

2 단 기어 감속기를 갖는 탐색기 짐발의 백래시 추정

백주현* · 홍성민** · 곽윤근*** · 김수현†

(2002년 3월 14일 접수, 2002년 7월 24일 심사완료)

Backlash Estimation of a Seeker Gimbal with Two-Stage Gear Reducers

Joo Hyun Baek, Sung Min Hong, Yoon Keun Kwak and Soo Hyun Kim

Key Words : Backlash Estimation (백래시 추정), Contribution Ratio(기여율), Frequency Response Characteristic(주파수응답특성), Anti-Resonant Frequency(반공진 주파수), Resonant Frequency(공진 주파수), Seeker Gimbal(탐색기 짐발)

Abstract

A unique technique to estimate the magnitude or contribution ratio of each stage backlash in a system with a two-stage gear reducer is proposed. The concept to estimate the magnitude or contribution ratio of each stage backlash is based on the change of frequency response characteristic, in particular, the change of anti-resonant frequency and resonant frequency, due to the change of each stage backlash magnitude, even though the total backlash magnitude of a system with a two-stage gear reducer is constant. The validity of the technique is verified in a seeker gimbal and satisfactory results are obtained. It is thought that the diagnosis and maintenance of the manufacturing machines and systems with two-stage gear reducers will become more efficient and economical by virtue of the proposed technique.

기호설명	
B_m	: 모터 점성 감쇠계수 ($N \cdot m / (rad / sec)$)
b_i	: 피니언 i 과 기어 i 사이에 존재하는 백래시를 피니언 i 고정시, 기어 i 축에서 측정된 각도 백래시 ($^\circ$) ($i=1,2$)
b_i	: 최종 부하단에서 측정된 전체 백래시 ($^\circ$)
$f_{1,E}, f_{2,E}$: $f_{AR,E}$ 부근의 동력 반치점의 주파수 (Hz)
$f_{AR,E}, f_{R,E}$: 실험에서 얻은 ARF 와 RF (Hz)
$f_{AR,S}, f_{R,S}$: 시뮬레이션에서 얻은 ARF 와 RF (Hz)
$f_{D,S}$: 시뮬레이션에서 얻은 ARF 와 RF 차이 (Hz)
$f_{D,E}$: 실험에서 얻은 ARF 와 RF 차이 (Hz)
$G_f(s)$: 태코제너레이터 필터 전달함수

i_a	: 모터 전류 (A)
$J_{g1}, J_L, J_m, J_{s1}, J_{p2}$: 기어 1, 부하, 모터, 회전축 1 과 피니언 2 의 관성모멘트 ($kg \cdot m^2$)
k_2	: 기어 2 와 축의 등가 비틀림강성 ($N \cdot m / rad$)
k_a	: 모터전압증폭기 증폭비
k_b	: 모터 역기전력상수 ($V \cdot s / rad$)
k_{gi}	: 피니언 i 과 기어 i 의 이 강성에 의한 비틀림강성 ($N \cdot m / rad$) ($i=1,2$)
k_{si}	: i 번째 축의 비틀림강성 ($N \cdot m / rad$) ($i=1,2$)
k_t	: 모터 토크상수 ($N \cdot m / A$)
k_s	: 태코제너레이터 상수 ($V \cdot s / rad$)
L_a	: 모터 인덕턴스 (H)
L_{b1}	: 백래시 b_1 에 의해 기어 1 위의 한 점이 이동한 거리
N_i	: 피니언 i 과 기어 i 사이의 기어비 ($i=1,2$)
N_r	: 피니언과 기어의 공전감속비
Q_{AR}	: 감쇠비를 정의하는 인자
R_{AR}, R_R	: 감쇠특성 고려시 $f_{AR,S}, f_{R,S}$ 의 근사화된

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과

E-mail: kimsh@kaist.ac.kr

TEL : (042) 869-3228 FAX : (042) 869-5201

* 회원, LG Innotek 연구소 연구 7 그룹

** LG Innotek 연구소 연구 7 그룹

*** 회원, 한국과학기술원 기계공학과

	주파수 감소율 (%)
R_m	: 모터전자저항 (Ω)
$T_{f,L}, T_{f,m}$: 부하단과 모터 정마찰토크 ($N \cdot m$)
$T_{g,i}$: 기어 1 에 전달된 토크 ($N \cdot m$)
T_m, T_L	: 모터와 부하 토크 ($N \cdot m$)
V_i	: 모터전압증폭기 입력전압 (V)
V_m	: 모터 입력전압 (V)
V_t	: 태코제너레이터 출력전압 (V)
V_o	: 태코제너레이터필터 출력전압 (V)
δ_i	: 피니언 i 과 기어 i 사이에 존재하는 백래시를 피니언 i 고정시, 기어 i 측에서 측정된 각도 백래시 크기의 $1/2$ (rad) ($i=1, 2$)
θ_{di}	: i 번째 감속단의 각 전달오차 (rad) ($i=1, 2$)
$\theta_{g1}, \theta_L, \theta_m, \theta_{p2}, \theta_{s1}$: 기어 1, 부하, 모터, 피니언과 회전축 1 의 회전각 (rad)
ξ_{AR}, ξ_R	: 반공진과 공진에서의 감쇠비
$sign(\cdot)$: (\cdot) 안 값의 부호

1. 서론

가공기계의 자동화와 로봇 및 서보 시스템의 빈번한 사용은 서보 모터를 사용한 서보 시스템의 수요를 크게 증가시키고 있으며, 최근 모터 개발 기술의 발전으로 기어 감속기를 필요로 하지 않는 직접구동방식의 모터를 사용한 서보 시스템이 개발되었다. 그러나, 직접구동모터를 채용한 서보 시스템은 기어 감속기를 사용한 서보 시스템과 비교하여 무게 및 크기가 큰 반면, 발휘되는 토크가 작아 지금까지 기어 감속기를 사용한 서보 시스템은 가공기계 및 이외 많은 분야에서 널리 사용되고 있다.

