Technical Paper

Journal of Aerospace System Engineering
Vol.15, No.3, pp.99-104 (2021)

EISSN 2508-7150
http://dx.doi.org/10.20910/JASE.2021.15.3.99

멀티콥터 드론 적용을 위한 바람 센서의 특성 실험

진재현[1,†]

[1]국립순천대학교 우주항공공학전공

Tests of Characteristics of Wind Sensors for Multicopter Drone Uses

Jaehyun Jin[1,†]

[1]Department of Aerospace Engineering/Center for Aerospace Engineering, Sunchon National University

Abstract

The characteristics of wind sensors were experimentally analyzed and compared for purposes of application in multicopter type drones. For rotating wind sensors, the dynamics effect causes measurement errors, while manufacturing errors and signal processing errors were found to constitute significant errors in ultrasonic sensors. In the ultrasonic sensor, the errors decrease as the distance of the transducer increases. These characteristics were experimentally confirmed, and it was established that ultrasonic sensors capable of outputting voltage or data of 10 Hz or more are suitable for use in multicopters.

초 록

멀터콥터형 드론에 적용할 목적으로 바람 센서의 특성을 분석하고 실험을 통하여 비교하였다. 회전식 풍속계의 경우 동역학 효과가 측정 오차를 만들며, 초음파식 센서는 제작 오차와 신호처리 오차가 주요한 것으로 나타났다. 초음파식 센서는 트랜스듀서의 거리가 멀수록 오차가 줄어든다. 실험을 통하여 이러한 특성들을 확인하였으며, 멀티콥터에는 전압 출력 혹은 10 hz 이상의 데이터 출력이 가능한 초음파식 센서가 적합하다고 판단한다.

Key Words : Wind Sensor(바람 센서), Ultrasonic Wind Sensros(초음파 바람 센서), Multicopter Uses(멀티콥터 적용), Sensor Test(센서 실험)

1. 서 론

바람은 항공기의 비행에 지대한 영향을 미치는 요소여서[1], 바람을 정확하게 파악하는 것은 매우 중요하다. 고정익기는 피토(pitot) 센서로 측정하지만, 피토 센서 없이 바람을 추정하는 사례도 있다[2,3]. 멀티콥터 형태의 무인기는 비행 속도가 낮기 때문에 바람에 더욱 민감하다. Waslander 등은 쿼드콥터의 자세제어 견실성을 위하여 바람을 추정하고 이를 보상하는 방법을 제안하였다[4]. Dong 등은 외란 관측기 기반의 제어기를 이용하여 외란(바람의 영향)을 제거하는 기법을 제시하였는데[5], 바람의 모델 없이 외란의 영향을 추정 및 제거한다. Ding 등도 바람을 외란으로 고려하고, 이의 영향을 제거하는 강인제어 기법을 제시하였는데[6], 제어기는 실시간으로 외란의 영향을 추정하고 제거하는 구조이다. Tomić 등은 멀티콥터 제어정보를 이용하여 바람을 추정하는 방법을 제안하였는데, 항력이나 프로펠러에 소요되는 동력을 이용하여 추정하였다[7]. Palomaki 등은 소형 멀티콥터 응용에서, 초음파식 바람 센서를 장착하여 측정하는 방안을 제시

Received: Jan. 05, 2021 Revised: Feb. 18, 2021 Accepted: Feb. 22, 2021
† Corresponding Author
Tel: +82-61-750-3827, E-mail: donworry@scnu.ac.kr
Ⓒ The Society for Aerospace System Engineering

하였다[8].

앞으로 멀터콥터의 응용사례가 많아지면서, 내풍성이 중요한 성능이 될 것이며, 추정보다는 측정하여 대응하는 것이 정확하고 신속한 방법이라고 판단한다. 그래서 본 논문에서는, 바람 측정 기반의 자세제어를 위한 선행연구로, 바람 센서를 분석하고 실험한 내용을 제시한다. 바람 센서로 많이 사용되는 것은 기계식과 초음파 방식이 있으며, 최근에 초음파 방식을 많이 사용하고 있는데, 기상정보 혹은 풍력발전을 위한 센서는 무겁고 비싸다[9]. 국내에서 최근에서야 초음파 센서에 대한 연구가 진행되고 있다[10-12].

2장에서는 센서의 종류와 이론적 분석을 제시하고, 3장에서는 실험에 사용한 4종의 센서, 실험 구성에 대해서 설명하였고, 실험 결과 및 결과에 대한 논의를 기술하였다. 4장은 이론적으로 분석한 내용과 실험한 결과를 종합하였다.

