

# 쿼드콥터 비행 시스템에서 최적의 PID 이득 계수를 얻기 위한 수정된 지글러-니콜스 방법

이상록  
신한대학교 IT융합공학부 부교수

## The modified Ziegler-Nichols method for obtaining the optimum PID gain coefficients under quadcopter flight system

Sangrok Lee  
Associate professor, School of IT Convergence Engineering, Shinhan University

**요약** 본 논문에서는 쿼드콥터형 드론 시스템을 구현하고, PID 제어기에서 안정화 시간을 최소화할 수 있는 이득 계수를 구하기 위한 경험적 방법을 제안하였다. 드론 자세 안정화 제어 시스템은 가속도 센서와 자이로 센서의 자세 정보를 마호니 필터를 통해 보정한 후 PID 제어기를 통해 4개의 모터를 구동한다. 제안된 방법은 기존의 지글러-니콜스 방법을 통해 1차적으로 이득 계수를 구한 후에 각각의 이득 계수를 경험적 방법으로 다시 최적화하는 단계를 거쳐서 결정한다. 최종적으로 구해진 이득 계수를 구현된 시스템에 적용하여 롤 방향으로 20도 회전하는 실험을 수행한 결과 기존의 지글러-니콜스 방법에 비해 최대 오버슈트는 44.3도에서 29.8도로 감소하면서도 안정화시간이 2.6초에서 1.7초로 개선됨을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 방식은 최적의 이득 계수를 구하기 위한 시행착오를 줄이면서도 드론과 같이 모터 잡음이 심한 환경에서도 잘 동작함을 실험을 통해 증명하였다.

**주제어** : 쿼드콥터, 드론, PID 제어기, 이득 계수, 지글러-니콜스 방법, 안정화 시간

**Abstract** This paper implemented quadcopter-type drone system and proposed the heuristic method for obtaining the optimum gain coefficients in order to minimize the settling time. Control system for quadcopter posture stabilization reads the posture data from accelerator and gyro sensor, revises the original posture data using Mahony filter, and drives 4 DC motors using PID controller. The first step of the proposed method is to obtain the gain coefficients using the Ziegler-Nichols method, and then determine the optimum gain coefficients using the heuristic method at the next 3 steps. The experimental result shows that the maximum overshoot decreases from 44.3 to 29.8 degrees and the settling time decreases from 2.6 to 1.7 seconds compared to the Ziegler-Nichols method. Therefore, we proved that the proposed method works well in quadcopter flight system with high motor noise while reducing trial and error to obtain the optimal PID gain coefficients.

**Key Words** : Quadcopter, Drone, PID controller, Gain coefficient, Ziegler-Nichols method, Settling time

\*This paper was supported by the fund of Shinhan university.

\*Corresponding Author : Sangrok Lee(srlee@shinhan.ac.kr)

Received August 26, 2020

Accepted November 20, 2020

Revised October 19, 2020

Published November 28, 2020

## 1. 서론

최근 드론 시스템은 배송용 드론, 촬영용 드론, 완구용 드론 등 다양한 분야에서 적용되고 있고, 쿼드콥터형 드론이 주류를 이루고 있다[1-6]. 쿼드콥터형 드론은 4개의 모터를 구동하여 드론의 자세와 이동방향을 제어한다. Fig. 1은 쿼드콥터형 드론 시스템에서 자세 안정화를 위한 제어 흐름도를 보이고 있다. 모션추적센서(Motion Tracking Sensor)로부터 드론의 현재 자세 정보 데이터를 읽은 후, 센서융합필터(Sensor-Fusion Filter)를 거쳐서 자세 정보 데이터를 보정한다. 보정된 자세 데이터로부터 목표 자세와 비교하여 오차를 계산한 후에 PID 제어기에서 4개의 모터에 해당되는 PWM 값을 계산하여 각각의 모터에 출력한다. 모터 출력이 따라서 현재의 자세 정보가 갱신되어 모션추적센서에 다시 반영된 후 이 과정을 반복함으로써 드론이 원하는 자세와 이동방향을 유지할 수 있다.

