

플랫 엔드밀을 이용한 미세 홈 가공에 관한 연구

이재일*, 이채문*, 정용호**, 이득우**

* : 부산대 대학원 정밀기계공학과, ** : 부산대 기계공학부

A Study on Micro-grooves Cutting Using Flat-end Mill

Jae-Il Lee*, Chea-Moon Lee*, Yoong-Ho Jung** and Dueg-Woo Lee**

* : Dept. of Precision Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

** : Dept. of Mechanical Engineering, Pusan National Univ.

Abstract

Mechanical micro-engineering is an easy and cheap way to fabricate micro-structures. If the application of the conventional machining method using flat-end mill becomes available for the micro-manufacturing process, it will be advanced as an extension of the conventional machining process. In this study, micro-grooves cutting using flat-end mill($\phi 8$) was performed. The characteristics on flat-end milling was investigated to improve machinability of micro-grooves. The experiments were performed according to variations of spindle revolution, depth of cut, and feed rate. Machinability through various cutting conditions was evaluated by surface geometry, tool wear, and cutting force. The results show that micro V-grooves of width(pitch) $297\mu\text{m}$ were acquired by flat-end milling. The maximum and minimum roughness of the wall of grooves was 438 and 67 nm, respectively.

Key words : Micro-grooves machining, Flat-end milling, Surface geometry, Tool wear, Cutting force

1. 서론

최근 정보 통신 산업의 발달과 더불어 전기, 전자, 광학 관련 기기 등의 발달로 소형화, 미세

화에 관련된 기술 개발의 수요가 꾸준히 증가하고 있다. 미세 가공에 의해 제작되는 부품들을 제작하는 수단으로 종래에는 에칭, 폴리싱, MEMS, LIGA 등의 미세가공 기술이 많이 사용되어 왔으나, 최근에는 나노급의 위치 정밀도를 갖는 초정밀 공작기계의 출현으로 기계적인 가공법으로도 마이크로 형상 부품을 제작할 수 있는 미세가공 기술에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^[1]

관련된 연구들을 살펴보면 H. Ohmori는 다이아몬드 슛들을 이용한 연삭가공으로 게르마늄 소재에 수백 μm 피치의 홈을 가공할 수 있는 장비를 개발하고 가공 실험을 수행하였다^[2]. I. H. Cho는 dicing saw를 이용한 PDP barrier rib 금형의 가공법에 대하여 연구하였는데 50in. XGA PDP에 사용되는 barrier ribs의 사양을 만족하는 $50\mu\text{m}$ 의 절삭폭과 $127\pm 5\mu\text{m}$ 의 절삭깊이, $224\mu\text{m}$ 의 피치로 가공하였다^[3]. 또한 Th. Schaller는 자체 제작한 미세 다이아몬드 엔드밀을 이용하여 황동과 스테인레스강에 폭이 각각 $50\mu\text{m}$ 와 $100\mu\text{m}$ 인 미세 홈을 가공하는 실험을 수행하였다^[4]. 이 연구에서는 가공시 발생하는 버를 제거하기 위해 화학적인 방법을 부가적으로 사용하였다. 박경호는 분말분사(Powder Blasting)를 이용한 유리의 미세 선형 홈 가공 시 노즐 주사 횟수의 영향에 대하여 연구하였다^[5].

기존의 가공법에 있어서 문제점은 에칭, 폴리싱은 화학액의 사용에 따른 부산물의 영향으로 환경오염의 문제가 심각하며 형상의 재현성 여부가 불투명한 것이 단점이다. MEMS, LIGA 등은

형상의 재현성 문제를 해결하였으나 막대한 초기 비용이 드는 단점이 있다.

이에 따라 본 연구에서는 광학 제품을 대량 생산하기 위한 미세 V-홈 형상의 금형을 단기간에 저비용으로 가공하는 방법을 연구하고자 한다. 금형 가공은 고정도의 CNC 머시닝센터를 이용하여 수행할 것이며, 45도 경사면의 금형강 소재에 $\phi 8$ 플랫 엔드밀을 이용하여 $297\mu\text{m}$ 피치의 미세 V-홈을 가공하였다. 가공조건의 변화에 따른 절삭력과 공구 런아웃, 공구 마멸을 통해 미세 홈 형상의 정도에 미치는 영향을 살펴보고 적절한 가공조건을 도출하고자 한다.

