

전기-유압식 추력벡터제어 구동장치시스템의 합성공진 특성 연구

민병주*, 최형돈**, 강이석***

Research of Synthetic Resonance Characteristics for Electrohydraulic Thrust Vector Control Actuation System

Byeong-Joo Min*, Hyung-Don Choi**, E-Sok Kang***

Abstract

In this paper, the analysis results of synthetic resonance characteristics are described for the electrohydraulic thrust vector control actuation system. The synthetic resonance is induced by integration of position servo actuation system on the flexible launch vehicle mounting structure. The new resonance mode is synthesized due to composition of hydraulic resonance for electrohydraulic position servo system with inertia load condition and structural resonance for flexible mounting structure. This synthetic resonance can make stability of control system worse by feedback and amplification of control system. The exact nonlinear analysis model of this phenomenon is developed to predict and design a control algorithm for improvement characteristics. The DPF (Dynamic Pressure Feedback) control algorithm has been designed and has excellent resonance suppression capability.

초 록

본 논문에서는 발사체에 적용하는 전기-유압식 추력벡터제어 구동장치시스템의 합성공진 현상에 대한 해석 연구결과를 기술한다. 합성공진 현상은 위치서보 구동장치시스템을 유연한 발사체 기체구조체 지지부에 장착하였을 때 발생한다. 이는 관성부하를 갖는 전기-유압식 위치서보 시스템의 유압공진 현상과 유연한 기체구조체 지지부의 구조공진 현상의 합성에 의하여 발생한다. 합성공진 현상은 발사체 제어시스템에 의하여 되먹임 및 증폭되어 안정성을 악화시킬 수 있다. 이와 같은 현상을 정확하게 예측 및 분석할 수 있는 비선형 모델을 개발하였으며 이에 기반을 둔 합성공진 억제 특성이 우수한 동적 압력 되먹임(dynamic pressure feedback) 제어기법을 개발하였다.

키워드 : 전기-유압식(electrohydraulic), 위치서보(position servo), 구동장치(actuation system), 합성공진(synthetic resonance), 동적 압력 되먹임(dynamic pressure feedback)

1. 서 론

현재 국내에서는 발사체 추력벡터제어용 제어 시스템으로 $\pm 70 \mu\text{m}$ 의 높은 위치제어 정밀도와 정격 0.5 % 수준의 선형성, $2 \times 10^7 \text{ N/m}$ 이상의 제어강성을 갖는 강건하고 안정성 높은 전기-유압식 위치서보 구동장치시스템을 개발하여 운용 중에 있다[1-4].

우주 발사체는 인공위성과 같은 탑재물의 중량 효율을 증대시키기 위하여 구성 시스템의 중량을 최소화시키는 상위 수준 개발 요구조건을 갖고 있기 때문에 중량에 대한 최적화 설계를 적용하고 있다. 이는 발사체를 구성하는 엔진 지지부 및 구동장치시스템을 장착하는 기체구조체에도 적용하기 때문에 지상에서 운용하는 일반적인 위치서보 구동장치시스템의 지지 구조체와는 달리 상대적으로 작은 구조강도 및 강성을 갖는다.

자체적으로는 제어특성이 우수한 구동장치시스템을 유연한 발사체 기체구조체 지지부 및 엔진부와 통합하여 연계시험을 수행하였을 경우 일반적인 전기-유압식 위치서보 구동장치시스템의 자체 유압공진 주파수보다 상대적으로 낮은 주파수 대역에서 구조공진 모드와의 합성에 기인한 합성공진 현상이 발생한다. 합성공진 주파수가 발사체의 벤딩모드 주파수와 유사할 경우 자세제어 되먹임 시스템에 의하여 그 영향이 증폭되어 발사체 전체의 불안전성 유발 및 이에 기인한 임무 미달성의 경우도 발생하게 한다.

이와 같은 문제점 해결에는 발사체 기체구조체의 강성을 증대시켜 벤딩모드 주파수 또는 구동장치 지지구조체의 구조공진 주파수 대역을 상향 이동시키는 방법이 있으나 이는 중량의 증가를 초래하여 탑재물의 중량 효율을 저감시키는 단점을 갖는다. 탑재물 중량 효율을 유지시키며 합성공진 현상을 제거하는 기존의 방법으로는 구동장치시스템과 엔진부, 기체구조체 지지부의 연계통합 시험시 관측되는 합성공진 주파수 대역에 대한 저주파 통과 노치필터(lowpass notch filter)를 적용하는 방법이 제안되었다[5].

본 연구에서는 위에서 기술한 발사체 추력벡

터제어용 전기-유압식 위치서보 구동장치시스템과 엔진부, 기체구조체 지지부의 통합에 의하여 발생하는 합성공진 현상의 개선을 위하여 시스템을 구성하는 유일한 능동부품인 서보작동기가 발생시키는 구동력과 합성공진 현상과의 연관 관계를 파악하고 이를 사용하여 합성공진 현상을 저감시켜 발사체의 안정성과 제어성능 향상을 이루고자 한다.

2. 시스템 모델링

발사체 추력벡터제어 구동장치시스템을 구성하는 전기-유압식 위치서보 시스템의 제어회로 구성은 그림 1과 같다.

