

# 초음파 케비테이션을 이용한 디버링 기술

원종률<sup>†</sup> · 최영재\* · 이석우\* · 최헌종\*

## Deburring Technology Using Ultrasonic Cavitation

Jong Youl Won, Young Jae Choi, Suk Woo Lee, Hon Zong Choi

**Key Words :** Deburring(디버링), Ultrasonic vibration(초음파 진동), Ultrasonic cavitation(초음파 케비테이션)

### Abstract

Surface and edge finishing processes are important technological operations of in parts machining. Quality of the finished parts directly affect the performance of the whole product. Especially, edge quality, which depends on burr control, is extremely important. Burrs are undesirable projections of the material beyond the edge of the workpiece. A number of deburring processes have been developed such as barreling, brushing, chemical methods etc. But, there are only few publications in the area of applying ultrasonics to deburring. When ultrasonic vibration propagates in the liquid medium, a large number of bubbles are formed. These bubbles generate an extremely strong force, which can be used to remove burrs. Cavitation is used as a term to describe the erosion of parts caused by the action of cavities in liquid. The object of this study is to analyze the effects of ultrasonic cavitation in the deburring process. For this purpose, we introduce a new ultrasonic cavitation method, which efficiently removes the burrs. Experimental parameters to verify the deburring effects of ultrasonic cavitations are ultrasonic power, amplitude, distant of the transducer from the workpiece, deburring time and abrasive. It has been shown that deburring with ultrasonic cavitation in water is effective to burrs.

### 기호설명

$P$  : Sound pressure

$a$  : Horn Radius

$c$  : Sound Velocity

$U_0$  : Initial Velocity

$\rho_c$  : density

### 1. 서론

여기에 일반적으로 버(Burr)는 가공 후 모서리 부분에 발생하는 돌출된 부분이라고 정의한다. 대부분 기계가공 시 발생하는 버는 부품의 가공정밀도를 나쁘게 할 뿐만 아니라 조립시에도 많은 문제점들을 발생시킨다. 특히 정밀 전자 부품의 성

능을 떨어뜨리며, 자동화 라인의 가공 공정 및 조립 공정시 버로 인하여 많은 문제가 발생된다.

최근 부품의 소형화, 정밀화가 진행되며, 버의 크기 또한 미세하게 형성되고 있다. 따라서 미세 버의 해결 방안 또한 매우 어렵게 만들고 있다. 미세 버를 위한 연구는 버의 생성을 제어하는 분야(1),(2),(3)와 생성된 버를 제거하는 분야(4),(5),(6)로 크게 나뉘며, 이를 위한 여러 방법들이 연구되고 있다. 현재, 일반적인 버 제거 방법은 연마제(abrasive), 바렐(barrelling)이나 브러쉬(brushing) 등을 이용하는 기계적인 버 제거 방법과 에칭 등 화학적인 반응을 이용하는 버 제거 방법 등이 있다. 그러나 일반 버 제거 방법과 미세 버 제거 방법을 비교해 볼 때, 제품자체의 정밀도와 크기가 작기 때문에 미세 버 제거는 가공면에 큰 손상을 미칠 가능성이 커지게 된다. 따라서 마이크로 버 제거 기술들이 활발히 연구되어지고 있다. Yoshihide Shibana는 마이크로 버의 제거와 표면 상태에 관한 연구를 하였으며(7), S.H.Yeo는 초음파 디버링과 케비테이션(cavitation)에 관하여 연구를 하였다(8). 그러나 초음파 진동을 이용한 버제거 기술은 초음

<sup>†</sup> 한국생산기술연구원 나노가공팀

E-mail : wjr@kitech.re.kr

TEL : (041)589-8282 FAX : (041)589-8280

\* 한국생산기술연구원 나노가공팀

과 진동 특성 중 극히 일부분의 변수에 대한 실험이기 때문에 제품의 양산라인에 적용하기에는 많은 한계를 가지고 있다. 본 논문에서는 마이크로 버 제거를 위하여, 초음파 진동 특성 중 출력(power), 초음파 혼 끝단과 마이크로 버 간의 거리, 초음파 디버링 시간과 지립 종류등을 실험 변수로 하였다. 실험 변수에 따른 초음파 디버링 효과를 파악하기 위하여 SEM 과 비접촉식 레이저를 이용하였으며, 초음파 디버링 전후의 버의 형상과 크기 및 표면 상태 등을 분석하였다.