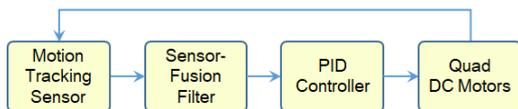


Fig. 1. Control flow for quadcopter posture stabilization

하지만 쿼드콥터형 드론의 기체가 호버링(hovering) 상태에서도 모터에서 발생하는 심한 진동에 의해 센서로부터 얻은 자세 데이터의 오차가 크게 발생하고 있다. 이는 안정적인 자세 제어를 위한 필수요소인 PID (Proportional-Integral- Derivative) 제어기에 영향을 미치게 된다. PID 제어기는 3개의 이득 계수를 조절하여 동작하는데 3개의 이득 계수인 비례(Proportional) 이득 계수, 적분(Integral) 이득 계수, 미분(Derivative) 이득 계수 값을 구하기 위한 방법으로 지글러-니콜스(Ziegler-Nichols) 방법이 적용되어 왔다. 하지만 진동이 매우 심하고 안정적인 호버링을 위해 빠른 안정화 시간을 요하는 드론 시스템에서는 오버슈트(overshoot)가 크고 수렴 속도가 느린 기존의 지글러-니콜스 방법의 이득 계수를 적용하기는 어려운 실정이다. 또한, 오버슈트가 전혀 없거나 약간 있는 수정된 PID 제어기의 이득 계수도 발표되었지만 드론과 같이 진동이 심한 환경에서는 안정화 시간이 상대적으로 느려서 수렴하지 못하고 발산하는 경우가 발생할 수 있어 역시 적용하기 어렵다[7].

따라서 기존의 지글러-니콜스 방법의 이득 계수에서 시행착오(trial-and-error)를 반복하면서 경험적 접근법

으로 최적의 이득 계수를 튜닝하여 적용하고 있는 실정이다. 하지만 이 방식은 드론의 크기, 무게, 모터 용량 등과 같은 시스템의 환경이 변할 때마다 이득 계수를 다시 튜닝하기 위해 많은 시행착오 시간을 필요로 한다. 또한, 드론의 안정화 시간을 최소화하기 위해 다양한 센서융합 필터를 적용한 사례도 있고, 이중 루프 PID 제어기 또는 3중 루프 PID 제어기를 적용한 사례도 있다[7-13]. 논문 [8]에서는 쿼드콥터 비행 환경에서 정확한 자세 정보를 추출하기 위해 센서융합필터인 마호니(Mahony) 필터와 칼만(Kalman) 필터를 적용하여 안정화 시간을 비교하였다. 논문 [10]에서는 기존의 PID 제어기에 외부 P 제어기를 추가하는 구조의 이중루프 PID 제어기를 적용하여 안정화 시간을 단축하였다. 논문 [2]에서는 32비트 Cortex-M3 시리즈의 MCU기반으로 표준 PID를 적용한 쿼드콥터 제어 시스템을 설계하고 구현하였다. 하지만 이 과정에서도 PID 제어기의 이득 계수를 최적화하는 과정은 시행착오를 반복하면서 경험적 접근법으로 설명되고 있다.

본 논문에서는 기존의 지글러-니콜스 방법의 이득 계수에서 시행착오를 반복하면서 경험적 접근법으로 최적의 이득 계수를 튜닝하는 과정에서 소요되는 시간을 단축하고자 한다. 이를 위해 이득 계수의 최적값을 구하는 경험적 접근법을 4단계로 정리한 과정을 제안한다. 제안된 방식은 기존의 경험적 접근법에 비해 최적값을 구하는데 소요되는 시간을 단축하면서도 안정화 시간을 최소화하는데 목표를 두고 있다. 이를 위해 2장에서는 쿼드콥터형 드론 시스템 설계 및 구현 과정을 설명하고, 3장에서는 제안된 PID 제어기의 이득 계수 최적화 과정과 실험 결과를 비교하면서 동작 과정을 설명한다.