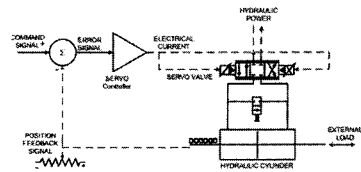


그림 1. 제어회로 구성도

위치제어를 위한 입력 신호와 서보작동기 현재 위치에 의하여 오차신호가 생성되고 이는 서보밸브를 구동하는 서보앰프의 입력신호로 전달된다. 서보앰프는 서보밸브를 구동하기 위한 전류를 생성한다. 서보밸브는 서보작동기의 팽창 및 수축 격실로 출입되는 유량을 제어하여 서보작동기의 위치제어를 수행한다. 시스템을 구성하는 서보밸브 및 서보작동기, 외부 부하, 제어 알고리즘 등에 대한 특성 및 수학적 모델링과 성능 예측 및 해석을 위하여 설정한 전제조건은 다음과 같다.

- 1) 유압동력 발생장치의 출력동력은 서보작동기 소요 동력보다 크기 때문에 서보작동기의 공급압력 P_s 는 일정하다.
- 2) 발사체 구동장치시스템에 적용하는 유압시스템은 고기동 특성에 의한 유압펌프 인입 포트 등에서의 공동현상(cavitation) 방지를 위하여 가압식 유압저장조인 저유기를 사용하기 때문에 공동현상은 발생하지 않으며 귀환압력 P_r 은 일정한 값을 갖는다.

- 3) 서보작동기의 팽창 및 수축 격실의 용적이 작기 때문에 격실내의 압력은 일정하다.
- 4) 서보밸브의 유량제어 오리피스에 개구부 형상은 직사각형이기 때문에 유량특성은 서보밸브 스톱 변위에 비례한다.

2.1 서보밸브

본 연구에서 사용하는 10 lpm(liter per minute) 미만급 서보밸브의 동특성은 정격입력 50 % 수준에 대한 진폭비 -3 dB 절점주파수 대역이 150 Hz 이상의 높은 응답 특성을 갖기 때문에 서보밸브의 입력전류 대비 스톱변위 출력에 대한 모델링은 실험적으로 구한 동특성 선도에 기반을 두어 식 (1)과 같이 선형 2차식으로 모델링하였다[6].

$$\frac{X_v(S)}{I(S)} = \frac{k_{SV} \cdot \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (1)$$

X_v 는 서보밸브 스톱의 변위이며, k_{SV} 는 서보밸브의 이득으로 단위전류당 운동한 서보밸브 스톱 변위, ω_n 은 본 연구에 사용한 제트-파이프(jet-pipe) 형상 서보밸브를 선형 2차식으로 모델링하였을 경우의 고유진동 주파수, ζ 는 감쇄비, I 는 서보앰프에서 서보밸브로 공급하는 구동전류이다.

2.2 오리피스 유량방정식

서보밸브에서 서보작동기로 공급하는 유량은 서보밸브 스톱과 슬리브 사이에 형성되는 개구면적이 직사각형 형태이므로 스톱변위에 선형적으로 비례하기 때문에 식 (2) 및 식 (3)과 같은 오리피스 유량방정식으로 모델링할 수 있다. 식 (2)는 서보작동기 격실 중 부피가 팽창하는 격실에, 식 (3)은 수축하는 격실에 적용하는 유량방정식이다.

$$Q_{exp} = C_d w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_S - P_{exp})} \quad (2)$$

$$Q_{con} = C_d w x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (P_{con} - P_R)} \quad (3)$$

위 식에서 C_d 는 유체 방출계수(discharge coefficient)로 개구면적부의 모서리를 예리하게 가공한 경우 난류유동에 대하여 개구부 형상에

무관하게 0.61 수준 정도의 값을 갖는다[7]. w 는 서보밸브 스톱과 슬리브 사이에 형성되는 유로 개구부의 오리피스의 면적 구배(orifice area gradient) 계수로 서보밸브의 정격 유량과 스톱의 정격 행정으로부터 구해진다.

2.3 연속 방정식

서보작동기의 팽창 격실은 고압의 유압작동유가 유입되어 피스톤을 운동시켜 제어입력으로 주어진 위치를 추종시킨다. 수축 격실은 피스톤의 운동과 서보밸브의 귀환측 오리피스에 의하여 형성된 배압으로 유동이 발생하여 유압시스템의 저장조로 유압작동유가 복귀하게 된다. 이와 같은 유압작동유의 유동은 질량보존의 법칙으로부터 유도된 연속방정식(continuity equation)에 의하여 팽창 격실은 식 (4), 수축 격실은 식 (5)와 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} & Q_{exp} - C_{IL}(P_{exp} - P_{con}) - C_{EL}P_{exp} \\ &= \frac{dV_{exp}}{dt} + \frac{V_{exp}}{\beta_e} \frac{dP_{exp}}{dt} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & C_{IL}(P_{exp} - P_{con}) - C_{EL}P_{con} - Q_{con} \\ &= \frac{dV_{con}}{dt} + \frac{V_{con}}{\beta_e} \frac{dP_{con}}{dt} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 C_{IL} 은 서보작동기 내부 누설 계수(internal leakage coefficient)로 누설을 방지하기 위하여 피스톤 밀봉재 글랜드(seal gland)부에 장착한 동적 밀봉재(dynamic seal)를 경유하여 팽창 및 수축 격실 간에 발생하는 단위압력차 및 단위시간당의 누설량의 크기를 나타낸다. C_{EL} 은 외부 누설 계수(external leakage coefficient)로 팽창 및 수축 격실에서 서보작동기 외부로 누설되는 단위압력차 및 단위시간당의 누설량 크기를 나타낸다. V_{exp} 및 V_{con} 는 서보작동기의 팽창 및 수축 격실의 용적 부피이다. β_e 는 유압시스템에 사용하고 있는 유압작동유(hydraulic working fluid)의 체적탄성계수(bulk modulus)로 식 (6)과 같이 정의된다[7]. 즉 단위 체적의 유압작동유에 대한 가압력의 변화에 의하여 발생하는 부피의 변화비율의 역수로서 유압작동유의 스프링 상수

