발간등록번호
11-1360000-100259-01

기상연구개발

우수성과 사례집



기상청
Korea Meteorological Administration

발간등록번호
11-1360000-100259-01



기상연구개발

우수성과 사례집

기상청
Korea Meteorological Administration



기상연구개발

우수성과 사례집

CONTENTS

CHAPTER 1
OUTSTANDING OUTCOMES

예보

AI로 6시간 앞의 비구름을 먼저 보다.
AI 초단기 강수예측모델 'NowAlpha(나우알파)' 개발·현업화 06

집중관측 기반 한반도 위험기상 입체진단 및 예측지원 기술 개발 08

폭염의 역학적 발생 기작 이해와 폭염 중기 확률예측시스템 개발 10

관측

다분야 수요자 맞춤형 레이더 기상정보 개발 및 제공 12

휴대용 기상관측장비 개선품 개발 14

세계 최초 전 지구 고해상도 라디오존데 관측자료를 활용한 대기 난류 분석 연구 16

기후

국가 탄소중립 및 기후변화 적응대책 이행지원을 위한 시나리오 개발 18

자료동화 및 기상모델을 이용한 하향식 온실가스 산출 시스템 개발 20

2000년대 이후 북태평양 냉각과 동아시아 한파의 연결 원인 규명 22

최근 유라시아 폭염 ·가뭄 발생 증가 원인 규명 24

융합

세계 최대규모 이중구조형 구름물리실험챔버 및 관측기술을 활용한
기상 ·기후연구 혁신플랫폼 기술개발 26

국가 강수부족 재해(산불, 가뭄 등) 완화를 위한 K-인공증우 구현 28

지진

맥동 기록을 활용한 시추공 지진계 센서 방향 정밀 결정 방법 개발 30

인공지능을 활용한 실시간 지진분석 기술 개발 32

태평양 맨틀 플룸의 양방향 흐름 세계 최초 규명 34

CHAPTER 2
EXCELLENT PROJECTS

수치예보 지원 및 활용 기술 개발(수치예보센터) 38
국민 안전을 위한 내일, 국민 체감형 정략적 예측정보 생산

기상재해 사전대비 중심의 시·공간 통합형수치예보기술 개발(수치예보센터) 40
1km 상세예측부터 30일 전망까지 하나의 한국형 체계로 통합

기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발(기후과학국) 42
국가 기후변화 감시·예측 정보 생산 및 활용 지원

기상위성 예보지원 및 융합서비스 기술개발(국가기상위성센터) 44
위성기반 조기탐지 및 예측 기술 확보와 다분야 융합활용 고품질 서비스 기술 개발

기상위성 운영 및 활용 기술 개발(국가기상위성센터) 46
위성영상 적시제공률 99.97% · 위험기상 최대 40분 선행탐지

CHAPTER 1



기상연구개발

우수성과 사례집

OUTSTANDING OUTCOMES

예보

AI로 6시간 앞의 비구름을 먼저 보다.
AI 초단기 강수예측모델 'NowAlpha(나우알파)' 개발·현업화 06

집중관측 기반 한반도 위험기상 입체진단 및 예측지원 기술 개발 08

폭염의 역학적 발생 기작 이해와 폭염 중기 확률예측시스템 개발 10

관측

다분야 수요자 맞춤형 레이더 기상정보 개발 및 제공 12

휴대용 기상관측장비 개선품 개발 14

세계 최초 전 지구 고해상도 라디오존데 관측자료를 활용한 대기 난류 분석 연구 16

기후

국가 탄소중립 및 기후변화 적응대책 이행지원을 위한 시나리오 개발 18

자료동화 및 기상모델을 이용한 하향식 온실가스 산출 시스템 개발 20

2000년대 이후 북태평양 냉각과 동아시아 한파의 연결 원인 규명 22

최근 유라시아 폭염 ·가뭄 발생 증가 원인 규명 24

융합

세계 최대규모 이중구조형 구름물리실험챔버 및 관측기술을 활용한
기상 ·기후연구 혁신플랫폼 기술개발 26

국가 강수부족 재해(산불, 가뭄 등) 완화를 위한 K-인공증우 구현 28

지진

맥동 기록을 활용한 시추공 지진계 센서 방향 정밀 결정 방법 개발 30

인공지능을 활용한 실시간 지진분석 기술 개발 32

태평양 맨틀 플룸의 양방향 흐름 세계 최초 규명 34

AI로 6시간 앞의 비구름을 먼저 보다.
AI 초단기 강수예측모델 'NowAlpha(나우알파)' 개발·현업화

독자 기술과 최신 AI 기술을 융합하여 6시간 강수예측자료 생산 및 예보업무 활용

연구배경 및 필요성

집중호우 대응과 대피 골든타임 확보를 위한 초단기예측 개선

- 시간당 50mm 이상 호우 발생 빈도가 1973~1982년 12.0일에서 2015~2024년 25.9일로 증가하는 등, 빈번한 집중호우에 대한 신속하고 정확한 예측 필요
- 기존 초단기 강수예측의 한계를 극복하여 국민의 생명·재산 보호와 방재 대응 및 대피 골든타임 확보 지원

기술내용

인공지능(AI)을 활용한 초단기 예보의 속도와 정확도 동시 향상

- **나우알파2024**: 생성형 AI와 양방향 트랜스포머를 결합하여 과거 레이더 영상의 강수 변화 패턴을 학습. 자료 간 관계와 시공간 변화 특성을 반영해 약 40초 만에 10분 간격의 미래 6시간 강수예측자료 생산
  - ('20~'23년) KAIST와 협력 시제품 개발 → ('24년) 정확도 개선·시험운영 → ('25.5~'26.9.) 현업 활용
- **나우알파2025**: 확산모델 기반 비디오 예측기법 적용으로 강수대의 단순 이동뿐 아니라 구조 변화를 반영하여 예측 후반부 최대강수 위치 재현력 향상과 강한 강수 예측정확도 개선
  - ('25.9~) 테스트베드 운영 → ('26.7~) 청내 시범운영 → ('26.9~) 현업화

우수성 및 차별성

강수예측자료 정확도 향상과 장시간 강수예측 성능 개선

- 기상청 초단기 강수 예측 가이던스의 2~5시간 구간 강수예측(체계적 강수)을 보완하여 예보관의 신속한 의사결정 지원
  - 나우알파2024 융합시: '25년 여름철 0.5mm 기준 성공임계지수 6.9% 향상
  - 나우알파2025 융합시: '26년 여름철 강수 사례 0.5mm 기준 성공임계지수 10.1% 향상
    ※ 기간: '26.8.28.~9.1.
- 생성형 AI·양방향 트랜스포머와 확산모델 기반 비디오 예측으로 새로운 기술적 방향 제시. 국내 레이더 자료와 위험기상 특성 및 예보환경에 최적화된 기술 확보

세부사업명

- 기상업무지원기술개발연구

대표성과

- **논문** 5편 게재(SCI(E): 3편)
- **수상** 2025년 책임운영기관 서비스혁신 공유대회 우수상 수상('25.12.)
  - 40초 안에 미래를 본다. AI 초단기 강수 예측모델 '나우알파'
- **기술이전** 3건(㈜에스이랩, ㈜지솔루션, 컨트롤에프㈜)
- **국제협력** 미국 AI 반도체기업 NVIDIA와 협력회의 등 5건

성공요인

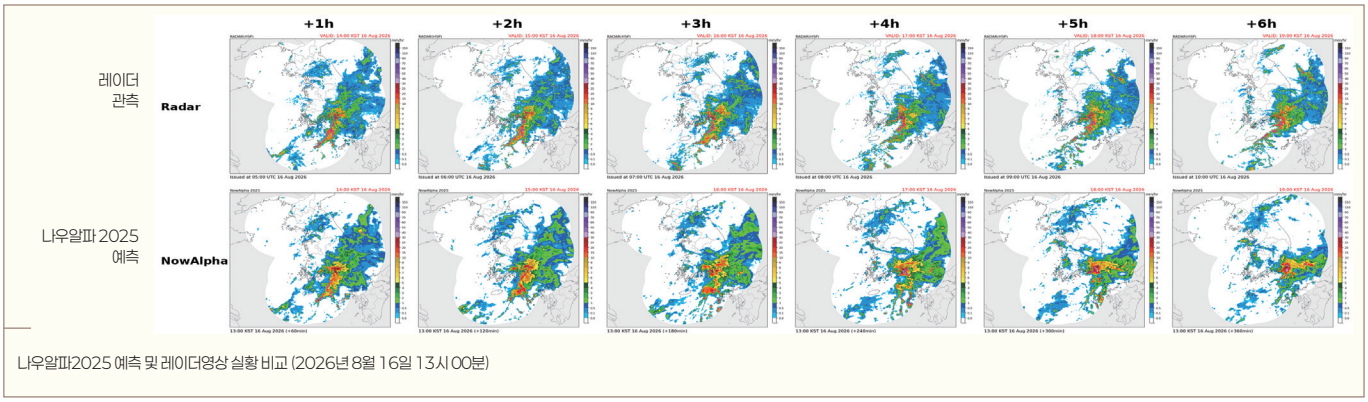
AI 및 기상 전문가 협업과 예보현장 검증 및 개선의 연계

- KAIST AI 연구진과 테스트베드를 운영하여 최신 AI 기술을 독자 모델에 신속히 적용하고 초단기 강수예측의 한계 보완
- 예보업무 시범운영과 예보관의 검증·환류를 통해 문제점을 파악하고, 후속 모델 개발·보완을 위한 연구·현업 연계 체계 구축
- Microsoft(2024.1.30.)·NVIDIA(2024.1.31.) 연구협력회의와 WMO AI 초단기예측 프로젝트 AINPP 워크숍을 통해 성과 공유 및 국제 기술교류 확대

성과의 활용도 및 파급효과

신속한 예보 의사결정과 집중호우 사전대응 및 기술자립 지원

- **현업 활용**: 10분 간격으로 + 6시간까지 레이더 관측과 동일한 형태의 강수 예측 정보로 예보관 판단 지원, 기상청 초단기강수예측 가이던스의 2~5시간 구간 융합으로 집중호우 대비와 대피 골든타임 확보에 기여
- **과학기술적 효과**: 국내 관측자료와 예보환경에 맞춘 독자 AI 모델로 개발 및 현업운영 노하우 마련, 확산 모델 도입 및 활용 기술 확보, 위험기상 특성과 현업 수요에 따라 유연한 보완·자료 생산 가능
- **경제·사회적 효과**: 강수예측정보의 신속성·정확도 향상으로 국민과 방재기관의 사전대비를 지원하고 인명·재산 피해 예방에 기여



나우알파2025 예측 및 레이더영상 실황 비교 (2026년 8월 16일 13시 00분)

집중관측 기반 한반도 위험기상 입체진단 및 예측지원 기술 개발

위성·레이더·지상관측을 통합해 관측 설계부터 재분석·예측지원까지 연결

연구배경 및 필요성

위험기상의 발생·발달 과정을 입체적으로 진단할 수 있는 기술 개발 필요

- 호우·대설·강풍 피해가 반복되지만 기존 현업관측만으로는 발생·발달 과정을 입체적으로 파악하는 데 한계. 목표관측·현업관측·수치모델의 통합 활용 필요
- 정지궤도위성(GEO)은 관측 간격이 짧고 저궤도위성(LEO)은 상대적으로 정확도가 높아 상호 보완 필요. 기존 우량계 중심 강수 보정은 관측 밀도·대표성에 제약
- 채널·시각별로 분산된 위성 복사휘도 자료의 밝기온도 변환·위경도 부여·품질검사에 시간 소요. 예측지원에 활용할 고해상도 분석·재분석 자료의 자동 처리·공유 체계 필요

기술내용

과학적 목표관측 설계와 다중자료 통합·동화·표출 체계

- **관측 설계**: 과거 위험기상 사례 통계와 가상 관측 영향 평가(OSSE)로 호우·대설·강풍별 관측 시기·지역·장비·전략을 정량적으로 설계
- **다중위성 강수합성**: 레이더 검증 기반 정확도 가중치 적용, GEO·LEO의 장점 활용, 동적결합을 통한 동아시아 2km 해상도 강수정보 생산(90분 지연 early mode, 270분 지연 late mode)
- **통합 처리**: 레윈존데·레이더·지상관측 자료를 표준화하여 품질관리·통합. 위성 복사휘도 자료의 밝기온도 변환, 위경도 부여, 품질관리와 단일 파일 통합을 자동화
- **분석·재분석**: 통합 관측과 수치모델을 결합해 대기구조·수증기 수송·바람장 등 발생환경 분석. 고해상도 모델에 다중규모 관측자료를 동화하여 관측과 유사한 위험기상 재분석장 생산
- **자료 활용**: 분석·재분석 자료를 검색·시각화하는 공유·표출 시스템 구축. 자료 통합관리, 압축·전송, 접근·배포를 연결해 연구자와 현업 예보자의 활용 지원

우수성 및 차별성

정량적 관측 설계와 위성자료의 상호 보완·자동화

- 경험 중심 관측 설계에서 과거 사례 통계·OSSE 기반 설계로 발전. 현상별 관측 시기·지역·전략을 과학적 근거로 선정
- 레이더 기반 정확도 가중치와 동적 병합으로 정지궤도·저궤도 위성의 특성을 보완. 2km급 강수정보 생산
- 사용자 수작업에 의존하던 위성 전처리의 변환·품질관리·파일 통합을 자동화하고, 관측→분석·재분석→동화→표출을 하나의 활용 체계로 연결

세부사업명
- 위험기상 선제대응 기술개발

대표성과
- **논문** 1건
- **특허 출원** 1건

성공요인

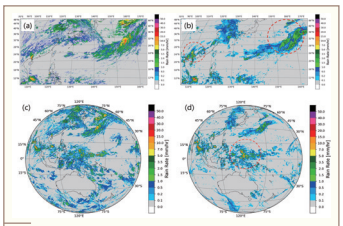
관측부터 자료 활용까지의 연계와 실측 기반 정량 검증

- 목표관측 설계, 자료동화, 고해상도 재분석장 생산과 공유·표출을 유기적으로 연계하여 연구성과의 활용 흐름 구현
- AWS 1시간 강수량 등 실측 자료를 기준으로 재분석장의 평균편차·표준편차·탐지확률(POD)을 산출하여 성능을 객관적으로 검증
- 레이더·위성·지상관측 등 다종 자료를 다루는 산학 연구진의 긴밀한 공동연구로 기술 역량을 결합하여 단기간에 국내 최초 기술 확보

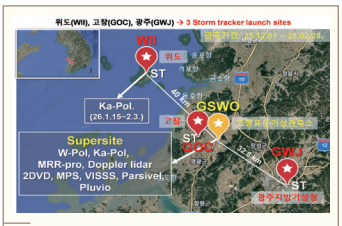
성과의 활용도 및 파급효과

예측 초기장 개선과 위험기상 선제대응 지원

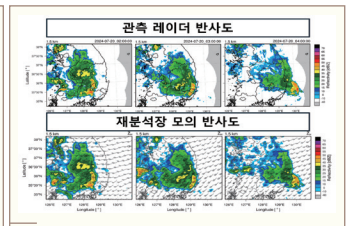
- **과학기술적 효과**: 국가 위험기상 예측·분석 역량을 강화하고 수치모델 초기장 개선·예보 기술 고도화 지원. 관측자료와 고해상도 재분석을 활용한 발생 기작 연구 기반 확대
- **후속 연구**: 자료 공유·표출 체계를 후속 연구개발과 AI 기반 기상자료 분석으로 확장 가능. 다양한 관측자료와 재분석 자료의 접근·활용 지원
- **산업 활용**: 농업·항공·건설·보험·에너지 분야의 맞춤형 기상서비스에 활용 가능. 소프트웨어·알고리즘의 공공기관·민간 기상기업 기술이전 가능성 제시
- **사회적 효과**: 위험기상 발생·발달 과정을 정밀 분석해 재난 피해 저감을 위한 선제대응 체계와 국민 안전 확보에 기여 기대



기상 레이더를 이용하여 보정된 다중위성 기반 강수합성장 산출물 예시



서해 대설 집중관측 위한 관측 설계도



위험기상 발생 및 발달 특성을 모의한 고해상도 재분석장 설계 및 생산



(재)분석자료 관리 및 공유 시스템 구축
(자료 통합 관리, 자료 압축 및 전송, 자료 접근 및 배포 등)

