

공심형 선형동기전동기 기반의 궤도열차 추진제어에 관한 연구

조정민*, 한영재¹, 이진호¹
¹한국철도기술연구원 자기부상철도연구팀

Study on a Propulsion Control of the Roller Coasters Train based on Air Cored Linear Synchronous Motor

Jeong-Min Jo^{*}, Young-Jae Han¹, Jin-Ho Lee¹

¹Maglev railway Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 고 중량의 궤도열차를 1G 포스이상 가속하기 위해서는 많은 추진력이 필요하다. 선형동기전동기(LSM)는 이러한 고 추력이 필요한 시스템에 적합하다. LSM의 추진 효율을 높이기 위해서 추진제어시스템은 정밀한 위상제어를 위한 실시간의 정확한 차량위치정보가 필요하다. 그러나 추진제어시스템은 전자석 길이구간마다 트랙에 설치되어져 있는 홀센서로부터 상대적으로 긴 시간간격을 갖는 불연속 위치정보를 수신하게 된다.

본 논문에서는 기존 d-q 방정식을 이용한 기본 전동기 모델을 구성하였다. LSM에 의해 추진되는 궤도열차의 모터모델은 코깅력과 마찰손실을 반영한 동적모델이다. 그리고 궤도열차용 LSM제어를 위해 차량위치 추정기를 기반으로 하는 추진제어 시스템을 제안하였다. 해당 궤도열차의 모터모델을 기반으로 위치관측기를 포함한 토크제어시스템의 특성을 확인하기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과는 본 제어시스템이 선형화된 시뮬레이션 모델 분석으로부터 제어기의 대역폭과 위상여유가 충분하다는 것을 보여주고 있으며, 제시한 위치 추정기 기반의 추력제어 알고리즘이 궤도열차의 추력을 제어하는데 효과적임을 확인시켜주었다. 따라서 위치 관측기의 가용성도 확인 할 수 있었다.

Abstract To accelerate a heavy roller coaster train with over 1G force, a lot of thrust is required and linear synchronous motor(LSM) as propulsion method is suitable for this kind of system. To increase the propulsion efficiency of LSM, precise and real-time position information of vehicle is required for accurate phase control. However, the discontinuous position information with relatively long time interval is usually transmitted from the hall-sensors on the track every magnet length.

In this paper, the basic motor model based on traditional dq-axis equations is described and the motor dynamic model is produced by considering the cogging force and friction loss. To improve the position accuracy, the position estimator is also proposed for LSM control system. Simulations were performed to check the characteristics of the torque control system which includes the position estimator based on the motor model. Simulation results based on the linearized model show that this control system has an enough bandwidth and phase margin and the executed algorithm achieves an ideal effect to follow the real-time position signal. Therefore, the feasibility of position estimator is also confirmed.

Keywords : Academia-Industrial Linear Synchronous Motor(LSM), Roller coaster train, Propulsion System, Position Estimator, Hall-sensors

1. 서론

LSM은 높은 출력밀도, 전류대비 높은 토크비 및 고

효율특징에 따라 서보 시스템에서 기존 DC 모터 또는 AC 유도모터를 대체하고 있다[1-4]. 이러한 LSM 특징은 최근 철도시스템의 고효율화에 편승하여 궤도차량 추

본 논문은 한국철도기술연구원 주요사업 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Jeong-Min Jo (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5619 email: jmjo@krri.re.kr

Received July 23, 2015

Revised (1st September 24, 2015, 2nd December 2, 2015)

Accepted December 4, 2015

Published December 31, 2015

진시스템에 기술도입이 검토되고 있다. 특히 유원시설의 궤도열차에 활용되는 LSM은 고 추력 및 급가감속 특징으로 인해 테마파크에서 가장 효과적인 어트랙션 중의 하나로 활용되고 있으며, 레저시설 추진시스템으로도 활용이 증가하는 추세이다. 그림 1은 궤도열차에 활용되는 추진시스템의 종류와 각 시스템에 대한 제조사에 대하여 나타내고 있으며, 표 1은 LSM을 적용한 궤도열차를 제조사와 함께 나타내고 있다. 해당 그림으로부터 LSM은 현재에도 궤도열차로 활용이 가장 높으며 향후 제작 예정인 궤도열차도 LSM이 주요한 추진시스템으로 활용되는 것을 알 수 있다.

