

미세홈 가공에 있어서 측면버 발생모델 Side Burr Generation Model of Micro-Grooving

임 한 석(부산대 대학원), 안 중 환(부산대 공대)

HanSeok Lim(Graduate School, PuSan Nat'l. Univ.), JungHwan Ahn(PuSan Nat'l. Univ.)

ABSTRACT

Burrs always come out with the machining of ductile material with small size. Though the size of burrs is small, burrs dominate deterioration of the accuracy of the micro grooves. So the burr generation model especially side burr generation model was investigated to predict the size of the burrs at the given cutting conditions. The side shear plane is introduced to build the burr generation model and the width of side shear plane nomalized with cutting depth is defined with the shear angle. From the theoretical observation, the width of side shear plane can vary up to 40% of the cutting depth. To determine the size of burr and stiffness, single groovings were carried out and it was found that there exist a critical depth of cut that the size or stiffness of the burr vary.

Key Word : side burr(측면버), micro grooving(미세홈 가공), diamond shaping(다이아몬드 형삭가공), burr growing rate(버 성장률), side shear plane(측면 전단면)

1. 서 론

프레넬 렌즈(Fresnel lens)는 투사형 TV의 스크린에서와 같이 대형의 렌즈를 박형화시키거나^[1,2] 광픽업장치의 소형화^[3]를 위해 사용되는 광학부품으로 경면의 미세한 홈의 집합으로 구성되어 있다. 광학부품으로서의 미세홈은 또한 렌티큘라 렌즈(lenticular lens)^[4]나 리플렉션 리플렉터(reflection reflector) 등에도 사용되고 있다. 이들 부품의 제작은 대량생산을 위해 정밀한 금형을 이용한 사출이나 광조형기법을 사용하고 있다.

이들 금형의 제작시에는 미세홈의 에지(edge)부의 형상은 매우 예리하여 일반적으로 곡률반경 $1\mu\text{m}$ 이하가 요구되며, 가공면 자체도 경면이 되어야 하기 때문에 다이아몬드 공구를 이용한 미세절삭이 가장 최선의 가공방법으로 주목된다. 그러나 미세형상 가공은 비절삭 저항의 증대에 따른 재료의 소성변형이 커져, 에지 가공부에 버(burr)를 형성시키거나 미세형상 자체를 변형시키는 등의 문제를 유발한다^[5].

일반적인 기계가공에 있어서 버(burr)는 제품의 조립을 방해하거나 부품 또는 작업자에게 상처를 입히기도 하는 등 공정상의 문제로서 대두되나, 광학부품용 미세홈의 경우는 제품자체의 정밀도와 기능에 직접적인 영향을 미치므로 버의 발생을 최대한

억제할 수 있는 가공조건의 탐색이 필수적이다. 버는 그 발생위치에 따라 입구버, 측면버, 출구버등으로 구분하기도 하는데^[6]광학부품에 있어서 문제가 되는 버는 주로 측면버(side burr)이다.

측면버는 공구의 진행방향에 직각으로 발생하며, 공구인선에서의 압축응력에 의해 측면으로 발생하는 것으로 간주되기 때문에 프와송버(poisson burr)라고도 불리고 있다.

Gillespe는 절삭깊이가 충분히 큰 경우 사이드 버의 발생을 인선 반경과 동일한 직경을 갖는 원통이 재료 내부에서 압력을 받을 때 발생하는 벌징(bulging)으로 설명을 하였다^[7]. 그러나 그에 의해 예측된 버의 크기는 실제보다 매우 작게 나타나기 때문에 오히려 절입깊이가 인선반경에 가까운 미세 절입의 경우에 타당성을 가지고 있다.

Nakayama등은 2차원 절삭실험을 통해 절입깊이에 대한 측면버의 크기를 조사하였으며, 단위절입깊이에 대한 측면버의 길이는 칩의 전단변형률과 밀접한 관계가 있음을 실험을 통하여 밝혔다^[8]. Fig.1은 전단변형률이 6이상인 경우의 버의 발생에 따른 공작물의 변형경로를 표시한 것으로, 공작물 단면에서 빗금으로 표시한 부분은 모두 공구의 전방에서 작용하는 정수압적 힘에 의해 바깥으로 밀려남으로써 버로 변형되는 것을 나타낸다.