폭염의 역학적 발생 기작 이해와 폭염 중기 확률예측시스템 개발

폭염 발생 기작 분석에서 확률예측·고해상도 상세화, 현장 정보 제공까지 연결

연구배경 및 필요성

강해지는 폭염에 대비하는 신뢰도 높은 조기 예측 필요

- 폭염은 국민 건강, 농업·산업 생산성, 전력 수요와 재난 대응 비용에 영향을 주는 복합 기후재난. 온열질환과 사회·경제적 피해를 줄이기 위한 선제 대응 필요
- 기후변화에 따른 폭염 빈도·강도·지속기간 증가에 대응해 극심한 여름 고온의 발생 원인을 밝히고, 단기·중기 및 도시 규모의 예측정보를 제공하는 연구 추진

기술내용

폭염의 물리적 발생 기작과 다중 규모 예측 기술 통합

- **지면–대기 결합**: 토양 수분 상태가 폭염 증가에 미치는 비선형 효과와 토양 수분–기온 결합 메커니즘 규명. 2018년 한국 기록적 폭염에서 여름철 대기 패턴의 상호작용·중첩이 극한 고온을 유발하는 기작 정량 분석
- **인공지능 기작 분석**: 설명가능한 인공지능(XAI)과 기계학습으로 폭염 예측에 중요한 원격상관 요인을 식별하고 영향을 분석. 물리 기후모델 대비 우수한 예측 성능 확보. 관련 기작 연구 3편 국제 SCIE 학술지 게재
- **중기 확률예측**: 기상청 전 지구 앙상블 예측자료를 활용한 폭염 중기예측시스템 구축. 한국·일본을 포함한 동아시아에서 최대 10일까지 실질 예측 가능 범위 확장
- **고해상도·단기 예측**: 요소분해 전략과 U-Net을 결합한 DeU-Net으로 1.5km 급 공간 상세화 및 최대 12일 리드타임 예측지도 제작. LDAPS·단순 기계학습 상세화 대비 복잡 지형의 기온 패턴을 더 명확하게 모의하고 평균 오차 감소. LENS·MOS로 단기 예측 개선
- **도시 열환경**: 지역수치예보모델–UFS 접합 모델에 연직 비균등 격자를 적용해 계산량 분산·병렬화 효율 개선 방안 제시. 유동인구를 고려한 열위험지수 지도 DB와 위성자료 기반 상세화 추진

우수성 및 차별성

과학적 기작에 기반한 확률예측과 고해상도 상세화

- 폭염 분석에서 지면–대기 상호작용과 대기 패턴 중첩의 중요성을 규명하고, 이를 통합한 기초 과학 연구로 국내 원천기술 확보
- 확률 기반 접근으로 중기 폭염 예측을 구현하고 동아시아 최대 10일 예측 가능 범위 제시. 1.5km 상세화 지도는 최대 12일 리드타임으로 제작하여 예측정보 제공 범위 확대
- 기작 연구·중기예측·도시 열환경 모의를 연결하고, 유관기관 예보자료 제공과 폭염백서 발간으로 정책·과학·대국민 정보 전달 연계

세부사업명

- 기상·지진 See-At기술개발연구

대표성과

- **SCI 논문** 47건
- **특허 등록** 2건
- **기술이전** 10건
- **소프트웨어 등록** 9건
- **인력양성** 37명(석사 18명, 박사 19명)
- **수상** 과학기술포장 수상(2024.4.22.)

성공요인

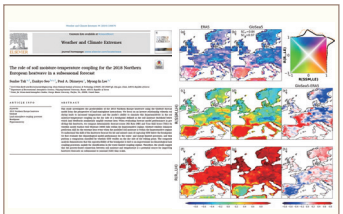
비선형 물리 인자 규명과 기후과학·수치예보 융합

- 토양 수분 결합 기작의 민감한 비선형 구간(hypersensitive regime)을 밝혀 예측 불확실성을 설명하는 핵심 물리 인자 제시
- 극한 폭염을 유발하는 대기 패턴 지수를 통합 분석하고, XAI·기계학습으로 원격상관 영향과 예측 가능성 검토
- 앙상블 확률예측과 DeU-Net 상세화 등 기술을 결합하고, 기상청·국립기상과학원과 지속적인 자료 제공을 통해 연구성과 활용 기반 확대

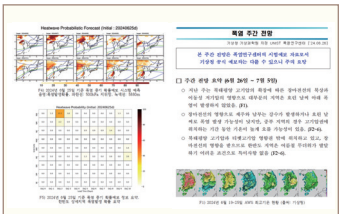
성과의 활용도 및 파급효과

보건·농업·전력·도시 분야의 사전 대응 지원

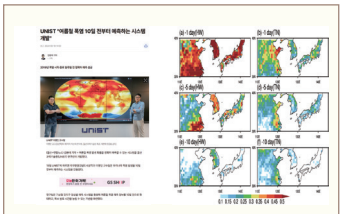
- **경제적 효과**: 전력 수급 관리, 야외 작업 안전 조치와 농작물 관리에 조기 예측정보 활용 가능. 피해 예방·사전 대응 비용 감소와 온열질환 관련 보건의료 부담 완화 기대
- **산업 융합**: 보건·농업·도시계획·전력 인프라에 기후예측기술을 접목해 분야별 의사결정과 융합형 기후서비스 발전 지원
- **사회적 효과**: 폭염백서로 과학 원리·정책·피해·미래 전망을 체계적으로 전달하여 국민의 기후위험 인식과 정보 접근성 향상
- **정책 활용**: 폭염 피해를 사전에 예측·대비하는 기반을 제공하고, 과학에 근거한 재난 대응과 기후위기 적응 정책 수립 지원



국제 SCIE급 학술지 폭염의 지면-대기 상호작용 중요성 관련 논문 게재



폭염 중기예측시스템 기반 폭염 계절예보, 여름철 주간전망 생산 및 유관기관 제공



최대 10일 폭염 중기예측시스템 개발 관련 SCIE급 논문 게재



폭염백서를 통한 폭염 기작 및 관련 연구, 피해 통계 등을 국민들에게 공유

다분야 수요자 맞춤형 레이더 기상정보 개발 및 제공

고품질 3차원 레이더 분석으로 예보·항공·도로 현장의 실시간 판단 지원

연구배경 및 필요성

극한 기상재해에 즉각 대응하는 현장 중심 레이더 정보 필요

- 기후위기 심화에 따른 극한호우 등 재해에 대응하기 위해 예보·방재 현장에서 즉시 활용할 수 있는 실효성 높은 레이더 통합분석 정보 수요 증가
- 2022년 8월 서울 동작구 시간당 강수량 141.5mm, 같은 해 9월 태풍 힌남노 영향으로 포항 일강수량 342.4mm 기록. 고해상도 실황 감시와 신속한 대응 지원 필요
- 수요자와의 지속적인 소통으로 분야별 맞춤형 콘텐츠를 개발하고, 실시간 제공·연계 체계를 갖추어 예보·항공·도로 방재업무 지원

기술내용

레이더 품질관리 및 3차원 합성장 기반 분야별 맞춤정보 제공

- **공통 기반**: 품질관리와 3차원 합성장 기술을 고도화하여 정확한 고해상도 자료 확보. 풍력발전·선박·지형 등 비정형에코 제거를 위한 독자 품질관리 기술 개발
- **예보·CBS 지원**: 레이더 호우감시와 반응형 강수량 감시시스템 구축. 지상관측장비 장애·공백 지역에 레이더 추정강수량을 제공하여 호우긴급재난문자 발송 판단 지원
- **위험기상 분석**: 3차원 합성장·연직단면으로 위험기상의 발달·소멸 전주기 감시. 수상체 분류, 연직적분 액체수함량(VIL), 에코정상고도(ETOP), 낙뢰·우박가능역 등 탐지 성능 개선
- **항공 안전**: 한국형 통합 공항·공역 서비스 시스템으로 강수·눈비·우박·바람장·낙뢰 정보 제공. 착빙 가능역의 주의·경계 등급, 최저·최고 고도와 연직분포 산출
- **도로 안전**: 수상체와 3차원 대기조건을 융합하여 어는비 가능역 산출. 예측강수역을 반영해 도로살얼음 위험을 조기 감지하고 전국 고속도로 도로위험 기상정보 시스템과 연동(2024.12. 시험 → 2025.12. 정규)

우수성 및 차별성

2차원 관측정보에서 3차원 위험기상 영향정보로 확장

- 기존 2차원 강수 표출에서 현장 대응에 필요한 3차원 입체 위험기상 정보로 전환. 고품질 실황과 분야별 위험요소를 결합하여 의사결정의 실효성 강화
- 예보관뿐 아니라 공항 운항 통제와 도로 결빙 관리 등 유관기관 실무자가 즉시 활용할 전용 콘텐츠를 적시에 제공하여 다분야 통합 서비스 구현
- 관측 공백 지역의 극한호우를 감시해 CBS 발송을 지원하고, 항공기 착빙·우박 및 도로살얼음 위험 정보를 제공하여 국민안전과 재해 대응 지원

세부사업명

- 국가레이더 통합 활용기술 개발

대표성과

- **SCI 논문** 1건
- **특허등록** 국내 5건, 국외 3건
- **범부처 기술이전** 위험기상, 강수 실황 예측 등 핵심기술 제공 16건
- **국제 기술 교류** 국제 기상·강우레이더 콘퍼런스 등 16건

성공요인

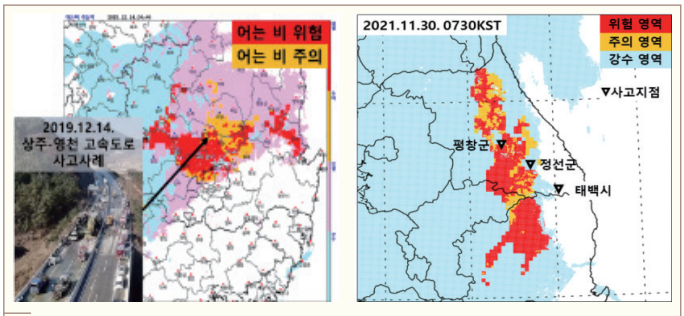
수요자 소통과 범부처 협업 및 검증을 통한 현업 연계

- 예보관 의견수렴과 예보·항공·도로 분야 수요자와의 지속적인 소통으로 필요한 콘텐츠를 발굴하고 기술 개발·제공에 반영
- 레이더정보서비스 현업화 심의위원회 검증을 마친 기술 73건을 예보 현업에 신속히 연계하여 현장 의사결정과 위험기상 대응 역량 강화
- 유관기관과 기술 공유·정보 연계를 통해 개발성과의 실무 활용을 확대하고, 국제 기상·강우레이더 콘퍼런스와 일본 NIED·대만 NCU 공동워크숍 등 기술교류 지속

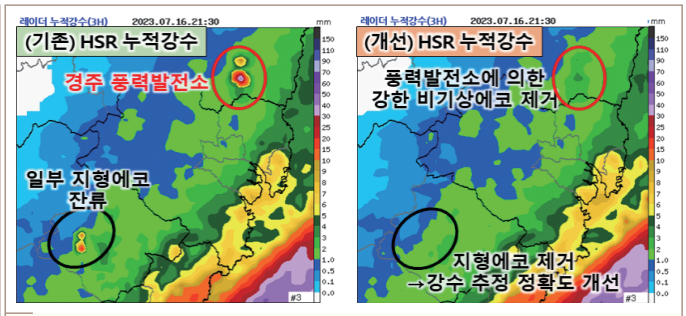
성과의 활용도 및 파급효과

재해 피해저감과 기술 권리화 및 연구성과 확산

- **과학기술적 효과**: Remote Sensing 논문 게재와 국내외 학회 발표로 성과 확산 및 협력 네트워크 구축. 핵심기술의 국내외 특허와 미국·유럽·일본 삼극특허 추진
- **경제적 효과**: 범부처 기술 공유와 맞춤형 정보 제공에 따른 기상재해 피해저감 등 2021~2029년 9년간 약 196억원 편익 추산(사업 경제성 분석 연구, 2026)
- **사회적 효과**: 극한호우 CBS 발송, 항공기 안전운항 및 도로살얼음 선제 대응을 지원하여 국민안전 제고와 생활 편익 확대
- 항공지연 약 180억원/년(2010년 자료), 도로살얼음 사고 약 120억원/년(2024년 자료)의 피해가 제시된 분야에 정밀 위험정보를 제공하여 피해예방 지원



레이더 기반 어는 비 가능역 탐지 결과



레이더 품질관리 기술 결과 (풍력단지 비기상에코 제거 기술 예시)

휴대용 기상관측장비 개선품 개발

75kg에서 12kg으로 경량화하고 설치시간 20분에서 2분으로 단축

연구배경 및 필요성

산불 등 접근이 어려운 재난 현장의 신속한 기상 지원

- 대형 산불에 따른 인명·재산 피해가 증가하면서 재난 현장에서 신속하게 기상정보를 확보·제공할 수 있는 관측 지원 필요
- 기상관측차량은 차도 밖의 좁은 길로 진입하기 어렵고, 기존 이동형 장비는 무거운 중량과 제한적인 실시간 자료 전송으로 신속한 현장 지원에 한계
- 휴대가 간편하고 설치가 쉬우며 실시간 자료 전송이 가능한 신규 기상관측장비 개발 필요

기술내용

소형화와 자동 진북 보정으로 현장 설치 및 활용성 개선

- 장비 무게를 75kg에서 12kg으로 63kg 감량하고 부피를 약 1/6로 축소. 센서·지지대는 백팩(42×20×57cm)에, 데이터로거는 소형 함에 수납하여 현장 운반 편의성 확보
- GPS 센서 2개를 활용한 자동 진북 기준 풍향 보정 기술을 기상관측장비에 세계 최초 적용. 임의의 방향과 기울기에서도 보정된 풍향을 산출하여 신속 설치 지원
- 통합 단일 케이블 1개 연결로 설치시간 20분에서 2분으로 단축. 전문가 2인이 필요했던 설치를 비전문가 1인이 수행할 수 있도록 개선
- 관측·자료처리 보드 등 하드웨어를 일원화하여 전력 소모 저감. 최대 24시간 연속 운용이 가능하며 배터리 교체를 통한 현장 운용 지원

우수성 및 차별성

특허 기술과 경량 설계로 관측장비의 현장 이동성 확보

- GPS 안테나 2개를 활용한 자동 진북 기준 풍향 보정 기능을 탑재하여 별도 초깃값 설정이나 수동 방향 보정 없이 사용 가능
- 기존 대형 차량 1대당 장비 1대 적재에서 일반 승용차에 최소 3대 적재 가능한 수준으로 소형화. 재난 현장의 운반·설치 접근성 향상
- 무게 63kg 감량, 설치시간 18분 단축으로 대형 장비의 한계를 개선하고 접근이 어려운 현장에서도 신속한 설치·관측 지원
- 연속 운용시간은 기존 72시간에서 개선품 최대 24시간으로 변경되었으며, 기존 장비와 달리 배터리 교체 가능

세부사업명

- 기상업무지원기술개발연구

- **특허 기술이전** 1건
  - 이전기술명: 휴대용 기상관측장치
  - 대상: (주)쿼터니언
  - 계약금액(기술료징수액): 4백만원(매출액의 3%)
- **수상이력** 1건
  - 시상기관 및 품격: 행정안전부/장관상
  - 수상자명 및 수상연월: 국립기상과학원/2024.11.
  - 시상내용: 책임운영기관 행안부 주관 서비스 혁신 공유대회 우수상

성공요인

위성항법 기술과 장비 통합 설계 및 현장 성능 검증

- 기존 나침반 기반 수동 조정이나 자북·진북 편각 보정 방식과 달리, GPS 센서 2개의 위치정보 차이와 센서 간 거리로 장비와 진북 사이의 편각을 산출하고 풍향값 보정
- 센서·지지대·데이터로거의 소형화, 하드웨어 일원화, 단일 케이블 연결로 운반부터 설치·운용까지 현장 사용 절차 간소화
- 형식승인 센서 도입과 강원지방기상청 비교관측으로 성능을 검증하고 방수·방진 인증으로 재난 현장 사용 신뢰성 확보

성과의 활용도 및 파급효과

실시간 기상정보로 재난 대응 지원 및 민간 활용 확대

- **경제적 효과**: 전용실시권 기술이전으로 민간업체 협력 및 상용화 기반 조성. 경량화·자동 진북 보정 기술로 관측장비 산업의 경쟁력과 기술 자립도 향상에 기여
- **산업 간 융합**: 기상·통신·GPS 기술을 결합하여 산림·재난 방재를 비롯한 농업·환경 모니터링으로 확장 가능. 공동개발·창업 및 측정·센서 분야 인력양성 기반 지원
- **사회적 효과**: 실시간 기상자료 제공으로 산불 등 재난 대응시간 단축과 피해 최소화에 기여. 농업·산림·해양 등 공공서비스 분야의 관측 지원 및 국민 안전 강화



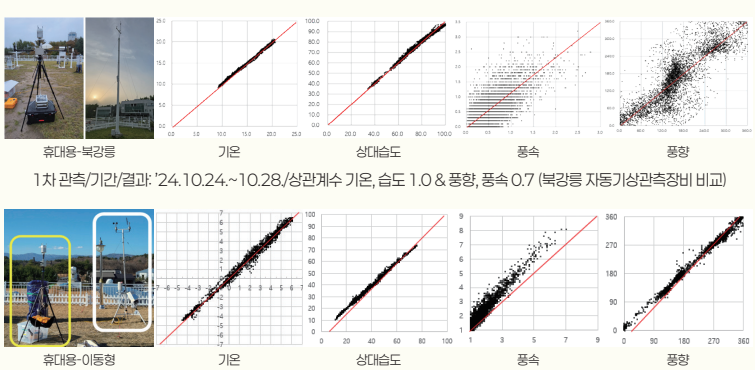
휴대용 기상관측장비



방수방진(IP55) 인증서('24.10.)



