

신경회로망을 이용한 2족 보행 로봇의 설계 및 구현

(Design and Implementation of a Biped Robot using Neural Network)

이성수* · 박알서**

(Seong-Su Lee · Wal-Seo Park)

Abstract

This research is to apply the control of neuron networks for the real-time walking control of Multi-articulated robot. Multi-articulated robot is expressed with a complicated mathematical model on account of the mechanic, electric non-linearity which each articulation of mechanism has, and includes an unstable factor in time of walking control. If such a complex expression is included in control operation, it leads to the disadvantage that operation time is lengthened. Thus, if the rapid change of the load or the disturbance is given, it is difficult to fulfill the control of desired performance. This paper proposes a new mode to implement a neural network controller by installing a real object for controlling and an algorithm for this, which can replace the existing method of implementing a neural network controller by utilizing activation function at the output node. The proposed control algorithm generated control signs corresponding to the non-linearity of Multi-articulated robot, which could generate desired motion in real time.

Key Words : Humanoid, Multi-articulated robot, Neural Network, Real-Time, Walking

1. 서 론

로봇을 연구하는 궁극적인 목표는 육체 및 정신적으로 인간과 유사한 행동방식을 총체적으로 모방한 기

계를 만드는 것이다[1-2]. 최근 로봇에 관한 연구는 거의 인간과 흡사한 수준까지 도달하는 연구 성과를 보이고 있다. 사람과 같이 자연스러운 보행을 하거나 사람의 행동을 모방하기도 한다[3-4].

휴머노이드 로봇의 보행 제어를 위하여 PID 제어, Sliding Mode 제어, Computed Torque 제어 등을 사용하고 있다.

PID 제어는 구조가 간단하고 단순히 추종해야 할 값과 현재 값의 차이만을 고려하여 제어 대상에 대한 정보를 알지 못하더라도 제어가 가능하기 때문에 가장 많이 사용되고 있다[5]. 그러나 제어 모델을 구하지 않고 제어를 설계할 수 있지만 수학적으로 안정성

* 주저자 : 한국폴리텍대학 익산캠퍼스 생산자동화과
** 교신저자 : 원광대학교 공과대학 전기공학과
* Main author : IKsan Campus of Korea Polytechnic
Department of Production Automation
** Corresponding author : Wonkwang University
Department of Electrical Engineering
Tel : 063-850-6890, Fax : 063-850-6890
E-mail : leexpert@kopo.ac.kr
접수일자 : 2012년 8월 29일
1차심사 : 2012년 8월 31일, 2차심사 : 2012년 9월 25일
심사완료 : 2012년 10월 2일

을 입증하기 어렵다.

Sliding Mode 제어는 비선형 제어 방법으로서 좋은 성능을 낼 수 있으며 외란에 있어서도 강인하여 많이 사용되고 있다[6-7]. 반면 일반적인 안정성에 대한 평가 방법이 없다는 어려움이 있다.

Computed Torque 제어는 모델을 기반으로 설계하기 때문에 PID 제어기 및 다른 비선형 제어기에 비해 설계가 상대적으로 수월하고 성능도 우수하기 때문에 많이 사용된다[8]. 그러나 수학적 모델의 정확성 정도에 영향을 많이 받는다.

이외 선형 및 비선형 제어 방법들이 제시되었지만 기존의 대부분의 제어 방법들은 안정성을 평가하기 힘들고 수학적으로 복잡하여 실시간으로 제어하기 어렵다. 따라서 휴머노이드 로봇은 수학적으로 복잡하지 않는 모델을 기반으로 설계되며 외란에도 강하고 연산량이 상대적으로 적어 실제 구현할 수 있는 방법이 필요하다.

본 논문에서는 신경회로망 제어 시스템(NN; Neural Network)에 에플레이터를 사용하지 않고 시스템의 특성에 적합하게 파라미터를 자동으로 결정할 수 있게 하기 위해서 신경회로망의 출력노드에 로봇의 응답특성곡선을 활성화 함수로 사용하였다. 로봇이 활성화 함수로 되어 구조가 간단하게 된 신경회로망 제어 시스템은 연산시간이 짧아지게 됨으로써 실시간으로 학습이 가능하게 된다[9]. 따라서 제시된 신경회로망 적응제어 시스템은 로봇 특성 곡선을 통한 학습에 의하여 정보를 획득하게 되므로, 부하의 급변 또는 외란이 인가되는 경우에도, 실시간으로 매개변수를 자동으로 결정하고 동조하게 되어, 실시간 제어에 유용하게 사용될 수 있다.

