

# 다이아몬드 공구를 이용한 미세 홈 가공

(Machining of Micro Groove using Diamond Tool)

임한석\*, 김창호\*, 김봉향\*\*, 안중환\*\*\*

\* 부산대학교 대학원, \*\* LG전자 창원공장

\*\*\* 부산대학교 공과대학 정밀기계공학과

HanSeok Lim\*, ChangHo Kim\*, BongHyang Kim\*\*, JungHwan Ahn\*\*\*

## Abstract

A cutting experiment using diamond tool was performed to make the die cavity which is composed of micro groove with mirror surface. Fine cutting depth was generated by the elastic recovery of the modified tool holder on the conventional M/C. Surface roughness and profile were investigated with cutting speed and depth and through the low cutting speed of 10mm/min, Rmax 0.05μm or less of machined surface could be achieved.

**Keyword** : Micro Groove, Broaching, Diamond tool, Mirror Surface

## 1. 서론

최근 정보기기의 발달과 더불어 전기, 전자, 반도체, 광학 관련기기 및 각종 제어기기 등에 있어서 요구되는 부품의 정밀도는 꾸준히 증가되고 있다. 초정밀 가공에 의해 제작되는 부품으로는 자기디스크, 폴리곤 미러, 감광드럼, 비구면경, 구면·비구면 렌즈 등이 있다. 이러한 기계부품의 가공은 지금까지 초정밀 가공기에서 다이아몬드 공구를 사용하여 선삭이나 플라이컷(flycut) 등의 가공방법으로 주로 평활한 경면을 얻는 것이다. 가공재질도 비교적 연질의 알루미늄, 구리, 프리스틱등이 사용되고 있다.

한편 볼록렌즈를 평면화시킨 프레넬 렌즈(fresnel lense) 또는 광확산용 렌즈(optical diffuser) 등은 미세한 프리즘 또는 홈 형상의 집합으로 이루어져 있으며, 가공면도 경면이 요구되는 부품들이다. LSI제조기술등에 있어서는 포토에칭 기법을 이용하여 μm이하의 선을 제작하는 기술은 이미 실용화 되어 있으나, 포토에칭법을 사용한 홈 형상의 가공은 가공단면의 형상을 임의로 하는 것이 곤란하기 때문에 직선이나 곡선으로 이루어지는 홈을 가공하기 위해서는 미세 홈의 단면형상을 가지는 공구를 사용한 기계적 가공이 바람직하다. 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 절

삭성과 공구 형상의 가공물에 대한 전사성(轉寫性)이 비교적 우수하기 때문이다. 그러나 미세 홈가공에 있어서는 재료의 소성거동과 결정입계의 영향이 정도에 큰 영향을 미치는 요인이므로 가공조건 선정에 세심한 주의가 요구된다<sup>[1]</sup>.

본 연구에서는 원형의 단면을 가지는 비교적 미세한 홈형상의 금형을 제작하기 위해 다이아몬드 공구를 사용하여 절삭실험을 수행하였다. 가공실험은 위치정도 ±0.5μm의 머시닝센터에서 행하였으며, 경면을 얻기 위한 미세절입은 공구를 고정하는 치구의 탄성변형을 이용하였다. 여러가지 가공조건중에서 가공정도에 영향을 미치는 인자를 조사하였으며, 가공 실험결과 표면거칠기 Rmax 0.05μm의 경면을 얻는 것이 가능하였다.

## 2. 미세 홈 가공 관련 연구동향 및 가공의 특징

### 2.1 연구 동향

미세한 홈으로 이루어진 사출용 평면금형의 제조를 위해 종래에는 초경합금, 세라믹, 소결다이아몬드, 단결정다이아몬드 등의 공구를 사용하여, 절삭성이 우수한 동합금, Al 합금, 비철합금 등의 금형 재료에 대해 형상가공방법을 주로 사용하였다. 이러한 기술에 있어서 문제점으로서 는 밀링, 조각기등에서 가공하는 경우는 절삭속도가 빠르

고, 단속절삭이 이루어지므로 정밀 렌즈 금형의 절삭에 적합한 단결정 다이아몬드 바이트는 내충격성이 약하여 사용 불가하다는 점이다<sup>[2]</sup>.

