

# 천정 크레인의 진동 저감을 위한 퍼지제어기 및 제어기 개발용 시뮬레이터 설계에 관한 연구

## A Study on Design of A Fuzzy Controller and A Simulator for Development of Controller for Reducing Vibration in Overhead Crane

정경채, 홍진철, 배진호, 이달해, 이석규, 이해영  
(Kyung-Chae Jeong, Jin-Cheol Hong, Jin-Ho Bae, Dal-Hae Lee, Suck-Gyu Lee, Hai-Young Lee)

**Abstract** : In this paper, a simulator is designed along with S/W package for crane controllers. Due to trolley's acceleration or deceleration, cranes inherently cause swing motion of the objects in transporting heavy objects. This swing not only deteriorates the crane handling safety but also increases the processing time. To overcome these drawbacks, the fuzzy rule-based simulator is developed with inhibitory swing at final action. The computer simulation shows that the swing at initial and final positions is removed fast with small position error. The proposed simulator can be used for handling object stably and the study of effectiveness in unmanned operation of cranes.

**Keywords**: anti-swing control, crane simulator, fuzzy controller, fuzzy rule, fuzzy variables

### I. 서론

제철 공장 등에서와 같이 무거운 물체를 크레인을 사용하여 물체를 이송시키는 경우 가장 크게 대두되는 문제점은 와이어 로프에 의한 물체의 진동현상 때문에 크레인을 원하는 목표에 정위치시키기 어렵고, 정위치부근에서도 진동현상 때문에 물체를 내려놓거나 다른 물체를 집어 올리는 등의 작업에 어려움이 많다는 것이다. 이로 인하여 이송 화물을 정확한 위치에 내려놓는데 시간이 걸리게 되어 하역 작업의 지체가 빈번히 발생하게 되어 경제적인 손실을 야기하게 된다. 뿐만아니라 너무 큰 진동이 발생할 경우에는 이송 화물이 전도되는 사고의 위험도 따르게 된다.

Y.Sakawa와 Y.Shindo[1]는 콘테이너 크레인의 운동을 총 5가지로 나누고, 각 운동구간에서의 경계조건과 성능지수를 만족하며 이송시간과 흔들림 각을 최소화하는 수학적 최적제어 알고리즘을 제안하였으나, 이러한 알고리즘의 수립성 여부는 증명하지 못하였다. 이외에도 크레인이 가지고 있는 여러가지 문제점을 해결하기 위한 논문이 다수 발표되었다.[2-6]

최근에는 유연성(flexibility)과 강인성을 확보하고 있는 퍼지 추론을 이용한 방법이 많이 사용되고 있다[7-8]. 이러한 방식은 시스템의 정확한 지배방정식을 유도할 필요가 없다는 것과, 실제 운전자의 경험을 반영한다는 장점을 가지고 있다. 그러나 여러가지 원인에 의해 발생된 진동을 일정한 이송패턴(가속, 등속, 감속)에 의해 진동을 억제하게 됨으로 강풍등과 같은 외란에 의한 진동의 억제는 느리게 대처한다는 단점이 있으므로 외란이 들어오는 즉시 진동을 억제할 수 있는 알고리즘이 필요하다. 또한 기존의 논문에서는 구해진 퍼지룰을 시스템에 바로 적용하는 방법을 택하고 있으므로 만약의 상황(퍼지룰이 실제 시스템과 맞지 않을 경우 등)에 사고를 유발할 수도 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 해결하기 위해서 크레인 모델에 퍼지이론을 도입하여 퍼지 변수를 모든구간에서 4개의 변수(거리오차와 속도 그리고 진동각과 각속도)를 적용하여 외란에 즉각 대응 할 수 있고, 화물의 진동이 최소가되며, 빠르고, 안정한 퍼지 규칙을 만든다. 이와같은 퍼지규칙을 효과적으로 찾기 위해 실시간 모의실험이 가능한

Simulator를 만들어 실제 Crane 운전 이전에 컴퓨터 화면상에서 운반물체의 무게, 로프길이, 이동거리등과 같은 Parameter에 따른 적절한 Fuzzy 규칙을 찾고 현장에 투입시켜 안정하고 정밀한 제어가 이루어지도록 한다. 이 Simulator는 PC 386이상에서 동작하며, 사용된 언어는 Watcom c이다. 또한 GUI(Graphic User Interface)개념에 근거를 둔 메뉴 구동 시스템으로 개발 되었다.

