韓國精密工學會 '96年度 春季學術大會論文集 pp.53~57

광학부품용 미세홈의 금형가공에 있어서 버와 형상변형에 관한 연구

(Burr and shape distortion in micro-grooving of optical components)

임 한 석*, 안 중 환†

*부산대학교 대학원, †부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

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 optical components were experimentally invesigated and a simplified model for their formation is proposed. Burr/shape distortion should be kept to a minimum level since they degrade the characteristics and performance of these parts. The focus of this study is on the influence of depth of cut and workpiece material, The workpiece materials used were brass, bronze and copper.

From the observation of the chip shape and burr/shape distortion, the proposed model, that the compressive force at the cutting edge causes the ductile uncut chip material to flow plastically outward toward the free surface to result in a burr, was verified.

Key words : microgrooving, side burr, shape distortion, diamond tool

1. 서 론

광학 부품으로서의 미세홈은 제품의 소형화 또는 박형화를 위해 기하광학적 기능을 하는 부품 또는 제품에 적용되고 있다. 미세홈이 사용되는 광학부품으로는 볼록렌즈나 오목렌즈를 평면화시킨 프레넬 렌즈, 입체그림 또는 입체 스크린에 적용되는 렌티큘라 렌즈, 액정 표시판의 조명용으로 사용되는 도광판(渡光板) 그리고 교통표지판 등에 사용되는 리플렉션 리플렉터등이 있다.

미세 3차원 형상을 제작하는 방법은 절삭, 연삭, 레이저 가공, 전자빔 가공, 에칭등의 제거가공과 도금, 스파트링, 광조형법 등의 부가가공, 마이크로소성가공과 같은 소성가공이 있다. 광학부품으로서의 미세홈은 그 형상이 광학적 기능을 갖기 위해 연속적인 홈 형상의 변화(프레넬 렌즈) 또는 원, 타원등과 같은 단면형상이 요구되는 경향이 있으며, 대량생산을 위한 대형의 금형이 요구될 경우 피가공물의 재질선정에 제한이 없는 마이크로 절삭에 의한 가공이 바람직하다. 즉 요구되는 형상에 맞는 공구를 제작하여 공구 형상을 공작물에 전사시킴으로써 고정도 3차원 형상을 가공하는 것이 가능하다.

한편 경면상태의 가공면이 요구되는 경우 다이아몬드 공구를 사용하여 가공하면 비교적 쉽게 경면을 얻을 수 있다. 다이아몬드 공구의 경우 인선반경을 극히 작게 만드는 것이 가능하며, 미세한 절입에 대한 절삭성과 공구 형상의 가공물에 대한 전사성(轉寫性)이 비교적 우수하기 때문이다. 그러나 미세 홈가공에 있어서는 가공단위가 작아질수록 비절삭저항이 증가하여 재료에 소성변형을 유발시키며, 결정입계도 정도에 큰 영향을 미치는 요인이므로 가공조건과 재료의 선정에 주의가 요구된다.

본 연구에서는 프레넬 렌즈의 경우와 같이 미세한 비대칭 프리즘으로 이루어진 금형의 제작을 목적으로 미세홈 가공실험을 수행하였다. Fig.1은 본 연구에서 가공하고자 하는 제품의 도면이다. 버와 형상변형의 측정을 용이하게 하기 위하여 가공실험은 주로 하나의 프리즘을 가공하는 것으로 대신하였으며, 버의 발생경향과 그 발생모델에 관하여 고찰을 수행하였다. 가공재질로는 황동, 인청동, 전기동의 3가지를 대상으로 하였으며 가공조건에 따른 버와 형상변형을 조사하였다.

2. 미세홈 가공시의 정밀도 저하 인자.

