Check for updates

Journal of KIIT. Vol. 20, No. 1, pp. 87-93, Jan. 31, 2022. pISSN 1598-8619, eISSN 2093-7571
http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2022.20.1.87

공작기계 이송시스템의 기계 공진 억제를 위한 공진 주파수 측정

박성문*, 김진순**, 최준영***

Resonance Frequency Measurement to Suppress Mechanical Resonance of Machine Tool Feed Drive System

Sung-Mun Park*, Jin-Sun Kim**, and Joon-Young Choi***

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE) 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임 (No. 20012815).

요 약

본 논문에서는 공작기계 이송시스템에서 노치 필터 기반 기계 공진 억제를 위한 공진 주파수 측정 방법을 구현한다. 실제 이송시스템과 유사한 환경에서 모의실험을 수행하기 위해 Matlab-Simulink를 이용하여 공작기계 이송시스템 모델을 개발한다. 공진 억제 방법으로 주로 사용되는 노치 필터를 설계하기 위한 공진 주파수 측정을 위해 정현파 스윕 신호 입력을 속도 제어기에 적용하고 주파수 응답을 분석한다. 구현된 Matlab-Simulink 모델과 공진 주파수 측정 방법을 기반으로 공작기계 이송시스템의 공진 주파수를 측정하고 노치 필터를 설계하여 기계 공진을 억제하는 모의실험을 수행한다. 모의실험 결과 공작기계 이송시스템의 공진 주파수가 가속도 센서를 이용한 측정 결과와 유사한 것을 검증하고 설계된 노치 필터를 적용하여 기계 공진이 억제된 것을 검증한다.

Abstract

In this paper, we implement a method for measuring resonance frequency to suppress mechanical resonance based on a notch filter in a machine tool feed drive system. The machine tool feed drive system model is developed using Matlab-Simulink to conduct simulation in an environment similar to the actual feed drive system. In order to measure the resonance frequency for designing a notch filter which is usually used as a resonance suppression method, a swept sinusoidal signal input is applied to a speed controller, and a frequency response is analyzed. Based on the implemented feed drive system model and resonance frequency measurement method, a simulation is conducted to measure the resonance frequency and suppress mechanical resonance by designing the notch filter. The simulation results verify that the measured resonance frequency is highly close to the actual one measured by an acceleration sensor and the mechanical resonance is significantly suppressed by applying the designed notch filter.

Keywords
machine tool feed drive system, mechanical resonance, resonance frequency, notch filter

* 부산대학교 기계기술연구원 연구원
- ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5946-8279
** 부산대학교 전기전자공학과 석사과정
- ORCID: http://orcid.org/0000-0002-6317-4759
*** 부산대학교 전자공학과 교수(교신저자)
- ORCID: http://orcid.org/0000-0002-5160-3739

· Received: Dec. 15, 2021, Revised: Jan. 05, 2022, Accepted: Jan. 08, 2022
· Corresponding Author: Joon-Young Choi
Dept. of Electronic Engineering, Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan, 46241, Korea,
Tel.: +82-51-510-2490, Email: jyc@pusan.ac.kr

Ⅰ. 서 론

고속, 고정밀도를 실현할 수 있는 고성능 모터 기반 모션 제어 시스템은 산업용 로봇, 공작기계, 풍력 발전기 등 다양한 산업 응용 분야에 사용되고 있다[1][2]. 그 중, 공작기계는 기어, 항공우주 재료, 집적 회로 부품 등과 같은 정밀 가공에 주로 사용되고 있다[3]. 공작기계의 중요 부분 중 하나인 이송시스템은 공작기계의 정확도와 안정성, 신뢰성 및 가공 효율을 결정한다[4].

특히 이송시스템에서 발생하는 진동은 공작기계의 높은 가공 성능을 달성하기 위한 중요한 요소 중 하나로 이송시스템의 위치 추적 성능에 영향을 준다. 진동으로 인한 위치 추적 성능 저하는 가공물 품질을 저하시키고 공구의 손상과 마모를 발생시켜 공작기계 수명을 단축시키는 요인이 된다[5][6].

