

식물공장 자동화를 위한 로메인 상추 생육 제어 시스템

이민혜¹, 유태수², 임순자^{3*}

¹원광대학교 교양교육원 교수, ²테이블컵 대표, ³원광대학교 전자공학과 교수

Growth Control System for Romaine Lettuce in Automated Plant Factories

Min-Hye Lee¹, Tae-Soo Yu², Soon-Ja Lim^{3*}

¹professor, Center for General Education, Wonkwang University, Iksan, 54538 Korea

²CEO and System Developer, Tablecup, Iksan, 54538 Korea

³Professor, Department of Electronic Engineering, Wonkwang University, Iksan, 54538 Korea

요약 기후 변화와 환경 오염으로 인해 건강한 먹거리에 대한 수요가 증가하면서 육류산업의 발전이 요구되고 있으나, 인구 고령화로 인한 기술 인력이 부족해지면서 작물의 생산과 관리가 어려워지고 있다. 이에 따라, 자동화된 작물 생육 시스템의 필요성이 높아지고 있으며, 고품질 작물의 안정적인 생산을 위해서는 모종의 생육 환경을 세밀하게 조절하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 식물공장 내부 환경을 모니터링하고 조절할 수 있는 자동화 제어시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 아두이노 및 다양한 센서를 통해 온도, 습도, 광량, 양액 공급을 관리하며, 고효율의 공기 순환 방식으로 내부 온도의 변동을 최소화한다. 로메인 상추를 대상으로 실험을 진행한 결과, 제안하는 시스템은 온도 편차 $\pm 1^{\circ}\text{C}$, pH 6.0, 전기 전도도 1.6 dS/m으로 식물공장 표준 성능에 부합하였으며, 노지 환경에서 재배된 작물보다 잎의 성장이 우수함을 확인하였다. 제안된 시스템은 노동 비용의 절감과 고품질 작물의 재배 효율성 향상에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대된다.

키워드 : 공기순환장치, 식물공장, 생육 환경, 스마트팜, 제어시스템

Abstract As the demand for healthy food increases, an automated system capable of precisely controlling the growth environment is essential for stable crop production. This study proposes an automated system for monitoring and controlling plant factories. It manages the growth environment using Arduino and various sensors, utilizing an efficient air circulation method to maintain stable internal temperatures. The experiment showed that the proposed system maintained a temperature deviation of $\pm 1^{\circ}\text{C}$, a pH of 6.0, and an electrical conductivity of 1.6 dS/m, meeting standard performance. Additionally, leaf growth was found to be superior compared to crops grown in open-field conditions. The proposed system is expected to help reduce labor costs and improve the efficiency of cultivating high-quality crops.

Key Words : Air circulation device, plant factory, growth environment, smart farm, control system

1. 서론

오늘날 사회는 인구 증가, 기후 변화와 환경 오염과 같은 복잡한 문제에 직면해 있다. 이러한 문제들은 식량 안보와도 밀접하게 연결되어 있어 일상생활 및 경제사회에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 근미래에 발생할 수 있는 식량 문제에 대응하기 위한 방안으로 농업 밸류체인 전반에 정보통신기술(Information and Communications Technology, ICT)을 접목하여 지능화를 구현하는 연구가 활발히 진행 중이다[1,2].

이러한 연구는 스마트 농업(Smart agriculture)이란 용어로 정의되고 있으며 스마트팜(Smart farm)과 식물공장(Plant factory)이 대표적인 예이다. 스마트팜은 온실이나 축사와 같은 실내 환경에서 사물인터넷, 빅데이터 등을 이용하여 작물이나 가축의 성장을 최적화하는 시스템이다. 식물공장은 인공광을 이용하는 밀폐형 식물 재배 시설에서 인공적으로 식물의 생육 조건을 조정하며 작물을 생육하는 시스템이다. 넓은 의미로는 식물공장 시스템은 스마트팜 분야에 포함된다고 볼 수 있다[3,4].

오래전부터 스마트 농업 분야에서는 식물의 성장을 자동으로 모니터링하고 제어하는 연구[5-8]가 진행되어 왔다. 농진청에서는 농작물의 품질 유지와 생산성 향상을 위한 식물공장의 핵심 기술을 장조, 빛, 자동화, 양분, 온도 5가지로 분류하였다[9]. 이러한 분류를 시스템에 적용하면 인공광, 환경제어, 양액 공급, 자동화 기술로 정리할 수 있다.

