

백래시 및 모터입력전압에 따른 기어감속 서보 시스템 대역폭에 관한 연구

백주현*, 홍성민*, 양태석**, 김수현***, 곽윤근***

A Study on the Bandwidth of Gear Reduction Servo System according to Backlash and Motor Supplied Voltage

Joo Hyun Baek*, Sung Min Hong*, Tae Suk Yang**, Soo Hyun Kim*** and Yoon Keun Kwak***

ABSTRACT

The paper presents the effect of the backlash magnitude and the supplied voltage of motor on the gear reduction servo system. The bandwidth of the system depends heavily on the supplied voltage of motor as well as the backlash magnitude. Specially, the bandwidth of the system increases as the supplied voltage of motor increases. It is shown that the system has the bandwidth of zero backlash in case of motor supplied voltage is infinite. It is also found that the magnitude of the supplied voltage of motor is very important in case of the analysis of the system bandwidth.

Key Words : Backlash(백래시), Anti-resonance(반공진), Resonance(공진), Bandwidth(대역폭), Equivalent Torsional Stiffness(등가비틀림강성)

1. 서론

자율주행 소형차량, 무인비행기 및 유도탄과 같이 지능화된 시스템은 뛰어난 환경 적응성 및 빠른 응답성을 필요로 한다. 이런 요구조건은 탑재된 장비에 자동화된 서보 장치와 빠른 응답성을 갖는 장비를 요구하여, 서보 모터를 사용한 서보 시스템이 많이 사용되고 있다.

서보 모터의 경우 최근 모터개발기술의 발전으로 기어감속이 필요 없는 직접구동방식의 모터들이 많이 개발되고 있다. 그러나, 직접구동방식의 모터는 기어 감속기를 사용한 기어감속 서보 시스템과 비교하여 부피 및 무게가 크고, 출력 토크가 상대적으로 작아 설치 공간 및 무게 제한이 큰 곳에는 기어감속 서보 시스템이 널리 사용된다.

이 중 유도탄과 같이 비행하는 물체에 탑재되는 서보 시스템의 크기 및 무게는 매우 중요하다. 특히, 설치된 서보 시스템의 무게 증가는 일정량의 추진제로 비행할 수 있는 거리를 단축시키며, 동일한 비행거리 유지를 위해서는 추가적인 추진제가 요구된다. 이와 같이 증가된 추진제는 유도탄 무게 증가의 또 다른 원인이 되어 서보 시스템의 무게 증가가 유도탄 전체 성능에 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다.

이러한 서보 시스템의 속도제어 대역폭 및 응

2001년 12월 31일 접수
* LG Innotek 연구소 연구 7 그룹
** 국방과학연구소 기술본부 2부 3팀
*** 한국과학기술원 기계공학과

답성은 모터 토크 입력에 대한 모터 각속도 출력에서 나타나는 반공진 및 공진 주파수에 의해 크게 제한 된다^[2]. 이 중 반공진 주파수는 서보 시스템의 속도제어대역폭을 결정하므로, 서보 시스템이 보다 빠른 추종성과 응답성을 갖도록 설계 및 제작하려면 시스템이 높은 반공진 주파수를 갖도록 하는 것은 필수적이다^[1]. 이를 위해선 설계 단계에서 기어 감속 서보 시스템의 대역폭을 정확히 예측할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하며, 또한, 기 제작된 서보 시스템의 경우 무게 증가 없이 대역폭을 확장할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다. 이와 관련된 연구로서, Rue 는 시스템 구동부 강성이 시스템 대역폭에 큰 영향을 미침을 보고하였다^[3]. Dhaouadi et al. 및 장석원 등은 백래시가 시스템 반공진 주파수 및 공진주파수에 미치는 영향을 해석 및 실험하였고, 이들의 결과에 의하면 백래시가 시스템 대역폭 감소에 미치는 영향은 작은 것으로 나타났다^[4,5].

기 제작된 기어 감속 서보 시스템의 무게 증가 없이 대역폭 확장을 위한 연구로서, Bigley 등은 최적제어 및 상태 동등화 제어기법을 이용하여, 제어적으로 서보 시스템이 갖는 반공진주파수의 영향을 최소화하거나, 제거하고자 하였으나, 최적 제어기법의 경우 정확한 실시간 모델링을 요구하고, 상태동등화기법은 부하관성이 큰 경우 모터 출력이 매우 커야 하는 시스템 구현의 어려움을 갖고 있다^[1, 2, 6, 7].

