

부상력을 고려한 컨테이너 이송을 위한 LMTT의 전자기적 해석

김상기\*, 이진우\*, 서진호\*, 이영진\*\*, 이권순\*\*\*

\*동아대학교 전기공학과 \*\*한국항공기능대학 전기계측제어과 \*\*\*동아대학교 전기전자컴퓨터공학부

Electromagnetic Analysis of Linear Motor based Transfer Technology (LMTT) for Container Transfer to Consider Lift-force

Sang Ki Kim\*, Jin Woo Lee\*, Jin Ho Suh\*, Young Jin Lee\*\*, and Kwon Soon Lee\*\*\*

\* Department of Electrical Engineering, Dong-A University

\*\* Dept. of Electrical Instrument and Control, Korea Aviation Polytechnic College

\*\*\* Division of Electrical, Electronic and Computer Eng., Dong-A University

**Abstract** - 초대형 컨테이너선을 대비하여 기존의 자동화 이송시스템인 AGV는 자동화, 유지보수의 어려움 등으로 인해 많은 문제점이 있다. 이에 대한 방안으로, 새로운 이송 시스템인 LMTT(Linear Motor based Transfer Technology) 시스템을 제안하였다. 특히 LMTT는 자동화, 고속화가 용이할 뿐만 아니라 AGV에 비해서 친환경적이다. 따라서 이와 유사한 새로운 이송 시스템에 대해서 많은 연구가 진행이 되고 있음에도 불구하고, LMTT 시스템은 거대한 서보 시스템으로서 특히 선형 모터(Linear Motor)는 차량의 무게에 의한 마찰력의 영향을 많이 받으며, 이러한 마찰력은 LMTT 시스템의 속응성의 저하 요인으로서 작용 하게된다. 따라서 본 연구에서는, 새로운 이송 시스템인 LMTT에 대하여 부상력을 고려함으로써 정지 마찰력을 감소시켜 시스템 속응성을 향상시킬 수 있는 연구를 수행하였다.

등의 제어를 위한 많은 제약 조건들이 발생한다. 본 논문에서는, 이러한 문제를 해결하고자 Lift Force를 이용하여 자체의 중량을 감소하여 마찰력을 감소시켜 시스템의 속응성을 향상 및 시스템의 성능을 높이고자 한다. 이를 통하여 차세대 컨테이너 터미널의 이송 시스템에 대한 방안으로 LMTT의 타당성을 검토함으로써, 추후의 항만 생산성 향상에 기여할 것으로 사료된다.

1. 서 론

2. 본 론

2.1 System Modeling

본 논문에서 고려되어진 LMTT 시스템의 구성도는 Fig. 1과 같다.

최근 세계 컨테이너 물동량이 연간 약 8% 정도 증가하는 추세이며, 초대형 컨테이너선(Super Post Panamax)의 출현 등으로 인해 항만의 환경이 급격하게 변하고 있다. 그리고 20년 이내에 15,000~18,000 TEU급의 ULCS(Ultra Large Container Ship)의 출현이 예상되고 있다. 또한 이에 맞추어 ULCS급의 선박들이 24시간 이내에 출항을 할 수 있도록 새로운 시스템의 하역시스템은 세계 각국에서 많은 연구가 진행되고 있다. 그러나 항만의 하역시스템을 ULCS급 선박에 맞게 제작 및 운영을 한다하더라도 이송시스템이 이것을 받쳐주지 못하면 ULCS급을 위한 하역시스템이나 항만 시스템은 전혀 효용이 없다.

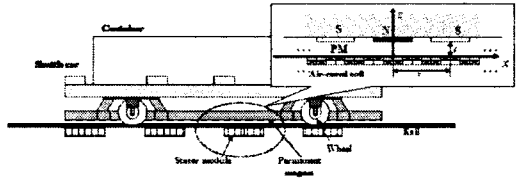


Fig. 1 LMTT 시스템의 구성도

이러한 LMTT 시스템에 대한, Shuttle Car의 운동방정식은 식(1)과 같이 나타 낼 수 있다.

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}(F_x - f_{fric} - f_{ripple} - f_{cog} - f_{dis}) \quad (1)$$

여기서,

- $F_x$  thrust force
- $M$  weight of shuttle car and container
- $x$  shuttle car position;
- $f_{fric}$  friction force;
- $f_{ripple}$  force ripple;
- $f_{cog}$  cogging force;
- $f_{dis}$  system disturbance.

