

# PI-LEAD 알고리즘을 이용한 2축 안정화 짐벌 시스템 제어

## The Control for the 2-Axis Stabilized Gimbal using the PI-LEAD Algorithm

이진복\*, 최한고\*\*

Jin-bok Lee\*, Han-go Choi\*\*

### 요약

서보 시스템에서 마찰과 같은 비선형 요소는 측정이 어려우며, 또한 정확한 예측이 어려워 보상하기가 쉽지 않다. 특히, 2축 안정화 짐벌 시스템에서 마찰은 큰 오차를 발생시켜 최종적으로 제어 성능을 만족시키지 못한다. 이와 같은 문제점을 해결하기 위해 관측기 등을 적용한 마찰 보상 연구가 많이 진행되어 왔으나 특정 조건에서만 적용되어 군수 분야에서 정밀도를 요하는 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하는데 제한적이다. 본 논문에서는 가장 일반적이면서 강인성이 입증된 PID 알고리즘을 변형시킨 PI-LEAD 알고리즘을 사용하여 모델링 및 시뮬레이션을 통해 마찰 보상 효과를 입증하고, 실제 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하여 효과를 검증한다. 성능시험을 통해 PI-LEAD 알고리즘이 마찰에 의한 오차를 최소화하여 정밀 서보 시스템에서 요구하는 성능을 만족하는 것을 검증하였다.

### ABSTRACT

Since the nonlinear factors such as friction in a mechanical servo system can't be easily measured nor estimated accurately. Therefore, it is difficult to compensate friction correctly. Friction makes a significant error in a 2-axis stabilized gimbal system and finally fails to reach the ultimate control performance goals. To solve these problems, lots of studies on the control methods applying observer have been performed. However, these methods can be used in specific conditions and are limited to apply them to the accurate 2-axis stabilized gimbal system in military sector. This paper deals with the PI-LEAD algorithm which is modified with a general and robust PID algorithm, proves the effect of the algorithm through modeling and simulation, and verifies the performance by applying the algorithm to the real 2-axis stabilized system. It is verified through the performance test that the PI-LEAD algorithm minimizes the error caused by friction and meets requirements of the accurate servo system.

**Keywords** : PI-LEAD, 2-axis stabilized gimbal system, accurate servo system, nonlinear friction

## I. 서론

서보 시스템은 명령값에 따라 추종하는 시스템으로서 일반적으로 직류 전동기를 이용하여 플랫폼을 구동시켜 최종 목표 값에 도달하도록 제어하는 시스템이다. 산업 현장의 로봇과 같은 자동화 시스템에서 위성장비에 이르기까지 여러 분야에서 서보 시스템이 적용되어 운용되고 있다. 군수 분야에 적용된 서보 시스템은 일반적으로 2축 안정화 짐벌로 구성되며, 장비의 신뢰성을 높이기 위해 매우 높은 정밀도와 정확도가 요구되고, 시스템 파라미터 변화에 대한 제어 안정도 및 강인성이 보장되어야 한다. 이와 같이 정밀도, 정확도 및 안정도 등의 제어 목표를 만족하기 위한 제어 알고리즘 연구는 그 중요성을 더하고 있다.

마찰은 접촉하는 두 물체 사이에서 발생하는 현상으로 비선형적인 특성이 매우 강하고, 부하의 변화, 온도의 변화, 윤활상태,

기계부품의 갱년 변화, 기계의 조립 상태에 따라 변하기 때문에 정확한 마찰 모델을 구하기는 어렵다[1,2,3]. 현재까지 마찰 보상에 대한 많은 연구가 이루어졌지만 마찰 모델의 부정확성으로 특정 시스템 및 특정 조건에서만 적용된다[4,5,6]. 따라서 환경에 대한 강인성이 요구되는 군수 분야에 적용하기에는 제한적이다. 정밀도 및 정확도를 요구하는 군사용 감시, 조준 및 추적 장비는 일반적으로 2축 안정화 짐벌로 구성되었으며, 움직이는 플랫폼(Platform)에 장착되어 플랫폼의 운동에 관계없이 절대좌표 기준 지정된 위치를 유지하는 시선 안정화 기능을 가진다[7]. 시선 안정화 기능은 기동 간 작전 수행 시 중요하며, 2축 안정화 짐벌에 존재하는 마찰은 표적을 정밀하게 조준하고 추적하는데 오차를 발생시켜 이러한 시선 안정화 성능을 저하시킨다[8,9].

비례-적분-미분(PID;Proportional-Integrator-Derivative) 제어 알고리즘은 대부분의 서보 시스템에 적용되어 강인성이 입증되었으며, 센서 신호를 이용한 궤환 루프를 사용하여 모델링 오차와 외란 등에 의한 시스템의 불확실성이 존재하더라도 만족스러운 제어 목표 성능을 유지한다[10,11,12,13,14]. 그러나 PID 제어 알고리즘에서 미분(D) 제어는 속응성을 향상시키지만 고주파 잡음에 대한 취약성이 있어 발산 가능성이 크므로 안정도가 요구되는 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하기가 쉽지 않다.

