

## 프레넬렌즈 금형용 미세홈 가공에 있어서 버 발생 경향에 관한 연구

임한석\*, 안중환\*\*

### A Study of Burr Formation on Microgrooving for Fresnel Lens Mould

Han-Seok Lim\*, Jung-Hwan Ahn\*\*

#### ABSTRACT

The side burrs and shape distortion resulting from the micromachining of an array of V-shape microgrooves in fresnel lens mould were experimentally investigated. The focus of this study is on the influence of depth of cut and prism angle on the burr shape and burr growing rate. The main experiments were conducted on the single prism cutting for the convenient of measuring the burr shape and cutting force. From the observation of the burr shape and burr growing rate, it was found that there exists a critical depth of cut below which the burrs are more or less irregular and weak. But above that critical value, the burrs are relatively clear and stiff.

**Key Words** : fresnel lens(프레넬렌즈), projection TV screen(투사형 TV 스크린), microgrooving(미세홈 가공), micro burr(미세 버), burr growing rate(버 성장률), diamond cutting(다이아몬드 절삭)

#### 1. 서론

광학부품으로서의 미세홈은 제품의 소형화 또는 박형화를 위해 기하광학적 기능을 하는 부품 또는 제품에 적용되고 있다<sup>1)</sup>. 미세홈으로 이루어진 광학부품으로는 볼록렌즈나 오목렌즈를 평면화시킨 프레넬렌즈(Fresnel lens), 입체그립 또는 입체 스크린에 적용되는 렌티큘라 렌즈(Lenticular lens), 액정 디스플레이의 조명용으로 사용되는 도광판(渡光板) 그리고 교통 표지판 등

에 사용되는 리플렉션 리플렉터(Reflection reflector) 등이 있다. 이러한 제품에 사용되는 미세홈은 광학적 기능을 갖기 위해 홈의 기울기가 연속적으로 변화하는 형상(프레넬렌즈)이거나 또는 원, 타원, 포물선 등과 같은 단면형상(렌티큘라 렌즈)이 요구된다. 이들을 제작할 수 있는 방법으로는 미리 가공형상에 맞게 준비된 공구를 이용하여 절삭가공을 하는 것이 최적의 방법이다. 이것은 절삭가공시 천연 다이아몬드 공구를 사용함으로써 경면의 가공 면을 얻을 수 있다는 점과 피삭재의 선정이

\* 부산대학교 대학원

\*\* 부산대학교 기계기술연구소

자유로우므로 대량생산을 위한 금형을 제작하는 경우에도 적용이 가능하다고 하는 이점 때문이다<sup>(2,3)</sup>.

본 연구에서 대상으로 하는 프레넬렌즈는 렌티큘라렌즈와 함께 프로젝션 TV(Projection TV)용의 대형 스크린에 사용되는 핵심 부품으로 주로 40인치 이상의 대형 스크린에 적용되고 있다. 가공되어 있는 홈은 수10~수100  $\mu\text{m}$ 의 피치에 미세한 각도 변화를 갖는 직선형상으로 Fig.1에 보인 바와 같이 비구면 볼록렌즈의 곡면 기울기를 평면상에 투영한 것과 같다. 볼록렌즈의 면을 보다 잘 근사시키기 위해서는 프리즘간의 피치가 작을수록 좋으나 프리즘의 비 렌즈면에 의해 효율이 저하되기 때문에 그 피치를 적절하게 선정하여야 한다. 프레넬 렌즈의 금형 제작에는 대형의 초정밀 가공기를 필요로 한다. 이러한 금형을 가공하는데는 가공기계의 정도, 가공재료, 공구형상, 작업환경 등 여러 측면이 고려되어야 하겠지만<sup>(4)</sup>, 특히 미세형상 가공이라는 점에서 비절삭 저항의 증대때문에 재료의 소성변형도 중요해진다. 재료의 소성변형은 미세형상의 가공시 에지(edge)부에 버(burr)를 형성시키거나 미세형상 자체를 변형시키는 등의 문제를 유발한다<sup>(5)</sup>.

