

# 일 반 기 사

78 우리나라 시설농업 단지의 수막재배 시설에 의한 사회적 비용 산정 및 정책적 관리 방안  
강동환·김용재·배인식

89 서울시 침수 예·경보제 운영 및 고도화 방안  
윤선권·김민석·김성은·최현석

101 지상 광역 토양수분 관측의 새로운 패러다임: 우주선 중성자 프로브(CRNP) 기술과  
KOSMOS 관측 네트워크 소개  
김기영·이용준·심은증·정재환·최민하

111 국내 수자원 상시감시를 위한 수동형 마이크로파 원격탐사: 가능성과 한계  
이재세·김형록

118 NASA SMAP Science Team Meeting 참가기  
이재세·최의영·박건희·정재균·오유상·김남훈·김형록

Water  
for future

# 우리나라 시설농업 단지의 수막재배 시설에 의한 사회적 비용 산정 및 정책적 관리 방안



**강동환**  
국립부경대학교  
SEED연구소  
전임연구원(책임급)  
dhkang@pknu.ac.kr



**김용재**  
(주)지아카  
자연환경동행연구소  
연구소장  
nhk2146@naver.com



**배인식**  
(주)지아카  
자연환경동행연구소  
이사  
pado196233@naver.com

## 요약

수막재배는 겨울철 시설하우스에서 지하수를 양수하여 비닐하우스 외피 또는 보온커튼 위에 수막을 형성하고, 이를 통해 내부 열 손실을 줄이는 대표적인 저비용 보온 방식이다. 우리나라 수막재배는 약 1만 ha 규모로 운영되는 것으로 알려져 있으며, 단위 면적당 지하수 사용량은 약 420 m<sup>3</sup>/day/ha, 전국 수막재배용 지하수 사용량은 연간 약 5.4억 m<sup>3</sup> 수준으로 추정된다. 수막재배는 농가의 난방비 절감에 기여해 왔으나, 겨울철 집중 양수로 인한 지하수위 저하, 수질 악화, 관정 간섭, 하천 기저유출 감소, 염수화 가능성

등 다양한 수자원 관리 문제를 동반할 수 있다.

본 기사에서는 수막재배로 인한 사회적 비용을 정량적으로 검토하기 위해 ① 지하수위 저하에 따른 추가 관정 개발 또는 펌프 교체 비용, ② 지하수 수질 악화에 따른 수처리 또는 대체 수원 확보 비용, ③ 주변 농가와의 물 이용 갈등 비용, ④ 하천 생태계와 기저유출 감소에 따른 환경비용, ⑤ 장기적 지하수 자원 회복을 위한 인공함양 및 관리 시설 비용을 산정하였다. 전국 수막재배 면적 10,746 ha와 연간 지하수 사용량 5.4억 m<sup>3</sup>를 기준으로 저영향, 중간영향, 고영향 시나리오를 구성한 결과, 수막재배의 사회·환경비용은 저영향 시나리오에서 약 146억 원/년, 중간 시

나리오에서 약 1,071억 원/년, 고영향 시나리오에서 약 3,627억 원/년으로 추정되었다.

이 결과는 수막재배의 경제성을 단순히 농가의 직접 난방비 절감 효과만으로 평가해서는 안 된다는 점을 보여준다. 특히 수막재배 밀집 지역, 하천변 층적층, 해안 저지대, 염수화 취약지역에서는 지하수 자원 손실과 환경비용이 농가의 사적 비용을 넘어 지역사회 전체의 사회적 비용으로 확대될 수 있다. 향후 수막재배 정책은 전면 금지 또는 단순 유지가 아니라, 지역별 지하수 취약성에 기반한 차등 관리, 순환식 수막재배, 지하수 인공함양, 고효율 히트펌프, 보온커튼, 수위·수질 모니터링을 결합한 통합 물·에너지 관리 체계로 전환되어야 한다.

주요어: 수막재배, 시설농업, 지하수, 사회적 비용, 관리 방안

## 1. 서론

우리나라 시설농업은 겨울철 생산 안정성과 농가 소득 유지에 중요한 역할을 한다. 딸기, 토마토, 오이, 상추 등 주요 시설작물은 야간 저온에 민감하기에 겨울철 보온 또는 난방이 필수적이다. 일반적인 난방 방식으로는 등유 보일러, 열풍기, 온수 배관, 전기히터, 히트펌프 등이 활용되지만, 연료비와 전기요금 상승은 농가 경영비 부담을 증가시킨다.

이러한 배경에서 수막재배는 농가가 비교적 낮은 비용으로 겨울철 보온을 유지할 수 있는 기술로 자리 잡았다. 수막재배는 약 14~16°C의 지하수를 양수하여 비닐하우스 외피 또는 보온커튼 위에 흘려보내고, 형성된 수막이 외기와 하우스 내부 사이의 열교환을 줄이는 방식이다. 즉, 수막재배는 지하수가 가진 열용량과 수막의 단열효과를 활용하는 지하수 기반 보온 기술이다.

수막재배의 장점은 명확하다. 화석연료 사용량을 줄일 수 있고, 농가의 직접 난방비 부담을 낮출 수 있으며, 작물의 겨울철 생육환경을 안정적으로 유지할 수 있다. 그러나 수자원 관리 관점에서 수막재배는 다른 의미를 가진다. 수막재배는 겨울철 야간에 대량의 지하수를 집중적으로 양수하는 방식이기 때문이다. 특히 시설농업 단지가 밀집한 지역에서는 다수의 관정이 같은 시간대에 동시에 가동되면서 지하수위 저하, 관정 간섭, 수질 변화, 하천 기저유출 감소 등의 문제가 나타날 수 있다.

그동안 수막재배는 주로 농가의 난방비 절감 효과를 중심으로 평가되어 왔다. 그러나 지하수는 공공성이 강한 수자원이며, 특정 농가 또는 단지가 대량으로 이용할 경우 그 영향은 주변 농가, 하천 생태계, 지역 수문순환, 미래 수자원 관리 비용으로 확산될 수 있다. 따라서 수막재배의 경제성은 농가의 사적 비용뿐 아니라 사회적 비용까지 포함하여 평가할 필요가 있다.

본 기사는 우리나라 수막재배 시설에서 발생할 수 있는 사회적 비용을 영향 정도(저영향, 중간, 고영향)에 따라 산정하고, 향후 정책적 관리 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 수막재배 시설의 규모와 지하수 사용 특성

기존 연구에 따르면 우리나라 수막재배 면적은 약 1만 ha 수준으로 추정된다. 전국 수막재배 면적 10,746 ha, 단위 면적당 지하수 사용량 420 m<sup>3</sup>/day/ha, 연간 운영 일수 120일을 적용하면 전국 수막재배용 지하수 사용량은 식 (1)과 같다.

$$420m \times 10746ha \times 120day/year = 5.4\text{억} m^3/year \quad (1)$$

이는 단순한 농업용수 사용량이 아니라, 겨울철 특정 기간에 집중적으로 양수되는 지하수량이라는 점에

서 중요하다. 1 ha당 연간 지하수 사용량은 약 50,400 m<sup>3</sup>이며, 수막재배 밀집 지역에서는 이 양수가 야간 시간대에 집중된다(표 1).

수막재배는 지하수의 열에너지를 이용한다는 점에서 에너지 절감 효과를 가진다. 그러나 순환식이 아닌 개방형 수막재배에서는 양수된 지하수가 하우스 외피를 따라 흐른 후 배수로로 배출된다. 일부는 하천이나 농수로로 빠르게 유출되고, 일부는 주변 토양으로 침투할 수 있으나, 양수된 물이 곧바로 원래 대수층으로 회복된다고 보기는 어렵다.

이러한 구조 때문에 수막재배는 “에너지 비용 절감”과 “지하수 자원 부담”이라는 양면성을 가진다. 농가 입장에서는 난방비를 줄이는 기술이지만, 지역 수자원 관점에서는 지하수 저장량을 일시적으로 대량 사용하는 기술이다.

### 3. 수막재배의 사회적 비용 개념

사회적 비용은 특정 행위로 인해 개인 또는 기업이 직접 부담하지 않지만, 지역사회나 공공부문, 환경이 부담하게 되는 비용을 의미한다. 수막재배의 경우 농가가 직접 체감하는 비용은 양수 전기료, 관정 유지비, 배관 설치비 등이다. 그러나 수막재배가 장기간·대규모로 운영되면 다음과 같은 비용이 지역사회에 전가될 수 있다.

첫째, 지하수위 저하로 기존 관정의 양수능력이 감소하면 추가 관정 개발 또는 펌프 교체가 필요하다. 둘째, 수질이 악화되면 철·망간 제거, 탁도 저감, 염수화 대응, 대체 수원 확보 비용이 발생한다. 셋째, 주변 농가와 관정 간섭 또는 물 이용 갈등이 발생하면 행정 조정, 민원 처리, 보상, 긴급 급수 비용이 필요하다. 넷째, 지하수 양수로 하천 기저유출이 감소하면 하천 생

표 1. 수막재배 지하수 사용량 산정 기준

구분	적용 값
전국 수막재배 면적	10,746 ha
단위 면적당 지하수 사용량	420 m <sup>3</sup> /일/ha
연간 운영 일수	120일/년
1 ha당 연간 지하수 사용량	50,400 m <sup>3</sup> /ha·년
전국 연간 지하수 사용량	약 5.4억 m <sup>3</sup> /년

표 2. 수막재배 사회적 비용 항목

비용 항목	주요 발생 원인
추가 관정 개발 또는 펌프 교체 비용	지하수위 저하, 양수능력 감소, 펌프 양정 부족
수처리 또는 대체 수원 확보 비용	철·망간, 탁도, 질산성질소, 염수화, EC 상승
물 이용 갈등 비용	관정 간섭, 양수 경쟁, 민원, 보상, 긴급 급수
하천 생태계·기저유출 감소 비용	갈수기 하천 유량 감소, 수문 연계 약화, 생태계서비스 손실
인공함양 및 관리 시설 비용	유출수 회수, 저류, 여과, 재함양, 관측망, 자동 계측



그림 1. 수막재배의 사회적 비용 구성 및 발생 메커니즘.

태계서비스 손실과 수문 환경 악화가 발생할 수 있다. 다섯째, 장기적으로 지하수 자원을 회복하기 위해 인공함양, 저류조, 여과·처리시설, 관측정, 자동 계측 시스템이 필요하다. 본 기사에서는 수막재배의 사회적 비용을 5개 항목으로 구분하였다(표 2).

#### 4. 사회적 비용의 산정 시나리오와 산정 절차

전국 수막재배 지하수 사용량 5.4억 m<sup>3</sup> 전체가 곧바

로 피해 비용으로 전환되는 것은 아니다. 실제 피해는 지역별 대수층 특성, 지하수 함양량, 관정 밀도, 하천과의 연결성, 해안 염수화 위험, 시설농업 단지의 밀집도에 따라 달라진다. 본 기사에서는 수막재배 전체 지역 중 실제 비용이 발생하는 비율을 기준으로 저영향, 중간, 고영향 시나리오를 설정하였다(표 3).

항목별 단가는 국내 관정 개발비, 농업용 관정 보조사업 단가, 상수도 대체 수원 비용, 물환경 부담금, 인공함양 및 관측 시설 설치비 등을 참고하여 개략적으

표 3. 영향 시나리오 설정

시나리오	발생 면적 (전체 대비)	발생 수량 (억 m <sup>3</sup> /년)	지역 특성
저영향	10%	0.54	지하수위 회복이 빠르고 수질 변화가 작은 지역
중간	25%	1.35	일반적인 수막재배 밀집 지역
고영향	40%	2.16	하천변 충적층, 해안 저지대, 염수화 취약지역

표 4. 사회적 비용 산정을 위한 적용 단가

항목	저영향	중간	고영향	산정 의미
추가 관정 및 펌프 비용	150만 원/ha·년	320만 원/ha·년	600만 원/ha·년	연간 관정 개발비와 펌프 교체비
수처리 및 대체 수원 비용	100원/m <sup>3</sup>	300원/m <sup>3</sup>	700원/m <sup>3</sup>	단순 여과부터 대체 수원 확보까지 포함
물 이용 갈등 비용	30만 원/ha·년	100만 원/ha·년	200만 원/ha·년	민원, 조정, 보상, 긴급 급수
하천 생태계 및 기저유출 비용	50원/m <sup>3</sup>	150원/m <sup>3</sup>	300원/m <sup>3</sup>	환경비용의 대리값
인공함양 및 관리 시설 비용	80원/m <sup>3</sup> + 20만 원/ha·년	250원/m <sup>3</sup> + 50만 원/ha·년	500원/m <sup>3</sup> + 100만 원/ha·년	회수·저류·여과·함양·관측망

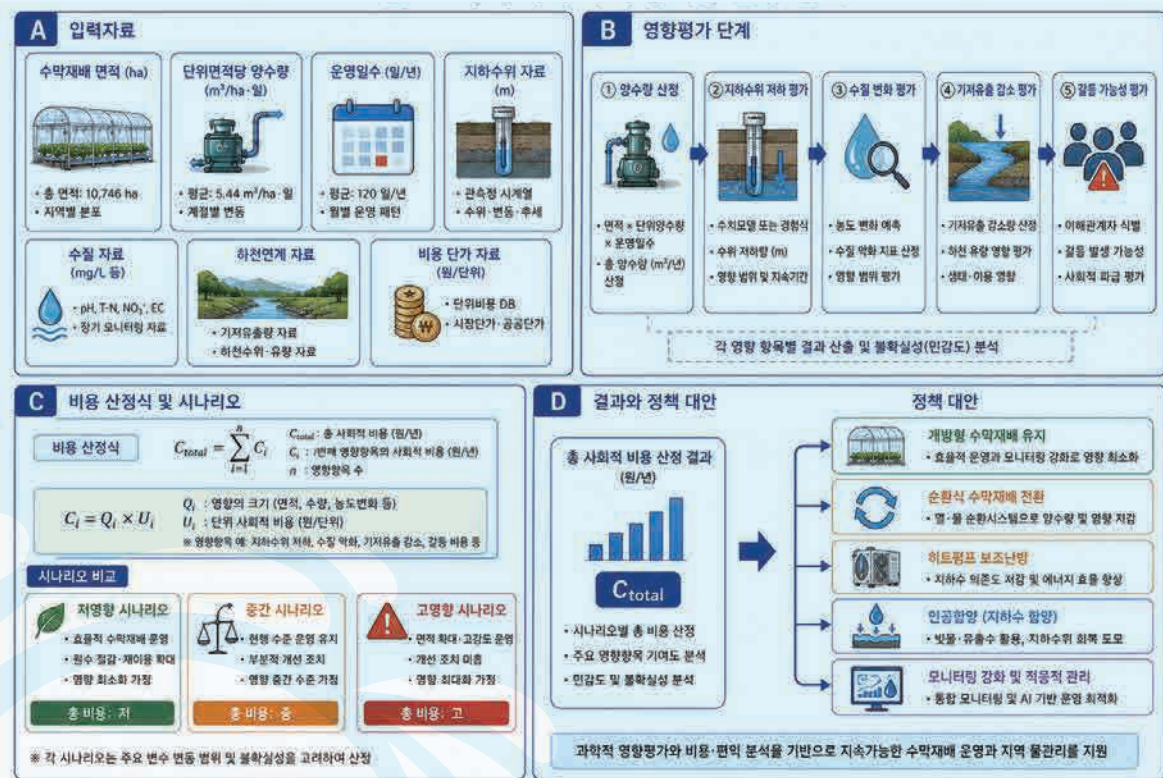


그림 2. 수막재배의 사회적 비용 산정 절차 및 정책 대안.

로 설정하였다(표 4). 이는 특정 지역의 실제 설계비가 아니라 전국 규모의 정책적 추정에 활용하기 위한 단가이다.

## 5. 사회적 비용의 산정 결과

### 5.1 지하수위 저하에 따른 추가 관정 개발 또는 펌프 교체 비용

수막재배 지역에서 겨울철 지하수위가 반복적으로 하강하면 기존 관정의 토출량이 감소하거나 펌프 양정이 부족해질 수 있다. 이 경우 농가는 더 깊은 관정을 개발하거나, 기존 펌프를 고탄정·고출력 펌프로 교체해야 한다. 또한 전기 인입, 배관 보강, 관정 보호공 설치 비용이 추가될 수 있다. 본 기사에서는 연간 비용으로 환산하여 저영향 150만 원/ha·년, 중간 320만 원/ha·년, 고영향 600만 원/ha·년으로 설정하였다(표 5).

이 비용은 개별 농가가 실제로 체감하기 쉬운 비용이다. 관정의 수위가 낮아져 양수가 어려워지면 바로 작물 피해와 연결되기 때문에, 농가는 추가 관정 개발 또는 펌프 교체를 선택할 가능성이 높다.

표 5. 추가 관정 개발 또는 펌프 교체 비용

시나리오	영향 면적(ha)	단가(만 원/ha·년)	연간 비용(억 원/년)
저영향	1,075	150	16
중간	2,687	320	86
고영향	4,298	600	258

표 6. 수처리 또는 대체 수원 확보 비용

시나리오	영향 수량(억 m <sup>3</sup> /년)	단가(원/m <sup>3</sup> )	연간 비용(억 원/년)
저영향	0.54	100	54
중간	1.35	300	405
고영향	2.16	700	1,512

### 5.2 지하수 수질 악화에 따른 수처리 또는 대체 수원 확보 비용

지하수 과다 양수는 수질 변화를 동반할 수 있다. 환원 환경의 지하수가 유입되면 철·망간 농도가 증가할 수 있고, 관정 노후화나 대수층 교란은 탁도 상승을 유발할 수 있다. 농경지의 비점오염 물질이 유입되는 지역에서는 질산성질소 농도가 높아질 수 있으며, 해안 지역이나 고염 지하수 분포 지역에서는 전기전도도와 염소이온 농도가 증가할 수 있다. 수질 악화가 경미한 경우에는 침전·여과·산화 처리 정도로 대응할 수 있다. 그러나 염수화 또는 질산성질소 문제가 심화되면 대체수원 확보, 혼합 공급, 수처리 설비 설치가 필요해진다. 본 기사에서는 수처리 또는 대체수원 비용을 저영향 100원/m<sup>3</sup>, 중간 300원/m<sup>3</sup>, 고영향 700원/m<sup>3</sup>로 설정하였다(표 6).

수질 악화 비용은 수막재배의 사회적 비용 중 가장 큰 항목이 될 수 있다. 특히 염수화가 발생하는 지역에서는 단순 여과로 해결할 수 없으므로 비용이 급격히 증가한다.

### 5.3 주변 농가와 물 이용 갈등 비용

수막재배는 특정 농가만의 문제가 아니라 시설농업 단지 전체의 물 이용 질서와 관련된다. 여러 관정이 같은 시간대에 동시에 가동되면 인접 관정의 수위가 낮아지고, 일부 농가에서는 양수량이 부족해질 수 있다. 이 경우 농가 간 갈등, 민원, 행정 조정, 임시 급수, 피해 보상 등의 비용이 발생한다. 본 기사에서는 물 이용 갈등 비용을 저영향 30만 원/ha·년, 중간 100만 원/ha·년, 고영향 200만 원/ha·년으로 설정하였다(표 7).

물 이용 갈등 비용은 전체 규모로 보면 다른 항목보다 작게 보일 수 있다. 그러나 특정 지역에서는 농가 간 신뢰, 공동체 관계, 행정 부담, 작물 피해와 직결되므로 실제 체감도는 매우 높다.