와 같은 역할을 수행하는 물질 계수이다.

$$\frac{1}{\beta_e} = \frac{\Delta V}{V \cdot \Delta P} \quad (6)$$

체적탄성계수는 위치서보 유압시스템의 제어특성을 결정하는 주요 성능 인자인 제어강성(control stiffness)에 직접적인 영향을 작용시킨다. 체적탄성계수는 유압작동유에 용해되어 있는 공기 및 혼입되어 있는 기포에 의하여 낮은 값을 갖게 되며 이는 유압시스템의 유압공진 현상을 낮은 주파수 대역에서 발생시키는 원인이 되기도 한다.

2.4 서보작동기 탄성변위 유발 요소

서보작동기의 합성공진 현상 해석에는 서보작동기의 절대 운동변위가 필요하기 때문에 절대변위를 발생시키는 그림 2와 같은 탄성변위 유발 요소에 의한 다음과 같은 증가강성 요인도 고려하였다.

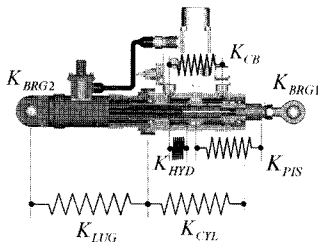


그림 2. 탄성변위 유발 요소

2.4.1 작동기 기동 탄성변위 요인, K_{HYD}

서보작동기의 행정이 그림 2와 같이 중립인 상태에서 팽창 및 수축격실 유압작동유 기동의 증가강성은 식 (7) 및 식 (8)과 같다.

$$K_{HYD,exp} = \frac{\beta_e \cdot A_P^2}{V_{exp}} \quad (7)$$

$$K_{HYD,con} = \frac{\beta_e \cdot A_P^2}{V_{con}} \quad (8)$$

위 식에서 피스톤이 중립행정에 위치할 경우 $V_{exp} = V_{con} = V_{zero}$ 이며, 양 격실의 압력은 외부 부하가 없는 경우 공급압력의 1/2 수준을 유지한다. 이는 팽창 및 수축 격실에 충분한 압력이 형성되어 힘평형을 이루고 있는 상태가 되어 유

압작동유 기동의 증가강성을 식 (9)과 같이 스프링의 병렬연결 상태로 모델링할 수 있다. 서보작동기가 중립행정을 유지하는 정적인 상태에서의 설계 데이터를 사용하여 계산한 K_{HYD} 는 6.2×10^7 N/m 수준의 강성을 갖는다.

$$\begin{aligned} K_{HYD} &= \frac{\beta_e \cdot A_P^2}{V_{zero}} + \frac{\beta_e \cdot A_P^2}{V_{zero}} \\ &= \frac{2\beta_e \cdot A_P^2}{V_{zero}} \end{aligned} \quad (9)$$

2.4.2 실린더의 호흡 효과 요인, K_{CB}

서보작동기의 실린더와 피스톤은 팽창 및 수축 격실내의 유압작동유 압력에 의하여 후프 응력(hoop stress) 조건을 받고 있다. 이는 실린더 및 중공형 피스톤의 경방향 및 길이방향으로의 변형을 유발시킨다. 이와 같은 호흡 효과(breathing effect)에 의한 길이 변화는 서보작동기의 증가강성, 유압공진 현상 등에 영향을 작용시킨다.

실린더의 팽창 또는 수축 격실에 유압작동유의 압력이 고르게 분포하고 실린더 외경부 및 피스톤 내경부의 압력은 대기압과 같다. 그림 3과 같이 서보작동기의 실린더와 피스톤을 두꺼운 두께를 갖는 압력용기로 가정하면 호흡 현상에 의한 증가 탄성계수 K_{CB} 는 다음과 같이 유도할 수 있다.

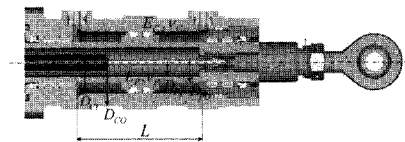


그림 3. 실린더 호흡효과 결정 요인

서보작동기 팽창 및 수축 격실의 용적 V 는 식 (10)과 같으며 A_P 는 피스톤의 수압면적으로 식 (11)과 같다.

$$V = A_P \cdot L = constant \quad (10)$$

$$A_P = \frac{\pi}{4} (D_{C1}^2 - D_{P0}^2) \quad (11)$$

식 (10)을 격실 압력으로 편미분하면 식 (12) 및 식 (13)이 유도된다.

$$\frac{\partial V}{\partial P} = L \cdot \frac{\partial A_P}{\partial P} + A_P \cdot \frac{\partial L}{\partial P} = 0 \quad (12)$$

$$\frac{\partial L}{\partial P} = -\frac{L}{A_P} \cdot \frac{\partial A_P}{\partial P} \quad (13)$$

