

Al6061의 엔드밀 절삭가공에서 초음파 진동이 가공 표면에 미치는 영향

정명원*, 곽태수#, 김명규*, 김건희**

(#, * 경남과학기술대학교, ** 한국기초과학지원연구원)

Effects of Ultrasonic Vibration on Machined Surface of Aluminium 6061 in Endmill Cutting Process

Myung-Won Jung*, Tae-Soo Kwak#, Myeong-Kyu Kim*, Geon-Hee Kim**

(Received 11 June 2014; received in revised form 18 June 2014; accepted 20 June 2014)

ABSTRACT

This study focused on the effects of ultrasonic vibration on a machined surface of Al6061 material in the endmill cutting process. It is known that ultrasonic vibration greatly increases the efficiency of the machining process when cutting or grinding. An ultrasonic vibration table was developed for application to ultrasonic vibration endmill machining experiments. In this study, the surface roughness and actual depth of the cut measured confirm the effects of ultrasonic vibration. As a result of the experiments, the actual depth of the cut increased during endmill machining when using ultrasonic vibration. The surface roughness was improved with increases in the amplitude of the vibration and the depth of the cut.

Key Words : Endmill cutting(엔드밀 가공), Ultrasonic Vibration(초음파진동), Surface Roughness(표면조도)

1. 서 론

정밀기기 산업의 급속한 발전으로 금속 및 비금속 가공품의 고정밀화에 대한 수요가 크게 높아지고 있다.^[1] 알루미늄은 가볍고 내식성이 양호할 뿐만 아니라 합금에 따라 기계적 성질을 현저하게 개선할 수 있어서 내마모성이 우수한 부품 소재로서 널리 적용되고 있다. 알루미늄에 납 또는 동등을 첨가하여 피절삭성을 향상하고 다듬질면의

광택을 개선한 쾌삭성 알루미늄 합금이 개발되어 있으며, 강도가 높은 고력 알루미늄은 내식성에 문제가 있으나 마그네슘이나 아연을 첨가하여 내식성을 개선한 내식성 고력 알루미늄 합금은 구조용으로 널리 사용 된다.

이와 같이 산업적 활용가치가 높은 알루미늄 합금은 용도에 따라 적합한 가공 방법이 요구된다. 알루미늄 합금의 절삭가공은 가공 시 발생하는 잔류응력에 대한 불안정성 문제에 대하여 다양한 방법으로 잔류응력을 줄이기 위한 기술 개발이 요구된다. 알루미늄 합금의 형상정밀도를 얻기 위해서는 초기 주물이나 사출물을 열처리 한 후 절삭가공을 행하고 있다. 알루미늄 합금의 절삭 가공에 있어서 절삭저항은 대체적으로 크지 않으나 알루미늄은 연질재이기 때문에 저속에서는 칩의

* Gyeongnam National University of Science and Technology

** Korea Basic Science Institute

Corresponding Author :

Gyeongnam National University of Science and Technology

E-mail : tskwak@gntech.ac.kr

생성과 함께 구성인선(built-up edge)이 많이 발생하며, 절삭 깊이가 증가하면 표면층 유도의 변화 양상이 매우 복잡하게 됨에 따라 양호한 절삭가공 표면을 얻기가 비교적 어렵다. 알루미늄의 절삭가공 시 절삭력은 소재 잔류응력 발생에 주요 인자가 되며, 각 소재마다 가공방법과 절삭조건에 따라 잔류응력 발생량이 각각 달라지므로 절삭가공 시 소재에 따른 절삭조건 설정이 중요하다.^[2] 따라서 최근에는 알루미늄 합금의 피절삭성을 개선하기 위한 가공 기술로서 초음파 진동을 활용하는 방법이 제안되고 있다. 초음파 진동 절삭이란 초음파의 정현파 진동을 공구에 강제로 작용시켜 절삭가공 시 공구와 공작물 사이에 순간적인 분리가 일어나도록 하고 재 접촉시 펄스 충격력에 의하여 가공될 수 있도록 하여 절삭력으로 인한 공작물과 공작기계의 미소한 탄성 변형을 최소화 하여 가공하는 방법이다. 초음파 진동 절삭은 공작물의 진원도 및 표면조도 개선과 공구의 발열방지로 인한 공구수명을 연장할 수 있는 장점이 있다. 또한 펄스 충격력에 의해 절삭되므로 소동력에 의한 절삭으로 공작기계의 강성을 강화하는데 효과적이다.^[3] 그러나 초음파를 공구에 강제하는 방법은 스핀들 및 공구의 구성이 복잡해지며 절삭방향의 변화에 따른 초음파 진동 방향을 설정하는데 어려움이 있다.

