

論文98-35S-5-5

자전 안정화형 탐색기 주사루프의 비연성 제어기 설계

(A Decoupling Controller Design for the Seeker Scan Loop with a Spin-Stabilized Platform)

柳寅億*, 李相禎**

(Inn Eark Yoo and Sang Jeong Lee)

요 약

본 논문은 자전 안정화 플랫폼으로 된 유도탄 탐색기 주사루프의 비연성 제어기에 관한 것이다. 주사명령에 대해 탐색기가 정확하게 움직이는 것은 표적의 포착 확률을 높이는 데 있어 필수적이다. 탐색기 주사루프는 상호 결합이 강한 2-입력 2-출력 시스템이므로 고성능의 제어기를 사용하더라도 표적의 각 축방향으로 정확하게 지향하기가 대단히 어렵다. 이러한 탐색기의 주사루프에 비연성 제어기를 사용할 경우, 상호 결합을 상당히 줄일 수 있다. 실시간 작동을 위해 차수가 낮은 제어기를 사용해야 하므로 비연성 여과기와 결합된 PI 제어기를 사용하고 다른 제어기와 그 성능을 비교하였다. 선형화된 동역학 모델을 사용하여 설계하였으며, 계단 응답 특성을 실험하여 그 설계 성능을 확인하였다.

Abstract

This paper presents a decoupling controller of the missile seeker scan loop with a spin-stabilized platform. A precise seeker motion with respect to the scan command is essential for the higher acquisition probability of the target. As the seeker scan loop is a deeply cross-coupled two input two output system, an accurate pointing or scanning for each axis to the target is very difficult, even though provided with the help of a high performance controller. When a decoupling control is applied to the seeker scan loop, the cross-coupling between two axes can be reduced to a remarkable amount. As a low order of controller is required for the real time operation, a PI controller with decoupling filter is suggested and compared with other controllers. A linearized dynamic model of seeker scan loop is used and validated through the comparison of experimental results of step responses.

I. 서 론

탐색기 주사루프는 표적의 지향좌표를 기준입력으로 하여 탐색기의 시계(FOV, Field of View) 중심을 나타내는 pitch와 yaw방향의 짐발(gimbal) 각도를 궤환신호로 하는 2-입력 2-출력의 위치 제어루프이다.

* 正會員, 國防科學研究所

(Agency for Defense Development)

** 正會員, 忠南大學校 電子工學科

(Chungnam National University, CS-Lab.)

接受日字: 1998年3月4日, 수정완료일: 1998年5月4日

이 루프는 탐색기의 시계중심이 매 순간마다 입력되는 표적좌표를 중심으로 사전에 설정된 모양으로 움직이면서 일정한 크기의 주사시계(Scan FOV)를 형성하여 탐색기가 표적을 쉽게 포착하도록 도와준다.

자전 안정화형 탐색기의 주사루프는 자이로의 짐발 각도를 측정하는데 있어, 원통형의 코일내부에서 자전하고 있는 영구자석의 움직임에 의해 코일에 유기되는 자기유도 전압을 사용하므로 pitch나 yaw방향의 상호 결합(Cross-Coupling)이 크게 나타난다^[1]. 그리고, 탐색기의 시계 중심을 움직이는 직류 신호의 제어 입력을 자전주파수로 변조하거나 짐발각도 신호를 복조할 때 사용하는 pitch나 yaw방향의 기준신호가 가지

는 위상차도 상호 결합으로 표현된다^[2]. 이러한 상호 결합이 존재하는 주사루프는 표적에 대한 입력정보가 정확하더라도 탐색기의 시계중심이 지향하는 위치오차는 커지게 되어 시계 내에 표적이 나타날 확률은 감소하게 된다. 따라서, 탐색기의 표적 포착확률을 높이기 위해 상호 결합이 작은 주사루프를 설계하는 것이 요구되고 있다.

자전 안정화형 탐색기 주사루프를 구성하기 위하여 여러 가지 제어기가 설계된 바 있다^{[3] [4] [5] [6]}. 설계된 기존의 여러 제어기는 주사루프의 모델링 오차에 대한 강인성을 보장하는데 중점을 두어 제어기 설계를 시도하였으므로 제어기내에 대상 플랜트의 전체 모델이 포함되어 제어기의 차수가 비교적 높다^{[4] [5] [6]}. 그리고, 자전구동 토크의 증가에 의한 상대축 스프링상수가 존재하는 경우^[7], 이에 의한 정상상태 오차를 제거하기 위한 적분기를 제어기의 내부에 포함해야 하므로 제어기의 구조는 더욱 복잡해진다.

