

3D 프린팅 복합소재의 가공에서 가공 조건 선정을 위한 머신러닝 개발에 관한 연구

김민재*, 김동현**, 이춘만***,#

*창원대학교 스마트제조융합협동과정, **창원대학교 메카트로닉스연구원, ***창원대학교 기계공학부

Development of Machine Learning Method for Selection of Machining Conditions in Machining of 3D Printed Composite Material

Min-Jae Kim*, Dong-Hyeon Kim** and Choon-Man Lee***,#

*School of Smart Manufacturing Engineering, Changwon National University

**Mechatronics Research Center, Changwon National University

***Department of Mechanical Engineering, Changwon National University

(Received 19 November 2021; received in revised form 06 December 2021; accepted 07 December 2021)

ABSTRACT

Composite materials, being light-weight and of high mechanical strength, are increasingly used in various industries such as the aerospace, automobile, sporting-goods manufacturing, and ship-building industries. Recently, manufacturing of composite materials using 3D printers has increased. 3D-printed composite materials are made in free-form and adapted for end-use by adjusting the fiber content and orientation. However, research on the machining of 3D printed composite materials is limited. The aim of this study is to develop a machine learning method to select machining conditions for machining of 3D-printed composite materials. The composite material was composed of Onyx and carbon fibers and stacked sequentially. The experiments were performed using the following machining conditions: spindle speed, feed rate, depth of cut, and machining direction. Cutting forces of the different machining conditions were measured by milling the composite materials. PCA, a method of machine learning, was developed to select the machining conditions and will be used in subsequent experiments under various machining conditions.

Keywords : 3D Printer(3D 프린터), Composites Material(복합소재), Machine Learning(머신러닝), Milling(밀링 가공), Cutting Force(절삭력)

1. 서 론

최근 산업이 발달함에 따라 재료의 경량화 및 안정성을 동시에 만족할 수 있는 소재 개발 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 수요를 만족하기 위해 복합소재에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 복합소재는

Corresponding Author : cmlee@changwon.ac.kr

Tel: +82-55-213-3622, Fax: +82-55-267-1160

일반 탄소강이나 알루미늄보다 경량하고 비강성과 비강도, 내마멸성, 피로 특성 등 기계적 성질이 우수하여 자동차, 항공기, 선박, 건축 자재 등 여러 산업 분야에서 널리 사용되어지고 있다. 탄소 섬유 복합재(Carbon fiber reinforced plastics, CFRP)는 탄소(Carbon)를 원자재로 하여 섬유(fiber) 형상을 유지하기 위해 기계적, 화학적 성질이 우수한 에폭시 수지를 기지로 만든 재료로서 방향성에 의한 배열 및 적층수와 각 fiber의 물성에 의한 강성 및 강도를 복합적으로 조절 가능하며 다양한 탄성율의 fiber를 이용하여 생산 가능하다^[1].

최근 복합소재 가공에 관한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되고 있다. Sa^[2]는 AlCrN, DLC 및 다이아몬드 코팅 엔드밀을 이용한 탄소 섬유 복합소재의 측면 밀링에 관한 비교 연구를 진행하였으며, Choi^[3]는 공구재종에 따른 엔드밀 가공의 절삭력에 관한 통계적 해석을 수행하였다. He^[4]은 탄소 섬유 강화 폴리머(CFRP) 복합재 밀링의 절삭력 및 결합 분석에 관한 연구를 수행하였으며, Halim^[5]은 탄소 섬유 강화 플라스틱 (CFRP)의 초음파 보조 밀링(UAM) 정상 작업 중 공구 마모, 절삭력, 표면 거칠기 및 가공 온도 분석을 수행하였다.