## 2 장 실험

### 2.1 실험 장치

Fig.1 은 초음파 디버링에 사용된 실험 장치이다. 초음파 혼은 Z 축 방향으로 0.01mm 단위로 이동이 가능하며 상, 하 이동 시 이동정밀도를 높이기 위하여 베어링 부싱을 이용하였다. 실험은 가공물과 초음파 혼을 물(또는 지립이 포함된 물)속에 설치하였으며, 물이 담긴 수조는 사각형의 아크릴로 제작되었다. 가공물과 초음파 혼의 거리 및 수조의 바닥과 가공물의 거리 조절이 가능하다. Table 1 은 초음파 발진 앰프 및 액추에이터의 사양이다. 사용된 앰프의 공진주파수는 20kHz 이며, 혼 끝단의 최대 진폭은 65 μm, 최대 파워는 750W 이며, 공진 주파수는 부하에 따라 자동 튜닝이 가능하다. 실험 시 혼은 물속 10mm 정도 삽입한 후 실험하였다.

**Table 1** Ultrasonic transducer and actuator specification

Specification	Value	Specification	Value
Ultrasonic power	750W	Horn material	Titanium (grade 5)
Resonance frequency	20kHz	Horn diameter	13mm
Transducer impedance	41Ω	Maximum amplitude	65 μm



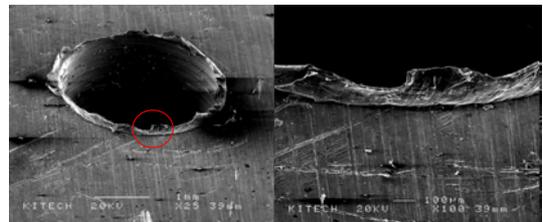
(a) Ultrasonic deburring system  
**Fig. 1** Photographs of experimental set-up

### 2.2 버 시편

Table 2 는 실험용 버 제작을 위한 드릴가공 조건이다. 시편은 두께 5mm 의 알루미늄이며, 직경 3mm 의 드릴을 이용하여 버 제작을 하였다. 드릴 버는 원주 위치에 따라 형상과 크기가 매우 불규칙 적이나, 평균적으로 약 120 μm 정도의 높이를 가지고 있었다. 버의 높이는 비접촉식 레이저를 사용하여 원주방향으로 5 Point 를 측정하였으며, 또한 SEM 사진을 통하여 버의 형상을 살펴보았다. Fig. 2 는 실험에 사용한 버의 SEM 사진이다.

**Table 2** Drilling conditions

Tool diameter (mm)	Speed (rpm)	Feed rate (mm/min)	Workpiece thickness (mm)	Workpiece material
3	3000	30	5	Al 6061



**Fig. 2** SEM photograph of burr

### 2.3 초음파 특성

초음파의 파워는 초음파를 발생시키는 액추에이터와 앰프의 특성에 따라서 달라진다. 그러나 초음파 Deburring 시 직접적인 영향을 주는 인자는 음압의 세기이다. 음압의 세기는 초음파 혼 끝단과 가공물 사이에 있는 매질의 성분과 포화도에 영향을 받으나, 액추에이터 끝단의 진폭이 가장 큰 영향을 미친다.(9)

공구 끝단의 상, 하 진동은 초음파 혼과 가공물 사이에 있는 물을 통하여 에너지를 전달한다. (10) 이때 전달된 에너지가 물속에 캐비테이션을 발생시킨다. 캐비테이션에 의한 폭발력을 이용하여 버 제거가 가능하다. 따라서 물을 통해 전파되는 음파의 세기에 대한 예측이 필요하다. 음파의 세기를 예측하기 위해 혼의 끝단에서 발생하는 속도를 이용하였다. 초음파 발진 후 3 차원 공간의 매질안에서의 음파 세기 분포는 식 <1>과 같다(11).

$$p(r, \theta, t) = j \frac{\rho_0 c}{2} U_0 \frac{a}{r} e^{j(\omega t - kr)} \left[ \frac{2J_1(ka \sin \theta)}{ka \sin \theta} \right] \quad <1>$$

혼 끝단의 거리에 따른 음압 분포를 알아보기 위해 측정된 앰프출력 100%시의 끝단 진폭 65 μm, 끝단속도 8.79m/s, 혼의 반지름 6.5mm 값을 이용하였으며, 매질은 물을 이용하였다. 초음파 압력 분포는 혼 끝단의 수직방향, θ=0 의 값을 계산하

였으며, Fig. 3 에 나타나 있다. 초음파 압력분포는 매질 특성과 초기속도, 밀도, 주파수 등의 영향을 기본적으로 받으나, Fig 3 에서 보는 것과 같이 거리에 의한 감쇠가 큰 특징을 나타낸다. 계산 결과 혼 끝단의 압력은 최대 20 기압 정도 됨을 알 수 있었다. 물속에서의 캐비테이션은 음압이 약 1-8 기압 정도에서 최초 발생하기 시작하는 것으로 알려져 있다.(12) 그러므로 본 연구에 사용된 실험 장치는 물속에서 캐비테이션을 발생시키기에는 충분한 출력을 가지고 있다.

