

단결정 다이아몬드 공구를 이용한 Micro-V 홈 가공기구

박동삼*, 서태일(인천대 기계공학과), 김정근, 성은제, 한진용(인천대학교 대학원), 이은상,
조명우(인하대학교 기계공학부), 최두선(한국기계연구원)

Mechanism of Micro-V Grooving with Single Crystal Diamond Tool

D. S. Park, T. I. Seo(Mech. Eng. Dept., UI), J. K. Kim, E. J. Seong, J. Y. Han(Mech. Eng. Dept., UI)
E. S. Lee, M. W. Cho(Mech. Eng. INHA), D. S. Choi(KIMM)

ABSTRACT

Fine microgroove is the key component to fabricate micro-grating, micro-grating lens and so on. Conventional groove fabrication methods such as etching and lithography have some problems in efficiency and surface integrity. This study deals with the creation of ultra-precision micro grooves using non-rotational diamond tool and CNC machining center. The shaping type machining method proposed in the study allows to produce V-shaped grooves of 40 μ m in depth with enough dimensional accuracy and surface. For the analysis of machining characteristics in micro V-grooving, three components of cutting forces and AE signal are measured and processed. Experimental results showed that large amplitude of cutting forces and AE appeared at the beginning of every cutting path, and cutting forces had a linear relation with the cross-sectional area of uncut chip thickness. From the results of this study, proposed micro V-grooving technique could be successfully applied to forming the precise optical parts like prism patterns on light guide panel of TFT-LCD.

Key Words : Micro-V groove(미세 V-홈), Single crystal diamond tool(단결정 다이아몬드 공구), Cutting mechanism(가공기구), Cutting force(절삭력), AE(Acoustic emission)

1. 서론

LCD의 응용분야는 노트북 PC 및 컴퓨터 모니터에서 LCD TV로 더욱 확대될 것으로 전망되며 2001년 LCD 세계시장에서 삼성전자가 노트북 PC용에서 세계 1위(23.4%), LG 필립스 엘시디가 모니터용에서 세계 1위(18.8%)를 차지하여 현재 한국 기업들이 LCD 시장에서의 계속적 우위를 확보하기 위한 충분한 잠재력이 있는데 이를 선도할 핵심기술의 확보가 필요함 시점이다.

또한, 2000년 국내 BLU 수요는 약 1천만개(13.3인치 기준)였으며 앞으로도 노트북 PC, 데스크탑 PC, 가정용 TV, 의료용 모니터, 이동통신 단말기, 캠코더, 디지털 카메라, 자동차 운항장치, 미니 PC, 군사용 및 우주과학용 모니터 등 많은 전자 제품에 있어 LCD의 폭발적 사용 증가가 예상됨에 따라 BLU의 성능과 제작상의 낮은 생산성이 LCD 업계의 가장 큰 문제로 대두되고 있다.

따라서, 이런 문제점을 해결하기 위해서는 새로

운 도광판 패턴으로 대두되고 있는 미세 V홈(micro-V groove)을 기초로 하는 프리즘 도광판의 개발이 절실히 요청되고 있다. 이러한 개발과정에서 도광판 사출금형 소재에 대한 초정밀 미세 V홈 패턴의 가공기술 확보가 그 핵심이 되며 V홈의 가공시 나타나는 여러 절삭특성을 규명하지 않으면 안된다.

한편, 현재 많이 연구되고 있는 마이크로 가공기술은 리소그래피와 에칭 등의 반도체 공정기술을 응용한 것과 절삭, 연삭, 방전가공, 레이저가공 등의 일반 기계가공기술을 응용한 것으로 크게 분류되는데 전자는 소재의 두께나 재질에 따라 제한될 수 있으나 후자는 연삭이나 방전가공의 경우 생산성은 양호하나 우수한 가공면을 얻기가 곤란하다. 따라서, 생산성이 우수하고 가공의 자유도가 높은 절삭가공의 적용에 대한 연구[1-6]가 활발히 이루어지고 있다. 그러나, 지금까지 발표된 연구결과들은 미세형상을 갖는 부품만을 가공하는데 주안점이 두어졌으며 미세형상 제품을 성형하기 위한 금형가공에 적용시킨 사례는 거의 드물다.

