

하역 생산성 향상을 위한 컨테이너 크레인의 제어기 설계

신선근*, 최재준**, 소명옥***

Design of Container Crane Controller for High Productivity in Cargo Handling

Sun-Gun Shin*, Jae-Jun Choi**, Myung-Ok So***

Abstract: For the merit of a container in transportation and cargo handling, the amount of container freight has been continuously on the increase. On the other hand, container crane had got the bottle neck in cargo handling due to low productivity so that freight congestion had been often occurred at ports. In this paper, A mathematical model for container crane system is represented, a method for designing a fuzzy controller of container crane system for high productivity in cargo handling is presented. The fuzzy controller is compared with other optimal controller at the same condition. In the computer simulation, the fuzzy controller obtained an excellent response to reference change better than the optimal controller. For disturbance such as a strong storm and parameter change due to change of cargo weight, the result was also stable and robust than the optimal controller.

Key Words: Container Crane(컨테이너 크레인), Fuzzy controller(퍼지 제어기), Optimal controller(최적 제어기)

1. 서 론

컨테이너 크레인의 제어에 관련된 연구에 있어서 최적제어기를 중심으로 한 연구가 많이 이루어져 왔으나 와이어 로프의 길이나 화물의 중량이 변하면 다시 최적해를 구해야 하는 단점이 있다. 이에 반해 퍼지제어는 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, 논

리와 추론의 기능을 가지고 있고, 병렬형 제어기로서 기존의 제어기에 비해 간단하면서도 외란에 대하여 강인하며 비선형시스템에 적용이 용이한 제어 기법이다. 본 연구에서는 컨테이너 화물의 중량 변화와 화물이송 종료시 필연적으로 존재하게 되는 화물의 흔들림을 짧은 시간내에 제어하고, 돌풍 등과 같은 외란을 극복할 수 있는 강인한 퍼지제어기의 설계 기법을 제안하여 모의 실험을 통해 그 우수성을 입증하고자 한다.

* 한국해양대학교 기관공학과 박사과정

** 한국해양대학교 기관공학과 박사과정

*** 한국해양대학교 기관시스템공학부 조교수

2. 시스템 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 컨테이너가 되므로 트롤리와 컨테이너의 운동에 대해서만 제어 대상으로 한다. 제어대상을 다음과 같은 가정 하에서 운동방정식을 유도한다.

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

그림 1은 트롤리와 컨테이너에 대한 직교좌표계를 정의한 것이고, 이 좌표계로부터 컨테이너 크레인의 운동방정식을 구하도록 한다.

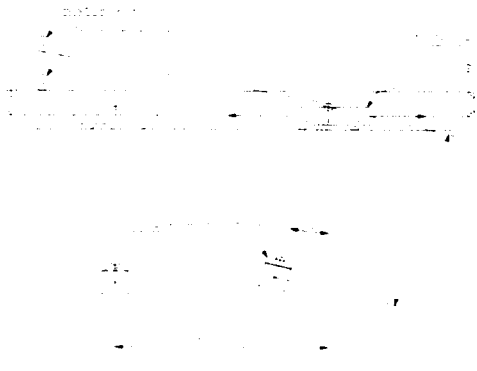


Fig. 1 Coordinate of the container crane system

그림 1에서 트롤리의 질량을 M , 컨테이너의 질량을 m , 트롤리 바퀴의 마찰계수를 C_r , 권상·권하용 시브의 마찰계수를 C_i , 트롤리와 컨테이너의 거리를 l , 트롤리의 수평위치를 r , 컨테이너의 흔들림 각도를 θ 라고 정의한다. 다음 Lagrange 운동방정식을 이용하여 크레인 시스템의 운동방정식을 유도하도록 한다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial D}{\partial \dot{q}_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q \quad (1)$$

Q : 일반화 외력, q_i : 일반화 좌표 ($i=1, 2, \dots, n$)