3D 프린팅 산업의 발달과 함께 복합재 적층에 관한 연구에도 관심이 커지고 있다. 그러나 관련 연구는 매우 적다. Ekoi^[6]은 3D 프린터로 제작한 직조 및 부직 연속 탄소 섬유 강화 폴리머(CFRP) 복합 재료의 피로 및 기계적 거동에 대한 연구를 수행하였다. 3D 프린터를 활용하여 복합소재를 제작하면 형상이 자유롭고 섬유함량 및 섬유배향을 조절할 수 있어 제품을 용도에 맞게 제작할 수 있다. 하지만 적층된 복합소재 특성상 후처리 절삭 가공시 박리(Delamination) 현상이 발생한다. 박리는 공구 경사각으로 fiber를 평행으로 절삭할 때 발생하며, 공작물의 품질을 보장하기 위해 피해야 하는 현상이다. 절삭력을 최소화하고 이러한 결함을 줄이면서 생산성 있는 가공을 하기 위해서는 복합재료의 가공에 대한 많은 연구가 절실히 필요하다.

따라서 본 연구에서는 3D 프린터로 제작된 복합소재를 스핀들의 회전속도, 이송속도, 절삭깊이, 가공방향 4가지의 가공조건에 따라 엔드밀 가공시 절삭력과 박리현상을 분석하여 최적의 가공조건을 선정하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다. Hagino^[7]은 엔드밀

가공에 의한 CFRP 절단 특성에 대한 탄소 섬유의 방향 및 나선 각도의 영향에 대한 연구를 수행했으며, 3D 프린터로 제작한 복합소재의 가공 방향에 따른 가공실험을 수행하여 가공 특성을 분석하였다. 또한 가공 조건 선정을 위해 PCA방식을 이용한 머신러닝을 개발하고 가공실험한 결과와 비교하여 최적의 가공조건을 선정하였다.

2. 실험 장치 및 실험 방법

2.1 복합 소재

본 연구에서는 복합재 전용 3D 프린터를 사용하여 시편을 제작하였다. Fig. 1은 본 연구에서 사용한 Markforged사의 Mark two 3D 프린터를 나타낸다.

실험에 사용된 소재는 마이크로 탄소섬유로 채워진 나일론의 일종인 Onyx 소재와 탄소섬유가 한 층씩 적층된 구조이다. Onyx 소재는 ABS보다 1.4배 더 강하고 단단하며 표면마감, 내화학성, 내열성이 우수한 소재이다. 탄소섬유는 강화 섬유중 가장 높은 강도 대비 중량 비율을 가지고 있으며 Onyx 소재보다 강성이 6배 더 강한 소재이다. 시편 형상은 가로 40 mm, 세로 40 mm, 높이 15 mm이고, Onyx 소재와 탄소섬유를 각각 0.125 mm 씩 적층하였으며, Fig. 2와 같이 나타내었다. Table 1은 Onyx 소재와 탄소섬유의 물성치를 나타낸다.



Fig. 1 3D printer for composite materials

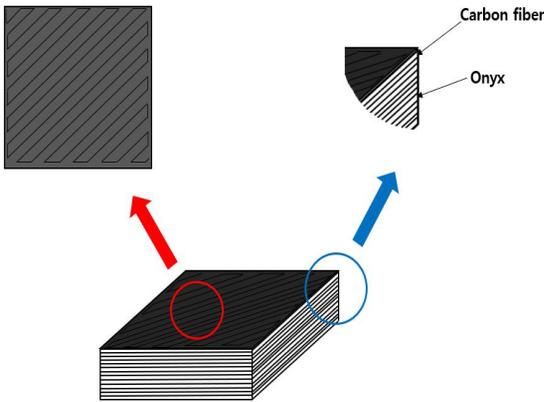


Fig. 2 Schematic diagram of the test specimen

Table 1 Material composites

Properties	Onyx	Carbon
Tensile Strength (MPa)	-	800
Tensile Modulus (GPa)	2.4	60
Tensile Stress at Yield (MPa)	40	-
Tensile Strain at Break (%)	25	1.5
Compressive Strength (MPa)	-	420
Compressive Modulus (MPa)	-	62
Heat Deflection Temp (°C)	145	105
Density (g/cm ³)	1.2	1.2

2.2 실험 장치 구성

Fig. 3은 3D 프린터로 제작한 복합소재를 가공하기 위한 장비를 나타낸다. 가공을 위해 5축 킬팅 테이블 머신링센터는 현대 WIA의 HI-V560 장비를 사용하였다. 본 연구에서 절삭력을 측정하기 위해 Kistler 사의 9527B 공구동력계를 사용하였다.