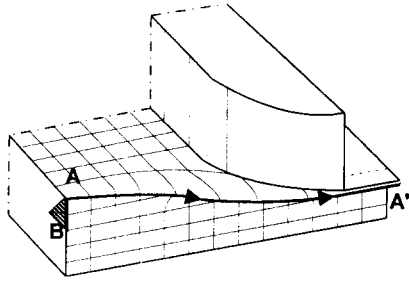


Fig. 1 Generation of side burr

본 연구에서는 미세홀 가공시의 문제가 되는 측면 버의 발생경향을 예측할 수 있는 절삭모형을 구축하고자 하였다. 또한 실제로 가공시 발생하는 버에 대한 초음파 디버링 실험을 통해 버의 두께나 강성을 추정하여 본 연구의 절삭모형의 타당성을 고찰하여 보았다.

2. 측면버의 발생모델

2.1 측면 전단면에서의 소비일

Fig.2는 Fig.1을 단순화시켜 2차원 절삭 모델에서 측면버 발생을 고려하기 위한 절삭모형이다. 일반적인 2차원 절삭에 있어서 가공시의 소성변형은 전단면에 집중되어 나타나는 것으로 가정되고 있다. 그러나 측면버가 발생하는 경우에는 재료의 유동은 가공방향의 직각방향(Y방향)으로도 발생되며 이 버 발생모델의 정확한 해석은 그 기하학적 모델이 간단하지 않기 때문에 3차원 유한요소 해석등에 의해 해석되기도 한다.

본 연구에서는 측면버가 발생할 때 Fig.2에 보인 바와 같이 재료가 측면방향으로 유동하는 측면 전단면(side shear plane) APBED가 존재한다는 가정을 하였다. 이것은 출구버(exit burr) 발생시 Ko^[9]의 이론에서 제시된 음의 전단면(negative shear plane)이 측면버 발생시에 있어서는 재료의 측면으로 존재한다고 가정한 것이다. Ko의 실험에 의하면 음의 전단면은 출구버 발생 초기에 발생하여 그 면이 재료의 끝과 만나는 점은 버발생 전 과정에 걸쳐 위치를 변화시키지 않은 플라스틱 힌지(plastic hinge)가 된다. Fig.2에서는 선분 PE가 이러한 플라스틱 힌지에 해당하는 것으로 생각한다.

삼각요소ADH는 절삭시 공구 전방의 재료의 정수압적 압력이 측면으로 작용하여 재료를 바깥으로 밀어낼 때 작용하는 유효면적을 단순화시켜 표현한 것이다. 삼각요소 ADH에 작용하는 평균압력을 $\bar{\sigma}_p$,

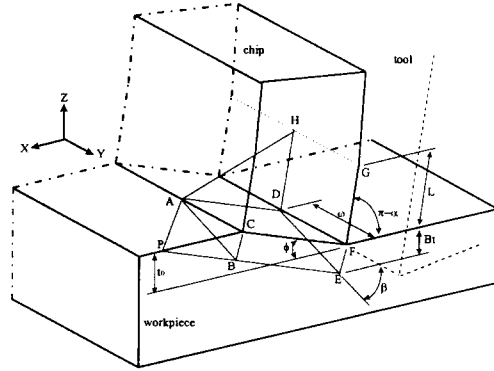


Fig.2 Schematic diagram of the side burr generation model

그 면적을 \bar{A}_p 라고 하자. 지금 이 삼각요소가 내부 압력에 의해 재료의 측면으로 dw 만큼 이동하였다고 가정하면 이 삼각요소가 재료에 대해 한 일은

$$\Delta w_p = \bar{\sigma}_p \cdot \bar{A}_p \cdot dw$$

이 된다. 측면버의 초기 발생시에 소요되는 에너지는 이 에너지의 값과 같은 것으로 볼 수 있다. 즉

$$\Delta w_p = \Delta w_{sideburrr}$$

가 된다. 버가 발생되는데 소비되는 에너지는 측면 전단면 이하가 변형되는데 소요되는 에너지와 이 변형되는 요소의 측면에서 변형에 저항하는데 소요되는 에너지의 합으로 구성된다고 가정하여

$$\Delta w_{sideburrr} = \Delta w_U + \Delta w_F \quad (1)$$

로 생각한다. 여기서

Δw_U = 측면 전단면의 변형에너지(요소APBED)

Δw_F = 변형에 저항하는 변형요소 측면의 마찰에너지(요소DEFGH)

이다.

