한국기계가공학회지, 제19권, 제6호, pp.73～79(2020.06) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 6, pp.73~79(2020.06) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.06.073

엔지니어링 플라스틱의 CNC 선반가공에서 공정변수 특성 및 표면거칠기 예측

이정희*, 엄성진**, 곽재섭*,#

*부경대학교 기계공학과, **부산직업능력개발원

The Process Factor Characteristics and Surface Roughness Prediction of Engineering Plastics in CNC Turning

Jung-Hee Lee*, Seong-Jin Eom**, Gil-Dong Kwak*,#

*School of Mechanical Engineering, Pukyong National UNIV.,

**Busan Vocational Competency Development Center

(Received 16 March 2020; received in revised form 2 April 2020; accepted 11 May 2020)

ABSTRACT

Although engineering plastics that are light-weight and have excellent mechanical performance have been widely applied in various industries in place of steel structures to reduce the burden of cost and time, there have been few studies related to their surface roughness. This study aims to evaluate the optimal effects of feed rate, cutting speed, and depth of cut as cutting parameters as well as nose angle on the surface characteristics of MC nylon in CNC lathe machining. To determine the best conditions under different nose radii, the experiments were performed based on the Taguchi L9(34) orthogonal array method, in which the resulting data was analyzed using the S/N ratio and ANOVA. Results indicate that the most significant contribution was feed rate followed by nose angle and cutting speed, whereas the depth of cut did not influence the performance. This study demonstrates that the suggested method for improving the surface finishing of MC nylon is efficient compared with results obtained from experimentation and prediction.

Key Words : Engineering Plastic(엔지니어링 플라스틱), MC nylon(MC 나일론), CNC Lathe Machining(CNC 선반가공), Surface Characteristic(표면 특성), Prediction(예측)

1. 서 론

범용 플라스틱은 금속 소재에 비하여 우수한 전기절연성, 성형가공성, 경량성을 바탕으로 반도체, 전기, 전자, 자동차 분야 등 다양한 산업분야에 적용되고 있지만, 기계적 강도와 내열성이 부족하여 사용 범위가 제한적이다[1].

엔지니어링 플라스틱은 일반적인 플라스틱 소재의 단점을 보완하여 개발되어진 소재로서 강성, 자기윤활성 및 경제성이 뛰어나다. 이 중 가장 널리 사용되는 MC 나일론은 인장강도, 내마모성, 내열성이 우수하여 고온 및 고속 회전에서 연속사용 가능하므로 절삭가공을 이용하여 부싱, 롤러, 베어링, 기어 등 금속의 대체제로 각종 기계요소

Corresponding Author : jskwak5@pknu.ac.kr
Tel: +82-51-629-6139, Fax: +82-51-629-6126

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에 활용되고 있다[2,3]. 따라서 절삭가공을 통한 제품의 표면정도는 강도, 마멸, 소음, 진동 등 기계적 특성 및 제품의 치수정밀도에 영향을 미치는 중요한 요인이다. 지금까지 많은 연구들이 비철금속을 이용하여 선삭가공을 수행할 때 다수의 공정조건이 표면거칠기에 미치는 영향을 평가하였지만, 고부가 소재인 엔지니어링 플라스틱에 대한 연구는 미흡한 단계이다[4-6].

본 연구에서는 MC901 소재를 이용하여 선삭가공 시 공정변수의 변화가 표면거칠기에 미치는 영향을 다구찌 $L_9(3^4)$ 직교배열법을 이용하여 실험을 계획하고 S/N비와 ANOVA분석을 통하여 각 인자의 영향도를 평가하고자 한다. 또한 본 연구의 신뢰성을 검증하기 위하여 임의의 조건에서 S/N비를 바탕으로 도출된 표면거칠기 추정값과 실제 선삭가공을 수행하여 측정된 표면거칠기 값을 비교 분석하였다.

2. 실험장치 및 조건

2.1 실험대상 및 장치

본 연구에서는 엔지니어링 플라스틱 중 가장 일반적으로 사용되고 있는 나일론 계열의 MC901 환봉을 이용하여 절삭가공을 수행하고자 한다. 가공 시 환봉의 길이로 인해 발생하는 떨림을 최소화하고자 치수를 ∅50×50mm로 선정하였다.

Fig. 1은 선삭가공 후 시편의 최종 형상을 나타낸 것으로 CNC 선반(Cutex-160A, Hwacheon)을 이용하여 외경가공을 수행하였다. 사용된 CNC선반의 주축 회전수는 최고 6,000rpm이고 공구 이송속도는 36m/min이다.

