

가속 성능을 고려한 경전철용 선형 유도전동기 설계

Design of Linear Induction Motor Considering Accelerating Performance for Light Rail Transit

조수연* 김광수* 함상환* 이형우** 이 주†
Su-Yeon Cho Kwang-Soo Kim Sang-Hwan Ham Hyung-Woo Lee Ju Lee

ABSTRACT

A linear induction motor have advantages for reducing mechanical frictions and noises because it has thrust force by induced torque instead of friction force between rail and wheels. An it has additional advantage for reducing volume of bogie frame for light rail transit. The small volume causes the cost of construction down. Recently, researches of linear induction motor for thrust force of the light rail transit have been actively studied. For the rail transit, vehicle is running as follow accelerating and constant speed, finally decelerating speed passing local stops between stations. The light rail transit have only these three patterns of operating. Thus, design of that has different design specifications from others. In this paper, the linear induction motor for the light rail transit was designed considering the goal speed, accelerating time, and accelerating distance for approaching the goal speed. The designed motor was proved that it could meet the requirement of accelerating performance by 2-dimensional finite element method and mechanical dynamics equation.

1. 서 론

선형 유도전동기의 경우, 레일과 바퀴와의 마찰에 의한 추력이 아닌, 바퀴는 가이드로서의 역할만을 하고 선형 유도전동기의 추력을 그대로 이용하므로 기구적인 마찰과 소음이 적은 장점을 가진다. 더불어 대차의 부피를 줄일 수 있고, 부피 감소에 따른 공사비 절약과 같은 추가적인 이득이 있다. 이러한 장점이 부각되어 선형 유도전동기를 추진 동력부로 활용하는 중저속 경전철에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 경전철의 경우, 역과 역 사이를 운행하는데 있어 초반 가속 이후의 중저속의 정속도 운행, 그리고 다음 역 근처에서의 감속운행을 계속적으로 반복하게 된다. 계속적으로 가속, 정속, 감속의 3가지 운행 패턴을 가지므로 일반적인 전동기의 설계와는 다른 요소를 고려하게 된다. 본 논문에서는 역과 역 사이의 거리에 대해서 정속 운행 속도까지의 도달 시간과 도달 거리를 고려하여 선형 유도전동기를 설계하였고, 설계된 선형 유도전동기의 발생 추력을 이용하여 위의 가속 성능을 검증하였다.

2. 설계 목표 사양 및 출력곡선 산정

2.1 설계 목표 사양

† 책임저자 : 정희원, 한양대학교 전기공학과 정교수
E-mail : julee@hanyang.ac.kr
TEL : (02) 2220-0349 FAX : (031) 2220-7111
** 정희원, 한국철도기술연구원 연구원
* 비희원, 한양대학교 전기공학과 박사과정

본 논문에서 설계하는 선형 유도전동기의 경우, 가속 성능 고려하므로 설계 목표 제원은 다음과 같이 거리-속도 프로파일과 유도전동기 성능 제원, 그리고 부하조건이 포함된다.

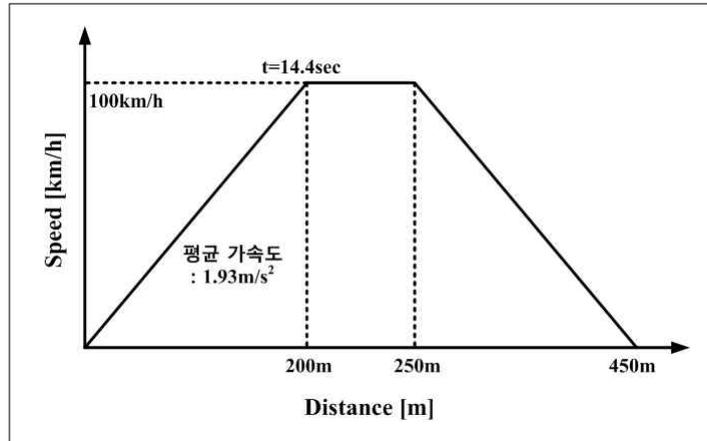


그림 1. 목표속도와 목표속도 도달거리에 대한 거리-속도 프로파일

그림 1는 거리-속도 프로파일을 나타낸다. 본 그래프로부터 최대 목표속도와 최대 목표속도까지의 도달거리를 이용해 가속도를 계산하였으며, 이용된 식은 다음과 같다.

