

고 용융점 소재의 압출적층성형을 위한 우수한 방열특성을 갖는 3차원 프린터 nozzle부 기구설계

김완진* · 이상욱**

Structural Design of 3D Printer Nozzle with Superior Heat Dissipation Characteristics for Deposition of Materials with High Melting Point

Wan-Chin Kim* · Sang-Wook Lee**

요 약

300도 이상의 높은 용융점을 갖는 소위 엔지니어링 플라스틱은 기구적인 강성과 내화학성 및 마찰 및 마모 성능이 우수하여 여러 산업에서 금속을 대체하는 소재로 각광받고 있다. 본 연구에서는 용융적층모델링 공법을 기반으로 하는 3D 프린터에서 높은 용융점을 갖는 엔지니어링 플라스틱을 조형할 수 있도록 방열특성이 우수한 3D 프린터 nozzle부의 구조를 설계하고 이를 해석적으로 검증하였다. 높은 온도로 가열되는 heat block과 필라멘트가 이송되는 nozzle상부 간의 단열 및 신속한 냉각을 위하여, 열전도계수가 낮은 열차단부(heat brake부)를 2중으로 구성하였고, 열차단부에 생성되는 열이 냉각핀을 통해 대기에 의해 냉각되는 구조를 적용하였다. 개선된 nozzle부 구조설계를 통해 종래 3D 프린터의 BCnozzle과 비교할 때, heat sink부에서의 온도를 50% 가량 낮출 수 있었으며, heat block에 직접적으로 연결된 heat brake부 최종단의 정상상태 온도를 14% 가량 낮출 수 있었다.

ABSTRACT

Since the engineering plastics having a melting point of higher than 300 degrees have a high mechanical rigidity, chemical resistance, friction and abrasion performance, those are being highlighted as metal replacement materials in various industries. In this study, 3D printer nozzle with excellent heat dissipation characteristics are designed and analytically verified to form engineering plastics with high melting points in 3D printers based on the melt-lamination modeling method. In order to insulate between the heat block heated to a melting point of filament material and the upper part of the nozzle where the filament is transferred, the heat brake part with low thermal conductivity was designed to have two separate parts, and a cooling fin structure is further applied to the heat brake part to lower steady-state temperature by air convection. Optimized structural design on FDM nozzle part reduces the temperature at the heat sink and at the end part of heat brake by 50% and 14% respectively, compared to the conventional BCnozzle structure.

키워드

Engineering Plastic, FDM (Fused Deposition Modeling), Heat Dissipation, Nozzle, 3D Printer
엔지니어링 플라스틱, 용융적층모델링, 방열, Nozzle, 3차원 프린터

* 교신저자 : 한밭대학교 스마트제조응용공학과
** 원광대학교 기계설계공학부 (swlee94@wku.ac.kr)
• 접수일 : 2019. 12. 29
• 수정완료일 : 2020. 02. 21
• 게재확정일 : 2020. 04. 15

• Received : Dec. 29, 2019, Revised : Feb. 21, 2020, Accepted : Apr. 15, 2020
• Corresponding Author : Wan-Chin Kim
Dept. Smart Manufacturing Applied Engineering, Hanbat National University,
Email : wckim97@hanbat.ac.kr

1. 서론

최근 활발하게 보급된 3D 프린팅 기기는 고형화된 필라멘트 형태의 수지를 용융점 이상으로 가열 및 압출하면서 적층하는 압출적층조형(Fused Deposition Modeling, FDM) 방식과 광 개시제가 함유된 포토폴리머에 특정한 에너지 밀도 이상의 광 에너지가 입사되는 경우 발생하는 광중합반응을 통해 적층형으로 조형하는 광중합적층조형(Stereo Lighthography) 방식을 사용하고 있다[1]. Table 1에 FDM 방식의 3차원 프린터에 주로 적용되고 있는 필라멘트 재료를 나타내었다. 가정 및 소규모의 사업장에 보급된 FDM 기기에서 대표적으로 활용되고 있는 필라멘트 재료로는 ABS(: Acrylonitrile butadiene styrene) 및 PLA(: Poly Lactic Acid)와 등이 활용되고 있는데 이러한 재료들은 탄성 및 높은 굴곡강성, 높은 영률(Young's modulus) 등을 가지고 있는 반면, 소량다품종 제품 생산에 있어 필수적으로 요구되는 높은 인장강도, 높은 경도 및 고내열성 등의 기계적인 특성은 낮은 단점을 갖고 있어, 3D 프린터를 활용하여 시제품이 아닌 실제 기계 등의 부품 및 의료용 보형물 등의 제품 구현에 어려움이 있다[2].

