

컨테이너 크레인을 위한 모델기반 퍼지제어기 설계

이수룡* · 이윤형** · 안종갑*** · 손정기**** · 최재준***** · 소명옥†

*동명대학교 조선공학과 교수, **, ***, ****, *****한국항만연구원 부산연수원 교수, † 한국해양대학교 선박전자기계공학과 교수

Design of a Model-Based Fuzzy Controller for Container Cranes

Soo-Lyong Lee* · Yun-Hyung Lee** · Jong-Kap Ahn*** · Jeong-Ki Son**** · Jae-Jun Choi***** · Myung-Ok So†

*Department of Naval Architecture, Tong Myong University, Pusan 608-711, Korea

** , ***, ****, *****Korea Port Training Institute, Pusan, 606-791, Korea

† Division of Mechatronics Engineering, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요 약 : 본 논문은 파라미터 변화나 외란이 존재하는 환경에서 컨테이너 크레인의 트롤리 위치와 컨테이너의 흔들림을 효과적으로 제어할 수 있는 모델기반 퍼지제어기를 제안한다. 이를 위해 우선 파라미터 변화에 대응할 수 있는 모델링 기법인 T-S 퍼지모델을 구현하고, 소속함수의 파라미터를 실수코딩 유전알고리즘(RCGA)으로 조정하는 문제를 다룬다. 다음으로 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 LQ 제어기법을 사용하여 서브제어기를 설계하고, 이렇게 설계된 서브제어기를 RCGA로 조정된 퍼지모델의 소속함수로 퍼지결합하여 제안하는 모델기반 퍼지제어기를 구성한다. 시뮬레이션을 통해 RCGA로 조정된 소속함수를 사용하는 퍼지모델은 컨테이너 크레인의 비선형 모델의 출력에 잘 추종하였고, 모델기반 퍼지제어기도 파라미터 변화와 외란이 존재하는 환경에서 강인한 제어를 수행하고 있음을 확인하였다.

핵심용어 : 컨테이너 크레인, 파라미터 변화, 퍼지모델, 실수코딩 유전알고리즘, 모델기반 퍼지제어기

Abstract : In this paper, we present the model-based fuzzy controller for container cranes which effectively performs set-point tracking control of trolley and anti-swaying control under system parameter and disturbance changes. The first part of this paper focuses on the development of Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy modeling in a nonlinear container crane system. Parameters of the membership functions are adjusted by a RCGA to have same dynamic characteristics with nonlinear model of a container crane. In the second part, we present a design methodology of the model-based fuzzy controller. Sub-controllers are designed using LQ control theory for each subsystem in fuzzy model and then the proposed controller is performed with the combination of these sub-controllers by fuzzy IF-THEN rules. In the results of simulation, the fuzzy model showed almost similar dynamic characteristics compared to the outputs of the nonlinear container crane model. Also, the model-based fuzzy controller showed not only the fast settling time for the change in parameter and disturbance, but also stable and robust control performances without any steady-state error.

Key words : Container cranes, Parameter change, Fuzzy model, RCGA(Real-coded genetic algorithm), Model-based fuzzy controller

1. 서 론

자동화된 터미널에서 컨테이너의 양·적하 작업에 투입되는 컨테이너 크레인(Container crane)은 여러 장비들과 상호협동하기 때문에 그 역할은 대단히 중요하다. 또한, 물류의 병목현상이 주로 컨테이너의 양·적하 작업에서 나타나게 되므로 터미널의 생산성은 컨테이너 크레인의 성능과 직접적인 연관성을 갖는다고 해도 과언이 아니다.

