

전자기파 탐색기의 안테나 유연특성 모델링

백주현

Modeling of a Flexible Characteristics of the Antenna in a Microwave Seeker

Joo Hyun Baek

Key Words : Modeling(모델링), Seeker (탐색기), Flexibility(유연성), Bandwidth(대역폭), Anti-resonance(반공진)

Abstract

The model of azimuth driving servo system with a flexible antenna in a microwave seeker has been derived in this paper. The validity of the model is verified by comparing the result of the model with that of experiment. It is found that one should consider an antenna as a flexible body in case of modeling the dynamics of the microwave seeker. It is also known that the effect of reducing backlash magnitude for extending the bandwidth in the system with a flexible antenna is smaller than that in the system with a stiff antenna. It is thought that the model-based design optimization of the microwave seeker will become possible by virtue of the derived model, when a weight reduction and a bandwidth extension are required.

1. 서 론

자국의 방위력 증강 및 국방력 증대를 위하여, 다양한 무기체계들이 개발되고 있으며, 이 중 유도무기체계는 현대전에서 제공권 확보 및 전략적 관점에서 중요한 무기체계로 대두되고 있다. 유도 무기체계 중 하나인 유도탄은 비행 중 인 목표물과 지상 이동 중인 목표물을 요격하기 위하여, 유도탄 자체에 목표물을 추적 및 탐색하기 위한 시스템을 장착하고 있다. 이것을 탐색기(Seeker)라 부르며, 유도탄 앞부분에 탑재되어 목표물의 위치 정보 추출 및 유도탄 비행궤적 수정을 위한 기초 신호를 생성한다.

본 연구에서 고려한 탐색기는 목표물 검출을 위한 검출신호매체로 전자기파를 사용하는 전자기파 탐색기로서, 전자기파를 방사하는 안테나, 방사할 전자기파를 생성 및 수신하는 송수신부, 송수신된 신호로부터 표적위치정보 및 비행정보를 추출하는 신호 처리부와 유도탄의 운동으로부터 안테나를 안정화 시키고, 유도탄이 목표물을 지속적으로 지

향할 수 있도록 동작하는 짐발(Gimbal)로 구성되어 있다. 이 중 안테나와 짐발은 탐색기의 기계 구조적 구성부로서 탐색기의 기계적 추종성능을 결정하는 주요 구성부이다. 이러한 구성부는 비행하는 물체에 탑재되어 운용되므로 무게 및 크기에 큰 제한이 따르며, 유도탄의 높은 명중률 구현을 위하여 정확한 추종성과 빠른 응답성이 요구된다.

Bigley⁽¹⁾ 의하면 빠른 응답성은 기계구조적 구성부의 모터 토크 입력에 대한 모터 각속도 출력에서 나타나는 반공진 및 공진주파수에 의해 제한되며, 반공진주파수는 시스템의 속도제어 대역폭을 결정한다고 한다. 그러므로, 탐색기 짐발이 빠른 응답성을 갖도록 하기 위해서는 가능한 높은 반공진주파수를 가져야 한다.

본 연구에서 고려된 탐색기 짐발은 안테나가 부착된 방위각 구동부와 유도탄에 기초를 둔 고각 구동부로 구성되어 있다. 이 중 방위각 구동부는 고각 구동부와 비교하여 목표물 탐색 시 회전하는 각이 크고 구동빈도가 높으므로 탐색기 성능에 미치는 영향이 크다. 그러므로, 탐색기 짐발 모델 작성의 선행연구로서 본 연구에서는 방위각 구동부만의 대역폭 예측모델을 제안하고자 한다.

참고로, 탐색기 짐발설계에 관한 기존 연구들을

* 회원, LG 이노텍㈜ 연구소, 연구 7 그룹
E-mail : jhbaekb@lginnotek.com
TEL : (031)288-9244 FAX : (031)284-4542

살펴보면 Stockum 과 Carroll⁽¹⁾은 안정화 성능 및 짐발 설계 시 고려해야 할 설계절충 사양에 대해서 언급하였고, Stockum 과 Burge⁽²⁾는 광학추적시스템의 고성능 짐발 구현을 위해 최적화 필요성을 제시하였다. 그리고, Iecovich⁽³⁾는 광학추적시스템의 액추에이터 결정기준을 제시하였으며, Back et al.⁽⁴⁾ 등은 백래시가 시스템의 반공진 주파수 및 공진주파수에 미치는 영향을 분석하였다.

