

선형전동기 기반 컨테이너 이송 시스템의 정밀 위치제어

論 文

57P-3-2

Precision Position Controller of Linear Motor-Based Container Transfer System

李榮珍* · 李晉宇** · 曹賢哲** · 李權純[†]

(Young-Jin Lee · Jin-Woo Lee · Hyun-Cheol Cho · Kwon-Soon Lee)

Abstract - In this paper, we introduced a linear motor-based transfer system with an active pid controller which can be replaced with an automated guided vehicle (AGV) for the port automation. This system, which is named LMCTS(linear motor-based container transfer system), is based on PMLSM (permanent magnetic linear synchronous motor) which basically consists of stator modules on the rail and shuttle car. Therefore more progressive and adaptive control mechanisms should be required to control a system with large variation of container weight, the difference of each characteristic of stator modules, a stator module's trouble etc. We introduced an active control mechanism with an online tuning scheme using modified evolutionary strategy. Some computer simulations are implemented to assess the robustness of the proposed system.

Key Words : Container Transfer System, Port Automation, Transportation Automation, Linear Motor

1. 서 론

1960년대부터 해상을 통하여 컨테이너선으로 대량 물류 이송이 가능하게 되면서 컨테이너를 이용한 물동량이 지속적으로 증가함에 따라 컨테이너선이 대형화 되고 있다. 최근 통계에 따르면 세계 컨테이너 무역 규모는 연간 9.5%씩 증가하고 있는 추세이다. 이러한 컨테이너 물동량의 증가는 선박의 대형화를 가져오고 이는 기존 항만의 병목현상을 야기시켜 재항시간을 늘여 물류비용 증가를 초래하고 있다. 때문에, 최근에는 항만자체의 터미널자동화를 추구하고 있다. 자동화 터미널에 필요한 새로운 개념의 항만 하역자동화 시스템은 크게 3가지로 나누어 볼 수 있다. 첫째, 안벽에서의 생산성과 서비스 수준을 증가시킬 수 있도록 기존의 컨테이너 크레인(Container Crane :C/C)을 개선하거나 새로운 개념의 안벽하역장비를 들 수 있다. 이에 관해서는 최근 더블 트롤리구조나 버퍼 크레인 등을 부가하여 안벽에서 양하역 시간을 단축함으로써 생산성을 향상시키는 연구가 활발히 진행되고 있으며, 크레인 자체의 자동화를 위한 연구도 함께 진행되고 있다. 둘째는 양하역된 컨테이너를 신속 정확하게 부두의 Yard로 이송할 수 있는 AGV나 LMCTS(Linear Motor-based Container Transfer System)와 같은 운송시스템이 필요하게 된다. 안벽 크레인에서 빠른 시간에 이루어지는 양하역 작업

과 더불어 부두 내에서 이송되는 시스템도 자동화하여 신속 정확하게 처리하여야만 병목현상 없이 터미널 전체 자동화가 가능해질 수 있을 것이다. 마지막으로 자동화 터미널에 걸맞는 대규모 저장시설에 부합되는 자동화 장치장 시스템이 필요하게 될 것이다. 이상의 3가지 시스템이 조합되어 새로운 개념의 차세대 항만 하역장비 자동화시스템이 완성될 수 있다

본 논문에서는 항만에서 병목현상을 해소하고 자동화를 가능하게 하는 야드 이송시스템 기술 개발의 일환으로써 대형 리니어 모터를 이용한 컨테이너 이송장비의 정밀 위치제어에 대한 내용을 다루고자 한다. 현재까지 컨테이너 자동화 이송장치로는 AGV(Automated Guided Vehicle)가 많이 검토되고 이용되고 있다. 네덜란드 ECT항에서도 이미 운행 중에 있으며, 싱가포르, 독일, 중국 등에서 적용을 앞두고 있는 실정이다. 최근 국내에서도 다각적인 검토를 하고 있지만, AGV는 운전 속도가 6m/s 정도이며, 그 외 센서의 불확실성, 부시스템(subsystem)들의 조합으로 인해 발생하는 여러 가지 문제들로 인하여 크레인과의 연계에 별도의 해결책이 필요한 실정이다. 즉, 이는 양하역 속도에 지대한 영향을 주는 위치정밀도가 대부분 $\pm 25.4[\text{mm}]$ (1인치)에 못 미치는 실정인어서 자동화 터미널에서 요구하는 사양을 충족시키기 힘든 것이 현실이다.

이러한 문제들을 해결하고, 보다 자동화를 쉽게 달성하기 위하여 LMTT(Linear Motor Transfer Technology)가 새로운 해결책으로 제안되고 있다. 이미 독일의 Eurokai항에서는 Noell사에서 대형 리니어 모터를 이용한 컨테이너 이송장치를 개발하여 실용화도 현재 검토 중에 있다[1]. LMTT에 기반을 둔 LMCTS는 수직·수평 이동이 가능하도록 설계된 셔틀카(shuttle car)의 휠 구조와 격자구조의 레일로 구성되어

[†] 교신저자, 終身會員 : 東亞大學校 電氣工學科 教授 · 工博
E-mail: kslee@dau.ac.kr

* 正 會 員 : 韓國폴리텍 航空大學 航空電氣科 副教授 · 工博

** 正 會 員 : 東亞大學校 電氣工學科 Post Doc. 工博

接受日字 : 2008年 4月 30日

最終完了 : 2008年 6月 5日

있으며, PMLSM (Permanent Magnetic Linear Synchronous Motor) 방식으로써 영구자석편이 설치된 셔틀카와 레일 사이에 일정한 간격으로 설치된 스테이터 모듈(stator module)에 의해 구동된다. 그러나 이러한 선형모터 기반 이송 시스템은 컨테이너와 같은 큰 중량의 이적재로 인한 자체 중량의 급작스런 변화에 따른 부하변동이 크고, 스테이터 모듈 간격에 의해 발생하는 제어상의 제약조건, 일반적인 PMLSM의 디텐트력(detent force) 및 이차적으로 드라이버 측으로 발생하는 리플(ripple)의 문제 등이 정밀 위치제어에 큰 방해요인으로 작용한다[2].

본 논문에서는 이러한 문제들을 해결하고자, LMCTS에 적합하도록 시스템 및 주변 환경에 대한 모델링을 수행하였고, 셔틀카의 위치 제어를 위한 정밀제어시스템을 구성하였다. 제어시스템은 PID 구조를 가지며, 진화전략 알고리즘을 이용하여 동조할 수 있는 구조를 설계하였다. 따라서 LMCTS의 거대한 정지마찰력에 의한 데드존(dead-zone)영향 및 디텐트력, 대형부하의 변동 등이 존재 할 경우에도 ±3[mm]이하 정밀 위치제어가 가능하도록 설계가 되었다. 이를 통해 양하역 이전 위치제어 시 소요되는 시간을 최소화될 것으로 기대되며, 나아가 LMCTS가 차세대 컨테이너 터미널의 이송 장치로서의 타당성 검증 및 항만 생산성 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

2. LMCTS의 수학적 모델링

본 연구에서 개발 중인 LMCTS는 PMLSM형 구조 선형전동기로서 Fig. 1과 같이 구성되어진다. 그 특징으로는 영구자석편이 레일에 설치되는 것이 아니라 컨테이너를 이송하는 셔틀카 하단면에 부착이 되며, 레일 중간에 일정 간격으로 스테이터 모듈이 설치된다. 이는 항만의 구조상 레일이 노출되어 있어 큰 자력을 가진 영구자석을 항만전체에 설치하였을 경우 그에 따른 문제가 야기될 뿐만 아니라 경제적으로 효과적이지 못하기 때문이다.

