

Original Article

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2023.31.1.011>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

환경요인에 따른 복합형 수직이착륙 무인항공기의 통합 시스템 오차 상관도 분석

엄송근*, 김정민*, 오정환**, 이동진***, 김도윤****, 한상혁*****

Analysis of the Total System Error Correlation of Hybrid Fixed-Wing UAV (Unmanned Aerial Vehicle) according to Environmental Factor

Songgeun Eom*, Jeongmin Kim*, Jeonghwan Oh**, Dongjin Lee***, Doyoon Kim****, Sanghyuck Han*****

ABSTRACT

In this study, the correlation analysis between total system error and environmental factor variables was performed to confirm the effect on the performance of the integrated navigation system by various environmental factors. To collect flight data of hybrid vertical take-off and landing UAVs, scenarios including various turning sections and straight sections such as left turn, right turn, turning rate, and path change angle were selected, and environmental data of wind direction, wind speed, temperature, air pressure, and humidity were collected in real time through weather station. As a result of the correlation analysis between the collected flight data and environmental data, it was concluded that the performance of the integrated navigation system by environmental factors within the collected data was not significant affected and was robust.

Key Words : Unmanned Aerial Vehicle(무인항공기), Unmanned Aircraft System Traffic Management (저고도 무인항공기 교통관리체계), Environmental Factor(환경요인), Electric Vertical Take-Off and Landing(전기 수직이착륙기), Total System Error(통합 시스템 오차)

1. 서 론

무인항공기의 활용성이 커질수록 등록되는 기체 수도 가파르게 증가하고 있으며, 이에 따른 저고도 비행

안전관리의 필요성 또한 증대되고 있다. 무인항공기에 대한 효율적인 저고도 비행 안전관리를 위해서는 저고도 무인항공기 교통관리 체계(UTM, Unmanned aircraft system Traffic Management) 확립이 필요하며, 안정적인 공역 분리를 위해 바람과 같이 항공기의 성능에 영향을 주는 환경요인에 대한 영향성 분석이 필요하다(Wnag et al., 2019).

본 연구에서는 바람, 기압 등 환경요인이 무인항공기 성능에 미치는 영향을 통합시스템오차(TSE, Total System Error)로 분석하고자 한다.

TSE 구성요소는 항법시스템오차(NSE, Navigation System Error), 비행기술오차(FTE, Flight Technical

Received: 23. Nov. 2022, Revised: 18. Dec. 2022,
Accepted: 31. Dec. 2022

* 한서대학교 항공시스템공학과 석사과정

** (주)모아소프트 연구원

*** 한서대학교 무인항공기학과 부교수

연락처자 E-mail : djlee@hanseo.ac.kr

연락처자 주소 : 태안군 남면 곶섬로 236-49

**** 한국항공우주연구원 선임연구원

***** 한국항공우주연구원 책임연구원

Error), 경로결정오차(PDE, Path Definition Error)로 구성되어 있으며, 본 논문에서는 NSE, FTE를 각각 도출하여 TSE를 도출한다.

TSE를 분석하기 위해 사전에 정의된 비행시나리오로 비행하여 데이터를 수집하였고 동시에 기상관측 센서를 설치하여 환경데이터를 수집하였다.

II. 본 론

2.1 복합형 수직 이착륙 무인항공기 제원

통합항법 성능 분석을 위해 국내/국외의 상용 기체 중 측위장비를 탑재할 수 있으며 전기 동력을 이용하여 구성한 시나리오를 원활하게 수행할 수 있는 복합형 수직 이착륙 무인항공기로 선정하였다. 복합형 수직 이착륙 무인항공기는 2개로 선정하여 비행 데이터를 수집하였으며 각 기체의 제원은 Table 1과 같다.



2.2 비행 시험 환경 및 환경 센서

2.2.1 비행 시험 환경

대기 환경은 무인항공기의 비행 성능에 직접적인 영향을 끼칠 수 있는 요소로써 장소별 정확한 기상 데이터가 필요하다. 하지만 기상청에서 제공하는 지역별 측정 기상 데이터는 비행 장소와는 다소 거리가 있어 정확한 측정치라고 보기 어렵다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 환경 센서를 이착륙 지점 근방에 설치하여 비행장소의 기상 데이터를 실시간으로 수집하였다(Kim et al., 2022).

Fig. 2는 고성 비행 시험장이며, 이착륙장 근방에 환경 센서를 설치하여 비행 시험 환경을 구성하였다.