먼저, 인공광은 식물 생장에 도움을 주는 파장의 빛을 적절하게 제공하여 생산성을 높이는 기술이다. LED 인공광 기술이 상용화되면서 식물공장의 생산성도 크게 향상되었다. 환경제어는 온습도, 이산화탄소를 적절하게 유지하여 병해충을 방지하고 식물의 성장환경을 최적화하는 기술이다. 양액 공급은 식물에 필요한 영양액을 적절하게 공급함으로써 식물의 생육을 균형 있게 유지하고 생산성을 높일 수 있다. 마지막으로 자동화 기술은 식물의 재배 및 수확, 포장 등과 같은 농업 밸류 체인을 자동화하여 노동력과 비용을 절감하는 기술이다[10-13].

최근에는 인공지능 모델을 적용하거나 빅데이터 분석 기술 등을 활용하여 작물의 성장을 분석하는 연구가 활발하게 이루어지고 있다[14,15].

본 연구에서는 식물공장에서 채소 모종의 효율적인 생육 환경 관리를 위해 내부 환경을 모니터링하고 조절할 수 있는 새로운 시스템을 제안하고자 한다. 제안하는 시스템은 아두이노 및 다양한 센서를 통해 온습도, 광량, 양액 공급을 관리하며, 고효율의 공기 순환 방식을 도입해 내부 온도의 변동을 최소화한다.

본 논문의 2장에서는 채소 모종 생육 제어시스템의 전체적인 구조를 설명한다. 3장에서는 제안하는 시스템의 설계 과정을 보여준다. 4장에서는 테스트베드를 구축하고 제작한 생육 제어시스템의 실제 동작 실험을 통해 성능을 확인하고 마지막으로 5장에서 결론을 맺는다.

2. 채소 모종 생육 제어시스템

고품질의 작물을 안정적으로 생산하기 위해서는 채소 모종의 성장환경을 세밀하게 조절하는 것이 필수적이다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 식물공장 내부 환경을 모니터링하고 제어할 수 있는 자동화된 시스템을 제안한다.

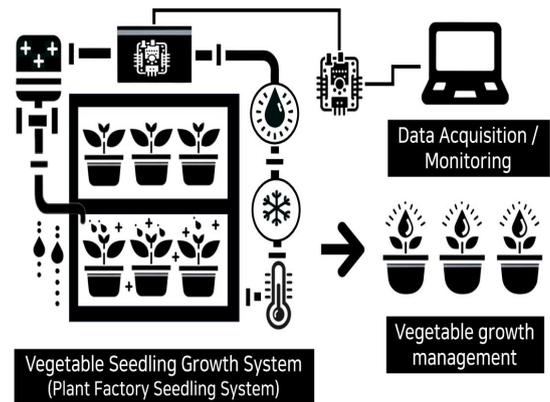


Fig. 1. Overall block diagram of the proposed system

제안하는 시스템은 아두이노와 라즈베리파이 4를 이용하여 Fig. 2와 같이 온습도, 조명, 양액 공급을 포함한 다양한 환경 조건들을 제어하고 확인할 수 있는 구조로 되어 있다. 온습도와 pH 값을 측정하는 센서들로부터 얻은 데이터를 통해 생육 환경의 상태를 평가할 수 있으며, 이 정보를 활용하여 LED 조명, 냉난방 시스템, 공기 순환기, 양액 및 관수 시스템을 제어할 수 있다.

