

타이어 변형량의 무선 계측 시스템 구현

박상수* · 곽성우** · 양정민***

Implementation of Wireless Measurement System for Tire Deformation

Sang-Su Park* · Seong-Woo Kwak** · Jung-Min Yang***

요약

본 논문에서는 스트레인게이지 센서와 Zigbee 무선 통신 기술을 활용하여 차량 주행 시 타이어의 변형량을 실시간으로 측정할 수 있는 무선 계측시스템을 개발하였다. 차량 타이어의 내부에 스트레인게이지 센서를 장착하고 DSP 모듈을 이용하여 차량이 주행 중 발생하는 타이어의 변형량을 취득하였다. 취득된 센서 값은 무선 통신으로 차량 내부로 전송된다. 차량내부에 장착된 무선 수신 모듈은 타이어의 변형량을 실시간으로 모니터링 할 수 있도록 구현하였다. 이와 같이 취득된 타이어의 변형량은 각 타이어에 가해지는 하중 또는 타이어의 속도 측정에 이용할 수 있다. 타이어에 가해지는 하중 또는 속도는 자율주행자동차의 안정성 있는 제어를 위해서는 반드시 필요한 파라메타들이다.

ABSTRACT

In this paper, a wireless measurement system has been developed which can measure the deformation of a tire in real time by utilizing strain gauge sensors and Zigbee wireless communication. A strain gauge sensor is mounted inside the tire and then the strain on the tire is obtained using the DSP module. The acquired sensor values are transmitted into the vehicle by radio communication. The wireless receiver module installed inside the vehicle can monitor the deformation of the tire in real time. The deformation of the tire can be used for measuring the load applied to each tire or the speed of the tire. The load or speed applied to the tires are essential parameters for the stable control of autonomous vehicles.

키워드

Strain Gauge Sensor, Tire Deformation, Wireless Communication, Autonomous Vehicle
스트레인 게이지 센서, 타이어 변형량, 무선 통신, 자율 주행 자동차

1. 서론

최근 자동차 관련 업체들은 자율주행 자동차의 상용화를 위해 노력하고 있다[1-2]. 자율주행 기술은 미국 방위고등연구계획국(DARPA: Defence Advanced

Research Projects Agency)이 군사적인 용도로 사용하기 위해 지상 차량에 대한 연구를 처음 시작하였다 [3]. 본 논문에서는 자율 주행 자동차의 주행 안전성을 높이기 위해 타이어의 변형량을 무선으로 계측하는 시스템을 구현하였다. VDC(Vehicle Dynamic

*발레오오토모티브코리아(constant_park@naver.com)

***교신저자 : 경북대학교 전자공학부

• 접수일 : 2020. 06. 10

• 수정완료일 : 2020. 07. 13

• 게재확정일 : 2020. 08. 15

• Received : Jun. 10, 2020, Revised : Jul. 13, 2020, Accepted : Aug. 15, 2020

• Corresponding Author : Jung-Min Yang

School of Electronics Engineering, Kyungpook National University

Email : jmyang@ee.knu.ac.kr

Control), AWD(All Wheel Drive)등의 차량 운동 제어시스템에서는 타이어와 노면 간의 접지력, 노면 마찰계수, 강성, 슬립각 등은 차량 동역학을 이용한 추정 값을 사용하고 있다. 하지만 유동적인 도로의 상황에 따라 즉각적인 대응이 필요한 자율 주행 자동차의 주행 안전성을 높이기 위해서는 타이어의 변형량을 실시간으로 측정하는 것이 필요하다. 타이어가 지면과 접촉하면서 생기는 변형량을 측정하면 타이어에 가해지는 하중을 직접 계산할 수 있다[4]. 또한 각각의 타이어에 가해지는 하중을 측정하면 자율 주행 오차를 발생시킬 수 있는 하중의 슬립 현상을 파악할 수 있다.

