

CFRTP 소재 가공을 위한 초음파 나이프 적용 가능성에 관한 연구

송기혁¹ · 김혜진² · 박지영² · 성시명^{2,1†}

한국폴리텍대학 스마트금형과¹
인하대학교 기계공학과²

A Study on the applicability of ultrasonic knife for processing CFRTP materials

Ki-Hyeok Song¹ · Hye-Jin Kim² · Ji-young Park² · Si-Myung Sung^{2,1†}

Department of mold, Korea Polytechnics¹

Department of mechanical Engineering, INHA University^{2†}

(Received June 19, 2023 / Revised June 23, 2023 / Accepted June 30, 2023)

Abstract: In this study, an experiment was conducted to confirm the applicability of the external shape control of the ultrasonic knife to the CFRTP material, which is the base material of thermoplastic. TC910 based on polyamide6 (PA6) was used as the material. The slope α and tool transfer speed of the material and tool were selected as process factors for processing, and the following results were obtained. Under all cutting conditions using an ultrasonic knife, friction heat caused by high-frequency vibration was issued at 150°C at the contact part between the material and the knife during cutting. As a result of the cutting force analysis, the faster the transfer speed, the higher the cutting force as the angle of entry of the blade increased, and the size of the cutting force changed during cutting. As for the size of the burr in accordance with the transfer speed condition, the smallest burr occurred at 150mm/min in the side part, and the smallest burr occurred at 150mm/min and 200mm/min in the case of the outlet burr. The size of the burr according to the entry angle tended to decrease as the tool entry angle increased, and the side part tended to increase as the tool entry angle increased. As a result of the cutting surface analysis, it was confirmed that the base material was eluted under all conditions, and the faster the transfer speed, the lower the elution phenomenon of the base material. Based on the above results, cutting the CFRTP material with an ultrasonic knife is possible, but the effect on heat generation caused by friction needs to be minimized, and further research needs to be conducted on this.

Key Words: CFRTP, Cutting, Thermoplastic, Ultrasonic knife

1. 서론

최근 자동차 및 항공 등의 운송 관련 산업에서 연료에 대한 효율을 높이기 위한 경량화 방법으로 기존 소재 대비 강도가 높으면서 가벼운 비강성 소재들에 대한 요구가 증대되고 있다.

탄소섬유 강화 플라스틱은 서로 다른 두 종류의 물질이 혼합된 복합재료로 플라스틱을 모재(matrix)로 사용하고 탄소섬유를 보강재(reinforcement)로 사

용한 재료이다. 탄소섬유강화 플라스틱의 장점은 높은 비강성, 비강도, 낮은 열팽창율 및 내부식성 특성을 가지고 있으며 단점으로 낮은 가공 특성에 따른 높은 제조 비용이다. 이러한 단점으로 인해 현재 탄소섬유 강화 플라스틱은 고급 자동차 생산에만 적용되고 있으며 이를 일반 자동차 생산에 적용하기 위해 많은 연구들이 진행되고 있다.¹⁻²⁾

Fig. 1은 복합재료에 대한 정의로 복합재료는 파이버의 형태, 재질 및 모재의 종류에 따라 구분된다. 복합재료의 모재는 크게 금속, 세라믹 및 고분자가 사용되며 고분자는 모재의 종류에 따라 열가소성 플라스틱을 모재로 사용한 Carbon Fiber Reinforced Thermal Plastic(CFRTP)과 열경화성플라스틱을 모재

