02 기상레이더

기상레이더센터	레이더지원팀	기상사무관	**남궁지연**
기상레이더센터	레이더운영과	방송통신사무관	**권두순, 김원기**
기상레이더센터	레이더분석과	기상연구관	**이승우, 정성화, 남경엽**

2.1. 지상 원격탐사관측장비 운영개선 및 인프라 확충

2.1.1. 공항 기상레이더(TDWR) 신설

기상청은 공항 주변의 강수, 급변풍 등 위험기상을 입체적으로 감시하고 실시간으로 제공함으로써 항공기 안전운항을 지원하기 위해 주요공항에 공항기상레이더(Terminal Doppler Weather Radar, TDWR) 관측망 구축을 추진하고 있다. 2019년부터 인천국제공항 TDWR(C-밴드, 단일편파)의 노후화(2001년부터 운영)에 따라 신규장비로 교체하는 사업을 추진하여 2022년 9월 첨단 TDWR(C-밴드, 이중편파) 구축을 완료하였고, 제주공항에도 기상레이더 신규 설치를 추진 중이다.

2019년에 시작한 제주공항 기상레이더 타워 설치사업은 2023년 3월에 기초공사를 시작으로 2023년 6월에 타워 및 장비실(쉘터) 설치를 완료하였으며, 안정적인 전원공급을 위한 수배전반, 무정전전원장치 및 비상 발전기의 설치는 2023년 12월에 완료하였다. 이로써 제주공항 기상레이더(TDWR) 신규 설치를 위한 기반을 구축하였고, 주민·관계기관들과 지속적으로 소통과 협의를 이어가고 있다.



그림 3-116 콘크리트 베이스 구축, 타워 조립, 타워 및 장비실(쉘터) 구축현황

2.1.2. 기상레이더 핵심기술 자립을 위한 국산화 및 신호처리 기술개발

기상청은 기상레이더 핵심기술의 해외 의존도를 낮추기 위해 2015년부터 국산화 기술개발을 추진하고 있다. 2023년에는 도파관 제습기인 'Dehydrator'를 개발하였다. 'Dehydrator'는 24시간 상시 운영하는 레이더 핵심부품이다. 또한, 운영 상태를 직관적으로 모니터링하기 위해 LCD를 부착하고 WEB을 이용하여 유지관리의 편의성을 제고하였다.



그림 3-117 기상레이더 부품 국산화(Dehydrator) 개발 현황

전량 해외도입에 의존하고 있는 기상레이더는 우리나라 지형 및 기상상태에 적합한 신호처리기술 개발의 필요성에 따라 「기상레이더 신호처리기술 개발」 R&D 사업을 2021년부터 2025년까지 5년간 40억의 예산으로 추진하고 있다. 본 사업의 목표는 대용량의 기상레이더 원시신호를 실시간으로 고속처리하는 신호처리기 시제품(TRL 7)을 개발하여 상용 신호처리기 수준의 핵심기술력을 확보하는 것이다. 2021년부터 2022년까지 기존 레이더 시스템에 영향을 주지 않고 신호처리기 개발과 성능시험이 가능하도록 테스트플랫폼 구축을 완료하였고, 지형 클러터 제거와 품질변수 임계값 처리기술, 기상모멘트 추정기술 구현 등 신호처리 알고리즘 개발을 2023년까지 진행하였다. 2023년부터 2025년까지 신호처리 알고리즘 최적화 및 신호처리기 시제품 개발을 완료하여 실증관측소에서 시험운영을 통해 기존 신호처리기와 성능을 검증할 예정이다.

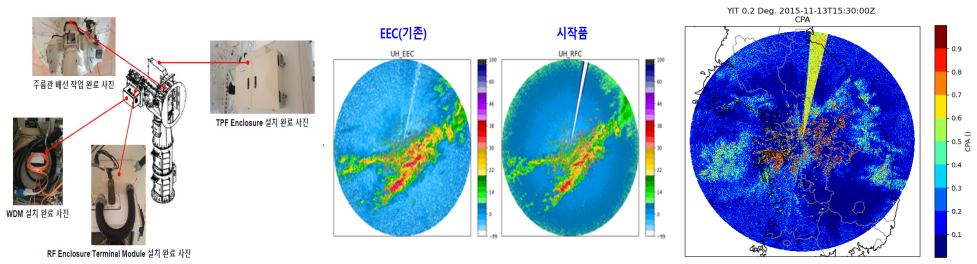

그림 3-118 테스트플랫폼 구축 및 신호처리 알고리즘 개발(테스트플랫폼 설치, 기상모멘트 추정(반사도), 품질변수(CPA) 추정)