차량이 주행 중에 타이어의 변형량을 측정하기 위해서는 회전 운동을 하는 타이어 휠과 고정된 차량 차체사이를 유선으로 연결시켜주는 슬립 링(slip-ring)과 같은 고가의 장치가 요구된다[5]. 본 논문에서는 슬립 링과 같은 고가의 장치 대신 타이어 내부[6-7]에 스트레인게이지 센서[8]를 부착하고 센서 신호 측정 모듈을 이용하여 변형량을 측정한 후, 그 결과를 무선으로 차량내의 수신 모듈로 전송하여 타이어의 변형량을 실시간으로 계속할 수 있는 시스템을 개발하였다. 무선 계측 시스템으로 측정된 데이터의 신뢰성을 검증하기 위해 별도의 유선 계측 시스템을 구성하고 실험결과를 비교하여 제안된 무선 계측시스템의 유용성을 검증하였다[9-10].

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서 개발된 무선 계측 시스템의 하드웨어 구성을 소개하고, 3장에서는 계측 시스템을 구성하는 각 모듈의 구동 소프트웨어를 설명한다. 4장에서는 차량이 주행할 때 측정된 타이어의 변형량 측정결과를 보여주고 5장에서 결론을 맺는다.

II. 무선 계측 시스템 구성

본 논문에서 개발한 타이어 변형량을 무선으로 계측할 수 있는 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 타이어 내부에 스트레인게이지 센서와 구동회로를 부착하고, 신호를 증폭한 후 데이터 수집 모듈(data measurement module)을 이용하여 스트레인게이지 신호를 취득한다. 취득된 신호는 무선으로 차량 내부의

데이터 통합 모듈(data integration & processing module)로 전송된다. 데이터 통합 모듈은 차량의 4개 바퀴에서 전달되는 타이어 변형량들을 수집하고 분석한 후 모니터링 시스템에 표출한다. 그림 1에서 볼 수 있듯이 스트레인게이지 센서, 구동회로 및 데이터 수집 모듈은 타이어에 장착되고 데이터 통합 모듈은 차량내부에 탑재된다.

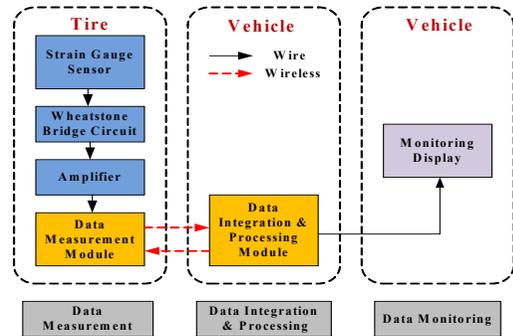


그림 1. 무선 계측 시스템의 구성도
Fig. 1 Configuration of wireless measurement system

스트레인게이지 센서 구동회로는 그림 2에서와 같이 브리지(bridge) 회로를 이용하여 구성하였다. 차량 주행 중에 타이어가 지면과 접촉하면 타이어의 접촉면에서 변형이 발생한다. 타이어 내부의 특정 부분에 스트레인게이지 센서를 부착하면 센서가 부착된 면이 지면과 접촉할 때마다 스트레인게이지 센서가 늘어나거나 줄어드는 변형이 발생하며 이것은 스트레인게이지 센서의 내부저항 값을 변화시킨다. 스트레인게이지 센서의 저항 변화는 그림 2의 브리지 회로의 전압 변화를 가져오므로 이것을 계측하여 타이어의 변형량을 측정하였다.

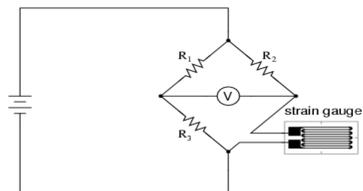


그림 2. 스트레인게이지 센서 구동 회로
Fig. 2 Driving circuit for strain gauge sensor

스트레인게이지 센서는 타이어 내부에 빈틈없이 밀

착되어야 타이어의 변형이 그대로 센서에 전달되므로 주의를 기울여 부착하였다. 그림 4에서 타이어 내부에 부착된 스트레인게이지 센서를 확인할 수 있다.

2.1 데이터 수집 모듈

본 연구에서 개발한 데이터 수집 모듈의 하드웨어는 그림 3과 같다. 데이터 수집 모듈은 DSP(Digital Signal Processing) 프로세서, 신호 증폭회로, 그리고 취득된 데이터를 무선으로 전송하기 위한 Zigbee 무선 모듈로 구성하였다. DSP 프로세서는 TI(Texas Instruments)(社)의 초소형 TMS320F28335 모듈을 사용하였다. TMS320F28335 모듈은 저 전력, 150MHz/150MIPS/150MMACS의 연산능력, 그리고 센서 데이터 취득에 필요한 12Bit ADC(Analog Digital Converter)를 가지고 있다.

