

고속 추진 시스템용 LSM 설계

이성구*, 원성홍*, 김태형**, 이형우***, 권삼영***, 이 주*
 *한양대학교, **경상대학교, ***한국철도기술원

Design of LSM for high speed propulsion system

Sung Gu Lee*, Sung Hong Won*, Tae Heung Kim**, Hyung Woo Lee***, Samyoung Kwon***, Ju Lee*
 *Hanyang University, **Gyeongsang National University, ***Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper provides the design of propulsion system for the catenary-pantograph run tester. Permanent magnet linear synchronous motor design suitable for an high-speed ground transportation system which need a big acceleration force. The propulsion system of the catenary-pantograph run tester need high speed and big acceleration.

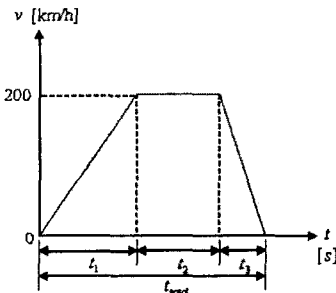
1. 서 론

초 단위의 짧은 시간 안에 200km/h의 속도로 가속하기 위해서는 상당한 큰 추진력이 요구된다. 기존 철도 시스템의 휠 온 레일 방식으로 이와 같이 커다란 추진력을 얻기 위해서는 휠과 레일 사이의 큰 마찰력을 얻을 수 있는 무거운 중량의 차체가 필요하다. 하지만 추진력을 얻기 위해 증가된 차체의 중량은 가속도를 얻기 위해 요구되어지는 추진력의 증가를 가져와 중국에는 어느 수치 이상의 가속도를 얻기 어려워지는 상황이 야기된다. 휠 온 레일방식과 같이 마찰에 의해 추진력을 얻는 시스템은 이런 제한을 갖게 되어 급가속 고속 추진 시스템에는 적합하지 않다. 이에 본 논문에서는 선형 전동기(Linear Motor)을 이용한 추진 시스템에 대해 고려해보고 이의 설계를 수행하였다.

선형 전동기 중의 하나인 영구자석형 선형 동기전동기(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor: 이하 PMLSM)는 선형 유도전동기에 비해 개루프 제어성능이 떨어지고 제조원가가 높다는 단점에도 불구하고, 계자원으로 영구자석을 사용하기 때문에 상대적으로 효율이 높고 추력/중량비가 높아 고 추력화, 소형화 및 고속화가 가능하다는 이점이 있다. 최근 들어 고 에너지밀도를 가지는 영구자석의 개발 및 제조원가의 하락, 전력전자 기술과 디지털 제어기술의 발전에 의해 PMLSM의 단점이 많이 보완되었다. 또한 PMLSM은 추력/전류비가 높고 제어가 용이하며 직접 직선 추진력을 발생하므로 최근 들어 고속 지상운송 수단으로서 뿐만 아니라 고층빌딩용 고속 엘리베이터, 반송 시스템 및 서보 시스템의 구동원으로 많이 연구, 검토되고 있다[1].

2. 본 론

2.1 전차선로-주행 시험기 추진 시스템의 기본 설계 및 해석



<그림 1> time-speed 곡선

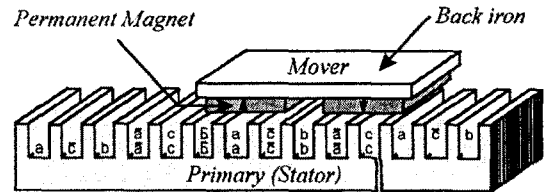
전차선로-집전계 주행시험기용 추진 시스템의 설계를 위해 우선 고려되어야 할 사항은 가속 구간 길이와 가속 구간에서 필요한 가속도이다. 위 그림 1은 1km의 실험 라인 상에서 가속 구간과 등속 구간, 감속 구간을 나타내고 있다. 가속 구간의 길이는 400m로 이 구간 상을 등가속도로 가속하게 된다고 가정하면 가속 시간은 약 14.4초이며 가속도는 약 3.9 m/s²에 달하게 된다. 추진 시스템을 포함한 전차선로-집전계 주행시험기의 전체 중량은 약 1000kg이며 모든 종류의 마찰을 무시한다면 가속 구간에서 요구되는 추진력은 다음 식과 같이 주어진다.

$$m \frac{d^2s}{dt^2} = F \quad \text{or} \quad ma = F \quad (1)$$

위 식에 의해 요구되는 추진력은 약 4000N 정도이다. 본 논문에서 고속 추진 시스템 설계에 채택한 선형 전동기는 영구자석형 선형 동기전동기 중에서도 편속식으로 이동자와 고정자 사이의 흡인력이 시스템에 요구되는 전체 추진력의 계산에 영향을 미치게 된다. 흡인력이 추진력의 약 4배에 달한다고 가정하고 이 흡인력이 자체 중량과 더해져서 차체를 지지하는 바퀴의 베어링 마찰에 영향을 미치게 된다. 풍손과 같은 여타의 마찰을 제외하고 오직 베어링 마찰만 고려한 이와 같은 일련의 계산을 통해 최종 요구 추진력은 약 5000 N에 달하게 된다. 추진시스템은 기계적인 바퀴에 의해 지지되는 구조이며 공극은 조립 오차에 대한 고려와 시스템 운행 발생할 수 있는 사고를 방지하기 위하여 10mm 정도로 선정하였다.

