

위치신호 보상 및 추정을 통한 초고속 자기부상철도 추력 성능 향상

이진호^{1*}, 조정민¹, 한영재¹, 이창영¹
¹한국철도기술연구원 초고속자기부상철도연구단

Thrust Performance Improvement through Position Signal Compensation and Estimation in Super Speed Maglev

Jin-Ho Lee^{1*}, Jeong-Min Jo¹, Young-Jae Han¹ and Chang-Young Lee¹
¹Super Speed Maglev Train Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 본 논문에서는 초고속 자기부상철도 추진 제어에 필수적인 차량의 위치검지에 있어서 위치신호 송신지연 및 송신주기가 추력에 미치는 영향을 수치적으로 분석하고 test bed를 이용한 실험을 통해 이를 확인하였다. 위치신호 송신문제를 해결하기 위한 방안으로서 위치신호 보상 및 추정 기법을 제시하였으며 제시된 방법을 test bed에 적용하여 효용성을 검증하였다. 적용 결과 추력이 크게 증가하였으며 이에 따라 차량의 가속도 및 속도 성능이 향상됨을 확인하였다. 본 방법은 향후 개발 예정인 한국형 초고속 자기부상철도의 위치검지시스템에 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다

Abstract In position detection for super speed maglev propulsion control, the influence of position signal delay and transmit cycle on propulsion power degradation is investigated analytically and validated by test bed experiments. As a solution to the problem caused by signal transmit, position signal compensation and estimation method is proposed and applied to the test bed. Through experiments, it is confirmed that by adapting the proposed method, the propulsion power is increased remarkably, which results in acceleration and velocity performance improvement. This method could be effectively applied to position detection system of Korean super speed maglev which is under development.

Key Words : Super Speed Maglev, Propulsion Control, Position Detection

1. 서론

최근 날로 높아져가고 있는 철도의 증속요구를 해결하기 위한 하나의 방안으로서 고효율의 선형동기전동기(LSM: Linear Synchronous Motor)를 추진동력으로 이용하고, 차량이 궤도를 부상한 상태로 운행하여 마찰력을 획기적으로 줄일 수 있는 초고속 자기부상철도가 각광을 받고 있다[1-5].

독일이 개발한 초고속 자기부상열차인 Transrapid는

현재 중국 상하이에서 운행 중에 있으며[6], 초전도를 이용한 일본의 MLX는 야마나시의 시험선로에서 테스트를 진행 중에 있다[7,8]. 반면에 국내의 연구는 이제 막 시작한 단계로서, 2012년부터 핵심기술개발 위주의 국책 연구과제가 수행 중에 있다.

시속 500km 이상의 초고속 자기부상열차를 구동하기 위한 추진 장치로는 고속, 대용량 및 고효율 측면에서 우수한 성능을 지닌 선형동기전동기가 적합하다. 이 경우에 고정자 역할을 하는 코일을 궤도를 따라 전 구간에 설치

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

*Corresponding Author : Jin-Ho Lee(Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5235 email: jinholee@krii.re.kr

Received July 30, 2013

Revised (1st August 26, 2013, 2nd September 3, 2013)

Accepted October 10, 2013

하고 회전자 역할을 하는 전자석을 차량에 취부 하여 상호 작용에 의해 구동력을 발생 시킨다. 추진 제어를 위해서는 운행 중인 열차의 위치를 실시간으로 파악하여 열차의 위치와 동기화된 전력을 궤도에 설치된 코일에 공급해 주어야 하는데, 이때 위치정보의 정확도는 열차의 추진효율에 직접적인 영향을 미치는 매우 중요한 요소이다[9-10].

초고속 자기부상열차는 열차가 궤도를 부상하여 운행하기 때문에 기존 차륜철도와는 달리 비접촉 방식의 위치검지 방법이 필요하며, 추진 제어가 이루어지는 이상의 제어실로 위치신호를 무선으로 송신해야 하기 때문에 신호 지연 및 송신 주기에 따른 추력 저하가 발생하게 된다[9]. 본 논문에서는 이러한 위치신호 무선 송신에 따른 문제가 추력저하에 미치는 영향을 분석하고 이에 대한 해결 방안을 제시하였다. 그리고 test bed를 이용한 실험을 통해 이를 검증함으로써 그 효용성을 입증하였다.