이러한 컨테이너 크레인의 가장 핵심적인 장치는 트롤리와 스프레더(Spreader)라고 할 수 있다. 한편, 이 두 장치 사이에는 호이스트용 와이어로프(Wire rope)가 연결되어 있어 트롤리가

이동하면 필연적으로 스프레더에 매달린 컨테이너의 흔들림이 발생하게 된다. 또한, 트롤리 동작이 이루어지는 동안에 호이스트 동작도 동시에 이루어지므로 화물의 흔들림과 함께 호이스트용 와이어로프의 길이도 변하게 된다. 결국 이러한 작업환경은 트롤리가 목표위치에 도달했음에도 스프레더에 매달린 컨테이너가 계속 흔들리는 문제를 야기하고, 다음 작업을 바로 시작하기 어렵게 한다. 이와 더불어, 컨테이너 크레인 시스템은 보유한 자유도 수가 구사할 수 있는 제어입력의 수보다 많고, 흔들리는 컨테이너를 트롤리로서 간접적으로 제어해야하고, 바람과 같은 돌발적인 외란도 극복해야 하는 문제점을 가진다.

이러한 컨테이너 크레인의 제어를 위해 Park 등(1989)은 로

* 대표저자 : 이수룡(정회원), lsyung@tu.ac.kr 051)620-3404

** 중신회원, domse54@daum.net

*** 정회원, jjongabi@naver.com

**** 정회원, flogging@hanmail.net

***** 정회원, fail0030@empal.com

† 교신저자 : 소명옥(중신회원), smo@hhu.ac.kr 051)410-4248

프 길이가 일정한 화물의 흔들림을 제어할 목적으로 화물의 흔들림 각의 변화율을 측정하고, 이것을 피드백하여 단진자 운동에 감쇠 효과를 부여하는 디지털 제어 알고리즘을 제안하였고, Yoon 등(1995)은 화물의 흔들림 감쇠와 정지위치 오차를 줄이기 위해 가속도 경로 계획방식, 속도 경로 폐회로 제어방식, 퍼지제어기의 설계방법을 제시하였다. Shin 등(2000)은 위치제어 및 흔들림 제어를 위해 LQ제어기와 퍼지제어기를 설계하였고, Son 등(2002)은 전동기의 구동부와 감속기어 계통까지 포함시켜 모델링하여 LQ제어기를 설계하였고, So 등(2003)은 퍼지제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어를 설계하였다. Hong 등(2003)은 트롤리가 주행할 때 흔들림 각을 제한하는 입력성형기법을 제안하였고, Kang 등(2004)은 시간최적제어를 이용한 지브크레인의 흔들림 제어를 수행하였다.

그러나 이러한 연구의 대부분은 호이스트용 와이어로프의 길이가 고정되거나 변화가 거의 없다는 가정에서 출발하므로 파라미터 변화에 대한 것을 잘 고려하지 못하였다. 이것은 기존의 연구가 호이스트용 와이어로프가 크게 변화하는 실제 컨테이너 작업 환경과는 많은 차이가 발생하여 실제 환경에서는 잘 대처하지 못한다는 것을 의미한다.

따라서 본 연구에서는 호이스트용 와이어로프 길이가 변화하고, 돌발적인 외란이 존재하는 환경에서도 트롤리의 목표위치를 정밀하게 추종시키고, 컨테이너의 흔들림 각을 최소화시킬 수 있는 모델기반 퍼지제어기 설계 기법을 제안한다.

제안하는 제어기를 설계하기 위해서는 우선 제어기의 소속함수를 얻어야 하는데 본 연구에서는 Lee 등(2007)이 연구한 퍼지 모델링 기법을 적용한다. 다음으로 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 LQ 제어기법을 적용하여 서브제어기(상태피드백 제어기)를 구한다. 그러면 제안하는 모델기반 퍼지제어기는 이 서브제어기들을 다시 퍼지결합함으로써 얻을 수 있다.

제안한 제어기는 파라미터가 변화하고, 외란이 존재하는 조건에서 컴퓨터 시뮬레이션을 실시하여 그 유효성을 확인한다.

2. 퍼지모델

컨테이너 크레인은 서론에서 언급했듯이 호이스트용 와이어로프 길이가 변화하는 시스템이다. 이러한 환경은 컨테이너 크레인을 단일 모델로 모델링할 수 없다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 도구로서 T-S 퍼지모델을 사용한다(Takagi, 1985; Lee 등, 2007).

