

다중채널 직접구동 액츄에이터의 구동전류 동일화 루프 설계

남윤수*

Current Equalization Loop Design of Muti-channel Direct Drive Valve Actuator

Yoonsu Nam*

ABSTRACT

A Direct Drive Valve (DDV) hydraulic actuation system which is commonly used as an aircraft's control surface driving actuator has multi-loop control structure to ensure its safety operation. However, because of not perfect matching of one self channel characteristics with the others, the servo valve driving current of each channel can be widely different. Therefore, the long-time use of DDV actuator without any correction of these channel current offsets will cause the problem of performance or life expectancy degradation due to unwanted heats in the linear motor. A current equalization loop structure which can minimizes current offsets between channels is introduced and designed. The performance of the current equalization loop is investigated and verified through the analytic and experimental ways.

Key Words : Hydraulic Servo Actuator(유압 서보 액츄에이터), Direct Drive Valve (직접구동 밸브), Current Equalization Loop (구동전류 동일화 루프)

1. 서론

유압 서보장치가 갖는 특성, 즉 자중당 출력비 (Power to Weight Ratio)가 다른 구동장치에 비하여 크다는 점, 그리고 부하쪽에서 본 강성 (Stiffness)이 매우 크기 때문에 과부하 상태에서도 비교적 고 대역폭 제어가 가능하다는 점등으로 인하여, 유압 서보장치는 항공기 조종면 구동을 위한 유일한 선택으로 받아들여 지고 있다. 또한, 최근에는 강한 자기력을 생성시킬 수 있는 사마륨-코발트 (Samarium-cobalt) 계 자성소재의 급속한 발전으로 선형 전기모터가 유압제어 밸브 스펴을

직접 움직일 수 있는 직접구동밸브 (Direct Drive Valve) 방식 유압서보 액츄에이터가 종래의 플래퍼 노즐형 전기유압밸브 (Flapper nozzle type Electro-Hydraulic Servo Valve)식 액츄에이터를 대체하고 있는 추세이다⁽¹⁻³⁾.

비행제어컴퓨터에서 명령되는 신호에 따라 조종면의 변위를 제어하는 유압서보 구동장치는 전기적으로는 3-중 또는 4-중의 다중화 신호로 제어되며, 유압공급은 보통 2-중으로 다중화 시킴으로서 액츄에이터 관련부품의 고장에 의한 항공기 손실을 최소화하도록 설계된다^(4,5). 그러나, 다중채널로 제어되는 직접구동 밸브식 유압 액츄에이터

* 강원대학교 기계·메카트로닉스 공학부

는 다중 센서간의 측정 오차 및 서보 앰프 각 채널의 이득 차이 등으로 각 채널의 구동전류 값들이 서로 큰 편차를 갖게 될 수 있다. 이러한 각 채널간의 구동전류 편차를 그대로 방치한다면, 밸브 스톱 (Valve Spool)을 구동하는 선형모터는 계속 가열되어 작동 특성이나 그 수명에 있어서 나쁜 영향을 받게 된다.

따라서, 본 논문에서는 각 채널간의 구동 전류 편차를 감소시키기 위한 제어계의 구조를 제시하고, 이의 설계 방안에 대하여 논의한다. 이를 위하여 전기적으로는 3 중의 다중화 신호에 의하여 제어되며, 유압공급은 2 중으로 다중화된 유압 액츄에이터에 관한 비선형 모델을 제시한다. 이 해석적인 모델에 기준하여, 구동전류 동일화 루프 (Current Equalization Loop)의 설계 인자들이 루프 특성에 각각 어떤 영향을 미치는가에 대한 분석을 수행한다. 이와 같이 설계된 구동전류 동일화 루프는 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 성능이 입증된다.

2. 직접구동 액츄에이터의 모델링

직접구동 유압 액츄에이터 (DDV Actuator: Direct Drive Valve Hydraulic Actuator)의 구조가 Fig. 1 에 개략적으로 도시 되어 있다. 이 그림에서 보듯이, DDV 액츄에이터의 운동을 제어하는 밸브 스톱 (valve spool)은 3 중의 전기적인 신호에 의하여 작동되는 선형 전기모터에 의하여 직접적으로 구동 된다. 또한, DDV 밸브 작동에 의하여 형성된 유압적인 힘은 결국 액츄에이터 램 (Ram)을 구동

하게 된다. 따라서, Fig. 1 과 같은 구조를 갖는 DDV 액츄에이터는 유압 공급면에서는 2 중, 그리고 전기 제어적인 면에서는 3 중으로 작동되는 다중화 제어의 개념을 갖도록 설계되어 있다. 이와 같은 다중화 설계로 인하여, DDV 액츄에이터의 작동모드는 크게 나누어 정상작동 모드와 고장대처 모드로 구분될 수 있다.

