

연삭을 이용한 Surface Texturing에서 패턴의 기울기 변화

정지용*, 위전*, 사하르*, 고태조*[#]

*영남대학교 기계공학부

Slope Change of Surface Texturing Pattern Using Grinding

Ji-Yong Jeong*, Yu Zhen*, Sahar M. Sana Ullah*, TaeJo Ko*[#]

*School of Mechanical Engineering, Yeungnam University

(Received 18 April 2016; received in revised form 3 May 2016; accepted 12 May 2016)

ABSTRACT

Most machines lose a lot of energy due to friction. Wear due to friction also reduces performance. Therefore, it is important to reduce friction on the surface to improve energy efficiency and decrease wear. Surface texturing refers to making patterns on the surface for reducing friction. There are many surface texturing methods, such as using lasers, abrasive jet machining, and so on. Recently, mechanical manufacturing methods, such as cutting and grinding, have been highlighted. Among them, the grinding method has the advantage of making patterns in large areas quickly. Therefore, it is appropriate for surface texturing on large machines. This paper is a study on the slope change of the surface texturing pattern using grinding. Therefore, we researched the slopes of the patterns corresponding to “spindle speed and feed rate” and “curvature of workpiece surface” using a mathematical model and experiment. As a result, we made a proper mathematical model concerning our research. Therefore, using the mathematical model in this paper, we could predict the slope change of the pattern according to grinding conditions.

Key Words : Surface Texturing(표면 패터닝), Grinding(연삭), Slope of the Pattern(패턴의 기울기)

기 호 설 명

S : Spindle speed

F : Feedrate

k : Curvature of workpiece surface

α : Slope angle of the pattern

α_{Flat} : Slope angle of the pattern on flat surface

$\alpha_{Convex\ arc}$: Slope angle of the pattern on convex arc surface

$\alpha_{Concave\ arc}$: Slope angle of the pattern on concave arc surface

P : Pitch of helical groove on grinding wheel

$S_{Helical\ grooving}$: Spindle speed for helical grooving

$F_{Helical\ grooving}$: Feedrate for helical grooving

R : Radius of arc surface of workpiece

r : Radius of grinding wheel

1. 서론

기계는 마찰력에 의해 많은 에너지손실이 발생한다. 예를 들어, 자동차의 엔진에서 마찰력에 의한 에너지손실은 약 40 %라고 알려져 있다^[1]. 뿐만 아니라 마찰력에 의한 마모도 기계의 성능 및 수명 저하를 가져온다. 그러므로 기계의 에너지효

Corresponding Author : tjko@yu.ac.kr

Tel: +82-53-810-2576, Fax: +82-53-810-4624

율을 향상시키고, 마모를 줄이기 위해서는 기계요소들의 표면에서 발생하는 마찰력을 감소시키는 것이 무엇보다 중요하다.

Surface texturing은 마찰이 작용하는 물체의 표면에 일정한 형태의 패턴을 생성하여 마찰력을 감소시키는 기술로써, 적용의 용이성과 효율성으로 인해 최근 관련 연구가 활발히 이뤄지고 있다^[8]. 패턴생성에는 레이저가공, 입자분사가공, 소성가공 등 다양한 가공법이 이용된다. 최근에는 전통적인 가공법인 절삭 및 연삭을 이용한 방법이 주목받고 있는데, 그 중에서 연삭을 이용한 방법은 넓은 면적을 빠르게 패턴닝할 수 있는 장점이 있다. 따라서 산업현장의 대형 기계에 패턴닝을 적용하는데 적합하다. 하지만 현재 이에 관한 연구는 매우 더디고, 특히 가공조건에 따른 패턴의 형태에 관한 연구는 아직 많이 부족한 실정이다^[2].

본 논문에서는 연삭을 이용한 Surface texturing에서 가공조건에 따른 패턴의 기술품 변화에 대하여 연구하였다. 이를 위해 본 논문에서는 연삭을 이용한 Surface texturing 방법을 먼저 간단히 설명한다^[6]. 그 다음, 패턴을 지배하는 변수들을 설정하고 수학적 모델을 만들었다. 그 후, 패턴생성 실험을 진행하고, 그 실험결과 값과 수학적 모델에서 얻은 이론값을 비교하여 리블렛 패턴 변화의 수학적 모델의 적합성을 검증하였다.

