

# RCGA 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지 모델링

이윤형\* · 유희한\*\* · 정병건\*\* · 소명옥\*\* · 진강규\*\*\* · † 오세준\*\*

\*한국해양대학교 자동제어실험실, \*\*한국해양대학교 선박전자기계공학부 교수, \*\*\*한국해양대학교 컴퓨터·제어·전자통신공학부 교수

## T-S Fuzzy Modeling for Container Cranes Using a RCGA Technique

Yun-Hyung Lee\* · Heui-Han Yoo\*\* · Byung-Gun Jung\*\* · Myung-Ok So\*\* ·

Gang-Gyoo Jin\*\*\* · † Sea-June Oh\*\*

\*Graduate school of National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

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

\*\*\*Division of Computer Control and Electronic Communications, National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

**요 약 :** 비선형성이 강한 컨테이너 크레인은 작업 시에 호이스트 와이어로프의 길이와 화물의 질량 변화로 인해 더욱 복잡한 동역학적 특성을 나타낸다. 이 같은 복잡한 비선형시스템을 다루기 위해 퍼지모형이 종종 사용되는데, 특히 각 퍼지 규칙의 결론부를 상태 방정식으로 표현하는 T-S 퍼지모델이 대표적인 방법이다. 본 논문에서는 T-S 퍼지모델을 이용하여 호이스트 와이어로프의 길이나, 화물의 질량이 변화하는 환경에서도 컨테이너 크레인의 동특성을 표현할 수 있는 퍼지모델을 얻는 방법을 제안한다. 이때, 퍼지모델의 소속함수 파라미터는 RCGA가 결합된 모델조정기법을 통해 최적으로 조정된다. 이렇게 구현한 퍼지모델과 컨테이너 크레인 비선형시스템의 개루프 응답을 비교하여 그 유효성을 확인한다.

**핵심용어 :** 컨테이너 크레인, T-S 퍼지모델, 퍼지결합, 실수코딩 유전알고리즘

**Abstract :** In this paper, we focuses on the development of Takagi-Sugeno (T-S) fuzzy modeling in a nonlinear container crane system. A T-S fuzzy model is characterized by fuzzy "if-then" rules which represent the locally input-output relationship whose consequence part is described by a state space equation as subsystem. The T-S fuzzy model in container cranes first obtains a few number of linear models according to operation conditions and blends these conditions using fuzzy membership functions. Parameters of the membership functions are adjusted by a RCGA to have same dynamic characteristics with nonlinear system of a container crane. Simulations are given to illustrate the performance of T-S fuzzy model.

**Key words :** Container cranes, T-S fuzzy model, Fuzzy blending, RCGA(Real-coded genetic algorithm)

## 1. 서 론

컨테이너 크레인은 매 운전 사이클 마다 컨테이너 질량이 변화하고, 운전 중에는 호이스트용 와이어로프의 길이가 변하는 복잡한 시스템이다. 또한, 바람과 조석간만의 차이 등으로 인한 외란도 상존한다. 그러나 이러한 운전환경을 고려하면 종래의 제어기(Ridout, 1987; Sagara, 1990; 相良愼, 1990; 손, 2002; 이, 2007)로는 트롤리를 목표위치에 정밀하게 추종시키고, 동시에 컨테이너의 흔들림 각을 빠른 시간 내에 제어한다는 것은 쉬운 일이 아니다. 이는 기존의 연구가 컨테이너 크레인을 파라미터가 변화하지 않는 선형시스템으로 간주하고, 이를 이용해 선형제어기를 설계하기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 트롤리의 목표위치를 정밀하게 추종시키고 컨테이너의 흔들림 각을 최소화시킬 수 있는 제어기 설계 이전단계로서 파라미터가 변화하는 경우에도 컨테이너 크레인의 동특성을 효과적으로 표현 할 수 있는 T-S(Takagi-Sugeno) 퍼지모델을 얻는 문제를 다룬다.

컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델은 호이스트용 와이어로프 길이와 컨테이너 질량을 설계변수로 간주하고 이들의 변화에 따른 다수 개의 지역 선형모델(서브시스템)을 구한 후, 이 선형모델을 IF-THEN 퍼지규칙으로 결합한 것이다. 이때, 퍼지 모델링의 주요한 관심분야인 퍼지모델의 소속함수 파라미터는 실수코딩 유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm : RCGA)이 결합된 모델조정기법을 통해 최적으로 조정하는

\* 대표저자 : 이윤형(정회원), domse54@hanmail.net 051)410-4877

\*\* 정회원, yoohh@hhu.ac.kr 051)410-4841

\*\* 정회원, bgjung@hhu.ac.kr 051)410-4269

\*\* 정회원, smo@hhu.ac.kr 051)410-4248

\*\*\* 정회원, ggjin@hhu.ac.kr 051)410-4341

† 교신저자 : 오세준(정회원), sj505@hhu.ac.kr 051)410-4285

방법을 제안한다. 이 방법은 컨테이너 크레인의 동특성과 퍼지모델의 동특성이 일치하도록 RCGA를 이용하여 퍼지모델의 소속함수 파라미터를 최적으로 조정하는 것이다.

