

정압제어를 위한 동적모델 해석 및 최적 퍼지 PID 제어기설계

논 문
61-2-18

Analysis of Dynamic Model and Design of Optimized Fuzzy PID Controller for Constant Pressure Control

오 성 권[†] · 조 세 희* · 이 승 주**
(Sung-Kwun Oh · Se-Hee Cho · Seung-Joo Lee)

Abstract - In this study, we introduce a dynamic process model as well as the design methodology of optimized fuzzy controller for its efficient application to vacuum production system to produce a semiconductor, solar module and display and so on. In a vacuum control field, PID control method is widely used from the viewpoint of simple structure and preferred performance. But, PID control method is very sensitive to the change of environment of control system as well as the change of control parameters. Therefore, it's difficult to get a preferred performance results from target system which has a complicated structure and lots of nonlinear factors. To solve such problem, we propose the design methodology of an optimized fuzzy PID controller through a following series of steps. First a dynamic characteristic of the target system is analyzed through a series of experiments. Second the process model is built up and its characteristic is compared with real process. Third, the optimized fuzzy PID controller is designed using genetic algorithms. Finally, the fuzzy controller is applied to target system and then its performance is compared with that of other conventional controllers(PID, PI, and Fuzzy PI controller). The performance of the proposed fuzzy controller is evaluated in terms of auto-tuned control parameters and output responses considered by ITAE index, overshoot, rise time and steady state time.

Key Words : Dynamic process model, Fuzzy controller, PID controller, Genetic Algorithms(GAs), Constant pressure system

1. 서 론

현대사회의 공업기술은 급격히 발전하고 있으며, 시스템은 갈수록 복잡해지고 정밀화 되어가고 있다. 시스템이 거대해지고 복잡해짐에 따라 시스템에 대한 수학적인 모델 및 전달함수나, 동특성 등의 정보를 얻는 것은 어려워지고 있을 뿐만 아니라, 시스템이 고차화 되어 가고, 비선형성이 커지고 있다. 이런 고차계나 비선형성이 큰 시스템을 제어하기 위한 새로운 제어이론이 제안되기도 하고, 기존의 제어이론을 개선하고자 하는 연구가 끊임없이 계속되고 있다.

초기에는 비선형 시스템을 선형화 하여 선형 시스템을 제어하는 방식이 일반적으로 사용되었고, 현대제어 이론에서는 비선형 시스템을 최적화(Optimization), 적응제어(Adaptive Control), 강인제어(Robust Control)등의 선형시스템으로 제어하는 방식이 많이 연구되었으며, 최근에는 비선형 제어 이론들이 많이 연구되고 있다. 비선형 제어 이론의 대표적인 것으로는 퍼지(Fuzzy), 뉴럴 네트워크(Neural Network), 뉴로-퍼지(Neuro-Fuzzy) 등이 있다[1-2]. 퍼지 이론은 전문

가나, 숙련가의 기술을 이용하여 규칙에 기반을 둔 지능형 알고리즘(Artificial Intelligent : AI)이며, 뉴럴 네트워크는 인간의 학습능력을 모방한 학습을 통하여 성능을 개선해 나가는 방식이다. 뉴로 퍼지는 퍼지와 뉴럴 네트워크의 장점을 이용한 알고리즘이고, 또한 이런 알고리즘을 개선한 많은 알고리즘들이 제안되고 있다.

퍼지 이론은 1965년 Zadeh에 의해 제창된 이래 여러 분야에서 응용이 시도 되었다. 그 중 눈에 띄는 결과를 내놓은 분야가 제어분야 이다. 기존의 PID제어기가 선형 시스템에서는 우수한 성능을 보이나 비선형 동적 시스템, 고차 시스템, 수학적 모델 선정이 어려운 시스템에서는 비효율적인 것에 반해 퍼지제어기는 인간의 지식과 경험을 이용한 지적 제어방식으로 If-Then 형식의 규칙으로부터 제어 입력을 결정하는 병렬형 제어이다. 이는 속응성과 강인성이 좋은 제어기법으로 비선형성이 강하고 불확실하며 복잡한 시스템을 쉽게 제어 할 수 있는 장점을 가진다[3-4]. 퍼지제어기에서 제어 규칙과 멤버쉽 함수 및 환산계수는 제어기의 핵심으로 이들의 설정에 따라 보다 효율적이고 안정적인 제어 결과를 얻을 수 있다.[5-7] 그러나 퍼지제어기의 제어 파라미터들은 수학적으로 결정하기가 매우 어렵기 때문에 일반적으로 전문가의 경험에 의해 결정되거나 시행착오를 거쳐 구하며, 최근에는 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)같은 진화 알고리즘을 이용하여 구하고 있다. 유전자 알고리즘은 직렬 진화 알고리즘의 한 종류이다. 유전자 알고리즘은 전역해를 찾을 수 있는 탐색 알고리즘으로 잘 알려져 있으며, 많은 응

† 교신저자, 시니어회원 : 수원대 공대 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : ohsk@suwon.ac.kr

* 준 회원 : 수원대 공대 전기공학과 석사과정

** 준 회원 : 수원대 공대 전기공학과 석사과정

접수일자 : 2011년 9월 20일

최종완료 : 2011년 10월 25일

용에 성공적으로 사용되고 있다.[8-9]

때문에 본 논문에서는 진공 제어 시스템의 동특성을 분석 및 보상하여 시스템 모델링 후 ITAE성능지수, 상승시간(Risetime), 오버슈트(Overshoot), 정상상태 도달시간(Steady state time)을 목적함수로 한 시뮬레이션을 통하여 PID, 퍼지 PID제어기를 시스템에 적용하여 성능을 평가 후 최적의 퍼지 제어기를 설계한다. 본 논문은 다음과 같은 구성으로 이루어져 있다. 먼저 2장에서는 대상 시스템의 구조 및 연동관계를 설명하고, 시스템의 동특성 분석을 통해 산출한 모델을 평가하였다. 3장에서는 퍼지 논리 시스템과 퍼지 제어기의 원리에 대하여 설명하였다. 4장에서는 유전자 알고리즘과 유전자 알고리즘을 이용한 동조 방법을 설명하였다. 5장에서는 동특성 분석을 통한 모델 응답의 보상 방법을 설명하고, 보상 후 제안된 모델의 실 시스템에서의 성능을 확인하고 마지막으로 6장에서는 본 논문에서 제안한 모델에 대한 결론을 서술하였다.