단결정 다이아몬드 공구를 이용한 절삭가공은 주로 경면을 얻기 위한 가공에 많이 적용되나, 공구의 인선반경을 극히 작게 만들 수 있는 다이아몬드 공구의 특징 때문에 미세 형상 가공에도 응용되고 있다. 山崎 등은 프레넬 렌즈가 내장된 LED제작용 금형을 만들기 위해 소형 초정밀 선반을 제작하고 금형가공을 하였다. 제작한 초정밀 다이아몬드 선반은 마찰구동기구( Friction Drive Unit : FDU )를 사용하고, 레이저 간섭계를 이용하여 20nm의 위치 분해능을 얻고있다. 주축은 air spindle을 사용하여 주축 정도 50nm, 속도 범위는 100 ~ 1800 rpm을 얻고 있다. 가공된 금형은 직경 3mm 정도의 소형 렌즈 금형이다<sup>[3]</sup>.

上田 등도 소형 프레즈넬 렌즈 금형제작을 위한 다이아몬드 공구 절삭법을 연구하였다. 동과 알루미늄등의 금속에 날끝모양이 원호 혹은 직선인 공구를 사용하여 경면 가공 하는 경우 공구 형상은 10nm오더까지 전사시키는 것이 가능하지만, 그 이하의 미세한 홈을 가공하려고 하는 경우에는 재료의 소성변형에 의해 홈 양쪽이 솟아오르는 현상이 발생하여 공구형상이 그대로 전사되지 않는다. 가능한한 공구의 형상이 그대로 전사되기 위해서 공구의 이송속도를 극히 적게 할 것과 공작물의 결정 방위를 고려할 것을 제안하였다<sup>[4]</sup>.

한편 미세홈이 가공된 원통형의 프라스틱 압연 금형에 대해서는 정밀 선반을 사용하여 금형을 가공하는 것이 가능하다. 선삭의 경우 고속절삭 (수십 ~ 수백 m/min)이 이루어지고, 연속적으로 수 $\mu$ m단위의 미세 절입이 가능하므로 정밀 절삭이 용이하다는 있점이 있다<sup>[5]</sup>.

## 2.2 단결정 다이아몬드 공구에 의한 미세 형상 가공의 특징

Fig.1은 범용 선반을 사용하여 동일한 절삭조건에서 다이아몬드 공구와 초경공구를 사용했을때의 거칠기를 비교한 것이다. 사용된 공구형상은 직선절입이며, 재질은 Al7075, 절입깊이 0.1mm, 이송 0.085mm/rev, 절삭속도 50cm/sec이다. 다이아몬드 공구를 사용했을때 Rmax는 약 1.2 $\mu$ m정도, 초경 공구를 사용했을때 Rmax는 약 5 $\mu$ m정도가 되고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 연결 금속에 대해 마무리 가공시 단순히 다이아몬드 공구를 사용하는 것만으로 가공면의 거칠기를 매우 향상시킬 수 있음을 알 수 있다.

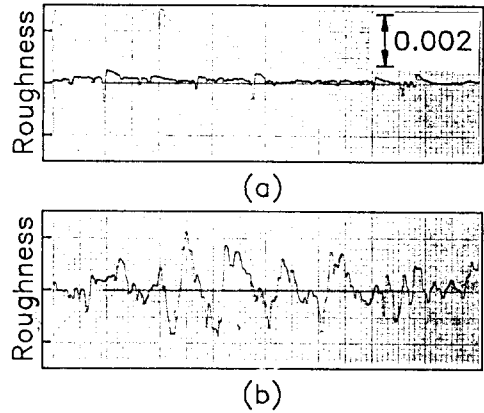


Fig.1 Roughness Comparison of Machined Surface  
(a) Diamond Tool, (b) Carbide Tool

다이아몬드 공구를 사용한 미세 절삭은 기존의 공구를 사용한 매크로적 절삭(최소 절삭깊이 0.1mm정도 이상)에 비해 다음과 같은 특징이 있다<sup>[1]</sup>.

