

드론 제어 교육을 위한 1-축 PID 제어기 설계 및 제작

A Design and Implementation of One-Axis PID Controller for Drone Control Education

정 보 환(정보통신과)

Bo-Hwan Jeong(Dept. of Information and Communication)

Key words : PID Controller, First-Order Low Pass Filter, Drone, One-Axis Plant

Abstract: In this study, we propose a one-axis PID controller test equipment for drone flight controller education. The prototype system consists of arduino pro mini, MPU-6050, BLDC motor, and ESC. We experiment and observe the effect of tracking performance and disturbance rejection with respect to change of PID controller gain. Experiments show that the prototype system implemented is excellent and convenient tool for selecting PID gain.

1. 서론

드론은 군사, 농업, 물류·운송, 소방·방재, 영화·방송 촬영 등의 다양한 분야에 사용되고 있으며 4차 산업 혁명 시대의 도래로 그 활용 범위가 지속적으로 확대되고 있다. 드론의 자율 비행 등 임무에서 비행 안정성은 아무리 강조해도 지나치지 않다. 드론의 비행 제어 안정성이란 제어 알고리즘을 통해 안정적으로 수평, 고도, 위치 등을 스스로 유지하면서 비행하는가를 의미한다. 이중 가장 기본적이며 근본적인 제어 알고리즘은 자세 제어 즉 자동 수평 제어 기능이다[1-4].

자동 수평 제어 기능을 위해 드론은 3축 롤, 피치, 요 제어 기능을 안정적으로 스스로 수행해야 한다. 이를 위한 여러 제어 기법 중 하나로 비례-적분-미분 (PID: Proportional Integral Derivative) 제어를 들 수 있다. 비례-적분-미분 제어기는 구조가 간단하고 제어 성능이 우수하여 오늘날 산업현장을 비롯한 모든 제어시스템 중 대부분을 차지하고 있다. PID 제어기는 기본적으로 피드백(Feedback) 제어기 형태를 가지고 있으며 제어 대상(Plant)의 출력 값을 측정하여 기준 입력 값 또는 설정 값과 비교하여 오차를 얻는다. PID 제어 기법은 오차에 대한 과거(적분), 현재(비례), 미래(미분)에 대한 정보를 바탕으로 제어량을 산출하므로 단순하지만 강력한 제어 알고리즘이다.

현재 산업용, 취미용으로 제작되는 대부분 드론의 제어 알고리즘 또한 PID 제어 기법을 바탕으로 한다. 여기서 PID 제어 알고리즘을 설계한다는 것은 비례이득, 적분이득, 미분이득을 결정한다는 것이다. 지난 수 십 년간 제어 이론을 바탕으로 수많은 방법들이 제시되어 왔다. 그러나 본 논문에서는 PID 제어 특성을 바탕으로 시행착오(Trial and Error) 기법에 근거하여 제어 이득을 설정하는 방법을 다룬다.

앞서 언급한 것처럼 드론의 자동 수평 제어를 위해서는 롤, 피치 축 제어가 수행되어야 한다. 쿼드콥터(Quadcopter) 구조의 드론인 경우 그 구조 특성상 롤과 피치 제어는 동일한 PID 제어 이득을 가진다. 따라서 어느 한 축의 제어 이득을 결정하면 다른 축은 자동으로 결정된다. 시행착오 기법에 의해 드론의 롤, 피치 제어 이득을 설정할 경우 드론 제어 기법뿐만 아니라 드론 조종법에도 상당한 경험을 가지고 있어야 한다. 그렇지 않으면 드론이 순식간에 지면과 충돌하는 불상사가 발생할 수 있다. 이를 방지할 목적으로 본 논문에서는 PID 제어 알고리즘에서 제어 이득을 보다 편리하고 정확하게 선정할 수 있도록 하는 1-축 제어기를 설계하고 구현한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 PID 제어기의 일반적인 특성을 기술한다. 3장에서는 아두이노 프로 미니와 자이로 센서를 이용한 1-축 제어기 설계 및 구현을 기술한다. 4장에서는 외란 제거 성능에 대한 실험을 수행하며 5장에서 결론을 다룬다.

2. 비례-적분-미분 제어기 기본 특성[5]

피드백 제어 시스템은 기준입력신호와 피드백신호의 차이를 오차신호로 하고, 이 신호를 제어기에 입력함으로써 오차를 줄이고 시스템의 출력을 입력신호인 목표값에 가깝도록 한다. 본 논문에서 제작되는 피드백 제어 시스템은 아래 그림 1과 같이 제어기, 작동기를 가진 플랜트, 자이로 센서 등으로 구성된다. 여기서 다루는 제어기 형태는 산업 현장에서 가장 많이 이용되는 비례-적분-미분 제어기이다. K_p 는 비례이득, T_i 는 적분시간, T_d 는 미분시간을 각각 나타낸다.