기어 감속기를 채용한 서보 시스템은 기어가 사용된 이후로 지금까지 기어 백래시와 관련된 많은 문제를 갖고 있다. 따라서, 이 문제들을 해결하기 위하여 많은 연구들이 수행되었으며, 특히 최근 로봇 및 서보 시스템의 성능 진단 및 유지, 보수를 위하여 시스템이 갖고 있는 백래시의 크기 및 변화를 감시 및 검출하기 위한 연구들이 수행되었다.⁽¹⁻⁴⁾ Dagalakis 와 Myers⁽¹⁾는 로봇 관절의 모터 입력전압과 링크의 가속도와의 주파수응답특성을 구한 후, 얻어진 주파수응답선도에서 나타난 공진점의 이득 값과 코히어런스 함수를 이용해 구한 코히어런스 값을 통해 로봇 관절 내에 존재하는 기어 감속기의 전체 백래시 크기를 추정하는 방법을 제안하였다. 또한, Stein 과 Wang⁽²⁾은 1 단 기어

감속기를 갖는 서보 시스템의 백래시를 검출 및 추정하기 위하여, 운동량 전달해석에 근거한 기술을 제안하였다. 그들은 피동 기어와 구동 피니언이 서로 충돌할 때 생기는 구동 피니언의 속도변화가 기어 감속기 내에 존재하는 백래시 크기와 관계가 있다는 것을 발견하였고, 이 관계로부터 백래시 크기 및 크기 증감을 추정할 수 있는 연구 결과를 발표하였다. 그리고, Saker 와 Moore⁽³⁾는 Stein 과 Wang 의 연구결과를 보완하고자, 피동 기어와 구동 피니언과의 충돌에서 발생하는 피니언의 속도변화를 측정하는 대신에 토크센서를 이용하여 충격토크를 측정함으로써 백래시를 추정하는 방법을 제안하였다. 마지막으로, Pan, Brussel, Sas 와 Verbeure⁽⁴⁾는 로봇 관절 구동용 모터에 정현파 전압을 인가하여 얻어진 로봇 링크의 가속도 응답으로부터, 2 차원 상관관계가 합쳐진 Wigner-Ville 분포를 구한 후, 이 분포로부터 로봇 구동부의 백래시를 검출하는 방법을 제안하였다.

그러나, 지금까지의 연구는 시스템 내에 존재하는 전체 백래시 크기 및 증감 정도만을 추정할 뿐, 로봇 및 동작기계등에서 종종 사용되는 2 단 기어 감속기의 각 단에 존재하는 백래시 크기 및 기여율(Contribution Ratio)을 추정하는 방법을 제안하지 않았다.

1 쌍의 기어 이 물림에 있어서, 가공오차, 열팽창, 이 변형 및 원활한 회전 등의 조건은 적절한 크기의 백래시를 기어 이 물림 시 요구한다. 백래시가 작을 경우, 간섭으로 인해 원활한 전동이 어려워지고, 지나치게 클 경우 진동충돌(Vibro-impact) 증가로 마모 및 제어안정성 문제가 야기된다. 그러므로, 기어 감속단의 적정 백래시 크기 관리 및 유지에 시스템 전체 백래시 크기 측면에서 이루어지기 보다는, 각 감속단에서 이루어져야 할 것이다. 이를 위하여, 본 연구에서는 전체 백래시 크기를 알 경우, 각 단에 존재하는 백래시 크기 및 기여율을 추정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. 기여율은 첫번째 감속단에 존재하는 백래시가 최종 부하단에서 측정된 전체 백래시 크기에 차지하는 비로서 정의되며, 본 연구에서는 다단 기어 감속의 선행연구로서, 2 단 기어 감속 서보 시스템의 각 단 백래시 크기 및 기여율을 추정하는 방법을 제안하였다.

각 단 백래시 크기를 추정하는데 사용한 개념은 백주현, 홍성민, 양태석, 김수현과 박윤근⁽⁵⁾이 발견한, 시스템의 전체 백래시 크기가 일정할지라도 각 단 백래시 크기의 변화에 따라 서보 시스템의 주파수응답특성에서 나타나는 반공진주파수(anti-resonant frequency: ARF) 및 공진주파수(resonant

frequency: RF)가 크게 변한다는데 근거한다. 이와 같은 현상은 백주현, 홍성민, 양태석, 김수현과 박윤근⁽⁶⁾의 연구결과에 의해 설명될 수 있다. 본 논문은 이 현상에 근거해 각 단 백래시 크기를 추정하는 방법을 제안하였으므로, 제안된 각 단 백래시 추정 방법의 타당성을 검증하기 위하여, 2축 구동 서보 시스템으로 구성된 탐색기 짐발(seeker gimbal)을 고려하였다. 탐색기란 유도탄의 눈 역할을 하는 장비로서, 짐발은 끝 단에 부착된 물체의 자세 각을 유도탄의 운동에 대해 독립시켜 안정화시키는 기계장치를 말한다. 고려된 탐색기 짐발은 방위각 구동 서보 시스템(azimuth driving servo system: ADSS)과 고각 구동 서보 시스템(elevation driving servo system: EDSS)으로 구성되어 있으며, 각 구동 서보 시스템은 각각 2 단 기어 감속으로 구성되어 있다.

2. 각 단 백래시 추정방법 개요

본 논문에서 제안한 각 단 백래시 추정방법의 흐름도는 Fig. 1 과 같다. 먼저, 각 단 백래시 크기를 관리할 시스템의 운동방정식을 모델링한 후,

전체 백래시 크기를 포함한 시스템 파라미터를 측정한다. 측정된 전체 백래시 크기를 사용하여 다음과 같이 정의된 기여율에 따라 시스템에 존재 가능한 각 단 백래시 조합을 계산한다.

$$Contribution\ ratio = \frac{[b_i / (N_1\ or\ N_2)]}{b_i} \times 100\% \quad (1)$$

계산된 각 단 백래시 조합과 측정으로부터 얻어진 파라미터 값을 이용하여, 기어감속 서보 시스템의 주파수응답특성을 기여율별로 시뮬레이션한다.

실험으로부터 얻은 주파수응답특성과 가장 근접한 시뮬레이션 결과를 낳는 기여율을 찾기 위하여 다음과 같은 오차지수 값을 계산한다.

$$error\ index = |f_{AR,S} - f_{AR,E}| + |f_{RS} - f_{RE}| + |f_{DS} - f_{DE}| \quad (2)$$

계산된 오차지수 값 중 가장 작은 오차지수 값을 찾은 후, 그 값에 해당하는 기여율 및 각 단 백래시 조합을 시스템의 기여율 및 각 단 백래시 크기로 추정한다.

3. 탐색기 짐발 모델

제안된 방법의 타당성 검증을 위해 본 장에서는 탐색기 짐발의 운동방정식을 유도하고자 한다.

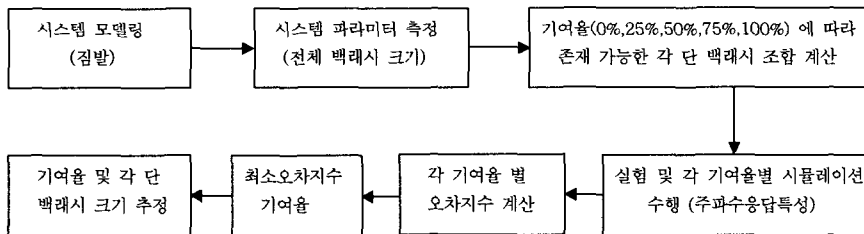


Fig. 1 The flow chart of backlash estimation method

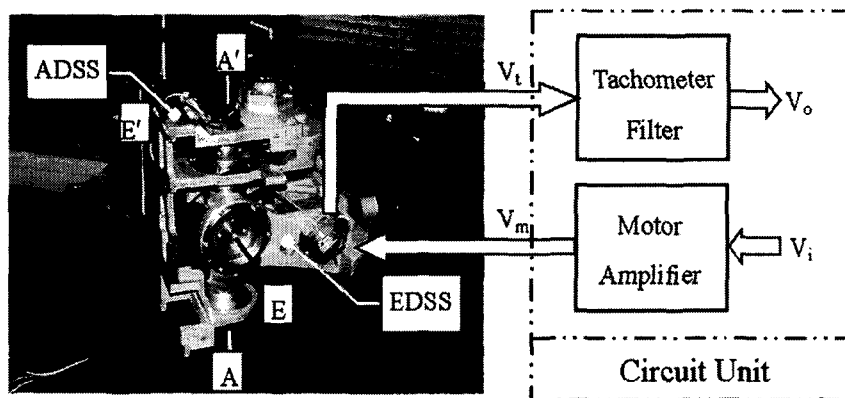


Fig. 2 A seeker gimbal

3.1 ADSS 의 모델

고려된 탐색기 짐발의 사진은 Fig. 2 에 나타내었다.

