

## DR-FNN을 이용한 LMTT Positioning System 제어

°이진우\*, 손동섭\*, 민정탁\*, 이권순\*\*  
\*동아대학교 대학원 전기공학과, \*\*동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

### LMTT Positioning System Control using DR-FNN

°Jin Woo Lee\*, Dong Sop Sohn\*, Jung Tak Min\*, Kwon Soon Lee\*\*

\*Dept. of Electrical Engineering, Dong-A University

\*\*Division of Electrical, Electronics and Computer Engineering, Dong-A Univ.

**Abstract** - LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology) is horizontal transfer system in the maritime container terminal for the port automation. The system is modeled PMLSM(Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor) that consists of stator modules on the rail and shuttle car(mover). Because of large variant of movers weight by loading and unloading containers, the difference of each characteristic of stator modules, and a stator module's default etc., LMCS(Linear Motor Conveyance System) is considered as that the system is changed its model suddenly and variously.

In this paper, we will introduce the soft-computing method of a multi-step prediction control for LMCS using DR-FNN(Dynamically Constructed Recurrent Fuzzy Neural Network). The proposed control system is used two networks for multi-step prediction. Consequently, the system has an ability to adapt for external disturbance, cogging force, force ripple, and sudden changes of itself.

## 1. 서 론

최근 세계 컨테이너 무역 규모는 연간 9.5% 증가하는 추세이며, 초대형 컨테이너선(Super Post-Panamax Vessel)의 출현 등 항만의 환경이 급격히 변화하고 있는 추세이다. 20년 이내에 15,000~18,000 TEU급의 ULCS(Ultra Large Container Ship)의 출현이 예상되고 있다<sup>[1,2]</sup>. 이러한 항만의 변화에 대처하기 위한 방안으로 항만 컨테이너 터미널 자동화의 중요성이 대두되고 있다.

항만 자동화를 위해서는 컨테이너 하역과 이송 장비, 게이트 및 운영 시스템의 연계 등 여러 분야가 있다. 본 논문에서는 그 중에서도 LMTT를 통한 이송장비의 자동화에 대한 내용을 다루고자 한다.

기존의 터미널 내의 컨테이너 이송장치 자동화를 위한 해결 방안으로 AGV(Automated Guided Vehicle)가 있다. 네덜란드 ECT항에서는 이미 운영중이며, 싱가포르, 독일, 중국 등에서 적용을 앞두고 있다. 그러나, AGV는 운전 속도가 5m/s 정도이며, 그 외 센서의 불확실성, 부시스템들의 조합으로 인해 발생하는 여러 가지 문제들을 가지고 있다. 따라서, 이런 문제들을 해결하고, 자동화를 쉽게 달성하기 위하여 LMTT가 새로운 해결책으로 제안되고 있으며, 이미 독일의 Hamburg항에서는 대형 linear motor를 이용한 컨테이너 이송장치를 개발하여 시운전을 앞두고 있는 상태이다.

LMTT는 수직·수평 이동이 가능하도록 설계된 mover의 wheel구조와 격자구조의 rail로 구성되어 있으며, LSM(Linear Synchronous Motor) 방식으로써 영구자석편이 설치된 mover(shuttle car)와 rail 사이에 일정한 간격으로 설치된 stator module에 의해 구동된다. 그러

나, main plant인 LMCS는 컨테이너의 loading/unloading에 의해 자체 중량의 급작스런 변화, stator module 간격에 의해 발생하는 제어상의 제약조건, 일반적인 LSM의 cogging force 및 force ripple의 문제, 그 외의 다양한 환경에 대한 외란이 존재한다.

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하고자, LMTT에 적합하도록 시스템 및 주변 환경에 대한 모델링을 수행하고, shuttle car의 속도 및 위치 제어를 위한 Positioning System을 구성하였다. 제안하는 DR-FNN(Dynamically Constructed Recurrent Fuzzy Neural Network)를 이용하여 제어 시스템을 설계하였다. 또한, controller와 emulator 형태의 두 개의 DR-FNN을 이용하여 다단계추시스템을 구성하여 성능을 높이고자 한다. 이를 통해 차세대 컨테이너 터미널의 이송 장치분야의 자동화 해결책으로써의 LMTT 타당성을 검증하고자 하며, 항만 생산성 향상에 도움이 되고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 System Modeling

LMTT의 main plant인 LMCS는 그림 1과 같이 구성된다.

