

# 기술정책 기상리영책

METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY



2021.

6

특집

미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책

칼럼 | 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 '기상정보'

정책초점 | 도심항공교통을 위한 기상관측 제언 |

| 도심항공기상을 위한 중미기상학 |

| 안전한 UAM을 향한 제언 |

| 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템 |

논단 | K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용 |

포커스 | UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언 |



기상청

『기상기술정책』지는 범정부적인 기상·기후 분야의 정책 수요에 적극적으로 부응하고, 창의적인 기상기술 혁신을 위한 전문적인 연구 조사를 통해 기상·기후업무 관련 분야의 발전에 기여할 목적으로 발간 기획되었습니다.

본 『기상기술정책』지는 기상·기후 분야의 주요 정책적 이슈나 현안에 대하여 집중적으로 논의하고, 이와 관련된 해외 정책동향과 연구 자료를 신속하고 체계적으로 수집하여 제공함으로써 기상 정책입안과 연구 개발 전략 수립에 기여하고자 정기적으로 발행되고 있습니다.

본지에 실린 내용은 집필자 자신의 개인 의견이며, 기상청의 공식의견이 아님을 밝힙니다. 본지에 게재된 내용은 출처와 저자를 밝히는 한 부분적으로 발췌 또는 인용될 수 있습니다.

## 원고모집

『기상기술정책』에서는 기상과 기후분야의 정책이나 기술 혁신과 관련된 원고를 모집하고 있습니다. 뜻있는 분들의 많은 참여를 부탁드립니다. 편집위원회의 심사를 통하여 채택된 원고에 대해서는 소정의 원고료를 지급하고 있습니다.

▶ 원고매수: A4 용지 10매 내외

▶ 원고마감: 수시접수

▶ 보내실 곳 및 문의사항은 발행처를 참고 바랍니다.

☞ 더 자세한 투고방법은 맨 뒷편의 투고요령을 참고바랍니다.

## 『기상기술정책』 편집위원회

발행인: 박광석

편집기획: 국립기상과학원(책임운영기관) 연구기획재정과

편집위원장: 김성균

편집위원: 정관영, 신동현, 이은정, 임하권,

박록진, 반기성, 홍진규, 김도우

편집간사: 임병환, 이대근, 김인점

## 발행처

주소: (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33

국립기상과학원(책임운영기관)

전화: 064-780-6545 팩스: 064-738-6513

E-mail: dglee7@korea.kr

# CONTENTS

특집: 미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책

**칼럼 03** \_ 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한  
필수 정보 '기상정보' / 박광석

**정책초점 06** \_ 도심항공교통을 위한 기상관측 제언 / 이규원

**20** \_ 도심항공기상을 위한 중미기상학 / 강성락

**32** \_ 안전한 UAM을 향한 제언 / 홍진규

**42** \_ 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템 / 박문수

**논단 56** \_ K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용 / 김재진

**포커스 67** \_ UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언 / 구성관

# 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 ‘기상정보’



박광석  
기상청장

“2020년 10월 세계에서 가장 빠른 양산차가 등장했다. 미국 슈퍼카 제조업체인 ‘셀비슈퍼카’가 제작한 ‘투아타라’는 라스베이거스 외곽에 위치한 11.27km의 폐쇄구간을 532.93km/h의 속도로 주파하여 기존 ‘부가티’사의 시론이 갖고 있던 490.48km/h 기록을 경신했다.”

이처럼 속도 향상을 위한 개발 경쟁은 기술의 과시를 넘어 사용자의 이동시간을 단축하는 데 의의가 있다. 단축된 시간은 더 윤택한 생활을 보장할 수 있기 때문이다. 2004년 우리나라에 KTX가 처음 개통될 때, 사람들은 업무차 방문한 부산의 해운대에서 점심을 먹고, 서울에서 가족들과 저녁을 함께하는 즐거운 상상을 했다. 이제 신속한 이동으로 절약된 시간은 일상적인 현실이 되었고, 우리의 생활을 여유롭게 만들었다. 그리고 이제 도심항공모빌리티(Urban Air Mobility, UAM)를 통해 속도의 근본 패러다임을 새롭게 전환해 나가고 있다.

UAM은 지상길이라는 2차원에서의 속도 경쟁을 하늘이라는 3차원 영역에서의 공간 경쟁으로 확장했다. 특히, 기존 항공기와의 큰 차이점이라면, UAM은 빌딩숲이 우거진 도심 한가운데를 비행할 것이라는 점이다. 꽉 막힌 도시의 도로를 생각하면 500km/h로 달릴 수 있는 자동차보다 200km/h로 나는 비행체가 목적지에 더 빠르고 안전하게 도착하는 교통수단이 될 수 있을 것이다.

정부는 2020년 6월 「한국형 도심항공교통 로드맵」을 발표하였다. 로드맵에 따르면, 2035년 이후 UAM 보편화를 목표로 인프라와 기술개발 지원을 계획하고 있다. 로드맵에는 운송사업자, 버티포트(UAM 이착륙장) 운용자, 교통관리 서비스 공급자 등 민간영역과 인프라 및 통제/관리 기반 구축의 정부 영역을 아우르는 UAM

생태계 구축이 포함된다. 그리고 UAM 성공의 필수적인 핵심요소가 있다. 바로 '기상정보'이다.

UAM의 성공을 위해선 바람 및 난류, 안개·구름·강수(눈, 착빙, 약한 비), 낙뢰·뇌우·우박·호우·다운버스트(강한 하강풍)·마이크로버스트(순간돌풍)에 관한 정량정보가 제공되어야 한다. UAM의 주요 항로는 기상학에서 정의하는 고도 300m-600m의 대기경계층 내에 위치한다. 문제는 해당 고도의 기상이 지형과 건물 등 지상 조건에 크게 영향을 받아 바람의 변화가 심하고, 안개와 강우(설) 등 안전한 시계비행을 저해하는 요소들로 가득 차 있다는 것이다. 특히 우리나라의 경우 도심 주변에 바다와 산이 있는 경우가 많아 매우 복잡한 기상현상이 발생할 수 있다. 또한 소형 비행체일수록 기상조건에 따른 민감도가 급격히 증가하기 때문에 UAM 안전 확보를 위해서는 정확한 기상정보가 필수적이다.

UAM 항로 고도는 지상과는 달리 관측자료가 거의 없으므로 현존하는 기상청 자동기상관측망(AWS), 도시기상관측망, 민간 관측망 등 다양한 자료를 공동활용하여 보완하는 방안이 필요하다. 기존 관측망에서의 누락 자료는 기상드론을 통한 지점관측과 레이더 등 원격탐사 관측망의 이용을 생각해 볼 수 있다. 그뿐만 아니라 방대하게 수집되는 대용량의 기상정보는 UAM에 필요한 수요자 맞춤형으로 선별 제공함으로써 활용성을 높일 필요가 있으며 이를 위한 타 분야와의 협업 또한 대단히 중요하다.

UAM에서 중요한 것은 도시기상기후학, 중규모 및 미기상학이지만, 이 분야는 아직 많은 이론이 정립되어 있지 않다. 이는 기존 항공기의 기상안전 체계로는 UAM의 안전운항을 보장할 수 없다는 뜻이다. 따라서 정확한 관측·예측에 기반한 운항안전 기상지도의 제작, 건물 규모에서 중간규모까지 고려된 기상모델링 연구, 실시간 돌풍탐지 알고리즘의 개발 등 다양한 연구가 지속적으로 시도되어 서비스 기반을 쌓아가야 한다.

항공사고의 치명률은 누구나 짐작할 수 있다. 아무리 시간을 절약한다 한들, 자신의 안전을 위협하면서까지 UAM을 이용하는 사람은 없을 것이다. 점점 현실로 다가오는 미래 하늘길 생활에서 기상정보의 높은 가치를 우리 스스로 인식하고, 거기서 얻어진 자부심이 더 나은 서비스를 제공하는 밑거름이 될 수 있도록 앞으로도 기상청의 관심과 역량 개발이 이어지길 희망한다.

## 정책 초점

도심항공교통을 위한 기상관측 제언

| 이규원

도심항공기상을 위한 중미기상학

| 강성락

안전한 UAM을 향한 제언

| 홍진규

도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템

| 박문수

# 도심항공교통을 위한 기상관측 제언

이규원 경북대학교 천문대기과학과 교수 gyuwon@knu.ac.kr

- I. 개념의 전환
- II. 기상정보의 필요성 및 관측 요소
- III. UAM 기상관측망 제언
- IV. 맺음말

UAM은 소형기체, 버티포트 위치, 항로의 특이성으로 인하여 기존 항공교통 대비 기상 관련 안전위험에 크게 노출되어 있다. 이착륙은 도심에서 고층 건물의 영향에 의해 발생하는 강풍과 난류의 영향을 받고, 항로는 강풍, 대기경계층 날씨에 영향을 받는다. 그러나, UAM이 운항하는 고도는 기상정보의 관측이 거의 실시되지 않는 지역이다. 따라서 UAM 운항에 필수적인 기상요소인 강풍/난류, 안개/구름/강수, 그리고 위험기상에 대한 체계적인 관측이 이루어져야 한다. 이를 위해 기존의 지점관측은 품질관리를 통한 통합기술을 개발해야 한다. 그리고 수직측풍기, 이중편파구름레이더, 도플러라이더 등의 첨단 원격탐사장비를 활용한 체계적인 관측망 구축이 UAM 계획 단계에서부터 함께 진행되어야 UAM의 성공을 담보할 수 있을 것이다. ■

“ UAM은 공항 사이를 연결하는 전통적 항공교통 개념에서의 전환 및 대응이 필요 ”

## I. 개념의 전환

최근에 주목을 받고 있는 도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 플라잉택시(flying taxi)를 이용하여 도심 또는 도심과 주변 지역을 연결하는 새로운 운송 수단이다. 특히 인구 밀집지역에서 극심한 교통 체증을 극복할 수 있는 유일한 대안이며 미래교통수단으로 부상하고 있다. 하지만 UAM은 공항(airport)과 공항을 연결하는 전통적인 항공교통의 개념에서 새로운 개념으로의 전환 및 이에 대한 대응이 필요하다. UAM 운영 및 환경 변화는 소비자를 다양한 안전 위협요소에 고스란히 노출시킬 수 있는데, 그 핵심 영역에 기상이 존재한다.

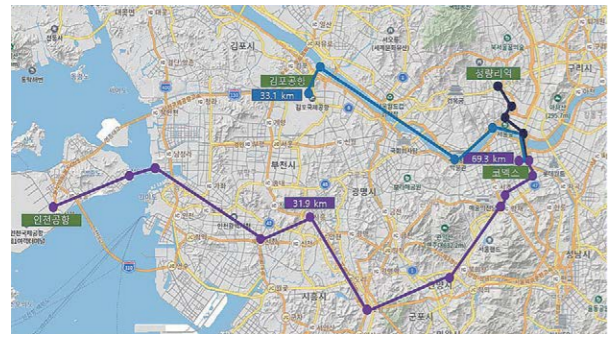
전통적인 항공교통은 광활한 평지에 공항을 설치하여 주위환경에 의한 제한을 최소화하고, 이러한 특수한 조건의 공항과 공항을 높은 고도의 항로로 연결함으로써 기상에 의한 영향을 최소화 한다. 공항에서 발생하는 저층바람시어(low level wind shear), 실링(ceiling) 및 착빙(icing), 다운버스트/마이크로버스트, 그리고 뇌우에 동반된 위험기상이 비행 위협요소로 작용하지만, 항로상에서는 높이 발달하는 뇌우와 연관된 위험기상과 청천난류(Clear Air Turbulence, CAT)를 제외하고는 비교적 위협요소가 적다. 또한 큰 기체는 항공교통이 특수한 기상 상황을 제외하고는 기상으로부터 비교적 자유로울 수 있게 한다.

한편 UAM의 주요 항로는 기상학에서 정의된 대기경계층 내 위치하고 있다(일반적으로 300m-600m). 해당 고도는 지상에 의한 영향을 크게 받을 뿐만 아니라, 구름과 강수에 의하여 시야 확보가 취약한 지역이다. 특히, 구름이 형성되는 고도에 가깝고 강수가 내리는 지역으로 짧은 시간에 시야의 급격한 변화가 존재할 수 있다. 따라서 전통 항공교통에서 항로상의 위협요소가 아니었던 하층 난류, 강수/실링/착빙, 그리고 고층건물이나 산악에 의한 강풍 및 난류가 UAM에서는 매우 중요한 안전 위협요소가 된다. 또한 UAM에서는 대부분 빌딩 옥상, 건물 사이 개활지에 버티포트(Vertiport), 버티허브(Verti-hub), 버티패드(Vertipad)를 구축하게 된다. 이는 기존의 공항과 달리 빌딩, 지형 등에 의한 영향을 심각하게 받는 원인이 된다. 따라서 UAM의 안전운항을 위해서는 기상의 중요성이 더욱더 강조되어야 하



정책 초점

[그림 1] 국토교통부에서 설정한 UAM 테스트베드와 경로 (국토교통부).



며, 기상이 UAM 확대의 성패를 가르는 가늠자가 될 것이다.

국토교통부는 김포공항-코엑스, 코엑스-인천공항을 연결하는 두 노선을 UAM 테스트베드로 운영할 계획이다[그림 1]. 테스트베드에서도 버티허브, 버티포트의 구축은 필요하며 대부분 도심 근처 또는 도심 내 개활지에 구축될 것으로 예상된다. 이로 인해 UAM의 지상인프라뿐만 아니라, 항로 전체가 대기경계층에서 발생하는 위험기상현상에 노출되

어 있고 지표면 근처의 환경에 영향을 많이 받게 될 것이다.

UAM의 특수한 환경으로 인해 운항관리에 기상을 반영한 관리는 필수적이며, 기상은 UAM의 효율을 넘어 안전과 사업의 성공을 좌우하는 핵심요소이다. 날씨와 연계한 운항관리는 크게 4가지 측면으로 살펴볼 수 있다. 먼저 정적 지리경계(static geofence)이다. 이는 특정한 영역 내로 비행을 못하게 막는 가상의 장벽으로서 위험기상 주위 영역이 이에 해당한다. 그러나 정적 지리경계는 변화무쌍한 기상의 본질을 반영하지 못할 뿐만 아니라, 매우 보수적인 접근 방식의 운항관리이다. 이러한 단점을 보완한 것이 동적 지리경계(dynamic geofence)이다. 동적 지리경계는 기상에 따라 경계를 움직이거나 비행체의 계획된 항로를 따라 형성되며 기상 예보의 정확도가 그 효용성을 결정한다. 또한 정확한 바람 정보나 기상의 수용성을 고려하여 다른 비행체와 분리된 4차원 항로를 결정하고, 비행하는 시간기반 운영(time-based operation)이 필요하다. 더 나아가 기상을 고려한 요구와 수용능력의 균형을 맞춘 운항관리가 필요하다. 결국, UAM에서의 효율적인 운항관리에는 기상이 필수적이며, 부족한 기상정보에 대한 고려가 선행되어야 UAM의 이점들을 극대화하여 현업화, 상용화가 가능할 것이다.

## II. 기상정보의 필요성 및 관측 요소

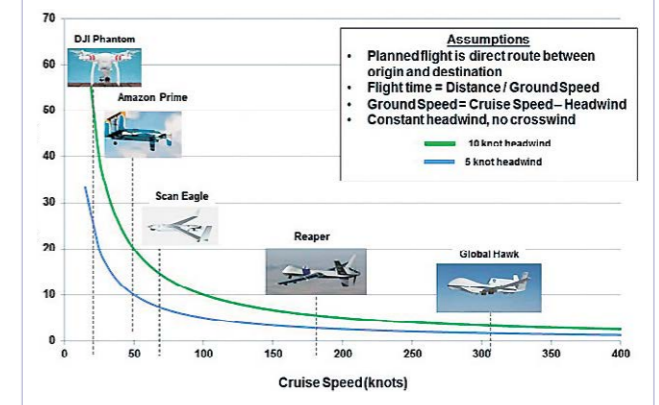
### 1. 기상정보의 필요성

최근 MIT-LL(Massachusetts Institute of Technology - Lincoln Laboratory)에서 출간한 보고서를 보면 무인항공체 운영시 부족한 기상정보에 대한 분석이 잘 나타나 있다(Campbell et al., 2017). 미항공교통국(Federal Aviation Administration, FAA) 위험분류(risk classification)에 따르면, 비행기의 크기가 작아짐에 따라 항공기 결함 및 사고 확률이 높아진다. 또한 기상재해에 따른 항공민감도도 비행기의 크기가 작아짐에 따라 급격히 증가한다. [그림 2]는 다양한 무인항공기에 대해 맞바람이 운항시간에 미치는 영향을 나타낸다. 무인항공기의 크기가 클 경우 비행시간 오차는 작은 반면, 크기가 작아짐에 따라 급격히 증가한다. 그리고 맞바람이 강할 경우 영향은 더 커진다. UAM의 경우 비행체의 크기가 작기 때문에, 기상에 의한 안전 위협요소가 급격히 증가하며 운항의 효율성에 직접적인 영향을 받는다고 할 수 있다.

현재 예상되는 UAM 항로는 고도 300m-600m이다. 이 고도는 대기경계층 내 외층 또는 에크만층(Ekman layer)으로 분류되며, 풍속이 자유대기에 근접하고 여전히 지표면의 영향이 남아 있는 층이다. 그리고 대기경계층 내에서 가장 바람이 강한 곳이며, 구름의 기저가 주로 위치하거나 강수가 내리고, 온도가 지표면 보다 낮다. 따라서, 강한 바람의 직접적인 영향을 받으며, 운항 고도에서 빈번하게 실링(ceiling)이 발생하면서 시계비행(visual flight rule, VFR)이 어렵고, 강수시 낮아진 온도에 의하여 착빙 가능성이 급격히 증가할 수 있다.

“비행기의 크기가 작아질수록 결함 및 사고확률이 높아진다.”

[그림 2] 다양한 무인비행체의 운항 시간에 맞바람(headwind)이 미치는 영향(Campbell et al., 2017).



“ UAM의 성공은 지상 인프라 지역에서의 기상요소 관측에서 시작 ”

버티포트나 버티허브에서는 운항항로부터 지상인프라 시설로의 전이가 필요하다. 이러한 전이고도는 대기경계층 내 관성아층(inertial sublayer)과 거칠기아층(roughness sublayer)으로서 지표면의 영향을 가장 많이 받는 영역이다. 따라서 UAM 지상인프라(버티포트, 버티허브)에서의 이착륙시에는 강한 돌풍, 시어, 난류가 나타나 정상적인 운항뿐만 아니라 안전에 직접적인 영향을 미친다. 특히 도심 내 또는 인근에 설치된 지상인프라의 경우, 주위 건물의 고도 및 이들의 수평분포가 급변함에 따라 매우 복잡한 바람과 난류를 동반한다. 따라서, 지상인프라 지역에서 이착륙에 영향을 미치는 기상변수에 대한 직접적인 관측이 반드시 이루어져야 한다.

UAM 운항이 항로 및 이착륙 고도에서 다양한 기상환경에 의하여 안전에 직접적인 영향을 받지만, 기상관측 측면에서는 “data void”로 불릴 만큼 가용한 관측자료가 적은 것이 현실이다. 대부분의 자동기상관측은 지표면에서 이루어지고, 고도에 따른 기상변수의 샘플링은 일 2~4회 비양되는 레윈존데(rawinsonde)의 관측에 의존한다. 이러한 관측자료의 부재는 전국의 모든 지역에서 존재하며, 관측의 한계를 극복하기 위하여 전통적인 공항에서는 수직측풍기, 저층바람시어장비, 기상레이더 등을 설치하여 운영하고 있다. 그러나 수직측풍기 또한 지표면에서 하층 200m-300m까지의 관측에 한계가 존재한다. 따라서 UAM에서 기상정보는 예측과 가공의 문제에 앞서 정보생산을 위한 관측이 우선되어야 함을 알 수 있다. 즉 UAM의 성공은 항로와 이착륙을 위한 지상인프라 지역에서 필수 기상요소의 관측에서 시작된다고 할 것이다.

## 2. 기상관측 요소

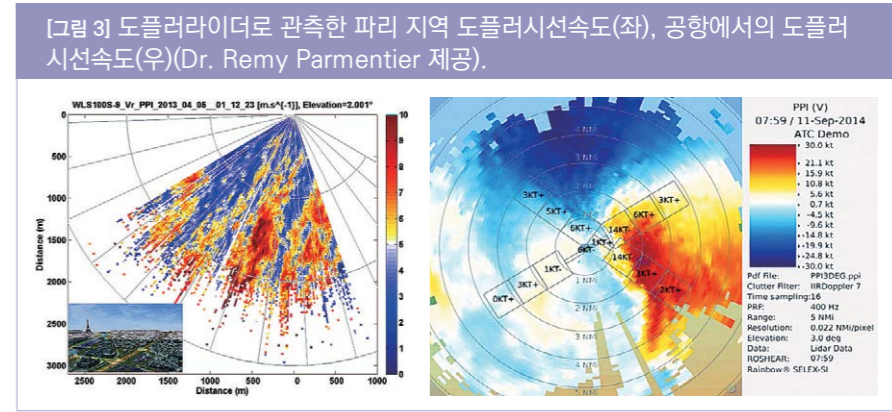
[그림 1]에서 UAM 테스트베드 영역은 동서로 인천공항-코엑스, 남북으로 군포-김포를 포함하는 약 50km×30km 정도이다. 연직으로는 0m-1,000m의 고도 영역이다. 이들 테스트베드 영역 내에서 항로상의 기상정보는 대략 수평해상도 100m, 연직해상도 50m가 요구될 것이다. 그러나 버티포트 지역에서는 고도 0m-1,000m

“ 필수 관측 요소는 바람 및 난류, 안개/구름/강수, 위험기상 정보이다. ”

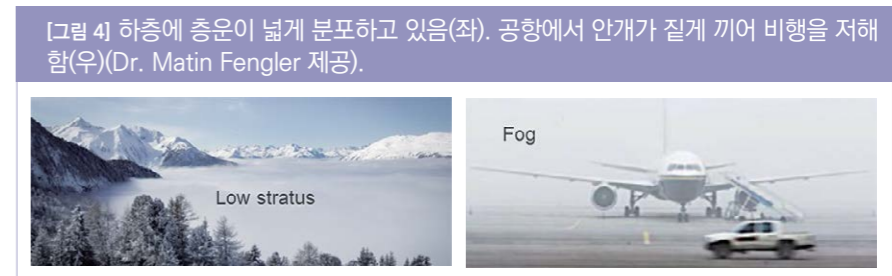
에서 더 높은 해상도(수평 20m-50m, 연직 20m-50m)의 자료가 요구될 것이다.

UAM 항로 및 지상인프라 지역에서 관측이 필요한 기상요소는 3가지로 분류할 수 있다. 첫째는 바람 및 난류 정보이다. 하층에서 발생하는 난류와 빌딩풍은 특히 중요한 관측요소이다. UAM 비행체가 작아짐에 따라 이들 요소에 대한 민감도가 증가한다. 반대로 해당 기상요소의 관측이 제대로 이뤄질 경우엔 운항관리의 효율성을 높일 수 있다. 바람 및 난류 정보는 청천, 강수 등 기상상태에 관계없이 생산되어야 한다. 따라서 매우 다양한 장비를 통한 바람 관측이 요구된다. [그림 3]은 프랑스 파리의 도심 지역과 공항에서 도플러라이더로 관측한 도플러시선속도이다. 도시에서는 남남서쪽 1.2km-1.7km 지점에 강한 바람과 급변풍이 존재한다. 또한 공항에서 관측한 영상에서는 남동쪽에 강한 바람을 동반한 급변풍이 관측되었다. 이러한 관측을 통하여 상세 3차원 바람장을 계산할 수 있을뿐만 아니라, 난류, 시어 등에 대한 정보도 획득할 수 있다. 도플러라이더는 강수 또는 구름을 통과하게 되면 감쇠에 의하여 신호가 급격히 약해지고 관측이 불가능하다. 따라서 강수 및 구름시 바람이 관측 가능한 다른 원격탐사 장비의 활용도 요구된다.

둘째는 정확한 안개, 구름, 강수(눈, 착빙, 및 약한 비)의 정량 정보이다. 강한 강수 시의 UAM 비행 가능성은 배제되었다. 약한 강수시 또는 실링이 비행고도 보다 낮을 때 1)시정 악화, 2)강한 난류, 3)착빙으로 인한 비



바람과 급변풍이 존재한다. 또한 공항에서 관측한 영상에서는 남동쪽에 강한 바람을 동반한 급변풍이 관측되었다. 이러한 관측을 통하여 상세 3차원 바람장을 계산할 수 있을뿐만 아니라, 난류, 시어 등에 대한 정보도 획득할 수 있다. 도플러라이더는 강수 또는 구름을 통과하게 되면 감쇠에 의하여 신호가 급격히 약해지고 관측이 불가능하다. 따라서 강수 및 구름시 바람이 관측 가능한 다른 원격탐사 장비의 활용도 요구된다.



[그림 4] 하층에 층운이 넓게 분포하고 있음(좌). 공항에서 안개가 짙게 끼어 비행을 저해함(우)(Dr. Martin Fengler 제공).

또한 공항에서 관측한 영상에서는 남동쪽에 강한 바람을 동반한 급변풍이 관측되었다. 이러한 관측을 통하여 상세 3차원 바람장을 계산할 수 있을뿐만 아니라, 난류, 시어 등에 대한 정보도 획득할 수 있다. 도플러라이더는 강수 또는 구름을 통과하게 되면 감쇠에 의하여 신호가 급격히 약해지고 관측이 불가능하다. 따라서 강수 및 구름시 바람이 관측 가능한 다른 원격탐사 장비의 활용도 요구된다.



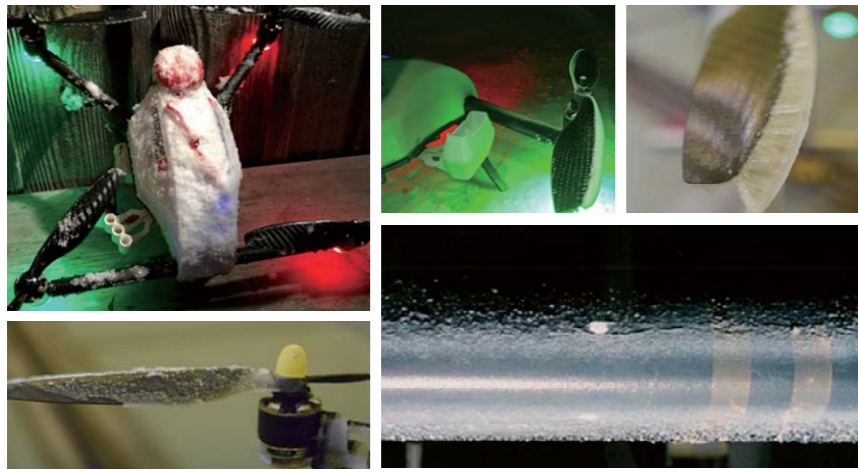
“ 위험기상 시종 정보는 UAM 운영의 효율성과 연계된다. ”

행능력 저하는 안전과 직결된다. [그림 4]는 하층운 또는 안개가 짙게 발생했을 때의 상황을 보여준다. 시야가 제대로 확보되지 않으면 UAM 운영의 지연 또는 이착륙은 저해될 것이다. 기계비행(Instrument flight rule, IFR)을 위한 비행 인프라는 필수적이며 IFR 비행 인프라가 잘 갖추어진 경우라 할지라도 매우 낮은 시정은 안전을 위협한다. UAM 기술이 성숙하여 완전 자율비행이 가능할지라도 기술적인 한계로 인해 자율착륙은 어려울 것이며, 최소한의 시야 확보는 착륙 안전으로 이어진다. 구름내 강한 난류는 또 다른 비행안전을 위협하는 요소이다. 특히 적은 내 강한 난류와 시정 악화는 구름속 비행을 어렵게 한다. 마지막으로 강수 또는 구름내 착빙은 비행능력을 저하시킨다. 눈이 내릴 경우 눈이 비행체에 쌓여서 얼어붙거나

프로펠러에 착빙이 발생하여 회전 효율이 낮아질 수 있다[그림 5]. 또한 날개 표면의 착빙은 양력을 급격히 감소시킨다. 이를 방지하기 위해서는 대형항공기에서와 마찬가지로 착빙방지 시스템을 장착하거나 비행체 표면을 착빙방지 재질로 제작할 수 있지만 이는 비용과 직결된다.

셋째, 중형, 대형 항공기와 마찬가지로 위험기상에 대한 정보는 필수이다. 낙뢰, 뇌우, 우박, 호우, 다운버스트/마이크로버스트 등의 상황에서는 UAM 운항이 어려울 것이다. 이러한 위험기상의 시종에 대한 정보는 UAM 운영의 효율성과 연계된다. UAM 도메인에 접근하는 위험기상의 정보는 현재 기상청에서 운영하는 대형이중편파레이더망으로 제공될 수 있지만, 도메인 내 하층(1km이하)에서의 상세정보 제공에는 한계가 있다.

[그림 5] 드론에 눈이 쌓이거나 프로펠러에 착빙이 발생하여 비행 성능이 저하된 사례들(Drs. Matin Fengler / Dan Fuleki 제공).



“ 지상관측망은 UAM 항로에서 해상도가 낮다. ”

### III. UAM 기상관측망 제언

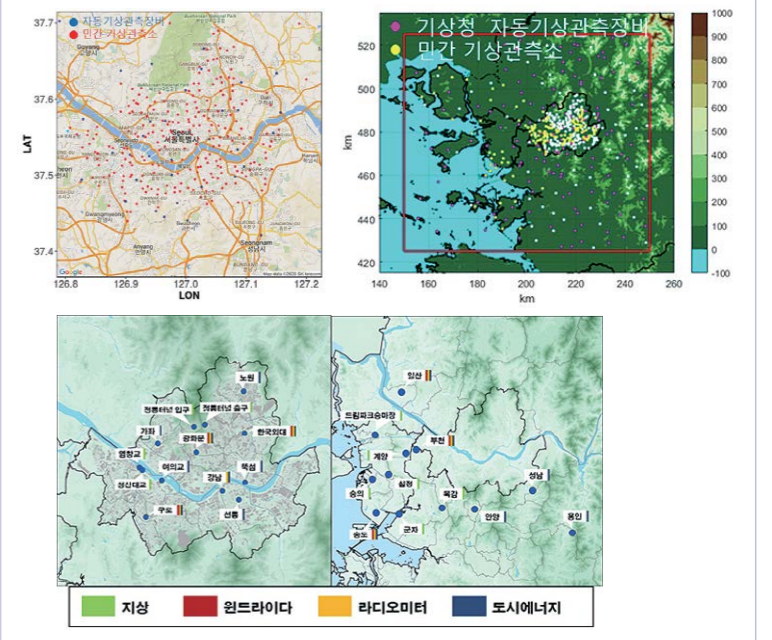
II장에서 살펴본 기상관측 요소에 근거하여 UAM의 안전운항을 위한 기상관측망을 제안하고자 한다. 지점(in-situ) 및 원격탐사(remote sensing) 관측망 측면과 기상상태에 따른 관측망 측면에서 살펴보고자 한다.

