

전체 백래시 검출수단으로 사용될 수 있는 현상에 대한 분석

*백주현, 김지역, 김진천
넥스원퓨처(주) 연구소 기계그룹

Analysis on Phenomenon that can be used as Measures in Detecting Total Backlash

*J. H. Baek, Jie Eok Kim, Jin Cheon Kim
NEX1 Future Co., Ltd., R&D Center, Mechanical Group

Key words : Backlash, Phenomenon, Frequency Response Characteristics, Anti-resonant Frequency, Resonant Frequency

1. 서론

기어 감속기를 사용한 서보시스템은 기어 백래시와 관련된 많은 문제를 갖고 있으며, 기어 이 물림 시 적당한 크기의 백래시를 필요로 한다.

백래시가 작을 경우 원활한 전동이 어려워지고, 지나치게 클 경우 진동충돌(Vibro-impact) 증가로 마모 및 제어안정성 문제가 야기된다. 따라서, 기어 감속기를 사용한 서보시스템은 시스템의 성능진단, 유지와 보수를 위하여 시스템이 갖고 있는 백래시 크기의 변화를 감시 및 검출할 필요가 있다.

따라서, 지금까지 기어감속 서보시스템 내에 존재하는 기어 백래시를 검출하기 위한 많은 연구들이 수행되었다.

지금까지의 연구들에는 모터입력전압에 대한 모터각속도 출력으로 표현된 주파수응답선도에서 나타나는 반공진 및 공진주파수를 전체백래시 검출수단으로 사용한 적이 없었다.

전체백래시란 다단 기어감속 서보시스템에서 모터 피니언을 고정시켰을 때 최종부하단에서 측정되는 시스템 백래시의 전체 크기를 말한다.

비록 Baek, Kwak 과 Kim⁽¹⁾만이 백래시 검출수단으로 반공진 및 공진주파수 변화를 사용하였으나, 그들은 시스템의 전체백래시 크기를 검출한 것이 아니라 전체백래시 크기를 아는 경우 각 기어 감속단에 존재하는 각 단 백래시 크기만을 검출하는데 그쳤다. 그러나, 본 연구에서는 모터입력전압의 크기를 감소시키면 전체백래시 크기 변화에 대한 반공진 및 공진주파수의 변화량이 크게 발생할 수 있다는 현상을 발견하였으며, 발견된 현상이 전체백래시 검출수단으로 사용될 수 있는 잠재적 가능성이 있음을 보여주는 것이 본 연구의 목적이다.

이를 위하여 정성적 분석 및 실험을 수행하였으며, 분석의 편이를 위해 1 단 기어 감속기를 갖는 서보시스템을 고려하였다.

2. 정성적 분석

본 연구에서 고려된 1 단 기어감속 서보시스템은 Fig. 1 과 같다.

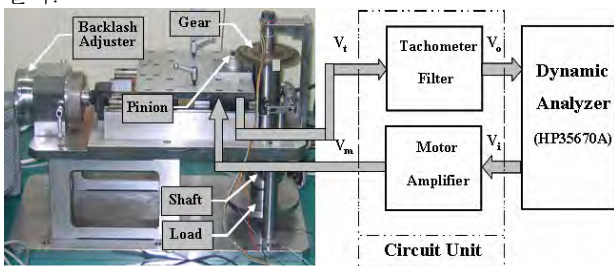


Fig. 1 The constitution diagram of a considered system

Bigley⁽²⁾에 의하면 기어감속 서보시스템의 주파수응답특성에서 나타나는 반공진 및 공진주파수는 다음과 같다.

$$f_{AR} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq, effect}}{J_L}} \quad (1a)$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq, effect}}{J_L J_m N^2 / (J_L + J_m N^2)}} \quad (1b)$$

여기서 f_{AR} 는 반공진주파수, f_R 는 공진주파수, $k_{eq, effect}$ 는 시스템 기어구동부의 유효등가 비틀림강성, J_L 는 부하의 회전관성모멘트, J_m 는 피니언을 포함한 모터 회전자의 회전관성모멘트이고, N 는 피니언과 기어 사이의 기어 비이다.

이때, 식(1)의 유효 등가비틀림강성은 다음과 같이 표현된다.

$$k_{eq, effect} = G_D(\delta, \theta_{d, max}) k_{eq} \quad (2)$$

여기서, $G_D(\delta, \theta_{d, max})$ 는 백래시 모델의 기술함수 이득, k_{eq} 는 시스템 기어구동부의 등가비틀림강성, δ 는 피니언과 기어 사이에 존재하는 백래시를 피니언 고정 시 기어 축에서 측정된 각도 백래시 크기의 1/2 이고, $\theta_{d, max}$ 는 각 전달오차의 진폭크기이다.