위와 같은 압력조건에서 서보작동기에 작용하는 힘은 식 (14)와 같으며 이를 압력으로 편미분하면 식 (15)와 같다.

$$F_{ACT} = -P \cdot A_P \quad (14)$$

$$\frac{\partial F_{ACT}}{\partial P} = -A_P - P \cdot \frac{\partial A_P}{\partial P} \quad (15)$$

위에서 유도한 식들을 사용하여 실린더의 호흡 현상에 기인한 등가강성을 K_{CB} 로 정의하면 식 (16)을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_{CB}} &= \frac{\partial L}{\partial F_{ACT}} = \frac{\partial L}{\partial P} \frac{\partial P}{\partial F_{ACT}} \\ &= \frac{L}{A_P} \cdot \frac{\partial A_P}{\partial P} \\ &= \frac{A_P + P \cdot \frac{\partial A_P}{\partial P}}{A_P^2} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)에서 $\frac{\partial A_P}{\partial P}$ 는 식 (11)로부터 식 (17)과 같이 유도되며 식 (17)의 $\frac{\partial D_{CI}}{\partial P}$ 및 $\frac{\partial D_{PO}}{\partial P}$ 는 hoop 응력해석으로부터 식 (18) 및 식 (19)와 같이 유도할 수 있다.

$$\frac{\partial A_P}{\partial P} = \frac{\pi}{4} (2D_{CI} \frac{\partial D_{CI}}{\partial P} - 2D_{PO} \frac{\partial D_{PO}}{\partial P}) \quad (17)$$

$$\frac{\partial D_{CI}}{\partial P} = \frac{D_{CI} [D_{CO}^2 (1 + \nu_C) + D_{CI}^2 (1 - 2\nu_C)]}{E_C (D_{CO}^2 - D_{CI}^2)} \quad (18)$$

$$\frac{\partial D_{PO}}{\partial P} = -\frac{D_{PO}}{E_P} \left(\frac{D_{PO}^2 + D_{PI}^2}{D_{PO}^2 - D_{PI}^2} - \nu_P \right) \quad (19)$$

설계값과 재료의 물성값을 대입하여 계산한 서보작동기의 K_{CB} 는 격실압력 $P = 105 \text{ kgf/cm}^2$ 조건에서 $4.5 \times 10^7 \text{ N/m}$ 수준의 강성을 갖는다.

2.4.3 기계요소들의 탄성변형

그림 2에서 K_{CB} 와 K_{HYD} 를 제외한 나머지 탄성변위 유발 요소들은 모두 기계부품으로 구성되어 있으며 이들은 격실 압력에 무관한 일정한 강

성값을 갖는다. 서보작동기의 힘전달 경로 상에 위치하는 기계요소 부품에 대하여 그림 4와 같은 응력 및 탄성변형 해석을 수행하여 산출한 등가강성값 들은 표 1과 같다.

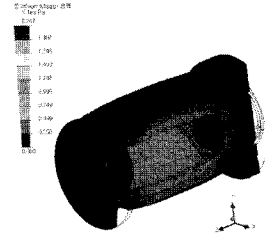


그림 4. 힘전달 기계요소 탄성변형 해석

표 1. 서보작동기 구성 요소들의 등가강성

강성 요소	기호	강성값 (N/m)
Tail End Bearing	K_{BRG2}	1.00×10^9
Cylinder Lug	K_{LUG}	9.10×10^8
Cylinder	K_{CYL}	2.59×10^9
Piston	K_{PIS}	1.01×10^9
Rod End Bearing	K_{BRG1}	3.15×10^8
Fluid Column	K_{HYD}	6.20×10^7
Cylinder Breathing	K_{CB}	4.50×10^7

위와 같이 해석을 통하여 산출한 서보작동기 힘전달 경로 상에 위치하며 탄성변형을 유발시키는 요소들을 모두 고려한 서보작동기의 등가강성은 피스톤이 중립행정에 위치한 무한주파수 상태에서 식 (20)과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{K_{ACT}} &= \frac{1}{K_{BRG2}} + \frac{1}{K_{LUG}} + \frac{1}{K_{CYL}} + \frac{1}{K_{CB}} \\ &+ \frac{1}{K_{HYD}} + \frac{1}{K_{PIS}} + \frac{1}{K_{BRG1}} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (20)에 표 1의 데이터를 대입하여 계산한 서보작동기의 중립행정 유지 상태에서의 무한주파수 강성은 $2.2 \times 10^7 \text{ N/m}$ 수준의 값을 갖는다. 표 1의 서보작동기 등가강성을 결정하는 구성 요소들의 강성을 살펴보면 실린더의 호흡 효과 및 유압작동유 기둥의 강성 요소가 기타 요소들보다 상대적으로 10배 이하 수준의 작은 값을 갖기 때문에 두 요소가 서보작동기 강성의 크기를 결정하는 지배적인 요인임을 알 수 있다.

2.5 힘평형 방정식

구동장치시스템 서보작동기는 그림 5와 같이 유연한 발사체 엔진마운트 기체구조체에 장착되어 이를 운동의 기반으로 삼아 등가관성 부하인 김발엔진을 회전시켜 발사체의 궤적제어 및 자세제어에 필요한 추력벡터제어를 수행한다.

