

(옆면)

(앞면)

위험기상 집중관측을 위한 기상청-대학 간 협력 프로그램 기획연구
2022년도 기상청

위험기상 집중관측을 위한 기상청-대학 간 협력 프로그램 기획연구
(Planning research on cooperative programs between Korea
Meteorological Administration and universities for intensive observation
of severe weather)

2022년도

기 상 청

정책연구 최종보고서

과 제 명	국 문	위험기상 집중관측을 위한 기상청-대학 간 협력 프로그램 기획연구		
	영 문	Planning research on cooperative programs between Korea Meteorological Administration and universities for intensive observation of severe weather		
주 관 연구 기관 (공 동 연구 기관)	기 관 명	소 재 지	대 표	
	경북대학교 산학협력단	대구광역시 북구 대학로 80 경북대학교 글로벌플라자	공성호	
주 관 연구 책임자 (공 동 연구 책임자)	성 명	소 속	전 공	
	이규원	경북대학교 지구시스템과학부 천문대기과학전공	천문대기과학	
총 연구기간 (당해년도)	2022. 08. 24. ~ 12. 20. (4 개월)			
총 연구비 (당해년도)	일금 29,400,000원 (₩ 29,400,000)			
총 참여연구원 (당해년도)	총 5 명	책임연구원	1 명	
		연구원	3 명	
		연구보조원	1 명	
		보조원	0 명	
연구 주요내용	<p>2022년도 위험기상 집중관측을 위한 기상청-대학 간 협력 프로그램에 관한 정책연구의 최종보고서를 붙임과 같이 제출합니다.</p> <p style="text-align: right;">붙임: 최종보고서 30 부</p> <p style="text-align: center;">2022 년 12 월 20 일</p> <p style="text-align: right;">주관연구책임자 이규원 인</p> <p style="text-align: right;">주관연구기관장 경북대학교 산학협력단장 직인</p> <p style="text-align: center;">기 상 청 장 귀 하</p>			

제 출 문

본 보고서를 “위험기상 집중관측을 위한 기상청-대학 간 협력 프로그램 기획연구” 최종보고서로 제출합니다.

- 주관연구기관명: 경북대학교 산학협력단
- 연 구 기 간: 2022. 08. 24. ~ 12. 20. (4 개월)
- 주관연구책임자: 이규원 교수
- 참 여 연 구 원
 - 부경대학교 권병혁 교수
 - 연세대학교 홍진규 교수
 - 공주대학교 김주완 교수
 - 경북대학교 백승원 연구보조원

※ 주관연구기관 및 주관연구책임자, 연구원은 실제 연구에 참여한 기관 및 자의 명의로 함

2022년 12 월 20 일

기상청장 귀중

목 차

□ 연구보고서 목차

제 1 장 서론	1
제 1 절 연구개발의 필요성 및 목표	1
제 2 절 연구개발 내용 및 범위	3
제 2 장 연구개발 결과	4
제 1 절 국내외 집중관측 사례 현황조사	4
1. 기상청 집중관측 프로그램 성과분석	4
2. 해외 집중관측 프로그램 및 조직 조사 분석	9
3. 국내 민간 참여 기상관측 프로그램 사례조사	31
제 2 절 대학생 참여 위험기상 집중관측 캠페인 추진 방안 제시	37
1. 집중관측 대상 조사 및 성과활용 방안제시	37
2. 캠페인 기본계획 제시	43
3. 지역대학·지방청 연계 관측·예보·서비스 전주기 기상업무 협력체계 제시 ..	46
4. 집중관측자료 공동활용 체계 구축을 통한 대학 교육·연구 활성화 방안 제시	50
제 3 절 예보현업-집중관측 프로그램 연계방안 제시	52
1. 위험기상, 특이 기상별 집중관측 분석 및 예보현업 활용방안 도출	52
2. 집중관측 노하우, 자료 활용방안 등 상시 관측망 개선사항 도출	56
제 3 장 연구개발의 기대효과	59
제 4 장 참고문헌	60
[첨부 1] 자문의견서	62
[첨부 2] 단기, 중장기 과제 도출	75

□ 표 목차

표 1.2.1.1 연구개발 내용 및 범위	3
표 2.1.1.1. 기상청 집중관측 프로그램 목록 (1999 - 현재)	5
표 2.1.2.1 PERILS 관측 프로그램에 사용되는 장비의 종류 및 담당 기관	12
표 2.1.2.2 TORUS 관측 프로그램에 사용되는 장비 및 참여기관	13
표 2.1.3.1 KORUS-AQ 연구에 활용된 중요 연구자원 요약	32
표 2.2.2.1 집중관측 캠페인 운영체계들.	44
표 2.2.3.1 미국 대학에 설치된 NOAA의 특화 공동 연구센터	46
표 2.3.1.1 레벨에 따른 자료 표준화 예시 및 설명	54

□ 그림 목차

그림 2.1.1.1. 수도권 집중관측을 위한 항공기 및 종관관측 원격탐사 및 지상 중규모 관측망 6	
그림 2.1.2.1. PRECIP 집중관측 캠페인에 투입된 지상관측 장비 및 위치	10
그림 2.1.2.2. PRECIP 집중관측 캠페인에 투입된 항공관측 장비 및 비행 영역	10
그림 2.1.2.3. PERILS 캠페인의 목표관측 지역 및 참여 기관 (대학 및 연구소)	11
그림 2.1.2.4. 미국 PERILS 관측 프로그램에 투입되는 다양한 기관 및 대학의 장비	11
그림 2.1.2.5. 미국 SAIL 강수 관련 지면-대기 프로세스 특별관측에 사용되는 ARM research facility의 예시	14
그림 2.1.2.6. Cabauw 타워의 남쪽 경관(Bosveld et al., 2020)	15
그림 2.1.2.7. 구름 레이더를 이용한 시정 관측 (Bosveld et al., 2020)	16
그림 2.1.2.8. 네덜란드 기상청의 자료 포출 시스템 구성	16
그림 2.1.2.9. 층적운과 무역풍적운의 전환 과정 (Albrecht et al., 1995)	17
그림 2.1.2.10. THORPEX 개념도(Park, 2004)	19
그림 2.1.2.11. Asia TReC의 태풍 관측체계 (Cho, 2005)	20
그림 2.1.2.12. ARGO 플롯 관측체계 (METRI, 2005)	21
그림 2.1.2.13. 지구관측시스템의 구성	22
그림 2.1.2.14. Global Climate Indicators	23
그림 2.1.2.15. SCSMEX의 집중관측 기간인 1998년 5월~8월의 현장관측 네트워크	24
그림 2.1.2.16. (a) SCMREX 동안 중국 남부 및 인근 지역의 관측망. (b) 광둥 중부 및 서쪽 지역의 집중관측기간 동안 설치 운영된 이동형 장비들 배치도	25
그림 2.1.2.17. TAMEX 도플러레이더 네트워크	26
그림 2.1.2.18. TiMREX 집중관측 기간 동안 고층관측을 위한 사운드 및 드랍사운드 예시 ..	27
그림 2.1.2.19. TiMREX 집중관측 기간 동안 대만 남서지역에 설치된 중규모 원격 및 지상관측망	27
그림 2.1.3.1. KORUS-AQ입체관측 협력 모식도 및 중요 준비 과정(출처: 환경과학원 2020) 31	
그림 2.1.3.2. KORUS-AQ의 핵심 관측 지점 및 장비 (출처: 환경과학원)	32
그림 2.1.3.3. KORUS-AQ 관측 프로그램 참여 연구자 기념사진	33
그림 2.2.1.1 2012년 7월 13일 서해상에서 발달한 선형 강수계 예시	38
그림 2.2.1.2. 2022년 8월 8일~11일 중부지방 호우 사례	38
그림 2.2.1.3 2018년 9월 12일 12UTC 변수별 예측장과 분석장의 차이	39
그림 2.2.1.4 온대저기압이 남부지방을 통과할 때 평창-동해지역에서 관측된 레이더 반사도의 (왼쪽) 동영상, (오른쪽) 호브몰르 그림. (Tsai et al., 2018)	40
그림 2.2.1.5. KORUS-AQ 2016의 모든 자료를 다운로드할 수 있는 NASA의 데이터베이스 42	
그림 2.2.1.6. NCAR의 Research Data Archive	42
그림 2.2.3.1. 대학에 설치된 NOAA의 연구기관 (NOAA Cooperative Institute)	47
그림 2.2.3.2. NSSL과 지역대학이 운영 중인 모바일 프로파일링 시스템과 모바일 메조넷 ..	47
그림 2.3.1.1. 테스트베드를 통한 집중관측과 협업화 연계도. (Dabberdt et al., 2005)	52
그림 2.3.1.2. R2O 과정에서 R과 O의 특성	53

요 약 문

본 연구에서는 기상관측 분야의 열악한 국내 환경을 극복하고 세계 환경 변화에 대응하기 위하여 1) 관측 주도의 기상 연구 도약, 2) 보호 학문으로서 기상관측 분야 학문 육성, 3) 기상관측 분야 기술 자립 및 활성화를 목표로 위험기상과 특이기상에 관한 연구중심의 집중관측 환경을 조성하고 기상청-대학 간 새로운 협력모델 마련을 위한 방안을 제시하였다.

먼저 국내외 집중관측 사례 현황을 조사하여 분석을 통하여 장단점 및 시사점을 도출하였다. 이를 바탕으로 국내 환경에 적합한 집중관측 및 협력방안을 도출하여 향후 계획으로 제시하였다. 국내에서는 주로 세계기상기구의 집중관측 프로그램과 연계하여 국내에서 집중관측을 수행하였다. 초기 새로운 기술 및 장비의 시험 및 도입이 활발하였으나 점차 통상적이고 전통적인 관측에만 치중함으로써 관측 그 자체로만 그치는 경우가 많았다. 이러한 한계성을 극복하기 위하여 다음의 세 가지 측면에서 계획, 추진, 활용 등의 연계와 환류가 필수적이다.

첫째, 현재 가용한 기상청 장비, 특히 연구 장비에 대한 전수 조사를 통하여 이를 목적에 맞도록 기상청 집중관측 시설, 일명 기상청 시설 (KMA facility)로 체계화하고 국산 장비의 개발 및 해외 첨단장비의 도입을 통하여 기상청 시설을 보강하고 이를 활용할 수 있는 집중관측계획을 수립하여야 한다. 또한, 이러한 첨단장비 또는 국산 장비들이 연구에서 현업화로 전환이 가능하도록 특성화 대학을 지정하여 지속적이고 체계적인 협력을 강화하여야 한다. 둘째, 관측의 특성으로 인한 국내 기상관측 분야의 낙후성을 극복하고 기상청 내 관측 분야 활성화를 위하여 지방기상청과 대학 간의 집중관측 연계 프로그램을 개발하여 지속적인 현장 교육과 관측을 통하여 관측 분야 전문성을 확보하여야 한다. 대부분의 지역 대학의 상황을 고려하여 첨단 원격탐사 장비보다는 모바일 센서 및존데 관측을 통한 협력이 적절할 것이다. 셋째, 관측-예보-현업화의 연계를 통하여 집중관측이 현업화와 연계되고 현업에서 관측에 대한 필요성 및 요구가 제시되어 상호 발전적인 환류 체계를 구축하여야 한다.

이러한 다양한 측면에서의 관측 활성화 방안들은 체계적인 계획 수립과 장기적 지원 정책을 통하여 가능할 것이며 이를 위한 기상청과 대학의 확고한 의지가 담보되어야 할 것이다.

PH

PH

제 1 장 서 론

제 1 절 연구개발의 필요성 및 목표

최근 한반도에 위험기상 및 특이기상 (극값, 이상 기압계 등 발생 빈도가 낮은 기상 현상)이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 기상 현상은 기존의 전통적 관측망으로 그 현상을 이해하고 예측하기에는 역부족이다. 이러한 현상은 1) 시간 및 공간상에서 급격한 변동성, 2) 기존에 관측되지 않은 극한값의 발생, 3) 발생 메커니즘의 복잡성 및 다양성 등의 특성을 가진다. 현재 관측망은 이러한 특성을 가지는 기상 현상을 관측하기에는 한계가 있다. 이러한 현상을 관측하기에 공간, 시간 해상도가 부족 할 뿐만 아니라, 극한값을 관측할 수 있는 관측장비 또한 부족한 편이다. 또한, 최근 높은 관심을 두는 도심 항공교통 (Urban air mobility, UAM), 도로 및 항공교통에서 기상의 중요성이 대두되고 있어 비전통적인 기상관측 분야에서 상세 기상 정보에 대한 요구가 증대되고 있다. 따라서, 이러한 위험기상/특이기상뿐만 아니라 기상 비전통 분야에서 기상관측자료 확보를 위한 관측 패러다임의 전환이 요구된다.

한국에서 기상관측 분야는 매우 취약하다. 초기 경제적 여건으로 인한 고가의 기상 장비 구매가 어려웠고 경제 발전과 더불어 기상장비를 도입할 수 있는 여건이 마련되었지만, 전문가의 부족, 작은 내수시장으로 인한 장비 국산화에 대한 필요성 부족으로 여전히 기상장비 개발 및 기상관측은 선진국 대비 매우 낮은 수준을 보인다. 또한, 최근 교육 및 연구 환경의 변화는 힘들고 어려운 기상관측 연구보다는 편의성 위주의 모델링 또는 이론 연구에 더 치중하는 경향을 보인다. 기상관측을 기피업종으로 바라보며 다른 분야에 비해서 관측을 힘들고 어려운 분야로 인식한다. 또한, 이론 연구나 모델링에 비하여 기상관측 연구는 경비와 인력이 많이 소요되며 관측을 수행하더라도 여러 가지 현장 여건으로 인하여 원하는 자료를 획득하지 못하는 경우가 비일비재하다. 따라서 기상관측 분야를 보호 학문으로 지정하고 관측 분야 전문가 육성을 위한 지속적인 지원이 필요하다.

세계 시장 변화에 따라 기상 분야 또한 급격한 변화를 겪고 있다. 거대 투자 자본을 갖춘 외국기업의 국내 기상시장 잠식은 지속적인 우려를 유발하였고 최근 기상기술에 대한 독점화 및 보호 장벽은 국산기술개발의 중요성을 강조한다. 기상 분야 발전은 신장비 주도로 흘러가고 있고 신기술에 대한 독점화 및 비공개화가 가속되고 있다. 따라서 이러한 시대 및 시장변화에 대처하기 위하여 자주기상을 위한 관측장비 국산화 및 관측 분야 기술 확보가 시급히 요구된다.

본 연구에서는 이러한 기상관측 분야의 열악한 국내 환경을 극복하고 세계 환경 변화에 대응하기 위하여 1) 관측 주도의 기상 연구 도약, 2) 보호 학문으로서 기상관측 분야 학문 육성, 3) 기상관측 분야 기술 자립 및 활성화를 목표로 위험기상과 특이기상에 관한 연구중심의 집중관측 환경을 조성하고 기상청-대학 간 새로운 협력모델 방안을 마련하고자 한다. 이를 위하여 국내외 집중관측 사례에 대한 현황을 조사하여 장단점 및 시사점을 도출할 것이다. 이

를 바탕으로 대학생 참여 위험기상 집중관측 캠페인 추진방안을 제시하여 지역대학과 지방청이 연계한 관측-예보-서비스 전 분야 협력체계를 제시하고 집중관측자료 공동활용을 통한 대학교육, 연구 활성화 방안을 제시한다. 또한, 지상 관측 분야와 예보 현업과의 연계방안을 제시하여, 기상관측 분야 육성을 위한 향후 발전 방향을 제시하고자 한다.

본 연구에서는 3차례의 대면 자문과 1차례의 서면 자문을 통하여 본 연구기획에 대한 전반적인 전문가 의견을 청취하였으며 자문 의견을 첨부 1에 수록하였다. 또한, 본 과제에서 기획연구의 결과로 향후 단기, 중장기 과제를 도출하였으며 이를 첨부 2에 수록하였다.

제 2 절 연구개발 내용 및 범위

표 1.2.1.1 연구개발 내용 및 범위

연구개발 내용		연구개발 범위
국내외 집중관측 사례 현황조사	기상청 집중관측 프로그램 성과분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 과거 기상청 집중관측 활동 및 연구 등 사례조사·분석 ○ 집중관측 분석결과 등에 나타난 집중관측 기대(수준) 조사 ○ 집중관측 프로그램 운영으로 예보 정확도 향상 가능성 진단
	해외 집중관측 프로그램 및 조직 조사·분석	<ul style="list-style-type: none"> ○ 미국·영국·ECMWF·WMO 등 집중관측 프로그램 사례조사 및 분석 ○ 기관별 조직 체계, 운영현황 등 조사·분석을 통한 시사점 도출 ○ 국외와 비교하여 현 기상청 집중관측 프로그램 벤치마킹 도출
	국내 민간 참여 기상관측 프로그램 사례조사	<ul style="list-style-type: none"> ○ 타 부처 민간 참여 우수 프로그램 사례조사 ○ 프로그램 운영을 위한 전문성 확보(예산, 전문 인력 등) 방안제시
대학생 참여 위험기상 집중관측 캠페인 추진방안 제시	집중관측 대상 조사 및 성과 활용 방안제시	<ul style="list-style-type: none"> ○ 위험 기상요소 선정, 실효성, 우선순위 등 집중관측 사례 제시 ○ 집중관측 프로그램을 통한 합리적인 성과 활용방안 제시
	캠페인 기본계획 제시	<ul style="list-style-type: none"> ○ 운영체계 유형(협업체계) 특성 및 장·단점 비교 분석, 국내외 사례분석을 통한 캠페인 운영체계 제시 ○ 캠페인 주제(성격), 예산산출, 인력 규모, 시기, 소요 장비, 안전관리, 대학 임무, 협력체계, 인센티브 지원 등 캠페인 운영방안 제시
	지역대학·지방청 연계 관측·예보·서비스 등 전주기 기상업무 협력체계 제시	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지방청별 맞춤형 지원(장비, 인력 등) 프로그램 마련에 적합한 운영체계 제시 ○ 지역대학-지방기상청 간의 장·단기 공동관측 연구개발방안 제시
	집중관측자료 공동활용 체계 구축을 통한 대학교육·연구 활성화 방안제시	<ul style="list-style-type: none"> ○ 집중관측자료 분석을 통한 대학교 연구과제 활용방안 도출 ○ 대학생 집중관측 프로그램의 단기·중장기 발전방안 및 환류 방안
예보 현업-집중관측 프로그램 연계방안 제시	위험기상, 특이 기상별 집중관측 분석 및 예보 현업 활용방안 도출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 집중관측자료 품질검사, 자료 분석 및 자료 활용방안 제안 ○ 집중관측별 예보가이드스 개발 및 언론 소통 등 예보 활용방안 제안
	집중관측 노하우, 자료 활용방안 등 상시 관측망 개선사항 도출	<ul style="list-style-type: none"> ○ 지역 대학교별 공동 관측 네트워크 구축 및 활용방안 제안 ○ 집중관측을 통한 민간 기상관측자료 수집 및 활용방안 제안 ○ 집중관측 장비개발, 관측망 확대 등 상시 관측망 개선방안 제안

제 2 장 연구개발 결과

제 1 절 국내외 집중관측 사례 현황조사

1. 기상청 집중관측 프로그램 성과분석

기상청은 90년대 후반부터 WMO와 연계하여 집중관측 프로그램을 운영해왔다 (표 2.1.1.1). 1999년 국제 집중관측 실험인 GEWEX (Global Energy and Water Exchanges)와 연계하여 KORMEX (Korea Monsoon Experiment)를 수행하였고, 주로 존데를 이용한 집중관측이 수행되었다. 2001년부터는 THORPEX (The Observing system Research and Predictability Experiment) T-PARC (THORPEX - Pacific Asian Regional Campaign)와 연계하여 KEOP (Korea Enhanced Observing Period)를 수행하였다. KEOP은 고해상도 집중관측을 통하여 한반도 위험 기상 현상과 이에 관련된 역학적 배경을 이해하고 예측 가능성을 향상하고자 하였다. 국내에서는 유일하게 다양한 신 관측 기술을 도입하여 시험하였으며 이들 기술의 일부는 현재 현업으로 활용 중이다. 이후 ProbeX (PREDictability and Observation Experiment of Korea)를 통하여 해상 관측 공백 지역이 수치예보에 미치는 영향을 보고자 하였다. 그러나 KEOP과는 달리 신관측 기술의 도입이나 체계적인 집중관측으로 설계는 이루어지지 못하였다. 이후 인공증우, 장마와 관련되어 산발적으로 집중관측이 추진되었지만, 신기술을 이용한 체계적인 집중관측으로 연계는 다소 한계가 있었다.

한반도에서 체계적인 설계에 따른 집중관측은 평창동계올림픽 기간에 진행한 ICE-POP2018 (International Collaborative Experiments for Pyeongchang 2018 Olympic and Paralympic winter games)이다. WMO의 RDP (Research Development Program)와 FDP (Forecast Demonstration Program)의 일환으로, 2~3년의 준비 기간을 통하여 세계 여러 나라의 첨단장비와 연구팀이 참석한 국내 최초의 국제공동 집중관측 캠페인으로 예비관측은 2016~2017년 겨울, 본 관측은 2017~2018년 겨울에 수행되었다. 다양한 미세물리 관측장비, 원격탐사장비 (라이다, 구름 레이더, 다파장 이중편파 레이더, 수직측풍기), 고해상도 존데 관측 등이 수행되었고 세계 각국의 고해상도 모델이 설치되어 운영되었다. ICE-POP 2018에서 생산된 집중관측 자료를 기반으로 다양한 연구가 진행되었고 (약 30여 편의 논문 출간) 현재에도 참여팀들을 중심으로 공동연구가 진행되고 있다.

ICE-POP 2018 이후 기상청의 집중관측 프로그램은 유사한 형태로 과학적 한계점에 기반한 기획, 연구 및 집중관측 설계, 집중관측, 자료 품질관리 및 산출물 생산, 공동 연구의 절차를 통하여 진행되고 있다. KPOP (Korea Precipitation Observing Program)은 여름철 수도권에서 발생하는 중규모 대류계에 대한 집중관측, 이해, 및 예측성 향상을 위한 프로그램으로 2~3년의 준비 기간을 거쳐 2023년과 2026년 2회의 집중관측 프로그램을 계획하고 있으며 세계 첨단장비와 연구팀이 참여하는 국제공동 연구 프로그램이다.

표 2.1.1.1. 기상청 집중관측 프로그램 목록 (1999-현재)

실험명	실험명 (약어)	기간	관련국제실험	목적	비고
Korea Monsoon Experiment	KORMEX	99-00	GEWEX (Global Energy and Water Exchanges) SCSMEX(South China Sea Monsoon Experiment) GAME(GEWEX Asian Monsoon Experiment)	장마와 이에 동반된 집중호우 현상을 이해하고 예측 능력 향상	존데
Korea Enhanced Observing Period(Program)	KEOP	01-08	CEOP (Coordinated Energy and Water Cycle Observation Project) THORPEX(The Observing system Research and Predictability Experiment) T-PARC (THORPEX - Pacific Asian Regional Campaign)	고해상도 집중관측을 통해 한반도 악기상 현상과 이에 관련된 역학적 배경을 이해하고 예측 가능성 향상	국가악기상집중관측센터(해남), 에어로존데, 오토존데, 윈드프로파일러, ORG, 20m 플렉스타워
Predictability and Observation Experiment of Korea	ProbeX	09-19	THORPEX, T-PARC	해상 관측 공백 지역이 수치예보에 미치는 영향 분석	존데
International Collaborative Experiments for Pyeongchang 2018 Olympic and Paralympic winter games	ICE-POP 2018	17-18	WMO RDP/FDP Winter olympic games experiment (SNOW V10, FROST-2014)	겨울 강설 예측성, 미세물리 모수화 개발	국제공동 중규모 실험 다양한 장비
Korea Precipitation Observing Program (수도권 집중관측)	KPOP	21-	PRECIP (Prediction of Rainfall Campaign in the Pacific) T-PARCII (Japanese Tropical cyclones-Pacific Asian Research Campaign for Improvement of Intensity estimations/forecasts) TAHOPE (Taiwan-area Atmospheric and Hydrological Observation and Prediction Experiment)	중규모 대류계 집중관측, 이해, 및 예측성 향상	국제공동 중규모 실험 다양한 장비

* SNOW V10: Science of Nowcasting Olympic Weather for Vancouver 2010

* FROST-2014: Forecast and Research in the Olympic Sochi Testbed

아래 그림은 KPOP의 일환인 수도권 집중관측에서 비행기 관측 및 고층 집중 관측망과 지상관측망을 나타낸다. 계획 단계의 구축안으로 실제 집중 관측망은 변경될 것이다. 인천공항 및 인천기상대에 다양한 원격탐사 및 지상 장비를 이용하여 슈퍼사이트를 구축하며 서해를 포함한 수도권 지역에 지상 강수 및 미세물리 관측망을 구축하고 있다. 집중관측 지역은 X-밴드, C-밴드, S-밴드의 이중편파레이더망을 갖추고, 20여 개 이상의 지상 사이트를 구축하였다. 또한, 기존의 도시기상관측망 및 항공기상망을 동시에 활용할 수 있다.

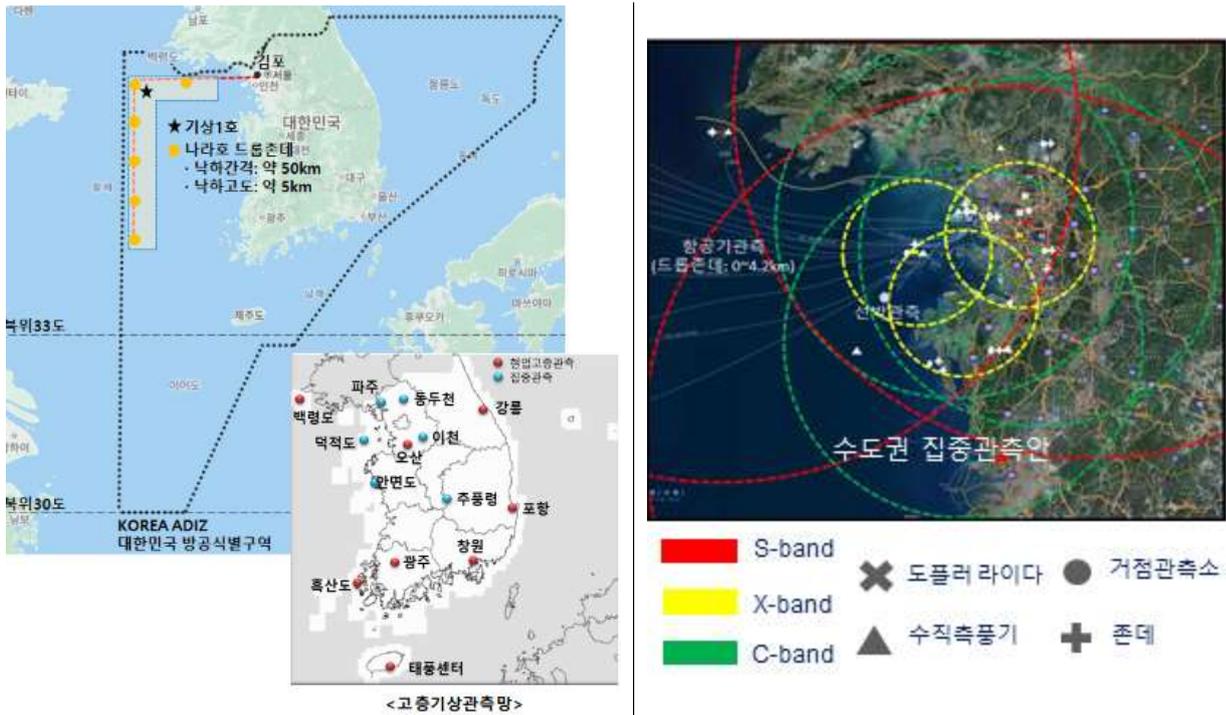


그림 2.1.1.1. 수도권 집중관측을 위한 (왼쪽) 항공기 및 중관관측, (오른쪽) 원격탐사 및 지상 중규모 관측망

KEOP의 1단계 사업 (2001~2005년)에서는 주로 해남 슈퍼사이트를 중심으로 한반도 남서부에 유입되는 장마전선 및 태풍에 관련된 중규모 위험기상 현상들에 대한 특별관측을 실시하였고, 2단계 사업 (2006~2010년)부터는 2006년에 거창, 남원에서 특별관측을 통한 서해 산악 기상 및 풍하측 기상 연구 시도, 2007년에는 문산과 이어도에서 특별관측, 중부 호우와 해양기상 연구 시도를 시도하였다. 2단계 사업부터는 한반도의 특성적인 기상 현상에 관한 관심이 높아졌다. KEOS는 한반도 위험기상 감시를 위한 집중관측을 여러 차례 수행하면서 유용한 자료를 축적하여 한반도에 유입되거나 발생하는 재해기상 현상들의 발달기구를 이해하는데 중요한 자료로 활용되었다. 즉, 한반도 남서부 장마전선 및 태풍 등 중규모 위험기상 현상, 서해 산악 기상 및 풍하측 기상 (거창, 남원), 중부 호우와 해양기상 (문산, 이어도) 같은 한반도 특이기상에 관한 관심을 고조하였다는 것에서 큰 의미가 있다.

또한, 장기간의 집중관측을 통하여 한반도 기상현상에 대한 다양한 자료들을 수집하여 한반도 위험기상 감시 자료를 축적하고, 태풍 및 한랭전선에 대한 구조 분석, 위성자료 산출의 검증, 장마전선 상의 중규모 대류 운동 분석, 재해기상 발달기구 연구, 비중관 자료에 대한 수치모델의 민감도 분석 등의 다양한 연구 분야에 활용되었다. 특히 관측자료가 모델에 미치는 영향 등을 집중적으로 조명하여 새로운 또는 조밀한 관측망의 필요성을 제시한 것이 큰 성과라 할 수 있다.

집중관측 프로그램 운영으로 예보 정확도 향상 가능성 진단에 기여한 것은 크게 3가지 분야, 즉, 1) 관측연구 및 재해성 기상 현상의 기구 규명, 2) 예측 가능성 분석, 3) 관측시스템

실험으로 구분할 수 있다.

관측 연구 및 재해성 기상 현상의 기구 규명: 재해성 기상 현상의 동계 및 하계 집중관측, 선상 집중관측을 통하여 고해상도 관측자료를 획득하였다. 특히, 수직측풍기, 오토존데, 에어존데, 라디오미터 등 첨단 관측장비를 신규 도입하여 실시간 고해상도 집중관측 자료를 생산하였다. 이러한 관측자료를 기반으로 윈드프로파일러와 존데 관측자료의 상호 비교 분석을 수행하여 정확도를 평가하였다. 또한, 고층관측 자료를 이용하여 장마전선의 연직 시·공간 특성을 분석하고, 시·공간 고해상도 자료의 EOF 분석을 통해 대기의 연직구조에 대한 특성을 연구하였다.