기존연구에는 본 연구에서 고려한 구조와 같은 탐색기의 대역폭 분석을 위한 모델링에 관한 연구가 없었다. 이에 본 연구에서는 안테나가 부착된 방위각구동부의 모델을 작성하여 향후 탐색기 성능향상 및 경량화 요구 시 최적설계용 모델로 사용하고자 한다.

2. 모델링

Fig. 1 은 실제 탐색기 짐발의 구조 및 기타 사양들을 등가화 한 시작품으로 원판형 안테나와 방위각 구동을 위한 방위각 구동 서보 시스템 (azimuth driving servo system: ADSS) 및 고각 구동을 위한 고각 구동 서보 시스템(elevation driving servo system: EDSS)로 구성되어 있다.

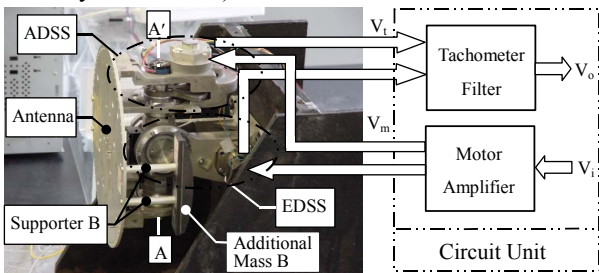


Fig. 1 A seeker gimbal including antenna

2.1 안테나를 강체로 고려한 ADSS 모델

Fig. 2(a)는 Fig. 1 에 나타난 탐색기 짐발 중 안테나 부를 제외한 ADSS 의 세부 구조 개략도이다. 고정축에 고정된 세그먼트 기어 2 는 회전하지 않고, 피니언 2, 회전축, 기어 1, 피니언 1, 모터 및 베어링을 포함한 Fig. 1 에서 사선 친 부분이 AA' 축을 중심으로 모터 회전에 동기되어 회전하는 구조이다. 각 회전축에 존재하는 베어링들은 예압에 의해 간극 없이 각 축을 지지한다고 가정하였으며, 점성마찰 및 감쇠효과는 무시하였다. 이와 같은 가정 하에 얻어진 Fig. 2(a)에 대한 상세 모델은 Fig. 2(b)와 같다. 여기서 피니언 1 과 기어 1 은 각각의 관성모멘트와 하나의 비틀림스프링으로 모델링 하였다. 피니언 1 의 관성모멘트는 모터 관성모멘트에 포함되며, 기어 1 축에 표현된 비틀림스프링은 피니언 1 과 기어 1 의 이 강성에 의해 생기는 비틀림강성을 표현하였다.⁽⁴⁾

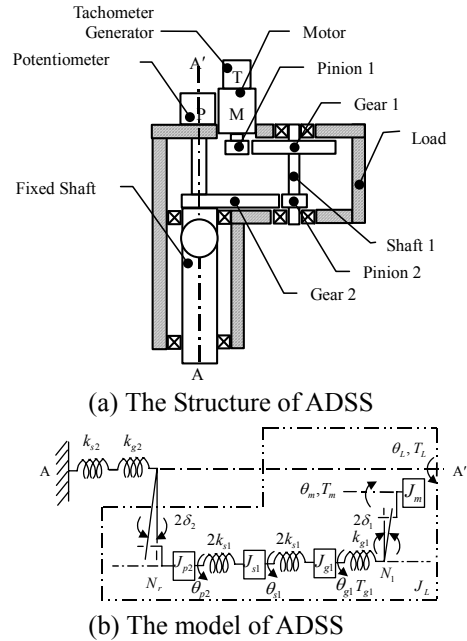


Fig. 2 The structure and model of ADSS in a seeker Gimbal

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. 이점쇄선으로 묶은 부분은 Fig. 2(a)의 전체 회전부로 부하를 의미한다. 본 연구에서 고려된 ADSS 는 Fig. 1 에 보이는 바와 같이 Fig. 2(a)의 세부구조, 모터전압증폭기 및 태코제너레이터 필터로 구성 되어 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 본 연구에서 관심 있는 주파수 영역 전체에 있어서 일정하므로, 모터입력 전압 V_m 과 모터전압증폭기의 입력전압 V_i 의 관계식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$V_m = k_a V_i \tag{1}$$

여기서, k_a 는 모터전압증폭기의 증폭 비이다.

