

컨테이너 크레인의 흔들림 및 위치 제어에 관한 연구

홍종덕* · 박진길**

A Study on the Sway and Position Control of the Container Crane

Jong-Duck Hong

Abstract

The container crane is the key equipment of a port automation. As we know, the container crane system operated by a skilled driver is used for moving a container to the target position as quick as possible without any sway. But there is unavoidable swing motion of a moving container due to the acceleration and deceleration of trolley which cause the serious safety problem to men and the given system. Automation of a container crane system is required to reduce the operational cost and to solve the safety problem.

In this paper, we will introduce the dynamic characteristic equations to depict a container crane for the automation system. Then, an optimal controller of LQ regulator and a fuzzy controller based on expert's experiences are made for the automatically operated crane system moving a container to the given position within the allowable time and minimum swing. The performance of both controllers are compared through the computer simulations to use the real system. The results show that two controllers have the similarly good function for the quick movement of a container to the given position with stable boundary sway angle. So both controllers are possible to apply the real control system of container crane.

1. 서론

1997년 한해 동안 우리나라의 총 수출은 약 1361억 달러로 항만을 통한 수출이 전체

* 한국해양대학교 기관공학과 석사과정 전기제어전공

** 한국해양대학교 기관공학과 교수

의 99.7%를 차지하고 있으며 이중 85%가 컨테이너 화물로 처리되었다. 이와 같이 화물의 컨테이너화는 국제적인 추세이며 경쟁력 확보라는 차원에서 많은 국가에서는 컨테이너 항만의 추가 건설 및 운용효율을 극대화하는데 많은 노력과 투자를 하고 있다. 또한, 해상 운항경비를 절감하기 위하여 선박의 형태가 일반화물선에서 다량의 화물을 신속하게 운송할 수 있는 대형 컨테이너선으로 대체되고 있으며, 고속화 및 자동화가 지속적으로 추진되고 있다.

그러나 실제 컨테이너 부두의 상황은 하역장비의 부족 및 노후화로 인한 하역작업 효율이 저하되고 있으며, 특히 터미널의 모든 작업이 운전자에 의해서 수동으로 조작되고 있는데 이는 안전상의 문제, 운전자의 고령화 및 인력난 등으로 인한 하역작업의 지연, 화물 운송비용의 증가 원인이 되기도 한다. 한편, 컨테이너 크레인을 이용한 컨테이너 운반시 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 것은 운반속도의 변화와 강풍과 같은 외란(disturbance)에 의해 이송 도중 또는 정지위치 부근에서 와이어 로프(wire rope) 끝에 매달려 있는 컨테이너의 진자운동(swing motion)이 불가피하게 일어난다는 것이다. 이러한 문제는 현재 크레인 운전자의 경험과 숙련도에 전적으로 의존하고 있는 실정이므로 정지부근에서 크레인의 진자적 운동을 자동으로 제어할 수 있는 시스템 개발이 시급한 실정이다.

본 논문의 목적은 컨테이너 크레인의 위치제어 및 크레인 작업시 큰 문제점으로 지적되고 있는 컨테이너의 흔들림 현상을 줄일 수 있는 제어를 개발하여 컨테이너의 이송작업의 안전성 및 인건비의 절약으로 생산성 향상을 도모하는데 있다. 본 논문에서는 현재 컨테이너 터미널에서 사용되고 있는 컨테이너 크레인을 모델로 선택했으며 모든 파라미터 및 변수들도 실제 물리량과 비슷하게 잡았다. 2장에서는 컨테이너 크레인의 트롤리 및 컨테이너 부분의 비선형 방정식을 유도하고 이를 다시 평형상태에 대하여 선형화를 이루었으며 이를 바탕으로 3장에서 최적제어기(optimal controller)와 퍼지제어기(fuzzy logic controller)를 설계하였다. 4장에서는 이들 제어기를 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였으며 이 두 제어기의 성능을 서로 비교 분석하였다.

