

# RTT 측정을 이용하는 USN 기반 Networked Control System

## Networked Control System Using RTT Measurement over USN

이 현 철, 김 유 종, 최 준 영\*  
(Hyun-Chul Yi<sup>1</sup>, Yu-Jong Kim<sup>1</sup>, and Joon-Young Choi<sup>1</sup>)

<sup>1</sup>Pusan National University

**Abstract:** We design a NCS (Networked Control System) where the communication between sensors and controllers takes place over a USN (Ubiquitous Sensor Network). In order to measure time delays between sensors and controllers in real time, we design an algorithm to measure RTT (Round Trip Time) between USN nodes, and implement it into TinyOS of USN. By using the measured time delays, we construct the Smith predictor to compensate the time delays between sensors and controllers in real-time. For the real time experiment, we simulate the dynamic plant model, controller, and USN interface using Real-Time Windows Target provided in MATLAB. The USN interface in the Simulink model consists of serial ports, which connect the plant output and controller with USN nodes. The experiment results show that the time delays between sensors and controllers are precisely measured in real time; the Smith predictor appropriately compensates the time delays; and the stability is achieved in the closed-loop of the NCS.

**Keywords:** USN, RTT, networked control system

### I. 서론

NCS (Networked Control System)은 센서, 구동기, 제어기가 제한된 대역폭을 갖는 공용의 디지털 통신 네트워크를 통하여 I/O 정보를 교환하는 시스템을 말한다. NCS는 무선 센서 네트워크, 원격 수술, 인터넷을 통한 상호 햅틱 시스템, 고속도로 자동화 시스템, 무인 항공기 등의 넓은 분야에 적용되고 있다[1]. 특히 WNCS (Wireless Networked Control System)은 무선 네트워크 설치를 통해 모든 모바일 제어가 가능하며 유연한 구조, 빠른 설치 및 저렴한 유지보수 비용으로 더욱 유망한 분야가 되고 있다[2]. NCS에서 핵심 연구 내용은 네트워크 딜레이와 패킷 손실을 처리하는 방법에 대한 것으로, 이는 제어 시스템의 피드백 루프에 존재하는 작은 크기의 시간 지연도 전체 시스템을 진동하거나 불안정하게 만들 수 있기 때문이다[3-5].

한편, Pervasive Computing, 통신, 센서 기술이 발전함에 따라 USN (Ubiquitous Sensor Network) 분야가 출현하였고, 많은 연구 개발을 통해 USN에 대한 기본적인 네트워크 기술들과 다양한 응용 기술들이 개발되었다. 이러한 USN을 기반으로 하여 WNCS를 설계하려는 접근 방법은 매우 드물게 [6,7]에서 시도되었다. [6]에서 제안하는 NCS는 USN을 기반으로 설계하고 Extended Kalman Filter를 기반으로 한 상태 측정 알고리즘을 제안한다. 그러나 [6]에서는 센서와 제어기 사이의 시간 지연을 직접 측정하지 않고 센서의 샘플링

주기기에 의존하는 일정한 상수 값의 최대 시간 지연을 가정하여 NCS를 설계하고 있다. [7]에서는 USN을 기반으로 하는 NCS를 T-S 퍼지 모델로 설계하고 Lyapunov 함수를 이용해서 시스템 안정을 위한 조건을 구한다. 그러나 USN을 포함한 모든 하위 시스템을 퍼지 시스템으로 모델링하고 시간 지연에 대한 보상은 고려하지 않으며 실제 실험이 아닌 모의실험으로 시스템의 유효성 및 성능을 검증하고 있다.