### II. 대상 크레인의 모델링

#### 1. 크레인의 수학적 모델링

본 논문에서 다루고자하는 크레인의 구조는 그림 1에 보여진 것과 같은 천정크레인으로 지표면보다 높게 설치한 레도를 왕복 주행하는 트롤리에 운반물체가 매달려져 있다. 제어입력이 크레인에 작용할 때 시스템의 수학적 모델을 구하면 다음과 같다. 운반되는 물체의 무게중심 (x, y) 좌표를 (x<sub>G</sub>, y<sub>G</sub>) 라고 하자. 그러면 x<sub>G</sub>와 y<sub>G</sub>는 다음과같이 표현될 수 있다.

$$x_G \cong x - l \sin \theta \tag{1}$$

$$y_G \cong - l \cos \theta \tag{2}$$

x방향의 운동에 대하여 Newton의 제2법칙을 적용하면

$$M \frac{d^2x}{dt^2} + m \frac{d^2x_G}{dt^2} = f \tag{3}$$

또는

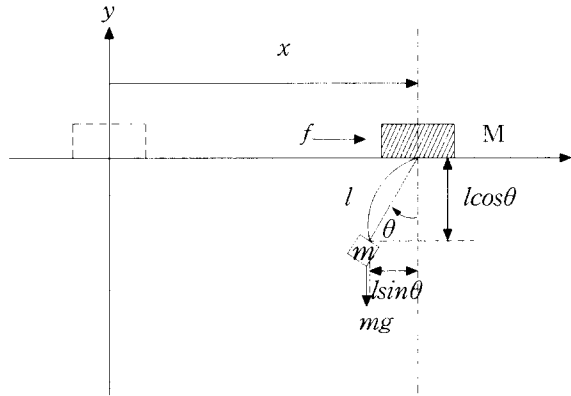
$$M \frac{d^2x}{dt^2} + m \frac{d^2}{dt^2} (x - l \sin \theta) = f \tag{4}$$

이다. 또한 이 식은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$(M + m)\ddot{x} + ml(\sin \theta)\ddot{\theta}^2 - ml(\cos \theta)\ddot{\theta} = f \tag{5}$$

y방향에서 질량 m의 운동방정식은 x방향의 운동을 고려하지 않고는 구할 수 없다. 그러므로 y방향에서 질량 m의 운동을 고려하는 대신 트롤리 중심점에서 질량 m의 회전운동을 고려한다. Newton의 제2법칙을 회전운동에 적용하면

$$m \frac{d^2x_G}{dt^2} l \cos \theta - m \frac{d^2y_G}{dt^2} l \sin \theta = mgl \sin \theta \tag{6}$$



$x$  : 목표점까지의 거리     $f$  : 트롤리의 구동력  
 $M$  : 트롤리의 질량         $m$  : 화물의 질량  
 $l$  : 와이어 로프의 길이     $\theta$  : 화물의 진동각

그림 1 대상 크레인의 구조.  
 Fig. 1. A mechanical structure of the target crane.

또는

$$\left[ m \frac{d^2}{dt^2} (x - l \sin \theta) \right] l \cos \theta - \left[ m \frac{d^2}{dt^2} (-l \cos \theta) \right] l \sin \theta = mgl \sin \theta \quad (7)$$

이다. 또한 이 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$m \left[ \ddot{x} + l (\sin \theta) \ddot{\theta}^2 - l (\cos \theta) \ddot{\theta} \right] l \cos \theta + m \left[ + l (\cos \theta) \ddot{\theta}^2 + l (\sin \theta) \ddot{\theta} \right] l \sin \theta = mgl \sin \theta \quad (8)$$

이 식을 단순화하면 다음과 같다.

$$m \ddot{x} \cos \theta = mgsin \theta + ml \ddot{\theta} \quad (9)$$

위(5)와 (9)는 대상 크레인의 로프길이 변화가 없는 상태에서의 수학적 모델을 나타낸다.