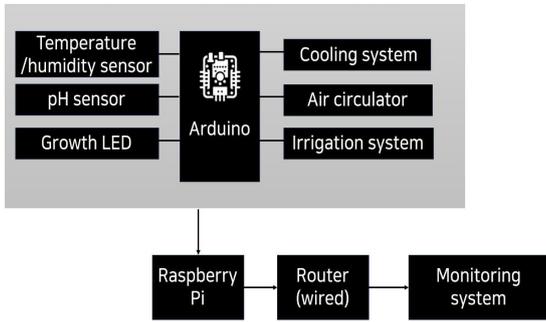


Fig. 2. Hardware block diagram of the proposed system

3. 제안시스템 설계

3.1 LED 제어부

채소 모종의 성장도에 따라 조사할 수 있는 빛의 색상은 일반적으로 적색광, 청색광, 백색광, 적청광, 네 가지로 나뉜다. 식물은 빛의 스펙트럼에 따라 다르게 반응하며, 이를 이용하여 생육 과정을 최적화할 수 있다. 여러 연구에 따르면 400~500nm 파장의 청색광과 640~700nm 파장의 적색광이 식물 광합성에 도움이 됨을 제안하고 있다[10]. 적색광은 식물이 꽃피는 단계와 열매 맺는 단계를 촉진하며 식물의 전반적인 성장을 돕는다. 청색광은 엽록소 생성을 촉진하여 식물의 광합성 능력을 높인다. 특히 잎의 성장과 강화에 기여한다. 백색광은 전체 스펙트럼을 포함하여 광범위한 빛을 제공한다. 백광은 자연광에 가깝기 때문에 식물의 전반적인 성장에 도움을 줄 수 있으며, 이러한 인공광의 특성은 식물공장에서 유용하게 활용된다[16].



Fig. 3. LED lighting (white light) of the proposed system

Fig. 3은 이를 기반으로 하여 육묘기 내부에 설치된 식물 성장용 LED 조명의 사진이다. 백광, 청광, 적청광 3가지 색상으로 제작되었으며 식물에 골고루 빛이 조사될 수 있도록 조명을 상부에 연결하였다.

3.2 온습도 (T/C) 센서 제어부

제안하는 시스템은 육묘기와 연결된 온습도 센서를 통해 식물의 성장환경을 정밀하게 모니터링하고 제어한다. 온습도 센서 제어부는 아두이노와 온습도 센서를 중심으로 구성되어 있다. 8개의 온습도 센서를 이용하여 식물공장의 환경 조건을 실시간으로 측정하며, 아두이노를 통해 처리한다. 아두이노는 데이터를 라즈베리파이 4로 전송하는 역할을 한다. 시스템은 유선 공유기를 통해 인터넷에 연결되어 있어, 원격 위치에서도 상황 모니터링이 가능하도록 설계한다. 이를 통해 사용자는 언제 어디서나 식물공장의 상태를 확인할 수 있다. 온습도 센서 제어부의 구조를 Fig. 4에 블록도로 나타내었다.

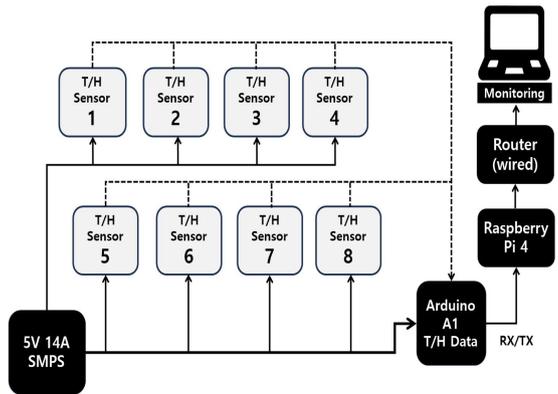


Fig. 4. Block diagram of temperature and humidity sensor control part

3.3 양액(pH/EC) 센서 제어부

양액 센서 제어부는 Fig. 5와 같이 총 7개의 EC 센서를 사용하여 식물의 양액 환경을 감시하며, 이를 통해 식물의 영양 상태와 성장 조건을 최적화한다. 양액 센서로부터 수집된 데이터는 아두이노를 통해 처리된 후 라즈베리파이로 전송된다.

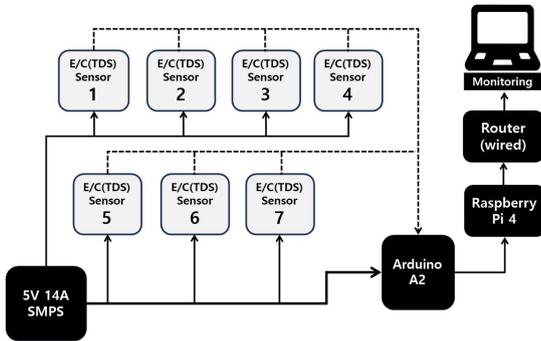


Fig. 5. pH/EC control part

Fig. 6은 양액 전달을 위한 관수 시스템의 테스트 사진이다. 펌프 라인에 연결되어 있는 양액을 관수와 함께 전달하여 온습도를 조절하고 pH를 맞춘다.