$$2aS = v_2^2 - v_1^2$$

$$a = \frac{1}{2S}v_2^2 - v_1^2 \quad (1)$$

(1)식을 통하여 계산된 가속도는 거리-속도 프로파일의 가속구간에서의 기울기이므로 평균 가속도로 볼 수 있다. 따라서 실제 경전철의 주행 프로파일을 고려하여 최대 가속도를 평균 가속도 대비 2배로 산정하였다. 또한 가속 시간동안 전동기는 순시 정격으로 운전되므로 연속 정격 출력 대비 2배의 순시 정격을 산정하고 순시 정격 운전 시간은 가속시간 근처로 정하였다. 그 외의 나머지 설계 목표 사양은 아래의 표 1에 나타내었다.

표 1. 선형 유도전동기 목표 설계 사양

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

2.2 출력 곡선

선형 유도전동기가 부담하는 총 무게가 $6000kg$ 이므로 최대 가속도를 고려할 때 (2)식을 이용하여 최대 추력을 계산할 수 있다.

$$F_E = m \times a_{max} \quad (2)$$

선형 유도전동기의 경우, 최대 속도의 절반 정도를 기저속도로 가지므로 최대 도달속도가 $100km/h$ 에 대해서 기저속도는 $50km/h$ 로 산정하였다. 기저속도 $50km/h$ 에서 최대 추력 $24000N$ 을 내기 위해서는 출력이 약 $333kW$ 이상이 되어야 하므로, 순시 정격 출력을 $360kW$ 로, 연속 정격 출력을 $240kW$ 로 결정하였다. 연속 정격 및 순시 정격에 대한 출력 곡선 및 설계 포인트를 그림 3에 나타내었다.

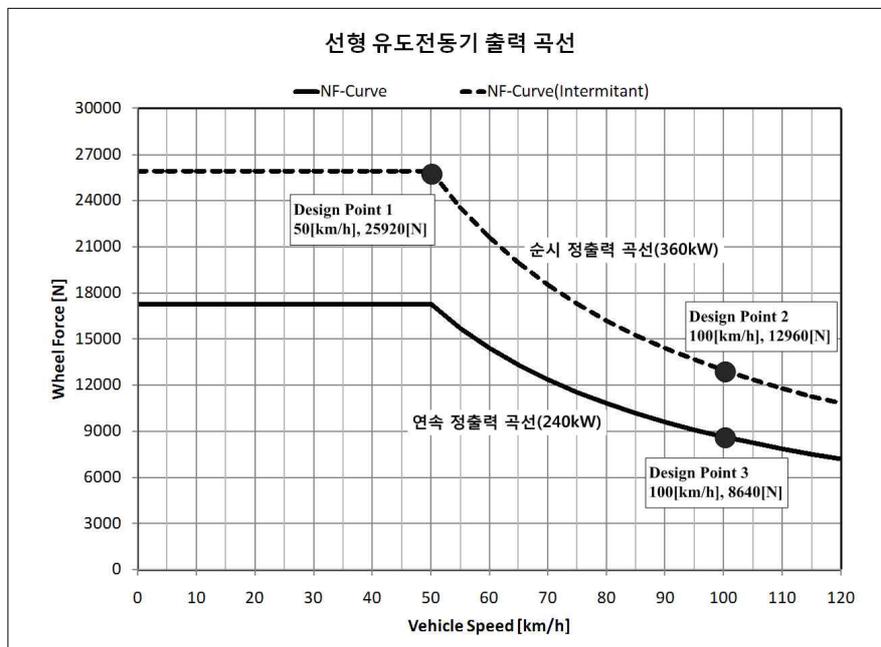


그림 3. 선형 유도전동기의 정격 출력 곡선 및 설계 포인트

3. 부하 조건

선형 유도전동기를 이용한 경전철의 구동 시, 부하 조건으로는 주행 저항력과 공기 저항력, 주행 시의 구배조건을 고려할 수 있다. 경전철의 경우, 구배조건이 없으므로 제외하고 주행 저항력과 공기 저항력만을 고려하였다. 주행 저항력은 경전철의 바퀴가 레일 위로 주행하고 있을 경우의 바퀴와 레일 사이의 마찰력에 의한 저항이며 공기 저항력은 경전철의 대차의 형태와 주행 속도에 따른 공기의 저항에 의한 부하이다.