본 논문에서 제안하는 퍼지 모델링 기법은 하나의 동작점에서 모델링된 단일 선형모델이 가지는 문제점인 동작점 이외의 영역에서 발생하는 모델링 오차 문제를 해결할 수 있기 때문에 시스템 모델링 관점에서 중요한 의미를 가진다. 동시에 이 퍼지모델을 적절히 이용하면 컨테이너 크레인의 작업 환경을 고려한 제어기 설계에 곧바로 응용할 수 있으므로 제어기 설계 관점에서도 매우 중요한 의미를 가진다.

제안한 컨테이너 크레인의 퍼지모델링 기법은 최종적으로 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 확인한다.

## 2. T-S 퍼지 모델

컨테이너 크레인은 서론에서 설명한 대로 컨테이너 질량과 호이스트용 와이어로프 길이가 변화하는 시스템이다. 그런데, 컨테이너 크레인의 수학적 모델은 이 두 가지 파라미터에 크게 의존하므로 이들을 일정한 값으로 가정하여 컨테이너 크레인을 모델링하는 것은 합리적이지 못하다. 따라서 여기서는 이와 같은 문제점을 해결할 수 있는 도구로서 본 논문에서 사용하는 T-S 퍼지모델(Takagi, 1985)에 대해 살펴보기로 한다.

많은 실제적인 문제에서 인간의 전문적인 지식은 IF-THEN 규칙을 사용하여 퍼지 시스템의 모델을 조합하는 언어적인 묘사가 가능하다. T-S 퍼지모델은 Takagi-Sugeno 추론법(Takagi, 1985)의 특별한 형태로서 식 (1)과 같은 1차항의 결합으로 시스템을 묘사하며, 암시된 퍼지규칙이 적더라도 고차의 비선형 함수를 잘 모델링할 수 있는 장점을 가진다.

$$R^i : \text{IF } x_1 \text{ is } M_1^i \text{ and } \dots x_j \text{ is } M_j^i \text{ and } \dots x_n \text{ is } M_n^i$$

$$\text{THEN } y^i = a_0^i + a_1^i x_1 + \dots + a_j^i x_j + \dots + a_n^i x_n$$

for  $i = 1, 2, \dots, r$  (1)

여기서  $x = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n] \in \mathbb{R}^n$ 는 입력벡터,  $R^i$ 는  $i$ 번째 퍼지 규칙,  $r$ 은 퍼지 규칙의 개수,  $a_j^i$ 는 후건부의 상수 파라미터,  $M_j^i$ 는 전건부의 퍼지집합을 의미한다.

주어진 입력  $x$ 에 대해 퍼지모델의 최종 출력은  $y^i$ 를 가중평균(weighting average)하여 구할 수 있다.

결국 식 (1)로 나타나는 퍼지모델의 물리적 의미는 입력벡터  $x$ 가 규칙의 전건부에 의해 특성이 결정되어진 퍼지 부공간에 제한될 때, 퍼지 시스템의 출력은 후건부 함수로부터 형성된 각각의 출력을 가중평균하여 구해진다는 것을 의미한다.

Fig. 1은 이와 같은 T-S 퍼지모델의 기본 개념을 도식화한 것으로 T-S 퍼지모델은 몇몇 선형시스템의 조합으로 비선형 시스템을 잘 근사화 할 수 있음을 보여준다.

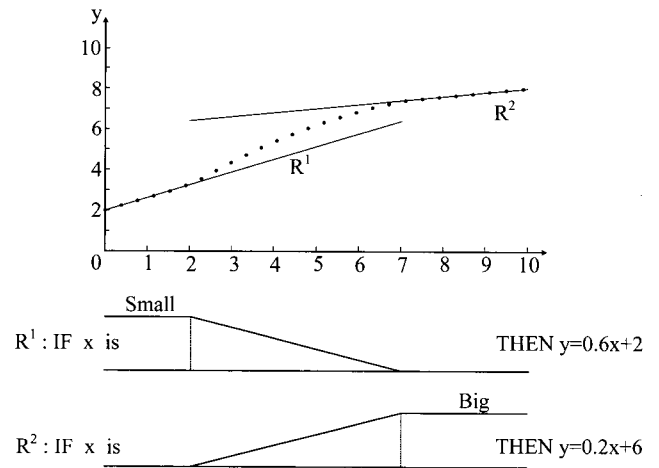


Fig. 1 Example of Takagi-Sugeno fuzzy model

식 (1)로 표현되는 T-S 퍼지모델은 후건부가 입력변수의 함수이다. 이를 동적 시스템의 관점에서 다시 표현하면 식 (2)와 같이 비선형시스템을 몇 개의 선형모델로 기술하는 것이 가능하다.