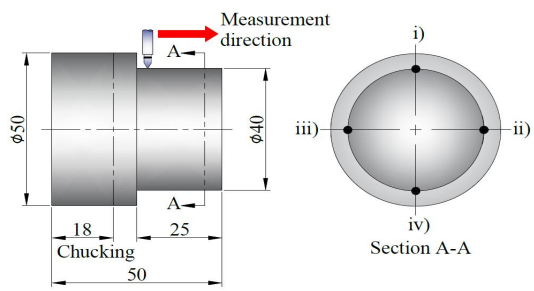

Fig. 1 Product shape and measurement method

가공 후 표면거칠기 측정기(SJ-301, Mitutoyo)를 이용하여 중심선 평균거칠기(R_a)를 측정함으로써 시편의 표면정도를 평가하였다. Cut-off length와 sampling length의 기준은 JIS-1994에 따라 각각 0.8mm과 4.0mm로 설정하였다. 신뢰성 확보를 위하여 표면거칠기 측정 위치를 Fig. 1에 도시한 바와 같이 90° 각도를 기준으로 4부분으로 나누고 총 4회 측정하여 평균값을 취하였다.

2.2 실험인자 및 조건

선삭가공 시 MC901의 표면거칠기에 영향을 미치는 공정인자는 다양하지만 본 연구에서는 가공 시 제어 가능한 인자인 절삭속도, 이송률, 절삭깊이와 절삭공구의 노즈각도를 기본 공정변수로 선정하여 실험을 수행하였다.

Table 1은 본 연구에 적용된 공정인자 및 수준을 나타낸 것으로 절삭속도는 100, 200, 300m/min, 이송률의 수준은 0.05, 0.1, 0.2mm/rev, 절삭깊이는 0.1, 0.5, 1.0mm로 선정하였다. 또한 절삭공구의 형상은 표면정도에 중요한 영향을 미치는 인자 중 하나이므로 표면정도 향상을 위해 적절한 인자 및 수준 선정이 중요하다. 따라서 본 연구에 적용되는 인서트는 알루미늄 및 비철금속에 적합한 초경재질의 인서트로 제조사는 대구텍이다. 기초 연구를 바탕으로 가공 시 공구의 경사각이 클수록 표면거칠기가 향상되었으므로, 본 연구에서는 경사각 가장 큰 20°의 공구를 이용하여 실험을 수행하였다. 공구 형상에 따른 표면거칠기 값을 비교하기 위하여 노즈각도를 35°, 60°, 80°(CCGT120404/08, TCGT16T304/08, VCGT160404/08, DaeguTec)로 선정하고, 각 노즈각도에 적합한 공구홀더(SVJBR-2525-M16, STGCR-2525-M16, SCLCR-2525

Table 1 Experimental factors and levels

Factors	Levels		
	1	2	3
Cutting speed(m/min), A	100	200	300
Feed rate(mm/rev), B	0.05	0.1	0.2
Depth of cut(mm), C	0.1	0.5	1.0
Nose angle(°), D	35	60	80

-M12, DaeguTec)를 사용하였다. Fig. 2는 본 연구에 사용된 공구 및 공구홀더를 나타낸 것이다.

또한 각 가공조건에서 노즈반경에 따른 표면거칠기 향상 정도를 계측을 위하여 상기 기술된 절삭공구와 동일한 조건으로 노즈반경이 0.4mm인 공구와 0.8mm인 공구를 선정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 공정변수에 따른 표면거칠기

본 연구에서는 선정된 공정인자와 수준을 바탕으로 두 개의 각기 다른 노즐반경을 가지는 초경 절삭공구를 이용하여 선삭가공 시 엔지니어링 플라스틱인 MC901의 표면정도에 미치는 영향을 분석하였다. 전체 실험횟수를 줄이고 선정된 공정인자 및 수준이 실험결과에 미치는 영향을 효과적으로 평가하기 위하여 다구찌 실험계획법을 활용하여 Table 2와 같이 $L_9(3^4)$ 직교배열표를 작성하였다. 실험순서는 랜덤하게 총 9회 실시하였고 선정된 가공조건에서 노즈반경 0.4mm일 때와 0.8mm일 때의 표면거칠기 값 R_a를 측정하였다.

