

논문 2020-15-18

# 무게-가변형 드론을 위한 동역학 기반 시뮬레이터 개발

## (Development of Simulator for Weight-Variable Type Drone Base on Kinetics)

백 금 봉, 김 정 환, 김 식\*

(Jin Feng Bai, Jung Hwan Kim, Shik Kim)

**Abstract** : Regarding previously-developed drone simulators, it was easy to check their flight stability or controlling functions based on the condition that their weight was fixed from the design. However, the drone is largely classified into two types that is the one with the fixed weight whose purpose is recording video with camera and racing and another is whole weight-variable during flight with loading the articles for delivery and spraying pesticide though the weight of airframe is fixed. The purpose of this thesis is to analyze the structure of drone and its flight principle, suggest dynamics-model-based simulator that is capable of simulating weight-variable drone and develop the simulator that can be used for designing main control board, motor and transmission along the application of weight-variable drone. Weight-variable simulator was developed by using various calculation to apply flying method of drone to the simulator. First, ground coordinate system and airframe-fixing coordinate system were established and switching matrix of those two coordinates were made. Then, dynamics model of drone was established using the law of Newton and moment balance principle. Dynamics model was established in Simulink platform and simulation experiment was carried out by changing the weight of drone. In order to evaluate the validity of developed weight-variable simulator, it was compared to the results of clean flight public simulator against existing weight-fixed drone. Lastly, simulation test was performed with the developed weight-variable simulation by changing the weight of drone. It was found out that dynamics model controlled various flying positions of drone well from simulation and the possibility of securing the optimum condition of weight-variable drone that has flying stability and easiness of controlling.

**Keywords** : Drone, Simulink, Kinetics, Simulator, Weight variable

### I. 서 론

드론은 통신 기술의 발전과 함께 발전되었다. 드론은 기동성이 높고 출입이 어려운 산간 지역 등 정찰이 가능하며 위치 추적 등 다양한 방법으로 응

용 개발되고 있다 [1].

하지만 한 대의 드론을 구매하여 농업용, 배달용, 정찰용 및 레이싱 등 다양한 활용이 불가능하므로 사용자가 활용하는 산업에 맞춰 드론을 구매해야 한다.

또한, 조립이 가능한 드론을 구매하더라도 다양하게 활용하기 위해서는 분해하여 다시 용도에 맞게 재조립한 뒤, 각 부품의 설정값을 다시 분석하여 설정해야 하며, 조립 후 설정된 값이 사용자의 요구에 맞게 탑재가 되었는지 확인하기가 어렵다.

비용에서도 레이싱용 드론의 경우 부품에 따라 중저가로 조립할 수 있지만, 산업용 드론 판매 업체 중 가장 큰 회사인 DJI의 농업용 방제 드론은 고가의 가격을 형성하고 있다.

\*Corresponding Author (shikm@semyung.co.kr)  
Received: May 7, 2020, Revised: May 25, 2020,  
Accepted: May 29, 2020.

J.F. Bai: Semyung University (Sc.D. Student)

J.H. Kim: Semyung University (Sc.D)

S. Kim: Semyung University (Prof.)

※ 본 논문은 2017년도 세명대학교 교내학술연구비 지원에 의해 수행된 연구임.

$$R(\phi, \theta, \psi) = R_x(\phi) R_y(\theta) R_z(\psi) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\phi & -\sin\phi \\ 0 & \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 & \sin\theta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\theta & 0 & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & 0 \\ \sin\psi & \cos\psi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta\cos\psi & -\cos\theta\sin\psi & \sin\theta \\ \cos\phi\sin\psi + \sin\phi\sin\theta\cos\psi & \cos\phi\cos\psi - \sin\phi\sin\theta\sin\psi - \sin\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\psi - \cos\phi\sin\theta\cos\psi \\ \sin\phi\cos\psi + \cos\phi\sin\theta\sin\psi & \cos\phi\cos\theta & \sin\phi\sin\theta\cos\psi \end{bmatrix} \quad (1)$$

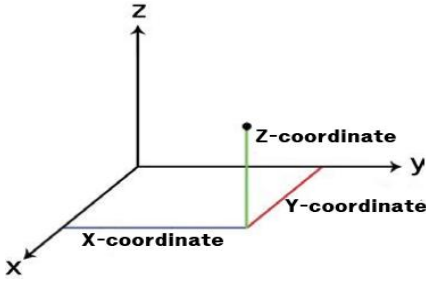


그림 1. 3차원 좌표축

Fig. 1 3-dimensions axis of coordinates

농업용 방제 드론의 가격이 비싼 이유는 농약 살포 전, 중, 후의 무게가 가변적이기 때문에 설정이 까다로우며 전문가를 통해 드론을 설정해야 하기 때문이다.

그리고 기존의 드론 부품의 설정을 변경하는 대표적인 시뮬레이터는 Cleanflight와 Betaflight이다. 하지만 기존 시뮬레이터의 단점은 레이싱, 촬영용 및 취미용 드론과 같이 무게가 고정된 드론에 최적화가 되어있고 사용 용도가 바뀔 때마다 변속기와 모터를 변경한 뒤 부품에 맞게 재설정을 해야 하며, 무게-가변형 드론의 경우 설정이 불가능하다 [2].

