

CFD를 이용한 도심내 드론 비행 경로 계획 및 안전성 평가

김건홍^{1†}, 황아영², 김효영³, 김연명³

¹주식회사 니나노컴퍼니

²주식회사 디섹,

³한서대학교

CFD-based Path Planning and Flight Safety Assessment for Drone Operation in Urban Areas

Geon-Hong Kim^{1†}, Ayoung Hwang², Hyoyeong Kim³ and Yeonmyeong Kim³

¹NINANO COMPANY INC.

²DSEC,

³Hanseu University

Abstract

This study suggests a method to enhance drone flight path planning and safety evaluation in urban areas using Computational Fluid Dynamics (CFD). As the use of drones in urban environments has been growing rapidly, there is a lack of established methods for path planning and safety evaluation, which leads to a risky approach relying on experimental methods. Therefore, this research takes into account the intricate 3D fluid dynamics between drones and buildings by employing CFD to quantitatively plan flight paths and evaluate their safety. To accomplish this, the study focuses on Gimcheon Innovation City as the target area and collects relevant terrain and building data, and selects prospective flight routes. CFD analysis is then carried out to gather essential data for flight simulations and safety assessment. The safety assessments are conducted based on environmental fluid dynamics when the drone operates along the proposed flight paths

초 록

본 연구는 도심 지역에서 드론 비행 경로의 계획과 안전성 평가를 개선하기 위해 CFD(Computational Fluid Dynamics)를 활용하는 방법을 제시한다. 도심 지역에서의 드론 비행은 빠르게 증가하고 있는데, 아직 경로 계획 및 안전성 평가 방법이 정립되어 있지 않으며 실험적으로 접근하고 있어 위험성이 높은 문제가 있다. 이에 본 연구에서는 CFD를 활용하여 드론과 건물 간 복잡한 3D 공간에서의 유체 역학을 고려한 비행 경로를 계획하고, 각 경로의 안전성을 정량적으로 평가하였다. 이를 위해 김천 혁신도시를 대상 지역으로 설정하여 지형과 건물 데이터 수집 및 비행 예상 경로를 선정하였다. CFD 유동 해석을 통해 비행 시뮬레이션과 안전성 평가를 위한 기본 데이터를 마련하였으며 이를 통해 드론이 제안된 비행 경로로 비행하였을 때 환경 유동에 의한 안전성 평가를 수행하였다.

Key Words : Computational Fluid Dynamics(전산 유체 역학), Urban Area(도심지), Flight Path(비행 경로), Drone(드론), Safety Analysis(안전성 평가)

1. 서 론

Received: Dec. 08, 2023 Revised: Feb. 28, 2024 Accepted: Mar. 04, 2024

† Corresponding Author

Tel: *** - **** - ****

E-mail: geonhong.kim@ninanobiz.com

© The Society for Aerospace System Engineering

드론은 4차 산업의 핵심 요소로써 많은 관심을 받아 왔으며 다양한 활용성을 바탕으로 여러 산업 분야에 적용시킴으로써 산업 현장의 변화를 유도하고 작업 수행 방식을 혁신적으로 변화시켜왔다. 특히 최근 UAM 산업의 대두와 우크라이나 전쟁에서의 드론 활용 등으로 인해 그 관심과 전망이 크게 증가하는 추세이다.

드론은 항공 사진, 영화 촬영, 농업, 인프라 검사, 수색 및 구조 작업 등과 같은 영역에서 다양하게 활용되고 있으며, 최근에는 물류 운송에 있어서도 활용성과 경제성을 찾기 위해 다양한 노력을 기울이고 있다. 그러나 드론 산업의 성장에 따라 보급률이 증가하고 일상 생활에 보다 가까이 활용됨에 따라 안전하게 운용할 수 있는 제도, 시스템, 그리고 기술 개발이 필수적이다.

경상북도 김천시는 2021년부터 국토교통부의 디지털 물류 실증 지원사업과 2022년-23년의 드론 실증도시 지원사업 등을 통하여 도심지 내, 그리고 도심과 비도심을 연결하는 물류 운송에 대해 드론을 적용하는 방안을 실증하고 있다. 특히 도심지는 많은 인구가 밀집하여 생활하는 공간으로, 드론 물류 운송의 실증과 수요 창출에 유리하나 비행 안전성 확보가 필수적이다. 특히 드론의 경우 비행 중 문제가 발생할 경우 대응이 어려우며 안전한 운용을 위하여 사전에 비행 안전성에 대한 철저한 평가가 필수적이다.