본 논문에서는 센서와 제어기가 실제 USN을 통해 I/O 정보를 교환하는 NCS를 설계한다. MATLAB의 Simulink를 이용하여 플랜트와 제어기를 모델링하고, 센서와 제어기 사이의 I/O 정보는 실제 USN 노드를 통해 교환한다. 센서와 제어기 사이의 시간 지연을 실시간으로 측정하기 위해 USN 노드 사이에서 RTT (Round Trip Time) 측정 알고리즘을 설계하고, USN의 TinyOS에 구현한다. 측정된 시간 지연 값을 파라미터로 이용하여 Smith Predictor [8]를 구성하고, 센서와 제어기 사이의 시간 지연을 실시간으로 보상한다. Smith Predictor는 모델 기반의 제어기로서, 피드백 루프에서 시간 지연을 보상하기 위한 제어기로 널리 사용되고 있다. 실험 결과는 센서와 제어기 사이의 시간 지연이 실시간으로 적절하게 측정하여 Smith Predictor가 시간 지연을 적절하게 보상하고 있으며, 설계된 NCS의 전체 닫힌 루프 시스템이 동적으로 안정적이라는 것을 예증하고 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II 장은 USN에서 RTT 측정 알고리즘에 대한 설명으로, RTT 측정 개념도와 순서도를 통해 USN에서 RTT를 측정하는 방법에 대해 기술한다. III 장에서는 본 논문에서 제안하는 USN 기반의 NCS 구조를 설계하고 분석한다. IV 장에서는 본 논문에서 설계한 USN 기반의 NCS를 다양한 환경에 대하여 실험하고 설계한 NCS의 안정성과 유효성을 예증한다. 마지막으로 V 장에서는 결론을 제시한다.

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수: 2012. 8. 27., 수정: 2012. 9. 14., 채택확정: 2012. 9. 25.  
이현철, 최준영: 부산대학교 전자공학과

(hcy@pusan.ac.kr/jyc@pusan.ac.kr)

김유종: 부산대학교 전자기반회로학과(countererror@pusan.ac.kr)

※ 본 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2012-0007718).

II. USN의 RTT 측정

RTT를 측정하기 위하여 그림 1과 같이 Packet Send (RTT Start)와 ACK Receive (RTT End) 사이에서 발생하는 시간 차이의 계산이 필요하다. Packet Send 시간은 송신 노드에서 패킷을 전송하기 직전에 측정하고 ACK Receive 시간은 송신 노드에서 수신 노드의 ACK 패킷을 수신한 직후에 측정한다. ACK 패킷이 수신 노드로부터 송신 노드에 도착한 시간을 정확히 측정하기 위해서 TinyOS의 ACK 컴포넌트를 이용한다[9,10]. 자세히 설명하면 송신 노드는 패킷을 전송하기 전에 ACK.requestAck() 함수를 호출하고 전송이 끝나면 ACK.wasAcked() 함수를 호출하여 ACK 패킷의 도착 여부를 확인할 수 있다. 이러한 방법을 이용하여 USN의 두 노드 사이에서 각 패킷에 대한 RTT를 실시간으로 측정할 수 있다[11].

이 과정을 순서도로 나타내면 그림 2와 같다. 순서도에서 패킷을 전송하고 ACK를 수신하는 역할은 USN의 송신 노드에서 담당하며, 패킷을 수신하고 ACK를 전송하는 역할은 USN의 수신 노드에서 담당한다. 따라서 RTT Start 시

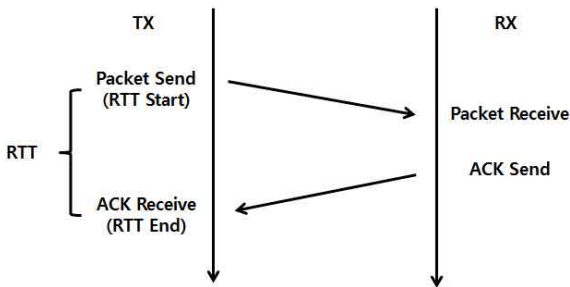


그림 1. RTT 측정 개념.  
Fig. 1. Outline of RTT measurement.

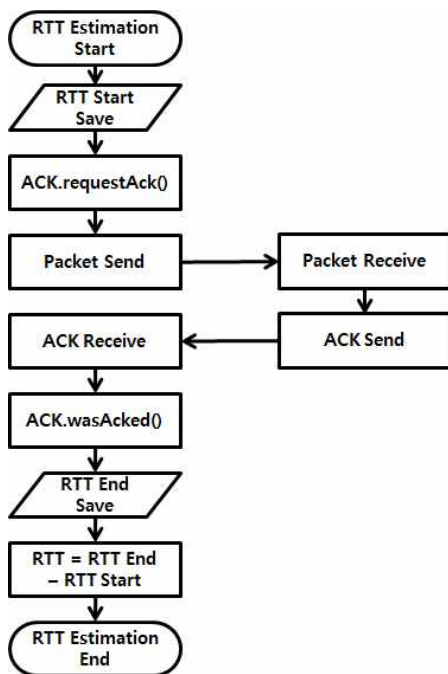


그림 2. RTT 측정 순서도.  
Fig. 2. Flowchart of RTT measurement.