현재 세계 각국에서 연구중인이거나 운해중인 이송시스템은 AGV(Automated Guided Vehicle)이다. 그러나 AGV는 차량과 같은 엔진을 사용함으로 인해 환경문제나 소음문제와 같은 공해를 유발 할 수 있다. 또한 시스템의 특성상 외부의 영향을 많이 받으며, 지금 운행되고 있는 속도도 보통 3~4m/s이고 최고속도 또한 6m/s에 불과하다. 이는 차세대 이송시스템이 요구하는 10m/s에 많이 부족하고, 위치 정밀도 역시 30mm에 달하고 있다. 따라서 이에 대한 대안으로 선형 모터를 이용한 새로운 방식의 이송 시스템이 제안되었으며, 독일의 Hamburg항에서는 LMTT의 시운전을 앞두고 있다.

또한,  $M$ 은 컨테이너 loding/unloding에 의한 비선형 함수로,  $M(t)$ 로 나타낼 수 있다. 이는 식(2)와 같은 크기를 가지는 급격한 변화를 가지는 계단함수(step function)로 나타낼 수 있다.

$$M_{min} \leq M(t) \leq M_{max} \quad (2)$$

여기서,

- $M_{min}$  only shuttle's weigh(15[ton])
- $M_{max}$  weight of heaviest container and shuttle car(60[ton])

LMTT는 수평, 수직 이동이 가능한 mover(Shuttle Car)와 격자구조의 rail로 이루어져 있다. PMLSM(Permanent Magnet Linear Synchronous Motor) 방식으로 mover에 영구자석이 설치되어 있고, 레일(rail)에는 일정한 간격으로 설치된 stator module에 의해 구동된다. 그러나 LMTT는 컨테이너의 loding/unloding에 의해 중량의 급격한 변화에 의해 마찰력이 급격하게 변화하고 이로 인해 시스템의 속응성

특히, cogging force, ripple force 그리고 외란항은 마찰력에 비해 그 크기가 미소하므로, 이들 항을 제외한 shuttle car의 운동방정식은 다음과 같이 간단히 표현되어진다.

$$F_x = M\ddot{x} + f_{fric}(\dot{x}, \widehat{M}) \quad (3)$$

LSM에 의해 발생하는 추력과 부상력은 각각 식(4)와 식(5)와 같이 나타내어진다 [1][2].

$$F_x = k_{R0}(\delta)I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) \quad (4)$$

$$F_z = -k_z(\delta)I_1^2 - k_{zMS}(\delta)I_1 \cos\left(\frac{\pi}{\tau}x\right) \quad (5)$$

여기서,

$k_{R0}, k_{zS}, k_{zMS}$  coefficients of thrust and lift forces concerning the structure parameters of the motor

$I_1$  Effective armature current

$\tau$  pole pitch

$\delta$  air-gap length

## 2.2 Lift force Modeling

본 논문에서 고려되어진, LSM의 장점 중의 하나인 한 개의 Stator Module에서 추력과 부상력을 동시에 사용할 수 있다는 것이다. 일반적인 LSM에서는 부상력은 사용하지 않고 추력만을 사용하지만, LMTT 시스템과 같은 거대한 서보 시스템의 경우에는 마찰력으로 인한 시스템 제어 특성이 나빠지게 된다. 따라서 본 논문에서 제안하는 방법은 기존에 시스템에서 사용하지 않았던 부상력을 이용하여 LMTT 시스템의 Shuttle Car 무게를 감소시켜 마찰력을 줄이고 이를 통하여 시스템의 속응성을 높이고자 하는 것이다.

먼저, LSM의 반발력은 다음의 식(6)과 같다.

$$F_z(x, \dot{x}) = i_d \frac{\partial \lambda_d(x)}{\partial g(x)} + i_q \frac{\partial \lambda_q(x)}{\partial g(x)} \quad (6)$$

여기서  $g(x)$ : 공극의 변화분

또한 Stator Module의 자속, 쇠교자속, 인덕턴스, 자계의 세기 및 자속밀도는 각각 식(7)-식(11)과 같이 나타내어진다.

$$\phi = BS = \mu_0 HS = \mu_0 \frac{Ni}{l} S \quad (7)$$

$$\lambda = N\phi \quad (8)$$

$$L = N \frac{\phi}{i} \quad (9)$$

$$H = \frac{Ni}{l} \quad (10)$$

$$B = \mu_0 H \quad (11)$$

일반적인 자석간의 반발력은 쿨롱의 법칙에 의해 다음과 같이 표현되어진다.

