

# 롤 금형 가공기의 힘 리플 모델링 및 보상연구 Modeling and Compensation of Force Ripple for Roll Lathe

\*황범수<sup>1</sup>, #전도영<sup>1</sup>

\*B. S. Hwang<sup>1</sup>, #D. Y. Jeon(dyjeon@sogang.ac.kr)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서강대학교 기계공학과

Key words : Roll lathe, Force ripple, Feedforward controller

## 1. 서론

최근 디스플레이 분야에서 대면적화와 저가화 추세에 따라 LCD BLU 용 광학 필름 등의 양산화를 위해 롤 성형 방법이 주목 받고 있다. 한국기계연구원에서는 대면적 미세가공장비의 원천기술 확보 및 롤 금형 가공기 개발 과제를 추진 중이며 현재 2m 급 초정밀 롤 금형 가공기의 제작이 완료되어 성능평가 단계에 있다[1]. 롤 성형 패턴 중의 하나로 30um 피치를 가지는 프리즘 형태의 미세 패턴이 있는데, 이를 가공하기 위해서는 주축인 C 축이 300RPM 으로 등속 회전하고 직선 이송축인 Z 축이 100um/s 로 등속 이송하여야 하며 패턴의 질을 높이기 위해서는 C 축과 Z 축의 등속성능이 유지되어야 한다. 각 축의 등속제어를 위해 기본적인 PID 제어를 사용하였을 경우 등속성능은 최대오차 기준으로 C 축이 +/-0.02 RPM, Z 축이 +/-0.3um/s 이하로 되어 미세패턴 가공에 충분한 등속 정밀도를 가지는 것을 확인하였다. 그러나, 시스템에 갑작스러운 외란이 가해져 C 축의 등속 성능이 저하되었을 경우에 패턴 가공의 정밀도를 유지하기 위해서는 Z 축이 동기오차를 보상해 주도록 제어되어야 하며 이를 위해서는 급격한 가속속 제적 및 미소변위 이송에 대한 추종 성능이 확보되어야 한다. 본 논문에서는 C 축과 Z 축의 동기제어 성능 향상을 위하여 Z 축 리니어 모터의 힘 리플(force ripple)을 모델링하고 보상기를 설계하는 방법을 제안하였으며 실험을 통해 성능을 검증하였다.

## 2. 시스템 분석 및 보상기 설계

대상 시스템인 2m 급 롤 금형 가공기의 Z 축은 리니어 모터로 구동되며 유정압 베어링을 사용하기 때문에 마찰 및 감쇠효과는 거의 무시할 수 있다. Z 축 시스템의 모델을 구하기 위하여 0.5Hz 부터 20Hz 의 정현파 입력으로 시스템을 가진시켜 주파수 응답을 도출하였을 때 보드선도는 Fig. 1 과 같이 나타났으며 주파수가 증가함에 따라 진폭이 선형적으로 감소하고 위상차가 전 주파수 구간에서 약 -180° 로 일정하므로 단순 질량 시스템으로 모델링 할 수 있다. 주파수 응답 결과로부터 식 (1)과 같은 시스템 전달함수를 도출하였다.

$$G(s) = 182.7/s^2 \tag{1}$$

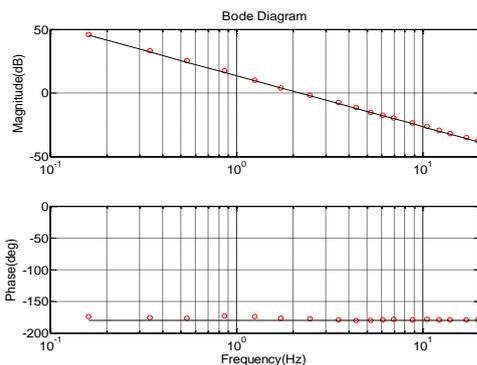


Fig. 1 Frequency response of the system (Z-axis)

이는 1m 급 롤 금형 가공기 시스템의 Z 축 모델[2]과 동일한 2 차의 단순 질량 모델이나, 이득이 약 2 배 증가하였으며 대역폭이 40Hz 정도 증가한 것으로 나타났다. 이것은 2m 급 Z 축 이송시스템의 질량은 1m 급 시스템과 거의 동일하나, 추력증가를 위해 2 개의 동기화된 모터를 사용하였기 때문으로 분석된다.

Z 축에 사용된 리니어 모터는 무철심형으로 영구자석과 트랜슬레이터 간 자기력에 의한 코깅(cogging) 현상은 무시할 수 있으나 전류 인가 시에는 전자기 현상으로 인해 힘 상수가 주기적으로 변하여 힘 리플이 발생할 수 있다. Z 축에 사용된 리니어 모터에서 힘 리플 주기에 영향을 주는 영구 자석간의 물리적 간격은 85.34mm 이다.