### 5.4 하천 생태계와 기저유출 감소에 따른 환경비용

지하수와 하천은 독립된 수계가 아니라 서로 연결된 수문 시스템이다. 하천 주변 충적층에서 지하수를 대량 양수하면 하천으로 서서히 공급되던 기저유출이 감소할 수 있다. 특히 겨울철과 갈수기에는 하천 유량이 감소하기 때문에, 지하수 양수의 영향이 상대적

으로 크게 나타날 수 있다. 기저유출 감소는 하천 수량 감소, 수온 변화, 서식처 축소, 수질 악화, 생태계서비스 감소로 이어질 수 있다. 이러한 비용은 시장에서 직접 거래되지 않기 때문에 과소평가되기 쉽다. 본 기사에서는 하천 생태계와 기저유출 감소에 따른 환경비용을 저영향 50원/m<sup>3</sup>, 중간 150원/m<sup>3</sup>, 고영향 300원/m<sup>3</sup>로 설정하였다(표 8).

환경비용 항목은 수막재배가 단순히 지하수 이용 문제에 그치지 않고, 하천 생태계와 유역 물순환 문제로 확장될 수 있음을 보여준다.

### 5.5 지하수 자원 회복을 위한 인공함양 및 관리 시설 비용

수막재배의 지속가능성을 높이기 위해서는 양수한 지하수를 그대로 유출하는 개방형 구조에서 벗어나야 한다. 필요한 대안은 유출수 회수, 저류, 여과, 순환, 인공함양, 수위·수질 모니터링을 포함한 통합 관리 체계다. 구체적으로는 유출수 회수 관로, 저류조, 침전·여과 시설, 함양정 또는 침투지, 관측정, 자동 수위계, 전기전도도 센서, 유량계, 통합제어 시스템 등이 필요하다. 본 기사에서는 이러한 시설 및 운영 관리비

표 7. 물 이용 갈등 비용

시나리오	영향 면적(ha)	단가(만 원/ha·년)	연간 비용(억 원/년)
저영향	1,075	30	3
중간	2,687	100	27
고영향	4,298	200	86

표 8. 하천 생태계와 기저유출 감소 비용

시나리오	영향 수량(억 m <sup>3</sup> /년)	단가(원/m <sup>3</sup> )	연간 비용(억 원/년)
저영향	0.54	50	27
중간	1.35	150	203
고영향	2.16	300	648

표 9. 인공함양 및 관리 시설 비용

시나리오	영양 수량 (면적)	단가 (설치비 + 연간 운영비)	연간 비용 (억 원/년)
저영양	0.54억 m <sup>3</sup> (1,075 ha)	80원/m <sup>3</sup> + 20만 원/ha·년	45
중간	1.35억 m <sup>3</sup> (2,687 ha)	250원/m <sup>3</sup> + 50만 원/ha·년	351
고영양	2.16억 m <sup>3</sup> (4,298 ha)	500원/m <sup>3</sup> + 100만 원/ha·년	1,123

를 저영양 80원/m<sup>3</sup> + 20만 원/ha·년, 중간 250원/m<sup>3</sup> + 50만 원/ha·년, 고영양 500원/m<sup>3</sup> + 100만 원/ha·년으로 설정하였다(표 9).

인공함양 및 관리 시설 비용은 단기적으로는 부담이지만, 장기적으로는 지하수위 저하, 수질 악화, 관정 간섭, 하천 기저유출 감소를 줄이는 예방 투자다. 특히 시설농업 단지가 밀집한 지역에서는 개별 농가 단위보다는 단지 공동시설 방식이 경제적일 수 있다.

### 5.6. 사회적 비용의 종합 산정 분석

사회적 비용 5개 항목을 합산하면 수막재배의 사회적 비용은 저영양 시나리오에서는 약 146억 원/년, 중간 시나리오에서는 약 1,071억 원/년, 고영양 시나리오에서는 3,627억 원/년으로 산정된다(표 10).

전국 수막재배 면적 10,746 ha를 기준으로 전체 사회적 비용을 1 ha당 평균으로 환산하면 저영양 시나리오에서는 약 136만 원/ha·년, 중간 시나리오에서는 약 997만 원/ha·년, 고영양 시나리오에서는 약 3,375만 원/ha·년이다(표 11).

## 6. 사회적 비용 저감을 위한 정책적 관리 방안

### 6.1 수막재배 지역의 지하수 사용량 계측

현재 많은 수막재배 지역에서는 실제 양수량이 정밀하게 계측되지 않는다. 지하수 사용량이 확인되지 않으면 수위 저하, 수질 변화, 기저유출 감소의 원인을 과학적으로 규명하기 어렵다. 수막재배 밀집 지역부터 유량계, 자동 수위계, 수온·전기전도도 센서 설

표 10. 수막재배 사회·환경 비용 종합 산정

비용 항목	저영양 (억 원/년)	중간 (억 원/년)	고영양 (억 원/년)
추가 관정 개발·펌프 교체	16	86	258
수질 악화 수처리·대체 수원	54	405	1,512
물 이용 갈등 비용	3	27	86
하천 생태계·기저유출 환경비용	27	203	648
인공함양·관리 시설 비용	45	351	1,123
합계	146	1,071	3,627

표 11. 전국 평균 기준 1 ha당 사회적 비용

시나리오	전국 비용(억 원/년)	1 ha당 평균 비용(만 원/ha·년)
저영향	146	136
중간	1,071	997
고영향	3,627	3,375

치를 단계적으로 의무화할 필요가 있다.

### 6.2 지역별 취약성 기반 차등 관리

수막재배 지역을 동일한 기준으로 관리해서는 안 된다. 지하수 함양량이 충분하고 수위 회복이 빠른 지역과, 해안 염수화 취약지역 또는 하천변 충적층 지역은 관리 강도가 달라야 한다. 지하수 취약성 지도, 관정 밀도, 수위 변동성, 전기전도도 변화, 하천과의 연결성을 종합하여 저위험, 중위험, 고위험 지역으로 구분해야 한다(표 12).

### 6.3 개방형 수막재배에서 순환식 수막재배로 전환

수막재배의 가장 큰 문제는 양수된 지하수가 회수되지 않고 유출되는 구조이다. 따라서 유출수 회수 관로, 저류조, 여과 시설, 재순환 펌프를 결합한 순환식 수막재배로 전환해야 한다. 단지형 시설농업 지역에서는 개별 농가 단위보다 공동 저류조와 공동 처리시설을 설치하는 것이 효율적이다.

표 12. 수막재배 지역의 유형별 관리 방향

지역 유형	주요 특징	권장 관리 방향
저위험 지역	지하수위 회복이 빠르고 수질 변화가 작음	수막재배 유지, 사용량 계측, 절수형 운영
중위험 지역	관정 밀집, 겨울철 수위 저하 반복	순환식 수막재배, 공동 저류조, 히트펌프 보조 난방
고위험 지역	하천변 충적층, 해안 저지대, 염수화 우려	개방형 수막재배 제한, 인공함양, 대체 난방 전환
초고위험 지역	관정 고갈, 수질 악화, 민원 반복	양수 총량제, 신규 관정 제한, 단지형 물·에너지 전환 사업

### 6.4 인공함양과 하천 기저유출 보전

수막재배 유출수를 적절히 처리한 후 함양정 또는 침투지를 통해 지하로 재함양하면 지하수위 저하를 완화할 수 있다. 또한 하천 주변에서는 지하수와 하천의 수문 연계성을 고려하여 기저유출 유지 방안을 함께 마련해야 한다. 인공함양은 단순한 시설 설치가 아니라 수질관리, 막힘 관리, 함양량 계측, 대수층 반응 모니터링이 병행되어야 한다.

### 6.5 고효율 히트펌프와 재생에너지 연계

수막재배를 기계식 난방으로 대체할 경우 화석연료 기반 난방은 탄소배출과 에너지 비용을 증가시킨다. 반면 히트펌프는 에너지 비용과 탄소배출량을 모두 낮출 수 있는 대안이다. 특히 지하수열 또는 지중열 히트펌프는 수막재배의 장점인 지하수 열 이용을 보다 효율적이고 통제 가능한 방식으로 전환할 수 있다. 태양광, ESS(Energy Storage System), 농업용 전력, 자동제어 시스템과 연계하면 저탄소 시설농업 단지 모델을 구축할 수 있다.



그림 3. 수막재배의 대안 및 단계별 전환 시나리오 로드맵.



그림 4. 수막재배 지역의 위험도 구분 및 관리전략.

## 6.6 사회적 비용을 반영한 지원사업 설계

수막재배 개선 사업은 단순히 농가 보조금 차원에서 접근하기보다, 지하수 보전과 탄소중립 편익을 함께 고려해야 한다. 예를 들어 고위험 지역에서 순환식 수막재배, 인공함양, 히트펌프를 도입하면 지하수위 저방지, 수질 악화 예방, 탄소배출 저감이라는 공익적 효과가 발생한다. 이러한 효과를 정량화하여 보조 사업, 정책자금, 탄소중립 농업 사업과 연계할 필요가 있다.

## 7. 결론

수막재배는 우리나라 겨울철 시설농업에서 중요한 보은 기술로 활용되고 있다. 농가 입장에서는 난방비를 줄이고 작물의 생육환경을 안정적으로 유지하는 유용한 기술이다. 그러나 전국적으로 약 1만 ha 규모에서 연간 약 5.4억 m<sup>3</sup>의 지하수가 사용된다는 점을 고려하면, 수막재배는 단순한 농업기술이 아니라 국가 지하수 관리의 중요한 대상이다.

본 기사에서는 수막재배의 사회적 비용을 5개 항목으로 구분하여 산정하였다. 그 결과 수막재배로 인한 사회·환경 비용은 저영향 시나리오에서 약 146억 원/년,

중간 시나리오에서 약 1,071억 원/년, 고영향 시나리오에서 약 3,627억 원/년으로 추정되었다. 특히 고영향 지역에서는 수질 악화 대응비, 하천 기저유출 감소 비용, 인공함양 및 관리 시설 비용이 증가할 수 있다. 수막재배는 화석연료 난방을 줄이는 효과가 있지만, 동시에 지하수 자원에 비용을 전가할 수 있다. 수막재배의 지속가능성은 농가의 난방비, 지하수 수위 및 수질, 하천 생태계, 탄소배출을 함께 고려하여 평가해야 한다.

수막재배 지역의 관리 정책은 다음과 같은 방향으로 전환되어야 한다. 첫째, 수막재배 밀집 지역의 지하수 사용량을 정확히 관측해야 한다. 둘째, 지역별 지하수 취약성에 따라 차등 관리 체계를 구축해야 한다. 셋째, 개방형 수막재배를 순환식 수막재배로 전환해야 한다. 넷째, 유출수 회수와 인공함양을 통해 지하수 자원 회복을 유도해야 한다. 다섯째, 고효율 히트펌프와 재생에너지 연계를 통해 에너지 비용과 탄소배출을 동시에 줄여야 한다.

수막재배 지역에서는 물·에너지·탄소를 함께 관리하는 통합적인 관리 전환을 통해, 농가의 경제성을 유지하면서도 지하수 자원의 지속가능성과 탄소중립 목표를 동시에 달성하는 것이 핵심 과제이다.

### 참고문헌

- 문상호, 김용철, 정운영, 황정 (2016). 청주 상대리지역에서 수막재배가 지하수-하천수 상호작용에 미치는 영향, *자원환경지질*, 49(2), 105-120.
- 문상호, 하규철, 김용철, 윤필선 (2012). 청원-충주지역 수막재배용 지하수 사용량 및 배출량 분석. *지질공학*, 22(4), 387-398.
- 이봉주, 김용철, 조병욱, 윤욱, 하규철, 이병대, 문상호, 윤필선, 김성운 (2015). 수위-유량 관계곡선을 이용한 수막재배용 지하수 사용량 추정. *지질공학*, 25(1), 35-43.
- 장선우, 정일문 (2014). 수막재배지역에서 일최저기온과 지하수 이용량의 상관관계를 이용한 지하수위 변화 분석. *지질공학*, 24(2), 217-225.
- 조병욱, 윤욱, 이병대, 고경석 (2012). 논산시 왕전리 수막재배지역의 지하수위 변화. *지질공학*, 22(2), 195-205.
- 한국가스공사 (2026). 도시가스용 천연가스 도매요금 및 요금체계. 한국가스공사.
- 한국수자원공사 (2024). 2023년 전국 평균 수도요금 및 물 사용 요금 통계. 한국수자원공사.

# 서울시 침수 예·경보제 운영 및 고도화 방안



**윤선권**  
서울연구원  
재난안전연구센터 연구위원  
skyoon@si.re.kr



**김민석**  
서울연구원  
재난안전연구센터 연구위원  
minseok@si.re.kr



**김성은**  
서울연구원  
지속가능연구실 연구위원  
sekim@si.re.kr



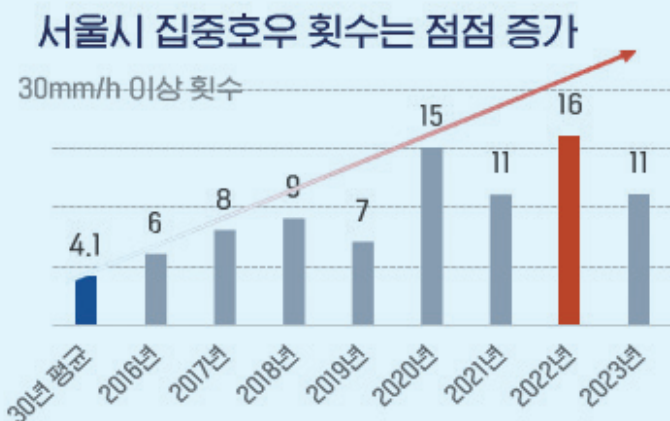
**최현석**  
서울연구원  
재난안전연구센터 연구위원  
hschoi@si.re.kr

## 1. 서론

기후위기로 인해 도시가 경험하는 강우의 양상은 과거와 달라지고 있다. 짧은 시간에 많은 비가 집중되는 극한호우가 잦아지면서, 기존의 하수관로, 빗물펌프장, 저류조, 하천 정비와 같은 구조적 대책만으로는 도시침수 위험을 충분히 관리하기 어려워졌다. 특히 서울은 고밀도 도시공간, 지하공간의 광범위한 이용, 반지하주택과 지하상가·지하주차장 등 침수취약시설의 존재로 인해 침수 발생 시 인명피해 가능성이 크다. 침수는 단순한 재산피해에 머물지 않는다. 짧은 시간 안에 지하공간으로 물이 유입되면 대피 시간이 급격히 줄어들고, 재해약자는 스스로 위험을 인지하거나 이동하기 어렵다. 따라서 침수 대응의 핵심은 물을 완전히 막는 것만이 아니라, 위험을 빠르게 감지하고 시민이

실제 행동으로 옮기도록 만드는 데 있다.

서울시는 2022년 집중호우 피해 이후 ‘더 촘촘한 수해 안전망 추진전략’을 수립하고, 방재성능목표 상향, 대심도 빗물배수시설 설치, 빗물펌프장·저류조 확충, 맨홀 추락방지시설 설치, 물막이판 지원 등 구조적·비구조적 대책을 병행해 왔다. 이 가운데 침수 예·경보제는 비구조적 대책의 핵심이다. 침수위험이 커지는 시점에 시민과 자치구, 경찰, 소방, 도로관리기관, 동행파트너에게 사전 경고를 전달함으로써 대피와 현장 대응을 유도하는 제도이기 때문이다. 특히 반지하주택 거주자, 고령자, 장애인 등 재해약자를 보호하기 위해서는 예·경보가 단순한 정보 전달에 그쳐서는 안 된다. 경보가 발령되면 누가, 언제, 어디로, 무엇을 해야 하는지가 명확해야 한다. 현재 서울시 침수 예·경보제는 전국 최초로 도입되었다는 점에서 정책적 의미가 크



### 10년간 서울시 자치구별 누적 침수 피해 규모



자료: 서울시, 행정안전부

그림 1. 서울시 집중호우 발생 횡수 및 피해 규모 증가 추세

다. 그러나 제도가 도입 초기 단계인 만큼 개선해야 할 과제도 분명하다. 강우량 중심 기준만으로는 국지적 침수위험을 충분히 반영하기 어렵고, 자치구별 현장판단에 따라 정보 발령의 일관성이 달라질 수 있다. 시민 입장에서는 정보 메시지가 너무 포괄적이면 실제 행동으로 이어지기 어렵고, 반복되는 재난문자는 정보 피로를 유발할 수 있다. 따라서 앞으로의 정책 방향은 명확하다. 서울시 침수 예·경보제는 강우 기준 중심의 알림체계에서 벗어나, 침수 가능성과 예상 피해, 시민 행

동요령, 재해약자 지원, 다기관 협업체계를 통합하는 도시침수 안전망으로 발전해야 한다.

## 2. 해외 사례조사

해외 주요 도시는 도시침수와 홍수 위험에 대응하기 위해 다양한 예·경보 체계를 운영하고 있다. 미국과 유럽연합은 기상자료, 지형정보, 하천수위, 토양습도, 레이더·위성자료 등 다양한 데이터를 활용해 홍

**하천범람 + 내수침수**

- 최근 기후변화에 따른 집중호우로 인한 100mm/hr 수준 이상 폭우 빈번히 발생, 외수-내수 복합 침수피해 발생
- 100% 하천 개수, 저지대 개발에 따른 내수의 자연배제 어려운 실정

< 도림천(2022.8.8, 시간당 110mm) >

< 강남역 일대(2011.7.27, 시간당 72mm) >

구조적 대책 한계...  
**비구조적 대책 강화!!**

**1984**

한강 범람(강동구 용남동)

**1990**

고양시 한강 제방붕괴

**2010**

사당역 일대 침수

**2010**

광화문 일대 침수

**2011**

도림천 범람

**2022**

강남역 일대 침수

그림 2. 도시침수 예방을 위한 비구조적 대책 강화 필요성

수 발생 가능성을 예측한다. 특히 미국은 강수량만을 일률적으로 적용하기보다 지역별 위험 상황에 따라 Flash Flood Warning, Flood Warning 등 다양한 경보체계를 운영한다. 이는 도시침수 위험이 단순히 비의 양만으로 결정되지 않는다는 점을 보여준다. 같은 강수량이라도 지형, 배수능력, 불투수면적, 하천수위, 선행강우에 따라 피해 양상은 크게 달라진다. 따라서 예·경보제는 지역 특성과 실제 위험을 함께 고려해야 한다.

유럽연합은 MeteoAlarm과 같은 통합 경보체계를 통해 국가별 기상위험 정보를 연계하고 공유한다. 유럽의 사례는 예·경보의 표준화와 정보공유가 중요하다는 점을 시사한다. 침수는 행정경계를 따라 발생하지 않는다. 한 지역의 집중호우가 인접 지역의 하천수위 상승, 도로통제, 대중교통 중단으로 이어질 수 있다. 따라서 서울시도 자치구 단위 경보체계를 운영하되, 시-자치구-유관기관 간 정보 공유와 표준운영절차를 강화할 필요가 있다. 일본은 도시침수 대응에서 실시간 관측과 단계별 경보체계가 발달한 사례로 볼

수 있다. X-밴드 MP 레이다, GIS, 기상·수문모델을 결합해 고해상도 강우와 침수위험을 파악하고, 재난 유형별로 단계적 경보체계를 운영한다. 특히 지하공간 침수 방지를 위해 특별경계수위와 같은 기준을 활용한다는 점은 서울에 중요한 시사점을 준다. 서울 역시 지하철역사, 지하상가, 지하주차장, 반지하주택이 밀집한 도시이므로, 일반 강우 기준과 별도로 지하공간에 특화된 경계 기준을 마련할 필요가 있다.

