

외란관측자를 이용한 롤 금형 가공기의 제어기 개발 Development of the Roll Die Machine Controller Using the Disturbance Observer

*황범수¹, #전도영¹

*B. S. Hwang¹, #D. Y. Jeon(dyjeon@sogang.ac.kr)¹

¹서강대학교 기계공학과

Key words : Roll die machine, Disturbance observer

1. 서론

대형 LCD 분야에서의 대면적화와 저가화에 따라 광학 필름의 저가 양산화를 위해 롤 성형 방법이 주목받고 있다. 이에 초점을 두어 한국기계연구원에서는 롤을 기계 가공을 통하여 제작할 수 있도록 롤 금형 가공기를 개발하였다 [1]. 롤 금형 가공기 시스템은 주축인 C축이 등속회전하고 직선 이송축인 Z축이 등속 이송하여 프리즘 패턴을 제작한다. 롤 금형의 패턴의 질은 성형되어 나오는 제품에 영향을 주기 때문에 롤 금형을 가공하는 과정에 있어서 패턴의 질을 높이기 위한 노력이 필요하다. 이러한 패턴의 질을 높이기 위해서는 C축과 Z축의 등속성을 유지하여 절삭면에 걸리는 절삭력이 일정하게 되도록 유지하면서 패턴의 크기와 간격이 일정하게 해야한다. 그러나 롤 가공기는 기계가 매우 크며 각종 펌프 및 구동기 때문에 외란에 대하여 매우 취약하다는 단점이 있다. 이러한 외란은 주변의 환경에 대하여 민감하게 반응하기 때문에 PID 제어기만으로는 성능에 한계가 있으며 노치필터 (Notch Filter)와 같은 고정된 주파수의 외란 보상기를 도입하였을 경우 불안정해 질 수 있다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 롤 금형 가공기의 외란에 대하여 외란관측자 (Disturbance Observer)를 적용하여 제어기의 성능을 높였다. 제어기 개발은 Z축에 대하여 이루어 졌으며 향후 C축 및 X축으로 확대 적용할 예정이다.

2. 시스템 분석

Z축은 유정압 베어링을 사용하고 있기 때문에 이송에 있어서 마찰, 댐핑 등의 감쇠효과는 거의 무시할 수 있으므로, 단순질량 시스템으로 가정할 수 있다. 모델의 확인을 위해 0.5Hz부터 20Hz의 주파수를 가지는 진폭 1V의 정현파를 입력하였다. 그 결과 Fig. 2에서와 같은 주파수 응답을 얻을 수 있었다. 주파수 응답의 위상차가 전 주파수 영역에서 -180도로 일정하므로 단순 질량 시스템으로 생각할 수 있다. 실험 결과에 곡선회귀를 사용한 결과 식 (1)과 같은 시스템 전달함수를 구할 수 있다.

$$G_p(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = \frac{93.36}{s^2} \quad (1)$$

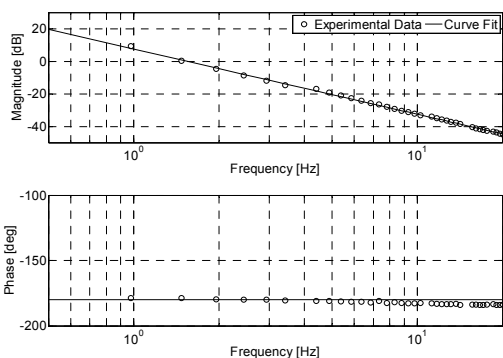


Fig. 1 Frequency response of the system

3. 외란관측자 설계

외란관측자는 시스템 모델을 기반으로 측정된 시스템 출력으로부터 외란을 예측하고 이를 보상하는 역할 및 시스템 모델 내의 불확정성을 보상하여 시스템이 등가모델처럼 거동하도록 하는 역할을 한다. 따라서 외란관측자를 적용함으로써 제어기의 정밀도를 향상시킬 수 있으며, 제어기의 강인성을 높여 실제 시스템이 설정한 등가모델과 같이 거동하도록 함으로써 앞먹임 제어기와 같은 모델기반의 정밀 제어를 적용할 수 있도록 해준다.