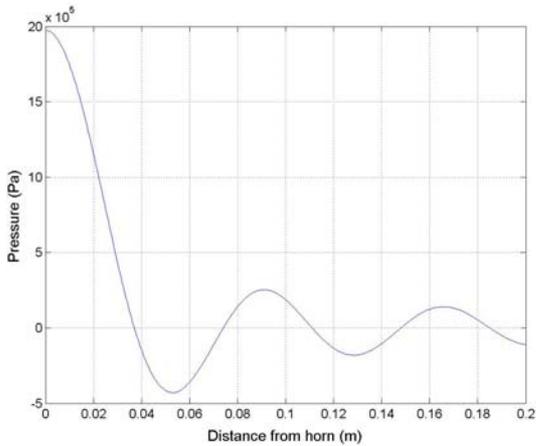


Fig. 3 Sound pressure estimated along the centerline according to distance

3 장 실험 결과

3.1 초음파 디버링 실험후의 형상

초음파 파워는 750W 를 100%로 설정한후, 50%에서 100% 까지 변화시키며 시험하였으며, 시편과 초음파 혼 사이의 거리는 0.5mm 부터 2mm 까지 시험하였다. 디버링을 한 시간과 지립등의 조건은 아래의 Table 3 과 같다.

Table 3 Experimental conditions

Experimental parameter		Values
Power (%)		50, 60, 70, 80, 85, 90, 95, 100
Distance (mm)		0.5, 0.75, 1, 1.5, 1.75, 2
Deburring Time (sec)		90, 100, 110, 120, 130, 140
Abrasive (type)	SiC	#8000, #800
	WA	#8000, #20000

디버링 이후의 버 제거 형상을 촬영한 시편은 파워 100%, 거리 1mm, 디버링 시간 120 초를 실험 조건으로 선정한 시편을 사용하였다. 실험결과는 Fig. 4 에 나타나 있으며, Hole 원주에 따른 버 제거량에 차이가 있었다. 이는 초기 버의 형상과 크기가 위치 마다 균일하지 않기 때문에 나타나는 특징이다. 또한 디버링 후 Hole 주위 표면에 일부 손상이 된 것을 확인 할 수 있었다. 이는 드릴링 가공 중에 버가 발생하는 부분이 변형을 하기 때문에, 초음파 디버링 시 그 부분이 제거된 것으로 생각 되어진다. Fig. 4 는 실험 전후의 버의 형상을 비교한 것이다. 비교시 버가 완전히 제거됨을 확인 할 수 있었다.

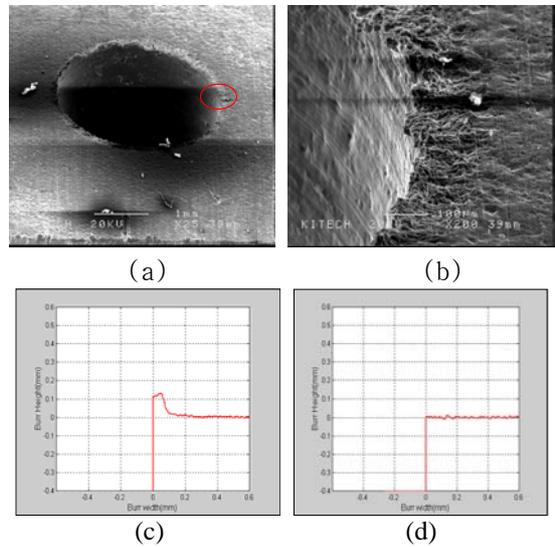


Fig 4. Hole shape by SEM after ultrasonic deburring(a)(b), Hole shape before ultrasonic deburring (c) vs. after ultrasonic deburring(d)

아래의 Fig.5 는 시간과 거리에 따른 버 제거 형상을 광학 촬영한 사진으로 버 제거 경향을 육안으로 확인이 가능하다. 시간이 경과함에 따라 디버링 효과가 증가하며, 거리가 늘어감에 따라서 디버링 효과가 감소한다는 것을 알 수 있다.