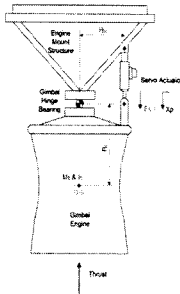


그림 5. 구동장치시스템 자유물체도

본 연구에서는 구동장치시스템의 유압공진 모드와 구조체의 구조공진 모드를 합성한 합성공진 현상을 예측할 수 있는 해석 모델을 그림 6과 같이 모델링하였다. 서보작동기와 등가관성 부하가 유연한 엔진마운트 기체구조체의 등가강성 $K_{S/Eq}$ 를 갖는 스프링에 의하여 연결되어 있다. 이는 서보작동기 피스톤이 등가관성 부하에 직접 작용력을 전달하여 운동시키는 것이 아니라 제어 대상체인 김발엔진의 절대변위량과 서보작동기의 동적강성을 고려한 피스톤의 절대운동 변위량과의 차이 변위량에 유연 기체구조체의 등가강성 $K_{S/Eq}$ 를 곱하여 구해진 스프링력이 등가관성 부하를 운동시키는 구조이다.

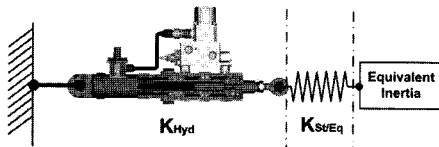


그림 6. 합성공진 현상 해석을 위한 구조 모델

그림 6과 같은 합성공진 해석 모델에 대한 힘평형 방정식은 서보작동기 작동력과 등가관성의 운동, 이를 연결시키는 기체구조체 등가강성에 기인한 작용력의 관계로부터 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$\begin{aligned} & (P_{exp} - P_{con}) \cdot A_P \\ & = M_P \cdot \ddot{x}_P + B_P \cdot \dot{x}_P + F_{fric} \cdot \frac{\dot{x}_P}{|x_P|} \\ & + K_{S/Eq} (x_{P/ABS} - \theta \cdot R_M) \end{aligned} \quad (21)$$

$$I_E \ddot{\theta} + B_E \dot{\theta} + K_{S/Eq} (\theta \cdot R_M - x_{P/ABS}) R_M = 0 \quad (22)$$

$$\begin{aligned} x_{P/ABS} = & x_P + (P_{exp} - P_{con}) \cdot A_P \cdot \left(\frac{1}{K_{BRG2}} \right. \\ & \left. + \frac{1}{K_{LUG}} + \frac{1}{K_{CYL}} + \frac{1}{K_{CB}} + \frac{1}{K_{PIS}} + \frac{1}{K_{BRG1}} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

$$x_{ABS} \cong \theta \cdot R_M \quad (24)$$

식 (21)과 식 (22)는 김발엔진의 등가관성이 피스톤에 탄성변형이 없는 강체에 의하여 직결되어 있는 형상으로 모델링하였던 기존의 힘평형 방정식과는 달리 그림 5와 같이 등가관성이 탄성변형을 수용하는 엔진마운트 구조체의 등가강성을 갖는 스프링에 의하여 피스톤에 연결되어 있는 형상을 모델링한 식이다. 강성 요소 K_{HYD} 가 식 (23)에서 제외된 이유는 연속방정식 식 (4) 및 식 (5)에 의하여 유압작동유의 체적탄성계수에 의한 압축성 및 이에 기인한 유압작동유 기둥의 탄성변형 변위가 이미 고려되었기 때문이다. 서보작동기 피스톤 및 등가관성에 작용하는 힘은 기체구조체 등가강성에 식 (23)의 피스톤 절대변위와 식 (24)의 김발엔진의 절대회전각 환산변위의 차를 곱한 물리량이 된다. 식 (24)는 김발엔진의 회전각 변위를 등가의 직선변위로 변환하여주는 관계식으로 모멘트암이 강건하여 발생하는 탄성변형을 무시할 수 있고 김발엔진의 회전각이 작은 경우를 가정하여 모델링하였다.

3. 합성공진 해석

3.1 유압공진

그림 7은 등가 관성부하가 401 kg이며 피스톤과의 연결이 그림 6에서와 같이 $K_{S/Eq}$ 를 경유하지 않는 경우 즉 서보작동기가 탄성변형이 없는 지지구조체에 설치되어 있으며 관성부하와 피스톤이 직결되어 있는 조건에서의 동특성 선도로 60 Hz 대역에서 유압작동유의 압축성에 기인한

유압공진 현상을 관측할 수 있다. 비례제어 이득 값이 작은 경우 주파수가 증가할수록 진폭비의 감소가 급격하며 유압공진 주파수 대역에서의 공진 증폭이 상대적으로 크게 나타나며 이는 제어 시스템의 일반적인 정성적 특성과도 일치한다.

그림 7(b)의 유압공진 주파수 대역에서 진폭비 선도가 그림 7(a)와 비교하여 모양이 다른 이유는 본 연구에서 적용한 해석 모델이 비선형 모델임에 기인한다. 연속방정식 식 (4) 및 식 (5)의 해로 구해지는 서보작동기 팽창 및 수축격실의 압력이 유압동력원의 공급압력 이하 및 저유기의 공급압 범위 내에 존재하도록 압력 적분기에 포화 상태를 고려하였기 때문이다. 이와 같은 포화 현상은 그림 7에서도 관찰 가능하다.