2. 기구학 해석 및 모델개발

2.1 다관절 로봇의 기구학

본 연구에 사용된 다관절 로봇은 좌측 및 우측 대칭으로 각각 6개의 서보모터로 구성되어 있다.

그림 1은 다관절 로봇의 우측 6개의 관절 조인트에 대한 3차원 좌표 벡터를 나타내었다.

표 1은 Denavit-Hartengerg의 표현방식에 따른 것

으로 그림 1의 좌표에 따른 다관절 로봇의 좌측 관절의 대칭으로 우측 6개의 관절의 자유도 범위를 나타내었다. 여기서 변수 θ_i 와 α_i 는 축 회전에 관한 변수이고, a_i 와 d_i 는 축 사이의 변위에 관한 변수이다.

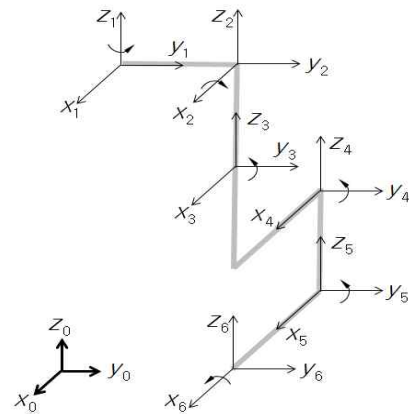


그림 1. 다관절 로봇의 구조 좌표
Fig. 1. Structure axis of robot

표 1. D-H 변수 및 조인트 각도
Table 1. D-H parameters and Joint angle

Joint	θ_i	α_i	a_i	d_i	Range
1	θ_1	-90°	0	d_1	-90° to 90°
2	θ_2	90°	0	d_2	20° to 160°
3	θ_3	-90°	0	d_3	-150° to 30°
4	θ_4	90°	0	d_4	-150° to 30°
5	θ_5	-90°	0	d_5	-150° to 30°
6	θ_6	0	0	d_6	20° to 160°

2.2 다관절 로봇의 동력학

로봇 머니플레이터는 운동에너지와 위치에너지를 이용하여 dynamics방정식을 도출하여 해석한다[10]. 먼저 로봇의 질량(m)을 다음과 같이 정의하였다.

$$\int_B \rho(x,y,z) dx dy dz = m \quad (1)$$

여기서 ρ 은 질량의 밀도, B 는 물체의 범위이다. 식 (1)을 이용한 물체의 운동에너지는 다음과 같이 나타낸다.

$$K = \frac{1}{2} \int_B \mathbf{v}^T(x,y,z) \mathbf{v}(x,y,z) dm \quad (2)$$

dm 은 좌표 x, y, z 에 있는 질점의 무한소질량을 나타낸다. 로봇의 관절은 각기 다른 속도로 움직이므로, 물체의 질량중심은 다음 식과 같이 정의된다.

$$x_c = \frac{1}{m} \int_B x dm, \quad y_c = \frac{1}{m} \int_B y dm, \quad z_c = \frac{1}{m} \int_B z dm \quad (3)$$

\mathbf{r}_c 가 질량중심의 3차원 좌표벡터를 나타내고 \mathbf{r} 이 물체 상의 한 점의 좌표벡터를 나타낸다고 하면, \mathbf{r}_c 는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{r}_c = \frac{1}{m} \int_B \mathbf{r} dm \quad (4)$$

위치에너지를 고려하면, 다음과 같이 나타낸다.

$$V = \int_B \mathbf{g}^T \mathbf{r} dm = \mathbf{g}^T \int_B \mathbf{r} dm = \mathbf{g}^T \mathbf{r}_c m \quad (5)$$

여기서 \mathbf{g} 는 기준 좌표계로 나타낸 중력벡터이다.

3. 로봇 플랫폼 개발

3.1 로봇 기구부 제작

인간의 몸 구조는 관절마다 1~3개의 많은 자유도를 가지기 때문에 부드러운 보행이 가능하다. 그러나 이처럼 필요한 자유도가 높다는 것은 그 만한 수의 모터를 제어할 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 실제 로봇을 제작할 경우 경제적인 측면과 제작의 어려움 때문에 인간의 구조와 같이 무한정 많은 자유도를 적용할 수는 없다.