먼저 측면전단면APBED의 단위폭당 소비되는 에너지 Δw_u 는 이 영역에서의 전단변형과 굽힘변형을 고려한 Ko 출구버 발생 모델을 인용하면

$$\Delta w_u = \sigma_e \omega^2 d \beta \left[\frac{k_0}{\sigma_e} \frac{1}{2 \tan \beta_0} + \frac{1}{4 \cos^2 \beta_0} \right] \quad (2)$$

로 주어진다. 여기서 σ_e 는 항복응력, k_0 는 항복전단 응력, w 는 측면전단면의 폭이다.

단위폭당의 소요일 Δw_u 을 고려하여 측면전단면에서 소요되는 일은 다음과 같이 삼각기둥요소 ABCDEF와 삼각추요소 ABCP에서의 일의 합으로 계산될 수 있다.

$$\Delta w_U = \Delta w_{ABCP} + \Delta w_{ABCDEF} \quad (3)$$

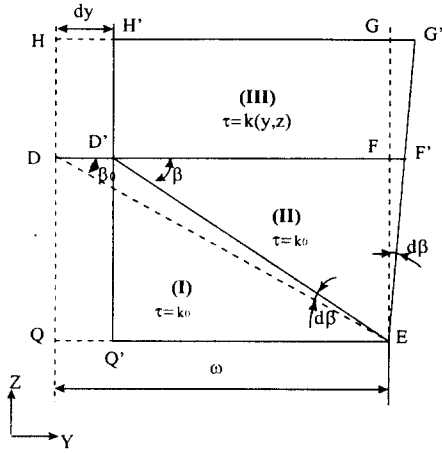


Fig.3 Shear resistant region of the workpiece

삼각기둥에서의 요소의 일 Δw_{ABCDEF} 는

$$\begin{aligned} \Delta w_{ABCDEF} &= \Delta w_u \cdot \overline{BE} \\ &= \sigma_e \omega^2 d\beta \left[\frac{k_0}{\sigma_e} \frac{1}{2 \tan \beta_0} + \frac{1}{4 \cos^2 \beta_0} \right] \cdot \frac{t_0}{\sin \phi} \end{aligned} \quad (4)$$

삼각추요소에서 소요되는 일 Δw_{ABCP} 는

$$\begin{aligned} \Delta w_{ABCP} &= \frac{1}{3} \sigma_e \omega^3 d\beta \left[\frac{k_0}{\sigma_e} \frac{1}{2 \tan \beta_0} + \frac{1}{4 \cos^2 \beta_0} \right] \\ &\quad \cdot \frac{\tan \beta_0 \cdot \cos \phi}{\tan \phi} \end{aligned} \quad (5)$$

이 되므로 식(4)와 식(5)을 식(3)에 대입하면

$$\begin{aligned} \Delta w_U &= \sigma_e \omega^2 d\beta \left[\frac{k_0}{\sigma_e} \frac{1}{2 \tan \beta_0} + \frac{1}{4 \cos^2 \beta_0} \right] \\ &\quad \cdot \left\{ \frac{t_0}{\sin \phi} + \frac{1}{3} \frac{w \cdot \tan \beta_0 \cdot \cos \phi}{\tan \phi} \right\} \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다.

다음으로 측면 전단면이 절삭방향의 직각으로 변형될 때 측면전단면의 변형은 공작물에 접하여 변형되므로 변형에 따른 전단력이 작용하여 저항을 받게 된다. 이러한 저항을 Fig.3에서와 같이 3부분으로 나누어 생각하기로 한다.

