

롤금형의 동적밸런스 보정을 통한 미세패턴 형상정밀도 향상[§]

이동윤*† · 홍상현** · 송기형*** · 강은구*** · 이석우****

* 한국생산기술연구원 융합생산기술연구부, ** 퀸즐랜드주립대학교 지리계획환경관리학과,
*** 한국생산기술연구원 디지털협업지원센터, **** 한국생산기술연구원 생산시스템연구부

Improving Dimensional Accuracy of Micropatterns by Compensating Dynamic Balance of a Roll Mold

Dongyoon Lee*†, Sanghyun Hong**, Kihyeong Song***, Eungoo Kang*** and Seokwoo Lee****

* Manufacturing Convergence R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology,

** School of Geography, Planning and Environmental Management, Univ. of Queensland,

*** Digital Collaboration Service Center, Korea Institute of Industrial Technology,

**** Manufacturing System R&D Department, Korea Institute of Industrial Technology

(Received January 12, 2010 ; Revised November 1, 2010 ; Accepted November 8, 2010)

Key Words: Roll Mold(롤금형), Dynamic Balance(동적밸런스), Micro Pattern Machining(미세패턴가공), Dimensional Accuracy(형상정밀도), Mass unbalance(질량불평형)

초록: 디스플레이, 광학, 에너지 분야 부품의 미세형상화, 대면적화, 저가격화 요구에 대응하기 위하여 대면적 롤금형의 미세형상 가공기술개발에 대한 필요성이 대두되고 있다. 롤금형은 기존의 평판금형에 비해서 금형의 납기가 빠르고, 대면적화에 용이하며, 연속성형이 가능하다는 장점을 갖고 있다. 본 연구는 롤금형에 미세형상을 가공할 때 발생하는 형상오차의 원인을 규명하는 것을 목적으로 하고 있으며, 가공 현장에서 개선 가능한 요소로서 롤금형의 동적밸런스 보정방안을 제시하고 있다. 기존보다 정밀한 동적밸런스 보정을 통하여 롤금형의 질량불평형이 최대 90%까지 감소되었고, 롤금형의 진동량이 0.044 mm/sec (RMS)에서 0.004mm/sec (RMS)로 감소하였으며, 결과적으로 미세패턴의 형상정밀도가 개선되는 것을 확인할 수 있었다.

Abstract: In the fields of display, optics, and energy, it is important to improve micropattern-machining technology for achieving small patterns, large surface areas, and low cost. Unlike flat molds, roll molds have the following advantages: they can be manufactured within a short time, larger surface areas can be obtained, and continuous molding can be achieved. In this study, we aim to investigate the causes for errors in the shapes for a micropattern-machining process, and we show that by compensating the dynamic balance of roll molds, the dimensional accuracy of machined parts can be improved. The experimental results show that dynamic-balance compensation for a roll mold reduced the mass unbalance and the vibrations of the roll mold, and as a result, the dimensional accuracy of machined micropatterns has been improved.

- 기호설명 -

1. 서론

- V : 속도, mm/sec
- f : 주파수, cycle/sec
- D : 변위, μm

대면적 롤금형은 LCD패널에 들어가는 확산필름의 제작에 사용되며 최근 복합광학 플레이트, X-Ray 형광관, 연료전지 분극판, 태양열 집광관 등의 부품을 성형하기 위한 금형으로도 연구되고 있다. 롤금형은 일반적으로 철로 제작된 롤에 400~600 μm 두께로 구리도금한 후 다이아몬드공구로 가공하며, 가공 후 산화방지를 통한 수명향상을 위하여, 크롬 및 니켈 등을 코팅하여 사용하기도 한다. 과거에는 확산필름 및 도광관의 성형

§ 이 논문은 대한기계학회 2009년도 추계학술대회 (2009. 11. 4.-6., 용평리조트) 발표논문임

† Corresponding Author, dylee@kitech.re.kr

© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers

을 위하여 평판금형을 많이 사용하였으나, 제품의 대면적화에 따라서 롤금형에 대한 수요가 급증하게 되었다. 롤금형은 평판금형에 비해서 금형가공을 연속적으로 할 수 있어서 롤금형의 제작납기를 단축할 수 있으며, 롤금형을 이용한 성형은 연속적으로 이루어지므로 제품의 생산성을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다.