## 2. 드론 시스템 설계 및 구현

### 2.1 시스템 하드웨어

쿼드콥터형 드론 시스템은 크게 원격제어 리모콘과 쿼드콥터 본체로 구성되고, Fig. 2는 구현된 쿼드콥터 본체 제어 모듈의 블록도와 프레임에 장착된 실물 사진을 보이고 있다. Fig. 2(a)의 블록도에서 보듯이 제어 모듈은 크게 MCU, 모션추적센서, 4개의 DC 모터, RF 송수신기, GPS 수신기, 온도센서, 그리고 모니터링 터미널 포트 등으로 구성된다. 제어용 MCU는 STMicroelectronics사의 32비트 Cortex-M3 시리즈인 STM32F103RB를 사용하였고, 동작 클럭 속도는 72MHz이다. 모션추적센

서는 MPU6050 모듈이고, MCU는 100kbps 속도의 I2C 통신으로 인터페이스하여 드론의 자세 데이터를 읽어온다. 사용된 DC 모터는 V262-16 모델이고, PWM 방식으로 속도를 제어하여 드론의 자세를 제어한다. RF 송수신기는 nRF24L01 모듈이고, SPI 통신으로 인터페이스하여 원격제어 리모콘으로부터 전송되는 제어 정보를 입력받는다. GPS 수신기는 NEO-7M 모듈이고, UART 통신을 통해 0.1초 단위로 위치정보를 입력받는다. Fig. 2(a)의 블록도를 기준으로 회로를 설계하여 PCB를 제작하였고, 제작된 PCB를 상용 쿼드콥터형 드론의 프레임에 적용하여 시스템을 구현하였다. Fig. 2(b)는 제작된 PCB 사진이고, 크기는 53mm x 75mm, 쿼드콥터 프레임의 크기는 550mm x 550mm이다.

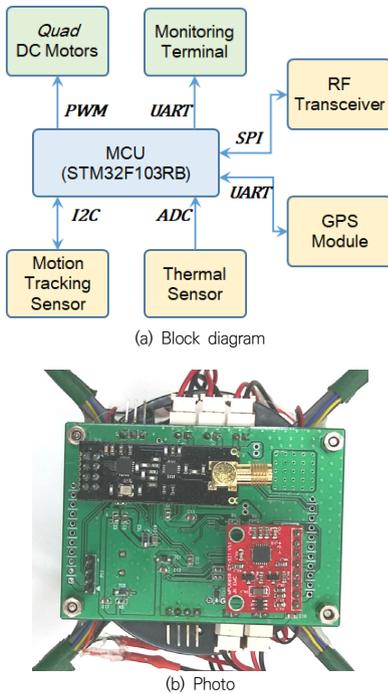


Fig. 2. Quadcopter control module

## 2.2 자세 안정화 제어기

2.1절에서 구현된 쿼드콥터형 드론을 구동하기 위해서는 MCU에서 자세 안정화 제어 프로그램을 필요로 하는데 제어 과정의 기본적인 흐름은 Fig. 1과 같고, 구체적으로 MCU에서 실행되는 제어 프로그램의 순서도는 Fig. 3에 보이고 있다. 구현된 시스템에서는 모션추적센서로 MPU6050을 적용하였고, 센서융합필터는 마호니 필터를 적용하였다. 또한, 자세 정보의 갱신 주기는

400Hz로 설정하였고, 이는 타이머 인터럽트로 주기를 제어한다.

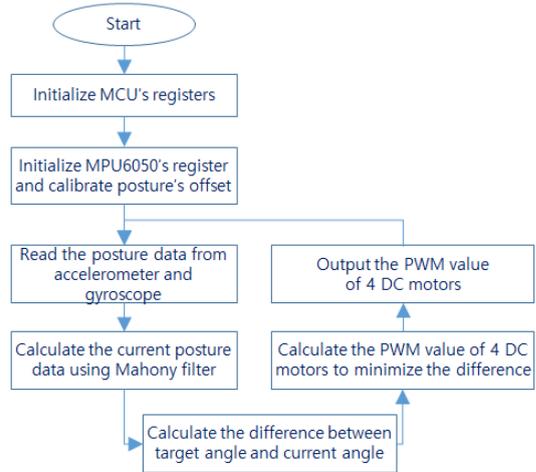


Fig. 3. Flowchart of algorithm for quadcopter posture stabilization

MPU6050은 드론의 자세 정보를 표현하기 위해 3축 가속도센서와 3축 자이로센서로 구성된다. 3축 가속도센서는 기울어진 정도를 중력가속도로 표현하고, 3축 자이로센서는 각속도 변화량으로 표현된다. 각각의 센서에서 출력되는 6개의 정보는 ADC 과정을 거쳐 16비트로 표현되고, 샘플링 주파수는 1kHz로 설정하였다. 또한, 센서에 내장된 저역통과 필터의 대역폭은 188Hz, 가속도센서의 해상도는  $\pm 16g$ , 자이로센서의 해상도는  $\pm 2000^\circ / \text{sec}$ 로 설정하였다[14].