2. 위치신호 영향 분석

2.1 선형동기전동기 추력 모델[11]

d-q 좌표변환을 통해 각속도 ω 로 회전하는 d-q 축 상으로 변환된 선형동기전동기의 고정자 전압 u 는 다음과 같다.

$$u_d(t) = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega\psi_q \quad (1)$$

$$u_q(t) = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega\psi_d \quad (2)$$

여기서 u_d , i_d 와 u_q , i_q 는 각각 d-q 축에서의 고정자 전압과 전류이고, R 은 전기자 저항을 나타낸다. ψ_d 와 ψ_q 는 d-q축에서의 고정자 쇄교자속으로 다음과 같이 표시된다.

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \quad (3)$$

$$\psi_q = L_q i_q \quad (4)$$

여기서 L_d , L_q 는 d-q 축에서의 고정자 인덕턴스이고, ψ_f 은 회전자의 쇄교자속이다. 식 (1)~(4)를 이용하면 전기자에 입력되는 전력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$u_d i_d + u_q i_q = Ri_d^2 + \frac{d\psi_d}{dt} i_d + Ri_q^2 + \frac{d\psi_q}{dt} i_q + \omega(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (5)$$

극간격이 τ 인 선형동기전동기의 속도 v_{lin} 는 ω 와 다음 식과 같은 관계가 성립하므로,

$$\omega = \frac{\pi}{\tau} v_{lin} \quad (6)$$

식 (5)에서 추력과 연관이 있는 마지막 항을 식 (6)의 v_{lin} 를 이용하여 나누면, 극수가 p 인 3상 선형동기전동기의 추력은 다음과 같이 구해진다.

$$F_{thrust} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (7)$$

2.2 위치신호 지연에 따른 영향

d-q 좌표변환을 이용한 선형동기전동기에서는 회전자의 위치 정보를 기반으로 회전자와 동기하여 회전하는 d-q 좌표를 설정하고 이 좌표를 기준으로 고정자 전류를 변환시킨다. 이렇게 변환된 고정자 전류는 회전자속과 항상 수직을 유지하게 되므로 회전자속과는 상관없이 고정자 전류만을 조절함으로써 선형동기전동기의 추진력을 쉽게 제어할 수 있게 된다. 그러나 이때 Fig. 1과 같이 회전자의 위치 정보가 지연되면 좌표변환의 기준이 되는 d-q축이 $\Delta\theta$ 만큼 회전한 d-q'축으로 바뀌게 되고 이로 인해 고정자 전류는 다음식과 같이 회전자속의 영향을 받게 된다[9].

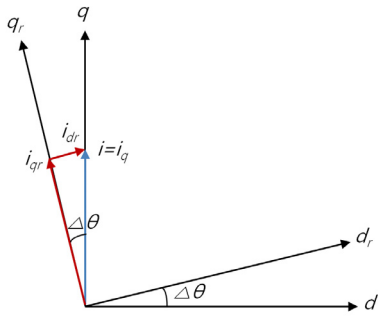
$$i_{dr} = i \sin \Delta\theta, \quad i_{qr} = i \cos \Delta\theta \quad (8)$$

따라서 식 (8)과 (7)을 이용하면 위치신호 지연($\Delta\theta$)에 의해 감소된 추력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} F_{thrust} &= \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_f + (L_d - L_q) i_{dr}] i_{qr} \\ &= \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} [\psi_f i \cos \Delta\theta + (L_d - L_q) i^2 \sin \Delta\theta \cos \Delta\theta] \end{aligned} \quad (9)$$

위 식에서 고정자가 표면부착형인 경우에는 L_d 가 L_q 와 유사한 값을 가지게 되므로, 초고속 자기부상철도에서 위치신호 지연 $\Delta\theta$ 가 존재할 때의 추력은 다음식과 같이 된다.

