

---

# 컨테이너 크레인의 퍼지제어기 설계

소명옥\* · 최재준\*\* · 손정기\*\*

## Design of a Fuzzy Controller for Container Crane

*Myung-Ok So\* · Jae-Jun Choi\*\* · Jeong-Ki Son\*\**

### Abstract

The amount of container freight is continuously increasing recently, but freight congestion problem frequently occurs at ports due to low efficiency of container crane operation in transportation and cargo handling.

In this paper, a Fuzzy controller for container crane is proposed to accomplish a design of improved control system for minimizing the swing motion at destination. In this scheme a mathematical model for the system is obtained in state space representation. Finally, the effectiveness of the proposed controller is verified through computer simulation of a container crane system.

### I. 서 론

세계무역기구의 창설과 더불어 국가나 지역 간의 경제 블록화가 사라지면서 교역량은 해마다 증가하고 있으며, 운송과 하역에 있어서의 컨테이너가 갖는 장점 때문에 교역화물은 컨테이너화 되고, 선박은 대형 컨테이너선으로 대체되는 추세에 있다.

이로 인해 항만에서는 컨테이너 크레인의 하역부분에서 화물의 병목현상이 심하게 나타나

고 있다. 이를 해결하기 위한 방법으로는 현재 세계 각국의 항만에서는 항만 하역장비의 대형화, 자동화 및 무인화를 통하여 항만운영 효율을 높이는 것과, 컨테이너 크레인의 하역효율을 높이는 방향으로 진행되고 있다. 크레인의 작업효율을 높이는 방법으로는 크레인의 권상·권하 및 횡행동작의 속도를 높이는 것과 트롤리가 목표지점에 도달했을 때 스프레더의 흔들림을 짧은 시간내에 자동으로 제어하는 것을 생각할 수 있다. 전자(前者)의 방법은 트롤

---

\* 한국해양대학교

\*\* 한국항만연수원

리 레일의 조건, 스프레더를 위한 전력선의 이동속도 및 모터 용량 등의 문제가 있기 때문에 용이하지 못하므로, 후자(後者)의 방법으로 해결하려는 연구가 여러 선진국에서 이루어지고 있다. 목표점에 도달했을 때 스프레더의 흔들림을 짧은 시간에 제어하게 되면 컨테이너 처리시간을 단축하게 되고 화물 파손 등의 안전사고를 방지함으로써 하역효율을 높이고 항만의 서비스를 개선하여 막대한 경제적 효과를 가져올 수 있을 것이다.

컨테이너 크레인의 제어에 관련된 연구에 있어서 Manson은 속도제어 모터를 이용한 시간에 대한 최적해를 구했으며[1] Yamaguchi는 목표값의 흔들림 제적과 결과값의 흔들림 오차를 피드백하여 오차를 최소화하는 방법을 발표하였다[2]. 또한, 국내에서는 윤, 박 등이 로프 길이가 일정한 화물의 흔들림을 제어할 목적으로 화물의 흔들림 각을 피드백하고, 단진자 운동에 감쇠 효과를 부여하여 트롤리의 이송속도 유형을 "최고속도 이송 및 흔들림 제어구간에 비 감속구간-정지위치 제어구간"으로 할 것을 제안하였다[3]. 이러한 최적제어 기법은 와이어 로프의 길이나 화물의 질량이 변하면 다시 최적해를 구해야 하는 단점이 있다. 이에 반해 퍼지 제어 기법은 규칙베이스 제어의 특수한 형태로서 불명확한 정보를 효율적으로 취급할 수 있고 전문가의 지식에 기초한 언어적 제어전략을 구체적으로 표현할 수 있는 언어적 제어의 특징을 가지고 있다. 특히, 논리와 추론의 기능을 가지고 있고, 병렬형 제어기로서 기존의 제어기에 비해 간단하면서도 외란에 대하여 강인하며 비선형 시스템에 적용이 용이한 제어 기법이다. 따라서, 본 연구에서는 비선형성이 매우 강한 컨테이너 크레인의 위치제어 및 흔들림 제어에 퍼지이론을 적용하여 트롤리의 횡행속도를 높

이면서 목표위치 도달시 필연적으로 존재하게 되는 화물의 흔들림을 짧은 시간내에 제어할 수 있는 계층구조의 퍼지제어기를 제안하고, 계단상 기준입력 변화에 대한 추종성과 외란에 대한 강인성 등을 모의실험을 통해 입증하고자 한다.