Fig. 6. Irrigation system test

3.4 웹 기반 모니터링 시스템

아두이노에서 수집된 생육 환경 데이터는 라즈베리파이4에서 일차적으로 취합된 후, 네트워크를 통해 서버에 저장된다. 서버에는 Fig. 7과 같이 데이터베이스가 구축되어 있으며, 식물공장의 환경 데이터, 센서 정보 및 상태, 종자 데이터, 데이터 수집 시간 등이 저장된다. 실시간으로 수집된 생육 환경 데이터의 변화를 시각적으로 확인할 수 있도록 웹 기반 모니터링 시스템을 설계하였다. Fig. 8은 설계된 모니터링 시스템의 예시 화면을 보여주고 있다.

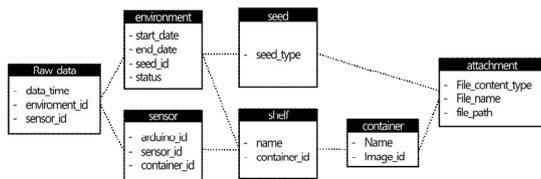


Fig. 7. Database ER Diagram



Fig. 8. Designed web-based monitoring system

4. 실험 및 고찰

4.1 식물공장 테스트베드 구축

본 연구에서는 제안된 시스템의 성능을 평가하기 위해 컨테이너 내에 생육 제어시스템을 구현하여 식물공장 테스트베드를 조성하고, 작물 성장 비교를 위해 노지 환경에서 동일 조건으로 로메인 상추를 재배하였다. 이를 통해 식물공장에서 제안된 시스템의 성능과 작물 재배의 우수성을 검증하였다.

본 연구에서 사용된 식물공장은 30m×30m×2.4m 크기의 컨테이너 내부에 6m×18m×3m 규모의 다층형 육묘기를 설치하여 조성하였다. Fig. 9는 컨테이너 내부에 배치된 다층형 육묘기와 실험을 위해 적청광과 백광을 식물에 조사 중인 제어시스템의 실제 사진이다.

육묘기 측면에는 자동 제어를 위한 관수 장치가 연결되어 있는 것을 확인할 수 있다.



Fig. 9. Multi-layer seedling in operation on test bed

다층형 육묘기는 내부 공기 순환의 효율성을 높이기 위해 특별히 고안한 구조로 컨테이너 내부에 배치하였다. Fig. 10은 다층형 육묘기의 시뮬레이션 이미지로 왼쪽의 범례는 공기 흐름의 시각화를 통해 내부의 공기 순환 효율성을 나타낸다. 붉은색으로 표시될수록 높은 속도의 공기흐름을 보여주며, 파란색은 낮은 속도를 의미한다. 육

묘기의 구조는 컨테이너 내부의 공간을 최대한 활용하도록 설계되어 있으며, 공기 순환을 위해 공간 사이에 충분한 간격을 두고 배치되었음을 볼 수 있다.

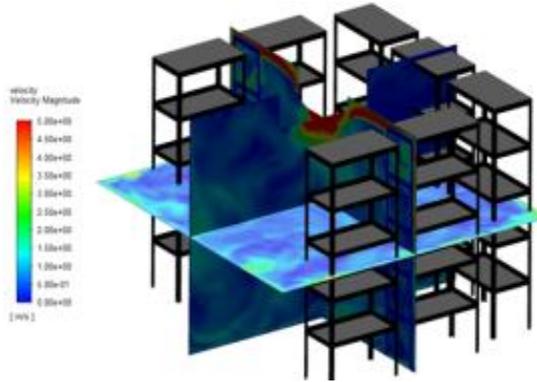


Fig. 10. Placement plan for seedling plant with air circulation structure

4.2 제어 시스템 동작 실험

구축한 식물공장 테스트베드에서 운영되는 용수 및 양액의 pH 농도 및 전기전도도(EC) 수질을 측정 후, 라즈베리파이로 송신된 데이터를 확인하였다. pH 농도 6.0 내외, 전기전도도 1.2~1.6dS/m인 경우 실제 식물공장의 육묘환경에 해당 시스템의 적용이 가능함으로 판단된다. 실험 결과, Table 1과 같이 pH 농도 측정값 6.0, 전기전도도 1.6dS/m으로 상용 시스템과 차이가 없음을 확인하였다.