또한, 액추에이터로 사용된 모터의 전기적 방정식은 다음과 같다.⁽⁴⁾

$$L_a \frac{di_a}{dt} + R_m i_a + k_b \dot{\theta}_m = V_m \tag{2-a}$$

$$T_m = k_t i_a \quad (2-b)$$

여기서, L_a 는 모터 인덕턴스(H), R_m 은 모터 전 기자 저항(Ω), k_b 는 모터역기전력 상수($V \cdot s/rad$), i_a 는 모터 전기자에 흐르는 전류(A), θ_m 는 모 터 회전자의 회전각(rad), k_t 는 모터의 토크 상수 ($N \cdot m/A$)이고, T_m 는 모터 토크($N \cdot m$)이다.

그리고, 모터 회전속도를 검출하기 위해 사용된 태코제너레이터의 출력전압 V_t 과 모터 회전 각속 도와의 관계는 다음과 같다.

$$V_t = k_{ts} \dot{\theta}_m \quad (3)$$

여기서, k_{ts} 는 태코제너레이터 상수($N \cdot m/A$)이다. 일반적으로, 태코제너레이터의 출력전압은 잡음이 많고, 부동전압 형태로 출력되므로, 차동 증폭 및 2 차 저역 필터를 거쳐야 한다. 태코제너레이터 필 터를 통과한 태코제너레이터 출력전압 V_o 는 다 음과 같다.

$$V_o(s) = G_f(s)V_t(s) \quad (4)$$

여기서, $G_f(s)$ 는 태코제너레이터 필터의 전달 함 수이다. 액츄에이터로 사용된 모터의 운동방정식 은 다음과 같다.

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = T_m - \frac{T_{gl}}{N_1} - T_{f,m} \text{sign}(\dot{\theta}_m) \quad (5)$$

여기서, J_m 는 모터의 관성모멘트($kg \cdot m^2$), B_m 는 모터의 점성 감쇠 계수($N \cdot m/(rad/sec)$), T_{gl} 는 기어 1 에 전달된 토크($N \cdot m$), $T_{f,m}$ 는 모터의 정 마찰 토크($N \cdot m$), N_1 는 피니언 1 과 기어 1 사이 의 기어 비이고, $\text{sign}(\cdot)$ 는 ()안의 값의 부호를 의 미한다. 기어 1 에 전달된 토크 T_{gl} 는 피니언 1 과 기어 1 사이의 백래시에 의해, 다음과 같은 비선 형 식으로 표현된다. 이때, 사용한 백래시 모델은 테드존 모델⁽⁴⁾을 사용하였다.

$$T_{gl} = \begin{cases} k_{g1}(\theta_{d1} - \delta_1) & , \theta_{d1} > \delta_1 \\ 0 & , |\theta_{d1}| < \delta_1 \\ k_{g1}(\theta_{d1} + \delta_1) & , \theta_{d1} < -\delta_1 \end{cases} \quad (6)$$

여기서, θ_{d1} 는 첫번째 기어 감속단의 각 전달오차 (rad), k_{g1} 는 피니언 1 과 기어 1 의 이 강성에 의한 비틀림강성($N \cdot m/rad$) 이고, δ_1 는 피니언 1 과 기어 1 사이에 존재하는 백래시를 피니언 1 고 정 시, 기어 1 측에서 측정되는 각도로 표시한 각 도 백래시 크기의 1/2 (rad) 이다. 이때, 첫번째 기어 감속단의 각 전달오차는 다음과 같다.

$$\theta_{d1} = \theta_m / N_1 - \theta_{g1} \quad (7)$$

여기서, θ_{g1} 는 기어 1 의 회전각(rad) 이다.

기어 1 의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{g1} \ddot{\theta}_{g1} = T_{g1} - 2k_{s1}(\theta_{g1} - \theta_{s1}) \quad (8)$$

여기서, J_{g1} 는 기어 1 의 관성모멘트($kg \cdot m^2$), k_{s1} 는 회전축 1 의 비틀림강성($N \cdot m/rad$) 이고, θ_{s1} 는 회전축 1 의 회전 각(rad) 이다.

회전축 1 의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{s1} \ddot{\theta}_{s1} = 2k_{s1}(\theta_{g1} + \theta_{p2}) - 4k_{s1} \theta_{s1} \quad (9)$$

여기서, J_{s1} 는 회전축 1 의 관성모멘트($kg \cdot m^2$) 이 고, θ_{p2} 는 피니언 2 의 회전 각(rad) 이다.

