

# 전기-유압 하이브리드 액추에이터를 이용한 하이브리드 굴삭기 Hybrid Excavator using Electro-Hydraulic Hybrid Actuator

안경관 · 조용래

K. K. Ahn and Y. R. Cho

## 1. 서 언

전기-유압 일체형 하이브리드 액추에이터 시스템은 기존의 유압 밸브에 의한 유압 액추에이터의 제어 방식을 대체할 수 있는 신-시스템으로, 소형 유압 파워 팩과 액추에이터를 일체화시킨 유압 구동방식이다. 이 시스템은 양방향 유압 펌프의 회전수 제어에 의하여 제어밸브를 경유하지 않고 직접 액추에이터를 제어하는 시스템으로 에너지 절감, 분산제어, 배관의 최소화 및 누유 등의 환경문제해결, 나아가 작은 설치공간 등의 장점을 가지고 있는 고부가가치 시스템이다.

해외의 선진업체들은 다양한 분야에 하이브리드 액추에이터를 적용하기 위한 연구와 개발에 많은 투자와 노력을 하고 있다. 특히 일본에서 많은 관심을 가지며 여러 분야에 접목시켜 개발이 진행 중이며, 고부가 가치 사업인 만큼 고가의 가격을 가진 하이브리드 액추에이터의 상용화를 진행 중에 있다. 일본의 유압 관련 업체 중의 하나인 일본 토요오키 공업주식회사는 “토요팩 모션”이라고 불리는 전기-유압 일체형 액추에이터를 개발하여 탁상용 압입기, 선박의 유압 조정장치 및 요동감쇠장치, 운전 인 쇄기용의 롤러 가압장치, 연속주조 설비의 용광로 유량제어장치 및 파이프 벤딩 장치에 적용한 것으로 알고 있다. 또, 일본의 대신상공에서는 유압원과 실린더 일체형인 모션팩 시리즈를 개발하였다. 이 모션팩에서는 실린더에 유압유닛을 일체로 장착함으로써 번거로운 배관작업을 없애고, 전기 배선만으로 간단하게 유압을 이용할 수 있게 하였다.

현재 국내에서는 이와 관련된 연구는 아직 진행되지 않고 있으며 전량 일본에서 수입하여 사용하고 있는 실정이다. 따라서 공작기계(프레스 등), 사출성형기, 원격제어 밸브 구동 시스템 등 육상, 해양 및 항공기에 이르기까지 다양한 분야에 적용 가능한 핵심 부품인 전기-유압 일체형 하이브리드 시스템 개

발의 필요성이 절실하다고 볼 수 있다.

본 해설에서는 유압시스템의 강력한 파워와 용이한 제어성, 전기시스템의 높은 재현성과 에너지 절감의 장점을 혼합한 하이브리드 액추에이터시스템에 제안한 알고리즘 LVQNN을 이용한 힘제어에 관한 저자들의 최근 연구 성과를 소개한다.

## 2. 시스템 구성

그림 1과 2는 하이브리드 액추에이터 시스템의 개략도와 실제 구성한 실험 장치를 나타낸다. 여기서 피드백 신호를 받는 A/D컨버터와 실린더 챔버 내의 압력을 측정하는 압력센서, 힘을 측정하는 Load Cell로 구성된다. 여기서 다양한 외부 부하를 표현하기 위하여 다른 강성을 가지는 스프링을 사용하였다.

