

# 전차선로-집전계 주행시험기의 LSM 추진장치의 타당성 검토 시뮬레이션

## Feasibility Study through Simulation of LSM Propulsion System for the Catenary-current Collection Run Tester

권상영† · 이형우\* · 박현준\* · 이 주\*\*

Sam-Young Kwon · Hyung-Woo Lee · Hyunjune Prak · Ju Lee

### Abstract

In this paper, as a conceptual design of the catenary-current collection run tester which is planning to be constructed by KRRI, the feasibility study is described. In this study, reviews to determine the propulsion linear motor rating based on the target distance-speed curve through various simulation of LSM propulsion system were conducted. Moreover, the reviews of simulation results and desirable linear motor specifications are discussed in this paper.

**Keywords :** Catenary-Current Collection(전차선로-집전계), LSM(선형동기모터), Propulsion(추진장치)

## 1. 서론

전차선로-집전계 주행시험기란 이름은 좀 생소할 것이다. 그럴 수밖에 없는 것이 철도기술연구원에서 구축하려고 추진중인 장치에 대하여 임의로 붙인 이름이기 때문이다. 이 시험기는 팬터그래프만을 탑재한 주행대차가 축소 스케일의 전차선로가 가설된 주행로를 주행하면서 전차선로-팬터그래프 사이 상호작용을 실제계처럼 모의할 수 있도록 하는 시험기로서 그림 1로 설명할 수 있다.

본 시험기를 구현하기 위해서는 여러 장치와 기술이 채용되어야 하지만 그중에서 가장 핵심적이고 중요한 것은 이동체의 추진장치이다. 본 시험장치는 짧은 구간에서 고속까지 도달하여야 하는 관계로 높은 가속력을 필요로 한다. 이를 실현할 수 있는 기술로는 리니어(Linear) 모터가 가장 적합하고 필수불가결하다. 리니어 모터는 자기부상열차의 추진 기술이기도 하다.

본 논문에서는 전차선로-집전계 주행시험기를 구축하기 위한 구상 및 기획단계에서 필요로 하는 기술적 타당성에 대하여 검토한 내용을 담고 있다. 본 연구에서는 리니어 모

터 중에서 향후 속도 향상(300km/h 이상으로 증속)을 고려하여 선형동기모터(Linear Synchronous Motor : LSM) 방식 채용을 전제로 하였다. 본 연구에서 시험기의 목표 속도와 정격을 만족하기 위하여 필요한 추진 장치 정격과 성능을 이론적 해석과 시뮬레이션을 통하여 검토하고, 이를 피드백하고 재계산하는 과정을 반복하는 등의 타당성 검토 과정을 수행하였으며, 이러한 내용들을 기술한다.

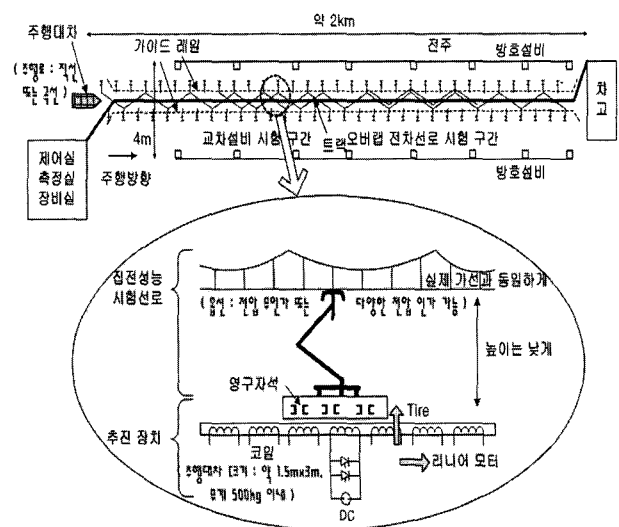


Fig. 1. Catenary-Current collection run tester

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 전력연구팀 책임연구원  
E-mail : sykwon@krrri.re.kr  
TEL : (031)460-5425 FAX : (031)460-5459