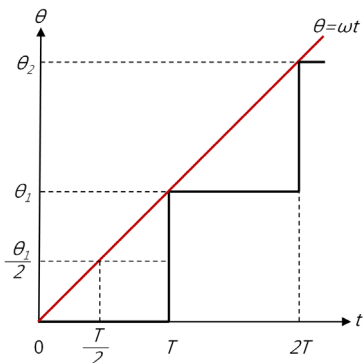
$$F_{thrust} = \frac{3}{2} p \frac{\pi}{\tau} (\psi_f i \cos \Delta\theta) \quad (10)$$



[Fig. 1] Influence of position signal delay

2.3 위치신호 송신주기에 따른 영향

Fig. 2와 같이 위치신호의 송신주기가 T 일 경우 위치값은 ΔT 마다 $\theta_1, \theta_2, \dots$ 와 같이 불연속적으로 입력된다. 그러나 회전자의 각속도가 ω 로 일정하다고 가정할 경우 실제 위치값 θ 는 Fig. 2에서 표시된 것과 같이 $\theta = \omega t$ 의 일차식 직선으로 나타낼 수 있다. 이때 $0 \sim T$ 구간에서 실제값과 입력값의 차이를 비교해 보면, $t=0$ 일 때는 0이지만 점점 증가하여 $t=T/2$ 일 때는 $\theta_1/2$, $t=T$ 일 때는 θ_1 만큼 실제값이 입력값보다 커지게 된다. 따라서 0과 T 사이에서 입력되는 위치신호는 실제 위치신호보다 평균적으로 $\theta_1/2$ 만큼 지연이 되는 것과 같은 효과가 발생함을 알 수 있다. 즉, 송신주기가 T 일 경우 이로 인해 위치신호 지연($\Delta\theta$)이 $\omega T/2$ 만큼 발생하게 되고 이는 식 (10)에서 살펴본 것과 같이 추력을 감소시키는 원인이 된다.



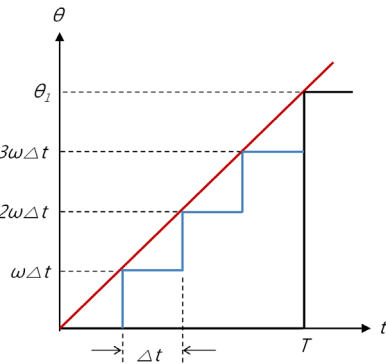
[Fig. 2] Influence of position signal transmit cycle

3. 위치신호 보상 및 추정 방법

위치신호의 지연시간이 T_d 일 경우, 회전자의 각속도

가 일정하다고 가정을 하면, 각속도에 지연시간 을 곱하여 지연된 시간 동안 회전자가 이동한 거리를 계산할 수 있다. 따라서 위치신호의 지연이 일정하게 유지된다면 ωT_d 만큼을 입력되는 위치값에 더해져서 위치신호 지연을 보상할 수가 있다.

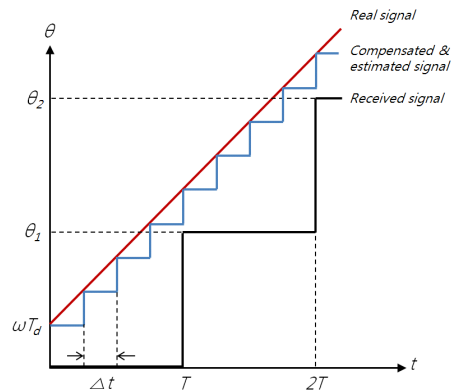
위치신호 송신주기가 T 일 경우, 2.3. 절에서 설명한 ΔT 사이의 실제 위치값을 추정하기 위한 방법이 Fig. 3에 나타나 있다. 즉, 전력변환장치 제어기의 데이터 처리 주기가 Δt 라고 하면, 처리 주기마다 회전자가 이동한 거리인 $\omega\Delta t$ 만큼을 더해져 누적시킴으로써 실제 위치값과 근사한 값이 되도록 추정하는 것이다. 일반적으로 $\Delta t \ll \Delta T$ 이므로 본 방법을 이용하면 실제 위치값을 매우 정확하게 추정할 수 있다.



[Fig. 3] Position estimation between transmit cycle

앞서 설명한 위치신호 보상 및 추정 방법을 적용한 결과가 Fig. 4에 나타나 있으며, 본 방법은 다음 식과 같이 간단하게 구현할 수 있다.