2.1.1 PMLSM의 추진력

본 논문에서는 PMLSM의 추진력에 대한 해석적인 표현식과 같은 모터 특성식들과 자기동기회로법을 이용하여 PMLSM의 설계를 수행하였다. 설계된 PMLSM의 구조와 권선 형태를 그림 2에 나타내었다. 이 그림은 지면 관계 상 1 pole pair에 대한 것만을 나타내었으며 실제 본 논문에서 설계된 PMLSM은 4 pole pair 이다.



<그림 2> PMLSM의 구조

설계 시 고려된 이동자 측 영구자석의 착자는 그림 2 과 같은 수직 착자이다. 일반적으로 바퀴와 같은 지지구조 없이 LSM의 부상력을 가지고 지지와 추진을 병행하는 고속 시스템에서는 이와 같은 수직 착자가 응용 면에서 더 유리하며, Hallbach 구조를 채택한 시스템은 높은 추진력이 요구되는 저속 시스템에 적합하다[3]. 하지만 본 논문에서 관심을 갖고 설계하고자 하는 시스템은 적절하게 설계 된 기계적인 바퀴를 가지고 지지되는 시스템으로써 앞서 언급된 시스템들과는 다른 설계 조건으로 인해 Hallbach 착자에 대한 고려도 가능하리라고 생각되나 본 논문에서 설계 시 채택한 착자 구조는 수직 착자이다. 차후에 Hallbach 구조를 채택한 설계에 대한 연구를 진행할 예정이다. Hallbach 착자는 동일 질량을 사용한 수직착자에 비해 대략 $\sqrt{2}$ 정도 크면서도 더욱 정현적인 공극자속을 얻을 수 있어 더 높은 출력을 낼 수 있는 구조이다.

$$F_{dx} = \frac{4}{\pi} p \gamma L_i B_r \frac{m_1 \sqrt{2} N_1 k_{w1} I_a}{p \gamma} \sin\left(\frac{\alpha_i \pi}{2}\right) \times \frac{1}{\mu_{rrel} \sinh \beta \gamma + \tanh \beta h_M \cosh \beta \gamma} \quad (2)$$

p : Pole pair, γ : Pole pitch,
 L_i : effective length of the stator core
 α : Pole-shoe to pole pitch ratio, β : π/γ

PMLSM의 추진력은 식(2)과 설계된 모델의 사양들을 나타낸 표1의 값들을 이용하여 계산될 수 있었으며 이런 계산을 통해 얻어낸 값은 약 5000N 정도였다.

〈표 1〉 설계 모델의 주요 사양

항 목	값	항 목	값
극 간격	141 mm	자석 재질	Nd-Fe-B
치 폭	20 mm	자석 치수	94×380×8 mm ³
슬롯 피치	47 mm	적층폭	400 mm
극 수	8 극	정격 출력	85 kW
상 수	3 상	공극의 길이	10 mm

2.1.2 유한 요소 정식화

변위 전류를 무시한 준 정상상태에서 자기벡터 퍼텐셜 \vec{A} 를 이용한 PMLSM의 지배방정식은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (3)$$

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

$$\vec{J}_o = \frac{N}{S} I_o, \quad \vec{J}_m = \frac{1}{\mu_o} \nabla \times \vec{M} \quad (4)$$

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

해석영역을 1차 삼각형 요소로 분할하고 근사해로 가정한 후, 식 (3)에 가중잔차법의 하나인 Galerkin법을 적용하여 계 방정식을 구하면 식 (5)과 같다.

$$[SS^{(e)}]\{A^{(e)}\} + [SC^{(e)}]\{I_o^{(e)}\} - [J_m^{(e)}] = \{R^{(e)}\} \quad (5)$$

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

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

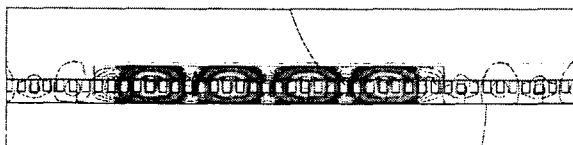
본 논문에서는 다음 식 (6)와 같이 맥스웰 응력법을 사용하여 부상력과 추진력을 구했다.

$$f_n = \frac{1}{2\mu_o} (B_n^2 - B_t^2), \quad f_t = \frac{1}{\mu_o} (B_n B_t) \quad (6)$$

식 (6)에서 B_n 은 적분 면에 대해서 수직성분의 자속밀도이고, B_t 는 접선성분의 자속 밀도이다.