본 연구에서 사용한 로봇은 12자유도를 가지고 있는 이족 보행 로봇이다. 그림 2에서와 같이 상체가 없는 구조로 하체의 움직임을 중심으로 전방향으로 굽혀지는 조류형 골격구조의 보행을 구현할 수 있도록 제작하였다.

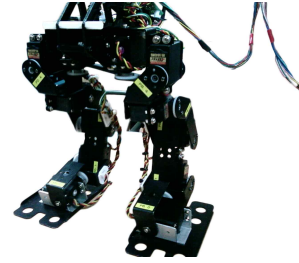


그림 2. 휴머노이드 로봇
Fig. 2. Humanoid robot

로봇의 제원으로는 12개의 R/C 모터와 브래킷, 3-Axis Acceleration Sensor(AM-3AXIS-P)들로 구성하였다. 로봇의 무게는 2.6kg, 크기는 280mm이다.

각 관절에 사용된 액츄에이터는 R/C 서보 모터로서 HS-5645MG(Hitec Inc., U.S.A) 모델을 사용하였다. HS-5645MG의 Torque는 DC4.8V에서 12.1kg·m이다. Pulse duration은 0.9ms에서 2.1ms일 때 모터의 각도는 0°에서 180°로 변화된다. Pulse refreshes는 20ms이며, 이때의 주파수는 50Hz이다.

본 논문을 위한 제어 시스템은 RecurDyn™을 통해서 생성된 보행궤적을 실시간으로 제어하기 위한 솔루션은 NI LabVIEW 2011과 NI CompactRIO Real-Time 컨트롤러(National Instruments Inc., U.S.A)를 사용하였다.

NI CompactRIO는 LabVIEW Real-Time 및 LabVIEW FPGA기반으로 구동되며 재구성이 가능한 임베디드 컨트롤 및 수집 플랫폼이다.

새시는 8슬롯으로 모듈 확장이 용이하며 각 모듈과의 입출력 연산속도는 25ns의 해상도를 정확하게 동기화 시켜서 Logic 구현에 충분한 Resource와 높은 응답성을 제공하는 Xilinx 사의 FPGA Core Vertex-5 LX85가 내장된 NI9116을 사용하였다.

RT 컨트롤러로는 Real-Time 어플리케이션을 위해 533MHz, Freescale MPC8347 리얼타임 프로세서와 신뢰성이 높은 Real-Time OS(VxWorks)가 탑재된 NI cRIO-9022를 사용하였다.

I/O 모듈 구성 중 8채널 100ns의 초고속 연산속도를 가지는 양방향 디지털 입력 및 출력 모듈인 NI9401 모듈 2개를 장착하여 12개의 R/C 모터를 PWM 제어 방식으로 제어할 수 있도록 하였다.

16비트 해상도와 250kS/s의 직접 샘플링 속도로 32개의 싱글 또는 16개의 차동 아날로그 입력 모듈인 NI9205를 장착하여 로봇의 각 축의 변화량 등, 아날로그 센서 시그널을 처리할 수 있도록 하였다.

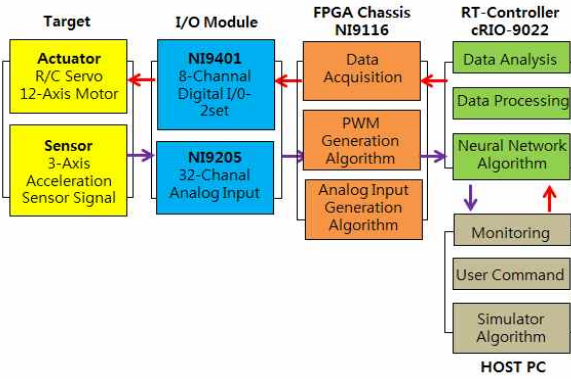


그림 3. 시스템 구성
Fig. 3. System Configuration

3.2 신경회로망 제어 시스템

본 연구에서 사용된 신경회로망은 X, Y, Z축 각각 단일 입력과 1층 3노드, 2층 4노드를 사용하였다.

