

전차선로-집전계 주행시험기용 리니어 추진시스템 설계

(Design of the Linear Propulsion System of a High-Speed Dynamic Tester for Catenary-Current Collection)

권삼영* · 이 주

(Sam-Young Kwon · Ju Lee)

요 약

본 논문은 철도에 사용되는 전차선로-집전계 주행시험기용 고속 리니어 추진시스템의 설계를 제안한다. 여러 가지 다양한 추진시스템 중에서 요구사항을 만족하며 짧은 구간에 높은 가속력을 제공할 수 있는 영구자석형 선형동기전동기를 선택하였다. 설계는 전동기의 특성식과 등가자기회로법을 이용하여 수행하였으며, 유한요소법을 이용하여 이를 검증하였다. 또한 실험계획법을 통하여 추진시스템의 성능에 주요한 영향을 미치는 주 설계인자의 분석을 수행하였다.

Abstract

This paper presents design of the linear propulsion system of a high-speed (200km/h) dynamic tester for catenary-current collection. Among various propulsion systems, a permanent magnet linear synchronous motor is chosen for need of high acceleration force. The design is performed by the equivalent magnetic circuit method and verified by the finite element method. In addition, analysis of the main effects of various design variables for performance of the propulsion system has been done by using simulation-based DOE method.

Key Words : Linear Synchronous Motor, LSM, PMLSM, DOE, Design of Experiment

1. 서 론

철도의 전철화가 꾸준히 증가됨에 따라 (현재 49[%]에서 2020년 93[%] 목표), 전력공급의 안정을 위한 전차선로-집전계에 관한 다양하고 많은 연구가 수행되어져 왔다. 특히 한국철도기술연구원

(KRRRI)은 전차선과 팬터그래프 사이의 집전성능을 향상시키기 위한 여러 기술들을 개발하여 왔다. 오늘날 고속철도의 수요가 나날이 커지는 상황에서 고속운전 시 전차선로-집전계의 성능을 정확히 분석하기 위해서는 동일한 운행조건 하에서 시험이 수행 되어져야 한다.

이에 따라 한정된 시험선로(그림 1 : 약 1[km])에서 200[km/h]의 고속을 달성할 수 있는(추후 400[km/h]까지 증속 예정) 주행체의 추진시스템은 반드시 급가속 및 급감속 능력을 보유하고 있어야 한다.

* 주저자 : 한국철도기술연구원 전력연구팀, 책임연구원
Tel : 031-460-5425, Fax : 031-460-5459

E-mail : sykwon@krii.re.kr
접수일자 : 2006년 7월 12일
1차심사 : 2006년 7월 18일
심사완료 : 2006년 8월 2일

전차선로-집전계 주행시험기용 리니어 추진시스템 설계

그러나 기존철도 시스템에서 널리 사용되고 있는 점착구동방식 (Wheel-on-rail)은 급가속을 위한 추진력을 얻기 위해 바퀴와 선로 사이의 커다란 마찰력이 필요하며, 마찰력 증대를 위하여 주행체의 무게를 증가시켜야 하고, 이는 급가속을 어렵게 만드는 요인으로서 다시 작용한다.

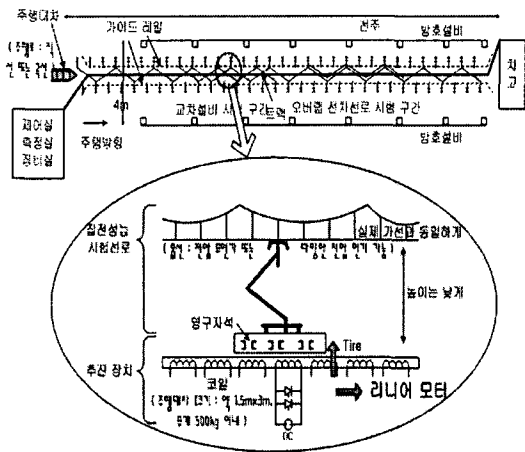


그림 1. 전차선로-집전계 주행시험기 시험선로
Fig. 1. Catenary-current collection run tester

또한 주행체의 속도가 증가됨에 따라 바퀴의 공진 현상이 발생하여 선로와의 마찰력이 감소되므로 추진력 또한 줄어드는 본질적인 단점을 가지고 있다. 따라서 점착구동방식과 같이 마찰에 의하여 추진력을 얻는 시스템은 전차선로-집전계 주행시험기로서 적절하지 않다.