본 연구에서는 프레넬렌즈용 금형의 가공에 있어서 미세한 비대칭 프리즘의 정밀 가공시 쉽게 발생하는 미세 버(micro burr)의 발생 경향을 실험적으로 조사하고, 버의 발생 기구를 규명하고자 하였다. 본 실험을 위한 가공기는 연구목적에 맞게 특별히 제작하였으며, 공구는 단결정 다이아몬드 공구를 사용하였고, 가공시편은 현재 프레넬렌즈용 금형으로 사용되고 있는 황동을 사용하였다. 실제의 대형 프레넬렌즈 금형은 공구의 각도를 변화시킬 수 있는 초정밀 수직형 선반을 이용하여 제작하지만, 본 연구에서는 주로 미세형상의 가공특성을 파악하기 위해 소형의 시편에 직선 절삭하는 방법으로 실험을 수행하였다.

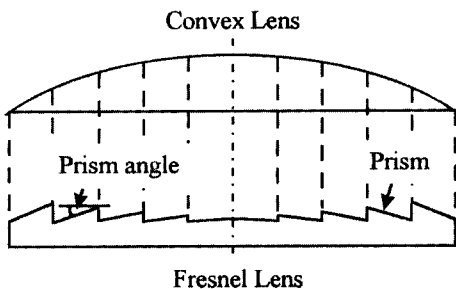
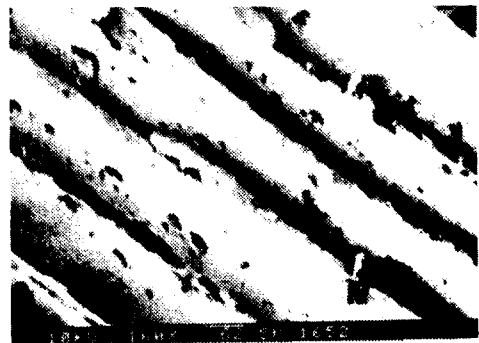


Fig.1 Principle of Fresnel lens

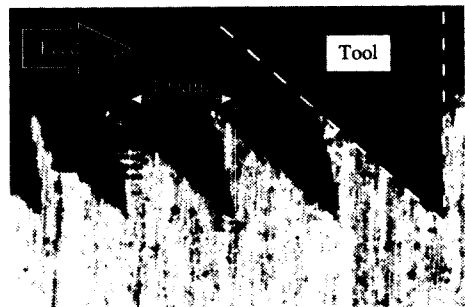
## 2. 미세홈 가공시의 정밀도 저하 인자.

일반적으로 절입 깊이가 작아지게 되면 치수효과에 의한 비절삭력이 증가하게 된다. 경면을 가공하는 경우에는 이 용력은 가공면의 잔류응력으로 남지만, 형상가공에 있어서는 공작물에 소성변형을 유발시키는데 이 소성변형은 형상의 끝에 버가 되어 남든지 형상 자체를 변형시키게 된다. Fig.2(a)는 피치 0.1mm, 프리즘 각 45°의 미세홈을 1회당 절입 깊이가 2 $\mu\text{m}$ 씩 황동 시편에 대해 가공하였을 때 발생한 버를 전자현미경으로 측정된 예이다. 그림에서 가공한 홈의 산 부분에 불규칙하게 발생된 버를 관찰할 수 있다.

Fig.2(b)는 동일한 시편에 1회당 절입 깊이가 20 $\mu\text{m}$ 씩 가공한 것을 공작물의 단면에서 현미경으로 관찰한 것으로 형상 찌그러짐이 발생한 것을 볼 수 있다. 이처럼 미세홈 가공에 있어서 버는 가공깊이가 작을 경우에도 발생하지만 가공깊이가 증가하여 절삭력이 커지게 되면 형상변형도 함께 나타난다.



(a) burr



(b) shape distortion

Fig. 2 Example of micro burr and shape distortion

Gillespe는 일반적인 기계가공에 있어서 발생하는 버를 그 발생 메커니즘에 따라 프와송 버(Poisson burr), 롤오버 버(roll over burr), 균열형 버(tear burr) 그리고 컷오프 버(cut-off burr)의 4가지로 분류하였으며<sup>(6)</sup>, Kawamura는 버의 발생 위치에 따라 입구버(entrance burr), 측면버(side burr), 출구버(exit burr)의 3가지로 분류하여 연삭에 있어서 버의 성장경향에 관하여 연구를 수행하였다<sup>(7)</sup>. Fig.3을 2차원 절삭에 있어서 버의 발생 위치에 따른 명칭을 표시한 것으로 Fig.2(a)에서 관찰되는 버는 Fig.3에 있어서 측면버(side burr)에 해당된다고 볼 수 있다.

