

전기자동차 충전기 쿨링시스템의 성능에 관한 실험적 연구

홍대선^{1*}, 최두한², 공석환², 김태우², 임경석³
¹창원대학교 기계공학부, ²창원대학교 메카트로닉스공학부, ³일신실업(주)

Experimental Study on the Performance of an Charger Cooling System for Electric Vehicles

Dae-Sun Hong^{1*}, Doo-Han Choi², Seok-Hwan Kong², Tae-Woo Kim², Kyoung-Suk Lim³
¹Department of Mechanical Engineering, Changwon National University
²School of Mechatronics Engineering, Changwon National University
³Ill Shin Industry co., Ltd

요약 세계 자동차 시장은 내연기관차에서 전기자동차로의 전환이 빠르게 이뤄지고 있으며, 이에 따라 전기자동차 충전 인프라가 지속적으로 증가하고 있다. 전기자동차의 충전을 위한 급속충전기와 전기자동차 배터리를 연결하는 케이블에는 고전류가 흐르게 되는데, 이 과정에서 충전 케이블의 전기 저항에 의해 열이 발생된다. 이 열은 케이블 및 충전기의 온도를 상승시켜 충전 효율을 감소시키게 되는데, 이러한 효율 감소를 해결하기 위해서는 케이블 냉각을 위한 쿨링시스템이 요구된다. 쿨링시스템에서 냉각유 펌프는 충전 케이블에서 발생한 열을 흡수하여 이동시키는 역할을 한다. 본 연구에서는 쿨링시스템의 냉각능력을 일정 수준으로 유지하면서 소비전력을 최소화하기 위한 냉각유 펌프 회전속도를 산출하기 위해 실험을 진행하였다. 본 실험을 통해 냉각유 펌프의 회전속도에 따라 냉각능력과 소비전력이 어떻게 변하는지 분석하고, 이를 통해 쿨링시스템의 효율적인 펌프의 회전속도를 제안하였다. 제안된 냉각유 펌프의 적합한 회전속도를 통해 전기자동차 충전기 쿨링시스템의 소비전력 절감이 가능하다.

Abstract As the global automobile market is rapidly changing from internal combustion engines to electric vehicles, the number of charging stations for electric vehicles continues to rise. For rapid charging, fast chargers are frequently used, and high current flows through the cable that connects a fast charger to a battery in electric vehicles. Also, heat is usually generated by the electric resistance of the charging cable. This heat causes a temperature rise in the cable and reduces the battery charging efficiency. Therefore, it is necessary to develop a cooling system that can solve these problems. An oil pump was used in a cooling system for transporting oil that absorbs heat. In this study, a series of experiments were conducted to verify the appropriate rotational speed of the oil pump for minimizing power consumption while maintaining the required cooling performance. Through these experiments, we investigated how the cooling capacity and power consumption change according to the rotational speed of the oil pump. Based on the results of the experiments, the appropriate rotational speed was derived. In conclusion, it is possible to reduce the power consumption of an electric vehicle charger's cooling system by using the appropriate rotational speed for the proposed oil pump.

Keywords : BLDC Motor, Cooling System, Electric Vehicle Charger, Heat Exchanger, Power Consumption

본 성과물은 중소벤처기업부에서 지원하는 2020년도 산학협력 거점형 플랫폼(R&D) (No. S3011109)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

*Corresponding Author : Dae-Sun Hong(Changwon National Univ.)

email: dshong@changwon.ac.kr

Received October 12, 2022

Revised November 17, 2022

Accepted December 7, 2022

Published December 31, 2022

1. 서론

세계 자동차 시장은 배기가스의 국제 환경규제 강화, 각국 정부의 친환경 정책, 자동차 제조사의 전기차 모델 확대 등으로 내연기관차에서 전기차로의 전환이 빠르게 이뤄지고 있다[1]. 전기자동차는 내부에 장착된 직류 전원 배터리에 저장된 전기에너지를 전기모터에 공급하여 구동되는데, BEV(Battery Electric Vehicle)는 HEV(Hybrid Electric Vehicle)와 달리 화석연료를 전혀 사용하지 않고 전기에너지로 구동되므로 내장된 배터리팩의 충전이 요구된다[2]. 전기자동차 충전 인프라는 전기자동차의 수요 급증으로 인하여 지속적으로 증가하고 있으며, 국내 전기자동차 충전 인프라는 2021년 6월 기준 급속충전기 1.2만기와 완속충전기 5.9만기가 보급되었다[3]. 향후 전기자동차의 보급 확산을 위해서는 충전 인프라 구축은 필수적으로 요구된다.