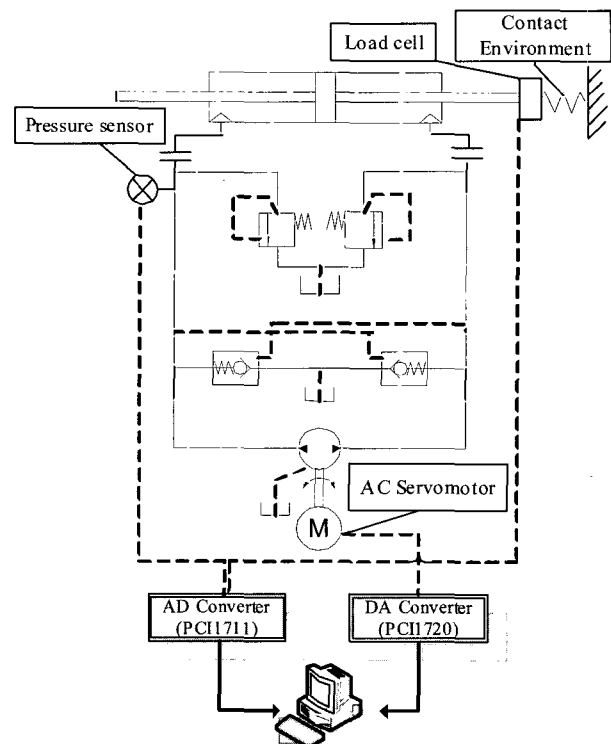


그림 1 하이브리드 액추에이터 시스템의 개략도

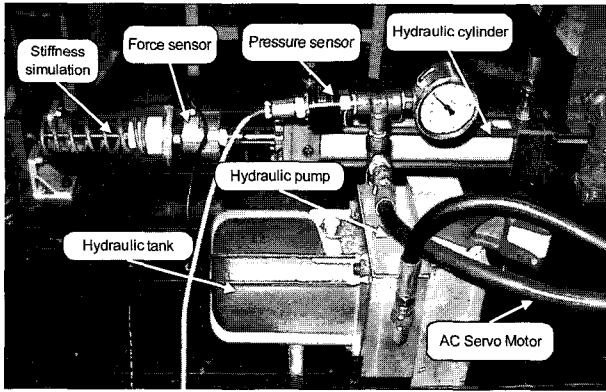


그림 2 하이브리드 액추에이터 시스템

### 3. 제안한 알고리즘

다양한 부하에 대하여 고정도의 힘제어를 실현하기 위하여 다음과 같은 제어 알고리즘을 제안하고 있다. 이 알고리즘에서는 외부환경의 부하조건을 판단하여 그 부하조건에 최적으로 설정된 제어기 개인으로 스위칭한다.

#### 3.1 뉴럴 네트워크의 구조

LVQNN(Learnign Vector Quantization Neural Network)은 외부 환경인 강성 변화를 인식하는 능력을 가지고 있다. 제안하는 지능 힘제어 알고리즘과 LVQNN의 구조를 아래의 그림3, 4에 나타내고 있다. LVQNN은 두 가지 층으로 이루어지는데, 첫 번째 층은 경합층으로 입력벡터의 분류학습을 실행한다. 또 두 번째층은 경합층의 클래스를 설계자가 정의한 목표의 분류로 변환한다. 제안한 제어알고리즘에서 LVQNN에의 입력값은 힘, 압력 및 제어입력이 되고, 출력은 1과 3사이의 정수값이 된다. 여기서 각각의 정수값은 외부환경의 강성이 50, 30 및 10kN/m인 경우를 각각 나타내고 있다.