2. 컨테이너 크레인의 모델링

2.1 컨테이너 크레인의 구조

Fig. 2.1은 실제 컨테이너 부두에서 사용되고 있는 컨테이너 크레인의 모습을 나타내고 있으며 컨테이너 하역 전용 크레인으로서 고성능을 발휘할 수 있도록 설계되어 있다.

본 논문에서 모델로 사용된 크레인의 주요 장치로서는 주행장치, 횡행장치, 권상·권하장치, 붐(boom)장치 등 4분야로 이루어져 있다.

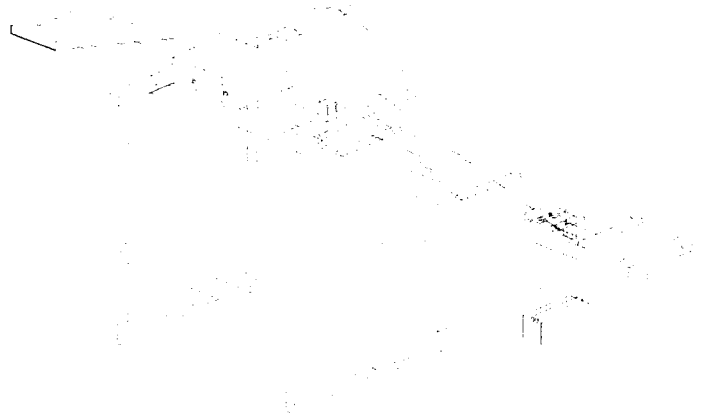


Fig. 2.1 Structure of the container crane

2.2 컨테이너 크레인의 운전 시스템

컨테이너 크레인의 운전 시스템은 Fig. 2.2와 같이 나타낼 수 있다. 현재 컨테이너 터미널에서는 안티 스웨이 시스템(anti-sway system)이 설치되어 있지만 작업효율이 떨어지고 빠른 안정성이 보장되지 않기 때문에 주로 운전자의 수동조작에 의해 흔들림 제어를 행하고 있다.

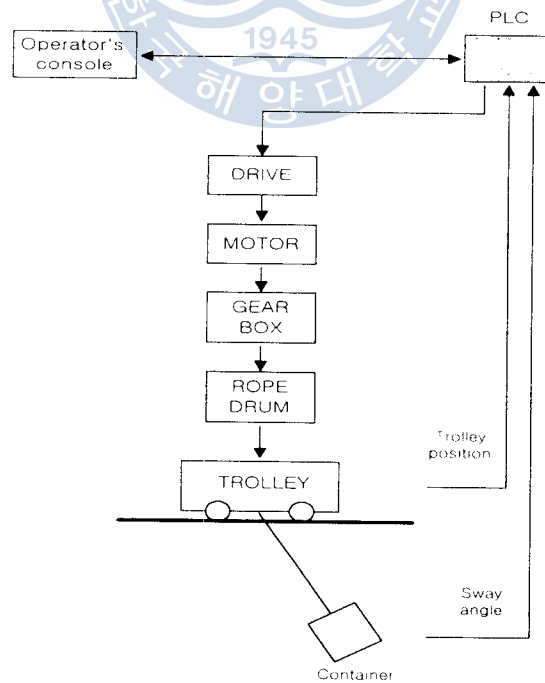


Fig. 2.2 Schematic diagram for the container crane operation system

2.3 컨테이너 크레인의 수학적 모델링

컨테이너 크레인 시스템의 운동을 표시하기 위하여 직교좌표계를 사용하였는데, 트롤리의 수평방향을 x , 수직방향을 y 로 한다. 여기서 f 는 트롤리에 작용하는 힘, r 은 트롤리의 이동거리를 의미하며 θ 는 컨테이너의 흔들림 각도를 나타내고 있다. Fig. 2.3은 트롤리와 컨테이너에 대한 직교좌표계를 간략하게 나타내었다