싱가포르는 고도로 도시화된 국가라는 점에서 서울과 비교 가능성이 크다. 싱가포르의 실시간 모니터링, 첨단 예측기술, 견고한 배수 인프라, 시민 참여를 결합해 홍수위험을 관리한다. 이 사례는 도시침수 대응이 기술만으로 완성되지 않는다는 점을 보여준다. 예측정보가 아무리 정밀해도 시민이 이해하지 못하거나 행동하지 않으면 피해를 줄이기 어렵다. 따라서 예·경보 메시지는 기술적 수치가 아니라 시민이 바로 이해할 수 있는 언어로 전달되어야 한다. “강우량이 얼마”라는 정보보다 “어느 지하공간이 위험한지”, “몇 분 안에 대피해야 하는지”, “어느 도로를 피해야 하는지”

<p><b>미국</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기상청(NWS)에서 홍수 예·경보 체계 구축 운영</li> <li>홍수(Flood), 돌발홍수(Flash Flood) 구분, 계측(15-30분) 자료 기반 Nowcasting 정보 제공</li> </ul>	<p><b>영국</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>환경청(SEPA)과 기상청(Met Office) 합동 홍수 예·경보 서비스 운영, Alert와 Warning으로 구분</li> <li>영향(impact)과 발생가능성(likelihood) 기반 예·경보</li> </ul>
<p><b>일본</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>기상청(JMA)과 물관리국토보전국이 도시침수 예·경보하되 기상청이 법령상 주관 부처</li> <li>재해 종류에 관계없이 5단계(5-Level) 기준 적용</li> </ul>	<p><b>싱가포르</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>환경부(NEA)-기상청(MSS) 산하 PUB에서 도시침수 예·경보 시스템 운영</li> <li>X-band 레이다 강우 예측 및 예·경보 시스템 구축</li> </ul>



그림 3. 해외 선진도시 도시침수 예·경보 사례

가 중요하다. 해외 사례의 공통점은 세 가지로 정리할 수 있다. 첫째, 강우량 중심의 단일 기준이 아니라 수위, 지형, 배수, 침수이력, 실시간 관측자료를 결합한 복합 판단체계를 활용한다. 둘째, 경보를 단계화하여 시민과 기관이 순차적으로 대응할 수 있도록 한다. 셋째, 단순 위험 알림을 넘어 예상 피해와 행동요령을 구체적으로 제시하는 영향 기반 예보로 전환하고 있다. 서울시 침수 예·경보제도 이러한 방향으로 고도화되어야 한다.

### 3. 서울시 도시침수 정책

서울시는 2022년 집중호우 피해 이후 침수피해 저감을 위해 종합적인 수해 안전망 구축전략을 추진하고 있다. 주요 전략은 방재성능목표 재설정, 지역맞춤형 방재시설 확충, 데이터·예측 기반 시스템 구축, 침수취약가구 안전 강화, 공공·민간 안전시설 확충으로 구성된다. 방재성능목표는 기존 시간당 95mm에서 서울시 전역 100mm, 강남 일대 등 중점관리지역

표 1. '더 촘촘한 수해안전망 추진전략' 세부 내용

추진전략	내용
강우처리목표 재설정	방재성능목표 상향(95mm/h → 100mm/h) ※ 중점관리지역은 110mm/h 지역별 방재성능목표 차등화(호우발생빈도, 기왕최대강수량, 침수면적, 침수심 등 수리수문학적 특성과 유동인구, 과거홍수피해액, 정주형태 등 사회경제적 특성 및 도심 내 하천의 처리능력 등을 고려)
지역맞춤형 방재시설 확충	침수취약 6개 지역: 대심도 빗물배수시설 설치(길이: 18.9km, 예산: 1조 5천억 원) - 1단계(~'27): 강남역 일대, 도림천 일대, 광화문 일대 - 2단계('25~'32): 사당역 일대, 한강로 일대, 길동 일대 침수우려지역: 빗물펌프장 증설(3,526억 원), 빗물저류조 신설(641억 원), 하수관거 정비(1조 2천억 원), 하천단면 확장(981억 원), 산사태 우려지역 정비(1,742억 원)
데이터·예측 기반 시스템 구축	스마트 경고시스템 도입: 위험상황 실시간 자동 전파 침수 예·경보제 도입: 반지하, 지하주차장, 일반도로 등 주거지역 침수우려지역을 대상으로 내비게이션을 통한 도로침수 실시간 상황 안내 재해지도 현행화 AI 기반 수방통합시스템 구축(~'30)
침수취약가구 안전 강화	돌봄공무원 1:1 지정: 장애인, 독거노인 대상으로 침수방지시설 사전점검, 대피정보 전파, 복구 맞춤 지원 물막이판 등 침수방지시설 무상 설치
공공·민간 안전시설 확충	맨홀 추락방지시설 1만 개소 설치 주민센터 양수기 1만 9천 대 지원 지하철 역사 출입구 차수판 설치 아파트 지하주차장 물막이판 설치 의무화를 위한 법제화

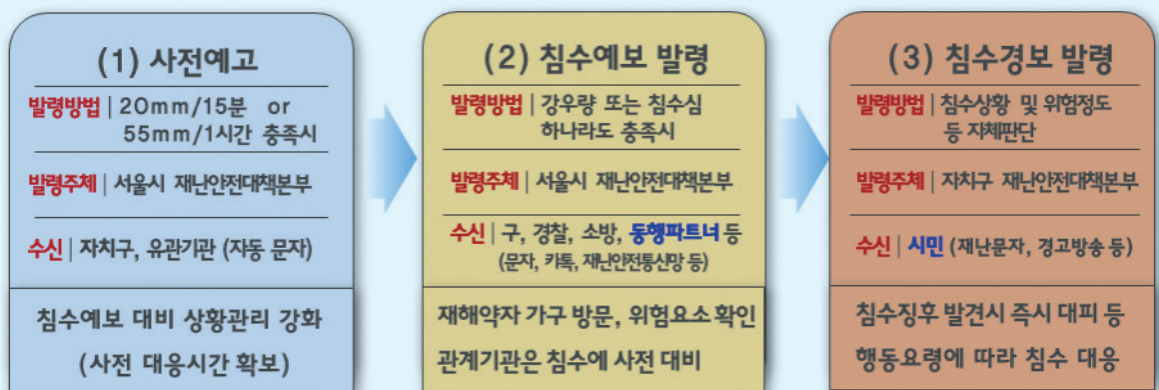
자료: 서울시 '더 촘촘한 수해안전망 추진전략' 내용을 참고해 저자 작성

110mm로 상향되었다. 이는 과거보다 강한 강우를 도시 방재 기준에 반영하려는 조치다. 또한 강남역, 도림천, 광화문 등 침수취약지역을 대상으로 대심도 빗물배수시설 설치가 계획되어 있으며, 빗물펌프장 증설, 빗물저류조 신설, 하수관거 정비 등 구조적 대책도 병행되고 있다.

그러나 시설 확충만으로 침수위험을 모두 해소할 수는 없다. 시설은 설계기준을 초과하는 강우 앞에서 한계를 갖고, 공사가 완료되기까지 긴 시간이 필요하다. 이에 따라 서울시는 침수 예·경보제와 동행파트너 제도를 도입해 비구조적 대응을 강화하고 있다. 침수 예·경보제는 강우량계와 도로수위계 등에서 일정 기준 이상 강우 또는 수심이 관측될 경우 자치구와 유관기관, 시민에게 침수위험을 사전에 알리는 체계다. 현행 침수예보 기준은 시간당 강우량 55mm와 15분 강우량 20mm가 동시에 초과되는 경우, 15분 강우량 30mm가 초과되는 경우, 또는 도로수위계 기준 침수심 15cm가 초과되는 경우이다. 이 가운데 하나라도 충족하면 자치구 단위로 침수예보가 발령된다.

서울시는 또한 반지하주택 거주 재해약자를 보호하기 위해 동행파트너 제도를 운영하고 있다. 동행파트너는 통·반장, 인근 주민, 돌봄공무원 등 지역 사정에 밝은 인력으로 구성되며, 침수예보 단계부터 재해약자의 안전 확인과 대피 지원을 수행하는 제도다. 이 제도는 행정기관의 대응만으로는 부족한 현장 접근성을 지역 공동체가 보완한다는 점에서 의미가 있다. 다만 실효성을 높이기 위해서는 동행파트너의 역할, 출동 기준, 책임 범위, 연락체계, 훈련체계를 제도적으로 명확히 해야 한다.

서울시는 2023년 침수예측 정보시스템도 구축하였다. 이 시스템은 예측강우와 침수시나리오를 활용해 배수분구와 행정구역별 침수위험 정보를 제공하고, 포인트 단위의 침수위험 추정을 목표로 한다. 이는 향후 침수 예·경보제를 강우량 중심에서 공간 기반 위험예측체계로 발전시키는 중요한 기반이 된다. 다만 현재 단계에서는 예측 정확도 향상, 실시간 운영 안정성 확보, 자치구 현업 활용성 강화가 필요하다. 침수예측 정보가 실제 경보 발령과 현장 대응으로 연결되



※ 사전예고 : ① 20mm/15분 또는 ② 55mm/1시간  
 ※ 침수예보 : ① 20mm/15분 & 55mm/1시간, ② 30mm/15분, ③ 도로침수심 15cm  
 ※ 강우량계 : 총 76개(기상청 28, 서울시 48)  
 ※ 도로수위계 : 총 61개(도로수위계는 총 107개이나 61개까지 시스템 연동)  
 자료: 서울시

그림 4. 서울시 침수 예·경보 발령 절차

표 2. '동행파트너' 상황에 따른 행동요령

상황구분	구성원별 행동요령
<b>평시</b>	- (돌봄공무원) 비상연락체계 유지(단체채팅방카톡 등), 기상정보 등 상황공유 - (구성원 인근주민) 임무 숙지 및 구성원 간 상호 신뢰 형성
<b>침수예보 *발령주체 (市 재대본)</b>	- (돌봄공무원) 구성원 및 재해약자에게 상황전파, 구성원 출동 요청 - (구성원 인근주민) 담당가구 출동 및 상황파악, 물막이판 설치유무 확인 등 ※ 자치구 재난안전대책본부(재대본)은 상황전파, 출동현황 등 상황관리
<b>침수경보 *발령주체 (區 재대본)</b>	- (돌봄공무원) 현장지휘, 특이사항 발생시 자치구 재대본에 보고 - (구성원 인근주민) 침수위기 등 대피 필요여부 판단 및 담당가구 대피 ※ 반지하 및 주택 외부에 물이 차오르는 등 침수징후 발견 시 즉시 대피 조치하되, 침수경보 발령 전이라도 현장에서 침수위기라고 판단되는 경우 대피 시행

표 3. 국내 주요 도시침수 예측 시스템 개발 현황

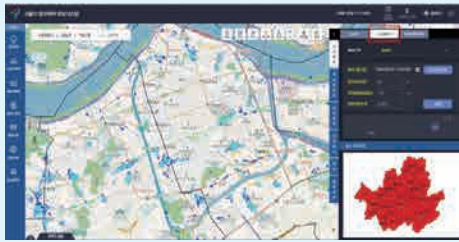

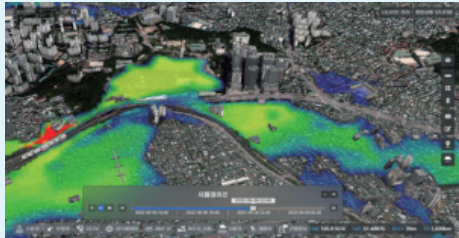

구분	현황	시스템 구축
서울시 (2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 서울시 침수예측시스템 고도화</li> <li>· 서울시 행정구역 단위 실황 및 예측 강우 추정</li> <li>· 배수분구별 침수해석 모델 구축 및 평가</li> <li>· 강우 시나리오를 이용한 침수 시나리오</li> <li>· 지속적 고도화 사업 추진 및 정확도 향상 필요</li> </ul>	
행정안전부 국립재난안전연구원 (2025)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 도시침수 모니터링 시스템(RAINSYS)</li> <li>· 관측(AWS)강우 및 예측강우(Radar) 분석</li> <li>· 도시침수 위험 기준에 따른 위험지역 알림</li> <li>· 실시간 침수 예측 및 시나리오별 침수예상도</li> <li>· 사용자 요구 지역 침수예상도 분석 기능</li> </ul>	
기후에너지환경부 K-water (2024)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 고정밀 수문레이더 기반 도시홍수 분석 시스템</li> <li>· 고정밀 수문레이더 강우 예측기술</li> <li>· 고정밀 침수위험지도 기반 예·경보 기술 개발</li> <li>· 레이더 기반 자료지향형 도시홍수 예측기술</li> <li>· 1·2D 통합 도시침수분석 S/W 개발</li> </ul>	
부산시 (2023)	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 부산시 온천천 유역 도시침수 예측시스템</li> <li>· 레이더-위성 다중센서 융합 강우 추정</li> <li>· 초단기 강우예측 알고리즘 적용</li> <li>· AI 기반 조위/수위 예측</li> <li>· 시스템 개발 후, 활용성·유지관리 미흡</li> </ul>	

표 4. 국내 도시침수 예측시스템 검토

구분	서울시	행정안전부	기후에너지환경부
명칭	서울시 도시침수 예측 시스템	도시침수 모니터링 시스템	도시홍수 통합 운영관리 플랫폼
법적 근거	자연재해대책법 도시침수방지법	자연재해대책법	하천법, 수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률 도시침수방지법
수행 부서	치수안전과	국립재난안전연구원	홍수통제소, K-Water
개발 목적	상습침수지역 및 지하공간 침수피해 방지	상습침수지역 및 지하공간 침수피해 방지	하천 홍수 관리 및 치수계획 수립
문제점	지속적인 현업 운영을 통한 정확도 향상 필요	전국 단위 상세 자료 확보 어려움	디지털 트윈 기술 신뢰성 확보 어려움
시사점	서울시 침수취약지역의 “내수침수 방어” 목적	전국 단위 도시지역의 “내수침수 방어” 목적	하천에 의한 “외수범람 방어” 목적 내수침수 분야 확대 시도



그림 5. 서울시 침수예측 정보시스템 통한 위험문자 알림

어야 정책 효과가 발생하기 때문이다.

서울시의 현행 정책은 구조적 대책과 비구조적 대책을 병행한다는 점에서 방향은 타당하다. 그러나 제도 운영의 핵심은 이제부터다. 침수 예·경보제가 시

민의 생명을 지키는 실효적 장치가 되려면 발령 기준의 정량화, 자치구 판단 절차의 표준화, 재난문자 메시지의 행동 유도성 강화, 재해약자 맞춤형 지원체계가 함께 정비되어야 한다.

### 5. 침수예·경보제 개선 방안

서울시 침수예·경보제 개선의 첫 번째 과제는 발령 기준의 정교화이다. 현재 기준은 강우량과 도로수위계 침수심을 중심으로 구성되어 있어 제도 운영이 비교적 명확하다는 장점이 있다. 실제 2010년부터 2025년까지 서울시 25개 자치구 AWS 분 단위 강우자료를 분석한 결과, 현행 기준을 적용하면 침수예보는 총 40일, 침수경보는 총 19일 수준으로 나타났다. 이는 연

평균으로 각각 약 2.5회, 1.2회에 해당하므로 제도가 과도하게 빈발하는 수준은 아니다. 또한 대형 피해 국면에서는 서울시 침수예보가 기상청 긴급재난문자보다 약 15~21분 선행하는 경향이 확인되었다. 이는 침수예보가 대피 골든타임을 확보하는 데 정책적 타당성을 가진다는 의미다.

다만 강우량 기준만으로는 모든 침수위험을 포착할 수 없다. 국지적 집중호우, 배수불량, 도로 저지대, 지하공간 유입, 하수관로 역류 등은 강우량이 동일하

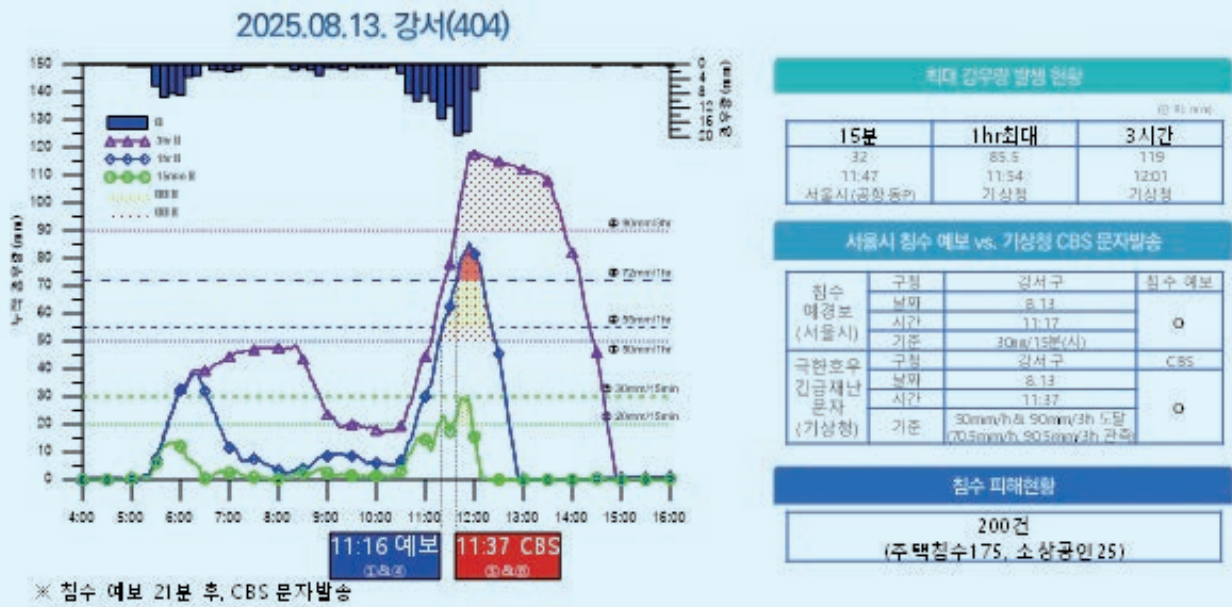


그림 6. 침수예보 vs. CBS 문자발송 비교 및 침수피해 현황

표 5. 침수예·경보 강우량 조건별 발생 통계

번호	강우조건	발생건수(자치구)
①	20mm/15min	134일 (535건)
②	30mm/15min	25일 (56건)
③	50mm/1hr	57일 (241건)
④	55mm/1hr	41일 (167건)
⑤	72mm/1hr	15일 (48건)
⑥	90mm/3hr	21일 (140건)

표 6. 조건별 침수예·경보 발령 통계

기준	발생건수(자치구)	비고
①&③	31일 (131건)	
①&④	28일 (111건)	
③&⑥	15일 (87건)	
②or(①&③)	42일 (155건)	50mm/h 적용 시
②or(①&④)	40일 (138건)	서울시 예보 기준
⑤or(③&⑥)	19일 (95건)	기상청 CBS 기준

※ 파란색: 서울시 침수예보 기준, 붉은색: 기상청 극한호우 CBS 발송 기준

더라도 지역별로 전혀 다른 피해를 만든다. 따라서 침수 예·경보 기준은 강우량, 도로수위, 하수관로 수위, CCTV, 침수예측정보, 침수취약시설 주소정보, 과거 침수이력 등을 결합한 복합 기준으로 발전해야 한다. 특히 침수취약지역에는 지역별 임계강우량을 별도로 산정하고, 도로수위계와 하수관로 수위를 활용해 현장위험을 더 빠르게 판단할 필요가 있다. 두 번째 과제는 침수 예·경보 단계를 명확히 정비하는 것이다. 서울시 침수 예·경보는 사전예고, 침수예보, 침수경보의 3단계 체계로 운영하는 것이 적절하다. 사전예고 단계에서는 강우가 침수예보 기준에 근접했을 때 자치구와 유관기관, 동행파트너가 준비태세에 들어가야

한다. 침수예보 단계에서는 현장순찰, 취약가구 확인, 물막이판 설치 확인, 지하공간 통제 준비가 이루어져야 한다. 침수경보 단계에서는 기상청 CBS 기준과 정합성을 확보하되, 자치구 상황판단회의를 통해 현장위험을 확인하고 시민에게 긴급재난문자를 발송해야 한다. 긴급 상황에서는 선발령 후보고 원칙을 허용하여 절차가 대응을 지연시키지 않도록 해야 한다.