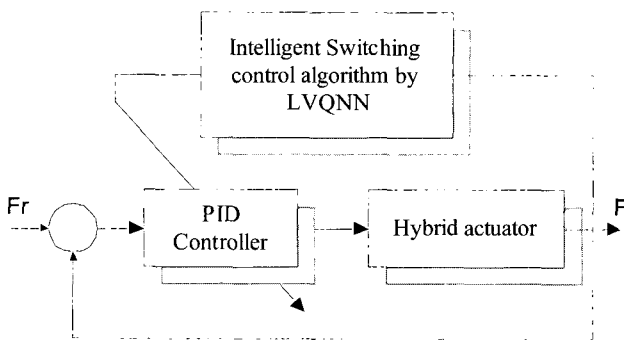


그림 3 제안하는 힘제어 알고리즘

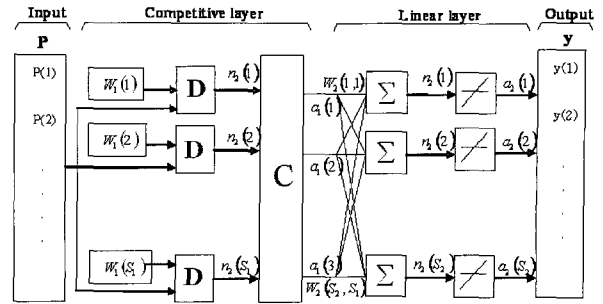


그림 4 LVQNN의 구조

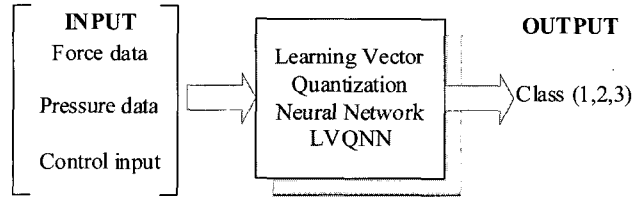


그림 5 LVQNN 학습을 위한 입출력 데이터

#### 3.2 학습결과

그림 6의 학습데이터를 가지고 LVQNN을 학습한 결과, 학습 성공률을 아래의 표에 나타내고 있다. 이 결과로부터 입력 데이터 개수가 11개, 중간층의 뉴런의 개수를 22개로 한 경우 가장 높은 학습 성공률(약 82.3%)을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 한편, 각각의 환경조건에서 실험적으로 구한 최적의 PID 제어기의 파라메타를 각각 표에 나타내고 있다. 또한 입력 데이터의 개수 및 중간층의 개수에 대한 학습성공률의 3차원 그래프를 함께 나타내고 있다.

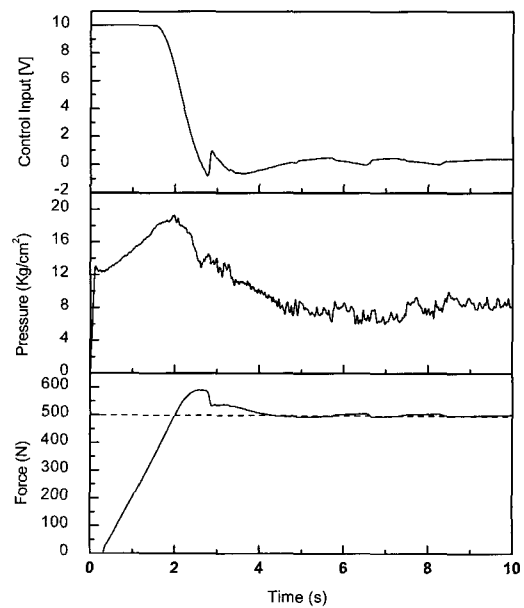


그림 6 LVQNN 학습을 위한 데이터의 예

표 1 학습 성공률

| Input Neuron | 10    | 11    | 13    | 16    | 18    |
|--------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 30           | 78.89 | 78.72 | 78.78 | 80.9  | 79.10 |
| 28           | 78.48 | 78.67 | 79.08 | 79.28 | 78.30 |
| 26           | 79    | 81.54 | 79.24 | 79.22 | 78.20 |
| 24           | 79.1  | 81.52 | 78.68 | 78.63 | 78.84 |
| 22           | 79.17 | 82.33 | 79.38 | 78.23 | 78.56 |
| 20           | 79.01 | 82.19 | 79.14 | 78.56 | 78.67 |
| 18           | 78.69 | 81.4  | 78.62 | 79.08 | 78.56 |
| 16           | 79.63 | 78.51 | 78.82 | 79.22 | 78.82 |

표 2 최적의 PID제어 게인

| Class No.        | $K_P$ | $K_I$       | $K_D$  |
|------------------|-------|-------------|--------|
| Class 1 (50kN/m) | 0.04  | $1.10^{-6}$ | 0.021  |
| Class 2 (30kN/m) | 0.05  | $2.10^{-5}$ | 0.04   |
| Class 3 (10kN/m) | 0.07  | $1.10^{-6}$ | 0.0722 |

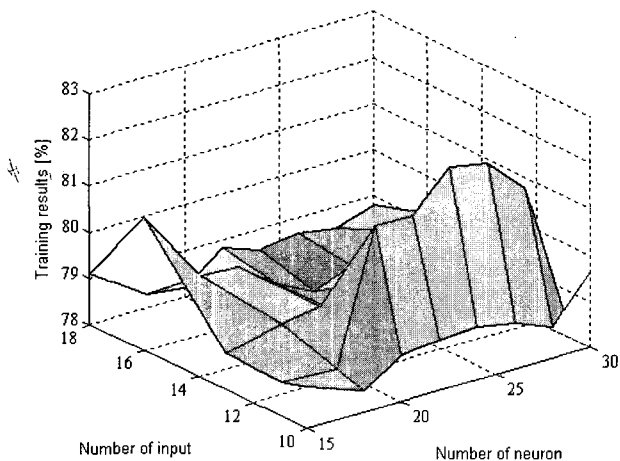


그림 7 각 설계변수의 변화에 따른 학습성률의 3차원 그래프

#### 4. 실험결과

제안한 제어알고리즘의 유효성을 파악하기 위하여, 다른 외부 강성계수(10, 30, 50)kN/m를 가지는 힘제어 응답곡선의 실험결과를 그림8에 나타낸다. 여기서 PID제어기 게인은 50kN/m의 외부 강성에 맞춰  $K_P = 0.04$ ,  $K_I = 1.10^{-6}$  및  $K_D = 0.021$ 로 각각 설정하였다. 결과에서 보듯이 외부 강성이 변화함에 따라 오버슈트와 진동이 발생함을 볼 수 있다. 따라서, 고정된 제어 게인으로서는 원하는 제어성능을 달성하기 어려울 수 있다.

