

# 퍼지제어기를 이용한 크레인의 진동억제 및 위치제어

## Anti-Swing and Position Control of Crane Using Fuzzy Controller

정승현, 박정일

(Seung-Hyun Jeong and Jung-II Park)

**Abstract** : The roof crane system is used for transporting a variable load to a target position. The goal of crane control system is transporting the load to a goal position as quick as possible without rope oscillation. The crane is generally operated by an expert operator, but recently an automatic control system with high speed and rapid transportation is required. In this paper, we developed a simple fuzzy controller which has been introduced expert's knowledge base for anti-swing and rapid transportation to goal position. In particular, we proposed the synthesis reasoning method which synthesizes on the basis of expert knowledge of the angle control input and position control input which are inferenced parallel and simultaneously. And we confirmed that the performance of the developed controller is effective as a result of applying it to crane simulator and also verified whether the proposed synthesis rules have been applied correctly using clustering algorithm from the measured data.

**Keywords** : crane, anti-swing, fuzzy controller, 2nd fuzzy reasoning, position control

### I. 서론

크레인은 산업현장의 무거운 물체를 이송하는 경우에 쓰인다. 크레인은 다른 운송수단에 비하여 운반물의 유지기구가 간단한데 비하여 큰 중량을 취급할 수 있고, 운반물이 공중에서 이동하므로 운송경로나 운반물을 취급하는 위치의 자유도가 높다. 또한 지상에서는 이동을 위한 통로가 필요 없으므로 운반물거치의 효율이 좋다. 크레인을 이용한 이송 과정은 물건을 들어올리는 동시에 가속을 하고 일정지점까지 등속으로 움직이다가 목표지점의 일정위치 근처에서 감속과 동시에 물건을 내리는 일련의 동작으로 이루어져 있다. 그리고 로프를 이용한 운송방식이기 때문에 운송에 따른 운반물진동의 발생은 피할 수 없으며 원활하고 안전한 운전을 위해서는 숙련이 필요하다. 이 때 발생한 진동은 물건의 추락 및 주변물체와의 충돌을 유발시킬 수 있고 물체 이송시간을 길게 만들며 목표지점에 도달했을 때 잔류진동을 남기게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 크레인의 자동화, 진동억제화의 요구가 높아져 각종의 연구개발이 진행되고 있으며 지금까지 많은 연구결과들이 발표되고 있다[1]-[13]. 실제적으로 산업현장에서 크레인 숙련작업자의 행동을 관측해보면, 인버터를 채용하고 있음에도 불구하고 노치 ON/OFF 조작에 의한 것이 대다수이다. 이것은 연속적인 속도제어를 하는 것이 아니고 수단계의 노치지령에 의하여 모터의 통전을 전환하는 것인데, 숙련 오퍼레이터의 운전조작을 보면 이와 같은 ON/OFF 제어인데도 불구하고 운반물진동 상황에 맞추어 적절한 타이밍에 노치조작을 실행하여 운반물진동을 흡수하면서 원활하게 진동각 및 위치제어를 함께 고려한 작업을 해내고 있다.

크레인을 제어하는 방법으로는 개루프제어, 피드백제어로 나눌 수 있다[1]. 여기서, 개루프제어는 로프의 진동을 최소로 하는 트롤리의 바람직한 속도제어를 미리 입력한 후 실제로 트롤리가 이 속도제어를 따라가도록 하는 것이다.

일반적으로 이 방법은 각도 피드백이 필요없기 때문에 산업용 크레인에 쉽게 적용되어 질 수 있다. 그러나 운행중 로프의 길이가 변하거나 로프의 초기진동이 있을 경우, 그

리고 외란이 인가되었을 경우에 효과적인 제어를 기대하기 어렵다. 반면에 피드백 제어는 진동각 및 트롤리의 속도와 가속도를 실시간으로 피드백시킴으로써 로프의 길이변화, 외부환경 변화 등에 대하여 적절히 대처할 수 있다. 이러한 단순한 피드백 제어와 더불어 퍼지제어기나 복잡한 구조의 피드백 제어기를 이용한 크레인의 진동각 및 위치제어에 관한 연구가 계속되어져 왔다[1]-[13].

지금까지 발표된 크레인 제어와 관련된 국내의 연구결과들을 살펴보면 다음과 같다. 먼저 [2]의 논문에서는 외란이 없는 상태에서 시간 최적제어 이론에서 계산된 속도계획을 구하고 정속도 구간과 목표위치 근처에서는 진동각과 위치가 원하는 위치내에 들어가도록 퍼지제어기를 도입하였는데 이때 작성된 퍼지 규칙은 진동 각속도에 따라 규칙을 작성하였으며, 여기서 사용된 퍼지제어기는 보조수단으로 일부 구간에서만 적용된 것이 특징이다. 그리고 또 퍼지제어기를 도입한 연구결과가 [3]의 논문에서 발표되었는데, 이 논문에서는 로프의 진동각과 운반물의 진동각이 완전히 같지 않고 보고 로프의 진동제어, 운반물의 진동제어, 위치결정을 위한 속도제어의 세 경우에 대해서 퍼지 규칙을 만들고 이들 세곳에서 병렬로 동시에 출력된 제어입력을 우선도 판별기를 통하여 트롤리의 가속도제어 입력이 만들어지고 이 입력은 퍼지제어기가 아닌 일반 고전 피드백 제어기를 통해서 계산된 위치지령과 합쳐져서 트롤리에 인가된다. 이들 세가지의 제어변수간에 간섭이 생기기 때문에 우선도 판별기를 통한 협조제어를 수행하고 있다. 또한 이 논문에서는 유전알고리즘을 이용한 자동학습 기능을 채용해서 전건부 속도 함수가 자동생성에 의해 설정되는 복잡한 구조를 취하고 있다. 또 대부분의 크레인 제어와 관련된 논문들이 1축의 무진동 제어를 수행한 반면 [4]의 논문은 피드백 제어기를 이용하여 2축 좌표계에서 천정 크레인의 2축 무진동 제어를 수행한 것이 특징이다. [5]의 논문은 크레인의 구동 모터와 피구동체간을 연결하고 있는 로프의 탄성까지 고려한 4-질량 크레인 시스템을 특이섭동(singular perturbation) 방법을 이용하여 2-질량 시스템으로 차수를 저차화하여 기존의 진동억제제어 이론을 그대로 적용할 수 있는 방법을 제안하였다. [6]의 논문에서는 작업자가 거리에 제한을 받지 않고 주행중에 있는 트롤리를 임의의 지점에 정지시켰을 때 발생하는 운반물의 진동을 신속히 감쇠시키고 정지위치 오