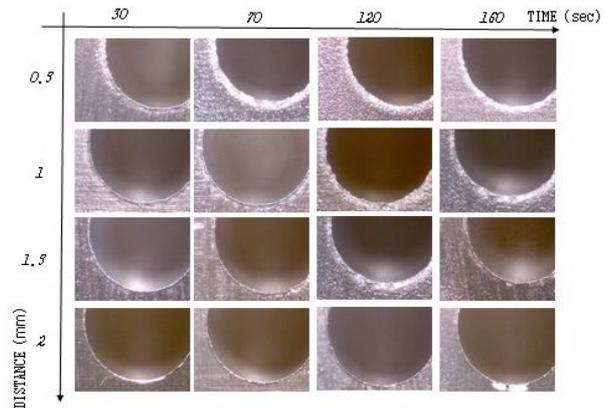


Fig. 5 Hole shape after ultrasonic deburring

3.2 시간에 따른 초음파 디버링 효과

버는 크기가 시편마다 각각 다르고, 형상 또한 다르게 나타난다. 본 연구에서는 원주방향의 5 점을 측정하여 평균 버의 높이를 기준으로 버의 제거 형태를 식 <2>와 같이 디버링 효과(Deburring effect)를 정의하여 평가하였다. 디버링 효과는 버의 제거량을 높이를 기준으로 백분율로써 표현하였다.

$$Deburring\ effect = \frac{(initial\ burr\ height - remain\ burr\ height)}{initial\ burr\ height} \times 100 \quad \langle 2 \rangle$$

디버링 시간에 따른 deburring effect 를 알아보기 위한 실험을 실시하였다. 초음파 파워는 100%, 시편과 혼과의 거리는 1mm 로 고정한 후 디버링 시간은 30 초부터 180 초 까지 30 초 간격으로 실험을 실시하였다. Fig. 6 에 실험 결과를 나타내었으며, 실험결과 150 초 이상 에서는 버가 완전히 제거되는 것을 알 수 있었다. 또한 초기에 많은 버가 제거되나 시간이 경과하면서 버의 제거량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 버의 부피가 시편과 접해 있는 부분이 버의 상부보다 크기 때문에 나타나는 현상이다.

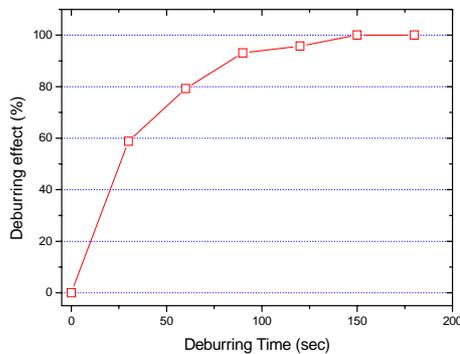


Fig. 6 Deburring effects according to time

3.3 출력(Power)에 따른 초음파의 디버링 효과

초음파의 출력에 따른 디버링 효과를 알아보기 위한 실험을 하였다. 혼의 끝단과 혼과의 거리를 1mm, 디버링 시간을 120sec 로 고정한후 초음파 Amplifier 의 출력을 50%~100%로 변화하면서 실험을 하였다. 실험 결과는 Fig. 7 에 나타나 있으며, 초음파 파워와 Deburring effect 는 비례하는 특성을 나타낸다. 결과적으로 80% 이상의 파워에서는 최소 85% 이상을 제거할 수 있었으며, 평균 100 μm 이상의 버가 제거된 것을 알 수 있었다. 또한 최대 출력 100% 일 경우에는 버가 완전히 제거됨을 확인할 수 있다.