간과 End 시간을 측정하여 RTT를 계산하는 작업은 송신 노드에서 처리하며 ACK를 수신한 경우 RTT는 RTT Start 시간과 RTT End 시간의 차이로 계산한다.

III. Smith Predictor를 이용한 NCS

설계한 NCS의 전체 구조를 도식화 하면 그림 3과 같고 각 블록에 대한 설명은 다음과 같다.  $G(s)$ 와  $K$ 는 각각 플랜트의 전달 함수와 Gain 값을 표시한다. 전달함수  $e^{-\tau s}$ 는 주파수 도메인에서  $\tau$ 초 시간 지연을 나타내고, ZOH 블록은 이산 신호를 연속 신호로 변환하는 Zero order holder를 나타낸다. Smith Predictor는 [8]의 설계방법에 따라 전달 함수  $(1 - e^{-\tau s})G(s)$ 로 구성한다. 센서 출력의 피드백 지연  $\tau$ 가 발생하고 제어기에 피드백 지연  $\tau$ 가 실시간으로 입력 되면 Smith Predictor는 시간 지연  $\tau$ 를 보상하여 전체 닫힌 루프 시스템을 안정화시킨다.

본 논문에서 설계된 NCS에서는 USN의 센서 노드 1이 플랜트의 출력을 측정하여 그 값을 노드 2로 전송한다고 가정한다. 그 밖에 노드 1은 노드 1과 2 사이의 RTT를 실시간으로 측정하고 노드 1과 2 사이의 시간 지연은  $RTT/2$ 로 계산한다. 매 샘플링 시간마다 노드 1은 시간 지연 값과 센서 출력 값을 함께 저장한 통합 패킷을 생성하여 USN을 통해 노드 2로 전송한다. 노드 1에서 전송한 패킷을 노드 2에서 수신하면, 노드 2는 패킷 내용에 대해 수정 없이 그대로 제어기로 전달한다. 제어기에서 패킷에 저장된 정보를 센서 출력 값과 시간 지연 값으로 분리한다. 분리된 센서 출력 값은 플랜트의 입력 값으로 다시 입력하고, 분리된 시간 지연 값은 실시간으로 Smith Predictor의 시간 지연 파라미터 값으로 사용한다.

IV. NCS 실험

본 논문에서는 실제 USN 노드를 이용한 NCS를 실시간으로 실험하기 위해, MATLAB의 Real-Time Windows Target을 채택하여 Simulink 모델을 MS Windows PC에서 실시간 엔진으로 실행시킨다. USN 센서 노드로는 Hmote2420 센서 노드를 이용하여 USN을 구축한다. 그림 3의 플랜트와 Smith Predictor는 Simulink에서 모델링하고 플랜트 출력과 센서 출력 피드백은 시리얼 포트를 통해 USN으로 연결한다. 플랜트의 전달 함수는  $1/(s+0.1)$ 로 설정하고 Gain 값은  $K=70$ 으로 설정한다. 샘플링 타임은 5 ms로 하고 레퍼런스 입력은 단위 스텝으로 설정한다.

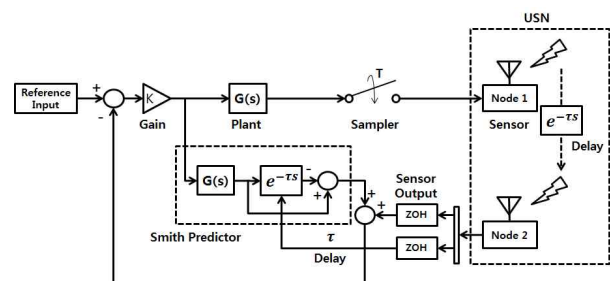


그림 3. USN 기반의 NCS 구조.  
Fig. 3. Structure of NCS over USN.