이에 본 논문에서는 많은 추진시스템 중에서 선형전동기를 이용한 추진시스템을 선정하고 설계를 수행하였다. 그림 2에서와 같이, 선형전동기는 일반 회전형 모터와 달리 고정자, 회전자 및 권선이 반으로 잘려서 선로위에 펼쳐 놓인 것과 같다. 동작원리는 회전형 모터와 동일하지만, 선형전동기는 계자부 또는 전기자부의 유한한 길이로 인하여 단부효과를 가지고 있으며, 커다란 공극으로 인해 효율이 낮다. 그러나 선형전동기는 직선운동을 요구하는 응용분야에 있어서 스크류, 체인, 기어박스 등과 같은 부품들의 기계적 마찰로부터 발생하는 진동과 소음의 양이 상당히 적으므로 회전형 모터보다 강

점을 지니고 있다. 또한, 다음과 같은 여러 가지 장점을 가지고 있다.

- (1) 높은 급가속 및 급감속 능력
- (2) 상대적으로 적은 바퀴의 마모량
- (3) 기계적 커플링의 부재로 인한 견고함과 내구성
- (4) 유지보수의 용이성

다양한 선형전동기를 고려하여, 이중 영구자석형 선형동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor : PMLSM)를 선정하였다.

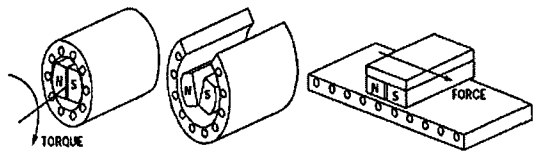


그림 2. 회전기로부터의 선형전동기 개념도(1)
Fig. 2. Linear motor illustration

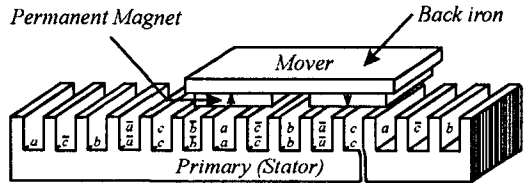


그림 3. 영구자석 이동형 선형동기전동기(1)
Fig. 3. LSM of permanent magnet moving type

PMLSM은 그림 3에서 보여주는 바와 같이 기기 안에 영구자석이라는 자체의 계자원을 가지고 있기 때문에 상대적으로 고효율, 고출력밀도, 높은 안전성 등의 장점을 가지고 있다. 또한 최근 들어 고 에너지 밀도를 갖는 영구자석의 개발 및 제조원가의 하락으로 고속 지상운송 수단으로서 뿐만 아니라 고층 빌딩용 고속 엘리베이터, 서보 및 반송 시스템의 추진 장치로서 많은 연구 검토가 이루어지고 있다.

본 연구에서는 전차선로-집전계의 성능평가를 위한 주행시험기의 요구사항을 고려하여 영구자석형 선형동기전동기의 설계를 수행하고 유한요소법을 통한 전자기력 해석을 통하여 설계결과를 검증하였다. 또한 추진 성능에 영향을 미치는 주설계인자를 실험계획법을 통하여 분석하여 추후 성능향상에 활용코자 하였다.

