

신경회로망 2 자유도 PID 제어기를 이용한 ган트리 크레인제어에 관한 연구

°최성욱·손주한·이진우·이영진·이권순***

A Study on Gantry Crane Control using Neural Network Two Degree of PID Controller

* S. U. Choi * · J. H. Sohn * · J. W. Lee * · Y. J. Lee ** · K. S. Lee ***

Key Words : Gantry crane, Anti-sway, Two degree of freedom PID control, Neural network tuner

Abstract

During the operation of crane system in the container yard, it is necessary to control the crane trolley position so that the swing of the hanging container is minimized. Recently an automatic control system with high speed and rapid transportation is required. Therefore, we designed a controller to control the crane system with disturbances and weight change.

In this paper, we present the neural network two degree of freedom PID controller to control the swing motion and trolley position. Then we executed the computer simulation to verify the performance of the proposed controller and compared the performance of the neural network PID controller with our proposed controller in terms of the rope swing and the precision of position control. Computer simulation results show that the proposed controller has better performances than neural network PID with disturbances.

* 동아대학교 전기공학과 대학원

** 항공기능대학교 전기계측제어과 전임교수

*** 동아대학교 전기 전자 컴퓨터공학부 교수

1. 서 론

최근 산업이 발전함에 따라 수출입 화물량이 급격하게 증가하고 있으나, 여기에 비해 물류 처리 시설 능력은 한정되어 있어 항만 운영에 많은 어려움이 대두되고 있다. 이를 위해 유럽이나 동남아의 대형 항만에서는 이에 대한 최적의 해결책으로 항만의 자동화에 대해 많은 연구가 진행되고 있으며, 네덜란드의 ECT항에서는 항만 운영시스템의 자동화가 이루어진 상황이다. 이러한 항만 자동화 시스템의 도입은 항만의 효율적인 운영과 물류비용의 절감 등 그 파급적 효과는 상당할 것이다. 항만 자동화 시스템에서 컨테이너를 이송하는 컨테이너 트레일러와 크레인은 항만자동화를 위한 중요대상이 되고 있다. 특히, 컨테이너 부두에 설치되어 컨테이너 양·하역 시에 사용되는 갠트리형 크레인(Gantry crane)은 하물 이송시 요구되는 생산성과 경제성을 향상시킬 수 있는 방안으로서 시스템의 자동화에 관심이 집중되고 있다 [1].

이와 같은 크레인 시스템은 항만현장 뿐만 아니라 산업현장에서도 이용되는 것으로서 주위의 작업 여건에 따라 트롤리(Trolley)의 이동속도, 화물의 무게 및 이송거리의 변화에 의하여 운반물체의 흔들림과 그에 따른 이송위치 오차도 함께 발생하고 있어, 생산성이 저하되거나 작업성이 크게 떨어지는 문제를 발생시키기도 한다[2]. 따라서, 이러한 문제를 해결하기 위하여 오래 전부터 PID 제어와 같은 고전적인 제어기법을 적용해 보고 있지만, 여전히 숙련된 운전자의 경험에 의존하고 있는 실정이다. 때문에 최근에는 퍼지이론, 신경망과 같은 지능형 제어기법을 도입하여 크레인 자동화연구에 많이 응용되고 있다.[3] 크레인 시스템을 제어하는 방법에는 속도제어에 의한 방법과 토오크 제어에 의한 두 가지 제어방법으로 나눌 수 있는데, 이는 제어입력이 각각 속도와 토오크인 경우로서 두 가지 제어시스템 모두 위치제어와 진동억제(Anti-sway)의 제어변수를 갖는다. 크레인의 하물을 이송시킬 때 발생되는 진동각과 위치오차는 서로 연관된 관계로서 위치제