책임운영기관 서비스 혁신 공유대회 우수상('24.11.)



1차 관측/기간/결과: '24.10.24.~10.28./상관계수 기온, 습도 1.0 & 풍향, 풍속 0.7 (북강릉 자동기상관측장비 비교)

2차 관측/기간/결과: '24.12.17~12.20./상관계수 기온, 습도, 기압 1.0 & 풍향, 풍속 0.9 (기존 이동형 장비 비교)

성능 검증을 위한 형식승인 센서 도입 및 비교관측 수행

세계 최초 전 지구 고해상도 라디오존데 관측자료를 활용한 대기 난류 분석 연구

정례 기상관측 풍선 자료로 자유대기 난류의 전 지구·고고도 분포 정량 분석

연구배경 및 필요성

항공 안전과 대기 물리 연구에 필요한 전 지구 난류 관측 기반 확보

- 대기 난류는 미량 기체·수증기의 수직 혼합과 열·운동량 확산에 핵심적으로 작용하며 항공기 운항·승객 안전에도 직접적인 영향. 고도·지역·계절별 분포 특성의 정량적 이해 필요
- 기존 항공기 관측은 주요 항로·특정 고도에, 레이더 관측은 설치 지역에 제한. 일부 국가·지역 중심 라디오존데 연구를 넘어 전 지구 자유대기 난류를 분석할 관측자료 기반 필요
- ECMWF가 제공하는 현업 고해상도 라디오존데 관측자료(HVRRD)를 활용해 추가 관측 비용 없이 정례 자료를 난류 분석에 적용하는 방안 제시

기술내용

6년 간 332개 관측소 947,319개 프로파일의 고해상도 분석

- **자료 범위**: 2017년 10월~2023년 9월 6년간 전 세계 332개 관측소의 HVRRD 프로파일 947,319개 수집. 매일 2회 수행되는 현업 관측의 연직 약 5~10m 해상도 자료 활용
- **분석 방법**: 온도 등 연직 관측자료를 바탕으로 난류를 도출하는 Thorpe 방법 적용. 난류 에너지 소산률(ε)과 유효 난류 에너지 소산률(EE)을 정량적으로 산출
- **분포 분석**: 대류권·성층권과 북반구·남반구를 구분하여 난류 강도 분포를 분석. 고도별·계절별·지역별 특성과 대류권계면 기준 연직 구조를 함께 평가
- **고고도 확장**: 상업 항공기 접근이 어려운 양 반구 고위도와 고도 18~30km까지 난류 정보 확보. 5.4~18km 및 18~30km 층의 전체·중강도 이상 난류 발생 횟수 분포 도출

우수성 및 차별성

정례 관측의 정밀도와 전 지구 분석 범위 결합

- 항공기·레이더의 공간·고도 제약과 지역 단위 연구의 한계를 보완. 기존 전 지구 현업 관측자료로 대류권부터 성층권까지 통합 분석하는 연구 체계 구현
- 연직 5~10m 고해상도 자료와 널리 활용되는 Thorpe 방법으로 난류 강도를 정량화. 계층·지역·계절별 차이와 난류의 연직 구조를 상세하게 평가
- 고위도 및 18~30km 고고도 관측 정보를 확보하여 미래 고고도 항공 운영과 난류 예측시스템 개발·검증을 위한 기초자료 제공

세부사업명

- 차세대 항공교통 지원 항공기상 기술개발

대표성과

- **논문** 1건(Ko, Chun, Geller, and Ingleby, 2024, BAMS, https://doi.org/10.1175/BAMS-D-23-0193.1)
- **수상** 2025년 한국기상학회 우수학위논문상
- **국제협력** 미국 NCAR 및 ECMWF 연구진과 국제공동연구 수행
  - 고해상도 라디오존데와 항공기 관측자료를 활용한 전지구 대기난류 특성 분석 및 예측 관련

성공요인

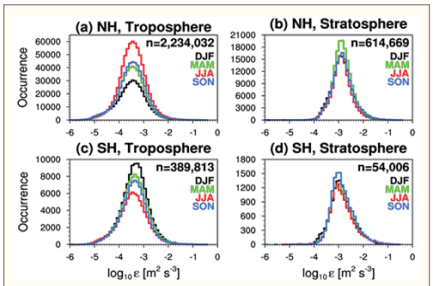
다년간 연구 역량과 한국·미국·유럽의 국제 협력

- Thorpe 방법과 미국 HVRRD를 활용한 난류 연구를 다년간 수행한 연구진의 자료 처리·분석 경험과 과학적 역량 축적
- 대기 중력파·난류 전문가 Marvin A. Geller 교수(Stony Brook University)와 고해상도 라디오존데 처리 전문가 Bruce Ingleby(ECMWF)가 공동저자로 참여
- 미국 NCAR·ECMWF 연구진과 라디오존데·항공기 관측자료 기반 전 지구 난류 특성 분석 및 예측 관련 국제공동연구 수행

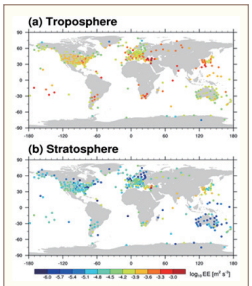
성과의 활용도 및 파급효과

항공 난류 예측의 검증 기반과 다분야 대기 연구 지원

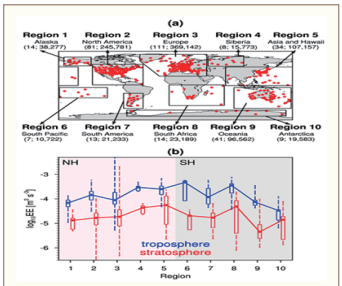
- **과학기술적 효과**: 전 지구 난류 데이터베이스를 항공 난류·위험기상 예측시스템의 검증·평가에 활용 가능. 고도 30km까지의 정보로 성층권 연구와 고고도 항공 기술 개발 지원
- **항공 활용**: 난류 분포·강도 정보를 운항계획과 예측기술 개선에 활용하여 승객 안전·운항 효율 향상 기반 마련. 연료 소모·운항 지연 감소 등 경제적 편익 기대
- **다분야 확산**: 대기 오염물질 확산, 기후 모델링과 미량 기체 혼합 연구에 응용 가능. 공공 기상자료 재활용의 가치를 제시하고 관측 인프라 활용·국제 협력 확대 지원



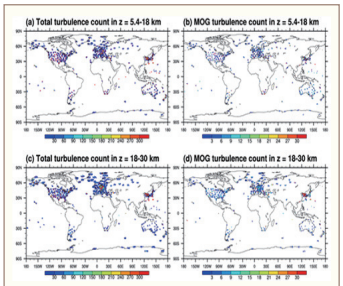
(a) 북반구 대류권, (b) 북반구 성층권,
(c) 남반구 대류권, (d) 남반구 성층권에서의 난류 에너지 소산률(log10ε)의 히스토그램. 각 색깔은 계절별 결과를 나타내며, "n"은 각 영역에서의 총 발생 개수를 의미함.



(a) 대류권과 (b) 성층권에서 각 관측소별 유효 난류 에너지 소산률($\log_{10}$EE)의 전지구 분포.



지역별로 구분된 라디오존데 관측소 분포와 각 지역 내 관측소 수 및 프로파일 수,
(b) 대류권(파란색)과 성층권(빨간색)에서 지역별 유효 난류 에너지 소산률(log10EE)의 박스플롯.



고해상도 라디오존데 관측자료로부터 도출된
(a, b) 고도 5.4–18 km 및 (c, d) 고도 18–30 km에서의 (a, c) 전체 난류 발생 횟수와
(b, d) 중강도 이상의 난류 발생 횟수 분포.

국가 탄소중립 및 기후변화 적응대책 이행지원을 위한 시나리오 개발

전 지구부터 남한 500m까지 국가표준 전망정보 생산 및 정책 이행 지원

연구배경 및 필요성

복합재난 대응과 기후정책 이행을 위한 과학적 전망정보 확보

- 호우·폭염·대형산불·장기가뭄 등 기후위기 심화에 대응하고, 기후적응·탄소중립 정책 수립과 이행을 뒷받침할 미래 기후변화 전망정보 필요
- 온실가스·에어로졸 등 인위적 요인을 반영하고, IPCC 제6~7차 평가 주기의 국제표준 시나리오 규격에 부합하는 국가표준 정보 생산 필요

기술내용

독자 지구시스템 기후모델과 일관된 시나리오 산출체계 구축

- 기상청 독자 모델 K-ACE·K-ACE2와 한·영 공동 모델 UKESM1을 개발하여 국제적 수준의 전지구 기후변화시나리오 생산 및 IPCC 평가보고서의 과학적 근거 제공
- 전지구 → 동아시아 → 남한상세 시나리오로 이어지는 산출체계 구축. 고해상화 기술로 남한상세 해상도를 1km에서 500m로 개선하여 지역맞춤형 전망 및 영향정보 생산
- 태양·온실가스·지면·화산·화학 및 에어로졸·해수면온도 및 해빙·질소침적 등 7개 범주, 57개 기후강제력 산출체계 구축
- 국가 온실가스 감축목표(NDC)를 적용한 전지구 미래전망자료 생산으로 탄소중립 이행경로에 따른 기후변화 완화 정책효과 분석

우수성 및 차별성

국내 유일의 전지구부터 남한상세까지 연계한 전망정보 생산

- 대기·에어로졸·화학·해양·해빙·지면 과정을 포함하는 자체 모델을 기반으로 CMIP5~7 국제표준 실험에 참여하여 국제 기후변화 연구와 IPCC 평가보고서에 기여
- 동아시아 지역기후프로젝트 CORDEX-EA를 주도하고 데이터센터 운영. 한·중·일 연구협력과 지역 시나리오 공동 활용 기반 확보
- SSP 기반 시나리오 10종(자체 5종, 공동 5종)의 국가 인증 획득. 500m 격자 상세 전망정보로 정부·지자체·공공기관의 적응대책 수립 지원
- NDC 이행에 따른 CO_2 농도·기온 및 폭염 발생빈도 감소 전망 제시. 2100년 기온 0.15℃ 감소, GDP 손실 1.7~4.5% 감소

세부사업명

- 기상업무지원기술개발연구

대표성과

- 기후변화 시나리오 전망보고서 3편 발간
- **논문** 24편(SCI(E) 9편, 비SCI(E) 15편)
- **특허등록** 9건(국제 6건, 국내 3건)
- **기후변화시나리오 국가 인증** 주관 5건, 공동 5건
- **보도자료** 12건, 방송 25편, 기고문 10편
- **주요수상**
  - 한국기상학회 묵산기술상(2023)
  - 과학기술우수논문상 2건(2023·2024)
  - 한국기상학회 우수논문발표상 1건(2023)
  - 한국기후변화학회 논문·발표 관련 수상 6건(2022~2026)
  - 탄소중립 교육용 보드게임 : 스위스 국제발명품전시회 은상, 대한민국 발명특허대전 동상(2022)

성공요인

연구협력과 국제표준 실험 및 대규모 계산 기반 확보

- 한·영 기상청 공동연구와 공주대·연세대·UNIST·전북대·포항공대·한양대 등 국내 학계 협력으로 선진 모델링 기술 확보 및 독자 모델 개발
- CMIP 국제표준실험 참여를 통해 시나리오 생산규격과 품질·성능 확보. 국가 인증으로 정책 근거자료의 신뢰성 강화
- 국가기상슈퍼컴퓨터 계산노드와 80PB 규모 저장공간을 확보하여 다중 모델 앙상블 기반 장기 전망자료의 체계적 생산·관리

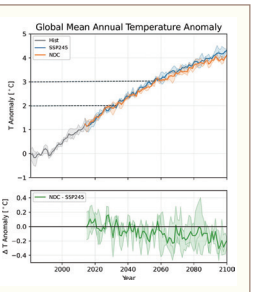
성과의 활용도 및 파급효과

국가정책과 지역 적응대책 및 기후변화영향평가 지원

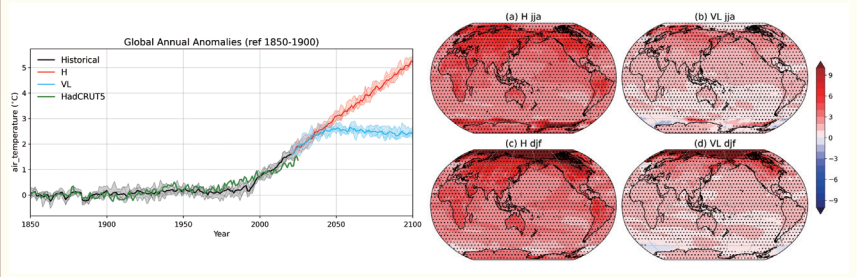
- **정책 활용**: 제3차 국가기후변화 적응대책(2021~2025),제3차(2021~2025)·제4차(2026~2030) 기후위기적응대책, 기후업무발전 기본계획(2024~2027), 제11차·제12차 전력수급기본계획 등에 활용
- 국가·지자체·공공기관의 기후위기 적응대책과 기후변화영향평가에서 대상지역의 기후현황 및 전망 분석을 위한 핵심 정보 제공

  ※ **기후변화영향평가서 검토 건수**: 2023년 31건 → 2024년 110건 → 2025년 222건 → 2026년 10월 기준 247건

  ※ 읍·면·동 단위 기후요소 7종, 극한기후지수 33종, 7개 부문 영향정보 33종 제공. 2025년 시나리오 다운로드 109,071건
- CMIP6 전지구 모델 K-ACE·UKESM1의 앙상블 시나리오 자료를 활용하여, 농업 분야 한반도 상세화 연구 수행 지원(국가농림기상센터·국립원예특작과학원, 국립농업과학원)
- 극한 시간강수 일변동성·인위적 기후변화 영향진단 등 재난 대응 및 원인규명 연구 확대. 송전설비 위험성 평가·원전안전 규제와 보건·농업·수문·생태계 분야 적응 연구에 활용



NDC 및 SSP2-4.5 기반 전지구 평균기온 전망과 차이



캐롤라인 플룸을 보여주는 S파 속도구조와 이방성 구조의 수직단면도

자료동화 및 기상모델을 이용한 하향식 온실가스 산출 시스템 개발

관측자료와 모델을 결합해 온실가스 배출량을 실제 대기 중 농도 변화에 기반해 추정

연구배경 및 필요성

탄소중립 이행을 위한 정확한 배출량 파악과 독립적인 검증 필요

- 파리협정에 따른 국가별 온실가스 감축 목표와 탄소중립 이행을 위해 현재 배출량을 정확히 파악하고, 지역·시기별 배출 특성을 감시하는 기술 필요
- 기존 상향식 방식은 산업·교통·주거 등의 활동자료에 배출계수를 곱해 배출량을 산정하는 방식으로 표본의 대표성과 배출원 파악의 한계 발생, 이에 따른 불확실성을 보완할 수 있는 관측 기반 추정 체계 필요

기술내용

WRF-Chem과 DART를 결합한 10㎞ 미만 고해상도 감시 시스템

- **대상·해상도**: 우리나라와 동아시아를 대상으로 10km 미만 급 지역 규모 하향식 온실가스 모니터링 시스템 구축, 국내 및 주변 지역의 환경·배출 특성에 맞게 입력자료와 모델링 과정 개선

  ※ 하향식 방식: 관측 대기 중 온실가스 농도를 기상장과 대기 수송·화학 모델로 역추적해 배출량 추정하는 방식으로 가뭄·화재·코로나19 등 급격한 환경·사회 변화에 따른 배출 변동 감시에 활용 가능