컨테이너 크레인의 운동에너지 T , 마찰에너지 D 및 위치에너지 U 는 각각 다음과 같다.

$$T = \frac{1}{2} (M+m) \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} m l^2 \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + m l \cos \theta \frac{dr}{dt} \frac{d\theta}{dt} \quad (2)$$

$$D = \frac{1}{2} C_r \left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \frac{1}{2} C_i \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 \quad (3)$$

$$U = m g l (1 - \cos \theta) \quad (4)$$

그리고 트롤리와 컨테이너에 대한 운동방정식은 각각 다음 식 (5)와 (6)과 같이 표현할 수 있다.

$$(M+m) \frac{d^2 r}{dt^2} + m l \sin \theta \frac{d^2 \theta}{dt^2} - m l \cos \theta \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 + C_r \frac{dr}{dt} = u \quad (5)$$

$$m l^2 \frac{d^2 \theta}{dt^2} + m l \cos \theta \frac{d^2 r}{dt^2} + m g l \sin \theta + C_i \frac{d\theta}{dt} = 0 \quad (6)$$

여기서, 식 (5)에서 $\ddot{\theta}$ 를 구하고 이것을 식 (6)에 대입하여 정리하면 식 (7)과 (8)를 각각 얻는다.

$$\frac{d^2 r}{dt^2} = \frac{u + m g \theta - C_r \frac{dr}{dt}}{M} \quad (7)$$

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = - \frac{u + m g \theta - C_r \frac{dr}{dt}}{M l} - \frac{g}{l} \theta \quad (8)$$

따라서 컨테이너 크레인의 시스템을 트롤리의 위치 r 과 컨테이너의 흔들림 각도 θ 의 각각에 대해서 2계 선형미분방정식으로 표현할 수 있으며 $x_1 = r$, $x_2 = \frac{dr}{dt}$, $x_3 = \theta$, $x_4 = \frac{d\theta}{dt}$ 와 같이 상태변수를 정의하면 다음 식(9)와 같은 동적방정식으로 간단히 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{만, } A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{C_r}{M} & \frac{mg}{M} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{C_i}{Ml} & -\frac{(M+m)g}{Ml} & 0 \end{pmatrix}, \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{M} \\ 0 \\ -\frac{1}{Ml} \end{pmatrix}$$

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

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

3. 최적제어기 설계

본 제어대상의 트롤리 질량 $M=12000[kg]$, 컨테이너 질량 $m=40000[kg]$, 트롤리 바퀴의 마찰계수 $C_r = 3350[kg \cdot m^2/s]$, 트롤리와 컨테이너의 거

리 $l=20[m]$, 중력가속도 $g=9.8[\%/s]$ 의 파라미터 값을 식(9)에 대입하면 시스템행렬 A 와 입력행렬 B 는 다음과 같다.

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1.0000 & 0 & 0 \\ 0 & -0.2732 & 44.9167 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1.0000 \\ 0 & 0.0254 & -4.9742 & 0 \end{pmatrix} \quad (10)$$

$$B = 1.0 \times 10^{-1} \begin{pmatrix} 0 \\ 0.833 \\ 0 \\ -0.075 \end{pmatrix}$$

식(9)의 동적방정식에서 식(11)과 같은 2차형식의 평가함수를 최소로 하면서 피드백 시스템을 점근적으로 안정하게 하는 최적제어 법칙은 아래 식(12)로 주어진다.

