

◆ 특집 ◆ 대면적 미세가공시스템

## 대면적 미세 가공공정 원천기술 개발

### Core Technology Development for Micro Machining Process on Large Surface

이석우<sup>1,✉</sup>, 이동윤<sup>2</sup>, 송기형<sup>2</sup>, 강호철<sup>3</sup>, 김수진<sup>4</sup>  
Seok Woo Lee<sup>1,✉</sup>, Dong Yoon Lee<sup>2</sup>, Ki Hyeong Song<sup>2</sup>, Ho Chul Kang<sup>3</sup> and Su Jin Kim<sup>4</sup>

1 한국생산기술연구원 충청지역본부 (Chungcheong Regional Division, KITECH)

2 한국생산기술연구원 IT 융합생산시스템센터 (IT Convergence based Manufacturing System Center, KITECH)

3 ㈜코아옵틱스 (CORE OPTIX Inc.)

4 경상대학교 기계항공공학부 (School of Mechanical and Aerospace Engineering, Department of Mechanical Engineering, Gyeongsang Univ.)

✉ Corresponding author: swlee@kitech.re.kr, Tel: 031-436-8051

Manuscript received: 2011.5.2 / Accepted: 2011.6.8

*In order to cope with the requirements of smaller patterns, larger surfaces and lower costs in the fields of displays, optics and energy, greater attentions is now being paid to the development of micro-pattern machining technology. Compared with flat molds, roll molds have the advantages of short delivery, ease of manufacturing larger surfaces, and continuous molding. This paper presents the state-of-the-art of the micro pattern machining technology on the roll molds and introduces some research results on the machining process technology. The copper and nickel-phosphorous-alloy plating process, machining process technology for uniform micro patterns, micro cutting simulation and the real time monitoring system for micro machining are summarized. The developed technologies have led the complete localization of the prism sheets and will be applied to the direct forming process with succeeding research & development.*

Key Words: Micro Machining (미세가공), Micro Pattern (미세패턴), Large Surface Roll Mold (대면적 롤금형), Uniform Machining (고균일 가공), Nickel-Phosphorous Plating (니켈-인 도금).

#### 1. 서론

미세패턴 형상을 가지는 부품을 이용하여 제작되는 디스플레이 제품의 대면적화에 대응하고 부품의 생산성 향상을 위하여 대면적 롤금형을 이용한 연속성형 공정에 대한 관심이 높아지고 있다. 롤금형을 이용한 공정을 평판금형을 이용한 공정과 비교해 보면, 롤금형은 선삭 가공공정을 이용하여 300m/min 이상의 빠른 가공속도로 연속가공이 가능하기 때문에 직선 이송 기반의 단속가공을 해야 하는 평판금형에 비하여 금형가공시간을 획기적으로 줄일 수 있고, 광학부품의 연속 성형이

가능하기 때문에 생산성의 극대화를 추구할 수 있다. 반면, 성형되는 부품의 형태가 필름형태로 국한되는 단점과 함께 광학부품의 사양을 만족시키기 위하여 2m 급의 대면적 롤금형을 안정적으로 회전시키면서 공구의 상대 위치를 정밀하게 제어할 수 있는 고가의 초정밀 가공장비를 필요로 한다. 또한, 이러한 장비를 활용하여 고객사가 원하는 미세패턴 형상을 대면적 롤금형의 품질과 생산성을 고려하여 빠른 시간에 납품하기 위한 가공공정 기술이 반드시 필요하다.

디스플레이 산업은 우리나라의 대표적인 주력 산업으로서 일본, 대만 등의 경쟁국들을 압도하고

있으며, 특히 LCD 분야는 우리나라가 최근의 대형화 및 고급화 경향을 선도하고 있다. LCD의 핵심 모듈인 BLU (Back Light Unit)에 사용되는 프리즘시트를 생산하기 위해 상기의 대면적 롤금형이 가장 많이 사용되고 있으며, 향후 도광판, 확산판 등으로 그 응용처가 확산될 것으로 기대되고 있다. 과거 프리즘시트는 전량 해외에서 수입에 의존하여 왔으며, LCD 기관유리가 7 세대에서 8 세대로 넘어가는 2007 년경부터 국내의 중소기업들이 프리즘시트 양산시장에 진입하기 시작하였으나, 당시 프리즘시트 양산용 롤금형 가공을 위한 장비 및 가공기술이 충분히 확보되지 않은 상황이었기 때문에 롤금형을 해외에서 수입하면서 양산 공정을 안정화하는 수준이었다.

본 특집 논문은 이러한 환경 속에서 정부의 지원으로 개발 중인 대면적 미세 가공공정 기술의 개발 현황을 소개하기 위하여 작성되었으며, 대면적 롤금형의 가공공정과 관련한 내용에 초점을 맞추고 있다. 우선, 광학부품 생산을 위한 대면적 롤금형의 특성 및 동향에 대해서 소개하고 롤금형의 소재 준비를 위한 니켈 도금 기술과 고균일 미세 패턴 가공공정기술, 가공공정의 지능화를 위한 가공공정 시뮬레이션기술과 실시간 모니터링 기술에 대하여 논한 후 마지막으로 3 년간의 기술개발의 성과와 향후 개발방향을 소개하고자 한다.