\* 삼성탈레스

\*\* 금오공과대학교 전자공학부

투고 일자 : 2013. 3. 11 수정완료일자 : 2013. 4. 8

계재확정일자 : 2013. 4. 30

본 논문에서는 2축 안정화 짐벌 시스템에서 마찰로 인해 발생하는 오차를 최소화하기 위해 PI 보상을 이용하고, 적분 동작으로 인한 시간지연 문제는 진상 보상기(Lead compensator)를 적용하여 보상함으로써 시스템 안정도를 향상시키는 PI-LEAD 제어 알고리즘 다루고 있다[15,16]. PI-LEAD 제어 알고리즘의 마찰보상 효과를 입증하기 위해 모델링 및 시뮬레이션을 수행하였으며, 실제 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하여 안정화 성능을 검증하였다. 시험결과는 직류 이득 15[dB]이상, 대역폭 30[Hz]이상, 안정화 오차 100[ $\mu$ rad]이하로 PI-LEAD 알고리즘이 마찰에 의한 오차를 최소화하여 시스템에서 요구하는 성능을 만족하는 것을 확인하였다.

## II. PI-LEAD 알고리즘

PI-LEAD 제어 알고리즘은 기존에 사용되었던 PID 제어 알고리즘의 고주파 잡음에 대한 취약성을 보완하기 위해 미분 보상 대신 진상 보상을 적용하여 PI 보상과 진상 보상을 직렬로 연결하여 2축 안정화 짐벌 시스템에서 요구되는 강인성 및 안정도를 만족시킨다. PI-LEAD 제어 알고리즘은 그림 1과 같다.

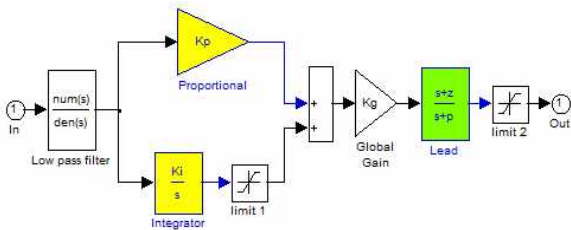


그림 1. PI-LEAD 제어 알고리즘  
Fig. 1. PI-LEAD control algorithm

PI-LEAD 제어 알고리즘은 저역통과 필터(Low pass filter)를 이용하여 센서 신호의 고주파 잡음을 제거하여 아날로그-디지털 변환 시 발생할 수 있는 주파수 왜곡(Frequency aliasing) 현상을 방지한다. 저역통과 필터를 거친 오차 신호는 PI 동작을 거치고 진상 보상을 통해 직류 전동기 제어 신호를 발생한다. 그림 1에서 limit1은 적분동작에서 발생하는 신호의 포화를 방지하여 Anti-Windup 기능을 수행하고, limit2는 제어기의 최종 제어 신호를 디지털-아날로그 변환기 전달하기 전에 신호에 제한을 걸어 디지털-아날로그 변환기 입력 범위에 맞춘다. PI-LEAD 보상기의 주파수 응답특성은 그림 2와 같다. 저주파 영역을 보면 적분 동작 특성이 주를 이루고 있는 것을 알 수 있다. 적분 동작으로 저주파 이득을 크게 하여 2축 안정화 짐벌 시스템에 존재하는 비선형 요소인 마찰 영향을 제거하고 오차를 최소화 한다. 적분 동작은 저주파 이득을 키울 수 있지만 시간 지연의 문제가 있어 시스템을 불안정한 영역으로 전이시킬 수 있다. 이를 방지하기 위해 진상 보상을 적용하였으며, 그림 2에서 30[Hz] 부근에서 진상 보상 특성을 확인할 수 있다.

이와 같이 PI-LEAD 제어 알고리즘은 PID 제어 알고리즘에서 고주파 잡음에 취약한 미분 보상 대신 진상보상을 적용하여 적분 동작으로 발생하는 시간 지연을 보상하고 시스템의 응답속도를

빠르게 하여 성능 및 안정도를 향상시킨다.