본 논문에서는 B. Thomas가 제안하는 비연성 여과기(Decoupling Filter)^[8]를 이용하여 상호 결합이 존재하는 2-입력 2-출력 구조의 탐색기 주사루프를 상호 결합이 없는 2개의 단일 입출력 구조로 변환하고, 계단입력에 대한 정상상태 오차를 없애기 위해 각각의 PI 제어기를 설계하였다. 설계된 비연성 여과기는 제어 대상의 구조를 이용하여 상대 축 방향의 전달함수가 '0'이 되도록 구성하고 출력에서는 다른 입력에 의한 영향이 나타나지 않도록 한다. 설계된 PI 제어기와 비연성 여과기를 합쳐 1 개의 비연성 제어기 블록으로 구성하고, 기 설계된 H ∞ 제어기 및 LQG/LTR 제어기^[9]와 계단입력에 대한 응답특성을 비교하였다.

II. 탐색기 주사루프와 수학적 모델

자전 안정화형 탐색기의 주사루프는 크게 나누어 자이로 구동명령 발생부, 자이로 구동용 신호처리부, 자전 안정화 자이로 뮌치, 자이로 위치 검출부 그리고 보조기능으로서 자전 구동부로 구분된다.

자이로 구동명령 발생부는 외부의 위치입력이나 주사파형 입력신호를 받아 자이로 위치 검출부에서 제공되는 자이로의 각도 위치신호와 비교하여 각도 오차신호를 만들고 이를 제어기에 인가하여 탐색기 주사루프의 제어 입력 신호를 발생한다. 자이로 구동용 신호처리부는 자이로 구동명령 발생부에서 나온 제어 입력 신호를 자이로의 자전주파수에 맞도록 자이로 위치 검

출부에서 발생하는 기준신호를 사용하여 변조하며, 자이로가 선회 구동하는데 필요한 전류신호로 바꾸는 역할을 한다. 자전 안정화 자이로뮌치는 4종류의 코일뮌치와 영구자석으로 된 회전자 및 그를 받치고 있는 자전용 플랫폼과 2-축 자유도의 짐발로 이루어져 있다. 영구자석 회전자는 4개의 자전구동용 코일 속에 위치하여 자전 구동부에서 공급되는 전류에 의해 일정한 각속도로 자전하고 있으며, 이 코일과 수직방향으로 선회코일이 감겨 있어 자이로 구동용 신호처리부에서 공급되는 전류가 선회코일에 흐르면 영구자석 회전자가 선회운동을 하게 된다. '자이로 위치 검출부는 자이로의 자전이나 선회구동용 변조신호 발생 및 자이로 자전축의 각도 신호 복조에 필요한 자이로 자전 기준 신호와 자이로의 자전축이 지향하는 2방향의 각도 신호($\hat{\psi}_g$, $\hat{\theta}_g$)를 발생한다. 자전 기준신호는 자전코일의 주위에 45(deg)가 어긋나면서도 같은 모양과 방향으로 부착된 4개의 기준코일에 의해 회전자의 N-S극의 위치를 감지하고 이를 상/하 및 좌/우의 구형파로 생성하여 만들어지며, 자전축의 짐발 각도 신호는 선회코일 위에 감겨져 있는 감지코일에서 자전축이 기울어진 방향과 크기에 비례하는 위상과 진폭을 갖는 전기신호를 기준신호로 복조하여 만들어진다. 자전 구동부는 자이로가 중심축의 방향과 무관하게 항상 일정한 자전주파수로 자전하도록 자전코일에 전류를 공급한다.

자이로의 중심축을 움직이거나 위치를 측정하는 전기신호는 회전체의 자전주파수로 극좌표 변조되어 있으므로 2-입력 2-출력을 갖는 주사루프를 구성하기 위해 다음과 같은 과정이 필요하다. 즉, 감지코일에서 측정된 자전축의 각도 위치신호를 직교좌표로 복조하여 탐색기의 짐발 각도에 해당하는 출력신호($\hat{\psi}_g$, $\hat{\theta}_g$)를 얻고, 2-방향 입력(R_ϕ , R_θ)에 대한 오차신호를 만들어 제어기에 입력하여 탐색기 주사루프의 제어 입력 신호(U_ϕ , U_θ)를 만든다. 이 제어 입력 신호는 다시 자이로 구동용 신호처리부에서 자전주파수로 변조하고 이에 비례하는 전류를 선회코일에 흐르게 하여 입력된 방향으로 자이로를 움직이게 한다. 그림 1에서는 디지털 제어기와 A/D 및 D/A 변환기를 포함하는 주사루프의 구성을 도시하였다.

