

이 사업은 복권기금 및 과학기술진흥기금의 지원을 통한 사업으로 우리나라의 공익적 가치에 기여하고 있습니다.

KAST 한국과학기술학원
The Korean Academy of Science and Technology



2024년 석학 커리어 디시전스 과학기술정책제언

인공위성 발전과 미래 수자원 관리

최민하(공학부 정회원, 성균관대학교)

KAST 한국과학기술학원
The Korean Academy of Science and Technology

2024년 석학 커리어 디시전스
과 학 기 술 정 책 제 언

인공위성 발전과 미래 수자원 관리

최민하(공학부 정회원, 성균관대학교)



KAST 한국과학기술학원
The Korean Academy of Science and Technology

발행처
한국과학기술한림원
031) 726-7900
kast@kast.or.kr

발행인
유옥준

발행일
2024년 12월

홈페이지
<http://www.kast.or.kr>

디자인/인쇄
경성문화사



이 보고서의 모든 저작권은 한국과학기술 한림원에 있습니다.

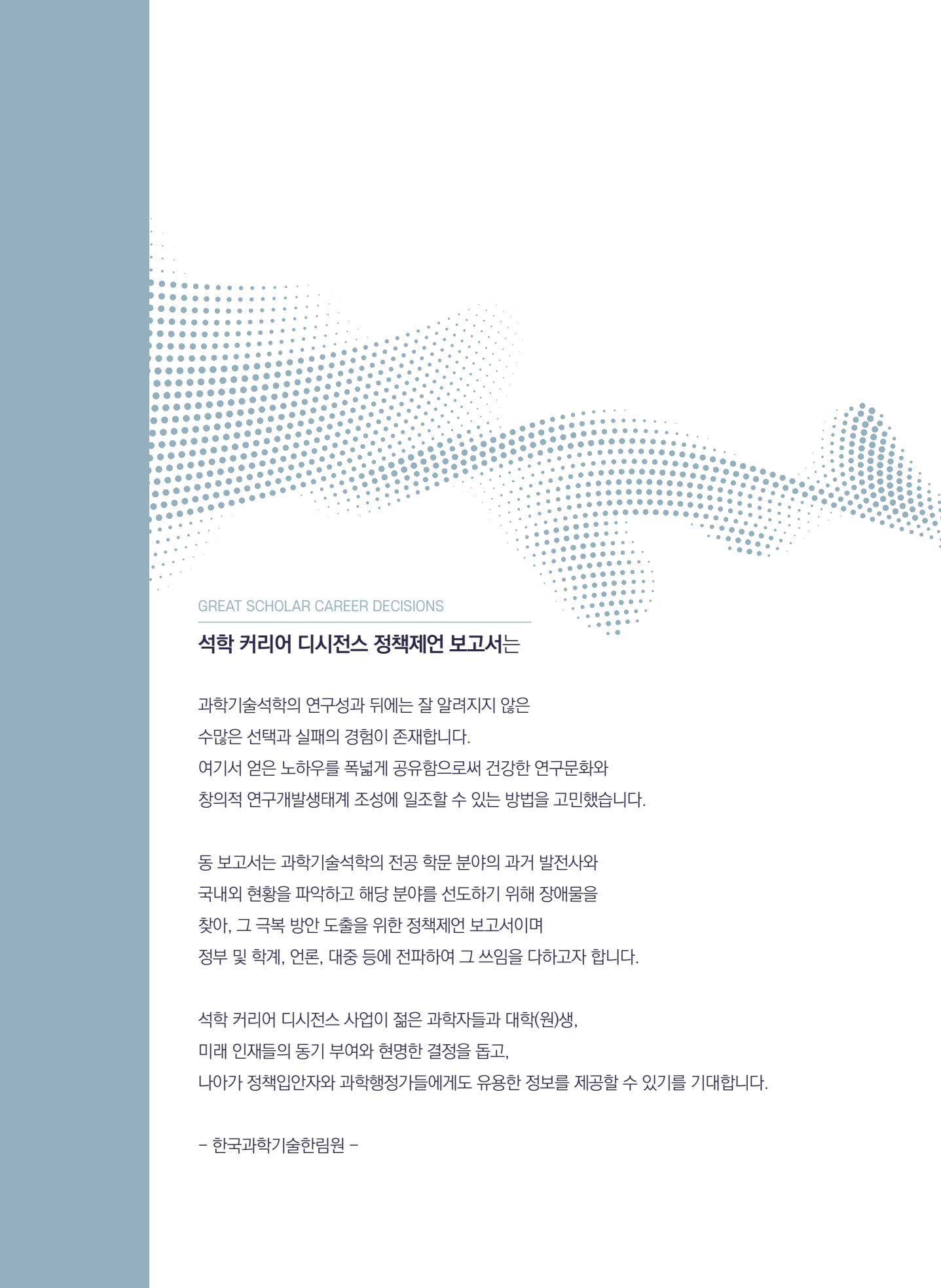
KAST 한국과학기술한림원은

대한민국 과학기술분야를 대표하는 석학단체로서 1994년 설립되었습니다.
우리나라 과학기술계를 대표하는 석학집단으로서,
1,000여명의 과학기술분야 석학들이 한국과학기술한림원의 회원이며,
대한민국이 과학기술 선진국으로 도약하여
글로벌 난제를 해결할 수 있는 최첨단 과학기술 업적을 창출할 수 있도록
창의와 도전의 연구개발 생태계를 만드는 데 기여하고자 합니다.

한국과학기술한림원 더 알아보기

-  **홈페이지** www.kast.or.kr
-  **블로그** kast.tistory.com
-  **포스트** post.naver.com/kast1994
-  **페이스북** www.facebook.com/kastnews





GREAT SCHOLAR CAREER DECISIONS

석학 커리어 디시전스 정책제언 보고서는

과학기술석학의 연구성과 뒤에는 잘 알려지지 않은
수많은 선택과 실패의 경험이 존재합니다.
여기서 얻은 노하우를 폭넓게 공유함으로써 건강한 연구문화와
창의적 연구개발생태계 조성에 일조할 수 있는 방법을 고민했습니다.

동 보고서는 과학기술석학의 전공 학문 분야의 과거 발전사와
국내외 현황을 파악하고 해당 분야를 선도하기 위해 장애물을
찾아, 그 극복 방안 도출을 위한 정책제언 보고서이며
정부 및 학계, 언론, 대중 등에 전파하여 그 쓰임을 다하고자 합니다.

석학 커리어 디시전스 사업이 젊은 과학자들과 대학(원)생,
미래 인재들의 동기 부여와 현명한 결정을 돕고,
나아가 정책입안자와 과학행정가들에게도 유용한 정보를 제공할 수 있기를 기대합니다.

- 한국과학기술한림원 -



최민하
성균관대학교 교수
(한국과학기술한림원 정회원)

최민하 교수는 수문학 및 원격탐사 분야에서 세계적으로 우수한 연구자로 인정받는 석학으로, 현재 성균관대학교 건설환경공학부 교수로 재직 중이다. 고려대학교에서 학사 및 석사를 마친 후 University of New Hampshire (UNH)에서 박사 학위를 취득하였으며, 이후 미국 농무부(USDA) Hydrology and Remote Sensing Laboratory에서 연구원으로 활동하며 위성 원격탐사를 활용한 지표-대기 상호작용 연구를 수행하였다. 귀국 후 한양대학교 교수직을 역임한 뒤, 현재 성균관대학교에서 연구 및 교육을 이어가고 있다.

국내에서는 전통적으로 통계·경험 기반의 수문학 연구가 중심을 이루었으나, 최민하 교수는 수문기상 현상의 물리적 해석 방법과 수문기상 인자 간의 상호작용을 규명하는 연구를 수행하며, 국내 수문학 연구에 새로운 패러다임을 제시하였다. 특히, 기후 변화로 인해 기존의 통계적 해석이 한계를 보이는 상황에서, 보다 정량적이고 물리적인 접근법을 통해 국내/외적으로 동 분야 연구를 선도하고 있으며, 새로운 연구 성과를 바탕으로 차별화된 강의를 진행하고 있다.

또한, 국내 수자원 연구 분야에 위성 원격탐사 기술을 본격적으로 도입한 연구자로 평가받으며, 수문기상 연구를 넘어 가뭄, 홍수, 도시 열섬현상 등 기후변화로 인한 재난·재해 분석 연구를 심도 있게 수행하고 있다. 기후변화로 인해 수문기상학적 패턴이 급격히 변하며 극한 수문현상의 예측과 대응이 중요한 시대에, 기존의 경험적 방법론을 넘어 위성 원격탐사 및 물리적 해석 기반의 새로운 접근법을 제시하였다. 최민하 교수는 학계에서의 영향력 있는 연구자를 뛰어넘어 미래 수문학/위성원격탐사 및 재해 대응 기술의 방향성을 제시하는 핵심 인물로 자리 잡고 있다.



위성 기술 활용 증진을 위한 제언

1. 위성 원격탐사 개요	04
2. 수문기상 분야 활용 기술 현황	14
3. 물관리 분야 활용 기술 현황	44
4. 정책제언	56
5. 결론 및 전망	66

1

위성 원격탐사 개요

- 위성 원격탐사 기술 개요
- 국내 위성 개발 현황

위성 원격탐사 기술 개요

국가 우주개발 전략상 위성 발사 계획에 따라, 최근 다양한 규모의 신규 위성 개발 계획이 추진되고 있어 다양한 센서를 탑재한 가용위성이 증가할 것으로 기대된다. 이를 효율적으로 활용하기 위해서는 차세대 신규 위성의 적시적/다각적 활용을 위한 원천·응용 기술 개발과 위성정보 분석을 위한 영상 분석·수급 체계 구축이 요구되고 있으며, 이는 공간 분포 자료의 활용도가 높고, 접근성이 어려운 지역의 자료를 필요로 하는 수자원 관리 분야에서는 시급한 실정이다.

2021년부터 국내에서는 차세대 중형위성 개발 계획에 의해 국내를 관측하는 높은 시공간 해상도를 갖춘 광학 위성 자료가 제공되고 있으며, 이후 2027년까지는 자료의 시공간적 한계를 극복할 수 있는 신규 위성 개발이 이루어질 예정이다. 따라서 이러한 위성 자료 활용 기반의 개선에 발맞추어 위성 자료를 활용한 수자원 관리 기술이 필요하다. 즉, 신규 위성의 적시적/다각적 활용을 위한 현황을 파악하고 이를 활용할 수 있는 기술 개발이 이루어져야 한다.

최근 물관리 일원화가 이루어진 이후 과학적/체계적 수자원 관리 기술들이 대두되고 있으며, 빈번한 가뭄 및 홍수 등 수재해가 발생함에 따라 이에 효과적으로 대응할 수 있는 시스템이 요구되고 있다. 한편, 환경부 등 유관 기관에서는 수자원 및 수재해를 모니터링하기 위해 신규 위성 사업을 추진하는 등 위성 원격탐사 기법을 활용하기 위한 노력이 계속되고 있다. 홍수 위험도를 산정하고 홍수 예·경보의 정확도를 높이는 데 영상레이더 기반 자료를 활용하려는 연구가 이루어지고 있으며, 다양한 위성 영상을 기반으로 가뭄지수들을 실시간으로 산출하여 이를 가뭄정보시스템을 통해 제공하고 있다.

이러한 배경 속, 본고에서는 위성 원격탐사 기술의 개념과 발전 과정에 대해 소개하고 수문기상, 수자원 관리 분야에서 원격탐사 기술이 어떻게 활용되고 있는지 살펴보고자 하였다. 이를 바탕으로 국내 위성 데이터 활용 증진을 위한 제언을 통해 향후 위성 기반 수자원 관리 기술 발전을 위한 방향성을 제안하고자 한다.

01 위성 원격탐사 개념

원격탐사(Remote sensing)란 특정 물체, 지역 또는 현상에 물리적으로 접촉하지 않는 측정기기를 통하여 얻어진 자료를 분석하여 그 관심 대상에 관련된 정보를 얻는 기술을 의미한다. 원격탐사는 지상, 항공기, 인공위성 등에 탑재되는 카메라, 레이더, 전자광학센서 등을 이용하여 자료를 분석해 정보를 획득하는 기술로 이루어진 학문이며 위성 원격탐사 기술은 그 중 인공위성 영상을 사용하여 지구 표면 및 대기의 정보를 획득하는 기술을 의미한다. 위성 데이터를 통해 지구의 대기, 해양 지표면 등 다양한 환경에 대한 정보가 획득된다. 이러한 데이터는 전자기파의 형태로 수집되며, 각기 다른 스펙트럼 대역을 통해 특정 환경 인자에 대한 정보를 분석하는 데 사용된다. 원격탐사 기술은 지구상의 여러 지역을 실시간으로 관찰하고 분석할 수 있는 장점이 있어 환경 모니터링, 기후변화 분석, 재난 대응 등 다양한 분야에서 그 활용도가 매우 높다.

위성 원격탐사의 장점 중 하나는 물리적으로 접근하기 어려운 지역에서도 광범위한 데이터를 얻을 수 있다는 점이다. 예를 들어, 열대우림, 극지방과 같은 오지에서의 환경 변화 등을 모니터링하는 데 크게 기여할 수 있다. 또한, 위성은 높은 고도에서 넓은 영역을 한 번에 관찰할 수 있기 때문에 지상 관측 장비로는 불가능했던 대규모 분석을 가능케 한다. 이러한 특성으로 인해 위성 원격탐사는 농업, 수자원 관리, 기후 연구 등 다방면에서 중요한 도구로 자리 잡았다.

위성 원격탐사는 기본적으로 플랫폼(위성), 탑재 센서, 지상 수신 시스템, 데이터 처리 시스템으로 구성된다. 이 중 탑재된 센서가 어떤 대상을 관측할 것인가에 대한 핵심 역할을 수행하는데, 전자기파를 이용하여 대기 중 또는 지표면에서 반사되는 신호를 감지하는 방식으로 데이터를 수집한다. 수집된 데이터는 지상으로 전송되어 분석 및 처리되며, 이러한 분석 결과는 과학적 연구 또는 다양한 실무에 활용된다. 특히 전자기파의 다양한 대역을 통해 특정 파장에 민감한 데이터를 얻을 수 있어, 식생 상태, 토양 습도, 해수면 온도 등의 환경적 변수를 효과적으로 모니터링할 수 있다.

102 원격탐사 기술의 발전



위성 원격탐사 기술의 발전은 1950년대 우주 개발 경쟁으로부터 시작되었다. 1957년 구소련은 인류 최초의 인공위성인 Sputnik을 발사하며 우주 탐사의 서막을 열었고, 미국은 1958년 NASA를 설립하고 Explorer 위성을 발사하면서 본격적으로 위성 개발 경쟁이 시작되었다. 이 초기의 인공위성들은 주로 군사적 목적으로 사용되었으며, 지구 표면과 대기의 상태를 관측하는 데 주력하였다. 초기 위성 사진은 대부분 카메라 기반 시스템을 통해 촬영되었다. 인공위성에 탑재된 카메라로 촬영된 필름은 지구로 낙하된 후, 지상에서 회수하는 방식으로 수집되었다. 1960년대 이러한 기술은 전자광학 센서로 대체되어 가시광선 외에도 적외선 등 다양한 파장대를 활용하여 데이터를 수집할 수 있게 해주었고, 이를 통해 지표면의 상태를 더욱 정교하게 감지할 수 있게 되었다. 또한, 이 시기에 위성 데이터가 무선으로 송수신되기 시작하면서, 원격탐사라는 개념이 본격적으로 자리 잡게 되었다.

1970년대에는 군사적인 목적을 넘어서 민간에서도 위성 원격탐사의 중요성이 인식되기 시작했다. 이를 기점으로, 민간 목적으로 처음 개발된 지구 관측 위성인 Landsat 1호가 1972년 발사되었으며, 지구 관측을 목적으로 다양한 전자광학 센서를 탑재하여 지구의 자연 자원과 환경 변화를 모니터링하는 데 중요한 역할을 했다. Landsat 프로그램은 위성 원격탐사 기술의 상업적 및 과학적 발전을 이끌 어낸 대표적인 사례로, 이후 수십 년간 지속적으로 개선된 위성들이 발사되었다. 특히 Landsat 8호에 이르기까지, Landsat 위성들은 다중분광 영상을 제공하여 전 세계 연구자들과 산업계에서 폭넓게 활용되고 있다.

Landsat의 성공은 전 세계적으로 위성 원격탐사 기술에 대한 관심을 증대시켰다. 프랑스의 SPOT 위성(1986년)은 상업적인 목적을 가지고 위성 영상을 제공한 첫 사례로, 이후 다수의 민간 기업들이 상업적 위성 관측 시장에 진출하게 되는 계기가 되었다. 1999년에는 최초의 고해상도 상업용 위성인 IKONOS가 발사되었으며, 이 위성은 고해상도 이미지를 신속하게 제공함으로써 위성 데이터를 상업적 목적으로 활용하는 시대를 열었다. 또한, 1990년대 이후에는 고해상도 영상에 대한 수요가 크게 증가하여 위성 원격탐사 기술의 고도화가 이루어졌다.

이후의 원격탐사 기술은 단순히 영상 촬영에 그치지 않고 디지털 영상 처리 기술을 통해 사용자들이 요구하는 구체적인 데이터를 제공하는 방향으로 진화되었다. 예를 들어, MODIS(MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer)와 같은 센서는 저해상도 광학 센서를 사용해 매일 전 지구를 촬영할 수 있으며, 해수면 온도, 식생 상태, 에어로졸 농도 등의 다양한 환경 정보를 산출하여 제

공한다. MODIS는 1999년 NASA의 Terra 위성과 2002년 Aqua 위성에 탑재되어 지구 전역을 관찰하며, 다양한 연구와 산업적 활용을 위한 데이터를 제공하고 있다.

최근에는 LiDAR(Light Detection and Ranging)와 SAR(Synthetic Aperture Radar)와 같은 기술이 발전하면서, 더욱 정밀한 지표면 분석이 가능해졌다. 특히 LiDAR는 3차원 지형 데이터를 생성할 수 있어 산림 관리, 도시 계획, 재난 복구 등에 활용되고 있으며, SAR는 날씨와 관계없이 지표면의 변화를 감지할 수 있어 지진, 산사태, 홍수 등의 자연재해 발생 시 중요한 정보를 제공하는 데 사용되고 있다. 오늘날 위성 원격탐사 기술은 계속해서 발전하고 있으며, 이를 통해 지구 전역을 실시간으로 모니터링하고 분석할 수 있는 환경이 조성되고 있다.

103 위성 원격탐사의 기술적 특징과 주요 활용 분야



위성 원격탐사 시스템은 위성(플랫폼), 탑재 센서, 지상 수신 시스템, 그리고 데이터 처리 및 분석 시스템으로 구성되며, 가장 핵심적인 요소는 위성에 탑재된 센서 시스템이다. 센서는 주로 전자기파를 활용하여 대기와 지표면에서 반사되거나 방출되는 신호를 감지한다. 원격탐사 센서는 Passive 센서와 Active 센서로 구분된다. Passive 센서는 태양광을 반사하거나 지표면에서 자연적으로 방출되는 에너지를 수집하는 방식으로 데이터를 얻는다. 대표적인 Passive 센서는 적외선 센서와 가시광선 센서로, 이들은 주로 지구의 대기, 해양, 식생, 토양 등의 상태를 모니터링하는 데 사용된다. 반면, Active 센서는 자체적으로 신호를 발사하고, 그 신호가 지표면에 반사되어 돌아오는 데이터를 수집하는 방식이다. SAR나 LiDAR가 대표적인 Active 센서로, 구름이나 악천후와 같은 조건에도 지표면 정보를 수집할 수 있다는 강점이 있다.

위성 원격탐사 기술의 또 다른 특징은 공간 해상도와 시간 해상도의 조합을 통해 다양한 시공간적 범위를 갖는 데이터를 생산할 수 있다는 점이다. 공간 해상도는 공간적으로 서로 다름을 감지할 수 있는 면적 단위이며, 해상도가 높을수록 더 세밀한 정보를 수집할 수 있다. 시간 해상도는 동일 지역을 다시 관측하는 데 걸리는 시간을 의미하며, 해상도가 높을수록 짧은 간격으로 데이터를 수집할 수 있다. 특히 정지궤도 위성은 특정 지역을 지속적으로 모니터링할 수 있어, 실시간 기상 관측이나 재난 상황에서 유용하게 활용된다.

위성 원격탐사 기술의 주요 활용 분야는 매우 광범위하다. 기후변화 모니터링은 가장 대표적인 활용 분야 중 하나로, 위성 데이터를 통해 대기와 해양의 상태를 장기적으로 추적할 수 있다. 이는 기후변화로 인한 이상 기후 현상, 해수면 상승, 온실가스 농도 변화 등을 분석하는 데 중요한 역할을 한다. 또한, 자연재해 대응에서도 위성 원격탐사는 핵심적인 역할을 담당한다. 홍수, 가뭄, 산사태, 지진 등의 자연재해 발생 시 위성 데이터를 통해 실시간 모니터링이 가능하며, 이를 통해 피해 지역을 빠르게 파악하고, 긴급 대응에 필요한 자료를 제공한다. 원격탐사 데이터는 농업 분야에서도 유용하게 사용되고 있다. 토양의 습도, 수분 상태, 작물의 생육 상태를 실시간으로 모니터링할 수 있으며, 이를 통해 농업 생산성을 최적화할 수 있다. 또한, 산림 관리와 생태계 보존에서도 위성 데이터를 통해 산림 파괴, 산불, 생태계 변화 등을 추적하고 분석할 수 있다.

수자원 관리에 있어서도 원격탐사 데이터는 필수적이다. 수문기상 데이터를 활용하여 강수량, 증발산량 등의 정보를 정확하게 분석할 수 있으며, 이를 바탕으로 가뭄 예측, 홍수 대응 등 다양한 물관리 전략을 세울 수 있다. 최근에는 위성 데이터를 기반으로 가뭄 지수, 홍수 예·경보 시스템 등이 개발되어 전 세계적으로 활용되고 있으며, 이는 기후변화에 효과적으로 대응할 수 있는 중요한 기술로 평가받고 있다. 이처럼 위성 원격탐사 기술은 다양한 분야에서 필수적인 도구로 자리 잡았으며, 앞으로도 더 많은 활용 가능성이 열려 있을 것이다. 위성 센서 기술의 발전과 데이터 처리 기술의 고도화가 이루어짐에 따라, 더욱 정밀한 분석과 실시간 활용이 가능해질 것으로 기대된다.

국내 위성 개발 현황

지구관측위성은 수자원 관리 외에도 환경 감시, 재난·재해 예방 및 대응, 환경 감시, 식량 안보 등 다양한 공공목적으로 활용되며 사회적 문제를 해결하는 데 기여하고 있다. 지구관측위성을 개발하고 활용하는 기술을 확보하기 위해 정부에서는 2018년 「제3차 우주개발진흥 기본계획」을 수립하여 우주 개발 중점전략(우주발사체 기술자립, 인공위성 활용 서비스 및 개발 고도화, 우주탐사 시작, 한국형 위성항법 시스템 구축, 우주 혁신 생태계 조성, 우주산업 육성과 우주일자리 창출)을 추진해 왔다.

「제3차 우주개발진흥 기본계획」상 국내에서 독자적으로 개발하게 되는 지구관측위성은 국토 초정밀 관측을 목표로 하는 다목적 실용위성, 한반도를 포함한 동아시아 지역의 기상, 환경을 상시 모니터링 하는 것을 목적으로 하는 정지궤도 위성, 국토, 농·산림 및 수자원 관측을 목표로 하는 차세대 중형 위성으로 구분된다(표 1, 2). 본고에서는 수자원 관측 분야에 활용이 가능한 다목적 실용위성과 기 발사되었거나 개발이 예정되어 있는 차세대 중형위성의 개발동향, 계획, 운용 체계 등을 소개한다.

표 1 국내 개발 위성 분류

구분	주목적	운용중	개발예정
다목적 실용위성	초정밀 위성 영상 생산	아리랑 3, 3A, 5호	아리랑 6, 7호
정지궤도 위성	한반도 상시 감시	천리안 2A, 2B호	천리안 후속위성, 조기경보위성 등
차세대 중형위성	국토, 농·산림, 수자원 관측	1호	2, 3, 4, 5호
차세대 소형위성	기술검증 및 과학임무	1호	차세대 소형위성 2호, 초소형 군집운용위성

출처: 한국항공우주연구원. https://www.kari.re.kr/kor/sub03_03.do

표 2 위성 개발 로드맵

	'18~'23	'24~
다목적 실용위성	-	6호, 7호, 7A호
정지궤도 위성	2A호, 2B호	3호(위성통신)
차세대 중형위성	1호	2호, 3호, 4호, 5호
차세대 소형위성	1호	2호, 초소형 군집위성

출처: 한국항공우주연구원. https://www.kari.re.kr/kor/sub03_03.do

101 다목적 실용위성

다목적 실용위성 3호는 기존 위성보다 뛰어난 0.7m급 고해상도 전자광학카메라(Advanced Earth Imaging Sensor System: AEISS)를 탑재하여 보다 정밀하고 해상도가 뛰어난 영상 정보를 수집할 수 있다. 전자광학카메라는 한국항공우주연구원에서 조립과 시험 등 개발의 전 과정을 독자적으로 수행한 인공위성 탑재체이다. 2004년 8월부터 개발에 착수하여 2012년 5월 발사되었다. 위성 제원은 직경 2.0m, 높이 3.0m, 중량 980kg이며, 고도 685km에서 정밀 지구 관측을 수행한다.

다목적 실용위성 3A호는 3호 설계를 기반으로 2006년부터 개발되어 2015년 3월 발사되었다. 3A호의 해상도는 70cm급에서 50cm급으로 정밀하며, 공개된 위성으로는 세계 최초로 중적외선 센서를 탑재한 위성이다. 광학 영상 해상도를 품질 저하 없이 30% 이상 향상시키는 기술을 개발함으로써 38cm급 유효영상 제공이 가능하다. 국내 기술로 개발된 다목적 실용위성 3A호의 고해상도 전자광학카메라 AEISS-A (Advanced Earth Imaging Sensor System-A)는 50cm급 광학 영상 촬영이 가능하며, 적외선 센서를 통해 주/야 기상상황에 상관없이 지상의 열을 탐지해 화재, 화산활동, 도심 열섬현상 등을 관측할 수 있다. 고도 528km의 태양동기궤도에서 운용되며 주/야 두 차례에 걸쳐 우리나라 상공을 지난다.

다목적 실용위성 5호는 2005년 6월 개발에 착수하여 2013년 8월에 발사되었다. 다목적 실용위성 5호는 광학 탑재체를 장착한 기존의 다목적 실용위성들과 달리 국내 최초로 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar: SAR)를 탑재한 지구관측위성이다. 마이크로파 영상레이더는 지상 목표물에 방사한 후 반사되어 돌아온 신호를 합성하여 영상을 생산하며, 광학 탑재체로 촬영이 어려운 야간이나 구름이 많은 악천후 상황에서도 원하는 영상정보를 획득할 수 있다. 레이더 영상은 가시광선 대역을 촬영하는 광학카메라의 단점을 보완할 수 있어 다목적 실용위성 3호, 3A호의 고해상도 광학 영상과 상호 보완적으로 활용되고 있다. 직경 2.6m, 높이 3.9m, 중량 1,315kg이며, 고도 550km에서 지표를 관측한다. 영상 정보는 공공 목적, 재난·재해 분석, 국토 관리 등에 활용되고 있다.

102 차세대 중형위성

차세대 중형위성 사업은 중형급 위성 표준 플랫폼을 활용해 다양한 공공 수요에 효과적으로 대응하고 민간 산업체를 육성하기 위한 사업이다. 차세대 중형위성 개발 사업 1단계는 정부가 개발한 위성 기술을 민간 기업으로 이전하고 이후 민간 기업 주도로 2단계 개발 사업을 수행할 수 있도록 개발 및 생산 체계를 구축하는 사업이다. 연구개발을 통해 500kg급 표준형 위성 플랫폼을 확보하였으며, 2021년 3월 차세대 중형위성 1호가 발사되었다. 1호기가 개발되며 대부분의 핵심 구성 부품이 국산화되었으며, 특히 정밀 지상용 광학 탑재체(Advanced Earth Imaging Sensor System-Compact: AEISS-C)는 국내 독자적 기술력을 바탕으로 개발되었다. AEISS-C의 전자 광학부는 5개의 반사경으로 이루어진 광학계, 이를 지지하기 위한 광구조부, 그리고 초점면전자부로 이루어져 있으며 2020년 광학 성능 측정 시험이 완료되었다. 현재 국토정보플랫폼을 통해 영상이 제공되고 있으며, 국토·자연 관리, 재난·재해 대응, 공간정보 서비스 등 다양한 분야에서 활용될 예정이다.

차세대 중형위성 2호는 위성 개발 사업이 민간 산업체 중심으로 전환되며 국내 우주 산업을 강화한다는 점에서 큰 의미를 가진다. 2호기 또한 1호기와 마찬가지로 정밀지상관측을 목적으로 하며, 동일한 광학 탑재체를 장착할 예정이다. 1호기와 2호기는 다목적 실용위성 3호와 유사한 제원의 탑재체를 장착한 위성군으로서 운용될 계획으로 시간 해상도를 크게 개선할 수 있을 것으로 기대된다. 동일 지점 촬영 주기는 1호기만 운영 시에 약 4.6일, 2호기를 함께 운영 시 2.3일로, 12km 이상의 관측 폭을 지닌 고해상도 영상이 4개 밴드 영역(Red, Green, Blue, NIR)으로 제공될 예정이다. 동일 지점 촬영 주기를 2일 이하로 확보한다면 한반도 전역 수자원 관리 및 재난 감시를 위한 자료로서 유용하게 활용될 수 있을 것이다.