대면적 롤금형은 광학부품에 응용되기 때문에 넓은 면적 전체에 대해서 균일한 가공이 필수적이며, 현재 피치(pitch)는 50 μ m 이하, 형상정밀도는 1 μ m 이하, 표면조도는 20nm Ra 정도가 일반적으로 사용되고 있는 수준이다. 그러나, 최근 들어 롤금형에 대한 산업계의 다양한 요구로 인하여 미세패턴형상의 복잡화, 미세화 및 대면적화가 급격히 추진되고 있으며 이에 롤금형의 고균일화 및 고품위화를 위한 다양한 연구의 필요성이 높아지고 있다.⁽¹⁾

일반적으로 가공시스템에서의 진동 문제는 불안정한 가공을 야기하여 가공 표면 품질에 영향을 미치게 되는데, 주축이 회전하는 형태의 공작 기계에 있어서 중요하게 고려해야 할 문제 중 하나가 질량 불평형(mass unbalance)에 의한 진동이다.⁽²⁻⁴⁾ 특히, 대면적 롤금형은 일반적으로 전체길이가 2m를 넘고, 무게가 1000kg 이상의 대형 공작물인데 반해 가공되는 형상은 크기가 50 μ m 이하이며, 광학부품의 성형에 사용되기 위해서 균일한 가공이 필요하다. 반면, 생산성 향상을 위해서 롤금형을 고속으로 회전하면서 가공하기 때문에 질량불평형에 의해서 야기되는 진동이 가공품질에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 본 논문에서는 롤금형의 질량불평형의 측정 및 수정을 통한 롤금형 회전시의 진동 감소가 미세 패턴의 가공에 미치는 영향에 대하여 다루고 있다.

2. 실험

2.1 실험 장비

본 실험에 사용된 대면적 미세패턴 롤금형 가공 장비는 미국 무어(Moore)사의 초정밀 롤 가공용 선반(ultra precision drum lathe)이며, 여기에 철로 제작된 롤 형태의 구조에 구리를 도금한 롤금형을 장착하여 가공 실험을 진행하였다.

롤금형의 밸런싱을 위해서 Fig. 1과 같은 휴대용 밸런싱 장비를 사용하였다. 휴대용 밸런싱 장비는 회전속도 측정기(RPM meter), 2개의 가속도

센서(TAS18s, 100mv/g)와 데이터를 처리할 수 있는 주 조작 패널(Main Control Panel)로 구성된 챔브(CEMB, 獨)사의 N500이다.

2.2 롤금형 회전시의 진동 확인

다이아몬드공구를 이용하여 롤금형의 외관을 경면으로 가공한 후, 롤금형을 회전시키면서 공구대에 장착한 갭 센서(gap sensor)를 이용하여 롤금형과 공구대간의 간격 변화를 측정하였다. 측정은 롤금형의 Head, Middle, Tail, 세 개의 위치 - Head, Tail은 롤금형의 양 끝단을 지칭하며, Head는 주축 스핀들 방향을, Tail은 심압대 방향이고 Middle은 Head와 Tail의 중간을 의미함 - 에서 실시하였으며, Fig. 2는 측정결과를 보여주고 있다. 롤금형이 1회전하는 동안 롤금형과 공구대간의 간격의 편차가 2.7 μ m에서 3.2 μ m까지 발생하는 것을 확인할 수 있었으며, 이로부터 롤금형이 회전하면서 진동하고 있다는 사실과 이 진동으로 인하여 가공품질에 악영향을 줄 수 있다는 것을 유추할 수 있었다.