자전 안정화형 탐색기 주사루프의 전달함수는 자이로를 포함하여 신호처리부의 변조기, 대역여과기, 선회 증폭기, 감지코일, 복조기 및 저역여과기등에 대한 모델을 이용하여 구하면 다음과 같다^[7].

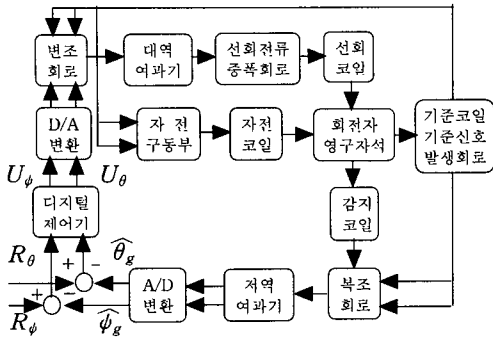


그림 1. 자전 안정화형 탐색기의 주사루프 구성도
Fig. 1. Scan loop block diagram of spin-stabilized seeker.

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_g \\ \hat{\theta}_g \end{bmatrix} = \frac{G_4(s)G_1(s)T_P Y_P}{G_2^2(s) + G_3^2(s)} \cdot \begin{bmatrix} \cos \phi & \sin \phi \\ -\sin \phi & \cos \phi \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -K_{\alpha} s \\ K_{\alpha} s & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} G_3(s) & G_2(s) \\ -G_2(s) & G_3(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} 1+a & 0 \\ 0 & 1-a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$G_1(s) = \frac{a_1}{s + a_1} \cdot g_1, \quad (2)$$

$$G_2(s) = Is^2 + Ds + K, \quad (3)$$

$$G_3(s) = Hs + T_M, \quad (4)$$

$$G_4(s) = \frac{a_2}{s + a_2} \cdot \frac{a_3}{s + a_3} \cdot \frac{180}{\pi} \cdot K_b. \quad (5)$$

식 (2)에서 $G_1(s)$ 는 직류화된 대역여파기의 전달함수로서, a_1 은 대역여파기의 시정수이며, g_1 은 변조기의 이득과 대역여파기의 직류이득이다. Y_P 는 전력증폭기에서 선회코일로 공급되는 전류의 변환이득, T_P 는 선회토크 상수이고, $G_2(s)$ 와 $G_3(s)$ 는 자이로의 동력학 모델에서 주어지는 다항식으로서 I, D, K, H 는 자이로의 관성질량, 감쇠상수, 스프링상수, 각운동량이며, T_M 은 상대 축 방향의 스프링 상수이다. $G_4(s)$ 는 복조기 및 저역통과회로의 전달함수로서 a_2 와 a_3 는 각각의 시정수이고, K_b 는 각도에 따른 감지코일의 감도상수이다. ϕ 는 복조기의 위상지연이며, K_{α} 는 감지코일의 결합상수이고, a 는 변조기의 위상차를 표시한다.

식 (1)에서 표현된 각 블록을 2-입력 2-출력의 전달함수 행렬로 정리하면, 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{\phi}_g \\ \hat{\theta}_g \end{bmatrix} = G_K(s) \cdot \begin{bmatrix} G_C(s) & G_D(s) \\ G_E(s) & G_F(s) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\theta \end{bmatrix}, \quad (6)$$

$$G_K(s) = \frac{G_4(s)G_1(s)T_P Y_P}{G_2^2(s) + G_3^2(s)}, \quad (7)$$

$$G_A(s) = \cos \phi + \sin \phi K_{\alpha} s, \quad (8)$$

$$G_B(s) = \sin \phi - \cos \phi K_{\alpha} s, \quad (9)$$

$$G_C(s) = (G_A(s)G_3(s) - G_B(s)G_2(s))(1 + a), \quad (10)$$

$$G_D(s) = (G_A(s)G_2(s) + G_B(s)G_3(s))(1 - a), \quad (11)$$

$$G_E(s) = (-G_B(s)G_3(s) - G_A(s)G_2(s))(1 + a), \quad (12)$$

$$G_F(s) = (G_A(s)G_3(s) - G_B(s)G_2(s))(1 - a). \quad (13)$$

그림 1과 같은 단일 궤환 시스템에서 제어 입력신호는 식 (14)와 같으며, (R_ϕ, R_θ) 는 각도입력 신호, $(\hat{\phi}_g, \hat{\theta}_g)$ 는 감지코일에서 측정된 탐색기의 수평방향, 수직방향의 짐발 각도(ϕ_g, θ_g)이고, K_c 는 제어기이다.