\* 한국철도기술연구원

\*\* 한양대학교

## 2. 본 론

### 2.1 주행시험기의 정격 수립

- 최대 속도 : 200km/h(추후 300km/h 이상으로 증속 고려)
- 주행 속도 곡선
- 이동체 최대 하중(대차 무게 + 적재 하중) : 1000kg
- 주행로 : 직선, 1km

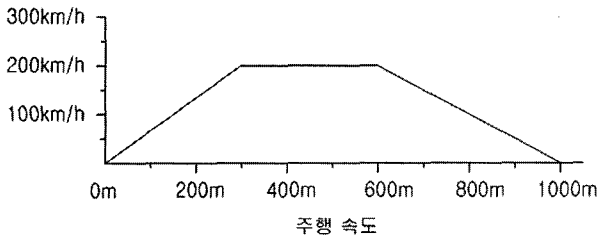


Fig. 2. Desired speed curve of the run tester

### 2.2 LSM 설계 파라미터 및 적용 이론 고찰

LSM은 기존의 회전형 동기 전동기와 동일한 구동 원리를 가지며 회전형에서 토크가 리니어에서는 추력이 되는 것뿐이다. 그러나 기존의 회전형 영구 자석형 동기 전동기와는 달리 상대적으로 큰 공극을 가지며, 직선형으로 펼쳐진 유한한 길이의 구조로 인해 회전기와는 다른 특성들이 존재한다. 따라서 LSM 설계 시에는 회전형 동기 전동기의 설계 시 고려해야 할 사항들 외에도 선형으로 변환되면서 생기게 된 비대칭으로 나타나는 수직력과 입구단과 출구단으로 야기되는 단부효과 및 이동체의 지지구조 등에 대하여 추가적으로 고려해야 한다.

선형 동기 전동기(LSM)는 영구 자석형이 대표적으로 많이 사용되고 있다. 영구 자석을 이용하지 않은 경우는 릴럭턴스를 이용하는 동기형 릴럭턴스 선형 전동기와 자석과 릴럭턴스가 결합된 하이브리드 형태 그리고 영구 자석 대신 계자를 전기자석을 이용하여 구성한 전자석형이 있다. 전자석형의 경우 회전형 전동기의 경우에는 브러시와 슬립링으로 전력을 공급받지만 선형 전동기의 경우는 집전장치 등을 이용하여 공급받을 수 있다. 본 주행시험기는 영구 자석형 선형 동기 전동기 PMLSM(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)를 전제로 하고 있다.

공극의 자속밀도를 통해 토크 식을 유도 할 수 있다. 공극에서의 자속밀도 분포가 가능한 정현적일 때 좋은 특성을 나타낸다. PMLSM의 공극 자속 밀도  $B_g$ 는 다음의 식 (1)과 같이 1차 측 고정자의 전기자 전류에 의한 공극 자속 밀도와 이동자 측에 붙어 있는 영구자석에 의한 공극 자속 밀도의 합으로 나타 낼 수 있다.

$$B_p = B_{pm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)$$

$$B_c = B_{cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} (x - x_d)\right)$$

$$B_g = B_p + B_c \tag{1}$$

차량(대차)이 주행하기 위해서는 차체에서 추진력을 발생시켜야 한다. 이는 에너지의 입력이 요구되는 동작이다. 다음 그림은 PMLSM의 발생 추력을 나타내고 있으며 PMLSM의 발생 추력은 반주기가 0에서  $\tau$  일 때  $x_d$  지점에서 최대 추력을 나타낸다.