본 연구는 알루미늄 합금의 절삭가공에서 공작물에 초음파 진동을 응용하여 알루미늄 합금의 피삭특성을 분석하였다. 초음파 진동은 초음파 진동 테이블을 제작하여 공작물에 적용하였으며 엔드밀 절삭 가공 실험을 통해 초음파 진동이 공작물의 가공 표면에 미치는 영향을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 구성

본 실험에서 사용된 시편은 쾌삭성과 내식성이 개선된 Al6061이다. 엔드밀 절삭성을 평가하기 위한 실험 장치로서는 5축 고속가공기(HSC 600, EXEPON co. ltd)를 활용하였다. 가공 중 공작물에 초음파 진동을 인가하기 위한 초음파 테이블은

40kHz의 발진주파수를 가진 PZT압전소자를 사용하여 제작하였다. 공작물의 초음파 진동 방향은 공구의 이송방향과 수직하며, Fig. 1은 초음파 진동 테이블과 공작물의 초음파 진동방향, 절삭공구의 이송방향 등을 나타내고 있다. Fig. 2는 본 실험에 사용한 초음파 진동 테이블 및 절삭가공 장치 사진이다.

2.2 실험 및 측정방법

초음파 절삭가공 실험에서는 초음파 진동의 적용 여부에 따른 실제 가공깊이의 변화와 표면조도 변화를 측정하여 비교 분석하였다. 초음파 진동의 세기가 피삭성에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험을 수행하였다. 초음파 진동의 세기는 초기 입력전류를 변화시킴으로서 조절할 수 있다. 실험에서 사용된 초음파 테이블은 입력 전류가 증가하면 초음파 진동의 진폭이 증가하도록 설계되어 있다. 초음파 절삭 실험의 입력전류는 초음파 테이블의 조정 스위치로 0.8A, 1.6A, 2.4A로 각각 설정하였다.

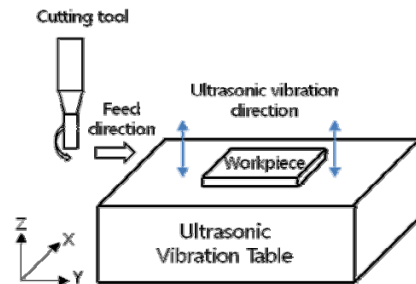


Fig. 1 Schematic diagram for ultrasonic cutting experiment



Fig. 2 Experimental setup for ultrasonic cutting



(a) Form Talysurf Series2 (b) IMS-M-34
Fig. 3 Measurement devices for analysis of ultrasonic cutting surface process

절삭공구는 직경 6mm의 초경 2날 평엔드밀을 사용하였고, 공구의 회전속도는 10,000rpm으로 동일하게 하였다. 실험 결과는 접촉식 표면조도 측정기 (Form Talysurf Series2, Taylor Hobsin co. Ltd.)를 이용하였고 공작물의 가공표면 상태를 확인하기 위하여 광학식 표면관찰 현미경(IMS-M-345)을 이용하였다. 실험방법은 초음파 진동이 절입 깊이에 미치는 영향과 이송속도와의 상관성을 확인하기 위한 실험으로 나누어 진행하였다. 초음파 진동이 절입 깊이에 미치는 영향을 분석하기 위한 실험에서는 이송속도를 1200mm/min으로 두고 절입 깊이는 각각 0.2, 0.5, 0.8mm로 설정하였으며, 이송속도와의 상관성을 확인하기 위한 실험에서는 절입 깊이는 0.5mm로 일정하게 두고 이송속도를 800, 1000, 1400mm/min으로 변화시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 초음파 진동과 절삭 깊이

절삭가공에서 고려해야할 주요 요인으로는 가공성, 공구수명 및 경제성 등이다. 특히 가공성은 피삭소재와 공구의 관련성이 깊다.^[4] 초음파 진동이 공작물의 절삭 깊이에 미치는 영향을 확인하기 위하여 동일한 이송속도 1200mm/min에서 절입 깊이를 각각 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm로 변화시켰을 때 실제 절입 깊이를 비교하였다. Table 1은 초음파 입력전류 변화에 따른 절입 깊이 변화를 측정된 결과를 표로 나타낸 것이다. Fig. 4는 절삭 모드별 추가 절입된 깊이를 그래프로 나타낸 결과이다.

