

## 다구찌 방법을 이용한 초음파 가공의 최적가공조건에 관한 연구

유군위\* · 김 건\* · 고태조\*† · 백대균\*\*

\* 영남대학교 기계공학과, \*\* 경북대학교 기계연구소

### Study of Optimal Machining Conditions of Ultrasonic Machining By Taguchi's Method

Jun Wei Liu\*, Jian Jin\*, Tae Jo Ko\*† and Dae Kyun Baek\*\*

\* Dept. of Mechanical Engineering, Yeungnam Univ.,

\*\*\* Institute of Mechanical Engineering Technology, Kyungpook Nat'l Univ.

(Received July 4, 2012 ; Revised July 29, 2012 ; Accepted July 30, 2012)

**Key Words:** Ultrasonic Machining(초음파 가공), Brittle Materials(취성 재료), Taguchi Method(다구찌 방법)

**초록:** 초음파 가공(Ultrasonic Machining:USM)은 새로운 기계가공기술 분야 중의 하나이다. 초음파 가공 과정은 비열, 비화학, 그리고 비전도의 방법이기 때문에 공작물 재료의 물리적, 화학적 변화가 없다. 이러한 특성으로 인해 초음파 가공기술은 유리, 세라믹 등과 같은 취성재료의 가공에 적합하다. 그러나 단점으로는 초음파 진동을 이용하여 취성재료를 가공하는 경우 크랙이 빈번하게 발생한다. 본 논문에서는 유리와 세라믹의 미세 구멍가공에서 다구찌 방법을 이용하여 크랙발생을 최소화하는 최적의 가공 조건을 얻고자 하였다. 이를 통해 공작물의 입구 및 출구에서 발생하는 크랙 현상을 감소시켰다.

**Abstract:** Ultrasonic machining (USM) is a new method used in metal cutting. This process does not involve heating or any electrochemical effects, causes low surface damage, has small residual stress, and does not rely on the conductivity of the workpiece. These characteristics are suitable for the machining of brittle materials such as glass or ceramics. However, the use of USM for brittle materials generates cracks on the workpiece. Therefore, in this study, Taguchi's method was used to optimize the processing conditions of micro holes drilled in glass and ceramics. This method was used to successfully reduce the number of cracks at the entrance and the exit of the micro holes.

## 1. 서 론

최근 반도체, 전자 부품 및 항공기나 자동차 산업 분야 등에서 보다 정밀하고 미세한 부품의 수요가 증대되고 있다. 특히 고강도와 고경도를 가진 소재에 대한 미세가공의 필요성이 증가하고 있다. 미세 형상중에서는 미세 구멍 가공이 대부분이며, 미세 구멍을 가공하기 위한 방법으로는 방전 가공, 전해 가공, 레이저 가공, 초음파 가공 등의 방법이 있다. 이 중에서 특히 초음파 가공법은 유리, 세라믹 등과 같은 취성 재료나 비전도성 재료들을 가공하는데 적합한 방법이다.<sup>(1,2)</sup>

초음파 가공은 전통적인 기계적 재료 가공방법

이 아니기 때문에 일반적으로 재료 제거율이 낮다. 그러나 이 가공은 공작물 재료의 전기적 또는 화학적 특성에 제약 받지 않는다.<sup>(3)</sup> 또한, 초음파 가공은 비열, 비화학, 그리고 비전도의 방법이기 때문에 공작물 재료의 물리적, 화학적 변화가 발생하지 않는다. 이러한 특성으로 인해 초음파 가공기술은 전기 전도성과 관련없이 H<sub>R</sub>C40 이상의 고경도 재료나 유리나 세라믹과 같은 취성재료의 가공에 적합하다.<sup>(4)</sup>

초음파 가공은 1927년 Wood와 Loomis에 의해 도입된 이후,<sup>(5)</sup> 초음파 드릴링, 초음파 입자가공, 초음파 절삭, 초음파 치수가공 또는 슬러리 드릴링 등으로 명명해왔다.<sup>(6)</sup> 그러나 오늘날 초음파 충격연삭 또는 초음파가공(USM)이 가장 일반적인 명칭이다.<sup>(3)</sup>

초음파 가공에서는 20,000 Hz 이상의 높은 진동수의 전기적 에너지가 진동자와 증폭기에 의해 기

† Corresponding Author, tjko@yu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