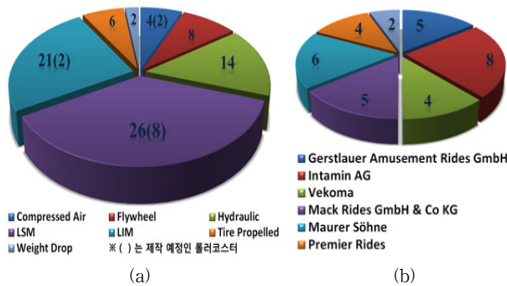


Fig. 1. Propulsion system used for roller coaster (a) Propulsion system type (b) Production companies

Table 1. Roller coasters using LSM

Name	Maker	Max. Speed
Atlantis (in Korea)	IntaminAG	75[km/h]
Superman the Escape	IntaminAG	161[km/h]
Battlestar Galactica	Vekoma	90[km/h]
I-Speed	IntaminAG	120[km/h]
Rock'n Rollercoaster	Vekoma	97[km/h]
Manta	Mack Rides	69[km/h]
Cheetah Hunt	IntaminAG	97[km/h]

동기 전동기의 직접토크제어를 위해서는 차량의 계자의 위치에 대하여 고정자의 전류를 제어하여야 한다. 따라서 선형동기전동기 고정자의 상대위치정보가 충분히 정밀하여야 추력효율을 향상시킬 수 있다[5,6]. LSM용 위치감지시스템은 여러 형태가 존재할 수 있지만, 차량에 탑재된 영구자석이 지상에 설치된 홀센서를 통과할 때 지상에서 차량자속위치를 검출하는 방식이 일반적이다. 그러나 이러한 차량자속위치 검출방식은 추진인버터의 추진제어에서 요구하는 위치정보 분해능의 요구조건에 미흡하다.

본 논문에서는 LSM 고정자의 이동자계를 이동차량의 전자석과 정밀하게 동기시키기 위해서 전 차원 위치관측기를 이용한 LSM 추진제어시스템을 제시하였다. 제시한 추진제어방법의 타당성을 검증하기 위해 시뮬레이션을 수행하였다.

2. LSM 추진 축소형 궤도열차 모델링

2.1 LSM 기본모델

AC 모터의 제어 알고리즘은 흔히 AC 기기의 d-q축 모델을 이용한다. d-q축 모터 모델을 유도하기 위해서 고정자 전압 방정식은 다음과 같이 표현 된다.

$$u_d(t) = R\dot{i}_d + d\frac{\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \quad (1)$$

$$u_q(t) = R\dot{i}_q + d\frac{\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \quad (2)$$

여기에서 u_d 와 u_q 는 고정자 공간전압벡터의 d축과 q축 성분으로, i_d 와 i_q 는 계자 전류 벡터의 d축과 q축 성분으로, R 은 전기자 상저항을 나타낸다.

이때 3상 전기자에 대한 순시 입력전력은 식(3)과 같이 표현할 수 있다.

$$P = u_A i_A + u_B i_B + u_C i_C = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q) \quad (3)$$

여기에서 u_A , u_B 와 u_C 는 순시 상전압이고, i_A , i_B 와 i_C 는 순시 상전류, 그리고 u_d 와 u_q 는 d축과 q축 전압성분, i_d , i_q 는 d축과 q축 전류성분이다. 전력 방정식은 고정자 전압 방정식 (1)과 (2)로부터 얻을 수 있다.

$$u_d i_d + u_q i_q = R\dot{i}_d^2 + \frac{d\psi_d}{dt} i_d + R\dot{i}_q^2 + \frac{d\psi_q}{dt} i_q + \omega(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (4)$$

상기 수식의 마지막 항은 LSM의 전자기력을 나타내며 3상기에 대해서는 식(5)와 같이 표현된다.

$$P_{elm} = \frac{3}{2}\omega(\psi_d i_q - \psi_q i_d) = \frac{3}{2}\omega[\psi_{EM} + (L_d - L_q)i_d]i_q \quad (5)$$

여기에서 L_d 와 L_q 는 전기자 인덕턴스이다. p 개의 극을 갖는 LSM의 전자기적 추진력 F_{thrust} 은 방정식 (5)에 선형속도 v_{lin} 으로 전자기적 전력 P_{elm} 을 나누고 여기에 극수 p 를 곱한 것이다.