프레넬 렌즈는 임의의 볼록렌즈나 오목렌즈의 형상중에서 렌즈면의 기울기를 미세한 프리즘으로 만들어 평면상에 투영시킨 것으로 렌즈를 박형화 하고자 할 때 사용된다. 렌즈면을 보다 잘 근사시키기 위해서는 프리즘간의 피치가 작을수록 좋으나 프리즘의 측면에 의해 효율이 저하

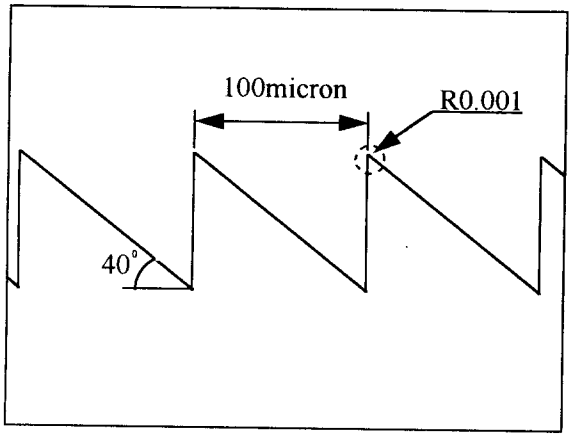
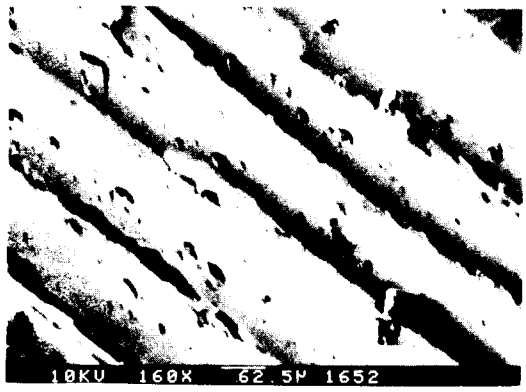


Fig.1 Drawing of Required Micro Groove

되기 때문에 무한정 작게 할 수는 없다. Fig.1에서 프리즘의 산 부분인 부분은 이 렌즈의 효율을 좌우하므로 최대한 정밀하게 제작되어야 하며 본 연구에서는 R=0.001 이하로 하는 것을 목표로 하였다.

일반적으로 미세절삭에서와 같이 절입깊이가 작아지게 되면 치수효과에 의한 비절삭력의 증가에 의해 가공물에 가해지는 응력이 증가하게 된다. 미세형상을 가공하게 되면 이 응력에 의해 공작물에 심한 소성변형이 유발되는데



(a)

(b)

Fig.2 Example of micro burr and shape distortion
(a) burr, (b) shape distortion

이 소성변형은 형상의 끝에 버(burr)가 되어 남든지 형상 자체를 변형시키게 된다. Fig.2는 Fig.1에서 주어진 형상을 가공하였을 때 발생한 버와 형상변형의 예이다. 일반적으로 가공깊이가 작을 경우에는 버의 발생이 형상변형보다 두드러지지만 가공깊이가 증가하여 절삭력이 커지게 되면 형상 변형이 동반된다. 즉 버의 발생과 형상 변형은 작용하는 가공력의 차이에 의해 동일한 프로세스에서 발생한다.

Gillespe는 일반적인 기계가공에 있어서 발생하는 버를 그 발생 메카니즘에 따라 프와송(Poisson)버, 롤오버(roll over)버, tear burr 그리고 컷오프 버의 4가지로 분류하였으며[1], Kawamura는 버의 발생위치에 따라 Fig.3에서와 같이 entrance burr, side burr, exit burr의 3가지로 분류하여 연삭에 있어서 버의 성장경향에 관하여 연구를 수행하였다[2]. Fig.2(a)에서 관찰되는 버는 Fig.3에 있어서 side burr에 해당된다고 볼 수 있다.