정상작동 모드: Fig. 1 의 바이패스 밸브 (Free Flow Bypass Valve)가 그림에 그려진 상태대로 작동되어 DDV 액츄에이터는 정상적으로 작동된다.

고장대처 모드: 2 중으로 공급되는 유압 시스템 중에서 어느 한 시스템의 공급 유압이 유압라인의 파손 등으로 비정상 공급상태가 되거나, 비행제어 컴퓨터에서 의도적으로 솔레노이드 밸브를 작동시키게 되면, 바이패스 밸브 스톱의 평형상태는 깨지게 되고, 액츄에이터의 양 챔버를 서로 연결시키게 되는 위치로 바이패스 밸브 스톱의 위치가 이동되게 된다. 서로 독립적으로 공급되는 유압 파워 시스템 중에서 한 시스템이라도 정상 작동이 되면, DDV 액츄에이터는 계속적으로 제어 가능한 모드로 남아 있게 된다. 그러나, 동시에 두 시스템에 고장이 발생하는 경우에는 Fig. 1 의 유압시스템 1 은 단순 바이패스 모드, 그리고 유압시스템 2 는 액츄에이터 양 챔버가 양 방향 오리피스를 통하여 어큐뮬레이터 (Accumulator)로 연결되어 댐핑을 갖는 바이패스 모드 (Damped Bypass Mode)로 작동되게 된다.

이제 위와 같이 복잡하게 작동되는 DDV 유압 액츄에이터에 대한 운동 모델을 제시하여 보자. 먼저, DDV 밸브 스톱의 운동특성은 다음 식으로 지배된다.

$$K_m \sum_{j=1}^3 (i)_j = M_v \frac{d^2 x_v}{dt^2} + B_v \frac{dx_v}{dt} + K_v x_v + F_f + \sum_{j=1}^2 (F_B)_j \quad (1)$$

$$V = Ri + L \frac{di}{dt} + K_{vB} \frac{dx_v}{dt}$$

여기서,

K_m 과 K_{vB} : DDV 모터 힘 및 역 기전력 상수

$(i)_j$: j-th 채널 구동전류 ($j=1$ to 3)

M_v 와 x_v : DDV 스톱 (Spool) 질량 및 변위

B_v 와 K_v : DDV 댐핑 및 스프링 계수

$(F_B)_j$: j-th 유압시스템에 의한 Bernoulli 유체힘

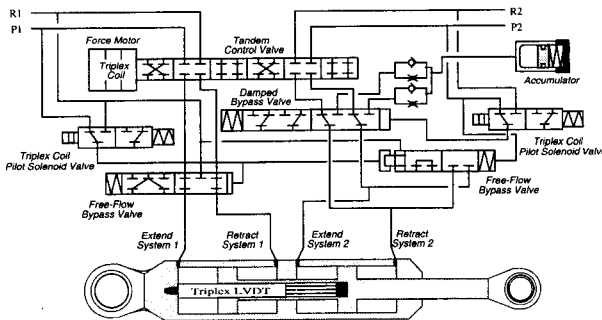


Fig. 1 The Schematic of DDV Actuator

$$\approx 0.43wx_v(P_s - P_L)_j \quad (j = 1 \text{ to } 2)$$

F_f : Columb 마찰력

V : DDV 선형모터 구동전압

R 과 L : DDV 모터 코일의 저항 및 인덕턴스

또한, 유압시스템 #1 에 연결된 액추에이터 양 챔버에 대하여 유량흐름에 관한 연속 방정식을 적용하면 아래의 식 (2)와 (3)를 얻을 수 있다⁽⁶⁾.

$x_v > 0$ 에 대하여

$$\begin{aligned} Q_1 &= k_1 x_v \text{sign}(P_s - P_1) \sqrt{P_s - P_1} \\ &= A_1 \frac{dy_{P/B}}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} + C_{ip}(P_1 - P_2) + C_{ep}P_1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= k_1 x_v \text{sign}(P_2 - P_r) \sqrt{P_2 - P_r} \\ &= A_2 \frac{dy_{P/B}}{dt} - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} + C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_2 \end{aligned}$$

$x_v < 0$ 에 대하여

$$\begin{aligned} Q_1 &= k_1 x_v \text{sign}(P_1 - P_r) \sqrt{P_1 - P_r} \\ &= A_1 \frac{dy_{P/B}}{dt} + \frac{V_1}{\beta_e} \frac{dP_1}{dt} + C_{ip}(P_1 - P_2) + C_{ep}P_1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Q_2 &= k_1 x_v \text{sign}(P_s - P_2) \sqrt{P_s - P_2} \\ &= A_2 \frac{dy_{P/B}}{dt} - \frac{V_2}{\beta_e} \frac{dP_2}{dt} + C_{ip}(P_1 - P_2) - C_{ep}P_2 \end{aligned}$$

