

유압 서보 모터를 위한 $e-\Delta e$ 위상평면을 이용한 이중 퍼지 로직 제어기 설계

Design of Dual Fuzzy Logic Controller using $e-\Delta e$ Phase Plane for Hydraulic Servo Motor

신위재*, 문정훈*

Wee-Jae Shin*, Jeong-Hoon Moon*

요약

본 연구에서는 응답의 과도영역에서 특징점의 각 영역과 $e-\Delta e$ 위상평면을 이용하여 이중 퍼지룰을 구성하였다. 구성된 퍼지 제어룰은 기본 퍼지제어 룰에 비해 상승시간, 지연시간, 최대오버슈트 등을 줄일 수 있었으며 퍼지 룰의 제안 방법은 $e-\Delta e$ 위상평면에서 하나의 퍼지룰은 과도영역에서 정상상태오차를 일으키고 다른 퍼지 제어 룰은 정상상태오차를 감소시키고 수렴영역에서 빠르게 수렴 하도록 교대로 사용한다. 또한 $e-\Delta e$ 위상평면에서의 두 개의 퍼지 룰은 플랜트의 응답 특성에 따라 교체시기를 결정한다. DSP 프로세서를 사용하는 유압서보 모터 제어시스템을 통한 실험의 결과로서 제안된 이중 퍼지 제어 룰은 기본 퍼지 제어 룰에 비해 빠른 상승시간, 정정시간등 양호한 응답을 얻을 수 있음을 확인하였다.

Abstract

In this paper we composed the dual fuzzy rules using each region of specific points and $e-\Delta e$ phase plane in order to make dual fuzzy rule base. We composed the fuzzy control rules which can decrease rise time, delay time, maximum overshoot than basic fuzzy control rules. proposed method is alternately use at specific points of $e-\Delta e$ phase plane with two fuzzy control rules that is one control rule occruing the steady state error in transient region and another fuzzy control rule use to decrease the steady state error and rapidly converge at the convergence region. Also, two fuzzy control rules in the $e-\Delta e$ phase plane decide the change time according to response characteristics of plants. In order to confirm the proposed algorithm As the results of experiments through the hydraulic servo motor control system with a DSP processor, We verified that proposed dual fuzzy control rules get the good response compare with the basic fuzzy control rule.

Keywords : $e-\Delta e$ phase plane, two fuzzy control rules, change time, hydraulic servo system

I. 서론

본 논문에서는 유압 서보 모터를 제어하는 데 있어서 퍼지 제어기의 성능을 향상시키기 위해서 일반적으로 사용되는 기본 퍼지 제어 규칙의 한계를 극복하기 위해 두 개의 제어 규칙을 사용하여 상승시간과 정정시간 및 오버슈트를 감소시키는 이중 퍼지 제어 규칙을 제안하였다. 두 개의 퍼지 제어규칙을 교체하는데 있어서 유압 서보 모터의 특성에 얽매이지 않고 보편적으로 사용할 수 있도록 $e-\Delta e$ 위상평면에서의 특징점에서 제어규칙을 교체시키는 방법을 연구하였다. 모의 실험으로 유압 서보 모터에 기본 퍼지 제어규칙과 이중 제어 규칙을 적용하여 이중 제어규칙의 성

능을 확인하였다.

II. 제안한 퍼지 제어기

본 논문에서 제안한 퍼지 제어기는 과도영역을 개선시키는 Rule1과 수렴영역을 개선시키는 Rule2를 갖는 퍼지 제어기이며 그림 1은 그 구조를 나타낸다.

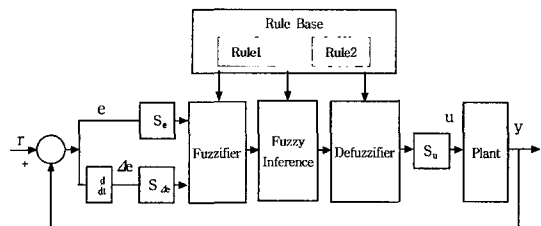


그림 1. 이중 제어규칙을 갖는 퍼지 제어기의 구조
Fig. 1. Structure of fuzzy controller using dual control rules

*경남대학교 전자공학과

논문 번호 : 2007-2-9 접수 일자 : 2007. 5. 11

심사 완료 : 2007. 5. 25

*이 연구 결과물은 2006년도 경남대학교 학술진흥연구비 지원에 의하여 이루어졌음.

