

## 초음파 절삭가공에 의한 절단면의 Burr 높이의 최적화 실험

맹헤민<sup>a</sup>, 최한빛<sup>a</sup>, 임동욱<sup>b</sup>, 박찬일<sup>a</sup>, 강동성<sup>a\*</sup>

## Optimization Experiment of Burr Height by Ultrasonic Cutting Machining

Hye-Min Maeng<sup>a</sup>, Han-Bit Choi<sup>a</sup>, Dong-Wook Lim<sup>b</sup>, Chan-Il Park<sup>a</sup>, Dong-Seong Kang<sup>a\*</sup><sup>a</sup> R&D Center, OL tech Inc.<sup>b</sup> Department of Mechanical Engineering, Inha University

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	10	June	2021
Revised	28	June	2021
Accepted	5	July	2021

## Keywords:

Ultrasonic machining  
PETG  
Cutting surface  
Burr height  
Ultrasonic power  
Cutting speed

## ABSTRACT

Ultrasonic cutting technology that can perform micro-cutting is applied for convenience of work to cut out unnecessary parts of a clear aligner during the manufacturing process of transparent devices for orthodontics. Ultrasonic processing is not limited physically or chemically by the material of the workpiece because it is a non-thermal, non-chemical, and non-conductive method. Owing to these characteristics, it is suitable for processing brittle materials such as glass and ceramic regardless of electrical conductivity. An ultrasonic cutting system is produced by applying this ultrasonic cutting technology, and the heights of burrs on the cut surface of PETG sheets are included in the experiment. The burr height is measured by setting the cutting speed to 100, 300, 500, 700, and 900 mm/min, and the power to 50, 60, 70, 80, 90, and 100 %. Then the optimal conditions are derived.

## 1. 서론

치아 교정용 투명장치 제조 공정은 3D 측정 장치를 통해 환자의 치아 형상을 측정 후 정상 상태로 수정하여 3축 가공기를 통해 치아 형상의 금형을 제작하고 성형하는 것으로 이루어진다. 성형은 주로 진공을 통한 흡착방식으로 이루어지며 원형의 폴리에틸렌 소재를 가열한 뒤 진공으로 성형 틀에 흡착시켜 제작한다. 이후 불필요한 부분을 잘라내는 작업은 현재 수작업으로 진행되고 있다. 하지만 교정력 발휘를 위해 높은 강성을 가져야 하는 소재 특성상 작업자의 의한 수작업은 정밀도가 떨어지며 공구의 고장이 빈번하여 교체 비용의 문제가 존재한다. 또한, 전단력을 통해 소재를 절단하는 공구는 소재에 압축응력을 발생시키며 불규칙적인 소재 손상을 야기한다. 일반적인 절삭 가공의 경우 공구와 공작물이 연속적

으로 접촉하여 가공 분력의 증감으로 인해 가공정밀도 및 표면거칠기 불량발생이 일어난다. 또한, 연속적인 마찰로 많은 열이 발생하여 공구 수명이 절감되는 단점을 가지고 있다<sup>[1,2]</sup>. 이를 해결하기 위해 특수한 가공법인 초음파 가공에 대한 연구들이 진행되었다.

초음파 가공의 경우 유리, 세라믹 등과 같은 취성 재료나 비전도성 재료들을 가공하는데 적합하다<sup>[3,4]</sup>.

초음파 커팅은 뼈, CFRP, 플라스틱 등을 절단하는데 이용되는 기술로 소재 변형을 방지할 수 있는 무압 절단 기술임과 동시에 높은 절삭력을 바탕으로 고정밀, 고효율 가공이 가능한 커팅 기술이다. 응용사례로는 식품 및 의료, 의류산업 등에서 소재를 절단할 때 주로 사용되고 있으며 최근 자동차산업 등에서 플라스틱 제품의 플래쉬(flash) 및 버(burr)를 제거하는 용도로 범위가 확대되고 있다<sup>[5]</sup>. Takeyama<sup>[6]</sup>는 복합재료인 유리섬유강화 플라스틱(GFRP)

\* Corresponding author. Tel.: +82-32-832-3610

E-mail address: kds@oltech.kr (Dong-Seong Kang).

