



J. Korean Soc. Aeronaut. Space Sci. 50(3), 173-180(2022)

DOI:https://doi.org/10.5139/JKSAS.2022.50.3.173

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

드론의 외풍 환경 비행 안전성 평가 및 정밀 시뮬레이션

이동열¹, 박선후², 신상준³

Risk Assessment of a Drone Under the Gust and its Precise Flight Simulation

DongYeol Lee¹, SunHoo Park² and SangJoon Shin³

Department of Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul, Republic of Korea

ABSTRACT

The operation and transportation environment for an unmanned aerial vehicle will be completely different from those for the conventional air and ground transportation. The requirement for a traffic management system for its safe operation has been emerging. Accordingly, investigation is being conducted to analyze the danger that unmanned aerial vehicle may encounter during the flight and to provide the countermeasure by the simulation. When the drones operate in an urban environment, they may be affected by the wind around the building. Thus it is essential to predict the influence of the gust and analyze the resulting risk. In this paper, a method for evaluating the safety for a flight mission under the gust is suggested. By using the precise 6-degree-of-freedom flight simulation that is capable of simulating the gust condition, possible deviation from the pre-planned flight path in terms of the attitude orientation will be predicted. A method of quantifying the probability of the flight mission failure will also be presented.

초 록

드론의 운항 방식 및 교통환경은 기존의 항공교통이나 지상교통과는 상이하다. 드론의 안전 운항을 위한 교통 관리 체계 정립의 필요성이 대두되고 있다. 이에 따라 드론이 비행 중에 조우할 수 있는 위험 상황에 대하여 시뮬레이션에 의거하여 분석하고 대책을 수립하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 드론이 도심 환경에서 운항할 때 건물 사이로 발생하는 외풍에 영향을 받을 수 있으며, 이러한 외풍의 영향성을 예측하고 위험도를 분석하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 외풍 환경에서 비행 임무의 안전도를 평가하는 방법을 제시하였다. 외풍 조건을 입력할 수 있는 정밀 6자유도 비행 시뮬레이션을 구현하여 비행 임무 수행 중 외풍으로 인한 경로의 이탈, 자세각의 변화 등 그 영향성을 예측하였다. 비행 임무 실패 확률에 대해 정량화하는 방법을 제시하였다.

Key Words : Drone(드론), Gust(돌풍), Risk Assessment(위험도 평가)

1. 서 론

드론의 발전으로 인해 택배 운송, 감시, 기후 측정, 응급 용품 운반 등 다양한 분야에서의 활용 가치

가 주목받고 있다. 이러한 요구를 충족하는 드론의 활용 영역을 확보하기 위해서는 안전 확보 및 위험도를 측정하는 과정을 구축하는 것이 필수적이다[1]. 드론 운항에 있어 위협이 될 수 있는 요소들을 구분하

† Received : November 15, 2021 Revised : February 17, 2022 Accepted : February 24, 2022

^{1,2} Graduate Student, ³ Professor

³ Corresponding author, E-mail : ssjoon@snu.ac.kr, 0000-0001-5835-4926

© 2022 The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences

고 각 요소에 대해 어떻게 비행 안전도를 평가하고 대비해야 하는지에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다[2-4]. Foster[5]는 멀티로터 모델링 및 6자유도 비행 시뮬레이션 구축을 수행하여 드론이 위험한 상황에 처했을 경우의 동적 거동을 예측하였다. Ancel[6]은 다양한 비행 사고 유발 요인들을 분석하고, 이들을 통합하는 확률의 계산 절차를 제시하여 위험성을 정량화하는 연구를 수행하였다.

외풍은 드론의 추락뿐만 아니라 비행 완료 시간의 지연, 비행 자세의 급격한 변화, 경로의 이탈로 인한 건물과의 충돌 등을 야기하므로 드론의 임무 수행에 대한 주요 위험 요소이다. 특히 드론이 도심 환경에서 저고도로 비행할 때 건물 주변에서 예상치 못하게 발생한 빌딩풍의 영향을 받을 수 있다. 동시에 운항하는 드론이 많아질수록 외풍의 위험성은 커지므로 이에 대한 대비가 필수적이다.

빌딩 외풍에 대한 연구는 지속적으로 수행되고 있으나 외풍이나 난류가 드론의 비행에 영향을 미치는 방식에 대해서는 상대적으로 적은 연구가 수행되었다. 돌풍을 고려한 6자유도 시뮬레이션 구축 연구[7]와 간섭 효과 등을 고려한 전산 유동 해석[8]에 대한 연구 등 드론의 동역학적, 공기역학적 해석모델을 구축하는 연구들이 수행되어 왔으나 이러한 내용을 드론의 안전도 평가에 대한 연구로 확장하려는 시도가 적게 나타났다. 따라서 외풍의 영향을 받는 드론의 거동에 대해 예측하고 안전도를 평가하여 대응책을 수립하는 연구가 필요하다.

