

# 비접촉식 표면연마를 통한 디버링 효과 향상에 관한 연구

이정희\*, 곽재섭\*<sup>#,</sup>

\*부경대학교 기계공학과

## A Study on Improving Deburring Efficiency Using Non-Contact Finishing Process

Jung-Hee Lee\*, Jae-Seob Kwak\*<sup>#,</sup>

\*School of Mechanical Engineering, Pukyong National UNIV.

(Received 13 October 2021; received in revised form 15 November 2021; accepted 10 December 2021)

### ABSTRACT

The surface status of a workpiece determines its functionality, product quality, and manufacturing costs. Thus, several finishing technologies have been widely investigated and applied to improve surface characteristics. In this study, rotational electro-magnetic abrasive finishing (REMAF) was suggested as a non-contact finishing process to achieve high geometric precision. To verify the effects of the REMAF process on burr removal on the surface of Al6061, experiments were conducted using the Taguchi method. Based on the experimental results analyzed by the S/N ratio and ANOVA, the optimal conditions were defined as  $A_3B_2C_3D_3$  that corresponded to 1,800 rpm of rotational speed, 1.5 kg of abrasive particle weight, 0.7 mm of abrasive diameter, and 15 min of working time. In addition, the particle weight was a key attribute for deburring, whereas the working time was less effective.

**Keywords :** Non-Contact Finishing Process(비접촉 마무리 공정), Rotational Electro-Magnetic Abrasive Finishing (회전전자기연마), Deburring Efficiency(버 제거 효율), Magnetized Abrasive particle(자화 연마입자)

## 1. 서 론

공작물의 표면정밀도는 제품의 신뢰성 및 생산성을 결정하는 중요한 요소이다. 각종 산업계에서 요구하는 표면의 고품질화, 가공의 고효율성 등의 조건을 만족하기 위하여 다양한 연마가공법이 적용되고 있다<sup>[1]</sup>. 최근 반도체, 생체의료, 우주항공 산업

요소로 사용되고 있고, 복잡한 형상을 가지는 초미세 부품의 수요가 급증함에 따라 목적에 맞게 유연하게 이용할 수 있는 새로운 연마가공 기술이 요구되고 있다<sup>[2, 3]</sup>.

고정된 공구를 사용하는 기존 연마공정은 편의성 및 경제성을 바탕으로 지금까지 산업계 전반에 걸쳐 활용되고 있지만, 공구의 유연한 제어, 제품의 크기, 형태 등에 제약이 따른다<sup>[4]</sup>.

기존의 고정적 연마방법이 가지는 단점을 극복하기 위하여 개발된 연마법 중 자기장의 분포와

# Corresponding Author : jskwak5@pknu.ac.kr

Tel: +82-51-629-6139, Fax: +82-51-629-6125

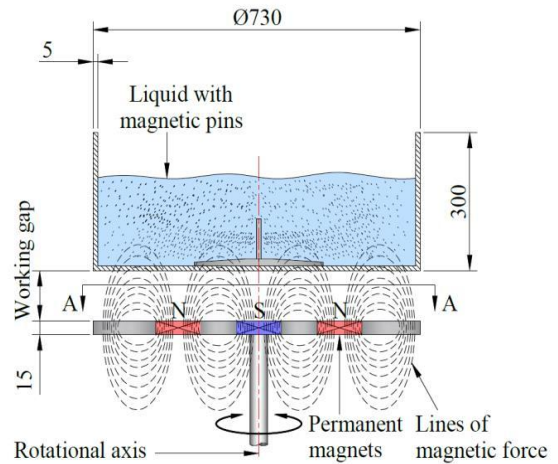
세기에 영향을 받는 자기연마(Magnetic abrasive finishing, MAF)는 표면에 작용하는 연마 힘을 조절할 수 있기 때문에 자유곡면을 가지는 제품의 표면품질 향상 및 형상오차 감소에 대한 이점을 가지고 있음이 다수의 연구를 통해 입증되었다<sup>[5-7]</sup>. 하지만 불균일한 자기력 분포를 가지는 대면적 곡면과 자화율이 낮은 비자성체에 대한 가공효율이 현저히 낮고, 자속밀도 분포의 편차로 인하여 불균일한 표면이 유발된다<sup>[8]</sup>. MAF 공정의 이점을 활용하고 문제점을 보완하기 위하여 자기에너지와 연마입자의 운동에너지를 활용한 비접촉식 연마공정의 일종인 회전 전자기연마(Rotational electro-magnetic abrasive finishing, REMAF) 방법이 제안되었으나 국내외 연구사례가 많지 않다<sup>9, 10)</sup>.