또한 출력층은 단일노드로 활성화함수 대신 다관절 로봇의 응답특성곡선을 사용하였다. 입력층 패턴 벡터 X, 은닉층 출력 벡터 Y, 출력층 출력 벡터 Z는 다음과 같이 나타낸다.

$$X = [x_1 \ x_2 \ \dots \ x_n], \quad Z = [z_1 \ z_2 \ \dots \ z_p]$$

$$Y = [y_1 \ y_2 \ \dots \ y_m] \quad (6)$$

입력층과 은닉층간의 연결강도 $V(p \times n)$, 은닉층과 출력층간의 연결강도 $W(m \times p)$ 는 임의 값으로 초기화하고 학습 패턴쌍을 차례로 입력하여 다음과 같이 연결강도를 변경한다.

은닉층의 가중합 NET_z 와 출력 Z, 출력층의 가중합 NET_y 와 출력 Y은 다음과 같다.

$$NET_z = XV^T, \quad Z = f(NET_z)$$

$$NET_y = ZW^T, \quad Y = f(NET_y) \quad (7)$$

여기서 은닉층의 활성화 함수는 단극성 시그모이드 함수를 사용하였으나 출력층의 활성화 함수는 다관절 로봇의 응답특성곡선을 사용하였다.

d는 로봇이 앉아 있는 상태에서 직립하기 위한 목표치이며 이때 출력 y을 비교하여 특정 학습 패턴에 대한 출력층 뉴런의 제곱오차 E는 다음과 같다.

$$E = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m (d_i - y_i)^2 \quad (8)$$

오차 E를 최소화하는 방향으로 연결강도 w_{ij} 와 은닉층의 연결강도 v_{jk} 는 오차가 최소가 되도록 변경하면 다음과 같다.

$$\Delta w_{ij} = -\alpha \nabla E, \quad \Delta v_{jk} = -\alpha \frac{\partial E}{\partial v_{jk}} \quad (9)$$

여기서 α 는 양수이다. 또한 뉴런 i에서 발생하는 오차신호 δ_{y_i} 와 δ_{z_i} 는 다음과 같이 정의한다.

$$\delta_{y_i} = (d_i - y_i) f'(NET_i)$$

$$\delta_{z_i} = \sum_{j=1}^m \delta_{y_j} w_{ij} \cdot \frac{\partial z_j}{\partial NET_{z_j}} \quad (10)$$

k 학습단계에서의 은닉층과 출력층간의 연결강도 변화량 ΔW^k 및 입력층과 은닉층간의 연결강도 변화량 ΔV^k 는 다음과 같다.

$$\Delta W^k = \alpha \delta_y Z, \quad \Delta V^k = \alpha \delta_z X \quad (11)$$

본 논문에서는 신경회로망의 입력층과 은닉층의 활성화 함수를 단극성 시그모이드 함수를 사용하였으나, 출력층에서의 활성화 함수는 시그모이드 함수를 사용하지 않고 다관절로봇의 응답특성곡선을 활성화 함수로 사용하는 방법을 도입하여 다관절 로봇의 자세제어에 적용하여 응답특성을 확인하였다.

제안된 알고리즘은 오차와 오차변화분의 정보를 이용하여 제어를 수행하게 되어 시스템의 수학적 모델링에 대한 정보 없이도 작업자가 원하는 제어를 실시

간으로 실행할 수 있다는 장점을 갖추고 있다.

4. 실험 및 결과고찰

본 연구에서 제안한 신경회로망 제어 시스템의 성능을 비교하기 위하여 PID 제어 시스템을 사용하였고, 매개변수는 Ziegler-Nichols가 제안한 계단 응답법으로부터 얻어진 파라미터를 사용하였다.

실험을 위한 PID 제어 시스템과 신경회로망 제어 시스템의 파라미터는 표 2와 같다.

본 논문에서는 다물체 동역학 해석 프로그램인 RecurDyn™ v.7.2(Functionbay Inc., Korea)을 이용하여 완성한 3차원 CAD 모델에 각 부품의 변위 및 무게 등의 특성을 부여하여 동특성에 따른 궤적을 생성하였다.

