

부상력을 이용한 LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology)의 마찰력 감소에 대한 최적 제어기 설계

서정현*, 이진우*, 한승훈**, 이권순***
 *...*** 동아대학교 전기공학과

A Design of Optimal Controller with Friction Reduction of Linear Motor-based Transfer Technology via Lift-force Control

Jung-Hyun Seo*, Jin-Woo Lee*, Seong-Hun Han**, Kwon-Soon Lee***
 *...*** Department of Electrical Engineering, Dong-A University

Abstract - The existing automation transfer systems such as AGV(Automated Guided Vehicle) have many problems (maintenance, accuracy, velocity, etc.) and wastes of a vast space and time. Hence we have suggested to LMTT(Linear Motor-based Transfer Technology). This paper deals with fundamental LMTT, and proposes a concept of mass reduction and propulsion control for LMTT when it is starting and reaching an object by using lift-force. By applying optimal controller and the repulsive lift force in the LMTT, a large percent of vehicle weight is compensated, and it reduces friction, then it needs less thrust force to propel the vehicle.

1. 서론

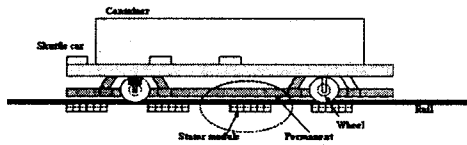
현재 세계 각국에서 연구중이거나 운행중인 이송장치는 AGV는 소음과 같은 환경문제나 외부적 환경에 따른 많은 기계적인 제한을 가지고 있다. 또한 지금 운행되고 있는 속도도 보통 3~4m/s이고 최고 속도는 6m/s에 불과하다. 이는 차세대 이송시스템이 요구하는 속도에 많이 부족한 실정이다. 따라서 이에 대한 대안으로 선형 모터를 이용한 새로운 방식의 이송 시스템인 LMTT 시스템을 제안한다. PMLSM(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor)방식으로 Mover에 영구자석이 설치되어 있다. 이는 자동적으로 제어가능하고 격자구조의 Rail을 따라 Stator Car는 이동하게 된다. 또한 공간과 시간축면에서도 높은 효율성을 가진다. 그러나 LMTT는 컨테이너의 loding/unloading에 의해 중량의 급격한 변화에 의해 Wheel과 Rail 사이 마찰력이 급격하게 변화하고 이로 인해 시스템의 속움성등의 제어를 위한 많은 제약 조건들이 발생한다.

따라서 본 논문은 이러한 마찰력을 감소시키기 위하여 Lift Force를 이용하여 자체의 중량을 감소시켜 시스템의 속움성을 향상 및 시스템의 성능을 높이고자 한다. 또한 제어 설계를 위해 사용된 마찰력 모델은 LuGre 모델을 기본으로 하는데, 이는 마찰력의 비선형성을 잘 표현하고, 제어 설계에 편리함으로 인해 최근 서보계에서 널리 사용되고 있다. 따라서 본 논문에서는 다수개의 물체 이송을 목적으로 하는 시스템의 정밀한 위치 제어를 위하여, 이동체의 질량변화에 의해 수직항력이 변화하고 이에 따른 마찰력 또한 변화하는 관계를 시스템에 적용하였다. 이를 통하여 이송 시스템(LMTT)의 최적 제어에 대한 속움성을 향상시키는 연구를 수행하였다.

2. 본론

2.1 LMTT의 모델링

본 논문에서 고려되어진 LMTT 시스템의 구성도는 그림 1과 같다.



〈그림 1〉 LMTT System

2.1.1 PMLSM의 Magnetic Force

PMLSM의 Magnetic Force는 그림 2에서 보는 것과 같이 추력, 부상력, 축력, 이 3차 상태방정식으로 나타낼 수 있다. 그러나 본 논문에서는 이동체가 선형적으로 움직이기 때문에 축력에 대한 효과는 무시한다.[3][4]



〈그림 2〉 PMLSM의 구조적 원리

PMLSM의 모델은 동기모터의 방정식에 의해 3상 전원에서 각 d-q축 변화

된 전압방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_q &= R_s i_q + p\lambda_q + \omega_e \lambda_d \\ v_d &= R_s i_d + p\lambda_d + \omega_e \lambda_q \end{aligned} \quad (1)$$

각 축에 대한 자속쇄교와 변화된 전류와의 관계는 다음 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \lambda_q &= L_q i_q \\ \lambda_d &= L_d i_d + \lambda_{PM} \end{aligned} \quad (2)$$

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

$$\begin{aligned} \omega_e &= n_p \omega_r, \\ \omega_r &= \pi v / \tau, \\ v_e &= n_p v = 2\tau f_e \end{aligned} \quad (3)$$