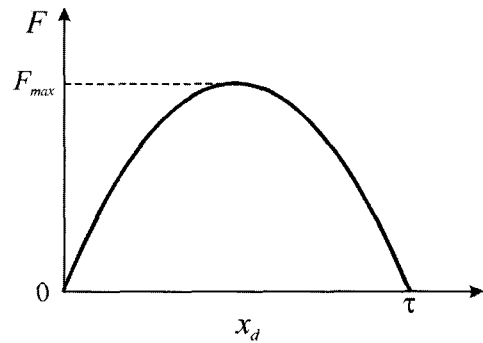


Fig. 3. Thrust force of a PMLSM

미소체적에 축적되는 자기 에너지는

$$dW_g = \frac{B_g^2}{2\mu_0} dv = \frac{1}{2\mu_0} (B_p + B_c)^2 dv \tag{2}$$

$$\begin{aligned} W_g &= \int_v dW_g \quad dv = \frac{phl_g}{2\mu_0} \int_0^\pi (B_p + B_c)^2 dx \\ &= \frac{V_g}{4\mu_0} (B_{pm}^2 + B_{cm}^2 + 2B_{pm} B_{cm} \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right)) \end{aligned} \tag{3}$$

따라서 PMLSM에서의 발생 추력은 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} F &= \frac{\partial W_g}{\partial x_d} = \frac{\pi V_g}{2\tau\mu_0} B_{pm} + B_{cm} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \\ &= F_{max} \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x_d\right) \end{aligned} \tag{4}$$

### 2.3 전자선로 집전계 주행시험기의 타당성 검토

#### 2.3.1 주행시험기 설계를 위한 운동방정식

움직이는 이동체(대차)와 지상에 설치되어 있는 선로 상에는 상대적인 운동이 존재한다. 다음 식 (5)는 주행집전시험기 설계를 위한 운동 방정식을 나타내고 있다.

$$\frac{dv}{dt} = \frac{F - F_d}{M} \Rightarrow \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{F - F_d}{M} \tag{5}$$

(여기서,  $F$  : 진행방향 추력,  $F_d$  : 마찰력을 포함한 부하,  $v$  : 이동체 속도,  $M$  : 이동체 질량)

주행시험기의 이동체(대차)에는 움직임을 저항하는 힘이 존재한다. 즉, 주행 저항력이다. 이는 마찰력으로 표현되며 속도에 따라 그 양상이 달라진다. 여기서는 다음과 같은 항목을 개략적으로 고려하는 것으로 한다.

총 마찰력 :  $T_f = T_c + T_r + T_s$  (6)  
 ( $T_f$  : Total Friction,  
 $T_c$  : Coulomb Friction,  
 $T_r$  : Viscous Friction =  $Bv$ ,  
 $T_s$  : Static Friction)

주행시험기의 대차가 움직이기 위해서는 저항, 즉 마찰력을 이기는 부하력을 필요로 한다. 다음과 같이 표현된다.

총 부하력 :  $T_d = T_c + T_r + T_s + T_w$  (7)  
 ( $T_w$  : Windage loss =  $Cv^2$ )