#### 1. 지점관측망

[그림 1]의 UAM 테스트베드 영역에는 비교적 조밀한 지상관측망이 존재한다. 기상청에서 운영하는 자동기상관측소(Automatic Weather Station, AWS)가 서울을 포함한 수도권 지역에 약 160개 존재하며, 민간에서 운영하는 기상관측소도 약 336개가 있다[그림 6]. 이러한 관측소에서는 일반적으로 바람, 온도, 습도, 압력에 대한 정보를 제공한다. 국립기상과학원에서 운영하는 도시기상관측망은 서울과 경기도 일부 지역에 위치하며 AWS에서 제공하지 못하는 더 많은 정보를 제공한다. 특히 원격탐사장비인 라디오미터는 정확도가 낮지만 온/습도 정보를 제공하며 도플러라이더는 고해상도의 바람 프로파일을 제공한다.

지상관측망은 서울과 일부 경기도 지역을 조밀하게 관측하지만 UAM 항로인 김포-코엑스의 한강 지역과 코엑스-인천공항의 경기 항로에서 그 해상도가 낮음을 알 수 있다. 그러나 도심이나 인근지역에서 AWS 설치를 위한 공간 확보 및 유지보수의 어려움 등을 고려하면 AWS의 추가 설치의 권장하지

[그림 6] 서울(좌상) 및 수도권(우상) 지역의 기상청 및 민간 운영 기상관측망, 국립기상과학원 도시기상연구팀 운영 관측망(하)(국립기상과학원).



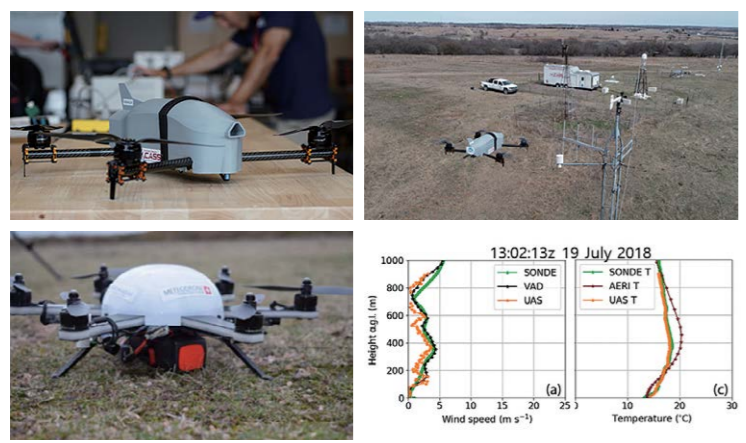
“ 기상드론을 활용한 관측은 UAM 기상 자료 부족 영역에서 유용하게 활용 가능 ”

않는다. 현존하는 기상청 AWS망, 도시기상관측망, 민간 관측망의 자료를 종합적으로 활용할 수 있는 품질관리 및 통합방안의 개발이 더 효율적이다.

조밀한 지상관측망이 지상에서 상세한 정보를 제공하지만, 여전히 고도에 따른 기상정보는 절대적으로 부족하다. 특히 버티포트 주위는 고해상도의 수평정보뿐만 아니라, 지표에서 UAM 항로까지 고도에 따른 고해상도(20m-50m) 정보가 요구된다. 따라서 버티포트에서는 고도에 따라 정확도가 높은 고해상도의 기상정보를 획득하기 위한 지점관측이 필요하며 이를 충족할 수 있는 지점관측 방안으로 기상관측 드론을 활용할 수 있다. 버티포트나 주위에서 기상드론을 설치하여 지상과 UAM 항로 사이를 반복적으로 이동하면서 고도에 따른 기상정보를 샘플링할 수 있다. 이 방법의 장점은 고도에 따라 해상도와 정확도가 높은 기상정보를 획득하는데 있다. 그러나 강한 바람이나 위험기상의 조건에서 기상드론 자체도 운항이 어려울 수 있어 제한된 기상 상황에서만 정보 획득이 가능할 것이다.

[그림 7]은 미국 오클라호마와 스위스에서 개발한 콥터존데(CopterSonde)와 미티오드론(MeteoDrone)이다. 이들 드론은 연구개발을 통해 자료의 정확도와 운영 환경에 대한 실험을 지속적으로 진행하였다. [그림 7]의 오른쪽 아래는 콥터존데

[그림 7] 오클라호마 대학에서 개발한 콥터존데(CopterSonde)(좌상)와 이를 이용한 관측 장면(우상). 스위스에서 개발한 미티오드론(MeteoDrone)(좌하)과 콥터존데로 관측한 바람, 온도와 라디오존데와 도플러라이더에서 산출한 변수들의 비교(우하)(Segales et al., 2020, Dr. Matin Fengler 제공).



와 라원존데 및 도플러라이더에서 관측한 바람을 비교한 것이다. 고도에 따른 바람 변화가 잘 관측되었다. 이러한 기상드론에 의한 기상관측은 UAM 기상자료 부족 영역에서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

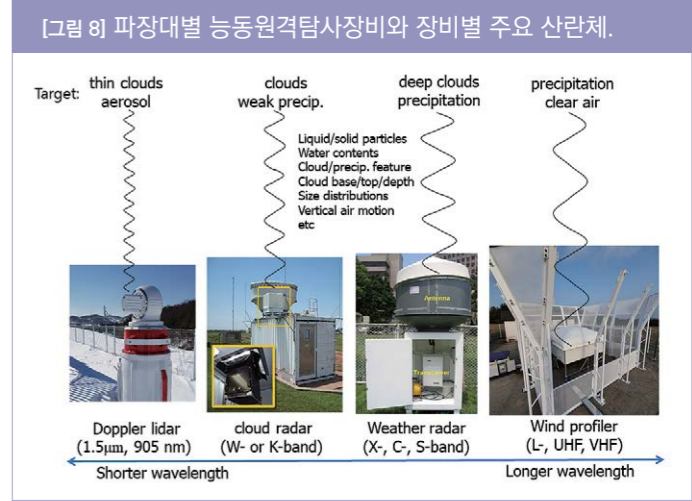
2. 원격탐사 관측망

원격탐사 관측망은 지점관측의 한계를 극복할 수 있는 유일한 대안이며 지점 관측 대비 넓은 영역 및 다양한 고

“ 파장대별 특성을 고려한 원격탐사관측망을 선택하여야 한다. ”

도에서 관측이 가능하다. 그러나 원격탐사 장비별, 특히 파장대별 특성을 명확히 파악하고 기상환경에 적절하게 활용하는 것이 중요하다. [그림 8]은 파장대별 능동원격탐사(active remote sensing) 장비와 관측 가능한 목표물(targets) 또는 산란체(scatters)를 기술하였다. 기상레이더는 일반적으로 파장 3cm-10cm(X, C, S 대역) 대역을 사용하며 왼쪽으로 단파장(고주파), 오른쪽으로 장파장(저주파)을 나타낸다. 일반적으로 파장이 길어지면 청천관측 능력이 좋아지고, 파장이 짧아지면 동일한 크기의 산란체의 경우 산란신호의 강도가 강해지고 강수에 의한 감쇠가 강해진다.

따라서, 장파장(L, UHF, VHF)대역은 청천시 바람관측을 위한 용도로 주로 활용된다. 특히 UHF 대역은 강수 및 청천 신호를 동시에 관측할 수 있어 청천뿐만 아니라, 강수 관측에도 활용 가능하다. 기상레이더는 강수관측에 주로 활용되며 아주 감도가 뛰어날 경우를 제외하고는 청천 및 구름 관측이 어렵다. 파장이 더 짧은 W 또는 Ka 대역은 강한 강우시 감쇠로 인하여 강우 및 원거리 관측이 어렵다. 반면 작은 구름입자에 대한 산란 강도가 강해지



면서 구름 및 강설 또는 약한 강우 관측이 용이하여 주로 구름 관측용으로 활용되는 구름레이더 대역이다. 파장이 더 짧아지면 감쇠에 의하여 구름 및 강우시 관측이 어렵지만 대기 중에 존재하는 에어로졸이나 작은 구름입자에 의한 산란이 강하게 나타나 얇은 구름이나 에어로졸 관측을 통한 청천 관측이 가능하다. 따라서 도플러 레이더는 구름이나 강수가 없는 맑은날 바람 관측에 최적이다. 이처럼 파장대별 주요 관측 대상이 다르고 UAM에서는 이러한 파장대별 특성을 고려하여 원격탐사 관측망을 선택하여야 한다.

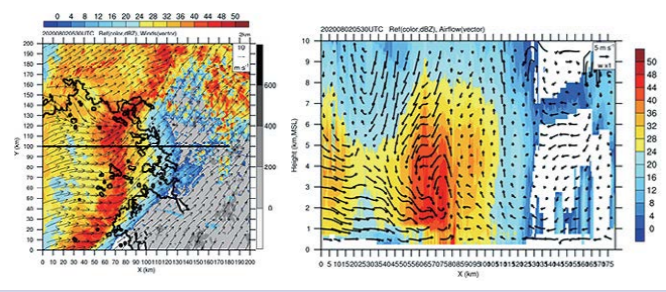
기상관측 요소별 대표적인 관측장비를 기술하고자 한다. 위험기상의 경우, 특히 강수와 연관된 위험기상의 경우에는 현존하는 기상레이더망의 정보를 융합한



“ X-밴드 이중편파 레이더망으로 하층을 관측하고 감도를 개선하는 방법 제안 ”

기상정보 생성이 이루어져야 한다. [그림 9]는 스킨라인 사례에 대하여 기상레이더들로 관측한 정보를 합성하여 산출한 3차원 반사도와 바람장을 나타낸다. 고도 2km에서 반사도와 바람벡터를 보면 스킨라인이 명확하게 보인다. 검은선을 따른 단면도에서는 강한 반사도 주위로 순환이 발생한다. 이처럼 기상레이더는 위험기상에 대한 상세 정보를 제공함에도 불구하고 현존하는 현업용 대향레이더(기상청, 홍수 통제소)의 경우 대부분 산꼭대기에 위치하고 있어 UAM 운항 고도에 대

[그림 9] 스킨라인 사례에 대해 기상레이더로 관측한 반사도 및 추정 바람장. 고도 2km에서의 레이더반사도(컬러) 및 바람벡터(좌), 검은선을 따른 연직 단면(우).



한 정보 제공이 어렵다. 또한 수도권에 설치된 3기의 X-밴드 소형레이더는 솔리드스테이트 방식으로 감도가 떨어져서 약한 강수의 관측이 불가능하다.

두 번째 기상요소인 안개, 구름, 강수(눈, 착빙, 및 약한 비) 관측은 현재의 기상레이더망으로는 관측이 불가능하다. 또한 기상레이더의 설치 위치 및 기종의 한계로 인하여 하층에

서 중간/강한 강수 관측도 어렵다. 약한 강수나 구름 관측을 위해서는 두 가지 측면에서 접근이 가능하다. 첫째 현재의 X-밴드 이중편파레이더망을 이용하여 하층을 관측할 수 있도록 하고 감도를 개선하는 것이다. 안테나 크기를 키워 빔폭을 0.5도 이하로 작게 할 경우 부방사부에 의한 오염을 최소화하여 저층에서 위험기상 관측이 가능하다. 또한 레이더 감도를 증가시켜 약한 강수에서 우박까지 강수의 전 영역을 관측함으로써 강수내 강풍 또는 난류에 대한 정보까지 획득할 수 있다. 또 다른 현실적인 방법은 이중편파 구름레이더를 이용하여 구름, 약한 강수, 그리고 구름내 난류를 관측하는 것이다. 이중편파 구름레이더망은 눈, 약한 강수, 짙은 안개 및 착빙에 대한 정보를 제공할 것이다.

UAM 운항에 가장 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 바람 및 난류에 대한 정보는 청천에서 강수시까지 전천후 관측이 필요하다. 전천후 바람 관측이 가능한 장비는 수직측풍기가 유일하다. 수직측풍기는 청천시 대기굴절률의 변동성을 관측하여

“ 도플러라이더 이용해 3차원 부피관측 실시, 이를 이용하여 상세 3차원 바람장 정보 획득 ”

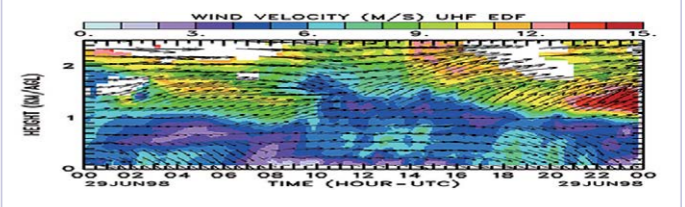
고도에 따른 바람정보를 제공한다. 일반적으로 지표면에서 100m-200m까지는 지형에코나 시스템의 한계로 관측이 불가능하지만, UHF 대역에서도 고도 1km까지의 바람관측은 용이하다. 강수시에는 강수에 의한 산란이 강해지면서 바람관측이 가능하다. 수직측풍기에서 관측이 어려운 하층(0m-200m)은 도플러라이더 중 풍력에너지 조사에 주로 사용되는 저가형 도플러라이더를 이용하여 보완할 수 있

다. [그림 10]은 UHF 대역 수직측풍기로 청천시 관측한 고도와 시간에 따른 바람 프로파일이다. 상층에서는 청천에 의한 산란 신호가 약해지면서 바람이 관측되지 않는 지역이 일부 존재한다. 수직측풍기는 전천후 고도에 따른 바람 프로파일을 제공하지만 장파장으로 인하여 일정한 빔폭을 유지하기 위해서는 큰 안테나를 사용한다. 그래서 큰 안테나로 인하여 수평방향 스캔 관측을 하거나 회전 관측을 하기에는 부적절하고, 공간 스캔에 의한 3차원 바람장을 제공하기 보다는 고도별 프로파일 생산에 주로 사용된다.

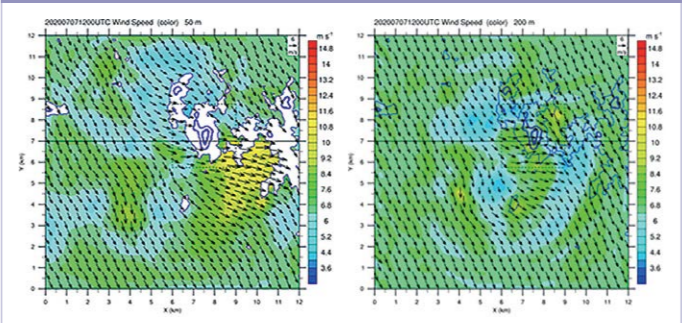
3차원 바람 정보는 스캔을 통한 도플러 정보의 관측으로 획득된다. 도플러라이더는 파장이 짧고, 안테나 사이즈가 작아 스캔이 용이하다. 따라서 도플러라이더를 이용하여 3차원 부피관측을 실시하고, 이를 이용하여 상세한 3차원 바람장 정보를 획득할 수 있다.

[그림 11]은 도플러라이더 관측자료를 이용하여 12km×12km 영역에서 각각 고도 50m, 200m에서 바람을 보여준다. 공간 해상도는 50m이다. 지형에 의하여 왜곡된 흐름이 잘 표현된 것을 볼 수 있다. 도플러라이더망을 구축하고 3차원 부피관측을 수행한다면 청천시 상세한 3차원 바람장 및 난류에 대한 정보를 획득할 수 있을 것이다. 구름이 발생하거나 강

[그림 10] 청천 사례에 대하여 수직측풍기로 산출한 바람장(벡터) 및 풍속(컬러)(Dr. B. Campistron 제공).



[그림 11] 청천 사례에 대하여 스캐닝 도플러라이더 관측자료를 이용하여 산출고도별(좌: 50m, 우: 200m) 바람장(벡터)와 풍속(컬러)(등고선은 지형을 나타냄).



“ UAM 계획 단계부터 다양한 기상관측, 정보 생산 및 활용이 필수적으로 고려되어야 함 ”

수 발생시 이중편파 구름레이더망을 이용한 3차원 부피관측을 통하여 유사하게 바람과 난류 정보를 얻을 수 있다.

#### IV. 맺음말

전통적인 항공교통과 비교하여 UAM에서는 더더욱 기상정보의 중요성이 대두된다. UAM 항로는 대기경계층에서 가장 바람이 강한 지역이며 강수나 실링이 빈번하게 존재할 수 있는 고도이다. 또한 도심공항의 위치 및 주위환경은 지표면에서 UAM 항로까지 정확한 기상정보를 요구한다. UAM 운항에서는 하층 난류, 강수/실링/착빙, 고층 건물이나 산악에 의한 강풍 및 난류, 위험기상 등 다양한 기상현상에 의해 심각한 영향을 받게 되어 기상은 전통 항공교통에서의 지원 역할을 넘어 UAM의 성패를 결정하는 가늠자가 될 것이다. 따라서 UAM 계획 단계에서부터 다양한 기상관측, 정보생산 및 활용이 필수요소로 고려되어야 할 것이다.

UAM에서는 비행체의 크기가 작아짐에 따라 항공기 결함/사고의 가능성 및 기상에 대한 민감도가 급격히 증가한다. UAM 항로는 대기경계층 내 에크만 층으로 풍속이 자유대기에 접근하고, 실링이 빈번하게 발생하고, 강수시 낮은 온도에 의하여 착빙의 가능성이 높다. 또한 버티포트/버티허브와 운항고도 사이는 강한 돌풍, 시어 및 난류가 빈번히 발생하고 주위 건물이나 지형에 의하여 기상요소가 급변하는 고도이다. 그러나 지상을 제외하고는 항로까지의 고도에서 기상정보를 획득할 수 있는 관측이 극히 드물다. 지표에서 항로까지 고도 및 항로상에서 필수적인 기상요소는 1)바람 및 난류, 2)안개, 구름, 강수(눈, 착빙, 약한 비), 3)위험기상이다. 따라서 이러한 기상요소를 지상인프라와 항로상에서 관측할 수 있는 관측망의 구축이 시급하다.

기상요소의 관측을 위해서는 지점관측망과 원격탐사망을 공동으로 활용하여 고해상도의 기상정보를 생산하여야 한다. 국토교통부에서 발표한 테스트베드인 서울 및 수도권지역은 기상청의 AWS망, 민간기상관측망, 그리고 도시기상관측망이

“ 소형 이중편파레이더망 개선과, 구름레이더망 구축, 수직측풍기 활용, 도플러레이더망 구축이 요구된다. ”

잘 갖추어진 장소이다. UAM 항로에서 지점관측이 부족하지만 설치장소 및 유지보수의 한계로 지점관측망의 확장보다는 기존에 존재하는 관측망의 통합 및 품질 향상이 더 중요하다. 원격탐사 관측망은 위 세 그룹의 기상요소에 대하여 파장대별 특성을 고려하여 평가 및 제안하였다. 현존하는 기상레이더망은 대기경계층에서 정보를 제공하는데 한계가 있고 감도 또한 낮아 약한 강수나 구름의 관측이 불가능하다. 따라서 기존 대형레이더망은 그대로 유지하지만, 소형 이중편파레이더망의 개선과 이중편파 구름레이더망 구축이 시급하다. 또한 바람 및 난류에 대한 전천후 관측을 위하여 수직측풍기를 활용하여야 하며, 청천시 상세한 3차원 바람장 확보를 위해서는 조밀한 도플러레이더망의 구축이 요구된다.

UAM 운항은 기존 항공교통과는 달리 효율적 운영뿐만 아니라, 안전 측면에서 기상정보는 필수적이기 때문에, 고해상도, 고정밀 기상정보의 생산이 UAM의 성패를 좌우할 것이다. 그럼에도 불구하고 제안된 UAM 항로는 현재 기상자료가 가장 부족한 고도인데 반해 기상의 변화는 가장 큰 곳이다. 결국 UAM 계획 초기부터 필요 기상요소의 정의-관측-생산에 대한 체계적인 방안이 마련되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

Campbell, S.E., D.A. Clark, J.E. Evans, 2017: Preliminary weather information gap analysis for UAS operations. MIT Lincoln Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, 99pp.  
Segales, Antonio R., Brian R. Greene, Tyler M. Bell, William Doyle, Joshua J. Martin, Elizabeth A. Pillar-Little, and Phillip B. Chilson, 2020: The CopterSonde: an insight into the development of a smart unmanned aircraft system for atmospheric boundary layer research. Atmos. Meas. Tech., 13, 2833-2848.



# 도심항공기상을 위한 중미기상학

강성락, 강원원주대학교 대기환경과학과 교수 slkang@gwnu.ac.kr

- I. 균질 지표상 대기경계층: 미기상학
- II. 비균질 지표상 경계층: 중미기상학
- III. 도심항공교통을 위한 중미기상학
- IV. 맺음말

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 지상 400-600m 상공을 비행한다. 대기권에서 UAM의 활동 영역은 대기경계층에 해당한다. 대기경계층은 지구 지표의 영향을 직접 받는 대류권 하부층이다. 현재 대기경계층에 대한 교과서적 설명과 대부분 날씨 및 기후모델에 직접 활용되고 대기과학 지식은 수평적으로 균질한 대기경계층에 기반을 두고 있다. 우리나라는 불과 수백 km의 동서 폭 내에, 약 1,500m 높이의 정상들이 동쪽에 치우친 태백산맥의 복잡한 지형상, 도시와 농촌을 비롯한 다양한 토지 사용의 비균질 지표 조건들이 중첩되어 있다. 즉, 우리나라의 경우 해륙풍과 산곡풍을 비롯한 각종 중규모 순환과 난류가 활발히 상호작용하는 다중규모 대기경계층이 그 주류를 이룬다. 현재의 대기경계층에 대한 교과서적 지식과 이에 기반한 대기 모델로는 UAM의 궁극적 지향점인 조종사 없는 자율비행에 충분한 안정성 및 신뢰성 확보가 어려울 것이다. ■

“ 대기경계층의 구조와 과정에 대한 정확한 이해 없이는 예측과 진단이 불가능하다. ”

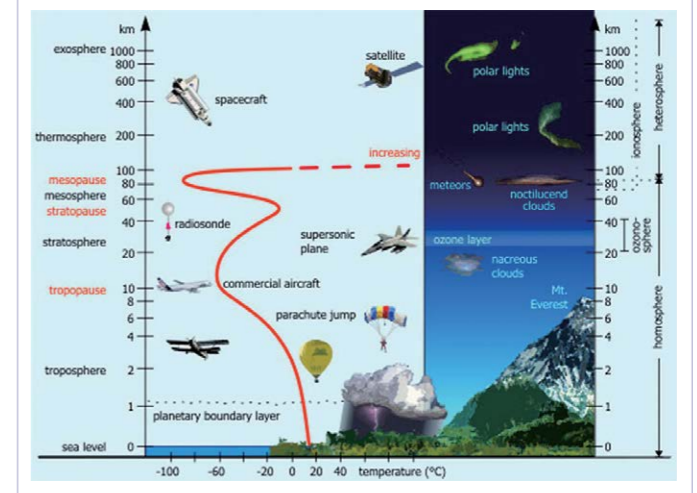
## I. 균질 지표상 대기경계층: 미기상학

대기경계층은 정의상 지구 지표로부터 직접적 영향을 받는 대류권 하부이다 (Arya, 1988; Stull, 1988). 비행기를 타고 장거리 해외 방문 시 성층권 하부까지 비행기가 고도를 올려 비행하는 경우를 제외하면 우리는 일생을 이 대기경계층 내에서 보낸다. 다시 말해, 우리가 매일 경험하는 온도, 습도, 바람, 강수 등의 기상변수와 미세먼지 같은 여러 대기 오염 물질의 시공간적 농도 변화에 대해 대기경계층의 구조와 과정에 대한 정확한 이해 없이는 예측은 물론 진단조차도 불가능하다.

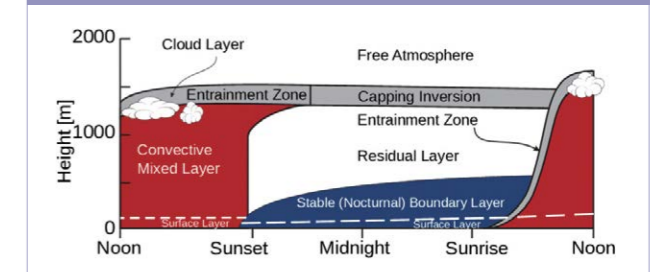
지구 대기권 높이는 명확히 정의되어 있지 않다. 하지만, 통상 지구를 둘러싸고 있는 공기가 점점 희박해져 거의 사라지는 고도를 대기권의 높이로 본다. 지구를 둘러싸고 있는 대략 100-km 높이의 대기권 연직구조에서 대기경계층은 전형적 대류권 높이인 10km의 10%에 해당하는 1km 정도의 높이를 갖는다(그림 1). 즉, 대기경계층은 대기권 전체의 1%에 불과하다. [그림 1]은 시·공간적 평균 측면에서 대기의 연직구조를 보여주는 것이다. 더군다나, [그림 1]의 1-km 대기경계층 높이는 고기압 종관기상 조건 하 맑은 날 주간의 경우에 해당한다.

대기경계층은 명확한 일주기를 갖고 있다. [그림 2]에서 보여주듯이 맑은 날 주간에는 태양 복사로 가열된 지표로부터 상승하는 열기포들(thermals)이 대류혼합층(convective mixed layer)을 만든다. 이 혼합층과 지표 영향으로부터 자유로운 자유대기와의 경계 영역을 유입지대(entrainment zone)라 부른다. 이러한 주간 대기경계층의 상부

[그림 1] 대기 연직구조 속의 경계층(출처: <http://greenwoodsoweather.weebly.com/atmosphere.html>).



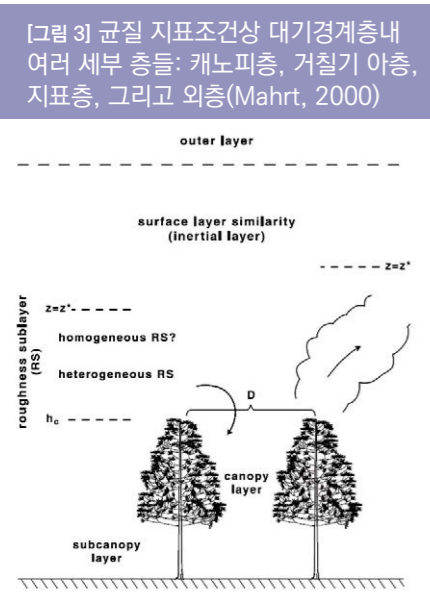
[그림 2] 고기압하에서 대기경계층의 시간적 변화(Stull, 1988).



“ 현재 교과서는 균질한 지표 조건상 대기 경계층의 구조와 과정 소개에 중점 ”

구조는 일몰 후에도 그대로 유지되나, 지표의 복사 냉각으로 인해 하부에는 안정층(stable boundary layer)이 형성된다. 하지만, 야간에는 대기경계층 중 상층의 주간 대기경계층으로부터의 잔여층(residual layer)에는 주간 대류 경계층과는 다르게 난류가 거의 존재하지 않는다.

맑은 날 주간, 편평한 지형의 균질지표 조건상 대기경계층은 캐노피층(canopy layer), 거칠기아층(roughness sublayer), 지표층(surface layer) 그리고 외층(outer layer)으로 나누어진다. 우선, [그림 3]과 같이 지표 위 나무 또는 빌딩 등 개별적 거칠기 요소들(roughness elements)이 존재하는 곳이 캐노피 층이다. 이 캐노피 층 위에 개별적 거칠기 요소들이 시간적으로 평균한 흐름에서 수평적 비균질성이 여전히 나타나는 곳이 거칠기아층이다. 즉 이 거칠기아층의 꼭대기에서는 개별 거칠기 요소들의 영향이 융합한다. 즉, 거칠기아층 위 지표층에서는 개별적 거칠기 요소들의 영향이 사라져 공간적으로 평균된 지표 현열 및 잠열 값을 모난-오브크호브의 유사성 이론(Monin-Obkhov similarity theory)을 활용하여 추정할 수 있다. 이 지표층 위, 지표보다 대기경계층 상부로부터 영향을 더 심하게 받는 층을 외층이라 한다.



[그림 3] 균질 지표조건상 대기경계층내 여러 세부 층들: 캐노피층, 거칠기 아층, 지표층, 그리고 외층(Mahrt, 2000)

현재 현업은 물론 연구용으로 사용되고 있는 대부분의 날씨 및 기후모델들은 그 첫 번째 층을 지표층이라 가정하고 Monin-Obkhov 유사성 이론을 활용하여 지표 현열 및 잠열을 추정하여 활용하고 있다. 앞서 설명하였듯 지표층의 존재는 지표가 균질하다는 조건 위에 성립된 것이며, Monin-Obkhov 유사성 이론도 균질지표 조건이 어느 정도 충족된 상태에서 관측한 값들에 기반하여 성립된 것이다.

대기경계층에 대한 소개는 고기압의 맑은 날씨일 때, 지형이 편평한 육지 상 다른 모든 지표 조건들, 예를 들어 토양수분, 토지 이용도, 그리고 식생의 유무 또는 정도 등이 균질한 조건에서 평균 구조적 측면에 대한 것이다. 현재, 교과서는 이러한 편평하고 균질한 지표 조건상 대기경계층의 구조와 과정을 소개하는데 대부분을 할애하고 있

“ 대부분의 모델 성능은 비균질성이 심한 지표 조건상에서 때때로 심하게 저하될 수 있다. ”

으며, 산악지형과 비균질 지표상 대기경계층에 대해서는 매우 간략히 소개하고 있다. 그 이유는 수평적으로 비균질한 대기경계층에 대해서는 최근에서야 연구가 활발하게 진행 중이기 때문이다.

