

論 文

# 진화전략을 이용한 컨테이너 크레인의 최적제어에 관한 연구

이 영 진\* · 이 권 순\*\*

An Optimal Control of Container Crane Using Evolution Strategy

Y. J. Lee · K. S. Lee

**Key Words** : 유전프로그래밍(Genetic programming), 진화전략(Evolution strategy), 2 자유도 PID 제어기(2-DOF PID controller), 자동동조(Auto tuning), 컨테이너 크레인(Container crane), 선형화(Linearization), 휴리스틱 알고리즘(Heuristic algorithm), 겐트리 크레인(Gantry crane)

## Abstract

During the operation of crane system in container yard, the objective is to transport the load to a goal position as quick as possible without rope oscillation. The container crane is generally operated by an expert operator, but recently an automatic control system with high speed and rapid transportation is required. Therefore, we developed an optimal controller which has to control the crane system with disturbances.

In this paper, we present a design of optimal 2-DOF PID controller for the control of gantry crane which has to control swing motion and trolley position. We used evolution strategy(ES) to tune the parameters of 2-DOF PID controller. It was compared with general PID controller. The computer simulations show that the proposed method has better performances than the other method.

## 1. 서 론

최근 들어 컨테이너 터미널의 운영효율을 향상시키고 해상수송 물류비용을 절감하기 위하여 항만시설의 자동화에 관한 필요성이 전세계적으로 증가되고 있는 추세에 있다. 이러한 과정 속에서 새로운

최적의 컨테이너 터미널 개발을 위한 일환으로써 항만하역장비에 대한 연구·개발이 활발히 진행되고 있는 가운데 컨테이너 크레인 및 트롤리(Trolley), 스프레더(Spreader), Cable reels 등과 같은 컨테이너 크레인의 구성 요소에 대한 다양한 연구가 폭넓게 진행되고 있다<sup>1,2)</sup>.

\* 학생회원, 동아대학교 전기공학과 박사과정

\*\* 정회원, 동아대학교 전기공학과 교수

항만 부두가에 설치되어 컨테이너 하역시에 사용되는 갠트리(Gantry)형 크레인도 그 대표적인 예로서 하물 이송시 요구되는 생산성 및 경제성과 양·하역시 발생될 수 있는 위험 요소들에 의한 안전성 등의 문제를 고려한 연구가 요구된다.

특히, 컨테이너를 하역할 때에는 바다로부터 불어오는 바람과 같은 외란에 의한 스프레더의 흔들림으로 시설물과의 충돌로 시설물이나 운반물체의 파괴 및 손상을 초래할 뿐만 아니라, 때에 따라서는 인명피해를 야기시키는 원인이 되기도 한다. 또한, 크레인이 정박된 선박으로부터 컨테이너를 하역하는 시간은 비용과 직결되는 생산성 문제로서 이를 고려한 제어방법도 최근에 많이 요구되고 있는 실정이다<sup>3,4)</sup>.

이와 같은 크레인 시스템은 항만하역장비 뿐만 아니라 산업현장에서도 다양한 종류의 화물을 이송시키는데 이용되는 것으로서 주위의 작업환경에 따라 트롤리(Trolley)의 이동속도, 운반하고자 하는 물체의 무게 및 이송거리의 변화에 의하여 운반물체의 흔들림과 그에 따른 이송위치 오차도 함께 발생하고 있어, 생산성이 저하되거나 작업성이 크게 떨어지는 문제를 야기시키기도 한다<sup>5)</sup>.

따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여 오래 전부터 PID제어와 같은 고전적인 제어기법을 이용하여 적용해 보고 있지만, 여전히 숙련된 운전자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 때문에 최근에는 퍼지이론, 신경망 및 유전자알고리즘과 같은 지능형 제어기법을 도입하여 크레인 자동화연구에 많이 응용되고 있다<sup>6,7)</sup>.