시스템 규칙 :

$$R^i : \text{IF } x_1 \text{ is } M_1^i \text{ and } \dots x_j \text{ is } M_j^i \text{ and } \dots x_n \text{ is } M_n^i$$

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

여기서  $x_j$ 와  $M_j^i$ 는 각각 전건부의 변수와 퍼지집합이고,  $r$ 은 "IF-THEN" 규칙의 수이다.  $x \in \mathbb{R}^n$ 는 상태벡터,  $u \in \mathbb{R}^m$ 는 입력 벡터이고,  $A^i \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ,  $B^i \in \mathbb{R}^{n \times m}$ 을 만족하는 행렬이다. 특히 후건부에  $A^i x + B^i u$ 로 표현된 선형모델을 서브시스템(subsystem)이라고도 부르며, 흔히 서브시스템은 비선형시스템의 여러 동작점에서 선형화하여 얻어진다.

만약 입출력 쌍  $(x, u)$ 이 주어지면 최종적인 퍼지 시스템의 출력은 다음과 같이 추론된다.

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

여기서  $x$ 와  $\rho^i$ 는 각각 다음과 같이 정의된다.

$$x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \quad (4)$$

$$\rho^i = \prod_{j=1}^n M_j^i(x_j) = \prod_{j=1}^n \mu_j^i, \text{ for } i = 1, 2, \dots, r \quad (5)$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \rho^i > 0 \\ \rho^i \geq 0 \end{cases}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, r \quad (6)$$

식 (5)에서  $\mu_j^i$ 는  $M_j^i$ 에 대한 소속함수  $x_j$ 의 소속정도이다.  $\xi^i$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\xi^i = \frac{\rho^i}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (7)$$

식 (3)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = \sum_{i=1}^r \xi^i \{A^i x + B^i u\} \quad (8)$$

여기서  $\xi^i$ 는 식 (6)과 식 (7)로부터 다음의 관계를 생각할 수 있다.

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^r \xi^i = 1 \\ \xi^i \geq 0 \end{cases}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, r \quad (9)$$

### 3. 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지 모델

기존의 대표적인 연구(손, 2002; 이, 2007)에서 사용하고 있는 컨테이너 크레인의 모델은 파라미터가 고정된 경우에만 그 정확도가 유지된다. 그러나 컨테이너 크레인 시스템은 앞에서 설명한대로 작업 사이클마다 컨테이너 질량이 변화하고, 컨테이너를 이송하면서 호이스트용 와이어로프 길이가 변하므로 기존 연구에서 사용된 선형모델은 파라미터가 변하는 실제 환경에서 시스템과 동일한 동특성을 보이지 못하는 것은 자명하다.

따라서 본 절에서는 파라미터가 변화하는 환경에서도 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 효과적으로 표현하는 것이 가능하도록 T-S 퍼지모델을 구현한다.

#### 3.1 서브시스템

일반적으로 T-S 퍼지모델의 전건부는 식 (2)에서 확인할 수 있듯이 서브시스템의 상태변수 중에 하나로 구성된다. 그러나 컨테이너 크레인은 외부변수인 호이스트용 와이어로프 길이  $\ell$ 과 컨테이너의 질량  $m$ 에 따라 서브시스템이 정의되므로, 퍼지모델의 설계변수로서  $\ell$ 과  $m$ 을 선정하면 전건부 변수는 기존의 T-S 퍼지모델과 다르게 시스템의 상태변수가 아니라 외부변수인  $\ell$ 과  $m$ 으로 표현된다.

컨테이너 크레인에 있어  $\ell$ 의 가능한 변화폭은 기존의 문헌을 참고하여 0.4 [m]에서 1.2 [m]로 가정하고, 퍼지 소속함수를 이용하여 SM(Small), MD(Medium), LG(Large)로 입력공간을 퍼지분할한다. 한편,  $m$ 의 가능한 변화폭은 0.2 [kg]에서 0.6 [kg]로 가정하고, LT(Light), HV(Heavy)로 퍼지분할한다. 그러면 컨테이너 크레인의 T-S 퍼지모델은 다음과 같이 6개의 규칙으로 표현하는 것이 가능하다.