## II. 컨테이너 크레인 시스템의 모델링

컨테이너 크레인은 주행동작, 횡행동작 및 권상·권하동작 등으로 인하여 크레인 구조물 전체가 힘을 받게 되고, 붐이나 스테이, 칼럼 등에 변형과 흔들림이 있게 된다. 그러나 실제 제어하고자 하는 대상은 주행방향이나 전체 구조물의 변형과 흔들림에 의해 힘을 받는 부분이 아니고, 거더나 붐의 트롤리 레일 위를 이동하는 트롤리에 매달린 스프레더 또는 컨테이너 화물이므로 트롤리와 컨테이너 화물의 운동에 대해서 다음과 같은 가정 하에서 운동방정식을 유도한다.

- 크레인 전체 구조물은 고정된 하나의 강체로서 트롤리나 컨테이너의 운동에 영향을 받지 않으며 탄성변형은 무시한다.
- 컨테이너의 질량은 집중 질량으로 보고 하중에 의한 권상·권하용 와이어 로프의 길이 변화는 트롤리 이동에 거의 영향을 미치지 못하므로 무시하며, 권상·권하용 시브의 마찰도 무시한다.

Fig. 2.1은 트롤리와 컨테이너에 대한 직교좌표계를 나타낸 것으로서, 트롤리의 질량을  $M$  [kg], 트롤리 바퀴의 마찰계수를  $C$  [kg/s], 컨테이너 화물의 질량을  $m$  [kg], 트롤리와 컨테이너 화물의 거리를  $l$  [m], 컨테이너의 수직에 대한 흔들림 각도를  $\theta$  [rad], 각속도를  $\dot{\theta}$  [rad/s], 트롤리의 수평방향 위치를  $r$  [m], 트롤리의 수평방향 속도를  $\dot{r}$  [m/s], 중력가속

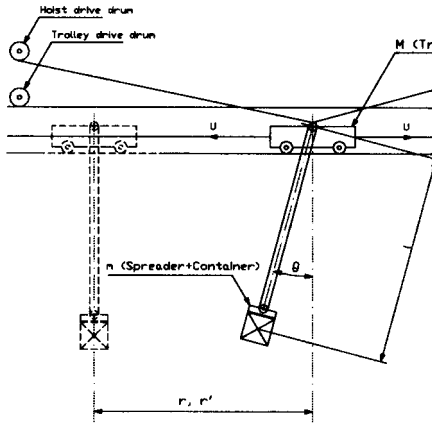


Fig. 2.1 Coordinate of a container crane system

도를  $g[m/s^2]$ , 트롤리용 와이어 로프에 작용하는 수평방향의 힘을  $u[N]$ 라고 정의하고 뉴턴의 운동방정식을 이용하여 크레인 시스템을 모델링하면 다음과 같은 비선형 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$(M+m)\ddot{r} - ml\ddot{\theta} \cos\theta + ml\dot{\theta}^2 \sin\theta + C_t\dot{r} = u \quad (2.1)$$

$$mgl\sin\theta - ml^2\ddot{\theta} + ml\dot{r}\cos\theta = 0 \quad (2.2)$$

(2.1)을 (2.2)에 대입하여 정리한 후,  $\theta$ 의 변화가 미소하다고 가정하고  $\sin\theta \cong \theta$ ,  $\cos\theta \cong 1$ ,  $\sin^2\theta \cong 0$ ,  $\cos^2\theta \cong 1$ 라 하여 선형화하여 정리하면 (2.3), (2.4)와 같다.