### 2.3.2 속도에 따른 부하력 부하곡선

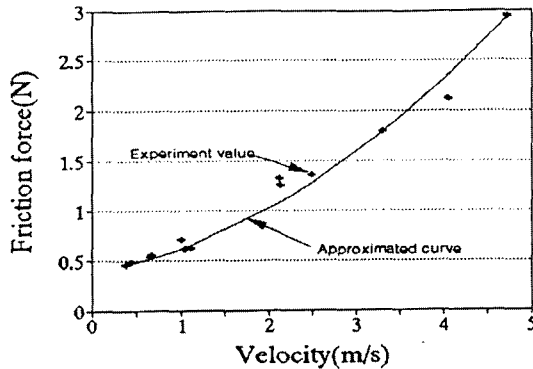


Fig. 4. Friction force according to velocity

$$F_d(v) = \alpha v^2 + \beta v + \gamma = 0.08v^2 + 0.162v + 0.376 \quad (8)$$

위 그림 4는 속도에 따른 부하력 근사 커브를 나타내고 있으며 위 식 (8)에 의해 구한 속도에 따른 부하력 근사 커브는 실험실 단위의 소규모로 제작된 실험 장치에서 얻어낸 데이터로써 주행집전시험기의 추진 장치와 같이 대형, 고속의 장치에서는 그 적용이 적절하지 않을 수도 있지만, 실제 주행집전시험기를 제작하여 이때의 속도에 따른 부하력을 구하는 것이나, 유체 CAE 해석 등을 통해 해석적으로 구하는 것도 현재 상태에서는 어려우므로, 개략적인 값이라는 전제 하에 위의 근사적인 속도 부하력 커브를 이용하여 타당성을 검토하였다.

### 2.3.3 Speed-Time Curve

가속 구간, 등속 구간, 감속 구간의 소요시간을 계산하기 위하여 속도에 대한 2차식으로 표현된 방정식을 사용하여, 가속구간에 소요되는 시간, 등속구간의 시간, 감속구간의 시간을 각각 구한다. 아래의 그림과 같은 속도-시간 특성을 가질 때, 각 구간의 시간은 다음 식 (9)로 구할 수 있다.

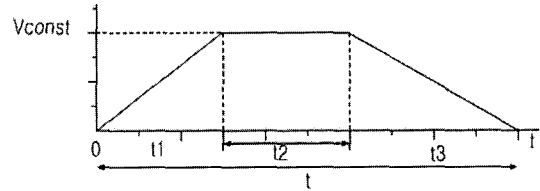


Fig. 5. Speed time curve

$$t_1 = \frac{v_{const}}{a} \quad t_3 = \frac{v_{const}}{d} \quad (9)$$

$$t_2 = t - t_1 - t_3 = t - v_{const} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right)$$

$$s = \frac{1}{2} v_{const} t_1 + v_{const} t_2 + \frac{1}{2} v_{const} t_3$$

$$= v_{const} t - \frac{v_{const}^2}{2} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right) \quad (10)$$

$$k v_{const}^2 - t v_{const} + s = 0 \quad k = \frac{1}{2} \left( \frac{1}{a} + \frac{1}{d} \right)$$

$$v_{const} = \frac{t}{2k} - \sqrt{\left( \frac{t}{2k} \right)^2 - \frac{s}{k}} \quad (11)$$

위 계산식들을 바탕으로 실제의 가속 구간, 등속 구간, 감속 구간의 소요되는 시간을 구하여 구간별로 필요한 추진력과 최대 소요 전력을 알아보기로 하였다. 실제로 1km 구간 내에서 그림 2와 같은 가속 특성, 등속 특성, 감속 특성을 실현하려면 가속구간에 소요되는 시간은 약 6초, 등속구간은 약 10초, 감속구간은 약 20초로 계산된다.

### 2.3.4 차분 근사 시뮬레이션

계산되어진 속도특성과 구간별 소요시간으로부터 실제의 속도 특성 곡선을 구하기 위하여 운동방정식을 차분 근사 시뮬레이션을 통하여 가속-등속-감속에 이르는 과정을 모사 해석해 보았다. 다음과 같이, 초기의 속도, 변위, 파워는 0으로 설정해 두고, 일정한 미소 시간 간격을 설정하여, 다음 순간의 속도와, 변위 파워를 계산하는 방식으로, 전체 구간의 속도-시간, 속도-거리 특성을 구한다.

$$\Delta v_{(i)} = \frac{(F - F_d) v_{(i)} \Delta t}{M}$$

$$v_{(i+1)} = v_{(i)} + \Delta v_{(i)}$$

$$x_{(i+1)} = x_{(i)} + v_{(i+1)} \Delta t$$

$$P_{(i+1)} = F_{acc} \times v_{(i+1)} \quad (12)$$

2.3.5 속도 특성 시뮬레이션 결과

위에 언급한 주행시험기의 운동방정식 및 차분근사식들을 이용하여 다음의 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 시뮬레이션 결과 1 : 최고출력 1,300kw, 15,000N (목표속도 300km/h, 중량 1Ton)