사실, 이러한 측면에서 그동안 대기경계층과 미기상학은 거의 동일시되어 왔다. 즉 편평하고 균질적인 지표상 대기경계층에는 시간 규모로 한 시간 이하, 공간 규모로 1-2km 이하의 난류에디(eddy)들만이 존재하기 때문이다. 하지만, 실제 대기에 있어 이러한 접근 즉, 중규모 이상의 흐름과 임의성 난류로 대기경계층 흐름을 이해하는 것은 매우 부정확할 수 있다. 특히 중규모 지표 비균질성이 극심한 조건들(도심, 산악, 해안 등)의 지역에서는 더욱 그렇다. 현재 대부분 날씨 및 기후 모델들이 이러한 미기상학 지식에 기반하여 모수화된 대기경계층 과정에 의존하고 있으므로 이들 모델의 성능은 비균질성이 심한 지표 조건상에서 때때로 심하게 저하될 수 있다.

II. 비균질 지표상 대기경계층: 중미기상학

I 절에서 기존의 대기경계층 기상학은 미기상학과 동일시되었다고 하였다. 사실, 아직도 이 두 과목은 같은 내용을 다루고 있는데 이름만 다르게 사용하는 것이라 인식 많이 있다. 실제 현실의 대기경계층 기상학에서는 미기상학의 주요 주제인 대기 난류만이 문제가 되는 것이 아니라, 중규모 흐름은 물론 이 중규모 흐름과 난류가 어떻게 상호 작용하는지도 중요한 문제가 되는 것이다. 즉 과거에는 해륙풍 및 산곡풍 등 중규모 흐름은 중규모 기상학에서 다루고, 미기상학은 중규모 기상 현상의 유무를 떠나, 이들을 모두 필터링하여 제거된 난류에 대해서만 다루었다. 하지만, 이제 앞으로의 대기경계층 기상학은 중미(규모) 기상학으로, 중규모 흐름과 미규모인 난류를 자연스런 하나의 묶음으로 연구하고 가르쳐야 할 것이다. 또한 이러한 중미기상학은 도심과 같이 중규모성이 심각한 다중규모 비균질성 지표상 대기경계층의 이해에 매우 필수적이다. 본 절에서는 이러한 중미기상학에 포함될 수 있는 내용 중 일부를 소개하고자 한다.

정책 초점

“ 도시를 대상으로  
상사성 이론으로  
지표층을 모사하는  
대기모델은  
UAM 지원에  
바람직하지  
않을 수 있다. ”

지구 지표는 지형은 물론, I절에서 이미 언급한 여러 지표조건 요소들이 다양한 규모와 정도로 항상 비균질적이다. 이러한 지형 외 비균질성 요소들은 대기에 영향을 미치는 측면에서 복합적으로 지표 거칠기(roughness length), 현열, 그리고 잠열로 정리될 수 있다. 예를 들면, 도시는 높은 건물들로 인하여 평균 바람이 0이 되는 높이 즉, 거칠기 길이가 잔잔한 해면의 경우에 비해 1만 배 이상 크다(Stull 1988). 또한 콘크리트와 아스팔트 등으로 대부분의 지표가 포장된 도시의 현열 대 잠열의 비인 보웬비(Bowen ratio)는 초원의 지표에 비해 50배 이상 클 수 있다(Stull 1988).

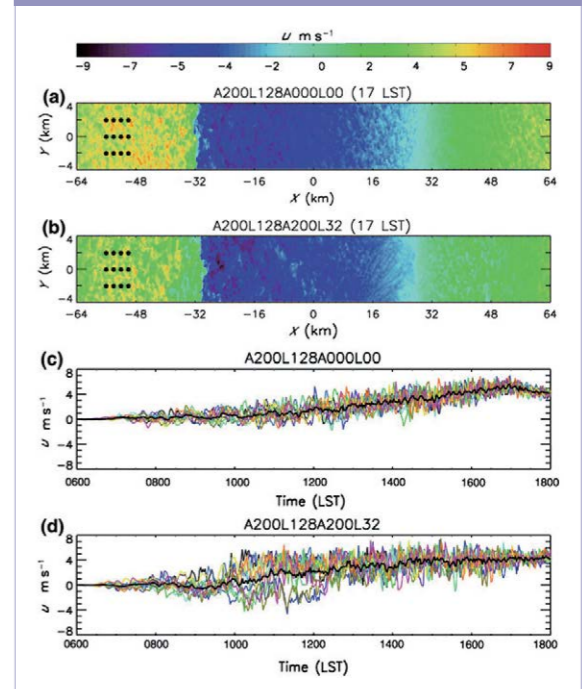
비균질성의 규모나 정도에 따라 대기에 미치는 지표의 영향은 크게 상이할 수 있다. 주간 대기경계층의 경우 비균질성의 규모가 대기경계층 높이보다 작을 경우, 개별적 비균질성의 요소들은 지표층 이상 대기경계층에 직접적 영향을 미치지 못한다. 따라서 지표층 위에 수평적으로 균질한 대기경계층으로 설명이 될 수 있다. 하지만, 대기경계층 높이보다 규모가 큰 비균질성 지표의 경우 예를 들면, 대기경계층 높이가 1km 일 경우, 이의 5배에 해당하는 5km 이상 규모의 지표 비균질성은 대기경계층 전체에 영향을 미칠 수 있다(Mahrt, 2000). 다시 말해, 이 경우는 지표층이 부재하므로 Monin-Obkhov 상사성 이론을 모델 첫 번째 층에 적용시키는 것은 모델 성능을 크게 저하시킬 수 있다. 즉 도심과 같이 중규모성이 강한 다중규모 비균질성 지표상 Monin-Obkhov에서 상사성 이론으로 활용 지표층을 모사하는 대기모델 자료는 UAM(Urban Air Mobility) 지원에 바람직하지 않을 수 있다.

해륙풍이나 산곡풍은 잘 알려진 중규모 기상현상이다. 교과서에서 이러한 현상은 대부분 독립적 단일규모에 기반하여 이해되고 있다. 하지만, 현실 대기에서 이러한 중규모 흐름을 유도하는 지표 비균질성은 다중규모이며, 어떤 규모의 특성이 어느 정도 강한지에 따라 발생하는 대기경계층 흐름의 특성은 전혀 다를 수 있다. 즉, 도심과 그 주변 지역을 비행할 UAM 측면에서 보면, 비행 경로상 중규모 성이 강한 다중규모 비균질성 지표에 의해 발생하는 다중규모 흐름의 특성 파악이 매우 중요하다.

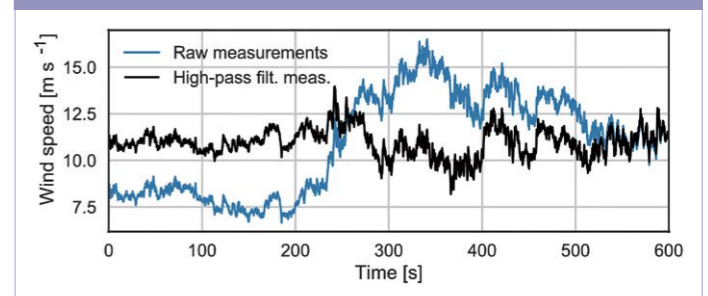
다중규모 비균질성 지표상 발생하는 다중규모 흐름에 대한 구체적인 한 예로 본 저자의 연구(Kang et al., 2012)를 소개하고자 한다. 동서로 128-km 지표 비균질성(도심 보다 큰 규모)에 32-km 비균질성(도심 규모)이 같이 존재하는 경우 발생하는 다중규모 대기경계층 흐름의 특성에 대한 연구이다. 이 논문에서 발췌한 [그림 4]는 128-과 32-km의 다중규모 비균질성이 있는 경우에 대한 큰에디모사(Large-Eddy Simulation, LES) 수치실험 결과를 제시해주고 있다. 오전 11시부터 적분을 시작하여 오후 5시에 지상 100m 높이에서 동서 바람장을 보여준다. 비교를 위해 [그림 4a]는 128-km 단일규모 비균질성 지표상의 결과이고, [그림 4b]는 128-과 32-km 비균질성이 같이 존재하는 다중규모 비균질성 지표상 결과이다. 동서로 128-km 지표 비균질성에 의해 유도된 수평 바람이 수렴하는 공기흐름은 [그림 4a, b] 모두에서 명확히 보인다. 또한, [그림 4a, b]는 수십 km 이하 규모에서 대기 흐름의 상세한 특성이 상당한 차이가 있음을 보여준다. 이는 도심 규모 비균질성의 유무에 의해 발생하는 대기 흐름의 차이에서 비롯된 것이다.

[그림 4c, d]는 각각 [그림 4a, b]에 표시된 12개 관측지점 지상 100m 높이에서의 바람 시계열을 보여준다. 128-km 지표 비균질성 상 바람 시계열[그림 4c]에 비하여, 128-와 32-km의 지표 다중규모 비균질성 상 시계열[그림 4d]은 공간적 변화도가 훨씬 큰 것을 볼 수 있다. 즉 도심 규모 지표 비균질성 특성이 강할 때 12개 지점에서 관측된 시계열이 서

[그림 4] 다중규모 지표 비균질성에 대한 대기경계층 저고도 수평 바람의 반응에 대한 큰에디모사 수치 실험 결과(Kang et al., 2012).



[그림 5] 덴마크 Høvsøre 관측소의 지상 100m 높이에서 관측 풍속 시계열(파란선)과 이를 High-pass filter로 처리한 시계열(검은선) (Hannesdottir and Kelly, 2019).





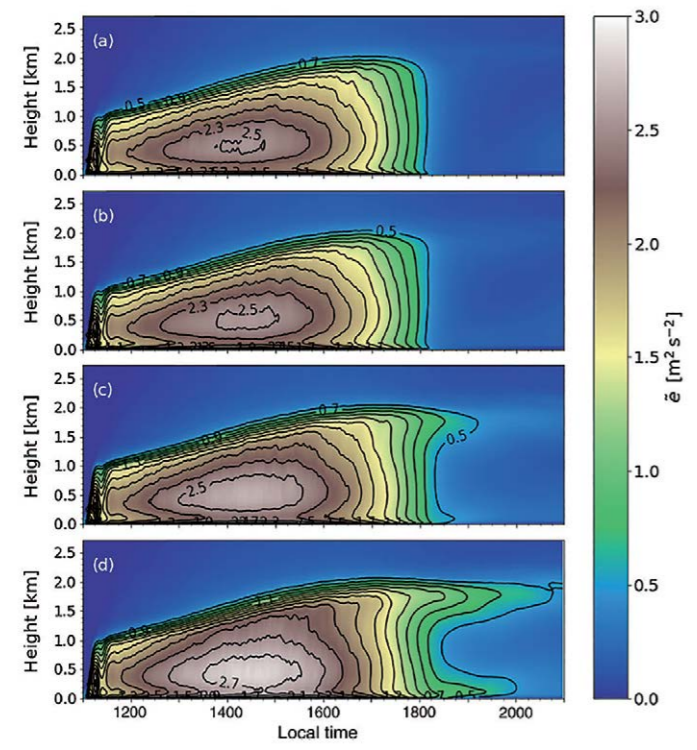
정책 초점

“ 도심과 인근지역은  
종관 배경  
기상장으로  
예측되지 못한  
강수현상이  
종종 발생 ”

로 상당히 다른 특성을 보인다. 도심 규모 지표 비균질성으로 생성된 수평 바람은 단시간 내 급격히 증가하거나 감소하는 현상이 발생한다. 실제 지상 바람에서 이러한 현상이 종종 관측되고 있다(그림 5). 이를 바람의 램(ramp) 현상이라고 부르며 풍력에너지 산업계 및 학계에서는 잘 알려진 현상이다.

다중규모 비균질성 지표에서 도심 규모 비균질성이 강하거나 약함에 따라 구름 및 강수의 생성도 심하게 변할 수 있다. 본 저자는 지표 현열 및 잠열의 분포에서 도심 규모 비균질성이 강하거나 약한 지표들 각각의 경우에 대해 구름과 강수 발달에 대한 수치실험을 실시하였다(Kang and Ryu, 2016). 이때 초기 대기상태로 사용

[그림 6] 수치실험 결과로부터 나온 오후부터 이른 밤시간까지 난류운동에너지( $\epsilon$ ) 연직 프로파일의 시간적 변동(다른 조건은 모두 동일하나 상이한 지표조건을 가정). (a)균질지표로, (b)도심규모 비균질성이 약한 지표, (c)도심규모 비균질성이 약간 심한 지표, (d)도심규모 비균질성이 매우 심한 지표(Kang, 2020).



된 평균대기의 조건은 동일하였다. 하지만, 결과는 강한 도심규모 지표 특성을 갖는 경우 비를 동반한 깊은 대류성 구름이 발달한 반면, 약한 도심규모 지표 특성을 갖는 경우 강수가 전혀 없는 얇은 구름들만 발달하였다. 즉, UAM 측면에서 본다면, 도심과 그 인근 주변은 종관 배경 기상장으로부터 예측되지 못한 강수현상이 종종 발생할 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다는 것이다.

도심 규모 지표 비균질성이 강한 지표상 대기경계층의 일변화는 I절의 교과서적 설명과는 상이할 수 있다. Kang(2020)에서 발췌한 [그림 6]은 오전 11시~밤 21시 대기 경계층 난류에너지 연직 프로파일의 시간적 변화를 보여주고 있다. 이 수치실험의 경우 다른 조건은 모두 동일하고, 지표 조건이 균질한 상태로부터 도심 규모 비균질성이 점차 강화되는 다중규모 상태로 변화하는

경우이다. 도심규모 비균질성이 강한 다중규모 지표 현열 및 잠열 분포상에서는 균질상태나 비균질성이 약한 지표 상과는 달리 일몰 후에도 난류운동에너지가 계속 심각하게 남아있는 것을 볼 수 있다. 이러한 일몰 후 운동에너지의 계속적 유지는 바람의 일주기뿐 아니라, 야간의 구름 및 강수 발달에도 크게 영향을 미칠 수 있다.

비균질 지표상 대기경계층이 균질 지표상 대기경계층과 상이한 점들에 대해서 현재 연구가 활발히 진행 중이다. 앞에서 살펴본 것처럼, 도심 같이 중규모성이 강한 다중규모 비균질성 지표상 대기경계층 관측은 현재 매우 부족한 상태이다. 설령 관측자료가 있다고 하더라도 비교과서적 현상들이 관측오차에 기인한 것인지 아니면 물리적으로 의미가 있는 현상인지를 분간하기가 쉽지 않다. 따라서 여기에서 본 바와 같이 수치실험을 통해서 주로 그 진척이 이루어지고 있다. 물론 이러한 지식의 축적이 보다 나은 관측망을 설계할 수 있도록 도와줄 것이고, 수치 실험에서 발견된 것을 관측자료 활용으로 증명하는 것은 중미기상학을 발전시키기 위한 보다 효율적이고 경제적인 접근이 될 것이다.

### III. 도심항공교통을 위한 중미기상학

지표로부터 400-600m 높이의 도심 상공을 비행하고 도시 내 버티포트(Verticport)에서 이착륙을 하는 전기추진 수직이착륙(Electrical Vertical Takeoff and Landing: eVTOL) 항공기인 UAM은 그 크기와 무게 측면에서 약 천후는 물론 다양한 날씨 조건들(강풍, 돌풍, 폭염, 한파, 구름 종류 및 정도, 강수량, 번개, 착빙, 미세먼지 농도, 시정 등)에 크고 작게 영향을 받을 것이다. 더군다나 UAM은 초기에는 조종사가 탑승하지만, 궁극적으로는 무인 조종의 자율비행이 그 지향점이다. 즉 궁극적 UAM은 이착륙시는 물론이고 비행경로 내내 지상통제센터(Ground Control Center, GCC)로부터 기상정보를 포함한 안정하고 효율적 비행을 위해 필요한 각종 공간 정보를 계속적으로 제공받는다. 특히, 기상정보는 사고 방지와 효율적인 도심항공교통의 운항을 위한 필수적 정보가 될 것이다.

“ 수치실험과 관측자료  
활용은 중미기상학을  
발전시키는 효율적,  
경제적 접근이 될 ”



“ 관측망과 인공지능 활용 이전에, 중미 기상학의 발달이 함께 요구된다. ”

관계부처합동(2020)에 의하면 정부는 이러한 UAM에 대한 기상 가이드를 위해 세밀한 기상관측망 구축과 인공지능에 기반한 정확도 높은 예측자료를 제공할 계획이라고 한다. 제대로 된 관측과 예측을 위해서는 미기상학이 아닌 중미기상학에 입각하여야 할 것이다. 하지만, 미기상학은 이론이 잘 정립된 상태인 반면, 중미기상학은 현재 연구가 진행 중이다. 다시 말해, 도심과 그 주변 지표 같은 비균질성 지표 상 대기경계층 구조와 과정은 알려지지 않은 것이 매우 많다는 것이다. 제한된 지식의 상태에서 제대로 된 관측망과 인공지능 구축이 과연 가능할 것인가가 심히 염려된다. UAM 지원을 위한 세밀한 관측망은 그 비용이 매우 클 것이다. 만약 그렇게 큰 비용을 부담하고 성능이 제대로 발휘되지 않을 경우 대책은 무엇인가? 또한, 인공지능은 데이터를 기계학습을 통해 실현하는 것이다. 데이터나 적용한 기계학습법이 적절하지 않아 큰 에러를 낳는다면 어떻게 할 것인가? 관측망과 인공지능을 활용하기 이전에, 아니면 활용하는데 있어 중미기상학의 발달이 함께 이루어져야 할 것이다.

#### IV. 맺음말

저자가 미국 텍사스 주립공과대학교에 재직 중, 현재는 미국 국립 대기과학연구소의 소장이된 Everette Joseph 교수로부터 무인항공기(Unmanned Aerial Vehicle, UAV) 프로젝트의 제안서 작성에 참여 제안을 받은 경험이 있다. 지금으로부터 4년 전 그 당시 Joseph 교수는 미국 뉴욕주 알바니시에 위치한 뉴욕주립대학교 대기과학연구소의 소장이었다. 그때 Joseph 교수는 미국 각주에 UAV 관제센터가 생기고, 이 센터가 무인항공기들의 이착륙과 비행을 조정할 것이라고 하였다. 관제센터로부터 UAV에게 다른 정보와 함께 기상정보도 실시간으로 전달될 것이고, 이 무인항공기들은 대기경계층 내에서 활동하기 때문에 대기경계층에 대한 이해가 매우 중요하며, 특히 무인항공기들의 활동에 지장을 초래하는 기상조건에 대한 시공간적 분포 진단 및 예단이 중요하다고 하였다. 따라서 Joseph 교수가 제안할 연

“ 도심 빌딩으로 인한 거칠기 높이, 포장 도로로 인한 극한의 보웬비 등은 대기 경계층 흐름을 복잡하게 만드는 요인 ”

구프로젝트는 무인 항공기들에게 제공될 대기경계층 기상정보의 정확성을 높이는 것에 대한 것이었다. 제안서가 제출되기 전 저자는 한국으로 돌아오게 되어 프로젝트에 참여는 하지 못하였다.

UAM에 대해 처음 들었을 때, UAV의 일부라는 생각이 들었다. UAM이 말 그대로 도심에 집중하는 것이라면, UAV는 UAM을 포함하는 전체 무인항공기에 대한 계획인 것 같았다. 따라서 UAM 기상지원은 UAV지원의 가장 어려운 부분이 아닌 가 싶다. 이미 앞에서 소개하였듯 도시를 포함한 지표는 비균질성이 극한의 상태이고, 특히 도심과 그 주변 지표의 차이는 심각한 중규모 비균질성을 내재하고 있다. 사실, 우리나라 대부분 도시의 대기환경은 해양과 육지의 지표 차이 또는 복잡지형의 영향을 심하게 받고 있다. 도심 내 고층빌딩들로 인한 극한의 거칠기 높이, 그리고 포장된 도심 지표로 인한 극한의 보웬비 등은 UAM이 활동할 도심 대기경계층 흐름을 매우 복잡하게 만드는 요인들로 작용하고 있다.

도심 대기경계층에 대해서는 현재 교과서적 지식은 지극히 제한되어 있다. 최근 이러한 비균질 지표 조건상 대기경계층에 대한 연구는 활발하지만, 현재까지의 지식만을 활용하여 UAM을 지원하기에는 미흡한 점이 너무도 많다. 사실, 비균질 지표 조건상 대기경계층에 대한 관측은 극히 어렵다. 비균질 지표 조건에 대한 관측과 이에 영향을 받는 대기경계층에 대한 관측이 동시에 충분히 이루어져야 한다. 또한, 중규모 흐름과 난류가 동시에 존재하는 자연스러운 다중규모 대기경계층 흐름의 다양한 형태에 대한 관측이 이루어져야 한다. 하지만, 현재 대부분의 관측이 난류를 제외하고 있으며, 지표 조건에 대한 관측도 거의 없는 상태이다. 이러한 이유로 다중규모 대기경계층 흐름의 연구는 큰에디모사를 활용한 수치실험을 통해 이루어지고 있다. 중규모 모델을 사용하여 사례연구에 익숙한 과학자들은 큰에디모사의 수치실험 결과도 관측자료와 직접 비교·검증하는 것으로 오해하기도 한다. 하지만, 큰에디모사 실험을 통해서 연구자는 대기경계층의 구조와 과정에 대한 이론을 제안하는 것이다. 이렇게 제안된 이론에 바탕을 두고 특별관측을 기획 및 실행하고, 제안된 이론을 수정 및 검증하는 것이 다중규모 대기경계층에 대한 이해를

“ 평균 흐름과 난류가 자연스레 연결되는 다중규모 대기경계층 흐름에 대한 이해는 아직 많이 부족하다. ”

높이기 위한 가장 효과적이고 경제적인 방안이다.

대기경계층 보다 구체적으로 다중규모 비균질 지표상 수평적으로 비균질한 대기경계층을 연구하는 학자로서 저자는 UAM에 대해 심히 염려가 크다. 어쩌면 본 저자는 너무 세세한 것들에 주의하여 지나친 염려를 하고 있는지도 모른다. 하지만, UAM, 특히 완전 자동화된 무인 UAM에 있어 부정확한 기상정보에 기반한 비행으로 추락 등의 심각한 사고와 이로 인한 이차적 피해를 초래할 수도 있다. 이미 여러 번 언급하였지만, 우리가 알고 있는 대기경계층에 대한 지식은 매우 제한적이다. 교과서적 지식은 대기경계층의 평균 구조적 측면과 중규모 이상의 흐름과 분류된 난류 과정에만 초점을 맞추고 있다. 또한, 난류 과정은 중규모 흐름과 직접 연관성 없이 독립적으로 상사성 이론에 의해 모수화 되었다. 이러한 평균과 섭동의 합으로 대기경계층 흐름을 보는 것은 현재 현업으로 사용되고 있는 대부분 대기 모델들이 채택하고 있는 방식이다. 따라서 도시와 그 주변 지역과 같이 중규모성이 강한 다중규모 비균질 지표상 다중규모 대기 흐름을 대기경계층 평균 구조와 모수화된 난류 과정으로 이해하는 것은 많은 에러를 낳을 것이다. 평균 흐름과 난류가 자연스럽게 연결되는 다중규모 대기경계층 흐름에 대한 이해는 아직 많이 부족하다. 따라서, 앞으로 연구가 더 많이 필요하고 이에 대한 정리가 반드시 선행되어야 한다.

참고문헌

Arya, S.P., 2001: Introduction to Micrometeorology, 2nd Ed. Academic Press, 420pp.  
Hannesdottir, A., and M. Kelly, 2019: Detection and Characterization of Extreme Wind Speed Ramps, Wind Energy Science, 4, 385-396.  
Kang, S.-L., 2020: Effects of Mesoscale Surface Heterogeneity on the Afternoon and Early Evening Transition of the Atmospheric Boundary Layer, Boundary-Layer Meteorology, 174, 371-391.  
Kang, S.-L. and J.-H. Ryu, 2016: Response of Moist Convection to Multi-scale Surface Flux Heterogeneity, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 142, 2180-2193.  
Kang, S.-L., D. Lenschow, and P. Sullivan, 2012: Effects of Mesoscale Surface Thermal Heterogeneity on Low-Level Horizontal Wind Speeds, Boundary-Layer Meteorology, 143, 409-432.

Mahrt L., 2000: Surface Heterogeneity and Vertical Structure of the Boundary Layer, Boundary-Layer Meteorology, 96, 33-62.  
Stull, R.B., 1988: An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Springer, 670pp.  
관계부처합동, 2020: 도시의 하늘을 여는 한국형 도심항공교통 로드맵. [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95083976](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95083976).

# 안전한 UAM을 향한 제언

홍진규 연세대학교 대기과학과 교수 jhong@yonsei.ac.kr

- I. 죽느니 앓는게 낫다.
- II. UAM 생태계의 출현과 안전 불감증
- III. 사회적 수용성: 1호가 될 순 없어!
- IV. 대기경계층 감시와 모델링
- V. 글을 마무리하며

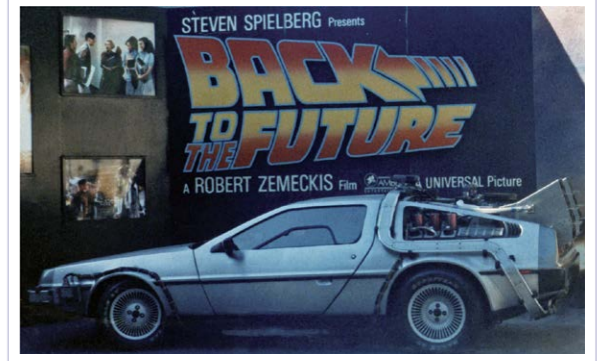
「1호가 될 순 없어」라는 예능프로그램 제목을 굳이 들지 않더라도, 새로운 기술을 일반 시민들이 보다 많이 사용하기 위해서는 그 기술이 가져다줄 수 있는 혜택과 관련 제도적 장치 마련이 중요하다. 하지만 결국 그 기술의 어두운 측면, 특히 장단기적 관점에서의 안전성에 대한 대비가 필수적이라고 할 수 있다. 새로운 기술에 대한 재빠른 사회적 수용성을 가진 우리나라 국민이라고 해도, 안전하지 않은 편리성을 쉽게 받아들일 수는 없을 것이다. 따라서 UAM으로 대표되는 소형 항공체인 드론이나 플라잉 카 운항의 안전성 확보는 건물의 구조와 기능, 그리고 도시 기후적 특성에 영향을 받으며 난류의 강도가 가장 강한 대기층인 대기경계층에 대한 새로운 과학적/기술적/도전적 과제 해결과 밀접하게 연결되어 있다. 현장 및 위성관측을 기반으로 하는 대기경계층 바람 환경의 관측 및 분석 기술과 초고해상도 유체역학 모델링의 지역규모 적용을 위한 계산 및 이론, 그리고 이를 안전운항정보 제공 체계와 연동하기 위한 다양한 ICT 기술과의 접목 기술에 대한 투자는 향후 UAM의 국제화 시대에 있어서 매우 중요한 역할을 할 것으로 기대된다. 다른 대기과학 분야보다 상대적으로 전문 연구인력이 부족한 이 분야에 있어, 향후 산학협력의 중요한 롤모델이 정착되어 한국의 UAM 관련 기술을 뒷받침할 수 있는 지원체계가 될 수 있기를 기대해 본다. ■

“플라잉카 상용화에 가장 큰 걸림돌은 운항 안전성 보장이 어렵다는 것”

## I. 죽느니 앓는게 낫다.

헐리우드의 오래된 공상과학 영화인 「백투더퓨처」를 보면 영화 속 현재인 1985년에서 미래인 2015년으로 시간여행을 하는 장면이 나온다. 영화 속 주인공 마티는 2015년 미래의 모습을 보며 놀라움을 감추지 못하는데, 실제로 2015년에 많은 사람은 이 영화 속에서 예측된 것들이 현실화한 예를 들면서 이 영화 속 예지력에 대한 찬사의 글들을 많이 남겼다. 그 대표적 예로는 지문결제시스템, 자동조명등, 화상전화, 증강현실 등이라고 할 수 있다. 하지만 영화 속 예측이 틀린 것들도 있는데, 대표적으로 분 단위의 매우 정확한 일기예보와 매우 발달한 팩스시스템을 들 수 있다.

[그림 1] 영화 “백투더퓨처”에 등장하는 하늘을 나는 자동차(Flickr.com (CCL))

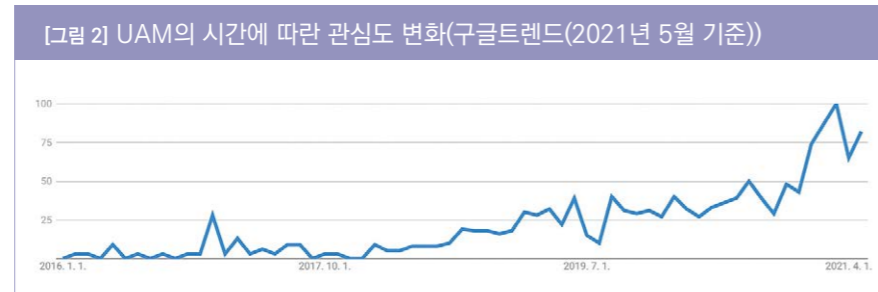


개인적 판단으로 특별히 잘못 예측한 예는 주인공인 브라운 박사가 타고 다니던 하늘을 나는 자동차, 일명 플라잉 카(flying car)를 들 수 있다[그림 1]. 이 지점에서 중요한 것은 많은 사람이 현재 우리가 언론을 통해 보고 있는 드론택시를 보며 영화의 예언이 맞았다고 주장한다는 점을 상기시킬 필요가 있다. 하지만 지난 몇 년간 우버 에어를 비롯해서 항공 및 자동차 업계에서는 몇 년 안에 플라잉 카가 상용화 될 것이라는 전망을 쏟아냈지만, 현재도 그렇고 당분간은 일상에서 우리가 플라잉 카를 이용할 가능성은 극히 낮아 보인다. 플라잉 카에 대해 기술적으로 상당한 진보가 있었으며 실제로 운영이 가능함에도 불구하고 상용화가 어려운 이유는 무엇일까? 법제도적 장치가 미흡한 면도 있겠지만, 상용화에 있어서 가장 큰 걸림돌은 사실 운항의 안전성을 보장하기 어렵다는 점이다. 극한 환경에서도 안전하게 이착륙하고 운행하는 것, 운항 및 이착륙이 안전한 곳을 찾고 경보하는 것, 추락 피해를 최소화하는 방법에 대한 구체적이고 현실적인 방안이 없다면, 아무리 빨리 원하는 곳에 도착할 수 있는 운송수단이라고 해도 사용자의 외면을 받을 수밖에 없을 것이다. 앓느니 죽는다는 말이 있지만 죽느니 지루한 것이 낫지 않을까?