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (11)$$

$$u = -Kx = -R^{-1}B^T P x \quad (12)$$

여기서, P 는 다음 식 (13)과 같은 Riccati 방정식의 해행렬이며 K 는 피드백 이득행렬이다.

$$A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q = 0 \quad (13)$$

한편, 행렬 Q 와 R 은 출력벡터와 제어입력의 상대적인 중요성에 근거를 두고 설계자가 선정하는 하중행렬과 하중계수로서 $Q \geq 0, R > 0$ 인 관계를 가지는데 본 논문에서는 평가함수의 하중행렬 Q 와 하중계수 R 을 바라는 제어응답이 되도록 다음과 같이 선정했다.

$$Q = 1.0 \times 10^3 \begin{pmatrix} 40 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 700 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 10^4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 10^{11} \end{pmatrix} \quad (14)$$

$$R = 0.1 \quad (15)$$

위 값을 대입하여 얻은 Riccati 해행렬 P 는 다음 식(16)과 같으며 정정 대칭행렬로 존재하므로 본 제어대상은 안정하다고 말할 수 있다.

$$P = \begin{pmatrix} 0.0003 & 0.0006 & -0.0025 & 0.0098 \\ 0.0006 & 0.0032 & -0.0256 & 0.0558 \\ -0.0025 & -0.0276 & 0.8895 & -0.4239 \\ 0.0098 & 0.0558 & -0.4239 & 1.2095 \end{pmatrix} \quad (16)$$

앞에서 구한 행렬 R 과 행렬 P 및 행렬 B 를 식 (12)에 대입하면 다음과 같은 최적제어기의 이득 K 를 구할 수 있다.

$$K = 1.0 \times 10^3 [0.0632 \ 0.3791 \ -3.6899 \ -3.9009] \quad (17)$$

4. 퍼지제어기 설계

퍼지제어기의 일반적인 구조는 퍼지화부(Fuzzification interface), 지식베이스부(Knowledge base), 퍼지추론부(Fuzzy inference engine) 및 비퍼지화부(Defuzzification interface)로 이루어져 있으며 그림 2는 퍼지논리 제어기의 구성을 나타내고 있다.

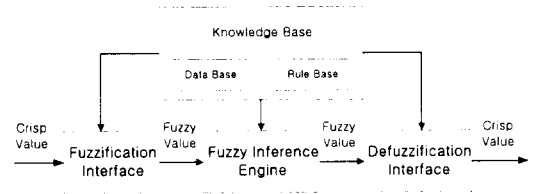


Fig. 2 Basic structure of a fuzzy logic controller

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 네 개 정의하고 후건부는 퍼지변수와 파라미터 $a_{j,i}$ 의 1차 결합으로 되어 있는 1차 Sugeno 퍼지모델을 선택한다. 전건부의 퍼지변수인 x_1 은 대차의 현재위치 r 과 기준 입력위치의 차를, x_2 는 대차의 속도 \dot{r} 를, x_3 는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각도 θ 를, x_4 는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각속도 $\dot{\theta}$ 를 나타낸다. x_1 의 입력공간은 $0 \sim 40[m]$ 로 정의하여 NE, ZE, PO로, x_2 의 입력공간은 $-4 \sim 0[m/s]$ 로 정의하여 NE, PO로, x_3 의 입력공간은 $-0.1 \sim 0.2[rad]$ 로 정의하여 NE, PO로, x_4 의 입력공간은 $-0.1 \sim +0.2 [rad/s]$ 로 정의하여 NE, PO로 퍼지분할한다. 여기서, 대차가 횡행레일의 중간위치 또는 권상·권하용 와이어 로프가 수직으로 똑바로 매달려 있는 상태를 "0"으로 했을 때 각각 대차가 중간위치의 왼쪽에 있을 경우 또는 권상·권하용 와이어 로프가 수직에서 왼쪽으로 기울어져 있을 경우에 부호 "-"를 붙였다. 그리고 퍼지 규칙은 식 (18)과 같이 네 개의 인입신호 x_1, x_2, x_3, x_4 와 1개의 출력 u_i 를 가진 "If-then" 문장으로 구성되어 있으며 총 규칙수는 24개이다.