어에 비중을 두게 되면 진동제어에 소홀해지고 진동제어에 비중을 두게 되면 위치제어에 문제가 될 수 있는 관계로서 이 두 가지 제어변수를 함께 제어하기란 쉽지 않은 문제이다[4]. 따라서, 본 논문에서는 크레인 시스템에 대하여 다양한 설정위치와 주위의 외란이 인가되었을 경우에도 효과적인 제어가 될 수 있도록 위치오차 및 진동각의 두 가지 제어변수를 동시에 제어될 수 있는 최적의 제어기를 설계하고자 한다. 즉, 이송 물체의 진동을 최소화하면서 최소의 시간 내에 설정된 위치에 도달할 수 있는 제어기로서는 설정치 변화와 외란 제어에 강인한 2 자유도 PID(Two degree of freedom PID : TDOFPID) 제어기를 적용하였으며, 제어기 파라미터 자기동조(Self-tuning)를 위하여 신경회로망 동조기(Neural network tuner)를 이용하였으며, 제어기의 성능평가를 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 컨테이너 크레인 시스템

2.1 갠트리 컨테이너 크레인 모델

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

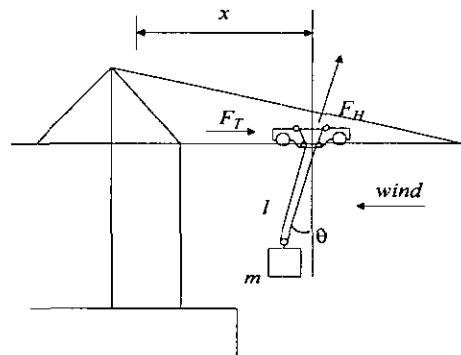


그림 1. 갠트리 크레인 시스템

크레인의 시스템의 동역학적 모델링을 위해서 사용한 변수들은 표 1과 같이 나타내었다.

표 1 크레인 시스템의 파라미터

Parameter	Descriptions
x	트롤리 위치[m]
\dot{x}	트롤리 속도[m/sec]
\ddot{x}	트롤리 가속도[m/sec ²]
l	로프 길이[m]
\dot{l}	로프 속도[m/sec]
θ	진동각[rad]
$\dot{\theta}$	진동각 속도[rad/sec]
$\ddot{\theta}$	진동각 가속도[rad/sec ²]
g	중력가속도[m/sec ²]
M	트롤리 질량[kg]
m	운반물 질량[kg]
F_T	트롤리에 인가되는 힘[N]
F_H	호이스트에 인가되는 힘[N]

2.2 수학적 모델링

크레인 시스템의 수학적 모델은 Lagrange 방정식을 이용하여 다음의 식 (1)~(3)과 같은 3개의 비선형 운동방정식으로 나타낼 수 있다[5].

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

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

(2)

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

(3)

이러한 크레인 시스템에 있어서 제어되어야 할 대상으로는 트롤리의 위치 x , 로프 길이 l 및 하물의 진동각 θ 가 있으며, 제어입력으로는 트롤리와 호이스트(Hoist)에 각각 인가되는 입력 F_H 와 F_T

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

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

(4)

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

아울러, 운반물체의 진동각이 아주 작다고 가정하면, $\sin \theta \approx 0$, 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. 제어기 설계

와 2 자유도 파라미터인 $\alpha_{-p}, \beta_{-p}, \alpha_{-a}, \beta_{-a}$ 로

3.1 신경회로망 2자유도 PID 제어기

본 논문에서는 크레인 시스템을 제어하기 위한 제어기로 기존의 PID 제어기와 같이 단순하고 외란 제거와 설정치 추종 성능이 뛰어난 특징을 가지고 있는 2자유도 PID 제어기로 하였다. 제어기의 파라미터 동조는 신경회로망 자기 동조기를 구성하여 동조하였다. 그림 2는 신경회로망 2자유도 PID 제어기에 의하여 구동되는 크레인 제어시스템의 블록다이어그램을 나타내고 있다.