“ UAM 상용화시 2030년까지 일자리 9만여 개 창출 등 다양한 이익 기대 ”

## II. UAM 생태계의 출현과 안전 불감증



실제로 UAM(Urban Air Mobility)에 대한 관심이 뜨거워지고 있는 것 같다. 구글 검색을 보면 2018년 유럽 도시들이 UAM Initiative를 European Innovation Partnership in Smart Cities and Communities의 하나로 시도하면서 사람들의 관심을 지속적으로 받고 있는 것을 알 수 있다(그림 2). 유럽연합은 UAM의 목표를 '도심 모빌리티를 3차원으로 이동시키는 것'으로 정의하고 다양한 분야의 이해당사자들을 관여시키는 일을 활발하게 진행하고 있다. 유럽통합항공안전청(European Union Aviation Safety Agency)은 UAM이 상용화될 경우에 2030년까지 9만여 개의 일자리 창출, 자동차 사고의 획기적 감소, 이동 속도의 70% 개선으로 인한 응급상황 처리 개선, 온실가스 배출 감소 등의 이익이 있음을 밝히고 있다(EASA).

20세기 초 라이트 형제가 처음 항공기의 시작을 연지 불과 100여년 만에 21세기에는 비행과 관련하여 새로운 이정표가 생길 가능성이 매우 큰 것처럼 보인다. 실제

로 지구밖 행성인 화성에서 비행물체의 비행이 있었고(그림 3), 도시의 차량 정체를 비롯해 수많은 문제해결에 도움을 줄 수 있는 비행체의 개발이 속속들이 이뤄지고 있다(그림 4).

여러 가지 사실에서 알 수 있듯이 UAM의 기본은 도시의 교통문제를 해결하는 수단으로서 중요한 의미를 가진다는 것을 알 수 있다. 교통체증 해소가 유발하는 직접적인 이득 뿐만 아니라, 온실가스 배출량을 줄이면서 에너지사용 효율



성을 극대화함으로써 스마트 시티의 목적에 기여하는데 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 보인다. 실제로 UAM의 목적을 달성한다면 인구밀도가 큰 도시와 수도권 사이의 차량 정체를 해결하고 더 나아가 에너지 시스템의 전환을 촉진함으로써 온실가스 배출량을 줄이고 ESG 관점에서 많은 혜택을 가져다줄 것으로 전망하고 있다. 이를 반영하듯 다양한 대기업 및 스타트업 기업들이 개인용 비행체(Personal Aerial Vehicle, PAV) 개발을 앞다퉈 시도하고 있으며, 관련 산업의 경제적 잠재력, 제도 및 법률, 사회적 수용성에 대한 분석이 이루어지고 있다. 컨설팅 회사인 '모건스탠리'는 2019년 보고서에서 UAM의 시장규모가 2040년에는 1조 5천억 달러에 이를 것으로 예측하였다(Morgan Stanley, 2019).

새로운 기술에 대해 비교적 개방적인 우리나라 국민들의 성향을 반영하듯이, 특히 우리나라의 UAM에 대한 관심은 다른 나라에 비해 매우 큰 것으로 보인다(그림 5). 최근 정부에서



도 관련 분야에 대한 연구투자 계획을 준비하고 있고, 이에 맞추어 국내 기업들과 함께 PAV 제조와 관련된 소재, 추진 장치, 관제 기술, 배터리, 전력 전자장치, 엔진, 조종성 향상 기술 개발과 함께 UAM의 인증기준 등을 포함하는 제도 및 법률의 정립, 그리고 버티포트 등을 비롯한 관련 인프라 건설 및 운영 등에 관한 개발투자에 적극적으로 나서고 있다. 하지만 우리 근현대사에서 속도를 강조하는 사회가 얼마나 많은 인재(人災)를 만들었는지 되돌아보면 과연 우리는 UAM 운영의 가장 중요한 문제인 운항의 안전과 사고방지대책, 그리고 사고 시 인명 및 재산피해를 최소화하는 기술에 대해서 다른 UAM 기술개발과 동등하거나 아니면 보다 중요하게 생각





“ UAM 안전을 위해 안전대책과 지원방안, 위험기상 대비 사전 연구 동시 진행 필요 ”

하고 있는지 다시금 생각해봐야 하는 시점이다. UAM을 상용화하였을 때 추락사고가 발생할 경우, 그 사고가 인재(人災)라는 지적이 나오지 않으려면 UAM 기체나 관련 전자장비기술 개발뿐만 아니라 안전비행을 위한 다양한 대책과 지원방안이 사전에 준비되어야 하며, 특히 모든 비행체와 마찬가지로 강풍과 강한 난류에 의한 위험기상에 대비한 사전 연구가 동시에 진행되어야 할 것이다.

### III. 사회적 수용성: 1호가 될 순 없어!

우리나라 국민들의 안전에 대한 염려는 우리 뇌에서 본능을 담당하는 변연계에 영향을 주지 않았나 싶기도 하다. 이제 젊은 사람들에게는 기억에 남아있지도 않은 와우 시민아파트(1970), 성수대교(1994), 삼풍백화점(1995) 붕괴와 함께 수많은 안전사고로 인한 인명피해를 겪으면서 우리는 ‘인재’라는 단어에 갖는 불쾌한 감정을 숨길 수 없다. 대한민국은 ‘민주공화국’이지만 아직 ‘안전공화국’은 아니라는 자조적인 말이 나오는 이유일지도 모르겠다. 실제로는 자연재해와 인재는 명확하게 구분되는 지점을 찾기가 어렵지만, 우리 사회의 준비된 모습은 그 노력이 아주 작더라도 임계점을 넘지 않게 함으로써, 대량의 인명 및 재산피해를 막을 수 있게 해주는 것임은 틀림없는 것 같다. 우리 사회는 효율성을 강조하면서 빠르게 세상의 변화에 대응할 수 있다는 장점이 있지만, 이러한 특성은 사실 남들보다 먼저 신제품을 써 보는 얼리어답터들이 숙명적으로 받아 들여야 하는 발견되지 못한 제품의 하자 문제를 겪을 수밖에 없을 것이다. 그리고 이런 제품의 하자로 인한 인명 피해는 새로운 기술에 대한 사회적 수용성을 크게 떨어뜨릴 수밖에 없다. UAM의 이득을 극대화하는 측면에서 가장 중요한 테제로 삼아야 할 것은 ‘안전성’ 그 이상도 그 이하도 아닐 것이다. 그리고 UAM은 TV, 자동차, 스마트폰과 같은 공산품이기 이전에 대기 상태에 영향을 받는 그래서 기체결함뿐만 아니라, 자연현상에 의해 안전성을 위협 받을 수 있음을 끊임없이 이해하고 이에 대한 점검을 게을리 하면 안 되는 것이다.

우리는 최근 사회적 수용성이 얼마나 중요한지 코로나19 백신 접종률에서 아주

“ UAM의 사회적 수용성 저하원인 중 하나로 안전성에 대한 불확신 지적 ”

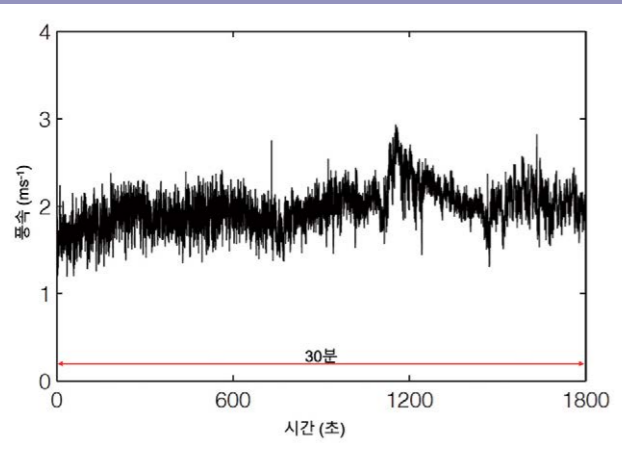
좋은 예를 발견할 수 있다. 코로나19 백신에 대한 많은 사람의 불신과 걱정으로 인해 예상보다 높지 않았던 백신 예약률과 접종률은 잔여백신 예약시스템의 등장으로 백신에 대한 부정적인 인식이 줄어들고, 접종률이 높아지는 효과가 나타나고 있다고 한다(머니투데이, 2021.6.7). 특히 잔여백신 예약시스템은 우리 국민의 놀라운 적응력 및 시민의식과 함께 IT기술 역량, 사회공헌에 관한 관심 등이 모두 어우러져 나타난 것이면서, 그러한 시도에 대한 사회적 합의가 충분히 도달되어 있었기 때문에 가능한 것이라고 할 것이다. 이는 단순히 하늘을 나는 택시를 실제로 단순히 보여주는 것 이상의 노력과 안전에 대한 담보가 확보되어야 함을 의미한다. 안전이 담보되지 않은 효율성과 속도는 다시금 과거 우리나라에 발생했던 재난에 드리운 인재의 그림자를 다시 만들지 않을지 걱정이다. 도심을 비행하는 소형항공기는 건물 이 밀집한 지역을 비행하기 때문에 추락 시 많은 인명피해를 발생시킬 수 있다. 누구든 사고 발생의 1호 피해자가 되고 싶지는 않을 것이다. 미국항공우주국 NASA의 조사에 따르면 UAM의 사회적 수용성을 방해하는 주된 원인 중 하나는 안전성에 대한 불확신 때문이다(NASA, 2018).

### IV. 대기경계층 감시와 모델링

우리는 과거 당장의 국가경제에 도움이 되지 않는다는 이유로 기초과학기술에 많은 투자를 해오지 않다가, 전 세계적 사회 전환에 크게 당황한 기억들이 많다. 최근 국가 연구개발 방향이 선진국 추격형에서 선도형으로 바뀌었지만, 기존 과학기술을 따라 하고 보완하는 연구가 많은 것도 사실이다. 실제로 우리는 최근 알파고와 이세돌의 대결 후에 다시금 인공지능에 대한 투자를, 그리고 mRNA 백신개발을 보면서 관련 연구개발 투자를 다시 시작하고 있다. 사실 기초연구에 대한 투자가 많을 필요는 없을지도 모른다. 우리가 생태계 다양성의 이득을 강조하면서 이를 보전해야 한다고 주장하는 것처럼, 과학 연구의 다양성은 이렇게 당장 실전에 필요한 분야만 투자한다고 해서 바로 해결되지 않는 경우가 많기 때문이다.

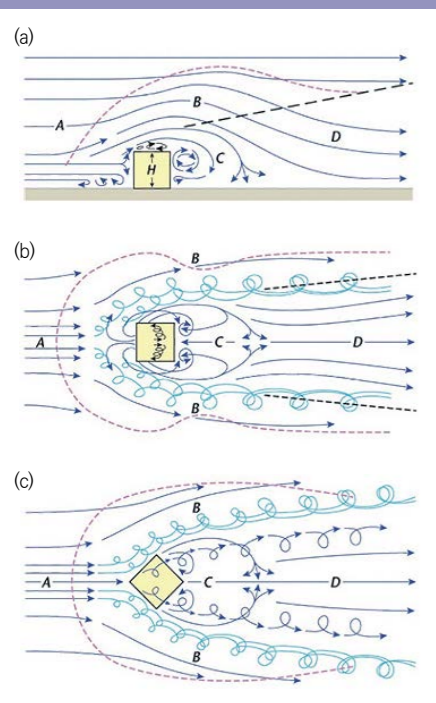
정책 초점

[그림 6] 대기경계층에서 난류의 시간 변동(연세대학교 미기상학 연구실(<https://eapl.yonsei.ac.kr>))



안타깝게도 UAM의 항공안전을 위한 대기과학의 수준은 높다고 단언하기 어렵다. 기후변화에 대한 관심과 함께 대규모 기후현상을 다루는 기후과학 기술은 상당한 투자와 함께 어느 정도 높은 수준으로 올라섰으나, 대기관측 기술과 건물 등의 장애물에 의해 발생하는 작은 규모의 대기현상을 다루는 도시기후학, 도시기상학, 그리고 미기상학 분야는 상대적으로 전문 연구인력이 적고, 연구투자가 상대적으로 부족한 것은 엄연한 사실이다. 아울러 게임체인저의 역할을 수행할 관련 최첨단 대기관측장비는 모두 외국에 의존하고 있다.

[그림 7] 빌딩 주변의 풍속과 난류 발생 (a)측면, (b)건물 정면, (c)45도 각도의 바람에 대한 평면도(Oke et al., 2017).



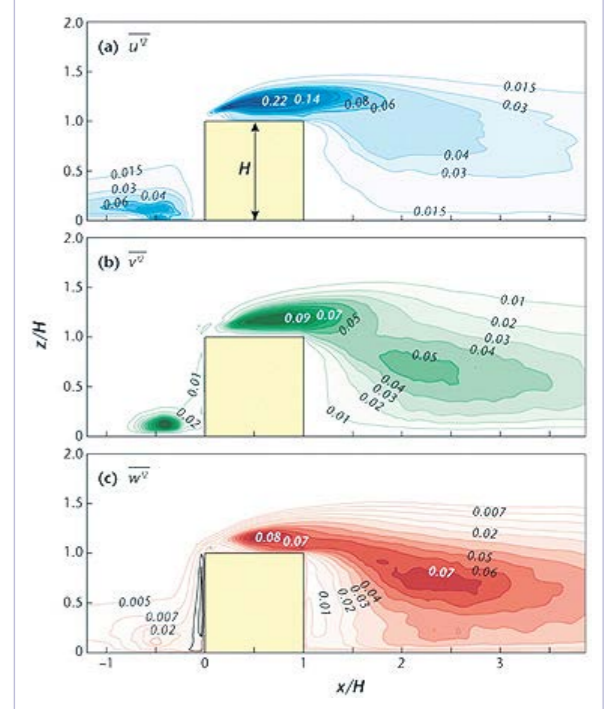
특히 UAM으로 대표되는 드론 및 소형 비행체의 운항안전은 공항을 중심으로 대형항공기의 이착륙 및 비행의 안전을 다루는 기존의 항공기상학과는 다른 미기상학적 난류현상에 대한 이해가 필수적이다. 도심의 하늘을 저공으로 비행하는 소형항공기는 건물 주변을 비행하게 될 것이며, 건물 주변은 건물의 개별 모양, 높이, 주변 건물과의 특성 및 거리 등과 함께 풍속/풍향에 따라 sweep 및 ejection 운동에 의해 실시간으로 강한 흔들림을 유발하는 난류와 빌딩풍이 강하게 그리고 매우 다르게 발생한다(그림 6-7). 그리고 UAM이 운영될 도시는 높은 건물 등의 장애물로 인하여 난류의 강도가 비도시지역보다 클 수밖에 없다(그림 8)(Hong and Hong, 2016; Kent et al., 2018; Lee et al., 2019; Lee et al., 2020). 이는 또한 전산유체 모델을 활용하여 특정한 조건 또는 이상적인 대기경계 조건을 활용한 안전성 관련 연구의 한계를 여실히 보여줄 수밖에 없고, 단순히 기존 항공기의 안전 체계로는 UAM의 안전한 운항을 확보하기 어렵다는 것을 의미한다. 결국 UAM의 안전에 대한 우려와 함

계 관련 기술을 수입에 의존해야 함으로써 UAM이 가져올 많은 경제적 이익을 포기해야 하는 것에 대한 안타까움의 감정을 만들어낸다.

그렇다면 우리는 UAM의 안전성을 확보하기 위하여 대기과학적 측면에서 어떤 것들을 최우선 순위에 두어야 할 것인가? 많은 다양한 의견이 있을 수 있고 제도 및 비행체 제작 및 전자장비 관련 기술에 대한 개발과 함께, 안전을 위한 대기과학의 기여는 다음을 이야기하는 것이 필요할 것 같다. 제일 중요한 것은 UAM의 안전성에 대한 표준 확립에 관심을 가져야 할 것이며, UAM이 비행하는 대기층이 대형항공기가 운항하는 고층과는 다른 물리적 성질을 가진다는 점을 이해하는 것이 필요하다. 지면의 성질에 영향을 받는 대기 경계층 내의 대기 성질은 배경대기의 조건, 건물의 크기 및 주변 건물의 공간분포 등이 상호작용하면서 어떤 일반적인 특성을 쉽게 드러내지 않는 특성이 있다. 이러한 복잡성과 함께 다양한 형태의 PAV가 가지는 각각의 공기역학적 안전성이 다를 것이며, 어떤 대기상태에 대해 안전한지에 대한 인증이 필요하다. 이는 법적 장치뿐만 아니라, 안전을 위한 핵심 과학기술인 대기과학적 지식과 실험에 의한 실증작업으로 뒷받침되어야 할 것이다. 특히 최첨단 난류관측 장비를 활용한 운항안전지도의 개발과 안전한 이착륙 상황에 대한 사전 모델링 연구 수행이 필요하다고 할 수 있다. 이를 기반으로 안전한 운항로 설정, 안전한 버티포트 위치 선정, 이착륙 가이드 및 운항안전 관련 사전 정보정보를 축적할 수 있을 것이다.

그리고 이러한 기술은 지면과 인접해 있는 대기경계층을 탐사할 수 있는 최첨단 원격탐사장비의 개발 및 미기상학 야외실험 수행뿐만 아니라, 관련 자료처리기술 전문인력의 양성을 위한 교육, 그리고 유체역학 모델링 결과의 빠른 결과 산출을 위

[그림 8] 입방형태의 단일 건물 주변의 난류 운동 에너지 (Oke et al., 2017).



“ 대기경계층 난류현상은 기술과 전문가가 부족한 우리나라에서 시급히 연구되어야 할 분야 ”

한 GPU를 활용한 병렬화와 같은 작업이 수행되어야 한다. 실제 UAM의 상용화가 이루어질 경우에 수많은 비행체에 대한 개별 안전성을 감시하고 통제하기 위한 인력이 필요한 지식을 갖추고 운항정보를 제공하기 위해서는 관련 연구뿐만 아니라 교육 및 재교육을 위한 체계가 확립되어야 할 것이다.

### V. 글을 마무리하며

최근 새로운 기술의 발전은 항상 우리 사회체계의 변화보다 빠르게 일어나는 것처럼 보인다. 핵무기가 그랬고, 인공 지능이 그랬으며, 코로나19 백신이 그렇고, 이제는 날아다니는 자동차도 그런 것처럼 보인다. 1950년대에는 정보량이 2배가 되는데 50여 년이 걸렸다면, 현재는 6개월이 채 되지 않는다고 한다. 정보지식의 습득을 게을리 하면 뒤처지는 이러한 급가속 시대에서 새로운 기술의 등장은 그때마다 관련된 제도적 장치를 만들어야 하는 어려운 숙제를 우리에게 던지고 있다. 특히 우리는 새로운 기술이 인간의 생존 및 안전과 직결된다면 조금 더 신중하게 기술의 발전을 조심히 설계하고 준비할 필요가 있다. UAM도 마찬가지라고 단언하고 싶다. 과거 우리 사회에서 안전보다 다른 목적에 좀 더 치중하면서 일어났던 사례를 거울 삼아 UAM에 대한 보다 조심스러운 접근이 필요한 시점이 아닐까 한다. 관련 기술의 발전을 막을 수도 없고, 관련 기술의 발전을 장려해야 하는 상황일지라도, 안전과 관련된 기술개발 및 투자를 소홀히 할 수 없는 이유이다. 특히 하늘을 나는 드론과 택시 등의 비행안전은 배경대기 상황, 도시기후적 특성과 지면의 건물 구조와 기능, 나무 등의 장애물에 의해 그 성질이 달라지는 대기경계층의 난류에 따라 크게 좌우된다는 점을 고려해야 한다. 그리고 이러한 대기경계층 난류현상은 지금까지 우리나라에서는 시도된 적이 없는 초고해상도 유체역학 모델링을 도시 지역에 대해 광범위하게 적용해야 하기 때문에, 관련 기술과 전문가가 상대적으로 부족한 우리나라에서 시급히 연구가 이루어져야 할 부분이다. 그리고 대기경계층의 현장 관측 및 원격탐사 관측장비 부분에서도 장비개발과 분석기술 개발을 위한 집중연

구가 필요한 상황이다. 그리고 당연하지만 이러한 대기경계층 관측 및 모델링 기술은 ICT 기술과 접목되어야 하고, 추락을 대비한 다양한 상황에 적용될 수 있도록 상용화되어야 한다. 이 분야에 있어 우리나라 산학협력의 좋은 사례가 만들어지기를 기대해본다면 너무 앞서는 것일까? 아무리 좋은 편리한 기술이라고 해도 생명을 담보로 할 수는 없으며, 편리성에 의한 사회적 수용성이 결국은 안전사고 한 건으로 그 수용성을 잃어버릴 수 있다. 100에서 1을 빼면 0이 될 수밖에 없는 것이다. 99번 성공했다고 해도 1번의 사고로 우리는 모든 것을 잃어버릴 수 있기에 말이다.

### 참고문헌

EASA, <https://easa.europa.eu>  
 Morgan Stanley, 2019: Are Flying Cars Preparing for Takeoff?  
 머니투데이, 2021.6.7.: 오늘부터 60~64세 310만명 AZ 접종 시작.  
 Hong J.W. and J. Hong, 2016: Changes in urban heat environment with residential redevelopment in the Seoul metropolitan area, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55, 1091-1106.  
 Kent C.W., K. Lee, H.C. Ward, J.-W. Hong, J. Hong, D. Gatey, and S. Grimmond, 2018: Aerodynamic roughness variation with vegetation state: analysis in a suburban neighborhood and a city park, *Urban Ecosystems*, 21, 227-243.  
 Lee J., J.-W. Hong, K. Lee, J. Hong, E. Velasco, Y. J.J. Lim, J.B. Lee, K. Nam, and J. Park, 2019: Ceilometer monitoring of boundary layer height in Seoul and its application to evaluate the dilution effect on air pollution, *Boundary-Layer Meteorology*, 171, 435-455.  
 Lee J., J. Hong, Y. Noh, and P.A. Jimenez, 2020: Implementation of a roughness sublayer parameterization in the Weather Research and Forecasting model (WRF version 3.7.1) and its validation for regional climate simulations, *Geoscientific Model Development*, 13, 521-536.  
 NASA, 2018: Urban air mobility (UAM) market study.



# 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템

박문수 세종대학교 기후환경융합학과 moonsoo@sejong.ac.kr

- I. 도심항공교통과 대기경계층 기상
- II. 수도권 복잡한 국지 순환
- III. 돌풍 발생 사례
- IV. 바람시어 및 돌풍감지시스템 제안
- V. 요약 및 결론

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 300m 내외의 도심 상공을 운항하는 비행체로 안전한 운항을 위해 기상 정보가 필수적으로 요구된다. 도심 상공은 역학적 난류와 국지적인 열적 난류가 발생할 가능성이 매우 크다. 특히, 수도권은 복잡한 지형으로 인해 다양한 종류의 국지순환이 발생하여 모델 기반으로 이를 예측하는 데에는 한계가 있다. 보성글로벌표준기상관측소의 종합기상관측탑 자료를 보면 300m 상공에서의 돌풍 사례를 통해 수도권 역시 돌풍 가능성이 매우 높을 수 있음을 확인하였다. 본고에서는 윈드라이다를 중심으로 한 UAM 운항 경로 상의 바람시어 및 돌풍감지시스템 구축과 모델기반의 돌풍지수 개발 및 돌풍탐지알고리즘 개발 등에 관한 기술 개발을 제안하였다. 도심 상공의 바람시어와 돌풍을 탐지하는 기술은 대기경계층 내에서의 연직혼합과정 연구에도 활용될 수 있을 것으로 기대된다. ■

## I. 도심항공교통과 대기경계층 기상

도심항공교통(Urban Air Mobility, UAM)은 도심 상공 약 300m 고도에서 운항하는 유·무인 이동 교통수단으로 UAM이 자리잡기 위해선 기상 영역에서의 기여가 필요하다(Goyal et al., 2018). UAM이 활성화된 뒤에는 UAM을 이용한 관측이 도시대기경계층 또는 고해상도 기상현상을 규명하는데 획기적인 기여를 할 것으로 기대되고 있다(Steiner et al., 2019). 현재는 도시 내에 한정된 항공교통이란 의미의 UAM을 사용하지만 시간이 지나면서 도시 사이의 항공 교통이란 의미의 AAM(Advanced Air Mobility)으로 확장하여 사용되는 추세이다(<https://www.faa.gov/uas>). UAM 비행체(eVTOLs, electric vertical takeoff and landing)가 도심공항(vertiport)에서 수직 이륙하여 수평으로 목적지까지 이동한 후 목적 지점에 수직 착륙하는 과정에 이르기까지 기상은 매우 중요한 역할을 한다. 강풍, 폭풍, 강수, 낮은 운저고도, 저시정, 극단적으로 낮거나 높은 기온 환경에서는 UAM 운항을 중지할 수도 있다(Goyal et al., 2018). 특히, 강풍과 돌풍, 그리고 강한 바람시어(shear)가 있는 경우에는 UAM 운항에 심각한 악영향을 끼칠 수 있다(Wang et al., 2019; Creighton et al., 2020; 이영재 등, 2020). 하지만 현상이 매우 국지적/단시간 동안만 발생할 수 있기 때문에, 정확한 관측·예측을 비롯한 사전 대비가 요구된다.

대기경계층은 지표의 영향을 직접 받아 난류가 강하고 온도나 풍속의 변화가 크다. 주간에는 2km, 야간에는 수백m 높이까지 성장한다(Stull, 1998). 도시는 알베도, 방출률, 거칠기길이 등의 지면 특성뿐만 아니라 건물높이, 평면적비(건물평면적/수평면적), 옆면적비(건물옆면적/수평면적), 건물높이-도로폭 비율 등의 기하학적 특성이 블록 단위로 매우 불균일하다(Yi et al., 2015). 복잡한 지면 특성 때문에 도시의 대기경계층은 일반대기경계층에서 나타나지 않는 캐노피층, 거칠기층(roughness sublayer)을 추가로 고려해야 한다. 거칠기층은 지면 불균일에 의한 효과가 여전히 존재하는 층이고, 그보다 높은 층(blended layer)에서는 수평 불균일이 없어져 평평한 지표에서의 지표층과 같은 형태가 된다(Roth, 2000; 2013).

“도시에 한정된 항공교통으로서의 UAM은 도시간 항공교통의 AAM으로 확장 추세”

정책초점

“ UAM 비행체와 도심항공 설계 시 도시의 종관기상 특성 분석 필요 ”

우리나라 대부분의 도시는 해안가에 위치해 있거나, 주변에 크고 작은 산과 하천들이 있어 매우 복잡한 국지순환 특성을 보인다(Ryu and Baik, 2013; Park and Chae, 2018). 윈드라이더(wind lidar) 관측자료 분석을 통해 종관 바람이 약하고, 맑은 날의 경우 서울 전역에서 주간부터 저녁까지는 서풍 또는 북서풍의 해풍이, 야간부터 오전까지는 동풍 계열의 육풍이 번갈아가면서 나타남을 확인했다. 해풍의 최고 풍속은 15-21시 400m 고도에서, 육풍은 4-8시 300m 고도에서 나타났다(Park and Chae, 2018).

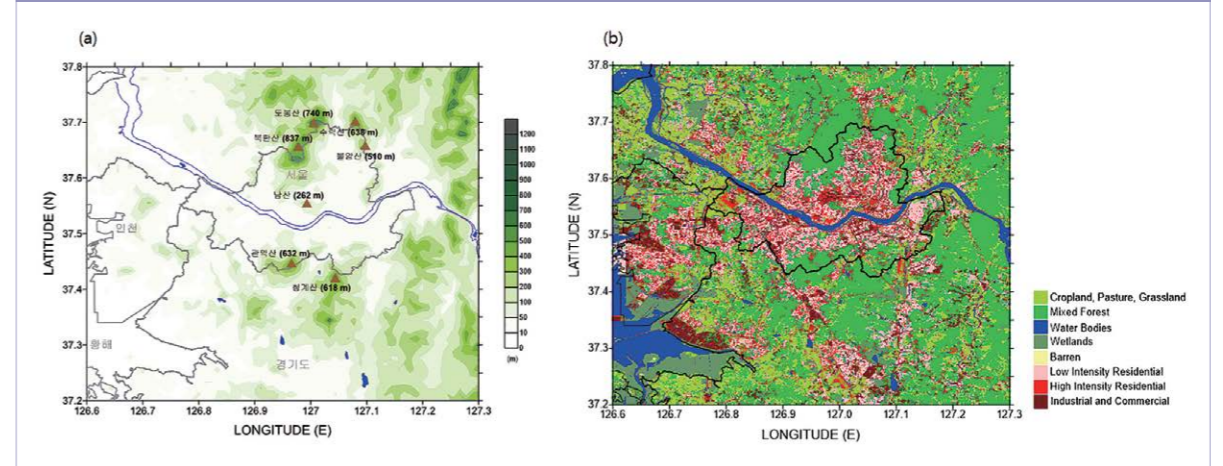
UAM 비행체나 도심공항을 설계하기 위해선 각 도시의 종관기상 특성 분석이 필요하다(Goyal et al., 2018). 지상부근에서 관측된 기상자료보다는 운항 고도에서의 자료분석이 중요하다. 그리고 실제 운항을 위해서는 항로 기상에 대한 정보제공이 요구된다. 운항을 시작하여 도착할 때까지 대략 1시간의 초단기 예측정보가 필요할 것이다. 예측정보는 모델 기반으로도 가능하지만, 현재 기상장 모델의 예측 수준이 국지성 대류 현상의 모의에는 여전히 한계가 있어 실시간 관측으로 극복해야 한다.

UAM 비행체는 크기가 작기 때문에 국지적으로 발생하는 강한 바람 또는 작은 난류에 매우 취약하다. 작은 규모의 기상현상은 현재의 기상모델 지원이 불가능하기 때문에, 관측 기반으로 제공되어야 한다. 본고에서는 차세대도시농림사업단에서 구축한 수도권의 도시기상관측소 자료로 분석된 자료와 보성글로벌표준기상관측소 자료를 분석하여 복잡한 대기경계층구조와 돌풍 발생 가능성을 제시하였다. 이를 배경으로 안전한 UAM 운행을 지원하기 위해 반드시 필요한 돌풍감지시스템을 제안하고자 한다.

## II. 수도권의 복잡한 국지 순환

수도권은 지형과 토지이용이 매우 복잡하기 때문에 다양한 종류의 국지 순환이 발생한다. 수도권의 서쪽에는 황해가 자리 잡고 있으며, 북한산, 도봉산, 수락산, 불

[그림 1] 수도권의 (a)지형과 (b)지면조건(Park et al., 2017).



