

# 대면적 롤금형의 고균일 가공기술 개발

## A Development of High Uniformity Machining Technology on Large Surface Roll Mold

\*#이동윤<sup>1</sup>, 송기형<sup>2</sup>, 남성호<sup>1</sup>, 최현중<sup>2</sup>, 이석우<sup>3</sup>

\*#D. Y Lee(dylee@kitech.re.kr)<sup>1</sup>, K. H. Song<sup>2</sup>, S. H. Nam<sup>1</sup>, H. Z. Chor<sup>2</sup>, S. W. Lee<sup>3</sup>

<sup>1</sup> 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부, <sup>2</sup> 한국생산기술연구원 디지털협업센터,

<sup>3</sup> 한국생산기술연구원 생산시스템연구부

Key words : Roll Mold, Ultra Precision Machining, High Uniformity, Prism Pattern, Diamond Tool

### 1. 서론

롤금형은 디스플레이 장치 등의 BLU(Back Light Unit)에 쓰이는 LGP(Light Guide Plate)의 패턴 생성을 목적으로 하는 금형의 일종으로, 원통 형상의 Steel 기반 몸체에 구리나 니켈등의 금속으로 도금하여 선반 가공을 통해 도금면에 미세 패턴을 새김으로써 제작되어진다. 롤금형에 새겨지는 패턴의 형상은 여러가지가 있으나 가공 시간이 비교적 짧은 장점을 가지고 있는 프리즘 형상이 많이 사용되는 추세이다. 디스플레이 산업에서는 점차로 큰 화면과 좋은 화질을 원하는 소비자들의 욕구를 충족시키기 위하여 보다 미세한 크기의 패턴을 가지는 더 넓은 크기의 프리즘 시트가 필요하게 되었다. 이러한 미세 패턴의 가공은 보통 1 μm 이하의 초미세 이송이 가능한 초정밀 선반에서 이루어지며, 품질 만족을 위한 균일한 가공을 할 수 있는 가공 기술이 뒷받침 되어야 한다.<sup>1</sup>

미세가공의 메커니즘을 밝히기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔는데, T. Freiheit 등은 일반적인 절삭가공 영역에서의 현상이 미세가공 영역으로 완전하게 적용될 수는 없으며, 미세 절삭가공영역에 대한 이해를 확대하기 위해서는 절삭이론에 대한 새로운 연구와 실험이 필요함을 역설하였다.<sup>2</sup> Zinan Lu 와 Takeshi Yoneyama 는 직접 제작한 선반에서의 가공 실험을 통하여 10 μm Pitch 의 가공 시 오차가 약 1 μm정도가 발생되는 것을 확인하였으며, 이를 통하여 일반 절삭가공 영역에서 가공할 때에 비해서 오차 범위가 비례적으로 줄어든 것이라는 예상이 틀렸음을 증명하였다.<sup>3</sup> 한편 이러한 미세 절삭가공의 모니터링을 위해 Y. H. Mu 등은 미세 절삭력의 측정을 통해 공구에 따른 미세절삭특성을 연구하였고<sup>4</sup>, 홍성민 등은 피삭재에 따른 미세절삭 특성에 대하여 연구하였다.<sup>5</sup> 또한, 공구 마모나 가공공정의 상태 감시를 위하여 강익수, D. E. Lee 는 AE 센서를 이용하여 연구하였으며<sup>6,7</sup>, Hongli Gao 는 다중센서로부터 수집한 신호들 간의 상관관계 분석을 통하여 공구상태를 예측하였다.<sup>8</sup> 이와 같이 미세 가공영역의 가공 메커니즘 분석을 위한 연구는 많은 연구자들에 의하여 수행되어 왔으며, 최근에는 실험실 환경을 벗어나 실제 가공 공정상에서의 가공 특성 분석을 위한 연구로 발전되어 오고 있다.