3.1 주행 저항력

주행 저항력의 경우, 레일과 바퀴와의 마찰력이므로 경전철의 수직항력에 대해서 주행 방식에 대한 계수값을 곱한 형태가 된다. 철 재질의 레일과 바퀴 사이의 주행 저항계수는 $0.0002 \sim 0.001$ 까지의 값을 가지나, 본 논문에서는 0.001 의 주행 저항계수를 이용하였다. 주행 저항력에 대한 식은 식(3)에 나타내었다.

$$F_R = C_{rr} \times m \times g \quad (3)$$

3.2 공기 저항력

공기 저항력은 경전철 대차의 앞부분 형상에 따라 공기 저항 계수가 바뀌게 된다. 또한 공기에 의한 저항이므로 공기 저항력은 대차의 속도의 2승에 비례하고, 공기의 밀도에도 영향을 받는다. 경전철의 앞부분 형상의 경우, 평평한 수직면을 가지므로 공기 저항 계수는 2.1로 결정하였으며, 대차의 전면부 면적은 $7.216m^2$, 공기의 밀도는 $1.21kg/m^3$ 이다. 공기 저항력에 대한 식은 식(4)에 나타내었다.

$$F_{air} = 0.5 \times C_{air} \times \rho \times v^2 \times A \quad (4)$$

3.3 주행속도 - 부하 곡선

총 부하는 주행 저항력과 공기 저항력의 합이다. 공기 저항력이 속도에 대해 변화하므로 부하곡선은 일정하지 않고 주행속도에 따라 달라진다. 주행속도 대 부하에 대한 곡선은 그림 4과 같다.