절삭깊이가 충분히 큰 경우 사이드 버의 발생은 인선반경과 동일한 직경을 갖는 원통이 재료 내부에서 압력을 받을 때 발생하는 벌징으로 설명하는 것이 가능하다[1]. 그러나 절입깊이가 매우 작을 경우에는 절삭재료내부의 전단면에서의 절삭저항보다 재료를 절인반경방향으로 누르는 저항이 더 크게 된다. 이 경우 공구의 여유면과 재료의 경계면에 생긴 높은 압력에 의해 재료가 공구의 측면으로 밀려나는 프와송버가 발생하게 된다.

한편, 공구가 공작물에서 이탈하는 순간에 발생하는 exit burr는 공구가 공작물의 끝으로 다가감에 따라 공작물 내부에서 발생하는 전단력에 의한 재료의 회전에 의해서 발생한다[3].

Fig.4는 미세홈 가공시의 공구와 공작물의 기하학적 관계와 절삭저항, 소성변형 영역에 관한 개념도이다. Fig.4(a)에서 공구는 지면을 향해 나오고 있으며, 절입깊이 d로 수회 절삭한 후의 상태라고 가정한다. 공구의 경사각과 비틀림각이 각각 0° 일 때 칩은 그림에서와 같이 공구 주절인에 직각인 방향으로 흘러나온다. 이때 발생하는 절삭력 Fz와 Fy가 합성된 배분력 Fv는 주절인과 직각을 이루게 된다.