R_j : If x_1 is $A_{1,j}$ and x_2 is $A_{2,j}$ and x_3 is $A_{3,j}$ and x_4 is $A_{4,j}$, then $u_j = \sum_{i=1}^4 a_{i,j} x_i + a_{0,j}$; 단, $i=1,2,\dots,24$, $j=1,2,3,4$ (18)

여기서, R_j 는 i 번째의 퍼지제어 규칙을 나타내고, x_j 는 전건부에 있는 변수이며 $A_{j,i}$ 는 소속함수에 의해 특성이 주어지는 전건부 변수의 퍼지 집합을 나타낸다. u_j 는 i 번째 제어규칙 R_j 에 대한 출력이고 $a_{j,i}$ 와 $a_{0,i}$ 는 후건부에 포함되어 있는 파라미터이다. 또한, 각 입력변수에 대한 전건부의 소속함수 $A_{j,i}(x_j)$ 는 다음 식 (19)과 같이 삼각형으로 취하여 각 입력공간에 등간격으로 배치한다. 삼각형의 모양과 위치는 세 꼭지점의 수평축 값을 나타내는 파라미터 $\{a_j, b_j, c_j\}$ 에 따라 달라진다.

$$A_{j,i}(x_j) = \begin{cases} 0, & x \leq a_j \\ \frac{x_j - a_j}{b_j - a_j}, & a_j \leq x_j \leq b_j \\ \frac{c_j - x_j}{c_j - b_j}, & b_j \leq x_j \leq c_j \\ 0, & c_j \leq x_j \end{cases} \quad (19)$$

단, $i=1,2,\dots,24$ $j=1,2,3,4$

그림 3에서 (a)는 퍼지변수 중 대차의 현재위치와 기준목표위치의 오차인 x_1 에 대한 소속함수를, (b)는 대차의 속도 x_2 에 대한 소속함수를, (c)는 권상·권하용 와이어 로프의 회전각도 x_3 에 대한 소속함수를, 그리고 (d)는 대차의 속도 x_4 에 대한 소속함수를 도시한 것이다.

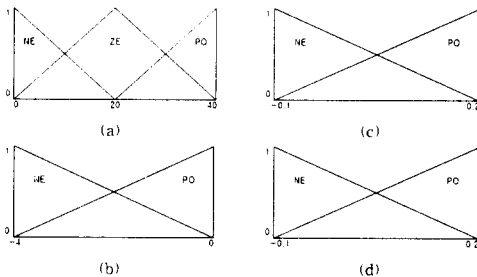


Fig. 3 Membership functions of fuzzy sets in the antecedent part

Table 1 Parameter values for the membership functions of fuzzy sets in the antecedent part

Parameters		a	b	c
x_1	NE	-0.0310	-0.0310	39.9957
	ZE	-0.0310	19.9800	39.9957
	PO	-0.0310	39.9957	39.9957
x_2	NE	-4.3986	-4.3986	0.0231
	PO	-4.3986	0.0231	0.0231
x_3	NE	-0.0851	-0.0851	0.1771
	PO	-0.0851	0.1771	0.1771
x_4	NE	-0.0679	-0.0679	0.1654
	PO	-0.0679	0.1654	0.1654

Table 2 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	1965.9	-7960.3	-470.4	344.3	6744.9
2	NE	NE	NE	PO	5367.3	-6512.6	-320.3	173.1	5866.9
3	NE	NE	PO	NE	54.8	-1383.6	-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	7328.9	-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	-382.1	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	115.3
11	ZE	NE	PO	NE	-2139.1	-121.3	-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	436.4
14	ZE	PO	NE	PO	972.7	-1222.3	-67.1	28.6	253.4
15	ZE	PO	PO	NE	-2392.1	805.3	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	-1888.3	178.1	-30.5	20.5	36.2
19	PO	NE	PO	NE	-86.3	-503.3	-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

그리고 식 (19)로 표현되는 전건부에 포함되어 있는 삼각형 소속함수의 파라미터 값들은 표 1과 같고, 후건부에 포함되어 있는 선형 파라미터의 값은 표 2와 같다. 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, 그림 4은 퍼지제어기의 내부구조와 추론과정을 간단히 나타내고 있다.

