

선형동기전동기의 특성해석

김 동수*, 전 대영*, 차 귀수**, 한 송엽*
서울 대학교*, 순천향 대학교**

Characteristic Analysis of a Linear Synchronous Propulsion System

Dong-Soo Kim*, Dae-Young Jeon*, Guee-Soo Cha**, Song-Yop Hahn*

Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University

Dept. of Electrical Engineering, Suncheonhyang University

Abstract

We calculate characteristics of the linear synchronous propulsion system by the finite element analysis. The finite element method using voltage source can consider the ripple factor caused by the core shape and the distorted wave of stator currents caused by the core shape and the back e.m.f.

The TRANSRAPID-06 system developed by Germany is adopted for the numerical example

1. 서론

자기부상열차는 기존의 접촉식 열차 시스템에 비해 고속, 저소음 등의 여러 장점을 가지고 있어 국내외에서 활발히 연구되고 있는 차세대 수송 시스템이다. 선형동기전동기를 추진 시스템으로 사용하는 자기부상열차는 부상 방식에 따라 흡인식과 반발식으로 분류되는데, 이 중 흡인식에 사용되는 선형동기전동기는 철심구조로 되어 있어 차량이 주행함에 따라 계자극이 전기자의 치를 통과하게 되어 공극 자속밀도가 변동하게 된다.

본 연구에서는 흡인식 선형동기전동기의 주행특성을 유한요소법으로 해석한다. 유한요소법을 사용하면 전기자 치의 영향 및 복잡한 형상을 한 계자극의 영향을 고려하게 되므로 등가회로법에서는 볼 수 없는 부상력 및 추진력의 맥동 성분을 구할 수 있다. 또한 전기자 및 계자의 전원을 전류원이 아닌 전압원 문제로 처리하여, 열차가 주행함에 따라 발생하는 비정현 역기전력과 임피던스에 의해 상한 값이 정해지는 전기자 권선의 비정현 전류 파형을 고려할 수 있

다. 또한 전기자 치와 계자극 간의 인덕턴스가 변함에 따라 생기는 계자전류의 맥동도 고려하게 되므로 특성해석의 정확도를 높일 수 있다. 해석과정에서 자기포화는 되지 않는다고 보았고, 전기자 치의 길이에 비해 폭이 상대적으로 길어 2차원 모델링하여 해석했다.

해석 모델로는 독일에서 개발 중인 TRANSRAPID-06을 선택했다. 이 때 차량의 전체 길이는 54 [m] 이고, 계자 자석은 좌우 각각 32조, 자석 1조는 6개의 자석으로 되어 있다.^[1] 본 연구에서는 자석 1조에 대해서 해석했다.

2. 유한요소해석

2.1 유한요소 정식화

성층된 철심구조를 갖는 자기부상열차가 주행함에 따라 계자와 전기자의 위치가 변하게 되는데, 이에 따른 자기적 변화 관계를 시간 차분법으로 해석하면, 주행하는 자기부상열차의 특성은 정자장 문제를 연속적으로 해석하는 것으로 써 얻을 수 있다. 철심에서 자장이 포화되지 않고 와전류 성분은 무시할 정도라면, 식 (1)과 같이 유한요소 정식화 할 수 있다.

$$\int_{\Omega} \left(\frac{1}{\mu} \nabla A \cdot \nabla N - \frac{n}{S} \right) d\Omega = 0 \quad (1)$$

여기서 μ 는 비투자율이고 A 는 자기벡터 포텐셜, N_i 는 형상함수, n 은 권선수, S 는 권선부의 면적, i 는 전류값이며 이 때 물리량의 단위계는 M.K.S.이다.

전압원을 인가전원으로 사용할 경우는 식(2)가 전압원의 수 만큼 추가된다.

$$\frac{d\phi}{dt} + Ri = v \quad (2)$$

여기서 v 는 권선에 인가되는 전원의 전압이고 ϕ 는 해당 권선에 쇄교되는 자속이며 R 은 권선의 저항이다.

부상력 및 추진력의 계산은 맥스웰 용력법을 이용하였다.

2.2 유한요소해석 영역의 설정

본 연구에서 해석하고자 하는 TRANSRAPID-06 (이하 TR-06)의 전기자 전원 공급 구간은 0.5 - 3 [km]로 일정하지 않으나 평균 1.2[km] 구간이 많으므로 1.2[km]를 전기자 전원공급의 단위구간으로 정했다.^{[2][3]} 전기자 구동전압의 최대값으로는 4250[V], 계자의 직류 구동전압은 440[V]를 택하였다.^{[2][3]} 철심의 비투자율은 800으로 정하였고, 그 밖의 관련 제원은 참고 문헌^{[2][4]}에 제시된 자료를 기초하여 사용했다.