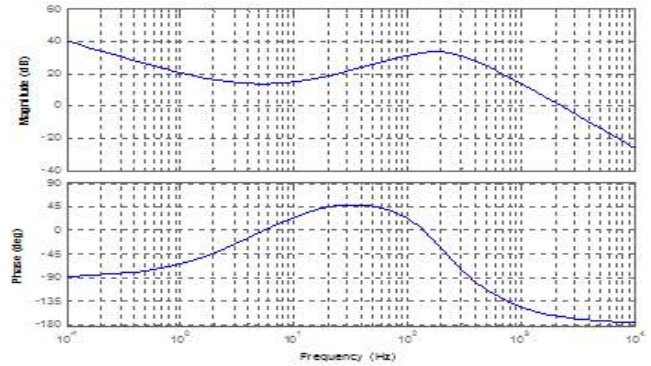


그림 2. PI-LEAD 보상기 주파수 응답 특성  
Fig. 2. Frequency response of PI-LEAD compensator

## III. 모델링 및 시뮬레이션

### 3.1 플랜트 운동방정식

서보 시스템은 기구 구조물인 플랜트, 직류 전동기 구동부, 센서 및 보상기로 구성된다[17]. 우선 플랜트의 모델링을 위해서 2축 안정화 짐벌(Gimbal)로 구성된 서보 시스템의 평형 방정식을 식 1과 같이 유도한다.

$$J\ddot{\theta} + T_f(\dot{\theta}, \theta) = F(t) \quad (1)$$

위 식에서  $J$ 는 플랜트 전체의 회전관성이고,  $T_f$ 는 마찰토크이다. 외부에서 인가되는 힘은 직류 전동기 토크인  $F$ 로 표현되었다. 그림 3은 2축 안정화 짐벌 시스템의 구조를 나타낸다.

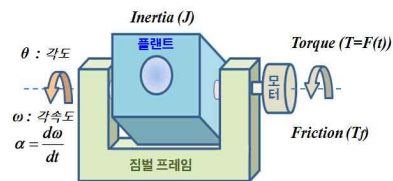


그림 3. 2축 안정화 짐벌 시스템 기구적 구조  
Fig. 3. Mechanical structure of the 2-axis stabilized gimbal system

식 1 플랜트 평형 방정식으로부터 전달함수를 구하기 위해 식을 다시 정리하면 다음과 같다.

$$T = J \frac{d\omega}{dt} + T_f \quad (2)$$

$$T_f = T_v + T_c \quad (3)$$

$$T_v = k_v \omega \quad (4)$$

위 식에서  $\omega$ 는 각속도,  $T_v$ 는 점성 마찰(Viscous friction) 토크,  $T_c$ 는 쿨롱 마찰(Coulomb friction) 토크,  $k_v$ 는 직류 전동기 역기전력 상수이다. 식 2 양변에 라플라스 변환을 취하여

전달함수를 구하면 식 5와 같다.

$$\frac{\hat{\omega}}{\hat{T} - \hat{T}_c} = \frac{1}{Js + k_v} \quad (5)$$

위 식에서  $\hat{\omega}$ ,  $\hat{T}$ ,  $\hat{T}_c$ 는 각각  $\omega$ ,  $T$ ,  $T_c$ 의 라플라스 변환을 의미한다.

3.2 직류 전동기 및 구동 회로

직류 전동기는 그림 4와 같이 등가 회로로 표현 할 수 있으며 키르히호프의 전압 법칙을 적용하면 식 6과 같이 유도할 수 있고, 전달함수를 구하면 식 7과 같다.

$$V_{in} = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} \quad (6)$$

$$\frac{\hat{I}_m}{\hat{V}_{in}} = \frac{1}{R_m + L_m s} \quad (7)$$

식 7에서 직류 전동기에 대한 전달 함수는 직류 전동기 저항  $R_m$ , 인덕턴스  $L_m$ 으로 구성된 1차 지연 요소가 있는 함수로 표현된다. 즉 직류 전동기 코일에 인덕턴스 값이 크면 직류 전동기 시정수가 커지고 시간 지연이 발생하여 시스템 성능에 영향을 줄 수 있다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 직류 전동기 구동 회로에 연산 증폭기를 이용한 PI 보상회로를 구성하여 직류 전동기 시정수를 보상한다.

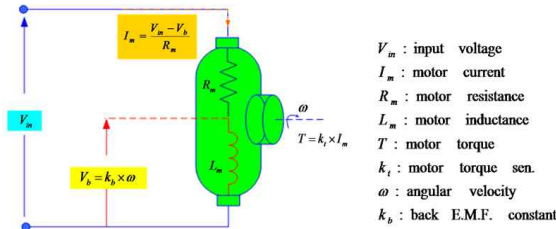


그림 4. 직류 전동기 등가 모델  
Fig. 4. Motor equivalent model

선형 방식으로 직류 전동기를 제어하는 구동회로는 그림 5와 같다. 전치 증폭기, PI 보상회로, 직류 전동기 및 직류 전동기 전류 제한 부분에 대한 전달 함수를 각각 구하여 직류 전동기 구동부의 전달 함수를 구하였다. 직류 전동기 구동부 입력 전압에 대한 직류 전동기 출력 전류에 대한 전달 함수는 식 8과 같다.