본 연구에 따르면, 장석원 등의 연구결과와 달리 대역폭에 미치는 백래시의 영향이 사용하는 모터의 최대입력전압에 따라 크게 달라짐을 알 수 있었으며, 기 제작된 서보 시스템의 무게 증가 없이 대역폭을 확장하는 방법 중 기계 구조적인 방법으론, 시스템 내의 백래시를 줄이는 것 임을 알게 되었다. 그러므로, 본 연구에서는 기어 감속 서보 시스템 대역폭에 미치는 백래시 크기의 영향을 모터입력전압 크기에 따라 분석하였으며, 참고적으로 시스템 강성 증가를 통한 대역폭 증가 시 수반되는 서보 시스템의 무게 증가를 정성적으로 분석하였다.

2. 이론 해석

2.1 모델링

Fig. 1 은 유도탄에 설치된 기어감속 서보시스템

의 개략도이며, 고정 축에 고정된 세그먼트 기어 2 는 회전하지 않고, 피니언 2, 회전축, 기어 1, 피니언 1, 모터 및 베어링을 포함한 Fig. 1 에 사선 친 전체 부분이 OO' 축을 중심으로 모터 회전에 동기되어 회전하는 구조를 보여준다. 여기서, 각 회전축에 존재하는 베어링은 예압에 의해 간극 없이 각 축을 지지한다고 가정하였다. 그리고, 각 부품의 감쇠효과, 특히 기어 이 물림 시 감쇠효과는 Yang 과 Sun 의 방법으로 모델링 할 수 있으나^[8], 본 연구에서 고려된 시스템은 짧은 길이를 갖는 높은 강성의 부품으로 구성 되어 있어 예상되는 감쇠효과가 작아 감쇠 효과를 무시하였다. 또한, 점성마찰의 경우 점성마찰을 무시하고 얻은 반공진 및 공진주파수 값에 실험으로 구한 시스템의 Q 인자로부터 그 감소율을 추정할 수 있으므로^[1], 점성마찰의 영향 역시 무시하였다. 끝으로, 고려된 시스템은 2 단 감속 구조이므로 피니언 1 고정 시 부하 회전축 OO' 에서 측정되는 시스템의 전체 백래시 b_{total} 은 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때 전체백래시의 측정은 치구로 피니언 1 을 고정시키고, Fig. 1 에 나타난 포텐쇼미터로부터 부하의 회전각을 측정하여 구하였다.

$$b_{total} = b_2 + \frac{1}{N_r} b_1 \quad (1)$$

- 여기서, b_1 : 피니언 1 과 기어 1 의 사이에 존재하는 백래시를 기어 1 축에서 측정 되는 각도로 표시한 각도 백래시 양
- b_2 : 피니언 2 와 기어 2 의 사이에 존재하는 백래시를 부하 회전축에서 측정되는 각도로 표시한 각도 백래시 양
- N_r : 피니언 2 와 기어 2 의 공진 감속비이다.

피니언 1 과 기어 1 사이에 존재하는 백래시 b_1 은 감속비 N_r 에 의해 감소 되어 최종 부하단에 나타나므로, 시스템에 지배적인 영향을 주는 백래시는 피니언 2 와 기어 2 사이에 존재하는 백래시 b_2 이다^[5, 10]. 그러므로, 백래시 b_2 위치에 최종 부하단에서 측정된 전체백래시 b_{total} 이 존재한다고 가정하였다. 기어 1, 회전축 및 피니언 2 의 관성모멘트는 최종 부하단으로 환산된 모터관성모멘트와 부하관성모멘트 크기와 비교하여 매우 작은

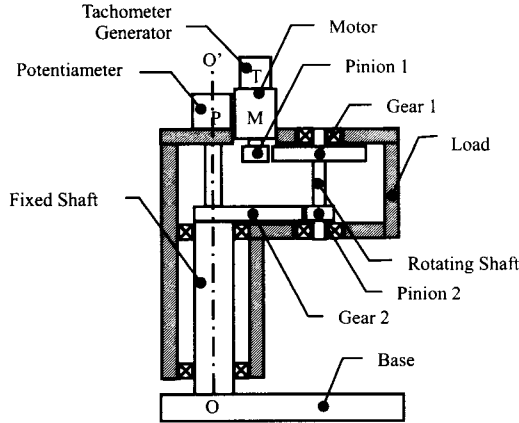


Fig. 1 Gear reduction servo system

값이므로, 이들 관성모멘트는 무시하였으며, 비틀림강성만 고려하였다. 이점쇄선으로 묶은 부분은 Fig. 1의 회전부로 부하를 의미하며, 이의 모델을 Fig. 2에 나타내었다.

