

◆특집◆ 정밀부품의 표면가공 및 디버링 기술

초음파 캐비테이션을 이용한 디버링 기술

최헌종*, 이석우*, 최영재*, 고성림**

Deburring Technology Using Ultrasonic Cavitation

Hon Zong Choi*, Seok Woo Lee*, Young Jae Choi*, Sung Lim Ko**

Key Words : Micro burr (미세 버), Deburring(디버링), Ultrasonic vibration(초음파 진동), Ultrasonic cavitation(초음파 캐비테이션), Deburring effect (디버링 효과)

1. 서론

일반적으로 버(Burr)는 가공 후 모서리 부분에 발생하는 돌출된 부분으로서 대부분 기계가공 시 발생한다. 버는 부품의 가공정밀도를 나쁘게 할 뿐만 아니라 조립시에도 많은 문제점들을 발생시키는데, 정밀 전자 부품에서는 제품의 성능을 떨어뜨리고, 자동화 라인의 가공 공정 및 조립 공정에서도 버로 인하여 많은 문제가 발생된다. 최근 부품의 소형화, 정밀화가 진행되면서, 버의 크기가 작아지게 됨에 따라 버의 제거 기술도 연구되어지고 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 연구되어지고 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 방법이 있다. 그러나 이러한 전통적인(일반적인) 버 제거 방법을 이용한 미세 버 제거를 위한 연구가 활발히 진행되고 있는데, Yoshihide Shibana는 미세 버의 제거와 표면 상태에 관한 연구를 하였으며⁷, S.H.Yeo.는 초음파 디버

링과 캐비테이션 (cavitation)에 의한 버 제거 기술들에 대하여 연구를 하였다⁸. 그러나 초음파 진동을 이용한 버제거 기술은 초음파 진동 특성인 캐비테이션의 영역 및 집중등 극히 일부분의 변수에 대한 실험이기 때문에 제품의 양산라인에 적용하기에는 많은 한계를 가지고 있다. 기존에 논문에서는 초음파를 이용하여 디버링을 할 경우 디버링 효과가 있다는 검증을 하였다. 본 논문에서는 초음파 디버링에 영향을 주는 인자를 선정하여 각 인자들이 초음파 디버링에 효과에 영향을 정량적으로 측정하였다. 인자로는 출력(power), 공구 끝단과 미세 버 간의 거리, 초음파디버링 시간등을 실험 변수로 하였다. 디버링 효과는 디버링 전의 높이에 대한 디버링 후의 높이의 백분율로 표현을 하였으며, 버의 높이를 측정하기 위하여 SEM과 비접촉식 레이저를 사용하였다.

2. 실험

2.1 실험 장치

Fig.1은 초음파 디버링에 사용된 실험 장치이다. 초음파 혼은 Z 축 방향으로 0.01mm 단위로 이송이 가능하며 상, 하 이송 시 흔들림을 방지하기 위하여 베어링 부싱을 이용하였다. 물(또는 지럽이 포함된 물)속에서 초음파 디버링 실험을 하기 위하여 사각형의 아크릴로 수조를 제작하였다. 실험조건을 다양하게 할 수 있도록 가공물과 초음파 혼의 거리

* 한국생산기술연구원 나노가공공정팀

Tel. 032-850-0301, Fax. 032-850-0310

Email choihz@kitech.re.kr

** 건국대학교 기계설계학과

및 수조의 바닥과 가공물의 거리 조절이 가능하도록 하였다. Table 1은 초음파 발진 앰프 및 액추에이터의 사양이다. 사용된 앰프의 공진주파수는 20kHz, 혼 끝단의 최대 진폭은 65 μ m, 최대 파워는 750W이며, 공진 주파수는 부하에 따라 자동 튜닝이 된다. 실험 시 가공물은 물의 표면에서 약 10mm 정도 위치에 설치 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	41 Ω	Maximum amplitude	65 μ m