- ① 다이아몬드 공구의 인선부 반경은 기존의 초경공구 등에 비해 예리하게 할 수 있어 인선의 반경은 이론적으로 2nm까지 제작하는 것이 가능하여 초미세 절입이 가능하다.(공구의 Sharpness 우수)
- ② 절입깊이를 1 $\mu$ m정도 이하로 하면 피삭재 재료내부의 결정입계나 전위(Dislocation)에 영향을 받지 않아 연속적인 칩이 생성되어 가공면이 극히 양호하게 된다.
- ③ 미세 절입시에는 비절삭저항이 증가하여 공구의 강도는 다이아몬드 정도를 필요로 한다.

한편 미세가공시 가공의 불확정 인자로는 다음과 같은 것을 언급할 수 있다.

- ① 역학적 인자 - 절삭경계면에서의 탄소성 거동, 절입 후퇴, 피삭재의 탄성회복, 여유면에서의 마찰
- ② 기하학적 인자 - 절인 능선의 거칠기, 인선 예리도, 전사성
- ③ 물성적 인자 - 마모(열적, 화학적, 기계적)

다이아몬드 절삭에 있어서 가공정도에 영향을 주는 요인의 하나로 공구 형상의 가공물체의 전사성이 있다. 동(銅) 또는 알루미늄등의 금속을 절인 형상이 원호 또는 직선의 공구에 의해 경면으로 가공하는 경우에는 공구 형상을 10nm오더까지 전사시킬 수 있으나,  $\mu$ m오더 또는 그 이하의 미세한 홈 형상을 가공하는 경우에는 홈의 양쪽에 소성변형에 의한 재료의 솟아오름 현상이 생기므로 공구 형상이 제대로 전사되지 않는다. 이때 솟아오름의 양은

공작물 결정 방위, 절삭 방향, 홈의 형상등에 영향을 받는다<sup>[4]</sup>.

따라서 미세한 홈 형상을 고정도로 가공하고자 하는 경우에는 공작물의 결정방위를 잘 선정해서 가공하거나, 절입량과 이송량을 적게하여 변형이 생기지 않는 작은 용력 상태에서 가공할 필요가 있다.

### 3. 가공 실험 및 방법

Fig.2 는 본 연구에서 제작하고자 하는 홈형상의 단면도이다. 주어진 홈 단면은 곡률반경 0.34mm, 피치 0.44mm이고 산의 높이는 0.08mm이다. 홈의 산 부분은 0.001mm이하의 곡률반경이 요구되고 있다. 이러한 형상의 가공방법으로 본 연구에서는 연삭휠을 단면형상으로 드레싱하여 가공하는 방법과 wire-EDM에 의한 방법을 시도하고 검토하였다. 그러나 연삭법의 경우 휠의 마모에 의해 오차가 발생하며 피치정도 유지가 어렵고, wire-EDM의 경우는 가공면 조도를 향상시키기 위해서는 장시간의 정삭이 필요하고, 대형의 공작물에 대해서는 wire의 떨림에 의해 정도 유지가 곤란한 문제가 있었다.

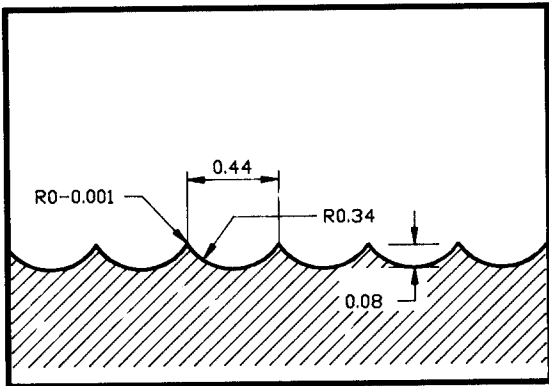


Fig.2 Drawing of Required Micro Groove

본 연구에서는 주어진 형상을 가공하기 위해 공구 nose 반경 0.34mm의 선삭용 다이아몬드 공구를 주문제작하였다. Fig.3은 제작된 다이아몬드 공구의 형상이며, 경사각 20° 여유각 1°이다. 또한 다이아몬드 공구는 비교적 연질의 금속재질에 대해서만 가공이 되기 때문에 가공재질도 구리, 알루미늄, 황동등에 대해서 가공실험을 수행하였다.