본 연구의 목표는 시뮬레이션을 통해 다양한 외풍 조건 하에서 드론의 비행 경로를 예측하고 동적 거동을 분석함으로써 안전도를 평가하는 것이다. 이를 위해 비행 임무를 설정하고 공기역학 해석 기법과 지형 조건, 외풍 환경을 고려한 비행 시뮬레이션을 구축하였다. 동적 유입류를 고려한 정밀 공기역학 해석 기법을 활용하였으며, 여러 경우의 외풍 환경을 적용하여 해석을 수행하였다. 임무 수행 중 외풍 조건 하에서 비행체의 속도와 자세에 대한 변화를 분석하고 비행 경로의 이탈로 인한 주변 지형과의 충돌 여부를 판단하는 안전도 평가를 수행하였다. 이러한 비행 임무의 안전도 평가를 통해 비행 승인 타당성 판단 및 비행 계획 수정 등의 의사결정에 있어 근거를 마련할 수 있다. 또한, 외풍 조건에 강건한 비행체 설계 및 제어 전략 구축 과정 등에 도움을 제공한다.

II. 본 론

2.1 6자유도 비행 시뮬레이션

블레이드 강제 플래핑과 동적 유입류를 고려하여 구축된 6자유도 비행 시뮬레이션 프로그램을 사용하였다. 비행 속도 및 자세, 로터 회전 속도, 외풍의 세

기와 방향을 반영하는 정밀 공력 해석을 구현하였다. 이러한 공력 해석과 동체의 비행 역학 해석을 결합하여 비행 시뮬레이션을 구축하였다. 제자리 비행, 전진 비행 등의 비행 조건에서 공력 특성을 실험 결과와 비교하였다[9]. 대상 드론으로는 DJI MATRICE 100을 적용하였다. 자세와 고도제어에 대하여 DJI 비행 제어가 적용되었고, p-d 타입의 위치제어를 사용하였다.

2.2 지형적 경계 및 외풍 환경

드론은 느린 비행 속도와 작은 중량, 작은 외형으로 인해 외풍에 의한 영향을 상당히 받게 받는다. 외풍으로 인해 드론이 경로에서 이탈하여 건물과 충돌한다면 드론과 건물에 손상이 발생할 뿐만 아니라 인명 피해를 야기할 수 있다. 본 논문에서는 도심 지형 고려를 위한 지형적 경계(geo-fence)와 외풍 환경 설정에 대하여 정식화하고자 한다.

2.2.1 지형적 경계

지형적 경계는 비행 경로 상에서 수직, 수평 방향에 대한 경계조건을 설정하여 시각화한 것이다. 저고도에서 비행하는 드론의 특성상 지형지물과의 충돌이 발생할 수 있다. 또한 비행 금지 구역으로 설정되어 드론이 침범할 수 없는 지역이 존재한다. Fig. 1의 avoidance zone의 경계선이 침범하지 않아야 하는 지형적 경계(keep-out geo-fence)가 된다. 건물 주변의 경우 인구 밀도가 높아 geo-fence와 충돌하는 경우에 인명 피해 등의 심각한 결과를 가져올 수 있다. 반대로 물품을 전달하거나 물체를 관찰하는 등 임무에서 반드시 통과해야 하는 구역(keep-in geo-fence)이 존재한다. 비행 착수 전 지형적 경계에 대한 정보를 바탕으로 비행 계획을 수립해야 하며 외풍의 영향으로 지형적 경계에 진입할 가능성에 대해 추가적인 고려가 필요하다. 이를 위하여 시뮬레이션 상에서 지형적 경계를 구현하여 비행 경로에서 이탈했을 때 변경된 경로가 지형적 경계를 통과하는지 확인하여야 한다. 본 논문에서는 정적인 지형적 경계를 사용하였으며 침범하지 않아야 하는 영역과 반드시 통과해야 하는 구역을 고려하였다.

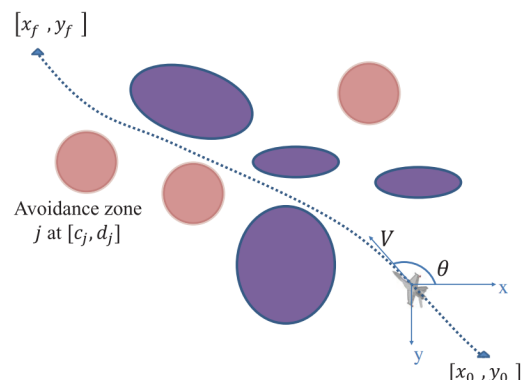
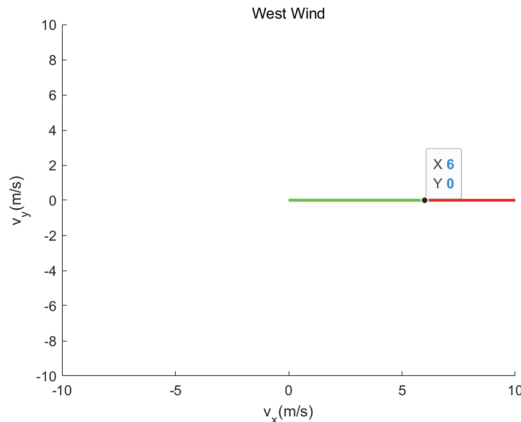