### III. 제어 Algorithm의 설계

#### 1. 제어 문제

II장에서 다룬 크레인 시스템의 각운동은 트롤리에 가해지는 힘( $f$ )을 입력으로 하고, 진동각도( $\theta$ )를 출력으로 하는 비감쇠 2차계임을 알 수 있다. 이와 같은 계는 고하중의 이송시 트롤리의 가속도에 의해 필연적으로 진동을 동반하며, 또한 강풍등과 같은 외란의 영향에 의해 진동이 생길 수도 있다. 제어 목표는 초기위치에서 지정된 목표위치로 이동시키는 것이다. 다시 말해서 원하는 위치까지 가능한 빠른 시간에, 그리고 진동없이 화물을 이송시키고자 한다. 본 논문에서 설계하고자 하는 제어기의 사양은 목표점 정지오차가 60mm 이내로 하고, 허용 잔류진동이 0.5° 이내로 한다.

#### 2. 로프의 궤적 계획

그림2에 나타난 바와 같이 출발시에는 운반 물체의 진동을 줄이기 위하여 로프를 적당히 감아 올린후 sec-1구간에서는 로프를 감아올리면서 트롤리를 가속 시킨다. 또한 sec 2구간에서는 로프길이를 고정후 트롤리를 이동 시키며, sec 3구간에서는 가속과 진동 및 위치를 제어하는 구간으로 트롤리가 목표지점에 정확히 그리고 빠르게 도달하게 하기 위하여 트롤리의 이동과 동시에 로프를 어느정도 감아내린다. 마지막으로 목표사양 이내로 도달하게 되면 원하는 위치까지 로프를 내려서 운반 물체를 내려 놓는다.

#### 3. 전체 시스템의 구성도

일반적으로 크레인을 한 지점에서 목표 위치까지 이송시킬 때는 정해진 속도계획에 따라서 이송을 시킨다. 다시말해서 숙련 운전자는 오랫동안의 운전경험을 통해 터득한 기

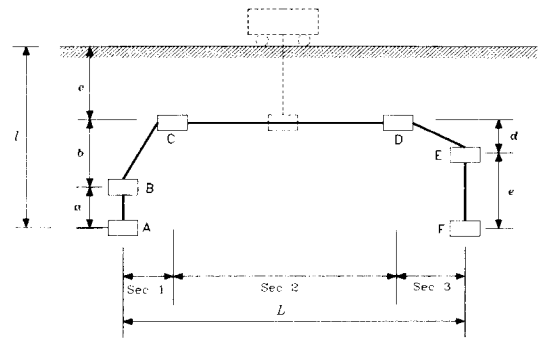


그림 2. 로프 길이 제어 패턴.  
 Fig. 2. Control pattern of the rope length.

술을 사용하여 정해진 패턴에 따라 운반물의 진동을 억제하면서 원하는 위치로 정확하게 이송을 시킨다. 따라서 본 논문에서는 크레인 시스템으로부터 목표점 까지의 거리와 화물의 진동각을 감지하여 전문가의 제어 경험지식에 바탕을 둔 퍼지알고리즘을 통하여 진동을 제거한다. 그러므로 모의 실험을 위한 시스템 구성은 그림 3에서와 같이 퍼지추론을 통하여 물체 이송에 필요한 트롤리의 구동력을 계산해 내는 제어기 부분과 실제의 크레인 시스템의 모델부분으로 구성되어 있다.

