

전기차용 7kW급 고전압 히터 유로 형상 설계를 위한 열유동 시뮬레이션

손권중

홍익대학교 기계정보공학과 부교수

Thermo-Fluid Simulation for Flow Channel Design of 7kW High-Voltage Heater for Electric Vehicles

Kwon Joong Son

Associate Professor, Department of Mechanical and Design Engineering, Hongik University

요약 내연기관 자동차 히터는 연소과정 중에 발생하는 엔진 열을 이용하므로 열원이 추가로 필요치 않지만, 배터리를 동력원을 얻는 전기자동차용 히터는 별도의 전열 장치가 요구된다. 지금까지 개발된 전기차용 히터 중에서 냉매를 이용하는 고전압 히터는 효율이 높고 작동 온도 범위가 넓은 장점이 있다. 고전압 히터 내부의 냉각수 유로의 형상은 열교환 성능을 크게 좌우하므로 히터 개발 시 유로 설계는 기술적으로 매우 중요하다. 본 논문에서는 대칭형 서펜타인 유로를 갖는 7kW급 고전압 히터의 유로 형상 설계를 위해 고전압 열유동 시뮬레이션을 수행하였다. 해석 결과로부터 입출구간 차압과 차온 및 유로에서의 유동 균일도를 계산하여 히터의 성능을 평가하였다. 도출된 대칭형 서펜타인 유로 설계안은 기존 평행 서펜타인 비해 차압은 높지만, 열교환 성능은 비등하며 저온부가 비교적 넓게 존재하여 제어 회로의 설치 공간으로 활용할 수 있다는 장점이 있다.

주제어 : 고전압히터, 전기자동차, 냉각수 유로설계, 열유동 시뮬레이션, 융합 설계

Abstract Unlike an international combustion engine car, a battery-powered electric vehicle requires an additional heat source for its heating system. A high-voltage coolant heater has the advantages of high efficiency and a wide operating temperature range. In its development, the geometry design of the coolant flow path is essential. This paper presents the thermal flow simulations of a 7kW high-voltage heater with symmetric serpentine flow channels arranged parallelly. The heater performance was evaluated from the simulation results in terms of the pressure and temperature differences and the flow uniformity. The proposed design showed a greater flow resistance and similar heat exchanging capability than the existing parallel serpentine design. It has the advantage of a relatively wide low-temperature surface area, where the control circuit board susceptible to high temperatures can be located.

Key Words : High-voltage heater, Electric vehicles, Flow channel, Thermo-fluid simulation, Convergence design

*This work was supported by Korea Institute for Advancement of Technology(KIAT) grant funded by the Korea Government(MOTIE) (P0017526, 2021년 지역대표 중견기업 육성사업, 주관기관: (주)유라테크).

*Corresponding Author : Kwon Joong Son (kjson@hongik.ac.kr)

Received December 23, 2021

Revised February 25, 2022

Accepted March 20, 2022

Published March 28, 2022

1. 서론

화석연료를 사용하는 내연기관 자동차의 배기가스는 대기오염과 지구 온난화를 유발하는 주요 원인 중 하나다. 대기오염과 이상기후의 심각성이 높아지면서 인류의 생존을 위협할 수 있다는 경각심으로 국제사회는 2015년 파리협정을 체결하고 온실가스 감축을 위해 공조를 지속하여 왔다. 각국은 자동차 배출가스 규제를 강화하고 있으며 자동차 업계도 전기차와 수소차로 대표되는 미래 친환경차 양산을 위한 핵심 기술 확보에 힘쓰고 있다. 배터리 기술과 자동차 전동화 기술의 발전뿐만 아니라 운전자의 환경에 대한 인식 변화 등의 요인으로 전기 자동차 보급은 전 세계적으로 증가하는 추세다. 하지만 전기 자동차의 대중화를 위해서는 1회 충전 시 주행거리 개선, 충전 인프라의 보급 확대, 배터리 용량 및 충전 속도 개선 등 기술 사회적 문제 해결이 선행되어야 한다. 여러 가지 전기차 관련 기술 혁신 주제 중에서 본 연구에서는 전기차용 히터의 효율 및 성능 개선에 대해 다룬다. 엔진에서 발생하는 연소 폐열을 난방에 사용하는 내연기관 자동차와 달리 전기차는 배터리에 축적된 에너지를 사용하므로 주행거리에 크게 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