식(4)와 식(5)으로부터 선형 동기모터의 기본적인 수학적 모델을 구성할 수 있으며 자기부상차량에 설치되어 있는 전자석의 쇠교 자석은 모터 추력상수 K 를 이용하여 식 (6)처럼 나타낼 수 있다.

$$\psi_{EM} = \frac{\tau}{\pi} \frac{2}{3} \frac{1}{p} \frac{F_{thrust}}{i_s} = \frac{\tau}{\pi} \frac{2}{3} \frac{1}{p} K \quad (6)$$

이 모델은 전자석에 의해 자속을 발생시키는 선형동기전동기에 해당한다.

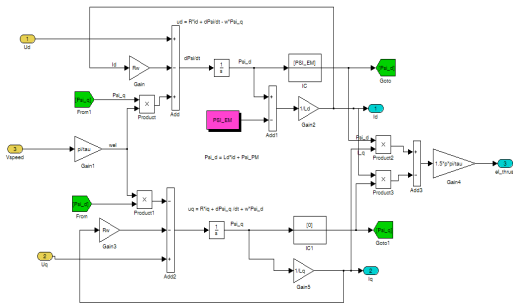


Fig. 2. Linear Synchronous Motor Model Block

2.2 LSM 기계적 모델

궤도열차에서 선형모터의 비선형성은 트랙킹 오차를 초래하거나 정정시간을 증가시킬 수 있다. 이러한 현상에 대하여 선형 모터 시스템의 동적 특성은 식(7)과 같은 방정식으로 표현될 수 있다.

$$F_{thrust}(t) = m_{tot} \frac{dv}{dt} + F_{load}(t) + F_{friction}(v) \quad (7)$$

여기에서 m_{tot} 는 차량 공차중량 m_{mov} 와 승객에 의한 중량 m_{load} 그리고 v 는 차량 이동속도, $F_{friction}$ 은 스트라이백(Stribeck)과 쿨롬(Coulomb) 효과 등을 고려한 힘, F_{load} 는 부하에 의해 발생하는 추가적인 힘이다.

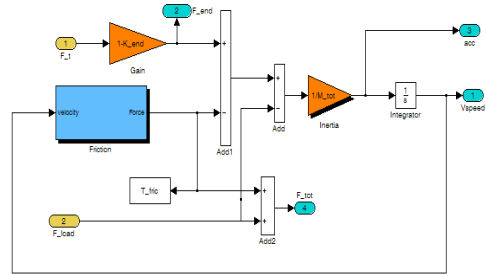


Fig. 3. Dynamic model block

식(7)에서 우변의 3개 항목은 각각 다음과 같은 의미를 갖는다. 첫 번째 항은 관성과 관련된 물리적 동특성 시스템에서의 필수부분이고, 두 번째 항은 구배에 따른 부하, 그리고 셋째 항은 롤러의 점성마찰력을 나타낸다. 선형 모터에서 마찰력은 부상마그넷과 고정자의 철심부에 발생하는 흡인력에 대한 것으로 매우 중요하다. 이 흡인력은 LSM의 기계적인 디자인에서 고려되어야 하며 소음, 진동과 관계된다.