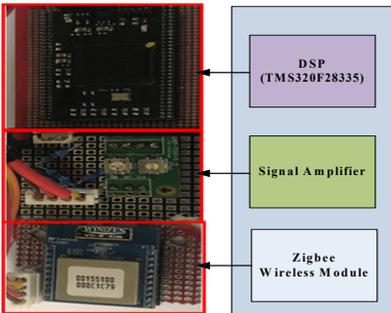


그림 3. 데이터 수집 모듈
Fig. 3 Data measurement module

신호 증폭회로(signal amplifier)는 그림 2의 스트레인게이지 구동 회로(Wheatstone bridge)와 전압 증폭회로를 결합한 것이다. 증폭된 스트레인게이지 신호는 DSP의 ADC로 전달된다. 데이터 수집 모듈을 통해 수집된 데이터는 Zigbee 통신 모듈을 이용하여 차량내의 데이터 통합 모듈로 전송된다. 데이터 수집 모듈에 인가되는 전원은 5V/1A 출력의 보조 배터리를 사용하였다. 그림 4는 타이어 내부에 부착된 스트레인게이지 센서와 데이터 수집 모듈을 보여준다.

2.2 데이터 통합 모듈

데이터 통합 모듈은 타이어에 장착된 데이터 수집 모듈에서 무선으로 전송되는 타이어 변형량 데이터를 처리하는 역할을 한다. 그림 5는 본 연구에서 개발된

데이터 통합모듈을 보여준다. 데이터 통합 모듈은 신호처리를 위한 DSP, 전원 공급을 위한 전원부, Zigbee 무선 통신부, 그리고 차량 내부 CAN 네트워크와 연결할 수 있는 CAN 인터페이스로 구성된다.

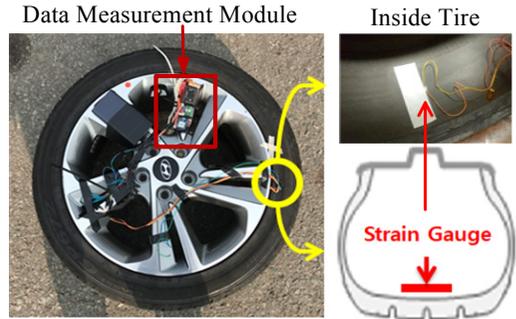


그림 4. 타이어에 장착된 센서와 데이터 수집 모듈
Fig. 4 Strain gauge sensor and data measurement module mounted on the tire

DSP 모듈은 데이터 수집 모듈에서와 동일한 TMS320F28335를 사용하였다. 전원부는 12V 차량 전원에서부터 전원을 공급받아 DC-DC 컨버터를 통해 DSP 모듈, Zigbee 및 CAN 통신 모듈에게 3.3V전원을 공급한다. CAN 인터페이스는 차량의 in-vehicle 네트워크에 접속하여 차량의 속도, 조향 등의 데이터를 수신하기 위해 장착되었다. CAN으로 전달되는 차량 내부 정보들은 타이어 변형량 데이터와 결합되어 각 타이어에 가해지는 하중 계산, 타이어의 속도 계산 등에 사용된다.

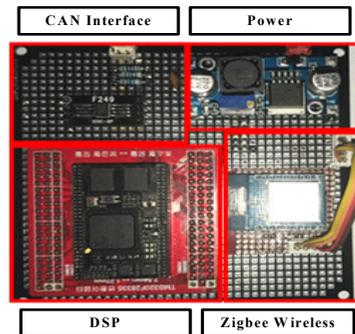


그림 5. 데이터 통합 모듈
Fig. 5 Data integration and processing module

데이터 통합 모듈은 각 타이어에 장착된 데이터 수

집 모듈로부터 스트레인게이지 센서 신호의 원시 데이터(raw data)를 무선으로 전달받아 신호 처리를 한 후 그 결과를 시리얼 통신으로 데이터 모니터링부에 전달하여 디스플레이 장치에 표출하도록 한다.