따라서 본 연구에서는 밀링가공으로 U채널 형상을 가지는 Al6061의 상부 표면에 발생된 버를 제거하기 위하여 REMAF를 활용하고자 한다. 또한 공정변수의 변화에 따른 디버링 효과를 분석하고 효율적인 Al6061 표면연마를 위한 공정조건을 제시하고자 한다.

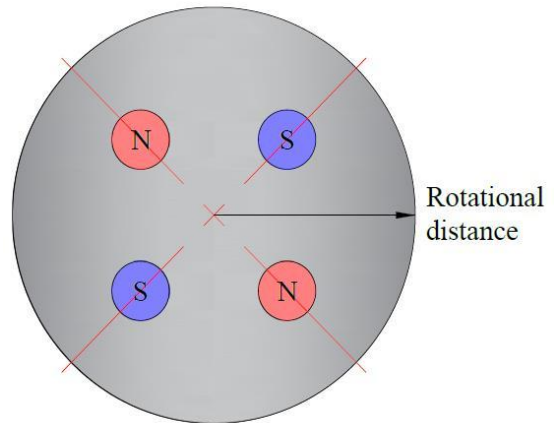
## 2. 회전전자기연마의 원리

REMAF 가공은 자성에너지를 이용한 MAF 가공과 연마입자의 운동에너지를 이용한 복합 마무리 공정으로 표면의 버 제거율, 평탄도, 잔류응력을 향상시키는 연마공정이다. 개략적인 장치의 구성은 Fig. 1(a)에 도시한 바와 같이 세 부분으로 구분된다. 실제 연마가공이 수행되는 원형수조, 자기력을 형성시키는 영구자석이 설치된 원판 형태의 자기 디스크, 연마입자의 운동에 영향을 주는 자기장을 변화시키기 위하여 자기 디스크의 회전 속도를 제어하는 제어부로 구성되어 있다.

제어부에 전원이 공급되면 AC모터가 Fig. 1(b)의 자기 원판 디스크를 회전시키고, 자기 디스크에 설치된 영구자석이 회전하면서 원형수조 내 자기장  $\vec{H}(\vec{r})$ 을 변화시킨다. 자기장의 변화로 연마입자는 자화되어 양 끝에 각기 다른 극성인  $+m$ 과  $-m$ 이



(a) Schematic equipment of non-contact finishing



(b) Magnetic disc(Section A-A)

Fig. 1 Operating principle of non-contact finishing

나타나고, 식 (1)과 같이 자기력  $\vec{F}_p$ 가 발생된다<sup>[11]</sup>. 발생된 자기력에 의해 연마입자는 원형수조의 원주 방향으로 공전운동을 하게 된다.

여기서  $\vec{r}$ 는 연마입자와 영구자석의 거리벡터를 나타내고,  $\vec{d}$ 는 연마입자의 양 끝에 형성된 극성  $+m$ 과  $-m$ 사이의 거리벡터를 의미한다.