미세가공의 적용 사례를 살펴보면 Fig. 1은 프레넬 렌즈에 V홈[7-9]이 적용된 예를 보여주며, Fig. 2는 V홈을 이용해 기존의 도트 패턴을 V 홈 가공으로 대체해서 프리즘 도광판을 가공한 예이다.

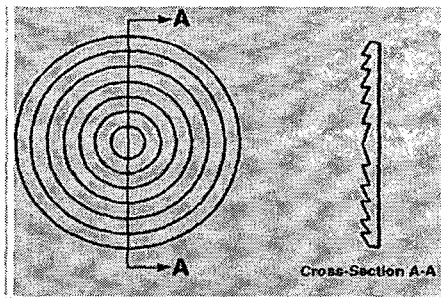


Fig. 1 An application of V-groove to fresnel lens

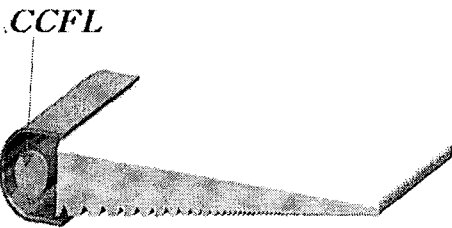


Fig. 2 An application of V-groove to prism LGP

본 연구는 단결정 천연 다이아몬드 공구를 이용한 미세 V-홈 가공의 가공기구를 규명하는 하는 것을 목적으로 하였다. 가공법은 셰이핑(shaping) 가공법을 이용하여 일반적으로 많이 사용되는 금형 소재인 무전해 니켈 도금층을 대상으로 미세 V 홈을 기계적으로 가공하는 기법을 개발하고자 한다.

절삭가공시의 공정제어 변수들인 회당 절입 깊이, 가공 피치 등이 형상의 정밀도나 성형 과정에 큰 영향을 미치게 되는데 본 연구에서는 그러한 공정 변수들이 성형형상 및 정밀도에 미치는 영향을 분석하는데 주안점을 두었다. 시편은 황동(6:4) 원소재에 니켈을 100 μ m 두께로 도금하여 제작하였으며 가공특성은 공구동력계의 절삭력 신호와 AE 신호를 사용하여 분석하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

절삭력 검출을 위하여 Kistler사의 피에조 방식의 4-Component Dynamometer (type 9272)를 사용하여 절삭도중 X, Y 분력 및 Z 방향의 추력을 검출하였다. AE 신호는 NF BLOCK 사의 AE센서(AE905US)와 AE 신호처리기(discriminator AE-922US)를 사용

하여 측정하였으며 분석에 사용된 AE신호의 형태는 포락선(envelope) 신호이다. 절삭력과 AE 신호의 A/D 변환을 위하여 National Instrument 사의 DAQ 1200 Card를 사용하였으며 변환된 신호는 컴퓨터에 저장된다. Fig. 3은 실험 장치의 구성도를 개략적으로 나타낸 것이다.

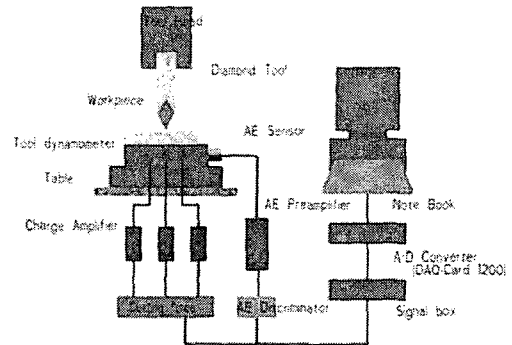


Fig. 3 Experimental setup

2.2 시편

실험에 사용된 공작물의 시편은 공구동력계에 부착할 수 있는 최대의 크기로 하였으며 Fig. 4에 이를 나타내었다. 2개의 드릴 홀을 통하여 공구 동력계에 고정되며, 모재인 6:4황동 위에 100 μ m의 니켈 도금층을 형성시켰다.

