

초음파 드릴링의 기하학적 가공 메커니즘 분석

장성훈*, 이석우**, 최현종**, 이선규#

The Geometric Machining Mechanism of Ultrasonic Drilling

Sung-Hoon Jang*, Seok-Woo Lee**, Hon-Zong Choi** and Sun-Kyu Lee#

ABSTRACT

With the acceleration of the miniaturization of products, especially in recent years, machining technologies for these products is in need of improvement. Conventional technologies have limitations in realizing the miniaturization due to the downsizing effects of the tools, which lack sufficient cutting stiffness during machining. The application of ultrasonic vibration is one of the most useful solutions in dealing with the problem. This study focused on the difference of ultrasonic drilling from conventional one in geometrical machining mechanism and the corresponding machining results. In detailed, some mathematical equations for drill cutting edge paths during drilling were extracted and new method to find uncut chip thickness from above equations was suggested. The experiments were carried out through the comparison between the results (disposed chips and internal surface states of holes) of conventional drilling and those of ultrasonic drilling. It was determined that the geometrical paths of cutting edges and analyzed uncut chip thickness agree with the appearance of disposed chips. Furthermore, the change in tool path by ultrasonic vibration resulted in the improvement of surface statement.

Key Words : stiffness(강성), machining mechanism(가공 메커니즘), uncut chip thickness(설정가공두께)

1. 서론

최근 IT 산업의 발전과 함께 정보기기, 각종 전자 기기 부품들의 다운사이징(down sizing) 경향이 가속화 되면서 제품들의 부품이나 부품을 생산하기 위한 금형의 소형화, 정밀화가 요구되고 있다. 이러한 요구와 맞물려 미세 즉, 마이크로 드릴링에 대한 관심이 증가되고 있는데 이는 드릴의 소형화

(miniaturization)라는 전제가 반드시 이루어져야 한다. 소형화된 드릴을 이용할 경우, 공구 강성이 현저하게 떨어져서 드릴이 부러지기 쉽다. 또한 드릴이 소 구경이기 때문에 가공 부하를 줄이기 위해서는 초고속 회전이 필요하며, 절삭유제의 공급과 많은 기술적인 문제점을 지니고 있다.¹⁾

이 같은 마이크로 드릴링의 단점들을 극복하기 위한 대안 중의 하나가 바로 초음파 진동의 적용이다. 초음파 진동을 이용함으로써 얻어지는 장점

접수일: 2004년 6월 17일; 게재승인일: 2005년 2월 18일

* 삼성전자, LCD 총괄, HDD 센터

** 한국 생산 기술연구원

교신저자: 광주과학기술원 기전공학과

E-mail skyeec@gist.ac.kr Tel. (062) 970-2388

은 시편상에서 취성 파괴의 발생을 예방할 수 있어 가공성능 즉 가공면의 품질이 크게 향상 된다. 즉 특정한 임계 절삭 속도 범위 내에서의 초음파 진동의 적용은 가공면의 미소 크랙 발생이나 취성 파괴가 감소되는 효과가 있다.² 또한 강도가 강한 재질인 스틸 계열이나 취성 재질인 유리나 세라믹스를 강도, 강성이 약한 소형의 공구(드릴)를 이용 정밀한 홀 가공을 하는데 있어서 공구의 절단이나 손상을 억제 할 수가 있고 미세 홀의 편심량을 획기적으로 개선시킬 수 있다.³

본 연구에서는 초음파 진동의 개입으로 인해 달라지는 가공 메커니즘을 분석하기 위해서 절삭 과정 중의 절삭날의 운동이 절삭칩에 대부분 전사된다는 가정아래 가공 중 드릴의 절삭 날(cutting edge)의 이동경로와 설정가공두께(uncut chip thickness)를 수식화 하였다. 각각의 가공조건에서 위 수식을 이용한 데이터(설정가공두께)와 실제 배출된 칩(chip)들을 서로 비교 분석하여 상호 연관성을 파악하였고 초음파 진동의 파라미터인 진폭과 주파수 변화에 따른 가공결과의 변화도 파악하였다. 또한 드릴의 주 절삭 날의 이동경로에 따른 가공된 홀의 내부 표면 상태에 대한 영향도 분석하였다.