Fig. 2는 외란관측자를 포함한 전체 시스템의 블록선도를 나타낸다. G_n^{-1} 은 시스템의 등가모델의 역을 나타내며 연속시간에서 다음과 같이 설정할 수 있다.

$$G_n^{-1}(s) = \frac{s^2}{93.36} \quad (2)$$

식 (2)를 0.5ms 샘플시간에 대해 ZOH 방법으로 이산화 시키면 다음과 같다.

$$G_n^{-1}(z^{-1}) = \frac{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}{1.167 \times 10^{-5} z^{-1} (1 + z^{-1})} \quad (3)$$

식 (3)은 $z = -1$ 에 극점을 지니게 되므로 이는 외란관측자의 출력을 불안정하게 한다. 따라서 본 논문에서는 외란관측자의 안정성을 향상시키기 위해서 $z = -1$ 의 극점을 소거한 형태의 등가모델인 G_n^{+1} 을 이용한다.

$$G_n^{+1}(z^{-1}) = \frac{1 - 2z^{-1} + z^{-2}}{1.167 \times 10^{-5} z^{-1}} \quad (4)$$

외란관측자의 전달함수를 분석하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$y = \frac{G_p}{1 - Q + QG_n^{-1}G_p} u + \frac{G_p(1 - Q)}{1 - Q + QG_n^{-1}G_p} d + \frac{G_p Q}{1 - Q + QG_n^{-1}G_p} \xi \quad (5)$$

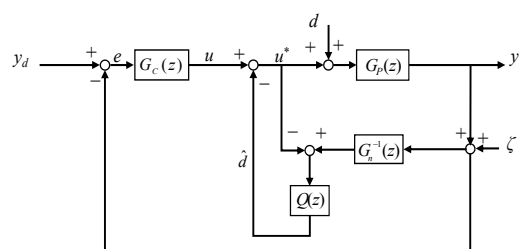


Fig. 2 Block diagram of the system including DOB

Q 필터는 외란관측자의 전달함수를 실현 가능하도록 하는 역할을 하며, 외란관측자의 성능에 밀접한 관계를 갖는다. 예를 들어 식 (5)에서 $Q = 1$ 이고 $G_n = G_p$ 이면 시스템 출력 y 에 대한 외란 d 의 영향이 제거됨을 확인할 수 있다. 롤 금형 가공기 시스템에서 제거하고자 하는 외란의 주파수 영역은 실험 결과로부터 0~70Hz 이므로, 저역통과필터 형식의 Q 필터를 설계한다. Q 필터는 평탄도가 좋은 Butterworth 2차 필터를 사용하며 70Hz의 정지주파수를 갖도록 연속 시간상에서 식 (6)과 같이 설계했다.