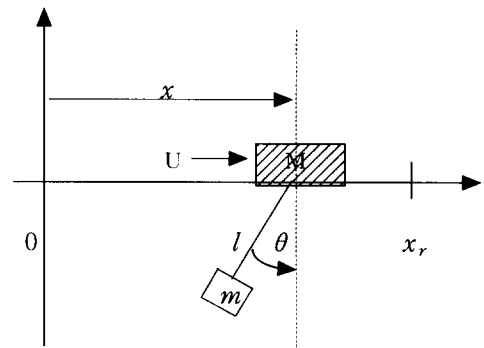
차도 최소로 줄일 수 있는 제어기를 제시하였다. 또한 이 논문에서는 진동각 제어와 정확한 위치제어 사이의 상호 간섭문제를 언급하였는데 이를 해결하기 위해서 진동각 지령을 0으로 고정하는 것이 아니라 위치오차의 비례한 값으로 내보내고 있다. 제어 방식으로는 일반적인 피드백 방식을 이용하였다. [7]의 논문에서는 트롤리의 상단에 비전 센서를 부착하여 트롤리가 목표지점에 도달하게 되었을 때의 저속 구간에서 스프레더의 진동을 센서를 통하여 감지하고 그 흔들리는 정도에 따라 가속도로 제어하는 방식을 제안하였다. [8][9]의 논문에서는 로프의 길이가 변하는 경우에 로프의 길이가 변하지 않는 경우에서의 이상적인 진동각과 실제로 측정되는 진동각 사이의 오차를 피드백 함으로써 트롤리의 속도를 가감속 하도록 하는 방식을 제시하였으며, 아울러 트롤리가 목표위치에 도달했을 때 컨테이너의 진동각이 0으로 되도록 하는 다양한 주행속도 패턴에 대해서 논의하였다. [10]의 논문에서는 빠르고 부드러운 이송을 위한 최적의 속도기준을 만드는 방법을 제시하였는데 특히 운반물과 트롤리가 동시에 움직이는 대각선방향으로의 운동에 대해서 운동에너지와 위치에너지를 기초로 하여 최적 속도 기준 패턴을 계산하였다. [11]의 논문에서는 트롤리의 위치제어와 진동각제어에 대한 제어루프를 병렬로 독립적으로 구성하고 이 상호간의 간섭에 대해서 논의하였는데 위치제어기에서 발생하는 기존의 기준속도 패턴에다 진동각 제어에 의해서 발생한 속도기준의 변화분을 더해서 제어기를 구성하였다. [12]의 논문에서는 트롤리의 위치제어와 진동각의 진동제어를 한꺼번에 고려한 퍼지제어기를 사용하여 현장에 적용하기 전에 사전에 시뮬레이션 해볼 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다. 위치와 진동각에 대한 퍼지제어기의 소속도 함수를 각각 5구간으로 나누었는데 이러한 경우에 진동각 제어에 대해서 25개의 퍼지 규칙들을 만들어야 하고 또 이 규칙의 각각에 대해서 25개의 위치제어 퍼지 규칙들을 적용해야 하므로 전체적으로 625개의 퍼지규칙들이 만들어진다. 물론 이 규칙들을 다 채워야 하는 것은 아니지만 사전에 이 규칙들을 만들어야 하는 것은 엄청난 작업이다. [13]의 논문에서는 목표지점 근처에서 퍼지제어기에 의해서 병렬로 동시에 계산된 진동각제어 입력과 위치제어입력을 합성함에 있어서 그 가중치를 진동각과 진동각속도를 기초로하여 퍼지규칙에 의하여 계산하는 방법을 제시하였다.

이와 같이 여러 논문에서 발표되고 있는 각종 크레인 제어 관련 연구결과들에서 위치제어와 진동각 제어에 대한 상호간섭에 대해서 언급하고 있다[3][6][11][13]. 즉, 목표 위치를 정확히 제어하기 위해서는 진동이 발생하게 되고 진동각을 줄이기 위해서는 목표위치에서 벗어나게 되는 경우가 발생한다. 또 퍼지제어기를 도입하여 제어를 수행하고 있다 [2][3][12][13]. 그래서 본 논문에서는 트롤리의 위치와 로프의 진동각에 대해서 퍼지제어기를 사용하여 각각의 제어입력을 추론한 다음 추론된 제어입력으로부터 새로운 제어입력을 만들어내는 방법을 제시하고자 한다. 이를 위해서 숙련기술자의 제어기법을 모델링하는 방법과 숙련 기술자의 지식기반을 기초로하여 1차 추론된 진동각 제어값 및 위치 제어값을 새로운 퍼지모델을 이용하여 2차의 합성추론을 수행한다. 그리고 이를 이용하여 크레인 시뮬레이터에 실험적으로 적용하여 그 효과를 살펴보고자 한다. 아울러 실험결과를 토대로 2차 퍼지합성 추론의 타당성을 살펴보고 올바르게 규칙이 적용되었는지 clustering 이론[16]을 통하여 살펴본다.

**II. 제어 알고리즘**

본 논문에서 다루고자 하는 크레인의 구조는 그림1과 같

은 구조를 하고 있다.



$x$  ; 트롤리의 현재 위치       $x_r$  ; 트롤리의 목표 위치  
 $M$  ; 트롤리의 질량             $m$  ; 운반물의 질량  
 $l$  ; 로프의 길이                 $\theta$  ; 진동각  
 $U$  ; 트롤리의 속도지령

그림 1. 크레인의 구조.  
 Fig. 1. Structure of crane.