2. 절삭조건에 따른 절삭력과 공구마멸 특성

2.1 실험장치 및 방법

본 실험에서는 금형강 소재인 SKD11 (HRC43)을 45° 경사지게 고정하여 직경이 8mm인 플랫 엔드밀의 날끝 부분을 이용하여 절삭하는 방법으로 폭이 $297\mu\text{m}$ 인 미세 V-홈을 가공하였다. Fig. 1은 가공시 공작물과 공구의 상대적 위치를 나타낸다.

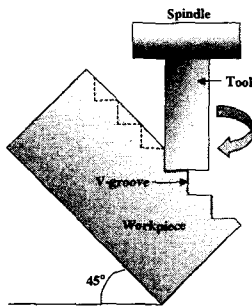


Fig. 1 Schematic of multi-grooves machining

넓은 범위의 다양한 조건에서 가공성을 평가하기 위해 절삭속도는 $50\text{m/min}(2,000\text{rpm})$, $125\text{m/min}(5,000\text{rpm})$, $251\text{m/min}(10,000\text{rpm})$ 세 가지로 설정하였고, 각각의 절삭속도에 대해 이송속도를 200mm/min , 500mm/min , $1,000\text{mm/min}$ 세 가지로 설정하여 총 9개의 가공조건에 대해 실험을 수행하였으며, 공구의 경로는 수평방향을 적용하였다. 아래의 Table 1은 본 실험의 절삭조건과 실험장비의 사양을 나타낸다.

Table 1 Experimental conditions

Workpiece	SKD11(HRC 43), 45° inclined plane
Cutting Tool	Carbide flat-end mill (TiAlN Coated, $\phi 8$, 2flutes)
Operation	Down Cutting
Cutting Speed	$50\text{m/min}(2,000\text{rpm})$, $125\text{m/min}(5,000\text{rpm})$ $251\text{m/min}(10,000\text{rpm})$
Feed	200mm/min , 500mm/min , $1,000\text{mm/min}$
Pick Feed	$210\mu\text{m}$ (Radial, Vertical)
Depth of cut	$500\mu\text{m}$
Cutting Environment	Dry
Experiment Equipments	
Machining Center (Makino V55)	Spindle Speed(max.) : $20,000\text{rpm}$ Feed Speed(max.) : 50m/min Location resolution : $2\mu\text{m}$
Tool Dynamometer (Kistler 9257B)	Range : $-2.5 \sim 2.5\text{kN}$ Rigidity : $240\text{N}/\mu\text{m}$

가공 상태를 가장 직접적으로 잘 나타내는 것이 절삭력이므로 본 연구에서는 가공 상태를 감시하기 위한 수단으로 절삭력을 측정하였다. 절삭력 신호의 수집은 공구 동력계의 출력신호를 증폭기로 증폭하여 최종적으로 디지털 오실로스코프를 통해 파일형태로 수집하였다. 아래의 Fig. 2는 절삭력 실험의 장치도를 도시한 것이다.

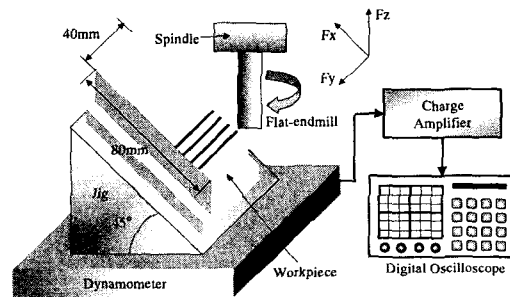


Fig. 2 Experimental set-up

미세 V-홈의 가공성을 평가하는 방법으로는 여러 가지가 있을 수 있으나 본 연구에서는 두 가지 요소에 의해 가공성을 평가하였다. 그 첫째는 미세 V-홈의 형상 정도이며 두 번째는 표면조도이다. 광학 제품을 생산하기 위한 금형 제

작의 목적으로 미세 V-홈을 가공하는데 있어 표면조도는 빼 놓을 수 없는 평가 항목이다.