(a) Insert with nose angle 35° with holder

(b) Insert with nose angle 60° with holder

(c) Insert with nose angle 80° with holder

Fig. 2 Shape of inserts and insert holders

Table 2 Taguchi's $L_9(3^4)$ orthogonal array table

Exp. no.	Levels			
	A	B	C	D
1	100	0.05	0.1	35
2	100	0.1	0.5	60
3	100	0.2	1.0	80
4	200	0.05	0.5	80
5	200	0.1	1.0	35
6	200	0.2	0.1	60
7	300	0.05	1.0	60
8	300	0.1	0.1	80
9	300	0.2	0.5	35

직교배열표를 바탕으로 구성된 실험조건에 따라 실험 후 측정된 R_a를 평가하기 위하여 S/N ratio를 사용하여 표면정도에 긍정적인 조건과 부정적인 조건을 평가하였다. 본 연구에서는 표면거칠기 값이 작을수록 표면정도가 좋음을 나타내므로 식 (1)과 같이 망소특성을 이용하여 선삭가공 후 표면거칠기를 분석하였다.

$$S/N\ ratio = -10\log_{10}\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} y_i^2\right) \qquad (1)$$

여기서, n은 실험횟수, y는 실험에서 얻어진 표면거칠기 값을 의미한다.

Table 3은 각각 다른 노즈반경을 가진 절삭공구를 이용하여 MC901을 가공한 후 측정된 평균 표면거칠기 값과 이를 토대로 망소특성을 적용하여 산출된 S/N비를 나타낸 것이다. 다구찌 실험계획법에 따라 계획된 공정인자와 수준의 조합을 바탕으로 실험을 수행한 결과, 각각 다른 노즈반경 0.4mm와 0.8mm일 때 표면거칠기 R_a값의 범위는 각각 0.31-3.60㎛와 0.28-1.79㎛이다. 측정된 R_a를 기준으로 노즈반경에 따른 S/N비를 분석하면, 두 조건 모두 동일한 가공조건인 1번 실험($A_1B_1C_1D_1$)에서 가장 높은 S/N비를 나타냄을 알 수 있었다. 즉 절삭속도가 100m/min, 이송률이 0.05mm/rev, 절삭깊이 0.1mm, 노즈각도가 35°일 때, 다른 가공조건에 비하여 표면조도 향상에 큰 영향을 미쳤음을 확인 할 수 있었다. 반면에 음의 값을 취하는 3번, 6

Table 3 Experimental results and S/N ratio

Exp. no.	R_a(㎛)		S/N ratio	
	0.4mm	0.8mm	0.4mm	0.8mm
1	0.31	0.28	10.24	11.21
2	0.82	0.6	1.75	4.44
3	3.6	1.79	-11.13	-5.03
4	0.48	0.32	6.38	9.83
5	0.72	0.44	2.88	7.13
6	3.28	1.52	-10.31	-3.65
7	0.38	0.36	8.46	8.81
8	1.14	0.62	-1.12	4.22
9	2.98	1.49	-9.49	-3.43

번, 9번의 실험조건은 실험시편의 표면가공을 저해하는 것으로 판단할 수 있었다.

산출된 S/N비를 이용하여 각각의 공정인자가 서로 다른 수준에서 엔지니어링 플라스틱의 표면정도에 미치는 영향력, 공정인자별 영향력의 차이, 기여율을 분석하였다. 분석 결과, 노즈반경과 무관하게 3수준에서 영향력 차이가 가장 크게 나타난 이송률(인자 B)이 표면거칠기 값에 가장 민감하였고 기여율이 약 80%임을 확인 할 수 있었다. Fig. 3은 각 수준에서 이송률에 따른 S/N비를 나타낸 것으로 이송률이 낮을수록 표면정도가 향상됨을 알 수 있었다. 이는 이송률이 높을수록 절삭력을 증대함으로써 절삭공구가 마모되고 표면거칠기에 영향을 주는 것으로 판단할 수 있었다.