III. 시스템 제어 소프트웨어

3.1 데이터 수집 모듈 소프트웨어

데이터 수집 모듈은 타이어 내부에 장착된 스트레인게이지 센서로부터 나온 원시 데이터를 12bit 분해능을 지닌 DSP 모듈의 ADC를 통해서 취득한다. 또한 Zigbee 무선 모듈을 통해 데이터를 손실 없이 실시간으로 데이터 통합 모듈로 송신한다. 이를 수행하기 위해 그림 6과 같은 순서도로 내부 소프트웨어를 구현하였다.

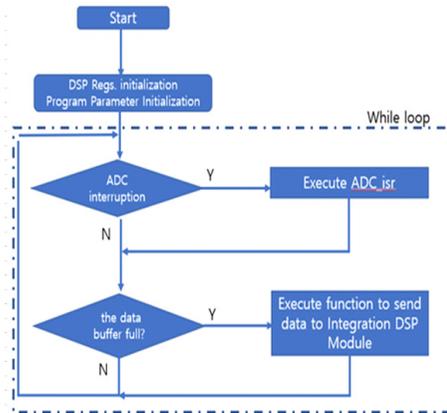


그림 6. 데이터 수집 모듈 소프트웨어 순서도
Fig. 6 Software flow chart for the data measurement module

데이터 수집 모듈은 실시간 계측에 중점을 두고 있기 때문에 일정 데이터가 수신될 때 바로 통합모듈로 데이터를 전송해야 한다. 이를 위해 폴링 방식의 데이터 전송이 아닌 인터럽트 방식을 사용하였다. 먼저 ADC 인터럽트가 발생하면 3개 미만의 데이터를 버퍼에 채운 뒤 스트레인게이지 센서 데이터의 수신이 완료됨과 동시에 Zigbee 무선 모듈을 이용하여 데이터를 전송하도록 인터럽트 서비스 루틴(ISR: Interrupt Service Routine)을 구현하였다.

3.2 데이터 통합 모듈 소프트웨어

데이터 통합 모듈은 데이터 수집 모듈로부터 전송 받은 데이터를 통합하고 노이즈를 없앤 후 모니터링 디스플레이로 데이터를 보내는 역할을 한다. 이런 동작을 수행하기 위해 그림 7과 같은 순서도로 소프트웨어를 구현하였다.

데이터 수집 모듈로부터 전송받은 데이터의 노이즈를 제거하고 원하는 주파수 영역 내의 성분만을 뽑아내기 위해 디지털 버터워스 필터(Butter worth filter)를 소프트웨어로 구현하여 사용하였다.

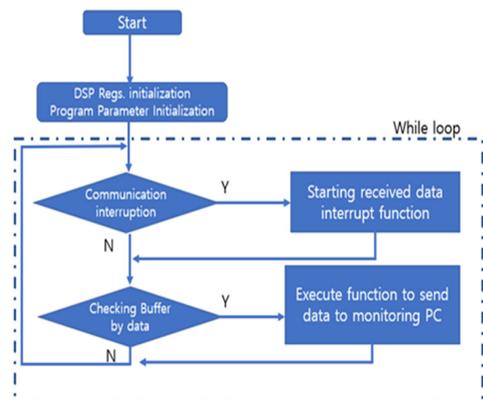


그림 7. 데이터 통합 모듈의 소프트웨어 순서도
Fig. 7 Software flow chart for the data integration and processing module

IV. 실험 결과

먼저 차량이 주행 중에 타이어가 지면과 접촉하면서 발생하는 변형량을 직접 계측하기 위해 그림 8과 같이 스트레인게이지 센서가 부착된 타이어와 바퀴 휠(wheel)에 슬립링을 장착하여 유선으로 스트레인게이지 신호를 취득할 수 있게 구성하였다. 타이어 내부의 스트레인게이지 센서로부터 나오는 신호는 NI(社)의 DAQ 보드를 이용하여 노트북에서 신호를 계측하였다. DAQ 보드는 그림 2의 스트레인 게이지 구동회로에서 출력되는 아날로그 전압을 직접 계측할 수 있는 장비이다.

그림 9는 차량이 주행할 때 DAQ 장비로 측정된 스트레인게이지 센서의 아날로그 전압파형을 보여준다. 센서가 부착된 타이어 면이 지면과 접촉할 때 피

크 전압이 발생하는 것을 볼 수 있다. 그림 9의 신호는 세로축의 아래쪽이 양의전압을 나타내고 위쪽은 음의 전압을 나타낸다는 것에 유의한다. 타이어가 늘어났을 때는 양의 피크 전압이 나타나고 수축되었을 때는 음의 피크 전압이 나타남을 볼 수 있다.

