

기상기술·정책

Meteorological Technology & Policy

기후위기 시대, 국가기후예측시스템을 통한 미래 예측



CONTENTS

기후위기 시대, 국가기후예측시스템을 통한 미래 예측

칼럼

불확실한 기후를 예측 가능한 미래로 전환, 국가 기후예측의 전략적 도약 / 이미선(기상청장)	04
---	----

정책초점

국가기후예측시스템 개발 필요성과 전략 / 이명인(울산과학기술원 교수)	08
AI-역학 하이브리드 기후모델의 활용가능성 / 윤진호(광주과학기술원 교수)	22
세계 주요국의 기후예측시스템 개발 동향 / 김혜미(이화여자대학 교수)	36
사용자를 위한 기후예측 서비스 방향 / 유진호(APEC 기후센터 선임연구원)	46
국가기후예측시스템으로 여는 국가 기후정책 자립 / 조경숙(기상청 기후예측과 과장)	62

기상기술·정책

Meteorological Technology & Policy

Vol.
18-2

부록

기상기술·정책지 발간 목록

74

『기상기술정책』 편집위원회

발행인 이미선
편집기획 국립기상과학원 기획운영과
편집위원장 강현석
편집위원 이조한, 김상백, 부경운, 오하영
편집간사 김인겸, 이경미, 우남철

발행처

주소 (63568) 제주특별자치도 서귀포시 서호북로 33
국립기상과학원(책임운영기관)
전화 064-780-6505 팩스: 064-738-9071
E-mail leekm80@korea.kr

불확실한 기후를 예측 가능한 미래로 전환, 국가 기후예측의 전략적 도약

오늘날 기후환경은 과거와 비교할 수 없을 정도로 빠르게 변화하고 있다. 계절의 경계는 흐려지고, 기후 패턴은 불규칙해지고 있으며, 예측하기 어려운 극한 기상현상이 빈번하게 발생하고 있다. 이러한 변화는 전 세계적인 흐름으로, 기상현상의 일시적 변동이 아닌 지구의 기후체계가 새로운 균형점으로 이동하고 있는 징후라 할 수 있다.

기후변화는 자연환경을 넘어, 식량 생산, 물 공급, 보건·의료, 에너지 수급, 산업 활동, 금융 시스템, 국토 관리 등 우리 사회의 모든 영역에 연쇄적인 영향을 미치고 있다. 이러한 복합적 영향은 기후 문제를 더 이상 환경 분야에 제한된 의제에 머물 수 없게 하였으며, 기후위기는 지금 이 시대의 생활·경제·정책 전반을 흔드는 현실적인 구조적 위협으로 인식되고 있다.

이 변화의 흐름 속에서 우리는 하나의 중요한 질문을 마주하게 된다.
“예측할 수 없는 미래를 어떻게 준비할 것인가.”

지금까지는 과거 기후와 통계 자료를 바탕으로 미래를 전망해 왔다. 그러나 현재 우리는 기후변화의 속도가 이미 과거의 평균적 변화율을 훌쩍 뛰어넘은 기후위기 시대에 살고 있다. 이러한 상황에서 기존의 경험이나 단기 정보만으로는 미래를 충분히 판단하기 어렵다. 이제는 불확실성 자체를 관리하고, 예측을 통해 대응 영역을 넓히며, 이를 사회 거의 모든 분야의 의사결정과 연계하는 체계적 대응이 필요하다. 그렇게 하기 위해서는 과학 기반의 예측 체계가 국가 수준에서 구축되어야 하며, 그 핵심에는 다가올 기후변화를 보다 정밀하게 이해하고 대비할 수 있는 장기 기후 예측정보가 필수적이다.

이와 관련하여 세계 각국은 이미 기후위기에 대응하기 위해 다양한 예측 기반 정책체계를 발전시켜 나가고 있다. 기후 데이터는 단순한 참고 자료가 아닌, 정책 우선순위 결정, 산업투자 판단, 사회 인프라 계획 등 국가 시스템 운영 전반의 핵심 정보로 활용되고 있다. 예측 가능한 미래를 제시하는 국가는 대응 속도와 방향을 스스로 선택할 수 있지만, 그러지 못한 국가는 변화에 끌려갈 수밖에 없다. 기후 문제가 국가의 미래 경쟁력과 지속가능성이라는 큰 틀에서 종합적으로 대응해야 할 과제로 확장된 이 시점에서, 우리에게 필요한 것은 국가의 기후 대응 속도를 예측력에 기반한 체계로 전환하는 일이다.

이를 위해 추진되는 것이 바로 기상청의 「국가기후예측시스템」 구축이다. 지금까지는 영국

이미선
기상청장



기상청 모델을 기반으로 1개월 및 3개월 전망체계를 운영해 왔다. 하지만 기존의 체계는 근미래(수개월~10년 수준)의 기후전망을 제공하지 못해, 국가 탄소중립 전략, 시·군·구 기후적응 계획, 인프라 설계, 농업·에너지·금융 등 주요 분야에서 요구되는 미래지향적 정보의 기반을 충분히 마련하기 어려웠다.

새롭게 구축될 국가기후예측시스템은 이러한 예측 공백 기간을 해소하는 동시에, 해외 모델의 의존에서 벗어나 한반도와 동아시아 환경에 적합한 예측 체계를 독자적으로 확보하는 방향을 지향한다. 또한, 국가기후예측시스템 구축은 단순히 ‘예측 정확도를 높이는 기술 개발’ 그 이상으로, 불확실한 기후환경을 예측 가능한 정보로 전환하여 미래 대응의 주체로서 국가 역량을 확립한다는 데에 궁극적 목적이 있다. 이를 통해 단기적 기후 대응을 넘어 장기적 적응과 미래 환경에 대한 준비까지 지원할 수 있는 기반이 마련될 것이다.

국가기후예측시스템이 안정적으로 구축되기 위해서는 여러 과제가 함께 해결되어야 한다. 시스템 개발뿐 아니라 연구 인프라 확대, 전문인력 양성, 법제 기반, 부처 간 정책 연계, 지자체·산업계·학계와의 활용 협력 구조 등 다양한 기반이 함께 마련되어야 한다. 특히 기후정보가 단순 분석자료에 머물지 않고 실제로 다양한 분야에서 활용되기 위해서는, 국민·정책 현장·산업계가 필요로 하는 방식으로 전달되고 해석될 수 있는 서비스 체계 또한 고도화될 필요가 있다.

지금 우리는 기후 불확실성이 증폭되는 기후위기 시대를 지나, 그 불확실성에 대응하는 능력이 곧 국가 역량이 되는 시대로 이동하고 있다. 국가기후예측시스템 구축은 이러한 시대의 전환에 대응하는 중요한 출발점이자, 앞으로 우리 사회가 기후위기에 준비하고 대처하는 방식을 근본적으로 변화시키는 계기가 될 것이다. 앞으로 국가기후예측시스템에 의해 산출된 기후예측 정보는 위험을 줄이고 기회를 넓히는 방향으로 의사결정을 지원하는 사회적 자산이자, 정교하고 유연한 국가 대응체계를 구성하는 기반이 될 것으로 기대된다.

국가기후예측시스템이 안정적으로 자리 잡아, 기후와 미래를 바라보는 국가의 정책 역량을 높이고, 사회가 기후위기에 준비할 수 있는 충분한 시간과 정보를 확보하는 토대를 마련해 주기를 기대한다. 불확실한 기후를 예측 가능한 미래로 전환하는 과정에서, 이번 도약이 보다 안전하고 지속가능한 대한민국을 만드는 초석이 되기를 바란다.

정책초점

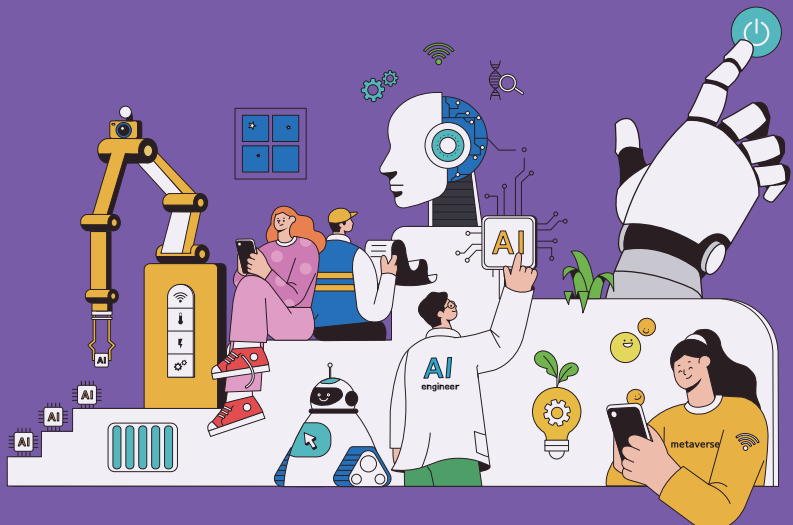
국가기후예측시스템 개발 필요성과 전략 /
이명인(울산과학기술원 교수)

AI-역학 하이브리드 기후모델의 활용가능성 /
윤진호(광주과학기술원 교수)

세계 주요국의 기후예측시스템 개발 동향 /
김혜미(이화여자대학 교수)

사용자를 위한 기후예측 서비스 방향 /
유진호(APEC 기후센터 선임연구원)

국가기후예측시스템으로 여는 국가 기후정책 자립 /
조경숙(기상청 기후예측과 과장)



국가기후예측시스템 개발 필요성과 전략

이명인 울산과학기술원 교수 milee@unist.ac.kr

- Ⅰ 사업 개요
- Ⅱ 사업 필요성
- Ⅲ 개발 전략
- Ⅳ 추진 로드맵
- Ⅴ 기대효과

21세기에 들어 더욱 심화되고 있는 기후변화로 전지구와 우리나라에서 폭염·집중호우·가뭄 등 기후재난의 빈도와 강도가 크게 증가하면서, 근미래(3개월~10년) 기후위험 관리를 위한 예측역량 확보가 국가적 과제로 부상했다. 그러나 국내 기후예측은 해외 계절예측시스템과 1~3개월 전망에 의존하고 있어 전력수급, 물관리, 농업, 재난, 금융 등 주요 분야의 3개월~10년 규모 중장기 의사결정에 활용 가능한 예측정보에 공백이 존재한다. 이를 해소하기 위해 국가기후예측시스템 개발 사업은 대기·해양·지면·해빙·대기화학·탄소순환을 통합한 지구시스템 결합모델 기반의 근미래 기후예측체계를 구축하는 것을 목표로 하며, 1단계에서는 50km급 모델 기반의 1년 예측체계를, 2단계에서는 25km급 고해상도 모델 기반의 10년 예측체계를 완성한다. 네 개의 세부사업을 통해 핵심모델 개발, 성분모델 접합, 현업 기반 기술 확보, 수요자 맞춤형 서비스 체계를 마련해 전처리-모델-후처리-서비스에 이르는 전주기 구조를 확립하게 되며, 이를 통해 국가와 산업·공공부문은 공통 기준의 근미래 기후 정보를 기반으로 보다 정합성 있는 중장기 계획과 위험관리 전략을 수립할 수 있다. 궁극적으로 국가기후예측시스템은 동아시아·한반도 특성에 맞는 독자적 예측역량과 연구 인프라를 확보하여, 2050 탄소중립과 기후위기 대응을 뒷받침하는 국가 핵심기술로 자리매김하게 된다.

I 사업 개요

2024년 현재 전지구 평균 이산화탄소 배경농도는 422.8ppm (Lan et al. 2025)을 육박하며 최근 10년 중 가장 큰 연간 증가 폭을 보였고, 세계기상기구는 1850년 이래 지구 관측사상 가장 뜨거웠던 해가 2024년으로 산업혁명 이전 대비 전지구 평균기온이 1.55℃ 이상 상승하였음을 확인하였다. 특히 최근 10년은 지구 관측 역사상 가장 더운 시기로 기록되고 있으며, 이는 전 세계적으로 급증하는 기후재난의 주요 원인으로 지목되고 있다. 최근 발생하는 기후재난은 빈도뿐만 아니라 강도 측면에서도 급격히 증가하여, 전 세계적으로 과거에 경험하지 못했던 수준의 위험기상 현상들이 동시다발적이며 또한 서로 연쇄적, 복합적으로 발생하는 사례가 빈번해지고 있다. 우리나라 역시 폭염, 집중호우, 가뭄 등 기록적인 기후재난이 매년 발생하고 있으며, 그 피해 규모 또한 증가하는 추세를 보이고 있다(그림 1).

다가오는 기후위기에 대응하기 위해 국제사회는 2015년 파리협정에 따라 2100년까지 전지구 평균기온 상승을 산업혁명 이전 대비 1.5℃ 이내로 제한하고자 노력하고 있다. 그러나 이 기준은 이미 2024년에 초과하였으며, 세계기상기구에 따르면 2027년경 전지구 평균기온이 역대 최고치를 경신할 확률은 98% 이상이며, 1.5℃를 초과할 확률도 66% 수준으로 전망되고 있어, 가까운 미래에 기후위기가 본격화될 것으로 예상된다.

따라서 기후위기 상황에서 에너지 수급, 농업·수자원 관리, 국가재난 대응을 위해 정확하고 상세한 근미래 기후예측정보를 생산하는 것이 매우 중요해지고 있다. 그럼에도 불구하고, 현행 기상청 기후예측시스템은 1개월 및 3개월 예측 중심 구조로 운영되고 있어 3개월에서 10년에 이르는 근미래 예측 구간에 뚜렷한 공백이 존재한다.

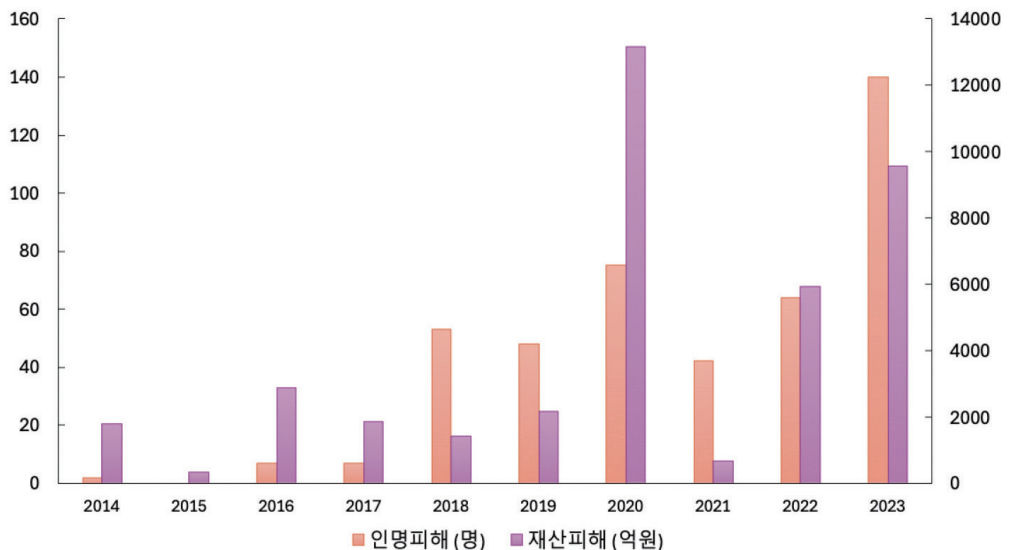


그림 1. 2014~2023년 우리나라 자연재난 피해 현황(행정안전부, 2025)

국가기후예측시스템 개발 사업은 대기, 해양, 지면, 해빙, 대기화학, 탄소순환 등을 포함하는 지구시스템 기반 결합모델을 활용하여 근미래 기후예측체계를 구축하는 것을 핵심 목표로 한다. 이와 함께 첨단 관측자료를 활용한 결합 자료동화 체계 고도화, 앙상블 기반 확률 예측 기술 개발, 후처리·응용기술 정교화 등을 통해 예측의 신뢰도와 실효성을 강화하는 방향으로 사업이 구성되어 있다.

국가기후예측시스템 개발은 기후변화가 가속되는 환경에서 국가적 대응 역량을 확보하기 위한 구조적이면서 필수적인 조치이다. 근미래 예측 구간의 공백을 해소함으로써 기후·재난·산업 분야에서 요구되는 중장기 기후정보 제공이 가능해지고, 이는 정책 의사결정과 위험관리 체계의 기반을 강화하는 핵심 기술 인프라가 될 것으로 기대된다.

II 사업 필요성

기후변화의 심화로 위험기상 현상들은 강도와 빈도를 동시에 키우며 사회·경제적 손실과 인명 피해를 확대하고 있다. 최근 10년간 영향 태풍과 국지적 집중호우의 발생 빈도는 증가 추세를 보이고 있으며, 전체 자연재난 복구비의 80% 이상을 기상재해가 차지한다. 복구비의 장기 추세 또한 가파르게 상승하면서 돌발적·국지적 재난의 파급력이 크게 확대되었다. 여름철 폭염으로 인한 건강 피해 역시 과거 기록을 잇달아 경신하고 있다. 이러한 위험을 선제적으로 줄이기 위해서는 신뢰도 높은 기후예측정보에 기반한 기후위기 적응 대책과 국가 차원의 예방·대응 체계가 필수적이다.

전 세계 기후재난의 발생과 피해는 가속화되고 있으며, 기후경제 시대에 접어든 현재 그 영향은 사회·경제·문화·정치·외교 전 영역으로 확대되고 있다. 정부는 과학적 예측과 분석에 근거한 정책을 수립하고, 다양한 영향 분야를 포괄하는 종합적 기후위기 대응 전략을 마련해야 한다. 특히 2050 탄소중립 달성과 실효적인 적응을 위해서는 향후 10년 내외의 근미래 기후예측정보가 국가 중장기 계획과 연구개발(R&D)의 기반이 되어야 한다. 「탄소중립기본법」은 중앙정부와 지자체의 중장기 계획 수립을 요구하고 있으며, 이에 부합하는 예측정보 생산 체계의 구축이 중요한 국가 과제로 대두되고 있다.

기후재난의 피해가 극대화·복합화·다변화됨에 따라 기후서비스 수요도 빠르게 증가하고 있다. 농업, 건설, 교육, 신재생에너지, 상·하수 및 수처리 등 공공성과 연계된 분야에서는 근미래 예측자료의 활용 필요성이 뚜렷하며, 기업과 공공부문은 단기에보를 넘어 수치모델

기반 중장기 예측, 지역 맞춤형 상세화, 과거 예보 및 관측오차 진단 등 고도화된 서비스를 요구하고 있다. 이상적인 감축 시나리오 이행이 지연되고 비가역적 전환점 도달 가능성이 앞당겨지는 현실에서, 6개월 이상 10년 미만의 근미래 예측역량은 정책·산업 의사결정의 핵심 인프라이다(그림 2).

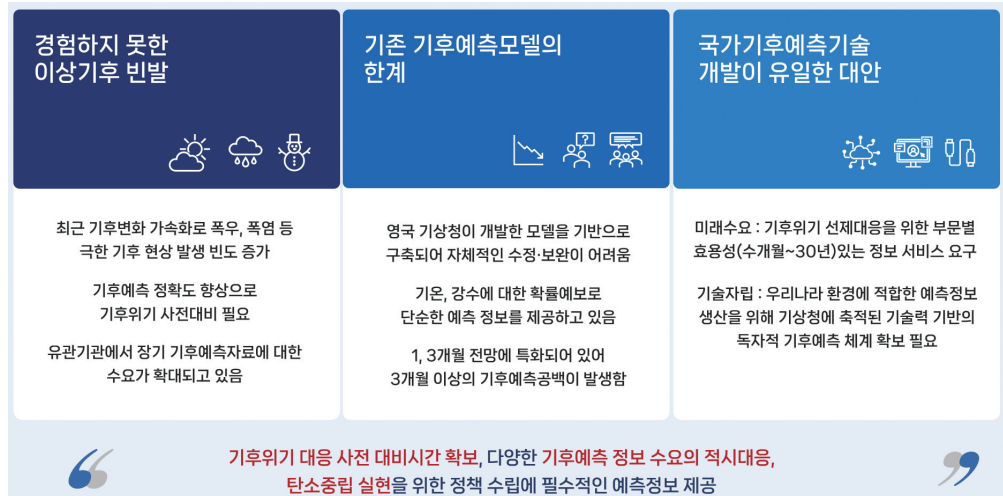


그림 2. 국가기후예측시스템 개발 사업의 필요성 요약

현재 국내 기후예측정보 생산은 영국기상청 계절예측시스템에 크게 의존하고 있어 1~3개월 범위의 예측에는 강점을 보이나, 1년 이상 예측정보를 생산하기 위한 기술·인프라가 부재하여 예측 공백이 발생하고 있다. 이로 인해 전력수급(약 2년), 발전기 예방정비(6개월~1년), 물관리 장·단기 운영, 농업 병해충·작황 리스크 등 핵심 분야에서 선제적 계획 수립에 큰 제약이 존재한다. 더불어 해외 시스템 의존 구조는 동아시아·한반도 지역 특성의 반영과 독자적 성능 개선·지역화에 한계를 초래한다. 실제로 동아시아에서 계절 확률 예측의 기온·강수 신뢰도가 낮게 보고되는 상황이 반복되고 있어, 예측 공백을 해소하는 동시에 신뢰도 높은 국가기후예측시스템 구축이 시급한 실정이다.

국내에서는 수치예보 기술 자립을 목표로 시·공간 통합형 전지구 모델(최대 1개월 예측)을 개발 중이나, 이는 근미래(1개월 이상~수년) 예측에 직접적으로 호환되지는 않는다. 근미래·장기 예측에는 대기뿐 아니라 지면, 해양, 해빙, 대기화학, 탄소순환 등 지구시스템 성분 간 상호작용을 고려하는 결합모델이 요구된다. 대기의 초기 상태 정보는 2주를 넘기면 영향력이 급감하며, 이후 예측성은 서서히 변화하는 토양 수분·온도, 적설량, 해양·해빙 상태, 대기 화학 조성 등에 좌우된다. 따라서 기상청 차세대수치모델(1개월 연장 중기예측) 성과를 기반 기술로 활용하되, 성분모델의 추가 개발과 결합, 계절내·계절 규모의 체계적 성능 평가·최적화가 병행되어야 한다. 이는 기존 사업과의 중복을 피하면서 연계성을 강화해 예산 효율성을 높이는 방향과도 부합한다.

한편, 현재 제공되는 1·3개월 전망은 기온·강수 중심의 간략한 정보(평년 대비 3분위 확률, 전국 및 12개 권역 제공)에 머물러 유관기관 실무 적용이 제한적이다. 농업 분야의 작황·병해충 예측, 수자원의 유량 예측 등은 더 세밀한 시·공간 해상도와 다양한 기상변수를 필요로 한다. 대국민 인식조사에서도 기후예측의 정확도 체감이 낮게 나타난 바 있어, 예측 정확도 향상을 위한 시스템 인프라 투자와 전문 인력 양성이 시급하다.

유관기관들은 이러한 한계로 인해 기후예측정보를 실무에 직접 연계하기보다는 참고자료 수준으로 활용하는 데 그치고 있다. 전력거래소는 계절·기후 전망 자료를 수요예측과 전력수급 계획에 참고하고 있으나, 전력수급기본계획(약 2년 선행), 발전기 예방정비계획(1~2년), 동·하·춘계 수급대책(6개월~1년)과 같은 중·장기 의사결정에는 근미래 예측자료 부재로 여전히 미래기후시나리오 기반 기후전망에 의존하고 있다. 물관리 분야에서도 한국수자원공사는 단기·장기 강우 및 태풍예측 모델을 자체 운영하여 기온·강수 정보를 활용하고 있으나, 장기간 물관리 의사결정에서는 단순 기후통계 자료에 의존할 수밖에 없어 불확실성이 크다.

기후변화로 인한 이상기후 영향이 확대되는 가운데 유관기관들은 정확하고 신뢰도 높은 근미래 기후예측정보와 현업 시스템에 바로 연동 가능한 형태의 산출물(적정 시·공간 해상도, 다양한 기상·수문 변수, 일관된 형식)을 강하게 요구하고 있다. 따라서 예측정확도(예측성) 개선과 함께 사용자 맞춤형 제공 형식으로서의 전환이 필수적이다. 무엇보다 날씨예보에서 계절·연간·수년 규모의 기후예측으로 이어지는 연속 스펙트럼을 구축하여 예측 공백을 해소할 때, 전력·물관리·농업 등 핵심 분야에 즉시 활용 가능한 기후서비스 제공이 가능해진다.

III 개발 전략

국가기후예측시스템 개발 사업은 기후변화로 인한 재난이 일상화되고 기후경제 시대에 접어든 현재, 3개월에서 10년에 이르는 근미래 기후예측 역량을 국가 차원에서 확보하기 위한 중장기 인프라 구축 사업으로 자리매김한다. 그동안 우리나라의 기후예측정보는 해외 계절예측시스템에 크게 의존해 왔으며, 기상청 현업 시스템 역시 1개월 및 3개월 전망 중심으로 운영되어 근미래 구간에 뚜렷한 예측 공백이 존재해 왔다. 이러한 공백은 전력수급, 물관리, 농업·식량, 재난·안전, 금융·보험 등 핵심 분야의 중장기 계획 수립을 시나리오 기반 간접 추정에 의존하도록 만들었고, 동아시아·한반도 특성에 맞는 독자적인

예측체계를 구축하지 못하게 하는 구조적 제약 요인으로 지적되어 왔다.