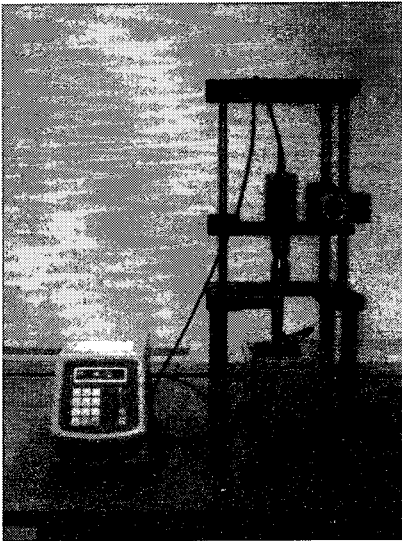


Fig. 1 Photographs of experimental set-up

2.2 버 가공물

Table 2는 실험용 버 제작을 위한 드릴가공 조건이다. 드릴링 버는 구멍 가공 시 끝단에서 나타나는 일반적인 소성변형으로 형성된 버이다. 가공물은 두께 5mm의 알루미늄이며, 직경 3mm의 드릴을 이용하여 버 제작을 하였다. 드릴 버는 원주 위치에 따라 형상과 크기가 매우 불규칙 적이나, 평균적으로 약 120 μ m 정도의 높이를 가지고 있었다. 버의 높이는 비접촉식 레이저를 사용하여 원주방향

으로 5 Point를 측정하여 평균값으로 하였으며, 또한 SEM 사진을 통하여 버의 형상을 살펴보았다. Fig. 2는 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

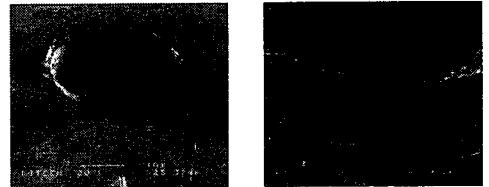


Fig. 2 SEM photograph of burr

2.3 초음파 특성

초음파의 파워는 초음파를 발생시키는 액추에이터와 앰프의 특성에 따라서 달라진다. 그러나 초음파 디버링시 직접적인 영향을 주는 인자는 음압의 세기이다. 음압의 세기는 초음파 혼 끝단과 가공물 사이에 있는 매질의 성분과 포화도에도 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 발생과 폭발을 반복하는데, 캐비테이션의 폭발력을 이용하여 버 제거가 가능하다. 따라서 물을 통해 전파되는 음파의 세기에 대한 예측이 필요하다. 초음파 진동을 하는 음파의 세기를 예측하였는데, 끝단에서 속도와 진폭을 측정하여 초음파 발진 후 3차원 공간의 매질 안에서의 음파 세기 분포는 식 (1)과 같다¹¹.

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

혼 끝단의 거리에 따른 음압 분포를 알아보기 위해 측정된 앰프출력 100%시의 끝단 진폭은 65 μ m,

끝단속도 8.79m/s 이었으며, 혼의 반지름 6.5mm 값과 매질을 사용한 물을 밀도 값을 이용하였다. 초음파 압력 분포는 혼 끝단의 수직방향, $\theta = 0$ 의 값인 경우의 혼 끝단에서 거리에 따른 초음파 압력분포는 매질 특성과 초기속도, 밀도, 주파수 등의 영향을 기본적으로 받으나, Fig 3에서 보는 것과 같이 거리에 의한 감쇠가 큰 특징을 나타낸다. 계산 결과 혼 끝단의 압력은 최대 20기압(atm) 정도 됨을 알 수 있었다. 물속에서의 캐비테이션은 음압이 약 1-8 기압 정도에서 최초 발생하기 시작하는 것으로 알려져 있으므로¹² 본 연구에 사용된 실험 장치는 물속에서 캐비테이션을 발생시키기에 충분한 출력을 가지고 있음을 알 수 있었다.

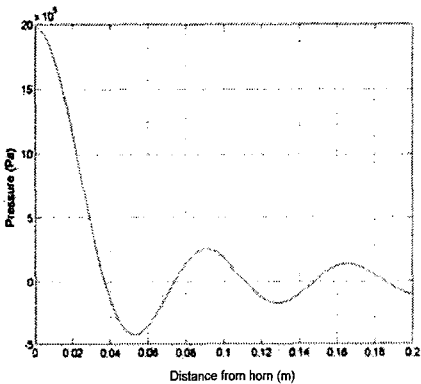


Fig. 3 Sound pressure estimated along the centerline according to distance

3. 실험 결과

3.1 초음파 디버링 실험후의 형상

초음파 발전기의 최대 파워인 750W를 100%로 설정한 후, 파워를 50%에서 100% 까지 변화시키며 시험하였으며, 가공물과 초음파 혼 사이의 거리는 0.5mm 부터 2mm 까지 변화시키면서 실험을 하였는데 정확한 실험 조건은 Table 3에 나타내었다.