**1. 진동각 제어**

트롤리 로프의 진동각 제어를 위해서 진동각  $\theta$  및 각속도  $\dot{\theta}$  의 소속도 함수를 그림 2처럼 정한다. 각각의 집합들은 제어를 원하는 구간에서 정규화를 시킨다. 이러한 정규화된 소속도 함수를 사용함으로써 임의의 구간에서 쉽게 함수를 적용시킬 수 있다. 그림 2의 삼각형의 소속도함수는 조건부 일차 방정식으로 표현할 수 있다. 한 예로 소속도 함수 NB의 표현은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\text{if } (\theta \text{ or } \dot{\theta} < -1) \\ &\quad \text{NB} = 1 \\ &\text{else if } (-1 \leq \theta \text{ or } \dot{\theta} < -0.5) \\ &\quad \text{NB} = -2 * [\theta \text{ or } \dot{\theta}] - 1 \\ &\text{else } \text{NB} = 0 \end{aligned}$$

퍼지 제어규칙은 다음과 같다.

If  $\theta$  is NB and  $\dot{\theta}$  is NB then U is PB  
 ..  
 If  $\theta$  is ZO and  $\dot{\theta}$  is NM then U is PM  
 If  $\theta$  is ZO and  $\dot{\theta}$  is ZO then U is ZO  
 ..

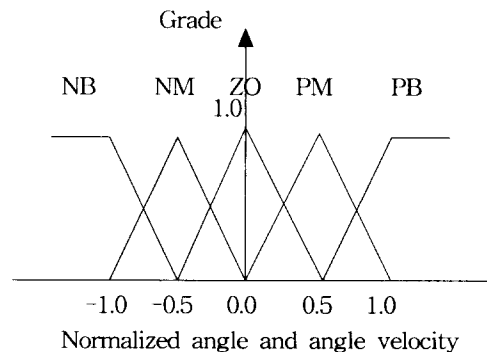


그림 2. 각도와 각가속도에 대한 소속도 함수의 모양.  
 Fig. 2. The shape of membership function for angle and angle velocity.

표 1의 제어규칙표는 일반적으로 쉽게 생각할 수 있는 보편타당한 삼단논법을 도식화한 것이다. 퍼지 규칙표의 대각선으로 ZO가 채워지고 그 축으로부터 멀어질수록 큰 값

으로 채워지게 된다. 따라서 일반적으로 위와 같은 표에서 제어값을 추론하는 방법은 직접추론법중에서 Mamdani의 함의에 따른다. 이는 Max-Min 합성으로서 진건부 적합도 중 Min값을 이용해서 각 규칙의 적합도를 구하고 후건부의 퍼지집합에 반영시켜 각각 규칙들의 추론결과를 구한 후 이들을 모아서 Max 연산을 이용 최종적인 추론결과를 얻는다. 크레인과 같은 플랜트는 확정치가 필요한 경우이기 때문에 최종적 추론결과와 무게중심을 구한다[14][15].

표 1. 제어규칙표.

Table 1. Rule table for angle control.

$\theta \setminus \dot{\theta}$	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	ZO
NM	PB	PB	PM	ZO	PM
ZO	PB	PM	ZO	NM	NB
PM	PM	ZO	NM	NB	NB
PB	ZO	NM	NB	NB	NB

PB : Positive Big, PM : Positive Medium,  
 ZO : Zero, NB : Negative Big,  
 NM : Negative Medium.

2. 위치 제어

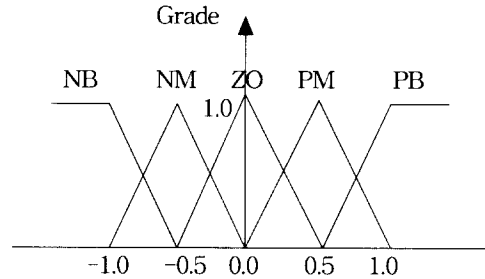
트롤리의 위치제어를 위해서 위치오차  $x_e (= x_r - x)$  및 속도  $\dot{x}_e$ 의 소속도 함수를 정한다. 이는 앞의 진동각제어와 같은 방법으로 실시한다. 즉, 위치오차  $x_e$  및 속도  $\dot{x}_e$ 에 관하여 NB, NM, ZO, PM, PB의 5개의 소속도 함수를 정의한다. 그 다음 제어규칙을 설정한다. 이 때의 제어규칙은 진동각 제어와 같은 규칙을 적용시킨다. 다음에는 제어규칙표를 만든다. 마지막으로 Max-Min gravity 합성을 실행하여 위치제어 값을 구한다.

3. 진동각제어와 위치제어의 합성

로프의 진동각 제어와 트롤리의 위치제어는 어느 한쪽을 제어하면 다른 한 쪽이 잘되지 않는 상호간섭이 있으므로 서론에서도 언급한 바와 같이 동시에 만족스럽게 제어하는 것은 매우 어렵다. 그래서 본 절에서는 크레인 숙련 기술자의 운전방법을 기초로하여 1차 퍼지추론으로 동시에 생성된 위치 제어입력과 진동각 제어입력을 2차의 퍼지추론으로 합성하는 방법을 찾아보고자 한다. 크레인 숙련기술자의 행동을 유심히 관찰해 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다. 첫째, 목표지점까지의 거리가 많이 남아있을 때는 작은 진동은 크게 신경쓰지 않고 위치제어에 충실한다. 둘째, 진동이 크게 발생한 경우에는 거리오차를 크게 신경쓰지 않는다. 셋째, 목표지점에 가까워지면 진동제어 입력과 위치제어 입력의 배분을 경험에 의해서 변화시킨다. 본 논문에서는 이러한 숙련기술자의 행동자체를 구체적으로 퍼지규칙으로 나타내어서 추론해 내고자 한다. 이를 위해서 한 샘플링의 제어구간에서 먼저 위치와 각도에 관한 트롤리의 구동지령값을 추론해내고 이를 숙련기술자의 행동자체를 모델링한 퍼지추론 룰에 대입시킨다.

3.1 각도 및 위치에 관한 지령값 소속도 함수의 결정

각각의 퍼지제어루프에 의해서 생성된 진동 제어값 ( $u_\theta$ )와 위치 제어값 ( $u_x$ )를 합성하기 위해서 각각의 소속도 함수를 다음의 그림 3과 같이 정한다.



Normalized control inputs for angle and position

그림 3. 각도 제어값과 위치제어값에 대한 소속도 함수의 모양.

Fig. 3. The shape of membership function for angle control input and position control input.

3.2 2차 합성추론을 위한 제어규칙표의 작성

앞에서 설명한 세가지의 숙련 기술자의 기술행동을 반영해서 표 2와 같은 제어규칙을 만들 수 있다.

표 2. 숙련 기술자의 지식베이스를 기초로한 제어규칙 테이블 구성.