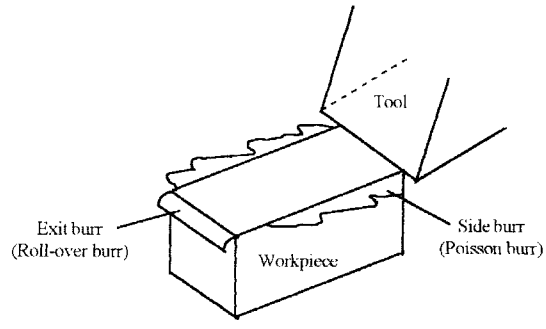


Fig.3 Designation of burr

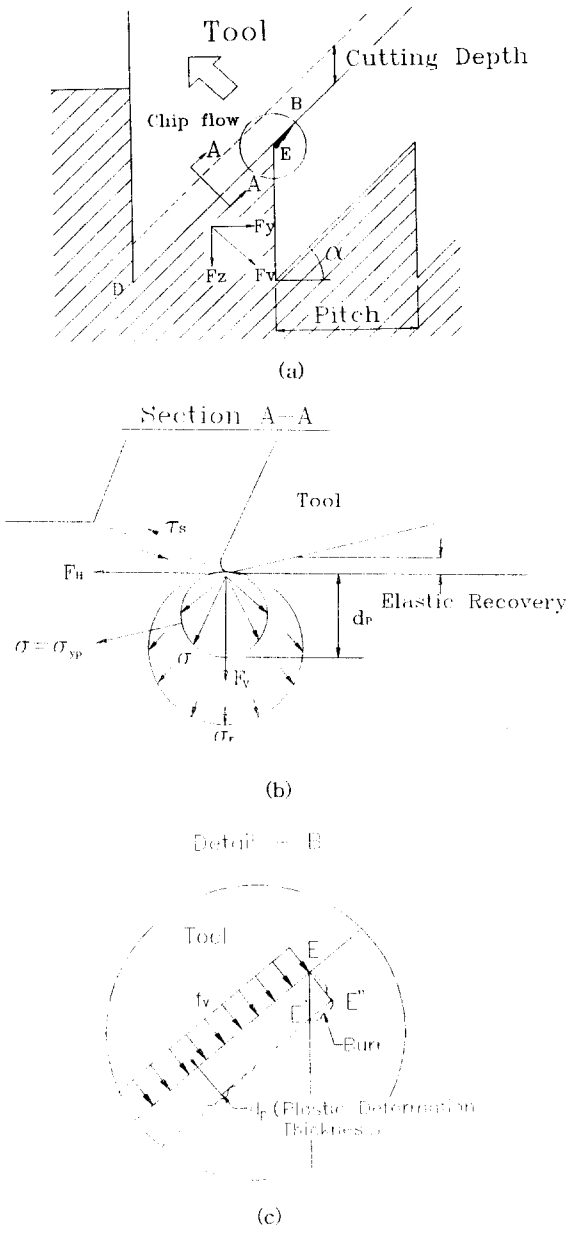


Fig.4 Schematic diagram of burr generation

Fig.4(b)는 주절인에 직각인 단면 AA에서 관찰하는 절삭모형이다. 주절삭력F_H가 대부분 칩을 생성하는데 작용한다고 가정하면 배분력 F_V는 공구인선에 집중하여 재료를 누르는 힘으로 작용한다. 이를 반무한체 표면에 수직으로 단위폭당 하중 P가 작용하는 응력문제[4]로 간주하면 반경방향의 응력σ_r만이 존재하며

$$\sigma_r = -\frac{2P}{\pi}\frac{\cos\theta}{r} \qquad (1)$$

의 관계가 성립한다. 식(1)에서 응력이 동일한 선을 구해 보면 Fig.4(b)에서 보인 바와 같이 원이 된다. 응력이 거리에 반비례하므로 $\sigma_r = \sigma_{yp}$의 관계가 성립되는 탄소성 경계층 d_p의 상부에서는 재료의 소성변형이 발생하며 공구의 전후로 변형되거나 소성잔류응력으로 남게된다.

Fig.4(c)는 프리즘의 E부분에 대하여 소성변형층 d_p를 포함하여 표시한 것이다. 배분력 F_V가 공구의 인선에 분포하중 f_V로 작용한다고 보면, 공작물내의 탄소성 경계층 DE'는 탄성변형층에 의해 지지되지만 공작물의 끝단 EE''는 공작물에 의해 지지되지 못하므로 E점이 E'' 방향으로 ε_p만큼 밀려 변형된다. 절입깊이 d가 ε_p보다 크면 방금 생긴 소성변형량은 다음번의 절삭에서는 제거되면서 또다시 ε_p만큼 발생한다. 이 경우 버는 성장을 하지 않게 된다. 그러나 대부분의 연성재료에 있어서는 ε_p는 절입깊이보다 크며 따라서 아무리 절삭을 반복해도 버는 제거되지 않고 끝임없이 성장하게 된다.

3. 실험 장치 및 방법

미세홈의 가공실험을 위해 본 연구에서는 Fig.5와 같은 3축 제어의 홈가공 전용기를 제작하였다. 본 연구에서 대상으로 하는 미세홈은 주로 넓은 평면에 직선의 홈이 배열된 형태를 취하고 있으므로 범용의 밀링기나 조각기에서와 같이 회전공구를 돌리기 위한 주축은 필요하지 않으며, XY테이블의 이송속도가 그대로 절삭속도가 된다. 이러한 구조는 평삭 또는 형삭기계에 사용되는 구조로 일반적으로 직선의 가공형상을 얻기위해서 불가결한 구조이며 비교적 저 속의 절삭속도로 가공이 진행된다. 본 기계의 X,Y축은 200mm X 200mm의 행정에 피치 5mm의 볼스크류와 LM가이드를 사용하였으며, 모터 엔코더의 분해능은 10,000P/R이다. Z축은 피치 2mm의 볼스크류에 50,000P/R의 마이크로 스텝모터를 채용하였다. 본 가공기의 각축 모터는 PC로부터 펄스 신호를 입력받아 제어되며 PC내부에는 자동가감속 기능을 가진 전용의 인터페이스 회로를 내장시켰다.