을 초음파를 이용한 가공으로 표면거칠기와 절삭력에 좋은 현상을 보였다. 그러나, 단일방향의 GFRP를 실험재료로 사용하였고, 유리섬유의 각도에 따른 고찰을 주로 하였으며, 2차원 절삭으로 실험하였다.

초음파 커팅에서는 초음파 출력이 증가할수록 절삭 성능이 증가하지만 그에 따른 열이 발생하여 버의 높이가 증가하게 된다. 따라서 열에 의한 영향을 줄이는 것뿐만 아니라 가공속도 혹은 가공효율의 향상을 위해 증가시킬 수 있는 절삭속도의 최댓값을 찾는 것이 필수적이다.

본 논문에서는 초음파 커팅 기술을 이용한 전용 시스템을 제작하고 초음파 발전기의 출력과 초음파 칼날의 절삭속도를 공정조건으로 설정한다. 치아 교정용 투명 장치인 PETG 시트 절단면에 발생하는 버의 높이를 최소화하는 최적의 가공조건을 도출하고자 한다.

## 2. 실험방법 및 조건

### 2.1 초음파 시스템

본 연구에서 초음파 커팅 위해 Fig. 1과 같이 초음파 커팅 시스템을 구성하였다. 실험재료는 PETG (glycolmodified polyethylene terephthalate) 소재이며 얇은 원판 형상이다. PETG 시트를 위치를 정렬하기 위한 금속핀과 고정하기 위한 진공압 블럭을 설계하여 적용하였다. Table 1은 본 논문에서 실험한 PETG 시트의 물성치이다. 커팅 시스템 사양은 Table 2에 표기하였다.

### 2.2 실험조건

초음파와 발전은 기계적 방법, 자왜소자 및 압전소자를 이용한 방법이 있으며 현재는 주로 압전소자를 이용한 구동 방식을 사용한다. 본 시스템에서는 압전소자를 이용한 진동 발생 메커니즘을 사용하였다. 압전소자를 이용한 방식은 전기에너지를 기계에너지로 변환시켜주는 역압전효과를 이용한다. 초음파를 생성하는 발전부를 트랜스듀서라고 하며 트랜스듀서의 공진주파수와 초음파 발전부의 주파수가 일치되어 공진현상을 일으켜야 가장 효율적인 진동을 할 수 있다<sup>7)</sup>. 이의 출력에 따라 초음파 커팅의 출력이 결정된다.

Fig. 2는 본 실험에서 커팅하기 위한 메커니즘이며 초음파 커터가 초음파의 주기적인 종진동으로 인해 절단되는 것이 이상적이다. 반면에 절삭조건이 맞지 않아 칼날의 이송력으로 절단되는 커팅은 초음파에 의한 커팅이라고 할 수 없다.

초음파 출력이 40% 이하일 때와 절삭속도가 1000 mm/min 이상일 때에는 절단력보다 이송력이 높아 소재의 휨이나 밀림현상이 발생하였다. 그러므로 초음파로 커팅이 가능한 초음파 출력은 50-100%의 범위에서 10% 간격으로, 절삭속도는 100-900 mm/min의 범위

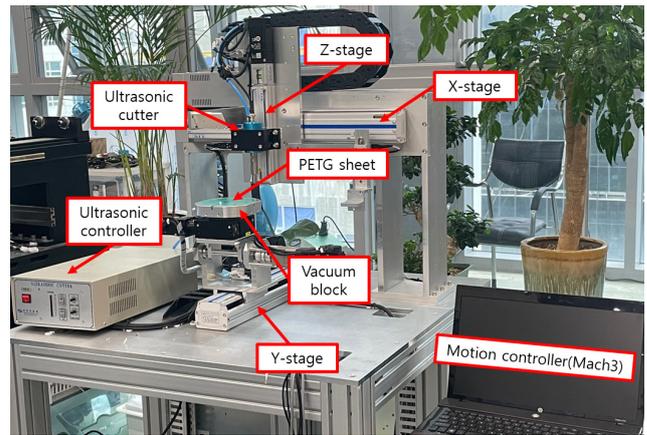


Fig. 1 Ultrasonic cutting system (3-Axis stage)

Table 1 PETG properties

Property	Typical value, units
Specific gravity	1.27
Mold shrinkage	0.002-0.005 mm/mm
Tensile stress @ Yield	28 Mpa (4100 psi)
Tensile stress @ Break	23°C - 33 J
Impact resistance, energy @ Max. Load	33 J (24 ft·lbf), 23°C
Deflection temperature	1.82 Mpa (264 psi), 64°C
Diameter	125 mm
Thickness	0.55 mm