또한 절삭력을 실시간으로 모니터링하기 위해서 다채널 증폭기(Multi-Channel Amplifier)를 통해 데이터 수집장치(Data Acquisition)에서 연결된 컴퓨터를 통해 모니터링이 가능한 시스템을 구축하였다.

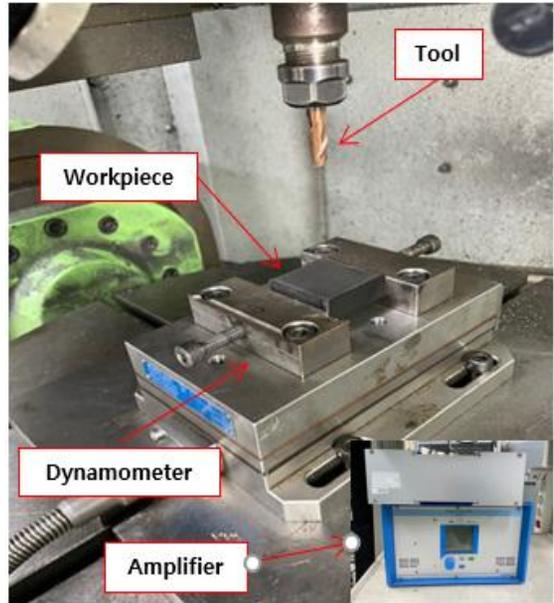


Fig. 3 Experimental set-up

2.3 가공 조건

Table 2에는 복합소재를 가공하기 위한 가공조건을 나타내었다. 스피들의 회전 속도는 6,000, 8,000, 10,000rpm 3가지 조건, 이송 속도는 30, 40, 50mm/min 3가지 조건, 시편에 대한 절삭 깊이는 0.5, 1.0mm 2가지 조건을 변수로 정하고 실험을 진행하였다. 가공 방향은 Starting point에서 +x (0°) 방향으로 30mm, 첫 번째 가공이 끝난 지점에서 +y (90°) 방향으로 30mm, 두 번째 가공이 끝난 지점에서 Start point (45°)까지 가공 순서를 정하여 가공하였으며 Fig. 4와 같이 가공경로를 구성하였다. 가공방향은 3D 프린터로 제작한 복합소재의 섬유배향각(Fiber stacking angle)에 따른 특성을 확인하기 위해 가공 조건에 포함하였다.

본 연구에서 사용한 공구는 WIDIN 사의 ZE712080 공구를 사용하였으며 공구는 Fig. 5와 같이 나타내었다. 절삭 공구는 2날형 AlTiN HH 고경도 고속가공용 35°헬릭스 엔드밀이다. 직경은 8mm, 길이는 60mm, 밑날은 2, 비틀림 각은 35°, 재질은 초미립자 초경합금 UWC(Ultra Fine)소재, 코팅은 AlTiN HH 처리가 되어있다.

Table 2 Machining conditions

Properties	Level
Spindle speed (rpm)	6,000, 8,000, 10,000
Feed rate (mm/min)	30, 40, 50
Depth of cut (mm)	0.5, 1.0
Machining direction (°)	0, 45, 90

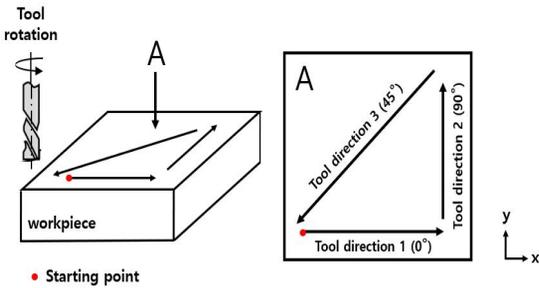


Fig. 4 Machining direction



Fig. 5 Machining Tool

3. 가공 조건 선정을 위한 머신러닝 개발

3.1 PCA(Principal Component Analysis) 방법

PCA(Principal component analysis)는 다양한 분야의 패턴 인식에서 대표적으로 차원 축소를 위해 이용되는 다변량 통계 분석 방법이다. 데이터의 분산을 최대한 보존하기 위해 표본 데이터의 분산이 최대가 되는 축을 찾아, 고차원 공간의 표본들을 선형 연관성이 없는 저차원 공간으로 변환해주는 역할을 한다. 이 때, 새로운 차원에서의 기저 벡터를 주성분(Principal components)이라고 한다. 차원 축소가 이루어지는 과정에서 데이터