퍼지모델:

$R^i$  : IF  $\ell$  is  $M_1^i$  and  $m$  is  $M_2^i$

THEN  $\dot{x} = A^i x + B^i u$ , for  $i = 1, 2, \dots, 6$  (10)

여기서  $M_1^i$  와  $M_2^i$ 는 각각 Table 1과 같은 의미를 가지는 전건부의 퍼지집합이다.

Table 1 Description of premise fuzzy sets

$M_1^i$	Description	$M_2^i$	Description
$M_1^1$	Small	$M_2^1$	Light
$M_1^2$	Small	$M_2^2$	Heavy
$M_1^3$	Medium	$M_2^3$	Light
$M_1^4$	Medium	$M_2^4$	Heavy
$M_1^5$	Large	$M_2^5$	Light
$M_1^6$	Large	$M_2^6$	Heavy

본 논문에서 사용한 비선형시스템은 여러 문헌(손, 2002; 이, 2007)을 참고하였으며, Table 2는 이로부터 얻은 서브시스템을  $\ell$ 과  $m$ 의 변화에 따라 나타낸 것이다. 본 논문에서는 비선형시스템과 서브시스템의 유도는 생략하기로 한다.

Table 2 Subsystems for T-S fuzzy model

서브시스템 1 : $\ell=0.4[m]$ , $m=0.2[kg]$ 인 경우	
$A^1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & -22.057 & -37.153 & -0.2 \end{bmatrix}$	$B^1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 4.291 \end{bmatrix}$
서브시스템 2 : $\ell=0.4[m]$ , $m=0.6[kg]$ 인 경우	
$A^2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & -28.095 & -32.798 & 0 \end{bmatrix}$	$B^2 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 3.788 \end{bmatrix}$
서브시스템 3 : $\ell=0.8[m]$ , $m=0.2[kg]$ 인 경우	
$A^3 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & -11.028 & -18.576 & 0 \end{bmatrix}$	$B^3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 2.145 \end{bmatrix}$
서브시스템 4 : $\ell=0.8[m]$ , $m=0.6[kg]$ 인 경우	
$A^4 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & -14.047 & -16.399 & 0 \end{bmatrix}$	$B^4 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 1.894 \end{bmatrix}$
서브시스템 5 : $\ell=1.2[m]$ , $m=0.2[kg]$ 인 경우	
$A^5 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1.953 & -19.815 & 0 \\ 0 & -7.352 & -12.384 & 0 \end{bmatrix}$	$B^5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.288 \\ 1.43 \end{bmatrix}$
서브시스템 6 : $\ell=1.2[m]$ , $m=0.6[kg]$ 인 경우	
$A^6 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -5.174 & -17.492 & 0 \\ 0 & -9.365 & -10.932 & 0 \end{bmatrix}$	$B^6 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 2.02 \\ 1.262 \end{bmatrix}$

3.2 퍼지규칙의 추론

식 (10)에서 입력으로  $\ell$  과  $m$ 이 주어지면,  $i$ 번째 규칙의 전건부 적합도는 식 (5)와 같이 되어 전체 규칙의 추론결과는 다음과 같이 계산된다.

$$\dot{\mathbf{x}} = \frac{\sum_{i=1}^r \rho^i \{A^i \mathbf{x} + B^i u\}}{\sum_{i=1}^r \rho^i} \quad (11)$$

$$= \sum_{i=1}^r \xi^i \{A^i \mathbf{x} + B^i u\}, \text{ for } i = 1, 2, \dots, 6 \quad (12)$$

여기서  $\xi^i$ 는 식 (7)과 동일하다.

3.3 RCGA를 이용한 소속함수의 최적 조정

일단 컨테이너 크레인의 비선형시스템이 식 (10)과 같은 T-S 퍼지모델로 표현되면 퍼지모델의 동특성과 비선형시스템의 동특성이 가까워지도록 전건부 입력변수들의 공간을 퍼지분할 하고, 퍼지 소속함수의 파라미터를 적절히 조정해야하는데 본 논문에서는 RCGA(진, 2000, 진2002)를 이용해 최적으로 조정한다.