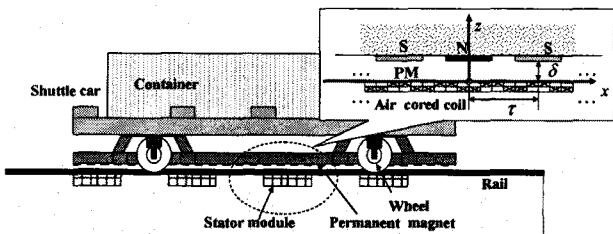


그림 1 LMCTS 구성도
Fig. 1 The configuration and components of LMCTS

이때, 셔틀카의 운동방정식은 다음과 같이 표현되어질 수 있음이 알려져 있다[3-5].

$$\ddot{x} = \frac{1}{M}(F_x - f_{friction} - f_{det} - f_{ripple} - f_{ds} - f_{wind}) \quad (1)$$

특히, 본 시스템에서 중량 M 은 컨테이너 양적하시에 변화

되므로 함수화하여 $M(t)$ 로 나타낼 수 있으며, 이는 식(2)와 같은 크기를 가지고 급격히 변화하는 스텝함수(step function)의 조합으로 구성이 가능하다.

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

여기서,

- M_{min} 셔틀카만의 중량(10 [ton]);
- M_{max} 컨테이너 적재시 최대중량(80 [ton]).

일반적으로 컨테이너의 무게는 내용물에 따라서 대략 30~40[ton]정도로 추정된다. 따라서 본 연구에서는 이의 평균치인 35[ton]을 기준으로 하여 동시에 두 개의 컨테이너를 적재하였다고 보았을 때, 카트의 무게(10[ton])+컨테이너 2개(70[ton])로 하였을 경우 컨테이너 적재시 카트의 최대 중량은 80[ton]이 될 수 있다.

리플, 바람, 그리고 외란항(disturbance term)은 마찰력과 디텐트력에 비해 그 크기가 미소하므로, 이들을 f_e 로 두면, 추력의 의한 셔틀카 운동방정식은 식(3)과 같이 나타낼 수 있다. 시뮬레이션에서는 f_e 를 제외한 마찰력과 디텐트력을 고려하였다.

$$F_x = M(t) \ddot{x} + f_{fric}(\dot{x}, \overline{M}) + f_{det} + f_e \quad (3)$$

여기서, \overline{M} 은 부상력을 사용할 경우 수직축으로 변화된 shuttle car의 추정중량을 나타낸다. x축으로 발생하는 추력 및 z축의 부상력은 각각 식(4), (5)와 같이 나타낼 수 있다 [5,6].

$$F_x = k_{r0}(\delta) I_1 \sin\left(\frac{\pi}{\tau} x\right) \quad (4)$$

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

이때 수직축으로 발생한 F_z 에 의해 변화된 셔틀카 전체의 추정된 중량은 식(6)과 같이 나타낼 수 있다[5].

$$\overline{M}(t, F_z) = M(t) - \mu_{scale}(F_z/g) \quad (6)$$

부상력을 이용할 경우, 그 만큼의 중량이 변화되었다고 볼 수 있으므로, 셔틀카 중량 변화에 대한 마찰력 또한 변화된다. $f_{fric}(\dot{x}, \overline{M}(t, F_z))$ 의 형태로 고려해 주어야 한다. 일반적으로 사용되는 마찰력 함수로 식(7)과 같이 나타낼 수 있다[3,4].

$$f_{fric} = [f_c + (f_s - f_c)e^{-v|\dot{x}|} + f_v \dot{x}] \text{sign}(\dot{x}) \quad (7)$$

특히 \dot{x} 는 정지시 발생하는 마찰력 크기가 셔틀카의 속도 증가에 따라 부분적으로 점차 감소되는 현상인 스트라이

백효과(stribeck effect)에 관련된 파라미터로써, 속도에 따라 클롱 마찰력까지 그 크기가 감소하는 기율기를 결정한다.

식 (7)의 마찰력 모델은 추정된 중량 $\widehat{M}(t, F_x)$ 와 그에 따라 선형화된 각 파라미터를 고려해야 한다. 따라서 휠 내부와 레일과의 마찰력은 $f_{fric}(\dot{x}, \widehat{M}(t))$ 의 형태로 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$f_{fric} = \left[\begin{array}{l} \vec{f}_c(\widehat{M}) + \{(\vec{f}_s(\widehat{M}) - \vec{f}_c(\widehat{M}))e^{-(\dot{x}/\dot{x}_s)^2} \\ + \vec{f}_v(\widehat{M})\dot{x} \} \text{sgn}(\dot{x}) \end{array} \right] \quad (8)$$

이때 레일과 바퀴들 사이의 굴림 정지마찰을 중량의 1%로 가정하고, 서틀카의 중량을 10~60[ton]으로 변화시켰을 경우의 마찰력은 Fig. 2와 같다. 이때, ㉠ 및 ㉡부분은 추력 및 외부 힘에 대한 데드존 구간을 나타낸다.

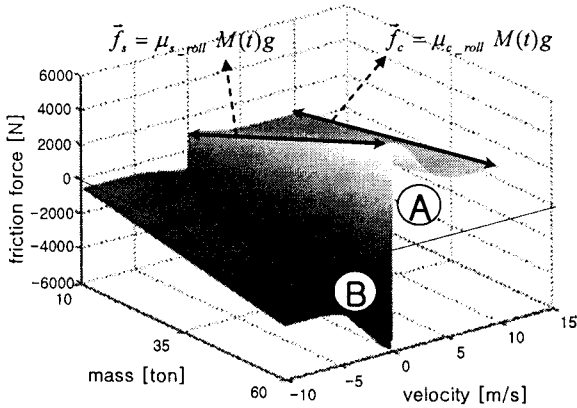


그림 2 레일과 휠 사이의 마찰력 모델
Fig. 2 Friction model between rail and wheels

Fig. 2에서 보는 바와 같이 컨테이너의 중량이 증가함에 따라 데드존의 폭이 더 커져 제어에 어려움이 많아짐을 알 수 있다. 또한, F_x 와 $-f_e$ 가 마찰력 경계를 넘지 못한다면 실제적으로 시스템에 영향을 주지 못한다고 할 수 있다. 따라서 식(8)은 시스템 동작과 동시에 식(9)와 같다고 할 수 있다.

$$f_{fric}(\dot{x}, \widehat{M}) = \begin{cases} f_{fric}^+ (F_x - f_e) \geq f_{fric}^+ \geq 0 \\ (F_x - f_e), f_{fric}^- < (F_x - f_e) < f_{fric}^+ \\ f_{fric}^- (F_x - f_e) \leq f_{fric}^- < 0 \end{cases} \quad (9)$$