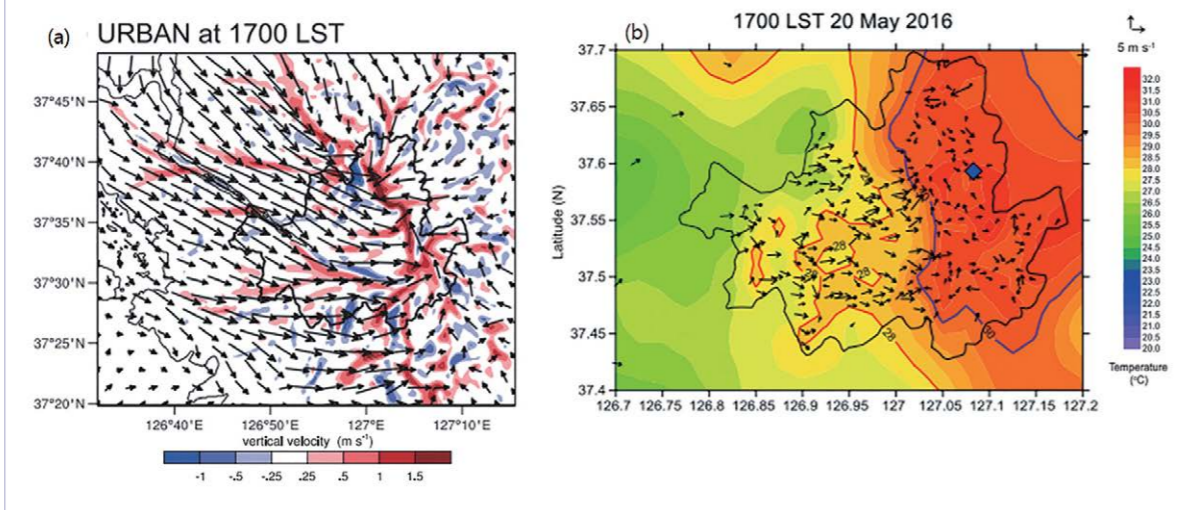
암산, 관악산, 청계산 등 500m 이상의 산이 서울의 북·동·남쪽을 감싸고 있고, 한강이 동쪽에서 서쪽으로 서울을 관통하며 흐르고 있다[그림 1a]. 그림 1b를 보면 영역 내에 숲이 36.0%로 가장 많고, 도시 28.3%, 농지 20.6% 순으로 도시비율이 매우 높은 것을 알 수 있다(Park et al., 2017).

Ryu and Baik(2013)은 서울대학교 도시캐노피모델(SNUUCM, Seoul National University Urban Canopy Model)과 결합한 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델을 이용하여 수도권에서 낮 동안 도시-시골 순환이 해륙풍이나 산곡풍, 하천-땅 순환 등과 같은 다른 국지순환과 강하게 상호작용할 수 있음을 밝혔다[그림 2a]. 특히, 한강 근처에는 도시 순환이 하천 순환, 해륙풍 순환 등과의 상호 작용으로 수렴 영역을 형성하였다. Lee et al.(2021) 역시 수도권에서 WRF 모델로 내륙까지 침투한 해풍 사례를 모의한 결과 해풍의 도달 시간은 비교적 잘 모의했으나 강도는 약하게 예측하여 그 원인을 대기경계층고도 관점에서 분석한 바 있다.

모델 기반뿐 아니라 수도권에 구축된 고해상도 지상관측망 자료를 이용한 분석에서도 유사한 결과가 나타났다. 2016년 5월 20일 17시에는 서울 동쪽까지 해풍 영향권에 있었다. 당시 해풍 영역에서는 기온이 낮았고, 해풍이 도달하지 않은 지역에서는 매우 높은 기온과 약한 풍속을 보였다[그림 2b](Park and Chae, 2018).



[그림 2] (a)SNUUCM이 포함된 WRF 모델로 수행된 1700 LST의 수도권 바람장과 연직 풍속(Ryu and Baik, 2013), (b)수도권 도시기상관측망 기반 2016년 5월 20일 1700 LST 기온과 바람장(Park and Chae, 2018)



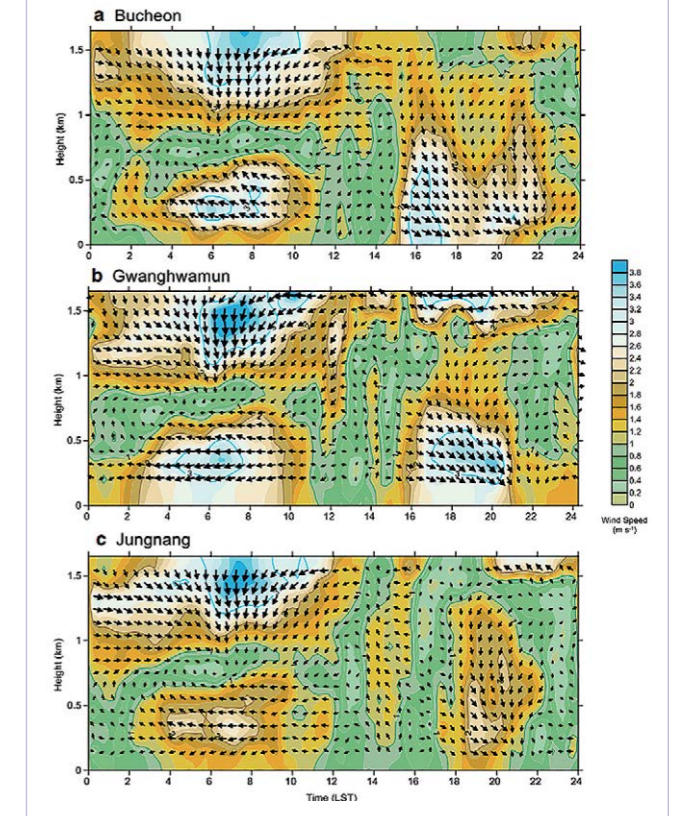
Ryu and Baik(2013)의 연구와 마찬가지로 한강 주변으로 수렴 영역이 관찰되었다[그림 2b]. 해안선으로부터 일정한 거리에 있는 지상자료를 분석한 결과 정오 경 해안선 부근에서 불어온 해풍은 18시 경 해안선에서 약 60km 내륙까지 영향을 미칠 수 있으며, 육풍은 50km 내륙에서 시작하여 야간부터 오전까지 영향을 미친다(Park and Chae, 2018).

해륙풍 순환은 해풍 셀과 육풍 셀을 구성하여 2차원 또는 3차원의 복잡한 구조를 가진다. 그림 3은 맑고 중관 바람이 약했던 2016년 5월 17-22일 동안 서울의 서쪽(부천), 중심(광화문), 동쪽(중랑)의 3개 지점에서 윈드라이다로 관측한 평균바람의 시간-고도 단면도이다. 세 지점 모두 오전에 700-800m 고도까지 육풍 셀이 형성되었으며, 15시 이후에는 1.2-1.4km 고도까지 해풍 셀이 형성되었다. 육풍 셀 중 최대 풍속은 300-400m 고도에서 06:00-07:00 LST에 나타났고, 해풍 셀 중 최대 풍속은 300-400m 고도에서 16:00-20:00 LST에 나타났다. 14:00 LST 부근에는 해풍도 육풍도 아닌 또 다른 바람이 관측되었다. 광화문에서는 육풍 셀 상층인 1.3 km 고도에서 북풍 계열의 return cell이, 해풍 셀 상층인 1.6km 고도에서 동풍 계열

의 return cell이 뚜렷하게 자리 잡고 있다. 해풍 셀의 시작 시각은 해안에서 가까운 부천에서 가장 빠르게 나타났고, 먼 중랑에서 가장 늦게 나타났다. 반면에, 해풍 셀의 종료 시각은 부천에서 가장 느리게 나타났고, 중랑에서 가장 빠르게 나타나 해풍전선의 이동/소멸에 영향을 받았다.

일반적으로 해풍은 해풍전선을 동반하면서 바다에서 육지 쪽으로 이동한다. 수도권에서도 12:00 LST 경 해안가에서 출발하여 시간당 10km의 속도로 육지를 향해 이동하는 것으로 관측되었다. 해풍전선이 통과하면서 갑자기 기온이 떨어지고, 수증기량(수증기압)은 증가, 바람은 강해지는 특성이 잘 관측되었다. 해풍전선이 통과하는 지점에는 공기 덩어리가 갑자기 변화하기 때문에 돌풍 가능성이 매우 크다. 그림 3에서 보여지듯이 해풍셀과 육풍셀이 발달했을 때 최대풍속 고도의 아래에서는 강한 양의 바람시어가, 상층에서는 강한 음의 바람시어가 발생할 수 있다. Return flow에서도 매우 강한 양의 바람시어가 나타나 매우 복잡한 구조를 가진다.

[그림 3] (a)부천, (b)광화문, (c)중랑 관측소별 2016년 5월 17일-22일 윈드라이다로 관측한 평균 바람-고도 단면도(Park and Chae, 2018).



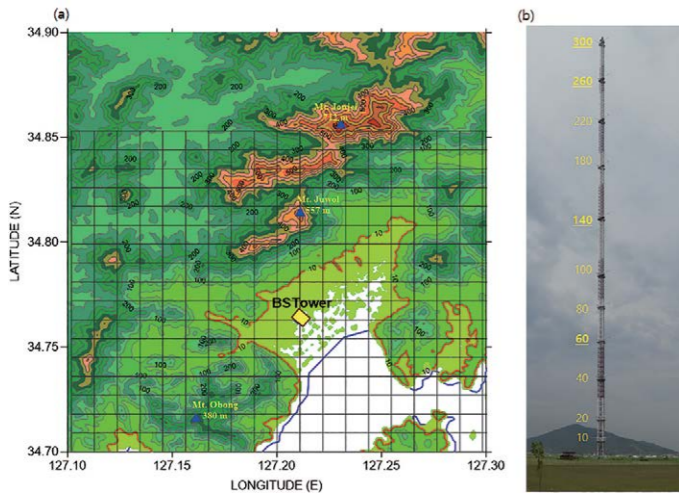
### III. 돌풍 발생 사례

UAM의 주요 운항 고도인 300m 부근의 돌풍 발생 사례를 분석하기 위해 보성글로벌표준기상관측소(이하 '보성관측소')에 위치한 종합기상관측탑(이하 '관측탑') 자료를 사용했다. 보성관측소는 득량간척지 내에 소재하고 있다. 관측소 북쪽으로

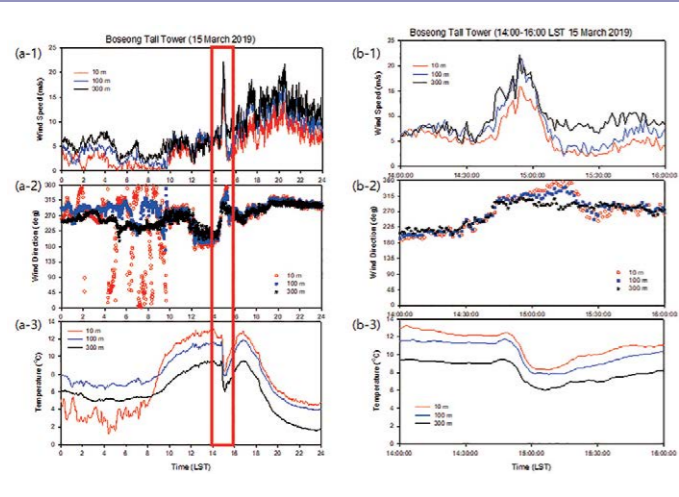


정책 초점

[그림 4] (a)보성글로벌표준기상관측소 부근 지형(수평 해상도는 관측소 중심으로 1km), (b)종합기상관측탑 전경(숫자들은 기온, 습도, 풍향, 풍속 센서가 설치된 고도, 숫자에 밑줄로 표시된 곳은 3차원초음파풍속계가 함께 설치된 고도).



[그림 5] (a)2019년 3월 15일 보성글로벌표준기상관측소 종합기상관측탑 10m, 100m, 300m 고도에서 관측한 (1)풍속, (2)풍향, (3)기온의 시계열. (b)는 (a)중 14:00-16:00 LST를 확대한 시계열.



는 존재산, 주월산이 서쪽으로는 오봉산이 자리 잡고 있으며, 남동쪽으로 남해가 있다[그림 4a]. 관측지점은 복잡한 주변 지형의 영향으로 해륙풍과 산곡풍이 복합적으로 영향을 미칠 수 있으며, 3-10월 동안 해풍 발생 일수는 40% 이상이다 (Lim and Lee, 2019).

보성관측소는 북북동-남남서 방향으로 약 10km, 북북서-남남동 방향으로 약 4km 간척지에 위치하여 주변이 매우 평평하다. 관측탑의 10m, 20m, 40m, 60m, 80m, 100m, 140m, 180m, 220m, 260m, 300m 높이에서 기온, 습도, 풍향, 풍속을 관측하여 1분마다 저장하고 있으며, 60m, 140m, 260m, 300m 높이에는 3차원초음파풍속계가 설치되어 20Hz로 난류관측을 수행하고 있다[그림 4b].

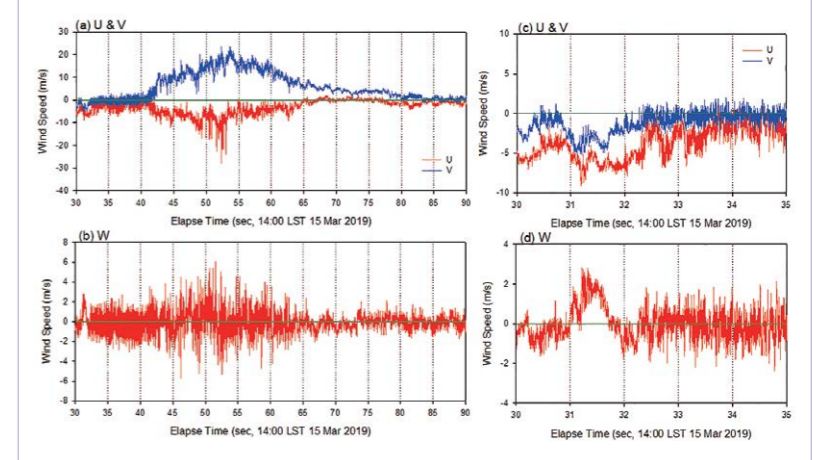
그림 5는 종합기상관측탑의 10m, 100m, 300m 고도에서 2019년 3월 15일 관측한 풍속, 풍향, 기온 시계열을 나타낸 것이다. 이날 14:30-15:10 LST 동안 갑자기 강한 바람이 기록되었다. 14:00-14:30 LST에는 10m에서 6.1%, 300m에서 7.0%를 기록하여 고도별 풍속의 차가 거의 없었다. 14:40 LST부터 갑자기

풍속이 증가하여 14:54 LST에 10m 고도에서 14.9%, 300m 고도에선 22.3%까지 증가한 후 15:10 LST에 10m 고도에서 3.0%, 300m 고도에서는 7.1%로 줄어들었다[그림 5b]. 10m 고도에서 16분 동안, 300m 고도에서는 24분 동안 10% 이상의 강한 돌풍이 불었다. 돌풍이 불었던 14:54-15:08 LST 사이 기록되지는 않았으나 강우가 감지되었다. 돌풍이 불면서 300m까지의 전 층에서 약 3°C의 기온 강하가 있었으며, 16:00 LST 이후에는 원래 기온을 회복하였다.

그림 6은 그림 2에서 돌풍이 발생했던 14:30-15:30 LST 동안 60m 높이의 초음파풍속계에서 관측된 동서(U), 남북(V), 연직(W) 방향 풍속을 나타낸 것이다. 15:10 LST 이후에는 연직풍속이 대체로 -2%~2% 사이에 위치했으나, 풍속이 강했던 시각에는 연직 풍속이 -3% 이하 또는 3% 이상의 바람이 빈번하게 발생했음을 확인할 수 있다. 갑작스런 강풍이 발생하기 전인 14:31-14:32 LST 사이에는 30초 이상 지속적으로 1-2%의 상승 풍속이 발생했다.

“ 수도권 상공에는 다양한 국지순환이 결합하여 복잡한 형태의 순환이 발생 ”

[그림 6] 2019년 3월 15일 14:30-15:30 LST 동안 보성글로벌표준기상관측소 종합기상관측탑의 60m 고도에서 초음파풍속계로 관측한 (a, c)동서와 남북 방향, (b, d)연직 풍속의 시계열. (b)와 (d)는 (a)와 (c)에서 14:30-14:35 LST를 확대한 시계열.



IV. 바람시어 및 돌풍탐지시스템 제안

II장과 III장에서 살펴 본 바와 같이 수도권 상공에는 다양한 국지순환이 결합하여 매우 복잡한 형태의 순환이 발생할 수 있다. 특히 향후 UAM의 주요 항로로 이용 가능한 300m 고도는 해풍과 육풍이 발달했을 경우 가장 강한 풍속이 불며, 해풍전선이 이동할 경우 전선면을 따라서 국지적으로 매우 강한 바람과 돌풍 가능성

“ 소규모 돌풍 감지나 바람의 연직시어 모의에 활용 가능한 최적 장비는 윈드라이다이다. ”

이 있다. 가장 유력한 운항 경로인 한강에는 주변보다 강한 바람과 도시의 상호작용으로 인해 돌풍 가능성이 매우 큰 지점이다. 또한 해풍 셀이나 육풍 셀 내에서는 바람의 연직시어가 매우 크게 나타날 수 있어 UAM 운항의 안전에 영향을 줄 수 있다.

종합기상관측탑에서 관측된 바람과 난류 자료로부터 1시간 이내에 갑자기 강한 돌풍이 발생과 소멸을 확인한 것처럼 수도권에서도 종종 그와 같은 돌풍이 발생할 가능성이 매우 크다. 수도권에서도 초음파풍속계 자료를 통해 1분 이내의 짧은 시간 동안 지속적으로 강한 상승/하강 기류가 만들어 질 수 있음을 알 수 있다. 수도권은 콘크리트, 아스팔트 등 열저장 능력이 뛰어난 재질로 덮여 있기 때문에 뜨거운 여름날 매우 국지적으로 강한 대류 셀이 형성될 빈도가 보성글로벌표준관측소보다 훨씬 클 수 있다.

현재의 모델 기술력으로는 매우 짧은 시간 동안 소규모로 발생하는 돌풍 감지나 바람의 연직시어를 정확하게 모의하여 실시간 정보를 제공하기 쉽지 않다. 관측 기반으로 바람시어 및 돌풍을 탐지하려면 3차원 바람을 관측할 수 있는 장비를 설치해야 한다. 그리고 장비 한 대가 탐지할 수 있는 반경이 정해져 있기 때문에, UAM 이동 경로에 여러 대의 장비를 설치하여 운영하고 이를 통해 실시간 바람시어 및 돌풍탐지 알고리즘을 개발·적용해 나가야 한다.

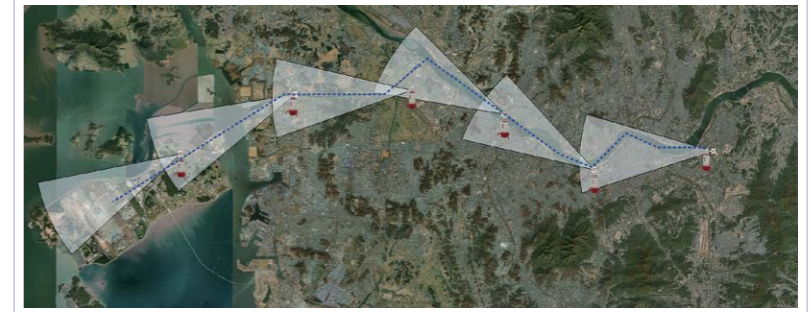
현재 기술로 활용 가능한 최적의 장비는 윈드라이다이다. 윈드라이다는 바람으로 움직이는 에어로졸에 의한 도플러 변이를 관측하여 이를 풍속으로 환산하는 장비이다(Park and Choi, 2016). 수도권에는 2014-2017년 사이에 「차세대도시농림융합기상사업단」에서 설치하여 2019년부터 국립기상과학원으로 이관하였고, 현재 6대가 운영 중이다. 초기에 도입되었던 「Leosphere」사의 Windcube-200은 스캔 기능이 없고, 이후 도입된 「Laser Systems」사의 WINDEX-2000은 스캔 기능을 포함하고 있다. 장비가 감지할 수 있는 최대 거리는 6km 이상이다(Park and Choi, 2016). 관측 최대거리와 해상도는 펄스 반복주기와 지속시간에 의해 달라지기 때문에 선택 가능하다.

UAM의 관심 고도는 지상으로부터 1km 이내이므로 만일 WINDEX-2000을 이

“ AWS, 3차원초음파 풍속계, 라이다식 운고계 설치도 필요 ”

용하여 바람시어 및 돌풍탐지시스템을 구축하려면 장비를 대략 5km 마다 한 대씩 설치해야 한다. 스캔을 위해 회전하는 속도는 제한이 있기 때문에, 특정 공간 영역에 대해 최대한 빠른 속도로 바람시어와 돌풍을 스캔하려면 스캔 범위를 최소화해야 한다. 만일 운항 경로가 일직선이면 스캔 방위각을 5°이내로 설정할 수도 있지만, 일직선이 아닌 경우에는 더 크게 설정해야 한다. 방위각이 결정되면 고도각을 고정시킨 후 방위각스캔(VAD, Velocity Azimuth Display) 후 다시 고도각을 변경하고 방위각을 스캔하는 작업을 반복해야 한다. 바람시어를 관측하려면 정해진 고도각에서 방위각 3지점 또는 4지점 관측(PPI, Plan Position Indicator)을 수행해야 한다. 그림 7은 잠실에서 인천공항까지의 가상 경로상에서 바람시어 및 돌풍탐지시스템을 위한 윈드라이다 위치

[그림 7] 바람시어 및 돌풍탐지시스템을 위한 윈드라이다 설치 위치 및 방위각 스캔 각도 설정 예시.



와 각 위치에서의 스캔 범위 예시를 나타낸 것이다. 해당 그림에서는 관측거리가 설치장비의 성능에 따라 결정되기 때문에 아직 정확하게 고려하지는 않았다.

윈드라이다 이외에 윈드라이다가 설치되는 지점의 지상 근처 기온, 습도, 바람 등을 관측할 수 있는 자동기상 관측장비(AWS, Automatic Weather Station)와 난류 탐지를 위한 3차원초음파 풍속계, 운고를 관측할 수 있는 라이다식 운고계 등도 설치되어야 한다[표 1].

[표 1] 바람시어 및 돌풍탐지시스템의 관측 장비 구성

장비	관측항목	기본 규격
윈드라이다	바람의 연직 프로파일 돌풍탐지	관측거리: 6km 연직간해상도: 50m
자동기상관측장비 (AWS)	지상 부근의 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수, 강우감지, 기압	자료수집간격: 1초
3차원초음파풍속계	난류 강도	자료수집간격: 10Hz
운고계	운저고도	연직해상도: 10m 자료수집간격: 1분

이와 더불어 도심 상공에서의 돌풍발생 가능성을 지수화한 돌풍지수 개발과 실시간 감시시스템으로부터 돌풍 및 바람시어를 탐지할 수 있는 알고리즘 개발이 동반되어야 한다.



“ 돌풍지수, 돌풍 탐지 알고리즘 개발 위해 상세지면정보 반영, 돌풍 정의 기준값 제시 등이 필요 ”

• 도심항공 바람시어 및 돌풍지수 개발

현재의 모델 기술수준으로 실시간 돌풍을 모의하는 것은 매우 어렵지만, 돌풍의 발생 가능성을 결정하는 것은 충분히 가능하다. 돌풍지수 개발을 위해선 도시 건물과 지면 조건이 충분히 잘 반영된 LES와 같은 고해상도 모델이 필요하다. 모델에서는 도시 하층의 건물을 포함한 상세한 지면 정보가 반영되어야 하고, 바람장 이외에 열적 효과도 충분히 모의할 수 있어야 한다. 모델은 1분 이내의 관측자료 또는 난류자료와의 비교를 통해 검증되어야 한다. 검증된 모델을 이용하여 지상에서 관측된 기상자료와 비교하여 돌풍 가능성을 지수화한 돌풍지수를 개발할 수 있다. 아울러 모델을 기반으로 바람시어 정보도 함께 개발해야 한다.

• 윈드라이다 자료로부터 바람시어 및 돌풍탐지 알고리즘 개발

윈드라이다는 스캔 방향의 시선(line of sight) 속도를 관측하는 장비이다. 대부분의 장비는 풍향, 풍속 등의 정보를 내부 알고리즘으로 제시해 주지만, 직접 돌풍 정보를 제공하지는 않는다. 따라서 관측된 수치형 자료 또는 장비에서 제공하는 이미지 자료를 해석하여 돌풍을 탐지할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다. 이를 위해 돌풍을 정의하는 기준값이 제시되어야 한다. 윈드라이다에서는 고도별 동서, 남북, 연직 풍속을 관측할 수 있기 때문에 바람시어를 계산하는 것은 어렵지 않다. 그러나, 주의보 또는 경보를 제공하기 위한 기준값 등은 연구를 통해 제시되어야 할 것이다.

V. 요약 및 결론

안전한 도심항공교통을 달성하려면 미세먼지, 황사, 연무, 안개 등으로 인한 저시정, 낮은 구름, 강수, 낙뢰나 착빙 가능성, 돌풍이나 바람시어 등의 기상요인을 정확히 제공받아야 한다. 특정 요소는 넓은 영역에서 동일한 값을 보이는 반면, 다른 요소는 매우 국지적으로 시간적 편차가 큰 것도 있다. 이 중 발생 가능성이 있으나

“ UAM 운항 경로의 5km 거리마다 윈드라이다 설치·운영을 제안한다. ”

모델 기반으로 예측이 어려운 것이 바람시어와 돌풍이다.

수도권에서는 복잡한 지형조건, 도시의 높은 건물과 블록 단위의 불균일성 등으로 인해 매우 복잡한 국지순환이 발생할 수 있다. 실제 관측으로부터 종관 바람이 약하고 맑은 날에 해풍 전선이 발달하여 오후가 되면서 해안선부터 내륙으로 이동하고, 그 과정에 갑작스런 기온, 습도, 바람의 변화를 동반함을 확인했다. 종관 바람이 약하고 맑은 기간을 분석한 결과 해풍 셀과 육풍 셀이 잘 나타났으며, 각 셀의 시작과 종료시각은 해안선으로부터의 거리에 따라 결정될 수 있다. 풍속은 UAM의 운항 고도인 300-400m 고도에서 최대가 나타났고, 그 하층에서는 양의 시어가, 상층에서는 음의 시어가 발생함을 확인했다. 또한, 보성글로벌표준기상관측소의 종합기상관측탑에서 관측된 자료를 이용하여 7% 내외 풍속의 바람이 불다가 갑자기 1시간 사이에 20%의 강풍이 부는 사례, 1분 내외로 강한 상승 풍속이 지속적으로 발생하는 사례 등을 살펴보았다. 수도권을 비롯한 도심은 높은 건물과 균일하지 않은 지면으로 인해 돌풍이 더 빈번하게 발생할 수 있다.

수도권에 적용 가능한 바람시어 및 돌풍감지시스템 구축을 위한 제안을 하였다. 가장 적합한 장비는 스캔 가능한 윈드라이다이고, UAM 운항 경로의 5km 거리마다 설치하여 운영할 것을 제안한다. 관측망을 설치하여 실질적인 바람시어와 돌풍 정보를 실시간 제공하려면 모델 기반의 바람시어 및 돌풍지수 개발, 바람시어 및 돌풍 탐지 알고리즘 개발 등 연구 과제도 병행되어야 한다.

본고에서는 UAM의 안전한 운항을 뒷받침하기 위한 바람시어와 돌풍탐지시스템을 제안하였으며, 이 시스템으로부터 수집되는 자료는 도시기상 연구를 위해 매우 중요한 자료로 활용 가능하다. 왜냐하면, 현재 대부분의 기상관측은 지상 부근에서 고해상도로 수행되는 반면, 상층 자료는 빈약하기 때문이다. 만일 이 시스템이 구축된다면 UAM 경로로 국한되기는 하지만 매우 상세한 바람 자료가 수집되고, 수집된 자료들은 도시에서 연직혼합을 포함한 대기경계층과정을 규명하는데 활용될 수도 있을 것이다.

대기과학의 관점에서 UAM이 안정적으로 운영될 경우 UAM에 기상 및 열화상



카메라 또는 다중스펙트럼이미지(multi-spectral imaging) 센서를 부착한 자료 수집 방식을 추천할 수 있다. 열화상 카메라는 표면온도 정보, 다중스펙트럼이미지 센서는 식생지수, 방출률, 반사율, 오염물질의 농도, 에어로졸 광학두께 등 초고해상도로 도시의 환경정보를 추가로 얻을 수 있을 것이다. 궁극적으로 대기경계층 연구의 수준을 높임으로써 현재 난제로 남아 있는 국지성 호우와 같은 미세규모의 기상 현상을 높은 정확도로 수치 모의할 수 있을 것으로 기대된다.

### 참고문헌

김예슬, 박노옥, 홍석영, 이경도, 유희영, 2014: 시계열 식생지수와 과거 작물 재배 패턴을 이용한 대규모 작물분류도의 조기 제작. 대한원격탐사학회, 30(4), 493-503.

이영재, 광태호, 정구문, 안재현, 정봉철, 이재우, 2020: 도심항공교통시스템 운용 개념 분석에 따른 운항경로 구축 연구. 한국항공우주학회지, 48(12), 1021-1031.

Creighton D., H. Parsons, L.M.U. Alvares, B. Gunn, R. Perez-Franco, and M. Johnstone, 2020: Advanced Aerial Mobility and eVTOL aircraft in Australia: Promise and Challenges. Deakin Mobility Series. 46pp.

Goyal R., C. Reiche, C. Fernando, J. Serrao, S. Kimmel, A. Cohen, and S. Shahee, 2018: Urban Air Mobility (UAM) Market Study. Booz Allen Hamilton, 159pp.

Lee Y.-H., M.-S. Park, and Y. Choi, 2021: Planetary boundary layer structure at an inland site under sea breeze penetration. Asia-Pac. J. Atmos. Sci., <https://doi.org/10.1007/s13143-020-00222-1>.

Lim H.-J. and Y.-H. Lee, 2019: Characteristics of sea breezes at coastal area in Boseong. Atmos., 29(1), 41-51.