## 2. 대면적 롤금형 가공공정 기술개발 동향

대면적 롤금형 가공기술이 국내에 도입되던 2007 년경은 LCD 산업이 7 세대를 넘어서면서 크

기 경쟁에 불이 붙던 시기이며, 이와 동시에 LCD의 고휘도 및 고해상도 등의 고품질화가 진척되던 시기이다. 이러한 시장 환경은 LCD의 주요 모듈인 BLU의 대면적화 및 BLU용 광학부품들의 미세피치화를 유도하였다. 대면적화 요구에 대응하기 위하여 롤금형의 길이는 2m를 넘어서게 되었으며, 기존 50  $\mu\text{m}$  수준의 미세패턴 피치크기도 20  $\mu\text{m}$ 이하로 요구되었다. 특히 회피 및 신제품 대응을 위한 새로운 형상의 패턴 가공에 대한 요구 증대로 FTS (Fast Tool Servo)를 이용한 복합패턴 가공기술과 예각 및 고세장비 형상의 미세패턴 가공기술에 대한 요구 또한 확대되었다.

Fig. 1은 일반적인 대면적 롤금형의 제작공정과 롤금형을 이용한 프리즘시트 생산공정을 간략하게 보여주고 있다. 코아롤(Core Roll)이라고 불리는 2m급의 드럼형태 원 소재를 구리나 니켈로 도금한 후 다이아몬드 공구를 이용하여 초정밀 대형 선반에서 미세패턴을 가공하며, 동도금한 롤금형의 산화방지를 통한 수명 향상을 위하여 크롬이나 니켈로 코팅하기도 한다. 롤금형은 성형기에 장착된 후 회전하게 되며, 광학 수지를 얇은 필름 (PET)과 함께 롤금형에 투입한 후 자외선 램프로 광학수지를 응고시키면 필름 위에 응고된 패턴이 전사되게 된다.

대면적 롤금형은 광학부품의 양산에 이용되기 때문에, 고균일 가공이 무엇보다 중요하다. 사람의 눈은 0.2  $\mu\text{m}$  수준의 작은 형상 오차에 의해 유발되는 미세한 밝기 차이를 감지할 수 있다고 알려져 있기 때문에, 전체 가공면적에서의 균일도가 대면적 롤금형의 가장 중요한 품질이 된다.

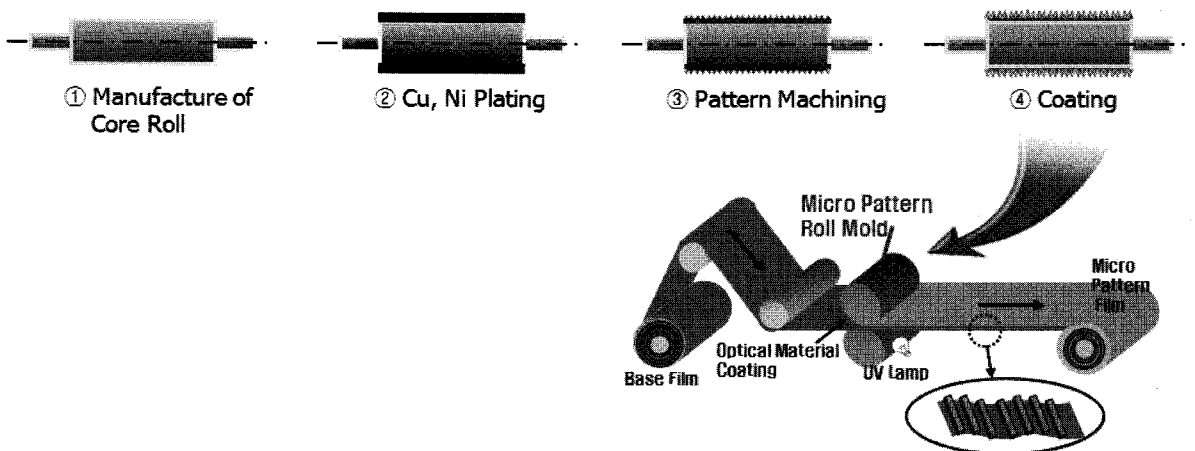


Fig. 1 Manufacturing process of large surface roll molds and prism sheets

대면적에서의 고균일 가공을 위해서는 롤금형 가공을 위한 공작기계의 정밀도가 우선되어야 하나, 가공 중 발생하는 다양한 현상들에 대한 이해를 바탕으로 엄격한 공정관리가 뒷받침되어야 한다. 대면적 롤금형은 형상에 따라 최소 4~5 시간에서 2~3 주에 이르는 시간 동안 가공을 해야 하기 때문에, 외기의 온도 변화에 영향을 받지 않도록 항온유지가 반드시 필요하며, 주변 진동이 가공에 영향을 주지 않도록 하기 위한 방진 대책이 마련되어야 한다. 이러한 환경적인 고려사항 외에 가공 중에 발생하는 버(Burr)와 변형(Deformation), 공구 마모에 의한 가공형상의 왜곡 현상을 미리 예측하고 이를 회피하면서도 생산성 저하를 피할 수 있는 최적의 절삭조건을 선정하기 위한 공정기술이 필요하다. 대면적 롤금형의 가공에는 고가의 장비와 환경 유지비용, 코아롤 제작비용과 다이아몬드공구 비용 등이 필요하지만 롤금형의 품질은 가공이 완료된 이후 작업자의 육안에 의해서 검사가 이루어질 수 밖에 없기 때문에, 장시간의 가공 이후에 가공 불량률이 발견되는 경우의 실패 비용이 상대적으로 크다. 이러한 실패비용을 줄이기 위해서는 가공 현상을 실시간으로 모니터링하면서 가공 불량률이 발생하는 경우 작업자에게 알려 줄 수 있는 실시간 모니터링 시스템의 필요성이 현장을 중심으로 대두되고 있다.