MPU6050은 MEMS 기반의 센서이므로 가볍고 저렴하지만, 잡음에 약하고 다양한 외부 영향에도 민감하다. 특히, 드론 시스템에서는 기체가 움직이지 않는 호버링 상태에서도 모터에서 발생하는 심한 진동으로 인해 센서로부터 얻은 자세 데이터의 오차가 크게 발생하고 있다. 특히, 가속도센서는 모터에서 발생하는 진동에 의해 오차가 심해지고, 자이로센서는 순간적인 진동에는 상대적으로 강하지만 센서 출력값인 각속도에서 각도를 구하기 위해 필요한 적분 과정에서 오차가 누적되는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해서 구현된 시스템에서는 마호니 필터를 적용하였다[15].

PID 제어기는 식(1)에서 보듯이 비례(Proportional) 요소, 적분(Integral) 요소, 미분(Derivative) 요소를 포함한 3개의 구성 요소에 의해 에러  $e(t)$ 를 최소화하는 구조로 동작한다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

여기서,  $e(t)$ 는 에러 함수,  $u(t)$ 는 현재 출력 함수,  $K_p$ 는 비례 이득 계수,  $K_i$ 는 적분 이득 계수,  $K_d$ 는 미분 이득 계수를 의미한다.

지글러-니콜스 방법은 PID 제어기의 이득 계수를 경험적으로 튜닝하는 방법이다. 첫 단계에서는 적분 이득 계수와 미분 이득 계수를 0.0으로 설정하고, 비례 이득 계수를 0.0부터 증가하면서 궁극(ultimate) 이득  $K_u$ 에 도달할 때의 값을 찾는다. 궁극 이득에 도달하면 제어기의 현재 출력 함수가 발진하는 상태가 되고, 이때의 발진 주기를  $T_u$ 라고 한다. 이때, 지글러-니콜스 방법에서 구한 PID 제어기의 이득 계수는 식(2)와 같다[16].

$$K_p = 0.6 K_u, K_i = 1.2 K_u / T_u, K_d = 3 K_u T_u / 40 \quad (2)$$

### 3. 제안된 PID 제어기 이득계수 최적화 방법

#### 3.1 PID 제어기 이득 계수 최적화 과정

본 논문에서 제안된 PID 제어기의 이득 계수 최적화 방법은 크게 4단계로 진행되고, 단계별 구체적인 수행 내

Table 1. Process of the proposed method to obtain the optimum gain coefficients of PID controller

	Criterion
Step 1	Measure $K_u$ and $T_u$ by applying Ziegler-Nichols method, and calculate gain coefficients of $K_p$ , $K_d$ , and $K_i$ .
Step 2	Measure the response waveform while increasing $K_p$ from the gain coefficients obtained in step 1, and select the $K_p$ value of the response waveform with the sharpest rise time.
Step 3	Measure the response waveform while increasing $K_d$ from the gain coefficients obtained in step 2, and select the $K_d$ value of the response waveform where the first overshoot decreases and the magnitude of the first overshoot and the second overshoot becomes similar.
Step 4	Measure the response waveform while increasing $K_i$ from the gain coefficients obtained in step 3, and select the $K_i$ value of the response waveform with the shortest settling time.

용은 Table 1에 보이고 있다. 제안된 방식의 궁극적인 목표는 첫 번째 오버슈트의 크기를 최소화하면서 안정화 시간을 최소화하는 것이다. 여기서 안정화 시간은 목표 각도의  $\pm 10\%$ 이내로 수렴하는 최초의 시간으로 정의한다. 단계 1에서는 지글러-니콜스 방법으로 구해진  $K_u$ 와  $T_u$ 값을 식(2)에 적용하여 이득 계수  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ 를 계산한다. 보완 단계인 단계 2, 단계 3, 단계 4에서는 각각 이전 단계에서 구해진 이득 계수에서 해당 이득 계수를 변화하면서 오버슈트와 안정화 시간을 최소화하는 단계이다. 즉, 단계 2에서는 이득 계수  $K_p$ , 단계 3에서는 이득 계수  $K_d$ , 단계 4에서는 이득 계수  $K_i$ 를 변화하면서 매 단계마다 Table 1에서 제시하는 조건을 만족하는 이득 계수  $K_p$ ,  $K_d$ ,  $K_i$ 를 선택한다.