$$\dot{r} = \frac{-mg\theta - C_t\dot{r} + u}{M} \quad (2.3)$$

$$\dot{\theta} = \frac{-(M+m)g\theta - C_t\dot{r} + u}{Ml} \quad (2.4)$$

여기서,  $x_1 = r$ ,  $x_2 = \dot{r}$ ,  $x_3 = \theta$ ,  $x_4 = \dot{\theta}$ 와 같이 상태변수를 정의하면 (2.5)와 같은 동적 방정식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu, \quad y = Cx \quad (2.5)$$

$$\text{단, } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_t}{M} & -\frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{C_t}{Ml} & -\frac{(M+m)g}{Ml} & 0 \end{pmatrix}$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ \frac{1}{Ml} \end{pmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

단,  $x = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4]^T$ 는 상태벡터이고  $y$ 는 출력이다.

본 논문에서는 실제 컨테이너 크레인과 유사하게 하기 위해서 트롤리 질량  $M=12,000[kg]$ , 컨테이너 화물의 질량  $m=40,000[kg]$ , 트롤리 바퀴의 마찰계수  $C_t=3,350[kg \cdot m/s]$ , 트롤리와 컨테이너의 거리  $l=20[m]$ , 중력가속도  $g=9.8[m/s^2]$ 을 사용하였다.

### III. 퍼지제어기 설계

퍼지제어기의 일반적인 구조는 퍼지화부(Fuzzification interface), 지식베이스부(Knowledge base), 퍼지추론부(Fuzzy inference engine) 및 비퍼지화부(Defuzzification interface)로 이루어져 있으며 Fig. 3.1은 퍼지논리 제어기의 구성을 나타내고 있다.

본 논문의 퍼지화부에서는 입력측정에 잡음이 많이 포함되어 있지 않는 것으로 가정하여 각 인입 신호를 퍼지단일값(Fuzzy singleton)으로 변환하였다.

그리고 지식베이스부에서는 전건부의 퍼지변수를  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 로 네개 정의하고 후건부는 퍼지변수와 파라미터  $a_{j,i}$ 의 1차 결합으로 되어 있는 1차 Sugeno 퍼지모델을 선택한다.

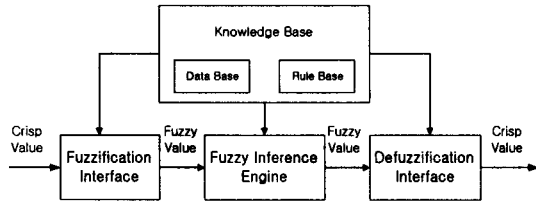
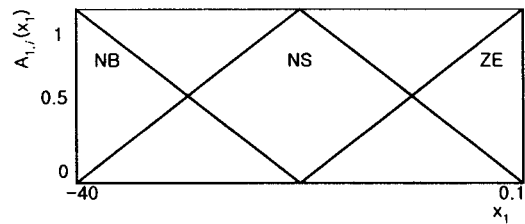