예측 가능성 분석: 고해상도 집중관측 자료의 EOF 분석을 통해 도출된 결과를 이용하여 수치 모델 기준 상태 설정에 따른 수치모형의 강수계 예측 가능성 분석을 수행하였다. 이중도플러 레이더를 이용한 바람장 산출을 기반으로 예측성 분석을 진행하였고 3차원 변분법을 기반으로 도플러레이더를 활용한 관측시스템 모사 실험을 수행하여 예보 정확도 향상에 기여하였다.

관측시스템 실험: 집중관측 영역에 대하여 목표관측 시스템을 구축하였다. 앙상블 정보를 이용한 수반 민감도 기반의 목표관측 전략을 연구 및 개발하고, 특이벡터를 이용하여 위험기상 사례의 예측 민감지역을 파악하고, 목표 관측자료를 동화할 수 있는 자료동화시스템인 WRF/3DVAR 시스템을 구축하였다. 또한, WRF/LAPS 및 WRF/3DVAR를 기반으로 집중관측 사례 수치모의를 위한 실험 체계를 구축 및 개선하고, 실험결과 포출 및 기본적 검증을 위한 시스템 구축, 현업 모형의 관측자료 수치 민감도 실험 분석 등을 통하여 OSE 실험을 위한 기반체제 개선을 진행하였다.

이러한 기상청 주도의 장기간의 집중관측 실험 연구는 위에서 언급한 다양한 성과와 예보 정확도 향상에 기여하였지만 여전히 많은 한계점과 시사점을 가진다. 이를 3가지 측면에서 살펴보았다.

집중관측 전문성의 부족: KEOP은 다소 산발적으로 집중관측으로 수행되었으며 위험기상 현상 위주의 체계적인 집중 관측망의 설계가 부족하였다. 따라서 이러한 전문적이고 체계적인 설계 부족 및 비전문적인 집중관측 수행으로 특이기상 이해를 위한 집중관측 자료가 부족하여 직접적인 연구 성과로 이어지지 못한 아쉬움이 있다. 이러한 한계는 근본적으로 관측의 전문성 부재, 관측 전문 인력 부족에서 기인하였다. 또한, 집중관측이 현업화까지 연결되기 위해서는 집중관측-품질관리-분석-모델링-현업화의 피드백 체계가 중요하지만, 기상청 집중관측 프로그램에서는 이러한 선순환 구조 또는 연계 부족으로 집중관측이 현업으로 활용되는데 한계가 있었다. 따라서 이러한 한계를 극복하기 위해서는 한반도 위험기상에 대한 포괄적, 체계적, 종합적 집중관측프로그램 (설계, 수행, 연구 활용, 및 피드백)이 필요하다.

집중관측의 다양성 및 활용성 부족: 앞에서 살펴본 것과 같이 기상청 집중관측은 규모

측면에서는 종관규모 또는 중- α 규모 현상에 대한 존재 관측에 치중하여, 다양한 규모 (작은 규모), 주제 (위험, 재해), 연구단계 (기초, 활용), 관측장비 (현업, 첨단장비, 개발 장비) 등에 관한 연구가 수행되지 못하였다. 또한, 생산된 집중관측 자료에 대한 체계적인 품질관리가 부족하였으며 집중관측 자료를 대부분 기상청이나 기상연구소 내에서 사용하는 등 자료 활용을 극대화할 수 있는 체계가 미비하였다. 집중관측은 기상청 내부로 제한되었고 학계에서 자료 활용 또한 매우 저조하였다. 따라서 다양한 한반도 위험기상에 대한 첨단장비를 활용한, 다양한 집단의 참여를 통한, 다중규모 집중관측 및 자료 활용이 필요하다.

현업화 연계 부족: 기상청의 집중관측은 관측장비의 집중적인 체계 시험을 통하여 표준화 및 현업화로 가는 방안의 제시가 진행되지 않아 현업과의 연계성이 부족하였다. 위험기상 현상 위주의 체계적인 집중 관측망 설계의 부족으로 현상이해를 위한 자료 부족과 이에 관한 연구가 진행되지 못하였으며, 집중관측-현업의 선순환이 이루어지지 못했다. 즉, 집중관측-품질관리-분석-모델링-현업 등의 R2O 체계가 부재하였다. 또한, 모델의 근본적인 개선을 위한 프로세스 검증보다는 성능 위주의 검증으로 집중관측이 모델 역학 및 물리과정의 개선으로 직접적으로 연계가 되지 못한 아쉬움이 있다. 따라서, 향후 집중관측 실험에서는 R2O/O2R 피드백 체계를 통한 집중관측의 현업 연계성을 확보할 필요가 있다.

2. 해외 집중관측 프로그램 및 조직 조사 분석

미국은 NSF (National Science Foundation)의 지원을 받는 대학들과 NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) 산하의 NSSL (National Severe Storms Laboratory)의 협력을 통해서 다양한 집중관측 프로그램을 진행하고 있다. 일반적으로 미국 내의 폭풍우와 관련된 연구가 많이 진행되지만, 국제적인 협력을 통해서 동아시아 또는 남미 지역의 연구를 수행하기도 한다. 이밖에도 DOE (Department of Energy)가 지원하는 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 프로그램을 통해서 다양한 기상, 기후 관측장비를 운영하고 해당 장비를 대학연구에 활용할 수 있게 하여 관측 연구의 환류 체계를 이루고 있다. 최근 미국에서 수행된 중요한 관측연구 프로젝트를 정리하였다.

PRECIP (Prediction of Rainfall Extremes Campaign in the Pacific): 최근 수행된 대만지역의 국제 관측연구로, 대만 및 일본 지역에서 발생하는 집중호우 관측과 분석 및 모델링을 통해 다중규모 집중호우를 이해하기 위한 연구이다. 2022년의 관측은 5월 25일부터 8월 10일에 수행되었으며, 지속적인 관측이 계획되어 있다. 미국 내 책임 연구기관은 Colorado State University (연구책임: Michael Bell, Kristen Rasmussen)이며 이외에도 North Carolina A&T, Pennsylvania State University (PSU), University of California Davis, University of Oklahoma, University of Hawaii, University of Wisconsin 등 다수의 대학이 참여한다. 대학 이외의 연구기관으로는 National Center for Atmospheric Research (NCAR), NOAA가 참여하여 관측장비와 관측자료를 수집하는 데이터베이스 체계를 제공한다. 추가로 다음과 같은 국제관측 프로젝트와도 협력이 진행되며 (TAHOPE: 대만, T-PARC: 일본, KPOP: 한국) 자세한 내용은 <http://precip.org/>에서 찾을 수 있다.

과학적 목표는 수증기가 많은 환경 및 복잡한 지형에서 발달하는 짧은 시간 규모의 집중호우 현상의 연구이며, 현업을 위한 단순 관측이 아닌 강수의 강도와 유지시간에 따른 호우 특성 및 핵심 강수 프로세스의 규명을 통해 장기적으로 다중규모(multi-scale)에서 발생하는 강수의 상호작용을 쉽게 이해하는 것을 중요 연구과제로 한다. 고밀도의 지상 관측 네트워크와 다수의 항공관측 및 중규모 모델링을 활용하여 강수현상의 깊이 있는 이해를 목적으로 하며 대학을 포함한 다수 국제기관의 협력이 특징이다.

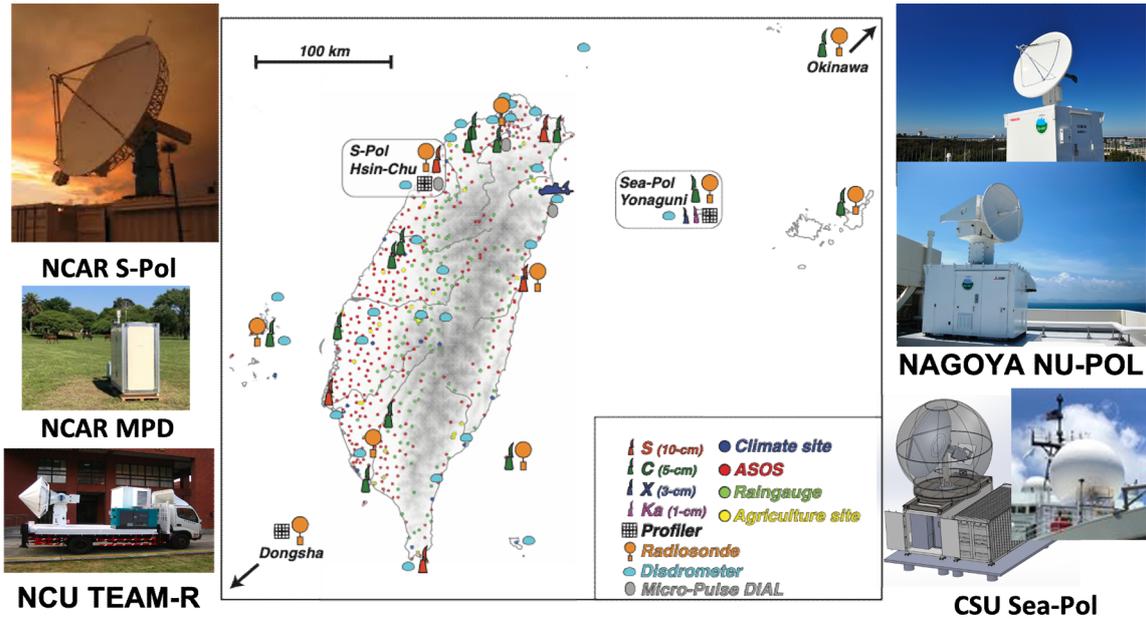


그림 2.1.2.1. PRECIP 집중관측 캠페인에 투입된 지상 관측 장비 및 위치

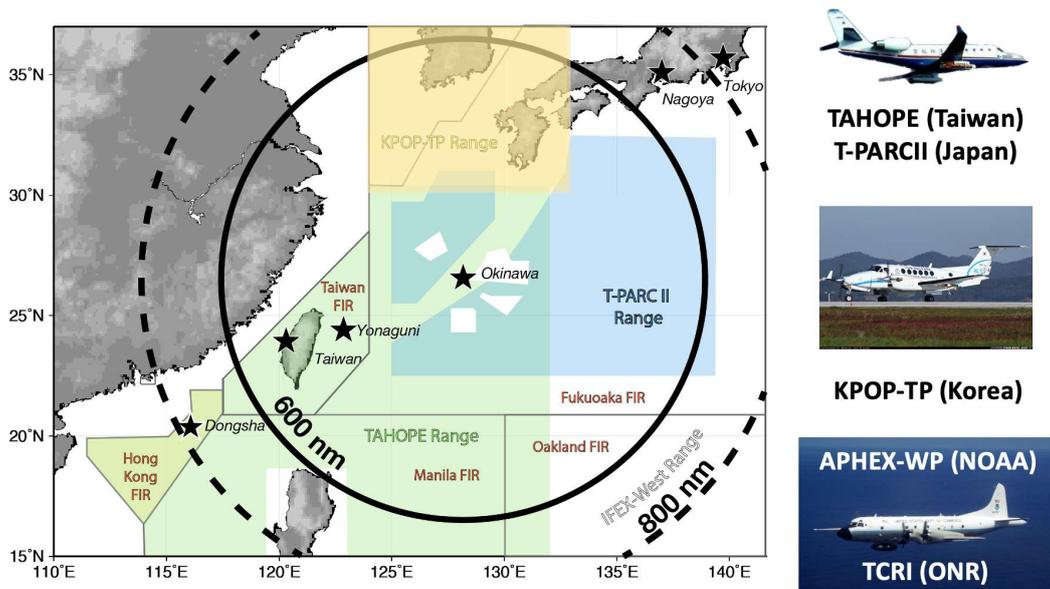


그림 2.1.2.2. PRECIP 집중관측 캠페인에 투입된 항공관측 장비 및 비행 영역

PERILS (Propagation, Evolution, and Rotation In Linear Storms): NOAA의 NSSL이 주도하고 NSF의 추가적인 지원으로 이루어지는 미국 내 토네이도성 준선형(quasi-linear) 폭풍우 시스템의 연구로, 미국 남동부 지역에서 겨울과 봄에 많이 발달하는 준선형 폭풍우 시스템에 집중하여 해당 현상의 발달, 전파 및 수반되는 중규모 저기압(mesocyclone/mesovortex)을 연구하는 관측 프로그램이다. 관측이 수행되는 기간은 2022~2023년이며 주도 기관인 NSSL 이외에도 NOAA 산하의 PSL (Physical Sciences Laboratory)과 GSL (Global Systems Laboratory), NSF 후

원을 받는 연구기관인 NCAR, 그리고 9개 이상의 미국 대학(U. Oklahoma, U. Alabama, U. Louisiana, Texas Tech, Perdue, SUNY Stony Brook, PSU)이 참여한다.

트럭이나 트레일러를 이용한 이동식 원격 장비(레이다, 라이더) 및 다수의 연직대기 측정 장비를 활용하여 목적지점의 현상 관측을 수행하며 대학과의 협력을 통해서 폭풍우가 발생하는 지역에 집중하여 17 이상의 지점을 동시에 관측하는 것이 특징적이다. 관측 지점과 대표적인 장비들을 그림에 표시하였으며 자세한 내용은 <https://www.nssl.noaa.gov/projects/perils/>에서 찾을 수 있다.

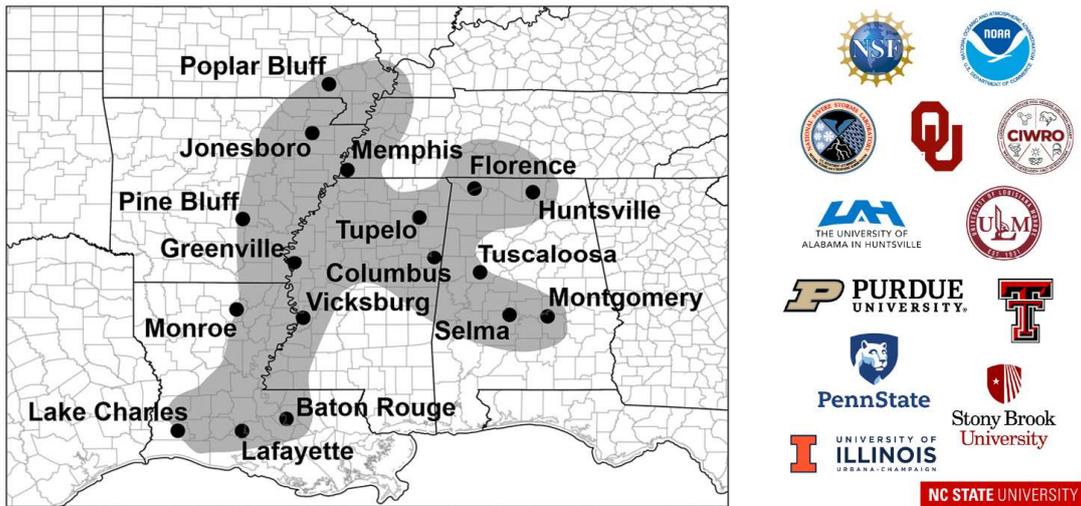


그림 2.1.2.3. PERILS 캠페인의 목표관측 지역 및 참여 기관 (대학 및 연구소)



NOXP/SMART-R Mobile Radar



Mobile Mesonet



CLAMPS Trailer



ULM Lidar



Sticknet (mobile AWS)



Lightning Mapper

- Mobile Radars - 7	
<ul style="list-style-type: none"> ▪ 2 SMART-Rs ▪ Stonybrook SKYLER ▪ NOXP ▪ UAH MAX ▪ DOW-7 ▪ COW 	
+ Profiling Platforms - 13	Lidar
+ Mobile Mesonets - 7	
+ Surface instrument platforms - 44 total sites	
+ Sounding Systems - 18	Radiosonde
+ Lightning Mapping Arrays	
+ PIPS	
+ UAS	

그림 2.1.2.4. 미국 PERILS 관측 프로그램에 투입되는 다양한 기관 및 대학의 장비

표 2.1.2.1 PERILS 관측 프로그램에 사용되는 장비의 종류 및 담당 기관

관측유형	장비 종류	담당 기관
Mobile Radars	SMART-R, SKYLER, NOXP, MAX, DOW-7, COW (*DOW: Doppler On Wheel, COW: C-band DOW)	NSSL, Stony Brook University, Oklahoma Univ, Univ. of Alabama (UAH)
Profiling Platforms	49/449/915-MHz Doppler wind profilers, Lidar trucks, Ceilometer CLAMPS (Collaborative Lower Atmospheric Mobile Profiling System)	NSSL, NOAA/PSL, Oklahoma Univ, Univ of Illinois (UIUC), UAH, Univ of Louisiana (ULM)
Mobile Mesonets	7 mobile mesonets (2 NSSL, 4 UIUC, 1 UAH)	NSSL, UIUC, UAH
Surface Platforms	44 platforms (24 TTU Sticknets, 20 UIUC Pods)	Texas Tech Univ (TTU), UIUC
Sounding Systems	14 rawin sonde , 4 swarm sonde (more frequent mini sonde)	NSSL, UAH, ULM, UIUC, Stonybrook Univ.
Lightning Map Arrays	9 Lightning Mapping Arrays Sensors	
Unmanned aerial (UAV)	Boundary layer profiler (coptersondes, 2-3), Damage assessment	

TORUS (Targeted Observation by Radars and UAS of Supercells): 2019년 - 2022년에 수행된 거대 뇌우(supercell)의 집중관측 연구로 책임기관은 University of Nebraska-Lincoln이다. NOAA NSSL와 OMAO (Office of Marine and Aviation Operations), 그리고 University of Oklahoma, Texas Tech. University, University of Colorado Boulder의 대학들이 참여하는 중소규모의 관측연구이다. 레이더와 무인기를 이용한 미국 대평원 지역 거대 뇌우의 목적관측을 수행하였으며 레이더와 무인기 이외에도 라디오존데, 소형존데, 항공기 관측을 활용하는 다차원 자료 수집을 목표로 한다. 다수의 연구자 (50명 이상)와 대학생의 참여를 통해 다양한 관측을 수행하며 이동형 관측장비를 활용하여 거대 뇌우 주변에서 항공관측(NOAA P-3 Hurricane Hunter)과 함께 조직화된 관측을 수행하는 것이 특징이다. 30억 원 (\$2.4 million) 규모의 연구비를 사용하며 연구비 지원기관은 NSF와 NOAA이다. 기타 자세한 내용은 <https://www.nssl.noaa.gov/projects/torus/>에서 찾을 수 있다.

표 2.1.2.2 TORUS 관측 프로그램에 사용되는 장비 및 참여 기관

관측 및 장비유형	연구 참여 기관/대학
Unmanned Aerial Systems (UAS) - 4기	<p><u>총연구책임 (Lead PI)</u></p> <p>Dr. Adam Houston, University of Nebraska-Lincoln</p> <p><u>기관별 세부연구책임 (PIs)</u></p> <p>Dr. Brian Argrow, University of Colorado, Boulder Dr. Michael Coniglio, NOAA/NSSL Dr. Eric Frew, University of Colorado, Boulder Dr. Erik Rasmussen, University of Oklahoma/CIMMS Dr. Christopher Weiss, Texas Tech University Dr. Conrad Ziegler, NOAA/NSSL</p> <p><u>(*다수의 대학원생들이 분산되어 다양한 지점의 현상 타겟팅 관측에 참여)</u></p>
NOAA P-3 Hurricane Hunter Aircraft - 1기	
TTUKa Mobile Radars - 2기	
Mobile Mesonets - 9 기	
NOXP Mobile Radar - 1기	
Mobile LIDAR system - 1기	
Mobile Sounding System - 1기	
Swarms (mini radiosonde) - 2기	

Surface Atmosphere Integrated Field Laboratory (SAIL): Lawrence Berkeley National Laboratory (연구책임: Daniel Feldman)에서 2021년부터 2023년까지 강수와 물순환 그리고 이에 영향을 미치는 다양한 프로세스를 이해하기 위한 지속적인 관측 프로젝트이다. 미국 DOE 지원의 ARM (Atmospheric Radiation Measurement) 장비 및 사이트를 이용한 지표 및 대류권 하층 대기 상태가 강수의 분포, 발달, 강도에 미치는 영향에 관한 연구를 수행하며, 강수의 발달 및 유지 메커니즘 이외에도 강유역의 수자원 유지에 중요한 지면-대기 프로세스를 연구하기 위한 기상-에너지-수자원 복합 관측을 수행한다. Berkeley Lab 이외에도 Los Alamos National Lab, Pacific Northwest National Laboratory, NCAR와 같은 다수의 연구기관이 참여하여, 이밖에 Colorado State University, Pennsylvania State University, Oregon State University, Indiana University, Boise State University, University of Utah, UC-Berkeley, UC-Davis, UC-Irvine 등과 같은 다수의 대학이 참여한다.

강수, 구름, 에어로졸, 복사, 온도, 습도 등 기본적인 관측 외에도 ARM research facility 프로그램(<https://www.arm.gov/>)에 기반하여 체계적으로 관리되는 50가지에 가까운 다양한 장비를 집적하여 강수 및 수문학적인 프로세스를 관측하는 점이 특징적이다. 자세한 내용은 <https://sail.lbl.gov/>에서 찾을 수 있다.

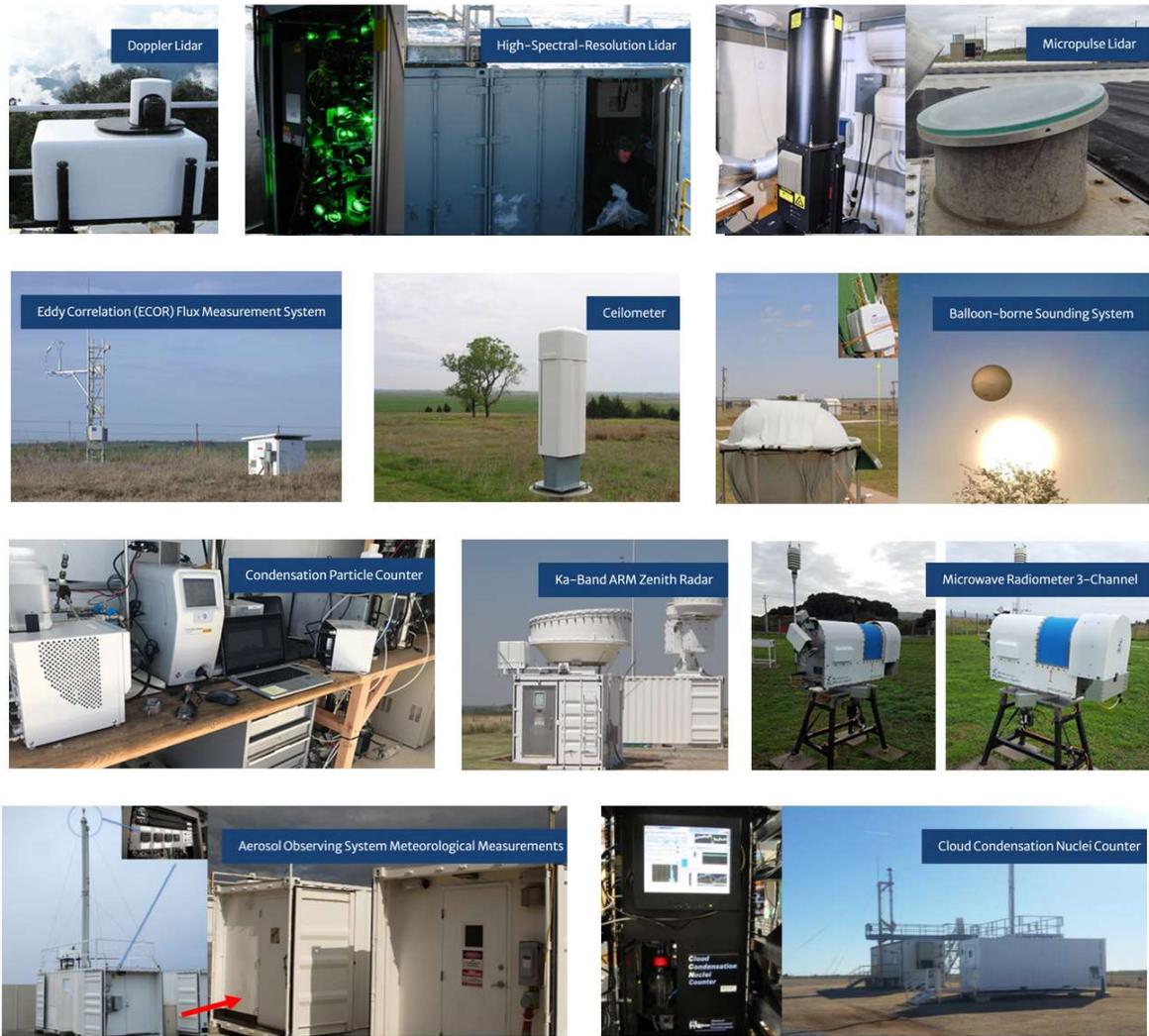


그림 2.1.2.5. 미국 SAIL 강수 관련 지면-대기 프로세스 특별관측에 사용되는 ARM research facility의 예시.

네덜란드 Cabauw 타워를 활용한 관측: 1972년에 설치한 213m 높이의 Cabauw 타워는 반세기 동안의 장기 관측을 통하여 위험기상 및 특이 기상 현상을 발견하고 이해하는데 기여하였다. 200m 높이에서의 관측은 온도 및 풍속과 같은 일반 기상관측뿐만 아니라 지역 규모의 지면 에너지 플럭스와 대기경계층 난류 특성의 연직 분포를 지속적으로 관측함으로써 중규모 및 미규모 현상을 관측해왔다 (그림 2.1.2.6). 이러한 지점 관측 (in situ observation)뿐만 아니라 윈드프로파일러와 같은 원격탐사 기반 장비를 결합한 상시관측 및 집중관측을 수행하였고, GEWEX (Global Energy and Water Cycle Experiment) 국제공동 실험 참여 등을 통하여 지면 모형의 개발, 안개 발생 메커니즘의 이해에 관한 연구를 수행하였다.

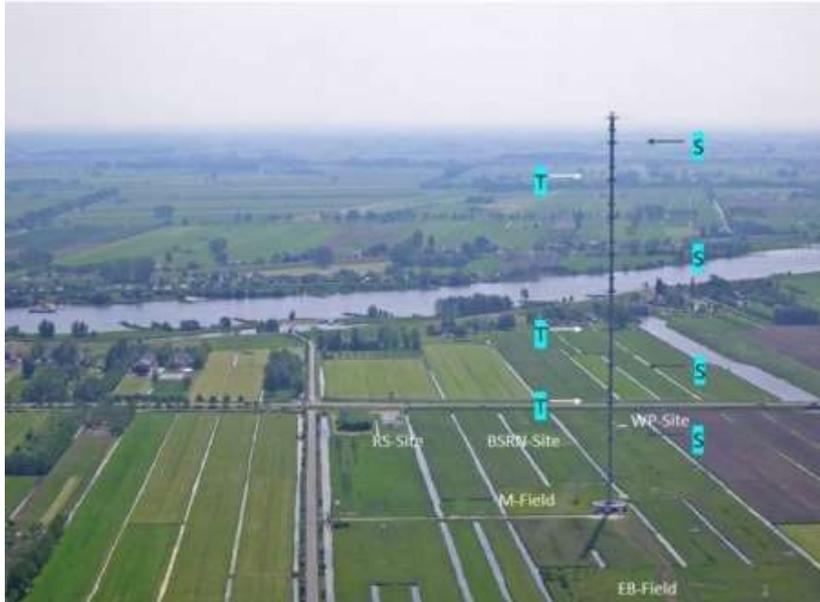


그림 2.1.2.6. Cabauw 타워의 남쪽 경관. 원격탐사 (RS-site), 윈드프로파일러 (WP-site), 지면 복사 관측 (BSRN-site), 기상관측 (M-field), 지면 에너지 균형 관측 (EB-field)로 구성됨 (Bosveld et al., 2020).

특히 1980년대 이후 ECMWF와의 협력관계 구축을 통하여 수치예보 모델의 검증과 모수화 향상에 크게 기여하였다. 미기상학적 현상뿐만 아니라 중규모 대류 현상에 의한 위험기상에 관한 연구를 수행하였다 (Beljaars et al., 1983; Verkaik and Holtslag, 2007). 미기상학 관측의 중요성을 강조하고 있으며 “유례없는 네덜란드 상공 하늘의 3차원 관측”을 위해 매우 상세한 대기 및 지표면의 장기 관측을 수행하고 있으며, 미규모에서 대규모 관측을 통합하고 미규모 모형과 전구 모형을 통합하여 분석하는 분석을 시도하고 있다. 이와 함께 웹 기반 자료표출 기반 시스템 구축, 데이터 플랫폼 구축, 데이터 집약적인 스트리밍을 통한 저장 및 접근을 위한 표준 프레임워크를 개발하고 있다.

네덜란드 기상청에 해당하는 KNMI는 기존 프로젝트에서 벗어나 상호보완적인 전문성을 갖춘 기관 간의 협력을 바탕으로 2002년 CESAR 컨소시엄 (Cabauw Experimental Site for American Research)을 설립하였다. CESAR 컨소시엄은 네덜란드 국립보건환경연구소, 네덜란드 에너지연구센터, 네덜란드 응용과학연구기구, 델프트 대학교, 바게닝겐 대학교, 위트레흐트 대학교, 유럽우주국 등이 참여하고 있다. CESAR의 목표는 (1) 대기 중 기후 변수의 장기적 추세 모니터링 (2) 위성 관측 및 검색 제품 검증 (3) 기상, 대기질 및 기후 모델 개선을 위한 대기 및 지표면에서의 프로세스 연구 (4) 날씨, 대기질 및 기후 모델 평가; (5) 새로운 관찰 방법의 개발, 구현 및 검증; (6) 석사, 박사 및 박사 후 수준의 젊은 연구원 교육으로 정의되어 있다.