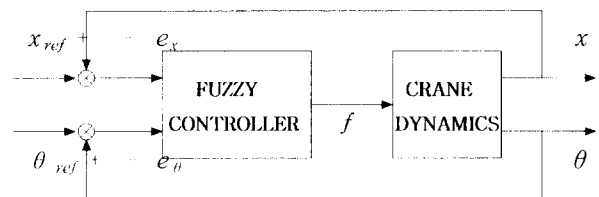


그림 3. 전체 시스템의 블럭도.  
 Fig. 3. Block diagram of overall system.

#### 4. 크레인의 퍼지 제어기 설계

본 논문에서 주 목표는 크레인이 움직임에 따라 물체의 진동각도는 변화하는데 크레인의 속도를 제어함으로써 진동각도를 작게 유지하면서 목표위치까지 최대한 빨리 이동시키고자 하는 것이다. 크레인의 진동은 크레인의 가속도에 의해서 영향을 받기 때문에 첫째 진동각과 트롤리의 속도와의 관계 둘째 현재의 위치와 트롤리의 속도와의 관계를 고려 하여, 퍼지제어기에 사용될 언어변수들은 조건부에 거리 오차와 그 미분 ( $e_x, \dot{e}_x$ )값과 진동 각과 각속도 ( $\theta, \dot{\theta}$ )로 잡았으며, 결론부에 트롤리의 구동력( $f$ )으로 잡았다. Term set의 각 요소에 대한 소속도 함수의 모양은 대개 삼각형 함수만으로도 원하는 응답특성을 얻을 수 있으므로 삼각형 함수를 선택하였다

언어변수의 Term set은 모두 동일하며 다음과 같다.

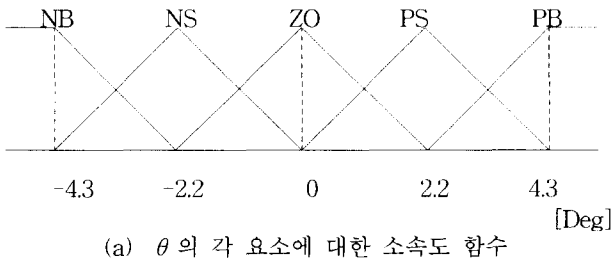
$$\text{Term set} = \{ \text{NB, NS, ZO, PS, PB} \}$$

여기서 Term set원소들의 각각의 의미는 다음과 같다. 즉 NB는 Negative Big, NS는 Negative Small, ZO는 Zero, PS는 Positive Small, PB는 Positive Big이다. 각 언어 변수에 대한 Term set의 각 요소의 소속도 함수는 그림 4에서 그림 6에 보여져 있다. 먼저 그림 4는 목표위치의 거리 오차와 오차의 미분에 대한 소속도 함수를 나타내고, 그림 5는 진동각과 진동 각속도에 대한 소속도 함수를 보여주며 그림 6은 출력으로서 모터의 구동력에 대한 소속도 함수를 보여준다. 위와같은 소속도 함수들의 값은 여러가지 경우에 대한 시뮬레이션과 기술적 상식을 통하여 본 논문의 연구목적에 적합한 값으로 선택하였다. 마지막으로 트롤리에 가해지는 구동력을 계산하기 위한 Fuzzy 규칙은 위에서 언

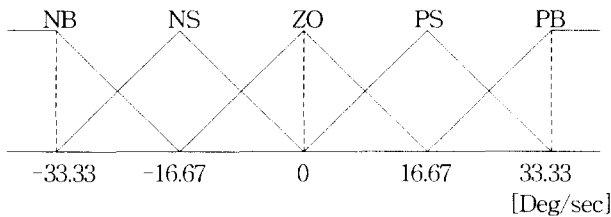


THEN f is PS

이것이 의미하는 것은 목표 위치와의 오차가 NB이고 그 미분값(속도)이 NB이고 진동각이 ZO이고 그 미분값(각속도)이 ZO이면 트롤리에 가해지는 구동력은 PS로 하라는 것이다. 조건부에 4개의 변수를 동시에 비교하였기 때문에 2개의 변수( $e_x$ 와  $e_x'$  또는  $\theta$ 와  $\dot{\theta}$ )를 비교하였을 때보다 초기진동이 많이 줄어 들었다.