† 교신저자: ssm225@kopo.ac.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

로 사용한 Carbon Fiber Reinforced Thermosetting Plastic(CFRSP)으로 구분 할 수 있다. 특히 CFRTP는 열가소성 플라스틱을 모재로 적용한 면의 형태로, 보강재가 직조된 형태의 Textile 형태와 보강재의 방향이 동일한 Unidirectional(UD) type 의 형태가 있다.³⁾ 일반적으로 열경화성플라스틱을 모재로 사용한 CFRSP는 저점도 특성에 따른 보강재의 용이한 함침 특성을 가지는 에폭시(epoxy) 또는 폴리에스터(polyester) 등을 사용한다. 이러한 CFRSP는 제조 시 경화반응을 위한 수 시간 동안 진공 챔버 내에서 높은 열과 압력을 가해하여야 하는 제조 공정 특성으로 인해 대량의 제조생산체제에는 적합하지 않으며 재활용이 안 되는 단점이 있다. 따라서 최근에는 제조 공정 시 경화반응이 필요 없는 열가소성 플라스틱을 활용한 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 CFRTP의 제조 공정은 프레스 금형 위에 프리프레그(pregreg : pre-impregnated material) 타입의 CFRTP를 적용한 후 프레스 등을 이용하여 압력과 열을 인가하여 제작하며 이때 모재인 열가소성 플라스틱은 높은 용융 온도와 높은 성형 압력이 필요한 단점이 있으나 단시간 생산이 가능한 장점이 있다.²⁻³⁾ 이러한 공정을 통해 제작된 CFRTP는 외곽 형상에 대한 제어를 위해 기존의 경우 워터젯을 활용하고 있으며 최근 대량생산 공정을 위한 프레스의 트림 공정 적용에 관한 연구가 진행되고 있다. 하지만 워터젯은 높은 설비비용과 3D 가공 형상 구현에 대한 한계 있으며 Choi 등은 CFRP의 트림 공정에 프레스 공정 적용 가능성을 분석하였으나 fig. 2와 같이 프레스 공정을 활용한 절단 시 CFRP 절단면 결함으로 인한 한계가 존재하였다.⁴⁾

따라서 연구에서는 프레스 공정을 통해 제작된 CFRTP에 대한 초음파 나이프의 외곽 형상 제어 적용 가능성을 확인하고자 한다.

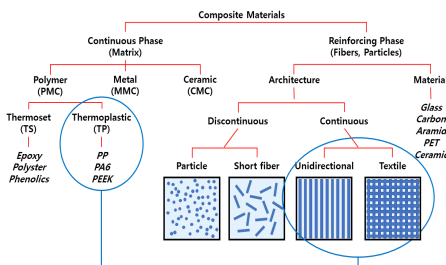


Fig. 1 Definition of composite materials³⁾

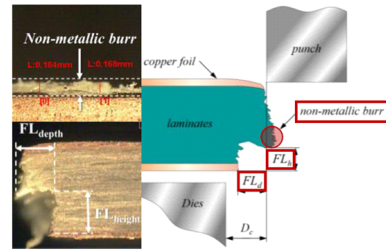


Fig. 2 Defects in cutting surface of CFRP due to press process application⁴⁾

2. 실험

2.1. 실험시스템

CFRTP 소재에 대한 초음파 나이프의 적용 가능성을 분석하기 위한 가공 시스템을 구성하였다. Fig. 3은 실험을 위한 시스템이다. 3축 스테이지를 통해 공구 위치 제어 및 소재의 이송제어를 하였으며 모션 제어는 Mach.3를 활용하였다. 신동초음파社의 초음파 컨트롤러를 활용하여 초음파 나이프를 제어하였으며 0.6 mm 두께 칼날 공구(SONOTEC, 3136-5H)를 적용하였다. 또한 증폭기(Kistler 5070a)와 공구동력계(Kistler 9256)를 사용하여 초음파 나이프로 CFRTP 절삭 시 발생하는 절삭력을 측정하였다. 절삭데이터는 DAQ 보드(NI 6221)를 통해 Labview 프로그램을 활용하여 수집하였다. 마지막으로 열화상 카메라(FLIR, ONE PRO)를 사용하여 절삭 시 발생하는 온도를 측정하였다.

시편은 열가소성플라스틱인 polyamide6(PA6)가 모재인 TC910(Toray Cetex社)을 사용하였으며 모재의 열변형온도는 200 °C이다. Fig. 4는 워터젯을 통해 제작된 가공 시편이며 80 x 20 x 2 mm의 외곽 형상으로 제작하였다.

Table 1은 CFRTP 가공 실험 조건이다. 가공에 대한 공정 인자로는 소재와 공구의 기울기 θ 와 공구 이송속도를 선정하였다. 이송속도 조건은 50, 100, 150, 200 mm/min로 선정하였으며 공구와 소재의 기울기 조건은 0°, 30° 및 60°로 선정하였다.