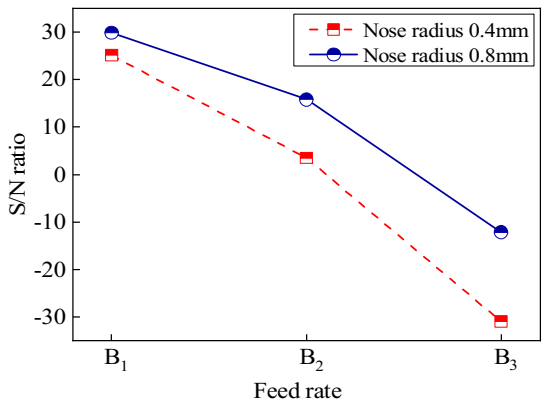

Fig. 3 Effects of feed rate on surface roughness

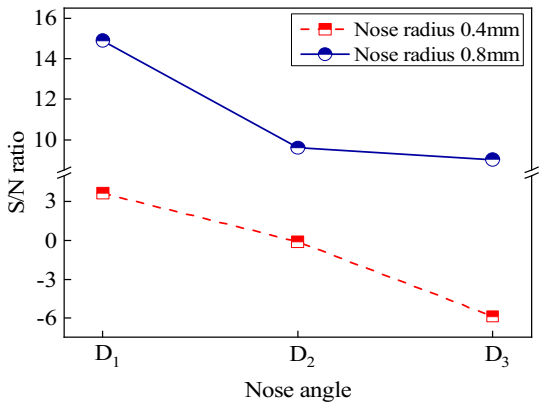

Fig. 4 Effects of nose angle on surface roughness

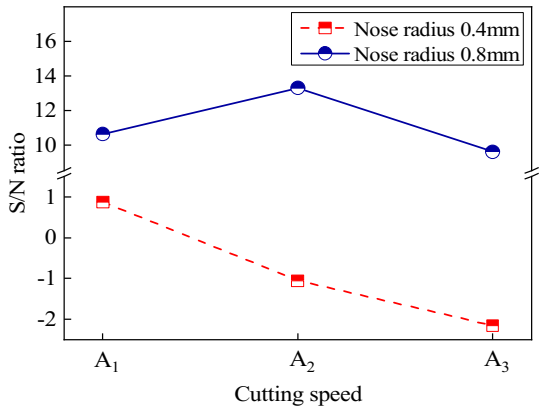

Fig. 5 Effects of cutting speed on surface roughness

Fig. 4는 노즈각도(인자 D)의 변화에 따른 표면조도 값을 나타낸 것으로 인자의 기여율은 노즈반경이 0.4mm일 때 약 13.6%이고, 노즈반경이 0.8mm일 때 약 11.2%임을 알 수 있었다. 표면거칠기 값 측정결과, 이송률과 동일한 경향으로 노즈각도가 낮을 때 표면조도가 향상됨을 확인할 수 있었다.

Fig. 5는 절삭속도(인자 A)에 대해 각 수준에 대한 S/N를 나타낸 것이다. 노즈반경이 0.8mm 일 때, 절삭속도와 표면향상 정도는 일정수준까지 비례함을 나타내지만 속도가 증가할수록 표면이 거칠어짐을 확인할 수 있었다. 이는 절삭속도에 따른 주축 회전수 증가로 인하여 절삭공구의 진동이 발생함으로써 표면가공을 저해하는 것으로 판단할 수 있었

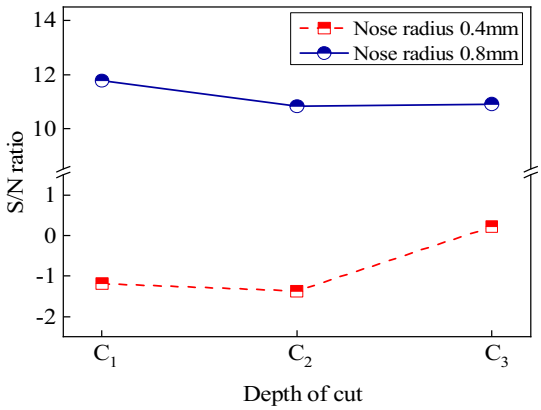

Fig. 6 Effects of depth of cut on surface roughness

다. 반면 노즈반경이 0.4mm 일 때는 절삭속도와 표면거칠기가 반비례 관계임을 확인 할 수 있었다.

이송률, 노즈각도, 절삭속도와 같은 공정인자에서는 수준에 따른 표면정도의 값을 예측할 수 있었지만 절삭깊이(인자 C)는 선삭가공에서 엔지니어링 플라스틱의 표면거칠기에 영향을 미치는 인자로 보기 어려웠다. Fig. 6은 절삭깊이에 따른 표면거칠기 S/N비를 나타낸 것으로, 두 노즈반경 모두 각 수준에서의 S/N비의 차이가 미비함을 알 수 있었다. 따라서 절삭깊이을 D_1수준으로 표준화하면 노즈반경이 0.4mm일 때 표면정도 향상에 영향을 미치는 최적조건은 $A_1B_1C_1D_1$이고, 0.8mm일 때 최적조건은 $A_2B_1C_1D_1$임을 알 수 있다.