III. 기본 퍼지 제어규칙

제어 전문가의 지식을 활용하는 방법 중에서 발견법으로 제어 대상의 스텝응답을 보고 오차(e)와 오차 변화율(Δe)의 위상평면에서 특징점과 특징영역을 사용하여 기본 퍼지 제어규칙을 구할 수 있고 49개의 규칙을 나타내면 Table 1과 같다.^[1,2]

IV. 이중 제어 규칙

본 논문에서 제안된 두 개의 제어규칙 중 과도영역에 중점을 둔 제어규칙인 Rule1은 상승시간과 최대오버슈트, 언더슈트를 감소에만 관점을 둔 규칙이고, 수렴영역에 중점을 둔 퍼지 제어규칙인 Rule2는 설정치에 더 빨리 도달하게 하는 제어규칙으로 Rule1의 수렴 특성을 보완한다. 두 개의 제어규칙을 각각의 영역에서 교체하여 사용하면 과도영역과 수렴영역에서 기본 퍼지 제어 규칙보다 나은 성능을 가진다. 그림 2에서 phase I와 phaseII에서는 e가 positive이고 크기 때문에 e를 줄이기 위해서는 큰 가속이 요구되고 상승시간의 감소에 비중을 많이 두고 오버슈트를 의식하지 않으므로 Δu를 positive로 값을 적용한다. phaseIII과 phaseIV는 오버슈트 부분으로 e가 negative로 계속 커져 큰 오버슈트가 예상되므로 Δu를 negative로 하고 큰 값을 적용한다. phaseV에서는 e<0이지만 e가 점점 작아지고 있으므로 Δu를 negative로 비교적 작게 한다. phaseVI에서는 언더슈트를 예상하여 미리 가속하기 위해 Δu값은 positive로 하며 Δu의 크기를 크게 적용한다.. phaseVII과 phaseVIII에서는 언더슈트 부분으로 e가 positive로 계속 커져 큰 언더슈트가 예상되므로 Δu를 positive로 하고 크기를 크게 적용한다. 이러한 방법으로 퍼지 제어규칙을 구하면 Table 2와 같이 되며 Rule1으로 사용한다.

그림 2에서 phase I은 e가 positive이고 크기 때문에 e를 줄이기 위해서는 큰 가속이 요구되므로 Δu를 positive로 하여야 하며 크기를 크게 적용하지만 phaseII에 가까워짐에 따라 Δu를 작게 적용한다. phaseII에서는 예상되는 오버슈트를 작게 하기 위해 미리 감속해야 한다. 따라서 Δu를 negative로 하고 크기는 작게 적용한다. phaseIII과 phaseIV는 오버슈트 부분으로 e가 negative로 계속 커져 큰 오버슈트가 예상되므로 Δu를 negative로 하고 오차와 오차의 변화율에 따라 크기를 적용한다. phaseV에서는 e<0이지만 e가 점점 작아지고 있으므로 Δu를 negative로 비교적 작게 한다. phaseVI에서는 언더슈트를 예상하여 미리 가속하기 위해 Δu값은 positive로 하며 오차와 오차의 변화율에 따라 크기를 적용한다. phaseV와 phaseVI의 경계선에서는 Δu가 negative에서 positive로 바뀌는 부분이므로 Δu를 zero로 한다. phaseVII에서는 언더슈트 부분으로 e가 positive로 계속 커져 큰 언더슈트가 예상되므로 Δu를 positive로 하고 오차와 오차의 변화율에 따라 크기를 적용한다. phaseVIII에서는 언더슈트 부분으로 e가 positive로 커지므로 Δu를 positive로 하며 크기를 크게 적용한다. 이러한 방법으로 퍼

지 제어규칙을 구하면 Table 3과 같이 되며 Rule2로 사용한다.