2. 본 문

2.1 전차선로-집전계 주행시험기의 요구사항

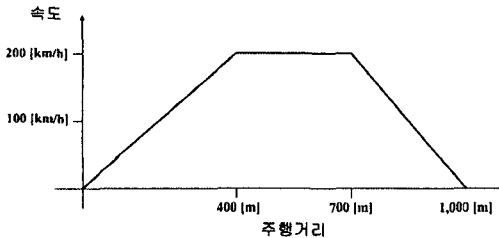


그림 4. 주행속도곡선
Fig. 4. Curve of speed at each location

한정된 시험선로에서 고속주행을 이루기 위해서는 추진시스템이 충분한 가속 및 감속능력을 제공해야 한다. 그림 4에서와 같이 본 시험기의 가속 구간은 400[m]이며, 감속구간은 300[m]이다. 등가속도로 가속 및 감속한다고 가정 시, 주행체의 가속 시간은 14.4초이며, 요구되는 가속도는 최소 $3.858[m/s^2]$, 감속도는 $-5.144[m/s^2]$ 이다. 주행체의 최대하중이 1,000[kg]이므로, 요구되는 추진력은 약 4,000[N]이다. 그러나 본 연구에 사용된 편축식 영구자석형 선형동기전동기는 일반적으로 이동자와 고정자 사이의 흡인력이 전체 추진력의 4~5배에 이른다. 이렇게 발생한 흡인력은 주행체 자체의 하중과 더해져서 차체를 지지하는 바퀴의 베어링 마찰에 영향을 미치게 되며, 추진력을 저해하는 성분으로서 작용한다. 따라서 요구되어지는 추진력을 계산할 경우 이러한 마찰력을 고려하여 추진력을 산정하여야 하며, 계산된 추진력의 4~5배에 이르는 흡인력에 의한 마찰을 반복적으로 계산하여 최종적으로 요구되는 추진력을 정해야 한다. 다음의 표 1에 주행시험기의 요구사항을 제시하였다. 그림 5는 전차선로-집전계 주행시험기의 개념도를 나타낸다. 주행체의 하단부에 영구자석형 선형동기전동기가 있으며, 이동자의 위치검출 및 색선전환을 위한 위치센서와 검출회로가 양 옆에 설치되어 있다.

시험장비 및 팬터그래프는 주행체의 상단부에 설치된다. 추진시스템은 기계적인 바퀴에 의해 지지되

는 구조이며, 공극은 조립오차와 시스템 운행 중 발생 가능한 이물질 침투 등의 사고를 방지하기 위하여 10[mm]로 선정하였다.

표 1. 주행시험기의 추진시스템 요구사항
Table 1. Requirements of traction system of the run tester

사 양	값		
시험주행로 총길이	1,000[m]		
가속구간	400[m]		
정속구간	300[m]		
감속구간	300[m]		
가속도	$3.858[m/s^2]$		
감속도	$-5.144[m/s^2]$		
추진력	6,000[N]		
정속주행속도	200[km/h]		
브레이크 시스템	와전류제동 및 회생제동		
중량	주행체	1,000[kg]	600[kg]
	부하		400[kg]

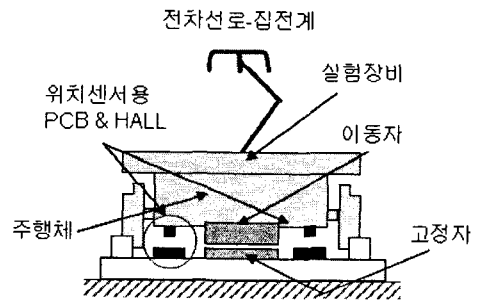


그림 5. 전차선로-집전계 주행시험기
Fig. 5. Truck of the catenary-current collection run tester

2.2 PMLSM의 이론 및 설계

2.2.1 PMLSM의 이론

PMLSM은 기존의 회전형 동기 전동기와 동일한 구동 원리를 가지며 회전형에서 토크가 리니어에서는 추력이 되는 것 뿐이다. 그러나 기존의 회전형 영구자석형 동기 전동기와는 달리 상대적으로 큰 공극을 가지며, 직선형으로 펼쳐진 유한한 길이의 구조로 인해 회전기와는 다른 특성들이 존재한다. 따

라서 LSM 설계 시에는 회전형 동기 전동기의 설계 시 고려해야 할 사항들 외에도 선형으로 변환되면서 생긴 비대칭으로 나타나게 된 수직력과, 입구단과 출구단으로 야기되는 단부효과, 및 이동자의 지지구조 등에 대하여 추가적으로 고려해야 한다.