만약,  $\vec{d}$ 가  $\vec{r}$ 보다 상대적으로 작다면, 식 (1)은 다음 식 (2)와 같이 표현된다<sup>[11]</sup>.

$$\vec{F}_p = m\vec{H}(\vec{r} + \vec{d}) - m\vec{H}(\vec{r}) \quad (1)$$

$$\vec{F}_p = m\vec{d} \cdot \nabla \vec{H} = \chi V \vec{H} \cdot \nabla \vec{H} \quad (2)$$

여기서  $V$ 는 연마입자의 부피,  $\bar{M}$ 는 자화세기,  $\chi$ 는 연마입자의 투자율을 나타낸다. 변화하는 자기장 내에서 양 끝단에 극성이 생긴 연마입자에는 식 (3)과 같이 우력모멘트  $\bar{T}_p$ 가 작용하여 자전운동이 발생된다<sup>[11]</sup>.

$$\begin{aligned} \bar{T}_p &= \frac{\bar{d}}{2} \times m\bar{H} - \frac{\bar{d}}{2} \times (-m\bar{H}) \\ &= m\bar{d} \times \nabla \bar{H} = \chi V \bar{H} \times \nabla \bar{H} \end{aligned} \quad (3)$$

REMAF 가공은 식 (2)와 식 (3)에 정리된 바와 같이 자기에너지에 의해 발생한 자기력과 우력모멘트에 의해 연마입자가 공전운동과 자전운동을 반복하여 공작물의 표면을 타격함으로써 표면정도를 향상시킨다. Fig. 2는 연마입자의 운동에 의해 표면의 버를 제거하는 과정을 도식화 한 것이다. 이는 아래 식 (4)와 같이 운동에너지의 합  $\bar{E}_p$ 으로 나타낼 수 있다<sup>[12]</sup>.

$$\bar{E}_p = \frac{1}{2} (Mv^2 + Iw^2) \quad (4)$$

여기서  $M$ 과  $v$ 는 각각 연마입자의 질량과 회전속도,  $I$ 는 관성모멘트,  $w$ 는 각속도를 의미한다.

### 3. 디버링 효과향상을 위한 특성평가

#### 3.1 공정변수 및 수준 선정

2장에 기술된 바와 같이 REMAF의 가공효율은 연마입자에 작용하는 자기력과 우력모멘트에 비례하고, 이는 연마입자의 체적과 자기장의 변화에 영향을 받는다. 즉 연마입자의 직경, 무게, 회전속도, 가공시간 등의 공정변수는 가공효율에 중요한 요소로 작용한다. 따라서 본 연구에서는 4개의 주요인자를 공정변수로 선정하여 밀링가공을 통해 Al6061 표면에 발생한 버 제거에 영향을 미치는 인자의 특성과 영향력을 다구찌 방법을 이용하여 실험을 수행하였다. Table 1은 선정된 주요인자와 수준을 나타낸 것이다. 각 인자의 수준은 실험기

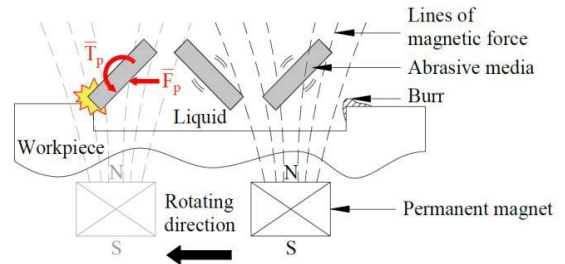


Fig. 2 Schematic diagram of deburring process

Table 1 Experimental factors and levels

Factor	Level		
	1	2	3
Rotational speed(rpm), A	1,200	1,500	1,800
Particle weight(kg), B	1.0	1.5	2.0
Particle diameter( $\mu$ m), C	300	500	700
Working time(min), D	5	10	15

구의 성능과 선행연구의 바탕으로 선정되었다. 연마입자의 운동에너지에 영향을 미치는 자기 원판 디스크의 회전속도는 최대 1,800rpm까지 회전 가능하므로 이를 고려하여 3수준으로 설정하였다. 실험에 사용된 연마입자는 SUS304L로 원통입자의 형태를 지닌다. 무게는 0.5kg 간격으로 1.0~2.0kg까지 각각 3수준을 설정하였고, 직경은 300, 500, 700 $\mu$ m이다. 가공시간은 기초 실험을 통해 5, 10, 15분으로 선정하였고,  $L_9(3^4)$  직교배열표에 따라 총 9번의 실험을 랜덤하게 수행하였다.