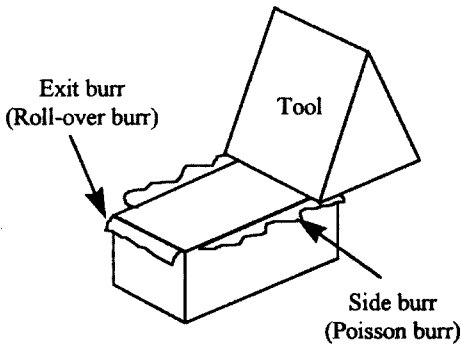


Fig. 3 Designation of burr

절삭깊이가 충분히 큰 경우 측면 버의 발생은 인선 반경과 동일한 직경을 갖는 원통이 재료 내부에서 압력을 받을 때 발생하는 벌징(bulging)으로 설명되고 있다<sup>(6)</sup>. 한편, 공구가 공작물에서 이탈하는 순간에 발생하는 출구 버는 공구가 공작물의 끝으로 다가감에 따라 공작물 내부에서 발생하는 전단력에 의한 재료의 회전에 의해 발생하는 것으로 규명되고 있다<sup>(8)</sup>.

### 3. 실험 장치 및 방법

#### 3.1 실험 장치

미세홈의 가공실험을 위해 본 연구에서는 Fig.4와 같은 3축 제어의 홈 가공기를 제작하였다. 본 가공기는 주로 넓은 평면에 임의 단면을 갖는 직선홈을 가공하기 위한 형삭기(shaping machine)로 절삭은 공구가 고정된 상태에서 XY테이블의 이송에 의해 이루어지므로 비교적 저속으로 가공이 된다.

본 가공기의 X,Y축은 각각 200mm의 작업 범위를 가지며, 피치 5mm의 볼 스크류를 AC 서보모터로 구동하여 1 $\mu$ m의 위치결정 정밀도를 갖고 있다. 최대 절삭속도는 약 200mm/sec정도이다. Z축은 피치 2mm의 볼 스크류와 마이크로 스텝 모터를 사용하였으며 50mm의 범위에서 실용 가능한 위치 결정 정밀도는 약 0.2 $\mu$ m이다. 각축의 모터는 PC로부터의 펄스 신호로 제어되며, PC내부의 인터페이스 회로는 모터 제어 전용 LSI(PCL240AK)를 통해 최대 4축까지 자동 가감속 펄스 출력을 낼 수 있다.

가공실험을 하는 동안에는 각 축방향으로 작용하는 절삭력을 공구동력계(KISTLEY 5109A)를 이용하여 측정하였으며, 측정된 신호를 데이터레코더에 기록한 후 A/D 변환기를 통해 컴퓨터로 읽어 들었다.

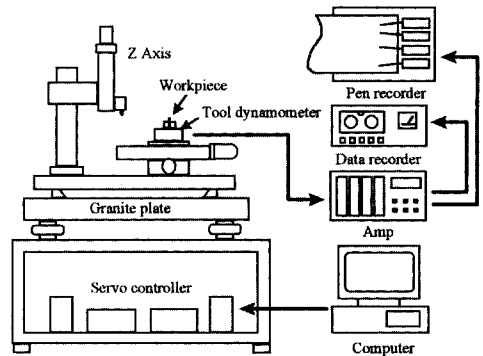


Fig. 4 Schematic diagram of experimental setup

#### 3.2 실험 방법

프레넬렌즈 금형가공시 공구의 이송이 홈의 피치 간격으로 주어지기 때문에 공구의 형상이나 시편재질을 정하면, 가공중에 변경할 수 있는 조건은 절삭속도, 1회당 절입깊이, 그리고 프레넬렌즈의 반경방향의 거리에 따른 프리즘각의 변화이다. 본 연구에서는 주로 1회당 절입깊이와 프리즘각의 변화에 대해 버의 성장 경향을 조사하였다.