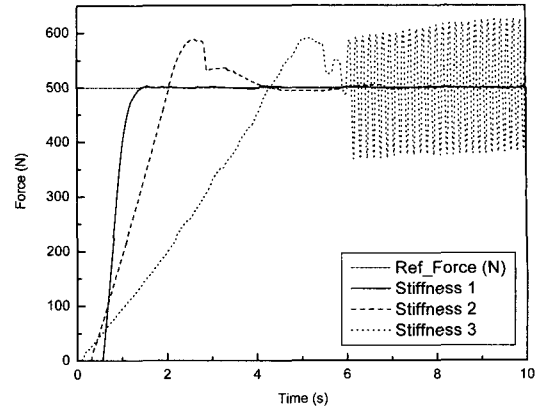


그림 8 기존의 PID제어기를 적용한 경우의 시스템 응답 곡선

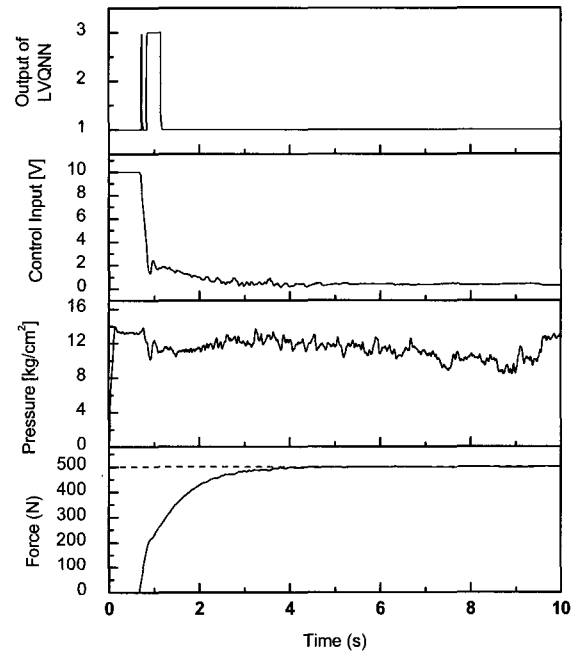


그림 9 제안한 제어기를 적용한 경우의 시스템 응답 곡선(외부강성:50kN/m)

제안한 제어알고리즘을 적용한 경우의 힘제어 실험결과를 그림 9, 10, 11에 나타낸다. 제어 알고리즘에서 LVQNN의 출력은 실린더가 외부환경에 접촉할 때부터 계산하기 시작한다. 실험결과에서 보듯이 LVQNN의 출력으로부터 바르게 외부 환경을 판별하고 있음을 알 수 있다. 또한 원하는 힘제어 성능을 얻을 수 있었다. 그림12, 13은 외부강성이 30, 10kN/m일 때 제안한 제어기와 기존의 제어기와의 응답특성을 비교한 결과 그래프이다. 본 결과로부터 제안한 LVQNN을 이용한 지능 힘제어 알고리즘이 유효함을 알 수 있다.

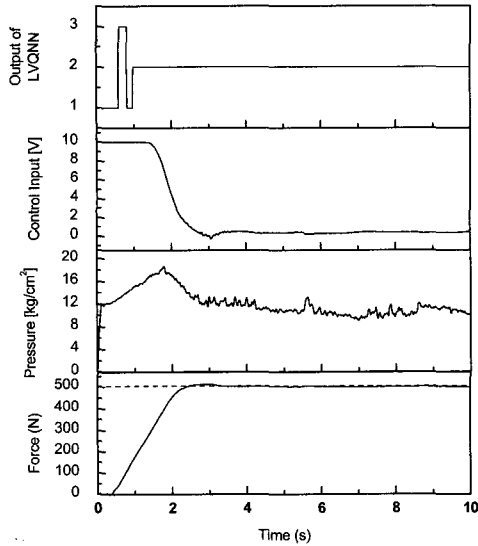


그림 10 제안한 제어를 적용한 경우의 시스템 응답 곡선(외부강성:30kN/m)