#### 3.2 실험구성 및 측정방법

본 연구에서는 폭 6mm, 깊이 500 $\mu$ m의 채널 형상을 가지는 Al6061 판재(50 $\times$ 40 $\times$ 5mm)를 이용하였고 사용된 실험장치(EMD-850L, Amech)의 사양은 Table 2와 같다. 연마가공이 이루어지는 원형 수조의 직경은 730mm지만 공작물의 크기와 연마입자의 유동을 고려하여 500mm 내에서 실험을 시행하였다. 자기장의 세기 및 변화에 영향을 미치는 자기 원판 디스크는 4개의 원형 Nd-Fe-B 자석이 N-S-N-S 교차배열로 설치되어 있고, 원형수조 중심으로부터 반경이 180mm인 부분에서 최대

자속밀도 68mT를 가짐을 확인하였다. 고려되어진 조건에서 디버링 효과를 극대화하기 위하여 모든 공작물의 위치는 최대 자속밀도가 측정된 반경 180mm에 동일하게 고정시켰다. 또한 가공 시 발생된 자기장에 의하여 연마입자가 응집되는 현상을 방지하기 위하여 연마액을 증류수에 1:100으로 희석하였다.

REMAF 가공의 버 제거 효과를 평가하기 위하여 식 (5)와 같이 가공 전후 공작물 표면의 버 높이  $\Delta B_{removal}$ 를 이용하였다. 버의 높이는 형상 측정기(CV-3200, Mitutoyo)를 사용하여 측정하였고, 측정된 값의 신뢰성 향상을 위하여 5mm 간격으로 선정된 위치에서 각 위치별 5회씩 측정하였다.

$$\Delta B_{removal} = 1 - \frac{B_i - B_f}{B_i} \quad (5)$$

여기서  $B_i$ 와  $B_f$ 는 REMAF 가공 전후 버의 높이를 의미한다.

본 연구에서는  $\Delta B_{removal}$ 가 작을수록 버 제거에 대한 REMAF 가공효율이 효과적임을 나타냄으로 망소특성을 이용한 S/N비를 분석하여 공정변수가 서로 다른 수준에서 특성치에 미치는 영향을 확인하고 최적 공정변수를 도출하였다. 또한 분산분석을 통해 각 인자의 주효과도를 분석하였다.

#### 4. 디버링 효과 분석

Table 3과 Fig. 3은 다구찌 방법을 이용하여 작성된 직교배열표에 따라 실험을 수행한 결과이다. S/N비가 클수록 외부잡음에 대한 영향이 작음을 의미하므로 특성치에 큰 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 따라서 S/N비가 크고  $\Delta B_{removal}$ 가 작을수록 버가 제거되는 정도가 증대하여 형상오차가 감소하는 반면 S/N비가 작고  $\Delta B_{removal}$ 가 클수록 버 제거율이 감소됨을 확인할 수 있었다. 이에 따라 본 연구에서는 다구찌 실험계획법을 바탕으로 고려되어진 공정변수별 수준조합 중, 회전속도가 1,800rpm, 연마입자의 무게 및 직경이 1.5kg과 0.3mm, 가공시간이 15분(Exp. no.8)일 때 디버링에 큰 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다.