Table 1 Cutting Condition

Source	Experiment conditions
Feed rate (mm/min)	50, 100, 150, 200
Tool Inlet-Angle (θ)	0, 30, 60

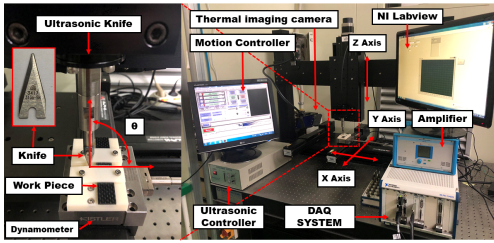


Fig. 3 Cutting System

80mm x 20mm x 2mm



↑ Cutting Direction

Fig. 4 Work Piece(CFRTP)

3. 실험결과 및 분석

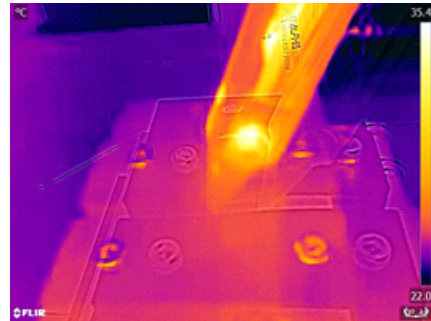
3.1. 온도 분석

초음파를 활용한 가공에서 초음파 트랜스듀서를 통한 초음파의 발진은 고주파의 전기 에너지를 고주파의 기계적 진동 특성으로 변환시켜주며 이때 초음파 나이프의 진동 전달을 시켜주는 mass 들은 공진을 통해 진폭을 극대화 하게 된다. 하지만 이러한 mass들은 트랜스듀서의 관점에서는 저항이며 공진 특성의 변화에 따라 트랜스듀서의 발열이 높아져 초음파 특성의 변화뿐만 아니라 가공시 공구에 영향을 주게 된다. 특히 얇은 두께의 나이프 공구의 경우 중진동 특성 변화에 따라 진동으로 인한 발열이 발생할 수 있다. 본 연구의 소재는 열가소성플라스틱을 모재로 사용하는 CFRTP로 가공 시 발생하는 열에 대한 영향이 클 것으로 예상되어 온도 분석을 수행하였다.

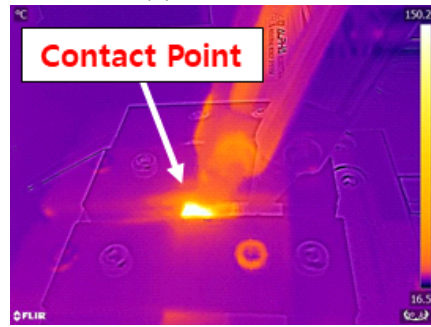
Fig. 5는 가공 시간에 따른 온도 측정 결과이다. 실험 조건은 이송속도 50mm/min 와 공구 진입 각도 30° 이다. 초음파 ON 상태에서 초기 온도는 최대 34°C 이며 절삭 날이 소재로 진입하는 순간 소재와 절삭 날이 접촉한 지점에서 급격한 온도 상승이 발생했음을 알 수 있다. 또한 절삭 시간에 따라 최대 150.2°C까지 온도가 상승 및 유지하였다.

Fig. 6은 가공 조건에 따른 온도 측정 결과이다. 모든 조건에서 절삭 시 150°C로 온도가 수렴하는 것을 알 수 있다.

이러한 발열의 원인으로 소재와 절삭 날의 접촉에 따른 마찰열과 접촉에 따른 공진 특성 변화에 따른 저항에 의한 발열을 예측할 수 있으며 fig. 6의 공구 진입 각도의 변화에 따른 온도의 변화가 없는 것을 통해 마찰에 의한 발열이 지배적 영향을 주었을 것으로 판단되었다.



(a)Ultrasonic ON



(b) Cutting

Fig. 5 Temperature measurement result over time

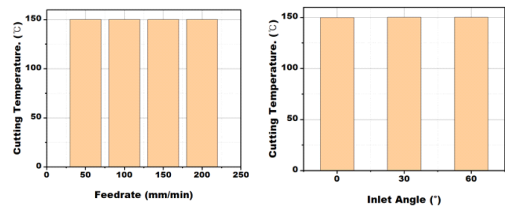


Fig. 6 Result of temperature according to feedrate & angle

3.2. 절삭력 분석

열가소성 플라스틱 모재의 CFRTP 소재에 대한 초음파 나이프의 가공 적용 가능성을 분석하기 위해 절삭 실험 수행을 하였으며 가공 조건에 따른 절

삭력 분석을 수행하였다.