Fig. 3(a)는 Fig. 2 에 나타낸 탐색기 짐발의 한 구동 서보 시스템인 2 단 기어 감속기를 갖는 ADSS 의 세부 구조도이다. 세그먼트 기어 2 는 회전하지 않고, 피니언 2, 회전축, 기어 1, 피니언 1, 모터 및 베어링을 포함한 Fig. 3(a)에 사선 친 부분이 AA' 축에 대해 회전한다.

각 회전축에 존재하는 베어링들은 예압에 의해 간극 없이 각 축을 지지한다고 가정하였으며, 점성마찰 및 감쇠효과는 무시하였다. 이와 같은 가정 하에 얻어진 Fig. 3(a)에 대한 상세 모델은 Fig. 3(b)와 같다. 여기서 피니언 1 과 기어 1 은 각각의 관성모멘트와 하나의 비틀림스프링으로 모델링하였다.

피니언 1 의 관성모멘트는 모터 관성모멘트에 포함되며, 기어 1 축에 표현된 비틀림스프링은 피니언 1 과 기어 1 의 이 강성에 의해 생기는 비틀림 강성을 표현하였다.⁽⁷⁾

회전축의 경우 관성모멘트는 기어 1 과 피니언 2 사이의 회전축 길이 1/2 되는 지점에 집중되어 있다고 가정하였으며, 비틀림스프링은 회전축 비틀림강성 값의 2 배인 비틀림스프링이 기어 1 과 피니언 2 에 각각 연결된 것으로 모델링 하였다. 그리고, 기어 2 와 고정축은 회전하지 않으므로, 비틀림스프링만이 존재한다고 가정하였고, 이 물림에서 발생하는 백래시는 피니언 고정 시 회전하는 기어의 회전각으로 각각 표현하였다. Fig. 3(b)에서 이점쇄선으로 묶은 부분은 전체 회전부로 부하를 의미한다.

본 연구에서 고려된 ADSS 는 Fig. 2 에 보이는 바와 같이 Fig. 3(a)의 세부 구조, 모터전압증폭기 및 태코제너레이터 필터로 구성되어 있다. 모터전압증폭기는 모터에 입력되는 전압을 증폭하기 위해 사용되며, 액추에이터로는 태코제너레이터가 부착된 영구자석 필드형 DC 모터가 사용되었다.

또한, 태코제너레이터의 출력전압을 필터링하기 위하여, 2 차 저역 필터가 사용되었으며, 모터전압증폭기의 특성은 관심있는 주파수 영역 전체에 있어서 일정하였다. 그러므로, 모터입력전압과 모터전압증폭기의 입력전압의 관계식을 다음과 같이 나타내었다.

$$V_m = k_a V_i \tag{3}$$

또한, 액추에이터로 사용된 모터의 전기적 방정식은 Clifford⁽⁸⁾에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_m i_a + k_b \dot{\theta}_m = V_m \tag{4a}$$

$$T_m = k_t i_a \tag{4b}$$

그리고, 모터 회전속도를 검출하기 위해 사용된 태코제너레이터의 출력전압과 모터 회전각속도와 의 관계는 다음과 같다.

$$V_t = k_v \dot{\theta}_m \tag{5}$$

일반적으로, 태코제너레이터의 출력전압은 잡음이 많고, 부동전압 형태로 출력되므로, 차동 증폭 및 2 차 저역 필터를 거쳐야 한다. 태코제너레이터 필터를 통과한 태코제너레이터필터 출력전압은 다음과 같다.

$$V_o(s) = G_f(s) V_t(s) \tag{6}$$

액추에이터로 사용된 모터의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = T_m - \frac{T_{sl}}{N_i} - T_{f,m} \text{sign}(\dot{\theta}_m) \tag{7}$$

피니언 1 과 기어 1 사이의 백래시에 의해 기어 1 에 전달된 토크는, 다음과 같은 비선형 식으로 표현된다. 이때, 사용한 백래시 모델은 Nordin, Galic 과 Gutman⁽⁹⁾의 연구논문에서 수록된 테드존 모

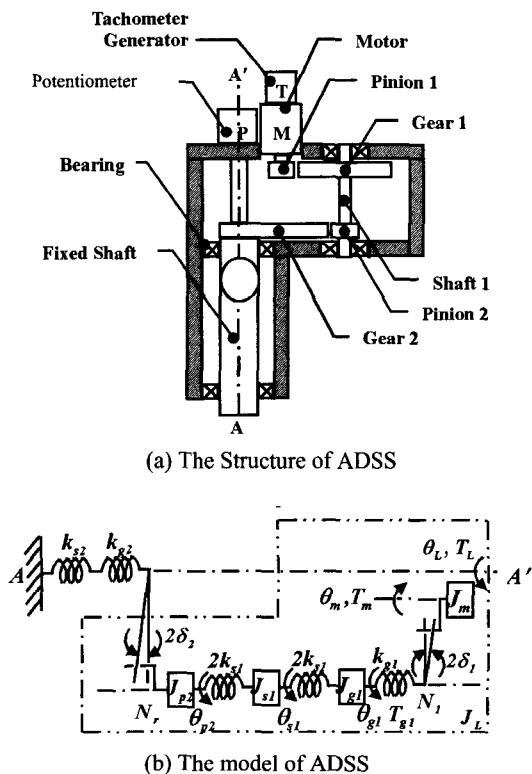


Fig. 3 The structure and model of ADSS in a seeker gimbal

델을 사용하였다.

$$T_{g1} = \begin{cases} k_{g1}(\theta_{d1} - \delta_1) & , \theta_{d1} > \delta_1 \\ 0 & , |\theta_{d1}| < \delta_1 \\ k_{g1}(\theta_{d1} + \delta_1) & , \theta_{d1} < -\delta_1 \end{cases} \quad (8)$$

여기서, 첫번째 기어 감속단의 각 전달오차는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_{d1} = \theta_m / N_1 - \theta_{g1} \quad (9)$$

기어 1의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{g1} \ddot{\theta}_{g1} = T_{g1} - 2k_{s1}(\theta_{g1} - \theta_{s1}) \quad (10)$$