이러한 진동을 억제하기 위한 방법으로는 필터 적용 방법, 입력 성형 방법, 상태변수 측정 및 추정 방법, 최신 제어 기법 적용 방법이 있다. 필터 적용 방법은 속도 제어기에 저역 통과 필터나 노치 필터를 적용하여 특정 주파수에서 진동하는 공진 성분을 제거하는 방법이고, 입력 성형 방법은 진동으로 인해 발생하는 위치 오차를 보상하기 위해 위치 지령을 진동에 맞춰 수정하는 방법이다. 상태변수 측정 및 추정 방법은 센서나 관측기를 이용하여 측정한 상태변수를 기반으로 피드백 또는 피드포워드 제어를 통해 진동을 제거하고, 최신 제어 기법 적용 방법은 퍼지 제어나 슬리이딩 모드 제어 등과 같은 비선형 제어기나 적응 제어기를 사용하는 방법이다[7]. 진동 억제 방법 중에서 필터 적용 방법은 구현이 용이하고 쉽게 적용하여 사용할 수 있으므로 노치 필터를 이용한 억제 방법이 주로 사용되고 있다[8].

노치 필터 기반 공진 억제 방법은 노치 필터로 제거할 공진 주파수의 측정이 필요하다. 공진 주파수 측정을 위한 방법으로는 가속도 센서를 선반이나 작업 공구에 부착하고 측정된 가속도 값에 FFT(Fast Fourier Transform)를 적용하여 주파수 응답을 분석한다[9]. 그러나 이러한 방법에서는 가속도 센서나 진동 측정을 위한 별도의 센서가 필요하고 센서 신호를 얻기 위한 추가적인 통신이 구축되어야 한다.

한편 진동 측정 및 억제 방법 등을 포함한 다양한 제어 방법들을 실제 이송시스템에 적용하여 실험하는 데는 많은 시간과 비용이 필요하다[6][10]. 또한, 이송시스템의 제어 특성과 오류를 발생시키는 인자를 제거하거나 분석하기 위해서는 가능한 실제 시스템과 유사한 모의실험 모델의 개발이 필요하다[11].

이러한 2가지 상황을 고려하여 본 논문에서는 이송시스템 모의실험 모델을 개발하고 노치 필터 기반 기계 공진 억제를 위한 공진 주파수 측정 방법을 구현한다. 이송시스템 모의실험 모델은 Matlab-Simulink를 기반으로 물리 시스템을 실험하기 위한 도구인 Simscape를 이용하여 구현한다. 공진 주파수를 측정하기 위한 방법으로 정현파 스윕 신호를 속도 제어기에 추가하고 주파수 응답을 분석하는 FANUC 사의 방법을 사용하여 별도의 진동 측정 센서 없이 공진 주파수를 측정한다[12]. 측정된 공진 주파수를 기반으로 노치 필터를 설계하여 모의실험 모델에 적용하고 모의실험을 수행하여 설계된 노치 필터의 성능을 검증한다.

전체 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 공작기계 이송시스템 모델에 관한 내용을 기술한다. 3장에서는 노치 필터를 위한 공진 주파수 측정 방법과 노치 필터 설계 방법을 기술한다. 4장에서는 Matlab-Simulink 기반의 모의실험 환경을 구축하고 모의실험을 통해 공진 주파수 측정 방법의 성능을 검증한다. 마지막으로 5장에서는 결론을 도출한다.

Ⅱ. 공작기계 이송시스템 모델

본 장에서는 Matlab-Simulink 기반 모의실험을 위한 공작기계 이송시스템 모델을 개발한다. 이송시스템은 공작기계 제어기가 생성한 위치 지령에 따라 공작기계 축의 위치와 속도를 제어하여 원하는 곳으로 공구나 작업선반을 이동시키는 역할을 한다.