백래시 모델로는 백래시 모델로 주로 사용되는 데드존 모델을 사용하였으며, 백래시 모델의 기술함수 이득값 $G_D(\delta, \theta_{d, max})$ 은 다음과 같다.^(1,2)

$$G_D(\delta, \theta_{d, max}) = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\sin^{-1} \left(\frac{\delta}{\theta_{d, max}} \right) + \frac{\delta}{\theta_{d, max}} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{\theta_{d, max}} \right)^2} \right] \quad (3)$$

식(1), (2)와 (3)에 의해 백래시 크기가 변함에 따라 시스템의 반공진주파수 및 공진주파수가 변하게 된다.

Fig. 2 는 식(3)의 이득값을 $\theta_{d, max}/\delta$ 에 대해서 표현한 그림이다. Fig. 2 에서 점 A는 각 전달오차 진폭크기가 2.4°이고 백래시 크기가 0.2° 일 때 $\theta_{d, max}/\delta$ 의 값이 12 가 되어 0.9 의 이득 값을 갖는다. 만일 이 상태에서 백래시 크기가 0.3°로 0.1° 증가한다면 $\theta_{d, max}/\delta$ 값은 8 이 되어 백래시 이득 값이 0.84 로 감소하게 된다. 결국 0.1°의 백래시 증가에 대해 0.06 의 이득값 감소가 발생하며, 이 이득값의 감소로 인해 식(1)에 나타난 바와 같이 반공진 및 공진주파수가 감소하게 된다. 그러나, 이 경우 백래시 크기 증가에 대한 이득 값의 변화가 작아 이득값의 변화로 나타나는 반공진 및 공진주파수의 변화량도 작게 나타난다.

그러나, 점 B의 경우는 각 전달오차 진폭크기가 점 A 보다 작은 0.6°이고 백래시 크기는 점 A 와 동일한 0.2°라

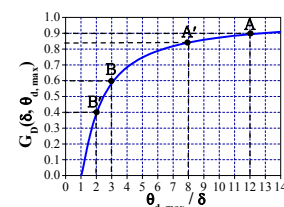


Fig. 2 The describing function gain of backlash model

할 때, $\theta_{d,max}/\delta$ 의 값은 3이 되며 0.6의 이득 값을 갖게 된다. 만일 이 상태에서 앞과 마찬가지로 백래시 크기만이 0.3° 로 0.1° 증가한다면 $\theta_{d,max}/\delta$ 값은 2가 되어 0.4의 이득 값을 갖는 점 B'으로 이동하게 된다. 이 경우 0.1° 의 백래시 증가에 대해 점 A의 3.3배인 0.2의 이득 값의 감소가 발생하게 된다. 그러므로, 백래시 증가량이 같더라도 각 전달오차의 크기에 따라 백래시 이득의 감소량은 크게 달라질 수 있음을 알 수 있으며, 각 전달오차 크기를 적절히 감소시키면 백래시 증가에 대한 반공진 및 공진주파수의 감소량을 크게 발생시킬 수 있다는 것을 알 수 있다.

모터에 입력되는 전압의 크기를 조절함으로써 기어감속 서보시스템의 각 전달오차 크기를 조절할 수 있음을 보여주기 위하여 Fig. 1 시스템에 존재하는 백래시 및 정마찰 토크를 모두 0이라 가정한 후 모터입력전압에 대한 각 전달오차의 전달함수를 구하면 다음과 같다.

$$\theta_o(s) = \frac{n_0}{d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0} V_m(s) \quad (4)$$

$$= \frac{n_0}{d_4s^4 + d_3s^3 + d_2s^2 + d_1s + d_0} \frac{2\pi f A_m}{(s^2 + 4\pi^2 f^2)}$$

식(4)에서 $n_0, d_4, d_3, d_2, d_1, d_0$ 는 시스템이 설계/제작되면 결정되는 상수이며, 모터에 입력되는 전압의 주파수가 정해지면 각 전달오차의 진폭크기는 모터에 입력되는 전압의 진폭크기에 비례함을 알 수 있다.

결론적으로 기어감속 서보시스템의 백래시 크기 변화에 대한 영향을 모터에 입력되는 전압의 크기를 조절함으로써 크게 증폭시킬 수 있으며, 이때 관찰되는 주파수 응답선도의 반공진 및 공진주파수의 크기 변화를 통해 전체백래시 크기 변화를 검출할 수 있다는 것을 알 수 있다.

3. 실험

Fig. 1에 나타난 실험장치를 이용하여 얻어진 주파수 응답 선도를 Fig. 3(a)와 (b)에 나타내었다. Fig. 3으로부터 모터에 입력되는 전압크기가 감소함에 따라 반공진 및 공진주파수의 감소량이 커짐을 확인할 수 있다.