2. 센서의 종류와 특성 분석

2.1 기계식 센서

바람 센서는 기계식과 초음파식으로 구분할 수 있다. 기계식은 풍향과 풍속을 독립적으로 측정하는데, Fig. 1은 다양한 기계식 센서를 보여준다.

Fig. 1 Mechanical Type Wind Sensors

풍속 측정은 컵(cup) 형과 베인(vane) 형으로 구분되며, 압력차이 혹은 모멘텀 전달에 의해 회전하는 코어 로터의 각속도를 측정하는 방식이다. 풍향 측정은 windcock처럼 수직 꼬리(vertical tale)의 공력 안정성을 이용하는 방식이다. 일체형도 있지만, 내부적으로 풍속과 풍향은 독립적으로 측정한다.

풍속과 풍향 측정에 대한 방정식은 식 (1),(2)와 같이 쓸 수 있다[13,14]. 변수는 Fig. 2를 참고하며, ω와 ψ는 로터 속도와 풍향을 나타낸다.

$$I_r\dot{\omega} + c_r\omega = \tau \quad (1)$$

$$I_t\ddot{\psi} + c_t\dot{\psi} + k_t\psi = k_t\psi_W \quad (2)$$

I_r, I_t는 로터와 테일의 질량 관성모멘트이고, c_r, c_t는 감쇠계수, k_t는 복원력 계수, τ는 회전 모멘트이다. 컵 형상의 항력계수는 Fig. 2와 같이 방향에 따라 차이가 난다. 편의상 컵이 2개인 것을 기준한다[13].

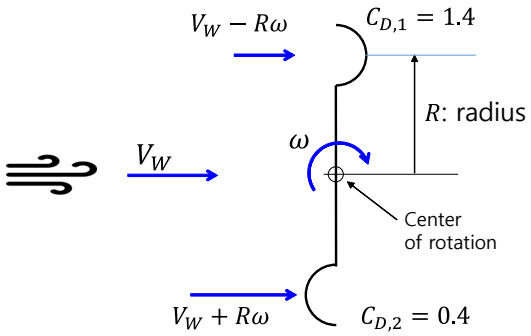

Fig. 2 Two-cup Type Configuration

두 컵의 항력에 의한 회전 모멘트는 식 (3)과 같다. 여기서 ρ, S는 각각 공기밀도와 컵의 기준면적이다.

$$\tau = R \times \frac{1}{2}\rho S\left[C_{D,1}(V_W - R\omega)^2 - C_{D,2}(V_W + R\omega)^2\right] \quad (3)$$

실제로는 회전에 따라 항력계수와 힘의 방향도 변하지만, 해석을 단순하게 하였다. 로터의 각속도가 점점 증가하면서, 어느 순간에 일정한 속도에 도달한다. 그러면 이때 모멘트는 영이 되면서 다음이 성립한다.

$$C_{D,1}(V_W - R\omega)^2 = C_{D,2}(V_W + R\omega)^2 \quad (4)$$

여기에서 다음의 최종 관계식을 유도할 수 있다[13].

$$\omega = \gamma\frac{V_W}{R}, \quad \gamma = \frac{k-1}{k+1}, \quad k = \sqrt{\frac{C_{D,1}}{C_{D,2}}} \quad (5)$$

식 (1)의 선형화된 방정식은 식 (6)과 같다. 상세한 과정은 부록에 제시하였다.

$$I_r\Delta\dot{\omega} + (c_r + B)\Delta\omega = A\Delta V_W \quad (6)$$

$$A \simeq 0.5R\rho S V_{W0}, \quad B \simeq 1.5R^2\rho S V_{W0}$$

공기력에 의하여 댐핑이 증가하는 것처럼 보이지만, 실제로는 식 (3)의 모멘트에 이러한 요소가 내재되어 있다. 댐핑이 증가하면 시상수가 증가하고, 결국 정상

상태(평형상태)에 도달하는 시간이 더 오래 걸린다. 이것은 센서로서는 좋은 특성이 아니다.

2.2 초음파식 센서

초음파식 센서는 매질속에서 음파의 전달원리를 이용하는 것으로, 풍속과 풍향을 동시에 측정할 수 있으며, 움직이는 부품이 없어서 유지보수 측면에서 장점이 있다[10]. 초음파식 센서는 모든 방향에서 불어오는 바람을 측정할 수 있으며, 트랜스듀서의 배치에 따라서 3차원 측정도 가능하다. Fig. 3은 초음파식 센서의 사례이다.