2.2 절삭 깊이에 따른 미세 V-홈의 가공성

미세 절삭 가공 시 가공성에 있어 가장 핵심적인 사항은 적절한 날 당 이송의 설정과 버(burr)의 생성 문제이다. 날 당 이송량이 작고, 피크피드가 작을수록 배출되는 칩의 체적은 감소하고 칩의 체적 감소로 단위 칩 당 질량이 감소됨을 의미한다. 공구의 회전관성력으로 칩이 배출되는 절삭과정에서 단위 칩의 질량감소는 배출되는 칩의 관성력을 저하시키고 비거리를 감소시킨다. 비거리 감소에 의해 칩의 일부분은 가공중인 면에 적층되고 공구인선의 원활한 절삭과정에 방해가 되므로 표면의 품질을 저하시킨다. Fig. 3는 미세 V-홈 가공 시 발생할 수 있는 버의 형태를 도시한 것이다. 그 중에는 입구 버(Entrance burr), 측면 버(Side burr), 출구 버(Exit burr)가 있다.

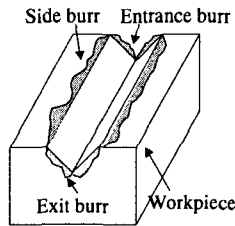


Fig. 3 Designation of the burr

본 연구에서는 서로 다른 절삭 깊이로 가공함으로써 절삭 깊이가 버의 생성에 미치는 영향에 관한 실험을 수행하였다. 가공조건은 회전수 10,000 rpm, 이송속도 500mm/min으로 고정하였고 절삭 깊이는 210 μ m와 500 μ m 두 가지 경우에 대해서 실험하였다.

Fig. 4는 가공된 미세 V-홈의 입구와 출구의 단면 사진을 CCD 카메라로 촬영한 것이다. 절삭 깊이가 210 μ m인 경우 칩의 질량이 작음으로 인해 버가 상대적으로 많이 발생하였으며, 절삭 깊이를 500 μ m로 하였을 때 상대적으로 큰 칩의 질량으로 인해 칩의 배출이 원활하게 이루어져 버의 발생이 감소하였다. 하향 절삭의 특성으로 인해 입구 버가 많이 발생하여 문제가 되었으며 상대

적으로 출구 버와 측면 버는 거의 발생하지 않았다.

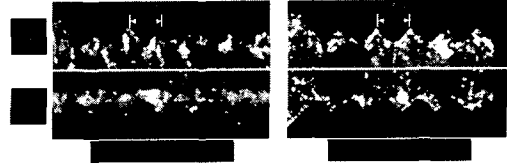


Fig. 4 Photos of machined surfaces (10,000rpm, 500mm/min)

2.3 절삭거리에 따른 절삭력 변화와 공구마멸의 관계

공구마멸은 공구교환시기를 결정하는 중요한 요인이며 표면형상에 직접적인 영향을 준다. 일반적으로 공구마멸은 크게 경사면 마멸과 여유면 마멸 등으로 나눌 수 있는데 공구 교환시기는 여유면 마멸을 기준으로 정삭에서는 0.1mm, 황삭에서는 0.3mm를 기준으로 하여 결정하고 있다. 본 실험에서는 위의 기준과는 별도로 미세 V-홈 단면이 완벽하게 가공되지 않고 형상이 일그러지는 시점을 공구 마멸의 임계값으로 설정하였다.

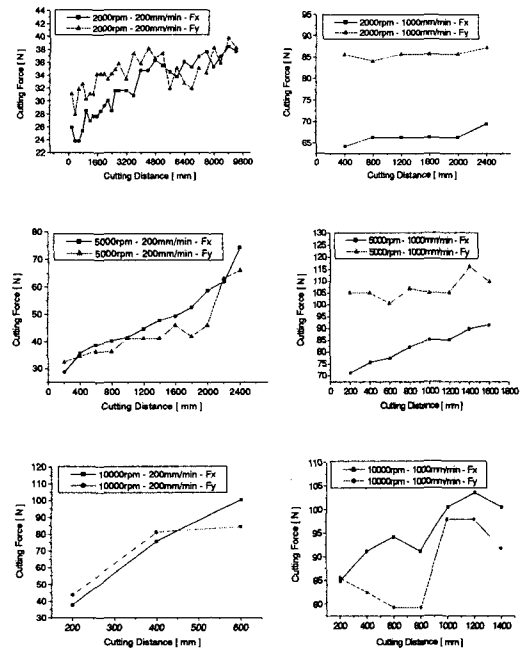


Fig. 5 Cutting force through cutting length

Fig. 5는 주축의 회전수 2,000rpm, 5,000rpm,

10,000rpm에 따라 이송속도 200m/min, 1,000 mm/min의 절삭조건에서 절삭거리에 따른 절삭력의 변화를 나타낸 것이다. 저속에서는 절삭거리에 따라 절삭력의 상승이 거의 없는 것이 특징이며 이것은 낮은 절삭속도로 인해 공구의 마멸이 그다지 크지 않기 때문이다. 앞에서 언급했듯이 전체적인 공구 마멸은 크지 않으나 공구 절삭인선(edge)의 부분적인 마멸로 인해 미세 홈의 골 부분의 곡률 반경이 커지고 따라서 공구마멸의 임계값에 도달하게 되는 것이다.