각 공정인자의 수준에 따른 S/N비 분석결과, 공정인자에 관계없이 노즈반경이 큰 0.8mm 일 때 표면거칠기 R_a가 감소함을 확인할 수 있었다. 이는 표면거칠기 값이 노즈반경에 반비례하는 일반적인 이론에 본 연구도 만족됨을 알 수 있었다.

Table 5는 노즈반경이 0.4mm일 때 각 인자들이 특성치에 미치는 영향을 평가하기 위한 분산분석표이다. 가장 영향력이 작은 절삭깊이(인자 C)를 오차항 E로 풀링하였다. 이송률(인자 B)과 노즈각도 (인자 D)의 검정통계량 F_0값이 각각 1,058.84과 30.43으로 유의수준 α=0.01에서 기각치 99와 α=0.05에서 기각치 19보다 크기 때문에 이송률의 유의수준이 99%, 노즈각도의 유의수준이 95% 신뢰수준 범위 내 있음을 알 수 있었다. 따라서 분산분석

Table 5 ANOVA for surface roughness at 0.4mm

	SS	DOF	V	F_0
A	1.55	2	0.78	3.09
B	532.04	2	266.02	1,058.84**
C	0.50	2	0.25	-
D	15.29	2	7.64	30.43*
E	(0.50)	(2)	(0.25)	-
Total	549.382	8	-	-

Table 6 ANOVA for surface roughness at 0.8mm

	SS	DOF	V	F_0
A	2.45	2	1.22	13.14
B	304.30	2	152.15	1,634.14**
C	0.19	2	0.09	-
D	7.03	2	3.51	37.73*
E	(0.19)	(2)	0.09	-
Total	313.96	8	-	-

* 95% of confidential level

** 99% of confidential level

및 F-검증을 바탕으로 표면거칠기 감소에 이송률과 노즈각도가 영향을 미치는 것으로 판단 할 수 있었다. 노즈반경이 0.8mm일 때의 분산분석표는 Table 6과 같으며, 노즈반경이 0.4mm일 때와 유사한 경향을 보임을 확인할 수 있었다. 절삭깊이(인자 C)를 오차항 E로 풀링하고 분산분석을 수행한 결과, 이송률(인자 B)의 검정통계량 F_0값이 1,634.14으로 유의수준 α=0.01에서 기각치 99보다 크기 때문에 귀무가설 H_0를 기각할 수 있다. 따라서 이송률은 유의수준 1%로 표면거칠기 향상에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다. 또한 노즈반경(인자 D)과 절삭속도(인자 A)는 검정통계량 F_0값이 각각 37.73과 13.14로 유의수준 α=0.05에서 기각치 19와 α=0.10에서 기각치 9보다 크기 때문에 노즈반경의 유의수준이 95%, 절삭속도의 유의수준이 90% 신뢰수준 범위 내 있음을 알 수 있었다.

3.2 표면거칠기 예측 및 검증실험

본 연구의 신뢰성을 향상을 위하여 각 노즈반경별 무작위로 가공조건을 선정하여 아래 식 (2)를 기준으로 추정 R_a를 산출하고 실제 선삭가공을

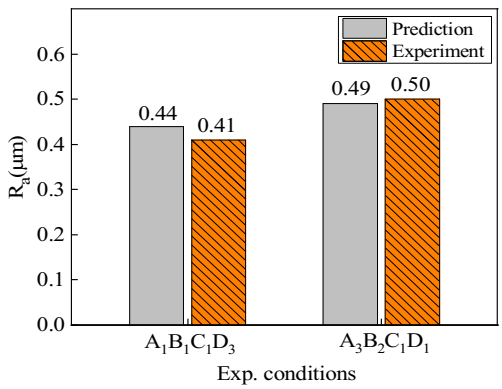

Fig. 7 Comparison to prediction and experiments

통해 R_a를 측정하여 비교하였다.