먼저 영역(I)은 측면전단면 아래에서 재료의 측면이 저항하는 것으로 한다. 재료가 강원전 소성체라고 가정하여 작용하는 전단응력은 최대전단응력 k_0 라고 간주한다. 영역(I)에서의 선분DQ가 D'Q'로 이동할 때 영역내 임의의 점이 선형으로 이동한다고 가정하면 영역(I)에서 소비되는 에너지 Δw_{F1} 은

$$\begin{aligned} \Delta w_{F1} &= \int_0^w k_0 \cdot dA_1 \cdot ds_1 = \frac{1}{3} k_0 \omega^2 \tan \beta_0 \delta y \\ &= \frac{1}{3} k_0 \omega^2 \tan \beta_0 \frac{l}{\sin \beta_0} d\beta \end{aligned} \quad (7)$$

이 된다.

영역(II)는 측면전단면 위의 재료가 측면에서 저항을 받는 것으로 한다. 이 영역에서도 최대 전단응력 k_0 이 작용하는 것으로 간주하고, 요소DEF가 D'EF'로 변형된 것으로 생각한다. 영역내에서 임의의 위치가 선형으로 변위된다고 가정하면 영역(II)에서 소비되는 에너지 Δw_{F2} 는

$$\begin{aligned} \Delta w_{F2} &= \int_A k_0 \cdot v(y, z) dA \\ &= \frac{1}{6} k_0 \omega^2 \tan \beta_0 \left[\frac{l}{\sin \beta} + w \tan \beta_0 \right] d\beta \end{aligned} \quad (8)$$

이 된다.

영역(III)은 절삭칩과 공구의 접촉에 의한 마찰력이 작용하는 면을 의미한다. 요소DH가 D'H'로, 요소FG가 F'G'로 이동한 것으로 한다. 공구와 칩의 마찰면에서의 마찰력 분포는 실험적으로 정해져야 하지만 일반적으로 공구와 칩의 접촉력은 공구의 외곽으로 갈수록 감소하므로 영역(III)에서의 전단응력을 다음과 같이 준선형함수(bi-linear function)^[10]로 간주한다.

$$\tau(y, z) = k_0 - \frac{k_0}{w} y - \frac{k_0}{l} z + \frac{k_0}{wl} yz$$

영역(III)에서의 소비에너지를 계산하면

$$\begin{aligned} \Delta w_{F3} &= \int_A \tau(y, z) u(y, z) dA \\ &= \frac{wlk_0}{12} \left(w \tan \beta_0 + \frac{2l}{\sin \beta} \right) d\beta \end{aligned} \quad (9)$$

위 식으로부터 영역(III)에서의 소비에너지는 칩접촉길이 l 에 의해 변화될 수 있음을 알 수 있다. 여기서는 통상적으로 2차원 절삭에서 칩이 공구의 경사면에 완전접촉하는 길이를 고려하기로 하며 따라서 $l \approx t_0$ 로 생각한다.

변형영역 측면의 마찰에너지는 식(7), (8), (9)의 합으로 이루어지며, 버를 발생시키는데 소요되는 총 에너지는 여기에 식(6)을 더하여 계산된다. 식(6)~(9)는 재료의 물성치인 압축항복응력 σ_e , 전단항복응력 k_0 와 접입깊이 t_0 , 칩접촉길이 l 등이 포함되어 있다. 또한 소비 에너지는 변형량을 나타내는 $d\beta$ 에 비례하고 있다, 변형이 항복상태에서 이루어지므로 Von Mises의 항복조건인 $k_0/\sigma_e = 1/\sqrt{3}$ 을 적용하고, $l = t_0 = d\beta = 1$ 을 대입하여 정리하면