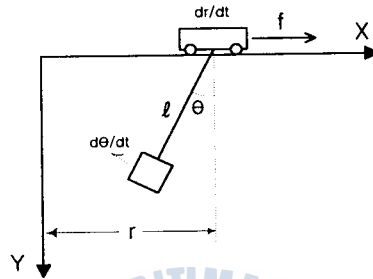


Fig. 2.3 x-y coordinate system of the container crane system

2.3.1 비선형 운동방정식

Fig. 2.3의 좌표계로부터 Lagrange 운동방정식

$$\frac{d}{dt} \left\{ \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right\} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} = Q_i \quad (2.1)$$

단, q_i : 일반화 좌표 ($i=1, 2, 3, \dots, n$)

T : 운동에너지

V : 위치에너지

D : 소산에너지

Q_i : 일반화 외력

을 이용하여 크레인 시스템의 운동방정식을 유도한다. 먼저 크레인 시스템의 에너지 방정식을 구한다.

(a) 운동 방정식

(가) 트롤리에 대한 운동방정식

$$(M+m) \frac{d^2 r}{dt^2} + ml \frac{d^2 \theta}{dt^2} \cos \theta - ml \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \sin \theta + M \frac{dr}{dt} = f \quad (2.2)$$

(나) 컨테이너에 대한 운동방정식

$$ml^2 \frac{d^2\theta}{dt^2} + ml \frac{d^2r}{dt^2} \cos\theta + mgl \sin\theta = 0 \quad (2.3)$$

2.3.2 선형화 및 상태방정식

적합한 상태변수피드백(state-variable feedback)을 크레인 시스템에 적용하기 위해서는 선형화를 이루어야 하는데 본 논문에서는 평형상태에 대해 선형화를 이루었다. θ 의 변동이 미소하다고 가정하고, 즉 $\theta \cong 0$ 에서 선형 근사화 하면 $\dot{\theta}^2 \cong 0$, $\sin\theta \cong \theta$, $\cos\theta \cong 1$, $\cos^2\theta \cong 1$, $\sin^2\theta \cong 0$ 로 나타낼 수 있다. 이를 식 (2.2), (2.3)에 대입하면 선형화된 식 (2.4), (2.5)를 얻을 수 있다.

$$\frac{d^2r}{dt^2} = \frac{f + mg\theta - M \frac{dr}{dt}}{M} \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{l} \frac{dr}{dt} - \frac{m(M+m)\theta}{Ml} - \frac{f}{Ml} \quad (2.5)$$

여기서 $x_1 = r$, $x_2 = \frac{dr}{dt}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \frac{d\theta}{dt}$ 와 같이 상태변수를 정의하면 식(2.4) 및 (2.5)는 다음과 같은 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\text{단, } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & \frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{1}{l} & -g \frac{M+m}{Ml} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{Ml} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

2.4 컨테이너 크레인의 상태공간 해석

식(2.6)에서 구한 컨테이너 크레인 상태방정식의 물리적 파라미터는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of the container crane system

	Description	value
m	Weight of the container	45100 [kg]
M	Weight of the trolley	9075 [kg]
l	Length from the trolley to the container	10 [m]
g	Gravitational acceleration constant	9.8 [m/s ²]

동적 시스템을 해석하고 설계하는데 매우 유용한 개념중의 하나가 1960년 Kalman에 의하여 소개된 가제어성(controllability)과 가관측성(observability)이다. 이는 우선 제어기를 설계하기 전에 시스템을 제어할 수 있는지 그리고 시스템의 상태를 관측할 수 있는지를 판별하는 것이다.

식 (2.6)의 계수 행렬을 Table 1의 파라미터로부터 구해 보면 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 48.7030 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0.1 & -5.8503 & 0 \end{bmatrix}, B = 1.0 \times 10^{-3} \begin{bmatrix} 0 \\ 0.1102 \\ 0 \\ -0.0110 \end{bmatrix}, C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

행렬 A의 고유값은 0, -0.1717, -0.4142+2.3530i, -0.4142-2.3530i 이다. 여기서 고유값의 실수부가 양의 값을 갖는 것이 없고 최대 0의 값을 가지므로 이 시스템은 안정한 계(marginally stable)에 있다고 말할 수 있다. 즉 트롤리에 외력을 가하기 전에는 불안정한 상태는 아니라는 것을 보여주고 있다.