2.1.3. 기상레이더 운영 안정성 강화

기상레이더의 안정적인 관측자료 제공을 위해 레이더관측소 청사, 레이돔 및 발전기 등 부대장비에 대한 피뢰설비 성능점검과 보강으로 전기안전연구원(KESCO)의 피뢰설비 인증획득을 추진하였다. 관악산 기상레이더에 대한 피뢰시스템 진단 결과 사무실 청사 분전반 및 서지보호장치 교체, 레이돔 내부의 피뢰돌침 인하도선 추가 설치 등 6개 항목에 대해 2023년 9월 보강공사를 완료하고, 전기안전연구원의 피뢰설비 레벨 I 을 획득(10월)하였다. 레이더 관측장비 및 기반시설 보호를 위하여 매년 1~2개 관측소를 대상으로 피뢰설비의 진단 및 보강을 추진할 예정이다.



그림 3-119 분전반 교체, 서지보호장치 개선, 피뢰돌침 인하도선 개선

또한 레이더 주요부품의 핵심 기능, 시스템 설치현황 및 운영방법 등 체계적인 장비관리와 기술인력 양성을 위한 관측장비 운영 매뉴얼 및 가이던스를 발간하였다. 이를 통해 지상 원격탐사장비 장애에 대한 신속한 대응으로 대응 역량을 강화하고 자체 운영기술을 향상시켜 레이더 운영의 안정성을 강화하였다.

표 3-52 매뉴얼 및 가이던스 발간

발간일	제목	주요내용
2023. 7. 20.	인천공항 기상레이더(TDWR) 운영 매뉴얼	• 인천공항 기상레이더 구성 주요부품 및 시스템 설치 현황 • 공항기상레이더 점검절차 및 시스템 운영방법
2023. 8. 28.	기상레이더 예방정비 가이던스	• 모듈별·수신부·전원부 점검방법, 이중편파 변수 교정방법 등
2023. 9. 1.	기상레이더 부품 도록	• 기상레이더 부품별 핵심 기능 • 부품별 사진 및 기본 정보 등
2023. 11. 24.	기상레이더 실증관측소 부품 성능 실험실 시험기 운영 매뉴얼	• 부품성능실험실 구성 세부내역 • 송신부·수신부·안테나부 점검 절차

2.1.4. 범부처 기상레이더 실증관측소 활용 운영기술 협업

기상청은 국방부, 환경부 등 레이더 운영기관과의 협업을 통해 기상레이더 운영 기술교류 등을 추진하였다. 범부처 레이더 공동활용 촉진을 위해 2023년 2월 기상레이더 실증관측소 운영협의위원회를 개최하여 5개의 협업과제를 발굴하고 부처 간 협업 활성화 방안 등 구체적인 추진방안에 대해 논의하였다. 또한, 범부처 레이더 예방점검 순회 프로그램(4회)을 운영하여 기관별 레이더 장애 사례를 공유하고 합동정비를 통해 표준 점검절차 및 운영 기술을 공유하였다.

표 3-53 2023년도 레이더 실증관측소 활용 협업과제

수행기관	과제명
국방부 공군기상단	기상-강우레이더 합동정비팀 운영 및 기관별 고장사례 토의
한국항공우주연구원	우주센터 선진화 사업
기상레이더센터	기상레이더 실증관측소를 이용한 위험기상(대설, 호우) 관측
기상레이더센터	부품성능실험실 활용 주요 예비품 성능 검증
환경부 한강홍수통제소	관측반경에 따른 거리접힘 현상 확인

표 3-54 2023년도 레이더 예방점검 순회 프로그램

구분	일정	내용
1차	2023. 4.26.~27.	소형기상레이더 운영기술 공유 및 이중편파레이더 합동정비
2차	2023. 5.22.~23.	국산화 디하이드레이터 공군 기상레이더 적용 가능성 확인
3차	2023. 8.24.~25.	국산화 개발 동향 및 실증관측소 레이더 적용 결과 공유
4차	2023.10.23.~24.	소형강우레이더 표준점검 절차에 따른 합동점검

2.1.5. 연직바람관측장비 구축 및 운영

기상청은 고층기상관측망의 공간해상도를 높여 위험기상 조기경보 체계를 실현하기 위하여 2003년 파주, 강릉 지점을 시작으로 총 15개 지점에 연직바람관측장비를 설치·운영하고 있다. 2023년에는 관측공백지역을 해소하고 남동풍에 의한 동해안 및 호남권으로 유입되는 위험기상 관측을 위해 울산(1,290MHz)과 안마도(437.5MHz)에 연직바람관측장비를 신설하였다. 향후, 위험기상 감시 역량을 강화하고 상층대기 흐름을 연속적으로 관측하기 위해 2028년까지 관측망을 확대해 나갈 예정이다.