$$\begin{bmatrix} U_\phi \\ U_\theta \end{bmatrix} = K_c \cdot \begin{bmatrix} R_\phi - \hat{\phi}_g \\ R_\theta - \hat{\theta}_g \end{bmatrix}, \quad (14)$$

상기의 식 (6)으로 주어진 개방회로 전달함수에 식 (14)의 비례 제어기를 사용한 폐회로를 구성하고, yaw방향 5(deg) pitch방향 0(deg)의 입력에 대한 계단 응답특성을 구해보면 그림 2와 같다.

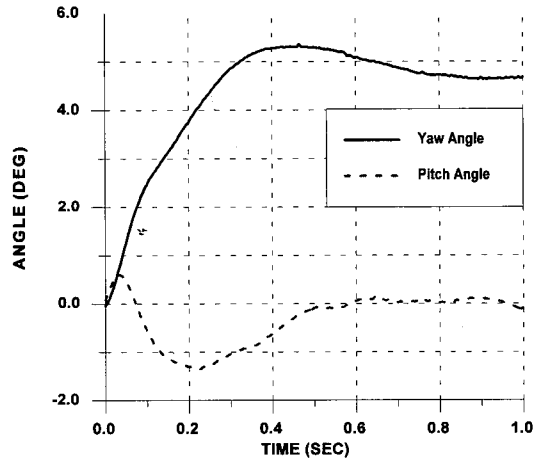


그림 2. Yaw방향 5(deg), pitch방향 0(deg) 입력에 대한 주사루프의 계단응답 특성

Fig. 2. Step response of the scan loop for yaw-5(deg) pitch-0(deg) input.

사용한 비례 제어기의 이득은 주사루프의 상승시간, overshoot, 상대축 방향에 나타나는 오차의 크기, 그리고 제어 입력의 크기 등을 고려하여 설정한 것이다.

그림 2에 나타난 계단 응답특성으로부터 탐색기 주사루프는 2-입력, 2-출력을 가지면서 상호 결합이 크게 존재하는 시스템임을 알 수 있다.

III. 비연성 제어기 설계

앞 절에서 구한 전달함수 행렬과 비례 제어기를 이용한 폐회로의 계단 응답특성으로부터 탐색기 주사루프는 상호 결합이 크게 존재하는 것을 확인하였다. 따라서 정확한 표적지향이나 주사를 위해서는 상호 결합이 없는 비연성 구조를 가지는 제어루프를 구성하는 제어기 설계가 요구된다.

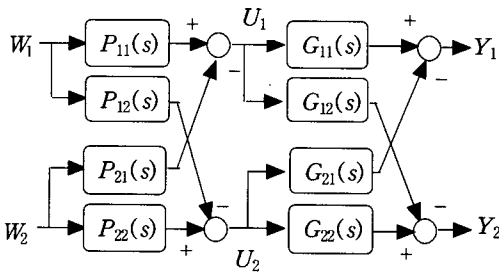


그림 3. Feedforward형 비연성 여과기를 사용한 시스템 비연화

Fig. 3. System decoupling via feedforward decoupling filter.

본 논문에서는 그림 3에서 보는 바와 같은 2-입력 2-출력 구조의 비연성 여과기를 사용하여 탐색기 주사계의 개방회로를 비연성 구조로 전환하고 이에 대한 제어기를 설계한다. 사용된 비연성 여과기는 그 형태에 따라 feedforward구조로 된 P-canonical형과 feedback구조로 된 V-canonical형^[10]이 있으나, 여기에서는 P-canonical형을 채택하였다.

제어 대상 시스템 $G(s)$ 가

$$G(s) = \frac{1}{d(s)} \begin{bmatrix} n_{11}(s) & n_{12}(s) \\ n_{21}(s) & n_{22}(s) \end{bmatrix} \quad (15)$$

와 같은 다항식으로 표현할 경우, $n_{11}(s)$, $n_{22}(s)$, 그리고 $d(s)$ 가 Hurwitz이면 시스템 $G(s)$ 는 식 (16)과 같은 feedforward 구조로 된 비연성 여과기^[8]로서 안정화된 비연화 시스템을 얻을 수 있다.

$$P(s) = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{n_{12}(s)}{n_{11}(s)} \\ -\frac{n_{21}(s)}{n_{22}(s)} & 1 \end{bmatrix} \quad (16)$$