서틀카 하부 축의 영구자석편 설치간격과 고정자 모듈에 의해 결정되는 f_{det} 거리에 대한 함수로 다음과 같이 $f_{det}(x)$ 로 표현할 수 있다. 그 특성은 여러 개의 고정자 모듈들이 간헐적으로 설치되므로, 식(10)과 같은 고조파의 형태를 가진다고 할 수 있다. 여기서, $K_1(\delta)$ 와 $K_2(\delta)$ 는 공극에 의해 결정되는 1, 2차의 고조파에 대한 스칼라 값(scalar

value)이다. 그 외의 백색잡음(white noise) 형태의 시스템의 관으로 $f_e(t, x, \dot{x})$ 를 가정할 수 있다.

$$f_{det}(x) = K_1(\delta)(15 \sin(2\pi x/P + \pi/4)) + K_2(\delta) \sin(6\pi x/P + 0.09\pi) \quad (10)$$

3. 진화전략 알고리즘을 이용한 제어기 설계

3.1 2-DOF PID 제어기

일반적으로 PID 제어기는 비교적 구조가 간단하면서도 구현하기가 쉽다는 장점을 가지고 있으므로 현재 산업현장에서 널리 사용되고 있다[7]. 본 논문에서도 PID 구조를 기본적으로 사용하였지만, LMCTS의 경우 대형 중량물에 의한 부하 변동과 같은 다양한 환경변화 등에 대하여 원활한 제어성을 얻기 위하여 설정치 추종 성능뿐만 아니라 외란 제거능력도 매우 우수한 2-DOF PID제어기를 Fig. 3과 같이 피드백형으로 구성하여 LM제어에 적용하는 문제를 연구하였다.

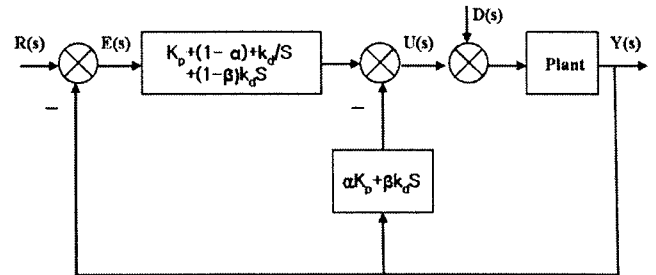


그림 3 2-DOF PID 제어기 블록 다이어그램
Fig. 3 A block diagram of the 2-DOF PID controller

먼저, Fig. 3의 제어기 출력 $U(s)$ 는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$U(s) = E(s) \left\{ k_p(1-\alpha) + \frac{k_i}{s} + (1-\beta)k_d s \right\} - (\alpha k_p + \beta k_d s) Y(s) \quad (11)$$

여기서, k_p, k_i, k_d 는 PID제어기 이득이며, $R(s)$ 는 LMCTS가 이동하고자하는 목표로 고려하면 되며, α 와 β 는 여러 가지 형태의 PID제어기 변형을 유도하는 파라미터이다. 따라서 본 논문에서는 2-DOF PID 제어기 설계에 필요한 파라미터 k_p, k_i, k_d 및 α, β 를 진화전략 알고리즘으로 자동 동조 하였다.

3.2 진화전략 알고리즘

PID제어에 필요한 제어기 파라미터들의 설계를 위하여 고전적 기법에서부터 지능제어에 이르기까지 많은 방법들이 연구되어 적용되고 있다. 하지만 고전적 기법을 이용한 제어기 설계법이 간단함에도 불구하고 정밀하거나 적응성을 요구하는 곳에는 다소 부족하고, 지능제어기법의 경우에서처럼 비교적 넓은 범위에서 동작하지만 불확실성이나 비선형성이 강한 경우에는 다른 대책을 강구해야만 한다. 따라서 본 연구에서

는, 이러한 종래의 문제점을 해결하고자 지능형 최적화 알고리즘인 진화전략 알고리즘을 이용하였다. 즉, 해의 탐색능력과 수렴특성이 우수한 진화전략 알고리즘을 이용함으로써 파라미터 탐색능력을 향상시키고자 하였다.

제어기 파라미터들을 동조하기 위하여 도입된 진화전략은 식 (12)와 같이 주어진 탐색 공간 내에서 우수한 개체를 선택해 나감으로써 최적점 근처에서 최적 탐색능력이 뛰어난 특징을 가지고 있다[8,9].

$$x^{t+1} = x^t + N(0, \sigma) \tag{12}$$

여기서, x^{t+1} 은 목적함수가 $f(x^{t+1}) > f(x^t)$ 인 경우에 부모세대로 받아들여지는 다음 세대 개체이며, $N(0, \sigma)$ 는 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 독립적인 랜덤 가우시안 함수벡터로서 작은 변화들이 큰 변화들보다 좀 더 자주 발생하도록 하는 함수이다.

또한, 진화전략은 주어진 표준편차내의 탐색공간에서만 해를 탐색하므로 국부수렴의 문제가 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 교배연산자 및 돌연변이 연산자를 도입하여 해의 탐색공간을 넓혀 국부수렴문제를 해결하였다. 본 논문에서 적용한 교배방법은 식 (13)과 같은 산술적 교배를 적용하였으며,

$$\begin{aligned} x_1^{t+1} &= ax_1^t + (1-a)x_2^t \\ x_2^{t+1} &= (1-a)x_1^t + ax_2^t \end{aligned} \tag{13}$$

각 세대의 적합도를 평가하기 위해서는 평가함수가 필요하다. LMCTS의 경우 평가함수는 시스템의 시간에 따른 위치 오차와 제어 에너지를 고려할 수 있다. 본 연구의 목적이 정밀위치제어로서 위치 오차는 LMCTS가 컨테이너를 양하역하기 위하여 필연적으로 최소화되어야 할 평가요소이다. 하지만, 제어량의 경우도 전기로 구동되는 시스템이므로 이를 최소화하는 것도 경제성을 향상시키는 면에서 매우 중요하다고 할 수 있겠다. 따라서, 본 연구에서는 이 두 가지 요소를 모두 충족할 수 있는 방향으로 제어기를 설계하고자 하였으며 이를 위하여 평가함수를 아래 식 (14)와 같이 설정하였다.

$$f(x) = \sum_{t=1}^n \{ e_x(t) \cdot tw_1 + u(t) \cdot tw_2 \} \tag{14}$$

이때, $e_x(t)$ 는 위치오차, $u(t)$ 는 제어량, w_1 과 w_2 는 각각 위치 및 제어량에 대한 가중치로서 경험적으로 결정하였으나, 일반적으로 제어량의 절대값의 크기가 위치오차에 비해 상대적으로 매우 크게 나타나므로 $w_1 \gg w_2$ 이 되도록 10000:1~10000:1 정도의 범위 내에서 결정하였다. 전반적으로 가급적 위치오차의 중요도가 높은 만큼 제어기 설계는 위치오차에 중점을 두면서 그 중 제어에너지를 최소화 하는 제어기를 선정할 수 있도록 하였다. 아울러 알고리즘의 종료조건은 평균자승에러(Mean Square error: MSE) 값 ϵ 을 이용하였다.