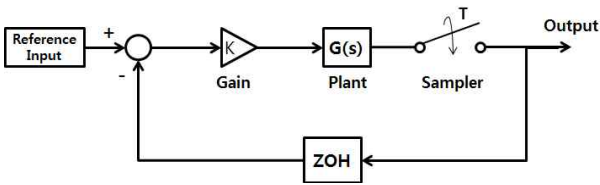


그림 4. 안정한 피드백 시스템.  
Fig. 4. Stable feedback system.

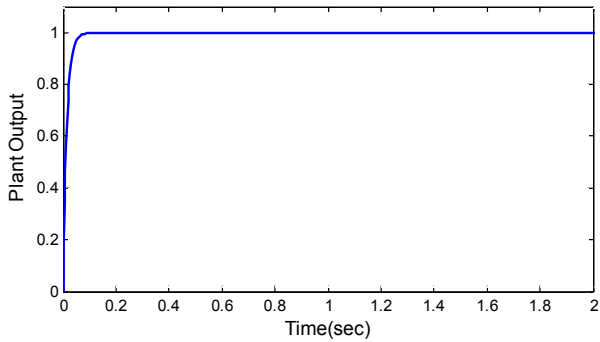


그림 5. 안정한 피드백 시스템의 반응.  
Fig. 5. Response of stable feedback system.

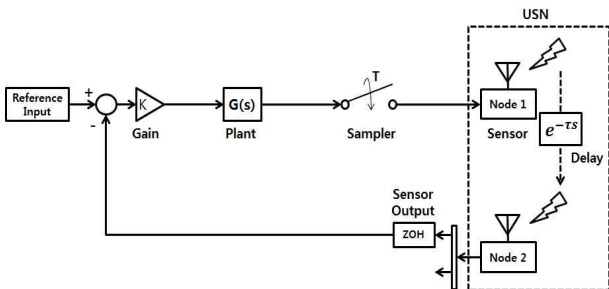


그림 6. Smith Predictor가 없는 USN 기반의 NCS.  
Fig. 6. NCS over USN without Smith Predictor.

설계한 NCS의 유효성을 예증하기 위해 4가지 경우의 실험을 진행한다. 첫 번째 경우는 그림 4와 같이 USN과 Smith Predictor가 없는 안정한 피드백 시스템이다. USN의 연결이 필요 없기 때문에 실험은 모의실험으로 진행된다. 두 번째 경우는 그림 6과 같이 Smith Predictor가 없는 USN 기반의 NCS이다. 세 번째 경우는 그림 3과 같이 본 논문에서 설계한 USN을 기반으로 Smith Predictor를 이용한 NCS이다. 이때 NCS의 샘플링 주기 T는 5 ms로 한다. 네 번째 경우는 세 번째 경우와 같은 NCS를 사용하며 샘플링 시간을 10 ms로 한다. 두 번째와 세 번째, 네 번째 경우의 실험은 실제 USN 노드를 연결하여 실험한다.

그림 5는 첫 번째 경우의 모의실험 결과로써 피드백 제어 시스템이 안정하고 시스템 출력 값이 안정 상태 값으로 수렴하는 것을 보여준다. 그림 7은 두 번째 경우의 실험 결과로서 USN에서 발생한 시간 지연이 시스템의 안정성을 무너트려 시스템 출력이 진동하고 결국 발산하는 것을 보여준다. 그림 8, 9는 세 번째 경우의 실험 결과로써, 그림 8은 실시간으로 측정된 시간 지연을 기반으로 Smith Predictor가

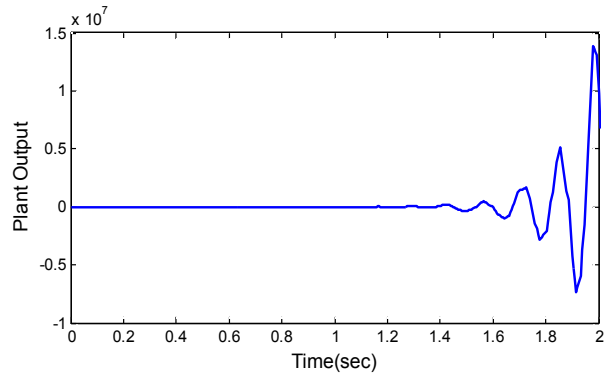


그림 7. Smith Predictor가 없을 때의 반응.  
Fig. 7. Response without Smith Predictor.