2. 비선형 시스템의 모델링

2.1 대상 시스템의 이해

제어기 설계에 앞서 제어하고자 하는 대상 시스템에 대해 먼저 상세히 검토를 해야 한다. 즉 시스템의 성질을 분석하여 특성을 파악하고, 그 시스템을 제어하기 위해 입력과 출력을 결정할 때에는 그것을 각각 구현할 수 있는 장치, 즉 제어기, 구동기 및 감지기를 함께 고려하여야 한다. 대상 시스템인 고진공 정압제어기는 대표적 비선형 시스템으로 항상 일정한 압력을 유지하는 것을 목적으로 한다. 구성요소는 진공 제조 환경이 되는 진공용기(Vacuum Chamber), 입력유량 센서(Inflow Sensor), 입력유량 제어기(MFC Controller), 밸브 제어기(Valve Control Module), 진공센서(Vacuum Sensor), 트로틀 밸브(Throttle Valve), 펌프(Pump)로 이루어지고, 시스템의 운동은 일정 유량의 유입과 배출이 이루어지는 동안 설정압력과 압력센서의 측정압력 사이의 오차를 입력으로 진공밸브를 조절하여 챔버 내의 압력을 제어하게 된다. 고진공 정압 제어 시스템의 전체 구조는 그림 1과 같고, 실제 시스템의 구조에 따른 연동관계는 그림 2에 나타냈다. 시스템은 7개의 주요 장치들로 구성되며 이들 장치들의 명칭 및 시스템 내에서의 역할은 표 1에 나타냈다.

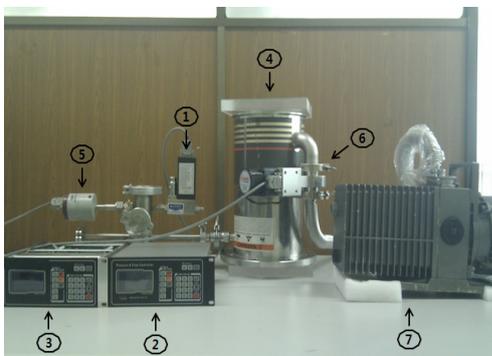


그림 1 고진공 정압 제어 시스템의 구조
Fig. 1 Structure of high-degree vacuum constant pressure control system

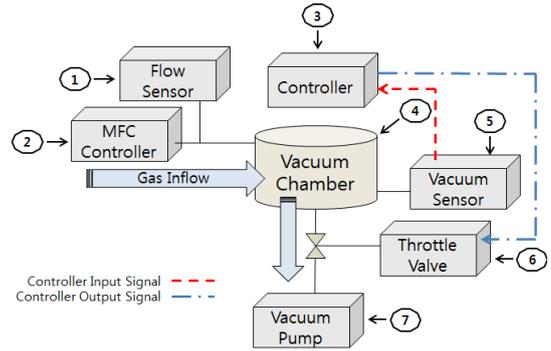


그림 2 고진공 정압 제어 시스템의 연동관계
Fig. 2 Link-age of high-degree vacuum constant pressure control system

표 1 고진공 정압 제어 시스템 구성요소 요약
Table 1 Components summary of a high-degree vacuum constant pressure control system

번호	장치	역할
①	흐름센서	진공용기 내로 유입되는 유기체의 유량을 측정하는 센서.
②	MFC 컨트롤러	공정에 따라 필요로 하는 유기체를 일정량으로 유입되도록 제어하는 컨트롤러.
③	밸브제어 컨트롤러	진공용기 내의 압력을 입력으로 밸브의 위치를 제어하는 컨트롤러.
④	진공 용기	반도체, 태양관 모듈, 디스플레이 등 공정의 제조 환경이 되는 용기.
⑤	압력센서	진공용기 내의 압력을 측정하는 압력센서
⑥	진공 밸브	실질적인 제어대상으로 밸브의 위치를 조절하여 진공 용기 내의 압력을 제어한다.
⑦	펌프	일정 유량으로 유기체를 배기하는 펌프

2.2 정압제어 시스템의 모델링

대상 시스템의 연동관계 및 장비의 기계적 특성 그리고 시스템의 동특성 분석을 통해 알아낸 특성을 기반으로 수학적 모델을 구한다. 이때, 기본 시스템 모델, 불확실성, 잡음, 외란 등의 영향을 고려하여 모델의 성질을 해석하고 규명한다. 그리고 이렇게 구한 모델이 실제 대상 시스템을 표현하기에 적합한가를 검토한다. 일반적으로 진공 배기계의 설계에서는 여러 가지 진공용기의 형상에 따라 배기관의 길이, 직경, 주선, 면적, 단면적, 표면적 등을 계산하여 흐름저항(Flow resistance)을 일차적으로 산출하고, 배기관에 직렬 또는 병렬로 설치된 각종 구성요소들의 컨덕턴스(Conductance)로부터 전체 컨덕턴스(Total Conductance)를 산출한다. 마지막으로 실제 배기속도는 진공용기를 배기하는 각종 펌프의 배기속도와 조합하여 산출한다. 진공시스템에서 진공 용기와 진공펌프 사이에 설치된 배기관, 각종밸브 등의 여러 가지 기구들로 인하여 흐름 저항이 발생되므로 압력제어장치를 구성하거나 설계할 때 이에 대한 이론적인 검토가 필요하다. 모델을 설계하는데 고려해야할 시스템 파라미터들을 표 2에 나타냈으며, 이들 파라미터에 의해 산출이 가능한 컨덕턴스, 유효 배기속도, 전체 가스유입량, 용기 내부 압력 등의 기본방정식 들은 식 (1)부터 식 (7)에 나타내었다.