(a)  $\theta$ 의 각 요소에 대한 소속도 함수



(b)  $\dot{\theta}$ 의 각 요소에 대한 소속도 함수

그림 5.  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ 의 각 요소에 대한 소속도 함수.  
Fig. 5. Membership function of each element for  $\theta$ ,  $\dot{\theta}$ .

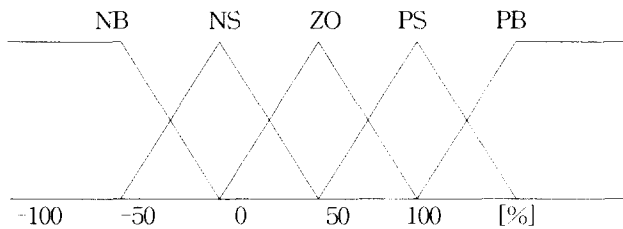


그림 6. f의 소속도 함수.  
Fig. 6. Membership function of element for f.

이렇게 얻은 Fuzzy규칙은 눈에 보이는 구체적인 사항을 통하여 무엇을 하면 좋겠는가하는 알고리즘으로 이루어져 있기 때문에 퍼지제어기의 능력을 개선하기가 쉽고, 여러개의 제어규칙들의 집합으로 구성되어 있기 때문에 섬세한 제어가 가능하게 된다. 표1과 같은 Fuzzy 규칙들과 소속도 함수들로부터 주어진 상태에서 새로운 설정값을 계산하기 위한 Fuzzy 추론 방법으로는 잘 알려져 있는 Mamdani의 Min-Max-Gravity방법[9]을 사용하였다.

**IV. 시뮬레이터**

본 시뮬레이터는 실제 크레인이 산업현장에서 발생할 수 있는 다양한 문제(진동억제, 강풍등과 같은 외란, 로프길이 제어등)들에 대한 해결능력을 가지도록 설계하였다. 또한 시시각각의 각종Data(거리, 속도, 각도, 각속도, 로프길이, 입력)의값을 Graph로 동시에 나타나게 하였으며, 각종Data의 수치정보를 한눈에 알아볼 수 있게 하였다. 그리고 System Parameter, Fuzzy rule, 로프길이들을 변경 및 저장도 할 수 있도록 하여 목표사양에 적합한 rule을 만드는데 도움을 주도록 설계하였다. 뿐만아니라 시각적인 효과를 높이기 위하여 여러가지 색깔로 graphic기능을 강화하였다. 시뮬레이터의 기능을 살펴보면 다음과 같다.

**1. Anti Swing Test Window**

그림 7과 같이 시뮬레이터의 main window로써 File, Window, Config, Help의 기능이 있으며 시뮬레이션 기능으로 Start, Continue, Stop기능이 있다.

**1.1. 주Window의 기능**

File : Fuzzy rule에 대한 저장 및 재저장 기능이 있으며 모든 simulator의 기능에서 빠져나오는 Exit가 있다.

Window : 각각의 Window를 display시킬수 있는 기능이 있다.

Config : Parameter정보에 관한 부분과 Rope의 길이 및 감아올리기 속도에 관한 부분으로 크게 나누어지며 그 기능으로 Rope길이 및 속도 조정 그리고 Parameter값 변경과 display및 저장 및 재저장 기능이 있다.

**1.2. Test 기능**

화면상의 크레인 모형에 대한 시뮬레이션을 할 수 있도록 start, continue, stop시키는 역할을 하며, 그 운동에 따라 크레인이 움직인다.

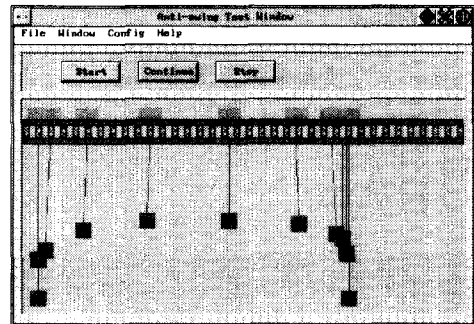


그림 7. 진동방지 테스트 윈도우.  
Fig. 7. anti Swing Test Window.