차세대 중형위성 사업 2단계는 1단계에서 확보한 표준 플랫폼을 활용하며 임무에 맞는 탑재체를 개발하는 사업으로, 산업체 주도하에 3기의 지상관측용 위성을 개발한다. 총괄 연구 기관인 한국항공우주산업(KAI)에서는 시스템/본체 개발을 담당하며, 4호기의 경우 농촌진흥청, 산림청이 탑재체 개발에 참여하고 위성 발사 이후 운영을 주도할 예정이다. 4호기는 재난·재해의 대응, 홍수 및 가뭄 분석, 농작물 및 산림 조사 등을 위한 자료 생산을 목표로 하며, 주관 기관인 농촌진흥청과 산림청에서는 대국민 서비스를 통해 위성 자료의 활용 범위를 확대시키고자 계획을 세우고 있다. 2020년 탑재체 주요 사항에 대한 설계가 완료되었다. 광학 탑재체가 위성에 장착될 예정이며, 적색 경계(Red Edge) 밴드가 추가적으로 장착되어 식생 감시에 보다 유리할 것으로 예상된다. 관측폭은 120km이며, 5개 밴드

영역 관측이 가능한 탑재체를 장착하여 식생 관측에 유리한 영상 자료를 산출할 것으로 예상된다. 기존의 농/산림 분야에서 활용되는 해외 위성인 Landsat, Sentinel 영상 자료와 함께 활용하기 위해 보다 고해상도의 자료와 넓은 관측 폭을 개발 목표로 설정하였고, 한반도 전체 촬영 주기 2-3일을 확보하는 것을 목표로 개발 중에 있다. 공간해상도 목표치는 5m로 설정되었는데, 이는 맥류 및 벼 작물 구분을 위한 최저 공간해상도인 10m보다 개선된 해상도이다.

차세대 중형위성 5호는 환경부 주도하에 위성 개발 및 운영이 이루어지고 있으며, 수자원 관측 및 수재해 감시를 목적으로 개발되고 있다. 5호기에는 C-band SAR 센서가 탑재될 예정이며, 약천후에도 수자원 및 수재해에 대한 감시가 가능할 것으로 기대된다. 10m 공간해상도로 1일 2회 촬영 주기를 갖는 것을 목표로 한다. 2020년 탑재체 개발에 착수하였다.

5호기의 활용 부처는 환경부이며, 위성 시스템 운영, 영상 획득 및 배포를 위한 데이터 Archive 운영이 계획되어 있다. 위성 영상 데이터 Archive는 위성 영상 활용 지원센터의 데이터 접근/활용/운영 플랫폼 기능을 업그레이드하여 구축될 예정이며, 국토교통부, 과학기술정보통신부 등 유관 기관과의 영상 자료 공유 및 시스템 연계를 기획하고 있다. 특히, 수자원/수재해 관측 위성 자료가 요구되는 기관이 참여하는 협력 체계를 수립하여 위성 활용성을 높이고자 하며, 이를 통해 토양수분, 수역탐지 및 가뭄, 범람 등 수자원 감시 체계를 구축하려 한다.

2

수문기상 분야 활용 기술 현황

- 토양수분 연구
- 증발산 연구
- 강수 연구
- 수체 탐지 연구

토양수분 연구

101 토양수분 관측 현황

토양수분은 물 순환, 에너지 순환 속 지표면과 대기 사이의 상호작용을 이해하기 위한 핵심 인자로 서, 강우, 유출, 증발산 및 침투와 같은 전반적인 물 순환 과정에 직접적으로 관여한다. 토양수분은 강 우 혹은 강설이 발생한 이후 유출을 통해 하천, 저수지, 해양 등의 인간이 직접적으로 마주하는 물의 집 결지 이전에 토양에 머무르는 물로, 이를 해석하는 것은 수자원, 가뭄, 홍수 등의 정밀한 분석이 필수적 인 요소이다. 토양수분의 관측은 '수자원의 조사/계획 및 관리에 관한 법률'에 규정되어 있으며, 「수문 조사선진화 5개년 계획」(2005)에 명시된 사항이다.

토양수분의 관측은 유전율식 센서를 이용한 간접 측정, 건토 중량법을 이용한 직접 측정 등의 지점 관측 기법과 우주선 중성자의 지표면 수분량에 대한 반응을 이용한 원격 공간 단위 관측 기법, 그리고 항공기 혹은 위성을 이용한 원격 공간 단위 관측 기법으로 나눌 수 있다.

1.1. 지점 토양수분 관측 현황

지점 토양수분 관측은 원격 공간 관측 기법이 개발되기 이전에 수행되어온 기법으로 현재는 원격 공간 관측 자료의 검증, 보정을 위해 활용되고 있다. 원격 탐사 기술의 발전이 미비하였던 과거에는 지 점 단위 토양수분 관측소를 구축하여 공간적인 토양수분 변동을 분석하기 위한 연구가 다수 수행되었 으며 관심 지역을 중심으로 밀도 높은 토양수분 관측이 국지적으로 이루어졌다. 위성 등의 토양수분 원 격탐사 플랫폼의 구축이 활발히 이루어지는 현재에는 위성에 탑재되는 다양한 센서(Active/Passive Microwave 등) 기반의 토양수분 검증을 위해 보다 광범위한 지역에 관측소를 구축하기 위한 노력이 국제적으로 이루어지고 있다. 지형의 복잡성, 지표면 환경의 다양성으로 인해 토양수분의 공간 변동이 큰 한반도의 경우 신뢰성을 수반한 원격탐사 토양수분의 생산을 위해 이러한 지점 토양수분 관측소의 구축이 필수적이다.

1.1.1 국내 토양수분 관측소 구축 현황

국내에서는 환경부, 기상청, 농업진흥청 등 여러 기관에서 토양수분 자료를 측정하지만 자료의 보 정, 공유 및 배포가 제대로 이루어지지 않는 실정이다. 무엇보다도 지점 토양수분 관측 자료의 경우 원 격 토양수분 관측 자료의 검증 자료 역할을 담당하기 때문에 정밀한 측정을 필요로 하지만 이를 충족시 키는 토양수분 관측소가 절대적으로 부족하다. 토양수분량을 전국 단위에서 정기적으로 생산하고자 하 는 국가적인 차원에서의 노력이 있었지만, 토양수분량 계측기술과 방법 등이 체계화되어 있지 않아 제 한된 지점에서만 정밀 관측이 이루어지고 있다.

현재 국토교통부가 운영하고 있는 토양수분량 관측소는 2개소(설마천, 청미천)로, 해당 관측 자료 는 한국수문조사연보에 수록되고 있고, 농촌진흥청은 2015년 1월부터 전국 100여 개에 논과 밭작물 의 생육 목적으로 토양수분 관측소를 운영하고 있으며, 산림청에서는 산림지에 서식하는 나무나 식생 등의 육림 목적으로 토양수분량을 관측하고 있다. 하지만 자료의 검보정, 배포, 활용이 이루어지는 관 측소는 여전히 부족하며 이를 해소하기 위한 노력으로 우주선 중성자 관측을 통한 지점 기반 공간 단위 토양수분 관측 기기가 소개되었다. 본 절에서는 국내에 위치한 지점 관측 기기 중 지점 기반 공간 단위 토양수분 관측소 1개소와 유전율식 센서 기반 토양수분 관측소 1개소를 소개하고자 한다.

국토교통부에서 운영 중인 유전율식 센서 기반 토양수분 관측소인 설마천 토양수분량 관측소는 작 측 사면의 특성을 파악할 목적으로 구축되었으며 깊이별로 21개(8개 지점)의 센서가 설치되어 있다. 설마천 토양수분량 관측소에서는 19개 지점에서 토양수분량을 측정하고 있다. 토양수분량 측정시스템 은 50여 초의 전자기파 (electromagnetic wave)의 전송과 반향을 가진다. 이들의 신호 분석을 통해 토양수분량은 2시간 간격으로 측정되고 있다. 2018년부터 2020년 사이에는 해당 지역에 TDR 센서 대비 정밀도는 떨어지지만, 경제성이 뛰어난 FDR 센서를 19개 이상 추가로 설치하여 CRNP 관측 실 험을 수행한 바 있다.

성균관대학교에서는 우주선 중성자 측정(Cosmic-ray Neutron Probe: CRNP) 장비를 활용한 토양수분 측정 자료 보정 및 검증을 위하여 CRNP 센서, 유전율식 센서를 포함한 토양수분 지점 관측 사이트(그림 1)를 국내 최초로 구축하였다(Kim et al., 2016). 관측 지점은 성균관대학교 자연과학캠 퍼스 식물원이며(그림 2), CRNP의 설치 이전 해당 연구 지역의 타당성 검증을 위하여 1년간 유전율식 센서를 활용하여 토양수분을 측정하였다. 관측 사이트의 적합성 검증은 유전율식 센서가 설치된 지점 에 대한 실내 건토중량 실험(평균 함수비, 비중, 액성한계, 소성한계, 공극률, 입도분포 등) 및 토양수분 자료의 변동성 분석을 통하여 이루어졌다.

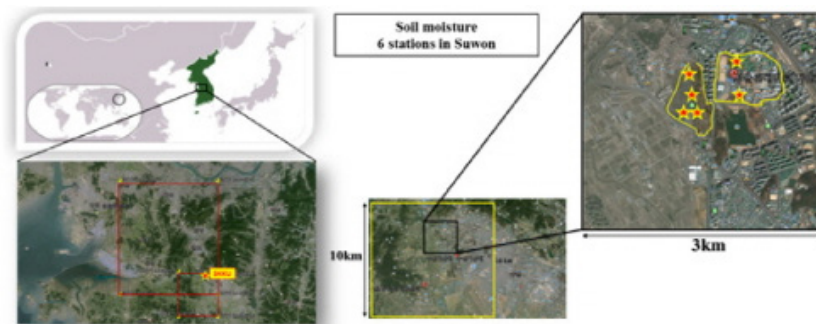
그림 1 (a) FDR 센서 설치 토양 단면 FDR 센서 및 (b) CRNP



출처: Kim et al., 2016

CRNP를 활용한 토양수분 측정 결과 유전율식 센서를 통해 관측된 토양수분의 변동성과 전반적으로 일치하는 것을 확인하였으나, 더욱 정밀한 연구를 위해서는 관측되는 중성자 개수를 보정할 필요가 있다. 이렇듯 CRNP는 설치 지점의 토양을 교란시키지 않으며, 단일 지점에 설치하기 때문에 관리 및 보수가 용이하다. 또한 원격으로 최대 반경 300m 내 공간 토양수분을 관측하여 보다 편리하게 토양수분 자료 획득이 가능하다는 장점을 지닌다.

그림 2 CRNP 검증을 위한 6개 FDR 센서 설치 위치



출처: Kim et al., 2016

1.1.2. 국외 토양수분 관측소 구축 현황

국외에서는 토양수분이 물과 에너지 순환에 핵심 요소로서 역할을 인식하고, 다양한 공간 및 시간 규모에서 토양수분을 관측하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 특히, 지점 기반 관측과 위성 기반 관

측을 통합하여 광범위하고 정밀한 토양수분 정보를 제공하고 있다. 이러한 관측을 통해 농업 생산, 수자원 관리, 홍수 및 가뭄과 같은 재해 대응에 필요한 정보를 제공하며, 이는 글로벌 기후변화 대응 및 지역 단위의 물관리 정책 수립에 핵심적인 역할을 수행하고 있다.

지점 토양 수분 관측은 전 세계적으로 주요한 수문기상 관측 방법으로 활용되고 있다. 미국, 유럽, 호주 등의 국가들은 국가 차원에서 토양수분 관측망을 구축하여 지역 및 국가 단위의 토양수분 변동을 파악하고 있다. 예를 들어, 미국 농무부(United States Department of Agriculture: USDA)는 Soil Climate Analysis Network(SCAN)이라는 지점 토양수분 관측망을 운영하고 있다. 이 관측망은 토양 수분뿐만 아니라 강수량, 온도, 습도 등의 기상 데이터를 측정하며, 위성 기반 토양수분 자료의 검증 및 보정에도 활용되고 있다(Schaefer et al., 2007).

유럽에서는 International Soil Moisture Network(ISMN)을 통해 다양한 지점의 토양수분 자료를 통합적으로 관리하고 있다(Dorigo et al., 2011). ISMN은 전 세계의 토양수분 관측 자료를 수집하고 표준화하여 위성 관측 자료의 검증에 활용되며, 지점 단위의 상세한 토양수분 정보를 제공하고 있다. 호주에서는 OzNet이라는 토양수분 관측망을 구축하여 토양수분의 시공간적 변화를 연구하고 있으며, 이러한 자료는 가뭄 및 홍수 예측에 사용된다(Smith et al., 2012). OzNet은 지점 관측 데이터를 수집하는 동시에 위성 기반 관측 자료와의 비교를 통해 다양한 환경에서 토양수분 관측의 정확도를 향상시키고 있다. 이러한 지점 관측 데이터는 위성 기반의 토양수분 관측을 보정하고 검증하는 데 필수적으로 사용되며, 국외에서도 지점 관측소의 적절한 공간적 분포와 정확도를 높이기 위한 노력이 지속되고 있다.

1.2 위성 토양수분 관측 현황

위성 토양수분 관측은 1990년대 후반부터 진행되어 왔으며, 개발 초기에는 Passive Microwave 센서를 이용한 관측이 개발되었다. Passive Microwave 센서 탑재 위성에서 생산되는 토양수분 자료의 관측 주기는 일 단위로 짧으나 공간 해상도가 20km 격자 단위로 세밀하지 않았다. 하지만 위성 발사 기술과 센서의 발달로 2008년대에 들어와서는 Active Microwave 센서의 도입으로 공간해상도가 10km 격자 단위로 상세화되었으며, 2015년 이후에는 Active Microwave 센서의 한 종류인 합성개구레이더(Synthetic Aperture Radar: SAR)를 탑재한 위성 데이터로부터 토양수분 복원에 관한 연구가 진행되어 최근에는 3km 이내의 해상도를 보유한 위성 기반 토양수분 자료가 생산되고 있다.

1.2.1 국내 현황

2024년 현재 국내의 경우 토양수분 관측을 위해 운용되고 있는 위성은 존재하지 않는다. 토양수분 관측 위성에 탑재되는 센서는 대표적으로 Passive Microwave 센서와 Active Microwave 센서가 있는데, 국내에서는 아직 이를 탑재한 위성이 운용되고 있지 않다. 2025년 SAR를 탑재한 수자원위성의 발사가 계획되어 있으나 해당 위성의 데이터 검보정 및 활용 가능한 수준의 정확도를 지닌 데이터가 산출되기 위해서는 앞서 언급한 지점 토양수분 관측망이 필수적으로 요구된다. 차세대 중형위성 5호는 환경부 주도하에 위성 개발 및 운영이 이루어지고 있으며, 수자원 관측 및 수재해 감시를 목적으로 개발되고 있다. 10m 공간해상도로 1일 2회 촬영 주기를 갖는 것을 목표로 하며, 토양수분의 경우 SAR 관측 영상을 기반으로 산정될 예정이다. 하지만 생산된 토양수분 자료의 활용 가능한 시점은 국내 토양수분 지점 관측 기반의 마련과 국외 동일 센서 기반 위성을 이용한 국내 토양수분 산출 결과 분석 등의 선제 조건이 충족될 시 빠르게 생산이 가능할 것이며, 그렇지 못할 시 다양한 SAR 기반 토양수분 산정 알고리즘 선정, 검증, 구축에 있어 긴 기간이 소요될 것으로 판단된다.

국내 전 국토를 대상으로 한 국외 다중 위성 자료 기반의 토양수분 복원 연구는 2010년대부터 진행되어 왔으며, 한반도를 대상으로 한 위성 탑재 Passive Microwave 센서 기반 토양수분의 지점 센서를 활용한 평가 연구가 2010년에 최초로 이루어졌고, Active Microwave 센서를 이용한 위성 토양수분의 연구가 2012년에 수행된 바 있다. 이후 SAR 기반의 토양수분 복원이 통계적 기법, Machine Learning 기법, 레이더와 지표면 간의 물리적 관계성을 활용한 기법 등이 2017년 이후 검토되었으며, 현재에는 다양한 위성 자료의 융합, 품질 개선, 고해상도 위성 기반 토양수분 자료 생산 등의 연구가 진행되고 있다.

1.2.2 국외 현황

앞서 언급한 바와 같이 국외에서는 국내 대비 20년 앞서 위성 기반 토양수분 연구 및 프로젝트가 활발히 진행되어 왔다. 광범위한 지역의 공간 토양수분을 대규모 지점 관측소를 설치하는 비용 대비 경제적으로, 신속하게 관측할 수 있다는 장점으로 인해 이러한 연구가 활발히 진행되었으며 초기에는 Passive, Active Microwave 센서를 탑재한 항공기, 무인기 등을 이용한 실험이 선제적으로 수행되었다. 이러한 선행연구를 기반으로 위성 기반 토양수분 관측이 광범위한 지역의 토양수분 분포와 변화 모니터링에 효과적이라는 사실을 밝혀냈으며, 지점 관측 한계 극복에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 판단하였다. 이러한 공간 자료의 강점은 토양수분을 모니터링해야 하는 지역이 넓은 미국과 같은

국가에게 매력적으로 다가왔으며, 공간 토양수분 자료의 농업 분야, 재난 분야에 대한 활용을 목적으로 국가 단위의 프로젝트가 시행되었다. 미국의 경우에는 Aqua와 GCOM 위성에 탑재된 AMSR-E, AMSR-2 센서를 이용한 토양수분 산정이 각각 2002년, 2010년부터 수행되었으며, 이후 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration: NASA)은 2015년 Soil Moisture Active Passive(SMAP) 위성을 발사하여 전 세계 토양수분을 관측하고 있다(Chan et al., 2016). SMAP은 L-밴드를 활용하여 지표면의 토양수분을 관측하며, 수자원 관리, 농업 모니터링, 홍수 및 가뭄 예측 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 특히, SMAP L4는 NASA Catchment Land Surface Model(CLSM)과 결합하여 정확도 향상과 짧은 주기의 시간 해상도를 통해 자료를 제공하는 연구도 수행되었다(Reichle et al., 2017).

유럽의 경우에는 SMOS, ASCAT, Sentinel-1 등의 토양수분 복원 목적의 위성을 운영 중에 있으며, 그 중 ASCAT은 Active Microwave 센서를 활용한 토양수분 자료를 생산하여 높은 정확도를 나타내는 검증 결과를 소개하였다. 유럽 우주국(European Space Agency: ESA)은 이러한 ASCAT 위성의 성공적인 운영 경험을 바탕으로, Sentinel-1 위성을 2015년 발사하였으며, 해당 위성은 고해상도 관측 영상 생산이 가능한 SAR를 탑재하였으며, 전 세계를 현재까지 관측하고 있다. SAR는 C-band 마이크로파 레이더를 활용하여 지표면에서 반사되는 신호를 통해 토양수분을 추정하며, 날씨와 관계없이 지표면의 수분 상태를 관측할 수 있다는 장점이 있다(Bauer-Marschallinger et al., 2019). 세계의 각 연구진은 Sentinel-1 SAR의 장점을 활용하여 토양수분을 추정하고자 다양한 알고리즘을 개발하여 적용하고 있다(Balenzano et al., 2021).

또한, 국외에서는 위성 자료의 품질 개선을 위해 지점 관측과 위성 관측의 결합을 통해 토양수분 자료의 정확도를 향상시키고 있다. 예를 들어, SMAP의 토양수분 자료는 미국 내 다양한 지역의 지점 관측소의 총체인 SCAN 관측망과의 검증을 통해 공간적 및 시간적 정확성을 높이고 있다(Reichle et al., 2017). 이러한 연계는 위성 기반 관측과 지점 관측의 융합을 통해 토양수분의 공간적 해상도를 개선하고, 위성 자료의 정확성을 높이는 데 기여하고 있다. 나아가, 지점 관측과 위성 관측의 연계는 단순히 보정 및 검증에 그치지 않고, 데이터 동화 기법 등 다양한 방법을 통해 기상 및 수문 모델에 활용되어 토양수분의 시공간적 변화를 보다 정밀하게 예측하는 데 활용되고 있다. 국외에서 수행 중인 지점 관측망과 위성을 연계하여 종합 데이터 세트를 구축하고 다양한 기법을 활용한 분석 수행은 우리나라의 지점 및 위성 관측 자료 활용의 현주소와 앞으로의 발전 방향을 제시한다.

국외에서는 현재 다양한 분야에 위성 토양수분 자료를 적용 중인데, 대표적으로 기상 예측, 분석 분야의 연구 자료로써 활용되는 것이 첫 번째 예이다. 유럽에서는 극한 기상 현상인 극한 강우, 혹은 폭염 등의 예측, 분석을 위한 공간 토양수분 자료를 활발히 이용 중에 있다. 두 번째는 농업 분야이다. 농업 분야의 경우 미국이 가장 활발히 적용하고 있는 국가 중 하나인데, 광범위한 지역의 농업 가뭄 심도 표출을 위한 자료 중 핵심적인 역할을 토양수분 자료가 담당하며 최근에는 고해상도의 토양수분 자료를 활용하여 국지적으로 나타나는 가뭄 피해 양상을 산정하기 위한 연구가 진행되고 있다. 재난안전 분야의 경우 산불 위험도 평가 등을 위해 토양수분을 활용하거나, 홍수 위험 지역 산출, 범람 피해 산정 등에 공간 토양수분 자료가 적용되고 있다. 나아가 기후변화 분석에도 토양수분이 이용되는데, 최근 이상 기후 현상이 빈번하게 발생함에 따라 기상과 지표 간 경계에 존재하는 토양수분의 역할과 기후변화와 의 관계성 등을 이용한 기후변화 예측 등을 위한 공간 토양수분 자료 적용이 수행되고 있다.

증발산 연구

10 증발산 개요

1.1. 증발산 구성 요소

증발(Evaporation)

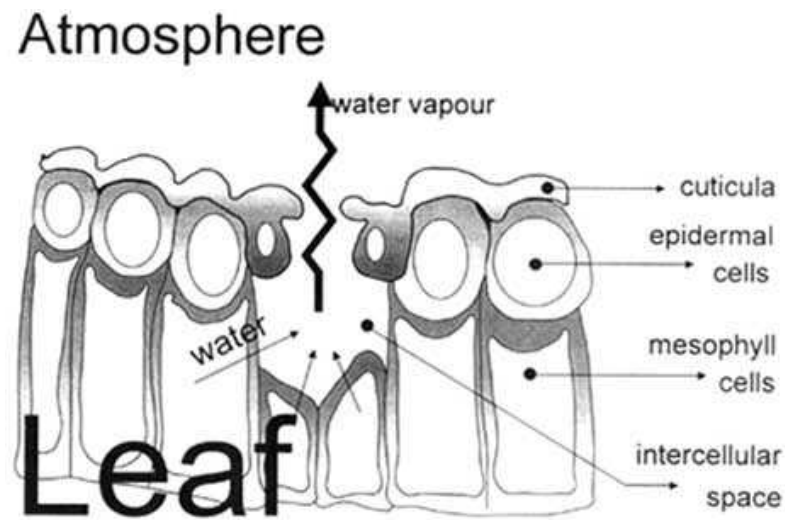
증발은 액체 상태의 물이 수증기로 변환되고 증발 표면에서 제거되는 과정이다. 이 상태변화 과정은 에너지를 필요로 하며, 주로 태양 복사와 주변 공기 온도로부터 에너지를 얻는다. 증발을 촉진하는 주요 요인은 증발 표면과 주변 대기 사이의 수증기 압력 차이이다. 증발이 진행되면서 주변 공기는 점차 포화되고, 바람이 포화된 공기를 순환시키지 않으면 증발 속도는 점차 감소하고 멈출 수 있다. 따라서, 태양 복사, 온도, 습도, 바람 속도는 증발을 평가할 때 고려해야 할 주요 기후 요소이다.

토양 표면에서 증발이 발생할 경우, 식물에 의한 그늘짐 정도와 증발 표면에서 사용 가능한 물의 양이 영향을 미친다. 토양 표면으로의 물 공급은 비, 관개 및 얇은 수위에서 위로 이동하는 물로 이루어진다. 토양이 증발 수요를 충족할 만큼 물을 빠르게 공급할 수 있다면 증발은 기상 조건에 의해 좌우된다. 그러나 강수와 관개의 간격이 길어지고 토양의 수분 전달 능력이 감소하면 표토의 수분이 줄어들고 표면이 건조해진다. 이러한 경우, 물의 부족이 토양 증발에 제한적인 영향을 미치며, 물 공급이 없을 경우 증발은 며칠 내로 급격히 감소하거나 거의 완전히 멈출 수 있다.

증산(Transpiration)

증산은 식물 조직 내의 액체 상태의 물이 수증기로 변환되고 대기로 배출되는 과정이다. 작물은 주로 잎의 기공을 통해 물을 잃는다(그림 3). 물은 뿌리에서 흡수되어 식물 전체로 이동하며, 증발은 주로 잎의 세포 간 공간에서 일어나고 대기와의 증기 교환은 기공의 개폐에 의해 조절된다(그림 3). 식물이 흡수한 거의 모든 물은 증산을 통해 손실되며, 식물 내에서 사용되는 물은 극히 적다.

그림 3 기공의 구조



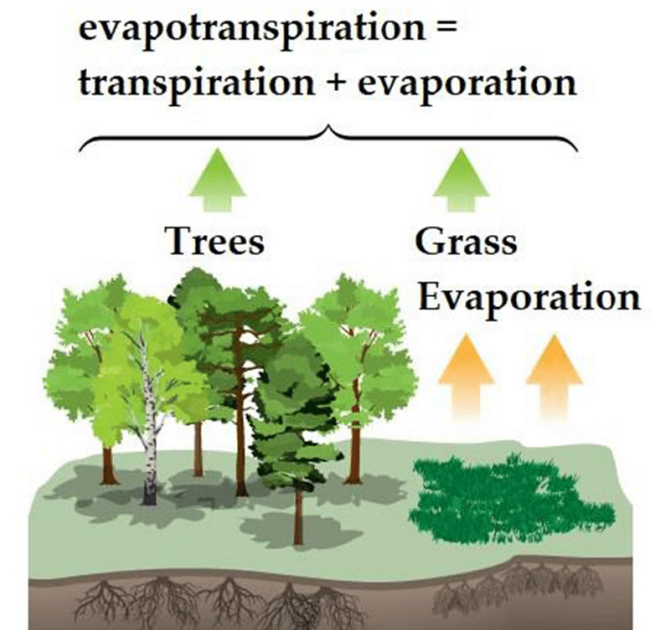
출처: Pereira et al., 1999

증산은 증발과 마찬가지로 에너지 공급, 증기압 차이, 바람 등에 의존한다. 따라서 복사, 공기 온도, 습도, 바람 조건을 고려해야 한다. 토양 수분 함량과 토양이 뿌리로 물을 전달하는 능력도 증산율에 영향을 미치며, 수분 침수나 토양 염도도 중요한 요소이다. 증산율은 작물의 특성, 환경적 요인 및 재배 방법에 따라 다르며, 작물 유형뿐만 아니라 작물의 발달 단계, 환경 및 관리 조건도 증산을 평가할 때 고려해야 한다.

증발산(Evapotranspiration)

증발과 증산은 동시에 발생하며, 두 과정을 명확히 구분하기는 어렵다(그림 4). 표토의 수분 가용성 외에도, 경작된 토양에서의 증발은 주로 태양 복사가 토양 표면에 도달하는 비율에 의해 결정된다. 이 비율은 작물의 생장이 진행됨에 따라 작물 덮개가 지표면을 점점 더 가리면서 감소한다. 작물이 작은 초기 단계에서는 주로 토양 증발을 통해 수분이 손실되지만, 작물이 충분히 자라 토양을 완전히 덮게 되면 증산이 주요 과정이 된다. 그림 4에서는 증발산이 증발과 증산으로 구분되는 과정을 잎 면적과 그 아래 토양 표면 단위 면적에 따라 나타내고 있다. 파종 초기에는 증발산의 거의 100%가 증발에 의한 것이지만, 작물이 완전히 덮인 상태에서는 90% 이상이 증산에 의해 발생한다.

그림 4 증발산 과정



출처: Keshtegar et al., 2022.

1.2 증발산 종류

잠재 증발산

잠재 증발산(Potential Evapotranspiration: PET)은 대기 조건이 완벽할 때, 즉, 물 공급이 충분하고 제한 요소가 없는 상황에서 발생할 수 있는 최대 증발산량을 의미한다. 이는 증발과 식물의 증산을 모두 포함하는 개념으로, 기상 조건(기온, 일사량, 습도, 바람 속도 등)에 의해 결정된다. ETp는 물이 무제한으로 공급된다고 가정했을 때 대기가 증발시킬 수 있는 최대 수분량을 나타내며, 주로 기후학, 수문학, 농업 분야에서 사용된다.

FAO Penman-Monteith 방법은 잠재 증발산량을 계산하는 데 가장 널리 사용되는 방법으로, 이를 통해 특정 지역의 대기 수요를 정량화할 수 있다. 이 방법은 최대 및 최소 공기 온도(T_{max} 및 T_{min}), 상대 습도(RH), 풍속(u_2), 태양 복사(R_n)를 사용하여 잠재 증발산량을 산정한다. 예를 들어, T_{max} 와 T_{min} 으로부터 포화 수증기 압력을 계산하고, 풍속과 결합하여 대기 중 수분 이동을 평가한

다. 잠재 증발산은 기상 조건이 고정된 참조 표면(주로 풀밭과 같은 가정된 식생 표면)에서 발생할 수 있는 증발과 증산을 기준으로 하며, 이를 통해 물이 제한 없이 공급될 경우 예상되는 물 손실량을 예측할 수 있다. 따라서 잠재 증발산량은 물 자원 관리와 농업 관개에서 중요한 역할을 하며, 특히 건조 지역에서 수분 공급이 최적화되지 않는 상황을 대비한 가뭄 예측 지표로 사용된다.

기준 증발산

기준 증발산(Reference Evapotranspiration)은 물이 충분히 공급된 상태에서 대기 조건에 의해 결정되는 증발 및 증산의 이론적 최대치를 나타내는 값이다. FAO Penman-Monteith 방정식은 기준 증발산을 계산하기 위한 국제 표준으로 채택되었으며, 이는 일정한 가상의 작물 표면에서 발생할 수 있는 증발산량을 기반으로 한다. 이 가상의 표면은 0.12m 높이의 풀밭으로 가정되며, 표면 저항은 70 s/m, 알베도는 0.23으로 설정된다. 이러한 설정은 전 세계적으로 일관성 있는 증발산량을 계산할 수 있도록 설계된 것이다.

기준 증발산 계산은 주로 태양 복사(Rn), 공기 온도(Tmax 및 Tmin), 상대 습도(RH), 풍속(u2)과 같은 기상 데이터를 기반으로 한다. 이러한 기상 요소들은 대기의 증발 수요를 결정하는 중요한 변수들이다. Penman-Monteith 방정식은 복잡한 기후 변수들을 통합하여 일관된 결과를 제공하며, 특히 다양한 기후 조건에서도 신뢰할 수 있는 값을 산출하도록 설계되어 있다. 예를 들어, 기상 데이터 중 일부가 누락된 경우에도 보정 절차를 통해 대체 데이터를 사용하여 기준 증발산을 계산할 수 있다.