여기서,

$$k_1 = C_d w \sqrt{2/\rho}$$

w 와 C_d : 밸브 유량포트의 폭 및 유량계수

P_s 와 P_r : 유압 공급 및 회수 압력

C_{ip} 와 C_{ep} : 내부 및 외부 누설계수

A_1 과 A_2 : 유압 챔버 1&2 에 대한 피스톤 단면적

ρ 와 β_e : 유압유의 밀도 및 Bulk Modulus

$y_{P/B}$: 액추에이터 피스톤의 상대변위

유압시스템 #2 에 의하여 지배 받는 부분도, 단면적이 모두 A_2 로 표현된다는 것을 제외하고는 위의 식들과 동일하게 표현된다.

부하 질량(M_L)의 운동은 아래의 식 (4)로 지배된다.

$$M_L \frac{d^2 y_p}{dt^2} + (B_L + B_p) \frac{dy_p}{dt} = \sum_{i=1}^4 A_i P_i \quad (4)$$

위 식에서 y_p 와 y_B 는 부하가 움직인 절대 변위 및 액추에이터 프레임의 절대 변위이고, B_L 과 B_p 는 부하 및 피스톤 운동에 대한 댐핑계수이다. 한편, DDV 액추에이터는 어느 정도 탄성(K_B)을 갖는 항공기 기체에 장착되므로, 액추에이터 내부에 설치된 LVDT는 액추에이터 피스톤의 상대 이동변위($y_{P/B}$)를 측정하게 된다.

$$y_{P/B} = y_p - y_B = y_p - \left(\sum_{i=1}^4 A_i P_i / K_B \right) \quad (5)$$

Fig. 2 에 위에서 설명된 DDV 액추에이터에 관한 운동 특성과 제어계의 구조를 포함한 SIMULINK 모델이 도시 되어 있다. Fig. 2 에서 “DDVn Model”로 표시된 서브 블록에는 식 (1)과 선형모터를 구동하는 서보 앰프 특성이 모델링되어 있으며, “Chamber_dyn”블록은 식 (2)와 (3)으로 표현되는 유체 운동에 관한 연속방정식을 나

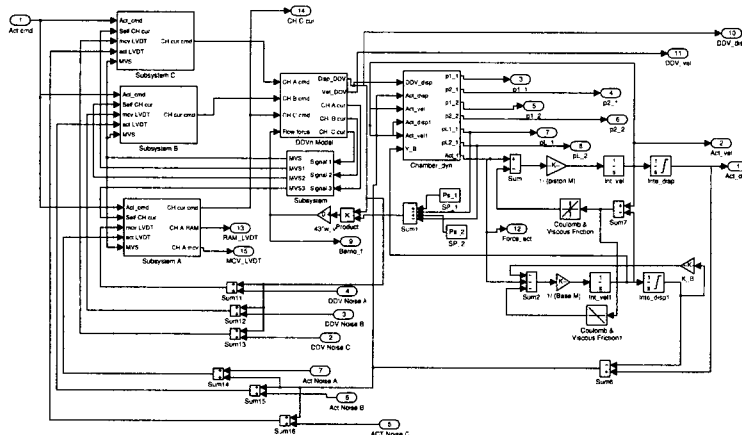


Fig. 2 3 CH Model of DDV Actuator with Current EQ Loop

타내고 있다. 또한, 식 (4)와 (5)의 특성은 Fig. 2 의 SIMULINK 모델에서 우측 부분에 표현되어 있다. 여기에서 자세히 설명되지는 않지만, Fig. 2 의 좌측 부분 (Subsystem A, B, C & Subsystem Block)은 3 중으로 다중화된 DDV 액츄에이터의 제어부를 나타내고 있다⁽⁷⁾.

3. 구동전류 동일화 루프 설계

항공기의 비행제어 시스템, 또는 원자력 발전소의 제어 시스템은 안전 작동 (Safety Operation)이 매우 중요하다. 따라서, 제어시스템의 고장으로 인한 중대사고 확률을 감소시키기 위하여 이들은 대부분 다중제어 시스템의 구조를 갖게 된다. 이 장에서는 이러한 다중제어루프 구조를 갖는 제어계의 현실적인 문제점들에 관하여 살펴보고, 이를 해결할 수 있는 방안에 대하여 논의한다.