Table 2 Specification of experimental apparatus

Specification	Condition
Diameter(mm)	730
Container Height(mm)	300
Thickness(mm)	15
Types	Permanent Nd-Fe-B
Magnet Number(ea)	4
Arrangement	N-S-N-S(max. 68mT)
Diluted polishing compound	1:100

Table 3 Experimental results for burr removal

Exp. no.	Levels				$\Delta B_{removal}$
	A	B	C	D	
1	1	1	1	1	0.3383
2	1	2	2	2	0.3148
3	1	3	3	3	0.2227
4	2	1	2	3	0.4644
5	2	2	3	1	0.2203
6	2	3	1	2	0.2677
7	3	1	3	2	0.2650
8	3	2	1	3	0.1681
9	3	3	2	1	0.2866

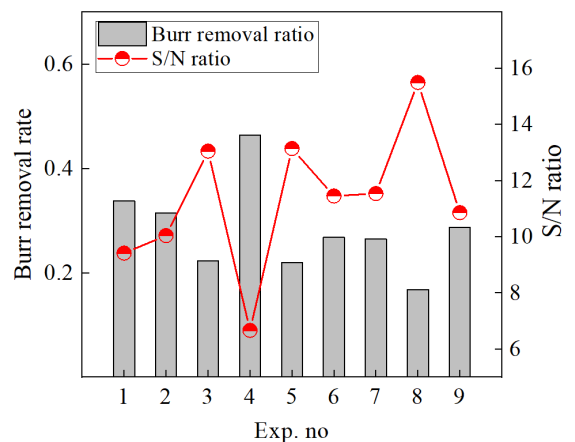


Fig. 3 Results for burr removal rate and S/N ratio

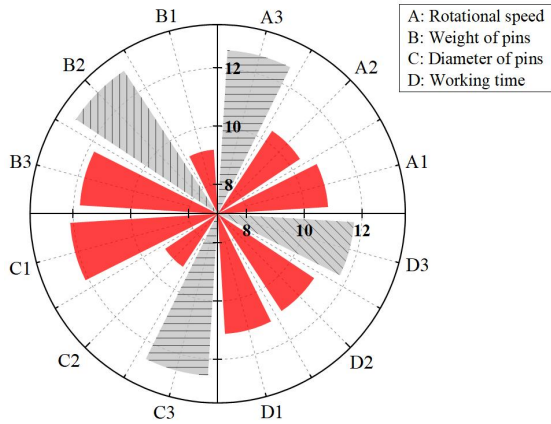


Fig. 4 Main effects of parameters on deburring

Fig. 4는 공정변수들에 대한 각각의 수준별 S/N 비를 도식화한 것이다. 이를 바탕으로 REMAF 가공에서 버 제거의 향상에 영향을 미치는 최적 공정변수 조합은 가장 큰 S/N비 값을 가지는 수준인 A<sub>3</sub>B<sub>2</sub>C<sub>3</sub>D<sub>3</sub>이다. 즉 회전속도가 1,800rpm, 연마입자의 무게와 직경이 1.5kg과 0.7mm, 가공시간이 15분일 때 버 제거율이 향상됨을 알 수 있었다.

연마입자의 무게는 1.5kg(B<sub>2</sub>)일 때 가장 큰 효과를 나타냈는데 이는 동일 가공면적 내에서 연마입자의 수가 증가함으로써 공작물 표면의 불필요한 버를 제거하는 효율이 향상되는 것으로 판단할 수 있었다. 그러나 연마입자의 무게가 1.5kg을 초과할 경우 연마입자간 상호충돌로 인해 운동에너지가 감소함으로써 형상오차가 증대됨을 확인할 수 있었다. 연마입자의 직경에 따른 디버링효과 분석결과, 연마입자의 직경이 0.7mm(C<sub>3</sub>)일 때 가장 효과적임을 알 수 있었다. 이는 연마입자에 작용하는 힘과 우력모멘트가 연마입자의 직경이 클수록 증대되어 큰 운동에너지로 공작물 표면의 버를 타격하는 것으로 판단된다. 반면 연마입자의 직경이 0.5mm 대비 0.3mm일 때 효과적으로 버를 제거할 수 있음을 알 수 있었다. 이는 0.3mm일 때 동일면적에서 디버링에 참여하는 연마입자의 수가 0.5mm일 때보다 많기 때문인 것으로 판단된다. 회전속도의 변화는 자기장 세기의 변화화에 영향을 미침으로써 연마입자의 공전속도를 변화시킨다. 즉 회전속도가 빠를수록 연마입자의 운동에너지를 향상