$$\theta_{new} = \theta_{previous} + \omega T_d + \omega \Delta t \quad (11)$$

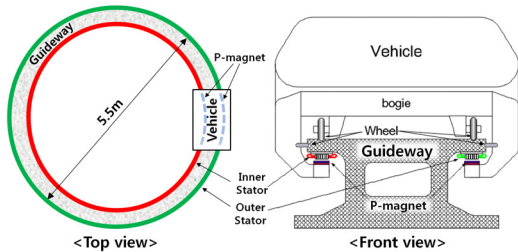


[Fig. 4] Compensation and estimation of position signal

4. 테스트 결과

4.1 Test bed

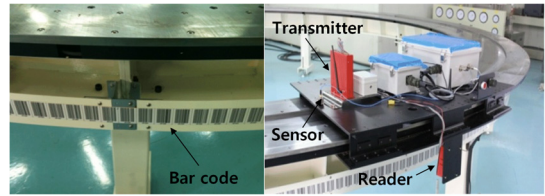
Test bed를 이용하여 위치신호 지연 및 송신주기가 추력에 미치는 영향을 살펴보고, 3절에서 도출한 위치신호 보상 및 추정 방안을 적용하여 그 효용성을 검증하고자 하였다. Test bed는 Fig. 5와 같이 직경 5.5m의 가이드웨이와 이를 감싸는 형태의 대차가 하부에 부착된 차량으로 구성되어 있다. 압연강판으로 제작된 가이드웨이 하부 좌우에는 고정자가 설치되어 있고, 차량 대차에는 영구자석(P-magnet)이 가이드웨이 곡률반경과 일치되도록 취부되어 있다. 위치신호 검지 및 송신을 위하여 Fig. 6과 같이 궤도 측면에 원주방향으로 17.28m 길이의 바코드를 설치하였으며, 차량에 바코드 리더기와 신호 송신기를 탑재하였다. 또한 차량 가속도 측정을 위한 센서와 데이터 전송 장치 및 전원공급을 위한 배터리 등도 차량에 추가로 탑재하였다. 차량 하드웨어, 선형동기전동기 및 위치신호 검지 장치에 대한 주요 사양은 Table 1과 같으며, Fig. 7은 약 8 회전 구동시 측정된 차량 데이터의 예를 보여준다.



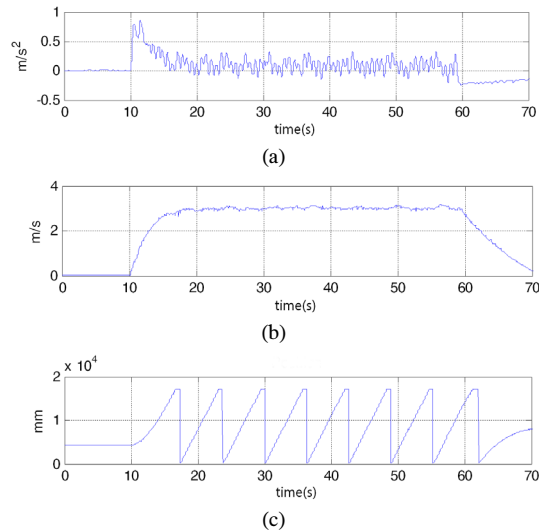
[Fig. 5] Conceptual diagram of test bed

[Table 1] Specification of test bed

Item		Value
Vehicle	Size($W \times L \times H$)	0.78×1.24×0.34m
	Weight(m)	64.4kg
LSM	Number of Pole(p)	1
	Pole Pitch(τ)	0.03m
	Continuous Force(F_{cont})	46N
	Continuous Current(I_{cont})	2.4A(rms)
	Force Constant(K)	19.2N/A(rms)
Position Detect & Transmit device	Resolution	0.001m
	Transmit Cycle(ΔT)	0.002s
	Delay Time(T_d)	0.015s
Controller CPU	Frequency Band	5GHz
	Processing Cycle(Δt)	0.0002s



[Fig. 6] Position detection and transmit device



[Fig. 7] Data measurement during running test
(a) Acceleration (b) Velocity (c) Position

4.2 테스트 결과

4.2.1 위치신호 지연에 따른 추력 변화

위치신호 지연이 추력에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 식 (11)에서 T_d 값을 0.015, 0.014, 0.013, 0.012초로 바꾸어 가면서 추력을 측정하였다. Test bed는 0.015초의 신호 지연시간을 가지므로 $T_d=0.015$ 일 때 위치신호 지연이 보상되어 식 (10)의 $\Delta\theta$ 가 0이 되며, T_d 가 감소할수록 $\Delta\theta$ 가 커지게 된다. 각각의 테스트시 T_d 를 제외한 다른 조건은 동일하게 유지하였으며, 충분한 데이터를 획득하기 위하여 차량을 7 회전 이상 구동시켰다. 그리고 차량에 전원이 공급된 시점부터 차단된 시점까지의 데이터를 분석에 활용하였다.