2. 초음파 드릴링의 기하학적 가공 메커니즘

2.1 주 절삭 날의 이동 궤적

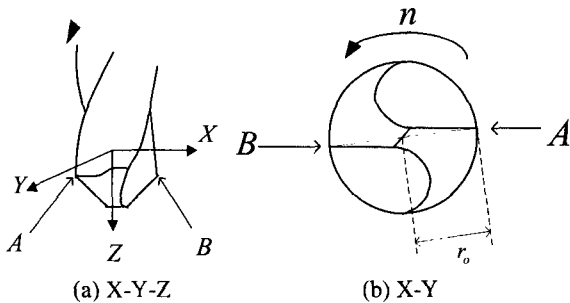


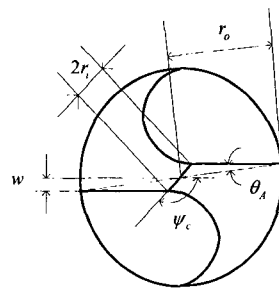
Fig. 1 The view of drill during drilling

Fig. 1 과같이 반경이 r_0 인 드릴의 두 절삭 날의 끝점을 각각 A, B 라 명명하고 회전수가 n (rev/s), 드릴의 수직 이송 속도(mm/min) V_0 로 드릴링 가공을 한다. 게다가 초음파 진동을 이용한 드릴링 가

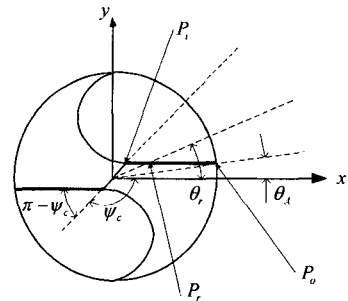
공은 일정한 수직 이송속도 V_0 와 단위 시간당 회전수 n 으로 가공을 하는 드릴에 주파수 f , 진폭 a 의 초음파 진동이 적용됨을 의미한다.

또한 가공시 드릴과 시편의 시간에 따른 z 축 방향의 위치 $z(t)$ 는 으로 나타낼 수 있다.^{4,5}

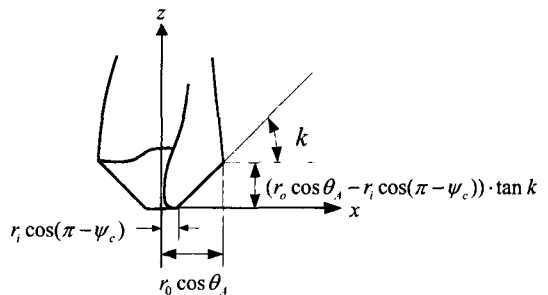
$$z(t) = V_0 \cdot t + a \sin(2\pi ft) \quad (1)$$



(a) The bottom view



(b) The cutting edges of drill on X-Y plane



(c) The cutting edges of drill on X-Z plane

Fig. 2 The cutting edges of drill in 3-dimensional space

Fig. 2 에서 보는 것처럼 드릴의 중심으로부터 거

리가 r 인 절삭 날상의 임의의 지점 P_r 의 시간에 따른 위치 벡터는 식(2)와 같다.

$$\vec{P}_r(r, t) = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

$$= \begin{bmatrix} r \cos(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ r \sin(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ V_0 \cdot t + (r \cos(\sin^{-1}(\frac{w}{r})) - r_i \cos(\sin^{-1}(\frac{w}{r_i}))) \cdot \tan k \end{bmatrix} \quad (2)$$

where $r_i \leq r \leq r_o, t \geq 0$

여기에 진폭 a , 주파수 f 의 초음파 진동이 적용될 경우, 시간에 따른 P_r 의 위치 벡터는 식(3)과 같이 나타낼 수 있으며

$$\vec{P}_r(r, t) = X\vec{i} + Y\vec{j} + Z\vec{k}$$

$$= \begin{bmatrix} r \cos(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ r \sin(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ V_0 \cdot t + a \sin(2\pi ft) + (r \cos(\sin^{-1}(\frac{w}{r})) - r_i \cos(\sin^{-1}(\frac{w}{r_i}))) \cdot \tan k \end{bmatrix} \quad (3)$$

where $r_i \leq r \leq r_o, t \geq 0$

절삭 날의 궤적을 도시해보면 Fig. 3 과 같은 부채꼴 파형을 그리게 된다.