Table 2 Experimental specifications

Item	Type	
x, y, z-Axis robot stage	Ball screw (pitch 10 mm), servo motor	
Function generation	WF1974, NF Inc.	
Ultrasonic unit	Output power (W)	300
	Frequency (kHz)	37.5
Tool (blade)	SD100, Shindong Ultrasonic Inc.	
	Angle (°)	75°
	Thickness (mm)	0.4
	Material	SKH
	Spec	SONOTEC Inc., 3136-5H
Motion controller	Mach3	

에서 200 mm/min 간격으로 변경해가며 실험을 진행하였다. Table 3은 실험조건을 나타낸다.

### 2.3 절단면 측정

초음파 칼날(SONOTEC Inc, 3136-5H)에 전달되는 열에 의해

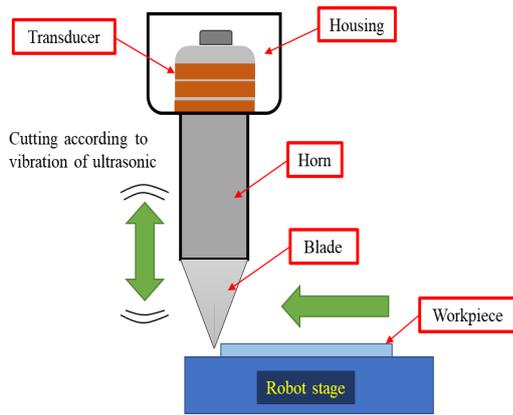


Fig. 2 Cutter mechanism

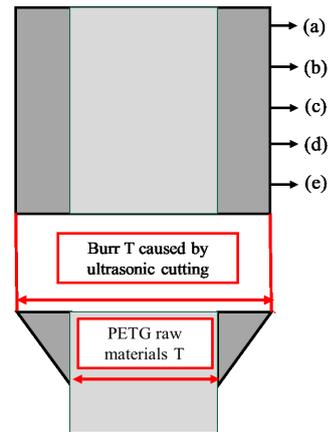


Fig. 3 Burr height

Table 3 Experimental conditions

Item	Type
Ultrasonic power (%)	50, 60, 70, 80, 90, 100
Cutting speed (mm/min)	100, 300, 500, 700, 900

발생된 버의 높이를 측정하였다. 커팅된 PETG 소재의 버 높이를 40배 배율 렌즈 공구현미경(Sometech Inc, ICS pro)으로 측정하였다. 절단면 사진을 측정하여 버의 높이가 가장 작을 때의 조건을 확인한다. Fig. 3은 절단면의 버 높이이다. 버 높이의 측정 방법은 PETG 원소재 두께와 커팅으로 인해 발생한 버 두께의 차로 Fig. 3과 같이 버 높이를 확인하였다. 25 mm의 간격으로 Fig. 3(a)-(c)와 같이 5 포인트의 버의 높이를 측정하였으며 같은 실험조건으로 5회 실행하여 이에 따른 평균값을 도출하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 절단면 분석

Fig. 4의 (a)는 초음파 가공이 정상적인 절삭조건인 절단면 모습이며 (b)는 절삭조건이 부적합하여 초음파 커팅이 제대로 이루어지지 않은 절단면의 비교 사진이다. (a)는 절삭속도 900 mm/min, 초음파 출력 90%의 조건일 때 발생한 절단면이고, 종방향으로 발생하는 주파수로 인해 절단면이 양호한 것을 알 수 있었다. (b)는 칼날의 이송력에 의한 절단면이다. 절삭속도 300 mm/min, 초음파 출력 50%의 조건일 때 발생한 절단면이며, 초음파의 진동이 아닌 칼날의 이송력에 의한 절단으로 소재의 밀집 현상과 휨 현상이 발생하여 절단면이 불규칙한 것을 알 수 있었다. (a)는 균일한 절단면이 형성되었고, (b)는 불규칙한 절단면이 형성되었으며 소재 자체가 휘고 깨진 것을 볼 수 있다.