Fig. 3.1 Basic structure of a fuzzy logic controller

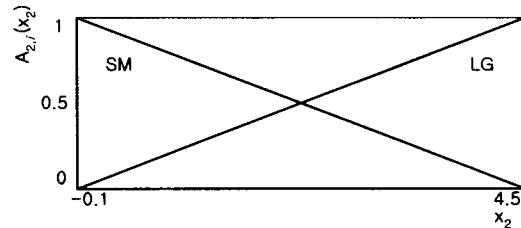
전건부의 퍼지변수인  $x_1$ 은 대차의 현재위치  $r$  과 기준입력위치  $r_r$ 의 차인  $r - r_r$ 을,  $x_2$ 는 트롤리의 속도  $\dot{r}$ 를,  $x_3$ 는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각도  $\theta$ 를,  $x_4$ 는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각속도  $\dot{\theta}$ 를 나타낸다.  $x_1$ 의 입력공간은  $-40 \sim 0.1$ [m]로 정의하여 NB, NS, ZE로,  $x_2$ 의 입력공간은  $-0.1 \sim 4.5$ [m/s]로 정의하여 SM, LG로,  $x_3$ 의 입력공간은  $-0.2 \sim 0.1$ [rad]로 정의하여 NS, PS로,  $x_4$ 의 입력공간은  $-0.2 \sim 0.1$ [rad/s]로 정의하여 NS, PS로 퍼지분할한다. 그리고 퍼지규칙은 (3.1)과 같이 네개의 인입신호  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 와 한개의 출력  $u_i$ 를 가진 "If-then"문장으로 구성되어 있으며 총 규칙수는 24개이다.

$$\begin{aligned}
 R_i: & \text{ If } x_1 \text{ is } A_{1,i} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{2,i} \\
 & \text{ and } x_3 \text{ is } A_{3,i} \text{ and } x_4 \text{ is } A_{4,i} \\
 & \text{ then } u_i = \sum_{j=1}^4 a_{j,i} x_j + a_{0,i} \\
 & \text{ 단, } i = 1, 2, \text{ CDOTS, } 24
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

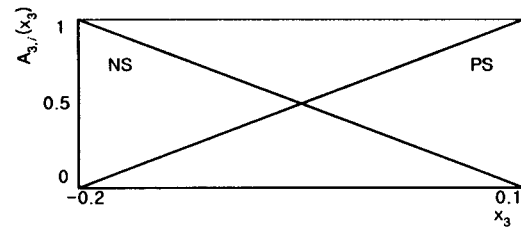
여기서,  $R_i$ 는  $i$ 번째의 퍼지제어 규칙이고,  $x_j$ 는 전건부에 있는 변수이다.  $A_{j,i}$ 는 삼각형의 소속함수에 의해 특성이 주어지는 전건부 변수의 퍼지집합을 나타내며, Fig. 3.2의 (a)는 전건부 퍼지변수 중 대차의 현재위치와 기준 목표위치의 오차인  $x_1$ 에 대한 소속함수를, (b)는 대차의 속도  $x_2$ 에 대한 소속함수를, (c)는 권상·권하용



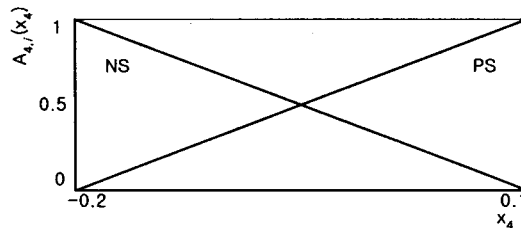
(a) Membership Functions on  $x_1$



(b) Membership Functions on  $x_2$



(c) Membership Functions on  $x_3$



(d) Membership Functions on  $x_4$

Fig. 3.2 Membership functions of fuzzy sets in the antecedent part

와이어 로프의 회전각도  $x_3$ 에 대한 소속함수를, 그리고 (d)는 대차의 속도  $x_4$ 에 대한 소속함수를 도시한 것이다. 그리고  $u_i$ 는  $i$ 번째 제어규칙  $R_i$ 에 대한 출력이고  $a_{j,i}$ 와  $a_{0,i}$ 는 후건부에 포함되어 있는 선형 파라미터로서 Table 3.1과 같다.

