

## 자기부상시스템 LSM 추진제어기술에 관한 연구

조정민\*, 한영재\*, 이창영\*, 이진호\*, 신현철\*, 배덕영\*  
한국철도기술연구원\*

### A Study on the LSM Propulsion Control Technologies for Maglev System

Jeong-Min Jo\*, Young-Jae Han\*, Chang-Young Lee, Jin-Ho Lee, Heon-Cheol Shin\*, Duk-Young Bae\*  
Korea Railroad Research Institute\*

**Abstract** - 지상1차 선형동기전동기는 속도와 위치센서가 회전축에 설  
부착되어 있는 회전형 동기전동기와 달리 가이드웨이를 따라 위치센  
서관련부품이 설치되어 있다. 차상 자기부상열차로부터 전송되는 위치  
신호는 지상 추진인버터의 실시간 추진제어에 필요한 정보에 미흡하다.  
본 논문에서는 지상1차 선형동기전동기를 구동하는 추진인버터에 대한  
위치신호 추정기에 대하여 제시하였다. 지상 추진인버터가 요구하는 수  
준의 높은 분해능의 위치신호를 얻기위하여 직류모터 모델의 블록선도  
로부터 페루프 위치관측기를 설계하고 시뮬레이션 및 실험을 통해 사용  
성능 확인하였다.

#### 1. 서 론

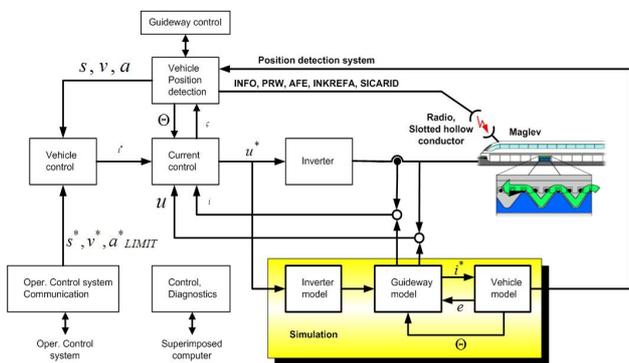
초고속 자기부상열차는 고속으로 승객과 고부가가치 화물을 이송시킬  
수 있는 궤도 기반의 교통시스템이다. 초고속 자기부상열차의 추진전동  
기는 바퀴식 지상 1차 선형동기전동기를 기반으로하기때문에 트랜스라  
피드나 MLX와 같은 초고속 자기부상열차의 위치신호는 추진제어에 핵  
심기술이다. 또한 이러한 시스템에서 열차 위치에 대한 정확한 정보는  
시스템 안정성 및 효율적인 열차 운행에 필수적이며, 안전성 측면에서도  
매우 중요하다[1]. 트랜스라피드 자기부상열차시스템은 열차의 선두부와  
후미부에 위치신호검출시스템 PRW(polradwinkelverfahren)가 탑재되어  
있고 가이드웨이에 위치정보 플레그가 설치되어 있어 차량이 이  
동하며 차량의 절대위치신호를 지상 추진시스템에 전송하게 된다. 위치  
정보 송출방식은 RS-485 통신프로토콜을 이용하여 20msec 주기로 라디  
오 주파수를 이용하여 전송하는 방식이며 전송율은 512kbps이다. 그러  
나, 이러한 방식으로 취득된 차량위치정보는 추진제어시스템의 실시간제  
어시스템의 요구사항에 만족되지 않는다[2].

본 논문에서는 초고속자기부상열차의 추진제어를 위해 차량으로부터  
수신된 차량위치정보를 입력으로하는 직류모터 수식모델 기반의 페루프  
전차원 위치관측기를 설계하여 추진인버터에서 실시간으로 요구하는 고  
정밀 고분해능의 위치정보 추정알고리즘을 제시하였다. 시뮬레이션 및  
실험결과는 지상 1차 선형동기전동기의 추진제어시스템에서 동적특성  
요구사항을 만족시키는 것을 확인시켜주었으며, 추진인버터의 추진전류  
가 개선됨을 주파수 분석을 통해 확인시켜주었다.