3.3 최적제어기의 구성

이상의 진화전략 알고리즘을 이용하여 2 자유도 PID 제어기의 파라미터를 동조하여 위치오차 및 제어에너지를 최소화할 수 있는 정밀위치 제어기가 되도록 Fig. 4와 같이 구성하였다.

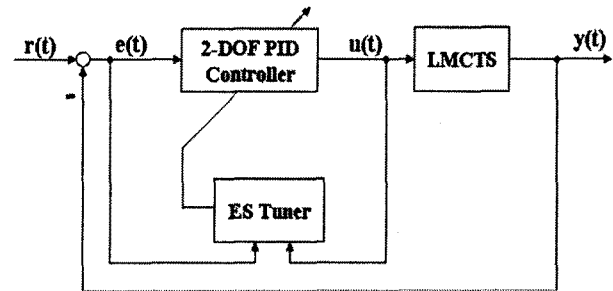


그림 4 ES 동조 제어시스템 블록 다이어그램
Fig. 4 A block diagram of the Off line ES tuned control systems

하지만, LMCTS의 경우 다양한 증량을 갖는 컨테이너를 이송하여야 하며, 이는 2 절에서 언급된 바와 같이 테드존의 크기의 변화를 가져오고 이로 인한 제어의 어려움을 야기 시키게 된다. 추후 시뮬레이션 결과에서 다시 언급하겠지만, 실제로 고정된 PID 제어 파라미터 값을 이용한 경우 증량 변화나 설정치 변경에 따른 제어에 문제가 많이 발생함을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 설계된 진화전략 알고리즘을 실시간 구조로 적용할 수 있는 방안을 제안하였다.

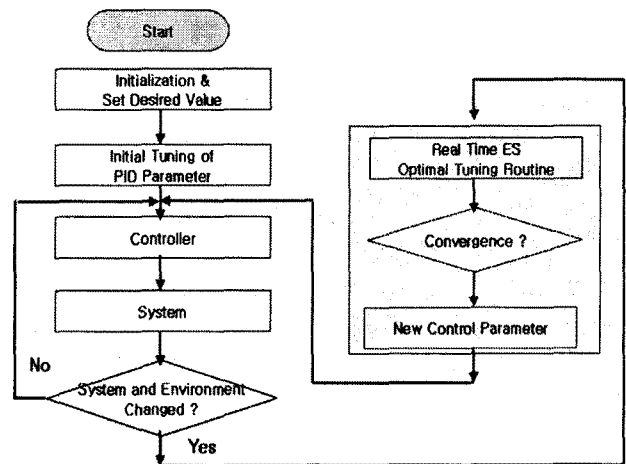


그림 5 실시간 제어시스템 블록 다이어그램
Fig. 5 A block diagram of the on-line tuning control systems

이와 같은 방법을 적용하기 위해서는 첫째, 실제 모델과 동일한 수학적 모델 또는 다이내믹이 필요하다. 본 연구에서는 아직 실험단계가 아니어서 실제 모델도 수학적 모델을 대상으로 하여 실시간 동조에 필요한 모델과 함께 사용하였다. 아울러, Fig. 5와 같은 시스템을 구성하기 위해서는 ES on-line tuning에 필요한 별도의 프로세스가 필요하다. 물론 최근 컴퓨터가 대중화되어 멀티 프로세스는 중화되어 있기 때문에 그리 큰 문제는 되지 않을 것으로 사료된다.

4. 시뮬레이션

4.1 개루프 시스템에 대한 모의실험

시스템에 사용된 외란은 마찰력과 디텐트력이며, 시스템 특성을 보기 위하여 개루프로 반주의 정현파 입력에 대하여 이동위치, 디텐트력, 마찰력 변화, 및 시스템에 실제 영향을 미치는 실효 입력 등을 나타내었다. Fig. 6은 입력 최고 130[kN]의 시스템 동작을 나타낸다. 서틀카는 15[m]로 이동하였으며, 속도증가에 따라 디텐트력 주기 증가와 마찰력 감소 현상을 볼 수 있다.

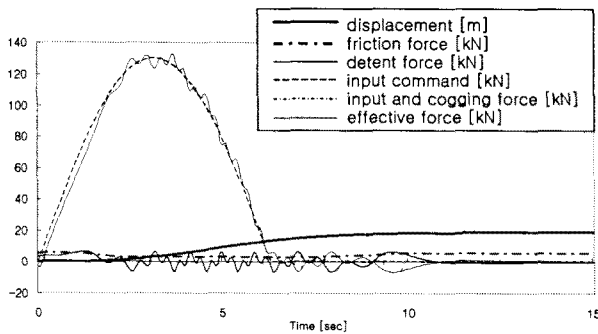


그림 6 최대 130[kN]을 갖는 입력파에 대한 개루프 특성
 Fig. 6 Open loop system characteristics on the input of half sine wave of maximum 130[kN]

Fig. 7은 최고 13kN의 입력으로 미세한 움직임이 있을 경우의 시스템 특성을 나타내었다. 정지마찰력에 의해 시스템에는 2초부터 4초 사이만 내부 및 외부입력에 대한 영향을 받아 4[cm]가량 이동하였음을 볼 수 있다. 즉, 기존의 PID 제어기로는 미세한 오차에 대한 제어입력이 정지마찰력 항복점까지 도달하지 못한다면, 적분항이 있음에도 불구하고, 미세조정에 많은 시간이 걸릴을 예측할 수 있다.

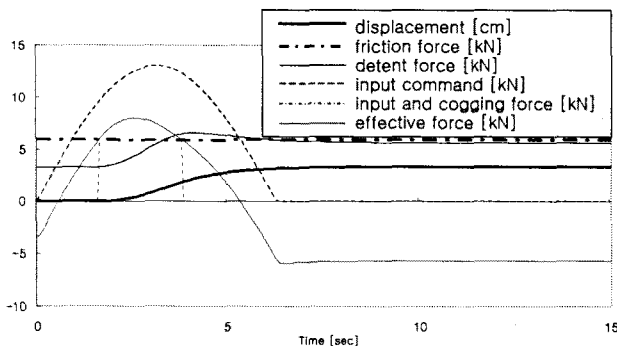


그림 7 최대 13[kN]의 입력파에 대한 운동특성
 Fig. 7 The minuteness motion characteristics on the input of half sine wave of maximum 13[kN]

4.2 시뮬레이션 방법

이러한 시스템의 특성을 바탕으로 설계된 제어기의 성능평가에 대한 모의실험을 위하여 다음과 같은 3가지 경우에 대한 시뮬레이션을 실시하였다.

- Case I: 일반 PID 제어기
- Case II: 파라미터 고정형 ES tuned PID 제어기
- Case III: ES On-line tuned PID 제어기

상기 제어기의 특성과 성능을 평가하기 위하여 다음과 같이 (i)이송 경로(route)를 가변하는 방법과 (ii)질량변화를 변화하는 방법을 고려하였다.

$$(i) \text{ Route} = \begin{cases} 20 [m] \text{ 왕복}, & 0 \leq t < 60 \\ 40 [m], & 60 \leq t \leq 100 \end{cases}$$

$$(ii) \text{ 질량변화: } M(t) = \begin{cases} 10, & 0 \leq t < 30 \\ 45, & 30 \leq t < 60 \\ 80, & 60 \leq t \leq 100 \end{cases}$$

이러한 방법에 대하여 본 연구에서는 다음의 두 가지로 시뮬레이션을 실시하였다.