에 포함된 잡음 또한 제거할 수 있어, PCA의 결과값을 학습모델의 특징으로 선택할 경우 표본 데이터를 그대로 모델에 학습하는 것에 비해 노이즈 제거, 연산량 감소의 효과를 얻을 수 있다. 따라서 PCA를 이용해 절삭력의 특징 벡터가 표현하고 있던 분산을 최대화하는 방향으로 특징 공간을 선형 사영하여 차원을 줄인다. 분산을 이용하여 고유값과 특징 벡터를 구한다. 고유값들의 크기 순서대로 나열하여 이에 해당하는 2가지 차원의 특징 벡터를 추출한다. 누적 기여율(누적 분산)이 전체 고유값 합 99%를 차지하는 2개를 선택한다^[8].

3.2 데이터 수집

Fig. 6은 PCA방법의 개념도를 나타낸다. 가공 실험 조건은 스펀들의 회전속도, 이송속도, 절삭깊이, 가공 방향 4가지로 선정하였다. 실험 데이터로 PCA를 하기 전 데이터 표준화 과정을 추가로 거치도록 하였다. 데이터 표준화는 큰 값을 가지는 특징에 의해 학습결과가 왜곡되는 것을 방지하기 위한 목적으로 사용하였으며, 평균을 0으로 갖고 표준편차를 1로 하는 StandardScaler 방식을 사용하였다. PCA를 통해 4차원 데이터를 Principal component 1과 Principal component 2로 구성된 2차원 데이터로 축소하여 Table 3와 같이 정리하였다. 축소된 2가지 조건에 따라 가공 실험을 진행하고 절삭력 데이터를 수집하였다. Fig. 7은 StandardScaler 방식을 사용하여 4가지 가공조건을 2차원 데이터로 변환하는 코드를 나타낸다.

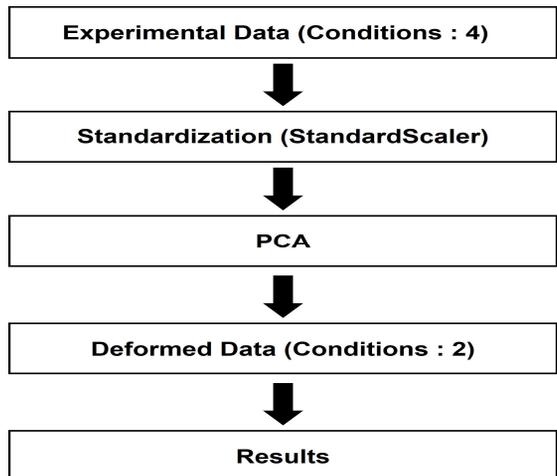


Fig. 6 PCA concept diagram

Table 3 Results of data reduction

No.	Principle component 1	Principle component 2
1	1.224745	2.005445e-16
2	0	3.622638e-16
3	-1.224745	3.622638e-16
⋮	⋮	⋮
52	1.224745	-1.160611e-16
53	0	-2.180416e-16
54	-1.224745	-2.180416e-16