다음으로 그림 8의 슬립링이 부착된 타이어를 데이터 수집 모듈이 탑재된 그림 4의 타이어로 교체하고 차량이 주행할 때 타이어 변형량 측정 실험을 실시하였다. 이번에는 NI(社)의 DAQ 장비 대신 그림 5의 데이터 통합 모듈을 이용하여 무선으로 스트레인게이지 센서 신호를 전달받아 타이어 변형량을 측정하였다.



그림 8. 타이어 변형량의 유선 계측 시스템
Fig. 8 Wireline measuring system of tire deformation

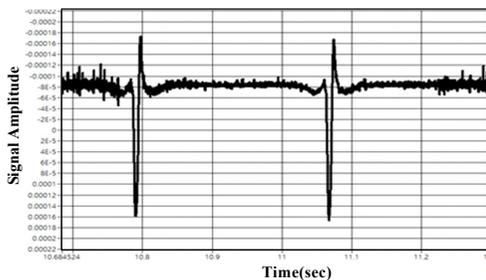


그림 9. 타이어 변형량의 유선 계측 신호
Fig. 9 Wireline measurement signal of tire deformation

그림 10은 본 연구에서 개발한 무선계측 시스템을 이용하여 타이어의 변형량을 측정된 결과이다. 무선 계측 시스템에서는 그림 3의 데이터 취득 모듈을 이용하여 스트레인게이지 센서의 아날로그 신호를 증폭한다. 그런 다음 DSP내의 ADC를 이용하여 디지털 신호로 변환한 후 무선으로 데이터 통합 모듈로 전송

한다. 그림 10은 데이터 통합 모듈에서 취득한 변형량 신호를 보여준다. 그림 10에서는 세로축의 위쪽으로 갈수록 타이어가 늘어남을 나타내고 아래쪽은 타이어가 수축하는 것을 나타낸다. 즉 그림 9와 비교하면 신호가 반전되어 표시되었다.

그림 9의 유선 계측 신호와 그림 10의 무선 계측 신호는 각 실험 시 차량의 주행 속도 및 도로의 환경 조건에 따라 일부 파형의 형태는 차이가 나지만 유선 계측 시스템을 통해 얻은 데이터와 비교했을 때 타이어의 변형이 생길 때 유사한 진폭의 변화를 확인할 수 있다. 이것은 무선 계측 시스템으로도 유선 계측 시스템과 거의 동일한 측정 결과를 얻을 수 있음을 나타낸다.

그림 10에서 타이어의 변형량의 최고점 피크인 A 점과 B지점의 시간차(B-A)는 타이어가 한 바퀴 회전한 시간을 나타낸다. 또한 변형량의 폭(C)은 타이어에 가해지는 힘과 비례관계에 있으므로 이로부터 타이어의 하중을 계산할 수 있다.

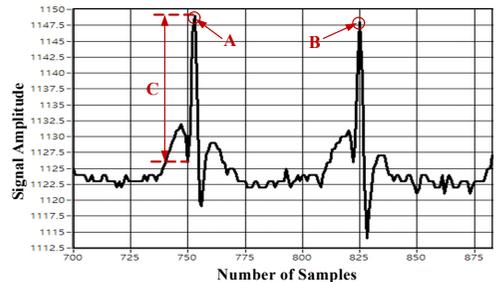


그림 10. 타이어 변형량의 무선 계측 신호
Fig. 10 Wireless measurement signal of tire deformation

V. 결 론

본 연구에서는 차량 주행 중에 타이어의 변형량을 실시간으로 측정하기 위해 스트레인게이지 센서와 근거리 무선 통신용 Zigbee 모듈, 신호 처리 모듈(DSP)을 활용한 무선 계측 시스템을 구현하였다. 무선 계측 시스템의 유용성을 확인하기 위해 슬립링을 활용한 유선 계측시스템을 구현하고 실험결과를 비교하였다. 그 결과 무선 계측시스템을 이용하여 타이어 변형량을 실시간으로 측정할 수 있음을 확인하였다.

