

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-1

국립기상과학원 대형 관측인프라 공동 활용 및 관측자료 공유 방향

이철규, 구태영, 김기훈, 김백조, 류동균, 김동진, 정승필, 인소라, 장승민, 고정석, 김현우

기상청 국립기상과학원 관측연구부

한반도의 계절과 지역에 따른 기상 현상의 다층적 이해와 예측정확도 향상을 위해서는 다양한 공간적·시간적 규모에서의 고해상도 관측자료가 필수적이다. 이를 위해 기상청 국립기상과학원은 기상항공기, 기상관측선, 표준기상관측소, 기상관측탑(307m) 등 대형 관측인프라를 운영하고 있으며, 이를 활용하여 대기-해양-지상에 걸친 통합 관측체계를 구축하고 있다. 본 연구는 국립기상과학원이 운영하는 대형 관측인프라를 소개한다. 기상항공기는 기본 기상, 구름물리, 대기질, 온실가스 등 관측장비를 탑재하고 한반도 해상에서 계절별 기상 현상에 대해 대기 연직구조 및 상층의 기상정보를 생산하고 있다. 기상관측선은 주로 황해를 중심으로 해양의 수심별 수온·염분 관측과 더불어 해수면 기상요소 및 대기연직구조를 관측하고 있으며, 고창·보성 표준기상관측소는 각각 지상기상관측, 고층기상관측에 특화된 관측장비와 인프라를 보유하여 다양한 기상관측장비의 장기간 비교관측 플랫폼을 제공하고 있다. 특히 보성 표준기상관측소에는 국내 유일의 고층 기상관측탑이 운영되고 있어 대기 하층의 기상현상 연구, 원격관측장비 검증 등에 활용되고 있다. 이러한 인프라는 구름·강수 미세물리, 해양-대기 경계층, 국지·중규모 기상 현상 등 기상연구의 핵심 주제에 필수 정보를 제공한다. 국립기상과학원은 해당 인프라를 국내 학계 및 연구기관과의 공동연구, 관측자료 공유 및 융합 분석 등에 적극 개방·활용함으로써 관측자료 생산과 활용 간의 연계성을 강화하고 국내 기상 연구·기술개발의 효율성을 높이고자 한다. 이와 같은 협력적 관측연구 체계는 국내 기상 연구 역량의 수준 향상에 기여하고 동시에 위험기상 현상 대응과 기후변화 예측 능력 제고 등 국가적 차원의 기상·기후 연구 역량 고도화에도 기여할 것으로 기대된다.

Keywords: 대형 관측인프라, 기상항공기, 기상관측선, 표준기상관측소, 기상관측탑, 공동연구

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 ‘국가 기상관측장비 및 관측자료 표준화(KMA2018-00221)’의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-2

국립기상과학원 기상항공기 운영 현황 및 성과

구태영, 정승필, 이광재, 이재복, 이수희, 김민성, 강덕두,
한승범, 이선범, 이석근, 홍찬기, 정주호, 이철규

국립기상과학원 관측연구부

2017년 11월 도입된 기상항공기는 쌍발 터보프롭 형식의 Beechcraft King Air 350HW 기종이고, 최대 비행고도와 임무비행시간은 각각 약 10 km와 5.5 시간이며, 27종의 관측장비를 보유하고 있다(Fig. 1). 2018년~2024년까지 총 운항시간은 약 2,626시간이고, 위험기상 선행관측(SW), 환경기상 감시(EM), 온실가스 감시(CM), 구름물리 관측과 기상조절 실험(CP) 등의 임무로 수행되었다(Fig. 2). 기상항공기의 연간 운항시간은 청 내외 기관 및 학계로부터 연간운항 수요조사를 바탕으로 약 400시간 이내에서 결정되며, 이러한 연중 운영 방식은 특정 기간 캠페인 중심으로 운영되는 국외 기관과 뚜렷한 차별성을 가진다.

기상항공기는 관측 자료의 다양성과 높은 시·공간성, 그리고 관측 공백 지역의 빠른 접근성이 특징이며, 1회 비행 당 최대 723종의 1차 산출물을 제공한다. 연직·수평기상관측정보(기압, 기온, 습도, 풍향, 풍속)와 에어로졸 수농도는 실시간 수집이 가능하며, 비행 후 품질관리까지 약 2시간 정도 소요된다(영상 자료 제외). 장비별 생산되는 관측요소, 관측주기, 관측기간 등 정보는 과학원 홈페이지 공개되어 있고, 현재 자료 배포는 요청 시 건별로 제공되고 있다.