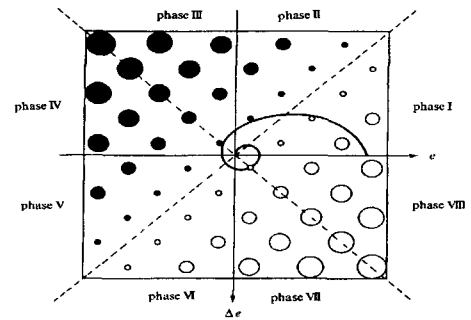


그림 2. e-Δe 위상평면에서의 궤적
○=positive ●=negative (원 크기=Δu 크기)

Fig. 2. Locus of e-Δe phase plane
○=positive ●=negative (circle size=Δu size)

표 1. 기본 퍼지 제어규칙

Table 1. Basic fuzzy control rule

e Δe	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZE
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZE	PS
NS	NB	NB	NM	NS	ZE	PS	PB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB
PM	NS	ZE	PS	PM	PB	PB	PB
PB	ZE	PS	PM	PB	PB	PB	PB

표 2. Rule 1의 제어규칙.

Table 2. Control rule of rule1

e Δe	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	PM	PB
NM	NB	NB	NB	NM	PM	PB	PB
NS	NB	NB	NM	NS	PB	PB	PB
ZE	NB	NM	NS	ZE	PB	PB	PB
PS	NM	NS	ZE	PS	PB	PB	PB
PM	NS	ZE	PB	PB	PB	PB	PB
PB	ZE	PB	PB	PB	PB	PB	PB

표 3. Rule 2의 제어규칙.

Table 3. Control rule of Rule2

e							
Δe	NB	NM	NS	ZE	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	ZE
NM	NB	NM	NM	NS	NS	ZE	PS
NS	NM	NM	NS	NS	ZE	PS	PS
ZE	NM	NS	NS	ZE	PS	PS	PM
PS	NS	NS	ZE	PS	PS	PM	PM
PM	NS	ZE	PS	PS	PM	PM	PB
PB	ZE	PS	PS	PM	PM	PB	PB

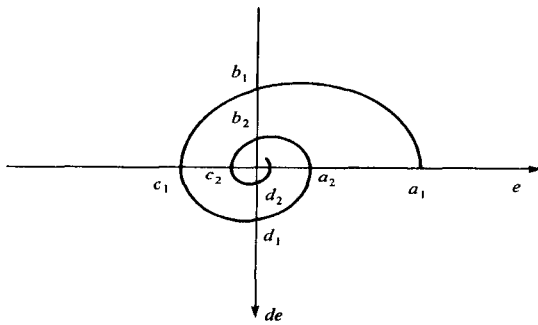


그림 3. e-Δe 위상평면 궤적의 특징점
Fig. 3. Feature point of locus of e-Δe phase plane

Rule1에서 Rule2로 교체되는 시기는 그림 3에서 볼 수 있는 것과 같이 과도영역과 수렴영역을 구분할 수 있는 e-Δe 위상평면에서의 특징점 b1,c1,d1등으로 정할 수 있다.

b1에서 Rule2로 교체되는 경우 Rule1을 적용하였을 때 플랜트가 일반적인 스텝응답 특성을 나타낼 경우, 즉 오버슈트가 발생할 경우에는 Rule2는 Table 3이 적용된다. 오버슈트가 발생하지 않았을 경우 스케일 계수를 조절함으로써 오버슈트를 유발한다.

주의할 것은 Rule1은 대칭성이 없으므로 현재의 설정치보다 낮은 값의 설정치를 위해서는 제시된 Rule1을 대칭이 되게 작성하여 적용하면 된다. 하지만 Rule2는 대칭을 이루고 있으므로 상관없다.