- **모델·자료동화**: 대기·화학 수송을 모의하는 WRF-Chem과 관측 자료를 반영해 모델 상태를 보정하는 DART를 결합해 온실가스 농도·배출량과 기상변수를 함께 최적화하는 체계 구현
- **추적 물질·검증**: 이산화탄소(CO_2)·메탄(CH_4)·육불화황(SF_6) 3종 추적. 코로나19 이전인 2019년 사례 실험으로 성능과 모의 특성을 확인하고, 이산화탄소 농도 및 배출량 산출 결과 생산
- **성능 고도화**: 관측지점 간격·개수, 관측 정확도·정밀도와 농도·초기장·기상장 민감도를 분석, 일반 리눅스 서버와 슈퍼컴퓨터에서 구동하도록 설계하여 격자별·주요 배출원별 재분석 기반 마련

우수성 및 차별성

고정밀 관측과 모델을 통합한 독립적 배출량 추정

- WMO 지구대기감시(GAW) 수준의 고정밀 관측자료에 대기화학 모델과 자료동화를 접목. 기존 미국 도입 중저해상도 체계에서 국내 고해상도 지역규모 핵심기술 확보로 발전
- 실제 대기 중 농도 변화에 기반한 독립적 추정으로 배출계수 중심 상향식 산정 결과와 교차 검증 가능. 국가온실가스 정보센터 자료와 비교·검증할 보완 정보 기반 확보
- 메탄 등 비이산화탄소 온실가스로 확장 가능한 기초기술 확보. 위성자료와 인공지능 기반 공간분석을 결합하여 고농도 배출지역의 공간 특성을 정량적으로 파악하는 체계 개발

세부사업명

- 기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발

대표성과

- 국내 독자 기술 확보와 국제 인정 및 연구성과 이전
- **SCIE 논문** 4건
- **특허** 출원 3건, 등록 1건
- **소프트웨어 등록** 10건
- **기술이전** 2건
- **수상** 한국기후변화학회 최우수포스터 논문상('23.6)

성공요인

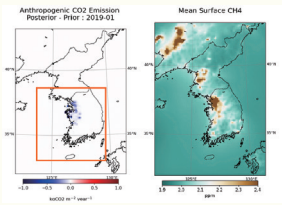
모델 결합과 관측·입력자료 개선을 통한 동시 최적화

- WRF-Chem의 대기·화학 수송 모의와 DART의 농도·배출량 자료동화를 결합해 배출량 불확실성을 보완하고, 고해상도 배출 변동과 기상장을 함께 감시
- 국내 환경에 맞는 입력자료 개선과 다양한 입력 요소의 민감도 분석·최적화를 수행. 관측망의 조밀화와 자료 정확도·정밀도 개선 등 후속 성능 향상 방향 제시

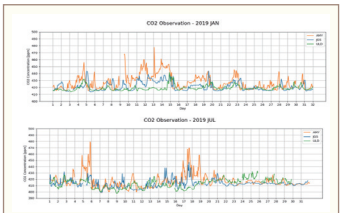
성과의 활용도 및 파급효과

지역·시기별 배출 특성에 맞춘 감축 정책과 검증 지원

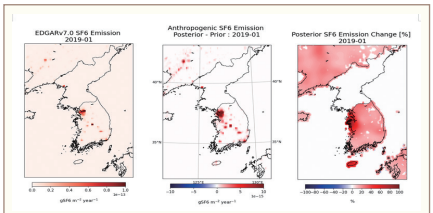
- **과학·기술적 효과**: 관측·모델 기반의 배출량 산출 가능성을 입증하고 비이산화탄소 감시·재분석 기반 확보, 관측지점 확대와 다양한 관측자료 활용 시 신뢰도 향상 기대
- **정책 활용**: 지자체 단위의 정밀 배출량 분석으로 어느 지역·시기에 배출이 집중되는지 파악 가능, 지역 맞춤형 감축·기후위기 대응과 국가 감축 정책 및 국제 보고의 과학적 보완 정보 제공 가능
- **사회경제적 효과**: 배출 변동성과 소규모 배출 특성을 고려한 효율적 감축 방안 제시. 탄소세·배출권거래제 효율 향상과 배출량 산정 불확실성에 따른 리스크·비용 감소 기대
- **확산·실용화**: 일반 서버·슈퍼컴퓨터 운용 설계와 2건의 기술이전으로 활용 기반 확대. 향후 국가기관 감시·재분석 업무 적용 가능



WRF-Chem/DART를 활용한 하향식 온실가스(이산화탄소, 메탄) 배출량 산출 시스템



2019년 1월과 7월의 이산화탄소 시계열 그래프



하향식 온실가스 배출량 시스템으로 산출한 육불화황의 배출량 그림



한국기후변화학회 학술대회 발표 및 최우수포스터 논문상 수상

2000년대 이후 북태평양 냉각과 동아시아 한파의 연결 원인 규명

태평양 십 년 주기 진동(PDO) 음의 위상 시 기온 영향의 역전을 관측·모델로 밝히고 예측인자로 확장

연구배경 및 필요성

2000년대 이후 달라진 PDO-동아시아 겨울 기온 간 관계 규명 필요

- 동아시아 겨울 기온은 시베리아 고기압·알류샨 저기압으로 대표되는 겨울 몬순의 영향을 크게 받음.(해양 상태와 대기순환의 연결 관계가 겨울철 예측의 중요 요소)
- 기존에는 PDO 음의 위상이 동아시아 온난화와 연결되는 것으로 이해하였으나 2000년대 이후 같은 음의 위상에서도 기온이 낮아지는 현상 발생
- PDO-동아시아 기온 간 관계의 비정상성(non-stationarity)은 기존 패러다임으로는 설명이 어려워 겨울철 기온·한파 예측성을 높이는 새 예측인자 발굴 필요성 확대

기술내용

관측 합성·대기순환 진단·CESM2 실험으로 관계 역전 검증

- **시기별 변화**: 관측 분석에서 1979~1999년(P1)에는 PDO 음의 위상 시 동아시아 온난화, 2003~2023년(P2)에는 한반도·중국 동부 중심의 냉각으로 전환됨을 최초 확인
- **하층 기작**: 최근 PDO 음의 위상에서 서열대 태평양 해수면 온도 상승·대류 강화 → 알류샨 저기압 남동쪽 이동·강화 → 시베리아 고기압과의 기압경도 증가 → 겨울 몬순 강화 → 북풍 계열 한랭 이류 증가
- **상층 기작**: 동아시아 제트류의 남북 방향 풍속 시어 강화와 제트 북쪽의 저기압성 소용돌이도 증가가 상층 기압골을 강화하여 한랭 조건 형성. 3차원 순환 구조의 통합 진단으로 확인
- **모델 검증**: 재분석·해수면 온도·강수 자료로 위상별·시기별 합성·상관 분석 수행. CESM2 결합 기후모델의 이상화 페이스메이커 실험으로 해수면 온도·대류 변화의 원격 영향을 정량 검증

우수성 및 차별성

중위도 해양 영향과 다중 해역의 복합 작용 규명

- 2000년대 초를 기점으로 PDO 음의 위상 영향이 온난화에서 냉각으로 역전되는 현상을 최초 규명. 열대·극지 강제력 중심 연구에 중위도 해양 강제력의 역할 추가
- 서열대 태평양과 북태평양의 복합 영향을 하층 기압계·겨울 몬순·상층 제트와 기압골까지 연결해 진단하고, 관측과 모델 실험으로 검증
- 관측에서 확인된 관계를 물리적 기작과 실험 결과로 뒷받침하여, 해수면 온도 상태를 함께 고려하는 조건부 예측으로 확장할 원천기술 확보

세부사업명
- 기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발

대표성과
- **SCIE 논문** 11건
- **소프트웨어 등록** 2건

성공요인

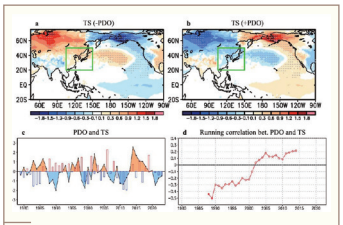
관측-진단-검증의 완결 구조와 자료 교차 검토

- PDO 위상별·시기별 합성·상관 분석으로 관계 변화를 발견하고, 대기순환장 분석으로 하층·상층 기작을 통합 해석
- CESM2 페이스메이커 실험으로 특정 해양 조건의 대기 원격 영향을 검증하여 관측 상관분석의 인과관계 해석 한계 보완
- "관측 분석 → 기작 진단 → 모델 검증"의 3단계 구조와 복수 재분석 자료 교차 검증으로 결론의 신뢰성·재현성 강화

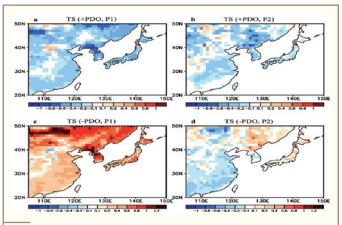
성과의 활용도 및 파급효과

계절 예측 후처리·AI 모델과 한파 선제 대응 연계

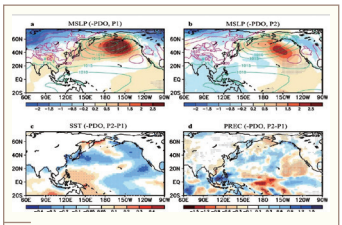
- **예측 기술 향상**: 기존 고정된 PDO–기온 상관관계를 전제로 한 예측에서 해양 배경 상태를 고려하는 조건부 예측으로의 전환 지원, 북태평양 해수면 온도 등 새 인자를 통계·역학 후처리와 U-Net·ViT 딥러닝 후보정 모델 입력에 활용 가능
- **현업·후속 연구 연계**: 겨울철 장기예보 가이던스와 계절 예측 전문가 회의에 활용 가능, 해양–대기 결합 미래 변화 연구 및 원격상관 인과 검증 역량 강화
- **경제적 파급 효과**: 한파 조기 진단을 통한 전력·가스 수급 계획과 에너지 비용·수급 위험 관리 지원, 농작물 냉해·양식업 이상저온 피해의 선제 대응에 기여 기대
- **사회적 파급 효과**: 취약계층 보호와 교통·산업시설 피해 예방 등 안전망 강화 지원, 동아시아 개발도상국 예측 기술이전과 국제 기후서비스 확장 가능



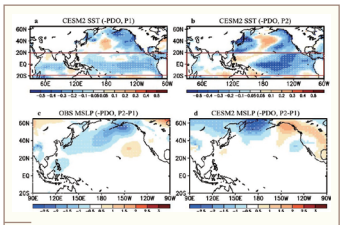
(상단) 1979~2023년 겨울철 PDO 지수(음영)와 동아시아 기온 지수(막대)의 정규화 시계열.
(하단 오른쪽) PDO와 동아시아 기온 지수 간 이동 상관계수. (PDO 위상에 따른 동아시아 지표 기온의 상관성의 역전)



PDO 양 및 음의 위상 시 동아시아 지표 기온 편차 합성도. (a),(c) P1 기간(1979~1999년), (b),(d) P2 기간(2003~2023년).
점 표시 영역은 90% 신뢰 수준에서 유의한 지역



PDO 양, 음의 위상에서 P2(2003~2023년)와 P1(1979~1999년) 기간 해수면 기압 (a), (b)과 해수면 온도와 (c)강수 (d)의 합성도 차이.
점 표시 영역은 90% 신뢰 수준에서 유의한 지역



PDO 음의 위상에서 두 (P2,P1) 기간의 해면기압 편차.
(위) 관측에서 두 기간의 해수면 기압 차이 (c)와 CESM2 페이스메이커 실험(POST_exp – PRE_exp) 결과 (d).
점 표시 영역은 90% 신뢰 수준에서 유의한 지역

최근 유라시아 폭염·가뭄 발생 증가 원인 규명

새로운 대륙 규모 순환 패턴과 280년 기후 복원으로 복합재해 증가 원인 규명

연구배경 및 필요성

동시다발 폭염·가뭄의 원인을 밝히는 장기예측 기반 필요

- 가뭄은 피해 범위가 넓고 오래 지속되어 농업·경제·환경에 영향. 한반도 가뭄의 근원적 기작을 파악하고 사후 조치에서 선제 예측·예방으로 전환할 장기예측 원천기술 필요
- 최근 20여 년 유라시아에서 폭염·가뭄이 함께 발생하는 복합재난 증가. 두 재해가 상호 강화하고 곡창지대에 동시에 영향을 주어, 곡물 수입 의존도가 높은 우리나라의 식량안보에도 위험
- 멀리 떨어진 재해 지역을 연결하는 대규모 대기순환과 해양·지면 조건 규명 필요. 약 100년의 관측 기록 한계를 보완해 변화 원인을 판별하고 수개월 앞선 선행 신호 발굴

기술내용

유라시아 횡단 폭염-가뭄 파동열(TEHD)의 강화와 발생 기작 분석

- **새 순환 패턴**: 유럽–서러시아와 몽골–북중국에 상층 고기압성 순환을 동시에 형성하는 TEHD(Trans-Eurasian Heatwave-Drought train)를 세계 최초로 규명·명명. 동시다발 복합재해를 하나의 대륙 규모 물리 구조로 설명
- **최근 변화**: 2001~2022년 동유럽·흑해 연안·이란 고원·몽골–북중국의 뚜렷한 고온·건조화와 2000년 전후 발생 공간분포 변화 확인. 상층 고기압이 정체하는 블로킹의 빈도·지속기간 증가 분석
- **장기 복원**: 나이테 기후 지시자로 280년간 TEHD 변동성을 복원하여 2000년대 이후 강화가 지난 3세기 중 매우 이례적임을 확인. 기존 자연변동 기반 순환 패턴에는 같은 기간 뚜렷한 변화가 없어 자연변동만으로 최근 급증을 설명하기 어려움
- **강화 원인**: 북서대서양 해수면 온도 상승과 아프리카 사헬 강수 증가가 로스비파를 생성·전파. 제트기류를 따라 전달된 파동과 내륙의 건조한 토양이 지표 가열·고기압을 강화하여 폭염·가뭄의 상호 증폭 유발
- **인간 영향·미래 전망**: CMIP6 분석에서 인간 활동에 따른 기후강제력을 고려한 실험에서만 TEHD의 급격한 출현 재현. 미래 온실가스 증가에 따라 패턴 강화와 복합재해 위험 증가 전망

우수성 및 차별성

개별 재해 분석에서 대륙 규모의 복합재해 구조로 확장

- 개별 지역의 폭염을 각각 설명하던 접근에서 벗어나 유럽부터 동아시아까지의 동시다발 폭염·가뭄을 TEHD라는 연결된 순환 구조로 해석
- 관측·재분석과 고기후 자료·모형을 함께 활용하여 짧은 관측 기간의 한계 보완. 280년의 장기 변동 속에서 최근 강화의 이례성을 검증
- 해양·사헬 강수의 원격 영향과 내륙 지면–대기 피드백을 결합하여 원인 규명. 인간 활동의 기후강제력과 미래 온실가스 증가에 따른 위험을 함께 평가

세부사업명
- 기상·지진 See-At 기술개발연구

대표성과
- **SCI 논문** 32건
- **기술이전** 9건
- **인력양성** 32명(석사 25명, 박사 7명)

성공요인

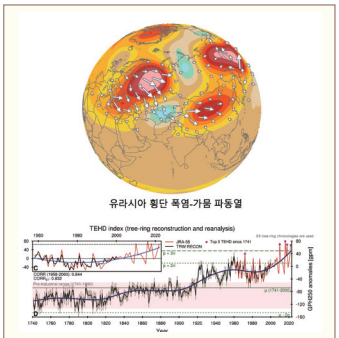
장기 정보를 보존하는 복원 기법과 학제 간 협력

- 나이테와 기후 인자의 단주기·장주기 변동을 분해하여 각각 복원한 뒤 통합. 나이테 성장 추세의 영향을 제거하면서 장기 변동 정보를 보존해 280년 복원 달성
- 대기역학·고기후·기후모델링을 아우르는 융합 연구 체계로 대륙 규모 순환, 지표 조건과 인간 영향의 연결 관계 해석
- 국내외 연구진의 다년간 축적된 협력으로 자료 확보·분석 역량 결합. 독립적인 세 종류의 증거를 교차 검토하여 결과의 신뢰성 강화