2. 연삭을 이용한 Surface Texturing 방법

2.1 패턴생성 방법

공작물의 표면에 패턴을 생성하기 위해 Fig. 1과 같이 머시닝센터 내에 연삭숫돌, 다이아몬드 드레서, 공작물을 설치한다.

연삭을 이용한 패턴생성 방법은 우선, 연삭숫돌 표면에 다이아몬드 드레서를 이용하여 나선형의 홈을 새긴다. 이 때, 연삭숫돌 표면의 나선곡선의 피치(P)는 식(1)과 같이 구한다.

$$P = \frac{F_{Helicalgrooving}}{S_{Helicalgrooving}} \quad (1)$$

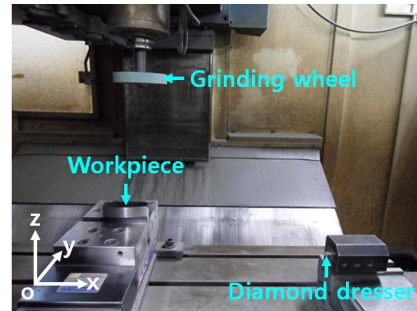


Fig. 1 Experimental setup

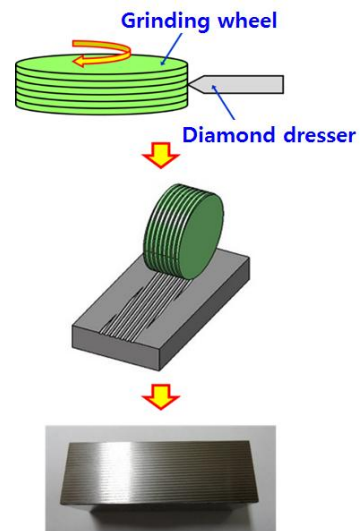


Fig. 2 Method for surface texturing by using grinding

그 다음, 이 연삭숫돌을 이용하여 적절한 주축 회전수(S)와 이송속도(F)로 공작물의 표면에 패턴을 생성한다. Fig. 2는 연삭을 이용한 패턴생성 방법을 나타낸다^[3].

2.2 공작물 표면의 형상에 따른 패턴생성

본 논문에서는 공작물 표면의 형상을 평면, 원호면, 자유곡면으로 나누어 순서대로 패턴생성 방법을 연구하였다. 평면의 경우, 앞에서 기술한 패턴생성 방법이 평면 기반이므로 따로 설명하지 않는다.

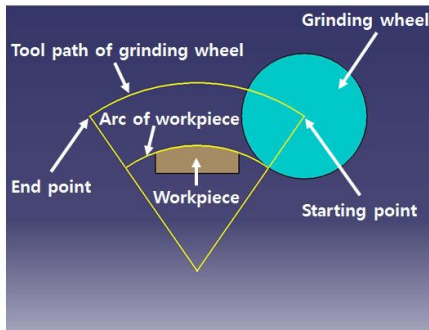


Fig. 3 Simulation by CATIA



Fig. 4 Experimental result on arc surface

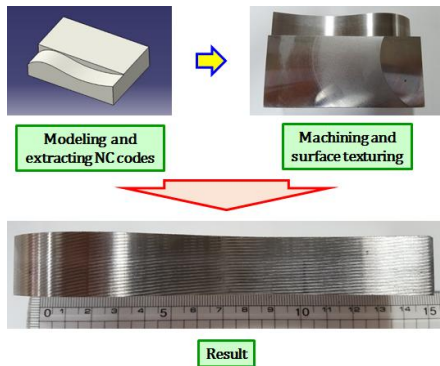


Fig. 5 Experimental result on free form surfaces

원호면의 경우, 4가지 사항을 고려해야 한다.

첫째, 연삭숫돌 경로는 볼록 원호면일 경우 원호 반지름에서 연삭숫돌의 반지름만큼 확대하고, 오목 원호면일 경우 원호 반지름에서 연삭숫돌의 반지름만큼 축소한다.

둘째, 오목 원호면에 패터닝할 때에는 연삭숫돌의 곡률이 원호면의 곡률보다 커야한다.

셋째, 원호면의 곡률이 너무 크면 패턴생성에 어려움이 따른다.

넷째, 원호면의 끝부분에 패턴을 생성하는 데에는 기술적인 어려움이 따른다.

원호면을 패터닝할 때 공작물 표면의 끝부분까지 패턴을 생성하기 위해서는 연삭숫돌 경로의 시작점과 끝점이 공작물의 바깥쪽에 위치해 있어야 한다. Fig. 3은 CATIA를 이용하여 연삭숫돌 경로 및 시작점, 끝점의 위치를 시뮬레이션한 것이고, Fig. 4는 원호면에 패터닝한 결과이다^[4].