크레인 시스템을 제어하는 방법에는 속도제어에 의한 방법과 토오크제어에 의한 두 가지 제어방법으로 나눌 수 있는데, 이는 제어입력이 각각 속도와 토오크인 경우로서 두 가지 제어시스템 모두 위치제어와 진동억제(Anti-sway)제어 변수를 갖는다. 크레인의 하물을 이송시킬 때 발생하는 진동각과 위치 오차는 서로 연관된 관계로서 위치제어에 비중을 두게 되면 진동제어에 소홀해지고 진동제어에 비중을

두게 되면 위치제어에 문제가 될 수 있는 관계로서 이 두 가지 제어변수를 함께 제어하기란 쉽지 않은 문제이다<sup>4,8)</sup>.

따라서, 본 연구에서는 크레인 시스템에 대하여 다양한 설정위치와 주위의 외란이 인가되었을 경우에도 효과적인 제어가 될 수 있도록 위치오차 및 진동각의 두 가지 제어변수를 동시에 제어할 수 있는 최적의 제어기를 설계하고자 한다.

즉, 이송 물체의 진동을 최소화하면서 최소의 시간 내에 설정된 위치에 도달할 수 있는 제어기로서는 설정치 변화와 외란제어에 강인한 2 자유도 PID(2-DOF PID) 제어기를 적용하였으며, 제어기 파라미터 자동동조(Auto tuning)를 위하여 유전프로그래밍(Genetic programming)의 한 방법으로서 그 적용이 간단하면서도 최적의 값을 구하기 쉬운 진화전략(Evolution strategy, ES)을 이용하여 구현하여 보았다.

특히, 진화전략을 비롯한 휴리스틱 알고리즘(Heuristic algorithm)은 최근에 여러 가지 병합제어 형태로 다양한 제어대상에 적용되어 그 우수성이 입증되고 있어 본 연구의 방향도 기존 제어방식의 단점인 국부수렴으로 인한 한계점과 외란에 강인하지 못한 단점을 극복할 수 있는 좋은 계기가 될 수 있을 것으로 기대하고 있다. 또한, 본 연구에서 시뮬레이션한 결과 진화전략으로 동조된 제어기의 제어 특성이 우수함이 확인됨에 따라 실제 산업현장에서도 손쉽게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. 본 론

### 2.1 제어계의 수학적 모델링

#### 2.1.1 컨테이너 크레인 모델

컨테이너 크레인 시스템 제어계는 Fig. 1과 같이 x축 방향의 트롤리 횡행속도 조작과 y축 방향의 로프 조작으로 크게 나누어 생각할 수 있다.

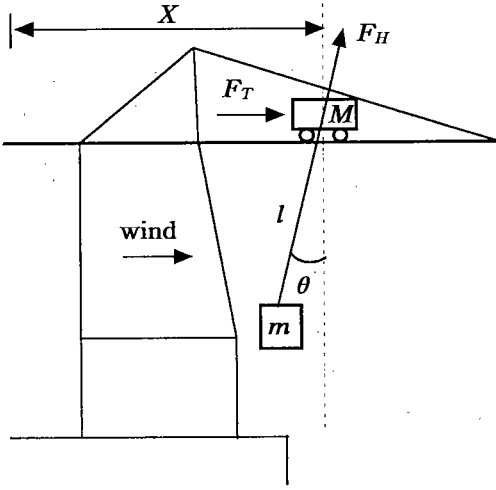


Fig. 1 A container crane system

$x$  : 트롤리 위치[m]

$\dot{x}$  : 트롤리 속도[m/sec]

$\ddot{x}$  : 트롤리 가속도[m/sec<sup>2</sup>]

$l$  : 로프 길이[m]

$\dot{l}$  : 로프 속도[m/sec]

$\theta$  : 진동각[deg]

$\dot{\theta}$  : 진동각속도[deg/sec]

$\ddot{\theta}$  : 진동각가속도[deg/sec<sup>2</sup>]

$g$  : 중력가속도[m/sec<sup>2</sup>]

$M$  : 트롤리 질량[kg]

$m$  : 운반물 질량[kg]

$F_T$  : 트롤리에 인가되는 힘[N]

$F_H$  : 호이스트에 인가되는 힘[N]

### 2.1.2 수학적 모델링

크레인 시스템의 수학적 모델은 Lagrange 방정식을 이용하여 다음의 식 (1)~(3)과 같은 3개의 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다<sup>9,10</sup>.