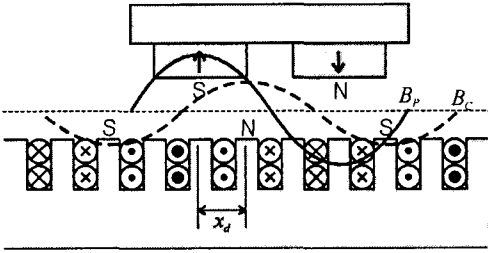


그림 6. PMLSM의 공극자속밀도
Fig. 6. Flux density in air-gap of PMLSM

그림 6은 PMLSM의 공극자속밀도를 나타낸다. 보는 바와 같이, 영구자석에 의한 자속과 전기자에 의한 자속이 존재하며, 공극자속밀도를 통해 추력식을 유도할 수 있다. 일반적으로 공극에서의 자속밀도 분포가 가능한 한 정현적인 때 좋은 특성을 나타내므로 설계시 이를 고려하여야 한다. PMLSM의 공극 자속 밀도 B_g 는 식 (1)과 같이 고정자의 전기자 전류에 의한 공극 자속 밀도와 이동자 측에 붙어 있는 영구자석에 의한 공극 자속 밀도의 합으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} B_p &= B_{pm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \\ B_c &= B_{cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} (x - x_d)\right) \\ B_g &= B_p + B_c \end{aligned} \quad (1)$$

이때 미소체적에 축적되는 자기 에너지는

$$\begin{aligned} dW_g &= \frac{B_g^2}{2\mu_0} dv = \frac{1}{2\mu_0} (B_p + B_c)^2 dv \text{ 이고,} \\ W_g &= \int_v dW_g \quad dv = \frac{phl_g}{2\mu_0} \int_0^{\pi} (B_p + B_c)^2 dx \\ &= \frac{V_g}{4\mu_0} (B_{pm}^2 + B_{cm}^2 + 2B_{pm} B_{cm} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right)) \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 PMLSM의 발생 추력은 식 (3)과 같으며, 그림 7에서 보이는 바와 같이 반주기가 τ 일 때 부하 각 90도에서 최대임을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{\partial W_g}{\partial x_d} = \frac{\pi V_g}{2\tau\mu_0} B_{pm} + B_{cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \\ &= F_{max} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \end{aligned} \quad (3)$$

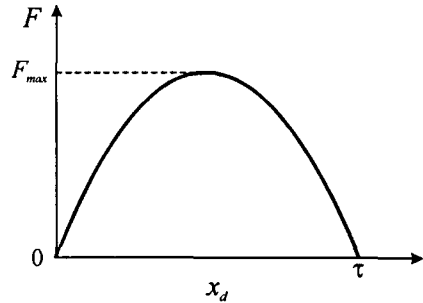


그림 7. PMLSM의 발생추력
Fig. 7. Thrust force curve of PMLSM

2.2.2 PMLSM의 설계

선형동기전동기 특성식 및 등가자기회로법에 따라 전차선로-집전계 주행시험기의 요구사양을 만족하는 고속 영구자석형 선형동기전동기를 설계하였으며, 표 2에 제시하였다.

정격출력은 93[kW], 정격 주파수는 197[Hz], 공극은 10[mm]이며, 횡방향 적층길이는 390[mm]이다. 각각의 영구자석은 Nd-Fe-B 재질로서, 주행체 이동자의 하단에 수직으로 부착되어 있다. 고정자에 사용된 적층류소강판은 시스템의 출력을 향상시키지만, 이동자에 있는 영구자석과의 흡인력에 의하여 마찰력을 증대시키고 추력을 감소시키는 영향을 미친다.