Table 3.1 Parameter values in the consequent part

Antecedents					Consequents [ $a_{j,i}$ ]				
$i$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$j$				
					0	1	2	3	4
1	NE	NE	NE	NE	1665.9	-7960.3	-470.4	344.3	6744.9
2	NE	NE	NE	PO	5587.3	-6512.6	-320.3	173.1	5896.9
3	NE	NE	PO	NE	54.8	-1583.6	-109.1	119.7	-30.7
4	NE	NE	PO	PO	-161.1	-100.4	-15.8	37.1	935.3
5	NE	PO	NE	NE	-5078.5	-22038.7	-3084.3	7528.9	-14273.1
6	NE	PO	NE	PO	2290.5	-18025.6	-1769.2	3450.3	60510.8
7	NE	PO	PO	NE	-1785.8	1057.6	-762.4	3089.5	-28573.1
8	NE	PO	PO	PO	-2698.6	-3648.1	-582.1	1464.8	15802.3
9	ZE	NE	NE	NE	798.4	-856.8	-44.3	5.7	261.1
10	ZE	NE	NE	PO	-442.1	720.1	40.1	-4.3	115.5
11	ZE	NE	PO	NE	-2139.1	-121.5	-15.4	12.2	-211.7
12	ZE	NE	PO	PO	-32.8	-696.9	-38.3	12.9	65.6
13	ZE	PO	NE	NE	711.4	-302.4	-14.4	44.2	456.4
14	ZE	PO	NE	PO	972.7	-1222.5	-67.1	28.6	253.4
15	ZE	PO	PO	NE	-2392.1	805.5	21.7	5.1	178.4
16	ZE	PO	PO	PO	1206.3	406.2	30.4	-6.9	-84.8
17	PO	NE	NE	NE	-3457.1	930.3	68.1	-4.4	-150.1
18	PO	NE	NE	PO	-1868.5	178.1	-30.5	20.5	36.2
19	PO	NE	PO	NE	-86.3	-503.5	-46.1	-12.2	51.4
20	PO	NE	PO	PO	2157.9	-339.4	30.4	11.6	17.1
21	PO	PO	NE	NE	-8470.2	-272.6	-51.1	-15.2	-103.9
22	PO	PO	NE	PO	-6507.0	-341.2	20.7	-4.2	-160.7
23	PO	PO	PO	NE	-5679.7	272.8	28.1	9.6	-179.4
24	PO	PO	PO	PO	-3939.2	262.6	-21.4	-10.8	-81.1

이렇게 하여 컨테이너 크레인의 퍼지제어기를 구성하면 전건부의 파라미터는 27개, 후건부의 파라미터는 120개, 그리고 전체의 총 규칙은 24개가 된다.

상기의 퍼지제어 규칙을 이용해서 원하는 제어출력을 구하기 위한 본 논문에서의 퍼지추론 과정은 다음과 같이 여섯 단계로 구성되어 있고, Fig. 3.3은 퍼지제어기의 내부구조와 추론과정을 간단히 나타내고 있다.

첫 번째 단계에서는 입력 측정에 잡음이 많이 포함되지 않는 것으로 가정하여 각 인입신호를 퍼지단일값(Fuzzy singleton)으로 변환한다.

두 번째 단계는 퍼지집합에 대한 소속함수

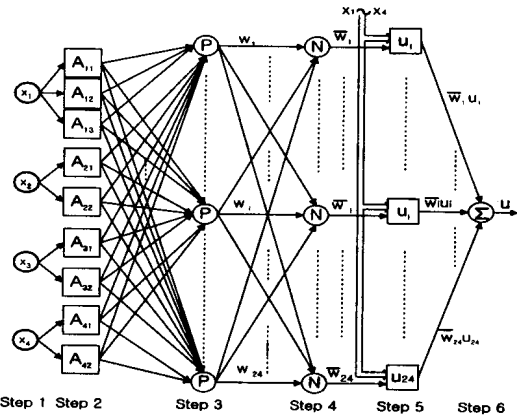


Fig. 3.3 Structure of the fuzzy controller for a container crane

$A_{j,i}(x_j)$ 를 정의하는 단계이며 소속함수  $A_{j,i}(x_j)$ 를 간단히  $A$ 로 표시했다. 여기서,  $A_{j,i}(x_j)$ 는 언어적 변수들이 가지는 "Positive", "Zero", "Negative" 등과 같은 퍼지집합의 입력변수  $x_j$ 에 대한  $i$ 번째 소속함수이다. 즉, 이 단계의 출력은 퍼지규칙의 전건부에 있는 소속함수의 값으로서  $x_j$ 가 주어질 때  $x_j$ 가 정량자  $A_{j,i}$ 를 만족하는 정도를 나타낸다.