Table 1. Hybrid VTOL specification

	항목	사양
	모델명	Duodrone-VM
	날개 길이	2.2m
	순항(최대) 속도	65(90)km/h
	FCC	Custom
	모델명	Duodrone-VA
	날개 길이	2.6m
	순항(최대) 속도	86(126)km/h
	FCC	Custom

2.2.2 환경 센서 제원

환경 센서는 Fig. 3과 같은 AIRMAR社의 Weather-Station 220WX 제품을 사용하였으며, 해당 센서의 사양은 Table 2와 같다. 해당 환경 센서를 이용하여 기온, 풍속, 풍향, 기압, 습도의 환경 데이터를 실시간으로 측정 및 수집하였다.

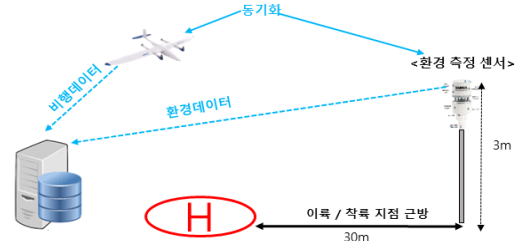


Fig. 1. Flight test configuration



Fig. 2. Actual flight test environment



Fig. 3. Weather station

Table 2. Environmental sensor specification

	풍속	풍향	온도	습도	기압
측정 범위	0 ~ 144 km/h	0 ~ 359.9°	-40 ~ 80°C	0 ~ 100%	300 ~ 1,100hpa
정확도	5%	±3°	±1.1°C	±5%	±0.5hpa
분해능	0.18 km/h	0.1°	0.1°C	0.1%	0.1hpa

2.3 비행 시험 시나리오

직선 및 경로점 변경 각도에 따른 비행 데이터 수집과 선화율에 따른 비행 데이터 수집을 위해 Fig. 4와 같이 비행 시험 시나리오를 구성하였다(Won et al., 2022).

2.4 통합 시스템 오차 분석 방법

2.4.1 정밀측위장비

무인항공기의 TSE 분석 시 필요한 실제 위치 데이터의 경우, 정밀측위장비에서 측정된 값으로 정의하였다. 정밀측위장비로는 Fig. 5와 같은 Trimble사의 BD992-INS 제품을 무인항공기에 탑재하여 활용하였으며, 성능은 Table 3과 같다.

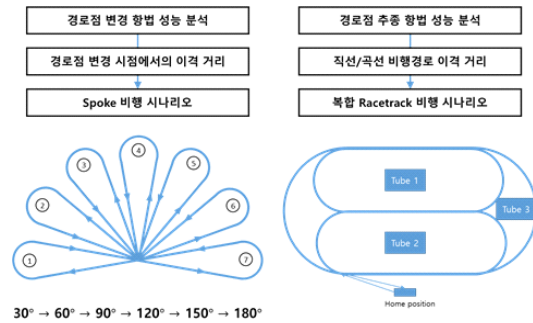


Fig. 4. Flight test scenario

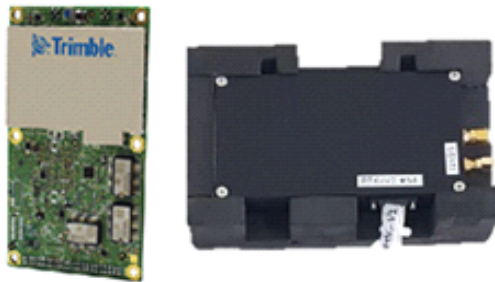


Fig. 5. Precision positioning equipment

Table 3. Precision positioning equipment specification

Mode	Position accuracy (m)
RTK int	H : 0.008, V : 0.015

2.4.2 통합 시스템 오차 구성요소 및 부호 정의

각 오차의 정의는 Fig. 6과 같으며, 정밀측위장비로부터 수집한 위치 데이터와 통합항법 해를 사용하였다. TSE 구성 요소는 NSE와 FTE 그리고 PDE가 있다(Kim et al., 2015). PDE는 desired path와 defined path 간의 차이 값이며, 과학 기술의 발전으로 정확한 좌표 도출이 가능하여 0이라 가정하였으며, NSE는 통합항법해와 정밀측위위치 차이이며, FTE는 Defined Path와 통합항법해의 이격거리이다. TSE는 SQSM방법으로 산출하였다(Fu et al., 2014).