본 논문에서는 시장의 요구에 따른 롤금형의 대면적화, 패턴의 미세화 및 복잡화를 위한 롤금형의 고균일 가공 기술 개발을 위하여 연구한 내용을 정리하였다.

### 2. 실험장비

본 연구에서는 초정밀 선반에 구리도금된 롤금형을 장착하여 가공 실험을 진행하였다. 가공 공구는 Single Crystal Diamond Tool 을 사용하였으며, 미세 패턴 가공시의 신호 취득을 위하여 공구동력계와 진동센서 및 AE 센서를 이용하였다. 실험에 사용된 공구동력계는 Kistler 사의 MiniDyn Multicomponent Dynamometer Type9256B1 이며, 진동센서는 PCB Piezotronics 사의 356B21 이고, AE 센서는 Fuji Ceramics 사의 1045D 이다.

### 3. 실험결과

#### 3.1 예각패턴 가공

대면적 롤금형 미세패턴에서 예각패턴 가공 실험은 다수의 광학패턴 필름을 대체 및 광학패턴 효과의 극대화를 위한 복합패턴 필름 가공을 위해서 필수적으로 진행되어야 하는 실험이다. 복합패턴 가공을 진행하기 위해서는 90° 미만의 예각 공구를 이용한 패턴 형상의 고균일화 가공과 가공위치의 정밀도를 확보하여야 한다.

예각 패턴 가공 실험을 위하여 공구각 60° 인 다이아몬드 공구를 이용하였다. 가공속도 300m/min, 절삭깊이 8.77 μm, 피치 10 μm로 가공하였다. Fig. 1 은 가공된 미세패턴을 실리콘으로 샘플링한 것을 주사전자 현미경으로 관찰한 사진이다. Fig. 1(a)에서와 같이 예각 공구를 사용하여 미세패턴을 1 회만 가공하는 경우 정확한 프리즘 형상이 나오지 않고, 형상의 왜곡이 발생하였으며, 가공 표면도 매끄럽지 않았다.

Fig. 1(b)에서와 같이 동일한 가공 경로에 대하여 2 회에 걸쳐 가공을 하는 경우 1 회만 가공하는 것에 비해 양호한 패턴 형상을 보였다. 2 회 가공을 한 경우에도 실리콘 샘플을 주사전자 현미경으로 확인하여 보면 Burr 로 의심되는 부분이 존재하는데, 이러한 부분을 제거하기 위하여 3 회 반복 가공 실험을 진행하였다.

60° 예각패턴의 3 회 반복 가공 실험 결과 Fig. 1(c)에서 보이듯이 2 회 반복 가공 실험에서 문제 시 되었던 'Burr' 로 예상되는 부분이 모두 제거 되었으며, 매끄러운 가공면을 확보하였다.

또한, 가공속도 및 3 회 반복 가공 시의 가공 깊이에 변화에 따른 영향을 분석한 결과 가공속도는 300m/min, 200m/min 에서 100m/min 에 비해 양호한 가공결과를 보였으며, 3 번째 가공의 가공 깊이는 2 ~ 3 μm일 때 가장 좋은 가공 품질을 확인할 수 있었다.

#### 3.2 교차 미세패턴 가공

LED Back Light Unit 등의 광학 필름 제작용 대면적 롤금형을 가공하기 위하여, 교차 미세패턴의 가공이 필요하다. 교차 미세패턴은 수직과 수평 가공을 이용하여 기존의 프리즘 패턴과는 다른 피라미드 형태의 패턴을 가공하게 되며, 가공시간이 길고 가공 중 발생하는 오차를 가공 후에 수정하기가 어려우므로 이상적인 가공조건을 산정하여, 가공을 진행할 필요가 있다.