Park M.-S. and J.-H. Chae, 2018: Features of sea-land-breeze circulation over the Seoul Metropolitan Area. Geosci. Letters, 5, 28.

Park M.-S. and M.-H. Choi, 2016: Development of a quality check algorithm for the WISE pulsed Doppler wind lidar. Atmos., 26(3), 461-471.

Park M.-S., S.-H. Park, J.-H. Chae, M.-H. Choi, Y. Song, M. Kang, and J.-W. Roh, 2017: High-resolution urban observation network for user-specific meteorological information service in the Seoul Metropolitan Area, South Korea. Atmos. Meas. Tech., 10, 1575-1594.

Roth M., 2000: Review of atmospheric turbulence over cities. Q. J. R. Meteorol. Soc., 126, 941-990.

Roth M., 2013: Urban heat islands. in Handbook of Environmental Fluid Dynamics (Vol. 2) (edited by Harindra et al.). CRC Press, Taylor & Francis Group, LLC.

Ryu Y.-H. and J.-J. Baik, 2013: Daytime local circulations and their interactions in the Seoul Metropolitan Area. J. Appl. Meteorol. Climatol., 52, 784-801.

Steiner M. 2019: Urban air mobility Opportunities for the weather community. Bull. Am. Meteorol. Soc., 100(11), 2131-2133.

Stull R.B., 1988: An Introduction to the Boundary Layer Meteorology. Kluwer Academic Publishers, 666pp.

Yi C., T.H. Kwon, M.-S. Park, Y.J. Choi, and S.M. An, 2015: A study on the roughness length spatial distribution in relation to the Seoul building morphology. Atmos. Korean Meteorol. Soc., 25(2), 339-351.

Wang B.H., D.B. Wang, Z.A. Ali, B.T. Ting, and H. Wang, 2019: An overview of various kinds of wind effects on unmanned aerial vehicle. Measurement and Control, 52(7-8), 731-739.

# K-UAM 사업으로의 도시대기 과학 연구 활용

김재진 부경대학교 환경대기과학과 교수 jjkim@pknu.ac.kr

- I. 들어가며
- II. 도시규모 대기과학 연구
- III. 맺으며

UAM(Urban Air Mobility) 비행체가 안정적으로 운항될 수 있도록 항로상의 정확하고 정밀한 운항 기상정보 제공이 필요하다. UAM이 운항할 대기 하층 고도(300-600m)의 기상은 지표면 특성(지형, 건물, 식생 등)에 따라 발생하여 시공간적 규모가 다양한 난류에 의한 변동성이 매우 크다. 그에 따라 하층대기의 변동성을 예측할 수 있는 수치모델 사용이 필요하다. 중규모 기상모델과 연계한 전산유체역학 모델은 하층대기 기상정보를 진단·예측할 수 있는 수치모델 중의 하나로 평가된다. K-UAM 사업을 대비하기 위해서, 현실적(정확성)이고 상세한(정밀성) 기상정보 생산에 적합한 수치모델 선정, 현업 기상모델과 연계할 수 있는 예측 선행시간 확보, UAM 운항 시점에서의 실현 가능성 여부 등에 대한 충분한 검토가 선행되어야 할 것이다. ■

## I. 들어가며

몇 일전 항공편으로 서울 출장을 다녀온 적이 있다. 김해공항으로부터 이륙한 직후부터 40여분을 즐았나 보다. 곧 착륙하겠다는 기장의 방송에 졸음을 깨고 창밖을 바라보았다. 창문 왼쪽으로 인천 공항이 보이는 순간 90도 가까이 오른쪽으로 선회하면서 김포공항 활주도로로 향했다. 얼마나 갔을까? 아래에 한강이 내려다 보이고, 크고 작은 건물들이 선명해지는 순간부터 기체가 심하게 흔들렸다. 탑승하고 있던 비행기는 한 열에 좌석이 5개가 배열된 작은 기종이기는 했지만, 전에 경험하지 못했을 정도로 강하게 기체가 흔들리는 경험을 했다. 'UAM(Urban Air Mobility)이 이 정도 고도에서 운항될 텐데...'라는 생각이 들었다. 공상과 학 영화 속에서나 볼 수 있었던, 우리가 살고 있는 건물 사이사이로 혹은 위로 비행체가 날아다니는 광경을 상상해 본다. 한들을 돌려서 거는 수동식 전화기로부터 현재의 스마트폰까지를 직접 경험한 우리 세대에게도 상상 그 이상으로 충격적이고 가슴 벅차는 장면이 아닐 수 없다. 그러나 소형 비행체에 탑승하면서 겪을 난류에 의한 흔들림을 생각해보면, 아찔함이 뇌리를 스친다.

한국형 도심항공교통(K-UAM) 사업을 성공적으로 실현하기 위해서 고려해야 할 사항들이 많겠지만, 무엇보다도 우선시 되어야 할 점은 안전성 확보가 아닐까 생각된다. UAM 비행체 자체의 안정성 확보는 물론, 헬기보다도 크기가 작은 UAM 비행체가 안정적으로 운항될 수 있도록 항로상의 정확하고 정밀한 운항 기상정보 제공이 필요하다. 그러나 UAM이 운항될 대기 하층 고도(300-600m)의 기상은 지표면 특성(지형, 건물, 식생 등)에 따라 발생하여 시공간적 규모가 다양한 난류에 의한 변동성이 매우 크기 때문에 기존의 관측과 모델 기술로 대기 하층의 기상을 진단하거나 예측하는 것은 매우 어렵다. 따라서 UAM이 운항할 대기 하층의 기상 변동성을 진단·이해하고 나아가 이를 예측하여 UAM 운항 기상정보를 제공하기 위한 정부, 민간, 학계의 노력이 필요할 것으로 생각된다. 이에, 지난 20여 년 동안 건물 규모로부터 도시규모의 대기흐름과 대기확산 현상에 관심을 갖고 연구를 수행해 온 연구자로서, 지표 근처부터 대기 하층의 흐름을 진단(제한적으로 예측)할 수 있는 수치모델과 관련 연구 내용을 소개하고자 한다.



## II. 도시규모 대기과학 연구

지난 수십년 동안 도시 인구는 꾸준히 증가해 왔고, 현재, 전세계 인구의 55%가 도시지역에 거주하고 있다(UN, 2019). 우리나라의 경우, 인구 전체의 약 80%가 도시지역에 거주하고 있다(통계청 국가통계포털). 도시지역에 인구가 과밀화되면서, 대기오염 문제, 도시 열섬, 폭염 등에 취약성이 제기되고 도시지역의 상세한 기상-대기오염 정보에 대한 수요가 증가하고 있다. 건물이 밀집되어 있고 교통로가 집중되어 있는 도시 지역의 기상현상과 대기오염 현상을 연구하는 학문 분야를 도시대기과학이라고 한다. 도시지역에서 측정된 바람, 기온, 강수 등은 인접한 교외지역과 상당한 차를 보인다. 열을 빠르게 흡수하는 도로 아스팔트와 건물 외벽은 낮시간 동안에 지표면 온도를 높여 도시기온을 상승시키고, 밀집된 고층건물들은 도시풍속을 약화시킨다(Zhang and Sun, 2019). 높은 기온, 약한 풍속, 대기오염물질의 인위적 배출은 도시 열섬 현상과 함께 대기오염 고농도 사례의 원인으로 작용한다. 대부분의 기상 모델은 채용하고 있는 격자체계와 공간해상도의 한계로 인해 그 규모에 비해 매우 작은(아격자 규모) 건물과 지형을 직접 분해하여 상세한 기상현상을 예측할 수 없다. 건물과 지형을 직접 분해하기 위해서는 적절한 격자체계를 채용하고 초고해상도를 갖는 수치모델 사용이 필요하다. 도시 내 건물밀집지역의 상세한 대기현상 분석 및 예측을 수행하였던 대부분의 수치 연구는 수 미터의 격자 해상도로 다면체 형태의 건물을 직접 분해할 수 있는 전산유체역학(computational fluid dynamics, CFD) 모델을 사용해 왔다.

### 1) 전산유체역학 모델을 활용한 도시협곡 기상-대기확산 연구

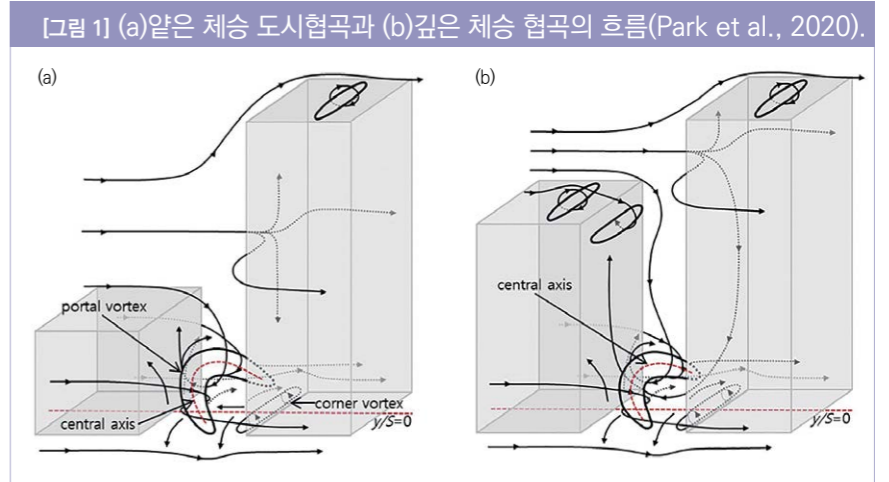
CFD 모델을 이용한 초창기 연구들은 단일 건물이나 단조로운 배치를 갖는 건물군(예, 도시협곡) 주변의 상세 흐름과 대기오염물질 확산에 대한 이해를 증진시켰다(도시협곡은 도로와 도로 양변의 건물이 이루는 공간을 말함). Baik and Kim(1999)과 Chan et al.(2002)은 CFD 모델을 이용하여 2차원 도시협곡에서 건물 외관비(건물 높이와 도로 너비의 비) 변화에 따른 도시협곡 흐름과 대기오염물질 확산 특성을 분석하였다. 이 연구들은 건물의 형태와 구조에 따라 도시 내부의 흐름과 대기오염물질 분포가 다르게 나타날 수 있음을 보였다. Sini et al.(1996)은 도시협곡 벽면의 차등 가열이 도시협곡 흐름에 미치는 영향을 조사하였고, Kim

and Baik(1999)은 이 영향을 체계적으로 분석하여 깊은 도시협곡과 얇은 도시협곡에 대해 도시협곡 흐름이 형성되는 메커니즘을 제시하였다. Kim and Baik(2001)은 외관비 변화와 도로 가열 강도에 따른 흐름체계를 분류하였고, 도로 가열에 의한 부력이 소용돌이 형성에 미치는 영향을 체계적으로 조사하였다. 이들 연구는 이상적인 도시협곡 내의 흐름 형성 메커니즘 이해를 증진시킴으로써 향후 도시 대기환경 연구를 선도하는데 기여하였다.

앞서 언급한 바와 같이, 초창기 연구는 대부분 두 건물 높이가 같은 이상적인 도시협곡을 대상으로 수행되었다. 도시지역에 실존하는 건물은 그 높이나 배치 형태 등이 매우 다양하기 때문에, 이 다양성과 현실성을 반영한 도시협곡 대기흐름에 대한 연구가 진행되고 있다(Addepalli and Pardyjak, 2013 and 2015; Hayati et al., 2017 and 2019; Park et al., 2020). Addepalli and Pardyjak(2013 and 2015)는 PIV(particle image velocimetry) 기법을 이용한 풍동실험을 수행하여 체승(step-up)과 체강(step-down) 도시협곡의 상세한 흐름 패턴을 조사하였다. Hayati et al.(2017 and 2019)은 3 종류의 수치모델(경험적 수치모델, RANS 모델, LES 모델)을 이용하여 Addepalli and Pardyjak(2013 and 2015)의 풍동실험에서 측

정된 평균장의 모의 능력을 상호비교하는 연구를 수행하였다. Park et al.(2020)은 체승 도시협곡의 흐름 패턴을 분석하여 구조화하였고, 건물 너비 변화에 따른 흐름 패턴의 변화를 규명하였다(그림 1).

도시협곡 흐름과 대기오염물질 확산에 영향을 미치는 요인은 도시협곡 외관비와 같은 기하학적 요소, 도시협곡으로 유입되는 난류 강도, 풍속, 풍향 등과 같은 기상학적 요소, 토지 피복 종류와 일사 여부에 따른 표면 차등 가열과 냉난방에 따른 인공열과 열환경적 요소 등으로 구분할 수 있다(Kondo and Tomizuka, 2009;

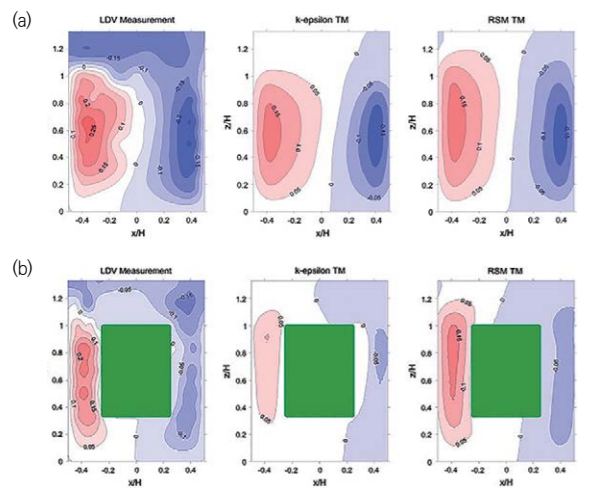


[그림 1] (a)얇은 체승 도시협곡과 (b)깊은 체승 협곡의 흐름(Park et al., 2020).





[그림 2] (a)수목이 존재하는 경우와 (b)존재하지 않은 도시 협곡에서 바람의 연직 성분 분포(왼쪽: 풍동, 중간: K-ε 모델, 오른쪽: RSM 모델)(Gromke et al., 2008).

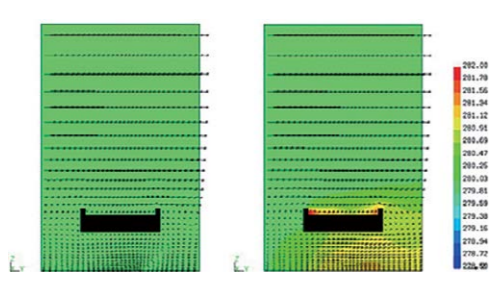


Lee et al., 2017; Park et al., 2016a). 이 외에도 도시 내부에 식재된 수목과 통행하는 자동차가 유발하는 난류가 도시협곡 흐름과 대기오염물질 확산에 영향을 미칠 수 있다(Gromke et al., 2008). Gromke et al.(2008)은 풍동실험과 CFD 모델을 이용한 연구를 통하여 수목이 도시협곡 내 흐름과 차량 배기가스 확산에 미치는 영향을 분석하고, 수목이 도시협곡 내부의 풍속을 감소시키고 차량에 의해 배출된 대기오염물질 농도를 증가시킬 수 있음을 보고하였다(그림 2). Kondo and Tomizuka(2009)는 CFD 모델을 이용하여 도시에서 흔히 볼 수 있는 고가도로 주변흐름과 오염물

질 확산에 대한 연구를 수행하였다(그림 3). 이들은 자동차가 유발한 난류와 배기열이 배기가스의 확산에 미치는 영향을 분석함으로써 자동차가 유발한 난류가 질소산화물(NOx) 농도 감소에 기여함을 보였다. Lee et al.(2017)은 WRF(Weather Research and Forecasting) 모델에 포함된 도시캐노피모델(Urban Canopy Model, UCM)을 이용하여, 인공열 효과를 반영함으로써 중규모 모델의 기온, 현열플럭스, 잠열플럭스 등의 성능을 개선하였다.

최근에는 CFD 모델을 활용하여 대기오염물질 사이의 화학 반응, 광화학 반응, 침착 반응

[그림 3] 차량 효과를 (a)포함한 경우와 (b)포함하지 않은 경우에 고가도로 주변의 바람 벡터와 기온 분포(Kondo and Tomizuka, 2009).



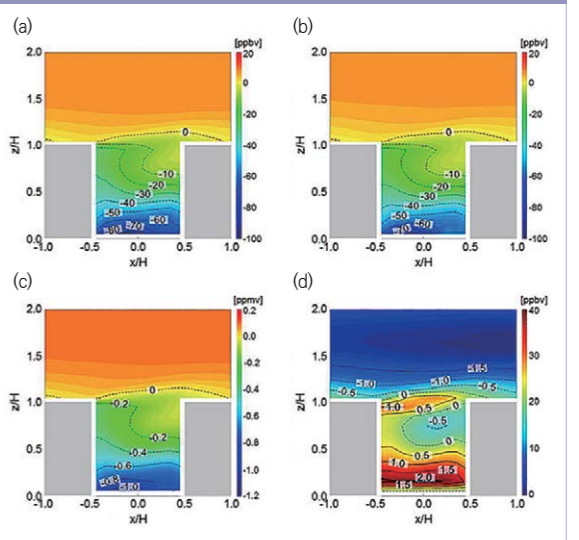
등을 고려한 도시 대기환경 연구가 활발히 진행되고 있다 (Park et al., 2015; Park et al., 2016a; Kim et al., 2019; Li et al., 2019). Sanchez et al.(2016)은 도시 캐노피에서 일산화질소와 이산화질소의 확산 모델링에 필요한 화학반응 조건을 조사하여, 배경오존농도나 풍속 등과 같은 대기조건이 일산화질소와 이산화질소의 확산에 미치는 영향을 분석하였다. 배경오존농도가 높고 풍속이 클수록 도시 캐노피 내부 보행자 고도의 오존과 일산화질소의 농도 변화가 커졌는

데, 이는 풍속이 커지면서 배경대기와 캐노피 내부 보행자 고도 사이의 대기오염물질 교환이 활발해지고 일산화질소의 적정 반응에 의해 오존 농도가 감소하기 때문이다. 그러나 오존농도가 낮은 겨울철에는 풍속이 거의 영향을 미치지 못했다. Park et al.(2016a)은 CFD-chemistry 접합모델을 이용하여 건물지붕 냉각이 도시협곡 주변의 기온과 흐름, 반응성 대기오염물질 확산에 미치는 메커니즘을 분석하였다. 건물지붕 냉각은 지붕 고도의 풍속을 증가시키고, 도시협곡 내부의 소용돌이 강도가 증가한다. 이에 따라 도로 높이에서는 도시협곡 내부에서 배출된 1차 대기오염물질의 외부배출을 증가시키고, 지붕 높이에서는 외부로부터의 깨끗한 공기 유입량을 증가시키기 때문에 도시협곡 내부의 1차 대기오염물질 농도는 감소한다(그림 4). 그러나 일산화질소(NO)의 적정 반응이 감소하면서 오존(O3) 농도는 오히려 증가하였다.

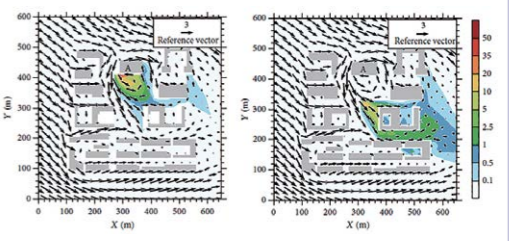
2) 중규모 기상모델과 연계한 건물 군 주변의 기상-대기확산 연구

앞서 기술한 이상적인 도시협곡과 같은 간단한 지형의 주변흐름과 대기오염물질 확산에 관한 이해를 바탕으로 실제 도시지역 내의 상세한 기상정보와 대기환경 정보 생산을 위한 연구가 수행되고 있다. 보다 현실적이고 상세한 도시 대기환경 연구를 위하여 현업 기상-대기질 수치예보모델 예측자료나 중규모 기상-대기질 수치모델 모의자료와 결합한 CFD 모델이 활용되고 있다(Baik et al., 2009; Mun and Kim, 2018; Zheng et al., 2015). 또한, 보다 현실적이고 상세한 도시 대기환경 연구를 위해 반드시 갖추어야 할 자료가 고해상도의 건물과 지형 정보이다. 건물과 지형은 기상학적 요인, 열환경적 요인 등과 함께 도시 내 흐름과 대기오염물질 확산을 결정하는 매우 중요한 요인이기 때문이다. CFD 모델의 지표경계 자료로 사용하는 건물과 지형은 지리정보시스템(Geographic

[그림 4] 도시협곡 지붕을 냉각한 경우(EXP)와 하지 않은 경우(CNTL)의 (a)NOx, (b)VOCs, (c)CO, (d)O3 농도 차(EXP-CNTL) 분포(Park et al., 2016a).

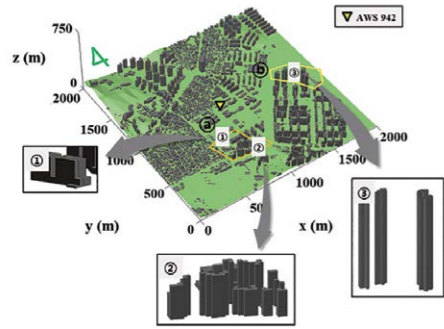


[그림 5] WRF-CFD 모델을 이용해 수치모의한 건물 주위의 흐름과 대기오염물질 확산 분포(Zheng et al., 2015).





[그림 6] 수치지도를 이용해 구축한 건물과 지형 경계 자료(Mun and Kim, 2018).

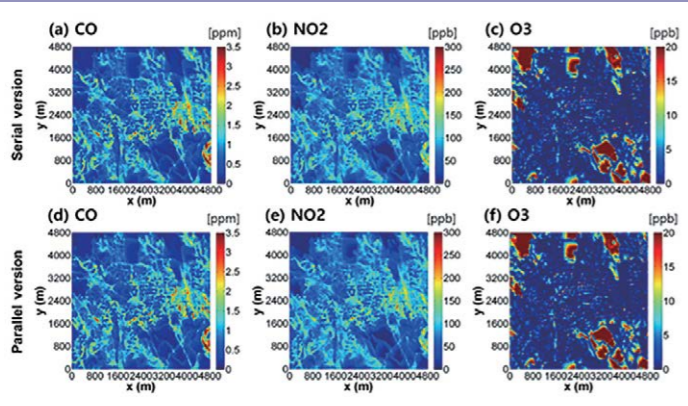


Information System, GIS)의 수치지도를 이용하여 구축할 수 있다(Miao et al., 2006; Wong et al., 2011). Zheng et al.(2015)은 WRF 모델과 CFD 접합 모델을 이용하여 대학 캠퍼스 내의 흐름과 대기오염물질 확산 특성을 연구하였다(그림 5). Mun and Kim(2018)은 수치지도와 자동기상관측장비(Automatic Weather System, AWS) 측정 자료를 CFD 모델의 지표경계/배경 자료로 사용하여 아파트 재개발과 건물 신축에 의한 복잡한 흐름 특성을 분석하였다(그림 6). Park et al.(2016b)은 중규모-상세규모 접합모델을 이용하여 도시기상에 영향을 줄 수 있는 토

지피복 종류에 따른 지표면 차등가열 효과를 분석하였다. 이들은 기상청에서 현업 운용 중인 국지예보모델(Local Data Assimilation and Prediction System, LDAPS)과 CFD 모델을 접합하여 서울 종로구 일부 지역에 대해 토지피복 종류에 따른 지표면 차등 가열 효과를 분석하고 중관기상관측소에서 측정한 기온과 비교함으로써 도로와 건물밀집 지역의 기온이 높게 나타나는 원인을 분석하였다.

CFD 모델 기반의 수치모델링 시스템을 이용하여 고해상도의 지형과 건물을 구현하는 등 외부 강제력을 보다 현실적으로 반영하고, 대기화학반응과 상세한 대기오염물질 배출까지

[그림 7] 직렬(상)과 MPI 병렬(하) CFD-Chemistry 모델이 계산한 일산화탄소(왼쪽), 이산화질소(중간), 오존(오른쪽) 농도 분포 (국립환경과학원, 2018).



고려한 도시 대기환경 정보를 제공하기 위해서는 막대한 양의 전산자원이 필요하다. 대부분의 CFD 모델은 건물 등의 외부 강제력에 조정된 흐름을 모의하기 위하여 수치적으로 안정한 암시적(implicit) 계산 방안을 채용한다. 암시적 방안은 수렴된 수치 해를 구하기 위하여 반복적으로 계산을 수행하기 때문에, 수치 프로그램을 MPI(Message Passing Interface) 기반으로 병렬화 하기 매우 어렵다. 부경대학교 연구

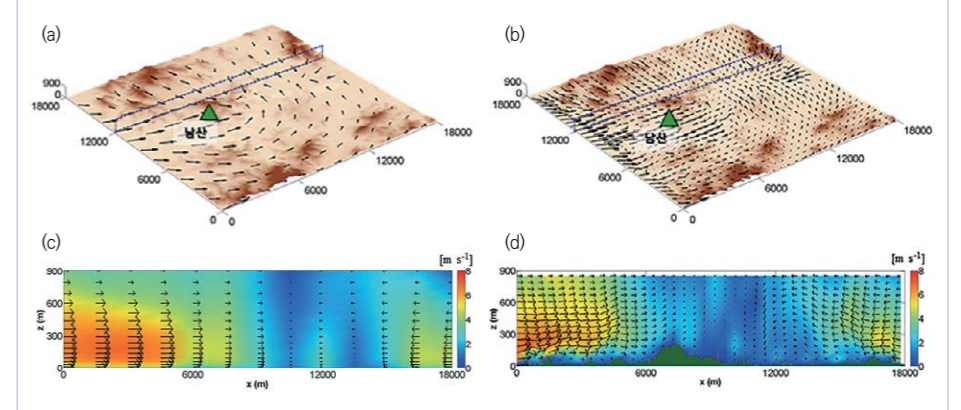
팀은 「예보권역별 맞춤형 상세 대기질 모델 구축 연구(국립환경과학원, 2018)」 수행을 통해 CFD 모델 기반의 상세 대기질 모델을 MPI 기반으로 병렬화 하는데 성공하였다(그림 7). MPI 기반 병렬 프로그램 구현은 향후 보다 고해상도의 수치모의와 넓은 영역 대상의 수치모의를 가능케 하는 큰 진전으로 평가된다.

3) 중규모 기상모델과 연계한 도시규모 기상 연구

앞서 기술한 바와 같이, 기존 기상모델의 아격자 규모 건물과 지형을 직접 분해하여 상세한(정밀한) 기상현상을 분석·예측할 목적으로 CFD 모델을 활용할 수 있고, 중규모 기상모델로부터 배경 기상정보를 제공 받음으로써 CFD 모델은 현실적이고 상세한 기상정보를 진단·예측할 수 있다. 중규모 기상모델이 제공하는 배경기상장의 공간적 변화가 작은 좁은 영역(예, 중규모 기상모델의 수평격자 크기 규모)을 대상으로 할 경우에는 해당 영역에 포함되는 중 규모 기상모델의 격자 자료를 CFD 모델의 경계 자료로 사용하여 상세한 기상정보를 진단·예측하는 보편적인 방법을 이용해 왔다. 그러나 CFD 모델의 수치모의 영역을 중규모 기상모델의 수평격자 크기 이상으로 확장할 경우에는 중규모 기상모델 기상정보에 포함된 공간적인

변동성(예, 해륙풍 등의 국지 순환)이 CFD 모델에 제대로 반영되어야 한다. 이를 확인하기 위하여, 기상청 국지예보시스템이 예측한 배경기상정보를 사용하여 CFD 모델로 서울시 지역(18km × 18km)에 대해 수평

[그림 8] 2019년 8월 5일 15시 LDAPS(좌)와 CFD(우) 모델이 예측한 바람의 수평 분포(a, c)와 연직분포(b, d).



과 연직격자 해상도를 각각 60m와 15m로 수치모의해 보았다. [그림 8]은 2019년 8월 5일 15시에 LDAPS와 CFD 모델이 예측한 바람의 수평분포와 연직분포를 나타낸다. LDAPS가 예측한 바람 분포(그림 8a, 8c)를 보면, 해풍이 서울시 내부까지 영향을 미쳤고, 남산 부근에 하





층 수렴영역이 형성된 것을 연직분포에서 확인할 수 있다. CFD 모델이 진단한 바람 분포[그림 8b, 8d]에도 LDAPS가 예측한 국지순환이 잘 반영되어 나타나는 것을 확인할 수 있다. 지표면 바람은 지표면의 마찰효과가 반영되어 풍속이 크게 감소하였다[그림 8b]. 지형효과가 연직바람 분포에 반영되어 나타나는데, 특히, UAM이 운항될 하층대기층의 바람 분포에 대한 지표면(지형, 건물 등)의 영향이 뚜렷하게 나타남을 확인할 수 있다.

### III. 맺으며

UAM 운항 경로는 수 내지 수십 km에 달할 것으로 예상된다. 지표면 특성(지형, 건물, 식생 등)을 반영해서 UAM 운항 경로의 기상예측 정보를 제공하기 위해서는 이에 적합한 수치예보시스템 사용이 필요하다. 다양한 종류의 수치모델이 활용될 수 있을 것으로 생각되지만, 본 기고문에서는 CFD 모델에 초점을 맞추어 소개를 했다. CFD 모델도 난류를 모사하는 방법에 따라 그 종류가 매우 다양하고, 각 종류의 CFD 모델이 갖는 장·단점, 한계 등도 비교적 잘 알려져 있다. UAM 운항 경로의 기상예측정보 제공을 위해서는 현실적(정확성)이고 상세한(정밀성) 기상정보 생산에 적합한 수치모델 선정, 현업 기상모델과 연계할 수 있는 예측 실행시간 확보, UAM 운항 시점에서의 실현 가능성 여부 등에 대한 충분한 검토가 선행되어야 할 것이다.

#### 참고문헌

국립환경과학원, 2018: 예보권역별 맞춤형 상세 대기질 모델 구축 연구II.

Addepalli, B. and E.R. Pardyjak, 2013: Investigation of the flow structure in step-up street canyons - Mean flow and turbulence statistics, *Boundary-Layer Meteorology*, 148(1), 133-155.

Addepalli, B. and E.R. Pardyjak, 2015: A study of flow fields in step-down street canyons, *Environmental Fluid Mechanics*, 15, 439-481.

Baik, J.J. and J.J. Kim, 1999: A numerical study of flow and pollutant dispersion characteristics in urban street canyons, *Journal of applied meteorology*, 38(11), 1576-1589.

Baik, J.-J., S.-B. Park, and J.-J. Kim, 2009: Urban flow and dispersion simulation using a CFD model coupled to a mesoscale model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 48(8), 1667-1681.