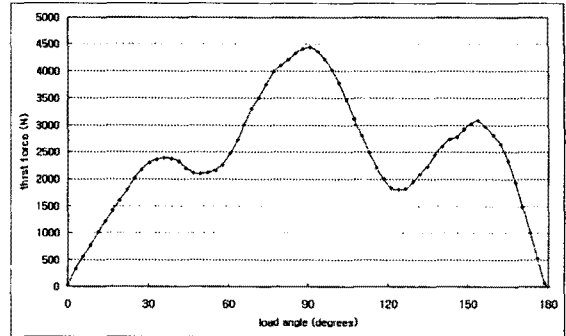
2.2 해석결과

그림 3은 유한요소해석을 위한 해석모델의 flux line을 나타내고 있다. 공극이 10 mm 인 관계로 공극에서의 Mesh의 개수를 어느 정도 이하까지 낮추어도 결과에는 그리 큰 영향을 미치지 않는 것을 여러 해석을 통해 알 수 있었다. 시스템의 동작 속도가 고속인 관계로 해석 모델의 횡축 길이를 적당한 길이에서 선정하여 해석을 수행하였다.



〈그림 3〉 해석 모델의 자력선도

유한 요소법을 이용하여 본 논문에서 설계된 PMLSM의 부하각에 따른 추진력 특성을 아래 그림에 나타내었다. 그림에 나타나 있듯이 90도 최대 부하각에서 약 4500 N의 추진력을 나타내며 이는 앞서 특성식을 가지고 예측한 5000N의 약 90% 정도로 10% 정도의 오차를 보이고 있다. 이는 (2)의 특성식을 유도할 때 고려하지 못했던 이동자와 고정자에 사용된 강자성체의 비선형성과 전도성, 치 부분에서의 프린징 효과, 그리고 전기자 권선이 무한히 얇은 전도 전류로 표현될 수 없다는 사실 등에 의해 야기된 오차로 생각되며 추후에 이 부분에 대한 연구를 진행시킬 예정이다.



〈그림 4〉 부하각에 따른 추진력 특성

시스템에서 설계 전 산정했던 요구 추진력이 5000N 정도였으나 실제 설계를 통해 본 논문에서 제안한 PMLSM을 이용한 전차선로-집전계 주행시험기 추진 시스템의 지지 바퀴와 여타의 구조들을 제외한 중량은 약 180 kg이다. PMLSM을 제외한 기계적인 구조물들과 추진 시스템에 장착될 주행시험기의 무게들까지 고려한다고 해도 설계 초기에 가정했던 1000kg에는 못 미치며 이는 곧 본 논문에서 설계된 PMLSM의 출력이 시스템의 요구 사양을 만족함을 의미한다.

3. 결 론

본 연구에서는 PMLSM을 이용한 전차선로-집전계 주행시험기의 추진시스템에 대한 설계를 모터 특성식과 자기등가회로법을 이용하여 수행하였고 이를 유한요소법을 이용하여 검토하였다. 유한요소법을 이용한 검토를 통해 특성식과 자기등가회로를 이용하여 설계한 PMLSM이 목적했던 추진력의 약 90%의 값을 갖는다는 사실을 알았다. 설계 목표와 유한요소해석을 통해 구한 결과 사이에서 발생하는 10%의 오차는 특성식에 포함된 여러 가정들과 자기등가회로를 구성하면서 발생한 미처 고려하지 못한 프린징효과와 같은 것들로 인한 것으로 사료되며 차후 있을 연구에서 이 부분에 대한 추가적인 고려가 필요함을 알 수 있었다.

감사의 글
이 논문(보고서)은 한국철도기술원에서 시행한 전기시스템 성능향상 기술연구 사업으로 수행된 논문(보고서)입니다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] 장석명, 윤인기, 이성호, 이중호, "영구자석형 선형 동기전동기의 디텐트력 저감방식에 관한 특성해석 및 상호 비교", 대한전기학회 하계학술대회,, 17-20, 2000.7
- [2] Jacek F.Gieras and Zbigniew J.Piech, "Linear Synchronous Motors", CRC Press, 2000
- [3] Thornton, R.D, "Linear Synchronous Motor Design", Electric Machines and Drives, 2005 IEEE International Conference, 1555-1560, May 15, 2005