측정된 데이터를 이용하여 다음과 같은 두가지 방법으로 추력을 계산하였다. 첫 번째 방법은 2.2 절에서 유도된 추력식인 식 (10)을 이용하는 방법이다. 여기서 i 는 전동기에 투입된 전류이며, p , τ , ψ_f 는 Table 1을 참조하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p = 1, \tau = 0.03$$

$$\psi_f = \frac{2\tau}{3\pi p} \frac{F_{thrust}}{i_s} = \frac{2\tau}{3\pi p} K = 0.122 \quad (12)$$

그리고 ΔT_d 를 $0.015 - T_d$ 로 정의하고, 구동 속도를 v 라고 하면 $\Delta\theta$ 는 다음식과 같다.

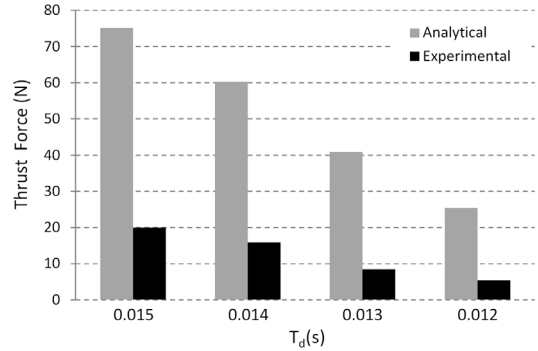
$$\Delta\theta = \Delta T_d v \frac{2\pi}{\tau} \quad (13)$$

두 번째 방법은 차량에 부착된 센서를 통해 측정된 구동방향의 가속도(a)와 차량의 무게(m)를 이용하여 다음 식과 같이 실험적으로 추력을 구하는 것이다.

$$F_{thrust} = ma \quad (14)$$

위치신호 지연에 따른 추력 변화 결과가 Fig. 8과 Table 2에 나타나 있다. 위치신호 지연이 증가함에 따라 추력이 감소함을 알 수 있는데, 그 감소비율은 수치적인 결과와 실험적인 결과가 유사하게 나타났다. 이는 식 (10)에 의해 분석된 신호지연에 따른 추력 저하식이 실제와 잘 일치함을 보여주는 것이다. 여기서 실제 추력값이 수치적으로 계산한 추력값에 비해 상대적으로 작게 측정된 이유는 다음과 같이 두가지로 생각할 수 있다. 먼저, 차량 운행시 차량 바퀴와 가이드웨이 표면 사이에 발생하는 마찰력에 의해 실제 추력이 감소하였을 것으로 추정된다. 본 연구에 사용된 차량에는 차량 하중을 지지하기 위한 바퀴와 회전운동으로 인해 발생하는 원심력을 지탱하기 위한 바퀴가 각각 차량 하부 및 측면에 부착되어 있다. 마찰력은 표면에 작용하는 힘과 마찰계수의 곱으로 표현되는데, 마찰계수는 접촉면의 상태, 회전 베어링의 상태 및 운행 속도 등에 의해 결정된다. 차량 하부의 바퀴와 가이드웨이 상면 사이의 마찰계수를 μ_{weight} 이라고 하면, 차량 하중이 $64.4kg (= 631N)$ 이므로 마찰력은 $\mu_{weight} \times 631(N)$ 이 된다. 그리고 차량 측면의 바퀴와 가이드웨이 측면 사이의 마찰 계수가 μ_{radial} 이고 회전속도를 $5m/s^2$ 라고 하면, 원심력 방향의 가속도가 $v^2/r = 5^2/2.75 = 9.1m/s^2$ 이므로 마찰력은 $\mu_{radial} \times (64.4 \times 9.1) = \mu_{radial} \times 586(N)$ 이 된다. 일반적으로 자동차의 마찰계수가 $0.1 \sim 0.4$ 이고[12], 철도차량의 마찰계수는 자동차의 $1/2 \sim 1/3$ 수준인 것을 고려하면[13], 앞서 살펴본 마찰력이 추진력을 상당부분 감소시킬 수 있음을 예상할 수 있다. 실제 추력값이 작게 나타난 또 다른 원인으로는 가속도 측정시 발생하는 측정 오차를 생각해 볼 수 있다. 본 시험 장치에서 가속도 측정

용 센서는 차량의 끝에 설치되어 있는데 차량의 좌우 방향 유격(약 40mm)으로 인해 운행 중 센서의 측정방향이 추력방향과 일치하지 않게 되고 그만큼 측정된 가속도 값은 실제 값보다 작게 되어 추력값이 작게 계산된 것으로 사료된다.