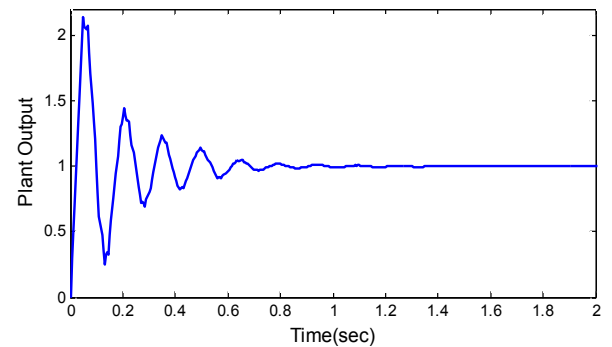


그림 8. Smith Predictor가 있을 때의 반응 (T = 5 ms).  
Fig. 8. Response with Smith Predictor (T = 5 ms).

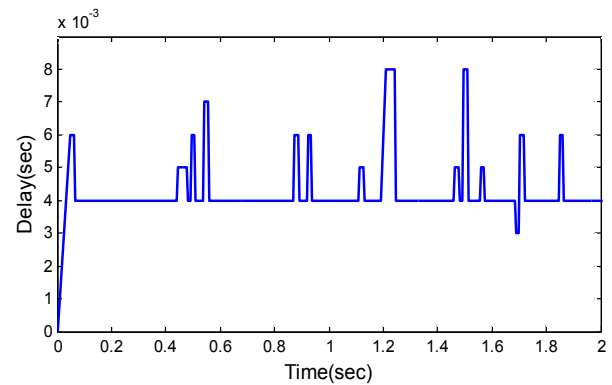


그림 9. 시간 지연 측정 (T = 5 ms).  
Fig. 9. Measured time delay (T = 5 ms).

시간 지연을 보상하여 시스템 출력이 안정 상태 값으로 수렴하는 것을 보여준다. 그림 9는 5 ms의 샘플링 시간마다 측정된 시간 지연 값을 나타낸다.

그림 10, 11은 네 번째 경우의 실험 결과로써, 세 번째 경우와는 다르게 샘플링 시간 T를 10 ms로 하여 시스템 출력과 RTT를 측정된 것을 보여준다. 그림 10은 샘플링 시간을 다르게 했을 경우에도 Smith Predictor가 시간 지연을 보상하여 시스템 출력이 안정 상태 값으로 수렴하는 것을 보여준다. 그림 11은 10 ms의 샘플링 시간마다 측정된 시간 지연 값을 나타낸다.

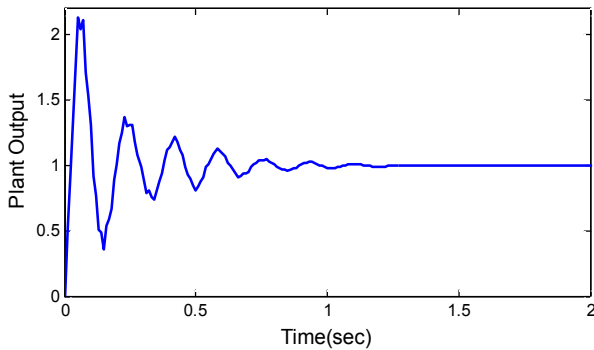


그림 10. Smith Predictor가 있을 때의 반응 ( $T = 10$  ms).

Fig. 10. Response with Smith Predictor ( $T = 10$  ms).

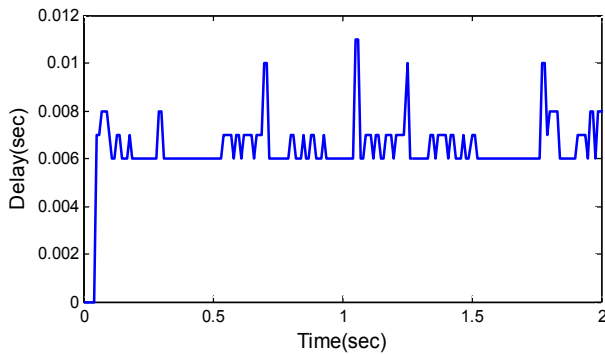


그림 11. 시간 지연 측정 ( $T = 10$  ms).