영구자석의 개수는 단부효과 등을 고려하여 8극으로 선정하였으며, 설계된 선형동기전동기의 단면도를 그림 8에 도시하였다. 그림에서 보는 바와 같이 제작공정의 편리성과 커다란 공극 때문에 슬롯은 완전개방형으로 하였다. 이러한 완전개방형 슬롯 구조는 영구자석의 모서리와의 상호작용으로 인하여 추력리플을 야기할 수 있으며, 이에 대한 설계인자의 분석을 다음 절에서 다룬다.

표 2. 영구자석형 선형동기전동기의 설계사양
Table 2. Design specifications of permanent magnet type LSM

	사 양	값
시스템	정격출력	93[kW]
	기동추력	6,000[N]
	동작 주파수	197[Hz]
고정자	공극	10[mm]
	정격전류	254[A]
	극간격	141[mm]
	상 수	3[phase]
	치폭	23[mm]
이동자	적층길이	390[mm]
	영구자석의 재질	Nd-Fe-B
	영구자석의 개수	8[ea]
	잔류밀도	1.23[T]
	영구자석의 크기	94×390×12[mm]

2.3 유한요소 정식화

주어진 주행시험기의 요구사양에 맞추어 설계된 영구자석형 선형동기전동기의 성능을 검증하기 위하여 유한요소법을 사용한 모의실험을 수행하였다.

변위 전류를 무시한 준-정상상태에서 자기벡터 포텐셜 \vec{A} 를 이용한 PMLSM의 지배방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (4)$$

여기에서 \vec{J}_o 는 1차축 권선의 전류밀도, \vec{J}_m 은 등가자화 전류밀도, μ 는 재질의 투자율이다.

또한 \vec{J}_o 와 \vec{J}_m 은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\vec{J}_o = \frac{N}{S} I_o, \quad \vec{J}_m = \frac{1}{\mu_o} \nabla \times \vec{M} \quad (5)$$

여기서 N은 직렬 턴 수, S는 슬롯 면적, \vec{M} 은 영구자석의 자화밀도, μ_o 는 공기 중의 투자율이다.

해석영역을 1차 삼각형 요소로 분할하고 근사해로 가정 한 후, 식 (4)에 가중잔차법의 하나인 Galerkin 법을 적용하여 계 방정식을 구하면 식 (6)과 같다.

$$[SS^{(e)}]\{A^{(e)}\} + [SC^{(e)}]\{I_o^{(e)}\} - [J_m^{(e)}] = \{R^{(e)}\} \quad (6)$$

$$\text{여기에서 } SS_{ij}^{(e)} = \frac{\nu}{4\Delta^{(e)}} (c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je}),$$

$$SC_{ij}^{(e)} = -\frac{\pm N\Delta^{(e)}}{3S} \text{ 이다.}$$

본 논문에서는 다음 식 (7)과 같이 맥스웰응력법을 사용하여 흡인력과 추진력을 구했다.

$$f_n = \frac{1}{2\mu_o} (B_n^2 - B_t^2), \quad f_t = \frac{1}{\mu_o} (B_n B_t) \quad (7)$$

식 (7)에서 B_n 은 적분 면에 대해서 수직성분의 자속밀도이고, B_t 는 접선성분의 자속 밀도이다.

2.4 해석 결과

그림 9는 유한요소법을 이용하여 해석한 PMLSM의 자속선도를 나타낸다. 설계된 선형동기전동기의 영구자석 개수는 8개이지만, 해석 모델의 크기를 줄임으로써 동일 시뮬레이션 시간과 메모리에 대하여 좀 더 많은 mesh수를 확보할 수 있고, 그에 따라 더 정확한 해석을 수행할 수 있으므로, 한 극쌍만을 해석 모델로 정하였다. 해석결과로부터 알 수 있듯이, 영구자석의 자력이 고정자의 전류에 의한 자력보다



그림 8. 영구자석형 선형동기전동기의 설계단면도
Fig. 8. Longitudinal sectional view of permanent magnet type LSM

전자선로-집전계 주행시험기용 리니어 추진시스템 설계

훨씬 더 강함을 알 수 있으며, 자석이 쇠교하지 않는 지점에서는 유효추력을 발생하지 못하므로 섹션전환의 기술을 이용하여 그 지점에 대한 전력공급을 중단해야 함을 알 수 있다.