- 실험 I: Route 변환
- 실험 II: Route 변화 + 부하변화

본 논문에서 시뮬레이션에 사용된 LMCTS의 설계파라미터는 아래 표 1과 같다.

표 1 LMCTS 시스템 파라미터
 Table 1 LMCTS system parameter

parameters	values
σ_0	1,000,000 [N/m]
σ_1	565,690 [Ns/m]
σ_2	88 [Ns/m]
F_c	0.01*m*g [N]
F_s	$F_c*(1/0.8)$ [N]
v_s	0.01 [m/s]
m	10~80[ton]

4.3 시뮬레이션 결과

4.3.1 실험 I

실험 I에서는 목표값 설정에 따른 특성변화를 살펴보기 위하여 컨테이너를 포함한 전체하중을 최대 중량인 80[ton]으로 한 후 이동 경로만을 변화시켜 각 제어기에 대하여 그 특성을 평가하였다. Fig. 8은 목표치에 대한 LMCTS의 이동 거리에 대한 변화를 나타낸다. Case I은 Matlab으로 이용하여 ZN법으로 동조된 고전 PID 제어기를 적용하였으나, 처음 설정된 목표위치에 대해서는 사전에 동조가 되어 잘 추종을 하였지만, 20[m]를 간 후 다시 돌아오는 경우 및 40[m] 목표위치 추종에 대하여 최대 28.4%이상의 오버슈트를 보였다. 하지만, 최종 잔류오차가 허용오차이내인 4[mm] 이내로 어느 정도 안정을 찾음을 확인할 수 있다. Case II는 진화전략 알

고리즘으로 한차례 동조를 실시하여 계속적으로 적용한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 Case I과 유사하게 20[m]를 간 후 다시 돌아오는 경우 및 40[m] 목표 위치 추종에 대하여 최대 22%의 오버슈트 비율을 보였다. 하지만 큰 오버슈트에 비해 최종 잔류 오차는 어느 정도 허용 범위 내에서 벗어나지 않는 것을 확인할 수 있었다. Case III은 본 연구에서 제안 방법으로 새로운 목표의 설정시 마다 별도의 제어기를 설계하는 on-line으로 동조한 경우로서 모든 경우에 대하여 오버슈트도 발생하지 않으며, 잔류오차도 1[mm] 이내로 허용오차 범위 내에서 이루어짐을 알 수 있다.

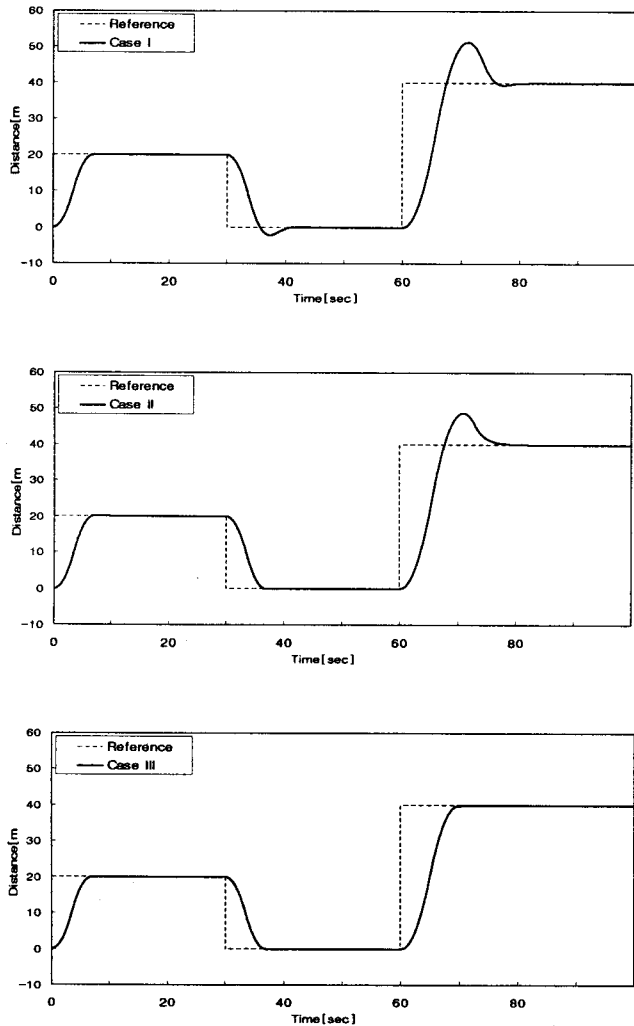


그림 8 기준 경로에 대한 거리추종 결과
Fig. 8 Distance variations for the reference trajectory

Fig. 9는 80[sec] 이후에 잔류하는 잔류오차를 확대한 그림이다. Case I의 경우 잔류오차가 비록 10[mm]내로 비교적 적절하지만 오실레이션으로 인하여 컨테이너 양하역 작업에 큰 지장을 초래할 우려가 예상된다. 컨테이너를 양하역할 시에는 고정된 위치에 정지해야만 빠른 시간 내에 작업을 수행할 수 있기 때문이다. 제안한 제어기인 Case III의 경우에는 1[mm]이내에서 오차가 발생하고 있어 매우 우수한 결과를 보여주고 있다.

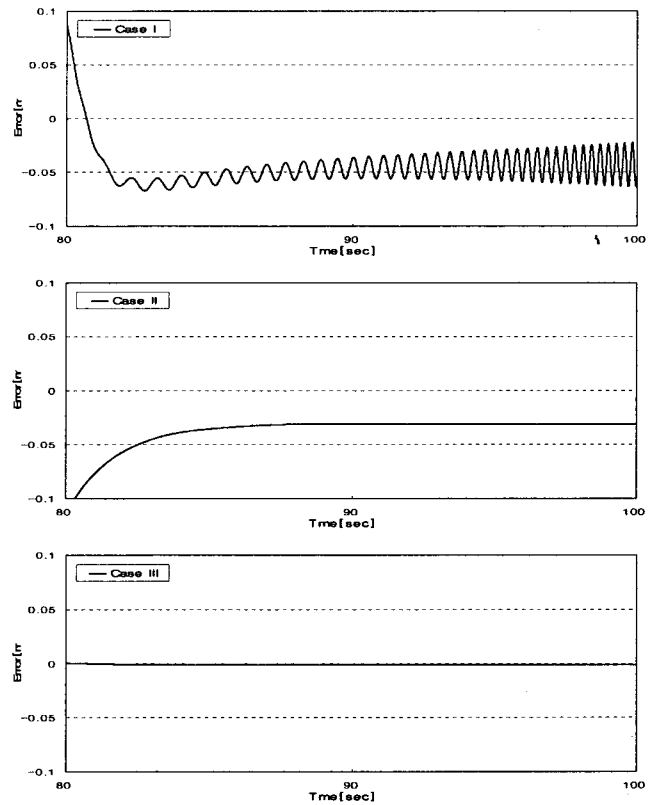


그림 9 평균 오차
Fig. 9 Average residual Error(after 80[sec])

Fig. 10은 오차에 대한 RMS(root mean square) 값을 나타낸다. Case III가 Case I에 대하여 11.3%, Case II에 대하여 16.7% 향상됨을 확인할 수 있다.