절삭속도가 낮을수록 초음파 가공 효율이 증가하며, 초음파 출력은 높아질수록 초음파 가공 효율이 증가하는 것을 Table 4를 통해

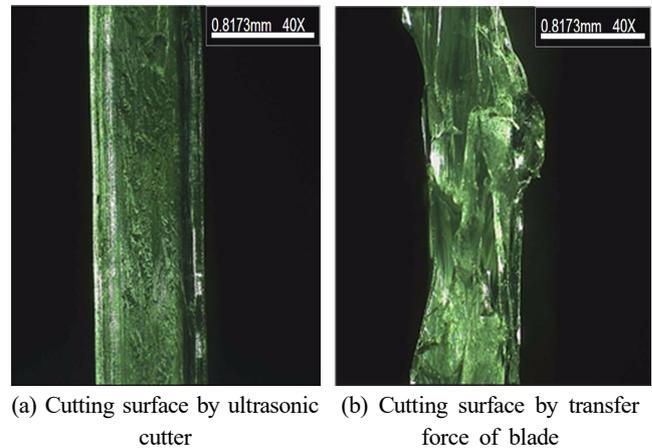


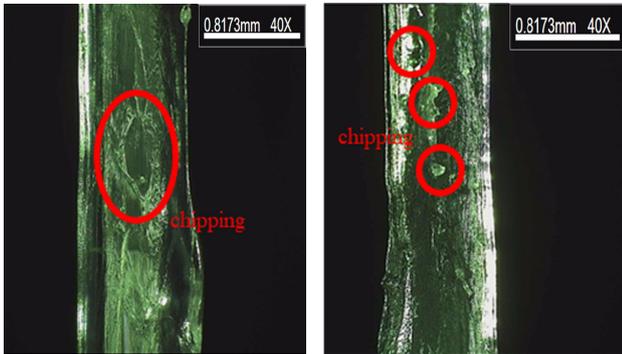
Fig. 4 Comparison of cutting surface by ultrasonic cutter

확인할 수 있다. 절삭속도가 100 mm/min일 때 모든 초음파 조건에서 커팅이 가능하였다. 절삭속도가 낮을수록 절삭속도 대비 초음파의 종진동 횟수가 증가하기 때문에 커팅이 가능한 것을 알 수 있다. Fig. 5 결과는 초음파 출력 50, 60% 조건에서 커팅은 가능하나 (a)와 같이 종방향으로 chipping 현상이 나타나거나 (b)와 같이 부분적으로 chipping 현상이 일어나 불균일한 절단면의 모습을 볼 수 있다. 또한, 초음파 출력이 90%, 100%일 때 모든 절삭조건에서 커팅이 가능하였다. 초음파 출력이 높을수록 초음파 종진동의 진폭이 증가하기 때문에 그만큼의 열이 발생하여 절삭속도가 느리면 절단면에 녹는 현상이 발생하였다. 이는 절삭공구 인선에 가해지는 절삭 저항의 변화가 크며, 절삭속도가 낮아 초음파 진동으로 발생하는 열에 의한 것으로 사료된다.

절삭속도가 가장 낮고, 초음파 출력이 가장 높을 때의 조건인 절삭속도 100 mm/min, 초음파 출력 100% 에서 절단면의 특성이 가장 양호할 것으로 예상되지만 그렇지 않다. Fig. 6의 (a)는 초음파 출력이 높고 절삭속도는 느리기 때문에 버의 높이가 가장 높고, (b)는 속도를 조금 빠르게 하여 버의 높이가 낮아진 것을 확인할

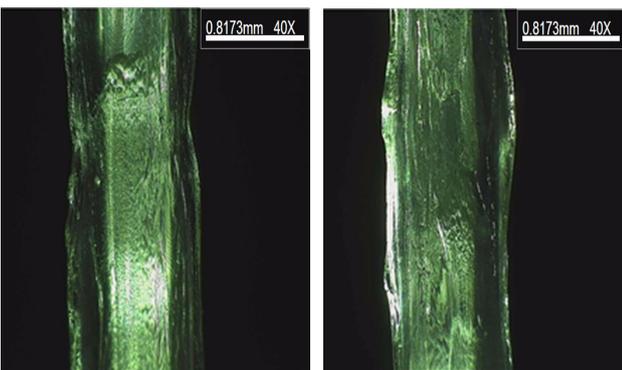
**Table 4 Experimental results (Burr height)**