V. 모의 실험 및 고찰

본 연구에서 제안한 알고리즘의 타당성을 확인하기 위해 매트랩 프로그램을 이용하여 모의실험을 실행하였다. 샘플링 시간 0.001ms로 이산화 하여 시뮬레이션 할 1차 지연플랜트에 대한 차분방정식은 식(1)과 같다.¹

$$y(n) = 1.66468 y(n-1) - 0.66817 y(n-2) + 0.07574 u(n-1) \quad (669)$$

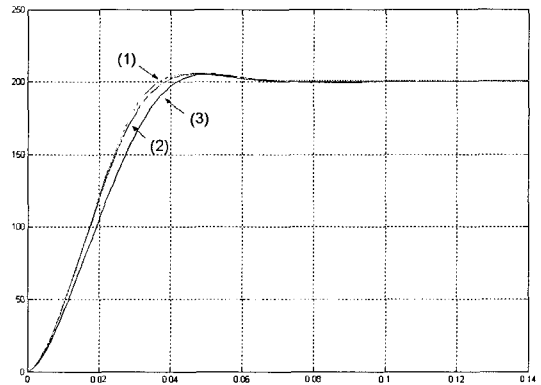


그림 4. (1) Rule1을 적용했을 경우
(2) Rule2를 적용했을 경우
(3)기본 퍼지 제어규칙을 적용했을 경우
Fig. 4. (1) Application of Rule1 (2) Application of Rule2
(3 Application of basic fuzzy control rule

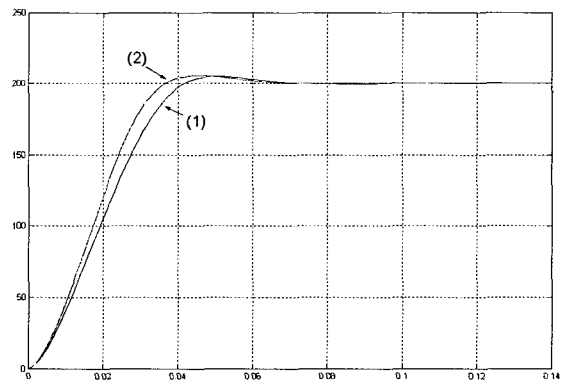


그림 5. 기본 퍼지제어규칙(1)과 이중 퍼지제어규칙(2)를 적용한 경우의 플랜트 응답 비교
Fig. 5. Comparison of plant response a case of application of basic fuzzy control rule(1) and dual fuzzy control rule(2)

지연시간은 기본퍼지 제어규칙만을 사용하는 경우에비해 약 2ms 빨랐으며 상승시간은 기본 퍼지 룰에 비해 약 2.8ms빨리 상승하여 최대오브슈트를 2.8 % 정도 증가시켰다. 따라서 정정시간은 기본퍼지 제어규칙을사용할 때에 비해 3.6ms 빨랐다.

표 4. 성능지수를 통한 응답특성 비교

Table 4. Comparison of response character through performance index

	지연 시간	상승 시간	정정 시간	최대 오버 슈트
기본퍼지 제어규칙	19.2ms	27.6ms	57.3ms	2.71%
Rule1	17.3ms	23.8ms	56.0ms	3.05%
Rule2	17.4ms	24.7ms	54.2ms	2.70%
이중퍼지 제어규칙	17.3ms	23.8ms	53.7ms	2.99%

VI. 실험 및 결과

이중제어 규칙을 가지는 퍼지제어기를 사용하여 유압 서보 모터에 적용하였다. 설정치를 200rpm으로 적용하였으며 그림 6은 기본퍼지제어기의 속도 응답을 나타내며 그림 4는 이중 Rule Table 퍼지제어기의 속도 응답을 나타낸다. 그림 8은 그림 6과 그림 7을 확대하여 비교한 그림이며 이를 토대로 하여 표 5를 작성하였다.

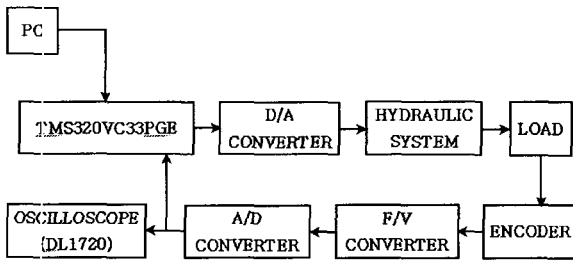


그림 6. 유압서보제어시스템 실험장치의 구조

Fig. 6. Structure of experimental equipment of hydraulic servo control system

PC는 ADSP-21020 계열 개발 소프트웨어를 사용하여 C 언어로 작성하고 제한한 알고리즘을 DSP 어셈블리 언어로 번역한 뒤 실행 파일을 생성시켜 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 RS-232 통신 방식으로 다운로드(Down loading)하여 알고리즘을 수행한다. 유압 서보시스템은 유압모터와 직접구동 밸브(Direct Drive valve), 관성부하로 이루어진다. 유압 서보시스템에서 제어기의 제어 입력 신호를 D/A 변환기를 사용하여 아날로그 전압으로 바꾼 다음 직접구동 밸브에 인가한다. 직접구동 밸브는 서보 증폭기를 내장하고 있는 일체형으로 직접구동 밸브의 구동신호(제어 입력)는 ±10V로 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드에