전기차 난방 장치는 공조 시스템 일부로써 차량 내부의 온도 조절 기능뿐 아니라 배터리 열관리 시스템과 통합되어 겨울철 배터리의 적정온도 유지 기능을 담당한다[1]. 보조난방 목적이 아닌 주난방 수단으로써 전기차용 히터는 겨울철 난방 부하를 감당하기 위해 5kW 이상의 열량을 공급할 수 있는 고전압을 사용한다. 전기차용 고전압 히터는 가열 대상에 따라 공기 가열식 히터와 냉각수 가열식 히터로 분류할 수 있다. 실내 공기를 직접 가열하는 방식의 히터는 PTC(positive temperature coefficient) 발열체라 불리는 정온 발열체를 주로 사용하고 있다[2]. 이 경우 고전압이 인가되는 히터가 운전자와 탑승자에 가깝게 위치하여 충돌 사고 시 전기사고 위험성이 매우 높다. 또한, 공기 가열식 히터는 배터리 냉각수 가열용으로 사용할 수 없다는 단점도 있다. 반면에 냉각수 가열식 히터[3-5]는 전기사고 위험이 덜하고 실내 난방과 앞 유리의 성에 제거를 위해 기존 내연기관 자동차에 쓰였던 열교환 장치인 히터 코어를 그대로 사용할 수 있다. 고전압 냉각수 히터는 주어진 유량 속도 조건에서 낮은 압력 손실과 높은 열교환 효율을 갖는 것이 바람직하다. 하지만 작동 유체의 유로를 지닌 열교환

기에서 유동저항과 열저항은 일반적으로 반비례 상관관계를 나타내므로 최적의 성능을 발휘하는 냉각수 히터 개발을 위해 유로 형상 설계는 매우 중요하다. 또한, 발열체의 제어와 히터의 상태 모니터링을 위한 회로 기판 및 소자가 적정온도에서 설치되어 구동될 수 있도록 히터 외곽 면에 충분한 크기의 저온부도 확보해야 한다[5].

전기차용 고전압 냉매 히터와 같이 단일 입수구와 출수구를 갖는 블록형 유체 열교환기에 적용되는 대표적인 유로 형상은 평행 채널[6], 서펜타인 채널[7], 평행 서펜타인과 같은 하이브리드 채널[4,5] 등이 있다. 평행 채널은 유동저항은 낮으나 열교환 효율이 높은 반면에 서펜타인 채널은 열교환 성능은 우수하나 유동저항이 높은 특성이 있는 것으로 알려졌다[8]. 서펜타인 채널이 평행하게 배치된 하이브리드 구조인 평행 서펜타인 유로는 열저항과 유동저항을 균형 있게 고려한 것이 특징이다. 냉각수 내압에 의해 누수가 발생하지 않도록 판형 유로 덮개를 용접과 같은 접합법이나 볼팅과 같은 기계적 체결법으로 고정해야 한다. 또한, 대전력 고속 스위칭 소자인 절연 게이트 양극성 트랜지스터(IGBT, insulated gate bipolar transistor)와 같은 구동 부품이나 제어 회로를 고전압 히터에 설치할 경우 과열 방지 대책이 필요하다. 현재 상용화된 평행 서펜타인 유로형 히터는 덮개를 용접으로 마감하였고 IGBT의 냉각을 위해 열교환핀을 갖추고 있다[3-5].

본 논문에서는 7kW급 냉각수 히터 설계를 위해 기존 평행 서펜타인 유로[4,5]와 비교하여 성능이 비등하면서도 넓은 저온부를 지닌 대칭형 서펜타인 형상의 유로를 제안하고 전산해석 기반 융합연구 방법론[9,10]을 통해 성능을 예측하고 설계안을 검토한다. 유동저항 및 열교환 성능을 평가하기 위해 전산유체동역학(CFD, computational fluid dynamics) 유동 해석[11,12]과 유한요소법(FEM, finite element method) 열전달 해석[13,14]에 기반한 열유동 시뮬레이션을 수행하고 결과를 고찰하고 기존 히터 디자인과의 차별성을 분석하였다.