Fig. 3 Ultrasonic Type Wind Sensors

Figure 4처럼 초음파 트랜스듀서(TD) 한 쌍을 배치하고, 한쪽에서 초음파를 발사하고 다른 쪽에서 받으며 걸린 시간을 측정한다. 반대로도 측정한다.

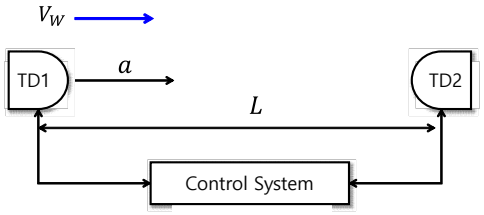

Fig. 4 Principle of Ultrasonic Sensor

이렇게 측정한 시간은 각 트랜스듀서에서 보낸 초음파가 다른 트랜스듀서에 도달하는데 걸린 시간이며, 다음과 같다.

$$T_1 = \frac{L}{a + V_W}, \quad T_2 = \frac{L}{a - V_W} \tag{7}$$

이 식에서 V_W를 구할 수 있다.

$$V_W = \frac{L}{2}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \tag{8}$$

이 식에는 음속(a)은 제외되므로, 온도 변화에 민감한 음속을 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 트랜스듀서를 Fig. 5처럼 배치하면 2차원 유동을 측정할 수 있으며, 풍속과 풍향을 동시에 측정한다.

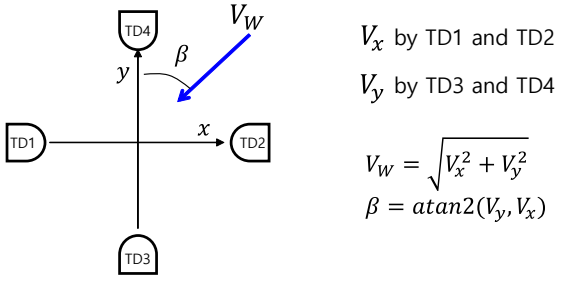

Fig. 5 2D Wind Measurement

거리 L의 오차(ΔL, 제작 오차)와 시간 T_1, T_2의 측정 오차(ΔT_C, 신호처리 오차)가 속도 측정 오차(ΔV_W)에 미치는 영향은 다음과 같다(부록 A2 참고).

$$\left|\frac{\Delta V_{W;1}}{V_W}\right| = \left|\frac{\Delta L}{L}\right|, \quad \left|\frac{\Delta V_{W;2}}{V_W}\right| \simeq 2\left|\frac{\Delta T_C}{L/a}\right| \tag{9}$$

예시로, L = 50 mm, a = 340 m/s, V_W = 3 m/s, ΔT_C = 10 μs, ΔL = 2 mm이면, 측정 오차는 $\Delta V_{W;1}$ = 0.12 m/s, $\Delta V_{W;2}$ = 0.41 m/s이다. ΔT_C에 의한 오차가 더 크며, 바람 속도에 따라 오차가 증가한다. 그리고 거리 L이 분모에 있기 때문에, 거리를 멀리하면 측정 오차가 줄어든다. 그러나 장치는 그만큼 커진다.

3. 센서 실험 및 결과 분석

3.1 실험용 센서

여기에서는, 다양한 센서를 실험하고 비교한 결과를 소개한다. Fig. 6은 사용한 센서를 보인 것이다. 이 센서들의 사양은 Table 1에 나타내었는데, 1번 센서는 기계식(3컵 형)이며, 나머지는 초음파식 센서이다[15].

Fig. 6 Used Sensors for Test

Table 1 Characteristics of Used Sensors

No	Type	Output	Weight (g)	Size (mm)
1	M/R	Voltage	1000	ϕ200×130
2	U	Voltage	680	ϕ140×160
3	U	RS232: 1 hz	280	ϕ82×108
4	U	RS232: 10 hz	50	91×91×52

M/R: mechanical/rotating, U: ultrasonic

3.2 실험 장치 구성

실험을 위하여 Fig. 7과 같이 구성하고 측정하였다. 실험실에서 선풍기를 이용하여 바람을 만들고, 센서 출력을 보이고, 데이터를 저장하여 후처리하였다. 일반 선풍기이기 때문에 일정한 바람은 만들지 못하고 계속 변동하는 바람이 만들어졌다. 실시간 모니터링 프로그램은 LabVIEW(2010 버전)를 이용하여 개발하였다. 센서 1, 2의 측정 주기는 20 msec이다.