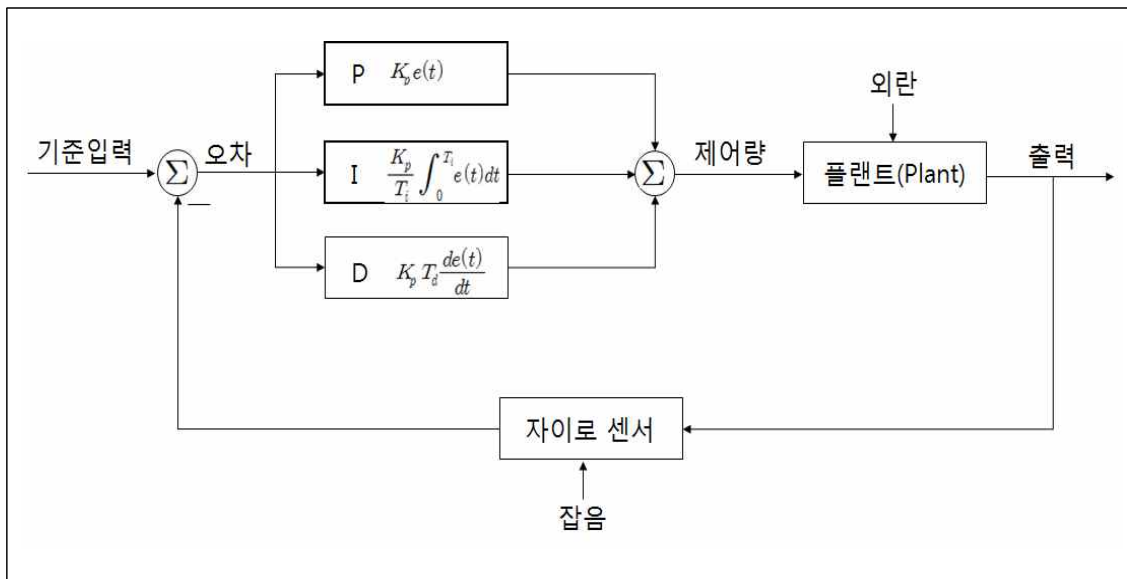
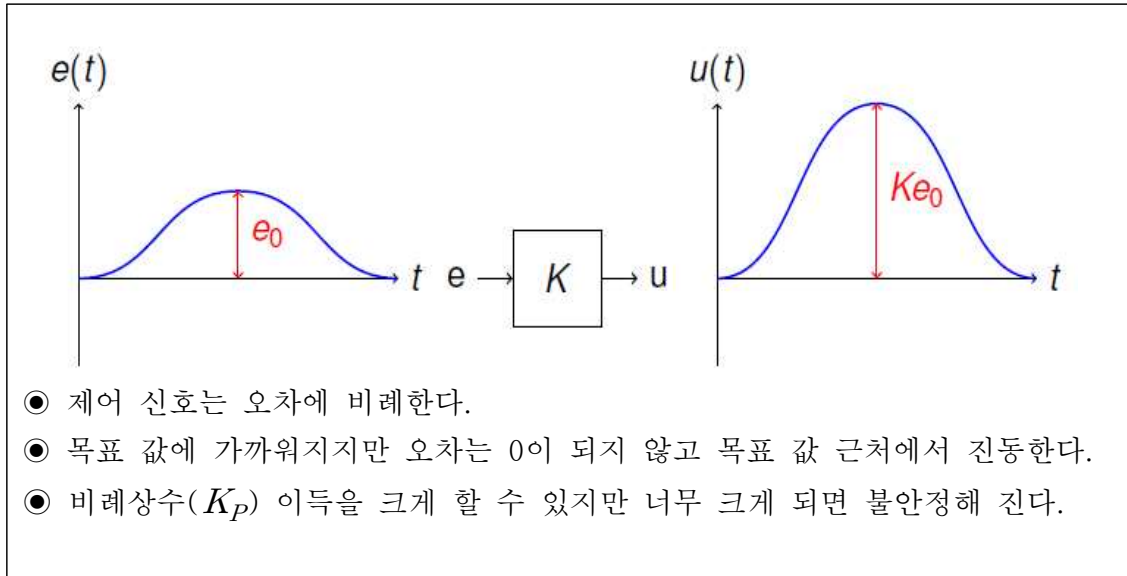


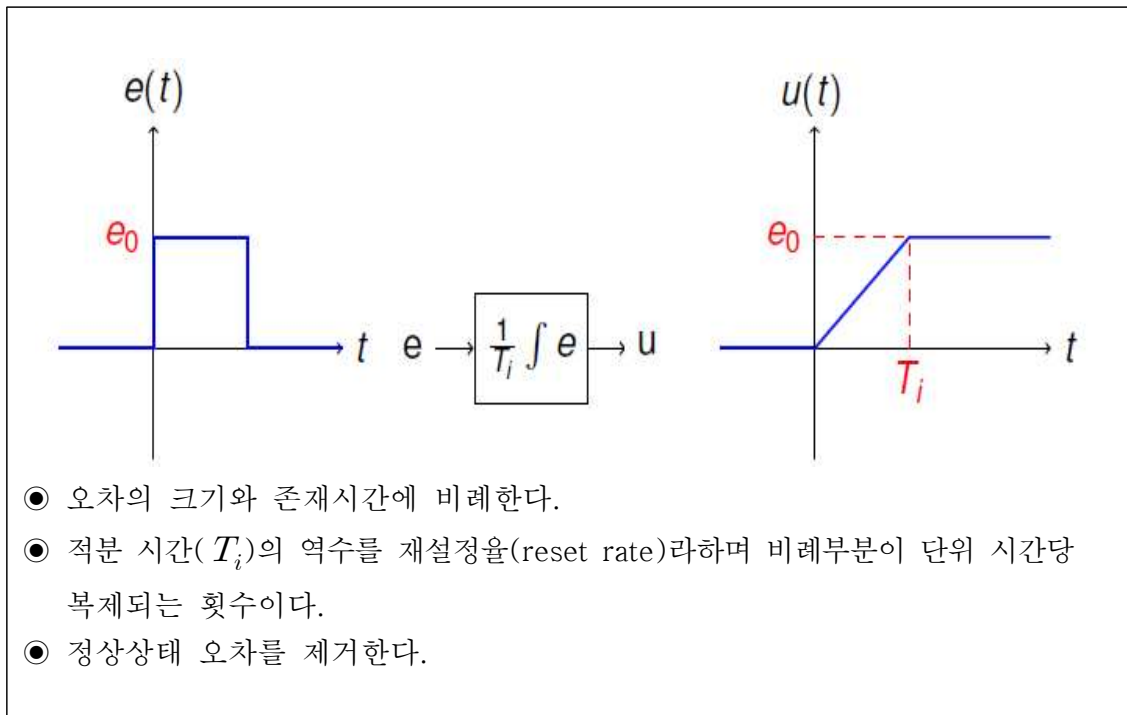
Fig. 1 Block Diagram of PID Controller System