피니언 2 의 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_{p2} \ddot{\theta}_{p2} = 2k_{s1}(\theta_{s1} - \theta_{p2}) - \frac{1}{N_r} T_L \quad (10)$$

여기서, J_{p2} 는 피니언 2 의 관성모멘트($kg \cdot m^2$), N_r 는 피니언 2 과 기어 2 사이의 공전 감속비이 고, T_L 는 안테나 구동토크($N \cdot m$)이다.

이때, 피니언 2 와 기어 2 사이의 공전 감속비는 다음과 같다.

$$N_r = N_2 + 1 \quad (11)$$

여기서, N_2 는 피니언 2 와 기어 2 의 기어 비이다.

부하 토크는 식(6)과 같이 피니언 2 와 기어 2 사이의 백래시에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$T_L = \begin{cases} k_2(\theta_{d2} - \delta_2) & , \theta_{d2} > \delta_2 \\ 0 & , |\theta_{d2}| < \delta_2 \\ k_2(\theta_{d2} + \delta_2) & , \theta_{d2} < -\delta_2 \end{cases} \quad (12)$$

여기서, k_2 는 기어 2 와 고정축의 등가비틀림강성 ($N \cdot m/rad$), θ_{d2} 는 두번째 기어 감속단의 각 전 달오차(rad) 이고, δ_2 는 피니언 2 와 기어 2 사이 에 존재하는 백래시를 피니언 2 고정 시, 부하 회 전축에서 측정되는 각도로 표시한 각도 백래시 크 기의 1/2 (rad) 이다. 이때, 두번째 기어 감속단의 각 전달오차는 다음과 같다.

$$\theta_{d2} = \theta_{p2} / N_r - \theta_L \quad (13)$$

여기서, θ_L 는 안테나 회전 각(rad) 이다.

또한, 기어 2 와 고정축의 등가비틀림강성은 다 음과 같다.⁽⁴⁾

$$k_2 = \frac{k_{g2} k_{s2}}{k_{g2} + k_{s2}} \quad (14)$$

여기서, k_{g2} 는 피니언 2 와 기어 2 의 이 강성에 의한 비틀림강성이고($N \cdot m/rad$), k_{s2} 는 고정축의 비틀림강성($N \cdot m/rad$) 이다.

마지막으로, 안테나를 강체로 고려한 경우의 안

테나 운동방정식은 다음과 같다.

$$J_L \ddot{\theta}_L = T_L - T_{f,L} \text{sign}(\dot{\theta}_L) \quad (15)$$

여기서, J_L 는 안테나 관성모멘트 ($kg \cdot m^2$) 이고, $T_{f,L}$ 는 안테나 회전부의 정마찰 토크 ($N \cdot m$) 이다.

지금까지 유도한 식들로부터 안테나를 강체로 고려한 경우의 시간영역응답을 얻을 수 있다.

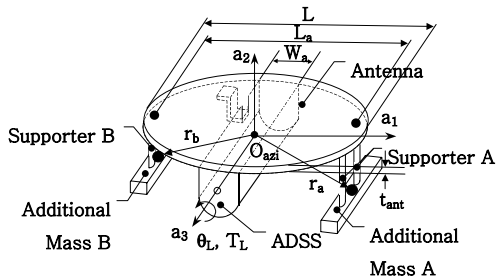
추가적으로, 각 단의 백래시 크기와 전체 백래시 크기와의 관계를 구해보면 다음과 같다.

$$b_i = b_2 + \frac{I}{N_r} b_1 \quad (16)$$

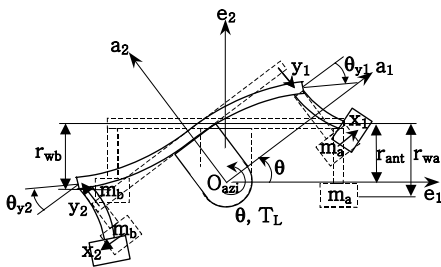
여기서, b_1 는 피니언 1 과 기어 1 사이에 존재하는 백래시를 피니언 1 고정 시, 기어 1 축에서 측정되는 각도로 표시한 각도 백래시 ($^\circ$), b_2 는 피니언 2 와 기어 2 사이에 존재하는 백래시를 피니언 2 고정 시, 부하 회전축에서 측정되는 각도로 표시한 각도 백래시 크기 ($^\circ$) 이고, b_i 는 시스템 최종 부하 단에서 측정되는 전체 백래시 ($^\circ$) 이다.