이러한 안전성 평가를 위해 실험적으로 접근하는 경우 비행 안전성을 해치는 환경을 모사하기 어려울 뿐만 아니라 높은 비용과 긴 시간이 소요되므로 접근이 쉽지 않다. 전산 유동 해석(CFD) 기법을 활용할 경우 비행 환경을 모사하기 용이하며 다양한 환경을 비교적 짧은 시간에 검토해볼 수 있으므로 매우 효율적인 접근 방법이 될 수 있다[1].

본 연구에서는 드론의 비행 경로를 계획하고 해당 경로 비행 중 바람에 의한 안전성을 평가하기 위한 기본 연구를 수행하였다. 이를 위하여 유동장을 예측하기 위한 대상 도심지를 선정하고 3차원 모델링 및 CFD 해석을 수행하였다. 도심지 내 이착륙장, 그리고 드론의 비행 경로를 임의로 선정하여 비행 중 비행체가 경험하는 바람과 난류 강도를 평가하였으며 이를 통해 비행 중 발생 가능한 위험 상황을 구분하였다.

2. 도심지 유동 환경 전산 유동 해석

2.1 대상지 선정 및 전처리

물류 운송을 위한 드론의 비행은 경북 김천의 혁신도시(울곡동)를 대상으로 하고 있으며, 이를 위하여 김천 혁신도시를 중심으로 환경 유동 해석 대상지를 선정하였다. 우선, 격자 생성을 위하여 3차원 도심지 모형이 필요한데 이를 위해 국토정보플랫폼에서 제공하는 김천시(울곡동) 수치지형도[2] v1.0을 활용하였다.

수치지형도는 2차원 지도를 나타내고 있으므로, 3차원의 공간 정보를 재구성하기 위해서는 각 지형과 건물의 높이 정보가 필요하다. 이러한 작업을 위해 QGIS[3]를 이용한 수치표고모형(Digital Elevation Model, DEM) 제작을 통해 기본적인 지형의 높이를 확

인하였고 공간정보 오픈플랫폼인 Vworld[4] WebGL 기반 지도에서 건물별 높이 정보를 수집하였다.

16방위의 유동 해석을 수행하기 위하여 김천 혁신도시에 위치한 주요 건물인 한국도로공사 본사, 한국전력기술 본사 등의 공공기관 건물과 12개의 아파트 단지를 포함하도록 반경 1km의 유동 해석 대상지를 선정하였다. 다만, 지표고와 건물 외에 도로나 철도, 임야와 전답 등에 따른 지표는 별도로 구분하지 않았다.



Fig. 1 Digital Topographic Map of Gimcheon-si (Yulgok-dong)

Figure 2는 유동 해석을 위해 전처리 과정을 거친 대상지(울곡동)의 3차원 공간 모델을 나타내고 있다. 360도 유동 해석을 위하여 해석 영역은 원형으로 설정하였으며 경계면에서 유입되는 유동의 발달을 유도하기 위하여 30m 길이의 버퍼 영역(buffer region)을 구성하였다. 아파트, 학교 등의 공공기관이나 상가 등 건물들의 경우 3차원 모델링을 진행하였으나, 일부 모델에 대해 평면 정보와 수직 고도 정보만으로 재구성되어 엄밀한 모델링이 되지 않은 경우도 발생하였다.



Fig. 2 3D Geometric Model of the Simulation Area

2.2 전산 유동 해석 기법

전산 유동 해석(CFD)을 수행하기 위하여 공개 소스 CFD 해석도구인 OpenFOAM[4]을 활용하였다. ESI-OpenCFD 그룹의 OpenFOAM-v2106을 기반으로 하였으며 효율성과 안정성을 개선한 정상상태 유동 해석

자인 simpleFoam.n3[6]를 이용하여 유동 해석을 수행하였다. 난류 모형은 k- ω SST 모델을 사용하였으며 유입류는 균일 유동(uniform flow)로 설정하였다. 지면과 벽면은 rough wall function을 적용하였는데, 실제로는 바닥면(terrain)의 종류에 따라 그 거칠기를 다르게 적용해야 하지만 각 바닥면 종류별 거칠기에 따른 모델링 연구의 부재와 연구 효율성 등을 감안하여 모든 바닥면에 동일한 거칠기를 적용하였다.