2.1 비례 동작

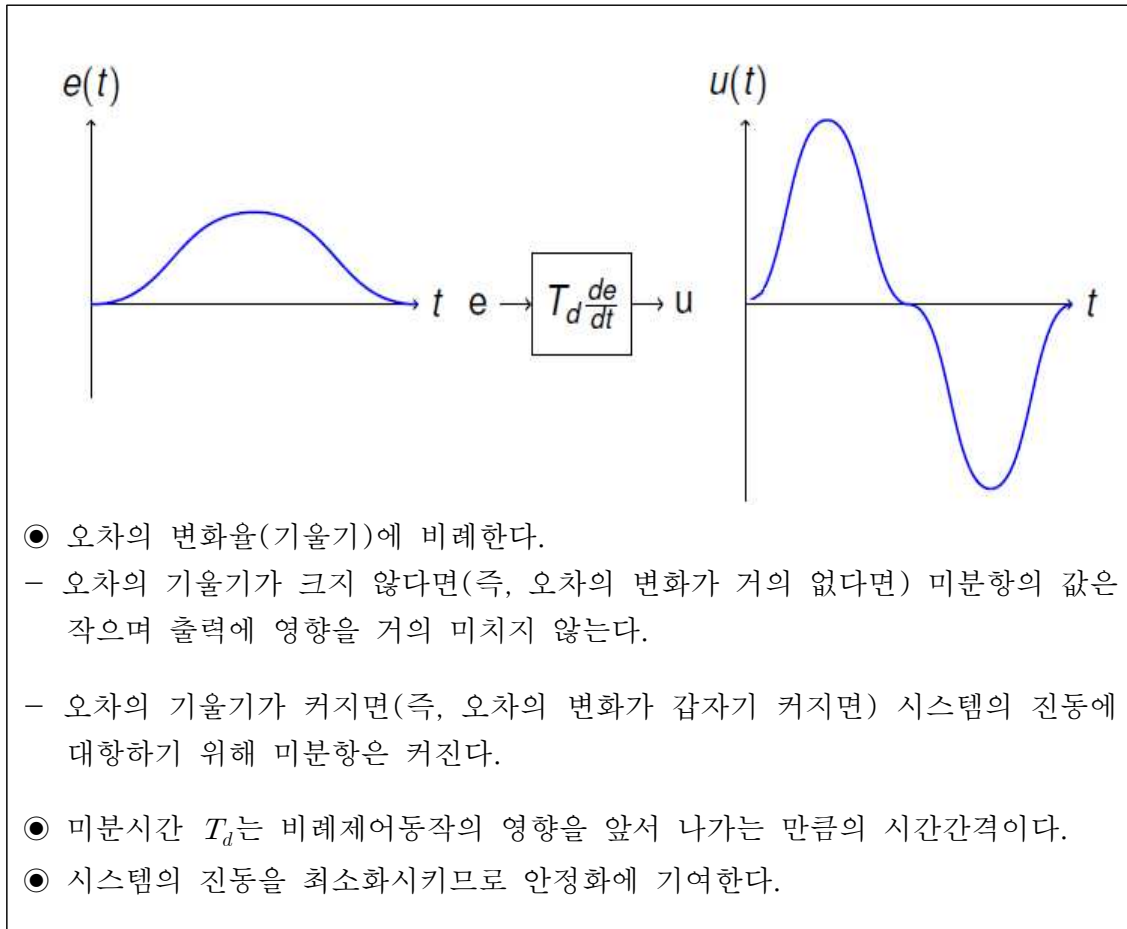
기준입력 값과 피드백 신호 사이의 차인 오차신호에 적절한 비례상수(K_p) 이득을 곱해 제어 신호를 만든다.



2.2 적분 동작



2.3 미분 동작



PID 제어기의 비례-적분-미분 파라미터에 따른 영향을 표 1에 나타내었다.

Table 1. Effects of PID parameter

파라미터	상승시간	오버슈터	정착시간	정상상태오차	안정도
비례이득	감소	증가	소폭변화	감소	감소
적분이득	감소	증가	증가	제거	감소
미분이득	소폭변화	감소	감소	영향없음	증가

3. 데이터 처리를 위한 잡음 제거[5]

센서를 통한 데이터 측정에는 잡음이 필수적으로 동반된다. 잡음을 제거하기 위해 여기에서는 비교적 단순한 이동 평균 필터와 1차 저주파 통과 필터에 대해 살펴본다.

3.1 이동 평균 필터

평균 필터를 활용하면 측정값에서 잡음을 제거할 수 있다. 그러나 측정값이 시간에 따라 변화하는 물리량이면 단순한 평균값은 동적변화를 반영하지 못하므로 적절하지 않다. 잡음을 제거하면서 시스템의 동적 변화를 반영하는 방법 중 하나가 이동평균 (Moving average)이다.

