

초고속 자기부상철도 위치검지 신호지연 및 전송주기에 따른 추력성능 저하 및 보상에 관한 연구

The Study on Thrust Force Degradation and Compensation according to Position Signal delay and Transmit Cycle in Super Speed Maglev

이진호*[†], 조정민*, 한영재*, 이창영*

Jin-Ho Lee*[†], Jung-Min Jo*, Young-Jae Han*, Chang-Young Lee*

Abstract For super speed maglev train with 500km/h level, the high power and efficient linear synchronous motor(LSM) as a propulsion device is suitable. To control the LSM, the real time position information of maglev must be detected and position-synchronized power should be provided to the LSM. The position detection performance is key factor which determines the control efficiency. However, since position signal has drawback such as delay and transmit cycle causing performance degradation, these factor should be compensated and corrected. In this study, the influence of position signal delay and transmit cycle on propulsion power degradation is investigated and the improved method is proposed.

Keywords : Maglev Train, Linear Synchronous Motor, Propulsion, Position Detection

초 록 550km/h 이상의 초고속 자기부상철도의 추진을 위해서는 고효율 및 대용량 추진이 가능한 선형동기전동기(LSM: Linear Synchronous Motor)가 적합하다. 선형동기전동기의 추진 제어를 위해서는 운행 중인 열차의 위치를 실시간으로 파악하여 열차의 위치와 동기화된 전류를 공급해 주어야 하는데, 이때 위치정보의 정확도는 열차의 효율을 좌우하는 중요 요소이다. 초고속 자기부상철도의 특성상, 무선송신에 따른 신호지연 및 전송주기가 발생하며 이에 대한 적절한 보상이 이루어 져야 추력 성능 저하를 최소화 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 위치검지 신호지연 및 전송주기가 추력성능 저하에 미치는 영향을 살펴보고 이에 대한 해결방안을 제시하고자 한다.

주요어 : 초고속자기부상열차, 선형동기전동기, 추진제어, 위치검지

1. 서 론

초고속 자기부상열차(시속 500km 이상)의 추진을 위해서 사용되는 선형동기전동기(LSM: Linear Synchronous Motor)는 고속, 대용량 및 고효율 측면에서 우수한 성능을 지닌다. 선형동기전동기 추진 제어를 위해서는 열차의 위치를 실시간으로 파악해서 열차의 위치와

† 교신저자: 한국철도기술연구원(jinholee@krri.re.kr)

* 한국철도기술연구원

동기화된 전력을 궤도에 설치된 고정자코일에 공급해 주어야 하는데, 이때 위치정확도 자기부상열차의 추진효율에 영향을 미치는 중요한 요소이다. 초고속 자기부상철도의 추진 제어실은 지상에 위치하고 있으며 제어실과 실제 차량과는 거리가 멀기 때문에 위치검지 신호를 제어실로 무선으로 송신해야 하고 이에 따른 신호 지연 및 송신 주기 문제가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 위치신호 정확도 저하가 열차의 추력저하에 미치는 영향을 테스트베드를 이용하여 분석하였고, 이를 보상하는 방법을 제시하고자 하였다.

2. 위치신호 영향 분석

2.1 위치신호 지연 영향

선형동기 전동기의 d-q 좌표 변환계에서의 추력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{thrust} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (1)$$

여기서 p 는 극수, τ 는 극간격, ψ_f 는 회전자의 쇄교자속이고, L_d L_q i_d i_q 는 각각 d-q축에서의 인덕턴스와 전류를 나타낸다. Fig. 1과 같이 열차의 위치 정보가 지연될 경우 d-q축이 $\Delta\theta$ 만큼 회전하게 되고, 이로 인해 고정자 전류는 다음과 같이 변하게 된다.

$$i_{dr} = i \sin \Delta\theta, \quad i_{qr} = i \cos \Delta\theta \quad (2)$$

따라서 식 (1)과 (2)를 이용하면 $\Delta\theta$ 만큼 지연된 위치신호에 의해 변화된 추력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{thrust} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_f + (L_d - L_q) i_{dr}] i_{qr} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_f i \cos \Delta\theta + (L_d - L_q) i^2 \sin \Delta\theta \cos \Delta\theta] \quad (3)$$