$$F = k \frac{\phi_1 \phi_2}{r^2} \quad (12)$$

식 (12)에, 식(7)과 식(11)을 대입하여 정리하면 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} F &= k \frac{\phi_{mag} \phi_{elec}}{r^2} = k \frac{\phi_{mag} \times BS}{r^2} \\ &= k \frac{\phi_{mag} \times \mu_0 HS}{r^2} = k \frac{\phi_{mag} \times \mu_0 \frac{Ni}{l} S}{r^2} \\ &= k \frac{\phi_{mag} \times \mu_0^2 NSi}{r^2 \times l} \end{aligned} \quad (13)$$

만약,  $\widehat{M}$ 가 부상력에 의해 중량이 감소되었다고 가정된 Shuttle Car의 추정치라고 가정하면,  $F_z$ 에 의한 수직축에 해당하는 Shuttle Car의 중량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\widehat{M}(t, F_z) = M(t) - \mu_{scale}(F_z/g) \quad (14)$$

특히, 부상력을 이용할 경우에는 그 만큼의 중량이 감소되었다고 볼 수 있으므로 Shuttle Car의 중량에 대한 마찰력으로  $f_{fric}(\dot{x}, M(t, F_z))$ 의 형태로 고려해 주어야 한다. 일단, 일반적으로 사용되는 마찰력 함수를 보면 다음과 같이 나타낼 수 있다 [3]-[7].

$$f_{fric} = [f_c + (f_s - f_v)e^{-(\dot{x}/x)^2} + f_v x] \text{sign}(\dot{x}) \quad (15)$$

여기서,

$f_c$  Minimum level of coulomb friction;

$f_s$  Level of static friction;

$x$ , Lubricant parameter which may be determined by empirical experiments;

$f_v$  Viscous friction parameter.

식 (15)의 마찰력 모델은  $\widehat{M}(t, F_z)$ 에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다. 따라서 wheel 내부와 rail과의 마찰력 마찰력은  $f_{fric}(\dot{x}, M(t))$ 의 형태로 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{fric} = [f_c(\widehat{M}) + (f_s(\widehat{M}) - f_v(\widehat{M}))e^{(\dot{x}/x)^2} + f_v(\widehat{M})x] \text{sign}(\dot{x}) \quad (16)$$

## 2.3 Simulation 및 결과

본 논문에서는 실제적 모델을 고려하여, Shuttle Car와 Container의 무게 60[Ton]를 효과적으로 이동시키기 위해서 Thrust Force를 25,000[N]으로 설정하였다. 그리고 쿨롱마찰계수는 무게의 1%, 마찰력 외의 외란은 없는 것으로 가정하였다. 그리고 Shuttle Car는 Lift Force의 유무에 따라 각각 20[m], 50[m], 100[m], 그리고 150[m] 이동하였고, 요구되는 정밀도는  $\pm 3$ [mm]이내에 도착할 때까지 시간에 대한 모의실험을 수행하였다. 또한 Lift Force를 가하는 시간은 2[sec], 크기는 질량의 1/2인 30[kN]로 가정하여 모의실험을 실행하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 20[m]와 100[m]을 이동시킬 때의 마찰력, 위치, 그리고 속도에 대한 결과를 나타내고 있다. 이러한 모의실험 결과에서, 우리는 Lift Force를 사용함으로써 LMTT 이송 시스템을 사용한 운송거리가 길어질수록 더욱 효율적이고 효과적인 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 Fig. 2와 Fig. 3의 결과들을 Table 1로서 표현하였고, Lift Force를 고려함으로써 이동거리가 더욱 짧은 시간에 이동되어짐을 알 수 있다.