기상항공기 드롭존데에서 관측되는 연직기상관측정보는 현업 수치모델(KIM)에 입전 및 자료동화에 사용되고 있다. 특히 앙상블 자료동화 영향평가에서 습도와 바람에 대하여 모바일 관측 플랫폼(항공기, 선박, 차량) 중 기상항공기 자료가 가장 크게 기여하였다(Hwang et al., 2025). 유사하게 태풍 오마이스 사례에 대한 WRF 자료동화 실험에서 기준 실험 대비 10m 풍속 RMSE 개선율은 약 11%로 나타났다.

Keywords: 기상항공기, 집중관측, 입체관측, 자료동화, 태풍

※ 이 연구는 기상항공기 활용기술 개발 연구 사업(KMA2018 0222)의 지원으로 수행되었습니다.

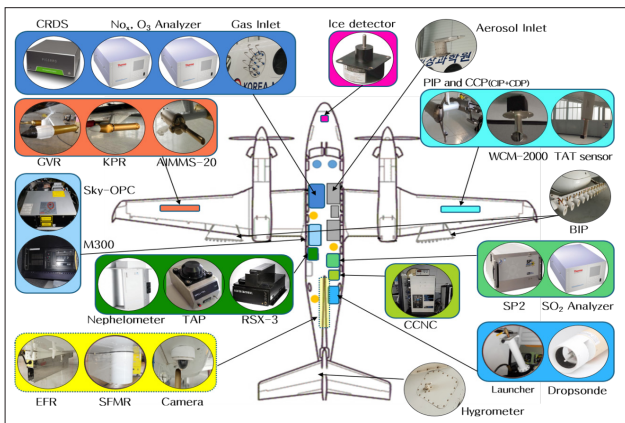


Fig. 1. Instrument chart of NIMS/KMA atmospheric research aircraft.

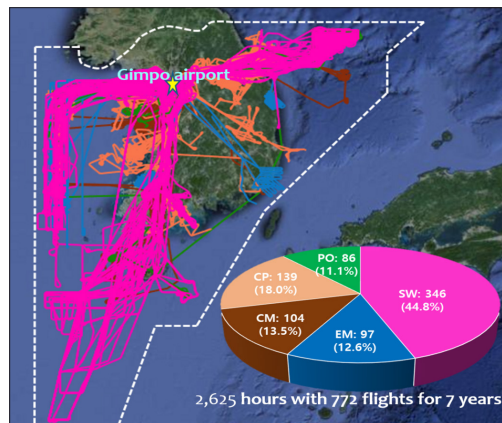


Fig. 2. Observation routes for 2018~2024

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-3

기상관측선을 활용한 고수온·저염분수 발생과 관련된 해양기상·환경 집중관측 및 분석적 연구

김백조, 조형준, 최한수, 김현우, 장승민, 류동균, 이철규

국립기상과학원 관측연구부

동아시아 지역에서 기후변화로 인한 극단적 위험 기상이 자주 발생하고 있다. 특히 중국의 여름철 몬순 시즌에 양쯔강 유역에 극한 호우가 발생하면 이로 인한 황해로의 유출량이 급격하게 증가한다. 이러한 유출량 증가는 제주도 연근해 저염분수(염분이 26psu 이하의 해수) 발생 가능성을 높게 된다. 제주도 연안 지역까지 저염분수가 출현하게 될 경우, 마을 어장 및 수산 양식업에 막대한 피해를 초래한다. 또한 저염분수는 해양의 barrier layer 형성으로 인해 고수온 발생에 핵심적인 역할을 하기도 한다(Moon et al., 2019). 최근에는 Hong et al.(2022)에서 저염분수로 형성된 barrier layer가 대기-해양 간 열·수분 교환을 증가시켜 태풍을 강화한다고 밝힌 바 있다. 한반도 주변 해역에서 고수온·저염분수가 동시에 발생할 경우, 해양 상에서 발생·발달하는 위험 기상에 미치는 영향은 더 커질 수 있다. 고수온·저염분수 발생 메커니즘과 이로 인한 대기에 미치는 영향을 규명하기 위하여 통합적 해양기상·환경 집중관측이 요구된다. 이를 위하여 국립기상과학원이 보유한 기상관측선은 한반도로 접근하는 위험 기상의 발생·발달과 관련된 대기-해양 상호작용 연구와 제주도 연근해 해양환경 감시·분석에 있어 중요한 역할을 담당하고 있다.