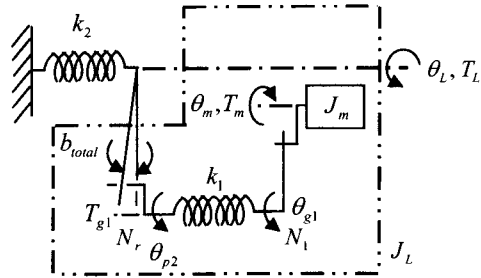


Fig. 2 Model of gear reduction servo system

Fig. 2 모델에서 등가화 된 비틀림강성 k_1 은 다음과 같다.

$$k_1 = \frac{k_{g1}k_{s1}}{(k_{g1} + k_{s1})} \quad (2)$$

여기서, k_1 : 기어 1 과 회전축의 등가비틀림강성 ($N \cdot m / rad$)
 k_{g1} : 피니언 1 과 기어 1 의 이 강성에 의한 비틀림강성 ($N \cdot m / rad$)
 k_{s1} : 회전축의 비틀림강성 ($N \cdot m / rad$) 이다.

이때, 비틀림강성 k_{g1} 은 다음과 같다^[10].

$$k_{g1} = \frac{d_{g1}^2 E_{p1} Z_{p1} E_{g1} Z_{g1}}{4(E_{p1} Z_{p1} + E_{g1} Z_{g1})} t_{g1} \quad (3)$$

여기서, d_{g1} : 기어 1 의 피치원경 (m)
 E_{p1}, E_{g1} : 피니언 1 과 기어 1 의 탄성계수 (N/m^2)
 Z_{p1}, Z_{g1} : 피니언 1 과 기어 1 의 탄성변형계수
 t_{g1} : 기어 1 의 이폭 (m) 이다.

그리고, 탄성변형계수는 다음과 같다^[10].

$$Z_i = \frac{y_i}{0.242 + 7.25 y_i} \quad (4)$$

여기서, y_i : 기어 i 의 루이스형상계수이다.

또한, 식 (2)에서 사용된 회전축의 비틀림강성은 다음과 같다.

$$k_{s1} = \frac{\pi G_{s1} d_{s1}^4}{32 L_{s1}} \quad (5)$$

여기서, G_{s1} : 회전축의 전단탄성계수 (N/m^2)
 d_{s1} : 회전축의 직경 (m)
 L_{s1} : 기어 1 과 피니언 2 사이의 회전축 길이 (m) 이다.

마찬가지로, 피니언 2 와 기어 2 사이의 비틀림강성과 고정축 비틀림강성도 다음과 같이 등가화할 수 있다.

$$k_2 = \frac{k_{g2}k_{s2}}{(k_{g2} + k_{s2})} \quad (6)$$

여기서, k_2 : 기어 2 와 고정축의 등가비틀림강성 ($N \cdot m / rad$)
 k_{g2} : 피니언 2 와 기어 2 의 이 강성에 의한 비틀림강성
 k_{s2} : 고정축의 비틀림 강성이다.

이때, 사용된 비틀림강성 k_{g2} , k_{s2} 는 식 (3)과 (5)에서와 같은 방법으로 구한다.

2.2 운동방정식

본 연구에서 사용한 모터는 태코제너레이터가 부착된 영구자석 필드형 DC 모터로 모터에 대한 전기적 방정식은 다음과 같다^[11].

$$V_m = L_a \frac{di_a}{dt} + R_m i_a + k_b \dot{\theta}_m \quad (7-a)$$

$$T_m = k_t i_a \quad (7-b)$$

$$V_{tacho} = k_{tacho} \dot{\theta}_m \quad (7-c)$$

여기서, V_m : 모터 입력 전압 (V)
 L_a : 모터 전기자 인덕턴스 (H)
 i_a : 모터 전기자에 흐르는 전류 (A)
 R_m : 모터 전기자 저항 (Ω)
 k_b : 역기전력 상수 ($V \cdot s/rad$)
 θ_m : 모터 피니언 회전각 (rad)
 T_m : 모터 토크 ($N \cdot m$)
 k_t : 모터 토크 상수 ($N \cdot m/A$)이다.
 V_{tacho} : 태코미터 출력 전압 (V)
 k_{tacho} : 태코미터 상수 ($V \cdot s/rad$)이다.

모터에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_m \ddot{\theta}_m = T_m - \frac{T_{g1}}{N_1} - T_{f,m} \text{sign}(\dot{\theta}_m) \quad (8)$$

여기서, J_m : 모터회전자 관성모멘트 ($kg \cdot m^2$)
 T_{g1} : 등가비틀림스프링 k_1 의 양 끝 단에 작용하는 토크 T_{g1} ($N \cdot m$)
 N_1 : 피니언 1 과 기어 1 사이의 감속비
 $T_{f,m}$: 모터 정마찰 토크 ($N \cdot m$)
 $\text{sign}(\cdot)$: ()안의 값의 부호이다.