#### 3.2 실험 및 결과 분석

이번 절에서는 3.1절에서 제안된 PID 제어기에서 최적의 이득계수를 구하기 위한 수정된 지글러-니콜스 방법의 타당성을 입증하기 위해 실험을 통해 검증하고 결과를 분석하였다.

단계 1에서는 기존의 지글러-니콜스 폐루프(closed-loop) 방법을 적용하여 PID 이득 계수에서  $K_d$ 와  $K_i$  값을 0.0으로 설정하고,  $K_p$  값을 0.0부터 증가하면서 응답 파형이 발진하는 상태를 찾는다. 제작된 드론에서 기존의 지글러-니콜스 방법을 적용하기 위한 실험 환경은 다음과 같다. 먼저 다양한 외부 영향을 최소화하기 위해 피치(pitch) 방향과 요(yaw) 방향의 움직임은 제한하고, 롤(roll) 방향의 움직임만 가능하게 한 후에 롤 방향으로만 회전을 통해 움직임을 검출한 후 분석하였다. 실험을 통해 구해진 최종적인  $K_u$  값은 10.0,  $T_u$  값은 1.6초이고, 식(2)를 통해 구해진 PID 제어기의 이득 계수는  $K_p = 6.0$ ,  $K_i = 8.0$ ,  $K_d = 1.1$  이다. 구현된 드론 시스템에 지글러-니콜스 방법을 적용하여 구해진 PID 이득 계수를 적용한 후, 롤 방향으로 20도 회전할 때 응답 파형은 Fig. 4에서 사각형(■) 심볼과 같다. 그림에서 보듯이 목표 각도는 20도이지만 첫 번째 오버슈트는 최대 44.3도까지 증가하였다가 감소하고, 크게 2회 오버슈트 후에 안정화되기 시작하고, 목표 각도까지의 안정화 시간은 대략 2.6초가 소요된다. 이같은 결과는 드론과 같이 빠른 응답 속도를 요하는 응용 분야에는 바람직하지 않다. 단계 2에서는 단계 1에서 구해진 이득 계수에서 미분 이득 계수와 적분 이득 계수는 고정하고,  $K_p$  값을 0.5씩

증가하면서 응답 파형을 측정하였다. Fig. 4는  $K_p$  값이 {6.0, 8.5, 9.5, 10.5, 11.0} 일 때의 응답 파형을 보이고 있다.  $K_p$  값이 증가할수록 응답 파형에서 상승 시간이 짧아지다가 11.0부터 다시 증가하는 현상을 보이고 있다. 한편으로 오버슈트의 크기는  $K_p$  값의 증가에는 크게 영향이 없음을 확인할 수 있다. 따라서 상승 시간이 짧아질수록 궁극적으로 안정화 시간도 짧아지므로 단계 2에서는 최적의  $K_p$  값으로 10.5를 선택하였다.

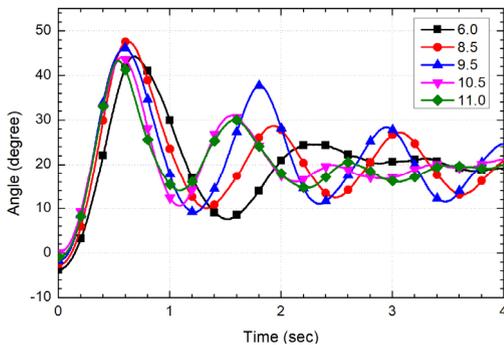


Fig. 4. Response waveform of step 2

단계 3에서는 단계 2에서 구해진 이득 계수에서 비례 이득 계수와 적분 이득 계수는 고정하고,  $K_d$  값을 0.5씩 증가하면서 응답 파형을 측정하였다. Fig. 5는  $K_d$  값이 {1.1, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5} 일 때의 응답 파형을 보이고 있다.  $K_d$  값이 증가할수록 응답 파형에서 첫 번째 오버슈트의 크기가 점점 감소하다가 3.0부터는 첫 번째 오버슈트가 두 번째 오버슈트보다 작아지는 현상을 보이고 있다. 또한,  $K_d$  값이 증가할수록 상승 시간이 느려져서 안정화 시간이 길어지게 되므로 단계 3에서는 최적의  $K_d$  값으로 2.5를 선택하였다.