절대위치에 의존적이며 주기적인 외란인 힘 리플의 특성 분석을 위해 기존 연구에서는 외란관측자(disturbance observer)[3] 및 적응제어(adaptive control)[4]와 같은 다양한 방법이 활용되었다. 본 논문에서는 Fig. 2 와 같은 반복제어기(repetitive controller)를 사용하여 시스템의 주기적인 힘 리플 특성을 도출하였다[5]. Fig. 2 의 블록선도에서  $G_c(z^{-1})$ 은 되먹임 제어기,  $G_p(z^{-1})$ 은 플랜트,  $G_{ff}(z^{-1})$ 은 앞먹임 제어기(feedforward controller)이며  $N_1$  과  $N_2$  는 지연시스템,  $K_r$  은 반복제어 이득값,  $F_{ripple}$  은 힘 리플에 의한 주기적 외란이다. 식 (1)로 모델링 된 시스템에 대해 반복제어를 적용하면, 오차가 최소가 되도록 하는 최적의 토크  $u$  와 위치  $x$  사이에 식 (2)와 같은 관계가 성립한다.

$$M\ddot{x} = u - F_{ripple}(y, v) \tag{2}$$

여기서, 시스템을 등속으로 움직여주면 식 (2)의 가속도항은 영이 되어  $u = F_{ripple}(y, v)$ 이 성립하므로 반복제어기의 출력값으로부터 힘 리플 신호만을 획득할 수 있다.

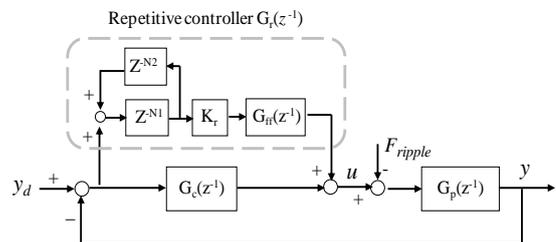


Fig. 2 Block diagram of the repetitive controller

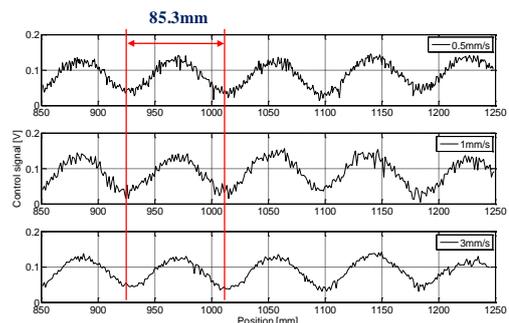


Fig. 3 The position dependent force ripple

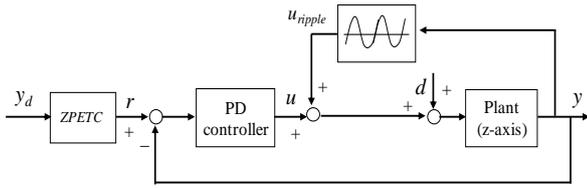


Fig. 4 Block diagram of the two degree of freedom controller with force ripple compensator

반복제어기를 이용한 등속 실험으로부터 도출된 힘 리플 특성을 Fig. 3 에 나타내었다. 그림의 x 축은 롤 금형 가공기 Z 축의 절대위치를 나타내며 850~1250mm 구간에 대해 실험이 수행되었다. y 축은 전압 단위로 나타낸 힘 리플 값으로 물리적인 리니어 모터 영구자석간 간격과 일치하는 85.3mm 의 주기를 가지는 것을 확인할 수 있다. 또한 대상 패턴가공을 위한 주 이송속도 범위인 0.1~3mm/s 구간에서 속도를 변화시켜가며 등속 실험을 수행한 결과 Fig. 3 에 나타낸 것과 같이 힘 리플은 이 구간에서 속도의 크기와 무관한 것으로 관측되었다. 이는 Z 축 시스템이 리니어 모터 및 유정압 베어링을 사용하여 구동되므로 속도에 의존적인 점성 마찰을 거의 무시할 수 있기 때문으로 분석된다.

위의 실험을 통하여 도출된 힘 리플은 반복적이고 주기적으로 나타나며 속도에 무관한 특성을 가지므로 곡선회귀 방법을 이용하여 식 (3)과 같은 절대위치에 대한 정현파 함수 모델을 도출할 수 있다.

$$u_{ripple} = 0.045 \sin\left(\frac{2\pi}{85.34}(y - 15)\right) + 0.078 \quad (3)$$

이 모델을 이용하면 Z 축의 엔코더로부터 측정된 절대위치 값을 식 (3)의 y 에 대입하여 보상값  $u_{ripple}$  을 도출한 후 이를 앞먹임 방식으로 보상해주어 해당 절대 위치에서의 힘 리플의 영향을 제거할 수 있다. 또한 Z 축의 추종 제어 성능 향상을 위한 앞먹임 방식의 모델 기반 ZPET(Zero-Phase Error Tracking) 제어기와 시스템 강인성 향상을 위한 뒤먹임 방식의 PD 제어기를 동시에 사용하는 TDF(Two-Degree of Freedom) 제어기를 적용하였다. 힘 리플 보상기를 포함한 TDF 제어기의 블록선도를 Fig. 4 에 도시하였다.