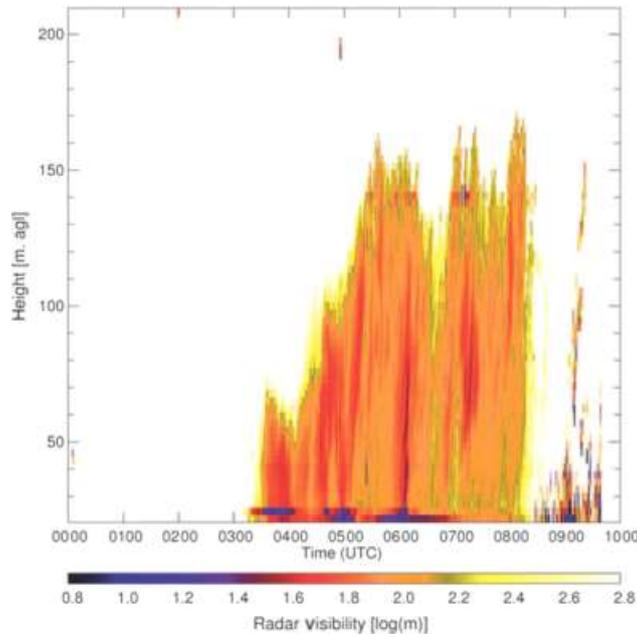


그림 2.1.2.7. 구름 레이더를 이용한 시정 관측 (Bosveld et al., 2020)

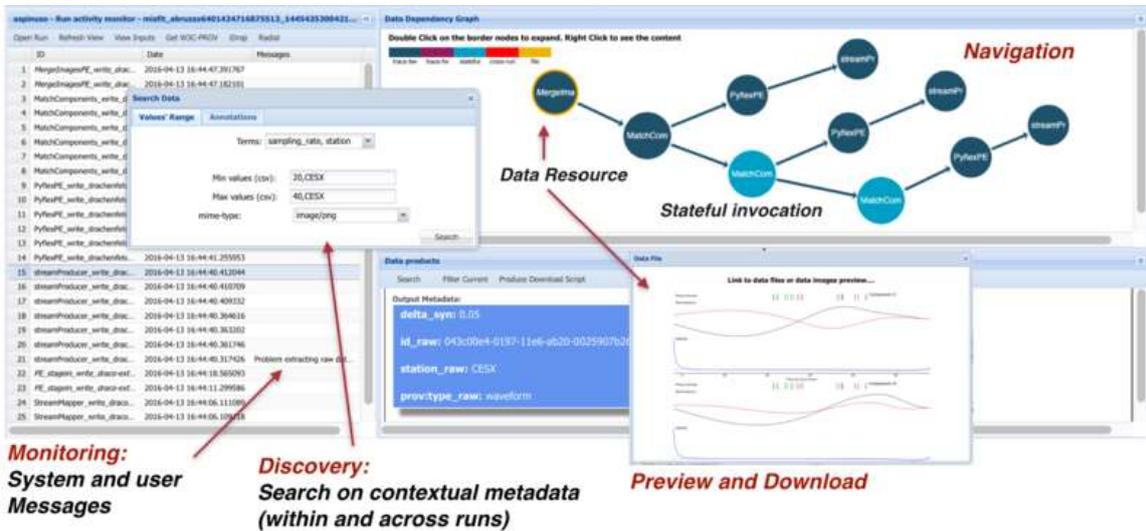


그림 2.1.2.8. 네덜란드 기상청의 자료 표출 시스템 구성

ASTEX (Atlantic Stratocumulus Transition Experiment): 1992년 섬을 중심으로 이루어진 집중관측 실험으로 층적운과 아열대 무역풍적운(trade cumulus) 사이의 전환 원인 규명을 시도 하였으며, 이 집중관측은 이전의 장기 및 상시관측과 FIRE (the First International Satellite Cloud Climatology Project Regional Experiment) 관측결과에 기반하여 집중관측 지역 및 대상을 선정하였다. 구름의 특성에 영향을 미치는 1) 구름 상부의 유입 불안정도 (entrainment instability), 2) 태양 복사에 의한 일변화, 3) 간헐적인 이슬비(drizzle)와 비균질 구름의 형성, 4)

중규모(mesoscale)의 순환과 구름 두께의 변동, 5) 강한 하강으로 상승응결고도 (lift condensation level; LCL) 이하로 역전층이 내려가는 현상이 어떤 영향을 미치는지를 확인하고자 하였다. 지상 관측, 항공기 관측, 선박 관측, 위성 관측 등의 자원을 집중하여 관측을 수행하고, 수치 모델링을 동시에 수행하여 구름 발달 과정에 관한 다양한 연구 성과를 확보하였다 (그림 2.1.2.9).

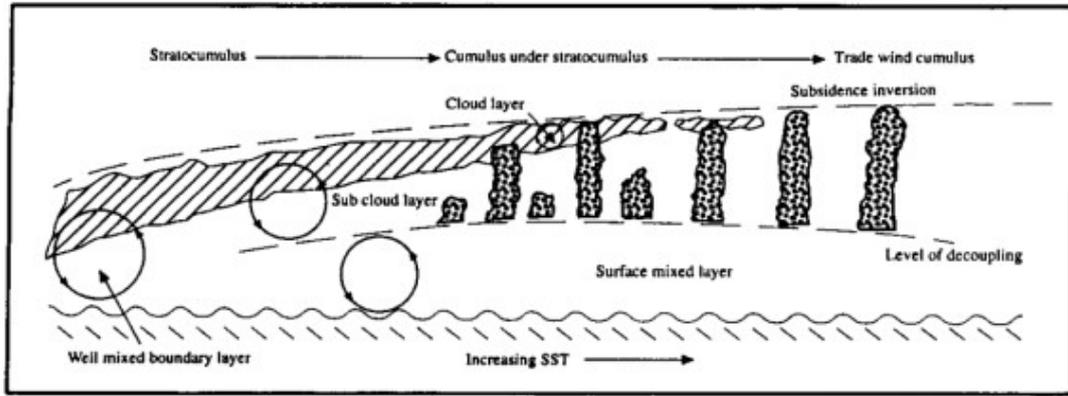


그림 2.1.2.9. 층적운과 무역풍적운의 전환 과정 (출처: Albrecht et al., 1995)

Meteorological Office와 영국 내 대학교와의 관측 분야 협력: 영국의 Meteorological Office는 구름 및 에어로졸, 대기 복사, 대기경계층 및 장비개발의 4개 연구팀으로 구성되어 있으며, 영국 내 대학 (University of Manchester, University of Leeds, University of Oxford, University of Reading 등) 및 국제 공동연구와 긴밀하게 협력하고 있으며, 이를 통하여 기상학 분야의 기초 학문 연구에 투자하고 있다. 구름 및 복사 연구는 항공기 관측을 이용하여 에어로졸 및 구름 미세물리 과정에 관한 기초연구를 수행하고 있다. 국제공동 관측캠페인을 수행하고, 자료 분석을 수행함에 있어서 Met Office 내부의 대기 과정 및 모수화 연구그룹뿐만 아니라 University of Leeds와 University of Manchester와의 협력을 수행한다. 대학이 보유하고 있는 최첨단 연구 장비 및 시설 (예, 에어로졸 챔버, 구름 챔버, 관측소, 미기상관측 장비)를 공동으로 활용하여 특정 목적의 연구 주제에 대해 장기간 관측을 수행하고, 모델링 기술을 활용하는 프로젝트를 수행하고 있다.

ECMWF의 관측 지원: 유럽중기기상청인 ECMWF와 영국 University of Reading의 기상학과는 3천만 파운드 규모의 15년 협력 프로젝트를 시작하였다. 이 프로젝트에서는 15년 동안 100명의 박사 교육 프로그램과 장학금 프로그램을 수행할 예정이다. 이 협력 방안에는 새로운 관측자료의 활용과 이 자료를 자료동화시스템에 활용하는 고분해능 자료동화시스템 개발도 포함되어 있으며, 이러한 협력을 통하여 새로운 관측기술에 대한 기술 이전을 강화하고, 일기예보 능력 향상을 위한 맞춤형 관측에 관한 상호 이해 및 협력을 강화하고 있다.

ECMWF가 가지고 있는 일기예보 기술을 대학 구성원에게 교육하는 프로그램을 정기적으로 수행하고 있으며, 보다 나은 일기예보를 위한 관측캠페인에 관한 워크숍을 지속적으로 수

행하고 있다. ECMWF가 주관하는 관측캠페인은 수치 날씨 예측 (NWP) 간의 연결을 강화하여 (1) 관측캠페인이 예측 결과를 사용하거나 예측 오류에 대한 지식을 최적화하고 (2) NWP 시스템 개발이 관측캠페인 데이터를 더 잘 활용할 수 있도록 돕는 것을 목표로 설정하였다. ECMWF 예측 오류를 투명하게 제공하여 관측캠페인에 동기를 부여하고, 예측 자료를 관측캠페인 동안 여러 가지 방법으로 사용한다. 이러한 워크숍을 통하여 ECMWF 데이터를 사용했거나 사용할 예정인 최근 또는 향후 캠페인에 참여하는 전문가를 초청하여 ECMWF 예측 사용 경험을 공유하고 피드백을 제공함과 동시에 캠페인 계획, 진단 및 모델 오류에 대한 이해 개선 과정, 그리고 궁극적으로 NWP 시스템의 개선에 관한 논의가 이루어진다. 궁극적으로 ECMWF는 순수 학문적 목적의 관측캠페인뿐만 아니라 최근 새롭게 발생하는 위험기상과 예측 오차가 큰 사례를 목적으로 관측을 수행하는 것들을 모두 지원하고 있다.

이러한 활발한 교류를 통하여 다음과 같은 질문에 답을 구하고자 한다. 명확한 질문을 설정함으로써 관측 디자인을 보다 명확하게 할 수 있고, 활용을 극대화할 수 있다:

- How are field campaigns making use of ECMWF data, for defining questions, flight planning, choice of period, etc.? Are there any obstacles to the use of this data?
- How is NWP development making use of observational campaign data? Can we identify concrete examples of model or forecast improvement based on past campaigns?
- How can observational campaigns help us identify and diagnose problems in models, observation operators, etc.?
- How can knowledge and diagnosis of NWP problems help define future field campaigns? What gaps in knowledge could future campaigns address?
- What diagnostic tools can help improve the links between observational campaigns and NWP development? How can these tools be improved?
- How can observational campaigns learn from each other in terms of their usage and diagnosis of ECMWF forecasts?
- What can ECMWF do to optimize the utility of data and modelling capabilities to support observational campaigns?

독일 Falkenberg, 네덜란드 Cabauw 및 핀란드 Sodankyla에 구축된 슈퍼사이트와 같은 회원국의 슈퍼사이트에서의 관측을 지원하였으며, 이를 통하여 대기의 가장 낮은 부분과 토양 및 눈에 대한 자세한 데이터를 제공받음으로써 지표면 근처 변수 예측 오차에 관한 새로운 통찰력을 제공하였다. 더 나아가 기온 예측 편향의 복잡한 패턴을 더 잘 이해하기 위해 식물, 토지 사용 또는 토양 특성에 대한 지역적 차이의 영향에 관한 연구를 대학과의 협력을 통하여 보완 중이다. 또한, 위성 관측의 중요성뿐만 아니라 위성 자료의 검 보정을 위한 슈퍼사이트 구축 및 이를 통한 지상 관측 지원 전담부서의 역할이 증대하고 있고, 별도의 플랫폼 등을 이용하여 자료를 공개함으로써 자료 활용성을 증가시키고 있다.

WMO THORPEX: THORPEX (The Observing System Research and Predictability Experiment)는 2003년 5월에 WMO 산하 WWRP (World Weather Research Program)의 정식 프로그램으로 채택된 10개년 국제적 관측 및 연구 프로그램이다. 목적은 위험기상 현상들에 대해 1~14일 사이의 예측 정확도를 향상하고 적응관측(adaptive observation) 또는 표적관측(targeting observation) 연구를 통해 관심 지역의 예보 오차에 가장 큰 영향을 주는 지역 (주로 관측자료가 빈약한 지역)을 찾아 관측을 강화하면 관심 지역의 예보 오차를 크게 줄일 수 있다는 개념을 적용하였다.

THORPEX는 크게 네 구성요소로 이루어지는데 1) 역학 과정 및 예측 가능성; 2) 관측 시스템; 3) 자료 동화 및 관측 전략; 4) 사회경제적 응용 등이다. THORPEX의 가장 중요한 성분은 전구 및 지역 규모의 관측캠페인이다.

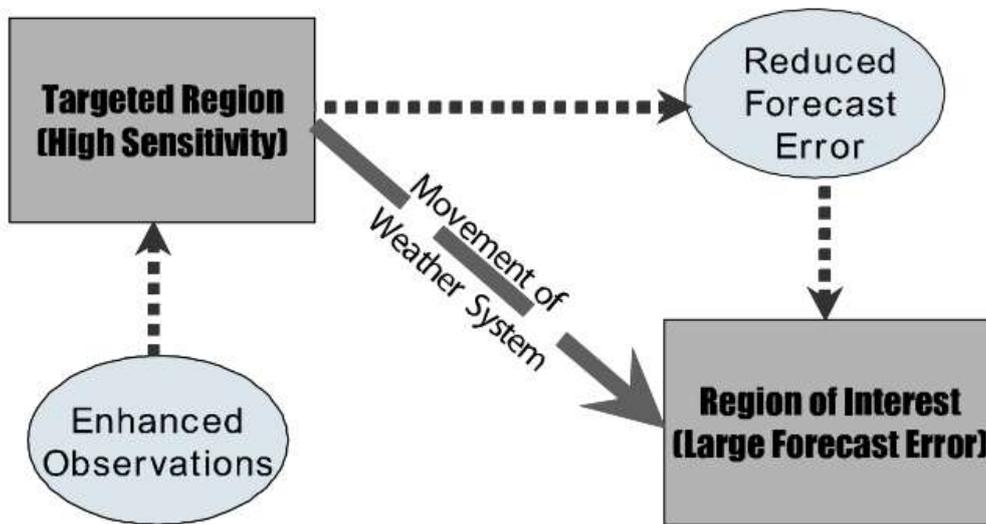


그림 2.1.2.10. THORPEX 개념도(Park, 2004)

TOSTs (THORPEX Observing-System Tests)는 현업 관측시스템의 초기 시연을 위한 시험대 역할을 하고, TReCs (THORPEX Regional Campaigns)는 지역적으로 여러 국가가 연합하여 1~3개월의 준 현업 지역 예보 실험들을 통해 상호작용적인 예보 시스템들의 모든 요소를 디자인하고 테스트 및 평가하였다.

GPC (Global Prediction Campaign)를 통해 관측 및 예보 시스템을 통합하여 THORPEX의 연구결과로 자료 동화 및 예측 가능성에 대한 선진 기술들을 테스트하고, 전구 관측시스템의 강화에 따른 현업예보의 향상 가능성을 제시하였다.

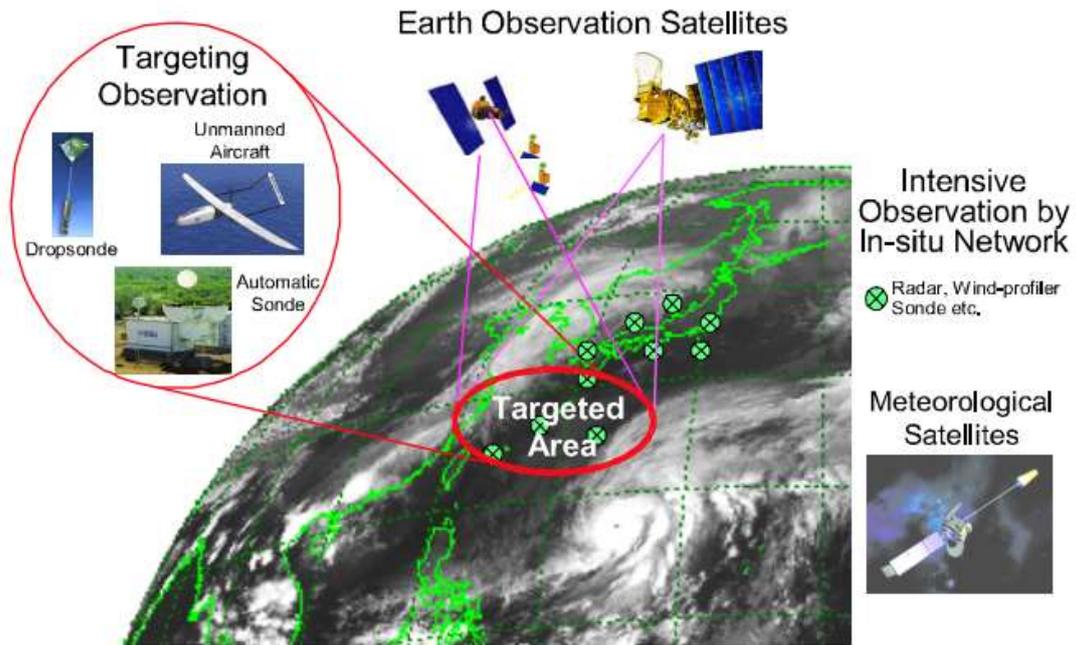


그림 2.1.2.11. Asia TReC의 태풍 관측체계 (Cho, 2005)

ARGO (Array for Real-Time Geostrophic Oceanography): ARGO (Array for Real-Time Geostrophic Oceanography)는 WMO 및 국가 간 해양과학위원회(IOC)의 국제공동 프로그램으로 전 지구 해양의 수온, 염분 및 해류의 준 실시간 감시 및 관측을 수행하는 사업이다. 주요 관측시스템은 해양 내의 수온 및 염분의 연직 프로파일을 측정하는 플로트로 2000년부터 투하되었다. 전 지구 기후/해양 관측 역사상 처음으로 해양 상층부의 물리적 상태가 일관적으로 측정되고 거의 실시간으로 수치 모델을 위한 자료 동화를 수행하였다. 해양에 투하된 플로트는 수심 2,000 m 까지 하강한 후 상승하면서 해양의 수온 및 염분을 측정하고 해수면에 나와서 표류하면서 위성으로 자료를 송신한다. 2005년까지 약 3,000개의 플로트 배열, 전구 해양에서 평균 3° 간격으로 매년 100,000개의 온도/염도 프로파일 및 속도 자료를 제공하고 있다. ARGO 자료의 주 활용도는 기후의 계절 및 순년 변동을 기록하고 그 예측 가능성에 대한 이해도 향상이다.

GOS (Global Observation System): 장기적인 목표는 첫째, 점점 더 정확한 기상 분석, 예보 및 경고 준비, 기후 및 환경 모니터링 활동에 대한 요구사항을 가장 효과적이고 효율적인 방식으로 충족하기 위해 대기 및 해양 표면의 상태를 관찰하기 위한 지구시스템을 개선하고 최적화하는 것이다. 둘째, WMO 및 기타 관련 국제기구의 프로그램에 따라 관측자료 품질, 공간 및 시간 해상도 그리고 장기적 안정성과 관련하여 사용자의 요구사항을 충족하기 위해 지역 기반 네트워크 계획을 포함하는 관측기술 표준화를 제공하는 것이다.

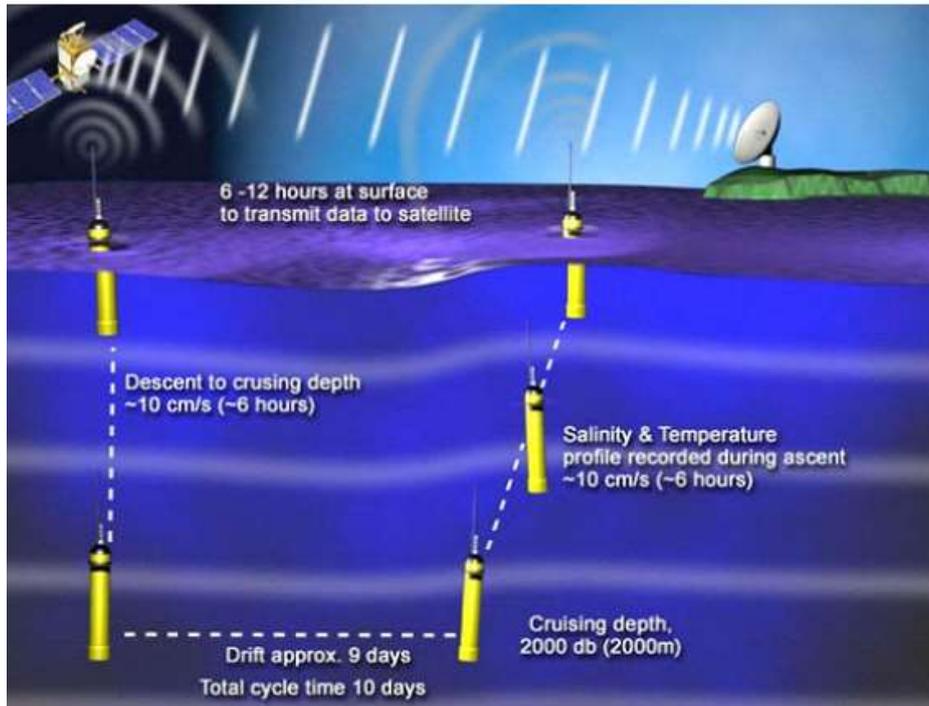


그림 2.1.2.12. ARGO 플롯 관측체계 (METRI, 2005)

지상에 약 11,000개의 관측소에서 지구 표면 또는 그 근처에서 대기압, 풍속 및 방향, 기온과 상대습도 같은 기상 매개변수를 최소 3시간마다 관측하고, 데이터는 실시간으로 전 세계적으로 교환된다. 이들 관측소 중 약 4,000개는 RBSN (Regional Basic Synoptic Networks)을 구성하고 3,000개 이상은 RBCN (Regional Basic Climatological Networks)을 구성하며, 지표 관측소의 하위 집합은 GCOS(Global Climate Observing System)와 GSN(Global Surface Network)에서 사용된다. 지상관측(Surface observations), 고층기상관측(Upper-air observations), 해상관측(Marine observations), 항공기관측(Aircraft-based observations), 위성관측(Satellite observations), 기타 관측(Solar radiation, lightning detection, tide-gauge measurements, wind profiler observations) 등 7개 관측 분야로 구성되었다.

GCOS (Global Climate Observing System): GCOS는 기후 관측이 정확하고 지속적이며, 자유롭고 개방적인 기후 데이터에 대한 접근을 추구한다. 정기적으로 지구 기후 관측 현황을 평가하고 개선 지침을 제공하는 WMO, IOC-UNESCO (Intergovernmental Oceanographic Commission of UNESCO), UN Environment (United Nations Environment Programme), 그리고 ISC (International Science Council) 공동 후원 프로그램이다.

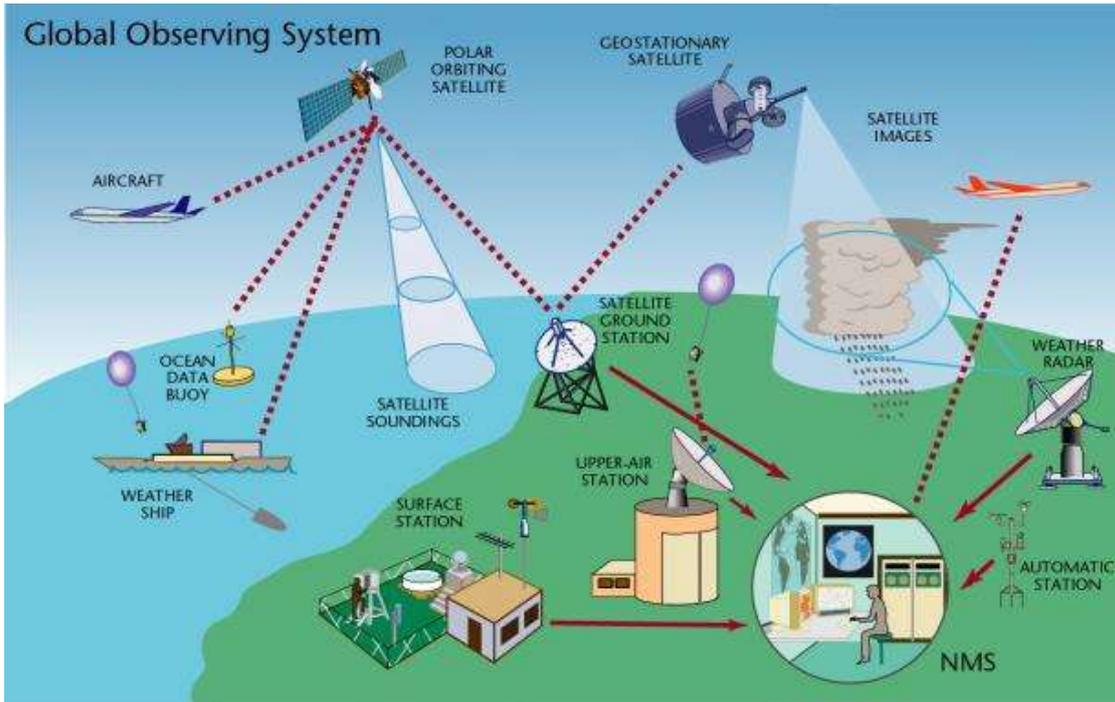


그림 2.1.2.13. 지구관측시스템은 다양한 연구비와 관리 프로세스를 운영하는 다수의 개별 기상 및 원격 기반 관측시스템으로 구성 (<https://public.wmo.int/en/programmes/global-observing-system>).

GCOS 전문가 패널은 ECVs (Essential Climate Variables)의 정의를 유지하고 (그림 2.1.2.14), 기후 관측시스템에서 비교하여 격차를 식별한다. ECV는 변화하는 지구의 기후를 체계적으로 관찰하는 데 필요한 관측이다. 전문가 패널은 물리적, 화학적 및 생물학적 관찰을 유지, 조정 및 개선하는 방법에 대한 계획을 정기적으로 개발한다. GCOS가 지원하는 관측은 기후 연구의 문제를 해결하는 데 기여하고 기후 서비스 및 적응 조치를 뒷받침한다.

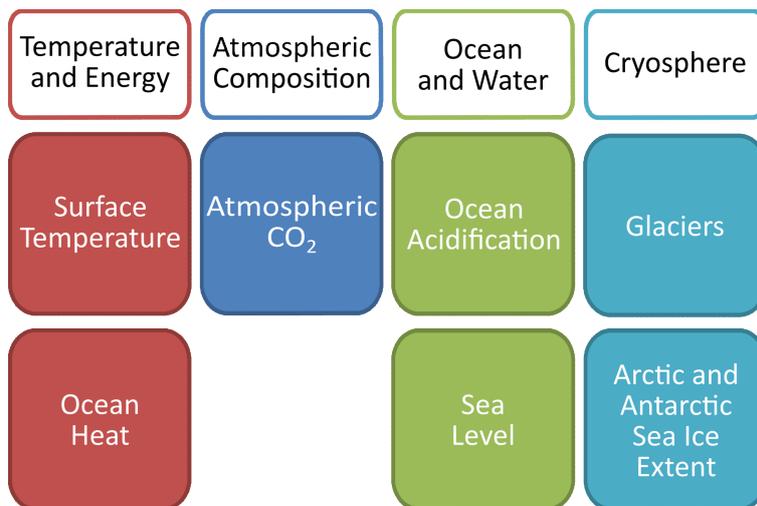


그림 2.1.2.14. Global Climate Indicators (<https://gcos.wmo.int/en/global-climate-indicators>).

IMOP (Instruments and Methods of Observation Programme): 기상 장비 및 관측 방법의 사용에 관한 기술 표준, 품질관리 절차 및 지침을 설정한다. CIMO (Commission for Instruments and Methods of Observation)의 지침에 따라 작동하여 국제 표준 생성을 촉진하고 측정의 호환성을 촉진하여 기상관측의 정확성을 보장한다. 현재 프로그램의 주요 과제 중 하나는 통합 및 새로운 기술이다. 수동 관측에서 자동, 그리고 원격 탐사 윈드프로파일러 및 위성 관측으로의 전환은 이들의 사용 및 성능에 대한 지침의 개발이 있어야 하고, 가능하면 상호 비교를 수행하여 상대적 성능을 평가한다(<https://public.wmo.int/en/programmes/instruments-and-methods-observation-programme> 참조).

현재 위험기상 예보와 같은 시간과 공간의 고해상도 기상관측과 재정 자원의 최적화에 대한 수요가 계속 증가함에 따라 기상 서비스는 다양한 출처의 관측데이터를 사용해야 한다. 표준의 촉진, 관찰 도구 및 방법에 대한 지침의 개발 및 출판, 기기 상호 비교 및 교육 워크숍, 기술 회의와 같은 역량 구축 활동을 조직한다. 과학 커뮤니티 및 기타 국제 조직으로 수년에 걸쳐 시너지 효과가 있는 곳에서는 공동의 목표를 달성하기 위해 다른 국제기구와 파트너 관계를 맺는다. BIPM (Bureau International des Poids et Mesures), ISO (International Organization for Standardization) 및 EMRP (European Metrology Research Program)와 같은 계측 연구에 CIMO 전문가의 직접 참여가 포함된다.

MAHASRI (Monsoon Asian Hydro-Atmosphere Scientific Research and Prediction Initiative): 이 프로그램은 GEWEX Asian Monsoon Experiment (GAME, <http://www.hyarc.nagoya-u.ac.jp/game/>)의 후속이다. 2005~2006년에 준비가 시작되어 2006년 9월부터 관측이 시작되었다. 프로그램의 목적은 아시아 몬순변동의 과학적 이해를 위하여 계절 시간 규모까지 수문-기상 예측시스템을 구축하는 것이다. 지역 및 유역 규모의 홍수 및 가뭄에 대한 경보시스템 개발도 포함하며 다양한 기상학적 문제들 (아시아 몬순시스템 내에서 대기-해양-육지의 상호작용, 지형이 몬순 강우에 미치는 역할, 아시아 몬순의 일 규모, 종관규모, 계절 내 규모, 계절 규모에서 규모 간 상호작용, 대류구름계와 지표 및 경계층의 상호작용 등)을 연구하였다.

SCSMEX (South China Sea Monsoon Experiment)와 SCMREX (Southern China Monsoon Rainfall Experiment): SCSMEX는 큰 규모 대기-해양 연계 실험이다. 실험의 주요 핵심인 현장 관측이 1998년 5월 1일 ~ 8월 31일의 기간 동안 있었다. (10° S-40° N, 70° -150° E)를 포함하는 아시아-서태평양 지역에서 관측이 이루어졌으며 (그림 2.1.2.15), 기간 중 두 번의 집중관측 (5월 5일~25일, 6월 5~25일)을 수행하였다. 첫 번째는 남중국해에서 몬순의 시작과 급격한 계절변동의 감시를 위하여 두 번째는 몬순의 성숙과 북쪽 이동을 관측하기 위함이다. 이 지역 내에서 두 개의 중규모 관측망을 구축하였다. 특히 홍콩에 인접한 중규모 관측망 영역에서는 이중 도플러레이더 분석망을 구축하여 남중국해의 북쪽에서 발달하는 대류와 중규모 대류계에 대한 집중관측이 이루어졌다.

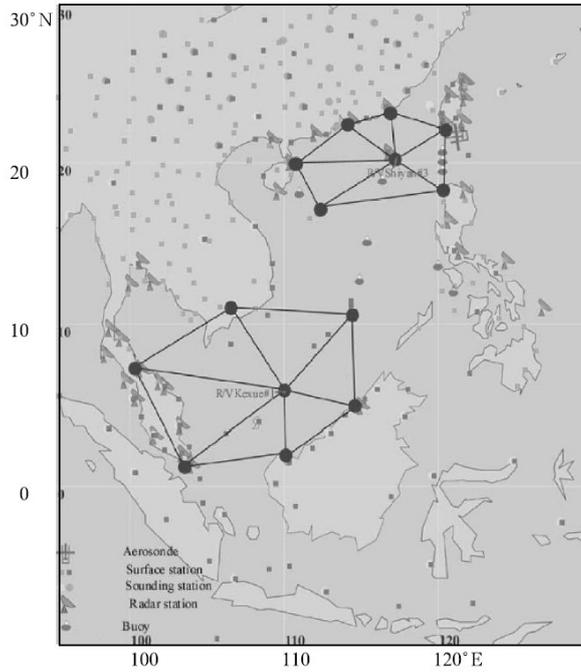


그림 2.1.2.15. SCSMEX의 집중관측 기간인 1998년 5월~8월의 현장관측 네트워크.