Table 2. Construction of control rule table based on experter's knowledge base.

$u_\theta \setminus u_x$	NB	NM	ZO	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	PB
NM	NB	NM	NM	ZO	PB
ZO	NB	NM	ZO	PM	PB
PM	NB	ZO	PM	PM	PB
PB	NB	PB	PB	PB	PB

표 2의 퍼지제어 규칙을 구성하는 방법에 대해서 논하기로 하겠다.

(1) 맨 좌측 column과 맨 우측 column의 요소들, 맨 가운데 row의 요소들은  $u_x$ 의 제어입력을 그대로 사용하고 있다. 이것은  $u_x$ 의 제어 입력이 아주 크거나  $u_\theta$ 의 입력이 아주 작을 때는 트롤리의 위치제어를 충실히 하겠다는 것을 의미하며, 트롤리와 목표지점까지의 거리가 상당히 멀 때는 작은 진동에는 크게 신경을 쓰지 않는다는 기술자의 행동양식을 반영한 것으로 볼 수 있다.  $u_x$ 의 값이 크다는 것은 대체로 목표지점까지의 거리가 멀다고 가정한다. 이 규칙의 타당성은 실험한 데이터를 근거로 보일 것이다.

(2) 맨 좌측 column과 맨 우측 column을 제외한 맨 위 row의 요소와 맨 아래 row의 요소들과, 맨 가운데 column은 즉,  $u_x$ 의 값이 아주 작거나  $u_\theta$ 의 입력이 아주 큰 경우에는 각도의 제어입력  $u_\theta$ 를 그대로 따르고 있다.  $u_x$ 의 값이 작다는 것은 트롤리가 목표지점에 어느 범주 이내로 들어왔음을 의미하므로 진동각 제어를 우선으로 하겠다는 것을 의미하며, 또한 진동이 크게 발생한 경우에는 거리오차를 크게 신경쓰지 않는다는 기술자의 행동양식을 반영한 것으로 볼 수 있다.

(3)左上에서 右下로 이어지는 대각선상의 제어입력들은 로프각도의 제어입력과 트롤리의 위치제어 입력의 방향과 크기가 서로 같은 모드이다. 그러므로 이 경우에는 같은 제어 입력을 인가하면 되므로 문제가 될 것이 없다. 그러나

右에서 左로 이어지는 대각선상의 퍼지제어 규칙을 어떻게 설정하느냐는 것이다. 이 모드에서는 로프의 각도 제어입력( $u_\theta$ )과 트롤리의 위치제어입력( $u_x$ )이 서로 상충하는 모드이다. 즉 로프의 각도 제어입력을 따르게 되면 트롤리의 위치제어가 나빠지게 되고, 트롤리의 위치제어 입력을 따르게 되면 로프의 진동이 더 심하게 발생한다. 그러므로 이 모드에서는 제어입력을 일단 인가하지 않는 상태로 있게 한다. 그러면 로프의 진동각도가 자연적으로 변하게 되므로 다른 어느 제어모드로 들어가서 제어가 다시 수행되게 된다. 이 과정은 목표지점에 가까워지면 진동각 제어입력과 위치제어 입력의 배분을 경험에 의해서 변화시키는 행동을 반영한 것이라고 볼 수 있다.

지금까지의 퍼지제어 규칙을 만드는 방법을 그림으로 도식화하면 그림 4처럼 나타낼 수 있다. 지금까지 설명한 각 제어모드는 위치제어의 값이 우선이 되는 위치제어 모드, 진동각의 제어가 우선이 되는 진동각 제어 모드, 두 제어입력이 서로 상충이 되었을 때 제어입력을 인가하지 않는 모드, 또 제어 입력이 서로 동일한 경우의 모드로 구분할 수 있다. 표 2와 그림 4는 그 공간이 일대일로 서로 매칭이 된다.

지금까지 기술한 전체 제어 매커니즘을 블록도로 나타내면 그림 5와 같다.

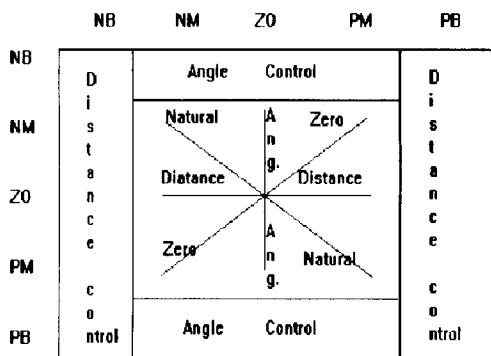


그림 4. 전문가의 행동모델 도식화.  
Fig. 4. The schematic figure of expert's action model.

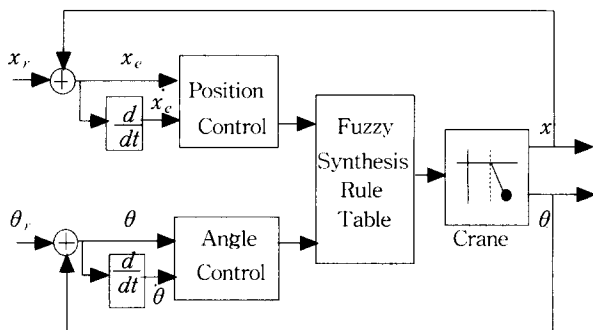


그림 5. 전체 제어 시스템의 블록도.  
Fig. 5. Block diagram of overall system.

III. 크레인의 실험 및 결과고찰

1. 실험결과 고찰

실험은 실험용으로 제작한 크레인 시뮬레이터를 이용하였으며, 그 구조는 길이 2m, 높이 1m이고, 구동 모터는 DC Servo 모터를 사용하였다. 그리고 로프의 진동은 트롤리의 진행축 방향으로의 각도만 엔코더를 이용하여 측정하며, 운반물의 무게는 1.5Kg, 로프의 최대길이는 0.8m이다.

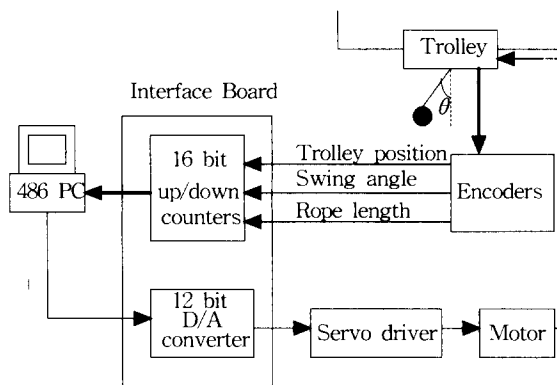


그림 6. 실험장치 구성도.  
Fig. 6. The block diagram of experimental apparatus.