Table 1. pH/EC measurement results

Measuring Items	standard value	Measurement (proposal system)	Compatibility (Y/N)
pH	6.0	6	Y
EC	1.2~1.6dS/m	1.6 dS/m	Y

식물공장 내부에 5단의 다층형 육묘기를 설치하고 실험에 사용되는 육묘기 두 대의 구분을 위해 No.1과 No.2로 표기하였다. 냉방장치와 공기 순환 시스템을 1시간 가동 후, 육묘기 상층(T)과 하층(B)의 온도를 측정하여 온도 편차를 확인하였다. 온도 편차가 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 인 경우 적합으로 판단한다. 육묘기 두 개의 상하층의 온도 차를 측정한 결과, Table 2와 같이 기준 온도 17°C 대비 온도 편차가 평균 0.65°C 로 나타나 식물공장 적용에 문제없음을 확인하

였다.

Table 2. Internal temperature difference measurement results of the proposed system

Floor	Reference Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Measurement Temp ($^{\circ}\text{C}$)	Temp. deviation ($^{\circ}\text{C}$)	Compatibility (Y/N)
No.1 (T)	17.0	17.6	0.6	Y
No. 1 (B)	17.0	17.3	0.3	Y
No. 2 (T)	17.0	18.0	1.0	Y
No. 2 (B)	17.0	17.7	0.7	Y

4.3 노지와 제안 시스템의 생육 데이터 비교

제안하는 시스템의 생육 상태 확인을 위해 비교군으로 노지 환경에서의 테스트베드를 구축하였다. 식물공장 테스트베드와 노지 테스트베드에서의 로메인 상추의 성장률 비교를 위해 한 트레이를 선별하여 잎의 길이를 분석하고 평균값을 내었다. 대조군과 비교군의 실험을 한 결과, Table 3과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 1주차에는 3mm로 동일한 성장률을 보였으나, 2주차부터 노지 환경의 작물보다 제안하는 시스템에서의 작물이 더 잘 자란 것을 확인할 수 있었다.

Table 3. Internal temperature difference measurement results of the proposed system

Leaf Length (mm)	Week 1	Week 2	Week 3	Week 4
Proposed system	3	50	94	140
Open Field	3	41	110	180

5. 결론

본 논문에서 제시된 시스템은 식물공장 내 채소 모종의 생육환경을 효율적으로 관리하기 위해 개발되었다. 이 시스템은 아두이노와 라즈베리파이 4, 그리고 온습도 및 양액 센서를 사용하여 생육환경 데이터를 수집하고, 이를 통해 생육 설비를 제어할 수 있도록 설계되었다. 수집된 데이터는 아두이노를 통해 처리되며, 후속 과정으로 라즈베리파이 4로 전송되어 웹 모니터링 시스템을 통해 추가적인 데이터 분석 및 저장이 진행된다.

식물공장 테스트베드를 구축하고 그 작동 상태 및 데이터 전송 기능을 실험한 결과, 시스템은 식물공장의 환

경 조건을 유지하고 식물의 생육에 필요한 최적의 조건을 제공하는 데 효과적임을 입증하였다. 또한, 식물공장 내부 상태를 정확히 수치화하여 모니터링할 수 있음을 확인하였다.

이러한 자동화된 시스템을 이용하여 식물공장을 운영함으로써 노동 비용을 절감하고 재배 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다. 향후 웹 모니터링 시스템과의 연동을 통해 다수의 식물공장을 보다 효율적으로 관리하고자 한다.