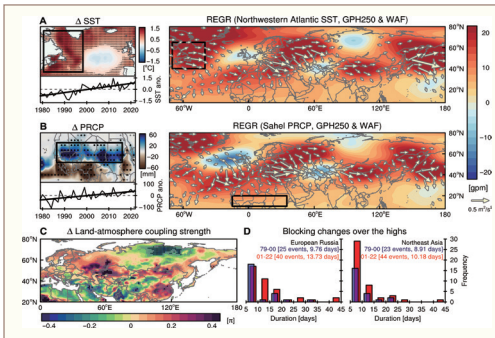
성과의 활용도 및 파급효과

선행 신호와 TEHD 지수로 복합재해 대응 지원

- **예측 활용**: 북서대서양 해수면 온도·사헬 강수를 여름철 폭염·가뭄에 수개월 앞선 선행 신호로 활용 가능. 가뭄 장기예측·조기경보 기술 고도화에 기여
- **진단 활용**: TEHD 강도 지수를 현업 감시·전망의 진단 지표로 활용 가능. 폭염·가뭄·산불·수자원 불안정에 대한 선제 대응의 과학적 근거 제공
- **정책·산업 활용**: 폭염과 가뭄의 분리 관리에서 복합재해 관점으로 전환할 근거 제시. 농업·수자원·산림·도시 방재 대응과 국가 기후변화 적응대책 수립 지원
- **사회적 효과**: 유라시아 주요 곡창지대의 동시 위험을 고려하는 곡물 수급·식량안보 관리에 기여하고, 언론 보도로 복합 기후재해에 대한 사회적 이해 확대



논문 내 분석 결과
(위) 유라시아 횡단 폭염-가뭄 파동열 패턴,
(아래) 지난 280년간 이 패턴의 강도 변화



논문 내 분석 결과(북대서양 온난화와 사헬 강수 증가로 인한
지면-대기 상호작용 및 블로킹 고기압 지속 증가 -> TEHD 패턴 강화)

세계 최대규모 이중구조형 구름물리실험챔버 및 관측기술을 활용한 기상·기후연구 혁신플랫폼 기술개발

국산 정밀제어 챔버로 구름생성 검증과 다분야 융합실험 기반 확보

연구배경 및 필요성

구름생성 불확실성 해소와 인공강우 원천기술 및 산업 수요 대응

- 구름생성 과정은 기상·기후변화 예측의 주요 불확실성으로, 실험을 통한 메커니즘 규명과 수치모의 검증 기반 강화 필요
- 산불예방·가뭄저감을 위한 인공강우 원천기술과 다양한 기상환경에서 장비·센서를 평가할 수 있는 환경 재현기술 수요 증가
- 기존 단일구조 챔버의 온도제어 한계와 작은 실험 규모, 기상·환경 분야의 분리 실험을 극복할 대형 통합실험 플랫폼 필요

기술내용

세계 첫 이중구조·재질과 정밀제어-통합순환 실험체계 구축을 통한 구름생성기술 고도화

- 세계 최초 구리·스테인리스 이중재질 적용. 외부챔버 압력제어와 내부챔버 온도제어를 독립적으로 수행하여 안정적이고 정밀한 기상환경 구현
- 세계 최대규모 이중구조형 챔버의 실제 실험공간 22.4m^3 확보. 외부챔버 7.5m×5m(실제 사용공간 5m×5m), 내부챔버 3m×3m 규모로 다목적 실험 지원
- 국내 최초 에어로졸챔버와 구름챔버를 유기적으로 결합. 에어로졸 생성·공급·분석과 구름 발생을 하나의 통합순환 시스템으로 구현하여 연속 실험 및 융합분석 수행
- 풍동기·연소반응·챔버실험 모듈의 연계 제어로 에어로졸 농도·성분 조건 구현. 내부 전 구간의 온도와 첨단 관측장비로 구름·에어로졸 생성·소멸을 실시간 감지·제어

우수성 및 차별성

국산 대형 실험기술과 국제 시범프로젝트를 통한 활용 기반 확보

- 국내 냉동·진공업체와 민관협업으로 순수 국내기술의 대형 챔버 설계·제작·구축 기술 개발. 국외 기준 챔버 구축예상비용 100억원 대비 배정예산 약 30억원의 제약을 극복하여 기술자립 기반 확보
- 제18차 WMO 아시아지역협의회 RAII 총회(2025.4.22.)에서 대한민국 구름물리실험챔버 활용 과제가 연구혁신 인프라 시범프로젝트로 지정
- 최대 1mm 크기 빙정 생성 및 다양한 형태의 빙정 재현. 국제구름강수학회 ICCP(2024.7.)에서 실험결과 발표와 국제 연구진 교류로 기술성과 공유

세부사업명

- 기상업무지원기술개발연구

대표성과

- **논문** 미국·유럽 저명학술지 3편 게재
- **다분야 활용실험기술 확보** 4건
- **특허** 7건
- **수상** 국제구름강수학회(ICCP) 2024년 우수연구자상 수상('24.7.)

성공요인

민관협업과 조직적 대응으로 설계부터 활용까지 국산화

- 기술·예산·인력 제약 속에서 국립기상과학원의 기상기술과 국내 냉동·진공 분야 전문기술을 결합하여 설계·제작·구축 역량 확보
- 전사적 대응체계와 부서 간 공조로 단계별 개발·실험평가·활용을 연계하고 국내외 공동연구를 통한 검증·기술 축적 추진

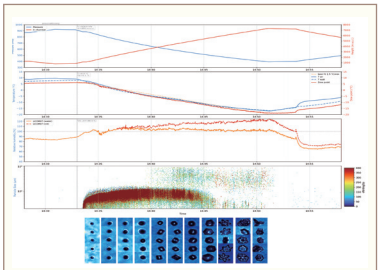
성과의 활용도 및 파급효과

구름물리 검증과 센서 평가 및 기상산업 사업화 기반 확대

- **과학기술적 효과**: 정밀 압력·온도제어로 구름성장 환경 재현과 실험 검증을 지원하고 구름생성 과정의 수치모의 개선 기반 마련. 기상·기후·대기환경 융합연구로 활용 확장
- **개방형 플랫폼**: 열린실험실 운영으로 국내외 산학연과 9개 연구과제 수행(2025). 관측장비 4건·인공강우 2건·구름물리 2건·모델링 1건을 통한 공동 활용
- **산업적 효과**: 실험 표준절차·데이터·분석기법 활용으로 연구방법 표준화와 관측센서 성능평가 지원. 국방·산업용 센서 평가 확대, 기업 조기 사업화 및 챔버 구축·운영 기술 수출 기반 확보
- **국제협력**: 독일(2022), 미국·태국(2024), KIST(2025)와 업무협약. 중동·아시아 등 다양한 국가의 챔버 제작·공동 활용 수요에 대응



첨단 대형 구름물리실험챔버 구성도



국산 대형 구름물리챔버(K-CPEC)를 활용한 구름입자 생성과 성장
- (상) 위 그래프(4개)는 구름의 생성 과정 표현
- (하) 시간대별 구름 방울, 얼음결정 성장 이미지 보여줌
※ 기존 인공강우 방식의 문제점을 보완하는 정보 지원(제시)



국내외 기술업무협약(MoU)
- 국외: 독일('22), 미국('24), 태국('24)
- 국내: 한국과학기술연구원('25)
※ UAE, 사우디아라비, 오만, 캐나다, 프랑스 등 다양한 국가에서 챔버활용 공동연구 업무협력 요청 중

국가 강수부족 재해(산불, 가뭄 등) 완화를 위한 K-인공증우 구현

전주기 기술개발과 복합실험으로 산불·가뭄 대응을 위한 인공증우 기반 확보

연구배경 및 필요성

대기 건조와 산불 및 가뭄 심화에 대응할 강수 확보 기술 필요

- 기후변화에 따른 건조 심화로 강수부족 재해 증가. 2020년대 국내 산불피해 면적은 2010년대의 약 27배, 대형산불은 약 4배 수준으로 확대
- 2025년 경북 의성 산불 피해는 45,157ha, 인명피해 27명, 피해액 1조 8,809억원으로 국가 차원의 재해 완화 기술 필요성 증대
- 2025년 강릉 가뭄 국가재난사태(8.30.~9.22.)에 대응하여 강원도청이 인공증우 실험 요청(9.8.). 지역 재난에 신속히 대응할 연구·실험 체계 필요

기술내용

신물질부터 효과 검증과 개선까지 전주기 연구개발 체계 구축

- 신물질 → 구름챔버 → 수치모델 → 필드실험 → 개선의 순환형 기술개발 사이클을 세계 최초 구축. 구름의 실내 재현, 강수 조건 예측, 시딩물질 살포 및 효과 검증을 연계
- 2022년 공군수송기·기상항공기 공동실험 수행. 2023년 염화나트륨·염화칼슘 분말 등 신물질 적용으로 기존 최대증우량 대비 29%(4.5mm) 향상
- 2025년 지상실험기·무인기·항공기로 전 구름층을 활용하는 국내 최초 복합실험 도입. 127회 실험으로 일평균 추정 증우량 2.4mm 확보
- 실험사례별 인공증우량 산정방법과 빗물의 시딩물질 성분을 1시간 간격으로 분석하는 직접 검증방법을 세계 최초 개발(Koo 등, 2025). 실험 결과를 다음 설계·운영 개선에 반영

우수성 및 차별성

복합실험과 다중 지표로 추정 증우량 및 재해 완화 가능성 확인

- 다중항공기 연속 실험에서 하루 최대 추정 증우량 10.2mm 확보. 미국의 기존 기록(5.5mm, 2014)의 약 186% 수준이며, 2025년 연간 누적 추정 증우량 약 101.2mm 기록
- 실험지역 산림연료습도는 대조지역 대비 2024년 3.6%p 상승, 2025년에는 4.2%p 상승하여 산불예방 활용 가능성 확인
- 구름챔버에서 1mm 크기 빙정 생성 구현. 수치모의·강수성분 분석과 현장관측을 연계하여 인공증우 효과의 정량적 검증 기반 강화

세부사업명

- 기상업무지원기술개발연구

대표성과

- **논문** 인공강우 성분검증방법 등 36편 게재
- **특허** 인공강우 전주기 기술 사이클 및 강수성분 검증방법 등 54건
- **수상** '25년 대한민국 근정포장 및 한국기상학회 묵산기술상 등 20건
- **저서·간행물** 구름물리학, 기상조절 연구특허집 등 4건
- **기술이전** 22건

성공요인

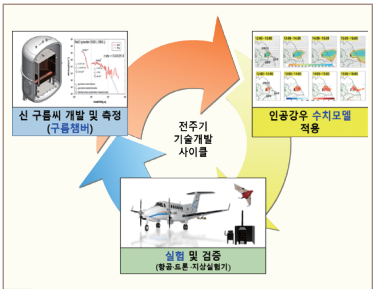
실험 인프라와 기술 축적 및 재난기관 협력의 결합

- 정부 예산지원으로 실험전용 항공기 등 인프라를 확보하고 선진 기술 도입·축적을 통해 복합실험 운영 역량 강화
- 구름물리실험챔버의 신물질 개발·평가, 수치모의, 현장실험, 효과 검증을 연계하고 결과를 다음 실험 개선에 반영하는 순환 체계 구축
- 강원도청·산불방지센터·지자체와 재난 상황별 실험 요청, 신속 추진, 결과 공유 체계 운영. 지속 실험과 강수 채수 등 현장 협력 기반 확보

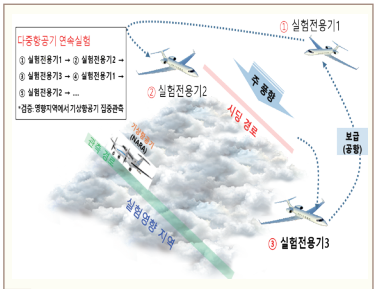
성과의 활용도 및 파급효과

효과 검증 기반 고도화와 산불 및 가뭄 대응 적용

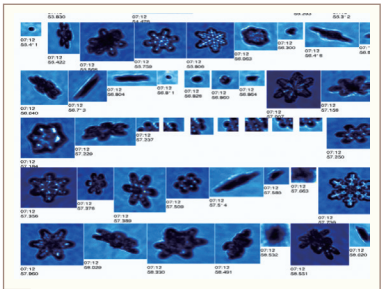
- **과학기술적 효과**: 고효율 시딩물질과 실험사례별 증우량 산정·시간별 강수성분 분석으로 실험 검증 및 운영 가이드라인 개선. 전 구름층 복합실험을 통한 실용적 증우량 확보 기반 마련
- **경제적 효과**: 2024년 강원지역 항공실험 40일의 추정 총증우량 89.7mm를 대상으로 산불피해 예방 효과 약 4,034억원 추산(종합분석 학술연구보고서, 2025.12.)
- **사회적 효과**: 2025년 강릉 가뭄 국가재난사태 해제 시점을 약 2일 앞당기는 데 기여한 것으로 평가. 국가 연구기관의 지역 기후재난 대응 사례 축적 및 국민 인식 확산
- 2025년 강원도 산불 발생은 최근 10년 평균 53.9건 대비 약 26% 감소. 강수의 연 변동성 등 다른 요인이 작용할 수 있어 인공증우와 재해 감소의 관계는 장기간 실험·분석 필요



< 세계 최초 인공증우 전주기 기술개발 사이클 >
미국, 중국, 러시아 등: 챔버, 실험, 모델 별도운영



< 국내 최초 다중항공기 연속 실험 운영>
세계 최고국(미국) 증우량기록의 186% 초과달성



< 세계 최대크기 구현 구름챔버 빙정 생성결과 >
1mm 빙정 최초 구현(미국, 일본: 최대 0.2mm, 5배)

맥동 기록을 활용한 시추공 지진계 센서 방향 정밀 결정 방법 개발

상시 배경 진동을 이용해 지진 발생을 기다리지 않고 센서 방위각 결정

연구배경 및 필요성

지하 심부 센서의 방향 불확실성을 해소하는 신속한 측정 필요

- 시추공 지진계는 지표 잡음을 줄여 양질의 지진파를 관측하지만, 지하 수십~수백 m에 설치되어 센서의 방위각을 확인·정렬하기 어려움. 정확한 파형 분석을 위해 설치 후 방향 결정 필요
- 기존 지진파 기반 방법은 적합한 지진 발생과 충분한 기록 수집을 기다려야 하며, 지진 위치 오차와 매질의 이방성으로 정확도가 저하될 수 있음. 같은 위치에 기준 지표 지진계를 추가 설치하는 방법은 비용·현장 제약 발생
- 해양 활동 등에 의해 항시 존재하는 미세 배경 진동인 맥동을 활용하면 사건 발생을 기다리지 않고 분석 가능. 주변 기존 관측망을 기준으로 활용해 신속성과 경제성을 높이는 기술 개발

기술내용

레일리파의 위상차와 진동 방향을 비교해 센서 오방향각 산출

- **분석 대상**: 주로 1Hz 이하에서 관측되는 맥동의 장주기 표면파(레일리파) 활용. 연세 지구관측소 연속기록의 0.05~0.5Hz 대역에서 지속적인 맥동 에너지 확인
- **방향 추정 원리**: 레일리파의 방사·수직 성분 사이 90° 위상차와 최대 상관계수를 활용해 겉보기 진동 방향 산출. 방향이 알려진 지표 센서와 시추공 센서의 진동 방향 차이로 오방향각 결정
- **기준 관측소 활용**: 국지적으로 레일리파 진행 방향이 유사한 특성을 이용하여 수 km 떨어진 기존 관측소를 기준으로 활용 가능. 같은 위치의 임시 지진계 설치 및 지진원·전파경로 정보 없이 분석
- **신뢰도 강화**: 맥동 자료를 누적하여 추정 안정성 향상. 지진 P파·지진 레일리파·맥동 분석 등 3개 독립 기법의 추정값을 가중 평균해 매질 이방성에 따른 굴절 영향 보완

우수성 및 차별성

상시 맥동과 주변 관측망을 활용한 새로운 방향 결정 기술

- 세계 최초로 제안된 맥동 기반 센서 방향 결정 방법. 지진원의 위치·지진파 경로 정보 없이 센서 방향을 결정하며, 매질 이방성 영향에 비교적 강한 분석 체계 확보
- 지진 발생 대기와 같은 위치의 지표 지진계 추가 설치 부담을 줄이고 주변 기존 관측망을 활용. 짧은 기록으로 방향을 확인하여 지진이 드문 지역에도 적용 가능
- 미국 특허 등록(2023.11.)과 국제 학술지 논문 게재(2024.4.)로 기술 권리화 및 연구성과 확산. 실측 검증과 한반도 지진 연구 활용으로 현장 적용성 제시

세부사업명

- 한반도 지하 단층·속도구조 통합모델 개발(II)