### 3. 대면적 롤금형의 도금공정 기술

우리나라에 대면적 롤금형이 도입되던 2007 년경에는 순수 구리로 코아롤을 도금하였으며, 가공 후 산화방지를 통한 수명향상을 위하여 크롬을 코팅하여 사용하였다. 당시에는 국내의 동도금 공정 기술도 안정되어 있지 않았기 때문에, 동도금된 코아롤을 수입하여 가공하기도 하였으나, 본 과제 의 기술개발을 통하여 고품질의 동도금 기술이 안정화되어 프리즘시트 제작용 롤금형 가공기술은 가공소재의 준비에서부터 제품까지의 전 단계가 완전히 국산화 되었다. 2m 급 대면적 롤금형의 동도금 공정을 안정화하기 위하여 동도금 불량유형을 DB 화하여 향후 자동검사를 위한 표준화 작업을 수행하였으며, 동도금 조건별로 가공실험을 수행하여 프리즘패턴 가공에 최적화된 동도금 경도를 선정(Hv 220~250)하였으며, 이로 인하여 국내 롤금형의 가공수율을 크게 향상시킬 수 있었다. 반면, 경도가 Hv200 이하일 경우 미세패턴의 산이

무너지는 것을 확인하였고, Hv200~220 에서는 도금된 동이 뜯겨지는 결함이 발생하였으며 Hv300 이상에서는 도금이 밀리고 다이아몬드공구가 파손되는 현상이 발견되었다.

최근에는 동도금된 롤금형의 코팅 재료로서 니켈을 사용하기도 하며, 더 나아가 니켈로 코아롤을 도금하여 니켈에 직접 미세패턴을 가공하는 연구가 수행되고 있다. 니켈도금된 소재는 다이아몬드공구를 이용한 초정밀가공을 통하여 광학소재 및 기타 초정밀 부품의 가공에 많이 사용되고 있으나, 니켈 자체로서는 가공성이 좋지 않기 때문에 무게 기준으로 11% 이상의 인(Phosphorous)을 첨가하여 절삭성을 향상시킨다. 전해방식으로는 니켈도금할 때 인을 11% 이상 함유시키는 것이 어렵다고 알려져 있어서, 일반적으로 무전해방식으로 니켈을 도금하였으며, 소형 평판금형에 많이 사용되어 왔다. 무전해방식의 니켈도금공정은 도금 시간이 전해방식 도금에 비해서 상대적으로 길기 때문에, 2m 급 롤금형과 같은 대형 공작물의 경우 황삭으로 제거되는 두께를 고려하여 500  $\mu\text{m}$  이상으로 도금을 수행하는 데는 적합하지 않았다. 최근 들어 도금액과 도금공정의 기술개발을 통하여 인의 함유량을 12%이상 높일 수 있게 됨에 따라서, 전해방식의 니켈도금 공정의 안정화를 위한 연구가 수행되고 있다.<sup>1</sup>

니켈은 구리보다 경도가 높기 때문에 대면적 가공시에는 공구마모를 고려해야 하므로, 본 연구에서는 각 도금 조건별로 동일한 가공조건을 적용한 가공실험을 통하여 공구의 마모를 비교 분석하였다. 전해니켈도금 조건으로서는 기초실험을 통하여 선정된 도금 수조의 온도(65°C), 산도(pH 1.3~1.8), 도금 전압(6V)을 고정변수로 하고, 황산 니켈과 염화니켈의 비율을 8:1, 6:1, 4:1 의 3 가지 조건으로, 첨가제 함유량 조건을 50 ml/l, 100 ml/l, 150 ml/l 의 3 가지 조건으로 변화해가면서 총 9 개의 도금 조건으로 도금을 수행하였다. 다이아몬드공구의 마모에 영향을 미치는 인의 함유량과 경도를 EDS 와 경도계를 이용하여 측정하였으며, 각 도금 조건에 대하여 50  $\mu\text{m}$  피치를 갖는 90° 프리즘형상을 1200mm 구간에 141.4m/min 의 가공속도로 가공깊이를 20  $\mu\text{m}$  와 7  $\mu\text{m}$ 로 와 분할하여 가공한 후 다이아몬드공구의 마모를 측정하였다. 상기 조건으로 가공하였을 경우의 총 가공거리는 45.2km 이다. 본 연구에서는 다이아몬드공구 마모의 기준을 마모에 의해서 발생하는 미세패턴의 깊이 방향

Table 1 Comparison of measured roughness data

No.	Concentration	Additive contents (ml/l)	Phosphorous content (wt %)	Hardness (HrC)	Tool wear (μm)
1	8:1	50	13.66	58.7	0.35
2	8:1	100	13.09	45.7	0.77
3	8:1	150	11.67	52.3	0.47
4	6:1	50	6.76	49.1	0.72
5	6:1	100	11.04	54.0	0.62
6	6:1	150	12.85	56.1	0.43
7	4:1	50	12.28	54.9	0.87
8	4:1	100	12.65	56.6	0.65
9	4:1	150	13.42	54.5	0.64