기준 증발산은 농업과 수자원 관리에서 매우 중요한 역할을 하며, 작물의 실제 증발산량을 계산하기 위한 기준점으로 사용된다. 작물의 성장 단계별로 작물 계수(Kc)를 적용하여, 기준 증발산 값에 이를 곱하면 실제 작물의 물 수요를 추정할 수 있다. 이를 통해 관개 시기를 최적화하고, 농작물의 물 사용 효율을 높일 수 있는 기반을 제공한다. 따라서 기준 증발산은 전 세계적으로 다양한 기후 조건에서 일관된 물 수요 예측을 가능하게 하는 중요한 도구로 활용되며, 농업, 수자원 관리, 관개 계획 등에서 필수적인 지표로 사용된다.

실제 증발산

실제 증발산(Actual Evapotranspiration)은 토양과 식물에서 실제로 대기로 손실되는 물의 양을 나타내며, 이는 특정 지역의 기상 조건, 토양 수분 상태, 그리고 식물의 성장 상태에 따라 달라진다. 실제 증발산은 잠재 증발산(ETp)과는 달리, 물 공급이 제한될 수 있는 실제 상황에서 발생하는 증발산량

이다. 물 공급이 충분하지 않거나, 토양 수분이 부족하거나, 식물이 스트레스를 받는 경우 실제 증발산은 잠재 증발산량보다 훨씬 낮을 수 있다.

실제 증발산을 계산하는 방법에는 여러 가지가 있으며, 직접 측정 방법으로는 라이시미터(Lysimeter)를 사용하는 방법이 있다. 라이시미터는 식물의 물 사용량을 측정하는 장비로, 매우 정확한 데이터를 제공하지만 비용과 시간이 많이 소요되기 때문에 주로 연구 목적으로 사용된다. 간접적으로 실제 증발산을 추정하는 방법으로는 위성 원격 탐사 자료를 활용하거나, 기상 데이터를 기반으로 한 모델링 기법이 있다. 이러한 모델링 기법은 잠재 증발산량과 실제 기상 조건, 작물 상태 등을 종합하여 실제 증발산을 추정한다.

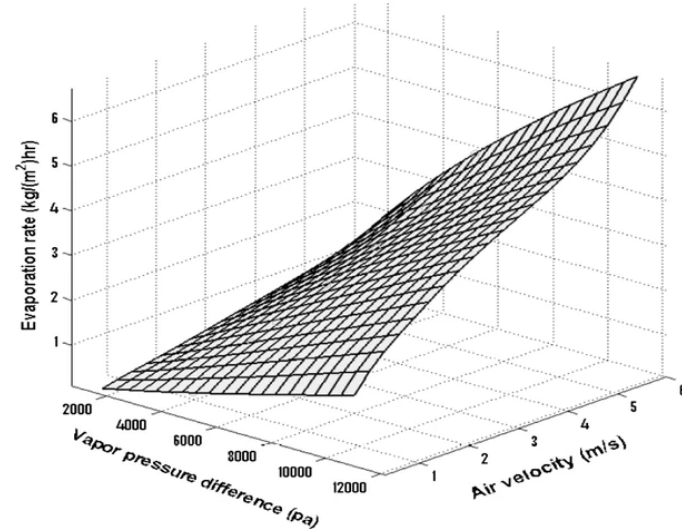
실제 증발산은 수자원 관리와 농업 분야에서 중요한 역할을 한다. 농업에서는 실제 증발산 데이터를 활용하여 관개 스케줄을 최적화하고, 작물의 물 부족 상태를 모니터링하여 수분 스트레스가 작물 생산성에 미치는 영향을 최소화할 수 있다. 또한 수문학에서는 실제 증발산을 활용해 물 수지를 분석하고, 지역의 물 부족 상황을 예측하는 데 사용된다.

1.3 증발산 산정식에 따른 분류

Mass transfer 증발산

Mass transfer 기반 증발산은 달톤(Dalton)식을 기반으로 물 표면에서 대기 중으로 수증기를 이동시키는 과정을 설명하는 이론이다. 이 메커니즘은 물 표면에서 발생한 수증기가 공기 중으로 이동하는 동안 바람과 수증기 압력 차이에 의해 증발률이 조절되는 것을 설명한다(그림 5). 바람의 속도가 높아지면 공기와의 혼합이 빨라지며, 이에 따라 증발률도 증가하게 된다. 주요 변수로는 포화 수증기압과 실제 수증기압, 그리고 풍속이 있다. 여러 연구들은 수증기압 차이와 풍속을 이용하여 증발률을 계산하는 다양한 변형된 달톤 방정식을 제안했으며, 이러한 방정식들은 증발산을 추정하는 데 유용하게 사용되었다. 특히 1950년대부터 1970년대까지 이러한 방정식들이 광범위하게 적용되었으나, 현대의 증발산 이해와는 다소 차이가 있어 대부분의 경우 대체된 상태이다.

그림 5 증기압 차이와 풍속이 수면 증발률에 미치는 영향



출처: Jodat et al., 2012

온도 기반 증발산

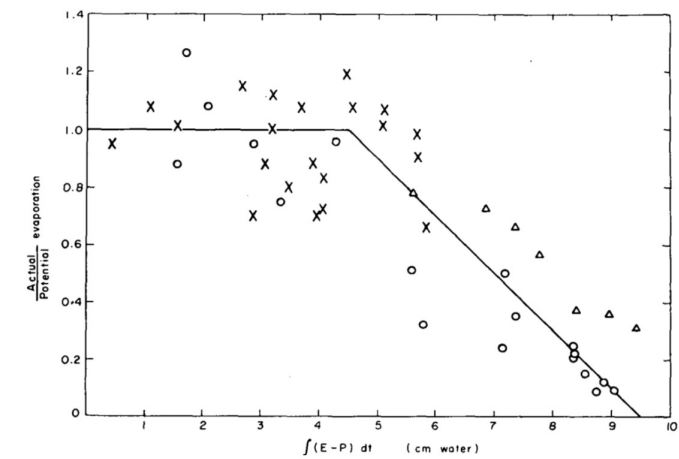
도 기반 증발산(Temperature-Based Evapotranspiration)은 기온과 증발산 간의 상관관계를 바탕으로 한 모델이다. Thornthwaite(1948)와 Blaney & Criddle(1950)식이 대표적인 예로, 기온 자료만을 활용하여 증발산을 추정할 수 있는 간단한 방법으로 널리 사용되었다. Thornthwaite식은 주로 월평균 기온과 강수량을 사용해 기후 조건에 따른 증발산을 예측하는 반면, Blaney and Criddle식은 기온과 일조 시간을 활용하여 잠재 증발산을 추정한다. 이들 식은 데이터 요구량이 적고 적용이 간편하여 세계 여러 지역에서 활용되었으나, 기후 조건에 따른 성능 차이가 크다는 한계가 있다. 특히 건조한 기후에서는 과소 추정되는 경향이 있고, 습윤 기후에서는 다소 과대 추정하는 경향이 관찰되었다. 이러한 차이점은 각 지역의 기후와 계절에 따른 변화에 민감하게 반응하기 때문이다.

복사에너지 기반 증발산

복사에너지 기반 증발산(Radiation-Based Evapotranspiration)은 태양 복사에너지가 증발산 과정에 기여하는 비율을 중심으로 설명되는 모델이다. 이러한 모델들은 주로 에너지 수지 이론에 기초하며, 증발산이 태양 복사에너지에 직접적인 영향을 받는다는 개념에 의해 개발되었다. 이 유형의 방정식

들은 Penman(1948)의 방정식을 단순화한 형태로 나타나며, 단기적으로는 상당히 신뢰할 수 있는 추정값을 제공한다. 가장 널리 사용되는 방정식 중 하나는 Priestley & Taylor(1972)의 방정식으로, 전 세계적으로 사용되어 왔으며, 특히 바람의 영향이 적고 물이 풍부한 조건에서 유효하다(그림 6). 하지만 이러한 방정식은 풍속의 영향을 고려하지 않기 때문에 바람이 강한 지역에서는 증발 저항을 적절히 반영하지 못해 실제 증발산을 과소 추정하는 경향이 있다.

그림 6 라이시미터 (x), 작물 (○), 평원 (△)에서의 건조 단계



출처: Priestley & Taylor, 1972.

융합 기반 증발산

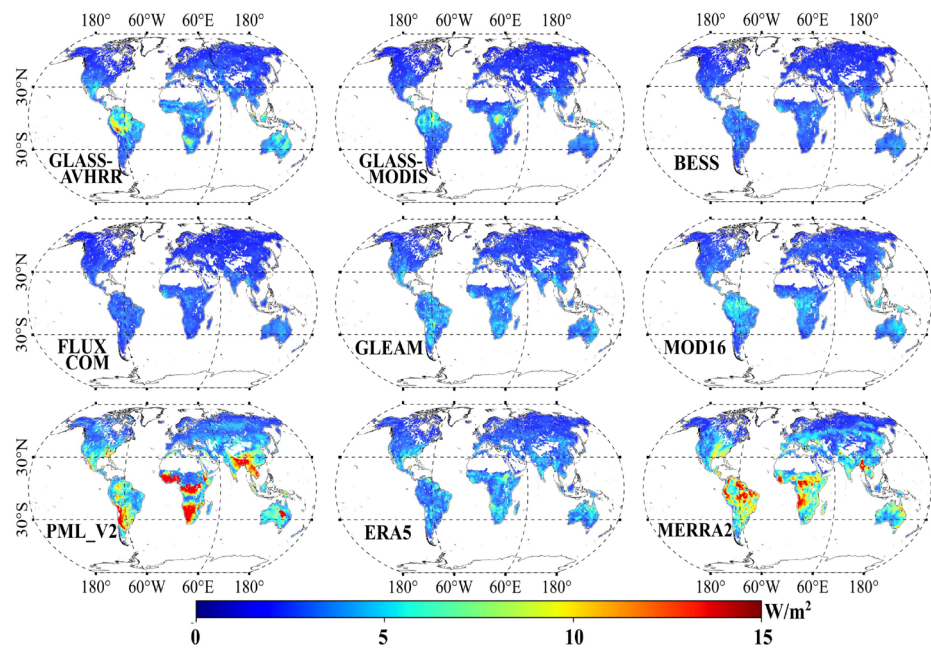
융합 기반 증발산(Combination-Based Evapotranspiration)은 에너지 균형과 공기역학 이론을 결합하여 증발산을 추정하는 방식이다. 이 방법은 Penman(1948)이 처음 제안한 것으로, 공기의 온도뿐만 아니라 풍속, 수증기 압력, 일사량과 같은 기후 조건을 모두 고려하여 증발산을 추정한다. 이러한 접근 방식은 물이 기체로 변화하는 과정(증발)과 증발된 물이 대기로 이동하는 과정을 모두 포함하는 점에서 유효하다. 특히 Penman-Monteith 방정식은 이러한 융합 방식을 적용한 대표적인 식으로, FAO에 의해 표준화되어 널리 사용되고 있다. 이 방정식은 식물의 표면 저항을 포함하여 작물 표면의 조건을 반영하고 있으며, 여러 기후 조건에 적응하도록 설계되었다. 따라서 융합 기반 방법은 다양한 기후와 작물 조건에서 증발산을 추정하는 데 효과적이며, 세계적으로 농업 및 수문학 분야에서 중요한 역할을 하고 있다.

102 해외 연구 현황

글로벌 증발산 평가 연구(Xie et al., 2024)

이 연구는 7개의 위성 기반 증발산 자료와 2개의 증발산 재분석 자료에 대한 전 세계적인 평가를 다룬 연구이다. 연구에서는 다양한 공간 규모에서 증발산 자료의 정확도와 불확실성을 평가하였으며, 230개의 플렉스 타워 데이터를 사용하여 지점 규모에서의 정확도를 평가하였다. 그 결과, 특정한 증발산 자료가 모든 육지 피복 유형에 대해 가장 정확한 예측을 제공하는 것은 아니었으나, GLASS-MODIS와 FLUXCOM이 다른 제품들에 비해 전반적으로 우수한 성능을 보였다(그림 7). 또한, 전 세계 36개의 주요 강 유역을 대상으로 물수지 방정식을 통해 ET 제품의 정확도를 평가하였으며, 위성 기반 ET 제품들이 재분석 제품들보다 불확실성이 적은 것으로 나타났다. 이 연구는 다양한 공간 규모 및 육지 피복 조건을 고려한 ET 제품 선택의 중요성을 강조하고 있으며, 이를 통해 대규모 ET 모델 개발에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 7 증발산 자료별 상대 불확실성 공간 분포

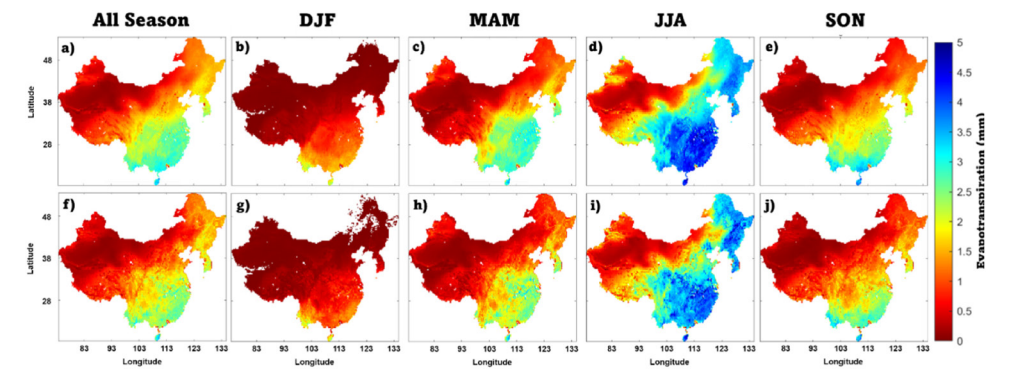


출처: Xie et al., 2024.

Triple collocation 기반 증발 및 증산 통합 수행 연구(Park et al., 2023)

이 연구는 triple collocation 기반 다중 출처 증발 및 증산 통합을 수행한 사례이다. 연구는 동아시아 지역에서 증발산 추정을 개선하기 위해 ERA5-Land, GLDAS, MERRA2 세 가지 재분석 기반 증발 및 증산 추정을 결합하여 보다 정확한 증발산 값을 산출하고자 하였다. 이를 위해 triple collocation 기법을 사용하여 각 데이터의 불확실성을 측정하고, 이를 바탕으로 결합된 증발산 추정값을 산출하였다. 연구 결과, 농업지대와 산림지대에서 결합된 증발산 추정치가 지상 기반 관측 데이터와 매우 유사한 것으로 나타났으며, 특히 봄과 여름철 증산 추정이 증발산 정확도를 높이는 데 중요한 역할을 하는 것으로 확인되었다(그림 8). 이 연구는 토지-대기 상호작용 및 물 자원 관리와 같은 다양한 분야에서 활용할 수 있는 보다 신뢰성 있는 증발산 데이터를 제공하는 중요한 해외 연구 사례로 평가된다.

그림 8 연간 및 계절별 증발산 융합 자료 공간 분포



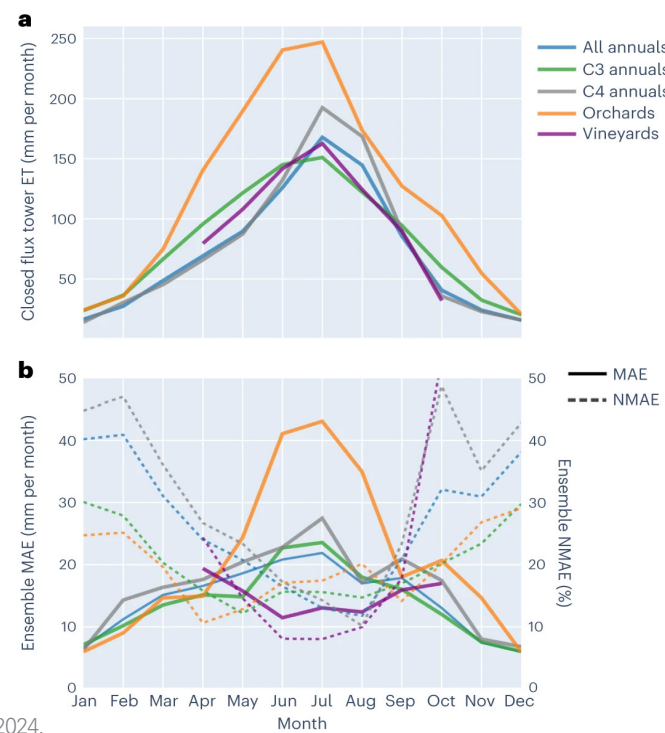
출처: Park et al., 2023.

OpenET satellite 기반 증발산 자료의 적용 가능성 평가 연구(Volk et al., 2024)

이 연구는 위성 기반의 증발산 데이터를 활용하여 물 자원 관리 및 토지 관리 응용을 지원하기 위한 연구 사례이다. 연구에서는 OpenET 시스템을 사용하여 미국 본토 전역의 152개 현장 관측소(주로 에디 공분산 플렉스 타워 데이터)와 위성 데이터를 비교하여 증발산의 정확성을 평가하였다. OpenET는 6개의 원격 감지 모델(ALEXI/DisALEXI, eeMETRIC, geeSEBAL, PT-JPL, SIMS, SSEBop)을 결합한 시스템으로, 미국 내 다양한 토지 유형과 기후대에서 데이터를 수집하여 분석하였다. 연구 결과, 농경지에서 OpenET 시스템의 평균 절대 오차는 월별 15.8mm(관측된 평균 증발산의 17%)로 높은

정확성을 보였으며, 특히 건조한 지역과 관개 농지에서 가장 높은 정확도를 기록했다(그림 9). 또한, 개별 모델 간의 편차가 크지 않았고, 모델 조합을 통해 얻은 평균값이 개별 모델보다 더 높은 신뢰성을 제공하였다. 이 연구는 위성 기반 증발산 데이터가 물 자원 관리 및 농업 관개와 같은 실질적인 응용에 유용하게 사용될 수 있음을 입증하였다.

그림 9 작물 종류별 모델 앙상블의 월 단위 MAE



출처: Volk et al., 2024.

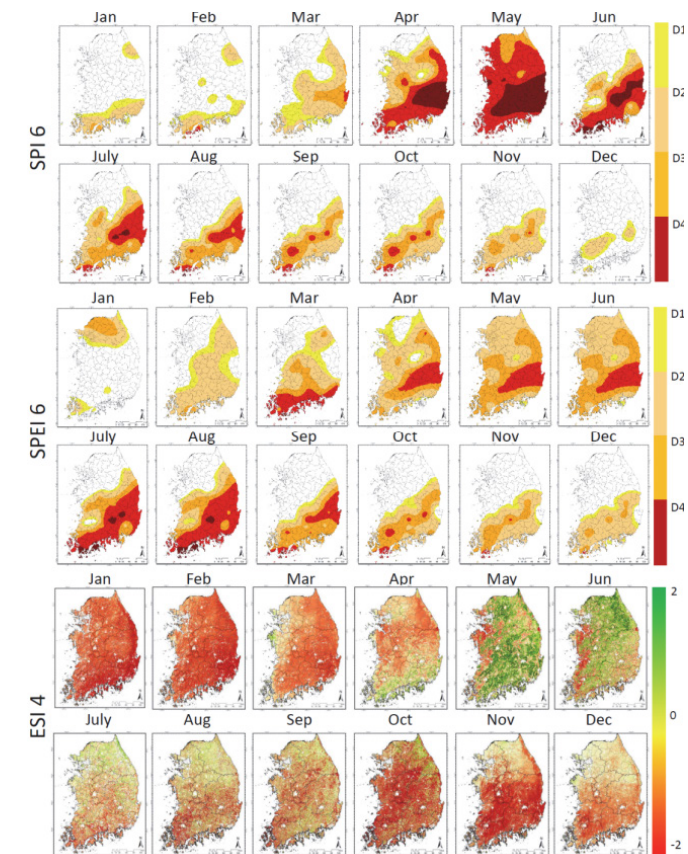
103 국내 연구 현황

증발산 기반 가뭄지수 활용 한반도 남부지역 가뭄 분석 연구(Park et al., 2024)

이 연구는 2022년 남부 지역에서 발생한 농업 가뭄을 분석하기 위한 사례로, 증발스트레스지수(Evaporative Stress Index: ESI)와 증발수요가뭄지수(Evaporative Demand Drought Index: EDDI)를 활용하여 가뭄의 시공간적 경향을 분석하였다. 해당 연구에서는 기상 관측소에서 수집

한 표준강수지수(Standardized Precipitation Index: SPI)와 표준강수증발산지수(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index: SPEI) 등 기존의 가뭄지수와 함께 ESI와 EDDI를 비교하였다. ESI는 위성 영상 데이터를 활용하여 토지 표면 온도를 기반으로 가뭄의 초기 징후를 감지하는 데 민감하며, EDDI는 대기 중 증발산 수요 변화를 분석하여 가뭄의 심도와 범위를 파악하는 지수이다. 연구 결과, 남부 지역의 가뭄이 중부 지역보다 더 길고 심각하게 지속되었음을 확인했으며, ESI는 1월부터 3월까지 가뭄 발생을 더 신속하고 정확하게 감지하였다(그림 10). 반면, 기존의 SPI와 SPEI는 가뭄의 발생 시기를 정확히 반영하지 못했으며, 특히 남부 지역에서 발생한 가뭄의 심도와 범위를 충분히 반영하지 못했다. ESI와 EDDI의 적용을 통해 가뭄을 조기 경보하고, 미계측 지역에서도 정확한 가뭄 감시가 가능하다는 점을 입증했으며, 이는 향후 농업과 물 자원 관리에 중요한 기초 자료로 활용될 수 있다.

그림 10 가뭄지수별 월 단위 가뭄 지도

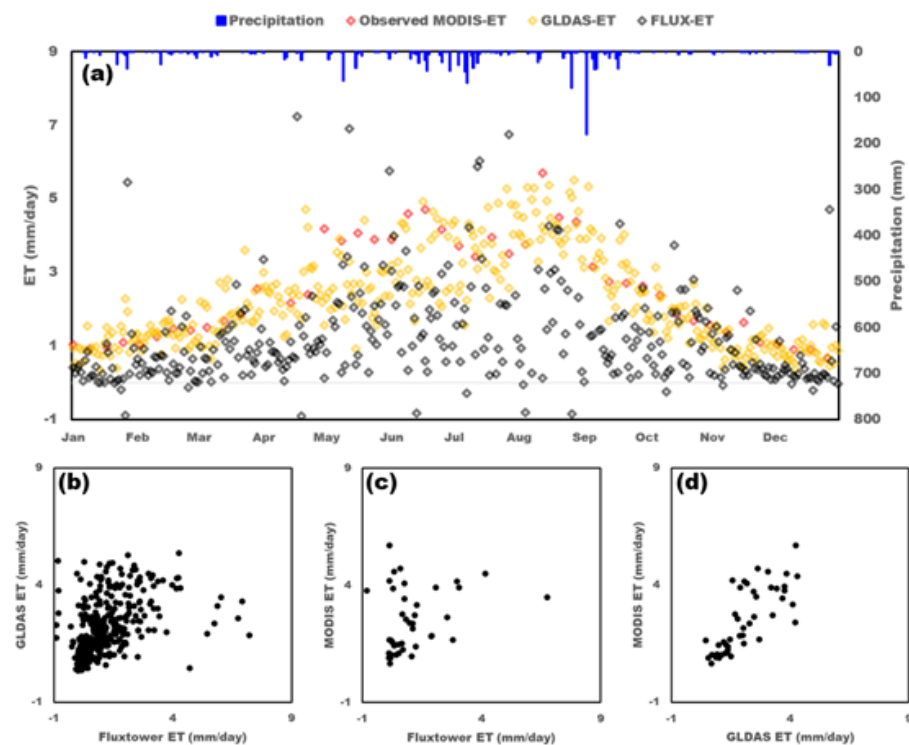


출처: Park et al., 2024.

제주도 대상 위성 기반 증발산 자료 적용성 평가(Jeon et al., 2021)

이 연구는 제주도에서의 위성 기반 증발산량의 적용성 평가에 대한 국내 연구 사례이다. 연구에서는 제주도의 지질적 특성과 수문학적 특성을 고려하여 효율적인 물관리를 위한 증발산량 분석이 필요함을 강조하며, 기존의 지상 관측 데이터가 공간적 대표성을 띠지 못하는 한계를 극복하기 위해 원격 탐사 자료를 활용하였다. MOD16과 GLDAS와 같은 위성 기반 증발산 산출물을 이용해 제주도 전역의 연 증발산량을 분석한 결과, 2019년과 2020년의 연 누적 증발산량은 각각 887.9mm와 927.3mm로 산출되었으며, 이는 연 강수량의 약 55%에서 65%에 해당하는 수치로 나타났다. 또한, 두 데이터 모두 지상관측 자료에 비해 과대 산정되는 경향이 나타났다(그림 11). 해당 연구는 위성 기반 증발산 데이터를 활용하여 제주도의 물 자원 관리에 대한 신뢰성 있는 자료를 제공하고, 기존의 지상 관측 데이터의 한계를 보완할 수 있는 방법론을 제시하고 있다.

그림 11 지점과 공간 단위 증발산 자료의 시계열 (a) 및 산점도 (b), (c), (d) 분석(Jeon et al., 2021)



출처: Jeon et al., 2021.

강수 연구

강수 개요

1.1 강수의 정의 및 중요성

강수는 대기 중에서 응결된 수증기가 물방울이나 눈, 얼음 형태로 지표면에 떨어지는 현상이다. 지구의 대기 시스템은 열과 수분을 이동시키면서, 강수 형태로 물을 대기에서 지표면으로 전달한다. 이 과정에서 에너지가 방출되고 흡수되며, 이는 기온 변화에 영향을 미친다. 강수는 대기에서 수증기의 상태 변화를 통해 발생하며, 물리적으로는 기상 현상과 대기의 순환 시스템과 깊이 연관되어 있다. 강수는 지표수, 지하수, 그리고 전 세계의 수자원 시스템을 유지하는 중요한 역할을 하며, 농업, 식수, 전력 생산, 산업용수 등 인류의 생존과 번영을 위해 필수적인 자원을 제공한다. 또한, 강수는 지역사회의 경제 활동에 큰 영향을 미치며, 극단적인 강수 현상은 홍수나 가뭄과 같은 재해를 유발할 수 있다.

강수는 농업 부문에서 매우 중요한 역할을 하며, 특히 강우 패턴이 일정하지 않은 지역에서는 더욱 그러하다. 예를 들어, 북미와 아시아의 농업 지역에서는 적절한 시기에 충분한 강수가 없으면 작물 생산이 급격히 감소할 수 있으며, 이는 경제적으로 큰 손실을 초래할 수 있다. 또한, 강수는 수문학적 과정에서 핵심적인 역할을 하여, 지하수 재충전, 하천 유량 유지, 그리고 자연 생태계의 건강성을 보장하는 데 기여한다. 한편, 강수의 부족은 가뭄을 초래하여 수자원 고갈, 농업 생산성 감소, 그리고 물 공급 위기를 불러일으킬 수 있으며, 이로 인해 지역 사회와 생태계에 큰 영향을 미친다. 따라서 강수는 자연 환경과 인류의 경제 활동을 지원하는 데 없어서는 안 될 요소이다.

1.2 강수 측정 방법

강수 측정 방법은 지상 측정과 원격 탐사 방법으로 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 지상 측정 방법으로는 대표적으로 강우계와 디스트로미터를 사용한다. 강우계는 일정한 시간 동안 내린 비의 양을 측정하는 기기이며, 간단한 구조와 경제성 때문에 널리 사용된다. 강우계는 물방울이 모여 담긴 양을 통해

강수량을 직접 측정하는 방식으로, 주로 기상 관측소나 농업 용수 관리에 활용된다. 한편, 디스트로미터는 떨어지는 물방울의 크기와 속도를 측정하는 기기로, 강우의 특성과 물방울 분포를 세부적으로 분석하는 데 사용된다. 디스트로미터는 물방울이 얼마나 빠르게 떨어지고, 어떤 크기의 물방울이 많이 내리는지를 분석함으로써 강수의 물리적 특성을 파악할 수 있다.

원격 탐사는 지상 기반의 레이더와 위성 기술을 이용한 방법으로, 대규모 지역에서의 강수 패턴을 분석하는 데 효과적이다. 레이더는 대기 중에서 수증기나 강수 입자의 크기와 분포를 감지하여, 특정 지역에서의 강수 강도를 실시간으로 모니터링할 수 있다. 레이더를 이용한 강수 측정은 특히 폭우나 국지성 호우와 같은 단기적인 기상 현상을 추적하고 예측하는 데 유리하다. 위성 탐사는 넓은 지역을 동시에 관측할 수 있어 지구 전역의 강수 패턴을 분석하는 데 매우 중요한 역할을 한다. 위성을 통해 수집된 자료는 주로 강수의 시간적, 공간적 변화를 추적하고, 기후변화로 인한 강수 패턴의 장기적인 변화를 연구하는 데 사용된다.

원격 탐사를 통한 강수 측정은 지구 전역의 강수량을 실시간으로 분석할 수 있는 중요한 방법이다. 특히 접근이 어려운 지역에서의 강수량 변화를 추적할 수 있으며, 이를 통해 기후변화에 따른 강수 패턴의 변동성을 연구하는 데 큰 도움을 준다. 이러한 데이터는 수문학 연구 및 수자원 관리에도 매우 유용하며, 전 세계의 물 자원 분포와 흐름을 이해하는 데 필수적이다. 원격 탐사 데이터를 통해 우리는 특정 지역의 강수량 변동성뿐만 아니라 지구 전체의 강수 패턴을 명확히 파악할 수 있다. 이를 통해 기후변화나 기상 이변에 대한 대비책을 마련할 수 있으며, 강수량 변화가 환경에 미치는 영향을 더 깊이 이해할 수 있다.