대표성과

- **특허** 1건
- **논문** 1건
- **핵심 검증 결과**
  - 실증 센서 2대
  - 3시간 기록: 오방향각 66° 산출 사례
  - 18시간 기록: 안정적 방향 결정
  - 이차 맥동 추정 표준오차 ±0.4°·±0.6°

성공요인

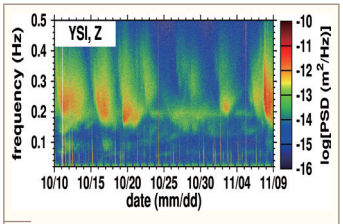
파동 특성의 물리적 해석과 독립 분석의 결합

- 레일리파의 역행 타원 운동과 수평·수직 성분의 90° 위상차를 응용하고, 상관계수 분석으로 진동 방향을 정밀하게 도출
- 상시 존재하는 해양 기원 맥동의 높은 에너지를 활용해 자료 확보의 제약 완화. 누적 기록으로 안정성을 높이고 두 시추공 센서에서 반복 분석
- 3가지 독립 분석의 가중 평균과 주변 기준 관측소의 유연한 활용으로 추정 정밀도·경제성·현장 적용성을 함께 확보

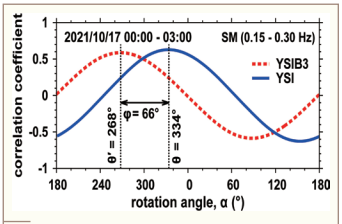
성과의 활용도 및 파급효과

관측자료 품질 향상과 국내외 시추공 관측망 적용 기반

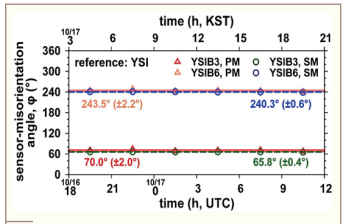
- **과학기술적 효과**: 센서 방향 보정으로 수평 성분의 왜곡을 줄이고 정확한 지진파형 분석 기반 확보. 한반도 지진 특성 연구와 관측자료의 신뢰도 향상에 활용
- **현업 활용**: 새로운 지진을 기다리지 않고 센서 방위각을 확인해 관측자료의 올바른 활용 지원. 국내외 시추공 지진계의 설치 후 방향 검증과 품질관리에 적용 가능
- **경제적 효과**: 동일 위치 기준 지진계의 추가 설치 비용을 절감할 수 있으며, 기존 관측망 자료를 재활용해 방향 검증의 현장 작업 부담 감소
- **확장성**: 장기간 맥동 자료 축적에 따른 분석 안정성 향상 가능. 특허와 논문을 기반으로 상시 방향 결정 기술의 연구·운영 활용 확대 기대



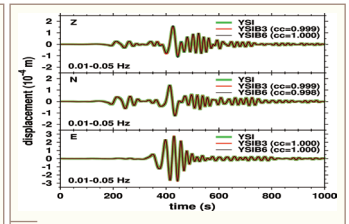
연세대학교 지구관측소 YSI 관측소의 연속파형 기록 스펙트로그램.
(0.05-0.5 Hz 주파수 영역에서 지속적인 맥동 에너지가 관찰된다.)



맥동 내 레일리파의 겉보기 진동 방향 비교를 통한 시추공 지진계 방향 결정. 3시간 길이의 맥동 기록에서, 맥동 내 레일리파의 겉보기 진동 방향은 연세대학교 지구관측소 지표 지진계 (YSI)에서 방위각 268°, 300m 깊이 시추공 지진계 (YSIB3)에서 방위각 334°로 나타난다. 겉보기 진동 방향의 차이는 시추공 지진계 센서 방향이 방위각 66°임을 나타낸다.



본 발명을 통한 연세대학교 지구관측소의 시추공 지진계 YSIB3와 YSIB6의 방향 결정 결과. 18시간 동안의 기록을 사용하여 두 시추공 지진계의 방향이 1° 미만 수준의 표준오차와 함께 결정되는 것으로 확인된다. 이는 본 발명을 통해 지진계 방향이 상시적이고 정확하게 결정될 수 있음을 보여준다.



결정된 시추공 지진계 센서 방향 검증. 연세대학교 지구관측소에 설치된 지표 지진계(YSI)와 함께, 맥동 분석을 통해 추정된 지진계 센서 방향 효과가 보정된 심부 시추공 지진계 (YSIB3, YSIB6)의 지진 파형이 비교되어 있다. 세 지진계에서의 파형이 잘 일치하여, 지진계 센서 방향이 잘 결정되었음을 지시한다.

인공지능을 활용한 실시간 지진분석 기술 개발

국내 지진자료에 맞춤 심층학습과 기존 분석시스템 연계로 현업 판단 지원

연구배경 및 필요성

제한된 시간 안에 신뢰도 높은 지진정보를 생산하는 분석 기반 필요

- 기상청은 지진 발생 시 진원·진원시·규모·단층운동해 등 주요 정보를 신속히 분석·발표. 다양한 관측자료를 제한된 시간 안에 처리해야 하므로 분석자의 경험·숙련도에 따라 분석 시간과 결과에 차이 발생
- 지진정보 생산의 효율성을 높이고 신뢰도 높은 분석 결과를 안정적으로 제공하기 위해, 분석자의 판단을 보조하고 업무의 신속성·일관성을 높이는 인공지능 기술 필요
- 해외 인공지능 위상 발췌 모델은 국내 자료에서도 높은 성능을 보이지만, 국내 관측환경과 파형 특성을 충분히 반영하지 못해 일부 오분석 발생. 국내 자료에 적합한 모델 개발 추진

기술내용

국내 자료에 최적화된 P파·S파 자동 발췌와 진원분석 연계

- **자동 위상 발췌**: 지진파형에서 P파와 S파의 위상, 즉 도달 시점을 자동으로 찾아내는 인공지능 모델 개발. 국내 지진자료로 학습·검증하여 지진분석의 핵심 입력정보 생산 지원
- **모델 구조**: 학습 안정성과 성능을 고려해 U-Net 기반 심층학습 구조 채택. R2U-Net의 순환·잔차 합성곱 구조를 활용하고, 국내 자료에 맞게 모델 구조와 학습 과정 개선
- **전이학습**: 국내 학습자료 부족을 보완하기 위해 대규모 국외 지진자료로 선행 학습한 뒤, 국내 자료를 이용해 미세조정. 국내 관측환경과 파형 특성에 대한 적응성 강화
- **시스템 연계**: 기상청 기존 지진분석시스템과 인공지능 모델을 연결하는 기술 개발·이전. 지속적인 모델 학습·성능 개선과 함께 Antelope·Hypoellipse를 이용한 진원분석 연계 기술로 확장

우수성 및 차별성

국내 관측자료 적응성을 높인 모델과 실제 업무 연계

- 국내 자료 특성을 반영한 모델로 P파 위상 발췌 F1-score를 PhaseNet 0.97에서 0.99로 개선. S파는 두 모델 모두 0.96으로 높은 성능 유지
- 해외 모델의 국내 적용에서 나타난 오분석 문제에 대응하고, 국내 관측환경에 적합한 학습·미세조정 체계를 구축하여 모델의 적용성 강화
- 위상 자동 발췌에서 기존 지진분석시스템 연계와 진원분석 활용까지 기술 범위 확대. 기상청 활용을 위한 연계 기술을 개발·이전하여 성과의 실무 적용 기반 확보

세부사업명

- 지진·지진해일·화산 감시 응용기술 개발

대표성과

- **논문** 3건
- **소프트웨어 등록** 2건
- **기술이전** 2건

성공요인

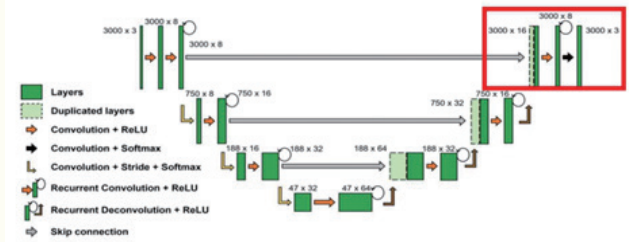
국외 대규모 자료의 선행 학습과 국내 자료 미세조정

- 가용한 대규모 국외 지진자료를 선행 학습에 활용해 국내 학습자료의 부족을 보완하고, 국내 자료 미세조정으로 지역별 파형 특성과 관측환경을 반영
- 선행연구의 다양한 모델을 검토하여 학습이 안정적이고 성능이 우수한 U-Net 기반 구조 선택. 국내 자료에 맞는 모델 구조·학습 과정 개선으로 성능 향상
- 모델 검증과 기존 시스템 연계를 함께 추진하고, 지속적인 재학습·성능 개선 및 진원분석 연계 기술이전으로 연구성과의 활용 범위 확대

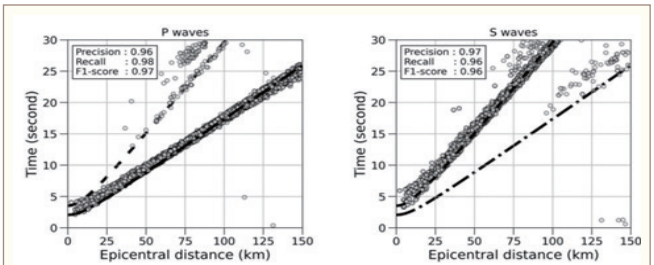
성과의 활용도 및 파급효과

분석자의 업무 능률 향상과 신뢰도 높은 지진정보 생산 지원

- **업무 활용**: P파·S파 자동 발췌와 진원분석 연계로 분석자의 판단을 보조하고, 지진분석의 신속성·정확성 및 업무 능률 향상에 활용 가능
- **과학기술적 효과**: 국내 맞춤형 위상 발췌, 자동화된 지진분석 체계와 심부 시추공 자료 분석 관련 논문으로 연구성과 확산
- **사회적 효과**: 보다 정확하고 일관된 지진분석 정보 생산을 지원하여 지진재해 경감에 기여할 것으로 기대. 현업시스템과 연계한 기술이전으로 활용 기반 마련



본 연구에서 사용된 R2U-Net(Recurrent residual convolutional neural network based on U-Net) 구조. 빨간색 상자 내의 마지막 층은 미세조정에 사용된 층임.



2021년 국내 국지 지진 자료를 활용한 PhaseNet(Zhu and Berozq, 2019)의 위상 발췌 성능 평가. 이론적인 P파(속도: 5.8km/s)와 S파(속도: 3.4km/s)의 주행시간은 점선으로 표현.

태평양 맨틀 플룸의 양방향 흐름 세계 최초 규명

캐롤라인 플룸-섭입판 상호작용을 영상화하여 새로운 지구동역학 모델 제시

연구배경 및 필요성

단순한 열점 이론으로 설명하기 어려운 캐롤라인 해산열

- 기존 열점 이론은 거의 고정된 맨틀 플룸이 수직으로 상승하고, 그 위를 지각판이 이동하면서 한 방향으로 화산섬·해산을 만든다고 설명. 화산체 나이도 판의 이동 방향을 따라 일정하게 변화
- 서태평양 캐롤라인 해산열은 서로 다른 지역의 화산 활동 시기가 겹치고, 활동이 장기간 지속되며, 화산체가 한 줄보다 넓은 지역에 분산되는 특징을 보임
- 이러한 현상을 설명하기 위해 플룸의 상승과 지각판·섭입판의 복합 상호작용 규명 필요. 해양 아래 맨틀 구조와 물질 이동을 함께 파악하는 정밀 분석 추진

기술내용

전파형 토모그래피와 이방성 분석으로 맨틀 구조·흐름 진단

- **대규모 관측**: 지진 3,374개·지진 관측소 410개의 자료 활용. 해저지진계를 포함한 관측자료와 단주기·장주기 지진파를 함께 이용하는 전파형 역산으로 지표 부근부터 약 660km 깊이의 맨틀전이대까지 영상화
- **수평 흐름 확인**: 약 50~150km 깊이의 연약권에서 저속 물질이 띠 모양으로 길게 분포. S파 속도구조와 방사방향 이방성(수평·수직 방향의 속도 차이)을 함께 분석하여 뜨거운 플룸 물질의 수평 이동을 진단
- **양방향 흐름 규명**: 상승한 플룸 물질이 섭입하는 해양판에 가로막힌 뒤 동쪽·서쪽으로 나뉘어 흐르는 현상을 세계 최초 확인. 이를 '양방향 연약권 흐름'이라는 새로운 메커니즘으로 제시
- **판구조 상호작용 해석**: Yap 해구의 섭입판이 플룸 물질의 이동 방향을 바꾸고, 이후 심부에서 섭입판 일부가 파열되며 물질 이동·화산 활동 양상이 다시 달라진 것으로 해석

우수성 및 차별성

수직 상승 중심의 열점 이론을 장거리·양방향 흐름으로 확장

- 플룸 물질이 섭입판과 상호작용하며 연약권을 따라 장거리 수평 이동하고 두 방향으로 분기할 수 있음을 지진학적 관측으로 규명. 복잡한 판 내부 화산 활동을 설명하는 새 메커니즘 확보
- 약 2,000km 이상 이어지는 흐름 구조를 영상화하고 이방성 분석으로 물질 이동 방향을 제시. 지하 속도구조를 넘어 맨틀의 유동 특성까지 함께 해석
- 해저 관측자료와 단주기·장주기 전파형 역산을 결합해 기존 속도 모델보다 향상된 공간 해상도 확보. 플룸과 주변 맨틀의 연결 및 이동 경로를 구체화

세부사업명 • 한반도 지하 단층·속도구조 통합모델 개발(II)

대표성과 • **논문** 1건

성공요인

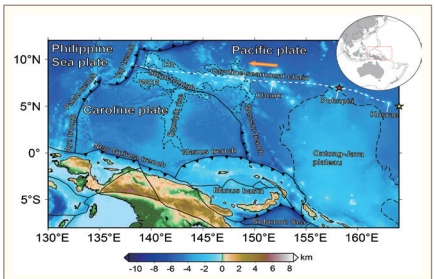
해저 관측자료 확보와 고해상도 분석 역량 결합

- 해저지진계를 포함한 대규모 지진자료 확보로 해양 맨틀의 세부 구조를 분석할 기반 마련
- 해외 전문 워크숍 참여로 해저지진계 자료 처리·분석 기술 습득. 방대한 자료를 전파형 토모그래피·이방성 분석에 활용하여 구조와 이동 방향을 정밀 진단

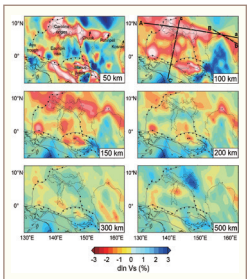
성과의 활용도 및 파급효과

전 세계 플룸 연구와 해양·심부 지구 연구의 기반 강화

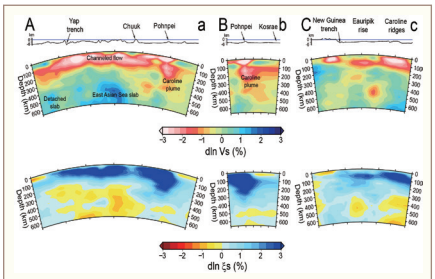
- **학술적 활용**: 플룸–섭입판 상호작용과 수평 흐름 모델을 하와이·아이슬란드·아파르 등 주요 플룸 지역의 형성·진화 연구에 적용 가능. 판 내부 화산 활동과 지구 내부 물질 순환 이해에 기여 기대
- **분석기술 확장**: 전파형 토모그래피·이방성 분석을 맨틀 유동, 화산 활동, 섭입대 구조 및 지진 발생 환경 연구에 활용 가능
- **해양 연구 기반**: 정밀한 맨틀·섭입대 구조 정보를 해저 지질구조·지열 시스템·해양 지구동역학 진화 연구의 기초자료로 활용. 국내 해양·심부 영상화 기술 기반 강화 기대
- **장기적 효과**: 내부 물질 이동과 화산·지진 발생 환경의 이해를 높여 자연재해 발생 원인 규명과 관련 후속 연구에 기초자료 제공



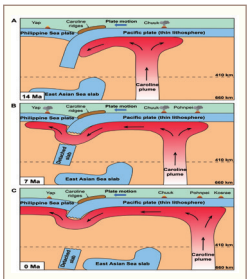
연구지역의 판구조 및 캐롤라인 해산열 분포



캐롤라인 플룸 주변의 깊이별 3차원 S파 속도구조



캐롤라인 플룸을 보여주는 S파 속도구조와 이방성 구조의 수직단면도



새로운 플룸-판구조 상호작용 모델 모식도

CHAPTER 2



기상연구개발

우수성과 사례집

CHAPTER 2

EXCELLENT PROJECTS

수치예보 지원 및 활용 기술 개발(수치예보센터) 38
국민 안전을 위한 내일, 국민 체감형 정략적 예측정보 생산

기상재해 사전대비 중심의 시·공간 통합형수치예보기술 개발(수치예보센터) 40
1km 상세예측부터 30일 전망까지 하나의 한국형 체계로 통합

기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발(기후과학국) 42
국가 기후변화 감시·예측 정보 생산 및 활용 지원