Fig. 4(a)와 (b)는 모터에 입력되는 전압을 점차적으로 감소시켰을 때 실험으로부터 얻어진 반공진주파수 및 공진주파수의 변화를 나타낸다. 비록 실험으로 얻어진 공진주파수의 변화가 다소 해석적이지 못한 형태를 갖으나 모터입력전압의 크기 감소에 따라 반공진 및 공진주파수가 감소하여 또한 급격히 감소하는 구간이 존재함을 확인할 수 있다. Fig. 4(b)의 그래프 형태의 원인으론 공진주파수에서 발생하는 시스템 진동이 모터각속도 측정에 영향을 주어 발생한 것으로 추정된다.

Fig. 5(a)와 (b)는 모터에 입력되는 전압과 백래시 크기에 따른 반공진 및 공진주파수의 변화를 3차원으로 나타낸 것이다.

Fig. 5(a)의 경우 모터입력전압의 크기가 크더라도 백래시

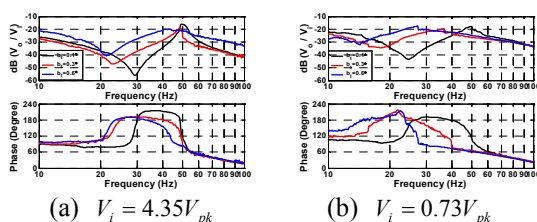


Fig. 3 The Bode diagram V_o/V_i obtained from experiment

증가에 따라 시스템의 반공진주파수는 변화를 검출할 수 있을 정도로 감소함을 볼 수 있으나, Fig. 5(b)의 경우 공진주파수의 변화량은 모터입력전압이 큰 경우 반공진주파수의 변화량 보다 작음을 볼 수 있다. 따라서, 모터입력전압이 크더라도 반공진주파수의 변화는 공진주파수의 변화 보다 쉽게 발생함을 알 수 있다.

이것은 시스템의 모터입력전압의 크기를 크게 감소시키기 어려운 경우 반공진주파수의 변화를 좀 더 비중있게 관찰할 필요가 있다는 것을 의미한다. 그러나, 모터입력전압이 적절히 감소될 수 있으면 이때 발생하는 공진주파수의 감소량이 반공진주파수의 감소량 보다 크므로 반공진주파수 뿐만 아니라 공진주파수 역시 백래시 크기변화 검출에 비중있게 고려되어야 한다.

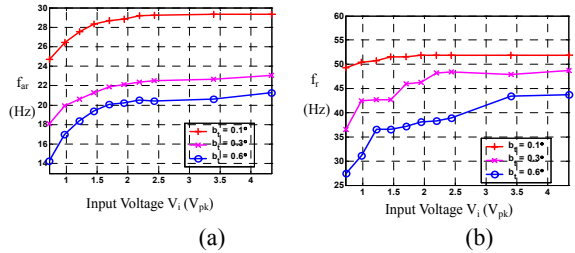


Fig. 4 Changes of (a) anti-resonant frequency and (b) resonant frequency obtained from experiment according to the input voltage of a motor amplifier.

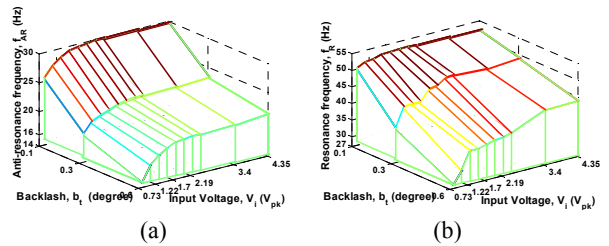


Fig. 5 Changes of (a) anti-resonant frequency and (b) resonant frequency obtained from experiment according to the input voltage of a motor amplifier and the backlash

4. 결론

본 연구에서는 기어감속 서보시스템에서 모터입력전압의 크기를 적절히 감소시키면 반공진 및 공진주파수의 변화는 시스템에 존재하는 전체백래시 크기와 변화를 검출할 수 있을 정도로 크게 발생한다는 현상을 발견하고 그 현상의 활용가능성에 대해 분석하였다.

발견된 현상이 전체백래시 검출수단으로서 활용될 수 있다는 가능성을 보여주기 위해 정성적 분석과 실험을 수행하였으며 만족스러운 결과를 얻었다.

발견된 현상은 향후 기어감속 서보시스템의 전체백래시 크기와 변화를 검출하는 검출수단으로 사용될 수 있을 것이라고 생각한다.

참고문헌

1. Baek, J. H., Kwak, Y. K. and Kim, S. H., "Backlash Estimation of a Seeker Gimbal with Two-Stage Gear Reducers," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, **21**, 604-611, 2003.
2. Bigley, W. J., "Wideband Base Motion Isolation Control via the State Equalization Technique," Optical Engineering, **32**, 2805-2811, 1993.