사업은 이러한 한계를 해소하기 위해 대기·지면·해양·해빙·대기화학·탄소순환 등 지구 시스템 성분을 통합한 결합모델을 기반으로, 3개월에서 10년에 이르는 예측 스펙트럼을 연속적으로 제공하는 국가기후예측시스템을 구축하는 것을 핵심 목표로 설정한다.

그림 3은 현행 1·3개월 예측 위주의 As-Is 구조와, 사업 추진을 통해 달성하고자 하는 To-Be 구조를 단계별 로드맵 형태로 제시한다. 1단계(2025~2027년)는 근미래(3개월~1년) 예측체계의 기반을 마련하는 시기로, 기상청 차세대수치예보모델을 활용하여 계절내·계절 규모까지 확장 가능한 기후예측모델을 구축하고, 관측 및 재분석 자료를 활용한 초기·경계조건 생산체계와 앙상블 기반 확률 예측 체계를 정립하는 데 중점을 둔다. 이 단계에서는 현재 1·3개월 전망에 머물러 있는 예측기간을 1년 이내까지 확장하고, 약 50km 수준의 공간해상도를 유지하면서도 해양과 지면, 해빙 등 서서히 변화하는 요소의 영향을 반영할 수 있는 구조를 갖추는 것을 목표로 한다.

2단계(2028~2031년)는 예측기간을 1~10년으로 확대하는 근미래 기후예측시스템의 완성 단계로, 해양 생지화학·지면·탄소 등 성분모델을 추가 개발·결합하여 지구시스템 기반 장주기 예측모델을 구현하고, 고성능컴퓨팅 인프라를 활용한 대규모 앙상블 시스템을 운영하는 것을 목표로 한다. 이를 통해 10년 이내 구간에서 기후변동과 기후변화 신호를 통합적으로 반영하는 실험 설계가 가능해지며, 에너지·수자원·농업·재난 등 수요 분야의 요구를 고려한 고해상도 지역상세화와 영향지표 산출체계가 갖추어지게 된다. 결과적으로 예측기간·공간해상도·예측변수 측면에서 점진적인 고도화를 통해 기존의 제한된 계절예측 체계를 근미래 기후리스크 관리 플랫폼으로 전환하는 것이 단계별 전략의 방향이다.



그림 3. 국가기후예측시스템 단계별 개발 전략

이러한 단계적 전략을 뒷받침하기 위해 사업은 네 개의 세부사업으로 구성되며, 표 1은 이들 세부사업의 구성과 근미래 예측 관점에서의 기술개발 범주를 체계적으로 정리한 것이다. 국가기후예측시스템 핵심기술 개발(세부 1 사업)은 성분모델 개발과 결합, 장기적분에 적합한 역학 코어와 물리과정 모수화, 전산자원 효율화와 모형 관리체계 구축 등 국가기후예측시스템의 기본 골격을 마련한다. 국가기후예측시스템 접합기술 개발(세부 2 사업)은 해양·지면·해빙 등 각 모듈을 개선하고 상호 접합함으로써, 세부 1 사업에서 구축된 역학 코어가 실제 지구시스템을 보다 일관성 있게 모사하도록 만드는 역할을 담당한다. 국가기후예측시스템 현업 기반 기술 개발(세부 3 사업)은 접합된 결합모형을 실제 운영환경에서 활용할 수 있도록, 첨단 관측자료와의 결합을 위한 자료동화 기술과 통계 기반 후처리 및 확률 예측 기법을 개발하여 연구용 성과를 현업 시스템으로 이전하는 가교 역할을 한다. 수요자 맞춤형 기후정보 서비스 체계 개발(세부 4 사업)은 세부 1~3 사업의 결과를 바탕으로 에너지, 수자원, 농업, 보건, 재난안전, 금융·보험 등 유관기관과 산업계, 지자체, 국민의 정보 요구를 분석하고, 영향지표와 위험지수를 산출·시각화하여 실제 의사결정에 바로 활용 가능한 형태로 제공한다.

개발전략은 세부 사업 간의 공동개발 협업 체계를 기반으로 산출물과 평가결과 등에 대한 높은 유기성과 피드백을 요구한다. 세부 1 사업에서 모형의 뼈대를 설계하고, 세부 2 사업에서 성분모형 간 접합을 통해 지구시스템 표현을 정교화하며, 세부 3 사업에서 관측자료와의 결합 및 후처리 기술로 현업 운용 기반을 마련하고, 세부 4 사업에서 수요자 관점의 서비스 체계를 구축하는 순환 구조가 유기적으로 맞물리도록 설계한 것이 이 사업의 특징이다.

표 1. 세부사업별 근미래 예측 측면에서의 기술개발 범주

세부사업	전략과제	근미래 예측 측면에서 기술개발 범주
(세부 1) 국가기후예측시스템 핵심기술 개발	기후모의를 위한 성분모형 개발 기후예측모델 결합	예측주기의 한계극복, 물리과정 모수화의 고도화 및 통합, 지구물리 요소를 고려한 결합 모델, 장기적분 안정성 확보, 전산환경 및 관리체계 개발
	전산과학 기술 접합	
(세부 2) 국가기후예측시스템 접합기술 개발	개선된 해양 및 지면 접합모델 개발	기후변화/인간활동에 따른 지구환경 변화 이해, 미래 지구환경 변화에 대한 합리적인 대처방안 개발, 진단 및 검증 체계 구축
	결합모델 진단 체계 개발 및 검증	
(세부 3) 국가기후예측시스템 현업 기반 기술 개발	첨단 관측자료 활용 결합 자료동화 체계 개발	고품질 기후예측에 최적화된 자료동화 시스템, 확률 예측 앙상블 기술 및 성능평가 체계 개발, 근미래 정보 생산을 위한 국가기후예측시스템 접합기술 최적 운영기술 개발
	앙상블 기반 확률 예측 체계 개발	
(세부 4) 수요자 맞춤형 기후정보 서비스 체계 개발	기후예측자료 응용기술 개발	근미래 기후예측정보 가공 기술, 거대화되는 기후예측정보의 관리기술 개발 및 수요자 맞춤 기후정보 생산/제공기술 개발, 국가기후예측모델과 범용 저해상도 기후예측모델의 양방향 개선 시스템 개발
	수요자 맞춤 과학정보 후처리기술 개발	
	지속가능한 민관협력 기후예측모델링 생태계 구축	

이러한 유기적 구성이 국가기후예측시스템의 전처리-모델-후처리 구조 속에서 어떻게 구현되는지는 그림 4에 제시되어 있다. 전처리 단계는 주로 세부 3 사업이 담당하는 관측·위성·재분석 자료의 수집·품질관리와 통합 자료세트 구축을 통해, 결합모델이 초기 상태와 경계조건을 일관되게 재현할 수 있도록 하는 과정이다. 모델 단계에서는 세부 1·2 사업을 중심으로 대기-지면-해양-해빙 성분모델이 결합된 국가기후예측모델이 구동되며, 태평양 엘니뇨·남방진동, 인도양·대서양 해수면온도 변동, 극지 해빙변동, 중위도 제트와 블로킹 등 근미래 예측성을 좌우하는 주요 기후모드의 재현력을 확보하기 위해 모수 조정과 성능 평가가 반복적으로 수행된다. 후처리 단계에서는 세부 3·4 사업을 통해 다수의 앙상블 예측 결과로부터 확률분포와 이상기후 발생 가능성을 산출하고, 수문·농업·보건·에너지 등 각 분야에 맞춘 수요자 맞춤형 형식으로 제공한다. 이 과정 전반에서 통계·인공지능을 이용한 편의 보정과 예측 신뢰도 산정이 병행되고, 수요기관의 활용 경험과 평가 결과는 다시 세부 1·2·3 사업의 모형 및 운영체계 개선으로 환류되어, 연구개발과 현업 운용, 서비스 제공이 하나의 순환 구조 안에서 지속적으로 고도화되도록 하는 것이 국가기후예측시스템 개발 사업의 지향점이다.

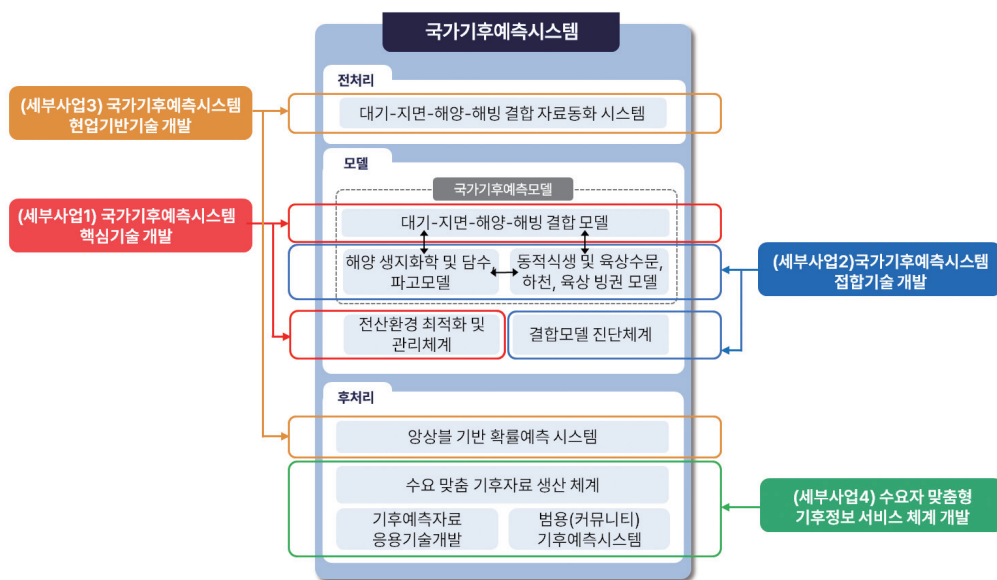


그림 4. 국가기후예측시스템의 전처리-모델-후처리 구조와 세부사업 연계

국가기후예측시스템에서 생산되는 산출물과 수요자 간의 연계 구조는 그림 5에 정리되어 있다. 시스템의 산출물은 전지구 및 한반도 주변의 기온·강수·해수면온도·해빙·토양수분 등의 기후예측정보, 폭염·한파·집중호우·가뭄 등 극한 현상에 대한 이상기후예측정보, 그리고 특정 수요 분야의 의사결정을 직접 지원하는 수요자 맞춤형 정보로 구분할 수 있다. 이들 정보는 수치모델 결과와 관측·통계 자료를 결합한 수치모델 빅데이터베이스에 축적되며, 향후 인공지능 기반의 새로운 예측·진단 도구 개발에도 활용된다. 전력·에너지

분야에서는 6개월~2년 선행의 전력수급 및 설비 정비계획 수립에, 수자원 분야에서는 가뭄·홍수 리스크 관리와 댐·저수지 운영에, 농업 분야에서는 작황·병해충 예측과 재배전략 수립에, 재난안전·보험 분야에서는 기상재해 위험도 평가와 보험료 산정에 근미래 기후예측정보가 활용될 수 있다.

나아가 국가기후예측시스템 구축 과정에서 개발되는 범용 결합모델과 장기 예측자료는 국내외 학계와 연구기관이 공동으로 활용할 수 있는 공공 연구 인프라로 기능하며, 기후변동·극한 현상 메커니즘 규명, 모형 성능 평가 및 개선, 후속 응용연구를 촉진하는 기반이 될 것으로 기대된다. 결국 국가기후예측시스템 개발 전략은 근미래 기후예측의 공백을 메우고, 동아시아·한반도 특성에 맞는 독자적인 예측 역량을 확보하여, 기후위기 시대의 국가적 대응과 2050 탄소중립 달성을 뒷받침하는 구조적 조치라 할 수 있다.

예측기간과 공간해상도, 예측변수, 서비스 형식이 단계적으로 고도화되고, 연구개발과 현업 운용, 수요자 피드백이 하나의 순환 체계로 작동할 때 근미래 기후위험은 불가피한 재난이 아니라 관리 가능한 위험으로 전환될 수 있다. 이는 향후 국가 중장기 계획과 기후·재난·산업 정책의 실효성을 높이는 핵심 기반이 될 것이다. 동시에 범용 결합모델과 수치모델 빅데이터를 개방·공유함으로써 국내 연구자들의 활용 폭을 넓히고, 국제 공동연구와 전문 인력 양성을 촉진하는 등 학계·연구계 차원의 파급효과 역시 기대할 수 있다.

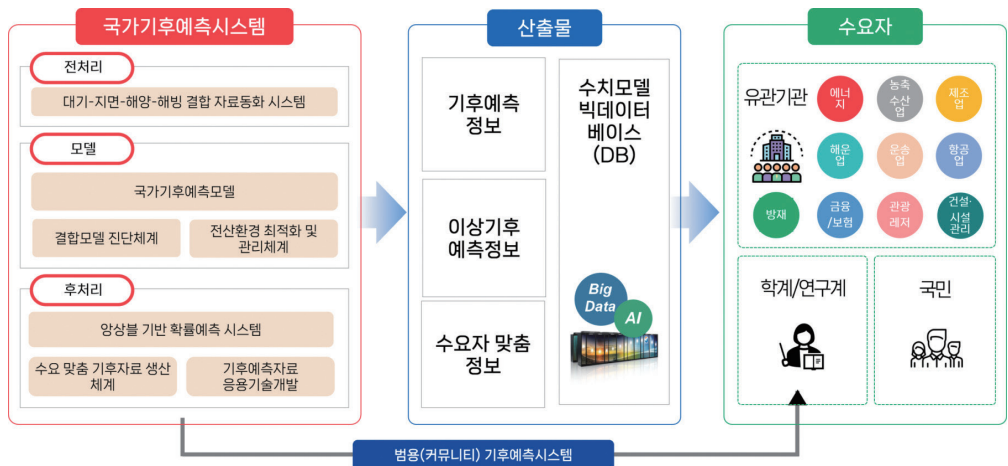


그림 5. 국가기후예측시스템에서의 산출물 및 흐름도

IV 추진 로드맵

국가기후예측시스템 개발 사업은 2025~2027년 1단계 사업과 2028~2031년 2단계 사업의 두 단계로 추진되며, 네 개의 세부사업이 병행된다. 이를 통해 국가기후예측모델 개발을 위한 핵심기술을 확보하고, 개발된 모델을 바탕으로 국가기후예측시스템을 구축·운영하며, 범용(커뮤니티) 모델로 활용될 수 있도록 하는 것을 목표로 한다. 1단계에서는 중해상도 국가기후예측모델을, 2단계에서는 상세화된 고해상도 국가기후예측모델을 최종적으로 개발한다. 각 세부사업에서는 국가기후예측시스템의 핵심기술, 접합기술, 현업 기반 기술, 수요자 맞춤형 기후정보 서비스 체계를 개발하며, 세부사업 간 연계를 통해 기술을 유기적으로 발전시킨다.

최종적으로 개발되는 국가기후예측모델은 10년 기후예측모델로서, 1년 기후예측모델에 대기화학 에어로졸, 지면, 물-에너지-탄소순환, 해양 생지화학 접합모형이 추가로 결합된 구조를 갖는다. 1단계에서 개발하는 중해상도 국가기후예측모델은 ‘전처리, 중해상도 국가기후예측모델, 1년 기후예측모델, 후처리’를 포함하며, 2단계에서 개발하는 고해상도 국가기후예측모델은 ‘전처리, 고해상도 국가기후예측모델, 10년 기후예측모델, 후처리’로 구성된다(그림 6).

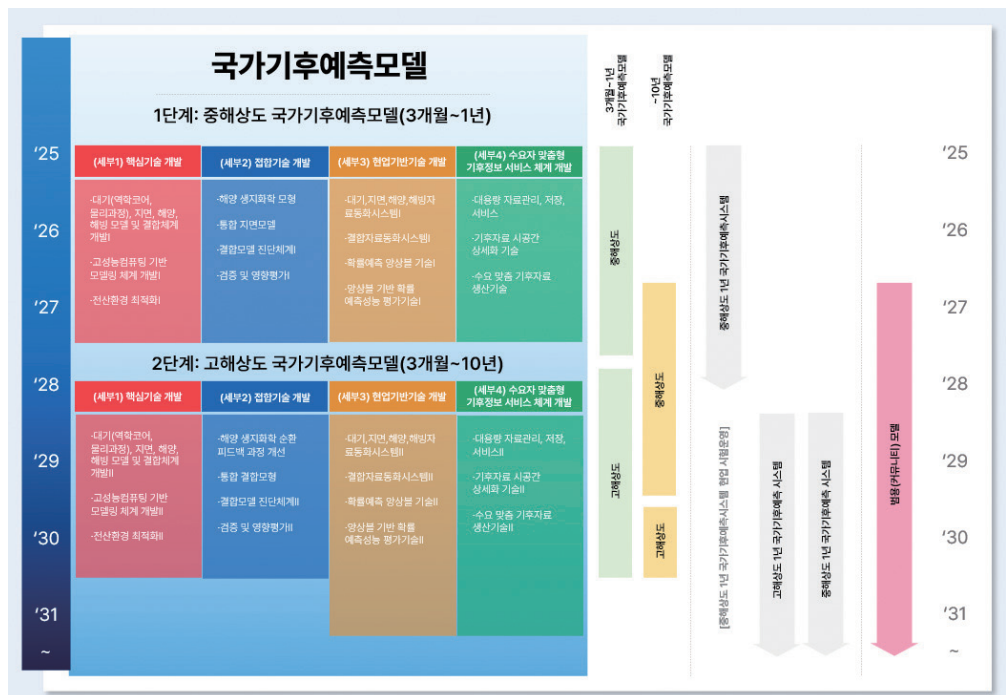


그림 6. 국가기후예측모델 단계별 개발 핵심기술 및 로드맵

이번 국가기후예측시스템 개발 이전에는 기상청 기후예측모델(Global Seasonal Forecasting System version 6, GloSea6)을 기반으로 1개월 및 3개월 전망을 기온 및 강수 형태로 제공해 왔다. 그러나 본 사업을 통해 2027년까지는 50km 해상도로 최대 3개월까지, 2031년까지는 25km 해상도로 최대 10년까지 예측이 가능한 국가기후예측모델을 개발함으로써, 기존 기후예측정보를 보다 상세하고 확장된 기간으로 제공할 수 있을 것으로 기대된다. 나아가 국가기후예측모델 개발 기술을 토대로 100년 적분이 가능한 고해상도 모델을 개발하여 기후변화 국가간 협의체(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)가 주관하는 기후모델 상호평가 프로젝트(Coupled Model Intercomparison Project) 참여와 시나리오 적분 수행도 가능해질 것으로 전망된다(그림 7).

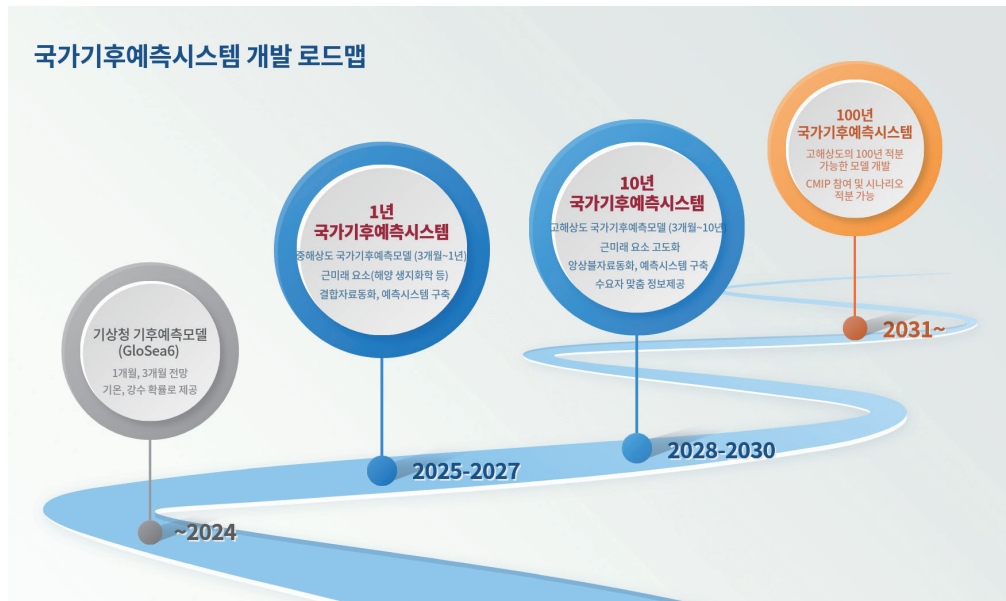


그림 7. 국가기후예측시스템 개발 로드맵

V 기대효과

국가기후예측시스템은 기존 기후예측 체계가 해결하지 못했던 정책, 산업, 재난, 운영 전반의 구조적 한계를 보완하는 기술 기반 인프라로 기능한다. 이 시스템이 구축되면 국가 차원의 데이터 활용 방식이 정교해지고, 예측 운영 체계와 정책 결정을 뒷받침하는 정보 구조 역시 보다 체계적으로 재편된다. 확장된 예측·데이터 생태계는 기상청을 중심으로 공공기관과 산업계, 연구계로 확산되며, 국가 전체가 공통된 기준의 기후정보를 실제 의사결정에 활용하는 흐름이 형성된다(그림 8).

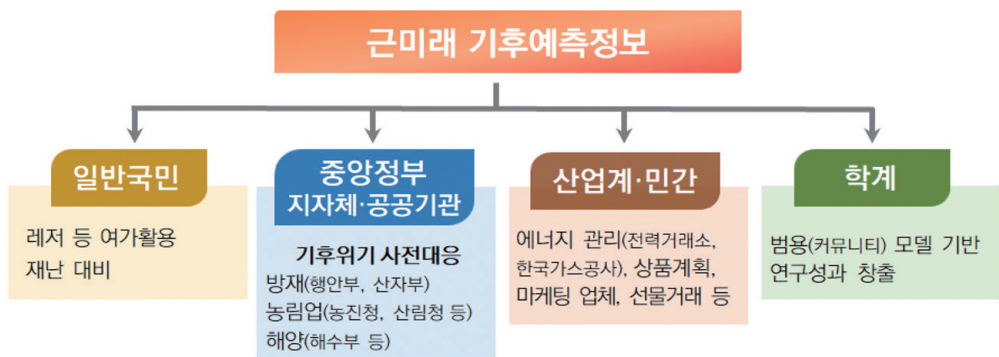


그림 8. 근미래 기후예측정보 활용 방안

국가기후예측시스템을 통해 3개월에서 최대 10년에 이르는 근미래 예측자료를 안정적으로 생산할 수 있게 되면, 각 부처는 동일한 기준 자료 위에서 중장기 계획을 수립할 수 있고, 이는 정책 간 정합성을 확보하는 핵심 기반이 된다. 이러한 예측정보는 정부가 기후위기에 대응하는 전략과 실행 체계를 단기 중심 대응에서 장기 관점의 구조적 대응으로 전환하는 데 중요한 출발점이 된다.

국가기후예측시스템에서 생산되는 근미래 기후정보는 다양한 공공기관과 산업 분야로 빠르게 확산된다. 에너지 수급, 농업 생산, 해양·수산 활동, 보험·금융, 방재, 물류·교통 등 기후변화에 민감한 영역에서는 각자의 운영 특성에 맞게 예측정보를 재가공하여 활용할 수 있다. 전력 수요·공급 전략, 댐 운영 계획, 농작물 재배 시기 조정, 해양 안전 관리, 보험 손해를 평가, 물류 경로 설계 등 실무 전반에서 근미래 기후정보는 기존의 해외 자료나 단편적 해석을 대체하는 공통 기준으로 자리 잡는다. 이를 통해 각 기관이 개별적으로 자료를 해석하던 방식에서 벗어나, 국가 표준자료를 중심으로 한 통합적 의사결정 체계 구축이 가능해진다.

연구 환경도 변화한다. 장기 적분이 가능한 한국형 모델과 다양한 기후감시 자료가 제공되면, 연구자들은 단기 변동 분석을 넘어 지역 기반 기후변동 연구, 극한 현상 진단, 응용모델 개발 등 보다 정교한 연구를 수행할 수 있다. 기관 간 공동 연구와 커뮤니티 모델 생태계도 확장되고, 연구와 현업 시스템 간 연계가 이전보다 긴밀해진다.

이러한 변화는 재난·위험관리 체계에도 직접적인 영향을 미친다. 폭염, 집중호우, 태풍, 가뭄 등 빈도와 강도가 모두 증가하는 극한 현상을 장기적 관점에서 평가할 수 있게 되면, 국가와 지자체는 더 이른 시점에서 대응 전략을 수립할 수 있다. 이는 단순히 예측기간이 확장되는 수준을 넘어, 위험을 바라보는 시간축 자체가 재편된다는 의미이며, 피해 저감의 실질적 효과로 이어질 수 있다.

산업 분야에서는 변화가 더욱 직접적이다. 근미래 기후자료가 표준화된 형태로 제공되면서, 산업계는 자체적으로 구축해온 기후리스크 관리 체계를 한 단계 고도화할 수 있다. 에너지 수급 계획, 생산량 전망, 항만·선박 운영, 물류·교통 흐름, 관광 서비스 운영까지 기후정보가 장기적 사업 전략에 본격적으로 포함되며, 금융·보험 부문에서도 손해를 예측과 리스크 평가에 기후요소를 보다 정밀하게 반영할 수 있다.