프레넬렌즈 금형의 정밀 가공을 위해 본 연구에서는 예비적으로 평판에 대해 복수 개의 홈 가공 실험을 수행해 보았다. 가공 결과는 Fig.2에 보인 것과 같이 버나 형상변형이 관찰되었다. 이러한 가공 방법은 Fig.5(a)와 같이 표현할 수 있다. 그러나 평판에 복수의 홈을 가공하였을 때는 현미경 상에서 초점 심도를 벗어나기 때문에 버

의 양을 정확하게 측정하기 어렵다.

따라서 본 연구에서는 프리즘 끝에서 버가 성장하는 것을 관찰하기 위해 Fig.5(b)에 보인 것과 같이 단일 프리즘 가공 실험을 수행하였다. 버의 형태는 가공면이 현미경 상에서 관찰 부위가 되도록 시편을 기울임으로써 측정 가능하다. 또한 형상이 미세하여 가공 기준면을 설정하기 어렵기 때문에 하나의 시편에서 상대적인 기준면이 만들어질 수 있도록 Fig.6에 보인 바와 같이 계단식 가공 실험을 하였다. 즉 한개의 시편에 전체적으로 총 절입깊이 100 $\mu\text{m}$ 을 가공하고, 여기에 다시 이보다 작은 가공 부위에 100 $\mu\text{m}$ 의 단차를 가공하는 방법으로 하여 총 4개의 계단식 가공을 하였다. 이렇게 함으로써 상대적인 측정에 의해 가공 기준면에 대한 오차 없이 100 $\mu\text{m}$ 의 가공에 대한 버의 성장값을 측정하는 것이 가능하다. 가공 시편은 0.5mm 두께의 황동 판을 사용하였으며, 공구동력계에 고정용 치구를 사용하여 고정하였다. 가공 조건을 Table 1에 정리한다.

Table 1 Cutting condition of Experiment

Material	Brass (Cu(60.90%), Zn(38.93%), Hardness(Hv0.5) 102)	
Cutting Condition	Cutting depth	1, 2, 4, 6, 8, 10, 12 $\mu\text{m}$
	Prism angle	10°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°
	Total cutting depth	100 $\mu\text{m}$ $\times$ 4 step
	cutting speed	5 mm/sec

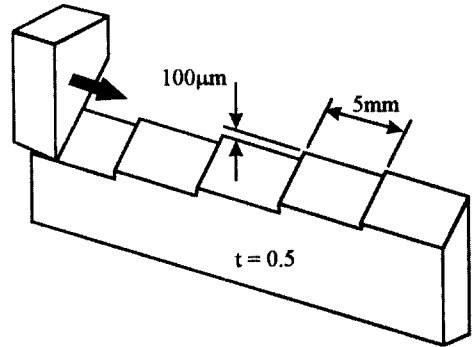


Fig. 6 Cutting strategies to evaluate burr growing rate

#### 4. 결과 및 고찰

##### 4.1 버의 발생 형태

Fig.7은 절입깊이 6 $\mu\text{m}$ , 프리즘면의 각도 50° 그리고 절삭속도 5mm/sec로 가공한 시편을 공구가 절입해 들어가는 방향에서 관찰한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 가공시 발생하는 버는 가공면이 공작물의 끝과 이루는 각이