전기자 전원공급 구간의 단위구간 전 영역을 유한요소해석 구간으로 설정하기는 사실상 불가능하므로 그림 1과 같이 계자석 1조 6극과 전기각으로 5주기에 해당하는 전기자치 30개를 유한요소해석 구간으로 하였다. 차량의 진행을 나타내는 시간차분 계산을 위해 전기자치 1개를 12 단계로 나누어 각 단계에서 정자장 문제를 풀게 되는데, 그림 1은 이 중 한 단계의 유한요소해석 영역을 나타낸다. 또한 유한요소해석 영역의 외계자석에 의한 영향과 차량이 지나가지 않는 전원공급 구간은 식 (3)에 의해 처리하였다. 이때 차량이 지나가지 않는 구간의 자기영향분은 그림 1의 각 영역 중 계자 부분은 없고 전기자만 있는 상태하에서의 유한요소해석 결과로부터 구한 자기 인덕턴스 및 상호 인덕턴스를 이용하여 처리했다.

$$N \frac{d\phi}{dt} \Big|_{\Omega_1} + \frac{d\phi}{dt} \Big|_{\Omega_2} + Ri = v \quad (3)$$

여기서 N 은 그림 1에 나타난 바와 같은 계자 1조가 차량에 탑재된 갯수이고 Ω_1 은 계자극이 포함된 영역이며 Ω_2 는 차량이 지나가지 않는 전원공급구간이다. 식 (3)을 전기자 한 상에 대해, 미리 구한 자기 인덕턴스 L 및 상호 인덕턴스 M 을 이용하여 전개하면 식 (4)가 된다.

$$N \frac{\Delta\phi_a}{\Delta t} + L \frac{\Delta i_a}{\Delta t} - M \frac{\Delta i_b}{\Delta t} - M \frac{\Delta i_c}{\Delta t} + Ri_a = v_a \quad (4)$$

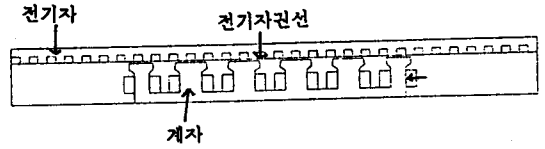


그림 1. TR_06의 유한요소해석 영역

3. 특성 계산

TR-06은 1988년 32 [km]의 시험 선로에서 412 [km/h]의 속도를 기록하였다. 본 연구에서는 400 [km/h]의 속도로 차량 1량이 정상 운전되고 있을 때의 제특성을 계산하였다. 그림 2는 전기자를 개방한 상태에서 차량에 탑재된 계자에 의해 전기자 양단간에 유기된 역기전력을 나타낸다. 전기자 치에 의해 정현파 형태가 아닌 역기전력이 발생됨이 보인다. 전원전압 V 와 역기전력 E 간의 위상차가 70° 로 정상운전 될 때 전기자에 흐르는 3상 전류 파형을 그림 3에, 추진력 F_x 를 그림 4에, 부상력 F_y 를 그림 5에 나타냈다. 추진력과 부상력은 전기각으로 한 주기에서 전기자 치의 수만큼 맥동이 보임을 알 수 있다. 이 때 그림 2, 3, 4, 5의 x 축은 계자 N 극의 중심과 전기자 권선 a 상의 중심이 일치했을 때를 기준점으로 삼았으며, 전기각 2π 는 전기자치 6개에 해당된다. 전원전압과 역기전력의 위상차에 대한 전기자 전류의 최대치와의 관계를 그림 6에, 평균 추진력과의 관계를 그림 7에, 평균 부상력과의 관계를 그림 8에 나타내었다. 전원전압과 역기전력간의 위상차가 클수록 전기자 전류는 많이 흐르고, 평균 추진력은 위상차가 약 70° 일 때 가장 크다. 또한 계자의 기자력이 비슷한 상황하에서도 전기자에서 발생하는 자속에 의해 부상력이 변동됨을 볼 수 있다.

TR-06의 설계시 필요한 추진력은 약 85 [kN], 부상력은 약 1100 [kN]이었다.^{[2][3]} 특성해석 결과, 설계시 필요한 힘을 얻을 수 있는 부하각을 알 수 있다.