2.1 서브시스템

구동부가 포함된 실제 컨테이너 크레인의 재원을 얻는다는 것은 쉬운 일이 아니므로, 본 논문에서는 DC 모터를 구동부를 갖는 모형 컨테이너 크레인을 고려한다. 호이스트용 와이어로프 길이 ℓ 의 가능한 변화폭은 0.4 [m]에서 2.0 [m]로 가정하고, 퍼지 소속함수를 이용하여 SM(Small), MD(Medium), LG(Large)로 입력공간을 퍼지분할 한다. 이때, 컨테이너의 질량 $m=0.5$ [kg]으로 고정된 값으로 생각한다. 그러면 컨테이너

크레인의 퍼지모델은 다음과 같이 3개의 규칙으로 표현할 수 있다.

퍼지모델:

$$R^i : \text{IF } \ell \text{ is } M^i$$

$$\text{THEN } \dot{x} = A^i x + B^i u, \text{ for } i = 1, 2, 3 \quad (1)$$

여기서 M^i 는 Small, Medium, Large의 의미를 가지는 전진부의 퍼지집합이다.

본 논문에서 사용한 비선형시스템은 여러 문헌(Son 등, 2002; Lee 등, 2007)을 참고한 것으로서 Table 1은 이로부터 얻은 서브시스템을 ℓ 의 변화에 따라 나타낸 것이다.

Table 1 Subsystems for fuzzy model

서브시스템 1 : $\ell = 0.4$ [m]인 경우	
$A^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.442 & -18.020 & -0.016 \\ 0 & -26.722 & -33.789 & -0.1 \end{bmatrix}$	$B^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.081 \\ 3.902 \end{bmatrix}$
서브시스템 2 : $\ell = 1.2$ [m]인 경우	
$A^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.442 & -18.020 & 0 \\ 0 & -8.907 & -11.236 & -0.01 \end{bmatrix}$	$B^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.081 \\ 1.30 \end{bmatrix}$
서브시스템 3 : $\ell = 2.0$ [m]인 경우	
$A^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -4.442 & -18.020 & 0 \\ 0 & -5.344 & -6.757 & 0 \end{bmatrix}$	$B^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.081 \\ 0.780 \end{bmatrix}$

2.2 퍼지규칙의 추론

식 (1)에서 입력으로 ℓ 이 주어지면, 전체 규칙의 추론결과는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{x} = \frac{\sum_{i=1}^r \rho^i \{A^i x + B^i u\}}{\sum_{i=1}^r \rho^i}, \text{ for } i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

여기서 x 와 ρ^i 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$x = [x_1, x_2, x_3, x_4]^T \quad (3)$$

단, 상태벡터 x 는 각각 트롤리 위치, 컨테이너 흔들림 각도, 트롤리 속도, 흔들림 각속도를 의미한다.

$$\rho^i = \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j) = \prod_{j=1}^n \mu_j^i, \text{ for } i = 1, 2, 3 \quad (4)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \rho^i > 0 \\ \rho^i \geq 0 \end{cases}, \text{ for } i = 1, 2, 3 \quad (5)$$

식 (4)에서 μ_j^i 는 M_j^i 에 대한 소속함수 x_j 의 소속정도이다. ξ^i 를 다음과 같이 정의하면

$$\xi^i = \frac{\rho^i}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (6)$$

식 (2)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \sum_{i=1}^r \xi^i \{A^i \mathbf{x} + B^i \mathbf{u}\}, \text{ for } i = 1, 2, 3 \quad (7)$$

2.3 RCGA를 이용한 소속함수의 조정

일단 컨테이너 크레인의 비선형시스템이 식 (1)과 같은 퍼지 모델로 표현되면 퍼지모델의 동특성과 비선형시스템의 동특성이 가까워지도록 전건부 입력변수들을 퍼지분할 하고, 소속함수의 파라미터를 적절히 조정해야하는데 본 논문에서는 RCGA(Jin, 2000; Jin, 2002)를 이용해 최적으로 조정한다.