격자는 OpenFOAM에서 제공하는 격자 생성 도구인 snappyHexMesh[7]를 이용하여 작성하였다. 벽면 주변으로 밀집한 격자를 구성하였으며, 총 격자 개수는 약 988만개이다. 유동은 정북을 기준으로 시계방향으로 22.5도 간격, 총 16개의 유동 조건에 대해 해석을 수행하였다. 아직 드론 비행을 위한 바람 기준이 명확하게 제시된 바는 없으나 실증사업 수행에 있어서 드론의 비행 가능 여부를 판단하기 위한 기준으로 평균 풍속 5m/s, 순간 풍속 10m/s를 적용하고 있으며, 이를 고려하여 유동 해석을 위한 경계면에서의 유속 조건으로 풍속 5m/s를 설정하였다.

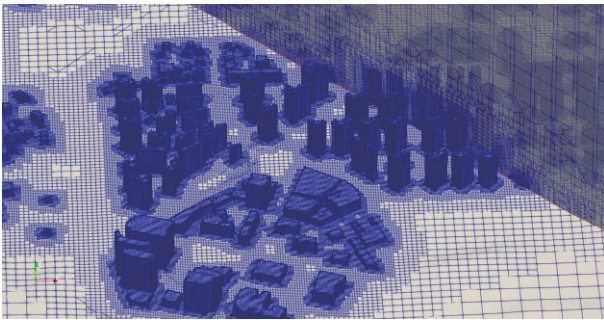


Fig. 3 Grid Arrangement Around Building

2.3 전산 유동 해석 결과

유동 해석은 1,000번의 반복계산을 수행하였으며, Fig. 4에서 보듯 대체로 수렴된 residual 분포를 보였다. 다만, 압력 residual은 그 수치가 다소 높는데, 이는 비정상 유동에 대해 정상 상태 해석을 적용하여 발생한 현상으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 경향성 파악이 주요하므로 정상상태 해석만 대상으로 한다. 풍향에 따라 수렴 속도의 차이는 있으나 경향은 서로 비슷하였다. 해석 결과는 ParaView를 이용하여 Fig. 5에서 보듯 건물 주변의 압력과 유속의 분포, 그리고 난류 분포 등을 가시화하여 확인할 수 있다. 또한 유동장에서 드론 비행 경로를 따라 속도 및 난류 데이터를 추출하여 드론 안전성 평가에 활용하였다.

유동 해석 결과 아파트 단지를 지나는 유동의 교란이 강하게 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 아파트 단지 내 빈 공간(void) 또는 아파트 단지과 단지 사이 공간에서 강한 재순환(recirculation) 영역이

형성되며 아파트 단지 위를 지나는 유동은 일시적으로 가속되는 경향을 보인다. 이로 인해 아파트 높이 이하의 고도에서는 아파트 후방에서 재순환에 의한 영향을, 아파트 높이보다 높은 고도에서는 가속된 유동에 의한 영향을 받을 것으로 예상할 수 있다.

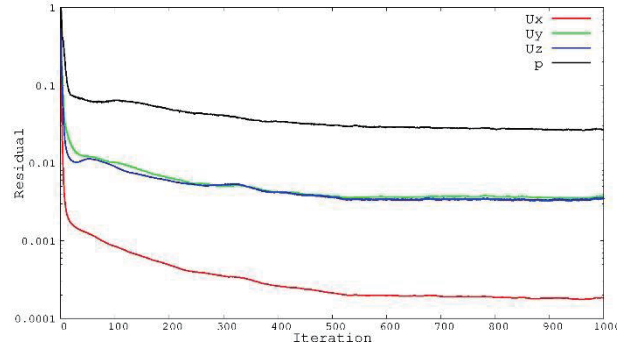


Fig. 4 Residual Distribution of E Wind Case

아파트 단지는 비슷한 높이의 건물이 비교적 넓은 면적에서 밀집하는 구조로 환경 유동의 교란을 야기하는 중요한 요소 중 하나이다. 또한 100m 이상의 높은 건물의 경우 건물 후방(바람이 불어오는 방향 기준)에서 재순환 영역이 형성된다. 다만, 본 연구에서 수행한 해석은 정상상태 해석으로 건물 뒤편에서 발생할 것으로 예상 가능한 와류(vortex)의 진동(oscillation)에 의한 영향은 해석 범위에서 제외하였다.