표 1. FDM 방식 3차원 프린터의 필라멘트 재료
Table 1. Filament materials for FDM 3D printers

Grade	Materials
Commodity Polymers	PEEK/PAEK/PEI/PSU/PPSU
Engineering-Grade Polymers	PC/Nylon
High-Performance Polymers	PLA/ABS/ASA/PETx/HIPS

3D 프린터를 이용한 제품생산 관점의 주요요소로는 크기, 부피, 표면 조도 등의 치수정밀도와 높은 경도 및 인장강도와 내열성 등 기계강성이 요구되는데 이러한 요구사항을 충족시키기 위해서는 금속소재를 이용하거나 PEEK(: Polyetheretherketone), PAEK(: Polyaryletherketone) 및 PEI(: Polyetherimide) 등 열변형 온도가 150°C 이상인 재료를 이용한 조형이 가능해야한다. 대체로 금속분말을 3D 프린팅에 이용하기 위하여 선택적 레이저소결 (Selective Laser

Sintering, SLS) 등의 방식이 적용되고 있으나, 이러한 기기는 고출력레이저를 이용하므로 고가의 스캐닝 시스템이 요구되고, 금속분말의 도포 및 Leveling 제어 등을 수행하므로 기기를 보급화하기에 어려움이 있다. PEEK 및 PAEK 등의 우수한 기계적 특성을 갖는 재료는 FDM 방식 또는 SLA 방식을 통해 적층조형이 가능한데, 이를 구현하는 FDM 기기의 경우 대체로 300도 이상의 높은 용융점을 갖는 재료의 특징으로 350도 이상으로 가열되는 Hot End의 열이 nozzle 상부 및 3차원 이송 스테이지부로 전달되는 것을 방지하기 위하여 대단히 고가의 방열구조를 갖고 있으며, PLA 또는 ABS 등을 출력할 수 있는 3D 프린터에 비하여 기기 가격이 10~20배에 달하여 보급화에 어려움이 있다.

FDM 방식 3D 프린터를 이용하여 치수정밀도 및 기계강성이 우수한 중형 기계구조물 및 기계요소부품 등에 대한 소량 다품종 제작을 가능하기 위해서는 표 1에 나타난 FDM 방식 3차원 프린터의 필라멘트 재료 중 엔지니어링급 폴리머 또는 고성능폴리머 계열에 해당하는 재료를 이용한 적층조형이 가능해야 한다. 이러한 재료는 대체로 300°C~ 340°C 사이의 용융온도(Tm)을 가지므로, 프린터 nozzle의 Hot-End 온도가 최소한 350°C 이상으로 가열되어야 한다. 뿐만 아니라 이러한 재료의 유리전이온도(Tg)는 140°C~150°C 이므로 nozzle Hot-End에서 발생한 열이 nozzle 상부로 전달될 때 nozzle 상부의 온도가 유리전이온도 이하로 유지되어야 한다. 뿐만 아니라 PEEK 및 PEI 등의 고성능 폴리머를 출력하는 경우 출력물이 안착되는 출력베드의 온도가 최소한 120°C 이상으로 유지되어야만 출력물이 충분한 접착력을 갖고 적층조형 될 수 있다[3].

등가 열전달 계수를 사용하여 3차원 프린터 nozzle의 열전달 해석하였으나 Hot-End의 온도가 230°C인 보급형 FDM 3D 프린터의 일반적인 nozzle헤드에 대한 열분포 해석을 수행하였으며[4-5], Hot-End가 최대 300°C 까지 가열되는 경우 냉각 팬의 유동특성을 고려한 열유동 연계 해석을 수행하였으나[6], nozzle 해석 모델을 정의함에 있어 필라멘트 주입을 원활하게 하기 위해 사용되는 테프론 튜브가 삽입되는 구조를 고려하였는데, Hot-End가 300°C 이상으로 가열되는 경우, 녹는점이 300°C인 테프론 튜브를 이용하여