자유곡면에 패터닝하는 경우, 손으로 NC프로그램을 작성하기가 거의 불가능하므로 CAD/CAM 프로그램을 사용하여 모델링하고, 이를 NC코드로 추출하여 공작물 표면의 형상을 가공한 후, 패터닝한다^[5].

CNC는 모든 곡선을 직선 또는 원호로 근사시켜 나타내므로 자유곡면에 패터닝하는 작업은 평면과 원호면에서의 패터닝 작업을 무수히 많이 수행하는 것이라고 볼 수 있다. Fig. 5는 자유곡면에 패터닝하는 방법과 그 결과를 나타낸다^[7].

3. 수학적 모델링

3.1 변수선정

Table 1과 같이 본 연구의 독립변수는 주축회전수(S)와 이송속도(F)의 크기, 공작물 표면의 곡률(k)이고, 종속변수는 패턴의 기울기 각도(α)이다. 즉, 본 연구는 주축회전수(S)와 이송속도(F)의 크기, 공작물 표면의 곡률(k)에 따른 패턴의 기울기 각도(α) 변화에 관한 것이다.

패턴생성 실험에서 S와 F 중 하나만 작용해서는 패턴이 생성되지 않는다. 따라서 S와 F가 항상 같이 작용해야 한다는 것을 염두에 두어야 한다.

Table 1 Process variables

Independent variables	Spindle speed(S) and feedrate(F)
	Curvature of workpiece surface(k)
Dependent variables	Slope angle of the pattern(α)

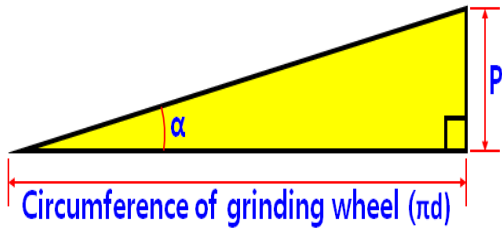


Fig. 6 Slope of helical grooving on grinding wheel

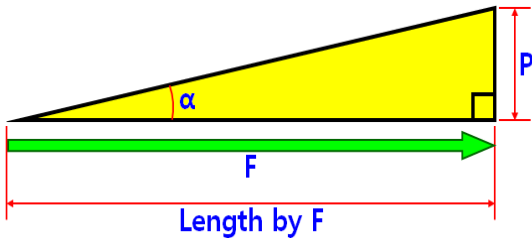


Fig. 7 Slope of the pattern on flat surface

3.2 평면에서의 패턴의 기울기

3.2.1 S와 F를 고려하지 않을 경우

패턴의 기울기를 알기 위해서는 우선 연삭숫돌에 새겨진 나선곡선의 모양을 알아야 한다. Fig. 6은 연삭숫돌의 나선곡선을 평면에 펼친 것으로써, 연삭숫돌이 한 바퀴 회전하는 동안의 피치(P)와 그때의 각도를 알 수 있다. 이는 S와 F를 고려하지 않을 경우의 패턴의 기울기와 같다.

3.2.2 S와 F를 고려할 경우

S와 F를 고려할 경우에는 우선 연삭숫돌이 한 바퀴 회전할 동안 걸린 시간을 알아야 한다. 이는 S의 단위가 rev/min이므로 rev가 1일 때의 시간(min)이다. 그 후, 계산한 시간동안 F에 의해 공작물이 간 거리를 계산한다. 이제 Fig. 7과 같이 F에 의해 공작물이 간 거리를 밑변으로 하고, 연삭숫돌의 나선홈의 피치(P)를 높이로 하는 직각삼각형을 그리고 Arctangent를 이용하여 패턴의 기울기를

구한다.