퍼지 분할에 이용되는 퍼지집합은 선형소속함수와 비선형소속함수로 구분하여 고려한다. 선형소속함수는 식 (8)로 정의되는 사다리꼴 형태의 “외부(Exterior)” 퍼지집합과 식 (9)와 같은 삼각형 형태의 “내부(Interior)” 퍼지집합으로 구성된 것이다.

$$M(\ell) = \begin{cases} \frac{\ell-a}{b-a}, & a \leq \ell \leq b \\ 1, & b \leq \ell \leq c \\ \frac{\ell-c}{d-c}, & c \leq \ell \leq d \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

$$M(\ell) = \begin{cases} \frac{\ell-o}{p-o}, & o \leq \ell \leq p \\ \frac{q-\ell}{q-p}, & p \leq \ell \leq q \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (9)$$

비선형 소속함수는 식 (10)으로 표현되는 시그모이드 형태의 “외부(Exterior)” 퍼지집합과 식 (11)과 같은 가우시안 형태의 “내부(Interior)” 퍼지집합으로 구성된 것이다.

$$M(\ell) = \frac{1}{1 + e^{-n(\ell-m)}} \quad (10)$$

$$M(\ell) = \exp\left(-\frac{(\ell-k)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (11)$$

여기서 $\{a, b, c, d\}$, $\{o, p, q\}$ 는 각각 사다리꼴 소속함수와 삼각형 소속함수의 파라미터를 나타내고, $\{n, m\}$ 과 $\{\sigma, k\}$ 는 각각 시그모이드와 가우시안 소속함수의 파라미터이다.

위와 같은 퍼지모델의 소속함수를 조정하는 문제는 일종의 비선형 최적화 문제로서, 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 적응 메커니즘으로 RCGA를 적용한 모델조정기법을 사용한다. 이 과정을 통해 퍼지모델과 컨테이너 크레인 비선형모델의 동특성이 서로 가까워지도록 퍼지 소속함수가 조정된다.

RCGA는 집단이 진화해 가는 동안 개체간의 우열을 가리기 위한 적합도 함수를 사용하며 적합도 함수는 다음의 목적함수로부터 계산된다.

$$J(\phi) = \int_{(k-W+1)T}^{kT} \|\mathbf{x}_p - \mathbf{x}_f\| dt \quad (12)$$

여기서 \mathbf{x}_p 와 \mathbf{x}_f 는 각각 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델의 상태, W 는 데이터 윈도우의 크기로서 퍼지모델의 정확도와 계산시간 사이에서 적절하게 타협되는 상수이고, $\|\cdot\|$ 는 벡터 놈(Norm)이다.

3. 제어시스템 설계

여기에서는 컨테이너 크레인의 운전에 따른 호이스트용 와이 어로프 길이 변화와 외란에 효과적으로 대응할 수 있는 모델기반 퍼지제어기를 설계한다.

3.1 서브제어기

우선, 여기서는 제안하고자 하는 퍼지제어기 설계의 전 단계로서 퍼지모델의 각 서브시스템에 대해 서브제어기를 설계하는 기법에 대해 살펴본다.

퍼지모델의 각 서브시스템을 다음과 같이 일반화하여 다시 생각하자.

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A} \mathbf{x} + \mathbf{B} \mathbf{u} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C} \mathbf{x} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{x}(t) \in \mathbb{R}^n$ 는 시스템의 상태벡터, $\mathbf{y}(t) \in \mathbb{R}$ 는 출력으로서 트롤리의 위치, $\mathbf{u}(t) \in \mathbb{R}$ 는 제어입력이고, $\mathbf{A} \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$, $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$, $\mathbf{C} \in \mathbb{R}^{1 \times 4}$ 이다. 한편 행렬쌍 (\mathbf{A}, \mathbf{B}) 가 가제어(Controllable)하면, 상태 피드백 제어가 가능하다.