가공실험에서는 다수의 미세홈을 평판에 가공하였을 때 가공단면이나 버의 크기를 관찰하는 것이 곤란하기 때문에 Fig.6에 보인 것과 같이 하나의 프리즘을 가공대상으로 하였다. 가공시편은 두께 0.5mm의 황동판, 인청동판, 전동판을 사용하였으며 Fig.6에서와 같이 공구동력계 위에 고정용 치구를 사용하여 고정하였다. 여러 예비적인 실험을 통해 버나 형상변형은 절삭속도에는 크게 관여하지 않음을 알았으며, 절삭속도는 5mm/sec의 한 경우에 대해서만 실험을 수행하였다. 가공깊이는 버의 발생이나 버의 형상에 많은 영향을 주는 요소이며, table 1에서와 같이 5개의 조건으로 하였다. 버의 성장특성을 보기위해 각 시편은 표의 절입깊이로 총 50μm를 가공하고 다시 50μm의 단차를 주는 방법으로 Fig.7에 보인것과 같이 총 5단계의 단차를 주어 각 단계별 버의 크기차이를 버 성장 값으로 하였다.

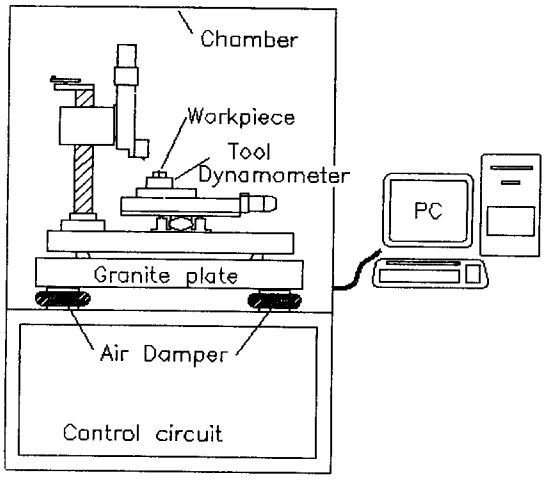


Fig.5 Schemetic diagram of experimental setup

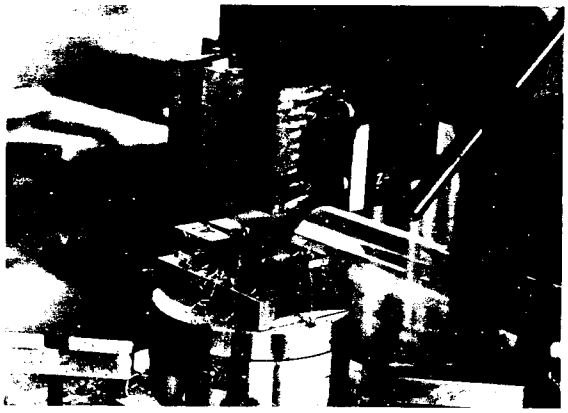


Fig.6 Photograph of tool and specimen setup

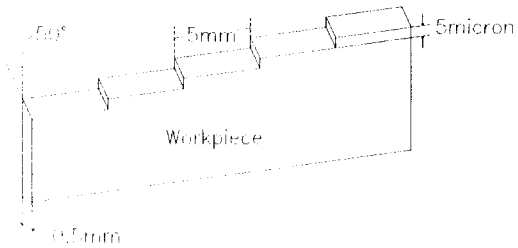


Fig.7 Cutting strategics to evaluate burr growing rate

Table 1 Cutting condition of Experiment

Material	Brass, Bronze, Copper	
Cutting depth	1, 2, 4, 6, 8 μm	
Total cutting depth	50 μm * 5 step	
Prism angle	50°	