필라멘트의 주입성을 제고하는 것이 불가능하기 때문에 테프론 튜브가 없는 보다 실제적인 구조를 고려한 열해석이 요구된다. 본 연구에서는 Heat block이 PEEK, PC, PAEK 등을 용융할 수 있는 350°C로 가열되는 경우, 필라멘트 주입이 시작되는 nozzle의 상부의 온도를 100°C 이하로 구현할 수 있는 nozzle 구조를 제시하고 종래의 보급형 FDM 3D 프린터에 적용되고 있는 nozzle의 열해석 결과와 비교함으로써 개선된 방열특성을 검증하고자 한다. 본 논문에서는 2장에서 종래 일반적인 3D 프린터에 널리 적용되고 있는 BCNozzle이 프린팅을 위해 가열되는 경우에 대한 열해석을 수행하였고, 3장에서 고 용융점 플라스틱을 이용하는 경우 BCNozzle의 열분포특성에서 나타난 문제점을 해결하기 위한 Nozzle부 구조설계와 해당 모델에 대한 열분포 특성을 해석하였다.

II. 종래 FDM 3D 프린터에 적용된 nozzle의 방열특성 검토

2.1 종래 FDM 3D 프린터에 적용된 nozzle구조

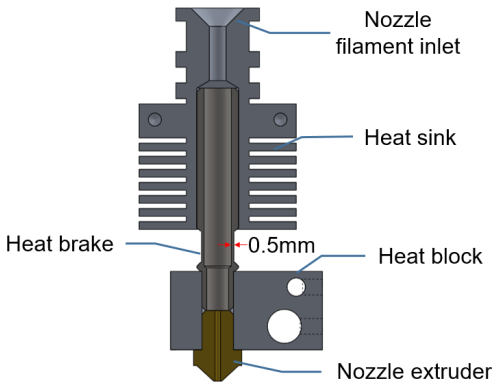


그림 1. 종래 보급형 FDM 3D 프린터에 적용된 BCNozzle의 단면 구조 (RepRap Barcelona Project)
Fig. 1 Sectional view of the BCNozzle designed by RepRap Barcelona Project

본 연구에서는 개선된 3D 프린터 nozzle 파트에 대한 열분포 해석을 진행하기에 앞서 RepRap Barcelona Project를 통해 개발되어 보급형 FDM 3D 프린터에 적용되고 있는 BCNozzle의 구조를 기준으로 heat

block이 최고 350°C 까지 상승되는 경우를 고려한 열분포 해석을 진행하였다[7-8]. Figure 1은 BCNozzle의 단면을 나타내고 있다. nozzle은 필라멘트를 이송하는 filament inlet 및 heat brake와 filament를 용융하기 위한 가열부인 heater가 직접적으로 연결된 heat block과 filament를 압출하는 nozzle extruder로 구성되어 있다. 보급형 3D 프린터에서는 원활한 filament의 이송을 위하여 테프론 호스를 heat block 바로 위 단 까지 삽입하는 구조를 갖고 있으나, 전술한 바와 같이 heat block이 350°C 까지 상승되는 경우 테플론 호스에 의한 filament 이송특성 개선이 효과적이지 못하므로 고려하지 않았다.

2.2 재료물성 및 해석조건

본 해석에서 고려한 Heat sink, Heat block 및 Heat brake와 Nozzle의 재료, 밀도, 열전달계수, 비열을 Table 2에 나타내었다. 본 해석에서는 온도에 따라 미비하게 달라지는 열특성과 열팽창 특성은 고려하지 않았다. Heat sink 및 Heat block 은 대체로 연전도율이 매우 높은 물질을 사용하므로 동일한 Aluminum 재질을 고려하였고, Nozzle은 열전도율은 높으나 열변형이 적은 황동이 대체로 사용된다. Heat brake는 nozzle 상부로의 열전달을 차단하기 위하여 낮은 열전도율을 갖는 stainless steel이 고려되었다.

표 2. 비교해석모델의 각 파트 열-기계물성
Table 2. Properties of materials for reference model

Part	Material	ρ (g/cm ³)	K (W/mK)	C_p (J/gK)
Heat sink	aluminum	2.73	155	0.893
Heat block	AW-3003-H18			
Heat brake	stainless steel SS304	7.96	14	0.502
Nozzle extruder	Brass EN CW614N	8.47	123	0.377

해석의 경계조건으로서, 대기온도는 25°C로 설정되었고, Heat block에 주입되는 발열체는 350°C로 가열되는 것을 고려하였고, 기압조건은 101325Pa이 고려되었고 열적평형상태에 도달했을 때의 온도분포를 분석하였다.