마찰력은 쿨롬, 주행에 따른 공기저항, 스트라이백효과 등으로 이루어져 있다. 스트라이백 마찰력은 저속에서 발생하는 음의 기울기 특성을 갖는다. 쿨롬 마찰력은 속도와 관계없이 일정한 힘을 발생시키고, 공기저항은 속도에 따라 증가된다. 식 (8)은 차량이 이동시 속도에 대한 마찰력을 나타낸다.

$$F_{friction}(v) = C_f \cdot sign(v) + S_f \cdot e^{-k|v|} \cdot sign(v) \quad (8)$$

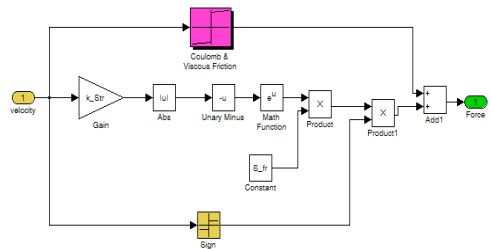


Fig. 4. Friction model block

2.3 축소형 궤도열차 기구모델 설계

국내 LSM 추진형 궤도열차인 ‘아틀란티스’는 약 1.5 초 동안 급발진 하여 최대 속도 75km/h에 도달하게 되며, 이러한 시스템의 특성으로 인하여 궤도열차의 추진 시스템은 LSM이 주로 활용된다. 1g 이상의 가속도는 탑

승객들에게 쾌감을 줄 수 있지만 4g가 넘는 경우 탑승자의 불쾌감을 초래할 수 있다. 본 연구에서는 LSM 추진형 궤도열차를 축소모델로 구성하고 목표 최대가속도는 1g 이상으로 하였다. 표2는 궤도열차용 LSM 축소 모델의 주요 설계 지표를 보여주고 있다. 궤도열차 축소모델의 최대속도는 제작의 용이성 및 실험 공간 등을 고려하여 10 m/s, 최대가속도는 1G.F. (Gravitational force) 이상을 설계 사양으로 선정하였다. 이 때 차량 중량은 20 kg이며 가속구간은 총 10m이다.

Table 2. Design Specification for the roller coaster

Parameter	Value	Parameter	Value
Max. Speed	10 [m/s]	Vehicle Weight	20 [kg]
Acceleration	Over 1 G.F.	Stator Length	10 [m]

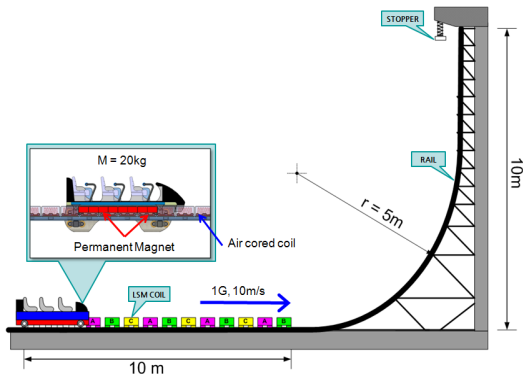


Fig. 5. The design concept of the miniature roller coaster

2.4 LSM 모터 설계

궤도열차용 LSM은 고속, 고추력 및 운행구간이 길다는 특징으로 인해, 코일이 이동하는 가동 코일형이 아닌, 가동 자석형 구조를 사용한다. 또한 철심형 LSM의 경우 단부효과로 인한 디텐트력(Detent force)에 의해 추력 맥동이 발생됨으로 공심형(coreless) LSM을 채택한다.

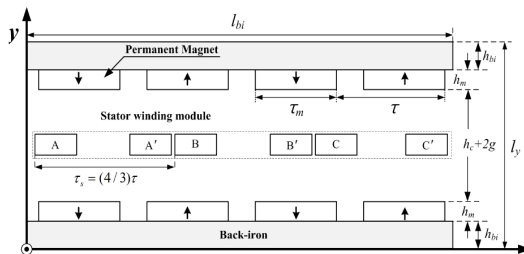


Fig. 6. Design of flat double-sided PM LSM

Table 3. Design Specification for PM LSM

Parameter	Value	Parameter	Value
Number of Pole	4	Number of phase	3
Air-gap(g)	8mm	Number of turn	80
Coil thickness(h _c)	10mm	Magnet thickness	10mm
Yoke thickness(h _{bi})	15mm	DC link voltage	300V

그러나 공심형 LSM의 경우 누설자속에 의한 추력 밀도가 낮아지기 때문에 이를 보완하기 위해 이동자는 양극식 영구자석(PM, Permanent Magnet)을 선택하였다 [7].