전자력은 식(4)와 같으며, 이로 인한 힘은 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

입력전류 i_q^* 에 의해 발생하는 식(6)의 이득에 의해 추력은 식(7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$K_F = 3\pi n_p \lambda_{PM} / 2\tau \quad (6)$$

$$F_e = K_F i_q^* \quad (7)$$

여기서, v_d, v_q 는 d-q축 전압; i_d, i_q 는 d-q축 전류; R_s 는 상(phase)당 권선 저항; L_d, L_q 는 d-q축 인덕턴스; ω_r 는 각속도; ω_e 는 전기각속도; λ_{PM} 는 영구자석의 쇄교자속; n_p 는 1차축 극수; p 는 미분연산자; v 는 셔플카의 선형화된 속도; x 는 셔플카의 위치; τ 는 폴피치; v_e 는 선형화된 전기속도; f_e 는 주파수를 나타낸다.

LSM에 의해 발생하는 추력과 부상력은 각각 식(8)과 같이 나타내어진다. [1][2]

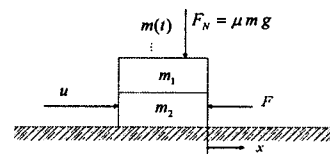
$$F_x = k_{F0}(\delta) I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (8)$$

$$F_z = -k_z(\delta) I_1^2 - k_{zMS}(\delta) I_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau} x\right)$$

여기서, k_{F0}, k_{zS}, k_{zMS} 는 추력과 부상력의 계수, structure와 관련된 힘의 계수, 모터의 파라미터 계수이고, I_1 는 전기자 전류, τ 는 폴피치, δ 는 공극을 나타낸다.

2.2 시스템 운동 방정식

수직항력의 변화는 입력 또는 추력의 반대방향으로 마찰력을 변화시키게 된다. 이러한 수평운동의 수학적으로 나타내면 식(9)와 같이 표현가능하다.



〈그림 3〉 시스템 모델과 요소들

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = u - F - F_E \quad (9)$$

여기서, x 는 이동체의 위치(position), m 은 이동체 전체 질량(mass), u 는 제어입력인 추력(thrust force), F 는 마찰력(friction force), 그리고, F_E 는 외란항을 나타낸다.

2.3 LuGre 마찰 모델링

본 논문에서는 LuGre 모델을 바탕으로 이동체의 질량 변화와 수직항력 변화가 연관되도록 하였다. 먼저 LuGre 동적 마찰력은 식(10)과 같이 속도만의 함수로서 나타낼 수 있다.[5][6]

$$F(v) = \sigma_0 z + \sigma_1 \frac{dz}{dt} + \sigma_2 v \quad (10)$$

여기서, v 는 속도(velocity); σ_0 는 강성(stiffness); σ_1 는 감쇠계수(damping coefficient); σ_2 는 점성계수(viscous coefficient)이다. 탄성을 갖는 강모의 휘어진 길이가 새로운 상태변수 z 를 갖는다. 이때 z 에 관한 동적 방정식은 식(11)과 같다.

$$\frac{dz}{dt} = v - \frac{\sigma_0 |v|}{g(v)} z \quad (11)$$

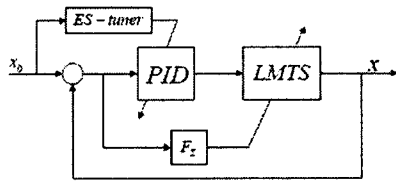
$$g(v) = F_C + (F_S - F_C) e^{-(v/v_s)^2}$$

이는 무게변화에 따라 다음 식(12)과 같이 바뀔 수 있다.[7]

$$\frac{dz}{dt} = v - \theta \frac{\sigma_0 |v|}{g(v)} z \quad (12)$$

$$\theta(t) = \frac{M(0)}{M(t, F_z)}$$

2.4 LMTT 제어기 설계



<그림 4> Controller Block Diagram

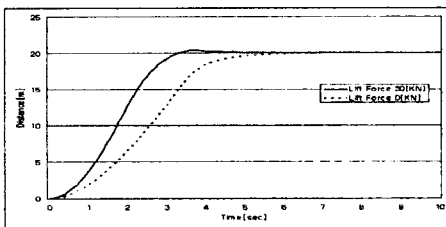
ES-PID를 사용하여 제어기를 설계하고 추력과 부상력은 다음 식(13)와(14)와 같이 설계하였다.

$$F_x = k_{c,s,p}(x_0 - x) + k_{c,s,d} \int (x_0 - x) dt + k_{c,s,d} \frac{d}{dx} (x_0 - x) \quad (13)$$

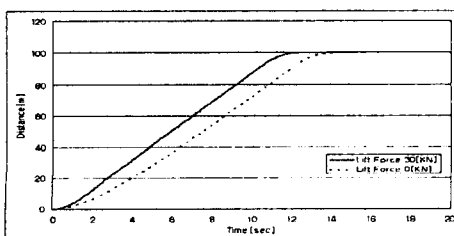
$$F_z = \begin{cases} M/n & (t \leq 3[\text{sec}]) \\ 0 & (t > 3[\text{sec}]) \end{cases} \quad (14)$$