도금방식은 무전해 방식을 채택하였으며 이는 전해 방식에 비해 도금 표면이 고르고 도금 두께가 가공의 수행에 필요한 두께인 100 μ m이상으로 형성이 가능했기 때문이다. 도금 후 도금층의 표면형상을 측정된 결과 표면거칠기가 0.02 μ m 정도로 양호하게 나타났다.

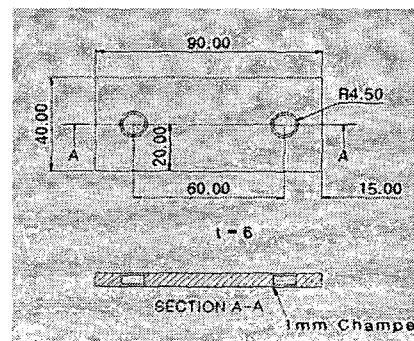


Fig. 4 Drawing of a sample

2.3 공구제작

단결정 천연 다이아몬드 공구 팁을 Fig. 5와 같이 제작하여 가공에 사용하였다. Fig. 6은 공구의 형상을 보여 주며, 공구의 노즈반경은 2 μ m 이내로 하였으며 수직경사각은 0 $^{\circ}$ 로 하였다

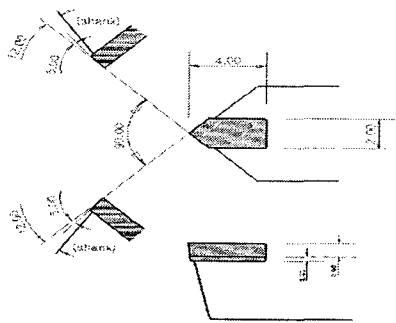


Fig. 5 Dimensions of diamond tool tip

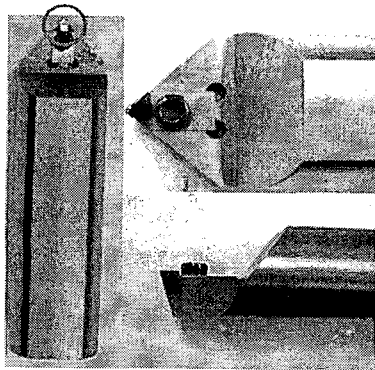


Fig. 6 Photographs of diamond cutting tool

2.4 실험방법

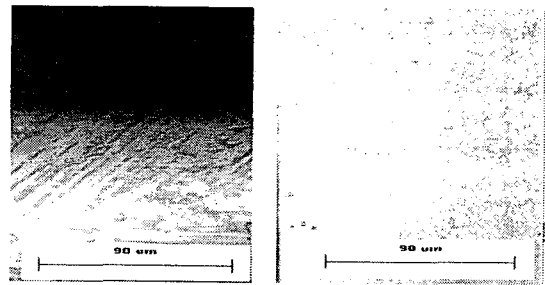
V 홈은 45 μ m까지 5 μ m씩 절입량을 증가시켜 가면서 절삭하였으며 절삭속도는 200mm/min으로 하였다. 가공시 Z축 원점 교정방법은 공구와 소재의 거리를 일정 간격으로 셋팅하고 5 μ m 씩 절입깊이를 하강시켜 AE신호를 모니터링 하여 피크가 발생하는 구간에서 기계의 공작물 좌표계 (Z축) 원점 설정 후 가공을 수행 하였다. 세이프 방식으로 V 홈을 가공시 발생하는 절삭력과 AE는 Fig. 3과 같이 노트북 컴퓨터에 장치된 12bit, 8채널의 A/D 변환기를 통하여 디지털화 되는데 AE 신호의 경우 필터를 통하여 300Khz-1Mhz의 주파수 성분만을 해석대상으로 하였다. 공작물의 길이 40mm 중 가공 길이 25mm를 가공하는데 소요된 시간은 시편당 10초 A/D 변환을 위한 표본화 속도(sampling frequency)는 각 채널당 2khz로 설정하였다.