세 번째 과제는 영향 기반 예보의 도입이다. 현행 재난문자는 종종 “침수 우려가 있으니 주의하라”는 포괄적 권고에 머무른다. 그러나 시민에게 필요한 것은 추상적 주의가 아니라 구체적 행동이다. 예를 들어 “○○동 반지하 거주자는 즉시 대피소로 이동”, “○○

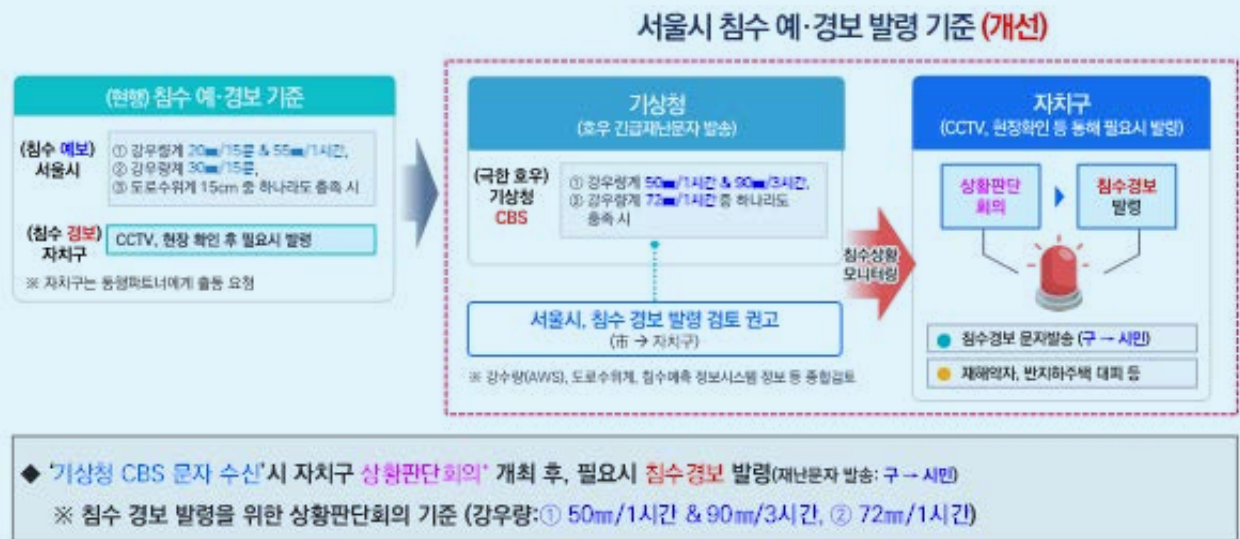
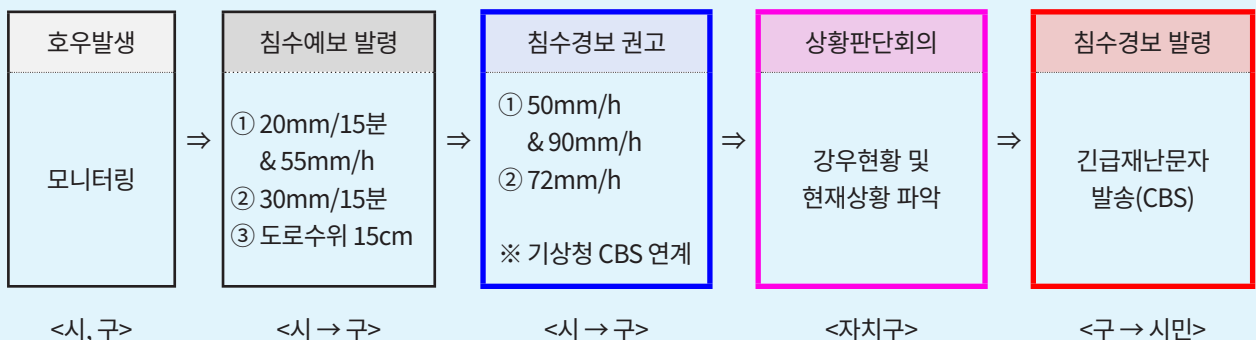


그림 7. 서울시 침수 예·경보 발령기준(안)

그림 8. 서울시 침수 예·경보 발령 절차(안)



지하차도 침수 위험, 차량 진입 금지”, “지하주차장 물 유입 시 차량을 두고 즉시 탈출”과 같은 메시지가 필요하다. 영향 기반 예보는 예상되는 피해, 위험 수준, 대상 지역, 행동요령을 결합해 전달하는 방식이다. 이는 경보 피로도를 줄이고 시민의 행동 가능성을 높이는 데 효과적이다. 네 번째 과제는 재해약자 맞춤형 관리체계의 제도화이다. 반지하주택 거주 고령자, 장애인, 아동 등은 경보를 받아도 스스로 대피하기 어려울 수 있다. 따라서 침수취약시설 주소록과 초정밀 침수 예측 정보를 연동하여 위험지역에 있는 재해약자에게 우선적으로 맞춤형 알람을 보내야 한다. 동시에 동행파트너가 침수예보 단계부터 현장 확인과 대피 지원에 나서도록 해야 한다. 이를 위해 동행파트너의 운영 근거를 조례 또는 매뉴얼에 명확히 규정하고, 출동 기준, 연락체계, 대피소 안내, 활동 기록, 사후평가 체계를 마련할 필요가 있다. 다섯 번째 과제는 표준운영 절차(SOP)의 수립이다. 침수 예·경보제의 성패는 예측 정확도만으로 결정되지 않는다. 경보 이후 기관과 시민이 얼마나 빠르고 일관되게 움직이는지가 더 중

요하다. 따라서 서울시, 자치구, 경찰, 소방, 도로관리 기관, 교통기관, 동행파트너, 시민의 역할을 단계별로 명확히 정리해야 한다. 사전예고 단계에서는 감시와 준비, 예보 단계에서는 현장 확인과 통제 준비, 경보 단계에서는 대피와 구조 중심으로 전환해야 한다. 이러한 절차가 문서에만 머물지 않도록 정기 훈련과 모의 발령, 사후 평가를 제도화해야 한다.

### 5. 결론 및 제언

서울시 침수 예·경보제는 기후위기 시대에 도시 안전망을 강화하기 위한 핵심 정책수단이다. 시설 확충은 반드시 필요하지만, 극한호우의 불확실성이 커지는 상황에서는 구조적 대책만으로 시민의 생명을 완전히 보호하기 어렵다. 침수 예·경보제는 위험을 빨리 알리고, 기관의 대응을 조직하며, 시민의 대피를 유도하는 비구조적 방재대책이다. 특히 반지하주택과 지하공간이 많은 서울에서는 침수 예·경보제가 인명 피해를 줄이는 데 중요한 역할을 할 수 있다. 첫째, 서

## “ 극한 호우 기준 (강우량 ① 50mm/1시간, 90mm/3시간 → 「동시충족」 ② 72mm/1시간) 도달 시 자치구 상황판단회의 후 필요시 침수경보 발령 ”

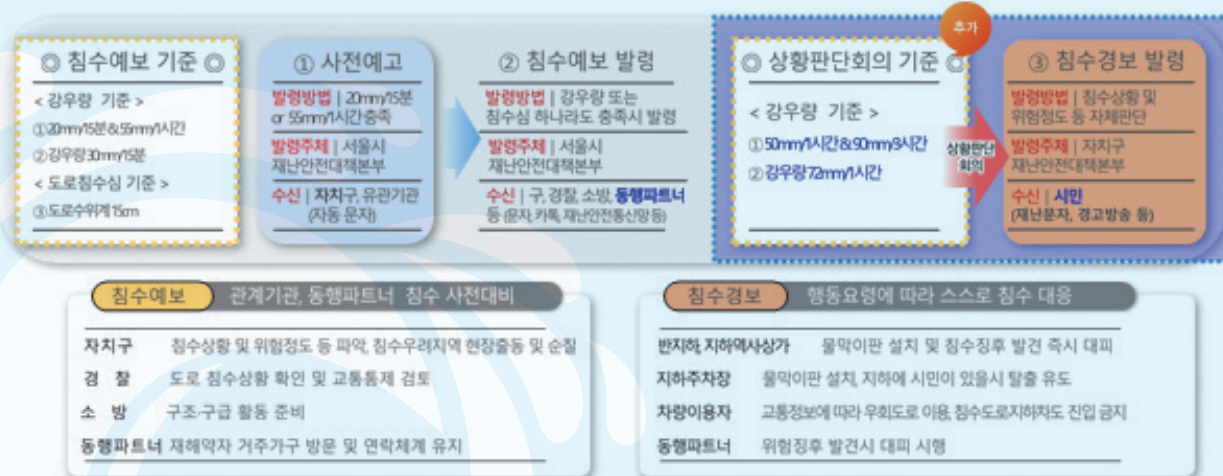


그림 9. 서울시 침수 예·경보 프로세스 및 행동요령

울시는 침수 예·경보 기준을 강우량 중심에서 복합위험 기준으로 전환해야 한다. 강우량, 도로수위, 하수관로 수위, CCTV, 침수예측정보, 침수이력, 지형·배수 특성을 결합해 지역별 위험을 판단해야 한다. 특히 배수분구별 임계강우량과 지하공간 특별경계수위 기준을 마련하면 국지적 침수위험을 더 정밀하게 관리할 수 있다. 둘째, 침수 예·경보 3단계 체계를 제도적으로 명확히 해야 한다. 사전예고는 준비 단계, 침수예보는 현장 대응 개시 단계, 침수경보는 시민 대피와 긴급 통제 단계로 구분되어야 한다. 각 단계별 발령 기준과 행동요령을 정량화하고, 자치구 상황판단회의의 절차와 권한을 명확히 해야 한다. 긴급 상황에서는 선발령 후보고 원칙을 적용하여 행정절차가 골든타임을 잃게 하지 않아야 한다. 셋째, 영향 기반 예보를 도입해야 한다. 시민에게 필요한 것은 강우 수치 자체가 아니라 그 비가 나에게 어떤 피해를 줄 수 있고, 지금 무엇을 해야 하는지에 대한 정보다. 따라서 재난문자는 예상 피해, 위험지역, 대피장소, 금지행동, 취약자 확인 등 행동 중심으로 표준화해야 한다. 특히 재난문자 글자 수 확대를 활용하여 더 구체적이고 실천 가능한 안내문을 제공할 필요가 있다. 넷째, 재해약자 맞춤형 밀착 관리체계를 구축해야 한다. 반지하주택, 지하상가, 지하주차장 등 침수취약시설의 주소정보와 침수예측 정보를 연동하고, 위험 발생 시 해당 시민에게 우선 알림을 제공해야 한다. 동행파트너 제도는 단순한 자원봉사 체계가 아니라 침수예보 단계부터 작동하는 현장 안전망으로 정비해야 한다. 이를 위해 역

할, 책임, 출동 기준, 교육·훈련, 평가체계를 제도화해야 한다. 마지막으로, 다기관 표준운영절차를 마련해야 한다. 도시침수 대응은 서울시 한 기관만으로 해결할 수 없다. 자치구는 현장 판단과 주민 안내를 담당하고, 경찰은 도로와 지하차도 통제를 지원하며, 소방은 구조태세를 갖추고, 도로관리기관은 침수도로를 신속히 차단해야 한다. 시민은 지하공간 물 유입 시 즉시 대피하고, 침수도로와 지하차도에 진입하지 않는 행동규칙을 숙지해야 한다. 이러한 역할 분담이 표준운영절차로 정리되고 반복 훈련될 때 제도의 실행력이 확보된다. 결국 더 빨리 알리고, 더 정확히 판단하며, 더 구체적으로 행동하게 하는 것이 중요하다. 침수 예·경보제는 기상정보 전달체계가 아니라 시민 생명을 지키는 행동체계여야 한다. 도시침수 예·경보는 데이터 기반 기준, 영향 기반 메시지, 재해약자 맞춤형 지원, 동행파트너 현장 대응, 다기관 표준운영절차를 결합하여 지역 맞춤형 예·경보 모델을 구축할 필요가 있다. 이것이 기후위기 시대에 선택해야 할 현실적이고 책임 있는 수해 안전망이다.

## 감사의 글

본 연구의 결과물은 2025년도 서울연구원 정책연구(과제번호: 2025-PR-52) 및 기후에너지환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 기후변화 적응 수재해 관리 기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다(RS-2026-25502323).

참고문헌

- 기상청 기상자료개방포털, <https://data.kma.go.kr/data/grnd/selectAsosRltmList.do?pgmNo=36>
- 국가법령정보센터, 「도시하천유역 침수피해방지대책법」, <https://www.law.go.kr/법령/도시하천유역 침수피해방지대책법>
- 국가법령정보센터, 「도시하천유역 침수피해방지대책법」 시행령, <https://www.law.go.kr/법령/도시하천유역 침수피해방지대책법 시행령>
- 내손안의 서울, '전국 최초 '침수 예·경보제' 도입... 서울시 풍수해 안전대책', <https://mediahub.seoul.go.kr/archives/2008333>
- 대한민국 정책브리핑, 홍수에 취약한 지방하천 '홍수특보지점' 12곳 → 129곳으로 확대, <https://www.korea.kr/news/policyNewsView.do?newsId=148922671>
- 법제처 국가법령정보센터. <<https://www.law.go.kr/>>
- 서울특별시 (2020). 「도림천 맞춤형 행동매뉴얼」
- 서울시 물순환안전 소식, <https://news.seoul.go.kr/env/archives/522983>
- 서울시 열린데이터광장, <https://data.seoul.go.kr/>
- 윤선권, 최현석 (2024) 도시침수방지법 시행에 따른 서울시 제도 정비 방안, 서울연구원
- 이승수, 김수빈, 강태운, 이문환, 노성진, 도시침수방지법 제정에 따른도시침수에.경보 체계 구축 방안, 한국환경연구원, 2024
- 일본 기상청, <https://www.jma.go.jp/jma/kishou/known/bosai/hyomenshisu.html>
- 전자정부 e-Laws. (2024). 「災害対策基本法」 (Basic Act on Disaster Countermeasures). Retrieved July 22, 2024, from <https://elaws.e-gov.go.jp/document?lawid=336AC0000000223>

# 지상 광역 토양수분 관측의 새로운 패러다임: 우주선 중성자 프로브(CRNP) 기술과 KOSMOS 관측 네트워크 소개



**김기영**

한국수자원조사기술원  
증발산·토양수분팀 팀장  
kykim@kihs.re.kr



**이용준**

한국수자원조사기술원  
증발산·토양수분팀 전임연구원  
lyj5779@kihs.re.kr



**심은증**

한국수자원조사기술원  
하천정보실 실장



**정재환**

서울대학교  
박사후연구원  
jhjeong226@snu.ac.kr



**최민하**

성균관대학교  
건설환경공학부 교수  
mhchoi@skku.edu

## 1. 서론

물은 순환한다. 대기에서 내린 강수는 지표를 적시고, 일부는 하천으로 흘러 바다로 향하며, 나머지는 토양 속으로 스며들어 식물의 뿌리를 적시고 지하수

를 함양한다. 이 순환의 한가운데에 토양수분이 있다. 토양수분은 단순히 "흙 속의 물"이 아니다. 강수가 지표에 닿는 순간, 토양수분 상태는 그 물이 유출로 빠져나갈지, 땅속으로 침투할지를 결정짓는 핵심 경계 조건으로 작동한다. 이미 토양이 포화에 가까운 상태

에서 집중 호우가 내리면 침투 여력이 없어 지표유출이 급증하고, 이는 홍수로 이어질 수 있다. 반대로 장기간 건조한 토양에서는 식생이 시들고 지하수 함량이 줄어 가뭄 위험이 심화된다.

이처럼 토양수분은 홍수와 가뭄, 두 극단적 수문 현상의 선행 지표로서 수자원 관리의 출발점이다. 나아가 토양수분은 지표면과 대기 사이의 에너지 교환, 즉 증발산을 매개함으로써 기상 예측과 기후 모델의 정확도에도 직결된다. 탄소 순환의 측면에서도 토양수분은 미생물 활동과 유기물 분해 속도를 조절함으로써 온실가스 배출량과 긴밀하게 맞닿아 있다.

문제는 이처럼 중요한 토양수분을 정확하게, 그리고 넓은 면적에 걸쳐 측정하는 일이 생각보다 훨씬 어렵다는 데 있다. 전통적인 건토중량법(gravimetric method)은 현장에서 토양 시료를 채취한 뒤 건조 전후의 무게 차이로 수분량을 산정하는 기법이다. 이 방법은 측정값이 가장 정확하여 다른 관측 방법을 검증하는 기준으로 쓰인다. 그러나 시료를 채취한 그 지점, 그 시점의 값만을 알 수 있을 뿐이어서 연속 관측이 불가능하고, 매번 인력이 현장에 투입되어야 한다는 한계가 있다.

이러한 제약 때문에 최근 국내에서 주로 쓰이는 방식은 TDR(Time Domain Reflectometry)이나 FDR(Frequency Domain Reflectometry) 센서를 이용한 유전율 기반 관측법(dielectric method)이다. 이 센서들은 토양 유전율을 이용해 실시간으로 토양수분을 연속 측정할 수 있어 활용도가 높지만, 탐침이 삽입된 지점으로부터 반경 수 센티미터 이내의 토양수분만을 측정한다. 이른바 "점(點) 관측"이다. 하나의 유역이 수 제곱킬로미터에 달하는 상황에서, 몇 개의 점 관측값만으로 유역 전체의 토양수분을 대표하기에는 분명한 한계가 있다. 지형의 기복, 토성의 불균질성, 식생 분포의 차이를 고려하면 점 관측의 공간 대표성은 구조적으로 제한될 수밖에 없으며, 이는 관측 지점의 수를 늘리는 것만으로는 해결하기 어려운 문제다.

점 관측과 광역 관측의 간극을 메우기 위한 시도가 오랫동안 이어졌다. 위성 원격탐사는 광역 관측이 가능하지만, 마이크로파 신호가 투과하는 깊이는 지표 수 센티미터에 불과하고, 공간 해상도는 수십 킬로미터 수준에 머문다. 또한 산림이나 복잡 지형에서는 정확도가 떨어지는 한계가 있다. 수문 모델을 통한 추정 은 모델 구조와 파라미터 불확도에 크게 의존한다. 결



그림 1. 한 지역에서의 다양한 토양수분 상태

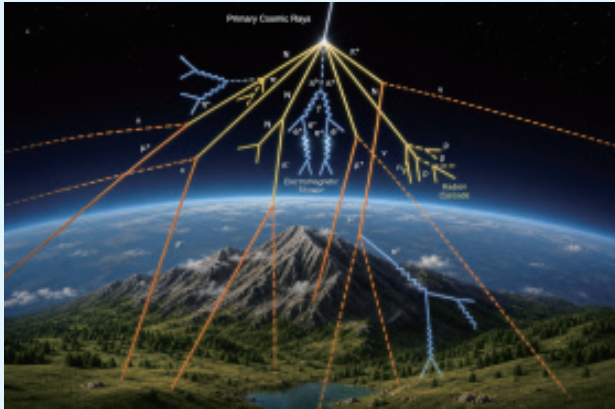


그림 2. 우주선의 대기중 에너지 감쇄

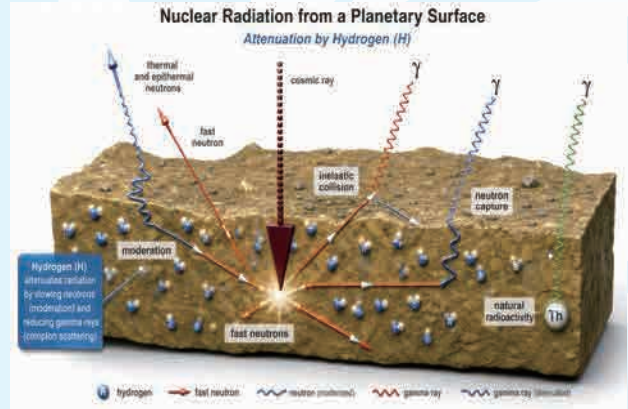


그림 3. 토양 내부에서 에너지 감쇄

국 지상에서 직접 넓은 면적을 대표하는 방식으로 토양수분을 측정하는 기술에 대한 필요성이 지속적으로 제기되어 왔다. 우주선 중성자 프로브(Cosmic-Ray Neutron Probe, CRNP)는 바로 이 간극을 채우기 위해 등장한 기술이다.

