

## 도심항공교통(UAM) 운용 실증 노선의 기상 특성 및 시사점: 한강회랑의 시정 및 바람을 중심으로

원완식\* · 김연명

한서대학교 항공산업공학과

(접수일: 2023년 8월 14일, 게재확정일: 2023년 8월 23일)

### Weather Barriers of Urban Air Mobility (UAM) Operations: A Case Study of the Visibility and Wind Shear around Han-River Corridor

Wan-Sik Won\* and Yeon Myung Kim

Department of Aerospace Industrial and Systems Engineering, Hanseo University, Taean, Korea

(Manuscript received 14 August 2023; accepted 23 August 2023)

**Abstract** Urban Air Mobility (UAM) is promising, sustainable and efficient air transportation in a metropolitan area. Korean government has recently announced operation demonstration plans as a step toward commercialization of UAM. However, there is lack of understanding on the potential impact of weather on UAM operation. We collected weather observations from Gimpo International Airport and 5 automatic weather stations (AWS) along UAM corridor of the Han-River to assess weather barriers such as low visibility, wind gust and wind shear. The results show the frequency of low visibility near the corridor fluctuated significantly from year to year depending on the concentration of fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) in Seoul. The frequency of high wind speed-shift calculated using 1-minute wind observations was increased not only during the spring season (March, April, and May) but also the beginning of rainy season (Jun). In addition, a chance of high wind shear from 1-minute wind observations varied by the stations, suggesting that the condition is largely affected by topography including a river and high-rise buildings. These basic weather properties suggest that there are substantial weather barriers to UAM operations along the Han-River Corridor, while they cannot properly surveil micro-scale weather conditions in detail such as wind gust and wind shear over the corridor. Thus, this study suggests that potential barriers related to adverse weather need to be evaluated, building high-density weather observations infrastructure prior to UAM demonstration and commercialization.

**Key words:** UAM, Han-River Corridor, Low Visibility, Wind Shear, Wind Gust

## 1. 서 론

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)이란 친환경 전기동력수직이착륙기(eVTOL, electric vertical

takeoff and landing)를 이용하여 도심 내 또는 도심과 외곽을 연결하며 사람과 화물을 수송하는 항공교통체계로서 지상의 교통혼잡과 환경문제 등을 획기적으로 개선할 수 있는 대안으로 떠오른 이후 실용화를 위한 연구가 한창이다(MOLIT, 2021b). 최근에는 도심뿐 아니라 도심과 외곽을 연결하거나 특정 지역 간의 교통 수단 등으로 운용 개념이 확대되면서 미래항공교통(Advanced Air Mobility, AAM)의 하위 개념으로 분류되기도 한다(FAA, 2023).

\*Corresponding Author: Wan-Sik Won, Department of Aerospace Industrial and Systems Engineering, Hanseo University, Taean, Chungcheongnam-do 32158, Korea.  
Phone: +82-41-671-6243, Fax: +82-41-671-6248  
E-mail: wswon@hanseo.ac.kr

2013년 독일의 ‘볼로콥터’사가 시험비행을 실행한 이후(Volocopter, 2013), 세계 최대의 차량공유 업체 중 하나인 ‘우버’가 2016년 UAM 서비스를 위한 회사 우버 엘레베이트(Uber Elevate)를 설립하고 뉴욕 맨하튼에서 JFK 국제공항까지 헬리콥터를 이용한 서비스를 운영하면서 큰 관심을 불러 일으켰다(Kulwin, 2019). 2017년 9월에는 아랍에미리트 두바이 모래밭 위에서 독일 볼로콥터(Volocopter)의 2인승 무인비행체( unmanned flying vehicle)가 두바이 왕세자를 태우고 약 5분간 200 미터 시험 비행을 하였고(Moon, 2017), 싱가포르에서도 2019년 10월 에어 택시 개념으로서의 볼로콥터 기체가 약 40 m 고도에서 약 2분간 1.5 km 거리를 비행하였다(Volocopter, 2019). 국내에서는 항공안전기술원 주관으로 열린 2020년 11월 UAM 실증행사에서 중국 기체인 이항(Ehang)이 한강 상공에서 비행하였고(MOLIT, 2020), 2021년 11월 김포공항에서 2인승 기체인 독일의 볼로콥터가 50 m 이하의 고도에서 약 3 km 비행 시연을 하였다(MOLIT, 2021a). 최근에는 2023년 5월 국토교통부와 서울시는 UAM 실증을 거쳐 2025년 상용화를 위한 단계로서 아라뱃길, 여의도, 잠실 등 단계별 구체적인 실증 노선을 발표함으로써 UAM의 상용화에 대한 기대가 높아지고 있다 (MOLIT, 2023; Seoul City, 2023).

한편, UAM이 실제 상용화로 이어지기 위해서는 운용 체계의 기술적 제도적 정비뿐만 아니라 잠재적 시장 규모에 대한 이해와 이러한 시장성을 확보하기 위한 과제들을 인식할 필요가 있는데, UAM에 대한 기술, 안전, 운임 수준 등과 관련된 사회적 수용성(societal acceptance)과 악기상(adverse weather)에 의한 운용 제한이 그것이다(Reiche et al., 2018). Reiche et al. (2021)의 연구에 따르면 미국의 상당수의 도시에서 UAM이 운항 가능할 것으로 예상되는 아침 7시부터 오후 6시까지의 낮 시간 동안 잠재적인 날씨 영향을 받는 시간이 평균 약 6시간 정도로 그 비율이 절반 이상인 경우가 많은 것으로 분석되었다. 또한 날씨 요소는 UAM의 운용 제한뿐만 아니라 기상 상태에 따른 탑승 의향에도 영향을 미치는 등 사회적 수용성과도 밀접한 연관이 있는 것으로 알려져 있다(Reiche et al., 2018; Ragbir et al., 2020; Reiche et al., 2021).