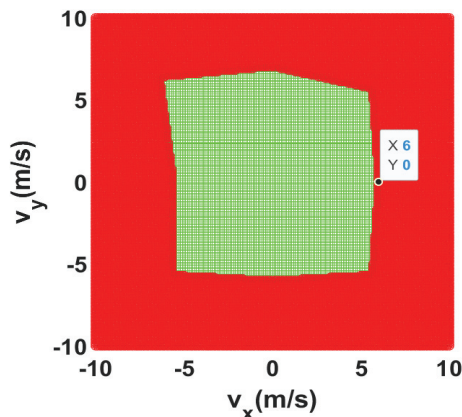
Fig. 1. UAV path planning and the avoidance zones[10]

2.2.2 외풍 환경

외풍 환경에 대해 다음 두 가지의 상황을 가정하였다. Case 1은 비행 임무 중 외풍이 일정하도록 설정한 경우이다. 8개의 방향에 대해 외풍의 세기를 증가시키며 시뮬레이션을 수행하였으며, 그에 따른 비행 임무의 수행 능력을 분석하였다. 외풍에 의해 비행 임무 수행이 불가능하다고 판단하는 조건은 응급 의료, 감시, 군용 등 비행 임무의 성질에 따라 상이할 수 있다. 본 논문에서는 일정 기준 이상의 경로 이탈, 자세각 변화, 임무 수행 완료 시간 지연이 발생하면 임무 수행이 불가능한 외풍 조건이라고 판단하였다. 각 방향별로 임무 수행이 불가능해지는 최소 외풍 세기를 임계 속도(critical speed)이라 정의하였다. Fig. 2는 가상의 임무에 대해 임계 속도의 예시를 나타낸다. 서풍으로 부는 방향에 대하여 외풍의 세기를 증가시키며, 비행 임무에 대한 시뮬레이션을 실행한 결과, 서풍에 대해 허용 가능한 바람의 세기를 6m/s 미만으로 판단하였다면 Fig. 2(a)와 같이 나타내게 된다. 이와 같이 남동풍, 남풍 등의 각 방향에 대해 임계 속도를 도출하면 Fig. 2(b)와 같이 비행 임무 수행이 불가능한 영역을 표시할 수 있다.



(a) Critical speed for the west wind



(b) Critical speed of the wind for all the directions

Fig. 2. Example of the critical speed

기상 관측 자료를 통해 외풍 속도의 평균(μ_x, μ_y)과 표준편차(σ)를 예측할 수 있다. 이를 이용하면 2차원 Gauss 분포에 의거한 외풍 확률분포함수가 식 (1)과 같이 표현된다[11].

$$f(v_x, v_y) = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(v_x - \mu_x)^2 + (v_y - \mu_y)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (1)$$

식 (1)의 확률분포함수를 식 (2)와 같이 비행 임무 수행 불가능의 외풍 영역에서 적분하여 위험 발생 확률 P_f 를 계산하였다.

$$P_f = \iint_{v_c}^{\infty} f(v_x, v_y) dv_x dv_y \quad (2)$$

Case 2는 비행 시간에 따라 풍향과 풍속이 변화하도록 설정한 경우이다. 빌딩풍은 고층 빌딩들 사이로 공기가 흐르며 발생하는 외풍으로, 20~30m/s의 세기로 형성된다. 이렇듯 갑작스럽게 발생하는 외풍하에서 드론의 비행 수행 가능성에 대해 예측하는 것은 필수적이다[12]. 이러한 외풍을 시뮬레이션 상에 구현할 때 대표적인 돌풍 형상인 1-cosine 형태의 외풍을 사용하였다[13]. 이를 식 (3)과 같이 나타내었다.

$$V = \begin{cases} 0 & (t < 0) \\ \frac{V_{\max}}{2} \left(1 - \cos \frac{2\pi t}{t_m}\right) & (0 \leq t \leq t_m) \\ 0 & (t > t_m) \end{cases} \quad (3)$$

V 는 임의의 방향으로 갑작스럽게 발생하는 외풍이고 t 는 시간이다. t_m 은 외풍이 작용하는 시간이며, V_{\max} 는 외풍의 최대 순간 세기를 나타낸다.

2.3 비행 임무 설정 및 위험도 평가

2.3.1 비행 임무 설정

드론이 수행하는 비행 임무는 무기를 장착하여 공격을 수행하는 임무, 응급 구호 물품을 수송하는 임무 등이 있다. 정확한 임무 수행을 위해서는 주변의 지형지물, 날씨 등을 파악하고 그에 맞게 경로를 설정하여야 한다.