그래서 본 논문은 한 대의 드론으로 촬영, 레이싱, 택배 등 드론의 무게가 고정된 분야나 농업용 방제, 산불 진압용 등 무게가 가변하는 분야 등 다양한 용도로 활용이 가능하도록 부품의 설정값을 자동으로 구하고 설정값 변경이 가능한 시뮬레이터를 개발하였다. 그래서 시뮬레이터를 통해 부품의 교체나 해체를 하지 않고 사용자 요구에 맞는 드론으로 설정이 가능한 시뮬레이터를 제안한다.

실험은 촬영용, 택배용 같은 무게-고정형 드론과 농업 방제용 같은 무게-가변형 드론으로 나누어 진행하였다.

드론의 다양한 동역학적 움직임을 파악하여 시뮬레이터에 탑재하기 위해 수식을 통해 분석한 뒤 이를 활용하여 분야에 맞는 드론 부품들의 설정값을 구할 수 있다.

시뮬레이터는 Simulink를 이용하여 개발하였으며 드론의 무게에 따라 모터가 최적의 성능을 나타낼 수 있는 값을 분석하여 자동으로 설정할 수 있게 하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서 동역학적 모델의 구축을 위한 연구를 설명하고 드론의 비행에 대한 수식을 설명한다. 3장에서는 테스트 베드용 드론을 설명하며 4장에서 시뮬레이터를 실험하고 결과를 기술한다. 5장에서 향후 연구 계획을 제시하며 결론을 맺는다.

## II. 동역학적 모델의 구축을 위한 연구

드론의 4개의 모터와 변속기를 사용자의 요구에 맞게 설정값을 변경하고 제어하기 위해 드론의 비행과 관련된 다양한 수식을 연구하였다.

드론의 비행은 헬리콥터와 움직임이 동일하다. 그래서 기본적인 드론의 비행은 그림 1과 같이 3차원 +X, +Y, +Z로 정의한다.

비행하는 자세는 X→Y→Z 순서로 적용해 회전 행렬을 만들어 낸다. 기체 고정 좌표계를 지면 좌표계로 변환시키는 전환 행렬은  $R(\phi, \theta, \psi)$  이다.  $R(\phi, \theta, \psi)$  은 수식 1을 통해 구한다 [3].

수식 1에서  $\phi$ 는 드론의 X축을 기준으로 전후 방향으로 비행하는 roll을 의미하며,  $\theta$ 는 Y축을 기준으로 좌우 방향으로 회전하는 pitch를 의미하며,  $\psi$ 는 Z축을 기준으로 수직으로 비행하는 yaw를 의미하며 그림 2와 같다.

$R_x(\phi)$ ,  $R_y(\theta)$ ,  $R_z(\psi)$ 은 각각 드론의 X, Y, Z축을 중심으로 회전할 때 드론의 고정 좌표계를 지면 좌표계로 전환하는 행렬이며 드론의 기본적인 비행을 의미한다.

### 1. 선운동 관련 연구

드론의 양력은 4개의 날개가 회전하면서 생긴다. 양력은  $F_T$ 는 기체 고정 좌표계에서 +Z 축의 방향이다. 양력  $F_T$ 는 수식 2를 사용한다 [4].

$$F_T = \left[ 0 \ 0 \ \sum_{i=1}^4 k\omega_i^2 \right]^T, \quad (2)$$

$$F_T^E = R(\phi, \theta, \psi) F_T = \sum_{i=1}^4 k\omega_i^2 \begin{bmatrix} \sin\theta \\ -\sin\phi\cos\theta \\ \cos\phi\cos\theta \end{bmatrix}. \quad (3)$$

수식 2에서  $k$ 은 양력 계수이며 ( $i=1,2,3,4$ )는 날개  $i$ 가 회전하는 속도이다. 지면의 좌표계에서의 양력  $F_T^E$ 는 수식 3을 사용한다. 지면 좌표계에서 드론의 중력  $F_G^E$ 은 수식 4를 사용한다. 수식 4에서 -는 중력의 방향이 +Z축 방향과 정반대 방향을 표시한다. 지면 좌표계에서 공기 저항력  $F_f^E$ 는 수식 5를 사용한다.

$$F_G^E = [0 \ 0 \ -mg]^T, \quad (4)$$

$$F_f^E = [-k_x \dot{x} \ -k_y \dot{y} \ -k_z \dot{z}]^T, \quad (5)$$

$$\sum F = m \frac{dV}{dt} = ma. \quad (6)$$

수식 5에서  $k_x, k_y, k_z$ 는 각각 지면 좌표계에서 X축, Y축, Z축의 저항력 계수이며,  $\dot{x}, \dot{y}, \dot{z}$ 는 각각 X축, Y축, Z축의 선속도이다. -는 저항력의 방향이 +Z축 방향과 반대 방향으로 표시한다.