또, 가제어성(controllability) 행렬 $[B \ AB \ A^2B \ A^3B]$ 를 구해보면

$$1.0 \times 10^{-3} \begin{bmatrix} 0 & 0.1102 & -0.1102 & 0.4255 \\ 0.1102 & -0.1102 & -0.4255 & 0.9622 \\ 0 & -0.0110 & 0.0110 & 0.0533 \\ -0.0110 & 0.0110 & 0.0533 & -0.1070 \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

와 같다. 이 행렬의 계급(rank)은 4이므로 이 플랜트는 제어 가능하다. 이것은 임의의 극배치에 의해 제어기를 설계할 수 있음을 뜻한다.

또, 가관측성(observability) 행렬 $[C \ CA \ CA^2 \ CA^3]^T$ 을 구해 보면

$$\begin{bmatrix} 1.0000 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1.0000 & 0 & -1.0000 & 0.1000 & 1.0000 & -0.1000 \\ 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 48.7030 & -5.8503 & -48.7030 & 4.8703 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 & 0 & 0 & 48.7030 & -5.8503 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

와 같다. 이 행렬의 계급 또한 4이므로 가관측하며 관측기에 의한 상태 추정이 가능하다.

3. 제어기 설계

3.1 최적제어기

식 (3.1)과 같은 Riccati 방정식에서 가중행렬 Q와 R을 구하면 식 (3.2)와 같다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \quad (3.1)$$

$$Q = 1.0 \times 10^5 \begin{bmatrix} 50 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1000000 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 100000 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.5 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

$$R = 0.5$$

이때, 상태피드백이 실시된 페루프 제어계의 고유값(eigenvalue)은 $E = [-1.3176 \pm 2.4008i, -0.1459 \pm 0.1624i, -0.1666]$ 이므로 안정된 제어계로 된다.

3.2 퍼지제어기

Fig. 3.1은 퍼지제어기가 부가된 전체 크레인 시스템이다.

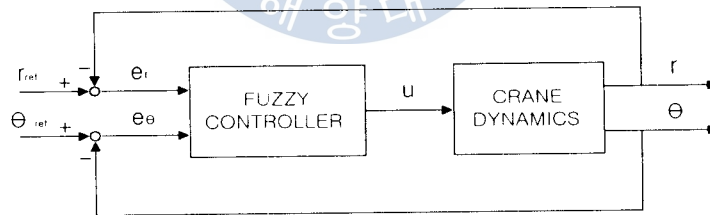


Fig. 4.5 Block diagram of the container crane system with the fuzzy controller

(a) 제어기 사항

- 퍼지화기 ⇒ singleton method
- Membership function ⇒ 삼각함수
- 제어규칙 작성법 ⇒ 숙련운전자의 조작행위
- 추론법 ⇒ Mamdani의 min-man합성법
- 비퍼지화기 ⇒ 무게중심법

본 논문에 사용되는 퍼지제어기의 입력 변수로서는 트롤리의 목표점에 대한 위치 오차와 컨테이너의 수직축에 대한 흔들림 각도를 각각 e_r 와 e_θ 로 정하였고, 출력 변수로서는 트롤리 모터에 의한 드럼에 인가되는 힘 f 를 u 로 표시하였다.

입력변수의 언어값은 각각 7개의 퍼지 부분집합으로 분할하였고 변수의 대집합 (support sets)은 $e_r = [-45, 45]$, $e_\theta = [-0.1, 0.1]$ 으로 하였다. 또한 출력 변수의 언어값은 7개의 퍼지 부분집합으로 분할하였으며 그 대집합은 $u = [-40000, 40000]$ 으로 하였다.

Fig. 3.2, Fig. 3.3, Fig. 3.4는 입출력 변수의 퍼지분할과 소속함수의 모양을 나타내었고 Table 2는 본 논문에 사용된 룰테이블을 표시하였다.