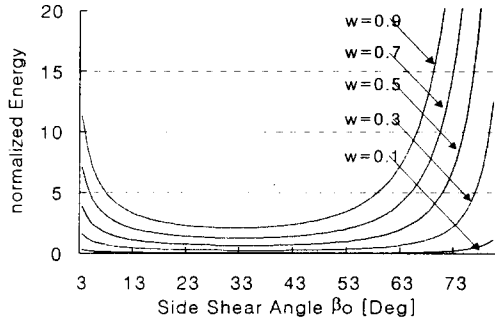


Fig.4 Variation of normalized deformation energy

$$\begin{aligned} \frac{\Delta W_U + \Delta W_F}{t_0 \sigma_e} &= w^2 \left[\frac{1}{2\sqrt{3} \tan \beta_0} + \frac{1}{4 \cos^2 \beta} \right] \\ &\cdot \left[\frac{1}{\sin \phi} + \frac{w \tan \beta_0 \cos \phi}{3 \tan \phi} \right] \\ &+ \frac{w^2}{2\sqrt{3}} \frac{\tan \beta_0}{\sin \beta_0} + \frac{w^3}{6\sqrt{3}} \tan^2 \beta_0 + \frac{1}{12\sqrt{3}} w^2 \tan \beta_0 \\ &+ \frac{1}{6\sqrt{3}} \frac{w}{\sin \beta_0} \end{aligned} \quad (10)$$

식(10)는 변형에 필요한 에너지를 단위 가공깊이로 정규화시키고, 재료의 인장강도의 영향을 배제한 기하학적 조건에서의 에너지 값이다. 따라서 재료의 강도가 변화된다면 변형에너지의 값은 이에 비례하여 증감하게 됨을 의미한다. 구해진 식은 전단각 ϕ 와 변형폭 w 을 포함하고 있다. 버가 발생할때의 β_0 의 값은 위식에서 변형에너지가 최소가 될 때로 생각할 수 있다.

식(10)을 전단각 30° 인 경우에 한해 변형폭을 절입깊이의 0.1~0.9배로 했을 경우 정규화된 에너지의 값을 그림으로 표현하면 Fig.4와 같이 표현된다. 전단각과 변형폭을 달리하면 그래프의 형태는 Fig.4와는 약간씩 달라지지만, 에너지를 최소화하는 측면 전단각의 값은 대략 $27^\circ \sim 29^\circ$ 에서 변화함을 알 수 있었다. 그러나 에너지값의 극소점 부근의 기울기는 매우 완만한 변화를 보이고 있기 때문에 측면 전단각의 값은 실질적으로 재료의 결정립의 방위나 불순물 등에 따라 약 $10^\circ \sim 55^\circ$ 사이에서 불규칙하게 변화될 수 있음을 예상할 수 있다.

2.2 측면전단면 폭

버의 크기를 결정하는 데는 측면전단각의 기울기기에 버로 변형되는 변형폭이 결정되어야 한다. 변형폭 w 는 Fig.2에서 요소 ADH에 작용하는 압축응력과 측면전단면과 관련된 요소의 전단응력을 고려하여

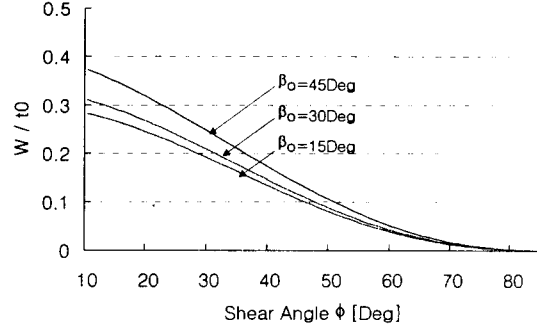


Fig.5 variation of deform width with shear angle

계산해본다. 요소 ADH에 작용하는 압축력은 공구의 경사각이 0° 일 경우

$$F_{ADH} = \sigma_p \cdot \frac{t_0^2}{2 \cos \phi}$$

가 된다. 이 압축력은 버가 될 재료를 바깥으로 밀어내게되며 이에 저항하는 요소로 Fig.2에 있어서 재료내부의 요소 ABC, 요소 ABED, 요소 DEF만을 고려해본다. 재료가 항복상태에 있으므로

$$\frac{t_0 w}{\sin \phi \cdot \cos \beta_0} k_s + w^2 \tan \beta_0 k_s = \sigma_e \cdot \frac{t_0^2}{2 \tan \phi} \quad (11)$$

가 되어 힘의 평형상태는 w 에 대한 2차방정식으로 주어진다. $k_0/\sigma_e = 1/\sqrt{3}$ 를 적용하고 양의 근을 구하면

$$w = t_0 \frac{\sqrt{1 + 2\sqrt{3} \sin \beta_0 \sin \phi \cos^2 \phi} - 1}{2 \sin \phi \sin \beta_0} \quad (12)$$

가 된다.