이제, 평면에서의 패턴의 기울기를 식으로 정리한다. 우선, F에 의한 거리를 계산한다. 여기서 속력은 F [mm/min], 시간은 1/S [min/rev]이고, 거리는 속력에 시간을 곱한 것이므로 F에 의한 거리는 F/S가 된다. 이를 Fig. 7의 직각삼각형의 밑변으로 하고, 연삭숫돌 나선홈의 피치(P)를 높이로 하면 Arctangent를 이용하여 평면에서의 패턴의 기울기를 식(2)와 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_{Flat} &= \tan^{-1} \frac{P}{\text{Length by } F} \\ &= \tan^{-1} \frac{P}{\frac{F}{S}} \\ &= \tan^{-1} \frac{P \times S}{F} \end{aligned} \quad (2)$$

3.3 원호면에서의 패턴의 기울기

3.3.1 S와 F를 고려하지 않을 경우

원호면에서의 패턴의 기울기는 공작물 표면의 곡률(k)에 따라 달라진다. 우선 공작물의 지름이 연삭숫돌의 지름과 같은 d일 경우를 생각해보자. 이때는 Fig. 8의 직각삼각형의 밑변의 길이가 연삭숫돌의 원둘레의 길이(πd)보다 1/2배 줄어든다.

다음으로 공작물의 지름이 연삭숫돌의 2배인 2d일 경우를 생각해보자. 이때는 Fig. 9의 직각삼각형의 밑변의 길이가 연삭숫돌의 원둘레의 길이(πd)보다 2/3배 줄어든다.

이제 공작물의 지름이 연삭숫돌의 3배인 3d일 경우를 생각해보자. 이때는 Fig. 10의 직각삼각형의 밑변의 길이가 연삭숫돌의 원둘레의 길이(πd)보다 3/4배 줄어든다.

이와 같이 공작물의 지름을 일정하게 변화시키면 직각삼각형의 밑변도 일정하게 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 볼록 원호면에서의 밑변의 변화를 나타낸 것이다.

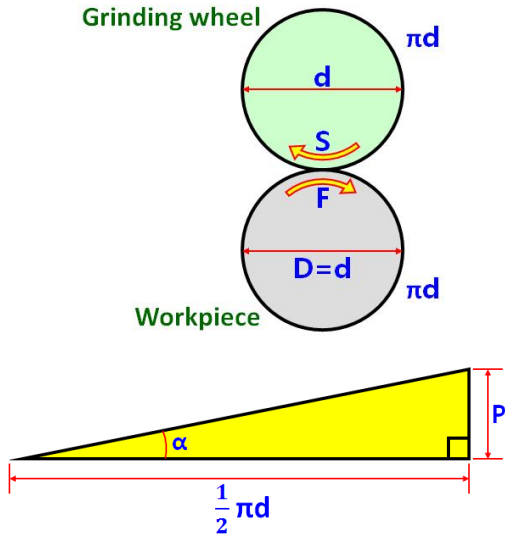


Fig. 8 Slope of the pattern on arc surface ($D=d$)

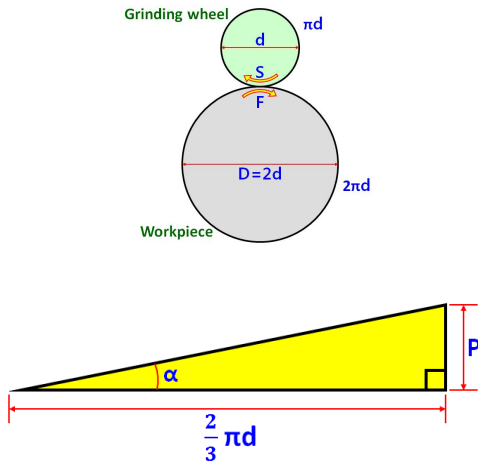


Fig. 9 Slope of the pattern on arc surface ($D=2d$)

3.3.2 S와 F를 고려할 경우

S와 F를 고려할 경우에도 Fig. 11과 비슷하다. Fig. 12는 S와 F를 고려할 경우의 패턴의 기울기를 나타내는 직각삼각형으로써, (a)는 볼록 원호면일 경우이고, (b)는 오목 원호면일 경우이다. 오목 원호면도 위와 같은 방법으로 구할 수 있다.

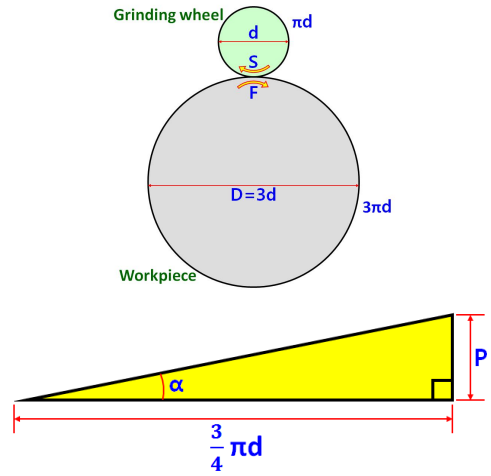


Fig. 10 Slope of the pattern on arc surface ($D=3d$)