국립기상과학원은 기상관측선을 활용하여 2024년(7.16~17)과 2025년(7.10~14)에 여름철 고수온·저염분수 대응을 위한 해양기상·환경 집중관측을 실시하였다. 2024년과 2025년에는 기상관측선의 수온·염분 관측지점을 기존 7개에서 4개를 추가하여 총 11개로 확대하였다. 본 연구에서는 해양기상·환경 집중관측 자료를 활용하여 고수온·저염분수 발생과 관련된 대기순환 패턴을 분석하고 기상요소와 대기 연직구조 변화, 수온과 염분의 연직 분포 특성을 알아보았다. 이와 같은 기상관측선 기반 해양기상·환경 관측·분석 연구는 해양 상의 위험 기상 발생·발달 메커니즘 규명과 제주도 연근해역의 고수온·저염분수의 전 주기적 대응체계 개발에 기여할 것이다.

Keywords: 기상관측선, 고수온·저염분수, 대기-해양 상호작용, 해양기상·환경 집중관측

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「해양기상 감시 및 차세대 해양예측시스템 개발」(KMA2018-00420)의 일부 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-4

국립기상과학원 표준기상관측소 활성화 추진 계획

김기훈, 인소라, 김동진, 황성은, 이영태, 김재원, 이철규

국립기상과학원 관측연구부

국립기상과학원 표준기상관측소는 기상관측장비의 시험·검증, 성능 개선 및 신기술 개발을 위한 국가적 테스트베드로 설립되었으며, 최근 세계기상기구(WMO) 지정 및 국제 협력 확대를 통해 그 위상이 강화되고 있다.

그러나 원격지 위치로 인한 접근성 한계, 운영 효율성 저하, 연구용 관측자료의 분산 관리 등 문제들이 지적되어 왔으며, 이에 따라 국립기상과학원은 2023~2027년을 대상으로 운영체계 개편과 지점별 특성화, WMO 기준에 부합하는 성능 개선 및 관측기술 고도화, 국내외 교육·연구 협력 확대와 전문 인력 양성을 핵심 전략으로 하는 활성화 계획을 수립하였다.

특히 보성 표준기상관측소는 WMO 측정선도센터(MLC)로 등록되어 지상 원격기상관측에 대한 연구와 국제적 비교·검증을 선도적으로 수행하고 있으며, 고창 표준기상관측소는 WMO Global Surface Reference Network(GSRN) Pilot Station 등록을 목표로 국제 기준에 부합하는 장기 기후변화 감시 자료 생산 체계를 구축 중이다. 본 계획은 표준기상관측소를 아시아 최고 수준의 기상관측 연구 기반으로 발전시키고, 산·학·연 협력과 국제 공동연구를 통해 기후변화 대응과 기상서비스 고도화에 이바지하는 것을 목표로 한다.