그림 1은 공작기계 이송시스템의 구조를 나타낸다. 그림 1에서 보는 것과 같이 이송시스템의 구조는 서보 제어와 기계 구조로 구분된다. 서보 제어 구조는 인버터와 제어기, 센서로 구성된다.

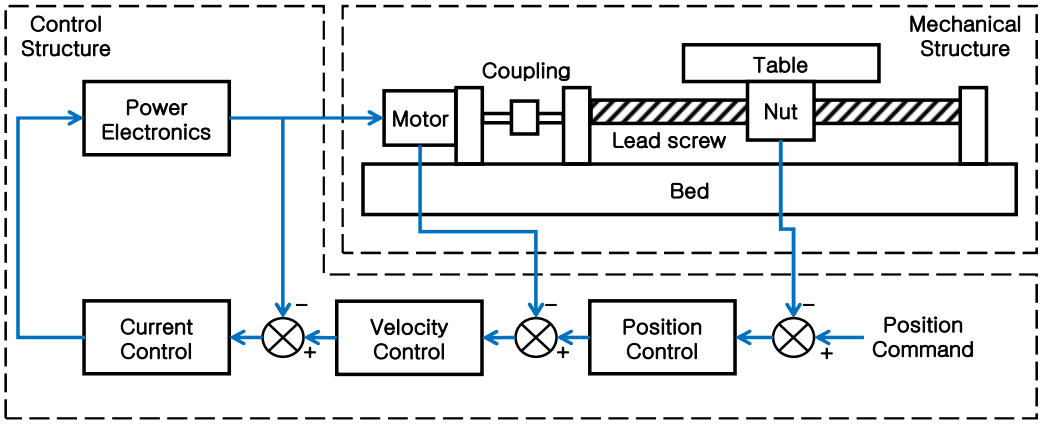


그림 1. 공작기계 이송시스템 구조
Fig. 1. Machine tool feed drive system architecture

작업선반의 위치 측정을 위한 리니어 엔코더와 모터의 속도 측정을 위한 로터리 엔코더, 전류 센서를 이용하여 피드백 신호를 측정하고 제어기를 동작시켜 인버터를 통해 모터를 구동한다. 기계 구조는 리드 스크류, 커플링, 모터, 작업선반 등으로 구성되며 서보 제어를 통해 모터가 구동되면 커플링과 연결된 리드 스크류가 동작하여 작업선반이 이동한다.

일반적으로 이송시스템에서 모터와 리드 스크류는 커플링으로 강하게 연결되어 있고 너트와 작업선반도 강하게 연결되어 있다고 가정하고 리드 스크류와 너트는 강하게 연결되어 있지 않다고 가정한다. 이러한 구조에서 이송시스템은 모터와 리드 스크류를 합친 관성과 작업선반의 관성으로 나누는 이관성 시스템으로 간주된다[13]. 이관성 시스템은 간단한 구조이기 때문에 모터의 전기적 토크에 대한 각속도의 전달함수를 구할 수 있고 전달함수의 극점을 구하면 공진 주파수를 쉽게 계산할 수 있다. 그러나 실제 이송시스템은 모터와 리드 스크류, 너트가 강하게 연결되어 있지 않고 서로 영향을 주기 때문에 이관성 시스템보다 더 정확한 이송시스템 모델이 필요하다.

실제 이송시스템과 유사한 모의실험 모델을 위해 Matlab-Simulink를 기반으로 Simscape 도구를 이용한다. Simscape는 Simulink 상에서 물리 시스템을 구현하기 위한 블록을 제공하고 있다. 이송시스템의 기계 구조 부분을 구현하기 위해 PMSM 블록과 모터의 관성 블록, 커플링 강성을 위한 스프링 블록, 리드 스크류 블록을 사용한다. 리드 스크류 블록은 직선 운동과 회전 운동의 변화에 대한 효율을 설정하여 마찰력의 효과를 주기 때문에 별도의 마찰력 블록을 사용한다. 또한, 작업선반을 구현하기 위한 질량, 강성, 댐퍼 블록을 사용하고, 베드를 구현하기 위한 질량, 강성, 댐퍼 블록을 사용한다. 작업선반의 위치는 리니어 엔코더 블록을 사용하여 측정하고, 모터의 속도는 로터리 엔코더를 사용하여 측정한다.