없이 통과한다. CRNP는 바로 이 열외중성자의 밀도를 지속적으로 계수(counting)하는 장비다. 검출기는 특수 기체가 채워진 튜브 형태로, 별도의 방사성 동위원소 없이 대기 중에 자연적으로 생성되는 우주선 기원의 중성자만을 감지한다.

## 2. CRNP 기술의 원리 : 우주에서 날아온 에너지로 흙 속 물을 측정한다.

### 2-1. 우주선과 열외중성자의 생성 과정

CRNP의 작동 원리를 이해하려면 먼저 우주선(cosmic-ray)이 무엇인지 살펴볼 필요가 있다. 우주선이란 태양 및 은하계 저편에서 지구로 끊임없이 쏟아지는 고에너지 입자 흐름으로, 주로 양성자와 알파 입자로 구성된다. 이 1차 우주선이 지구 대기권 상층부에 진입하면 대기 중의 질소, 산소 원자핵과 충돌하여 2차 입자의 연쇄 반응을 일으킨다. 이 연쇄 반응 과정에서 다양한 에너지 스펙트럼을 가진 중성자가 생성된다.

이 중 에너지가 비교적 낮은 범위(약 0.5 eV ~ 10 keV)에 해당하는 중성자를 열외중성자(epithermal neutron)라 부른다. 열외중성자는 지표면 근방, 대략 지상 수십 미터 이내의 공기층과 토양 상층부를 끊임

<방사선 안전성 - "중성자는 위험하지 않나요?">

CRNP라는 이름에서 "중성자"라는 단어를 접하면 방사선 피폭에 대한 우려가 생길 수 있다. 결론부터 말하면, CRNP는 별도의 방사성 물질을 사용하지 않는다. 이 장비가 검출하는 중성자는 우주선이 대기와 반응하여 자연적으로 생성되는 것으로, 우리가 일상적으로 노출되는 자연방사선의 일부다. 장비 자체는 중성자를 방출하지 않고 오직 감지만 한다. 따라서, 관측소에서 근무하는 연구자나 인근 주민이 CRNP로 인해 추가적인 방사선에 노출될 위험은 없다.

### 2-2. 수소 원자와 중성자의 상호작용 : 감속 원리

CRNP가 토양수분을 측정할 수 있는 핵심 원리는 중성자와 수소 원자핵(양성자) 사이의 특별한 상호작용에 있다. 중성자는 자신과 질량이 비슷한 입자와 충돌할 때 에너지를 가장 크게 잃는다. 수소 원자핵(양성자)은 중성자와 질량이 거의 동일하기 때문에, 두 입자가 충돌하면 당구공이 정면충돌하듯 에너지 대부분이 전달되며 중성자는 급격히 감속된다. 이를 탄성

산란(elastic scattering)에 의한 중성자 감속이라 한다.

토양수분이 높을수록 수소 원자의 밀도가 증가한다. 수소 밀도가 높아지면 지표 근방을 통과하는 열외중성자가 더 빈번하게 충돌·감속되어 검출기에 도달하는 중성자의 수가 줄어든다. 반대로 토양이 건조할수록 중성자 감속이 적게 일어나 검출 수가 증가한다. 즉, CRNP의 중성자 계수율과 토양수분은 역상관 관계에 있다. 이 단순하면서도 강력한 물리적 원리가 CRNP 기술의 근간이다.

한 가지 중요한 점은, 토양의 수소가 물(H<sub>2</sub>O) 분자로만 존재하지 않는다는 것이다. 토양 유기물, 식물 뿌리, 점토 광물에 결합된 격자수(lattice water) 등도 수소를 포함한다. 따라서 CRNP가 감지하는 신호는 순수한 액체 상태의 토양수분뿐 아니라, 해당 관측 반경 내 모든 수소 원자의 총량을 반영한다는 점을 염두에 두어야 한다.

### 2-3. 토양수분 변환 공식 및 보정 개요

관측된 중성자 계수율을 체적 토양수분(volumetric soil moisture,  $\theta$ )으로 변환하는 데는 경험적 공식이 활용된다. 가장 널리 사용되는 관계식은 다음과 같은 형태로 표현할 수 있다.

$$\theta = \frac{a_0}{N_{corr}/N_0 - a_1} - a_2$$

여기서  $N_0$ 은 보정된 중성자 계수율,  $N_0$ 는 기준 상태(reference state)에서의 계수율,  $a_0, a_1, a_2$ 는 경험적 파라미터다.

CRNP의 중성자 계수율은 토양수분 외에도 여러 환경 요인에 의해 영향을 받는다. 따라서 원시 계수율을 토양수분으로 변환하기 전에 반드시 다음 보정을 적용하는 것이 일반적인 절차이다.

- **입사 우주선 플럭스 보정** : 태양 활동에 따라 지구로 유입되는 1차 우주선의 플럭스가 변하므로, 전 세계에 분포한 중성자 모니터 데이터베이스(neutron monitor database, NMDB) 자료를 이용해 이 변동을 보정한다.
- **기압 보정** : 기압이 높을수록 대기가 중성자를 더 많이 흡수하므로, 계수율을 기준 기압으로 정규화한다.
- **대기 수증기 보정** : 대기 중 수증기 자체도 수소를 포함하므로, 절대습도 변화에 따라 계수율이 변동한다.

이러한 다단계 보정 절차를 거치면 환경 요인이 제거된 계수율  $N_{corr}$ 을 얻을 수 있고, 이렇게 보정된 계수율을 앞의 변환식에 대입하면 토양수분이 산출된다.

이때 토양수분 변환식에서 가장 중요한 변수는 기준 계수율  $N_0$ 이다.  $N_0$ 는 현장 교정(in-situ calibration)을 통해 결정되며, CRNP 운영의 핵심 과정 중 하나이다.

반면 입사 우주선 플럭스·기압·대기 수증기 보정이 관측 지역과 무관하게 공통으로 적용되는 표준 절차인 것과 달리,  $N_0$ 는 관측소마다 달라진다. 중성자가 토양수분뿐 아니라 식생 바이오매스, 낙엽층, 토양 유기물, 점토 격자수 등 관측 반경 내 모든 수소원에 반응하기 때문이다. 문제는 이들 수소원의 종류와 양이 관측소가 놓인 환경에 따라 크게 달라진다는 데 있다. 울창한 산림에서는 수목 바이오매스와 낙엽층의 기여가 두드러지고, 관목지에서는 그 영향이 상대적으로 작으며, 농지에서는 작물 생육 주기에 따라 수소원이 계절적으로 변동한다. 따라서 모든 사이트에 동일한  $N_0$ 를 일률적으로 적용하면, 환경별로 다른 수소원 분포가 토양수분 신호에 섞여 들어가 정확도를 떨어뜨린다.

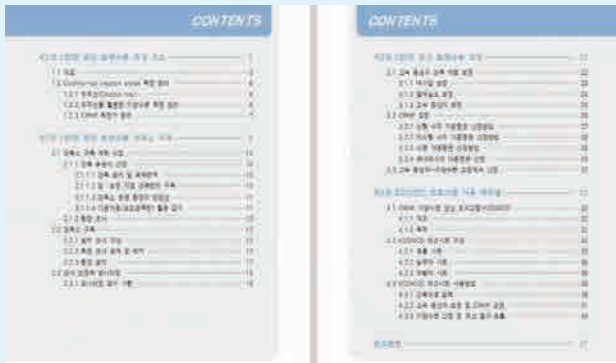


그림 4. 우주선 중성자-토양수분 설치·운영 매뉴얼



그림 5. 기술원 보정 프로그램 예시1



그림 6. 기술원 보정 프로그램 예시2

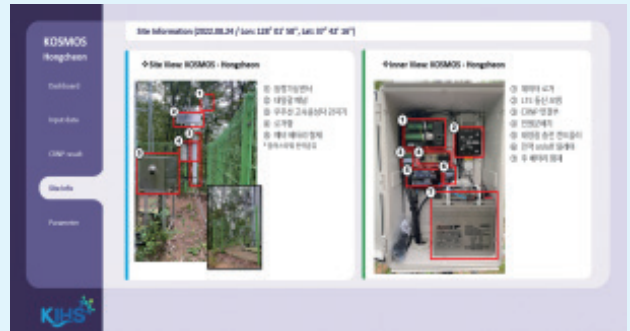


그림 7. 기술원 보정 프로그램 예시3

한국수자원조사기술원은 이러한 한계를 극복하기 위해, 표준 보정에 더해 각 관측소의 환경 특성을 반영한 사이트별 교정(site-specific calibration)을 수행하고 있다. 현장에서 채취한 다지점 토양 시료의 실측 수분량과 CRNP 관측값을 대응시켜 사이트 고유의 교정 상수를 산출하며, 이를 통해 해당 관측소의 비토양 수소원 기여를 정량화한다. 나아가 기술원은 산지(파주·홍천), 관목지(평창), 농지(수원)라는 서로 다른 토지피복 환경에 관측소를 운영하면서, 각 환경에서 교정 상수와 관측 특성이 어떻게 달라지는지를 체계적으로 비교·분석하고 있다. 이는 한반도의 다양한 수문 환경에 적용 가능한 표준 보정 체계를 수립하기 위한 핵심 과정이다.

### 3. CRNP의 관측 특성 : 기존 센서와 무엇이 다른가?

CRNP의 기술적 가치는 원리의 참신함보다 관측의 규모(scale)에서 더욱 두드러진다. 기존 지상 센서와 비교했을 때 CRNP는 세 가지 측면에서 본질적으로 다른 관측 특성을 가진다.

첫째, 공간 대표성. CRNP 한 대가 대표하는 관측 반경은 대기 습도와 고도에 따라 달라지지만, 일반적으로 반경이 약 150~300m 에 달한다. 이는 7~28만 m<sup>2</sup>, 즉 축구장 약 10~40개에 해당하는 면적이다. TDR 센서 한 개가 반경 수 센티미터만을 대표하는 것에 비하면, 면적 기준으로 수백만 배에 달하는 공간 통합 효과를 제공한다. 이 공간 통합 특성 덕분에 CRNP의 관측값은 소규모 공간 불균질성의 영향을 자연스럽게

평균화하여, 유역 수문 모델이나 위성 검증에 필요한 "면적 대표 토양수분"에 근접한 값을 제공한다.

둘째, 관측 심도. CRNP의 관측 심도는 고정되어 있지 않다. 토양이 습할수록 중성자의 이동 경로가 짧아져 관측 심도가 얕아지고(약 15cm), 건조할수록 깊어진다(약 70 cm). 이 동적 관측 심도는 토양 프로파일의 수분 변화에 따라 관측 층위가 자동으로 조정되는 특성을 지니며, 표층은 건조하고 심층에는 수분이 남아 있는 건조기 토양 상태를 포착하는 데 독특한 강점을 발휘한다.

셋째, 시간 해상도. CRNP는 일반적으로 1시간 단위의 연속 자동 관측을 수행한다. 강우 사상 전후의 토양수분 변화, 야간 이슬 및 수증기 응결의 영향, 융설기 수분 급증 등 동적 수문 과정을 실시간에 가깝게 포착할 수 있다.

## 4. 국내 시험 관측소

### 4-1. 사이트 개요

국내 CRNP 기술 도입은 2015년 성균관대학교 최민하 교수팀(지구원격탐사 연구실)이 수원 자연과학캠퍼스 내 식물원 부지에 장비를 설치하고, 시운영을 통해 국내 적용 가능성을 최초로 입증한 데서 시작되었다. 이후 2018년 한국수자원조사기술원이 첨단 조사 기술 개발의 하나로 파주 시험유역에 CRNP를 도입하면서 실제 관측소 환경에서의 본격적인 운영이 시작

되었다. 한국수자원조사기술원은 첨단 수문조사 기술의 표준화를 목표로 파주·홍천·평창·수원 4개 시험유역을 단계적으로 구축하고, 국내 수문 환경과 유역 분석에 최적화된 관측망을 운영해 지속적으로 기술도입을 평가하고 있다.

이 관측망은 미국의 COSMOS(COSmic-ray Soil Moisture Observing System), 영국의 COSMOS-UK 등 국제 네트워크의 운영 체계를 벤치마킹하여 국내 실정에 맞게 발전시킨 것으로, KOSMOS(Korean cOSmic-ray Soil Moisture Observing System)로 명명하였다. KOSMOS는 단순한 장비 도입을 넘어선다. 한반도의 다양한 토지피복 환경에서 CRNP 표준 모니터링 체계를 수립하고, 국가 수문 자료로서의 신뢰성을 확보하기 위한 장기 관측 네트워크를 지향한다. 각 사이트는 토지피복 유형별 보정 체계 수립을 위한 연구 플랫폼으로서, 관측 기술의 국내 정착과 고도화를 단계적으로 추진하고 있다.

각 시험 관측소는 고유한 운영 목표 아래 운영되고 있다. 파주 사이트는 국내 관측소 환경에 CRNP를 최초로 도입하여 기술 적용 가능성을 검증한 실증 거점으로, 현재까지 국내에서 가장 긴 연속 관측 기록을 보유하고 있다. 홍천은 파주에서 축적된 운영 경험을 바탕으로 산지 혼효림 환경에 특화된 표준 보정 절차를 정립하기 위해 구축되었으며, FDR 검증 센서를 12 지점 36개소로 확대 배치하여 광역 관측값의 공간 대표성을 강화하였다. 수원 사이트는 국내 4개 사이트

표 1. 토양수분 측정 방법별 특징

관측 방법	공간 대표 반경	관측 심도	시간 해상도	주요한계
전기적방법 (TDR/FDR)	15~30cm	탐침 설치 위치	분~시간	점 관측, 공간 대표성 제약
CRNP	반경 150-300m	15-70cm	1시간	Biomass 등 기타 수소원 보정 필요
위성	9~36km	수 cm(표층)	2~3일	산림, 복잡지형 정확도 제약

시험유역	운영기간	토지피복 유형	검증 센서(FDR)	운영 목표
파주	2018.07.04.~	산지(혼효림)	9지점 27개소	국내 기술도입 평가
홍천	2022.08.25.~	산지(혼효림)	12지점 36개소	산지 표준 보정 평가
평창	2024.08.27.~	산지 평원(관목지)	12지점 36개소	평지 표준 보정 평가
수원	2024.08.15.~	경작지(밭)	3지점 9개 센서	농지 표준 보정 평가

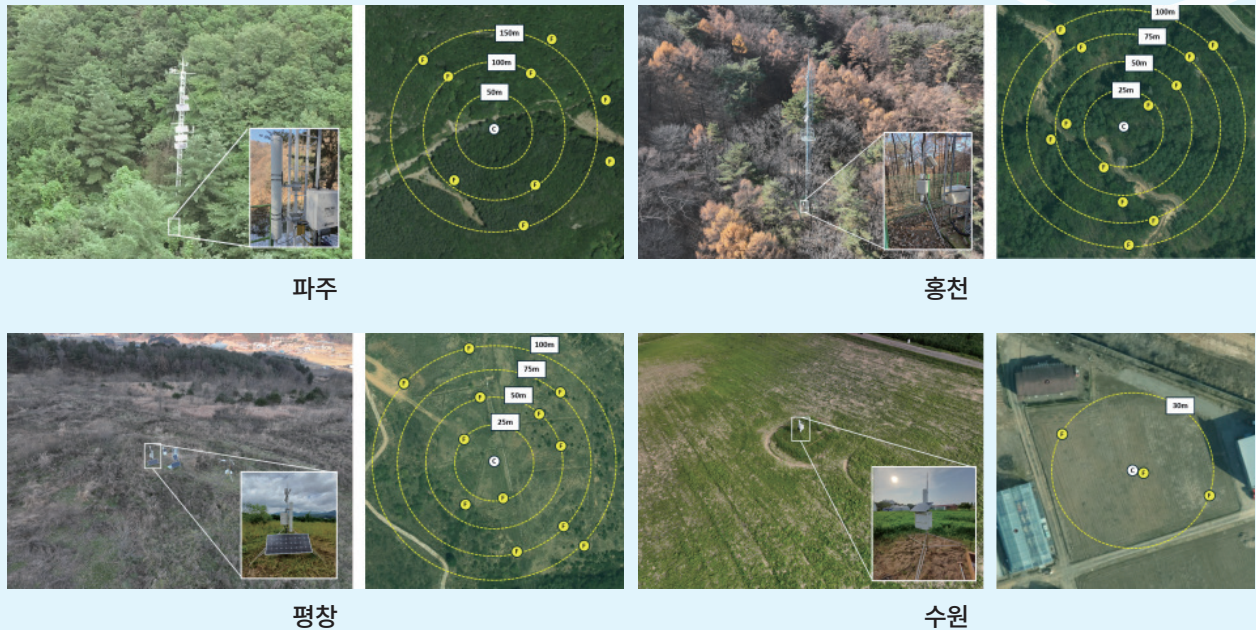


그림 8. 우주선 중성자-토양수분 시험 관측소

중 유일한 농경지 환경으로, 작물 생육 주기에 따라 변화하는 바이오매스 수소원이 CRNP 신호에 미치는 영향을 정량화하고 농지 조건에 적합한 보정 기법을 개발하는 데 초점을 맞추고 있다.

이 중 평창 사이트는 교목층이 발달하지 않은 산지 평원 지형에 위치하며, 관목지가 우세한 식생 환경이라는 점에서 기존 산지 혼효림 사이트인 파주·홍천과 차별화된다. 수목에 의한 수관차단과 바이오매스의 영향이 상대적으로 적은 이 환경은, 평지형 표준 보정 절차를 복잡 지형 조건에 적용하고 그 유효성을 검증하는 데 있어 비교적 통제된 실험 조건을 제공한다. 2024년 8월 운영을 시작한 평창 사이트는 12지점 36

개소의 FDR 센서망을 기반으로, CRNP 광역 관측값과 지점 센서값 간의 공간적 일치성을 체계적으로 분석하며 표준 보정 체계 수립을 위한 자료를 축적하고 있다.

또한 평창 사이트는 교목층의 간섭이 적고 지형적으로 비교적 균질한 관측 환경을 갖추고 있어, CRNP 외에도 다양한 수문·기상 측정장비를 복합적으로 운영하는 슈퍼사이트(super-site)로 기능하고 있다. 이를 통해 위성-지상 검증, 다중 센서 간 상호 비교·보정 등 복합적인 연구 목적을 동시에 수행할 수 있는 거점으로 활용되고 있다.

#### 4-2. 산림 환경에서의 CRNP 적용 특수성

우리나라는 국토의 약 70%가 산지로 이루어져 있으며, 태백산맥을 중심으로 한 복잡한 지형 구조는 강수-유출 응답의 공간적 불균질성을 심화시키는 주요 원인이 된다. 이러한 환경에서 전기적 특성 기반의 지점 관측은 센서가 설치된 극히 제한된 면적만을 대표하기 때문에, 수십 미터 단위로 달라지는 토양 특성과 식생 분포의 차이를 온전히 반영하기 어렵다. 관측 지점의 수를 늘려 공간 대표성을 확보하는 방법도 있으나, 산지 지형의 특성상 센서 설치와 유지관리에 상당한 비용과 인력이 소요된다는 현실적 한계가 있다.