전기자동차의 충전 방식에는 급속충전기에 사용되는 DC 직류 충전 방식과 완속충전기에 사용되는 AC 교류 충전 방식이 있다[4,5]. 급속 충전 방식은 완속 충전 방식에 비해 높은 전압과 전류를 전기자동차에 공급하고 충전기의 교류를 배터리의 직류로 변환하는 과정이 필요 없어 충전 시간을 상당히 단축할 수 있다[6]. 급속충전기는 제작 사양에 따라 수십 kW부터 수백 kW까지 구성할 수 있으며, 100 A 이상의 고전류를 전기자동차로 전송한다[7]. 급속충전기와 전기자동차 배터리를 연결하는 케이블에는 고전류가 흐르게 되는데, 이 과정에서 케이블의 전기 저항에 의해 열이 발생된다. 이 열은 케이블 및 충전기의 온도를 상승시켜 충전 효율을 감소시키며, 이러한 효율 감소를 해결하기 위해서는 케이블 냉각을 위한 쿨링시스템이 요구된다[8].

전기자동차 충전기 쿨링시스템은 전기자동차가 충전되는 동안 지속적으로 가동되는데 냉각유 펌프와 연결된 브러시리스 DC(Brushless DC, BLDC) 모터의 속도를 가변적으로 제어함으로써 충전 케이블에 공급되는 냉각유의 유량을 조절한다. BLDC 모터의 제어를 통한 냉각유 펌프의 가변속 운전 방법은 토출측의 밸브 조절만을 통해 유량을 제어하는 정속 운전에 비해 15 ~ 30 % 정도의 에너지를 절감할 수 있는 것으로 연구되고 있다[9,10].

본 연구에서는 쿨링시스템의 냉각능력을 일정 수준으로 유지하면서 소비전력을 최소화하기 위한 냉각유 펌프 회전속도를 산출하여 펌프의 제어 조건을 설정에 활용하고자 한다. 또한 운전 조건에 따른 시스템 성능 변화를

분석하여 전기자동차 충전기 쿨링시스템 제어에 필요한 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1 실험장치의 구성

전기자동차 충전기 쿨링시스템의 성능을 평가하기 위한 실험장치를 구성하였으며, 개략도는 Fig. 1과 같다. 실험장치는 열교환기, 냉각팬, 오일 탱크, 냉각유 펌프, 전기히터, 제어장치, 냉각유, 압력 센서, 온도 센서, 유량계 등으로 구성되어 있다. 열교환기는 핀-관 구조로 충전기 내부의 협소한 공간을 고려하여 255 mm (W) × 170 mm (L) × 480 mm (H) 크기를 가지며, 냉각팬은 120 mm (W) × 120 mm (L) × 38 mm (T) 크기로 열교환기의 크기를 고려하여 6개를 장착하였다. 펌프는 6 l/min의 최대 토출량을 가지며, 냉각유는 비중이 0.83 이고 40 kV 이상의 절연내압을 가지는 친환경 오일을 사용하였다. 제어장치는 전기히터, 펌프, 냉각팬을 각각 제어하며 펌프의 회전속도를 수동으로 조절 가능하도록 구성하였다. 열교환기의 입구와 출구에 온도 센서를 설치하였으며, 펌프 토출측에 압력 센서와 유량계를 설치하였다. 냉각유 펌프의 회전속도를 500 RPM ~ 2500 RPM 범위로 설정 가능하도록 하기 위하여 펌프의 구동부를 BLDC 모터로 구성하였다.