으로의 형상왜곡 정도로 정의하였으며, Table 1 은 각 도금조건에 대한 인 함유량, 경도 및 가공 후 SEM 을 이용해서 측정된 다이아몬드공구 마모량을 보여주고 있다. 6 번 도금 조건에서 형상왜곡의 상한선인 0.5 μm 미만의 공구마모와 우수한 외관품질을 확보할 수 있었으며, 인의 함유량도 목표값인 12%를 상회하는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4. 대면적 롤금형의 고품위 가공기술

##### 4.1 대면적 롤금형의 고균일 가공기술

대면적 롤금형의 균일한 가공을 위해서는 회전하고 있는 피삭재(롤금형)와 고정되어 있는 다이아몬드공구간의 거리가 전 가공영역에서 일정하게 유지되어야 한다. 이 거리가 일정하게 유지되지 않을 경우 가공 깊이의 차이가 발생하게 되며, 결과적으로 미세패턴의 산간거리(피치, pitch)의 변화를 유발하게 되어 가공불량의 이유가 된다. 피삭재와 절삭공구간의 거리가 일정하게 유지되기 위해서는 장비의 관점에서는 공구대가 이송하는 Z 축과 피삭재가 회전하는 C 축의 평행도와 Z 축 이송계의 진직도가 확보되어야 하며, C 축의 회전정밀도의 확보 또한 반드시 필요하다. 공정의 관점에서 살펴보면 피삭재를 장착할 때 주의가 필요한데 우선 C 축의 회전중심과 롤금형의 회전중심을 일치시키기 위한 정렬(alignment) 작업이 필요하다. 상기의 준비 작업 이후 가공이 이루어지는 중에도 피삭재와 공구간의 거리를 변화시키는 요인으로서 롤금형의 질량불평형에 의해서 발생하는 회전 진

동을 고려하여야 한다.<sup>2</sup> 대면적 롤금형의 경우 가공해야 하는 영역이 2m 에 달하고 무게가 300kg 이상의 대형 공작물인데 반해, 가공되는 형상의 크기는 50 μm 이하이기 때문에 질량불평형에 의해서 야기되는 진동이 가공의 균일도를 저하시키는 것으로 기초실험을 통해 확인하였다. 대면적 롤금형 가공기술이 국내에 도입되던 2007 년 후반에는 질량불평형을 고려할 때 회전을 고려하지 않은 정적밸런스만 보정하였으며, 정밀하게 제작된 대면적 롤금형의 경우 ISO 의 동적밸런스 규격이 G2.5 수준으로 측정이 되었다. 반면, 동적밸런스 규격을

