

양방향 부하를 갖는 시스템의

직구동 위치제어기 설계

최동근 김정은 권기복 강치부  
대전기계창

Direct-Drive Position Controller Design  
for the Plant with Bidirectional Load

Dong G. Choi Jung O. Kim Kee B. Kwon Chi W. Kang  
A. D. D.

Abstract

In this study, direct-drive position controllers are designed and implemented for the flying vehicle's actuating system with both positive and negative load factors, where the load factors are assumed proportional to the deflection angle of control surface. Its analog and digital controllers are verified through software simulation and hardware-in-the-loop simulation.

1. 서론

전동기를 이용한 위치제어 시스템은 기어상자(Gear Box)를 사용해 왔으나 출력손실과 [1] 뒤틀림(Back Lash) 같은 비선형 항이 발생하게 되고, 응답속도가 빠른 시스템 구성에 적합하지 않다.

최근에는 희토류 제질(Rare Earth Material; SmCo 등)을 사용한 출력모터/크기 비가 큰 전동기들이 생산되고 있으므로 기어를 사용하지 않는 직구동 위치제어 시스템을 구성할 수 있게 되었다[2].

일반적으로 비행체의 구동장치는 전체 자동 조종 장치의 내부회로(Inner Loop)에 사용된다. 따라서 구동장치는 보통 빠른 응답속도가 요구되고 그에 반하여 정상상태 오차는 크게 문제되지 않는다.

비행체의 구동장치에 가해지는 외부 부하는 공력부하(Aerodynamic Load)인 힌지 모우멘트(Hinge Moment)이다. 힌지 모우멘트는 비행조건에 따라 변화하는데 그 크기는 힌지축과 압력중심(Center of Pressure)간의 거리와 동압(Dynamic Pressure)에 비례한다. 보통 힌지축은 압력중심 보다 앞에 위치시키므로 힌지 모우멘트의 계수(Hinge Moment Coefficient)는 항상 양(Positive)의 방향만 가진다. 최근에는 공력부하의 절대값의 크기를 줄이

기 위하여 힌지축을 압력중심이 변화하는 범위의 중간에 위치시키는 방법이 이용되고 있다. 이런 경우에 힌지 모우멘트의 계수는 양과 음의 양쪽방향의 값을 갖는다.

본 연구에서는 비행체의 조종날개 위치제어 시스템에 대해서 공력부하가 양과 음의 양쪽방향의 값을 갖을 경우에 대해서 아날로그 진상제어기(Analog Phase-Lead Controller)와 설계된 아날로그 진상제어기를 Tustin 방법에 의해서 변환된 디지털 진상제어기(Digital Phase-Lead Controller), 그리고 직접 디지털 영역(Digital Domain)에서 설계한 상태피환(State Feedback)과 관측자(Luenberger Observer)를 이용한 디지털 제어기를 설계하여 그 성능분석을 Software Simulation 및 HILS(Hardware-in-the-Loop Simulation)를 통하여 수행하였다.

2장에서는 공력부하를 고려한 위치제어 시스템의 모델을 구하고, 3장에서 시스템 요구사항을 설정하여, 4장에서 이를 만족시키는 제어기를 설계하며, 5장과 6장에서는 실험결과 및 결론을 각각 기술한다.

2. 공력부하(Aerodynamic Load)를 고려한 위치제어 시스템의 모델

공력부하인 힌지 모우멘트의 크기는 각변위에 비례한다. 그 관계식은 아래와 같다.

$$T_L = H \cdot \theta$$

$T_L$  : 힌지 모우멘트  
 $H$  : 힌지 모우멘트 계수 ( $-H_{max} \leq H \leq H_{max}$ )  
 $\theta$  : 각변위

저기 시정수를 무시하고, 공력부하를 고려하여

입은 위치 제어 시스템의 모델을 상태방정식과 전달 함수로 표시하면 아래와 같다.

상태방정식 :

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{H}{J} & -\frac{K_E K_T + R D}{J R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{360}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{J R} \end{bmatrix} U \quad (1a)$$

$$y = [1 \quad 0] \begin{bmatrix} \theta \\ \omega \end{bmatrix} \quad (1b)$$

전달함수 :

$$Gp(s) = \frac{y}{U} = \frac{\frac{360}{2\pi} \cdot \frac{K_T}{J R}}{s \left( s + \frac{K_E K_T + R D}{J R} \right) + \frac{H}{J}} \quad (2)$$

U : 입력전압 (V), y : 출력각 (Deg.)