3.1 다중제어루프를 갖는 제어계의 특성

앞서 논의된 Fig. 1 의 구조를 갖는 DDV 액츄에이터를 3 중의 제어계를 사용하여 제어하려 할 때, 다음과 같은 실제적인 현상에 의하여 DDV 스펴 (MCV: MasterControl Valve)을 구동하는 각 채널 전류는 서로간에 많은 편차를 갖을 수 있다. 즉, DDV 스펴의 변위, 그리고 액츄에이터 램의 변위를 측정하는 3 중의 LVDT 센서는 동일한 변위에 대하여 서로 다른 전기적 신호를 출력할 수 있다. 특히, 제조회사로부터 양산되는 DDV 액츄에이터에 내장된 다중 LVDT 센서의 전기적 특성은 제조회사에서 규정한 한도 내에서 제품마다 서로 다른 특성을 갖을 수 있다. Fig. 3 은 본 논문에서 사용된 DDV 액츄에이터에 대하여, DDV 스펴 및 액츄에이터 램의 변위가 정적인 조건 (Static Condition) 하에서 각 채널별로 측정된 LVDT 신호 출력을 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 각 LVDT 센서의 전기적 출력 신호는 서로 편향 (Offset)되어 있음을 알 수 있다. 이 데이터를 바탕으로 본 논문에서 사용된 DDV 액츄에이터에 내장된 LVDT 센서의 통계적 특성을 표 1 과 같이 유도할 수 있다. 표 1 에 주어진 대로 각 LVDT 센서가 서로 편향되어 있는 동시에 가우시안 잡음 (Gaussian Noise)을 갖고 있다는 가정 하에서 DDV 액츄에이션 시스템으로 크기 500mV 의 2 Hz 구형

파 신호를 입력하였을 때, Fig. 2 에 의존한 비선형 시뮬레이션 결과와 실제 실험 결과가 Fig. 4 에 도시 되어 있다. 이 그림에서 상위 3 개의 응답은 DDV 선형모터를 구동하는 각 채널별 구동 전압을 (즉, Fig. 5 에서 DAC 출력 전압), 그리고 4 번째 및 5 번째 응답은 DDV 스펴 및 액츄에이터 램의 변위에 대한 채널 B LVDT 센서 출력신호를 각각 나타내고 있다. 또한, 이 그림의 실선 부분은 실험 결과를, 그리고 점선 부분은 시뮬레이션 결과를 각각 의미하고 있다. Fig. 4 에서 볼 수 있듯이, 각 채널별 구동 전압은 서로 편향되어 있으며, 단지 각 채널의 구동 전압의 DC 값들은 서로 상쇄되고 있기 때문에, DDV 스펴이나 액츄에이터 램 변위가 명령신호를 거의 추종하고 있음을 알 수 있다. 여기서, 각 채널 구동 전압에 있어서 시뮬레이션 결과와 실험 결과가 편차가 있는 것은 Fig. 2 의 비선형 모델에 대한 시뮬레이션 상에서 단지 LVDT 센서의 부정확성만을 고려하고, 각 제어 채널마다 서로 다를 수 있는 서보 앰프등의 DC 게인 차이를 고려하지 않은 결과라 생각된다. Fig. 4 의 결과가 의미하는 중요한 사실은 다중 루프로 제어되는 DDV 액츄에이터에 있어서, 각 제어 채널의 상이한 특성으로 발생하는 각 채널간의 구동전류 편차를 그대로 방치한다면, DDV 스펴을 구동하는 선형 모터는 필요이상으로 계속 가열되어 그 특성이 변화되거나, 수명에 있어서 악 영향을 받게 된다는 점이다.

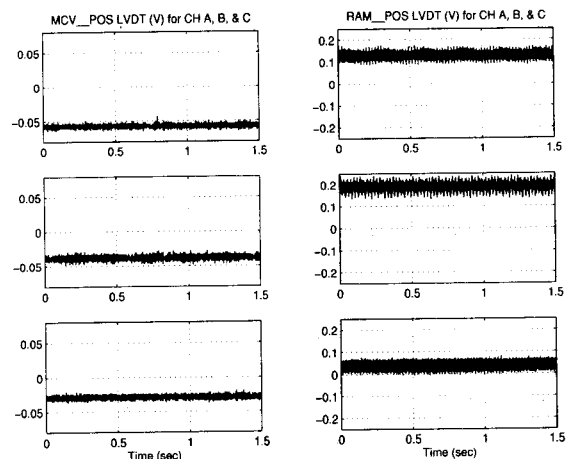


Fig. 3 MCV & RAM LVDT Output Signals (Static Case)

Table 1. Statistical Characteristics of LVDT Sensors installed on DDV Actuator (Unit: inch)