피니언 1의 회전각 θ_m 과 기어 1의 회전각 θ_{g1} 의 관계는 다음과 같다.

$$\theta_{g1} = \frac{1}{N_1} \theta_m \quad (9)$$

여기서, θ_{g1} : 기어 1의 회전 각 (rad)이다.

등가비틀림강성 k_1 의 양 끝 단에 작용하는 토크 T_{g1} 는 다음과 같다.

$$T_{g1} = k_1 \left(\frac{1}{N_1} \theta_m - \theta_{p2} \right) \quad (10)$$

여기서, θ_{p2} : 피니언 2의 회전 각 (rad)이다.

그리고, 토크 T_{g1} 과 부하 토크 T_L 과의 관계는 다음과 같다.

$$T_{g1} = \frac{1}{N_r} T_L \quad (11)$$

여기서, T_L : 부하 토크 ($N \cdot m$)
 N_r : 피니언 2와 기어 2의 공전 감속비 ($N_r = N_2 + 1$)
 N_2 : 피니언 2와 기어 2의 피치원경 비 ($N_2 = d_{g2}/d_{p2}$)이다.

식 (10)과 (11)의 관계로부터 피니언 2의 회전각 θ_{p2} 는 다음과 같다.

$$\theta_{p2} = \frac{1}{N_1} \theta_m - \frac{T_L}{k_1 N_r} \quad (12)$$

부하 토크 T_L 은 피니언 2와 기어 2 사이의 백래시에 의해 다음과 같이 표현된다. 이때 사용한 백래시 모델은 데드존 모델을 사용하였다^[10].

$$T_L = \begin{cases} k_2(\theta_d - \delta) & , \theta_d > \delta \\ 0 & , |\theta_d| < \delta \\ k_2(\theta_d + \delta) & , \theta_d < -\delta \end{cases} \quad (13)$$

여기서, θ_d : 각 전달오차 ($\theta_d = \theta_p/N_r - \theta_L$) (rad)
 θ_L : 부하 회전 각 (rad)
 δ : 피니언 1 고정 시 최종 부하단에서 측정된 전체백래시 b_{total} 의 1/2 ($\delta = \pi b_{total}/360^\circ$) (rad)이다.

부하에 대한 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_L \ddot{\theta}_L = T_L - T_{f,L} \text{sign}(\dot{\theta}_L) \quad (14)$$

여기서, J_L : 부하 관성모멘트 ($kg \cdot m^2$)
 $T_{f,L}$: 부하 단의 정마찰 토크 ($N \cdot m$)이다.

2.3 전달함수 해석

2.2 절에서 유도한 운동방정식에서 백래시 δ 와 마찰토크 $T_{f,m}$ 과 $T_{f,L}$ 을 0 으로 가정하면 기어감속 서보 시스템은 선형시스템이 된다. 이 경우의 모터 토크 T_m 에 대한 모터 각속도 $\dot{\theta}_m$ 의 전달함수는 다음과 같다.

$$\frac{\dot{\theta}_m(s)}{T_m(s)} = \frac{N^2(J_L s^2 + k_{eq})}{s[J_L N^2 J_m s^2 + k_{eq}(N^2 J_m + J_L)]} \quad (15)$$

여기서, N : 전체 감속비 ($N = N_1 N_r$)
 k_{eq} : 시스템 전체 등가비틀림강성이다.

이때, 등가비틀림강성은 다음과 같다.

$$k_{eq} = \frac{N_r^2 k_1 k_2}{N_r^2 k_1 + k_2} \quad (16)$$

식 (15)의 영점과 극점에 해당하는 주파수를 반공진주파수와 공진주파수라 하며 다음과 같다.

$$f_{AR} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{J_L}} \quad (17-a)$$

$$f_R = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_{eq}}{N^2 J_m J_L / (N^2 J_m + J_L)}} \quad (17-b)$$

여기서, f_{AR} : 반공진 주파수 (Hz)
 f_R : 공진 주파수 (Hz) 이다.

백래시 및 마찰토크가 0 인 경우에 기어감속 서보 시스템이 갖는 반공진 및 공진주파수는 기어감속단의 구조적 강성, 감속비, 모터 및 부하의 관성모멘트에 의해 결정됨을 알 수 있다.

2.4 백래시 증가에 따른 영향

Fig. 3 에 나타난 데드존 모델에 기술함수법을 적용하여 모델의 기술함수 이득을 구하면 다음과 같으며, 이것을 Fig. 4 에 나타내었다^[12].

$$N(A) = 1 - \frac{2}{\pi} \left[\sin^{-1} \left(\frac{\delta}{A} \right) + \frac{\delta}{A} \sqrt{1 - \left(\frac{\delta}{A} \right)^2} \right] \quad (18)$$

여기서, $N(A)$: 기술함수 이득

A : 입력 정현파 신호의 크기이다.