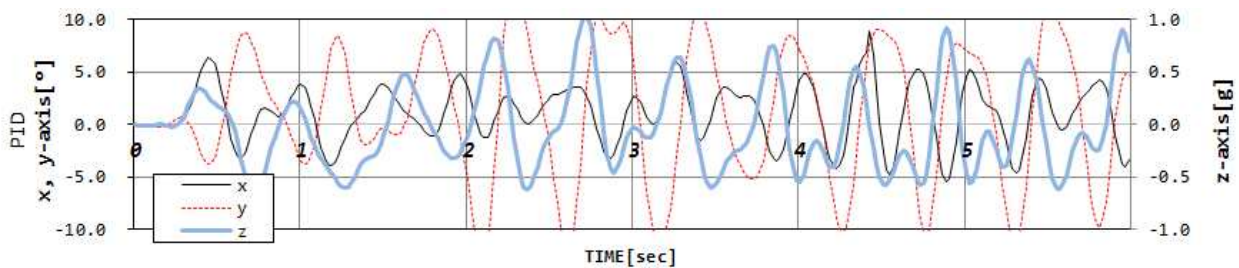
로봇의 보행에 따른 로봇의 보행 안정도를 측정하기 위해 로봇의 상단에 센서를 부착하고 생성된 보행 궤적을 추종하기 위하여 신경회로망 제어 시스템을 이용하여 실험을 수행하였다.

그림 4는 로봇의 보행에 따른 제어 시스템들의 응답곡선이다.

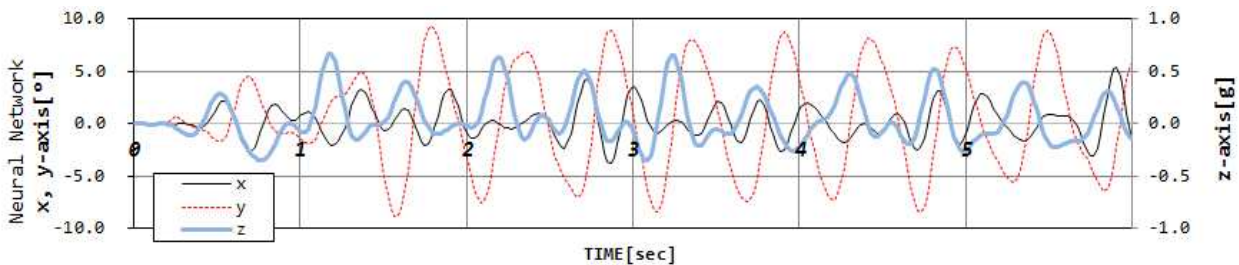
표 2. 시스템의 파라미터
Table 2. Parameter of systems.

Category		Values
P I D	비례이득 K_p	1.20
	적분이득 K_i	0.50
	미분이득 K_d	0.13
N N	학습상수 c	0.42
	교사신호 d	각 관절의 보행궤적
	뉴런상수 λ	1.0
	활성화 함수	단극성 시그모이드 함수 및 로봇의 응답특성곡선

그림 4 (a), (b)의 x 응답곡선은 앞쪽과 뒤쪽 방향으로 기울어짐을 나타내었다. 그림 4 (a)의 PID 제어 시스템은 $-6\sim 9^\circ$ 까지 진동(Peak to Peak)하였으나, 신경회로망 제어 시스템은 $-4\sim 5^\circ$ 로 진동이 발생하였다. 또한 그림 4 (a), (b)의 y 응답곡선은 좌측과 우측으로



(a) Response of PID control system



(b) Response of Neural Network control system

그림 4. 응답곡선
Fig. 4. Response curve

기울어짐을 나타내었다. 그림 4 (a)의 PID 제어 시스템은 보행궤적 추적시 $\pm 10^\circ$ 이상 좌-우측으로 진동하는 반면, 그림 4 (b)의 신경회로망 제어 시스템은 $\pm 9^\circ$ 정도로 진동하였다. 그림 4 (a), (b)의 z 응답곡선은 위쪽방향과 아래쪽 방향으로 진동하는 가속도의 크기를 나타낸 것으로서 중력 가속도 g는 9.8m/s^2 이다. 그림 4 (a)의 PID 제어 시스템은 $-0.65\sim 1\text{g}$ 이었으나, 그림 4 (b)의 신경회로망 제어 시스템은 $-0.29\sim 0.67\text{g}$ 로 PID 제어 시스템 보다 진동이 작게 나타났다.