Keywords: 표준기상관측소, 지상원격기상관측, GSRN, 측정선도센터, MLC

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-5

나라호 특별 관측 결과를 이용한 산악파 및 난류 특성 분석

신예원¹, 강준호¹, 김정훈¹, 전해영², 고한창², 정승필³, 구태영³, 임병환⁴

¹서울대학교 지구환경과학부

²연세대학교 대기과학과

³국립기상과학원 관측연구부

⁴국립기상과학원 예보연구부

봄철 영동 지역에서는 태백산맥에 서풍이 유입될 때 풍하측 강풍이 빈번하게 발생하며, 이로 인해 시설물이 파괴되거나 산불이 확산되기도 한다. 또한 진폭이 큰 산악파가 형성되어 연직으로 전파하고 파괴되면 대기 상층에서 난류가 발생하여 항공기 운항을 방해하기도 한다. 이와 관련된 중규모 산악파 및 미규모 난류의 특성을 이해하기 위해, 태백산맥을 중심으로 풍상측부터 풍하측까지, 그리고 대기 하층부터 상층까지 조밀하고 입체적인 관측이 요구된다. 이에 2025년 4월 7-11일 서울대, 연세대, 국립기상과학원 관측연구부 및 예보연구부가 학연 협력으로 기상항공기 나라호의 드롭존데와 기상 관측 차량의 라디오존데를 이용한 특별 관측을 수행하여, 최초로 태백산맥에서 발생하는 산악파와 난류를 항공기를 이용하여 관측 및 분석하였다. 나라호가 김포에서 이륙하여 강릉을 지나 동해상에서 3회/일 드롭존데를 낙하하고, 강릉과 울진 사이를 비행하며 풍하측을 중심으로 관측한 뒤 김포에서 착륙하였다. 또한 산맥의 풍상측인 흥천과 풍하측인 북강릉에서는 06 UTC에 라디오존데를 비양하였다. 본 연구에서는 현업 수치모델인 KLAPS 및 LDAPS를 특별 관측 결과와 비교하여, 수치모델에서 나타나지 않은 산악파 및 난류의 특성이 관측되었는지 확인하였다. 전반적으로 수평 및 연직 해상도가 KLAPS보다 좋은 LDAPS의 온도 및 수평 바람은 관측 결과와 유사했다. 그러나 수치모델의 해상도는 관측 자료만큼 조밀하지 않아 변수의 수평 및 연직 변동을 충분히 반영하지 못하며, 특히 연직 속도의 크기와 변동을 과소모의하였다. 4월 7-8일에는 한반도를 중심으로 남고북저형 해면기압 배치에서 태백산맥에 서풍이 유입되어 산악파 및 난류 발생 가능성이 있었으며, 수치모델에서 연직으로 전파하는 산악파를 확인하였다. 존데 자료로부터 대기 하층에서 태백산맥 서쪽에서는 서풍, 동쪽에서는 동풍이 유입되었으며, 약 2 km 고도에서 정적 안정도가 크게 증가하였고, 산악파의 연직 파수의 제공이 양수로 나타나 산악파가 연직으로 전파할 수 있었음을 확인하였다. 특히 8일 0610 UTC에는 약강도 난류가 관측되었는데, 항공기 자료로부터 3차원 바람이 크게 변동하였으며, EDR이 약 $0.05 \text{ m}^{2/3} \text{ s}^{-1}$ 로 나타났음을 확인하였다. 이와 같이 최초의 학연 협동 산악파 특별 관측을 통해서 중규모 이하의 산악파 및 난류의 특성을 분석하기 위한 학연 협동 집중 관측의 필요성을 확인하였다. 궁극적으로 국토의 70% 이상이 산악인 한반도 주변에서의 집중 및 특별 관측이 지속된다면, 국지적으로 다양한 편차를 보이는 중규모 위험기상에 대한 발생 메커니즘을 이해하고 그 예측성을 향상시키는 데에 많은 도움이 될 것으로 기대된다.

Keywords: 특별 관측, 기상항공기, 태백산맥, 풍하측 강풍, 산악파 난류

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」(KMI2022-00310, KMI2022-00410) 및 기상항공기 활용기술 개발(KMA2018-00222)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-6

기상항공기 착빙 탐지기 자료를 활용한 과냉각수적량 추정 및 객관적 착빙 강도 진단 연구

김은태¹, 김정훈¹, 구태영², 정승필²

¹서울대학교 지구환경과학부

²국립기상과학원 관측연구부

국립기상과학원 기상항공기 나라호는 2018년 2월부터 우리나라 공역에서의 기상환경을 주기적으로 관측해오고 있으며, 2024년 2월까지 총 547회의 관측 임무를 수행 중이다. 나라호에 탑재된 착빙 탐지기(Rosemount Icing Detector; RID)는 약 40 kHz로 진동하는 실린더로, 구름 내 비행 시 과냉각수적 충돌 및 결빙에 따른 주파수 감소를 통해 착빙을 탐지한다. 주파수의 단위시간당 감소율은 착빙 강도와 밀접한 연관성이 있지만, 이를 객관적인 착빙 강도로 변환(calibration)이 필수적이다. 본 연구에서는 RID 주파수 변화를 과냉각수적량(Supercooled Liquid Water Content; SLWC)으로 정량화하며, 미공군 및 미항공청에서 정의한 SLWC 임계값에 따라 나라호 자료를 이용해 최초의 객관적 착빙 발생 강도를 산출하였다. 먼저, 주파수 변화를 SLWC로 정량화하기 위해 ice accretion technique (IAT)과 ice sublimation technique (IST) 두 가지 추정 방법을 적용 및 비교 분석하였다. 두 추정 방법의 구현 및 검증에는 나라호 cloud droplet probe와 WCM-2000 LWC 관측 자료를 활용하였다. IAT는 착빙 발생 시 측정된 주파수의 감소율과, 해당 환경에서 관측된 구름수액량(liquid water content; LWC) 간의 상관관계를 분석하여 SLWC를 추정하는 방법이다. IST는 착빙 발생 후 구름 외부로 빠져나와 건조한 대기에서 기온, 습도, 항공기 속도 등 여러 조건에 따라 이론적으로 승화되는 얼음량을 계산한 후, 해당 환경에서 측정된 주파수 증가율과의 상관관계를 분석하여 SLWC를 역으로 추정하는 방법이다. IAT와 달리 LWC 관측 자료를 필요로 하지 않아 불확실성은 비교적 낮지만 얼음 승화율 계산 과정에 적용되는 파라미터의 근사와 가정에 의한 불확실성이 남아있다. 따라서 본 연구에서는 두 방법 및 다종의 LWC 관측 자료를 활용하여 비교분석하고, 비교적 정확한 SLWC 산출 방안 탐색을 목표로 하였다. 본 연구를 통해 얻어진 SLWC 추정 자료 및 객관적 착빙 강도 자료는 착빙 예측 시스템 객관적 검증 뿐만 아니라, 대기수상체 탐지 알고리즘 검증, 모델 물리모수화 개선 등 다양한 분야에서 활용 가능할 것으로 기대된다.