$$\frac{I_m}{V_{IN}} = \frac{K_1 R_3 (s R_2 C + 1)}{s R_1 R_3 C R_m (T_m s + 1) + R_1 R_s (s R_2 C + 1)} \quad (8)$$

여기서  $T_m$ 은 직류 전동기 시정수를 나타낸다. 식 8에서  $T_m = R_2 C$  조건을 만족하도록 저항과 커패시터 값을 선정하면 직류 전동기 시정수와 보상되어 설계자가 원하는 직류 전동기 구동부 대역폭을 설정 할 수 있다. 식 9는 직류 전동기 시정수를 보정한 전체 전달 함수, 직류 이득 및 대역폭을 나타낸다. 실제 시스템에 적용할 때 찾은 파라미터 값 및 상수 값은 표 1과 같다.

$$\frac{I_m}{V_{IN}} = \frac{K_{DC}}{s\omega + 1}, K_{DC} = \frac{K_1}{R_s}, \omega = \frac{R_s}{R_1 R_m C} \quad (9)$$

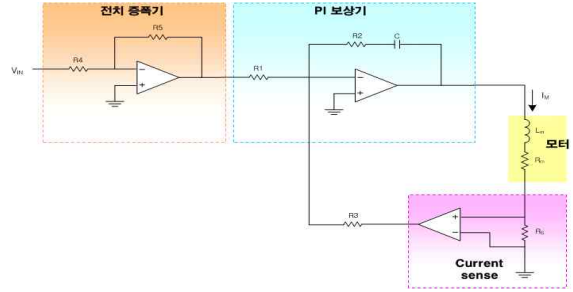


그림 5. 선형 방식 직류 전동기 구동 회로  
Fig. 5. Linear type motor drive circuits

표 1. 시스템 파라미터 및 상수 값  
Table 1. System parameters and constants

구분	회전관성 ( $J$ )	마찰토크 ( $T_f$ )	직류 전동기		직류 이득 ( $K_{DC}$ )	대역폭 ( $f = \frac{\omega}{2\pi}$ )
			$R_m$	$L_m$		
방위각	4 [oz.in.s <sup>2</sup> ]	50.4 [on.in]	6.92 [ohms]	3.19 [mH]	0.6 [A/V]	1.5 [kHz]
고저각	2.2 [oz.in.s <sup>2</sup> ]	22.9 [on.in]	4.86 [ohms]	1.57 [mH]	0.4 [A/V]	1.5 [kHz]

3.3 센서

2축 안정화 짐벌 시스템의 움직임을 감지하는 센서인 자이로 (Gyro)는 회전 각속도를 감지하는 센서로 과거 오랫동안 선박이나 항공기 그리고 로켓 등의 항법 장치에 활용되어 왔다.

자이로에 대한 수학적 모델링은 자이로 제작업체에서 제공하는 스펙을 이용하여 1차 지연 또는 2차 지연을 갖는 수식으로 간략화하여 표현할 수 있다. 그림 6은 대역폭이 100[Hz]이고, 각속도 1 [°/sec]에 출력 1[Volt]를 내는 자이로에 대한 모델링을 나타낸다.

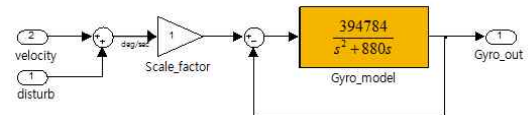


그림 6. 자이로 모델링  
Fig. 6. Gyro modeling

3.4 시뮬레이션

모델링 수식을 바탕으로 2축 안정화 짐벌 시스템에 대한 시뮬레이션은 Matlab 프로그램을 사용하였다. Matlab Simulink를 이용하여 모델링하면 그림 7과 같다.