이동평균은 모든 측정 자료가 아니라 지정된 개수의 최근 측정 자료만을 가지고 계산한 평균이다. n 개 측정 자료에 대한 이동평균을 수식으로 나타내면 아래 수식 (1)과 같다.

$$\bar{X}_{kn} = \frac{x_{k-n+1} + x_{k-n+2} + \dots + x_k}{n} \quad (1)$$

순환식으로 유도하기 위해 바로 이전 이동평균을 식 (2)에 나타내었다.

$$\bar{X}_{(k-1)n} = \frac{x_{k-n} + x_{k-n+1} + \dots + x_{k-1}}{n} \quad (2)$$

식 (1)에서 식 (2)를 빼서 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{X}_{kn} - \bar{X}_{(k-1)n} &= \frac{x_{k-n+1} + x_{k-n+2} + \dots + x_k}{n} - \frac{x_{k-n} + x_{k-n+1} + \dots + x_{k-1}}{n} \\ &= \frac{x_k - x_{k-n}}{n} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)을 \bar{X}_{kn} 에 대해 정리하면 이동평균 필터의 순환식은 다음과 같다.

$$\bar{X}_{kn} = \bar{X}_{(k-1)n} + \frac{x_k - x_{k-n}}{n} \quad (4)$$

이동평균 필터 설계 시 평균을 구하기 위한 자료 개수 (n)은 잡음 제거능력과 시스템의 변화 민감성을 고려하여 설정하여야 한다. 측정하려는 물리량이 빠르게 변하면 이동평균 자료 개수를 줄여야 변화를 빠르게 반영할 수 있다. 반면 물리량의 변화가 느리면 이동평균 자료 개수를 늘려 잡음 제거 성능을 높일 수 있다.

이동평균 필터의 한계

식 (1)을 풀어 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \bar{X}_{kn} &= \frac{x_{k-n+1} + x_{k-n+2} + \dots + x_k}{n} \\ &= \frac{1}{n} x_{k-n+1} + \frac{1}{n} x_{k-n+2} + \dots + \frac{1}{n} x_k \end{aligned} \quad (5)$$

이동평균은 n 개 자료에 동일한 가중치 $\left(\frac{1}{n}\right)$ 를 부여한다. 가장 최근 자료 (x_k)와 가장 오래된 자료 (x_{k-n+1})를 같은 비중으로 평균에 반영한다. 이동평균 필터를 측정값 변화가 심한 신호에 적용하면 잡음 제거 성능과 변화 민감성 모두 달성하기 어렵다. 예를 들어 1초에 250회 각속도를 측정하는 드론에서 가장 최근 측정값이 드론의 현재 상태를 가장 많이 반영한다고 할 수 있다. 그러나 이동평균 필터는 n 개 자료에 같은 가중치 $\left(\frac{1}{n}\right)$ 부여하여 계산하므로 시스템의 상태 변화를 빠르게 반영하지 못하는 단점이 있다.

3.2 1차 저주파 통과 필터

이동평균 필터 한계는 평균값 계산에 이용되는 모든 자료를 같은 비중으로 고려한다는 것이다. 이런 단점을 보완하기 위해 가장 최근 측정값에 높은 가중치를 부여하고 오래된 측정값에는 가중치를 줄이는 방법이 도입되었다. 이 방법 중 하나로 1차 저주파 통과 필터라 할 수 있으며 표현은 다음과 같다.

$$\hat{X}_k = \alpha \hat{X}_{k-1} + (1-\alpha)x_k \quad (6)$$

여기서 $0 < \alpha < 1$ 인 임의의 상수이다. 식 (6)의 의미를 살펴보기 위해 바로 이전 추정값을 표현하면

$$\begin{aligned} \hat{X}_{k-1} &= \alpha \hat{X}_{k-2} + (1-\alpha)x_{k-1} \\ \hat{X}_{k-2} &= \alpha \hat{X}_{k-3} + (1-\alpha)x_{k-2} \\ &\vdots \end{aligned} \quad (7)$$

이다. 이 식을 (6)에 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \hat{X}_k &= \alpha \hat{X}_{k-1} + (1-\alpha)x_k \\ &= \alpha \left(\alpha \hat{X}_{k-2} + (1-\alpha)x_{k-1} \right) + (1-\alpha)x_k \\ &= \alpha^2 \hat{X}_{k-2} + \alpha(1-\alpha)x_{k-1} + (1-\alpha)x_k \\ &= \alpha^3 \hat{X}_{k-3} + \alpha^2(1-\alpha)x_{k-2} + \alpha(1-\alpha)x_{k-1} + (1-\alpha)x_k \\ &\quad \vdots \end{aligned} \quad (8)$$

$0 < \alpha < 1$ 이므로 가장 최근 측정값과 시간이 지날수록 측정값 사이 $(x_k, x_{k-1}, x_{k-2}, x_{k-3}, \dots)$ 계수 관계는 다음과 같다.

$$(1-\alpha) > \alpha(1-\alpha) > \alpha^2(1-\alpha) > \alpha^3(1-\alpha) > \dots \quad (9)$$

저주파 통과 필터는 가장 최근 측정값에 가장 높은 가중치를 부여하고 시간이 지날수록 오래된 측정값에는 기하급수적으로 작은 가중치를 부여한다. 따라서 1차 저주파 통과 필터를 지수가중 (Exponentially weighted) 이동평균 필터라고도 한다.

4. 1-축 PID 제어기 설계 및 제작

여기서 설계·제작되는 1-축 제어기 목적은 드론의 롤/피치 제어 이득을 효과적으로 얻기 위함이다. 구성 요소로 제어기, 전자변속기, BLDC 모터, 프레임, 기구물 등으로 드론에 대부분 적용할 수 있다. 그림 2는 마이크로컨트롤러인 아두이노 프로 미니, 각속도를 측정하기 위한 MPU-6050, 스마트폰의 앱과 통신하기 위한 블루투스 모듈로 구성된 제어기 설계도이다. 그림 3은 PCB 설계도, 그림 4는 제작된 1-축 PID 제어 이득 설정 시험 장치이다. 여기서 PID 제어기는 250Hz 단위, 즉 1초에 250번 제어 출력이 갱신된다.