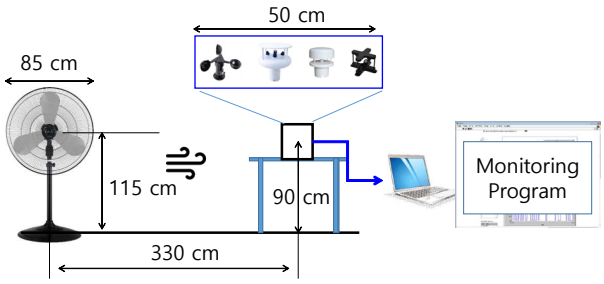

Fig. 7 Test System Layout

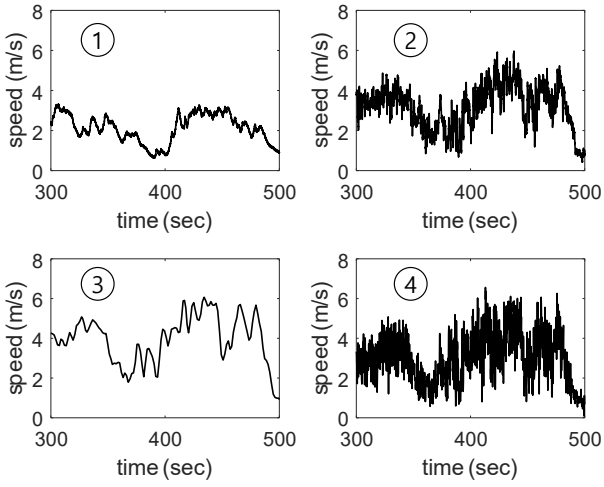

Fig. 8 Outputs of Sensors

3.3 실험 결과 분석

Figure 8는 센서 4개의 출력을 비교한 것이다. Fig. 9는 센서 1과 2의 출력을 비교한 것이다. 위 그림에서 보면 전체적인 추세는 비슷하지만, 차이가 나는 부분도 많다. 센서 1의 동적 특성이 영향을 미치고 있다. 아래는 1번 센서의 동적 특성을 보여주는 실험이다. 바람 속도가 빨리 바뀔 때, 1번 센서는 2번 센서보다 느리게 동작한다.

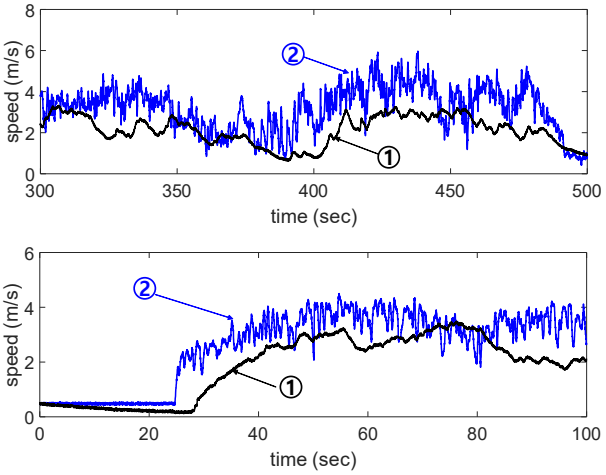

Fig. 9 Outputs of Sensor 1 and 2

Figure 10은 센서 2와 3의 출력을 비교한 것이다. 마찬가지로 전체적인 추세는 비슷한데, 2번 센서도 초음파식이어서 동특성 효과가 없다. 그러나 2번 센서의 출력과 시간적 차이가 있어 보이는데, 3번 센서의 출력은 1 hz 이기 때문이다.

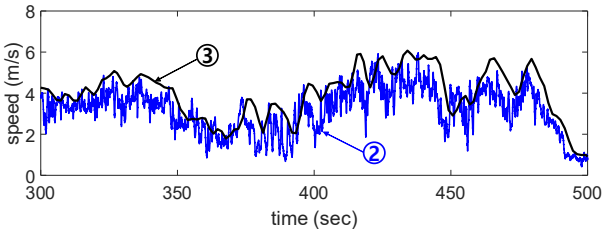

Fig. 10 Outputs of Sensor 2 and 3

Figure 11은 센서 2와 4의 출력을 비교한 것인데, 두 센서의 출력이 거의 일치한다. 그러나 센서 4의 변동이 큰데, 센서 4의 노이즈 때문인지, 원래 바람의 특

성인지는 추가적인 분석이 필요하다. 참고로 초음파 트랜스듀서의 길이는 L_2 = 60 mm, L_4 = 36 mm이다. 식 (9)에 의하면 2번 센서의 오차가 줄어들 여지가 크다.