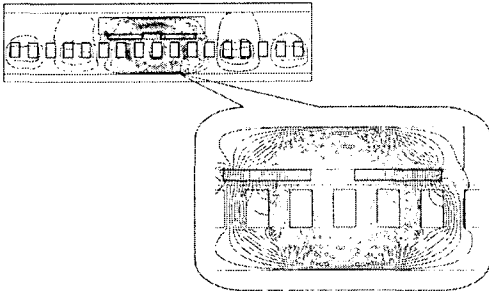


그림 9. 해석 모델의 자속분포도
Fig. 9. Flux distribution of the analysis model

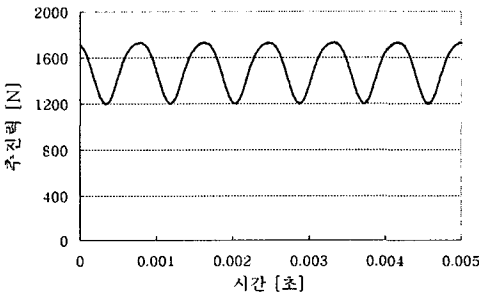


그림 10. PMLSM의 추진력
Fig. 10. Thrust force of PMLSM

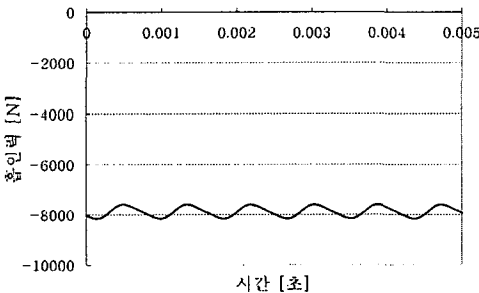


그림 11. PMLSM의 흡인력
Fig. 11. Attraction force of PMLSM

그림 10과 그림 11에 주행시험기의 추진력과 흡인력의 해석결과를 도시하였다. 동기기의 최대부하각인 전기각 90도에서 최대추력을 나타내며, 평균추력은

약 1,500[N]이다. 8극(4극쌍)의 경우 $1,500[N] \times 4 = 6,000[N]$ 을 발생시키므로, 초기의 주행시험기의 요구사양을 만족한다.

또한 설계 시 예상한 바와 같이 6고조파인 디텐트력(Detent force : 회전기에서의 코깅 토크)이 존재하며, 그 크기는 250[N]으로서, 전체 평균 추력의 16[%]를 차지한다. 흡인력의 경우, 초기 설계 시 고려한 바와 같이 추력의 약 5배의 크기를 나타낸다. 이러한 흡인력은 마찰력으로서 작용함으로 미리 고려하여 설계하여야 한다.

2.5 설계 주요인자 분석

2.5.1 실험계획법

선형전동기 특성식 및 등가자기회로법을 이용하여 PMLSM의 설계를 수행하였으며, 유한요소법을 이용하여 그 성능을 검증하였다. 그러나 더 나은 성능을 얻기 위해서는 여러 가지 설계식 및 방법뿐만 아니라, 성능에 주요한 영향을 미치는 설계인자를 분석하는 것이 중요하다. 기존에는 여러 가지 경우의 설계를 통한 성능과약의 결과로부터 주요 인자를 구할 수 있었으나, 최근에는 수치해석의 빠른 발달로 인하여, 실험과 동일한 결과를 모의실험을 통하여 얻을 수 있으므로 각각의 경우에 대한 실험장치의 설치가 요구되어지지 않는다.

더 많은 설계변수를 사용 할수록 더 정확한 분석을 이룰 수 있으므로 PMLSM의 성능향상을 위한 설계인자 검토에는 가능한 한 많은 설계변수를 사용하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 기존의 설계방법 등을 고려하여 다음과 같이 다섯 가지 설계변수를 선정하였다.