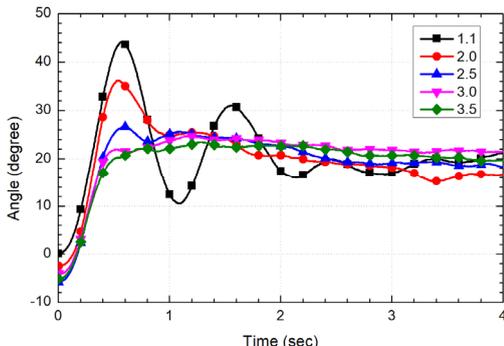


Fig. 5. Response waveform of step 3

단계 4에서는 단계 3에서 구해진 이득 계수에서 비례 이득 계수와 미분 이득 계수는 고정하고,  $K_i$  값을 1.0씩 증가하면서 응답 파형을 측정하였다. Fig. 6은  $K_i$  값이 {8.0, 9.0, 11.0, 13.0, 15.0} 일 때의 응답 파형을 보이고 있다. 적분 이득 계수는 순간적인 변화보다는 장시간의 변화에 영향을 미치므로 그림에서 보듯이  $K_i$  값의 변화에 크게 영향을 미치지 않는다. 다만,  $K_i$  값이 증가할수록 응답 파형에서 안정화 시간이 감소하다가 13.0부터는 오버슈트가 커지면서 안정화 시간도 증가하는 현상을 보이고 있다. 따라서 최종적으로 단계 4에서는 최적의  $K_i$  값으로 11.0을 선택하였다.

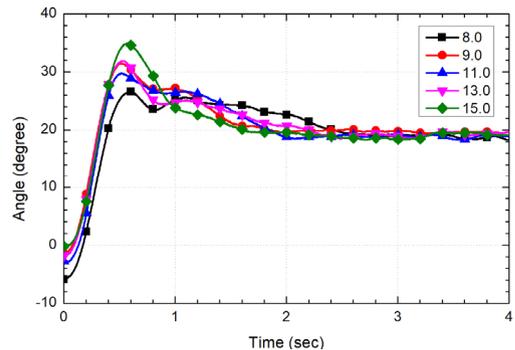


Fig. 6. Response waveform of step 4

이상과 같이 본 논문에서 제안된 단계를 거쳐 구해진 PID 제어기의 최적 이득 계수는  $K_p = 10.5$ ,  $K_i = 11.0$ ,  $K_d = 2.5$  이다. Fig. 7은 각각의 단계에서 구해진 최종적인 이득 계수를 적용한 응답 파형을 보이고 있다. 심볼에서 사각형(■)은 단계 1에서 기존 지글러-니콜스 방법으로 구해진 이득 계수를 적용한 응답 파형, 원형(●)은 단계 2에서  $K_p$  값을 최적화한 응답 파형, 삼각형(▲)은 단계 3에서  $K_d$  값을 최적화한 응답 파형, 역삼각형(▼)은 단계 4에서  $K_i$  값을 최적화한 응답 파형을 의미한다. 단계 1의 파형에 비해 단계 2의 파형에서 상승 시간이 단축됨을 확인할 수 있고, 단계 3에서는 오버슈트가 감소하고, 단계 4에서는 오버슈트가 약간 증가하지만 안정화 시간이 단축됨을 확인할 수 있다. 단계별 안정화 시간을 비교해 보면 단계 1에서는 2.6초, 단계 2에서는 2.3초, 단계 3에서는 2.2초, 단계 4에서는 최종적으로 1.7초로 단축됨을 확인할 수 있다. 따라서 기존 지글러-니콜스 방식에 비해서 제안된 방식은 안정화 시간은 2.6초에서 1.7초로 0.9초 단축되고, 최대 오버슈트는 44.3도에서 29.8

도로 감소됨을 확인할 수 있다.