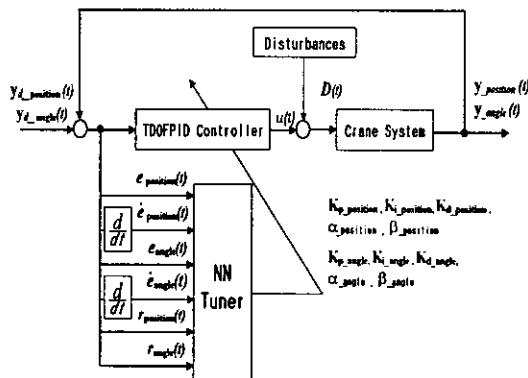


그림 2. 크레인 제어 시스템의 블록 다이어그램

제안한 신경회로망 2자유도 PID 제어기는 신경회로망 자기동조기와 2자유도 PID 제어기로 나눌 수 있다. 그림 3은 신경회로망 자기동조기의 구조를 나타내고 있다. 여기서, 신경회로망 학습을 위하여 모멘텀 오차 역전파 학습 알고리즘을 이용하였으며, 입력층 벡터는 위치오차(Position error)와 진동각오차(Swing angle error), 위치오차의 변화분과 진동각 오차의 변화분 및 위치 목표치와 진동각 목표치로 하였다. 그리고, 출력은 2자유도 PID의 파라미터인 $K_{i-p}, K_{p-p}, K_{d-p}, K_{p-a}, K_{i-a}, K_{d-a}$

하였다[6].

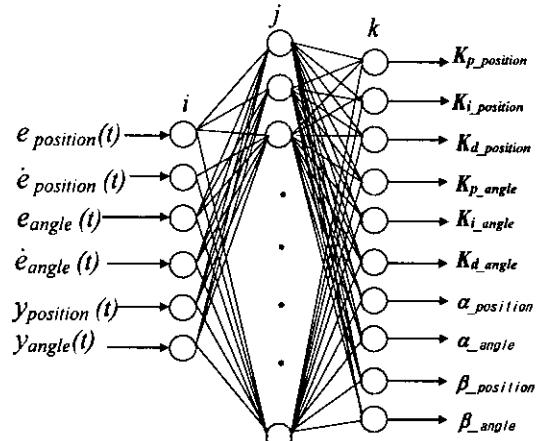


그림 3. 신경회로망 동조기의 구조

2자유도 PID 제어기의 제어입력은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 u(t) = & \{(1 - \alpha_p)K_{p-p}(e_p(t) - e_p(t-1)) + K_{i-p}e_p(t) \\
 & + (1 - \beta_p)K_{d-p}(e_p(t) - 2e_p(t-1) + e_p(t-2)) \\
 & - \{\alpha_p K_{p-p}(y_p(t) - y_p(t-1)) + \beta_p K_{d-p}(y_p(t) \\
 & - 2y_p(t-1) + y_p(t-2))\} \\
 & + \{(1 - \alpha_a)K_{p-a}(e_a(t) - e_a(t-1)) + K_{i-a}e_a(t) \\
 & + (1 - \beta_a)K_{d-a}(e_a(t) - 2e_a(t-1) + e_a(t-2)) \\
 & - \{\alpha_a K_{p-a}(\theta_a(t) - \theta_a(t-1)) + \beta_a K_{d-a}(\theta_a(t) \\
 & - 2\theta_a(t-1) + \theta_a(t-2))\}
 \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, 평가함수는 식 (9)와 같다.

$$E_{\text{pos}} = \frac{1}{2} [y_d(t) - y(t)]^2 \quad (9)$$

$$E_{\text{ang}} = \frac{1}{2} [\theta_d(t) - \theta(t)]^2$$

최급경사법에 의해 출력층과 은닉층의 가중치는 식 (10), (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta W_{jk}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{jk}} + \epsilon \Delta W_{jk}(t-1) \quad (10)$$

$$\Delta W_{ij}(t) = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} + \epsilon \Delta W_{ij}(t-1) \quad (11)$$

여기서, η 는 학습률이고, ϵ 는 모멘텀 상수이다.