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

초음파 파워 100%, 거리 1mm, 디버링 시간을 120초로 실험한 결과를 Fig. 4에 나타내었는데, Hole 원주에 따른 버 제거량에 차이가 있었다. 이는 초기 버의 형상과 크기가 위치마다 균일하지 않기 때문에 나타나는 특징이다. 또한 디버링 후 Hole 주위 표면에 일부 손상된 부분을 확인 할 수 있었는데, 이는 드릴링 가공 중에 버가 발생하면서 이 부분이 변형에 따른 응력이 존재하기 때문에, 초음파 디버링 시 그 부분이 제거된 것으로 생각 되어진다. Fig. 4는 실험 후의 버가 제거된 것을 촬영한 사진이며, Fig. 5는 실험 전후의 버의 형상을 측정 한 결과를 비교한 것으로써 초음파 디버링으로 버가 완전히 제거됨을 확인 할 수 있었다.

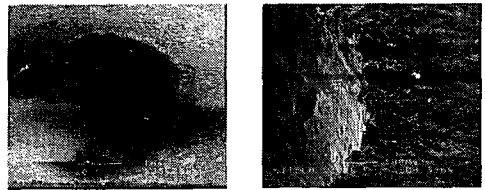
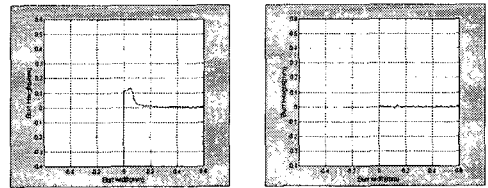


Fig 4. SEM photograph deburring effect



(a) Before

(b) After

Fig 5. Burr size according to ultrasonic deburring

Fig.6은 시간과 거리에 따른 버 제거 효과를 광학 촬영한 사진으로 실험 조건에 따른 버 제거 효과를 확인 할 수 있다. 시간이 경과함에 따라 디버링 효과가 증가하며, 혼과 가공물 사이의 거리가 늘어감에 따라서 디버링 효과가 감소한다는 것을 알 수 있다.

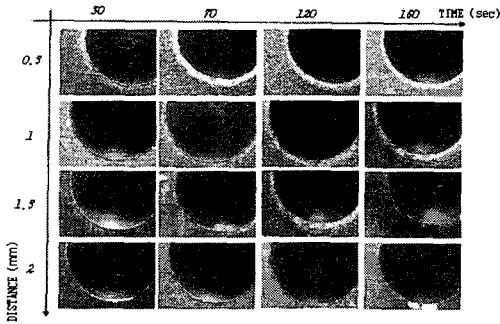


Fig. 6 Deburring effect according to experiment parameter

3.2 시간에 따른 초음파 디버링 효과

버의 크기는 가공물마다 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 =

$$\frac{(\text{initial burr height} - \text{remain burr height})}{\text{initial burr height}} \times 100 \quad (2)$$

디버링 시간에 따른 디버링 효과를 알아보기 위한 실험을 실시하였다. 초음파 파워는 100%, 가공물과 혼과의 거리는 1mm로 고정된 후 디버링 시간은 30초부터 180초 까지 30초 간격으로 실험을 실시하였다. Fig. 7에 실험 결과를 나타내었으며, 실험 결과 150초에서는 버가 완전히 제거되는 것을 알 수 있었다.