2.2 안테나를 유연체로 고려한 ADSS 모델

Fig. 3(a) 는 Fig. 1 에 표시된 안테나의 개략도이며 부가질량체 A, B 를 안테나에 고정시키는 지지대 A, B 와 부가질량체 A, B 를 보여준다.



(a) The schematic diagram of antenna



(b) The flexible behavior of antenna

Fig. 3 The schematic drawing and flexible behavior of an antenna

Fig. 3(b)는 ADSS 구동 시 발생하는 안테나의 유연거동 예상도이다. 안테나는 원판 중간부위가 방위각 서보구동부의 장착대에 고정되고, 일부는 장착대 밖으로 돌출되어 있으므로 돌출된 안테나 자유단을 각각 외팔보로 고려하였다. 또한, 안테나

는 안테나 직경에 비해 두께가 작고, 지지대 A, B 역시 길이에 비해 단면적이 작으므로 내부에 존재하는 분포질량의 전단변형과 회전관성은 작다고 가정하였다.⁽⁵⁾ 그러므로, 안테나 유연거동 시 안테나 미소질량의 a_1 방향의 변형과 지지대 A, B 미소질량의 $-a_2$ 방향의 변형은 작다고 가정하고 무시하였으며, 지지대 A, B 의 끝단에서의 처짐각 역시 안테나 유연거동특성에 미치는 영향은 작다고 가정하고 무시하였다. 최종적으로 안테나 및 지지대 A, B 의 강성계산 시 모두 외팔보로 고려하였으며 오일러-베르누이 보 이론⁽⁵⁾을 적용하였다. 안테나 좌우측 자유단에 힘과 모멘트가 동시에 존재할 경우 안테나 좌우측 자유단 처짐은 다음 식과 같다.

$$X_A = C_A F_A \quad (17a) \quad X_B = C_B F_B \quad (17b)$$

여기서, $F_A = [F_{y1} \ M_{A,a3}]^T$ 와 $F_B = [F_{y2} \ M_{B,a3}]^T$ 는 안테나 우측과 좌측 자유단의 외력벡터, $X_A = [y_1 \ \theta_{y1}]^T$ 와 $X_B = [y_2 \ \theta_{y2}]^T$ 는 안테나 우측과 좌측 자유단의 변위벡터이고, C_A 와 C_B 는 안테나 우측과 좌측 자유단의 컴플라이언스 행렬이다.

식(17)의 컴플라이언스 행렬로부터 안테나 좌우측 강성행렬을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$K_A = C_A^{-1} \quad (18a) \quad K_B = C_B^{-1} \quad (18b)$$

여기서, K_A 와 K_B 는 안테나 우측과 좌측 자유단의 강성행렬이다.

지지대 A, B 의 강성은 가정에 의해 처짐만을 고려하면 다음과 같다.

$$k_{s,a} = \frac{3E_{AL}I_{s,a}}{L_{s,a}^3} \quad (19a) \quad k_{s,b} = \frac{3E_{AL}I_{s,b}}{L_{s,b}^3} \quad (19b)$$

여기서, $k_{s,a}$ 와 $k_{s,b}$ 는 지지대 A 와 지지대 B 의 처짐 강성이다. Fig. 4 는 Fig. 3 에 나타난 안테나의 분포질량을 동일한 회전관성모멘트를 갖는 등가집중질량으로 나타낸 모델이다. 본 연구에서는 안테나 유연거동을 4 개의 등가질량체로 표현하였으며, 6 개의 변위 일반화좌표를 설정하였다.

안테나 좌우측 자유단의 등가질량체 위에 이동좌표계 {C}와 {D}를 설정하였다. 회전축 O_{azi} 로부터 안테나 좌측 자유단의 등가질량체 $m_{eq,ant,b}$ 와 안테나 우측 자유단의 등가질량 $m_{eq,ant,a}$ 까지의 위치벡터는 다음과 같다.