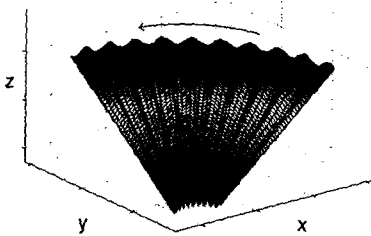


Fig. 3 The trajectory of a cutting edge (ultrasonic drilling)

2.2 초음파 드릴링의 설정 가공 두께

드릴링 가공 시 설정 가공 두께(uncut chip thickness) h 는 식(4) 및 Fig. 4 와 같이 정의된다.⁶

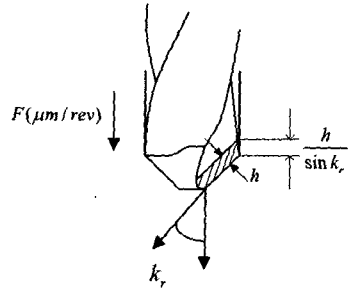


Fig. 4 Uncut chip thickness, h in drilling

$$h = \frac{F}{2} \sin k_r \quad (4)$$

앞서 2.1 절에서 언급한 바와 같이 $r = r_o$ 인 두 절삭 날의 양 끝점을 A, B 라 할 때 이 두 지점의 시간에 따른 위치 벡터는 식(2)에서 미세 위상항을 무시한다면 일반 드릴링에선

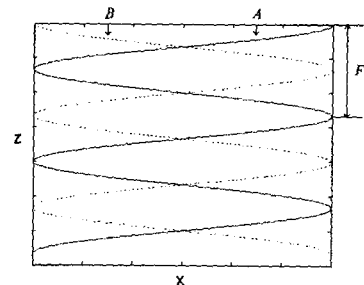
$$\vec{P}_A = \begin{bmatrix} r_o \cos(2\pi nt) \\ r_o \sin(2\pi nt) \\ V_0 \cdot t \end{bmatrix}, \vec{P}_B = \begin{bmatrix} r_o \cos(2\pi nt + \pi) \\ r_o \sin(2\pi nt + \pi) \\ V_0 \cdot t \end{bmatrix} \quad (5)$$

식(5)와 같고 초음파 드릴링의 경우,

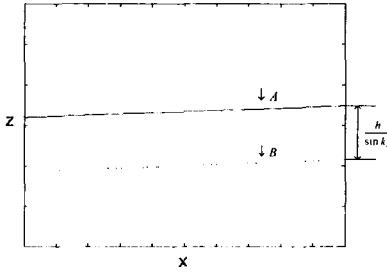
$$\vec{P}_A = \begin{bmatrix} r_o \cos(2\pi nt) \\ r_o \sin(2\pi nt) \\ V_0 \cdot t + a \sin(2\pi ft) \end{bmatrix}, \vec{P}_B = \begin{bmatrix} r_o \cos(2\pi nt + \pi) \\ r_o \sin(2\pi nt + \pi) \\ V_0 \cdot t + a \sin(2\pi ft) \end{bmatrix} \quad (6)$$

식(6)처럼 표현된다.

식(5)를 이용하여 A, B 의 이동경로를 그려보면



(a) X-Z



(b) axial gap between A and B path

Fig. 5 A, B paths (conventional drilling)

Fig. 5-(a) 는 식(5)의 곡선을 X-Z 평면에 투영시킨 모습인데, A 가 반 바퀴 회전 이동하여 Z 축으로 일정한 거리 만큼 하강한다. 여기서 A, B 의 이동은 절삭 날이 이동하여 절삭가공을 의미한다. A 가 일정한 회전속도와 수직 이동속도로 회전 이동하는 동안 B 는 X-Y 평면상에서 A 와 π 의 위상차를 지니면서 동일한 회전속도와 수직 이동속도로 회전 이동한다. π 의 위상차로 인해 X-Z 평면상에서 A, B 의 이동경로는 z 축 상에서 일정한 만큼의 위상차를 보이고 있는데 식으로 표현하면 식(7) 과 같다.