$$(M+m)\ddot{x} + m(l\ddot{\theta}^2 \sin \theta - 2\dot{l}\dot{\theta} \cos \theta) - ml\ddot{\theta} \cos \theta - m\dot{l}\sin \theta = F_T \quad (1)$$

$$ml\ddot{x} \cos \theta - ml^2 \ddot{\theta} - 2ml\dot{l}\dot{\theta} - mgl \sin \theta = 0 \quad (2)$$

$$m\ddot{x} \sin \theta - m\dot{l} + ml\dot{\theta}^2 + mg \cos \theta = F_H \quad (3)$$

이러한 크레인 시스템에 있어서 제어되어야 할 대상으로는 트롤리의 위치  $x$ , 로프 길이  $l$  및 하물의 진동각  $\theta$ 가 있으며, 제어 입력으로는 트롤리와 호이스트에 각각 인가되는 입력  $F_T$ 와  $F_H$ 가 있다.

본 논문에서는 이상과 같은 제어계에 대하여 로프의 길이는 변하지 않고 고정되어 있다고 가정한 2 자유도의 시스템으로 선형화하여 트롤리의 속도만으로 주어진 위치까지 운반물체를 최소의 진동으로 이송시킬 수 있는 시스템으로 구성하였다.

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} \cos \theta + m\dot{\theta}^2 \sin \theta = F_T \quad (4)$$

$$m\ddot{x} \cos \theta - ml\ddot{\theta} = mg \sin \theta \quad (5)$$

아울러, 운반물체의 진동각이 아주 작다고 가정하면,  $\sin \theta \approx \theta$ , 그리고  $\cos \theta = 1$ 로 가정할 수 있으며, 이로부터 다음과 같은 선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$(M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} = F_T \quad (6)$$

$$l\ddot{\theta} + g\theta = \ddot{x} \quad (7)$$

## 3. 최적제어기 설계

### 3.1 자유도 PID 제어기

본 논문에서 연구한 크레인 제어계에 대하여, 외란을 고려하지 않은 일반적인 경우에는 P나 PI제어기와 같은 단순화된 제어기능만으로도 충분히 제어할 수 있지만, 설정치가 변화되거나 바람과 같은 주위의 예측할 수 없는 환경변화에 대해서는 원활한 제어가 어렵게 됨에 따라 운전자의 작업환경에 그만큼의 부담을 주게 된다. 따라서, 본 논문에서는 설정치 추종 성능 뿐만 아니라 외란 제거능력도 매우 우수한 2 자유도 PID제어기를 Fig. 2와 같이 피드백

형으로 구성하여 크레인의 위치 및 운반물의 흔들림 제어에 적용하는 문제를 연구하였다<sup>11)</sup>.

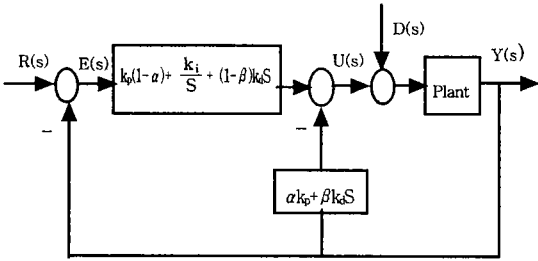


Fig. 2 A block diagram of the 2-DOF PID controller

먼저, Fig. 2의 제어기 출력  $U(s)$ 는 식 (8)과 같이 나타낼 수 있으며,

$$U(s) = E(s) \left\{ k_p(1-a) + \frac{k_i}{s} + (1-\beta)k_d s \right\} - (\alpha k_p + \beta k_d s) Y(s) \quad (8)$$

여기서,  $k_p, k_i, k_d$ 는 PID제어기 이득이며,  $R(s)$ 는 트롤리의 최종위치 및 운반물의 진동각으로 설정하였으며,  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 다음과 같은 여러 가지 형태의 PID제어기 변형을 유도하는 파라미터이다.