UAM의 운항은 거리, 고도 등의 규모와 도심과 관련된 환경적인 측면에서 기존의 항공교통과는 다른 특성을 지니고 있다. 일반적으로 항공기 운항에 위협적인 영향을 미치는 대기의 연직운동은 대류에 의한 것과 기계적 난류에 의한 것이 있는데, 여름철 도심의 구역별 비균등 가열과 고층 빌딩에 의한 난류는 눈에 보이지 않는 대기의 연직운동을 강화할 수도 있다(Lester, 2013). 특히 도심의 미기상(micro-meteorology) 현상들은 수 미터 규모에서 급격한 바람의 변화를 야

기할 수 있어서 기존의 기상 자료에 비해 더욱 고해상도의 관측과 예측 정보를 요구한다. 미국 항공우주국(NASA)의 운용개념서에 따르면 날씨에 의한 영향 또는 충격으로부터 회복력을 갖추기 위해서는 특히 바람에 대한 불확실성을 줄이는 것이 필요하다(NASA, 2020).

UAM은 저고도를 비행하는 소형 기체라는 특성상 저고도의 도심의 기상특성을 이해하는 것이 필요하지만 그러한 환경에서의 UAM 운항에 미치는 기상 영향에 관한 연구는 매우 부족한 실정이다. 해외의 연구 사례에서는 악기상에 의한 영향과 그와 관련된 사회적 수용성에 관한 연구가 어느 정도 수행되고 있으나(Ragbir et al., 2020; Reiche et al., 2021), 국내에서는 여전히 UAM 실증과 운용을 위한 날씨 영향에 대한 연구가 거의 없는 상황이다. 따라서 본 연구에서는 향후 실제 UAM 운용을 위해 기상 요소가 어느 정도 영향을 미칠지에 대한 기초 연구로서 실증 계획이 논의되고 있는 김포공항으로부터 한강의 일부 UAM 회랑에 대하여 현재 수집 가능한 지상의 기상 관측 자료를 이용하여 UAM 운용에 영향을 미칠 수 있는 시정과 바람의 특성에 대해 고찰하고자 한다. 추가로 날씨에 의한 운용 제한 등 UAM에 미치는 기상 요소와 그 영향을 파악하기 위해 필요한 과제를 제시하고자 한다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 연구대상 지역 선정 및 자료 수집

2023년 5월 국토교통부와 서울시가 발표한 실증 1 단계는 아라뱃길 노선(드론시험인증센터~계양 신도시) 실증이며, 2단계와 3단계는 여의도(김포공항~여의도, 18 km)와 잠실(잠실~수서, 8 km) 2개 노선으로 예정되어 있다. 본 연구에서는 기상청의 기상관측망이 타 지역에 비해 상대적으로 많이 구축되어 있는 서울을 연구 대상으로 설정하였다.

기상청은 전국에 95개 종관기상관측소(Synoptic Station)와 약 510여 지점에 자동기상관측장비(Automatic Weather Station, AWS)를 설치하여 운영하고 있다. 그 중 서울시 지역(서울시, 광명시, 과천시 포함)에는 35개의 AWS가 기온, 바람, 강수, 습도, 기압 등의 기상요소를 관측하고 있다(KMA, 2023b, 2023c). 본 연구에서는 Fig. 1에서와 같이 UAM 실증 2단계 예정 구간인 김포공항~여의도 회랑에 대하여 가용한 기상 관측 자료를 다음과 같이 수집하였다.

김포공항 2015~2022년 8년간의 기상관측보고(Meteorological Aerodrome Routine, METAR) 자료와 한강 주변 5개 지점의 2022년 기상청 자동기상관측(AWS) 자료를 획득하여 분석하였다. 김포공항 METAR는 시간별 자료로서 8년간의 데이터 수는 누락된 자



**Fig. 1.** Han-River UAM Corridor (blue dashed line), Gimpo International Airport (red circle), and 5 AWS stations (yellow color)-Gangseo (404), Yancheon (405), Yeongdeungpo (510), Hangang (418), and Yongsan (415). 3 digit numbers indicate a station number of the each AWS. (Map source: ©Naver Map & KMA Weather Data Service (<https://data.kma.go.kr/>)).

료 없이 총 70,104개이며, 5개 지점의 AWS 자료는 1분당 자료로서 1년치의 데이터 수는 자료 누락이 없을 경우 지점당 총 525,600개인데, 장비의 오작동이나 점검 또는 통신 장애 등으로 일부 누락된 관측을 제외하고 지점별로 약 520,000개 안팎의 자료가 수집되었다. Figure 1은 서울시의 UAM 실증 예정지인 한강 회랑(파란 점선) 및 김포공항(붉은색 동그라미)과 다섯 개의 AWS 지점(노란색 표시)의 위치를 나타낸다. 왼쪽에서 오른쪽으로 순서대로 김포공항, 강서(404), 양천(405), 영등포(510), 한강(418), 용산(415) 지점의 위치를 나타내며 AWS 지점의 괄호 안 숫자는 각 지점에 부여된 고유 번호를 나타낸다.

**2.2 시정(visibility) 자료 수집 및 분석 기준**

시정 관측 자료는 김포공항 METAR에서 수집하였다. 종관 기상 관측에서는 일부 유인 관측소에서 시정을 관측하기도 하지만 AWS 지점에서는 시정을 관측하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 김포공항 METAR의 시정 자료를 수집하였다. 또한 미세먼지 농도가 시정의 변화에 상당한 영향을 미치는 것으로 알려져 있어(Won et al., 2020), 김포공항 인근의 미세먼지 측정

소의 자료를 수집하여 항공기 운항에 영향을 미칠 수 있는 저시정(low visibility)의 빈도수가 얼마나 되는지를 살펴보았다.

초기 UAM 운용은 실증 목적으로 현재의 공역 체계를 따를 가능성이 높다. 운용 방식은 현재의 시계비행규칙(Visual Flight Rules, VFR)과 유사할 것으로 예상되고 조종사 탑승, ATC (Air Traffic Control, 항공교통관제) 업무 제공이 되는 형태로 예상된다(Thippavong et al., 2018). 시계비행규칙은 항공안전법 시행규칙과 국토부 행정규칙으로서 ‘고정익 및 회전익을 위한 운항기술기준’에 명시되어 있는데, 시정(visibility; 사물이 보이는 최대 거리)과 운고(ceiling; 하늘의 절반 이상을 덮고 있는 구름의 최저면 높이)를 기준으로 정해진다. 시계비행은 시정이 3 마일(약 5,000 m) 이상 확보될 때 수행하도록 규정되어 있다. 따라서 본 연구에서의 저시정의 기준으로는 시계비행 임계값인 5000 m를 기준으로 최근 8년간의 평균 시정 변화 경향을 살펴보았다.