[Fig. 8] Thrust force according to T_d

[Table 2] Thrust force and reduction rate according to delayed time

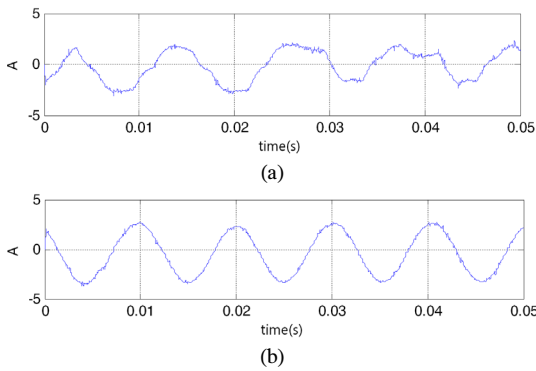
T_d	Delayed time	Thrust force(N)		Reduction rate(%)	
		Analytic	Experiment	Analytic	Experiment
0.015	-	75.1	19.9	-	-
0.014	0.001	60.3	15.8	19.7	20.5
0.013	0.002	40.9	8.5	45.6	57.3
0.012	0.003	25.4	5.3	66.2	73.3

4.2.2 위치신호 추정 효과

위치신호 송신주기로 인한 실제 위치값과 입력값과의 차이로 인해 추력 저하가 발생하며, 추정 알고리즘을 이용하여 송신주기 사이의 실제 위치값 추정이 가능함을 각각 2.3절과 3절에서 설명하였다. 이를 실험적으로 검증하기 위하여 식 (11)에서 추정 알고리즘에 해당하는 $\omega\Delta t$ 항목을 포함시켰을 경우와 그렇지 않은 경우에 대해서 각각 테스트를 수행하였다. 앞 절에서와 마찬가지로 수치적인 방법과 실험적인 방법으로 추력을 구하였으며, 이때 식 (10)에서의 $\Delta\theta$ 는 다음과 같다.

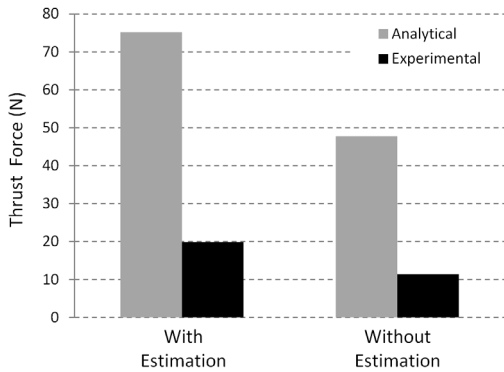
$$\Delta\theta = \frac{T}{2} v \frac{2\pi}{\tau} \quad (15)$$

먼저 추정 알고리즘 적용 전후의 모터 입력전류 파형을 측정하여 비교해 보았다. 그 결과 Fig. 9와 같이 추정 알고리즘을 통해 생성된 보다 정확한 위치 정보로 인해 전류 파형이 개선되었음을 확인할 수 있었다.



[Fig. 9] Output current profile improvement through position signal estimation
 (a) Current without estimation
 (b) Current with estimation

추정 알고리즘 적용 여부에 따른 추력 저하 결과가 Fig. 10과 Table 3에 나타나 있다. 앞 절의 실험 결과와 마찬가지로 추력 저하 비율이 수치적인 결과와 실험적인 결과에서 유사하게 나타남을 확인 할 수 있다. 여기에서도 실제 추력값이 수치적으로 계산한 추력값에 비해 상대적으로 작게 측정된 이유는 앞절에서 설명한 것과 같이 차량과 가이드웨이 사이에 작용하는 마찰력과 가속도 측정 오차가 작용하였기 때문이다.