2.3 종래 FDM 3D 프린터 nozzle구조의 방열특성

Figure 2에 종래 FDM 3D 프린터에 보편적으로 적용되고 있는 BCNozzle의 Heat block을 350°C로 가열하여 PC 또는 PEEK 등을 용융하는 조건에 대한 정상상태 열분포 해석 결과를 나타내었다. PC 및 PEEK 등을 열해석에서 고려하지 않았으나, filament 재료의 경우 열전도율이 매우 낮기 때문에 주변의 온도에 의하여 필라멘트의 부분별 온도가 정의된다고 판단할 수 있다 [9]. PC 또는 PEEK 등의 유리전이온도가 140~150°C 수준임을 감안하면, Heat sink 부분에서부터 필라멘트 재료의 연화가 발생되기 시작하며 heat brake 부분에서 240°C 이상으로 상승하고 heat block으로 진입하자마자 350°C에 도달하기 때문에 필라멘트가 용융되어야 하는 Nozzle에 도달하기 전에 필라멘트가 용융되어 정상적인 압출력을 전달하기 대단히 어려운 조건임을 확인할 수 있다.

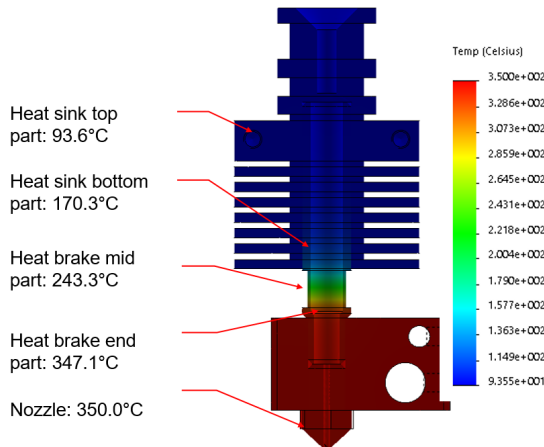


그림 2. 종래 보급형 FDM 3D 프린터에 적용된 nozzle의 방열특성 해석 결과
 Fig. 2 Steady-state thermal analysis result on nozzle for conventional FDM 3D printer

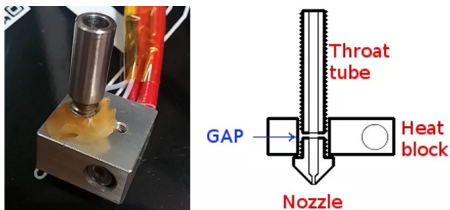


그림 3. nozzle에서 발생하는 필라멘트 leakage 현상
 Fig. 3 Filament leakage in heat block

대체로 이와 같이 Heat block 이전에 filament 재료의 연화가 심하게 발생하는 경우, Heat block의 반복된 열팽창에 의하여 내부의 Throat tube와 Nozzle 간의 체결이 느슨해지므로 Fig. 3에 제시된 예와 같이 filament의 leakage 현상이 심각하게 발생한다.

III. PC/PEEK 소재에 대응 가능한 FDM 3D 프린터 nozzle 기구의 방열특성 검토

3.1 방열특성 개선을 위한 FDM 3D 프린터 nozzle부의 구조설계

비교 모델로 검토한 FDM 3D 프린터에 기기에 보편적으로 적용되고 있는 BCNozzle의 주요한 문제점은 최종 Nozzle extruder 부로 진입하기 전에 filament가 녹아내리는 현상이 발생될 수 있는 문제점이었다. 이를 개선하기 위한 nozzle부의 구조를 Fig. 4에 나타내었다.