$${}^A r_{ant,b} = -\frac{L_a}{2} a_1 + (r_{ant} + y_2) a_2 \quad (20a)$$

$${}^A r_{ant,a} = \frac{L_a}{2} a_1 + (r_{ant} - y_1) a_2 \quad (20b)$$

또한, 안테나 우측자유단 등가질량 $m_{eq,ant,a}$ 와 좌측자유단 등가질량 $m_{eq,ant,b}$ 의 질점으로 부터

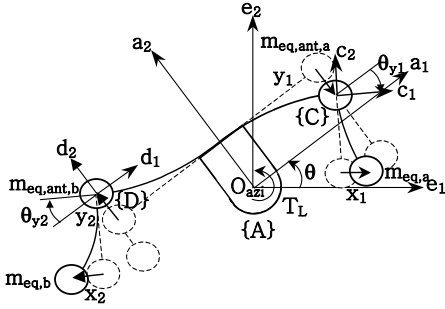


Fig. 4 The equivalent lumped mass model of antenna

부가질량체 A 와 B 의 등가질량 $m_{eq,a}$ 와 $m_{eq,b}$ 까지의 위치벡터 c_{r_a} 와 c_{r_b} 는 다음과 같다.

$$c_{r_a} = x_1 c_1 - r_{wa} c_2 \quad (21a) \quad d_{r_b} = -x_2 d_1 - r_{wb} d_2 \quad (21b)$$

고정좌표계 {E}에 대한 ADSS 에 고정된 좌표계 {A}의 각속도는 다음과 같다.

$${}^E w^A = \dot{\theta} a_3 \quad (22)$$

또한, 고정좌표계 {E}에 대한 안테나 우측자유단 등가질량체에 고정된 좌표계 {C}와 좌측자유단 등가질량체에 고정된 좌표계 {D}의 각속도는 다음과 같다.

$${}^E w^C = {}^E w^A + {}^A w^C = (\dot{\theta} - \dot{\theta}_{y1}) c_3 \quad (23a)$$

$${}^E w^D = {}^E w^A + {}^A w^D = (\dot{\theta} - \dot{\theta}_{y2}) d \quad (23b)$$

등가질량체 $m_{eq,ant,a}$, $m_{eq,ant,b}$, $m_{eq,a}$, $m_{eq,b}$ 질점에서의 선속도는 다음과 같다.

$${}^E V_b = \frac{{}^E d(Ar_b)}{dt} = \frac{{}^E d(Ar_{ant,b})}{dt} + \frac{{}^E d(Dr_b)}{dt} \quad (24a)$$

$${}^E V_a = \frac{{}^E d(Ar_a)}{dt} = \frac{{}^E d(Ar_{ant,a})}{dt} + \frac{{}^E d(Cr_a)}{dt} \quad (24b)$$

$${}^E V_{ant,b} = \frac{{}^A d(Ar_{ant,b})}{dt} + {}^E w^A \times {}^A r_{ant,b} \quad (24c)$$

$${}^E V_{ant,a} = \frac{{}^A d(Ar_{ant,a})}{dt} + {}^E w^A \times {}^A r_{ant,a} \quad (24d)$$

얻어진 각속도와 선속도로부터 안테나를 포함한 ADSS 의 운동에너지 T 는 다음과 같다.

$$T = T_{gm} + T_{ant,a} + T_{ant,b} + T_{ant,a,r} + T_{ant,b,r} + T_a + T_b \quad (25)$$

여기서, $T_{gm} = J_{gm} \dot{\theta}^2 / 2$, $T_{ant,a} = m_{eq,ant,a} {}^E V_{ant,a}^T \cdot {}^E V_{ant,a} / 2$, $T_{ant,b} = m_{eq,ant,b} {}^E V_{ant,b}^T \cdot {}^E V_{ant,b} / 2$, $T_{ant,a,r} = J_{eq,a} {}^E w^C \cdot {}^E w^C / 2$, $T_{ant,b,r} = J_{eq,b} {}^E w^D \cdot {}^E w^D / 2$, $T_a = m_{eq,a} {}^E V_a^T \cdot {}^E V_a / 2$ 이고 $T_b = m_{eq,b} {}^E V_b^T \cdot {}^E V_b / 2$ 이다.