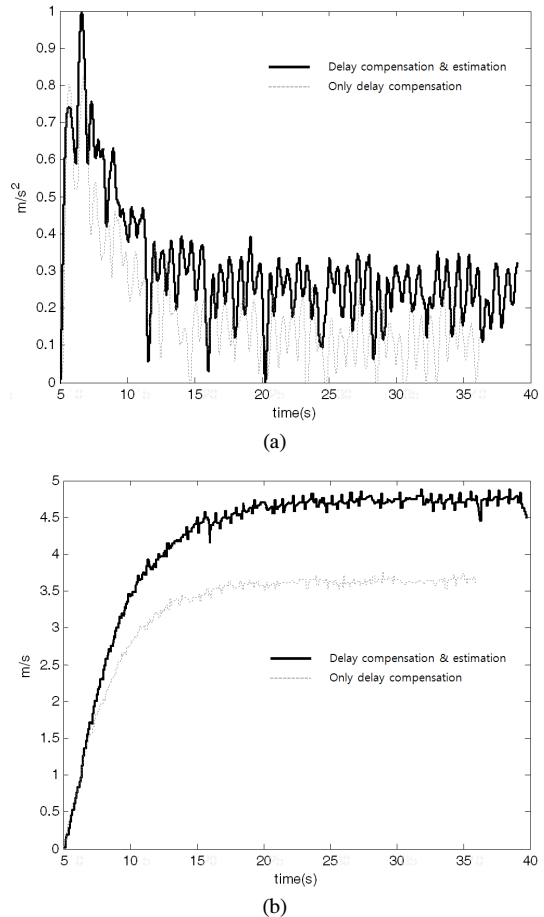
[Fig. 10] Thrust force according to position signal estimation

[Table 3] Thrust force and reduction rate according to position signal estimation

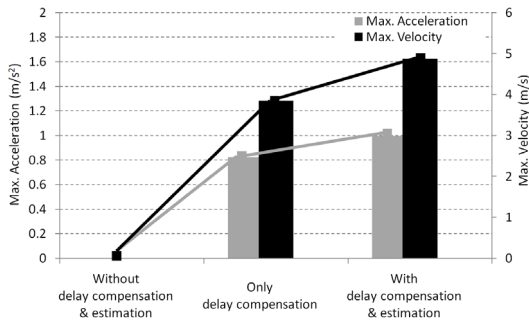
	Thrust force(N)		Reduction rate(%)	
	Analytic	Experiment	Analytic	Experiment
With estimation	75.1	19.9	-	-
Without estimation	47.8	11.4	36.4	42.8

4.2.3 위치신호 보상 및 추정에 따른 성능 향상

위치신호 보상 및 추정 방법을 test bed에 적용한 후 가속도 및 속도 성능 변화를 살펴보았다. 위치신호의 지연을 보상하지 않을 경우 과도한 신호지연으로 인해 구동이 되지 않기 때문에, 먼저 지연 위치신호만을 보상하였을 경우에 대해서 살펴 본 후, 추가로 추정 알고리즘을 적용하였을 경우에 대해서 성능 변화를 확인하였다. 각각의 경우에 대한 가속도 및 속도 데이터 파형과 최대값이 Fig. 11과 Fig. 12에 나타나 있다. 그림에서 나타난 것과 같이 추정 알고리즘을 적용할 경우, 지연위치신호만을 보상했을 경우 대비, 최대 가속도 및 최대 속도가 각각 21%, 27%씩 향상 되었음을 알 수 있다.



[Fig. 11] Acceleration and velocity measurement results
 (a) Acceleration (b) Velocity



[Fig. 12] Test bed performance improvement through position signal compensation and estimation

5. 결론

본 논문에서는 초고속 자기부상철도의 추진 제어를 위해 필수적인 위치감지시스템에 있어서, 위치신호 무선송신에 따른 신호지연 및 전송주기 등과 같은 요소가 추력저하에 미치는 영향을 수치적인 방법으로 검토하고 이를 실험적으로 검증하였다. 또한 이에 대한 해결 방안을 제시하고 이를 test bed에 적용하여 그 효용성을 입증하였다.

연구 결과, 0.001초의 위치신호 지연에 의해 약 22%의 추력저하가 발생함을 수치적으로 계산하였고, 실험을 통해 실제 추력이 약 24% 저하됨을 확인할 수 있었다. 또한 0.002초의 전송주기에 의해 발생하는 추력저하는 약 36%로 예상 되었으며, 실제 실험 결과 약 43%의 추력저하가 발생함을 확인 하였다.