이송시스템의 서보 제어 구조는 모터를 구동시키기 위한 인버터와 SVPWM 블록, PI 전류 제어기, PI 속도 제어기, P 위치 제어기를 사용한다. 실제 서보 제어 시스템에서는 전류 제어기와 속도 및 위치 제어기가 다른 주기로 동작하고 있어 샘플링 속도 변환 블록을 추가하여 전류 제어기가 속도 및 위치 제어기보다 더 빠른 속도로 동작할 수 있도록 한다. 개발된 이송시스템 모의실험 모델은 그림 2와 같다.

III. 노치 필터를 위한 공진 주파수 측정

3.1 공진 주파수 측정

이송시스템의 공진 주파수를 측정하기 위해서는 일반적으로 진동을 측정할 수 있는 가속도 센서를 기계 구조에 부착하고 측정된 가속도를 이용하여 주파수 응답을 구한다. 그러나 이러한 방법에서는 별도의 진동 센서가 필요하고 센서를 직접 작업선반에 부착 후 측정하기 때문에 잦은 고장이 발생한다.

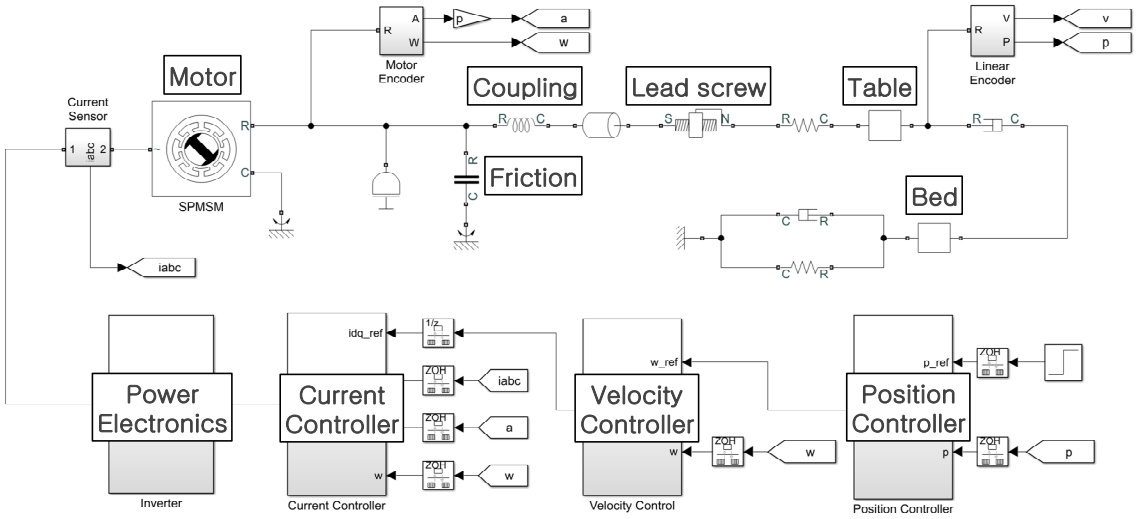


그림 2. 개발된 모의실험 모델
Fig. 2. Developed simulation model

이러한 문제를 해결하기 위해 진동 센서 없이 추가적인 신호 입력을 이용한 공진 주파수 측정 방법을 사용한다[12].