Table 4 Cutting force by machining conditions

Exp. No.	Spindle speed (rpm)	Feed rate (mm/min)	Depth of cut (mm)	Machining direction (°)	Cutting force (N)
1	6,000	30	0.5	0	4.615
2	6,000	30	0.5	45	4.216
3	6,000	30	0.5	90	5.481
4	8,000	30	0.5	0	3.549
5	8,000	30	0.5	45	2.859
6	8,000	30	0.5	90	3.152
7	10,000	30	0.5	0	2.563
8	10,000	30	0.5	45	3.101
9	10,000	30	0.5	90	3.431
10	6,000	40	0.5	0	2.795
11	6,000	40	0.5	45	2.023
12	6,000	40	0.5	90	2.020
13	8,000	40	0.5	0	1.572
14	8,000	40	0.5	45	1.247
15	8,000	40	0.5	90	1.586
16	10,000	40	0.5	0	1.244
17	10,000	40	0.5	45	1.007
18	10,000	40	0.5	90	1.810
19	6,000	50	0.5	0	3.364
20	6,000	50	0.5	45	2.636
21	6,000	50	0.5	90	2.666
22	8,000	50	0.5	0	2.016
23	8,000	50	0.5	45	1.968
24	8,000	50	0.5	90	2.129
25	10,000	50	0.5	0	1.619
26	10,000	50	0.5	45	1.593
27	10,000	50	0.5	90	2.230
28	6,000	30	1.0	0	3.178
29	6,000	30	1.0	45	2.907
30	6,000	30	1.0	90	2.540
31	8,000	30	1.0	0	2.360
32	8,000	30	1.0	45	2.324
33	8,000	30	1.0	90	2.530
34	10,000	30	1.0	0	2.981
35	10,000	30	1.0	45	2.455
36	10,000	30	1.0	90	2.351
37	6,000	40	1.0	0	3.219
38	6,000	40	1.0	45	2.627
39	6,000	40	1.0	90	1.898
40	8,000	40	1.0	0	2.583
41	8,000	40	1.0	45	2.670
42	8,000	40	1.0	90	2.572
43	10,000	40	1.0	0	2.670
44	10,000	40	1.0	45	3.311
45	10,000	40	1.0	90	3.072
46	6,000	50	1.0	0	3.494
47	6,000	50	1.0	45	3.446
48	6,000	50	1.0	90	4.775
49	8,000	50	1.0	0	3.937
50	8,000	50	1.0	45	3.029
51	8,000	50	1.0	90	2.972
52	10,000	50	1.0	0	2.813
53	10,000	50	1.0	45	3.121
54	10,000	50	1.0	90	3.318

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 가공 실험

절삭력을 분석하기 위해 가공경로, 절삭깊이, 이송속도, 스핀들의 회전속도 4가지 가공조건에 대한 절삭력의 크기를 Table 4에 나타내었다. 각 조건들 중 17번 조건인 가공경로 45°, 절삭깊이 0.5mm, 이송속도 40mm/min, 스핀들의 회전속도 10,000rpm 일 때의 절삭력이 가장 낮게 측정되었으며 최대 82%가 개선됨을 확인하였다. 그리고 16번 조건인 가공경로 0°, 절삭깊이 0.5mm, 이송속도 40mm/min, 스핀들의 회전속도 10,000rpm일 때, 14번 조건인 가공경로 45°, 절삭깊이 0.5mm, 이송속도 40mm/min, 스핀들의 회전속도 8,000rpm일 때 순서로 절삭력이 낮게 측정되었으며, 낮게 측정된 조건 3가지를 Fig. 8에 막대 그래프 형식으로 나타내었다. Fig. 9은 절삭력이 낮게 측정된 조건 3가지(14번, 16번, 17번)로 가공한 시편을 나타낸다.

```
In [5]: 1 from sklearn.preprocessing import StandardScaler
        2 x = StandardScaler().fit_transform(x)

In [6]: 1 from sklearn.decomposition import PCA
        2 pca = PCA(n_components=2)
        3 principalComponents = pca.fit_transform(x)
        4 principalDF = pd.DataFrame(data = principalComponents, columns = ['principal component 1', 'principal component 2'])
```