주축회전수 5,000rpm의 절삭조건에서는 2,000 rpm에서와 마찬가지로 이송속도가 커짐에 따라 절삭력이 증가함을 알 수 있다. 다만 2,000rpm 조건과 다른 점은 이송속도 200mm/min에서는 대체적으로 이송분력이 배분력보다 작은 값을 가지나 이송속도가 증가함에 따라 이송분력이 배분력에 비해 상대적으로 증가하는 현상이다.

회전수 10,000rpm의 절삭조건에서는 세 가지 이송속도 조건에서 이송분력과 배분력의 차이는 크지 않다. 이송속도 200mm/min에서는 이송분력이 배분력에 비해 근소하게 큰 값을 가지고 1,000mm/min의 이송속도에서는 이송분력이 배분력 보다 오히려 작은 값을 가진다. 새로운 공구로 절삭하는 시점에서는 이송속도의 증가에 따라 절삭력이 증가하나 공구마멸이 어느 정도 진행된 시점에서는 세 가지 이송속도에서 절삭력의 크기가 비슷하다. 이것은 고속가공으로 인해 공구수명이 극도로 단축된 결과라고 볼 수 있다.

2.4 절삭조건에 따른 공구마멸

Fig. 6은 절삭조건에 따른 절삭거리를 나타낸다. 절삭거리가 가장 긴 조건은 주축회전수 2,000rpm에 이송속도 200mm/min인 경우로 최대 절삭거리가 9.2m이고 절삭거리가 가장 짧은 조건은 주축회전수 10,000rpm에 이송속도 200mm/min인 경우로 최대 절삭거리는 0.6m였다. 한 가지 주목할 점은 회전수 2,000rpm과 5,000rpm에서는 이송속도가 커짐에 따라 공구수명이 감소하였으나 10,000 rpm에서는 이송속도가 커짐에 따라 공구수명이 감소하지 않고 오히려 소폭 증가하였다는 점이다. 일반적으로 동일한 회전수의 조건에서 이송속도가 커짐에 따라 날당이송이 증가함으

로서 날당 소재 제거량이 증가하게 되어 절삭력은 증가하고 공구의 마멸 또한 증가하게 된다.

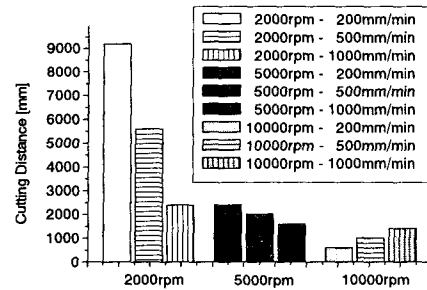


Fig. 6 Tool life according to change of cutting condition

이러한 면에서 볼 때 2,000rpm과 5,000 rpm에서 일어나는 현상은 이론과 일치한다고 볼 수 있다. 그러나 10,000rpm에서 이송속도가 증가함에 따라 공구수명이 감소하지 않는 이유는 다음과 같이 요약할 수 있다. 고속가공 시 공구의 수명은 극도로 단축되며 공구수명을 지배하는 요인이 있어서 이송속도의 변화보다는 절삭속도의 영향이 더 크기 때문이다.

Fig. 7은 공구 여유면 마멸을 CCD 카메라로 촬영한 것이다. 공구는 두 날형 플랫 엔드밀이며 두 날 모두 촬영하였다. 회전수 2,000rpm, 5,000rpm, 10,000rpm으로 이송속도는 500 mm/min의 조건에서 실험한 공구의 여유면 마멸을 나타낸 것이다. Fig. 7(a) 2,000rpm에서는 부분적으로 치핑(chipping) 현상이 일어났을 뿐 전체적인 마멸은 크지 않다는 점이다. 한 날의 마멸이 다른 한 날의 마멸보다 심하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(b) 5,000rpm의 경우 2,000rpm 조건과 비교하여 치핑 현상이 여유면에 넓게 분포한다는 점이 특징이다. 두 날의 마모 상태는 비슷한 양상을 보인다. Fig. 7(c) 회전수 10,000 rpm의 경우, 앞의 두 조건에 비해 공구 마멸이 크다는 것을 알 수 있다. 고속가공 시 높은 절삭속도로 인해 피삭재와 공구가 접촉하는 부위에 거의 균일하게 치핑 현상이 일어난 결과에 따른 것이다.