서브제어기는 몇 가지 방법으로 설계할 수 있는데, 가장 대표적인 방법은 극배치(Pole placement)방법과 LQ(Linear Quadratic)제어기법이다. 본 연구에서는 LQ제어기법을 이용하여 서브제어기를 설계하기로 한다.

다음과 같은 2차형식의 평가함수를 정의한다.

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (14)$$

여기서 Q는 양의 반한정 대칭행렬이고, R은 양의 하중계수이다.

식 (14)의 평가함수를 최소화 하는 의미에서 상태피드백 제어법칙은 다음과 같다.

$$u = -Kx = -R^{-1}B^T P x \quad (15)$$

여기서 K는 피드백 이득행렬로서 실수행렬이고, P는 Riccati 방정식의 해행렬이다.

본 논문에서는 컨테이너 크레인의 서브제어기의 제어입력을 다음과 같은 제어법칙으로 고려한다.

$$u = -[0 \ k_2 \ k_3 \ k_4] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + k_1 (y_r - x_1) \\ = -Kx + k_1 y_r \quad (16)$$

여기서 $K=[k_1 \ k_2 \ k_3 \ k_4]$ 이다.

3.2 모델기반 퍼지제어기

제안하는 퍼지제어기는 2장에서 설명한 퍼지모델의 각 서브 시스템에 대해 3.1절에서 설명한 서브제어기를 설계하고, 퍼지 모델의 소속함수로 서브제어기를 다시 퍼지결합한 것이다. 퍼지시스템은 식 (16)을 이용해 다음과 같이 표현되는 i번째 제어입력을 통해 점근적으로 안정하게 만드는 것이 가능하다.

$$\tilde{R}^i : \text{IF } \ell \text{ is } M^i \\ \text{THEN } u^i = -[0 \ k_2^i \ k_3^i \ k_4^i] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + k_1^i (y_r - x_1) \\ = -K^i x + k_1^i y_r, \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (17)$$

여기서 $K^i=[k_1^i \ k_2^i \ k_3^i \ k_4^i]$ 는 i번째 규칙에 해당하는 피드백 이득행렬이다.

그러면 모델기반 퍼지제어기의 출력은 다음과 같다.

$$u = \frac{\sum_{i=1}^3 \rho^i u^i}{\sum_{i=1}^3 \rho^i} = \sum_{i=1}^3 \xi^i u^i \quad (18) \\ = -\sum_{i=1}^3 \xi^i \{k_1^i (x_1 - y_r) + k_2^i x_2 + k_3^i x_3 + k_4^i x_4\}$$

이때, 원래의 시스템에서 제어를 수행하면 x, y 대신에 원래 비선형 시스템의 상태와 출력인 x_p, y_p 를 피드백하게 되므로 식 (18)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\tilde{R}^i : \text{IF } \ell \text{ is } M^i$$

$$\text{THEN } u^i = -[0 \ k_2^i \ k_3^i \ k_4^i] \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + k_1^i (y_r - y_p) \\ = -K^i x_p + k_1^i y_r, \quad \text{for } i = 1, 2, 3 \quad (19)$$

4. 시뮬레이션

4.1 소속함수의 조정

퍼지모델의 소속함수에 사용된 RCGA의 제어변수는 집단의 크기 $N=20$, 재생산계수 $n_i=1.8$, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.2$ 를 사용하였다. 데이터 윈도우 $W=4000$, 샘플링 주기 $T=0.01$ 로 선정하고, ℓ 은 2장에서 가정한 범위 내에서 임의로 변화하고 있는 조건이다.

Fig. 1은 최종적으로 조정된 선형 및 비선형 소속함수를 나타낸다. 선형소속함수의 경우 조정된 SM의 파라미터 {c, d}={0.2, 0.96}, MD 파라미터 {o, p, q}={0.22, 1.2, 1.93}이고, LG 파라미터 {a, b}={1.06 1.99}이다. 비선형소속함수인 경우 조정된 SM 파라미터 {n, m}={-29.09, 0.71}, MD 파라미터 {o, k}={0.39, 1.20}이고, LG 파라미터 {n, m}={20.49, 1.40}이다.