드론의 모든 힘의 합은  $F_T^E, F_G^E$  및  $F_f^E$ 의 벡터 합이며 Newton의 제2 법칙을 활용한 수식 6으로 확인할 수 있다.

## 2. 모멘트 관련 연구

모터는 기본적으로 회전 운동을 하므로 물체를 회전시키려고 하는 힘의 작용인 모멘트 (moment)를 계산하고 적용해야 한다. 공기역학적 모멘트  $M_T$ 는 수식 7을 사용한다 [5].

수식 7에서  $k$ 는 모터와 프로펠러가 회전할 때 주위의 유체를 밀어내어 생기는 반작용 현상인 추력을 나타내고  $d$ 는 모터와 프로펠러의 추력 계수와 저항 계수이며  $l$ 은 중앙에서부터 날개의 중심까지의 거리이다.  $\omega_i$  ( $i=1, 2, 3, 4$ )는 날개  $i$ 가 회전하는 각속도다. 공기저항 모멘트  $M_f$ 는 수식 8을 사용한다.

식 8에서  $c_x, c_y, c_z$ 는 각각 지면 좌표계에서 X축, Y축, Z축의 공기저항 모멘트 계수이며,  $p, q, r$ 은 각각 드론의 X축, Y축, Z축의 각속도다.

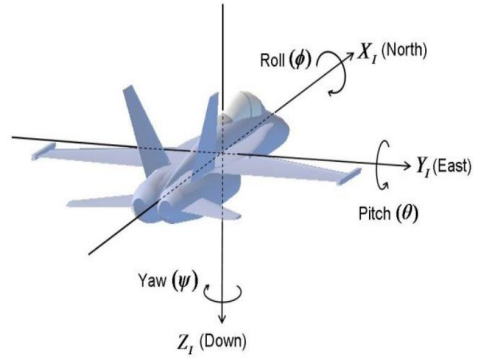


그림 2. X축, Y축, Z축

Fig. 2 X axis, Y axis, Z axis

$$M_T = \begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}l}{2} (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \\ \frac{\sqrt{2}l}{2} (F_1 - F_2 + F_3 - F_4) \\ d \frac{(-\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2)}{2} \end{bmatrix} = \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} \frac{\sqrt{2}lk}{2} (-\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) \\ \frac{\sqrt{2}lk}{2} (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) \\ d \frac{(-\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2)}{2} \end{bmatrix}, \quad (8)$$

$$M_f = [c_x p \ c_y q \ c_z r]^T,$$

회전하고 있는 모터를 회전축의 방향을 변경하도록 요구될 때 생기는 차이로 모멘트  $M_t$ 는 수식 9이며  $J_r$ 은 날개의 관성 모멘트이다.

$$M_t = \omega \times J_r \sum_{i=1}^4 \omega_i = \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} J_r q (-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ -J_r p (-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ 0 \end{bmatrix}.$$

드론의 모든 모멘트는  $M_T, M_f$  및  $M_t$ 의 벡터 합이다. Newton-Euler 방정식을 응용한 수식 10으로 확인할 수 있으며,  $I$ 는 X축, Y축, Z축의 회전 관성 모멘트 계수이다 [6].

$$\sum M = I\dot{\omega} + \omega \times I\omega, \quad (10)$$

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{1}{m} \left( k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \sin\theta - k_x \dot{x} \right), \\
\ddot{y} &= \frac{1}{m} \left( -k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \sin\phi \cos\theta - k_y \dot{y} \right), \\
\ddot{z} &= \frac{1}{m} \left( k \sum_{i=1}^4 \omega_i^2 \cos\phi \cos\theta - mg - k_z \dot{z} \right), \\
\dot{p} &= \frac{\sqrt{2}}{2I_x} lk (-\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2) + \frac{c_x p}{I_x} + \frac{J_r}{I_x} q (-\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) - \frac{(I_z - I_y)}{I_x} q r, \\
\dot{q} &= \frac{\sqrt{2}}{2I_y} lk (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2) + \frac{c_y q}{I_y},
\end{aligned} \tag{11}$$

$$\begin{aligned}
U_1 &= (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) = k(\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2), \\
U_2 &= \frac{\sqrt{2}}{2} l (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) = \frac{\sqrt{2}}{2} lk (-\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 + \omega_4^2), \\
U_3 &= \frac{\sqrt{2}}{2} l (F_1 - F_2 + F_3 - F_4) = \frac{\sqrt{2}}{2} lk (\omega_1^2 - \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2), \\
U_4 &= (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) = d(-\omega_1^2 + \omega_2^2 + \omega_3^2 - \omega_4^2),
\end{aligned} \tag{12}$$

$$\begin{aligned}
\ddot{x} &= \frac{U_1}{m} \sin\theta, \\
\ddot{y} &= -\frac{U_1}{m} \sin\phi \cos\theta, \\
\ddot{z} &= \frac{U_1}{m} \cos\phi \cos\theta - g, \\
\ddot{\phi} &= \frac{U_2}{I_x} - \frac{(I_z - I_y)}{I_x} \dot{\theta} \dot{\psi}, \\
\ddot{\theta} &= \frac{U_3}{I_y} - \frac{(I_x - I_z)}{I_y} \dot{\phi} \dot{\psi}, \\
\ddot{\psi} &= \frac{U_4}{I_z} - \frac{(I_y - I_x)}{I_z} \dot{\phi} \dot{\theta}.
\end{aligned} \tag{13}$$

### 3. 시스템의 동역학 모형

수식 6과 Newton-Euler 방정식 10을 사용하여 선운동 방정식과 각운동 방정식인 수식 11을 구한다.