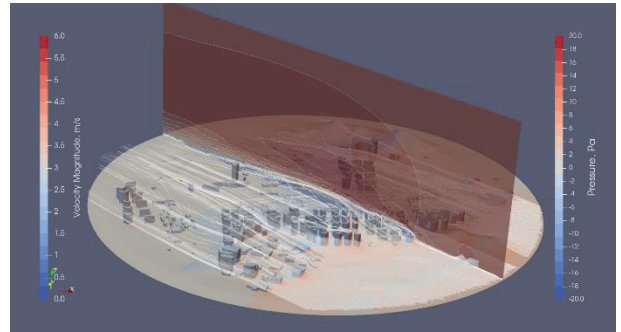


Fig. 5 Resultant Flow Field of an Environmental Flow Simulation of the SE Wind Case

3. 비행 경로 안전성 평가

3.1 비행 경로의 선정

김천 혁신도시는 381만 km^2 의 부지에 수용 인구가 27,000여명의 도심으로, 12개의 공공기관과 아파트 단지가 위치해 있다. 특히 유아 및 청소년 비율이 높은 도심 지역으로 드론이 자유롭게 비행하기 어려운 지역이다. 김천혁신도시의 중심부를 동서로 가로지르는 하천이 있으며, 드론 비행은 해당 개천을 중심으로 수행하는 것이 적절할 것으로 예상된다. 이 때 하천을 중

심으로 한 예상 비행 경로가 Fig. 6에 나타나 있다.

비행 경로를 중심으로 북쪽으로는 상가, 공사, 관공서 등이 위치해 있으며, 상대적으로 밀도와 높이가 낮은 건물들이 분포해 있으나 한국도로공사 본사와 한국전력기술 본사와 같이 높이가 100m 이상 되는 구조물이 위치하기도 한다. 반대로 경로 남쪽으로는 아파트 단지가 위치하고 있어 비교적 높은 건물들이 높은 밀도로 분포되어 있는 특징이 있다. 바람 방향은 북쪽을 기준(0도)으로 하여 시계 방향으로 증가하도록 정의하였으며, 이 때 비행 경로는 270도에서 90도 방향으로 진행하는 것으로 설정하였다.

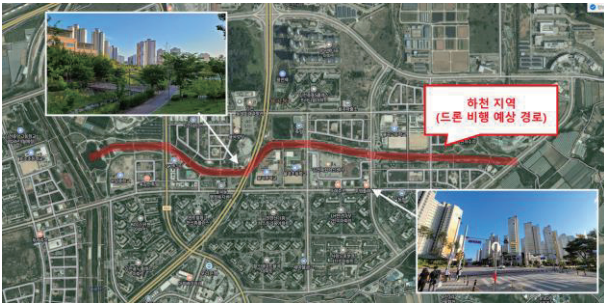


Fig. 6 Expected Flight Path of a Delivery Drone.

외부 유동이 있는 조건에서 바람이 빌딩숲(building complex)을 지나며 교란이 발생하며, 이러한 교란이 드론에 미치는 영향을 최소화하는 고도를 비행 경로로 선정하는 과정이 필요하다. 다만, 고도가 높으면 높을수록 비행을 위해 소모하는 에너지가 커지므로 효율성의 관점에서는 가급적 낮은 고도에서 비행하는 것이 유리하다. 따라서 이러한 상황을 종합적으로 판단하여 비행에 영향을 최소화할 수 있는 범위에서 가능한 낮은 고도를 비행 경로로써 선정한다. 또한 드론이 비행 가능한 고도가 지표고 150m 이하임 고려하여 40m~120m 사이의 고도를 20m 간격으로 나누어 풍향별 바람에 의한 영향을 분석하였다. 이 때 Fig. 4의 평균 지표고가 해발 70m이며, 이를 기준으로 동일 해발 고도를 비행 고도로 선정하였다. 즉, 고도 40m의 비행 경로는 해발고도 110m인 비행경로와 동일하다.