가) 흐름저항 (Flow resistance)

$$\begin{aligned}
 R &= R_L + R_o & (1) \\
 R_o &= K_{efc} \cdot 10^3 / 3 \cdot A_c \\
 R_L &= K_{efc} \cdot 10^3 \cdot L \cdot U / A_c^2 \\
 K_{efc} &= 3/8 \cdot \sqrt{\pi \cdot M / (2 \cdot R_u \cdot T)}
 \end{aligned}$$

나) 전체 컨덕턴스 (Total conductance)

$$C = 1/R \quad (2)$$

직렬연결인 경우

$$1/C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (3)$$

병렬연결인 경우

$$C = \sum_{i=1}^n C_i \quad (4)$$

다) 전체 가스주입량

$$Q = Q_i + Q_m + Q_o + Q_p \quad (5)$$

여기서 누설량(Q_i), 침투량(Q_m), 확산, 기화, 역류에 의한 가스 유입량(Q_o)은 미소량이라 가정하고 무시하며, 분자가 충돌하기 전에 움직인 평균거리인 평균자유행로와 압력 P 와의 관계식은 대기온도의 공기인 경우, $\lambda = 5 \times 10^{-1} / P$ 로 표현된다. 여기서 분자흐름(Molecular flow)영역에서는 진공용기와 연결된 배기관의 지름과 평균자유행로(Mean free path)사이의 비인 Knudsen number (D/λ)는 다음의 조건을 만족해야 한다.

$$\begin{aligned}
 D/\lambda &< 1 & (6) \\
 16 &< (5 \times 10^{-1} / P) \\
 P &< 5 \times 10^{-1} / 16 = 3.125 \times 10^{-2} \text{ [torr]}
 \end{aligned}$$

따라서 진공용기의 조절하려는 운용압력 범위는 3.1×10^{-2} torr 이하의 분자흐름인 경우가 되므로 초기값을 1×10^{-2} torr로 하였다. 종값은 현재 부착된 시스템을 고려하여 진공배기계가 수십 또는 수백 mtorr의 공정압력에서 30sec 이내에 도달 할 수 있는 진공압력인 5×10^{-3} torr로 선정하였다.

라) 시간에 따라 가스 유입량 Q_p 가 일정한 경우 진공용기 내 압력가스 유입량 Q_p 가 시간에 따라 일정하게 유입되는 경우 용기내의 초기압력 P_i 에서 종압력 P 까지 배기하는데 소요되는 시간과의 관계는 다음 식 2.7와 같이 나타낼 수 있으며, 본 논문에서는 아래의 식을 기반으로 시뮬레이터를 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다.

$$\begin{aligned}
 P &= (P_i - K_o) \cdot e^{[(-V/S_p) \cdot t / (1 + S_p/C)]} + K_o & (7) \\
 K_o &= [1 + (S_p/C)] \cdot P_o + [1 + (S_p/C)] \cdot (Q_p/S_i)
 \end{aligned}$$

표 2 고진공 정압제어기의 파라미터 요약

Table 2 Parameters summary of a high-degree vacuum constant pressure control system

A_c [cm^2]	배기관의 단면적 (Cross Section area)
C [l/sec]	전체 컨덕턴스 (Total Conductance)
C_L [l/sec]	배기관에 의한 컨덕턴스
C_o [l/sec]	연결요소들에 의한 컨덕턴스
K_o	상수 (Constant number)
K_{efc}	외부 마찰계수
L [cm]	배기관의 길이 (Length)
M	분자량 (Relative molecular mass)
P [$torr$]	진공용기의 최종 압력
P_i [$torr$]	진공용기의 초기 압력
P_o [$torr$]	펌프의 최저압력
Q [l/sec]	전체 가스 주입량 (Total gas throughput)
Q_i [l/sec]	초기 설정값 (Initial Setpoint)
Q_l [l/sec]	누설량 (Leak)
Q_m [l/sec]	침투량 (Permeation)
Q_o [l/sec]	확산, 기화, 역류 등에 의한 가스 유입량
Q_p [l/sec]	가스 주입량
R [sec/l]	전체 흐름저항 (Total flow resistance)
R_L [sec/l]	전체 길이에 의한 흐름 저항
R_o [sec/l]	개구부에 의한 흐름저항
R_u [$cm^3/kmol \cdot sec$]	이상기체 상수 (Universal gas constant)
S_p [l/sec]	펌프의 배기 속도
t [sec]	초기압력에서 종압력 까지 시간
T [K]	절대온도 (Absolute temperature)
U [cm]	배기관 단면적의 주선 (Circumference)
V [l]	반응용기의 체적 (Volume)

3. 퍼지 PID 제어기 설계

본 논문에서 설계한 퍼지 PI제어기는 표준화된 E , ΔE 데이터를 입력으로 ΔU 의 출력 데이터를 출력하는 속도형 제어기로 제어기 기본 구성도를 그림 3에 나타내었다.

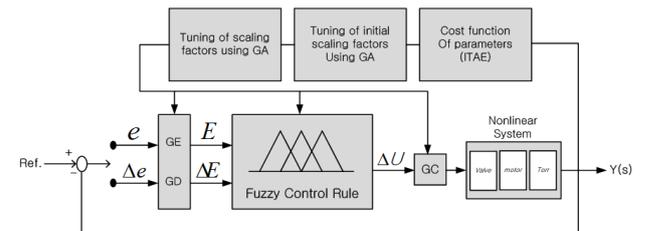


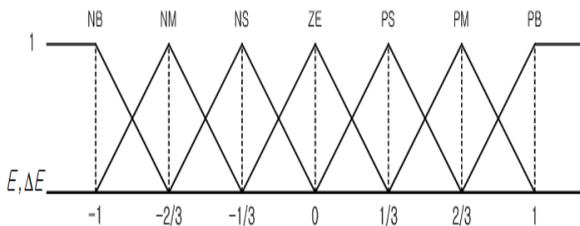
그림 3 퍼지 PI 제어기의 기본 구성도
Fig. 3 General Structure of Fuzzy PI Controller

여기서, $R(S)$: 설정값, $Y(S)$: 공정 출력값, e : 설정치와 공정출력의 오차, Δe : 설정치와 공정출력 오차의 변화량, E : 정규화된 설정값과 공정출력의 오차, ΔE : 정규화된 설정값과 공정출력 오차의 변화량, ΔU : 퍼지추론 규칙의 후반부 출력, U : 프로세스 제어입력, GE, GD : 제어 입력의 퍼지환산 계수, GC : 제어 출력의 퍼지환산 계수 이다. 퍼지환산 계수 GE 및 GD는 실제 공정에서의 에러(e)와 에러변화(Δe)를 퍼지 추론 규칙에 적용하기 위해 $[-1, 1]$ 의 범위 내로 표준화하기 위한 수치를 의미하는 환산계수이고 GC는 $[-1, 1]$ 범위의 퍼지 추론 규칙의 출력을 공정의 차원과 일치