그림 3-120 연직바람관측장비 신설 현황(울산(좌), 안마도(우))

표 3-55 2023년 연직바람관측장비 관측지점

기관	주파수	내용
기상청	1,290.0 ㎒	철원, 울진, 북강릉, 파주, 군산, 창원, 북격렬비도, 서귀포, 원주, 추풍령, 해남, 울산
	437.5 ㎒	백령도, 덕적도, 안마도

2.2 레이더 위험기상 감시·예측기술 개발 및 대국민 날씨정보 서비스 강화

2.2.1. 기상레이더 기반 대국민 초단기 강수예측 기술 개선

기상레이더는 500m의 공간해상도로 한반도 전역에 대한 강수 정보를 제공할 수 있는 장점이 있으나, 전자기파를 활용하는 특성으로 인해 기온과 습도가 급변할 때 전자기파가 비정상적으로 휘어지며 이상전파에코(anomalous propagation)를 탐지할 수 있다. 이러한 이상전파에코가 초단기 강수 예보의 초기 입력값으로 활용되면 잘못된 초단기 강수 예보를

생산하게 될 뿐 아니라, 예보관에게 잘못 판단된 강수 실황 정보를 제공할 우려가 있기 때문에 위성 구름관측 정보와 레이더 강수정보를 융합하여 이상전파에코를 자동으로 탐지하고 제거하는 기술을 개발하였다. 레이더 강수 영역과 위성의 구름 영역이 중복되는 영역을 판별하여 레이더 강수에코에서 이상전파에코를 제거하였고, 초단기 예보모델의 초기값으로 반영하여 1시간 예보 기준 2022년 대비 초단기 강수예측 성능이 3.8% 개선되었다.