1.3 강수의 위성 원격탐사

강수의 위성 원격탐사는 다양한 센서와 기법을 사용하여 전 지구적인 강수 패턴을 모니터링하고 분석하는 중요한 도구이다. 위성 원격탐사는 지리적으로 접근이 어려운 지역의 강수 현상을 관찰할 수 있으며, 이로 인해 지구 전역에서 강수량을 시간적, 공간적으로 높은 해상도로 측정할 수 있는 능력을 제공한다. 여러 원격탐사 기법 중에서 적외선(Infrared: IR) 관측은 구름의 상단 온도를 측정하여 강수를 추정하는 방법이다. 구름이 차가울수록 강수 가능성이 높다는 이론에 기반하며, 대규모 구름 시스템의 움직임을 빠르게 포착할 수 있어 시공간 해상도가 뛰어나다. 그러나 구름 상단의 온도만으로 실제 강수량을 정확히 측정하기 어려운 한계가 있어 다른 기법들과 결합하여 사용되는 경우가 많다.

마이크로파 관측은 강수의 물리적 특성을 더 정확히 파악할 수 있는 기법으로, 구름 내의 물방울과 얼음 입자의 크기, 분포 등을 직접 측정할 수 있다. 특히 대기와 지표에서 방출되는 마이크로파 신호를

분석함으로써 강수량뿐만 아니라 눈, 비, 진눈깨비 등 강수 형태도 구별할 수 있다. TRMM(Tropical Rainfall Measuring Mission)과 GPM(Global Precipitation Measurement) 위성은 이러한 마이크로파 기법을 이용하여 열대 및 온대 지역의 강수량을 매우 높은 정밀도로 측정하고 있으며, 강수의 공간적, 시간적 변동성을 분석하는 데 중요한 데이터를 제공하고 있다. 특히 GPM은 두 개의 주파수를 사용하는 듀얼 주파수 강우 레이더를 통해 보다 정밀한 강수 추정을 가능하게 한다.

다양한 센서 데이터를 결합한 합성 제품 역시 중요한 역할을 한다. 여러 센서로부터 수집된 자료를 통합하여 더 정확한 강수량을 추정하는 방식으로, 적외선과 마이크로파 데이터를 결합한 CMORPH(Climate Prediction Center Morphing Technique)는 이러한 접근법의 대표적인 예다. CMORPH는 전 지구적인 고해상도 강수량 추정을 가능하게 하며, 특히 시공간적으로 세밀한 해상도를 제공하여 강수 패턴을 보다 정교하게 분석할 수 있다. 이와 같은 다중 센서 기반의 접근법은 단일 센서의 한계를 보완하고, 특정 기상 조건이나 지리적 특성에 맞는 최적화된 강수 예측을 가능하게 한다.

또한 위성 원격탐사는 극한 강수량 분석에 있어서도 중요한 도구로 사용된다. 극한 강수는 홍수, 가뭄과 같은 기후 재해를 예측하고 대비하는 데 필수적인 요소이기 때문에 이를 정확히 측정하고 예측하는 것이 중요하다. 이를 위해 위성 데이터는 대규모 지역의 장기적인 강수 패턴을 분석할 수 있으며, 시간적 변화와 공간적 변동성을 포착하는 데 탁월하다. 예를 들어, PERSIANN-CCS는 인공지능망을 이용해 구름의 형태와 강수량을 분석하는 시스템으로, 0.04° 해상도의 데이터를 제공하여 세밀한 시간적, 공간적 분석이 가능하다. 이러한 고해상도 제품은 특히 극한 강수 현상을 더 정확히 포착할 수 있어 재난 대응 및 기후변화 연구에 중요한 기초 자료로 활용된다.

레이더 기반의 원격탐사는 지상 레이더를 이용해 특정 지역의 강수를 실시간으로 모니터링하는 방법이다. 이 기법은 구름 내의 수분 분포를 정확히 추적하여 강수량을 측정할 수 있으며, 대기 중 수증기의 움직임을 감지해 강수 예측을 할 수 있다. 레이더는 주로 지역적인 강수 모니터링에 사용되지만, 위성 데이터를 보완하여 보다 정교한 강수 예측 모델을 구성하는 데 활용된다. 이러한 레이더와 위성 데이터를 결합한 분석은 지역적 강수 패턴을 보다 정확하게 파악하고, 전 지구적 수준의 강수 변화 연구에도 큰 기여를 한다.

이러한 다양한 원격탐사 기반 강우 관측 기법들은 기후변화에 따른 강수 패턴의 변화를 분석하고 예측하는 데 핵심적인 역할을 하고 있으며, 특히 극단적인 기상 현상을 예측하고 이에 대응하기 위한 중요한 도구로 자리 잡고 있다. 예측 정확도를 높이기 위해서는 여러 원격탐사 기법의 상호 보완적 사용이 중요하며, 이를 통해 기후변화로 인한 재난을 더 효율적으로 관리할 수 있는 기반이 마련된다.

1.4 기후변화와 강수 패턴

기후변화는 전 세계적인 강수 패턴에 중대한 영향을 미치고 있다. 특히, 대기 온도의 상승은 강수의 형태와 양에 변화를 초래하고 있으며, 이는 전 세계의 수자원 관리와 자연 생태계에 심각한 도전을 던져주고 있다. 예를 들어, 북미와 같은 지역에서는 산악 지대의 기온이 상승하면서 기존에 눈으로 내리던 강수량이 점차 비로 전환되고 있으며, 이는 봄철의 눈 녹은 물이 주요 수자원 공급원인 지역에서 큰 문제로 작용하고 있다. 이러한 변화는 강수의 시간적, 공간적 변동성을 증가시키며, 이를 기반으로 한 수자원 관리와 재해 방지 시스템을 더욱 복잡하게 만든다. 또한, 기후변화로 인해 강수의 빈도와 강도가 변하고 있어, 홍수나 가뭄과 같은 극한 기상 현상이 빈번해지고 있다.

연구에 따르면, 전 세계적으로 강수 패턴은 기후변화에 따라 점진적으로 변화하고 있다. 예를 들어, 미국 서부의 산악 지역에서는 최근 수십 년 동안 겨울철에 비로 내리는 강수량이 증가하고 있으며, 이는 수자원 관리에 있어 새로운 도전을 야기하고 있다. 또한, 강수 패턴의 변화는 특정 지역의 기후와 생태계에 부정적인 영향을 미칠 수 있다. 예를 들어, 기후변화로 인해 가뭄이 빈번해지는 지역에서는 수자원이 더욱 부족해져 농업 생산성이 감소하고, 식량 안보에도 위협이 될 수 있다. 이러한 변화는 인류와 자연 생태계 모두에 심각한 영향을 미칠 수 있으므로, 기후변화에 따른 강수 패턴 변화를 예의주시하고, 이에 적응하기 위한 전략을 마련하는 것이 중요하다.

1.5 강수 예측 및 모델링

강수 예측은 기후 모델과 수치 예측 모델을 통해 이루어지며, 이러한 모델들은 기상 조건, 대기 순환 패턴, 지역적 기후 특징 등을 분석하여 강수량을 예측한다. 현재 사용되는 수치 모델들은 지역적 기상 조건을 반영하여 강수 예측의 정확성을 높이고자 하지만, 강수는 매우 변동성이 큰 현상이기 때문에 예측이 어려운 경우가 많다. 특히 기상 조건이 급변하거나 지역별로 상이한 강수 패턴이 발생할 경우, 예측 모델의 성능이 떨어질 수 있다. 그럼에도 불구하고 최근 연구에서는 기상 관측 데이터를 기반으로 한 고해상도 모델이 기존 모델보다 더 정밀한 강수 예측을 제공할 수 있음을 보여주고 있다.

특히, 강수 예측에서 중요한 요소 중 하나는 강수의 형태이다. 비와 눈은 물리적으로 매우 다른 성질을 가지며, 각각의 형태에 따라 수문학적 시스템에 미치는 영향이 다르다. 기온에 따라 강수의 형태가 결정되며, 특히 산악 지역에서는 기온이 조금만 변화해도 비와 눈이 바뀔 수 있다. 이러한 변화는 수자원 관리, 홍수 예측, 농업 계획 등에 큰 영향을 미친다. 최근 연구에서는 기온뿐만 아니라 대기 습도, 기압 등의 변수를 함께 고려한 물리 기반 모델이 기존의 경험적 모델보다 더 정확한 강수 예측을 제공할 수 있다는 점을 강조하고 있다.

강수 예측 모델은 수문학적 모델과 결합되어 수자원 관리, 홍수 예방, 기후변화 연구에 중요한 역할을 하고 있다. 예를 들어, 기상 모델을 기반으로 한 홍수 예측 시스템은 강수량 변화를 미리 예측하여 홍수를 예방하는 데 기여할 수 있다. 또한, 기후변화에 따른 장기적인 강수 패턴의 변화를 예측함으로써, 수자원 관리 정책을 사전에 수립하고 기후변화에 대비할 수 있는 중요한 도구가 된다.

1.6 강수와 수자원 관리

강수의 변화는 전 세계적으로 수자원 관리에 큰 영향을 미치고 있다. 특히, 기후변화로 인해 강수 패턴이 변하면서 기존의 수자원 관리 체계가 도전에 직면하고 있다. 예를 들어, 미국 서부의 산악 지역에서는 겨울철 눈이 주요 수자원 공급원이었다. 그러나 최근 몇 년 동안 겨울철 기온 상승으로 인해 눈이 아닌 비로 내리는 강수량이 증가하면서, 이 지역의 수자원 관리에 큰 어려움이 발생하고 있다. 이러한 변화는 특히 수자원이 제한적인 지역에서 물 부족 문제를 더욱 악화시키고 있으며, 이에 대한 대응책 마련이 시급하다.

기후변화로 인해 강수 패턴이 변화하면서, 수자원 관리 당국은 새로운 전략을 마련하고 있다. 예를 들어, 강수량이 급격히 변동하는 지역에서는 물 저장 시설을 확충하거나, 강우량이 적은 시기에 대비해 물을 효율적으로 사용하기 위한 방안을 모색하고 있다. 또한, 기후변화로 인한 극단적인 강수 현상에 대응하기 위해 홍수 방지 시스템을 강화하는 등의 조치도 필요하다. 이러한 변화에 적응하기 위한 전략은 장기적인 수자원 안정성을 확보하는 데 중요한 역할을 할 것이다.

강수는 수자원 관리의 핵심 요소이며, 강수량의 변동성은 지역 사회와 산업에 큰 영향을 미칠 수 있다. 따라서 수자원 관리 정책을 수립할 때는 기후변화와 강수 패턴의 변화를 예측하고 이에 적절히 대응할 수 있는 방안을 마련하는 것이 중요하다.

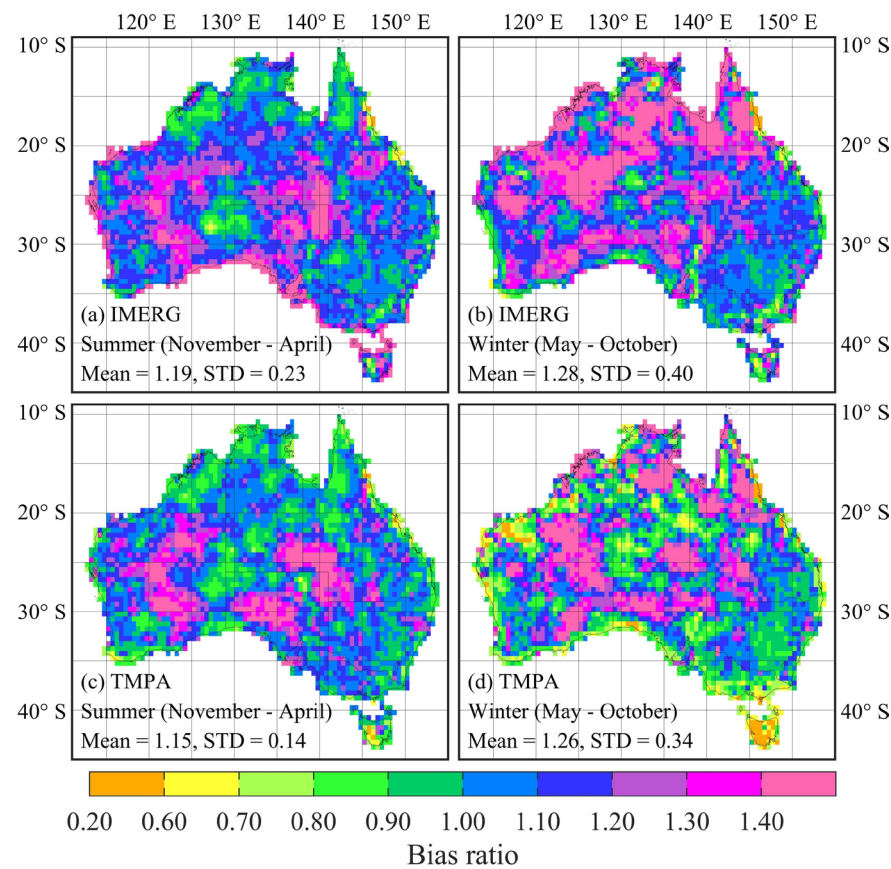
102 해외 연구 현황

호주 대상 위성 기반 강우 자료들의 비교 및 평가 연구(Islam et al., 2020)

이 연구는 호주에서의 5가지 위성 강수 제품(IMERG, TRMM, CMORPH, PERSIANN, PERSIANN-CDR)을 비교하고 평가하였다. 연구는 호주 전역을 대상으로 5년 동안(2014년 10월부터 2019년 9월까지) 위성 기반 강수 데이터를 평가하여, 물 자원 관리 및 수문학적 모델링에 활용할

수 있는 강수 제품의 정확성을 분석하였다. 특히, 연구에서는 위성 강수 데이터를 활용하여 증발산과 같은 수문학적 변수를 추정하는 데 있어 그 정확성과 불확실성을 평가하였다. 위성 데이터를 통한 강수량 추정은 증발산 계산의 중요한 기초 자료로 사용되며, 호주와 같이 기후대가 다양하고 강수량의 공간적, 시간적 변동성이 큰 지역에서 매우 유용하다. 연구 결과, IMERG와 TRMM 제품이 상대적으로 높은 정확도를 보였으며, 특히 IMERG는 겨울철 강수량 추정에서 가장 뛰어난 성능을 나타냈다(그림 12). 이러한 위성 기반 강수 데이터는 호주의 물 자원 관리 및 가뭄 모니터링과 같은 실용적인 분야에 유용하게 적용될 수 있으며, 특히 호주의 건조 지역이나 관측소가 부족한 지역에서 증발산 추정에 중요한 역할을 할 수 있음을 확인하였다.

그림 12 IMERG와 TMPA의 계절별 오차 비율 공간 분포

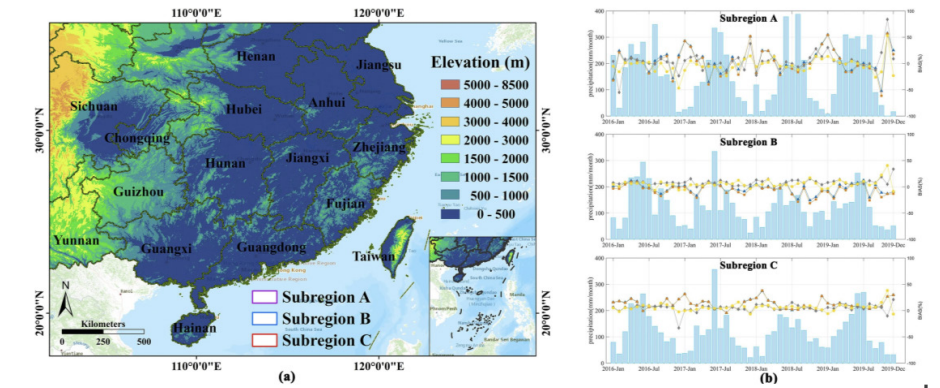


출처: Islam et al., 2020.

중국 대상 모델 및 위성 기반 강수 자료의 비교 및 평가(Xu et al., 2022)

이 논문은 중국에서의 모델 기반 강수 자료(ERA5, ERA5-Land)와 위성 기반 강수 자료(IMERG, GSMaP)의 비교 및 평가를 다룬 사례이다. 연구는 2016년부터 2019년까지의 기간 동안 중국 전역에서 모델 기반과 위성 기반 강수 제품의 정확성을 분석하였다. 특히 증발산과 관련하여, 이러한 강수 제품들은 증발산 산출을 위한 중요한 기초 자료로 사용되며, 각 제품의 정확성과 불확실성을 평가함으로써 수문학적 모델링과 물 자원 관리에 유용하게 적용될 수 있음을 확인하였다(그림 13). 연구 결과, 위성 기반 제품(IMERG, GSMaP)이 모델 기반 제품(ERA5, ERA5-Land)보다 전반적으로 우수한 성능을 보였으나, 겨울철이나 고위도 지역에서는 모델 기반 제품이 더 나은 성능을 보이는 경우도 있었다. 이러한 연구는 향후 물 자원 관리 및 가뭄 모니터링과 같은 분야에서 증발산을 정확하게 추정하는 데 중요한 참고 자료가 될 수 있다.

그림 13 지역별 모델 및 위성 기반 강수 자료와 지상관측 자료의 통계 분석 결과



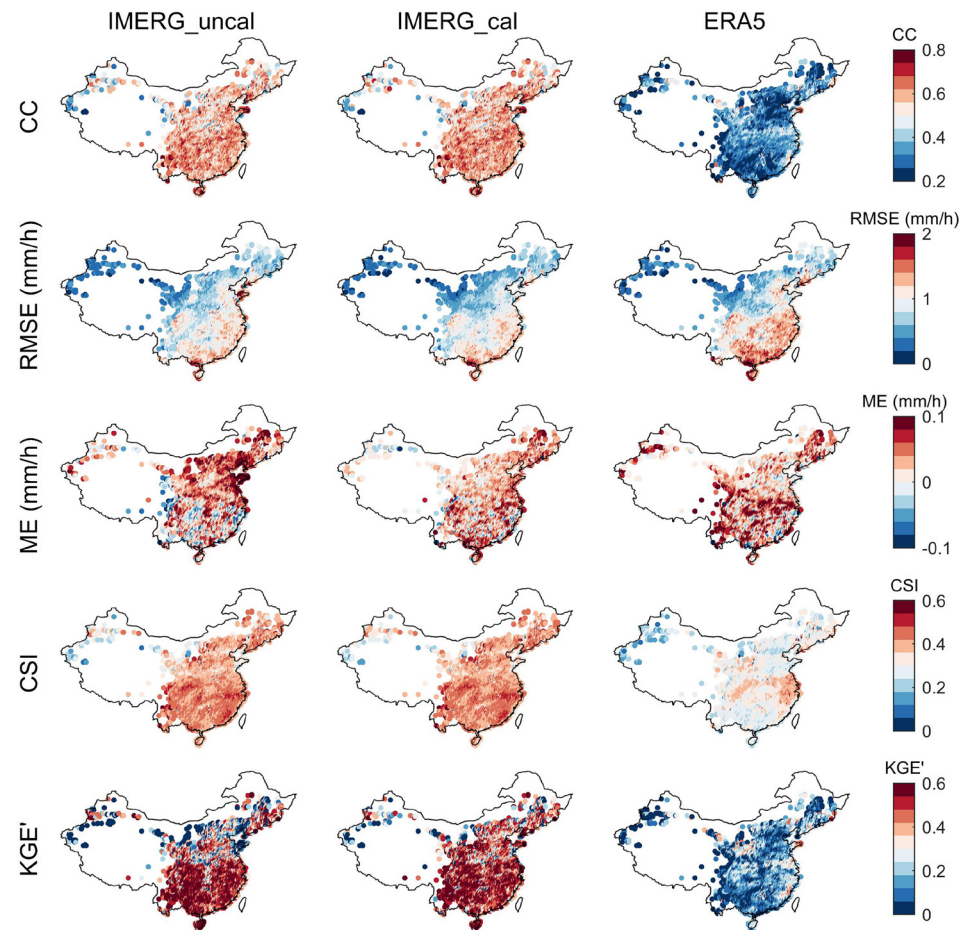
출처: Xu et al., 2022.

GPM 기반 위성 및 재분석 강수 자료들의 비교 및 평가 연구(Tang et al., 2020)

이 논문은 위성 기반 강수 데이터를 사용하여 지난 20년간 위성 강수 제품의 성능을 비교한 연구 사례이다. 연구에서는 주로 GPM IMERG 제품을 중심으로 다른 9개의 위성 및 재분석 데이터 세트(TRMM 3B42, CMORPH, PERSIANN-CDR, GSMaP, CHIRPS, SM2RAIN, ERA5, ERA-Interim, MERRA2)와 비교하여 분석하였다. 특히 이 연구에서는 증발산과 관련된 중요한 데이터를 제공하는 강수 예측의 정확성을 평가하였다. IMERG는 일간 및 시간별 강수 데이터를 제공하며, 중국

전역에서 2000년부터 2018년까지의 데이터를 분석한 결과, IMERG가 다른 제품들보다 전반적으로 우수한 성능을 보였지만, 특히 고위도 지역과 겨울철 강수 예측에서는 재분석 데이터에 비해 성능이 떨어지는 경우도 있었다(그림 14). 이 연구는 증발산과 같은 수문학적 변수를 보다 정확하게 추정하기 위한 위성 기반 강수 데이터의 활용 가능성을 보여주었으며, 다양한 지역 및 기후 조건에 따라 적절한 강수 제품을 선택하는 데 중요한 참고 자료가 될 수 있다.

그림 14 위성 강수 자료와 지상 관측 자료의 통갯값 분포



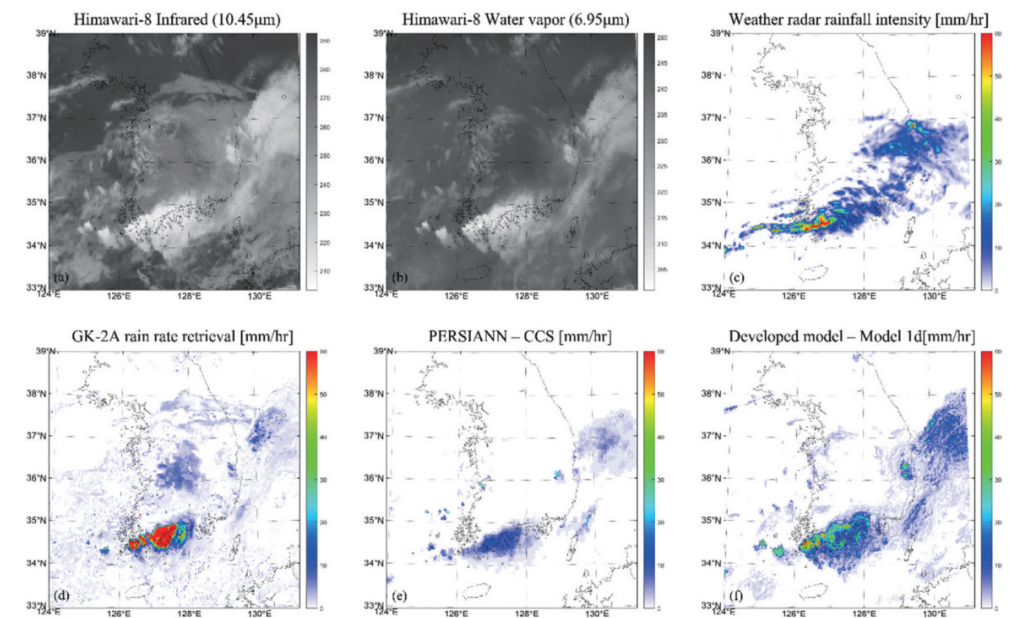
출처: Tang et al., 2020.

03 국내 연구 현황

정지 궤도 기상 위성 활용 기계학습 기반 강우 강도 추정 연구(Shin et al., 2021)

이 논문은 한반도 여름철을 대상으로 한 정지 궤도 기상 위성을 이용한 기계 학습 기반 강우 강도 추정 연구로, 국내 연구 사례이다. 연구에서는 정지 궤도 위성 Himawari-8의 고해상도 위성 데이터를 활용하여 강우 강도를 추정하는 모델을 개발하였다. 연구진은 랜덤 포레스트(Random Forest) 기법을 활용하여 기상 레이더의 강우 반사도와 강우 강도 간의 관계를 학습하고, 이를 통해 정확한 강우 강도를 예측하였다. 특히 이 연구에서는 기존의 위성 강우 추정 모델보다 더 높은 정확성을 보이는 강우 강도 산출 결과를 얻었으며, 이를 통해 한반도 여름철 집중호우와 같은 극한 기상 현상의 모니터링에 활용할 수 있는 중요한 자료를 제공하였다(그림 15). 이러한 결과는 향후 물 자원 관리 및 기후변화 대응 전략에 중요한 기초 자료가 될 수 있다.

그림 15 폭우 발생 시기에서의 위성 및 모델 강우 공간 분포

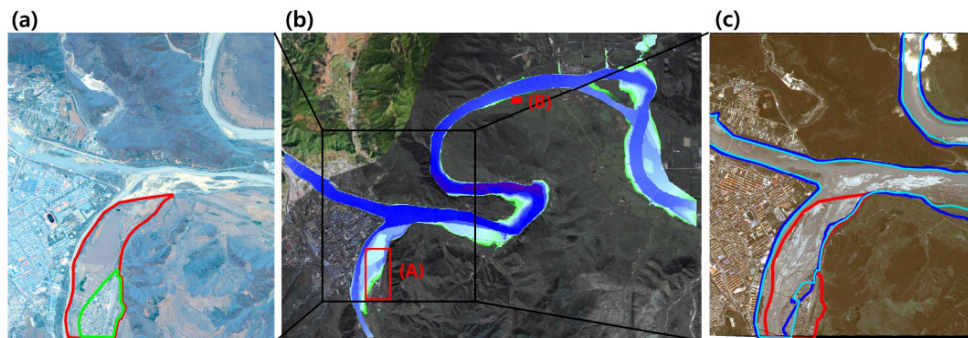


출처: Shin et al., 2021.

위성 강우 활용 미계측 지역 침수 모의 연구(Choi et al., 2020)

이 논문은 위성 강우와 글로벌 지형 자료를 활용하여 미계측 지역인 두만강 도문/남양 지역의 홍수 침수 모의를 수행한 국내 연구 사례이다. 이 연구에서는 2016년 태풍 라이언룩에 의해 발생한 홍수 상황을 분석하였으며, 위성 영상에서 유도된 강우 자료(IMERG)를 이용하여 두만강 유역의 유출 모의를 진행하였다. 또한, 홍수 모의 결과는 현지 조사와 홍수 전후의 위성 영상 데이터를 통해 검증되었다(그림 16). 연구 결과, IMERG를 통한 홍수량 예측이 지상 관측 자료와 약 0.1%의 오차 범위 내에서 일치하는 것으로 나타났으며, 범람 해석 결과도 침수 범위와 침수 깊이가 현장 조사와 유사하게 나타났다. 본 연구는 미계측 지역에서 위성 기반 증발산과 강우 데이터를 활용한 정량적 홍수 분석에 중요한 기초 자료를 제공하며, 향후 물 자원 관리 및 재해 예방에 유용하게 활용될 수 있는 방법론을 제시하고 있다.

그림 16 침수 모의 결과 공간 분포



출처: Choi et al., 2020.

수체 탐지 연구

수체 탐지 기술 개요

1.1. 수체 탐지의 개념 및 활용 분야

수체(Water body)는 지구 표면에 존재하는 자연 또는 인공적으로 생성된 물이 모여있는 공간을 의미한다. 수체는 가용수자원의 확보, 생태계 유지, 농업, 도시 관리 등 다양한 분야에서 필수적인 자원이다. 수체는 기원에 따라 자연 및 인공 수체로 구분된다. 자연적 수체는 지질 및 기후의 변화로 인해 자연적으로 형성된 수체로 강, 호수, 하천, 습지 등이 포함되어 있다. 인공적 수체는 물의 저장, 수력 발전, 농업 관개의 목적으로 인간의 필요에 의해 건설된 수체로 저수지, 댐, 운하, 인공 호수 등이 포함된다.

수체 탐지(Water body detection)는 지구 표면에 존재하는 수체를 탐지하고 그 경계와 분포를 측정하는 기술을 의미한다. 수체 탐지는 현장 관측(Field observation)과 원격 탐사(Remotely-sensed) 기반 방법으로 나뉜다. 현장 관측은 수체 탐지를 위하여 사람이 직접 현장에서 측정기기를 사용하여 데이터를 수집하는 방법이다. 대표적으로는 수심 측정기를 사용하여 수체의 물리적 특성을 직접 조사하는 방법이 있다. 이를 통해 수체의 깊이, 면적, 수량을 정확하게 모니터링할 수 있다. 원격 탐사 기반 수체 탐지에는 인공위성, 드론, 항공기 등 원격탐사 장비를 사용하여 수체를 탐지하는 방법을 의미한다. 원격 탐사 기반 수체 탐지의 핵심 원리는 수체와 비수체 지역의 전자기파(가시광선, 적외선, 마이크로파) 대역의 반사 특성 차이를 활용하는 것이다. 원격 탐사 자료의 활용은 광범위한 지역의 수체면적, 경계, 변화를 신속하고 효율적으로 모니터링 가능하게 한다.

원격 탐사 기반 수체 탐지는 수자원 관리뿐 아니라 수재해 모니터링, 도시 계획 수립에 핵심적인 역할을 한다. 수자원 관리에서는 수체의 면적과 수량의 지속적인 모니터링으로 물 부족 사태를 사전에 방지하고, 농업 및 식수 공급에 필요한 가용수자원의 효율적인 관리가 가능하다. 또한, 홍수 발생 시 수체의 범람 탐지, 범위, 영향을 신속하게 파악하여 피해의 최소화 및 효과적인 재난 대응이 가능하다. 도시 계획에서는 수체 탐지를 통해 수변 생태계를 보호하고, 도시 내 수재해 위험을 사전에 예측하여 재난안

전 시스템의 설계에 중요한 기반을 제공한다. 이처럼 수체 탐지는 효율적인 자원 관리와 재난 대응, 지속 가능한 도시 개발에 필수적인 도구로 활용되고 있다.