		본 논문에서 사용된 DDV Actuator		MOOG 사 자료에 의한 사양	
		채널간 OFFSET	Standard Dev (Noise)	채널간 OFFSET	Stand Dev (Noise)
MCV LVDT	CH A	-1.6825×10^{-4}	6.9906×10^{-6}	2.38095 $\times 10^{-3}$ MAX	1.65 $\times 10^{-4}$ MAX
	CH B	-1.1283×10^{-4}	8.8040×10^{-6}		
	CH C	-8.3774×10^{-5}	7.0358×10^{-6}		
RAM LVDT	CH A	3.6909×10^{-2}	4.3225×10^{-3}	3.4091 $\times 10^{-2}$ MAX	1.86 $\times 10^{-2}$ MAX
	CH B	5.4622×10^{-2}	5.6525×10^{-3}		
	CH C	1.2162×10^{-2}	4.5026×10^{-3}		

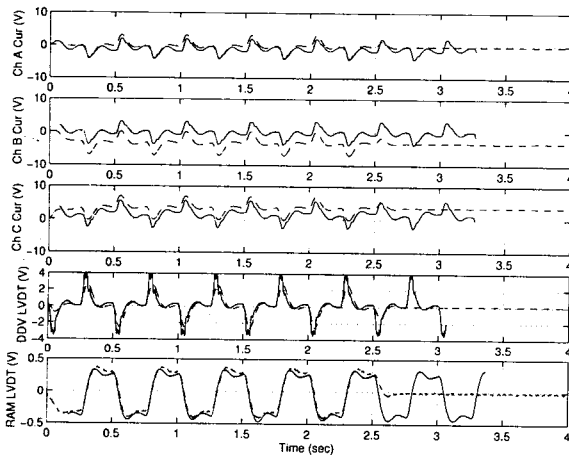


Fig. 4 Simulated vs Experimental Time Domain Response (500 mV Input & EQ Loop Off)

3.2 구동전류 동일화 루프의 구조

위에서 언급된 문제점을 해결하기 위하여는 Fig. 5 의 우 상단부에 그려진 구조를 갖는 구동전류 동일화 회로가 사용될 수 있다. 이 피드백 회로는 위에서 언급된 여러 요인으로 인하여 자기 채널 (Self Channel)의 구동전류가 중간 값 선택기 (MVS: Mid Value Selector)에 의하여 출력되는 신호와 서로 다른 경우, 저역 통과 필터 (Low Pass Filter)와 신호크기 제한기 (Authority Limiter)를 통하여 교정 시킴으로서 각 채널의 전류가 서로 DC 편차 (Offset) 없는 거의 동일한 값의 전류를 갖게 만드는 역할을 하게 된다. Fig. 5 의 전체 구조에서 전류 동일화 회로만을 독립시키면, Fig. 6 의 블록 선도를 얻을 수 있다. Fig. 6 의 각 제어 파라미터

들은 다음의 사항들을 고려하여 설계되어 져야 한다.

구동전류 동일화 회로의 주된 목적은 다중 채널 구조를 갖는 제어부를 실제적으로 구현할 때, 항상 나타나게 되는 LVDT 센서 오차, 또는 하드웨어 특성 오차에 의한 각 채널간의 구동전류 불일치를 해결하기 위한 것이다. 따라서, 역추예이더 제어를 위한 다중 루프중의 임의의 한 채널에서 발생될 수 있는 비정상 작동 전류 (예를 들어, 한 채널 서보 앰프가 포화조건(Hardover)인 상태)에 대하여, 전류 동일화 회로는 무관하게 작동되어야 한다. 그러나, 실제로 이러한 작동모류가 임의의 한 채널에서 발생되었을 때, 비행제어컴퓨터의 오작동 감지기능 (Fault Monitoring)에 의하여 이 오작동 채널이 감지되고 다중제어 구조에서 제외 (Voting out)될 때까지는, 비록 짧은 순간이기는

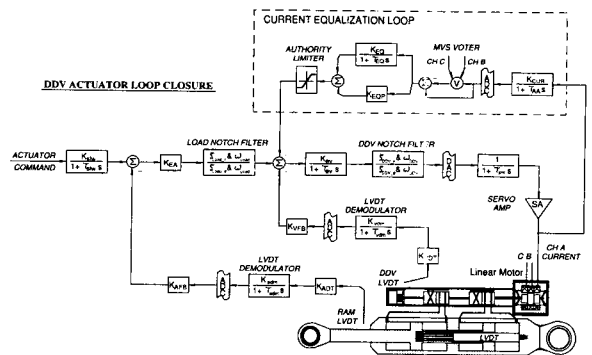


Fig. 5 Digital Loop Closure Structure of DDV Actuator

하지만, 구동전류 동일화 회로 구조에 의하여 타 채널 전류들은 고장 채널 전류에 의하여 영향을 받게 된다⁽⁸⁾. 이러한 영향을 최소화하는 방안은 Fig. 6 에서와 같이 신호크기 제한기를 사용하는 것이 될 수 있다. 여기서, 이 크기 제한기의 한계 값은 각 채널간의 LVDT 센서 오차, 그리고 하드웨어 특성 오차의 크기를 반영하여 결정되어야 한다.