기상위성 예보지원 및 융합서비스 기술개발(국가기상위성센터) 44
위성기반 조기탐지 및 예측 기술 확보와 다분야 융합활용 고품질 서비스 기술 개발

기상위성 운영 및 활용 기술 개발(국가기상위성센터) 46
위성영상 적시제공률 99.97% · 위험기상 최대 40분 선행탐지

수치예보 지원 및 활용 기술 개발

[수치예보센터]

국민 안전을 위한 내일, 국민 체감형 정량적 예측정보 생산

연구배경 및 필요성

- 한국형수치예보모델(KIM, 이하 한국형모델)을 기반으로 초단기·단중기 예측을 상세화하고 태풍 분석·예측기술 강화 필요
- 위험정보를 취약계층과 현장에 신속히 전달할 지역특화 영향예보 서비스 고도화 필요
- 정확한 모델자료가 있어도 위험의 대상·시점·영향이 전달되지 않으면 피해 예방에 한계가 있어 예측과 서비스의 연계 필요

핵심기술

- 한국형모델 정확도 향상에 기여하는 물리과정(한반도 강수특성 반영) 및 자료동화(수도권 집중관측, 위성자료 활용 확대) 기술 개발
- 초단기예측시스템의 관측자료 활용 확대(레이더 관측자료(바람) 등)를 통한 분석기법 개선
- 수치·통계·앙상블·위성·AI를 결합한 태풍 위치·진로·강도·강수·바람·급강화 분석기술 개발
- 영향예보 선행시간 확대와 문자·모바일웹·AI 스피커 등 취약대상 맞춤형 전달기술 개발

추진내용

- 한국형모델 기반의 한반도 구름·강수·지형 특성을 반영한 지역 한국형모델(3km)·국지 한국형모델(1km) 운영기술 개발
- 위험기상에 대한 3차원 분석과 집중관측 자료를 반영하여 한반도 강수특성에 적합한 물리과정 개선 및 위성자료 활용 확대를 통한 자료동화 개선 기술 개발
- 준 연직 바람자료레이더, 지상 수증기서해 장대교량 관측자료 활용 기술 개발을 통한 초단기 모델 개선
- 초단기예측시스템 고해상도 지형자료 체계 및 시험 체계 구축
- 위성·AI 태풍 자동분석, 해양 표류부이 관측 및 확률기반 태풍 계절전망기술 개발
- 폭염 영향예보 선행시간을 1일에서 2일로 확대하고 관계기관 협력 및 시스템 연계를 통한 맞춤형 전달체계 구축

추진 특징

- 수치예보 정확도 향상을 태풍 가이던스와 영향예보 전달기술로 연결해 연구성과가 현장 대응으로 이어지도록 설계

주요성과

01 한국형모델 기반으로 단·중기 예측자료 생산 시, 동일한 방정식계를 유지(예측자료 일관성 확보)하여 이음새 없는 체계 구축

02 위성자료 활용률은 세계 1위유럽 대비 94.1%로 '20년 대비 약 27% 개선

03 현업 초단기예측시스템 개선으로 예보초단기 상세화 지원

04 AI기반 태풍 중심위치 자동분석 평균오차00h 기준 39.9km로 RSMC 신뢰도 '높음' 기준(55km 이내) 달성

05 폭염 영향예보 만족도 66.6%('23년)→74.9%('24년)→91.6%('25년) 향상

위성자료 활용률, 세계 1위와의 격차 감소

('20) 66.7% → ('25년) 94.1%

영향예보 만족도 향상

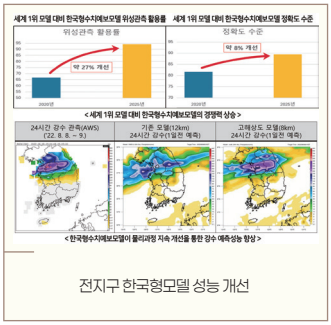
('23) 66.6% → ('25년) 91.6%

파급효과

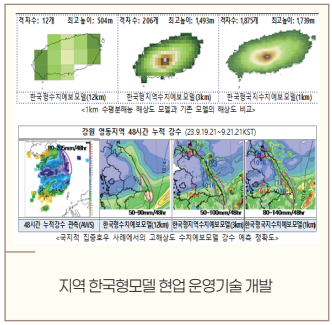
- 2025년 기준 세계 중위권 수준의 수치예보기술을 확보해 국가 기상기술 경쟁력 강화
- 고해상도 예측과 태풍 가이던스로 집중호우·태풍·폭설에 대한 방재기관 의사결정 지원
- 맞춤형 폭염 영향예보로 2021~2040년 피해액 최대 약 6억 원, 진료비 최대 약 44억 원 경감 기대
- 예측정보를 국민·현장 중심 서비스로 전환해 공공·산업 분야 활용성과 기상정보 신뢰도 향상
- 수치예측자료의 개방·맞춤형 가공을 확대해 공공기관·산업계·학계가 방재·교통·에너지 등 2차 서비스를 개발할 기반 제공

성과활용

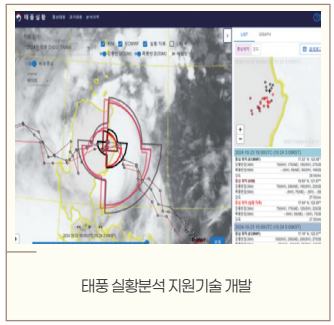
- 지역·국지모델은 집중호우의 미세구조를 제공해 방재기관과 민간 기상서비스의 2차 정보 생산을 지원
- 폭염 영향예보는 문자·앱·AI 스피커·마을방송으로 전달되어 취약대상의 현장 대응을 지원



전지구 한국형모델 성능 개선



지역 한국형모델 현업 운영기술 개발



태풍 실황분석 지원기술 개발



폭염 영향예보 전달체계 다각화

성공요인

- 외국모델 의존을 줄이기 위해 한반도 특성을 반영한 고해상도 한국형모델과 관측자료 활용 확대
- 연구개발과 현업을 연계해 예측성능을 반복 검증하고 예보관 의견을 모델 개선에 반영
- 수치예보·태풍예보·영향예보를 연계해 예측부터 맞춤형 전달까지 전주기 성과 창출
- 예보 정확도와 정보 전달을 별도 성과로 보지 않고 모델개선-태풍분석-영향예보를 하나의 사용자 관점에서 연계

향후계획

- 초단기~중기 현업 수치예보체계를 지속 개선해 위험기상 예측정확도와 예보 의사결정 지원 강화
- 태풍 분석·예측 가이던스 확대를 통한 태풍예보 의사결정 지원 강화
- 위험·특이기상 발생 가능성과 사회적 영향을 연계한 영향예보를 고도화하고 공공·민간 활용 확대

기상재해 사전대비 중심의 시·공간 통합형 수치예보기술 개발

[수치예보센터]

1 km 상세예측부터 30일 전망까지 하나의 한국형 체계로 통합

연구배경 및 필요성

- 독자 개발한 한국형수치예보모델(KIM)을 기반으로 국지성 집중호우부터 30일 기상변동까지 연속 예측 필요
- 전지구 예측과 한반도 상세예측을 단일 체계에서 수행해 예측정보의 정확도와 일관성 향상 필요
- 위험기상 사전대비 시간을 확대해 국민의 생명·재산 보호와 국가 재난대응 역량 강화
- 기존 균일격자 체계는 전지구 계산비용 때문에 한반도 상세예측에 한계가 있어 필요한 지역에 해상도를 집중하는 기술 필요

핵심기술

- 전지구 육면체구 격자를 한반도 주변에서 촘촘하게 배치하는 국내 최초 가변격자 역학코어 개발
- 단일 모델에서 전지구 예측과 한반도 약 3km 상세예측을 동시에 수행하는 체계 구축
- 대기·지면·해양·해빙·파랑·하천을 연결한 전지구 결합모델을 개발해 30일 예측 기반 확보
- 구성요소 간 에너지·수분 교환을 결합모델에서 직접 계산해 대기만 예측하던 체계보다 연장중기 변동성을 현실적으로 반영

추진내용

- **초단기**: 약 1km 제한지역모델과 1~3시간 간격 고해상도 자료동화체계 개발
- **단기**: 한반도 중심 약 3km 가변격자모델 운영체계 개발
- **중기**: KIM의 역학·물리과정을 개선하고 수평해상도를 12km에서 8km로 고도화
- **연장중기**: 지구시스템 결합모델을 이용한 32km 앙상블 예측체계를 구축하여 예측기간을 30일까지 확대
- 자료동화·역학·물리·앙상블·검증·운영 분야를 병렬 개발하고 공통 버전과 성능기준으로 통합해 시스템 완성도 확보

추진 특징

- 초단기·단기·중기·연장중기 체계를 동일한 한국형모델 기반으로 연결해 예측기간별 불연속 최소화
- 고해상도화의 계산비용은 가변격자/제한지역모델과 운영 최적화로 줄이고 현업 적용을 전제로 단계별 성능 검증

주요성과

01 기상분석장 생산주기를 6시간에서 1~3시간으로 단축해 실황분석 상세화

02 전지구 균일격자 12km에서 균일·가변격자 1~8km 체계로 공간해상도 향상

03 대기·해양 등 결합예측으로 예측기간을 10일에서 30일까지 확대

04 폭염 사전대비 선행시간 1일→7일 확대

05 태풍 진로 예측오차 280km→175km로 저감

공간 해상도
1~8km

예측기간 확대
30일

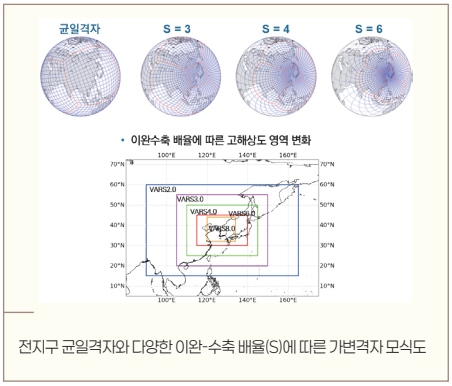
태풍 진로오차
175km

파급효과

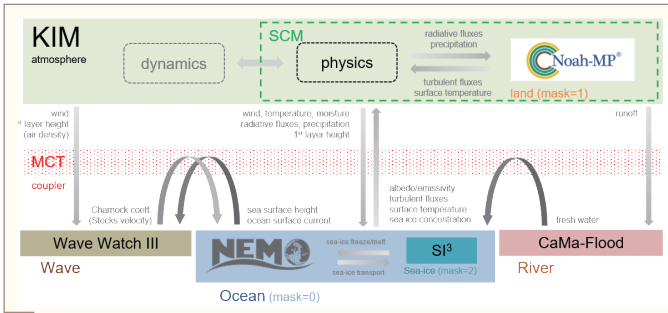
- 초단기~연장중기와 전지구~국지 예측체계를 통합해 예보정보의 일관성과 활용 효율 향상
- 한반도에 계산자원을 집중하는 가변격자기술로 상세예측 성능과 전산 운영 효율을 동시에 확보
- 결합모델을 장기 모의·기후변동성·기후변화 연구와 국가기후예측시스템의 기반기술로 활용
- 독자 역학코어와 결합모델 기술은 해외모델 의존도를 낮추고 국가 슈퍼컴퓨터 자원의 효율적 활용과 기술자립에 기여

성과활용

- 1~3시간 분석장은 집중호우 초기 발달 감시에, 1~8km 예측장은 한반도 위험기상 상세예보에 활용
- 30일 결합예측체계는 폭염·한파 등 지속성 기상현상의 사전대비와 국가 기후예측시스템 개발에 활용



전지구 균일격자와 다양한 이완-수축 배율(S)에 따른 가변격자 모식도



차세대 수치예보시스템의 결합예측체계 모식도

성공요인

- 기상청과 한국수치모델개발원이 계획·진도·성과·활용 전 과정을 공동 관리
- 자료동화·초단기·단기·중기·연장중기·검증·운영 등 8개 분야 47명 현업추진협의체 운영
- 전략과제별 과제담당관 운영으로 모델 성능과 운영 가능성을 지속 점검하고 연구진에 환류
- 국외 현업기관 전문가로 구성된 과학자문위원회를 통해 최신 기술동향과 연구성과를 객관적으로 검토
- 연구 초기부터 현업 운영환경·계산시간·자료흐름을 함께 검토해 성능이 우수해도 운영하기 어려운 연구성과의 한계를 예방

향후계획

- 단계별 성능검증과 안정화를 거쳐 차세대 수치예보모델을 기상청 현업 날씨예보에 활용
- 실제 예보결과와 현업 사용자 의견을 반영해 예측성능과 운영체계를 지속 개선
- 현업 병행시험에서 예측성·안정성·계산시간을 종합 검증하고 분야별 기준을 충족한 구성요소부터 단계적으로 적용

기후 및 기후변화 감시·예측정보 응용 기술개발

[기후과학국]

국가 기후변화 감시·예측 정보 생산 및 활용 지원

연구배경 및 필요성

- 기후변화 심화로 기후 위기 대응을 위한 기후·기후변화 감시·예측, 활용 정보 수요 증가
- 계절내~가까운 미래 기후예측성 향상기술과 기후응용정보 생산기술 개발을 통한 기후위기 및 위험 대응역량 강화 필요

핵심기술

- 계절내(2주~2개월), 가까운 미래(1년~10년) 기후 예측 향상 기술
- IPCC AR6 기반 상세 기후변화 시나리오 생산 및 불확실성 평가, 기후변화·탄소중립 과학정보 개발 및 평가 기술
- 미량 온실가스 정밀 관측 기술 및 고해상도 온실가스 기원추적 시스템 원형

추진내용

- 계절내 (2주~2개월)부터 가까운 미래(1년~10년)까지 기후예측 기술개발 및 고도화
- 가까운 미래(1년~10년) 기후 예측시스템 구축 및 한반도 이상기후 진단
- AR6기반의 상세 기후변화 시나리오 정보 생산 및 극한기후 메커니즘 분석·탐지기술 개발
- WMO IG3IS 이행사업의 일환으로 역모델링을 이용한 온실가스 기원추적 모델 개발
- 탄소동위원소, 할로겐화합물 등 온실가스 측정·분석기술 개발 및 다양한 관측자료를 이용한 온실가스 시공간 분포 산출기술 개발

추진 특징

- 기후·기후변화 감시부터 예측, 전망, 응용 정보 생산까지 연계하여 국가 기후위기 대응에 필요한 과학기술 기반 확보
- 국가 기후위기 대응, 탄소중립, 국가 온실가스 감축목표 달성 등 국가 기후정책 수요에 기반한 기술 개발
- 관측 기반의 과학적 기후정보 생산 체계 구축으로 기후변화에 대한 과학적 근거 강화

주요성과

01	GloSea6 물리·역학 과정 개선과 계절내 예측인자·원격상관 진단체계 구축
02	동아시아 여름철 강수와 이상기후 연구성과를 「장마백서 2022」로 발간
03	육상 25km(동아시아)·1km(한반도) 및 한반도 해역 8km 상세 기후변화 시나리오 생산
04	기후변화 시나리오 국제자료센터(ESGF/CORDEX-EA)에 공식 제공(4건)
05	아시아 최초 WMO 통합전지구온실가스정보시스템(IG3IS) 공식 프로젝트 인정, 국내 최초 고해상도 하향식 온실가스 배출량 시스템 원형 구축
06	'20~'25년 사업기간 중 SCI급 논문 165건(평균 mrnIF 80.87), SW 등록 94건, 기술이전 42건, 특허 119건 등 과학적·기술적 성과 창출

계절 내~가까운 미래
기후 예측성 향상

상세 기후변화 시나리오
우리나라 1km / 해양 8km

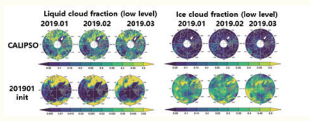
WMO IG3IS 인정
아시아 최초

파급효과

- 계절 내(2주~2개월)부터 가까운 미래(1년~10년)까지의 기후 예측 역량 향상 및 선제적 재난 대응 지원으로 국가 기후위기 대응 역량 강화
- 상세 기후변화 전망 및 활용 정보 생산·제공으로 기후변화로 인한 피해 예방 및 사회·경제적 회복력 강화에 기여
- 온실가스 관측·기원추적을 통해 국가 배출량 검증의 신뢰도를 높이고 국제 이행점검 기반 마련