1.2. 수체 탐지의 역사

수체 탐지의 역사는 여러 단계를 거쳐 기술적 발전을 이루었으며, 초창기에는 수동적인 관측으로 시작해 현재 위성과 원격탐사의 기술 도입 그리고 인공지능(Artificial Intelligence) 발전으로 이어져 왔다. 수체 탐지의 기원은 인류의 문명이 시작된 이래 수자원 관리의 필요성에서 유래되었다. 과거 수 세기에 걸쳐 육안 관측과 지상 측정을 통해 수체의 분포를 파악해 왔으며, 이러한 관측 방식은 범위가 제한적이므로, 광범위한 수자원의 변화에 대한 관측에 한계점이 있었다. 20세기 초, 항공 관측의 기술이 도입되면서 수체 탐지의 역사는 한 단계 더 발전하게 된다. 항공 관측을 통해 하천, 저수지, 호수, 해안선 등 광범위한 지역의 수계를 지도화할 수 있게 되었으며, 기존의 육안과 지상 관측을 보완하여 수체 탐지의 혁신을 이루었다. 1970년대 이후 발사된 Landsat 시리즈와 같은 지구관측위성은 지표면의 다양한 정보를 다중분광 센서를 통해 수집할 수 있게 하였으며, 이는 수체 탐지에 있어 정확성과 효율성 면에서 큰 혁신을 가져왔다. 위성 관측을 통해 수체의 분포와 변화 추적이 가능해지면서, 홍수나 가뭄과 같은 자연재해 상황에서도 실시간 관측 및 대응이 가능해졌다. 최근에는 수체 탐지 분야에서는 인공지능(Artificial Intelligence)의 도입으로 머신러닝(Machine Learning) 및 딥러닝(Deep Learning)에 대한 연구가 이루어지고 있으며, 위성 및 드론 영상 데이터를 기반으로 학습하고 분석하여 수체의 경계와 면적을 자동으로 탐지한다. 이러한 자동화된 탐지 기술은 과거 수동으로 데이터를 해석했던 한계를 극복하며, 수계 변화에 대한 실시간 대응 능력을 향상시킨다. 또한, 클라우드 기반 데이터 처리 기술의 발달로 대용량 영상 데이터의 저장, 처리, 분석이 가능해지면서 수체 탐지의 정확성이 향상되고 있다. 결론적으로, 수체탐지의 역사의 발전은 지속적으로 변화하고 있다. 항공 영상 촬영에서 위성 관측 그리고 인공지능 기반 자동화 탐지까지 수체 탐지의 기술은 더욱 정교해지고 있으며, 앞으로도 다양한 분야에서 중요한 활약을 할 것으로 전망된다.

1.3. 위성 원격 탐사 자료 기반 수체 탐지 관측 원리

1.3.1. 광학 위성 영상

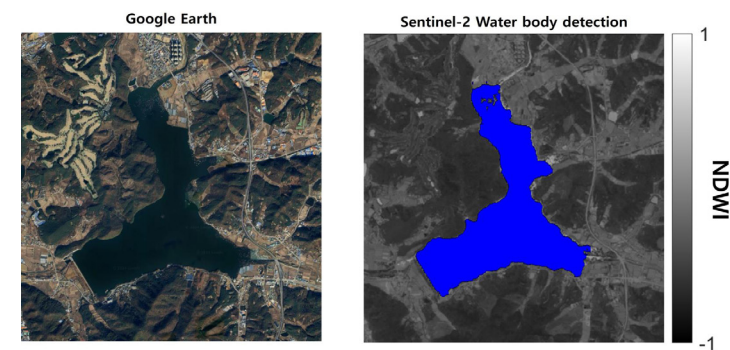
수체 탐지에서 광학 위성은 가장 광범위하게 사용되는 데이터로, 가시광선, 근적외선(Near-Infrared), 단파 적외선(Short Wavelength InfraRed: SWIR) 대역을 활용해 지표면의 특성을 다양

하게 파악할 수 있다. 근적외선 및 단파 적외선 대역에서 수체는 빛을 흡수하는 특성이 있으며, 식생, 토양, 건물 등 비수체 영역에서는 빛을 반사하는 특성이 나타난다. 수체는 투명하며 빛의 대부분을 흡수 및 통과시키기 때문에 반사율이 낮게 나타난다. 반면 식생에서는 엽록소와 같은 광합성 색소로 인해 근적외선 대역에서 높은 반사율이 나타난다. 토양 및 인공 구조물은 물체의 조성에 따라 다양한 파장 대역에서 반사 특성이 다르게 나타나지만, 수체와는 다른 반사율을 가지기에 수체 탐지에 있어 유용한 대조를 제공한다. 광학 영상의 특성을 활용하여 수체 탐지의 성능을 높이는 다양한 지수들이 개발되어 왔다. 그중 대표적인 지수는 정규수분지수(Normalized Difference Water Index: NDWI)이며, 녹색 대역과 근적외선 대역의 반사율 차이를 통해 수체와 비수체의 분류가 가능하다(그림 17).

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR}$$

그러나 도심 환경에서의 건물과 그림자와 같은 요소에서 오탐지가 발생할 가능성이 높으며, 인공 구조물이 존재하는 복잡한 지역에서는 한계가 있다.

그림 17 Sentinel-2 NDWI 영상 기반 수체 탐지 결과 예시(경기도 용인시 이동저수지)



출처: 최민하 교수, 지구원격탐사연구실.

NDWI 단점을 보완하기 위해 개선된 정규수분지수(Modified Normalized Difference Water Index: MNDWI)가 개발되었다. MNDWI는 근적외선 대신 단파 적외선 대역을 활용하여, 수체와 비수체 간의 반사율 차이가 크며, 특히 구조물, 도로, 콘크리트 등과 같은 인공 구조물의 반사율이 수체와 크게 차이가 나기 때문에 수체 탐지의 정확도를 높일 수 있다.

$$MNDWI = \frac{Green - SWIR}{Green + SWIR}$$

1.3.2. SAR 위성 영상

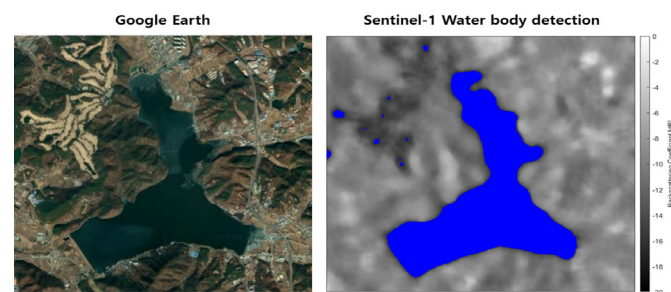
SAR(Synthetic Aperture Radar)를 탑재한 인공위성의 경우 레이더에서 방출된 마이크로파가 지 표면에 반사되어 돌아오는 후방산란 신호를 이용하는 후방산란계수(backscattering coefficient)를 산출하여 주야나 기상현상에 상관없이 지표면을 주기적으로 관측할 수 있다는 장점을 가지고 있어 수 체 탐지 분야에서 활발한 연구가 진행되고 있다.

수체는 평평하고 매끄러운 표면을 가지고 있어, 마이크로파를 일정하게 반사시키는 정반사가 발생 한다. SAR 영상에서 수체는 대부분 마이크로파 수신 방향과 반대 방향으로 반사하게 되어 후방산란계 수가 낮다. 그러므로 수체는 어두운 영역으로 나타나며, 다양한 환경 속에서도 수체를 명확히 탐지할 수 있는 장점을 제공한다.

반면, 비수체는 표면의 거칠기가 수체와 달리 거친 표면을 가지고 있어 마이크로파가 여러 방향으 로 산란하는 난반사가 발생한다. 난반사로 인해 SAR 수신기에 마이크로파가 더 많이 반사되며, 후방 산란계수가 높게 나타나 비수체는 밝은 영역으로 나타난다.

SAR 영상은 전자기파의 진동 방향에 따라 동일한 송수신 방향을 가지는 VV(Vertical Transmit - Vertical Receive), HH(Horizontal Transmit - Horizontal Receive)와 서로 다른 송수신 방향(cross-polarization)을 가지는 VH(Vertical Transmit - Horizontal Receive), HV(Horizontal Transmit - Vertical Receive) 등의 편파를 제공한다. 수체는 동일한 송수신 방향을 가지는 VV, HH 편파에서 민감하 게 반응한다. 이러한 편파 정보를 활용하여 수체와 비수체 간의 후방산란 특성 차이를 선명하게 나타내어 수체 탐지에 대표적으로 활용된다(그림 18). 또한, 다양한 편파를 조합하여 다중 편파 데이터를 활용하는 것도 유용하다. 계절적 변화 및 수체의 표면 상태를 고려하여 편파별 후방산란 특성이 다를 수 있기 때문 에 여러 편파 정보를 결합하여 분석하면 수체 탐지의 정확도 및 신뢰성을 높일 수 있다.

그림 18 Sentinel-1 VV 편파 영상 기반 수체 탐지 결과 예시(경기도 용인시 이동저수지)



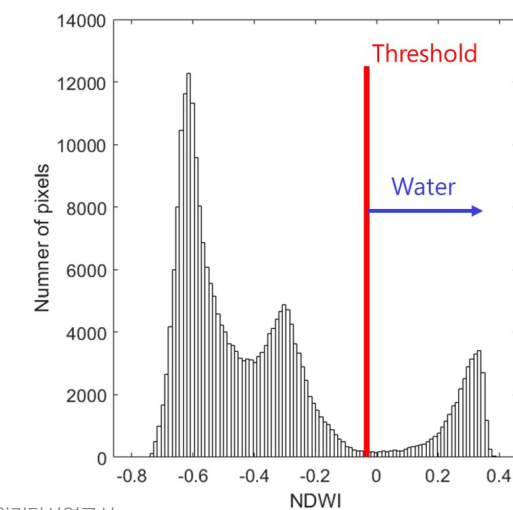
출처: 최민하 교수, 지구원격탐사연구실.

02 수체 탐지 기법

2.1. 히스토그램 기반 임계값 기법

수체 탐지 분야에서는 전통적으로 영상의 픽셀값을 두 그룹(수체, 비수체)으로 분류하기 위하여 히스토그램 기반 임계값 기법(Histogram-based thresholding)이 널리 사용되어 왔다. 히스토그램 기 반 임계값 기법은 영상 내 픽셀값을 시각화한 그래프인 히스토그램의 분포를 분석하여 특정 임계값을 설정하고, 이를 기준으로 수체/비수체를 분류하는 과정을 통해 이루어진다. 수체 영역은 비수체 영역 과 다른 반사 특성이 나타나기 때문에 히스토그램에서 특정한 패턴이 나타난다. 이러한 특성을 이용하 여 수체와 비수체를 분류하는 임계값의 산정이 가능하다. 일반적으로 광학 영상의 경우 Green, NIR 대역의 차이를 이용하는 Normalized Difference Water Index(NDWI) 영상에서 임계값을 기준으로 값이 큰 영역을 수체로 분류한다(그림 19). SAR 영상의 경우 수체에 민감하게 반응하는 VV, HH 편파 영상에서 임계값을 기준으로 후방산란계수가 작은 영역을 수체로 분류한다.

그림 19 Sentinel-2 NDWI 영상의 히스토그램 및 임계값 산정



출처: 최민하 교수, 지구원격탐사연구실.

Otsu 기법은 히스토그램 기반 임계값 기법 중 가장 널리 사용되는 방법 중 하나이다. Otsu 기법은 영상의 픽셀값의 히스토그램이 이봉 분포(Bimodal distribution) 형태로 이루어져 있다는 가정하에 클

래스 내 분산(intra-class variance)은 최소화하고 각 클래스 간 분산(inter-class variance)은 최대가 되는 임계값을 선택하여 수체와 비수체를 분류한다(Otsu, 1975). Otsu 기법은 히스토그램의 분포가 이봉 분포 형태로 이루어져 있을 경우 수체/비수체를 명확히 분류하는 임계값의 산정이 가능하다.

Kittler-Illingworth(KI) 기법은 Otsu 기법과 유사하게 히스토그램을 분석하여 임계값을 찾는 방법이지만, 확률적 모델을 적용하여 최적의 임계값을 결정한다(Kittler & Illingworth, 1986). KI 기법은 히스토그램의 두 개의 가우시안 분포로 모델링 후, 각 분포에 따라 이진 분류의 오차 확률을 최소화하는 임계값을 산정한다. KI 기법은 객체의 오탐지율을 최소화하는 임계값을 설정하기 때문에 수체를 보수적으로 탐지하여 노이즈가 많거나 수체 주변 토지피복이 복잡한 영상에서도 효과적인 수체 탐지가 가능하다.

히스토그램 기반 임계값 기법의 경우 간단한 계산으로 수체 탐지가 가능하다는 장점이 존재한다. 하지만 영상의 히스토그램 분포가 이봉 분포가 아닌 단이 분포 혹은 다봉 분포의 형태일 경우 수체/비수체를 분류하는 임계값의 산정이 어렵다는 한계점이 존재한다. 또한 노이즈가 많이 포함된 영상의 경우, 히스토그램의 분포가 왜곡되어 임계값의 산정이 어려워진다는 한계점 역시 존재한다.

국외의 경우 Sentinel-1 위성의 VV 편파 영상과 Sentinel-2 위성의 NDWI 영상에서 Otsu, KI 임계값 기법을 활용한 수체를 탐지하는 연구가 진행되어 왔다(Du et al., 2016; Liang & Liu, 2020; Sekertekin, 2021). 국내에서는 성균관대학교 최민하 교수 연구팀에서 농업용 저수지를 대상으로 2017년부터 2020년까지 Sentinel-1 SAR 영상과 임계값 기법을 활용하여 수체 탐지 및 수표면적 모니터링을 수행한 바 있다(Jeong et al., 2021).

2.2. 경계 탐지 기법

수체 탐지 분야에서 경계 탐지 기법은 수체와 비수체 간의 경계 영역을 탐지하기 위한 기법이다. 경계 탐지 기법은 이미지 내 픽셀값의 변화가 급격한 부분을 경계로 인식하여 객체와 배경을 분류한다. 수체 탐지의 경우, 수체와 비수체 간의 경계선을 추출하고 분류하는 방법으로 이루어진다. 대표적인 기법으로는 Canny, Sobel 알고리즘이 널리 사용되며, 각각의 방법은 경계를 탐지하는 방식과 특성에서 차이를 보인다.

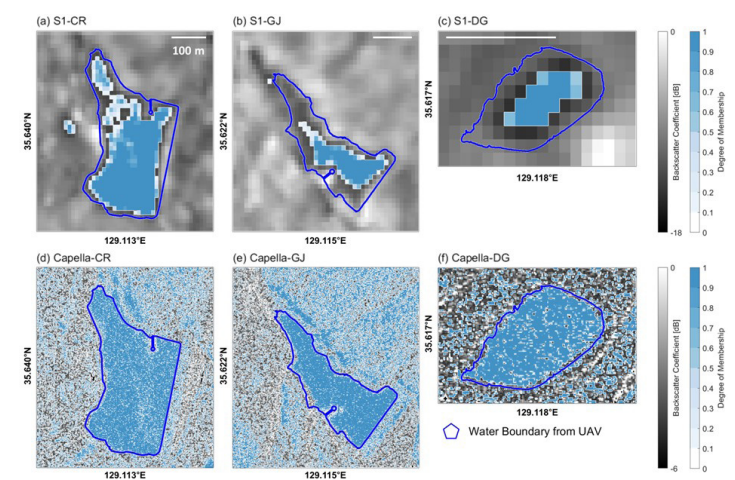
Canny 경계 탐지 알고리즘은 수체와 비수체의 경계 영역을 검출하는 효과적인 기법으로, 경계를 보다 선명하게 탐지하고 위성 영상 이미지 노이즈를 억제하기 위한 과정을 수행한다. 우선 가우시안 필터를 활용하여 노이즈를 제거하고, 그래디언트(Gradient) 계산을 통해 경계 영역을 확인한다. 가우시안 필터는 영상을 흐리게 만들어 작은 노이즈를 제거하고, 영상의 큰 구조만 남기게 하는 필터링 기

법이다. 이후 비-최대 억제 계산(Non-maximum suppression)을 통해 경계의 두께를 최소화하며, 이 중 임계값(Double threshold)을 적용하여 강한 경계(Strong Edge)와 약한 경계(Weak Edge)를 구분한다. 약한 경계 주변에 강한 경계가 존재하여 연결되어 있을 경우에만 경계로 인식하며, 이를 통해 수체와 비수체 경계를 보다 정확하게 탐지한다. Canny 알고리즘은 이러한 단계적 과정을 통해 영상에서 노이즈를 줄이고 정확한 수체 경계를 탐지하는 데 활용되고 있다. 그러나 노이즈에 민감한 반응이 보일 수 있어 후처리 및 파라미터 조정이 필요하며, 복잡한 계산을 통해 시간적인 소모가 많다는 단점이 존재한다.

반면, Sobel 경계 탐지 알고리즘은 Canny보다 상대적으로 간단하며 빠르게 경계를 탐지하는 기법으로, 이미지의 수직 및 수평 방향 그래디언트를 계산하여 경계를 검출한다. Sobel 알고리즘은 영상의 픽셀값의 변화 정도를 계산하여 경계의 방향 및 강도를 파악하여 수체를 탐지한다. 간단한 계산으로 수체를 탐지하며 노이즈 억제에 효과가 있는 장점이 있지만, 경계의 두께가 일정하지 않을 수 있으며, 경계에 대한 오탐지가 포함될 수 있다는 한계점이 존재한다.

국외에서는 Sentinel-1,2, RADARSAT-1, Landsat 등 여러 위성 영상과 Canny, Sobel과 같은 경계 탐지 기법을 활용한 수체 탐지 연구가 진행되고 있다(Billa & Pradhan, 2011; Cordeiro et al., 2021). 국내에서는 성균관대학교 최민하 교수 연구팀에서 울산광역시 울주구에 위치한 50만 톤급의 차리, 갈전, 뒷골 저수지를 대상으로 Sentinel-1, Capella 영상과 경계 탐지 기법을 활용하여 수체 탐지 및 저수면적 산정 연구를 수행한 바 있다(그림 20).

그림 20 국내 중소 규모 저수지를 대상으로 Sentinel-1, Capella 영상의 후방산란계수와 객체 탐지 기법을 활용한 수체 탐지 예시

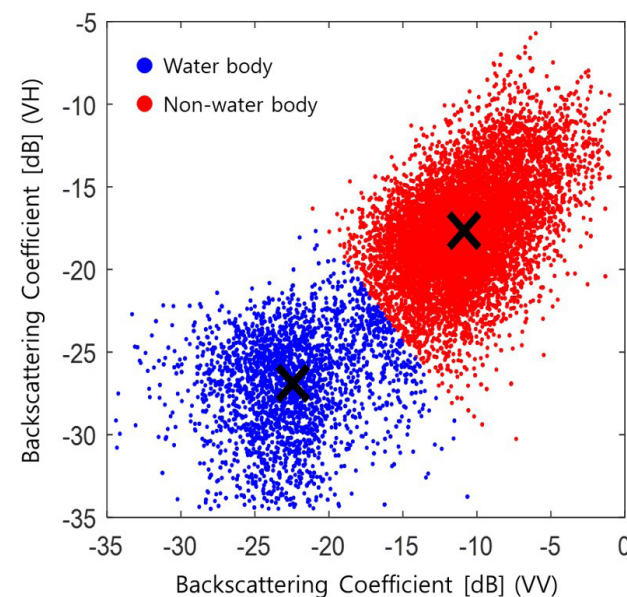


출처: Lee et al., 2022.

2.3. 클러스터링 기법

클러스터링 기법은 데이터의 구조나 패턴을 파악하여 비슷한 특성을 가지는 데이터들을 그룹으로 분류하는 비지도 학습(Unsupervised learning) 방법 중 하나이다. 클러스터링 기법은 사전 레이블이 없는 상태에서도 데이터를 군집화할 수 있어, 지도 학습(Supervised learning)과 달리 레이블 자료(Labeled data)가 필요 없다는 장점을 가지고 있다. 또한, 클러스터링은 데이터가 가지는 특성을 분석하여 자동으로 그룹을 형성하기 때문에, 데이터의 복잡한 분포나 패턴을 탐지할 수 있다(그림 21). 특히 수체 탐지와 같은 객체 탐지 분야에서 효과적으로 활용되고 있다. 클러스터링 기법은 크게 하드 클러스터링(hard clustering)과 소프트 클러스터링(soft clustering)으로 나뉜다.

그림 21 Sentinel-1 SAR 영상의 후방산란계수와 클러스터링 기법을 활용한 수체/비수체 분류 예시



출처: 최민하 교수, 지구원격탐사연구실.

하드 클러스터링 기법은 각 데이터의 특정 군집을 명확하게 분류하는 방식으로, 군집 간의 중복 없이 수체/비수체를 분류한다. 수체 탐지 분야에서는 대표적으로 K-means 클러스터링 기법이 사용된다. K-means 클러스터링은 주어진 데이터를 미리 정해진 K개의 클러스터로 나누고, 각 데이터를 클러스터의 중심에 할당하는 방식으로 이루어진다(Krishna & Murty, 1999). 초기 클러스터의 중심점이

결정된 후 각 중심점이 소속된 클러스터 내 데이터와의 유클리드 거리(Euclidean distance)가 최소가 될 때까지 중심점의 위치가 수정되며, 최종 중심점의 위치에 따라 데이터가 분류된다. K-means 클러스터링 기법은 계산이 간단하여 위성 영상에서 빠르게 수체/비수체를 분류할 수 있다는 장점이 존재하지만 각 클러스터가 구형(spherical)으로 분포하고 있지 않거나 클러스터 간의 경계가 명확하지 않을 경우 성능이 저하될 수 있다는 한계점이 존재한다.

소프트 클러스터링 기법은 데이터가 여러 군집에 동시에 속할 수 있는 가능성을 부여하는 방법이다. 각 데이터는 하나의 군집에만 속하지 않고, 여러 군집에 소속될 확률값을 제공한다. 대표적인 소프트 클러스터링 기법인 Fuzzy C-means 클러스터링 기법은 각 데이터가 모든 군집에 대한 소속도(affiliation degree)를 가지며, 이러한 소속도를 바탕으로 군집의 중심값을 갱신한다. 이 과정을 반복적으로 수행하며, 각 데이터가 어느 군집에 더 가깝게 속하는지를 확률적으로 계산하여 도출한다(Bezdek et al., 1984). 소프트 클러스터링 기법은 각 데이터가 여러 군집에 동시에 속할 수 있는 가능성을 주어 더 유연하게 데이터의 군집화가 가능하다. 예를 들어, 수체와 비수체의 경계가 애매한 지역에서는 각 데이터가 수체와 비수체 둘 다에 속할 확률을 가진 군집을 생성한다. 이에, 소프트 클러스터링 기법은 영상 내에서 수체와 육지 간의 경계가 명확하지 않은 경우 하드 클러스터링 기법보다 더욱 유연한 수체 탐지가 가능하다는 장점을 가지고 있다.

국외의 경우 Sentinel-1, 2 위성 영상에서 K-means, Fuzzy C-means 클러스터링 기법을 활용한 수체를 탐지하는 연구가 진행되어 왔다(Grimaldi et al., 2020; Cordeiro et al., 2021; Li et al., 2022). 국내에서는 성균관대학교 최민하 교수 연구팀에서 경기도 이동저수지, 충청남도 천태저수지를 대상으로 차세대 중형위성 1호(CAS500-1), 다목적 실용위성 3호, Sentinel-1/2 등 다중 위성 영상과 K-means 클러스터링 기법을 활용하여 수체 탐지를 수행한 바 있다(Lee et al., 2023).

2.4. 머신러닝 기법

머신러닝(Machine learning) 기법을 활용한 수체 탐지는 전통적인 수체 탐지 기법과 비교하여 높은 정확도에서 수체/비수체의 분류가 가능하다. 머신러닝 기법은 대량의 레이블 데이터를 학습하여 패턴을 학습한다. 수체 탐지에서 머신러닝 기법은 각 데이터에 대해 수체/비수체로 분류된 레이블 데이터를 기반으로 학습을 진행하므로, 새로운 데이터에 대한 예측 성능이 높으며, 다양한 토지피복 조건에서도 높은 정확도의 수체 탐지가 가능하다. 수체 탐지 분야에서 사용되는 대표적인 머신러닝 모델에는 인공신경망(Artificial Neural Network: ANN), 서포트 벡터 머신(Support Vector Machine: SVM), 그리고 랜덤 포레스트(Random Forest: RF)가 존재한다.

ANN은 인간의 뇌 신경망에서 영감을 받아 다층 구조를 통해 입력 데이터의 패턴을 학습하는 비선형 모델이다(Agatonovic-Kustrin & Beresford, 2000). ANN은 여러 층의 뉴런 네트워크를 통해 입력 데이터를 처리한다. 각 뉴런 네트워크는 입력 데이터를 받아 활성화 함수를 통해 비선형 변환을 수행하고, 이를 통해 데이터의 패턴을 학습한다. ANN은 여러 층으로 구성된 퍼셉트론(Multilayer Perceptron: MLP) 구조를 사용하여, 데이터의 복잡한 패턴과 고차원적 특성을 효과적으로 학습할 수 있도록 설계되어 있다. MLP 구조는 여러 계층을 거치면서 데이터의 중요한 특성을 점차적으로 파악해, 수체 탐지와 같은 복잡한 문제에서도 높은 성능을 보인다.

SVM은 주어진 데이터의 클래스 간 경계를 최적화하는 분류 기반 머신러닝 모델이다(Vishwanathan & Murty, 2002). SVM의 주요 목적은 수체와 비수체처럼 서로 다른 두 그룹의 데이터를 최대한 분리할 수 있는 경계선을 학습하는 것이다. 이 경계선은 두 그룹 사이의 여백이 가장 넓은 초평면(hyperplane)으로 설정되며, 이를 통해 SVM 모델은 새로운 데이터가 들어왔을 때도 높은 정확도로 수체와 비수체를 구분할 수 있다. SVM은 수체와 비수체 간의 경계를 최대한 넓게 설정하여, 학습에 사용되지 않은 새로운 데이터에서도 높은 정확도로 분류가 가능하도록 한다. 또한 SVM은 커널 트릭(kernel trick)을 통해 데이터를 고차원으로 변환하여, 원래의 공간에서 선형적으로 분류되지 않는 데이터에서도 선형적으로 분류할 수 있게 만든다. 이러한 특성으로 복잡한 수계 영역에서도 효과적인 분류를 가능하게 한다. RF는 다수의 결정 트리(decision tree)를 결합한 앙상블 학습 기법으로, 수체 탐지와 같은 분류 작업에서 높은 성능이 나타난다.

RF는 여러 개의 결정 트리를 만들어서 데이터를 분류하는 앙상블 모델이다. 이 과정에서 각 결정 트리는 무작위로 선택된 일부 특성에 기반해 학습되며, 각 트리는 독립적으로 예측을 수행한다. 모든 트리가 예측한 결과를 다수결 방식으로 결합하여 최종 모델이 선택된다(Rigatti, 2017). 여러 트리를 조합하면 단일 트리에서 발생할 수 있는 과적합 문제를 줄이고, 데이터의 중요한 특성을 반영한 예측이 가능하다. 이를 통해 데이터의 중요한 특성들을 고려한 최적의 모델을 자동으로 선택하여 노이즈가 포함된 영상이나 복잡한 수계 영역에서도 높은 정확도의 분류가 가능하다는 장점이 존재한다.

이러한 머신러닝 모델들은 높은 정확도에서 수체 탐지가 가능하지만 충분한 양의 레이블 자료가 필요하다. 또한 머신러닝 모델은 데이터의 공간적 패턴의 학습에는 어려움이 있어 얇은 수계 및 수체와 비수체의 경계가 복잡한 지형에서는 탐지 성능이 떨어진다는 한계점도 존재한다.

국외에서는 Sentinel-1, 2 위성 영상에서 머신러닝 기법을 활용한 수체를 탐지하는 연구가 진행되어 왔다(Wang et al., 2011; Xie et al., 2015; Zhou et al., 2019; Parajuli et al., 2022). 국내에

서는 성균관대학교 최민하 교수 연구팀에서 Sentinel-1 SAR 영상과 SVM 기법을 활용하여 수체 탐지를 수행하였다(Lee et al., 2024). 또한, 부경대학교 이양원 교수 연구팀에서는 ANN, SVM, RF를 앙상블 한 Automated Machine Learning(AutoML)을 활용하여 국내 중소 규모 농업용 저수지를 대상으로 수체 탐지 연구를 진행하였다(Choi et al., 2022).

2.5. 딥러닝 기법

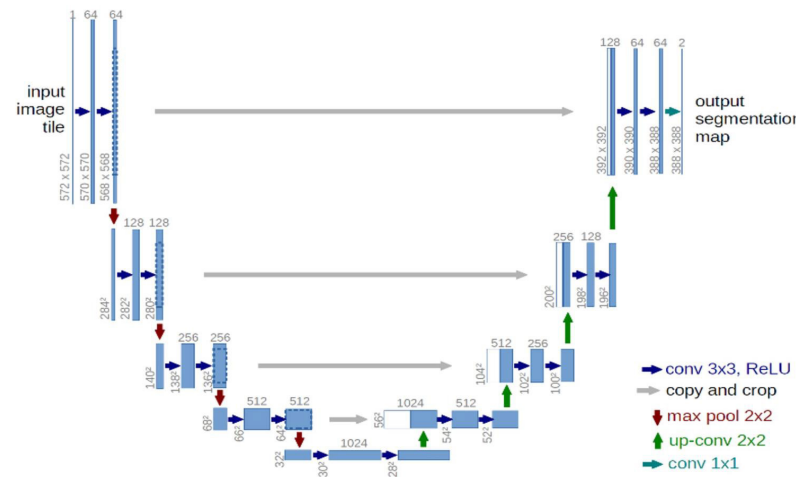
최근, 수체 탐지 분야에서는 머신러닝 모델의 한계점을 극복하기 위해 데이터의 공간적 패턴의 학습이 가능한 CNN (Convolutional Neural Network) 모델들이 도입되고 있다. CNN은 영상 데이터를 분류하기 위해 설계된 네트워크로, 영상의 공간적 패턴을 효과적으로 학습할 수 있는 합성곱(Convolution), 풀링(Pooling), 완전 연결(Fully connected) 연산이 사용된다. 합성곱은 입력 영상에서 특징맵(feature map)을 생성하여, 입력 영상의 특정 패턴을 추출하는 역할을 수행한다. 풀링은 합성곱 과정에서 영상의 사이즈가 줄면서도 중요한 정보는 유지하여 계산의 효율을 높여주는 역할을 한다. 일반적으로 가장 중요한 정보(최댓값)만을 추출하는 최대 풀링(max pooling)이 사용된다. 마지막으로 합성곱 및 풀링이 수행된 특징맵들은 완전 연결층에서 최종적으로 영상의 분류 및 예측이 수행된다.