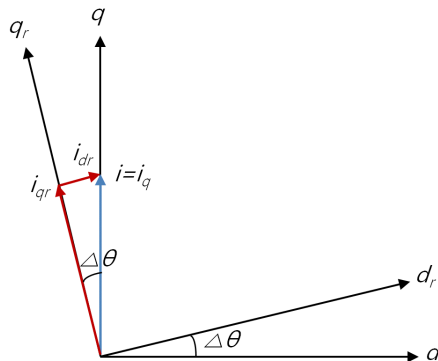


Fig. 1 Influence of position signal delay

2.3 위치신호 송신 주기 영향

송신주기가 T 일 경우 위치신호는 Fig. 2와 같이 ΔT 마다 불연속적으로 입력된다. 그러나 실제 위치값은 $\theta = \omega t$ 의 직선식으로 표시되며, $0 \sim T$ 구간에서 실제값과 수신된 값을 비교해 보면 평균적으로 $\theta_1/2 = \omega T/2$ 만큼 신호가 지연되는 것과 같은 효과가 발생함을 알 수 있다.

3. 위치신호 보상 및 추정 방법

위치신호 지연시간이 T_d 라면, 속도에 지연시간을 곱하여 지연된 시간동안 이동한 거리를 계산할 수가 있으므로, 그만큼을 입력되는 위치값에 더해서 위치신호 지연을 보상할 수 있다. 위치신호 송신주기가 T 일 경우, ΔT 사이의 실제값은 전력변환장치 제어기의 데이터 처리주기가 Δt 라면, 처리주기마다 회전자가 이동한 거리를 더해서 누적시킴으로써 추정할 수 있다. 이와 같은 방법을 적용한 결과가 Fig. 3에 나타나 있으며 다음식과 같이 간단하게 구현할 수 있다.

$$\theta_{new} = \theta_{previous} + \omega T_d + \omega \Delta t \quad (4)$$

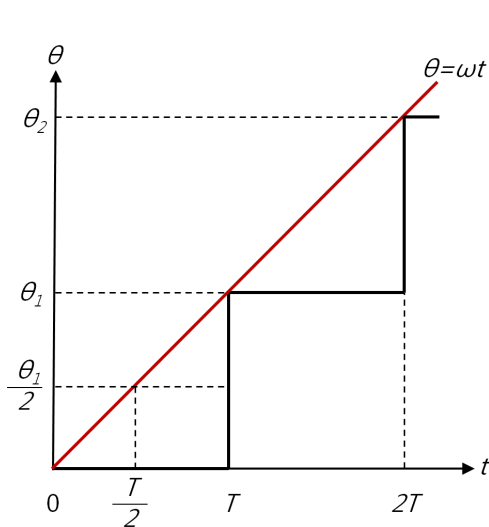


Fig. 2 Influence of position signal transmit cycle

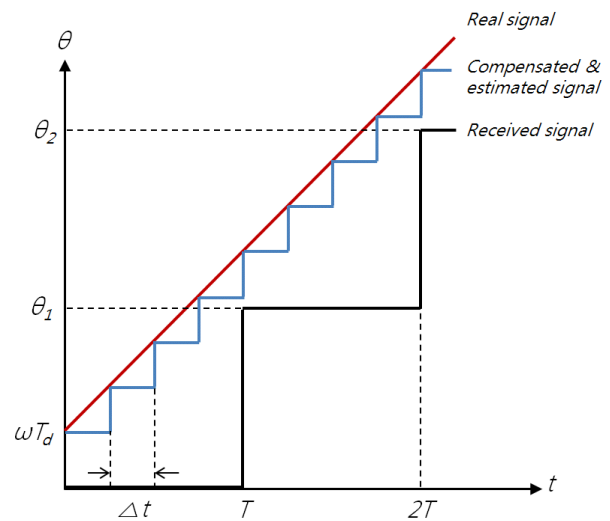


Fig. 3 Compensation and estimation of position signal

4. 테스트 결과

4.1 Test bed

상기와 같은 분석 결과를 Fig. 4와 같은 test bed를 이용하여 검증하고자 하였다. Test bed는 직경 5.5m의 가이드웨이와 이를 감싸는 형태의 차량으로 구성되어 있으며 위치검지는 Fig. 5와 같은 바코드 타입을 이용하였다. Test bed의 주요 사양은 Table. 1과 같다.