Cutting speed (mm/min)	100	300	500	700	900
50	326 $\mu\text{m}$ (○)	×	×	×	×
60	298 $\mu\text{m}$ (○)	×	×	×	×
70	272 $\mu\text{m}$ (○)	270 $\mu\text{m}$ (○)	244 $\mu\text{m}$ (○)	×	×
80	327 $\mu\text{m}$ (○)	247 $\mu\text{m}$ (○)	202 $\mu\text{m}$ (○)	×	×
90	336 $\mu\text{m}$ (○)	307 $\mu\text{m}$ (○)	299 $\mu\text{m}$ (○)	187 $\mu\text{m}$ (○)	136 $\mu\text{m}$ (○)
100	364 $\mu\text{m}$ (○)	321 $\mu\text{m}$ (○)	310 $\mu\text{m}$ (○)	309 $\mu\text{m}$ (○)	222 $\mu\text{m}$ (○)



(a) Ultrasonic power 50%, cutting speed 100 mm/min  
(b) Ultrasonic power 60%, cutting speed 100 mm/min

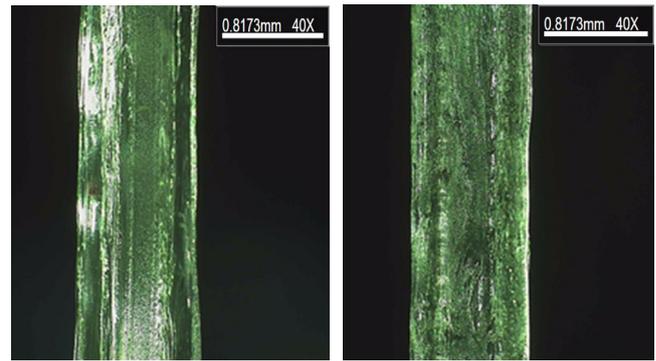
**Fig. 5 Chipping on cutting surface**



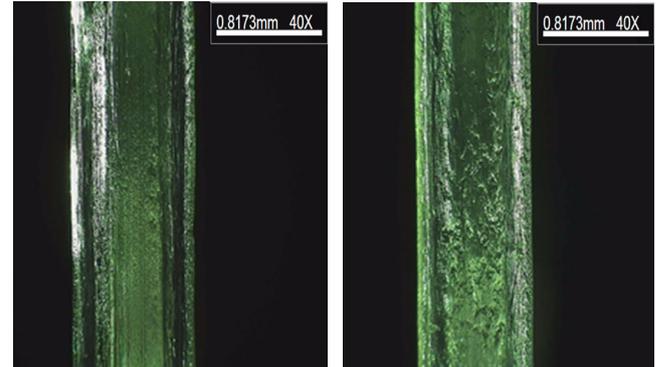
(a) Ultrasonic power 100%, cutting speed 100 mm/min  
(b) Ultrasonic power 100%, cutting speed 300 mm/min

**Fig. 6 Cutting surface melted by ultrasonic vibration heat**

수 있었다. 이는 초음파 종진동으로 인해 발생한 과도한 열의 영향으로 PETG 소재의 절단면이 녹아 버의 높이가 커지는 것으로 판단되며 가장 최적화한 실험조건이라고 할 수 없다.



(a) Cutting speed 100 mm/min (b) Cutting speed 300 mm/min



(c) Cutting speed 500 mm/min (d) Cutting speed 700 mm/min



(e) Cutting speed 900 mm/min

**Fig. 7 Ultrasonic power 90%**

초음파 출력이 90%일 때 절삭속도에 따른 절단면의 모습을 Fig. 7에 나타냈다. 절단면의 균일한 정도가 매우 일정하고 버의 높이 또한 낮으며 chipping 현상도 보이지 않는다. 가장 안정적인 버의 높이와 절단면의 상태를 나타내는 초음파 출력 90% 조건에서 (a)는 절삭속도가 100 mm/min으로 가장 느린 속도에서 버의 높이가 336  $\mu\text{m}$ 이며, (b)는 절삭속도 300 mm/min, 버의 높이가 307  $\mu\text{m}$ , (c)는 절삭속도 500 mm/min, 버의 높이가 299  $\mu\text{m}$ , (d)는 절삭속도 700 mm/min, 버의 높이가 187  $\mu\text{m}$ , (e)는 절삭속도 900 mm/min, 버의 높이가 136  $\mu\text{m}$ , 순으로 절삭속도가 높아질수록 절단면의 특성이 더 좋아지고, 버의 높이가 더 낮아지는 것을 확인할 수 있었다. 이는 적합한 초음파의 종진동으로 인해 모든 절삭속도 조건에서