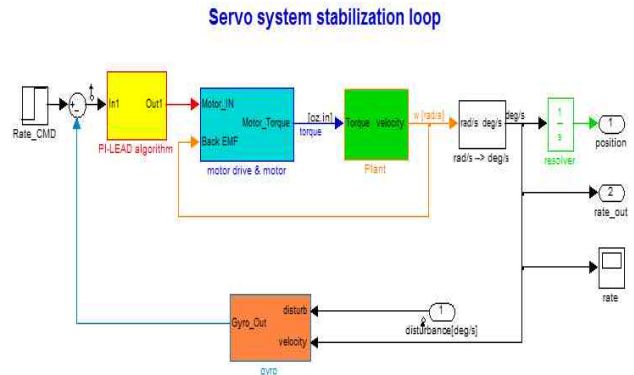


그림 7. 2축 안정화 짐벌 시스템 모델링  
Fig. 7. 2-axis stabilized gimbal system modeling

여기서 Rate\_CMD는 운용자가 핸들을 이용하여 2축 안정화 짐벌 시스템을 조작하여 원하는 위치로 조정할 수 있는 핸들 속도 명령을 의미한다. 핸들 속도 명령은 PI-LEAD 제어 알고리즘을 통하여 직류 전동기 제어 신호를 발생시키고, 직류 전동기를 구동하여 플랜트를 움직인다. 이때 플랜트에 장착된 자이로 센서가 플랜트의 각속도를 감지하고 각속도에 해당하는 신호를 부채환시켜 핸들 속도 명령에 추종하도록 제환 루프를 구성한다. 플랜트에 외란이 발생하면 자이로는 외란 각속도를 감지하고 외란 각속도에 해당하는 신호를 부채환시켜 외란 방향의 반대 방향으로 플랜트를 구동시켜 시선안정화(Line of sight stabilization) 기능을 수행한다. 따라서 2축 안정화 짐벌 시스템에 장착된 CCD(Charge coupled device) 카메라 및 열 영상센서는 플랫폼의 흔들림에 상관없이 안정된 영상을 제공할 수 있다[17].

주파수 영역 응답특성을 보기 위해 그림 7에서 Rate\_CMD를 입력으로 하고 rate\_out을 출력으로 하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과는 그림 8과 같다. 이득 교차점은 36.8[Hz]이며, 이때 위상 여유가 63.4°로서 제어 알고리즘의 진상 동작 역할로 속응성과 위상 여유를 증가시켜 시스템의 안정도를 향상시킨 것을 확인할 수 있다.

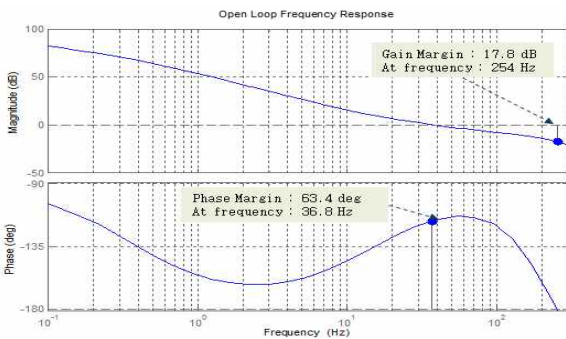


그림 8. 개루프 주파수 응답특성 시뮬레이션 결과  
Fig. 8. Simulation result of open loop frequency response

외란 제거(Disturbance rejection) 성능을 보기 위해 그림 7에서 입력을 외란(deg/s), 출력은 오차(Rate\_CMD - Gyro\_Out)로 설정하여 주파수 응답특성을 시뮬레이션 하였다(그림 9참조).

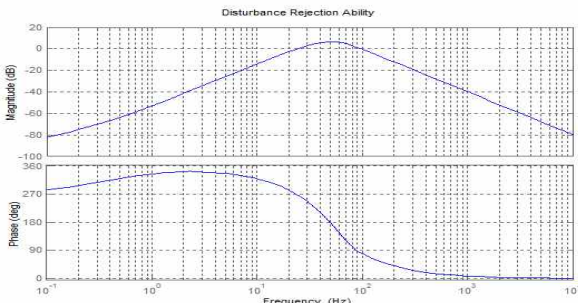


그림 9. 외란 제거 시뮬레이션 결과  
Fig. 9. Simulation result of disturbance rejection

그림 9에서 고주파 성분의 잡음 제거 능력뿐만 아니라 저주파 성분의 외란도 제거됨을 알 수 있다. 즉 PI-LEAD 제어 알고리즘은 센서 등 2축 안정화 짐벌 시스템에 존재하는 고주파 잡음

신호에 덜 민감하고, 저주파 외란 신호에 대해서도 강인하다는 것을 시뮬레이션 결과를 통해서 확인할 수 있다.

다음은 모델링한 2축 안정화 짐벌 시스템에 마찰 정보를 포함시켜 시간영역에서 응답 특성을 분석하였다. 입력 명령이 30°/s인 계단 입력에 대한 계 응답특성은 그림 10과 같다. 그림에서 알 수 있듯이 알고리즘의 적분 동작을 제외하면 마찰로 인해 정상상태 오차가 발생하는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션에서 입력 명령이 30°/s이고 출력이 28.37°/s로 1.63°/s의 정상상태 오차가 발생하여 2축 안정화 짐벌 시스템의 정밀도 및 정확도 성능이 저하됨을 알 수 있다. 따라서 2축 안정화 짐벌 시스템에 존재하는 비선형 마찰 요소를 보상하기 위해 적분 동작을 추가하고, 적분 동작에 의한 시간 지연 문제로 과도상태 성능 저하 현상은 진상 보상을 이용하여 개선할 수 있다.

시뮬레이션 결과 PI-LEAD 제어 알고리즘은 2축 안정화 짐벌 시스템에 존재하는 비선형 마찰을 충분히 보상하여 오차를 최소화하고, 시스템의 상대 안정도 또한 향상시키는 것을 알 수 있다.