반면 CRNP는 단일 장비로 반경 150~300m에 달하는 광역 토양수분을 연속적으로 관측할 수 있어, 복잡한 산지 지형에서 지점 관측이 가지는 공간 대표성의 한계를 효과적으로 보완한다. 특히 유역 단위 수문 해석에 필요한 "면적 대표 토양수분"을 지상에서 직접 취득할 수 있다는 점은, 위성 관측이나 수문 모델 추정에 의존해 온 기존 방식과 비교하여 뚜렷한 기술적

강점이다. 평창·홍천과 같이 기복이 크고 식생이 복잡한 산지 유역일수록 이 강점은 더욱 두드러진다.

다만 CRNP가 탐지하는 중성자 신호는 토양 내 수분만을 선택적으로 감지하지 않는다. 중성자는 관측 반경 내에 존재하는 모든 수소 원자에 반응하기 때문에, 산지 환경에서는 토양수분 이외에도 수목의 줄기·가지·잎 등의 바이오매스에 함유된 수소원, 낙엽층의 차단 수분, 토양 유기물에 결합된 수소, 겨울철 적설의 수분 등이 신호에 복합적으로 기여한다. 이러한 비토양 수소원의 영향을 정량화하지 않으면, 관측값이 실제 토양수분을 과소 또는 과대 추정하는 오류로 이어질 수 있다. 따라서 CRNP 관측의 정확도를 높이기 위해서는 토양수분 측정 자체와 함께, 바이오매스 수분량의 계절적 변동, 낙엽층 수분 특성, 적설 수분량 등 비토양 수소원에 대한 체계적인 현장 조사와 분석이 병행되어야 한다. 이는 국내 산지 환경에 적합한 표준 보정 체계를 수립하는 데 있어 핵심적인 연구 과제이기도 하다.



그림 9. 평창 슈퍼사이트 공동 운영 시스템

### 4-3 발전 방향 및 기대효과

CRNP가 명실상부한 국가 수문 관측 기술로 자리매김하기 위해서는 기술적·제도적 측면에서 해결해야 할 과제가 남아 있다. 첫째, 수문자료의 국가 공인 체계 수립이다. 현재 CRNP로 생산되는 토양수분 자료는 연구 목적의 실험적 관측 단계에 머물러 있다. 이를 홍수 예경보, 가뭄 판단, 수자원 정책 수립에 공식적으로 활용하기 위해서는 관측·처리·보정 절차에 대한 표준화와 국가 수문 자료로서의 공인 기준 마련이 선행되어야 한다. 이는 기술의 신뢰성을 사회적으로 담보하는 제도적 기반이기도 하다.

둘째, 관측 반경과 심도의 유동성에 대한 문제이다. CRNP의 관측 범위는 대기 습도, 토양수분, 기압 등 환경 조건에 따라 동적으로 변화하는데, 이는 시계열 자료의 공간적 일관성을 저해하고 위성 자료와의 직접 비교를 어렵게 만드는 근본적 한계다. 이를 극복하기 위해 거리별 중성자 감도 가중 함수를 활용한 Footprint 표준화, 기상 자료 실시간 연동을 통한 동적 Footprint 추적·보정, 다중 CRNP 배열을 통한 고정 격자 관측 구현 등의 기술적 접근이 연구되고 있다. 국내 산지 환경에 특화된 Footprint 추정 알고리즘 개발은 향후 CRNP 관측망의 정량적 신뢰도를 한 단계 높이는 핵심 연구 과제가 될 것이다.

이러한 과제들이 해결될 때 CRNP 관측망의 활용

가치는 한층 확대된다. 가장 직접적인 기대효과는 위성 자료 검증이다. SMAP 위성은 전 지구 토양수분을 2~3일 주기로 관측하지만, 그 정확도는 지역적 조건에 따라 크게 달라진다. 특히 산림으로 피복된 복잡 지형에서는 마이크로파 신호가 수관에 의해 차폐되어 정확도가 저하되는 것으로 알려져 있다. CRNP 관측값은 이러한 위성 제품의 한반도 산지 조건에서의 편의를 정량화하고 보정 알고리즘을 개선하는 데 핵심 자료로 활용될 수 있다.

유역 수문 모델 연계 측면에서도 기대효과가 크다. 토양수분은 강우-유출 모델에서 선행 토양수분 조건으로 입력되는데, 이 초기 조건의 정확도가 침투 홍수량 예측 정밀도에 직접 영향을 미친다. CRNP의 연속 관측 자료는 산지 유역 모델의 초기화와 결과 검증에 활용됨으로써, 궁극적으로는 홍수 예경보 시스템의 신뢰도 향상에 기여할 수 있다.

장기적으로는 한반도 기후변화 모니터링의 관점에서 의의가 있다. 수십 년에 걸친 토양수분의 장기 경향은 강수 패턴 변화, 증발산량 변동, 식생 천이 등 기후변화의 복합적 영향을 통합적으로 반영한다. 파주·홍천·평창·수원으로 이어지는 관측망의 단계적 확대와 장기 관측 자료의 축적은, CRNP를 단순한 연구 플랫폼을 넘어 국가 수자원 관리 인프라의 핵심축으로 발전시키는 토대가 될 것이다.

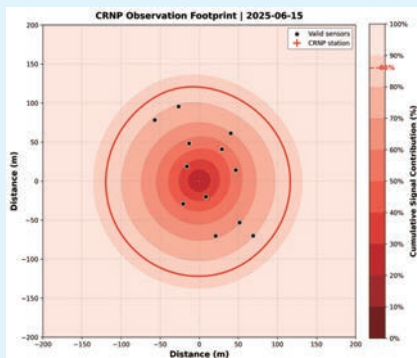


그림 10. 평창 CRNP 관측 반경 모델링

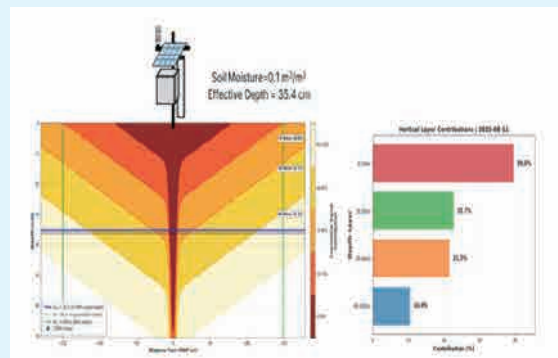


그림 11. 평창 CRNP 관측 심도 모델링

## 5. 결론 : 보이지 않는 물을 조사하는 기술의 미래

흙 속의 물은 눈에 보이지 않는다. 그러나 그 보이지 않는 물이 홍수의 규모를 결정하고, 가뭄의 심도를 좌우하며, 식물의 생사를 가른다. 수문학은 오랫동안 이 보이지 않는 물을 측정하기 위해 분투해 왔고, CRNP는 그 여정에서 등장한 가장 혁신적인 도구 중 하나다.

우주 저편에서 날아온 고에너지 입자가 대기를 통과하며 만들어낸 중성자가 토양 속 수소 원자와 충돌해 흙의 수분 상태를 알려준다. 이 사실은 단순한 기술적 흥미를 넘어, 자연의 스케일에서 물을 관측하는 새로운 패러다임을 제시한다. 반경 수백 미터, 깊이 수십 센티미터에 달하는 광역·심층 관측 능력은 점 관측과 위성 관측 사이의 공백을 채워, 수문 과학의 공간적 이해를 한 단계 끌어올린다.

한국수자원조사기술원 시험 관측소는 이 기술이 한반도의 복잡한 산지 환경에 어떻게 적용되는지를 검증하는 최전선이다. 산림 생체수의 계절적 변동, 겨울

철 적설, 집중 강수 등 한반도 고유의 수문 환경이 만들어내는 도전을 해결해 나가는 과정 자체가, 글로벌 토양수분 측정 기술 발전에 기여하는 과학적 성과가 된다.

앞으로의 과제는 단일 사이트를 넘어 네트워크의 확장이다. 기후대별, 토지피복별로 대표성을 가진 관측 거점들이 유기적으로 연결될 때, CRNP 네트워크는 한반도 토양수분의 시공간 분포를 실시간으로 파악하는 강력한 인프라가 된다. 여기에 위성 자료, 드론 기반 관측, AI 기반 공간 내삽 기법이 융합된다면, 가뭄 조기 경보에서 홍수 예측, 농업용수 관리, 탄소 저장량 추정에 이르기까지 그 활용 범위는 더욱 넓어질 것이다.

한국수자원조사기술원의 CRNP 관측망 운영과 데이터 공개는 단순히 장비를 가동하는 행위에 그치지 않는다. 그것은 눈에 보이지 않는 토양수분을 과학적으로 포착하려는 오랜 노력의 축적이며, 대한민국 수자원 관리의 과학적 기반을 한층 견고히 다져가는 과정이다.

### 참고문헌

- Jeong, J., Lee, S., Cho, S., Kim, K., & Choi, M. (2024). Multi-scale assessment of a cosmic-ray neutron probe observation of soil moisture for surface layer applications in a mountainous forest environment. *Agricultural and Forest Meteorology*, 356, 110155.
- Andreasen, M., Jensen, K. H., Desilets, D., Franz, T. E., Zreda, M., Bogaen, H. R., & Looms, M. C. (2017). Status and perspectives on the cosmic-ray neutron method for soil moisture estimation and other environmental science applications. *Vadose Zone Journal*, 16(8), 1-11.
- Zreda, M., Shuttleworth, W. J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., & Rosolem, R. (2012). COSMOS: The cosmic-ray soil moisture observing system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(11), 4079-4099.
- 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*, 49(2), 133-144.
- 정재환, 조성근, 이슬찬, 김기영, 이용준, 이충대, 이신재, 최민하. (2023). 한국형 코즈믹 레이 토양수분 관측 시스템을 위한 국내 적용성 연구. *대한원격탐사학회지*, 39(2), 233-246.

# 국내 수자원 상시감시를 위한 수동형 마이크로파 원격탐사: 가능성과 한계



이재세

환경에너지공학과  
광주과학기술원 박사후연구원  
jaeselee@gist.ac.kr



김형록

환경에너지공학과  
광주과학기술원 조교수  
hyunglokkim@gist.ac.kr

## 1. 수동형 마이크로파 원격탐사의 개요

수동형 마이크로파 원격탐사는 지표에서 자연적으로 방사되는 마이크로파 영역의 전자기파, 즉 밝기온도(Brightness Temperature; TB)를 인공위성으로부터 관측하는 기술이다. 일반적으로 1-40 GHz 범위의 마이크로파 신호를 활용하며, 복사전달모델에 기초하여 관측된 TB의 물리적 구성 성분을 분리함으로써 지표 환경 변수를 정량화할 수 있다 (Mo et al., 1982). 특히 수자원 관리에서 중요한 요소 중 하나인 지표 토양수분을 추정할 수 있다는 점에서, 수동형 마이크로파 원격탐사는 국내 수자원 상시감시를 위한 중요한 잠재력을 지닌다 (그림 1).

현재 토양수분 산출에 활용될 수 있는 대표적인 수동형 마이크로파 위성 및 센서로, 일본 우주항공연구개발기구(Japan Aerospace Exploration Agency; JAXA)의 GCOM-W 위성 및 향후 IBUKI-GW 위성 에 탑재된 Advanced Microwave Scanning Radiometer-2 및 -3(AMSR2/AMSR3) (Bindlish et al., 2018), 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)의 Soil Moisture Active Passive(SMAP) (Entekhabi et al., 2010), 그리고 유럽우주국(European Space Agency; ESA)의 Soil Moisture and Ocean Salinity(SMOS) (Kerr et al., 2010) 등이 있다. AMSR2/AMSR3는 C-band(6.9 GHz)부터 Ka-band(36.5 GHz)에 이르는 다중 주파수

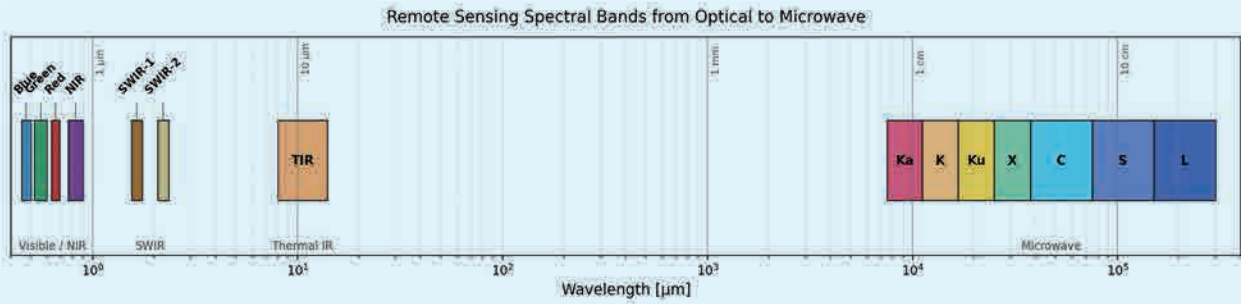


그림 1. 원격탐사에서 주로 활용되는 광학-열적외선-마이크로파 스펙트럼 대역의 파장 범위. 가시광선 영역의 Blue, Green, Red와 근적외선(NIR), 단파적외선(SWIR), 열적외선(TIR)은 마이크로미터 단위의 짧은 파장 영역에 위치하는 반면, 마이크로파 L-, S-, C-, X-, Ku-, K-, Ka-band는 밀리미터에서 센티미터 규모의 긴 파장 영역에 해당한다. x축은 로그 스케일로 표시하였다.

TB를 관측하며, SMAP과 SMOS는 L-band(1.4 GHz)의 장파장 신호를 이용하여 식생이 존재하는 지표 조건에서도 토양수분을 정량화할 수 있도록 설계된 고성능 위성 임무이다 (그림 2).

## 2. 국내 적용 가능성과 주요 한계

그러나 수동형 마이크로파 센서는 지표에서 자연적으로 방사되는 약한 신호를 관측하므로, 충분한 관

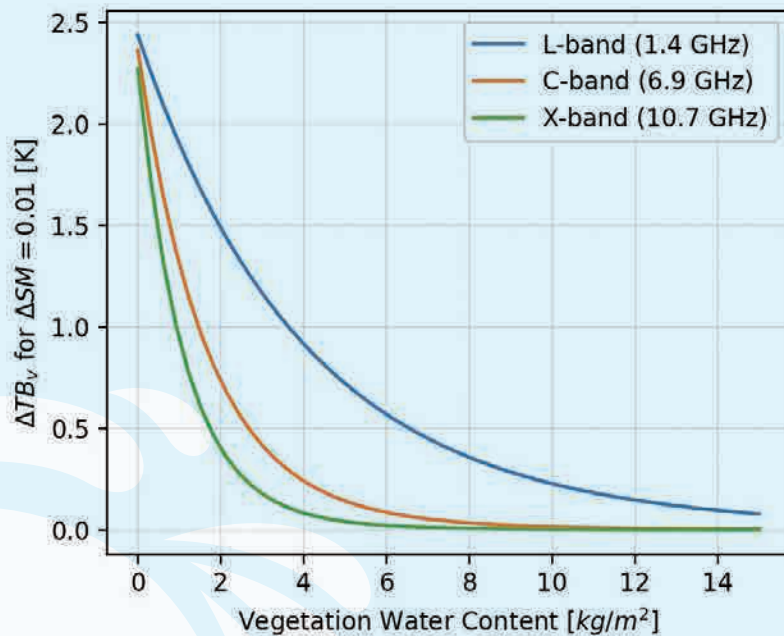


그림 2. 식생수분함량(Vegetation Water Content; WVC)에 따른 토양수분 변화 신호의 마이크로파 밝기온도 민감도 감소. y축은 토양수분이 0.01 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> 변화할 때 수직편파 밝기온도(TBv)가 변화하는 크기  $\Delta TB_v$ 를 나타낸다. 식생수분함량이 증가할수록 식생층에 의한 감쇠가 강해져 토양수분 변화가 관측 TBv에 반영되는 정도가 급격히 감소한다. 특히 C- 및 X-band는 L-band보다 빠르게 민감도가 감소하며, 이는 높은 주파수일수록 식생 수분에 의한 감쇠 영향이 커져 지표 토양수분 신호를 분리하기 어려워짐을 보여준다.

측 민감도를 확보하기 위해 넓은 면적의 신호를 통합해 수신해야 한다. 일반적으로 SMAP과 SMOS의 토양수분 산출물은 약 40 km 수준의 공간해상도를 가지며, 이는 한반도와 같이 지형, 토지피복, 수문 조건이 공간적으로 복잡한 지역에 적용할 때 토양수분의 세밀한 공간분포를 정량화하는 데 한계로 작용한다 (그림 3).

국내 지역에서 수동형 마이크로파 관측을 활용할

때 또 다른 주요 한계는 Radio Frequency Interference(RFI)이다. RFI는 인공적인 마이크로파 방사 (e.g., 지상레이더, 통신설비 등)가 위성 센서에 함께 기록되는 현상으로, 자연 지표에서 발생하기 어려운 수준의 비정상적으로 높은 TB를 유발하여, 자연적인 TB 범위에서 작동하도록 설계된 물리 기반 토양수분 산출 알고리즘의 적용을 어렵게 만든다. 특히 L-band

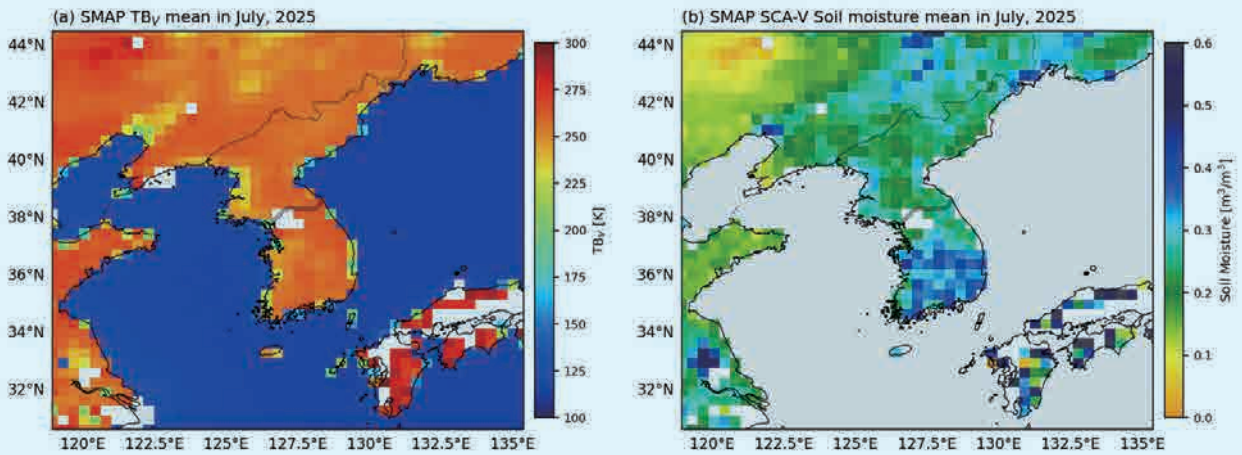


그림 3. 2020년 7월 1-7일 평균 SMAP 관측 결과. (a) TBv는 한반도 주변 해양과 육지의 방사 특성 차이를 뚜렷하게 보여준다. (b) 동일 기간의 SMAP 토양수분 산출물은 한반도 및 주변 지역의 지표 수분 분포를 나타내며, 공간적으로 불연속적인 패턴은 수동형 마이크로파 관측의 저해상도 특성과 해안·수체 영향, 품질관리 마스킹 등의 영향을 함께 반영한다. 색상은 각각 밝기온도 [K]와 체적토양수분 [ $m^3/m^3$ ]을 의미한다.