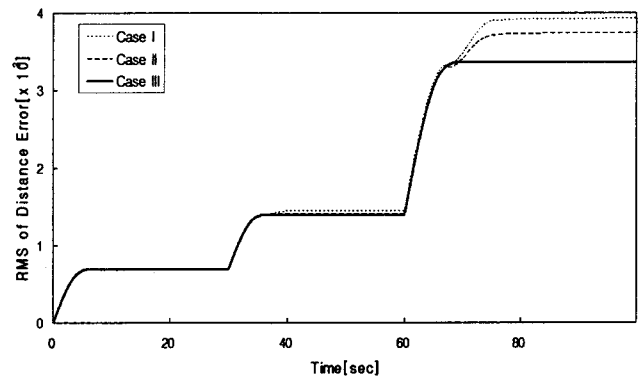


그림 10 RMS 오차
Fig. 10 RMS value of error

다음 Fig. 11은 실험 I의 경우에 대하여 각 제어기에 대한 제어입력을 나타내고 있다. 실제로 제어 입력의 경우도 Fig. 9에서 보는바와 같이 효과적으로 입력되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 12는 각 제어기 구현 시 발생된 제어량을 RMS로 표현한 것으로 Case III의 경우가 Case II에 비하여 28.6%, Case I에 비하여 31.8% 향상됨을 확인할 수 있다. 따라서 제어 에너지 효율 면에서도 제안한 제어기가 우수함을 확인할 수 있다.

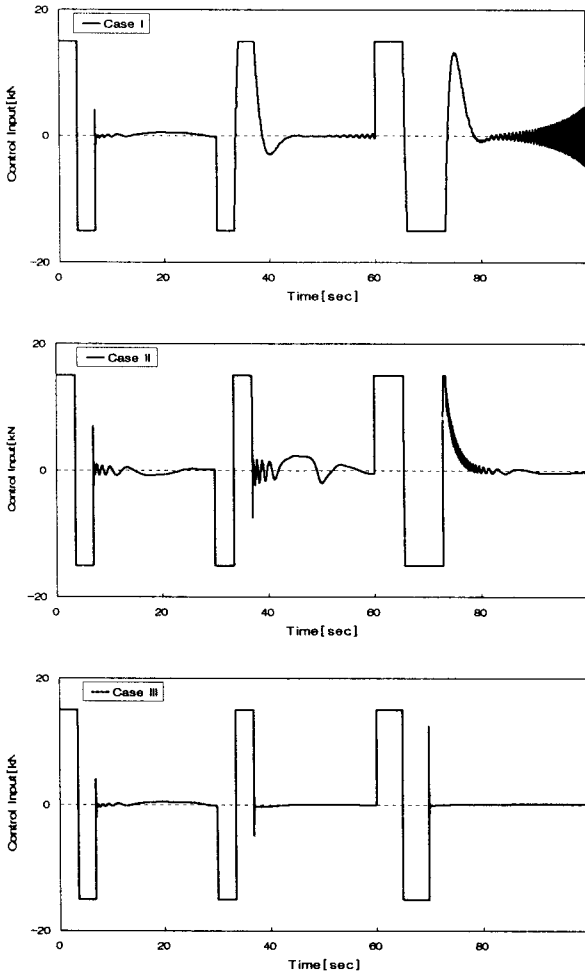


그림 11 제어 입력
Fig. 11 Control Input

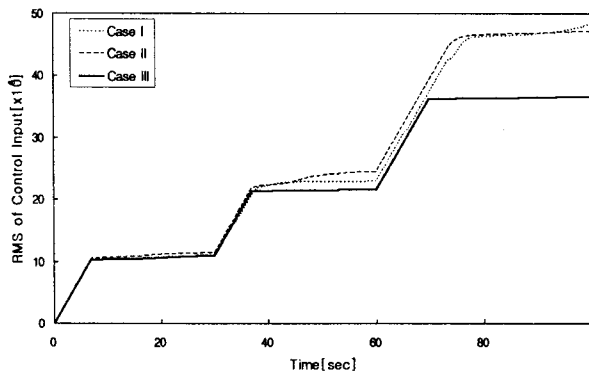


그림 12 제어입력의 RMS 값
Fig. 12 RMS value of control input

이상의 실험 I에 대한 시뮬레이션 결과를 표 2에 나타내었다. 실험 I의 경우 기존의 제어기 및 방법대비 큰 성능향상은 가져오지 않았지만, 기본적으로 목표치만 변경하였는데도 오버슈트가 많이 발생한 것은 크레인 양하역 시간을 많이 소요시켜 생산성에 다소 영향을 미칠 것으로 사료된다.

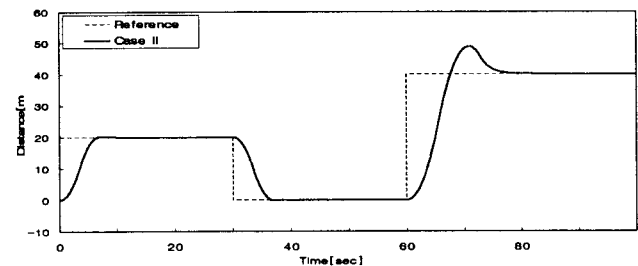
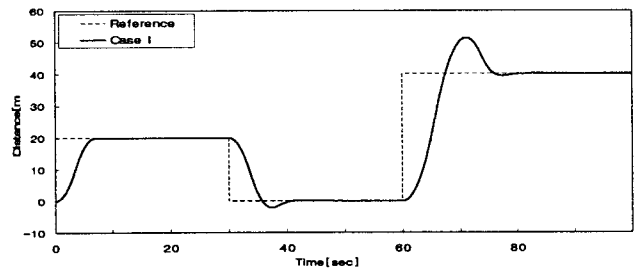
표 2 시뮬레이션 결과(실험 I)

Table 2 Simulation results(Experiment I)

Items \ Cases	Case I	Case II	Case III
Max Overshoot (for 40[m] distance)	28.4[%]	22.0[%]	0.03[%]
Average Residual Error (after 80[sec])	0.04[m]	0.03[m]	0.01[m]
RMS of Error($\times 10^3$)	3.92	3.74	3.36
RMS of Control Input($\times 10^6$)	48.31	47.16	36.66

4.3.2 실험 II

실험 II에서는 이동 경로와 컨테이너의 질량변동을 동시에 고려하여 각 제어기에 대하여 그 특성을 평가하였다. Fig. 13은 목표치에 대한 LMCTS의 이동 거리에 대한 변화를 나타낸다. Case I의 경우 초기에 설정된 목표추종과 질량에 대해서는 적응적으로 동작을 하지만, 20[m]를 간 후 다시 돌아오는 경우 및 40[m] 목표위치 추종에 대해서는 두 경우 모두 수미터 이상의 오버슈트가 발생하였다. 더욱이 평균 잔류 오차의 경우도 1.77[m]로서 제어기로는 사용할 수 없는 실정이다. Case II는 진화전략 알고리즘으로 한차례 동조를 실시하여 계속적으로 적용한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 Case I보다는 다소 성능이 개선되기는 하였지만 부하 변동과 목표치 변동의 경우 역시 불안정한 특성을 보였다. Case III은 본 연구에서 제안 방법으로 새로운 목표의 설정시마다 별도의 프로세서를 통하여 최적의 값을 on-line으로 동조한 경우로서 모든 경우에 대하여 오버슈트도 발생하지 않으며, 잔류오차도 3[mm]정도로 비교적 허용오차범위 내에서 이루어짐을 알 수 있다. 이는 부하변동이나 주위 외란에 대하여 강인한 특성을 보임을 알 수 있다.