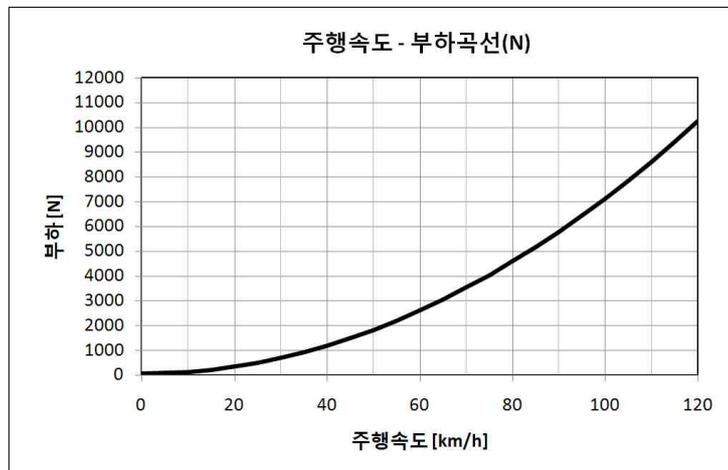


그림 4. 선형 유도전동기의 주행속도 - 부하 곡선

4. 선형 유도전동기 설계

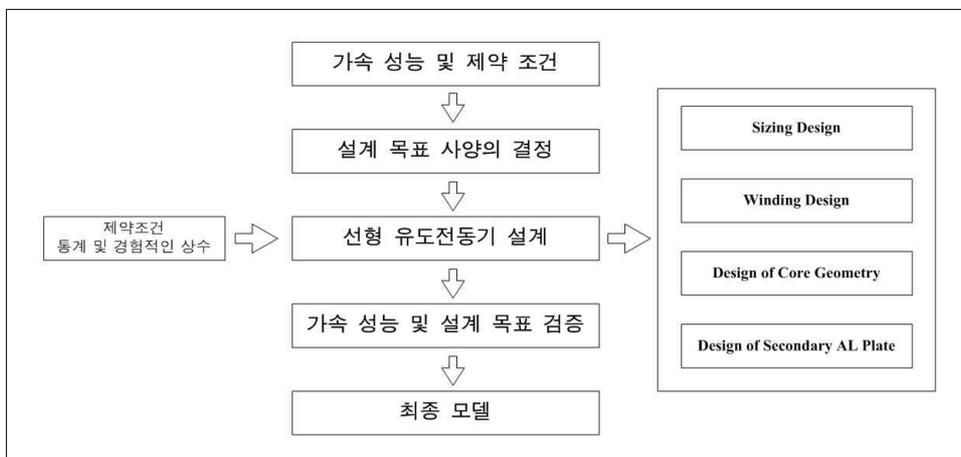


그림 5. 선형 유도전동기의 설계 흐름도

선형 유도전동기 설계 흐름도를 그림 5에 나타내었다. 설계 사양으로부터 사이즈 설계, 권선 설계, 1차측 고정자 설계, 2차측 리액션 플레이트 설계 순으로 진행된다.[1] 본 논문에서 설계하는 선형 유도전동기의 경우, 순시 정격 운전 시간이 짧으므로 전동기 설계는 연속 정격 운전에 대한 설계 사양을 만족하도록 설계하였다.

5. 2차원 유한요소해석을 통한 출력 특성 분석

선형 유도전동기의 2차원 유한요소해석 시 정상상태 해석결과를 보기 위해서는 긴 해석시간이 요구된다. 따라서 1차측 고정자의 이동거리가 길어져야 되므로 해석모델의 사이즈가 커지게 되는 단점을 가진다. 기존에 진행되었던 연구의 결과로서 그림 6은 선형 타입과 원형 타입의 결과 비교를 위해 간략화된 해석 모델을 나타내며 그림 7은 원형 타입과 선형 타입 해석모델에 대한 결과를 비교한 것으로 결과값이 서로 유사한 것을 알 수 있다.[2]

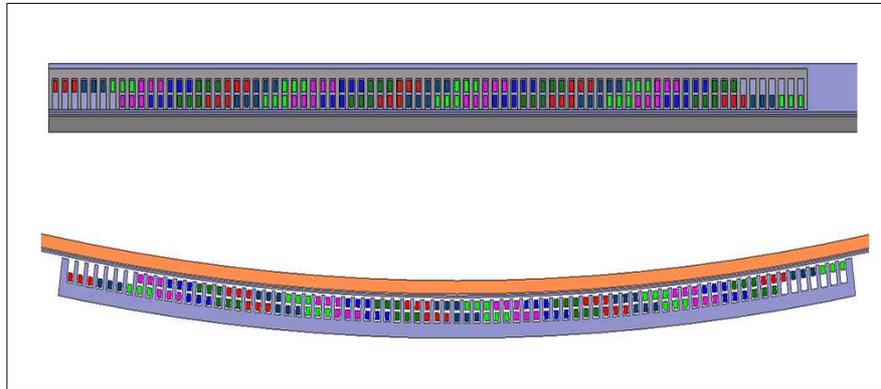


그림 6. 선형 타입 해석모델(위)과 원형 타입 해석모델(아래)