식 (15)와 같이 주어진 시스템 $G(s)$ 의 극점은 $d(s) = 0$ 의 근으로 주어지며, 영점은 $n_{11}(s)n_{22}(s) - n_{12}(s)n_{21}(s) = 0$ 의 근으로 주어진다. 또한 비연성 여과기 $P(s)$ 의 극점은 $n_{11}(s)n_{22}(s) = 0$ 의 근으로 주어지고, 영점은 $G(s)$ 의 영점과 동일하다. 따라서 비연화된 시스템 $S(s) (= G(s)P(s))$ 는 다음과 같이 주어진다.

$$S(s) = \frac{n_{11}(s)n_{22}(s) - n_{12}(s)n_{21}(s)}{d(s)} \begin{bmatrix} \frac{1}{n_{22}(s)} & 0 \\ 0 & \frac{1}{n_{11}(s)} \end{bmatrix} \quad (17)$$

식 (17)로부터 $S(s)$ 의 극점은 $G(s)$ 와 $P(s)$ 의 극점으로 주어지며, 영점은 $G(s)$ 의 영점과 동일하다.

주사계 개방회로의 비연화는 식 (7)의 안정한 극점과 함께, 식 (10), (13)이 Hurwitz(극점 : -232.8, -109.8, -0.9281)이므로 위의 사실로부터 그림 3의 구조로서 식 (17)의 전달함수를 가지는 비연화된 구조로 변환이 가능하다. 즉, 식(6)-(13)의 주사루프에 식 (16)을 이용하여 비연화된 개방회로를 구하면 다음과 같다.

$$S(s) = G_K(s) \begin{bmatrix} G_C(s) & G_D(s) \\ G_E(s) & G_F(s) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_D(s)}{G_C(s)} \\ -\frac{G_E(s)}{G_F(s)} & 1 \end{bmatrix} \\ = \frac{G_A(s)G_1(s)T_p Y_p(1+K_{\alpha}^2 s^2)}{G_a(s)} \begin{bmatrix} 1+\alpha & 0 \\ 0 & 1-\alpha \end{bmatrix} \quad (18)$$

여기에서 $G_a(s)$ 는

$$G_a(s) = \cos \phi K_{\alpha} I s^3 + (\cos \phi K_{\alpha} D + \sin \phi (K_{\alpha} H - I)) s^2 \\ + (\cos \phi (H + K_{\alpha} K) + \sin \phi (K_{\alpha} T_M - D)) s \\ + \cos \phi T_M - \sin \phi K \quad (19)$$

로서 식 (10)과 (13)의 $G_C(s)$ 나 $G_F(s)$ 와 같은 근을 가진다.

제어기의 구성은 식 (18)에서 구한 주사루프의 비연화 개방회로에 대해 저주파 영역에서의 외란 제거성과 우수한 명령 추종성을 보장하고 고주파 영역에서 센서잡음과 모델링 오차에 대한 강인성을 확보하면서도 구조가 비교적 간단한 PI 제어기로 구현한다. 루프는 2 개의 단일 입출력 시스템으로 구조가 바뀌었으므로 각각의 루프에 대해 같은 PI 제어기로서 시스템의 요구 사양에 맞추어 다음과 같이 설계한다.

$$K(s) = K_p \begin{bmatrix} 1 & -\frac{G_D(s)}{G_C(s)} \\ -\frac{G_E(s)}{G_F(s)} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 + \frac{1}{T_s} & 0 \\ 0 & 1 + \frac{1}{T_s} \end{bmatrix} \quad (20)$$

설계하는 주사루프의 사양은 다음의 표 1과 같으며, 사양에 맞추어 설계된 주사루프의 계단입력에 대한 응답특성과 제어 입력의 크기는 그림 4와 그림 5에 나타나 있다. 그림 4와 5에서는 설계된 제어기와 기 설계된 두 종류의 제어기^[9]와 함께 도시하였다.

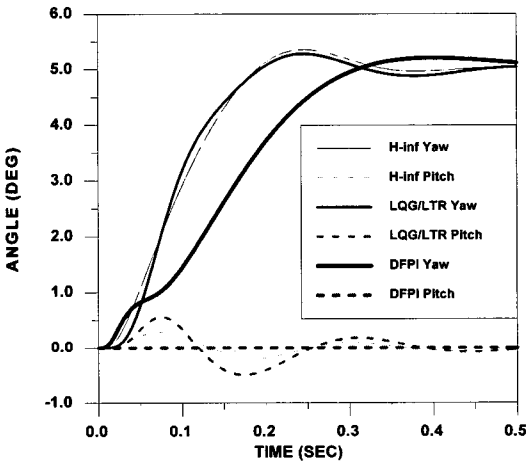


그림 4. Yaw방향(5 deg) 계단입력에 대한 제어기의 종류별 응답특성
Fig. 4. 5 (deg) yaw step responses for 3 controllers.