계적 진동으로 변환된다. Fig. 1과 같이 축방향의 진동은 혼(horn)을 통과하면서 증폭이 된다. 따라서 공진의 관점에서 큰 변위를 얻기 위해서는 혼/공구계의 설계가 매우 중요하게 된다. 일반적으로 진폭은 수  $\mu\text{m}$  에 불과하다. 가공을 위해 정적 하중이 공구를 통해 가공물에 가해지고, 액체중에 지립을 함유시킨 슬러리가 가공영역, 즉, 공구의 진동면과 가공물의 가공면간 사이에 공급된다.<sup>(6)</sup>

지립은 진동에 의하여 가공면에 충격을 가하며, 가공은 주로 지립의 충격력에 의하여 행해진다. 지립의 1회 충돌에 의해 제거되는 재료의 양은 적지만, 지립의 충돌회수가 많으므로 가공조건이 적당히 유지되면 가공속도는 상당히 크게 된다. 지립으로는 실리콘 카바이드, 보론 카바이드, 공업용 다이아몬드 등이 많이 쓰인다.

한편, 초음파 진동을 이용하여 취성재료를 가공하는 경우 가공 메커니즘이 취성파괴를 바탕으로 하기 때문에 구멍가공의 경우 입구 및 출구부분에서 크랙 또는 치핑이 빈번하게 발생한다.<sup>(7)</sup> 구멍가공에서의 치핑을 방지하기 위해 Pei 등은 회전 초음파 가공에서 세라믹 복합재료의 경우에 대해 실험계획법의 사용 가능성에 대해 연구하였다.<sup>(8,9)</sup> 동일한 목적으로 유한요소법 및 실험을 적용하였다. 그러나 이 연구는 회전 초음파의 경우이고, 일반 초음파 가공의 경우 연구가 거의 없었다.

따라서 본 연구에서는 유리와 세라믹의 미세 구멍 가공에서 입구 및 출구에서 발생하는 크랙 또는 미소 치핑을 감소하기 위한 가공조건을 실험설계와 다구찌 방법을 통하여 최적화 하고자 한다.

## 2. 다구찌 방법을 이용한 실험

### 2.1 인자 및 수준의 선정

초음파 가공에서 가공되는 구멍의 크랙 또는 치핑은 다양한 인자들에 의해 결정된다. 이러한 여러 인자들의 영향을 정량적으로 파악하기 위하여 모든 인자들의 조합을 고려하여 실험할 경우 실험횟수는 크게 늘어나게 된다. 따라서 실험횟수를 최소화하고 외부 교란인자가 작용해도 일정한 구멍이 가공되도록 할 필요가 있다. 이를 위해 다구찌 실험법을 이용하여 실험을 한다.

다구찌방법의 강건설계는 제어할 수 있는 영향력이 큰 인자를 찾아내어 이 인자들의 영향력을 최대로 하여 잡음의 영향력을 최소로 하는 것이다. 교란인자의 영향으로부터 품질을 강건하게 유지하기 위하여 SN비(signal to noise ratio)를 사용한다. SN비는 신호대 잡음의 비율을 뜻하는 것으로 신호입력의 힘과 잡음이 주는 영향의 힘의 비율로서 나타낸다. 즉, 각각의 조절인자의 SN비를 크게 만드는 값을 그 인자의 값으로 결정하면 이렇게 선정된 값은 잡음에 대하여 강건해진다.<sup>(10)</sup>

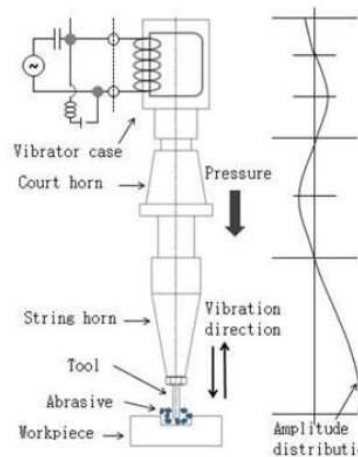
SN비는 목적함수, 즉 특성치에 의해 그 정의가 달라지게 되는데 특성치는 망목(normal is best), 망소(lower is better), 망대(higher is best)특성으로 나뉘어진다. 본 연구에서 크랙이 작을 수록 좋은 망소 특성임으로 망소특성 분석에 준하여 실험하였다.