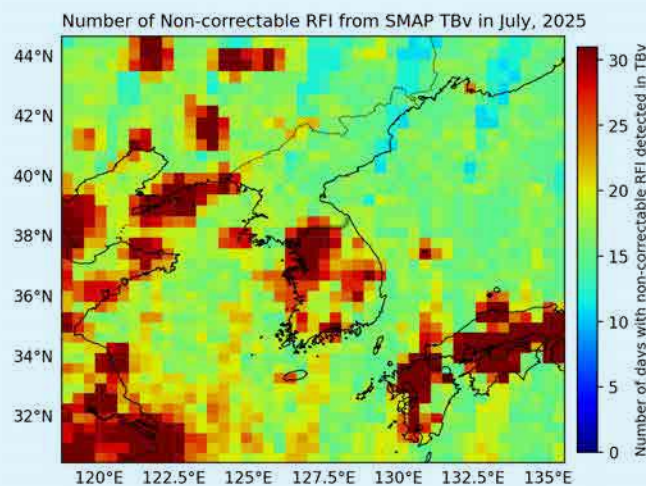


그림 4. 2020년 7월 동안 SMAP TBv 품질 플래그에서 탐지된 RFI 발생 빈도. 색상은 31일 중 RFI가 탐지된 일수를 의미하며, 값이 클수록 해당 기간 동안 RFI 오염이 반복적으로 발생했음을 나타낸다. 한반도 및 주변 지역에서 공간적으로 불균질한 RFI 탐지 패턴이 나타나며, 이는 국내 지역의 L-band 수동형 마이크로파 관측 활용 시 RFI 탐지 및 복원 과정이 중요함을 보여준다.

와 같이 저해상도 TB를 활용하는 경우 국내 일부 지역에서 관측 불확실성이 증가할 수 있으므로, RFI를 효과적으로 탐지·제거하거나 오염된 값을 복원하는 추가적인 방법론이 고려될 필요성이 있다 (그림 4).

### 3. 국내 토양수분 자료의 제약과 물리 기반 관측의 필요성

현재까지 국내 토양수분 탐지 연구는 주로 인공지능 기반의 수동형 마이크로파 토양수분 자료 고해상도화, 또는 합성개구레이다(Synthetic Aperture Radar; SAR) 관측을 이용한 토양수분 산출에 초점을 맞추어 왔다. 그러나 이러한 접근법에도 한계가 존재한다. 인공지능 기반 고해상도화는 실제 토양수분의 시간 변화 신호보다는 고해상도 인공지능 입력자료 (e.g., Normalized Difference Vegetation Index; NDVI, Land Surface Temperature; LST) 등 대리 변수의 시-공간적 변화에 의존하는 경우가 많아, 실제 토양수분 변화를 과소 또는 과대 추정할 가능성이 있다. 또한 광학·열적외선 기반 보조 자료는 구름의 영향을 크게 받을 수 있어 연속적인 토양수분을 관측함에 제약이 있다. SAR 기반 토양수분 산출의 경우 높은 공간해상도를 제공한다는 장점이 있으나, 지형, 표면 거칠기, 식생 구조의 영향이 강하게 섞이기 때문에 토양수분 신호만을 안정적으로 분리하는 데 어려움이 있다.

이에 비해 수동형 마이크로파 관측은, 토양수분 변화에 대한 물리적 해석이 비교적 명료하다는 장점이 있다. 또한 넓은 지역을 반복적으로 관측할 수 있어 장기간의 토양수분 변화를 안정적으로 추적하고, 기상 조건, 가뭄, 수문 환경 변화에 따른 지표 수분 상태를 모니터링하는 데 유용하다. 따라서 국내 수자원 감시 체계에서 수동형 마이크로파 원격탐사는 SAR 관측을 단순히 대체하기보다는 상호 보완적인 관측 수

단으로 활용될 수 있다. 예를 들어, 수동형 마이크로파 관측으로부터 물리적으로 일관된 토양수분 정보를 먼저 산출하고, 이를 SAR 관측의 높은 공간해상도와 결합하여 고해상도 토양수분 자료를 생산하는 접근이 가능하다 (Das et al., 2018). 이러한 방식은 NDVI, LST 등 대리 변수에 의존한 통계적 고해상도화 방법보다 토양수분 신호에 대한 물리적 일관성을 높일 수 있다는 장점이 있다.

그럼에도 불구하고, 수동형 마이크로파 관측 기반 토양수분 산출 알고리즘의 정확도를 확보하기 위해서는 복사전달모델에 포함된 물리 변수의 정밀한 모수화가 필수적이다. 위성관측 복사계의 제한적인 정보량 (수직 및 수평 편파 TB)으로 전체 모수의 최적화가 어렵기 때문에, 다양한 환경 조건에서 현장 토양수분 센서와 지상 복사계 및 다양한 보조관측을 연계한 지상실험을 수행하고, 국내 환경 특성에 적합한 복사전달모델의 선택과 모수의 최적화가 필요하다. 특히 산림 밀도가 높은 국내 지표 조건을 고려할 때, 단일 산란 효과를 가정하는 기존의 0차 복사전달모델만으로는 식생층 내 복잡한 산란 과정을 충분히 설명하는 데 한계가 있을 수 있다 (Kurum, 2013; Schwank et al., 2018). 따라서 향후에는 다중 산란 효과를 고려할 수 있는 고도화된 복사전달모델을 도입하고, 이에 기반한 모수화 체계를 개선할 필요가 있다.

### 4. 차세대 관측 기술과 미래 활용 전망

향후 발사가 계획되었거나 개발 중인 수동형 마이크로파 원격탐사 임무들은 이러한 한계를 완화하기 위한 새로운 관측 전략을 포함하고 있다. 예를 들어 ESA의 SMOS high-resolution(SMOS-HR) (Rodriguez-Fernandez et al., 2020) 또는 Copernicus Imaging Microwave Radiometer(CIMR) (Kilic et al.,

2018), 등은 다수의 센서를 탑재하여 보다 고해상도의 L-band TB 관측을 가능하게 하거나, L-band TB를 포함한 고주파 TB의 동시 관측 정보를 결합하여 공간 해상도를 향상시키고 복사전달모델의 역산에 필요한 정보량을 향상시키는 방향으로 개발되고 있다.

수동형 마이크로파 관측으로부터 얻을 수 있는 중요한 변수 중 하나인 식생 광학두께(Vegetation Optical Depth; VOD)는 식생수분함량, 식생 높이, 바이오매스 등과 관련된 지표로 해석될 수 있다 (그림 5). 따

라서 VOD를 함께 분석하면 토양수분뿐만 아니라 산림 수분 상태, 식생 구조 변화, 산림 바이오매스 변화 등 국내 산림자원 감시에도 활용될 가능성이 크다. 최근 여러 연구에서도 VOD를 활용한 생태·수문·탄소순환 응용 가능성이 활발히 논의되고 있으며 (Konings et al., 2021), 이는 수동형 마이크로파 원격탐사가 단순한 토양수분 관측을 넘어 국내 수자원 및 산림자원 통합 감시 기술로 확장될 수 있음을 시사한다.

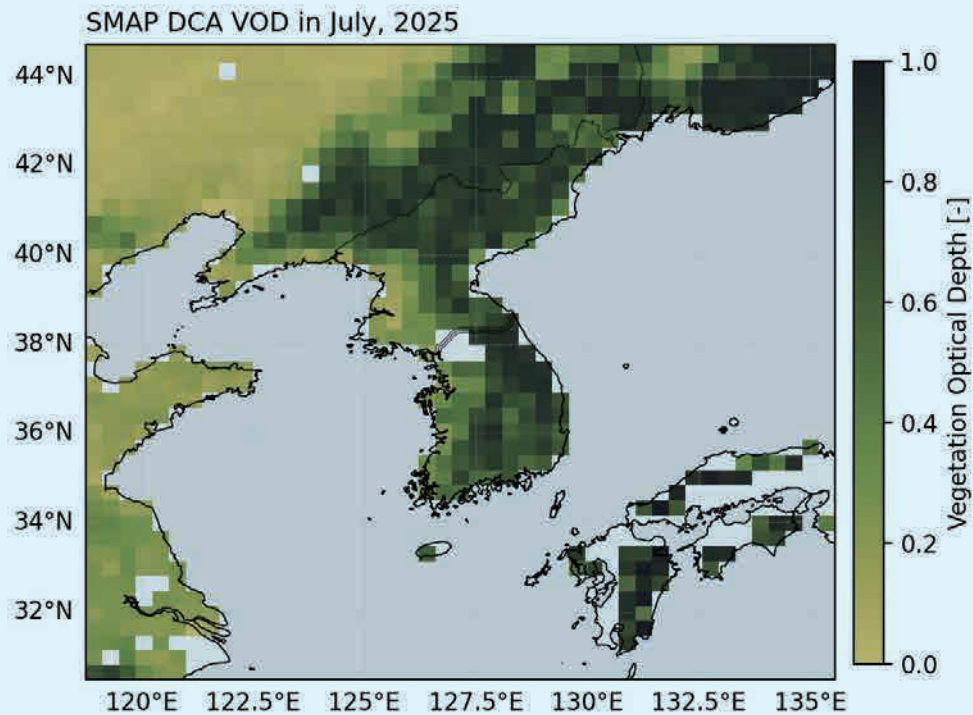


그림 5. 2020년 7월 1-7일 평균 SMAP DCA 식생광학두께(Vegetation Optical Depth; VOD) 분포. 색상은 L-band 수동형 마이크로파 관측에서 산출된 식생에 의한 신호 감쇠 정도를 나타내며, 값이 클수록 식생층의 영향이 강함을 의미한다. 한반도 북부 및 산림 지역에서 상대적으로 높은 VOD가 나타난다.

참고문헌

- Bindlish, R., Cosh, M.H., Jackson, T.J., Koike, T., Fujii, H., Chan, S.K., Asanuma, J., Berg, A., Bosch, D.D., Caldwell, T., Collins, C.H., McNairn, H., Martinez-Fernandez, J., Prueger, J., Rowlandson, T., Seyfried, M., Starks, P., Thibeault, M., Van Der Velde, R., Walker, J.P., Coopersmith, E.J., 2018. GCOM-W AMSR2 Soil Moisture Product Validation Using Core Validation Sites. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 11, 209–219. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2017.2754293>
- Das, N.N., Entekhabi, D., Dunbar, R.S., Colliander, A., Chen, F., Crow, W., Jackson, T.J., Berg, A., Bosch, D.D., Caldwell, T., Cosh, M.H., Collins, C.H., Lopez-Baeza, E., Moghaddam, M., Rowlandson, T., Starks, P.J., Thibeault, M., Walker, J.P., Wu, X., O'Neill, P.E., Yueh, S., Njoku, E.G., 2018. The SMAP mission combined active-passive soil moisture product at 9 km and 3 km spatial resolutions. *Remote Sens. Environ.* 211, 204–217. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2018.04.011>
- Entekhabi, D., Njoku, E.G., O'Neill, P.E., Kellogg, K.H., Crow, W.T., Edelstein, W.N., Entin, J.K., Goodman, S.D., Jackson, T.J., Johnson, J., Kimball, J., Piepmeier, J.R., Koster, R.D., Martin, N., McDonald, K.C., Moghaddam, M., Moran, S., Reichle, R., Shi, J.C., Spencer, M.W., Thurman, S.W., Tsang, L., Van Zyl, J., 2010. The Soil Moisture Active Passive (SMAP) Mission. *Proc. IEEE* 98, 704–716. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043918>
- Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Wigneron, J.-P., Delwart, S., Cabot, F., Boutin, J., Escorihuela, M.-J., Font, J., Reul, N., Gruhier, C., Juglea, S.E., Drinkwater, M.R., Hahne, A., Martín-Neira, M., Mecklenburg, S., 2010. The SMOS Mission: New Tool for Monitoring Key Elements of the Global Water Cycle. *Proc. IEEE* 98, 666–687. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2010.2043032>
- Kilic, L., Prigent, C., Aires, F., Boutin, J., Heygster, G., Tonboe, R.T., Roquet, H., Jimenez, C., Donlon, C., 2018. Expected Performances of the Copernicus Imaging Microwave Radiometer (CIMR) for an All-Weather and High Spatial Resolution Estimation of Ocean and Sea Ice Parameters. *J. Geophys. Res. Oceans* 123, 7564–7580. <https://doi.org/10.1029/2018JC014408>
- Konings, A.G., Saatchi, S.S., Frankenberg, C., Keller, M., Leshyk, V., Anderegg, W.R.L., Humphrey, V., Matheny, A.M., Trugman, A., Sack, L., Agee, E., Barnes, M.L., Binks, O., Cawse-Nicholson, K., Christoffersen, B.O., Entekhabi, D., Gentine, P., Holtzman, N.M., Katul, G.G., Liu, Y., Longo, M., Martinez-Vilalta, J., McDowell, N., Meir, P., Mencuccini, M., Mrad, A., Novick, K.A., Oliveira, R.S., Siqueira, P., Steele-Dunne, S.C., Thompson, D.R., Wang, Y., Wehr, R., Wood, J.D., Xu, X., Zuidema, P.A., 2021. Detecting forest response to droughts with global observations of vegetation water content. *Glob. Change Biol.* 27, 6005–6024. <https://doi.org/10.1111/gcb.15872>
- Kurum, M., 2013. Quantifying scattering albedo in microwave emission of vegetated terrain. *Remote Sens. Environ.* 129, 66–74. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2012.10.021>
- Mo, T., Choudhury, B.J., Schmugge, T.J., Wang, J.R., Jackson, T.J., 1982. A model for microwave emission from vegetation-covered fields. *J. Geophys. Res. Oceans* 87, 11229–11237. <https://doi.org/10.1029/JC087iC13p11229>

- 
- Rodriguez-Fernandez, N.J., Anterrieu, E., Cabot, F., Boutin, J., Picard, G., Pellarin, T., Merlin, O., Vialard, J., Vivier, F., Costeraste, J., Palacin, B., Rodriguez-Suquet, R., Amiot, T., Khaazal, A., Rouge, B., Morel, J.M., Colom, M., Decoopman, T., Jeannin, N., Caujolle, R., Escorihuela, M.J., Bitar, A.A., Richaume, P., Mialon, A., Suere, C., Kerr, Y.H., 2020. A New L-Band Passive Radiometer For Earth Observation: SMOS-High Resolution (SMOS-HR), in: IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Presented at the IGARSS 2020 - 2020 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, IEEE, Waikoloa, HI, USA, pp. 5978-5981. <https://doi.org/10.1109/IGARSS39084.2020.9324685>
- Schwank, M., Naderpour, R., Mätzler, C., 2018. "Tau-Omega"- and Two-Stream Emission Models Used for Passive L-Band Retrievals: Application to Close-Range Measurements over a Forest. *Remote Sens.* 10, 1868. <https://doi.org/10.3390/rs10121868>
-

# NASA SMAP Science Team Meeting 참가기



**이재세**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 박사후연구원  
jaeselee@gist.ac.kr



**최의영**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 박사과정  
eychoi36@gm.gist.ac.kr



**박건희**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 석사과정  
kunheepark@gm.gist.ac.kr



**정재균**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 석박통합과정  
jaegyunjeong@gm.gist.ac.kr



**오유상**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 석박통합과정  
yusang\_oh@gm.gist.ac.kr



**김남훈**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 석사과정  
namhunkim@gm.gist.ac.kr



**김형록**

광주과학기술원  
환경에너지공학과 조교수  
hyunglokkim@gist.ac.kr

## 1. 참가 배경

기후변화로 인한 홍수와 가뭄, 농업용수 부족, 산불 위험은 더 이상 특정 지역의 예외적 현상이 아니라 전 지구적 물관리의 일상적 과제가 되고 있다. 이러한 변화 속에서 토양수분은 대기와 지표, 식생과 지하수, 농

업과 재난관리를 연결하는 핵심 변수로 주목받고 있다. 지표면 아래 저장된 수분 상태는 강우 이후 유출 반응을 결정하고, 작물 생육과 관개 수요를 좌우하며, 가뭄과 홍수의 조기 감시에도 중요한 정보를 제공한다.

그러나 토양수분은 공간적으로 매우 이질적이고 시간에 따라 빠르게 변하기 때문에, 제한된 지상 관측만

으로 넓은 유역과 대륙 규모의 변화를 파악하기에는 한계가 있다. 미국 항공우주국(National Aeronautics and Space Administration; NASA)의 SMAP(Soil Moisture Active Passive) 위성은 이러한 한계를 보완하기 위해 2015년 발사된 대표적인 토양수분 관측 임무이다. SMAP은 전 지구 표면 토양수분과 동결·융해 상태를 주기적으로 관측하며, 수문, 기상 예측, 가뭄 연구 등 다양한 분야에서 활용되어 왔다.

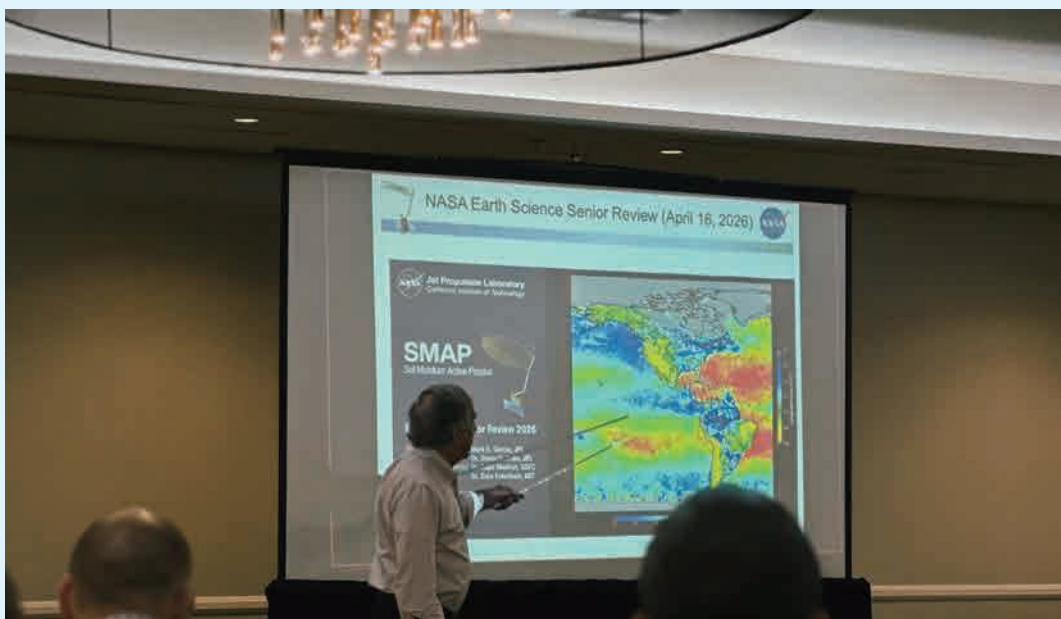
발사 이후 10년이 지난 현재에도 SMAP 자료의 이용은 꾸준히 확대되고 있다. NASA와 국제 연구 커뮤니티는 자료 정확도 향상, 알고리즘 개선, 차세대 위성 임무와의 연계 가능성을 지속적으로 모색하고 있으며, 이러한 논의의 장 중 하나가 연구 성과를 공유하고 향후 방향을 논의하는 SMAP Science Team Meeting이다.