회전축 1의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{s1} \ddot{\theta}_{s1} = 2k_{s1}(\theta_{g1} + \theta_{p2}) - 4k_{s1}\theta_{s1} \quad (11)$$

피니언 2의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{p2} \ddot{\theta}_{p2} = 2k_{s1}(\theta_{s1} - \theta_{p2}) - \frac{1}{N_r} T_L \quad (12)$$

여기서, 피니언 2와 기어 2 사이의 공전감속비는 다음과 같다.

$$N_r = N_2 + 1 \quad (13)$$

부하 토크는 식 (8)과 같이 피니언 2와 기어 2 사이의 백래시에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T_L = \begin{cases} k_2(\theta_{d2} - \delta_2) & , \theta_{d2} > \delta_2 \\ 0 & , |\theta_{d2}| < \delta_2 \\ k_2(\theta_{d2} + \delta_2) & , \theta_{d2} < -\delta_2 \end{cases} \quad (14)$$

여기서, 두번째 기어 감속단의 각 전달오차는 다음과 같다.

$$\theta_{d2} = \theta_{p2} / N_r - \theta_L \quad (15)$$

또한, 기어 2와 고정축의 등가비틀림강성은 Chubb⁽⁷⁾에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$k_2 = \frac{k_{g2} k_{s2}}{k_{g2} + k_{s2}} \quad (16)$$

마지막으로, 부하의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_L \ddot{\theta}_L = T_L - T_{f,L} \text{sign}(\dot{\theta}_L) \quad (17)$$

지금까지 유도한 식들로부터, 모터전압증폭기 입력전압에 대한 태코제너레이터필터의 출력전압 응답을 얻을 수 있다. 참고적으로, 각 단의 백래시 크기와 전체 백래시 크기와와의 관계를 살펴보면 다음과 같다.

$$b_i = b_2 + \frac{1}{N_r} b_1 \quad (18)$$

결국, 각도 백래시 b_i 와 δ_i 의 관계는 다음과 같다.

$$b_i = 360^\circ \delta_i / \pi \quad (i=1,2) \quad (19)$$

3.2 EDSS의 모델

본 절에서는 EDSS의 모델과 운동방정식을 유도하였다. EDSS의 상세 구조는 Fig. 4(a)에 나타내

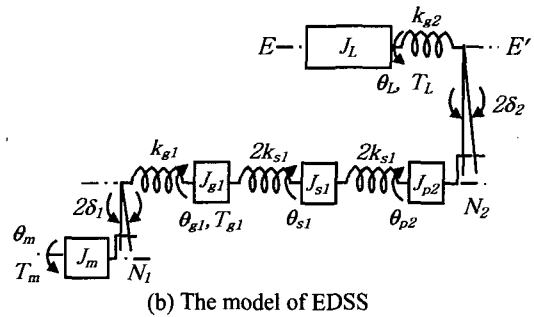
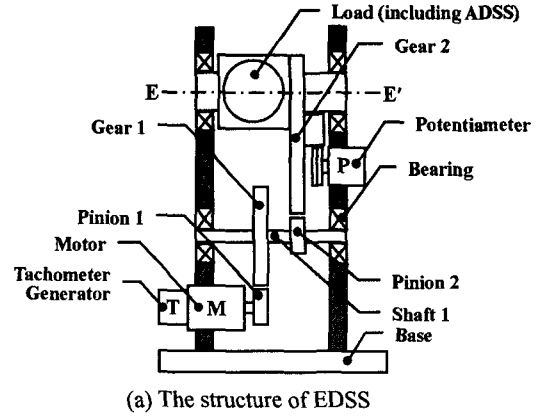


Fig. 4 The structure and model of EDSS in a seeker gimbal

었으며, 이것의 모델을 Fig. 4(b)에 나타내었다.

기어 2는 부하에 직접 부착되어 있으므로, 기어 2의 관성모멘트는 부하 관성모멘트에 포함시키고, 비틀림스프링만을 표현하였다.

EDSS는 ADSS와 동일한 모터전압증폭기 및 태코제너레이터 필터 등을 사용하고, 구조가 다소 다르긴 하나, ADSS와 유사한 2단 기어 감속 구조를 갖으므로, 3.1절에서 유도한 식들 중 식 (12) ~ (16)와 (18)들을 다음 식 (20) ~ (23)들로 대체하여, EDSS의 운동방정식들을 구할 수 있도록 하였다.

$$J_{p2} \ddot{\theta}_{p2} = 2k_{s1}(\theta_{s1} - \theta_{p2}) - \frac{1}{N_2} T_L \quad (20)$$

$$T_L = \begin{cases} k_{g2}(\theta_{d2} - \delta_2) & , \theta_{d2} > \delta_2 \\ 0 & , |\theta_{d2}| < \delta_2 \\ k_{g2}(\theta_{d2} + \delta_2) & , \theta_{d2} < -\delta_2 \end{cases} \quad (21)$$

$$\theta_{d2} = \theta_{p2} / N_2 - \theta_L \quad (22)$$

$$b_i = b_2 + \frac{1}{N_2} b_1 \quad (23)$$

결국, 식 (3) ~ (11)와 식 (20) ~ (23)으로부터, 모터 전압증폭기 입력전압에 대한 EDSS의 태코제너레이터필터의 출력전압 응답을 얻을 수 있다.

들을 Fig. 5의 블록선도로 변환하였으며, 집발 시스템의 파라미터들을 측정하여 Table 1에 수록하였다. 또한, ADSS와 EDSS의 전체 백래시 크기를

4. 시뮬레이션

시스템내의 전체 백래시 크기의 증가는 시스템의 유효 등가 비틀림강성 값을 감소시키는 효과가 있기 때문에, 전체 백래시 크기 증가는 시스템의 주파수응답특성을 변화시킨다는 것은 널리 알려져 있는 사실이다.⁽¹⁰⁾ 그러나, 시스템의 전체 백래시 크기가 동일하더라도, 각 단 백래시 크기 변화에 따라 시스템의 주파수응답특성이 변한다는 연구 결과는 백주현, 홍성민, 양태석, 김수현과 곽윤근⁽⁵⁾에 의해서만 보고되었다.