공진 주파수를 측정하기 위해서는 이송시스템의 주파수 응답을 분석해야 한다. 주파수 응답을 분석하기 위한 대표적인 방법은 시스템의 전달함수를 구하는 것이지만 이송시스템과 같은 복잡한 시스템은 전달함수를 구하는 것이 어렵다. 따라서 정현파 스윕 신호를 입력하고 FFT를 적용하여 주파수 응답을 구하는 방법을 사용한다[14].

그림 3은 이송시스템의 공진 주파수를 측정하기 위한 방법을 나타낸다. 그림 3에서 보는 것과 같이 속도 제어기 출력인 토크 지령에 정현파 스윕 신호를 입력하고 입력한 신호가 포함되지 않은 토크 지령을 출력한다.

그림 4는 공진 주파수 측정 결과를 나타낸다. 그림 4(a)에서 보는 것과 같이 정현파 스윕 신호는 정현파의 주파수를 대수적으로 증가하도록 하여 주파수가 시간에 지수적으로 비례해서 증가하는 신호다. 그림 4(b)에서 보는 것과 같이 측정한 토크 지령에는 입력한 정현파 스윕 신호의 주파수 영역에 해당하는 시스템 응답이 포함되어 있다. 측정한 토크 지령은 입력한 신호의 크기에 따라 양수와 음수를 모두 나타내기 때문에 토크 지령의 포락선을 추출하여 상단 부분을 주파수 응답으로 사용한다.

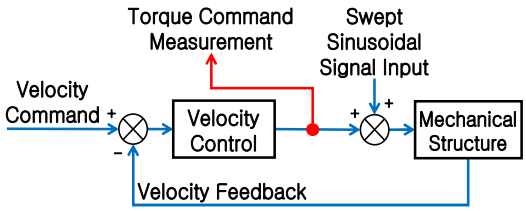
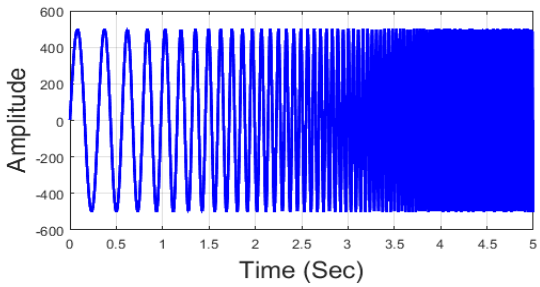
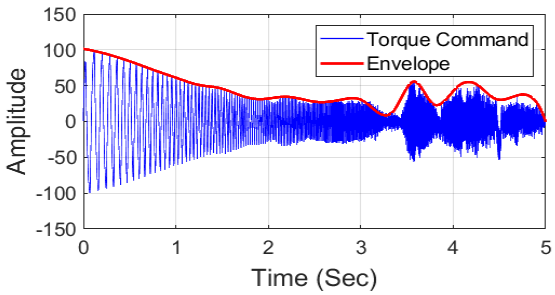


그림 3. 공진 주파수 측정
Fig. 3. Resonance frequency measurement



(a) 정현파 스윕 신호
(a) Swept sinusoidal signal



(b) 토크 지령 출력
(b) Torque command output

그림 4. 공진 주파수 측정 결과
Fig. 4. Resonance frequency measurement result

측정한 주파수 응답에서 갑자기 크게 증가하는 부분을 공진이 발생하는 부분으로 판단하고 해당 영역의 주파수를 공진 주파수로 추정한다.

3.2 노치 필터 설계

측정한 공진 주파수를 이용하여 노치 필터를 설계하고 이송시스템의 공진을 억제한다. 노치 필터는 특정 주파수 영역에서 급격한 감쇠 특성을 갖고 있는 필터로 불필요한 주파수 성분을 제거하는 목적으로 사용된다. 노치 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$N(s) = \frac{s^2 + 2\zeta_n \omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta_n \kappa_n \omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

여기서, ω_n은 제거해야 하는 주파수인 노치 주파수이고, ζ_n은 주파수 범위를 나타내는 노치 폭, κ_n은 노치 주파수에서의 크기를 나타낸다[8]. 측정한 공진 주파수와 크기를 바탕으로 3가지 파라미터를 조절하여 노치 필터를 설계한다. 설계된 노치 필터는 속도 제어기 출력에 적용하여 공진 주파수 성분을 제거한다.