Fig.5는 식(12)로부터 w/t_0 를 전단각 ϕ 에 대하여 그린 것이다. 그림으로부터 변형폭은 전단각이 증가할수록 감소하는 경향을 나타낸다. 전단각이 10° 일 경우 변형폭은 절입깊이에 대해 약 0.28~0.37배 정도의 크기를 가지고 나타난다. 전단각이 45° 일 경우 버의 변형폭은 절입깊이의 약 0.11배 정도로 나타나 버의 발생을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 따라서 공구의 경사각을 크게 하든지, 절삭유를 사용하여 공구경사면의 마찰력을 감소시키는 등의 조치로 전단각을 증가시킴으로써 버의 발생을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 그러나 버의 두께는 전단각이나 측면전단각에 기하학적으로 크게 의존하며, 측면전단각은 넓은 범위에서 변화를 보이기 때문에 버의 두께 자체는 반드시 변형폭에 비례한다고는 볼 수 없다.

3. 미세 버 특성의 실험적 고찰

3.1 측면버 성장 특성

미세홀의 가공에 있어서 버 발생의 실험을 위해 본 연구에서는 3축 제어의 홀 가공기를 제작하였다. 주로 넓은 평면에 대한 직선홀을 가공하기 위한 본 가공기로 본 연구에서는 두께 0.5mm의 황동시편에 공구를 기울여(tilting) 렌즈용 프리즘의 가공실험을 하였다¹¹⁾.

Fig.6은 공구를 프리즘각으로 기울여 총 100 μ m의 절입을 한 경우의 프리즘각과 1회당 절입깊이에 따른 버의 길이를 측정된 값이다. 버의 길이는 프리즘각이 커질수록 그리고 1회당 절입깊이가 커지는 것을 알 수 있다. 1회당 절입깊이가 4 μ m이하인 경우와 그 이상인 경우 절입깊이의 변화에 대한 버의 길이의 변화율이 달라지는데 미세형상가공에서 이처럼 버의 길이가 달라지는 절입깊이를 임계절입깊이라고 부르기로 한다.

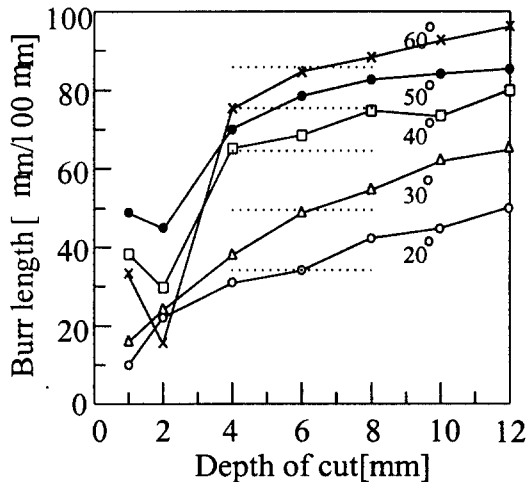


그림 6 Burr length with prism angle

Fig.7의 (a)~(f)는 프리즘각 50°, 절삭속도 5mm/sec로 가공한 시편에서 발생한 버를 가공면에 수직인 방향에서 관찰한 현미경 사진이다. 버의 형상은 그 끝의 형상의 규칙성으로부터 절입깊이에 따른 차이를 볼 수 있다. 절입깊이가 6 μ m이하인 경우에는 그 끝이 불규칙해지고 강도도 저하된다. 이것은 버로 변형되는 변형폭이 감소하여 버의 강도에 재료의 결정계면의 영향이 두드러져 버의 탈락이 쉽게 일어나기 때문으로 생각된다. 한편 절입깊이를 증가시키면 버의 끝이 매끄러워지면서 강도도 증가되는데 임계절입깊이에서의 버 길이는 특히 총가공깊이를 가공

면에 투영한 길이와 유사한 특성을 보이고 있다. 총 절입깊이를 가공면에 투영한 길이를 투영길이(Bp)라고 하며, 총절입깊이의 프리즘각에 대한 sin값과 같다. Fig.6에 표시된 점선은 각 프리즘각에 대한 Bp 값을 나타낸다.