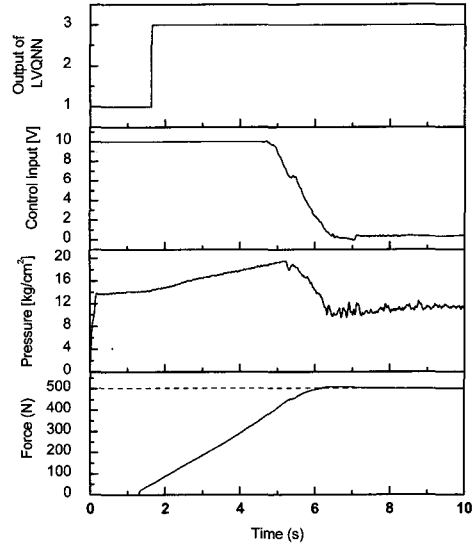


그림 11 제안한 제어를 적용한 경우의 시스템 응답 곡선(외부강성:10kN/m)

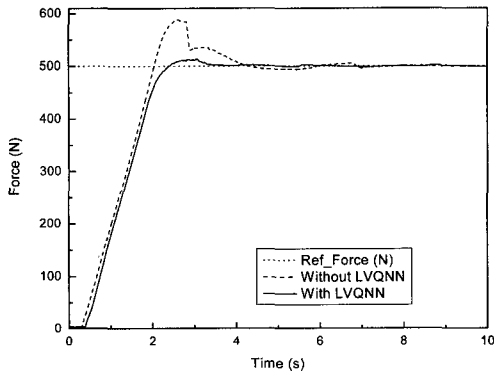


그림 12 외부강성이 30kN/m일 때, 제안한 제어기와 기존의 PID제어기와의 비교

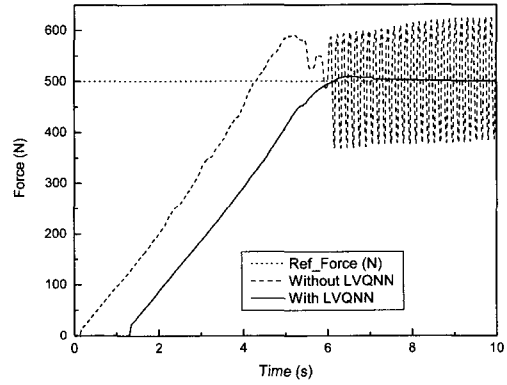


그림 13 외부강성이 10kN/m일 때, 제안한 제어기와 기존의 PID제어기와의 비교

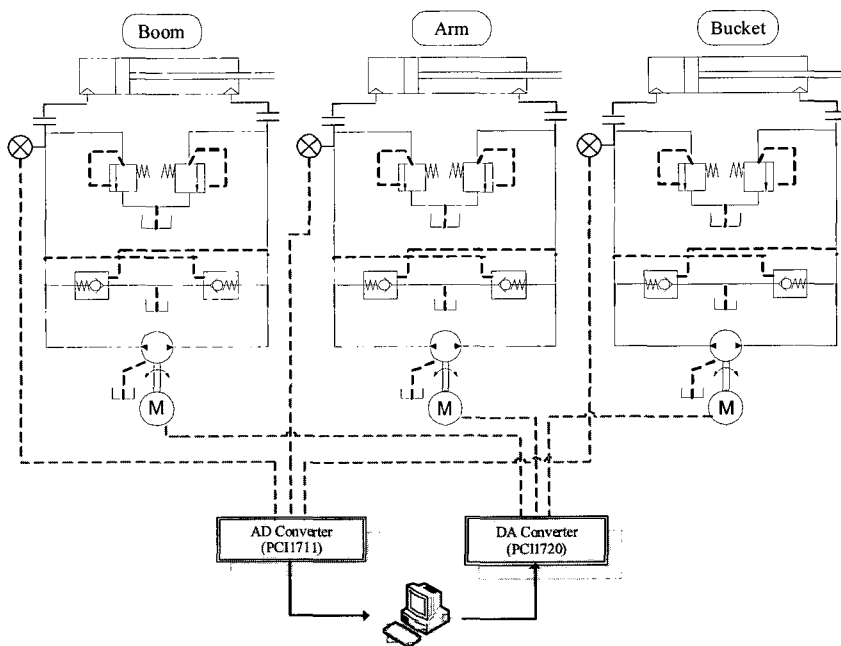


그림 14 하이브리드 굴삭기 시스템의 개략도

## 5. 결 언

전기-유압 하이브리드 액추에이터에 제안한 LVQNN을 이용한 지능 힘제어 알고리즘의 그 유효성을 확인하였으며, 원하는 성능을 얻을 수 있었다. 향후 계획으로는, 현재 건설 중장비에서 요구되는 것이 에너지의 효율 문제이다. 현재 유압 시스템은 엔진이 기동하면 중립이외에는 항상 펌프와 엔진이 직결되어 작동유가 항상 유로를 흐르고 있다. 이에 따른 에너지 손실이 많은 것으로 각 중장비 메이커마다 보고되고 있다. 특히 건설 중장비중 굴삭기의 경우는 실제 100%의 효율 중 작업시 25~30%의 에너지만 작업에 사용되는 실정이다. 이러한 에너지 효율 개선을 위해 MCV개선, 유로 간소화 등의 개선 방법이 검토될 뿐 전기-유압 하이브리드 액추에이터를 이용하는 것은 아직 국내에서 연구되고 있지 않다. 따라서 추후에 전기-유압 하이브리드 액추에이터를 응용할 것을 제안하면서, 추후에 본 연구실에서 실제 굴삭기에 적용이 가능한지를 선행 연구하기 위해 모형 굴삭기에 본 연구에서 사용되어진 전기-유압 하이브리드 액추에이터를 장착하여 그 가능성을 검토할 것이다.

## 참고문헌

- 1) AHN, K. K., Tu, D. C. T., 2004, "Improvement of the Control Performance of Pneumatic Artificial Manipulator using Intelligent Switching Control Method," in KSME, Int. Journal, Vol. 18, No. 8, pp. 1388 ~ 1400.
- 2) Andersson J., Krus P., Nilsson K., Storck, K., 1999, "Modelling and Simulation of Heat Generation in Electro-Hydrostatic Actuation Systems," In proc. of the 4th JHPS Int. Symposium on Fluid Power, Tokyo, Japan, November 15-17.
- 3) Andrew Alleyne, Rui Liu, 2000, "A simplified approach to force control for electro-hydraulic systems," Control Engineering Practice 8, pp. 1347~1356.