Fig. 11. Measured time delay ( $T = 10$  ms).

그림 8, 10을 통해 본 논문에서 설계한 NCS는 5 ms와 10 ms의 샘플링 시간에서도 안정적으로 동작하는 것을 입증한다. 또한, 그림 9, 11을 통해 NCS에서 동작하는 RTT 측정 알고리즘이 시간 지연을 실시간으로 적절하게 측정한다는 것을 입증한다.

## V. 결론

본 논문에서는 센서와 제어가 USN을 통해 I/O 정보를 교환하는 NCS를 설계하였다. 다른 연구에서 제안한 방법과는 다르게 시간 지연을 USN 노드에서 직접 측정하고 제어기의 Smith Predictor에 실시간으로 전달하여 Smith Predictor가 시간 지연을 정밀하게 보상하게 하였다. 이렇게 시간 지연을 실시간으로 직접 측정하는 방식은 USN 기반의 NCS를 안정하게 만들고, 더욱이 시간에 따라 변하는 USN의 시간 지연에 적절하게 대응하는 것을 가능하게 한다. V 장의 실험은 두개의 USN 노드와 하나의 피드백 제어기로 구성된 NCS에 대하여 수행되었지만, 본 논문에서 제안된 NCS 설계 방법은 다수의 USN 노드와 다수의 피드백 제어기로 구성된 NCS로 확장될 수 있다.

## 참고문헌

- [1] J. P. Hespanha, P. Naghshtabrizi, and Y. Xu, "A survey of recent results in networked control systems," *Proc. of IEEE*, vol. 95, no. 1, pp. 1-26, Jan. 2007.
- [2] M. Drew, X. Liu, A. Goldsmith, and K. Hedrick,

"Networked control system design over a wireless LAN," *Proc. of 44th Conf. Decision and Control and European Control Conf.*, pp. 6704-6709, Dec. 2005.

- [3] Y. A. Millan, F. Vargas, F. Molano, and E. Mojica, "A wireless networked control systems review," LARC Robotics Symposium, pp. 1-6, Oct. 2011.
- [4] H. H. Choi, "Variable structure control design for time-delay systems," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 16, no. 12, pp. 1208-1211, Dec. 2010.
- [5] G. S. Bae and Y. H. Joo, "Intelligent control for networked control systems with time-delay," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 17, no. 2, pp. 139-144, Feb. 2011.
- [6] H. Li, X. Li, J. Wang, and H. Ma, "Design of networked control system based on wireless sensor networks," *Proc. of 2009 IEEE International Conference on Information and Automation*, pp. 1140-1143, Jun. 2009.
- [7] Y. H. Joo, I. H. Ra, G. B. Koo, and J. B. Park, "Decentralized fuzzy output feedback control of nonlinear networked control systems for wireless sensor network," *Journal of Korean Institute of Intelligent Systems (in Korean)*, vol. 19, no. 3, pp. 323-328, Jun. 2009.
- [8] O. J. M. Smith, "Closer control of loops with dead time," *Chemical Engineering Progress*, vol. 53, pp. 217-219, May. 1957.
- [9] "TinyOS source," <http://www.tinyos.net/>
- [10] R. Gao, H. Zhou, and G. Su, "Structure of wireless sensors network based on TinyOS," *International Conference on Control, Automation and Systems Engineering (CASE)*, pp. 1-4, Jul. 2011.
- [11] H. C. Yi, H. J. Kim, Y. J. Kim, and J. Y. Choi, "RTT estimation method in WSN," *2012 International Conference on Information and Computer Networks (ICICN 2012)*, IACSIT Press, Singapore, vol. 27, pp. 17-21, Feb. 2012.



이 현철

2010년 부산대학교 정보컴퓨터공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전자전기공학과 석사. 현재 동 대학원 박사과정. 관심분야는 임베디드 시스템, 무선센서 네트워크.



김유중

2010년 부경대학교 전자정보통신공학부 졸업. 현재 부산대학교 대학원 석사과정. 관심분야는 PCB 마이크스트립, 광학검사.

**최 준 영**

1994년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 석사. 2002년 동 대학 박사. 현재 부산대학교 전자전기공학부 부교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 제어 시스템.