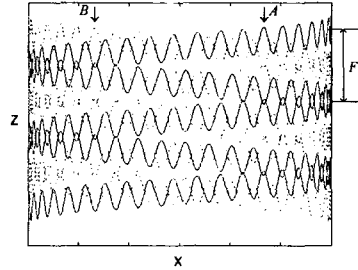
$$\left\| \vec{P}_A(t) - \vec{P}_B(t + \frac{1}{2n}) \right\| = \left\| \begin{matrix} 0 \\ 0 \\ V_0 \cdot (-\frac{1}{2}) \end{matrix} \right\| = V_0 \cdot (\frac{1}{2n}) \quad (7)$$

단위 회전 당 드릴의 이동거리를 나타내는 이송속도(feedrate, F) 는 단위 시간당 이동거리 ($\mu\text{m/s}, \text{mm/min}$)를 단위 시간당 회전 수(rev./s)로 나눈 것과 동등하게 생각할 수 있으므로 식(7)은

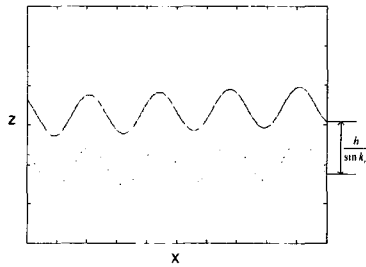
$$\left\| \vec{P}_A(t) - \vec{P}_B(t + \frac{1}{2n}) \right\| = V_0 \cdot (\frac{1}{2n}) = \frac{F}{2} = \frac{h}{\sin k_r} \quad (8)$$

식(8)로 변환된다. 따라서 식(4)로부터 A, B 이동경로 간 z 축상의 위상차, 즉 두 경로의 수직 간격이 $h/\sin k_r$ 이 됨을 알 수 있고, Fig. 6 에서 파악할 수 있듯이 단위 회전 당 드릴의 수직 이동 거리인 이송속도(F)를 2 등분 한 값과 같다. 또한 설정가공두께(h)는 식(9)과 같이 표현 가능하다.

$$h = \frac{F}{2} \cdot \sin k_r = \sin k_r \cdot \left\| \vec{P}_A(t) - \vec{P}_B(t + \frac{1}{2n}) \right\| \quad (9)$$



(a) X-Z



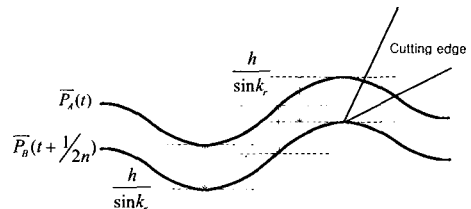
(b) axial gap between A and B path

Fig. 6 A, B paths (ultrasonic drilling)

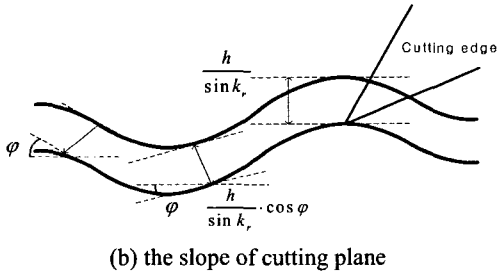
여기에 일정한 주파수 f 와 진폭 a 를 지닌 초음파 진동이 적용되면, A, B 의 궤적은 상하 방향의 파형을 이루고 있고 설정가공두께는

$$h = \sin k_r \cdot \left\| \vec{P}_A(t) - \vec{P}_B(t + \frac{1}{2n}) \right\| = \sin k_r \cdot [V_0 \cdot (-\frac{1}{2n}) + a\{\sin(2\pi ft) - \sin(2\pi f(t + \frac{1}{2n}))\}] \quad (10)$$

식(10)과 같고 그 파형은 Fig. 6 과 같이 나타낼 수 있다.



(a) the axial gap between A and B path



(b) the slope of cutting plane

Fig. 7 The uncut chip thickness of ultrasonic drilling

Fig. 7 은 X-Z 평면상에서 초음파 드릴링의 실제 설정가공두께를 나타낸 것인데 가공 시 배출되는 칩 두께는 가공면상에 수직한 축 방향 설정가공두께에 비례한다고 볼 수 있다. 결국 실제 설정가공두께($h_{ultrasonic}$)는 Fig. 7-(b)와 같이 식(10)의 값에 $\cos \varphi$ (φ : 가공면의 기울기)를 곱한 식 (11)과 같이 구할 수 있다.⁴

$$h_{ultrasonic} = h \cdot \cos \varphi$$

$$= \sin k_r \cdot \cos \varphi \cdot [V_0 \cdot (-\frac{1}{2n}) + a\{\sin(2\pi ft) - \sin(2\pi f(t + \frac{1}{2n}))\}]$$

(11)

기울기 φ 는 Fig. 8에서 보듯 A, B가 X-Y 평면상에서 회전할 때 회전 선 속도($=V_x \vec{i} + V_y \vec{j}$) 벡터와 속도 벡터의 사이 각으로 볼 수 있고 식(12)으로 표현된다.