그리고, 출력층의 오차신호는 식 (12)와 같다.

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} \quad (12)$$

여기서, $\text{net}_k = \sum_j W_{jk} O_j + \theta_k$ 이다.

출력층에 대한

$$K_{p-p}, K_{i-p}, K_{d-p}, \alpha_{-p}, \beta_{-p}, K_{p-a}$$

$K_{d-a}, \alpha_{-a}, \beta_{-a}$ 는 식(13)과 같다.

$$K_{p-p} = f(\text{net}_k_1), K_{i-p} = f(\text{net}_k_2)$$

$$K_{d-p} = f(\text{net}_k_3), K_{p-a} = f(\text{net}_k_4)$$

$$K_{i-a} = f(\text{net}_k_5), K_{d-a} = f(\text{net}_k_6)$$

$$\alpha_p = f(\text{net}_k_7),$$

$$\beta_p = f(\text{net}_k_8)$$

$$\alpha_a = f(\text{net}_k_9), \beta_a = f(\text{net}_k_{10})$$

여기서, $f(\cdot)$ 는 활성화 함수이다.

연쇄법칙(chain rule)을 사용하여 은닉층과 출력층의 가중치를 변경한다.

$$\Delta W_{jk}(t+1) = \eta \delta_k O_j + \epsilon \Delta W_{jk}(t) \quad (14)$$

출력층 각 노드의 오차 신호는 다음 식과 같다.

$$\delta k_{p-a} = (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}_{k_{p-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{p-a}}$$

$$\delta k_{i-a} = (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}_{k_{i-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{i-a}}$$

$$\delta k_{d-a} = (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}_{k_{d-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{d-a}}$$

$$\delta k_{p-a} = (\theta_d(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}_{k_p}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_p}$$

$$\delta k_{i-a} = (\theta_d(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}_{k_{i-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{i-a}}$$

$$\delta k_{d-a} = (\theta_d(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(\text{net}_{k_{d-a}}) \frac{\partial u(t)}{\partial k_{d-a}}$$

$$\delta\alpha_p = (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(net_{\alpha_p}) \frac{\partial u(t)}{\partial \alpha_p}$$

(15)

$$\delta\alpha_a = (\theta_d(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{\alpha_a}) \frac{\partial u(t)}{\partial \alpha_a}$$

$$\delta\beta_p = (y_d(t) - y(t)) \frac{\partial y(t)}{\partial u(t)} f'(net_{\beta_p}) \frac{\partial u(t)}{\partial \beta_p}$$

$$\delta\beta_a = (\theta_d(t) - \theta(t)) \frac{\partial \theta(t)}{\partial u(t)} f'(net_{\beta_a}) \frac{\partial u(t)}{\partial \beta_a}$$

여기서, $\frac{\partial y(t)}{\partial u(t)}$ 는 시스템의 자코비안이고,

$f'(\cdot)$ 는 신경회로망의 각각의 노드에 대한 출력의

미분식을 나타낸다.

또한, 외란 $D(t)$ 는 식 (16)과 같이 갑작스런 돌풍에 대하여 고려하였다.

$$D(t) = 4(3 \sin \omega t + 7 \sin 2\omega t + 5 \sin 3\omega t + 4 \sin 4\omega t) \quad (16)$$

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 그림 2와 같이 구성된 신경회로망 2 자유도 PID 제어기를 적용하여 컨테이너의 위치 및 전동제어에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하고 제어성능을 분석하기 위해서 신경회로망 PID 제어

기와 비교해 보았다. 또한, 중량변화와 외란에 대해서 제어기의 성능 비교 분석하였다. 표 2는 크레인 시스템의 파라미터값을 나타낸다.