퍼지 분할에 이용되는 퍼지집합으로 호이스트용 와이어로프 길이  $\ell$ 에 대해서는 식 (13)으로 정의되는 사다리꼴 형태의 “외부(Exterior)” 퍼지집합과 식 (14)와 같은 삼각형 형태의 “내부(Interior)” 퍼지집합으로 구성하고, 컨테이너 질량  $m$ 에 대해서는 식 (13)과 같은 사다리꼴 형태의 소속함수를 사용한다.

$$M_j^i = \begin{cases} \frac{v_i^j - a_{ij}}{b_{ij} - a_{ij}}, & a_{ij} \leq v_i^j \leq b_{ij} \\ 1, & b_{ij} \leq v_i^j \leq c_{ij} \\ \frac{v_i^j - c_{ij}}{d_{ij} - c_{ij}}, & c_{ij} \leq v_i^j \leq d_{ij} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$M_j^i = \begin{cases} \frac{z_i^j - o_{ij}}{p_{ij} - o_{ij}}, & o_{ij} \leq z_i^j \leq p_{ij} \\ \frac{q_{ij} - z_i^j}{q_{ij} - p_{ij}}, & p_{ij} \leq z_i^j \leq q_{ij} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

여기서  $\{a, b, c, d\}$ 는 사다리꼴 소속함수의 각 모서리 위치를 의미하고,  $\{o, p, q\}$ 는 삼각형 소속함수의 왼쪽 모서리, 중심, 오른쪽 모서리 위치를 나타낸다.

사다리꼴 소속함수를 가지는 전건부 퍼지집합은  $M_j^i = \{(i,j) | (1,1), (1,2), (2,1), (2,2), (3,2), (4,2), (5,1), (5,2), (6,1), (6,2)\}$  이고, 삼각형 소속함수를 가지는 전건부 퍼지집합은  $M_j^i = \{(i,j) | (3,1), (4,1)\}$ 이다. 한편, 전건부 퍼지집합의 파라미터 중에 조정되는 파라미터는  $a_{ij}, b_{ij}, c_{ij}, d_{ij}$ 와  $o_{ij}, q_{ij}$ 가 된다.

이와 같이 퍼지모델의 소속함수를 최적으로 조정하는 비선형 최적화 문제를 해결하기 위해 적응 메커니즘으로 RCGA를 적용한 모델조정기법을 사용하며, 이 과정을 통해 퍼지모델과 비선형시스템의 동특성이 서로 가까워지도록 퍼지 소속함수가 조정된다. 따라서  $\ell$  과  $m$ 을 설계변수로 선정하여 구현되고, 소속함수가 조정된 퍼지모델은 파라미터가 변화하여도 비선형시스템의 동특성을 효과적으로 표현할 수 있다. Fig. 2는 지금까지 설명한 퍼지 모델링 기법을 나타낸다.

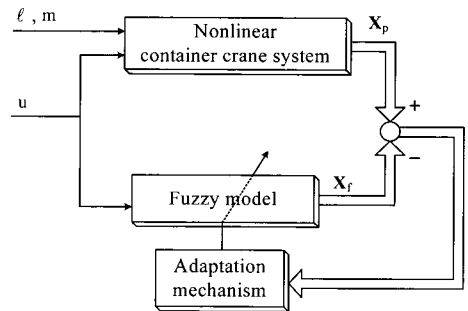


Fig. 2 Schematic diagram for fuzzy modeling of the container crane

RCGA는 집단이 진화해 가는 동안 개체간의 우열을 가리기 위한 적합도 함수를 사용하며 적합도 함수는 다음의 목적함수로부터 계산된다. 특히 목적함수는 온라인 추정치를 얻기 위하여 식 (15)와 같이 유한시간 동안만 계산된다.

$$J(\phi) = \int_{(k-W+1)T}^{kT} \|x_p - x_f\| dt \quad (15)$$

여기서  $x_p$ 와  $x_f$ 는 각각 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델의 상태,  $\|\cdot\|$ 는 놈(norm)연산자이고,  $W$ 는 데이터 윈도우의 크기로서 퍼지모델의 정확도와 계산시간 사이에서 적절하게 타협되는 상수이다.

한편, RCGA는 실수코딩을 채용하기 때문에 탐색하는 파라미터와 염색체의 유전자가 일대일로 대응되므로 염색체는 Fig. 3과 같이 소속함수의 모서리 값을 의미하는 10개로 구성된다.