망소특성의 경우 SN비는<sup>(10)</sup>

$$SN = -10 \log \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2 \right) \quad (1)$$



(a)



(b)

Fig. 1 (a) Compact 500W ultrasonic machine (b) Principle of ultrasonic machining

이다. 식(1)에서  $n$ 은 측정값의 수를 나타내고  $Y_i$ 는 측정된 특성값을 나타내고 기대값은  $E(Y^2)$ 가 된다. SN비의 진수부분은  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i^2$ 의 추정치라 볼 수 있다. 따라서 진수부분의 감소(기대값의 감소)는 SN비의 증가를 가져온다.

Soda lime glass 및 Alumina ceramic 재료에 대한 예비실험을 통하여 초음파 가공에서 크랙에 영향을 미칠 수 있는 인자 및 수준을 선정하였고, 이를 Table 1에 나타내었다. 공구는 직경 1 mm의 환봉으로 하였다. 이 경우 크랙에 영향을 미치는 인자는 초음파 파워(ultrasonic power), 이송속도(feed rate), 공구 길이(tool length), 왁스 코팅(wax coating)으로 결정되었다. 왁스코팅의 경우 공작물의 상부에 고체왁스 (Sonic-Mill wax #600-001, USA)<sup>(11)</sup>를 코팅하는 경우이다. 초음파 파워의 경우 파워를 조정함에 따라서 30, 50, 70%의 출력인 경우 변위의 크기는 각각 11, 14, 17  $\mu\text{m}$ 에 해당한다.

2.2 실험설계 및 실험결과

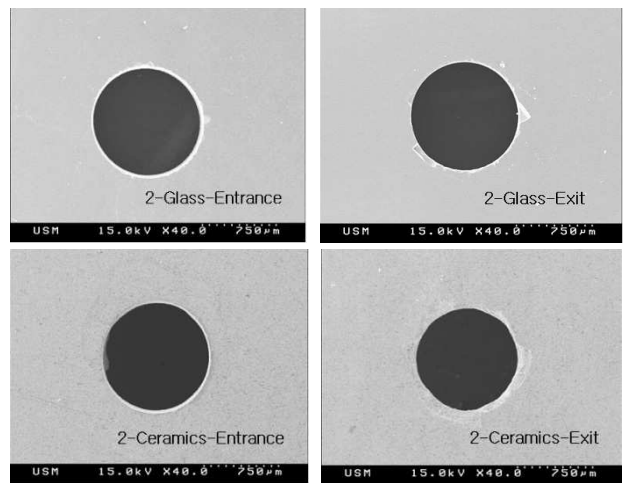
실험계획법에서 직교배열표를 사용하는 이유는 재현성, 바람직한 최적조건 결정 및 안정성에 대한 평가와 실험의 크기를 확대시키지 않고도 실험에 많은 인자를 넣을 수 있다는 데 있다. 본 실험에서 총 9번의 실험횟수를 가지는 4인자 3수준계 직교배열표( $L_93^4$ )를 적용하였다.

Table 2는 초음파 가공 실험조건을 나타내며, 이를 이용하여 Table 3에는 초음파 파워, 이송속도, 공구 길이, 왁스 코팅의 인자들을 배치하였고 4개의 인자에 해당되는 값들을 정하여 나타내었다. Table 3의 1열에 초음파 파워(A), 2열에 이송속도(B), 3열에 공구 길이(C), 4열에 왁스 코팅(D)을 할당하였다. 각 실험의 결과는 인자할당의 오른쪽에 나타냈다. 가공된 구멍의 크랙은 SEM을 이용하여 측정하였으며 Table 3의 측정 결과값은 측정

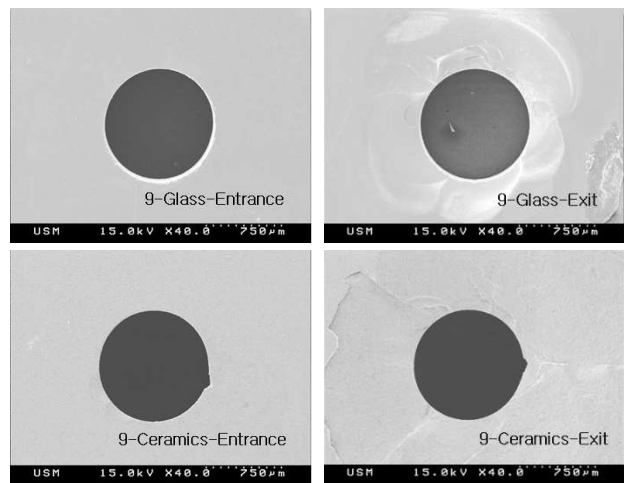
값의 평균값이다. 측정된 측정데이터로부터 SN비를 계산하여 Table 3에 나타냈다. SN비에 따른 2번과 9번의 결과를 이용하여 차이가 제일 큰 것을 사진으로 나타냈다. Fig. 2에서 (a)는 좋은 결과(2번)이