전류 동일화 회로는 피드백 회로의 성질에 의하여 자기 채널의 전류를 중간 값 선택기에 의하여 결정되는 값으로 접근시키는 역할을 하고 있지만, Fig. 6 에 그려진 대로 구동전류 동일화 필터(Current EQ Filter)가 위상지연 필터(Phase Lag Filter) 이므로 τ_{eq} 를 부적절하게 선정하면 루프 안정도에 나쁜 영향을 미치게 된다. 특히, Fig. 6 의 전류 동일화 회로에서 K_{eq} 와 K_{eqp} 의 값들을 크게 설정하면, 정상상태에서 각 채널간의 전류 편차값들은 감소되지만, 전류 피드백 회로의 대역폭(Bandwidth)을 필요이상으로 확장 시키게 되고, 결국은 루프 안정도는 보장되지 않게 된다. DDV 엑츄에이터의 대역폭이 대략 4 Hz 근처의 값을 갖도록 설계 되므로⁽⁷⁾, Fig. 5 에서 구동전류 동일화 루프의 대역폭을 대략 6 Hz 근처로 한다면, 전류 동일화 회로의 존재는 전체 DDV 엑츄에이터의 제어 성능에 큰 영향을 미치지 않는다.

3.3 시뮬레이션 및 실험결과

위에서 언급된 대로, Fig. 6 의 구동전류 동일화 루프에서 3 개 설계 파라미터들인 $K_{eq}, K_{eqp}, \tau_{eq}$,

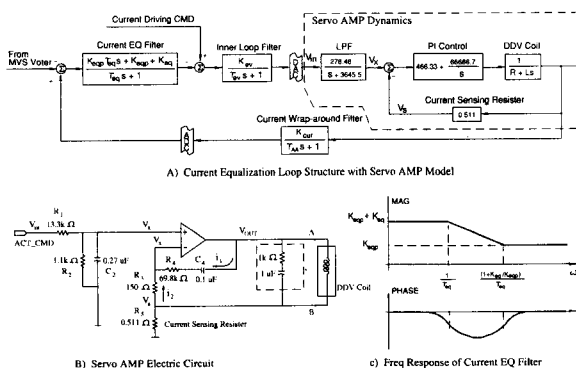


Fig. 6 Current Equalization Loop Structure with Servo AMP

그리고, τ_{eq} 의 값들은 구동 전류 동일화 루프의 안정도 및 성능에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이 파라미터들이 구동전류 동일화 루프에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, $K_{eq} = -72$, $K_{eqp} = -1$, 그리고 $\tau_{eq} = 12.43$ 으로 선정된 공칭 조건에서 이 값들이 각각 0.01 - 100 배 범위에서 변화될 때, 구동전류 동일화 회로의 페루프 댐핑, 대역폭, 그리고 정상상태 채널전류 편차 값들의 변화가 Fig. 7 에 정리되었다. 이 그림들에서 'x'로 표시된 값들은 K_{eqp} , 'o'로 표시된 값들은 K_{eq} , 그리고 '+'로 표시된 값들은 τ_{eq} 파라미터가 위에서 명시된 범위 한도에서 변했을 때, 구동전류 동일화 루프의 페루프 댐핑, 대역폭, 그리고 정상상태 편차의 값들을 각각 의미한다. 이들 그림으로부터 다음과 같이 결론할 수 있다.