SCMREX는 중국 남부에서 여름 전 우기동안 정량 강수예측의 정확도를 향상하기 위하여 시작되었으며 세계기상기구 연구 및 개발 프로그램으로 진행되었다. 이 관측 프로그램의 주요 목적은 1) 누적 강우량의 정확한 시간과 위치를 결정하는 중규모 대류계의 시작, 진화, 구조, 조직화, 및 지속시간을 지배하는 물리과정의 이해, 2) 순간 강우를 결정하고 수치 모델의 구름-강수 미세물리과정을 나타내는 모수화기법의 검정을 통하여 중규모대류계의 미세물리 및 운동학적 구조의 이해, 3) 다규모 강수과정의 이해를 통한 고분해능 강수예측정확도 향상 등이다. 이를 위하여 수치모델에서 고분해능 관측자료 동화의 영향을 평가하고 구름 미세물리과정 모수화를 향상하고자 하였다.

SCMREX에서는 현업 관측망을 통하여 큰 규모에서의 대기의 흐름 및 강수 패턴을 파악하고 목표로 하는 지역에 중규모 집중 관측망을 구성하여 보다 상세한 구조 및 특성을 파악하였다. 특히 중규모 집중 관측망에는 구름 및 강수에 대한 미세물리특성 관측을 위하여 구름 레이더, 이중편파레이더, 및 지상 미세물리 관측장비를 동시에 설치 운영하였다. 또한, 이중편파레이더, 단일편파 레이더, 라디오미터를 이용하여 중규모 역학 및 열역학적 특성을 파악하였다.

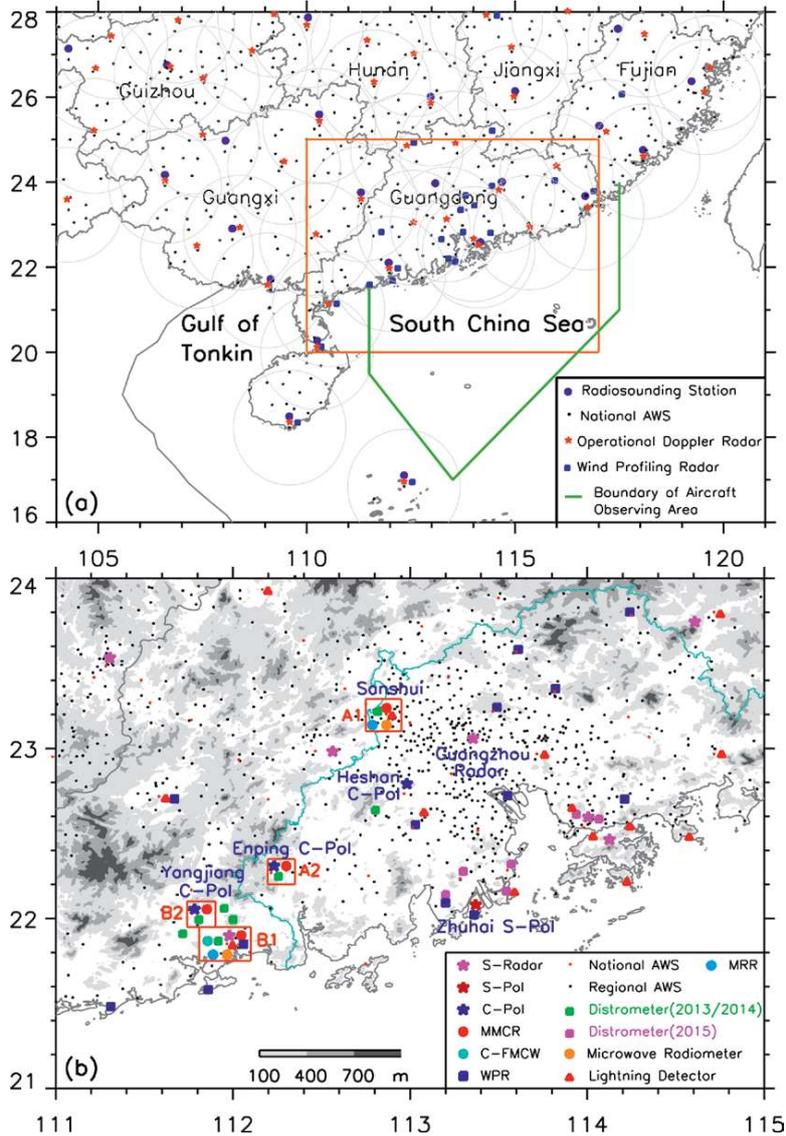


그림 2.1.2.16. (a) SCMREX 동안 중국 남부 및 인근 지역의 관측망. (b) 광둥 중부 및 서쪽 지역의 집중관측기간 동안 설치 운영된 이동형 장비들 배치도

TAMEX (Taiwan Area Mesoscale Experiment): TAMEX의 주요 목표는 호우와 연관된 중규모 동역학과 미세물리과정의 이해를 증진하는 것이다. 이를 위하여 1) 장마전선 (Mei-Yu)과 연관된 중규모 순환, 2) 장마전선 상에서 중규모 대류계 (Mesoscale convective system)의 진화, 3) 장마전선 및 중규모 대류계에 지형이 미치는 영향을 연구하기 위하여 현장실험을 통한 관측 자료를 획득하였다.

장마전선과 연관된 과학적 목적은 1) 장마전선의 중규모 열역학적, 운동학적 구조의 기술, 2) 중규모 전선 순환을 유지하는 물리 메커니즘의 이해, 3) 장마전선과 중규모대류계의 상호작용, 4) 하층 제트류의 구조 및 하층 제트와 중규모 대류계의 관계에 관한 연구 등이다. 중

규모 대류계와 연관된 목적은 1) 아열대 중규모 대류계의 운동학적 열역학적 구조를 기술하고 이를 중위도 또는 적도 중규모 대류계와 비교, 2) 중규모 대류계의 중규모 발생기작 (하층 제트, 발산류의 경계 (outflow boundary), 중규모 전선 강제력 등) 기술, 3) 대류셀과 모루운의 미세물리 구조 및 강수과정에 관한 연구이다. 지형효과와 연관된 목적은 1) 중앙산맥에 의한 주풍의 블로킹 및 변동의 효과, 2) 해륙풍, 산곡순환 등의 지역 순환에 관한 기술 및 이들에 의한 중규모 대류계의 발생 또는 변동, 3) 대만 주위에서 발달하는 중저기압, 산악과의 구조 및 동역학 이해, 4) 중앙산맥 서쪽 경사면에서 국지 강수의 증가에 대한 물리과정 기술, 5) 장마전선과 중규모대류계의 지형에 의한 효과 등이다.

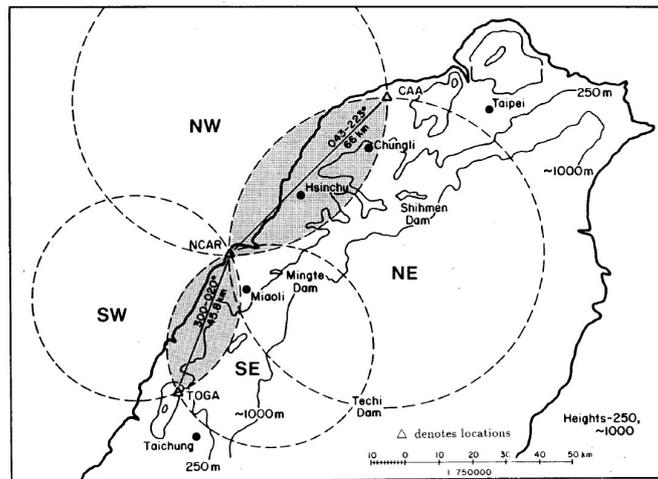


그림 2.1.2.17. TAMEX 도플러레이더 네트워크.
SW, NW, NE, SE로 표시된 영역은 레이더망을
이용하여 바람을 추정할 수 있는 지역임.

TiMREX (Terrain-influenced Monsoon Rainfall Experiment): TiMREX의 주요 목적은 1) 지형성 호우와 몬순 환경과 연관된 물리과정의 이해 증진, 2) 남서 몬순 계절에 국가, 도시, 유역 규모에서 0~36시간 정량 강수 추정 및 예측의 정확도 및 능력을 향상하는 것이다. 이러한 주요 목적을 달성하기 위하여 아래의 4가지 분야에 관한 연구를 수행하였다. 1) 대기 흐름과 중규모 대류계에 지형이 미치는 영향, 2) 중규모 대류계와 연관된 동역학, 미세물리, 예측성 연구, 3) 중규모 자료 동화 및 정량 강수 예보, 4) 대류 생성, 일주기 변동, 경계층 과정에 관한 연구 등이다.

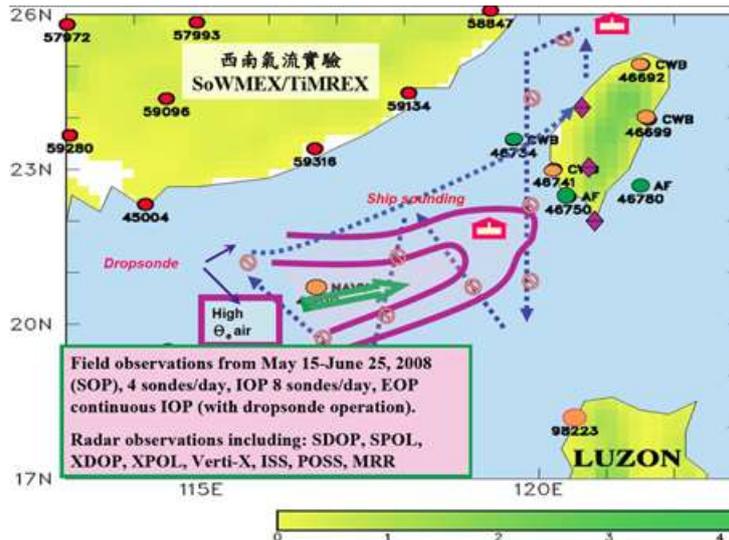


그림 2.1.2.18. TiMREX 집중관측 기간 동안 고층관측을 위한 사운딩 및 드랍사운딩 예시.

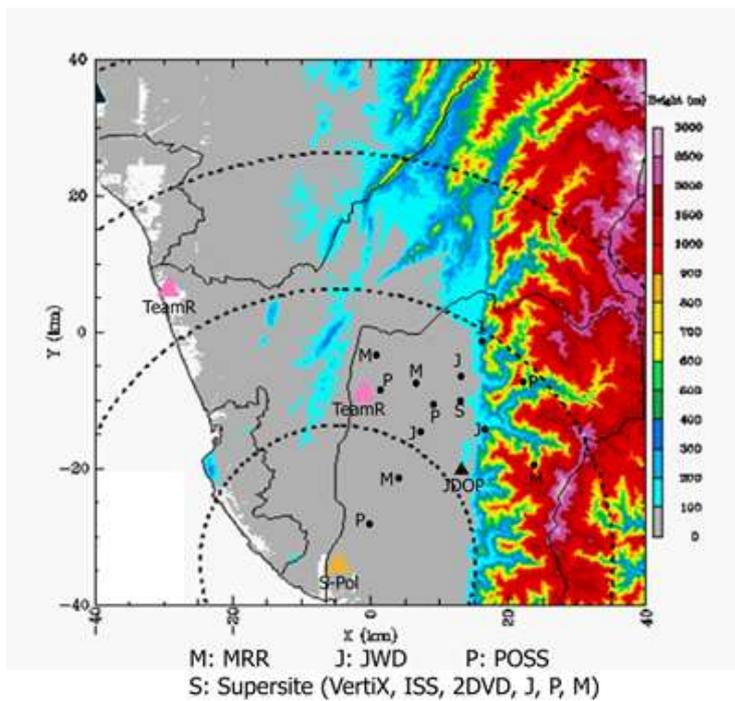


그림 2.1.2.19. TiMREX 집중관측 기간 동안 대만 남서지역에 설치된 중규모 원격 및 지상관측망. S-Pol은 S-밴드 이중편파레이더, TeamR은 X-밴드 이중편파레이더, JDOP는 X-밴드 도플러레이더임.

이러한 다양한 해외 집중관측프로그램의 조사 분석결과의 시사점과 벤치마킹 사항들을 크게 6가지, 1) 각 분야 전문성에 기반한 설계-계획-실행-모델링-분석 종합적 연계, 2) 다양한 규모 (전 지구, 지역, 중규모 등) 집중관측 실험 수행, 3) 다양한 첨단장비를 활용한 집중관측 실험, 4) 다양한 기관주도/협력 집중관측 실험, 5) 다양한 단계(R/O) 및 분야 집중관측 연구 수행, 6) 대학생 다양한 참여로 정리할 수 있다.

각 분야 전문성에 기반한 설계-계획-실행-모델링-분석 종합적 연계: 해외 집중관측 프로그램은 장기간의 준비 기간을 거치면서 구체적인 연구목표를 수립하고 이에 적합한 계획을 수립하였다. 광의의 연구목표를 지양하면서 구체적, 체계적이며, 상세한 실행 계획을 세운다. 따라서 종합적 계획에 기초한 단계별 계획과 로드맵이 명확하게 제시된다. 이러한 과정에 따라 진행된 집중관측 프로그램은 연구의 연속성, 지속성을 담보하며 향후 더 발전된 관측실험으로 발전할 수 있다.

다양한 규모 (전 지구, 지역, 중규모 등) 집중관측 실험을 수행함: 중국은 초기 중관규모의 관측 (몬순)에서 지역/중규모 (호우)로 변화하고 있으며 대만은 중규모 집중관측을 주로 수행하였다. 일본 또한 중국과 유사하게 중관규모에서 중규모 및 태풍에 대한 집중관측으로 규모를 바꾸었다, 미국은 다양한 주제로 다양한 규모의 집중관측을 수행하며 특히 미국 내뿐만 아니라 전 세계 주요지점에 대한 집중관측을 국제공동으로 수행하였다. 따라서 집중관측으로 목표를 달성하기 위해서는 연구목표에 적절한 체계적인 집중관측 계획을 통하여 다양하며 체계적인 국제공동 관측 및 연구 협력이 필요하다.

다양한 첨단장비를 활용한 집중관측 실험: 집중관측에는 매우 다양한 첨단장비가 활용되었다. 개발 장비에서 연구 및 현업 장비에 이르기까지 다양한 단계의 첨단장비가 활용되어 집중관측이 수행되었다. 또한, 대만처럼 국내 관측 장비가 부족한 국가에서는 국제공동 관측을 통하여 부족한 장비와 다양한 분야 전문가를 확보하였다. ICE-POP 2018에서도 유사한 형태의 국제공동 집중관측을 통하여 부족한 자원을 확보하였다. 따라서, 먼저 기상청 (기상과학원 포함)에서 보유하고 있는 장비에 대한 장비 풀, 가칭 KMA 시설 (KMA facility)을 구성하고 이를 집중관측에 활용하기 위한 체계를 확립하는 것이 가장 시급하다. 또한, 다양한 장비 개발 R&D 프로그램을 개발하여 장비를 국산화하고 이들 장비를 활용한 연구 장비 실험 및 현업화 (R2O) 체계를 구축하여 운영하여야 한다. 이 체계 속에서는 개발 장비를 활용하거나 개발 장비의 집중관측 참여 프로그램이 포함되어야 한다.

다양한 기관주도/협력 집중관측 실험: 국내에서 대부분의 기상 집중관측 연구는 기상청 주도로 이루어졌다. 집중관측 실험의 방대성 및 거대성으로 인하여 연구재단이나 기상기술원에서 수행하기가 어려웠고 논문실적 위주의 연구평가 체계로 인하여 집중관측실험은 자연스럽게 외면되었다. 이에 비하여 해외 특히, 유럽 및 미국은 집중관측 실험이 이루어지고 여기에서 획득된 자료를 이용한 연구가 주로 수행되었다. 따라서, 연구재단 주도의 집중관측에 국한되지 않고 현업기관 (기상청), 현업연구기관 (NOAA, NASA, DOE), 순수연구기관 (NSF) 등 다양한 기

관주도로 진행되었다. 또한, 한 기관의 주도뿐만 아니라 동일한 목표를 지향하는 다양한 기관의 공동협력으로 집중관측이 수행되기도 하였다. 따라서 기상청의 집중관측 실험은 좀 더 다변화되고 타 기관과의 공동협력을 모색하여 예산을 절감하고 시너지를 창출할 필요가 있다.

다양한 단계(R/O) 및 분야 집중관측 연구 수행: 집중관측은 다양한 단계의 연구를 진행할 수 있다. 해외 집중관측 사례들을 살펴보면 순수 연구에서 현업화 연구까지 다양한 연구목표를 달성하기 위하여 하나의 집중관측 실험을 수행하는 경우가 많고 이들의 장기 연구를 통하여 현업과 유기적으로 연계될 수 있도록 계획 단계에서 많은 노력을 기울인다. 또한, 현업뿐만 아니라 뚜렷하고 구체적인 목표를 설정하고 다양한 분야 (위험/재해기상, 대기경계층/대류권/성층권, 해상/육지/산악 등) 순수 연구를 통한 메커니즘 이해 연구에도 많은 시간을 할애한다. 따라서 향후 집중관측 실험은 설계 단계에서 현업을 고려한 집중관측을 계획하고 장기간의 집중관측과 이들 자료를 활용한 연구를 통하여 현업과 연계될 수 있도록 하여야 한다. 또한, 현상에 치중한 집중관측보다는 구체적 목표 (모델 역학/모델 모수화/현상이해/장비평가/관측정확도 평가 등) 지향적 집중관측에 더욱 노력을 기울일 필요가 있다.

대학생 다양한 참여: 대학이 참여하는 위험기상 특별관측은 주로 NSF와 NOAA가 지원하며, 기초교육의 활성화 및 대학생들의 집중관측 참여를 장려한다. 국내 기상 관련 전공 대학은 장비 보유가 어렵고 여러 가지 상황으로 관측에 특화되어 있지 못하다. 대기 관측은 모델링과 달리 고가 장비가 필요하며, 대기과학 지식뿐만 아니라 다양한 지식이 필요한 분야로서, 기상청 장비 활용 실습, 대학 간 교과목 교류 등 다양한 협력이 필요하다.

이러한 시사점 및 벤치마킹 이외에도 미국의 경우 NSF facility 또는 ARM facility의 경우 지속적인 연구지원을 통해서 특정 장비를 지속적 운영한 경험이 있는 책임 전문가가 존재하며, 해당 장비에 대한 자세한 정보가 수록되어 있어 (예, <https://www.arm.gov/capabilities/instruments>) 특별관측 수행 시 필요한 장비의 구축이 용이하게 구성되어 있다. 대학이 참여하는 위험기상 특별관측은 주로 NSF와 NOAA가 지원하며, 이 경우 NSF의 후원을 받는 UCAR가 자료 목록을 구축하여 관측 수행 관련 정보를 체계적으로 기록한다. 목록은 관측 수행 기간 (In-field phase) 동안 연구자 간 실시간 정보공유를 위해 실용적으로 활용되며, 매일 세부정보를 자세히 기록하여 향후 논문과 같은 정리된 연구결과의 도출에 기반이 된다. 추가로 다양한 연구자가 쉽게 정보에 접근할 수 있는 형태로, 관심이 있는 연구자의 참여를 돕는다.

새로운 측정 기술과 방법의 개발로 점점 더 넓은 범위의 대기 특성을 관찰할 수 있고, 이에 따라 대기 관측은 모든 종류의 전문 지식을 필요로 하게 되었으며 단일 기관에 의해 수행되거나 해석될 수 없다는 것이 분명해졌다. 고가의 장비는 국민의 세금이 대규모로 투입되어 구매하기 때문에 한 개인 또는 그룹이 독점적으로 사용하기보다는 자료의 투명한 개방성이 담보되어야 한다. 또한, 중규모 및 미기상 현상이 모델 및 관측에서 중요해짐에 따라 관련 관측을 강화해야 하고 기존 관측 장비의 공간 대표성, 연구 목적 현상에 미치는 관측 위치 영향 평가 등을 통하여 기존 관측망에 대한 전면적인 재평가가 이루어져야 한다.

국내 기상 관련 전공 대학의 경우, 고가의 최첨단 장비를 직접 구매하여 연구를 수행하기 어렵고, 관련 과목이 부족한 상황에서 각 대학은 서로 다른 대기 관측 장비에 특화된 과목을 운영하고 있다. 대기 관측은 모델링과 달리 고가 장비가 필요하며, 대기과학 지식뿐만 아니라 다양한 지식이 필요한 분야로서, 대학 간 과목 교류뿐만 아니라 기상청이 구매할 수 있거나 구매한 고가의 장비를 활용할 수 있는 교과목 개발이 필요하다. 기후변화에 따라 최근 발생하고 있는 특이 기상 현상은 장기적으로는 일상적인 현상이 될 가능성이 매우 크기 때문에 장기 관측망을 재구성하는 시도가 필요하며 이는 단순히 AWS나 ASOS 관측망을 늘이는 것은 지양하고 원격탐사 및 대기경계층 특수 관측이 이루어져야 함을 의미한다.

관측 프로그램의 정보를 종합적으로 수집하여 정리하는 체계가 부족하여 연구자 간 정보공유가 수월하지 않으며, 향후 연구 진행을 위한 자료 및 정보가 부족하여 관측 연구의 경우 연구 수월성이 낮은 편이다. 따라서 연구 수월성 향상을 위한 표준자료를 생성하고 공개하는 것이 필요하다.

체계적인 대학에서의 관측 교육 부족과 인력 부족에도 불구하고 기상청 집중관측 프로그램에 대한 시도는 비교적 꾸준하게 시도되고 있다. 관측 장비 측정 원리를 이해시키고, 품질 관리 방법에 관한 과학 이론 교육을 국내 대학에서 광범위하게 활성화하여야 한다. 특히 최신 관측 장비와 특수 목적 장비, 원격탐사 장비에 관한 이론적 교육이 부족한 상황이다. 이를 위해 기상청 직원들의 재교육을 위한 대학 위탁 교육을 지원하고, 최첨단 장비를 활용하는 대학 교과목 지원 정책이 필요하다. 또한, 대학원생 및 상급 학부생에게 다양한 영역의 프로젝트에서 소프트웨어 엔지니어 및 과학자와 함께 작업할 기회를 제공하여야 한다. 기상측기 및 관측 자료처리에 관한 강의 자료를 개발하여 현장에서 활용하는 것도 중요하다.

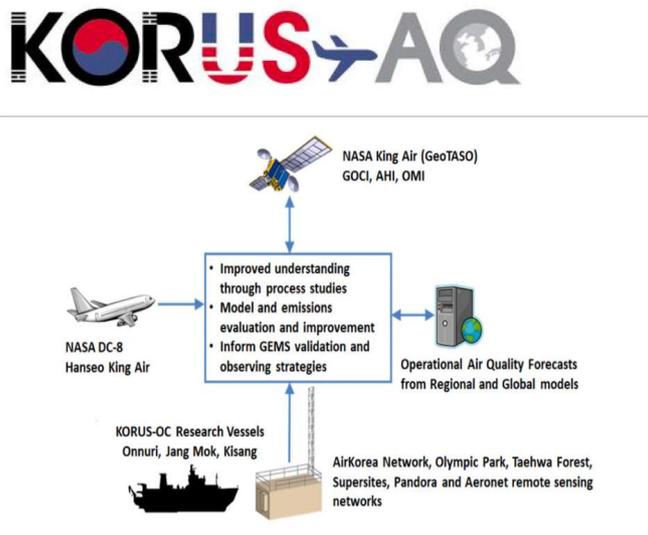
고해상도 관측에 대한 인식의 전환 및 기존 AWS 관측의 활용성 제고가 필요하다. 미국 Mesonet에 대해 국내에서 간과된 가장 중요한 문제는 단순히 관측 지점을 늘이는 것은 원래 목적을 달성하기 어렵다는 것이다. 특히 복잡 지형인 우리나라에서는 관측소 간 수평 거리를 줄이는 것이 예보 성능 개선에 주는 효과가 크지 않을 수 있다. 단순히 고정 관측소를 늘이는 것이 아니라, 중규모 현상의 3차원 구조와 지형, 대규모 및 미기상 현상과의 상호작용에 대한 이해를 바탕으로 관측 변수를 지정하고, 그 관측의 시공간 분해능을 고려해야만 이를 바탕으로 수치 예보 모델의 개발과 검증에 유용한 자료가 될 수 있다.

3. 국내 민간 참여 기상관측 프로그램 사례조사

다음은 국내 참여 기상관측 프로그램 사례들로 1) KORUS-AQ (Korea-United States Air Quality) campaign, 2) GMAP (GEMS Mapping of Air Pollutants), 3) SIJAQ (Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality) 등이 있다.

KORUS-AQ (Korea-United States Air Quality) field mission: 한미 대기질 공동 조사 연구로 항공관측과 지상관측을 활용하여 2016년 5~6월 한국 대기질 집중 측정을 수행한 연구이다. 항공, 지상, 해양조사선, 위성 관측, 화학 수송 모델을 복합적으로 활용하여 대기오염 물질의 생성, 전구물질 배출, 수송, 증착 과정에 대한 화학적, 물리적, 기상학적 이해를 돕는 것을 주요 목표로 한다. 한국은 환경과학원, 미국은 NASA를 중심으로 하여 EPA (U.S. Environmental Protection Agency), NCAR 및 다수의 대학 연구자들이 참여했으며 한국의 주요 연구 참여 대학은, 한국외대, 연세대, 광주과학기술원(항공관측) 서울대, 고려대, 연세대(지상관측) 등이다.

특별관측 프로그램을 통한 한반도 지역의 미세먼지, 오존, 대기오염 물질의 입체적인 측정을 복합적으로 수행하고, 초미세먼지의 원인이 되는 에어로졸 2차 생성과 해당 과정이 기상패턴에 큰 영향을 받음을 확인하였다. 한반도의 오존 오염이 지속해서 증가하고 있으며 NOx 이외에도 VOC가 큰 영향을 미치는 문제, 한반도 지역 미세먼지 및 대기오염 물질의 발생, 수송 이해 및 오염물질 배출량 산정의 정확도에 크게 기여하였으며, 원격측정 기반의 환경오염감시를 위한 유용한 기술 습득에 기여한 것으로 평가받고 있다.



KORUS AQ 준비 일정

- 2010-11 한국 미국 연구팀 사전 논의
- 2012 09 NASA, NCAR 연구팀 한국 방문**
- 2013 09 한국 연구팀, 환경부 미국 방문
- 2014 01 공동연구계획 초안 작성
- 2014 10 NASA 공동관측 동의
- 2014 12 한미 공동 관측 백서 작성**
- 2015 01 Steering Group 회의(1회/2주)
- 2015 02 관련 연구제안서 모집 공고
- 2015 04 NASA 지상장비 사전 방문 설치
- 2015 05 연구제안서 모집 (66 연구팀)
- 2015 5-6 한국 사전 지상/항공 관측
- 2015 06 미국팀 방문, 오산기지 거점지정
- 2015 07 관측계획 연구팀 패널 리뷰
- 2015 08 연구제안서 선정 (28 연구팀)**
- 2015 10 연구팀 미팅, 한미 MOU
- 2015 12 AGU 특별세션, 연구 계획 토의
- 2016 01 항공 관측 경로 상세결정
- 2016 3-4 항공 관측 장비 설치, 테스트
- 2016 5-6 한반도 항공관측 수행**

그림 2.1.3.1. KORUS-AQ 입체관측 협력 모식도 및 주요 준비 과정
(출처: 환경과학원 2020).

추가로 국내 관측 중 대학 참여가 가장 활발했던 프로그램으로, 해외 우수 관측 프로그램과 유사한 형태로 진행되며 다수의 대학에서 연구자 및 대학원생이 관측 및 연구 활동에 참

여하였고, 해당 프로그램을 통해 해외 우수연구자와의 공동연구 논문 및 우수한 대기오염측정 전문 인력이 도출된 것으로 평가된다. 연구 장비는 PTR-MS(Proton Transfer Reaction - Mass Spectrometry), HR-AMS (High-Resolution Aerosol Mass Spectrometer)와 같은 고성능 화학 성분 분석기기, GeoTASO (Geostationary Trace gas and Aerosol Sensor Optimization Spectrometer), Pandora와 같은 고성능 초분광 원격 장비 비롯하여 다수의 직접 및 원격 관측 장비가 활용되어 해당 전문가 양성에 기여하였다. 장비에 대한 자세한 내용은 <https://espo.nasa.gov/korus-aq/content/KORUS-AQ>에서 찾을 수 있다.

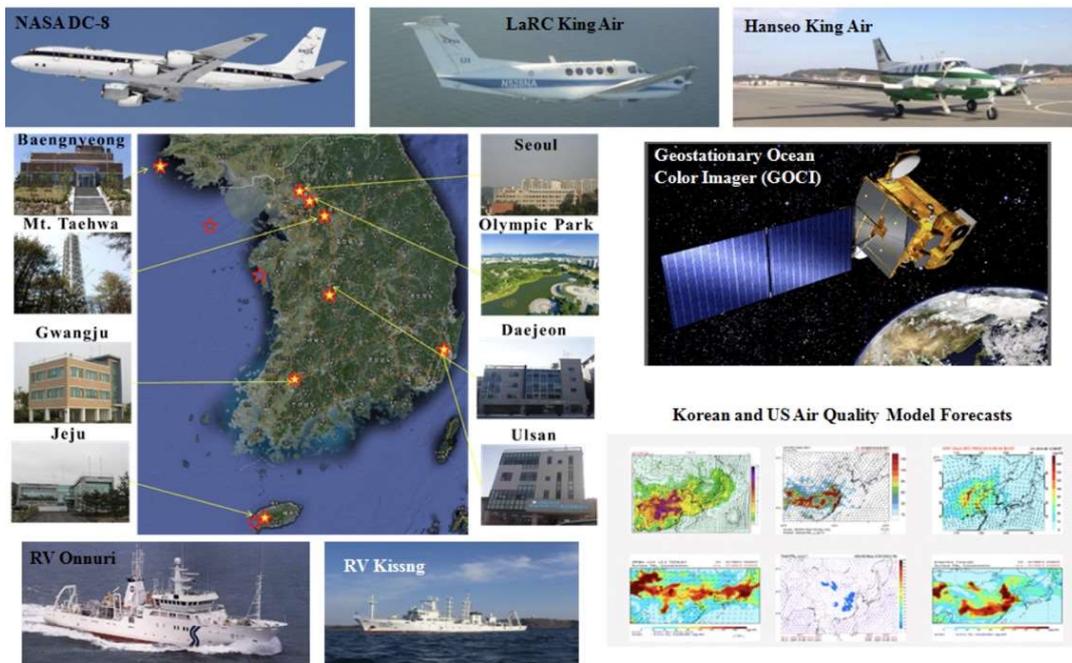


그림 2.1.3.2. KORUS-AQ의 핵심 관측 지점 및 장비 (출처: 환경과학원).