2.5 LSM 전류제어기 설계

LSM은 고성능 제어를 위해서 제어기에 필요한 물리량을 직류로 환산하여 취급한다. 그리고 전류제어기는 LSM단자의 입력전압을 제어함으로써 LSM의 전류를 제어한다. 따라서 전류 제어 알고리즘은 그림 7과 같이 전류 지령과 궤환 전류를 비교하여 이에 상응하는 전압을 LSM에 인가하도록 구성하였다.

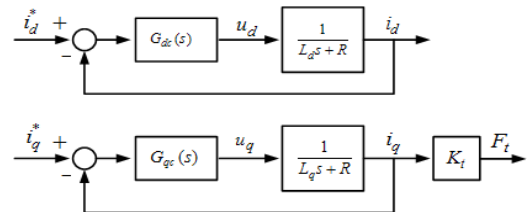


Fig. 7. Block diagram of current controller

그림 7에서 G_{cs}(s)함수는 전압 명령과 실제 전류의 차이로부터 전압을 생성하는 제어기의 역할을 수행하고 있으며, 본 제어기는 식 (8)과 같이 전류 오차에 비례하여 전압출력을 생성하는 항과 전류 오차의 적분으로부터 전압을 생성하는 항으로 구성되어 진다.

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

2.6 차량 전자석 위치 관측기 설계

회전자속기준제어에서, 동기회전축은 이동자 자속의 위상에 일치되어져 있다. 따라서 이동자속의 정밀한 위치신호를 검출하는 것은 LSM의 추력을 제어하는데 있어 매우 중요하다. 궤도열차의 위치신호 검출을 위한 홀

센서는 극간격 τ 가 0.042[m]임을 고려하여 0.042[m]간격으로 설치한다. 따라서 궤도열차의 위치정보는 자속의 위상이 제로 크로싱(zero crossing) 되는 점에서 갱신됨으로 전류 위상 한 주기 동안 4번의 위치정보를 얻을 수 있다.

추진인버터는 500[us]주기의 전류제어루프를 갖고 있다. 따라서 전류제어기는 정밀한 위상제어를 실시간 수행하기 위해서 보다 빠르고, 정밀한 차량의 자속위치신호를 취득할 필요가 있다. 그러나 본 시스템은 차량으로부터 대략 5[ms]지연된 위치신호를 2msec주기로 전송받기 때문에 위치신호 지연을 보상한 차량자속위치 관측기가 필요하다.

궤도열차의 추진 제어는 차량으로부터 수신된 차량위치정보를 입력으로 하는 직류 모터 수식모델 기반의 폐루프 전 차원 위치 관측기를 도입하였다. 따라서 추진인버터에서 실시간으로 요구하는 고 정밀, 고 분해능의 위치정보를 만족시킬 수 있다. 그림 8의 직류 모터 모델은 참고문헌[2]에서 점성 마찰력을 무시한 모델을 적용하였다. 여기에서, K_t 는 모터토크상수, M 은 차량 질량, F_t 차량의 추진토크, τ_d 는 외란토크이다.

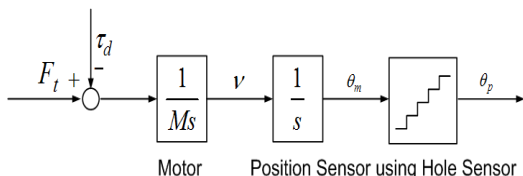


Fig. 8. Dynamic model of mechanical plant

그림 8의 직류 모터 모델을 상태변수 방정식으로 나타내면, 식 (10)과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\theta}{dt} \\ \frac{dv}{dt} \\ \frac{d\tau_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/M \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ v \\ \tau_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M \end{bmatrix} F_t \quad (10)$$