안테나에 저장되는 탄성에너지는 다음과 같다.

$$V_{azi} = V_{ant,a} + V_{ant,b} + V_{b,a} + V_{b,b} \quad (26)$$

여기서, 안테나 우측자유단의 탄성에너지 $V_{ant,a} = X_A^T K_A X_A / 2$, 안테나 좌측자유단의 탄성에너지 $V_{ant,b} = X_B^T K_B X_B / 2$, 지지대 A 에 저장되는 탄성

에너지 $V_{s,a} = k_{s,a} x_1^2 / 2$ 이고, 지지대 B 에 저장되는 탄성에너지 $V_{s,b} = k_{s,b} x_2^2 / 2$ 이다. 안테나에 작용하는 일반화 힘 $Q_i (i = 1, \dots, 7)$ 은 다음과 같다.

$$Q_1 = T_L - T_{f,L}, \quad Q_2 = Q_3 = Q_4 = Q_5 = Q_6 = Q_7 = 0 \quad (27)$$

다음 라그랑지 방정식과 식(25), (26), (27)를 이용하여 안테나의 유연거동에 대한 7 개의 비선형 운동방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial(T-V)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial(T-V)}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, \dots, 7) \quad (28)$$

여기서, $q_1 = \theta$, $q_2 = y_1$, $q_3 = y_2$, $q_4 = \theta_{y1}$, $q_5 = \theta_{y2}$, $q_6 = x_1$ 이고 $q_7 = x_2$ 이다.

식(28)의 연산은 Mathematica 를 이용하여 수행하였으며, 2.1 절의 식(15)을 본 절에서 구한 운동방정식으로 대체하면 안테나 유연거동을 포함한 ADSS 의 주파수응답특성을 구할 수 있다.

3. 시뮬레이션과 실험

본 장에서는 안테나를 강체로 고려한 모델과 유연체로 고려한 모델의 시뮬레이션 결과를 실험결과와 비교하여 안테나 유연성이 탐색기 짐발 대역폭에 미치는 영향을 분석하였으며, 각 모델에 대한 백래시 크기 감소 영향에 대해 관찰하였다.

각 모델에 대한 주파수응답특성을 얻기 위하여 2 장에서 구한 운동방정식을 블록선도로 변경 후 MathWorks 사의 Matlab Simulink 를 이용하여 시간영역응답을 구했으며, 안테나 유연모델의 경우 S-function 을 이용하여 Simulink 에 삽입하였다.

시뮬레이션은 2.5 V_{pk} 의 정현파 전압신호를 모터전압증폭기 모델에 입력한 후 과도응답이 지난 정상상태응답에 대해서 태코제너레이터 필터 모델로부터 출력되는 전압신호를 10μsec 간격으로 샘플링하였다. Runge-Kutta solver 를 사용하였으며, 10 Hz ~ 100 Hz 의 주파수 범위에 걸쳐 전압을 모터전압증폭기에 인가하였다. 그리고, 각 가진 주파수에 대한 시스템의 이득 및 위상을 얻기 위해 시간영역 신호를 주파수 분석하였다.

실험은 Hewlett-Packard 사의 HP35670A Dynamic analyzer 를 사용하여 수행하였으며, 시뮬레이션으로부터 얻은 결과와 비교하기 위해 모터전압증폭기의 입력전압을 시뮬레이션과 동일하게 2.5 V_{pk} 로 하였다. 이와 같이 얻어진 시뮬레이션과 실험 결과는 Fig. 5 와 같다.

Fig. 5 를 살펴보면 안테나를 강체로 고려한 모델 결과는 1 쌍의 반공진 및 공진주파수가 관찰되는데 비해 안테나 유연거동을 고려한 결과는 실험

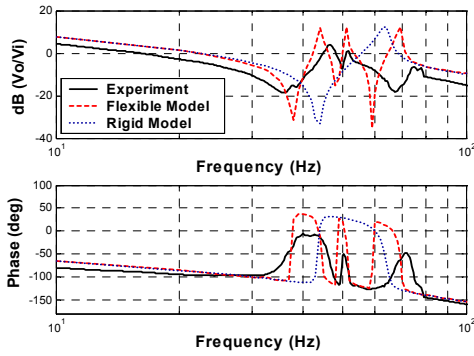


Fig. 5 The comparison of rigid antenna model with flexible antenna model

결과와 마찬가지로 3 쌍의 반공진 및 공진주파수가 나타나며 전체적으로 실험과 유사한 형태의 주파수응답특성을 갖음을 볼 수 있다. 또한, 시스템의 속도제어 대역폭을 결정하는 첫번째 반공진주파수의 발생위치도 실험결과에 보다 근접함을 볼 수 있다. 결론적으로 탐색기 짐발의 응답성 향상을 위한 최적설계 수행 시 안테나를 유연체로 고려한 모델을 사용해야 하며, 안테나의 유연성은 탐색기 짐발 응답성에 지배적인 영향을 줄 수 있음을 알 수 있었다.