2.5 시뮬레이션

본 논문에서 실제적 모델을 고려하여 Shuttle Car와 무게 60[ton]이라 추정하여 추력을 25[kN]으로 설정하였다. 그리고 마찰력 계수는 전체의 무게 1%, 마찰력 외란은 거의 없는 것으로 가정하였다. 또한 Shuttle Car의 움직인 거리는 20, 50, 100, 150[m]으로 이동하여 시뮬레이션 하였다. 부상력은 2[sec], 크기는 질량의 1/2인 30[kN]으로 가정하여 모의실험을 행하였다.



<그림 5> 20[m] 이동시 거리변화

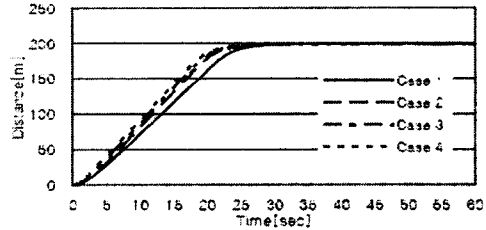


<그림 6> 100[m] 이동시 거리변화

<표 1> 부상력을 사용한 도착시간

거리[m]	힘[kN]	30	0
20		7.1[sec]	8.8[sec]
50		9.8[sec]	11.8[sec]
100		15.6[sec]	17.4[sec]
150		20.4[sec]	22.7[sec]

또한 본 논문에서는 LMTT의 에너지측면에 최소화화를 위한 시뮬레이션 결과를 도출하였다.



<그림 7> 제한된 입력 에너지에 대한 거리변화(200[m])

<표 2> 제한된 입력 에너지에 대한 거리변화(200[m])

Case	Thrust[kN]	Lift[kN]	도착시간[sec]		
			100m	3m	0m
1	250	0	7.7	28.1	32.1
2	240	100	7.0	26.0	30.4
3	230	200	6.4	25.4	30.4
4	220	300	6.0	25.0	31.5

표 2는 같은 에너지에서 부상력을 사용한 LMTT의 수행에 따른 결과를 나타낸 결과이다. 위 표를 보면 LMTT는 각각의 부상력 제어에 따른 시스템의 성능과 에너지 효율이 증가함을 알 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서 부상력을 사용함에 따라 시스템의 속응성이 향상되는 것을 보았다. 그리고 근거리의 이동보다는 원거리의 이동시에 부상력을 사용하는 효과적이라는 것을 알 수 있었다. 새로이 제안된 이송시스템으로 무게에 대한 하중은 크게 감소될 것이다. 또한 LMTT에 부상력의 사용은 마찰손실과 마모, 대기오염, 소음, 유지 보수에 대한 높은 효율성을 가질 것이다. 본 논문에서 모의실험을 통하여 부상력 사용에 대한 유용성을 확인하였지만, 추후에 ES-PID 제어기가 아닌 더욱 향상된 여러 제어기를 사용하여 부상력을 최적으로 제어할 수 있는 실험을 필요할 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학기술부(MOST) 지정 국가지정연구실사업(NRL: 2003-202-01-005)의 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] E. Huth, W. Canders, and H. Mosebach, "Linear motor transfer technology for container terminals," in *Proc. LDIA'98*, Tokyo, Japan, pp. 39-41., 1998,
- [2] K. Yoshida, "Linear synchronous motor propulsion method for guided vehicle," Japanese Patent Pub. 1991-27730.
- [3] K. Yoshida, H. Takami, X. Kong, and A. Sonoda, "Mass Reduction and Propulsion Control for a Permanent-Magnet Linear Synchronous MotorVehicle", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 37, No. 1, pp. 67-72, 2001.
- [4] K. Yoshida and H. Weh, "Method of modeling permanent magnet for analytical approach to electrical machinery," *Arch. Elektrotech.*, vol. 68, no. 4, pp. 229-239, 1985.
- [5] Canudas De Wit C., Youssef A., and Nguyen-Phuoc V. T., "Almost Globally Stable Nonlinear Speed Observer for a Permanent Magnet Synchronous Motor," *Decision and Control, Proceedings of the 41st IEEE Conference on*, Vol. 1, pp. 136-141, 10-13 Dec. 2002.
- [6] Canudas de Wit C., Olsson H., Astrom K. J., and Lischinsky P., "A New Model for Control of Systems with Friction," *Automatic Control, IEEE Transactions on*, Vol. 40, No. 3, pp. 419-425, March 1995.
- [7] 이진우, 서진호, 이영진, 이권순, "비선형 마찰력을 갖는 선형 서보계를 위한 질량 추정형 적응 제어기 설계," *대한전기학회 논문지*, 제54D권, 제7호, pp.428-436, 2005.