본 연구에서의 가공물이 비교적 대형이고, 기준면에 대한 전체의 가공깊이는 상대적으로 덜 중요한 요소임을 감안하여 가공실험을 머시닝센터상에서 수행하였으며, 사용된 머시닝센터의 위치결정정도는  $\pm 0.5\mu\text{m}$ 이다. Fig.4는 머

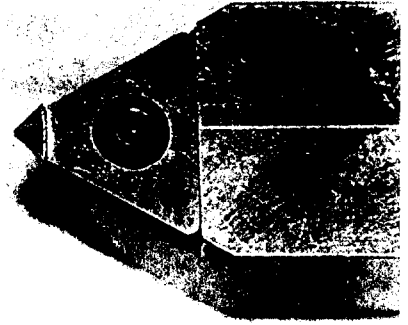


Fig.3 Diamond Tool

시닝센터상에 선삭용 공구를 부착시킨 모습이다. 회전축이 견고하게 고정되지 않으므로, 그림과 같이 주축대 주위에 치구를 부착하여 공구를 고정할 수 있도록 하였다.

Fig.4와 같이 공구를 고정할 후 예비실험을 한 결과 가공에 공구의 진동이 발생하였으며 마무리가공에 상당한 어려움이 있음을 알 수 있었다. 이것은 공구홀더의 변형에 의해 공구끝단이 공작물 내부로 파고 들어가는 방향으로 변형이 생기기 때문인 것으로 추정된다. 따라서 Fig.5와 같이 공구를 고정할 수 있는 치구를 추가하여 가공실험을 하였다. Fig.5(b)에서와 같이 치구를 추가했을 경우 절삭력이 생기면 공구의 끝단이 공작물에서 빠져나오는 방향으로 변형이 생기므로, 황삭 후 가공깊이를 주지않고 여러차례 정삭을 하면 공구의 탄성회복에 의해 미세한 절입깊이를 주는 것이 가능해진다.

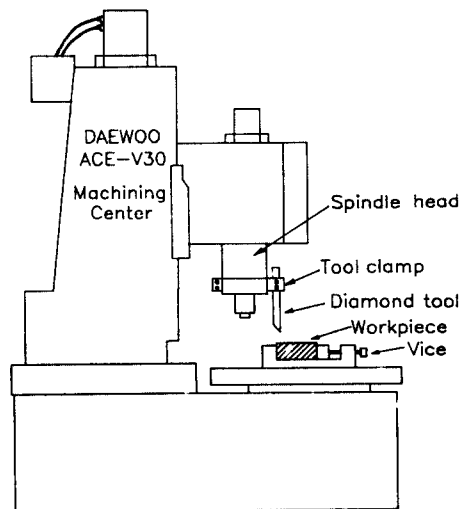


Fig.4 Attachment of Diamond Tool to M/C

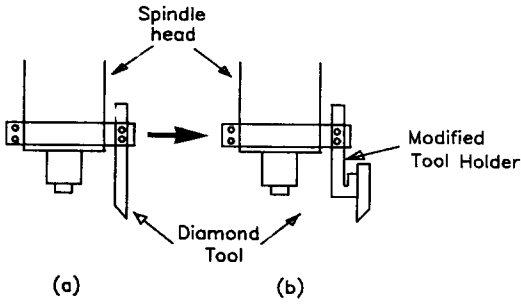


Fig.5 Modified Tool Clamp

#### 4. 결과 및 고찰

미세 홈 가공에 있어서 단면 형상은 공구의 전사성에 크게 의존하므로 절입깊이가 달라지면 절삭력과 소성변형량이 달라질 것이 예측된다. 따라서 단면창성에 미치는 절입량의 영향을 조사하기 위해 서로 다른 절입량으로 가공실험을 해보았다. Fig.6은 절입량에 변화를 주었을 때의 단면의 형상을 비교한 것이다. 그림에서 (a)는 절입량 0.12mm, (b)는 0.23mm이며 절삭속도 10mm/sec로 1회의