본 논문에서 설정한 비행 임무를 Fig. 3과 Table 1에 나타내었다. Fig. 3은 지형적 경계와 비행 경로를 좌표로 표현한 것이다. 고층 빌딩 사이에서 저고도로 운행하는 상황을 가정하여 모든 지형적 경계의 높이는 비행 고도보다 높은 것으로 설정하였다. (0m, 0m)에서 출발하여 위치 입력을 목표지점 1인 (100m, 0m)로 하여 이동하고, 이후에 위치 입력을 목표지점 2인 (100m, 80m)로 하여 이동한다. 전진 비행을 할 때 지면에 대한 자세각은 15° 이므로 목표지점 1을 향할 때나 목표지점 2를 향할 때의 속력은 같다. 70초가 될 때까지 일정 범위 내에 들어와야 임무를 안전하게 수행했다고 판단하였다.

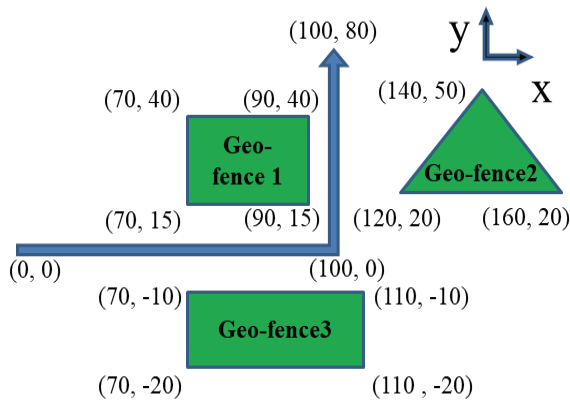
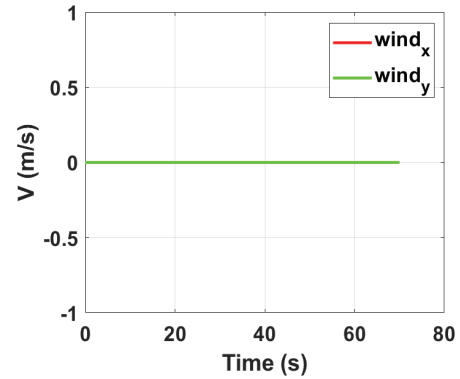


Fig. 3. Flight path and geo-fence of the mission. All units in meters

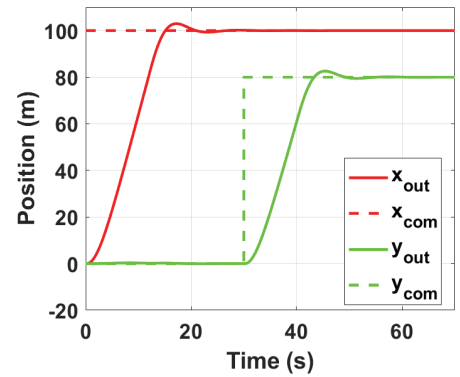
Table 1. Present mission profile

| | |
|------------------------------|---|
| target point 1 | (100, 0) (m) until t=30 |
| target point 2 | (100, 80) (m) after t=30 |
| cruise pitch and roll angle | 15° |
| maximum pitch and roll angle | 25° |
| total duration | 70 seconds |
| mission | reaching within 10m around target point 2 |

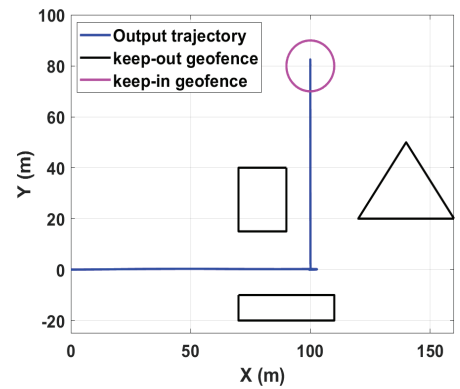
Figure 4는 외풍이 입력되지 않은 시뮬레이션의 비행 임무 수행 결과를 나타낸다. Fig. 4(a)는 해석 좌표축을 기준으로 수평 방향과 수직 방향의 외풍을 나타낸다. 외풍이 없으므로 두 값 모두 0m/s로 유지된다. Fig. 4(b)는 위치제어에 대한 위치 입력값과 실제 비행 위치를 비교한 것이다. x_{com} 과 y_{com} 은 위치 제어의 입력값으로 (x_{com}, y_{com})이 처음 30초는 (100 m, 0m)이며, 이후로는 (100m, 80m)임을 확인할 수 있다. 실제 위치인 x_{out} 과 y_{out} 은 입력된 위치를 추종하고 있다. x 방향에 대해 약 6m/s의 속력으로 전진 비행하다가 20초부터 30초까지 (100m, 0m)에서 hovering함을 확인할 수 있고, 위치 입력이 (100m, 80m)로 바뀌는 30초부터 y 방향에 대해 약 6m/s의 속력으로 전진 비행함을 확인할 수 있다. Fig. 4(c)는 비행 경로를 나타낸다. Fig. 4(d)는 시간에 따른 자세 각의 변화를 나타낸다. 이러한 비행 시뮬레이션을 통해 비행 경로와 지형적 경계 간의 비교, 비행 자세각의 임계값 초과 여부 확인을 수행할 수 있다. 이를 종합하여 비행 임무의 위험성 및 성공 여부를 판단할 수 있다.