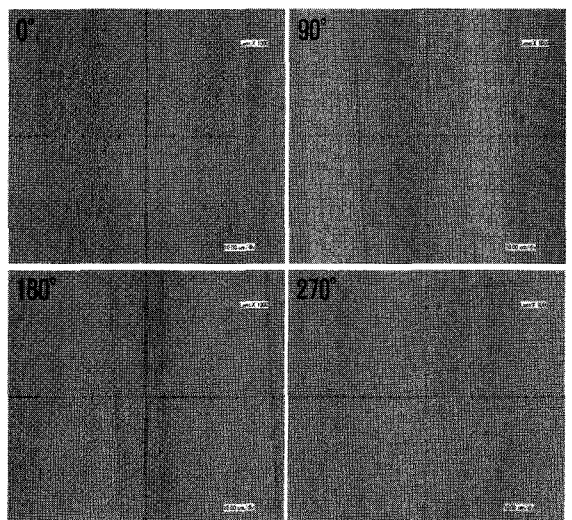


Fig. 2 Machined surface before balancing

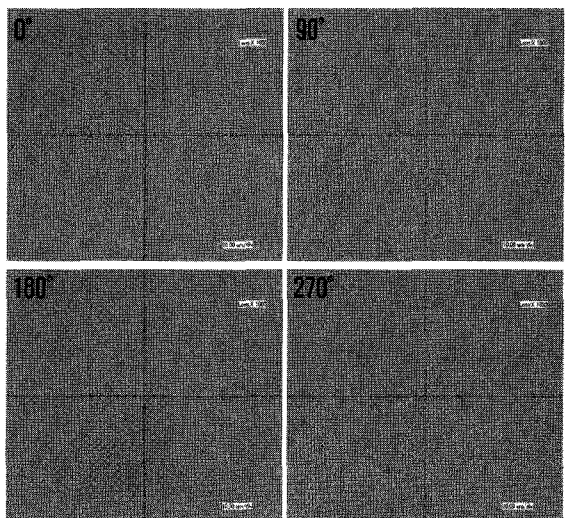


Fig. 3 Machined surface after balancing

G0.4 수준으로 보정한 결과 회전 진동량이 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 롤금형 가공기에 장착된 대면적 롤금형에 대하여 동적밸런싱 보정 전후의 진동량을 최대값 기준으로 비교해 보면, 보정 전 Head - 롤금형 가공장비의 스핀들 - 에서 0.076mm/s (RMS), Tail - 롤금형 가공장비의 심압대 - 에서 0.044mm/s (RMS)로 측정된 값들이, 보정 후 Head 에서 0.007mm/s (RMS), Tail 에서 0.004mm/s (RMS)로 크게 줄어들었다는 것을 확인할 수 있다. 동적밸런싱 보정이 미세패턴 가공에 미치는 영향을 확인하기 위하여 가공깊이를 2.0  $\mu\text{m}$ , 패턴 간격을 4.0  $\mu\text{m}$ 로 설정하여 가공실험을 수행한 결과가 Fig. 2 와 Fig. 3 과 같다. 동적 밸런싱을 수행하지 않은 롤금형은 회전에 의한 진동에 의하여 공구와 피삭재간의 거리가 변하게 되어 일부 구간에서는 가공이 이루어지지 않은 부분을 발견할 수 있었으나, 동적밸런싱을 수행한 롤금형을 가공했을 경우 원주 방향을 따라 모든 위치에서 균일하게 가공이 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

**4.2 대면적 복합 미세패턴 가공기술**

최근들어 미세패턴의 피치가 미세화되고 복잡화됨에 따라 예각패턴 가공의 필요성이 증대되고 있다. 또한, LED BLU 등의 광학 필름을 위한 교차 미세패턴의 필요성도 증대되어 가고 있다. 예각패턴이나 교차미세패턴을 가공할 경우에는 버의 발생과 형상 변화를 억제하기 위한 공정기술이 필요하다. 예각패턴의 경우에는 이전에 가공된 패턴의 바로 옆에 새롭게 패턴이 형성되면서, 가공중 발생하는 절삭력에 의해서 직전의 패턴에 영구 변형이 발생하는 현상이 발견되었으며, 이러한 현상을 제거하기 위해서 반복 가공을 수행하여 60°의 형상을 가지고 있는 예각패턴을 Fig. 4 와 같이 가공할 수 있었다. 교차미세패턴의 경우에는 기존에 가공되어 있는 패턴에 수직으로 가공할 경우 주기적인 단속 절삭이 발생하게 되는데 단속 절삭이 끝나는 탈출부에서 가공된 패턴이 뜯기는 현상을 발견할 수 있었으며, 이러한 현상의 원인이 가공속도의 차이에서 기인한다는 것을 실험을 통해서 확인할 수 있었다. 절삭속도를 변경해가면서 가공 실험을 수행한 결과 5~10m/min 으로 가공속도를 선정하게 되면 단속절삭 중 공구 탈출부의 뜯김 현상이 발견되지 않는다는 것을 Fig. 5 에서와 같이 확인할 수 있었다.

LCD 제품에는 반복적인 미세패턴이 여러 겹

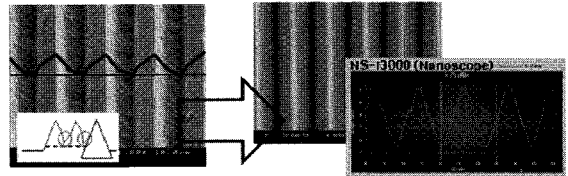


Fig. 4 Acute pattern (60°)

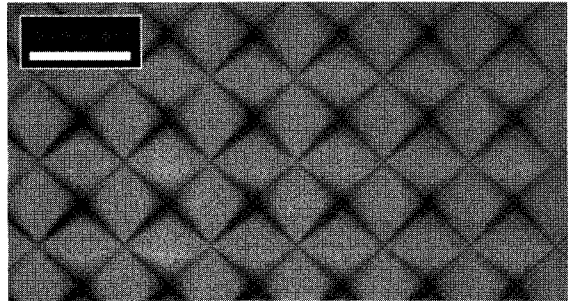


Fig. 5 Cross pattern

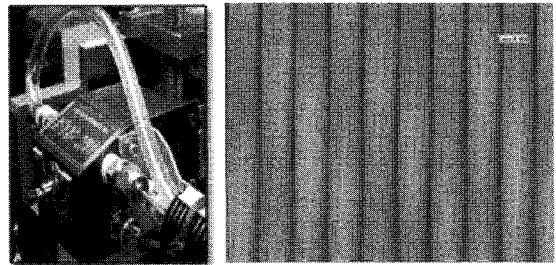


Fig. 6 Machined random pattern by using FTS

겹쳐져서 사용되는데 이로 인하여 Wet-out 현상이나 모아레(Moire) 현상에 의해서 광학특성이 저하되기도 하며, 이러한 문제 해결을 위하여 미세패턴의 반복성에 변화를 주기 위한 가공기술이 필요하게 되었다. FTS (Fast Tool Servo)를 이용하여 주기 및 진폭 조건을 변화시키면서 미세패턴을 가공하면 가공깊이 피치가 일정하지 않은 복합 랜덤(Random) 패턴을 구현할 수 있다. FTS의 반복 주기는 랜덤패턴 대면적 롤금형의 가공생산성을 결정하는 중요한 요소로서, 현재는 20kHz 급의 FTS가 현장에 적용되어 사용되고 있으며, Fig. 6 은 이 장비로 가공된 랜덤패턴의 형상을 보여주고 있다.