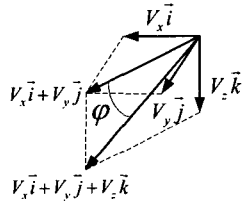


Fig. 8 The slope of cutting plane, φ

$$\cos \varphi = \frac{\|V_x \vec{i} + V_y \vec{j}\|}{\|V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k}\|} = \frac{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2)}}{\sqrt{(V_x^2 + V_y^2 + V_z^2)}} \quad (12)$$

where $\vec{V} = \frac{d}{dt}(\vec{P}_A, \vec{P}_B) = V_x \vec{i} + V_y \vec{j} + V_z \vec{k}$

3. 실험

Table 1 Experimental Condition (Copper & Al 6061)

Material	Copper	Al 6061
Drill Size (diameter)	0.3 mm	1.0mm
Rotational Speed	30,000 rpm	
Step length (μm)	30	200
Feed (mm/min)	30, 40, 50	100
Amplitude (μm)	Conventional(0), 0.5, 1.0, 1.5, 2.0	
Frequency (kHz)	20	

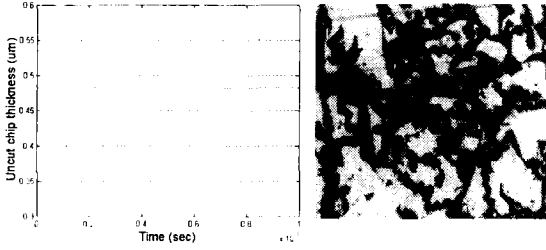
일반 드릴링과 초음파 드릴링의 가공 메커니즘 비교 분석을 위하여 가공 시 배출되는 칩의 형태와 크기, 가공 후 홀의 내부 표면의 상태를 측정 대상으로 삼았다. 표 1에서 초음파 진동의 진폭을 실험 변수로 하였고 이 변수들의 변화에 따른 가공 특성을 파악하였다. 가공기를 이용한 드릴링 가공 시 회전속도를 30,000rpm으로 채택하였고 드릴의 이송속도(Feed : mm/min)와 스텝길이는 표 1에 나타나 있다. 또한 표 1엔 구리와 Al6061을 일반 드릴링과 초음파 드릴링에서 각각 실험한 조건을 싣고 있다. 기계구조상 초음파 진동은 테이블에 부여하였으며, 일반적으로 많이 쓰이는 주파수인 20kHz와 40kHz 중에서 에너지 소모량이 적고 보다 높은 진폭을 낼 수 있는 20kHz용 초음파 진동 테이블을 선택하여 공작물 고정테이블을 가진하고, 진동의 진폭은 테이블과 연결되어 있는 증폭기에서 입력전력을 증감 함으로서 조절이 가능하게 하였다.

4. 결과

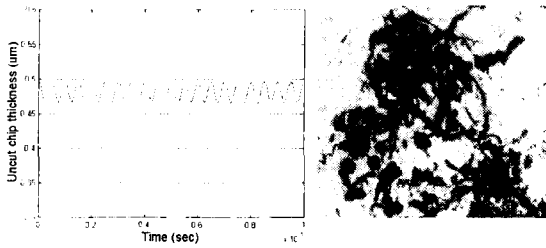
4.1 배출되는 칩의 특성

가공 중 발생하는 칩의 사이즈는 설정가공두께에 의해서 좌우되는데 특히 칩 두께와 길이가 그러하다. 따라서 식(9), (11)을 이용, Table1의 실험 조건에서의 계산된 설정가공두께와 실제 칩을 비교해 보면 Fig. 8에서 보는 바와 같이 진폭의 증가로 인하여 이론상의 설정가공두께 변화의 폭이 커지며 실제 배출된 칩의 길이가 작아지는 것을

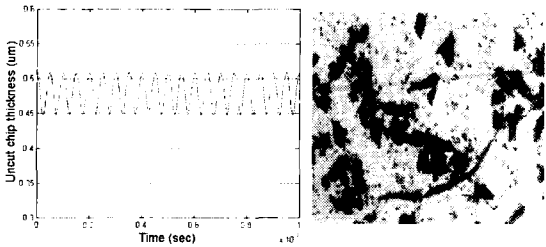
확인할 수 있다. 이것은 설정가공두께의 변화 폭이 증가함에 따라 칩 두께의 변화로 인해 칩이 배출될 때 구부러지거나 절단되는 성질이 강해지기 때문으로 해석할 수 있다.