이 모든 흐름을 뒷받침하는 기반은 운영·관리 체계의 변화이다. 모델 개발, 자료동화, 예측, 후처리까지 이어지는 전주기 기술자립이 가능해지면, 해외 모델 의존이나 자료 업데이트 지연으로 인한 제약에서 벗어나 안정적인 예측 운영이 가능해진다. 국가지원이 직접 예측 체계를 관리한다는 것은 단순한 기술 확보를 넘어, 장기적으로 지속 가능한 기후예측 플랫폼을 갖추게 된다는 의미를 지닌다.

결국 국가기후예측시스템은 하나의 모델이 추가되는 수준을 넘어, 기상청을 기점으로 공공기관, 산업계, 연구계, 그리고 국민까지 이어지는 활용 생태계를 재편하는 과정이다. 근미래 기후정보가 일관된 기준 위에서 제공되면 정책, 산업, 재난 대응, 연구, 대국민 서비스 전반에서 의사결정의 깊이가 달라지며, 국가 전체가 보다 장기적 관점에서 기후변화를 다룰 수 있는 기반을 확보하게 된다.

참고문헌

행정안전부, 2025: 2023 재해연보. 499pp.

Lan, X., Tans, P., and Thoning, K.W., 2025: Trends in globally-averaged CO₂ determined from NOAA Global Monitoring Laboratory measurements, Version Thursday, accessed Nov 13, 2025, MST <https://doi.org/10.15138/9N0H-ZH07>.

AI-역학 하이브리드 기후모델의 활용가능성

윤진호 광주과학기술원 교수 yjinho@gist.ac.kr

- Ⅰ 강화된 필요성: 왜 지금 '국가 차원 기후예측시스템'인가
- Ⅱ 현행 국가기후예측시스템 구조 및 한계
- Ⅲ 차세대 국가기후예측시스템의 구축 방향
- Ⅳ AI 기반 기후예측 기술 및 하이브리드 시스템의 가치
- Ⅴ 10개년 시스템 구축 로드맵
- Ⅵ 다양한 활용
- Ⅶ 결론

기후변화로 인한 전 세계 경제적 피해는 최근 10년간 약 2조 달러를 넘어섰으며, 2024년 한 해 자연재해 손실만 4,170억 달러에 달하는 등 기후 리스크는 이미 글로벌 경제와 인프라를 실질적으로 위협하는 수준에 도달했다. 한반도 또한 폭염·집중호우·열대야 등 기후 극단현상이 급격히 증가하고 있으며, 세기말 폭염 일수는 최대 9배까지 확대될 것으로 전망된다. 이에 따라 기후예측정보의 수요는 단기 기상예보를 넘어, 수개월~수십 년을 포괄하는 근미래 기반 확률 예측 및 정책 의사결정 시스템으로의 전환이 요구된다. 현행 국가기후예측체계(GloSea6 공동 운영)는 국제적 표준과 비교해 기본적 예측 역량을 갖추고 있으나, 해양·해빙 초기 조건의 해외 의존, 결합 자료동화 부재, 24년 규모 Hindcast 한계, 240일 이후의 수년 예측 공백 등 구조적 제약이 존재한다. 이에 본 보고서는 향후 10년간 독자적 지구시스템 모델 기반 프레임 구축 → 결합 자료동화 및 확률 예측 고도화 → 산업 적용형 기후서비스 플랫폼 완성이라는 3단계 국가 구축 전략을 제안한다. 특히 AI-물리 하이브리드 예측 시스템은 극한기상 확률 탐지, 계산 효율성, 산업 활용성 측면에서 혁신적 전환점을 제공하며, 기후정보를 '예보'에서 '국가 운영 인프라'로 진화시키는 핵심 기술축이 될 것이다.

I 강화된 필요성: 왜 지금 ‘국가 차원 기후예측시스템’인가

1. 기후위기의 전세계와 한반도의 현실

최근 10년간 전 세계 기후 관련 극한기상으로 인한 피해 비용은 약 2조 달러에 달하며 (ICC, 2024), 2024년 한 해 자연재해 손실만 4,170억 달러를 기록했다(Gallagher Re, 2024). 미국의 10억 달러 이상 재해는 1980년대 연 3건에서 2010년대 연 19건으로 급증했고, 유럽은 1980~2024년간 누적 8,220억 유로의 손실을 입었다. 이는 극한 기상이 더 이상 일시적 문제가 아닌, 글로벌 경제 시스템과 국가 재정, 공급망, 인프라 전반을 위협하는 구조적 리스크임을 보여준다. 한반도도 예외가 아니다. 한국 기후위기 평가보고서 2025는 폭염과 집중호우의 빈도·강도 증가를 확인했으며, 2025년 7월 서울 열대야는 23일로 역대 최다를 기록했다. 세기말 한반도 폭염 일수는 현재 대비 최대 9배 증가할 것으로 예측되며, 이는 국민 건강, 농업, 인프라, 에너지 수요 등 사회-경제 전반에 장기적 충격을 줄 수 있다. 따라서 단기에보를 넘어 수개월~수십 년 단위의 기후전망과 대응 전략 수립이 필수적이다.

2. 현재의 대응 격차와 근미래 ‘골든타임’

기상관측과 재해 대응 체계 발전으로 자연재해 사망자는 감소했으나 경제적 손실은 지속 증가하고 있다. 이는 피해 양상이 ‘인명 보호’에서 ‘인프라·경제 시스템 보호’로 변화했음을 의미하며, 단순한 경보 체계만으로는 불충분하다. 보험사, 에너지, 농업, 금융, 지자체 등 사회 전반에서 기후예측 기반 위험 관리 수요가 급증하고 있으며, 글로벌 보고서들은 향후 수십 년간 재해 비용이 더욱 커질 것으로 전망하며 예측 기반 적응 체계 구축의 중요성을 강조한다. 기후시스템의 복잡한 피드백과 관성으로 인해 당장 온실가스 배출이 멈춰도 수십 년간 기후변화는 불가피하다. 지금이 장기 리스크 관리 역량을 갖출 수 있는 ‘골든타임’이다. 향후 5~30년 내 기후예측 체계 구축을 늦출 경우 인프라 피해와 재정 부담이 심화되어 회복이 어려울 수 있으나, 지금 투자한다면 향후 수십 년간의 기후 리스크를 사전 완화하고 적응 비용을 절감할 수 있다.

3. 글로벌 기후위기 대응 흐름과 국제 비교

유럽에서는 1980년부터 2024년까지 기후·기상 관련 극한현상으로 인한 손실이 누적 약 8,220억 유로에 달하며, 수해(Floods)·태풍/폭풍(Storms)·폭염(Heat Waves) 등 복합 위험이 전체 손실의 대부분을 차지한다는 집계 있다. 글로벌 보험시장과 금융산업도,

기후리스크를 재무 리스크로 인식하고 있으며, 최근 몇 년간 보험 손실이 급증함에 따라 보험료 재산정, 리스크 기반 투자 재구조화 등 변화가 진행 중이다. 또한, 최근 국제 보고서는 기후변화가 기존 사회경제 불평등을 심화시키고, 기후 재해에 취약한 국가와 계층일수록 피해 비율이 높다는 점을 강조하며, 글로벌 차원의 ‘예측 기반 적응 투자’ 확대를 촉구하고 있다. 즉, 국가기후예측시스템의 강화는 국내 문제에 국한되는 것이 아니라, 글로벌 스탠더드와 국제 흐름에 맞춘 필수 인프라라는 점에서도 매우 중요하다.

요약하면, 다양해진 근거 기반으로 본 기후예측시스템 구축의 ‘긴박한 필요성’이 있음을 확인할 수 있다. 전 세계 및 국내에서 경제적 손실이 기하급수적으로 증가하고 있으며, 한반도 역시 기온 상승, 폭염·호우·열대야 증가라는 관측된 기후위기 현실에 직면해 있다. 이로 인해 사회 각 분야(에너지, 농업, 보험, 인프라, 금융 등)에서 기후예측정보 수요가 폭발적으로 증가하고 있다. 기후시스템의 비선형성 및 누적 영향으로 인해 지금이야말로 미래 리스크를 미리 관리할 수 있는 마지막 기회일 수 있다. 글로벌 기후위기 대응 및 적응 전략의 국제적인 흐름 속에서, 독자적이고 과학 기반의 기후예측시스템은 더 이상 선택이 아닌 필수 조건이다.



그림 1. 근미래 기후예측시스템의 필요성에 대한 간략한 모식도

II 현행 국가기후예측시스템 구조 및 한계

1. 시스템 개요: GloSea6 기반 한·영 공동 계절예측 체계

현재 우리나라 국가기후예측시스템은 영국 기상청(UK Met Office, UKMO)의 전지구 계절예측시스템 GloSea6 (Global Seasonal Forecasting System version 6)를 도입·공동 운영하는 구조이다. GloSea6는 대기·지면·해양·해빙 결합 기후모델 HadGEM3-GC3.2 기반의 앙상블 예측 시스템으로, 중위도 기준 약 50km 수평해상도를 갖추고 있다. 기상청은 2021년 슈퍼컴퓨터 5호기 도입과 함께 기존 GloSea5를 GloSea6로 업그레이드했으며, 국립기상과학원 주도로 과거기후 재현(Hindcast)과 실시간 예측(Operational Forecast)을 생산·관리하고 있다. 이 시스템은 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO) 장기예측 선도센터 네트워크에서 전지구생산센터 서울(Global Producing Centre Seoul, GPC Seoul)의 핵심 모델로 활용되며, 최대 240일(약 8개월)까지의 계절예측정보를 제공한다.

2. 예보 생산 체계

1993~2016년, 총 24년치 과거기후예측장을 구축했으며, 이를 활용하여 계절예측 신뢰도 평가(검증)와 실시간 예측을 보정하고 있다. 앙상블 과거기후예측은 시간지연 앙상블(Time-Lagged Ensemble)과 추계적 물리기법(Stochastic Kinetic Energy Backscatter v2, SKEB2)을 조합한 구조로 이루어진다. 매달 1일·9일·17일·25일 네 날짜를 기준 시작일로 삼고, 각 날짜마다 7개 앙상블 멤버를 생성하여 총 252일(약 8개월)까지 적분한다. 또한 시간지연 앙상블(Time-Lagged Ensemble)은 한 달 내 네 차례로 시작일을 분산하여 자연적 초기조건 변동성을 반영하며, SKEB2는 소규모 난류 에너지를 대규모 흐름에 재주입해 모델 내부 불확실성을 모의하는 기법이다. 이를 통해 각 멤버에 서로 다른 섭동을 부여하여 총 24년 × 월별 28멤버 규모의 고정 Hindcast 앙상블이 구축되었으며, 이는 예측 신뢰도 평가, 선형·비선형 통계보정, 다중모델 앙상블(Multi Model Ensemble, MME) 구성 등에 활용된다. 초기조건은 ECMWF Reanalysis v5 (ERA5) 재분석장, European Modelling of the Ocean Variational Data Assimilation (NEMOVAR) 기반 재분석장을 사용한다. 다만 이 재분석장은 국내에서 자체 생산하지 않고, 영국 기상청에서 산출한 자료를 전량 입수해 사용하는 구조이다. 즉, 과거 기후예측시스템에서 대기·지면 초기장은 국내 통제력이 있는 반면, 해양·해빙 초기장은 해외기관(UKMO)에 의존하는 구조적 특성을 갖는다.

GloSea6 예측시스템의 초기조건은 대기·지면 상태에 대해서는 ECMWF의 ERA5 재분석

자료를, 해양·해빙 상태에 대해서는 NEMOVAR 기반 해양 재분석 자료를 사용한다. ERA5는 전 지구 대기 상태를 약 31km 해상도로 재구성한 고품질 재분석장으로, 전 세계 기상·기후 연구의 표준 자료로 활용되고 있다. NEMOVAR는 UKMO가 개발한 해양 자료동화 시스템으로, 관측자료를 해양 모델에 최적으로 결합하여 3차원 해양 상태(수온, 염분, 해류 등)를 재현한다.

그러나 문제는 이러한 재분석 자료, 특히 해양·해빙 초기장을 국내에서 자체 생산하지 못하고 UKMO에서 산출한 자료를 전량 도입·의존하고 있다는 점이다. 대기·지면 초기장의 경우 ERA5가 공개 자료이므로 접근성과 활용도가 높고, 필요시 국내 관측자료를 추가 동화하여 보완할 여지가 있다. 반면, 해양·해빙 초기장은 UKMO의 고유 시스템에서 생산되며, 이는 해당 기관의 기술력, 자료동화 알고리즘, 관측망 구성에 전적으로 의존하는 구조를 의미한다. 이러한 구조적 의존성은 다음과 같은 한계를 낳는다. 첫째, 한반도 주변 해역(황해, 동해, 동중국해 등)의 해양 상태가 전지구 재분석 자료에서 충분히 정밀하게 반영되지 않을 가능성이 있다. 둘째, 해양 초기조건의 품질 개선이나 오류 수정이 필요할 때 국내 주도적으로 대응할 수 없다. 셋째, 장기적으로 독자적인 기후예측 역량 확보와 기술 자립도를 높이는 데 근본적인 장애 요인이 된다. 즉, 현재 시스템은 대기 부문은 상대적으로 국내 통제가 가능하나, 해양·해빙 초기화는 해외 기관에 전적으로 의존하는 비대칭적 구조를 지니고 있으며, 이는 국가기후예측시스템의 자주성과 신뢰성 확보 측면에서 중요한 개선 과제로 남아 있다.

기상청이 현업으로 생산하는 1개월·3개월 기후전망은 모두 GloSea6 기반 전지구 계절예측시스템을 통해 산출된다. 현업 예측 체계는 예측 기간에 따라 단기 계절예측(약 72일)과 확장 계절예측(최대 240일) 두 가지로 구분된다. (1)단기 계절예측(72일)은 매일 00 UTC 기준으로 초기화되며, 시간지연 앙상블 기법을 활용하여 7개의 연속된 날짜를 초기일로 사용한다. 각 초기일마다 4개의 앙상블 멤버를 생성하여 총 28멤버(7일×4멤버) 구성으로 운영된다. 이는 1개월 및 3개월 기후전망의 기초 자료로 활용된다. (2)확장 계절예측(240일)은 보다 장기적인 기후전망을 위해 21일 간격으로 초기일을 설정하며, 각 초기일 마다 2개의 앙상블 멤버를 생성한다. 1년간 약 17~18개 초기일이 설정되어 총 42멤버(21개 초기일×2멤버) 규모로 운영되며, 이는 계절 내 변동성 및 중장기 기후전망에 활용된다.

3. 예측 산출물 및 서비스 구조

현행 기후예측시스템은 전지구 예측자료, 한반도 및 동아시아 영역 평균 자료, 1개월·3개월 기후전망 등을 주요 산출물로 생산한다. 이러한 예측정보는 기상청 내부에서 장기전망 및 기후감시 담당 예보관들이 분석·가공하여 국내 1개월·3개월 전망문과

기후감시 보고서 형태로 발표된다. 가공된 예측정보는 국내 관계기관(환경부, 농림축산식품부, 수자원공사, 전력거래소 등)에 제공되며, 국제적으로는 WMO GPC Seoul 공식 제품으로 전 세계 기상기관과 공유된다. 그러나 현재 체계는 부문별 맞춤형 서비스 측면에서 한계를 지닌다. 전력, 수자원, 보험, 지자체 등 최종 사용자가 실제 필요로 하는 부문별 기후지수(댐 저수율 전망, 냉방도일, 작황지수, 질병 발생 위험도 등)로 직접 변환·제공되는 경우는 여전히 제한적이다. 대부분의 사용기관은 기상청이 제공하는 범용 예측자료를 받은 후 자체적으로 후처리 및 응용 작업을 수행해야 하는 구조이며, 이는 예측정보의 실용성과 활용도를 제약하는 요인으로 작용한다.

4. 현행 시스템의 구조적·기술적 한계

현행 기후예측시스템은 여러 구조적·기술적 한계를 안고 있다. 가장 근본적인 문제는 해의 모델 및 자료에 대한 높은 의존도와 결합 자료동화(Coupled Data Assimilation) 기술의 부재이다. 앞서 언급한 바와 같이 해양·해빙 초기장을 UKMO에 전적으로 의존하고 있으며, 대기-해양 결합 자료동화 체계를 독자적으로 운영하지 못하고 있다. 이는 한반도 주변 해역의 정밀한 해양 상태 반영과 예측 성능 개선에 근본적인 제약으로 작용한다. 또한 과거기후 재현(Hindcast) 기간 및 앙상블 규모의 한계도 지적된다. 현재 24년(1993~2016년) 규모의 Hindcast는 통계적 신뢰도 확보와 극한기후 사례 확보 측면에서 불충분하며, 앙상블 멤버 수 역시 예측 불확실성을 충분히 표현하기에는 제한적이다. 나아가 근미래(수년~10년) 기후예측의 공백은 정책 수립과 장기 인프라 계획 측면에서 중요한 문제이다. 현재 시스템은 최대 8개월(240일) 예측에 그치고 있어, 수년 단위 기후 변동성(예: 엘니뇨 남방진동(El Niño-Southern Oscillation, ENSO) 다년 주기, 북극 해빙 변화 등)을 반영한 중장기 전망 제공이 불가능하다. 이러한 한계들은 국가기후예측시스템의 자립성과 실용성 확보를 위해 반드시 해결되어야 할 핵심 과제이다.

Ⅲ 차세대 국가기후예측시스템의 구축 방향

차세대 기후예측시스템의 기술적 세부사항은 관련 선행 연구 및 계획에서 충분히 논의된 바 있으므로, 여기서는 핵심 방향만 언급하고자 한다. 새로운 시스템은 기존 계절예측 중심의 GloSea 기반 구조에서 탈피하여, 근미래(수개월~수십 년) 기후변화를 예측하고 리스크 기반 의사결정을 지원할 수 있는 독자적 지구시스템 예측 플랫폼으로 구축되어야 한다. 핵심 개선 방향은 다음 네 가지로 요약된다.

- 1) 지구시스템 모델로의 확장: 예측 대상을 기존 대기-해양 결합 시스템에서 빙권, 지면, 생지화학(Biogeochemical Cycle), 탄소순환, 에어로졸 상호작용을 포함한 완전한 지구시스템(Full Earth System)으로 확장해야 한다. 이는 동아시아 몬순, 북극진동, 해양열저장 등 복잡한 기후 연결 메커니즘을 더욱 정확히 재현하며, 기온·강수 예측을 넘어 탄소 흡수량, 생태계 반응, 수문 순환 변화까지 통합적으로 전망할 수 있게 한다.
- 2) 결합 자료동화 체계 고도화: 예측 정확도의 핵심인 결합 자료동화 체계를 구축해야 한다. 대기-해양-빙권-지면 관측자료를 동시에 최적화하여 초기조건 불확실성을 최소화하는 이 기술은 ENSO, 해수면 온도, 극한 강수 등 예측 난이도가 높은 요소의 정확도 향상에 직접 기여한다. 이를 위해 장기 해양 관측망(Argo 등) 확대, 위성 관측 융합, 초고해상도 분석장 생산 체계 구축이 필수적이다.
- 3) 확률 기반 예측 체계 도입: 기존의 단일 시나리오 예측에서 벗어나 확률 기반(Probabilistic) 미래 전망 체계를 갖춰야 한다. 생성형 AI 모델(생성적 적대 신경망(Generative Adversarial Network, GAN), 확산 모델(Diffusion Model) 등)과 물리 기반 앙상블 예측을 결합하면 수백~수천 개의 가능한 미래 시나리오를 생성할 수 있으며, 극한 사건 발생 확률, 상위 5% 위험 지표 등 정책 의사결정에 직접 활용 가능한 정보를 제공할 수 있다.
- 4) 부문별 맞춤형 기후서비스 체계 구축: 기후예측 결과는 단순한 기상 격자 자료 제공 수준을 넘어 산업 적용형 의사결정 지원 정보로 전환되어야 한다. 전력 수급 부하 지수, 농업 작황 전망, 수자원 저수율 예측, 보험 리스크 프리미엄 산출 등 부문별 기후지수(Climate Index)를 직접 생산·배포하는 체계가 확립될 때, 비로소 기후예측시스템이 실질적인 ‘국가 기후 인프라’로 기능할 수 있다.

IV AI 기반 기후예측 기술 및 하이브리드 시스템의 가치

1. 물리-AI 융합 기후예측시스템의 필요성

기존 기후예측은 주로 전지구 기후모델(Global Climate Model, GCM)에 기반하며, 기후를 지배하는 다양한 물리·화학·수학 법칙에 근거한 예측 일관성과 과학적 신뢰성을 제공한다. 그러나 이러한 물리 기반 모델은 막대한 계산 비용으로 인한 공간 해상도 제약, 수십 년 단위 장기예측의 불확실성 증가, 극한 사건 재현 능력 부족 등 구조적 한계를 동시에 지니고 있다. 최근 2010년대 중반 이후 딥러닝과 생성형 AI 기술이 급격히 발달하면서, 관측자료·재분석 자료·수치예측자료를 통합 학습하는 AI 기반 기후예측 모델이 속속 등장하고 있다. 이러한 AI 모델은 물리 모델 대비 수백~수천 배 빠른 연산 속도, 극한 사건의 확률적 재현 능력, 고해상도 다운스케일링 가능성 등에서 강점을 보인다. 따라서 물리 모델의 과학적 일관성과 AI 모델의 계산 효율성 및 패턴 학습 능력을 결합한 ‘물리-AI 융합(Hybrid) 기후예측시스템’이 차세대 국가예측체계의 핵심 기술 방향으로 주목받고 있다. 이는 물리 모델로 장기 기후시나리오를 생성하고, AI 모델로 고해상도 극한 사건 확률 분포를 보강하는 등 상호 보완적 구조를 통해 예측 정확도와 실용성을 동시에 향상시킬 수 있다.

2. AI 기반 기후예측 기술 적용 및 하이브리드 방식의 장점

표 1에서 보듯이 AI 모델은 단독으로도 예측이 가능하지만, 물리적 일관성 보장이 취약하다는 한계를 지닌다. 따라서 실제 현업 체계에서는 AI를 단독으로 운영하기보다는, 물리 모델과 결합하여 각 단계별 목적에 맞게 활용하는 물리-AI 융합(하이브리드) 방식이 핵심 방향으로 채택되고 있다(표 2).

표 1. AI 기술의 다양한 활용에 대한 설명

기술 단계	설명	대표 모델/기법
AI 후보정 (Bias Correction)	수치모델 편향 제거 및 오차 축소	CNN, RF, Transformer based bias-corrector
AI 다운스케일링	50~100km → 5~10km 해상도 향상	SR3, ESRGAN, SR-CNN
AI 확률/생성 예측	미래 상태를 확률분포 형태로 생성	Diffusion, GAN, Flow-based AI
AI 직접예측	수치모델 없이 AI만으로 미래장을 생성	FourCastNet, GraphCast, Pangu-Weather

표 2. AI단독 및 하이브리드 시스템의 장·단점 비교

구분	기존 물리 모델 단독	AI 단독	하이브리드 시스템
물리 일관성	매우 높음	낮음(보완 가능)	높음
극한 이벤트(꼬리분포)	약함	강함	최대성능
계산 효율성	비용 매우 큼	매우 빠름	실시간 구현 가능
장기~근미래 예측	한계 존재	자료기반 확장 가능	정확도 개선 기대
운영 위험	안정적	불확실성 존재	물리 기반 안정성 유지

- 1) 물리적 신뢰성과 계산 효율성의 동시 확보: 물리-AI 융합 시스템은 수치모델의 물리적 일관성과 AI의 계산 효율성·적응력을 동시에 활용할 수 있다는 점에서 핵심 강점을 지닌다. 기존 GCM 기반 예측은 물리 법칙 준수와 장기 일관성이 우수하지만, 막대한 계산 비용으로 인해 고해상도 확장과 다수 시나리오 생성에 제약이 크다. 반면 AI 모델은 방대한 관측·재분석 자료를 학습하여 빠르고 반복 가능한 예측을 수행하지만, 물리 법칙이 명시적으로 내재되지 않아 예측 안정성과 과학적 해석 가능성이 제한적이다. 두 체계를 결합하면 물리 모델이 제공하는 과학적 일관성을 기반으로 AI가 고해상도 보정, 극한 사건 확률 분포 생성, 신속한 다중 시나리오 산출 등을 담당하는 상호 보완 구조가 형성된다. 이를 통해 예측 정확도, 해석 가능성, 운영 비용 측면에서 최적화된 국가 기후예측 체계를 구축할 수 있다.
- 2) 극한 사건의 확률적 예측 능력 혁신: 융합 시스템은 극한 사건의 꼬리 분포(Tail Distribution) 예측 능력을 획기적으로 개선할 수 있다. GAN, Diffusion Model 등 생성형 AI는 수천 개의 가능한 미래 시나리오를 생성할 수 있으며, 이는 단일 시나리오 예측이 제공하지 못하는 극한 사건 발생 확률, 예상 피해 규모, 공간적 분포 패턴 등 정책 의사결정에 필수적인 위험 기반 정보를 제공한다. 특히 폭염, 집중호우, 가뭄, 태풍 경로 급변 등 고도의 비선형 극한 현상에 대해, 물리 모델의 체계적 편향을 AI가 학습 기반으로 보정하고 확률 분포를 생성함으로써, 기존 체계 대비 위험 탐지 정확도와 신뢰구간 산출 능력이 크게 향상된다.
- 3) 운영 효율성과 실시간 서비스 혁신: 융합 예측 체계는 운영 비용과 계산 효율성 측면에서 혁신적 개선을 가져온다. 물리 모델로 전지구 고해상도 예측을 다회 반복 수행하려면 슈퍼컴퓨터(High-Performance Computing, HPC) 운영 비용이 기하급수적으로 증가하지만, AI는 학습 완료 후 추론 단계의 계산 비용이 극히 낮아 수백~수천 회 확률 시뮬레이션을 실시간에 가깝게 수행할 수 있다. 이는 기후재난 대응, 수자원 운영, 전력 부하 예측 등 시의성과 연속성이 중요한 분야에서 특히

유효하며, 향후 자동화된 실시간 기후정보 서비스 체계 구축의 기술적 기반이 된다. 물리 모델이 주기적으로 기준 시나리오를 생성하고, AI가 사용자 요구에 따라 즉시 맞춤형 예측을 제공하는 하이브리드 운영 구조는 국가기후서비스의 접근성과 활용도를 비약적으로 높일 수 있다.