3.2 비행 경로에 따른 유동 특성 분석

Figure 7과 8은 각각 풍향과 고도에 따른 항로상 평균 풍속과 최대 풍속을 나타낸다. 즉, 비행체가 각 풍향 조건에서 Fig. 6의 비행 경로를 따라 비행 중 겪게 되는 순간적인 최대 풍속과 경로 전체에 걸친 평균 풍속을 의미한다. Fig. 7에서 90도와 270도 바람 조건에서는 상대적으로 평균 풍속이 높는데, 이는 해당 방향에서 유동을 교란하는 요소가 없기 때문인 것으로 보인다. 반대로 대체로 남쪽에서 불어오는 바람의 경우

바람의 교란이 강해 낮은 고도에서 평균 풍속이 상당히 낮은 것을 확인할 수 있다. 고도가 높아질수록 평균 풍속은 점차 증가하는 경향을 보이며, 최대 풍속의 경우 80m 이상에서 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다.

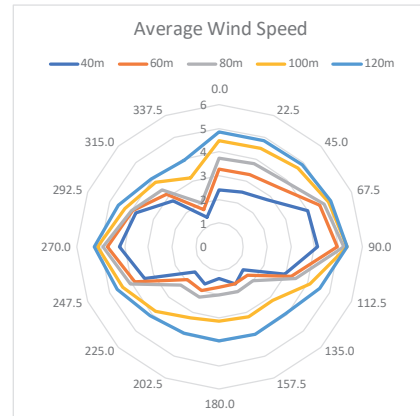


Fig. 7 Average Wind Speed with the Wind Direction and Altitude

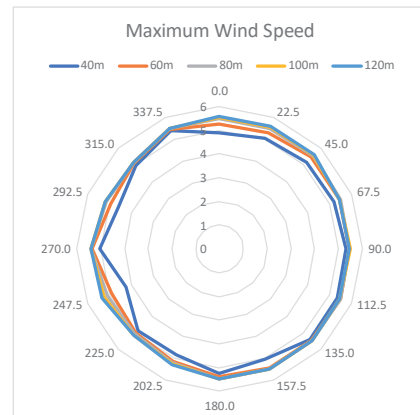


Fig. 8 Instantaneous Maximum Wind Speed with the Wind Direction and Altitude

Figure 9은 풍향과 고도별 비행 경로를 따라 바람의 변화되는 기울기(du/dl)를 나타내고 있다. 이 때 기울기는 수치적으로 계산된 값을 바탕으로 비행 경로상 각 점들의 데이터를 추출한 후 이를 중앙 차분(central differencing) 기법으로 계산하였다. 기울기가 크다는 것은 드론이 비행함에 있어서 바람의 변화가 큰 영역을 지난다는 의미이다. 기울기가 낮을수록 드론이 비행함에 있어서 경로상 바람의 변화가 크지 않음을 의미한다. 북쪽과 남쪽에서 불어오는 바람의 경우 건물들에 의한 유동 교란이 커 평균 풍속은 줄고 바람의 최대 기울기는 증가하는 모습을 확인할 수 있다. Fig. 10은 유동 방향이 0도인 경우(북풍) 고도 40m 높이에서 유속의 분포와 비행 경로에 따른 유속 분포를 나타내고 있다. Fig. 10(a)에서 흰색 선으로 표시한 것이 비행 경로이며, 해당 경로를 따라 유동 속도의 크기와 x,

y, z 방향 성분, 그리고 난류 운동 에너지의 분포가 Fig. 10(b)에 나타나 있다. 비행 경로의 북쪽으로는 낮은 언덕과 높은 빌딩, 그리고 아파트 2개단지가 있으며 이들로 인해 영향을 크게 받는 모습을 보인다.

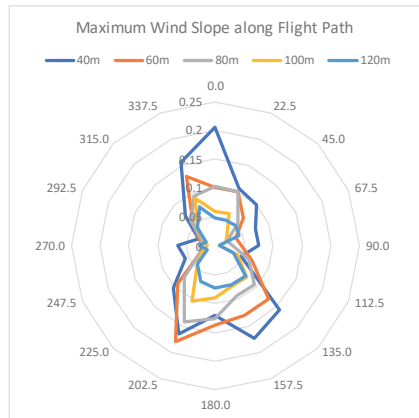
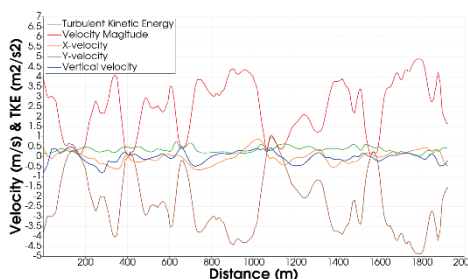


Fig. 9 Maximum Slope of Wind Speed Along the Flight Path

이와 대조적으로, Fig. 11에서 보듯, 90도(동풍) 조건에서는 바람의 교란이 크지 않다. 이는 건물의 배치가 동서를 가로지르는 하천을 중심으로 남북으로 주로 배치되어 있으며 결과적으로 동풍 조건에서는 바람이 잘 빠져나가는 모습을 보인다. 동풍의 경우 비행 경로 중 존재하는 낮은 건물들(학교 또는 상가 등)과 지상의 고저에 따른 유동의 교란이 일부 영향을 주는 모습을 볼 수 있으나 전반적으로 북풍과 비교했을 때 드론이 비행 중 겪는 유속의 변화가 크지 않은 모습을 확인할 수 있다.