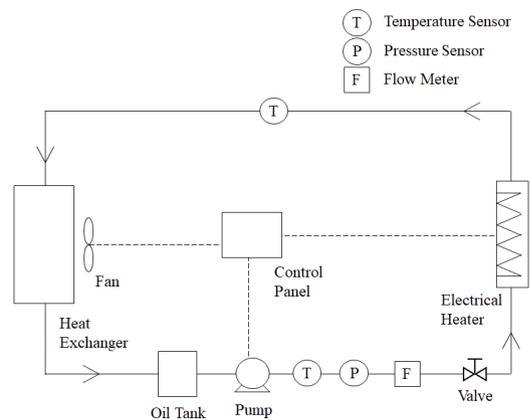


Fig. 1. Schematic diagram of the system

2.2 실험 조건 및 방법

본 연구는 BLDC 모터의 가변속 운전에 의해 냉각유 유량이 변하는 쿨링시스템에서 펌프의 회전속도에 따라

냉각능력과 소비전력이 어떻게 변하는지 분석하고, 이를 통해 쿨링시스템의 효율적인 펌프의 회전속도를 도출하여 제어알고리즘 구성을 위한 자료를 마련하고자 한다.

실험방법은 전기히터를 작동하여 냉각유를 가열하고, 냉각유 펌프와 팬을 작동시킨 후, 일정 시간 이상 가동하여 열교환기 성능이 정상적으로 작동됨을 확인한다. 정상적인 작동이 확인되면 유량, 입구 온도, 출구 온도를 측정하며, 측정값을 통하여 열교환기의 냉각능력 산출을 위한 열량을 계산한다. 설치된 계측기를 통하여 유량, 압력과 소비전력을 측정한다. 열교환기 냉각능력을 파악하기 위하여 식(1)로부터 열량을 계산하였다.

$$Q = \dot{m} C (T_{out} - T_{in}) \quad (1)$$

여기에서 Q 는 열량 [kcal/h], \dot{m} 은 시간당 냉각유 질량 [kg/h], C 는 냉각유 비열 [kcal/kg°C], T_{out} 은 출구 온도 [°C], T_{in} 은 입구 온도 [°C]이다.

전기자동차 충전기 쿨링시스템의 성능을 확인하기 위해서 충전기의 운전 조건을 검토하였으며, 운전 조건과 부합하는 냉각유 펌프 회전속도와 전기히터 용량을 변수로 하여 실험하였다. 실험 조건은 Table 1과 같이 펌프의 회전속도를 500 RPM에서 500 RPM 씩 증가시키며 2500 RPM까지 실험하였고, 전기히터 용량은 0.4 kW에서 0.2 kW 씩 증가시켜가며 3.0 kW까지 실험하였다.

Table 1. Test Condition

Parameter	Unit	Condition
Pump speed	RPM	500/1000/1500/2000/2500
Power of electric heater	kW	0.4/0.6/0.8/1.0/1.2/1.4/1.6/1.8/2.0/2.2/2.4/2.6/2.8/3.0

3. 결과 및 고찰

3.1 냉각유 펌프 회전속도에 따른 성능 특성

Fig. 2는 냉각유 펌프 회전속도가 500 RPM일 때 냉각능력을 나타낸 것으로 전기히터 용량이 1.0 kW일 때 냉각능력은 681 kcal/h이며, 전기히터 용량이 1.2 kW일 때 입구 온도는 60 °C를 초과하였다.