3. 하이브리드 시스템의 다양한 적용 가능성

- 1) 고해상도 편향 보정 및 다운스케일링: 기상·기후예측의 후처리 단계에서 AI 기반 편향 보정과 다운스케일링이 효과적으로 적용될 수 있다. GCM이 생산한 낮은 해상도의 예측자료를 AI 모델이 수 킬로미터 정도의 초고해상도로 상세화하면, 도시 홍수, 하천 유량, 산불 위험 지수 등 지역 단위 세부 대응 정보를 확보할 수 있다. 동시에 물리 모델의 계통적 오차를 관측자료 기반 학습을 통해 보정하여 실제 관측장에 가까운 예측장으로 변환할 수 있다. 이러한 AI 기반 후처리는 단기예보뿐만 아니라 계절예측 및 수년 단위 기후전망에서도 활용 가능하며, 후처리 기반 하이브리드 구조의 가장 직접적이고 실용적인 적용 형태이다.
- 2) 확률 예측 및 다중 미래 시나리오 생성: 확률 예측 및 다중 미래 시나리오 생성 분야에서도 융합 방식은 매우 효과적이다. 물리 모델이 제공하는 기본 예측 흐름에 AI 기반 확률 생성 모델을 결합하면, 단일 미래 시나리오가 아닌 수백~수천 개의 확률적 전개 경로를 산출할 수 있다. 이를 통해 상위 1~5% 극한 기후 사건에 대한 위험도 기반 정책 의사결정 지표를 생산할 수 있다. 구체적으로 태풍 상륙 확률 변화, 폭염 지속 일수의 95% 신뢰구간, 댐 저수율 임계점 도달 확률, 전력 수요 급증 가능성 등의 정량적 지표가 생성 가능해지며, 이는 보험·전력·농업·수자원 부문에서 즉시 활용 가능한 형태로 제공될 수 있다.
- 3) 근미래 기후예측(1~30년)의 불확실성 완화: AI 융합 시스템은 근미래(1~30년) 기후예측, 즉 데카달 예측(Decadal Prediction) 영역에서도 중요한 기여를 할 수 있다. 데카달 예측은 자연적 기후 변동성(내부 변동성)과 인위적 온실가스 배출(외부 강제력)이 혼합된 복합 영역으로, 기존 GCM의 예측 불확실성이 급격히 증가하는 구간이다. 그러나 관측자료 기반 학습을 수행한 AI는 장기 기후 모드(ENSO, 태평양 10년 진동(Pacific Decadal Oscillation, PDO), 대서양 자오면 순환(Atlantic meridional overturning circulation, AMOC) 등)의 변동 경향을 통계적으로 학습하여, 미래 상태를 확률적으로 추론할 수 있다. 물리 모델의 기본 예측 + AI 기반 편향 보정 및 확률 분포 생성 구조는 근미래 기후전망의 기술적 한계를 실질적으로 완화하고, 정책 수립에 필요한 신뢰구간을 제공할 수 있는 핵심 접근법이다.

V 10개년 시스템 구축 로드맵

향후 10년간의 국가기후예측시스템 구축은 ①기반 인프라 확립, ②기술 통합 및 확률 예측 고도화, 그리고 ③산업·정책 활용 체계 확장이라는 3단계 전략으로 추진되어야 한다.

1) 초기 단계(1~3년차): 독자적 예측 기반 구축

초기 단계에서는 전지구 및 동아시아 대상 지구시스템 모델 기반 프레임워크 구축과 관측·재분석 자료 체계 정비를 추진한다. 특히 해양·빙권 초기 자료의 독자적 확보 체계를 마련하고, 결합 자료동화 초기 버전을 구현하여 기초 예측 역량을 확립하는 것이 핵심이다. 이 단계에서는 기존 GloSea 기반 예측시스템과 병행 운영하면서 점진적으로 독립성을 확보하고, 24년 규모의 과거기후 재현(Hindcast) 자료를 확장하여 통계적 신뢰도를 강화한다. 핵심 산출물은 독자 지구시스템 모델 기반 시범 예측 체계와 해양 자료동화 시스템 1차 버전이다.

2) 중기 단계(4~7년차): 예측 성능 고도화 및 확률 예측 체계 구축

중기 단계에서는 예측 성능 향상을 위한 결합 자료동화 시스템 고도화, AI 기반 후처리·다운스케일링 체계의 정식 현업화, 생성형 AI (GAN / Diffusion) 기반 확률 예측 및 다중 미래 시나리오 생성 엔진 개발이 핵심 과제이다. 이를 통해 단일값 예측이 아닌 위험 확률 중심의 근미래 전망(Probabilistic Climate Outlook)을 제공할 수 있으며, 기온·강수·극한 지수뿐 아니라 ENSO, 해양 열속 등 기후 모드 기반 예측도 정량화 가능해진다. 또한 510km 고해상도 지역 기후예측정보를 정례 생산하여 지자체 및 산업계 수요에 대응한다. 핵심 산출물은 확률 기반 계절~수년 예측시스템과 고해상도 지역 기후전망 자료이다.

3) 장기 단계(8~10년차): 의사결정 지원형 기후서비스 플랫폼 구축

장기 단계에서는 시스템을 산업 수요 중심의 의사결정 지원 기후서비스 플랫폼으로 확장한다. 전력 수급 지수, 농업 작황 전망, 수자원 저수율 및 홍수 위험도, 보험 산업 극단 위험(Tail Risk), 국토·인프라 설계 기준 등을 자동 산출하는 부문별 기후 응용 지수 생산 체계를 확립하고 실시간 운영한다. 궁극적으로는 물리-AI 융합 기반 지구시스템 기후예측센터를 구축하여, 근미래(1~30년) 리스크 기반 국가기후전략 수립과 적응 정책 이행의 핵심 과학 인프라로 발전시키는 것이 최종 목표이다.

VI 다양한 활용

첫째, 전력·에너지 부문: AI 기반 기후예측은 전력 수급 안정성과 가격 변동성 대응에 핵심적이다. 기온과 일사량 전망은 냉난방 부하 변화 및 전력도매가격(System Marginal Price, SMP) 변동과 직결되며, 월~계절 단위 전력 수요 지수를 통해 발전량 계획, 계통 안정성 확보, 피크 대응을 사전 관리할 수 있다. 특히 재생에너지 비중 증가에 따라 예측 기반 운영은 필수 기능이 되고 있다.

둘째, 농업·식량 부문: 작황 생산량은 기온·강수·토양 수분에 직접 영향을 받으며, 계절~연 단위 예측을 통해 수급 조절, 수입 계획, 재고 최적화가 가능하다. AI 기반 확률 시나리오(기뭄 확률 20%, 폭염 지속 확률 10% 등)는 파종 시기 조정, 취약 작물 선정, 비축 전략 등 사전 대응형 농식품 정책 수립을 지원한다.

셋째, 수자원·홍수 관리 부문: AI 다운스케일링을 통해 5~10km 고해상도 강우·유출 예측이 가능해지면, 특정 지역의 홍수 위험을 사전 파악하여 댐 방류/취수 조절/하천 시설 운영을 실시간으로 수행할 수 있다. 이는 집중호우·태풍 피해 비용을 절감하고 도시 인프라 및 지자체 방재 정책을 근본적으로 강화한다.

넷째, 금융·보험 부문: 보험사는 기후재해 청구 리스크를 기반으로 보험료를 산정하는데, AI 확률 예측이 제공하는 상위 1~5% 극한 확률은 보험료 책정, 재보험 구조 설계, 기후 채권 발행의 핵심 기준이 된다. 이는 재해보험 시스템의 지속가능성을 높이고 ESG (Environmental, Social, Governance) 채권·기후금융 상품 설계와 직접 연결된다.

VII 결론

본 글에서는 기존 GCM 기반 기후예측 체계가 지닌 구조적 제약(계산 비용, 극한 예측 한계, 장기 예측 불확실성, 맞춤형 활용 제약)을 극복하고, 미래 국가 기후 리스크 대응 역량을 강화하기 위한 차세대 예측시스템의 방향성을 제시하고자 하였다. 핵심 전략은 물리 모델의 과학적 일관성과 AI의 확률 생성·고해상도·계산 효율성을 결합한 융합 구조를 통해, 단일 예측 중심에서 미래 위험 분포 기반 의사결정 체계로 전환하는 것이다. 이는 “어떤 미래가 올 것인가”가 아니라 “어떤 미래들이 얼마나 확률적으로 가능한가”를 제시하여, 정책 수립자와 산업계가 불확실성을 정량적으로 관리할 수 있게 한다. 향후 10년간 단계적 구축 로드맵에 따라 (1)지구시스템 모델 확장, (2)결합 자료동화 고도화, (3)AI 확률 예측 플랫폼 완성, (4)부문별 기후 지수 정제화를 달성할 경우, 기후예측은 단순 기상정보 제공을 넘어 국가 인프라·산업 전략의 핵심 운영 체계로 기능하게 된다. 미래의 기후정보는 더 이상 ‘예보’가 아니라, 전력·농업·수자원·보험·도시계획을 실시간으로 조정하는 의사결정 기준 신호가 될 것이다. 물리-AI 융합 기후예측 체계는 기후 변동성 증가 시대의 필수 대응 전략이다. 이는 기후위기 관리 비용을 최소화하고, 국가의 장기 기후 적응 역량과 산업 경쟁력을 확보하는 가장 현실적이고 효과적인 기술 혁신 경로이며, 더 이상 선택이 아닌 생존을 위한 필수 인프라이다.

참고문헌

Gallagher Re, 2024: Natural Catastrophe and Climate Report: 2024. accessed Dec 1, 2025, <https://www.ajg.com/gallagherre/news-and-insights/gallagherre-natural-catastrophe-and-climate-report-2024/>.

ICC (International Chamber of Commerce), 2024: The economic cost of extreme weather events. accessed Dec 1, 2025, <https://iccwbo.org/news-publications/policies-reports/new-report-extreme-weather-events-cost-economy-2-trillion-over-the-last-decade/>.

세계 주요국의 기후예측시스템 개발 동향

김혜미 이화여자대학 교수 hyemi.kim@ewha.ac.kr

- Ⅰ 국외 주요 기관별 기후예측시스템 개발 동향
- Ⅱ 기후예측시스템 핵심 기반 기술 개발 동향
- Ⅲ 근미래 예측(Decadal Prediction) 동향

전 세계적으로 기후변화가 가속화됨에 따라 단순한 물리 모델의 결합을 넘어 대기, 해양, 해빙, 지면을 아우르는 '이음새 없는(Seamless) 예측 시스템'과 '고해상도 지구시스템모델'로의 기술적 진화가 급격히 이루어지고 있다. 유럽중기예보센터(ECMWF), 영국 기상청(UKMO), 미국 해양대기청(NOAA) 등 기상 선진국들은 예측 성능의 한계를 돌파하기 위해 결합 초기화(Coupled Initialization) 기술을 고도화하고 있으며, 나아가 10년 후를 내다보는 근미래(Decadal) 예측까지 현업 영역을 확장하고 있는 추세다. 특히 미국의 엑사스케일(Exa-scale) 컴퓨팅 도입과 커뮤니티 모델 활성화 사례는 우리에게 시사하는 바가 크다. 본 보고서는 각국의 최신 기후예측시스템 개발 동향과 핵심 기반 기술을 분석하였다.

I 국외 주요 기관별 기후예측시스템 개발 동향

대부분의 국외 기후모델은 중장기 미래 예측의 불확실성을 줄이기 위해 결합모델의 고도화를 추진하고 있으며, 현업 모델과 연구용 커뮤니티 모델이 상호 발전하는 형태를 띠고 있다. 유럽중기예보센터(European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF)는 통합형 예보 시스템(Integrated Forecasting System, IFS)을 기반으로 한 최신 버전인 SEAS5 (Seasonal Forecasting System 5)를 운영하고 있다(표 1). 이 시스템의 수평해상도는 대기 모델이 약 32km, 해양 모델이 약 25km인 고해상도로 구동되며, 이전 버전인 System 4에 비해 엘니뇨 예측 능력 등이 개선된 것으로 보고되고 있다. ECMWF는 고해상도 모델의 현업화를 수행함과 동시에, 중기 예보부터 13개월 이상의 장기 예보까지 아우르는 포괄적인 예측 체계를 구축하여 운영 중이다.

표 1. ECMWF SEA5와 SEA6 비교

Key Characteristics	SEA5	SEA6 (planned)
Status	Operational since Nov 2017	Operational expected in 2025
Atmosphere	Cy43r1, Tco319 (~32km), L91 (top 0.01hPa, ~80km)	Cy49r2, Tco319 (~32km), L137 (top 0.01hPa, ~80km)
Ocean/Sea Ice	ORCA025/NEMO3.4 LIM2	eORCA025 NEMO4-SI3
Ensemble Size	51 members	101 members, twice monthly
Lead Time	Up to 7 months (13 months quarterly)	Up to 7 months monthly and extended ENSO out to 24 months

영국 기상청(UK Met Office, UKMO)은 중장기 예측에 GloSea6 (Global Seasonal Forecasting System version 6) 시스템을 사용하고 있다. GloSea6는 이전 모델인 GloSea5 대비 해상도의 변화는 없으나, 대기와 해양 등 각 요소 모델의 물리 과정을 업그레이드하고 앙상블 멤버를 증대하여 예측의 신뢰도를 높였다. 특히 영국은 기상 모형과 기후 모형을 동일한 관리 체계에서 운영하는 ‘이음새 없는(Seamless) 예측’ 시스템을 갖추고 있으며, 향후 차세대 전구 예측 시스템인 LFRic 개발을 통해 기술적 세대교체를 추진하고 있다.

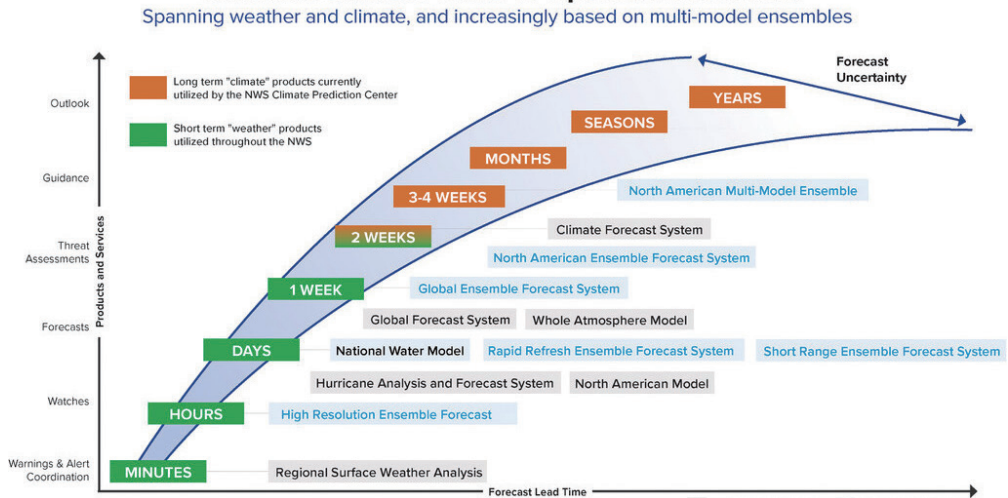


그림 1. NOAA의 이음새 없는 현업화 모델 구축 계획(Uccellini et al., 2022)

미국은 기관별로 특화된 목적을 가지고 협력 및 독자 개발을 병행하는 전략을 취하고 있다. 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)은 2019년부터 현업 수치예보에서 활용 중인 FV3 (Finite-Volume Cubed-Sphere Dynamical Core)를 차세대 기후예보모형(Climate Forecasting System version2, CFSv2)에 도입하여 예보 체계를 일원화하고 있으며, 커뮤니티와의 협업을 위한 Common Community Physics Package (CCPP) 프레임워크를 구축하여 최신 기술의 현업화를 가속하고 있다(그림 1). 에너지부(Department of Energy, DOE)는 Exascale 슈퍼컴퓨터를 활용하여 대류 모의가 가능한 키로미터 해상도의 Energy Exascale Earth System Model (E3SM)을 개발 중이다(그림 2). 또한 국립대기연구센터(National Center for Atmospheric Research, NCAR)는 커뮤니티 모델인 Community Earth System Model (CESM) 지원을 강화하고 NOAA와 협력하여 통합예보 물리과정(Unified Forecast System, UFS) 프로젝트를 진행함으로써 학계와 현업의 공동 개발을 추진하고 있다.

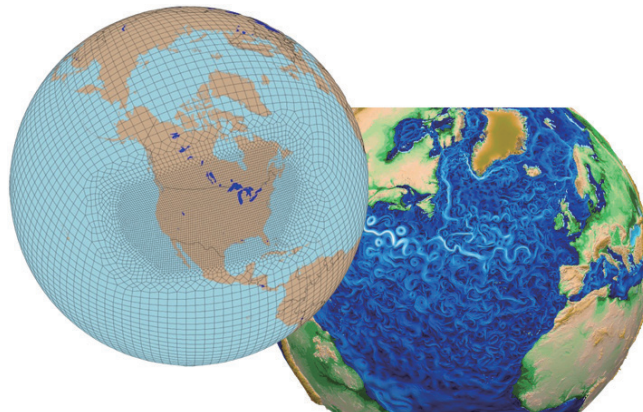


그림 2. E3SM의 가변격자 활용 및 고해상도 해양 모형 활용 사례

일본 기상청(Japan Meteorological Agency, JMA)은 JMA/MRI-CPS3 (Coupled Prediction System version 3)를 기후예측시스템으로 운영하고 있다. 이 시스템은 대기 약 55km, 해양 약 25km의 해상도를 가지며, 고도화된 초기화 기법을 통해 예측의 정밀도를 높이고 있다. 독일 기상청(Deutscher Wetterdienst, DWD)은 예측 주기에 따라 효율적인 이원화 전략을 채택하고 있다. 계절내 예측은 자체 모델 대신 ECMWF 예측자료를 활용하여 정보를 생산하는 반면, 계절 예보는 막스플랑크 연구소에서 개발한 MPI-ESM-HR (Max Planck Institute-Earth System Model-High Resolution)모델을 기반으로 한 자체 시스템(Global Coupled Forecast System, GCFS)을 운영하여 독자적인 예측 역량을 유지하고 있다(표 2).

표 2. 세계 주요국 기후예측시스템 기술 현황 비교

예측기관	기후예측시스템	모델 (대기, 해양, 지면, 해빙)	해상도	앙상블 초기 섭동
Met Office, UK	GloSea6-GC3.2	UM-GA7.2, NEMO3.6, JULES-GL8.0, CICE5.1.2	N216L85 (~60km)	Lagged Initialized Stochastic Kinetic Energy Backscatter (SKEB)
ECMWF, UK	SEAS5	IFS-Cycle-49r1, NEMO3.4, LIM2	Tco319L137 (~32km)	SKEB, Stochastic Perturbed Physics Tendencies (SPPT)
BoM, Australia	ACCESS-S2	UM-GA6.0, NEMO3.4, JULES-GL6.0, CICE3.1	N216L85 (~60km)	Coupled Bred Vectors
NASA, USA	GEOS-S2S-3	GMAO NWP, MOM5, CICE4.0	~0.5°x0.5°, 72 levels	Lagged Initialized, SPPT
NCEP, USA	CFSv2	GFS, MOM4p0, Noah-LSM2.7.1	T126 (~100km)	Lagged Initialized
JMA, Japan	MRI-CPS3	GSM2003-iSiB, MRI.COMv4.6	TL319L100 (~55km)	Breeding of Growing Mode (BGM), SSPT, Lagged Initialized

II 기후예측시스템 핵심 기반 기술 개발 동향

1. 결합 자료동화 시스템

자료동화(Data Assimilation, DA) 및 초기화란 다양한 관측자료(위성, 레이더, 지상 관측 등)를 수치 모델과 결합하여, 예측 시작 시점의 대기 및 해양 상태를 가장 현실에 가깝게 추정해 내는 기술을 말한다. 기상 및 기후 시스템은 카오스적인 성질을 가지고 있어 초기 조건의 미세한 오차가 시간이 지남에 따라 급격히 증폭되기 때문에, 초기화는 예측의

정확도를 결정짓는 필수적인 단계이다. 특히 기후예측에서는 대기뿐만 아니라 해양, 해빙, 지면 시스템 초기 상태의 정확성이 장기 예측 성능을 좌우한다.

각 지구시스템 구성 요소별로 최적화된 초기화 기법이 적용되고 있다. 대기 분야에서는 4차원 변분법(4D-Var¹⁾)이 표준으로 자리 잡았으나, 최근에는 강한 결합을 구현하기 위해 4차원 앙상블 변분법(4D-Ens-Var)이 새롭게 대두되고 있다. 해양 분야에서는 3차원 변분법(3D-Var)과 앙상블 칼만 필터(Ensemble Kalman Filter, EnKF)가 주로 사용되며, 온도와 염분뿐만 아니라 해류와 해수면 높이를 필수적으로 동화하고 있다. 해빙 초기화의 경우 대부분의 기관이 위성 기반의 해빙 농도 자료를 동화하고 있으나, 최근 영국 등 선진국에서는 해빙 두께까지 초기화하여 예측 성능을 높이는 연구를 진행 중이다. 지면 초기화는 토양수분의 정확도가 핵심인데, 위성 자료를 활용하여 주로 EnKF나 확대 칼만 필터(Extended Kalman Filter, EKF) 기법으로 동화하고 있다.

가장 핵심적인 기술 이슈는 이러한 개별 요소들을 통합하는 결합 자료동화(Coupled DA) 기술이다. 현재 대부분의 기관은 각 모델을 별도로 분석한 후 플럭스만 교환하는 약한 결합 방식을 사용하고 있으며, ECMWF는 현재 지면-대기, 파도-대기, 해양-대기에 관한 약한 결합 자료 동화 접근법을 사용하고 있다.

2. 과거기후 및 현재기후예측 운영체계 동향

과거기후예측(Hindcast)은 실시간 예측의 오차 보정과 성능 평가를 위해 필수적으로 수행된다.

- ECMWF는 실시간 예측 보정을 위한 '재예측(Reforecast)'을 운영한다. 1981년부터 2016년을 대상으로 매월 1일 25개 앙상블을 생성하며, 연간 예보(Annual Range Forecast) 보정을 위해 분기별로는 15개 멤버를 6개월 연장 예측한다. 대기 초기조건은 ERA-interim을 사용하며, 일관성을 위해 2015년 기준의 앙상블 자료동화(EDA) 섭동을 적용한다.
- UKMO는 1993년부터 2016년을 대상으로, 초기장을 제외하면 현재기후예측과 동일한 방식으로 수행한다. 매월 4회 고정된 날짜에 7개 멤버로 예측하며, 시간지연 방식과 추계물리 기법을 적용한다.
- BoM (Bureau of Meteorology, 호주 기상청)은 38년(1981~2018년)이라는 가장 긴 과거기후 자료를 보유하고 있다. ACCESS-S2 도입 후 앙상블 수는 줄이고 예측 시작일을 늘리는 전략을 통해 전산 비용을 약 27% 절감했다. 현업 보정용과 성능 향상용을 구분해 운영하며, 시간지연 방식을 통해 앙상블 효과를 극대화한다.
- JMA는 1991년부터 2020년을 대상으로 매달 2회, 각 5개 멤버씩 총 10개 멤버를 운영한다.
- NCEP (National Centers for Environmental Prediction, 미국 국립환경예측센터)는 1982년부터

1) Var: Variational Data Assimilation(변분자료동화)

2010년을 대상으로 매일 4회 수행하는데, 5일 간격으로 9개월 장기 예측을 하고 그 외에는 계절(123일) 및 월(45일) 예측을 수행한다.