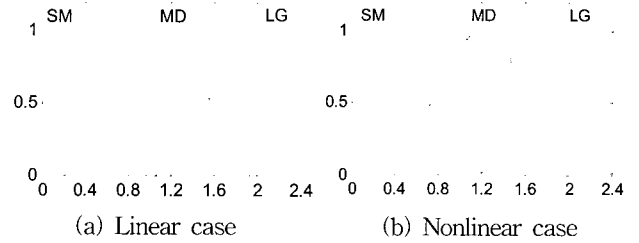
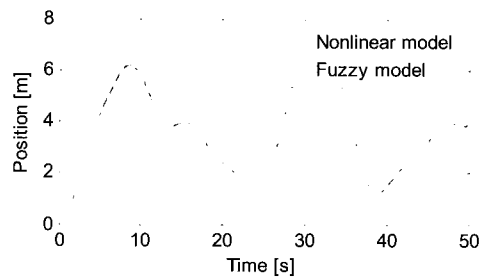


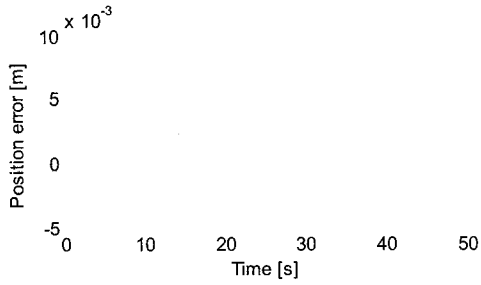
Fig. 1 Membership functions after tuning with RCGA

4.2 퍼지모델의 검증

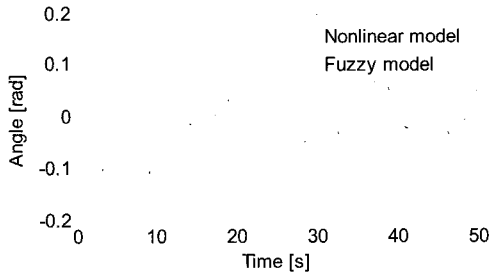
소속함수의 조정결과, 선형소속함수를 적용한 퍼지모델이 비선형소속함수를 사용한 퍼지모델보다 더욱 정교한 출력을 나타내었다. 따라서 여기서는 선형소속함수를 적용한 퍼지모델의 출력만 나타낸다. Fig. 2의 (a)와 (b)는 각각 퍼지모델과 비선형 모델의 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 각도를 나타낸 것이고, (c)와 (d)는 각각 두 모델 사이의 오차를 나타낸 것이다. 퍼지모델은 비선형 모델을 아주 작은 오차범위 내에서 정교하게 추종하고 있음을 알 수 있다.



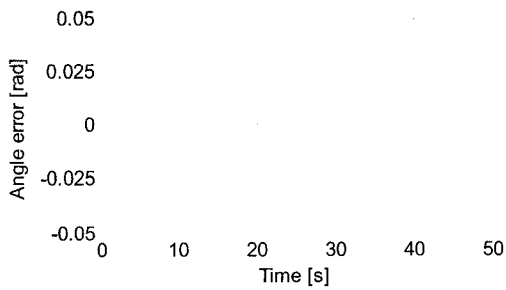
(a) Trolley position of the nonlinear model and fuzzy model



(b) Error of between nonlinear model and fuzzy model



(c) Swing angle of the nonlinear model and fuzzy model



(d) Error of between nonlinear model and fuzzy model

Fig. 2 Performance results of fuzzy model

4.3 모델기반 퍼지제어기의 검증

모델기반 퍼지제어기를 구성하는 서브제어기는 식 (14)의 평가함수를 적용하면 다음과 같이 구할 수 있다. 이때 Q와 R은 시행착오를 통해 결정된 것이다.