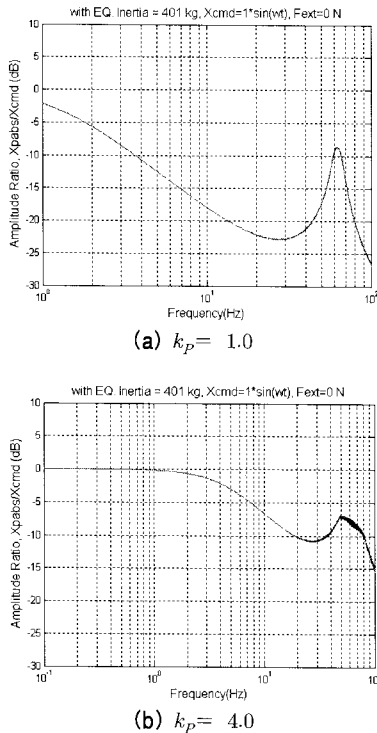
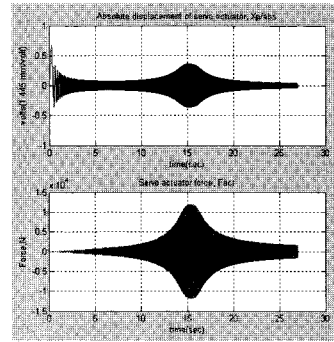


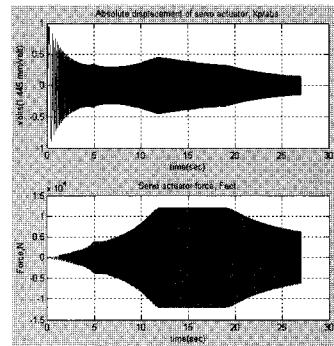
그림 7. 유압공진 주파수 특성

그림 8은 제어입력으로 27초간 주파수가 1 Hz에서 110 Hz까지 선형적으로 증가하는 진폭 1 volt의 정현파를 사용하였을 경우의 서보작동기의 절대변위 $x_{P/ABS}$ 와 작동력 F_{ACT} 의 시간에 대한 이력 데이터이다. 유압공진 대역에서 서보작

동기에는 관성부하에 의하여 정격 작동력 1.17×10^4 N 수준의 작동력이 발생한다. 즉 유압공진 대역에서 서보작동기의 작동력이 급격하게 증가하는 물리적 특성을 관찰할 수 있다.



(a) $k_p = 1.0$



(b) $k_p = 4.0$

그림 8. 유압공진 시간이력 특성

3.2 구조공진

그림 5에서 구동장치시스템 서보작동기를 지지하고 있는 유연한 기체구조체의 등가강성이 각각 1.0×10^7 N/m와 2.0×10^7 N/m이며 등가관성을 401 kg로 가정한 경우에 대하여 구조체 강성과 관성부하에 의한 구조공진 주파수는 식 (25)에 의하여 25.1 Hz 및 35.5 Hz로 예측할 수 있다.

$$\omega_{S/Eq} = \sqrt{\frac{K_{S/Eq}}{M_{Eq}}} \quad (25)$$

3.3 합성공진

합성공진 현상 해석을 위하여 식 (21) 및 (22),

(23), (24)와 같이 개선한 힘평형 방정식을 적용한 구동장치시스템의 SIMULINK 모델링은 그림 9와 같다. 식 (22)로 모델링한 김발엔진 등가관성 부하의 운동방정식 모델이 추가되었으며 서보작동기 피스톤의 절대변위 $x_{P/ABS}$ 와 김발엔진의 절대회전각 θ 가 엔진마운트 기체구조체의 등가강성 $K_{St/Eq}$ 에 의하여 상호 연계되어 있다.

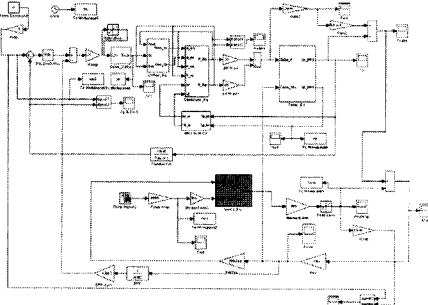
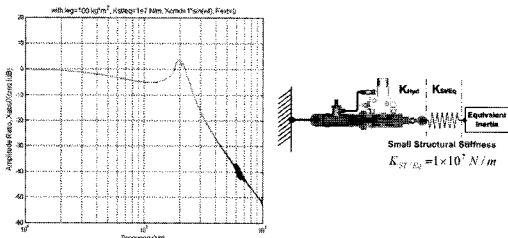
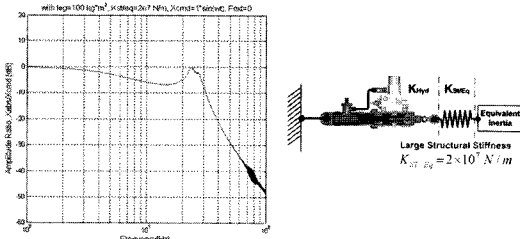


그림 9 합성공진 해석을 위한 SIMULINK 모델링

그림 10은 그림 9의 모델에 대하여 구동장치 시스템 서보제어기의 비례제어 이득 $k_p = 4.0$ 과 기체구조체의 등가강성을 1.0×10^7 N/m와 2.0×10^7 N/m를 적용하였을 경우의 해석결과 선도이다.