**2. Rule window**

그림 8과 같으며 Fuzzy rule을 한눈에 파악할수 있게 하였고 또한 Fuzzy rule를 Rule Change Dialog에서 변화시킬 수 있게 하였으며 최적의 rule이 선정되면 저장할수 있는 기능을 삽입하였다. 뿐만아니라, NB:고동색 NS:분홍색 ZO:노랑색 PS:녹색 PB:청색등으로 나타내게 하여 보다 선명하게 알 수있게 하였다.

**2.1. Fuzzy rule 변경**

mouse를 이용하여 Rule window상에서 변경하고자 하는 룰을 선택하면 Rule Change Dialog가 나타나게 되어, 여기서 변경할 Rule을 선정하게 된다.

**2.2. Fuzzy rule 저장**

Anti-Swing Test Window에서 file을 누르면 New, Open, Save, Save as, Exit가 나타나게 되는데 이때 Save를 누르면 변경된 rule이 저장된다.

**3. System Parameter Window**

그림 9와 같으며 중력가속도(G), 마찰계수(B), 트롤리 무게(M), 이동 거리(L), 운반 물체의 무게(m), 로프길이(l), 샘플링 Time(h)등과 같은 Parameter값을 변경할 수 있으며 저장 및 display기능을 갖고 있다.

**4. Rope Configuration Window**

그림10과 같으며 출발점 및 목표지점 그리고 이동시 로프길이를 설정 할 수 있으며 감아올리기 및 감아내리기 속도를 설정 할 수있다

**V. 시뮬레이션**

IV장에서 설명한 Simulator의 기능을 보이기 위하여 본 장에서는 시뮬레이션을 하고 그 결과에 대해 설명하고자 한다.

시뮬레이션 조건은 목표점 정지오차 60mm이내, 허용 잔류진동이 0.5° 이내로하였다. Parameter의 값은 System마다

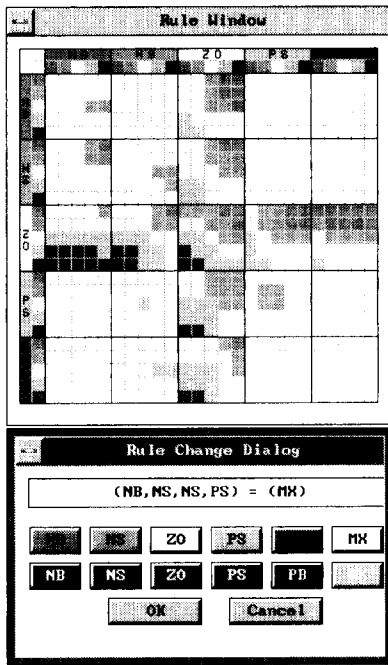


그림 8. 룰 윈도우.  
Fig. 8. Rule Window.

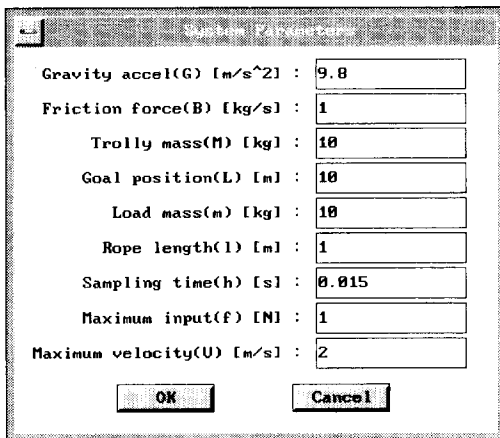


그림 9. 시스템 파라미터 윈도우.  
Fig. 9. System Parameter Window.