(\* 전동기 상수들은 3장에서 기술)

위 시스템에서 힌지 모우먼트의 변화에 따른 극 ( Pole ) 들의 위치는 그림 1 과 같다.

시스템은 힌지 모우먼트의 계수가 0일때를 제외하고는 0형 시스템이고, 힌지 모우먼트 계수가 음의 값을 가질때는 불안정한 시스템이 된다.

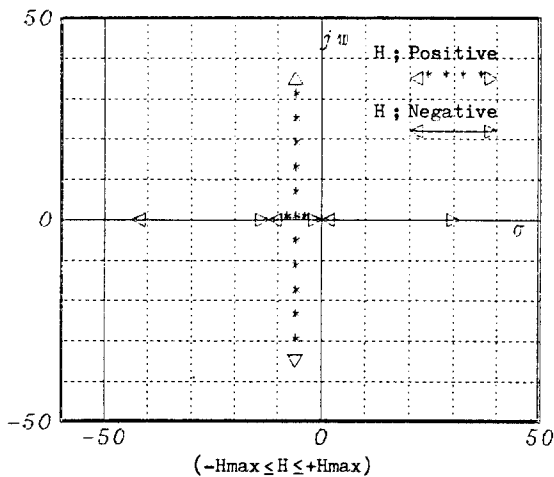


Fig. 1. Open-Loop Poles

### 3. 시스템의 요구조건

사용된 전동기의 상수들은 표 1 과 같다.

시스템의 요구조건은 전동기의 특성과 시스템의 응답속도를 고려하여 다음과 같이 설정하였다.

- 최대 힌지 모우먼트 계수 (Hmax)  
: 71.047 N.m/rad
- 최대 각변위 : ±10 Deg
- 단위계단 응답  
상승시간 ≤ 0.065 sec  
최대 오버슈트 ≤ 5%

정상상태 오차 ≤ 30%

• 대역폭

9Hz ≥ : 최대각변위 × 0.1 신호

6Hz ≥ : 최대 각변위 × 0.05 신호

3Hz ≥ : 그 밖의 다른 신호

대역폭 ( Band Width ) 이 입력신호의 크기에 따라 다른 것은 비선형항 ( 특히 입력전압의 제한요소 ) 때문이다.

Contents	Quantities	Dimension
Total Moment of Inertia ( J = J <sub>M</sub> + J <sub>L</sub> )	51.86 × 10 <sup>-3</sup>	Kg.m <sup>2</sup>
DC Resistance ( R )	2.11	Ω
Viscous Damping Coefficient ( D )	3.52 × 10 <sup>-3</sup>	N.m per rad/sec
Back EMF Constant ( K <sub>E</sub> )	1.15	V per rad/sec
Torque Sensitivity ( K <sub>T</sub> )	1.15	N.m/Amp
Peak Voltage	27.3	V

(\* QT6202C : Inland 사)

Table 1. Motor Constants

### 4. 제어기 설계

표 1 로 부터 플랜트 전달함수는 아래와 같다.

$$Gp(S) = \frac{603.325}{S(S+12.17) + 19.28H} \quad (3)$$

Gp(S) : 플랜트 전달함수

시스템은 힌지 모우먼트 계수 ( H ) 가 시간에 따라 변하는 시변 시스템 이지만 해석은 힌지 모우먼트 계수가 음의 최대값 ( -Hmax ), 0, 양의 최대값 ( +Hmax ) 일때에 대해서 수행하고 전체적인 특성을 유추 하였다.

제어기 설계 방법은 극 배치 ( Pole Assignment )

방법을 사용 하였는데 시스템의 요구조건 으로부터 원하는 폐회로 시스템의 극들의 위치는 다음과 같다.

고유주파수 : ω<sub>n</sub> ≥ 54 rad/sec

감쇠 상수 : ζ ≥ 0.7

제어기는 먼저 아날로그 제어기 ( Analog Controller ) 를 설계하고 시스템의 요구조건 으로부터 샘플링

주기 ( T ) 를 결정하여 디지털 제어기를 설계한다.