(a) 등가 구조강성 $K_{St/Eq} = 1 \times 10^7$ N/m



(b) 등가 구조강성 $K_{St/Eq} = 2 \times 10^7$ N/m

그림 10. 유압공진과 구조공진의 합성공진 현상

60 Hz 대역에서 유압공진 현상을 발생시키는

그림 7(b)과 비교하여 구조공진 주파수 25.1 Hz 및 35.5 Hz 성분과의 합성에 의하여 합성공진 주파수는 20 Hz 및 25 Hz 대역으로 이동하며 진폭비는 -7 dB 수준에서 3 dB 및 0 dB 수준으로 증가하는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 스프링 상수가 다른 두 개의 스프링을 직렬로 연결한 끝에 집중질량을 갖는 운동체의 진동특성과 정성적으로 동일한 특성을 가지며 본 연구에서 개발한 합성공진 해석 모델이 물리적으로 적합성을 갖고 있음을 검증한다.

4. 동적 압력 되먹임 제어

기체구조체의 경량화 설계에 기인하여 발사체 구동장치시스템에 필연적으로 발생하는 유압공진 모드와 구조공진 모드의 합성에 의한 합성공진 현상 개선을 위하여 다음과 같은 전기-유압식 위치제어 서보시스템의 고유 특성에 착안하여 연구를 수행하였다.

그림 8에서 공진현상 발생시 제어대상체의 절대운동 변위와 구동장치시스템 서보작동기의 작동력이 급격하게 증가하는 특성을 관찰할 수 있다. 특히 서보작동기의 작동력 증가율이 더 큰 것을 알 수 있다. 즉 구동장치시스템의 공진현상 발생시 서보작동기의 작동력은 급격하게 증가하는 특성을 갖는다.

아울러 고성능 유량제어 서보밸브를 사용한 경우 서보작동기의 위치제어와 부하제어 측면에서의 제어 민감도에 있어 부하제어가 다음과 같이 더 민감하게 반응한다. 중립행정에서 평형 상태를 유지하고 있는 서보작동기에 한 방울의 용적에 해당하는 0.05 ml의 유량을 서보밸브를 경유하여 유입시킬 경우 본 연구의 대상인 서보작동기 위치제어의 경우에는 식 (26)에 의하여 정격행정 대비 0.58 %의 행정변화를, 하중제어의 경우에는 식 (27)에 의하여 평형상태 격실압력 대비 43.6 %의 압력변화를 유발한다. 즉 같은 용적의 미소량 유량제어에 의하여 부하제어는 위치제어 대비 75배 이상의 민감도를 갖기 때문에 제어의 속응성을 달성시키는 것이 상대적으로 용이

하다.

$$\left. \frac{\Delta x}{x_{rated}} \right|_{\Delta F=0} = \frac{\Delta V}{x_{rated} \cdot A_p} = 0.58 \% \quad (26)$$

$$\left. \frac{\Delta P}{0.5P_{rated}} \right|_{\Delta V=0} = \frac{\beta_e \cdot \Delta V}{0.5P_{rated} \cdot V_{zero}} = 43.6\% \quad (27)$$

본 연구에 적용하고 있는 서보작동기용 서보밸브는 50% 정격입력에 대한 -3 dB 진폭비 절점 주파수가 150 Hz 대역을 갖는 고성능 밸브이므로 그림 9에서 관찰 가능한 30 Hz 미만 대역에서 발생하는 합성공진 현상을 위에서 기술한 공진현상 발생시 증가하는 서보작동기의 작동력을 서보밸브 구동용 서보작동기 위치오차 신호에 중첩시켜 되먹임하면 부하제어가 위치제어보다 상대적으로 속응성을 갖기 때문에 공진현상을 억제하는 것이 가능할 것으로 판단한다.

그러나 구동장치시스템 서보작동기가 큰 외력을 받는 상태에서 '0' 위치제어를 위한 조정기(regulator) 제어에 있어서는 중첩되는 부하되먹임 제어가 오히려 위치추종 성능을 저하시킬 수 있다. 아울러 공진주파수 대역 이하의 저주파 영역에서는 위치제어만으로도 추종성능이 우수하기 때문에 공진주파수 이하의 요구 동특성 대역까지는 위치제어의 역할을 부각시키고 위치제어 요구 동특성 대역 이상의 주파수 영역 및 공진주파수 대역에서는 부하제어의 역할을 부각시켜 합성공진 현상을 억제하는 제어기법 도입이 필요하다.

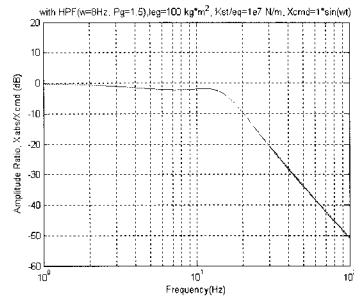
위에서 기술한 합성공진 억제를 통한 공진특성 개선을 위해 변동하는 서보작동기의 팽창 및 수축 격실 압력을 측정된 후 수압면적을 곱하여 작동력을 산출한다. 이와 같이 산출한 작동력을 식 (28)과 같은 고주파 통과 필터(high pass filter)를 경유하여 되먹임 시키는 방법에 대한 연구를 수행하였다. 공진현상시 발생하는 변동하는 서보작동기의 팽창 및 수축 격실의 압력을 되먹임 제어에 사용하였기 때문에 이를 본 연구에서는 동적 압력 되먹임(DPF, Dynamic Pressure Feedback) 제어기법으로 칭한다.