Table 1 Measured results of actual depth of cut by change of depth of cut

Cutting Mode	Depth of cut(mm)			Ultrasonic current(A)
	Command	Actual	Additional	
Conventional	0.2	0.210	0.010	-
	0.5	0.515	0.015	
	0.8	0.822	0.022	
Ultrasonic cutting 1 (US_1)	0.2	0.209	0.009	0.8
	0.5	0.519	0.019	
	0.8	0.824	0.024	
Ultrasonic cutting 2 (US_2)	0.2	0.217	0.017	1.6
	0.5	0.525	0.025	
	0.8	0.831	0.031	
Ultrasonic cutting 3 (US_3)	0.2	0.236	0.036	2.4
	0.5	0.544	0.044	
	0.8	0.852	0.052	

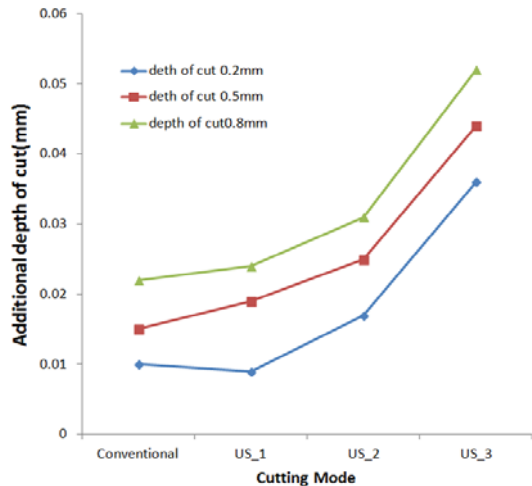
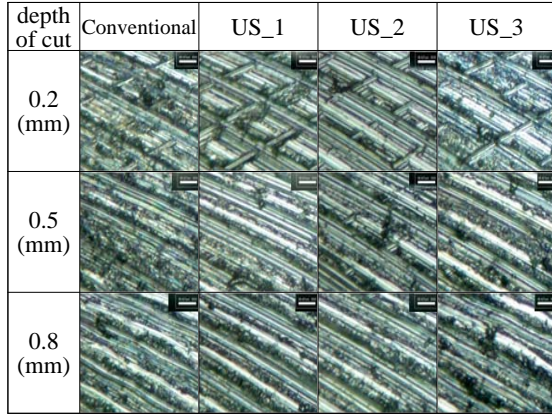


Fig. 4 Additional depth of cut by cutting mode respective on feed rate 1200mm/min

초음파 진동을 위한 입력전류가 높아질수록 추가 절입 깊이가 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 입력전류가 증가함에 따라 초음파 테이블의 진폭이 증가하게 됨으로서 추가 절입 깊이가 증가하는 것으로 사료된다. 이송속도 1200mm/min, 지령 절입깊이 0.2mm인 경우에 초음파 입력 전류가 낮을 때(0.8A)는 실제 절입깊이의 차이는 거의 나타나지 않았으나, 입력전류가 1.6A 이상이 되면 실제 절입깊이의 차이가 증가하는 것을 확인할 수

Table 2 Magnified photographs on cutting ground by change of depth of cut



있었다. 지령 절입깊이가 0.5mm, 0.8mm일 때는 입력 전류가 낮은 경우에도 실제 절입깊이는 증가하였다. 또한 동일한 초음파 입력 전류에도 불구하고 지령 절입깊이가 증가할수록 추가 절입깊이도 증가하였다.

초음파 입력 전류와 지령 절입깊이의 변화에 따른 절삭가공 표면을 비교하기 위해 광학현미경 사진을 촬영하였다. Table 2는 지령 절입깊이 변화에 따른 가공표면 사진을 나타낸 것이다. 초음파 진동을 인가하였을 경우 낮은 절입깊이에서 공구 선단에 의한 선형의 가공 흔적이 남아 있는 것을 확인할 수 있었으나 절입깊이가 깊어질수록 공구 선단에 의한 가공 흔적은 나타나지 않았다. 이것은 공구선단에서 절입된 공작물은 공구가 진행함에 따라 가공압력이 낮아지고 공작물의 탄성회복으로 인해 공구후단에서 추가적인 절삭작용이 일어나기 때문으로 생각된다.