상기 수식(10)로부터 전 차원 위치관측기를 설계하면 식(11)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\theta}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}}{dt} \\ \frac{d\hat{\tau}_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/M \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{v} \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ M \end{bmatrix} F_t \quad (11)$$

$$+ \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \left[\theta - \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{v} \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} \right]$$

식 (11)에서 이득을 구하면 식(12)와 같다.

$$\begin{aligned} \tilde{x} &= x - \hat{x} \\ \dot{\tilde{x}} &= (A - LH)\tilde{x} \\ \begin{cases} s^3 + s^2l_1 + sl_2 + l_3 = 0 \\ (s + \omega_n)(s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2) = 0 \end{cases} & \quad (12) \\ l_1 &= (2\xi + 1)\omega_n \\ l_2 &= (2\xi + 1)\omega_n^2 \\ l_3 &= \omega_n^3 \end{aligned}$$

2.7 시뮬레이션 결과 및 고찰

LSM의 위치검지 관측기에 의한 제어특성을 분석하기 위해 그림 9와 같이 시뮬레이션 모델을 구성하였다.

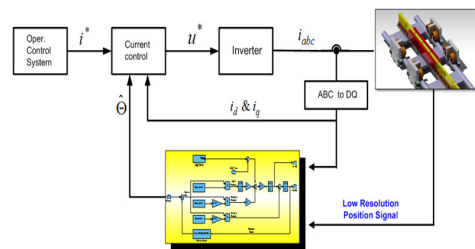


Fig. 9. LSM Control System Block with position estimator

시뮬레이션 모델은 토크 전류제어기, LSM의 모델, 기계적 모델 및 차량위치 관측기로 구성되어 있으며, 시뮬레이션과 관련된 시스템 파라미터는 표 3과 같다.

위치 관측기를 포함한 토크제어시스템의 주파수 도메인에서의 응답특성은 그림 10과 같다. 그림10으로부터 토크제어기 대역폭은 9320[rad/sec], 위상여유는 60° 이상, 이득여유는 40[dB]이상임을 알 수 있다. 토크제어기 대역폭 9320[rad/sec]는 토크전류제어기 응답시간은 대략 2[ms](시정수 3 τ 적용)을 나타내며, 폐루프 시스템의 안정성은 위상여유 60°로부터 안정함을 확인할 수 있다.

Table 4. Parameters of the dynamic model used in simulation

Parameter	Value	Parameter	Value
R_u	0.11 [Ω]	S_{fr}	10 [N]
L_d, L_q	1.1 [mH]	K_{str}	10 [s/m]
p	4	V_{fr}	3 [Ns/m]
τ	0.042 [m]	C_{fr}	30 [N]
M	20 [kg]	K_t	0.1129 [N/A]
Φ_{em}	0.0252 [wb]	r	5 [m]

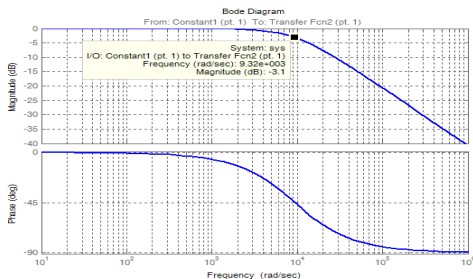


Fig. 10. Bode plot for torque PI controller with position estimator

그림 11은 위로부터 차량 속도 V_s , 구동토크 T_e 및 전계부하토크 T_L , 모터 A상전류 i_A , 차량 가속도 A_V 그리고 차량 위치계적 S_V 를 나타낸다.

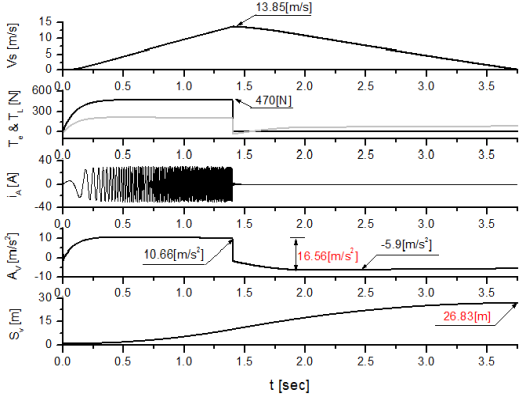


Fig. 11. speed, torque, A phase current of the motor, acceleration and position diagrams