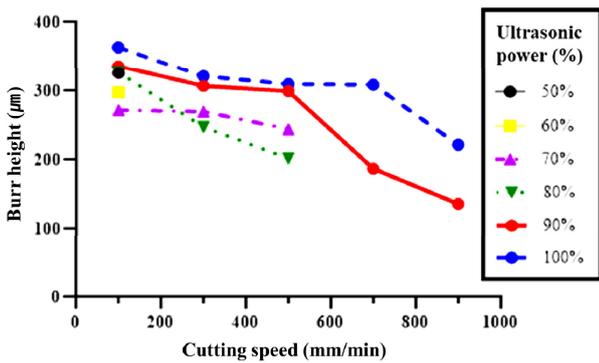


Fig. 8 Burr height as a function of cutting speed

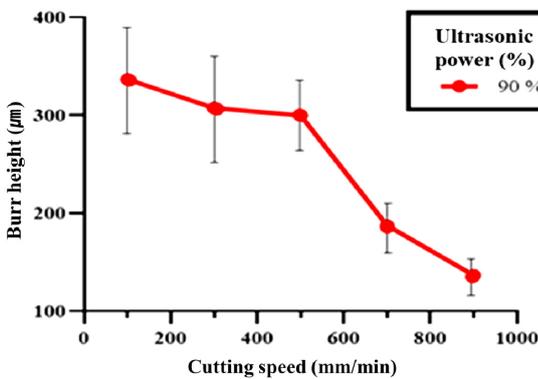


Fig. 9 Burr height as a function of cutting speed (ultrasonic power 90%)

매끄럽게 절단된 것으로 생각된다. 또한, 초음파 출력이 90%보다 낮은 조건에서 초음파 커팅이 되지 않는 부분이 있는 것은 절삭속도 대비 출력이 낮아 소재가 밀리거나 흰 것으로 보인다. 절삭속도가 1000 mm/min일 때 모든 초음파 출력 조건에서 절단되지 않았는데 이 또한 이러한 이유이다.

측정한 데이터를 토대로 절삭속도에 따른 버의 높이를 초음파 출력별로 정리하여 Fig. 8에 표현하였다. Fig. 8에서 전체적인 그래프의 꺾은선이 절삭속도가 높아질수록 버의 높이는 낮아지는 것을 한눈에 알 수 있다. 초음파 출력 90%가 100%보다 열에 의한 영향을 덜 받기 때문에 90%의 버의 높이가 100%의 버의 높이보다 낮게 발생한 것으로 판단된다.

초음파 출력별로 비교해보았을 때 90%의 출력일 때가 가장 우수한 결과를 보이고 있으며 편차를 확인하기 위해 Fig. 9과 같이 버 높이의 측정값의 최댓값, 최솟값 그리고 평균값을 표기하여 편차를 나타냈다. 절삭속도가 높아질수록 버 높이가 낮아지고 버 높이의 편차도 감소하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 절삭속도가 900 mm/min, 초음파 출력은 90%일 때 버의 높이가 136 µm로 가장 낮아 PETG를 절단하기에 최적의 조건을 도출하였다. 반면, 절삭속도 100 mm/min, 초음파 출력이 100%일 때 버의 높이가

364 µm로 가장 높다. 속도는 느리고 출력이 높기 때문에 초음파 종진동으로 인한 열의 영향을 과도하게 받아 버가 크게 발생한 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

초음파 커터에 의한 치아교정용 투명장치인 PETG의 안정적인 버 발생과 커팅 효율을 극대화하기 위한 실험을 진행하였고, 실험의 절단면을 공구현미경으로 측정하고 분석하였다.