#### 2. 초고속 자기부상열차의 디지털 추진제어기 개발

##### 2.1 독일 Transrapid의 디지털 구동제어기 분석

지상1차 선형동기전동기는 추진력을 어떠한 물리적 마찰없이 차량에  
직접적으로 전달하고, 추진력을 정밀하게 제어할 수 있으며, 기계적인  
마찰이 없어 유지보수가 간단하기때문에 어떤 다른수단의 추진시스템에  
비하여 우수한 특징을 보유하고 있다.



〈그림 1〉 차량자속위치 검출기능을 갖는 디지털 구동제어 시스템

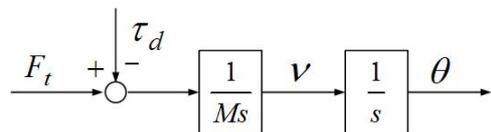
이러한 지상1차선형동기전동기는 추진효율을 높이기위해서는 첫째  
지상 1차 선형동기전동기 전기자부를 여러색선으로 구분하고, 둘째는 차  
량의 이동자속에 대한 정밀한 위치 정보를 검출하는 것이 필요하다.

초고속 자기부상열차의 디지털 구동제어시스템(DDC, Digital Drive  
Control system)은 1989년에 독일 지멘스에 의해 개발되었으며 독일  
엠슬랜드 자기부상열차 시험선에서 그 자체의 성능을 입증했다. 그림 1  
은 차량의 이동자속위치를 검출하기위한 위치 시뮬레이션 모델을 갖는  
디지털 구동제어시스템의 블록도를 나타낸다. 이 제어블럭의 주된 기능  
은 차량의 위치검출, 속도제어, 전류제어, BLT II 운영제어시스템을 갖  
는 시리얼 통신시스템, 속도지령프로파일에 의한 제동 및 일정한 거리제  
어등이 있다.

##### 2.2 추진제어시스템의 차량 위치추정기 설계

회전자속기준제어에서, 동기회전축은 이동자 자속의 위상에 일치되어  
져 있다. 따라서 이동자속의 정밀한 위치신호를 검출하는것은 선형동기  
전동기의 추력을 제어하는데 있어 중요하다. 초고속 자기부상열차의 추  
진인버터는 500usec주기의 전류제어루프를 갖고 있기때문에 정밀한 위  
상제어를 실시간 수행하기위해서 정확하고 정밀한 차량의 자속위치신호  
를 취득할 필요가 있다. 그러나 본 시스템은 차량으로부터 대략 5msec  
지연된 위치신호를 2msec주기로 전송받기때문에 위치신호 지연을 보상  
한 차량자속위치 추정기가 필요하다.

본 논문에서는 초고속자기부상열차의 추진제어를 위해 차량으로부터  
수신된 차량위치정보를 입력으로하는 직류모터 수식모델 기반의 페루프  
전차원 위치관측기를 설계하여 추진인버터에서 실시간으로 요구하는 고  
정밀 고분해능의 위치정보 추정알고리즘을 제시하였다. 그림 2는 직류모  
터 모델에서 참고문헌[2]에서는 점성 마찰력을 무시하고 페루프 관측기  
를 설계하였다. 여기에서,  $K_t$ 는 모터토크상수,  $M$ 은 차량 질량,  $F_t$  차량  
의 추진토크,  $\tau_d$ 는 외란토크이다.



〈그림 2〉 직류모터 모델의 블록선도

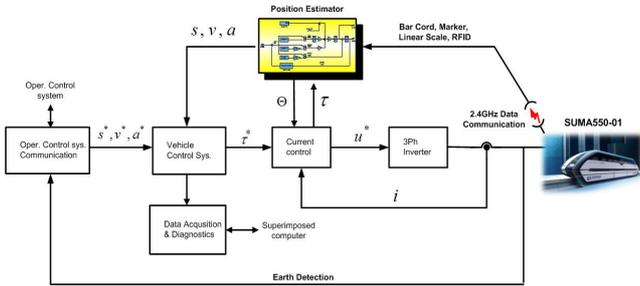
그림 2의 직류모터 모델을 상태변수 방정식으로 나타내면, 식 (1)과 같다.