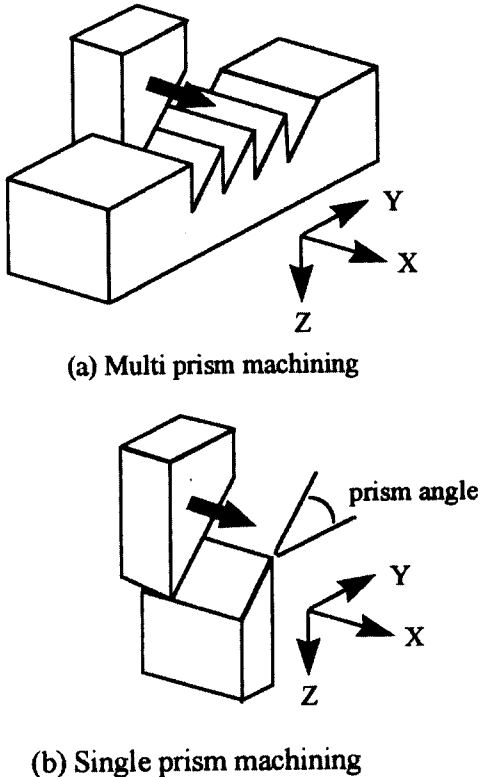


Fig. 5 Single prism machining strategies

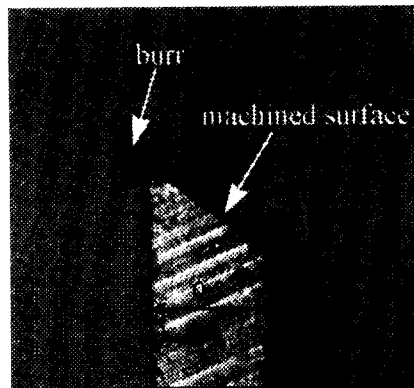


Fig.7 Typical shape of micro burr at tool entrance section

둔각인 프리즘 아래 부분에서는 거의 발생하지 않았지만, 예각인 프리즘 끝 부분에서는 렌즈면과 나란한 방향인 재료 바깥쪽으로 발생하였다. 이러한 경향은 거의 모든 시편에서 동일하게 나타났다.

Fig. 8의 (a)~(f)는 프리즘각 50°, 절삭속도 5mm/sec로 가공한 시편에서 발생한 버를 가공면에 수직인 방향에서 관찰한 현미경 사진이다. 발생하는 버의 형상은 절입깊이에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 절입깊이가 클수록 버의 끝은 균일해지며, 강도도 증가된다. 절입깊이가 대략 6 $\mu\text{m}$  이하가 되면 버의 끝이 불규칙해지기 시작하는데 이것은 절입깊이가 감소함에 따라 버 두께와 강도가 감소하여 버의 탈락이 쉽게 일어나기 때문으로 여겨진다.

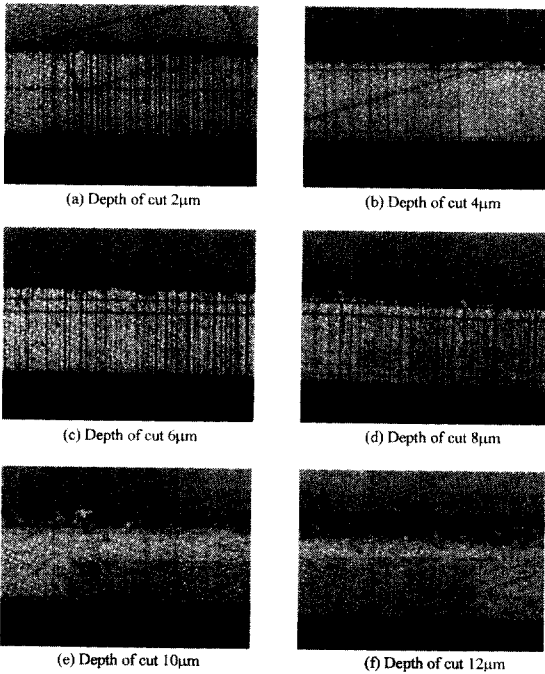


Fig. 8 Shape of the machined surface and burr with cutting depth

#### 4.2 절입깊이 및 프리즘각과 버 성장률과의 관계

Fig. 9는 50°의 기울기로 가공된 프리즘 면의 단차가 있는 부분을 가공면의 수직 방향에서 관찰한 것이다. 버를 포함한 가공면은 가공량이 많은 A쪽이 그보다 100 $\mu\text{m}$  적게 가공한 B쪽보다 넓은 것을 알 수 있다. 시편의 두께가 일정하므로 가공된 렌즈면의 폭도 일정해야 할 것이므

로, 그림에서 A와 B의 길이 차이는 버의 성장에 의한 것으로 간주할 수 있다. Fig. 10(a)는 이러한 버의 성장을 간략화 하여 표현한 것이다. 100 $\mu\text{m}$ 의 단차에 대한 버의 성장률을 측정하기 위해 먼저 각 가공면에 대한 평균적인 폭 A, B, C, D의 단계별 차이를 평균값을 취하여 구하였다. Fig. 10(b)는 절입깊이 및 프리즘각에 따른 버 성장률의 측정결과이다. 버 성장률은 절입깊이가 커짐에 따라 증가되는 것을 볼 수 있다. 버 성장률은 절입깊이가 작을 경우에는 절입깊이가 증가함에 따라 빠르게 증가되지만 절입깊이가 큰 경우에는 그 증가폭이 줄어드는 경향을 가지고 있다. 버 성장률은 또한 프리즘각의 변화에도 영향을 받는데, 동일한 절입깊이에 대해 프리즘각이 클수록 버도 많이 발생하는 것은 버 발생 메커니즘이 기하학적 조건에 영향을 받고 있음을 의미한다. 프리즘각이 40~60° 인 경우에 있어서 절입깊이가 2 $\mu\text{m}$ 일 때 버 성장률이 급격히 감소하는 것은 절삭시 칩이 말리면서 버가 발생하는 부위와 접촉하여 발생하는 버를 탈락시켰기 때문이다.