3.2 초음파 세정기에 의한 디버링 실험

미세홀가공에 있어서 버의 발생은 가공조건에 의존하여 그 양이 가변하기는 하지만 버가 완전히 없이는 가공하는 것은 곤란하다. 그러나 가공 후 후처리 과정에서 버를 제거할 수 있다면 미세홀의 정밀도를 향상시키는데 많은 도움이 될 수 있다. 일반적인 기계가공에서는 버를 제거하기 위해 줄질, 연삭, 연마, 샌드쇼팅(sand shotting), 진동 등 다양한 방법을 사용하고 있다. 초음파 디버링(deburring)은 버를 제거해야 할 부품을 액체속에 담구어 두고 초음파진동자에 의한 충격파를 이용하여 버를 제거하는 방법으로 디버링 공구가 닿을 수 없는 부분도 작업이 가능하고, 부품을 손상시키지 않기 때문에 미세형상가공부품의 디버링에 적합한 방법이다.

본 연구에서는 초음파 세정기를 사용하여 프리즘각 50°의 단일프리즘시편에 대해 디버링 실험을 해보았다. Fig.8은 Fig.7에서 보인 가공부위를 디버링 실험한 결과이다. 디버링 실험 결과 버의 탈락정도는 가공조건에 밀접한 관계를 가짐을 알 수 있었다. 절입깊이 2 μ m의 시편에 있어서는 약 1분간의 작업으로 거의 모든 버가 제거됨을 알 수 있었다. 절입깊이 4~6 μ m의 시편이 있어서는 약 10~20분 정도의 시간이 소요되어 대부분의 버를 제거하는 것이 가능하였다. 그러나 절입깊이 8 μ m 이상의 시편에 있어서는 약 40분이상의 디버링으로도 버를 완전히 제거시킬 수 없어 가공부위 끝에는 불규칙한 버가 남아있었다. 초음파 세정기에 의한 디버링 실험에 있어서도 버가 쉽게 제거되는 경우는 절입깊이가 임계절입깊이 이하로 가공하였을 경우이었다.

4. 결론

미세홀 가공시 정도에 미치는 영향이 큰 측면버의 크기를 예측하기 위한 절삭모델을 제시하고, 단일프리즘 시편에 대한 절삭실험을 통해 버를 관찰한 결과 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 측면버 모델에서의 측면전단면의 폭은 전단각의 변화에 따라 대략 절입깊이의 0.1~0.3배 사이에서 결정된다.
2. 버의 길이, 끝의 형상 그리고 초음파 디버링 등에서 버의 거동은 절입깊이에 영향을 받는데, 버의

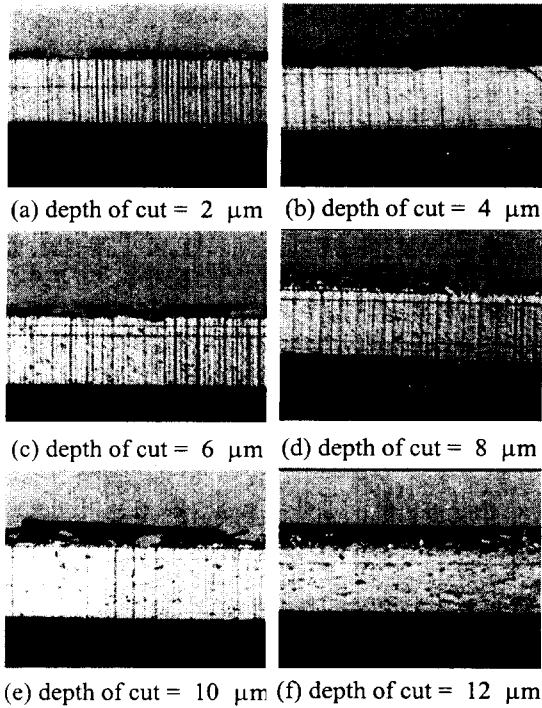


Fig.7 Shape of machined surface and burrs with cutting depth

강도가 약해지는 임계절입깊이가 존재한다.