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

상기 수식(1)로부터 전차원 관측기를 설계하면 식(2)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{d\hat{\theta}}{dt} \\ \frac{d\hat{v}}{dt} \\ \frac{d\hat{\tau}_d}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1/M \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{v} \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix} F_t + \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \\ l_3 \end{bmatrix} \theta - [100] \begin{bmatrix} \hat{\theta} \\ \hat{v} \\ \hat{\tau}_d \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $l_1, l_2, l_3$ 는 관측기 이득상수이다.



**<그림 3> 차량위치추정기를 갖는 초고속자기부상열차 추진제어 블럭도**

그림 3은 차량위치추정기를 갖는 초고속자기부상열차의 추진제어블럭도를 나타내고 있다. 본 시스템에서 차량의 절대위치 검출기는 바코드와 리니어스케일, RFID등이 있다.

**2.3 초고속 자기부상열차 시험결과 분석**

초고속 자기부상열차 시험선은 150m 길이로 가이드웨이 양측에 지상 1차 LSM이 설치되어 있으며, 차량 외관 <그림 3> 및 LSM의 주요 파라미터는 <표 1>과 같다.

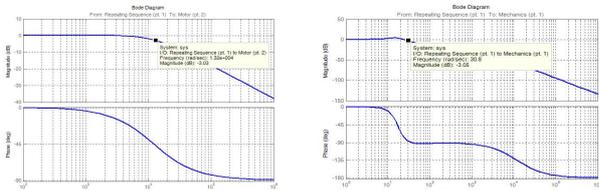


**<그림 3> LSM 기반 초고속 자기부상열차**

**<표 1> LSM 주요 파라미터**

Symbol	Value	Parameter
$M$	26,000[kg]	Gross Mass
$R_w$	0.36[ohm]	Phase resistance
$L_d$	7.9[mH]	d-axis inductance
$L_q$	7.9[mH]	q-axis inductance
$\tau$	0.24[m]	Magnet pole pitch

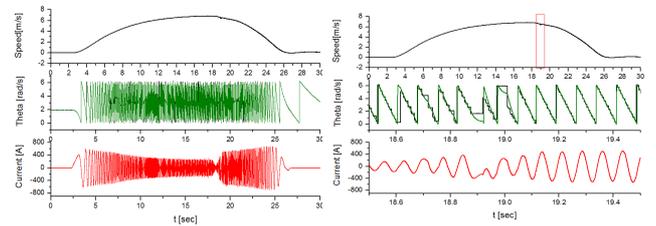
해당 추진시스템은 전류제어와 ATO운전시 속도제어기에 의한 운전된다. 따라서 전류제어기의 응답특성이 속도제어기의 지령속도와의 상관관계를 파악하기위해 해당 제어시스템의 파라미터를 적용하여 전류제어기와 속도제어기에 대한 보드선도를 도식하였으며 <그림 4>는 각각 전류제어기와 속도제어기에 대한 보드선도를 나타내었으며, 시뮬레이션 결과 전류제어기의 대역폭은 120Hz내외이고, 속도제어기의 대역폭은 3Hz 내외로 속도제어기가 전류제어기에 영향을 미치지 않을 만큼 빠르게 동작함을 알 수 있다.