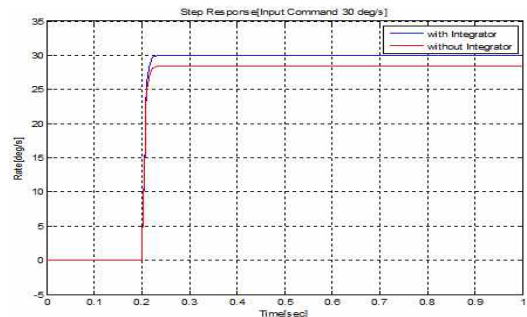


그림 10. 계단 입력에 대한 응답 특성 시뮬레이션 결과  
Fig. 10. Simulation result of step response characteristics

#### IV. 실험 및 결과 고찰

##### 4.1 2축 안정화 짐벌 시스템

PI-LEAD 알고리즘을 실제 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하여 성능을 검증한다. 형상은 그림 11과 같다.



그림 11. 알고리즘 검증용 2축 안정화 짐벌 시스템  
Fig. 11. 2-axis stabilized gimbal system for verifying the algorithm

2축 안정화 짐벌 시스템은 장착 플랫폼이 흔들리는 외란 환경 하에서 고저, 방위각 2축 안정화 보상을 통해 표적을 추적하는 기능을 갖는다. 여기에 적용된 직류 전동기는 정밀 제어를 위해

직접 구동식 직류 전동기를 적용하였으며, 각속도 감지를 위한 센서는 2축 자이로를 적용하였다. 각각에 대한 주요 특성은 표 2와 표 3과 같다. 제어루프는 안정화 기능을 위한 속도제어루프와 지정위치 구동을 위한 위치제어루프로 구성된다. 여기서는 시스템의 안정화 성능을 보기 위해 속도제어루프에 대해 기술한다. 속도제어루프 시스템 구성은 그림 12와 같으며, 제어기는 PI-LEAD 알고리즘을 적용하였다.

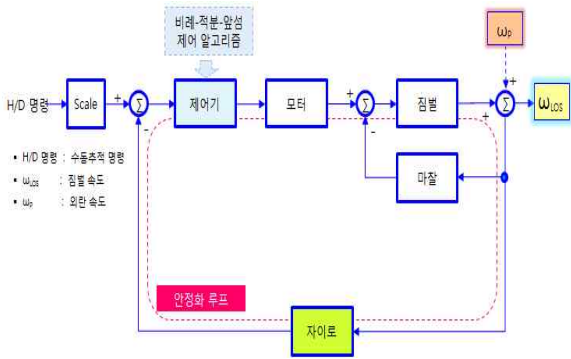


그림 12. 속도제어루프 시스템 구성도

Fig. 12. Block diagram of speed control loop system

표 2. 직류 전동기 특성

Table 2. Motor Characteristics

Characteristics	unit	Value	
		방위각	고저각
Peak Torque(T)	oz.in	400	75
Elec.time.cons.	msec	0.46	0.32
Torque sensitivity	oz.in/A	67.2	17.5
Resistance	ohms	6.9	4.9
Back EMF	v/rad/s	0.475	0.124

표 3. 자이로 특성

Table 3. Gyro Characteristics

Characteristics	unit	Value
Operation range	°/s	± 360
Scale factor error	%	5
Bias error	°/hr	< 360
Angular random walk	°/rt-hr	< 0.4
Frequency response	Hz	> 100

4.2 시험 결과 고찰

시스템 성능 시험은 주파수 응답특성과 안정화 정확도에 대해 수행하였으며, 결과는 그림 13과 표4와 같다. 주파수 응답 특성 시험 결과를 보면 저주파 영역에서 처지지 않고 직류 이득이 19.4[dB]로 5[Hz]까지 15[dB] 이상 유지한다. 이는 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용된 제어 알고리즘이 시스템에 존재하는 마찰 요소를 충분히 보상함을 나타내며, 이득 교차점은 34.6[Hz]로 응답속도가 빠르다는 것을 나타낸다. 즉 장착 플랫폼이 외란에 의해 흔들리더라도 빠르게 보상을 하여 시선 안정화를 유지할 수 있음을 의미한다. 또한 상대 안정도 측면에서도 위상여유가 36.4°로 여유가 충분함을 확인할 수 있다.