Fig.6 Comparison of Machined Section with Cutting Depth

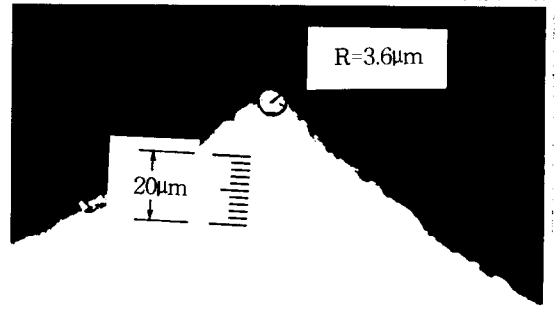


Fig.7 Photograph of the Machined Groove Edge

절삭을 한 경우이다. Fig.6에서 알 수 있듯이 단면형상에 있어서는 두 경우 크게 차이를 보이지 않는다. 이것은 본 실험에 있어서 절입량이 대략 같은 오더이며, 소성변형이 작용하는 크기가 실험조건에 사용된 크기에 비해 훨씬 작은 영역에서 작용하기 때문으로 여겨진다.

Fig.7은 절삭깊이 0.03mm로 3회 가공하여 총 절입깊이 0.09mm로 가공한 후 절입을 주지않고 이송속도 10mm/min으로 3회의 정삭했을 때의 가공된 홈의 에지부분을 확대한 것이다. 본 실험을 통해 에지의 최소 곡률반경 0.0036mm를 얻을 수 있었다.

본 연구에서 요구되는 홈의 최대 깊이는 0.08mm이지만 기준면의 오차에 의해 산부분이 제대로 가공되지 않을 것을 막기 위해, 0.03mm로 3회 황삭한 후 절입을 주지 않은 상태에서 다시 3회의 정삭을 하는 방법으로 실험을 수행하였다. 정삭시 이송속도를 변화시켰을 때 표면의 거칠기를 측정하여 이송에 따른 표면상태를 비교하였다. Fig.8은 이송속도별로 가공면의 거칠기를 측정한 것으로 (a) 300mm/min, (b) 100mm/min, (c) 10mm/min의 경우이다. (a)의 경우  $R_{max}$  0.16mm, (b)의 경우  $R_{max}$  0.14mm, (c)의 경우  $R_{max}$  0.05mm의 표면거칠기로 가공이 되었다. 그림에서 표면거칠기는 이송이 감소함에 따라 감소하고 있다. 따라서 경면을 얻기 위해서는 보다 저속으로 절삭을 할 필요가 있음을 알 수 있다. 그러나 절삭속도를 저하시킬 경우 전체 공작물에 대해 가공시간이 증가하기 때문에 최적의 절삭속도는 생산성을 고려하여 선정할 필요가 있다.

본 연구에서 수행한 실험은 모두 다이아몬드 공구에 의한 미세저속절삭 실험이다. 일반적인 저속 절삭에서 특히 연질의 재질에 있어서는 대부분 구성인선의 영향이 나타난다. 본 연구에서도 이러한 구성인선의 영향이 관찰되었