- 본 연구에 있어서 황동의 임계절입깊이는 약 6μm 이하가 되며, 이는 황동의 결정립 경계가 버의 강성에 영향을 나타내기 시작하기 때문으로 여겨진다.

5. 참고 문헌

- [3] 山崎雄司, 中村和人, 橋本洋, フレネル렌즈內藏LED의開發, 精密機械工學會誌, vol.59, no.4, 1993
- [5] 上田勝宣, 住谷充夫, 微細溝의超精密切削加工, JSPE, vol.52, no.12, 1986, pp2016-2019
- [1] 本田誠, 프레넬렌즈型의製造方法, 日本國特許廳 公開特許情報(A) 昭57-201102, 1982
- [2] 西口 隆, 프레넬렌즈およびその製造方法, 日本國特許廳 公開特許情報(A) 平4-281443, 1992
- [4] 中野新吾, 金丸正一, 렌치キュラー-렌즈金型의製造方法, 日本國特許廳 公開特許情報(A) 平4-53642, 1992
- [7] L.K. Gillespie, P.T. Blotter, The Formation and Properties of Machining Burrs, J. of Eng. for

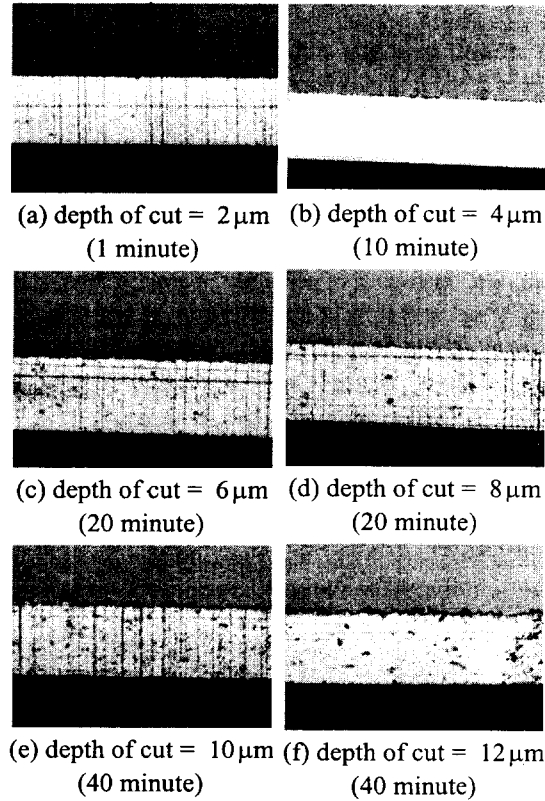


Fig. 8 Ultrasonic deburring results

- Ind., Trans. of ASME, Feb., 1976, pp66-74
- [6] S. Kawamura, J. Yamakawa, Formation and Growing up Process of Grinding Burrs, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol.23, No.3(Sept. 1989), pp194-199
- [8] Kazuo Nakayama and Minoru Arai, Burr Formation in Metal Cutting, Ann. of CIRP, vol. 36, no.1, 1987, pp33-36
- [9] Sung-Lim Ko, David A. Dornfeld, A Study on Burr Formation Mechanism, J. of Eng. Mat. and Tech., Trans. of ASME, Vol.113, Jan., 1991, pp75-87
- [10] J.N. Reddy, An introduction to the Finite Element Method - 2nd ed., Mc.Graw-Hill, 1993
- [11] 임한석, 안중환, 프레넬 렌즈용 미세홈 가공에 있어서 버 발생 경향에 관한 연구, 한국정밀공학회, 제14권, 제3호, 1997