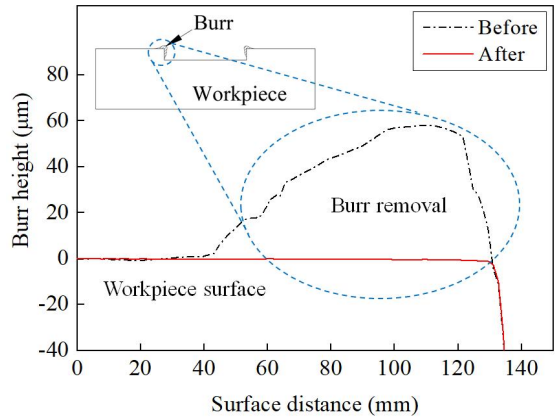


Fig. 5 Burr removal profile in cross direction

Table 4 ANOVA for burr removal

	SS	$\Phi$	V	F <sub>0</sub>
A	8.28	2	4.14	9.18
B	21.46	2	10.73	23.79*
C	20.29	2	10.14	22.50*
D	(0.90)	(2)	(0.45)	-
Total	50.93	8		

시킴으로써 버를 효과적으로 제거할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 회전속도가 1,800rpm(A<sub>3</sub>)일 때 버 제거율이 가장 높음을 확인할 수 있었다. 공정시간의 경우 타 공정변수 대비 가장 적은 영향을 미쳤으며 15분(D<sub>3</sub>)일 때 디버링 효과가 증대됨을 알 수 있었다. Fig. 5는 도출된 최적공정 조건에서 REMAF공정 전후의 상부표면의 버 높이를 형상측정기(CV-3200, Mitutoyo)로 측정한 결과이다. 측정결과 초기 버의 높이가 58 $\mu$ m에서 9.3 $\mu$ m로 감소함을 확인할 수 있었다.

Table 4는 각각의 공정변수가 특성에 미치는 영향을 평가하기 위하여 분산분석을 수행한 결과이다. 유의성이 낮은 가공시간은 풀링하여 분석한 결과, 회전속도가 유의수준 90%로 신뢰수준 범위 내에 있음을 확인할 수 있었다. 또한 연마입자의 무게와 직경이 95%의 유의수준을 만족함으로써 디버링 효과에 큰 영향을 미치는 것으로 판단할

수 있었다.

디버링 효율 향상에 가장 큰 영향을 미친 공정 변수는 연마입자 무게로 기여도가 약 42%로 나타났다. 연마입자의 직경, 회전속도, 가공시간 순으로 가공효율에 영향을 미쳤음을 확인할 수 있었다. 이는 회전속도와 연마입자의 체적이 클수록 연마입자에 작용하는 힘과 우력모멘트가 증대함으로써 디버링 향상에 긍정적 영향을 미치는 것으로 판단할 수 있다. 반면 가공시간의 기여도는 1.8%로 제거에 가장 적은 영향을 미침을 알 수 있었다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 U채널 형상을 가지는 비자성체인 Al6061의 표면정도 및 표면연마 가공의 효율을 향상시키고자 비접촉식 표면연마 공정인 REMAF를 제안하였다. 제안한 연마가공법에서 디버링 향상에 영향을 미치는 공정변수를 선정 후 다구찌 실험 계획법에 따라 실험을 수행하였다. 실험결과를 바탕으로 공정변수가 가공효율에 미치는 영향을 분석하고 최적조건 도출을 통해 REMAF 가공의 효과를 입증하고자 하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 고려되어진 공정변수 중 디버링 향상에 가장 큰 영향을 끼치는 인자의 조합은 회전속도가 1,800rpm, 연마입자의 무게가 1.5kg, 직경이 0.3mm, 가공시간이 15분일 때 나타남을 확인하였다.
2. 망소특성을 이용한 S/N비 분석을 통해 본 연마공정에서 도출된 최적조건은 버 제거율이 85%로 나타난  $A_3B_2C_3D_3$ 일 때임을 알 수 있었다. 즉 회전속도가 1,800rpm, 연마입자의 무게가 1.5kg, 직경이 0.7mm, 가공시간이 15분일 때 Al6061 상부표면의 버 제거가 가장 효율적임을 알 수 있었다.
3. 분산분석을 통해 디버링에 가장 많은 영향을 미치는 인자는 42%를 차지하는 연마입자의 무게이고, 연마입자의 직경, 회전속도, 가공시간 순임을 알 수 있었다. 가공시간의 경우, 디버링에 대한 기여도는 1.8%로 가장 미비한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