따라서 본 연구의 로봇 이동에 적용된 신경회로망 제어 시스템은 같은 보폭에 의해서 이동할 때에 앞뒤, 좌우, 위와 아래의 작은 진동으로 이동하므로, 보행 이 동시 안정성이 우수함을 보였다.

5. 결 론

본 연구에서는 휴머노이드 로봇의 실시간 보행 제어를 위해서, 신경회로망의 마지막 노드에 로봇의 특성 곡선 함수를 활성화 함수로 사용하는 제어 시스템을 제안 및 구현하였다. 적용된 신경회로망 시스템은 보행 이동시에 앞뒤, 좌우, 우측과 아래쪽 방향으로 진동이 작게 발생하여 로봇의 보행 안정성을 확보할 수 있었다.

이와 같은 결과는 수학적 모델링에 대한 정보를 사용하지 않고도, 다관절 로봇의 특성곡선을 이용하여 효과적으로 보행제어가 수행될 수 있음을 보였고, 앞으로 다양한 자세 제어 및 보행에 대하여 연구하고자 한다.

본 논문은 2012학년도 원광대학교의 교비지원에 의해서 수행됨.

References

[1] Kazuo Hirai, Masato Hirose "The Development of Honda Humanoid Robot", Proc. of Int. Conf. on Robotics and Automation, vol.2, pp. 1321-1326, May 1998.
 [2] Yamaguchi, J., Soga, E., Inoue, S. & Takanishi, A. "Development of a Biped Humanoid Robot-Control Method of Whole Body Cooperative Dynamic Biped Walking", IEEE

International Conference on Robotics and Automation pp. 368-374, May 1999.
 [3] Y. Ogura, K. Shimomura, H. Kondo, A. Morishima, T. Okubo, S. Momoki, H. Lim and A. Takanishi, "Human-like Walking with Knee Stretched, Heel-contact and Toe-off Motion by a Humanoid Robot," in Proc. of IEEE/RSJ Int. Conf. on Intelligent Robots and Systems, 2006, pp. 3976-3981.
 [4] S. Kim, C. Kim, and B. J. You, "Whole-Body Motion Imitation using Human Modeling," in Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Biomimetics, 2008, pp. 596-601.
 [5] S. Kajita, T. Yamaura, and A. Kobayahi, "Dynamic Walking Control of a Biped Robot Along a Potential Energy Conserving Orbit," IEEE Trans, on Robotics and Automation, 1992, pp. 431-438.
 [6] N. Motioi, T. Suzuki, and K. Ohnishi, "A Bipedal Locomotion Planning Based on Virtual Linear Inverted Pendulum Mode," in Proc. of IEEE Int. Conf. on Industrial Technology, 2006, pp. 158-163.
 [7] Bebek, O, Erbatur, K, "A Gait Adaptation Scheme for Biped Walking Robots," AMC '04. The 8th IEEE International Workshop on 25-28 March 2004, pp. 409-414.
 [8] S. S. Lee, Y. W Kim, H. Oh and W. S. Park, "Implementation of Self-adaptive System using Algorithm of Neural Network Learning Gain". IJCAS. No. 3, Vol. 6, pp. 453~459. June 2008.
 [9] S. S. Lee, Y. W Kim, H. Oh and W. S. Park, "Implementation of Self-adaptive System using Algorithm of Neural Network Learning Gain". IJCAS. No. 3, Vol. 6, pp. 453~459. June 2008.
 [10] Mark W. Spong, M. Vidyasagar, " Robot Dynamics and Control", John Wiley & Sons Co., 1989.
 [11] T. Sato and K. Ohnishi, "ZMP Disturbance Observer for Walking Stabilization of Biped Robot," in Proc. of IEEE Int. Workshop on Advanced Motion Control, 2008, pp. 290-295.

◇ 저자소개 ◇



이성수 (李成洙)

1973년 5월 10일생. 2002년 원광대학교 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2004년~현재 한국폴리텍대학 익산캠퍼스 생산자동화와 교사.



박알서 (朴日緒)

1953년 5월 1일생. 1982년 원광대학교 전기공학과 졸업. 1985년 조선대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 원광대학교 대학원 전기공학과 박사. 현재 원광대학교 전기공학과 교수.