각국은 최신 모델과 앙상블 기술을 통해 현업 예측 정확도를 높이고 있다(표 3). ECMWF는 2017년부터 SEAS5를 현업 운영 중이다. 매월 1일 51개 앙상블로 7개월 예측을 수행하며, 분기별로는 13개월까지 연장한다. 앙상블은 초기조건 섭동과 추계물리(Stochastically Perturbed Parameterization Tendency Scheme Version 3, SPPT3)를 조합해 생성한다. UKMO는 GloSea6를 통해 이음새 없는 예측 체계를 구축했다. 매일 8개 멤버로 64일간 예측하고, 이 중 4개는 216일 장기 전망으로 연장한다. BoM은 ACCESS-S2를 운영하며 매일 11개(기후전망), 22개(다주예측) 멤버를 생성한다. 이를 며칠간 누적하여 각각 총 99개 멤버의 대규모 앙상블로 활용하는 것이 특징이다. JMA는 JMA/MRI-CPS3를 통해 매일 5개 앙상블 멤버로 예측한다. 대기섭동은 Bred vector, 해양섭동은 4DVAR를 이용하고, 시간지연과 초기섭동 조합으로 앙상블 예측이 수행된다. NCEP의 CFSv2는 하루 16회 예측을 실행한다. 9개월 장기 예측 4회, 계절 예측 3회, 45일 예측 9회로 구성되며, 실시간 현업 기후 자료동화시스템(Climate Data Assimilation System, CDAS)의 초기조건을 활용한다.

표 3. 주요 국가별 과거기후 및 현재기후예측 생산체계

국가	기관	과거기후생산	과거기후 생산 앙상블 생성기법	현재기후 생산	현재기후 생산 앙상블 생성기법
국내 외	기상청	1993~2016 (24년) 7개 앙상블 매달 1, 9, 17, 25일 시작	초기시간지연, 추계적 운동에너지 후방산란(SKEB2)	GloSea6 매일 8개 앙상블 72일 예측(4개 240일 예측) 예측목표 3주 전까지 총 21일 시간지연 사용	초기시간지연, 추계적 운동에너지 후방산란(SKEB2)
	E U ECMWF	1981~2016 (36년) 25개 앙상블 매달 1일 시작	EDA with SPPT	SEAS5(ECMWF IFS 43r1) 매월 1일 51개 앙상블 7개월 예측 이 중 2, 5, 8, 11월의 15개 앙상블은 13개월 예측	EDA with SPPT
	영 국 UKMO	1993~2016 (24년) 7개 앙상블 매달 1, 9, 17, 25일 시작	초기시간지연, 추계적 운동에너지 후방산란(SKEB2)	GloSea6 매일 8개 앙상블 64일 예측 이중 4개 앙상블 216일 예측 매주 84개 앙상블 6개월 예측	초기시간지연, 추계적 운동에너지 후방산란(SKEB2)
	호 주 BoM	1981~2018 (38년) 약 27개 앙상블 매달 1, 16일 시작	DA system	ACCESS-S2 매일 22개 앙상블 42일 예측 이중 11개 앙상블 217일 예측 (9일 연속 99개 앙상블)	DA system
	일 본 JMA	1991~2020 (30년) 10개 앙상블 매달 2번, 15일 간격으로 시작	초기시간지연	Seasonal Ensemble Prediction System (JMA/MRI-CPS3 system) 매일 5개 앙상블 7개월 예측	초기시간지연
	미 국 NCEP CPC	1982~2010 (29년) 24개 앙상블 매달 5일, 00, 06, 12, 18UTC 시작	초기시간지연	Climate Forecast System version 2 매일 9개 앙상블 45일 예측 3개 앙상블 계절 예측 4개 앙상블 9개월 예측	초기시간지연

3. 앙상블 생성 및 예측 기술

앙상블(Ensemble) 예측이란 단 하나의 결정론적 예측만을 수행하는 대신, 초기 조건이나 모델의 물리 과정에 미세한 변화(섭동)를 주어 여러 개의 예측 시나리오를 생산하는 기법을 의미한다. 지구 시스템은 본질적으로 불확실성을 내포하고 있어 단일 예측만으로는 미래의 가능한 상태를 모두 대변할 수 없다. 앙상블 기술은 이러한 불확실성을 정량화하여 발생 가능한 다양한 기상·기후시나리오의 확률 정보를 제공함으로써, 사용자가 리스크를 관리하고 의사결정을 내리는 데 필수적인 정보를 제공한다.

예측의 불확실성을 제어하기 위해 다양한 앙상블 기법이 혼용되고 있다. 가장 보편적인 방식은 초기시간 지연(Time-Lagged) 기법으로, 호주 기상청의 경우 앙상블 멤버 수를 줄이는 대신 예측 시작일을 확대하는 전략을 사용하기도 한다. 또한 모델 내부 물리 과정의 오차를 고려하기 위해 추계적 물리 과정(Stochastic Physics)이 필수적으로 사용된다. ECMWF의 SPPT 기법이나 추계적 운동에너지 후반산란(Stochastic Kinetic Energy Backscatter Scheme Version 2, SKEB2) 기법 등이 대표적이다(그림 3). 일부 기관에서는 짧은 기간 내에 집중적으로 앙상블 멤버를 생성하는 Burst 앙상블 기법을 통해 초기 불확실성을 포착하고 있다.

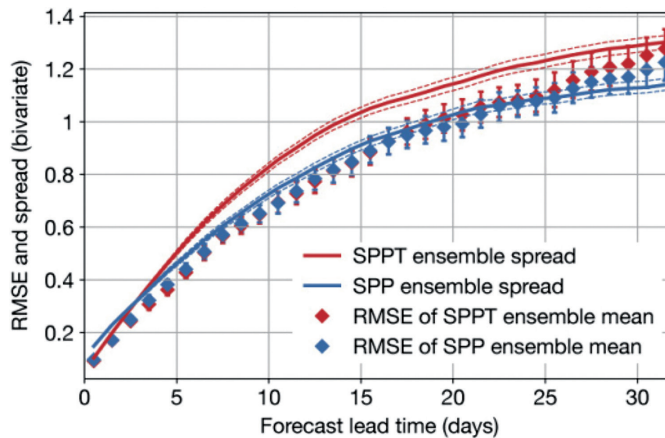


그림 3. 앙상블 섭동 방법에 따른 예측성(RMSE and spread) (Uccellini et al., 2022; Leutbecvher et al., 2024)

4. 사후 처리 및 검증

사후 처리 및 검증은 모델이 생산한 예측자료의 계통적 오차(Systematic Bias)를 보정하고, 그 결과가 실제 관측과 얼마나 일치하는지를 평가하는 과정을 말한다. 아무리 우수한 수치 모델이라도 물리 과정의 근사화 등으로 인해 필연적으로 고유의 오차를 가진다. 따라서 과거의 예측자료(Hindcast)를 기반으로 이러한 계통적 오차를 통계적으로 제거해야만 정확한 예측정보를 생산할 수 있다. 모델이 가진 오차를 수정하기 위해

과거기후(Hindcast) 자료를 기반으로 한 계통적 오차 보정이 수행된다. 예를 들어, 호주는 사분위-사분위 대조(Q-Q matching) 기법을 사용하여 강수량 등의 극값 분포를 정밀하게 보정한다.

예측 모델의 성능 검증은 현재 모델의 성능 수준을 진단하고 향후 개선 방향을 설정하는 나침반 역할을 한다. 성능 평가를 위해서는 편차상관계수(Anomaly Correlation Coefficient, ACC), 신뢰도 다이어그램, ROC 곡선, 브라이어 점수(Brier Skill Score, BSS) 등 다양한 통계적 지표가 복합적으로 활용되고 있다.

III 근미래 예측(Decadal Prediction) 동향

최근 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)와 세계기후연구프로그램(World Climate Research Programme, WCRP)의 주도로 1년에서 10년 규모를 내다보는 근미래 기후예측이 정례화되고 있다(그림 4). 이는 단순한 계절 예측을 넘어 인프라 건설이나 에너지 계획 등 국가 정책 결정에 실질적인 정보를 제공하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 10년 규모 기후예측 프로젝트(Decadal Climate Prediction Project, DCP)라는 표준 프로토콜이 마련되었으며, 매년 11월 1일을 기점으로 향후 10년을 예측하되 최소 10개 이상의 앙상블 멤버를 수행할 것을 권고하고 있다.



그림 4. 근미래 예측에 참여하는 기관들(Collier et al., 2022)

주요국의 대응 현황을 살펴보면, 영국은 Decade Prediction System (DePreSys)을 통해 1960년부터의 과거 재현 실험을 완료하였으며, 미국 NCAR는 40개의 대규모 앙상블을 이용한 방대한 데이터셋(Decadal Prediction Large Ensemble Project, DPLE)을 구축하였다. 스페인의 Blind Source Separation (BSC), 독일의 Modellierung und Vorhersage des Klima (MiKlip) 프로젝트, 호주의 Coupled Assimilation and Forecast Experiment (CAFE) 시스템 등도 각국의 주력 모델을 활용하여 DCPD 프로젝트에 적극적으로 참여하며 기술력을 축적하고 있다(표 4).

표 4. 주요 국가별 근미래(decadal) 예측 운영체계 비교

국가	기관	근미래예측자료 생산
스페인	BSC EC Earth consortium	EC-Earth3 모델: ECMWF IFS Cy36r4, NEMO 3.6, LIM3 1960-2019년 매년 11월 1일 시작 10년 10개 앙상블 (3D-기온장에 섭동 2개 x 해양과 해빙은 5개 자료동화 초기장)
영국	UK Met Office Hadley Centre (MOHC)	DePreSys4 모델: HadGEM3-GC3.1 이용 1960-2020년 매년 11월 1일 시작 10년 10개 앙상블 10 full-field data assimilating simulation.
이탈리아	Euro-Mediterranean Centre	CMCC-CM2-SR5 1960-2020년 매년 11월 1일 시작 10년 7개 앙상블
독일	DWD	MPI-ESM-LR 모델: ECHAM6/MPIOM 1960-2020년 매년 11월 1일 시작 10년 16개 앙상블 Full-field nudged atmos, ocn via EnKF
호주	CSIRO	CAFE (Climate Analysis Forecast Ensemble system) 1960-2020년 매년 11월 1일 시작 10년 10개 앙상블 호주 기후자료동화시스템 CAFE60 이용 대기, 해양, 해빙 자료화(EnKF-96개 앙상블)
미국	NCAR	Decadal Prediction Large Ensemble Project (DPLE) 모델: CESM 1954~2015년 매년 11월 1일 시작 122개월 40개 앙상블

세계 기후예측 기술의 흐름은 시스템의 통합(Seamless), 고해상도화, 그리고 초기화 기술의 고도화로 요약될 수 있다. 특히 ECMWF의 SEAS5와 영국의 GloSea6 사례는 시스템의 통합과 정교한 결합 초기화가 예측 성능 향상의 핵심 열쇠임을 증명하고 있다. 기상청은 이러한 국제 동향에 발맞춰 독자적인 결합 초기화 역량을 확보하고, 다가올 근미래 예측 서비스 시장을 선점하기 위한 선제적 투자를 단행해야 할 시점이다.

참고문헌

- Collier, M. A., O’Kane, T. J., Kitsios, V., and Sandery, P. A., 2022: CSIRO CAFE-60 submissions to the World Meteorological Organization operational decadal forecasts and the international multi-model data exchange. *J. South Hemisph. Earth Syst. Sci.*, 72, 52-57, <https://doi.org/10.1071/ES21024>.
- Leutbecher, M., Lang, S., Lock, S.-J., Roberts, C., and Tsiringakis, A., 2024: Improving the physical consistency of ensemble forecasts by using SPP in the IFS. *ECMWF Newsletter*, 181, 26-31, <https://doi.org/10.21957/mlz238dk1p>.
- Uccellini, L. W., Spinrad, R. W., Koch, D. M., McLean, C. N., and Lapenta, W. M., 2022: EPIC as a Catalyst for NOAA’s Future Earth Prediction System. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 103, E2246-E2264, <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0061.1>.

사용자를 위한 기후예측 서비스 방향

유진호 아시아-태평양경제협력체 기후센터 선임연구원 jhyoo@apcc21.org

- Ⅰ 서론
- Ⅱ 기후예측정보가 의사결정에 사용되기 위한 조건
- Ⅲ 해외 기후예측 서비스 발전을 위한 노력: 유럽을 중심으로
- Ⅳ 기후예측 서비스의 현실적 제약
- Ⅴ 결론 및 제언

기후예측정보의 활용은 기술적 성능뿐 아니라, 사용자의 신뢰, 사용자 요구 적합성과 정보 활용의 정당성이 확보되어야 한다. 이러한 속성을 바탕으로 기후예측 서비스 활성화를 위한 해외 주요 사례와 활동의 진화 과정과 현실적인 한계를 살펴보았다. 기후예측정보의 활용 촉진을 위해서는 서로 다른 지향점을 가진 다층적 서비스 구조가 필요하며, 데이터 접근성은 이를 가능하게 하는 핵심 기반이다. 새로운 국가기후예측모델 개발과 함께 데이터 개방성을 향상시키고, 지속적 파일럿 사업을 통해 기후예측정보 활용의 실증적 경험을 축적해야 한다.

I 서론

1982년 말 강력한 엘니뇨가 발생하기 직전까지, 엘니뇨가 발생할 것이라는 예측은 사실상 존재하지 않았다. 엘니뇨는 최전성기에 이르기 얼마 전에서야 관측자료를 통해 확인되었을 뿐이다. 이후 해양 관측망의 확대, 예측 모델의 꾸준한 개발과 개선을 거쳐, 40여 년이 지난 지금은 엘니뇨의 발생 여부에 대해 수개월 전부터 일정 수준의 신뢰도를 갖는 과학적 예측을 제시하는 것이 가능해졌다. 엘니뇨 예측의 발전은 전지구 기후예측의 토대를 이루었으며, 엘니뇨와 같은 주요 기후변동과 이를 구성하는 기후요소의 물리적 상호작용은 각 지역의 다음 계절에 예상되는 기온·강수의 경향성을 추정하는 기반이 되었다. 기후예측 모델은 여러 기후요소 사이의 물리적 상호작용을 재현하고 예측정보를 생산하는 과학적 기후예측의 핵심 도구이며, 지난 수십 년간 지속적인 발전을 이루어 왔다.

기후예측정보는 향후 수개월에서 수년에 걸쳐 예상되는 날씨의 특성을 바탕으로, 작물 재배나 에너지 수급 등 분야별 중장기 계획과 관련된 의사결정에 활용되기 위해 생산된다. 이러한 정보는 수요자의 실제 의사결정 과정에 통합될 때 비로소 가치를 가진다. 그럼에도 불구하고, 기후예측정보는 오랫동안 연구 커뮤니티와 기상 전문기관 내부에서 활용되는 기술적 자료로 인식되는 경향이 강했으며, 산업과 정책의 의사결정에는 제한적으로만 반영되는 경우가 많았다. 예측 결과의 불확실성과 적용 조건의 복잡성은 실무에서 이를 직접 활용하는 데 장애로 작용해 왔고, 많은 기관에서 기후예측은 여전히 ‘참고 자료’ 수준에 머무르는 것이 현실이다.

그러나, 기후예측을 ‘사용할 수 있는 정보’로 전환하려는 시도는 꾸준히 지속되고 있다. 기후변동성과 극한 기후 사건의 증가, 예측 기술과 데이터 접근성의 향상, 기후 관련 경제적 영향의 가시화에 따라, 기후예측을 정책·산업 의사결정의 입력 정보로 고려하려는 움직임이 확산되고 있다. 최근 연구(Lemoine and Kapnick, 2024)에 따르면 미국 해양대기청(National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA)의 엘니뇨 전망 발표 시점에 농산물 가격, 에너지 선물시장, 변동성 지수 등에서 의미 있는 가격 조정과 전략 변화가 관측된다(그림 1). 이는 기후예측정보가 실제 기후 현상이 발생하기 이전에 이미 위험 인식과 투자 행동에 영향을 미치는 ‘경제적 신호’로 기능하기 시작했음을 보여준다. 또한 인도주의 분야에서는 예측기반 재정대응(Forecast-based Financing)을 통해, 기후위험 발생 이전 단계에서 구호물자와 인력의 배치를 조정하여 재난 대응 활동 효율을 높이려는 시도가 이루어지고 있다.

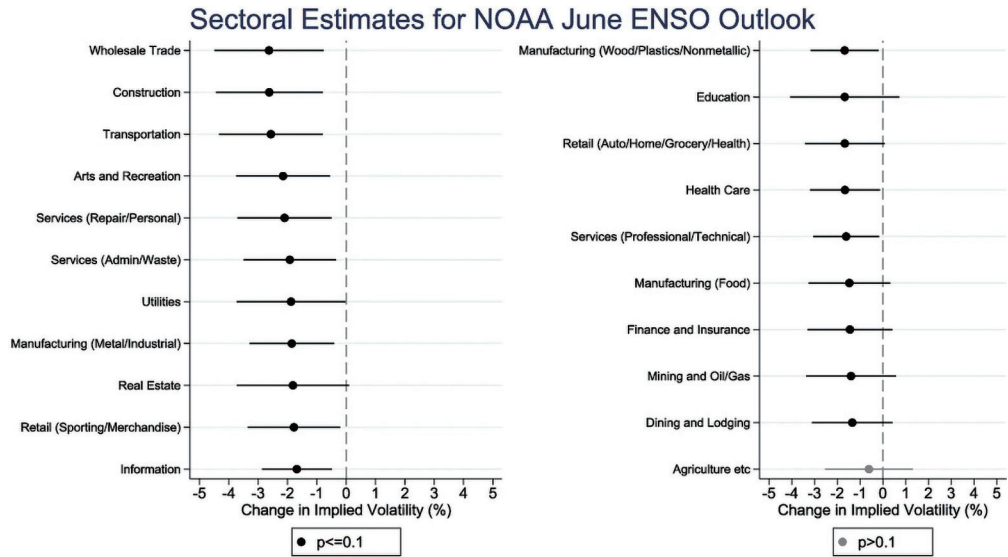


그림 1. NOAA의 6월 ENSO 전망에 따른 각 분야별 금융지표의 불확실성(volatility) 감소 추정치(Lemoine and Kapnick, 2024(Fig.2c))

이러한 활용은 아직 초기 단계이며 보편적이라 보기 어렵지만, 기후예측이 실제 의사결정 과정에 통합될 가능성을 보여주는 ‘시범적 사례’가 형성되고 있다는 점에서 의미가 크다. 새로운 국가기후예측모델의 개발을 추진하고 있는 지금, 보다 신뢰도 높은 기후예측정보를 생산하는 과학적 도구의 개발뿐 아니라, 모델에서 생산된 정보가 실제 정책과 의사결정에 어떻게 활용될 수 있을지에 대한 고민이 함께 이루어질 필요가 있다. 다시 말해, 기후예측 기술의 고도화와 더불어 ‘사용되는 예측’을 위한 서비스 설계와 방향을 동시에 검토하는 것이 중요하다.

II 기후예측정보가 의사결정에 활용되기 위한 조건

기후예측정보는 일기예보에 비해 훨씬 큰 불확실성을 가진다. 이는 기후예측이 일기 예보와 동일한 방식으로 수용·활용되기를 기대하기 어렵다는 것을 의미한다. 기후예측정보가 실제 의사결정에 활용되기 위해서는 예측 정확도 향상과 데이터 접근성 개선과 같은 기술적 기반이 필요하다. 그러나 기술적 기반이 충분하더라도, 예측정보가 의사결정 과정에 자동으로 통합되는 것은 아니다. Cash et al. (2003)은 과학기술 정보가 사회적·정책적 의사결정에 활용되는 데 필요한 조건으로 Credibility (신뢰성), Salience (관련성), Legitimacy (정당성)를 제시하였다. 이른바 CSL 구조는, 기후예측이 존재함에도 불구하고 실제 사용되지 않는 이유를 설명하고, 기후서비스를 설계할 때 고려해야 할 사용자 중심 요건을 구조적으로 정리하는데 유용한 틀을 제공한다. 즉, Credibility는 “예측을 믿을 만한가?”, Salience는 “이 정보가 내 일에 도움이 되는가?”, Legitimacy는 “이 정보를 근거로 결정해도 괜찮은가?”라는 질문에 각각 대응한다고 볼 수 있다.

1. Credibility: 예측을 신뢰할 수 있는가?

Credibility는 예측정보가 과학적으로 타당하고 신뢰할 수 있다고 받아들여지는 정도를 의미한다. 당연히게도 그 핵심 요소는 예측 정확도이며, 이는 사용자들이 예측의 품질을 판단하는 출발점이 된다. 다만, Credibility는 다음과 같은 요소를 통해 강화될 수 있다.

- 1) 성능 검증과 검증 지표 제공: 과거 예측의 성공·실패 사례를 포함한 성능 기록과 불확실성 범위가 공개될 때, 사용자는 예측의 한계를 이해하면서도 시스템 자체에 신뢰를 형성할 수 있다.
- 2) 일관성과 방법론적 투명성: 예측 모델, 근거 자료, 갱신 방식, 주요 가정 등이 명확히 설명되고 반복 가능한 방식으로 운영될 때 Credibility는 높아진다. 매년 같은 기준과 절차에 따라 예측이 생산·공개되는 것 자체가 신뢰의 기반이 된다.
- 3) 책임과 피드백 구조: 예측 결과에 대한 사후 분석과 사용자 피드백 반영 절차가 존재할 경우, 사용자는 예측이 ‘일회성 산출물’이 아니라 학습되는 서비스라는 인식을 갖게 된다.

Burgeno and Joslyn (2023)은 사용자 신뢰가 단순히 예측이 맞았는지 아닌지보다 설명이 일관적인지, 변경 이유가 이해 가능한지에 더 민감하다고 제시하였다. 다시 말해 Credibility는 단순히 ‘예측이 정확한가’를 넘어, 검증 가능성과 설명 가능성이 포함된 사용자 관점에서의 신뢰 구조를 의미한다. 예측 성능의 향상은 Credibility를 높이는 핵심 요소이지만, 그 성능을 어떻게 설명하고 공유하는지가 신뢰 형성의 중요한 조건이 된다.

2. Salience: 이 예측이 나에게 의미가 있는가?

Salience는 예측정보가 사용자의 질문과 의사결정 맥락에 적합한 형태로 제공되는 정도를 의미한다. 기후예측이 존재하더라도, “언제 무엇을 바꾸어야 하는지”가 명확하지 않다면 사용자는 예측을 활용하지 않는다. Salience는 다음 조건을 통해 높아질 수 있다.

- 1) 시간적 적합성: 예측정보가 실제로 계획·구매·운영·대응 등의 결정 시점에 맞추어 제공되어야 한다. 예를 들어 댐 운영계획 수립, 파종 시기 결정, 연료 구매계약 등의 주요 의사결정 시점을 기준으로 예측 정보의 시점이 조정될 필요가 있다.
- 2) 공간적 적합성: 국가·대륙 규모 예측이 아닌, 유역·작물·전력망·행정 단위 등 실제 관리 단위에 맞게 정보가 제공될 때 사용자의 활용 가능성이 높아진다.
- 3) 의사결정 변수로의 변환: 확률 예측이 단순한 수치나 지도로 제시되는 것이 아니라, 행동 옵션, 위험 임계값, 운영 시나리오 등 사용자 언어로 변환되어 제공되어야 한다. 예를 들어, 강수량이 ‘평년보다 많을 확률 60%’라는 정보가 ‘저수지 수위 유지 전략 A를 선택할 경우의 이익·위험’과 연결될 때 비로소 의사결정에 의미가 있다.

즉, Salience는 정보를 단순히 전달하는 것이 아니라, ‘사용 가능한 형태로 구조화하고 번역하는 과정’에서 확보된다. 사용자 맞춤형 서비스, 영향예보 등은 결국 Salience를 체계적으로 높이는 작업이라고 볼 수 있다.

3. Legitimacy: 이 정보를 근거로 결정해도 괜찮은가?

Legitimacy는 예측정보와 정보 제공기관이 공정하고 신뢰할 수 있다고 인식되는 정도를 의미한다. 특히 기후예측처럼 불확실성이 존재하는 정보에서는, 사용자는 예측 내용뿐 아니라 예측을 제공하는 과정과 제도적 맥락을 함께 평가한다. Legitimacy를 높이는 조건은 다음과 같다.

- 1) 거버넌스의 투명성: 예측 기준, 운영 절차, 이해관계 관리 구조가 공개되고 일관적으로 적용되어야 한다.
- 2) 사용자 참여 기반 설계: 예측 생성뿐 아니라, 표현·배포·검증 과정에 사용자가 참여하거나 의견을 반영할 수 있는 경로가 존재할 때 사용자는 정보 생산 과정의 편향성을 의심하지 않는다.
- 3) 기관의 독립성과 공공성: 특정 산업·정책적 이해에 과도하게 종속되지 않고, 공익적 관점에서 운영되는지를 판단하는 것으로, 공공기관으로서의 인지도와 인식을 개선함으로써 높아질 수 있다.

이 요소들은 사용자에게 예측을 사용하는 것이 단순히 유용한 선택을 넘어, 조직적으로

정당화할 수 있는 선택임을 보장한다. 과학기술 기반 정보에서는 Legitimacy가 상대적으로 덜 문제 될 수 있다고 생각하기 쉽지만, 과거의 ‘Climategate’ 논란이나 화석연료 회사의 지원을 받은 일부 기후 연구에 대한 신뢰 위기 사례는, 과학적 정보조차 Legitimacy가 위협받을 수 있음을 보여준다.