2. 대칭형 서펜타인 유로 디자인

본 연구에서는 구동 회로 설치를 위한 저온부를 확보할 수 있고 용접보다 생산 단가를 낮출 수 있도록 유로 덮개의 볼트 체결이 용이한 대칭형 서펜타인 유로를 설계하고 그 성능을 열유동 해석을 통해 평가하였다. Fig. 1은 평행 서펜타인 유로와 대칭형 서펜타인 유로를 갖는

고전압 히터 열교환부의 형상을 나타낸다. 평행 서펜타인 유로의 형상과 치수는 참고문헌[5]를 참고하여 설정하였고 대칭형 서펜타인 유로와 동일한 외형을 갖는다. 대칭형 서펜타인 유로는 참고문헌[15]와 같이 이중 배열로 되어 있지만, 직렬 유로가 아닌 평행 유로 형태를 띠는 점에서 차별성이 있다.

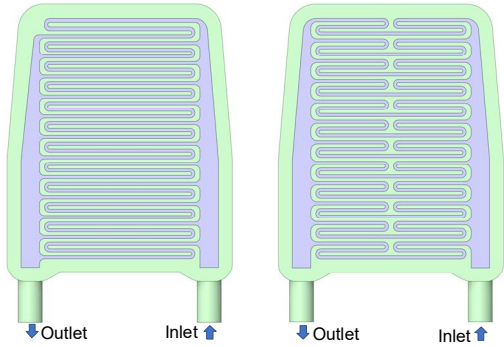


Fig. 1. High voltage coolant heating blocks with non-symmetric parallel serpentine flow channel (left) and symmetric parallel serpentine flow channel (right)

Fig. 2는 유로 덮개를 기계적으로 체결하기 위해 볼트 홀을 가공한 예시를 보여준다. 대칭형 서펜타인 유로는 비대칭형 유로와 달리 유동의 단절이나 분기 없이 히터 중앙부에 볼트 홀을 가공할 수 있어 상부 덮개를 고정하는 데 편리하다. 그뿐만 아니라 대칭형 서펜타인 유로는 저온의 입수구 측 서펜타인 구역과 열교환 이후 온도가 상승한 출수구 측 서펜타인 구역으로 공간적으로 분리되어 제어 회로 설치를 위한 저온부 확보가 가능하다.

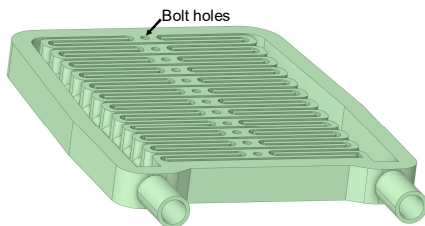


Fig. 2. Symmetric parallel serpentine flow channel with bolt holes along body centerline

Table 1은 고전압 히터 모델의 주요 치수 정보와 제원을 나타낸다. 평행 서펜타인 유로와 대칭형 서펜타인

유로의 공동부 부피는 각각 182.1cc와 183.2cc로 그 차이는 0.6% 정도로 열교환 성능 비교 시 히터 내부를 차지하는 냉매 부피 차이에 의한 영향은 무시할 수 있다.

Table 1. Specifications of two heat designs

Model type	Parallel serpentine model	Symmetric serpentine model
Total mass	1.287kg	1.351kg
Cavity volume	182,106mm ³	183,171mm ³
Overall dimensions	251.0mm×177.4mm×23.5mm	
Channel wall thickness	2.8mm	
Flow channel width	2.5mm	
Flow channel height	8mm	

3. 열유동 시뮬레이션 결과 및 분석

Fig. 1에 제시한 두 가지 히터 형상 모델에 대해 열교환 성능을 비교 및 분석하기 위하여 상용 소프트웨어인 Altair SimLab의 전-후처리 통합 작업 환경에서 Altair AcuSolve를 CFD 솔버로 사용하여 냉각수 유동 및 열전달 시뮬레이션을 수행하였다. Table 2는 열유동 해석을 위해 필요한 냉각수와 유로 구조재인 알루미늄 합금의 재료 상수를 보여준다. 냉각수의 재료 상수는 기존 평행 서펜타인 유로 열유동 시뮬레이션 연구[5]에서 사용한 부동액의 물성과 동일하게 설정하였다.