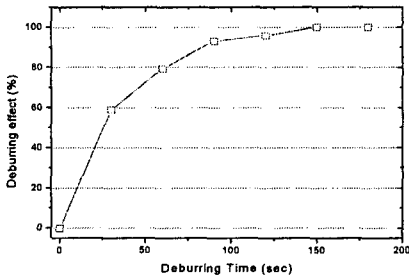


Fig. 7 Deburring effects according to time

또한 초기에 많은 버가 제거되나 시간이 경과 하면서 버의 제거량이 줄어드는 것을 알 수 있는데 이는 버의 두께가 가공물과 접해 있는 부분이 버의 상부보다 크기 때문에 나타나는 현상이다.

3.3 출력(Power)에 따른 초음파 디버링 효과

초음파의 출력에 따른 디버링 효과를 알아보기 위하여 혼의 끝단과 가공물의 거리를 1mm, 디버링 시간을 120초로 고정된 후 초음파 발전기의 출력을 50%~100%로 변화하면서 실험을 하였다. 실험 결과는 Fig. 8에 나타내었으며, 초음파 파워와 디버링 효과는 비례하는 특성을 알 수 있었다. 결과적으로 80% 이상의 파워에서는 최소 85% 이상의 버를 제거할 수 있었으며, 평균 100µm 이상의 버가 제거된 것을 알 수 있었다. 또한 최대 출력 100% 일 경우에는 버가 완전히 제거됨을 확인할 수 있었지만, 가공물 표면에도 캐비테이션에 의한 영향이 나타났다.

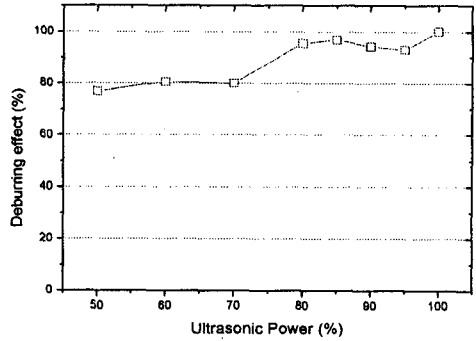


Fig. 8 Deburring effect according to power

3.4 거리에 따른 초음파 디버링 효과

거리에 따른 초음파 디버링 효과를 알아보기 위하여 실험하였다. 디버링 시간은 120초, 초음파 출력은 100%로 고정된 후 혼의 끝단과 가공물 사이의 거리를 0.5mm부터 2mm까지 0.25mm씩 변화하면서 디버링 실험을 실시하였다. 실험 결과가 Fig. 9에 나타내었으며, 초음파 혼과 가공물 사이의 거리가 1.25mm까지는 버의 제거량이 비슷함을 알 수 있지만 거리가 1.25mm 이상이 되면 디버링 효과가 급격히 감소됨을 알 수 있었다. 이러한 현상은 Fig. 3에서 나타낸 것과 같이 초음파 압력이 거리에 따라 급격히 감소하기 때문에 초음파 혼 끝단에서 발

생한 에너지의 전달이 약하게 될 뿐만 아니라 캐비테이션의 발생도 급격히 감소하기 때문에 나타나는 현상이다.

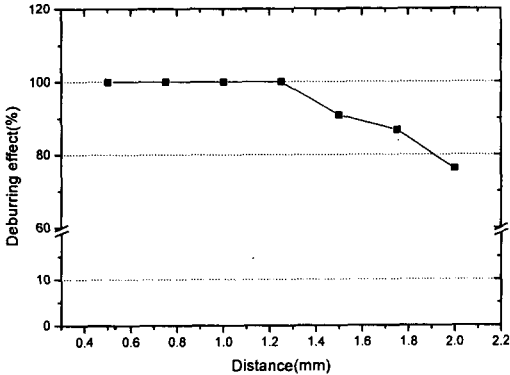


Fig. 9 Deburring effect depend on distance

3.5 거리 및 시간에 따른 디버링 효과

디버링 시간과 혼과 가공물 사이의 거리에 따른 디버링 효과를 알아보기 위하여 초음파 출력은 100%로 하고, 디버링 시간을 0~180초, 혼과 가공물 사이 거리를 0.5~2.5mm까지 변화하면서 실험한 결과를 Fig. 10에 나타내었다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 혼과 가공물 사이의 거리가 1mm 이내에서는 버가 완전히 제거 되었지만, 1.5mm 이상에서는 시간이 경과하여도 완전히 버를 제거하지는 못하였다. 0.5mm 떨어졌을 경우에는 60초 이전에 완전히 버가 제거 되었는데, 버의 제거 양은 익스포넨셜 그래프와 같이 나타나며 시간에 따른 영향보다 거리에 따른 영향이 크게 나타남을 알 수 있다.