3.2 이송속도와 절삭깊이

절삭가공은 절삭속도, 이송속도, 절삭깊이, 절삭공구의 각도 등 절삭가공 조건에 의해 품질이 결정된다.⁹⁾ 동일한 절입 깊이에서 공구의 이송속도가 변할 때 초음파 진동이 절삭가공에 미치는 영향을 확인하였다. 절입 깊이는 0.5mm를 기준으로 하였으며, 이송속도는 각각 800, 1000, 1400mm/min로 설정하여 실험하였다. Table 3은 각각의 이송속도에 대하여 초음파 입력전류

Table 3 Measured results of depth of cut by change of feed rate

Cutting Mode	Feed rate (mm/min)	Depth of cut(mm)		Ultrasonic current(A)
		Actual	Additional	
Conventional	800	0.513	0.013	-
	1000	0.514	0.014	
	1200	0.515	0.015	
	1400	0.515	0.015	
Ultrasonic cutting 1 (US_1)	800	0.520	0.020	0.8
	1000	0.520	0.020	
	1200	0.519	0.019	
	1400	0.521	0.021	
Ultrasonic cutting 2 (US_2)	800	0.525	0.025	1.6
	1000	0.526	0.026	
	1200	0.525	0.025	
	1400	0.528	0.028	
Ultrasonic cutting 3 (US_3)	800	0.543	0.043	2.4
	1000	0.543	0.043	
	1200	0.544	0.044	
	1400	0.545	0.045	

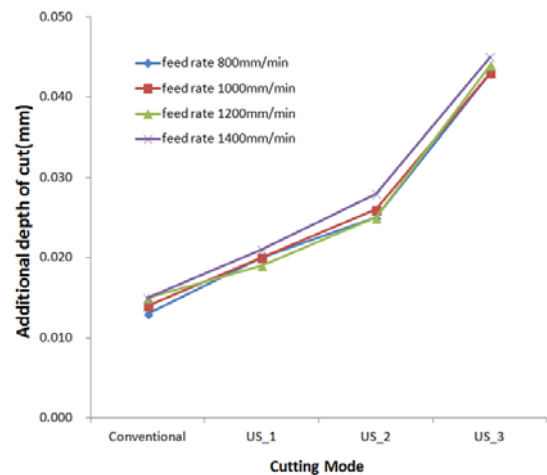


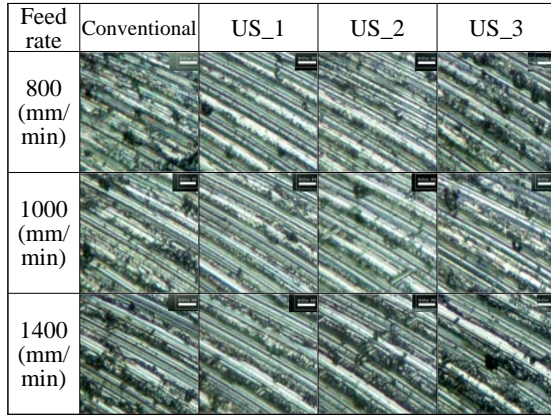
Fig. 5 Additional depth of cut by change of feed rate

의 세기에 따른 실제 절입 깊이를 측정된 결과표이다.

Fig. 5는 측정결과를 그래프로 나타낸 것이다. 초음파 입력전류가 증가할수록 실제 절입깊이도 증가하였으며, 입력 전류가 2.4[A]에서 실제 절입깊이는 크게 증가하였다. 또한, 이송속도가 빨라짐에 따라 근소하게 절입 깊이가 함께 증가하는 것을 볼 수 있는데 이것은 주분력이 증가하면서 공작물 고정 패드의 탄성변형에 의한 것으로 사료된다.

이송속도 800mm/min, 낮은 입력전류(0.8A)에서의 초음파 절삭가공 표면은 공구의 회전방향으로 절삭흔

Table 4 Magnified photographs on cutting ground by change of feed rate



적이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있으나, 입력 전류 2.4A일 때는 거친 가공 표면이 생성되는 것을 확인되었다. 이송 속도 1000mm/min에서는 초음파 입력 전류의 크기에 따른 절삭 가공면의 변화는 현저하지 않았으나 초음파 적용 전과 후의 가공면에는 차이를 보였다. 이송속도 1400mm/min인 경우에는 절삭가공 표면에 물결무늬가 발견되었다. 이것은 빠른 이송속도와 초음파 진폭의 증가로 인해 나타나는 것으로 예상된다.