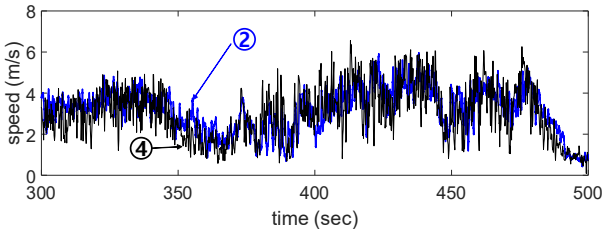

Fig. 11 Outputs of Sensor 2 and 4

3.4 실험 결과 논의

1번 센서(회전형 풍속계)는 저렴하고 출력 처리가 쉽지만, 회전 관성의 영향이 크다. 소형 멀티콥터에 적합하게 소형화해야 한다. 그리고 풍향계가 추가되어야 한다. 2번 센서는 지상용이라 부피가 크고 무겁지만, 출력은 처리하기 쉽고 변동도 작은 것이 장점이다. 다만 크기를 줄인다면 측정 정확도가 줄어들 수 있다(식 (9) 참고). 3번 센서는 작지만, 측정 주기가 너무 길어 자세 제어용으로는 부적합하다. 4번 센서는 작고 가볍고 다양한 정보를 출력하는데, 상대적으로 고가이며 출력 변동이 큰 편이다.

실내 공간에서 선풍기를 이용한 실험이라, 양질의 바람이 모든 센서에 균등하게 불지 않았을 것으로 추측한다. 더 유용한 결과를 얻기 위해서 실험하는 방법의 개선이 필요하다.

결 론

멀터콥터형 드론의 자세나 위치 유지 목적으로 여러 바람 센서의 특성을 분석하고 실험을 통하여 비교하였다. 기계식 센서는 동적 효과를 줄이도록 소형 · 경량화를 해야 하며, 초음파식 센서가 좀 더 적합하다. 그러나 초음파 센서의 크기를 줄이면 측정 오차는 클 수 있다. 바람의 순간 변화가 심하기 때문에 측정 주기는 1 hz 로는 부족하며, 최소한 10 hz 이상이어야 한다.

추후 연구로, 바람 센서를 멀티콥터에 탑재하고 자세제어와 연결하여 능동적으로 자세제어와 위치 유지하는 기법을 연구할 계획이다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No.2019-0-01770, 가상비행환경을 이용한 ADP/DL 기반 자율비행 멀티콥터 핵심기술개발).

부 록

A1. 회전형 풍속계의 선형 운동방정식 유도

상태 변수 섭동(perturbation)을 가정하는데, 하첨자 0은 평형상태에서의 변수값을 의미한다.

$$\omega = \omega_0 + \Delta\omega,\quad V_W = V_{W0} + \Delta V_W,\quad \tau = \tau_0 + \Delta\tau \tag{A1}$$

이를 이용하여 식 (1),(3),(4)를 정리한다.

$$\begin{aligned}\Delta\tau &= R\rho S\left[C_{D,1}(V_{W0} - R\omega_0)(\Delta V_W - R\Delta\omega)\right. \\ &\qquad \left. - C_{D,2}(V_{W0} + R\omega_0)(\Delta V_W + R\Delta\omega)\right] \\ &= A\Delta V_W - B\Delta\omega\end{aligned} \tag{A2}$$

$$A = R\rho S\left[C_{D,1}(V_{W0} - R\omega_0) - C_{D,2}(V_{W0} + R\omega_0)\right] \tag{A3}$$

$$B = R^2\rho S\left[C_{D,1}(V_{W0} - R\omega_0) + C_{D,2}(V_{W0} + R\omega_0)\right]$$

그러면 운동 방정식은 식 (A4)처럼 정리된다. 바람 속도의 변화(ΔV_W)에 따른 로터 각속도의 변화($\Delta\omega$)를 표현한다.

$$I_r\Delta\dot{\omega} + (c_r + B)\Delta\omega = A\Delta V_W \tag{A4}$$

Figure 2의 항력계수를 참고해서, 예시적으로 A와 B를 구해본다. $k = \sqrt{C_{D,1}/C_{D,2}} \simeq 1.87$로 할 때, $R\omega_0 \simeq 0.3\,V_{W0}$이 되며, A와 B는 다음처럼 쓸 수 있다.

$$A \simeq 0.5\,R\rho S V_{W0},\quad B \simeq 1.5\,R^2\rho S V_{W0} \tag{A5}$$

A2. 오차 관계식(민감도) 유도

식 (8)에서 L, V_W를 변수로 생각해서, 양변을 미분하면 다음과 같다.

$$\Delta V_W = \frac{\Delta L}{2}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right) \tag{A6}$$

이를 식 (8)로 나누면, 식 (9)의 첫 번째 식을 얻는다.