Keywords: 나라호, 항공기 착빙, 과냉각수적, LWC, 착빙 강도

※ 이 연구는 기상청 「차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발(NARAE-Weather)」 (RS-2022-KM220410) 및 국립기상과학원 「기상항공기 활용기술 개발」 (KMA2018-00222)의 지원으로 수행되었습니다.

특별세션 7 / 관측 인프라 활용 1-7

KPOP-MS 집중관측 자료를 활용한 2023년 8월 7일 대류성 셀 발생 및 발달 메커니즘 분석

이정은¹, 김승희², 정종훈³, 변재영⁴, 박향숙⁴, 이규원¹

¹BK21 위험기상 교육연구팀, 대기과학과, 대기원격탐사연구소, 경북대학교

²Institute for Earth, Computing, Human and Observing (ECHO), Chapman University, Orange, CA, USA

³I.M. Systems Group, Inc., Rockville, MD, USA

⁴국립기상과학원 예보연구부

대류성 셀(convective cell, CC)은 크기가 매우 작고 지속시간이 짧음에도 불구하고 호우, 강풍, 낙뢰 등 위험기상을 유발하며, 대규모화(upscale growth) 과정을 통해 조직화된다. 현업 관측망은 CC 발생 및 발달과 관련된 소규모 대류를 포착하는 데 제약이 있으며, 이를 보완하기 위해 다양한 관측 장비를 활용한 대형 집중관측이 수도권을 중심으로 수행되고 있다. 본 연구에서는 2023년에 수행된 KPOP-MS(Korea Precipitation Observation Program, International Collaborative Experiments for Mesoscale Convective Systems) 집중관측 기간에 수집된 자료를 활용하여, 2023년 8월 7일 발생한 CC의 발생 및 대규모화와 관련된 대류 메커니즘을 분석하였다.

사례 기간 동안 지면 가열에 의해 산악 지역 주변에서 발생한 다수의 CC는 태풍 키논의 영향으로 대체로 남서진하였으나, 17시 이후 서해안에서 발달한 CC는 정체하며 규모가 확대되었다. 새로운 CC가 서해안에서 생성되어 후면의 셀과 병합하며 강화되었고, 전면에서는 해풍에 인한 유입류가 관측되었다. 후면 유입류는 하강기류와 상호작용하여 상승하였고, 상층의 얼음 또는 싸락눈 입자가 유입류를 따라 유입되었다. 얼음 입자 성장에 따른 잠열 방출은 대류를 강화시켰다. 해안 지역의 대류가용에너지(CAPE)는 내륙에 비해 높아 대류 발달에 유리한 환경을 보였으며, 내륙에서는 태풍에 의해 공급된 고온 다습한 공기가 안정층을 따라 상승하며 CC가 생성되었다. 또한 내륙의 북동풍과 해안의 강한 북서풍이 해안선 부근에 강한 수렴대를 형성하여 CC 발달과 정체를 유도하였다. 본 연구는 KPOP-MS 집중관측 사례를 통해 CC의 발생 및 대규모화에 작용한 메커니즘을 규명하였으며, 해안 지역에서 발생하는 CC 예보의 정확도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

Keywords: 대류성 셀, 대규모화, 집중관측

※ 이 연구는 기상청 국립기상과학원 「수도권 위험기상 입체관측 및 예보활용 기술 개발」(KMA2018-00125)의 지원으로 수행되었습니다. The authors would like to thank the participants of the field campaign “Korea Precipitation Observation Program: international collaborative experiments for Mesoscale convective system in Seoul metropolitan area” (KPOP-MS), hosted by the Korea Meteorological Administration (KMA).