**2.3 바람(wind) 자료 수집 및 분석 기준**

AWS 바람 자료는 360도(degree) 단위의 풍향과 m

$s^{-1}$  (meter per second) 단위의 풍속이며, 1분 평균 자료와 10분 평균 자료가 저장된다. 본 연구에서는 최대한 시간 해상도가 높은 바람의 특성을 살펴보기 위해 1분 자료를 사용하였고, 풍속의 단위는 항공기상 관측에 사용하는 노트(knot, kt)로 변환하여 사용하였다.

한편, 본 연구에 사용된 기상 자료에는 윈드시어 측정값이 없으므로 지점별 윈드시어(wind shear)를 간접적으로 추정하기 위한 방법으로 1분당 바람의 변화량을 계산하였다. 윈드시어는 수평적 또는 수직적으로 풍향과 풍속이 급변하는 현상을 말하며, 우리나라 기상업무에서는 기상법 시행령 제10조 ‘항공기에 대한 예보 및 특보’에서 ‘항공특보’에 해당하는 기상현상 중의 하나로서 ‘급변풍(wind shear)’, 즉 ‘급변풍’ 다음의 괄호 안에 한자어 대신 영문으로 표기함으로써 용어의 의미를 명확히 하고 있다.

이러한 윈드시어 개념을 적용한 바람의 변화 특성을 보기 위해 1분간 풍속의 변화량을 계산하여 풍속이 급변하는 현상의 빈도수를 분석하였다. UAM의 운항에 있어서 어느 정도의 급격한 풍속 변화가 유의미한 영향을 미치는지는 거의 알려지지 바가 없다. 다만, 항공기상에서 저고도 윈드시어의 강도별 분류는 100 ft 당 풍속 변화가 4 kt 미만인 경우는 약한 윈드시어, 4에서 8 kt 사이일 때는 중강도 윈드시어, 8 kt 이상일 때는 강한 윈드시어로 구분하고 있다(Lester, 2013). 본 연구에서는 Park and Chae (2018)의 서울지역 해륙풍 연구를 참고하여 분당 6 kt의 풍속 변화를 해풍 전선과 같은 위험 기상을 진단할 수 있는 유의미한 임계값으로 설정하였다. Park and Chae (2018)의 연구에 의하면, 서울지역의 해륙풍 사례에서 약 10분간 기온은 약 4°C 하락하며 풍속은 약 10 kt 이상 급증하는 현상으로 해풍전선이 확인되었는데, AWS 1분 바람자료의 변화로는 분당 약 6 kt를 임계값으로 설정 시 이러한 해풍전선의 유무를 식별할 수 있을 것으로 판단하였다.

또한 풍속뿐만 아니라 풍향이 함께 급변하는 현상을 파악하기 위해 1분간 바람의 벡터(vector) 변화량을 계산하여, 벡터의 크기가 분당 10 kt 이상 변화하는 사례의 빈도수를 분석하였다. 위의 풍속 급변 기준값과 마찬가지로 10 kt의 바람 벡터 변화가 UAM의 운항에 어떠한 영향을 미치는지에 대해 알려진 바는 없으나, ICAO (International Civil Aviation Organization; 국제민간항공기구) Annex 3(부속서 제3권)의 항공기상관측 규정에 의하면, 평균 풍속이 10 kt 이상에서 풍향이 60도 이상 변하는 경우는 유의미한 기상 변화로서 특별 관측을 실시하여 보고하도록 하고 있다.

Figure 2는 두 바람벡터를 이용하여 윈드시어를 계산하는 예를 보여준다(ICAO, 2005). Figure 2에서 좌측의 바람 벡터는 해당 시간의 풍향 및 풍속으로 나

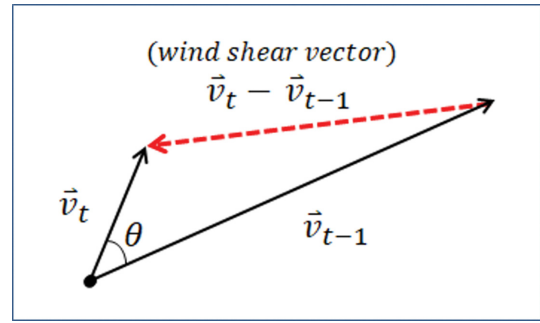


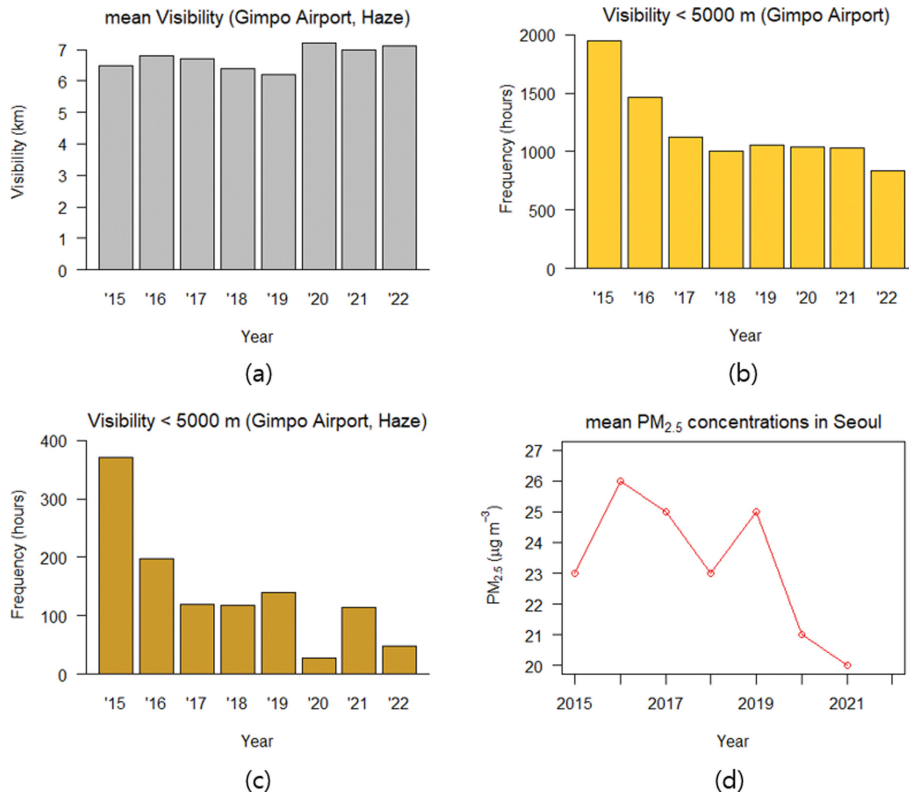
Fig. 2. Illustration of wind shear calculation using two wind vectors of 1-minute intervals.