4. 균형과 조정: ‘사용 가능한 예측’으로의 전환

Credibility, Salience, Legitimacy는 서로 독립된 요소가 아니라 상호작용하며, 때로는 긴장을 형성한다. 예측을 세분화할수록 Salience는 높아지지만 Credibility가 낮아질 수 있고, 반대로 예측 범위를 넓히거나 보수적으로 운영하면 Credibility는 높아질 수 있으나 사용자 관점의 실용성은 낮아질 수 있다. 따라서 기후예측 서비스는 특정 요소 하나를 최적화하는 것이 아니라, 사용 목적과 맥락에 따른 균형점을 찾아가는 과정이다.

예를 들어 농업 사용자는 ‘우리 지역 4월 첫째 주 강수량’과 같이 매우 구체적인 정보를 원하지만, 이러한 시·공간적으로 세밀한 예측은 계절 평균 예측보다 예측 정확도가 현저히 낮다. 전력 부문은 ‘특정 지역의 일 최고기온’을 알고 싶어 하지만, 이는 월 평균 기온보다 불확실성이 크다. 수자원 관리자는 ‘특정 댐 유역의 주간 유입량’이 필요하지만, 이는 전국 규모 월 강수량보다 예측하기 어렵다.

이 딜레마는 기후예측 서비스 설계의 핵심 과제다. 사용자 요구에 맞춰 지나치게 세밀한 정보를 제공하면 예측 신뢰도가 낮아져 오히려 불신을 낳을 수 있고, 반대로 예측 정확도를 유지하기 위해 광범위한 평균값만 제공하면 의사결정에 큰 도움이 되지 않는다. 이 긴장을 해소하기 위해서는 단순히 모델 성능을 개선하는 것을 넘어, 예측 생산자와 사용자 간의 지속적인 대화를 통해 “어느 수준의 정보가 어느 정도의 불확실성을 가지고 있으며, 이것이 의사결정에 어떻게 활용될 수 있는가”를 함께 탐색하는 과정이 필요하다.

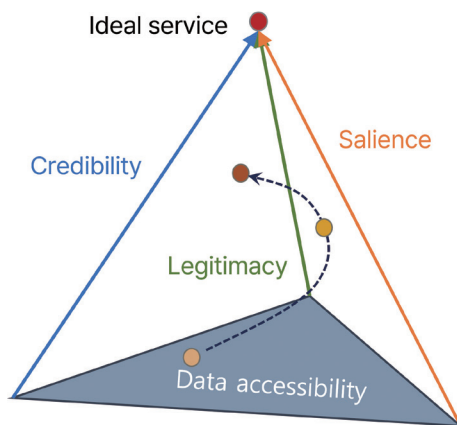


그림 2. CSL (Credibility-Salience-Legitimacy) 구조와 기후예측 서비스의 발전 궤도: 사용 목적과 상황에 맞게 CSL 3개 요소 사이의 균형점을 단계적으로 찾아가는 과정

이 과정에서 데이터 접근성과 개방성은 CSL을 뒷받침하는 핵심 촉진요인(Enabling Factor)으로 작동한다. 접근 가능한 데이터는 Credibility를 뒷받침하는 검증 기반을 제공하고, 사용자가 자체 분석·운영 시스템에 통합할 수 있도록 해 Salience를 높이며, 공개되고 투명한 정보 체계는 Legitimacy를 강화한다. 결국 기후예측 서비스 설계의 목표는 더 많은 예측이나 더 정교한 기술을 제공하는 데만 있지 않다. 예측과 사용자 경험, 제도적 환경이 함께 작동하는 구조 속에서 '신뢰할 수 있고, 의미 있으며, 실제로 사용할 수 있는 예측'의 지점을 찾아가는 것이 핵심이다. 요약하면, CSL 요건과 데이터 개방성을 함께 고려하는 것은 '존재하는 예측'을 '사용되는 예측'으로 전환하기 위한 필수 조건이다.

III 해외 기후예측 서비스 발전을 위한 노력: 유럽을 중심으로

유럽연합(European Union, EU)의 기후예측 서비스는 다국적 협력사업을 통해 연구에서 실증, 제도화로 이어지는 단계적 진화를 거쳐 발전해 왔다. 이는 단순히 예측 기술을 고도화하는 것을 넘어, 예측이 사용자에게 의미 있는 정보가 되고, 나아가 공공 부문과 산업 의사 결정에 반영될 수 있도록 사용 구조, 운영 규칙, 제도적 기반을 함께 구축해 온 과정이었다. 이러한 방향성은 세계기상기구(World Meteorological Organization, WMO)가 2009년 Global Framework for Climate Services (GFCs)를 공식 수립하면서 기후서비스 개념이 국제적으로 선명해지고 제도적 과제로 확산된 흐름과도 맞물린다. 특히 EU는 2015년 「European research and innovation roadmap for climate services」를 통해 기후서비스 발전을 위한 연구·혁신 로드맵을 제시하고, 기후서비스 시장 형성과 활성화를 위한 협력과 투자를 이어가고 있다.

1. 탐색 단계(FP7, 2007~2013): 가능성 정의와 사용자 요구 등장

FP7 이전의 기후예측 관련 사업들은 주로 예측 모델과 예측 성능 향상 방안에 초점을 두었다면, FP7 프로그램에서는 계절-10년 규모 예측의 가능성을 확인함과 동시에 사용자 요구를 탐색하는 시도까지 범위가 확대되었다. 이 시기에 수행된 대표 사업으로 CLIM-RUN¹⁾, SPECS²⁾, EUPORIAS³⁾ 등을 들 수 있다.

1) Climate Local Information in the Mediterranean region Responding to User Needs

2) Seasonal-to-decadal climate Prediction for the improvement of European Climate Services

3) EUropean Provision Of Regional Impacts Assessments on Seasonal and decadal timescales

이 단계에서는 주로 예측 시스템의 기술적 신뢰성을 확보하고, 사용자 요구를 탐색해 예측정보의 적합성(Salience)을 높이려는 시도가 나타났다. 예컨대 SPECS는 예측 성능 개선을 목표로 했고, CLIM-RUN은 사용자 참여형 설계(Co-design)를 통해 예측정보가 실제 수요에 맞도록 하는 방향을 제시했다. EUPORIAS는 프로토타입 기후예측 서비스를 실제 운영 환경에 적용해보는 실험을 수행하며 ‘기후서비스’라는 개념을 구체화했다. 동시에 이 시기는 기후서비스 개념이 국제적으로 본격화되는 시점으로, GFCS 설립 논의가 WMO에서 가시화되었다. 요약하면, 이 단계는 “예측이 가능한가?”라는 질문에서 “예측은 왜, 누구에게, 어떻게 의미가 있는가?”로 질문이 확장된 시기였다.

2. 실증·산업 적용 단계(Horizon 2020, 2014~2020)

Horizon 2020 단계에서는 예측정보가 특정 산업 및 운영 의사결정과 직접 연결되는 형태로 활용되기 시작했다. 대표 프로젝트로는 S2S4E⁴⁾(재생에너지 분야), SECLI-FIRM⁵⁾(에너지·수자원 통합 리스크 관리) 등이 있다. S2S4E에서는 재생에너지 운영기업과 공동 설계된 의사결정 지원 도구를 통해 예측을 전력 수급 계획과 운영 모델에 직접 연계했다. SECLI-FIRM에서는 예측정보를 사용하는 경우와 사용하지 않는 경우 사이의 경제적 차이(Add Value)를 비교함으로써, “예측을 사용하는 것이 합리적인가?”라는 질문에 실증적 답변을 제시하고자 했다.

이 단계에서는 예측정보가 실제 의사결정의 시간·공간 스케일에 맞추어 조정되었고, 산업 현장에서 예측을 활용할 수 있는 형태로 재해석되었다. 또한 사용자-제공자 간 공동 설계와 산업 분야의 프로젝트 공동 참여를 통해 서비스 운영의 정당성도 검토되었다. 다시 말해, 이 단계에서는 예측정보가 ‘쓸 수 있는 정보’에서 ‘쓰는 것이 더 합리적인 정보’로 자리매김할 수 있는지를 검증하려 했다.

예를 들어 SECLI-FIRM에서는 유럽 전력기업(EDF (Électricité de France), ENEL)과 예측기관이 협업하여, 기온 예측이 전력시장 가격 전략과 수력발전 운영에 어떻게 반영될 수 있는지를 모델링했다. 이 과정에서 전력회사는 의사결정 시점과 필요한 정보의 형태를 명확히 제시했다. 예를 들어 “수력발전댐 운영 결정을 6월에 내리므로, 유역별 4~8월 누적 유입량 정보가 필요하며, 불확실성 범위가 $\pm 30\%$ 이내일 경우에만 활용 가능하다”와 같은 요구 조건이 제시되었다. 연구자들은 이에 맞추어 강수 예측을 수문모델로 변환하고, 앙상블 예측을 확률 구간으로 표현하며, 의사결정 모델에 입력할 수 있는 형식으로 재구성하는 작업을 2년간 반복적으로 수행했다. 새로운 의사결정 모델의 가치를 평가하기 위해 계절예측(3~6개월 전망)을 활용한 경우와 과거 평균(Climatology)에 기반한 전략을

4) Sub-seasonal to Seasonal climate forecasting for Energy

5) SEasonal CLimate Information for FIRst Risk Management

비교한 결과, 계절예측을 활용한 저수지 운영 전략은 과거 이상기후 사례(예: 2003년 유럽 폭염, 2010년 이상 저온 등)에서 평균적으로 수백만 유로 규모의 추가 수익을 창출할 수 있었던 것으로 추정되었다(Goodess et al., 2022). 이는 계절예측 성능이 중위도에서 결코 높지 않음에도, 불확실성을 정량적으로 관리할 경우 의사결정 개선이 가능하다는 점을 보여주는 사례이다.

3. 제도 및 구조화 단계(Horizon Europe, 2021~현재)

최근 단계에서는 기후예측 서비스가 연구 프로젝트 차원을 넘어서, 공공 정책과 시장 인프라의 일부로 편입되고 있다. 대표적으로 CLIMAAX⁶⁾(지역 기후 리스크 평가 표준화), Climateurope2⁷⁾(기후서비스 표준화 및 품질관리) 등이 있다. 이 단계에서는 서비스의 Legitimacy (제도적 수용성) 확보가 중심 과제가 되며, 동시에 예측 품질 및 투명성(Credibility)과 사용의 적합성(Salience)도 함께 제고되고 있다. GFCS 제창 이후 국가 및 지역 차원의 기후서비스 프레임워크(NFCS 등) 구축이 글로벌 의제로 부상하면서, 기후예측 서비스는 점차 제도적 구조 속에 자리 잡아가고 있다.

4. 시사점

각 단계별 프로젝트와 CSL 요소들을 정리하면 표 1과 같다. EU의 경험은 기후예측 서비스가 기술 성숙도를 확보했다고 해서 자동으로 활용되는 것이 아니라, 사용자 요구에 맞춰 조정되고, 실제 운영 환경에서 시험되며, 제도적 기반 위에 정착되는 과정이 필요함을 보여준다. 다시 말해, 기후예측 서비스는 ‘예측을 정교하게 만드는 프로젝트’가 아니라, 예측이 사회적·경제적 의사결정에 자리 잡도록 만드는 일련의 ‘전환 과정’이다.

표 1. EU의 단계별 기후서비스 프로젝트

단계	대표 프로젝트	주로 강화된 CSL 요소
탐색(FP7)	CLIM-RUN, SPECS, EUPORIAS	Credibility → Salience
실증(H2020)	S2S4E, SECLI-FIRM	Salience → Credibility + Legitimacy
제도화(HE)	CLIMAAX, Climateurope2	Legitimacy + Credibility → Salience

6) CLIMAté risk management and Adaptation eXcellence

7) Climateurope2 – Linking Science and Society for Climate Services

흥미로운 점은, 서비스 측면을 강화하기 위해 초기에 시도된 사용자 적합성(Salience) 제고가 다시 예측 신뢰성(Credibility)의 강화를 요구하게 만들고, 이어서 제도적 뒷받침(Legitimacy)을 확보하는 일로 연결된다는 점이다. 이후에는 다시 예측 신뢰성과 사용자 적합성을 높이는 활동이 반복되며 고도화되는, 일종의 나선형 진보가 나타난다. 이 과정에서 실증적 성과를 보여주는 사례를 도출함으로써, 기후서비스의 시장 확장성과 가치에 대한 인식을 높이려는 전략이 병행되었다.

앞서 언급한 것처럼, 이 모든 과정에서 데이터의 개방성과 접근성은 기후예측 서비스 및 CSL을 뒷받침하는 핵심 기반으로 기능하였고, EU에서는 Copernicus Climate Change Service (C3S)가 그 중심적 역할을 수행해 왔다. C3S는 EU 기후서비스 로드맵의 핵심 요소이자, 예측정보의 제공·검증·활용을 뒷받침하는 중앙 플랫폼으로 기능하며, 기후예측 서비스의 지속성과 신뢰성을 높이는 중요한 인프라로 자리매김하고 있다. 요약하면, 유럽의 경험은 기술-서비스-제도-플랫폼이 함께 조정될 때 비로소 기후예측이 ‘사회 속에서 쓰이는 정보’가 된다는 점을 보여준다.

IV 기후예측 서비스의 현실적 제약

앞선 사례들은 기후예측 서비스가 단순한 연구 결과를 넘어 산업·정책 의사결정에 통합될 수 있는 가능성을 보여준다. 그러나 성공 사례만으로 전체 맥락을 설명할 수는 없다. 기후예측 서비스가 사회적·제도적 시스템 안에서 실제로 작동하기 위해서는 기술적 정교함 이상의 조건이 필요하며, 서비스의 채택과 확산 과정에서는 여러 구조적 갈등과 운영상의 장벽이 반복적으로 나타났다. 특히 기후예측은 단순한 정보가 아니라 불확실성이 내재된 미래에 대한 판단 근거이기 때문에, 기존 제도와 의사결정 문화, 책임 구조와 충돌하는 경우가 많았다. 이 장에서는 이러한 현실적 제약을 세 가지 축(예측 성능과 활용 요구 간의 간극, 사용자 조직의 구조적·제도적 저항, 협업 기반 접근의 실행 한계)을 중심으로 살펴본다. 이러한 분석은 기후예측 서비스 개발 전략이 단순한 ‘모델 개선’이나 ‘데이터 제공 확대’를 넘어, 기술·조직·제도·사용자 체계를 아우르는 구조적 접근을 필요로 함을 보여준다.

1. 예측 성능과 사용자 요구의 간극: Credibility-Saliency 갈등의 지속

기후예측 서비스는 오랫동안 Credibility(예측의 과학적 신뢰성)와 Saliency(사용자 의사결정에의 적합성) 사이에서 균형을 찾는 데 어려움을 겪어 왔다. 예측은 과학적으로 의미 있는 패턴을 포착하더라도, 실제 정책·산업 의사결정에서 요구되는 수준의 확실성과 일관성을 제공하지 못하는 경우가 많다.

SECLI-FIRM 프로젝트 참여 기업들은 예측 모델이 일부 지역과 계절에서 의미 있는 신호를 제공함에도 불구하고, 예측의 변동성, 신호의 약함, 극한 사건 탐지의 한계 등으로 인해 이를 의사결정의 핵심 입력값으로 사용하기 어렵다고 평가했다. 다시 말해 예측이 ‘사실을 설명할 수는 있어도, 행동을 결정하기에는 불충분한 정보’로 남는 상황이 지속된 것이다.

이는 예측 품질이 절대적으로 낮기 때문이라기보다, 사용자가 요구하는 ‘확실성의 수준’이 기후 시스템의 본질적 불확실성을 넘어서는 경우가 많기 때문에 발생하는 구조적 문제다. 기업과 공공 기관은 예측의 ‘정확성’ 자체보다, “의사결정 리스크를 줄여 주는가”, “내부 규칙과 책임 체계에 통합될 수 있는가”를 기준으로 예측의 가치를 판단한다. 이 기준에 비추어 볼 때, 현재의 계절·기후예측은 여전히 충분히 ‘결정을 내릴 수 있는 수준’이 되지 못하는 경우가 많이 있다. 이러한 Credibility-Saliency 간 갈등은 정보생산과 제공 과정의 기술적 문제이자 기후예측 서비스가 넘어야 할 첫 번째 구조적 장벽으로 이해할 수 있다.

2. 사용자 측 제도·조직 문화의 저항: ‘사용할 필요가 없는 정보’의 구조

Rayner et al. (2005)은 미국 서부 수자원 관리자를 대상으로 한 연구에서 사용자가 “기후예측이 정확하지 않아서 사용하지 않는다”고 말할 때, 실제로는 정확도 부족이 아니라 조직의 제도·운영 규칙·권한 체계가 예측의 채택을 어렵게 만드는 구조적 요인이 더 크게 작용한다는 점을 지적했다.

공공기관이나 인프라 운영 조직에서는 실패 비용이 매우 크기 때문에, 예측 기반의 선제적 행동은 위험한 선택으로 간주된다. 반면 ‘과거 평균에 의존한 관행적 판단’은 잘못된 결과가 나와도 책임을 묻기 어렵다. 이러한 환경에서는 아무리 정교한 예측이라도, 예측을 채택했을 때의 잠재적 비판 위험이 예측을 사용하지 않았을 때의 위험보다 더 크게 인식되기 쉽다.

또한 많은 국가의 기술 규정, 매뉴얼, 제도는 과거 관측값을 기준으로 의사결정 하도록 설계되어 있으며, 확률 기반 미래예측을 공식적으로 적용할 수 있는 법적·절차적 공간이 존재하지 않는다. 따라서 예측정보는 참고자료로는 활용되지만, 공식 의사결정 체계에 포함되지 못하는 불완전한 서비스로 남게 된다. 또한, 예측정보가 외부 기관에 의해

생산되는 경우에는 정보 활용이 전문성, 권한, 조직 정체성의 문제와 충돌하는 경우가 있다. 요약하면, 사용자 측 제도·조직 문화는 ‘예측이 필요하지 않아도 되는 체계’를 만들어 왔으며, 이는 기후예측 서비스 확산을 가로막는 두 번째 구조적 장벽이 된다.

한편, 15년 뒤에 이루어진 Lach and Rayner (2017)의 후속연구는 2005년 당시 ‘겁쟁이(Wimps)를 위한 것’으로 여겨졌던 일기예보는 이제 ‘당연한 것’이 되어 수자원 관리의 필수 인프라로 자리잡았음을 보여주었다. 이 변화는 비단 예측 성능의 향상뿐 아니라 실시간 정보 접근성, 사용 편의성, 그리고 정보 생산자-사용자 간 지속적 협력의 결과였다. 기후예측은 아직 운영 결정에 사용되지는 않지만, 일부 선도 조직에서 맥락 설정과 장기 계획 수립에 부분적으로 활용하기 시작했다. 이는 15년 전에는 없던 진전이고, 제도적, 문화적 장벽은 극복 불가능하지 않으며, ‘성능 개선+접근성+지속적 대화’의 조합이 점진적 변화를 가능하게 한다는 점을 시사한다.

3. 협업 기반 서비스 구축의 실행 한계: Co-production의 현실성

Co-production은 기후서비스의 대표적인 이상 모델로 간주되어 왔다. 서비스 설계 단계부터 사용자를 참여시키고, 피드백을 기반으로 반복적으로 개선하는 방식은 정보의 적합성을 높이고 신뢰를 구축한다는 점에서 중요한 전략이다. 그러나 실제 프로젝트 경험은 이 접근이 모든 상황에 일반화되기 어려운, 특정 조건에서만 유효한 전략임을 보여준다.

EU 프로젝트의 결과, 사용자 참여 기반 서비스 설계는 효과적이었지만 시간·노동·전문 역량·조정 비용이 매우 높아, 단기 프로젝트 기간 동안에는 가능하더라도 장기적인 운영 체계로 확장하기에는 부담이 크다는 평가가 뒤따랐다. Soares and Buontempo (2019) 역시 Co-production이 모든 상황에 적용될 수 있는 원칙이 아니라, 적용 조건이 명확할 때에만 효과적인 선택적 도구임을 강조한다. 그들은 “참여가 있었는가?”가 아니라 “참여가 의사결정 권한과 결과를 실제로 바꾸었는가?”가 평가 기준이 되어야 한다고 주장한다.

결국 Co-production은 기후예측 서비스 설계의 보편적 해법이라기보다는, 특정 고위험·고부가가치 의사결정 영역 또는 소수 핵심 사용자군을 대상으로 할 때 보다 효과적인 수단으로 고려될 필요가 있다.

4. 이상적 모델이 아닌, 층위별·맥락별 접근이 필요하다

앞서 살펴본 사례들은 기후예측 서비스 확산의 핵심 장애물이 예측 성능의 한계뿐 아니라, 예측을 받아들이고 활용하도록 설계된 제도·책임 구조·조직 문화의 부재임을 분명히 보여준다. 또한 예측의 과학적 신뢰성과 사용자 의사결정과의 정합성 사이에는 여전히 조정되지 않은 구조적 간극이 존재하며, 이는 ‘좋은 예측’이 반드시 ‘사용되는

예측'으로 이어지지 않는 이유가 되고 있다.

여기에 더해, 협업 기반 접근(Co-production)은 중요한 가치와 성과를 낳았지만, 모든 서비스에 적용할 수 있는 보편적 해법이라기보다는 특정 조건에서 효과적인 전략적 도구임이 확인되었다. 특히 소수 사용자를 대상으로 한 깊이 있는 맞춤형 협업은 유의미한 성과를 만들 수 있지만, 이를 국가 규모 또는 다양한 산업·정책 영역으로 확장하는 과정에서는 비용·조직 역량·운영 구조 측면에서 현실적 제약이 발생한다.

이 점에서 기후예측 서비스가 단일 모델이 아니라, 참여 수준·정보 수요·의사결정 구조에 따라 구분된 층위적 서비스 체계로 설계되는 것이 더 현실적이다. 즉, 다음과 같이 구분된 서비스 구조가 적절할 수 있다.

- 1) 광범위하고 반복적 사용자를 위한 표준화된 정보 제공층(예: 웹 서비스, 자동화된 지도·지수 제공, 단순화된 해설 콘텐츠) - 기후예측 노출 및 문해력(Literacy) 강화
- 2) 특정 산업·기관을 위한 상호작용 기반 확장형 서비스층(예: 정기 브리핑, 운영 시나리오 번역, 의사결정 대응 범례 제공) - 피드백, 상호작용을 통한 상호 학습
- 3) 고위험·고부가가치 의사결정 영역을 위한 맞춤형 공동 설계 서비스층(예: 공동 모델 구축, 공동 지표 설계, 내부 의사결정 체계 통합) - 깊은 협력을 바탕으로 한 실증

이러한 다층 구조의 서비스 체계는 기후예측 활용이 '한 번의 시스템 구축'으로 완성되는 것이 아니라, 다양한 사용자 생태계에 적합한 형태로 분화·정착되어야 한다는 점을 시사한다. 따라서 기후예측 서비스 구축은 기술적 향상이 중심이 되는 과학적 프로젝트를 넘어, 다양한 사용자의 제도적 현실·행동 방식·위험 구조를 고려한 운영 설계 과제에 가깝다고 볼 수 있다. 요약하면, 기후예측 서비스의 확산은 '이상적인 단일 모델'을 구현하는 것이 아니라, '여러 층위의 사용자에게 맞는 다양한 사용 구조'를 설계하는 문제이다.

V 결론 및 제언

기후예측정보는 사용하는 주체에 따라 필요 수준, 결정 방식, 리스크 감수 범위, 해석 능력이 모두 다르다. 따라서 서비스는 일률적인 구조가 아니라 층위별로 설계된 다중 구조로 운영될 필요가 있다. 이는 모든 사용자에게 동일한 수준의 맞춤형 협업이나 동일한 범위의 참여를 요구하는 방식이 아니라, 사용자 집단별 정보 필요도와 활용 가능성을 기준으로 서비스 제공 방식을 구분해야 한다는 의미다.

가령 가장 광범위한 사용자층에는 누구나 접근하고 이해할 수 있는 표준화된 기후예측정보가 제공되어야 하며, 이는 웹서비스 기반의 지도, 간단한 서술형 전망, 핵심 지표와 같은 형태일 수 있다. 반면 특정 산업이나 공공기관처럼 기후예측이 운영 의사결정과 직접 연결되는 집단에게는 정보 해석 과정과 위험 판단의 틀이 함께 논의될 필요가 있다. 마지막으로 극히 일부의 고위험·고가치 분야에서는 모델 가정과 불확실성 표현 방식까지 사용자와 함께 설계하는 공동 개발(Co-design) 방식이 요구될 수 있다. 중요한 점은 이 세 층위가 서로 경쟁하거나 대체되는 구조가 아니라, 서로 다른 역할과 필요를 충족하는 상호 보완적 구조가 되어야 한다는 것이다. 이러한 층위적 접근은 단순히 예측 전달 방식의 차별화가 아니라, Credibility-Saliency-Legitimacy (CSL) 간의 긴장을 관리하면서 서비스가 안정적으로 확장되기 위한 조정 메커니즘이기도 하다.