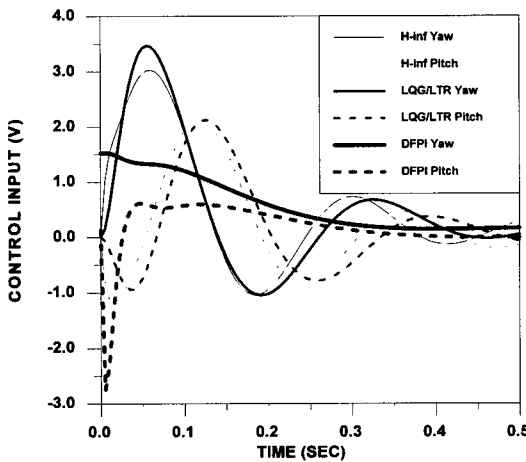


그림 5. Yaw방향(5 deg) 계단입력에 대한 제어기 종류별 제어 입력
Fig. 5. Control inputs of 3 controllers for 5 (deg) yaw step input

표 1. 탐색기 주사루프의 설계사양

Table 1. Seeker scan loop design specifications.

설계 항목	사양
상승시간 (sec)	0.25(sec) 이내
Overshoot (%)	10 (%) 이내
상호 결합 (%)	10 (%) 이내
최대 제어 입력 (V)	3.5 (V) 이내

그림 4와 그림 5에 나타난 응답특성을 요약하면 표 2와 같다.

표 2. 제어기 종류별 yaw방향 계단입력에 대한 응답특성

Table 2. 3 controllers output responses in yaw axis step input.

항 목	상승시간 (sec)	Overshoot (%)	상호결합 (%)	최대 제어 입력(V)
H-infinity[9]	0.126	7.08	5.81	3.03
LQG/LTR[9]	0.113	5.61	11.2	3.48
비연성 PI	0.222	4.15	6.53×10^{-3}	-2.75

표 2에서 나타난 바와 같이 비연성 제어기를 적용한 탐색기 주사루프는 상승시간이 길어지는 단점이 있지만, overshoot가 작고, 상호 결합이 거의 보이지 않을 정도로 작으면서도 제어 입력의 크기가 상대적으로 작다는 점을 들 수 있다. 최대 제어 입력의 부호가 반대로 된 것은 그림 5에서 보는 바와 같이 상호 결합을 감소하기 위해 pitch방향에 인가되는 값이 더 크게 작용하기 때문이다. 또한, yaw방향의 크기도 약 1.524(V)로서 다른 두 제어기의 경우보다 상대적으로 충분히 작음을 알 수 있다. 또한, 제어기의 차수가 비연성 여과기(6차)와 PI 제어기(2차)를 합하여 8차로 구성되는 반면, 제어 대상의 모델이 포함되는 H-infinity 제어기의 경우는 14차이고, LQG/LTR 제어기의 경우는 12차로 구성된다^[9]. 모델링 오차를 극복하는 강인 제어기의 경우, 이론적인 설계과정에서는 비교적 좋은 결과를 얻을 수 있으나, 비연성 제어기와 비교하여 높은 차수로 설계되어 제어기를 실제로 구현하는 과정에서 실시간 작동과 관련된 어려움이 발생한다.

IV. 실험 및 결과분석

앞 절에서 설계된 제어기는 INMOS사의 디지털 프

로세서인 트랜스퓨터 T-805로 구현되었다. 제어 대상인 탐색기의 짐발각도 신호를 200 (Hz)로 A/D 변환하고 설계된 제어 알고리즘을 100 (Hz)의 이산화 식으로 계산한 다음, 100 (Hz)로 D/A 변환하여 주사루프의 선회구동 신호로 인가하였다.

그림 6과 그림 7에서는 yaw방향 5(deg)와 pitch방향 0(deg)의 계단입력을 인가하여 이에 대한 주사루프의 응답특성에 대한 측정결과를 시뮬레이션 결과와 함께 도시하고 있다.