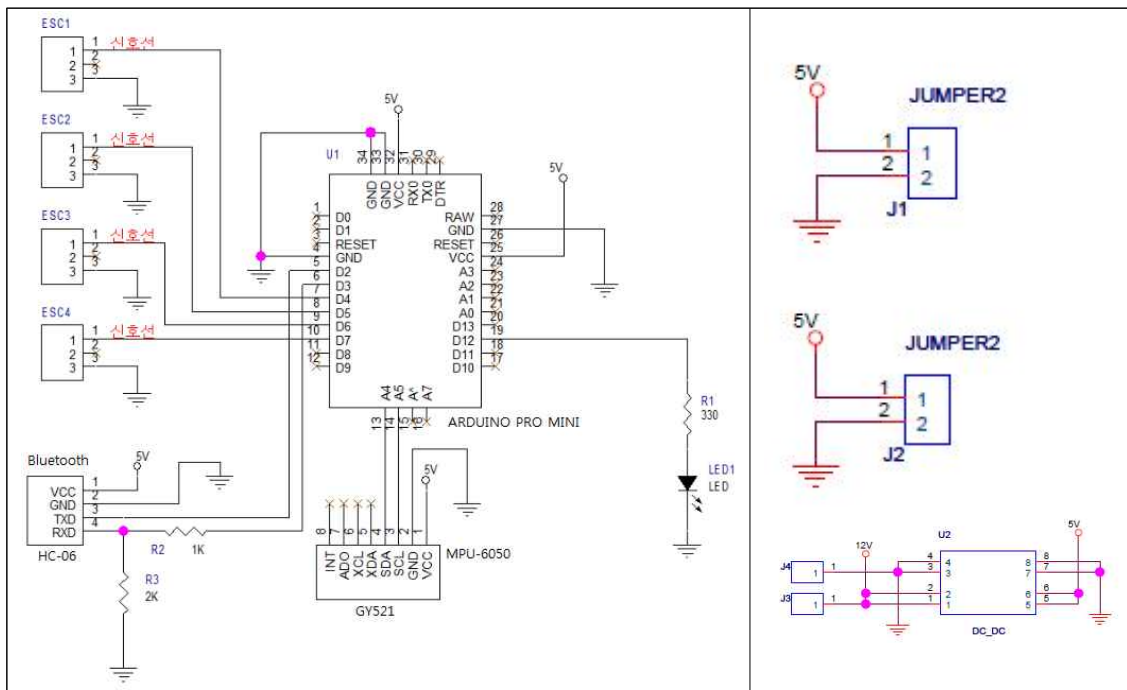


Fig. 2 Design of 1-axis PID Controller

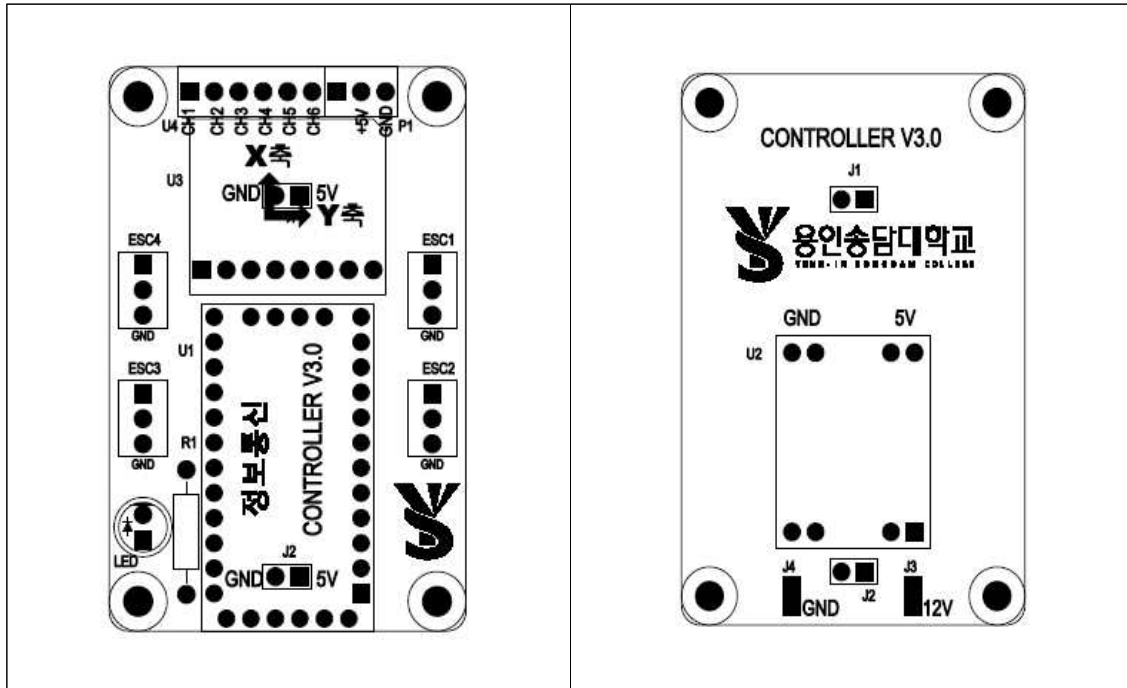


Fig. 3 PCB Board of 1-axis PID Controller

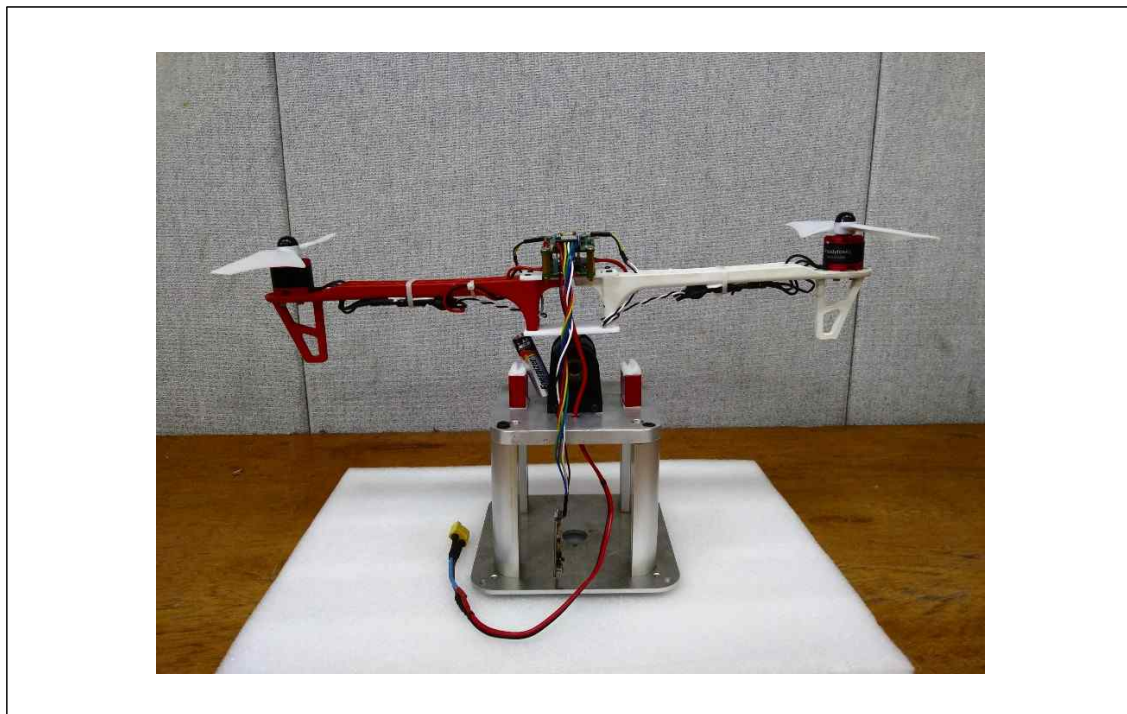


Fig. 4 Implementation of 1-axis PID Controller

5. 실험 및 고찰

5.1 단위 계단 입력 응답 실험

실험을 위한 초기 파라미터 설정으로 $K_p = 1.5$, 스로틀 펄스폭 1300us이며 입력은 시계방향으로 $2^\circ/\text{sec}$ 로 하였다. 이 경우 오차신호(입력신호 - 출력신호) 크기는 2이며 비례 제어를 통한 신호의 크기는 3에 불과하다. 그림 5의 실험 장치에서 왼쪽 모터에 인가되는 펄스폭은 1303us, 오른쪽 모터에 인가되는 펄스폭은 1297us이다. 순수 비례 제어기는 현재 오차만을 고려하므로 중력에 대항할 충분한 추력을 얻지 못하므로 어떤 움직임도 보이지 않는다.