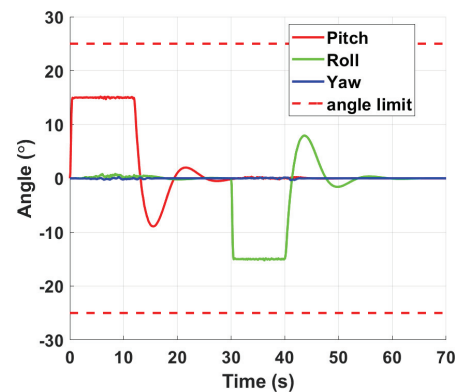
(a) Global wind profile



(b) Position profile and input



(c) Flight path



(d) Attitude profile and angle limit

Fig. 4. Results for no wind

2.3.2 위험도 평가

비행 시뮬레이션을 통해 외풍으로 인한 비행 속도 및 경로의 변화에 따른 위험도 평가를 진행하였다.

외풍 조건 Case 1은 외풍을 비행 임무 중 일정하도록 설정하고 방향에 따라 허용 가능한 외풍 세기를 계산한 것이다. Fig. 5는 외풍 조건 Case 1에서 8개 방향에 대해 임계 속력의 외풍이 작용했을 경우의 비행 경로를 나타낸다. Fig. 5(a)와 같이 외풍의 세기가 5.6m/s일 때 임무에 실패하였으며, 그 원인은 지형적 경계와의 충돌이었다. 즉 동풍으로 5.6m/s 이상의 외풍이 발생한다면 비행 임무를 성공할 수 없다. 동풍, 남동풍, 남풍, 서풍, 북동풍에 대해서 임계

속력일 때 지형적 경계와 충돌하는 것을 확인할 수 있고 남서풍, 북서풍, 북풍에 대해서는 목표 지점 2에 도달하지 못한 것을 확인할 수 있다. 비행 자세각이 임계값을 초과하며 위험 상황이 발생한 경우는 나타나지 않았다. Fig. 6은 Fig. 5에 나타난 8개의 임계 속력을 결합하여 모든 방향에 대해 나타낸 것이다.

Figure 7은 평균 풍속이 (2.77, -2.00)m/s이고 표준편차가 1.82m/s인 지역에서의 외풍 확률분포함수의 그래프이다. Fig. 6의 붉은 영역에 대해 Fig. 7의 확률분포함수를 식 (2)와 같이 적분하였을 때 결과값은 0.0194이다. 이는 해당 지역에서 해당 비행 임무를 실패할 확률이 0.0194(1.94%)임을 의미한다.