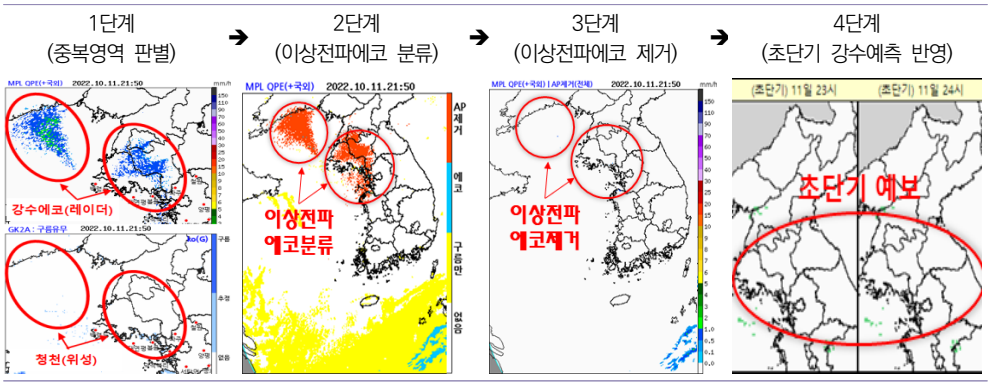

그림 3-121 레이더 이상전파에코 분류·제거 알고리즘 흐름도 및 초단기 강수예측 개선 결과

2.2.2. 집중호우 감시 강화를 위한 강수정체구역정보 제공

최근 태풍이나 중규모 대류계와 관련된 강수대의 국지적인 정체에 의한 폭우로 인명피해가 반복적으로 발생하고 있다. 집중호우는 수백 m에서 수 km 규모의 좁고 강한 호우 구역을 형성하여 지상의 자동기상관측망(AWS) 만으로는 정체를 탐지하기가 쉽지 않다. 기상청은 종관적 대기흐름 특성이나 지형 영향으로 정체되는 강수대에 의한 집중호우를 조기에 탐지하기 위하여 시공간 해상도가 높은 레이더 영상을 활용하여 강수대 이동 벡터를 산출하고, 이를 통해 느리게 이동하며 특정 지역에 집중호우를 유발할 수 있는 위험 대류계를 신속하게 감지하는 레이더 기반 강수정체정보(SPOT[51])를 개발하였다. 이 알고리즘은 분석하고자 하는 시간에 대한 레이더 영상 자료 유무를 확인하고, 해당 시각과 바로 이전 시각의 레이더 영상 변화를 기반으로 광학흐름기법을 이용하여 이동 벡터를 생성한다. 레이더 격자마다(500m 간격) 벡터를 생성하고 이를 활용하여 각 픽셀별 속력을 계산한다. 이때 특정 기준속력 이하인 영역과 레이더 에코 강도의 변화를 고려하여 강수대가 일정 시간 이동하지 않아 강수 집중이 예상되는 픽셀을 선정한다. 입력자료는 5분 간격으로 산출되는 240km HSR 반사도 합성영상을 사용하였고, 산출물로는 강수정체 시작 신호 탐지에 유리한 15분 누적 정보와 강수정체 지속성 탐지에 용이한 30분 누적 정보를 제공한다.

51) SPOT: Stationary Precipitation area detection using the Optical flow Technique

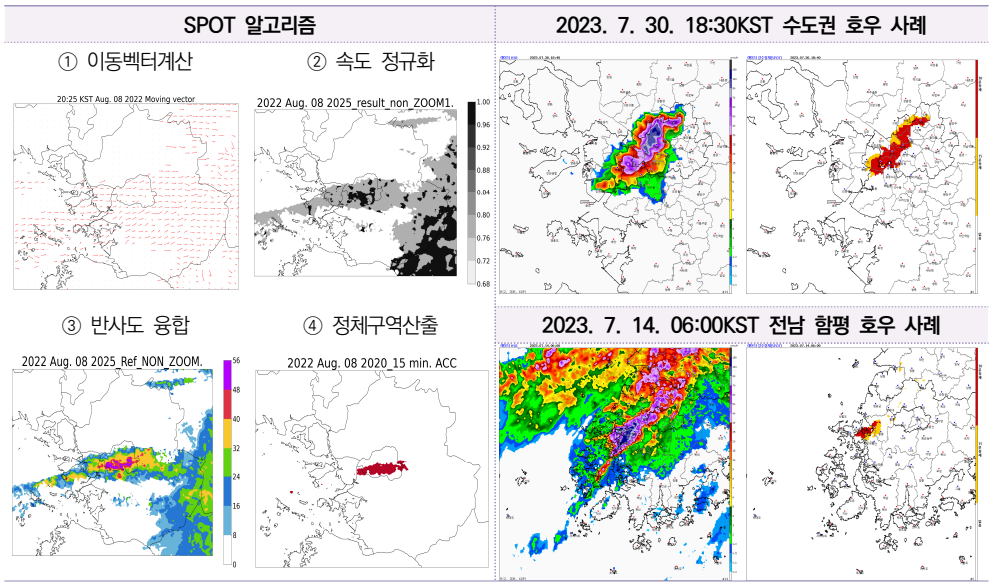

그림 3-122 레이더 기반 SPOT 산출 알고리즘 개요 및 집중호우 위험구역 탐지 사례

2.2.3. 레이더 기반 한반도 강수량 상세정보 제공

최근 4년(2019~2022)간의 레이더 자료 재분석을 통해 강수량 추정과정의 취약점 분석과 보정 기술을 개발하여 레이더 기반 강수량 추정 정확도를 높였다. 이를 통해 기후변화 대응 지원에 필요한 레이더 기반 상세 강수량 기후자료 산출하였다. 생산된 한반도 강수량 상세 기후자료는 수문, 돌발홍수, 도심 침수 등 기후변화에 따른 물관리 및 수재해 대응에 활용하도록 제공하였다. 최신의 자료 품질관리, 이중편파 강수량 추정, 빔 최저고도 합성 방법 등을 적용하여, 2019년부터 2022년까지 3월~11월의 기간에 대하여 범부처 S-밴드 이중편파레이더 관측망 16개 지점 및 한반도 영역합성(HSR, 1시간 누적강수) 강수 자료를 재생산하였다.