- (1) 영구자석의 두께(Magnet height)
- (2) 영구자석 대 극간격의 비(Magnet ratio)
- (3) 영구자석의 모서리 제거율(Magnet shape)
- (4) 치 모서리 제거율(Teeth shape)
- (5) 치 폭 대 치간격의 비(Teeth length)

설계변수(n)와 각각의 가능한 설계변수의 값(m)이 증가하면 할수록 해석의 수도 증가하며 (m^n), 각

각의 설계변수들간의 교호작용이 발생할 수도 있다. 따라서 모든 경우의 설계모델을 구하여 해석하는 것은 쉬운 일이 아니며, 해석 시간 또한 상당히 오래 걸린다. 그러므로 모의실험의 경우의 수를 줄이고, 각각의 설계인자들이 얼마나 설계목적에 민감한지를 이해하기 위하여 본 연구에서는 모의실험을 기반으로 하는 실험계획법을 적용하였다[10]. 본 방법은 다음과 같은 논리적인 가정들을 통하여 실제 설계 제약조건에 있어서의 설계변수들을 조합하여 적절한 모의실험을 수행하는 방법이다.

- (1) 설계변수들간의 영향은 무시할 수 있다.
- (2) 설계 목적과 변수들간에는 선형성을 가지고 있다.

그림 12와 그림 13은 설계 성능목표인 추력향상과

디텐트력 저감에 관한 실험계획법의 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 다섯 가지 설계변수 가운데 (2) 영구자석 대 극간격의 비, (5) 치 폭 대 치간격의 비; 두 가지의 설계변수가 추진력과 디텐트력에 주요한 인자이며, 그 값이 커질수록 추진성능에 긍정적인 영향을 미침을 알 수 있다.

그림 14와 그림 15는 설계변수 상호간의 교호작용을 분석한 그림이다. 보는 바와 같이 추진성능에 가장 큰 영향을 미치는 (2), (5)의 설계인자 간의 교호작용이 크지 않음을 알 수 있으며, 이로부터 주 설계인자의 값을 변경해도 상호 무방함을 알 수 있다. 따라서 분석결과로부터 전차선로-집전계 주행시험기용 PMLSM의 설계 시 (2), (5)항을 깊이 고려하여 설계에 적용하여야 한다.

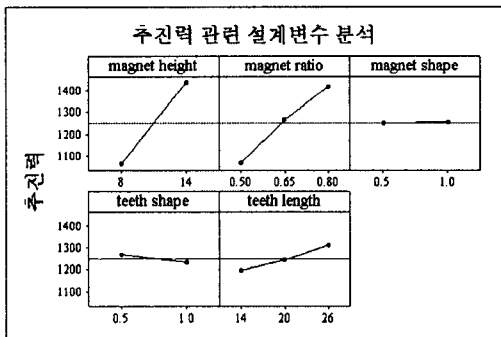


그림 12. 추진력에 대한 설계변수분석
Fig. 12. Traction force variations according to the design parameters

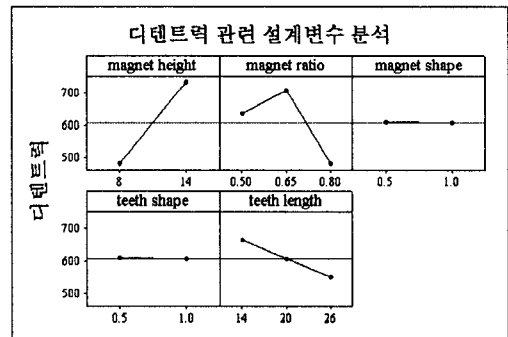


그림 13. 디텐트력에 대한 설계변수분석
Fig. 13. Detent force variations according to the design parameters