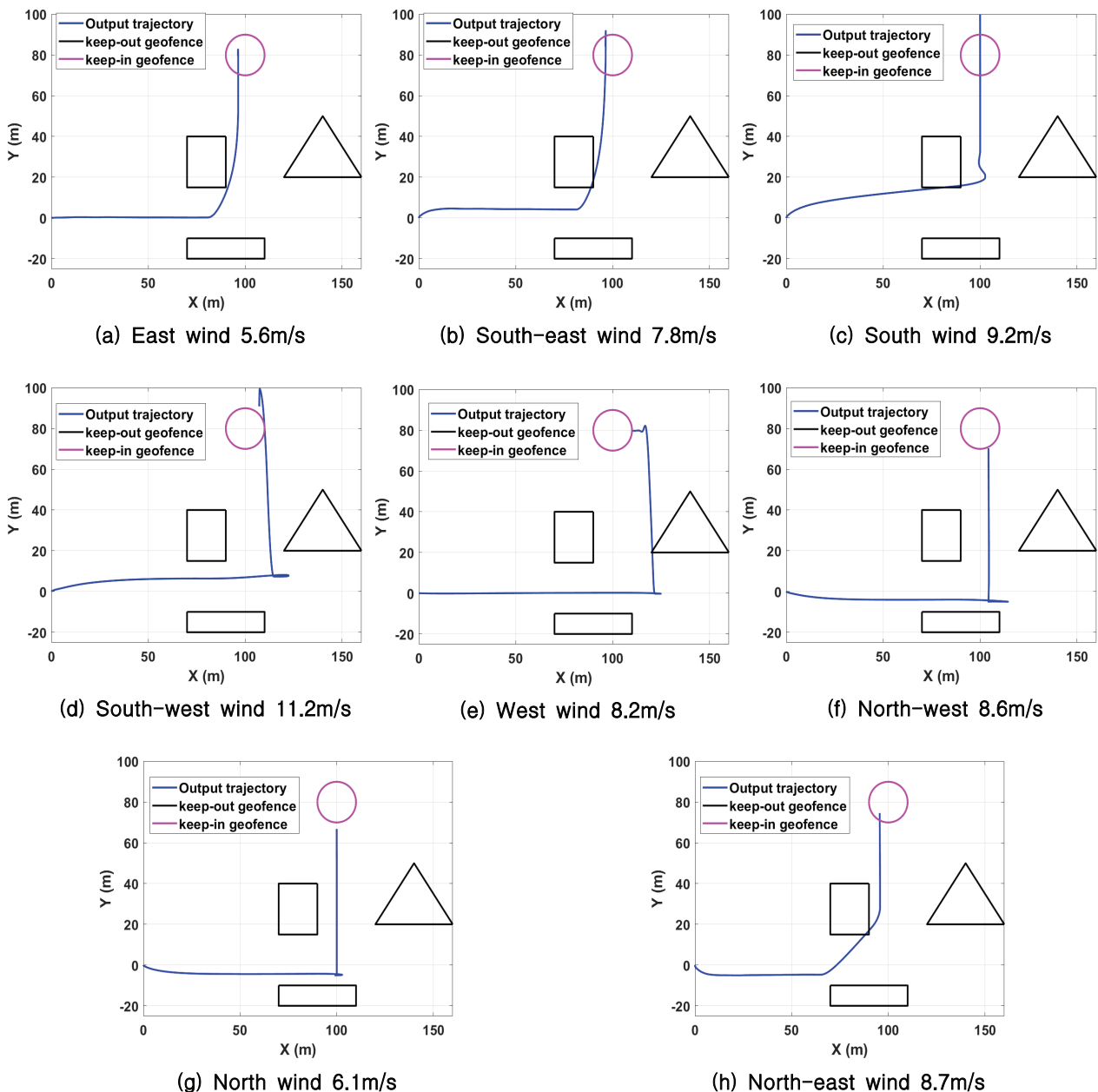


Fig. 5. Flight path of the critical situation regarding each direction (Case 1)

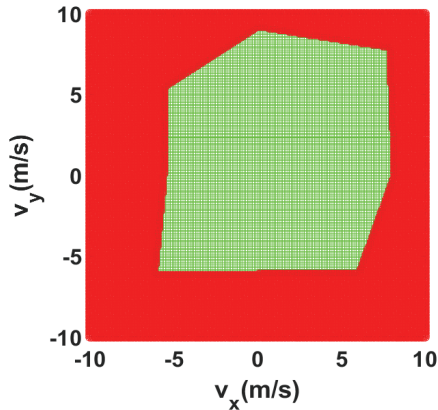


Fig. 6. Critical speed of the wind for the mission (Case 1)

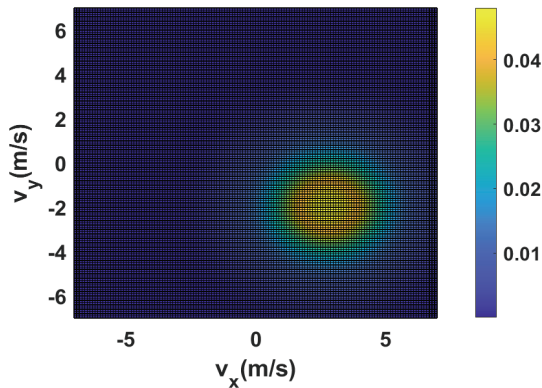


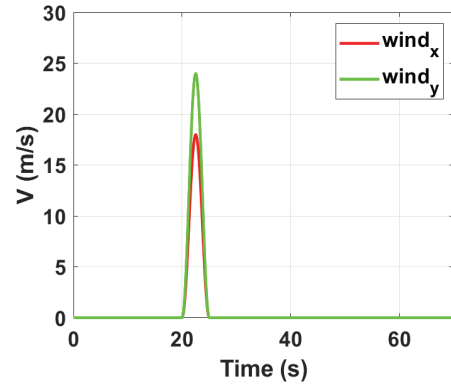
Fig. 7. Probability distribution function of the wind speed (Case 1)

외풍 조건 Case 2는 비행 임무 중 갑작스러운 강한 외풍이 발생하는 경우이다. 먼저 Fig. 8은 $t=20$ 에서 V_{max} 가 30m/s인 “1-cosine” 형태의 외풍이 (3/5, 4/5) 방향으로 5초에 걸쳐 작용했을 경우의 결과이다. Fig. 8(d)에서 알 수 있듯이 비행 자세각이 임계값을 초과하여 위험 상황이 발생했음을 확인할 수 있다.