- 예상한대로 K_{eq}, K_{eqp} 와 τ_{eq} 의 값들은 루프 안정도에 모두 영향을 미치고 있다. 즉, K_{eq} 값이

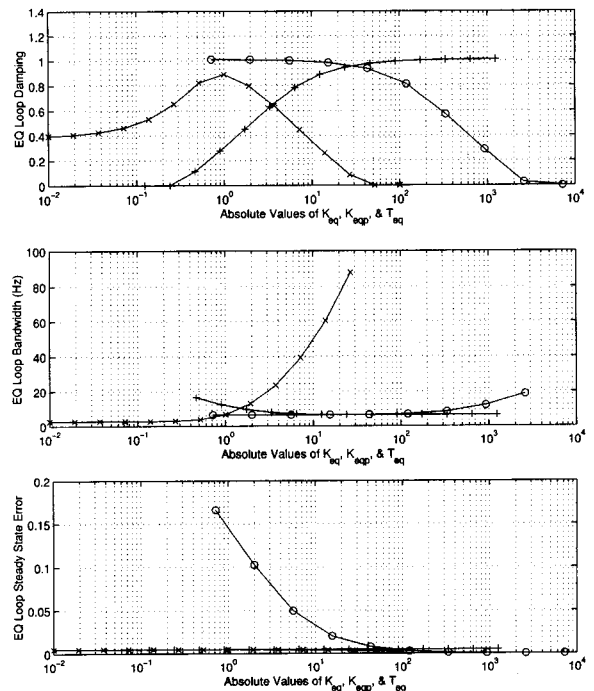


Fig. 7 Parameter Variation Effects on EQ Loop Damping, Bandwidth, and Steady State Error

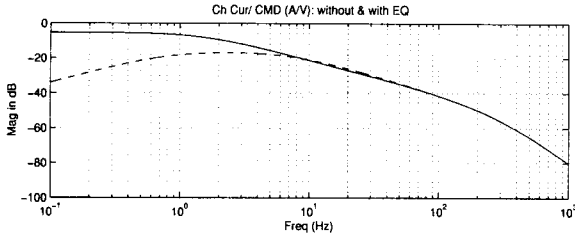


Fig. 8 Comparison of Current Transfer Characteristic

6000 보다 크게 되거나, K_{eqp} 의 값이 50 보다 크게 되거나, 또는 τ_{eq} 값이 0.3 보다 작게 되면, 구동 전류 동일화 루프는 불안정 해진다.

- 구동전류 동일화 회로의 대역폭을 결정하는 주된 설계 파라미터는 Fig. 7 에서 보듯이 K_{eqp} 이다. 즉, 루프 대역폭을 확장 시키기 위하여는 이 값을 크게 설정하면 된다. Fig. 6 의 구조에서, 구동전류 동일화 루프의 존재에 의하여 구동전류 명령 (Current Driving Command) 입력에 대한 채널 전류 (Channel Current) 출력 신호의 전달특성이 변화되지 않아야 한다. 피드백 회로 내에 존재하는 저역 통과 필터 (Low Pass Filter)는 전체 페루프 특성을 고역 통과 필터 (High Pass Filter)로 바꾸므로, 동일화 회로의 루프 대역폭을 너무 크게 확장하면 구동전류 전달 특성이 루프 대역폭보다 저 주파수인 대역에서는 훼손되게 된다. 이러한 특성은 Fig. 8 에 잘 나타나고 있다. 이 그림에서 실선은 전류 동일화 회로가 없을 때의 전류 전달특성을, 그리고, 점선은 전류 동일화 회로가 존재할 때의 전달 특성을 각각 의미하고 있다. 즉, 위에서 언급된 공칭 값들을 갖는 구동전류 동일화 루프에 대하여, 동일화 루프가 사용되지 않을 때와 사용될 때의 주파수 응답은 저주파수 대역에서 많은 차이를 보여주고 있다. 따라서, 구동전류 동일화 루프의 대역폭은 필요이상 크게 설계하지 않도록 하여야 한다.

- Fig. 9 에서도 보듯이 K_{eq} 를 제외한 다른 파라미터들은 정상상태 채널전류 편차 값에 미치는 영향이 크지 않다. 즉, 위에서 명시된 공칭 값들에서 K_{eqp} 나 τ_{eq} 를 변화시켜도 정상상태 편차를 크게 변화시킬 수는 없다. 그러나, K_{eq} 의 절대값을 공

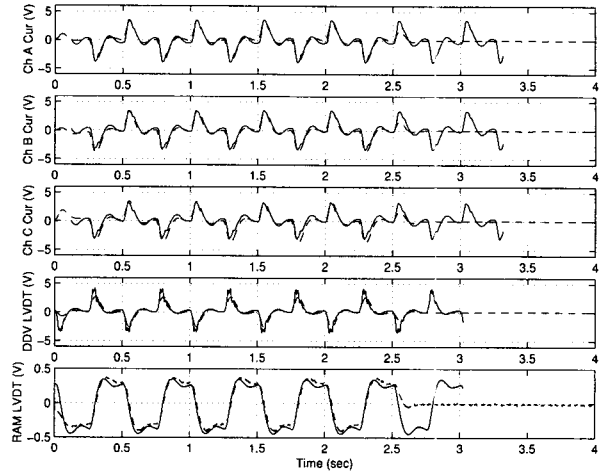


Fig. 9 Simulated vs Experimental Time Domain Response (500 mV Input & EQ Loop On)

칭 값인 -72 에서 더 크게 하면 정상상태 편차를 줄일 수 있다.