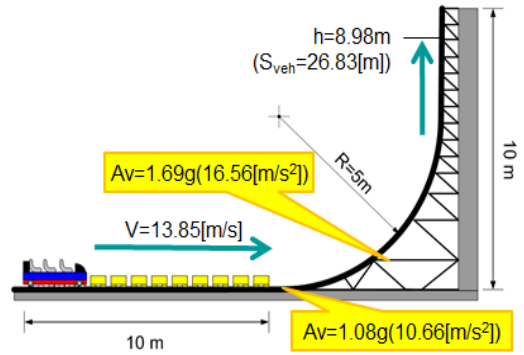


Fig. 12. Simulation results

시뮬레이션 결과로부터 차량의 최고속도는 13.85[m/s], 곡선부에서 최대 가속도는 16.56[m/s²]로써 대략 1.08[g], 차량의 수직 궤도부 도달높이는 차량의 이동거리 26.83[m]로부터 8.98[m]까지 상승함을 알 수 있으며 그림 12에 나타내었다.

그림 13은 궤도열차의 이동거리 및 각각의 부하토크를 나타낸다.

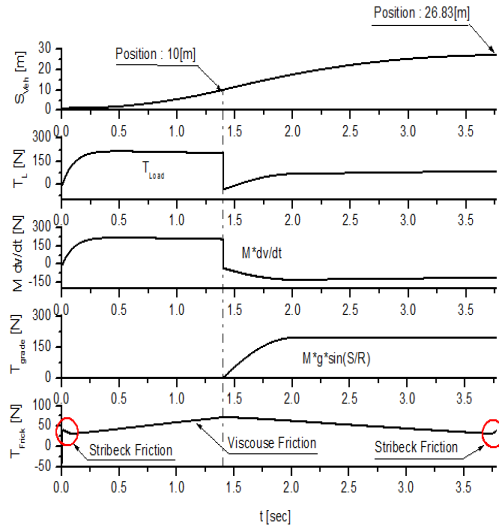


Fig. 13. position, load torque, Inertia load, gradient resistance and friction force

그림 14는 궤도열차 주행시 차량위치 관측기와 관련된 것으로써, 차량위치 S_{veh} 와 차량 추정위치 S_{Est} (상)과 위상각 PH_{real} 과 PH_{Est} 를 나타내고 있으며, 그림 15는 그림 14의 0초 ~ 0.3초 구간을 확대한 파형이다. 해당 결과로부터 LSM의 1극 간격마다 4번의 위치정보가 측정되고 있으며, 이러한 불연속적인 차량위치 측정 정보

는 차량 위치 관측기로부터 추정된 선형위치정보와 일치하는 것을 확인할 수 있었다.

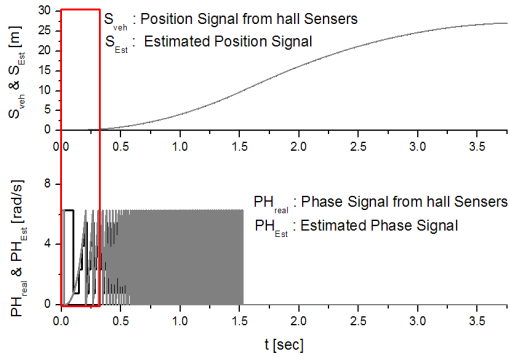


Fig. 14. vehicle position S_{veh} & estimated position S_{Est} (Upper) and Phase Angle PH_{real} & estimated phase angle PH_{Est} (Lower)