표 2. 크레인 시스템 파라미터값

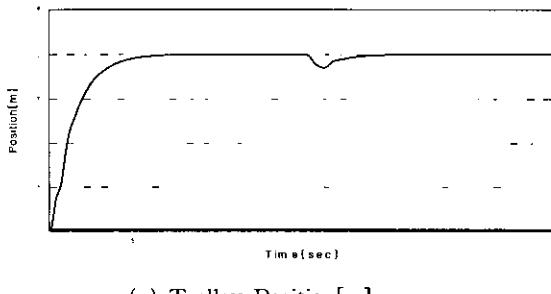
Parameter	Values
중력 가속도 (g)	9.8[m/sec ²]
트롤리 질량 (M)	4.2[kg]
운반물의 질량 (m)	5.6[kg]
로프의 길이 (l)	0.86[m]

본 논문에서 구성한 신경회로망 PID 제어기와 신경회로망 2자유도 PID 제어기는 각각 3층 구조로 하였으며, 신경회로망 PID 제어기의 경우는 입력층, 은닉층 그리고 출력층에 대한 각 층의 노드수는 각각 6, 12, 10으로 하였고, 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 경우는 입력층, 은닉층, 그리고 출력층에 대한 각 층의 노드수는 각각 6, 15, 6으로 하였다. 그리고, 신경회로망 모델링 학습에 대한 학습율과 모멘트 계수는 신경회로망 PID와 신경회로망 2자유도 PID 모두 각각 0.5, 0.5로 설정하였다. 또한 각 층에 대한 연결강도의 초기값은 0.5로 하였고, 은닉층과 출력층에 대한 활성화 함수는 시그모이드 함수와 항등 함수를 각각 적용하였다.

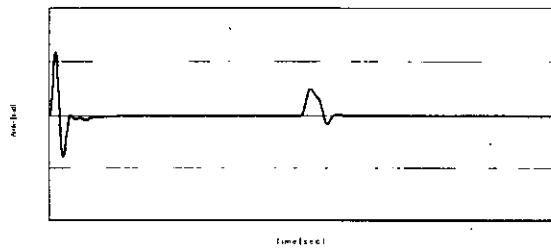
크레인의 최종 트롤리의 목표위치는 2[m], 초기 스프래더의 흔들림을 0[rad]으로 설정하고, 15초 후에 갑작스런 돌풍으로 인한 외란이 부가된 경우에 대하여 고려하여 보았다.

그림 4는 신경회로망 PID 제어기를 적용한 경우로서, 트롤리의 목표위치인 2[m]을 추종함에 있어서 정정 시간은 약 7.9초이며, 오버슈트나 오실레이션이 없이 잘 추종을 하였다. 또한, 스프래더의 흔들림의 제어에서는 초기 0.0118[rad]정도 진동하였고 약 4.6초 후에 흔들림이 없이 트롤리의 목표치인 2[m]에

추종하였다. 그리고, 갑작스런 외란이 부가될 경우 트롤리의 위치은 1.85[m]정도 뒤로 밀린 후 위치 재보정 시간은 약 4.5초가 소요되었다. 그리고 스프레더의 흔들림은 0.0047[rad]정도 진동 후 3.5초 후에 진동이 제어되었다.

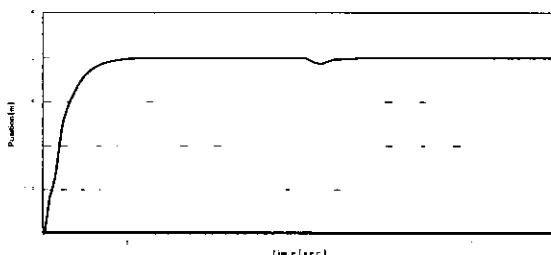


(a) Trolley Position[m]