$U_1, U_2, U_3, U_4$ 를 제어 시스템의 입력량으로 정의하여 네 개의 모터 RPM (revolution per minute, 분당 회전 수)을 제어한다.  $U_1, U_2, U_3, U_4$ 는 수식 12에 따라 동작하며 각 모터의 RPM에 따라 X축 rolling, Y축 pitching, Z축 yawing으로 드론이 비행한다. 지면 좌표계의 각속도는 기체 고정 좌표계의 각속도와 같다. 그래서 본 논문의 시뮬레이터 수학 모델은 수식 13으로 만들 수 있다. 이러한 수식들을 조합하여 다양한 방법으로 비행할 수 있는 드론의 설정값을 유추할 수 있다. 그래서 드론의 4개의 독립된 모터, 변속기, 자이로 센서 및 메인 컨트롤 보드 등을 사용자의 요구에 맞게 제어할 수 있는 시뮬레이터를 개발하고 실험하였다.

## III. 테스트 베드용 드론과 시뮬레이터 개발

### 1. 테스트 베드용 드론 개발

무게-고정형과 무게-가변형을 동시에 적용할 수 있는 드론을 제작하기 위해 테스트 베드용 드론은 레이싱용 드론 부품 중심으로 사용하여 조립하였다. 가장 중요한 모터는 군사, 방제등 산업용 모터를 제작하는 DUALSKY의 XM7015HD-11와 모터의 최대 성능을 활용하는데 필요한 변속기는 Tiger Motor의 Flame 80A를 사용하였다.

메인 컨트롤 보드는 시뮬레이터를 통해 설정이 가능한 Holybro의 Pixhawk 4 Mini를 사용하였으며, 조립한 테스트 베드용 드론은 그림 3과 같다.

드론의 자세 교정을 위한 각 모터 주변에 총 4개의 자이로 센서와 위치 추적을 위한 GPS 등 센서들을 추가로 탑재하였다.

### 2. 시뮬레이터 개발

시뮬레이터는 Simulink를 사용하여 개발하였다. 그림 4는 드론의 동역학적 모델의 구조도를 Simulink에 적용하기 전 간단하게 도식화한 것이다. 그림 4의 왼쪽 4개의 모터가 각각 작동할 때 드론의 움직임을 나타낸 그림 2의 X축, Y축, Z축을 출력으로 확인할 수 있다.

회로도를 기준으로 Simulink에 그림 5와 같이 설계를 하였다. 그림 5 (a)는 드론 시뮬레이터 설계의 일부이며, 그림 5 (b)는 설계를 완성한 후 드론의 형태가 시뮬레이터로 나타낸 것이다 [7, 8].



그림 3. 테스트 베드용 드론  
Fig. 3 Test bed drone

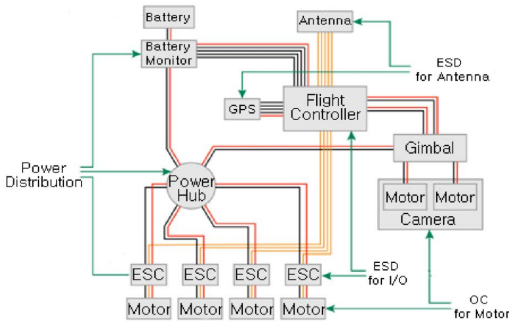
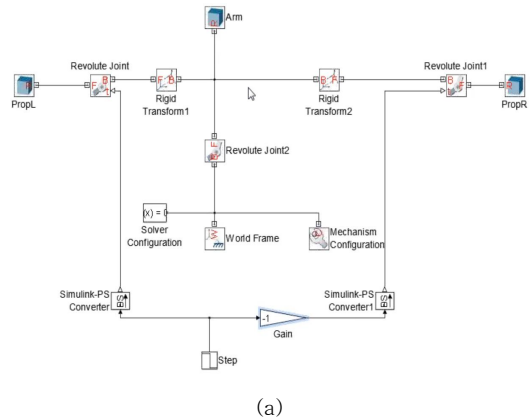