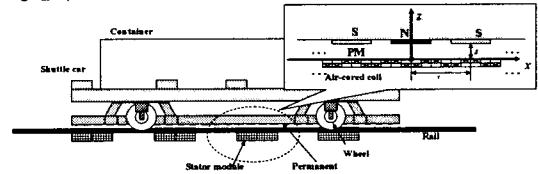


그림 1. LMCS의 구동부

LMCS는 동기식 선형모터 타입을 이용하므로, 동기모터의 전압방정식에 의해 3상 전원에서 각 d-q축 변환된 전압방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_d = R_s i_d + p\lambda_d + \omega_e \lambda_q, \quad v_q = R_s i_q + p\lambda_q + \omega_e \lambda_d \quad (1)$$

각 축에 대한 자속쇄고와 변환된 전류와의 관계는 다음 식(2)과 같다.

$$\lambda_d = L_d i_d, \quad \lambda_q = L_q i_q + \lambda_{PM} \quad (2)$$

일반적인 회전형 동기모터의 경우에 대하여 Mover의 각속도와 전기각속도, 선형일 경우 전기속도를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\omega_e = n_p \omega_r, \quad \omega_r = \pi v / \tau, \quad v_e = n_p v = 2\tau f_e \quad (3)$$

전자력(electromagnetic power)은 식(4)과 같으며, 그로 인한 힘(electromagnetic force)은 식(5)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_e = F_e v_e = 3n_p (\lambda_d i_q - (L_d - L_q) i_d i_q) \omega_e / 2 \quad (4)$$

$$F_e = 3\pi n_p (\lambda_d i_q + (L_d - L_q) i_d i_q) / 2\tau \quad (5)$$

Mover dynamics는 식(6)과 같으며, force equation은 식(7)과 같다.

$$F_e = Mpv + Dv + F_L \quad (6)$$

$$F_c = 3\pi\lambda_{PM}i_d/2\tau \quad (7)$$

그리고, 간략화된 PMLSM driver system을 위해 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_c = K_F i_d^* \quad (8)$$

$$K_F = 3\pi n_p \lambda_{PM} / 2\tau \quad (9)$$

$$H_b(s) = \frac{1}{Ms + D} = \frac{b}{s + a} \quad (10)$$

$F_L$ 은 다음과 같이 각각 cogging force, force ripple, disturbance(noise)로 구성된다.

$$F_L = f_{cogging} + f_{ripple} + f_{dis} \quad (11)$$

사용된 파라미터는 표 1에 나타내었다.

### 표 1. Parameters

$v_d, v_q$	d-q axis voltages
$i_d, i_q$	d-q axis currents
$R_s$	phase winding resistance
$L_d, L_q$	d-q axis inductances
$\omega_r$	angular velocity of the mover
$\omega_e$	electrical angular velocity
$\lambda_{PM}$	permanent magnet flux linkage
$n_p$	number of primary poles
$p$	differential operator
$v$	linear velocity of the mover
$\tau$	pole pitch
$v_c$	electric linear velocity
$f_c$	electric frequency
$M$	total mass of the moving element system
$D$	viscous friction and iron-loss coefficient
$F_c$	electromagnetic force
$F_L$	disturbance term

### 2.1.1 LMCS Driver System

LMIT에 사용된 모터는 영구자석형 선형 동기식 모터이나, 일반적인 형태와는 1차, 2차축이 반대로 구성되어 있다. 그림 2는 일반적인 PMLSM의 motor driver 부분을 나타낸다.