Table 2. Material properties for CFD simulations

Property	Coolant	Aluminum
Density (kg/m ³)	1,050	2,770
Thermal conductivity (W/m·K)	0.355	175
Viscosity (mP·s)	1.72	-

평행 서펜타인과 대칭형 서펜타인 유로 모델에 대해 열유동 해석을 위해 생성한 요소의 총개수는 고체 영역과 유체 영역을 모두 포함하여 각각 2,691,990개와 2,706,684개이다. Fig. 2의 모델과 유사한 형상과 크기를 갖는 히터에 대해 열유동 해석을 수행한 기존 연구에서 계산 정확성 및 수렴성을 확보하기 위해 총 250만 개 이상의 요소를 사용한 점을 요소 생성 시 참고하였다 [4]. Table 3에 열유동 해석에 필요한 주요 입력 인자를 정리하였다. 유량 속도, 입수구 온도, 대류 열전달 계수는 기존의 평행 서펜타인 유로에 대한 정상상태 열유동 해석 연구[5]로부터 참조하였으나 최대 출력은 최근 전기차에서 요구되는 난방 부하를 만족하기 위하여 5kW

에서 7kW로 상향하였다. 난류 모델을 유로 폭이 좁은 경우의 내부 유동 계산 시 정확성이 높은 SST $k-\omega$ (shear stress transport $k-\omega$)[5] 모델을 사용하였다. 50회 이내의 반복 계산 후 수렴성 지표인 잔차 (residuals)가 포화되는 것으로 관찰되어 최대 반복 계산 수는 50으로 설정하였다.

Table 3. CFD simulation parameters

Parameter	Value
Inlet flow rate (l/h)	550.0
Inlet temperature (°C)	66.0
Outlet pressure (kPa)	0.0
Outlet pressure loss factor	0.1
Wall boundary condition	No-slip condition
Ambient temperature (°C)	25.0
Convection coefficient (W/m ² ·K)	5.0
Heating rate (kW)	7.0
Turbulence model	SST $k-\omega$
Number of maximum iterations	50
Convergence tolerance	0.001

Fig. 3은 유로의 중간 단면에서 계산한 유속 분포를 보여준다. 평행 서펜타인과 대칭형 서펜타인 유로 모델 모두 채널별 유속 분포가 균일한 편으로 유동 불량에 따른 지역적 온도 상승으로 냉각수 기화 현상이 발생할 염려는 없는 것으로 예측된다.

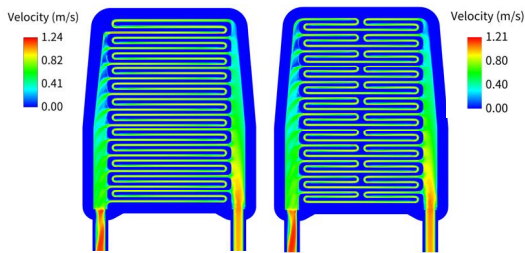


Fig. 3. Simulation results: flow velocity distributions at mid-plane

Fig. 4는 유로의 중간 단면과 유체 영역 및 고체 영역 외곽 면에서 계산한 온도 분포를 보여준다. 부동액의 비등점이 125°C 이상인 점을 고려할 때 두 모델 모두 냉각수의 기화 현상은 나타나지 않는 것으로 예측된다. 최고 온도의 경우 고체 영역이나 유체 영역에서 평행 서펜타인 모델이 대칭형 서펜타인 모델보다 높게 나타났다. 대칭형 서펜타인 모델의 경우 상부에 100°C 이하의 영역이 넓게 존재하는 것을 확인할 수 있다.

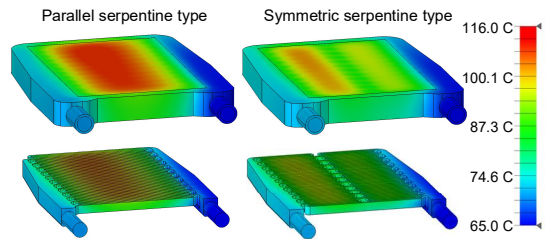


Fig. 4. Simulation results: temperature distributions on outer surface and on fluid domain

Table 4에 히터 성능 정량 성능 평가를 위한 시뮬레이션 주요 결과를 정리하였다.