각 오차의 부호 정의는 Fig. 7과 같으며, Fig. 7에 표시된 초록 점들은 통합항법 해의 위치 데이터를 의미한다. 또한, 계획 경로보다 좌측(수평) 또는 하단(수직)에 위치할 경우 FTE를 음수로 정의하고 반대의 경우는 양수로 정의한다. NSE는 원의 반경에서 통계적인 값으로 도출되기 때문에 부호를 반영하지 않았다.

2.4.3 데이터 동기화

수집하는 데이터들은 서로 다른 장비 및 센서로, Table 4처럼 다른 저장주기를 가지고 있다. 해당 데이터들을 분석하기 위해 정밀측위장비의 UTC time을 기준으로 Fig. 8과 같이 데이터 동기화를 수행하였다.

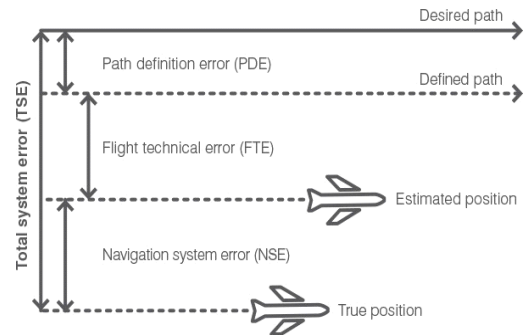


Fig. 6. TSE definition

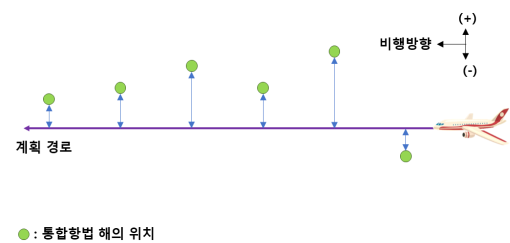


Fig. 7. Sign direction

Table 4. Data storage cycle of each sensor

	데이터 동기화	
	센서	저장주기
FCC	자체 FCC	50Hz
정밀측위장비	BD992-INS	50Hz
환경 센서	AIRMAR 220WX	0.75Hz

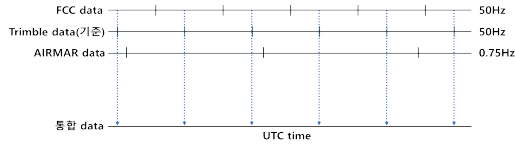


Fig. 8. Data synchronization example

2.4.4 통합 시스템 오차 도출 방법

본 연구에서는 실시간으로 도출이 가능한 SQSM (Scalar Quantity Summation Method) 방법을 사용하여 FTE, NSE 그리고 TSE를 Fig. 9와 같이 도출하였다(Won et al., 2022).

FTE와 NSE는 식 (1)과 (2)를 통해 도출할 수 있으며, TSE는 식 (3)처럼 도출된 식 (1)과 (2)의 합으로 계산된다.

$$FTE = \frac{\left| \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_{INS} - y_{INS} + y_1 - \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} x_1 \right|}{\sqrt{\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \right)^2 + (-1)^2}} \quad (1)$$

$$NSE = \sqrt{(x_{INS} - x_{RTK})^2 + (y_{INS} - y_{RTK})^2} \quad (2)$$

$$TSE = FTE + NSE \quad (3)$$

x_1 : 이전 경로점의 Longitude [m]

y_1 : 이전 경로점의 Latitude [m]

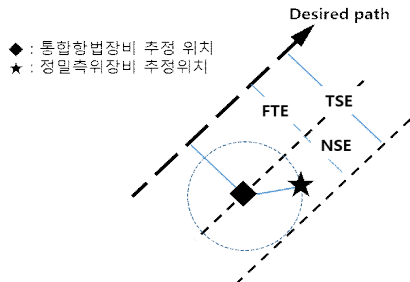


Fig. 9. FTE and NSE derivation using SQSM method

x_2 : 목표 경로점의 Longitude [m]

y_2 : 목표 경로점의 Latitude [m]

x_{RTK} : 정밀측위장비 추정위치의 Longitude [m]

y_{RTK} : 정밀측위장비 추정위치의 Latitude [m]

x_{INS} : 통합항법 추정위치의 Longitude [m]

y_{INS} : 통합항법 추정위치의 Latitude [m]

2.5 환경요인에 따른 상관도 분석

2.5.1 상관도 분석

본 연구는 각각의 환경 요인이 FTE, NSE 그리고 TSE에 미치는 영향성을 확인하기 위해 상관도를 활용하고자 하며, 상관관계의 크기를 나타내는 값은 -1~1 사이로 크기에 따라 영향성을 판단할 수 있다. 상관관계의 크기 중 1은 positive의 가장 높은 상관관계를 나타내며, -1은 negative의 가장 높은 상관관계를 나타낸다(Rovai et al., 2013).