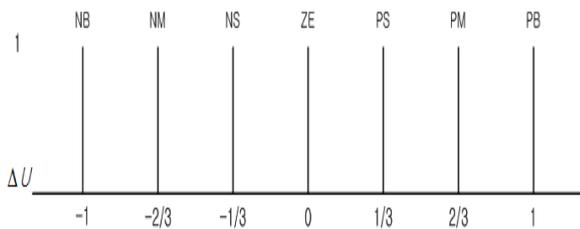
시킴을 위한 수치를 의미하는 퍼지 환산계수이다. 퍼지 환산 계수들은 퍼지 제어의 입·출력 데이터의 멤버십 함수의 제어 영역을 결정하는 제어 파라미터로서 제어기 성능에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 최적의 퍼지 PI제어기 설계를 위해 초기 퍼지 환산 계수를 설정하는 것은 가장 중요한 과정으로 본 논문에서는 4장에서 소개하는 제어 파라미터 최적화 알고리즘 중 하나인 유전자 알고리즘을 이용하여 제어 파라미터 동조를 하였다.

제어기 형태 및 입·출력 변수가 결정되면 다음으로 멤버십 함수를 구성한다. 이 멤버십 함수는 퍼지화(Fuzzification) 과정에 적용되며 크리스프 입력을 퍼지 집합으로 사상시키는 역할을 한다. 그간의 퍼지 제어기에 관한 다양한 연구 및 실험을 통하여 일반적으로, 전·후반부 입력 변수의 멤버십 함수는 각각 NB(Negative Big), NM(Negative Medium), NS(Negative Small), ZE(Zero), PS(Positive Small), PM(Positive Medium), PB(Positive Big)의 [-1, 1] 범위 내에서 균등 분배 및 차등 분배에 의해 표준화된 7개의 멤버십 함수를 사용한다. 멤버십 함수의 형태로 삼각형, 가우시안, 사다리꼴 등을 결정해야 하는데 일반적으로 표준화된 삼각형 형태를 사용한다.

본 논문에서도 전반부 입력 변수의 멤버십 함수로 표준화된 삼각형 형태의 멤버십 함수를 사용하고, 후반부 출력 변수의 멤버십 함수로 상수 변수(Singleton)형태의 멤버십 함수를 사용하였으며 그 구조를 그림 4에 나타내었다.



(a) 전반부 입력변수의 멤버십 함수



(b) 후반부 출력변수의 멤버십 함수

그림 4 입·출력 변수의 멤버십 함수

Fig. 4 Membership function of input and output variable

다음으로 입력 멤버십 함수 값에 따른 출력 멤버십 함수 값을 결정하는 제어규칙을 정의해야 한다. 퍼지 제어알고리즘은 일반적으로 식 (8)의 형태를 취하는 N개의 독립적인 제어 규칙들로 구성된다.

$$R^k : \text{IF } E \text{ is } A_i \text{ and } \Delta E \text{ is } B_i, \text{ THEN } \Delta U \text{ is } C_i \quad (8)$$

여기서, R^k : k 번째의 제어 규칙 ($k = 1, 2, \dots, N$), E : 오차값, ΔE : 오차의 변화값, ΔU : 제어 입력의 변화값, A_i, B_i : 퍼지 변수, C_i : 상수변수(Singleton) ($i = 1, 2, \dots, N$) 이다.

입력 변수 E 및 ΔE 의 멤버십 함수값에 따른 후반부 상수 변수의 관계를 나타내는 퍼지 제어 규칙은 다음 표 3에 나타내었다.

식 (8)의 퍼지 제어규칙에서 입·출력 변수의 멤버십 함수는 그림 4와 같이 [-1, 1]사이에서 표준화된 삼각형 형태를 사용한다. 각각의 규칙에 있어 전반부의 추론 결과값은 식 (9)와 같다.

$$W_i = \text{Product} \{ \mu_{A_i}(E_k), \mu_{B_i}(\Delta E_k) \} \quad (9)$$

여기서, W_i 는 표준화된 에러(E_k) 및 에러 변화(ΔE_k)값에 대한 퍼지 추론 결과값으로 각 퍼지 제어 규칙의 적합도값이라 하기도 한다. 각각의 퍼지 제어 규칙에 대하여 추론 결과값의 연산은 표준화된 전반부 퍼지 입력인 E_k 와 ΔE_k 의 사상된 멤버십 함수 값 $\mu_{A_i}(E_k)$ 와 $\mu_{B_i}(\Delta E_k)$ 의 곱으로 계산하였다. 그리고 비퍼지화(defuzzification)과정을 거친 후반부 추론결과 값은 식 (10)과 같이 얻을 수 있다.

$$\Delta U^* = \frac{\sum_{i=1}^N W_i \cdot C_i}{\sum_{i=1}^N W_i} \quad (10)$$

여기서, W_i : 각 퍼지제어 규칙에서의 퍼지 추론결과값, C_i : 퍼지 제어규칙표에 의한 후반부 상수 변수의 값이다. 비퍼지화 연산으로는 무게 중심법(Center of gravity)을 적용하여 추론 결과를 얻었다.

표 3 퍼지 제어 규칙 표

Table 3 The table of fuzzy control rule

		ΔE						
		NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
E	NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
	NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
	NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PN
	ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PN	PB
	PS	NM	NS	ZE	PS	PN	PB	PB
	PM	NS	ZE	PS	PN	PB	PB	PB
	PB	ZE	PS	PN	PB	PB	PB	PB

4. 유전자 알고리즘을 이용한 제어파라미터 동조

퍼지제어기를 설계하는데 있어서 제어 규칙과 멤버십 함수 및 환산계수는 제어기의 핵심으로 이것의 설정에 따라 빠르고 안정된 제어 결과를 얻을 수 있다. 그러나 이 퍼지 제어기의 제어 파라미터들은 수학적으로 결정하기 매우 어렵기 때문에, 일반적으로 전문가의 경험에 의해 결정되거나 시행착오를 거쳐 구하며, 최근에는 유전자 알고리즘 같은 최적화 알고리즘을 이용하여 구한다. 본 논문에서는 최적 퍼

지제어기를 설계하기 위해 최적화 알고리즘 중 하나인 유전자 알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하여 제어기의 파라미터를 동조하였다.