## 후 기

“이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비 (2021년)에 의하여 연구되었음.”

## REFERENCES

1. Qian, C., Fan, Z., Tian, Y., Liu, Y., Han, J., and Wang, J., "A Review on Magnetic Abrasive Finishing," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 112, No. 3, pp. 619-634, 2021.
2. Mosavat, M. and Rahimi, A., "Numerical-Experimental Study on Polishing of Silicon Wafer Using Magnetic Abrasive Finishing process," *Wear*, Vol. 424, pp. 143-150, 2019.
3. Singh, M. and Singh, A. K., "Magneto-rheological Finishing of Copper Cylindrical Roller for its Improved Performance in Printing Machine," *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, Vol. 235, No. 1, pp. 103-115, 2021.
4. Yadav, R. D., Singh, A. K. and Arora, K., "Parametric Analysis of Magneto-rheological Finishing Process for Improved Performance of Gear Profile," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 57, pp. 254-267, 2020.
5. Zhang, J., Chaudhari, A., and Wang, H., "Surface Quality and Material Removal in Magnetic Abrasive Finishing of Selective Laser Melted 316L Stainless Steel," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 45, pp. 710-719, 2019.
6. Kumar, A. S., Deb, S., and Paul, S., "Ultrasonic-assisted Abrasive Micro-Deburring of Micromachined Metallic Alloys," *Journal of Manufacturing Processes*, Vol. 66, pp. 595-607, 2021.
7. Tian, Y., Shi, C., Fan, Z., and Zhou, Q., "Experimental Investigations on Magnetic Abrasive Finishing of Ti-6Al-4V Using a Multiple Pole-Tip Finishing Tool," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 106 No.

- 7, pp. 3071-3080, 2020.
8. Son, C. B., Lee, J. H., and Kwak, J. S., "The Study on Burr Removal Rate Along the Cutting Radial Distance in U-type Flow Channel," *Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers*, Vol. 18, No. 7, pp. 8-13, 2019.
  9. Safavi, S. M., Hasnvand, S., and Jafari Nedoushan, R., "Experimental Investigation of Magnetic Abrasive Polishing of Paramagnetic Workpieces," *Scientia Iranica*, Vol. 26, No. 2, pp. 789-795, 2019.
  10. Zhang, Y., Yoshioka, M., Hira, S.I., and Wang, Z., "Effect of Magnetic Strength of Three-dimensionally Arranged Magnetic Barrel Machine on Polishing Characteristics," *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, Vol. 9, No. 2, pp. 34-38, 2008.
  11. Jone, T. B., *Electromechanics of Particles*, Cambridge University Press, pp. 5-74, 2005.
  12. Yamaguchi, H., Shinmura, T., and Takenaga, M., "Development of a New Precision Internal Machining Process using an Alternating Magnetic Field," *Precision engineering*, Vol. 27, No. 1, pp. 51-58, 2003.