Ⅳ. 모의실험

4.1 모의실험 환경

모의실험은 2장에서 개발된 Matlab-Simulink 모델을 기반으로 수행한다. 모의실험에서 사용한 이송시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. 이송 시스템 파라미터
Table 1. Feed drive system parameters

Parameter	Value (Unit)
Motor inertia	0.04 (kg·m^2)
Coupling stiffness	8520 (N·m/rad)
Lead screw inertia	0.00823 (kg·m^2)
Lead screw damping	1.95 (N·s/m)
Table mass	138 (kg)
Table stiffness	1.95X10^8 (N/m)
Table damping	500 (N·s/m)
Bed mass	570 (kg)
Bed stiffness	1.83X10^6 (N/m)
Bed damping	800 (N·s/m)

공진 주파수 측정을 위해 입력한 정현파 스윕 신호의 주파수는 5초 동안 10Hz에서 300Hz까지 대수적으로 증가시킨다. 위치 지령은 100cm의 계단 입력을 인가한다. 공진 주파수의 측정값을 검증하기 위해 정현파 스윕 신호 입력으로 측정한 주파수 응답과 작업선반의 가속도를 측정하고 측정한 가속도를 FFT하여 얻은 주파수 응답[9]을 비교한다. 정현파 스윕 신호를 인가한 경우 위치 제어기의 이득은 1로 설정하여 위치 루프의 영향이 없도록 설정하고, 가속도를 측정하는 실험의 경우 위치 제어기의 이득은 기존 값인 50000으로 설정한다.

4.2 모의실험 결과

그림 5는 정현파 스윕 신호 입력 방법의 공진 주파수 측정 결과를 나타낸다. 그림 5에서 보는 것과 같이 측정된 공진 주파수는 총 2개로 140Hz와 229Hz이다. 측정한 공진 주파수를 검증하기 위해 작업선반의 가속도를 측정하고 FFT하여 얻은 주파수 응답과 비교한다.

그림 6은 가속도를 이용하여 측정한 주파수 응답을 나타낸다. 그림 6에서 볼 수 있듯이 가속도를 이용하여 측정된 공진 주파수는 145Hz와 217Hz로 정현파 스윕 신호 입력 방법으로 측정된 공진 주파수와 유사한 것을 확인할 수 있고, 이는 정현파 스윕 신호 입력을 이용한 공진 주파수 측정 방법이 가속도 센서 없이도 공진 주파수를 정확히 측정하는 것을 검증한다.

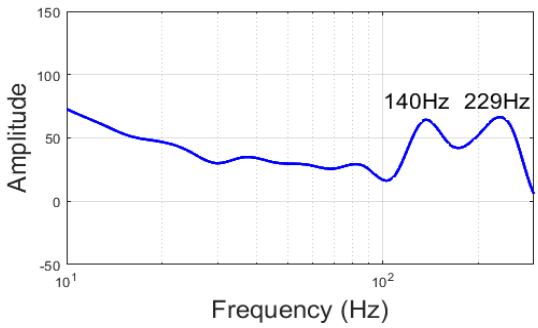


그림 5. 정현파 스윕 신호를 이용한 공진 주파수 측정 결과
Fig. 5. Resonance frequency measurement using swept sinusoidal signal

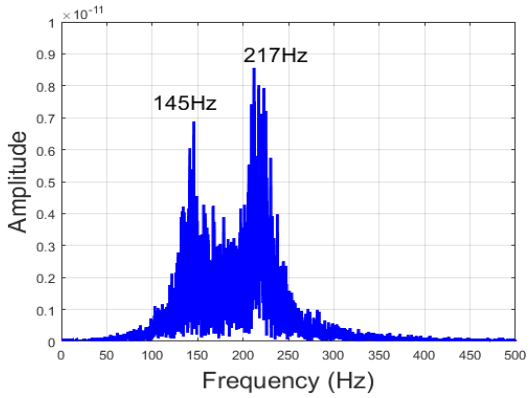


그림 6. 가속도를 이용한 공진 주파수 측정 결과
Fig. 6. Resonance frequency measurement using acceleration