아날로그 제어기는 진상제어기 ( Phase-Lead Controller ) 이고 디지털 제어기는 아날로그 제어기를 Tustin 방법에 의하여 변환한 것과 상태피드백 ( State Feedback ) 과 관측자 ( Luenberger Observer ) 를 이용한 제어기 이다.

디지털 제어기의 샘플링 주기의 설정은 대역폭의 10배 정도 빠르거나, 또는 상승시간 동안 10번 정도 샘플링을 하게, 또는 아날로그 제어기의 극보다 5배 정도 빠르게하여 설정할 수 있다.

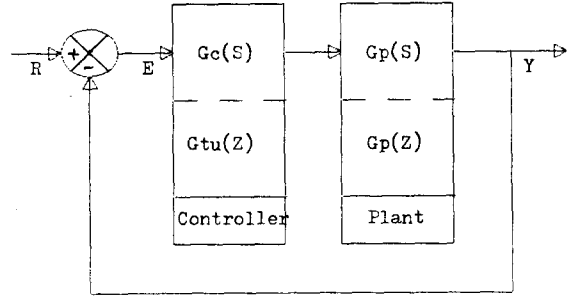
샘플링 주기 :

$$T \leq \frac{1}{B.W.} \times \frac{1}{10}, \text{ or}$$

$$\leq \text{Rising Time} \times \frac{1}{10}, \text{ or}$$

$$\leq \frac{1}{W_p} \times \frac{1}{5}$$

$W_p$  : 아날로그 제어기의 극 (Pole )



(Analog/Digital : Phase Lead)

Fig.2. Closed-Loop System

(1) 진상제어기 (Phase-Lead Controller)

구상된 폐회로 시스템의 구조는 그림 2와 같다. 진상제어기는 아날로그 형태와 Tustin 방법으로 변환된 디지털 형태 두 가지 이다.

근 궤적 방법에 의하여 설계한 아날로그 진상 제어기는 다음과 같다.

$$G_c(S) = 10 \frac{S/45 + 1}{S/600 + 1} \quad (4)$$

$G_c(S)$  : 아날로그 진상제어기 전달함수

Tustin 방법은 아날로그 계의 주파수 변수 (S)를 디지털 계의 주파수 변수 (Z)로 근사시키는 것으로 Trapezoid 방법 이라고도 한다 [3].

Tustin방법 :

$$S \sim \frac{2}{T} \frac{Z-1}{Z+1}$$

샘플링 주기 T 를 아날로그 제어기 극보다 5배 정도 빠르거나 2msec 로 정하여 Tustin 방법으로 아날로그 제어기를 변환하면 다음과 같은 디지털 진상 제어기를 얻는다.

$$G_{tu}(Z) = G_c(S) \Big|_{S = \frac{2}{T} \frac{Z-1}{Z+1}}$$

$$= 87.0843 \frac{Z - 0.9139}{Z - 0.25} \quad (5)$$

$G_{tu}(Z)$  : Tustin 방법에 의한 디지털 진상 제어기 전달함수

(2) 상태궤환 (State Feedback ) 과 관측자 (Luenberger Observer )

를 이용한 디지털 제어기 Tustin 방법에 의하여 변환된 디지털 제어기는 원래의 아날로그 제어기보다 그 성능이 떨어진다 [5]. 본 연구에서는 직접 디지털 영역 (Digital Domain )에서 설계하는 방법으로 상태공간 (State Space )에서의 디지털 제어기 설계를 선정하였다.

설계에 사용한 감지기는 모든 상태를 측정하지 않고 각변위만 감지하므로 관측자 (Luenberger Observer )를 사용하였고 얻어진 상태를 궤환

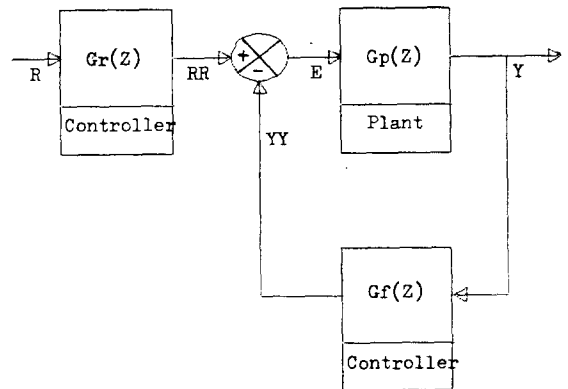
하여 극 배치 방법에 의하여 제어기를 설계하였다 [4].