표 2.1.3.1 KORUS-AQ 연구에 활용된 중요 연구자원 요약

종류	연구자원 및 장비
Participants	130 research group, 580 participants
Aircraft	DC-8 : 20 flight, 150 hr, measured over 200 air pollutants and parameters B200 Kingair : 30 flight, 124 hr, carried GEO-TASO simulator Hanseo Kingair : 32 flight, 120 hr, support B200 and flined near point source
Ground	3 major sites : BN Island, Olympic Park and Taewha 5 NIER supersite, 3 NIMR monitoring site, 5 other site
Remote sensing	18 AERONET site, 8 Pandora site, 6 LIDAR site Ozone Lidar in Taewha, HSRL in Seoul

Vessel	Kissing(NIMR) : traveled back and forth Incheon to Mokpo, 17 times Onnuri : KORUS-OC
Satellite	GOCI, OMI, MODIS, CALIPSO, IASI, etc.
Modelling	Models including GEOS-Chem and WRF-Chem



그림 2.1.3.3. KORUS-AQ 관측 프로그램 참여 연구자 기념사진. 사진의 인원 이외에도 국내 10개 이상의 대학에서 200명 이상의 연구자가 직접 관측에 참여
(사진 출처: 환경과학원 2020)

GMAP (GEMS Mapping of Air Pollutants) campaign: 환경과학원 주도로 진행되는 항공, 지상, 모바일, 광학 관측 프로그램으로 2020년 발사된 천리안 정지궤도 환경 위성(Geostationary Korea Multi-Purpose Satellite-2B) 초분광센서인 GEMS (Geostationary Environment Monitoring Spectrometer)의 검증 및 미세먼지를 포함한 한반도 오염물질 성분 및 분포 이해를 목표로 한다. 2020년에는 충남지역 중심으로 판도라 분광계 지상관측을 수행하였으며, 2021년에는 서울/수도권 중심으로 항공관측, 지상관측 수행하였다. 참여대학은 UNIST, 서울대, 한국외대, 목포대, 부경대, 고려대 등이다. 대학과의 연구 협력을 통한 관측 및 연구, 박사급 전문연구인력 양성에 기여도가 높으며 2022년부터 SIJAQ (Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality) campaign으로 확대하여 국외 및 국내 대학의 연구그룹을 추가적으로 조직하고 있다. GMAP

2016 기간에 구축된 해외 및 국내 연구팀 네트워크를 기반으로 23개의 연구팀과 국제 공동연구를 추진하고 있다.

SIJAQ (Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality): 환경과학원에서 주도하는 GEMS 위성의 검증 및 활용, 동아시아 대기질 조사를 아우르는 국제 캠페인으로 2022년부터 시작되어 지상, 위성 관측, 배출량 산정, 모델링 연구를 종합적으로 지원한다. 지상집중관측, 항공관측, 위성 관측 등 다양한 관측 플랫폼을 이용하여 한-미 공동연구 (KORUS-AQ)에서 부족했던 국내 VOCs의 농도 현황과 다양한 배출 인벤토리를 파악하고 한반도 대기 환경 문제 해법 및 제반 정책적/과학적 시사점 도출하고, 효율적인 미세먼지 및 오존 오염 관리 대책 마련 지원하는 것을 목적으로 한다. 환경과학원의 지원으로 UNIST (연구책임), 서울대, 연세대, 부경대, 부산대, 공주대, 아주대, 이화여대, GIST, 건국대 등이 참여하여 지상 및 항공관측, 모델링 및 분석의 핵심 분야 연구비 규모는 20~25억 수준이며 핵심 분야를 지원하는 다수의 보조 연구(2~4억 규모)가 같이 수행된다. SIJAQ에는 국내에서만 10개 이상의 대학기관이 참여하고 있다.

민간 관측 사례들이 시사하는 바는 다음과 같이 4가지로 요약 정리할 수 있다.

기상청 집중관측 독립 R&D 프로그램 운영: 관측 관련 기상청 독립 연구개발 프로그램 운영을 통하여 장기간의 집중관측 프로그램을 운영할 수 있는 안정적 예산 확보가 가능할 것이다. 이를 통하여 집중관측 자료 활용 기초연구 및 현업화 연구지원 체계를 구축하고 R2O (Research to operation)을 활성화할 수 있을 것이다. 또한, 연구 장비를 개발하거나 연구 장비의 시험 운영 및 개선을 통하여 현업화 활용이 가능할 것이다.

기상청 집중관측 시설 구축 및 운영: 미국 연구재단이나 NOAA처럼 기상청 집중관측 시설을 구축하고 운영하여야 한다. 기상청에서 운영하는 산재한 관측 시설의 체계적 관리 및 운영이 이루어져야 하며 이들 시설을 집중관측에 활용할 수 있는 체계가 구축되어야 한다. 이를 위해서는 먼저 기상청 내 관측 전문성을 확보하고 첨단장비 개발 및 도입에 대한 투자와 이를 통한 R2O가 장려되어야 한다.

기상청-대학 집중관측 협력 프로그램 개발 및 운영: 기상청과 대학의 집중관측 협력 프로그램을 개발 운영하여 세부 연구 분야별 파트너십 구축을 통한 전문적 관측 및 연구체계를 구축하여야 한다. 또한, 기상청-대학 간 관측 교육 프로그램 구축을 통하여 신기술에 대한 지속적인 교육이 이루어져야 한다.

국제 공동협력 집중관측 프로그램 운영 필요: 해외 연구기관과의 공동협력 집중관측 프로그램 운영을 통하여 전문성을 확보하고 공동연구를 활성화하여야 한다.

또한, 국내에서 수행된 민간 참여 집중관측 프로그램의 분석을 통하여 전문성 확보 및 예산 확보 방안으로 제시하였다.

집중관측 수행을 위한 국내 전문 연구팀 확보 및 양성을 위해서는 기상청-대학 연구팀의 지속적인 공동 관측 연구, 기상청 보유 관측 및 분석 장비 공동활용, 관측 연구 체계화 및 관측 교육/연구 프로그램 운영 등이 필요하다.

기상청-대학 연구팀의 지속적인 공동 관측 연구: 앞 사례들에서 언급된 환경과학원의 경우 관측 연구 네트워크를 구축하여 대기질 관측, 관측 장비의 개발 및 검증을 위해 3~5년 수준의 연속성 있는 관측 연구 프로그램을 대학의 파트너와 함께 수행하며, 단순한 사업의 관리뿐 아니라 장비의 개발 및 검증, 자료의 생산에도 함께 참여하고 있다. 대학의 전문가에게 단순 위탁하여 관측을 수행하는 수준을 넘어, 국가 기관도 연구의 일부를 담당하여 공동연구 파트너쉽을 구축하는 방식으로 관측 연구를 수행하면 더 의미 있는 결과가 도출될 것으로 판단된다. 추가로 신뢰할만한 대학 연구자와 다년차 연구 협약을 통해서 연속성 있게 관측 연구를 수행하면 박사 수준의 관측 전문 인력 양성에도 기여할 수 있을 것이다.

기상청 보유 관측 및 분석 장비 공동활용: 대학의 연구비 규모는 소형 관측 장비만 운영할 수 있는 수준으로, 사실상 국내 대학의 연구는 자료 분석과 모델링에 집중되어 있다. 기상청이 보유한 전문 관측 장비를 대학의 연구자가 공동으로 활용할 수 있는 프로그램이 있으면 대학의 장비 및 인프라 문제를 보완하고 추가로 대학의 관측 연구자와 기상청의 공동연구를 활성화할 수 있는 기회가 될 것으로 판단된다. 국내의 기상청 슈퍼컴 공동활용 사업이나 국외의 ARM research facility 사업 등이 좋은 예가 될 수 있다.

관측 연구 체계화 및 관측 교육/연구 프로그램 운영: 관측 분야는 다년간에 걸친 측정 노하우가 요구되므로, 신진 연구인력을 양성하기 위해서는 지속적인 관측 프로그램이 수행되어야 한다. 특히 박사 수준의 관측 연구자 양성을 위해서는 정해진 주제에 대한 3~5년 이상의 체계적인 집중관측 연구가 수행되어야 한다. 장기 계획이 부족한 단편적인 관측 프로그램은 대학 연구자 (혹은 대학원생)의 관점에서 소모적인 행사성 과제로 인식될 수 있으므로 관측 프로그램 기획 단계부터 기상청과 대학 연구자의 공감대가 중요하다.

추가로 다수의 대학(원)생들에게 관측 연구는 수행과 논문 작성이 어려운 3D 분야로 취급되는 경향이 있으므로 관측에 대한 인식 개선도 중요한 부분으로 판단된다. 대학(원)생이 쉽게 참여할 수 있는 다양한 관측 교육/연구 프로그램을 정기적으로 운영하여 관측 분야 인식 개선 및 신진 인력 양성에 노력을 기울일 필요가 있다. 미국의 경우 국가가 보유한 관측 장비를 대학에 제공하여 연구뿐 아니라 교육에 활용할 수 있도록 하는 FARE (Facilities for Atmospheric Research and Education) 프로그램 등이 운영되고 있다.

지속적인 집중관측 프로그램 운영 및 전문 관측 장비 유지/운영을 위해서는 예산 확보가 필수적이며 이를 위한 방안으로 대학 관측 인력을 위한 예산 지원, 연구재단-기상청 협력 관측 연구체계 구축, 관측을 위한 다부처 협력 및 예산 확보 등이 있다.

대학 관측 인력을 위한 예산 지원: 대학의 관측 연구 인력 양성과 관측 장비의 유지를

위해서는 체계적인 지원 프로그램이 필요하다. 미국의 경우 대학 연구 커뮤니티 장비 활용을 지원하는 CIF (Community Instruments and Facilities) 프로그램과 항공관측과 같은 대규모 관측 연구 및 장비의 활용을 지원하는 LAOF (Lower Atmosphere Observing Facilities) 연구를 체계적으로 나누어 운영하여 연구 인력 양성과 실용적인 집중관측을 수행한다. 연구 규모에 따라 아래와 같이 3개의 특성화 트랙을 구축하여 교육 및 연구를 활성화하고 있다.

Track 1 (교육, 봉사): 교육 및 지역사회 기여 활동을 위한 소규모 연구지원 (<\$50,000)

Track 2 (단독연구): 단일 연구 설비의 활용이 필요한 단독 및 소규모 공동연구지원

Track 3 (관측캠페인): 국제공동연구, 항공관측 등 다수 설비 활용 대규모 연구지원

기상청도 유사한 관측 교육 및 연구 지원체계를 운영할 수 있을 것으로 판단되며, Track 1 과같이 연구자를 양성하는 소규모 프로젝트의 경우는 비용이 많이 들지 않으므로 환경과학원과 유사하게 기상청 자체 예산으로 감당할 수 있을 것으로 판단된다. 연구비의 규모가 크고 현업과 연구의 성격이 혼재하는 Track 2, 3의 경우는 다음과 같은 다양한 연구비 확보 방안을 고려할 수 있다.

연구재단-기상청 협력 관측 연구체계 구축: 연구재단은 지구과학과 관련된 다양한 연구를 지원하므로 기상/기후/환경 연구와 관련된 부분은 연구재단과의 협력을 통해 일부 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 특히 기상청 차원에서 기상관측을 보호 학문으로 육성하기 위하여 연구재단과 협의를 필요할 것이다. 미국의 경우 대학이 참여하는 위험기상 공동 관측 프로그램에는 일반적으로 NOAA 이외에도 NSF (미국 연구재단)의 예산이 투입되며, NOAA가 기본 관측체계를 구축하고, 대학이 이를 기반으로 NSF 예산을 추가로 확보하는 구조로 되어 있다. 연구재단과 기상청의 협의를 통하여 중장기(3~7년) 규모의 체계적 집중관측 및 대학 협력 계획을 수립하고, 대학이 관측 관련 연구재단 예산을 확보할 수 있는 기반 마련이 필요할 것이다.

관측을 위한 다부처 협력 및 예산 확보: 현재 국가의 강수나 대기 상태에 대한 정보는 기상청 이외에도 다수의 수요 부처들 (환경부, 산림청, 해양수산부, 국토교통부 등)이 개별적인 예산을 확보하여 다양한 관측을 수행하고 있다. 기상청은 타 부처보다 우수한 대기 관측 기반 및 전문가 네트워크를 보유하고 있으므로, 관련 자료가 필요한 타 부처와의 협의를 통해 공동 관측 예산 확보가 가능할 것으로 판단된다. 미국의 경우 에너지부 (Department of energy)에서 지원하는 ARM 관측사이트와 장비들이 상무부 (Department of commerce) 소속의 NOAA와 협력을 통해 대기과학 연구를 위해서 공동 활용되는 사례가 많다.

제 2 절 대학생 참여 위험기상 집중관측 캠페인 추진 방안 제시

1. 집중관측 대상 조사 및 성과활용 방안제시

집중관측 대상으로는 기상청에서 그 중요성을 인식하여 4대 난제로 정의한 1) 한반도 중규모 대류계의 집중관측을 통한 예측성 향상, 2) 여름철 제주도 동부에서 발달하는 호우, 3) 겨울철 서해안 강설, 4) 겨울철 동해안 강설 등이 피해 규모, 현상 이해도, 및 예측 가능성 등의 측면에서 가장 높은 우선순위를 가진다.

한반도 중규모 대류계의 집중관측을 통한 예측성 향상: 아래 그림은 2012년 7월 13일에 발생한 밴드형의 중규모 대류계이다. 유사한 사례로 2022년 8월 8일에서 11일에 발생한 중규모 대류계가 있다 (그림 2.2.1.2). 서해상에서 밴드형의 강수가 발생하고 밴드 내 대류 세포 및 밴드의 이동이 밴드의 방향과 평행하여 동일한 지역에 많은 강수를 유발한다.

기존 연구에 따르면 한반도에서 발생한 중규모 대류계 또는 호우성 강수는 크게 4가지로 구분할 수 있다. 대류 세포는 여름철 열적 불안정에 의해 발생하며 셀들이 서로 상호 연관성이 없이 이동하며 크기 또한 중규모 대류계 중 가장 작은 것에 속한다. 또한, 중규모 대류 복합체 (Mesoscale convective complex: MCC)는 타원 또는 원형의 매우 큰 강수 셀을 가지고 위성 적외 영상에서 매우 낮은 온도를 보인다. 스콜라인은 밴드형의 강수를 보이며 강수 영역이 밴드와 평행하게 움직이면 평형 스콜라인, 스콜라인의 이동이 밴드와 큰 각도를 이루면서 이동하는 것은 수직 스콜라인으로 구분할 수 있다.

이러한 중규모 대류계는 서울을 포함한 주로 중부지방에서 발달하고 일부 형태의 중규모 대류계는 강하고 많은 양의 비를 내린다. 특히 평형 스콜라인은 많은 강수를 유발하여 가장 중요한 호우 강수계이다. 이러한 중규모 대류계는 열적 및 역학적 요인이 혼재하며 발달하기 때문에 이를 이해하고 예측성을 향상하기 위해서 집중관측이 필수적이다.

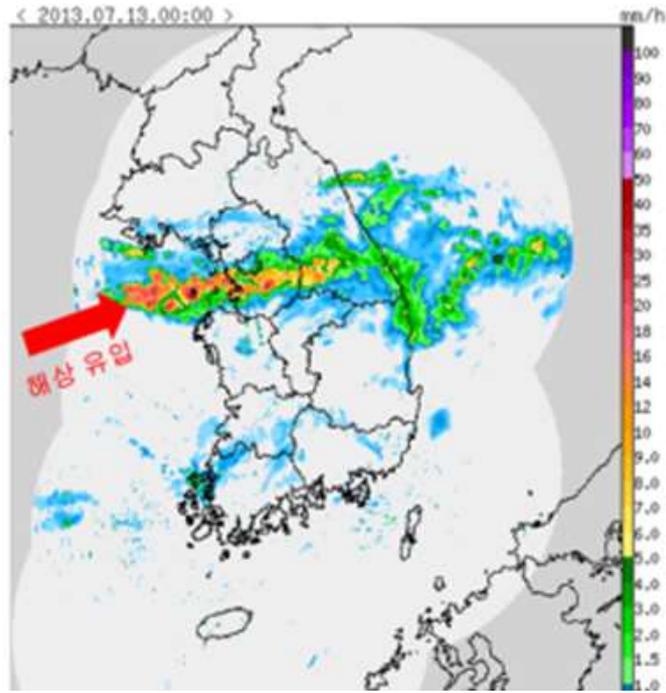


그림 2.2.1.1 2012년 7월 13일 서해상에서 발달한 선형 강수계 예시

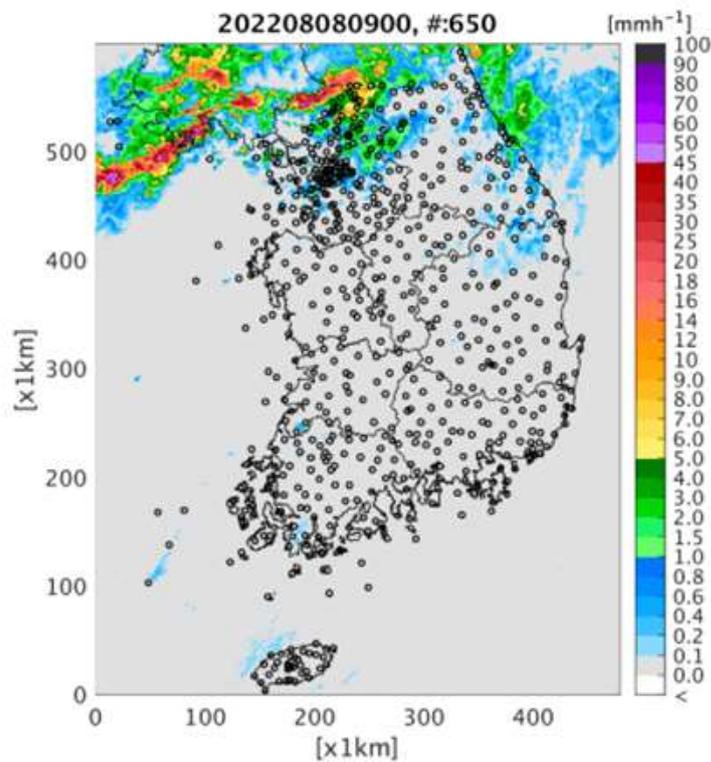


그림 2.2.1.2. 2022년 8월 8일~11일 중부지방 호우 사례

여름철 제주도 동부에서 발달하는 호우: 여름철 많은 수증기가 유입되고 제주도 남쪽으로 저기압이 통과할 경우, 제주도 동부에서는 강한 강수를 동반하는 저기압 시스템이 발달하여 제주도에 영향을 미친다. 아래 그림은 동일한 (검정 가능한) 예보시간에 대해 24 h 시간 간격으로 생성된 동일한 시간대 예측과 재분석의 차이이다. 특히 제주 동부에서 재분석이 예측 대비 많은 양의 강수를 보인다. 또한, 제주도 남서쪽에 저기압성 소용돌이를 약하게 예측하여 제주 동부로 유입되는 수증기량도 적다. 제주도 동부에서 동풍류가 비교적 약하게 예측되어 동부에서 강수의 과소 예측은 수증기량과 수렴의 과소 예측에 기인하는 것으로 추정된다. 따라서 집중관측을 통하여 이러한 과소 예측 원인을 개선하기 위한 연구와 그 원인을 이해하는 것이 필요하다.

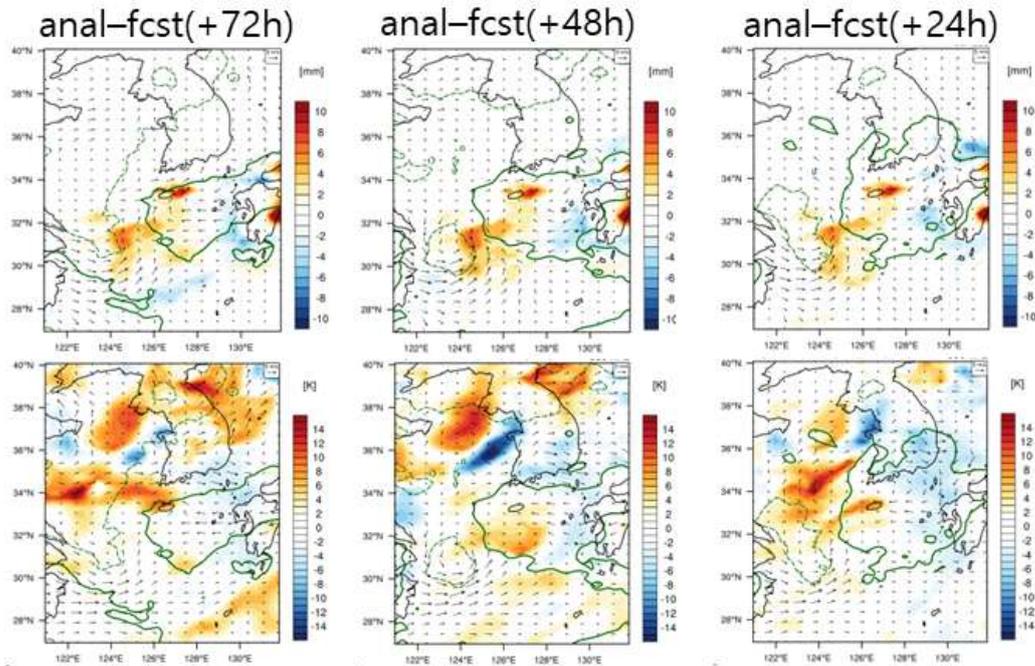


그림 2.2.1.3 2018년 9월 12일 12UTC GDAPS (a) +72, (b) +48, (c) +24hr 예측장과 분석장 (anal)의 3시간 누적강수량(shading), 해면기압(green line), 10m 바람장(vector) 차이, (d) +72, (e) +48, (f) +24hr 예측장과 분석장 (anal)의 상당온위(shading), 해면기압(green line), 10m 바람장(vector) 차이

겨울철 동해안 및 서해안 강설: 여름철 강수뿐만 아니라 겨울철 동해안과 서해안에서 발생하는 강설은 한반도에 큰 영향을 미친다. 대부분의 강설 시스템이 따뜻한 바다와 차가운 공기의 상호작용에 의해 발생하며 저기압의 통과 방향에 따라서도 강설의 큰 변동을 유발한다. 또한, 서해에서의 북서풍류 유입 시 지형 (특히 경기만)과의 상호작용과 서해에 존재하는 해륙풍과의 상호작용은 많은 연구가 진행되지 않았을 뿐만 아니라 수치모델에서도 모수화가 개선되어야 하는 분야이다. 동해안에 발달하는 강설은 남북으로 위치한 산악으로 인하여 강수과정의 복잡성을 더한다. 바다와 대기의 상호작용뿐만 아니라 해안선 근처에서 찬 공기의 축적, 동풍류의 산악에 의한 북풍류로의 전환, 산악 서쪽에서 서풍류의 유입, 북풍/북서풍에 의한 한기의 유입, 그리고 지형에 의한 상 하강기류 및 온도 변화 등이 동해안 강설의 예측성을 저하시킨다.

아래 그림은 2013년 1월 20일 발생한 동해안 강설시 강원도 지역에서 레이더 반사도 영상 (왼쪽)과 호브플르 그림(오른쪽)이다. 강설 초기에는 산악의 서쪽에는 남서풍, 동쪽에는 남동풍류가 유입되면서 동해에 강수가 넓게 퍼져있지만, 점차 동쪽에서 동풍류로 전환되면서 동해에 강한 대류선을 형성하고 해안선으로 이동하지 못하고 정체하고 있다. 이후 바람이 북동풍류로 바뀌면서 대류선이 점차 해안으로 접근하면서 동해안에 강한 강수를 유발하였다. 따라서 이러한 대류선의 해안 유입시기는 강한 강수의 시점과 매우 밀접한 관계를 가진다. 현재 이러한 동해안 강수 구조를 이해할 수 있는 관측 자료는 매우 부족하다.

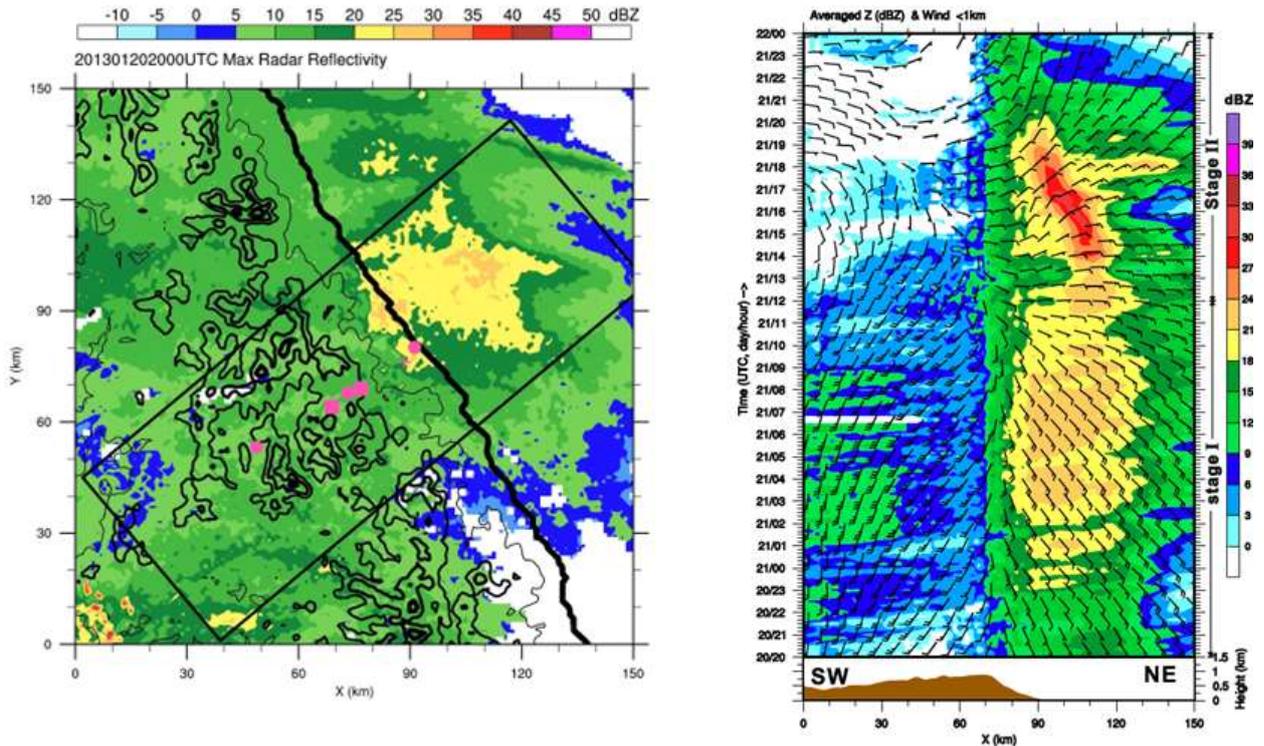


그림 2.2.1.4 온대저기압이 남부지방을 통과할 때 평창-동해지역에서 관측된 레이더 반사도의 (왼쪽) 동영상, (오른쪽) 호브플르 그림 (Tsai et al., 2018).

집중관측 대상으로 예보현안 4대 난제에 대한 집중관측을 우선 수행하여 관측결과를 이용하여 관측-예보의 연계체계를 통하여 성과를 도출하는 것이 중요하다. 이러한 성과를 활용할 수 있는 방안으로는 1) 집중관측설계 시 집중관측-분석-모델-예보의 연계체계 마련, 2) 집중관측 자료 활용정책 (Data policy) 및 포털 구축을 통한 활용성 증대, 3) 집중관측의 현업화 연계 (Research to Operation: R2O)가 있다.

집중관측 설계 시 집중관측-분석-모델-예보의 연계체계 마련: 이를 위해서는 먼저 1) 집중관측 사전 협의체 또는 준비위원회를 구성하여야 한다. 체계적인 장기 관측에 기반하여 집중관측이 필요한 현상을 논의하여야 한다. 자료처리 과정의 표준화, 자료 개방 범위 및 시기 등에 대한 논의를 통하여 국내뿐만 아니라 국외 연구자들의 참여와 활용이 확대될 것이다. 이

러한 협의체는 다양한 기관, 다양한 전문가(관측, 예보, 모델링 전문가 등)가 참여하여야 한다. 위원회의 협의를 통하여 2) 체계적인 집중관측의 설계가 진행되어야 한다. 체계적인 설계를 통하여 구체적인 연구 방향과 필요 관측 자료에 대한 정의가 함께 이루어져야 한다. 집중관측이 진행되는 동안에는 3) 장비별 품질관리를 통하여 실시간 자료를 활용하고, 집중관측 후에는 고도의 품질관리 기술을 적용하여 자료의 품질을 향상하여 활용성을 높여야 한다. 또한, 이렇게 품질관리가 된 자료를 활용하여 4) 관측기반 분석장을 생성하고 5) 관측 자료와 분석장을 이용하여 현상에 관한 이해 연구를 수행하고 6) 이들 자료와 수치모델 연계 실험을 통하여 집중관측 자료의 효과 분석을 진행하여야 하고 7) 집중관측자료 및 분석결과를 연계하여 모델 개발 및 개선 연구를 진행하여 더욱 첨단 수치예보모델에 활용하여야 한다. 이러한 자료의 수치예보 직접 활용뿐만 아니라 집중관측자료의 예보 활용성 및 예보를 향상하기 위한 자료로 활용하여야 한다.

집중관측 자료 활용정책 (Data policy) 및 포털 구축을 통한 활용성 증대: 기상청과 기상과학원을 중심으로 여름철 재해기상 집중관측이 진행되고 있으나 대학의 일반 연구자가 이에 대한 자세한 정보와 관측데이터를 습득하는 것에 큰 어려움이 있다. 집중관측을 수행할 때 관련 정보를 실시간으로 업데이트하고 향후 자료 공유를 돕는 1) 체계적인 집중관측 정보 지원 체계가 필요하다. 미국의 경우 NSF 지원을 받는 집중관측에 대해서는 UCAR를 중심으로 관측 정보를 업데이트하는 catalog 시스템 (<https://catalog.eol.ucar.edu/>)을 운영하여, 다양한 연구자가 손쉽게 집중관측 내용을 이해할 수 있도록 돕고 있다. 이러한 catalog 시스템은 관측 수행 시 연구자 사이에 빠르게 실시간 정보를 공유하는 역할과 관측 종료 후 다양한 연구자에게 자세한 관측정보를 제공하여 집중관측 활동이 논문과 같은 연구 성과로 이어지게 하는 순기능을 제공한다.

집중관측 프로그램에 대한 전반적인 정보를 제공하는 catalog 시스템 이외에도, 2) 관측 연구에 참여하는 연구자들이 자료를 공유할 수 있는 체계적인 데이터베이스가 필요하다. NASA의 경우 ESPO와 같은 세부부서를 통해 해당 데이터베이스를 관리하고 연구 프로그램에 직접 참여하는 연구자는 아이디어의 발급만으로 모든 데이터를 지연 없이 활용할 수 있는 체계를 활용한다 (그림 2.2.1.5). 추가로 NCAR의 경우 연구 자료 아카이브 (Research Data Archive)를 운영하여 (그림 2.2.1.6), 집중관측을 포함한 다양한 자료의 접근 및 활용을 용이하게 하고 있다. 체계화된 데이터베이스 및 자료에 대한 자세한 정보를 담은 아카이브의 운영은 관측 자료 활용도를 높이는데 크게 기여할 수 있다. 데이터베이스의 구축 및 지속적인 운영을 위해서는 전문적인 지식을 갖는 기술 인력 및 담당 부서가 필요하다.