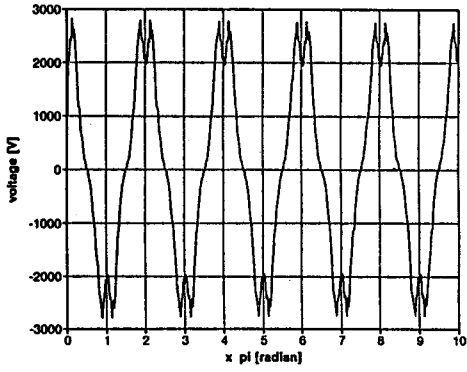


그림 2. 전기자 a상의 역기전력 파형

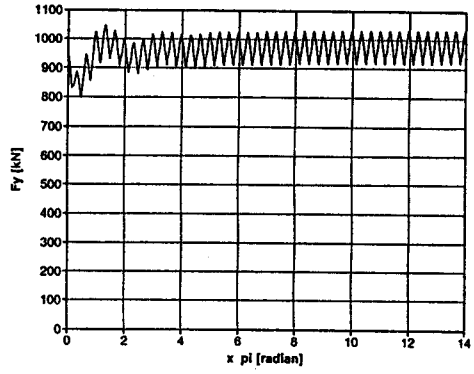


그림 5. 전기각에 따른 부상력

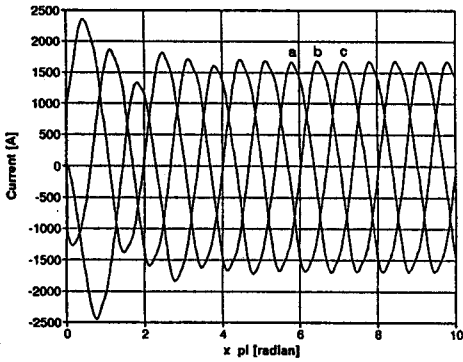


그림 3. 전기자 3상 전류

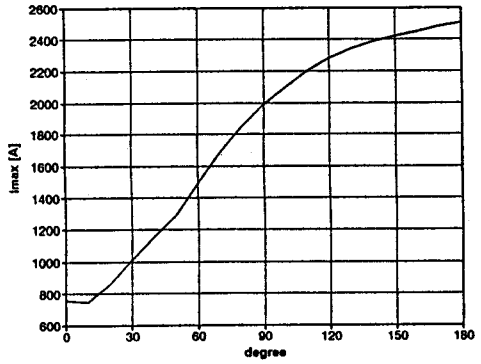


그림 6. 구동전압과 역기전력 간의 위상차에 따른 전기자 전류의 최대치

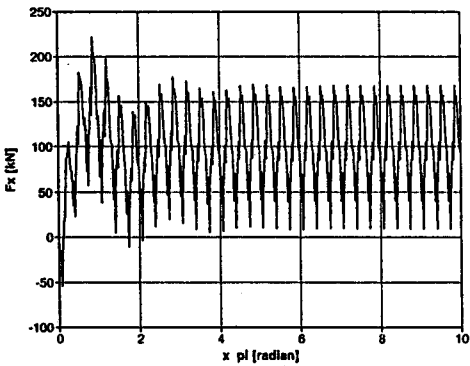


그림 4. 전기각에 따른 추진력

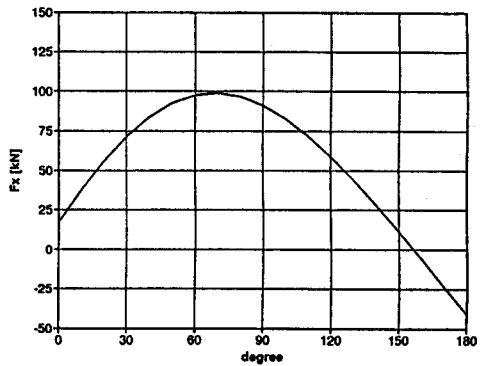


그림 7. 구동전압과 역기전력 간의 위상차에 따른 평균 추진력

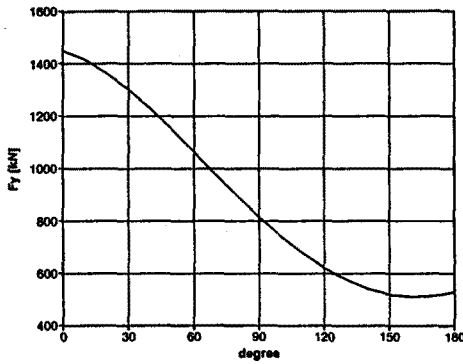


그림 8. 구동전압과 역기전력 간의 위상차에 따른 평균 부상력

4. 결론

상전도 흡인식 선형동기전동기인 TR-06의 특성해석을 위한 알고리즘을 확립하고, 정상운전 하에서의 특성을 해석하였다.

유한요소법을 사용하여 전기자 치 및 계자극의 형상이 고려되어 추진력 및 부상력의 맥동성분을 계산할 수 있었고, 전압을 구동전원으로 사용하여 운전속도와 부하각에 따라 변동하는 전기자 전류의 파형 계산이 가능하였다.

본 연구에서 개발된 알고리즘과 해석 수단을 사용하면, 상전도 흡인식 선형동기전동기로 구동되는 자기부상열차의 특성 향상을 위한 설계시이의 검증이 가능해졌다.

참고 문헌

- [1] Klaus Heinrich (ed.), "Transrapid Maglev System", HESTRA-VERLAG Darmstadt, 1989.
- [2] R. Friedrich, et al., "The Power Supply and the Propulsion System of the TRANSPRAPH 06 Vehicle Results of Trials," Proc. MAGLEV, Vancouver, May, 1986, pp243-249.
- [3] W. Merkinghaus and P. Mnich, "The MAGLEV TRANSPRAPH System on the way to Application," Proc. MAGLEV, Las Vegas, May, 1987, pp 211-218.
- [4] 선형동기 추진시스템의 기술 개발, 한국전기연구소, 1992.