설계된 폐회로 시스템은 그림 3과 같다.

$G_r(Z)$  는 전방 전달함수 (Forward Transfer Function ) 이고  $G_f(Z)$  는 궤환 전달함수 (Feedback Transfer Function ) 로 다음과 같다.

$$G_r(Z) = 30 \frac{Z - 0.5808}{Z - 0.1044} \quad (6a)$$

$$G_f(Z) = 130 \frac{Z - 0.9033}{Z - 0.1044} \quad (6b)$$



(Digital : St.F. + L.O.)

Fig.3. Closed-Loop System

5. Software Simulation 및 HILS 결과

Software Simulation 에서는 제어기와 플랜트를

모두 수학적 모델을 사용하여 성능을 분석하였으며 HILS 시에 제어기는 Software 로 처리하고 플랜트는 모의시험장치를 제작하여 성능을 확인 하였다.

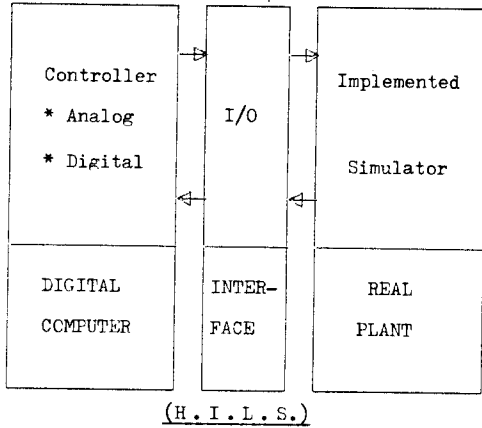


Fig.4. Simulation Block Diagram

그림 4와 같이 구성하여 HILS를 실시하였는데 공력부하(Aerodynamic Load)는 양방향 스프링부하(Bidirectional Spring Load)로 모사하였다.

앞에서 설계된 각 제어기로 구성된 위치제어 시스템의 계단함수 입력에 대한 시간 응답은 그림 5에서 Software Simulation 결과를 보이고 그림 6은 HILS 결과를 보인다. 이때 명령각은 5도로 하였다.

HILS 에서는 Software Simulation 시에 고려하지 못한 신호 잡음(Signal Noise)이 발생되었으나 전반적인 특성은 유사하다. 따라서 수학적 플랜트 모델과 구성된 모의시험 장치는 서로 충분히 모사되었다. 그림 5와 그림 6에서 Tustin 방법에 의하여 변환된 디지털 제어기는 원래의 이산로그 제어기보다 성능이 떨어짐[5]을 볼 수 있고 정상 상태 오차는 상용공간에서 설계한 디지털 제어기가 작음을 보인다.

그리고 대역폭에 대한 결과는 표 2에서 종합 하였으며 점선 부분의 경우를 택하여 대표적인 주파수 특성곡선의 형상을 보았다. 대역폭은 전반적으로 시스템 요구조건 보다 크다.

## 6. 결 론

비행체의 구동장치를 위한 작구동 위치제어 시스템을 구성하여 성능을 분석하였다. 설계된 아날로그 및 디지털 제어기는 시간응답, 주파수 응답에 대한 요구조건들을 잘 만족시킨다. 공력부하가 음(Nega-

tive)인 경우에 플랜트는 불안정 하지만 제어기를 설계하여 구성한 폐회로 시스템은 안정성이 보장된다. 정상상태 오차는 음일 경우에 더 커지므로 공력부하가 있는 시스템의 최야조건은 런치 모우먼트의 계수가 음인 경우이다.

양방향 부하를 갖는 시스템은 전동기의 최대 출력 토크의 크기가 한쪽 방향으로 부하를 갖게 할 경우의 출이므로 시스템 구성에 장점이 있다.

공력부하는 시변(Time Varying)이므로 적응 제어기(Adaptive Controller)에 대한 연구도 필요하다.