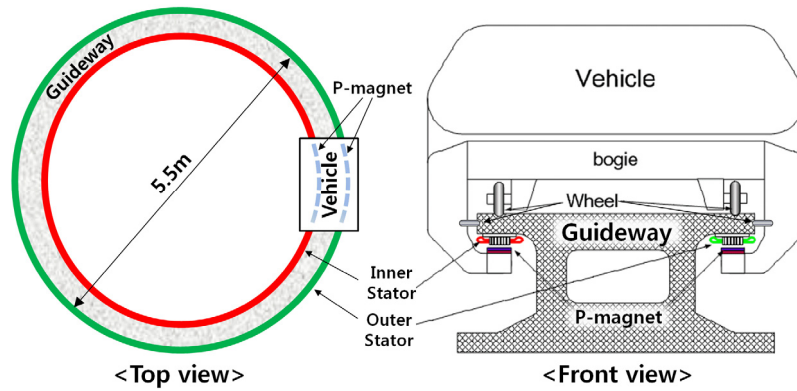


Fig. 4 Conceptual diagram of test bed

Table. 1 Specification of test bed

Item		Value
Vehicle	Size	0.78×1.24×0.34m
	Weight	64.4kg
LSM	Number of Pole	1
	Pole Pitch	0.03m
	Continuous Force	46N
	Continuous Current	2.4A(rms)
	Force Constant	19.2N/A(rms)
Position Detect & Transmit device	Resolution	0.001m
	Transmit Cycle	0.002s
	Delay Time	0.015s
	Frequency Band	5GHz
Controller CPU	Processing Cycle	0.0002s

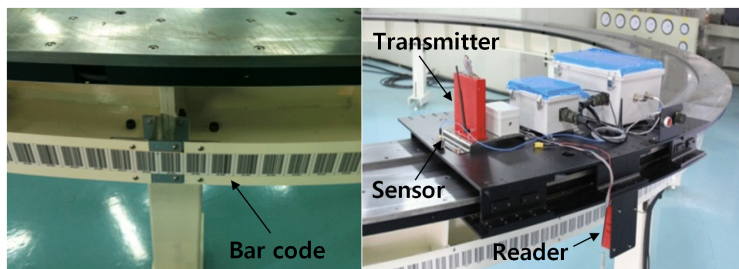


Fig. 5 Position detection and transmit device

4.2 테스트 결과

위치신호 지연에 따른 추력 변화 결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 위치신호 지연이 증가함에 따라 추력이 감소함을 알 수 있고, 그 감소비율은 실험과 식 (3)을 이용한 계산결과가 비슷하게 나타났다.

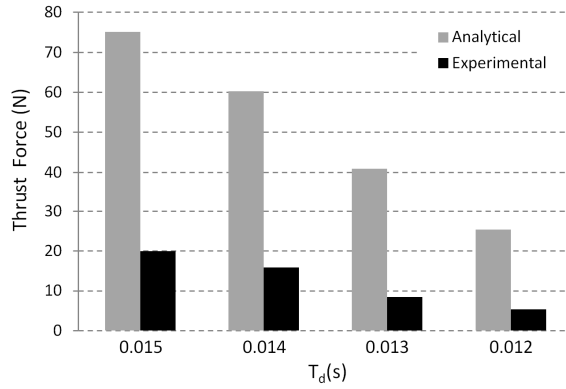


Fig. 6 Thrust force according to T_d

위치신호 송신주기 사이의 실제 위치값 추정을 위하여 식 (4)에서 추정 알고리즘에 해당하는 $\omega\Delta t$ 항목을 포함시켰을 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 테스트하여 전류파형을 비교한 결과가 Fig. 7에 나타나 있다. 보다 정확한 위치 정보로 인해 전류 파형이 개선되었음을 알 수가 있다. 추력 저하 테스트 결과는 Fig. 8에 나타나 있다.