Table 2 Experiment conditions

Items	Type	
Ultrasonic unit	Frequency (kHz)	20
	Feed rate ( $\mu\text{m/s}$ )	2.5, 5, 10
Abrasive material	Aluminum Oxide #1000	
Circle tool	Material ( $\Phi$ )	Hard metal (1 mm)
	Length (mm)	7, 10, 13
Workpiece	Soda lime glass (1 T), Alumina ceramics (0.5 T)	
Wax thickness	1 mm	



(a)



(b)

Table 1 Four factors and three levels

Control factors	Des.	Lev. 1	Lev. 2	Lev. 3
Ultrasonic power (%)	A	30 (11 $\mu\text{m}$ )	50 (14 $\mu\text{m}$ )	70 (17 $\mu\text{m}$ )
Feed rate ( $\mu\text{m/s}$ )	B	2.5	5	10
Tool length (mm)	C	7	10	13
Wax coating	D	Top	Bottom	Top/Bottom

Fig. 2 (a) Best condition in orthogonal arrays (b) Worst condition in orthogonal arrays

**Table 3** Orthogonal arrays and SN ratio of experimental results

Exp. No.	A	B	C	D	Glass		Ceramics		SN ratios
					Entrance crack (μm)	Exit crack (μm)	Entrance crack (μm)	Exit crack (μm)	
1	1	1	1	1	31.97	501.50	13.15	591.91	-51.78
2	1	2	2	2	50.30	86.65	32.98	69.62	-36.01
3	1	3	3	3	22.17	174.29	21.63	75.81	-39.67
4	2	1	2	3	19.53	191.06	27.90	105.61	-40.87
5	2	2	3	1	31.40	248.10	17.73	208.26	-44.24
6	2	3	1	2	96.78	156.21	19.44	93.25	-40.30
7	3	1	3	2	90.22	121.03	69.28	354.18	-45.83
8	3	2	1	3	61.42	97.34	49.86	228.76	-42.31
9	3	3	2	1	60.83	471.39	36.85	849.44	-53.75

**Table 4** Factors affecting the crack

Level	Ultrasonic power (%)	Feed rate (μm/s)	Tool length (mm)	Wax coating
1	-42.49	-46.16	-44.80	-49.93
2	-41.80	-40.85	-43.54	-40.71
3	-47.30	-44.57	-43.25	-40.95
Delta	5.49	5.30	1.55	9.21
Rank	2	3	4	1

고 (b)는 좋지 않은 결과(9 번)의 입구 및 출구사진을 나타냈다.

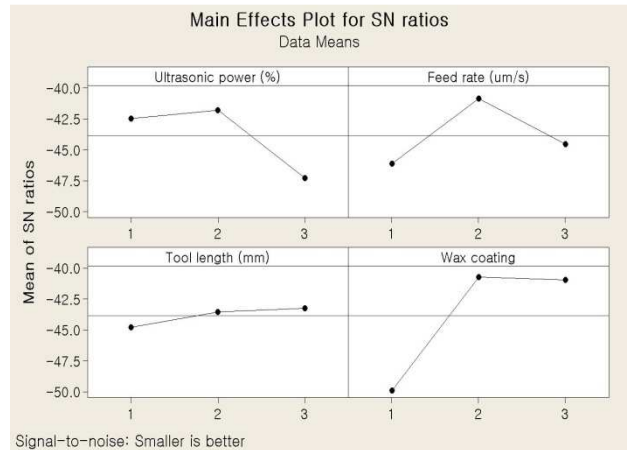
### 3. 실험결과 분석

#### 3.1 최적조건 도출

초음파 가공에서 최적조건을 도출하기 위하여 Minitab을 이용하였다. Minitab을 통해서 Table 3의 각 인자와 수준의 효과를 구했다. 예를 들어 A인자, 수준 1의 효과  $A_1$ 는 실험번호 1, 2, 3에 해당됨으로 SN비의 평균으로 계산된다. 즉,

$$A_{avr} = \frac{(-51.78) + (-36.01) + (-39.67)}{3} = -42.49$$

이 되며 같은 방법으로 모든 인자와 수준에 그 효과를 계산할 수 있다. Table 4는 계산한 인자 및 수준의 효과를 나타냈고, Fig. 3은 SN비에 대한 주효과도를 나타냈다.