2.3 롤금형의 동적밸런스 측정 및 보정

휴대용 밸런싱 장비의 작동원리는 다음과 같

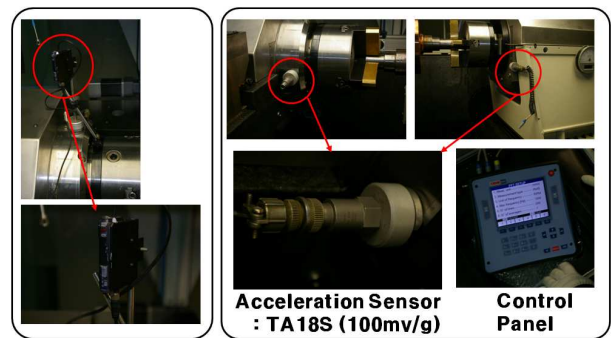


Fig. 1 Portable balancing machine

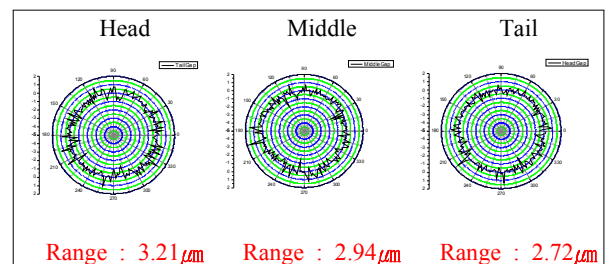


Fig. 2 Measurement results of gap sensor

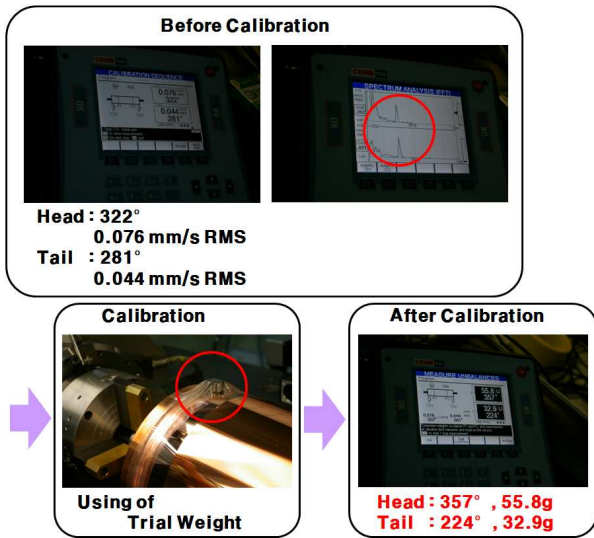


Fig. 3 Balance calibration of roll mold

다. 우선, 교정(calibration) 단계로서 회전속도 측정기로부터 들어오는 신호와 가속도 센서로부터 들어오는 진동 신호를 조합하여, 회전 위치에 따른 진동량을 계산하고 이를 질량불평형량으로 변환한다. 이후, 필요한 무게를 롤금형의 적절한 위치에 추가하거나 제거하여, 질량불평형량을 줄여 줌으로서 롤금형 회전 시의 진동을 최소화하며, 이 단계를 보정(compensation) 단계라고 한다.

길이 1500mm, 지름 300mm, 무게 500kg의 롤금형을 상기의 초정밀 선반에 장착한 후 500rpm으로 회전시키면서 휴대용 밸런싱 장비를 이용하여 진동량을 측정하였다. 측정된 진동량을 질량불균형량으로 변환하기 위해서 무게를 알고 있는 무게 추(trial weight, 본 실험에서는 51g)를 롤금형의 Head, Tail 부분에 각각 1회 장착한 후 다시 진동량을 측정하였다. 휴대용 밸런싱 장비가 새로 추가된 무게와 무게추가 장착되기 이전과 이후의 진동량 변화값을 이용하여 최종적으로 질량 불균형량을 수정하기 위한 질량과 그 위치를 - 본 논문에서 표시된 각도는 가공장비의 원점을 기준으로 측정된 롤금형의 회전각도를 의미함 - Fig. 3과 같이 표시해 주게 된다. Fig. 4는 롤금형의 Head와 Tail의 지정된 각도에 계산된 양의 무게를 추가하여 롤금형의 동적밸런스를 보정한 것을 보여주고 있으며, 보정 이후 측정된 질량불평형량과 진동량이 보정 이전에 비해 감소하였다는 것을 확인할 수 있었다.