Fig. 7은 가공 조건 중 이송 속도를 150 mm/min로 고정한 상태에서 공구의 진입 각도 θ 에 따른 절삭력 분석 결과이다. 공구 진입 각도가 증가할수록 절삭력이 감소하였으며 진입 각도가 증가할수록 초기 절삭력의 증가 기울기가 완만한 것을 확인할 수 있다. 또한 공구 진입 각도가 증가할수록 절삭력의 증가 기울기가 감소하는 것을 확인할 수 있으며 진입각도 60°를 제외하고 나머지 조건에서 모두 포인트 a 지점 이후 급격한 절삭력 감소 현상이 발생하였으며 이후 다시 급격히 절삭력이 증가하는 현상이 발생하였다.

Fig. 8은 가공 조건 중 진입각도를 30°로 고정한 상태에서 절삭 이송속도 조건에 따른 초음파 나이프의 절삭력 분석 결과이다. 분석 결과 이송속도가 증가할수록 절삭력의 증가를 확인할 수 있으며 절삭 이송 속도가 증가할수록 절삭력의 증가 기울기가 증가하며 절삭 출구에서 절삭력 감소 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다.

모든 조건에서 절삭력이 시간에 따라 증감을 반복하며 웨이브 특성을 나타내었으며 이는 절삭시 절삭력의 변화가 지속적으로 발생하였음을 의미한다. 가공 소재로 사용한 CFRTP의 모재는 polyamide6(PA6)로 열변형 온도는 200°C이나 열가소성 플라스틱의 특성상 150°C까지의 온도 증가에 따라 부분적으로 고체상에서 높은 점성 특성의 액체상으로 변화하였을 것으로 이로 인해 변화된 부분의 절삭은 급격히 진행되고 정상적인 고체상 부분은 정상적인 절삭이 이뤄 졌을 것으로 예측되었다.

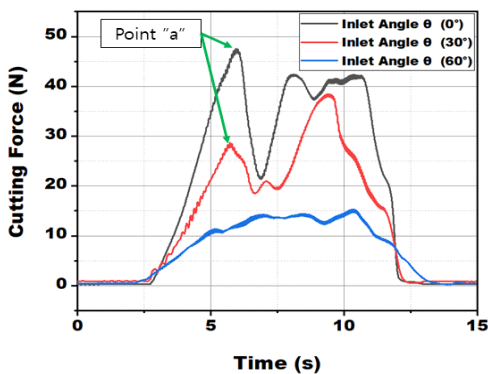


Fig. 7 Result of Cutting force according to Inlet angle θ

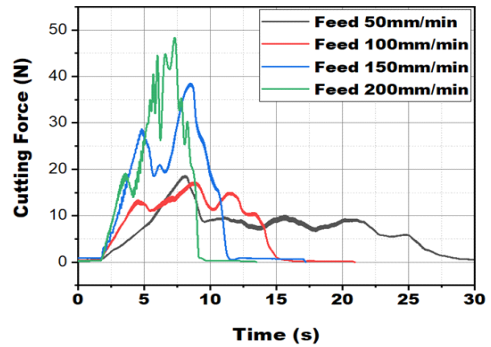


Fig. 8 Result of Cutting force according to Feedrate

3.3. 버(burr) & 표면 분석

모재가 열가소성 플라스틱인 CFRTP 소재에 대한 초음파 나이프 가공 적용 가능성 분석을 위한 실험을 수행하였으며 가공된 시편에 대한 버(burr)와 단면에 대한 표면 결함 분석을 수행하였다.

Fig. 9는 버에 대한 정의로 절삭 방향을 기준으로 공구가 지나간 방향의 측면부의 burr와 출구 쪽 버로 구분하였고 버 높이는 공구현미경(Sometech社: ICS pro)을 활용하여 측정하였다.

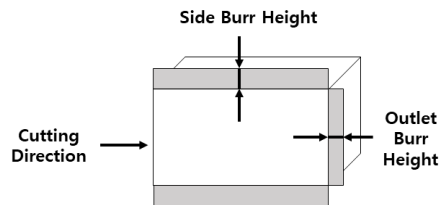


Fig. 9 Division of burr

Fig. 10은 공구의 진입 각도에 따른 버 높이 측정 결과이며 절삭 이송속도 조건은 150 mm/min로 고정하였다. 측정 결과 출구부의 버의 경우 공구 진입 각도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며 측면 버의 경우 공구 진입 각도가 커질수록 커지는 경향을 나타내었다.