Fig. 7 StandardScaler and PCA code

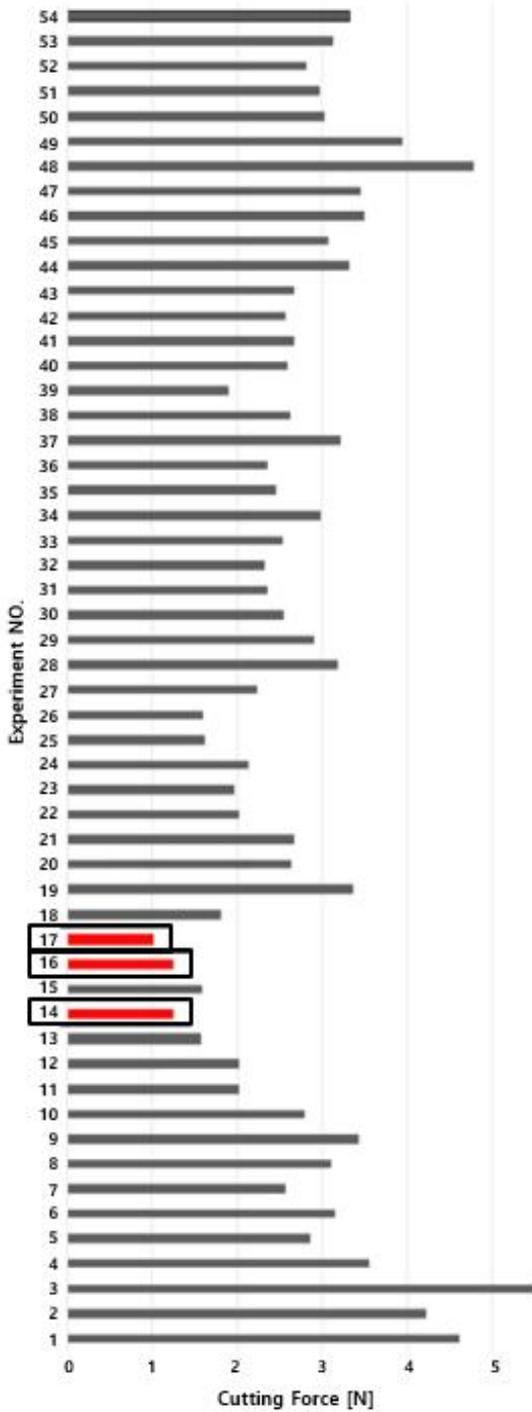


Fig. 8 Results of machining experiment

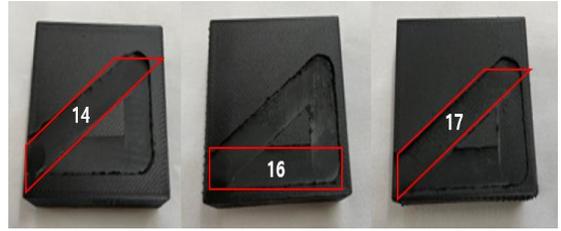


Fig. 9 Experimental results according to optimal conditions

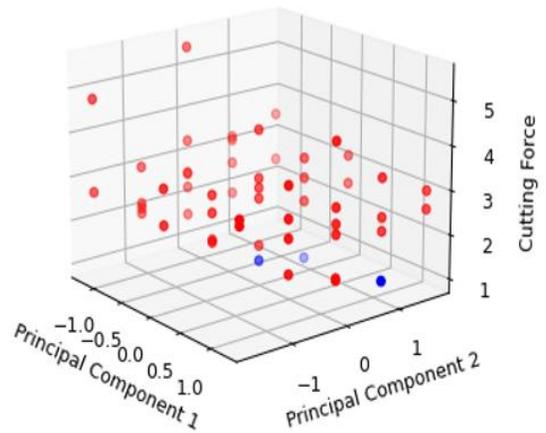


Fig. 10 3D-plot visualization

4.2 머신러닝을 활용한 조건 선정

Fig. 10은 4가지 가공 조건을 PCA로 Principal component 1과 Principal component 2로 구성된 2차원 데이터로 축소하여 얻은 절삭력을 3D 그래프로 시각화하여 나타내었다. 총 54번의 실험결과를 절삭력이 1.5N 미만인 조건을 제시하여 조건에 부합하면 True 값을 부여하고 파란색 원으로 표시였으며, 조건에 부합하지 않으면 False 값을 부여하고 빨간색 원으로 표시하였다.