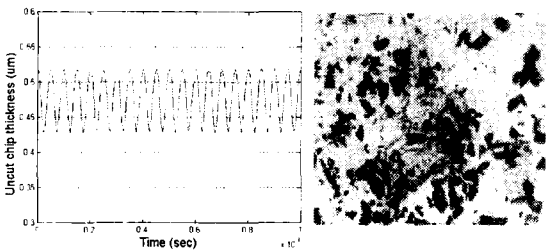
(a) Conventional ($\times 50$: optic microscope)



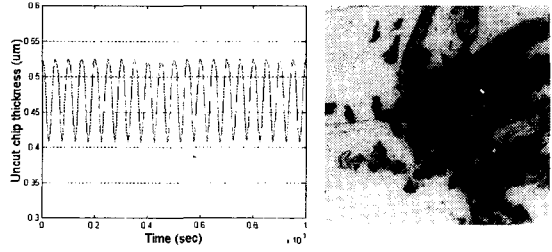
(b) $0.5 \mu\text{m}$ ($\times 50$: optic microscope)



(c) $1.0 \mu\text{m}$ ($\times 50$: optic microscope)



(d) $1.5 \mu\text{m}$ ($\times 50$: optic microscope)



(e) $2.0 \mu\text{m}$ ($\times 50$: optic microscope)

Fig. 9 Uncut chip thickness and disposed chips according to ultrasonic vibration amplitude (feed : 30mm/min, frequency : 20kHz, rotational speed : 30,000rpm)

초음파 진동에 의한 칩의 구체적인 형상 변화를 측정하기 위해 Al6061 을 이용한 실험을 하였다.

우선 배출되는 칩의 형상을 파악하는데 있어 설정가공두께를 구하기 위한 식(9),(11)을 이용, 드릴의 절삭 날이 가공 중 이동할 때 X-Y 평면상에서 설정가공두께 값을 구하기 위해 식(2), (3)과 식(9), (11)로부터

$$\begin{bmatrix} X(r,t) \\ Y(r,t) \\ h(r,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ r \sin(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ h(r,t) \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} X(r,t) \\ Y(r,t) \\ h_{ultrasonic}(r,t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r \cos(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ r \sin(2\pi nt + \sin^{-1}(\frac{w}{r})) \\ h_{ultrasonic}(r,t) \end{bmatrix} \quad (14)$$

식(13),(14)을 구한다. 위 식들은 드릴 절삭 날 궤적상에서 설정가공두께를 나타낸다. 따라서 이를 토대로 Table 1 조건(Al6061)의 각 설정가공두께와 실제 배출된 칩을 비교해 보면 Fig. 10 에서 보듯 초음파 진동의 영향으로 나선형 연속 칩(일반 드릴링)에서 구부러지기 쉬운 헬리컬 타입의 칩으로 변형된다. 진폭이 작은 $0.5 \mu\text{m}$ 에서는 짧은 헬리컬 칩의 상태가 비교적 잘 보존되어 있다. 진폭이

증가할 경우 $1.5 \mu\text{m}$ 에선 칩의 외곽 부분이 점점 찢겨져 $2.0 \mu\text{m}$ 에선 그 정도가 심해진다. 이는 초음파 진동 진폭의 증가로 인해 Fig. 9 에서 언급한 바와 같이 설정가공두께 변화 폭이 증가하여 칩의

rotational speed : 30,000rpm)
 절손이 심해지기 때문이다. 이러한 칩 형태의 변화와 공구면에서의 마찰력저하가 직접적인 절삭력 저하의 원인으로 생각할 수 있다.⁷

4.2 가공된 홀의 내부 표면

초음파 진동에 의해서 가공된 홀의 가공품위를 조사하기 위하여 내부 표면 상태를 관찰 하였다.