이번 NASA SMAP Science Team Meeting은 캘리포니아 아카디아에서 사흘간 개최되었다. SMAP Science Team과 국제 협력 연구자들이 참석한 가운데 위성 시스템 현황, 수문·기상 응용, 현장 검보정

관측망, 고해상도 토양수분 산출 알고리즘 등 폭넓은 주제가 다루어졌다. 이번 회의에는 광주과학기술원(Gwangju Institute of Science and Technology; GIST) 김형록 교수 연구팀이 참석하여 SMAP 및 NISAR 기반 토양수분 연구가 국제 현장에서 어떻게 논의되고 확장되는지를 가까이에서 접할 수 있었다.

## 2. 1일차: SMAP 임무 현황과 응용 연구

첫날 회의는 SMAP 과학자 모임을 이끄는 Massachusetts Institute of Technology의 다라 엔텍하비와 NASA Jet Propulsion Lab의 사이먼 유에의 현황 보고로 시작되었다. 위성 시스템 상태, 알고리즘 개발 우선순위, 데이터 처리·배포 환경이 차례로 소개되었으며, 사용자 수와 다운로드 건수가 매년 증가하고 있다는 통계는 발사 10년을 넘긴 임무에 대한 연구 커뮤니티의 수요가 여전히 견고함을 보여주었다. 올해 Proceedings of the IEEE 특집 논문 출판과 NASA Senior Review 제안서 제출을 앞둔 만큼, 이날의 보



SMAP 토양수분 및 해양표층염분 자료를 설명하는 다라 엔텍하비

고는 임무 연장의 과학적 타당성을 정리하는 자리이기도 했다.

이어진 과학 세션에서는 SMAP 토양수분 자료가 본래의 관측 목적을 넘어 다양한 분야로 확장되고 있음을 확인할 수 있었다. 물·대기 순환, 동결·해빙 과정을 포함한 대기-탄소 순환, 토양수분과 대류성 강수의 관계를 다룬 기상 예측 연구가 차례로 발표되었다. 태풍 예측에서 육지의 토양수분 분석이 영향을 줄 수 있다는 내용은 수문학과 기상학의 긴밀한 연결성을 보여주는 사례였다.

오후 세션에서는 식생과 생태수문학 연구가 이어졌다. 토양수분의 저장 특성을 분석하여 식물의 물 이용 전략을 해석하려는 연구들은 위성 관측이 생태학 이론과 연결되는 방식을 제시했다. 마지막 세션은 응용 연구와 차세대 위성으로 이어졌다. SMAP과 NASA-ISRO 공동 위성 NISAR를 결합해 현재 9km 수준의 토양수분 해상도를 3km까지 개선하려는 준비가 소개되었고, 이는 SMAP이 기존 임무에 머무르지 않고 다음 세대 관측 체계와 연결되고 있음을 시사했다.

공식 세션이 끝난 뒤 이어진 저녁 식사에서는 발표장에서 미처 나누지 못한 이야기들이 오갔다. 다양한 기관의 연구자들과 교류하며 각국의 연구 현장과 자료 활용 경험을 들을 수 있었다.

### 3. 2일차: 차세대 위성 미션과 검보정

2일차 세션은 국제 파트너십 및 미션, 수문학 및 수문 과정, 알고리즘 및 과학 산출물이라는 세 가지 주제를 중심으로 진행되었다. 현재 운용 중인 위성의 한계를 극복하기 위한 차세대 미션, 토양수분 자료를 활용한 전 지구 수문 현상 규명, 물리 모델과 인공지능을 결합한 알고리즘 개발까지 다양한 연구가 소개되었다. 발표 전반에서는 우주 기반 관측 기술이 고도

화될수록 이를 실제 데이터로 검증하는 현장 검보정(Calibration/Validation, Cal/Val) 관측망의 역할이 커진다는 점이 반복적으로 확인되었다.

첫 번째 세션에서는 L-band 관측의 연속성을 확보하고 공간 해상도를 높이기 위한 국제적 노력이 다루어졌다. GLOWS는 차세대 토양수분 관측을 위한 새로운 위성 임무 개념으로 소개되었다. 발표에서는 메타물질 렌즈 기반 안테나 기술을 활용하여 기존 수동형 마이크로파 관측의 공간해상도 한계를 개선하고, 보다 고해상도의 토양수분 정보를 제공하는 방향이 제안되었다. 유럽우주국 주도의 CIMR 미션은 다중 주파수를 활용해 전 지구 토양수분 및 식생 광학두께 산출물을 제공할 예정이며, HydroGNSS 미션은 위성항법장치 반사 신호를 이용해 토양수분과 동결·융해 상태를 저비용으로 관측하는 방향을 제시했다.

고해상도 L-band SAR 위성인 NISAR와 함께, 200m 해상도 토양수분 산출물을 검증하기 위해 호주 Yanco 지역에서 기획된 대규모 검보정 캠페인 Hi-MoVeS도 소개되었다. 이 캠페인은 위성 통과 시간에 맞추어 항공기 탑재 복사계 비행을 수행하고, 초원과 농경지 등 다양한 지표에서 조밀한 지상 토양수분 샘플링을 병행하는 방식으로 설계되었다. 이는 고해상도 위성 자료를 신뢰성 있게 활용하기 위해 지상 관측도 픽셀 내부의 공간적 이질성을 파악할 수 있을 만큼 정교해져야 함을 보여준다.

NASA Goddard Space Flight Center의 리자트 빈 들리시는 올해 말 현업 적용을 목표로 하는 NISAR baseline 토양수분 산출 알고리즘의 초기 평가 결과를 발표하였다. NISAR 토양수분 산출물은 11년 이상 축적된 검증 결과를 보유한 SMAP 토양수분 자료와 비교되었으며, 두 자료 간의 높은 공간적 일관성과 유사한 분포 특성을 통해 NISAR 토양수분 산출 결과의 높은 신뢰도를 확인할 수 있음을 보여주었다.

수문학 세션에서는 SMAP 자료가 기후변화와 극한 기상 조건에서의 수문 현상 이해에 어떻게 활용되는지 논의되었다. SMAP 표면 토양수분 자료와 XG-Boost 알고리즘을 결합하여 전 세계 얇은 지하수의 깊이와 함양량을 추정하는 연구는 표층 자료로 심층 수문 현상을 해석할 수 있는 가능성을 보여주었다. 또한 대규모 강우 시 발생하는 하천 홍수 분석에서는 강우 이전 뿌리층 토양수분의 상태와 강우의 공간적 분포가 홍수 침투량을 결정하는 주요 요인이 제시되었다. 이는 큰 홍수가 단순히 많은 강우만으로 설명되지 않으며, 유역의 사전 상태가 홍수 반응을 좌우할 수 있음을 뒷받침한다.

산불 감시와 연결되는 살아있는 식생 수분 함량(LFMC, Live Fuel Moisture Content) 산출 연구도 소개되었다. 이 연구에서는 미국 산림청의 현장 수분 데이터베이스를 활용하여 위성 알고리즘의 정확도를 평가했는데, 균일한 식생과 충분한 관측 쌍을 갖춘 고품질 사이트에서는 위성 산출물과 지상 자료 사이의 상관성이 유의미하게 나타난 반면, 저품질 사이트에서는 상관성이 크게 낮아졌다. 이는 신뢰도 높은 지상 검보정 관측망이 위성 산출물의 최종 품질 평가와 직결됨을 보여주는 사례였다.

마지막 알고리즘 세션에서는 물리적 전자기파 모델링과 딥러닝을 통한 데이터 품질 향상 방안이 소개되었다. U-Net 딥러닝 구조를 활용해 육지와 해양에 광범위하게 존재하는 전파간섭(Radio Frequency Interference, RFI) 신호를 정교하게 탐지하고, 관측 데이터를 복원하는 기술이 큰 관심을 받았다. 또한 산림이나 옥수수밭과 같은 복잡한 식생 구조에서 전자기파 산란을 3차원 맥스웰 방정식으로 빠르게 시뮬레이션하는 기법도 제시되었다.

이러한 고도화된 물리 모델과 인공지능 알고리즘 역시 현장 자료를 통한 검증 없이는 실효성을 입증하

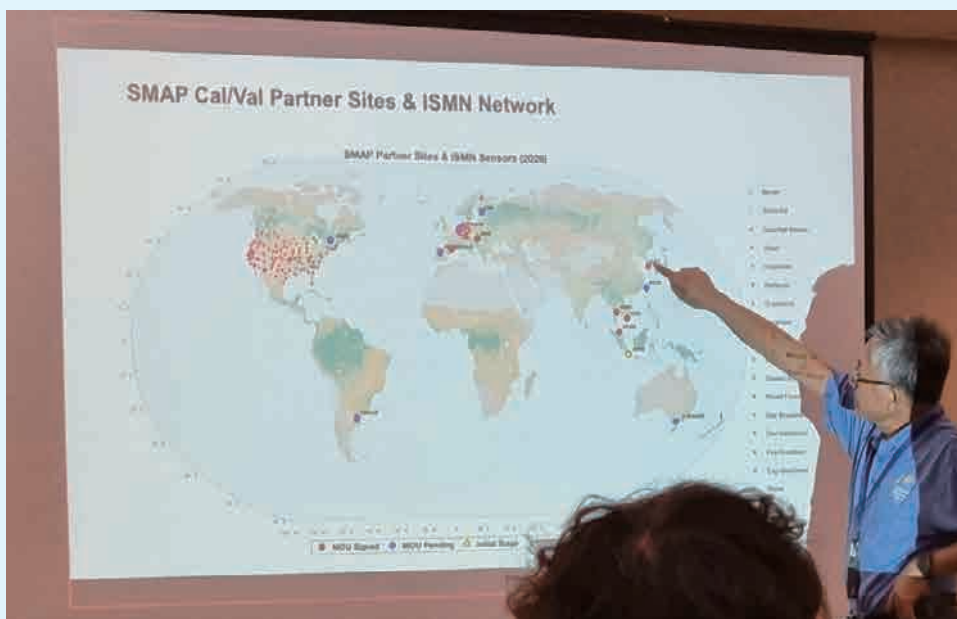
기 어렵다. 산림 산란 모델의 검증에는 하버드 연구팀의 3차원 라이더 스캔 자료와 GNSS 수신기 탑재 로봇을 동원한 실측 캠페인이 활용되었고, 식생 내부 수분의 일주기 변화를 포착하려는 연구에서는 식물 수액 흐름 실측과 지상 타워 기반 복사계 관측이 결합되었다. 2일차 세션은 차세대 위성 시대에 관측 해상도와 알고리즘이 정교해질수록 현장 검보정 네트워크의 역할도 함께 커진다는 점을 보여주었다.

#### 4. 3일차: 위성 토양수분의 응용과 국제 검보정 네트워크

3일차 회의에서는 SMAP 자료의 실제 활용 사례와 함께 위성 토양수분 자료를 신뢰성 있게 사용하기 위한 검보정 연구가 중점적으로 소개되었다. SMAP은 전 지구 토양수분을 주기적으로 관측할 수 있다는 장점이 있지만, 위성에서 관측한 값이 실제 지표의 토양수분을 얼마나 잘 대표하는지는 현장 관측자료를 통해 꾸준히 확인해야 한다. NISAR와 같은 고해상도 SAR 위성자료가 본격적으로 활용되면, 위성자료와 지상 관측자료 사이의 공간 스케일 차이를 줄이고 다양한 토지피복 조건에서 정확도를 검증하는 과정이 더 큰 비중을 차지할 것으로 보인다.

회의 초반에는 SMAP 토양수분 자료가 홍수 분석과 모델링에 활용될 수 있는 가능성이 소개되었다. 홍수는 강수량만으로 설명되기 어렵고, 비가 내리기 전 토양이 얼마나 젖어 있었는지에 따라 유출 반응이 크게 달라진다. 발표에서는 SMAP 토양수분 정보가 홍수 발생 원인 이해, 홍수예보 개선, 침수 분석, 홍수빈도 분석 등에 활용될 수 있음을 보여주었다. 이는 토양수분 자료가 가뭄 감시뿐 아니라 홍수와 같은 수문 재해를 해석하는 데에도 필요한 변수임을 확인하게 했다.

농업 분야에서의 토양수분 관측 사례도 이어졌다.



SMAP-NISAR 토양수분 검보정 협업 그룹에 대해 토론하는 사이먼 유에, 광주과학기술원(GIST) core validation site검증 네트워크를 언급하고 있다.

캐나다의 RISMA 관측망은 농업지역에서 토양수분, 토양온도, 전기전도도와 함께 강수량, 풍속, 상대습도, 태양복사 등 다양한 기상자료를 수집하는 시스템이다. 이 관측망은 SMAP과 같은 위성자료의 검증뿐만 아니라 농업 생산성, 가뭄 감시, 물수지 및 물관리 연구에도 활용되고 있었다. 농업 현장에서 토양수분은 작물 생육과 관개 관리에 직접 연결되는 변수이므로, 위성자료와 현장 관측망을 함께 활용하는 접근은 실제 물관리 측면에서도 의미가 크다.

이후 다양한 환경에서 운영 중인 토양수분 검보정 사이트들이 소개되었다. Simon Yueh는 SMAP-NISAR 토양수분 자료의 검보정을 위한 국제 협업 체계를 개괄하였으며, 한국의 GIST 검증 지점을 포함해 10개국 이상에서 다국적 연구그룹이 현장 토양수분 관측자료를 수집하고 있음을 설명하였다. 이러한 협력은 향후 SMAP-NISAR 토양수분 산출물의 신뢰도 평가와 알고리즘 개선에 중요한 기반이 될 것으로 기대된다.

이후, 핀란드 Sodankyla 지역의 ESA Cal/Val Su-

persite는 고위도 환경에서 SMAP 자료를 검증하기 위한 대표적 사례였다. 이 지역은 적설, 동결·융해, 산림, 습지 등 복잡한 지표 조건을 포함하고 있어 위성 신호 해석이 쉽지 않다. 발표에서는 지상 관측, 타워 관측, 위성 관측을 함께 활용하여 토양수분, 식생 광학두께, 동결·융해, 적설, 온도 등을 장기적으로 관측하고 있음을 보여주었다. 이는 정확한 위성 토양수분 산출을 위해 토양수분 센서뿐 아니라 위성 신호에 영향을 주는 다양한 지표 조건을 함께 관측해야 함을 시사한다.

산악지역의 토양수분 검증 사례도 다루어졌다. 산악지역은 지형이 복잡하고 경사가 크며, 토지피복과 적설 조건이 공간적으로 크게 달라진다. 따라서 넓은 면적을 평균적으로 관측하는 위성 토양수분 자료를 그대로 적용하기에는 불확실성이 커질 수 있다. 이탈리아 알프스 지역 사례에서는 지상 토양수분 관측자료와 Sentinel-1 SAR 영상을 결합하여 산악 유역의 토양수분을 추정하는 방법이 소개되었다. 여러 지점에서 토양수분, 토양온도, 강수량, 기온, 습도, 풍속,

태양복사 등을 함께 관측하고 이를 토양수분 산정에 활용하는 접근은 복잡한 지형에서 현장자료와 보조 기상자료가 필요함을 보여주었다.

한국의 NASA-Korea 핵심 검보정 사이트 구축 계획도 소개되었다. 우리 연구진은 전라남도 함평 지역을 대상으로 SMAP 및 NISAR 토양수분 산출물 검증을 위한 관측체계를 구축하는 계획을 발표하였다. 이 계획은 1km x 1km 규모의 핵심 검보정 영역 안에 25개 지점의 지상 토양수분 센서를 설치하고, NISAR 위성 통과 시점에 맞추어 UAV 기반 L-band 복사계, LiDAR, 다중분광 센서 등을 함께 운용하는 것을 목표로 한다. 함평 지역은 낮은 RFI 환경, 접근 가능한 지형, UAV 운용 가능성, 논과 밭이 포함된 다양한 토지 피복 조건 등을 고려하여 후보지로 제시되었다. 국내 현장을 기반으로 국제 위성 검보정 네트워크에 참여할 수 있다는 점에서, 이 발표는 우리 연구가 세계적인 관측 체계와 직접 연결될 수 있음을 보여주었다.

캐나다 Guelph 대학교의 Elora Research Station 사례는 NISAR 시대의 검보정 방향을 보여주었다. NISAR는 기존 수동 마이크로파 위성보다 높은 공간 해상도의 토양수분 산출물을 제공할 예정이므로, 하나의 위성 픽셀을 대표하기 위해 지상 센서를 어떻게 배치할지가 중요한 문제가 된다. 발표에서는 여러 토

양수분 센서를 체계적으로 배치하고, 위성 통과일에는 식생 높이, LAI, 식생 수분함량, 작물 피복 사진 등을 함께 수집하는 계획이 소개되었다. 또한 UAV 기반 L-band 복사계, LiDAR, hyperspectral 관측 등 다양한 보조자료를 함께 활용하는 방안도 제시되었다. 이는 앞으로의 검보정 연구가 단순히 위성값과 지점 관측값을 비교하는 수준을 넘어, 위성 픽셀 내부의 공간적 이질성을 이해하는 방향으로 발전하고 있음을 보여준다.

3일차 발표들은 위성 토양수분 자료의 활용 가능성이 커질수록 현장 검증의 필요성도 함께 커진다는 점을 확인시켜 주었다. SMAP 자료는 홍수, 농업 물관리, 산악지역 토양수분 분석 등 다양한 분야에서 활용될 수 있었고, NISAR와 결합될 경우 더 높은 공간해상도의 정보를 제공할 것으로 기대된다. 그러나 이러한 자료를 실제 수문·농업 문제에 적용하기 위해서는 지상 센서, 기상자료, 식생 관측, 드론 관측, SAR 자료를 결합한 체계적인 검보정이 필요하다. 결국 위성 자료의 가치를 높이는 일과 현장 관측의 품질을 높이는 일은 별개의 과제가 아니라는 점을 확인할 수 있었다.

## 5. 돌아오며

이번 SMAP Science Team Meeting은 위성 토양수



GIST 김형록 교수(왼쪽) 및 GIST 이재세 박사후 연구원(오른쪽) 발표

분 자료가 단순한 관측 산출물을 넘어 수문·기상·농업·재난관리 분야의 의사결정 기반으로 확장되고 있음을 확인할 수 있는 자리였다. 회의에서 다루어진 연구들은 주제와 방법론은 달랐지만, 공통적으로 지표면의 물 순환을 더 정확하게 관측하고 해석하며 실제 문제 해결로 연결하려는 방향을 공유하고 있었다. 특히 SMAP의 장기 관측 성과와 NISAR로 대표되는 차세대 고해상도 관측 체계가 결합되면서, 위성 토양수분 연구의 활용 범위는 앞으로 더욱 넓어질 것으로 보인다.

이번 회의는 고도화된 위성 자료일수록 신뢰성 있는 현장 관측과 검보정 체계가 뒷받침되어야 한다는 점을 분명히 보여주었다. 고해상도 위성 산출물이 실제 수문 현상과 물관리 문제에 활용되기 위해서는 지상 센서, 기상자료, 식생 관측, UAV 관측, 물리 모델,

AI 분석이 유기적으로 결합되어야 한다. 이러한 흐름은 광주과학기술원(GIST) 연구진이 수행하고 있는 위성 원격탐사, AI, 수치모델 기반의 물순환 및 자연재해 연구와도 밀접하게 연결된다.

무엇보다 이번 참가는 국내 연구가 국제 위성 검보정 네트워크와 어떻게 연결될 수 있는지를 구체적으로 확인하는 계기가 되었다. 토양수분 자료의 가치는 관측 자체에 머무르지 않고, 자료의 불확실성을 이해하고 현장 조건에 맞게 해석하며 실제 물관리 의사결정에 적용할 때 더욱 커진다. 앞으로 SMAP과 NISAR 자료를 활용한 연구가 국내 수문·농업·재난관리 분야에서 실질적인 성과로 이어질 수 있도록, 현장 기반의 검보정 연구와 자료 융합 방법론을 지속적으로 발전시켜 나갈 필요가 있다.