총 54개 조건들 중 14, 16, 17번 조건의 절삭력이 1.5 N 미만이었고, 상기 4.1에서 시행한 가공 실험 결과와 같은 결과를 확인하였다. 따라서 14, 16, 17번 조건 중 가장 절삭력이 낮은 17번 조건인 가공경로 45°, 절삭 깊이가 0.5mm, 이송 속도 40mm/min, 스피들의 회전속도 10,000rpm일 때를 최적 가공조건으로 선정하여 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 결론

3D 프린터로 제작한 복합소재의 절삭력 및 박리 현상을 분석하기 위해 4가지 조건에 따라 가공 실험 진행 및 가공 조건 선정을 위한 머신러닝을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 3D 프린터로 Onyx 소재와 탄소섬유를 적층하여 기계적 성능이 우수한 복합소재를 제작하였다. 절삭력을 측정하기 위해 적절한 가공장비를 구축하였으며 가공에 적절한 가공조건을 선정하였다.
2. 머신러닝 방법 중 PCA방법을 통해 4차원 데이터를 2차원 데이터로 가공하고, 절삭력을 측정하였다. 가공조건 중 가공경로 45°, 절삭깊이 0.5mm, 이송속도 40mm/min, 스피들의 회전속도 10,000rpm일 때의 절삭력이 가장 크게 감소하였다.
3. 가공 실험을 통해 얻은 최적 가공조건과 머신러닝을 통해 얻은 최적 가공조건이 동일함을 확인하였다. 이를 바탕으로 절삭력이 가장 낮은 최적 가공 조건을 선정하였다.

본 연구에서 제시한 방법으로 향후 목적변수가 절삭력 및 다른 특성치가 포함되고 기존 실험 개수보다 더 많은 가공 실험의 경우에도 훨씬 더 효율적으로 활용될 것으로 판단된다.

후 기

“이 논문은 2021~2022년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.”

REFERENCES

1. Kim, M. S., Lee, M. K., Cho, G. H. and Lee, S. K., “Effect of the Fiber Orientation and the Radial Depth of Cut on the Flank Wear in the Milling of CFRP,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 21, pp. 1187-1199, 2020.
2. Sa, M. W., “Comparison Study on Side Milling of CFRP with AlCrN-based, Diamond-Like-Carbon(DLC), and Diamond-Coated End Mill,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, pp. 9-15, 2020.
3. Choi, M. S., “Statistical Analysis of Cutting Force for End Milling with Different Cutting Tool Materials,” *Journal of the Semiconductor & Display Technology*, Vol. 15, pp. 86-91, 2016.
4. He, Y. L., Qing, H. A., Zhang, S. G., Wang, D. Z., and Zhu, S. W., “The cutting force and defect analysis in milling of carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) composite,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 93, pp. 1829-1842, 2017.
5. Halim, N. F. H. A., Ascroft, H. and Barnes, S., “Analysis of Tool Wear, Cutting Force, Surface Roughness and Machining Temperature During Finishing Operation of Ultrasonic Assisted Milling (UAM) of Carbon Fiber Reinforced Plastic (CFRP),” *Procedia Engineering*, Vol. 184, pp.185-191, 2017.
6. Ekoi, E. J., Dickson, A. N., Dowling, D. P., “Investigating the fatigue and mechanical behavior of 3D printed woven and nonwoven continuous carbon fiber reinforced polymer(CFRP) composites,” *Composites Part B: Engineering*, Vol. 212, No. 1, 2021.
7. Hagino, M. and Inoue, T., “Effect of Carbon Fiber Orientation and Helix Angle on CFRP Cutting Characteristics by End-milling,” *International Journal of Automation Technology*, Vol. 7, No. 3, pp. 292-299, 2013.
8. Yoo, Y. S., Kim, D. H., Kim, S. and Hur, J. W., “Fault Prognostics of a SMPS based on PCA-SVM,” *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 19, No. 9, pp. 47-52, 2020.