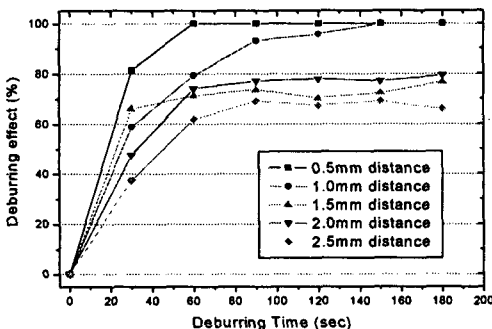


Fig. 10 Deburring effects according to time and distance

4. 결론

초음파 디버링의 효과를 알아보기 위하여 Al6061에 3mm 구멍을 가공하여 버를 발생 시킨 후 초음파 디버링 시간, 혼과 가공물 사이의 거리, 초음파 출력등을 변화하면서 실험하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- [1] 초음파 디버링 효과에 가장 큰 영향을 미치는 변수는 가공물과 혼과의 거리이다.
- [2] 디버링 효과는 디버링 시간에 비례하여 초기에는 버가 많이 제거 되지만 시간이 지남에 따라 버의 제거 속도가 늦어지는데 이는 가공물에 접해 있는 버의 두께가 두껍기 때문이다.
- [3] 가공물과 혼의 거리가 1mm 이하일 경우에는 버를 완전하게 제거 할 수 있었으며, 가공물과 혼의 거리가 1.5mm 이상일 경우에는 디버링 시간을 길게 하여도 버를 완전히 제거 할 수 없었다.
- [4] 초음파의 파워는 디버링 효과와 비례하지만 파워가 커지면 가공물 표면에 나쁜 영향을 미친다.

후 기

본 논문은 국가지정실험실 사업의 사업비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Ko, S.L., "A study on Burr Formation in face milling," KSPE Conference, pp.810-813, 2000.
2. Lee, J.K., "Study on Mechanism of Burr Formation in Drilling," KSPE Conference, pp. 823-826, 2000.
3. Chang, J.E., "Development of Drill Geometry for Burr Minimization in Drilling," KSPE Conference, pp.991-914, 2001.
4. Choi, H.Z., "Technology of Micro Deburring Using the Ultrasonic Vibration," KSPE Conference, pp. 250-253, 2002.
5. Chae, J.W., "Analysis of Deburring Characteristics by Magnetic Abrasive Finishing Method," KSPE Conference, pp. 241-244, 2002.
6. Masanori, Nakagawa, "Deburring by Water Jet,"

- PSFDT, pp. 179-185, 2002.
7. Yoshihide, Shibano, "Ultrasonic Micro Deburring Application," 3rd international Conference on Precision Surface Finishing and Burr Technology, 1994.
 8. Yeo, S.H., Ngoy, Bryan B. K. A. and Chua, L.Y. "Ultrasonic Deburring," The international Journal of Advanced Manufacturing Technology, pp. 333-341, 1997.
 9. Tsochatzidis, N.A., Guiraud, P., Wilhelm, A.M., Delmas, H., "Determination of velocity, size and concentration of ultrasonic cavitation bubbles by the phase-Dopple technique," Chemical Engineering Science, Vol. 56, pp. 1831-1840, 2001.
 10. Niemczewski, Bogdan, "Chemical activation of ultrasonic cavitation," Ultrasonics Sonochemistry Vol. 6, pp. 211-216, 1999.
 11. Kinsler, Lawrence E., Frey, Austin R., Coppens, Alan B., Sanders, James V., "Fundamentals of Acoustics," third Edition, John Wiley & Sons, 1982.
 12. Hughes, D.E, "The disintegration of bacteria and other micro-organisms by the M.S.E. Mullard ultrasonic disintegrator," J. Biochem. Microbiol. Tech. Eng., Vol. 3, pp. 405-433, 1961.