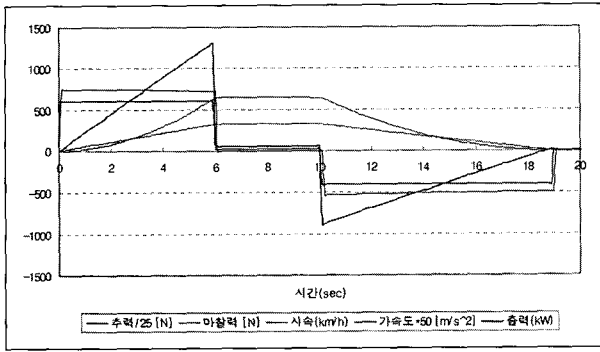


Fig. 6. Time-axis curve

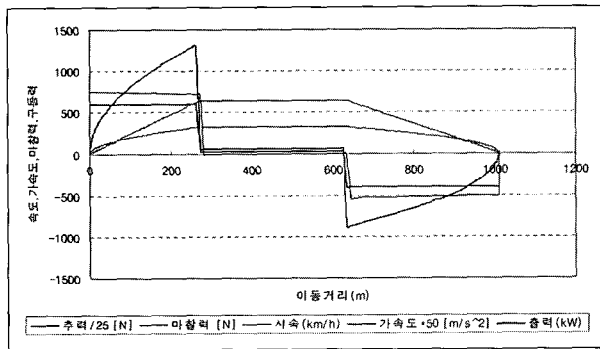


Fig. 7. Distance-axis curve

- 시뮬레이션 결과 2 : 최고출력 360kw, 6,500N (목표속도 200km/h, 중량 1Ton)

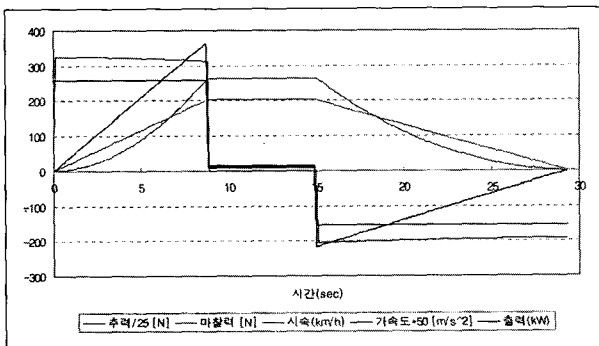


Fig. 8. Time-axis curve

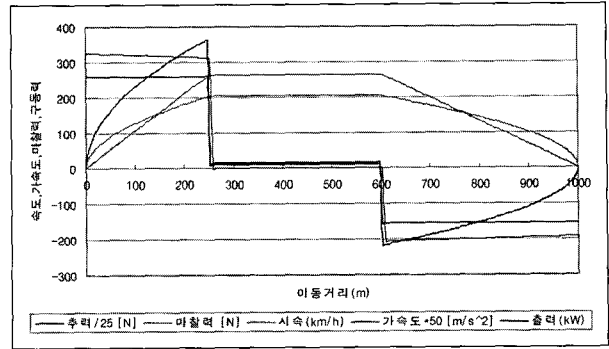


Fig. 9. Distance-axis curve

- 시뮬레이션 결과 3 : 최고출력 185kw, 3,300N (목표속도 200km/h, 중량 500kg)