- |                                     |             |
|-------------------------------------|-------------|
| ▷ $\alpha = \beta = 0$              | → 기본형 PID   |
| ▷ $0 < \alpha \ll \beta, \beta = 1$ | → 미분선행형 PID |
| ▷ $\alpha = 1, \beta = 1$           | → 비례선행형 PID |

따라서, 본 논문에서는 2 자유도 PID 제어기 설계에 필요한 파라미터  $k_p, k_i, k_d$  및  $\alpha, \beta$ 를 진화전략 알고리즘으로 자동동조 하였으며, 위치오차 및 흔들림 오차에 대한 2대의 제어기로 각각 구성하여 총 10개의 파라미터를 추정하였다.

또한, 외란  $D(s)$ 는 식 (9)와 같이 상시 일정한 주기를 가지는 강풍과 갑작스런 돌풍의 2가지 외란에 대하여 고려하였다.

$$F_w = 0.02 (3 \sin \omega t + 7 \sin 2 \omega t + 5 \sin 3 \omega t + 4 \sin 4 \omega t) \quad (9)$$

### 3.2 진화전략

제어기 파라미터들을 동조하기 위하여 도입된 진화전략은 식 (10)과 같이 주어진 탐색공간내에서 우수한 개체를 선택해 나감으로써 최적점 근처에서 최적 탐색능력이 뛰어난 특징을 가지고 있다<sup>12-14)</sup>.

$$x^{t+1} = x^t + N(0, \sigma) \quad (10)$$

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  $\sigma$ 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 GA법에 적용되는 교배 연산자 및 돌연변이 연산자를 도입하여 해의 탐색공간을 넓혀 국부수렴문제를 해결하였다. 본 논문에서 적용한 교배방법은 식 (11)과 같은 산술적 교배를 적용하였으며,

$$\begin{aligned} x_1^{t+1} &= \alpha x_1^t + (1-\alpha)x_2^t \\ x_2^{t+1} &= (1-\alpha)x_1^t + \alpha x_2^t \end{aligned} \quad (11)$$

각 세대의 적합도를 평가하기 위한 평가함수는 시스템의 시간에 따른 위치오차 및 진동각 오차를 고려하여 식 (12)와 같이 설정하였다.

$$f(x) = \sum_{i=1}^n \{ e_x(t) \cdot t \cdot w_1 + e_\theta(t) \cdot t \cdot w_2 \} \quad (12)$$

여기서,  $e_x(t)$ 는 위치오차,  $e_\theta(t)$ 는 진동각 오차,  $w_1$ 과  $w_2$ 는 각각 위치 및 진동각의 가중치로서 경험적으로 결정하였으나, 위치오차가 진동각보다 일반적으로 작게 나타나므로  $w_1 \ll w_2$ 이 되도록 1:100정도로 선정하였으며, 위치최적이냐 흔들림최적이냐에 따라 원하는 제어방향에 맞게 적절하게 바꾸어서 선정할 수도 있다.

3.3 최적제어기 구성

2 자유도 PID 제어기의 경우 설정치 변화에 대해서는 기존의 P, I, D 파라미터를 적절히 조정하고 외란에 대해서는  $\alpha, \beta$ 를 조정하면 되므로 본 연구에서는 Fig. 3과 같이 2 자유도 PID 제어기의 파라미터를 진화전략으로 자동동조하여 위치오차 및 진동각을 최소로 하면서 외란에도 강인한 제어가 되도록 구성하였으며, 향후 이를 실시간으로 응용할 수 있도록 온라인 구조로 구성하였다.

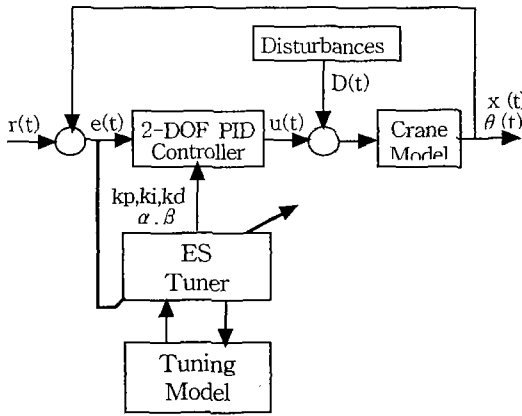


Fig. 3 A block diagram of the proposed control systems

우선, 본 연구에서는 2 자유도 PID 제어기의 성능평가 및 진화전략의 자동동조 특성을 파악하기 위하여 진화전략으로 먼저 동조된 파라미터를 제어기에 적용하는 off-line 형태의 시뮬레이션을 구현하였으나, 실제 자동동조에 소요되는 시간이 약 15초 이내에서 거의 최적의 값을 찾고 있으므로 크레인 시스템 기동시에 소요되는 시간내에 충분히 제어기 파라미터를 실시간으로 동조할 수 있을 것으로 기대하고 있다.