**Fig. 3** Plot for SN ratios (glass and Ceramics)

SN비에 대한 주 효과도의 분석을 통하여 초음파 파워(50%), 이송속도(5 μm/s), 공구 길이(13 mm), 왁스 코팅(Bottom)의 최적 가공조건을 찾았다. 그리고 Table 4에서와 같이 크랙에 가장 큰 영향을 주는 인자는 왁스 코팅으로 나타났다.

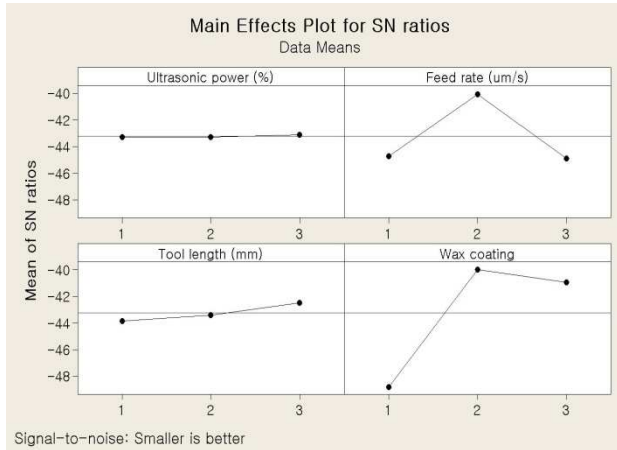
#### 3.2 민감도 분석

한편, Fig. 4와 Fig. 5에서는 유리와 세라믹의 SN비에 대해 각각 분석하였다. 즉, 인자들의 영향이 서로 다른 재료에 대해 어떻게 미치는지를 파악함이 목적이다.

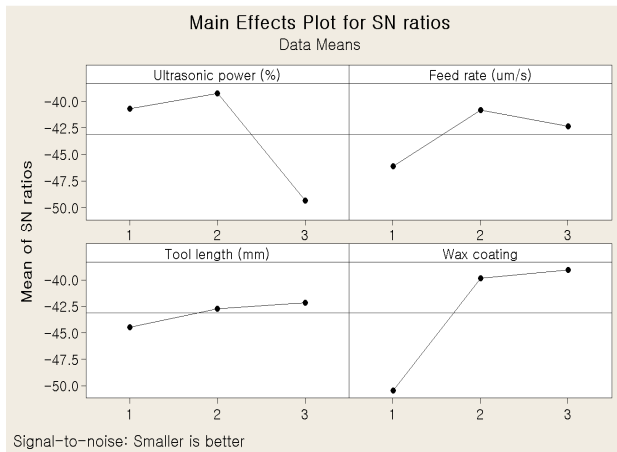
유리 가공에서는 초음파 파워 수준에 대한 SN비는 값이 비슷하였고, 세라믹 가공에서 초음파 파워 수준에 대한 SN비의 값이 많은 차이를 보였

**Table 5** Experiment result with optimal conditions

Glass		Ceramics		SN ratio
En. crack (μm)	Ex. crack (μm)	En. Crack (μm)	Ex. crack (μm)	
19.47	28.73	18.62	69.83	-32.06



**Fig. 4** Plot for SN ratios (glass)

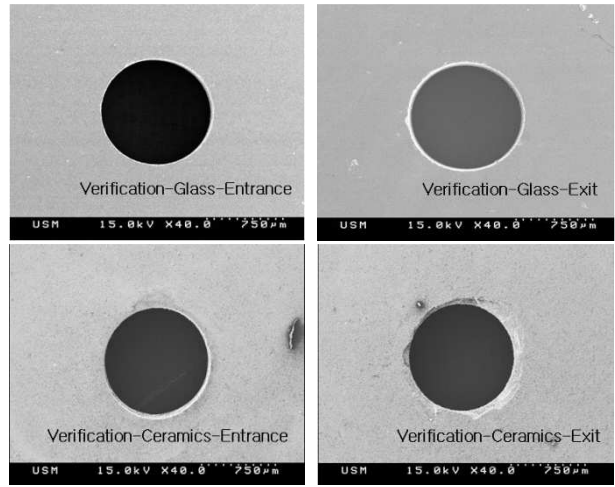


**Fig. 5** Plot for SN ratios (ceramics)

다. 다른 조건인 이송속도, 공구 길이, 왁스 코팅의 3 인자는 재료의 종류에 따라서 크게 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