- 4) He, S., Sepehri, N., 2000, "Online Modeling and Prediction of a Hydraulic Force-acting System Using Neuron Networks," IEEE Int., Conf., on Systems, Man, and Cybernetics, 2667 ~ 2672.

- 5) W. Backe and H. Murrenhoff, "Trends in hydraulic and pneumatic components and systems," 1994 ASME International Congress & Exposition, Vol.1, pp.1~34, 1994.
- 6) S. Habibi and A. Goldenberg, "Design of a new high-performance electro-hydraulic actuator," IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, Vol. 5, No. 2, pp.158~164, 2000.
- 7) W. Ma, S. Ikee and K. Takahashi, "Research on hydraulic cylinder position control using constant pressure system," JFPS, pp.579~584, 2002.
- 8) Herbert E. Merritt, "Hydraulic Control Systems", John Wiley & Sons, Inc, pp.334~355, 1967

### [저자 소개]

안경관(책임저자)



E-mail : kkahn@ulsan.ac.kr

Tel : 052-259-2282

1966년 12월 16일생

1990년 서울대학교 기계공학과

졸업(공학사), 1992년 한국과학기술원 기계공학과 석사과정졸업, 1999년 동경공업

대학 정밀기계시스템 박사 과정 졸업. 1992년 삼성중공업 중장비사업본부 입사, 2000년 울산대학교 기계자동차공학부 조교수, 2004년 동 대학 부교수. 유공압시스템의 지능제어, 에너지 회생을 위한 유압시스템 및 기능성유체를 이용한 새로운 액추에이터의 연구에 종사. 유공압시스템학회 총무이사, 대한기계학회, 한국정밀공학회, 제어자동화시스템공학회, IEEE, 일본기계학회, 일본유공압학회, 일본계측자동제어학회, 일본로봇학회 등의 정회원, 공학박사

### [저자 소개]

조용래



E-mail : uou93cho@ulsan.ac.kr

Tel : 052-259-1501

1974년 5월 28일생

1998년 울산대학교 기계공학과 졸업,

2003년 울산대학교 기계자동차공학부

석사과정졸업, 2005년 울산대학교 기계

자동차공학 박사과정 수료. 유공압학회, 한국정밀공학회, 제어자동화시스템공학회, 일본유공압학회 등의 학생회원