이러한 상황에서 적분기를 작동시키기 위해 적분이득 K_i 를 0.02로 설정한다. 적분기는 오차를 계속 누적시키므로 1초 후 적분기 출력 $5(= 0.02 \times 250)$, 2초 후 적분기 출력 $10(5+5)$, 3초 후 적분기 출력 $15(10+5) \dots$ 10초 후 적분기 출력은 50을 나타내지만 비례 제어 출력은 여전히 3이다. 시간이 흐르면 어느 순간 적분기의 출력으로 인해 왼쪽 모터에 중력을 대항할 충분한 추력을 얻을 수 있는 순간에 도달한다.

표 1에서 비례-적분 제어기는 상승시간을 감소시키지만 오버슈터를 증가시키는 특징을 가지고 있다. 이로 인해 프레임은 진동하면서 시계 방향으로 회전한다. 진동을 제거하기 위해 이제는 미분기를 작동시킨다. 미분기의 초깃값은 2이며 진동의 과도상태를 관찰하면서 점진적으로 증가시킨다. 적절한 값으로 설정된 비례-적분-미분 제어 이득은 시스템을 안정화시키면서 기준 입력 값을 충실히 추적한다. 그림 5의 오른쪽은 입력 각속도를 $2^\circ/\text{sec} \rightarrow 0^\circ/\text{sec}$ 로 하여 수평을 유지하도록 한다. 외부에서 어떤 외란이 가해지지 않으면 수평을 유지한다.