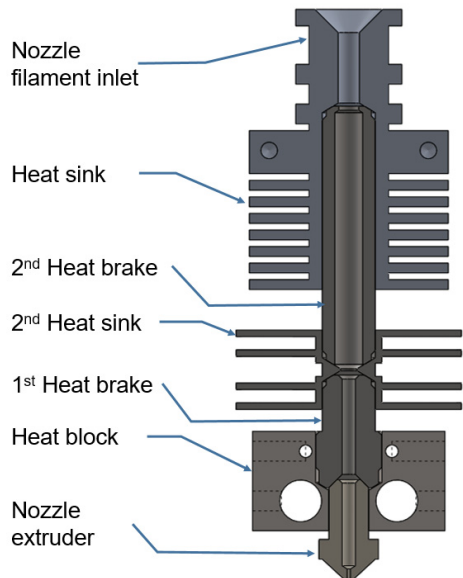


그림 4. 방열특성 개선을 위한 FDM 3D 프린터 nozzle부의 구조
 Fig. 4 Sectional view of the nozzle part with improved thermal dissipation characteristics

Heat block 내부로 깊숙하게 배치되는 1st heat brake에 분포되는 열이 방열핀인 2nd heat sink를 통해 대기에 의해 냉각되도록 하였으며, heat brake 상

부의 온도상승을 최대한 억제하기 위하여 1st heat brake와 2nd heat brake가 미소한 공기 절연층을 갖도록 2nd heat sink에 체결되는 구조로 설계하였다. 2nd heat brake에 분포되는 열도 방열핀인 2nd heat sink를 통해 대기에 의해 냉각되도록 하였다. Table 3에 Fig. 4에 제시된 FDM 3D 프린터의 nozzle부 각 파트의 재질과 열-기계 물성을 나타내었다. 최고 350°C로 가열되는 것을 고려하여 aluminum과 황동보다 thermal expansion 계수가 낮은 titanium과 nickel로 Heat block과 Nozzle extruder의 재질을 선정하였다.

표 3. 개선된 해석모델의 각 파트 열-기계물성
Table 3. Properties of materials for optimized model

Part	Material	ρ (g/cm ³)	K (W/mK)	C_p (J/gK)
Heat sink	aluminum Al 6061	2.70	170	1.300
Heat block	titanium Ti-Gr5	4.43	17	0.526
1 st /2 nd Heat brake	stainless steel SS304	7.96	7	0.502
Heat sink				
Nozzle extruder	nickel Ni 200	8.89	70	0.456

3.2 설계된 nozzle부의 방열특성 해석

Figure 5에 설계된 nozzle부의 방열특성 해석 결과를 나타내었다. 해석에서는 block heater를 통해 Heat block이 350°C로 가열되는 조건을 고려하였다. Heat block의 재질을 titanium으로 변경함으로써 종래의 aluminum Heat block과 비교할 때 열전달계수가 현저하게 감소하여 1st heat brake로 전달되는 열량이 감소되었을 뿐 아니라, Heat break에 형성된 방열핀을 통해 대기에 의해 냉각되는 특성을 바탕으로, Fig. 5에 나타난 해석결과에 나타난 바와 같이, 제안된 FDM 3D 프린터 nozzle부를 이용하여 Heat block 내부로 장착된 1st Heat brake 최종단에서의 온도를 300°C 이하로 낮출 수 있었으며, 1st Heat brake 상단의 온도가 190°C 이하로 나타났다. 뿐만 아니라 Heat sink inlet의 온도가 90°C 이하로써 filament를 nozzle로 이송할 수 있는 압출력이 충분히 전달될 수 있을 것으로 기대된다.

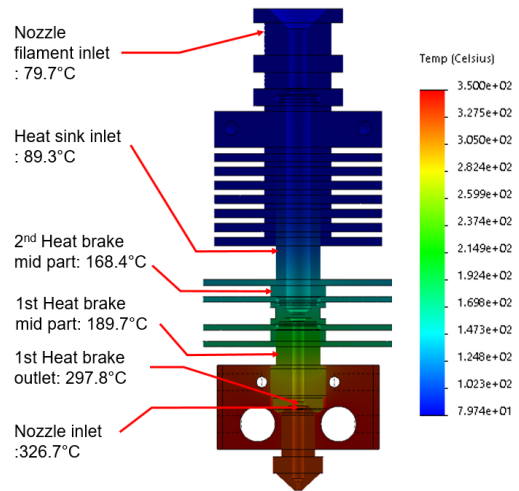


그림 5. 방열특성이 개선된 FDM 3D 프린터 nozzle부의 정상상태 열분포 해석 결과
Fig. 5 Steady-state thermal analysis result on novel structural design of nozzle for FDM 3D printer