4. 시뮬레이션 결과

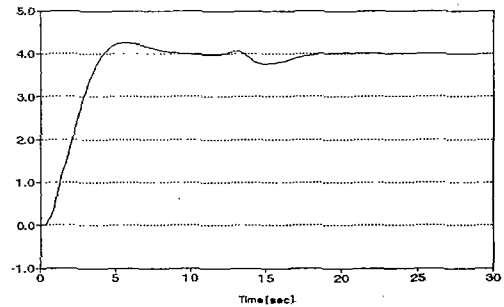
본 연구에서는 Table 1과 같은 시스템 파라미터를 갖는 pilot개념의 크레인 시스템에 대하여 Fig. 3

과 같이 구성된 자동동조 2 자유도 PID 제어기를 적용하여 다음과 같이 운반물의 위치 및 진동을 구하여 제어성능을 관찰하여 보았다.

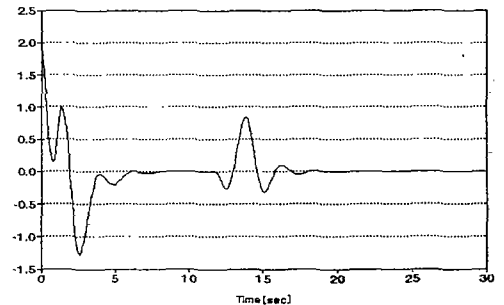
Table 1. A simulation data of the crane system

Parameter	Values
중력 가속도 ( $g$ )	9.8[m/sec <sup>2</sup> ]
트롤리 질량 ( $M$ )	4.2[kg]
운반물의 질량 ( $m$ )	5.6[kg]
로프의 길이 ( $l$ )	0.86[m]

먼저, Fig. 4, 5와 같이 크레인의 최종 목표위치를 4[m], 초기 진동각을 2[deg]로 설정하여, 10초 후에

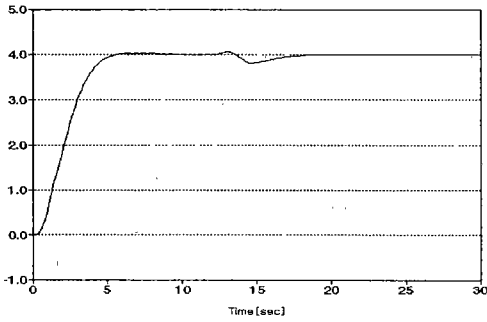


(a) trolley position[m]

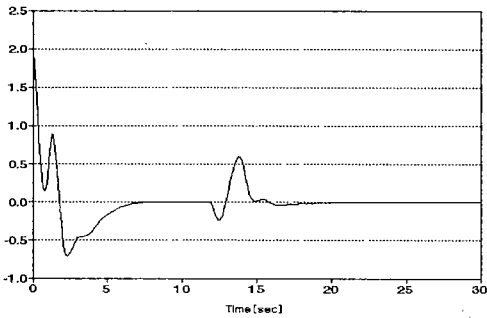


(b) angle[deg]

Fig. 4 A step response of the general PID control for sudden wind forces (initial angle = 2[deg], set position = 4[m])



(a) trolley position[m]

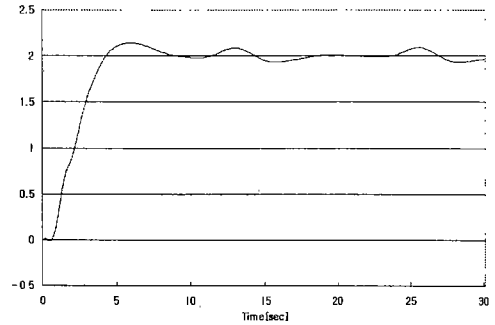


(b) angle[deg]