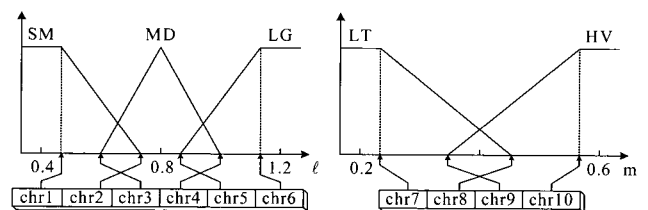


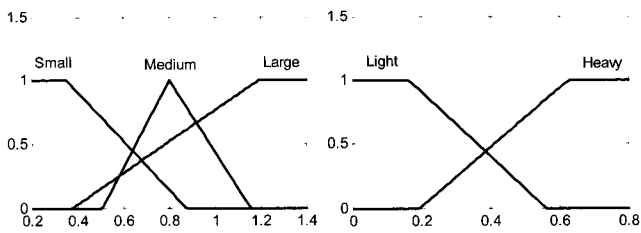
Fig. 3 The expression of chromosome

### 4. 시뮬레이션

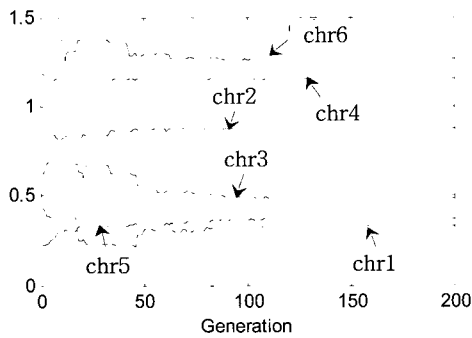
#### 4.1 소속함수의 최적 조정

퍼지모델의 소속함수는 앞에서 설명한 바와 같이 컨테이너 크레인 비선형시스템의 동특성에 접근하도록 RCGA 기반의 모델조정기법을 이용해 최적화 된다. 이때 RCGA의 제어변수는 집단의 크기  $N=30$ , 재생산계수  $n_r=1.8$ , 교배확률  $P_c=0.9$ , 돌연변이 확률  $P_m=0.2$ 를 사용하였다. 데이터 윈도우  $W=4000$ , 샘플링 주기  $T=0.01$ 로 선정하고, 입력은 임의의 신호인  $u=3.02\sin(0.5t) + 2.05\sin(0.3t) + 1.5\sin(1.0t)$ 를 사용하였다.

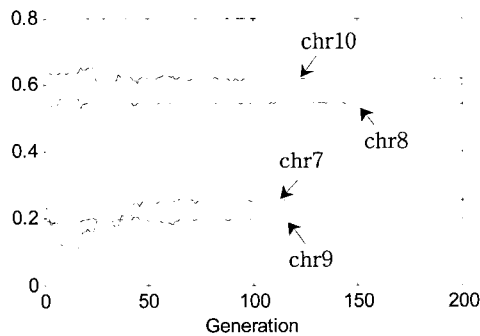
Fig. 4는 최종적으로 조정된 소속함수를 나타내며, Fig. 5는 RCGA가 소속함수 파라미터를 탐색하는 과정이다.



(a) Premise variables :  $l$  (b) Premise variables :  $m$   
Fig. 4 Membership functions after tuning with RCGA



(a) Premise variables :  $l$



(b) Premise variables :  $m$

Fig. 5 Searching process of membership functions

Table 3 Chromosome values for the membership function

	chr1	chr2	chr3	chr4	chr5	chr6
$l$	0.331	0.873	0.485	1.158	0.367	1.267
	chr7	chr8	chr9	chr10		
$m$	0.253	0.543	0.195	0.616		

#### 4.2 T-S 퍼지모델의 검증

RCGA에 의해 소속함수가 조정된 퍼지모델이 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 얼마나 잘 표현하는지를 알아본다. 실제 컨테이너 크레인의 운전 환경은 한 사이클 내에서는 컨테이너 질량이 고정되지만 여기서는 파라미터 변화에 대한 퍼지모델의 강인성을 확인하기 위해 컨테이너의 질량도 한 사이클 내에서 변화하는 것으로 가정한다.

먼저  $l$  과  $m$ 이 Fig. 6과 같이 앞에서 가정한 변화폭 내에서 변화하는 상황에서 계단상의 입력을 인가한 경우이다.

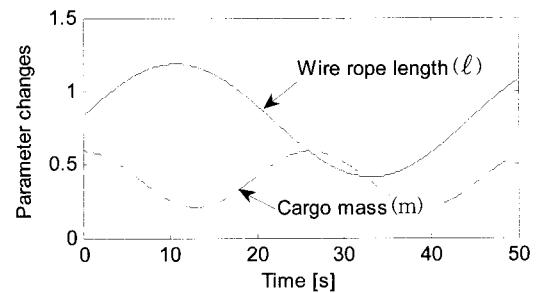
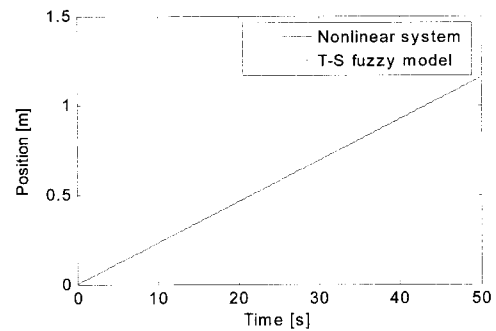
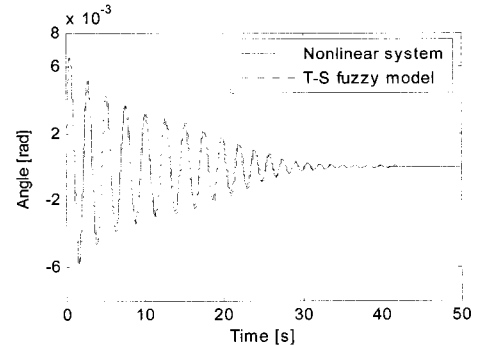