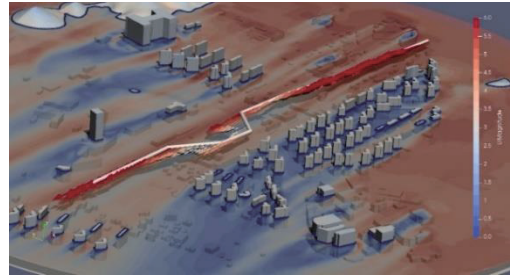


(a) Wind contour and vector along the flight path

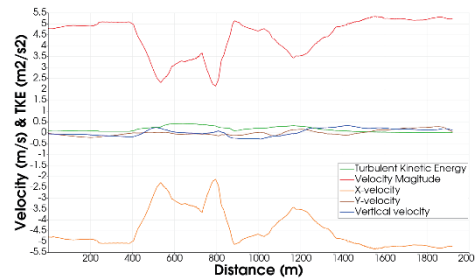


(b) Wind velocity and turbulent kinetic energy distributions along flight path

Fig. 10 Velocity Contour with Flow Vector and Velocity Distributions Along the Flight Path at Altitude 40m and Wind Direction 0.0 Degrees (North Wind)



(a) Wind contour and vector along the flight path



(b) Wind velocity and turbulent kinetic energy distributions along flight path

Fig. 11 Velocity Contour with Flow Vector and Velocity Distributions Along the Flight Path at Altitude 40m and Wind Direction 90.0 degrees (East Wind)

특히 건물들의 경우 남향으로 지어지는 경우가 많아서 대체로 동서로 긴 구조를 하고 있는데, 북풍의 경우 바람을 맞는 면적이 넓어 이에 따른 영향을 받는 후류의 면적이 넓은 반면 동서로 부는 바람에서는 바람을 맞는 면적이 좁아 후류도 비교적 좁은 영역에서 형성되는 것을 확인할 수 있다.

비행경로 남쪽으로 형성된 아파트 단지의 경우 건물 높이가 60~80m로 다양하고 그 형태도 정남향의 박스형 건물과 남동/남서향의 쉐기(wedge)형 건물이 복합적으로 분포하고 있어 이들이 유동에 미치는 영향을 일반화하기 어렵다. 그러나 대체로 고도 100m 이상 되어야 그 영향이 다소 완화되는 것으로 판단된다.

3.3 비행 위해 요소 및 안전성 분석

일반적인 드론의 경우 측면에서 불어오는 균일한 바람에서는 10m/s 이상의 높은 속도의 바람이라도 기체 자세를 비교적 잘 유지한다. 통상 순간적으로 불어오는 돌풍과 상하방 바람, 그리고 난류 등이 위험한 환경으로 인식된다. 비행 중 드론이 겪는 바람의 변화(기

울기)는 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다. 동서로 불어오는 경우에는 바람의 경로 방향 차분 성분이 모든 비행 고도 영역에서 단위길이(m)당 0.1m/s 이내로 작으나 남북으로 부는 방향에서는 고도 100m 이상에서만 0.1m/s/m 이하의 적은 차분 성분을 보이고 있다.