위에서 명시된 3 개의 설계 파라미터들에 대한 공칭 값들이 사용될 때, 구동전류 동일화 회로의 성능은 다음과 같이 예상되며, 이 조건에 대하여 수행된 시간영역 시뮬레이션 및 실험결과가 Fig. 9 에 도시 되어 있다.

정상상태에서 각 채널간 전류 편차의 크기: Fig. 6 의 중간값 선택기 (MVS Voter)에 의한 계단파 입력신호에 대하여 0.5%의 편차

구동전류 동일화 회로의 루프 댐핑: 대략 0.9

구동전류 동일화 회로의 대역폭: 대략 6 Hz

Fig. 9 의 시간영역 응답특성은 구동전류 동일화 루프가 사용되었다는 점을 제외하고는 앞서 논의된 Fig. 4 의 경우와 전적으로 동일한 시뮬레이션 조건 하에서 얻어진 것이다. 즉, Fig. 9 의 비선형 시뮬레이션 결과는 2.5 초 동안만 지속되는 2 Hz 구형파 입력신호에 대한 응답을 나타내고 있으며, Fig. 9 의 실험 데이터는 2 Hz 구형파 입력신호에 대한 3 초간의 실험 결과가 정리된 것이다. 전류 동일화 회로가 사용되지 않은 Fig. 4 의 결과와 비교할 때, Fig. 9 에서 각 채널의 구동전압은 거의 동일한 형상의 응답을 보여주고 있음을 알 수 있다.

특히, Fig. 4 와 9 에서 2.5 초 이후의 시뮬레이션 응답 특성은 구동전류 동일화 회로의 적용에 의하여 DC 상태에서의 각 제어 채널간의 구동전압 편차 현상이 현저하게 완화됨을 잘 보여주고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 3 중의 다중제어 구조를 갖는 직접구동 방식 유압 액츄에이터의 위치 제어계를 실제적인 HW 를 사용하여 구현하려 할 때 나타나는 제어 특성에 관하여 살펴보았다. 다중 제어계를 구성하는 각 제어채널의 정적 및 동적 특성은 각 채널마다 연결되어 있는 센서 및 HW 구성품들의 특성이 조금씩 서로 다를 수 있기 때문에, 각 제어채널의 플랜트 구동신호는 채널에 따라 서로 다를 수 있다. 특히, DDV 액츄에이션 시스템에서와 같이 제어루프의 DC 게인이 상대적으로 큰 경우, 작은 정도의 채널간의 구성품들의 특성 불일치는 서보밸브를 구동하는 전류의 값에서 채널간에 큰 편차를 유발할 수 있다. 이와 같이 각 채널간에 발생될 수 있는 구동전류 편차를 최소화시키기 위한 방안으로서 구동전류 동일화 회로의 구조 및 설계 방법이 제시되었다. 즉, 저역통과 필터와 전류신호 크기 제한기로 구성되는 전류 동일화 회로의 각 제어 인자들은 전류 동일화 루프의 안정도, 대역폭, 그리고 정상상태 오차를 고려하여 선정되었다. 이와 같이 설계된 구동전류 동일화 회로의 특성은 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 성능이 입증되었다.

참고 문헌

1. K.W. Vieten, J.D. Snyder, and R.P. Clark, "Redundancy management Concepts for Advanced Actuation Systems," AIAA/AHS/ASEE Aerospace Design Conference, Feb., 1993.
2. M. J. Anthony and F. Mattos, "Advanced Flight Control Actuation Systems and Their Interface with Digital Commands," SAE Technical Paper Series 851754, Oct., 1985.
3. W.S. Schaefer, L.J. Inderhees, and J.F. Moynes, "Flight Control Actuation System for B-2 Advanced Technology Bomber," Technical Bulletin 153,

MOOG

4. T.F. Weistermeier, "Triplex Digital Fly-By-Wire Redundancy Management Techniques," AIAA Paper, 1978.
5. D. J. Flavell, "LAVI Primary Flight Control Actuation - A Contemporary Electrohydraulic Fly-By-Wire Solution," Technical Bulletin 153, MOOG
6. Merritt, "Hydraulic Control Systems," John Wiley & Sons, 1967.
7. Y.N. Hsu, C.Y. Lai, M.H. Hsu, and Y.K. Lee, "Development of the Direct Drive Valve (DDV) Actuation System on the IDF Aircraft," International Pacific Air and Space Technology Conference, Oct., 1991.
8. Y. Nam and E. Lee, "Fault Monitoring of Aircraft Actuation System," 한국항공우주학회지, Vol. 24, No. 2, 1996.4.