$$G_{HPF}(S) = \frac{S}{S + \omega_{cf}} \quad (28)$$

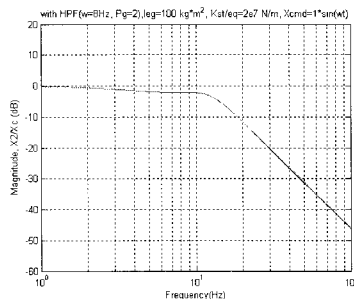
그림 11은 그림 10과 같이 발생한 합성공진

현상 개선을 위하여 동적 압력 되먹임 제어기법을 적용한 구동장치시스템의 동특성 응답신도로 기체구조체의 등가강성이 1.0×10^7 N/m인 경우와 2.0×10^7 N/m인 경우 모두 합성공진 주파수에서의 진폭비의 급상승 현상을 제거하여 개선된 효과를 나타내고 있다. 동적 압력 되먹임 제어기의 후단에는 동적 압력에 의하여 생성되는 서보작동기의 작동력을 고주파 통과 필터를 경유하여 위치제어용 PID 제어기 후단에서 중첩한 후 서보앰프로 공급하기 위하여 물리적인 신호의 크기 수준을 맞추어 주어야 한다. 이를 동적 압력 되먹임 제어기의 이득값, k_{DPF} 로 칭하고 식 (29)에 의하여 그 값의 적정 범위를 산출하였다.

$$k_{DPF} \approx \left. \frac{k_p \cdot X_{COM}(S)}{G_{HPF}(S) \cdot F_{ACT}(S)} \right|_{S=\omega_{cf}} \quad (29)$$



(a) 등가 구조강성 $K_{St}/E_0 = 1 \times 10^7$ N/m



(b) 등가 구조강성 $K_{St}/E_0 = 2 \times 10^7$ N/m

그림 11. DPF 제어에 의한 합성공진 억제 특성

5. 결 론

본 연구에서는 관성부하를 갖는 전기-유압식

위치서보 구동장치시스템 고유의 유압공진 특성을 예측할 수 있는 해석모델을 개발하였다. 아울러 구동장치시스템이 장착되는 유연한 기체구조체의 구조공진과 구동장치시스템의 유압공진의 합성에 의한 합성공진 현상도 예측 가능한 해석모델도 개발하였다.

이는 모두 구동장치시스템의 능동부품인 서보작동기의 등가강성 해석에 기반을 둔 것이며 정확한 해석을 위하여 본 연구에서는 서보작동기 실린더의 유압작동유 기동의 압축성에 기인한 강성뿐만 아니라 후프 응력(Hoop Stress) 조건에 기인한 실린더의 호흡현상과 서보작동기를 구성하는 기계요소들의 탄성변형에 기인한 강성 영향도 고려하였다.

공진현상 발생시 증가하는 서보작동기의 구동력을 고주파 통과 필터를 경유하여 되먹임 시켜 관심 위치서보 동특성 주파수 대역 이상에서 발생하는 합성공진 특성을 개선한 동적 압력 되먹임(DPF, Dynamic Pressure Feedback) 제어기법을 개발하였다. 동적 압력 되먹임 제어기는 합성공진 주파수 대역에서 진폭비를 현격하게 저감시키는 우수한 공진 억제 특성 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. 민병주, 최형돈, 강이석, "고고도 발사체용 전 기유압식 구동장치시스템 개발", 한국항공우주학회지, 제34권 제12호, 2006, pp.82-89.
2. 민병주, 이희중, 박문수, 최형돈, "고체모터 가동노즐 추력벡터제어용 구동장치시스템의 제어특성 연구", 한국항공우주학회지, 제33권, 제1호, 2005, pp.85-92.
3. 민병주, 박문수, 이희중, 최형돈, "3단형 과학 로켓 김발엔진 구동장치 개발", 한국항공우주학회지, 제30권, 제6호, 2002, pp.116-123.
4. 민병주, 박문수, 이희중, 선병찬, 최형돈, "고체모터 가동노즐 구동장치시스템", 한국항공우주학회지, 제32권, 제5호, 2004, pp.122-128.
5. 선병찬, 박용규, 최형돈, "KSR-III 김발엔진 구동장치 서보필터 설계", 한국항공우주학회지, 제32권, 제10호, 2004, pp.83-92.
6. *Jet Pipe Servovalves*, Abex Corporation Aerospace Division
7. H. E. Merrit, *Hydraulic Control System*, John Wiley & Sons, New York, 1967
8. Dale E. Schinstock, Douglas A. Scott and Tim A. Haskew, "Transient Force Reduction in Electromechanical Actuators for Thrust Vector Control", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 17, No. 1, 2001, pp.65-72.
9. Dale E. Schinstock, Douglas A. Scott and Tim A. Haskew, "Modeling and estimation for Electromechanical Thrust Vector Control of Rocket Engine", *Journal of Propulsion and Power*, Vol. 14, No. 4, 1998, pp.440-446.
10. Vincent B. Blaignan and Victor A. Skormin, "Stiffness Enhancement of Flight Control Actuator", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 2, 1993, pp.380-390.
11. David S Layton and Vatanna Gaines, "F-22 Actuator Dynamic Stiffness(Impedance) Testing", 48th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structure, Structural Dynamics and Materials Conference, 2007, AIAA 2007-1792