집중관측의 현업화 연계 (R2O): 집중관측을 현업화와 연계하는 것은 집중관측의 지속성, 연속성, 실효성 등을 위하여 매우 중요하다. 따라서, 1) 집중관측을 설계하고 수행할 때 반드시 현업(O)을 고려하여야 한다. 또한, 집중관측 설계 시 2) 현업연계에 대한 계획을 명시화하고 이에 대한 기대수준뿐만 아니라 현업과 직접적으로 연계된 담당 부서를 명시하여 집중관측의 결과가 현업에 적용될 수 있도록 하여야 한다.

The screenshot shows the NASA website for Airborne Science Data for Atmospheric Composition. It features a navigation menu with Home, Tools, Missions, Data, and Contact Us. The main heading is 'KORUSAQ 2016 Current Archive Status As of Fri Aug 12 07:12:04 2022 EST'. Below this, there is a table listing various aircraft types and their associated data products. For example, the DC-8 aircraft includes data for the 'Merge' mission, and the B737 aircraft includes data for the 'Analysis' mission. The table also lists specific aircraft names like 'NIER M. Teelwa' and 'NIER Daejeon'.

The screenshot displays a file browser interface for the 'THOMPSON ANNE' dataset. It shows a list of files with columns for 'Download', 'Filename', 'Rec'd/Updated', and 'Size (KB)'. The files are organized into sub-directories like 'korusa-OlympicParkOzone sondes' and 'korusa-TachonOzone sondes'. Each file name includes a specific date and time, such as '20160531_R1_L1.L1'. The interface also includes a search bar and a 'Download' button.

그림 2.2.1.5. KORUS-AQ 2016의 모든 자료를 다운로드할 수 있는 NASA의 데이터베이스. 해당 자료를 활용한 논문이 2022년까지 출판되고 있음.

The screenshot shows the NCAR Research Data Archive website for the WCRP and WWRP THORPEX YOTC (Year of Tropical Convection) Project. The page features the NCAR logo and the text 'Research Data Archive Computational & Information Systems Lab'. It includes a navigation menu with Home, Find Data, Ancillary Services, About/Contact, Data Citation, Web Services, Metrics, and For Staff. The main heading is 'WCRP and WWRP THORPEX YOTC (Year of Tropical Convection) Project ds629.0 | DOI: 10.5065/D6R20ZDD'. Below this, there is a 'Description' tab and a 'Data Access' tab. The 'Data Access' tab shows the temporal range: '2008-05-01 00:00 +0000 to 2010-05-10 12:00 +0000 (Entire dataset)'. The page also includes a 'Go to Dataset' field and a 'Help with this page' section.

그림 2.2.1.6. NCAR의 Research Data Archive. 단순한 데이터베이스의 기능을 넘어 자료의 설명, 사용방법, 참고문헌 등을 다양하게 제공함.

2. 캠페인 기본계획 제시

국내외 사례를 바탕으로 다양한 운영체계 (협업체계)를 정의하고 이에 대한 특성, 장단점을 비교 분석하고 이를 통하여 캠페인 운영체계를 제시하였다 (표 2.2.1.1).

첫 번째 방안은 가장 보편적이며 효율적인 캠페인 체계로 미국 NSF 시설 (Facility)을 활용한 캠페인 방식이다. 장비의 개발, 유지보수, 운영, 품질관리, 자료관리, 산출물 (분석장) 생성 등을 담당하는 기관이나 주체가 별도로 정의되어 있고 이들 facility를 필요로 하는 수요자가 제안서로 요청하여 캠페인을 수행하는 형태이다. NCAR EOL, CSU-CHILL, DOW 등이 이러한 체계에 해당하며 캠페인과 별개로 이 시설들은 기본적인 정부 재원 지원을 받고 운영되며 NSF를 통하여 선택된 제안서 PI의 의도에 따라 캠페인이 수행되며 시설들은 최선의 캠페인을 위하여 지원하는 형태이다. 매우 체계적이며 장비의 국산화에서 관측 전문가 양성까지 다양한 장점이 있는 체계이다.

두 번째 방안은 현업 부서 (기상청)에서 특정한 지역에 특정한 목적의 관측망을 구축해 놓고 학계나 산업계에서 본인들의 장비를 추가로 설치하여 집중관측을 수행하거나 알고리즘/모델을 시험하는 방식으로 캠페인을 수행하는 것이다. 미국 국립재해기상연구소 (NSSL, National Severe Storm Laboratory)에서 운영하는 위험기상 테스트베드 (HWT, Hazardous Weather Testbed)가 이러한 유형이며 주로 알고리즘/모델 테스트에 더 치중된 형태이다. 위험기상 예측 모델의 새로운 기술과 개념을 실험하고 검증하여 현업을 지원하는 역할을 할 수 있다. 현업기관의 예보사, 연구기관의 연구사, 대학교의 교수 및 대학원생 등 다양한 참여자가 각자의 예측모델에 대한 피드백을 통해서 문제점을 해결하고, 새로운 예측 기술을 개선 추진할 수 있다. 이러한 형태는 주로 장비, 모델의 개선, 개발에 주로 활용되는 형태이며 장비의 경우 표준화, 새로운 개념의 장비 개발, 시험 등에 활용 가능한 방식이다.

세 번째 방안은, 주로 장비를 보유한 대학들이 과학적인 문제를 정의하고 컨소시엄 형태로 장비들을 배치하고 운영하여 집중관측을 수행하고 관측 자료의 활용을 컨소시엄 내로 한정하는 방식이다. 이 방식은 기상 장비 개발이 활성화된 국가나 연구과제에서 대형 장비 구매가 가능한 국가에서 적용되는 방식이다. 많은 장비를 소유하거나 개발 능력이 있는 대학을 다수 보유한 유럽에서 주로 많이 행하는 방식이다.

국내에서는 두 번째 방안에서 보유한 장비를 기상청 시설로 등록 운영하고 기상청 연구개발 사업으로 새로 개발 또는 도입된 장비, 기상청 내에서 연구용으로 도입한 장비를 첫 번째 방안으로 등록하는 “기상청 시설 (KMA facility)” 운영체계를 추천한다. 기존 장비의 활용을 극대화하고 장비의 국산화를 통한 현업화가 가능하다. 국산 장비의 지속적 지원을 통한 장비전문가 및 관측 전문가의 양성이 가능하고 현업화로도 직결된다.

국내에서는 대학이 최첨단 장비를 구매하여 운영하기 어렵고 장비 국산화 또한 다양한 이유로 진행되지 못하는 실정이다. 이러한 실정에서 국내 기술로 장비를 개발하고 이를 현업화

까지 연계하기는 쉽지 않다. 관측 전문 인력의 양성은 대학의 관측 교육의 강화와 집중관측 또는 현장실습 중심의 관측 교육이 이루어지고 기상청에서 관측 전문 인력 채용과 내부 연구 인력의 재교육을 통하여 가능하다. 최첨단 장비의 지속적인 개발 및 활용을 위해서는 현재 기상 산업기술원의 ASOS 또는 AWS 유지보수 인력만으로는 부족하여 별도 조직을 구성하는 것이 더 현실적이다. 따라서 이러한 다양한 요구사항을 만족할 수 있는 형태로 집중관측 운영체계를 갖추어야 한다.

표 2.2.2.1 집중관측 캠페인 운영체계들.

방안	내용	특성	예시
1	미국 NSF Facility 활용 캠페인 방식	<ul style="list-style-type: none"> - NSF 예산 지원으로 장비 개발, 유지/보수, 관측 등 수행 - NSF 제안서를 통한 시설 요청 (NSF내 시설운영을 위한 예산) 	NCAR EOL, CSU-CHILL, DOW
2	현업 부서에서 특정한 지역에 특정 목적 관측망 구축 후, 학계/산업계에서 장비를 추가 설치, 집중관측 수행 및 알고리즘/모델 시험 방식	<ul style="list-style-type: none"> - 체계적인 목적관측망 구축 필요 - 장비, 모델의 개선, 개발에 주로 활용되는 형태 - 장비 표준화, 신개념 장비 개발, 시험 등에 활용 가능한 방식임 	HWT
3	장비 보유 대학들이 과학적인 문제 정의 및 컨소시엄 형태로 장비 배치, 운영, 집중관측 수행	<ul style="list-style-type: none"> - 기상 장비 개발이 활성화된 국가 활용 모델 - 연구과제에서 대형 장비 구매가 가능한 국가 적용 방식 	유럽/일본/미국

이러한 운영체계를 유지하고 운영하기 위해서는 다음의 두 운영 방안, 1) 기상청 집중관측 실험시설 (KMA intensive observation facility), 2) 기상청 집중관측 실험시설 프로그램 (KMA facility program)을 생성 및 유지하여야 한다.

기상청 집중관측 실험시설 (KMA intensive observation facility): 기상청 집중관측 실험시설을 갖추기 위하여 가장 먼저 기상청이 보유하고 있는 다양한 기존 장비 및 시설을 이용하여 풀 (pool)을 생성하여야 한다. 이를 위하여 기존 장비에 대한 전수 조사가 필요하다. 전수 조사에는 장비 종류, 활용 및 운영실태, 목적 및 타당성, 설치 위치의 타당성, 목적에 따른 활용성 등 다양한 조사를 통하여 전국에 산재한 기상청 연구용 관측망에 대한 재평가가 필요하다.

이를 바탕으로 일부 장비의 이동 설치, 목적의 재정의 등을 통하여 위험기상 집중관측에 적합한 체계로의 전환이 필요하다. 또한, 앞에서 언급한 집중관측 대상에 대한 목적지향형 관측망을 일부 신규 구축하여 기상청 시설의 근간을 마련하여야 한다.

장비 또는 시설 확충 측면에서는 1) 장비의 국산화를 지원하고 국산화된 장비의 지속적인 시험 및 운영을 통하여 국산화 장비가 현업으로 연계될 수 있도록 하여야 한다. 이를 위하여 관측 관련 특성화 대학 (기상업체와의 컨소시엄)을 지정하여 협력관계를 설정하고 이를 통하여 장비 개발, 국산화, 시험, 현업화 연구를 지원하여야 한다. 또한, 2) 특성화 대학 또는 기상청 내 연구기관에서 해외 첨단장비를 구매, 운영하여 전문성을 강화하고 이들 장비를 기상청 시설에 등록하여 집중관측에 활용할 수 있다. 장비 국산화의 경우 장기간이 소요되는 단점을 보완하기 위한 것으로 해외 선진 연구용 첨단장비를 도입하여 집중관측실험 및 현업화 시험을 할 수 있다.

이러한 첨단장비를 활용한 기상청 시설 구축 및 집중관측 이외에도 지방지상청에서 모바일 관측 장비를 구축하고 이를 지역 대학과 연계하여 운영할 수 있다. 이들 모바일 장비 또한 기상청 시설에 등록되며 집중관측 실험에 참여한다. 이를 위하여 기본 기상변수와 존데 관측 기능을 갖춘 모바일 관측 장비를 지방청별로 구축하고 이를 이용하여 지역별 특이기상을 관측할 수 있다. 따라서 모바일 관측 장비 구축 및 활용을 통하여 지방청의 관측 전문성을 강화하고, 대학 연계 사업을 활성화할 수 있을 것이다.

기상청 집중관측 실험시설 프로그램 (KMA facility program): 기상청 시설을 개발 및 운영하기 위하여 “기상청 집중관측 실험시설 프로그램”을 운영하여야 한다. 이 프로그램은 세 가지로 운영할 수 있다.

- 1) 기상청 집중관측 실험시설 운영: 이 운영 프로그램은 기상청 내 장비 pool의 운영 및 집중관측 인력/예산 확보, 장비 개발/국산화/시험/현업화 지원체계 (관리인력/예산) 확보, 첨단장비 도입 관측실험/현업화 지원체계 (관리인력/예산), 지방청-대학 연계 집중관측 사업 (인력/예산) 등으로 구성된다.
- 2) 기상청 시설 활용 프로그램 운영: 이 운영 프로그램은 다음으로 구성된다.
 - 소규모 (교육, 봉사): 교육 및 지역사회 기여 활동을 위한 소규모 연구지원 (<1억 원)
 - 단독연구 (단독실험): 단일 연구 설비의 활용이 필요한 단독 및 소규모 공동연구 지원으로 장비 비교검증, 특수 목적형 관측 등이 포함될 수 있음.
 - 집단연구 (관측캠페인): 국제공동연구, 항공관측 등 다수 설비 활용 대규모 연구지원으로 장기간의 준비와 계획 단계가 요구됨.
 - 집중관측 활용연구: 집중관측에서 생성된 자료를 활용하여 진행하는 연구를 지원하고 학부생/대학원생 및 연구자 등 레벨별 연구 제안이 가능함.
- 3) 기상청 시설 활용 교육 프로그램 운영: 이 운영 프로그램은 기본 관측, 원격탐사 등 관측 장비 유형별 교육, 집중관측 참여 및 교육 등으로 구성된다.

3. 지역대학·지방청 연계 관측·예보·서비스 등 전주기 기상업무 협력체계 제시

지방청별 맞춤형 지원 프로그램 마련에 적합한 운영체계 제시를 위하여 해외 모범 사례를 살펴보았다. 미국 NOAA의 경우는 필요한 주제별(기상, 기후, 해양기상, 위성, 지구시스템 데이터 활용 등)로 10~30인 규모의 특화 공동 연구센터 (NOAA Cooperative Institutes)를 대학에 설치하여 연구 협력을 강화하고 있다. 협력 기관을 통해 NOAA 연구를 수행할 연구자 (Post Doc, Researcher)를 고용하여 연구 인력을 확보하고 각 협력 기관은 대학과 기관의 공동연구를 촉진하는 지역별 허브의 역할을 수행한다. 해당 센터의 정보를 아래 표에 정리하였다. 이밖에도 학생 고용 프로그램 (Student Employment Programs)을 운영하여 전문 기상 인력의 교육 및 현업연계 활성화 노력을 진행 중이다.

표 2.2.3.1 미국 대학에 설치된 NOAA의 특화 공동 연구센터

특화 연구센터	설치 대학 및 연구내용
CIWRO (Cooperative Institute for Severe and High-Impact Weather Research and Operations)	University of Oklahoma 스톡 및 중규모 악기상 연구 (*구 CIMMS)
CIRA (Cooperative Institute for Research in the Atmosphere)	Colorado State University 위성 활용연구
CIESRDS (Cooperative Institute for Earth System Research and Data Science)	University of Colorado-Boulder 데이터 과학 기반 지구시스템 연구
CISESS (Cooperative Institute for Satellite Earth System Studies)	North Carolina State University 위성기반의 지구시스템 연구
CICOES (Cooperative Institute for Climate, Ocean, & Ecosystem Studies)	University of Washington 기후변화 및 생태계 연구
CIMSS (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies)	University of Wisconsin 기상위성 연구

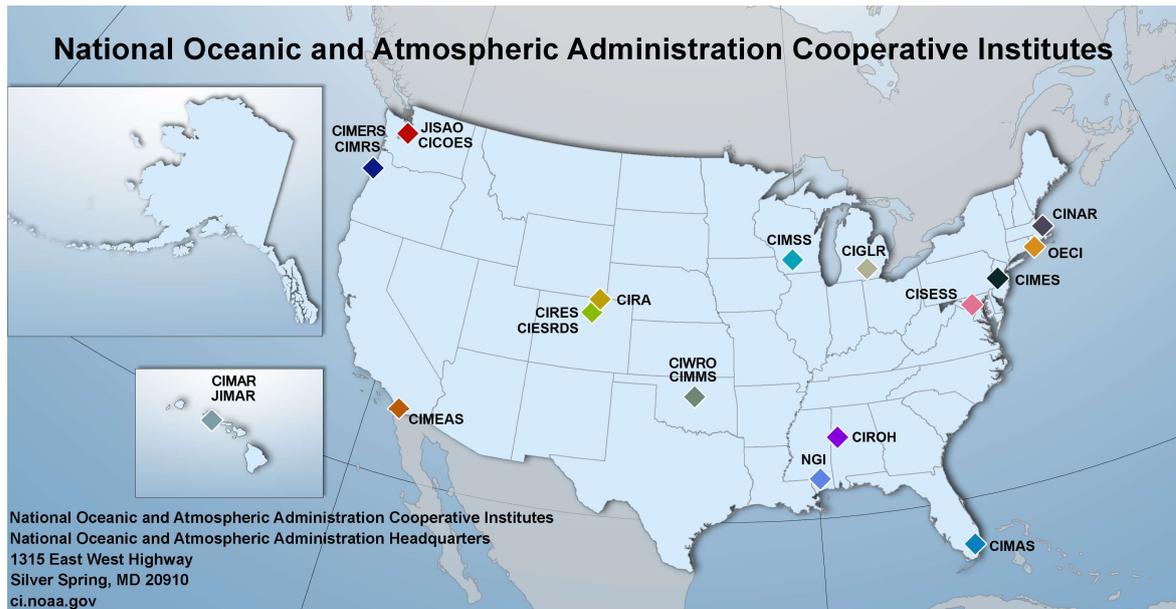


그림 2.2.3.1. 대학에 설치된 NOAA의 공동 연구기관 (NOAA Cooperative Institute).

또한, NOAA/NSSL은 지역대학에 연구 장비 및 플랫폼을 보급하여 공동 집중관측에 참여한다. NSSL은 위험기상의 관측 및 연구에 필요한 장비 (mobile radar, mobile profiling system, mesonet)를 대학과 함께 개발하고 이를 다시 주변의 여러 대학에 보급하여, 지역별 특별관측에 활용하고 있다 (그림 2.2.3.2).



그림 2.2.3.2 NSSL과 지역대학이 운영 중인 모바일 프로파일링 시스템과 모바일 메조넷.

지방청별 집중관측 협력을 위해서 1) 지방청 특화 위험기상 집중관측 운영체계를 구성하고 2) 장단기 공동관측 연구개발이 필요하다.

지방청 특화 위험기상 집중관측 운영체계 구성: 지방청별 집중관측 운영체계 구성을 위해서는 먼저 지방청별 특이기상을 선정하여야 한다. 다음은 지방청별 특이기상 예시이며, 관련 주제는 추후 기상청에서 선정하는 것이 효율적일 것으로 판단된다.

- 수도권청기상청: 도시기상, 여름철 집중호우
- 강원지방기상청: 동해안 폭설, 강풍, 산악기상
- 대전지방기상청: 폭설, 내륙기상 (산악기상), 안개
- 전주지방기상청: 가뭄, 서해안 폭설
- 대구지방기상청: 우박, 낙뢰, 폭염
- 광주지방기상청: 서해안 폭설, 풍력, 연안기상
- 부산지방기상청: 연안기상, 태풍
- 제주지방기상청: 제주 동부 집중호우, 태풍

지방청별 기본변수의 특별관측을 위한 모바일 관측망 운영: 지방청별로 기본 기상변수 관측을 위한 모바일 관측망을 구축하고 이를 지역대학과 연계하여 집중관측을 위하여 운영하여야 한다. 지방청별 또는 지역대학별 첨단장비에 대한 전문성을 갖추기는 어렵다. 따라서 첨단 관측 장비보다는 기본 기상변수의 집중관측 분야에 협력이 바람직하다. 따라서 기본 기상변수 관측에 필요한 모바일 차량에 통합센서 및 라디오 사운드 관측 장비를 설치하여 집중관측에 활용할 수 있다.

첨단 관측 장비를 활용한 집중관측은 상당한 전문성과 지속적인 연구개발이 이루어져야 하는 분야이다. 따라서, 지방청 또는 지역대학에 첨단장비의 개발 및 도입을 통한 협력보다는 보다 전문성을 갖춘 대학을 특성화 대학으로 지정하고 첨단장비에 관한 장기적인 연구가 가능한 기상과학원과의 협력체계를 구축하는 것이 더 바람직할 것이다. 이를 통하여 특성화 대학과 연계한 첨단 관측 장비(모바일)를 구축하고 운영하여 관측의 전문성과 전문가를 양성하여야 한다.

이러한 기본 기상변수 관측용 모바일 관측소를 이용하여 학생 대상으로 기본 관측 교육을 진행할 수 있을 것이다. 지역에서 발생하는 위험기상의 집중관측을 위한 프로그램에 학생들이 자연스럽게 참여함으로써 관측 경험을 축적하고 관측에 대한 중요성과 흥미를 유발할 수 있을 것이다.

장단기 공동관측 연구개발: 장·단기 공동관측 연구개발을 위한 방안으로는 앞에서 언급한 지방청별 지역별 특이기상에 대한 전담 연구팀 (관측 및 분석팀)을 구성하여야 한다. 특화된 주제에 대해 지속적으로 연구하는 전문 인력 (혹은 연구팀)을 지방청이 보유하지 않으면 지방청의 관측 활동은 업무 부담만 높이는 단기 행사성 프로그램이 될 가능성이 크다. 지역별로 중요한 위험기상을 지방청별 특화 주제로 선정하고, 소규모의 운영 예산 (1~2억 규모, 장비 구매 및 유지 비용 제외)을 지속적으로 제공해야 관련 주제에 대한 전문 관측인력을 양성할 수 있을 것으로 판단된다. 먼저 지역 특이기상 연구를 위한 협의체를 구성하고 지역별 특이기상에 대한 집중관측 및 연구 계획을 수립하고 이를 위한 예산이 확보되어야 한다.

지방청이 구축한 모바일 관측망은 원격탐사장비, 항공기 등 첨단장비와 함께 KMA 시설로 등록하여야 한다. 첨단장비는 집중관측 특성화 대학에서 도입하거나 개발한 장비로 구성

된다. KMA 집중관측 시설은 요청에 따라 집중관측에 참여한다. 지역별 집중관측뿐만 아니라 타 집중관측에서 모바일 관측소를 요구할 경우, 관측 지원을 할 수 있도록 하여야 한다. 반대로 지방청에서 특이기상관측을 위하여 필요한 경우 KMA 시설을 요청할 수 있다.

또한, 특성화 대학 또는 지역대학-기상청 간 관측 연계 및 교육 프로그램 개발을 통하여 연구세미나 및 교육 활동 (계절 학교 등)을 안정적으로 운영할 수 있으며, 필요시에 특성화 대학을 중심으로 특별관측 프로그램을 구성하면 효율적인 현업 및 연구 활동이 가능할 것으로 판단된다.

4. 집중관측자료 공동활용 체계 구축을 통한 대학 교육·연구 활성화 방안 제시

집중관측자료 분석을 통한 대학교 연구과제 활용방안 및 대학생 집중관측 프로그램의 단기·중장기 발전/환류 방안은 “품질관리 및 표준화된 연구에 활용할 수 있는 자료 프로그램 (Clean & Standard research-ready data program)”을 통하여 가능할 것이다. 이를 위한 세 가지 방안은 1) 교육 프로그램, 2) 연구 프로그램, 3) 자료 표준화 프로그램이다.

교육 프로그램: 교육 프로그램을 통하여 대학생들이 집중관측에 참여하고 집중관측을 통하여 관측 교육을 강화하고 집중관측에서 생산된 자료를 활용한 교육 프로그램을 통하여 대학 관측 교육 및 연구를 활성화할 수 있다. 먼저 집중관측-자료품질관리-분석-활용으로 이어지는 연계 과정의 확립을 통하여 관측 분야의 활성화가 가능할 것이다. 또한, 집중관측에서 획득된 자료에 대한 교육과 집중관측에 사용된 첨단 관측 장비에 대한 교육을 집중관측 참여를 통하여 활성화할 필요가 있다.

대학 연구자와 협의를 통해 과학적으로 우수한 첨단 관측 장비와 기본 기상변수 관측 장비들을 하나로 묶는 기상청 집중관측 시설 (KMA facility)를 구축하여 활용하여야 한다. 해당 장비에 정보를 자세히 제공하여 대학생을 포함한 대학의 연구자가 손쉽게 접근할 수 있도록 하며 기상청 시설을 이용한 관측 연구 자료는 기상청이 체계적으로 관리하는 데이터베이스 (혹은 연구 아카이브)를 통해 관리하여 해당 자료가 다양한 연구에 활용될 수 있도록 운영할 수 있다.

집중관측 시 대학생을 대상으로 기상청 집중관측 시설(KMA facility) 관측 장비에 대한 교육을 통해 대학생이 관측 기술을 습득할 기회를 제공하여야 한다. 이러한 관측 교육을 대학 학점과 연계하여 대학생 교육 프로그램을 운영하여 기상청이 보유한 우수한 관측 장비를 대학생이 활용할 수 있는 기회를 제공하는 것이 필요하다. 또는 기상청이 제공한 관측 수업 (또는 여름학교) 이수 시 해당 과정에 대한 수료증을 발급하여 향후 수료증이 연구 기회 또는 취업에서 의미를 가질 있도록 지원 방안을 고려하여, 대학생들의 관측 참여 및 우수한 전문 인력 양성을 유도하여야 한다.

또한, 집중관측에 활용되는 첨단장비가 아니더라도 기상청의 만기가 도래한 장비 또는 유휴 장비를 교육을 위한 시설로 구축하여 이를 활용한 학부생 교과목 개발과 대학원생 관측 전문가 양성이 이루어질 경우, 기상청 기관 목적에 적합한 관측 구성에 관한 지식이 축적될 것이며, 관련 전문가 집단이 구축되면서 자연스럽게 관측 교육의 내실화가 이루어질 것으로 판단된다. 또한, 이러한 시설을 기상청 직원에 대한 관측 재교육 시설로 활용할 수 있다.

연구 프로그램: 연구 프로그램을 통하여 학부생, 대학원생이 집중관측 자료를 활용하여 수준에 맞는 연구 제안이 가능하도록 하여야 한다. 대규모 연구 프로그램뿐만 아니라 소규모

연구 프로그램을 운영하여 많은 대학생 및 연구자가 집중관측 자료를 활용할 수 있도록 유도하여야 한다. 이를 위해서는 수준별 집중관측자료 활용연구 제안 공모를 수행하고 기상청이 아닌 타 부처 과제에서도 집중관측 자료를 활용할 수 있도록 장려하여야 한다. 관측 전문가 양성이라는 목적과 직접적인 연계를 위해서는 학부생/대학원생 대상 여름/겨울 인턴 연구 프로그램을 마련하여 기상청 또는 대학에서 대학생들의 집중관측 자료를 이용한 연구를 지원하여야 하며 이러한 연구 프로그램을 기상청 인력 충원 시스템과 연동하여 집중관측과 집중관측 자료 활용연구에 참여한 학생들을 기상청으로 유도하여야 한다.

자료 표준화 프로그램: 자료의 활용성을 극대화하기 위해서는 자료 표준화와 이러한 자료를 개방하는 것이 필요하다. 자료 활용을 위한 자료 지원체계를 구축하고 집중관측 자료에 대한 광범위한 자료 품질관리를 수행하고 자료에 대한 메타 자료 (보조 정보 추가, 보정 및 유지 정보)를 추가하여야 한다. 원시 자료 (raw data) 및 원시 자료 처리 방법이 공개되어야 하며 다양한 배경의 자료 활용자를 고려하여 집중관측 자료를 레벨화하여야 한다. 또한, 보다 심도 있는 연구를 위하여 집중관측 자료 기반 분석장과 산출물을 생성하여 사용자에게 제공하여야 한다.

자료의 공개뿐만 아니라 사용된 첨단장비에 대한 관측 원리에 대한 설명서를 작성하여 보다 수준 높은 관측 연구가 가능하도록 하여야 한다. 또한, 집중관측 후 자료 공개 및 활용시 발생할 수 있는 문제점을 최소화하기 위하여 투명한 자료 정책 (data policy)을 마련하여 집중관측에 대한 공정한 기여도를 부여하여야 한다.

이러한 활성화 방안 이외에도 집중관측 자료의 완성도를 배가하기 위하여 관측 자료 생산뿐만 아니라 자료 전송 프로토콜의 업데이트를 통하여, 자료 송수신 오류로 인한 자료 미확보 및 처리 지연 문제를 해결해야 한다.

제 3 절 예보현업-집중관측 프로그램 연계방안 제시

1. 위험기상, 특이기상별 집중관측 분석 및 예보현업 활용방안 도출

집중관측 프로그램과 예보 현업의 연계를 위해서는 집중관측 자료의 품질관리, 분석, 활용에 대한 방안과 이를 예보와 연계할 수 있는 방안이 필요하다. 이를 위해서는 먼저 집중관측에서 현업화로 연계되는 R2O (Research to Operation) 체계를 이해하여야 한다. 아래 그림에서 보인 바와 같이 예측 향상이나 의사 결정을 위한 새로운 관측체계나 새로운 알고리즘이 개발될 경우, 이의 현업화 연계는 집중관측을 통하여 이들에 대한 실험 및 현장 실증을 통하여 영향을 평가하고 이에 대한 수정 보완 및 새로운 실증을 거쳐 현업화로 이어진다. 즉, 테스트베드를 통한 집중관측 실험 및 현업화의 환류 체계 (R2O 및 O2R: Research-to-Operation and Operation-to-Research)는 입력 자료에서 결과물까지 연결 체계를 기반으로, 현업에서 요구하는 새로운 관측체계 또는 알고리즘(모델)의 개발 및 시험을 위하여, 최적의 집중관측을 통한 현장 실험을 진행하며 획득된 자료의 영향 평가를 통하여 관측체계의 효용성을 진단하거나 모델의 성능을 평가하여 수정, 보완 및 재실험을 통하여 고도화하여 현업화 단계로 넘어간다. 이러한 환류 체계에서 목적 달성을 위한 최적의 집중관측실험을 설계하고 집중관측을 통한 반복적인 시험 및 고도화가 필수적이다.

