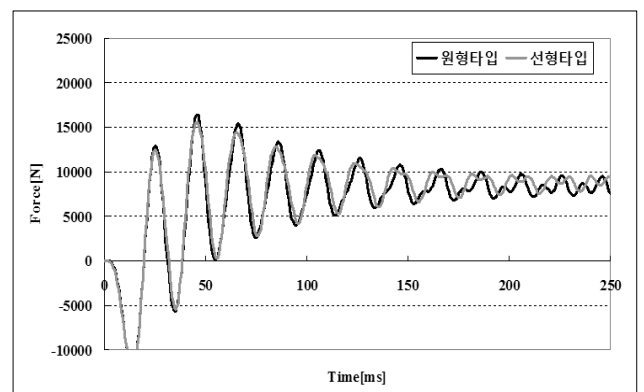
그림 3 선형 유도 전동기의 설계 흐름도
Fig. 3 Design flow of LIM

표 2 설계된 선형 유도전동기의 설계 제원
Table 2 Design specifications of LIM

설계 사양	값	단위
LIM 총 무게	700	kg
슬립	0.198	-
슬롯수	79	-
슬롯 피치	7/9	-
턴 수	4	turn



(a) 선형 유도전동기의 선형방식과 원형방식 모델링



(b) 유한요소법에 의한 추력 특성 비교

그림 5 선형 유도전동기의 2차원 유한요소 해석을 위한 선형방식과 원형방식 모델링 및 추력 특성 결과 비교
Fig. 5 modeling and comparison of thrust force characteristics of linear and arc type for 2d FEM of LIM

표 3 선형 유도전동기의 2차원 유한요소 해석 결과

Table 3 2D FEM analysis results of LIM

		50km/h 순시정격	100km/h 순시정격	100km/h 연속정격	단위
추력		24869.4	13159.9	8422	N
전류 밀도		6.32	5.34	4.27	A/mm^2
상 전류	U	445.1	392.7	314.2	A_{rms}
	V	420.4	394.7	315.8	
	W	465.9	411.4	329.1	
출력		345.4	364.5	233.2	kW
효율		74	76.03	76.00	%
역률		0.68	0.7	0.7	
슬립		0.198	0.198	0.198	
주파수		26	52	52	Hz

2.4 설계 모델의 가속 성능 검증

2차원 유한요소해석법을 통한 추력 특성과 주행 대차의 중량, 그리고 부하조건을 이용하여 설계된 선형 유도전동기의 가속 성능을 검증하였다. 발생된 추력과 부하조건을 이용하여 주행 속도를 시뮬레이션하였으며 시간에 대한 주행 속도의 변화를 고려하여 목표 도달속도까지의 주행거리를 계산하였다. 가속 성능의 검증에 사용된 식은 다음과 같다.

$$F = F_E - F_L = ma \tag{4}$$

$$F = m \frac{dv}{dt} \tag{5}$$

$$\frac{1}{m} \int_0^t F dt = \int_0^t dv = v \tag{6}$$

$$S = \int_0^t v dt \tag{7}$$

운동계 방정식에 대하여 시뮬레이션을 하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하였다. 순시 정격 운전으로 가속하는 경우, 최대 목표속도까지의 도달시간은 약 10.938초이며, 도달거리는 약 193m가 되므로 주어진 가속 성능 조건을 만족한다. 그림 6과 7은 설계된 선형 유도전동기의 가속 성능에 대한 시뮬레이션과 그 결과를 나타낸다.

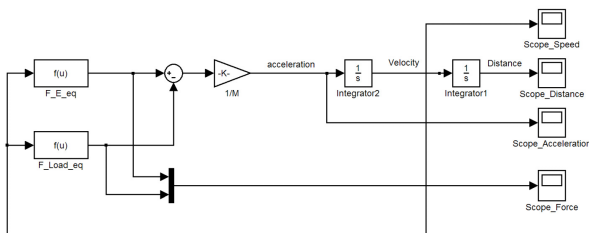
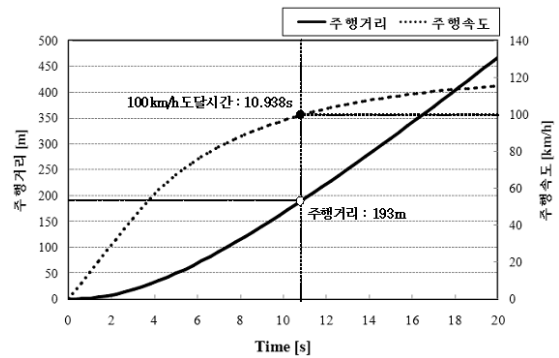
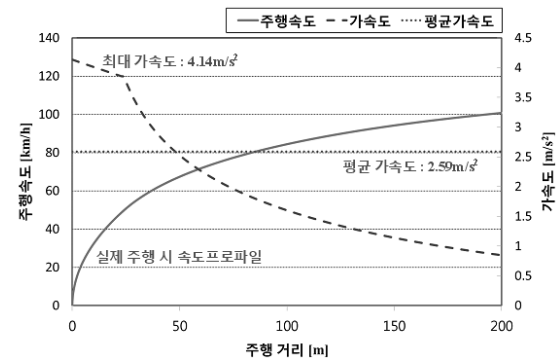


그림 6 선형 유도전동기의 가속 성능 시뮬레이션
Fig. 6 Accelerating ability simulation of LIM(Simulink)



(a) 시간에 따른 주행 거리 및 주행 속도



(b) 주행 거리에 따른 속도 및 가속도

그림 7 선형 유도전동기의 가속 성능 시뮬레이션 결과
Fig. 7 Accelerating ability simulation results of LIM

3. 결론

본 논문에서는 집진계 시험기용 주행 대차의 추진에 이용되는 선형 유도전동기의 가속 성능을 고려한 설계를 수행하였다. 속도 대 거리의 프로파일로부터 목표로 하는 출력 특성을 계산하였고 부하조건을 고려하였다. 설계된 선형 유도전동기는 2차원 유한요소해석을 통해서 추력 특성을 계산하였으며 계산된 추력 특성은 가속 성능 검증을 위한 시뮬레이션에 이용되었다. 발생 추력을 통해 시간에 따른 주행 속도의 변화와 주행 거리를 계산하였으며 설계된 선형 유도전동기가 주어진 가속 성능을 만족시킴을 보였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(기초연구사업((구)국가지정연구실사업) No. 2008-0060145)

참고 문헌

[1] 박사훈, 권삼영, “속도 측정 모형 실험 방법을 통한 집진계 성능 분석 연구의 실험 방법 및 효율성에 대한

연구”, 한국철도학회 2008년도 춘계학술대회 논문집, 2008

- [2] Jacek F. Gieras. "Linear Induction Drives", Clarendon Press, Oxford, 1994
- [3] J.Mukolera, G.R.Slemon, "Calculation of pitch torque for an arc-type linear induction motor", Electric power components and systems, 1979

저 자 소 개



함 상 환 (咸相瓌)

1980년 4월 7일생. 2006년 한양대학교 전기공학과 졸업. 2006년 - 현재 한양대학교 전기공학과 석박사통합과정
Tel : (02)2220-0349
E-mail : goodhami@hanyang.ac.kr



조 수 연 (趙修衍)

1983년 1월 22일생. 2008년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2008년~현재 동대학원 전기공학과 석박사통합과정.
Tel : (02)2220-0349
E-mail : chosynet@gmail.com



이 주 (李柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학박). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~2009년 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수. 2009년~현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 정교수.
Tel : (02)2220-0342
E-mail : julee@hanyang.ac.kr