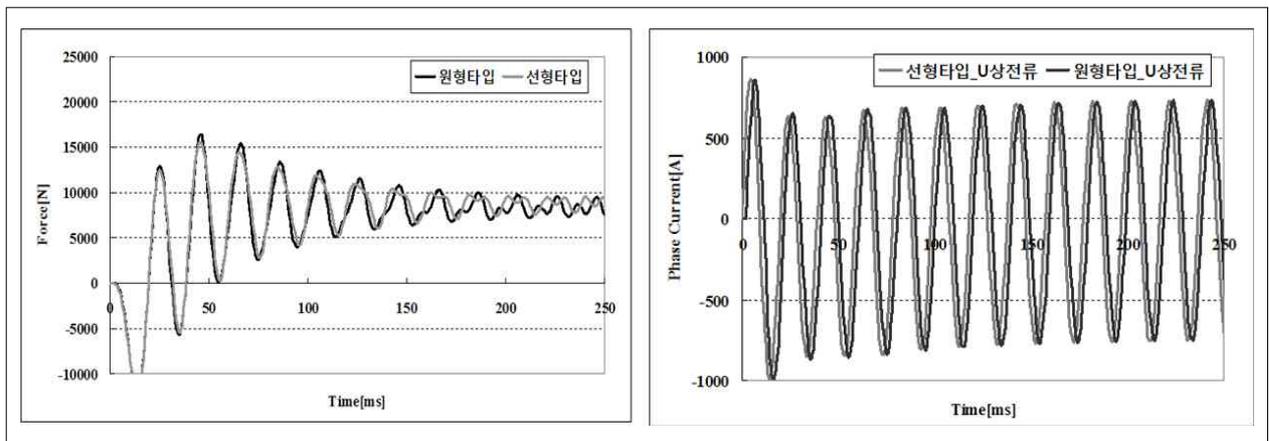


그림 7. 간략화된 해석모델에 대한 선형 타입과 원형 타입의 해석결과 비교(좌: 추력, 우: 전류)

이러한 결과에 근거하여 본 논문에서 설계된 선형 유도전동기에 대해서는 원형 타입의 해석모델을 이용하여 해석하였다. 전동기 출력곡선에 나타난 설계 포인트 1~3에 대해서 2차원 유한요소해석법을 통한 특성 해석 결과로 추력 및 전류, 효율, 출력, 역률 등의 출력 특성을 계산하였고, 결과는 다음 표 2에 나타내었다. 설계된 선형 유도전동기의 경우, 100km/h의 목표속도까지의 가속구간에서는 순시 정격 출력(360kW제한)을 내고 목표속도 도달 이후에는 정속 운전이므로 연속 정격(240kW제한)으로 동작하게 된다.

표 2. 설계 포인트 1~3에서의 2차원 유한요소해석법을 통한 특성 해석 결과

	설계포인트 #1 50km/h 순시정격	설계포인트 #2 100km/h 순시정격	설계포인트 #3 100km/h 연속정격
추력[N]	24869.4	13159.9	8422
속도[m/s]	13.89	27.78	27.78
상전류[A_{rms}]	445.1(U상)	392.7(U상)	314.2(U상)
	420.4(V상)	394.7(V상)	315.8(V상)
	465.9(W상)	411.4(W상)	329.1(W상)
전류밀도[A_{rms}/mm^2]	6.05	5.34	4.27
출력[kW]	345.4	364.5	233.2
효율[%]	74	76.03	76.00
역률	0.68	0.7	0.7
슬립	0.198	0.198	0.198
전원주파수[Hz]	26	52	52

6. 설계 모델의 가속 성능 검증

2차원 유한요소법을 통한 해석으로 구한 출력 특성과 선형 유도전동기가 부담하는 경전철 대차의 중량, 그리고 주행속도 대 부하곡선을 이용하여 설계된 선형 유도전동기가 주어진 가속 성능을 만족하는지를 검증하였다. 발생 추력과 부하를 이용해 주행속도를 시간에 따라 계산하였고, 시간에 대한 주행속도의 변화를 이용하여 목표 속도까지의 주행거리를 계산하였다. 가속 성능 검증에 이용된 운동계 방정식은 식(5), (6)과 같다.

$$F = F_E - F_L = ma$$

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

$$\frac{1}{m} \int_0^t F dt = \int_0^t dv = v \quad (5)$$

$$S = \int_0^t v dt \quad (6)$$

운동계 방정식을 풀기 위하여 Matlab/Simulink를 이용하였으며 블록도는 그림 8과 같다.