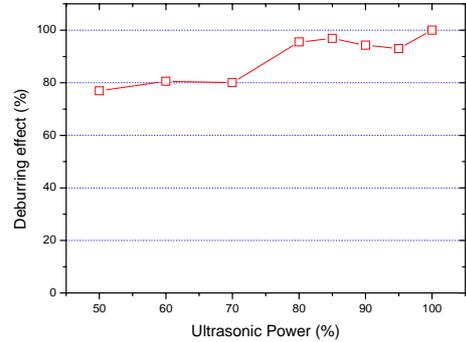


Fig. 7 Deburring effect according to power

3.4 거리에 따른 초음파 디버링 효과

거리에 따른 초음파 디버링 효과를 알아보기 위하여 실험하였다. 디버링 시간은 120sec, 초음파 출력은 100%로 고정한 후 혼의 끝단과 가공물 사이의 거리를 0.5mm 부터 2mm 까지 0.25mm 씩 변화하면서 디버링 실험을 실시하였다. 실험 결과가 Fig. 8 에 나타나 있으며, 초음파 혼과 가공물 사이의 거리가 1.25mm 까지 변화하는 경우에는 버의 제거량이 비슷함을 알 수 있지만 거리가 1.25mm 이상이 되면 디버링 효과가 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 현상은 Fig. 3 에서 나타낸 것과 같이 초음파 압력이 거리에 따라 급격히 감소하기 때문에 초음파 혼 끝단에서 발생한 에너지의 전달이 약하게 될 뿐만 아니라 캐비테이션의 발생도 급격히 감소하기 때문에 나타나는 현상이다.

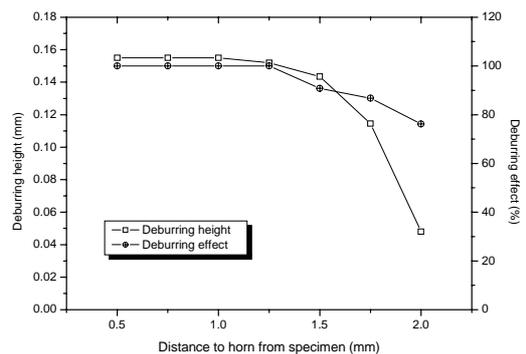


Fig. 8 Deburring effect depend on distance

3.5 거리 및 시간에 따른 디버링 효과

시간 및 거리에 따른 효과를 알아보기 위하여 시간 및 거리에 따른 효과와 거리에 따른 효과의 결과 시간을 180 초 까지 변화하고, 거리는 0.5mm 씩 변화하며, 파워는 100%로 유지하였다. 실험후 결과는 아래의 Fig. 9 와 같다. 결과에서 보듯이 거리가 1mm 까지는 버가 완전히 제거 되었으며,

1.5mm 이상에서는 시간이 경과하여도 완전히 버를 제거하지는 못한다. 0.5mm 떨어졌을 경우에는 60 초 이전에 완전히 버가 제거된다. 버의 제거 양상은 익스포넨셜 그래프와 같이 나타나며 시간에 따른 영향보다 거리에 따른 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

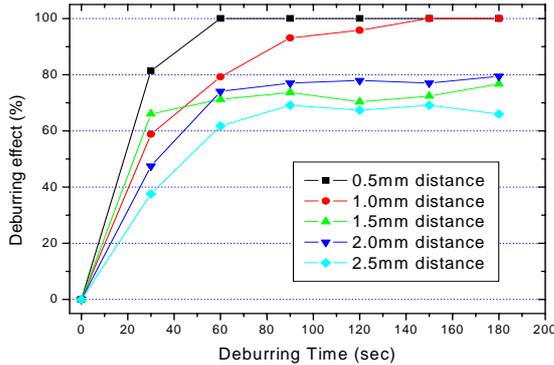


Fig. 9 Deburring effects according to time and distance

3.6 지립에 따른 Ultrasonic deburring effect

초음파에 의한 Deburring 에서 Abrasive 의 특성 들을 알아보기 위하여 지립을 4 가지로 시험하였다. SIC 의 8000 매쉬와 800 매쉬, 알루미늄과 WA 8000 매쉬를 각각 파워 100%, 거리 1mm, 시간은 120sec 로 설정한 후 실험하였다. 결과는 아래의 Fig. 10 과 같이 나타난다.

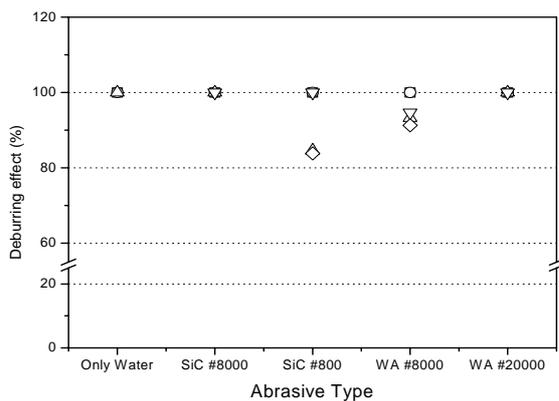


Fig.10 Deburring effects according to different Abrasives

물만을 사용하여 버를 제거하는 경우에는 초음파 캐비테이션을 이용하나, 지립을 사용한 경우에는 지립의 충격력으로 버를 제거한다. Fig. 11 에서 처럼 지립의 충격력으로 버를 제거할 경우 시편의