Table 4. Simulation results

Model type	Parallel serpentine model	Symmetric serpentine model
Average outlet temperature	76.5°C	76.5°C
Maximum fluid temperature	111.2°C	104.7°C
Maximum solid temperature	115.6°C	108.9°C
Average inlet pressure	2.65kPa	3.12kPa

히터의 성능 지표로써 유동저항 R_f 와 열저항 R_t 를 각각 다음 식과 같이 정의하였다[8].

$$R_f = \frac{\Delta P}{Q}, R_t = \frac{\Delta T}{H} \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 입출수구 압력차, Q 는 냉매의 체적유량, ΔT 는 입출수구 평균 온도차, H 는 열원으로부터 전달되는 가열량을 나타낸다. 입수구 측 유량 조건인 Q 는 550 l/h로 $1.528 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ 로 환산되며 가열량 H 는 7kW로 설정하였다. Table 4의 시뮬레이션 결과와 식 (1)로부터 얻은 성능 지표를 Fig. 5에 그래프로 표현하였다. 평행 서펜타인 유로의 경우 채널별로 유동 방향이 3회 바뀌지만 대칭형 서펜타인 유로에서는 4회의 유턴이 발생하여 유동저항이 17.9% 높게 나타난다. 하지만 550 l/h 유량 속도 기준 평행 서펜타인 유로의 입출수구 차압은 3.12kPa로 상용 전기차의 냉각수 히터 모듈에서 통상적으로 요구하는 4.0kPa 이내 차압 조건을 만족한다. 기존 평행 서펜타인 유로 디자인에 대해 대칭형 서펜타인 구조가 갖는 장점은 열교환 성능은 동일하게 유지하면서 고체 영역이나 유체 영역에서의 최고 온도를 낮춰 전체적으로 열전달 균일성을 높이고 히터 외부

에 제어 회로 설치에 필요한 저온부를 확보할 수 있다는 점이다.

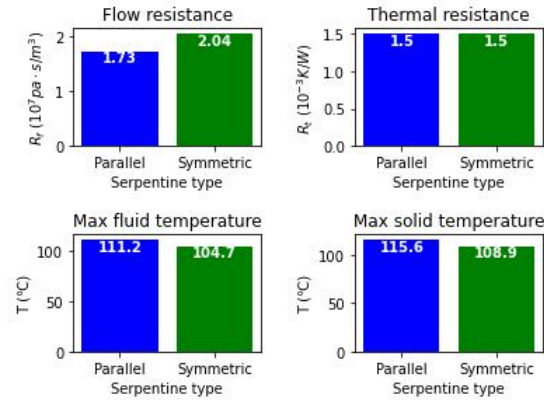


Fig. 5. Performance indices graph

4. 결론

본 논문에서는 7kW급 전기차용 고전압 냉각수 히터의 유로 형상으로써 대칭형 서펜타인 유로를 제안하고 열유동 시뮬레이션을 통해 그 성능을 예측하였다. 대칭형 서펜타인 유로는 기존의 평행 서펜타인 유로에 비해 입출수구 압력차가 17.9% 높다는 단점이 있지만 넓은 저온부와 볼트 체결부를 확보할 수 있다는 장점이 있다. 대칭형 서펜타인 유로를 갖는 고전압 히터의 열유동 시뮬레이션 결과 열교환 효율을 나타내는 열저항은 1.5K/kW로 기존 디자인과 비등한 결과를 나타냈으며 유체 영역과 고체 영역에서의 최고 온도는 각각 6.5°C와 6.7°C 더 낮게 예측되어 온도 균일도가 향상되었고 히터 제어 회로 및 부품 설치를 위한 저온부 확보도 가능한 것으로 확인되었다. 본 논문의 연구 결과는 전기자동차 공조시스템의 핵심 모듈 중의 하나인 냉각수 히터 모듈의 연구 개발 분야에 이바지할 것으로 기대한다. 본 연구는 기존 고전압 냉각수 히터 디자인의 개선 부분에 초점을 맞추었지만 유량 속도, 입수구 온도, 난방 부하와 같은 운전 조건이 히터 출력에 미치는 영향에 대한 조사나 모델 기반 제어를 위한 고전압 히터 전이 함수 모형 도출 등이 향후 추가 연구 주제가 될 수 있다.