또한 CNN은 지역 연결성과 공유 가중치라는 두 가지 주요 원리를 활용하여 효과적인 모델의 학습이 가능하다. 지역 연결성은 필터가 영상의 작은 영역만을 처리하도록 하여, 데이터의 공간적 관계를 보존하면서 학습할 수 있다. 이를 통해 영상의 의미론적 분할(Semantic segmentation)이 가능하도록 한다. 또한, 공유 가중치는 필터가 영상을 이동하면서 동일한 가중치를 사용하게 함으로써, 모델의 파라미터 수를 줄이고 학습 효율성을 높인다. 이를 통해 과적합을 방지하며, 더 적은 계산으로도 효과적인 학습이 가능해진다.

대표적인 CNN 기반 모델에는 U-net, HRNet(High-Resolution Network)이 존재한다. U-Net의 주요 특징은 대칭적인 U자 형태의 네트워크 구조로, 영상의 세부 정보를 잃지 않으면서 고해상도의 출력 이미지를 복원할 수 있다는 것이다(그림 22). U-Net은 크게 인코더(Encoder)와 디코더(Decoder) 두 부분으로 나뉜다. 인코더는 합성곱층과 풀링층으로 이루어져 있으며, 입력 이미지를 점진적으로 작은 크기의 특징맵으로 변환되면서 중요한 정보를 추출한다. 디코더는 인코더에서 생성된 특징맵을 점차 원래 이미지 크기로 복원하면서 각 픽셀에 대한 예측을 수행한다. 디코더 과정에서는 인코더의 특징맵에서 손실된 세부 정보를 보완하기 위해 스킵 연결(Skip connection)이 사용된다. 스킵 연결은 인코더 단계에서 추출한 세부 정보를 디코더 단계로 직접 전달하여 영상을 복원하는 과정을 의미

한다. 이러한 구조로 U-net 모델은 영상의 공간적 특징을 고려한 수체 탐지가 가능하다. 하지만 인코더-디코더 과정을 거치면서 영상의 세부 정보가 일부 손실될 수 있다. 이는 특히 작은 수역이나 복잡한 경계에서 탐지 성능의 저하가 될 수 있다.

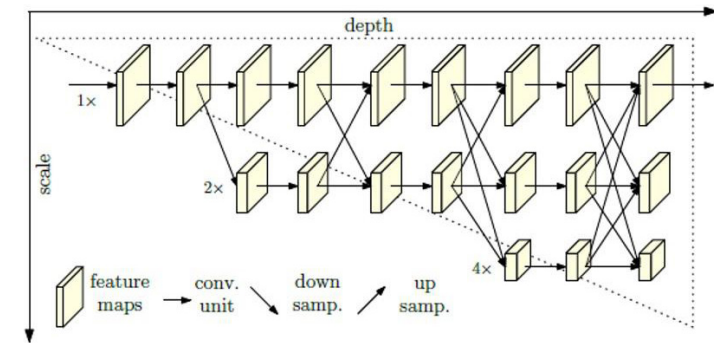
그림 22 U-net 모델 구조



출처: Ronneberger et al., 2015.

U-net 모델의 한계점을 극복하기 위하여 HRNet 모델이 개발되었다. HRNet은 고해상도의 특징을 지속적으로 유지하면서 동시에 다중 해상도의 정보를 통합하는 모델이다. 기존의 CNN 모델들은 네트워크가 깊어질수록 이미지의 해상도를 점차 낮추어 정보를 요약하는 방식으로 특징을 추출하였다. 반면, HRNet 모델의 주요 개념은 네트워크가 깊어질수록 저해상도로 변환하지 않고, 고해상도의 특징을 유지하면서 다른 해상도의 특징들과 병합하는 과정을 거친다는 것이다(그림 23). 이는 네트워크 내부에서 다중 해상도의 정보가 상호 교환되면서 각각의 해상도에서 유용한 특징들을 서로 비교하며 종합적인 학습이 이루어진다. 이는 이미지의 큰 형태를 저해상도로 파악하면서도, 작은 디테일이나 경계선 등은 고해상도로 유지하여 세밀한 객체 탐지가 가능하게 한다. 이러한 특성으로 HRNet 모델은 작은 수체 영역이나 복잡한 경계가 포함된 영상에서도 세밀한 정보를 유지할 수 있어 높은 정확도에서 탐지가 가능하다는 장점이 존재한다.

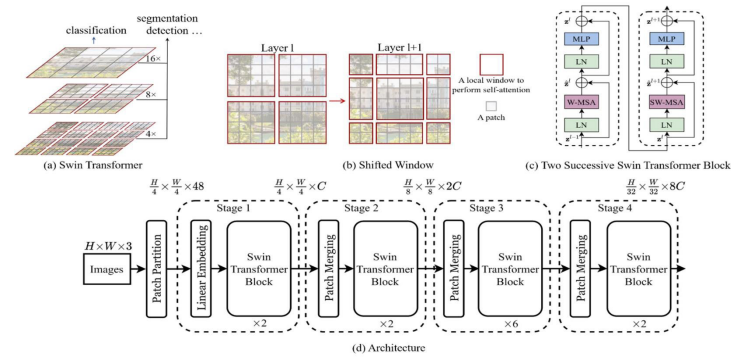
그림 23 HRNet 모델 구조



출처: Sun et al., 2019.

최근 영상 처리 분야에서 최첨단(State-of-the-Art: SoTA) 모델로 자리 잡은 SwinTransformer는 기존의 CNN 모델보다 더욱 효과적인 수체 탐지가 가능하다. SwinTransformer는 원래 자연어 처리에서 사용된 트랜스포머 모델을 영상 처리에 적합하도록 변형한 구조로, 특히 윈도우 기반의 다중 해상도 학습 방식을 도입하여 고해상도 영상에서 효율적으로 패턴을 학습할 수 있다. SwinTransformer 모델의 핵심은 각 영상을 작은 구역(window)으로 나누어 각 구역에서 지역적인 패턴을 학습하는 방식으로, 전체적인 영상의 특징까지도 효과적으로 통합할 수 있도록 설계되어 있다는 것이다(그림 24). 이 방식은 CNN의 지역 연결성과 유사하지만, Self-attention이라는 메커니즘을 통해 더 넓은 범위의 중요한 특징들을 효율적으로 학습한다. 윈도우 기반 학습은 영상을 여러 작은 구역으로 쪼개어 분석하는 방식이다. 각 윈도우는 이미지의 일부분만 포함하고 있기 때문에 그 지역에서 발생하는 세부 패턴을 국소적으로 학습한다. 이 과정에서 SwinTransformer는 각 윈도우 간 정보를 교환하고 결합하여 점점 더 큰 범위의 패턴을 파악이 가능하다. 따라서 작은 창을 통해 세부적인 패턴을 정확히 학습하면서도, 전체 영상의 전반적인 특징을 동시에 학습한다. 또한, Self-attention은 각 픽셀이 다른 픽셀들과의 연관성을 학습한다. Self-attention의 작동 원리는 각 데이터가 다른 모든 데이터들과 얼마나 중요한지 계산하는 것이다. 이미지에서 특정 픽셀이 주변 픽셀들과 얼마나 관련이 있는지를 학습하여, 서로 관련 있는 부분들을 강조하여 중요한 특징의 파악이 가능하다. Self-attention은 CNN처럼 픽셀의 위치에만 의존하지 않고, 픽셀 간의 연관성을 고려하기 때문에, 경계가 복잡하거나 작은 물체가 있는 영상에서도 효과적인 객체 탐지가 가능하다. 또한, SwinTransformer 모델은 대규모 영상에서도 계산 복잡도를 낮추면서 성능을 극대화시키는 구조로 설계되어 있어 다양한 해상도에서 높은 탐지 성능이 나타난다. 이러한 특성으로 작은 수체 영역이나 복잡한 경계에서도 높은 정확도의 수체 탐지가 가능하다.

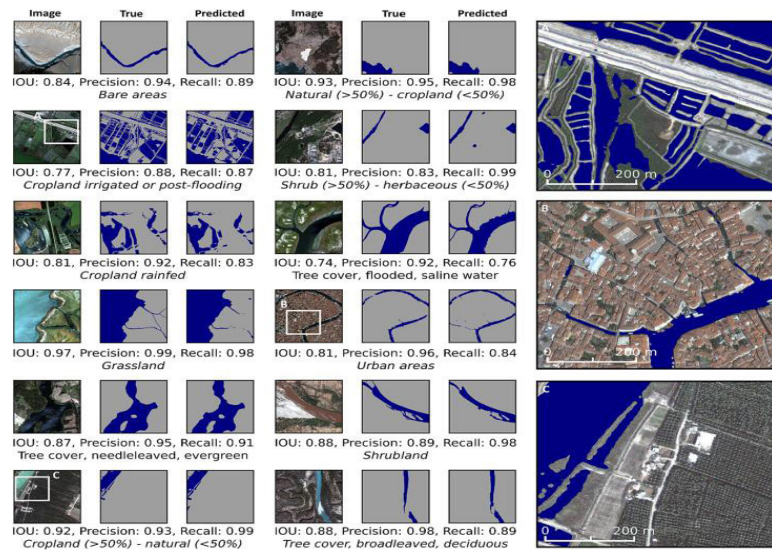
그림 24 SwinTransformer 모델 구조



출처: Liu et al., 2021.

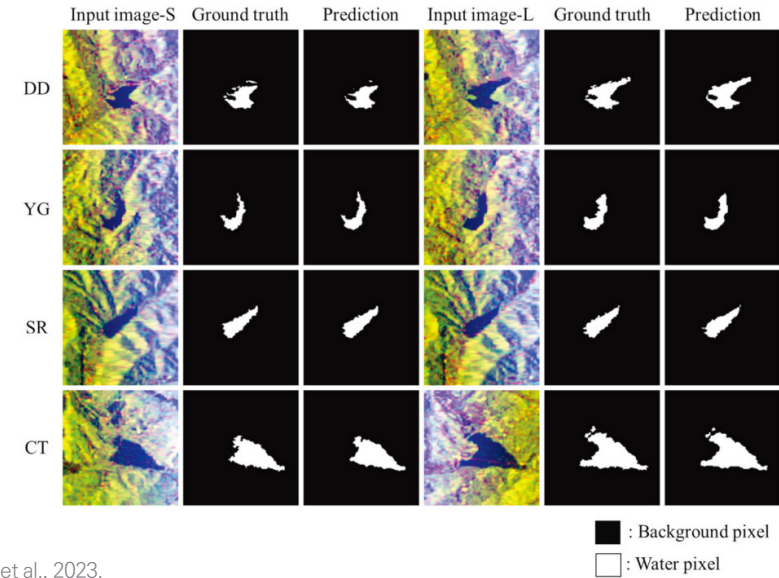
국외에서는 그림 25에 나타난 바와 같이 Sentinel-1, 2, PlanetScope 등 여러 위성 영상과 CNN 기반 딥러닝 기법을 활용한 수체를 탐지하는 연구가 진행되고 있다(Fei et al., 2022; Wieland et al., 2023; Freitas et al., 2024; Pena et al., 2024; Valman et al., 2024). 국내에서는 그림 26에 나타난 바와 같이 부경대학교 이양원 교수 연구팀에서는 CNN 및 SwinTransformer 모델을 활용하여 국내 수계를 대상으로 수체 탐지 연구를 진행하고 있다(Choi et al., 2023).

그림 25 PlanetScope 영상 및 U-net 모델을 활용한 수체 탐지 결과 예시



출처: Wieland et al., 2023.

그림 26 Sentinel-1 영상 및 SwinTransformer 모델을 활용한 국내 중소 규모 저수지 탐지 결과 예시



출처: Choi et al., 2023.

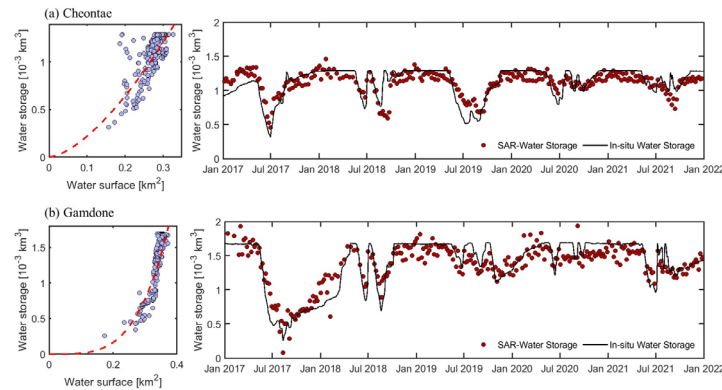
03 수체 탐지 활용 현황

3.1. 가용수량 모니터링

위성 영상 기반 수표면적 결과를 활용하여 저수지 및 댐의 수량 모니터링이 가능하다. 가용수량 모니터링은 효율적인 수자원 관리 및 계획 수립을 위해 중요한 역할을 한다. 가용수량이란 특정 지역에서 사용 가능한 수자원의 양을 의미하며, 이를 파악하는 것은 농업, 산업, 식수 공급 등 다양한 분야에서 필수적이다. 위성 영상 기반 가용수량 모니터링은 수역의 범위 및 변화를 지속적으로 모니터링함으로써 지역 규모의 수자원 관리 및 전략을 세우는 데 중요한 역할을 한다.

일반적으로 저수면적과 저수량의 관계는 저수지 및 댐의 형태에 따라 차이가 존재하지만, 저수량이 증가하면 저수면적도 함께 증가한다. 저수지는 일반적으로 수위가 낮을 시에는 저수량의 증가율에 비하여 저수면적의 증가율이 크며, 수위가 높아질수록 저수면적의 증가율은 작아진다. 특히 만수위 시 저수량의 급격한 증가는 범람의 위험이 있어, 실제 만수위에 가까워질수록 저수량의 증가율에 비하여 저수면적의 변화는 크지 않도록 설계하는 경우가 많다(Jang et al., 2020). 이처럼 저수면적과 저수량의 관계는 지수함수의 형태로 나타났을 때 가장 높은 상관성을 가진다(Jeong et al., 2021). 이러한 저수면적과 저수량의 관계를 활용하여 위성 영상 기반 수량 산정이 가능하다(그림 27).

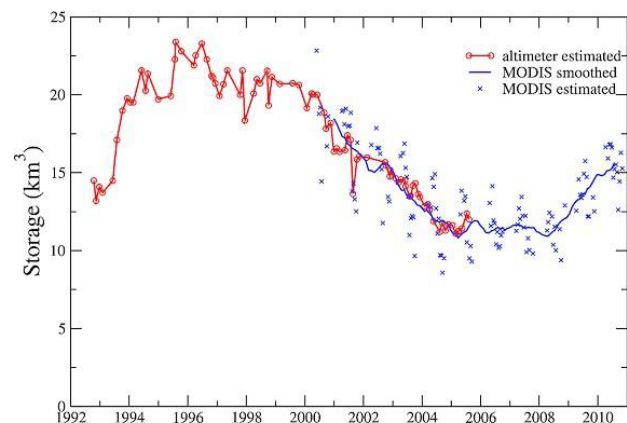
그림 27 회귀식을 활용한 SAR 영상 기반 저수량 모니터링 결과, (a) 충청남도 홍성군 천태저수지, (b) 전라남도 무안군 감돈저수지



출처: 최민하 교수, 지구원격탐사연구실.

국외 연구에서는 대형 호수 및 저수지(5억 톤 이상)를 대상으로 1992년부터 2010년까지 Landsat 영상 기반 수표면적 및 수량을 모니터링하는 연구가 진행되어 왔다(Gao et al., 2012; Cai et al., 2016). 이러한 연구들은 위성 데이터 기반 가용수량 변화를 효과적으로 모니터링한 성공적인 사례로 평가받는다(그림 28). 국내 연구의 경우 성균관대학교 최민하 교수 연구팀은 중규모 및 대규모 저수지(1백만~1천만 톤)를 대상으로 2017년부터 2022년까지 Sentinel-1 SAR 영상 기반 수표면적 및 수량을 모니터링하는 연구를 수행하였다(Kim et al., 2024).

그림 28 미국 몬타나주의 포트 펙(Fort Peck) 저수지 대상 Landsat 영상 기반 저수량 모니터링 결과



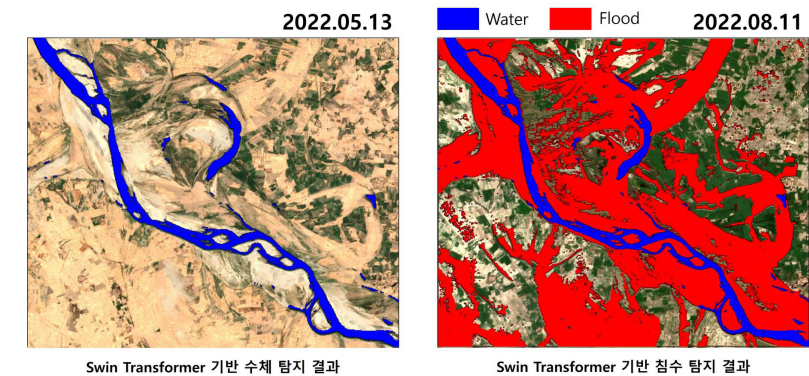
출처: Gao et al., 2012.

3.2. 침수 모니터링

위성 영상을 활용한 침수 모니터링은 홍수 위험 예측 및 대응을 위한 필수적인 기술로 활용되고 있다. 강우량이 급증하여 하천이 범람하게 될 경우, 침수 영역을 신속하게 파악하고 확산 범위를 모니터링하는 것은 재난 관리와 피해 경감을 위한 중요한 단계이다. SAR 위성 영상 기반의 침수 모니터링은 기상현상에 상관없이 광범위한 지역에서 수체 변화 및 침수 지역을 효과적으로 모니터링 할 수 있다.

일반적으로 위성 영상 기반 침수 지역 탐지는 침수 영상의 수체 탐지 결과와 침수 전 영상의 수체 탐지 결과를 비교하여 침수된 영역을 분류한다(그림 29). 이는 특정 시간대에 촬영된 위성 영상에서 수체를 탐지한 후, 이전 시점의 영상과 비교함으로써 발생한 변화를 탐지하는 방식이다. 이러한 비교 기법은 다중 시계열 분석을 통해 침수 패턴을 지속적으로 모니터링할 수 있는 장점이 있다.

그림 29 파키스탄 인더스강 하류 대상 침수 탐지 예시



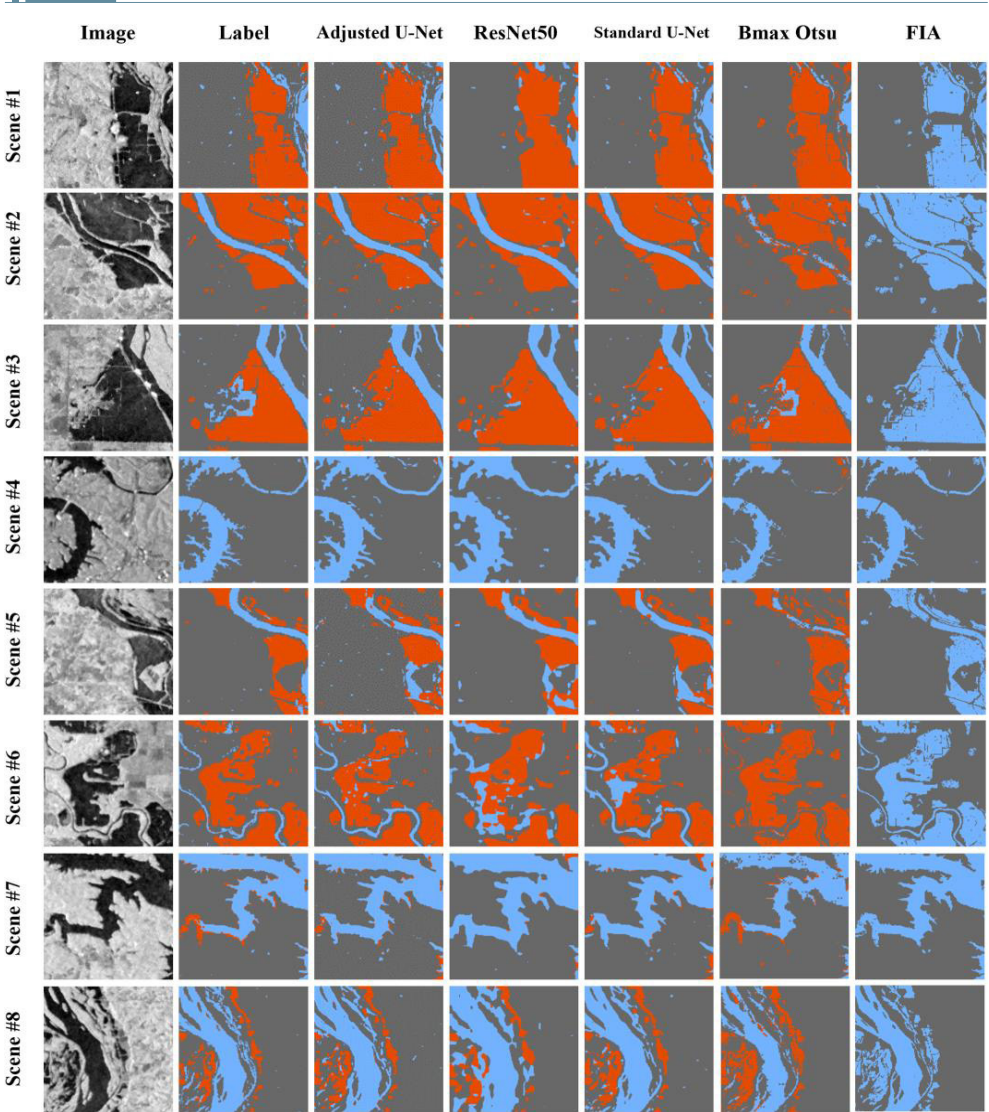
출처: 최민하 교수, 지구원격탐사연구실.

최근에는 AI 모델을 비수체, 수체, 침수와 같은 여러 클래스로 학습시켜 보다 정교한 수체 탐지가 가능해졌다. 전통적으로는 수체와 비수체로 나누어 분류하는 방식이 일반적이었으나, 기후변화로 인한 극단적인 강우 및 홍수 상황이 빈번해지면서 침수 영역을 별도의 클래스로 학습시키는 것이 중요해졌다. 이러한 방식은 복잡한 형태의 침수 지역을 보다 정확하게 탐지할 수 있어 더욱 효율적인 재난 대응과 수자원 관리가 가능하다.

국외 연구의 경우 침수 지역을 대상으로 Sentinel-1/2 영상과 클러스터링, 머신러닝, 딥러닝 기법을 활용한 수체 탐지 연구가 활발히 진행되고 있다(McCormack et al., 2022; Shastry et al., 2023;

Li & Demir., 2023; Zhao et al., 2024; Chen et al., 2024). 이러한 연구들은 위성 데이터 기반 침수 탐지를 효과적으로 모니터링한 성공적인 사례로 평가받고 있다(그림 30). 국내 연구의 경우 성균관대학교 최민하 교수 연구팀은 2020년 10월의 파키스탄 인더스강 유역을 대상으로 Sentinel-1 SAR 영상과 머신러닝 모델을 활용하여 침수 지역을 탐지하는 연구를 수행한 바 있다(Lee et al., 2023).

그림 30 Sentinel-1 SAR 영상 기반 수체 탐지 결과. 파란 영역: 수체 영역, 붉은 영역: 침수 영역



출처: Li & Demir, 2023.

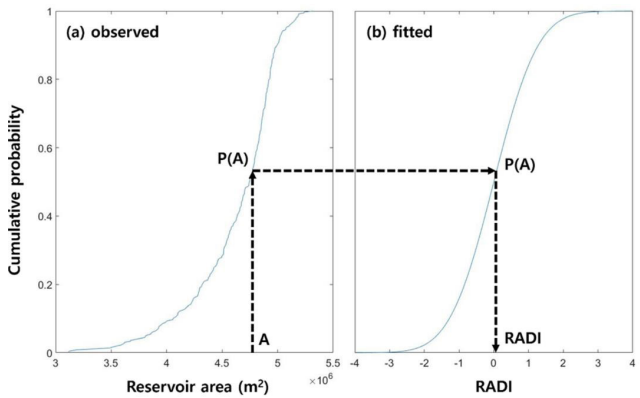
3.3. 수문학적 가뭄 모니터링

한반도는 몬순기후대에 위치해있어 강수가 지역 및 계절별로 편중되어 나타나, 해마다 국지적인 가뭄이 다수 발생하고 있다. 가뭄은 수개월에서 수년에 걸쳐 일정 기간 동안 수분 혹은 강수량이 현저히 부족하여 발생하는 자연현상을 의미하며, 홍수, 태풍, 지진 등 다른 자연재해들과 달리 시작과 끝을 정의하기 어렵고, 진행 속도가 느리며, 광역적인 공간을 통하여 전파하는 특성을 갖는다. 이러한 가뭄을 효과적으로 감시하기 위해서는 위성 원격탐사 자료의 활용이 효과적이다.

가뭄은 관점에 따라 기상학적 가뭄, 농업적 가뭄, 수문학적 가뭄으로 분류된다. 특히 수문학적 가뭄은 물 공급에 초점을 맞추어 지표수 및 지하수가 부족한 경우를 의미하며, 댐, 하천, 저수지, 호수 등의 실질적인 가용수량의 부족과 연관이 있다. 또한 수문학적 가뭄은 다른 종류의 가뭄들에 비하여 장기간에 걸쳐 발생하는 특성으로 사회 및 경제에 즉각적인 악영향을 끼쳐 지속적인 모니터링이 필수적이다. 하지만 수문학적 가뭄은 분석을 위한 위성과 센서 및 산출물이 비교적 부족하여 원격탐사 기반 접근 방식의 개발이 제한적이다. 수문학적 가뭄 모니터링은 주로 지점 유량 및 수문 인자 자료를 연계하여 사용되고 있다. 하지만 이러한 접근 방식은 지역 규모의 수문학적 가뭄 모니터링이 어렵다는 한계점이 존재한다.

2019년 미국의 텍사스 A&M 대학에서는 지역 규모의 수문학적 가뭄의 모니터링을 수행하기 위해 Landsat 영상 기반 수표면적만을 사용하는 수문학적 가뭄지수인 Reservoir Area Drought Index (RAD)를 개발하였다. RAD는 저수면적의 누적분포함수와 정규분포의 역함수를 이용하여 수문학적 가뭄의 정규화 및 특성화가 가능하다(그림 31). RAD는 먼저 특정 저수면적의 누적분포함수 값에 대응하는 정규분포 값을 계산하고 이후 정규분포 값의 역함수를 이용하여 산정된다.

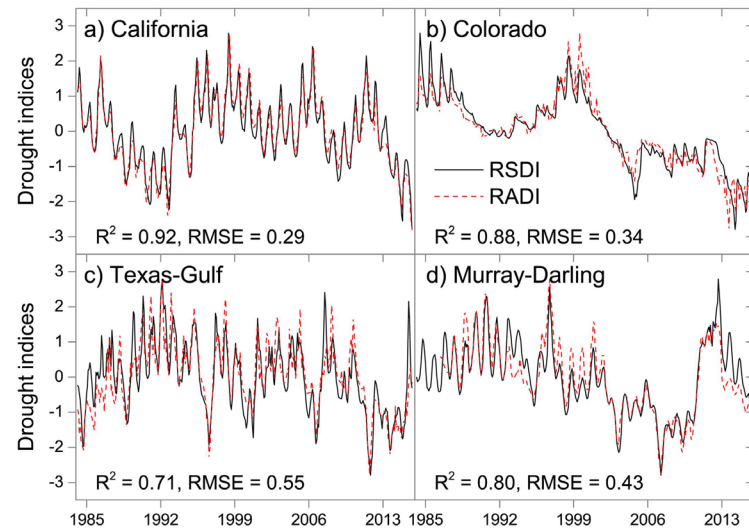
그림 31 RAD 산정 예시, (a) 수표면적의 누적분포함수, (b) 정규화된 누적분포함수 및 RAD 산정



출처: 최민하 교수. 지구원격탐사연구실.

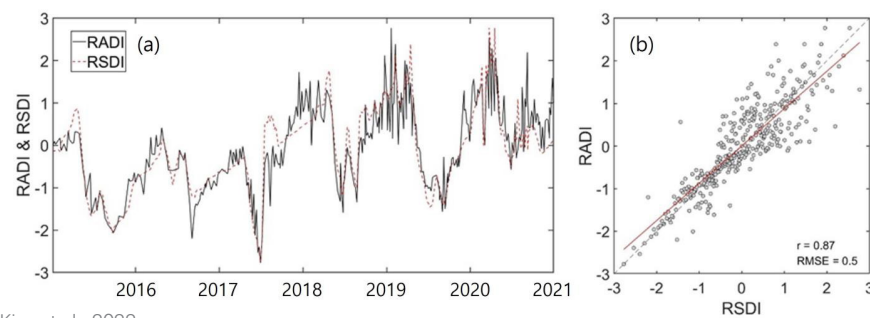
국외의 경우 RADI의 개발 및 미국 및 유럽의 대규모 저수지를 대상으로 Landsat 기반 RADI를 평가하였다(Zhao & Gao, 2019). 다음 연구는 위성 원격 탐사 자료만을 활용한 수문학적 가뭄을 효과적으로 모니터링한 성공적인 사례로 평가받고 있다(그림 32). 광학 영상 기반 RADI의 경우 구름이 존재하는 영상의 활용이 제한적이다. 이러한 한계점을 극복하기 위해 성균관대학교 최민하 교수 연구팀은 Sentinel-1 SAR 영상 기반 RADI 모니터링을 수행하였다(그림 33). 또한 한반도에서의 RADI의 활용성을 평가하는 연구를 수행하였다(Kim et al., 2022).

그림 32 충청북도 진천군 대상 SAR 영상 기반 RADI 모니터링 및 검증 결과



출처: Zhao & Gao, 2019.

그림 33 Landsat 기반 RADI 모니터링 및 검증 결과



출처: Kim et al., 2022.