가공시편의 형상측정은 공구현미경(KH100 high Scope, SONY)과 비접촉식 3차원 측정기(WYCO NT-1000, VEECO) 및 표면거칠기 측정기(Form tracer, Mitutoyo) 등을 사용하였으며, 측정의 정밀도와 정확성을 높이기 위하여 항온항습실에서 측정을 수행하였으며(온도 20 $^{\circ}$ C, 습도 36%), 측정은 각각 5회 이상 실시하여 신뢰성을 높였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 가공형상 분석

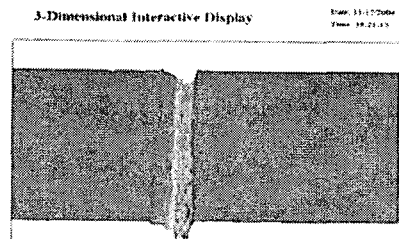
홈 깊이 45 μ m까지 가공한 후 최종적인 V 홈 형상 사진을 Fig. 7에 나타내었다. 공구의 절입 시작위치에서 본 사진 (a)로부터 홈의 형태가 비교적 잘 가공되었음을 알 수 있으며, 홈의 위쪽에서 촬영한 사진 (b)로부터도 V 홈이 잘 가공되었다는 것을 알 수 있으나 홈과 공작물 표면의 경계부에서는 미세하나마 버(burr)가 나타나고 있음을 알 수 있다.



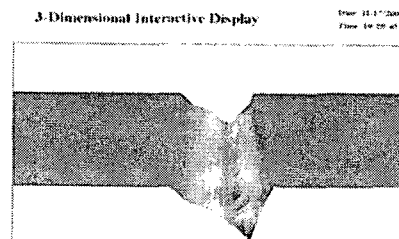
(a) Front view (b) Top view
Fig. 7 Photograph of V-groove (depth 45 μ m)

3.2 절삭 깊이에 따른 홈 형상

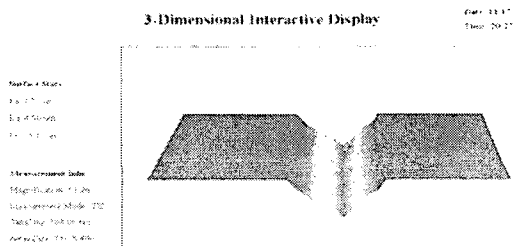
절삭깊이가 5 μ m씩 증가 할 때마다 홈의 폭은 절삭 깊이의 2배로 증가하게 된다. Fig. 8은 절삭깊이를 5 μ m, 10 μ m, 15 μ m 및 20 μ m 으로 가공할 때 절삭 깊이에 따른 홈의 형상을 3차원 미세 형상 측정기로 측정된 측정 결과이다.



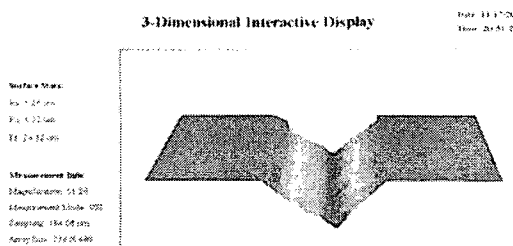
(a) cutting depth : 5 μ m



(b) cutting depth : 10 μ m



(c) cutting depth : 15 μ m



(d) cutting depth : 20 μ m

Fig. 8 Three dimensional view of V groove

전반적으로 가공깊이가 커질수록 V 홈의 형상 정밀도도 더 양호하게 나타나는데 가공깊이가 5 μ m이나 10 μ m 일 경우는 가공된 면의 정밀도도 많이 떨어지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 초정밀 미세가공용이 아닌 일반 머시닝센터를 이용하여 가공실험을 수행한 데에 따른 것이라 판단된다.

한편 가공깊이 20 μ m에서의 V 홈 형상(Fig. 8(d))의 단면을 Fig. 9에 나타내었는데, V 홈의 형상을 나타내는 X 프로파일은 어느 정도 정밀하지만 가공면을 따른 표면거칠기에 해당되는 Y 프로파일의 형상을 보면 가공 깊이에 따라 표면의 정밀도가 많이 변하고 있음을 알 수 있다.