REFERENCES

- [1] Z. Zhang, J. Wang, X. Feng, L. Chang, Y. Chen & X. Wang. (2018). The Solutions to Electric Vehicle Air Conditioning Systems: A Review. *ATZ Worldwide*, 115(6), 16-19. DOI : 10.1016/j.rser.2018.04.005
- [2] M. H. Park & S. C. Kim. (2017). Heating Performance Characteristics of High-Voltage PTC Heater for an Electric Vehicle. *Energies*, 10(10), 1494. DOI : 10.3390/en10101494
- [3] C. Cap & C. Hainzmaier1. (2013). Layer Heater for Electric Vehicles. *ATZ Worldwide*, 115(6), 16-19. DOI : 10.1007/s38311-013-0068-9
- [4] F. Dong, Z. Wang, Y. Feng & J. Ni. (2021). Numerical Study on Flow and Heat Transfer Performance of Serpentine Parallel Flow Channels in a High-Voltage Heater System. *Thermal Science*, 168-168. DOI : 10.2298/TSCI200926168D
- [5] F. Dong, Y. Feng, Z. Wang & J. Ni. (2019). Effects on Thermal Performance Enhancement of Pin-Fin Structures for Insulated Gate Bipolar Transistor (IGBT) Cooling in High Voltage Heater System. *International Journal of Thermal Sciences*, 146, 106106. DOI : 10.1016/j.ijthermalsci.2019.106106
- [6] W. Zhang, P. Hu, X. Lai & L. Peng. (2009). Analysis and Optimization of Flow Distribution in Parallel-Channel Configurations for Proton Exchange Membrane Fuel Cells. *Journal of Power Sources*, 194(2), 931-940. DOI : 10.1016/j.jpowsour.2009.05.033
- [7] A. F. Al-Neama, N. Kapur, J. Summers & H. M. Thompson. (2017). An Experimental and Numerical Investigation of the Use of Liquid Flow in Serpentine Microchannels for Microelectronics Cooling. *Applied Thermal Engineering*, 116, 709-723. DOI : 10.1016/j.applthermaleng.2017.02.001
- [8] K. H. Cho, H. S. Ahn & M. H. Kim. (2011). Optimizing the Configurations of Cooling Channels with Low Flow Resistance and Thermal Resistance. *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B*, 35(1), 9-15. DOI : 10.3795/KSME-B.2011.35.1.009
- [9] K. J. Son. (2020). Performance Evaluation of Multi-Degree-of-Freedom Robotic Mixer using Discrete Element Mixing Simulations. *Journal of*

- the Korea Convergence Society*, 11(10), 219-224.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.10.219
- [10] K. J. Son. (2021). Numerical Simulation of Productivity of Metal Powder Spray Granulation Process Using Discrete Element Method. *Journal of the Korea Convergence Society*, 12(1), 185-191.
DOI : 10.15207/JKCS.2021.12.1.185
- [11] T. Kajishima & K. Taira. (2017). *Computational Fluid Dynamics*, Cham : Springer.
DOI : 10.1007/978-3-319-45304-0
- [12] L. Rostami, P. M. G. Nejad & A. Vatani. (2016). A Numerical Investigation of Serpentine Flow Channel with Different Bend Sizes in Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells. *Energy*, 97, 400-410.
DOI : 10.1016/j.energy.2015.10.132
- [13] K. K. Choi & J. U. Cho. (2020). A Convergent Investigation on the thermal and stress analyses of CPU Cooler. *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(8), 153-158.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.8.153
- [14] K. K. Choi & J. U. Cho. (2020). A Convergent Investigation on the Thermal Analysis due to Heat Generation of Laptop. *Journal of the Korea Convergence Society*, 11(11), 189-194.
DOI : 10.15207/JKCS.2020.11.11.189
- [15] X. Cao, H. Liu, X. Shao, H. Shen & G. Xie. (2020). Thermal Performance of Double Serpentine Minichannel Heat Sinks: Effects of Inlet-Outlet Arrangements and Through-Holes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 153, 119575.
DOI : 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2020.119575

손 권 중(Kwon Joong Son)

[중신회원]



- 2003년 2월 : 포항공과대학교 기계공학과(공학사)
- 2005년 5월 : 미국 카네기멜런 대학교 기계공학과(공학석사)
- 2009년 5월 : 미국 텍사스대학교 오스틴 기계공학과(공학박사)
- 2010년 8월 ~ 2015년 4월 : 아랍에미리트 두바이 아메리칸대학교 기계공학과 부교수
- 2015년 9월 ~ 현재 : 홍익대학교 기계정보공학과 부교수
- 관심분야 : 전산역학, 스마트제조, 인공지능, 융합교육
- E-Mail : kjson@hongik.ac.kr