유전자 알고리즘이란 적자생존의 생물학 원리에 바탕을 둔 최적화 기법중 하나로 환경에 잘 적응한 개체가 좀 더 많은 자손을 낳을 수 있다는 자연선택 과정과 유전자의 변화를 통해서 좋은 방향으로 발전해 나간다는 자연 진화의 과정인 자연계의 유전자 메커니즘에 바탕을 둔 탐색 알고리즘이다. 이진수 형태로 표현된 유전자와 적합도들로 이루어진 개체들의 집합을 이용해서 최적화 과정을 수행하는 알고리즘으로 기존의 최적화 알고리즘은 최적화 하고자 하는 목적함수를 미분해서 탐색을 수행하는 반면, 유전자 알고리즘은 선택 연산자, 교배 연산자, 돌연변이 연산자와 적합도를 이용하여 탐색을 수행한다. 또한 유전자 알고리즘은 개체들이 모여 이루는 군집에 의한 병렬적 탐색이라는 점에서 기존의 최적화 알고리즘과 다르다. 한 세대의 군집에 속한 개체들은 진화를 거듭하면서, 이전 세대까지 축적된 정보를 서로 교환하고 새로운 영역으로의 탐색을 시도한다. 탐색의 방향이나 영역이 초기값에 의해서 결정되지 않고 세대마다 확률적으로 결정되므로 지역 최소점에 빠질 가능성이 적어 전역 최적화가 가능한 알고리즘으로 알려져 있다.

유전자 알고리즘은 길으로는 임의선택방법(Random search method)의 형태를 갖지만, 이를 바탕으로 근거 있는 다른 정보 가공을 통해 최적 지점을 찾아간다. 최근의 많은 탐색 방법들은 한 번에 최적 값을 찾아내지 않고, 반복을 통해서 최적 지점에 접근해 가는 방법을 사용하고 있다. 유전자 알고리즘도 마찬가지로 적정 수준에 도달할 때까지 탐색 과정을 반복한다. 유전자 알고리즘은 코딩 방법에 따라 크게 이진코딩, 실수코딩, 심볼릭코딩 세 가지로 나뉘는데 그중 이진코딩 유전자 알고리즘이 보편적으로 많이 사용되고 있다. 본 논문에서도 이진 코딩의 유전자 알고리즘을 사용하였다.

기존의 방법들이 한 점에서 시작해 단지 그 수를 이용해 값을 찾는 것과 비교해 GA는 동시에 여러 점을 탐색하고 수 자체가 아닌 코딩된 수를 사용한다는 것이 가장 큰 차이점이다. 본 논문에서는 다음과 같은 흐름으로 유전자 알고리즘을 사용하였다.

유전자 알고리즘의 수행 과정을 그림 5에 나타냈다.

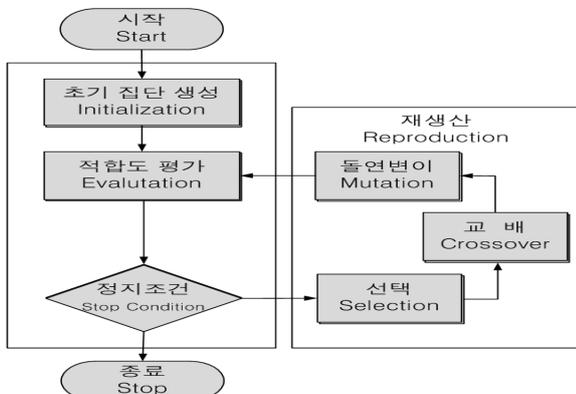
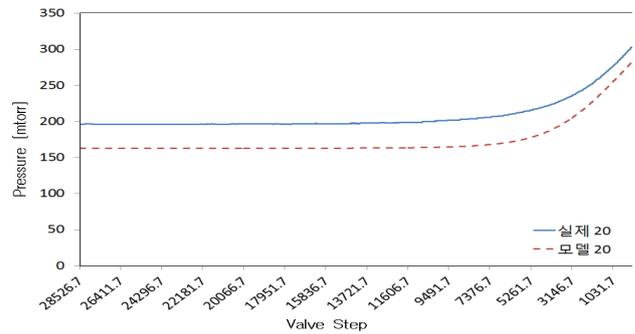


그림 5 유전자 알고리즘의 흐름도
Fig. 5 Flowchart of Genetic Algorithm

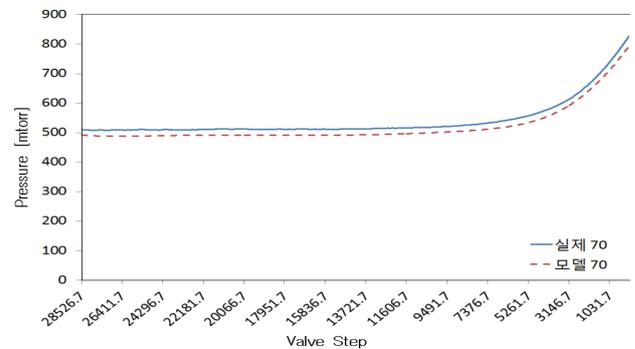
5. 비선형 시스템의 모델 보상과 시뮬레이션 및 실험결과

5.1 동특성 비교를 통한 모델 보상

정압제어 시스템의 연동관계 및 각종 장비의 기계적 특성의 수치적 분석과 진공이론에 기초하여 산출한 수학적 시스템 모델이 실제 시스템의 동특성을 완벽하게 반영하지 못하기 때문에, 이번 절에서는 이러한 문제점을 해결하기 위한 모델보상 방법을 설명한다. 그림 6과 그림 7에 우리가 설계한 모델과 실제 시스템의 동특성 출력의 차이를 가지적으로 확인하기 위한 그래프를 나타냈다.