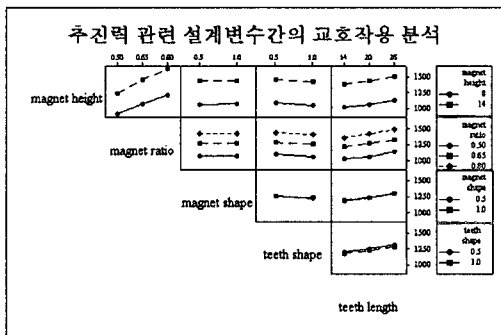


그림 14. 추진력에 대한 설계변수간의 교호작용분석
Fig. 14. Traction force influence cross-comparisons between the design parameters

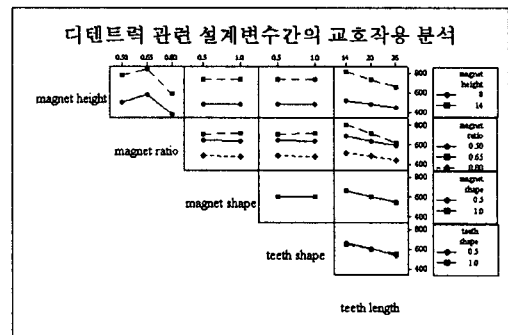


그림 15. 디텐트력에 대한 설계변수간의 교호작용분석
Fig. 15. Detent force influence cross-comparisons between the design parameters

3. 결 론

본 연구에서는 현재 한국철도기술연구원에서 구축을 기획중인 전차선로-집전계 주행시험기에 대하여 영구자석형 선형동기전동기를 이용한 리니어 추진시스템에 대한 설계를 모터 특성식과 등가자기회로법을 이용하여 수행하였고, 산정된 설계를 유한요소법을 이용하여 검증하였다. 해석결과를 통하여 주행시험기에서 요구하는 높은 가속력을 만족할 만한 추력을 제공하는 리니어 추진시스템의 설계가 제대로 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 또한 설계 특성식으로부터는 미리 파악할 수 없었던 디텐트력과 같은 현상과 정량적 크기에 대하여 고찰할 수 있었으며, 추진시스템의 성능에 큰 영향을 주는 주 설계인자들을 실험계획법을 통하여 분석함으로써, 영구자석 대 극간격의 비, 치폭 대 치간격의 비가 성능에 미치는 영향을 파악하였다.

References

[1] H-W. Lee, K. Kim and J. Lee, "Review of Maglev Train Technologies", IEEE Trans on Magnetics, vol.42, No.7, pp.1917-1925, July 2006.
 [2] Jacek F.Gieras and Zbigniew J.Piech, "Linear Synchronous Motors", CRC Press, 2000.
 [3] L. Honds and K. H. Meer, "A linear D.C. motor with permanent magnets", Philips Tech. REV.(Netherlands), Vol. 40, No. 11-12, pp. 329-337, 1982.
 [4] Y. Akiama, "Current situation and problems of industrial linear DC motors", Vol. MAG-84-97, pp. 9-18, 1984.

[5] J. Lee, H.-W. Lee, Y. Chun, M. Sunwoo, and J. Hong, "The performance prediction of controlled-PM LSM in various design schemes by FEM", IEEE Trans on Magnetics, vol.36, No.4, pp.1902-1905, July 2000.
 [6] Thornton, R.D, "Linear Synchronous Motor Design", Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference, pp.1555-1560, May, 2005.
 [7] 전자장수치해석기법 조사전문위원회, "기술조사보고 제3호 : 전자장수치해석 기법현황", 대한전기학회, 1992.
 [8] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사, 1986.
 [9] Ju Lee, "3-Dimensional FEM Analysis of Controlled-PM Linear Synchronous Motors", Ph.D Thesis, Kyushu University, 1996.
 [10] F. Gillon and P. Brochet, "Shape optimization of a permanent magnet motor using the Experimental design method," IEEE Trans. On Magnetics, Vol.35, No.3, May 1999.

◇ 저자소개 ◇

권삼영 (權三榮)

1962년 8월 22일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1997년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.

이 주 (李 柱)

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 시스템 정보과학연구과 졸업(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수.