유선 계측시스템의 경우 슬립 링과 같은 고가의 장치가 타이어 휠에 부착되어야하기 때문에 시스템을 구성하는데 많은 비용이 소요되고 실제 차량에 장착하기도 쉽지 않다. 하지만 개발된 무선 계측 시스템을 이용하면 차량의 다양한 데이터들을 실시간으로 취득할 수 있기 때문에 운전자 보조 시스템(ADAS: Advanced Driver Assistant System)이나 자율주행자동차의 주행 제어 등에 적용할 수 있다. 또한 타이어에 가해지는 하중이나 타이어의 회전 속도 등 차량의 안정성을 위한 여러 가지 보정계수를 얻는데 활용 할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 임(No. NRF-2016R1D1A1B02012959). 이 논문은 2020년도 부경대학교 전기 신입교수 연구력강화 지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

References

[1] Y. Ann and S. Kwak, "Long Distance Vehicle Recognition and Tracking using Shadow," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 1, 2019, pp.251-256.

[2] Y. Ann, S. Kwak, J. Lee, H. Lee, H. Liu, H. Jo, S. Park, I. Lee, E. Lee, J. Song and S. Kim, "Long Distance Vehicle Recognition using Mono-Camera," *Proc. of Korea Institute of Intelligent Systems Spring Conf.*, Jeju, Korea, Apr. 2017, pp.235-236.

[3] S. Thrun, "Stanley: The Robot that Won the DARPA Grand Challenge," *J. of Field Robotics*, vol. 23, no. 9, 2006, pp. 661-692.

[4] Y. Seo, S. Kwak, J. Lee, H. Lee, H. Liu, H. Jo, S. Park, and E. Lee, "Vehicle Load Measurement using Tire Deformation Values," *J. of Korea Institute of Intelligent Systems*, vol. 28, no. 2, 2018, pp. 170-176.

[5] H. Jo, M. Yeom, J. Lee, K. Park, and J. Oh, "Development of Intelligent Tire System," *SAE*

2013 *World Congress & Exhibition*, Technical paper 2013-01-0744, Apr. 2013.

[6] B. Choi, S. Kim, and S. Hwang, "Performance Analysis of TPMS Beamformer According to Variance of Antenna Interelement Spacing" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 8, no. 6, 2013, pp.907-916.

[7] S. Kim and S. Hwang, "Computational Complexity Comparison of TPMS Beamformers for Interference Suppression," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 7, no. 6, 2012, pp.1327-1335.

[8] S. Choi, Y. Jeon, and W. Cho, "The Development of Torque Sensor for Electric Bicycle," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 6, no. 6, 2011, pp.873-880.

[9] W. Choi and K. Seok, "Survey on ways to improve the system in preparation for changes in the radio management system" *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 6, 2018, pp. 1145-1154.

[10] J. Yang, K. Seok, and H. Sin, "Technological and Social Significance of the Revision of the Radio Law," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 4, 2019, pp. 627-636.

저자 소개



박상수(Sang-Su Park)

2013년 계명대학교 전자공학과 졸업(공학사)

2020년 계명대학교 대학원 전자전기공학과 졸업(공학석사)

2019년~현재 발레오오토모티브코리아

※ 관심분야 : 임베디드 프로그래밍, 무인 자율주행 제어, 센서 융합



곽성우(Seong-Woo Kwak)

1993년 한국과학기술원 전기및전자
공학과 졸업(공학사)

1995년 한국과학기술원 전기및전자
공학과 졸업(공학석사)

2000년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학
박사)

2000년~2003년 인공위성연구센터 선임연구원

2003년~2019년 계명대학교 전자공학과 교수

2020년~현재 부경대학교 제어계측공학과 교수

※ 관심분야 : 실시간 시스템, 비동기 시스템 제어,
내고장성 시스템, 자율주행 자동차



양정민(Jung-Min Yang)

1993년 한국과학기술원 전기및전자
공학과 졸업(공학사)

1995년 한국과학기술원 전기및전자
공학과 졸업(공학석사)

1999년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업(공학
박사)

2013년~현재 경북대학교 전자공학부 교수

※ 관심분야 : 비동기 순차 머신 교정 제어, 실시간
시스템 고장 진단 및 극복, 불리언 제어 네트워크