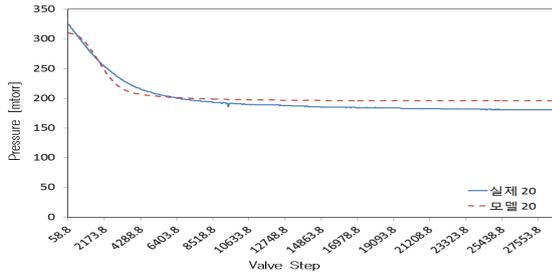
(a) 입력유량 20에서의 동특성 비교



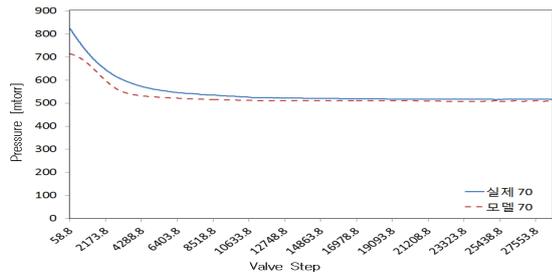
(b) 입력유량 70에서의 동특성 비교

그림 6 보상 전 실제 시스템과 시뮬레이션 동특성 비교
Fig. 6 Comparison of Dynamic Characteristics between Real System and Simulation before Compensation

그림 6과 7은 실제 정압제어 시스템과 2장 2절의 식 (7)을 기초하여 설계한 모델의 동특성을 입력 유량별로 비교한 그래프이다. 2장에서 설명하였듯이 실제 시스템과 모델의 동특성 응답을 비교해 보면 비교적 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이는 시뮬레이션을 통한 제어기 설계에 있어 큰 문제를 발생시킨다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 시스템 모델의 보상을 수행하였으며 3단계로 설명하면 다음과 같고 보상 후 모델의 동특성 응답 그래프를 그림 8과 9에 나타냈다.



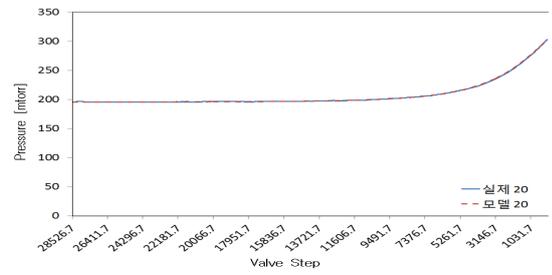
(a) 입력유량 20에서의 동특성 비교



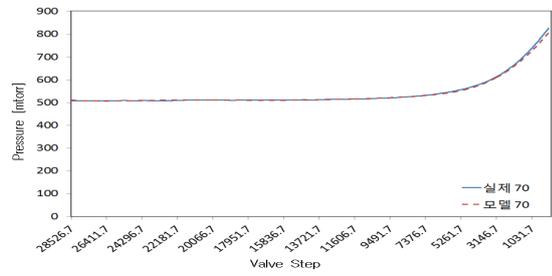
(b) 입력유량 70에서의 동특성 비교

그림 7 보상 전 실제 시스템과 시뮬레이션 동특성 비교
Fig. 7 Comparison of Dynamic Characteristics between Real System and Simulation before Compensation

[Step 1] 실제 시스템의 동특성 응답과 설계한 모델의 동특성 응답의 밸브 스텝별 오차를 구한다.
 [Step 2] 각 스텝별 평균 오차를 구하고 밸브 스텝에 대한 평균오차의 함수식을 구한다.
 [Step 3] 밸브 스텝에 대한 평균오차의 함수를 설계한 모델식에 보상하여 최종 모델식을 구성한다.



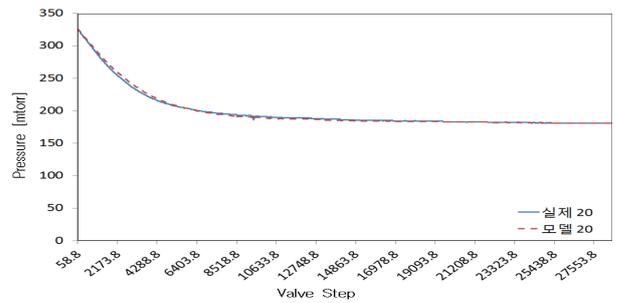
(a) 입력유량 20에서의 동특성 비교



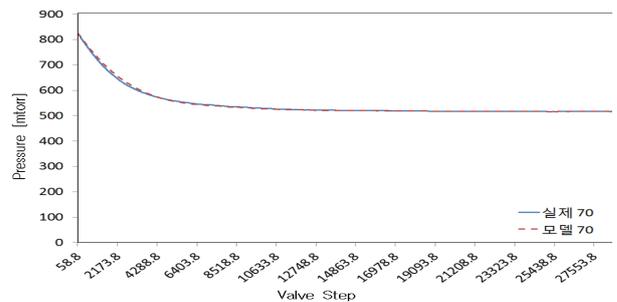
(b) 입력유량 70에서의 동특성 비교

그림 8 보상 후 실제 시스템과 시뮬레이션 동특성 비교
Fig. 8 Comparison of Dynamic Characteristics between Real System and Simulation after Compensation

그림 8과 9는 보상한 모델의 동특성과 실제 시스템의 동특성 응답을 입력 유량별로 비교한 그래프이다. 정상 상태에서의 오차는 거의 없고 과도 상태에서 매우 작은 오차만이 존재함을 확인 할 수 있다. 이는 제안한 모델 보상 방식에 의하여 보상된 시스템 모델이 실제 시스템의 동특성을 충분히 반영한다고 평가할 수 있으며 다음 절에서 설명 수행 할 유전자 알고리즘을 이용한 제어 파라미터 동조를 함에 있어 문제가 없다 결론지을 수 있다.



(a) 입력유량 20에서의 동특성 비교



(b) 입력유량 70에서의 동특성 비교

그림 9 보상 후 실제 시스템과 시뮬레이션 동특성 비교
Fig. 9 Comparison of Dynamic Characteristics between Real System and Simulation before Compensation

5.2 보상된 모델을 이용한 제어 파라미터 동조

이번 절에서는 시뮬레이션을 통하여 시스템에 적용할 PID제어기, 퍼지 PID제어기의 최적 파라미터를 찾고 제어기 성능을 비교 및 평가한다. 시뮬레이션에서 설정압력은 500 mtorr로 설정하였고, 유량 변화는 20~70 [l/sec]로 설정하였다. 성능평가 지표로는 식 5.1에 나타낸 ITAE성능지수, 상승시간(Risetime), 오버슈트(Overshoot), 정상상태 도달시간(Steady state time)을 고려하였으며 빠른 시간 안에 최소 오버슈트로 안정된 정상상태에 도달하는 가로 정의하였다. 또한, 시뮬레이션을 통해 최적화 된 제어기를 실제 정압제어 시스템에 구현 한 뒤 성능비교를 하였다.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t \cdot |e| dt \tag{11}$$