본 연구에서 각 단의 백래시 크기 및 기여율 추정 시 사용한 개념은, 기어 감속 서보 시스템의 전체 백래시 크기가 일정하더라도, 각 단의 백래시 크기가 다를 경우 서로 다른 주파수응답특성을 갖는다는 현상에 근거한 것이다. 그러므로, 이 현상 및 가설을 재확인하기 위하여, 탐색기 집발의 각 구동부인 ADSS와 EDSS의 두 경우에 있어서, 전체 백래시 크기는 일정하게 두고, 각 단 백래시 변화에 따른 주파수응답특성의 변화를 시뮬레이션 하였다. 이를 위하여 3장에서 유도한 운동방정식

Table 1 Specifications for ADSS and EDSS

Parameter	Unit	ADSS	EDSS
N_1	-	5.94	6.41
k_{g1}	(N·m/rad)	3.40E4	4.74E4
J_{g1}	(kg·m ²)	2.34E-5	3.69E-5
k_{s1}	(N·m/rad)	22.8	1.54E2
J_{s1}	(kg·m ²)	8.30E-8	2.04E-7
J_{p1}	(kg·m ²)	2.21E-7	4.84E-7
N_1, N_2	-	10.5	7.75
k_2, k_{g2}	(N·m/rad)	7.74E4	2.54E5
J_1	(kg·m ²)	2.75E-3	1.44E-2
$T_{f,1}$	(N·m)	7.0E-3	7.1E-3
b_1	(Degree)	0.066	0.276
L_a	(H)	8.50E-4	
R_m	(Ω)	4.10	
k_b	(V·s/rad)	3.44E-2	
k_t	(N·m/A)	3.49E-2	
J_m	(kg·m ²)	8.60E-6	
$T_{f,m}$	(N·m)	1.40E-2	
k_v	-	4.11	
k_{cs}	(V·s/rad)	8.60E-2	
$G_f(s)$	-	723439 / (s ² + 1710s + 723439)	
B_m	(N·m/(rad/s))	1.6E-4	

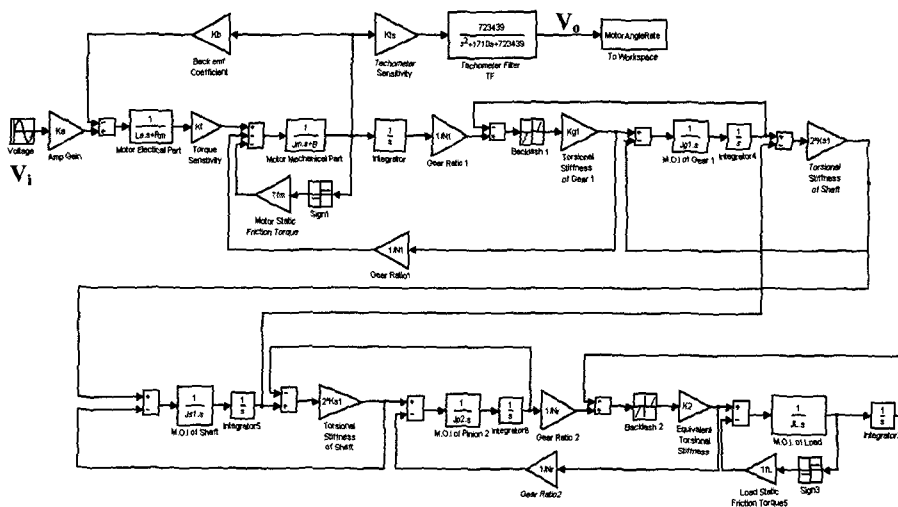


Fig. 5 Block diagram

측정한 후, 식 (1), (18) 및 (23)의 식들로부터 기여율에 따른 각 단의 백래시 크기 조합을 구하였으며, 이것을 Table 2 에 나타내었다. 기여율이란 식 (1)에 정의된 바와 같이 첫번째 감속단에 존재하는 백래시가 최종 부하단에서 측정된 전체 백래시 크기에 차지하는 비율을 말한다.

각 가진 주파수에 대한 시간영역 응답을 얻기 위하여 MathWorks 사의 Matlab Simulink 를 이용하였으며, 시뮬레이션 조건으로 모터전압증폭기에 입력되는 정현파 전압의 피크 진폭을 2.5 V, 샘플링 시간은 10 μ sec 로, 솔버로는 Runge-Kutta 를 사용하였다.

정상상태응답을 얻기 위하여 각 가진 주파수별로 57 sec 간 시뮬레이션하였으며, 초기 55 sec 간의 데이터는 버리고, 나머지 2 sec 간의 데이터만 취하여 가진 주파수 성분을 추출하는 주파수 분석을 수행하였다. 이와 같은 방법으로 얻어진 ADSS 의 보드선도를 Fig. 6 에 나타내었다.

시뮬레이션에서 얻어진 Fig. 6 로부터 각 기여율에 따른 ARF 와 RF 의 변화를 Table 2 에 정리하였으며, 이 값들을 Fig. 7(a)에 나타내었다. 참고로, 얻어진 ARF 와 RF 의 차이를 Fig. 7(b)에 나타내었으며, Fig. 7(a)와 7(b)로부터, 전체 백래시 크기가 일정할 지라도, 각 단 백래시 크기가 변화함에 따라 서보 시스템의 주파수응답특성은 변화함을 확인할 수 있었다.

이 현상을 한번 더 관찰하기 위하여, 탐색기 짐발의 EDSS 를 ADSS 와 같은 방법으로 시뮬레이션 하였다. ADSS 경우와 마찬가지로 얻어진 결과는 Fig. 8(a)와 8(b)에 나타내었으며, 이 값 역시 Table

2 에 나타내었다. Fig. 7(a), 7(b), 8(a)와 8(b)로부터, 전체 백래시 크기가 일정할 지라도, 각 단 백래시 크기 변화에 따라 2 단 기어 감속기를 갖는 서보 시스템의 주파수응답특성은 서로 다를 수 있음을 확인할 수 있었다.

5. 실험

본 장에서는 ADSS 와 EDSS 의 보드선도를 실험적으로 구하기 위하여, Hewlett-Packard 사 HP35670A 모델번호의 Dynamic Analyzer 를 사용하였다.

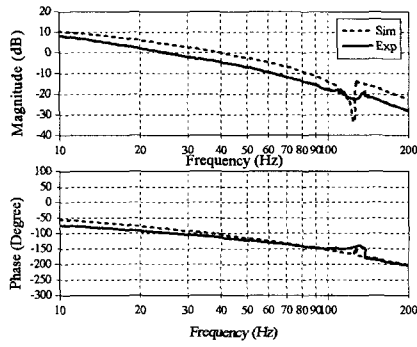
시뮬레이션으로부터 얻은 결과와 비교하기 위하여, 실험 시 인가된 모터전압증폭기의 입력전압 피크 진폭을 시뮬레이션과 동일하게 2.5V 로 하였다. 실험으로부터 얻어진 ADSS 와 EDSS 의 보드선도들은 Fig. 9(a)와 9(b)에 나타내었으며, 각각의 ARF 및 RF 값을 쉽게 비교하기 위해 Table 2 에 시뮬레이션 결과와 함께 나타내었다.

제안된 각 단 백래시 추정방법에 대한 타당성 검증 및 정확도 평가를 위하여, 짐발 ADSS 와 EDSS 의 각 기어 감속기들의 각 단 백래시 크기를 측정하였다. 짐발은 각 단 백래시 크기 측정을 위한 센서가 부착되어 있지 않으므로, 짐발로부터 ADSS 와 EDSS 의 기어 감속단을 분리한 후, 각 단 백래시 크기를 광학 현미경으로 측정하였다. 각 단 백래시 크기 측정 예는 Fig. 10(a)와 10(b)에 나타내었으며, 측정된 값들은 Table 2 에 나타내었다.