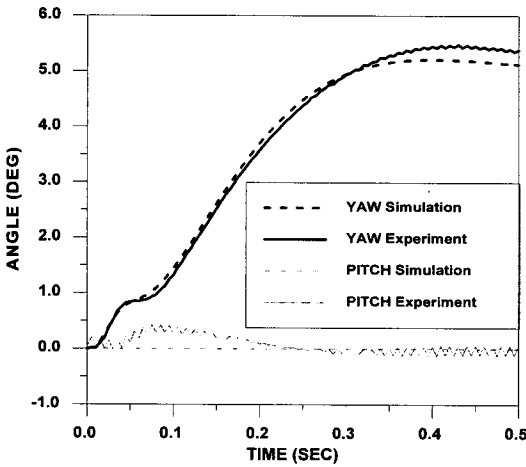


그림 6. Yaw 방향(5 deg)의 계단입력에 대한 실험결과

Fig. 6. Test result for 5 (deg) step response in yaw axis.

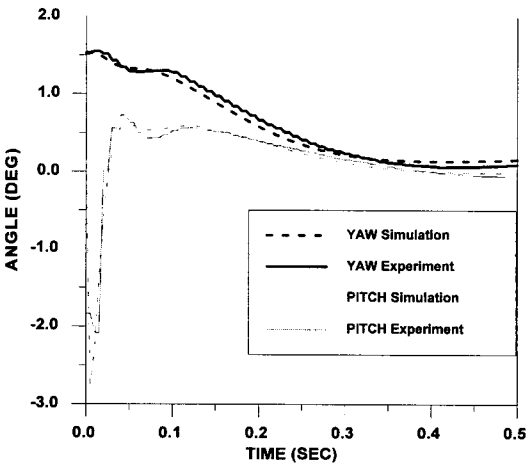


그림 7. Yaw방향(5 deg)의 계단입력시의 제어 입력
Fig. 7. Control inputs for 5 (deg) step input in yaw axis.

그림 6과 그림 7의 결과를 요약하면 다음 표 3과 같다.

표 3. Yaw방향(5 deg) 계단입력에 대한 시뮬레이션 및 실험결과

Table 3. Simulation & test results for 5 (deg) step input in yaw axis.

항 목	상승시간 (sec)	Overshoot (%)	상호결합 (%)	최대 제어 입력(V)
Simulation	0.222	4.15	6.53×10^{-3}	-2.752
실험 결과	0.229	8.11	8.60	-2.087

표 3에서 보는 바와 같이 상승시간은 비슷한 것으로 나타났으나, overshoot와 상호 결합은 비교적 크게 나타났으며, 최대 제어 입력의 크기는 약 0.7(V)가 작게 나타났다. 그리고 yaw 방향의 제어 입력은 시뮬레이션의 경우에는 1.524 (V) 정도이었으나, 실험의 경우에는 1.55(V)로 측정되었다.

Overshoot가 크게 나타난 이유로는 그림 7에서 보는 바와 같이 yaw방향으로의 제어 입력이 시뮬레이션의 경우와 비교하여 상승구간에서 인가된 제어 입력이 커져 나타난 결과로 예측된다. 이는 상호 결합의 경우에서도 마찬가지로 pitch방향의 제어 입력이 시뮬레이션으로 계산된 크기와 비교하여 실제 제어 입력이 충분히 커지지 못한 이유로 예측된다. 이들에 대한 근본적인 원인은 디지털 제어기로 구현하는 과정에서 탐색기의 각종 기능을 제어하는 주 제어 프로세서의 작동 주파수가 100 (Hz)로 되어 10 (msec)의 주기를 가지고 있어 계산된 제어 입력 신호가 100(Hz)의 주기로 발생되기 때문이다. 즉, 그림 7에서 보는 바와 같이 pitch방향의 제어 입력신호가 10(msec)동안 동일한 크기로 유지되고 있다. 따라서 이 제어 입력으로는 상호 결합을 감소시키기에 부족한 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과와 같이 상호 결합을 충분히 감소하기 위해서는 아주 빠른 모드의 제어 입력신호가 필요하다는 것을 알 수 있다. 또한 pitch방향의 각도 신호에도 고주파 신호의 잡음이 포함되어 측정된 신호에는 200 (Hz)의 측정신호가 나타나고 있으며, 이에 의한 제어 입력신호의 오차도 상호 결합의 크기를 증가하는 데 기여하였을 것으로 예측된다.

비연성 제어기의 설계는 개방회로의 비연화 여파기의 설계 과정에서 제어 대상의 정확한 모델이 우선적으로 요구된다. 따라서 이론적인 모델과 실제의 동역학 모델과의 차이에 의한 시스템 비연화의 부족도 실

험 결과와의 차이에 기여하였을 것으로 추측된다.