그림 6은 실험장치의 구성도이다. 전체 동작과정을 살펴 보면, 트롤리 구동 모터에 달린 엔코더로 트롤리의 위치를, 트롤리에 설치되어 있는 엔코더로 로프 진동각을, 그리고 로프의 길이를 변화시키는 모터에 달려 있는 엔코더로 로프 길이를 인터페이스 보드에서 up/down 카운트하여, 486PC로 입력하고, 486PC는 C언어로 구성된 제안된 퍼지 제어기에서 제어 입력을 추론한다. 이 값은 다시 인터페이스보드의 D/A변환기를 통해서 드라이브에 전달되어 모터로 속도지령을 내보낸다. 모든 실험들은 제어초기(초기의 약 50cm 구간)에는 제어입력을 일정비율로 증가시켜서 인가하는 등가속구간을 두었다. 일반적 속도프로파일을 이용한 제어실험은 초기에는 등가속 지령, 등속구간에는 등속지령과 진동각 제어 입력을 합해서, 그리고 초기 감속구간에서는 등감속 지령에 진동각 제어입력을 합해서, 그리고 마지막 구간에는 진동각과 위치에 대해서 각각 추론된 퍼지제어의 값을 1:1로 합하여 인가하는 제어 방식을 사용하였다. 그리고 본 논문에서 제안한 방식에서는 초기구간에서는 일반적인 등가속도 운동을 위한 지령을 그 이후부터는 트롤리의 위치와 로프의 진동각에 대해서 각각 1차 추론된 위치제어 입력과 진동각 제어입력을 2차 합성 추론을 하여 인가하였다. 이 때 트롤리의 위치제어는 5구간으로 소속도함수를 구분하는데 남은거리 1m에 대해서는 coarse 제어를, 트롤리가 목표위치에 어느정도 범주(50cm)이내로 들어가게 되면 fine 제어를 수행하였다. 그리고 진동각은  $+\pi/6$  (rad)에서  $-\pi/6$  (rad)까지를, 진동 각속도는  $+0.4$ (rad/s)에서  $-0.4$ (rad/s)까지를 등간격으로 5구간의 소속도 함수로 나누었다.

그림 7은 일반적인 사다리꼴의 가속, 등속, 감속의 속도프로파일을 이용하며 그림에서 나타낸 것처럼 부분적으로 진동각 제어를 동시에 수행하였으며 마지막 구간에서는 위치제어와 진동각 제어의 추론 결과를 일정한 비율로 합해서 제어한 결과이다. 그림 8은 본 논문에서 제안한 방식의 결과로서 트롤리의 위치와 로프의 진동각에 대해서 각각 1차 추론된 위치제어 입력과 진동각 제어입력을 2차 합성 추론을 하여 인가하였다. 두 경우 모두 로프의 길이는 그림에 나타낸 것처럼 변하고 있다. 즉, 등가속과 동시에 운반물을 끌어올리고 있으며 등속구간에서는 로프의 길이를 일정하게, 감속과 동시에 운반물을 내리고 있다. 모든 그림의 로프의 각도와 트롤리의 속도, 로프길이, 그 때의 트롤리의 위치는 그림 7의 그림상에서 표기한 대로이다. 본 논문에서 제시한 방식이 위치오차 측면에서 보면 정상상태 도달 시간이 2초 정도 빠름을 알 수 있다. 이는 속도와 위치에 관한 가중치를 적절히 퍼지합성 추론을 수행함으로써 가능하게 되었다.

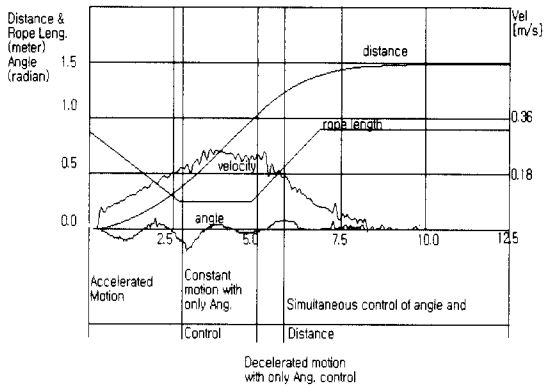


그림 7. 일반적인 사다리꼴의 속도프로파일을 이용한 방법에 의한 제어.  
Fig. 7. Control result by method using general trapezoidal velocity profile.

그림 9, 10은 그림 7, 8과는 달리 로프길이 변화가 없을 때의 각각의 제어 결과이다. 이 때의 로프길이는 80cm로 일정하게 유지되었다. 이 결과에서도 제안된 퍼지합성 추론에 의한 제어방식이 각도와 위치의 수렴특성이 빠름을 알 수 있다.

그림 11, 12는 로프길이의 변화량이 30cm로 로프길이가 적게 변했을 때의 각각 방식의 제어결과이다. 이 결과에서도 제안한 방식이 수렴속도가 빠름을 알 수 있다.

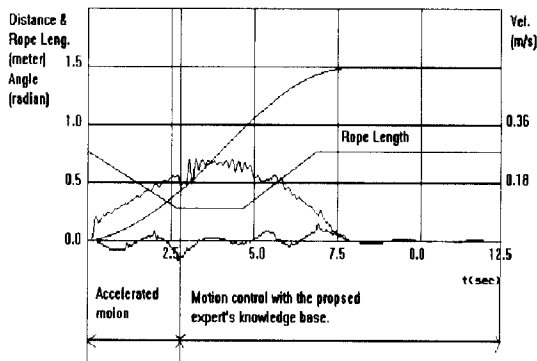


그림 8. 제안한 퍼지 합성 추론방식을 이용한 제어 결과.  
Fig. 8. Control result using the proposed fuzzy synthesis inference method.