그림 4. 동역학적 모델을 위한 회로도  
Fig. 4 A circuit diagram for dynamic model

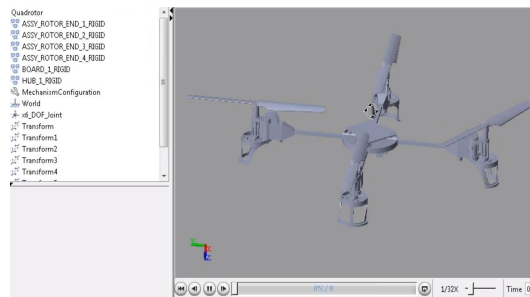
그림 5 (b)의 시뮬레이터에서 드론의 무게, 모터 RPM 등 조절이 가능하다. 각 부품의 설정값을 변경하였을 때, 모터 RPM이나 드론의 움직임을 모니터링이 가능하다. 모터에 부하가 생길 것으로 예측되면 사용자에게 경고를 준다. 이를 통해 자신에게 맞는 최적화된 설정값을 찾을 수 있으며 다양한 방법으로 드론을 활용할 수 있게 된다. 그리고 각 모터가 동작할 때 실제 드론이 어떻게 동작하는지 확인하기 위해 그림 6와 같이 드론의 움직임을 시뮬레이터에서 확인할 수 있는 기능을 오픈 소스인 Cleanflight의 기능 중 일부를 수정 보완한 뒤 탑재하였다 [9].

#### IV. 실험 및 결과

모든 드론 시뮬레이터에서 드론의 실제 속도는



(a)



(b)

그림 5. Simulink로 작성한 드론 설계도  
Fig. 5 A Design Plan for Drone in Simulink

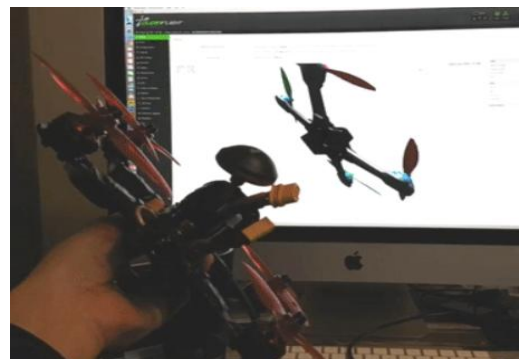


그림 6. 드론 자세 모니터링  
Fig. 6 Drone Position Monitoring

측정이 불가능하며, 모터의 최대 RPM을 측정하여 최대 속도를 추정하는 것만 가능하다. 그래서 모터의 성능을 확인하기 위해 회전하지 않는 구간부터 최대 RPM까지의 구간을 10단계로 나누어 측정한다.

드론과 시뮬레이터를 연결한 뒤 그림 5 (b)의

시뮬레이터에서 사용자가 드론의 사용 용도에 따른 설정을 하면 모터의 최대 RPM까지 도달하는 시간, 비행 형태 및 드론의 수평 유지를 측정할 수 있다. 최대 RPM까지 걸리는 시간을 측정하는 이유는 드론의 무게가 증가할수록 모터가 과부하를 일으킬 수 있으므로 시뮬레이터가 RPM 설정을 어떻게 하였는지 확인을 하고 드론의 비행이 가능한지 확인이 필요하기 때문이다.

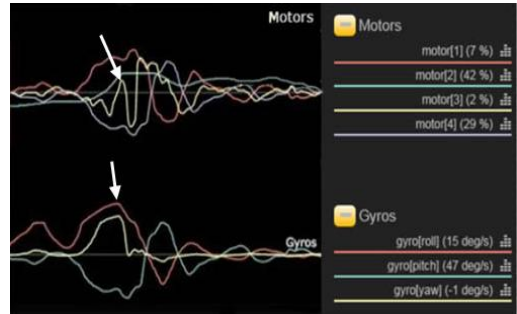
수평을 확인하는 실험은 4개의 모터가 독립적으로 RPM을 조절하며 비행할 수 있게 설정한 뒤, 각 모터 주변에 있는 자이로 센서가 수평을 잃을 것으로 판단되면 각 모터는 RPM을 조절하여 수평을 잡을 수 있게 하고 해당 수치를 저장하여 그 이상의 RPM이 나오지 않도록 설정되게 하였다. 드론의 질량, 회전 관성, 모멘트 계수 등을 고려하여 촬영용, 택배용과 같은 무게-고정형과 농업용 방제와 같은 무게-가변형으로 나누어 시뮬레이터로 확인하고 실제 드론에 탑재하여 결과를 확인하였다. 택배용을 무게-고정형으로 분류한 이유는 적재물을 탑재할 경우 무게가 고정된 상태에서 비행을 하기 때문이다. 하지만 적재물의 무게에 따라 드론의 설정값이 달라야 하므로 1Kg, 500g으로 실험을 진행하고 결과를 확인하였다. 실험은 무게-고정형, 무게-가변형 드론의 본체가 수평으로 비행할 수 있는 최적의 RPM을 찾은 뒤 유지할 수 있도록 설정하였다. 그리고 무게-가변형 드론은 농업용 방제 드론을 가정하였기 때문에 1Kg 증가한 상태에서 10초에 100g 씩 무게가 감소하는 것으로 설정하였다.