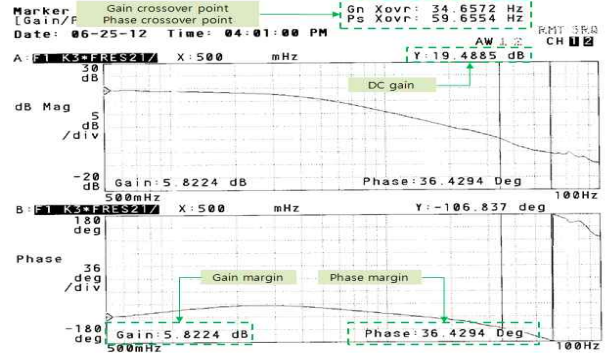


그림 13. 주파수 응답 시험 결과

Fig. 13. Test result of frequency response

안정화 정확도 시험을 위해 2축 안정화 짐벌 시스템을 2축 Rate Table에 장착하고 실제 운용 환경의 외란을 인가하여 시스템이 플랫폼 흔들림에 영향을 받지 않고 얼마나 정확하게 시선 안정화 기능을 수행하는 지 실험하였으며, 시험 결과는 표 4, 그림 14, 그림 15와 같다.

표 4. 안정화 정확도 시험결과

Table 3. Test result of stabilization accuracy

구 분	안정화 오차 [urad]			
	최대값	최소값	평균값	RMS값
방위각	88.2	-75.1	0.2	22.5
고저각	58.3	49.7	0.2	17.0

안정화 정확도 시험결과를 살펴보면 PI-LEAD 알고리즘이 시스템에 존재하는 비선형적인 요소인 마찰 토크를 보상하여 안정화 오차를 Peak-to-Peak 기준 100[urad] 이하로 줄이는 것을 확인할 수 있었다. 실제 운용 환경에서 100[urad] 크기의 안정화 오차 값은 1[km] 거리에서 10[cm]의 오차를 의미한다. 이는 매우 작은 값으로 2축 안정화 짐벌 시스템이 매우 정밀하고 정확하게 시선 안정화 성능을 유지한다는 것을 의미한다.

이와 같이 PI-LEAD 제어 알고리즘을 실제 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하여 성능을 확인한 결과 적분 동작이 시스템에 존재하는 비선형요소인 마찰 토크를 보상하고, 진상 보상이 적분 동작으로 인한 시간 지연을 보상하여 시스템이 안정된 영역에서 오차를 최소화하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 PI-LEAD 알고리즘은 실제 군수분야의 운용 환경에서 외란에 대해 매우 강인하고 만족할 만한 안정화 정확도 성능을 달성할 수 있음을 실험을 통해 검증하였다.

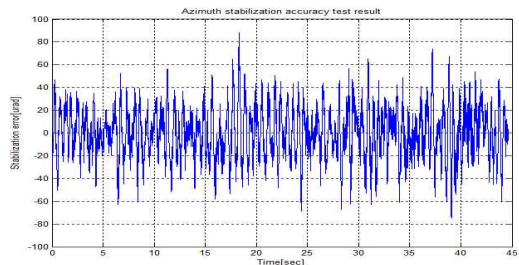


그림 14. 방위각 안정화 정확도 시험 데이터

Fig. 14. Test result of azimuth stabilization accuracy

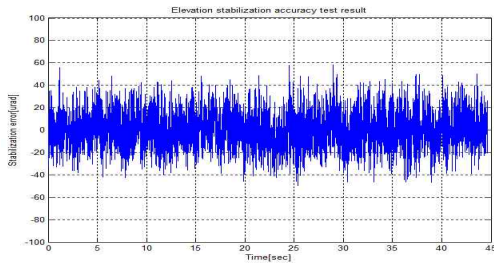


그림 15. 고저각 안정화 정확도 시험 데이터

Fig. 15. Test result of elevation stabilization accuracy

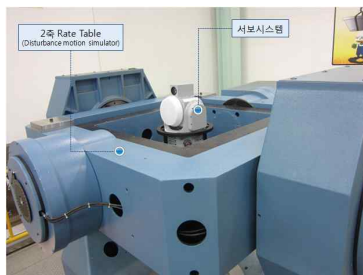


그림 16. 안정화 정확도 시험 장면

Fig. 16. The picture of stabilization accuracy test

## V. 결론

본 논문에서는 2축 안정화 짐벌 시스템에 존재하는 비선형적 요소인 마찰로 인해 발생하는 오차를 최소화하고 외란 제거 능력을 향상시킬 수 있는 PI-LEAD 제어 알고리즘을 구현하였다. PI 보상과 진상 보상을 직렬로 연결하여 기존에 적용되었던 PID 보상의 고주파 잡음에 대한 취약성을 보완하여 군수분야의 서보 시스템에서 요구되는 강인성 및 안정도를 만족시킬 수 있었다.

제어 알고리즘 적용을 판단하기 위해 2축 안정화 짐벌 시스템에 대한 모델링과 시뮬레이션을 수행하여 성능을 확인하였으며, 실제 2축 안정화 짐벌 시스템에 적용하여 주파수 응답 특성 및 안정화 정확도 성능을 검증하였다. 현재 PI-LEAD 제어 알고리즘이 적용된 시스템은 요구 성능을 만족하고 현장에서 사용 중이다.