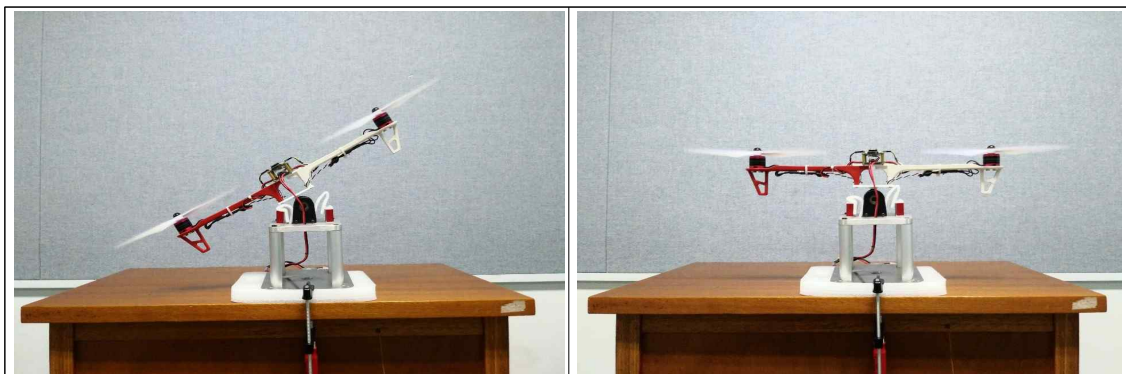


Fig. 5 A snap shot of One-axis PID Controller

5.2 외부 외란 제거 능력 실험

외란 제거 능력을 시험하기 전 1-축 PID 제어 장치를 수평 상태로 유지한다. 이 상태에서 적분기와 미분기의 제어 이득을 0으로 리셋한다. 제어 장치의 구조가 완벽히 대칭 구조가 아닐 뿐만 아니라 모터의 추력 또한 동일하지 않다. 따라서 제어 장치가 어느 한 방향으로 기울어지면 비례 제어기는 외란에 대응하지 못하고 그림 6처럼 결국에는 기울어진다.

둘째, 수평 유지 상태에서 비례-적분 제어기의 외란 제거 능력을 시험한다. 외란이 인가되면 그림 7과 같이 진동을 하지만 점점 안정화 단계로 수렴한다. 여기서 과도 상태에서 진동을 제거할 수단이 요구된다.

셋째, 수평 유지 상태에서 비례-적분-미분기의 외란 제거 능력을 시험한다. 외란이 인가되면 비례-적분 제어기와 달리 그림 8과 같이 빠르게 안정화 단계로 수렴한다. 이는 변화에 대응하는 미분기의 영향으로 인한 결과이다.