총 300 소티(sortie)의 비행데이터를 통해 도출한 FTE, NSE 그리고 TSE와 환경 센서를 통해 수집한 바람, 기온, 기압, 습도의 환경 데이터를 활용하여 상관도 분석을 수행하였으며, 바람 데이터는 기체의 cross track, along track으로 구분하였다. Cross track의 경우 Fig. 10(a)와 같이 수평 성분에 많은 영향을 줄 것으로 예상되어 수평 오차만 분석하였고, along track의 경우 Fig. 10(b)와 같이 수직 성분에 많은 영향을 줄 것으로 예상되어 수직 오차만 분석하였다.

상관도 분석에 앞서 상관도 분석 방법을 선택하기 위해 데이터의 정규성을 검정하는 KS(Kolmogorov-Smirnov) test를 수행하였다. KS test의 귀무가설 H_0 은 '표준 정규분포에서 데이터가 추출된다'이며, 대립가설 H_1 은 '해당 데이터가 표준 정규분포에서 데이터가 추출되지 않는다'이다. Table 5에 기재되어 있는 모든 요인의 p -value는 유의수준 0.05(5%)보다 작았기 때문에 귀무가설을 기각하고 대립가설을 채택하였다. 또한, 본 데이터는 정규성이 없는 것으로 판단

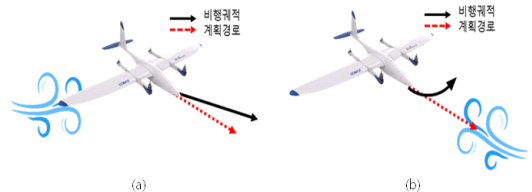


Fig. 10. (a) Cross track and (b) along track

Table 5. KS test result

	통계량	p -value	Normality
바람 (cross track)	0.031	<0.001	×
바람 (along track)	0.090		×
기온	0.975		×
기압	1		×
습도	1		×
수평 FTE	0.465		×
수직 FTE	0.067		×
수평 NSE	0.559		×
수평 TSE	0.260		×
수직 TSE	0.122		×

되어 스피어만 상관계수(Spearman's correlation) 방법을 사용하였다.

스피어만 상관계수는 정규성을 만족하지 못하고, 표본 수가 적은 두 연속형 변수 간의 상관관계를 추정하는 대표적인 순위 상관 분석이다. 비모수적 척도이며, 상관계수를 계산할 때 두 변수를 순서형으로 취급하여 계산한다.

2.5.2 환경요인이 FTE, NSE 그리고 TSE에 미치는 영향

환경 센서로부터 수집한 풍속, 풍향, 기온, 기압 그리고 습도의 환경 데이터와 비행 데이터를 통해 도출한 FTE, NSE 그리고 TSE 상관도를 분석하였다.