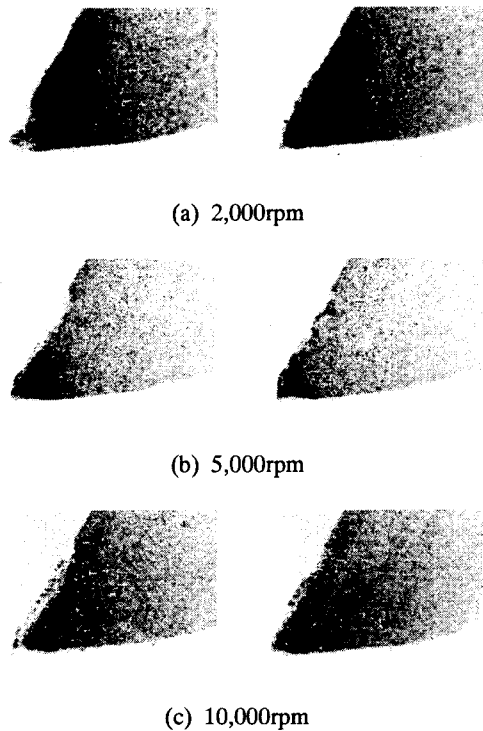


Fig. 7 Tool wear patterns against Cutting condition

공구마멸의 측면에서 보았을 때 저속 영역인 2000rpm이 유리하고 비교적 고속 영역인 10,000 rpm은 극도로 불리하다고 볼 수 있다. 그러나, 광학 제품의 특성상 가공 표면의 품질을 좌우하는 표면조도는 고속 영역에서 가공할수록 개선되는 것이므로 단지 공구마멸 측면에서 유리한 2,000rpm을 적절한 가공조건이라 단정지을 수는 없다.

3. 절삭조건에 따른 가공표면의 조도

표면조도는 가공면의 품질 평가에서 제외할 수 없는 요인 중 하나다. 가공조건에 따라 표면 조도는 달라질 것이며 플랫 엔드밀의 바닥날과 옆날로 가공되는 표면은 서로 다른 조도를 가질 것이다. 본 연구에서는 45도 경사면에서 가공한 미세 V-홈 금형을 수평 바이스에 고정한 뒤 V-홈의 절반을 플랫 엔드밀로 절삭하여 떨어내는 방법으로 표면조도 측정기의 촉침(probe)과 가공면이 접촉할 수 있는 공간을 확보하였다.

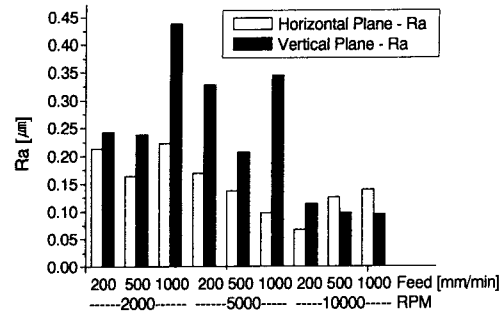


Fig. 8 The comparison of horizontal plane and vertical plane

Fig. 8은 각각의 절삭조건에 따른 수평면과 수직면의 표면조도를 비교한 것이다. 절삭속도가 증가함에 따라 표면조도는 대체적으로 향상됨을 알 수 있다. 10,000rpm 영역에서 표면조도가 가장 좋으나 공구의 마모가 큰 것이 문제점이다. 앞에서 언급했듯이 10,000rpm 영역에서는 이송속도를 크게 할수록 공구수명이 길어지므로 표면의 품질을 향상시키면서 만족할만한 공구수명을 얻기 위해서는 적절한 수준으로 이송속도를 높이는 것이 바람직하다고 생각된다.

2,000rpm과 5,000rpm 등의 비교적 저속 영역에서는 수평면의 표면조도가 수직면에 비해 양호함을 알 수 있다. 가공 시 공구의 회전오차는 가공 표면의 품질에 영향을 미치는데 플랫 엔드밀의 바닥날과 접촉하는 수평면보다 옆날과 접촉하는 수직면이 그 영향을 더 많이 받기 때문이다.