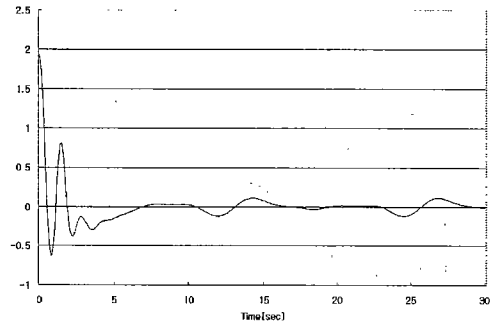
Fig. 5 A step response of the 2-DOF PID control for sudden wind forces  
(initial angle = 2[deg], set position = 4[m])

갑작스런 돌풍으로 인한 외란이 부가된 경우에 대하여 고려하여 보았다. Fig. 4는 일반적인 PID 제어를 적용한 경우로서, 이송 물체의 초기 흔들림으로 인하여 설정위치 추종시 오버슈트가 발생하고 있으며, 갑작스런 외란이 부가됨에 따라 위치보정 및 흔들림 교정이 다소 지연되고 있음을 알 수 있다.

한편, Fig. 5는 본 연구에서 제안한 2 자유도 PID 제어를 적용한 경우로서 설정위치에 도달할 때까지 과도한 흔들림이 발생하지 않았고, 외란에 대해서도 강인한 특성을 보이고 있으며, 목표지점에 도달 후에도 불필요한 잔류 흔들림이 없으므로 이송차량과 컨테이너의 도킹(docking)이 보다 용이해짐에 따라 생산성이 향상될 수 있을 것으로 기대된다.



(a) trolley position[m]



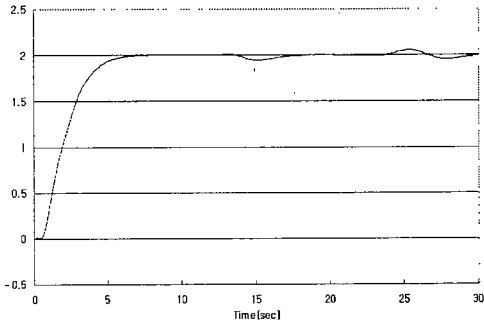
(b) angle[deg]

Fig. 6 A step response of the general PID control for wind forces  
(initial angle = 2[deg], set position = 2[m])

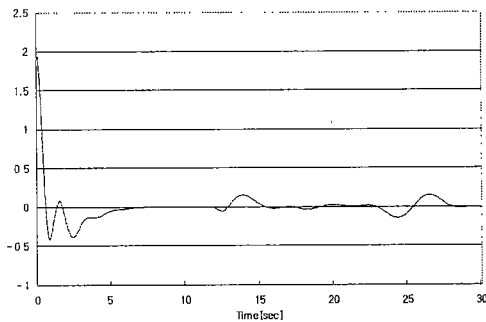
다음으로, Fig. 6과 7은 다양한 설정치 변화에도 강인함을 확인하기 위하여 설정위치를 2[m]로 변화시키고, 시스템의 안정도를 평가하기 위하여 주위의 외란인 식 (9)의 바람을 초기상태부터 부가되도록 하였다.

상시 바람이 불고 있다고 가정한 경우에 대하여서는 Fig. 6에서 알 수 있듯이 일반적인 PID 제어기는 외란에 대하여 설정위치 대비 오버슈트가 발생하고 있고, 이송물체의 과도한 진동도 발생되고 있으며, 이송 후에 발생한 외란에 대해서도 응답속도가 본 논문에서 설계한 제어기보다 느림을 알 수 있다.

또한, Fig. 7은 본 연구에서 설계한 2 자유도 PID 제어를 적용한 경우로서 외란이 시스템 초기에서



(a) trolley position[m]



(b) angle[deg]

Fig. 7 A step response of the 2-DOF PID control for wind forces  
(initial angle = 2[deg], set position = 2[m])

부터 추가되어도 제어특성이 Fig. 6의 일반적인 PID 제어기보다 강인함을 알 수 있으며, 설정위치 추종 능력도 우수함을 알 수 있었다.