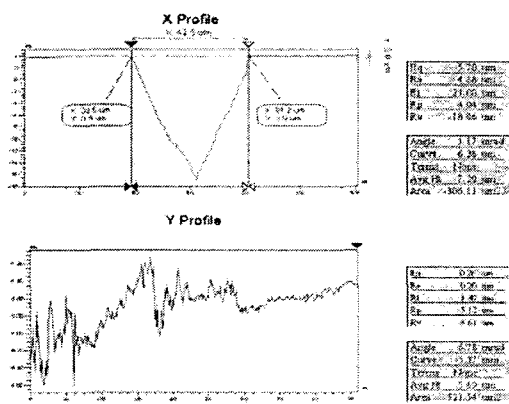
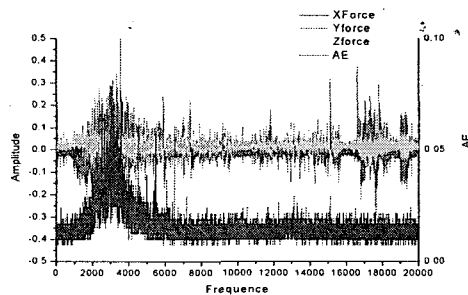


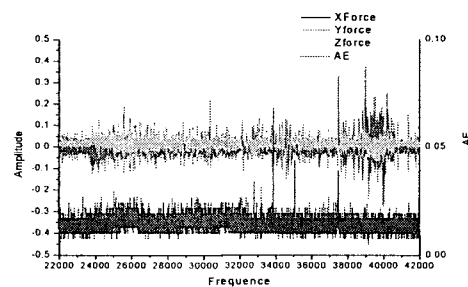
Fig. 9 X-Y profile of V groove, Fig. 8(d)

3.3 절삭력과 AE신호

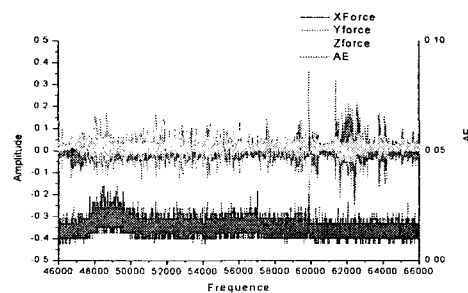
가공깊이 변화에 따른 절삭력과 AE 신호의 형태를 Fig. 10에 나타내었는데 전반적으로 볼 때 공구의 진입구간과 탈출구간에서 절삭력이 크게 나타났으며, 공구 초기 진입시 AE신호의 피크가 현저히 크게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 첫번째 5 μ m 절삭시 공구 진입부에서 가장 큰 절삭력과 AE 신호가 나타남을 알 수 있는데, 이는 삼각단면의 파단형 칩이 생성되기 시작하는 구간이며, 당시의 절삭 단면적이 가장 컸음을 알 수 있다. 이후의 10 μ m, 15 μ m 및, 20 μ m 절입 구간에서의 공구 진입시 절삭력은 두드러진 양상을 보이지 않으나 AE의 경우 절삭깊이가 증가할수록, 즉 절삭 단면적이 증가할수록 AE 신호도 증가됨을 보여주고 있다. 전반적으로 나타나는 공구 탈출시의 절삭력이 두드러짐 현상은 지금까지 절삭력 관련 연구와 거의 유사한 경향을 보여준다.