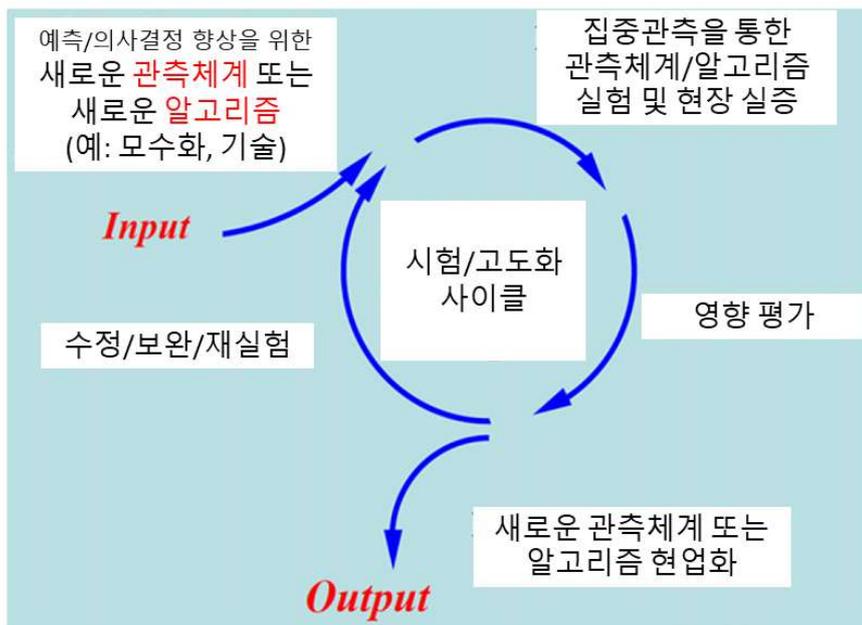


그림 2.3.1.1. 테스트베드를 통한 집중관측과 현업화 연계도.
(Dabberdt et al., 2005)

R과 O는 매우 다른 특성을 가진다. R은 새로운 기술 및 방법론에 대한 탐구적 특성을 가지며, 현업 시스템 대비 고해상도의 특성을 가진다. 또한, 현업에 존재하지 않는 다양한 기술 기반의 다양한 센서가 활용되며 이를 통하여 새로운 관측 변수가 획득된다. 또한, R의 가장 중요한 특징은 예보의 정확도나 연속적인 운영이 아닌 물리과정에 대한 진단을 주요 목표로 한다. 이에 비하여 O는 효율성과 신뢰성을 그 특징으로 한다. 또한, 현업의 신뢰성을 확보하기 위하여 연속성을 유지하여야 하며 비용 효율성이 있어야 한다. 대부분의 R은 초기 개발 장비

또는 신규 알고리즘이 활용될 수 있지만, O에서는 상용화 또는 규격품이거나 실시간 안정적인 운영이 가능한 알고리즘이어야 한다. 따라서 R2O는 이렇게 다른 특성의 두 단계를 극복하여야 한다. 테스트베드에서 집중관측을 통하여 시험하고자 하는 장비, 알고리즘, 모델 등의 특성이 R과 O 중 어디에 더 가까운지에 따라 현업화 가능성이 결정되며 R에서 O의 특성으로 넘어갈 수 있도록 수정/보완/재실험을 지속적으로 수행하게 된다.

집중관측이 이러한 단계 극복의 교량 역할을 하여야 한다. 따라서 집중관측에 요구되는 것은 새로운 많은 개념이나 장비를 시험할 수 있도록 유연하게 설계되어야 하고, 이들 중 어떤 장비 또는 개념이 중요한 것인지, 실행 가능한 것인지에 대한 판단이 가능하도록 전문성을 갖추어야 한다 (그림 2.3.1.2). 또한, 현업을 위한 새로운 산출물을 생산할 수 있는 장비나 알고리즘을 견고하게 할 수 있는 인프라가 갖추어져야 한다.

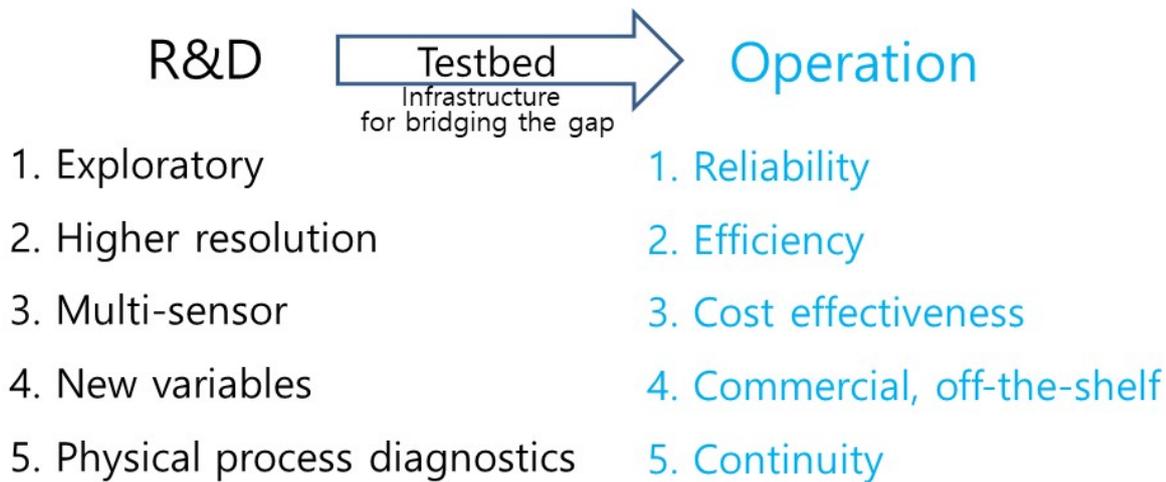


그림 2.3.1.2. R2O 과정에서 R과 O의 특성.

앞에서 살펴본 바와 같이 R2O를 위해서는 집중관측 자료의 품질관리, 분석, 자료 활용 및 이를 예보와 연계할 수 있는 방안이 필요하다. 이를 위한 방안으로는 품질관리 및 표준화된 연구에 활용할 수 있는 자료 프로그램 (Clean & Standard research-ready data program)과 R2O/O2R 상호 피드백 프로그램 (R2O/O2R feedback program)이 있다.

품질관리 및 표준화된 연구에 활용할 수 있는 자료 프로그램은 다섯 가지 방안으로 살펴볼 수 있다. 먼저 사용자를 고려한 수요자 중심의 자료 생산이 있어야 한다. 사용자의 관점에 맞게 자료를 생산하고 제공하여 자료의 사용자를 넓히는 것이 중요하다. 사용자의 레벨 (요구 정도)에 따른 자료 생산이 이루어져야 한다. 따라서 표준화된 자료 생산 절차를 마련하고 절차에 따라 자료가 생산되어야 한다. 아래 표는 활용할 수 있는 표준화된 자료 생산 절차에 대한 예시이다.

표 2.3.1.1 레벨에 따른 자료 표준화 예시 및 설명.

자료 레벨	자료명	설명
level 0	원시 자료(처리 전)	관측된 원시 자료(기계 수준)
	원시 자료(처리 후)	관측된 원시 자료(신호처리 후)
level 1	관측 자료	품질관리 전 자료
	관측 자료 (rQCed)	실시간 품질관리 자료
	관측 자료 (QCed)	관측 후 품질관리 자료
level 2	산출물	장비만으로 생산된 산출물
	융합산출물	다른 장비와 융합산출물

품질관리를 포함한 표준화된 자료 생산 절차를 통하여 산출된 집중관측 자료는 자료 정책 (Data policy)을 통해 공개되어야 자료의 활용도를 높일 수 있다. 이를 위하여 집중관측 자료만을 위한 포털 및 다양한 자료를 공유할 수 있는 웹사이트의 구축이 필요하다. 또한, 생산 자료의 활용도를 향상하기 위하여 품질관리, 산출물 생산, 분석 방법론에 관한 지속적인 연구 개발이 함께 진행되어야 한다. 품질관리, 자료 분석 방법론에 대한 문서가 함께 제공될 수 있어야 하며, 자료 사용자는 자료 제공자, 품질관리 및 분석기법에 대한 사사 또는 공저자 참여에 대한 자료 정책을 따라야 한다.

집중관측과 예보-현업연계를 위해서는 앞에서 언급한 R2O, O2R의 환류 체계가 체계적으로 갖추어져야 한다. 이를 통하여 너무 성급하지도 늦지도 않는 현업화 및 집중관측 환류가 이루어져야 한다. 대부분의 경우 집중관측이 진행된다면 바로 예보에 활용할 수 있는 기술이 개발될 것으로 오해하기 쉽지만, 앞에서 설명한 것과 같이 집중관측-예보의 환류 체계는 장기간의 상호작용이 필요하며 이를 지속적으로 지원할 수 있는 체계가 있어야 한다. 집중관측이 수행된 이후 자료에 대한 품질관리는 상당한 시간이 요구되며 모델에 사용 가능한 양질의 산출물 및 분석장 생산은 더 오랜 시간이 걸린다. 따라서 집중관측-자료처리-분석-모델-재실험이 이루어질 수 있도록 장기간의 순환체계(최소 3년)가 있어야 한다.

또한, 단계별 성과를 정의하여 성과물이 O의 특성을 갖출 수 있도록 하여야 한다. 즉, 초기 단계에서는 주요 성과를 품질관리 자료 및 산출물, 이후 사례 분석 및 기작 연구, 후반 단계에서는 기작의 일반화 및 예보 가이드스화를 작성하여 예보에 활용하거나 집중관측 장비의 현업화가 가능하도록 집중관측 프로그램이 마련되어야 한다.

품질관리의 경우 실시간 자료 활용을 위하여 완성도는 낮지만, 집중관측 기간 동안 실시간 운영할 수 있는 알고리즘을 적용하여 실시간 품질관리 자료를 생산하고 이를 이용하여 산출물을 생산할 수 있어야 한다. 집중관측 시 이러한 실시간 분석 자료의 제공을 통하여 예보

자 활용성을 진단하고 산출물에 대한 예보자 및 관련자 교육이 함께 이루어져야 한다. 또한, 집중관측 이후 완성된 알고리즘을 적용하여 후처리된 품질관리 자료 및 산출물을 생산하는 이원화 체계를 갖추어야 한다. 따라서 집중관측 자료의 예보활용도 향상을 위해서는 기상청 내 현업화 전담팀을 구성하거나 협업화 체계를 갖추어야 할 것이다.

2. 집중관측 노하우, 자료 활용방안 등 상시 관측망 개선사항 도출

지역대학별 공동 관측망 구축 및 활용방안은 지방청 및 대학의 전문성을 고려하여 두 가지 측면에서 살펴볼 수 있다.

첫째는 모바일 장비 (기본 센서 또는 존데)를 활용하여 지역대학 공동관측 네트워크를 구축하는 것이다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 대학과 지방청의 전문성 부재를 고려한 방안이다. 많은 대학에서 관측 전문가가 부재하고 관측 교육이 원활하지 않은 상황을 고려하여 난해하고 운영이 어려운 첨단장비의 즉각적인 도입이나 활용보다는 더 기본적이고 안정한 장비를 이용하여 협력체계를 구축하는 것이다.

먼저 기상청과 학계로 구성된 전문위원회를 구성하고 이 위원회를 통하여 집중관측에 활용될 모바일 장비에 대한 설계 및 통일된 규격을 마련하고 이를 기반으로 지방청 또는 지역대학이 모바일 자동기상관측 장비와 고층관측 장비를 도입 및 구축한다. 이러한 모바일 장비는 비교적 안정적이고 비교적 전문성이 높지 않아도 쉽게 운영할 수 있다. 이렇게 구축된 모바일 관측 장비를 기상청 집중관측 시설 (KMA facility)의 풀(pool)에 등록하고 지역별 및 전국의 다양한 기상 현상 관측에 지방기상청과 지역대학 공동으로 동시 활용하여야 한다. 장비 도입, 유지/보수, 운영, 예산 등의 행정적 측면을 고려하여 지방청 또는 지역대학이 장비의 구매나 소유를 담당하여야 한다.

둘째는 특성화 대학을 지정하여 첨단 관측 장비(주로 원격탐사)를 구축하여 운영하여야 한다. 기상관측에 전문성을 가지거나 특히 원격탐사에 특화된 지역 대학을 특성화 기관으로 지정하고 특성화 대학을 통하여 첨단 원격탐사 장비의 연구개발, 시험, 운영, 현업화를 연계하여야 한다. 특성화는 지역 대학뿐만 아니라 원격탐사 장비개발 경험이 있는 기상장비 개발업체를 포함하여 지역대학 및 기상장비 개발업체의 컨소시엄에 대하여 지정되어야 한다. 이렇게 지정된 특성화 컨소시엄은 첨단 원격탐사 국산 장비를 개발하여 시험, 운영을 거쳐 현업화까지 연계하여야 한다. 컨소시엄에서 해외 첨단장비의 구매를 통하여 현업화 연계도 하나의 중요 연구업무로 지정할 수 있다.

이렇게 특성화 컨소시엄에서 개발하거나 해외에서 도입한 장비를 자체 시험 및 운영하여야 하고 이 시설을 기상청 집중관측 시설 풀로 등록하고 집중관측에 활용하여야 한다. 이러한 특성화를 통한 시설 구축 및 관측 전문성 배양은 궁극적으로 기상청-지역대학의 협력체계가 추구해야 하는 가장 중요한 프로그램이다. 이러한 특성화 시설을 이용한 관측 장비 현업화 및 집중관측을 통한 관측 전문성 확보를 위해서는 지속적인 지원과 효율적인 성과 평가 시스템이 있어야 한다. 특성화 컨소시엄에서 갖추어야 하는 중요한 기능은 집중관측 자료에 대한 체계적인 품질관리 및 산출물 생산 기술이다. 따라서 장비의 개발에서 품질관리, 산출물 생산으로 연계가 컨소시엄 내에서 이루어질 수 있도록 하는 것이 매우 중요하다.

집중관측을 통한 민간 기상관측 자료 수집 및 활용방안은 다섯 가지 측면에서 살펴볼 수 있다.

집중관측을 통한 민간기상 자료 수집 및 활용은 관측 자료의 밀도를 높이고 예산을 절감할 수 있는 장점이 있다. 그러나 표준화되지 않은 민간 자료의 활용성을 극대화하기 위해서는 체계적인 품질관리 및 보정을 통한 자료의 품질 향상이 집중관측의 프로그램으로 함께 진행되어야 한다. 기상장비 표준화를 통하여 민간 기상장비에 대한 최소한의 표준 규격 (설치 조건, 센서, 운영 등)을 마련하거나 권고 규격을 마련하는 것 또한 자료 활용 측면에서 매우 중요하다.

집중관측의 일반적인 자료 정책은 집중관측 참여자 우선이다. 민간이 집중관측에 장비 제공자 (instrument provider)로 참여할 경우, 참여하는 장비의 자료에 대한 우선권은 민간에 주어지며, 민간은 이 장비의 자료를 기반으로 한 과학 프로젝트를 제안할 수 있으며 민간이 수집한 이외의 자료는 부수적으로 사용할 수 있는 권한이 주어진다. 대학의 참여 또한 마찬가지이다. 그러나 민간보다는 좀 더 넓은 과학적 목적으로 집중관측에 참여할 것이며 다른 참여자와 과학적 목적이 중복되지 않도록 과학 프로젝트를 명시화하는 것이 필요하다. 중복 시 공동연구에 대한 가능성을 살펴보아야 한다. 다른 집중관측 참여자 또한 동일하다. 즉 다른 참여자는 부수적으로 민간의 자료를 활용할 수 있다. 단 자료 정책이 정하는 바에 따라 자료가 공개된 이후에는 누구나 자료 활용이 가능하며 다양한 과학적인 목적을 위하여 집중관측 자료를 활용할 수 있다. 따라서 민간의 참여가 예상될 경우, 명확한 자료 정책과 자료의 품질관리 및 처리 방안 마련을 통하여 민간 기상자료의 수집 및 활용을 활성화하여야 한다.

이처럼 다섯 가지 방안을 통한 민간기상 자료 수집 및 활용을 극대화함으로써 관측 자료의 밀도를 향상하고 관측 예산의 절감 효과를 가져올 수 있을 것이다. 궁극적으로 기상정보의 고도화를 통하여 기상 서비스의 향상으로 이어질 수 있다.

집중관측 장비개발, 관측망 확대 등 상시 관측망 개선방안으로는 “기상장비의 R2O/O2R (R2O/O2R for meteorological instrumentation)”가 필요하며 이를 위한 다섯 가지를 제안한다. 먼저 특성화 대학의 장비개발을 통한 국산 장비를 개발하고 해외 첨단장비를 도입하여, 지속적 시험 및 운영을 통한 현업화 체계를 통하여 상시 관측망을 개선하고 첨단화하는 것이다. 테스트베드를 통한 집중관측의 또 하나의 중요한 목적은 신개념 또는 첨단장비의 체계적 시험, 그리고 장비의 효용성 평가를 통하여 연구 장비를 현업을 위한 상시 관측망으로 확보하는 것이다. 앞 절에서 설명한 R2O, O2R에서 시험 대상이 장비일 경우, 장비를 테스트베드에서 집중관측을 수행함으로써 장비의 정확도, 안정성, 운용성 등을 시험할 수 있고 이 장비에서 획득된 자료를 알고리즘이나 모델에 적용함으로써 그 영향을 평가할 수 있다. 이 과정을 통하여 장비에 대한 재설계, 개선, 재평가 등이 함께 이루어짐으로써 장비의 특성을 진단하여 현업을 위한 제안이 가능할 것으로 판단된다. 이후 장비의 상용화와 정책적인 결정을 통하여 새롭게 개발된 국산 장비 또는 새로운 신개념 장비의 현업화를 진행함으로써 상시 관측망의 개선이 가능할 것이다. 이러한 과정은 원천기술 또는 국산기술 개발을 위한 정책적 지원과 테스트베드

를 통한 개발 장비에 대한 지속적인 평가를 위한 집중관측 등의 장기간의 체계적인 관리와 지원을 통해서만 가능할 것이다. 이러한 장비를 먼저 기상청 집중관측 시설 풀에 등록하여야 하며 특성화 대학과의 지속적 협력 연계를 통하여 관측 전문가의 양성 및 이를 통한 관측 분야의 전반적인 고도화가 가능할 것이다.

이러한 대학과 기상청의 협력을 통한 관측망의 전반적인 개선은 다양한 정책적인 결정과 지원으로 가능할 것이다. 먼저, 국산개발 장비의 상용화를 위한 단계 및 지원체계 등이 정책적으로 결정되어야 한다. 또한, 국산 장비 및 첨단 해외도입 장비에 대한 현업화 단계 및 절차가 마련되어야 할 것이다. 집중관측과 국산개발 장비/해외도입 장비에 대한 연계성을 정의하고 이를 지원할 수 있는 장기간의 정책과 관리 체계가 갖추어져야 하며 이러한 업무를 담당하고 기획할 수 있는 추진력을 갖춘 기상청 내 관측 전담부서 또는 전문 인력을 확보하여야 할 것이다.

제 3 장 연구개발의 기대효과

- 국내에서 수행한 집중관측 실험의 전반적인 조사, 분석 및 평가를 통하여 국내 집중관측에 대한 현황을 파악하고 향후 집중관측 실험의 지향점을 도출할 수 있다. 또한, 다양한 해외 집중관측 실험을 조사, 분석하고 국내 실험과 비교 분석을 통하여 그 차이점을 도출하여 향후 국내 집중관측실험의 계획 및 실행에 활용할 수 있다.
- 국내 민간 참여 집중관측실험에 대한 조사/분석을 통하여 계획, 예산, 인력 및 전문성 확보 방안과 수행 예시들을 살펴봄으로써 향후 집중관측실험 수행 시 벤치마킹할 수 있을 것이다.
- 집중관측실험에 대한 대상을 선정하고, 캠페인 운영체계, 운영 방안, 협력체계를 제시하여 보다 계획적이고 성과 지향적인 집중관측실험을 수행할 수 있을 것으로 기대한다. 또한, 집중관측 자료를 대학교 연구과제에 활용하고 대학생 집중관측 프로그램 및 교육 참여로 관측 관련 대학교육의 활성화 및 관측 분야 전문가 양성이 기대된다.
- 위험기상, 특이 기상별 집중관측 프로그램에서 획득된 자료를 활용하여 체계적인 분석이 가능할 것이며, 이를 예보 현업과 연계하여 집중관측이 예보 현업에 활용될 수 있는 선순환 구조를 구축할 수 있을 것이다. 또한, 집중관측 실험을 통하여 국산개발 장비나 해외 첨단장비에 대한 체계적인 시험, 운영, 개선 등을 통하여 현업으로 전환함으로써 상시 관측망을 개선할 수 있을 것이다.
- 집중관측실험 및 이를 활용한 지역대학-기상청 연계는 기상관측의 전반적인 활성화를 가져올 것이며, 관측 분야 전문가의 양성 및 관측의 다양화로 기상기술 발전 전반에 기여할 것이다.
- 따라서, 관측의 중요성이 대두되고 관측 전문성의 필요성을 느끼고 있는 시대적인 흐름에 맞게 기상청에서는 기상청 집중관측시설, 집중관측실험, 관측 대학 특성화, 집중관측 - 기상청 연계 등에 대한 체계적이고 장기적인 계획을 통하여 기상관측 분야, 나아가 기상기술 전반에 대한 발전으로 이어질 수 있는 노력을 기울여야 할 것이다.

제 4 장 참고문헌

- Albrecht, B. A., C. S. Bretherton, D. Johnson, W. H. Scubert, and A. S. Frisch, 1995: The Atlantic Stratocumulus Transition Experiment—ASTEX. Bull. Amer. Meteor. Soc., 76, 889–904, [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1995\)076<0889:TASTE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1995)076<0889:TASTE>2.0.CO;2).
- Beljaars, A. C. M., P. Schotanus, and F. T. M. Nieuwstadt, 1983: Surface layer Similarity under Nonuniform Fetch Conditions. J. Climate Appl. Meteor., 22, 1800–1810, [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1983\)022<1800:SLSUNF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1983)022<1800:SLSUNF>2.0.CO;2).
- Bosveld, F. C., P. Baas, A. C. M. Beljaars, A. A. M. Holtslag, J. V.-G. de Arellano, and B. J. H. van de Wiel, 2020: Fifty Years of Atmospheric Boundary-Layer Research at Cabauw Serving Weather, Air Quality and Climate. Boundary-Layer Meteorol, 177, 583–612, <https://doi.org/10.1007/s10546-020-00541-w>.
- Cho, C.-H., 2005: Introduction to THORPEX. Presented at the 2005 KMS Spring Meeting, Kangnung, 28–29 Apr., 2005, Kor. Meteor. Soc.
- Dabberdt, W. F., and Coauthors, 2005: Multifunctional Mesoscale Observing Networks. Bull. Amer. Meteor. Soc., 86, 961–982, <https://doi.org/10.1175/BAMS-86-7-961>.
- EOL Field Catalog, cited 2022: NCAR UCAR Earth Observing Laboratory field catalog. [Available online from <https://catalog.eol.ucar.edu/>]
- GCOS, cited 2022: GCOS – Global Climate Observing System. [Available online from <https://public.wmo.int/en/programmes/global-observing-system>]
- IMOP, cited 2022: IMOP – Instruments and Methods of Observation Programme. [Available online from <https://public.wmo.int/en/programmes/instruments-and-methods-observation-programme>]
- GEWEX, cited 2022: GEWEX – Global Energy and Water cycle EXperiment. [Available online from <http://www.hyarc.nagoya-u.ac.jp/game/>]
- KORUS-AQ, cited 2022: KORUS-AQ: An International Cooperative Air Quality Field Study in Korea (2016). [Available online from <https://espo.nasa.gov/korus-aq/content/KORUS-AQ>]
- METRI, cited 2022: ARGO – Array for Real-Time Geostrophic Oceanography. [Available online from <http://argo.metri.re.kr/>]
- NOAA Cooperative institutes, cited 2022: [Available online from <https://cpo.noaa.gov/Fellowships-Partners/Cooperative-Institutes>]
- Park, S. K., 2004: The Observing System Research and Predictability Experiment (THORPEX) and potential benefits for Korea and the East Asia. Atmosphere, 14, 41–54.
- PRECIP, cited 2022: Experiment Design of PRECIP 2022. [Available online from <http://precip.org/experiment-design/>]
- PERILS, cited 2022: PERiLS – Propagation, Evolution, and Rotation in Linear Storms. [Available online from <https://www.nssl.noaa.gov/projects/perils/>]

- SAIL, cited 2022: SAIL - Surface Atmosphere Integrated Field Laboratory: Lawrence Berkeley National Laboratory [Available online from <https://sail.lbl.gov/>]
- Tsai, C.-L., K. Kim, Y.-C. Liou, G. Lee, and C.-K. Yu, 2018: Impacts of Topography on Airflow and Precipitation in the Pyeongchang Area Seen from Multiple-Doppler Radar Observations. Monthly Weather Review, 146, 3401-3424, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0394.1>.
- TORUS, cited 2022: TORUS - Targeted Observations by Radars and UAS of Supercells. [Available online from <https://www.nssl.noaa.gov/projects/torus/>]
- UCAR Research Data Archive, cited 2022 [Available online from <https://www2.cisl.ucar.edu/computing-data/data/research-data-archive>]
- Verkaik, J. W., and A. A. M. Holtslag, 2007: Wind profiles, momentum fluxes and roughness lengths at Cabauw revisited. Boundary-Layer Meteorol, 122, 701-719, <https://doi.org/10.1007/s10546-006-9121-1>.

[첨부 1] 자문 의견서 (총 11부)

● 자문 의견서 1.

구분	자문 의견	비고
<p>기상청-대학 간 협력 프로그램 기획</p>	<p><단기></p> <ul style="list-style-type: none"> - 우리나라의 실정이 장기간에 걸쳐서 실험 실습비 예산이 극도로 축소되어왔고, 논문실적의 양적 요구는 팽창해왔음. 그 결과 예산이 들고, 연구에 많은 시간을 요하고, 논문 수를 많이 채우기 어려운 관측 연구는 등한시되어왔음(관측 연구 기반의 붕괴). - 이러한 배경에서, 기상청-대학 간 협력 프로그램을 가동하고 소기의 성과를 거두기 위해서는 우선 붕괴 상태인 대학의 관측 연구 기반을 복구하는 것에서부터 시작해야 할 것. - 대학의 대기과학 관련 학과의 대학생, 대학원생들의 관측 연구에의 참여를 통해 관심도를 높이고 관측의 중요성을 깨닫는 계기를 마련해 주는 것이 바람직하겠음. <p><중기></p> <ul style="list-style-type: none"> - 지방기상청과 해당 지역 대학 간에 지역 고유의 기상현상(재해기상 포함)을 대상으로 관측기반의 연구과제를 도출하고, 장기적으로 꾸준하게 공동연구를 수행해갈 수 있는 기반을 만들어야 하겠음(예로서, 일본기상연구소의 예산을 보면, 지방기상 관서별로 고유의 연구사업을 할 수 있는 예산이 배정되고 있음). <p><중·장기></p> <ul style="list-style-type: none"> - 전국의 대기과학과를 해당 지역 특성, 대학의 연구 수준을 감안하여 특성화를 유도하여야 함. - 대학에서 졸업 후에 곧바로 기상청이나 유사 기관에서 관련 업무를 바로 수행할 수 있을 정도로 체계화된 교육과 현장연구가 이뤄지도록 유도해야 함. - 대학교수진과 기상청 연구진 간에 교류 근무도 가능하도록 제도적 유연성을 갖춰가는 것도 요구됨. - 한반도 주변에서 발생하는 기상 현상을 시작으로 하여 장기적으로는 전 지구적 현상도 대상으로 하여 기상현상의 메커니즘을 관측기반으로 이해하고, 수치모델의 개선에도 활용할 수 있는 대규모 관측기반의 기상학 발전을 추구해가면 좋겠음. 	

● 자문 의견서 2.

구분	자문 의견	비고
<p>기상청-대학 간 협력 프로그램 기획</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 최근 기상관측 장비는 대학의 학과나 연구실 단위에서 구입할 수 없는 고가의 원격탐사 장비가 대부분임. 이러한 추세에 발맞추어 기상청-대학 간 협력 프로그램을 시도하는 것은 매우 바람직한 현상임. - 선진국의 경우 기상연구소와 같은 기관에서 GPS에서부터 레이더 및 항공기까지 다양한 관측 장비를 운영하며 대학과 협력하여 집중관측 프로그램 혹은 연구 활동에 지원하고 있음. - 관계 기관 산하의 관측 장비 운영 부서에서는 1년을 단위로 관측 프로그램 및 연구 장비 활용 수요조사를 실시하여 연중 계획을 수립하고, 연구 장비를 소정의 배송료만으로 지원함. - 이를 통해, 교육 및 연구 프로그램으로 활용하여 실질적인 교육이 이루어질 수 있도록 관측-자료처리-분석-활용의 연계 과정 전 과정을 체험할 기회를 제공할 수 있음. - 또한, 관측으로 얻어진 노하우 혹은 문제점을 장비 개발에 적용할 수 있는 선순환 구조의 체계를 구축할 수 있을 것으로 판단됨. 	

● 자문 의견서 3.

구분	자문 의견	비고
<p>기상청-대학 간 협력 프로그램 기획</p>	<p>2023년부터 시작될 기상청의 차기 집중관측 프로그램의 방향성과 우선순위에 대체로 동의한다. 특히 최신 레이다 장비를 포함한 새로운 장비들의 도입 계획이 상세하게 잘 기술되었고 중요성이 커지고 있는 극한기상 현상에 대한 집중관측 계획도 잘 기술되었다.</p> <p>다만, 기상청과 학계가 현재 공감하고 있는 부분인 학계 인력 양성 부분의 구체성이 조금 떨어지고 우선순위에서도 관측 장비 도입 등에 비해 순위가 낮게 배치되어 있어 중요성이 좀 더 강조될 필요성이 있어 보인다.</p> <p>양질의 집중관측 자료를 생산해 내는 것도 중요하나 막대한 예산이 투입되는 집중관측 자료를 어떻게 하면 활용도를 높일 것인지에 대한 구체적인 논의도 필요해 보인다. 특히, 학계와 기상청의 관측 및 모델링 전문가로 구성된 협의체 구성이 필요해 보이며 협의체에서 어떤 현상에 타겟팅해서 집중관측 프로그램을 운영할 것인지를 결정하고 운용에 참여하는 방안도 고려해볼 만하다.</p>	

● 자문 의견서 4.

구분	자문 의견	비고
슈퍼사이트 운영	<p>- 기상청과 대학 간의 관측 협력은 두 기관의 상생할 수 있는 좋은 사업이고 연구와 동시에 교육 효과를 도모할 수 있으므로 꼭 적극 추진되어야 할 필요가 있음. 아쉬운 점은 관측정책과 장기 로드맵에서 제시된 우선순위에서 하위권에 있는 점임.</p>	
상시 및 집중관측	<p>1) 기상청과 각 대학 간의 주제를 선정하여 주제별 관측 프로그램을 운영하는 방안 추천함. 이를 위해서는 지역별 로(수도권 포함) 슈퍼사이트(super site)를 지정하고 이를 중심으로 관측 프로그램을 유지하면 좋아 보임.</p> <p>2) 관측 프로그램은 기본적으로 상시 관측망과 집중 관측망을 운영하여 효율성을 높이기 바람. 상시 관측망은 직접 관측보다는 원격관측 위주의 연속관측, 집중관측은 항공 및 선박 관측 등이 포함된 직접 관측 위주의 정밀 관측이 필요함.</p>	
교육의 장	<p>3) 기상청이 보유한 관측 인프라를 활용할 수 있고, 대학은 학생들에게는 다양한 관측 장비를 직접 접해볼 기회를 제공함. 결국, 이는 관측 전문가 양성을 할 수 있는 장으로 활용 가능함.</p>	
영동집중관측	<p>4) 참고로 강원지방기상청, 국립기상과학원 그리고 강릉원주대학교는 겨울과 봄철에 집중관측 캠페인을 운영 중임. 처음에는 강설에 초점을 맞추었으나, 향후 강풍 사례도 포함하고 있으며, 2021년에는 지금까지 관측방법론과 연구결과를 대기지 특별 호로 발간한 바 있음.</p>	
지역별 주제 선정	<p>5) 지역별로 자주 발생하는 특이 기상(혹은 위험기상), 즉 중규모 기상 현상을 주제로 선정하여 관측 프로그램 운영이 이상적이라고 보임. 예를 들면 4)에서 제시한 바와 같이 영동지역의 대설이나 강풍 현상, 남부지방에서는 태풍이나 장마 현상, 수도권 집중호우 그리고 남서부의 초겨울 강설 등을 생각해 볼 수 있음.</p>	

● 자문 의견서 5.