분석 결과 절삭속도가 낮을수록 초음파 가공 효율이 증가하며, 초음파 출력은 높아질수록 초음파 가공 효율이 증가한다. 그러나 절삭속도가 가장 낮을 때와 초음파 출력이 가장 높을 때의 두 조건이 중첩되어 절삭열이 발생하여 높은 버의 크기를 나타내었다. 이는 최적의 조건이 될 수 없으므로 절단면의 균일정도가 우수하고, 버의 높이가 가장 낮게 발생하는 초음파 출력이 90%일 때 모든 절삭조건에서 가장 양호한 절단면의 모습을 확인할 수 있었다. 초음파 출력 100% 이상부터는 초음파 종진동으로 인한 열이 과도하게 발생하여 PETG 소재가 녹으면서 버의 높이가 높아지는 것으로 판단되었다.

가공되는 조건 중에서 절삭속도가 증가할수록 절단면의 균일한 정도가 우수하며 버의 높이가 확연히 낮아지는 결과를 확인하였다. 버의 높이가 136 µm로 가장 낮은 조건인 초음파 출력 90%, 절삭속도 900 mm/min로 최적화 공정조건을 도출하였다. 이는 버의 높이가 가장 높은 조건인 초음파 출력 100%, 절삭속도 100 mm/min의 버 높이 364 µm일 때보다 37% 감소한 결과를 보였다.

절삭조건에 따라 초음파 진동으로 인한 열의 영향을 배제할 수 없는 것이 본 연구의 한계점이다. 추후 열에 의한 소재변형의 문제를 고려하여 냉매가스 혹은 에어쿨링 등을 적용하여 최적화 실험을 해야할 것으로 판단된다.

#### 후기

이 본 연구는 중소벤처기업부 “투명 교정시트 형상 자동 커팅 장비개발(S2884114)” 사업의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

#### References

- [1] Seo, G. H., 2013, A Study on the Machining of Difficulty-to-cut Materials using Ultrasonic Vibration Assisted Cutting, Master Thesis, Incheon University, Republic of Korea.
- [2] Liu, J. W., Jin, J., Ko, T. J., Baek, D. K., 2012, Hole Fabrication

for Glass Using Ultrasonic Machining, Proc. Int. Conf. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf., 249.

- [3] Liu, J. W., Jin, J., Ko, T. J., Baek, D. K., 2013, Study of Optimal Machining Conditions of Ultrasonic Machining By Taguchi's Method, Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, 37:2 213-218, <http://doi.org/10.3795/KSME-A.2013.37.2.213>.
- [4] Singh, R., Khamba, J. S., 2006, Ultrasonic Machining of Titanium and Its Alloys: A Review, J. of Materials Processing Technology, J. Mater. Process. Technol., 173:2 125-135, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.10.027>.
- [5] Song, G. H., 2020, A Study on the Development of Ultrasonic Transducer and Ultrasonic Spindle Indirect Measurement Algorithm for Adaptive Control and the Applicability of CFRTP Cutting Process with Ultrasonic Knife, Doctoral Dissertation, Inha University, Republic of Korea.
- [6] Takeyama, H., Lijima, N., 1988, Machinability of Glassfiber Reinforced Plastics and Application of Ultrasonic Machining, CIRP Ann-Manuf. Technol., 37:1 93-96, [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)61593-5](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)61593-5).
- [7] Kim, W. Y., Song, K. H., Kim, J. H., Cho, M. W., 2018, Study on the Design of Transducer for Ultrasonic Spindle, Proc. Int. Conf. Manuf. Technol. Eng. Spring Conf., 198.

	<p><b>Hye-Min Maeng</b>                      Research engineer in the Department of R&amp;D Center of OL tech Inc. Her research interest is mechanical design.                      E-mail: mhm@oltech.kr</p>
	<p><b>Han-Bit Choi</b>                      Associate Research engineer in the Department of R&amp;D Center of OL tech Inc. His research interest is mechanical design.                      E-mail: chb@oltech.kr</p>
	<p><b>Dong-Wook Lim</b>                      Ph.D candidate in the Department of Mechanical Engineering, Inha University. His research interest is Machine.                      E-mail: slimer92@naver.com</p>
	<p><b>Chan-Il Park</b>                      CEO in the Department of OL tech Inc. His research interest is electric apparatus.                      E-mail: oltech2020@oltech.kr</p>
	<p><b>Dong-Seong Kang</b>                      Director in the Department of R&amp;D Center of OL tech Inc. His research interest is mechanical design.                      E-mail: kds@oltech.kr</p>