본 논문에서는 2축 안정화 짐벌 시스템에서 마찰 영향을 극복하기 위한 알고리즘에 초점을 맞추어서 연구를 수행하였다. 센서는 2축 안정화 짐벌 시스템에서 궤환 루프를 구성하는 가장 중요한 부품으로 센서 성능이 시스템 성능을 좌우한다고 할 수 있다. 정밀도 및 정확도를 위해 2축 안정화 짐벌 시스템에서는 고가의 센서 사용이 요구되므로 이 경우 가격 경쟁력 있는 제품화에 어려움이 많다. 따라서 향후 연구 주제로 저가 센서를 사용하였을 때 발생하는 센서 잡음에 의한 시스템 성능 저하를 분석하고 이를 개선할 수 있는 알고리즘 연구를 수행할 예정이다.

## 참고 문헌

[1] Carlos Canudas de Wit, Henrik Olsson, Karl Johan Astrom, Pablo Lischinsky, "A New Model for Control

of Systems with Friction", Automatic Control, IEEE Transactions, VOL. 40, NO. 3, pp.419-425, March 1995.

[2] H. Olsson, K.J. Astrom, C. Canudas de Wit, M. Gafvert, P. Lischinsky, "Friction Models and Friction Compensation", 1997.

[3] 송진일, 최용훈, 유지환, 권동수, "적분 제어기 정보를 이용한 비선형 마찰보상", 한국정밀공학회지, VOL. 17, NO. 1, pp.110-119, January 2000.

[4] Brian Armstrong, "Friction: Experimental Determination, Modeling and Compensation", Robotics and Automation, 1988. Proceedings., 1988 IEEE International Conference, VOL. 3, pp.1422-1427, April 1988.

[5] 강윤식, 김도중, 이부환, "포수조준경 안정화장치의 마찰특성 규명", December 1995.

[6] 강민식, 김창재, "건설한 비선형 마찰보상 이산제어-이론", 한국정밀공학회지, VOL. 14, NO. 4, pp.88-96, April 1997.

[7] 강민식, "마찰보상을 통한 서어보제어계의 정밀 안정화 제어", 한국정밀공학회지, VOL. 16, NO. 3, pp.109-115, March 1999.

[8] Basilio Bona, Marina Indri, "Friction Compensation in Robotics: an Overview", Decision and Control, 2005 and 2005 European Control Conference, CDC-ECC '05. 44th IEEE Conference, pp.4360-4367, December 2005.

[9] C. Canudas, K.J. Astrom, K. Braun, "Adaptive friction compensation in DC motor drives", Robotics and Automation, IEEE Journal, VOL. 3, NO. 6, pp.681-685, December 1987.

[10] Richard C. Dorf, Robert H. Bishop, Modern Control Systems, 7th ed., Addison-Wesley, pp.55-317, 1998.

[11] Gene F. Franklin, J. David Powell, Abbas Emami-Naeini, Feedback control of dynamic systems, 3rd ed., Addison-Wesley, pp.167-210, 1994.

[12] Charles E. Rohrs, James L. Melsa, Donald G. schultz, Linear control systems, McGraw-Hill, Inc., pp.431-460, 1993.

[13] Benjamin C. Kuo, Automatic control systems, 7th ed., Prentice Hall, Inc., pp.671-743, 1995.

[14] 김종식, 선형 제어시스템 공학, 청문각, pp.106-123, 1994.

[15] Gene F. Franklin, J David Powell, Abbas Emami-Naeini, Feedback control of dynamic systems, 5th ed., Pearson Education, Inc., pp.50-324, 2006.

[16] 안규봉, "조준경 안정화장치의 파라미터 추출 및 제어기 설계", June 1996.

[17] 김문준, 신대왕, 김근영, 김종식, "외란 관측기 및 슬라이딩 모드 관측기를 이용한 시선안정화 제어시스템 설계", 대한기계학회부산지부, 추계학술대회논문집, pp.126-131, 2002.



**이 진 복** (Jin-bok Lee)

1998년 고려대학교 전자공학과 (공학사)  
2011년 ~ 현재 금오공과대학교 전자  
및 전기공학과 (공학석사)  
1998년 ~ 현재 삼성탈레스 수석연구원  
※관심분야: 서보 시스템 설계, 제어 알  
고리즘 연구



**최 한 고** (Han-go Choi)

正會員

1979년 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
1988년 Univ. of Florida, USA 전기 및  
전자공학과 (공학석사)  
1992년 Univ. of Florida, USA 전기 및  
전자공학과 (공학박사)  
2001년 MIT, USA (Research Scientist)

1979년 ~ 1986년 국방과학연구소, 연구원  
1993년 ~ 현재 금오공과대학교 전자공학부 교수  
※관심분야: 실시간 DSP, 컴퓨터비전, 생체 신호처리

---