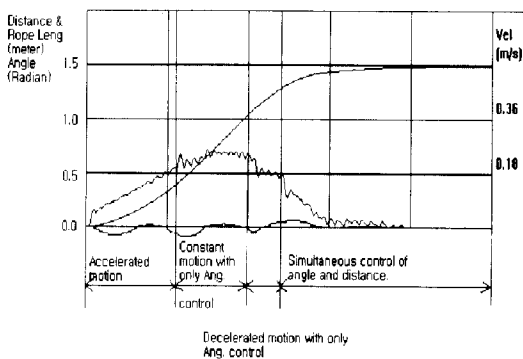


그림 9. 로프의 길이변화가 없을 때의 일반 속도프로파일을 이용한 제어결과.  
Fig. 9. Control result using general velocity profile when the rope length is constant.

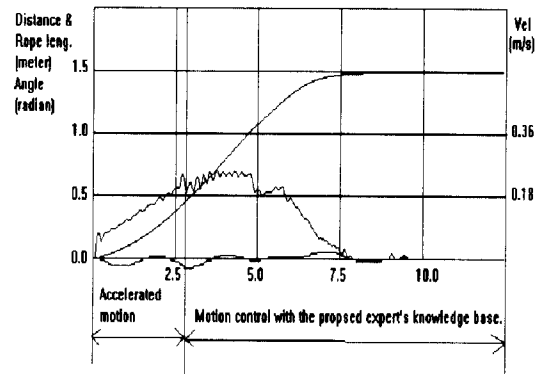


그림 10. 로프길이변화가 없을 때의 제안한 방식을 이용한 제어결과.  
Fig. 10. Control result using the proposed method when the rope length is constant.

그림 13, 14는 1.2m 부근에서 운반물에 외란을 인가시켰을 경우의 각각의 제어결과이다. 그림 14의 본 논문에서 제안한 퍼지합성추론을 이용한 방식이 임의의 외란을 효과적으로 대처함을 볼 수 있다.

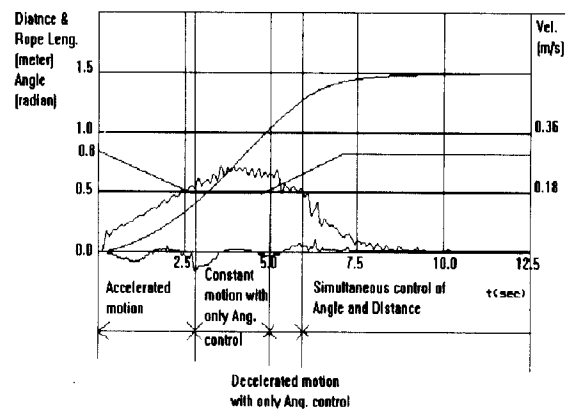


그림 11. 로프길이 변화량이 적을 때의 일반 속도 프로파일을 이용한 제어결과.  
Fig. 11. Control result using general velocity profile when the variation of rope length is small.

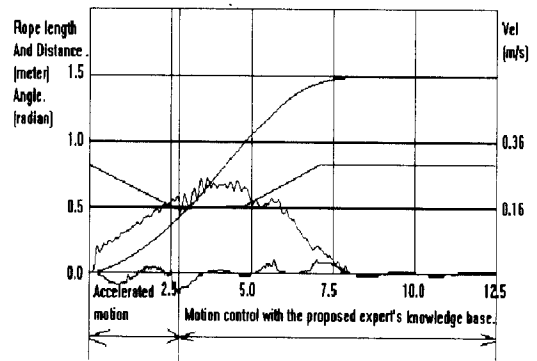


그림 12. 로프길이의 변화가 적을 때의 제안한 방식에 의한 제어결과.  
Fig. 12. Control result using the proposed method when the variation of rope length is small.

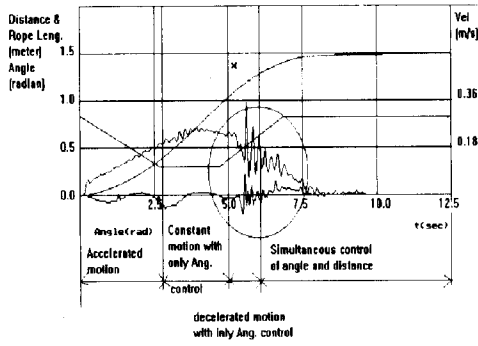


그림 13. 외란인가시 일반 속도프로파일을 이용한 결과.  
Fig. 13. Control result using general velocity profile when the disturbance is applied.

2. 합성추론의 검증

본 논문에서 제안한 합성추론의 동작을 검증해 보기 위

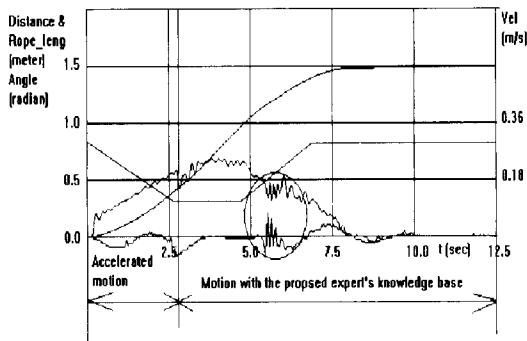


그림 14. 외란인가시 제안한 방식에 의한 제어결과  
Fig. 14. Control result using the proposed method when the disturbance is applied.

해서 그림 7과 그림 8의 결과를 위치오차의 함수에 대해서 진동각 오차와 그 때의 추론된 제어 입력과 합성된 제어 입력을 그림으로 다시 나타낸 것이 각각 그림 15와 그림 16이다. 그림 15의 (a)는 일반적인 속도프로파일을 이용하여

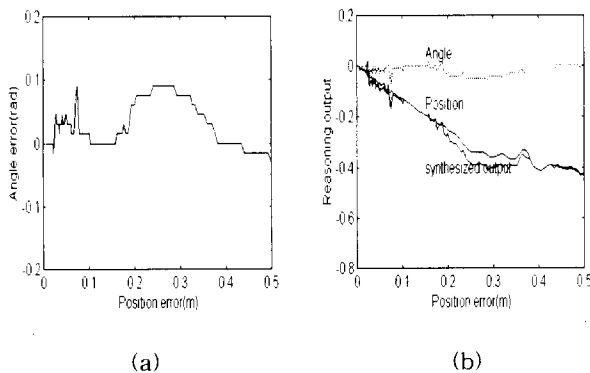


그림 15. 일반 제어 방식에서의 위치오차와 추론된 제어 입력의 관계 (a) 위치오차 대 진동각오차, (b) 위치오차 대 추론된 제어입력.  
Fig. 15. Relation between position error and reasoning control input in general control. (a) position error versus angle error, (b) position error versus reasoning control input.