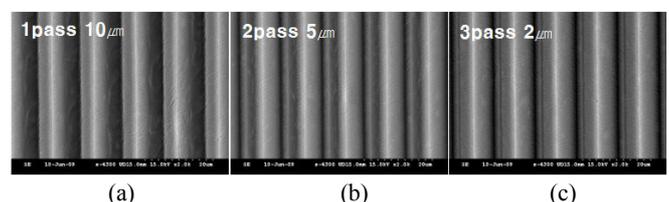


Fig. 1 60° Prism Pattern

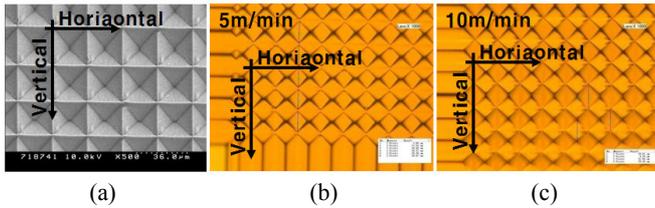


Fig. 2 Pyramid Pattern

가공 조건은 가공깊이 15  $\mu\text{m}$ , 교차미세패턴 피치 26  $\mu\text{m}$  (C 축 0.01° 회전), 수평 가공속도 10m/min, 수직 가공속도 300m/min 으로 진행하였다. 가공 후 2D Digital Microscope 를 통하여 가공상태를 확인하였으며, 자세한 분석을 위하여 실리콘 샘플링을 한 후 전자주사 현미경을 이용하여 분석하였다.

1 차 가공 실험 진행 결과 Fig. 2(a)와 같이 교차미세 패턴의 꼭짓점이 정확하게 형성되지 않으며, 수직 가공 시 뜯김이 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 수직 가공 시 패턴의 뜯김 문제를 해결하기 위하여 가공 순서를 수직가공 후 수평가공으로 변경하여 가공 실험을 진행하였다. 가공 속도를 5m/min, 10m/min 의 두 가지로 실험을 진행하였으며, 결과적으로 Fig. 2(b)과 Fig. 2(c)를 비교한 것과 같이 5m/min 에서의 가공성이 10m/min 보다 좋은 것으로 확인되었다.

교차 미세패턴을 정상적으로 가공하기 위해서는 초정밀선반 C 축의 회전 정확도 오차 원인에 대한 정확한 분석 및 수정이 필요하며, 이러한 꼭짓점 오차가 실제 광학 필름 성형 및 사용 시에 최종 어플리케이션에서 미치는 광학적 특성에 대한 분석이 필요하다.

### 3.3 45° 기울기 프리즘패턴 가공

45° 기울기로 프리즘패턴을 가공할 때 롤금형의 전체 둘레에 걸쳐서 균일하고 정확한 피치의 설정을 위해서는 롤금형의 정확한 둘레길이를 알아야 한다. 이를 알아내기 위해 테스트 가공을 통해 일정한 각도로 몇 줄의 패턴을 가공하여 각 패턴간의 거리를 측정 후 회전된 각도와 함께 계산하여 전체 롤금형의 둘레를 구하였다. 계산된 피치를 적용하여 45° 기울기로 프리즘패턴을 가공한 결과 1st Cut Line 과 Last Cut Line 에서 Pitch 오차 발생함을 발견하였다.

1st Cut Line 과 Last Cut Line 에서의 Pitch 오차 개선을 위하여 롤금형 회전방식에 따른 패턴피치 변화 비교한 결과 패턴 가공 시 다음 가공을 위하여 원점 복귀 시에 역회전 하는 경우의 최초/최종 가공 부분 피치 정밀도가 정회전 하는 경우에 비하여 우수함을 확인하였다.

### 3.4 미세패턴 가공 시의 센서별 특성 파악

고균일 가공을 위해서는 롤금형의 미세패턴 가공 특성을 기초로한 실시간 가공 상태 파악이 필요하다. 이를 위하여 공구동력계와 진동센서, AE 센서를 이용하여 가공 조건에 따른 신호 특성을 파악하였다.