**5. 대면적 롤금형 가공공정 지능화**

**5.1 대면적 롤금형의 가공시뮬레이션 기술**

미세패턴 가공의 품질과 생산성을 높이기 위한 프로세스 최적화를 위해서는 가공 중 발생하는 다

양한 현상을 이해하기 위하여 절삭력, Burr, 공구 수명을 예측하는 시뮬레이션 기술이 필요하다. 본 연구를 통하여 절삭력, Burr, 공구수명을 고려한 미세패턴 최적가공조건 선정 프로그램이 개발되었으며, 가공조건 별 절삭력 예측과 3D 가공 시뮬레이션, Burr 예측, 공구마모 예측과 가공조건 추천 기능들로 구성되어 있다.

미세절삭 특성을 고려한 절삭력 예측 알고리즘을 개발하였으며, 실험 데이터를 기반으로 절삭력 예측 공식을 완성하였다. Fig. 7의 검증 실험결과를 살펴보면 0.4N의 미세 절삭력을 ±0.04 N 오차로 예측 가능하다는 것을 확인할 수 있다. 이를 미세패턴을 가공하는 기업에서 쉽게 이용할 수 있도록 일정 절삭력 기반 가공조건 선정 알고리즘을 개발해 가공 단계, 특히 황삭가공 단계를 최소화 할 수 있도록 하였는데, 미세패턴 3D 가공 시뮬레이션으로 가공 영역을 계산하고 절삭력 모델로 미세 절삭력을 예측한 후 최적 절삭 깊이를 추천할 수 있도록 구성되어 있다.<sup>3</sup>

미세 Burr 는 도금된 소재의 경도가 낮고 미세패턴의 각이 예각일수록, 가공깊이가 깊을수록 크기가 커지는 것으로 예측 및 실험에서 분석 되었다. 가공의 형태에 따라서 Side burr의 크기와 Exit burr의 크기가 재료의 물성값 및 실험데이터를 이용해서 예측되었다.<sup>4</sup>

대면적 플금형을 미세가공할 경우 동일한 가공 깊이와 속도를 사용하더라도 다이아몬드공구의 마모가 달라지는 것을 확인할 수 있는데, 피삭재 도금의 불균일성에서 비롯되는 것으로 알려져 있다. 다이아몬드공구의 소재는 천연 다이아몬드와 합성 모노 다이아몬드공구로 크게 나눌 수 있는데, 각각의 경우에 대한 공구마모 실험 결과 천연 다이아몬드공구의 내마모성이 더 우수한 것으로 나타났다. 결정구조의 차이에 의한 것으로 사료된다. 대면적 플금형 가공은 공구, 소재, 장비의 가격이 비싸고 실험에 소요되는 시간이 길기 때문에 반복적인 실험을 수행하는 것도 어려우나, 다이아몬드공구의 마모는 미세패턴의 형상정밀도, 즉 균일도에 중요한 영향을 미치기 때문에, 예측의 필요성이 대단히 높다고 할 수 있으며, 이러한 어려움을 극복하기 위하여 통계적 기법을 적용하였다. 통계적 예측 방법의 검증을 위하여 총 8 회의 가공 후 예측된 마모량과 확률, 실제 마모량의 분포를 분석하였다. 공구 마모가 3.3 μm이하일 확률은 80%로 예측되었고 실험에서 8 개의 마모가 모두 3.1 μm

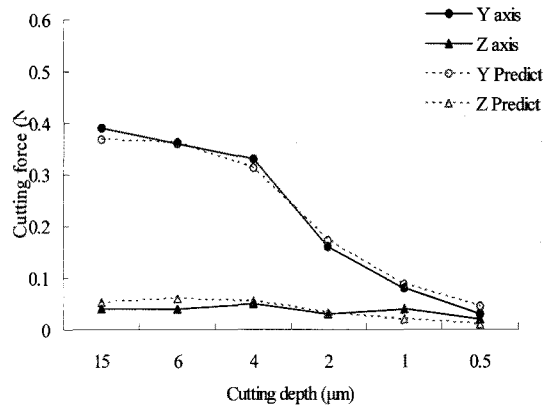


Fig. 7 Prediction of micro cutting force

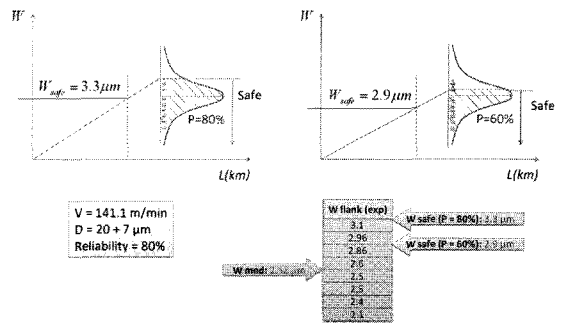


Fig. 8 Statistical prediction of tool wear

이하로 나타났다. 또한 공구 마모가 2.9 μm이하일 확률은 60%로 예측되었고 실험에서 2 개 공구의 마모가 예측 마모량보다 크고 6 개의 마모가 예측 마모량보다 작았다. 실험에서 얻은 마모량의 분포와 예측된 분포를 비교했을 때 조금 더 안전하게 예측되고 있음을 알 수 있는데 이것은 신뢰도를 이용해 그룹의 평균을 샘플보다 안전하게 높였기 때문이다.