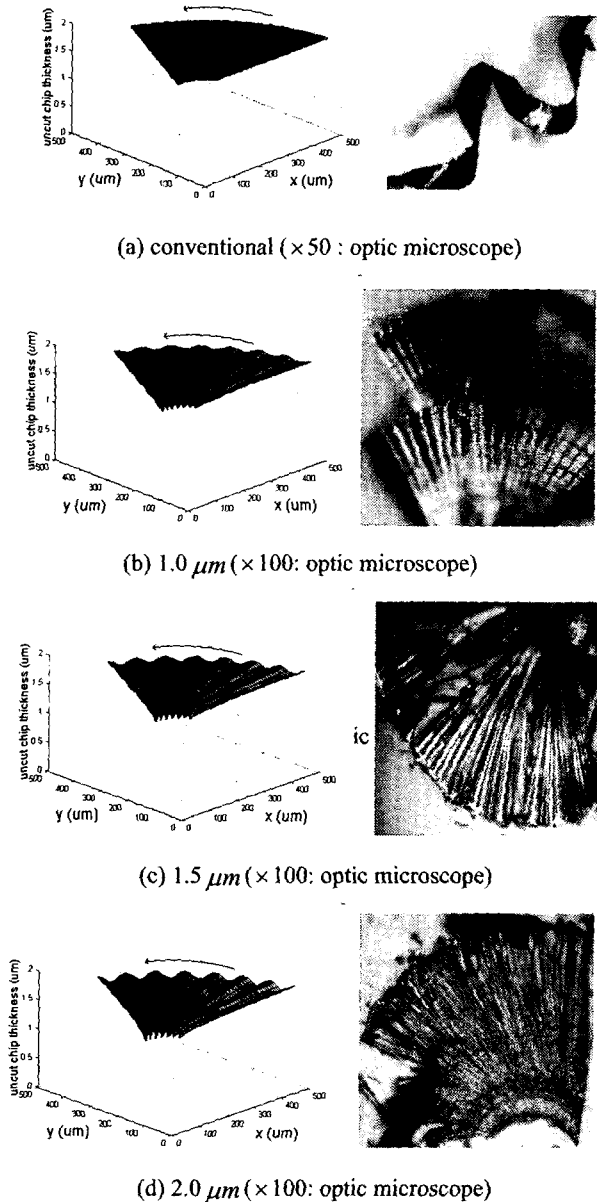
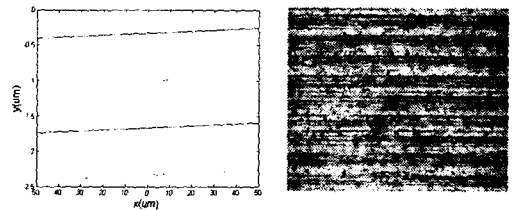
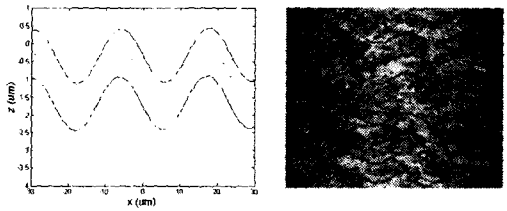


Fig. 10 The view of chips (Al 6061) according to Amplitude (feed: 100mm/min, frequency: 20kHz,



(a) conventional drilling (x50: LSM)



(b) ultrasonic drilling (x50: LSM)

Fig. 11 The paths of A, B and the internal surface (workpiece : Copper feed: 40mm/min frequency : 20kHz, amplitude : $1.5 \mu\text{m}$ rotational speed : 30,000rpm)

Fig. 11 은 Table 1 조건에 따라 가공했을 때 그림에서 언급한 드릴 날 양 끝 지점 A, B 의 이동 궤적과 실제 가공된 홀의 내부 표면이다. 각각의 드릴링에서 A, B 의 이동궤적이 실제 표면상에 잘 반영되어 있다는 것을 알 수 있다. 이는 가공 중 A, B 의 이동이 내부 표면 상태에 크게 영향을 미친다는 것을 의미한다.

Fig. 12 을 보면 일정한 드릴 회전 속도와 이송 속도(Feed : mm/min)에서 초음파 진동의 적용은 일반 드릴링(진폭 : 0)보다는 내부 표면 상태를 양호하게 하지만 진동 진폭이 증가할수록 표면이 거칠어진다. Fig. 12 의 평균 표면 조도 값은 각각 동일한 실험 조건에서 3 회의 드릴 가공 후 각 홀의 내부 표면 조도를 평균한 값이다. 평균 표면 조도

그래프를 보면, 드릴의 이송속도(Feed : mm/min)가 30, 40 mm/min 일 경우 초음파 진동이 내부 표면상태를 양호하게 만든다.