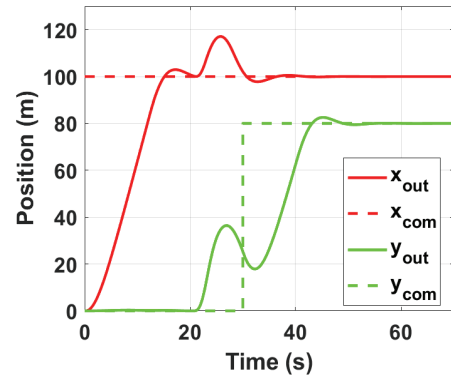
Figure 9는 $t=10$ 에 V_{max} 가 20m/s인 “1-cosine” 형태의 외풍이 (0, -1) 방향으로 2초에 걸쳐 작용하고, $t=33$ 에 V_{max} 가 24m/s인 “1-cosine” 형태의 외풍이 (-1, 0) 방향으로 2초에 걸쳐 작용한 경우의 결과이다. Fig. 9(c)에서 알 수 있듯이 keep-out 지형적 경계를 비행 경로가 침범하여 위험한 상황이 발생함을 예측할 수 있다.

III. 결 론

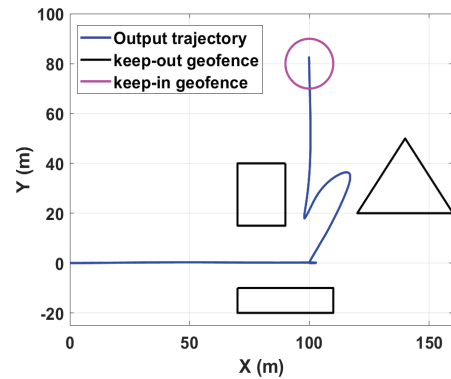
본 논문에서는 정밀 시뮬레이션을 활용하여 드론이 외풍 환경에서 운항할 때 위험도를 평가하는 방법을 제시하였다. 동적 유입류를 고려한 공기역학 모델과 6자유도 비행 역학을 통한 시뮬레이션을 수행하였고, 외부의 지형적 경계와 외풍을 구현하였다.