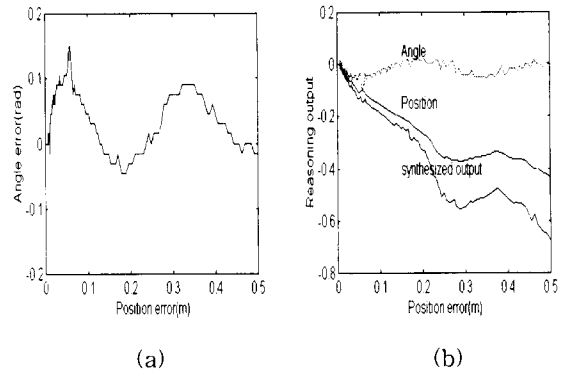


그림 16. 제안한 제어 방식에서의 위치오차와 추론된 제어입력의 관계. (a) 위치오차 대 진동각오차, (b) 위치오차 대 추론된 제어입력.  
Fig. 16. Relation between position error and reasoning control input in proposed control. (a) position error versus angle error, (b) position error versus reasoning control input.

제어한 결과를 위치오차(남은거리) 대 진동각을 나타낸 것이고, 그림 15(b)는 그때의 진동각과 위치오차에 대해서 각각 추론된 퍼지출력을 남은 거리에 대해서 나타낸 것이다. 이 값은 30cm 이내에서는 그대로 합쳐져서 인가되고, 남은 거리가 30cm에서 50cm내에서는 그림의 진동각에 대해서 추론된 값에 그림에는 나타나 있지 않은 등감속지령이 합쳐져서 인가된다. 그림 16은 본 논문에서 제안한 2차 합성추론을 수행한 결과를 나타낸 것이다. 이 경우는 그림 16(b)의 합성된 출력이 그대로 인가된다. 그림 15나 그림 16의 (a)경우를 보면 각도의 오차크기는 비슷하고 본 논문에서 제시한 방식이 더 빠르게 변함을 알 수 있다. 두 그림 모두 시간축은 그려져 있지 않지만 앞의 그림 7, 8에서 그림 16의 방식이 훨씬 더 빠른시간내에 이루어 짐을 알 수 있다.

이제 본 논문에서 제시한 숙련 기술자의 행동기술이 2차 합성 추론 규칙에 옹계 반영이 되었는가를 살펴보자. 첫째 기술한 숙련 기술자의 행동은 목표지점까지의 거리가 많이 남아 있을 때는 위치제어에 충실한다는 것인데, 그림 16(b)를 보면 1차 추론된 위치제어입력 ( $u_x$ )이 클 때가 대략 위치오차가 크므로,  $u_x$ 가 클 때가 남은 거리가 많이 남아있음을 나타낸다. 그러므로  $u_x$ 가 클 때 합성추론의 결과가  $u_x$ 를 따른다는 것은 위치제어에 충실한 것을 나타낸다. 또 같은 그림의 오른쪽 부분에서 위치제어 입력과 합성추론된 제어입력의 상대오차를 보면 위치오차가 적을 때(0.3m)가 위치오차가 클 때(0.35m) 보다 진동각 제어입력의 반영이 더 큼을 알 수 있다. 이것도 숙련 기술자의 첫번째 행동기술을 반영한 것이라 볼 수 있다. 그리고 진동각이 큰 경우에 1차 추론된 진동각 제어값이 큼을 알 수 있고 그래서 진동각이 크게 발생한 경우(0.05m 부근)에는 합성추론 값이 진동각 추론 값의 모양을 따르고 있으므로 이것은 진동이 클 때는 위치제어에는 크게 신경을 쓰지 않고 진동각 제어에 충실한다는 두번째 숙련기술자의 행동을 반영한 것이라 볼 수 있다. 그러나 0.35m 부근에서 진동각이 크게 발생했을 때는 위치오차도 큰 부분이므로 합성추론은 첫번째와 두번째의 행동이 복합적으로 나타나므로 단정적으로 얘기하기는 어렵다. 그러므로 전체적으로 합성추론된 값은 앞에서 제시한 합성추론 규칙표(숙련 기술자의 행동기술)를 이용하여 복합

적으로 추론된 것이기 때문에 그 전체결과가 나타난 원인을 부분적으로 행동근거를 하나씩 들어서 설명하기란 어렵다.

그래서 그림 8에서 측정된 실험결과 데이터틀 이용하여 clustering 알고리즘[16]을 이용하여 합성 퍼지규칙에 대한 추론값을 Matlab상에서 그려본 결과가 그림 17이다. 또 표 2의 합성제어 규칙에 대한 추론결과를 그린 그림이 그림 18이다. 두 그림을 비교해 보면 일부구간을 제외하고는 아주 유사함을 알 수 있다. 그림 17의 일부구간이 편평한 이유는 실험데이터가 감속부분만 있기 때문이다. 여하튼 그 이외의

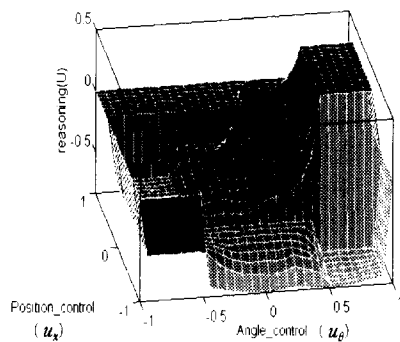


그림 17. Clustering 이용하여 찾은 실험적으로 적용된 추론 평면.

Fig. 17. Experimental reasoning surface found using clustering.

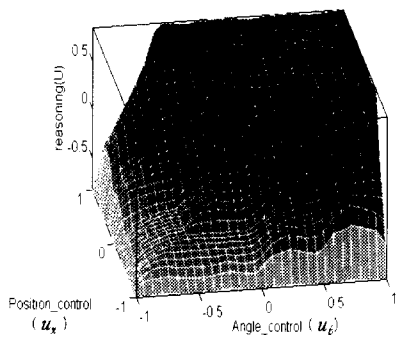


그림 18. 합성 퍼지 규칙에 대한 추론평면.

Fig. 18. Reasoning surface for synthesis fuzzy rules.