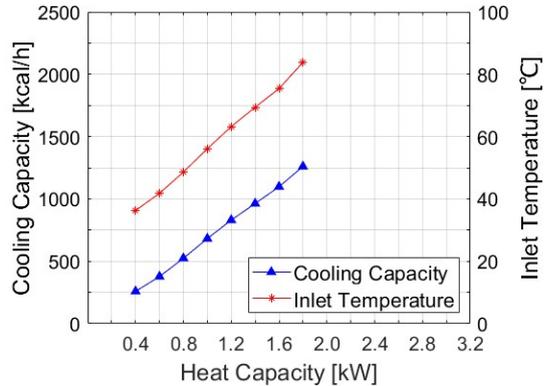


Fig. 2. Cooling capacity according to heat capacity at pump speed 500 RPM

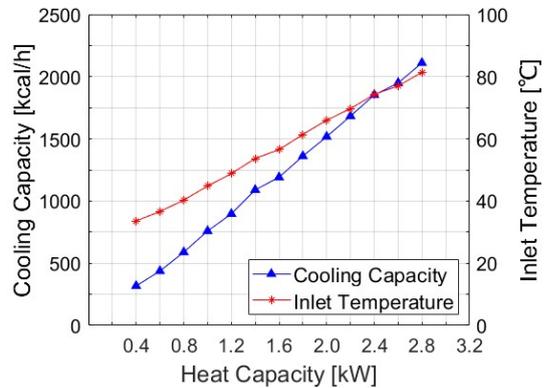


Fig. 3. Cooling capacity according to heat capacity at pump speed 1000 RPM

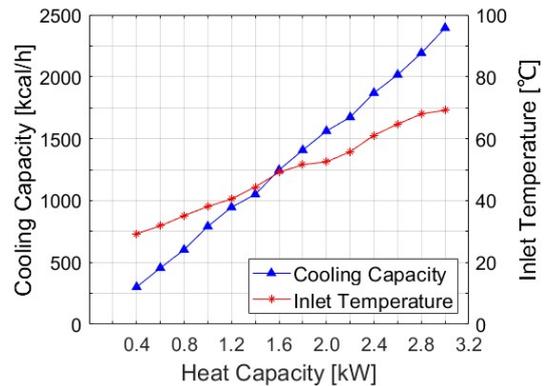


Fig. 4. Cooling capacity according to heat capacity at pump speed 1500 RPM

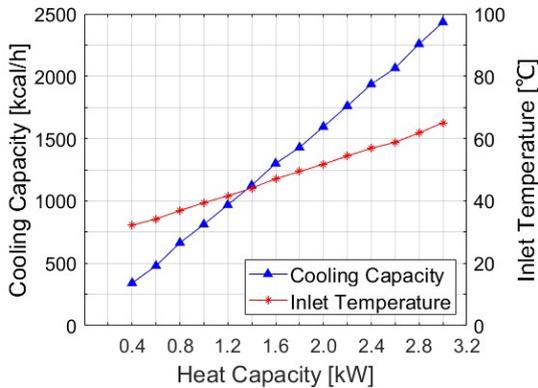


Fig. 5. Cooling capacity according to heat capacity at pump speed 2000 RPM

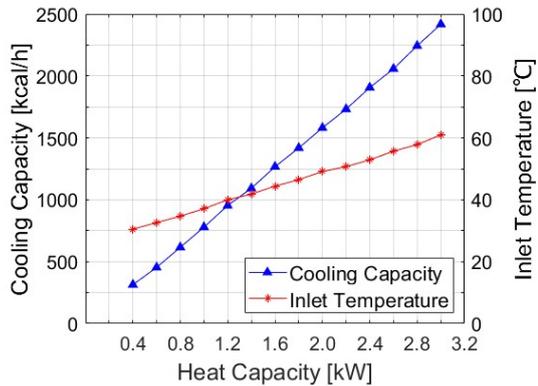


Fig. 6. Cooling capacity according to heat capacity at pump speed 2500 RPM

Fig. 3은 냉각유 펌프 회전속도가 1000 RPM일 때 냉각능력을 나타낸 것으로 전기히터 용량이 1.6 kW일 때 냉각능력은 1190 kcal/h이며, 전기히터 용량이 1.8 kW일 때 입구 온도는 60 °C를 초과하였다.

Fig. 4는 냉각유 펌프 회전속도가 1500 RPM일 때 냉각능력을 나타낸 것으로 전기히터 용량이 2.2 kW일 때 냉각능력은 1673 kcal/h이며, 전기히터 용량이 2.4 kW일 때 입구 온도는 60 °C를 초과하였다.

Fig. 5는 냉각유 펌프 회전속도가 2000 RPM일 때 냉각능력을 나타낸 것으로 전기히터 용량이 2.6 kW일 때 냉각능력은 2064 kcal/h이며, 전기히터 용량이 2.8 kW일 때 입구 온도는 60 °C를 초과하였다.

Fig. 6은 냉각유 펌프 회전속도가 2500 RPM일 때 냉각능력을 나타낸 것으로 전기히터 용량이 2.8 kW일 때 냉각능력은 2243 kcal/h이며, 전기히터 용량이 3.0 kW일 때 입구 온도는 60 °C를 초과하였다.