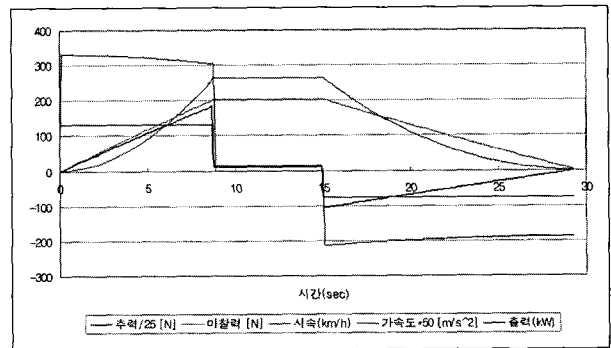


Fig. 10. Time-axis curve

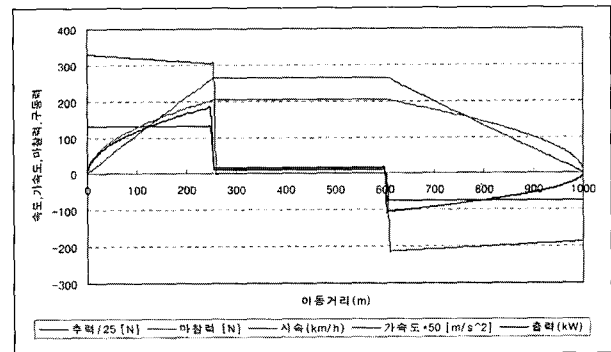


Fig. 11. Distance-axis curve

위 시뮬레이션 결과를 보면 목표 속도 300km/h에서는 1,300kW의 출력을 낼 수 있는 모터가 필요함을 알 수 있다. 하지만 1,300kW급 모터는 현실적으로 타당성이 결여되어 있으며, 목표 속도 200km/h에서 요구되는 360kW급 모터 역시 현실적으로는 많은 어려움을 가질 수밖에 없는 설계 목표치이다. 이 검토에서 드러난 사실은 주행시험기를 위해 설정한 가감속 성능을 만족하기 위해서는 모터의 용량이 너무 크다는 사실이다. 모터의 용량을 기술적으로뿐만 아니라

경제적으로도 타당한 범위 내로 조정하기 위한 방법으로는 주행시험기가 주행할 주행로의 길이를 늘이거나 혹은 주행로의 길이는 그대로 둔 채로 기존에 설정했던 가감속 구간에 수정을 가하는 것이다. 주행로의 길이를 늘이는 방법은 현실적으로 어렵다고 보고 검토대상에서 제외하고 새로운 가감속 구간을 설정하는 방법을 채택하여(그림 13) 2차적인 타당성 검토를 수행하였다.

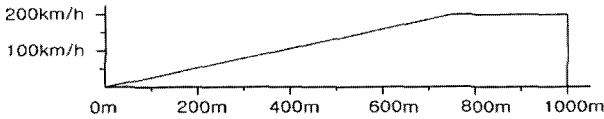


Fig. 12. Redesigned Acc./Dec. characteristic curve

새롭게 설정된 가감속 커브는 급감속을 가정한 현실적으로 불가능하지만 검토를 위해 임의로 상정한 커브(가속 시간 : 25.2초)이다. 목표 속도는 200km/h에, 중량은 1톤을 전제로 하였다. 이 케이스에 대한 해석 결과는 다음과 같다.