Fig. 6 Change of parameters :  $l$  and  $m$



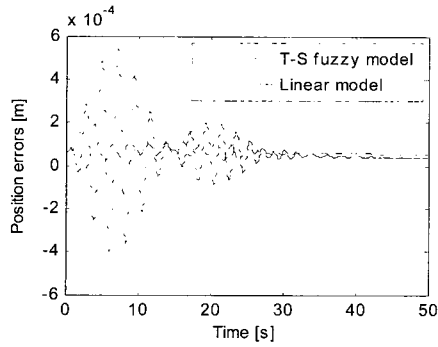
(a) Trolley position



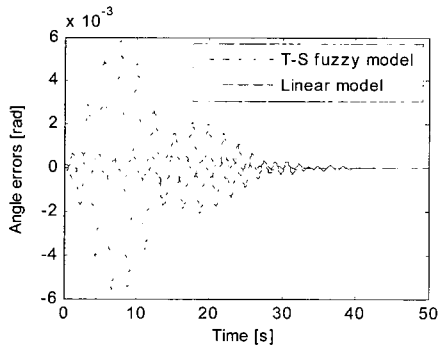
(b) Swing angle

Fig. 7 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for container crane

Table 3은 RCGA에 의해 탐색된 소속함수의 파라미터 값을 나타낸다.

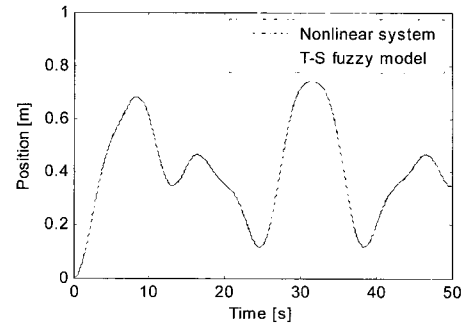


(a) Errors of trolley position

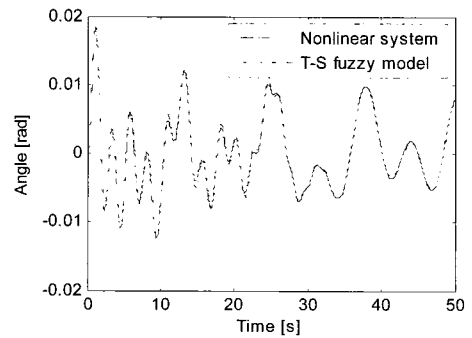


(b) Errors of swing angle

Fig. 8 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system



(a) Trolley position



(b) Swing angle

Fig. 10 Outputs of the nonlinear system and fuzzy model for container crane

Fig. 7은 퍼지모델의 출력과 컨테이너 크레인의 비선형시스템 출력을 동시에 나타낸 것이다. RCGA를 이용해 최적으로 조정된 소속함수를 가지는 T-S 퍼지모델은 컨테이너 크레인 비선형시스템의 동특성에 잘 근접함을 확인할 수 있다.

여기서는 편의상 네 가지 상태 중에서 트롤리 위치와 컨테이너의 흔들림 각도만을 나타내었다.

Fig. 8은 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델, 그리고 비선형시스템과 네 번째 서브시스템( $\ell=0.8, m=0.6$ ) 사이의 오차를 나타낸 것이다. 이 네 번째 서브시스템은 파라미터 변화 폭의 중간에 상응하는 모델이므로 다른 서브시스템에서는 이보다 더욱 큰 오차가 발생한다. 따라서 선형모델(서브시스템)은 파라미터가 변화하는 실제 환경에서는 적용하기 어려운 모델이라는 것을 확인할 수 있다.

다음은 계단상의 입력신호가 아닌 Fig. 9와 같은 임의의 사인파 조합신호를 입력신호로 인가한 경우이다. 이때,  $\ell$  과  $m$  의 변화는 Fig. 6과 동일하다.