#### 4.3 임계절입깊이와 버 투영길이

Fig. 8에 있어서 절입깊이가 8 $\mu\text{m}$ 이상인 경우에는 버 끝의 형상은 절입깊이와 관계없이 항상 매끄러운 모양을 이루고 있다. 그러나 절입깊이가 점차 감소하여 6 $\mu\text{m}$ 이하가 되면 버의 형상은 불규칙해진다. 단일 프리즘 가공에 있어서 버가 불규칙해지기 시작하는 절입깊이는 프리즘각에는 크게 영향을 받지 않는데 본 연구에 있어서는 대략 4~6 $\mu\text{m}$ 이하에서 이러한 경향이 나타나기 시작했다. 이것을 하나의 임계절입깊이로 간주할 수 있다. 임계절입깊이 이하로 가공한 결과 발생한 버는 그 형상이 불규칙하기도 하지만 버 자체의 강도도 약하여 쉽게 제거할 수 있기 때문에 후공정으로서의 디버링을 고려한 절입조건으로 사용될 수 있다.

버 성장률은 절입깊이가 변함에 따라 변화하지만 임계절입깊이에서의 버 성장률은 특히 총가공깊이를 가공면에 투영한 길이와 유사한 특성을 보이고 있다. 총절입깊이를 가공면에 투영한 길이를 투영길이(Bp)라고 하며, 총절입깊이의 프리즘각에 대한  $\sin$ 값과 같다. Fig. 10(b)에 표시된 점선은 각 프리즘각에 대한 Bp값을 나타낸다. 임계절입깊이는 버의 형상이 매끄러운가 불규칙한가를 기준으로 결정되지만 버 성장률을 측정함으로써도 결정될 수 있다. 즉 버 성장률이 Bp 이하가 되기 시작하는 절입조건

을 임계절입깊이로 결정할 수 있으며, 임계절입깊이 이하에서의 버 성장률은 임계절입깊이 이상의 경우에 비해 상대적으로 절입깊이의 변화에 영향을 많이 받고 있다.

임계절입깊이 이하에서는 버의 두께가 얇아 탈락이 일어나기 때문에 형상이 불규칙하고 버성장률도 감소된다. 반면 임계절입깊이 이상에서는 버의 탈락이 전혀 발생되지 않으며, 버성장률이  $B_p$ 보다 큰 것은 버가 되어 남는 부분이 재료 바깥쪽으로 굽힘변형을 받고 있음을 의미한다.

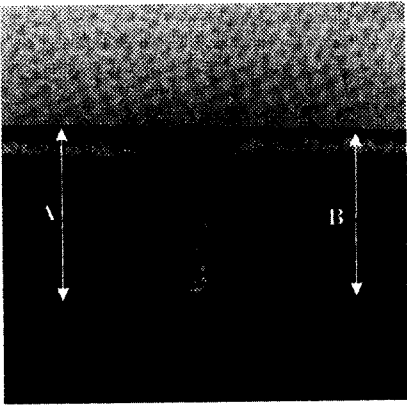
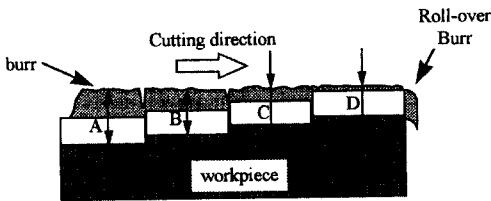
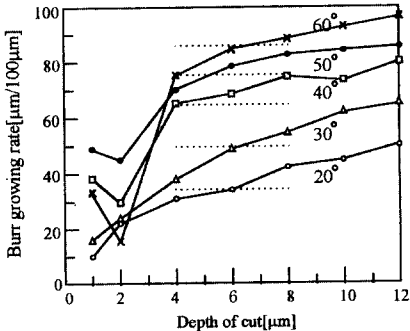