Chan, T.L., G. Dong, C.W. Leung, C.S. Cheung, and W.T. Hung, 2002: Validation of a two-dimensional pollutant dispersion model in an isolated street canyon, *Atmospheric environment*, 36(5), 861-872.

Gromke, C., R. Buccolieri, S. Di Sabatino, and B. Ruck, 2008: Dispersion study in a street canyon with tree planting by means of wind tunnel and numerical investigations-evaluation of CFD data with experimental data, *Atmospheric Environment*, 42(37), 8640-8650.

Hayati, A., R. Stoll, J.-J. Kim, T. Harman, M.A. Nelson, M.J. Brown, and E.R. Pardyjak, 2017: Comprehensive evaluation of fast-response, Reynolds-Averaged Navier-Stokes, and Large-Eddy Simulation methods against high spatial resolution wind-tunnel data in step-down street canyons, *Boundary-Layer Meteorology*, 164(2), 217-247.

Hayati, A., R. Stoll, E. Pardyjak, T. Harman, and J.-J. Kim, 2019: Comparative metrics for computational approaches in non-uniform street-canyon flows, *Building and Environment*, 158, 16-27.

Kim, J.-J. and J.-J. Baik, 1999: A numerical study of thermal effects on flow and pollutant dispersion in urban street canyons, *Journal of applied meteorology*, 38(9), 1249-1261.

Kim, J.-J. and J.-J. Baik, 2001: Urban street-canyon flows with bottom heating, *Atmospheric Environment*, 35(20), 3395-3404.

Kim, M.J., R.J. Park, J.J. Kim, S.H. Park, L.S. Chang, D.G. Lee, and J.Y. Choi, 2019: Computational fluid dynamics simulation of reactive fine particulate matter in a street canyon, *Atmospheric environment*, 209, 54-66.

Kondo, H. and T. Tomizuka, 2009: A numerical experiment of roadside diffusion under traffic-produced flow and turbulence, *Atmospheric environment*, 43(27), 4137-4147.

Lee, H., J.B. Jee, and J.S. Min, 2017: A Study on High-resolution Numerical Simulation with Detailed Classification of Landuse and Anthropogenic Heat in Seoul Metropolitan area, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 19(4), 232-245.

Li, B., X.B. Li, C. Li, Y. Zhu, Z.R. Peng, Z. Wang, and S.J. Lu, 2019: Impacts of wind fields on the distribution patterns of traffic emitted particles in urban residential areas. *Transportation Research Part D, Transport and Environment*, 68, 122-136.

Miao, S., W. Jiang, X. Wang, and W. Guo, 2006: Impact assessment of urban meteorology and the atmospheric environment using urban sub-domain planning, *Boundary-layer Meteorology*, 118(1), 133-150.

Mun, D.-S. and J.-J. Kim, 2018: A study on the flow changes around building construction area using a GIS data, *Korean Journal of Remote Sensing*, 34(6-1), 879-891.

Park, S.J., J.J. Kim, M.J. Kim, R.J. Park, and H.B. Cheong, 2015: Characteristics of flow and reactive pollutant dispersion in urban street canyons, *Atmospheric Environment*, 108, 20-31.

Park, S.J., W. Choi, J.J. Kim, M.J. Kim, R.J. Park, K.S. Han, and G. Kang, 2016a: Effects of building-roof cooling on the flow and dispersion of reactive pollutants in an idealized urban street canyon, *Building and Environment*, 109, 175-189.

Park, S.-J., S.-H. Choi, J.-E. Kang, D.-J. Kim, D.-S. Moon, W. Choi, J.-J. Kim, and Y.-G. Lee, 2016b: Effects of differential heating by land-use types on flow and air temperature in an urban area, *Korean Journal of Remote Sensing*, 32(6), 603-616.

Park, S.J., J.J. Kim, W. Choi, E.R. Kim, C.K. Song, and E.R. Pardyjak, 2020: Flow Characteristics Around Step-Up Street Canyons with Various Building Aspect Ratios, *Boundary-Layer Meteorology*,





174(3), 411-431.

Sanchez, B., J.L. Santiago, A. Martilli, M. Palacios, and F. Kirchner, 2016: CFD modeling of reactive pollutant dispersion in simplified urban configurations with different chemical mechanisms, Atmospheric Chemistry & Physics, 16(18), 12143-12157.

Sini, J.-F., S. Anquetin, and P.G. Mestayer, 1996: Pollutant dispersion and thermal effects in urban street canyons, Atmospheric Environment, 30, 2659-2677.

United Nation, 2019: World urbanization Prospects: The 2018 Revision, Department of Economic Social Affairs, Population Division, New York.

Wong, M.S., J. Nichol, and E. Ng, 2011: A study of the "wall effect" caused by proliferation of high-rise buildings using GIS techniques, Landscape and urban planning, 102(4), 245-253.

Zhang, Y. and L.S. Sun, 2019: Spatial-temporal impacts of urban land use land cover on land surface temperature: Case studies of two Canadian urban areas, International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 75, 171-181.

Zheng, Y., Y. Miao, S. Liu, B. Chen, H. Zheng, and S. Wang, 2015: Simulating flow and dispersion by using WRF-CFD coupled model in a built-up area of Shenyang, China. Advances in Meteorology, 2015, 528618.

# UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언

구성관 한서대학교 항공산업공학과 교수 skku@hanseo.ac.kr



- I. UAM 개요
- II. UAM 운항시 고려가 필요한 기상요소 및 항공기상 서비스 현황
- III. UAM 운항 지원을 위한 기상자료 제언
- IV. UAM 운항 지원을 위한 기반 기술 등 필요 조건

## I. UAM 개요

글로벌 시대의 경쟁이 심화됨에 따라 대도시권에 인적 자원이 집중되면서 지상교통의 혼잡은 지속될 것이다. UAM(urban air mobility, 도심항공교통)은 도시의 교통문제를 근본적으로 해결하는 대안으로 제시되고 있는 교통시스템으로 세계 각국에서 항공교통의 새로운 형태로 제시하고 있는 3차원 항공교통시스템이다. 교통체증 없는 도심의 하늘길을 개척하여 새로운 시·공간의 패러다임 창출을 위해 각 국가에서는 관련 기술의 개발과 실증 계획이 제시되고 있다. 우리나라 정부도 2020년 6월 4일 「제2차 혁신성장전략회의」에서 UAM의 2025년 상용화 서비스 개시를 위한 '한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵'을 발표했다.

대중들에게 UAM의 일반적인 개념은 하늘을 나는 자동차(flying car) 또는 에어택시(air taxi) 등으로 인식되고 있다. 이는 과거부터 도로에서 운영되는 자동차에 날개를 장착한 이미지 또는 공상과학 영화에 등장했던 하늘을 나는 자동차 등을 봐왔기 때문일 것이다. 시대별 개발기술의 수준에 따라 이러한 비행체를 부르는 용어는

변화한다[표 1]. 현재 UAM은 PAV(Personal Air Vehicle)와 같은 비행체 자체를 의미하는 용어가 아닌 관련 인프라와 서비스를 모두 포함한 체계를 의미한다.

UAM의 기술적 배경은 항공기 제작 및 제어 기술, 무인항공기 운영 기반, 수직이착륙비행체(Virtical Take Off and Landing, VTOL) 등 과거부터 발전된 전통적 항공기 제작 기술과 관제

[표 1] 주요 용어별 설명(국토교통부)

구분	용어	시기	사진	개념 및 주요내용
기체	플라잉카	'~00년 이전		• 도로주행 · 비행 겸용 교통수단이나 하늘을 나는 교통수단의 대명사로 통용
	PAV (Personal Aerial Vehicle, 개인용 비행기)	'00년대~		• 개인 소유가 가능한 수준으로 소형화 및 조종이 단순화된 비행체
	eVTOL (electric Vertical Take Off & Landing, 전기동력 수직이착륙기)	최근		• 전기동력 활용(소음 ↓) 및 수직 이착륙이 가능한 비행체
서비스 (기체 · 운항 · 인프라 총칭)	드론택시	'15년~		• 무인조종 · 자율비행(인건비 ↓)을 전제로 한 대중교통 서비스
	UAM (Urban Air Mobility, 도심 내 항공교통수단)	최근		• 도심 내 항공교통 서비스를 의미하며, eVTOL기체 활용을 내포

및 공역, 항공교통 관리 등과 같은 항공기 운영 기술뿐만 아니라 최근 급격한 발전과 가시적인 성과를 보이고 있는 모터 및 배터리 기술 등과 같은 최신화된 기술이 결합된 형태라고 할 수 있다. 2020년 미국 라스베이거스에서 열린 CES(소비자가전쇼)에서 우리나라 굴지의 자동차 생산기업이 발표한 UAM의 형상 및 개발 계획과 같이 하나의 비행체 하나에 해당하는 것이 아닌 타 교통수단과의 연계성, 사용자 이용의 편리성, 배출가스 문제가 고려된 친환경성이 고려되어야 한다. 특히, 하늘을 나는 비행체가 갖는 안전성 확보를 위한 다양한 기반기술은 반드시 고려되어야 하는 요소이다.

UAM에서 공중이동 수단으로 제시되고 있는 개인용 비행체(PAV)는 대부분 배터리를 동력으로 하는 수직이착륙(electric Vertical Take Off and Landing, eVTOL) 방식으로 2020년초 기준 전세계 110여개 업체가 130여개 모델의 비행체를 개발 중이다. eVTOL은 현재 항공기에서

기술적 한계로 지적되는 소음 및 배출가스 등 환경적인 문제의 대안으로 제시된 개념이다. 해외에서는 전문 기술을 보유한 스타트업 기업을 중심으로 글로벌 항공기 및 자동차 제작사도 본격적으로 개발에 참여하기 시작했고, 국내에서도 자동차, 방산, 항공기 생산기업이 각각 비행체의 개념 형상을 제시하고 각자의 개발방식에 따라 비행체 개발에 착수한 상태이다. 해외에서 교통수단의 공유서비스를 제공하는 플랫폼 기업도 2023년 에어택시 형태의 상용화 서비스 출시 계획을 발표하고 있으며, 자동화 제어를 비롯한 다양한 분야에서의 기술적 문제해결을 위해 우수한 IT 기업들도 UAM 개발에 투자를 활발하게 진행하고 있다.

최근 인공지능, 빅데이터, IoT, 드론, 블록체인, 3D프린팅, 에너지 저장 등과 같이 4차 산업혁명의 기반 기술로 불리는 분야는 향후 산업의 큰 변화를 발생시킬 것으로 예상되고 있다. 이러한 기술이 주목 받는 이유는 각 개별기술의 우수성보다 해당 기술의 융합과 연계를 통해 더 큰 파급력을 가지고 올 수 있기 때문이다. 즉, 4차 산업혁명에서 예상되는 제조혁신 기술과 디지털 기술, 에너지 기술을 활용하여 한계를 극복하고 새로운 시장과 가치가 창출될 것으로 예상할 수

있으며, 이러한 기술을 활용할 수 있는 것으로 주목 받는 분야가 모빌리티 산업이다. 미국항공우주국(NASA)은 저고도 공중을 활용해 구축하고자 하는 도시의 단거리 항공운송 생태계를 'Urban Air Mobility'로 명명한 이후, 관련 분야에서도 UAM 용어를 통용하고 있다[그림 1]. 현재 우리나라에서 UAM은 도심(intracity)에 초점을 맞춰 '도심' 항공교통으로 불리고 있으나, 넓은 개념으로 보면 UAM은 도심과 그 주변의 광역권(intercity)을 연결할 수 있는 새로운 이동체계의 형태로 볼 수 있다[그림 2].

한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵에서는 2025년 상용서비스 최초 도입을 주요 목표로 설정하고, 2024년까지 비행실증, 2030년부터 본격적 상용화를 준비하는 단계적 목표를 제시하고 있

[그림 1] 미국 NASA의 중장기 항공교통 비전(Advanced Air Mobility)(NASA)

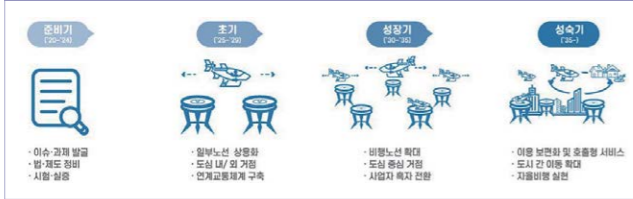


[그림 2] UAM을 통한 서비스 활용 범위(KPMG Global (2019), Getting mobility off the ground, 삼성KPMG 경제연구원)





[그림 3] 한국형 도심항공교통(K-UAM) 단계별 주요 추진 계획(국도교통부, 2020).

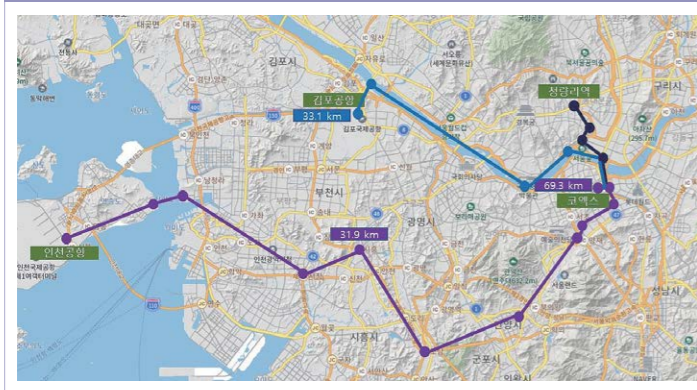


다. 2035년 이후에는 UAM의 이용이 보편화될 것으로 예측하고 관련 시장도 민간 중심으로 이루어 도록 그 이전에 필요한 인프라와 기술개발을 위해 정부의 초기지원을 계획하고 있다(그림 3).

우리나라에서 UAM 상용화 이전 한국형 실증 사업(K-UAM 그랜드챌린지)의 단계적 추진에 따

라 안전성이 입증된 기체와 설비는 실제 운항 환경에서의 검증에 의해 도심지를 포함한 실증 노선을 2024년에 지정-운용할 계획이다(그림 4). 이를 위한 기체 및 핵심부품과 비행체 운영에 필요한 정보체계에 관한 종합적인 연구개발을 추진할 예정이다.

[그림 4] 수도권 지역 실증노선(안)출처 : K-UAM 로드맵, 2020, 국도교통부



UAM이 상용화/실용화되기 위한 핵심적 요소는 UAM 비행체 구현과 다수의 비행체를 효율적이고 안전하게 운용할 수 있는 기반을 구축하는 것이다. 그리고 이를 UAM 생태계라고 할 수 있다. UAM 생태계는 안전한 교통체계 구축을 위한 전 분야가 포함되어 있으며, '범부처 한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵'에서 UAM을 교통수단으로 활용하는데 필요한 생태계 내의 핵심기술 확보 전략을 제시하고 있다(그림 5).

[그림 5] K-UAM 기술로드맵 기술확보 전략 주요 내용(K-UAM 기술로드맵 공청회, 2022?)

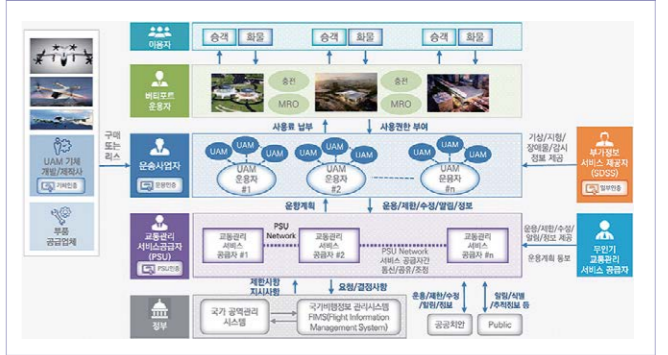


UAM 생태계 중 서비스 부문은 운송사업자, 비행체 이착륙장인 버티포트(vertiport) 운전자, 교통관리 서비스 공급자, 관련 부가서비스 제공자 등 대부분 민간 영역에서 이루어질 것으로 예상된다. 정부는 주요 인프라, 통제 및 관리, 안전확보를 위한 기반구축이 주요 업무 역할일 것이며, 비행체의 공역에서 안전한 운용을 위한 기상정보는 반드시 함께 고려가 필요한 인프라 및 서비스 정보가 된다(그림 6).

## II. UAM 운항시 고려가 필요한 기상요소 및 항공기상 서비스 현황

UAM 생태계 확산을 위한 필수적인 요소는 관련 인프라시스템의 구축이다. 대부분의 UAM 기체가 eVTOL로 개발되고 있는 만큼, 활주로를 보유한 공항처럼 대규모 인프라가 필요하지는 않을 것이다(그림 7). 그러나 복잡한 도심에서 수많은 비행체를 이착륙시키기 위한 적정 위치, 충전 및 정비, 비행체가 이동

[그림 6] K-UAM 관련 산업 생태계(안)(K-UAM 기술로드맵 공청회, 2021)



하기 위한 주변의 여건 등도 고려해야 할 요소가 된다. 기존 헬리콥터 이착륙장(heliport)을 활용하는 방법도 있으나, 헬리콥터 기체의 요

[그림 7] 우버(좌)와 현대자동차(우)의 UAM 공항 및 허브 컨셉



건을 고려하면 사실상 빌딩 옥상에 한정되어 도심지에서 상시 이착륙하기에는 위험요소와 안전문제로 즉시 적용하기는 어렵다. 이에 따라 UAM 생태계와 연계된 기술에는 UAM 전용 이착륙과 타 교통수단과의 연계 및 안전한 운항을 위한 기반 데이터의 생성/제공/활용 등이 모두 포함되어 있다.

UAM은 도로, 철도 등 다른 교통수단과의 연계가 중요하다. 따라서 다양한 교통데이터를 기존 민간 업계가 활용할 수 있는 기초/핵심데이터로 이전하는 능력이 필요하다. 국내 대도시권의 거시적 지표(인구, 소득 등)를 고려하면 세계 유수의 시장예측기관에서 우리나라를 주요 UAM 시장으로 평가했으나, 현재 우리나라는 기초 교통데이터의 공유와 확보에 어려움이 있다. 민간 사업 영역이 축적하기 힘든 교통분야의 상세 데이터 및 빅데이터는 중앙중부와 지방정부가 관리하는 핵심정보로서 실제 UAM 시장의 수요분석, 사업성 검토, 안전 확보를 위한 기반 정보에 활용이 필수적이다.

특히, 도심 내 안전한 비행체 운용과 효율적인 운항을 위해 기상정보가 복합된 공간정보도 필



수적으로 요구된다. 풍향/풍속, 낙뢰, 결빙 등 비행안전에 위험을 발생시킬 수 있는 국소적 기상 상황은 비행체의 고장과 치명적 사고를 유발할 수 있다. 그리고 위험한 경우 상시적 운항 중단을 초래하는 등 조건에 따라 비행체의 운항 여부/간격/횟수 및 사업성 결정에 영향을 줄 수 있는 중요한 것이 기상정보이다.

UAM과 같은 저고도 비행체의 운항에 영향을 미칠 수 있는 기상현상은 바람(강풍 등), 안개, 구름, 비, 눈, 먼지(황사), 호우/폭설, 우박, 뇌전, 적란운, 윈드시어(Wind shear), 마이크로 버스트(Microburst), 난류(turbulence), 착빙(icing), 산악파가 있다. 실제 공역 및 비행체 운항을 위한 항공로 상의 기상현황 확인을 위해선 관측시스템이 구축되어야 한다. 저고도 운항 비행체가 요구하는 정보생성을 위해 운고계, 시정계, 도플러기상레이더(TDWR), 낙뢰관측망, 연직 대기상태 관측에 필요한 Raiometer, SODAR, LIDAR, Wind profiler 등이 필요하다. 최근 레이더와 같이 넓은 범위와 전방향 정보의 확인이 가능한 기능을 갖춘 LIDAR도 개발된 바 있다.

[그림 8] 인공장애물(좌)과 자연장애물(우)로 인한 난류 흐름(Pilot handbook of aeronautical knowledge)

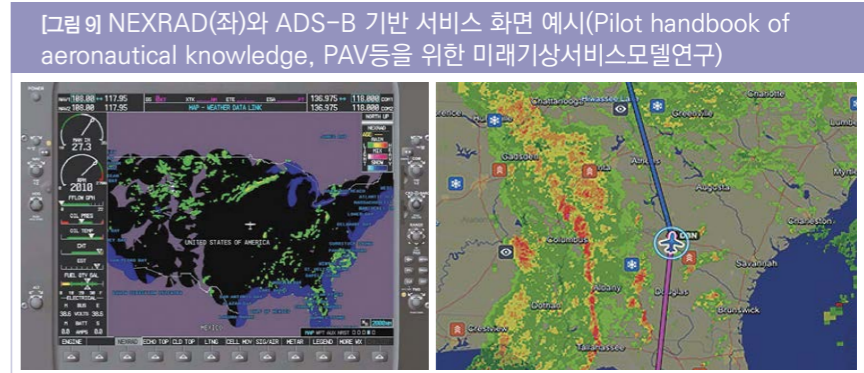


저고도에서 운항하는 비행체는 고고도 운항 항공기와 달리 지상 근처에서 발생하는 각종 기상 현상의 영향을 받게 되므로 비행에 필요한 세부적이고 정확한 예측 및 실황정보를 필요로 한다. 특히 UAM 운항 영역으로 예상되는 고도는 연직 바람시어가 매우 강하고 복잡한 대기난류가 자주 발생하는 구역의 경계인 대기경계층 고도에 포함되는 영역이다. 대기경계층 영역은 일반 항공기상정보에서는 제공하지 않는 매우 작은 규모의 기상현상이 산재되어 있는 영역이다. 이러한 영역은 국지적인 특이기상이 자주 발생하고 역학모형을 통한 예측이 어려운 환경으로, 현재 기상청에서 활용하고 있는 수치모델로는 저층의 다양한 정보생성이 쉽지 않다. 또한 도심지 운항을 고려할 때, 건물 및 지형 등 장애물로 인한 바람의 변화 등이 비행체 운항에 큰 영향을 미치는 요소인데, 현재 도심에는 비행체를 위한 저층 바람의 관측 및 정보의 연계체계가 마련되어 있지 않다[그림 8].

저고도에서 운항하는 비행체는 고고도 운항 항공기와 달리 지상 근처에서 발생하는 각종 기상 현상의 영향을 받게 되므로 비행에 필요한 세부적이고 정

미국연방항공청(FAA) 등에서는 주요 항공기상정보 전달을 위한 관련 연구를 수행하였다. 그에 따라 현재 운영되고 있는 유인기의 항공교통관리(Air Traffic Management, ATM) 차원에서 실시간 위험기상정보 제공을 위한 인프라 및 시스템을 구축하여 비행하는 항공기에 제공하고 있다.

미국에서 개발된 NEXRAD는 운송용 항공기보다 낮은 수준의 운항지원 서비스를 받는 일반항공기(general aviation)용 서비스 형태이나, UAM과 같은 근거리 비행 비행체를 위한 정보가 아

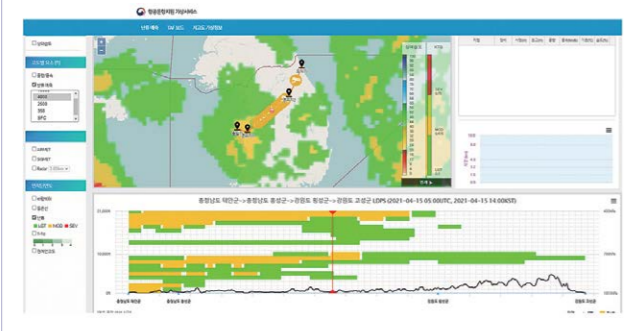


니므로 정보의 해상도와 시작고도, 위험기상 정보에 포함되는 요소 제한 등의 한계가 있다. 하지만 우리나라의 경우 인프라 구축, 정보간 연계, 항공기 탑재 장비의 미비 등으로 관련 서비스가 이루어지지 않고 있다[그림 9].

### III. UAM 운항 지원을 위한 기상자료 제언

기존 항공분야는 항공선진국으로 언급되는 소수의 국가가 기체 개발·생산, 서비스 형태 정의, 데이터 공유 및 기존 시스템과의 연계 등 모든 분야를 선도하고 있다. 하지만 UAM은 아직 실현되지 않은 서비스 형태와 시장으로서 현재의 개발계획과 체계로 적극적인 협업이 이루어진다면 주요 선진국들과 경쟁이 가능한 새로운 시장을 구축할 수 있다. 이미 확정된 K-UAM 로드맵과 기술로드맵에 따라 정부와 지자체, 민간 영역 등이 동일한 목표로 UAM 서비스 실행을 위한 기술개발을 추진할 수 있는 기반이 마련되었고, 기상청을 포함한 5개 부처(국토교통부, 과학기술정보통신부, 산업통산자원부, 중소벤처기업부)가 다부처 공동 신규 R&D를 준비하고 있다. 우리나라 항공기상분야도 다양한 연구개발 프로젝트를 통하여 실제 사용자가 필요로 하는 정보 제공 노력을 기울이고 있다. 최근에는 저고도 항공기의 운항지원을 위한 별도의 웹서비스 및 상세한 정보 제공을 위한 다양한 체계, 서비스 담당자 지정, 관련 교육프로그램 운영 등을 시행하

[그림 10] 항공기상청의 저고도 항공기 운항 지원용 계획 항로 정보 제공 예시



고 있다(그림 10).

UAM의 운영 형태가 저고도 항공기와 유사한 특성을 보이지만, 기존 항공기상청의 저고도 서비스를 활용하기 위해서는 몇 가지 개선이 필요한 부분이 있다.

첫째, 수요자 관점의 기상정보의 제공이 필요하다. 기존의 기상데이터는 일반인이 접근하기 쉽지 않다. 특히 대용량 데이터의 선별관리가 어려운 경우 실제 데이터 취급이 용이하지 않은 한계가

있다. 기존의 연구개발이 주로 데이터 제공자 관점에서 이루어진 측면이 있기 때문에, 실제 이용자의 사용성 확보에 일부 한계가 있다.

둘째, 고해상도·초단기·초저층 데이터의 제공이 필요하다. 기상청 LDAPS의 해상도는 1.5km 수준으로 실제 생활에 유용한 구역예보(동네예보 등), 운송용 항공기 운항 지원을 위한 고고도 예보, 운항 결정에 참고하기 위한 시간 예보 등 적절하게 이루어질 수 있다. 다만, 이러한 정보는 약 30분 비행하는 UAM의 운영 형태를 대응하기에는 정밀도에 한계가 있을 것이다. UAM 운항 영역과 환경으로 예상되는 대기경계층고도에 포함되는 저층 영역에 대해서도 데이터의 정밀도를 높일 수 있는 연구가 필요하다. 이용자에게 정확한 서비스 이용 가능 여부(비행체의 Go - No Go 정보 등)에 대한 정보를 제공하는 것은 실제 서비스의 활용과 정착뿐만 아니라, 비행체의 안전 확보 측면에서도 매우 중요한 요소가 될 것이다.

셋째, 서비스의 접근 또는 공개 범위의 확대가 필요하다. 항공기상청에서 제공하는 정보는 실제 항공기 운항 지원을 위한 중요 서비스인 관계로 서비스 접근과 활용의 범위를 운영자로 한정하고 있다. 정보개방을 통하여 운영자 외에 서비스를 이용하려는 이용자, 데이터를 활용한 타 서비스의 구현 사업자 또는 데이터 자체의 활용을 목적으로 하는 경우까지 공개 범위를 확대할 필요가 있다. 다만, 모든 데이터를 공개하는 경우 문제가 발생할 수 있으므로 공개범위 또는 협업범위에 대한 면밀한 검토가 필요할 것이다.

#### IV. UAM 운항 지원을 위한 기반 기술 등 필요 조건

마지막으로 현재 UAM 지원이 효과적인 결과로 이어지기 위해 현재 부제된 기반 기술에 관하여 제안하고자 한다.

##### 1) 관측 강화

UAM은 도심권 또는 도심 인근의 저고도를 운항하는 비행체이다. 현재 관측되는 바람 정보는 대부분 지면 바람에 한정되어 있으므로, 실제 비행체가 비행하는 환경에서의 바람 또는 난류 등을 관측하기 위한 현실적인 방안이 고려되어야 할 것이다. 30분 내외로 예상되는 UAM의 운영 특성을 고려하더라도 초단기 예보 정보와 함께 비행고도에서의 관측자료는 매우 중요한 정보가 될 것이다. 이를 구현하기 위해선 지면위 고정 위치에서의 관측뿐만 아니라 기체에서 비행 중 해당 고도의 실시간 관측과 정보전달 체계 구축도 함께 고려되어야 할 것이다.

##### 2) 서비스 연계 기반 구축/이용자를 위한 기상 데이터 가공

개발과 상용화가 완료된 UAM 기체와 이착륙 위치인 Vertiport 등은 최종 단계에서는 무인 운영이 실현될 것이다. 이는 실시간 비행체의 상태와 이착륙 단계에서의 안전한 운영을 위해서 모든 정보가 효율적으로 집합되고 활용될 수 있는 체계가 필요함을 의미한다. 현재 생성되는 기상 데이터는 용량이 커서 타 분야의 다양한 정보가 결합될 경우 처리에 많은 시간이 소요될 것으로 예상된다. 이러한 문제 해결을 위해선 실제로 현장에서 필요한 정보만 한정하여 애초에 제공되는 데이터의 용량을 줄이는 방법과 모든 데이터를 공개 후 사용이 필수적인 데이터만 선별하여 사용하도록 유도하는 방법이 있을 것이다. 현대 사회의 데이터 문제는 다양한 계층에서 접근하는 것이 더 효율적인 문제해결의 계기가 될 수 있다. 다만, 이를 위해 별도의 데이터 선별과 가공의 필요 여부는 별도로 확인해야 한다.

##### 3) 타 분야의 연계

기상데이터는 모든 사용자가 필요로 하는 데이터이다. 특히, 안전한 비행체 운영을 위한 의사 결정자 또는 서비스 제공자 측에서는 수요자의 요구조건이 반영된 의사결정지원시스템의 구축을 위해 반드시 필요한 정보이다. 이러한 시스템 구축과 지원을 위해서 기존 기상 데이터의 생성과 접근을 고려해야 하는 경우 폭넓은 연계가 가능한 접근도 고려해야 한다. 이는 UAM뿐만 아

나라 공공목적의 대국민 서비스를 위한 기본정보인 기상정보의 가치를 높일 수 있는 전략적 접근법이 될 수도 있다.