1. 시뮬레이터의 정상 동작 여부 확인

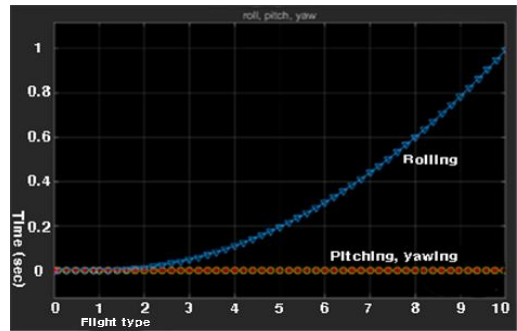
논문의 시뮬레이터가 정상적인 동작 여부를 확인하기 위해 테스트 베드용 드론을 레이싱 드론으로 설정하여 모든 부품이 최대 성능을 나타낼 수 있도록 설계하였다.

그림 7 (a)는 드론이 상승하면서 최대 RPM과 최대 RPM까지 도달하는 시간을 측정할 그래프이다. x축은 Rolling, Pitching, Yawing을 최대 10단계로 나누어 확인하는 것이며, y축은 초 단위의 시간을 의미하며 레이싱 드론 설정을 통한 성능은 최대 RPM까지 출력하는 데까지 걸리는 시간이 1초인 것을 확인할 수 있다. Rolling만 증가하는 이유는 시뮬레이터에서 4개의 모터를 동일한 RPM으로 동작시킬 경우 수직 상승만 하기 때문이다.

그림 7 (b)는 4개의 모터가 각각 다른 RPM으로 출력하는 동시에 자이로 센서가 본체의 움직임을 측정할 것이다.



(a)



(b)

그림 7. 작동 확인을 위한 테스트  
Fig. 7 Test for Operational Verification

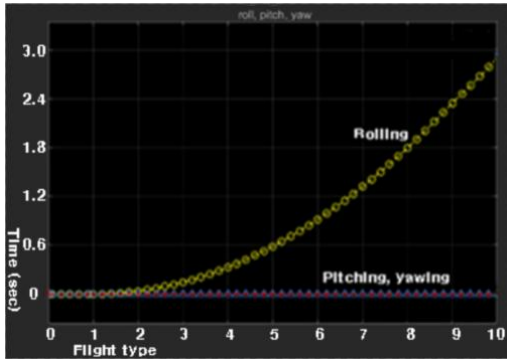
화살표로 나타낸 곳을 확인하면 한 모터가 최대 RPM으로 출력했을 때 자이로 센서 중 하나가 피크치로 확인되는 순간 반대쪽 모터가 순간적으로 출력을 높여 드론의 수평을 잡는 것을 확인할 수 있다.

2. 무게-고정형 드론의 실험 및 결과

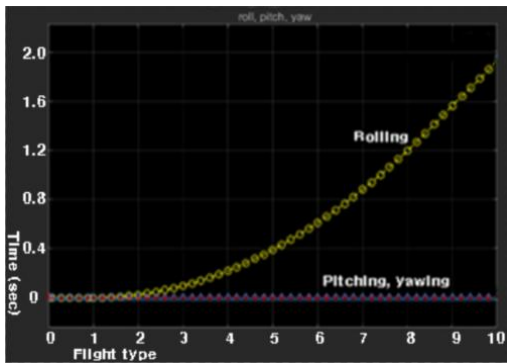
시뮬레이터가 정상적인 동작하는 것을 확인한 후 무게-고정형 드론 설정의 실험을 진행하였다.

그림 8 (a) 그래프는 적재함의 무게를 1Kg으로 설정한 결과이며, 그림 8 (b) 그래프는 500g으로 설정한 결과다. 수직 비행 시 최대 RPM까지 도달하는 시간을 확인했을 때 1Kg 증가한 드론은 약 3초로 측정되었고 500g 증가한 드론은 약 2초의 시간이 소요되었다. 최대 RPM까지 도달하는 시간이 늦어질수록 드론의 무게가 무거워지더라도 수평을 유지한 상태로 비행이 하기가 쉬워지는 동시에 비행 속도도 느려지므로 좀 더 안정적인 비행이 가능하다.

그림 9는 비행 중인 드론이 수평을 유지하며 안정적인 비행을 하는지 확인하기 위해 각 모터의



(a)



(b)

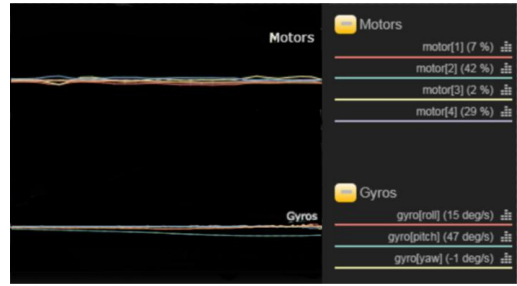
그림 8. 무게-고정형 드론 데이터 측정 1  
Fig. 8 Fixed-Weight Type Drone Data Measurement 1

RPM과 각 자이로 센서의 변화를 측정한 결과이다. 1Kg 증가한 드론의 경우 수평을 유지하기 위해 각 모터의 RPM이 조금씩 변화되는 것을 그림 9 (a)에서 확인할 수 있다. 그리고 그림 9 (b)와 같이 500g 증가한 드론은 1Kg 증가한 드론보다 모터의 RPM이 큰 변화가 없이 비행하며 수평을 잡는 것을 확인할 수 있다. 무게가 가벼울수록 드론의 수평을 잡기 쉽고 모터 RPM의 변화가 적은 것을 확인할 수 있었다.