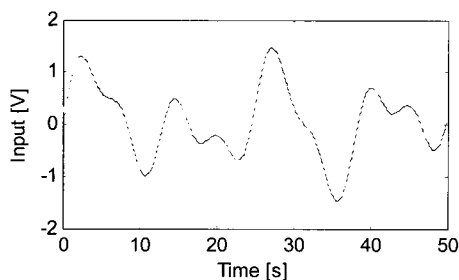
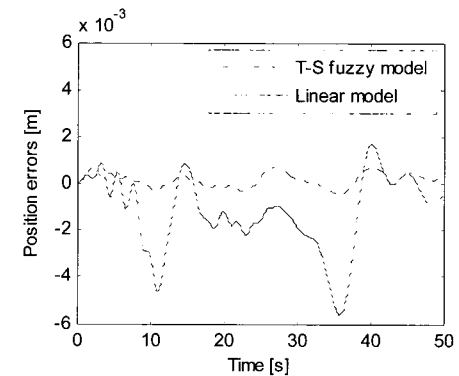
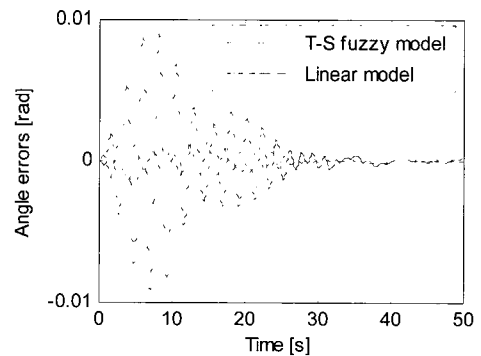


Fig. 9 Test input signal for validation of T-S fuzzy model



(a) Errors of trolley position



(b) Errors of swing angle

Fig. 11 Errors of fuzzy model and linear model to nonlinear system

이 경우에도 T-S 퍼지모델은 컨테이너 크레인의 비선형시스템 출력에 잘 접근하고 있음을 Fig. 10을 통해 확인할 수 있다.

특히 T-S 퍼지모델은 임의의 입력신호로 인해 초기에 발생하는 컨테이너의 급격한 흔들림도 아주 작은 오차범위에서 비선형시스템에 잘 접근하고 있다.

Fig. 11은 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 퍼지모델 그리고 비선형시스템과 네 번째 서브시스템 사이의 오차를 나타낸 것으로 역시 선형모델은 컨테이너 크레인의 비선형시스템과 많은 차이를 보인다.

지금까지의 시뮬레이션을 통해 T-S 퍼지모델은 파라미터가 변화하는 상황에서도 컨테이너 크레인의 비선형시스템을 효과적으로 표현하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 컨테이너 크레인의 주요 파라미터인 호이스 트용 와이어로프와 컨테이너 질량이 변화하는 환경에도 시스템의 동특성을 효과적으로 표현할 수 있는 T-S 퍼지 모델을 RCGA 기법을 사용하여 구현하였다. T-S 퍼지모델은 파라미터 변화에 따른 몇 개의 선형모델을 퍼지결합함으로써 구현하였으며, 퍼지모델의 소속함수를 최적으로 조정하기 위해 RCGA가 결합된 모델조정기법을 적용하였다.

구현한 퍼지모델은 파라미터가 변화하는 환경 하에서 비선형 컨테이너 크레인 시스템의 동특성에 잘 접근하는 것을 확인하였다. 향후에는 본 논문에서 구현한 퍼지모델을 이용한 제어기 설계가 이루어져야 할 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 손정기, 최재준, 소명욱, 남택근, 권순재(2002), "LQ 제어 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 제어기 설계", 한국박용기관학회지, Vol. 26, No. 5, pp. 544-553.
- [2] 이윤형, 유희한, 조권희, 소명욱(2007), "RCGA 기법을 이용한 컨테이너 크레인의 최적 상태 피드백 제어", 한국항해항만학회지, Vol. 31, No. 3, pp. 247-252.
- [3] 진강규, 주상래(2000), "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 6, No. 4, pp. 268-275.
- [4] 진강규(2004), 유전알고리즘과 그 응용, 교우사.
- [5] 相良愼, 大川不二夫(1990), "クレーンの最適制御", 日本機械學會論文集(C編), No. 56, pp. 1443-1447.
- [6] Mamdani, E. H. (1974), "Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant", IEE Proc. Control and Science, Vol. 121, No. 12, pp. 1585-1588.
- [7] Ridout, A. J.(1987), "New Feedback Control System for Overhead Cranes", Electric Energy Conference, Adelaide, pp. 135-140.
- [8] Sagara, S. and Ohkawa, F.(1990), "Adaptive Control for Cranes", 日本機械學會論文集(C編), No. 89, pp. 150-154.
- [9] 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 : 2007년 8월 9일

원고채택일 : 2007년 10월 31일