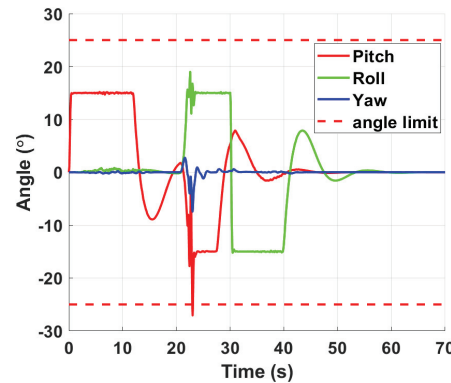
(a) Global wind profile



(b) Position profile and input

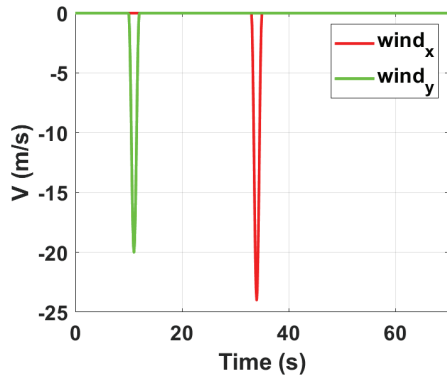


(c) Flight path

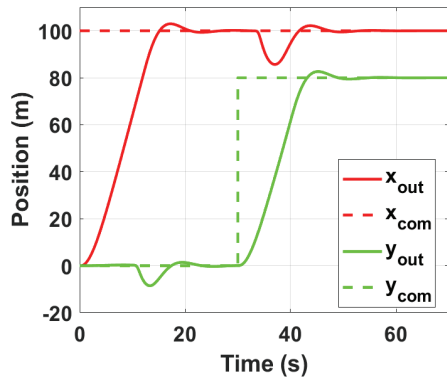


(d) Attitude profile and angle limit

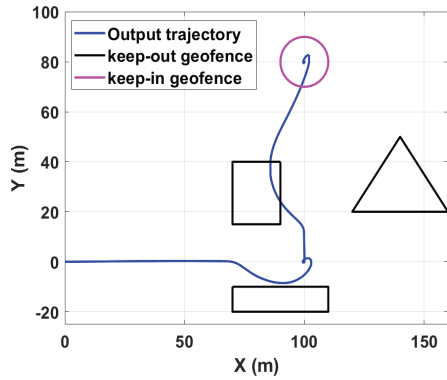
Fig. 8. Mission results for Case 2-1



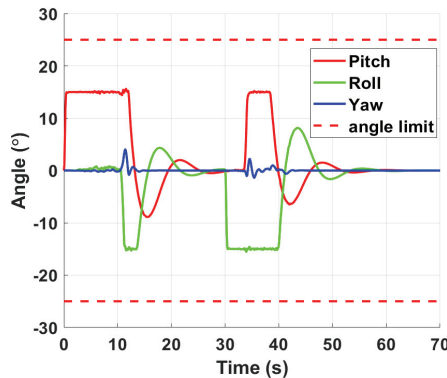
(a) Global wind profile



(b) Position profile and input



(c) Flight path



(d) Attitude profile and angle limit

Fig. 9. Mission results for Case 2-2

비행 임무를 설정하고 임무의 성공 조건을 설정하였다. 외풍에 의해 드론이 원래의 비행 경로에서 이탈할 때 임무 수행의 성공 여부 및 지형적 경계와의 충돌 여부의 확인을 통해 위험도를 평가하였다. 외풍에 대해서 Gauss 확률 분포 함수를 도입하여 위험 발생 확률을 계산하는 방법을 제시하였다. 또한, 건물풍으로 인해 갑작스럽게 외풍이 발생하는 상황에 대해서 시뮬레이션을 수행하였으며 위험 상황을 분석하였다.

계속하여 증가하게 될 드론에 대한 교통 시스템을 안전하고 효율적으로 관리하기 위해서 많은 연구가 요구된다. 향후에는 시뮬레이션에 경로 추적과 외란 상쇄를 할 수 있는 비행 제어를 구현하여 안전도를 관찰하는 연구를 수행할 계획이다. 또한, 안전도와 비행 시간 등을 고려하여 비행 경로를 최적화하는 연구를 수행하고자 한다.

후 기

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 무인 항공기 안전지원 기술개발사업의 연구비 지원(과제번호 21USTR-B127901-05)에 의해 수행되었습니다.

References

- 1) Ancel, E., Capristan, F. M. and Foster, J. V., "In-Time Non-Participant Casualty Risk Assessment to Support Onboard Decision Making for Autonomous Unmanned Aircraft," *AIAA Aviation 2019 Forum*, June 2019.
- 2) Barr, L. C., Newman, R. L., Ancel, E., Belcastro, C. M., Foster, J. V., Evans, J. K. and Klyde, D. H., "Preliminary Risk Assessment for Small Unmanned Aircraft Systems," *Air Transportation Integration & Operations (ATIO) - Aerospace Traffic Management (ATM) Conference, AIAA Aviation Forum*, June 2017.
- 3) Kwatny, H. G., Dongmo, J. E. T., Chang, B. C., Bajpai, G., Yasar, M. and Belcastro, C., "Nonlinear analysis of aircraft loss of control," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 40, No. 4, 2017, pp. 149~162.
- 4) Hartman, D. C., "Identification of Hazardous Flight Conditions to Establish a Safe Flight Envelope for Autonomous Multirotor Aircraft," *AIAA Aviation Sci-Tech 2019 Forum*, June 2017.
- 5) Foster, J. V. and Hartman, D. C., "High-Fidelity Multi-Rotor Unmanned Aircraft System Simulation Development for Trajectory Prediction under Off-

Nominal Flight Dynamics," *Air Transportation Integration & Operations (ATIO) - Aerospace Traffic Management (ATM) Conference, AIAA Aviation Forum*, June 2017.

6) Ancel, E., Shih, A. T., Jones, S. M., Reveley, M. S., Luxhøj, J. T. and Evans, J. K., "Predictive safety analytics: inferring aviation accident shaping factors and causation," *Journal of Risk Research*, Vol. 18, No. 4, 2015, pp. 428~451.

7) Davoudi, B. and Duraisamy, K., "A Hybrid Blade Element Momentum Model for Flight Simulation of Rotary Wing Unmanned Aerial Vehicles," *AIAA Aviation 2019 Forum*, June 2019.

8) Misorowski, M., Gandhi, F. and Oberai, Assad, A., "A Computational Study on Rotor Interactional Effects for a Quadcopter in Edgewise Flight," *American Helicopter Society 74th Annual Forum Proceedings*, Phoenix, Arizona, May 2018.

9) Park, S., Yoo, J., Lee, S. and Shin, S., "Real-Time Flight Simulation for Multirotor UAV Integrated with the Dynamic Inflow Aerodynamics,"

Journal of the American Helicopter Society, Vol. 66, No. 4, 2021, pp. 1~14.

10) Sun, C., Liu, Y. C., Dai, R. and Grymin, D., "Two Approaches for Path Planning of Unmanned Aerial Vehicles with Avoidance Zones," *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 40, No. 8, 2017, pp. 2076~2083.

11) McWilliams, B., Newman, M. M. and Sprevak, D., "The Probability Distribution of Wind Velocity and Direction," *Wind Engineering*, Vol. 3, No. 4, 1979, pp. 269~273.

12) Nguyen, D. D., Rohacs, J. and Rohacs, D., "Autonomous Flight Trajectory Control System for Drones in Smart City Traffic Management," *ISPRS International Journal of Geo-Information*, Vol. 10, No. 5, p. 338.

13) Guo, S., Jing, Z. W., Li, H., Lei, W. T. and He, Y. Y., "Gust response and body freedom flutter of a flying-wing aircraft with a passive gust alleviation device," *Aerospace Science and Technology*, Vol. 70, 2017, pp. 277~285.