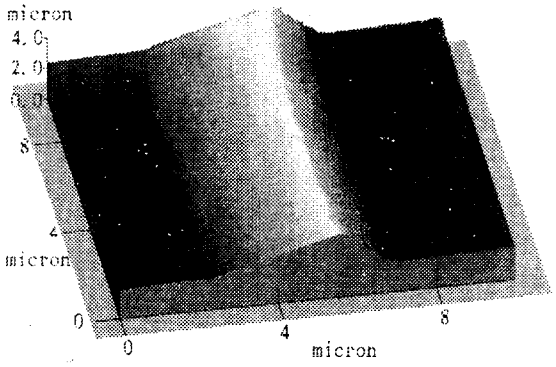


Fig.8 AFM scaned Cutting edge profile

실험에 사용한 다이아몬드 공구는 경사각 0°에 주절인의 각이 50°인 천연 단결정 다이아몬드 공구이다. 공구의 절인반경은 미세절삭시 배분력의 발생에 직접적인 영향을 주므로 실험전 새로운 다이아몬드 공구의 절인반경을 측정해 보았다. Fig.8은 AFM을 이용하여 공구의 주절인 형상을 측정한 것이며, 절인단면의 형상으로부터 인선반경은 약 0.8μm 정도로 추정되었다.

4. 결과 및 고찰

본 연구에서는 가공조건으로 절입깊이와 가공물의 재질이 버의 발생에 주는 영향에 대해 조사하였다. 그리고 하나의 프리즘 면을 만든 후에 이 프리즘 면을 기준으로 다시 50μm를 더 가공하는 식으로 단차가 있는 프리즘을 하나의 시편에 대해 5개씩 만들었다. Fig.9는 깊이 6μm씩 가공한 황동시편의 가공이 완료된 시편을 공구가 절입해 들어가는 방향에서 관찰한 것이다. 그림에서 보듯이 가공시 발생하는 버는 둔각의 프리즘 아래부분에서는 거의 발생하지 않았으며 예각인 프리즘 끝부분에서는 버 발생이 두드러졌다. 이러한 경향은 거의 모든 시편에서 동일한 경향을 나타낸다. 이것은 Fig.4에서 설명하였듯이 절삭시 발생하는 배분력에 의한 공구끝단에서의 소성압축력이 공작물에 의해 지탱되지 않아서 발생하는 전단변형에 의한 것으로 여겨진다.

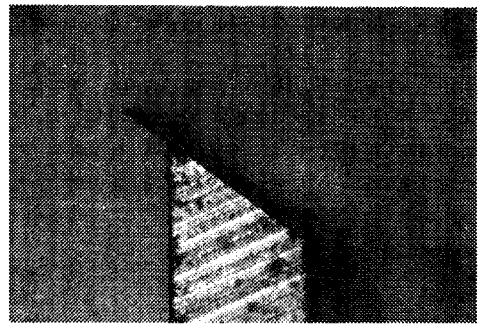


Fig.9 shape of micro burr at tool entrance section

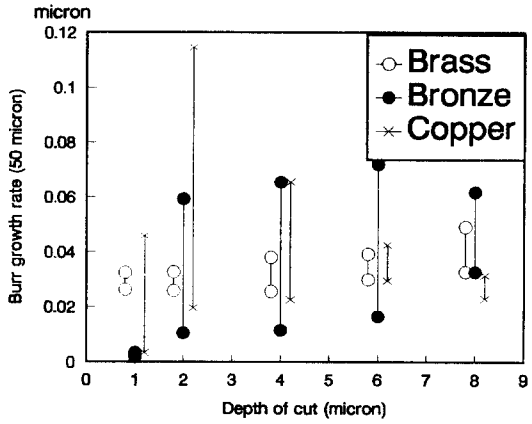


Fig.10 characteristics of burr growing with cutting depth

Fig.10는 버의 성장율을 구한 것으로 매 50μm씩의 각 단차간에 있어서 버의 길이의 차를 표시한 것이다. 버 성장율은 재료마다 분명한 차이를 보이고 있다. 황동의 경우는 절입깊이가 다르더라도 50μm씩 더 가공하더라도 그 차이는 대개 일정하며 약 0.3μm에서 0.5μm씩의 증가를 보이고 있다. 그러나 버의 강도는 절입깊이가 작을수록 훨씬 작아지는 것이 관찰되었다. 인청동의 경우는 절입깊이가 1μm인 경우에는 버가 거의 발생하지 않으나 2μm이상에서는 크기의 기복이 심하고 최대 버 크기도 황동의 경우보다 훨씬 크게 나타난다. 1μm인 경우 버가 거의 발생하지 않은 것은 인청동이 비교적 경도가 높아 가공시 발생한 진동에 기인하는 것으로 생각된다. 전기동의 경우는 절입깊이가 증가할수록 버발생의 기복이 적어지는데 이것은 전기동이 비교적 인성이 우수하여 절입이 클 경우에는 안정된 연속칩을 만들며 버 발생이 일정해지기 때문으로 생각된다. 버 발생량은 황동의 경우와 대개 비슷한 값을 가지지만 절입량이 작을 경우 버의 기복이 매우 심하게 나타났다.