D/A 변환기를 연결하여 생성하며 직접구동 밸브의 A, B 포트는 유압모터의 포트에 연결되고 유압모터의 축은 커플링을 통해 관성부하를 연결하는 축에 결합된다. 밸브에 의해 제어된 유량은 유압모터로 공급되고 공급된 유량에 비례하여 회전력을 발생시킨다. 관성부하를 고정하는 축은 다시 커플링을 통하여 증분 광부호기로 연결된다. 증분 광부호기는 유압모터의 회전수를 감지하는 부분으로 F/V 변환기를 사용하여 유압모터의 회전수를 전압신호로 변환하고, 변환된 신호는 A/D 변환기를 통과하여 ADSP-21020 EZ-LAB™ DSP 보드로 연결된다.

PC는 A/D 변환 카드(Lab-PC-1200/AI)로 실험 결과를 기록한다. 유압 서보시스템 실험장치는 서보밸브를 100% 열고 유압펌프의 압력을 최대로 하면 250 rpm으로 모터가 회전하지만 설정치가 100rpm, 150rpm, 200rpm, 250rpm일 때 80 kg/cm²의 유압을 유지하여 실험하고 설정치는 200 rpm과 0rpm으로 하였다.

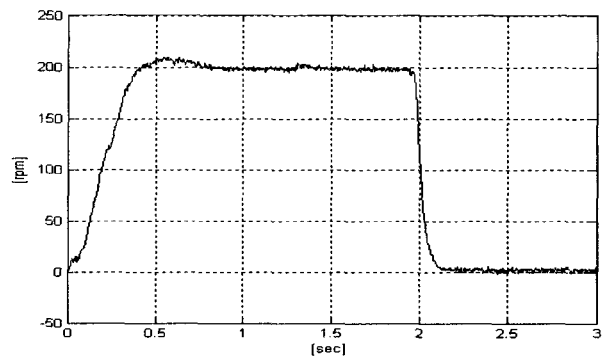


그림 7. 설정치 200rpm에서 기본 퍼지제어기의 속도 응답.
Fig. 7. Speed response of basic rule fuzzy controller at set point 200rpm

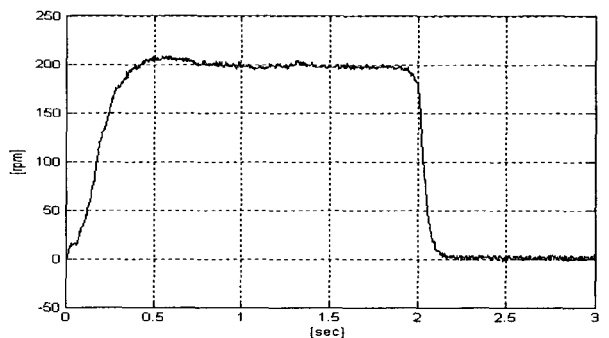


그림 8. 설정치 200rpm에서 이중 Rule Table 퍼지제어기의 속도 응답.
Fig. 8. Speed response of dual rule table fuzzy controller at set point 200rpm

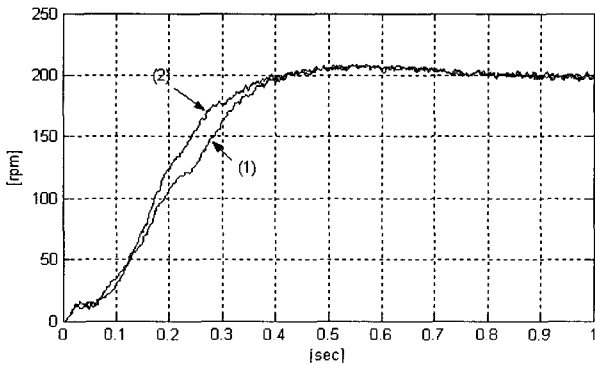


그림 9. 설정치 200rpm에서 기본 규칙 퍼지 제어기(1)와 이중 Rule Table 퍼지제어기(2)의 속도 응답 비교

Fig. 9. Comparison of speed response of basic rule fuzzy controller(1) and dual rule table fuzzy controller(2) at set point 200rpm