백래시는 0 ~ 1 사이의 이득을 갖으며, 백래시 증가는 시스템의 등가비틀림강성 k_2 를 감소시킨다^[12]. 백래시에 의해 감소된 등가비틀림강성 k_2 의 유효등가비틀림강성은 다음과 같다.

$$k_{2,eff} = N(A)k_2 \quad (19)$$

여기서, $k_{2,eff}$: 유효등가비틀림강성이다 ($N \cdot m$).

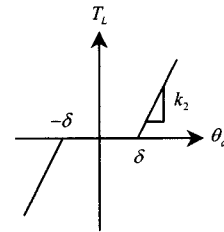


Fig. 3 Deadzone model

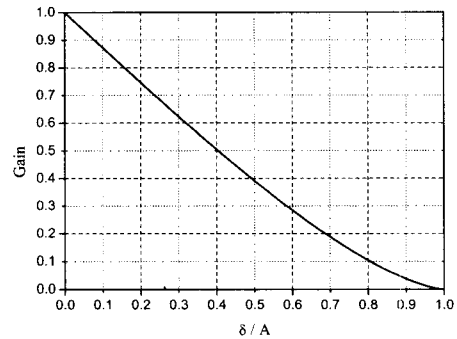


Fig. 4 Describing function gain of backlash

결국, 서보 시스템 내 기어감속단의 백래시 증가는 유효등가비틀림강성을 감소시키며^[4], 따라서 시스템의 반공진 및 공진주파수는 작아지게 된다.

2.5 전체등가비틀림강성 증가에 따른 영향

시스템 전체 등가비틀림강성 k_{eq} 가 증가함에 따라 시스템의 반공진 및 공진주파수가 증가함을 식 (17-a), (17-b)을 통해 알 수 있다. 본 절에서는 강성증가를 통해 시스템 대역폭을 확장 시키는 경우 증가되는 기어감속 서보 시스템의 무게를 정성적으로 분석하고자 한다. 이때 부하 관성모멘트와

감속비를 포함한 구조적 형상은 변화하지 않는다는 가정 하에 속도제어 대역폭을 제한하는 반공진 주파수를 2 배 증가시킬 때 발생하는 무게 증가를 분석하였다. 식 (17-a)에 나타낸 바와 같이 반공진 주파수 f_{AR} 을 2 배 증가시키기 위해서는 시스템의 등가비틀림강성 k_{eq} 을 4 배 증가시켜야 하며, 식 (16)에서와 같이 k_{eq} 는 $N_r^2 k_1$ 과 k_2 의 조화합이므로 k_1 과 k_2 를 각각 4 배 증가시켜야 한다. 결국, 반공진 주파수를 2 배 증가시키기 위해서는 최종적으로 각각의 비틀림강성을 4 배 증가시켜야 한다.

따라서 회전축의 강성을 4 배 증가시키기 위해서는 식 (5)로부터 다음과 같이 회전축의 직경을 변경시켜야 한다.

$$d_{new} = \sqrt{2} d_{old} \quad (20)$$

여기서, d_{old} : 변경 전 회전축 직경 (m)

d_{new} : 변경 후 회전축 직경 (m)

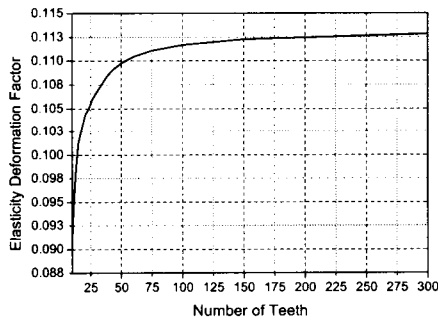


Fig. 5 Elasticity deformation factor according to number of teeth (pressure angle=20°)

이 경우 회전축의 무게는 기존에 2 배가 된다. 기어 비틀림강성은 가정에 의해 피치원경은 변경하지 못하고, 치폭을 증가시키거나, 다음에 나타낸 등가탄성변형계수 Z_{eq} 를 증가시켜야 한다.

$$Z_{eq} = \frac{Z_p Z_g}{(Z_{p1} + Z_{g1})} \quad (21)$$

여기서, 기어와 피니언의 탄성계수는 같다고 하였다. 그러나, 탄성변형계수는 Fig. 5 에 나타낸 바와 같이 0.088 ~ 0.114 사이의 값을 갖으므로 기존의 4 배가 될 수 없고, 치폭 증가를 통해서만 4 배

의 비틀림강성 증가가 가능하다. 그러므로, 기어 비틀림강성 증가의 경우 최대 4 배의 무게 증가를 가져온다고 볼 수 있다.