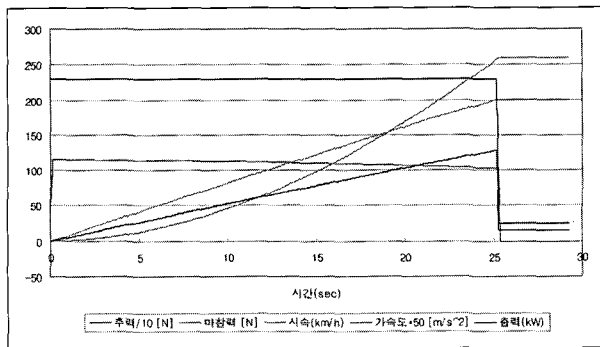


Fig. 13. Time-axis curve

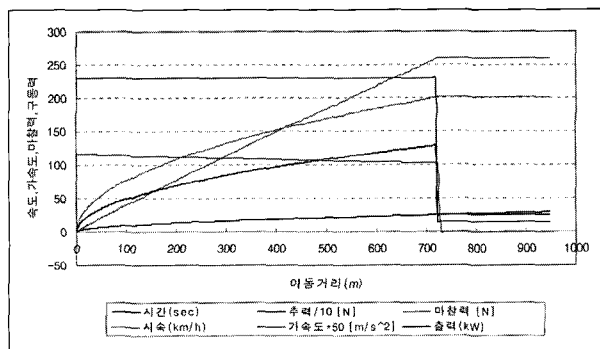


Fig. 14. Distance-axis curve

이 케이스에서 요구되는 추진 모터의 출력은 128kW, 2,300N이다. 이는 기존의 가감속 구간에서 요구되는 출력 용량 360kW의 약 35%에 해당하는 값으로 새롭게 설정된 가감속 구간을 통해 모터 용량을 65%정도 줄일 수 있다.

### 2.3.6 추진 모터 설계

비록 128kW도 상당히 대형의 모터이고 더 작은 용량의 모터의 필요성이 대두되지 않는 것은 아니나, 이정도 용량이면 본 연구에서의 요구조건을 어느 정도 만족한다는 가정하에 개략적인 추진 모터의 설계를 진행시켜 나갔다. 추진 출력의 요구 용량을 토대로 영구자석형 LSM 추진 모터의 개략적인 중량과 부피를 계산하고, 세 가지 설계 조건(출력, 중량, 부피)을 가지고 전동기의 세부 설계를 수행하였다. 영구자석 모터이기 때문에 어떤 종류의 영구자석을 사용할 것이냐, 어떤 모양, 어떤 중량의 영구자석을 사용할 것인가가 중요한 설계 변수로서 작용하며 아울러 전기자 권선의 배치와 형상 설계 역시 중요한 설계 변수이다. 하지만 영구자석의 선정에서부터 공극의 설정, 영구자석과 전기자 권선의 형상 설계 등등 모든 설계 변수들을 정할 뚜렷한 기준이 없는 실정이며, 이의 설계에는 설계자의 다양한 설계 경험, 여러 근사적인 설계 보조 수단, 가정에 근거를 둔 예측 등을 통한 수밖에 없다. 본 연구에서는 영구자석의 설계와 전기자 권선 코일의 설계 등에서는 유사 연구들과 여러 설계를 통해 축적해 놓은 설계 경험들을 참고하여 설계하였으며, 표 1에 그 사양을 제시하였다. 설계된 영구자석형 LSM의

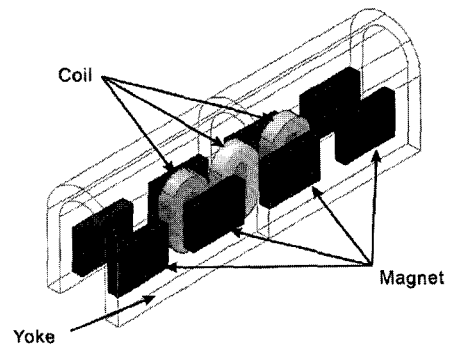


Fig. 15. 3-D shape of the LSM

Table 1. Specification of the LSM

	사양	값
시스템	정격출력	128 [kW]
	기동추력	2,300 [N]
	공극	30 [mm]
고정자	정격주파수	100 [Hz]
	극간격	300 [mm]
	상 수	3 [phase]
이동자	영구자석의 재질	Nd-Fe-B
	리코일 투자율	1.1
	잔류밀도	1.23 [T]
	영구자석의 크기	200×140×70 [mm]



Fig. 16. Flux vector of the LSM

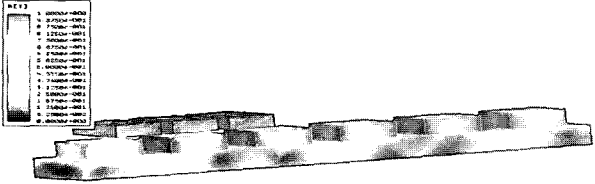


Fig. 17. Equivalent Flux density of the LSM

스펙들을 가지고 등가 자기회로 해석을 통한 속도, 추력 특성을 검증하여 보았으며, 또한 3차원 유한 요소 해석을 통하여 그 결과를 검증하여 보았다. 이러한 설계는 근본적으로 가정과 예측 등을 전제로 하였기 때문에 이러한 설계를 통해 얻어낸 전동기의 성능이 기대했던 값을 만족하느냐는 여타의 검증 방법을 통해서 검증되어야 한다.