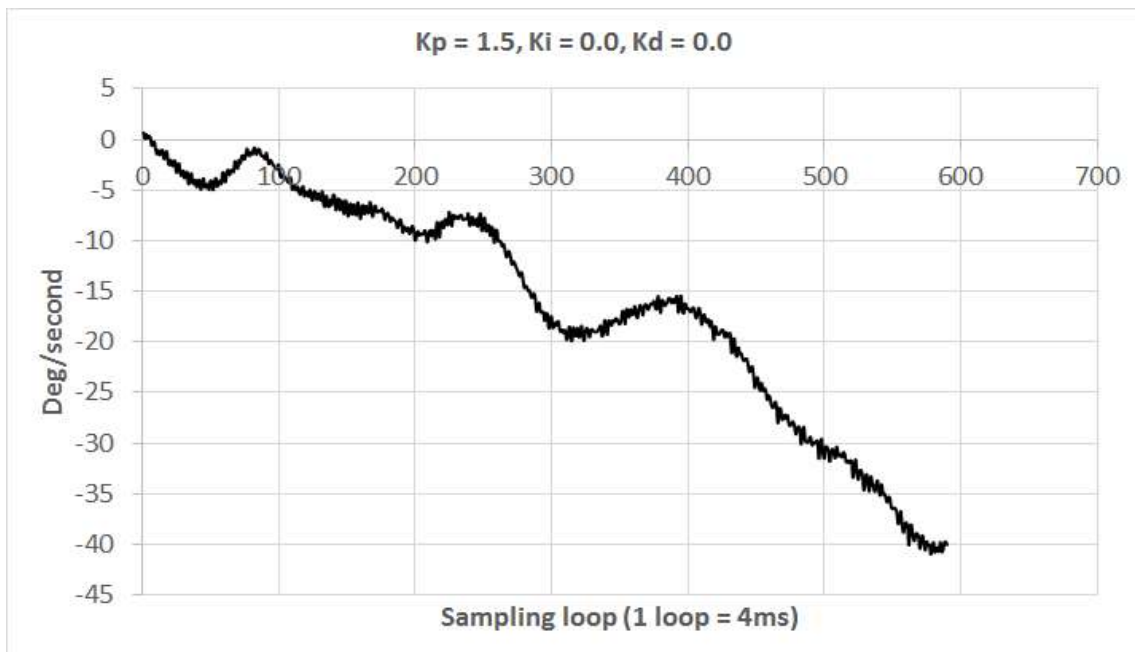


Fig. 6 Experiment result of P Controller

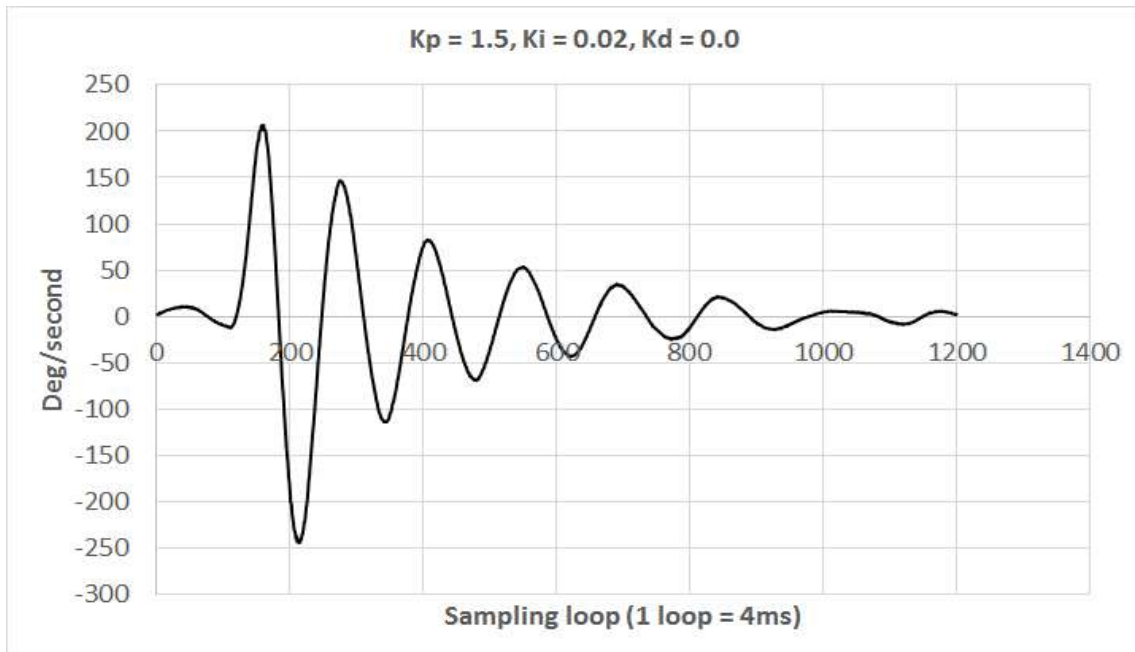


Fig. 7 Experiment result of PI Controller

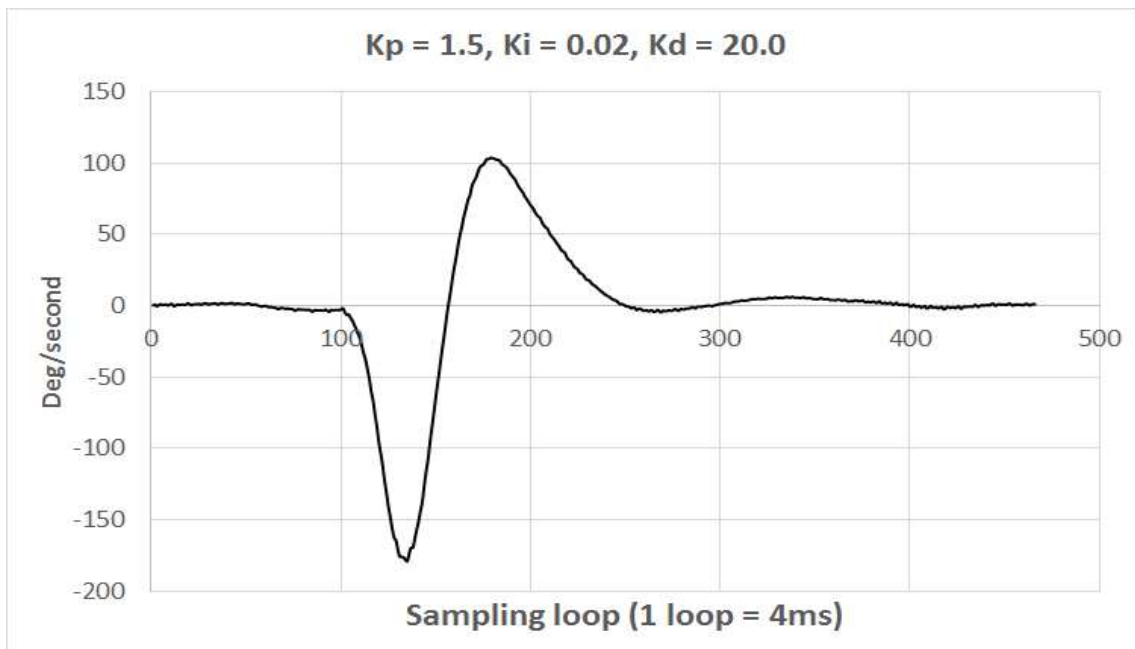


Fig. 8 Experiment result of PID Controller

6. 결론

본 논문에서 PID 제어 이득을 효과적으로 설정하는 장치를 설계 · 제작하였다. PID 제어는 과거, 현재, 미래에 대한 오차 정보를 바탕으로 단순하지만 강력한 성능을 발휘한다. 그러나 PID 제어 이득 설정이 미흡한 경우 불안정한 시스템이 될 수 있다. 더구나 드론 시스템인 경우 시행착오법에 의해 PID 제어 이득을 설정할 경우 상당한 위험 부담이 따른다.

드론의 자동 수평제어를 위해서는 롤 · 피치 제어가 동반되어야 한다. 쿼드콥드 구조의 드론인 경우 그 구조 특성상 롤과 피치 제어는 동일한 PID 제어 이득을 가진다. 따라서 어느 한 축의 제어 이득을 결정하면 다른 축은 자동으로 결정된다.

여기서 설계 · 제작된 1-축 PID 제어기 이득 설정 장치는 450급 드론에 적합하다. 제어 입력에 대한 추적 성능과 갑작스런 외란에 대한 제거 능력을 실험을 통해 살펴 보았다. 이를 통해 실제 드론의 PID 제어 이득 설정에 적용할 수 있음을 보였다.

참고문헌

- (1) 이성희 외, “배터리 전압 강하를 고려한 드론 모터 속도 제어기 개발”, 정보처리학회논문지, 제44권, 제6호, 2017, 6월
- (2) 한만수, “드론의 고도 측정을 위한 디지털 대기압 센서의 필터링 방법 개선”, 한국지능시스템 학회논문지, 제27권, 제6호, 2017, 12월
- (3) 오상은, 드론의 기술개발 동향 및 기업의 대응 방안, 임베디드소프트웨어 · 시스템산업협회, 2016, 8월
- (4) 정보환, “아두이노 우노와 GY-86 모듈을 이용한 교육용 드론 제작”, 대한전자공학회 논문지, vol. 56, no. 1, pp. 115-120, 2019년 1월.
- (5) 정보환, 드론 비행 제어기 펌웨어 파헤치기, 영민출판사, 2018, 10월