3. 모의실험

3.1 모터입력전압크기의 영향

본 연구에서 고려한 기어감속 서보 시스템의 명세서는 참고문헌^[13] 에 수록된 값을 사용하였으며, 모의실험은 Matlab Simulink 를 사용하였다. 모델의 블록선도는 Fig. 6 과 같고, 모터에 정현파 전압을 10 Hz ~ 300 Hz 까지 인가하여 정상상태 모터각속 도응답을 0.5msec 간격으로 샘플링하였다. 얻어진 모터각속도 데이터를 주파수분석하여 시스템 이득과 위상을 구하였다. 이와 같은 방법으로 얻어진 기어감속 서보 시스템의 주파수응답특성을 Fig. 7 과 Fig. 8 에 나타내었다.

Fig. 8 의 경우 백래시가 0.08° 일 때 반공진 및 공진점의 감소 폭이 Fig. 7 의 경우 보다 작으며, 추가적인 백래시 증가에 따른 반공진 및 공진점의 감소 폭이 Fig. 7 보다 작다. 이것은 백래시 모델의 기술함수 이득이 백래시 크기 뿐만 아니라 입력정현파 신호 크기의 함수이므로, 모터입력전압의 증가에 따른 모터 속도 증가로 각 전달오차 θ_d 가 커져, 동일한 백래시 양에 대한 기술함수의 이득이 커지기 때문이다.

따라서, 같은 크기의 백래시 양에 대하여 모터 입력전압이 큰 Fig. 8 이 Fig. 7 보다 높은 반공진 및 공진주파수를 갖게 된다.

백래시가 0.08° 일때 반공진 및 공진주파수의 큰 폭 감소가 발생하는 이유는 백래시가 0 일 때는 모터입력전압크기에 영향을 받지 않으나, 백래시가 존재하는 경우 모터의 입력전압의 영향을 받기 때문이다. 그러므로, 백래시가 주파수응답특성에 미치는 영향 해석 시 사용모터의 최대입력전압은 매우 중요하다. 전체 백래시 양이 0.08° 인 경우 모터 입력전압 증가에 따른 반공진 및 공진주파수의 변화를 Fig. 9 에 나타내었으며, 모터 입력전압을 무한히 높이면 시스템은 백래시가 없는 시스템의 대역폭을 갖게 됨을 알 수 있다. 그러나, 실제 사용되는 모터의 최대모터입력전압은 한계가 있으므로, 본 연구에서 사용한 모터의 최대전압은 17.9 V_{pk} 로 제한하였다.

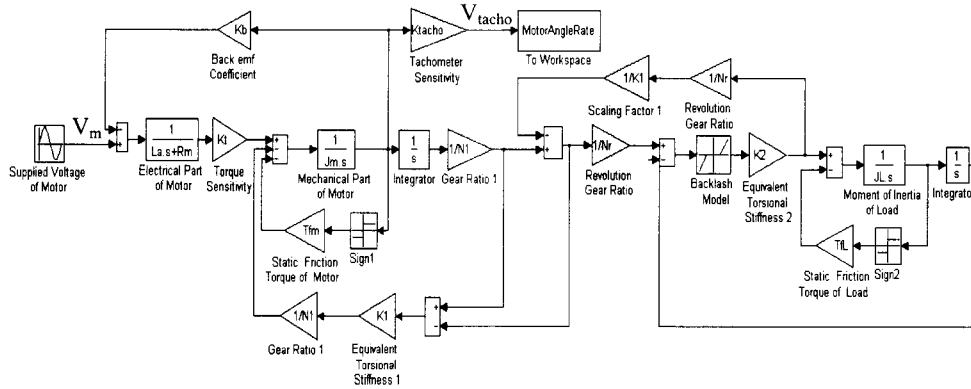


Fig. 6 Block diagram of the gear reduction servo system

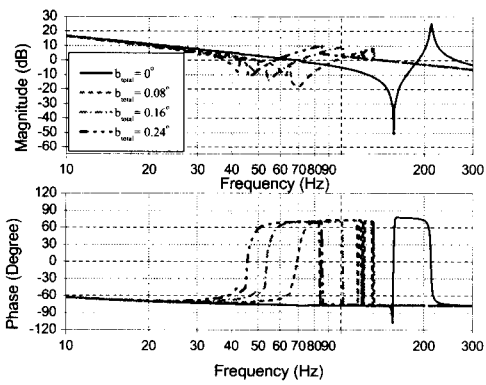


Fig. 7 The Bode diagram V_{tacho}/V_m of gear reduction servo system ($V_m = 10.0 V_{pk}$)