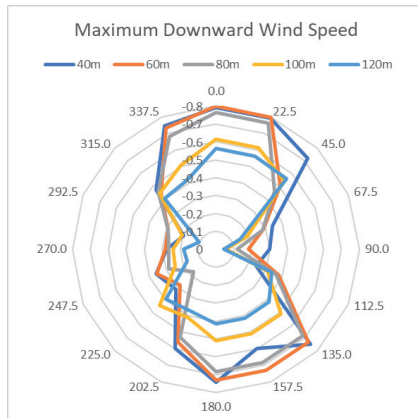


Fig. 12 Maximum downward wind speed distribution with the wind direction and altitude

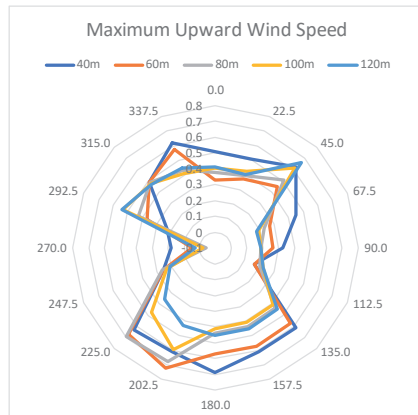


Fig. 13 Maximum upward wind speed distribution with the wind direction and altitude

Figure 12와 13은 각각 풍향과 고도 조건에서 경로 상 최대 하방풍과 상방풍 분포를 나타내고 있다. 이 역시 마찬가지로 동서 바람에 대해서는 전 고도에 걸쳐 하방풍과 상방풍이 크지 않은 것을 알 수 있다(자유 흐름 유속의 5% 이내). 그러나 남북으로 부는 바람에 대해서는 자유 흐름 유속의 10~16% 수준의 하방 또는 상방풍이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 결과적으로 고도 100m 이상에서 비행해야 한다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFD를 활용하여 도심 내 드론 비행 경로의 계획과 안전성 평가 방법을 제시하였다. 도심 지역에서의 드론 비행 수요는 빠르게 증가하고 있는데

반해, 드론 운용을 위한 경로 계획과 안전성 평가 방법은 아직 정립되어 있지 않으며 주로 실험적으로 접근하고 있어 평가에 한계가 있었다. 본 연구에서는 CFD를 활용하여 도심의 복잡한 3D 공간에서 유체 역학을 고려한 비행 경로를 계획하고, 각 경로의 안전성을 정량적으로 평가하는 방법을 적용하였다. 김천 혁신도시를 대상 지역으로 설정하여 도심 지역의 특성을 고려한 시뮬레이션을 수행하였다.

제안된 CFD 기반 비행 경로 계획 및 안전성 평가 방법을 통해 실제 비행을 하지 않아도 실제 비행이 예상되는 경로를 따라 환경 유동에 따른 위험도를 사전에 평가하고 경로 선정을 위한 기본 데이터를 제공할 수 있다. 또한, CFD 기반 비행 경로 계획은 도심 지역의 다양한 환경 요소를 고려하므로 드론 운용자에게 더욱 정확하고 안전한 비행을 지원하는데 도움이 될 것으로 기대된다. 이러한 방법론은 도심 내 드론 운용의 확장과 스마트 도시 구축 등에 기여할 수 있다.

하지만, 본 연구는 여전히 몇 가지 제한 사항이 존재한다. 해석의 효율성을 위하여 정상상태 해석을 수행하였으며 와류 등 비정상 유동에 의한 평가는 고려되지 않았다. 또한 도로나 철도 등 도심지의 더 많은 요소에 대한 엄밀한 모델링과 함께 실험적 검증이 이루어져야 한다. 이러한 제한 사항을 극복하기 위해 추가적인 연구를 수행하고 실제 드론의 동역학 모델링을 반영한 시뮬레이션을 통하여 보다 엄밀한 드론 운용 안전성 평가가 가능할 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 2022년도 중소벤처기업부의 기술개발사업 지원에 의한 연구임 (S3312825)

References

- [1] G.H, Kim and A. Hwang, "Assessment of Safety during Approach of a Drone to Urban Areas using Computational Fluid Dynamics," Proceeding of 2022 KSAS Conference, pp.964-965, Nov 2022.
- [2] National Spatial Data Infrastructure Portal, <http://www.nsd.go.kr/lxportal/>
- [3] QGIS, a free open source Geometric Information System, <https://qgis.org/en/site/>
- [4] Spatial Information Open Platform <https://www.vworld.kr/>
- [5] OpenFOAM, <https://www.openfoam.com/>
- [6] G.H. Kim, "Cost Effective CFD Simulation Method using

Cloud Services and OpenFOAM," Proceeding of the 2021 KSCFE Fall Conference, Nov 2021.

- [7] OpenFOAM User Guide: 4.4 Mesh generation with the snappyHexMesh utility,
<https://www.openfoam.com/documentation/user-guide/4-mesh-generation-and-conversion/4.4-mesh-generation-with-the-snappyhexmesh-utility>