측정된 2개의 공진 주파수 성분을 제거하기 위해 2개의 노치 필터를 설계한다. 첫 번째 노치 필터는 주파수는 140Hz, 크기는 0.3, 폭은 0.1로 설계하고, 두 번째 노치 필터는 주파수는 230Hz, 크기는 0.3, 폭은 0.1로 설계한다. 설계한 2개의 노치 필터는 속도 제어기 출력에 적용한 후 측정한 주파수 응답은 그림 7과 같다. 그림 5와 7을 비교하면 140Hz 영역에서의 크기가 62.76에서 53.54로 14.69%가 감소한 것과 230Hz 영역에서의 크기는 65.81에서 55.08로 16.30%가 감소한 것을 확인할 수 있고, 이는 설계한 노치 필터가 기계 공진을 억제하는 것을 검증한다.

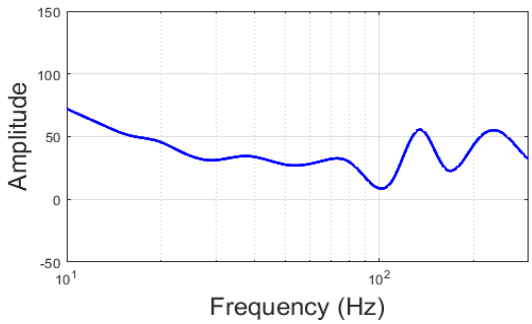


그림 7. 노치 필터를 적용한 후 주파수 응답
Fig. 7. Frequency response after applying notch filter

V. 결 론

본 논문에서는 Matlab-Simulink를 기반으로 실제 이송시스템과 유사한 환경의 모의실험 모델을 개발하고 노치 필터를 기반으로 기계 공진을 억제하기 위해 공진 주파수 측정 방법을 구현하였다. 개발된 모의실험 모델은 이송시스템의 기계 구조를 바탕으로 모터, 리드 스크류, 커플링, 너트, 작업선반, 베드를 구현하고 서보 제어 구조에서 다중 주기 동작을 구현하여 실제 이송시스템과 유사한 환경으로 구현하였다.

또한, 별도의 진동 센서가 없이 공진 주파수를 측정할 수 있도록 속도 제어기 출력인 토크 지령에 대수적 정현파 스윕 신호를 입력하고 입력 신호가 포함되지 않은 토크 지령을 측정하여 이송시스템의 주파수 응답을 분석하였다. 정현파 스윕 신호 입력으로 측정한 주파수 응답과 작업선반의 가속도를 측정하고 FFT하여 얻은 주파수 응답을 비교하여 정현파 스윕 신호 입력 방법의 성능을 검증하였다. 또한, 측정한 공진 주파수를 기반으로 공진 주파수 성분을 제거하기 위한 노치 필터를 설계하여 설계된 노치 필터의 성능을 검증하였다.

References

[1] R. Yang, et al., "Robust predictive current control of PMLSM with extended state modeling based Kalman filter: for time-varying disturbance rejection", IEEE Trans. Power Electron, Vol. 35, No. 2, pp. 2208-2221, Feb. 2019. https://doi.org/10.1109/TPEL.2019.2923631.

[2] S. Brock et al., "Two approaches to speed control for multi-mass system with variable mechanical parameters", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 64, No. 4, pp. 3338-3347, Apr. 2017. https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2598299.

[3] C. Y. Lin and C. H. Lee, "Remote servo tuning system for multi-axis CNC machine tools using a virtual machine tool approach", Applied Sciences, Vol. 7, No. 8, pp. 776-796, Jul. 2017. https://doi.org/10.3390/app7080776.