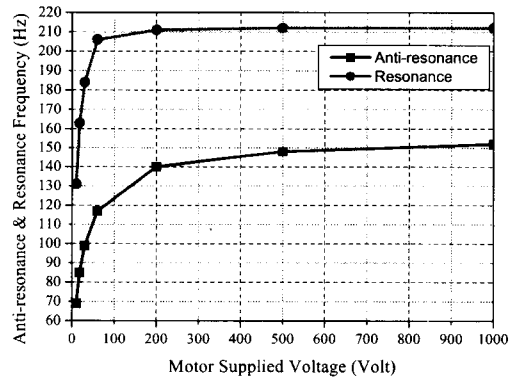


Fig. 9 Anti-resonance & resonance according to the supplied voltage of motor ($b_{total} = 0.08^\circ$)

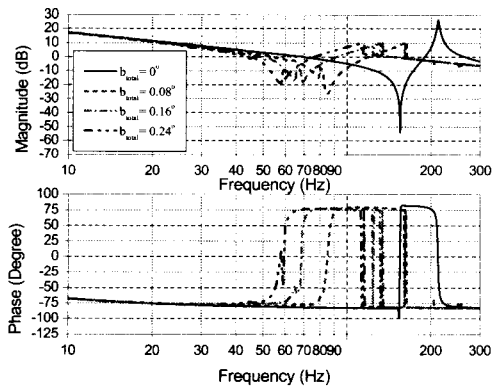


Fig. 8 The Bode diagram V_{tacho}/V_m of gear reduction servo system ($V_m = 17.9 V_{pk}$)

3.2 백래시 크기의 영향

본 절에서는 모터의 최대입력전압이 $10.0 V_{pk}$ 와 $17.9 V_{pk}$ 인 경우에 기어감속단의 백래시 크기 변화에 따른 기어감속 서보 시스템의 반공진 및 공진주파수의 변화를 알아 보았다. Fig. 10 과 Fig. 11 두 경우 모두 백래시 증가에 따라 시스템의 반공진 및 공진주파수가 감소하는 변화를 보여준다. 반공진 및 공진주파수의 감소율은 모터입력전압이 작은 Fig. 11 가 Fig. 10 의 감소율 보다 훨씬 크며, 동일한 백래시 크기의 경우 Fig. 11 이 훨씬 작음을 알 수 있다.

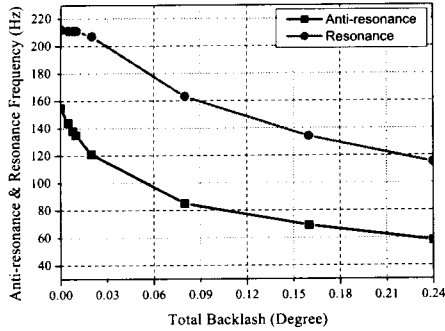


Fig. 10 Anti-resonance & resonance frequency according to back-lash variation ($V_m = 17.9 V_{pk}$)

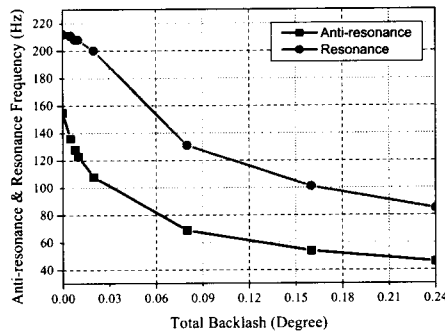


Fig. 11 Anti-resonance & resonance frequency according to back-lash variation ($V_m = 10.0 V_{pk}$)

또한, 서보 시스템의 모터가 결정되어 최대입력 전압이 제한된 경우 시스템의 무게 증가 없이 대역폭을 확장 시킬 수 있는 적절한 방법은 시스템의 백래시 크기를 줄이는 것임을 알 수 있다.

이때, 백래시를 줄이는 방법은 피니언과 기어를 지지하는 축들의 축간거리를 줄이는 방법과, 피니언 및 기어 가공 시 정밀가공을 통한 백래시 감소 방법이 있다^[14].

3.3 모터입력전압 및 백래시 크기 결정

본 절에서는 백래시 크기와 모터입력전압크기에 따른 반공진주파수의 변화를 다루었으며 이를 Fig. 12에 나타내었다.