REFERENCES

- [1] M. H. Lee, T. S. Yu, S. Y. Shin, & S. J. Lim. (2023). Designing a Growth Management System for Vegetable Seedlings. *in Proceeding of the 54th Fall Conference on Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Anseong: Korea, 449-450.
- [2] J. H. Kim. (2009). Trends and prospects of plant factories. Retrieved from <http://library.krei.re.kr/pyxis-api/1/digital-files/605ba745-9c42-2a94-e054-b09928988b3c>
- [3] G. S. Yu & C. M. Yeo. (2021). Smart Agriculture. Korea Institute of Science and Technology Planning and Evaluation. Retrieved from http://www.foodsecurity.or.kr/bbs/download.php?&bbs_id=qnaa04&page=3&type=1&doc_num=308
- [4] Y. C. Choi & I. H. Jang. (2019). Smart Farm in the 4th Industrial Revolution Era. *Information & Communications Magazine*, 36(3), 9-16. Retrieved from <https://www.dbpia.co.kr/journal/articleDetail?nodeId=NODE07993379>
- [5] Y. H. F. Yeh, T. C. Lai, T. Y. Liu, C. C. Liu, W. C. Chung, & T. T. Lin. (2014). An automated growth measurement system for leafy vegetables. *Biosystems Engineering*, 117, 43-50. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2013.08.011
- [6] M. S. Kim, S. W. Jee, M. K. Kim, & Y. C. Cho. (2018). A Study on the Control System of Plant Growth Using IT Convergence Technology. *Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, 22(4), 959-964. DOI: 10.7471/ikeee.2018.22.4.959
- [7] N. K. Joo. (2021). Development of Solid Culture Medium, Bed and Growing Environment Management System for Ginseng Sprout Based on IoT. *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, 25(9), 1254-1262. DOI: 10.6109/jkiice.2021.25.9.1254
- [8] B. C. Kim. (2016). The ICT convergence agriculture automated machines designed for smart agriculture. *Journal of digital convergence*, 14(2), 141-148. DOI: 10.14400/JDC.2016.14.2.141
- [9] G. H. Lee. (2019). Trends and prospects for future agricultural technology. Retrieved from <https://www.ibric.org/bric/trend/bio-report.do?mode=view&articleNo=8692539>
- [10] S. G. Sul, Y. T. Baek, Y., & Y. Cho. (2022). Effects of Light Intensity, Light Quality and Photoperiod for Growth of Perilla in a Closed-type Plant Factory System. *Journal of Bio-Environment Control*, 31(3), 180-187. DOI: 10.12791/KSBEC.2022.31.3.180
- [11] S. G. Lee, J. S. Lee, & J. H. Won. (2020). Effects of Lettuce Cultivation Using Optical Fiber in Closed Plant Factory. *Protected Horticulture and Plant Factory*, 29(2), 105-109. DOI: 10.12791/KSBEC.2020.29.2.105
- [12] J. S. Shin & J. Y. Hong. (2020). Simultaneous Heating and Cooling Multi-Air Conditioning System for Agricultural Products Management. *The Journal of The Institute of Internet, Broadcasting and Communication*, 20(6), 65-70. DOI: 10.7236/JIIBC.2020.20.6.65
- [13] J. H. Ko & H. C. Kim. (2019). PLC Automatic Control for IOT Based Hydroponic Plant Factory. *Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, 23(2), 487-494. DOI: 10.7471/ikeee.2019.23.2.487
- [14] S. Vorapatratorn. (2021). Development of Automatic Plant Factory Control Systems with AI-Based Artificial Lighting. *in Proceeding of the 13th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering*, 69-73. DOI: 10.1109/ICITEE53064.2021.9611820
- [15] J. H. Bang, J. Park, S. W. Park, J. Y. Kim, S. H. Jung & C. B. Sim. (2022). A System for

Determining the Growth Stage of Fruit Tree Using a Deep Learning-Based Object Detection Model. *Smart media journal*, 11(4), 9-18.
DOI: 10.30693/SMJ.2022.11.4.9

[16] BISSOL LED. What is LED for plant growth? Retrieved from <https://bissolled.com/page.php?menu=0102>

이민혜(Min-Hye Lee)

[정회원]



- 2012년 8월 : 원광대학교 전자공학과 (공학석사)
- 2018년 2월 : 원광대학교 전자공학과 (공학박사)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 원광대학교 교양교육원 교수

- 관심분야 : 의공학, 영상처리, 인공지능, 게임콘텐츠
- E-Mail : lmh3322@wku.ac.kr

유태수(Tae-Soo Yu)

[정회원]



- 2017년 8월 : 원광대학교 전자공학과 (공학사)
- 2017년 4월 ~ 현재 : Tablecup 대표
- 2024년 8월 ~ 현재 전북대학교 IT 응용시스템공학과 대학원 재학 중

- 관심분야 : 임베디드 시스템, IoT응용개발, 스마트팜
- E-Mail : tablecup.wizard@gmail.com

임순자(Soon-Ja Lim)

[정회원]



- 1991년 8월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
- 2001년 8월 : 원광대학교 대학원 전자공학과 (공학박사)
- 2011년 8월 ~ 현재 : 원광대학교 전자공학과 교수

- 관심분야 : 임베디드 시스템, 사물인터넷응용
- E-Mail : lsj633@wku.ac.kr