세 번째 단계에서는  $i$ 번째 규칙의 적합도  $w_i$ 를 구하기 위해서 (3.2)와 같이 각 인입신호들에 대한 소속정도의 값을 대수적으로 곱하며, 기호로 간단히  $\textcircled{P}$ 로 표시했다.

$$w_i = A_{1,k_1}(x_1) \cdot A_{2,k_2}(x_2) \cdot A_{3,k_3}(x_3) \cdot A_{4,k_4}(x_4) \quad (3.2)$$

$A_{j,k}(x_j)$ 는 퍼지 입력값  $x_j$ 에 대한  $k$ 번째 소속정도를 나타낸다. 일반적으로 퍼지-AND 연산을 하는 "t-norm" 연산자는 이 계층에서 사용된 대수곱 연산자 "." 대신에 사용되어 질 수 있다.

네 번째 단계에서는 전체 규칙의 적합도의 합에 대한  $i$ 번째 규칙의 적합도의 비를 구하여 정규화된 적합도  $\bar{w}_i$ 를 출력시키며 간단히  $\textcircled{N}$ 으로 표시했다.

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{i=1}^{24} w_i} \quad (3.3)$$

다섯 번째 단계에서는 각각의 제어규칙에 대한 출력을 구하는 과정으로  $i$ 번째 규칙에 대한 정규화된 적합도  $\bar{w}_i$ 와  $i$ 번째 규칙의 후건부 값  $u_i$ 를 대수적으로 곱하며, 간단히  $\square$ 로 표시했다.

$$\bar{w}_i \cdot u_i = \bar{w}_i \cdot \left( \sum_{j=1}^4 a_{j,i} x_j + a_{0,i} \right) \quad (3.4)$$

여기서,  $\{a_{j,i}, a_{0,i}\}$ 는 "If-then" 규칙의 후건부에 있는 파라미터이다.

여섯 번째 단계는 반드시 비퍼지화라고는 할 수 없지만 (3.5)와 같이 모든 규칙에 대한 후건부의 값을 적합도  $w_i$ 로 가중평균하여 하나의 출력으로 내보내며 이것이 제어기의 출력인 제어입력이다.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^{24} w_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^{24} w_i} \quad (3.5)$$

Fig. 3.4 24개의 규칙으로부터 4개의 인입신호  $x_1, x_2, x_3, x_4$ 가 피드백될 때 컨테이너 크레인의 대차와 컨테이너 화물의 흔들림 각도를 제어하기 위한 제어입력을 구하는 추론과정을 나타내고 있다.

#### IV. 모의실험 및 고찰

##### 4.1 계단상 기준입력 변화에 대한 검토

본 모의실험에서는 제안한 제어기의 추종성을 보이기 위해 이동거리 40[m]의 계단상 기준 입력을 가한다.