기어감속 서보 시스템이 설계자가 원하는 반공진주파수를 갖도록 할 경우, Fig. 12로부터 모터입력전압 및 백래시 크기를 결정할 수 있다. 예를

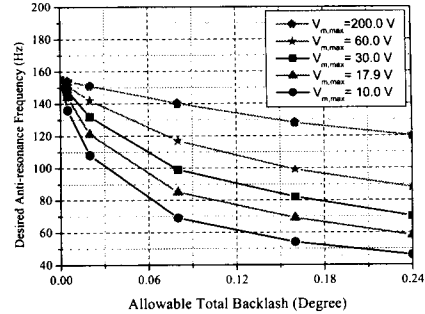


Fig. 12 Anti-resonance frequency variation according to the backlash and the supplied voltage of motor

들어 기어감속 서보 시스템이 100 Hz 이상의 반공진주파수를 갖도록 할 경우, 모터 최대전압이 10 V 인 모터를 사용한다면 시스템에 허용되는 최대 백래시 크기는 0.03°이다. 그러나, 백래시 감소에 소요되는 가공 및 제작비용을 줄이기 위해 30.0 V의 최대입력전압을 갖는 모터를 사용한다면 허용되는 백래시 크기는 0.08°이다. 이로부터 시스템에 허용되는 최대 백래시 크기는 사용되는 모터의 최대입력전압에 따라 달라짐을 알 수 있으며, Fig. 12로부터 시스템에 적절한 백래시 크기 및 필요한 모터전압을 결정할 수 있다.

그러나, 이 경우에 있어서 Fig. 12는 시스템의 점성마찰 및 감쇠효과를 무시한 가정 하에 얻어진 것이므로, 실제 적용 시 Fig. 12에 보여진 반공진주파수 값들은 감쇠효과에 의해 다소 작아질 것이다. 그러므로, 주어진 모터입력전압 및 백래시 크기에 대한 반공진주파수 값을 보다 정확히 예측하기 위해서는 실험을 통해 얻은 시스템의 Q 인자로부터 Fig. 12 값의 감소율을 고려해야 할 것이다. 이것에 대한 자세한 내용은 참고문헌^[1]을 참고하기 바란다.

4. 결론

본 연구에서는 기어감속 서보 시스템의 대역폭 확장을 위하여 시스템 전체 등가비틀림강성을 증가시킬 때 수반되는 시스템의 무게 증가를 정성적으로 분석하였으며, 모터입력전압의 크기 및 백래시 크기 변화에 따른 시스템의 대역폭 변화를 살펴 보았다. 백래시가 존재할 경우 모터입력전압이

대역폭에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있었으며, 백래시를 포함한 기어감속 서보 시스템의 대역폭 해석 시 반드시 모터 최대입력전압을 함께 고려하여 해석해야 되며, 무게 증가 없이 대역폭을 높이기 위해 필요한 백래시 크기 감소량은 사용하는 모터의 최대입력전압에 따라 달라짐을 알 수 있었다. 또한, 본 연구를 통하여 사용할 모터가 결정된 경우 기어감속 서보 시스템의 대역폭 요구조건 만족을 위해 필요한 최대허용백래시 크기를 결정할 수 있게 되었다.

후 기

본 연구는 LG Innotek 연구소의 위탁과제로서 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

- Bigley, W. J., "Wideband Base Motion Isolation Control via the State Equalization Technique," *Optical Engineering*, Vol. 32 No. 11, pp. 2805-2811, 1993.
- Bigley, W. J. and Rizzo, V. J., "Wideband Linear Quadratic Control of a Gyro-Stabilized Electro-Optical Sight System," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 20-24, 1987.
- Rue, A.K. "Precision Stabilization Systems," *IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems*, Vol. AES-10, No. 1, pp. 34-42, 1974
- Dhaouadi, R., Kubo, K. and Tobise, M., "Analysis and Compensation of Speed Drive Systems with Torsional Loads," *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Yokohama, Japan, pp. 271- 277, 1993.
- 장석원, 오준호, "기어시스템의 backlash 에 대한 동특성 해석," *한국정밀공학회 춘계 학술대회 논문집*, pp. 453-456, 2000.
- Bigley, W. J. and Tsao, S. P., "Optimal Motion Stabilization Control of an Electro-Optical Sight System," *Proceedings SPIE Acquisition, Tracking, and Pointing*, Vol. 1111, pp. 116-121, 1989.
- Bigley, W. J. and Schupan, F., "Wideband Base Motion Isolation Control for a Mobile Platform," *Proceedings of the American Control Conference*, Vol. 2, pp. 1483-1490, 1987.
- Yang, D. C. H. and Sun, Z. S., "A Rotary Model for Spur Gear Dynamics," *Journal of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design*, Vol. 107, pp. 529-535, 1985.
- Meirovitch, L., *Principles and Techniques of Vibrations*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ, 1997.
- Chubb, B. A., *Modern Analytical Design of Instrument Servomechanisms*, Addison-Wesley Publishing Company, 1967.
- Clifford, M., *Modern Electronic Motors*, Prentice Hall, 1990.
- J.J. Slotine, J. E. and Li, W., *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, pp. 175-177, 1991.
- K-MSAM Seeker 김발구동부 비선형특성 분석, LG Innotek(주)연구소 연구보고서, 2000.
- 박영조, 기계설계, 보성문화사, pp. 327~328, 1981.