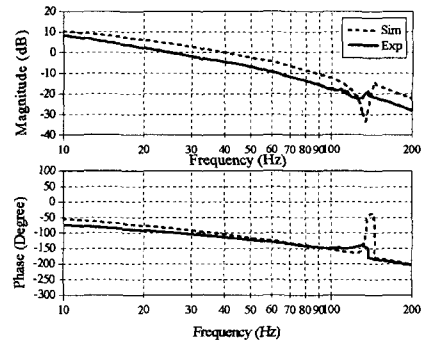
이와 같은 방법으로 EDSS 의 각 단 백래시 크기 역시 측정하였다.

Table 2 The simulation and experiment results of ADSS and EDSS according to the contribution ratio (Exp: Experiment)

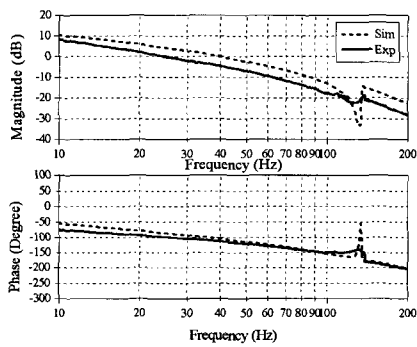
	Case	Contribution Ratio (%)	b_1	b_2	Anti-resonant (dB / Hz)	Resonant (dB / Hz)
ADSS	1	0	0°	0.066°	-33.6 / 125	-12.8 / 127
	2	25	0.173°	0.0495°	-33.5 / 131	-14.3 / 135
	3	50	0.347°	0.0330°	-33.3 / 134	-14.0 / 145
	4	75	0.519°	0.0166°	-32.2 / 137	-9.6 / 149
	5	100	0.693°	0°	-30.8 / 141	0.2 / 153
	Exp.	23	0.161°	0.051°	-22.3 / 128	-18.6 / 137
EDSS	1	0	0°	0.276°	-24.7 / 50	-3.4 / 79
	2	25	0.535°	0.207°	-23.7 / 51	-15.1 / 84
	3	50	1.07°	0.138°	-27.5 / 52	-3.2 / 97
	4	75	1.60°	0.069°	-20.8 / 52	-5.9 / 92
	5	100	2.14°	0°	-22.4 / 51	-3.9 / 89
	Exp.	4	0.0856°	0.265°	-14.6 / 40	-1.8 / 75



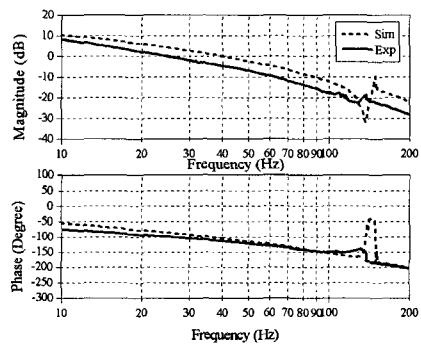
(a) Case 1 (0%)



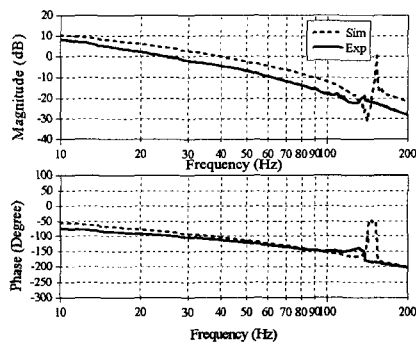
(c) Case 3 (50%)



(b) Case 2 (25%)

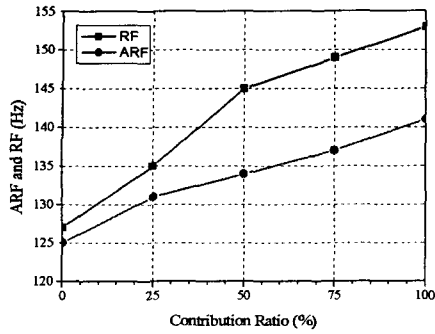


(d) Case 4 (75%)

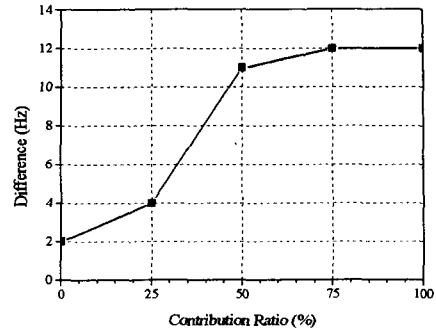


(e) Case 5 (100%)

Fig. 6 The Bode diagram(V_o/V_i) of ADSS according to the contribution ratio (Sim: Simulation, Exp: Experiment)