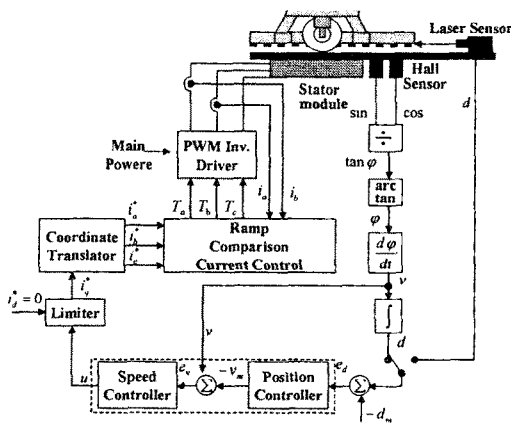


그림 2. LMCS의 driver system

Hall 센서를 이용하여 mover의 위치와 속도를 검출하며, 정밀위치제어 시 레이저 센서를 이용할 수 있도록 되어 있다. 제어기 출력인 제어값은 limiter를 통하여 목표치 q축 전류로 coordinate translator로 입력되어 3상에 대한 전류 목표치로 역변환된다. 이후 power driver 내에서 PWM 인버터에 의해 구동을 위한 3상 전류가 stator module로 입력된다.

## 2.2 Design of Control System

### 2.2.1 DR-FNN (Dynamically constructed Recurrent Fuzzy Neural Network)

제어방식은 제어기와 에뮬레이터를 사용하여 간접제어 형식의 적응제어 방식이며, 사용될 unit은 DR-FNN을 제안한다. 제어시스템과 하나의 DR-FNN unit을 그림 3에 나타내었다.

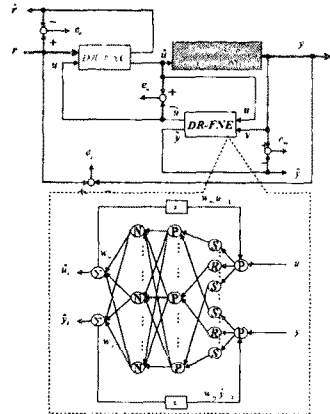


그림 3. DR-FNN을 이용한 제어 시스템

DR-FNN은 fuzzy의 장점인 인간과의 인터페이스가 용이하며, neural network 구조를 가짐으로써 비선형성에 강한 장점이 있다. 또한, 동적으로 노드 개수의 조절이 가능하므로, 여러 시스템에 대하여 좋은 성능을 기대할 수 있다. 회귀(Recurrent)형식을 가짐으로써 대하여 노드 개수를 줄이면서도 과거의 정보를 이용할 수 있으며, 수렴성이 뛰어난 이점이 있다.

1층의 각 노드의 출력은 멤버함수의 소속 정도를 나타내며, 식(12)와 같다.

$$\mu_i(x_i) = \exp\left\{-\frac{(x_i - c_{ij})^2}{\sigma_{ij}^2}\right\} \quad (i=1,2, \dots, u) \quad (12)$$

여기서, 1층의 두 노드에 대한 입력은 회귀된 부분을 포함하여 식(13)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$x_1(t) = u(t) \cdot w_{m1} \cdot \hat{u}(t-1), \quad x_2(t) = v(t) \cdot w_{m2} \cdot \hat{v}(t-1) \quad (13)$$

2층의 출력은 규칙에 관한 부분으로 식(14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_k = \exp\left\{-\frac{\sum_{i=1}^u (x_i - c_{ij})^2}{\sum_{i=1}^u \sigma_{ij}^2}\right\} \quad (14)$$

3층의 출력은 정규화 부분으로써 식(15)와 같다.

$$N_k = R_k / \sum_{i=1}^N R_i \quad (15)$$

DR-FNN의 최종 출력은 예측된 목표치와 예측된 시스템 출력으로 두 개의 값을 가지며, 식(16)과 같이 각각 나타낼 수 있다.

$$\hat{y}(t) = \sum_{k=1}^N w_{yk} \cdot N_k, \quad \hat{u}(t) = \sum_{k=1}^N w_{uk} \cdot N_k \quad (16)$$