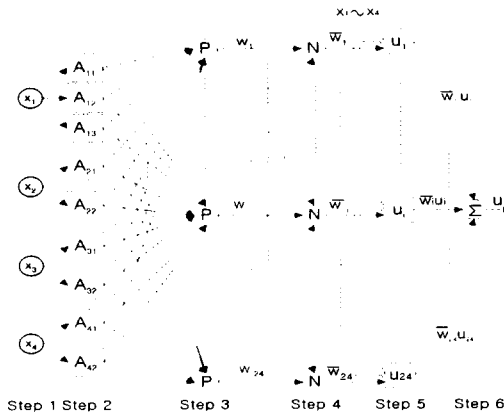


Fig. 4 Structure of the fuzzy controller for a container crane

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

두 번째 단계는 퍼지집합에 대한 소속함수 $A_{j,i}(x_j)$ 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. 소속함수로는 비교적 계산이 간단한 식 (19)의 삼각형을 사용한다.

세 번째 단계에서는 i 번째 규칙의 적합도 w_i 를 구하기 위해서 식 (20)과 같이 각 인입신호들에 대한 소속정도의 값을 대수적으로 곱하며, 기호로 간단히 P 로 표시했다.

$$w_i = A_{1,i}(x_1) \cdot A_{2,i}(x_2) \cdot A_{3,i}(x_3) \cdot A_{4,i}(x_4) \quad (20)$$

$A_{j,k}(x_j)$ 는 퍼지 입력값 x_j 에 대한 k 번째 소속정도를 나타낸다.

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

$$\bar{w}_i = \frac{w_i}{\sum_{j=1}^M w_j} \quad (21)$$

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 U 로 표시했다.

$$\bar{w}_i \cdot u_i = \bar{w}_i \cdot \left(\sum_{j=1}^4 a_{j,i} x_j + a_{0,i} \right) \quad (22)$$

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

여섯 번째 단계는 반드시 비퍼지화라고는 할 수 없지만 식 (23)과 같이 모든 규칙에 대한 후건부의 값을 적합도 w_i 로 가중평균하여 하나의 출력으로 내보내며 이것이 제어기의 출력인 제어입력이다.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^M \bar{w}_i \cdot z_i}{\sum_{i=1}^M \bar{w}_i} \quad (23)$$

그림 5는 24개의 규칙으로부터 4개의 인입신호 x_1, x_2, x_3, x_4 가 피드백될 때 컨테이너 크레인 의 대차와 컨테이너 화물의 흔들림 각도를 제어하기 위한 제어입력을 구하는 추론과정을 나타내고 있다.

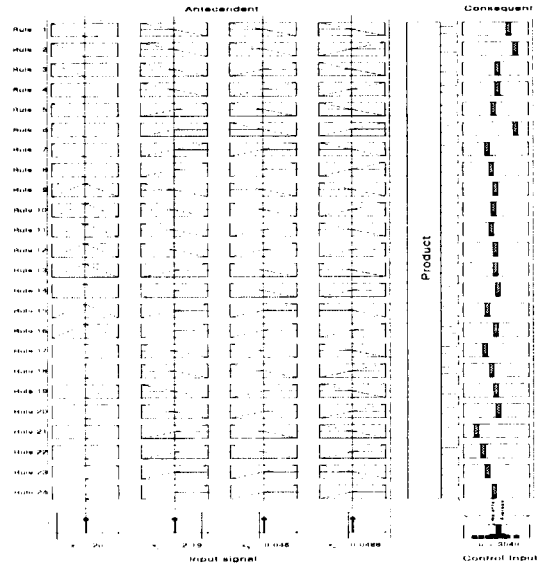


Fig. 5 Fuzzy inference process of fuzzy controller for a container crane

5. 모의실험 및 고찰

본 장에서는 앞에서 설계한 최적제어기와 퍼지제어기를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 실시하며 두 제어기 모두 동일한 제어대상에서 그 성능을 고찰한다. 모의실험의 첫 번째는 계단입력에 대한 일반적인 응답특성과 계단상의 기준입력 변화에 대한 응답의 추종성능을, 두 번째는 돌풍 등과 같은 외란에 대한 응답특성을, 세 번째는 컨테이너 화물의 무게변화로 야기되는 파라미터 변화에 대한 응답특성을 나타낸 것이다.