이에 반해 10,000rpm의 비교적 고속인 영역에서 이송속도가 500mm/min, 1,000mm/min인 경우에는 수직면의 표면조도가 수평면에 비해 더 양호했다. 높은 절삭속도에서 원활한 절삭과정에 의해 공구의 회전오차가 감소함으로써 수직면의 표면조도가 개선되었다고 볼 수 있다.

플랫 엔드밀의 특성상 바닥날과 옆날의 절삭과정의 상이함으로 인해 수직면과 수평면과 표면 조도는 서로 다른 값을 가지게 된다. 이런 현상은 광학 제품에 있어 바람직하지 않으므로 수평면과 수직면의 표면조도를 동일한 수준의 레벨로 맞추면서 표면 품질을 향상시키는 절삭조건을 선택해야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 일반적인 머시닝센터에 $\Phi 8$ 플랫 엔드밀을 장착하여 여러 절삭조건에 대하여 미세 V-홈 가공을 수행하였으며 다음과 같이 결론을 몇 가지로 요약할 수 있다.

1) 미세 절삭 가공의 경우 단위 칩 당 제거량이 작음으로 인해 칩이 전량 배출되지 않고 가공면에 적층되어 버의 형태로 남는 것이 문제이며, 본 연구와 같은 미세 V-홈 가공에서는 하향 절삭의 특성으로 입구 버가 문제가 되었다. 이에 따라 본 연구에서는 피크피드를 동일하게 하면서도 절삭깊이를 크게 하는 방법으로 단위 칩 당 제거량을 증가시켰고 그 결과, 입구 버가 현저하게 감소하여 가공 표면의 품질 향상을 도모할 수 있었다.

2) 실험 결과, 고속가공으로 가공 표면의 품질을 향상시킬 수 있으나 절삭력은 감소하지 않고 오히려 증가하여 공구수명의 급격한 감소를 초래하였다. 이에 따라 가공 표면의 품질을 떨어뜨리지 않으면서도 적절한 공구수명을 보장하는 방법으로 높은 주축 회전수에서 이송속도를 높이는 방법을 제안하였다.

3) 플랫 엔드밀의 특성상 바닥날로 가공한 표면과 옆날로 가공한 표면의 표면조도는 다를 수밖에 없으며 이것은 바람직하지 않은 현상이다. 주축 회전수 5,000rpm에서 수평면과 수직면의 표면조도의 편차가 가장 컸으며 고속 영역인 10,000rpm에서는 그 편차가 상당히 감소하는 경향을 발견할 수 있었다. 광학 제품을 만들기 위한 목적으로 금형을 가공할 시에는 적절한 가공조건을 선택하여 수평면과 수직면의 표면조도를 비슷한 레벨로 맞추는 것이 필수적이므로 가공면 품질의 확보를 위해서는 고속영역에서 가공하는 것이 유리하다.

위와 같이 본 연구에서는 미세 V-홈의 기계적 가공을 위해 플랫 엔드밀을 이용하여 가공하는 방법에 대한 접근을 시도하였으며 결론적으로 플랫 엔드밀을 이용하여 미세 V-홈을 가공할 수 있음을 증명하였으며, 향후 이 방법을 LCD 도광판이나 고휘도 반사지 등의 생산에 활용할 수 있

을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] 이선우, 이동주, 이응숙, 제태진, "미세가공 시스템을 이용한 미세 그루브 가공실험", 한국공작기계학회 2001 춘계학술대회 논문집 pp.263~268
- [2] H. Ohmori, N. Ebizuka, S. Morita, Y. Yamagata, "Ultraprecision micro-grinding of germanium immersion grating element for mid-infrared super dispersion spectrograph", Annals of the CIRP Vol. 50/1 (2001), pp.221~224
- [3] I. H. Cho, S. C. Jeong, J. M. Park, H. D. Jeong, "The application of micro-groove machining for the mold of PDP barrier ribs", JMPT Vol. 113 (2001), pp.355~359
- [4] Th. Schaller, L. Bohn, J. Mayer, K. Schubert, "Microstructure grooves with a width of less than 50 μm cut with ground hard metal micro end mills", Precision Engineering Vol. 23 (1999), pp.229-235
- [5] 박경호, 김광현, 최종순, 박동삼, "Powder Blasting을 이용한 유리의 미세 선형 홈 가공 시 노즐 주사 횟수의 영향", 한국공작기계학회 2001 춘계학술대회 논문집, pp.294~299