표 3-56 연도별 범부처 S-밴드 이중편파레이더 분석 지점 및 지점수(검정색 기상청, 파란색 환경부)

지점	2019	2020	2021	2022
분석 지점	(기상청: 9개소) 백령도, 관악산, 광덕산, 구덕산, 오성산, 면봉산, 고산, 성산, 진도, (환경부: 5개소) 비슬산, 소백산, 모후산, 서대산, 가리산			
추가 지점		강릉(기상청)		예봉산(환경부)
지점수 누계	14소	15소	15소	16소

레이더와 AWS의 연간 누적 강수량 분포를 비교해보면, 연도별 강수 특성에 따라 누적 강수에서 약간의 차이를 보인다. 2019년은 기상 가뭄으로 평년보다 강수량이 적어 내륙 강수량이 1,000mm 이하로 적지만 총 7개의 태풍이 영향을 주어 태풍 이동 길목인 남부지방과 동해안에 많은 강수가 기록되었다. 영동지방은 중첩 관측하는 레이더 수가 적고, 강릉 레이더가 단일에서 이중편파로 교체되는 과정에서 관측 공백이 있어 특히 동해안의 레이더 강수량이 AWS 대비 과소 추정되었다. 2020년은 지난 50년간 가장 긴(28.5일) 장마기간으로 강수일수도 길고 평년보다 강수량이 많았다. 2019년에 비해 내륙에 많은 강수를 기록했으며 특히 전라도, 경남 및 영동 북부에 강수량이 집중되었다. 2021년은 비가 자주 내렸으나 강수량은 평년 대비 86%로 적었다. 2022년은 장마전선이 중부지방에 정체하며 지역 간 강수량 편차가 컸으며, 특히, 전례없이 큰 재산과 인명피해를 가져왔던 수도권 집중호우(2022. 8. 8.~9.) 및 태풍 힌남노(2022. 9. 6.)가 발생한 해이기도 하다. 일부 제주, 동해안 및 산간지역에서 레이더가 AWS에 비해 강수량을 과소 추정하였으나, 전반적인 강수 분포는 매우 유사하였으며 AWS대비 훨씬 상세한 강수의 공간분포를 보여주었다.

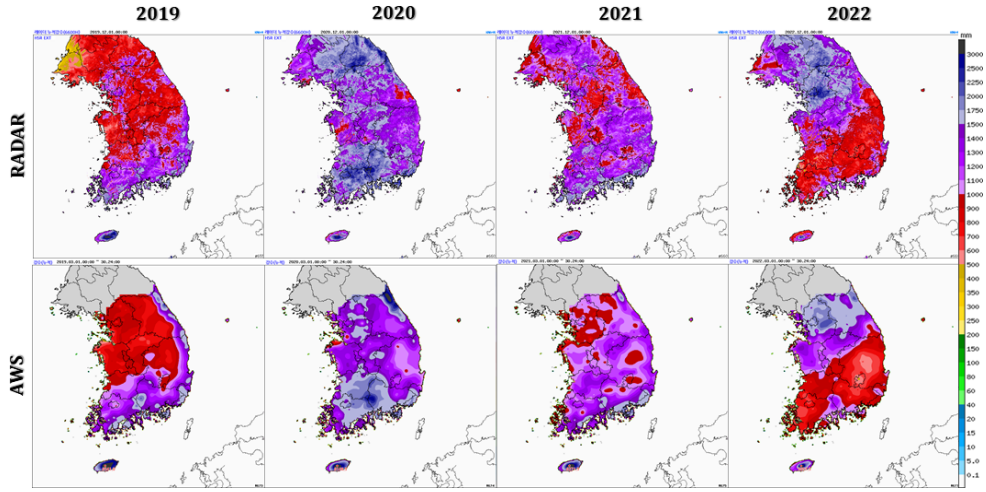

그림 3-123 연도별(2019~2022) 누적 강수량 분포. 레이더(상), AWS(하)