3.3 초음파 진동과 표면조도

절삭가공에서 초음파 진동이 공작물의 가공 표면에 미치는 영향을 확인하기 위해서 표면조도를 측정하였다. Table 5와 Fig. 6은 이송속도 1200mm/min, 절입량을 각각 0.2mm, 0.5mm, 0.8mm로 절삭가공 후 표면조도를 측정한 결과이다. 측정결과를 살펴보면, 초음파를 이용한 절삭가공은 표면조도의 개선에는 기여하지 못하고 거칠기 값이 오히려 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 절입 깊이가 증가하면 초음파 유무에 따른 표면조도의 차이는 크게 감소하였다. 낮은 입력전류(0.8A)에서는 절입 깊이가 증가함에 따라 표면조도는 1.985umRa에서 1.883umRa로 완만하게 개선된 반면에, 높은 입력전류(2.4A)에서는 2.15umRa에서 1.69umRa로 크게 개선되었다. 초음파 입력 전류가 낮고 절입 깊이가 작을 때 초음파 진동이

Table 5 Measured results of surface roughness by depth of cut in feed rate 1200mm/min

Cutting Mode	Depth of cut(mm)	Surface roughness		Ultrasonic current(A)
	Command	umRa	umRt	
Conventional	0.2	1.827	10.649	-
	0.5	1.791	9.671	
	0.8	1.676	10.652	
Ultrasonic cutting 1 (US_1)	0.2	1.985	10.484	0.8
	0.5	1.917	10.314	
	0.8	1.883	10.047	
Ultrasonic cutting 2 (US_2)	0.2	2.032	10.557	1.6
	0.5	1.820	9.849	
	0.8	1.666	9.846	
Ultrasonic cutting 3 (US_3)	0.2	2.150	12.110	2.4
	0.5	1.964	12.272	
	0.8	1.690	11.109	

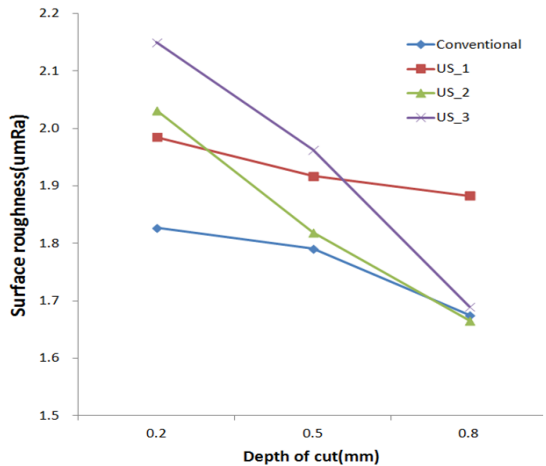


Fig. 6 Surface roughness, umRa by depth of cut in feed rate, 1200mm/min

표면조도에 미치는 영향은 크게 나타났다. Table 6과 Fig. 7은 절입 깊이가 0.5mm일 때 이송 속도 변화에 따른 초음파 절삭 전후의 가공표면을 측정한 결과이다. 공구의 이송속도가 증가할수록 표면조도는 증가하고 초음파 입력 전류가 증가함에 따라 표면조도는 감소하는 경향이 나타났다.

이송속도 800mm/min에서는 초음파 입력 전류가 표면조도에 미치는 영향은 거의 나타나지 않았으나, 1000mm/min이상의 이송속도에서는 초음파 입력 전류가 증가함에 따라 표면조도가 개선되는 것을 확인할 수 있었다. 초음파 진동이 표면조도에 미치는 영향

Table 6 Measured results of surface roughness by feed rate in depth of cut 0.5mm

Cutting Mode	Feed rate (mm/min)	Surface roughness		Ultrasonic current(A)
		umRa	umRt	
Conventional	800	1.377	8.513	-
	1000	1.705	8.899	
	1200	1.791	9.671	
	1400	2.351	14.370	
Ultrasonic cutting 1 (US_1)	800	1.293	8.420	0.8
	1000	1.754	8.882	
	1200	1.917	10.314	
	1400	2.316	13.919	
Ultrasonic cutting 2 (US_2)	800	1.399	8.305	1.6
	1000	1.704	10.041	
	1200	1.820	9.849	
	1400	2.137	13.992	
Ultrasonic cutting 3 (US_3)	800	1.304	8.044	2.4
	1000	1.475	9.048	
	1200	1.964	12.272	
	1400	1.612	9.373	