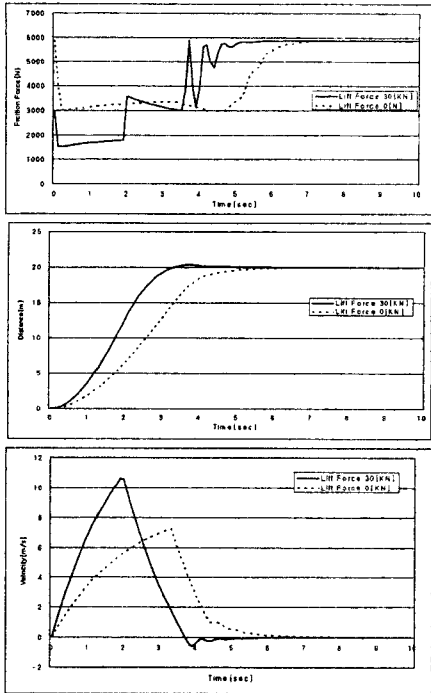


Fig. 2 20[m] 이동시 마찰력, 위치, 속도

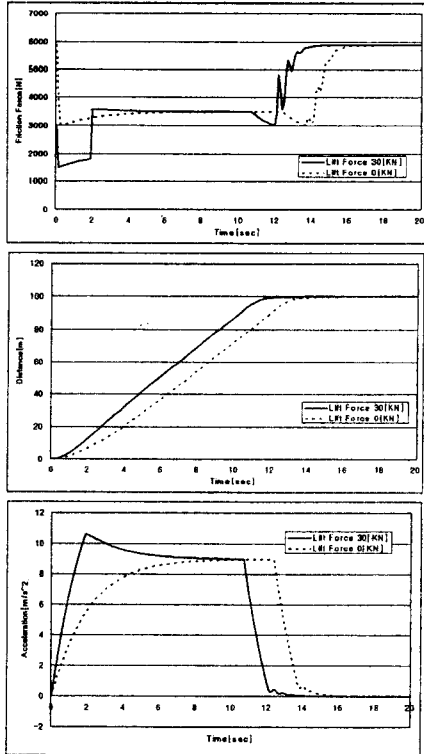


Fig. 3 100[m] 이동시 마찰력, 위치, 속도

Table 1. Lift Force의 사용에 따른 도착 시간

Distance[m]	Lift Force	
	30[kN]	0[kN]
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]

### 3. 결 론

본 논문에서 Lift Force를 사용함에 따라 시스템의 속용성이 향상되는 것을 보았다. 그리고 근거리의 이동보다는 원거리의 이동시에 부상력을 사용하는 효과가 명확하게 나타났다. 이송시스템은 물류 시스템으로서, 물류는 결국 짧은 시간동안 더 많은 물동량을 이송 할 수 있어야만 할 것이다. 본 논문에서, 모의실험을 통하여 Lift Force 사용의 유용성을 확인하였으나, 추후에는 시제품 제작을 통한 실제 실험으로서 제안되어진 방법의 유용성을 증명하여야 할 것이다. 그리고 Lift Force를 가하는 시간을 2[sec]로 고정하였으나 추후에는 시간의 변화에 따른 유용성도 확인을 하여야 할 것이다. 또한 본 연구에서는 출발시에만 부상력을 사용하여 정밀 위치를 잡는데 시간이 많이 걸렸으나, 정지시에 반대로 흡입력을 사용한다면 Lift Force의 사용에 따른 시간의 절약은 더욱 커지게 될 것이다.

### 4. 후 기

본 연구는 산업자원부의 지역전략산업 석박사 인력양성 사업의 연구결과로 수행되었음

### [참 고 문 헌]

- [1] K. Yoshida, H. Takami, X. Kong, and A. Sonoda, "Mass Reduction and Propulsion Control for a Permanent Magnet Linear Synchronous Moto Vehicle", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp. 67-72, 2001.
- [2] K. Yoshida, X. Kong, and H. Takami, "Network Transport Automation Study of PM LSM Vehicle on Orthogonally-Switching Guideway", Industry Applications Conference, Vol. 2, pp. 1109-1114, 2000.
- [3] K. K. Tan, S. N. Huang, and T. H. Lee, "Robust Adaptive Numerical Compensation for Friction and Force Ripple in Permanent-Magnet Linear Motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 38, No. 1, pp. 221-228, 2002.
- [4] Klaus Peter Franke, "Boosting Efficiency of Split Marine Container Terminals by Innovative Technology", Proc. of IEEE Int. Conf. on Intelligent Transportation Systems, pp. 774-779, 2001.
- [5] 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 Networks, Vol. 12, No. 1, January, 2002.
- [6] Rong-Jong Wai, Faa-Jeng Lin, "Adaptive Recurrent Neural-Network Control for Linear Induction Motor", IEEE Trans. on Aerospace & Electronic Systems, Vol. 37, No. 4, pp. 1176-1192, 2001.
- [7] B. Widrow and E. Walach, Adaptive Inverse Control, Upper Saddle River, Prentice Hall, 1996.