서브제어기 1 : $Q=\text{diag}(20 \ 30 \ 3 \ 4)$, $R=0.02$ 일 때

$$K^1=[31.6228 \ 67.4617 \ 17.8753 \ 3.3667] \quad (20)$$

서브제어기 2 : $Q=\text{diag}(155 \ 160 \ 80 \ 90)$, $R=0.02$ 일 때

$$K^2=[88.0341 \ 140.4702 \ 73.3109 \ -33.0085] \quad (21)$$

서브제어기 3 : $Q=\text{diag}(220 \ 350 \ 150 \ 130)$, $R=0.02$ 일 때

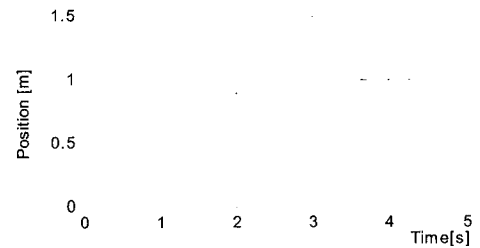
$$K^3=[104.8809 \ 185.2975 \ 99.4316 \ -40.1328] \quad (22)$$

이제 최종적으로 설계된 모델기반 퍼지제어기의 유효성을 살펴보기 위해 제어시스템에 대하여 시뮬레이션을 실시한다. 제

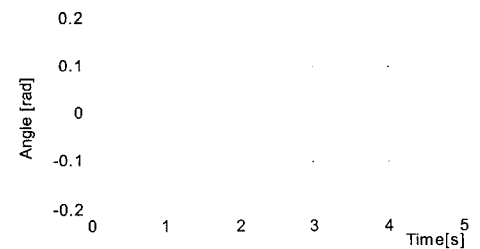
안한 제어기는 식 (20)-(22)의 서브제어기를 퍼지결합하여 얻어 지는데, 퍼지모델에서 선형소속함수가 비선형소속함수보다 더욱 정교한 응답을 나타내었으므로 모델기반 퍼지제어기의 구성에 필요한 소속함수는 Fig. 1(a)의 선형소속함수로 적용한다. 시뮬레이션 환경은 컨테이너 크레인의 적하 상황을 가정하여 m 은 0.5 [kg]의 고정된 값으로 설정하고, ℓ 은 갈수록 짧아지다가 다시 증가하도록 설정하였다.

우선 기준입력 변화에 대한 제어시스템의 추종성능을 검토하기 위해 트롤리의 이동거리에 대해 계단상의 기준입력을 변경시켜 보았다. Fig. 3에 시뮬레이션 결과를 나타내었으며, 그림의 (a)는 트롤리 위치, (b)는 컨테이너의 흔들림 각도, (c)는 $\pm 10[V]$ 로 제한한 제어입력, (d)는 파라미터 변화로서 호이스트 와이어로프의 길이변화를 보여주고 있다.

Fig. 3에서 확인할 수 있듯이 모델기반 퍼지제어기는 정상편차와 오버슈트 없이 트롤리를 목표위치에 잘 추종시키고, 동시에 목표위치에서 컨테이너의 흔들림을 잘 제어하고 있다.



(a) Trolley position



(b) Swing angle



(c) Control input



(d) Parameter change : ℓ

Fig. 3 Step responses of the model-based fuzzy controller

Fig. 4는 Fig. 3과 동일한 환경하에서 0.5 [s]에 돌발적인 흔들림 외란이 인가된 경우이다. 이 경우에도 모델기반 퍼지제어기는 트롤리를 목표위치에 잘 추종시키고, 동시에 컨테이너의 흔들림을 잘 억제하고 있다.