이 지점에서 데이터 접근성과 개방성은 선택적 요소가 아니라, 이러한 다층적 구조를 가능하게 하는 핵심 기반이다. 예측 데이터를 단순 공개하는 수준을 넘어, 표준화된 포맷, 명확한 메타데이터, 과거 예측 아카이브(Forecast Archive), 불확실성 정보, 성능 평가 자료 등이 함께 제공될 때, 사용자들은 스스로 분석·재해석·응용할 수 있게 된다. 이는 서비스 제공 기관이 모든 해석을 통제하거나 사용자 행동을 일일이 설계하려는 공급자 중심 모델을 넘어, 사용자가 다양한 방식으로 탐색·실험·활용할 수 있는 생태계 기반 접근으로의 전환을 의미한다.

따라서 서비스 제공자의 역할도 변화해야 한다. 과거처럼 ‘결과를 생산해 전달하는 기관’이 아니라, 사용자·데이터·제도·산업 간의 연결을 지원하는 촉진자(Facilitator)로서 기능해야 한다. 즉, 어떤 정보는 ‘제공’하고, 어떤 해석은 ‘협의’하며, 어떤 구성 요소는 ‘함께 설계하는’ 방식으로, 서비스의 범위와 깊이를 사용자 맥락에 따라 조정하는 것이 필요하다. 이는 기후예측 서비스가 한 번 설계해 완성되는 정적인 시스템이 아니라, 사용과 학습이 반복되며 점진적으로 정착되는 과정이라는 점을 인정하는 접근이다. 현실적으로는 이상적인 서비스의 구현을 위해 초기단계에서 공급자가 방향을 제시하고 이끌어가는 과정이 반드시 필요하다.

이러한 관점에서, 향후의 첫 단계는 거대한 서비스를 단번에 구축하는 것이 아니라, 현실적 맥락에서 작동 가능한 구조를 시험해 보는 소규모 파일럿에서 출발하는 것이 적절하다. 파일럿은 기술 자체를 검증하는 것뿐 아니라, 사용자-제도-운영 방식의 적합성을 검증하는 실험이어야 하며, ‘예측이 실제 결정 과정 어디에, 어떻게 들어갈 수 있는지’를 경험적으로 확인하는 과정이어야 한다.

첫째, 기후예측 데이터 접근성 개선이 필요하다. 기상청은 이미 기상·기후 데이터를 제공하고 분석을 지원할 수 있는 플랫폼과 인프라를 구축해 두었으며, 이는 데이터 접근성 측면에서 상당히 성숙한 단계로 볼 수 있다. 다만 그 안에서 기후예측정보는 여전히 분산되고 잘 드러나지 않아서, 사용자가 이 정보를 ‘찾고 사용하는 경험’을 갖는 데 제약이 있다. 앞으로 필요한 것은 새로운 시스템을 추가로 만드는 것이 아니라, 기존 플랫폼들을 정렬하고 기후예측정보에 대한 단일 진입점과 표준화된 제공 구조를 구축하는 방향이다. 다시 말해, 기후예측정보가 어디에 있고, 어떻게 접근하며, 어떻게 읽어야 하는지를 명확히 보여주는 뚜렷한 중앙 허브 역할이 요구된다.

둘째, 기후예측 활용 노하우의 개발 및 축적이 중요하다. 기후예측을 실제 의사결정에 활용하는 과정은 단순한 정보 전달만으로 해결되지 않는다. 해외 사례에서처럼, 기후예측이 산업·정책 영역에서 쓰이기까지는 작은 실증을 반복하며 사용성과 한계를 학습하는 과정이 필요하다. EU는 EUPORIAS에서 ‘활용 가능성’을 탐색하는 초기 실험을 진행한 뒤, SECLIFIRM 단계에서는 실제 적용 과정에서 나타나는 제도적 저항, 해석의 모호성, 불확실성 표현 문제 등을 직접 경험하며 해결방안을 추적했다. 이러한 방식은 단일 사업 안에서 정답을 완성하는 것이 아니라, 여러 해에 걸쳐 축적된 시행착오가 결국 서비스를 보다 구체화하는 형태였다. 우리나라에서도 이미 진행해 온 「지역기후융합서비스」 등의 사업이 있고 여러 성과를 거두었지만, 많은 경우 단발 사업으로 분절되어 경험과 교훈이 축적되지 못한 채 종료되는 한계가 있다. 앞으로는 기후예측 데이터 허브와 연계하여 개별 사업들을 하나의 연속된 학습 체계로 묶어가는, 보다 긴 호흡의 접근이 필요하다.

국가기후예측모델 개발을 통해 산출될 고품질 정보의 가치를 구현하기 위해서는, 한쪽에서는 제공 체계를 정비해 정보에 접근하기 쉬운 환경을 만들고, 다른 한쪽에서는 반복적인 실증을 통해 예측이 어디에 어떻게 쓰일 수 있는지에 대한 경험을 쌓아가야 한다. 이 두 축이 함께 작동할 때, 기후예측정보는 더 이상 단순히 조회되는 정보가 아니라 실제로 사용되는 정보로 전환될 수 있을 것이다.

참고문헌

- Burgeno, J. N., and Joslyn, S. L., 2023: The Impact of Forecast Inconsistency and Probabilistic Forecasts on Users' Trust and Decision-Making. *Weather Clim. Soc.*, 15(3), 603-621.
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., Jäger, J., and Mitchell, R. B., 2003: Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 100(14), 8086-8091.
- Goodess, C. M., Troccoli, A., Vasilakos, N., Dorling, S., Steele, E., Amies, J. D. et al., 2022: The Value-Add of Tailored Seasonal Forecast Information for Industry Decision Making. *Climate*, 10(10), 152.
- Lach, D., and Rayner, S., 2017: Are Forecasts Still for Wimps? *J. Southwest*, 59(1/2), 245-263.
- Lemoine, D., and Kapnick, S., 2024: Financial markets value skillful forecasts of seasonal climate. *Nat. Commun.*, 15, 4059.
- Rayner, S., Lach, D., and Ingram, H., 2005: Weather Forecasts are for Wimps: Why Water Resource Managers Do Not Use Climate Forecasts. *Clim. Change*, 69(2-3), 197-227.
- Soares, M. B., and Buontempo, C., 2019: Challenges to the sustainability of climate services in Europe. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 10(4), e587.

국가기후예측시스템으로 여는 국가 기후정책 자립

조경숙 기상청 기후예측과 과장 cks0716@korea.kr

- Ⅰ 기후위기 시대
- Ⅱ 기상청의 역할과 독자기후예측시스템의 필요성
- Ⅲ 국가기후예측시스템과 기후정책 자립
- Ⅳ 국가기후예측시스템을 통한 지속가능한 기술자립과 기후정책 자립을 위한 과제

최근 기후변화로 이상기후가 빈발하며 기후재난이 증가하고 있어 사전 대비를 위한 중장기 국가 정책의 필요성이 강조되고 있다. 그러나, 현재 기상청이 제공하는 기후예측정보는 영국기후예측시스템을 기반으로 1~3개월 전망에 그쳐 급변하는 동아시아·한반도 기후환경변화 예측과 장기간 예측에 한계가 있다. 이에, 기상청은 한반도 기후환경에 적합하고 1개월에서 10년까지 기후예측이 가능한 독자기술 기반의 국가기후예측시스템 개발을 2025년에 착수했다. 외국 기후예측기술에 의존한 기후예측정보는 국내 상황과 부합하지 않아 기후정책의 이행 가능성이 낮아지고 정책의 실패로 이어질 위험이 크기 때문에 한국형 기후예측기술과 이를 기반으로 한 기후정책 이행이 필요하다. 외국 기후예측기술에서 벗어난 국가기후예측시스템은 우리나라의 기후예측 기술자립과 함께 기후정책 자립까지 이끌어 낼 것으로 기대된다.

I 기후위기 시대

산업혁명 이후 대기 중 이산화탄소의 농도는 계속해서 증가하고 있으며, 그에 따른 지구 온도 상승은 더 빈번한 기후재난을 초래하고 있다.

WMO는 2024년 전지구 기후현황 보고서에서 앞으로 5년(2024~2029년)의 평균기온이 1.5℃를 초과할 확률은 70%이며, 적어도 한해는 역대 최고기온을 기록한 2024년 기온을 초과할 확률이 80%라고 밝혔다(WMO, 2024). 전지구뿐만 아니라 아시아에서도 온난화는 심각하게 진행되고 있다. 2024년 아시아 기후 현황 보고서에서 아시아 지역의 온난화 속도는 “전 세계 평균보다 거의 두 배 빠르며” 아시아 해역 해수면 온도는 역대 최고치를 기록, 최근 10년 10년의 상승률(0.24℃/년)은 전지구 평균(0.13℃/년)의 두 배에 육박한다고 밝혔다(그림 1).

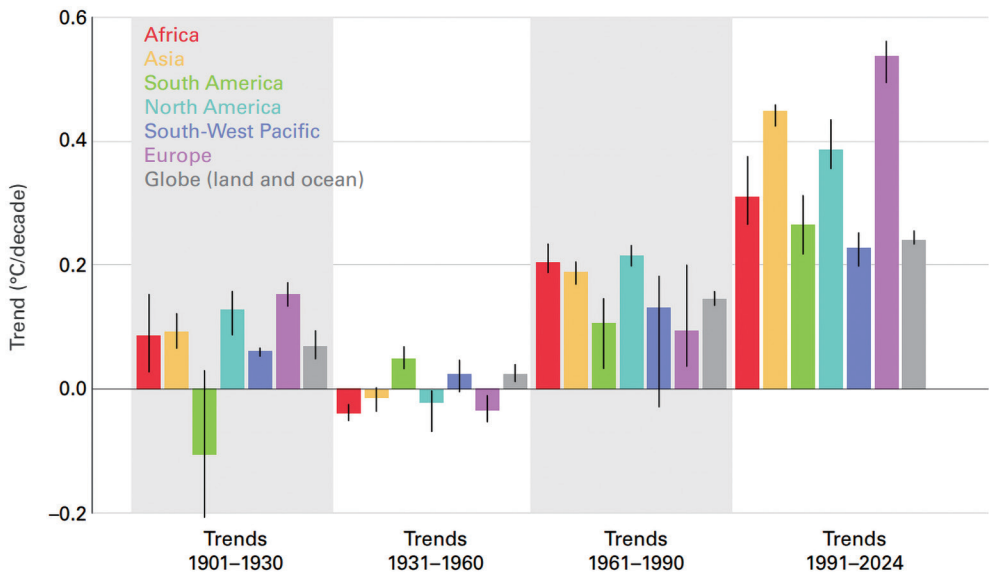


그림 1. 4개 기간(1901~1930년, 1931~1960년, 1961~1990년, 1991~2024년)에 대한 지역별 평균 기온 추세(°C/10년)(WMO, 2025)

또한 해양열파 영향 면적이 1993년 이후 가장 넓은 해로, 북인도양, 일본 근해, 황해, 동중국해의 해양열파 강도는 심함(severe) 또는 극심함(extreme) 단계였으며, 황해·동중국해는 해양열파 발생일수가 150일 이상으로 역대 최대로 나타났다. 지역별 강수량 편차가 큰 가운데, 중앙아시아·서아시아·인도·네팔·중국 등 아시아 전역에서 여러 차례 극심한 강수 현상이 발생하였으며, 2024년 가장 강력한 열대저기압인 야기(Yagi)는 베트남·필리핀·라오스·태국·미얀마·중국 전역에 광범위한 피해와 사상자를 내기도 하였다.

2025년 5월 남아프리카공화국에서는 동부지방을 중심으로 기록적인 폭우로 홍수가 발생하면서 49명이 사망하였으며, 2025년 봄부터 여름까지 유럽전역에서 폭염이 반복하여 나타나면서 일부 지역은 최고 50℃에 근접하여 수천명이 사망하였고, 특히 남부유럽과 서유럽에서 폭염피해가 심각하게 나타났다. 또한 영국, 레바논에서는 최악의 가뭄이 발생한데 반해, 동남아시아에서는 2025년 말에 드물게 적도 근처에서 발생한 열대성 사이클론과 몬순 우기가 겹치면서 대규모 홍수와 산사태가 발생하고 인도네시아 수마트라, 말레이시아, 태국 등에서 1,000여 명이 사망 또는 실종되었으며, 수많은 이재민과 기반시설이 피해를 입기도 하였다. 이와 같은 극한 강수, 폭염은 단순히 자연재해에 그치지 않고 식량안보, 물 안보, 도시·농촌 인프라 붕괴, 보건, 경제 전반에 영향을 준다.

우리나라 또한 기후위기로부터 예외가 될 수 없다. 2024년 여름에는 전국 평균기온이 25.6℃로 1973년 관측 이래 역대 1위, 열대야일수 24.5일로 역대 1위, 폭염일수 30.1일로 역대 2위를 기록하였다(그림 2). 특히, 올해 7월 24일부터 8월 31일까지 전국 대부분 지역에 폭염특보가 유지되는 등 매우 더운 해로 온열질환자는 3,704명, 사망자는 34명으로 나타났다. 또한 올해는 7월부터 10월 상순까지 강릉지역에 가뭄이 발생하여 제한급수를 실시하고 가뭄으로 인한 최초의 재난지역으로 선포되기도 하였다. 그러나 9월 2일 군산에는 1시간 동안 152.2mm의 극한호우가 내려 상가 26동이 침수되고, 철도 운행이 중단되기도 하였다.

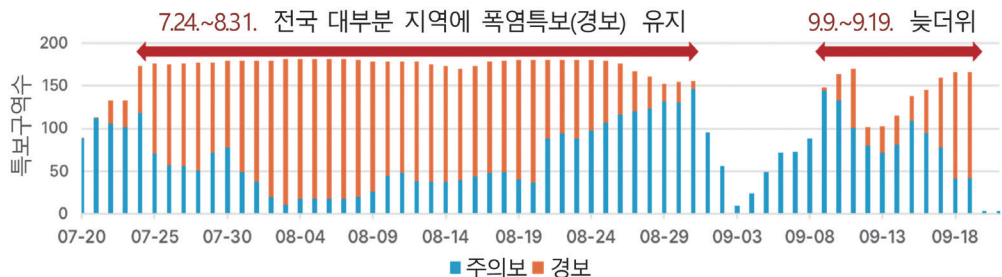


그림 2. 2024년 폭염특보 발효 현황

이렇게 빈발하고 있는 이상기상·기후에 의한 사회경제적 피해를 최소화하고, 무엇보다 국민의 안전과 재산 보호를 위해서는 사전에 대비할 수 있는 분야별 기후재난 안전 대책이 필요하다. 특히, 국민의 안전 및 삶과 직결되는 재난안전, 농업, 물, 에너지 등 다양한 분야에서는 기후예측정보를 활용한 과학기반의 장기 대책 수립이 시급하다.

II 기상청의 역할과 독자기후예측시스템의 필요성

기상청은 국민 일상생활의 안전 및 재산보호 등 사회경제적 피해 최소화를 위해 날씨예보와 기후예측정보를 제공하고 있다. 예보발표일부터 11일째 되는 날까지의 초·단·중기예보를 날씨예보라고 하며, 11일 이후의 장기간의 예측정보를 기후예측정보라고 한다. 기후예측정보는 1개월전망, 3개월전망, 계절전망, 연기후전망 등으로 이루어지며, 주로 기온과 강수량에 대한 정보를 제공한다(그림 3).



그림 3. 기상청 날씨예보 및 기후예측 종류

날씨예보(초·단·중기예보)를 생산하기 위해서는 ‘관측자료’, ‘수치예보모델’, ‘예보관’의 3요소가 필요하다. 촘촘하고 정확한 관측자료 분석을 통해 현황을 파악하고, 현황이 반영된 수치예보모델에서 예측해 낸 미래상황을 숙련된 예보관이 과거 유사사례 등 다양한 통계, 물리·역학적 해석 등을 통해 최종적으로 결정한다. 특히, 수치예보모델은 다양하고 복잡한 대기 현상을 물리·역학적으로 계산하는 도구의 한가지로써 슈퍼컴퓨터의 성능이 빠르게 발전하면서 활용도가 점점 더 커지고 있고, 전세계 기상청은 수치예보모델 개발에 투자를 아끼지 않고 있다. 기상청은 영국의 수치예보모델을 활용하여 예보를 생산하여 오다가, 독자기술의 한국형 수치예보모델(Korean Integrated Model, KIM)을 개발하여 2020년부터 날씨예보에 사용하고 있다(한국형수치예보모델개발사업단, 2020). 특히,

세계 최초로 전세계를 8km 격자 단위로 쪼개서 촘촘하게 계산이 가능한 고해상도 전지구 수치예보모델을 2025년부터 운영하고 있다.

그럼, 기후예측정보는 어떻게 생산할까? 기후예측정보도 날씨예보와 마찬가지로 기후예측모델과 이를 운영하기 위한 기후예측시스템이 요구된다. 현재 영국에서 개발된 기후예측시스템(Global Seasonal forecast system, GloSea)을 2013년 처음 도입하였으며, 3차례에 걸쳐 업데이트하여 사용하고 있다. 영국기상청과 동일한 버전의 기후예측시스템을 활용하고, 앙상블 자료 상호 공유 등 기술 협력 중에 있다.

그럼 왜 우리나라에서 개발한 한국형 수치예보모델을 동일하게 사용하지 않는 것일까? 10일 내외의 단기간을 예측하는 수치예보모델은 대류운 등 짧은 시간에 발생하고 발달하는 작은 규모의 현상들을 예측하는데 특화되어 있어, 10일 이상을 넘어서 예측에 활용하기에는 정확도의 한계가 있다. 즉, 한국형 수치예보모델에 입력자료로 사용하는 대기의 초기 상태는 14일 이내 예측은 신뢰할 만하나 이후에는 신뢰성이 급격히 떨어진다. 이를 극복하기 위해 해양, 해빙, 지면, 에어로졸, 식생 등 대기와 상호작용하는 지구시스템(기후시스템) 요소를 반영하여 복합적으로 계산해 내는 지구시스템모델기반의 기후예측시스템이 요구된다. 이는 기상청이 한국형 수치예보모델을 개발하였음에도 불구하고, 10일 이상의 긴 기간에 대한 기후예측정보를 생산하는 데 영국 기후예측시스템을 활용하는 이유다.

그러나, 영국기상청 기후예측시스템도 한계가 있다. 여전히 최소한의 지구시스템모델을 기반으로 하기 때문에 예측성의 한계와 활용의 한계가 남아 있다. 영국기상청 기후예측시스템은 영국 및 유럽 주변 기후 환경에 중점을 두고 개발되어 동아시아·한반도 기후환경 변화를 예측하기에는 부족한 면이 있다.

또한, 1개월과 3개월 기후예측에 중점을 둔 기후예측시스템으로 급격하게 변화하고 있는 동아시아·한반도 기후환경에 부합한 기후위기 적응 대책을 수립하고 이행하기 위해서 필요로 하는 근미래(1~10년) 기후예측을 하기에는 시간규모에 한계가 있다. 「탄소중립녹색성장기본계획」, 「전력수급계획」, 「자연재해저감 종합계획」 등 10년 단위의 국가기본계획 수립, 기후변화에 따른 작물재배적지 선정, 기후리스크를 최소화하는 재해보험 설계 등 중장기 의사결정에 활용하기에는 3개월 이상의 기후예측 공백이 초래된다(그림 4).

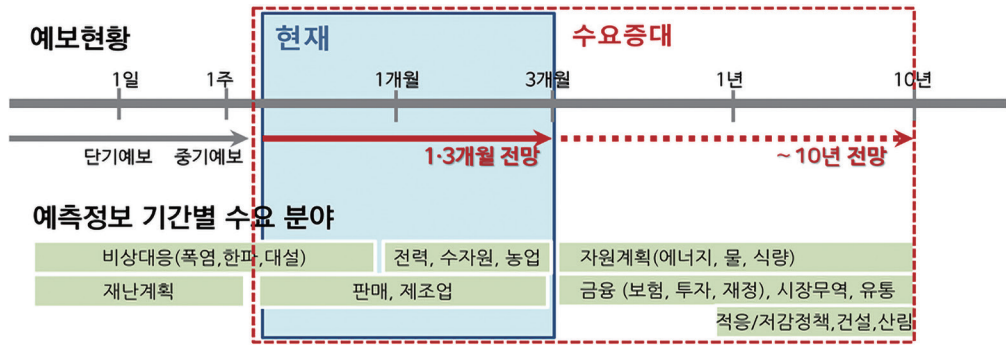


그림 4. 기상청 날씨예보 및 1·3개월전망과 수요 분야

특히, 영국기상청 기후예측시스템은 자체적으로 동아시아·한반도 기후환경에 적합하게 개선하기 위해서는 역학·물리과정 개선이 핵심이나 역학코어 등 핵심모듈 수정·개선에 제약이 따라 기술 자립의 획기적인 도약이 어렵다.

III 국가기후예측시스템과 기후정책 자립

기상청은 「기후위기 대응을 위한 탄소중립·녹색성장 기본법」 및 같은 법 시행령에 따라 기후위기 감시 예측에 관한 업무 총괄지원 기관으로써, 또한 「기후·기후변화 감시 및 예측 등에 관한 법률」에 따른 기후예측정보 생산·제공 기관으로써 관계부처, 지자체 및 관계기관이 기후위기 감시 및 예측정보를 기반으로 기후위기 적응 시책을 수립하고 이행하도록 적극지원 해야만하는 책무가 있다.

이에, 기상청은 올해 4월에 근미래(1년~10년) 기후위기 대응을 위해 동아시아·한반도 기후환경에 적합한 국가기후예측시스템 개발에 착수하였다. 본 국가기후예측시스템은 국내 학계를 중심으로 기후분석 및 기후예측모델 전문가가 협력하여 7년(2025~2031년) 동안 개발되며, 한국형 수치예보모델(KIM)을 기반으로 개선·개발되는 독자 모델을 목표로 한다. 즉, 동아시아·한반도 기후환경에 부합하게 기후예측모델의 역학코어를 한국형으로 개발하고, 미국, 일본 등 전지구 기상위성자료뿐만 아니라, 기상청이 운영하는 국가기상위성 자료와 지상·고층 관측자료를 조밀하게 활용하는 한국형 기후예측시스템을 개발한다.

또한 동아시아·한반도 기후시스템의 변화를 즉각적으로 반영하여 업데이트 할 수 있게 지구시스템모델을 개발하여 향후 100년까지 기후변화 예측이 가능하도록 설계하였다.

IPCC 제6차 평가보고서에서는 지구시스템모델(Earth System Model, ESM) 활용으로 더욱 정밀해진 기후변화 예측을 가능하게 하며, 이를 통해 국가 수준의 기후 리스크(위험) 평가, 영향 분석, 적응 및 완화 전략 수립에 핵심적인 과학적 근거를 제공한다고 설명하였다. 지구시스템모델(ESM)이란 대기, 해양, 지표면, 빙하, 생물권 등 지구 기후시스템을 구성하는 요소들의 복잡한 상호작용을 물리, 역학, 화학, 생물학적 과정을 포함하여 시뮬레이션하는 정교한 수치모델로서 기후시스템 요소간의 복잡한 과정을 반영하여 전 지구 및 지역별 기온, 강수량 변화, 해수면 상승 등을 보다 현실화할 수 있다(그림 5).

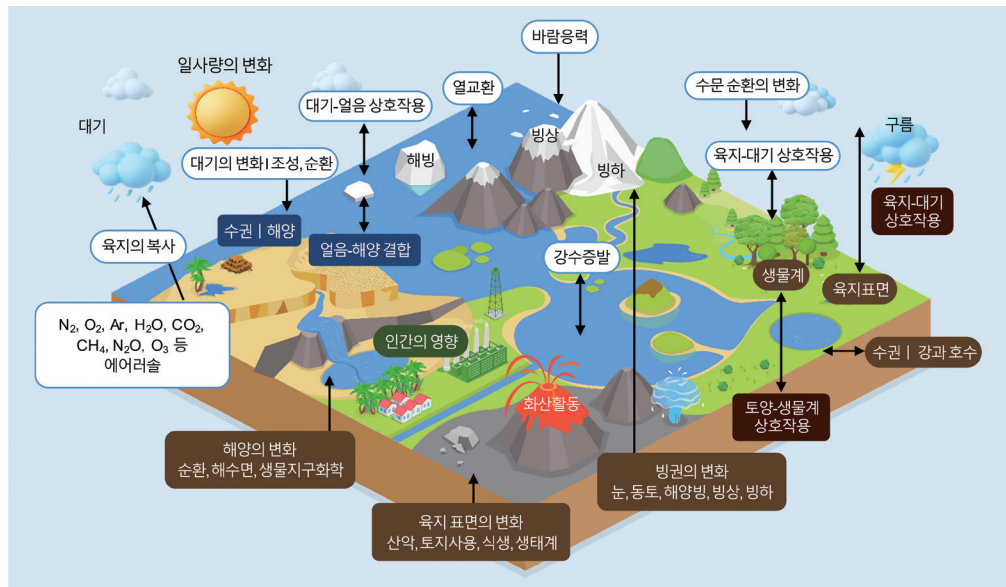


그림 5. 지구 기후시스템 모식도

따라서 국가기후예측시스템은 향후 한국형 대기, 해양, 지표에 대한 핵심기후변수와 함께 극한고온·저온, 극한호우, 장기가뭄 등의 극한기후예측이 가능하다. 또한 빙설, 연안 등 기후시스템에 영향을 끼치는 직·간접 기후영양인자를 제공할 뿐만 아니라 자연 변동에 의한 대기 중 이산화탄소 농도 변화 추세 등의 산출도 가능하다.