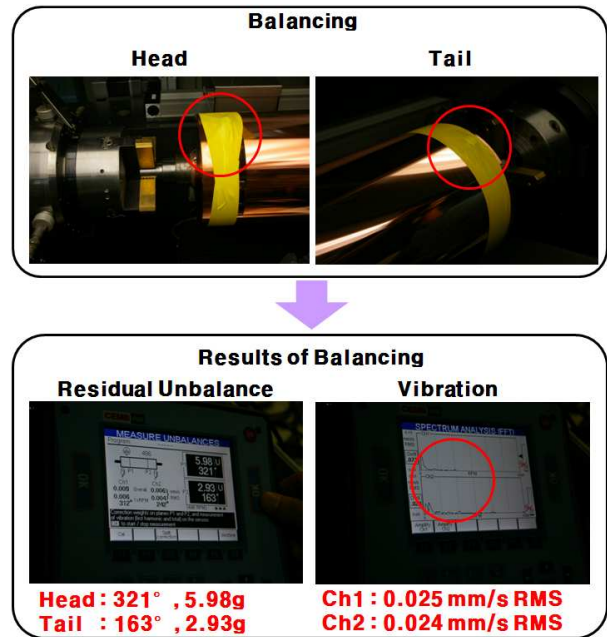


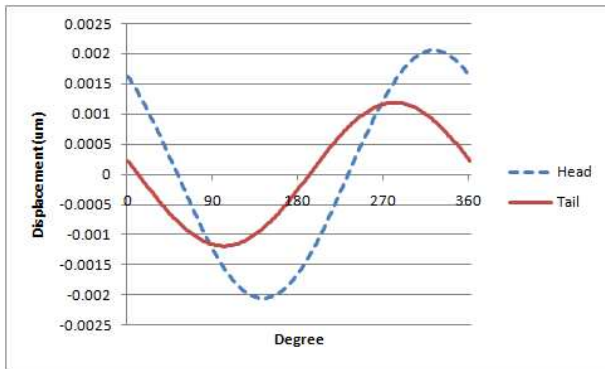
Fig. 4 Balance compensation of roll mold

3. 실험 결과 및 분석

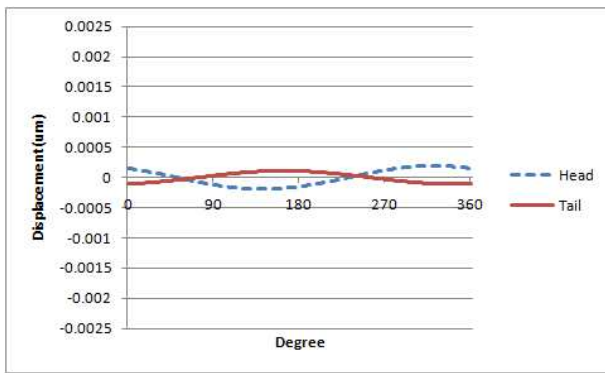
3.1 롤금형의 동적밸런스

ISO에서는 회전 기계가 갖추어야 하는 동적밸런스의 기준을 등급별로 나누어 정의하고 있다.⁽⁵⁾ 현재까지 롤금형을 제작할 때의 동적밸런스 규격은 G2.5를 기준으로 하고 있었다. 그러나, 본 실험에서 이용한 대면적 롤금형의 사양인 무게 500kg, 지름 350mm 및 회전 속도 500rpm을 적용하여, 동적밸런스 허용 오차를 ISO규격에 명시된 방법으로 계산하여 보면, 수정량이 79.58g, 편심량이 47.75 μ m이 된다. 같은 롤금형에 대해서 정밀 연마용 공구 등에 적용하는 ISO 밸런스 기준의 최고 등급인 G0.4의 적용을 가정하여 계산하여 보면, 수정량이 12.73g, 편심량이 7.64 μ m가 되며, 본 논문에서는 진동량 감소를 위하여 G2.5 기준으로 제작된 롤금형을 G0.4로 보정하였다.