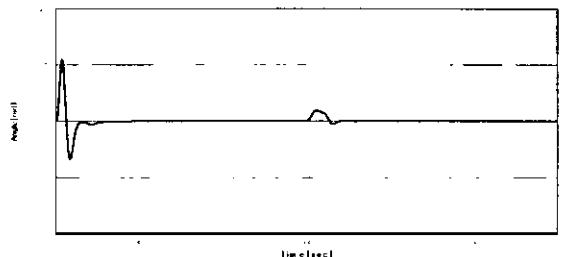


(b) Angle[rad]

그림 4. 돌풍에 대한 신경회로망 PID 제어기의 응답



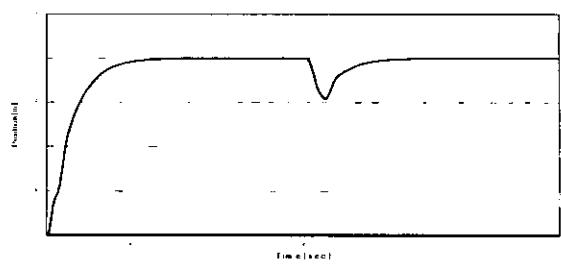
(a) Trolley Position[m]



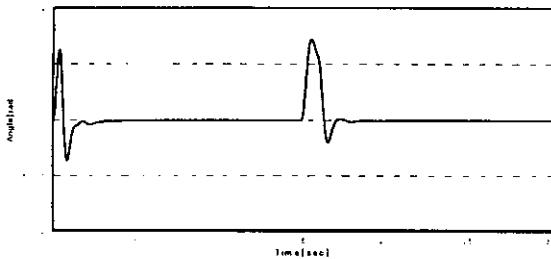
(b) Angle[rad]

그림 5. 돌풍에 대한 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 응답

그림 5는 본 논문에서 제안한 신경회로망 2자유도 PID 제어기를 적용하였다. 트롤리의 목표위치인 2[m]에 도달할 때까지 신경회로망 PID 제어기와 유사하게 오버슈트나 오실레이션은 발생하지 않았으나, 트롤리의 목표위치인 2[m]에 추종하는데 시간이 5.5초가 소요되어 신경회로망 PID 제어기보다 감소되었다. 그리고, 초기 크레인이 동작할 때 스프레더의 흔들림은 0.011[rad]이며, 약 4.5초 후에 흔들림이 없이 트롤리의 목표치인 2[m]에 추종함으로써 신경회로망 PID 제어기와 거의 비슷한 성능을 나타내었다. 그러나, 15초 후 갑작스런 외란이 적용될 경우 본 논문에서 제안한 제어기를 살펴보면, 트롤리의 위치는 1.93[m]정도 뒤로 밀린 후 위치 재보정시간은 약 3.75초가 소요되었다. 그리고 스프레더의 흔들림은 0.002[rad]정도이고 진동후 2.5초후에 진동이 제어되어 신경회로망 PID 제어기보다 약 2.5배 정도의 그 성능이 개선되었다.

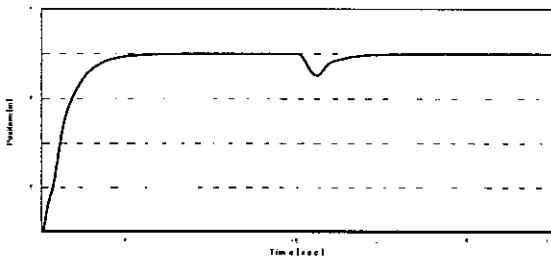


(a) Trolley Position[m]

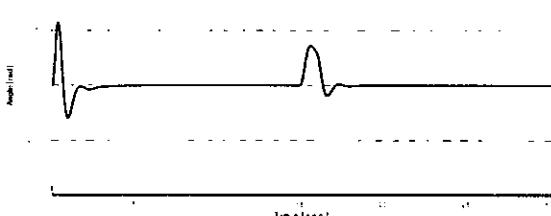


(b) Angle[rad]

그림 6. 컨테이너 중량이 25[%] 감소될 경우의 돌풍에 대한 신경회로망 PID 제어기의 응답



(a) Trolley Position[m]



(b) Angle[rad]

그림 7. 컨테이너 중량이 25[%] 감소될 경우의 돌풍에 대한 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 응답

그림 6, 7은 컨테이너 화물의 질량을 35[%]감소 시킬 경우 각각의 제어기 응답특성을 나타낸다.