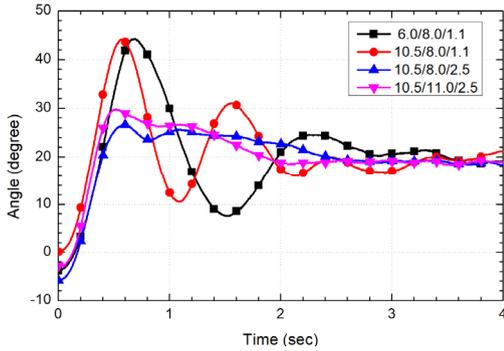


Fig. 7. Final response waveform of each step

Fig. 8은 제안된 방식으로 구해진 최적의 이득 계수를 적용한 후, 롤 방향으로 회전할 목표 각도를 {10, 20, 30, 40}으로 변화하면서 응답 파형을 보이고 있다. 4개의 목표 각도의 실행에서 최대 오버슈트는 0.6초 이내에 제한 되면서도 안정화 시간이 최대 1.9초 이내로 수렴함을 확인할 수 있다. 구체적으로 살펴보면 목표 각도가 10도일 때는 1.9초, 20도일 때는 1.7초, 30도일 때는 1.47초, 40도일 때는 1.34초의 안정화 시간으로 수렴한다. 또한, 모든 각도에서 2초 이내에 목표 각도와 차이가 1도 이내로 수렴함을 확인할 수 있다.

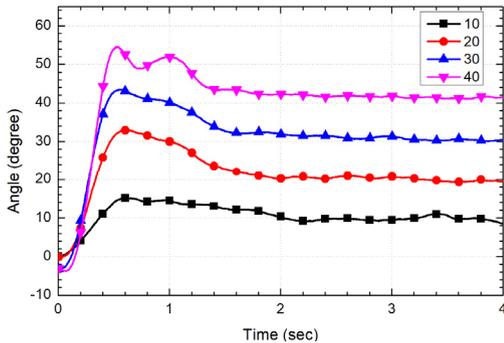


Fig. 8. Response waveform in variation of target angle

#### 4. 결론

본 논문에서는 쿼드콥터형 드론 시스템을 구현하였고, 드론의 자세 안정화에 필수 요소인 PID 제어기에서 최적의 PID 이득 계수를 구하는 과정에서 수정된 지글러-니콜스 방법을 제안하고 실험을 통해 타당성을 분석하였다. 구현된 드론 제어시스템은 STM32F103RB MCU,

MPU6050 모션추적센서, 4개의 DC 모터, GPS 수신기, RF 송수신기 등으로 구성된다. 드론 자세 안정화 제어를 위해서는 가속도센서와 자이로센서의 자세 정보를 마호니 필터를 통해 보정한 후 PID 제어기를 통해 4개의 모터를 구동하였고, 400Hz 주기로 자세 정보를 갱신하도록 설계하였다. 기존의 지글러-니콜스 방법으로 구해진 PID 제어기의 이득 계수로는 모터 잡음이 심한 드론 환경에서는 적용하기 어려워서 최적의 이득 계수를 구하기 위한 경험적 방법을 4단계로 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 지글러-니콜스 방법을 통해 1차적으로 이득 계수를 구한 후에 각각의 이득 계수를 경험적 방법으로 다시 최적화하는 단계를 거쳐서 최종적인 이득 계수를 결정한다. 최종적으로 구해진 이득 계수를 구현된 드론 시스템에 적용하여 롤 방향으로 20도 회전하는 실험을 수행한 결과 최대 오버슈트는 44.3도에서 29.8도로 감소하면서도 안정화시간이 2.6초에서 1.7초로 개선됨을 확인할 수 있었다. 또한, 롤 방향으로 목표 각도를 10도에서 40도 까지 변화하면서 회전하는 실험에서도 안정화 시간이 1.9초 이내로 만족할 뿐만 아니라, 최대 2초 이내에 목표 각도와 1도 이내의 차이로 수렴함을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 경험적 방식은 최적의 이득 계수를 구하기 위한 시행착오를 줄이면서도 드론과 같이 모터 잡음이 심한 환경에서도 잘 동작함을 실험을 통해 증명하였다.