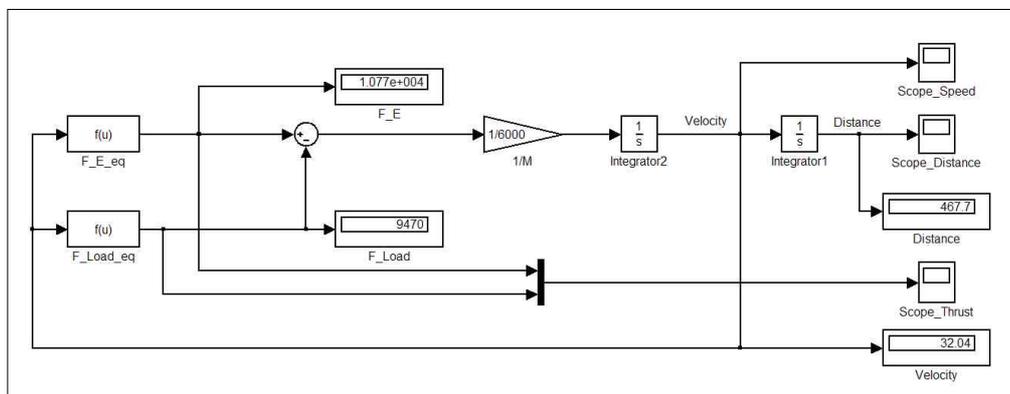


그림 8. 선형 유도전동기 가속 성능 검증을 위한 Matlab/Simulink 블록도

순시 정격 345kW로 가속하는 경우, 최대 목표속도 100km/h까지 가속하는데 걸리는 시간은 약

10.938초이며, 도달거리는 약 193m가 된다. 따라서 주어진 설계사양의 가속 성능을 만족한다. 그림 9는 운동계 방정식을 이용하여 계산된 설계된 선형 유도전동기의 가속 성능에 대한 검증 결과로 최대 목표 속도에 도달하는데 걸리는 시간과 목표속도에 도달하는 데까지 이동한 거리를 나타낸다.

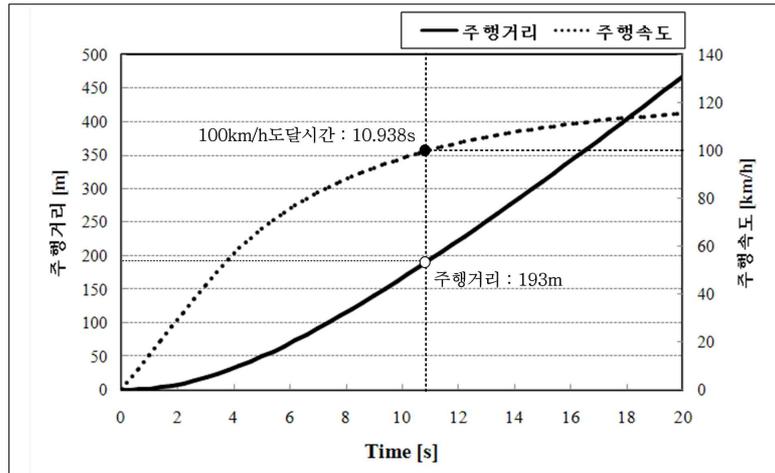


그림 9. 선형 유도전동기의 가속 성능 검증 결과 그래프

7. 결 론

본 논문에서는 경전철용 선형 유도전동기의 설계에 있어 가속 성능에 주안점을 두고 설계 과정을 진행하였다. 시간-속도에 대한 주행 프로파일로부터 목표로 하는 출력곡선을 계산하고, 중량부하 및 주행 부하를 부하 조건으로 고려함으로써 선형 유도전동기의 가속 성능을 고려하였다. 설계된 선형 유도전동기는 2차원 유한요소해석법을 통하여 기저속도와 최대속도에서의 발생 추력 및 효율, 역률, 출력 등을 계산하였고, 이러한 설계된 모델의 출력 특성에 관한 유한요소해석 결과는 설계 사양의 가속 성능을 재 검증하는데 이용되었다. 가속 성능의 검증을 위하여 운동계 상태방정식이 이용되었고, Matlab/Simulink를 이용하여 계산하였다. 발생된 추력을 입력으로 하여 시간에 따른 주행 속도의 증가와 주행 거리를 관찰하였으며 설계된 선형 유도전동기의 경우, 주어진 설계 사양의 가속 성능을 만족하였다.

본 논문에서 보인 전동기 설계에 대한 부하조건 계산 및 출력 곡선의 산정, 그리고 결과에 대한 검증의 설계 방법들은, 부하 조건과 출력 특성이 민감한 설계 사양으로 작용하는 견인용 전동기 설계에 두루 적용될 수 있을 것이라 예상된다.

8. 감사의 글

본 연구는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력양성사업의 연구결과입니다.

참고문헌

1. JACEK F. GIERAS, "Linear Induction Drives", CLARENDON PRESS · OXFORD, 1994
2. 함상환, 원성홍, 이성구, 조수연, 김윤성, 이주, "회전기 타입의 시험기가 LIM의 추력 특성에 미치는 영향," 2008년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집