참고문헌

국토교통부, 2020: 한국형 도심항공교통(K-UAM) 로드맵.  
 국토교통부, 2021: 한국형 도심항공교통(K-UAM) 기술로드맵.  
 국토교통부, 2021: K-UAM 기술로드맵 공청회 자료.  
 삼정KPMG, 2020: 하늘위에 펼쳐지는 모빌리티 혁명, 도심항공모빌리티(Urban Air Mobility, UAM).  
 한국법제연구원, 2020: 도심항공교통(UAM) 정책분석.  
 Ku, S.K. et al, 2018: Analysis of meteorological service requirements for safe operation of low-altitude aircraft, International journal of advanced culture technology.  
 NASA, 2018: Urban Air Mobility(UAM) market study.  
 FAA, 2016: Pilot handbook of aeronautical knowledge.

기상기술정책지 발간 목록

창간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월

칼럼	기후변화 대응을 위한 기상청의 역할	권원태	3-11
정책초점	기후변화감시 발전 방향	김진석	12-18
	미국의 기상위성 개발현황과 향후전망	안명환	19-38
	기상산업의 위상과 성장가능성	김준모	39-45
	최적 일사 관측망 구축방안	이규태	46-57
	국가기상기술로드맵 수립의 배경과 의의	김백조, 김경립	58-61
논단	A New Generation of Heat Health Warning Systems for Seoul and Other Major Korean Cities	L.S. Kalkstein, S.C. Sheridan, Y.C.Au	62-68
해외기술동향	프랑스의 에어로솔 기후효과 관측 기술	김상우	69-79
	일본의 우주기상 기술	김지영, 신승숙	80-84

기상산업의 현황과 전략, 제1권 제2호(통권 제2호), 2008년 6월

칼럼	기후변화시대, 기상산업 발전상	봉종현	1-3
정책초점	기상산업의 중요성과 전략적 위치	이중우	5-13
	기후변화가 산업에 미치는 경제적 영향과 적응대책	한기주	14-22
	기후경제학의 대두와 대응 전략	임상수	23-33
	기후변화와 신재생에너지 산업	구영덕	34-45
	기상산업 육성을 위한 정책대안 모색	김준모, 이기식	46-54
	미국 남동부의 응용기상산업 현황	임영권	55-64
	최근 황사의 특성 및 산업에 미치는 영향	김지영	65-70
논단	A brief introduction to the European Cooperation in the field of Scientific and Technical Research (COST)	Radan Huth	71-81
	우주환경의 현황과 전망	안병호	82-92
해외기술동향	유럽의 기후변화 시나리오 불확실성 평가: EU(유럽연합) 기후변화 프로젝트를 중심으로	임은순	93-103
	미국 NOAA의 지구 감시 현황	전영신	104-107

항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월

칼럼	기상 관측·연구용 항공기 도입과 활용	정순갑	1-4
정책초점	무인항공기 개발 현황 및 응용 방안	오수훈, 구삼욱	6-18
	해외 기상관측용 항공기 운영 및 활용 실태	김금란, 장기호	19-34
	항공기를 이용한 대기물리 관측 체계 수립 방안	오성남	35-45
	효과적인 항공기 유지 관리 방안	김영철	46-56
	공군에서의 항공관측 현황과 전망	김종석	57-66
	항공기를 이용한 대기환경 감시	김정수	67-74
	항공/위성 정보를 활용한 재해 피해 조사	최우정, 심재현	75-84
논단	유/무인항공기를 이용한 기후변화 감시	윤순창, 김지영	85-93
해외기술동향	미국의 첨단 기상관측 항공기(HIAPER) 운영 현황	김지영, 박소연	94-99
	미국의 탄소 추적자 시스템 개발 현황 및 전략	조천호	100-108
	미국의 우주기상 예보와 발전 방향	곽영실	109-117
뉴스 포커스	한국, IPCC 부의장국에 진출	허은	118-119



### 기상기술정책지 발간 목록

전자구관측시스템 구축과 활용, 제1권 제4호(통권 제4호), 2008년 12월

칼 럼	• 전자구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	• GEO/GEOSS 현황과 추진 계획	엄원근	6-21
	• GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안	김병수	22-31
	• GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안	허 은	32-39
	• 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안	신동철	40-41
	- 재해 분야	박덕근	42-44
	- 보건 분야	이희일	45-47
	- 에너지자원 분야	황재홍, 이사로	48-50
	- 기상 및 기후 분야	이병렬	51-53
	- 수문 및 수자원 분야	조효섭	54-56
	- 생태계와 생물다양성 분야	장임석	57-58
	- 농업 분야	이정택	59-62
	- 해양 분야	김태동	63-67
- 우주 분야	김용승, 박종욱	68-71	
논 단	• Taking GEOSS to the next level	José Achache	72-75
해외기술동향	• GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향	강용성	76-83
	• 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황	이경미	84-95
뉴스 포커스	• 한국, GEO 집행 이사국 진출	이용섭	96-97

기상장비의 녹색산업화 전략, 제2권 제1호(통권 제5호), 2009년 3월

칼 럼	• 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기상장비의 산업여건과 국산화 전략	김상조	4-13
	• 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략	이종국	14-21
	• 기상레이더 국산화 추진 방안	장기호, 석미경, 김정희	22-29
	• 기상레이더의 상용화 현황과 육성 방안	조성주	30-41
	• 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향	이부용	42-51
	논 단	• 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원
해외기술동향	• 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로	방기석	73-80
	• 세계의 기상장비 및 신기술 동향	김지영, 박소연	81-89

기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

칼 럼	• 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화와 물환경정책	김영훈	4-15
	• 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향	노재화	16-27
	• 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰	김문모, 정창삼, 여운광, 심재현	28-37
	• 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안	문영일, 오태석	38-50
	• 수문기상학적 기후변화 추세	강부식	51-64
	• 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책	배덕호	65-77
	• 이상기후에 대응한 댐 운영 방안	차기욱	78-89
	논 단	• 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석
해외기술동향	• 미국의 기상-수자원 연계기술 동향	정창삼	111-121
	• NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황	김지영, 박소연	122-131
	• 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참관기	김용상	132-140

### 기상기술정책지 발간 목록

기상·기후변화와 경제, 제2권 제3호(통권 제7호), 2009년 9월

칼 럼	• 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	• 기후변화에 따른 에너지정책	박현종	4-18
	• 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향	박종현	19-29
	• 기후변화가 농업경제에 미치는 영향	김창길	30-42
	• 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정	김정인	43-52
	• 기상산업 활성화와 과제	이만기	53-59
	• 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언	김동식	60-69
논 단	• 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정	김지영	79-85
	• 강수의 경제적 가치 평가 방법론	유승훈	86-96
뉴스 포커스	• 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기	이영곤	97-103

날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월

칼 럼	• 날씨공감포럼의 의의와 발전방향	전병성	1-2
정책초점	• [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향	고상백	4-19
	• [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향	이재학	20-29
	• [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안	차두송	30-41
	• [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향	김익근	42-50
	• [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성	조명희, 조운원, 김성재	51-60
	• [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성	김정배	61-72
	• [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안	김명주	73-88
논 단	• 국민과의 '소통' - 어떻게 할 것인가?	김연중	89-97
뉴스 포커스	• 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기	김정윤	98-101

기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월

칼 럼	• 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책	박광준	1-2
정책초점	• 기상이변의 경제학	이지훈	4-11
	• 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고	한기주	12-21
	• 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언	이종인	22-32
	• 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향	이상현, 정상기, 이상훈	33-45
	• 기후변화와 건설 산업	강운산	46-56
	• 코펜하겐 어코드와 탄소시장	노종환	57-66
	• 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영	이서원	67-77
	• 이산화탄소(CO <sub>2</sub> ) 저감기술 개발동향: DME 제조기술	조원준	78-84
논 단	• 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로	양용석	85-99
	• 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임	김창섭	100-109
뉴스 포커스	• 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

## 기상기술정책지 발간 목록

국가 기후정보 제공 및 활용 방안, 제3권 제2호(통권 제10호), 2010년 6월

칼 럼	• 국가기후자료 관리의 중요성	켄 크로포드	1-2
정책초점	• 기후변화통합영향평가에대한 국가기후정보의 역할	전성우	4-11
	• 친환경 도시 관리를 위한 기후 정보 구축 방안	권영아	12-22
	• 기상정보의 농업적 활용과 전망	심교문	23-32
	• 기상자료 활용에 의한 산불위험예보 실시간 웹서비스	원명수	33-45
	• 경기도의 기상·기후정보 활용	김동영	46-57
	• 국가기초풍속지도의 필요성	권순덕	58-62
	• 국가기후자료센터 구축과 기상산업 활성화	김병선	63-74
	• 국가기후자료센터 설립과 민간의 역할 분담	나성준	75-83
	• 가치있는 기후정보	김윤태, 정도준	84-99
논 단	• 기상청 기후자료 활용 증대 방안에 관한 제언	최영은	100-110
뉴스 포커스	• 국가기후자료센터의 역할	임용한	111-119

장기예보 정보의 사회경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월

칼 럼	• 장기예보 투자 확대해야	박정규	1-2
정책초점	• 전력계통 운영 분야의 기상정보 활용	정응수	4-15
	• 기상 장기예보에 대한 소고	박창선	16-23
	• 패션머천다이징과 패션마케팅에서 기상 예보 정보의 활용	손미영	24-33
	• 장기예보의 사회·경제적 가치와 서비스 활성화 방안	김동식	34-43
	• 기상 장기예보의 농업적 가치와 활용	한점화	44-53
	• 장기예보 정보의 물관리 이수(利水) 측면에서의 가치와 활용	우수민, 김태국	54-64
	• 기상예보와 재해관리	박종윤, 신영섭	65-81
해외기술동향	• 장기예보 업무의 과거, 현재, 그리고 미래	김지영, 이현수	82-89
	• 영국기상청(Met Office) 해들리센터(Hadley Centre)의 기후 및 기후 영향에 관한 서비스 현황	조경숙	90-101
뉴스 포커스	• WMO 장기예보 다중모델 앙상블 선도센터(WMO LC-LRFMME)	윤원태	102-106
뉴스 포커스	• 영국기상청과의 계절예측시스템 공동 운영 협정 체결	이예숙	107-109

사회가 요구하는 미래기상서비스의 모습, 제3권 제4호(통권 제12호), 2010년 12월

칼 럼	• 시대의 요구에 부응하는 기상·기후서비스	권원태	1-3
정책초점	• 기상학의 역사	윤일희	6-16
	• 지질학에서 본 기후변동의 과거, 현재, 그리고 미래	이용일	17-29
	• 예보기술의 성장 촉진을 위한 광각렌즈	변희룡	30-44
	• 전쟁과 기상	반기성	45-55
	• 날씨와 선거	유현종	56-64
	• 기후변화와 문학	신문수	65-74
	• 기후변화와 문화 I (문명의 시작과 유럽문명을 중심으로)	오성남	75-87
	• 비타민 D의 새로운 조명	김상완	88-96
	• G20서울정상회담과 경호기상정보 생산을 위한 기상청의 역할	이선제	97-105
논 단	• 기상정보의 축적과 유통 활성화를 통한 국부 창출	김영신	106-115
	• 날씨의 심리학	최창호	116-122
해외기술동향	• 기상정보의 사회·경제적 평가에 관한 해외동향	김정윤, 김인겸	123-130

## 기상기술정책지 발간 목록

신규 시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안, 제4권 제1호(통권 제13호), 2011년 6월

발 간 사	• G20 국가에 걸맞는 기상산업 발전 방향	조석준	1-3
칼 럼	• 대학과 공공연구소의 기상기술 이전 활성화 및 사업화 촉진을 위한 기술이전센터(TLO) 발전 방안	박종복	4-13
	• 새로운 기상산업 시장창출과 연계된 금융시장 활성화에 대한 소고 - 보험산업의 입장에서	조재린, 황진태	14-23
정책초점	• 신규 기상시장 창출을 통한 기상산업 육성 방안 연구	국립기상연구소 정책연구과	26-63

도시기상관측 선진화방안, 제4권 제2호(통권 제14호), 2011년 12월

발 간 사	• 도시기상 선진화, 미래의 약속입니다.	조석준	1-3
칼 럼	• 도시기후 연구의 과거, 현재, 미래	최광용	6-18
	• 기후변화로 인한 도시 재해기상의 특성 변화 및 기상관측 선진화 방안	박민규, 이석민	19-30
	• 도시열섬의 환경평가와 도시기상관측시스템 구축방안	김해동	31-42
	• 수치모델을 이용한 도시기상 연구의 현재와 한계	이순환	43-50
	• 도시 기상 관측 연구 현황	박영산	51-62
정책초점	• 도시기상 관측 선진화 방안 연구	이영곤	64-73

원격탐측기술(레이더, 위성, 고층) 융합정책 실용화 방안, 제5권 제1호(통권 제15호), 2012년 6월

칼 럼	• 원격탐측의 융합정책과 기상자원 가치 확산	Kenneth Crawford	3-8
정책초점	• 레이더-위성 융합 강수정보 생산 기술	신동빈	10-18
	• 위성과 첨단기술 융합을 통한 미래 기상서비스 발전 방향	은종원	19-27
	• 라이다 관측기술 활용 방안	김덕현	28-41
	• 위성기술을 이용한 수문분야의 융합 정책	배덕호, 이병주	42-53
논 단	• 위성자료의 해양 환경감시 활용	황재동	54-65
	• 우리나라의 융합기술발전 정책 방향	이상현	66-72
해외기술동향	• 일본의 원격탐사 활용 및 융합정책	윤보열, 장희욱, 임효숙	73-85
포 커 스	• 레이더 융합행정 포럼 : 레이더운영과	송원화	86-93

해양기상서비스의 현황 및 전망, 제5권 제2호(통권 제16호), 2012년 12월

칼 럼	• 해양기상서비스의 의미 및 가치 확산	박관영	3-7
정책초점	• 해양기상 융합서비스의 필요성	김민수	10-20
	• 수자원 변동에 따른 해양기상서비스의 강화	김희용	21-29
	• 해양기상정보 관리의 선진화 방안	정일영	30-39
	• 해양기상·기후변화 대응을 위한 정책제언	양홍근	40-47
논 단	• 해양기상서비스 현황과 정책 방향	김유근	48-57
해외기술동향	• 선진 해양기상기술 동향	우승범	58-67
포 커 스	• 제4차 WMO/IOC 해양학 및 해양기상 합동기술위원회(JCOMM) 총회	해양기상과	68-73

### 기상기술정책지 발간 목록

국민의 행복 증진을 위한 "기상기후서비스 3.0", 제6권 제1호(통권 제17호), 2013년 6월

칼 럼	• 국민이 원하는 기상기후서비스	이일수	3-4
정책초점	• 기상기후분야 과학과 서비스 발전 방향	전종갑	6-14
	• 지진조기경보 역량 강화를 위한 정책적 제언	최호선	15-30
	• 기상기후 서비스 혁신을 위한 기술경영 전략	박선영	31-47
	• 자연재해 대응 서비스 기술 및 정책변화	허종안, 손홍민	48-59
논 단	• 수요자 맞춤형 서비스를 위한 기상기술 고도화 방안	김영준	60-72
포 커 스	• 국민행복서비스 포럼 개최 후기	국립기상연구소 정책연구과	73-78

빅데이터 활용 기상융합서비스, 제6권 제2호(통권 제18호), 2013년 12월

칼 럼	• 정부3.0에 따른 기상기후 빅데이터 활용	고윤화	3-4
정책초점	• [정책] 정부3.0 지원을 위한 빅데이터 융합전략	안문석	6-13
	• [정보] 스마트국가 구현을 위한 빅데이터 활용방안	김현곤	14-31
	• [서비스] 빅데이터 분석 기반 기상예보의 신뢰도 향상 방안	이기광	32-46
	• [경영] 빅데이터 기반 날씨경영 성과 제고 방안 - 공항기상정보 활용사례 -	방기석	47-58
	• [농업] 기후변화시나리오 활용 농업 기상 과학 융합 전략	김창길, 정지훈	59-76
	• [재난] 재난관리의 새로운 해결방안, 빅데이터	최선화, 김진영, 이종국	77-87
논 단	• 기상기후데이터를 품은 빅데이터	이재원	88-97
	• 한국형 복지국가의 전략적 방향성안	안상훈	98-111

기상기후 빅데이터와 경제, 제7권 제1호(통권 제19호), 2014년 6월

칼 럼	• 기상기후 빅데이터를 활용한 날씨경영	고윤화	3-4
정책초점	• 기상기후정보의 사회경제적 역할	안중배	6-11
	• 미래 재난재해 해결을 위한 기상기후 서비스	김도우, 정재학	12-19
	• 빅데이터의 사회경제적 파급효과	김진화	20-30
	• 기상기후 빅데이터의 산업경영 활용과 전략	김정인	31-41
	• 기상기후 빅데이터 기반 기상산업육성	송근용	42-56
논 단	• 빅데이터 기반의 미래 산업	황종성	57-71
	• 기상기후정보 효율성 제고를 위한 융복합 연구	이성종	72-77
포 커 스	• 위험기상에 따른 기상기후 빅데이터 활용	국립기상연구소 정책연구과	78-93

위성 기술과 활용, 제7권 제2호(통권 제20호), 2014년 12월

칼 럼	• 위성을 활용한 전 지구적 관측 방안	고윤화	3-4
정책초점	• 기상위성 운영기술의 선진화 방안	김방업	6-15
	• 관측위성기술의 현황 및 전망	김병진	16-24
	• 연구개발용 위성의 현업 활용성 제고 방안	안명환	25-43
	• 위성을 이용한 국가재난감시 체계 구축	윤보열, 염종민, 한경수	44-56
	• 위성영상서비스 시장 빅뱅과 새로운 관점	조황희	57-67
논 단	• 우주기상의 연구 현황 및 발전 방향	김용하	68-81
해외기술동향	• 기상위성 기술 정책 정보 동향	국가기상위성센터 위성기획과	82-92
	• 위성기반 작전기상 소개	안숙희, 김백조	93-100

### 기상기술정책지 발간 목록

장마의 사회경제적 영향, 제8권 제1호(통권 제21호), 2015년 6월

칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	• 수자원 확보에 있어서 장마의 역할	박정수	8-16
	• 장마가 농업생산에 미치는 영향	최지현	17-24
	• 장마의 변동성과 예측성 향상	서경환	25-30
	• 장마기간 유통산업 영향 및 전략	김정윤	31-40
	• 장마철 유의해야할 건강 상식	이준석	41-51
논 단	• 장마-문순 예측기술 향상 방안	하경자	52-59
해외기술동향	• 동아시아 여름강수 예측기술 현황	권민호	60-65

겨울철 위험기상의 영향과 대응, 제8권 제2호(통권 제22호), 2015년 12월

칼 럼	• 겨울철 위험기상 예보의 중요성	고윤화	3-4
정책초점	• 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책	김두천	6-17
	• 한국의 동절기 도로제설 현황	양충현	18-29
	• 한파가 농업에 미치는 영향	심교문	30-41
	• 겨울철 한파 대비 건강관리	송경준	42-56
논 단	• 겨울철 위험기상의 예측능력 향상	김주홍	57-68
	• 미래 겨울철 위험기상의 변화	차동현	69-75

영향예보의 현황 및 응용, 제9권 제1호(통권 제23호), 2016년 6월

칼 럼	• 영향예보를 통한 기상재해 리스크 경감	고윤화	3-4
정책초점	• 영향예보 비전과 추진 방향	정관영	6-22
	• 재해기상 영향예보시스템 현황 소개	최병철	23-31
	• 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향	김동준	32-40
	• 영향예보를 위한 수문기상정보 지원	이은정	41-51
논 단	• 재해영향예보의 효과	손철, 김건후	52-63
포 커 스	• 확률 예보를 위한 앙상블예측 기술 소개 및 현황	강지순	64-74

인공지능을 접목한 기상 분야 활용, 제9권 제2호(통권 제24호), 2016년 12월

칼 럼	• 기상서비스를 변화시키는 인공지능	고윤화	3-4
정책초점	• 인공지능의 발달이 몰고 오는 변화상	진석용	6-20
	• 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신	최혜봉	21-30
	• 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은?	구본권	31-50
	• 인공지능의 기상정책 개발 활용	국립기상과학원	51-63
논 단	• 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보	고한석	64-77



### 기상기술정책지 발간 목록

영향예보 서비스 확대, 제10권 제1호(통권 제25호), 2017년 6월

칼 럼	영향예보 서비스 개발과 활성화	고윤화	3-4
정책초점	영향예보 서비스 확대를 위한 제언	예상욱	6-17
	교통안전관리를 위한 도로기상정보 활용	손영태	18-30
	태풍 재해 리스크 관리를 위한 영향예보	이은주	31-40
	기상, 기후 그리고 숲과 사람	박주원	41-55
	KISTI 재난대응 의사결정지원시스템(K-DMSS) 소개	조민수	56-70
논 단	기상예측정보를 활용한 농경지 물사용 영향예보	최진용, 홍민기, 이성학, 이승재	71-81
	화재 기상예보 서비스	류정우, 권성필	82-92
포 커 스	오픈데이터와 일본기상비즈니스 컨소시엄	정효정	93-107

4차 산업혁명과 미래 기상기술, 제10권 제2호(통권 제26호), 2017년 12월

칼 럼	기후변화 저감을 위한 미래 기상기술	남재철	3-4
정책초점	4차 산업혁명과 미래 기후변화 대응기술	김형주	6-15
	4차 산업혁명 시대의 기후변화 대응	채여라	16-25
	인공지능 기술 발전을 위한 제도 및 정책	김윤정	26-43
	기후변화 대응을 위한 에너지 정책	전재완	44-54
논 단	기후변화에 대응하기 위한 농업과 과학기술의 융합	이현숙	55-65
포 커 스	4차 산업혁명과 미래 전문직	윤상후	66-73

여름철 위험기상의 영향과 대응, 제11권 제1호(통권 제27호), 2018년 6월

칼 럼	국민의 안전을 위협하는 여름철 폭염과 대응	남재철	3-4
정책초점	기후변화로 심화되는 폭염 대응을 위한 경보체계의 개발	이명인	6-18
	재난정보관리 표준화 기술 개발	김병식	19-34
	지표홍반자외선정보 제공 및 향후 대응	박상서	35-43
	스마트 폭염대응을 위한 기상 전문가의 역할	권용석	44-53
	인공지능을 활용한 재해기상 저감·예측 기술	김동훈	54-69
논 단	미래 여름철 기온변화에 의한 건강영향 예측	이재영, 김호	70-77
포 커 스	폭염 피해와 정책 동향	김도우	78-85

기상정보 활용 확대와 기상청의 역할, 제12권 제1호(통권 제28호), 2019년 6월

칼 럼	날씨, 국민 생활의 시작과 끝	김종석	3-4
정책초점	기상조건에 따른 이동수요의 변화	이재호, 전재영	6-14
	기상데이터로 알려주는 국민건강 알람서비스	한성욱, 전예슬	15-23
	신재생에너지 발전량 예측에서의 기상정보 활용	이영미, 박다빈	24-32
	ICT수목원과 기상기술	이상용	33-43
	기후변화가 농작물 생산에 미치는 영향과 대응	문경환	44-57
	4차 산업혁명 기술을 활용한 친환경 건축/도시 설계 기술	이호영	58-69
	실시간 수(水)재해 예측을 위한 기상정보 활용 방안	이병주	70-80
포 커 스	복합재난대응 연구사례 중 도심지 침수 현상을 중심으로	백용, 이동섭, 김형준	81-87

### 기상기술정책지 발간 목록

겨울철 위험기상의 사회경제적 영향, 제12권 제2호(통권 제29호), 2019년 12월

칼 럼	겨울철 안심사회 건설과 기상청의 기여	김종석	3-4
정책초점	도로에서의 기상정보 활용 및 시스템 구축 사례	윤덕근	6-16
	정확한 산불위험 예보를 위한 노력	이병두	17-24
	기해년 4월 산불 이후, 「산불극복 뉴딜 전략」 제언	김경남	25-39
	미세먼지 개선을 위한 국가 정책 및 기술 방향	심창섭	40-48
	2019년 겨울철 대설·한파 종합대책	최병진	49-59
논 단	건강한 겨울나기, 겨울철 질환에 대한 예방 및 대응	임도선	60-68
	서울시 미세먼지 저감정책의 효과: 차량 배출량 관점	허창희	69-80

중규모 대류계 기상현상의 이해와 대응, 제13권 제1호(통권 제30호), 2020년 6월

칼 럼	호우 피해, 아는 만큼 대비할 수 있다	김종석	3-4
정책초점	코로나, 4차 산업혁명, 그리고 대기 관측	홍진규	6-23
	도시 돌발홍수 관리를 위한 수문과 기상 기술의 융합	황석환, 이동률	24-40
	기후변화 대응과 소하천 계측기술	정태성	41-52
논 단	돌발 기상 예보와 과제	이우진	53-65
	중규모 대류계의 예측	이동규	66-79
	위성원격탐사 기반의 한반도 하계 강우특성 진단	손병주	80-90
포 커 스	중규모 대류계 연구를 위한 국지기상관측 제언	이규원	91-105
	집중호우 등 풍수재 사고와 담보보험	이보영	106-112

유관 부처 기상정보 관측·예측기술 현황, 제13권 제2호(통권 제31호), 2020년 12월

칼 럼	소금과 같은 기상서비스, 가치를 더하기 위해 부처협업이 필요한 때입니다	박광석	3-4
정책초점	국립해양조사원 해양예보서비스 현황	이준식	6-16
	동해연안 원전주변 해양환경변화 실시간 모니터링시스템	신종훈	17-31
	도로기상정보를 활용한 도로살얼음 사고예방 사례와 제언	경기원	32-43
	해양로봇을 활용한 해양 공간 조사와 활용	권오순	44-54
	국가대기오염측정망 운영과 명예대기관리원 제도	박지해	55-63
	식물계절 현장 관측자료를 활용한 산림생태계의 기후변화 영향 예측	손성원	64-72
	드론과 위성을 활용한 디지털 농업관측기술	홍석영	73-86
	홍수관리를 위한 기상 관측 및 정보 활용 현황	현명숙	87-98

미래 도심항공교통(UAM) 준비를 위한 지식·기술 그리고 정책, 제14권 제1호(통권 제32호), 2021년 6월

칼 럼	도심의 공간을 지배하는 서비스, UAM 성공을 위해 기상정보는 필수 불가결입니다.	박광석	3-4
정책초점	도심항공교통을 위한 기상관측 제언	이규원	6-19
	도심항공기상을 위한 중미기상학	강성락	20-31
	안전한 UAM을 향한 제언	홍진규	32-41
	도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템	박문수	42-55
논 단	K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용	김재진	56-66
포 커 스	UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언	구성관	67-76

## 『기상기술정책』 투고 안내

### 투고방법

1. 본 정책지는 기상기술 분야와 관련된 정책적 이슈나 최신 기술정보 동향을 다룬 글을 게재하며, 투고된 원고는 다른 간행물이나 단행본에서 발표되지 않은 것이어야 한다.
2. 원고의 특성에 따라 다음과 같은 5종류로 분류된다.  
(1) 칼럼 (2) 정책초점 (3) 논단 (4) 해외기술동향 (5) 뉴스 포커스
3. 본 정책지는 연 2회(6월, 12월) 발간되며, 원고는 수시로 접수한다.
4. 원고를 투고할 때는 투고신청서, 인쇄된 원고 2부, 그림과 표를 포함한 원본의 내용이 담긴 파일(hwp 또는 doc)을 제출하며, 일단 제출된 원고는 반환하지 않는다. 원고접수는 E-mail을 통해서도 가능하다.

### 원고심사

1. 원고는 편집위원회의 검토를 통하여 게재여부를 결정한다.

### 원고작성 요령

1. 원고의 분량은 A4용지 10매 내외(단, 칼럼은 A4용지 3~5매 분량)로 다음의 양식에 따라 작성한다.
  - 1) 워드프로세서는 '아래한글' 또는 'MS Word' 사용
  - 2) 글꼴: 신명조
  - 3) 글자크기: 본문 11pt, 표:그림 10pt
  - 4) 줄간격: 160%
2. 원고는 국문 또는 영문으로 작성하되, 인명, 지명, 잡지명과 같이 어의가 혼동되기 쉬운 명칭은 영문 또는 한자를 혼용할 수 있다. 학술용어 및 물질명은 가능한 한 국문으로 표기한 후, 영문 또는 한문으로 삽입하여 표기한다. 숫자 및 단위의 표기는 SI규정에 따르며, 복합단위의 경우는 윗 첨자로 표시한다.
3. 원고 첫 페이지에 제목, 저자명, 소속, 직위, E-mail 등을 명기하고, 저자가 다수일 경우 제1저자를 맨 위에 기입하고, 나머지 저자는 그 아래에 순서대로 표시한다.
4. 원고의 계층을 나타내는 단락의 기호체계는 I, 1, 1), ①, ①의 순서를 따른다.
5. 표와 그림은 본문의 삽입위치에 기재한다. 표와 그림의 제목은 각각 원고 전편을 통하여 일련번호를 매겨 그림은 아래쪽, 표는 위쪽에 표기하며, 자료의 출처는 아랫부분에 밝힌다.  
예) <표 1> <표 2> [그림 1] [그림 2]
6. 참고문헌(reference)
  - 1) 참고문헌 표기 양식
    - 참고문헌은 본문의 말미에 첨부하되 국내문헌(가나다 순), 외국문헌(알파벳 순)의 순서로 정리한다.
    - 저자가 3인 이상일 경우, '등' 또는 'et al.'을 사용한다.
    - 제1저자가 반복되는 경우 밑줄(\_)로 표시하여 작성한다.
  - 2) 참고문헌 작성 양식
    - 단행본: 저자, 출판년도: 서명(영문은 이탤릭체), 출판사, 총 페이지 수.
    - 학술논문: 저자, 출판년도: 논문명, 게재지(영문은 이탤릭체), 권(호), 수록면.
    - 학술회의(또는 세미나) 발표논문: 저자, 발표년도: 논문명, 프로시딩명(영문은 이탤릭체), 수록면.
    - 인터넷자료: 웹 페이지 주소

# METEOROLOGICAL TECHNOLOGY & POLICY

A decorative graphic consisting of several overlapping, wavy, translucent blue lines that flow across the middle of the page, creating a sense of movement and depth.

**Volume 14, Number 1**

33, Seohobuk-ro, Seogwipo-si, Jeju-do, 63568, Korea

TEL. 064-780-6545 | FAX. 064-738-6513

<http://www.kma.go.kr>