Fig. 9 Growing of burr near the step



(a) Simplified diagram of burr formation



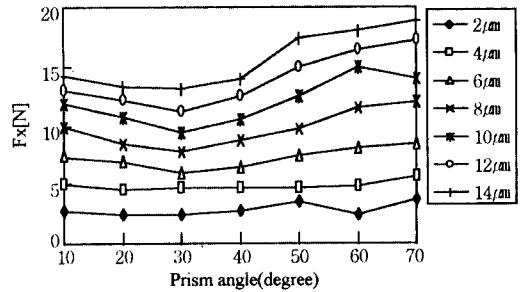
(b) Burr growing rate

Fig. 10 Burr growing rate

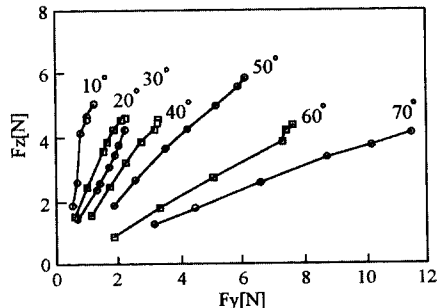
#### 4.4 절삭력 측정 결과 및 버 성장 과정

Fig.11(a)는 프리즘 각 및 절입 깊이의 변화에 따른 주절삭력의 관계를 표시한 것이다. 그림에서 주절삭력은 가공 깊이가 증가할수록 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 절삭 단면적이 증가하므로 일반적으로 절삭이 있어서 당연한 결과이다. 한편 1회당 절입 깊이는 공구의 기울임에 관계없이 Fig.5에서 표현한 Z축 방향으로의 깊이이다. 이것은 시편의 폭이 일정하므로 공구의 각도에 관계없이 절삭 단면적은 일정하다는 것을 의미한다. 그런데 그림으로부터 프리즘 각이 증가함에 따라 주절삭력이 조금씩 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 절삭 단면적은 일정하지만 프리즘 면에 수직 방향으로의 실제 절입 깊이는 프리즘 각이 증가함에 따라 감소하므로 비절삭력의 변동 즉 치수 효과에 의한 것으로 생각된다.

Fig.11(b)는 프리즘각 및 절입깊이가 변화에 따라 가공면에 작용하는 두 힘  $F_y$ ,  $F_z$ 를 직교좌표계로 표현한 것이다. 그림에서  $F_y$ 와  $F_z$ 의 합성력이 작용하는 방향이 프리즘 각의 변화에 따라 변하고 있음을 알 수 있다. 그런데 각 프리즘 각에 있어서  $F_z$ 는 절입 깊이가 증가함에 따라 대략 1N에서 5N 정도로 변화를 보이고 있으나,  $F_y$ 는 프리즘 각에 따라 그 크기의 범위를 달리하고 있다. 즉 가



(a) Principal force



(b) Thrust force

Fig. 11 Principal force and thrust force distribution

공면에 작용하는 힘은 절입깊이와 프리즘 각이 증가함에 따라 증가하지만, 프리즘 각에 따른 힘 성분의 변화를 보면  $F_z$ 는 어느 일정한 범위 안에서 변화하는데 대해  $F_y$ 는 각 프리즘 각에 대해 그 크기의 범위를 달리하고 있다. 이것은 가공 시편의 강성이 Z방향은 일정한데 비해 Y방향으로는 탄성 변형되기 쉽기 때문에, 이전 절삭에서 탄성 변형에 의해 가공되지 않은 부분의 탄성력이 절삭력에 부가된 것으로 생각된다.

이러한 프리즘면 가공에 있어서의 탄성 변형과 버의 성장 방향을 고려하면, 미세홈 가공에 있어서 프리즘 끝에 발생하는 버의 성장을 Fig.12에서와 같이 생각할 수 있다.