$e_u$  입력과 출력에 대한 오차값을 이용하여 네트워크 학습은 식(17)과 같이 이루어진다.

$$\left. \begin{aligned} e_u &= u_c(t-1) - u_c(t-1), \quad E_u = \frac{1}{2} e_u^2 \\ w_{uk}(t+1) &= w_{uk}(t) + \eta \left\{ -\frac{\partial E_u}{\partial w_{uk}} \right\} \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

마찬가지로  $e_v, e_m$ 에 의하여 에뮬레이터와 제어기 역할의 DR-FNN이 같은 구조를 가질 수 있다. 즉, 어떤 시스템에 대해서도 목표치와 출력값을 일치시킬 수 있는 구조로써 급격한 시스템변화에 빠른 적응성을 얻을 수 있다.

### 2.2.2 다단계 예측 시스템 구조 (Multi-step Predictable Control Structure)

시스템 변화에 대하여 DR-FNN의 수렴성을 높이기 위하여 다단계 예측이 가능한 구조를 갖는다. 다단계 예측을 위한 시스템은 그림 4와 같이 나타낼 수 있다. 기본적으로 1단 예측제어를 수행할 수 있는 구조이며, 제어 대상 없이 학습된 에뮬레이터와 제어를 이용하여, 시스템에 대하여 다단계 예측이 가능하다.

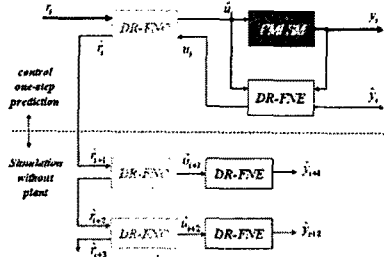


그림 4. 다단계 예측 제어 시스템 구조

### 2.2.3 Positioning System

LMTT의 positioning system은 그림 2에서 보는바와 같이 정밀제어 구간에서는 laser sensor를 사용하며, 주행 시 속도 위주의 제어에서는 hall sensor로 스위칭 되도록 되어 있다. 그림 5는 급격한 무게변화에도 주어진 속도 및 위치 profile에 맞도록 적응하기 위하여 mover의 위치에 따라 기억된 DR-FNN의 파라미터들이 이동하며 제어하는(이동 세그먼트) 방식을 나타낸다.

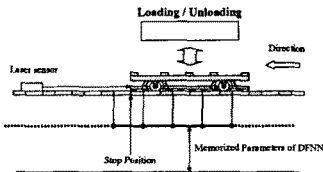


그림 5. Positioning System과 이동 세그먼트 제어방식

### 2.3 Simulation

시뮬레이션에서는 stator module의 길이를 3m로, 간격은 2m로 설정하였다. 이는 식(11) 중  $f_{ripple}$ 에 속하며, 제어 입력에 대하여 전체추력  $F_L$ 을 주기적으로 램프형식으로 증가·감소시킨다. 또한, cogging force는 식(18)과 같이 설정하였다.

$$f_{cogging} = 180 \cdot (15 \cdot \sin(2\pi d_m / P + \pi/4) + 20 \cdot \sin(6\pi d_m / P + 0.09\pi)) \quad (18)$$

시뮬레이션을 위한 전체 시나리오는 33m지점을 왕복하고, 50초에서 40ton의 컨테이너를 적재한 후 50m지점을 왕복하도록 하였다. 그림 6의 (a)는 이미 학습된 FNN에서 파라미터를 고정하여 제어하였을 경우이며, (b)는 위치와 속도에 관해 각각 5개의 규칙노드와 회귀형식의 FNN을 사용하였을 경우이다. (c)는 같은 방법으로 5개의 멤버십 함수에서 출발하여 16개의 노드로 분할되었을 경우의 결과이다. (a)에서 (c)의 경우로 갈수록 예측에 의해 응답특성이 좋으며, 급격한 시스템의 중량변화에도 강인하며, cogging force 및 stator module의 영향에 강인하였다.



본 연구는 한국과학기술연구원 동서대학교 지능형통합항공관련연구센터의 지원에 의한 것입니다.