타내며, 오른쪽 바람 벡터는 1분 전 바람을 나타낸다. 두 벡터 사이의 각( $\theta$ )은 두 바람의 풍향 변화를 나타내며, 붉은색 점선으로 나타낸 벡터는 1분 차이로 관측된 두 바람의 벡터차로 계산되는 윈드시어 벡터를 나타낸다. Figure 2와 같이, 윈드시어는 풍속 또는 풍향이 다를 경우 발생하며 두 요소가 함께 변화할 때도 발생한다.

### 3. 결과 및 토의

#### 3.1 저시정(Low Visibility)

과거 관측 자료로 UAM 운항 예정지의 시정을 분석하기 위한 자료로는 앞서 언급한 바와 같이 공항의 METAR 자료가 유일하다. 서울지역에서는 김포공항과 서울공항의 시정 자료를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 한강 회랑의 시정 특성을 간접적으로 이해할 수 있는 방법으로 김포공항의 시정 관측 자료를 이용하였고, Fig. 3에 최근 8년간의 김포공항 평균 시정을 정리하였다. 여기서 평균 시정은 시정 하락이 발생하는 도심의 연무(haze)가 발생했을 때의 시정 관측값만을 사용하였다. 그 이유는 공항 METAR에서의 시정 관측은 최대 10 km 까지만 관측하기 때문에 모든 시정 관측값을 평균할 경우 저시정 현상에 대한 왜곡이 발생할 수 있기 때문이다. 연무 발생시의 평균 시정은 대체로 6~7 km 정도이며 코로나19 팬데믹을 기점으로 평균 시정이 7 km 이상으로 조금 향상된 경향을 보이는데 연도별로 큰 차이를 확인하기는 어렵다. 그러나 Fig. 3b에서 보는 바와 같이 VFR 조건인 시정 5000 m 미만의 빈도수를 보면 2015년 1947회(22%)에서 2022년 834회(10%)로 연도별 차이가 두드러지고, 특히 Fig. 3c에서 보듯이 2020년에 연무(haze) 관측시의 저시정 빈도수가 크게 줄어든 것을 볼 수 있다. 이러한 현상은 전 세계적으로 심각한 영향을 미쳤던 코로나19에 기인하는 것으로 파악되는데, 2020



**Fig. 3.** Frequency of annual mean- and low-visibility of Gimpo International Airport. (a) Mean visibility in case of haze, (b) Frequency of low visibility less than 5,000 m, (c) Frequency of low visibility less than 5,000 m in case of haze, and (d) Annual mean fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) concentrations (µg m<sup>-3</sup>) in Seoul.

년에는 유럽, 아시아 등의 세계 주요 도시에서 미세먼지(PM<sub>2.5</sub>) 농도가 약 10% 이상 감소하는 현상이 나타났다(Chauhan and Singh, 2020; Rodríguez-Urrego and Rodríguez-Urrego, 2020), 중국에서는 2019년에 비해 약 20% 이상 감소한 것으로 알려졌다(Ming et al., 2020). Figure 3d는 서울시의 연평균 미세먼지 농도의 변화를 나타낸다. 2022년은 아직 확정 자료가 발표되지 않아 2021년까지의 값을 나타냈으며, 코로나19 시기에 미세먼지 농도가 현저히 낮아진 것을 볼 수 있다.

이상의 시정 자료는 김포공항의 관측자료로서 서울 도심의 시정 특성을 반영한다고 단언할 수는 없지만 향후 도심의 대기오염과 관련된 시정의 변동성을 이해하는 데는 도움이 될 수 있다. 최근의 경향은 미세먼지 농도가 낮아지면서 평균적인 시정이 호전된 경향을 보이지만, 코로나 19 이전의 사례에서 보듯이 도시 교통신량 증가와 도심의 오염도가 높아질 경우, 초기 UAM의 운용이 현행 VFR 조건으로 진행된다면 도심의 저시정 요소도 UAM의 운용 효율성 떨어뜨리는 요인이 될 수 있을 것이다.

### 3.2 바람(Wind Shear)

#### 3.2.1 풍속과 윈드시어

앞서 Fig. 1에서 보인 바와 같이 김포공항에서 용산 AWS 지점까지는 약 15 km 정도의 거리로서 연구 대상 지역은 기상학에서의 중규모(수 킬로미터~수백 킬로미터)의 중에서도 작은 규모에 해당하므로, 중규모 관점에서 김포공항과 5개의 AWS 지점은 거의 동일한 공간 내에 있다고 할 수 있다. 그러나 미규모(수 센티미터~수 킬로미터) 관점에서 보면 여섯 개의 지점은 각기 다른 기상 현상 및 특성을 가질 수 있다.

Table 1은 AWS 지점의 풍속 기록을 나타내는데, 5개의 AWS 중 한강 지점의 평균 풍속이 4.2 kt로 가장 높았다. 한편, 김포공항의 2022년 평균 풍속은 5.6 kt로 기록되었는데(KMA, 2023a), 김포공항과 한강 지점은 다른 지점에 비해 상대적으로 주변에 장애물이 적은 점을 참고할 때 평균적으로 풍속이 높게 나타났을 것으로 추정할 수 있다. 한편, 최대 풍속은 영등포와 용산 지점에서 28 kt로 다른 지점보다 높은 값이 관측되었다.



**Table 1.** Summary of wind observations, 1-minute wind speed shift, and 1-minute wind shear vector from 5 AWSs around Han-River UAM corridor.