[4] S. Yun, O. Sim, U. Ri, and J. Rim, "Modeling and simulation of servo feed system of CNC machine tool based on Matlab/Simulink", viXra, pp. 1-5, May 2018.

[5] Y. J. Kim et al., "Effects of Design Alterations on the Vibration Suppression of a Machine Tool

Structure", Journal of KSMPE, Vol. 15, No. 3, pp. 122-129, Jun. 2016. https://doi.org/10.14775/ksmpe.2016.15.3.122.

[6] S. M. Park, Y. W. Sung, Y. W. Kwon, and J. Y. Choi, "Analysis of Vibration Characteristics through Modeling and Simulation of CNC Machine Tool", CICS'20, Jeju, Korea, pp. 113-114, Oct. 2020.

[7] Y. Chen et al., "Analysis of oscillation frequency deviation in elastic coupling digital drive system and robust notch filter strategy", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 66, No. 1, pp. 90-101, Jan. 2018. https://doi.org/10.1109/TIE.2018.2825300.

[8] C. C. Liu, M. S. Tsai, M. Q. Hong, and P. Y. Tang, "Development of a Novel Tuning Approach of the Notch Filter of the Servo Feed Drive System", Journal of JMMP, Vol. 4, No. 1, pp. 21-31, Mar. 2020. https://doi.org/10.3390/jmmp4010021.

[9] R. Sato, G. Tashiro, and K. Shirase, "Analysis of the coupled vibration between feed drive systems and machine tool structure", International Journal Autom. Technol., Vol. 9, No. 6, pp. 689-697, Nov. 2015. https://doi.org/10.20965/ijat.2015.p0689.

[10] Z. Pandilov et al., "Virtual modelling and simulation of a CNC machine feed drive system", Transactions of FAMENA, Vol. 39, No. 4, pp. 37-54, Jan. 2015.

[11] S. K. Ro, B. S. Kim, S. C. Lee, and C. K. Song, "Modeling and Simulation of Servo Drive Systems for Machine Tools", Proceeding of KSPE Spring Conference, Jeju, Korea, pp. 75-76, May 2012.

[12] FANUC, "FANUC AC SERVO MOTOR PARAMETER MANUAL", https://www.fanuc.com. [accessed: Dec. 14, 2021]

[13] D. H. Lee, J. H. Lee, and J. W. Ahn, "Mechanical vibration reduction control of two-mass permanent magnet synchronous motor using adaptive notch filter with fast Fourier transform analysis", IET Electric Power Applications, Vol. 6, No. 7, pp. 455-461, 2012. https://doi.org/10.1049/iet-epa.2011.0322.

[14] M. Kang and H. J. Kim, "A method of frequeney response analysis of mechanical system combining swept-sine and stepped-sine excitation", 2017 IEEE International Conference on RCAR, Okinawa, Japan, Jul. 2017. https://doi.org/10.1109/RCAR.2017.8311947.

저자소개

박 성 문 (Sung-Mun Park)

2014년 2월 : 부산대학교 전자전기공학부(공학사)
2016년 2월 : 부산대학교 전자전기컴퓨터공학과(공학석사)
2021년 8월 : 부산대학교 전기전자공학과(공학박사)
2021년 9월 ~ 현재 : 부산대학교 기계기술연구원 연구원
관심분야 : 임베디드 시스템, 제어 시스템

김 진 순 (Jin-Sun Kim)

2020년 8월 : 부산대학교 전기공학과(공학사)
2021년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 전기전자공학과 석사과정
관심분야 : 임베디드 시스템, 제어 시스템

최 준 영 (Joon-Young Choi)

1994년 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학사)
1996년 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
2002년 : 포항공과대학교 전자전기공학과(공학박사)
2005년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 전자공학과 교수
관심분야 : 임베디드 시스템, 제어 시스템