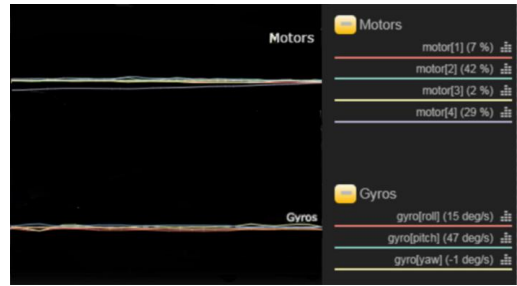
### 3. 무게-가변형 드론의 실험 및 결과

무게-가변형 드론은 농업용 방제나 소방용 드론을 모델로 했기 때문에 최초 1Kg이 더 추가된 상태에서 1초에 10g씩 무게가 가벼워지게 설정하였다.

그림 10 (a)와 같이 최대 RPM까지 도달하는 시



(a)



(b)

그림 9. 무게-고정형 드론 데이터 측정 2  
Fig. 9 Fixed-Weight Type Drone Data Measurement 2

간은 약 2.8초로 무게-고정형 드론 중 1Kg을 증가한 그림 9 (a)와 비슷한 결과를 확인할 수 있다.

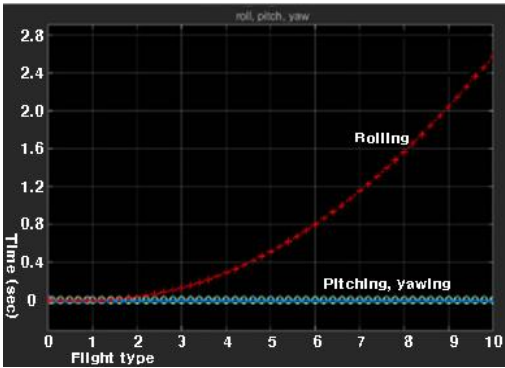
하지만 y축의 시간 단위를 살펴보면 무게-가변형 드론이 좀 더 세분화되었다. 무게-가변형의 경우 시간에 따라 드론의 중량이 서서히 줄어들기 때문에 동일한 RPM을 유지할 경우 드론이 사용자가 원하는 방향으로 비행은 하지만 고도가 서서히 상승하게 된다. 그러므로 중량이 줄어드는 만큼 모터의 RPM도 그림 10 (b)의 모터 그래프와 같이 일정한 패턴으로 감소하는 것을 확인할 수 있다.

무게-고정형 드론에 비해 모터의 RPM의 변화가 변동이 심한 이유는 비행 중 무게가 줄어들면서 생길 수 있는 본체의 흔들림을 잡기 위함이다.

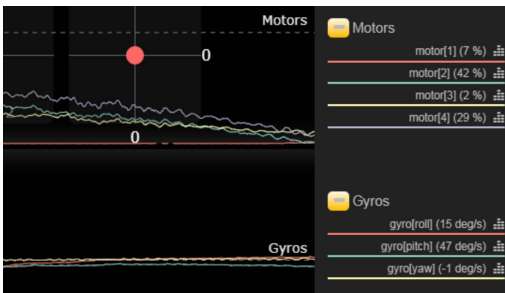
그림 10 (b)의 아래 그래프인 자이로 센서 그래프가 큰 변화 없이 직선을 유지하는 것은 각 모터가 RPM을 조절하면서 본체가 수평으로 비행을 하는 것이라 판단할 수 있다.

## V. 결론

기존의 시뮬레이터는 각 부품들의 정상적인 동작 여부 확인, 부품과 메인 컨트롤 보드의 싱크로



(a)



(b)

그림 10. 무게-고정형 드론 데이터 측정  
 Fig. 10 Weight-Variable Type Drone Data Measurement

율을 확인하여 조절하는 기능, 모터의 최대 RPM 조절이 가능하지만 무게-고정형 드론에 최적화되어 있다. 그래서 무게-가변형 드론에 대한 시뮬레이션은 불가능하거나 적용하기에 어려움이 있다.

본 논문은 비행 중 적재물의 무게가 변하는 드론을 위한 무게-가변형 드론의 시뮬레이터를 개발하였다. 드론의 4개의 독립된 모터, 변속기, 자이로 센서 및 메인 컨트롤 보드 등 사용자의 요구에 맞게 제어할 수 있도록 최적치와 임계치를 사전에 확인이 가능하며, 비행의 안정성과 조정의 용이성을 위한 시뮬레이터를 개발하고 실험하였다.

기존의 무게-고정형 시뮬레이터의 단점을 보완하기 위해 드론의 비행과 관련된 움직임을 동역학적 모델로써 연구하고 최대 RPM, 무게에 따른 RPM, 비행 중 드론의 수평 상태 유지 등 다양한 조건을 만족할 수 있는 기능을 개발하였다. 또한, 다양한 수식을 활용하여 드론의 비행 방식을 연구하여 시뮬레이터에 적용하였다. 우선 지면 좌표계와 기체 고정 좌표계를 구축하고 두 좌표계의 전환

행렬을 만들었다. 그리고 Newton의 법칙과 모멘트 평형 원리를 이용하여 드론의 동역학적 모델을 구축한다.