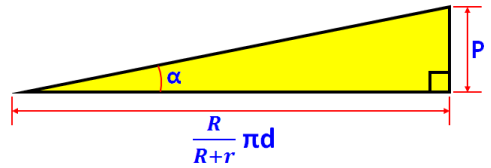


Fig. 11 Slope of the pattern on convex arc surface

이제, 원호면에서의 패턴의 기울기를 식으로 정리한다. 우선, F에 의한 거리는 F/S 이므로 이를 대입하여 직각삼각형의 밑변을 구하고, 연삭숫돌 나선축의 피치(P)를 높이라 하면 Arc tangent를 이용하여 원호면에서의 패턴의 기울기를 식(3), 식(4)와 같이 정리할 수 있다. 여기서, 식(3)은 볼록 원호면에서의 패턴의 기울기에 관한 식이고, 식(4)는 오목 원호면에서의 패턴의 기울기에 관한 식이다.

$$\begin{aligned} \alpha_{Convex\ arc} &= \tan^{-1} \frac{P}{\frac{R}{R+r} \times Length\ by\ F} \quad (3) \\ &= \tan^{-1} \frac{P}{\frac{R}{R+r} \times \frac{F}{S}} \\ &= \tan^{-1} \frac{P \times S}{\frac{R}{R+r} \times F} \end{aligned}$$

$$\alpha_{Concave\ arc} = \tan^{-1} \frac{P \times S}{\frac{R}{R-r} \times F} \quad (4)$$

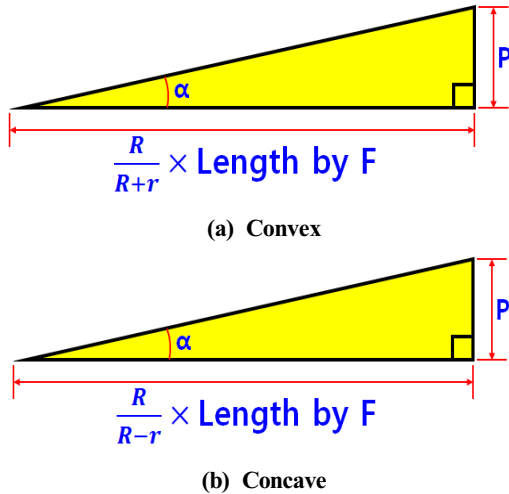


Fig. 12 Slope of the pattern on arc surface

4. 실험 및 결과

4.1 평면

평면에서의 패턴생성 실험에서는 Table 2와 같이 S와 F를 4가지 경우로 나눠서 진행하였다. 이때 연삭숫돌의 나선홈의 피치(P)는 1 mm, 연삭숫돌의 지름은 150 mm, 연삭숫돌의 나선홈의 깊이는 60 μ m, 공작물의 패턴의 깊이는 20 μ m이다.

Table 3은 실험결과이다. 여기서 S가 2배로 커지면 패턴의 기울기도 약 2배로 증가(1과 3 또는 2와 4)하며, F가 2배로 커지면 패턴의 기울기는 약 1/2배로 감소(1과 2 또는 3과 4)하는 것을 볼 수 있다. 또한 S와 F의 비율이 같으면 패턴의 기울기도 거의 같다(1과 4)는 것을 알 수 있다.

Table 4는 실험값과 이론값을 비교한 것으로써, 이론값은 Table 2의 값을 식(2)에 대입한 것이다. 실험값과 이론값을 비교해볼 때, 거의 비슷한 양상을 보이는 것을 볼 수 있다. 따라서 수학적 모델이 본 연구에 적합함을 확인할 수 있다.

Table 2 Experimental conditions on flat surface

No.	S [rev/min]	F [mm/min]
1	200	2000
2	200	4000
3	400	2000
4	400	4000

Table 3 Experimental result on flat surface

No.	Picture	Slope angle
1		5.202 °
2		2.611 °
3		9.931 °
4		5.461 °

Table 4 Comparison of slope angle on flat surface

No.	Calculation	Experiment	Error	Error rate
1	5.711 °	5.202 °	0.509 °	8.913 %
2	2.862 °	2.611 °	0.251 °	8.770 %
3	11.310 °	9.931 °	1.379 °	12.193 %
4	5.711 °	5.461 °	0.25 °	4.378 %

4.2 원호면

원호면에서의 패턴생성 실험에서는 Table 5와 같이 공작물 표면의 곡률(k)을 5가지 경우로 나눠서 진행하였다. 이때 S는 200 rev/min, F는 2000 mm/min이다. 그리고 연삭숫돌의 나선홈의 피치(P)는 1 mm, 연삭숫돌의 지름은 150 mm, 연삭숫돌의 나선홈의 깊이는 60 μ m, 공작물의 패턴의 깊이는 20 μ m로 평면에서와 동일하다.