계단상 기준입력에 대한 대차의 위치를 표시

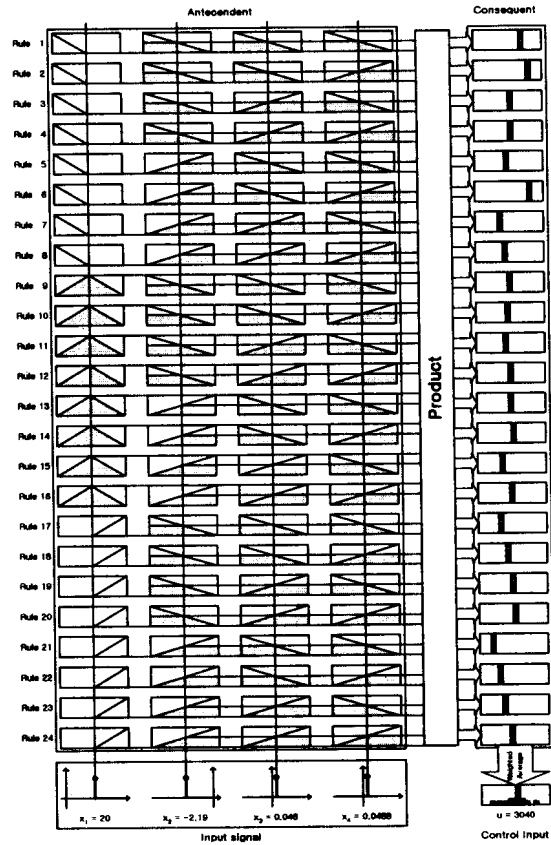


Fig. 3.4 Fuzzy inference process of fuzzy controller for a container crane

하고 있는 Fig. 4.1에서 약 17초에 목표위치에 도달하였으며 큰 오버슈트나 정상편차 없이 안정한 제어결과를 얻고 있다.

##### 4.2 외란에 대한 검토

일반적으로 제어시스템은 운전중 외란이 가해지거나 부하가 변동될 수도 있으므로 본 연구에서는 10초 시점에서 +0.05[rad], 25초 시점에서 -0.05[rad] 크기의 각도 외란을 각각 0.02초 동안 부여하였다. 10초에서의 외란은 대차가 목표점을 향해 진행중일 때 진행방향과 같은 쪽으로 가해지는 것이고 25초에서의 외란은 목표점

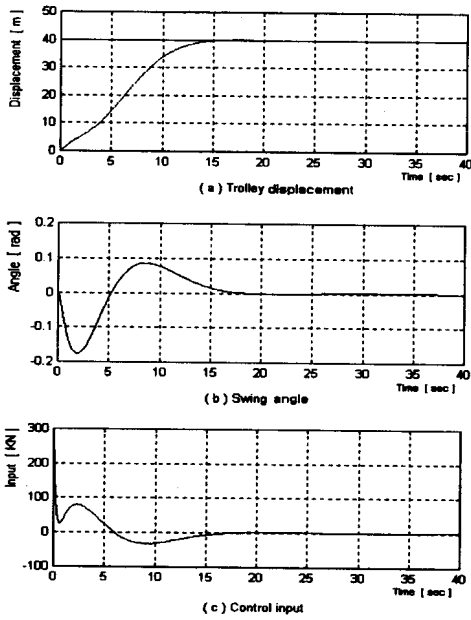


Fig. 4.1 Step response using Fuzzy control (Reference input 0→40[m])

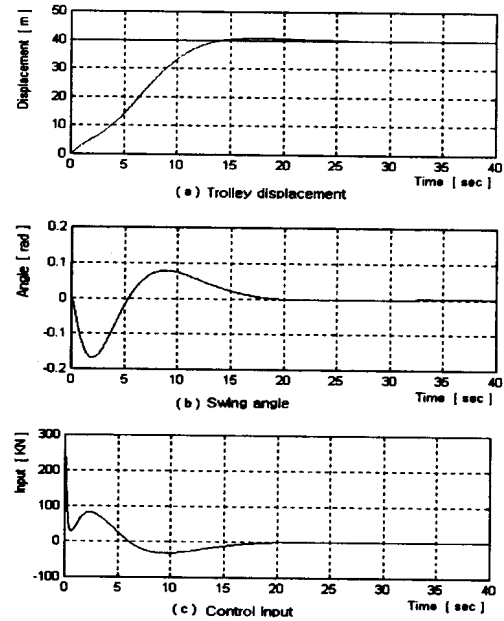


Fig. 4.3 Step response using Fuzzy control (Cargo mass change +20[%])