Station (number)		Gangseo (404)	Yancheon (405)	Yeongdeungpo (510)	Hangang (418)	Yongsan (415)
(a) wind speed (unit: kt*)	Min.	0	0	0	0	0
	1st Qu.	1.4	1.4	1.7	2.3	1.8
	Median	2.5	2.5	3.3	<b>3.9</b>	3.3
	Mean	3.0	2.8	3.8	<b>4.2</b>	3.8
	3rd Qu.	4.3	3.7	5.1	5.6	5.1
	Max.	17.5	20.4	<b>28.2</b>	19.2	<b>28.2</b>
(b) 1-minute wind speed shift (unit: kt min <sup>-1</sup> )	Min.	0	0	0	0	0
	1st Qu.	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
	Median	0.6	0.6	0.6	0.6	0.6
	Mean	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
	3rd Qu.	1.0	1.2	1.2	1.0	1.2
	Max.	8.9	10.7	9.1	<b>12.2</b>	10.9
(c) 1-minute wind shear (unit: min <sup>-1</sup> )	Min.	0	0	0	0	0
	1st Qu.	0.4	0.5	0.6	0.4	0.6
	Median	0.9	1.1	1.3	0.9	1.3
	Mean	1.2	1.4	<b>1.7</b>	1.3	<b>1.9</b>
	3rd Qu.	1.6	1.9	2.3	1.8	2.4
	Max.	13.3	26.1	16.2	16.6	34.4

Bold font indicates the significant highest values.

\* 1 m s<sup>-1</sup> = 1.94 kt

Table 1b는 매 분마다 풍속의 변화값(분당 풍속변화율)을 새로운 변수로 요약한 자료인데, 평균값은 지점별로 큰 차이가 없고 한강 지점에서 가장 큰 최대값이 기록되었다. 이는 5개의 AWS 중 한강 지점의 평균 풍속이 가장 큰 것과 관련이 있을 것으로 판단된다. Table 1c는 매 분마다 바람 벡터의 차를 계산한 값을 새로운 변수로서 요약한 자료인데, 영등포와 용산 지점에서의 평균값이 다소 높게 기록되었다. 이는 두 지점의 풍속 최대값이 타 지점에 비해 높게 관측된 것과 무관하지 않은데, 분당 풍속이 변화가 크지 않더라도 풍향의 변화가 생길 경우 윈드시어 값이 높아지므로 이 두 지점은 풍향의 변화가 다른 곳보다 크게 나타나는 것으로 추정된다. 서로 3~4 km 밖에 떨어지지 않은 AWS 지점에서 바람이 다르게 나타나는 것은 관측 기기가 설치되는 주변 환경에 따라 공기의 흐름이 달라질 수 있기 때문인데, 영등포와 용산 지점은 상대적으로 주변에 빌딩이 많이 분포하는 환경이 1분 윈드시어 값을 높이는 원인이 될 수 있다. 한편, 이러한 지상의 몇 개 측정 지점의 자료만으로 돌풍의 발생 여부를 확인할 수는 없지만, 풍속의 변화에 비해 풍향의 변화가 평균적으로 크게 나타나는 현상으로부터 돌풍 내지는 윈드시어 현상이 타 지점에 비해 많다는 것을 간접적으로 유추할 수 있다.

### 3.2.2 풍속급변(Wind speed-shift) 발생 빈도

위에서 살펴본 바와 같이 AWS 관측값의 기술 통계 자료만으로는 시공간적 바람의 특성을 이해하기가 쉽지 않다. Figure 4는 각 지점별로 특정 임계값을 초과하는 분당 풍속의 변화가 얼마나 자주 발생했는지를 월별로 나타낸다. 여기서 말하는 ‘임계값’이란 위의 2절에서 설명한 바와 같이 6 kt min<sup>-1</sup>을 기준으로 하였다. 이러한 기준이 UAM의 운항에 영향을 미치는 임계치라고 할 수는 없지만, UAM과 같은 소형 기체에 충분히 영향을 미칠 수 있는 해륙풍 또는 해풍 전선의 유무를 진단할 수 있는 임계치로서 설정한 값이다.

Figures 4d-e에서 보는 바와 같이, 월별 분포를 나눠보지 않더라도 한강과 용산 지점에서 풍속이 급변하는 발생 빈도가 나머지 세 지점에 비해 월등히 높은 것을 볼 수 있는데, Fig. 4에서 보듯이 한강이 313회, 용산이 344회로 가장 높게 나타났다. 이러한 결과는 앞서 Fig. 1에서 보인 바와 같이 한강 가까이에 설치된 두 지점의 위치 특성과 무관하지 않을 것으로 보인다. 흔히 강가에서 바람이 잘 생기는 것은 수면과 육지의 비열 차이에 의한 영향도 무시할 수 없는데, 이러한 특징이 한강과 용산 지점의 풍속에 반영된 것으로 판단된다.