Fig.11은 깊이 4μm씩 가공한 황동시편의 가공된 프리즘면의 단차가 있는 부분을 수직의 방향에서 관찰한 것이다. 버를 포함한 프리즘 가공면은 면을 깊이 가공한 A쪽이 그보다 50μm적게 가공한 B쪽보다 폭이 넓은 것을 알 수 있다. 또한 버의 끝이 이루는 선은 거의 모든 시편에 있어서 동일한 선을 이루고 있었다. 이것은 버의 끝이 성장하는 것은 버의 길이방향이 아니라 최초에 발생한 지점에서 계속 공구의 주절인에 수직한 방향으로 이동함으로써 발생한다는 것을 보여준다.

5. 결론

광학부품을 만들기 위한 본 연구에서의 미세 프리즘 가공실험을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 미세홈 가공시 홈의 산부분에서 발생하는 버의 거동을 단일 프리즘 가공실험을 통해 조사할 수 있었다.
2. 절삭시의 배분력에 의한 소성변형에 의해 발생하는 버의 발생 및 성장 모델을 제시하였다.
3. 황동의 경우 절입깊이에 관계없이 버의 발생은 거의 동일한 경향을 갖는다.
4. 버의 끝은 최초 발생한 버가 공구 주절인에 수직한 방향으로 밀리므로 가공량에 관계없이 동일한 끝선을 유지한다.
5. 프리즘의 각이 둔각인 경우 사이드버는 거의 발생하지 않는다.

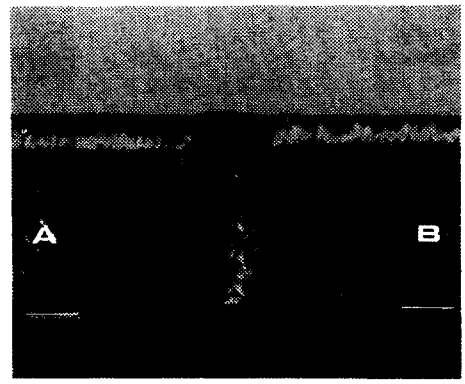


Fig.11 Shape of machined surface and burr

6. 참고문헌

[1] L.K. Gillespie, P.T. Blotter, The Formation and Properties of Machining Burrs, J. of Eng. for Ind.,Trans. of ASME, Feb., 1976, pp66-74

[2] 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

[3] 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

[4] 李康鏞, 彈塑性力學概論, 文運堂, 1991, pp62-69

[5] 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, 1984, pp153-180

[6] 中野新吾, 金丸正一, レンチキュラ-レンズ金型の製造方法, 日本國特許廳 公開特許情報(A) 平4-53642, 1992

[7] 山崎雄司, 中村和人, 橋本洋, フレネルレンズ內藏LEDの開發, 精密機械工學會誌 ,vol.59, no.4, 1993

[8] 上田勝宣,住谷充夫, 微細溝の超精密切削加工, JSPE, vol.52, no.12,1986,pp2016-2019

[9] 先端加工技術研究會, 超生産加工技術への挑戰, 工業調査會,1984

[10] D.A.Lucca, Y.W.Seo,Effect of Tool Edge Geometry on Energy Dissipation in Ultraprecision Machining, Ann. of CIRP, vol.42, no.1, 1993, pp83-86