Figs. 11~18은 환경요인과 FTE, NSE 그리고 TSE에 대한 이변형 타일 형식 히스토그램으로, 관측값의

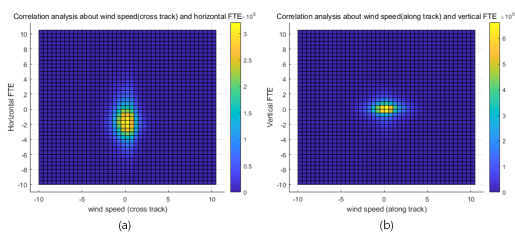


Fig. 11. Correlation histogram about wind speed and FTE

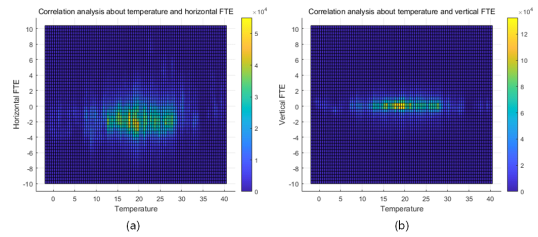


Fig. 12. Correlation histogram about temperature and FTE

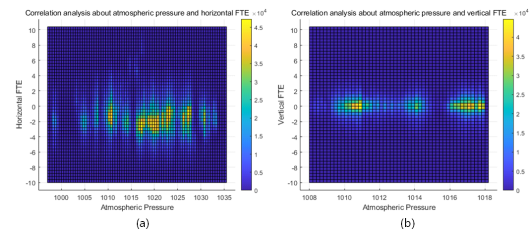


Fig. 13. Correlation histogram about atmospheric pressure and FTE

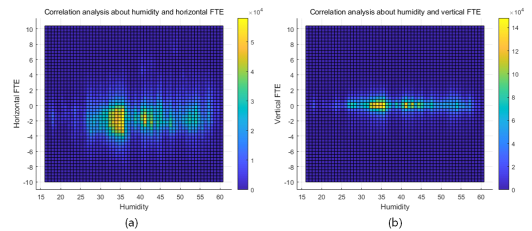


Fig. 14. Correlation histogram about humidity and FTE

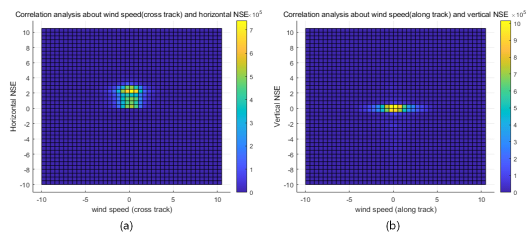


Fig. 15. Correlation histogram about wind speed and NSE

도수에 따라 색이 달라진다. 해당 히스토그램에서는 값이 커질수록 노란색으로 채색된다.

Fig. 11은 바람(cross, along track), Fig. 12는 온도, Fig. 13은 기압, Fig. 14는 습도에 대한 FTE의 상관도를 도출한 것이다. Table 6은 Figs. 11~14에 대

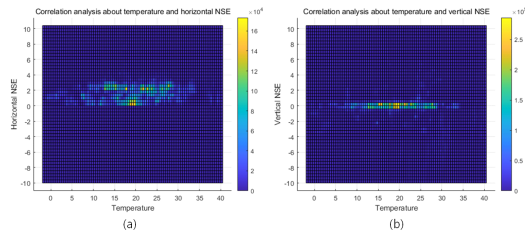


Fig. 16. Correlation histogram about temperature and NSE

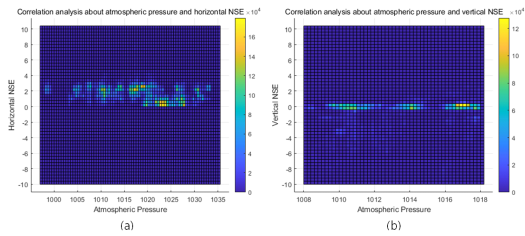


Fig. 17. Correlation histogram about atmospheric pressure and NSE

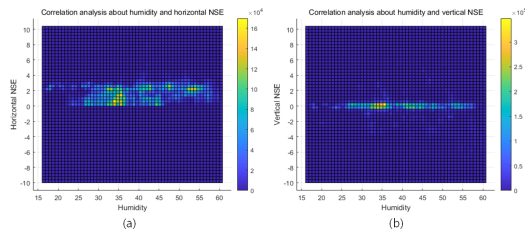


Fig. 18. Correlation histogram about humidity and NSE

Table 6. Correlation analysis about FTE

비행 구간	상관 계수	
	수평 FTE	수직 FTE
바람 (cross track)	-0.007	-
바람 (along track)	-	-0.005
기온	0.074	0.007
기압	-0.041	-0.012
습도	0.082	-0.004

한 상관 계수 값들을 나타낸 것이다. 상관도 분석 결과, 모든 요인의 상관 계수 값들은 절대값 0.3보다 작게 도출되어 상관성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 15는 바람(cross, along track), Fig. 16은 온

Table 7. Correlation analysis about NSE

비행 구간	상관 계수	
	수평 NSE	수직 NSE
바람 (cross track)	0.005	-
바람 (along track)	-	0.006
기온	0.135	-0.079
기압	-0.341	0.126
습도	0.273	-0.159

Table 8. Correlation analysis about TSE

비행 구간	상관 계수	
	수평 TSE	수직 TSE
바람 (cross track)	0.01	-
바람 (along track)	-	-0.003
기온	0.069	-0.069
기압	-0.037	0.099
습도	0.076	-0.125

도, Fig. 17은 기압, Fig. 18은 습도에 대한 NSE의 상관도를 도출한 것이다. Table 7은 Figs. 15~18에 대한 상관 계수 값들을 나타내었다. 상관도 분석 결과, 기압 요인과 수평 NSE의 상관 계수는 -0.3 이하로 분석되었으며, 이외의 요인 상관 계수 값들은 절대값 0.3보다 작게 도출되어 상관성이 매우 낮은 것으로 판단된다.