위치신호 지연 및 전송주기에 의한 추력저하 문제를 해결하기 위한 방안으로써 속도 정보를 이용하여 지연시간을 보상하는 방법과 전력변환장치 제어기의 데이터 처리 주기를 이용하여 실제위치를 추정하는 방법을 제안하였다. 지연시간을 보상하기 전에는 과도한 신호지연으로 구동되지 않았으나, 보상 후에는 최대 가속도와 최대 속도가 각각 0.8m/s²과 3.8m/s로 향상되었고, 위치신호 추정 알고리즘을 추가로 적용한 후에는 각각 1m/s²과 4.9m/s로 더욱 향상된 결과를 얻을 수 있었다.

References

[1] J. Lee, Y. Han, J. Jo, C. Lee, "A study on trend of technology development for super-speed maglev", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, vol.14, No.6, pp.2631-2638, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2013.14.6.2631>

[2] S. Yamamura, "Magnetic levitation technology of tracked vehicles present status and prospects", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.12, No.6, pp.874-878, 1976.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1976.1059125>

[3] P. Sinha, "Design of a magnetically levitated vehicle", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.20, No.5, pp.1672-167, 1984.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063552>

[4] D. Rogg, "General survey of the possible applications and development tendencies of magnetic levitation technology", *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.20, No.5, pp.1696-1701, 1984.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/TMAG.1984.1063347>

[5] A. R. Eastham, W.F Hayes. "Maglev systems development status", *IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine*, vol.3, No.1, pp.21-30, 1988.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/62.843>

[6] W. Dories, B. Viola, "Further development programme for the TRANSRAPID of the Federal Ministry of Transport, Building and Housing", *Maglev 2004*, vol.1, pp.23-31, 2004.

[7] S. Miyamoto, Y. Osada, Y. Katsumi, F. Tsutomu, "The status of the running tests of JR-Maglev", *Maglev 2004*, vol.1, pp.60-64, 2004.

[8] The final stage of test line extension construction, <http://www.sannichi.co.jp/linear/news/2013/02/15/16.html>, 2013.2.15

[9] C. Qian, R. Wei, X. Wang, Q. Ge, Y. Li, "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*, 2011.

[10] H. Liu, S. Zhang, X. Wang, "Position sensing and signal transmission of linear synchronous motor for high speed maglev", *The 21st Int. Conf. on Magnetically Levitated System and Linear Drives*, 2011.

[11] P. Ponomarev, "Control of permanent magnet linear synchronous motor in motion control applications", *Master's thesis, Lappeenranta University of Technology*, 2009.

[12] K. Woo, S. Yamazaki, "A study on the estimation of friction coefficient between tire and road surface using running car data", *Transaction of the Korean Society of Automotive Engineers*, vol.7, No.6, 207-213, 1998.

[13] N. Kim, S. Cho, "A study on the friction characteristics of the wheel-rail contact patch", *Proceeding of 2013 spring conference, Dynamics and Control Sector, KSME*, 79-80, 2013.

이 진 호(Jin-Ho Lee)

[정회원]



- 1998년 2월 : 한국과학기술원 기계공학과 (공학학사)
- 2000년 2월 : 광주과학기술원 기계공학과 (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

이 창 영(Chang-Young Lee)

[정회원]



- 1993년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학학사)
- 1995년 2월 : 부산대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2012년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
- 1994년 12월 ~ 2005년 12월 : LS(前LG)전선, 전력연구소 선임연구원
- 2006년 1월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

초전도기기, 열차추진시스템, 철도차량정밀진단

조 정 민(Jeong-Min Jo)

[정회원]



- 1999년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 명지대학교 전기공학과 (공학박사)
- 2007년 9월 ~2009년 3월 : 현대로템 선임연구원
- 2009년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

전력변환시스템, 철도차량시스템

한 영 재(Young-Jae Han)

[정회원]



- 1994년 2월 : 홍익대학교 전기제어공학과 (공학학사)
- 1996년 2월 : 홍익대학교 전기제어공학과 (공학석사)
- 2004년 2월 : 홍익대학교 전기정보제어공학과 (공학박사)
- 2013년 2월 : 성균관대학교 경영학과 (경영학학사)
- 1995년 12월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

추진제어시스템, 전기철도