Fig. 11은 이송속도에 따른 버 높이 측정 결과이며 공구 진입 각도 조건은 30°로 고정하였다. 측정 결과 측면부 버의 경우 가장 작은 버는 150 mm/min의 조건에서 발생하였으며 출구부 버의 경우 이송속도 조건 200 mm/min와 150 mm/min에서 가장 작은 약 0.38 mm의 버가 발생하였다.

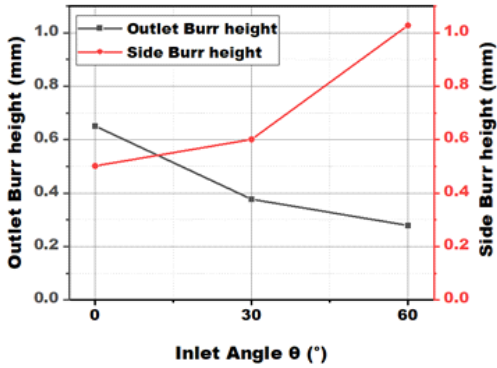


Fig. 10 Result of Burr Height Measurement according to Inlet angle θ

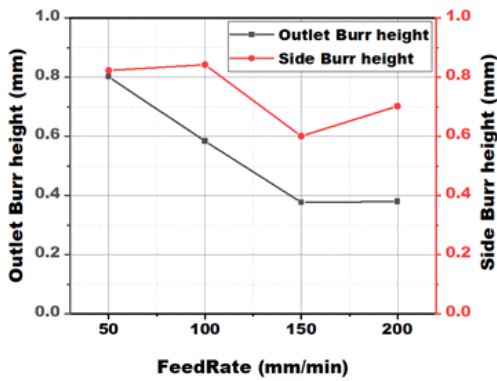
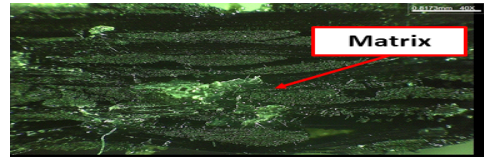


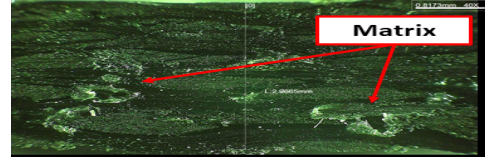
Fig. 11 Result of Burr Height Measurement according to Feedrate

Fig. 12는 이송속도 조건에 따른 소재의 절단면에 대한 측정 이미지이며 절삭 시 공구 진입 각도는 30°로 고정된 결과이다. 측정 이미지 분석에서 모든 가공 조건에서 모재가 용출 (flow-out) 되었음을 확인 할 수 있었으며 이송속도가 빠를수록 모재의 용출 현상은 감소하는 것을 확인할수 있었다. 이러한 모재의 용출은 초음파 절삭 시 발생한 150℃의 온도와 무관하지 않으며 결국 고체상태의 CFRTP의 모재 인 polyamide6(PA6)를 높은 점도 특성의 유체로 상변형을 유발시켰을 것으로 판단된다. 따라서 초음파 나이프를 활용한 CFRTP 절삭 시 온도에 대한 영향을 최소화할 위한 방안이 필요할 것으로 판단되었다.

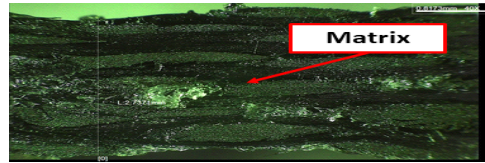
Fig. 13은 사용된 초음파 나이프에 대한 이미지로 모재가 사용된 모든 공구에서 존재하는 것을 확인하였다.



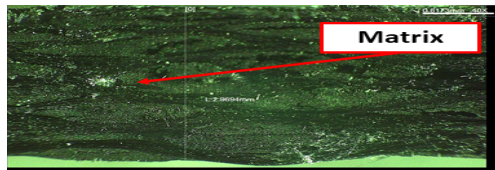
(a) 50mm/min



(b) 100mm/min



(c) 150mm/min



(d) 200mm/min

Fig. 12 Image of Surface according to Feedrate

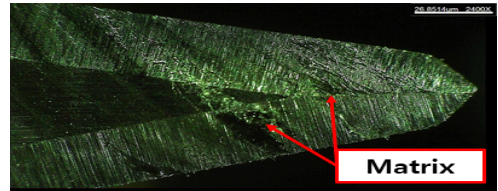


Fig. 13 Image for used tool surface

4. 결론 및 토의

본 연구에서는 열가소성 플라스틱이 모재인 CFRTP 소재에 대해 초음파 나이프를 활용한 외곽 형상 제어 적용 가능성 확인을 위한 실험을 수행하였고 다음의 결론을 얻었다.