5.1 계단상 기준입력 변화에 대한 검토

본 모의실험에서는 제안한 제어기의 추종성능을 보이기 위해 계단상의 기준입력을 가하는 데 이동거리는 40[m]를 계단상의 기준입력으로 정했다. 계단상 기준입력에 대한 대차의 위치를 표시하고 있는 그림 7의 퍼지제어기가 그림 6의 최적제어기보다 약 10초 정도 빠른 17초에 목표 위치에 도달하였으며 두 제어기 모두 큰 오버슈트나 정상편차 없이 안정한 제어결과를 얻고 있다.

또한, 일반적으로 제어시스템은 목표값이 변함에 따라 운전중 응답이 변화하므로 기준입력 변화에 대한 제어기의 추종성능을 알아보기 위해 제어 시작으로부터 처음 20[sec]간은 40[m]의 계단상 기준입력을 가하고 20[sec] 경과 후 다시 40[m]의 계단상 기준입력을 추가하여 목표점이 총 80[m]가 되도록 모의 실험을 했다. 그림 8과 9에서 보면 역시 퍼지제어기의 성능이 다소 우수한 것을 확인할 수 있다.

5.2 외란에 대한 검토

일반적으로 제어시스템은 운전중 외란이 가해지거나 부하가 변동될 수도 있으므로 본 연구에서는 $\pm 0.05[\text{rad}]$ 크기의 임펄스적인 흔들림을 10[sec]와 25[sec]에서 각각 가하여 보았다. 10[sec]에서의 외란은 대차가 목표점을 향해 진행중일 때 진행방향과 같은 쪽으로 가해지는 것이고 25[sec]에서의 외란은 목표점 도달 후 거의 정지하고 있는 상태에서 외란이 가해지는 것이다. 그림 10과 11에서 두 제어기 모두 오버슈트나 정상상태 오차가 크지는 않지만, 그림 10의 최적제어기에 의한 방법은 약 25[sec] 경과 후 목표위치에 도달하고 약간의 편차가 있다. 그러나 그림 11의 퍼지제어기에 의한 방법은 약 18[sec]에 목표점에 도달했으며 그 후 다음 외란이 들어올 때까지 편차도 별로 없는 것을 볼 수 있다.

5.3 파라미터 변화에 대한 검토

일반적으로 제어시스템은 제어기 설계시 파라미터의 값이 정확하게 선정된다 하더라도 주위환경에 따라 운전중 파라미터의 값이 변할 수도 있으므로 화물의 무게를 +20[%] 변화시켜 모의실험을 실시했다. 그림 12와 13은 각각 화물의 무게를 +20[%] 변경시켰을 때 계단상 기준입력에 대한 최적제어기와 퍼지제어기에 의한 응답곡선을 나타내고 있다. 그림 12를 보면 최적제어기에 의한 방법은 오버슈트는 없으나 도달시간이 22[sec]로 다소 늦으며, 그림 13을 보면 퍼지제어기에 의한 방법은 오버슈트는 다소 크지만 목표점 도달시간이 약 14[sec]로 매우 빠르다.

6. 결론

본 연구는 컨테이너 크레인의 하역 생산성 향상을 위한 제어기의 설계에 주안점을 두고, 컨테이너 화물의 중량변화와 화물이송 종료시 필연적으로 존재하게 되는 화물의 흔들림을 짧은 시간 내에 제어하고, 돌풍 등과 같은 외란을 극복할 수 있는 강인한 퍼지제어기의 설계 기법을 제안하였다. 그리고 제안한 퍼지제어기를 종래의 제어기와 비교하기 위해서 최적제어기를 설계하였으며 여러 가지 모의 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

제안한 퍼지제어기는 최적제어기와 비교하여 계단상의 목표위치 변경에 대하여 추종성능이 양호하고, 목표위치 도달시간이 단축되었으며 목표점 도달시 컨테이너 화물의 흔들림이 거의 없었다. 그리고 돌풍과 같은 강한 외란과 화물의 무게변화로 야기되는 시스템의 파라미터 변화에 대해서도 적응성이 있고 강인하였다.