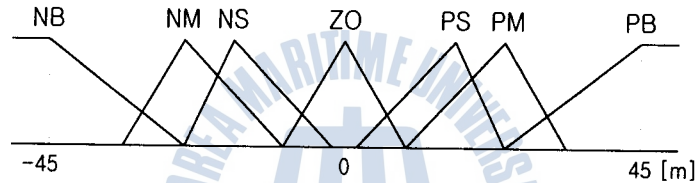


Fig. 3.2 Fuzzy sets and membership functions for the position

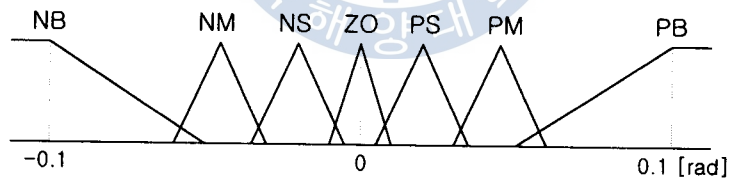


Fig. 3.3 Fuzzy sets and membership functions for the angle

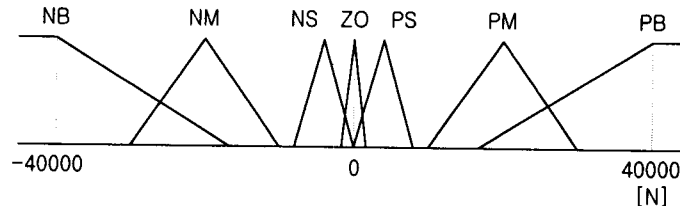


Fig. 3.4 Fuzzy sets and membership functions for the control outputs

Table 2 Rule of the fuzzy control

e_r \ e_r'	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NM	PS	PM
NM	NB	NB	NM	NS	NS	PS	PB
NS	NB	NB	NS	PS	PS	PM	PB
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NB	NS	NS	NS	PS	PM	PB
PM	NB	ZO	ZO	PS	PS	PM	PB
PB	NM	PS	PS	PM	PM	PB	PB

4. 시뮬레이션

다음과 같은 조건하에서 시뮬레이션을 실시 하였다.

- ⇒ 실제 컨테이너 크레인의 물리적 parameter를 적용.
- ⇒ 외란 및 목표점 변경.
- ⇒ 안전한계 흔들림 각도 설정 → 0.05[rad].
- :설정 각도를 벗어나지 않으면 유효한 제어로 간주.

Case of the optimal control

Case of the fuzzy control

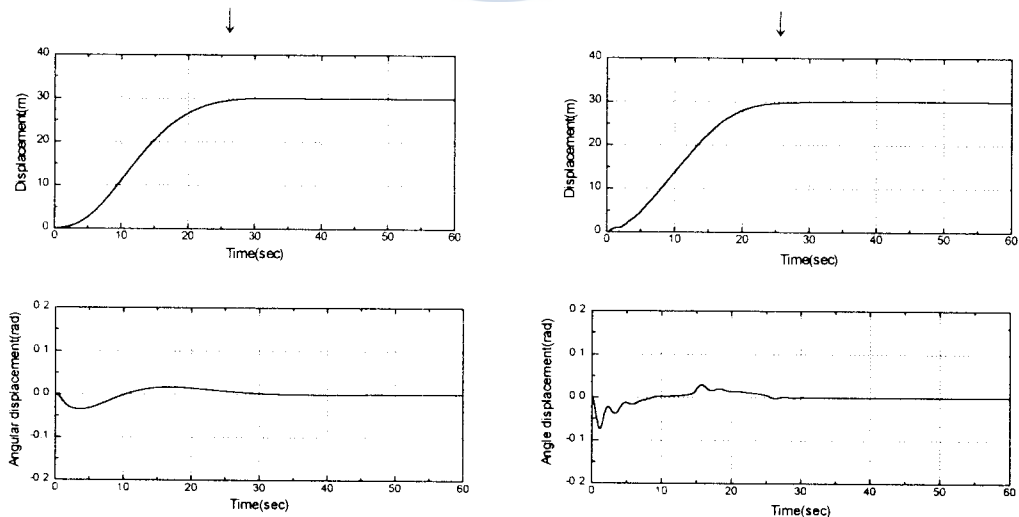


Fig. 4.1 Simulation results using the optimal and fuzzy control method to reference