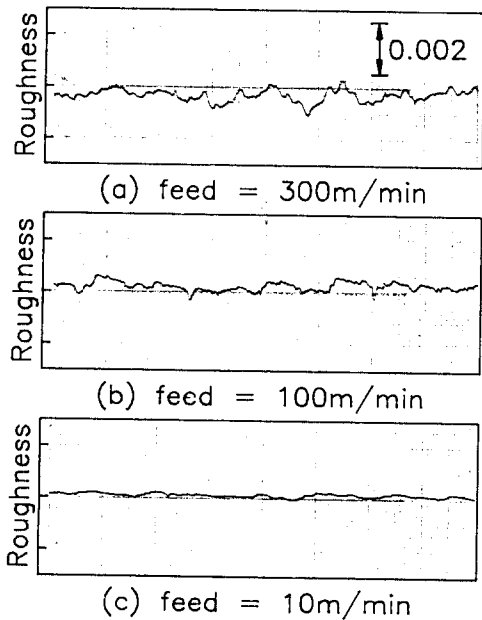


Fig.8 Comparison of Surface Roughness with Cutting Feed

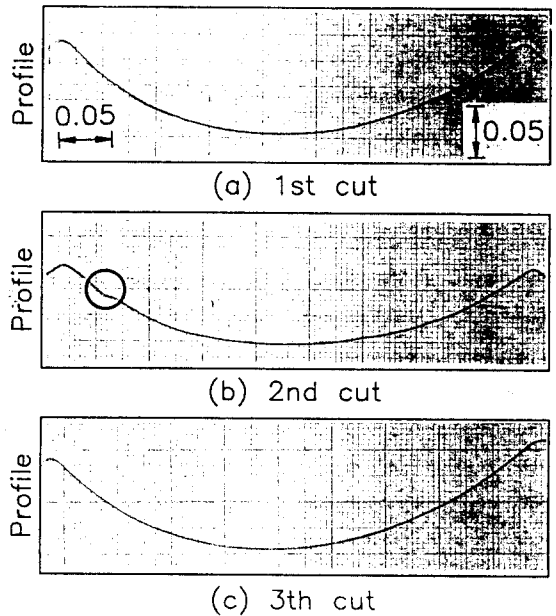


Fig.9 Machined Section influenced by Built-Up-Edge

다. Fig.9는 가공된 공작물을 표면형상측정기로 측정된 것이다. 3개의 단면형상에 있어서 그림(b)의 단면에서는 모서리부분에서 약 0.05mm지점에서 단면 형상이 매그럽지 못한 부분이 관찰되었다. 이것은 공구의 치핑에 의한 것으로 여겨졌으나, (b)의 절삭실험 이후에 절삭된 (c)의 경우에는 이러한 것이 관찰되지 않고 있다. 따라서 (b)에서 관찰된 것은 공구의 날끝에 칩의 일부가 부착되어 가공된 것으로 여겨진다. 보다 정밀한 형상을 얻기 위해서는 저속영역에 있어서 이러한 공구와 칩의 부착현상을 피할 수 있는 가공조건 탐색이 필요함을 알 수 있다.

## 5. 결론

미세한 홈 형상의 경면 가공을 위한 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- ① 머시닝센터상에서 치구를 사용하여 선삭용 공구를 고정된 후 저속의 형삭가공을 통하여 미세한 홈을 가지는 금형의 제작이 가능하였다.
- ② 절입량의 변화는 가공 단면의 형상에는 커다란 영향을 미치지 않는다.
- ③ 이송속도가 감소함에 따라 표면거칠기는 개선되지만 생산성을 고려하여 가공조건을 선정할 필요가 있다.
- ④ 홈의 모서리의 곡률반경은 0.0036mm까지 제작이 가능하였다.

## 6. 참고문헌

- [1] 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
- [2] 中野新吾, 金丸正一, 렌치큐러-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
- [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
- [4] 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
- [5] 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
- [6] 김동식, 김정두, 초정밀 가공에서의 미소절삭특성에 관한 연구, 대한기계학회, '93추계학술발표대회논문집(1), 1993, pp706-711
- [7] 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
- [8] M.Sawa, Y.Meada, M.Masuda, Development of an Advanced Tool-Setting Device for Diamond Turning, Ann. of CIRP, vol.42, no.1, 1993, pp87-90