(a) 전류제어기에 대한 보드선도 (b) 속도제어기에 대한 보드선도

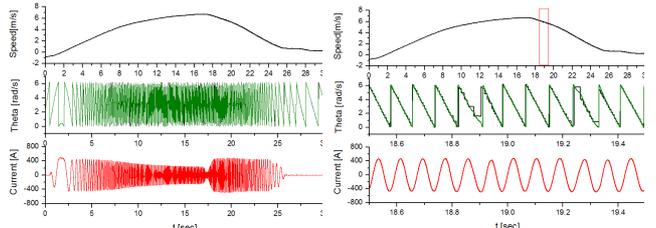
**<그림 4> 속도제어기와 전류제어기에 대한 보드선도**

다음은 차량위치 추정기의 성능을 분석하기 위해 차량을 7m/s속도까지 가속한 후 선형동기전동기의 전류를 분석하였다. 그림5~그림6은 각각 속도 추정기 적용 전후를 나타낸 것으로 속도추정기를 적용하지 않은 경우 전류의 왜곡현상이 두드러지게 나타남을 알 수 있다.



(a) 속도, 위상각&추정각, A상전류 (b) 특정구간 확대파형

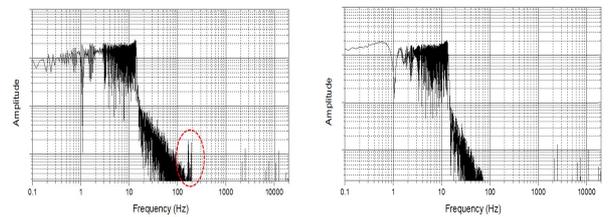
**<그림 5> 절대위치신호 적용시 시스템 각부파형**



(a) 속도, 위상각&추정각, A상전류 (b) 특정구간 확대파형

**<그림 6> 차량위치추정기 적용시 시스템 각부파형**

다음은 차량위치추정기 적용시 전류왜곡현상에 대한 분석을 위해 FFT 분석을 수행하였으며 <그림 7>은 그림5와 그림6의 A상 전류에 대한 주파수분석결과이며, 해당 분석결과로부터 차량위치추정기 적용시 전류개선점이 두드러지며 특히 100~200Hz 부분에서 개선효과가 높은 것을 확인하였다.

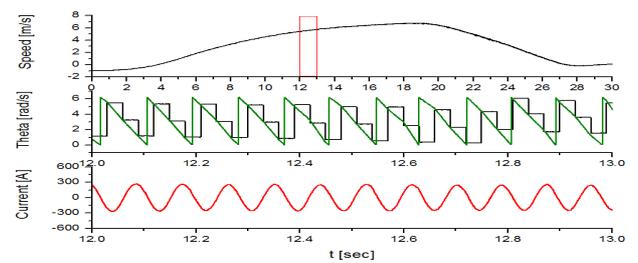


LSM 전류 FFT분석 결과 (without Estimator)

LSM 전류 FFT분석 결과 (with Estimator)

**<그림 7> LSM의 A상 전류 FFT분석결과**

<그림 8>은 차량으로부터 절대위치정보를 트랜스라피드와 같은 수준의 30msec주기로 전송하는 경우로써, 현재 위치정보 업데이트 주기에 15배 늦은 위치정보에도 차량 자속위치 추정능력이 있는 것을 알 수 있다.



**<그림 8> 위치 추정기 신호 적용 (30msec)**

**3. 결 론**

본 논문에서는 초고속자기부상열차의 추진제어를 위해 차량으로부터 수신된 차량위치정보를 입력으로하는 페루프 진차원 위치관측기를 설계하였으며, 실험을 통해 제시한 알고리즘이 우수함을 확인하였다.

**[참 고 문 헌]**

[1] Kazumasa Morishita, Jun-ichi Kitano, Takayuki Maeda, "Novel Train Position Detecting System in the Yamanashi Maglev Test Line", The 19th International Conference on Magnetically Levitated Systems and Linear Drives.  
 [2] Sheng-Ming Yang and Shuenn-Jenn Ke, "Performance evaluation of a Velocity Observer for Accurate Velocity Estimation of Servo Motor drives," IEEE Trans. on Ind. Applicat., vol. 36, no.1, Jan/Feb. 2000.