04 결론

수체 탐지는 다양한 위성 원격 탐사 데이터를 활용하여 수자원 관리, 수재해 대응 등 다양한 분야에서 활용되고 있다. 전통적인 히스토그램 기반 임계값 기법부터 머신러닝, 딥러닝에 이르기까지 다양한 접근 방식이 국내외에서 연구되고 있으며, 특히 최근에는 SwinTransformer와 같은 최첨단 딥러닝 모델이 활용되고 있다. 이러한 기술을 통해 기상 조건에 구애받지 않고 정밀한 수체 탐지가 가능해졌다. 국외에서는 중해상도의 Sentinel 1/2 위성 영상과 고해상도의 PlanetScope, Capella 영상을 활용한 수체 탐지 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 성균관대학교 최민하 교수 연구팀과 부경대학교 이양원 교수 연구팀을 중심으로 Sentinel-1/2, 차세대 중형위성 1호, 다목적 실용위성 3/5호 등 위성 영상을 활용한 고도화된 수체 탐지 연구가 진행되고 있다. 국내 수체 탐지 연구는 수자원 관리와 재난 대응에 필요한 핵심 정보를 제공하며, 국내외 연구와 비교해도 경쟁력 있는 수준의 연구가 진행되고 있다. 추후 이러한 기술이 더욱 발전해 가며 수체 탐지의 신뢰성과 정확성을 높여줄 것이며, 지속 가능한 수자원 관리와 기후변화에 대응하는 데 중요한 역할을 할 것으로 기대된다.

3

물관리 분야 활용 기술 현황

- 개요
- 재난안전 분야 활용
- 농업/산림 분야 활용
- 기후변화 대응

개요

국내 수자원 분야 위성활용 기술 수준은 세계 최고 기술 수준 보유국인 미국에 비해 상당한 기술 격차를 가진 것으로 보고된 바 있다. 국내 학계에서는 위성 영상을 이용한 수자원 관련 분야의 연구는 대부분 Landsat, Sentinel, MODIS, GPM, AVHRR 등 해외 위성 영상 자료를 이용하였다. 주요 연구 분야는 토지피복분류, 강우분포, 지표수분포, 적설분포, 증발산량, 토양수분, 지하수 추정, 수문모델링 등이 있다. 각종 수재해 발생의 전/후 영상을 비교하거나 재해 진행 과정을 추적하여 재해가 발생한 지역의 지형, 식생 특성 등의 변화로부터 재해로 인한 영향을 평가하고 효과적인 대응 방안을 마련하는 연구 또한 진행되고 있다.

수자원 분야에서는 수질관리, 수자원 현황파악, 유역관리, 습지 변화 탐지 등의 연구에 위성 영상이 활용되고 있다. 농업 분야에서는 위성 영상을 토양 분석, 작황 분석 및 예측, 농작물 분류 및 구분 등의 연구에 활용하고 있다. 재난안전 분야에서 또한 가뭄 분석, 산사태 모니터링, 태풍 및 해일 모니터링, 홍수 및 범람 모니터링, 사면붕괴 모니터링, 수질 모니터링, 적조현상 모니터링 등 농·산림 재해, 수재해, 지질재해 모니터링에 위성 영상을 적극 활용하고 있다.

국가 차원에서는 수자원의 관리를 위하여 환경부, 농촌진흥청, 국토부 등이 각각의 노력을 기울이고 있으며, 환경부의 경우 유역 단위 통합 물관리 시범 사업을 추진해 왔으며 수자원에 대한 정밀한 모니터링을 위해 위성, 레이더, 자동기상관측 장비를 종합적으로 활용하고 있다. 또한, 유역 단위 홍수량을 산정하고 가뭄예보시스템을 구축하는 데 위성 자료가 활용되고 있다. 최근에는 기후변화로 인해 급격하게 일어나는 홍수 및 가뭄을 예방하고 이를 효율적으로 관리하기 위해 통합수자원관리(Integrated Water Resources Management: IWRM) 체계를 도입하였으며, 그 일환으로 GIS, 모델링 기법을 활용하는 연구가 이루어지고 있다. 국토부의 경우에는 하천 관리, 건천화 모니터링, 제방과 독의 관리를 지자체와 연계하여 수행하고 있으며, 농촌진흥청의 경우 농촌 용수의 관리, 밭 가뭄 현황 모니터링 등을 수행하고 있다. 행정안전부의 경우에는 가뭄 상황 발생 시 비상 급수 공급을 담당하고 있으며, 산림청은 산림 수자원 관리를 수행하고 있다. 이처럼 국내에는 다양한 분야의 물을 관리하고 올바르게 활용하기 위한 다양한 기관, 조직이 존재하며 본 장에서는 물관리 분야에 위성 기술 활용을 위한 3개의 카테고리를 소개하고자 한다.

재난안전 분야 활용

가뭄

가뭄은 지구온난화, 해수면 온도 변동 등 기후변화의 영향을 크게 받으며, 최근 전 세계적으로 가속화되는 기후변화의 영향으로 가뭄에 취약해지는 지역이 증가하여 한반도의 경우에도 극심한 가뭄양상이 나타나고 있다. 대한민국의 경우 가뭄에 의한 피해를 관련 분야 종사자가 아닌 경우에는 체감하기 어려우나, 2001년도부터 2014년 사이의 가뭄 발생 패턴과 2015년 이후의 가뭄 발생 패턴은 증발산량, 강수량, 토양수분과 같은 수문 인자로 살펴보았을 때 크게 변화되었으며, 기온과 해수면 온도의 상승과 함께 국내 토양수분, 강수량의 경우에도 매년 감소하는 추세를 보이고 있다. 이는 2010년대부터 심화된 기후변화의 영향으로 판단되며 국내 가뭄 발생의 경우 2016년 201일간의 가뭄 기간 발생, 2018년 최대 무강우 일수의 보고 등과 같이 발생 빈도와 형태가 변화하고 있다.

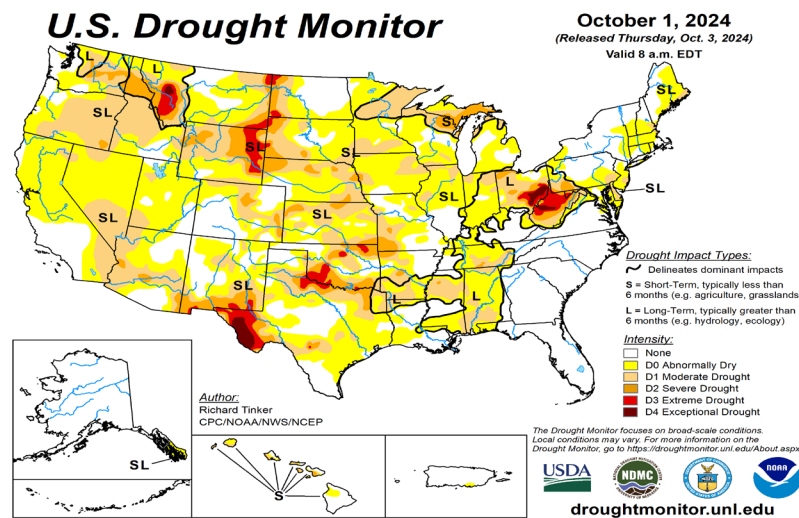
이는 전반적으로 상승한 기온의 영향과 강수량이 특정 기간에 집중된 영향으로 판단되며, 지구온난화에 따라 대기의 기온이 1도 증가할 때, 대기에 포함되는 수증기량은 7%씩 증가하지만 평균 강수량의 증가는 2%에 불과하여, 가뭄 위험 지역의 취약성은 매년 심각해질 것으로 보고되고 있다.

가뭄 영향 완화 및 피해 저감을 위해 국토교통부의 경우 용수 확보를 위한 지하수 인공함양 기술 개발을 수행하고 있으며, 환경부 산하 홍수통제소, 한국수자원조사기술원, 수자원공사의 경우 전국 하천을 대상으로 유출량을 측정하고 있으나 이러한 가뭄 대응 기술의 경우 국지적으로 가뭄을 판단하고, 예방하기 위한 기술로 보다 넓은 지역을 대상으로는 효용성이 떨어진다. 따라서 가뭄 대응을 위하여 광범위한 지역을 관측하고 수자원 정보 수집이 가능한 위성 기반 수문 관측 기술의 도입은 필수적이며, 위성 기술이 활용될 수 있는 방안에는 과거 장기간 가뭄 발생 패턴 분석, 가뭄 피해 현황 파악, 미래 가뭄 예측을 들 수 있다.

장기간 가뭄 발생 패턴 분석의 경우 위성 기반의 강수량, 토양수분, 증발산 자료를 활용할 수 있다. 이러한 인자들을 활용한 가뭄 지수를 산정하여 매년 가뭄이 발생하는 취약 지역을 파악할 수 있으며 지수를 기반으로 가뭄 발생 전후 시기의 인자 분석을 통해 가뭄 예측 모형 개발이 가능하다. 가뭄 피해 현황의 경우 위성 기반 토양수분과 증발산, 수체면적 데이터를 활용할 수 있으며, 토양수분과 증발산의 경우 농업 가뭄 피해 분석에 적용될 수 있고 수체면적의 경우 가뭄 시기 가용수자원 측정을 위한 자료로 활용될 수 있다.

이처럼 위성 기반 수문 인자 관측 자료는 효율적으로 가뭄 정보를 수집할 수 있어 가뭄 발생 대응을 위한 정책 수립, 신기술 개발 등의 방향을 설정하기 위한 참고 자료가 될 수 있으며, 나아가 국내의 경우 불분명한 가뭄의 현 상황을 판단하기 위한 기준 데이터 역할을 수행할 수 있다. 국외의 경우 미국이 위성 데이터를 가뭄 모니터링 대응에 가장 적극적으로 활용하고 있는데, 수문 인자뿐만 아니라 위성 기반 식생 관측 자료, 기상 관측 자료 등을 융합한 복합 가뭄 지수 산정에 적용하여 농업 종사자들에게 배포하고 있으며 가뭄 관련 정책 수립, 대응 방안 마련 등에 적극적으로 이용하고 있다.

그림 34 위성 기반 수문 인자와 기상 인자, 식생 인자 등을 활용한 미국 가뭄 모니터링 사례



출처: droughtmonitor.unl.edu

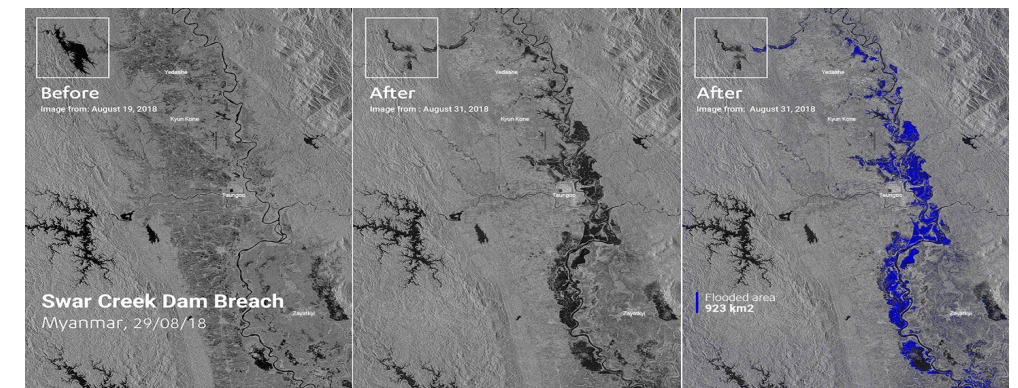
102 홍수

홍수의 경우 가뭄과 같이 기후변화에 의한 영향으로 과거 여름철과 태풍이 발생한 시기에 발생이 집중되던 양상에서 벗어나 장마 기간 전 극한 호우의 발생으로 인한 홍수 발생 등 대응과 예측이 어려워지고 있다. 홍수는 가뭄과 달리 직접적으로 인명피해를 발생시키고 막대한 재산피해를 일으키기 때문에 강수량의 실시간 모니터링, 도시침수지도, 침수흔적도의 제작 등을 통해 대응하고 있으나 최근 국지적

으로 발생하는 극한 호우 패턴, 인적 조사를 통해 작성된 도시침수지도, 침수흔적도의 정확성 미비 등으로 인해 공간 자료의 도입이 필요하다. 공간 단위 강수 자료와 기상에 영향을 적게 받는 SAR 영상 기반 수체면적, 토양수분 자료 등이 홍수 대응에 활용될 수 있으며 유럽의 경우 홍수 대응을 위해 위성 영상을 실제로 이용 및 적용 중에 있다.

세부적으로 하천 단위의 침수 모델을 공간 수문 데이터를 기반으로 구축하여 실시간으로 관측된 강수량을 이용해 홍수 발생 시 대피 시나리오를 제작하거나, 홍수 위험 지도 제작에 위성 기반 수체면적 데이터를 이용하는 등 가뭄보다 발생면적이 적으나 유역 단위로 발생하는 홍수 발생 상황을 통제/관리하기 위해 위성 기반 공간 수문 데이터를 적용하고 있다.

그림 35 덴마크 EOatDHI 사에서 제공하는 위성 기반 홍수 위험 지도 제작 사례



출처: <https://eo.dhigroup.com/solutions/flood-risk-hazard-mapping/>

103 산사태/산불

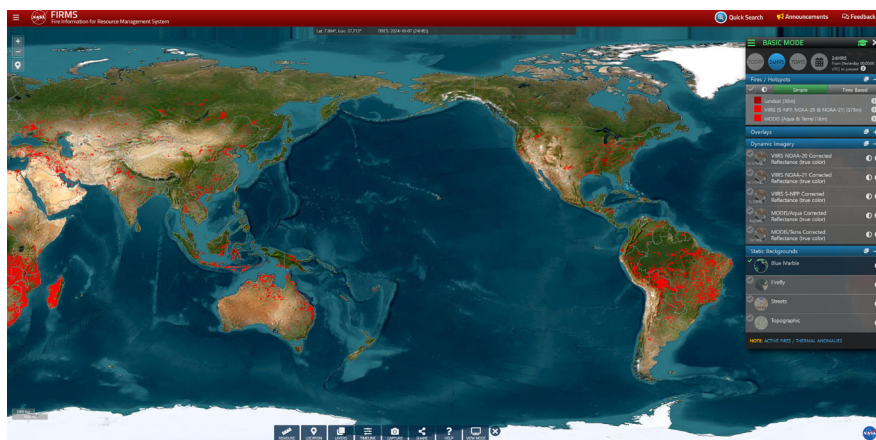
국국도의 산지 비율이 높고, 계절별 강수량의 편차가 매우 심한 한반도의 지리적·기후적 특성상 산불, 산사태와 같은 산림재해는 해마다 국민의 안전과 재산을 위협하고 있다. 강수량이 적고 건조한 동절기에는 산불이 발생하여 소중한 산림 자원이 소실되고 있으며, 하절기에는 집중호우로 인한 산사태가 국민 안전과 재산의 막대한 피해를 발생시키고 있다. 산림청(2019) 통계에 의하면, 2010년부터 2019년까지 최근 10년간 우리나라에서 발생한 산불은 약 8,573ha의 산림 소실을 발생시키고 42명의 인명

피해를 일으켰으며, 산사태는 총 2,057ha의 피해면적과 52명의 인명피해를 일으킨 것으로 보고되었다. 또한, 이로 인한 피해액은 산불이 약 5,042억 원, 산사태는 약 4,343억 원에 이르는 것으로 조사되었다. 최근 기후변화로 인해 강우 양상의 편차가 점점 커지고 있으며, 이에 따라 건조일수가 증가하고 집중호우가 늘어나 산불 및 산사태의 위험은 지속적으로 증가하고 있다.

산사태의 경우 극한 호우의 영향을 크게 받아 2010년대부터 기존의 설계를 바탕으로 지어진 산지의 터널, 옹벽 등을 붕괴시켜 큰 피해가 발생하고 있다. 산사태 대응을 위하여 공간 단위의 강수량, 토양수분 자료가 적용될 수 있으며 이는 산사태 위험 지역 판단, 예측 시뮬레이션, 준실시간 위험도 산출 등에 활용될 수 있다. 국내의 경우 드론과 CCTV 등을 이용한 산사태 원격 감시 기술 개발 및 도입이 이루어지고 있으나 위성의 경우 동일 지점 재방문 주기가 산사태 모니터링에 활용하기에는 어렵다는 한계가 있다. 향후 시간 단위의 국내 관측 위성이 도입될 시 전국 단위 산사태 모니터링이 이루어질 수 있을 것으로 판단된다. 해외의 경우 위성 기반 지반 변위 자료와 토양수분, 강수량 자료를 함께 활용하여 산사태 위험 지역 추정 기술이 개발/적용되고 있으며 이는 산지가 대부분인 국내의 경우에도 요구되는 기술이다.

산불의 경우 건조한 대기로 인한 자연 발생, 인위적인 방화 등으로 인해 국내의 경우 매년 봄/가을에 빈번하게 발생하고 있으며 이를 감시하고 발생 위험지역 관리를 위해 증발산, 토양수분 자료가 활용될 수 있다. 식생 내 수분 관측 자료와 공간 단위 증발산, 토양수분 자료를 함께 활용할 시 산불 발생 위험 지수를 산정하는 것이 가능하며, 산불 발생이 빈번한 미국 서부 지역의 경우 이를 활용한 산불 위험 모니터링 시스템이 운영되고 있다.

그림 36 미국 NASA에서 운영 중인 산불 관리 시스템(Fire Information for Resources Management System, FIRMS) 사례



출처: <https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs:@-153.2,4.5,3.3z>

농업/산림 분야 활용

101 농업 분야

국내 농업 종사 인구의 경우 강수량과 농업 저수지의 저수율에 의존하며 이로 인해 매년 유사한 강수 패턴, 수자원 보존량에 변동이 생길 시 작황에 큰 영향을 받는다. 최근 극한 기상 현상으로 인해 매년 농작물이 피해를 입고 있으며, 영향을 주는 기상 현상으로는 극한 호우, 폭염 등을 들 수 있다.

공간 단위의 위성 기반 토양수분, 증발산량은 기상 현상으로 인한 농작물의 반응, 상태를 예측하기 위해 효과적인 데이터이며, 국내의 경우 도입되지 않고 있으나 해외의 경우 국가/민간 단위에서 최근 연구와 실제 적용이 활발히 일어나고 있다. 농작물의 피해가 육안으로 식별된 이후 대응을 시작하는 국내와 달리 공간 단위 수문 데이터를 활용할 시 2-3일 이후의 농작물의 상태를 예측할 수 있으며 대응책을 예비할 수 있다. 또한 예측의 불확실성이 큰 기상 예보와 다르게 현재 농작물 인근의 수자원을 관측한 공간 자료는 특히 대규모 농업 지역을 대상으로 도입될 시 극한 기상 현상에 대응할 수 있는 보조 자료 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

아직 민간 단위까지 기술의 확산이 이루어지지 않아 위성 기반의 공간 수문 데이터가 활용되기 위해서 시간이 필요하다. 하지만 국립산림과학원과 농촌진흥청에서 발사 준비 중에 있는 농림위성(차세대 중형위성 4호)이 2025년 하반기 발사를 목표로 개발되고 있으며 이를 활용할 시 농업 분야에 위성 수문 자료의 도입이 촉진될 것이다.

102 산림 분야

산림의 경우 한반도 물 순환의 중요한 역할을 담당하며 산림청에서는 전국 산림수자원 모니터링 및 물 지도 제작을 수행하고 있다. 앞서 언급된 농림위성과 함께 위성 기반의 토양수분, 증발산량 자료가 활용될 시 국내 산림수자원 모니터링 주기를 단축할 수 있으며 보다 상세한 물지도 제작이 가능할 것으로 기대된다.

국외에서는 국내와 마찬가지로 산림수자원의 중요성을 고려하여 위성 기반의 대규모 산림수자원 감시를 수행하고 있으며, 위성 기반의 식생 지수를 함께 활용하고 있다. 다만 산림의 경우 위성 자료 검증에 위한 지점 자료가 식생이 비교적 적은 농업지역, 초지 대비 다수 요구되며 조밀한 토양수분 관측망과 증발산량 관측소를 위성 자료와 함께 활용하고 있다.

특히 해외의 경우 산림의 탄소 저장 능력을 정량화하고 효과적인 녹지의 관리, 확장을 위해 공간 단위 수문 자료를 도입하고 있으며 이는 탄소 저감 정책 수립을 위한 공간 단위 수문 자료의 산림 분야 활용 가능성을 시사한다.

기후변화 대응

기후변화는 최근 극한 기상 현상으로 인한 피해가 빈번하게 발생하며 주목받고 있다. 기후변화를 분석하고 예측하기 위해서는 전 지구적인 스케일의 수문기상 자료가 요구되며, 이를 국내 관측 자료와 연계하는 것이 필요하다. 특히 극지와 같이 기후변화의 진행 상황을 나타내는 지역의 자료가 필수적이며 위성 기반 수문 관측 영상은 접근이 어려운 극지의 데이터 수집에 매우 효과적이다.

국내에서는 극지연구소가 극지 빙하 관측, 해수 온도 등을 관측하기 위해 위성 자료를 활용하는 연구를 진행하고 있으나 이를 국내 관측 자료와 연계한 연구는 미비한 실정이다.

국외의 경우 위성 기반의 전 지구 데이터를 이용한 기후변화 시뮬레이션, 극한 기상 현상 발생 시나리오 작성 등의 연구가 활발히 수행되고 있으며 이를 자국의 기상 관측 자료, 수문 인자 관측 자료와 연계하여 기후변화 대응 기술 개발 혹은 정책 수립에 활용하고 있다. 위성 기반의 기후변화 연구는 인간이 체감할 수 없는 범위에서 일어나는 기후변화의 영향을 나타내기 위한 현존하는 가장 효율적인 수단이며, 앞서 언급된 재난안전 분야, 농업/산림 분야의 기후변화 영향 분석/예측을 위한 기초 연구 자료로 활용될 수 있다.

4

정책제언

- 학계
- 정부
- 산업계

학계

101 위성 데이터 분석 인력 양성 필요성

기후변화로 인해 홍수, 가뭄, 극한 강우 등의 재난 발생 빈도가 증가하면서, 실시간으로 넓은 지역의 수문기상 데이터를 수집하고 분석할 수 있는 위성 데이터의 활용이 점점 더 중요해지고 있다. 그러나 이러한 데이터를 실제로 분석하고 활용할 수 있는 인력은 여전히 부족한 상황이다. 특히, 수자원 및 수문 전공자들은 위성 탑재 센서와 위성 데이터의 특성을 깊이 이해해 정확하게 데이터를 분석할 수 있는 능력을 갖추는 것이 필수적이며, 위성 원격탐사 전공자들도 수자원 및 수문 분야에 대한 전문성을 확보하는 것이 중요하다.

102 융합 교육 프로그램 강화

수자원 분야에 위성 원격탐사 기술을 효과적으로 적용하려면 다방면의 전문 지식이 필요하므로 학문적 경계를 넘는 융합형 교육 프로그램의 확대가 필요하다. 특히, 최근 인공지능의 발전으로 거의 모든 연구 분야에서 빅데이터와 인공지능 기법이 활용되고 있으며, 수자원 원격탐사 연구도 예외가 아니다. 그러나, 수문학적 지식 없이 과거 자료만을 기반으로 인공지능 기법을 적용할 경우, 기후변화로 인해 발생하는 이례적인 강우나 폭염 상황에 적절히 대응하기 어렵다. 따라서 대학은 수문학, 기상학, 원격탐사, 데이터 분석, 소프트웨어 및 인공지능 등 다양한 분야를 아우르는 융합 학과를 신설해 학생들이 폭넓은 지식을 습득할 수 있는 환경을 조성해야 한다. 정부도 융합 교육의 중요성을 인식하고, 특성화 대학원 지원 사업 등을 통해 전문 인력을 양성할 수 있는 기반을 지속적으로 지원할 필요가 있다. 이를 통해 수문기상 분야에서 복합적 문제를 해결할 수 있는 전문 인재를 체계적으로 배출할 수 있을 것이다.

103 국제공동연구 활성화

미국과 유럽은 수자원 원격탐사 분야에서 선도적인 연구를 오랫동안 진행해 왔으며, 기초 연구를 바탕으로 위성 탑재 센서의 파장대와 관측 원리에 따른 수문 및 기상 인자의 물리적·통계적 산출 방안을 체계적으로 연구하고 있다. 이를 통해 신뢰성 높은 데이터를 생산하며, 이 데이터는 자연재해 모니터링, 농업 관리 등 다양한 분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 일본의 JAXA, 인도의 ISRO 등 주요 항공·우주 연구 기관들과의 국제 공동 연구도 활발히 진행 중이며, 이와 관련된 위성 미션들도 다수 운영되고 있다. 한국은 현재 국제 공동 연구의 비중이 낮은 편이나, 이러한 글로벌 연구 네트워크에 더욱 적극적으로 참여할 필요가 있다.

국내 대학과 연구기관의 연구자들은 국제공동연구 지원 사업, 학술교류 행사, 해외기관 연수 지원 등을 적극적으로 활용해 연구 경험을 넓혀야 한다. 특히 젊은 연구자들에게 국제적인 연구 환경을 경험할 기회를 제공해 최신 기술과 연구 동향을 파악할 수 있도록 해야 한다. 연구자들은 단순히 국제 연구에 참여하는 것을 넘어, 국내 실정에 맞게 이를 응용하고 확장하여 다양한 분야에서 실무에 적용할 수 있도록 노력해야 한다.

정부

101 기초 연구에 대한 지원 확대

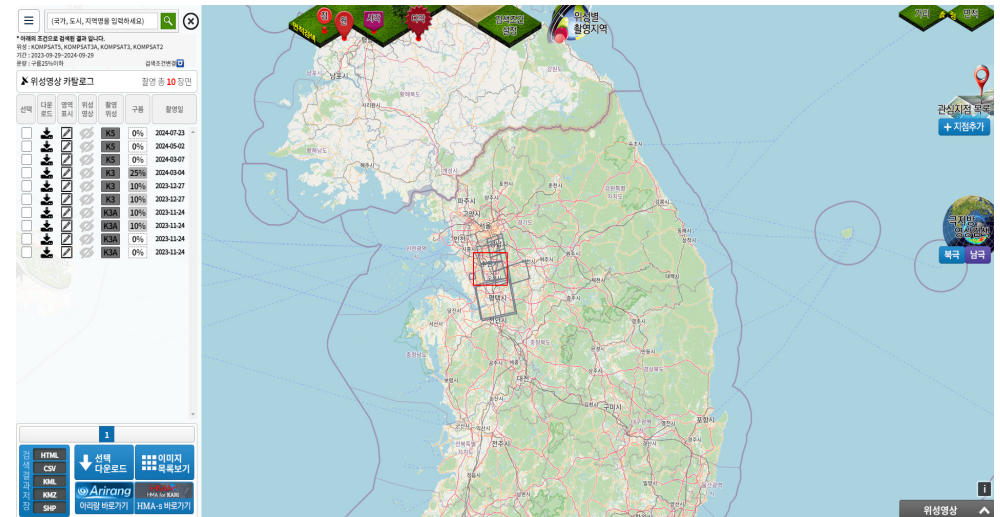
위성 산업은 위성과 발사체 개발부터 위성 데이터 활용까지 아우르는 대규모 산업으로, 정부의 역할이 매우 중요하다. 차세대 중형위성 개발 사업이 진행되면서 위성 데이터에 대한 관심이 높아지고 있는 현시점에서, 정부는 장기적 연구 프로젝트에 대한 투자를 늘려 신뢰성 있는 데이터를 확보할 수 있도록 기초 연구 중심의 지원 프로그램을 확대할 필요가 있다. 현재의 연구 프로젝트들은 실무에 직접 적용하거나 빅데이터, 인공지능 기술과의 융합을 중심으로 지원되는 경우가 많지만, 데이터 품질을 높이기 위한 기초 연구에 대한 투자는 상대적으로 부족하다.

예를 들어, 미국 NASA는 SMAP 위성 발사 이전에 지상에서 다양한 실험을 통해 토양수분 측정 기술을 개발하고 검증한 바 있다. 이를 위해 Core validation site를 구축하고, 위성 센서에서 획득한 토양수분 데이터를 검증하기 위해 실험실 테스트, UAV, 항공촬영 등을 활용했다. 국내에서도 수자원위성 등 수문 분야에서 사용될 위성의 경우 이러한 알고리즘 개발, 검증을 위한 사이트를 구축하여 발사 이전 수문 인자들에 대한 산출 신뢰도를 확보하는 것이 중요하다고 생각된다.

102 위성 데이터 통합 플랫폼 구축

현재 우리나라의 위성 데이터는 한국항공우주연구원, 기상청, 국토지리정보원 등 여러 기관에서 각 개별적으로 제공되고 있다. 예를 들어, Kompsat 위성 시리즈는 항공우주연구원의 위성정보 활용지원 서비스를 통해, 국토위성 데이터는 국토정보플랫폼을 통해, 천리안위성 데이터는 기상자료개방포털을 통해 제공되는 식이다(그림 37-39). 이처럼 기관별로 나뉘어 관리되는 데이터는 연구자들이 일관성 있게 접근하고 활용하기 어렵다는 문제가 있다.

그림 37 위성정보 활용지원 서비스 내 위성 영상 검색 결과



출처: <https://ksatdb.kari.re.kr/>

그림 38 기상자료개방포털 천리안위성 검색화면



출처: <https://data.kma.go.kr/>

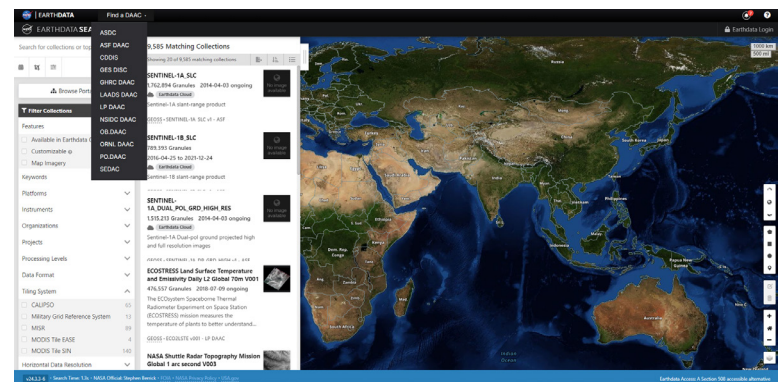
그림 39 국토정보플랫폼 국토위성 영상 검색 결과



출처: <https://map.ngii.go.kr/>

반면, 미국의 경우 NASA, USGS 등의 국가기관, 연구기관, 대학 등 여러 기관이 보유한 영상을 조회할 수 있는 Earthdata 플랫폼을 통해 다양한 위성 데이터를 하나의 통합 시스템으로 제공하고 있으며(그림 40), 추가적인 데이터를 제공하기 위해 확장되고 있다. 해당 플랫폼에서는 서로 다른 투영 체계를 사용하는 영상들을 통일된 좌표계에서 조회할 수 있으며, 사용자의 선택에 따라 재투영, 모자이크 등이 가능하고 영상 처리 레벨, 데이터 포맷 등을 선택할 수 있다. 또한 각 위성 데이터를 제공하는 데이터 아카이브에 접속할 수 있는 링크가 포함되어 있으며, 일부 아카이브에서는 데이터 처리에 대한 전문 지식을 필요로 하지 않는 Analysis Ready Data(ARD)를 제공하기도 한다.