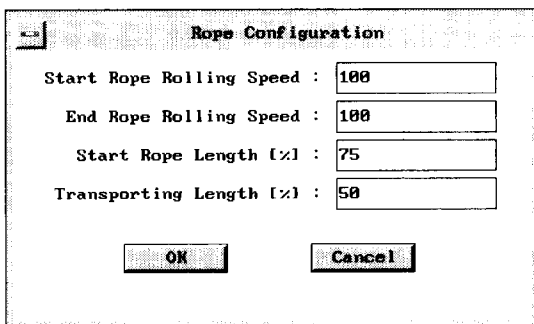


그림 10. 로프에 관한 윈도우.  
Fig. 10. Window for Rope.

각기 다르다. 따라서 최적의 Fuzzy rule도 달라진다. 본 실험의 목표는 이송시간을 최대한 단축하고, 운반물의 진동을 최대한 억제하는 것이며, 결정된 Parameter의 값에 따라 최적의 Fuzzy rule을 구할 수 있었으며, 그 결과는 양호함을

알 수 있다. 또한 현장 운전 이전에 최적의 Fuzzy rule을 찾음으로서 공정의 안정성 및 생산성을 높일 수 있을 것이다. 그림 9는 모의실험에 사용된 파라미터의 값을 나타내었고, 그림 8은 최적의 Fuzzy 규칙을 보여주며, 그림 11은 시간대 거리에 관한 곡선이다. 그림 12는 시간대 각도에 관한 곡선으로 출발시 최대로 흔들린 각도는 2.3° 정도 였으며, 정지시 최대로 흔들린 각도는 3.7° 정도가됨을 보여 준다. 또한 제어기의 사양인 목표점 정지오차 60mm이내, 허용 잔류진동이 0.5° 이내로 되는데 걸리는 시간은 14.6초정도이다. 참고로 본 논문에서 제시한 제어방법에 의하면 이송거리를 크게하여도 속도패턴은 일정하게 삼각형모양으로 유지된다.

VI. 결론

산업현장에서 실제로 크레인을 운전할 때 생기는 잔류진동은 여러 가지의 지연인자나 기계의 마찰계수 등에 의하여 때로는 증가하기도 하며, 심지어 주어진 패턴에 따른 제어를 행한 경우에도 증가하는 경우도 있다. 이러한 현상으로 인하여 하역작업이 지연되는 경우가 많으며, 너무 큰 진동이 발생할 경우에는 이송화물이 진도되어서 사고의 위험도 따르게 된다. 기존의 크레인에서는 운전자가 자신의 숙련된 경험과 기술을 바탕으로 진동을 적절히 보상하며 운전을 행하고 있다. 이러한 비효율적인 점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 크레인 제어기 개발에 활용할 수 있는

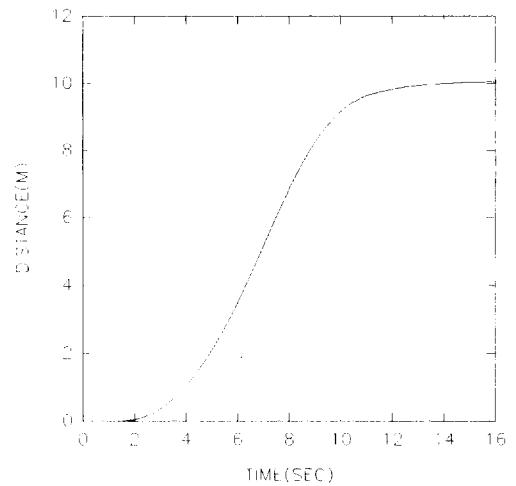


그림 11. 시간 대 거리곡선.  
Fig. 11. Time VS Distance Curve.