신경회로망 PID제어기의 경우 트롤리의 목표위치인 2[m]에 추종하는 시간은 약 7.2초였으며, 오버슈트나 오실레이션이 없이 잘 추종하였다. 또한, 스프레더의 흔들림 제어에서는 초기 0.01125[rad]만큼 진

동하였으며, 약 4.26초 후에 흔들림이 없이 목표위치인 2[m]에 추종하였다. 그리고, 갑작스런 외란이 부가될 경우 트롤리의 위치는 약 1.54[m] 뒤로 밀린 후 걸린 위치 재보정 시간은 약 4.1초가 소요되었으며, 스프레더의 흔들림은 약 0.0144[rad]정도 진동 후 4.3초 후에 진동이 제어되었다.

그림 7에서 제안한 신경회로망 2자유도 PID 제어기의 경우 목표위치에 도달할 때까지 신경회로망 PID 제어기와 같이 오버슈트나 오실레이션은 발생하지 않았으나, 트롤리의 목표위치인 2[m]에 도달하는 추종시간이 6.3초로서 신경회로망 PID제어기보다 시간이 감소되었다. 그리고, 초기 크레인이 작동할 때의 스프레더의 흔들림은 0.011[rad]이며, 약 4.5초 후에 흔들림이 없이 목표치인 2[m]에 추종하였다. 그러나, 15초 후 갑작스런 외란이 부가될 경우 제안한 제어기와 신경회로망 PID제어기와 비교하여 보면, 트롤리의 위치는 1.756[m]정도 뒤로 밀린 후 위치 재보정 시간은 약 6.1초가 소요되었으며, 스프레더의 흔들림은 0.007[rad]이고, 추종시간은 3.0초로서 신경회로망 PID 제어기보다 약 2.0배정도 성능이 개선되었다.

5. 결 론

본 논문에서는 실제 항만현장에서 발생되는 환경 변화에 대하여 크레인의 흔들림을 최소화하면서 트롤리를 목표지점까지 신속하게 이동시키기 위해 신경회로망 2자유도 PID 제어기를 구성하여 Pilot 크레인 모델에 적용하였다. 그리고 목표 추종, 위치 보정 및 진동 등에 대한 제어기의 성능을 비교 분석하였다.

시뮬레이션 결과에서와 같이 제안한 신경회로망 2자유도 PID 제어기가 신경회로망 PID보다 목표 추종, 위치 보정, Anti-sway 측면에서 성능이 개선되었으며, 외란이 인가시 우수한 응답특성을 나타내었다.

향후, 항만의 실제 상황을 고려한 제어기의 특성 분석과 실제 크레인 모델에 대한 고려가 앞으로 진

행해야 할 과제이다.

참고 문헌

- [1] 정승현, 박정일, “페지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어”, 제어·자동화·시스템공학회 논문지, Vol. 3, No. 5, pp. 435-442, 1997.
- [2] 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.
- [3] 윤지섭, 강이석, “천정크레인의 무진동/위치제어기 개발에 관한 연구”, 대한기계학회논문집, Vol. 19, No. 6, pp. 1391-1401, 1995.
- [4] A. Marttinen, J. Virkkunen, and R. T. Salminen, “Control Study with a Pilot Crane”, IEEE Trans. on Education, Vol. 33, No. 3, pp. 298-305, 1990.
- [5] W. Li and X. Cheng, “Computer Control of High Speed Cranes”, Proc. of the American Control Conference, pp. 2562-2566, 1993.
- [6] S. Omatsu, M. Khalid and R. Yusof, Neuro-Control and its Applications, Springer, 1996.