### 5.2 실시간 가공공정 모니터링

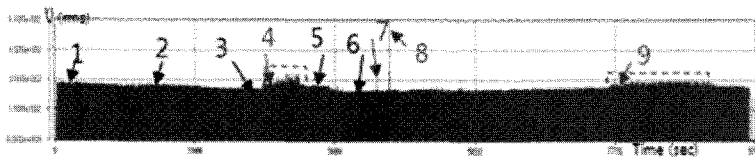
미세 가공 영역의 경우 절삭량이 매우 적기 때문에 작은 절삭 부하가 발생하며 그로 인해 그 중요성에도 불구하고 가공상태 모니터링 연구가 어려운 것이 사실이다. 본 연구에서는 과거 많은 연구들을 통해서 일반적인 가공영역에서의 가공상태를 나타낼 수 있다고 알려진 여러 종류의 센서를 동시에 사용하여 미세 가공 영역에서의 가공 상태에 대한 모니터링 연구를 수행하였다. 공구동력계 (Kistler, 9256B1), 가속도 센서(PCB Piezotronics,

356B1), AE 센서(Fuji Ceramics, M204A)의 세 가지 센서를 이용하였으며, 미세 가공 영역에서의 각각의 신호 특성을 분석하고, 대면적 롤금형 미세패턴 가공공정에서의 모니터링에의 활용을 목적으로 검토하였다.

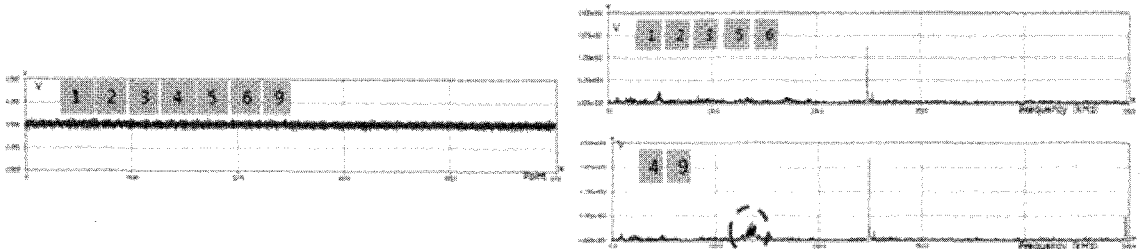
공구동력계와 AE 센서는 미세 절삭부하의 변화에 민감한 신호 변화를 보였다. 선행된 연구 논문들을 통해 볼 때, 절삭력 측정 시 절입 깊이를 작게 하여 파형의 폭이 작을수록 가공된 소재의 표면 품질이 향상됨이 보고된바 있는데, 공구동력계를 통해 가공 중 실시간으로 표면품질의 예측이 가능할 것으로 보이나, 장시간 측정 시 드리프트(Drift) 현상으로 인한 신호의 왜곡이 발생하는 공구동력계의 특성상 롤금형 가공의 실시간 모니터링 적용에 어려움이 있을 것으로 예상된다. 그러나, 롤금형의 미세 패턴 가공 실험에 있어서의 미세 가공 부하에 대한 AE 신호 결과는 절삭력과 유사한 특성을 보였으므로 공구동력계를 대신하여 AE 센서를 적용하는 것이 가공상태 모니터링을 위한 한 방법이 될 수 있을 것으로 사료된다.

위의 내용과 같이 AE 센서의 특성 파악을 통해 수행한 모니터링 실험을 통해서도 AE 센서가

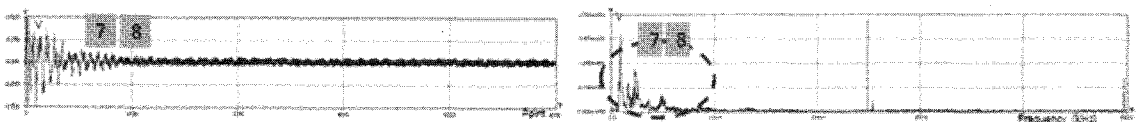
가공 소재의 불균일로 인한 가공 품질의 변화를 감지할 수 있음을 알 수 있었다. 아래의 Fig. 9는 니켈 도금된 롤금형에 대하여 1200mm 길이의 구간을 가공하는 실험에서 불균일한 가공이 이루어진 경우에 취득한 신호를 분석한 것이다. 그림 9(a)에서 1, 2, 3, 5, 6 과 같은 구간들은 균일한 가공이 이루어진 부분이며 붉은색 글씨로 표시한 4, 7, 8, 9 는 불균일한 가공이 이루어진 부분이다. 균일한 가공이 이루어진 부분은 AE 센서 신호가 시간영역에서 연속형의 신호로 나타나며, FFT 분석 결과에서 특이할 만한 주파수 성분의 발생이 없다. 그러나, 4, 9의 경우에는 시간영역에서는 연속형의 신호로 나타났으나, FFT 분석 결과에서 140~180kHz 구간에서 신호의 크기가 증가하였다. 7, 8의 경우는 시간영역에서 돌발형의 신호로 나타났으며, FFT 분석 결과에서 100kHz 이하의 구간에서 신호의 크기가 증가하였다. 불균일한 가공이 이루어진 경우의 가공 후 롤금형을 관찰하면 가공이 이루어진 1200mm 길이의 구간에서 가공면이 균일한 색깔을 보이지 않고 부분적으로 얼룩이 있는 것과 같이 보이는 것을 발견할 수 있는데, 광학현미경을 이용한 2D 광학 측정이나 미세패턴 샘플 전사를 통