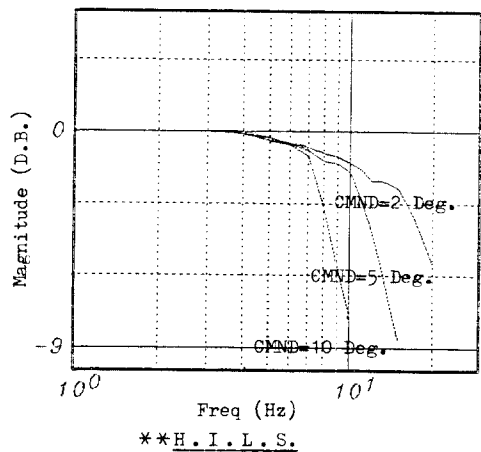
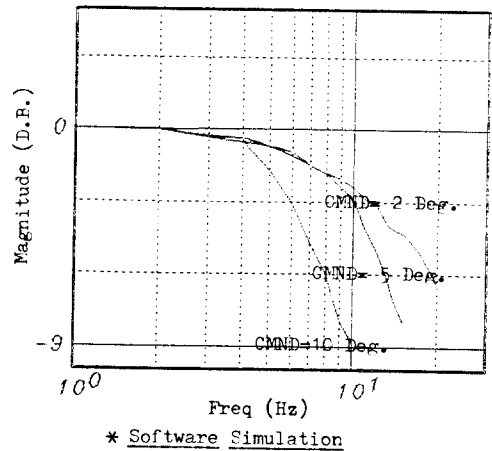
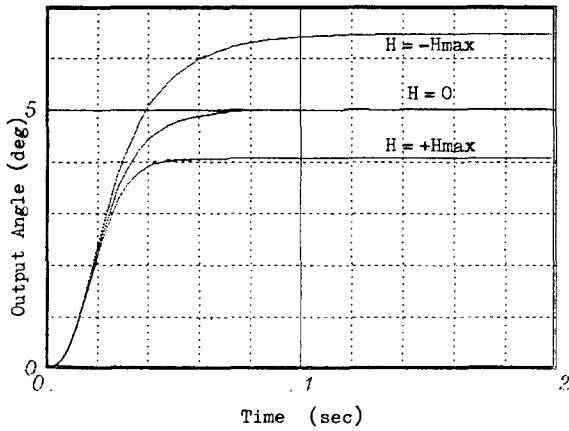
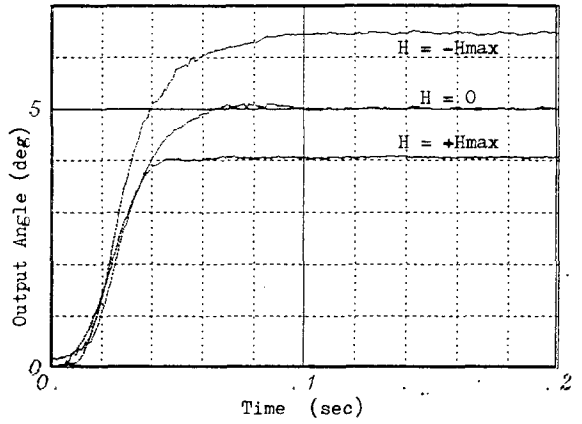


Fig.7. System Band Width

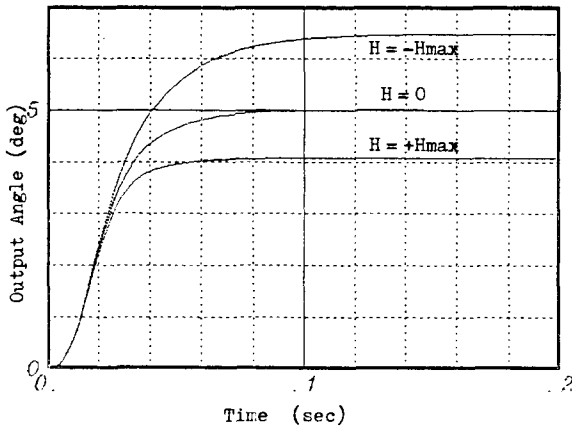
Step Response  
Analog (Phase Lead)