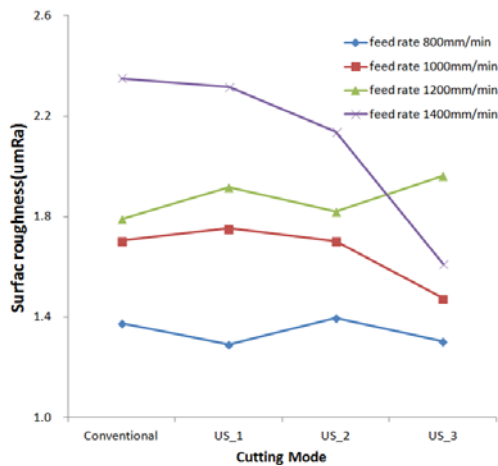


Fig. 7 Surface roughness, umRa by change of feed rate in depth of cut 0.5mm

을 실험한 결과에서 절입 깊이가 깊고, 이송 속도가 감소할수록 초음파 절삭가공면의 표면조도는 개선되었다. 또한, 초음파 입력 전류가 높아질수록 표면조도가 개선됨을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 알루미늄합금(Al6061) 소재를 대

상으로 5축 고속가공기를 이용한 엔드밀 가공에서 초음파 진동이 절삭가공에 미치는 영향을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 이송속도 1200mm/min, 지령 절입깊이 0.2mm인 가공 조건에서 초음파 입력 전류, 0.8A에서는 초음파 절삭 전후의 실제 절입깊이 변화는 없었으나, 입력전류가 1.6A이상 이 되면 실제 절입깊이는 증가하였다.
2. 이송속도(800, 1000, 1400mm/min)와 초음파 입력 전류(0.8A, 1.6A, 2.4A)의 변화에 따른 실제 절입깊이를 측정 한 결과, 초음파 입력 전류와 이송속도가 증가하면 실제 절입 깊이기도 증가하는 경향이 나타났으나, 이송속도가 실제 절입깊이에 미치는 영향은 초음파 입력 전류의 영향에 비해 낮았다.
3. 초음파 진동이 표면조도에 미치는 영향을 실험한 결과, 절입 깊이가 깊고, 이송 속도가 감소할수록 초음파 절삭가공면의 표면조도는 개선되었다. 또한, 초음파 입력 전류가 높아질수록 표면조도가 개선됨을 확인하였다.

후 기

“이 논문은 2012년도 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.”

REFERENCES

1. Ratmond, G. O., "Comparison of stress-relief procedures for cryogenic aluminum mirrors," NASA Tech., Report No. 20020061280, pp. 57-70, 2002.
2. Joo, H. Y. and Lee, Y. S., "A study on Residual stress at Cutting work," J. of KSMTE, Vol. 6 No. 3, pp. 111-117, 1997.
3. Kang, J. P., Kim, B. H. and Song, J. B., "A Study on the Improvement of Cutting Precision

- by the Ultrasonic Vibration Cutting," J. of KSPE, Vol. 8 No. 2, pp. 69-77, 1991.
4. Kim, N. H., "Selection of the Optimal Machining Condition for a High-hardness Resin using the 5-axis Machine," J. of KSMPE, Vol. 11 No.5, pp. 29-34, 2012.
 5. Kim, H. T. and Shin, K. H., "A Study on the Effects of Feed rate and Shotpeening on the Fatigue Life of Al7075-T6 Specimens," Transactions of KSMTE, Vol. 16 No. 4, pp. 64-70, 2007.
 6. Song, Y. C., Kenichi, T. and Toshimichi, M., "Mirror Finishing of Co-Cr-Mo Alloy by Ultrasonic Elliptical Vibration Cutting Method," J. of KSPE, Vol. 25 No. 3, pp. 56-62, 2008.
 7. Kim, K. D. and Lee, K. H., "Development of Excitation Table for 2-dimensional Vibrational Micro Cutting," J. of KSMPE, Vol. 11 No. 3, pp. 62-67, 2012.
 8. Song, Y. C. and Park, C. H., "Ultra-precision Cutting of Polycarbonate for Optical Components by Using Elliptical Vibration Cutting Method," J. of KSPE, Vol. 26 No. 6, pp. 42-49, 2009.
 9. Kim, K. D., Loh, B. G. and Kim, J. S., "Development of Ultra-Precision Ultrasonic Surface Machining Device Using Cyclic Elliptical Cutting Motion of a Couple of Piezoelectric Material," J. of KSMPE, Vol. 5 No. 3, pp. 29-35, 2006.