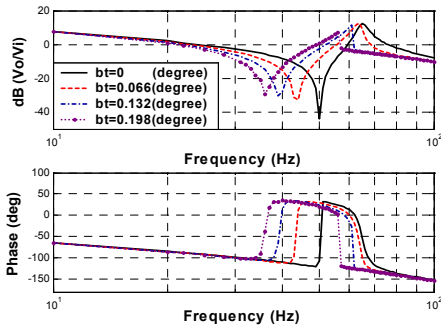


Fig. 6 Influence of backlash change in case of a rigid antenna model

Fig. 6 은 안테나의 강성을 키워 강제화 한 모델의 경우 기어감속단의 전체백래시 변화에 따른 주파수응답특성의 변화를 나타낸다. 백래시를 0.066°에서 0°로 감소시킬 경우 대역폭을 제한하는 반공진주파수가 6 Hz 증가함을 보여주며, 안테나 강성이 큰 경우는 Baek et al. (4)의 연구결과와 동일하게 백래시 크기가 대역폭 결정에 지배적인 영향을 미침을 확인할 수 있었다. Fig. 7 은 실제 안테나 강성값을 갖는 ADSS 기어감속단의 백래시를 강제안테나모델과 마찬가지로 0°로 감소했을 때 주파수응답특성을 보여준다. 안테나 강성을 높여 강제화한 모델 결과와 비교해 첫번째 반공진주파수는 강제안테나모델 결과의 1/3 인 2 Hz 만 증가함을 볼 수 있다. 그러므로, 전자기와 탐색기 짐발의 대역폭은 기어감속단의 비틀림강성과 백래시크기 뿐

만아니라 부하로 고려된 안테나의 강성 값에도 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

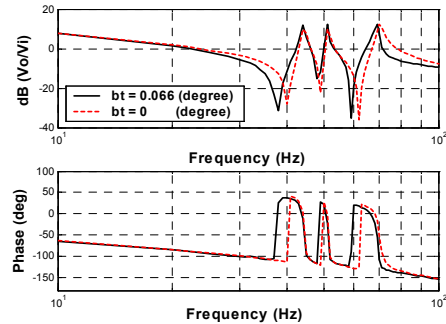


Fig. 7 Influence of backlash change in case of a flexible model

4. 결론

본 연구에서는 전자기와 탐색기 방위각 구동 서보 시스템의 모델을 구하였다. 얻어진 모델은 실험결과와 비교하여 그 타당성을 검증하였으며, 전자기와 탐색기 모델링 시 안테나를 유연체로 고려해야 정확한 모델을 얻을 수 있음을 알 수 있었다. 또한, 안테나의 강성이 큰 시스템에서는 백래시 크기 감소를 통한 대역폭 확장방법이 효과적이거나, 안테나의 강성이 작은 시스템에서는 백래시 크기 감소를 통한 대역폭 확장효과가 상대적으로 작음을 알 수 있다. 본 논문에서 작성한 탐색기 짐발 모델을 통하여 향후 시스템 무게감량과 대역폭 확장 최적설계 수행 시 모델근거 최적설계가 가능하게 되었다.

참고문헌

- (1) Stockum, L. A., Carroll, G. R., 1984, "Precision Stabilized Platforms for Shipboard Electro-Optical Systems," *Proceedings SPIE Acquisition, Tracking, and Pointing*, Vol. 493, pp. 414~425.
- (2) Stockum, L. A., Burge, J., 1987, "Electro-Mechanical Design for Precision Pointing and Tracking Systems," *Proceedings SPIE Acquisition, Tracking, and Pointing*, Vol. 779, pp. 66~74.
- (3) Iecovich, M., 1990, "Line of Sight Stabilization Requirements for Target Tracking Systems," *Proceedings SPIE Acquisition, Tracking, and Pointing IV*, Vol. 1304, pp. 100~111.
- (4) Baek, J. H., Kwak, Y. K., Kim, S. H., 2003, "Analysis on the Influence of Backlash and Motor Input Voltage in Geared Servo System," *IEEE The 11th Mediterranean Conference Control and Automation*, Rhodes, Greece.
- (5) Junkins, J. L., Kim, Y., 1993, *Introduction to Dynamics and Control of Flexible Structures*, AIAA Education Series, pp. 139~234.