쿨링시스템의 입구 온도가 80 °C를 넘으면 고온의 냉각유로 인하여 실험을 실시하지 않았다. 냉각유 펌프 회전속도가 500 RPM일 경우 전기히터 용량이 1.8 kW에서 입구 온도가 80 °C를 넘었으며, 냉각유 펌프 회전속도가 1000 RPM일 경우에는 전기히터 용량이 2.8 kW에서 입구 온도가 80 °C를 넘었다. 냉각유 펌프 회전속도가 500 RPM과 1000 RPM인 실험을 제외한 나머지 실험에서는 전기히터 용량이 3.0 kW 이상에서 냉각유 펌프 회전속도가 2500 RPM 이하로 운전될 경우 입구 온도를 60 °C 이하로 유지 못하는 것을 확인했다. 쿨링시스템의 입구 온도를 60 °C 이하로 유지하기 위해서는 냉각유 펌프의 회전속도를 2500 RPM 이상으로 운전해야 할 것으로 판단된다.

3.2 소비전력

전기자동차 충전기 쿨링시스템의 소비전력을 측정하였으며, 냉각유 펌프의 회전속도를 500 RPM에서 500 RPM 씩 증가시키며 2500 RPM까지 설정하여 측정하였다. Table 2는 냉각유 펌프 회전속도에 따른 소비전력을 나타낸 것으로 펌프의 회전속도가 증가할수록 소비전력 또한 증가하는 것을 알 수 있다.

Table 2. Power consumption according to pump speed

Pump speed [RPM]	Power consumption [W]
500	66
1000	73
1500	77
2000	99
2500	121

Table 3. Recommended operating conditions

Power of electric heater [kW]	Pump speed [RPM]
0 ~ 1.0	500
1.0 ~ 1.6	1000
1.6 ~ 2.2	1500
2.2 ~ 2.6	2000
2.6 ~ 2.8	2500
2.8 ~ 3.0	More than 2500

본 실험 결과를 통하여 전기자동차 충전기 쿨링시스템의 운전 조건을 Table 3과 같이 나타내었다. 쿨링시스템 운전 조건은 전기히터 용량에 따른 냉각유 펌프의 적합한 회전속도를 제안하였으며, 그 조건으로는 펌프의 소

비전력을 최소화하고 열교환기 입구 온도가 60 ℃ 이하가 되는 운전상태로 하였다. 전기히터 용량이 1.0 kW까지는 펌프의 회전속도가 500 RPM, 1.0 kW에서 1.6 kW까지는 1000 RPM, 1.6 kW에서 2.2 kW까지는 1500 RPM, 2.2 kW에서 2.6 kW까지는 2000 RPM, 2.6 kW에서 2.8 kW까지는 2500 RPM, 2.8 kW에서 3.0 kW까지는 2500 RPM 이상일 경우 쿨링시스템은 효율적인 운전이 가능하다.

4. 결론

본 연구에서는 전기자동차 충전기 쿨링시스템의 성능을 확인하고자 하였으며, 소비전력을 절감하기 위해 사용 환경에 따른 적정 성능에 대해 분석하였다. 냉각유 펌프 회전속도와 전기히터 용량을 변수로 하여 다양한 조건에서의 쿨링시스템 성능을 실험하였으며, 냉각유 펌프 회전속도에 따라 전기자동차 충전기 쿨링시스템의 냉각 능력 차이가 있음을 확인했다. 그리고 냉각유 펌프 회전속도에 따른 소비전력을 측정하였다. 쿨링시스템의 다양한 운전 조건에서의 냉각능력과 소비전력 측정을 통하여 전기히터 용량에 따른 냉각유 펌프의 적합한 회전속도는 제안하였다. 제안된 전기히터 용량별 냉각유 펌프의 회전속도를 전기자동차 충전기 쿨링시스템에 적용할 경우 가변적으로 유량이 조절이 가능하며, 유량이 일정하게 운전되는 전기자동차 충전기 쿨링시스템에 비해 소비전력 절감이 가능하다.

References

[1] Y. S. Lim, C. W. Kim, J. Y. Soh, S. B. Kim, "The Research of Communication Interface Establishment for the Performance Verifying Equipment on the EV DC Fast Charger", *Proceedings of the IEIE Conference*, IEIE, Jeju, Korea, pp.1501-1503, June 2011.