원주방향의 버의 크기가 일정하게 줄어드는 것을 관찰 할 수 있으며, 시편의 표면 품위가 좋아지는 것을 관찰 할 수 있다. 그러나 #800 지립의 경우와 같이 지립의 크기가 클 경우에는 침전에 의해서 버가 완벽하게 제거 되지 않는다. 지립의 공급 방식이나, 지립의 유동방향을 제어 하면 보다 좋은 특성을 얻을 것으로 판단된다.

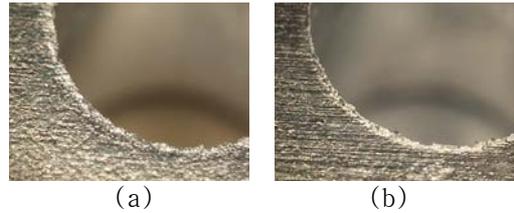


Fig. 11 Removed shape of burr without abrasive (a) vs with(b) abrasive

4. 결론

마이크로 버 제거 방법으로 초음파 진동을 이용하였으며, 초음파가 물속에서 진동 시 발생하는 캐비테이션이 버제거에 어떠한 효과를 미치는 지를 살펴보고자 하였다. 본 연구에서 사용된 실험장치로 실험결과 아래와 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- [1] 초음파 디버링 효과에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 시편과 혼과의 거리이다.
- [2] 시편과 혼의 거리가 1mm 이하일 경우에는 완벽한 디버링 효과를 얻을 수 있다.
- [3] 시편과 혼의 거리가 1.5mm 이상일 경우에는 완벽한 디버링 효과를 기대할 수 없다.
- [4] 초음파의 파워는 디버링 효과와 비례한다.
- [5] 초음파 조사 시간은 디버링 효과와 비례하나, 거리 1.5mm 이후에는 시간에 대한 영향이 거의 나타나지 않는다.
- [6] 지립을 사용한 초음파 디버링의 경우 물만을 사용한 경우보다 표면품위 및 디버링 효과의 균질성이 좋아진다.

참 고 문 헌

(1) S. L.Ko : 2000, A study on Burr Formation in face milling , KSPE, A Fall Scientific Journal 2000, pp. 810-813

- (2) J.K.Lee : 2000, Study on Mechanism of Burr Formation in Drilling, KSPE, A Fall Scientific Journal 2000, pp. 823-826
- (3) J.E.Chang : 2001, Development of Drill Geometry for Burr Minimization in Drilling, KSPE, A Fall Scientific Journal 2001, pp. 991-914
- (4) H.Z.Choi : 2002, Technology of Micro Deburring Using the Ultrasonic Vibration, KSPE, A Fall Scientific Journal 2002, pp. 250-253
- (5) J.W.Chae : 2002, Analysis of Deburring Characteristics by Magnetic Abrasive Finishing Method, KSPE, A Fall Scientific Journal 2002, pp. 241-244
- (6) Masanori Nakagawa : 2002, Deburring by Water Jet, PSFDT 2nd Asia-Pacific Forum, pp. 179-185
- (7) Yoshihide Shibano : 1994, Ultrasonic Micro Deburring Application, PSFDT, 3rd international Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, pp. 138-145
- (8) S.H. Yeo, Bryan B. K. A. Ngoy and L.Y. Chua : 1997, Ultrasonic Deburring, The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 333-341,.
- (9) N.A. Tsochatzidis, P.Guiraud, A.M. Wilhelm, H. Delmas : 2001, Determination of velocity, size and concentration of ultrasonic cavitation bubbles by the phase-Dopple technique, Chemical Engineering Science 56, pp. 1831-1840,
- (10) Bogdan Niemczewski : 1999, Chemical activation of ultrasonic cavitation, Ultrasonics Sonochemistry 6, pp. 211-216,
- (11) Lawrence E. Kinsler, Austin R. Frey, Alan B. Coppens, James V. Sanders : 1982, Fundamentals of Acoustics, third Edition, John Wiley & Sons, pp. 179
- (12) D.E Hughes : 1961, The disintegration of bacteria and other micro-organisms by the M.S.E. Mullard ultrasonic disintegrator, J. Biochem. Microbiol. Tech. Eng. 3 , pp. 405-433