제어 파라미터 동조를 위한 최적화 알고리즘으로 4장에서 설명한 유전자 알고리즘을 사용하였으며, 동일 환경에서의 성능 평가를 위하여 세대수, 집단 크기, 교배확률, 돌연변이

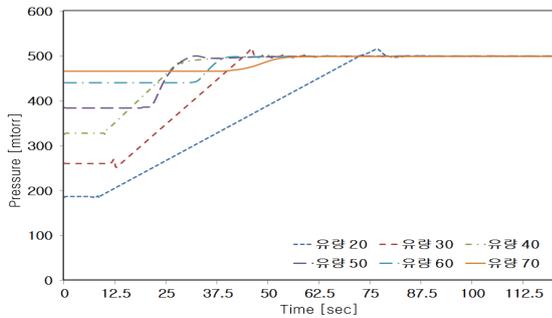
확률 등의 설정 값을 표 4에 나타낸 값으로 동일하게 설정하였다.

본 논문에서는 실제 정압제어 시스템에 대하여 다양한 환경변화에서도 우수한 제어 성능을 갖는 최적의 단일 파라미터의 제어기 설계를 목표로 연구한다. 각각의 제어 방식에서 탐색하고자하는 것은 입력유량 50[l/sec]의 환경에서 최적의 성능을 갖는 제어 파라미터이다.

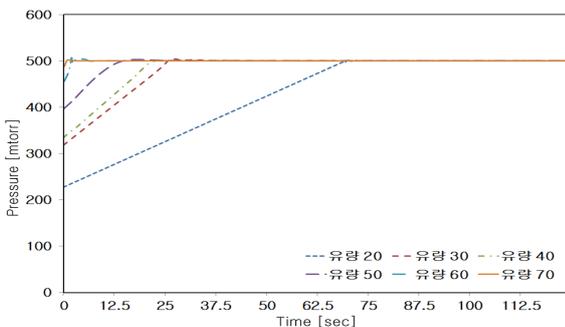
표 4 유전자 알고리즘의 파라미터 및 연산자 요약

Table 4 Summary of the parameters and operators of Genetic Algorithm

Genetic Algorithm		
Parameter	세대수	100
	집단크기	100
	교배율	0.8
	돌연변이율	0.01
Operator	선택연산자	룰렛-휠 선택연산
	교배연산자	단순 교배연산
	돌연변이연산자	단순돌연변이연산
	기타 전략	엘리트 전략 적용



(a) PID 제어기 시뮬레이션 결과



(b) Fuzzy PID 제어기 시뮬레이션 결과

그림 10 시뮬레이션 결과

Fig. 10 Simulation results

그림 10은 입력유량 50[l/sec], 설정압력 500[mTorr]에서 동조한 단일 제어파라미터로 최적화된 PID제어기, 퍼지 PID제어기를 20~70의 유량변화 동안의 성능을 나타낸 그래프이다. 그래프에서 보듯이, 퍼지 PID 제어기가 PID제어기보다 빠른 Risetime, 적은 Overshoot, 빠른 Steady state time에 우수하고 안정된 제어 성능을 보임을 확인할 수 있다. 표 5는 그림 10의 시뮬레이션 결과를 수치로 나타낸 것이다. 입력유량과 설정압력은 각각 50 [l/sec], 500 [mTorr]로

동일한 값이다. PID제어기에서 가장 우수한 성능을 보이는 유량 40[l/sec]에서의 수치를 기준으로 비교하면, 상승시간(Risetime), 정상상태 도달 시간(Steady state time) 등 거의 모든 지표에서 퍼지 PID제어기가 가장 우수한 성능을 보임을 볼 수 있다. 또한 퍼지 PID제어기는 유량 70[l/sec]에서 오버슈트 0.34%, 정상상태 도달시간 2초로 가장 우수한 성능을 보임을 특징적으로 확인했다.

표 5 시뮬레이션에서의 제어 성능 비교

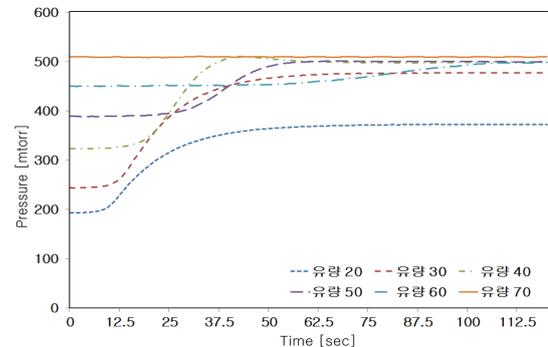
Table 5 Comparison with performance of controller in simulation

(a) PID 제어기 시뮬레이션 결과

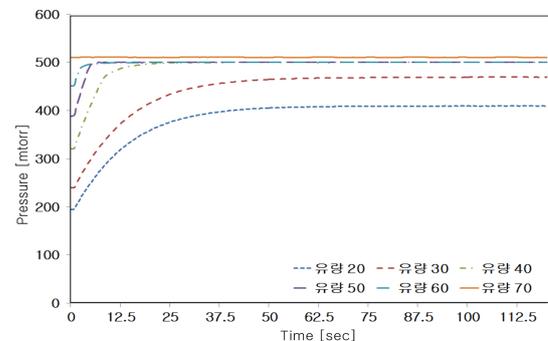
Rate of Inflow [l/sec]	Risetime [sec]	Overshoot [%]	Steady state time [sec]
20	62.25	3.18	83
30	37.75	3.52	69.75
40	23.75	0.09	47
50	25	0.08	52
60	33.5	0	57
70	0	0	70.75

(b) Fuzzy PID 제어기 시뮬레이션 결과

Rate of Inflow [l/sec]	Risetime [sec]	Overshoot [%]	Steady state time [sec]
20	49.25	0.11	70.25
30	19.25	0.76	32
40	15.5	0.11	23.25
50	6.25	0.54	20.75
60	0	0.73	6
70	0	0.34	2



(a) PID 제어기 실제 시스템 결과



(b) Fuzzy PID 제어기 실제 시스템 결과

그림 11 실제 시스템의 결과

Fig. 11 Result of real system

그림 11은 표 5에 나타난 입력유량 50[l/sec], 설정압력 500[mtorr] 및 동일한 배기 환경에서 동조한 최적의 단일 제어파라미터의 PID, 퍼지 PID제어기를 실제 시스템에 구현한 결과를 비교한 결과이다. 실제 시스템의 결과는 기후변화에 따른 대기압의 변화, 부하변동에 따른 진공 펌프 및 유량 공급기의 성능 변화, 측정 오차 등에 따라 비선형적 특성이 달라지기 때문에 시뮬레이션과 조금 다를 수 있다. 하지만 대체적으로 시뮬레이션과 비슷한 결과를 보임을 볼 수 있다. 실제 시스템의 결과에서도 PID제어기 보다 퍼지 PID제어기가 보다 우수한 성능을 보임을 볼 수 있다.