(a) RMS Trend Graph



(b) Continuous Signal (Waveform) & FFT Analysis



(c) Transient Signal (Waveform) & FFT Analysis

Fig. 9 AE sensor signals of irregularly machined roll mold

한 SEM 분석 등을 통해서도 이러한 차이점을 발견할 수 없었다. AE 신호는 사람의 육안 이외의 측정 장비를 통하여 구별이 어려운 미세가공 표면의 얼룩 현상 발생시에 균일한 가공이 이루어지는 경우와는 다른 신호 특성을 시간영역과 주파수영역 분석 결과에서 보여주는 것으로 사료된다. 대면적 롤금형의 경우 장기간의 도금이 필요하기 때문에, 도금의 균일성이 저하되는 것이 의심되며, 이로 인하여 불균일한 가공이 발생하는 것으로 사료되나, 롤금형의 소재 불균일성의 발생 원인과 이상 상태의 AE 신호와의 명확한 연관성 규명을 위하여서는 추가적인 연구가 필요하다.

## 6. 향후 개발 방향

대면적 롤금형은 연속성형공정을 위한 부품으로서 디스플레이, 광학 등의 분야에서 폭 넓게 사용되고 있는 미세패턴 부품을 성형할 수 있다. 롤금형을 이용한 연속성형공정은 크게 2 가지로 나눌 수 있는데 UV 연속성형과 직접 연속성형으로 나뉜다. UV 연속성형은 UV 광선에 의해서 고화되는 UV 수지를 Base 필름 (PET 필름) 위에 도포한 후 롤금형에 가공되어 있는 미세패턴을 전사하는 성형공정임에 반하여, 직접 연속성형은 필름이나 플라스틱에 직접적으로 미세패턴을 전사하는 방법으로서 UV 방식에 비해서 고온, 고압의 환경 속에서 사용된다.

최근들어 복합도광판을 제조하기 위한 방법으로서 직접 연속성형에 대한 요구가 늘어남과 함께 고중량 롤금형에 대한 수요도 확대되고 있으며, 특히 고압의 환경 속에서 성형이 가능하기 때문에 UV 성형에서는 전사하기 어려운 고심도 미세패턴을 성형할 수 있는 장점이 있다. 고심도 패턴의 경우 특히 대형 LCD TV 의 복합도광판 제작을 위한 가변피치 미세패턴이나 PDP 전극용 고심도 격벽패턴 등이 직접적인 시장으로 형성되고 있다. 고중량 롤금형을 가공하기 위한 롤금형 가공기가 이미 선진국에서는 개발 완료되어 국내 업계에 공급되기 시작한 시점으로, 가공공정기술 원천기술 확보를 통한 조기 상용화가 필요한 시점이다.

## 7. 결론

본 논문을 통해 대면적 롤금형의 가공공정 기술에 대한 동향 및 국내의 기술 개발 결과와 향후

의 개발 방향에 대하여 소개하였다.

본 연구의 수행 결과로 2m 급 롤금형의 고균일 가공공정 기술을 확보하였고, 니켈코팅 및 고인함유 니켈도금 공정이 개발 및 실용화되었다. 이로 인해 연구 초기 단계에 15% 였던 대면적 롤금형의 미세패턴 가공수율이 80% 까지 향상되었다. 본 연구를 통한 가장 큰 성과는 프리즘 시트용 대면적 롤금형의 완전 국산화를 실현하였다는 것이며, 그 결과 국내 관련 기업의 매출액이 급성장할 수 있었다는 점이라 할 수 있다. 현재는 앞에서 언급한 대면적 롤금형의 직접 성형공정에 대한 원천기술 확보를 위하여, 고심도 패턴 가공 및 자기유변유체를 이용한 미세 Burr 제거 등의 가공 공정 기술과 고온/고압의 성형 환경을 견디기 위한 롤금형의 수명 증대 방안으로 코팅 및 고경도 도금 기술 등에 대한 연구를 추진 중에 있다.

## 후 기

본 연구는 지식경제부 산업원천기술개발사업인 “대면적 미세 가공공정 원천기술 개발”과제의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Lee, D. Y., Hong, S. H., Kang, H. C., Choi, H. Z. and Lee, S. W., “Wear of Single Crystal Diamond(SCD) Tools in Ultra Precision Turning of Electro-Nickel Plated Drum,” Trans. of the KSME A, Vol. 33, No. 7, pp. 621-628, 2009.
2. Lee, D. Y., Hong, S. H., Song, K. H., Kang, E. G. and Lee, S. W., “Improving Dimensional Accuracy of Micropatterns by Compensating Dynamic Balance of a Roll Mold,” Trans. of the KSME A, Vol. 35, No. 1, pp. 33-37, 2011.
3. Lee, J. M., Je, T. J., Choi, D. S., Lee, S. W., Le, D. and Kim, S. J., “Micro Grooving Simulation and Optimization in the Roughing Stage,” Int. J. of Prec. Eng. and Manuf., Vol. 11. No. 3, pp. 361-368, 2010.
4. Le, D., Lee, J. M., Kim, S. J., Lee, D. Y. and Lee, S. W., “Burr analysis in microgrooving,” Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 50, No. 5-8, pp. 569-577, 2010.