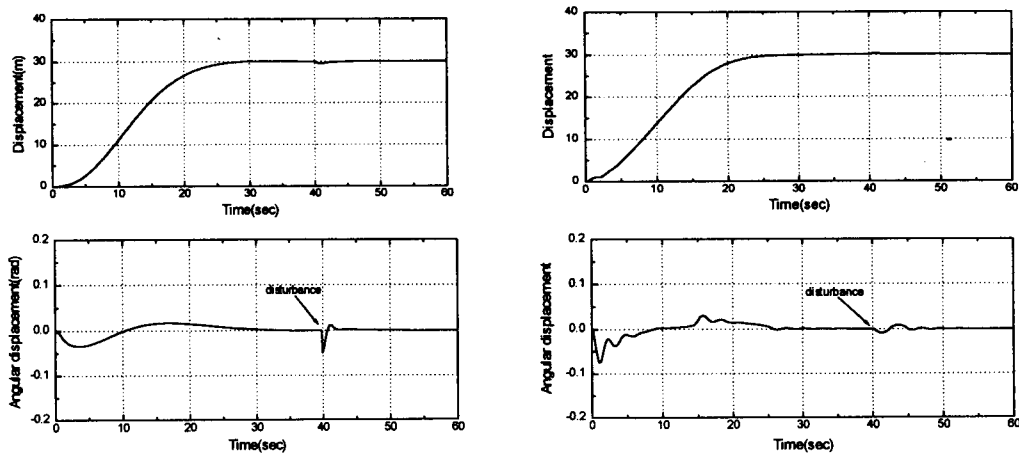


Fig. 4.2 Simulation results using the optimal and fuzzy control method when the disturbance is applied

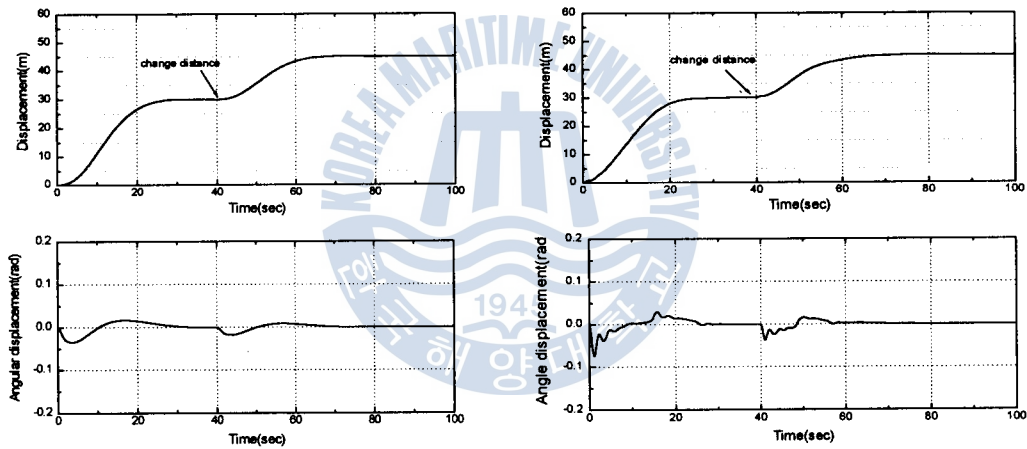


Fig. 4.3 Simulation results using the optimal and fuzzy control method when the reference is changed

5. 결론

컨테이너 크레인 은 비선형성이 강하고 수학적으로 모델링이 어려운 SIMO 시스템으로서 트롤리에 가해지는 힘으로 트롤리의 위치 및 컨테이너의 흔들림 제어를 동시에 행하여야 한다. 본 논문에서는 현재 터미널에서 많이 사용되고 있는 컨테이너 크레인을 모델로 하여 트롤리의 위치제어와 컨테이너의 흔들림을 제어하기 위하여 퍼지제어기와 최적제어기를 설계하였고 이 두 제어기를 시뮬레이션을 통해 비교 분석하였다.