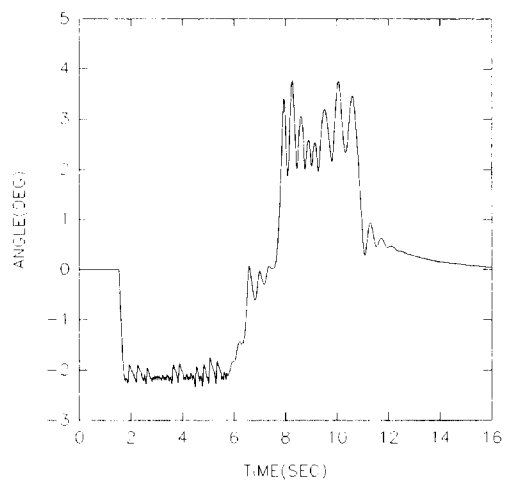


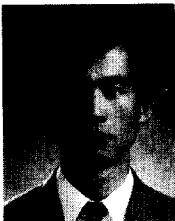
그림 12. 시간 대 각도 곡선.  
Fig. 12. Time VS Angle Curve.

Simulator를 설계 하였고 S/W package를 만들었다. 이것을 이용하여 하나의 주어진 크레인 모델에 적용하여 진동억제 기능을 가진 Fuzzy제어규칙을 설계하였으며 결과를 화면상에서 확인하여 본 결과 계획한 대로 동작함을 볼 수 있었다. 한편 크레인의 모델이 달라지면 그때마다 본 Simulator를 이용하여 해당 크레인의 상황에 적절한 Fuzzy제어기를 용이하게 개발할 수 있다.

**참고문헌**

[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 control of overhead cranes with hoisting of the load", *Automatica*, vol. 23, no. 4, pp. 437-447, 1987.  
 [3] Arto Marttinen, "Pole-Placement control of a pilot

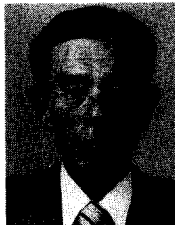
gantry", *ACC'89* pp. 263-269, 1989.  
 [4] Alan. J. Ridot, " Variably damping swing control of the overhead crane", *IECON'89*, pp. 263-269, 1989.  
 [5] 임 태승, "최소 진동을 유지하는 천정 크레인의 위치 제어", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1991.  
 [6] 박 병석, 윤 지섭, 이 재철, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구", '90 *KACC*, vol. 1, pp. 292-297, 1990.  
 [7] 廣田 薫, "ファジィ 活用事例集", 工業調査會 pp. 116-126, 1990.  
 [8] S. Yasunobu, "豫見 Fuzzy 制御方式による コンテナ・クレーン自動運轉", 計測自動制御學會 論文集, vol. 22, no. 10, pp. 1066-1073, 1986.  
 [9] 박 민용, 최 항식, 퍼지 제어 시스템, 대영사, pp. 70-135, 1990.



**정 경 채**  
 1960년 6월 23일생. 1987년 영남대 전기 공학과 졸업, 1992년 동 대학원 졸업(석사), 1994년 동대학원 박사과정 수료, 1979.1 ~ 1994.2 한국전력공사 근무, 1994.3 ~ 현재 경주전문대학 전기과 교수.



**홍 진 철**  
 1970년 10월 19일생. 1994년 영남대 전기 공학과 졸업, 1996년 동 대학원 졸업(석사), 1996년 현재 동 대학원 박사과정 재학중.



**배 진 호**  
 1931년 6월 24일생. 1956년 서울대 전기 공학과 졸업, 1964 ~ 66년 부산대학교 전기공학과 교수, 현재 영남대학교 전기 전자공학부 교수(공박).



**이 달 해**  
 1935년 6월 20일생. 1959년 서울대학교 졸업, 1987년 명지대학교 공학박사, 현재 영남대학교 전기전자공학부 교수.



**이 석 규**  
 1956년 12월 7일생. 1979년 서울대 전기 공학과 졸업, 1981년 동 대학원 졸업(석사), 1990년 UCLA 공학박사, 현재 영남 대학교 전기전자공학부 교수, 주관심분야 : 공장자동화 및 로봇공학.



**이 해 영**  
 1962년 7월 5일생. 1984년 부산대 전기기계공학과 졸업, 1986년 한국과학기술원 전기및 전자과 졸업(석사), 1990년 한국과학기술원 전기및 전자과 졸업(박사), 현재 영남대학교 전기전자공학부 교수, 주관심분야 : 공정제어, 지능제어응용, 전자회로.