그림 40 Earthdata 검색화면



출처: <https://search.earthdata.nasa.gov/>

우리나라도 위성 데이터가 본격적으로 축적되기 시작하는 현시점에서 통합 플랫폼을 구축한다면, 연구 효율성을 극대화하고 데이터 간 상호 운용성을 높이는 데 큰 도움이 될 것이다. 다양한 기관에서 분산되어 관리되는 데이터를 한곳에서 제공할 수 있는 플랫폼이 조성된다면, 연구자들과 기업들이 쉽게 데이터에 접근하고 활용할 수 있는 환경을 만들 수 있을 것으로 기대되며, 이를 위한 정책적 지원과 투자가 필요할 것으로 사료된다.

03 민간 기업의 위성 데이터 활용 촉진

원격탐사 분야에 있어 가장 성공적인 민간 활용 사례는 아마도 Google Earth일 것이다. Google은 NASA, USGS와 협력하여 인공위성, 특히 Landsat 위성 데이터를 사용하여 Google Earth 서비스를 발전시키고 있다. 2010년에는 수많은 위성 데이터를 실시간으로 시각화하고 이를 사용자가 직접 다양한 목적에 맞게 분석할 수 있는 플랫폼인 Google Earth Engine 서비스를 개발했다. 이와 같은 민간 서비스는 재난 대응, 환경 모니터링 등의 공공 목적 이상으로 다양한 분야에 걸쳐 폭넓게 사용되고 있다.

우리나라에서도 민간 기업들이 위성 데이터를 적극적으로 활용할 수 있는 환경이 필요하다. 현재 위성 데이터에 대한 수요는 주로 기상청, 한국수자원공사 등 정부/공공기관에서 발생하며, 이는 재난 예방, 기후변화 대응, 수질 관리 등 공공부문에서 활용된다. 그러나 민간 부문에서도 신기술 개발과 서비스 상용화를 위해 위성 데이터를 활용할 수 있는 분야가 무궁무진하다. 이를 위해, 정부는 민간 기업을 대상으로 위성 데이터 활용을 촉진하는 초기 창업 지원을 확대할 필요가 있다. 위성 데이터를 활용한 솔루션 개발이나 서비스를 준비하는 스타트업에 대한 지원과 기술 자문 등을 통해 초기 단계의 기업들이 다양한 분야에 대한 적용성을 분석하고 성공적으로 성장할 수 있도록 도와야 한다. 이는 위성 활용 기술 혁신을 촉진하고 국가 경쟁력을 강화하는 중요한 전략이 될 것이다.

GREAT SCHOLAR CAREER DECISIONS

산업계

101 산학협력 활성화

최근 우주항공산업은 국가의 미래 성장 동력의 핵심 분야로 주목받고 있으며, 2030년까지 최소 2배 이상 확대될 것으로 예상된다. 우리나라도 이에 발맞춰 정부의 다양한 지원을 통해 ‘뉴스페이스’ 시대에 적극적으로 대응하고 있다. 2022년 11월 우주항공청 설립 추진단이 구성된 이후, 우주항공청 특별법이 국회를 통과하면서 우주항공 분야의 연구개발과 산업 육성에 박차를 가하게 되었다. 그 결과, 2023년 5월에는 우주항공청이 개청되어 우주 강국으로의 도약을 목표로 하고 있으며, 세계 5대 우주 강국과 어깨를 나란히 할 국가 주력 산업으로 육성하려는 의지를 표명했다. 우주항공청은 우주항공 관련 정책을 수립하고 조정하며, 연구개발과 핵심 기술 확보, 우주 자원 개발 및 활용 등을 통해 민간 주도의 우주산업 생태계를 조성하는 것을 주요 임무로 하고 있다.

우주산업이 성공적으로 발전하기 위해서는 민간과 학계 간의 협력이 필수적이다. 특히 우주산업은 다른 산업에 비해 복잡하고 다양한 고도의 기술을 요구하기 때문에, 전문 기술을 보유한 대학과 연구기관이 기업에 지식을 제공하는 산학협력의 역할이 중요하다. 이를 위해, 인력 양성과 공동 기술 개발 프로그램을 강화하는 것이 필요하다. 예를 들어, 위성 설계, 추진체 개발, 위성 데이터 분석 등 특정 분야에서 요구되는 전문 기술을 대학과 연구기관이 제공하여 기업들이 기술적 기반을 확보할 수 있도록 지원해야 한다. 또한, 대학에서는 실무 중심의 연구와 교육을 통해 기업이 필요로 하는 고급 인재를 배출하고, 기업은 산학협력 프로젝트와 인턴십 등을 통해 학생들이 실제 산업 현장을 경험할 수 있도록 기회를 제공할 필요가 있다. 이러한 산학협력 활성화는 우주산업 생태계의 기반을 강화하고, 우리나라가 글로벌 우주산업에서 경쟁력을 갖출 수 있도록 하는 중요한 전략이 될 것이다.

102 민간수요/공급 및 피드백

글로벌 우주산업의 투자 규모와 건수는 지난 10년 동안 약 10배 이상 증가하며 가파른 성장세를 보이고 있다. SpaceX, 블루 오리진과 같은 대형 우주기업의 투자뿐만 아니라, 소규모의 초기 단계 우주기업 비중이 점차 증가하고 있다는 점에 주목할 필요가 있다. 이는 과거 정부 주도로 이루어졌던 우주산업이 이제는 민간 기업들, 특히 소규모 혁신 기업들이 다양한 비즈니스 모델을 통해 우주산업에 진출하고 있음을 보여준다. 이러한 민간 수요가 증가하는 이유는 빠르게 발전하는 기술과 다양한 분야에서 우주 데이터를 활용할 수 있는 새로운 비즈니스 모델의 등장 덕분이다. 위성통신, 우주관광, 소행성 채굴, 지구 관측, 환경 모니터링, 재난 대응 등에서 민간의 수요가 증가하면서 다양한 분야로 투자가 확대되고 있다.

산업계는 이러한 트렌드를 적극적으로 수용해 자체적인 수요와 공급을 창출하고, 시장에서 얻은 피드백을 기반으로 기술과 서비스를 개선하는 데 집중할 필요가 있다. 초기 단계의 기업들은 위성 데이터를 활용한 플랫폼 개발이나 다양한 응용 모델을 발굴하여 시장의 요구에 부합하는 서비스를 제공하는 데 노력을 기울여야 한다. 이와 함께, 산업계 내에서는 협업 네트워크를 구축하여 중소기업과 대기업이 상호 지원할 수 있는 환경을 조성할 필요가 있다. 정부는 산업계가 이러한 역할을 원활히 수행할 수 있도록 기술 개발과 시장 진입을 위한 자금 지원 프로그램을 제공하여, 특히 초기 기업들이 시장 피드백을 바탕으로 사업 모델을 개선할 수 있는 기회를 제공해야 한다. 정책적·재정적 지원이 확대된다면, 산업계는 우주산업 생태계를 더욱 활성화하고, 우리나라 우주산업의 글로벌 경쟁력을 강화하는 데 중요한 역할을 할 것이다.



5

결론

결론

기후변화로 인한 극단적인 기상 현상이 빈번해지면서, 수문기상 및 물관리 분야의 기술적 대응이 더욱 중요해지고 있다. 위성 원격탐사 기술은 이러한 기후 재난에 실시간으로 대응할 수 있는 도구로 주목받고 있으며, 미국, 유럽 등 원격탐사 분야를 선도하는 나라들에서는 이를 활용한 재난 모니터링 시스템이 도입되고 있다. 그러나 우리나라는 아직 위성 기술 활용 수준을 확대할 여지가 많으며, 학계와 산업계 간의 협력이 더욱 강화될 필요가 있다. 또한, 현재 수자원 관리 기관들과 위성 데이터 관리 기관들 간의 데이터 공유와 협력이 개선된다면 종합적인 물관리에 있어 더욱 큰 진전이 있을 것으로 기대된다.

수문기상 연구 분야에서의 위성 원격탐사 기술은 토양수분, 증발산, 강수량 등 주요 환경 변수를 관측하고 분석하는 데 활용되고 있다. 최근에는 고해상도 위성 이미지와 인공지능 기법을 결합하여 더욱 정밀한 분석이 가능해졌으며, 이를 통해 가뭄, 홍수와 같은 재난을 사전에 예측할 수 있는 시스템이 개발되고 있다. 이러한 기술은 수자원 관리, 농업, 산림 관리 등 다양한 분야에 적용될 수 있으며, 기후변화 대응에 시공간적으로 효용성 있는 데이터를 제공함으로써 그 중요성을 입증하고 있다. 국내외 연구 기관에서도 이를 바탕으로 통합 수자원 관리 등의 시스템을 구축하려는 노력이 이어지고 있다.

위성 원격탐사 기술이 더욱 실질적인 목적을 가지고 효과적으로 활용되기 위해서는 해결되어야 하는 과제가 남아있다. 중요한 문제 중 하나는 위성 데이터의 분석을 담당할 수 있는 전문 인력이 부족하다는 것이다. 위성 원격탐사와 수문 현상을 동시에 이해하는 전문가가 부족하여 수집된 데이터를 효과적으로 활용하는 데 한계가 있다. 또한, 현재 각 기관에서 개별적으로 관리하고 있는 위성 데이터를 통합적으로 관리할 수 있는 플랫폼이 부재하다. 정부와 학계는 이러한 문제를 해결하기 위해 융합 교육 프로그램을 강화하고 국제 공동 연구를 활성화할 필요가 있으며, 보다 일관적인 데이터 관리 전략과 체계적인 데이터 관리 플랫폼을 구축해야 한다. 특히, 기후 위기에 대응하는 데 있어 위성 데이터의 중요성을 인지하고 관련 기술을 발전시키기 위한 장기적인 정책 지원이 요구된다. 민간 기업들이 위성 데이터를 활용할 수 있도록 지원을 확대하고 기술 혁신을 촉진하는 방안도 마련해야 할 것으로 생각한다.

최근 제4차 우주개발진흥 기본계획이 제시되었으며, 이에 따라 국내 신규 위성 개발이 활발히 진행되고 있다. 이는 국제적인 우주개발 선두에 위치한 국가들에 비하여는 5년에서 10년가량 뒤처졌으나

곧 다가올 것으로 전망되는 우주 산업 시대에 부응하는 방향이다. 위성 원격탐사 기반의 수문 인자 활용 기술은 수자원과 기후변화가 점차 대두되고 있어 우주 산업과 공간 산업 분야에서 큰 비중을 차지할 것으로 예상되며 이를 대비한 세부적인 정책이 뒷받침될 때 물관리 기술의 새로운 패러다임을 국가와 민간에서 성공적으로 도입할 수 있을 것이다. 또한 신규 위성 개발이 위성 원격탐사 기반 수문 인자 활용 기술 개발과 맞물려 나아갈 때 전 국토 물관리 시스템이 운영될 수 있을 것이다. 이는 직접적으로 물 안보 강화, 정밀 재난 예측/대응을 통한 국가 안전 강화에 기여할 것이며, 간접적으로는 새로운 산업 발굴, 육성의 발판 역할을 하여 경제 발전의 동력 역할을 담당할 수 있을 것이다.

참고문헌

Agatonovic-Kustrin, S., & Beresford, R. 2000. Basic Concepts of Artificial Neural Network (ANN) Modeling and Its Application in Pharmaceutical Research. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, Vol. 22, No. 5, pp. 717–727.

Balenzano, A., Mattia, F., Satalino, G., Lovergine, F. P., Palmisano, D., Peng, J., Marzahn, P., Wegmüller, U., Cartus, O., Dąbrowska-Zielińska, K., Musial, J. P., Davidson, M. W. J., Pauwels, V. R. N., Cosh, M. H., McNairn, H., Johnson, J. T., Walker, J. P., Yueh, S. H., Entekhabi, D., Kerr, Y. H., & Jackson, T. J. 2021. Sentinel-1 Soil Moisture at 1km Resolution: A Validation Study. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 263.

Bauer–Marschallinger, B., Freeman, V., Cao, S., Paulik, C., Schaufler, S., Stachl, T., Modanesi, S., Massari, C., Ciabatta, L., Brocca, L., & Wagner, W. 2019. Toward Global Soil Moisture Monitoring with Sentinel-1: Harnessing Assets and Overcoming Obstacles. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 57, No. 1, pp. 520–539.

Bezdek, J. C., Ehrlich, R., & Full, W. 1984. FCM: The Fuzzy C-means Clustering Algorithm. *Computers & Geosciences*, Vol. 10, No. 2–3, pp. 191–203.

Billa, L., & Pradhan, B. 2011. Semi-Automated Procedures for Shoreline Extraction Using Single RADARSAT-1 SAR Image. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, Vol. 95, No. 4, pp. 395–400.

Blaney, H. F., & Criddle, W. D. 1950. Determining Water Requirements in Irrigated Areas From Climatological and Irrigation Data. *Soil Conservation Service Technical Paper 96*, Soil Conservation Service. US Department of Agriculture, Washington.

Cai, X., Feng, L., Hou, X., & Chen, X. 2016. Remote Sensing of the Water Storage Dynamics of Large Lakes and Reservoirs in the Yangtze River Basin from 2000 to 2014. *Scientific Reports*, Vol. 6, No. 1, p. 36405.

Chan, S. K., Bindlish, R., O'Neill, P. E., Njoku, E., Jackson, T., Colliander, A., Chen, F., Burgin, M., Dunbar, S., Piepmeier, J., Yueh, S., Entekhabi, D., Cosh, M. H., Caldwell, T., Walker, J., Wu, X., Berg, A., Rowlandson, T., Pacheco, A., McNairn, H., Thibeault, M., Martinez-Fernandez, J., Gonzalez-Zamora, A., Bosch, D., Starks, P., Goodrich, D., Prueger, J., Palecki, M., Small, E. E., Zreda, M., Calvet, J. C., Crow, W. T., & Kerr, Y. 2016. Assessment of the SMAP Passive Soil Moisture Product. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 54, No. 8, pp. 4994–5007.

Chen, F., Zhang, M., Zhao, H., Guan, W., & Yang, A. 2024. Pakistan's 2022 Floods: Spatial Distribution, Causes and Future Trends from Sentinel-1 SAR Observations. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 304, p. 114055.

Choi, S., Youn, Y., Kang, J., Kim, S., Jeong, Y., Im, Y., Seo, Y., Kim, W., Choi, M., & Lee, Y. 2023. Waterbody Detection for the Reservoirs in South Korea using Swin Transformer and Sentinel-1 Images. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 39, No. 5_3, pp. 949–965.

Choi, S., Youn, Y., Kang, J., Park, G., Kim, G., Lee, S., Hagyu, J., & Lee, Y. 2022. An Artificial Intelligence Approach to Waterbody Detection of the Agricultural Reservoirs in South Korea using Sentinel-1 SAR Images. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, No. 5, pp. 925–938.

Choi, Y. S., Kim, J. H., & Kim, J. S. 2020. Inundation Analysis on the Flood Plain in Ungauged Area Using Aatellite Rainfall and Global Geographic Data: In the Case of Tumen/Namyang Area in Duman-gang (Riv.). *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, Vol. 23, No. 1, pp. 51–64.

Cordeiro, M. C., Martinez, J. M., & Peña-Luque, S. 2021. Automatic Water Detection from Multidimensional Hierarchical Clustering for Sentinel-2 Images and a Comparison with Level 2A Processors. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 253, p. 112209.

Dorigo, W. A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., van Oevelen, P., Robock, A., & Jackson, T. 2011. The International Soil Moisture Network: A Data Hosting Facility for Global in Situ Soil Moisture Measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 5, pp. 1675–1698.

Du, Y., Zhang, Y., Ling, F., Wang, Q., Li, W., & Li, X. 2016. Water Bodies’ Mapping from Sentinel-2 Imagery with Modified Normalized Difference Water Index at 10-m Spatial Resolution Produced by Sharpening the SWIR Band. *Remote Sensing*, Vol. 8, No. 4, p. 354.

Fei, J., Liu, J., Ke, L., Wang, W., Wu, P., & Zhou, Y. 2022. A Deep learning-based Method for Mapping Alpine Intermittent Rivers and Ephemeral Streams of the Tibetan Plateau from Sentinel-1 Time Series and DEMs. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 282, p. 113271.

Freitas, P., Vieira, G., Canário, J., Vincent, W. F., Pina, P., & Mora, C. 2024. A Trained Mask R-CNN Model over PlanetScope Imagery for Very-high Resolution Surface Water Mapping in Boreal Forest-Tundra. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 304, p. 114047.

Gao, H., Birkett, C., & Lettenmaier, D. P. 2012. Global Monitoring of Large Reservoir Storage from Satellite Remote Sensing. *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 9.

Grimaldi, S., Xu, J., Li, Y., Pauwels, V. R., & Walker, J. P. 2020. Flood Mapping Under Vegetation Using Single SAR Acquisitions. *Remote sensing of Environment*, Vol. 237, p. 111582.

Islam, M. A., Yu, B., & Cartwright, N. 2020. Assessment and Comparison of Five Satellite Precipitation Products in Australia. *Journal of Hydrology*, Vol. 590, p. 125474.

Jang, M. Y., Song, J. I., Jang, C. R., & Kim, H. T. 2020. Estimation of Small Reservoir Storage Using Sentinel-1 Image. *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 16, No. 1, pp. 79–86.

Jeon, H., Cho, S., Chung, I. M., & Choi, M. 2021. Evaluation of Satellite-based Evapotranspiration and Soil Moisture Data Applicability in Jeju Island. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 10, pp. 835–848.

Jeong, J., Oh, S., Lee, S., Kim, J., & Choi, M. 2021. Sentinel-1 SAR Image-based Waterbody Detection Technique for Estimating the Water Storage in Agricultural Reservoirs. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 54, No. 7, pp. 535–544.

Jodat, A., Moghiman, M., & Anbarsooz, M. 2012. Experimental Comparison of the Ability of Dalton Based and Similarity Theory Correlations to Predict Water Evaporation Rate in Different Convection Regimes. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 48, pp. 1397–1406.

Keshtegar, B., Abdullah, S. S., Huang, Y. F., Saggi, M. K., Khedher, K. M., & Yaseen, Z. M. 2022. Reference Evapotranspiration Prediction Using High-order Response Surface Method. *Theoretical and Applied Climatology*, Vol. 148, No. 1, pp. 849–867.

Kim, H., Sunwoo, W., Kim, S., & Choi, M. 2016. Construction and Estimation of Soil Moisture Site With FDR and COSMIC-ray (SM-FC) Sensors for Calibration/validation of Satellite-based and COSMIC-ray Soil Moisture Products in Sungkyunkwan University, South Korea. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 49, No. 2, pp. 133–144.

Kim, W., Jeong, J., & Choi, M. 2022. Evaluation of Reservoir Monitoring-based Hydrological Drought Index Using Sentinel-1 SAR Waterbody Detection Technique. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, No. 2, pp. 153–166.

Kim, W., Lee, S., & Choi, M. 2024. A Comparative Study of Remotely Sensed Reservoir Monitoring Across Multiple Land Cover Types. *Science of The Total Environment*, Vol. 948, p. 174678.

Kittler, J., & Illingworth, J. 1986. Minimum Error Thresholding. *Pattern Recognition*, Vol. 19, No. 1, pp. 41–47.

Krishna, K., & Murty, M. N. 1999. Genetic K-means Algorithm. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics)*, Vol. 29, No. 3, pp. 433–439.

Lee, S., Jeong, J., Oh, S., Jeong, H., & Choi, M. 2022. Multi-resolution SAR Image-based Agricultural Reservoir Monitoring. *Korean Journal of Remote Sensing*, Vol. 38, No. 5, pp. 497–510.

Lee, S., Kim, W., Cho, S., Jeon, H., & Choi, M. 2023. Water Resources Monitoring Technique Using Multi-source Satellite Image Data Fusion. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 56, No. 8, pp. 497–508.

Lee, S., Kim, W., Lee, S., Jeong, H., Park, J., & Choi, M. 2024. Comparative Study of Flood Detection Methodologies Using Sentinel-1 Satellite Imagery. *Journal of Korea Water Resources Association*, Vol. 57, No. 3, pp. 181–193.

Li, J., Meng, Y., Li, Y., Cui, Q., Yang, X., Tao, C., Wang, Z., Li, L., & Zhang, W. 2022. Accurate Water Extraction Using Remote Sensing Imagery Based on Normalized Difference Water Index and Unsupervised Deep Learning. *Journal of Hydrology*, Vol. 612, p. 128202.

Li, Z., & Demir, I. 2023. U-net-based Semantic Classification for Flood Extent Extraction Using SAR Imagery and GEE Platform: A Case Study for 2019 Central US Flooding. *Science of The Total Environment*, Vol. 869, p. 161757.

Liang, J., & Liu, D. 2020. A Local Thresholding Approach to Flood Water Delineation Using Sentinel-1 SAR Imagery. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 159, pp. 53–62.

Liu, Z., Lin, Y., Cao, Y., Hu, H., Wei, Y., Zhang, Z., Lin, S., & Guo, B. 2021. Swin Transformer: Hierarchical Vision Transformer Using Shifted Windows. In *Proceedings of the IEEE/CVF International Conference on Computer Vision*, pp. 10012–10022.

McCormack, T., Campanyà, J., & Naughton, O. 2022. A Methodology for Mapping Annual Flood Extent Using Multi-temporal Sentinel-1 Imagery. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 282, p. 113273.

Otsu, Nobuyuki. 1975. A Threshold Selection Method from Gray-level Histograms. *Automatica*, Vol. 11, No. 285–296, pp. 23–27.

Parajuli, J., Fernandez-Beltran, R., Kang, J., & Pla, F. 2022. Attentional Dense Convolutional Neural Network for Water Body Extraction from Sentinel-2 Images. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, Vol. 15, pp. 6804–6816.

Park, G., Nam, W., Lee, H., Sur, C., Ha, T., & Jo, Y. 2024. Comparative Analysis of the 2022 Southern Agricultural Drought Using Evapotranspiration-Based ESI and EDDI. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers*, Vol. 66, No. 3, pp. 25–37.

Park, J., Baik, J., & Choi, M. 2023. Triple Collocation-based Multi-source Evaporation and Transpiration Merging. *Agricultural and Forest Meteorology*, Vol. 331, p. 109353.

Peña, F. J., Hübinger, C., Payberah, A. H., & Jaramillo, F. 2024. DeepAqua: Semantic Segmentation of Wetland Water Surfaces with SAR Imagery Using Deep Neural Networks without Manually Annotated Data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Vol. 126, p. 103624.

Penman, Howard L. 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Royal Society London*, Vol. 193, pp. 120–145.

Pereira, L. S., Perrier, A., Allen, R. G., & Alves, I. 1999. Evapotranspiration: Concepts and Future Trends. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, Vol. 125, No. 2, pp. 45–51.

Priestley, C., & Taylor, R. 1972. On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-scale Parameters. *Monthly Weather Review*, Vol. 100, pp. 81–92.

Reichle, R. H., De Lannoy, G. J. M., Liu, Q., Ardizzone, J. V., Colliander, A., Conaty, A., Crow, W., Jackson, T. J., Jones, L. A., Kimball, J. S., Koster, R. D., Mahanama, S. P., Smith, E. B., Berg, A., Bircher, S., Bosch, D., Caldwell, T. G., Cosh, M., González-Zamora, Á., Holifield Collins, C. D., Jensen, K. H., Livingston, S., Lopez-Baeza, E., Martinez-Fernandez, J., McNairn, H., Moghaddam, M., Pacheco, A., Pellarin, T., Prueger, J., Rowlandson, T., Seyfried, M., Starks, P., Su, Z., Thibeault, M., Velde, R. V. D., Walker, J., Wu, X., & Zeng, Y. 2017. Assessment of the SMAP Level-4 Surface and Root-zone Soil Moisture Product Using in Situ Measurements. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 18, No. 10, pp. 2621–2645.

Rigatti, Steven J. 2017. Random Forest. *Journal of Insurance Medicine*, Vol. 47, No. 1, pp. 31–39.

Ronneberger, O., Fischer, P., & Brox, T. 2015. U-net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation. *Medical Image Computing and Computer-assisted Intervention-MICCAI 2015: 18th International Conference, Munich, Germany, October 5–9, 2015, proceedings, part III 18*, Springer International Publishing, pp. 234–241.

Schaefer, G. L., Cosh, M. H., & Jackson, T. J. 2007. The USDA Natural Resources Conservation Service Soil Climate Analysis Network (SCAN). *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 24, No. 12, pp. 2073–2077.

Sekertekin, Alihsan. 2021. A Survey on Global Thresholding Methods for Mapping Open Water Body Using Sentinel-2 Satellite Imagery and Normalized Difference Water Index. *Archives of Computational Methods in Engineering*, Vol. 28, No. 3, pp. 1335–1347.

Shastry, A., Carter, E., Coltin, B., Sleeter, R., McMichael, S., & Eggleston, J. 2023. Mapping Floods from Remote Sensing Data and Quantifying the Effects of Surface Obstruction by Clouds and Vegetation. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 291, p. 113556.

Shin, Y., Han, D., & Im, J. 2021. Rainfall Intensity Estimation Using Geostationary Satellite Data based on Machine Learning: A Case Study in the Korean Peninsula in Summer.

Smith, A. B., Walker, J. P., Western, A. W., Young, R. I., Ellett, K. M., Pipunic, R. C., Grayson, R. B., Siriwardena, L., Chiew, F. H. S., & Richter, H. 2012. The Murrumbidgee Soil Moisture Monitoring Network Data Set. *Water Resources Research*, Vol. 48, No. 7.

Sun, K., Zhao, Y., Jiang, B., Cheng, T., Xiao, B., Liu, D., Mu, Y., Wang, X., Liu, W., & Wang, J. 2019. High-resolution Representations for Labeling Pixels and Regions. *arXiv preprint arXiv:1904.04514*.

Tang, G., Clark, M. P., Papalexiou, S. M., Ma, Z., & Hong, Y. 2020. Have Satellite Precipitation Products Improved Over Last Two Decades? A Comprehensive Comparison of GPM IMERG with Nine Satellite and Reanalysis Datasets. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 240, p. 111697.

Thorntwaite, Charles W. 1948. An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, Vol. 38, pp. 55–94.

Valman, S. J., Boyd, D. S., Carbonneau, P. E., Johnson, M. F., & Dugdale, S. J. 2024. An AI Approach to Operationalise Global Daily PlanetScope Satellite Imagery for River Water Masking. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 301, p. 113932.

- Vishwanathan, S. V. M., & Murty, M. N. 2002. SSVM: A Simple SVM Algorithm. In Proceedings of the 2002 International Joint Conference on Neural Networks. IJCNN'02 (Cat. No. 02CH37290), Vol. 3, pp. 2393–2398. IEEE.
- Volk, J. M., Huntington, J. L., Melton, F. S., Allen, R., Anderson, M., Fisher, J. B., Kilic, A., Ruhoff, A., Senay, G. B., Minor, B., Morton, C., Ott, T., Johnson, L., Andrade, B. C., Carrara, W., Doherty, C. T., Dunkerly, C., Friedrichs, M., Guzman, A., Hain, C., Halverson, G., Kang, Y., Knipper, K., Laipelt, L., Salazar, S. O., Pearson, C., Parrish, G. E. L., Purdy, A., Revelle, P., Wang, T., & Yang, Y. 2024. Assessing the Accuracy of OpenET Satellite-based Evapotranspiration Data to Support Water Resource and Land Management Applications. *Nature Water*, Vol. 2, No. 2, pp. 193–205.
- Wang, Y., Yu, Q., Lv, W., & Yu, W. 2011. Coastline Detection in SAR Images Using Multi-feature and SVM. In 2011 4th International Congress on Image and Signal Processing, Vol. 3, pp. 1227–1230. IEEE.
- Wieland, M., Martinis, S., Kiefl, R., & Gstaiger, V. 2023. Semantic Segmentation of Water Bodies in Very High-Resolution Satellite and Aerial Images. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 287, p. 113452.
- Xie, L., Zhang, H., & Wang, C. 2015. Water-body Types Classification Using Radarsat-2 Fully Polarimetric SAR Data. In 2015 IEEE International Conference on Aerospace Electronics and Remote Sensing Technology (ICARES), pp. 1–5. IEEE.
- Xie, Z., Yao, Y., Tang, Q., Liu, M., Fisher, J. B., Chen, J., Zhang, X., Jia, K., Li, Y., Shang, K., Jinga, B., Yang, J., Yu, R., Zhang, X., Guo, X., Liu, L., Ning, J., Fan, J., & Zhang, L. 2024. Evaluation of Seven Satellite-based and Two Reanalysis Global Terrestrial Evapotranspiration Products. *Journal of Hydrology*, Vol. 630, p. 130649.
- Xu, J., Ma, Z., Yan, S., & Peng, J. 2022. Do ERA5 and ERA5-land Precipitation Estimates Outperform Satellite-based Precipitation Products? A Comprehensive Comparison Between State-of-the-art Model-based and Satellite-based Precipitation Products over Mainland China. *Journal of Hydrology*, Vol. 605, p. 127353.
- Zhao, B., Sui, H., Liu, J., Shi, W., Wang, W., Xu, C., & Wang, J. 2024. Flood Inundation Monitoring Using Multi-source Satellite Imagery: A Knowledge Transfer Strategy for Heterogeneous Image Change Detection. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 314, p. 114373.
- Zhao, G., & Gao, H. 2019. Towards Global Hydrological Drought Monitoring Using Remotely Sensed Reservoir Surface Area. *Geophysical Research Letters*, Vol. 46, No. 22, pp. 13027–13035.
- Zhou, X., Liu, X., & Zhang, Z. 2019. Automatic Extraction of Lakes on the Qinghai-Tibet Plateau from Sentinel-1 SAR Images. In 2019 SAR in Big Data Era (BIGSAR DATA), pp. 1–4. IEEE.