우리나라의 기후 특성은 봄철 잦은 기압골 통과와

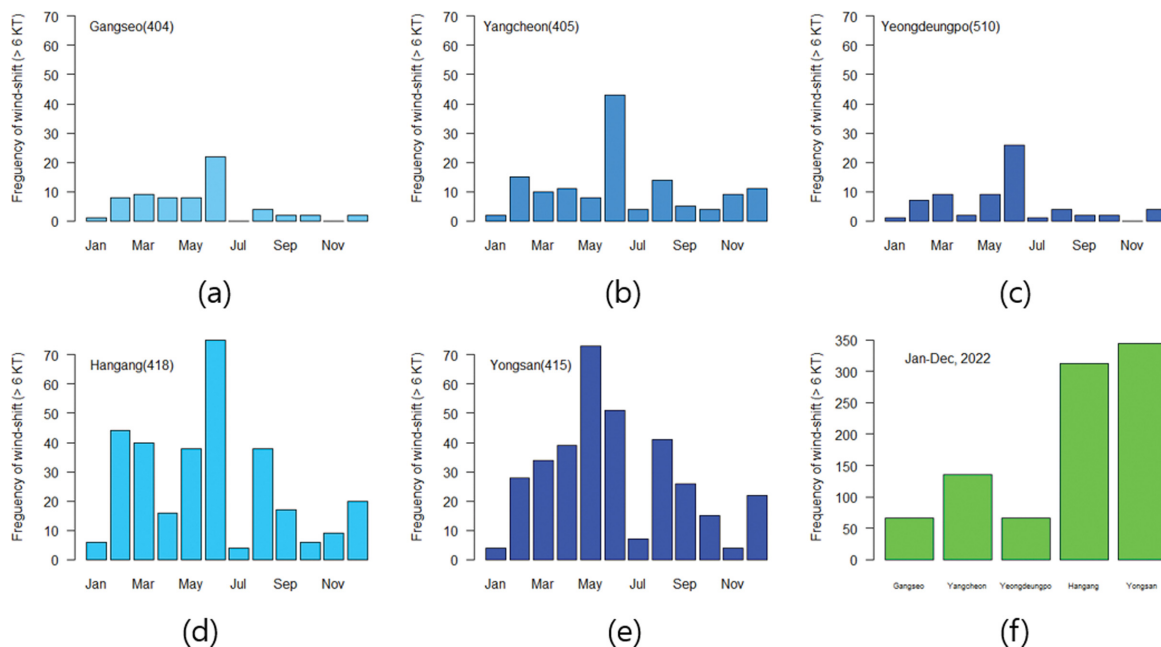


Fig. 4. Monthly frequency of 1-minute wind speed shift in excess of 6 kt in (a) Gangseo, (b) Yangcheon, (c) Yeongdeungpo, (d) Hangang, and (e) Yongsan, and (f) annual frequency of that of each station.

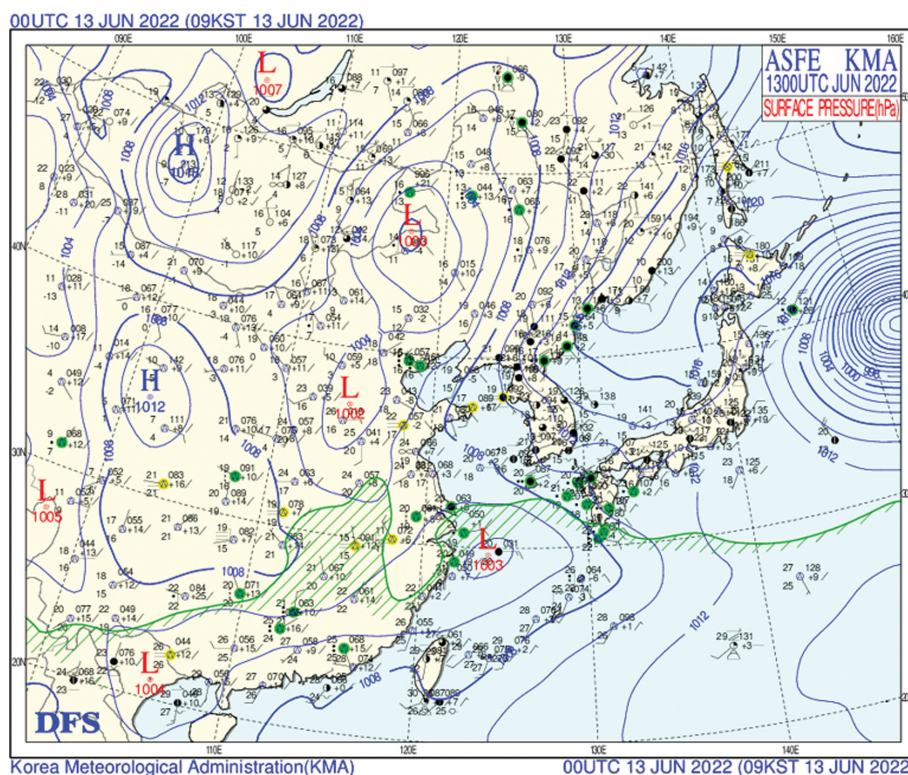
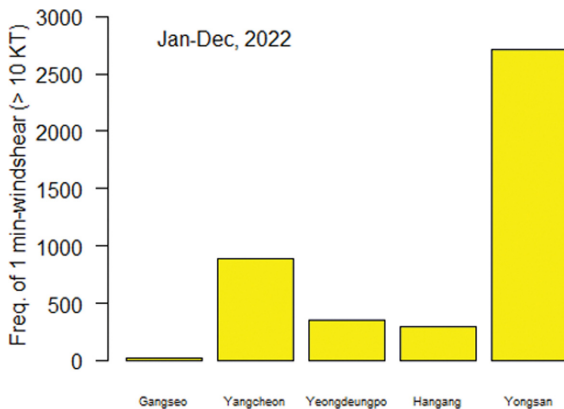


Fig. 5. Surface synoptic chart at 00 UTC, Jun 13, 2022.

영향으로 월별 평균풍속은 3, 4월에 가장 높다(KMA, 2023c). 최근 김포공항 기상 관측 통계로는 2020년은 3월과 4월, 2021년은 2, 4, 5월, 2022년은 2, 4, 5, 6월에 월 평균 풍속이 6 kt 이상으로 풍속이 높게 관측되었다. Figures 4a-e에서 보는 바와 같이 2022년 용산을 제외한 4개 AWS 관측에서는 6월에, 용산에서는 5월에 풍속 급변 현상의 빈도가 가장 높았다. 이러한 2022년의 결과는 도심의 기후 변동성에도 주의를 기울여야 한다는 점을 시사한다. 5월과 6월에 풍속 급변 사례가 많은 것은 해륙풍에 의한 해풍전선 또는 초여름의 장마전선의 영향으로 파악된다. 특히 Park and Chae (2018)의 연구에서 보인 바와 같이 5월 후반은 고기압권의 맑은 날씨에서 해풍 전선의 발달로 갑자기 바람이 급변하는 사례가 적지 않게 발생한다. Figure 5는 오후 한때 급격한 풍속 변화가 나타났던 2023년 6월 13일의 종관 지상일기도를 보여주는데, 우리나라의 종관장은 고기압권에서 가변적인 약한 바람이 관측되고 있다. 일반적으로 해풍전선 또는 장마전선 등의 전선은 그 발달과 이동의 분석과 예측이 쉽지 않고, 더욱이 현재의 관측망으로는 해풍전선 등 미규모의 전선의 발달과 이동을 예측하는 데에 한계가 있어서 향후 UAM 실증 및 상용화를 위해서는 바람의 상세한 시공간적 변화를 감시할 수 있는 관측 체계가 선행될 필요가 있다.