구분	자문 의견	비고
<p>총평</p> <p>내실 있는 기상청-대학 공동 관측 프로그램 개발을 위한 제언</p>	<p>기상청이 대학과 집중관측을 위한 협력 프로그램을 만들려는 시도는 매우 고무적으로 생각하며, 내실 있는 계획을 세우고 실행한다면, 기상청 관측결과의 질적 향상은 물론 학생들에게 실습경험을 제공함으로써 대학에서 기상관측 분야의 인재를 양성하고, 이를 기상청에 보급하는 선순환의 구조가 갖추어질 수 있다고 생각함.</p> <ul style="list-style-type: none"> - 먼저 기상청은 공동 집중관측 프로그램을 추진함에 있어, 그 취지와 목적을 학계에 충분히 알려 관심 있고 역량 있는 대학들이 모두 참여할 기회를 주도록 노력해야 함. - 공동 집중관측 프로그램이 성공적으로 진행되기 위해서는 프로그램을 추진하는 기상청은 물론 여기에 참여하는 대학들이 교육은 물론 연구 측면에서 관심을 가지는 주제를 선정해야 함. 대학들이 참여하는 연구과제의 일환으로 공동 집중관측이 진행되어야 적극적 참여가 이루어질 것. - 집중관측에 사용될 대부분의 관측 기기는 첨단화된 전자 기기일 가능성이 크므로 사용될 관측 기기의 작동원리, 기본적인 유지 관리에 대한 교육 및 실습 기간이 연구과제 기간의 초반부에 반드시 포함되어야 함. - 또한, 연구과제의 기간은 공동 집중관측 프로그램이 끝난 후 1~2년 후까지를 포함해야 관측 자료의 보정 분석을 거친 양질의 관측 자료 생산이 연구과제의 일환으로 진행될 수 있을 것. - 과제 종료 후의 환류 계획도 구체적으로 명시하여야 함. - 공동 집중관측 프로그램을 진행하면서, 기상청은 단순히 관측 기기를 제공하고 연구과제를 부여하는 기관이 아니라 관측기기 및 관측 자료 전반을 책임지고 관리 감독할 수 있어야 함. 이를 위해서는 가장 먼저 기상청 내부에 관측기기 전문가를 확보하고 이 전문가가 대학과 소통해야 함. -공동 집중관측의 주제를 ” 위험기상 “에만 국한하지 말고 기후변화 관련 집중관측 등을 포함하도록 다양화할 필요가 있음. 	

● 자문 의견서 6.

구분	자문 의견	비고
집중관측대상	<ul style="list-style-type: none"> 본 과제가 “ 위험기상 집중관측” 에 초점을 두고 있기에 집중관측 대상을 관련 호우나 강설 등 위험기상에 국한하여 설정하고 있음. 위험기상예측 정확도 향상을 위한 대기경계층 종합 관측 및 모델링을 목적으로 대기경계층 역학·열역학적 구조 또한 집중관측의 대상이 될 수 있을 것으로 생각함. 	
KAM facility program	<ul style="list-style-type: none"> 가능하다면 국내 연구진의 역량을 모아서 진행하는 그룹의 공동 관측 연구(집단연구)를 지향하며, 집중관측 결과 해석 등 연구 성과 도출을 위해 충분한 기간에 대한 프로그램 지속이 필요함. 국내 연구진의 국제 집중공동관측 프로그램 주도적 참여 활성화를 위해 국제관측프로그램 멤버로 참여하는 연구진에 대한 활동 적극 지원체계 구축. 또한, 국내 연구진이 국제집중공동관측 프로그램의 국내 유치 노력에 대한 기상청의 적극 지원이 필요. 	
기상청 관측 인프라 공동활용	<ul style="list-style-type: none"> 기상청이 국내 유일 보유한 최첨단 장비들의 학계 공동활용 시스템 구축(공동활용 장비 리스트 사전 공개 후 수요조사 및 제안서 접수 등 인프라 활용체계 가시화 및 운영). 기상청의 내구연한 초과 노후 장비 중 기상청의 활용목적이 제한된 경우 학계 등 외부 연구진이 활용할 수 있도록 기기운영관리 및 지원체계 구축을 통한 대학원생 등 신진인력 장비 교육 및 활용 기회 증대. 최첨단 고가 기상장비 도입 및 활용 관련하여서는 관련 기상청-학계의 자문위원회 구축을 통해 도입 타당성 논의뿐만 아니라 도입 후 활용방안에 대한 상세 계획 수립. 집중관측 시작 전 참여 연구원(대학원생)에 대한 training school 운영. 	
관측 일원화	<ul style="list-style-type: none"> 집중관측 실험 시의 다양한 관측기기에서 생산되는 자료의 ‘수집-품질관리-표출-활용’ 을 하나의 pipe-line으로 구축하여, 집중관측실험자료의 현업 활용 및 연구 활용 극대화 	
집중관측 지향점	<ul style="list-style-type: none"> 기상청-학계의 집중관측이 현업화를 기본적으로 지향하더라도, 대학원생을 위하여 연구를 지향하는 두 가지 목적(지향점)을 명확히 설정하는 것이 필요해 보임. 	

● 자문 의견서 7.

구분	자문 의견	비고
	<p>1. 집중관측 대상 목표와 목표별 연구목표를 설정하는 것이 중요</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대상 목표 : 기후학적으로 지역 기후를 특징짓는 현상 예) 동해안 양간지풍, 대구 열섬, 대전 서안만 대설, 전북 지리산 우박 - 기상청, 대학, 연구소 등에 있는 기후, 관측, 예보의 지역 전문가가 모여 논의(집중관측 대상, 우선순위 설정)할 수 있는 세미나 필요 - 연구목표 : 메커니즘 규명, 예보기법 개발, 현상 전문가 육성 <p>2. 정규적이고 체계적인 기상청·대학 간의 협력체계 구축 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기상청·대학별 공동 집중관측 프로그램 지정·운영 (기상청 독립 R&D 과정으로 운영하면 더욱 효과적) - 기상청·대학 집중관측 프로그램 설계 세미나 개최 - 기상청(기상기후인재개발원)·대학에서 학점 인정 프로그램 운영 예) 특수 관측 장비 운영, 집중관측 설계, 집중관측 현상 분석 <p>* 대전청-공주대 “차령 집중관측 캠페인”의 역할 분담 대전청: 관측 장비 제공, 관측 장비 운영 교육, 관측 프로그램 운영, 관측 자료 DB 운영 공주대: 대학원생 관측 참여, 관측 소모품 지원 관측결과를 활용한 연구논문 작성</p> <p>3. 기상청·대학 집중관측 강화 방안</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대학 R&D 과제에서 집중관측 프로그램 운영 지원 허용 - 집중관측장비별 학점 인정 정규 강의(관측, 설계, 예보) 개설 (대학 또는 기상기후인재개발원) - 집중관측 관련 논문을 기상청 주관 R&D 과제 실적으로 인정 - 한국기상학회 및 기상청 공동 주관 전국 세미나 정기 개최 <p>4. KMA facility 운영 방안(공동활용 Data bank 운영 방안)</p> <ul style="list-style-type: none"> - 대상 : 기상청, 대학, 공공기관이 보유하는 관측 장비, 불용 장비, 시험 장비 - बैं크 운영 원칙: 자발적 참여 등록(기상청 R&D 과제는 의무 등록) 및 참여목록 활용 <p>* 대학교 기자재 공동활용제도 참고</p> <ul style="list-style-type: none"> - 공동활용 관측 자료 DB 시스템 운영 - बैं크 운영 기관 : 공신력 및 안정적 운영체계 확보, 기관 및 학계가 편리하게 활용 측면에서 기상산업기술원에서 기상산업진흥 차원으로 운영 	

● 자문 의견서 8

구분	자문 의견	비고
	<p>○ 집중관측 설계 프로토콜 작성 및 활용 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기존에 기상청에서 수행한 집중관측은 표준적인 프로토콜이 없이 개별 부서에서 디자인하고 추진하는 경우가 많다 보니, 관측망의 설계, 관측 수행 및 품질검사, 자료 공유 및 활용체계가 체계적이지 않았고, 부실하게 수행되거나 활용도가 낮을 수밖에 없었음. - 따라서 관측의 설계(관측망 구성, 설치 관측 장비 등), 관측수행 방법 (관측주기, 기간, 시기 등), 품질검사 (장비별 QC 수행, QC 플래그, 검증 방안 등), 자료 공유 (자료 수집, DB 구성, 저장형식 등), 활용방안 (사용자 그룹 참여, 논문화 및 현업화 방안 등)에 대한 표준 집중관측 프로토콜을 수립하고, 이에 따라 계획안을 작성하도록 해야 함. <p>○ 집중관측 추진에 대한 심의기구 설치 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> - 기존 집중관측은 관측 자료 수집에 집중되고, 품질검사나, 활용에 대한 성과가 부족하였음. - 이는 집중관측이 개별 부서 단위에서 추진되기 때문에, 외부 시각에서의 검증이나 문제점 분석이 안 되었고, 다양한 측면에서의 고려가 부족했기 때문에 일부 기인한 것으로 판단됨 - 따라서 청 내외 전문가를 중심으로 집중관측 관련 심의기구를 구성하고 심의기구를 통해 표준프로토콜에 의해 작성된 집중관측 계획안을 검토하고 보완하여 내실 있는 추진안이 도출되도록 하는 과정이 필요하다고 판단됨. <p>○ 집중관측 자료의 활용 확대 방안</p> <ul style="list-style-type: none"> - 집중관측이 관측 수행 단계까지만 진행되고 그 이후 활용되지 않고 디스크에 저장된 채로 휴면상태로 남아 있는 경우가 대다수임. 이에 대한 해결을 위해서는 다음과 같은 고려가 필요함. <ol style="list-style-type: none"> 1) 첫 번째로 집중관측을 통해 해결하고자 하는 과학적 이슈 (scientific issue) 혹은 현업적 이슈(operation issue)를 좀 더 상세하고 구체적으로 설정해야 함. 지금까지는 굉장히 폭넓은 주제로 진행되었음 (예를 들어 남부지방 장마의 이해, 집중호우의 이해 등). 그러나 한 번의 집중관측으로 모든 문제를 해결할 수 없기에 좀 더 구체적이고 특정화된 과학적 이슈를 대상으로 하는 집중관측 수행을 통해 실질적인 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단됨. 	

	<p>2) 관측 자료의 품질검사가 반드시 수행되어야 하고, 이는 각 관측을 담당하는 전문가나 기관이 품질검사까지 책임지도록 해야 함. 이는 관측 이후 품질검사가 완료되는 것이 아니고, 향후 장기적으로 품질에 대한 이슈가 제기되면 이에 대한 담당자가 명확하게 지정되어 있어서, 사후 관리가 가능하도록 체계를 갖추어야 함.</p> <p>3) 설계 단계에서 사용자 그룹을 포함하고, 향후 사용자 그룹별 활용방안을 포함하도록 설계안이 구성되어야 함. 예를 들어 관측캠페인은 아니지만 ECMWF 재분석 프로젝트의 경우 재분석 자료를 활용하는 수문, 해양, 생태계 관련 연구그룹의 연구 프로포절까지 포함해서 자료 생산 후 활용도를 사전에 확보하는 작업을 포함하고 있음.</p> <p>○ 집중관측의 선순환 체계 구축 필요</p> <ul style="list-style-type: none"> - 관측이 종료되면 집중관측 캠페인이 끝나는 게 아니고 시작이라는 시각이 중요함. 관측이 종료되고, 적어도 2~3년의 자료 분석에 대한 예산 및 인력의 지원이 필요하고, 이 기간까지를 집중관측캠페인 기간으로 산입해야 함. 또한, 이 분석결과를 기반으로 해당 집중관측 이후 해결되지 않는 문제를 명확히 하고, 이 문제를 풀기 위해 향후 어떠한 집중관측을 추가로 해야 하는지에 대한 후속 조치가 필요함. 이러한 조치를 통해 2단계 3단계의 집중관측이 연결되는 집중관측의 순환체계 도입이 필요함. - 집중관측 정보가 투명하게 공개될 수 있는 데이터 플랫폼을 기상청에서 유지 관리할 필요가 있음. 집중관측 캠페인이 종료된 이후에도 향후 학계나 전문가 그룹에서 필요로 하는 경우 쉽게 접근과 활용을 할 수 있도록 정보를 공개하는 체계 구축 필요. (예 DOI를 이용한 집중관측 자료 공개). 이를 통해 집중관측 자료가 미래의 연구 및 분석을 위한 보고(寶庫)로 활용될 수 있음. - 집중관측을 통해 현업적인 기여는 두 가지 측면에서 고려가 필요함. 첫 번째는 연구 성과를 이용한 예측 기술의 개발 측면이고, 두 번째는 집중 관측망의 유용한 관측체계를 현업 정규 관측망에 편입하는 것에 대한 논의가 이루어져야 함. 이 사항은 이미 집중관측의 과학적 이슈 부분에 포함되어 있어야 함. <p>○ 대학 및 연구기관의 관측장비별 특성화를 통한 협업체계 구축</p> <ul style="list-style-type: none"> - 집중관측에서 추구하는 과학적 이슈가 명확하게 정의되었다고 해도 과학적 이슈를 해결하기 위한 적절한 관측 장비가 활용되지 않으면 원하는 관측정보를 얻을 수 없다는 문제가 있음. 	
--	--	--

	<ul style="list-style-type: none"> - 지금까지 기상청의 집중관측은 이미 있는 관측 자료나 라디오존데를 좀 더 비양하는 제한된 형태로 추진되었으나, 위험기상과 밀접한 중규모 이하의 기상 현상을 위해서는 특화된 관측 장비(구름 레이더, 연직프로파일러 등 원격탐사장비 등)를 활용하는 것이 무엇보다 중요함. - 그러나 집중관측을 위해 기상청이 한시적으로 첨단장비를 도입하여 운영하기는 쉽지 않고, 또한 집중관측 이후 유지 관리하는데도 어려움이 있음. - 또한, 이러한 첨단 관측 장비는 기상청에서 유지 관리하고 전문성을 유지하기 어려우므로, 각 대학 연구소 단위로 첨단 관측 장비를 관리 운영하고 개선하도록 특화된 과제를 유지하는 것이 필요함. - 대학 연구소별로 특화된 장비가 유지 관리 개선되는 상황에서 기상청은 집중관측을 디자인하고, 각 장비를 보유한 대학 연구기관은 집중관측에 참여하는 협력체계를 개발하는 것이 필요함. 	
--	---	--

● 자문 의견서 9.

구분	자문 의견	비고
<p>3.2. 대학생 참여 위험기상 집중관측 캠페인 추진 방안</p>	<p>3.2.2. 캠페인 기본계획 제시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 명확한 목표 선언 - 집중관측 설계, 캠페인 운영, 데이터 지속 활용 전 과정에 대한 중장기적 관점 반영 - 집중관측 캠페인 대상 기상 현상에 대한 심층분석 및 현 분석 단계에서의 한계에 대한 이해와 인식 제고 - 캠페인 성과물에 대한 사전 설계 - 캠페인 관측 자료의 공유 계획 - 관련 주제로 추진 중인 국제 캠페인 참여 병행 방안 검토 - 인지 수준을 높일 수 있는 명칭 및 로고 제작 및 홍보 - 기본계획에 대한 이해관계자 공유 - 검증체계 설계 및 이해관계자 공유 - 캠페인 배치 관측 장비 및 관측특성에 대한 정보 제공 - 관측 자료 품질관리 현황 및 문제점 보완기술 개발 계획 포함 	
<p>3.3. 예보 현업 집중관측 프로그램 연계 방안</p>	<p>3.3.1. 위험기상, 특이 기상별 집중관측 분석 및 예보 현업 활용 방안 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> - 지방청 지역 특이 기상 특별관측 수요조사(필요성, 시의성, 활용성, 파급효과 등을 평가하여 우선순위 선정) - 단기간 소규모 집중관측 프로그램을 다수 운영하여 빠른 환류와 성과 창출 성공사례 구현 - 중규모와 마이크로 규모를 결합한 현상 해석 및 이해 증진 <p>3.3.2. 집중관측 노하우, 자료 활용방안 등 상시관측 개선 사항 도출</p> <ul style="list-style-type: none"> - 자료 공유 플랫폼 구축 - 실시간 관측 자료 공유 - 가독성 높은 표출 시스템 운영 - 관측 장비에 따른 관측값의 차이 자동분석 	
	<p>3.2.2. 국내외 사례분석을 통한 캠페인 운영체계 제시</p> <ul style="list-style-type: none"> - 미국 WFIP: 풍력발전을 지원하는 터빈 고도 바람예측기술개선 프로젝트(DOE, NOAA, 발전사, 대학 등 참여) - WFIP1: 단순한 지형 대상(2011~2013) - WFIP2: 산악, 협곡을 포함한 복잡한 지형 대상(2015~2018) - WFIP3: 해상의 대기경계층 대상(집중관측 계획 단계) <p>* Wind Forecast Improvement Project</p>	<p>해외 집중관측 사례</p>

● 자문 의견서 10.

구분	자문 의견	비고
공동 집중관측 및 실험방안	<p>기본적으로 관측은 많은 비용, 인력, 장비 및 시간을 투입해야 하는 업무임으로 초기에 관측목적, 시기, 장소, 투입 장비, 활용 방안 등 설계가 매우 중요함. 그런 점에서 집중관측 대상으로 4대 난제를 제시한 것은 매우 의미가 있음. 현실적인 측면에서 가장 실현 가능성이 높은 방안으로 KMA facility 및 프로그램을 활용하는 것임. 이 경우 소규모보다는 4대 난제와 같이 구체적인 목적을 달성할 수 있도록 중-대규모 과제로 장기간 수행하는 집단연구 또는 집중관측 활용연구를 먼저 추진하였으면 함.</p>	
대학생 공동 집중관측 참여 활성화 및 관측 전문가 양성 방안	<ul style="list-style-type: none"> - 학부생의 경우 아래 기타에서 제시하였음. - 대학원생의 경우 기본적으로 논문을 작성해야 졸업도 하고 취업도 할 수 있으므로 현재와 같이 논문 편수로 평가하는 체제하에서는 학생과 지도교수 모두 부담이 큰 사업임. - 따라서 대학원생이 집중관측사업에 참여해서 관측 자료 DB 구축, QC 기법 개발 등도 업적 평가 시 고려할 필요가 있음. - 관측 전문가가 되기 위해서는 석-박사과정 동안 지속해서 관측 및 자료처리에 참여해야 하므로 장기간 관측을 수행할 수 있는 사업개발이 필요함. 	
기상청(본청/지방 기상청)-대학 간 관측 및 연구 협력 활성화 방안	<ul style="list-style-type: none"> - 기상청(본청/지방기상청)-참여대학 간 관측 및 연구 협력 활성화를 위한 MOU 체결. - 기상청, 타 대학 등에서의 집중관측자료 활용 중소형 연구과제 지원을 통한 집중관측자료 활용연구 활성화. 	
집중관측을 통한 현업화 방안	<ul style="list-style-type: none"> - 집중관측 사업이 현업예보 수준 향상에 활용되기 위해서는 먼저 집중관측이 필요한 분야(목적)가 구체적으로 정의가 되어야 함. - 이를 위해서는 주요 선진국에서 수행한 유사 특별관측 사업들에 대한 깊이 있는 분석과 전문가 초청 등을 통한 사전 준비를 철저히 할 필요가 있음. - 또한, 집중관측 팀과 기상청 현업예보팀 또는 모델개선팀이 주기적으로 만나 정보를 공유하고 문제점을 개선해 나갈 필요가 있음. - 집중관측 및 자료 활용을 통해 기상청 현업 개선에 기여한 대학 또는 연구팀에 대해서는 인센티브 제공. 	
기타	<p>* 관측의 경우도 학부와 대학원을 분리해서 추진할 필요가 있어 보임. 학부생의 경우 관측을 활성화하기 위해서는 현실적으로 다음과 같은 방안이 효과가 있어 보임.</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) 오존존데/에어로존데, 드론, 레이더, 라이다 등 새로운 관측 장비에 관한 교재 개발 및 특별교육, 또는 견학 확대 2) 세계기상의 날 행사 시 관측경시대회(가칭) 또는 아이디어 경시대회를 개최하여 기상청장상, 관측국장상 등을 수여하고 기상청 입사 시 다른 자격증과 같이 가산점 부여 3) 기상청 또는 각 대학에서 실시하는 특별관측 프로그램에 일정 기간 참여시 수료증/자격증 부여 4) 9급 시험에서 관측 분야 비중 확대 	

● 자문 의견서 11.

구분	자 문 의 견	비 고
1. 교육	-관측에 관한 학부생의 참여를 유도하기 위해서 학교마다 존재하는 관측에 관한 강의에서 기상청에 도움이 되는 좋은 관측결과물에 대한 기상청 공채에 가산점을 부여하는 것을 고려해 주면 좋을 것 같음. - 악기상 중 강수에 대한 관측은 예산이 많이 들지만 폭염과 연관된 온도측정에 관한 장비는 저렴한 예산으로 실시할 수 있고 그 결과의 효과는 매우 높을 것으로 사료됨. 특히 초중고등학교에 있는 기상관측 장비를 이용하고 분석을 대-중고생과의 R&D 교육 과제로 연결한다면 효과가 높아질 것.	
2. 국제공동연구	중국의 산업화 도시화로 인한 높은 오염으로 기상/기후에 큰 변화를 겪고 있을 것으로 사료됨. 이와 같은 현상은 국제적으로 높은 관심을 가지고 있어서 세계적인 집중관측 및 분석 연구를 계획하면 국제적인 관심을 가지는 연구가 될 것으로 사료됨.	

[첨부 2] 단기, 중장기 과제 도출

1. 배경 및 필요성

1.1. 기상 환경의 변화: 위험기상 및 특이기상의 빈번한 발생

- 시간 및 공간상에서 급격한 변동성
- 기존에 관측되지 않은 극한값의 발생
- 발생 메커니즘의 복잡성 및 다양성
- 다양한 분야 (UAM, 도로기상, 항공기상 등) 비전통적 상세 기상정보 요구 증대
- 상세한 관측 자료 확보를 위한 관측 패러다임 전환이 요구됨

1.2. 교육 및 연구 환경의 변화: MZ 세대의 편의성 위주의 기상학 연구 접근

- 관측을 3D로 바라보는 관점의 변화
- 관측을 복잡하고 힘든 분야로 인식
- 관측에 소요되는 경비 및 인력의 거대성
- 보호 학문으로 관측 분야 육성이 요구됨

1.3. 기상 분야 세계 환경의 변화: 신기술 보호 장벽 및 독점화를 통한 시장 잠식

- 신장비 주도 기상 발전으로 변화
- 신기술의 보호 장벽 (독점화, 비공개화)
- 해외 거대 자본 및 기술에 기반한 국내 시장 잠식
- 자주 기상을 위한 관측 장비 국산화 및 관측 기술 확보가 요구됨

2. 목표

2.1. 위험기상의 집중관측으로 상세 기상자료 확보 및 현상이해:

“관측 주도의 기상 연구 도약”

- 위험기상 집중관측 캠페인
- 집중관측 자료를 이용한 위험기상 메커니즘 이해
- 관측 패러다임 전환을 통한 기상관측의 비약적 발전

2.2. 기상청-대학 간 관측 분야 새로운 협력모델 구축:

“기상관측 분야 보호 학문 육성”

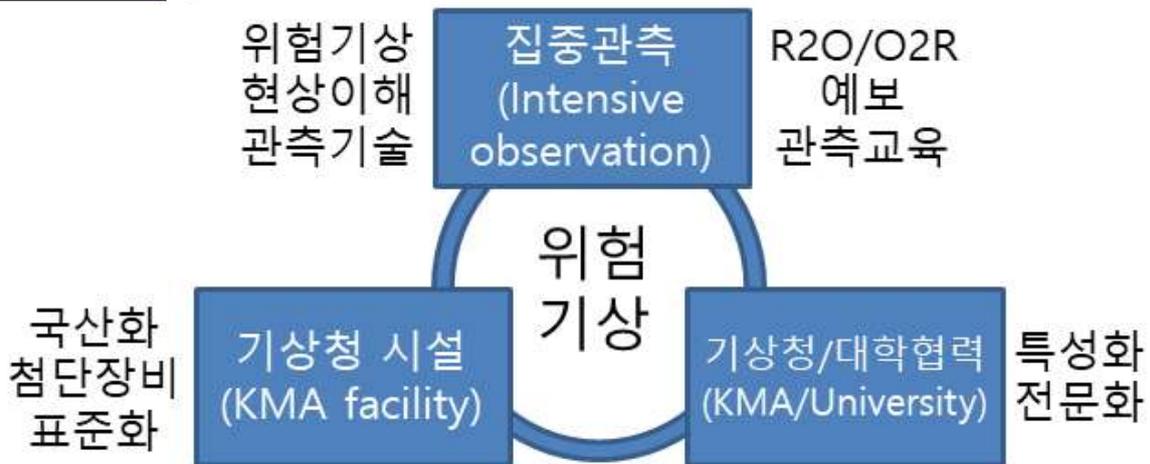
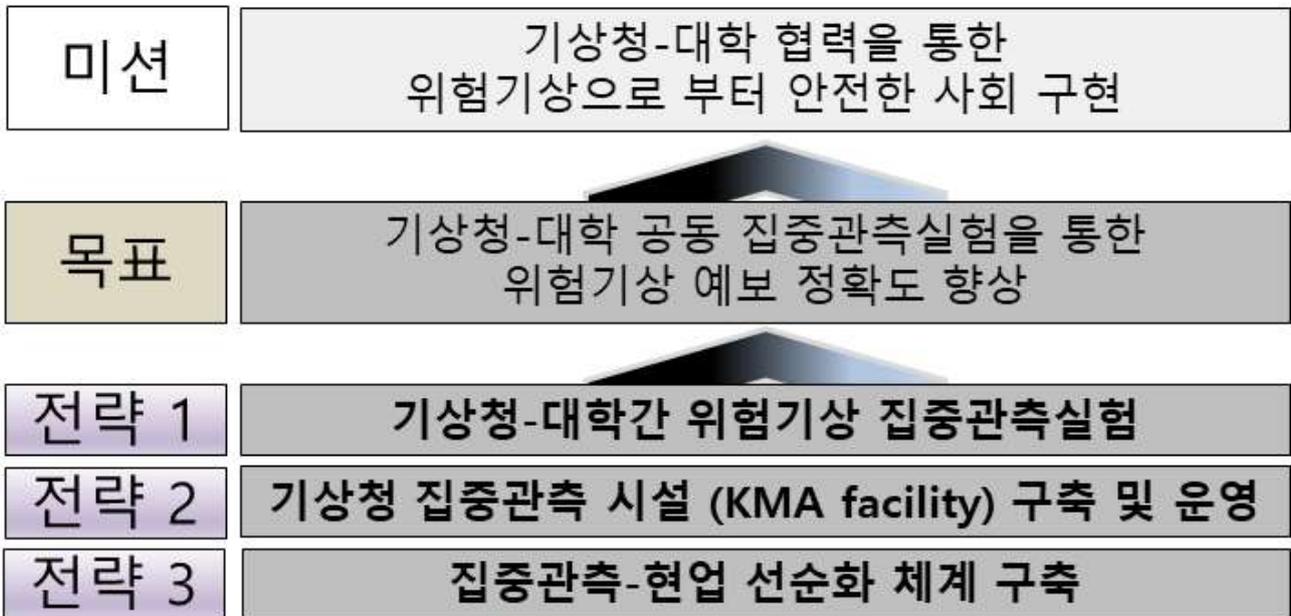
- 대학생 집중관측 참여를 통한 관측 전문가 양성

- 기상청-대학 간 관측 분야 새로운 협력모델 구축
- 위험기상 및 특이기상에 대한 기상청-대학 연구 협력 강화
- 보호 학문으로 기상관측 분야 육성 및 특성화

2.3. 국내 관측기술 확보를 통한 4차 산업시대 기상관측 분야 선점:

“기상관측 분야 기술 자립 및 활성화”

- 장비 국산화와 연계된 기상 신기술 개발 및 확보
- 집중관측을 통한 국산 장비 및 해외 첨단장비 시험 및 기술력 확보
- 장비국산화-집중관측실험-평가 및 효과분석 등을 통한 연구-분석-현업화 선순환 구조 구축



3. 단기, 중장기 과제

3.1. 단기 과제

3.1.1. 수도권 위험기상 집중관측을 통한 기상청-대학 간 협력 연구

- 수도권 위험기상 예측성 향상을 위한 관측 협력
- 3개 존데 지점 관측 협력 (과거 존데 관측 협력 용역)
- 3개 대학 존데 수신기 확보 및 존데 관측
- 3개 대학 집중관측 연구 제안

3.1.2. 수도권 집중관측 네트워크를 활용한 대학생/대학원생 관측 교육

- 집중관측 설계, 실행 계획, 운영 교육
- 집중관측장비 원리 및 교육
- 대학생 집중관측 참여
- 품질관리 및 자료 분석 교육

3.1.3. 모바일 관측망을 활용한 지방기상청-지역대학 협력

- 모바일 관측망 (기본변수, 존데) 설계 및 구축
- 모바일 관측망 활용 지방기상청-지역대학 공동 위험기상 집중관측
- 대학생 지역 특이기상 연구 프로그램
- 학부생 인턴십 프로그램

3.2. 중장기 과제

3.2.1. 기상청-대학 간 위험기상 집중관측 R&D 프로그램

- 위험기상 집중관측 캠페인
- 집중관측자료 품질관리 및 분석물 산출기술 개발
- 집중관측자료 활용한 위험기상 발생 메커니즘 및 예측성 향상 연구
- 집중관측-품질관리-분석-현업화 연구

3.2.2. 2) KMA 집중관측 시설 (KMA facility) 구축 및 운영

- 기상청 인프라 활용 “KMA facility” 체계 구축 및 운영
- 기상청-대학 집중관측분야 협력모델 구축
- 기상장비 국산화를 통한 관측 신기술 개발 및 KMA facility 운영
- 해외 첨단장비 기반 집중관측시설 구축 및 KMA facility 운영
- 장비국산화/첨단장비도입-집중관측실험-평가/효과분석-현업화 선순환 구조

3.2.3. 집중관측 자료 공동활용 체계 구축

- 집중관측 자료 공동활용 시스템 구축 및 운영
- 집중관측 자료 품질관리 시스템 구축
- 집중관측-분석-표출-자료제공 체계 구축
- 집중관측 자료 활용 활성화를 위한 자료 교육

주 의

1. 이 보고서는 기상청에서 시행한 연구개발사업으로 위험기상 집중관측을 위한 기상청-대학 간 협력 프로그램 기획연구의 연구용역과제 연구보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 기상청에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안됩니다.
4. 이 보고서와 관련된 문의사항은 기상청 관측정책과(Tel: 042-481-7337)로 하시면 됩니다.