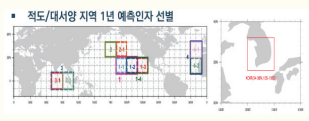
성과활용

- 기후변화로 인한 이상기후 감시 및 조기 대응과 기후 민간 분야에서의 의사결정 지원
- 상세 기후변화 시나리오 기반 수요자 맞춤형 기후변화 정보 제공으로 다양한 분야에서의 기후·기후변화 대응 정책 수립에 활용
- 온실가스 기원추적 결과는 국가 배출량의 객관적 검증과 탄소중립 정책효과 평가 지원



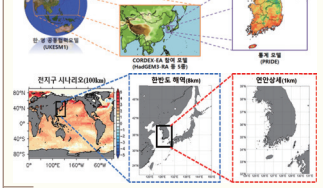
기후예측모델(GloSea6)의
물리-역학 과정 적용과 모수화 개선

※ 2019년 1월~3월 사이 위성관측자료와 GloSea6의 하층 구름 내 수적(좌), 구름 내 빙정(우) 분포 차이



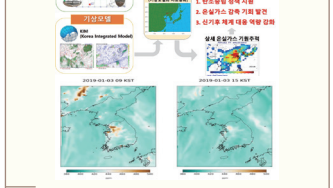
가까운 미래 예측을 위한
적도 태평양 기후변동성 분석

※ 1-3지역, 4-2지역의 해수면온도와 1년 후 한반도 지상 기온의 상관관계를 분석하여 한반도 지상기온 예측에 기여



상세 (해양) 기후변화 시나리오

※ (위) 상세(25km, 1km) 기후변화시나리오 (기온, 강수, 습도, 일사, 풍속) 생산
※ (아래) 한반도해역(8km) 해양순환(수온, 염분 등) 시나리오 생산



온실가스 기원추적(IG3IS) 원형(모델)

※ 국내 최초 고해상도 하향식 온실가스 배출량 시스템 원형 구축으로 아시아 최초로 세계기상기구 IG3IS 공식 프로젝트로 인정

성공요인

- 현업·정책 수요를 연구기획부터 반영하고 개발성과를 기후 감시·예측 업무에 직접 연계
- IPCC 등 국제기구와의 협력과 국제 비교실험을 통한 연구결과 신뢰성 및 국제적 활용성 확보
- 선행 과제에서의 연구 성과를 적극 연계·활용하고, AI 등 차세대 전산 기술과의 융합

향후계획

- 검증된 기술을 기상청 현업 환경에서 지속 개선해 기후 감시·예측 업무에 적용
- 후속 사업(기후재난 대응 기후변화 감시·전망·영향진단 통합 기술개발 사업)과 연계하여 연구 성과 고도화
- 생산된 시나리오와 응용정보를 국가·지역 적응정책과 국제 이행점검의 과학적 근거로 제공
- 기후전망과 사회·경제 영향정보의 연계를 강화해 분야별 위험진단과 수요자 맞춤형 기후서비스로 발전

기상위성 예보지원 및 융합서비스 기술개발

[국가기상위성센터]

위성기반 조기탐지 및 예측 기술 확보와 다분야 융합활용 고품질 서비스 기술 개발

연구배경 및 필요성

- 태풍·집중호우·폭염 등 위험기상의 빈도와 강도 증가에 따라 조기탐지·예측기술 확보 필요
- 천리안위성 2A호와 다중위성 자료에 AI·빅데이터를 접목해 위성정보의 정확도와 활용성 향상 필요
- 방재뿐 아니라 기후환경·우주기상·재생에너지 등 분야별 맞춤형 위성서비스 확대 필요
- 고해상도·다채널 등 자료가 늘어나면서 단순 영상 제공을 넘어 대류운의 발생 전조와 발달·소멸 전 과정을 분석할 기술개발 필요

핵심기술

- 대류운 일생감시(RDT), 대류운 전조탐지(DeepCI), 중규모 대류계 진단 및 AI 모의레이더 기술 개발
- 정지·저궤도 위성의 복사량·바람·수증기 자료를 한국형수치예보모델(KIM)에 활용하는 기술개발
- 폭염·가뭄·산불·일사량·자외선과 우주기상 위험요소 감시기술 개발
- 태풍 이동경로의 주야간 합성영상과 기본채널 초해상화 기술 개발

추진내용

- 위험기상 탐지 정확도 향상 및 선행시간 확대, 수치예보 모델의 위성자료 활용 확대, 기후환경 산출물 확대, 우주위험기상 탐지 확대, 위성정보 품질개선 및 활용기관 확대 추진
- 위성 산출물 개발-품질검증-예보현장 적용-사용자 서비스의 전 과정을 연계
- 산·학·연 공동연구와 EUMETSAT·NOAA 등 해외기관 기술교류를 통해 최신 위성·AI 기술 반영
- 전문가 자문과 사용자 요구조사를 통해 연구성과의 품질·현업 적용성·서비스 편의성을 함께 점검하고 개선과제에 반영

추진 특징

- 천리안위성 2A호뿐 아니라 2B호·저궤도위성·레이더·수치모델을 함께 활용하는 융합체계 구축
- 위험기상 탐지에서 기후환경·우주기상·재생에너지까지 산출물의 이용대상과 서비스 범위를 단계적으로 확대

주요성과

01	대류운 일생감시(RDT) 산출물 위험기상 탐지 정확도(POD)를 64.9%(2020년)에서 71.2%(2024년)로 향상
02	AI 모의레이더 영상 정확도를 62.8%(2023년)에서 73.3%(2024년)로 개선
03	대류운 전조 확률탐지 기술 개발로 집중호우 유발 대류운의 생성 전 감시역량 강화
04	폭염(RMSE 개선 5.2%→4.4%), 토양수분(RMSE 개선 9.6%→4.3%)·잠재증발산량·산불탐지(10분→2분) 일사량 등 기후환경 산출물을 생산해 기후환경 분야 활용 확대
05	천리안위성 2A·2B호 융합한 안개 영상 공간해상도 개선(500→250m), 기본(적외) 채널 초해상화(2km→1km, 4배) 기술 개발
06	특허 5건, 소프트웨어 저작권 110건, 기술이전 5건, 논문 30건, 현업화 42건 창출

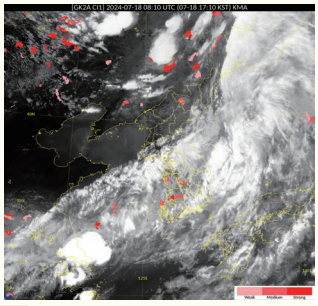
대류운 일생감시(RDT) 산출물 위험기상 탐지 정확도	AI 모의레이더 정확도	연구성과 현업화
71.2%	73.3%	42건

파급효과

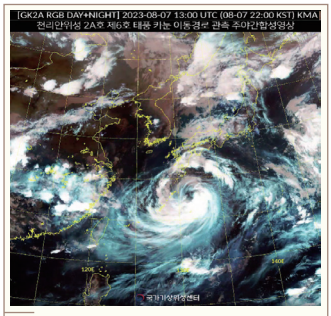
- AI·빅데이터 기반 위성기술 확보로 위험기상 탐지의 정확성과 신속성 향상
- 농림·해양·항공·교통·환경·에너지 분야에 고품질 위성정보를 제공해 공공·산업 활용 확대
- 정지궤도 기상위성 보유국으로서 독자적인 위성자료 분석·서비스 역량과 후속 연구기반 확보
- 축적된 특허·소프트웨어와 현업화 성과는 국내 위성산업의 기술기반으로 활용 가능

성과활용

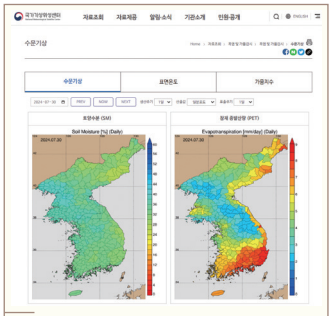
- AI 모의레이더는 관측 공백지역의 강수 감시를 보완하고, 대류운 전조탐지는 집중호우 대응시간 확보에 기여
- 토양수분·잠재증발산량·일사량은 농업가뭄과 재생에너지 생산량 분석 등 산업서비스로 확장 가능



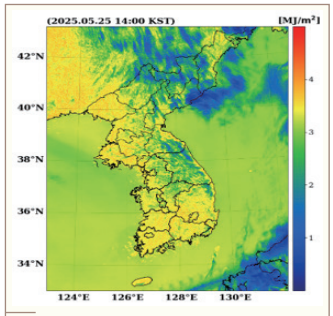
대류운 전조탐지



태풍 이동경로 주야간합성영상



(좌)토양수분, (우)잠재증발산량



천리안위성 2A호 기반 일사량

성공요인

- 연구기관과 예보·서비스 부서가 공동으로 성능을 검증하고 사용자 의견을 반영해 현업 적용성 확보
- 국내외 위성기관과 공동연구·자문·기술교류를 추진해 빠르게 변화하는 위성·AI 기술에 대응
- 개발성과를 지식재산권·기술이전·현업화로 연계해 연구성과의 활용성과 지속성 강화
- 기술개발-검증-현업화-서비스 개선을 순환 구조로 운영해 연구 종료 후에도 성과가 지속적으로 활용될 수 있는 체계 마련

향후계획

- 후속 사업「기상위성 융합 활용 기술개발(2025~2031년)」과 연계해 위험기상·기후변화 감시기술 고도화
- 1단계(2025~2027년) AI·다중위성 기반 3차원 분석과 위험기상 조기탐지 기술 강화
- 2단계(2028~2031년) 천리안위성 5호 산출물 개발과 사전 생산체계를 구축해 서비스 연속성 확보
- 천리안위성 5호 발사 이전에 신규 산출물 알고리즘과 생산·검증환경을 준비해 2A호에서 5호로의 안정적 전환 추진

기상위성 운영 및 활용 기술 개발

[국가기상위성센터]

위성영상 적시제공률 99.97% · 위험기상 최대 40분 선행탐지

연구배경 및 필요성

- 천리안위성 2A호(16개 채널과 한반도 2분 간격 관측) 자료의 안정적 수신·처리·제공할 수 있는 운영기술 필요
- 위성·지상국 장기 운영에 따른 장비 노후화와 산출 자료량의 증가에 대응하고 태풍·집중호우 등 위험기상 감시역량 강화 필요
- 장기간의 위성 관측자료를 기후변화·항공·해양·도로·친환경에너지 분야에 활용할 수 있도록 품질관리 및 서비스 고도화 필요
- 관측자료의 제공이 지연되거나 서비스가 중단되면 위험기상 판단과 후속 서비스 전체에 영향을 주므로 위성 운영의 안정성 확보와 자료 활용기술의 강화 필요

핵심기술

- 위성 관제부터 영상 처리·배포까지 365일 24시간 운영하기 위한 장애 대응훈련, 부관제소 운영 협력 및 대체자료 제공 체계 구축
- 16개 채널 관측자료를 검·보정한 기본관측영상을 3분 이내 생산하고 대용량 자료의 압축·저장기술 확보
- 다중위성 비교검정과 표준 생산절차를 적용해 실시간 자료와 장기 기후자료의 품질·일관성 확보
- AI 대류운 조기탐지, 모의레이더, 태풍 분석, 산불·가시거리·폭염·가뭄·일사량 산출기술 개발

추진내용

- 위성·지상국 장애유형별 대응절차를 마련하고 원격지 백업, 방송배포 전환시험 및 예방점검 정례화
- 위험기상 발생 시 관심지역 특별관측과 모의 RGB·해상풍·토양수분 등 예보지원 산출물 제공
- 「위성자료 현업화 가이드라인」을 마련해 성능검증을 거친 연구성과 5건을 현업에 적용
- 위성정보시스템 통합, 공개 API 및 국내외 자료제공을 통해 사용자 접근성과 활용범위 확대
- 예보관·국민·유관기관 만족도 조사와 사용자협의회 결과를 산출물 개선, 시스템 통합 및 서비스 우선순위 결정에 반영

추진 특징

- 운영 안정성과 연구개발을 분리하지 않고 관제·수신·처리·품질관리·서비스를 하나의 전주기로 관리
- 실제 장애와 위험기상 사례를 기술개선에 환류하고 연구성과는 검증·심의를 거쳐 현업에 적용

주요성과

01 천리안위성 2A호 운영 성공률 99.91%(2022년), 영상 적시제공률 99.97%(2025년) 달성

02 AI 대류운 조기탐지로 소낙성 강수 발달징후를 레이더보다 평균 40분 먼저 포착

03 대류운 조기탐지 오보율을 86.6%에서 12.4%로 약 74.2%p 향상

04 위성방송(38개소), FTP(국내 39개소, 해외 29개소) 자료 제공 및 공개 API 약 8,730만 건 제공(2025년)

05 태풍 '송다' 발달 전 열대저압부와 제1호 태풍 '우딥' 특별관측으로 태풍 분석·예보 지원

06 해외 기상위성자료의 2024년 기준 적시제공률 98.7%로 국내외 위성자료의 안정적인 공동 활용 지원

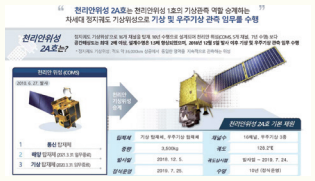
영상 적시제공률	강수 발달 선행탐지	대류운 오보율 개선
99.97%	40분	74.2%p

파급효과

- 2분 간격 집중관측과 AI 조기탐지를 통해 위험기상 대응시간을 확보하고 예보관의 의사결정 지원
- 위성정보 활용대상을 방재에서 항공·해양·도로·환경·에너지·기후연구 분야로 확대
- 천리안위성 2A호 활용서비스의 사회경제적 편익 약 2조 8,655억 원 추정(2025년 기획연구)
- 축적된 운영·품질관리 경험을 천리안위성 5호 지상국 구축과 후속 위성 운영에 활용
- 국내외 위성운영기관과 자료·품질관리 기술을 공유해 아시아·태평양 지역의 위험기상 감시와 국제협력에 기여

성과활용

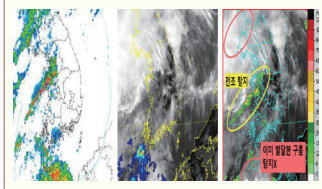
- 해상풍·바다안개는 선박 안전, 토양수분·가뭄은 방재업무, 우주방사선 정보는 극항로 항공 안전에 활용
- 장기 위성자료와 일사량 정보는 기후변화 연구, 태양광 자원평가 및 에너지 생산 예측의 기초자료로 활용



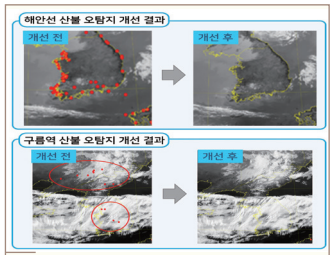
천리안위성 2A호



2022년 위성정보시스템3 신규 추가 기능



대류운 조기 탐지



기상위성 운영 및 활용 기술개발_산불자료

성공요인

- 실제 장애 사례를 매뉴얼과 장애대응 훈련에 반영해 위험요인을 사전 관리하고 관계기관·제조사와 공동 대응
- 기존 장비 재활용과 단계적 저장장치 보강으로 예산 부담을 분산하면서 운영 안정성 확보
- 예보관·유관기관 의견을 반영하고 검증·심의를 거쳐 연구성과를 신속하게 현업화
- 다중위성 상호비교와 표준 생산절차를 운영업무에 내재화해 실시간 예보자료와 장기 기후자료의 신뢰성을 동시에 확보

향후계획

- 노후 장비·소프트웨어와 저장·전원설비를 단계적으로 보강해 천리안위성 2A호 장기 운영 안정성 확보
- AI 기반 낙뢰·태풍·서리·산불 예측과 위성 바람자료 정확도 향상 등 생활밀착형 서비스 확대
- 천리안위성 장기자료를 활용한 일사량·에너지 기상정보 생산체계를 구축하고 천리안위성 5호 운영 준비
- 자동 이상징후 감시와 반복 훈련을 강화하고 천리안위성 5호 지상국 구축·시험운영으로 위성 전환기의 서비스 공백 예방



기상연구개발

우수성과 사례집

발행일 2026. 10.
기획 및 발행 기상청 기획조정관 연구개발담당관
제작 및 인쇄 경성문화사
ISBN 979-11-6988-797-7 (95450)

기상청
Korea Meteorological Administration



기상연구개발

우수성과 사례집

기상청
Korea Meteorological Administration