이와 같은 결과를 종합해 보면 본 연구에서 제안한 퍼지제어기는 비선형성이 강한 컨테이너 크레인에 적합하고, 좀 더 개선하여 실용화하면 항만의 하역생산성 향상에도 큰 도움을 주리라 생각한다.

참고 문헌

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

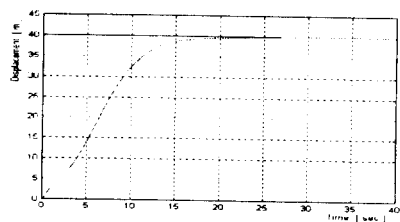


Fig. 6 Step response using optimal controller (Reference input 0 →40[m])

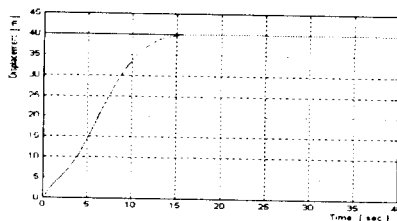


Fig. 7 Step response using fuzzy controller (Reference input 0 →40[m])

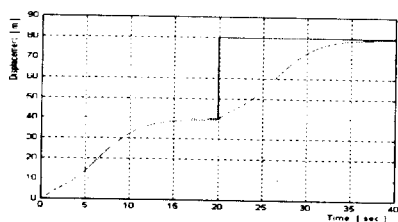


Fig. 8 Step response using optimal controller (Reference input 0 →40 →80[m])

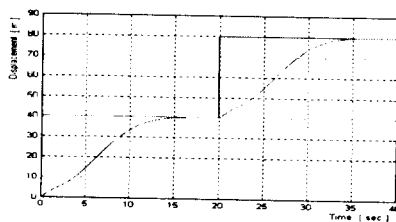


Fig. 9 Step response using fuzzy controller (Reference input 0 →40 →80[m])

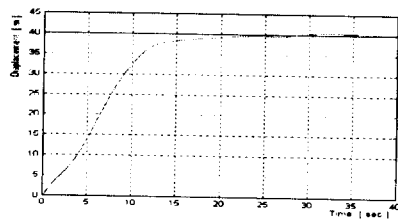


Fig. 10 Step response using optimal controller (Disturbance + 0.05[rad])

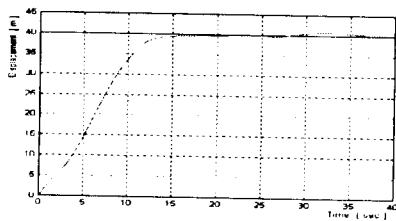


Fig. 11 Step response using fuzzy controller (Disturbance + 0.05[rad])

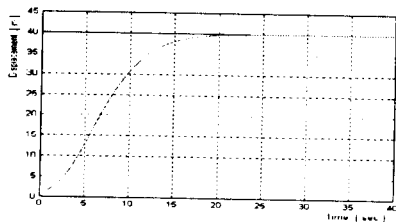


Fig. 12 Step response using optimal controller (Cargo weight change +20[%])

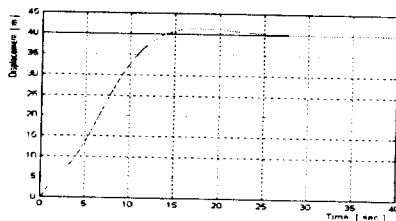


Fig. 13 Step response using fuzzy controller (Cargo weight change +20[%])