## 5. 결론

본 논문에서 추구하고자 하는 바는 실제 산업현장에서 발생하는 다양한 환경변화와 같은 외란에 강인하고 보다 안정된 최적의 크레인 제어시스템을 개발하는데 있다. 따라서 본 연구에서는 진화전략을 이용하여 최적의 2 자유도 PID 제어기를 설계한 후 Pilot 크레인 모델에 대하여 위치 및 진동을 동시에 고려하여 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은

결과를 얻을 수 있었다.

첫째, 진화전략을 이용하여 PID 제어기 파라미터를 복잡한 수식을 거치지 않고도 짧은 시간내에 최적의 파라미터를 동조할 수 있으므로, 이를 on-line으로 구성하여 자동동조시키면 효과적일 것으로 기대된다.

둘째, 크레인 제어변수는 크게 위치와 진동각으로 나누어 생각할 수 있는데 본 논문에서 제안한 식 (12)의 평가함수를 사용하므로써 가중치  $w_1$ 과  $w_2$ 의 변화에 따라 위치 및 진동각 오차를 운전자가 선택적으로 가중치를 부여하여 제어할 수 있다는 장점이 있다.

아울러, 향후의 과제로서는 위치와 흔들림 오차의 상관관계를 명확히 밝혀 보다 신뢰성 있는 평가함수가 설정되어야만 최적제어 조건을 도출할 수 있을 것으로 판단되며, on-line 구성에 필요한 시스템 동정에 관한 연구와 실제 산업현장에서 바로 적용될 수 있도록 비선형성을 고려한 실용화 연구가 있어야 할 것으로 생각된다.

## 참고문헌

- 1) 정승현, 박정일, “퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어”, 제어·자동화·시스템 공학회 논문지, Vol. 3, No. 5, pp. 435-442, 1997.
- 2) 손정기, “컨테이너 크레인 스프레더의 흔들림 제어”, 부경대학교 석사논문, 1997.
- 3) J. W. Auernig and H. Troger, “Time Optimal Control of Overhead Cranes with Hoisting of the Load”, Automatica, Vol. 23, No. 4, pp. 437-447, 1987.
- 4) M. Nomura, Y. Hakamada, and H. Saeki, “Anti-sway Position Control of Crane based on Acceleration Feedback and Predicted Pattern Following Method”, Trans. of the Institute of Elec. Eng. of Japan D, Vol. 117, No. 11, pp. 1341-1347, 1997.

- 5) 윤지섭, 강이석, “천정크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 6, pp. 1391-1401, 1995.
- 6) S. Yasunobu, “Automatic Container Crane Operation based on a Predictive Fuzzy Control”, 計測自動制御學會論文集, Vol. 22, No. 10, pp. 60-67, 1986.
- 7) M. Sakumoto and T. Kayashi, “Application of Fuzzy Control to Anti-sway System of Container Crane”, 日本機械學會論文集, Vol. 58, No. 550, pp. 106-111, 1992.
- 8) A. Marttinen, J. Virkkunen, and R. T. Salminen, “Control Study with a Pilot Crane”, IEEE Transactions on Education, Vol. 33, No. 3, pp. 298-305, 1990.
- 9) W. Li and X. Cheng, “Computer Control of High Speed Cranes”, Proceedings of the American Control Conference, pp. 2562-2566, 1993.
- 10) S. Sagara and F. Ohkawa, “Adaptive Control for Crane”, 日本機械學會論文集, Vol. 56, No. 526, pp. 150-154, 1990.
- 11) 김동화, 이원규, “신경망 2-자유도 PID제어기를 이용한 원자력 발전소용 증기 발생기 수위제어”, Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 4, No. 3, pp. 321-328, 1998.
- 12) D. P. Kwok and Fang Sheng, “Genetic Algorithm and Simulated Annealing for Optimal Robot Arm PID Control”, Proceedings of the first IEEE Conference on Evolutionary Computation, pp. 708-713, 1994.
- 13) 박진현, 김현식, 최영규, 이만형, “진화알고리즘에 의한 온라인 제어방식”, '95 KACC, pp. 906-910, 1995.
- 14) Z. Michalewicz, “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, Springer-Verlag, 1994.