G2.5 기준으로 제작된 롤금형에 대하여 초기 질량불평형량을 측정된 결과 Fig. 3과 같이 Head의 357°에서 55.8g, Tail의 224°에서 32.9g의 질량 불평형량이 확인되었다. 이를 Fig. 4와 같이 롤금형의 동적밸런스를 보정한 결과 질량불평형량이 Head의 321°에서 5.98g, Tail의 163°에서 2.93g으로 줄어들었음을 확인할 수 있었다. 보정 전후의 진동량도 최대값을 기준으로 비교해보면, 보정 전 Head에서 0.076mm/s (RMS), Tail에서 0.044mm/s



(a) Before balancing



(b) After balancing

Fig. 5 Difference of the amplitude and the phase of the vibration

(RMS)로 측정된 값들이, 보정 후 Head에서 0.007mm/s (RMS), Tail에서 0.004mm/s (RMS)로 크게 줄어들었다는 것을 확인할 수 있었다.

회전 속도의 주파수로 나타나는 질량불평형을 가진 기계의 진동은 가장 기본적인 주기 운동의 형태인 조화운동으로 볼 수 있으며, 이 때 변위와 속도 간의 관계는 다음의 식 (1)로 정의된다.⁽⁶⁾

$$V=2 \pi fD \quad (1)$$

Table 1은 휴대용 밸런싱 장비에서 측된 진동량(속도)을 기준으로 위의 식 (1)을 이용하여 변위를 계산해 본 결과이다. 동적밸런싱 보정을 통하여, 진동 변위(peak to peak)가 Head 4.11 μ m, Tail 2.40 μ m에서 Head 0.38 μ m, Tail 0.22 μ m로 크게 줄어들었음을 확인할 수 있으며, Fig. 5는 이 결과를 이용하여 롤금형이 1회전 하는 동안 Head와 Tail의 변위를 표시한 그래프를 보여주고 있다.

3.2 미세 패턴 가공 결과

롤금형의 동적밸런싱 보정이 미세패턴 가공에

Table 1 Reduction of the vibration

		Amplitude of Vibration	Before	After
Head	Vel.	(RMS) mm/s	0.076	0.007
	Disp.	(RMS) μ m	1.45	0.14
		(Peak) μ m	2.05	0.19
		(P-P) μ m	4.11	0.38
Tail	Vel.	(RMS) mm/s	0.044	0.004
	Disp.	(RMS) μ m	0.84	0.078
		(Peak) μ m	1.2	0.11
		(P-P) μ m	2.4	0.22

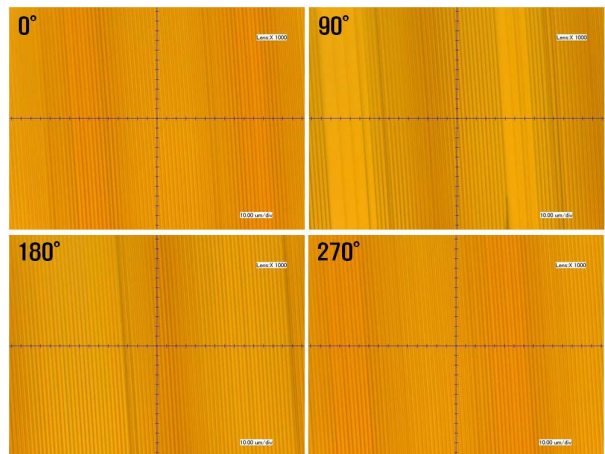


Fig. 6 Machined surface before balancing

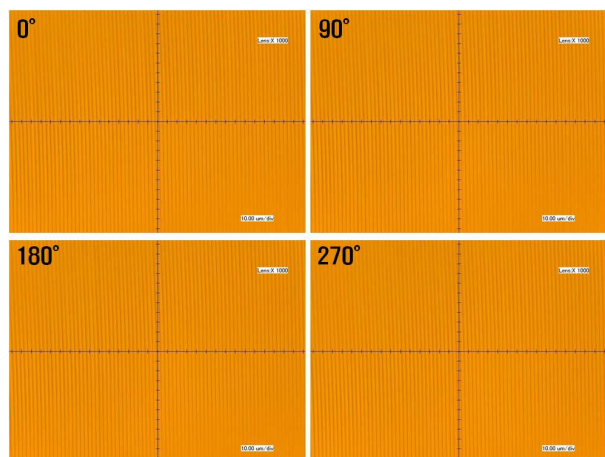


Fig. 7 Machined surface after balancing

미치는 영향을 확인해보기 위하여, 동적밸런싱 보정 전과 후에 가공깊이를 2.0 μ m, 패턴간격을 4.0 μ m로 설정하여 가공실험을 수행하였다. Fig. 6