부분은 거의 동일한 모양을 하고 있으므로 제대로 합성규칙이 실험적으로 적용되었음이 검증된다.

한가지 재미있는 사실은 그림 16(b)의 합성된 추론의 모양(트롤리의 실제 속도 지령이 됨)이 남은거리와 시간의 관계가 선형이라면 [9]의 논문에서 설명한 시간최적제어로부터 유도된 노치형 속도프로파일의 모양과 유사함을 알 수 있으며 이 때 추종한 속도프로파일도 그림 8을 살펴보면 감속부분에서 노치형 속도프로파일과 유사한 모양을 하고 있다.

#### IV. 결론

본 논문에서는 크레인을 이용하여 운반물을 부드럽고 빠른 수송을 하기위해서 필연적으로 수반되는 진동각 제어와 위치제어의 상호 간섭 문제를 해결하고자 노력하였다. 로프의 진동각제어와 트롤리의 위치제어 위해서 1차적으로 기본 퍼지제어를 도입하였으며 각각 1차 추론된 진동각 제어값과 위치제어 값을 합성하여 최종적으로 트롤리에 인가하기 위한 2차 퍼지 합성추론법을 제시하였다. 일반적인 속도 프로파일을 이용하면서 위치제어 입력과 진동각제어 입력을 일

정한 가중치로 합하여 출력하는 제어방식과, 본 논문에서 제안한 위치제어와 진동각 제어의 출력값들을 2차의 퍼지합성 추론을 이용하여 적절히 변화시켜 출력하는 제어방식을 비교하였다. 그리고 제어결과를 보고 합성추론이 올바르게 적용이 되었는가를 클러스터링 알고리즘을 통하여 검증하였다. 또 숙련 기술자의 어느 행동기술에 의한 것인가도 분석하였다. 본 논문에서 제안한 2차 추론 합성법을 이용한 제어방식이 일정한 가중치로 합하여 출력하는 제어방식보다 크레인의 무진동제어 및 위치제어가 훨씬 효과적으로 수행됨을 알 수 있었다. 이것은 가중치가 일정한 경우와는 다르게 임의의 상황에 대처해서 적절한 숙련 기술자의 지식을 기초로하여 최종제어 출력이 추론되므로써 정상상태 도달시간을 크게 향상시킬 수 있었던 것으로 생각된다.

#### 참고문헌

- [1] 박병석, 윤지섭, 이재설, "무진동 크레인을 이용한 흔들림 제어에 관한 연구," 한국자동제어학술회의 논문집 pp. 292-297, 1990.
- [2] 임태승, 유완식, 변중남, "퍼지논리를 이용한 천정 크레인의 무진동 제어," '93 제어계측연구회 합동학술연구 발표회 논문집, pp. 87-91, 1993.
- [3] 大坪亮, 木峻義彰, 藤川英司, 山田新一, "ファジィ制御器の最適化と大井クレーンへの応用," 日本電気学会システム制御・産業計測制御合同研究会資料, vol. SC-95-8, IIC-95-26, pp. 65-74, 1995.
- [4] 이호훈, 조성근, 조재성, 정연우, "2축 천정 크레인의 무진동제어," '96 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 1428-1431, 1996.
- [5] 김용석, "로프 트롤리 방식 컨테이너 크레인의 진동억지 제어," 대한전기학회 논문지, 제 44권, 제 12호, pp. 1668-1674, 1995.
- [6] 윤지섭, 강이석, "천정 크레인의 무진동/위치 제어기 개발에 관한 연구," 대한기계학회 논문집, 제 19권, 제 6호, pp. 1391-1401, 1995.
- [7] 손정기, 배종일, 이만형, "비전센서에 의한 컨테이너 크레인 스프레더의 흔들림 제어에 관한 연구," '96 한국자동제어학술회의 논문집, pp. 832-835, 1996.
- [8] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인 흔들림 제어 (PartI): 모델링, 제어전략, 기준선도를 통한 오차피드백 제어," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제 3권 제 1호, pp. 23-31, 1997.
- [9] 홍금식, 손성철, 이만형, "컨테이너 크레인 흔들림 제어 (PartII): 트롤리 주행속도 조절을 통한 진자 운동의 제어," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제 3권, 제 2호, pp. 132-138, 1997.
- [10] J. J. Hamalainen, A. Martinen, L. Baharova and J. Virkkunen, "Optimal path planning for a trolley crane: fast and smooth transfer of load," *IEE Proc.-Control Theory Appl.*, vol. 142, no. 1, pp. 51-57, 1995.
- [11] Yoshimi Hakamada and Masakatsu Nomura, "Anti-sway and position control of crane system," *Proc. of AMC'96-MIE in Japan*, pp. 657-661, 1996.
- [12] 정경채, "천정 크레인의 진동저감을 위한 제어기 개발"

- 발용 시뮬레이터 설계에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학회 논문지, 제 2권, 제 2호, pp. 96-101, 1996.
- [13] 한창욱, "퍼지제어기를 이용한 크레인의 무진동 및 위치 제어의 합성에 관한 연구," 영남대 전자공학과 석사 학위 논문, 1995.
- [14] M. Sugeno, *International Applications of Fuzzy*

*control*, Elsevier Science Publishers B.V. 1985.

- [15] B. Kosko, *Neural networks and Fuzzy systems*, Prentice-Hall International, Inc. 1992.
- [16] Ronald R. Yager and Dimitar P. Filev, "Approximate clustering via the mountain method," *IEEE Trans. on Systems man and Cybernetics*, vol. 24, no. 8, August, 1994.



**정 승 현**

1970년 5월 15일생. 1995년 영남대학교 전자공학과 졸업. 현재 동 대학원 전자공학과 석사과정. 주관심 분야는 퍼지제어, 신경회로망.



**박 정 일**

1958년 4월 8일생. 1981년 경북대학교 전자공학과 졸업. 1983년 서울대학교 대학원 전자공학과 석사. 1989년 동대학원 박사. 1983년-1984년 삼성전자 종합연구소 연구원. 1989년-1992년 2월 삼성종합기술원 선임연구원. 1992년, 3월-현재 영남대학교 전기전자공학부 조교수. 주관심분야는 지능적응 제어, 모터 제어, 서보제어 시스템 및 자동화를 위한 모션제어 시스템 구축 등임.