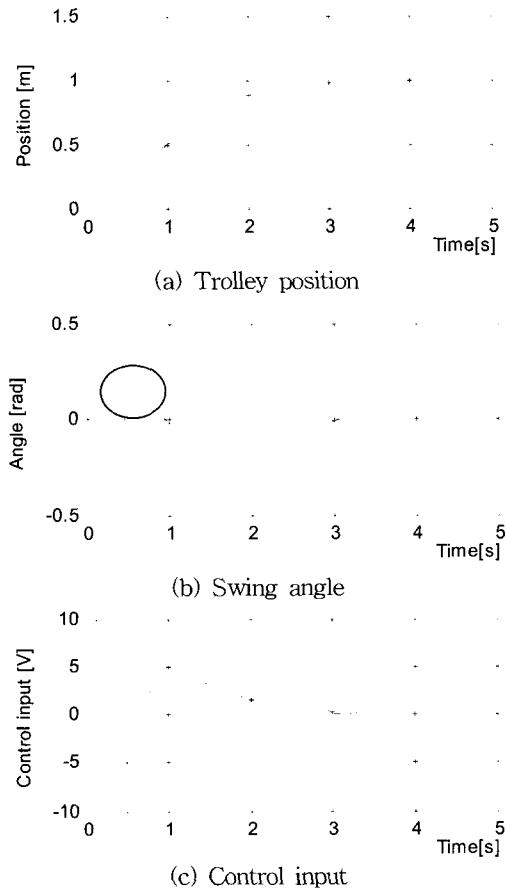


Fig. 4 Step responses of the model-based fuzzy controller with disturbance

5. 결 론

본 논문에서는 컨테이너 크레인에 있어서 가장 중요한 파라미터라고 할 수 있는 호이스트용 와이어로프가 변화하고, 외란이 존재하는 환경에서 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 각도를 정밀하게 제어할 수 있는 모델기반 퍼지제어기를 제안하였다.

제안한 제어기의 소속함수를 결정하기 위해 RCGA 기반의 모델조정 기법을 사용하여 퍼지모델을 얻었고, 서브제어기는 LQ 제어기법을 이용한 상태피드백 제어기를 설계하였다.

제안한 제어기는 호이스트용 와이어로프 길이가 변화하고, 외란이 주어지는 환경 하에서 트롤리의 위치와 컨테이너의 흔들림 제어를 정밀하게 수행하고 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 2008년 동명대학교 항만물류사업단의 지원을 받아 연구되었음에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 강민우, 홍금식(2004), "시간최적제어를 이용한 지브크레인의 흔들림제어", 한국해양공학회지, Vol. 19, No. 1, pp. 87-94.
- [2] 박병석, 윤지섭, 이채설(1989), "무진동 크레인의 제어 알고리즘 설계", 한국자동제어학술회의 논문집, Vol. 1, pp. 260-265.
- [3] 소명옥, 유희한, 박재식, 남택근, 최재준, 이병찬(2003), "퍼지제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계", 한국박용기관학회지, Vol. 27, No. 6, pp. 759-766.
- [4] 손정기, 최재준, 소명옥, 남택근, 권순재(2002), "LQ 제어기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계", 한국박용기관학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 544-553.
- [5] 신선근, 최재준, 소명옥(2000), "하역효율 향상을 위한 컨테이너 크레인의 제어기 설계", 한국박용기관학회지, Vol. 24, No. 4, pp. 110-116.
- [6] 윤지섭(1995), "무진동 크레인의 구현을 위한 여러 가지 제어방식의 비교 연구", 대한기계학회논문집, 제19권 9호, pp. 2399- 2411.
- [7] 이윤형, 유희한, 정병건, 소명옥, 진강규, 오세준(2007), "RCGA 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지 모델링", 한국항해항만학회지, Vol. 31, No. 8, pp. 697-703.
- [8] 진강규, 주상래(2000), "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275.
- [9] 진강규(2004), "유전알고리즘과 그 응용", 교우사.
- [10] Hong, K. T., Huh, C. D. and Hong, K. S.(2003), "Command Shaping Control for Limiting the Transient Sway Angle of Crane Systems", International Journal of Control, Automation and Systems, Vol. 1, No. 1, pp. 43-53.
- [11] Tagaki, T and Sugeno, M.(1985), "Fuzzy Identification of Systems and Its Application to Modeling and Control", IEEE Trans. on SMC, Vol. SMC-15, No. 1, pp. 116-132.

원고접수일 : 2008년 3월 28일
 심사완료일 : 2008년 8월 26일
 원고채택일 : 2008년 8월 29일