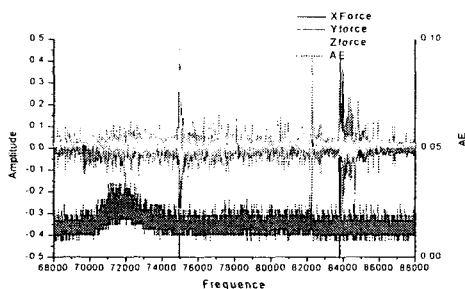
(a) cutting depth : 5 μ m



(b) cutting depth : 10 μ m



(c) cutting depth : 15 μ m



(d) cutting depth : $20\mu\text{m}$

Fig. 10 Cutting force for each cutting depth

4. 결론

단결정 천연 다이아몬드 공구를 이용하여 니켈 도금층에 세이핑 방식으로 V홈을 $5\mu\text{m}$, $10\mu\text{m}$, $15\mu\text{m}$ 및 $20\mu\text{m}$ 의 절삭깊이로 가공시 절삭력 및 AE신호를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 미세 홈 가공을 위한 단결정 천연 다이아몬드 공구 팁을 설계 제작하였으며 이를 기존의 머시닝센터 주축부에 고정하여 세이핑 방식으로 미세 V홈을 절삭하는 가공공정을 확립하였다. 또한, 미세 V홈 가공시 발생하는 절삭력과 AE 신호를 측정하고 신호처리 하는 방법론을 개발하였다.
2. 제작된 단결정 천연 다이아몬드 공구 팁을 사용하여 연질의 황동(6:4)에 형성된 $100\mu\text{m}$ | 니켈 도금층에 약 $20\mu\text{m}$ | μm 개의 형상오차로 가공할 수 있었다.
3. 공구의 초기 진입구간과 탈출구간에서 전반적으로 절삭력이 크게 나타나며 특히 공구 탈출구간에서 절삭력의 증가 현상이 뚜렷이 나타났다. AE 신호도 유사한 형태를 보이거나 V홈 가공을 위한 최초 공구 진입시 아주 큰 AE 신호가 나타나는데 이를 이용하여 공작물과 공구의 최초 접촉상태를 검지하는데 유용하게 사용될 수 있다.
4. 절삭깊이에 따른 절삭력의 변화를 분석한 결과 절삭 단면적이 절삭력과 상관성이 있으며, 절삭 단면적과 절삭력의 크기는 거의 비례함을 알 수 있었다.
5. 보다 적은 절삭력과 정밀한 표면거칠기를 얻기 위해 절삭 단면적을 최소화시킬 필요가 있으므로 삼각형의 절삭단면적을 갖는 1차 가공 후에 V형 절삭 단면적을 갖는 2차가공을 수행할 필요가 있다.
6. 초기 절삭시에는 단면이 삼각형인 파단형 칩이 배출되나 이후 $5\mu\text{m}$ | 절삭깊이를 증가시켜 가공한 결과 V형 단면을 갖는 칩이 배출 되었다.

후기

본 연구는 2004년도 특정연구개발사업(대면적 미세형상의 초정밀/지능화 가공원천기술 개발)으로 지원된 연구의 일부로 관계자에게 감사드립니다.

참고문헌

1. Yutaka Yamagata, Shin-ya Morita, 2001, "Fabrication of blazed holographic optical element by ultra high-precision cutting", RIKEN Review No. 34.
2. David P. Adams, Michael J. Vasile, Gilbert Benavides, Ann N. Campbell, 2001, "Micromilling of metal alloys with focused ion beam fabricated tools", Precision Engineering Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology, Vol. 25, pp.107-113.
3. M. A. Davies, C. J. Evans, S. R. Patterson, R. Vohra, B. C. Bergner, 2003, "Application of precision diamond machining to the manufacture of micro-photonics components", Proc. of SPIE, Vol. 5183, Lithographic and Micromachining Techniques for Optical Component, Fabrication II.
4. Takeuchi, Y., Kato, K., Sawada, K. and Sata, T., 1992, "Study of Ultraprecision Milling (Structure of Ultraprecision Milling Machine and Machining)?", Trans. Jpn. Soc. Mech Eng., (in Japanese), Vol. 58, No. 554, C, pp. 3116-3122.
5. Takeuchi, Y., Kawakita, S., Sawada, K., and Sata, T., 1993, "Ultraprecision Milling (Sculptured Surface Generation)", Trans. Jpn. Soc. Mech. Eng., (in Japanese), Vol. 59, No. 566, C, pp. 3193-3198.
6. Zinan Lu, Takeshi Yoneyama, 1999, "Micro cutting in the micro lathe turning system", International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 39, pp. 1171-1183.
7. 제태진, 이응숙, 최두선, 이선우, 2001, "기계적 미세 가공 시스템 구성 및 응용 연구", 한국정밀공학회 2001년도 춘계학술대회논문집, OIS205, pp. 934-937.
8. 이선우, 이동주, 이응숙, 제태진, 2001, "미세 가공 시스템을 이용한 미세 그루브 가공실험", 한국공작기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집, pp. 263-268.
9. 이응숙, 제태진, 신영재. 2000. "절연삭에 의한 Micro Machining 기술", 한국정밀공학회지, Vol. 17. No. 7, pp. 5-13.