식 (7)에서 음속 a의 관계식을 구할 수 있다.

$$a = \frac{L}{2}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right) \tag{A7}$$

그리고 식 (8)에서 V_W, T_1, T_2를 변수로 생각해서, 양변을 미분한다. T_1, T_2는 미소변위 ΔT가 공통이다.

$$\begin{aligned} \Delta V_W &= -\frac{L}{2}\left(\frac{1}{T_1^2} - \frac{1}{T_2^2}\right)\Delta T \\ &= -\frac{L\Delta T}{2}\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right) \end{aligned} \tag{A8}$$

이를 식 (8)로 나누고, 식 (A7)을 이용하면, 식 (9)의 두 번째 식을 얻는다. 부호는 중요하지 않아서, 절대값으로 표현하였다.

References

[1] B. Wnag, D. Wang, Z. Ali, B. Ting, and H. Wang, "An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle," *Measurement and Control*, vol. 57, no. 7-8, pp. 731-739, 2019.

[2] J. Jin, et al., "Robust airspeed estimation of anunpowered gliding vehicle byusing multiple model Kalman filters," *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems (in Korean)*, vol. 15, no. 8, pp. 859-866, 2009.

[3] J. W. Langelaan, N. Alley, and J. Neidhoefer, "Wind field estimation for small unmanned aerial vehicles," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 34, no. 4, pp. 1016-1030, 2011.

[4] S. L. Waslander and C. Wang, "Wind disturbance estimation and rejection for quadrotor position control," *Proc. of AIAA Infotech@Aerospace Conference*, Seattle, Washington, US., April 2009, AIAA 2009-1983.

[5] W. Dong, G.-Y. Gu, X. Zhu, and H. Ding, "High-performance trajectory tracking control of a quadrotor with disturbance observer," *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 211, pp. 67-77, 2014.

[6] L. Ding and Z. Wang, "A robust control for an aerial robot quadrotor under wind gusts," *Journal of Robotics*, vol. 2018, Article ID: 5607362, Aug. 2018.

[7] T. Tomić, K. Schmid, P. Lutz, A. Mathers, and S. Haddadin, "The flying anemometer:unified estimation of wind velocity from aerodynamic power and wrenches," *Proc. of 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, Daejeon, pp. 1637-1644, 2016.

[8] R. Palomaki, et. al., "Wind estimation in the lower atmosphereusing multirotor aircraft," *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, vol. 34, no. 5, pp. 1183-1191, 2017.

[9] B. Jang, S. Lee, T. Cho, and Y. Kim, *Study of Measuring Upstream Wind Speed and Direction of Wind Turbine with Ultra-sonic Anemometer*, Technical Report of Korea Aerospace Research Institute, 2017.

[10] J. H. Kim, D. H. Park, K. Y. Kim, and Y. H. Yu, "A study on NMEA 2000 based two-dimensional ultrasonic anemometer," *The Journal of Korea Navigation Institute (in Korean)*, vol. 15, no. 1, pp. 25-31, 2011.

[11] S. G. Lee, Y. S. Moon, and S. Y. Choi, "The ultrasonic type wind sensor with piezoelectric actuator," *Journal of Sensor Science and Technology (in Korean)*, vol. 22, no. 4, pp. 292-296, 2013.

[12] W. J. Lee, J. H. Yim, and Y. G. Kang, "Implementation of ultrasonic anemometer & anemoscope data-logger system," *The Journal of Korean Institute of Communications and Informataion Sciences (in Korean)*, vol. 39C, no. 2, pp. 184-190, 2014.

[13] S. Pindado, J. Pérez, and S. Avila-Sanchez, "On cup anemometer rotor aerodynamics," *Sensors*, vol. 12, no. 5, pp. 6198-6217, 2012.

[14] R. Nelson, Flight Stability and Automatic Control (2nd Ed.), McGraw Hill, pp. 188-193, 1998.

[15] J. Jin, "Comparison of ultrasonic anemometers for multicopter type drone," *Proceedings of 2020 SASE Fall Conference (in Korean)*, 2020.