특히, 퍼지제어기의 규칙베이스는 운전자의 조작행위를 모델로 하여 작성하였으며 그 조작모델은 초기 운전시에는 트롤리의 가속으로 생기는 흔들림에는 신경을 크게

쓰지 않고 위치제어에만 충실하고, 목표지점 근처에서는 위치제어와 진동제어를 적절히 배분하여 제어를 행하였다. 또한, 컨테이너의 안정 최대흔들림각도를 $0.05[\text{rad}]$ 으로 정하여 이 안정치를 넘지않는 한 유효한 제어로 간주하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

시뮬레이션한 결과 모두 안정적인 제어행위를 보였으며, 최적제어기가 목표점 도달 시간에서 평균 약 $2[\text{sec}]$ 정고 빨랐고 외란에도 더 강한 모습을 보였는데 이는 미소한 차이로 간주할 수 있었다. 가장 중요한 컨테이너 흔들림에 있어서는 퍼지제어기의 초기진동을 제외하고는 두 제어기 모두 안정 한계각도 안에서 유지되었는데 이 초기 흔들림은 규칙베이스를 적절히 변경하면 극복할 수 있는 사항이라 생각한다. 특히 목표지점 도달시에는 퍼지제어기가 최적제어기보다 잔류흔들림이 적은 특성을 나타내었다. 하지만 이와 같은 결과는 모델링오차(modeling error)나 시변(time varying)성 등을 고려하지 않은 결과이며, 실제 대상플랜트에 적용하여 운전한다면 이들 사항에 강한 모습을 보이는 퍼지제어기가 더 나은 결과를 가져오리라 본다.

끝으로 실제 실험을 하지 못한 점, 시스템 모델링시 무시한 사항들, 그리고 규칙베이스를 여러 가지로 변경하면서 다른 제어기와의 비교 검토가 이루어지지 못한 점은 앞으로 계속 연구할 과제라고 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. sakawa and Y. shindo, "Optimal Control of Container Cranes", AUTOMATICA, vol.18, No.3, pp.257-266, 1982
- [2] J. W. Auernig and H. Troger, "Time Optimal of Overhead Cranes with Hoisting of the Load", AUTOMATICA, vol.23, No.4 pp.437-447, 1987
- [3] 中政生, "다변수 제어계 설계법을 이용한 컨테이너 크레인의 운전자동화에 관한 연구", 부경대학교 박사논문, 1995
- [4] 정승현, 박정일, "Anti-Swing and Position Control of Crane Using Fuzzy Controller", Journal of Control, Automation and System Engineering, vol.3, No.5, October.1997
- [5] F. E. Kalman, "A new approach to Linear Filtering and Prediction Problems", Trans. of the ASME, J of Basic Eng. vol.82, pp.35-45, 1960
- [6] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant", IEEE Proc. Control & Science, vol.12, No.12, pp.1585-1588, 1974
- [7] I. G. Umbers, P. J. King, "An analysis of human-decision making in cement

- kiln control and the implication for automation”, *Int. Man-Machine studies*, vol.12, No.1, pp.11-23, 1980
- [8] Robert H. Bishop, “Modern Control Systems Analysis and Design Using MATLAB”.
- [9] Bahram Shahian and Michael Hassul “Control System Design Using MATLAB”, Prentice-Hall, 1993
- [10] “Simulink User’s guide”, The Mathworks Inc., 1993
- [11] Chuen Chien Lee, “Fuzzy Logic in Control systems:Fuzzy Logic Controller -Part I,II”, *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.20, No.2 March/April 1990
- [12] Ned Gulley, J.-S. Roger Jang, “Fuzzy Logic Toolbox for Use with MATLAB”, The Mathworks Inc., 1995