$$Q(s) = \frac{1.934 \times 10^5}{s^2 + 622s + 1.934 \times 10^5} \quad (6)$$

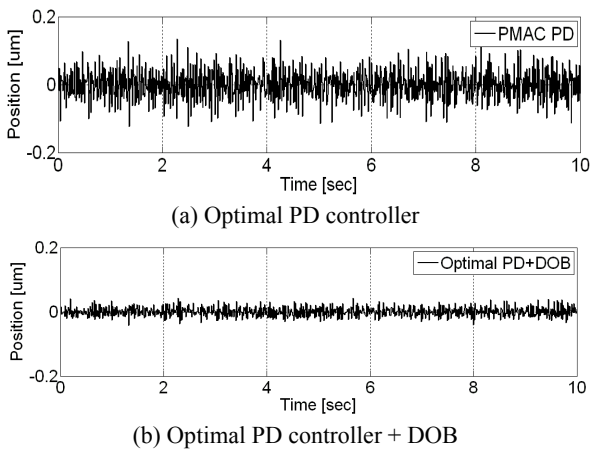


Fig. 3 Position errors for static condition

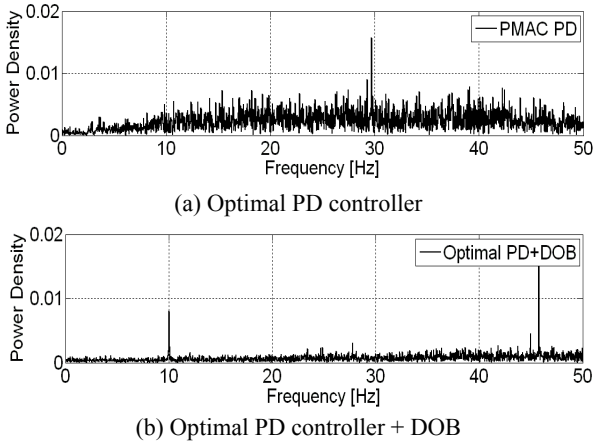


Fig. 4 FFTs for static condition

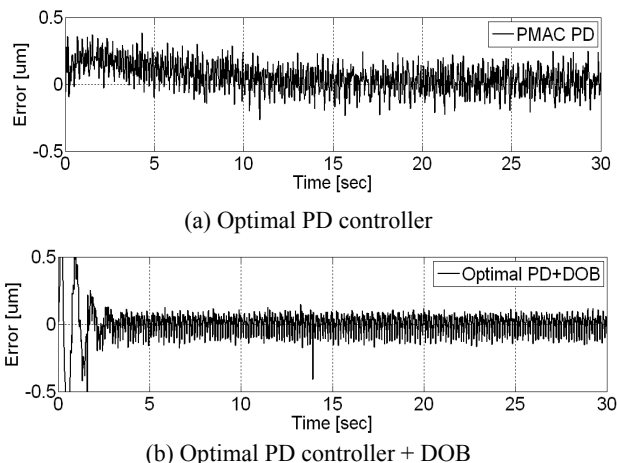


Fig. 5 position errors for 0.2mm/s motion trajectory

이산화 된 Q 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$Q(z^{-1}) = \frac{0.0207z^{-1}(1+z^{-1})}{1-1.691z^{-1}+0.7327z^{-2}} \quad (7)$$

4. 실험

제안된 Optimal PD+DOB 제어기의 성능을 직접 검증하기 위하여 롤 금형 가공기에 제안된 제어기를 적용하고, 실험적으로 튜닝된 PMAC PD제어기의 성능과 비교하는 실험을 수행했다. 실험은 시뮬레이션과 마찬가지로 정적상태 유지성능과 0.2mm/s 등속궤적에 대해 수행되었다.

Fig. 3과 4는 정적상태 유지실험의 결과를 보여준다. Fig.3에서 두 제어기의 최대 위치오차의 크기를 비교해보면 제안된 제어기의 경우 약 0.04µm로 약 0.13µm의 크기를 갖는 PMAC PD제어기에 의한 오차의 30.7% 수준으로 줄어들었음을 알 수 있다. 또한, FFT를 통해 위치오차를 주파수 영역에서 분석한 Fig. 4를 살펴보면 제안된 제어기에 의해 0~50Hz 저주파 외란의 영향이 크게 감소되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 0.2mm/s 등속궤적 실험의 결과를 나타내고 있다. 실험 초반에는 과도응답에 의해 제안된 제어기의 위치오차가 더 크지만 약 10초 이후에는 정상상태에 도달하면서 약 0.25µm 크기의 위치오차를 가짐으로써 0.4µm의 오차크기를 갖는 PMAC PD제어기보다 더 정밀한 궤적추종이 가능함을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 롤 금형 가공기의 직선 이송축인 Z축의 서보제어기를 설계하였다. 기본적인 되먹임 제어기로 PD제어기를 적용하였으며, DLQR 방법을 이용하여 제어기 계수를 최적화 하였다. 정밀한 위치제어를 위해서는 외란과 모델오차의 영향을 최소화 하는 강인제어기가 필요하므로 외란관측자를 설계하여 적용했다. 외란관측자의 안정성을 높이기 위하여 이산영역에서의 등가 모델의 차수를 줄임으로써 단위원 가까이 있는 극점을 제거했다. 제안된 제어기의 성능을 검증하기 위하여 정적상태 유지 및 등속 궤적 추종에 대한 시뮬레이션과 실험을 수행했다. 그 결과 외란관측자를 적용하는 경우 외란의 영향을 효과적으로 상쇄함으로써 제어기의 성능이 향상됨을 확인할 수 있었다. 앞으로 롤 금형 가공기의 Z축 이외에 C축 및 X축에도 본 제어기를 확대 적용할 예정이다.

참고문헌

1. 오정석, 황주호, 박천홍, "초정밀 롤 금형 가공기 개발," 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, 465-466, 2007.
2. Heui-Wook Kim, Seung-Ki Sul, "A New Motor Speed Estimator Using Kalman Filter in Low Speed Range," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 40, 498-504, 1996.
3. M. Tomizuka, "Zero Phase Error Tracking Algorithm for Digital Control," *Transactions on Dynamic System, Measurement and Control*, 109, 1, 65-68, 1987.
4. C. J. Kempf and S. Kobayashi, "Disturbance Observer and Feedforward Design for a High Speed Direct Drive Positioning Table," *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 7, 5, 513-526, 1999.
5. E. Gross, M. Tomizuka and W. Messner, "Cancellation of Discrete Time Unstable Zeros by Feedforward Control," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, 116, 33-38, 1994.