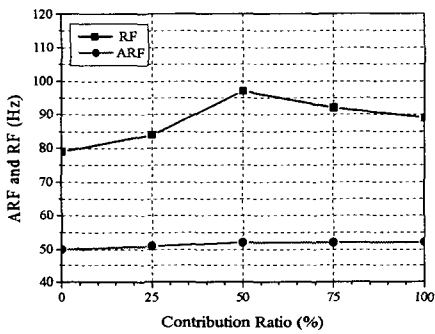


(a) ARF and RF

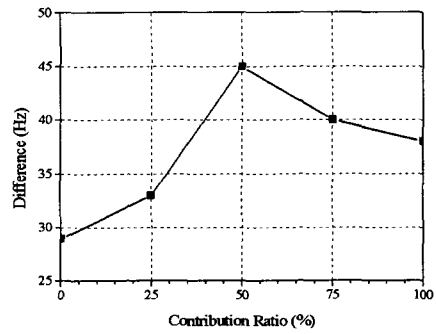


(b) The difference between ARF and RF

Fig. 7 The simulation results of ADSS according to the contribution ratio

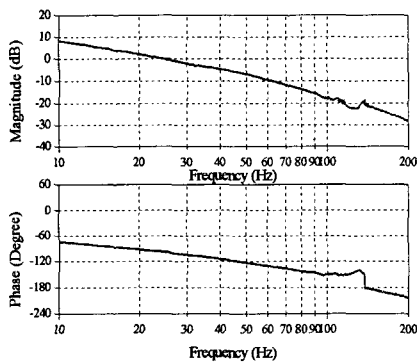


(a) ARF and RF

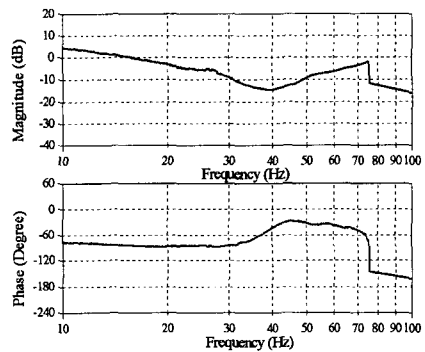


(b) The difference between ARF and RF

Fig. 8 The simulation results of EDSS according to the contribution ratio

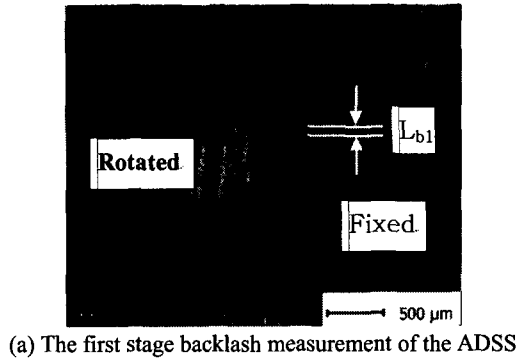


(a) The Bode diagram of the ADSS

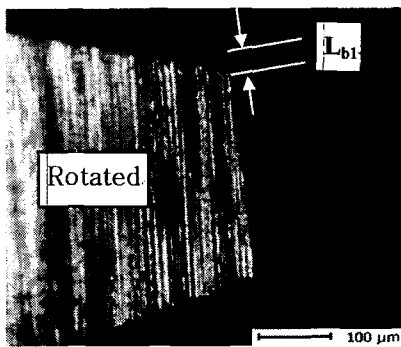


(b) The Bode diagram of the EDSS

Fig. 9 The experiment results of ADSS and EDSS



(a) The first stage backlash measurement of the ADSS



(b) The first stage backlash measurement of the EDSS

Fig. 10 Examples of the backlash measurement of ADSS and EDSS using a microscope

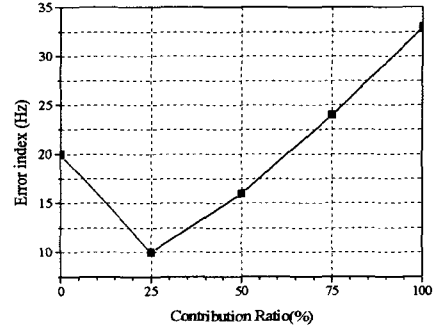
6. 결과 및 고찰

6.1 결과

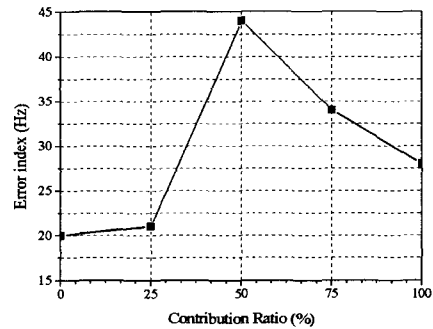
4 장에서 얻은 시뮬레이션 결과는 감쇠효과 및 베어링 간극 등의 효과를 무시한 가정하에 얻어진 결과이므로, 실험결과와 시뮬레이션결과가 정확히 일치하기가 어렵다. 그러므로, 2 장에서 정의한 식 (2)의 오차지수(Error Index)를 사용하여 실험 결과와 가장 근접한 시뮬레이션 결과를 낚는 기여율 값을 찾도록 하였다.

기여율에 따라 계산된 ADSS 와 EDSS 의 오차지수들은 Fig. 11(a)와 11(b)에 나타내었으며, 이 중 최소오차지수를 갖는 ADSS 의 기여율 값은 25%이며, EDSS 는 0%이다. 광학현미경을 사용한 측정으로부터 얻어진 ADSS 와 EDSS 의 기여율은 Table 2 에 나타낸 바와 같이 각각 23%와 4%이다.

Fig. 12 로부터 제안된 방법은 2 단 기어 감속기를 갖는 탐색기 짐발 내의 ADSS 와 EDSS 각 단 백래시 기여율 및 크기를 추정하기에 충분히 정확함을 확인할 수 있었다.



(a) The error index of the ADSS



(b) The error index of the EDSS

Fig. 11 The error indices of ADSS and EDSS according to the contribution ratio

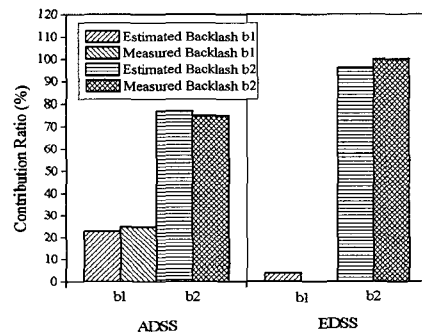
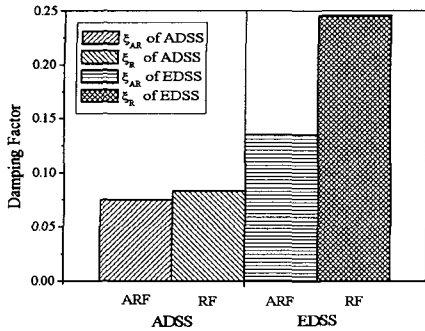


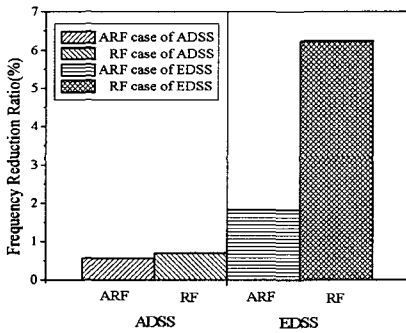
Fig. 12 A comparison estimated contribution ratio and measured contribution ratio

6.2 고찰

Fig. 11(a)와 11(b)에 보이는 바와 같이 EDSS 는 ADSS 보다 큰 최소오차지수를 갖는다(EDSS: 20Hz ADSS: 10Hz). 이 원인을 분석하고자 오차가 발생할 수 있는 여러 원인 중, 모델링 시 무시한 시스템 감쇠특성의 영향을 고려하고자 한다. Fig. 3(b)와 4(b)에 표현된 ADSS 와 EDSS 모델의 정확한 전달



(a) The damping factor at the ARF and RF of ADSS and EDSS



(b) The frequency reduction ratio at the ARF and RF of ADSS and EDSS

Fig. 13 The damping factor and frequency reduction ratio of ADSS and EDSS

함수 해석은 매우 복잡하고 어려우므로, 분석을 단순화하기 위하여 각 서보 시스템들을 2 개의 관성모멘트와 1 개의 비틀림스프링을 갖는 선형시스템으로 단순화하였다.⁽¹¹⁾

이와 같은 단순화와 Fig. 9(a)와 9(b)로부터 근사화된 감쇠비들을 Bigley⁽¹¹⁾에 의해 얻을 수 있다.

$$\xi_{AR} = \frac{1}{2Q_{AR}} = \frac{(f_{2,E} - f_{1,E})}{2f_{AR,E}} \quad (24)$$

$$\xi_R = \frac{f_{R,E}}{f_{AR,E}} \xi_{AR} \quad (25)$$

그리고, 구해진 감쇠비들로부터 근사화된 주파수 감소율 값을 다음과 같이 얻을 수 있다.⁽¹²⁾

$$R_{AR} = 1 - \sqrt{1 - 2\xi_{AR}^2} \quad (\text{when } 0 \leq \xi_{AR} \leq 0.707) \quad (26a)$$

$$R_R = 1 - \sqrt{1 - 2\xi_R^2} \quad (\text{when } 0 \leq \xi_R \leq 0.707) \quad (26b)$$

구해진 ADSS와 EDSS의 감쇠비와 주파수 감소율은 Fig. 13(a)와 13(b)에 나타내었다. ADSS의 감쇠비는 ARF에서 0.075이며, RF에서 0.083이다.