진동을 가할 때 보다 더 양호해지며 그 이동 궤적을 확인하였다.

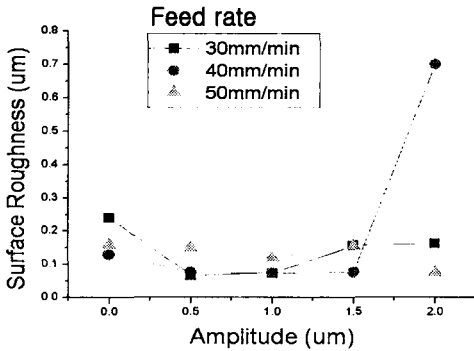


Fig. 12 The average surface roughness
(frequency : 20kHz, rotational speed : 30,000rpm, workpiece : Al 6061)

그림에서는 이송속도가 40mm/min 인 조건에서 진폭이 2.0 μm 일 경우의 표면조도 값이 급격히 증가 하는데 이것은 3 회의 가공 시도 중 1 회의 값이 비정상적으로 큰 값을 포함한 평균값에 기인하였다. 50mm/min 의 이송속도에서는 그림에서 보는 것처럼 초음파 진동의 적용으로 인한 표면 조도 값의 감소가 상대적으로 적다는 것을 알 수 있다. 즉, 일정한 가공조건(임계 절삭 속도 내)의 범위에선 초음파 진동의 적용이 가공면의 표면상태를 향상시키게 되는데 이러한 사실은 이미 이전 연구들^{2,8,9}을 통해서 입증되었다.

5. 결론

본 연구에서는 초음파 드릴링의 기하학적인 가공 메커니즘 분석에 중점을 두었다. 가공 메커니즘을 분석하기 위해 드릴 날의 기하학적인 이동 경로를 수학적으로 모델화하였으며 이를 이용하여 절삭 가공의 중요한 파라미터인 설정가공두께를 구하였다. 초음파 드릴링의 설정가공두께는 일정한 폭과 주기를 지닌 파형을 그리면서 변하게 된다. 이 때문에 배출되는 칩은 정상시의 나선형 연속 칩에 비해 헬리컬 형태로 변하여 절삭력을 감소시키는 것으로 예측된다.

또한, 가공된 홀의 내부 표면상태는 절삭 날의 양 끝점 A, B 의 이동경로의 영향 때문에 초음파

참고문헌

- Ogawa, M., " The present and future of Micro hole drilling," machinery and tool, pp. 18-25, 1999-8.
- Choi, I.H., Kim, J.D., " An Analysis of Micro-Surface Generation in Ultrasonic Vibration Cutting of Optical Plastics," J. of KSPE, Vol. 11, No. 3, 1994.
- Lee, B.G., Choi, H.Z., Lee, S.W., " A Study on Micro-hole machining for Ceramics (Al₂O₃) Using Ultrasonic vibration," proceeding of KSPE, pp. 988-992, 2002.
- Wang, L.-P., Wang, L.-J., He, Y.-H. and Yang, Z.-J., " Prediction and computer simulation of dynamic thrust and torque in vibration drilling," Proc Instn Mech Engrs, Vol. 212, Part B, pp 489 - 497, 1998.
- SASAHARA, H., HARADA, K., " Variation of Relative Cutting Speed and Simulation of Chip Forming Process," JSPE, pp. 578-582, 2004.
- Tomas, C., Maekawa, K., Obikawa, T. and Yamane, Y., " Metal Machining," Arnold, 2000.
- Zhang, D.-Y., Chen, D.-C., " Relief- face Friction in Vibration Tapping," Int. J. Mechanical Science, Vol. 40, No. 12, pp. 1209-1222, 1998.
- Kang, J.-P., Kim, B.-H., Song, J.-B., " A Study on the improvement of Cutting Precision by the Ultrasonic Vibration Cutting," KSPE, Vol. 8, No.2, pp. 69-77, 1991.
- Kim, J.-D., Kwak, Y.-K., " A Study on Precision Machining with Ultrasonic Vibration," KSME, Vol. 4, pp. 818 - 829, 1990.