일반적인 의미의 기후정책 자립은 외부 기술이나 국제 분석체계에 의존하지 않고 국가가 스스로 자국의 미래 기후를 예측하여, 기후위험을 진단하고 이를 바탕으로 독립적이고 주도적으로 기후 정책을 설계 집행, 평가하는 능력을 의미한다. 이는 단순한 기술 독립이 아니라, 국가 기후전략 전반의 지속성과 안전성 및 탄력성을 담보하는 핵심 역량이다. IPCC(2022)는 정책 자립을 가진 국가는 변화하는 기후위험에 더 신속하고 효과적으로 대응할 수 있다고 할 정도로 기후위기 시대에 기후정책 자립은 매우 중요하다.

이러한 관점에서 기상청은 영국기상청 기후예측시스템에 대한 의존성에서 벗어나 한국형 독자 국가기후예측시스템 개발·구축을 통해 기술 자립을 확보하고자 한다.

우리나라 지형과 기후환경에 맞는 기후예측을 기반으로 기후위험을 평가하고 기후위기 대응 정책의 수립과 이행은 기후정책 자립의 구체성과 효율성을 높이고 실제 위험을 토대로 적응, 감축 전략 수립이 가능하게 할 것이다. 또한 기상청은 지속적으로 한국형 독자 국가기후예측시스템 개발·구축 및 고품질의 국내의 관측자료를 수집하여 국가기후예측시스템을 안정적으로 운영하고 미래 기후예측정보를 생산하여 재난안전, 농업, 에너지, 물 등 다양한 분야에 맞춤형으로 제공함으로써 미래 식량 안보, 에너지 안보 및 안정적 수자원 확보 등 기후정책에 직접적으로 기여할 것으로 기대한다. 급변하는 기후위험에 대한 국가 차원의 대응능력을 향상하여 기후 안보 역량을 확보할 수 있으며, 기술 및 예측역량을 기반으로 국제적인 기후·외교·산업 경쟁의 우위를 확보함으로써 국제 협상력과 과학기술 경쟁력을 강화할 수 있다(그림 6).



그림 6. 한국형 독자 국가기후예측시스템을 기반으로 한 기후예측활용 분야 예시

IV 국가기후예측시스템을 통한 지속가능한 기술자립과 기후정책 자립을 위한 과제

앞서 언급한 바와 같이 기후정책의 자립은 과학적·기술적 자립에서 출발한다. 국내 기후환경을 고려한 독자 기후예측 기술의 확보와 자립 기술 기반으로 생산된 기후예측정보를 활용한 기후정책 수립과 이행, 평가는 정책 실패를 최소화하는데 기여할 것이다. 기후정책의 근거로 국제기구 또는 외국 자료에 의존할 경우, 국내 상황과 부합하지 않아 정책의 이행 가능성이 낮아지고 정책의 실패로 이어질 위험이 크다.

국가기후예측시스템의 지속가능한 기술개발과 성능 향상은 기후예측 기술 자립의 성패를 좌우한다. 이를 위해서는 R2O2R (Research-to-Operations-to-Research) 순환 체계를 효과적으로 구축하는 것이 매우 중요하다. 학계의 혁신적인 연구성과를 현업 운영시스템에 신속하게 적용하고, 그 운영 경험과 피드백을 다시 연구로 환류시키는 선순환 구조를 의미한다. 소통과 공동 책임 인식하에 강력한 협업 생태계 구축이 필요하며, 표준화된 연구 공동 플랫폼 및 인터페이스를 통해 모델 코드 버전 관리, 입출력 데이터 포맷과 검증 도구 등을 표준화하여야만 효율적인 현업화가 가능해진다. 특히, 현업테스트베드를 통해 학계에서 개발된 모델 버전을 현업 시스템과 동일하거나 유사환경에 시험운영하고 객관적인 성능 지표를 마련하여 검증하고, 그 결과를 학계와 현업기관에 즉각적으로 피드백하여 연구 성과를 극대화할 필요가 있다. 이에, 국가기후예측시스템 개발이 완료되는 시점에는 범용 국가기후예측모델을 학계와 연구계에 배포하여 커뮤니티모델로 활용되게 함으로써, 지속가능한 기술 공유가 활성화할 수 있는 선순환체계 마련도 필요하다.

성공적인 기후정책 자립을 위해서는 이러한 국가기후예측시스템을 개발하고 운영하는 기술에 더해 사회적 수요를 기반으로 구축되어야 하며 수요자가 쉽게 접근하고 활용할 수 있는 정보 제공체계 마련도 시급하다. 국민 누구나 활용할 수 있는 예측정보 제공뿐만 아니라, 효율적으로 기후위기에 대응할 수 있도록 정부, 지자체, 산업계 등이 요구하는 맞춤형 정보를 제공함으로써 기후정책 효과를 극대화하는데 기여할 필요가 있다. 이에, 국가기후예측시스템 개발 사업에는 국가기후예측모델 기술, 현업운영 기술과 함께 수요자 맞춤형 기후예측서비스 제공 체계 개발도 포함된다.

구슬도 꿰어야 보배라고 하였다. 농업·식량, 재난·안전, 전력·에너지, 물관리, 금융·보험 등 기후위기에 민감한 다양한 분야를 대상으로 한 수요자 자문단 등의 운영 등을 통해 지속적으로 요구를 파악해야 한다. 국가기후예측시스템을 통해 제공되는 기후예측정보는

기후예측모델의 불확실성, 관측자료의 품질과 공백에서 오는 불확실성 등 다양한 한계점을 내재하고 있다. 따라서 기후예측정보의 불확실성을 정량화하여 사용자에게 함께 제공하고 이해시킬 수 있는 방안 마련도 필요하다.

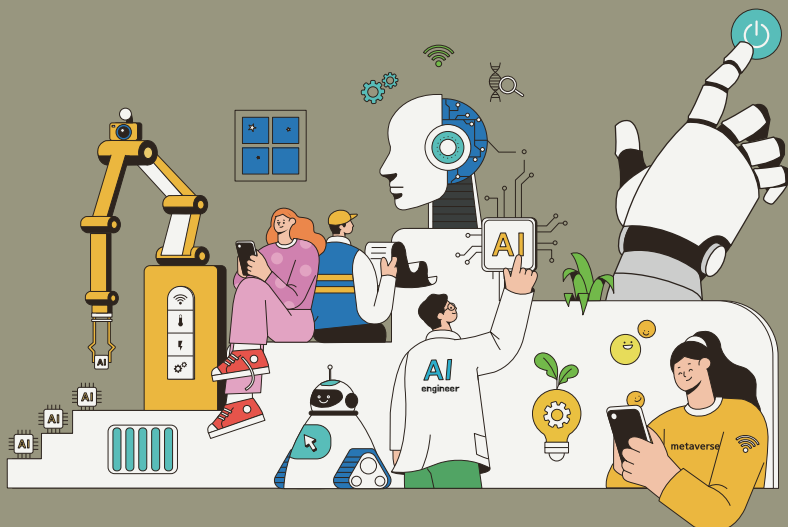
기후위기 속에서 기후 적응에 대한 만능 해결책은 없다. 기후 현상의 예측 불가능성과 이상기후·극한기후의 빈도 및 강도의 증가는 국가·기관 운영과 개인의 삶을 상당히 어렵게 할 수 있으며, 특히 사회적 약자, 소외된 계층에게는 더 큰 위협으로 다가올 수 있다. 기후재난으로부터 사회안전망을 구축하기 위해서는 사전에 준비하는 예방이 필수적이다. 독자기술의 국가기후예측시스템을 통해 한걸음 빨리 기후위기 대응이 가능해지길 기대해 본다.

참고문헌

- 차동현 등, 2023: 차세대 기후예측시스템 개발을 위한 기획연구.
- 한국형수치예보모델개발사업단, 2020: 한국형수치예보모델개발사업 최종보고서.
- 한국환경정책·평가연구원, 2020: 국가 기후 및 에너지 관리 정책개발 기획연구.
- IPCC, 2022: AR6 WGII Report.
- WMO, 2023: State of the Global Climate Report.
- WMO, 2024: Global Annual to Decadal Climate Update.
- WMO, 2025: 2024년 아시아기후보고서.
- UNEP, 2021: Adaptation Gap Report.

부록

기상기술·정책지 발간 목록



기상기술·정책지 발간 목록

❖ 창간호, 제1권 제1호(통권 창간호), 2008년 3월

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

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

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

❖ 항공기 관측과 활용, 제1권 제3호(통권 제3호), 2008년 9월

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

기상기술·정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 전지구관측시스템(GEOSS) 구축과 이행의 중요성	정순갑	1-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • GEO/GEOSS 현황과 추진 계획 • GEOSS 구축을 위한 전략적 접근 방안 • GEO 집행위원회에서의 리더십 강화 방안 • 국내의 분야별 GEOSS 구축과 발전 방안 - 재해 분야 - 보건 분야 - 에너지자원 분야 - 기상 및 기후 분야 - 수문 및 수자원 분야 - 생태계와 생물다양성 분야 - 농업 분야 - 해양 분야 - 우주 분야 	엄원근 김병수 허 은 신동철 박덕근 이희일 황재홍, 이사로 이병렬 조효섭 장임석 이정택 김태동 김용승, 박종욱	6-21 22-31 32-39 40-41 42-44 45-47 48-50 51-53 54-56 57-58 59-62 63-67 68-71
논 단	• Taking GEOSS to the next level	José Achache	72-75
해외기술동향	<ul style="list-style-type: none"> • GEOSS 공동 인프라(GCI) 구축 동향 • 최근 주요 선진국의 GEO 구축 현황 	강용성 이경미	76-83 84-95
뉴스 포커스	• 한국, GEO 집행 이사국 진출	이용섭	96-97

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

칼 럼	• 녹색산업으로서의 기상장비 산업 육성 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 기상장비의 산업여건과 국산화 전략 • 기상장비 수출 산업화를 위한 성공전략 • 기상레이더 국산화 추진 방안 • 기상레이더의 상용화 현황과 육성 방안 • 기상장비의 시장성 확보 전략 및 방향 	김상조 이종국 장기호, 석미경, 김정희 조성주 이부용	4-13 14-21 22-29 30-41 42-51
논 단	• 외국의 기상레이더 개발 동향과 제언	이규원	52-72
해외기술동향	<ul style="list-style-type: none"> • 유럽의 기상장비 산업 현황: 핀란드 바이살라를 중심으로 • 세계의 기상장비 및 신기술 동향 	방기석 김지영, 박소연	73-80 81-89

❖ 기후변화와 수문기상, 제2권 제2호(통권 제6호), 2009년 6월

칼 럼	• 기후변화에 따른 수문기상 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화와 물환경정책 • 기후변화에 따른 물 관리 정책 방향 • 기후변화에 따른 하천 설계빈도의 적정성 고찰 • 수문기상정보를 활용한 확률강우량 산정 방안 • 수문기상학적 기후변화 추세 • 기상정보 활용을 통한 미래의 물관리 정책 • 이상가뭄에 대응한 댐 운영 방안 	김영훈 노재화 김문모, 정창삼, 여운광, 심재현 문영일, 오태석 강부식 배덕호 차기욱	4-15 16-27 28-37 38-50 51-64 65-77 78-89
논 단	• 기후변화의 불확실성 해소를 위한 대응방안	양용석	90-110
해외기술동향	<ul style="list-style-type: none"> • 미국의 기상-수자원 연계기술 동향 • NOAA의 수문기상 서비스 및 연구개발 현황 • 제5차 세계 물포럼(World Water Forum) 참가기 	정창삼 김지영, 박소연 김용상	111-121 122-131 132-140

기상기술·정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 기상정보의 경제적 가치 제고를 위한 정책 방향	전병성	1-2
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화에 따른 에너지정책 • 기후변화 대응이 경제에 미치는 영향 • 기후변화가 농업경제에 미치는 영향 • 기상 재난에 따른 경제적 비용 손실 추정 • 기상산업 활성화와 과제 • 날씨 경영과 기상산업 활성화를 위한 정책 제언 	박현종 박종현 김창길 김정인 이만기 김동식	4-18 19-29 30-42 43-52 53-59 60-69
논 단	• 기후변화와 새로운 시장	이명균	70-78
해외기술동향	<ul style="list-style-type: none"> • 기상정보의 사회·경제적 가치와 편익 추정 • 강수의 경제적 가치 평가 방법론 	김지영 유승훈	79-85 86-96
뉴스 포커스	• 기상정보의 경제적 가치 평가 워크숍 개최 후기	이영곤	97-103

❖ 날씨·기후 공감, 제2권 제4호(통권 제8호), 2009년 12월

칼 럼	• 날씨공감포럼의 의의와 발전방향	전병성	1-2
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • [건강] 지구온난화가 건강에 미치는 영향 • [해양] 기후변화에 있어서 해양의 중요성과 정책방향 • [산림] 기후변화에 따른 산림의 영향과 정책방안 • [관광] 기후변화 시대의 관광 활성화 정책방향 • [도시기후] 대구의 도시 기후 및 열 환경 특성 • [에너지] 태양에너지 소개와 보급의 필요성 • [디자인] 생활디자인과 기후·기상과의 연계방안 	고상백 이재학 차두송 김의근 조명희, 조운원, 김성재 김정배 김명주	4-19 20-29 30-41 42-50 51-60 61-72 73-88
논 단	• 국민과의 '소통' - 어떻게 할 것인가?	김연종	89-97
뉴스 포커스	• 날씨공감포럼 발전을 위한 정책 워크숍 개최 후기	김정윤	98-101

❖ 기후변화와 산업, 제3권 제1호(통권 제9호), 2010년 3월

칼 럼	• 기후변화에 따른 기상산업의 성장가능성과 육성정책	박광준	1-2
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 기상이변의 경제학 • 기후변화 영향의 경제적 평가에 관한 소고 • 기후변화 정책에 따른 산업계 영향 및 제언 • 기후변화예측 관련 기술 동향 및 정책 방향 • 기후변화와 건설 산업 • 코펜하겐 어코드와 탄소시장 • 기후변화, 환경산업 그리고 환경경영 • 이산화탄소(CO2) 저감기술 개발동향: DME 제조기술 	이지훈 한기주 이종인 이상현, 정상기, 이상훈 강운산 노종환 이서원 조원준	4-11 12-21 22-32 33-45 46-56 57-66 67-77 78-84
논 단	<ul style="list-style-type: none"> • 기후변화와 정보통신 산업의 상관관계: 그린 IT를 중심으로 • 기후변화 대응을 위한 산업계 및 소비자의 책임 	양용석 김창섭	85-99 100-109
뉴스 포커스	• 기후변화미래포럼 개최 후기	김정윤	110-115

기상기술·정책지 발간 목록

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

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

❖ 장기에보 정보의 사회·경제적 가치와 활용, 제3권 제3호(통권 제11호), 2010년 9월

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

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

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

기상기술·정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

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

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

기상기술·정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

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

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

기상기술·정책지 발간 목록

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

칼 럼	• 장마와 날씨경영	고윤화	3-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 수자원 확보에 있어서 장마의 역할 • 장마가 농업생산에 미치는 영향 • 장마의 변동성과 예측성 향상 • 장마기간 유통산업 영향 및 전략 • 장마철 유의해야할 건강 상식 	박정수 최지현 서경환 김정윤 이준석	8-16 17-24 25-30 31-40 41-51
논 단	• 장마-몬순 예측기술 향상 방안	하경자	52-59
해외기술동향	• 동아시아 여름강수 예측기술 현황	권민호	60-65

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

칼 럼	• 겨울철 위험기상 예보의 중요성	고윤화	3-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 겨울철 위험기상을 위한 에너지 정책 • 한국의 동절기 도로제설 현황 • 한파가 농업에 미치는 영향 • 겨울철 한파 대비 건강관리 	김두천 양충헌 심교문 송경준	6-17 18-29 30-41 42-56
논 단	<ul style="list-style-type: none"> • 겨울철 위험기상의 예측능력 향상 • 미래 겨울철 위험기상의 변화 	김주홍 차동헌	57-68 69-75

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

칼 럼	• 영향예보를 통한 기상재해 리스크 경감	고윤화	3-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 영향예보 비전과 추진 방향 • 재해기상 영향예보시스템 현황 소개 • 영향예보 지원을 위한 수치예보 개발 방향 • 영향예보를 위한 수문기상정보 지원 	정관영 최병철 김동준 이은정	6-22 23-31 32-40 41-51
논 단	• 재해영향예보의 효과	손철, 김건후	52-63
포커스	• 확률 예보를 위한 앙상블예측 기술 소개 및 현황	강지순	64-74

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

칼 럼	• 기상서비스를 변화시키는 인공지능	고윤화	3-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 인공지능의 발달이 몰고 오는 변화상 • 4차 산업혁명과 기상예보시스템의 혁신 • 인공지능 시대를 살아가기 위한 인간 능력은? • 인공지능의 기상정책 개발 활용 	진석용 최혜봉 구본권 국립기상과학원	6-20 21-30 31-50 51-63
논 단	• 인공지능 도입으로 정확도를 혁신하는 기상예보	고한석	64-77

기상기술·정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

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

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

기상기술·정책지 발간 목록

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

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

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

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

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

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

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

칼 럼	• 도심항공모빌리티(UAM) 성공을 위한 필수 정보 '기상정보'	박광석	3-4
정책초점	• 도심항공교통을 위한 기상관측 제언	이규원	6-19
	• 도심항공기상을 위한 중미기상학	강성락	20-31
	• 안전한 UAM을 향한 제언	홍진규	32-41
	• 도심항공교통(UAM) 안전을 위한 바람시어 및 돌풍감지시스템	박문수	42-55
논 단	• K-UAM 사업으로의 도시대기과학 연구 활용	김재진	56-66
포커스	• UAM 운항 지원을 위한 항공기상 자료 관련 제언	구성관	67-76

기상기술·정책지 발간 목록

❖ 2050 탄소중립 대응 전략, 제14권 제2호(통권 제33호), 2021년 12월

칼 럼	• 탄소중립을 위한 청량음료 한 모금	박광석	3-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 2050년 탄소중립 달성 전략 • 2050 탄소중립 추진전략(에너지기술) • '2050 탄소중립'과 기후변화 과학 • 탄소중립 이행을 위한 신재생에너지 발전 분야의 이음새 없는(Seamless) 기후예측정보의 활용 제언 • 2050 탄소중립 달성을 위한 생태계의 역할 • 탄소중립대응을 위한 탄소흡수원 관리 	노동운 김현구 전의찬 오지현 이동근 이우균	6-18 19-25 26-32 33-44 45-55 56-65
포커스	• 기후위기 극복을 위한 탄소중립과 기후변화 적응	박진한	66-74

❖ 기상특보의 사회경제적 효과, 제15권 제1호(통권 제34호), 2022년 6월

칼 럼	• 기상재해 리스크 경감을 위한 기상청의 도전	유희동	3-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 폭염특보 현황 및 선진화 • 폭염과 건강영향, 그리고 대응정책 • 폭염(열파)이 국민 건강에 미치는 영향을 고려한 폭염특보 개선 방향 제언 • 호우특보와 재난관리 • 도시 기후변화 재해취약성분석 제도의 이해와 기상분야 과제 	이명인 홍윤철 최광용 조재웅 권용석	6-20 21-29 30-41 42-54 55-62
논 단	• 변화하는 기후에 달라지는 태풍: 시사점과 대응방안	문일주	63-73
포커스	• 자연재난에 안전한 지자체 구축을 위한 기상특보의 활용	허종배	74-83

❖ 지진·화산·지진해일 기술동향 및 추진방향, 제15권 제2호(통권 제35호), 2022년 12월

칼 럼	• 지진, 더 이상 남의 나라 얘기가 아니다	유희동	3-4
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 3차원 속도구조 모델을 이용한 지진 분석과 지진동 예측 • 우리나라 주변 해역에서 발생하는 지진 • 지진해일 모델링의 새로운 도전과 과제 • 지진해일 조기 탐지 및 예·경보를 위한 기술 동향 및 제언 • 화산기술과 화산특화연구센터 	이준기 김광희 손상영 신성원 윤성효	6-16 17-25 26-42 43-55 56-70
포커스	• 백두산 화산 재해	이윤수	71-81

❖ 선진 기술동향 및 미국 기상예산 분석, 제16권 제1호(통권 제36호), 2023년 6월

칼 럼	• 기상기술의 퀀텀점프를 가능케 할 양자컴퓨팅 기술	유희동	3-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 메커니즘 기반의 장마 이해 • 집중관측을 통한 한반도 중규모 강수과정 연구 • 양자컴퓨팅과 일기예보: 장마와 집중호우를 중심으로 • 수치해석기반 기상 및 기후예측을 위한 양자컴퓨팅의 실현 가능성 연구 	장은철 이규원 방승현 안도현	8-19 20-35 36-47 48-58
포커스	• 미국 해양대기청(NOAA)의 예산구조 분석	김득갑	59-71

기상기술·정책지 발간 목록

❖ 기후전망·기상조절 기술동향 및 선진국 투자 동향, 제16권 제2호(통권 제37호), 2023년 12월

칼 럼	• 기후위기 시대, 더욱 안전한 국민의 나라를 위한 기상청의 역할	유희동	3-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 신속하게, 정의로운 저탄소사회로 전환을 위한 미래 기후전망의 활용과 제언 • IPCC 6차 기후변화 평가보고서 기반 한반도 상세 기후변화 전망 • 기상조절기술 현황 및 전망 • 구름물리첨배: 미래로 전진을 위한 실험실 	최영은 차동현 김병곤 엄준식	8-22 23-35 36-48 49-67
포커스	• 기상선진국 미국의 기상 관련 예산 분석	김득갑	68-89

❖ 해양기후변화 대응과 해양 감시·관측 기술, 제17권 제1호(통권 제38호), 2024년 6월

칼 럼	• 미래를 위한 항해: 해양기상·기후 서비스 강화	유희동	3-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 해양기후변화의 이해와 예측 • 아르고 플로트 기반 전지구 해양감시·관측 • 웨이브 글라이더(wave glider) 소개 및 활용 • 해양글라이더의 개발과 활용: 국내 사례 및 태풍 예측력 향상 방안 	안중배 김백조, 조형준, 이철규 김대현 박종진	8-24 25-35 36-49 50-69
포커스	• 수요자 중심의 해양기상서비스	박승균	70-83

❖ 인공강우 기술의 발전과 기후변화 대응을 위한 활용방안, 제17권 제2호(통권 제39호), 2024년 12월

칼 럼	• 비구름을 만드는 '인공강우', 산불 예방을 위한 새로운 대안	장동언	3-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 인공강설실험의 물리·화학적 통합 검증 • 인공강우 시뮬레이션 연구 및 현업운영 방향 • 인공강우의 실질적인 효과들 • 모델링을 통해 살펴본 인공강우의 생태보호 효과 • 인공강우를 통한 미세먼지 저감 가능성 • 인공강우를 통한 우박억제 효과 • 인공강우 항공관측의 필요성 및 전망 • 구름물리실험첨배 연구성과 	김병곤 송상근 유철상 나우영 박진수 김경익 엄준식 박민수	8-21 22-41 42-58 59-72 73-85 86-94 95-115 116-129
해외기술동향	• 주요국가별 인공강우 기술 및 현황	차주완	130-137
포커스	• 기상조절 주요 현업국가의 조직과 예산	김영미	138-143

❖ 초단기부터 기후까지: AI 기반 기상예측 기술개발, 제18권 제1호(통권 제40호), 2025년 6월

칼 럼	• AI 예보 혁신, 국민 안전을 위한 기상청의 새로운 도전	장동언	4-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • AI 단중기 기상예측모델 • AI 기반 기후예측기술 개발 • 예보 지원을 위한 설명가능 인공지능: 신뢰성과 현업 활용성 강화를 위한 제언 • 예보관의 기상 업무 지원을 위한 인공지능기법 연구 방향 	윤세영 함유근 최재식 장은철	8-19 20-37 38-56 57-68
포커스	• AI 분야 국가전략기술 특화연구소	이혜숙	70-80

기상기술·정책지 발간 목록

❖ 기후위기 시대, 국가기후예측시스템을 통한 미래 예측, 제18권 제2호(통권 제41호), 2025년 12월

칼 럼	<ul style="list-style-type: none"> • 불확실한 기후를 예측 가능한 미래로 전환, 국가 기후예측의 전략적 도약 	이미선	4-5
정책초점	<ul style="list-style-type: none"> • 국가기후예측시스템 개발 필요성과 전략 • AI-역학 하이브리드 기후모델의 활용가능성 • 세계 주요국의 기후예측시스템 개발 동향 • 사용자를 위한 기후예측 서비스 방향 • 국가기후예측시스템으로 여는 국가 기후정책 자립 	이명인 윤진호 김혜미 유진호 조경숙	8-21 22-35 36-45 46-61 62-72



기상기술·정책

Vol.18, No.2

Meteorological Technology & Policy

Volume 18, Number 2

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

TEL. 064-780-6505 | FAX. 064-738-9071

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