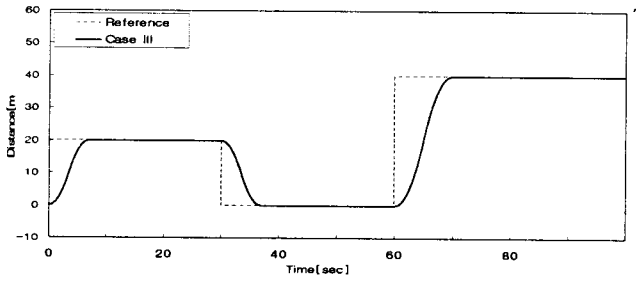


그림 13 기준 경로에 대한 거리변화
Fig. 13 Distance variations for the reference trajectory

Fig. 14는 80[sec] 이후에 잔류하는 잔류오차를 확대한 그림이다. Case I과 Case II 두 가지 경우 모두 실제 현장에서 사용할 수 없을 정도의 오버슈트와 잔류오차를 보였다. 제안한 제어기인 Case III의 경우에는 3[mm]이내에서 오차가 발생하고 있지만 허용오차범위내의 매우 우수한 결과를 보여주고 있다.

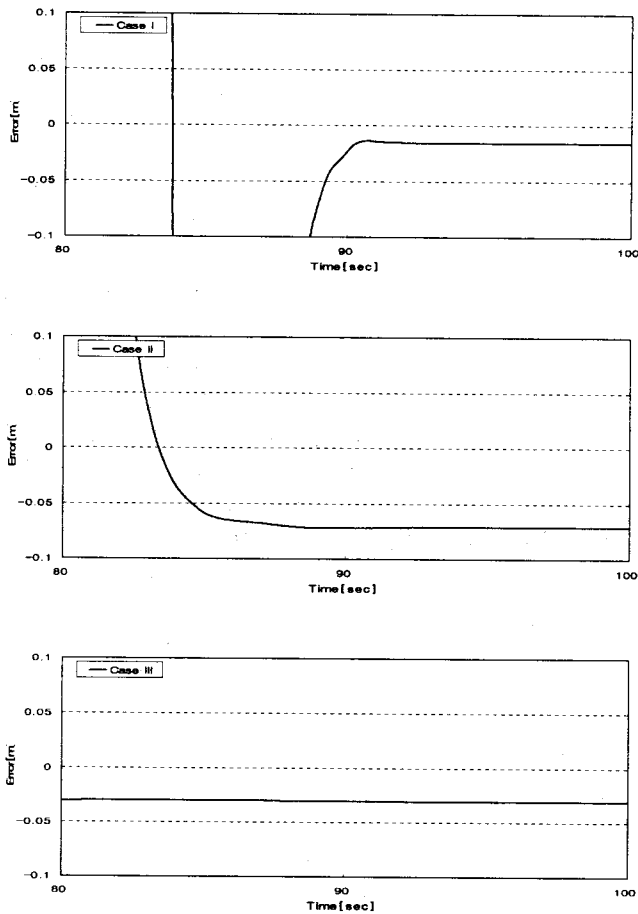


그림 14 평균 잔류오차
Fig. 14 Average residual Error(after 80[sec])

Fig. 15는 오차에 대한 RMS(root mean square) 값을 나타낸다. Case III가 Case I에 대하여 50.2%, Case II에 대하여 81.5% 향상됨을 확인하였다.

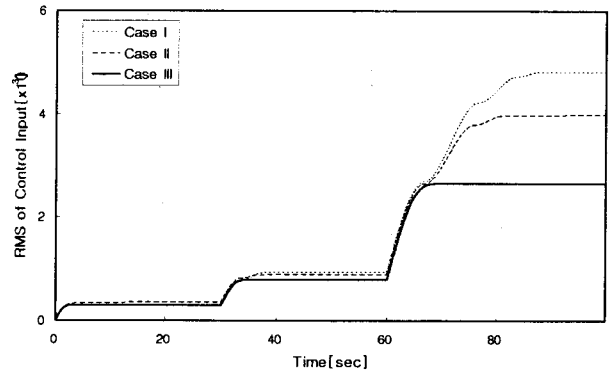


그림 15 시스템 오차의 RMS 값
Fig. 15 RMS value of system error

다음 Fig. 16은 실험 II의 경우에 대하여 각 제어기에 대한 제어입력을 나타내고 있다. 실제로 제어 입력의 경우도 Fig. 16에서 보는바와 같이 효과적으로 입력되고 있음을 확인할 수 있다. Fig. 17은 각 제어기 구현시 발생된 제어량을 RMS로 표현한 것으로 Case III의 경우가 Case II에 비하여 76%, Case I에 비하여 130% 향상됨을 확인할 수 있다. 따라서 제어 에너지 효율 면에서도 제안한 제어기가 매우 우수함을 확인할 수 있다.