미세 패턴 가공 중에 취득한 각 센서의 신호를 분석한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 절삭력 신호는 가공 깊이 및 소재 경도 차이에 따른 미세 절삭 부하 변화 감지에 유리하며, 가속도 신호의 경우 미세 절삭 부하 변화에 따른 영향력 판단 어려움
- 2) 공구 마모에 대하여 절삭 신호와 가속도 신호는 서로 다른 특성으로 마모 상태 변화에 대한 감지 가능함
- 3) AE 센서는 미세 가공 부하 변화에 민감함

## 4. 결론

대면적 롤금형의 고균일 가공 기술을 개발하기 위하여 예각 가공과 피라미드 가공, 45° 기울기 가공 시의 미세 패턴 가공 특성을 분석하였다. 또한, 실시간 가공 상태 파악

을 위한 기초 연구로 여러 가지 센서들의 미세 패턴 가공 시의 신호 특성을 파악하였다. 연구된 내용을 종합하여 볼 때 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- 1) 프리즘 패턴의 가공에서 패턴 형상의 예측화 및 45° 기울기로 가공하는 경우에 발생하는 프리즘 형상의 왜곡 및 가공표면의 품질은 가공 공정의 개선을 통하여 향상시킬 수 있다.
- 2) 피라미드 패턴 가공에서는 가공표면의 품질은 공정 조건의 조절을 통하여 향상 가능하며, 수평 가공 시의 피치 오차 개선을 위해서는 가공 장비의 C 축 정밀도에 대한 면밀한 검토와 개선이 수반되어야 한다.
- 3) 센서 종류에 따라 미세 가공 부하의 변화에 대한 반응 특성이 다르며, 다양한 원인에 의한 가공 상태 변화의 감지를 위해서는 여러 종류의 센서를 동시에 활용하는 것이 필요하다.

미세가공 영역에서는 가공 장비 및 구성 요소들이 가공 품질에 미치는 영향이 일반적인 가공에 비하여 크며, 이러한 가공 특성에 대한 이해를 바탕으로 가공 공정의 개선과 실시간 상태 감시를 통하여 가공 균일도를 향상시킬 수 있을 것으로 사료된다.

## 후기

본 연구는 지식경제부의 전략기술개발사업 “대면적 미세 가공시스템 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다. 이에 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. 이동운, 홍상현, 강호철, 최헌중, 이석우, “전해니켈도금된 대면적 롤금형 가공시 단결정 다이아몬드공구의 마모에 관한 연구”, 대한기계학회 논문집 A 권, Vol. 33, No. 7, pp. 621~628, 2009.
2. Chae J., Park S.S., Freiheit T. “Investigation of micro cutting operations” Int J Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp. 313-332, 2006.
3. Lu Zinan and Yoneyama Takeshi “Micro cutting in the micro lathe turning system” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 39, pp. 1171-1183, 1999.
4. Y. H. Mu, N. P. Hung and K. A. Ngoi, "Monitoring a Sub-Newton Cutting Force for Ultra-Precision Machining," The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 16, pp. 229 - 232, 2000.
5. 홍 성민, 제태진, 이동주, 이종찬, "V 형 다이아몬드공구에 의한 연질소재의 미세절삭특성 연구", 한국기계가공학회지, 제 4 권, 제 4 호, pp. 28~33, 2005.
6. 강익수, 정연식, 권동희, 김전하, 김정석, 안중환, "마이크로 엔드밀링에서 AE 신호를 이용한 공구상태 감시", 한국정밀공학회지, 제 3 권, 제 1 호, pp 64 - 71, 2006.
7. D. E. Lee, I. Hwang, C. M. O. Valente, J. F. G. Oliveira and D. A. Dornfeld, "Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission", International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp 176 - 188, 2006.
8. Hongli Gao and Mingheng Xu, "Intelligent Tool Condition Monitoring System for Turning Operations", Lecture Notes in Computer Science, Advances in Neural Networks - ISNN 2005, pp 883 - 889, 2005.