TSE에 대한 상관도 분석결과는 Table 8과 같으며, 모든 요인에 따른 TSE의 상관 계수는 절대값 0.3보다 작게 도출되어 상관성이 매우 낮은 것으로 판단된다. 수평 NSE와 기압 요인간의 상관 계수는 -0.341로 약간의 상관성을 보였으나, 수평 TSE와 기압 요인간의 상관 계수는 FTE와 NSE 합으로 인해 상관성이 상대적으로 낮게 도출되었다.

III. 결 론

본 연구에서는 다양한 환경요인에 따른 복합형 수직 이착륙 무인항공기의 TSE 상관도에 대해 분석하였다.

환경 센서로 수집한 풍속, 풍향, 기온, 기압 그리고 습도의 환경 데이터와 비행 데이터를 통해 도출한 FTE, NSE 그리고 TSE에 대한 상관 계수 값을 도출하였다.

각각의 환경 요인과 FTE와 TSE의 상관 계수 값은 절대값 0.3보다 작게 도출되어 상관성이 매우 미미한 것으로 판단되었다. 기압, 습도 요인과 수평 NSE의 상관 계수 값은 절대값 0.27보다 높게 도출되어 기압과 습도에 약간의 상관성을 나타내고, 약간의 영향이 있는 것으로 판단된다. 환경요인에 따른 FTE, NSE 그리고 TSE의 상관도 분석 결과를 종합적으로 보았을 때, 해당 복합형 수직이착륙 무인항공기는 수집된 바람, 기온, 기압, 습도 환경 데이터 내에서 통합항법 시스템 성능이 환경요인에 의한 영향을 크게 받지 않으며 강인하다는 결론을 내릴 수 있다.

추후에는 각 환경요인의 균등하고 폭넓은 데이터 수집과 추가적인 비행 데이터 수집을 통해 더 명확한 통계성이 있는 분석을 수행하고자 한다. 또한, 분석된 데이터를 통해 다양한 환경요인에 따른 통합항법 시스템 성능에 대한 영향성을 확인하고, 이를 기반으로 UTM 공역 분리 체계 확립에 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 과학기술정보통신부 무인이동체 미래선도 핵심기술개발사업의 연구과제(과제고유번호: NRF-2017 M1B3A2A01049995)의 지원으로 수행되었습니다.

References

1. Wang, B. H., Wang, D. B., Ali, Z. A., Ting, B., and Wang, H., "An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle", *Measurement and Control*, 57(7-8), 2019, pp.731-739.
2. Kim, M., Kim, K., Lee, J., and Pullen, S., "Flight technical error modeling for UAV supported by local area differential GNSS", *Journal of the Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, 43(12), 2015, pp.1054-1061.
3. Kim, J. W., Ryu, J. H., Na, S. J., and Seong, S. C., "Analysis of low altitude wind profile data from wind lidar for drone aviation safety", *Journal of The Korean Society Aeronautical and Space Sciences*, 50(12), 2022, pp.899-907.
4. Won, D. H., Oh, J. H., Kang, W. S., Eom, S. G., Lee, D. J., Kim, D. Y., and Han, S. H., "Flight scenario trajectory design of fixed wing and rotary wing", *Journal of the Korean Society for Aviation and Aeronautics*, 30(1), 2022, pp.38-43.
5. Fu, L., Zhang, J., and Li, R., "Real-time total system error estimation: Modeling and application in required navigation performance", *Chinese Society of Aeronautics and Astronautics*, 27(6), 2014, pp.1544-1553.
6. Won, D. H., Oh, J. H., Lee, D. J., and Kim, D. Y., "Integrated navigation performance analysis of hybrid fixed wing UAV using SQSM and RSSM methods", *The Korean Society for Aeronautical & Space Sciences Spring Conference*, Gosung, 2021, pp.678-679.
7. Rovai, A. P., Baker, J. D., and Ponton, M. K., "Social Science Research Design and Statistics: A Practitioner's Guide to Research Methods and IBM SPSS Analysis", *Watertree Press LLC*, 2013, p.375.