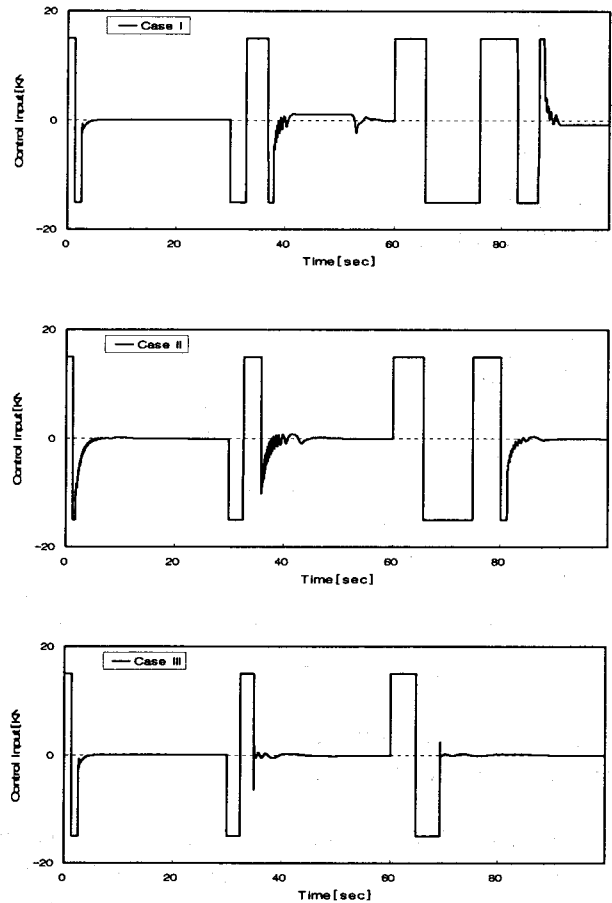


그림 16 제어 입력
Fig. 16 Control input

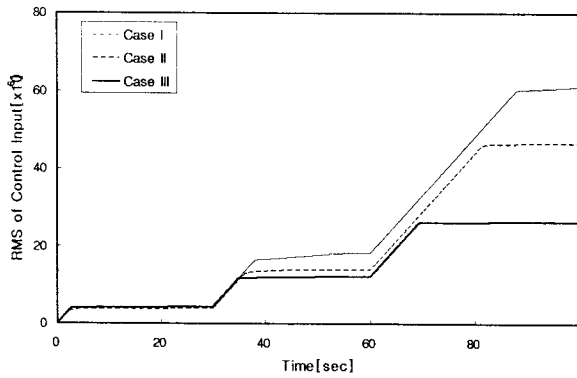


그림 17 제어입력의 RMS 값
 Fig. 17 RMS value of control input

이상의 실험 II에 대한 시뮬레이션 결과를 표 3에 나타내었다.

표 3 시뮬레이션 결과(실험 II)
 Table 3 Simulation results(Experiment II)

Items	Cases		
	Case I	Case II	Case III
Max Overshoot (for 40[m] distance)	57.9[%]	47.4[%]	0.05[%]
Average Residual Error (after 80[sec])	1.77[m]	0.18[m]	0.03[m]
RMS of Error(×103)	4.81	3.98	2.65
RMS of Control Input(×106)	61.04	46.42	26.37

5. 결 론

항만에서 이용하게 될 LMCTS는 비교적 큰 중량물을 적재하며, 그 변화폭이 커 위치제어시스템에서는 중량의 급격한 변화와 이로 인한 마찰력의 변화, 그리고 주기적 외란인 디텐트력이 제어시 큰 방해요소로 작용한다. 특히, 마찰력은 셔틀카의 중량 및 속도 관계까지 고려하였으며, 데드존 영향을 갖도록 하였다. 이러한 시스템에서 강인하며, 적응성을 갖도록 하기 위해 본 논문에서는 진화전략 알고리즘과 2-DOF PID 제어를 도입하였다. 시뮬레이션 결과 해소된 오버슈트를 비롯한 잔류오차가 우수함을 확인할 수 있었으며, 특히, 잔류오차는 컨테이너를 양하역시 요구되는 매우 중요한 요소로서 본 논문에서 종래의 제어기법으로는 불가능함을 확인할 수 있었다. 이는 LMCTS가 가지는 데드존이 크고 이로 인한 비선형성이 큰 것이 가장 큰 요인이 아닌가 사료된다. 더불어 제어에너지 효율 면에서도 제안한 제어기가 보다 우수함을 확인할 수 있어 경제성면에서도 우수한 것으로 평가된다. 이상의 시뮬레이션 결과를 통하여 양하역 이전 위치제어 시 소요되는 시간을 최소화될 것으로 기대되며, 나아가 LMCTS가 차세대 컨테이너 터미널의 이송 장치로서의 타당성 검증 및 항만 생산성 향상에 도움이 될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통기술평가원의 교통체계효율화 사업의 연구비지원(07교통체계-물류05)에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] Klaus-Peter Franke, 2001, "Boosting Efficiency of Split Marine Container Terminals by Innovative Technology," IEEE Intelligent Transportation Systems Conference Proc., Oakland, USA, August, pp. 774-779.
- [2] K. K. Tan, S. N. Huang, and T. H. Lee, 2002, "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.
- [3] 이진우, 서진호, 이영진, 이권순, 2004, "DR-FNNs를 이용한 리니어 모터 기반 컨테이너 이송시스템의 위치 제어," 한국항해항만학회지, 제28권, 제6호, pp. 541-548.
- [4] F. J. Lin, R. J. Wai, and C. M. Hong, 2002, "Hybrid Supervisory Control Using Recurrent Fuzzy Neural Network for Tracking Periodic Inputs," IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 12, No. 1, January.
- [5] Rong-Jong Wai, Faa-Jeng Lin, 2001, "Adaptive Recurrent-Neural-Network Control for Linear Induction Motor," IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 37, No. 4, pp. 1176-1192.
- [6] K. Yoshida, H. Takami, X. Kong, and A. Sonoda, 2001, "Mass Reduction and Propulsion Control for a Permanent-Magnet Linear Synchronous Motor Vehicle," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 37, No. 1, pp. 67-72.
- [7] K. Yoshida, X. Kong, and H. Takami, 2000, "Network Transport Automation Study of PM LSM Vehicle on Orthogonally-Switching-Guideway," Industry Applications Conference, Vol. 2, pp. 1109-1114.
- [8] Y. Mitsukura, T. Yamamoto and M. Kaneda, 1999, "A Design of Self-Tuning PID Controllers using a Genetic Algorithm," Proceedings of the American Control Conference, pp. 1361~1365.
- [9] Anyong Qing, 2006, "Dynamic differential evolution strategy and applications in electromagnetic inverse scattering problems," IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 44, Issue 1, pp. 116-125.
- [10] D. P. Kwok and Fang Sheng, 1994, "Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal Robot Arm PID Control", Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation, pp. 708-713.

저 자 소 개



이 영 진(李榮珍)

1992년 동아대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 석사. 2000년 동 대학원 박사. 2001년~현재 : 한국폴리텍 항공대학 항공전기와 부교수. 관심분야 : 자동화시스템, 고장진단, 지능제어, 물류자동화
Tel : 055-830-3482
E-mail : airlee@kopo.ac.kr



이 진 우(李晉宇)

1998년 경남대학교 전기공학과 졸업, 2000년 동아대학교 전기공학과 대학원 학석사, 2006년 동 대학원 박사, 2006년~현재 : 동아대학교 전기공학과 포닥연구원 관심분야 : 영상처리, 적응제어, 물류자동화, 지능제어
Tel : 051-200-6954
E-mail : tojwlee@hanmail.net



조 현 철(曹賢哲)

1997년 부경대학교 제어계측공학과 졸업, 1999년 동아대학교 전기공학과 대학원 석사, 2006년 미국 네바다 대학교 전기공학과 대학원 박사, 2006년~현재 : 동아대학교 전기공학과 포닥연구원, 관심분야 : 제어시스템, 신경회로망, 확률프로세서, 임베디드 시스템
Tel : 051-200-6950
E-mail : hyunccho@gmail.com



이 권 순(李權純)

1977년 충남대학교 공업교육과 졸업, 1981년 서울대학교 전기공학과 대학원 석사, 1990년 미국 오레곤 주립대학교 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(Ph.D.), 1982년 ~ 현재 : 동아대학교 전기공학과 교수, 관심분야 : 물류자동화, 지능제어, 최적화, 영상처리, 의용공학
Tel : 051-200-7739
E-mail : kslee@dau.ac.kr