**3.3 검증 실험**

실험을 통하여 얻어진 최적의 가공조건에 대한 검증 실험을 실시하였다. Table 5에는 검증 실험결과를 나타냈고, Fig. 6에서는 얻어진 최적의 가공조건을 이용하여 가공된 유리와 세라믹의 구멍이다. 발생한 크랙의 길이를 측정하였고 계산된 SN비는



**Fig. 6** Micro-hole SEM image with optimal conditions

-32.06이었다. 이 결과는 Table 3에서 가장 좋은 조건인 2번의 SN비 -36.01보다 더 낮다. 따라서 얻어진 최적의 가공조건을 정확하게 판단할 수 있었다.

**4. 결론**

초음파 진동을 이용하여 취성재료인 유리와 세라믹을 가공할 때 크랙을 줄이는 최적의 조건을 탐색하기 위하여 본 논문에서는 다구찌 실험법을 적용하였다.

유리와 세라믹 구멍가공 실험결과와 SN 비 분석을 통하여 구멍가공에서 크랙발생에 미치는 영향이 가장 큰 인자는 공작물에 완충용 왁스의 코팅 처리 유무이다. 즉, 왁스코팅을 통해 구멍가공시 입구 및 출구부분에 발생하는 크랙의 발생을 많이 줄일 수 있다. 또한, 공작물 속으로 침투하는 속도인 이송속도도 크랙 발생에 많은 영향을 미쳤다. 그리고 세라믹 가공의 경우에는 유리와 달리 초음파 파워가 크랙발생에 민감하게 영향을 미친다. 따라서 세라믹 가공의 경우 공구의 진폭에 영향을 미치는 전류의 크기(초음파 파워) 선택을 달리해야 함을 알 수 있다.

**후 기**

본 연구는 교육과학기술부의 중견연구자지원사업의 연구비 지원 (과제번호 2011-0013496)으로 수행되었습니다.

**참고문헌**

(1) Singh, R. and Khamba, J. S., 2006, "Ultrasonic

- Machining of Titanium and Its Alloys: A Review,” *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 173, pp. 125~135.
- (2) Ko, J. H., Shaw, K. C., Chua, H. K. and Lin, R. M., 2011, “Cusp Error Reduction Under High Speed Micro/Meso Scale Milling with Ultrasonic Vibration Assistance,” *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*,” Vol. 12, No. 1, pp. 15~20.
- (3) Benedict, G. F., 1987, *Nontraditional Manufacturing Processes*, Marcel Dekker, Inc, New York, pp. 67~86 [Chapter 6].
- (4) Soundararajan, V. and Radhakrishnan, V., 1986, “An Experimental Investigation on the Basic Mechanisms Involved in Ultrasonic Machining,” *Int. J. MTDR*, Vol. 26, No. 3, pp. 307~321.
- (5) Neppiras, E. A., 1956, “Report on Ultrasonic Machining,” *Metalworking Production*, Vol. 100, pp. 1283~1288.
- (6) Thoe, T. B., Aspinwall, D. K. and Wise, M. L. H., 1998, “Review on Ultrasonic Machining,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 38, No. 4, pp. 239~255.
- (7) Kainth, G.S., Nandy, A. and Singh, K., 1979, “On the Mechanics of Material Removal in Ultrasonic Machining,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 19, pp. 33~41.
- (8) Li, Z. C., Jiao, Y., Deines, T. W., Pei, Z. A. and Treadwell, 2005, C., “Rotary Ultrasonic Machining of Ceramic Matrix Composites: Feasibility Study and Designed Experiments,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 45, pp. 1402~1411.
- (9) Li, Z. C., Cai, L., Pei, Z. J. and Treadwell, C., 2006, “Edge-Chipping Reduction in Rotary Ultrasonic Machining of Ceramics: Finite Element Analysis and Experimental Verification,” *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, pp. 1469~1477.
- (10) Peace, G. S., 1995, *Taguchi Methods*, Addison Wesley, pp. 273~337 [chapter 17].
- (11) [www.sonicmill.com](http://www.sonicmill.com), 2012, Sonicmill Company.