### 3. 실험 결과 및 분석

Z 축의 동기제어 성능 검증을 위하여 힘 리플 보상기가 포함된 TDF 제어기를 적용하고 검증 실험을 수행하였다. 대상 패턴인 30um 의 프리즘 패턴 가공 시 C 축 1 회전 당 Z 축은 20um 만큼을 이동해야 하므로 300RPM 으로 회전하던 C 축이 갑작스러운 외란에 의해 0.2 초간 1 회전을 더 하게 되었다고 가정하면, 동기오차의 보상을 위해서 1000um/s 로 움직이고 있던 Z 축은 0.2 초간 1100um/s 로 급격히 이송 속도를 변경해 주어야 한다. 본 동기제어 모사 실험에 대한 결과는 Fig. 5 에 도시된 바와 같으며 위치오차는 최대오차를 기준으로 PID 제어가 0.62um, 제안된 힘 리플 보상기를 포함한 TDF 제어기의 경우 0.18um 로 약 71%의 오차 감소 효과를 보였다.

대상으로 하는 가공 패턴의 크기가 매우 작고 높은 정밀도가 요구되기 때문에 Z 축의 미소변위 이송성능은 C 축과 Z 축의 동기제어에 있어서 또 하나의 중요한 요소이다. Z 축의 미소변위 이송 성능 검증을 위해서 10um 의 미소변위에 대한 이송 실험을 수행하였다. 미소변위 이송을 위하여 정지된 상태에서 가속시간 30ms 의 급격한 램프 입력 후 오버슈트, 정착시간 및 정상상태 오차를 분석하였다. 미소변위에 대한 이송 실험 결과는 Fig. 6 및 Table. 1 에 제시한 바와 같으며 제안한 제어기를 사용한 경우 PID 제어에

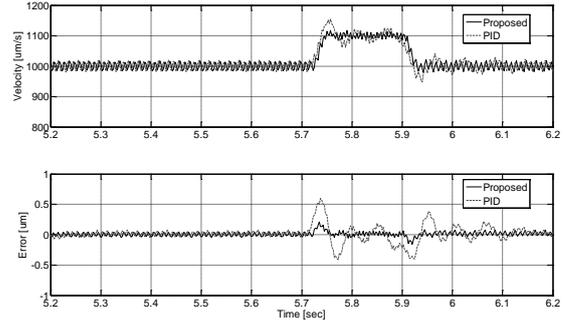


Fig. 5 Experimental result: velocity and tracking error

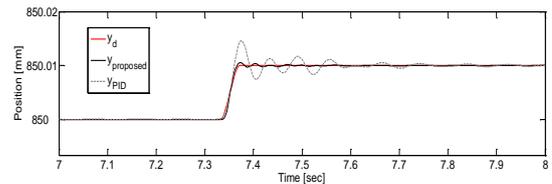


Fig. 6 Experimental result: tracking of 10um displacement

Table. 1 Experimental result: tracking of 10um displacement

	PID controller	Proposed controller
Overshoot	35.7%	1.2%
Settling time	0.71sec	0.18sec
Steady-state error	0.03um	0.02um

비해 오버슈트 및 정착시간이 크게 감소하였음을 확인하였다.

### 4. 결론

본 연구에서는 2m 급 롤 금형 가공기의 C 축과 Z 축의 동기제어 성능 향상을 위하여 Z 축 서보계의 특성을 분석하고 보상기를 설계하였다. 리니어 모터로 구동되는 Z 축의 전자기 현상에 의한 힘 리플 특성을 분석하고 이를 절대위치에 대한 정현파 함수로 모델링하여 보상기를 설계하였으며, Z 축의 주파수 응답을 도출하여 시스템의 전달함수를 도출하고 이를 기반으로 앞먹임 방식인 ZPET 제어기를 설계하여 PID 제어기와 함께 TDF 형태의 제어기를 구성하였다. 제안한 제어기를 적용한 성능검증 실험에서 Z 축의 빠른 가감속 제적 및 미소변위 이송에 대한 추종성능이 크게 향상되었음을 확인하였다.

### 참고문헌

- 오정석, 심종엽, 김병섭, 황주호, 송창규, 박천홍, “2m 급 초정밀 롤 금형 가공기 개발,” 한국정밀공학회 추계학술대회, 2009.
- 황범수, 전도영, “외란관측자를 이용한 롤 금형 가공기의 제어기 개발,” 한국정밀공학회 추계학술대회, 2009.
- E. Schrijver and J. van Dijk, “H $\infty$  Design of Disturbance Compensators for Cogging Forces in a Linear Permanent Magnet Motor”, Journal A, vol.40, no.4, pp.36-41, 1999.
- L. Xu and B. Yao, “Adaptive Robust Precision Motion Control of Linear Motors with Ripple Force Compensations: Theory and Experiments” in Proc. of IEEE Conf. on Control applications, pp. 373-378, 2000.
- 박기양, 전도영, “서보시스템의 지능적 마찰보상 연구”, 한국 기계학회지, 제 22 권, 제 7 호, 1998.