마지막으로 Simulink 플랫폼에서 동역학적 모델을 구축하고 드론 무게를 변화시켜 시뮬레이션 실험을 하였다. 개발된 무게-가변형 시뮬레이터의 타당성을 확인하기 위해서 기존의 무게-고정형 드론에 대한 Cleanflight 공개 시뮬레이터의 결과와 비교하였다. 마지막으로 기존의 무게-고정형 드론을 무게-가변형 드론으로 변경하여 사용할 수 있도록 시뮬레이터를 사용하여 실험하였다.

실험을 통해 기존에 사용했던 무게-고정형 드론을 농업용 방제, 소방용 드론과 같이 무게-가변형 드론으로 설정이 가능한 것을 확인하였다. 그리고 그래프나 수치를 직관적으로 개발하여 초보자도 쉽게 설정 후 시뮬레이터와 드론의 설정을 동기화할 수 있다.

향후, 실제 드론을 운용하기 전 가상 현실에서 자신의 드론과 동일한 사양으로 연습 비행을 할 수 있는 환경을 VR과 같은 그래픽 작업을 통해 시뮬레이터에서 비행시킬 수 있는 기능을 추가하는 연구를 진행 중이다. 또한, 현재 본 논문은 모터가 4개인 쿼드콥터만 실험하였지만 향후 모터가 6개, 8개를 가진 멀티콥터도 적용할 수 있는 시뮬레이터를 개발할 예정이다.

References

[1] Jung hwan Kim, Shik Kim, "Development of a Pixel-based Area Measurement Program Using Drone and Camera Module," IEMEK J. Embed. Sys. Appl., Vol. 14, No. 3, pp. 157-163, 2019.

[2] Z. Cheng, R. West, C. Einstein, "End-to-End Analysis and Design of a Drone Flight Controller," IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, Vol. 37, No. 11, pp. 2404-2415, 2018.

[3] P. Neumann, M. Bartholmai, J. H. Schiller, B. Wiggerich, M. Manolov, "Micro-drone for the Characterization and Self-optimizing Search of Hazardous Gaseous Substance Sources: A New Approach to Determine Wind Speed and Direction," IEEE International Workshop on



- Robotic and Sensors Environments, pp. 1-6, 2010.
- [4] M. Di Luca, S. Mintchev, G. Heitz, F. Noca, D. Floreano, "Bioinspired Morphing Wings for Extended Flight Envelope and Roll Control of Small Drones," *Interface Focus*, Vol. 7, No. 1, pp. 20160092, 2017.
- [5] Yanchao Liu, "An Optimization-Driven Dynamic Vehicle Routing Algorithm for On-Demand Meal Delivery Using Drones," *Computers & Operations Research*, Vol. 111, pp. 1-20, 2019.
- [6] Aminurrashid Noordin, Mohd Ariffanan Mohd Basri, Zaharuddin Mohamed, Amar Faiz Zainal Abidin, "Modelling and PSO Fine-Tuned PID Control of Quadrotor UAV," *Int. J. Adv. Sci. Eng. Inf. Technol.*, Vol. 7, No. 4, pp. 1367-1373, 2017.
- [7] García M, Viguria A, Heredia G, Ollero A, "Minimal-Time Trajectories for Interception of Malicious Drones in Constrained Environments," *Computer Vision Systems ICVS 2019, Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 11754, pp. 734-743, 2019.
- [8] Moon G. Joo, Min J. Kim, Seol B. Bae, Woon-Kyung Baek, Kyoung Nam Ha, "A Way-Point Tracking of Hovering AUV by PID Control," *IEMEK J. Embed. Sys. Appl.*, Vol. 10, No. 4, pp. 257-264, 2015
- [9] P. A. Samara, G. N. Fouskitakis, J. S. Sakellariou and S. D. Fassois, "Aircraft Angle-of-Attack Virtual Sensor Design Via a Functional Pooling Narx Methodology," *European Control Conference (ECC)*, pp. 1816-1821, 2003

#### Jin Feng Bai (백 금 봉)



She received the B.S.degree in Electronic information from Dalian Minzu University and M.S. degree in Communication and information system from

Hebei University.

Email: 63360437@qq.com

#### Junghwan Kim (김 정 환)



He received the B.S. and M.S. degree and Ph.D in Information and Com- munication system from Semyung University.

His research interests include embedded system.

Email: jhwem82@gmail.com

#### Shik Kim (김 식)



He received B.E degree in Dept. of Electronics, Kyungbuk Univ, in 1979 and M.S degree in Dept of information and com- munication Okayama

prefectural University in 2004. He was a senior researcher in Agency of Defence Development (ADD) in Korea and a researcher staff in Texas Transportation Institute (TTI) in Texas, USA. He is currently a full professor in the school of information and communication in Semyung university. His research interest the embedded platform, the convergence of IT with automobile and drone

Email: shikm@semyung.ac.kr