참 고 문 헌

V. 결론 및 검토

2-입력 2-출력을 갖는 자전 안정화형 탐색기의 주사루프에 대한 보완 모델^[7]에 대하여 정확한 표적 지향이나 주사를 실시하는 방안으로서 상호 결합을 줄이기 위한 제어기로서 비연성 제어기를 설계하고 기존의 강인 제어기 설계 결과와 비교하였다. 제어기의 설계과정은 제어 대상인 탐색기 주사루프의 개방회로를 비연화시키는 여과기를 구성하여 2 개의 단일 입출력 시스템으로 재구성하고, 이에 대한 각각의 PI 제어기를 설계하였다.

설계된 PI 제어기는 탐색기 주사루프가 요구하는 성능에 맞도록 설계 상수가 설정되었다. 이론적인 설계 결과는 제어 대상의 모델을 포함하는 기존의 제어기와 비교하여 계단 응답특성에서 상승시간이 다소 부족하였으나 상호 결합의 크기는 대단히 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 이론적인 설계과정에서 보다 우수한 성능을 가지는 제어기를 설계할 수 있으나, 제어기의 실시간 구현 과정에서 발생하는 제어기의 성능을 감안하여 주사루프의 요구성능을 만족하는 제어기의 상수를 설정하였다.

제어기를 실제로 구현하는 데 있어 디지털 프로세서에 할당된 제어기의 사용 시간이 충분하지 않아 8차 이상의 차수를 갖는 제어기는 실시간 구현이 불가능하였다. 동시에 제어기를 구현하는 과정에서 100 (Hz)의 이산화 주파수를 사용함으로써 계산에 의한 제어 입력의 크기가 충분히 반영되지 못하여 빠른 모드의 제어 입력 신호를 발생할 수 없었다. 이론적인 설계결과와 설계된 제어기의 실험 결과를 계단 응답특성으로 비교한 결과, 이론적인 예측 성능에 비추어 overshoot도 커지고 상호 결합도 크게 나타나는 원인도 제어 입력이 계산된 결과보다 작은 것으로 추측된다. 그러나, 제어 대상의 모델이 포함되는 제어기에 비하여 차수가 작아서 실시간으로 구현하는 것이 가능하였으며, 주사루프의 요구성능을 충분히 만족하는 설계 결과를 얻을 수 있었다.

- [1] G. R. Sturiale, "Sensors and Electronics on Gimballed Platforms", *Proceedings of AIAA*, pp 628 - 638, 1979.
- [2] S. A. White, "Dynamics of a solenoidal-torqued gyro-stabilized seeker assembly for guidance and tracking", *IEEE Tr. Aerospace and Elec. Syst.*, vol. AES-10, no.1, pp.113 - 122, 1974.
- [3] 유 인억, 김 병연, 이 상정, "자전안정화 플랫폼의 위치제어용 퍼지 논리 제어기 설계", 대한 전자공학회 논문집 제30권 B편 제 4호, pp 56 - 66, 1993
- [4] 황 흥연, 이 호평, "탐색기의 주사루프 모델링과 LQG/LTR보상기 설계", 대한기계학회논문집 제 17권 제11호, pp, 2730 -2741, 1993
- [5] H. Y. Hwang, W. E. Schmitendorf, "Robust Hinf stabilizing controllers for a seeker scan loop system", *Proceedings of the ASME DSC-Vol. 57-1*, pp 307 - 313, 1995.
- [6] H. P. Lee, H. Y. Hwang, "Two-degree-of-freedom robust control of a seeker scan loop system", *AIAA Guidance, Navigation and Control Conference*, AIAA Paper 96-3911, San Diego, CA, 1996.
- [7] I. E. Yoo, S. J. Lee, "A Dynamic Model of Spin-Stabilized Seeker Scan Loop with a Large Autoerection Torque", *Proceedings of 2nd Asian Control Conference*, Vol. II, pp 367 - 370, Seoul, 1997.
- [8] B. Thomas, "Identification, Decoupling and PID-Control of Industrial Processes", *Chalmers University of Technology Technical Report No. 204*, pp119 - 126, 1990.
- [9] H. P. Lee, "Scan Loop Control Design for a Spin-Stabilized Seeker", *IEE Proceedings-Control Theory and Applications*, 게재 예정
- [10] L. C. Hui, "General Decoupling Theory of Multivariable Process Control Systems", *Lecture Notes in Control and Information Sciences*, Vol. 53, Springer-Verlag, 1983.

저 자 소 개