Table 5 Workpiece profiles on arc surface

No.	Shape of arc	Radius of arc	Curvature(k)
1	Convex	100 mm	0.01
2	Convex	200 mm	0.005
3	Flat	-	0
4	Concave	200 mm	-0.005
5	Concave	100 mm	-0.01

Table 6 Experimental result on arc surface

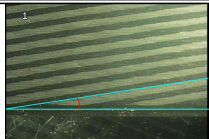
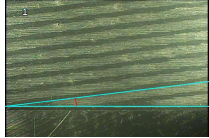

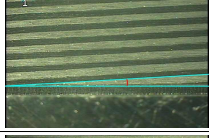
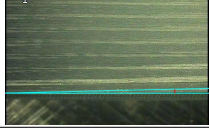
No.	Picture	Slope angle
1		8.834 °
2		7.424 °
3		5.202 °
4		3.230 °
5		1.349 °

Table 7 Comparison of slope angle on arc surface

No.	Calculation	Experiment	Error	Error rate
1	9.926 °	8.834 °	1.092 °	11.001 %
2	7.829 °	7.424 °	0.405 °	5.173 %
3	5.711 °	5.202 °	0.509 °	8.913 %
4	3.576 °	3.230 °	0.346 °	9.676 %
5	1.432 °	1.349 °	0.083 °	5.796 %

Table 6은 실험결과이다. 여기서 원호면의 곡률이 일정하게 감소할수록 패턴의 기울기도 일정하게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

Table 7은 실험값과 이론값을 비교한 것으로써, 이론값은 Table 5의 값을 식(3) 및 식(4)에 대입한 것이다. 실험값과 이론값을 비교해볼 때, 거의 비슷한 양상을 보이는 것을 볼 수 있다. 따라서 수학적 모델이 본 연구에 적합함을 확인할 수 있다^[4].

5. 결론

본 연구는 주축회전수(S)와 이송속도(F)의 크기, 공작물 표면의 곡률(k)에 따른 리블렛 패턴의 기울기 각도(α) 변화에 관한 것으로써, 수학적 모델링과 실험을 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. S와 F에 따른 α 의 변화는 식(2)와 같이 일정한 공식을 따른다.
2. 원호면에서 k에 따른 α 의 변화도 식(3) 및 식(4)와 같이 일정한 공식을 따른다.

후기

이 논문은 2014년도 교육부와 한국연구재단의 지역혁신창의인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2014HIC1A1066502).

REFERENCES

1. Chae, Y. H. and Kim, S. S., "Fundamental study on the effect of friction reduction based micro-scale surface texturing," Conference of The Korean Society of Tribologists and Lubrication Engineers, pp. 17-24, 2004.
2. Ko, T. J., Han, D. H., Qiu, K. and Park, J. K., "Grinding Technology for Surface Texturing," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 31, No. 5, pp. 367-373, 2014.
3. Denkena, B., Kohler, J. and Wang, B., "Manufacturing of Functional Riblet Structures by Profile Grinding," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology, Vol. 3, No. 1, pp. 14-26, 2010.

4. Jeong, J. Y., "A Study on Changes of Width and Slope of the Pattern on Surface Texturing by Using Grinding," A Thesis of a Master, Yeungnam University, Republic of Korea, 2016.
5. Jeong, J. Y., Yu, Z., Ko, T. J. and Kim, H. C., "Surface Texturing on Free Form Surfaces by Grinding Process," ICME-AM, 2015.
6. Kim, H. C. and Ko, T. J., "Parametric modeling of a screw fabricated by turning," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 11, No. 6, pp. 62-68, 2012.
7. Choi, H., Seo, C. Y., Park, W. K. and Lee, C. S., "A Study on the Internal Thrust Grinding by Machining Center," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 4, pp. 55-61, 2015.
8. Hwang, N. S., "A Study on Friction Characteristics According to Micro-dimple Patterns," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 14, No. 3, pp. 124-130, 2015.