Fig.12(a)는 가공 전 공구와 가공면과의 관계를 보이는 것으로 가공면의 기울기는 공구의 각도보다 크며, 이것은 전 가공 후 시편이 탄성 회복하기 때문이다. Fig.12(b)는 가공면의 공구와 공작물의 관계이며, 가공면은 공구와 완전히 평행이나, 공작물의 측면은 작용하는 배분력에 의해 바깥으로 약간 탄성 변형하게 된다. 이 경우 공작물 끝에 붙어 있던 버의 끝은 공작물의 탄성 변형에 의해 공구의 아래쪽으로 이동하여 공구에 닿지 않게 됨으로써, 버가 공구에 의해 제거되지 않고 성장할 수 있게 된다. 따라서 미세 프리즘 가공에 있어서 버 성장 모델은 기존의 프와송 버에 의한 측면버 발생 모델 이외에, 미세 가공에 따른 상대적인 절삭력의 증가에 의한 재료의 탄성 변형이 버가 성장하는데 도움을 주고 있음이 고려되어야 함을 알 수 있다.

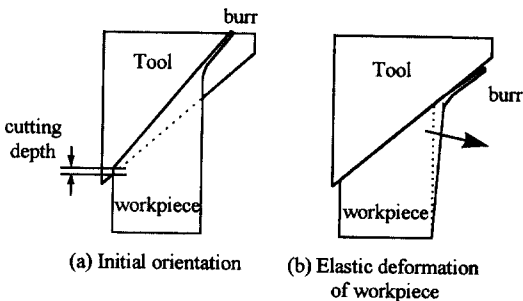


Fig. 12 Burr formation process

## 5. 결론

본 연구에서는 프레넬렌즈 금형용 미세홈 가공 실험을 통해 고정도 형상을 얻기 위해서는 버와 형상 변형을 저감시켜야 할 요인으로 제시하였다. 형상 변형은 절입량을 줄여 절삭력을 감소시키면 저감이 가능하다. 그러나 버는 미세한 절입으로 가공하더라도 발생하므로 그 거동을 조

사하기 위해 단일 프리즘 가공 실험을 수행하였다. 가공 중 발생된 버의 성장을 관찰하고, 가공 중의 절삭력 측정을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 단일 프리즘의 계단식 가공을 통해 버 성장률을 측정하였으며, 버 성장률은 프리즘각과 절입깊이가 증가할수록 증가한다.
2. 총 절입깊이를 가공면에 투영한 길이(Bp)보다 버 성장량이 작은 절입조건이 존재하며, 이 경우에는 버의 탈락이 생겨 버의 끝이 불균일해지며 상대적으로 버의 강도가 약해진다.
3. 버의 길이는 총 가공 깊이에 비례하므로, 버 저감을 위해서는 전 가공면을 정밀하게 가공하여 오차를 없애고, 필요한 총 가공 깊이를 최소화 할 필요가 있다.
4. 단일 프리즘 가공시의 절삭력 측정을 통해, 프리즘의 측면으로 작용하는 절삭력이 공작물을 탄성 변형시켜 버의 끝이 공구에 의해 제거되지 않고 계속 성장한다는 버 성장 모델을 제시할 수 있었다.

## 참고 문헌

1. 山崎雄司, 中村和人, 橋本洋, フレネルレンズ内藏 LEDの開発, 精密工學會誌, vol.59, no.4, pp655-660, 1993.
2. 山形豊, 口俊郎, 精密切削による微細形状創成, 精密機械工學會誌, vol.61, no.10, pp1361-1364, 1995.
3. 杉田忠彰, 上田完次, 稻村豊四郎, 基礎切削加工學, 共立出版株式會社, pp153-180, 1984.
4. 先端加工技術研究會, 超生産加工技術への挑戦, 工業調査會, 1984.
5. 上田勝宣, 住谷充夫, 微細溝の超精密切削加工, JSPE, vol.52, no.12, pp2016-2019, 1986.
6. L.K. Gillespie, P.T. Blotter, The Formation and Properties of Machining Burrs, J. of Eng. for Ind., Trans. of ASME, Feb., pp66-74, 1976.
7. S. Kawamura, J. Yamakawa, Formation and Growing up Process of Grinding Burrs, Bull. Japan Soc. of Prec. Engg., Vol.23, No.3, pp194-199, 1989.
8. Sung-Lim Ko, David A. Dornfeld, A Study on Burr Formation Mechanism, J. of Eng. Mat. and Tech., Trans. of ASME, Vol.113, Jan., pp75-87, 1991.