과 Fig. 7은 동적밸런스 보정 전과 후에 가공된 면을 롤금형을 90°간격으로 회전시키면서 촬영한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6을 살펴보면, 롤금형의 원주 방향을 따라 가공이 균일하게 이루어지지 않았으며, 일부 구간은 공구가 가공면에 닿지 않아 가공이 되지 않았음을 확인할 수 있다. 이와 비교하여, 동적밸런스를 보정한 Fig. 7의 경우에는 원주 방향을 따라 모든 위치에 가공이 이루어졌음을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 대면적 롤금형에 미세패턴을 가공함에 있어서 최근의 패턴 미세화 및 복합화에 대응하기 위한 가공기술개발을 목적으로 수행되었으며, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 롤금형의 정밀한 동적밸런스 보정을 통해 롤금형의 질량불평형량을 Tail 위치 기준으로 기존 대비 90% 감소시켰으며, 진동량은 0.044mm/s에서 0.004mm/s로 줄일 수 있었다. 미세한 가공깊이 (2.0 μ m) 가공실험 결과로부터 동적밸런스를 G0.4 수준으로 정밀하게 보정한 경우 보정하기 이전인 G2.5 수준인 경우보다 가공품질이 향상되었다는 것을 확인할 수 있었다. 이 결과를 통해 대면적 롤금형의 동적밸런스 정도 기준을 정밀한 등급으로 관리해야 보다 균일한 미세패턴의 품질을 확보할 수 있다는 것을 알 수 있었다.

(2) 롤금형 회전 시 캡센서 측정 결과에서 나타난 진동량 (Fig. 2)과 롤금형의 밸런싱 작업 시에 측정된 진동량 (Table 1)이 다르게 나타나는 것을 보았을 때, 롤금형 가공 시 시스템에서 나타나는 진동은 여러 가지 요인이 복합적으로 작용하여 나타난 결과로 사료된다. 그러나, 본 연구에서 수행한 실험결과로부터 롤금형의 동적밸런스 보정을 정밀하게 개선하는 것만으로도 진동량의 대부분을 감소시킬 수 있었다.

(3) 현재 관리되고 있는 롤금형의 동적밸런스 정도는 G2.5 수준이므로, 향후 패턴 미세화 및

복합화에 대응하기 위해서는 보다 정밀한 수준으로 관리할 필요성이 있다. 또한, 가공속도를 높이기 위해 롤금형의 회전속도를 높게 될 경우, 질량불평형에 의한 진동량이 속도증분에 비례하여 증가하게 되므로, 생산성 향상을 위해서도 동적밸런스 관리는 필요하다. 그러나, 동적밸런스 수준을 높일수록 작업현장에서의 비효율성이 증가할 개연성이 있으므로, 명확한 기준 정립을 위한 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구는 지식경제부에서 전략기술개발사업으로 지원하는 ‘대면적 미세 가공공정 원천기술 개발’ 과제를 통해서 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Lee, D. Y., Hong, S. H., Kang, H. C., Choi, H. Z. and Lee, S. W., 2009, "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.
- (2) Cheng, K. Ed., 2009, "Machining Dynamics," Springer
- (3) Moon, J. D., Kim, B. S., Kim, D. H. and Lee, S. H., 2005, "A Study on the Active Balancing Device for Spindle System of Machine Tools," *Trans. of the KSNVE(A)*, Vol. 15, No. 3, pp. 297~305.
- (4) Roisum, D. R., 1996, "The Mechanics of Rollers," Tappi Press
- (5) ISO 1940-1 Mechanical Vibration - Balance Quality Requirements for Rotors in a Constant (Rigid) State - Part 1 : Specification and Verification of Balance Tolerance
- (6) Eshleman, R. L., 1990, "Machinery Vibration Analysis I," Vibration Institute