표 5. 성능지수를 통한 응답특성 비교

Table 5. Comparison of response character through performance index

	지연 시간	상승 시간	정정 시간	최대 오버 슈트
기본퍼지 제어규칙	191.2ms	255.6ms	370.0ms	3.61%
이중퍼지 제어규칙	172.9ms	238.8ms	311.4ms	3.615%

Ⅶ. 결론

본 논문에서는 스텝응답의 특징점과 $e-\Delta e$ 위상평면의 각 영역을 분석하여 기본 퍼지 제어규칙보다 과도영역에서 상승시간, 지연시간 모두를 감소시킬 수 있는 퍼지 제어규칙과 수렴영역에서 더 빨리 수렴하는 퍼지 제어규칙을 작성하고 이러한 두 가지 퍼지 제어규칙을 $e-\Delta e$ 위상평면의 적절한 특징점에서 교체하여 사용하는 방법을 유압 서보 모터를 사용하여 실험하였다. 기본 퍼지 제어규칙과 이중 퍼지 제어규칙을 적용하여 응답특성을 비교하여 제안한 이중 퍼지 제어규칙의 성능을 입증하였다. 과도 영역에 적용되는 퍼지 제어규칙(Rule1)의 과도 영역 특성을 그대로 살리면 서 수렴영역에서의 Rule1의 좋지 않은 특성을 버리고 Rule2를 적용함으로써 수렴영역에서 Rule2의 특성을 가지는 결과를 얻었다.

Ⅷ. 참고문헌

[1] Ronald R. Yager, Dimitar P. Filev, Essentials of Fuzzy Modeling and Control, John Wiley & Sons, Inc., pp.109-202, 1999.
 [2] E. H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in

linguistic synthesis with a fuzzy logic controller", Int. J. Man-Machine Studies, Vol. 7, No. 1, 1975.

[3] 김창균, 이중희, 변증남, 윤명중, "퍼지 논리 제어를 이용한 BLDC 모터의 고정밀 속도 제어에 관한 연구", Proc. of KFIS Spring Conf., Vol. 5, Number 1, pp.78-82, 1995.
 [4] K. J. Astrom, B. Wittenmark : Computer Controlled Systems Theory and Design Control, Prentice-Hall, pp.1-156, 1984.
 [5] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic in controller, Part I", IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 404~418, 1990.
 [6] C. C. Lee, "Fuzzy logic in control systems : fuzzy logic in controller, Part II", IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, pp. 419~435, 1990.
 [7] 박광목, "이중 제어규칙을 갖는 퍼지 제어기설계와 구현", 석사학위논문, 경남대학교 대학원 전자공학과, 1999
 [8] 신위재, "퍼지PID 제어기 설계및구현",신호처리.시스템 학회논문지 제6권2호 2005.4



신 위 재(Wee-jae Shin)

1975년 동아대학교 전자공학과
 1979년 동대학원 전자공학과(공학석사)
 1989년 동아대학교 전자공학과(공학박사)
 1996년 1997년 대한전자공학회 부산경남지부장
 1998년 1999년 대한전자공학회 학술위원

1998년 일본 Kyushu 대학 객원교수
 2000년 현재한국신호처리·시스템학회 부회장
 1983년-현재 경남대학교 전자공학과 교수
 관심분야 : 시스템지능제어 및 자동화, 신호처리



문 정 훈(Jeong-hoon Moon)

2005년 경남대학교 전자공학과 졸업(공학사)
 2007년 경남대학교 전자공학과 (공학석사)

현재~ (주)우레아텍 부설연구소 연구원
 관심분야: 인공지능, 위치인식, 유압시스템, 지능로봇