### 3. 결론

현재 철도기술연구원에서 구축을 기획중인 전차선로-집전계 주행시험기에 대하여, 본 시험기는 짧은 구간에서 고속까지 도달하여야 하는 높은 가속력을 필요로 하는 장치로서, 이를 구현하기 위해서는 리니어(Linear) 모터 추진 방식으로 갈 수 밖에 없으며, 이와 관련된 기술적 타당성에 대하여 검토하였다.

검토 결과, 첫 번째 시뮬레이션에서 목표 속도 300km/h에서는 1300kW 출력의 전동기가, 200km/h에서는 360kW급 전동기가 요구됨을 확인하였다. 이 정도로 큰 모터는 현실적으로는 많은 어려움을 가질 수밖에 없으며 따라서 설정한 주행시험기 가감속 커브를 만족하기가 어려움을 파악하였다. 이를 타당한 범위 내로 조정하기 위한 방법으로 가감속 커브에 수정을 가하는 것을 상정하였으며, 새로운 가감속

곡선(가속 시간 : 25.2초)을 설정한 시뮬레이션에서 필요한 모터 출력은 128kW로 나타났다.

결론적으로 목표 속도(200km/h)를 실현하기 위해서는 초기에 설정한 가감속 커브를 변경하거나 중량을 줄이는 등의 수정이 필요하다는 것을 알 수 있었다.

### 참고 문헌

1. J. C. Heinrich, P. S. Huyakorn and O.C Zienkiewicz, "An up-wind finite element scheme for two-dimensional convective transport equation", *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.11, pp.131-143, 1977.
2. T. Furukawa, K. Kbmiya, I. Muta, "An Upwind Galerkin Finite Element Analysis of Linear Induction Motor", *IEEE Trans on Magn*, vol.26, No.2, pp.662-665, 1990.
3. M. Ito, T.Takahashi, M. Odamura, "Up-wind finite element solution of travelling magnetic field problems", *IEEE Trans on magn*, vol.28, No.2, 1992.
4. L. Hond 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.
5. Y. Akiama, "Current situation and problems of industrial linear DC motors", *Vol.MAG-84-97*, pp.9-18, 1984.
6. Magnetic Actuators Technical Committee, "Linear Motors and Their Applications", *I.E.E. of Japan*.
7. K. Yoshida, J. Lee, T. Omura, "Levitation and Propulsion Motion Control of Controlled-PM LSM Maglev Carrier", *ICEM'96*, 1996.
8. Henneberger, G., Rodder, D., "Contactless Transportation Vehicle with 4 Hybrid-Excited Magnets and an Energysaving Levitation Control", *LDIA'95 Nagasaki, Japan*, 1995.
9. T. Yoshimura, H. J. Kim, M. Watada, S. Torri, D. Ebihara, "Analysis of the Reduction of Detent Force in a Permanent Magnet Linear Synchronous Motor", *IEEE Trans. on Magn.*, Vol.31, No.6, pp.3728-3730, 1995.
10. 전자장수치해석기법 조사전문위원회, "기술조사보고 제3호 : 전자장수치해석 기법현황", *대한전기학회*, 1992.
11. 임달호, "전기계의 유한요소법", *동명사*, 1986.
12. Ju Lee, "3-Dimensional FEM Analysis of Controlled-PM Linear Synchronous Motors", *Ph.D Thesis, Kyushu University*, 1996.