### 3.2.3 윈드시어(Wind shear vector) 발생 빈도

분당 바람벡터의 변화가 10 kt 를 초과하는 빈도를 Fig. 6에 나타내었다. 2절에서 언급한 바와 같이 윈드시어는 공간 상의 바람 변화를 의미하며, 따라서 이론적인 윈드시어의 단위는 ‘거리’ 규모가 제외된 단위( $s^{-1}$ )로 표현된다. 그러나 본 연구에서의 AWS 지점



**Fig. 6.** Annual frequency of 1-minute wind shear vector in excess of 10 kt in each station. Yongsan shows the highest of 2709.

자료로는 이러한 정확한 의미의 윈드시어를 측정할 수 없기 때문에, 공간적인 윈드시어의 발생은 동일한 미규모 시간 상에서도 윈드시어를 발생 시킬 수 있다는 가정 하에 1분간 변화된 두 바람 벡터의 차이로 윈드시어를 계산하였다.

1분 간격으로 측정된 바람 벡터의 변화로 계산한 윈드시어는 풍속이 변하는 경우뿐만 아니라 풍향만 변하는 경우도 해당되며, 풍속과 풍향이 함께 변할 때는 그 값이 더 크게 나타난다. Figure 5에서 보는 바와 같이 용산 지점에서는 본 연구에서 설정한 임계치인 10 kt을 초과한 사례가 총 2709회로서 인근의 한강 지점에 비해서 약 9배 많게 관측되었다. 이는 풍속의 변화보다 풍향의 변화가 빈번한 것으로 해석이 되는데, 용산은 한강변이면서도 주변의 건물이 많고 북쪽으로는 남산이 위치하여 풍향이 불규칙하거나 급변하는 사례가 다른 지점에 비해 빈번하게 나타난 것으로 추정된다. 용산 다음으로 윈드시어 벡터 변화가 빈번히 나타난 지점은 양천으로서 1분 윈드시어 벡터가 10 kt 이상 발생한 횟수가 885회로 나타났다. 1분간 풍속의 변화는 한강 지점보다 많지는 않았지만, 윈드시어 빈도가 높다는 것은 풍향이 급변하는 사례가 많았음을 의미한다. 용산과 양천은 각각 한강과 안양천을 바로 인근에 두고 주변에 고층 빌딩들이 산재해 있다는 점에서 이러한 지형 지물의 영향이 바람 특성에 반영이 되었을 것으로 추정된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 향후 UAM 운용에 영향을 미칠 것으로 예상되는 기상 요소에 대한 기초 연구로서, UAM 실증 지역으로 논의되고 있는 김포공항과 한강 회랑의 일부 구간에 대하여 김포공항 및 기상청 자동기상 관측 자료를 수집하여 시정과 바람의 특성을 살펴봄으로써 UAM 운용에 미치는 기상 영향 및 향후 필요 과제를 제시해 보고자 하였다.

연구 대상지와 자료로는 2023년 5월 국토교통부에서 발표한 UAM 실증 노선 중 김포공항에서 여의도를 잇는 18 km의 구간에 대하여 기상 관측 자료를 수집하여 시정과 바람의 특성을 분석하였다. 김포공항의 기상 자료는 2015년부터 2022년까지 8년간, 매 시간마다 발표되는 기상관측보고(METAR) 자료를 분석하였고, 한강 주변의 관측 자료로는 기상청의 5개 지점의 2022년 자동기상관측(AWS) 자료 중 1분 간격의 바람 관측 자료를 분석하였다.

김포공항의 시정 분석 결과는, VFR 제한 조건인 시정 5,000 m 미만의 빈도수를 보면 2015년 1947회(22%)에서 2022년 834회(10%)로 연도별 차이가 두드러지고, 특히 연무 발생시의 저시정 빈도는 코로나 19를



기점으로 상당히 줄어든 것으로 분석 되었다. 이러한 결과는 운항 조건에 영향을 주는 저시정 현상이 도심의 미세먼지 농도에 상당히 영향을 받는다는 것을 보여주는데, 최근의 미세먼지 경향은 그 농도가 낮아지면서 평균적인 시정이 호전된 경향을 보이지만, 코로나 19 이전의 사례에서 보듯이 다시 도시의 교통량과 오염도가 높아질 경우에는 저시정 현상이 UAM의 운용 효율성을 떨어뜨리는 요인이 될 수 있을 것이다.

2022년의 5개 AWS 지점의 바람 특성을 살펴본 결과는, 3~4월에 평균 풍속이 높게 나타나는 우리나라의 기후 특성과는 다르게 5월과 6월에 풍속이 급변하는 빈도가 가장 높았다. 이러한 결과는 연별 변동성에도 주의를 기울여야 한다는 점을 시사하는데, 5월과 6월에 풍속이 급변하는 사례가 많은 것은 해륙풍에 의한 해풍전선 또는 초여름의 장마전선의 영향으로 파악된다. 풍속뿐만 아니라 풍향에 의한 윈드시어의 발생 빈도는 용산 지점에서 가장 높게(한강 지점에 비해 약 9배) 나타났는데, 이는 지형적 위치와 고층건물 등의 주변 환경이 바람의 변동성과 관련이 있을 수 있음을 시사한다.

이와 같이 한강 회랑의 기상 관측 자료로 시정과 바람의 특성을 분석한 결과, UAM 운용 환경은 기존의 항공 운항에서 활용하는 기상 정보 체계로는 파악하기 어려운 미규모의 기상 특성을 가지고 있음을 확인하였다. 특히 시정 관측 자료는 공항에 한정되어 있어 UAM 실증 및 상용화 예정지의 특성을 분석하기 쉽지 않으며, 현행 지상의 기상 관측망도 수 십 미터 규모의 고해상도 바람 특성을 파악하기에는 역부족이다. 또한 지상의 관측자료로는 UAM 운용 고도의 바람 특성을 추정만 할 뿐 실제로 중대한 영향을 미치게 될 돌풍과 윈드시어의 체계적인 감시는 불가능하다. 따라서, UAM 실증과 상용화를 위한 구체적인 계획이 논의되고 있는 시점에서 안전성과 효율성과 관련된 기상 요인에 대한 연구가 요구되며, 특히 UAM 운용 회랑의 기상 특성을 이해하기 위해서 도심지의 저시정 및 돌풍과 윈드시어를 감시할 수 있는 관측 체계의 수립이 필요한 시점이다.