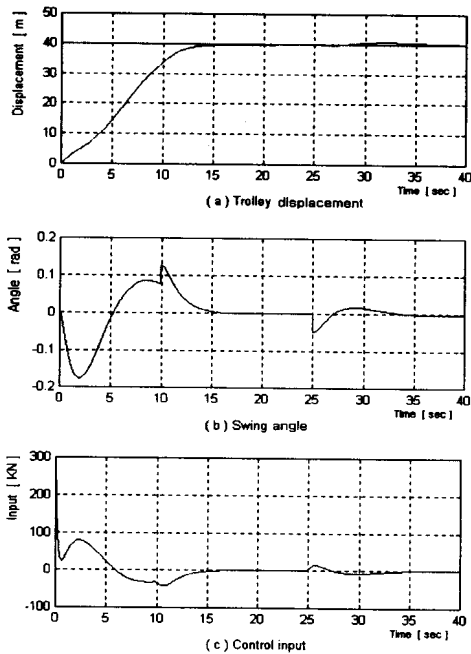


Fig. 4.2 Step response using Fuzzy control (Disturbance  $\pm 0.05$ [rad])

도달 후 거의 정지하고 있는 상태에서 외란이 가해지는 것이다. Fig. 4.2를 보면 오버슈트도 거의 없고, 약 18[sec]에 목표점에 도달하며 그 후 다음 외란이 들어올 때까지 편차도 별로 없다는 것을 알 수 있다. 따라서 오버슈트가 거의 없으므로 불필요한 트롤리의 전후진 동작이 없게 되므로 운전자의 피로가 경감된다

#### 4.3 파라미터 변화에 대한 검토

일반적으로 제어시스템은 제어기 설계시 파라미터의 값이 정확하게 선정된다 하더라도 주위 환경에 따라 운전중 파라미터의 값이 변할 수도 있으므로 화물의 질량을 40,000[kg]에서 48,000 [kg]으로 +20[%] 변화시켜 모의실험을 실시했다. Fig. 4.3을 보면 오버슈트는 다소 크지만 목표점 도달시간이 약 14[sec]로 매우 빠르다.

## V. 결 론

본 연구는 컨테이너 크레인의 하역 효율을 높이기 위해서 트롤리를 가능한 고속으로 주행시키고, 트롤리가 목표지점에 도달했을 때 화물의 흔들림을 빠른 시간 내에 제어하는 퍼지제어기의 설계 기법을 제안하였으며 모의 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

제안한 퍼지제어기는 계단상의 목표위치 변경에 대하여 목표위치 도달시간이 빠르고 목표점 도달시 컨테이너 화물의 흔들림이 거의 없었으며 정상편차 없이 안정한 제어 결과를 얻을 수 있었다. 그리고 돌풍과 같은 강한 외란과 화물의 무게변화로 야기되는 시스템의 파라미터 변화에 대해서도 적응성이 있고 강인했다.

이와 같은 결과를 종합해 보면 본 연구에서 제안한 퍼지제어기를 좀더 개선하여 실용화하면 비선형성이 강한 컨테이너 크레인의 하역효율 향상에도 큰 도움을 주리라 생각한다.

## 참 고 문 헌

- [1] G. A. Manson, "Time optimal control methods arising from the study of overhead cranes", Ph. D. Thesis, Univ. of Strathclyde, Glasgow, U.K., 1977
- [2] O. Yamaguchi, "Anti-swing control of overhead crane", 材料また Process, Vol. 7, pp. 347, 1994
- [3] 윤지섭, 박병석, 이재설, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구", KACC, Vol. 1, pp. 292 - 297, 1990
- [4] M. Sugeno and K. Muramaki, "Fuzzy Parking Control of Model Car", in 23rd IEEE Conf. on Decision and Control, Las Vegas, 1984
- [5] 朴玟用, 崔恒植 譯, "퍼지시스템의 응용 입문", 大英社, 1990
- [6] 홍금식, 이신섭, "크레인 진자계의 최적제어", 대한기계학회 춘계학술대회 논문집, pp. 832-837, 1995