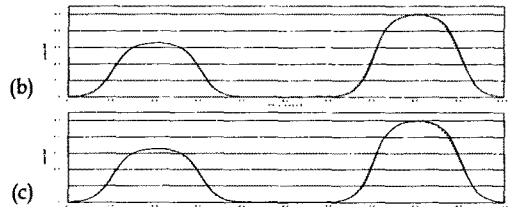


그림 6. 운전 profile에 대한 mover의 위치

그림 7과 8은 각각 제어입력과 거리오차에 대한 변화를 나타낸다. (c)의 경우, B구간의 제어입력신호를 관찰하면, 저속 및 정지구간에서 발생하고 있는 cogging force를 저감하기 위해 계속 제어 되고 있음을 볼 수 있다.

위치정밀도는 최고 1.8cm 미만, 평균 약 1cm 정도로 요구사항인  $\pm 3\text{mm}$ 에는 미치지 못하고 있다. 그러나, (c) 경우의 거리오차는 각각 (a)에 비해 68%, (b)에 비해 3%의 성능이 개선되었다.

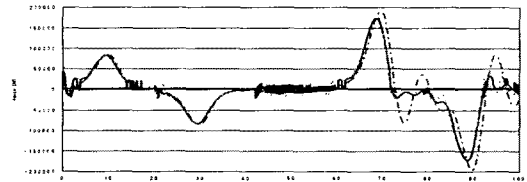


그림 7. 제어 입력에 대한 추력변화

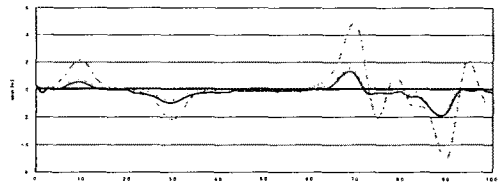


그림 8. 거리오차의 변화

## 3. 결 론

LMTT에서는 일반적인 선형동기모터에서 발생하는 문제와 같이, cogging force와 stator module에 의해 발생하는 force ripple은 정밀 위치 제어에 큰 방해 요소로 작용할 수 있다. 이에 본 연구에서는 급격한 시스템 변화에 강인하며, 적응성이 있는 DR-FNN을 제안하였으며, 이를 다단계 예측이 가능한 구조로 설계하여 이상의 문제들을 해결하고자 하였다. 요구되는 위치 정확도를  $\pm 1 \sim 3\text{mm}$ 에 미치지 못했지만, 제안하는 방법으로 cogging force 외에 발생할 수 있는 문제의 영향을 저감시킬 수 있었다. 아직 LMTT의 mover 속도가 10m/s, 가속력  $0.5\text{m/s}^2$  이상이 되기 위해서는 plant의 재질 및 기계적 설계상의 문제가 남아 있으며, 여러 대 mover 간의 navigation 문제 또한 과제이다. 이런 문제점을 해결할 수 있을 때, 작업이 낭비되는 시간의 최소화와 항만 자동화에 의해 생산성 향상을 가져올 수 있을 것이다.

### [참고 문헌]

- (1) T. Sakamoto and T. Shiromizu, "Propulsion Control of Superconducting Linear Synchronous Motor Vehicle," IEEE Trans. on Magnetis, vol. 33, no. 5, pp. 3460-3462, 1997.
- (2) F.-J. Lin, R.-J. Wai, and C.-M. Hong, "Hybrid Supervisory Control using Recurrent Fuzzy Neural Network for Tracking Periodic Inputs," IEEE Trans. on Neural Network, vol. 12, no. 1, pp. 68-90, 2001.
- (3) K.-K. Shyu, C.-K. Lai, Y.-W. Tsai, and D.-I. Yang, "A Newly Robust Controller Design for the Position Control of Permanent-Magnet Synchronous Motor," IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 49, no. 3, pp. 558-565, 2002.
- (4) Bin Yao and Li Xu, "Adaptive Robust Motion Control of Linear Motors for Precision Manufacturing," PERGAMON Mechatronics, vol. 12, pp. 595-616, 2002.