#### REFERENCES

- [1] W. Kim. (2019). Design of hybrid communication structure for video transmission in drone systems. *Journal of the Korea Convergence Society*, 10(11), 9-14. DOI : 10.15207/JKCS.2019.10.11.009
- [2] S. R. Lee. (2019). Design and implementation of quadcopter with stable hovering based on IMS sensor, *The Society of Convergence Knowledge Transactions*, 7(1), 41-46. DOI : 10.22716/SCKT.2019.7.1.007
- [3] G. H. Cha, I. Sim, S. G. Hong, J. H. Jung & J. Y. Kim. (2015). A study of method and algorithm for stable flight of drone. *Journal of Satellite, Information and Communications*, 10(3), 32-37.
- [4] W. H. Jung & J. P. Lee. (2016). Implementation of quad-rotor hovering systems with tracking. *Journal of Advanced Navigation Technology*, 20(6), 574-579. DOI : 10.12673/JANT.2016.20.6.574
- [5] H. G. Kim & Y. H. Kim. (2019). Design of water surface hovering drone for underwater stereo

photography. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(6), 7-12.  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.6.007

- [6] J. H. Jin, G. B. Kim & S. Y. Jin. (2019). A study on the flight safety test of drones for the establishment of toy drone safety standards. *Journal of Convergence for Information Technology*, 9(6), 141-146.  
DOI : 10.22156/CS4SMB.2019.9.12.141
- [7] Y. W. Cho & H. S. Kim. (2014). Posture stabilization control of quadcopter using sensor fusion and modified PID control. *Journal of Institute of Korean Electrical and Electronics Engineers*, 18(3), 376-382.  
DOI : 10.7471/IKEEE.2014.18.3.376
- [8] S. A. Ludwig & K. D. Burnham. (2018). *Comparison of Euler estimate using extended Kalman filter, Madgwick and Mahony on quadcopter flight data*. 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems. Dalas : ICUAS.  
DOI : 10.1109/ICUAS.2018.8453465
- [9] Y. W. Cho. (2018). A tripple nested PID controller based on sensor fusion for quadrotor attitude stabilization. *The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, 67(7), 871-877.  
DOI : 10.5370/KIEE.2018.67.7.871
- [10] D. S. Jeon & S. R. Lee. (2019). Double-loop PID controller for quadcopter attitude stabilization. *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 44(4), 748-754.  
DOI : 10.7840/KICS.2019.44.4.748
- [11] D. Korsane, D. Mute & A. Halmare. (2014). Comparative analysis of different PID tuning techniques for coupled tanks system. *International Journal of Engineering Research and Applications*, 41-46.
- [12] I. H. Hong, J. W. Chung & C. Y. Oh. (2018). A fusion control for a flexible manipulator using PID controller and BELBIC. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 20(4), 458-466.  
DOI : 10.17958/ksmt.20.4.201808.458
- [13] H. C. Lee, S. C. Kim, & C. Y. Oh. (2016). A study on position and vibration control of a flexible robot arm endpoint using PID and fuzzy controller. *Journal of the Korean Society of Mechanical Technology*, 18(4), 529-535.  
DOI : 10.17958/ksmt.18.4.201608.529
- [14] InvenSense. (2013). *MPU-6000 an MPU-6050 product specification revision 3.4*. PS-MPU-6000A-00. www.invensense.tdk.com
- [15] R. Mahony, T. Hamel & J-M Pflimlin. (2008). Nonlinear complementary filters on the special orthogonal group. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 53(5), 1203-1217.  
DOI : 10.1109/TAC.2008.923738
- [16] R. Kumar, S. K. Singla & V. Chopra. (2015). Comparison among some well known control schemes

with different tuning methods. *Journal of Applied Research and Technology*, 13, 409-415.  
DOI : 10.1016/J-JART.2015.07.007

이 상 록(Sangrok Lee)

[종신회원]



- 1991년 2월 : 고려대학교 전자전산공학과(공학사)
- 1993년 2월 : 고려대학교 전자공학과(공학석사)
- 1997년 8월 : 고려대학교 전자공학과(공학박사)
- 2002년 9월 ~ 현재 : 신한대학교 IT융합공학부 전자공학전공 교수
- 관심분야 : 임베디드시스템, IoT
- E-Mail : srlee@shinhan.ac.kr