[2] S. H. Han, S. K. Yang, S. B. Kim, H. B. Lee, "Performance Test of Quick Charger for Electric Vehicle", *Proceedings of the KIEE Conference*, KIEE, Kangwon, Korea, pp.1189-1190, July 2011.

[3] O. G. Shin, "Technology Trends on Electric Vehicle Charging Infrastructure", *Magazine of the KIPE*, Vol.27, No.2, pp.28-35, April 2022.

[4] K. J. Kim, D. W. Kim, J. S. Hwang, D. K. Park, "Research of EV DC Fast Charger Active Isolation

Management System Control Method and Application", *Transactions of KSAE*, Vol.30, No.4, pp.305-311, April 2022.

DOI: <https://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2022.30.4.305>

[5] D. Y. Jeong, "Technology and Development Trend of the Electric Vehicle Fast Charger", *Magazine of the KIPE*, Vol.20, No.6, pp.47-53, Dec. 2015.

[6] S. S. Jeon, K. B. Lee, "Development and Introduction of the Electric Vehicle Fast Charger using a Power Electronics Technology", *Proceedings of KIEE*, Vol.69, No.5, pp.10-15, May 2020.

[7] Y. S. Lim, C. W. Kim, J. Y. Soh, S. B. Kim, "The Research of Communication Interface Establishment for the Performance Verifying Equipment on the EV DC Fast Charger", *Proceedings of the IEIE Conference*, IEIE, Jeju, Korea, pp.1501-1503, June 2011.

[8] J. H. Ahn, J. H. Kim, H. S. Jo, G. W. Lee, "Analysis of Heat Release Characteristics of Water-Cooled High-Current Charging Cable According to Thermal Conductivity of Composite Filler", *Proceedings of the KSME Conference*, KSME, Kangwon, Korea, pp.3096-3100, Dec. 2018.

[9] K. W. Kim, S. H. Suh, Rakibuzzaman, "Evaluation of Energy Savings for Inverter Driving Centrifugal Pump with Duty Cycles", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol.18, No.6, pp.81-85, Dec. 2015.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5293/kfma.2015.18.6.081>

[10] S. H. Suh, H. H. Kim, MD. Rakibuzzaman, K. W. Kim, I. S. Yoon, "A Study on the Performance Evaluation of Variable-speed Drive Pump", *The KSFM Journal of Fluid Machinery*, Vol.17, No.5, pp.83-88, Oct. 2014.
DOI: <https://dx.doi.org/10.5293/kfma.2014.17.5.083>

홍 대 선(Dae-Sun Hong)

[정회원]



- 1986년 2월 : 한국과학기술원 대학원 생산공학 (공학석사)
- 1995년 8월 : 한국과학기술원 대학원 생산공학 (공학박사)
- 1982년 1월 ~ 1997년 2월 : 삼성 항공산업(주) 수석연구원
- 1997년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 기계공학부 교수

<관심분야>

생산자동화, 인공지능응용

최 두 한(Doo-Han Choi)

[정회원]



- 2019년 8월 : 부경대학교 기술경 영협동과정 (공학석사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (박사과정)
- 2020년 5월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스연구원 전임연구원

〈관심분야〉

생산자동화, 인공지능응용, 열전달

임 경 석(Kyoung-Suk Lim)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 정밀기계학과 (공학사)
- 1998년 2월 : 부산대학교 기계공학부 (공학석사)
- 1991년 8월 ~ 2013년 11월 : LG 전자 본부연구소 수석연구원
- 2019년 3월 ~ 현재 : 일신산업(주) 기술연구소 연구소장 (상무이사)

〈관심분야〉

열교환기, 시스템 및 유로 설계, 소음

공 석 환(Seok-Hwan Kong)

[정회원]



- 2010년 2월 : 인하대학교 건축공학 (공학석사)
- 2020년 9월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (박사과정)
- 2020년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스연구원 전임연구원

〈관심분야〉

재제조, 건설기계

김 태 우(Tae-Woo Kim)

[준회원]



- 2022년 2월 : 창원대학교 기계공학부 (공학사)
- 2022년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 메카트로닉스공학부 (석사과정)

〈관심분야〉

생산자동화, 인공지능응용