IV. 결 론

본 연구에서는 용융점이 300°C 이상인 PEEK, PC, PAEK 등을 용융할 수 있는 FDM 3D 프린터 nozzle부의 기구설계 및 열분포 해석에 대한 연구를 수행하였다. Heat block이 350°C로 가열되는 경우, filament의 용융이 Nozzle inlet에서 부터 일어나도록 하며 Heat brake 상부의 온도를 100°C 이하로 낮추는 것을 목표로 nozzle구조를 설계하였다. 이를 위하여 2단으로 구성된 Heat brake 구조를 고안하였고, Heat brake에 생성된 열이 대기에 의하여 냉각될 수 있도록 Heat brake에 방열핀을 추가하였다. 설계된 nozzle부의 방열특성 해석을 통하여 종래의 BCNozzle 구조의 열해석 결과와 비교할 때, Fig. 2와 Fig. 4를 통해 확인할 수 있는 바와 같이 Heat brake 최종단의 온도를 14% 가량 낮출 수 있었으며, Heat sink inlet에서의 온도를 50% 가량 저감할 수 있었다. 본 연구의 결과를 활용하면 300°C 이상의 용융점을 갖는 강성이 우수한 재료로 조형이 가능한 FDM 3D 프린터의 nozzle부를 낮은 비용으로 구현하는 것이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] S. Choi and S. Hwang, "3D Printing Design for Minimizing Flection Phenomenon," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 12, Dec. 2014, pp. 1415-1420.
- [2] E. Kim, "Development of a Multi-tool Carving Machine and a Machine Control Software," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 14, no. 4, Aug. 2019, pp. 755-760.
- [3] X. Deng, Z. Zeng, B. Peng, S. Yan, and W. Ke, "Mechanical Properties Optimization of Poly-Ether-Ether-Ketone via Fused Deposition Modeling," *Materials*, vol. 11, no. 216, Feb. 2018, pp. 1-11.
- [4] J. Park, M. Lyu, S. Kwon, H. Roh, M. Koo, and S. Cho, "Temperature Analysis of Nozzle in a FDM Type 3D Printer Through Computer Simulation and Experiment," *Elastomers and Composites*, vol. 51, no. 4, Dec. 2016, pp. 301-307.
- [5] D. Shin, H. Lee, C. Lee, and K. Park, "Thermal Structural Coupled Numerical Analysis for Design of HighTemperature Extruder of FDM 3D Printers," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, vol. 24, no. 3, Mar. 2018, pp. 341-347.
- [6] C. Lee, H. Kim, J. Yu, and K. Park, "Thermal-Fluid Coupled Analysis of the Nozzle Part for the FDM 3D Printers Considering Flow Characteristics of Cooling Fan," *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, vol. 35, no. 5, May 2018, pp. 479-484.
- [7] R. Jerez-Mesa, J. A. Travieso-Rodriguez, X. Corbella, R. Busqué, and G. Gomez-Gras, "Finite element analysis of the thermal behavior of a RepRap 3D printer liquefier," *Mechatronics*, vol. 36, June 2016, pp 119-126.
- [8] B. N. Turner, R. Strong, and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: I. Process design and modeling," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 30, no. 3, Apr. 2014, pp. 192-204.
- [9] Y. Ko, "A Study about the Modelling of Thermolectric Cooler and the Thermal Transfer Analysis," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 9, no. 11, Nov. 2014, pp. 1291-1296.

저자 소개



김완진(Wan-Chin Kim)

2001년 서강대학교 기계공학과 졸업(공학사)

2004년 연세대학교 대학원 정보지장공학과 졸업(공학석사)

2009년 연세대학교 대학원 정보지장공학과 졸업(공학박사)

2018년 ~현재 한밭대학교 스마트제조응용공학과 조교수

※ 관심분야 : 3D 프린팅시스템, 자율주행시스템



이상욱(Sang-Wook Lee)

1998년 부산대학교 항공우주공학과 졸업(공학사)

2000년 한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 졸업(공학석사)

2006년 한국과학기술원 기계공학과 항공우주전공 졸업(공학박사)

2017년~2019년 호남대학교 미래자동차공학부 조교수

2020년~ 현재 원광대학교 기계설계공학과 조교수

※ 관심분야 : 3D 프린팅시스템, 전산유체역학