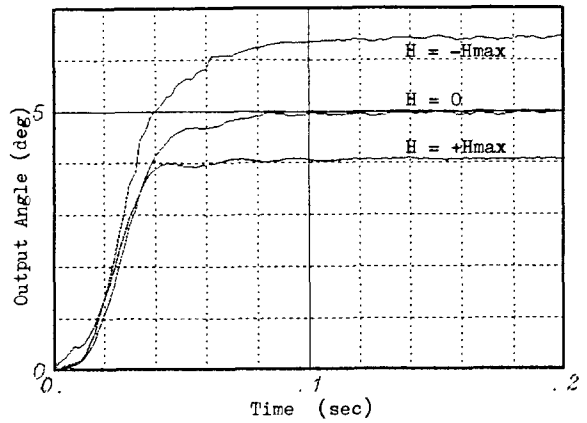
Step Response  
Analog (Phase Lead)



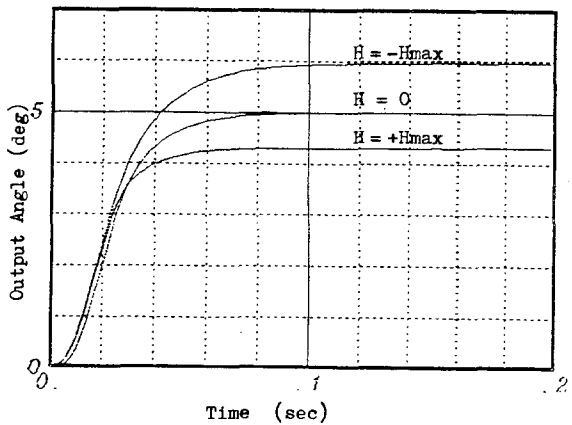
Step Response  
Digital (Tustin)



Step Response  
Digital (Tustin)



Step Response  
Digital (St.F. + L.O.)



Step Response  
Digital (St.F. + L.O.)

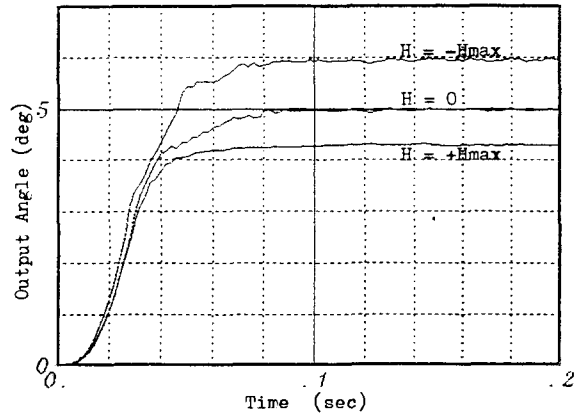


Fig.5. Software Simulations

Fig.6. H. I. L. S.

Hinge Moment Coefficient	Command Amplitude (Deg)	Analog Controller (Phase Lead)		Digital Controller			
				(Tustin)		(St.F. + L.O.)	
		SS	HILS	SS	HILS	SS	HILS
+Hmax	2	21	21	21	21	18	20
	5	14	13.5	13	14	12	13
	10	11	10	7.5	9.5	7	10
0	2	19	18	18	18.2	* 13	** 16.9
	5	12	10.5	10	11	10	10.8
	10	8	7.5	6	7.6	6	7.7
-Hmax	2	15	14	15	15	10	10
	5	8	7.5	8	8	8	8
	10	3	5	3	3	5	5

Table 2. System Bandwidth (Hz)

#### References

- [1]. Jacob Tal, Stephen Kahne, "The Selection of Variable Gear for Minimum Energy", IEEE Tr. A.C., pp.353-358, 1972, June.
- [2]. Inland Motor, "Direct Drive DC Motors," p.88, 1982, April.
- [3]. G.F. Franklin, J.D. Powell, "Digital Control of Dynamic System," pp.54-61, Addison-Wesley, 1980.
- [4]. G.F. Franklin, J.D. Powell, "Digital Control of Dynamic System," pp.131-154, Addison-Wesley, 1980.
- [5]. Paul Katz, "Digital Control Using Micro-processors," pp.57-64, Prentice-Hall, 1981.