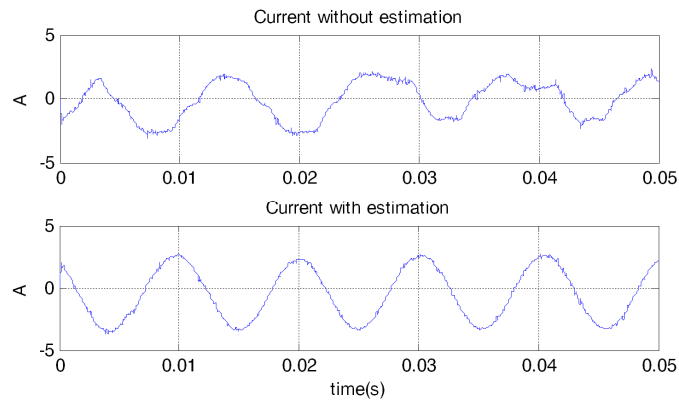


Fig. 7 Output current profile improvement through position signal estimation

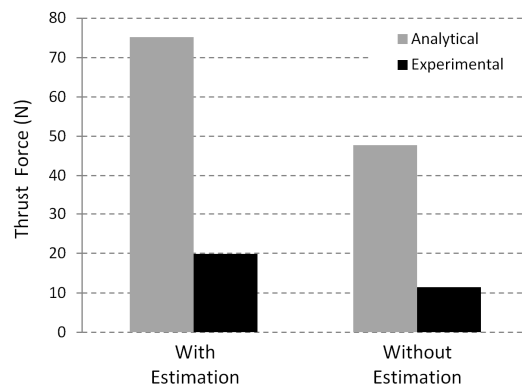


Fig.8 Thrust force according to position signal estimation

위치신호 보상 및 추정 방법을 test bed에 적용한 후의 최대 속도 및 최대 가속도의 변화를 측정한 결과가 Fig. 9에 나타나 있다. 위치신호의 지연을 보상하지 않을 경우 과도한 신호지연으로 인해 구동이 되지 않았으며, 추정 알고리즘을 적용할 경우, 지연 위치신호만을 보상했을 경우 대비, 최대 가속도 및 최대 속도가 각각 21%, 27%씩 향상되었다.

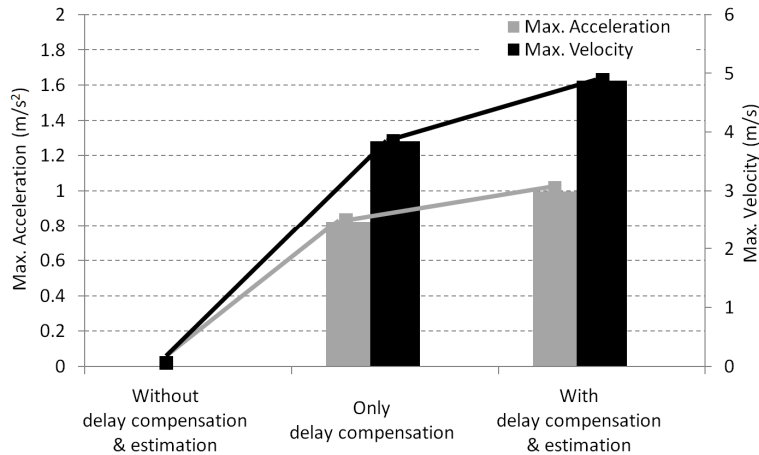


Fig. 9 Test bed performance improvement through position signal compensation and estimation

5. 결론

본 논문에서는 초고속 자기부상철도에서 신호지연 및 송신주기로 인한 위치검지의 성능저하가 추력에 미치는 영향을 살펴보고 이에 대한 해결방안을 제시하였다. 이를 적용하기 위하여 test bed를 구축하였으며, 실험을 통하여 제시된 방안의 효과를 검증하였다.

후 기

본 연구는 국토교통부에서 시행하는 “초고속 자기부상철도 핵심기술개발” 과제로 부터 지원을 받아 수행한 연구 결과입니다. (11PRTD-B061485)

참고문헌

- [1] J. Lee, J. Jo, Y. Han, C. Lee. (2013) Development of Propulsion Testbed for Super Speed Maglev, *2013 Spring Conference of the Korean Society for Railway*.
- [2] C. Qian, R. Wei, X. Wang, Q. Ge, Y. Li. (2011) Analysis the position signal problem I propulsion system with long stator linear synchronous motor, *The 21st Int. Conf. on Magnetically Levitated System and Linear Drives*.
- [3] H. Liu, S. Zhang, X. Wang. (2011) Position sensing and signal transmission of linear synchronous motor for high speed maglev, *The 21st Int. Conf. on Magnetically Levitated System and Linear Drives*.