$$\hat{\mu}(A_1B_1C_1D_1) = \mu + \widehat{a_1 + b_1} + c_1 + d_1 \qquad (2)$$

Fig. 7은 각 노즈반경에 따른 추정 R_a와 실제 R_a를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 노즈반경이 0.4mm면서 $A_1B_1C_1D_3$일 때 추정 표면거칠기 값은 0.44㎛로 실제 실험을 통해 측정된 0.41㎛과 비교하여 오차율이 약 7.3%로 나타남을 알 수 있었다. 노즈반경이 0.8mm 인 경우, 선정된 가공조건은 $A_3B_2C_1D_1$으로 추정 R_a와 실험 데이터의 차이가 약 0.01㎛임을 알 수 있었다. 이는 약 2% 오차율로 실제 선삭가공과 실험계획법에 의해 산출된 S/N비를 통한 예측이 유사함을 확인 할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 고부가 소재인 엔지니어링 플라스틱 MC nylon에 대하여 각기 다른 노즈반경을 가지는 절삭공구를 이용하여 선삭가공 수행 시 가공조건의 변화가 표면거칠기에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 선삭가공 시 표면거칠기에 영향을 미치는 절삭속도, 이송률, 절삭깊이, 노즈각도를 공정인자로 선정하고 다구찌 실험계획법에 실험을 수행하여 각 인자별 특성 및 영향력을 분석하였다. 또한 추정 표면거칠기 값과 검증 실험을 통하여 계측된 표면거칠기 값을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 노즈반경 0.4mm와 0.8mm에 관계없이 절삭속도가 100m/min, 이송률이 0.05mm/rev, 절삭깊이 0.1mm, 노즈각도가 35°인 $A_1B_1C_1D_1$에서 표면정도가 가장 향상되었다. 각 노즈반경에서 측정된 표면거칠기 값 R_a는 각각 0.31㎛, 0.28㎛이다.
2. 엔지니어링 플라스틱의 선삭가공 시 표면거칠기에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 이송률, 노즈각도, 절삭속도 순이다. 절삭깊이는 표면거칠기의 변화에 유의한 인자가 아님을 알 수 있었다.
3. 동일한 가공조건에서 노즈반경에 따른 표면거칠기 값 비교 결과, 노즈반경이 클수록 표면정도 향상이 증대함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서도 노즈 반경이 0.8mm일 때 표면거칠기 값이 0.4mm 대비 작음을 확인 할 수 있었다.
4. 실험 검증을 위해 실험조건을 무작위로 선정하여 가공 한 후 표면거칠기 R_a를 측정하였다. 실제 실험과 추정 표면거칠기 값의 비교 결과 노즈반경이 0.4mm면서 $A_1B_1C_1D_3$일 때 정확도는 92.7%이고, 0.8mm면서 $A_3B_2C_1D_1$인 경우 약 98%의 정확도를 나타냄을 알 수 있었다.

후 기

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2017R1D1A1B03029639).

REFERENCES

1. Fu, S., Yu, B., Tang, W., Fan, M., Chen, F., and Fu, Q., “Mechanical Properties of Polypropylene Composites Reinforced by Hydrolyzed and Microfibrillated Kevlar Fibers,” Composites Science and Technology, Vol. 163, pp. 141-150, 2018.
2. Guo, S., Pu, S., Jing, Z., Wang, K., and Fu, Q., K. and Lee, S. H., “Exploitation of a Promising Flame-retardant Engineering Plastics by Molten Composited Polyketone and Diethyl Zinc

Phosphinate," Polymer for Advanced Technologies Vol. 30, No. 8, pp. 1978-1988, 2019.
3. Koffi, D., Bravo, A., Toubal, L., and Erchiqui, F., "Optimized Use of Cooling Holes to Decrease the Amount of Thermal Damage on a Plastic Gear Tooth," Advances in Mechanical Engineering, Vol. 8, No. 5, pp. 1-13, 2016.
4. Nee, C. Y., Saad, M. S., Nor, A. M, Zakaria, M. Z., and Baharudin, M. E., "Optimal Process Parameters for Minimizing the Surface Roughness in CNC Lathe Machining of Co28Cr6Mo Medical Alloy Using Differential Evolution," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 97, No. 1-4, pp. 1541-1555, 2018.
5. Mia, M., and Dhar, N. R., "Optimization of Surface Roughness and Cutting Temperature in High-pressure Coolant-assisted Hard Turning Using Taguchi Method," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 88, No.1-4 pp. 739-753, 2017.
6. Debnath, S., Reddy, M. M., and Yi, Q. S., "Influence of Cutting Fluid Conditions and Cutting Parameters on Surface Roughness and Tool Wear in Turning Process using Taguchi Method," Measurement, Vol. 78, pp. 111-119, 2016.