## 감사의 글

이 연구는 2022년도 과기정통부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 개인연구지원사업(RS-2022-00166766)의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

Chauhan, A., and R. P. Singh, 2020: Decline in PM2.5 concentrations over major cities around the world associ-

ated with COVID-19. *Environ. Res.*, **187**, 109634, doi:10.1016/j.envres.2020.109634.

FAA, 2023: Advanced Air Mobility (AAM) Implementation Plan, Version 1.0, 40 pp [Available online at <https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/AAM-I28-Implementation-Plan.pdf>].

ICAO, 2005: Manual on Low-level Wind Shear. International Civil Aviation Organization, 213 pp [Available online at <https://skybrary.aero/sites/default/files/bookshelf/2194.pdf>].

KMA, 2023a: *2022 Aviation meteorological yearbook*, Korea Meteorological Administration, 30 pp.

\_\_\_\_\_, 2023b: *Meteorological yearbook 2022*, Korea Meteorological Administration, 328 pp.

\_\_\_\_\_, 2023c: Korea Meteorological Administration website, [Available online at <https://www.weather.go.kr/>] (in Korean).

Kulwin, N., 2019: Uber Made it Cheaper to Take a Helicopter than a Car to the Airport. [Available online at <https://theoutline.com/post/8467/uber-helicopter-airport?zd=1&zi=t7gzjrve>].

Lester, P. F., 2013: *Aviation Weather: 4th Edition*, JEPPESEN, 454 pp.

Ming, W., Z. Zhou, H. Ai, H. Bi, and Y. Zhong, 2020: COVID-19 and Air Quality: Evidence from China. *Emerging Markets Finance and Trade*, **56**, 2422-2442. doi:10.1080/1540496X.2020.1790353.

MOLIT, 2020: Comprehensive demonstration of drone delivery and taxi using K-drone control system. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, [Available online at [http://www.molit.go.kr/mta/USR/N0201/m\\_36770/dtl.jsp?lcmepage=26&id=95084728](http://www.molit.go.kr/mta/USR/N0201/m_36770/dtl.jsp?lcmepage=26&id=95084728)] (in Korean).

\_\_\_\_\_, 2021a: Comprehensive demonstration of Korean urban air mobility (K-UAM) at Gimpo Airport. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, [Available online at [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?id=95086186](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?id=95086186)] (in Korean).

\_\_\_\_\_, 2021b: Operating Concept of Korean Urban Air Mobility (K-UAM) 1.0. UAM Team Korea, 52 pp (in Korean).

\_\_\_\_\_, 2023: Drone taxis could appear above Seoul from next year... Promotion of demonstration project. [Available online at <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148915031>] (in Korean).

Moon, M., 2017: Dubai tests a passenger drone for its flying taxi service. [Available online at <https://www.engadget.com/2017/09/26/dubai-volocopter-passenger-drone-test/>].

NASA, 2020: UAM Vision Concept of Operations (Con-

- Ops) UAM Maturity Level (UML) 4. National Aeronautics and Space Administration, [Available online at <https://ntrs.nasa.gov/citations/20205011091>].
- Park, M.-S., and J.-H. Chae, 2018: Features of sea-land-breeze circulation over the Seoul Metropolitan Area. *Geosci. Lett.*, **5**, 1-12, doi:10.1186/s40562-018-0127-6.
- Ragbir, N. K., S. Rice, S. R. Winter, E. C. Choy, and M. N. Milner, 2020: How weather, distance, flight time, and geography affect consumer willingness to fly in autonomous air taxis. *The Collegiate Aviation Review International*, **38**, 19 pp doi:10.22488/okstate.20.100205.
- Reiche, C., R. Goyal, A. Cohen, J. Serrao, S. Kimmel, C. Fernando, and S. Shaheen 2018: Urban Air Mobility (UAM) Market Study, Final Report. National Aeronautics and Space Administration, 160 pp.
- Reiche, C., A. P. Cohen, and C. Fernando, 2021: An initial assessment of the potential weather barriers of Uuban air mobility. *IEEE*, **22**, 6018-6027, doi:10.1109/TITS.2020.3048364.
- Reichmann, K., 2020: Uber Elevate Acquired by Joby Aviation. [Available online at <https://www.aviationtoday.com/2020/12/08/uber-elevate-acquired-joby-aviation/>].
- Rodríguez-Urrego, D., and L. Rodríguez-Urrego, 2020: Air quality during the COVID-19: PM2.5 analysis in the 50 most polluted capital cities in the world. *Environ. Pollut.*, **266**, 115042, doi:10.1016/j.envpol.2020.115042.
- Seoul City 2023: Seoul city, spurring commercialization after UAM demonstration... Demonstration of 2 routes in Yeouido and Jamsil. [Available online at [https://www.seoul.go.kr/news/news\\_report.do#view/387267](https://www.seoul.go.kr/news/news_report.do#view/387267)] (in Korean).
- Sloan, J., 2020: Joby Aviation acquires Uber Elevate. [Available online at <https://www.compositesworld.com/news/joby-aviation-acquires-uber-elevate>].
- Thippavong, D. P., and Coauthors, 2018: Urban Air Mobility Airspace Integration Concepts and Considerations. In 2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference: American Institute of Aeronautics and Astronautics, National Aeronautics and Space Administration, [Available online at <https://ntrs.nasa.gov/citations/20180005218>].
- Volocopter, 2013: Volocopter VC200 - First Flight 2013. [Available online at <https://youtu.be/I3VYBVLp32s>].
- \_\_\_\_\_, 2019: Volocopter Air Taxi Flies Over Singapore's Marina Bay. [Available online at <https://www.prnewswire.com/news-releases/volocopter-air-taxi-flies-over-singapores-marina-bay-300942843.html>].
- Won, W.-S., R. Oh, W. Lee, K.-Y. Kim, S. Ku, P.-C. Su, and Y.-J. Yoon, 2020: Impact of fine particulate matter on visibility at Incheon International Airport, south korea. *Aerosol and Air Qual. Res.*, **20**, 1048-1061, doi:10.4209/aaqr.2019.03.0106.