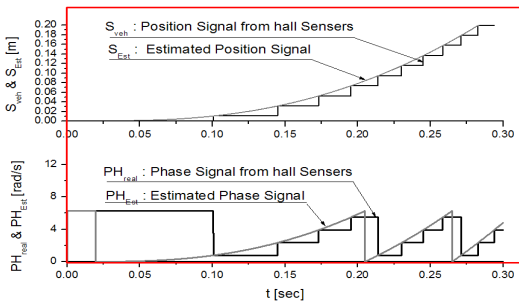


Fig. 15. Vehicle Position and Phase Angle in the time range from 0s to 0.3s

3. 결론

본 논문에서는 LSM 추진시스템기반의 궤도열차에 대하여 차량위치관측기를 적용한 추력제어방식에 대하여 고찰하였다. 이를 위해 축 변환이론에 의한 LSM 토크제어기를 구성하고, 차량위치 추정기를 추진제어기에 적용하였다. 제시된 토크제어시스템의 성능을 확인하기 위해 Matlab/Simulink를 이용하여 궤도열차의 시뮬레이션 모델을 도출하였고, 시뮬레이션을 통해 차량위치 추정기를 포함한 LSM 토크제어시스템의 안정성 및 목표응답특성을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 토크제어기의 대역폭이 9,320 [rad/sec], 위상여유는 60° 이상으로 응답특성과 안정성에 대하여 충분한 여유가 있는 시스템

임을 확인하였다. 또한 위치관측기는 위상각 한 주기에 4번씩 취득되는 위치정보로부터 선형적인 위상각 정보를 추정할 수 있어 추진효율을 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다. 향후 궤도열차의 축소모델개발을 통해 해당 제어시스템의 성능확인이 필요할 것으로 사료된다.

References

- [1] B.S. Bhangu, C.M. Bingham, Nonlinear State- Observer Techniques for Sensorless Control of automotive PMSM's including Load-Torque Estimation and Saliency, EPE 2003
- [2] Uwe HENNING, Rainer KNIGGE, Verena FREI- TAG, Propulsion and control system for high-speed maglev trains, Scientific Shop 6th WCTR,1992
- [3] J.F. Gieras, z.J. Piech and B.Z. Tomczuk, "Linear Synchronous Motor, 2nded", Taylor & francis CRC Press, Boca Ration, 2012.
- [4] Won-Bum Jang, Seok-Myeong Jang and Dae-Joon You, " Dynamic Drive Analysis through Base Speed Determination for Optimal Control Boundary in PMLSM with Self-Load", IEEE Trans. Magnetics, vol 41, 2005.
- [5] Faa-Jeng Lin, Po-Hung Shen, Ying-Shieh Kung," Adaptive vavelet neural network control for linear synchronous motor servo drive," IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 41, 2005
- [6] Wu Hong-Xing, Hong Jun-Jie, Li Li-Yi, Tang Young-Bin, Deong Kan, Cao Hai-Chuan, " Research for the control System of a Pulsed Power permanent Linear Synchronous Motor," IEEE Trans. Magnetics, 2009
- [7] J.M. Kim, H.W. Cho, S.M. Jang, J.M. Jo, Y.J. Han, " Design and Analysis on Linear Synchronous Motor with Long Stator and Phase Concentrated Winding," Trans. of KIEE, Vol. 63, No. 1. pp.54-62, 2014

조 정 민(Jeong-Min Jo)

[정회원]



- 1999년 2월 : 명지대학교 명지대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 명지대학교 명지대학원 전기공학과 (공학석사)
- 2007년 11월 ~ 2009년 3월 : 현대로템 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

전력변환시스템, 자기부상시스템

한 영 재(Young-Jae Han)

[정회원]



- 1996년 2월 : 홍익대학교 전기제어공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 홍익대학교 전기제어공학과 (공학박사)
- 2013년 2월 : 성균관대학교 경영학과 (경영학학사)
- 1995년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

추진제어시스템, 전기철도

이 진 호(Jin-Ho Lee)

[정회원]



- 2000년 2월 : 광주과학기술원 기전공학과 (공학석사)
- 2005년 12월 : University of Florida 기계공학과 (공학박사)
- 2006년 4월 ~ 2009년 12월 : 삼성코닝정밀소재 책임연구원
- 2010년 1월 ~ 2011년 12월 : 국방기술품질원 선임연구원

- 2012년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

기계제어, 열차시스템