표 6 실제 시스템의 제어 성능 비교

Table 6 Comparison with performance of controller in real system

(a) PID 제어기 실제 시스템 결과

Rate of Inflow [l/sec]	Risetime [sec]	Overshoot [%]	Steady state time [sec]
20	-	-	-
30	-	-	-
40	29.5	1.6	73.5
50	39.5	0	60.25
60	0	0	127
70	-	-	-

(b) Fuzzy PID 제어기 실제 시스템 결과

Rate of Inflow [l/sec]	Risetime [sec]	Overshoot [%]	Steady state time [sec]
20	-	-	-
30	-	-	-
40	7	0.138	24.5
50	3	0.02	6.5
60	0	0.11	3.25
70	-	-	-

표 6은 그림 11의 실제 시스템의 결과를 수치로 나타낸 것이다. 적용한 네 가지 제어 방식 모두 오버슈트(Overshoot) 2% 이내로 적절하다. 하지만 정상상태 도달 시간은 PID제어기는 1분 이상으로 매우 늦은 반면 퍼지 PID제어기는 10초 이내의 정상상태 도달 시간으로 가장 우수한 성능을 보임을 볼 수 있었다.

6. 결 론

본 논문에서는 고진공 정압 제어를 위해 유전자 알고리즘을 이용한 퍼지 제어기의 최적 설계에 관하여 연구하였다. 제안된 퍼지 PID제어기를 실제 고진공 정압제어 시스템에 구현하기 위하여 시스템의 동특성을 분석하고 모델을 보상 설계하였다. 퍼지제어기의 멤버쉽 함수 범위를 결정하는 제어파라미터만을 최적화하여 최적 퍼지 제어기 설계하는데 중점을 두었기 때문에 멤버쉽 함수의 형태 및 제어 규칙의

최적화에 미흡한 점이 있다. 하지만, 멤버쉽 함수 범위를 결정하는 제어파라미터를 최적화 한 것만으로도 기존 PID제어기가 보다 제안된 퍼지 PID제어기가 더 성능이 우수함을 확인하였으며, 향후 제어 파라미터뿐만 아니라 멤버쉽 함수의 구성 및 제어 규칙까지 최적화를 수행한다면 더욱더 우수한 성능의 퍼지제어기를 설계할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 중소기업청에서 지원하는 2011년도산학연 공동 기술개발사업(No. 00047279)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다 그리고 2009년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2009-0074928).

참 고 문 헌

- [1] H. Takagi, N. Suzuki, T. Kojima,, "Neural Networks Designed on Approximate Reasoning Architecture and Their Applications." IEEE trans. Neural Networks, Vol. 3, No.5, pp.752-760, 1992.
- [2] Adcock TA. What is fuzzy logic? An overview of the latest control methodology. TI Application Report, January; p. 1-7. 1993.
- [3] H. J. Lee, J. B. Park and G. Chen, "Robust Fuzzy Control of Nonlinear Systems with Parametric Uncertainties," IEEE Trans. on Syst., Vol. 9, No. 2, pp. 369-379, 2001.
- [4] H.-N. Wu and K.-Y. Cai, "Robust fuzzy control for uncertain discrete-time nonlinear Markovian jump systems without mode observations," Information Sciences Vol. 177, Issue 6, pp. 1509-1522, 2007.
- [5] S.-K. Oh, "Fuzzy model & control system", naeha., 2002.
- [6] C. C. Lee, "Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - part I and part II," IEEE Trans. on Syst., Man Cybern., vol. 20, pp. 404-435, 1990.
- [7] L. Wang, "Stable and Optimal Fuzzy Control of Linear Systems," IEEE Trans. on Fuzzy Syst. vol. 6, no.1, pp.137-143, 1998.
- [8] D.E. Goldberg, "Genetic algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning," Addison-Weatley, 1989.
- [9] Sung-Kwun Oh, Seok-Beom Roh, "The Design of Fuzzy Controller Based on Genetic Optimization and Neurofuzzy Networks," Journal of Electrical Engineering & Technology Vol. 5, No. 4, pp. 653~665, 2010.

저 자 소 개



오 성 권 (吳 聖 權)

1981년 연세대학교 전기공학과 졸업, 동 대학원석사(1983),박사(1993). 1983-1989년금성산전연구소(선임연구원). 1996-1997년 캐나다 Manitoba 대학 전기 및 컴퓨터공학과Post-Doc. 1993-2004년 원광대학교 전기전자 및 정보공학부 교수.

2005~현재 수원대학교 전기공학과 교수, 2002~현재 대한전기학회, 제어로봇시스템학회, 퍼지및지능시스템학회 편집위원. 관심분야는 퍼지 시스템, 퍼지-뉴럴 네트워크, 자동화 시스템, 고급 computational intelligence, 지능 제어 등.

Tel : 031-229-8162

Fax : 031-220-2667

E-mail : ohsk@suwon.ac.kr



조 세 희 (趙 世 熙)

2011년 수원대학교 전기공학과 졸업.

2011년~현재 동 대학원 석사과정.

관심분야는 퍼지추론 시스템, 퍼지 제어

Tel : 031-222-6544

E-mail : se-hee@suwon.ac.kr



이 승 주 (李 承 周)

2011년 수원대학교 전기공학과 졸업.

2011년~현재 동 대학원 석사과정.

관심분야는 퍼지추론 시스템, 뉴럴 네트워크

Tel : 031-222-6544

E-mail : inpneuma@suwon.ac.kr