- 1) 초음파 나이프를 활용한 모든 절삭 조건에서 절삭 시 소재와 나이프의 접촉부에서 고주파수의 진동에 의한 마찰열이 150℃ 발행하였다.
- 2) 절삭력 분석 결과 이송속도가 빠를수록 칼날

의 진입 각도가 증가할수록 절삭력이 증가하였으며 절삭 중 절삭력의 크기가 변화하는 특성을 나타내었다.

3) 이송속도 조건에 따른 버의 크기는 측면부에서는 150 mm/min의 조건에서 가장 작은 버가 발생하였으며 출구부 버의 경우 200 mm/min와 150 mm/min 조건에서 가장 작은 버가 발생하였다.

4) 진입 각도에 따른 버의 크기는 출구는 공구의 진입 각도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타냈으며 측면은 공구 진입 각도가 커질수록 증가하는 경향을 나타내었다.

5) 절삭 표면 분석 결과 모든 조건에서 모재가 용출되었음을 확인할 수 있었으며 이송속도가 빠를수록 모재의 용출 현상은 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

위의 결과들을 토대로 CFRTP 소재에 대한 초음파 나이프를 활용한 절삭은 가능하나 마찰에 의한 발열에 대한 영향을 최소화하기 필요하며 이에 대한 추가적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

참고문헌

- 1) Nguyen, D., Abdullah, M.S.B., Khawarizmi, R., Kim, D., Kwon, P., "The effect of fiber orientation on tool wear in edge-trimming of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) laminates" Wear, Vol 450 - 451, 2020
- 2) Hamada, M., "Making Cars with CFRTP: Cheap, and Ready for Volume Production" Nikkei BP Japan Technology Report, A1403-064-006, 2014.
- 3) Lim, S.T., "Development Trend for Thermoplastic Polymer Composite" Polymer Science and Technology Vol. 24(1), pp25-29, 2013.
- 4) Choi, H.S., Jeon, Y.J., Lee, H.J., Heo, I.S., Yu, G. H., Kim, D.E., "Investigation Of Sheared Edge Characteristics For CFRP / GFRP Materials In Die Trimming", The Korean Society For Technology of Plasticity, pp.72-78, 2019.
- 5) Park, J.Y., Yoon, G.S., Lee, J.W., Choi, J.M., A Study on Deformation of LSR Injection Moldings Having the Runners with Same Flow Distance, Journal of the Korea Society of Die & Mold Engineering, Vol.7:1 60-63, 2013.

저자 소개

송기혁 (Ki-Hyeok Song)

[정회원]



- 2015년 2월: 인하대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2020년 8월: 인하대학교 기계공학과 (공학박사)
- 2020년 8월~현재: 한국폴리텍 스마트금형과 교수

< 관심분야 >

초음파가공, 복합소재, 공정모니터링

김혜진 (Hye-Jin Kim)



- 2022년 8월 : 인천대학교 산업경영 공학과 (공학석사)
- 2023년 3월 : 인하대학교 기계공학과 재학 중
- 2023년 2월~ 현재 : 정성에듀테크 소속

< 관심분야 >

플라스틱 금형, 소프트웨어 개발, 성형 해석, 3D 프린팅

박지영 (Ji-young Park)



- 2016년 2월 : 인천대학교 기계공학과 (기계교육 석사)
- 2021년 8월 ~ 현재 : 인하대학교 기계공학과 박사과정 재학중
- 2019년 9월 ~ 현재 : 동양미래대학교 로봇자동화과 겸임교수

< 관심분야 >

기계설계, 3D Print, CAD/CAM

성시명 (Si-Myung Sung)



- 2016년 2월: 한양대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2021년 8월 ~ 현재: 인하대학교 기계공학과 박사과정 재학중
- 2017년 12월~현재: 한국폴리텍 스마트금형과 교수

< 관심분야 >

프레스금형, 판재성형, 제조설계