2.2.4. AI 기반 레이더 초단기 강수예측모델 원형 개발

최근 생성형 인공지능 모델(Generative Artificial Intelligence Models)은 다양한 분야에 적용되어 대격변을 일으키고 있다. 현업용 AI 강수실황예측 모델 개발을 목표로 2022년부터 생성적 적대 신경망 기반의 실황예측모델 개발을 시작하였으며, 2023년 그 원형모델인 Paired Complementary Temporal Cycle-Consistent Adversarial Networks for Radar-Based Precipitation Nowcasting(PCT-CycleGAN)을 개발하여 발표하였다. 시간적 인과성을 확보하기 위해 기존의 다른 강수실황예측 모델들의 경우 Convolutional Long Short-Term Memory(ConvLSTM)이나 Convolutional Gated Recurrent Unit(ConvGRU)를 신경망 내부에 포함시켜 시간적 인과성을 확보하는 방식을 택하지만, PCT-CycleGAN은 쌍을 이룬 적대적 학습 프레임워크 내의 손실 함수들을 통해 시간적 인과성을 확보한다. 생성자 신경망인 전방생성자(Generatorforward)와 후방생성자(Generatorbackward)는 각각 한 스텝 미래와 과거의 시간에 대한 강수 예측을 수행하도록 학습된다. 학습이 완료되면, 전방생성자의 반복 사용을 통해 여러 스텝 미래의 예측 수행이 가능하며, 일반적으로 2시간까지의 신뢰할 수 있는 예측 수행이 가능하다. 2022년도의 지능형 강수실황예측 모델과 비교하여 2023년도의 가장 큰 변화이자 핵심 기술은 Torrential Loss의 도입이다. Torrential Loss는 전방생성자와 후방생성자가 생성한 강수 예측 결과에서 특정 임계값 이상의 임계성공지수(CSI)가 최대가 되도록 학습을 진행한다. Torrential Loss는 집중호우 상황이나 태풍과 같은, 흔하지 않은 기상 현상이 존재할 때에도, 강수 예측이 정밀하게 이루어질 수 있도록 도입되었다.

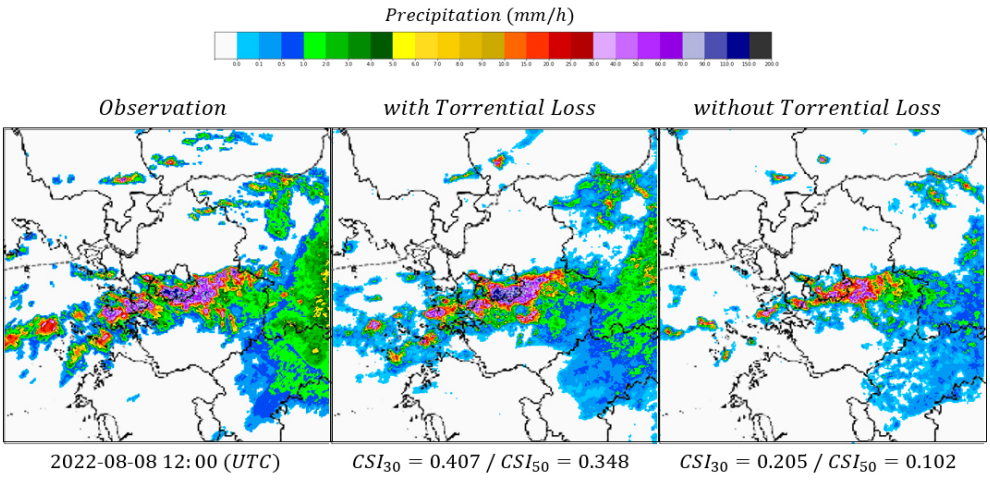

그림 3-124 Torrential Loss를 적용한 2022년 8월 집중호우 사례의 초단기 강수예측 결과(Choi et al., 2023).

2.3. 대내외 레이더 협업 및 대국민 소통 강화

2.3.1. 국가레이더 통합 활용 강화를 위한 기술교류 확대

기상레이더센터는 레이더 기반의 위험기상 탐지·분석 역량 강화 및 서비스 품질 향상을 목표로 국가레이더 통합 활용 강화 및 국내·외 기술을 공유하고자 「2023년 국제 기상·강우레이더 콘퍼런스(2023 International Conference on Weather Forecast and Hydrological Application of Radar」를 개최하였다(2023. 10.). 환경부와 격년으로 개최하는 레이더 콘퍼런스는 온·오프라인 병행으로 진행하였고 미국, 캐나다, 독일, 일본 등 각국의 레이더 전문가를 포함한 국내·외 레이더 관계자 120명(기상청, 환경부, 국방부, 대학)이 참석하였다. 세계 각국의 강수실황예측 기술 소개 및 기상·수문학적 활용, 레이더 분석 기술 및 활용 연구, AI 및 최신 기술을 접목한 연구 등을 논의하는 자리가 되었다.



그림 3-125 2023년 국제 기상·강우레이더 콘퍼런스(2023. 10. 25.~26.)