반면에, EDSS의 경우 ARF에서 0.135이며, RF에서는 0.246로 EDSS의 감쇠비가 ADSS의 감쇠비보다 크다.

이 원인으로 Fig. 2에 보이는 바와 같이, ADSS는 EDSS의 부하로 EDSS 위에 설치되므로, EDSS가 ADSS보다 비교적 복잡한 부하 구조를 갖게 된다. 이것은 부하를 단일 질량의 강체로 고려한 모델과 달리 EDSS가 ADSS보다 큰 모델 오차를 갖는 것으로 판단된다.

결과적으로, Fig. 13(b)에 나타난 바와 같이 EDSS는 큰 감쇠비에 기인한 큰 주파수 감소율로, ADSS보다 실험결과와의 오차지수가 더 크게 나타나는 것으로 생각된다. 그리고, EDSS가 큰 최소 오차지수를 갖는 나머지 원인으로 ADSS와 마찬가지로 시스템 파라미터 불확도에 기인한 것으로 생각된다.

본 감쇠특성에 의한 영향 분석을 통하여, 보다 넓은 분야에 본 백래시 추정개념을 확장하여 적용할 때에는 시스템의 감쇠계수 및 불확도가 작은 시스템에 적용해야 한다고 판단된다.

그럼에도 불구하고, 각 단 백래시 크기 변화에 따른 주파수응답특성상의 ARF 및 RF의 변화를 통해 각 단 백래시 기여율 및 크기를 추정하는 본 연구의 백래시 추정 개념은 충분히 타당하며, 각 단 백래시 추정에 사용될 수 있다고 판단된다.

7. 결론

본 논문에서는 2 단 기어 감속기를 갖는 탐색기 집발의 각 단 백래시 기여율 및 크기를 추정하기 위한 방법으로 주파수응답특성에서 나타나는 ARF 및 RF를 사용하였다. 제안된 방법의 개념은 전체 백래시 크기가 동일할 지라도, 각 단의 백래시 크기 변화에 따라 ARF와 RF가 변한다는 점에 근거한다. 제안된 각 단 백래시 추정방법은 2 단 기어 감속기를 갖는 탐색기 집발의 ADSS와 EDSS의 각 단 백래시 추정을 통해 그 타당성을 검증하였으며, 본 연구를 통해 향후 다단 기어 감속 서보 시스템의 각 단 백래시 추정에 관한 연구도 용이해지리라 판단된다.

제안된 방법은 기존 전체 백래시 추정 방법들과 비교하여 다음과 같은 장점을 갖는다. 첫째, 서보 시스템의 전체 백래시 크기를 아는 경우, 각 단 백래시 크기를 직접 측정하지 않고, 각 단 백래시의 기여율 및 그 크기를 추정할 수 있는 현재 존재하는 유일한 방법이다. 둘째, 본 방법은 서보 시스템의 일반적인 속도 센서 중의 하나인 태코제너레이터만을 사용하여 모터의 각속도만을 측정하

므로, 기존 연구와 같은 가속도계 및 토크센서와 같은 부가적인 센서를 요구하지 않는다. 셋째, 본 연구를 통하여 각 단의 백래시 크기를 기어 감속기의 분해 및 별도의 센서 부착 없이 쉽게 알 수 있게 되었다. 넷째, 과도한 양의 백래시에 기인한 서보 시스템의 결함 발생시 과도한 백래시 크기를 갖는 기어 단을 쉽게 찾을 수 있으므로, 기어 감속단 백래시 전체를 조정하거나 교체함이 없이, 문제의 백래시 크기를 갖는 기어 단만을 조정 또는 교체 할 수 있으므로 경제적이고 효율적이다. 다섯째, 제안된 방법은 서보 시스템의 출력 축 또는 로봇의 링크 위에 가속도계와 같은 센서를 부착할 필요가 없으므로, 스피들 기계(spindle machine)와 같은 일반적인 공작기계에도 적용될 수 있다.⁽²⁾

끝으로, 제안된 방법의 개념에 근거하여, 다양한 공작기계 및 많은 서보 시스템들의 백래시에 의한 결함 발생시, 진단, 유지 및 보수가 보다 경제적이고 효과적으로 될 것이라 판단된다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Dagalakis, N. G. and Myers, D. R., 1985, "A Technique for the Detection of Robot Joint Gear Tightness," *Journal of Robotic Systems*, Vol. 2, No. 4, pp. 414-423.
- (2) Stein, J. L. and Wang, C. H., 1998, "Estimation of Gear Backlash: Theory and Simulation," *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control*, Vol. 120, pp. 74-82.

- (3) Sakar, N., Ellis, R. E. and Moore, T. N., 1997, "Backlash Detection in Geared Mechanisms: Modeling Simulation, and Experimentation," *Mechanical Systems and Signal Processing*, Vol. 11, No. 3, pp. 391-408.
- (4) Pan, M. C., Brussel, H. V., Sas, P. and Verbeure, B., 1998, "Fault Diagnosis of Joint Backlash," *ASME Journal of Vibration and Acoustics*, Vol. 120, pp. 13-24.
- (5) Baek, J. H., Hong, S. M., Yang, T. S., Kim, S. H., Kwak, Y. K., 2002, "Frequency Response Characteristics of Two-Stage Gear Reduction Servo System according to the Backlash Contribution Ratio Variation of Each Gear Reduction Stage," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering* Vol. 19, No. 5, pp. 103-109.
- (6) Baek, J. H., Hong, S. M., Yang, T. S., Kim, S. H., Kwak, Y. K., 2002, "A Study on the Bandwidth of Gear Reduction Servo System According to Backlash and Motor Supplied Voltage," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 6, pp. 119-127.
- (7) Chubb, B. A., 1967, *Modern Analytical Design of Instrument Servomechanisms*, Addison-Wesley Publishing Company, Massachusetts, USA.
- (8) Clifford, M., 1990, *Modern Electronic Motors*, Prentice Hall.
- (9) Nordin, M., Galic, J. and Gutman, P. O., 1997, "New Models for Backlash and Gear Play," *International Journal of Adaptive Control and Signal Processing*, Vol. 11, pp. 49-63.
- (10) Dhaouadi, R., Kubo, K. and Tobise, M., 1993, "Analysis and Compensation of Speed Drive Systems with Torsional Loads," *IEEE International Workshop on Advanced Motion Control*, Yokohama, Japan, pp. 271-277.
- (11) Bigley, W. J., 1993, "Wideband Base Motion Isolation Control via the State Equalization Technique," *Optical Engineering*, Vol. 32, No. 11, pp. 2805-2811.
- (12) Meirovitch, L., 1997, *Principles and Techniques of Vibrations*, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ.