

(옆면)

(앞면)

19CTAP
-C1436
85-02

보안 과제(), 일반 과제(O) / 공개(O), 비공개()발간등록번호()

국토교통기술촉진 사업 제 2 차 연도 최종 보고서

R&D/19CTAP-C143685
-02

국가 물 관리를 위한 통합형 토양수분량 계측시스템 설계 기술 개발 최종보고서

2020.2.19.

주관연구기관 / 성균관대학교 산학협력단
협동연구기관 / 한국수자원조사기술원

2020

국 토 교 통 과 학 기 술 진 흥 원
국 토 교 통 부

국 토 교 통 부
국토교통과학기술진흥원

제 출 문

국토교통부 장관(국토교통과학기술진흥원) 귀하

'국가 물 관리를 위한 통합형 토양수분량 계측시스템 설계 기술 개발'
(연구개발 기간 : 2018. 4. 17 ~ 2019. 12. 31) 과제의 최종보고서 1부를 제출합니다.

2020. 2. 19.

주관연구기관명 : 성균관대학교 산학협력단

추 현 승



공동연구기관명 : 한국수자원조사기술원

정 성 원



주관연구기관책임자: 성균관대학교

최 민 하

공동연구기관책임자: 한국수자원조사기술원

정 성 원

국토교통부소관 연구개발사업 운영규정 제29조에 따라 최종보고서 열람에
동의합니다.

3. 보고서 요약서

과제 고유 번호	18CTAP-C14 3685-01	해당 단계 연구 기간	2019-01-01 ~ 2019-12-31	단계구분	2/2
연구사업명	중사업명	국토교통기술촉진연구사업 창의도전연구분야 기초원천 지원유형			
	세부사업명				
연구과제명	대과제명	국가 물 관리를 위한 통합형 토양수분량 계측시스템 설계 기술 개발			
	세부과제명	주관: Cosmic-ray 를 활용한 산악지역 토양수분량 산출 알고리즘 개발 공동: 토양수분량 계측 기술 및 방법 가이드라인 제시			
연구책임자	최 민 하	해당단계 참여연구원 수	총: 13 명 내부: 13 명 외부: 명	해당단계 연구비	정부: 220,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
		총 연구기간 참여연구원 수	총: 13 명 내부: 13 명 외부: 명	총 연구비	정부: 370,000 천원 민간: 천원 정부외: 천원 상대국: 천원 계: 천원
연구기관명 및 소속 부서명	성균관대학교 산학협력단			참여기업명 한국수자원조사기술원	
국제공동연구	상대국명:			상대국 연구기관명:	
위탁연구	연구기관명:			연구책임자:	

※ 국내·외의 기술개발 현황은 연구개발계획서에 기재한 내용으로 같음

연구개발성과의 보안등급 및 사유	일반
-------------------------	----

9대 성과 등록·기탁번호

[illegible]

국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입기관	연구시설 · 장비명	규격 (모델명)	수량	구입연월일	구입가격 (천원)	구입처 (전화)	비고 (설치장소)	NTIS 등록번호

요약

- 국내외 토양수분량 계측시스템 설계 기술 개발 관련 선행연구 조사 수행.
- 국내 산악지형 대상 토양수분 계측기기 성능 점검 및 연구 지역 선정 기법 개발
- 연구지역을 대상으로 통합형 토양수분량 계측시스템 운영 및 유지관리 수행.
- Cosmic-Ray Neutron Probe를 이용한 산악지형에서의 면 단위 토양수분량 계측.
- Cosmic-Ray Neutron Probe 기반 면 단위 토양수분 산출 기술 고도화 수행.
- 국내 산악지형 대상의 토양수분량 계측 시스템 설계 기술 개발 수행.
- 원격탐사 기반 자료와의 연계를 통한 면 단위 토양수분 데이터 활용 방안 제시.

보고서 면수: 180

4. 국문 요약문

연구의 목적 및 내용	다목적 활용성을 고려한 「한국형 토양수분량 계측시스템 설계 기법」 ○ 한국형 토양수분량 계측 기술 및 방법 가이드라인 제시 ○ Cosmic-Ray를 활용한 지역적 규모의 토양수분 산출 알고리즘 개발 ○ 원격탐사기법과 Cosmic-Ray 기법의 연계 방안 제시				
연구개발성과	○ 유역단위의 유전율식 관측소 계측 기술 및 방법 제시 ○ Cosmic-Ray Neutron Probe 관측 기기를 활용한 DB화 연구				
연구개발성과의 활용계획 (기대효과)	○ 국가 물 관리 정책 및 수자원 계획 수립 등에 활용 ○ 연구 개발로 도출된 토양수분량 계측시스템 설계 기법은 우리나라 수문 조사 기술의 발달에 기여				
핵심어 (5개 이내)	국가관측망	토양수분	Cosmic-ray	FDR	TDR

5. 영문 요약문

Purpose & Contents	Development of Soil Moisture Measurement System for Multi-purpose Utilization in Korea ○ Suggestion of the guideline for soil moisture measurement technique and method ○ Development of algorithm to estimate soil moisture at watershed scale by cosmic-ray ○ Presenting a linkage between remote sensing and cosmic-ray technique				
	○ Suggestion of measurement technique and method for dielectric constant-type soil moisture station at watershed scale ○ A study to build a DB using Cosmic-Ray Neutron Probe observation instrument				
Results	○ This study can be utilized for national water management policy and water resource planning establishment ○ This study will contribute to design soil moisture measurement system to development of hydrological survey technology in Korea				
Expected Contribution					
Keywords	National Monitoring Network	Soil Moisture	Cosmic-ray instrument	Frequency Domain Reflectometry	Time Domain Reflectometry

1. 연구개발과제의 개요	1
2. 국내외 기술 개발 현황	16
3. 연구수행내용 및 성과	23
4. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도	163
5. 연구개발성과의 활용계획	169
6. 연구 과정에서 수집한 해외 과학기술 정보	175
7. 연구개발성과의 보안등급	178
8. 국가과학기술종합정보시스템에 등록한 연구시설·장비 현황	178
9. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적	178
10. 연구개발과제의 대표적 연구 실적	178
11. 기타 사항	179
12. 참고 문헌	179

제1장. 연구개발과제의 개요

1. 연구개발 목적

가. 연구개발 최종 목적 및 세부 목적

구분	내용
최종 목적	다목적 활용성을 고려한 「한국형 토양수분량 계측시스템 설계 기법」
세부 목적	■ 주관기관: 성균관대학교 산학협력단대학교 ○ Cosmic-ray를 활용한 지역적 규모의 토양수분 산출 알고리즘 개발 - 시험 유역특성을 반영한 Cosmic-ray 매개변수 교정 및 산정 - Cosmic-ray 매개변수 최적화 기법 제시 - Cosmic-ray의 공간 대표성 확인 - Cosmic-ray 알고리즘 및 관측 시스템 운영의 고도화 ○ 원격탐사기법과 Cosmic-ray 기법의 연계 방안 제시 - 장기 토양수분량 조사 방안 마련 ■ 공동기관: 한국수자원조사기술원 ○ 한국형 토양수분량 계측 기술 및 방법 가이드라인 제시 - 토양수분량 계측시스템 구축을 위한 대표성 분석 가이드라인 제시 - 토양수분량 계측시스템 설계를 위한 기법 제시 - 시험유역 선정 및 운영 기법 제시 - 토양수분량 품질관리 및 관측소 운영 가이드라인 제시 - 시험유역 특성 및 토양수분량 자료를 활용한 물 수지 분석 기법 제시 - 국가차원의 토양수분량 자료 활용 방안 제시

나. 연차별 연구개발 목적

연차 구분	내용
1차 연도	[연구목표] 1) 토양수분량 관측 운영사례를 조사하여 최적의 토양수분 관측 시험유역 선정 2) 기존의 유전율식(FDR, TDR) 기기 및 Cosmic-ray 센서에 대한 국내/외 선행연구 사례 조사 3) Cosmic-ray 관측 기기를 이용한 토양수분량 변환 및 한반도에 특화된 Calibration 분석 ■ 주관기관: 성균관대학교 산학협력단 ○ 선행연구 사례 수집 및 연구 - Cosmic-ray 선행연구 조사 ▪ 국내외 토양수분/관측기기에 관한 선행연구 조사 ▪ Cosmic-ray 센서에 관한 국내외 선행연구 조사 ▪ 토양수분과 중성자의 상관성 분석 연구 사례조사

연차 구분	내용
1차 연도	▪ FDR과 TDR 자료를 활용한 Cosmic-ray Calibration 선행연구조사 - 원격탐사기법 적용 사례 연구 ▪ 인공위성자료(AMSR-2, SMOS 등), 지역모형(GLDAS) 등 - 토양수분량 공간맵핑을 고려한 연구 사례 연구 - 토양수분량 조사 관련 학술논문 연구 ○ 시험구역 선정 및 토양수분량 계측시스템 위치 확정 - 시험구역 선정 및 조건 ▪ Cosmic-ray 센서 설치 조건을 만족한 구역 - 대표성 분석 및 시험구역 선정 ▪ 여러 조건을 고려한 대표성 분석 - 계측시스템 설치 위치 확정 ▪ 현장조사를 통한 최종 확정 ▪ 관측기기 등 성능 평가 ▪ 토양수분량 자료의 적절성 평가 ○ 계측시스템 설계 및 구축 - Cosmic-ray 계측시스템 설계 - 면 단위 토양수분량 계측시스템 구축 - 시험운영을 통한 계측시스템 최종 확정 ▪ 관측기기 등 성능 평가 ▪ 토양수분량 자료의 적절성 평가 ■ 공동기관: 한국수자원조사기술원 ○ 선행연구 사례 수집 및 연구 - 토양수분량 조사 이론 및 방법 ▪ 중량법, TDR, FDR, Cosmic-ray - 유전율식(TDR, FDR) 방식 적용 사례 연구 - 국가수문관측망 구축 사례 연구 ▪ 강수량, 수위, 유량, 토양수분량, 증발산량 등 ▪ 토양수분량 계측시스템 구축 사례 - 토양수분량 관측소 설치 기준 연구 - 토양수분량 조사 매뉴얼 연구 - 토양수분량 품질관리 매뉴얼 연구 - 토양수분량 관측소 운영 및 유지관리 매뉴얼 연구 - 국가수문관측망 구축 사례 및 관련 연구 - 시험구역 운영 사례 조사 및 분석 연구 - 대상구역의 대표성 분석 연구

연차 구분	내용
1차 연도	○ 시험유역 선정 및 토양수분량 계측시스템 위치 확정 - 시험유역 선정 및 조건 ▪ 수문자료를 활용할 수 있는 유역(물 수지 분석) ▪ 국가증발산량 관측소가 운영되고 있는 유역 ▪ 국가토양수분량 관측소가 운영되고 있는 유역 ▪ 토양형 및 토지피복 등의 정량화가 가능한 유역 ▪ Cosmic-ray 센서 설치 조건을 만족한 유역 - 대표성 분석 및 시험유역 선정 ▪ 여러 조건을 고려한 대표성 분석 - 계측시스템 설치 위치 확정 ▪ 현장조사를 통한 최종 확정 ○ 계측시스템 설계 및 구축 - 유전율식(TDR, FDR) 계측시스템 설계 ▪ 수평적 위치 결정(측점 배치 및 측정수 등) ▪ 수직적 위치 결정(토심별 센서수 등 결정) - 면 단위 토양수분량 계측시스템 구축 - 시험운영을 통한 계측시스템 최종 확정 ▪ 관측기기 등 성능 평가 ▪ 토양수분량 자료의 적절성 평가
2차 연도	[연구목표] 1) 유전율식 토양수분 관측 운영 및 평가, 각 토심별 설계에 관한 분석 2) Cosmic-ray 관측 자료의 개선을 위한 고도화 및 관측 자료의 검증 평가 3) 유전율식, Cosmic-ray 관측 기반의 토양수분 DB화 및 통계분석 ■ 주관기관: 성균관대학교 산학협력단 ○ Cosmic-ray 매개변수 최적화 - Cosmic-ray 교정·보정(Calibration) ▪ Cosmic-ray 센서 관측자료 파악 ▪ TDR과 FDR 관측자료의 weighting function 파악 ▪ Cosmic-ray 센서의 raw neutron intensity 분석 ▪ Cosmic-ray 관측자료의 전처리 - Atmospheric and neutron monitor data - Correction of Cosmic-ray data ▪ Cosmic-ray 자료의 Calibration 기술 조사 및 산정 - Cosmic-ray 매개변수 최적화 기법 ▪ 유전율식(TDR, FDR) 방식의 센서 수 고려 ▪ Cosmic-ray 최적화 기법

연차 구분	내용
2차 연도	○ Cosmic-ray 자료 개선을 위한 고도화 - 계측자료의 고도화를 위한 전처리(vegetation, hydgen sources data) - Cosmic-ray의 calibration function의 결정 - Cosmic-ray 관측자료의 고도화(Improvement of Corrected neutron intensity) - 고도화된 Cosmic-Ray 관측자료의 검증 및 평가 - 유전율식 자료(FDR, TDR)와 Cosmic-ray 자료의 정확성 검증 ○ 토양수분량 계측시스템 설계 기법 개발 - Cosmic-ray 계측시스템 설계 기법 ▪ Cosmic-ray 설치 조건 및 기준 ▪ 유전율식 방식(TDR, FDR) 설치 기준 ▪ TDR, FDR 자료 품질관리 기준 및 체계화 - Cosmic-ray, TDR, FDR 자료의 Merging Technique - 토양특성, 기후, 식생 등의 타 영향 인자와의 관계성 연구 - Test-bed에 따른 최적 토양수분량 산출 방식 분석 - 원격탐사기법에 연계 방안 마련 - 미래의 토양수분량 조사 방안 ■ 공동기관: 한국수자원조사기술원 ○ 계측시스템 운영 및 자료 분석 - 계측시스템 유지관리 및 자료수집 ▪ 2주 단위의 유지관리를 통한 안정적 운영 ▪ 2주단위의 안정적 자료수집 - Cosmic-ray의 자료 분석 및 DB화 - 유전율식(TDR, FDR)의 자료 분석 및 DB화 - 월별 토양수분량 특성 분석 및 정량화 ▪ 자료는 2주 단위로 분석하여 월별 특성 정량화 - 토양수분량 자료의 현장 검증 - 중량법을 활용하여 신뢰도 검증 - Cosmic-ray와 유전율식 자료 연계 분석 ○ Cosmic-ray 최적화 - 물 수지 분석 및 검증 ▪ 강수량, 유량, 증발산량 등 수문자료 정량화 ▪ 월별 물 수지 분석 및 검증 - 토양수분량 계측시스템 검증 및 평가 ○ 토양수분량 계측시스템 설계 기법 개발 - 대표성을 고려한 토양수분량 계측기법 - 시험유역 선정 기법 - 토양수분량을 이용한 물 수지 분석 기법 - 토양수분량 조사 매뉴얼 - 토양수분량 자료 품질관리 매뉴얼 - 토양수분량 관측소 운영 및 유지관리 매뉴얼 - 토양수분량 자료의 활용 방안 ▪ 국가 물 관리 활용 방안 등 ▪ 수자원 계획 및 개발, 수장기 활용 방안, 수문조사사업 적용 방안 등

2. 연구개발의 필요성

가. 토양수분 관측의 중요성

- 토양수분은 물 순환, 에너지 순환 속 지표면과 대기 사이의 상호작용을 이해하기 위한 핵심 인자로써, 강우, 유출, 증발산 및 침투와 같은 전반적인 물 순환 과정에 직접적으로 관여함
- 물 순환 과정의 규명, 홍수 및 가뭄 예보, 유출 해석 및 모형 개발, 물 수지 분석, 작물의 소비수량 산정, 산사태 등의 재해, 기상예보 정확도 향상 등 국가 물 관리에 직접적으로 활용됨
- 이에 따라, 각종 정책 수립 및 물 순환과 관련된 연구에 기초 자료로 제공될 수 있도록 일관성 있고 정확도 높은 토양수분 자료 생산이 요구되는 실정임
- 토양수분의 관측은 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 규정된 사항이며, 수문조사선진화 5개년 계획 (2005)에 명시되어있음

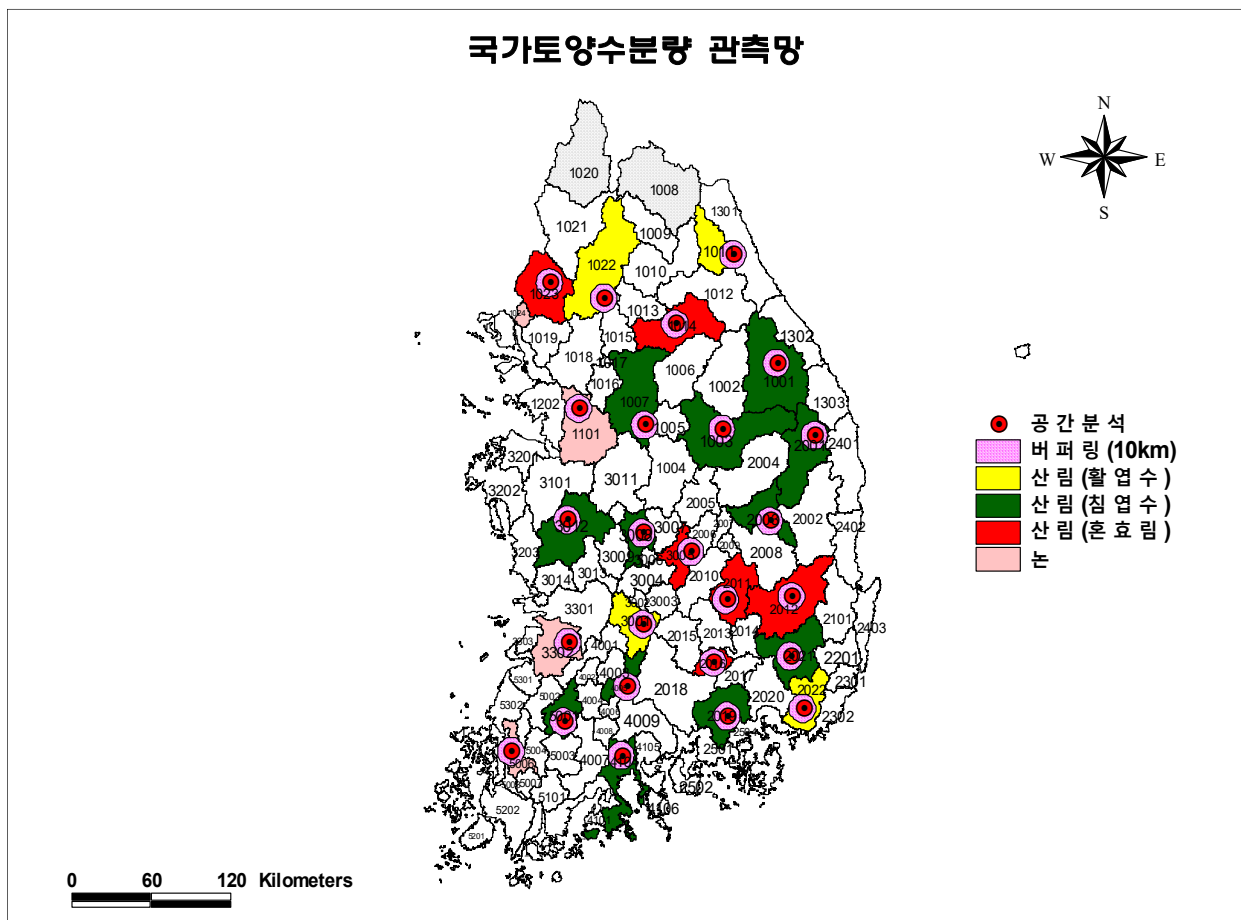


Fig. 1.2.1 국가토양수분량 관측망

- 2018년 기준 구축되어있는 국가토양수분량 관측망은 25개소의 토양수분 관측소로 이루어져있음 (한강 유역 8개소, 낙동강 유역 8개소, 금강 유역 5개소, 섬진강 유역 2개소, 영산강 유역 2개소; Fig. 1.2.1)
- 국가토양수분량 관측망은 향후 원격탐사 기법과 연계를 고려하여 구축된 관측망으로써, 대상 유역의 대표성 등을 종합 고려하여 구축되었음(한국수자원조사기술원)
- 토양수분량 조사에 관한 사항은 법적으로 정해진 사항이나, 아직까지 **Cosmic-ray**를 통한 토양수분 계측 시스템에 관한 연구 개발이 전무하여 전국적으로 확대되지 못하고 있는 실정임
- 따라서, 국가 토양수분량 관측망을 기반으로 전국단위 토양수분량 자료 생산이 필요하며, 이를 위해 「토양수분량 계측시스템 설계 기법」에 대한 연구개발이 필요함

나. 토양수분 조사 현황

- 우리나라 토양수분량에 대한 조사 기반은 2005년 건설교통부의 「수문조사선진화5개년계획」에 포함되면서 마련되기 시작함
- 토양수분량을 전국단위에서 정기적으로 생산하고자 하는 국가적인 차원에서 노력이 있었음에도 불구하고 토양수분량 측정기술과 방법 등이 체계화되어 있지 않아 제한된 지점에서만 관측이 이루어지고 있음
- 현재 국토교통부가 운영하고 있는 토양수분량관측소는 2개소(설마천, 청미천)로, 해당 관측 자료는 한국수문조사연보에 수록되고 있음
- 농촌진흥청은 2015년 1월부터 전국 100여개에 논과 밭작물의 생육목적으로 토양수분 관측소를 운영하고 있으며, 산림청에서는 산림지에 서식하는 나무나 식생 등의 육림목적으로 토양수분량을 관측하고 있음
- 최근 공간 단위의 고해상도 토양수분 자료의 활용성이 대두됨에 따라 원격탐사 기법을 활용한 토양수분량 추정하는 연구가 활발히 이루어지고 있음
- 성균관대학교에서는 Cosmic-ray Neutron Probe를 통해 토양수분량을 추정하는 연구를 수행하고 있으며, 다양한 검/보정 프레임워크를 성공적으로 개발하여 공간단위의 평균 토양수분량을 산출하는 기술을 개발 중임
- 전반적으로 제한된 지점에서 토양수분량을 측정하여 활용하고는 있지만, 대부분 점 단위 측정에 한정되어 있고, 관측소 설치 기준이나 관측소 운영 매뉴얼, 품질관리 등도 체계화되어 있지 않음
- 반면, 미국 등 여러 선진국에서는 오래전부터 토양수분에 대한 이론적인 개념을 정립하여 토양수분을 비교적 정기적으로 측정해 오고 있으며, 최근에는 TDR 센서 및 FDR 센서와 같은 유전율식 장비를 이용한 토양수분 관측소 구축, 자료의 품질 향상을 위한 제반 기술과 자료처리 및 품질관리 방법 등을 체계화하여 실무에 이용하고 있음
- 대표적인 예로 International Soil Moisture Network (ISMN)이 있으며, 이는 Vienna University of Technology (TU-Wien)와 European Space Agency (ESA)를 포함한 국제기관들이 운영하는 전 세계 지점 관측 토양수분 데이터베이스로, 26여개 국가의 토양수분 관측 자료를 제공하고 있음. 주로 FDR 센서, TDR 센서 및 Cosmic-ray 센서를 기반으로 측정된 토양수분 자료를 제공하고 있으며, 위성 토양수분 관측 자료를 검증하거나 지표 모델의 성능을 향상시키기 위한 목표로 운영되고 있음
- 미국의 경우 Cosmic-ray 센서 기반 토양수분의 측정이 다양한 환경에서 이루어지고 있음. 특히 애리조나 대학교(University of Arizona)에서 관리 및 운영하고 있는 COSMOS는 세계 최대이자 최대 규모의 Cosmic-ray 토양수분 네트워크로, 70개 이상의 분산된 토양수분 네트워크를 보유하고 있으며, 또한 지속적으로 ISMN에 자료를 제공하고 있음
- 영국의 경우도 마찬가지로 COSMOS-UK 모니터링 네트워크를 도입하여 Cosmic-ray 센서 기반 토양수분 관측소를 운영하고 있으며, 동시에 지열플럭스, 지점 토양수분, 3차원 풍향/풍속, 적설량 등 다양한 기상 관측을 실시하고 있음

다. 연구개발의 중요성

- 토양수분량은 국가수문조사사업, 수자원장기종합계획, 하천기본계획, 홍수 예보, 갈수 예보, 가뭄 분석, 산사태와 같은 방재 등에 기본이 되는 자료로서, 국가 물 관리 정책에 용이하게 활용하기 위해서는 대상유역을 대표하는 토양수분 측정 방법의 개발이 필수적임
- 선진 외국의 경우 토양수분 관측망을 구축하여 수자원 개발 및 계획 수립 시에 효과적으로 이용하고 있으나, 국내의 경우 실측되는 토양수분의 자료가 부족한 실정이며, 단순한 가정이나

경험식에 의한 추정치들을 이용하여 물 관리를 수행하고 있음

- 기후변화에 따라 수자원의 관리가 어려워지고, 자연재해가 빈번히 발생함에 따라서 수문기상 인자의 정확한 관측을 통한 수자원 관리의 중요성이 더욱 증대될 전망이며, 이에 따른 관측 기술의 개발이 필수적임
- 농작물 생육 및 산림의 육림을 위해 해당 지역의 토양수분을 관측하기 위한 체계적인 관측 시스템 설계 기법을 구축할 필요가 있음
- 연구개발 결과로 도출된 토양수분 계측시스템 설계 기법 및 Cosmic-ray 센서를 기반으로 측정된 토양수분 자료는 우리나라 수문조사 기술의 발전을 선도할 것으로 기대되며 나아가 원격 탐사 기법을 활용한 토양수분 자료의 정확도 향상에 기여할 수 있음

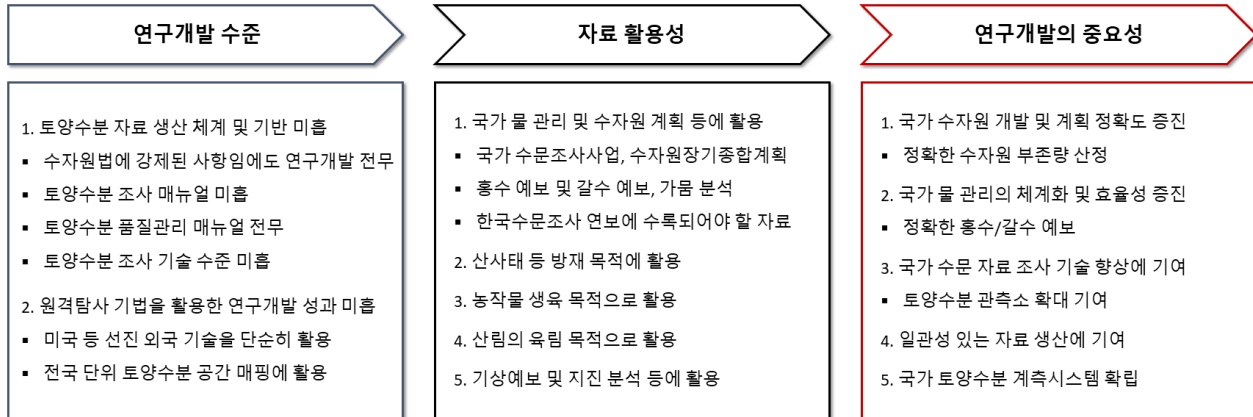


Fig. 1.2.2 연구개발의 필요성

3. 연구개발 범위

가. 연구개발 시스템 구성도

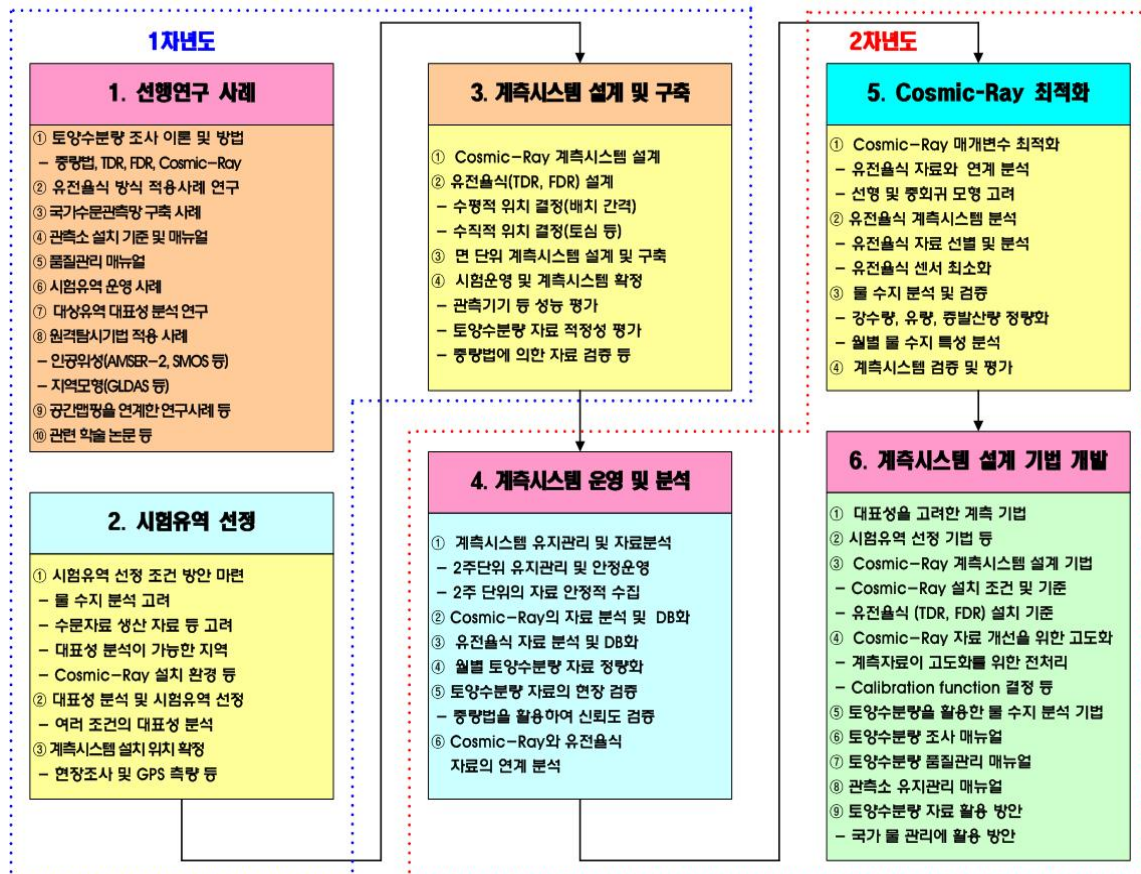


Fig. 1.3.1 연구개발 시스템 구성도(내용적 측면)

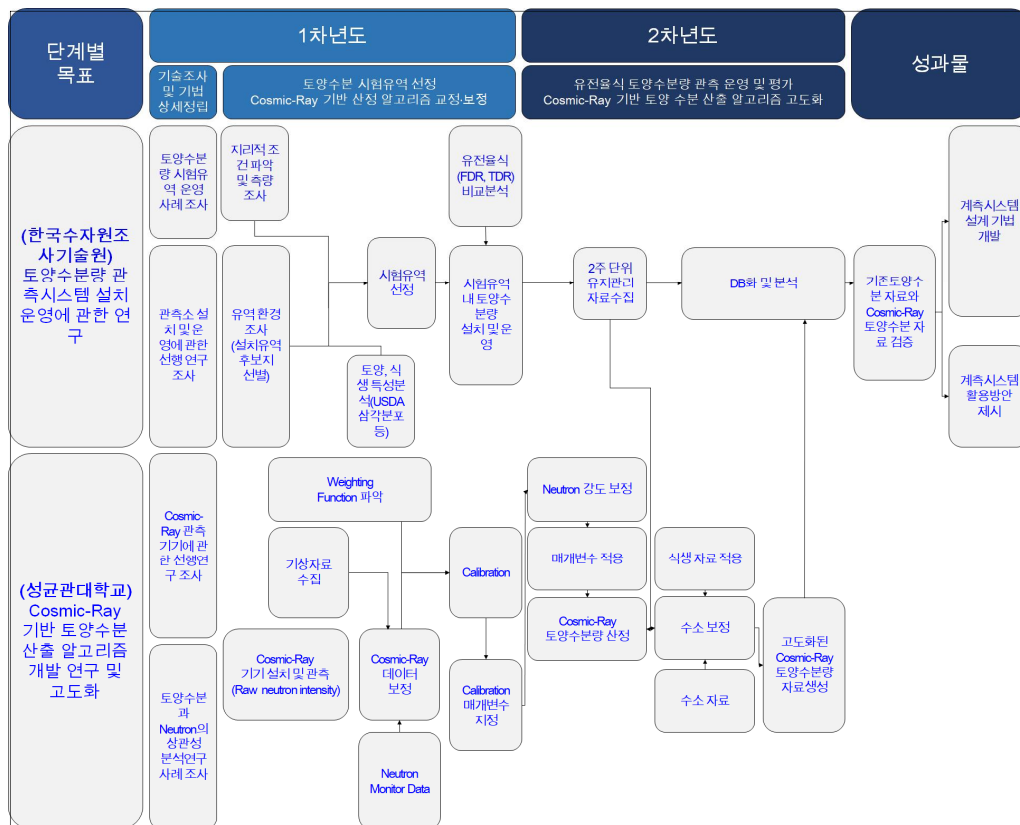


Fig. 1.3.2 연구개발 시스템 구성도(기술적 측면)

나. 연구개발의 핵심 내용

1) 시험유역의 선정

- 시험유역 선정 방안 마련
- 시험유역의 목적은 연구개발 성과를 도출하고 검증하는 데에 있으며, 여러 후보지를 평가하여 선정하는 것이 바람직함
- 강수량 등의 추가적인 수문자료 활용성을 고려하였을 때, 물 수지 분석 등을 수행할 수 있는 후보지가 적정함
- 장기간 수문조사가 수행되어 기존 자료가 충분히 있는 유역, 토양형 및 토지피복 등의 수치정보가 존재하여 정량화가 가능한 유역, Cosmic-ray 센서의 설치 조건을 만족한 유역 등을 대상 유역으로 설정이 가능함
- 대표성 분석 가능성 측면
 - 지형 및 피복 특성을 고려한 대표성 분석 수행 가능 여부, 토양형 및 유효토심 특성, 유역 사면의 경사, 산림, 식생, 농경지 등의 피복 특성 파악 가능 여부를 사전 조사할 필요가 있음
- 토양수분량의 정확도 검증 평가, 토양수분량 계측시스템 구축
- 유지관리 고려
- 시험유역 선정에 관한 제안사 의견
 - 시험유역은 토양수분량 및 증발산량 관측소가 설치되어 운영 중인 설마천과 청미천 유역 중에서 선정하는 것이 바람직함
 - 최근 한강홍수통제소(인제, 홍천), 금강홍수통제소(이인, 초강), 영산강홍수통제소(무안, 고창, 장흥)에서 증발산량 관측소를 운영 중에 있으므로, 이들 관측소가 해당되는 유역도 후보지로 검토하는 것이 바람직함

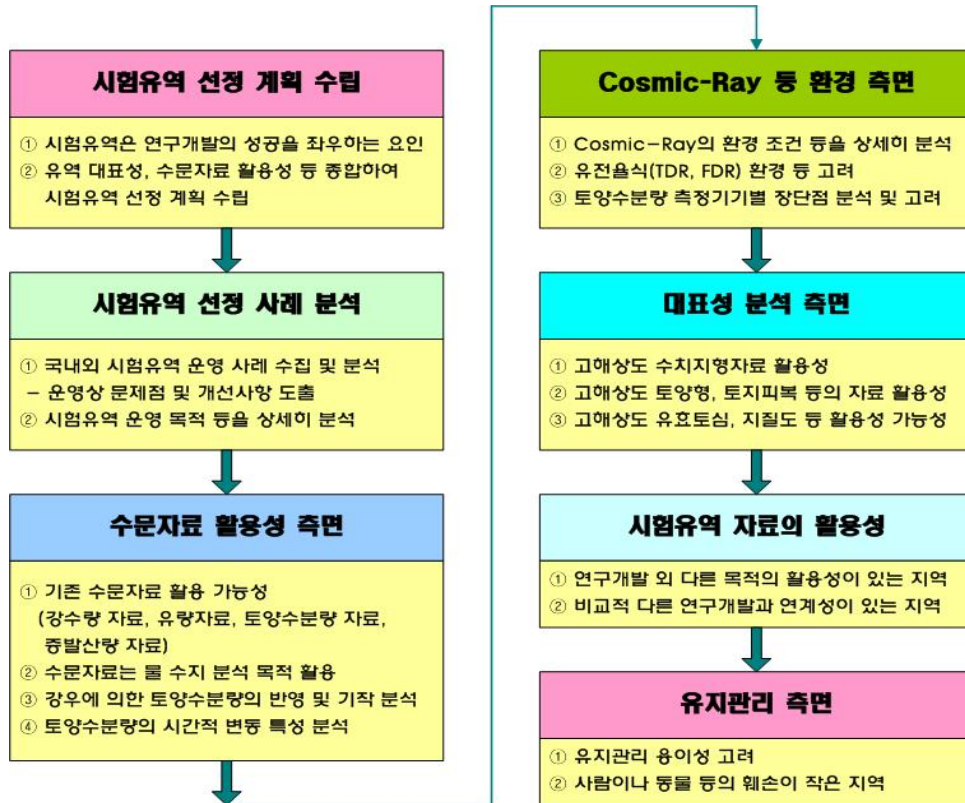


Fig. 1.3.3 시험유역 선정 방안

○ 시험유역 사전 분석 사례: 설마천 유역

- 설마천은 임진강 하구로부터 약 46 km 상류인 경기도 파주시 적성면 두 지리 지점에서 좌안 측으로 유입하는 임진강의 제 1지류임
- 동경 126° 52'44"~126° 58'40", 북위 37° 55'00"~37° 58'05"에 위치하며, 유역면적 18.56 km², 유로연장 10.77 km로, 임진강 전체 유역면적(8,117.5 km²)의 약 0.2%를 차지하고 있고, 수계형상은 대체로 수지상의 모양을 보임
- 국토교통부에서 토양수분량 및 증발산량 관측소를 2007년도부터 운영하여 현재까지 자료가 정기적으로 생산되고 있음
- 산지 소유역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료의 지속적 축적을 위해 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역(영국군 전적비교를 출구로 하는 설마천 중상류 유역)으로 현재까지 운영 중에 있음
- 작은 절리가 많이 발달되어 있으며, 시험유역에는 6개 우량관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 운영되고 있음

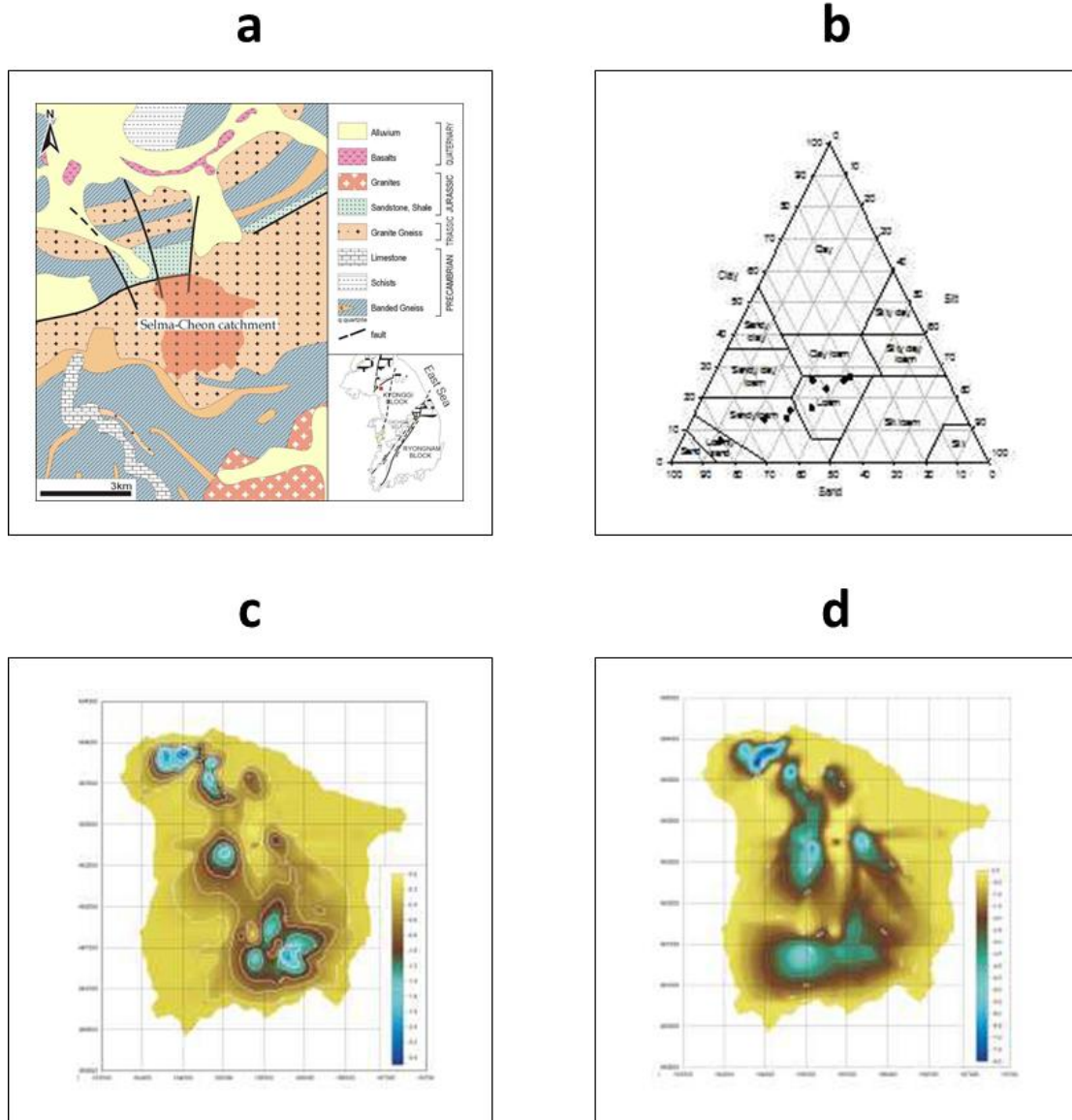


Fig. 1.3.4 설마천 유역 사전 분석 사례
 (a) 지질도(한국지질자원연구원) (b) 토양분류도(한국수자원조사기술원)
 (c) 토양층 분포(한국지질자원연구원) (d) 풍화대의 분포(한국지질자원연구원)

○ 시험유역 사전 분석 사례: 청미천 유역

- 충청북도 음성군의 수례의산을 상류부로 포함하고 있는 청미천 유역은 한강의 제 1지류인 청미천을 형성하는 농업유역으로 경기도 이천시 장호원읍과 여주시 점동에 걸쳐 분포하고 있으며, 유역면적은 569.60 km², 유로연장 60.80 km, 평균 유역 경사는 17.01%임
- 국토교통부에서 토양수분량 및 증발산량 관측소를 2007년도부터 운영하여 현재까지 자료가 정기적으로 생산되고 있음
- 국제수문관측사업(International Hydrological Programme, IHP)의 일환으로 체계적인 수문관측이 진행되고 있으며, 원부교와 장호원교 지점에서는 수위관측소가 운영되고 있고, 원삼, 삼죽, 설성, 생곡, 금왕 등 5개 지점에서는 우량관측소가 운영되고 있음
- 유역 내 평지의 경우 농경지가 주를 이루고 있고, 산지가 복합되어 있으나, 최근에는 골프장, 쇼핑몰 등의 위락시설이 유역 중·상류부에 건설되고 있음. 토심은 30-100 cm까지 분포하고 있으며, 토질은 사양토가 주류를 이루고 있음

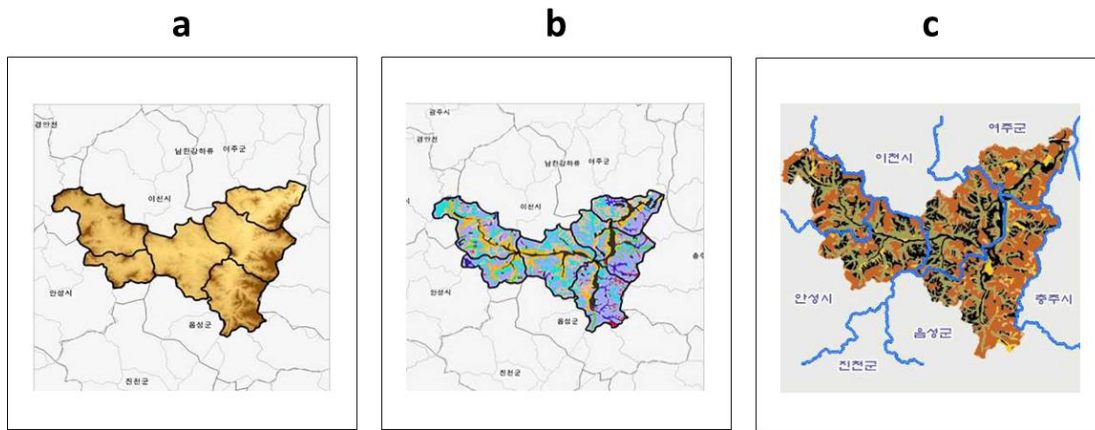


Fig. 1.3.5 청미천 유역 사전 분석 사례 (a) Digital Elevation Model (한국수자원조사기술원), (b) 지질도(한국지질자원연구원), (c) 토양층 분포(농업과학기술원)

○ 유전율식 장비(TDR, FDR) 토양수분량 검증 및 평가

- TDR 센서 및 FDR 센서 등의 유전율식 장비를 활용한 토양수분 자료는 Cosmic-ray 센서 기반 토양수분 자료 보정/검증 및 활용도를 평가하기 위한 기준자료로서 활용되기 때문에 정확도 및 신뢰도에 대해 평가할 필요가 있음
- TDR 방식의 정확도는 $\pm 2\%$ 이하로 평가받고 있으나(SoilMoistureCorp. operation manual) 실제 현장에서는 연장 웨이브가이드 길이에 따라 정확도가 달라짐
- 추가적으로, 밀도, 전기전도도 등 토양의 특성에도 영향을 받을 수 있음
- 일반적으로 토양수분 측정 자료에 대한 신뢰도 평가는 중력식 측정법(gravimetric)에 의한 결과와의 비교 및 분석을 통해 이루어짐
- 따라서 유전율식 토양수분 측정 자료에 대한 검증 및 신뢰도 평가는 Fig. 1.3.6과 같이 설계됨
- 시험유역 선정 이후 주기적인 토양시료 채취 및 특성 분석과 함께 중력식 토양수분 측정을 진행하며, 이를 활용한 보정 및 검정을 통해 최종 토양수분량을 산출함

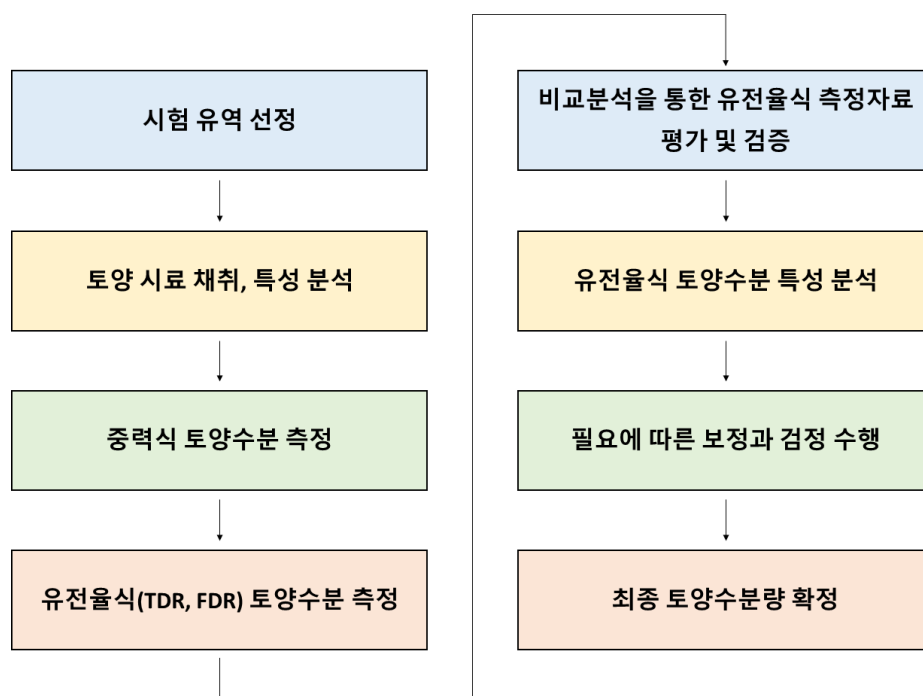


Fig. 1.3.6 중력식 토양수분 측정자료를 활용한 유전율식 토양수분 자료 검증 및 평가

○ Cosmic-ray Neutron Probe의 측정 영역 분석

- 면 단위 토양수분 계측 시스템 설계를 위한 Cosmic-ray의 관측 반경(footprint)에 대한 수평·수직적 분석 수행

- (수평적 분석) 직경 600 m 이상
- (수직적 분석) 우기와 건기로 구분하여 분석

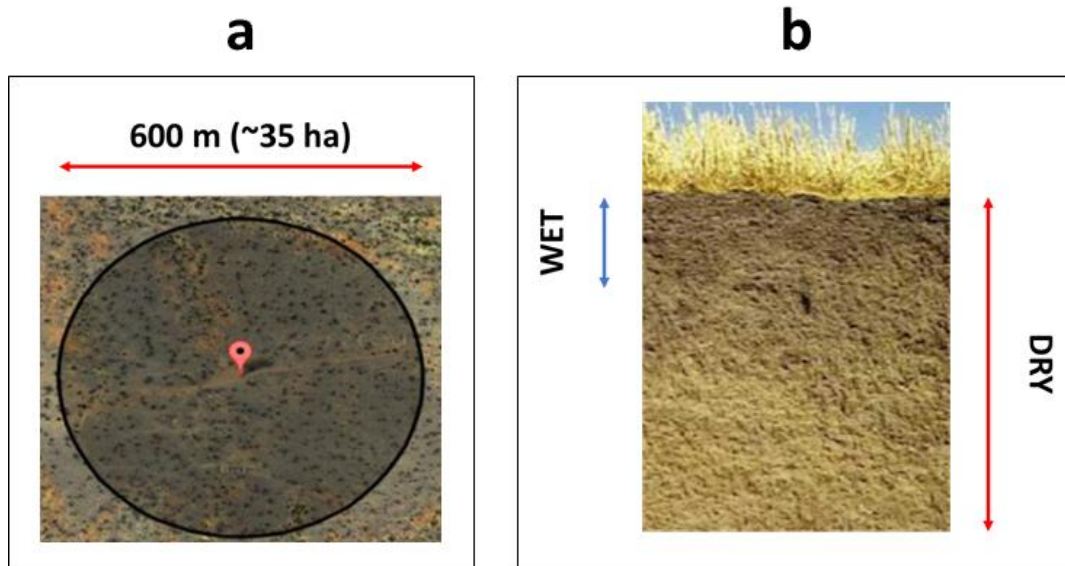


Fig. 1.3.7 Cosmic-ray Neutron Probe의 측정 영역 구분
(a) 수평적 분석 (b) 수직적 분석

○ 유전율식(TDR, FDR)과 Cosmic-ray를 연계한 계측시스템 설계 기법

- Cosmic-ray 센서 기반 토양수분 자료 검증 목적의 유전율식 장비 최소화 방안

- Cosmic-ray 토양수분의 검증에 활용할 유전율식 장비를 최대한 많이 설치하여 운영하나, 추후 토양수분 계측 시스템 설계를 위해 효율적으로 최소화 할 수 있는 방법을 찾을 필요가 있음
- 이를 위해 위치별, 토심별로 Cosmic-ray 토양수분 자료를 검정하여 필요 수량을 결정

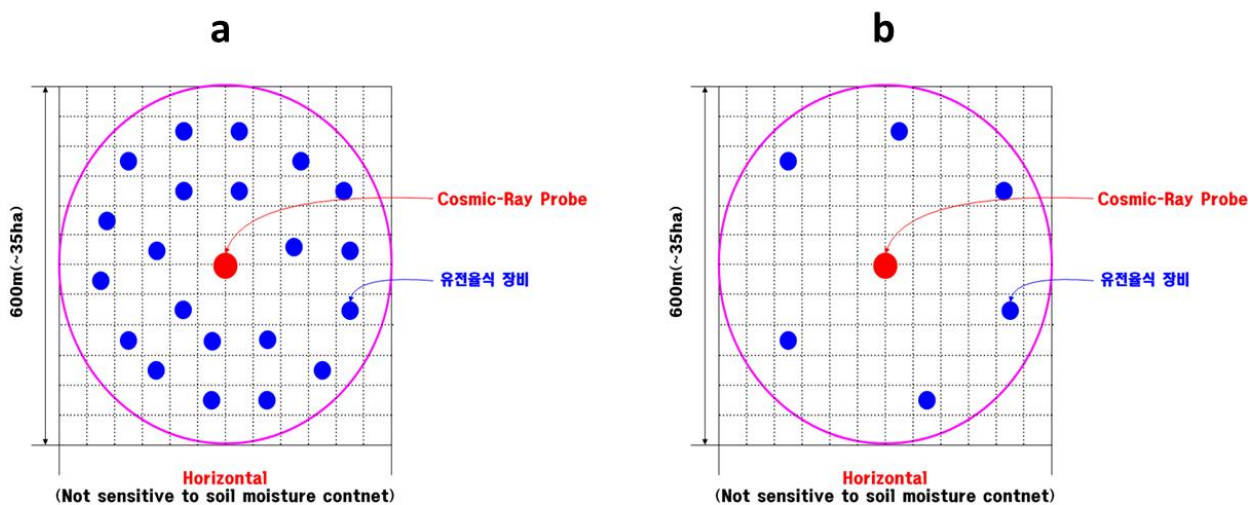


Fig. 1.3.8 (a) 시험 구역 운영을 위한 유전율식 장비 설치안 (b) 유전율식 장비 최소화 방안

다. 정량적 연구개발 성과 목표

성과지표	성과 목표	최소 성과 목표
SCI(E)급 학술지 게재(2점)	1건	1건
일반학술지게재(1점)	6건	3건
특허출원(1점)		
특허등록(2점)		
디자인 등록(1점)		
소프트웨어(1점)		
하드웨어(1점)		
기타(1점)		
소계(점수)	8점	5점

성과지표	점수
국내학술지, 국토교통분야 IF평균('16년 기준) 미만 SCI(E)급 학술지게재	1점
국토교통분야 IF평균('16년 기준) 이상 SCI(E)급 학술지* 게재	2점
특허출원	1점
특허등록	2점

라. 정성적 연구개발 성과 목표

1) 기술개발 성숙도

구분		연구 착수	연구 종료	단계별 설명	
기초연구 단계	TRL 1	■	☐	TRL 1	이론적 연구단계
	TRL 2	☐	☐	TRL 2	기술적 개념정립 단계
실험 단계	TRL 3	☐	☐	TRL 3	실험적 증명 단계
	TRL 4	☐	■	TRL 4	실험실 성능평가 단계
시작품 단계	TRL 5	☐	☐	TRL 5	유사환경 시험 단계
	TRL 6	☐	☐	TRL 6	유사환경 기술시험 단계
실용화 단계	TRL 7	☐	☐	TRL 7	실제환경 시작품 대모 단계
	TRL 8	☐	☐	TRL 8	시제품 설치 및 성능시험 단계
사업화 단계	TRL 9	☐	☐	TRL 9	현장적용/사업화 단계

2) 연차별 세부 성과 목표

연차	구분	핵심성과	단위성과	성과지표	목표치	가중치	양적 성과
1차	주관	Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘 개발	토양수분과 Neutron의 상관성 분석 연구 사례조사	토양수분관측에 관한 선행연구조사	선행연구조사 10건 이상	20	비SCI 2 건
			Cosmic-ray 기반 토양수분 Calibration 기술	Cosmic-ray 기반 토양수분 Calibration 기술 및 산정	Cosmic-ray를 이용한 토양수분 산출	20	
	공동	토양수분량 관측시스템 설치 운영에 관한 연구	시험유역 운영 사례조사	토양수분량 시험유역 관측소 설치 및 운영에 관한 선행연구조사	선행연구조사 10건 이상	10	비SCI 1 건
			유역환경조사	지리적 조건 파악 및 측량조사	유역 내 측량 조사	10	
				위성, 지형모델 및 지상 관측망을 통한 기상특성조사	시험유역리스트 5곳 이상 조사	10	
				토양특성조사	시험유역리스트 5곳 이상 조사	10	
			시험유역 내 설치 및 운영	유전율식 기반 토양수분량 계측기 설치	DB 구축	20	
	계						100

연차	구분	핵심성과	단위성과	성과지표	목표치	가중치	양적 성과
2차	주관	Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘 개발	Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘 고도화	Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘 고도화	Cosmic-ray 토양수분 고도화	20	SCI 1 건 비SCI 1 건
			Cosmic-ray의 산출 결과의 검증	기존 토양수분 기기와의 Cosmic-ray 의 산출 결과의 검증	산정 결과의 비교	20	
	공동	토양수분량 관측시스템 설치 운영에 관한 연구	유전율식 비교분석	건토중량법을 통해 유전율식과 비교분석 활용성 제안	현장횟수 5회 이상	5	비SCI 2 건
			유지관리 및 자료 수집	유지관리 및 데이터수집	2주 1회	5	
				품질관리 및 DB화	2주 1회	10	
			계측시스템 평가	계측시스템 설계기법 평가	물수지 평가	20	
				계측시스템 활용 방안	면단위의 계측시스템 활용방안 제시	20	
			계				

3) 핵심 연구 성과

연번	핵심성과 (CTE)	핵심성과 설명	연구기관	해당 연차	TRL
1	Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘 개발	Cosmic-ray 기반 토양수분 산정 알고리즘 교정·보정 (Calibration)	성균관대학교 산학협력단	1차 연도	4
2	토양수분량 관측시스템 설치 운영에 관한 연구	시험유역 설치 운영에 관한 연구	한국수자원 조사기술원	1차 연도	4
3	Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘 개발	Cosmic-ray 기반 토양수분량 산출 알고리즘 고도화	성균관대학교 산학협력단	2차 연도	4
4	토양수분량 관측시스템 설치 운영에 관한 연구	유전율식 토양수분량 관측 운영 및 평가	한국수자원 조사기술원	2차 연도	4

1. 국내 기술 개발 현황

가. 국내 Cosmic-ray 센서 기반의 토양수분 관측 연구 현황

국내에서는 몇몇 토양수분 관측소에서 토양수분이 측정되고 있으며, 대부분 지점 단위 토양수분 데이터를 생산한다. 또한 관측소 설치 기준, 관측소 운영 기법, 관측 시스템 및 관측자료 D/B 구축 기법, 품질관리 기법 등에 대한 체계화가 이루어지지 않아 토양수분 자료를 이용한 연구가 더딘 실정이다. 연구개발이 시작된 시점(2018년)을 기준으로 국내에서는, 성균관대학교에서 진행한 CRNP 센서를 통해 토양수분을 측정하기 위한 연구를 제외하면 토양수분의 측정에 CRNP 센서를 활용한 연구는 전무하다.

나. 국내 토양수분 관측소 구축 현황

국내에서는 환경부, 기상청, 농업진흥청 등 여러 기관에서 토양수분 자료를 측정하지만 자료 공유 및 배포가 제대로 이루어지지 않고 있다. 따라서 토양수분을 활용한 연구들이 활발하게 이루어지기 어렵고, 토양수분 자료의 활용 방안에 대한 구체적인 가이드라인이 제시되지 못하는 실정이다. 이러한 상황을 비추어 볼 때, 본 과업에서 목표로 하고 있는 토양수분관측소 설치 및 운영 방안에 대한 구체적인 제시가 필요하다.

1) 성균관대학교 Cosmic-ray 토양수분 관측소

- 성균관대학교에서는 Cosmic-ray Neutron Probe (CRNP) 장비를 통한 토양수분 측정 자료 보정 및 검증을 위하여 CRNP 센서, FDR 센서 토양수분 지점 관측 사이트를 구축하였다 (김형록 등, 2016). 관측 지점은 성균관대학교 자연과학캠퍼스 식물원이며 (Fig. 2.1.1), CRNP의 설치 이전 해당 연구 지역의 타당성 검증을 위하여 1년간 FDR 센서를 활용하여 토양수분을 측정하였다. 관측 사이트의 적합성 검증은 FDR 센서가 설치된 지점에 대한 실내 토질실험(평균 함수비, 비중, 액성한계, 소성한계, 공극률, 입도분포 등) 및 토양수분 자료의 변동성 분석을 통하여 이루어졌다. 이를 통해 실험 지역 토양수분 자료의 실효성을 평가하였으며 CRNP를 추가 설치하여 관측 사이트가 설계되었다 (Fig. 2.1.2).
- CRNP를 활용한 토양수분 측정 결과 FDR 센서를 통해 관측된 토양수분의 변동성과 상당히 잘 일치하는 것을 확인하였으나, 더욱 정밀한 연구를 위해서는 관측되는 중성자 개수를 보정할 필요가 있다고 강조하였다. 이렇듯 CRNP는 비파괴적이며, 단일 지점에 설치하기 때문에 관리 및 보수가 용이하여 보다 편리하게 토양수분 자료 획득이 가능하다는 장점을 지닌다.

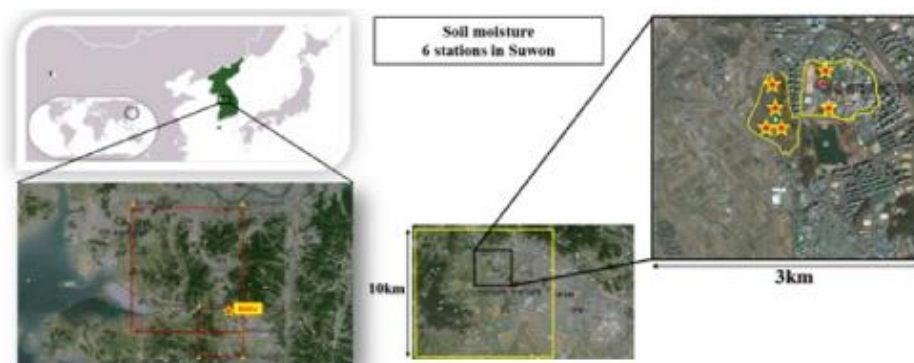


Fig. 2.1.1 CRNP 검증을 위한 6개 FDR 센서 설치 위치 (김형록 등, 2016)



Fig. 2.1.2 (a) FDR 센서 설치 토양 단면 FDR 센서 및 (b) CRNP

2) 설마천 토양수분 관측소

- 설마천 토양수분량 관측소에는 TDR 센서가 Transect A, Transect B, Transect C 상에 위치하고 있다. 좌측 사면의 특성을 파악할 목적으로 구축된 Transect A에는 A1부터 A7에 이르기까지 토심별로 21개 (8개 지점)의 센서가 매설되어 있다. Transect B에는 B1에서 B8에 이르기까지 18개 (7개 지점)의 센서가 위치하고 있다. 또한 사면 하단부의 수문학적인 반응을 파악할 목적으로 구축된 Transect C에는 12개(4개 지점)의 측정센서가 매설되어 있다.
- 설마천 토양수분량 관측소에서는 토심별 51개 지점 (19개 지점)에서 토양수분량을 측정하고 있다. 토양수분량 측정시스템은 약 50여초의 전자기파 (electromagnetic wave)의 전송과 반향을 가진다. 이들의 신호 분석을 통해 토양수분량은 2시간 간격으로 반복·측정되고 있다. 토양수분량 측정에 적용되고 있는 2시간 측정간격은 시간 대비 34%의 시스템 가동률을 보인다.

3) 청미천 토양수분 관측소

- 청미천 토양수분량 관측소는 충청북도 음성군 수레의산 내에 위치하고 있다. 수레의산 산지사면은 범륜사 사면보다 토양층의 심도가 깊고, 토양층의 발달상태가 양호하다. 사면경사도 급경사와 완경사를 폭넓게 포함하고 있어, 사면의 수문학적인 가치가 높다. 식생은 침엽수림이 최상단부에 부분적으로 분포해 있지만, 최상단부 이하 지역에는 떡갈나무 등의 활엽수림이 성장하고 있다. 측정구역은 상단부에서 사면출구까지를 구성하는 1개 주요 사면과 상부 기여사면의 역할을 수행하는 3개 보조사면으로 구성되어 있다. 청미천 토양수분량 측정시스템은 Transect A를 구성하는 주요사면과 Transect B, C, D의 3개 부속사면으로 구성되어 있다. Transect A에는 A1부터 A9에 이르기까지 토심별로 29개(9개 지점)의 센서가 매설되어 있다. Transect B에는 6개(2개 지점)의 센서가 매설되어 있다. 사면 우단부의 부사면인 Transect C에는 9개(3개 지점), 좌측 하단부의 부사면인 Transect D에는 12개 (4개 지점)의 센서가 매설되어 있다. 청미천 관측소에는 총 18개의 위치에 56개의 센서가 매설되어 있다. 토양수분량 측정시스템은 약 50여초의 전자기파의 전송과 반향을 가진다. 이들의 신호 분석을 통해 토양수분량이 2시간 간격으로 반복·측정되고 있다.

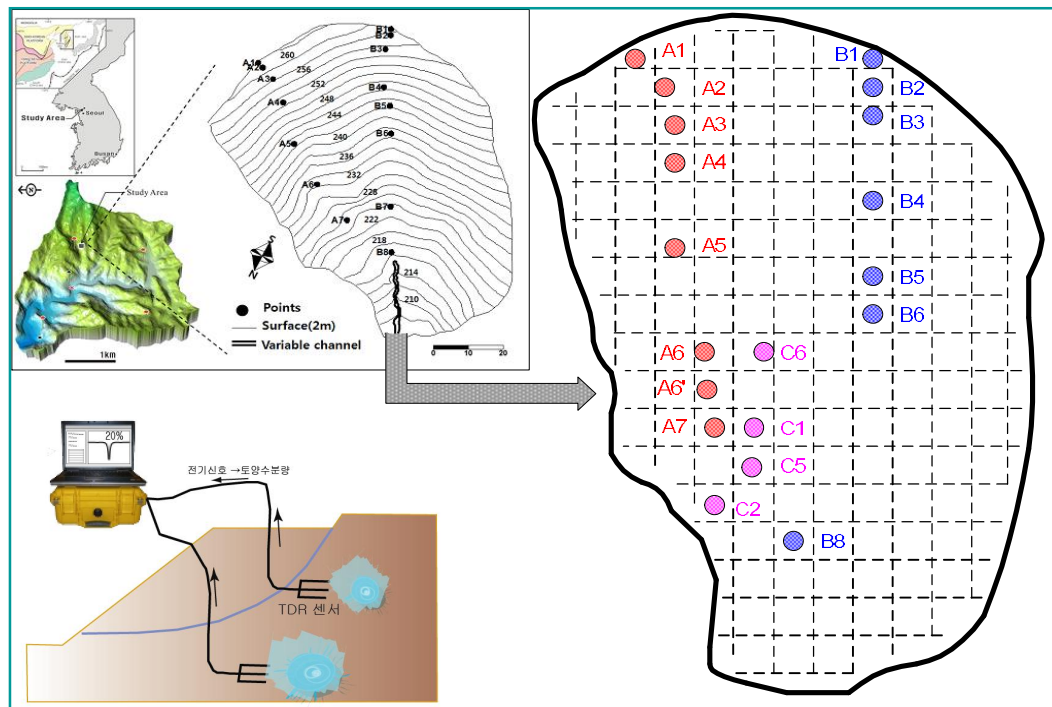


Fig. 2.1.3 설마천 관측소 토양수분량 측정시스템

Table 2.1.1 설마천 관측소 토양수분량 측정센서 정보

Transect	지점	센서 수	토심[cm]
A	A1	2	10, 30
	A2	3	10, 30, 60
	A3	3	10, 30, 60
	A4	3	10, 30, 60
	A5	3	10, 30, 50
	A6	2	10, 20
	A6'	3	10, 30, 40
	A7	2	10, 30
B	B1	3	10, 30, 60
	B2	2	10, 30
	B3	3	10, 30, 60
	B4	2	10, 30
	B5	2	10, 30
	B6	3	10, 30, 60
	B8	3	10, 30, 60
C	C1	3	10, 30, 60
	C2	3	10, 30, 60
	C5	3	10, 30, 60
	C6	3	10, 30, 60
계	19	51	-

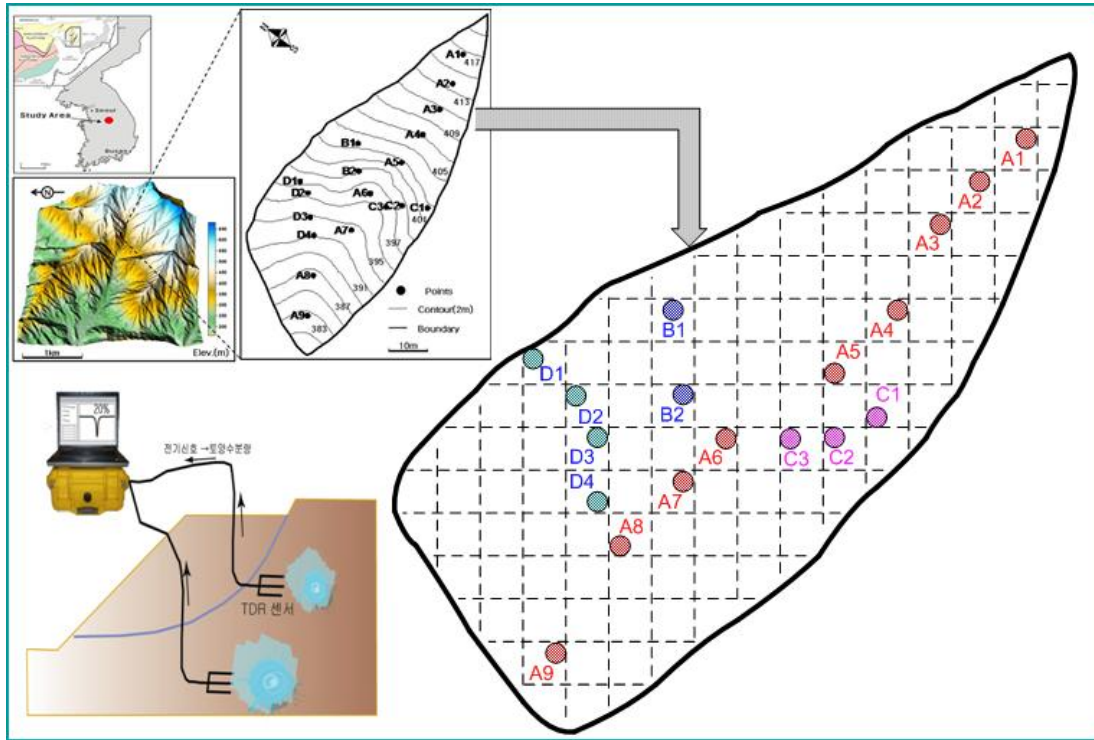


Fig. 2.1.4 청미천 관측소 토양수분량 측정시스템

Table 2.1.2 청미천 관측소 토양수분량 측정센서 정보

Transect	지점	센서 수	토심[cm]
A	A1	3	10, 30, 60
	A2	3	10, 30, 60
	A3	3	10, 30, 60
	A4	3	10, 30, 60
	A5	3	10, 30, 60
	A6	3	10, 30, 60
	A7	3	10, 30, 60
	A8	4	10, 30, 60, 90
	A9	4	10, 30, 60, 90
B	B1	3	10, 30, 60
	B2	3	10, 30, 60
C	C1	3	10, 30, 60
	C2	3	10, 30, 60
	C3	3	10, 30, 40
D	D1	3	10, 30, 60
	D2	3	10, 30, 60
	D3	3	10, 30, 60
	D4	3	10, 30, 60
계	18	56	-

○ 설마천, 청미천 지역의 유전율식 센서는 지면으로부터의 깊이에 따라 설치되어 깊은 지점의 토양수분을 획득할 수 있다는 장점을 지닌다. 그러나 면 단위 토양수분의 산출을 위해서 설마천에서는 51개의 지점 센서가, 청미천에서는 56개의 센서가 사용되었다. 이는 CRNP 센서에 비해 시간과 비용적으로 매우 비효율적이다. 또한, 데이터 획득 시나 센서 보수 및 교체 역시 시간과 비용적으로 소모되는 자원이 상당하기 때문에, 보다 빠른 시일 내에 면 단위 토양수분 획득을 위한 시스템이 개발되어 체계화되어야 할 것이다.

2. 국외 기술 개발 현황

가. 운영 중인 국제 Cosmic-ray Neutron Probe 토양수분 관측소 현황

미국 등 여러 선진국에서는 비교적 오래전부터 토양수분에 대한 이론적인 개념을 정립하여 토양수분을 비교적 정기적으로 측정해 오고 있으며, TDR 센서 및 FDR 센서와 같은 유전율식 장비를 이용한 토양수분 관측소 구축, 자료의 품질 향상을 위한 제반 기술과 자료처리 및 품질관리 방법 등을 체계화하여 실무에 이용하고 있다. 최근에는 고해상도의 공간대표성을 지닌 CRNP 기반 토양수분 자료의 활용 가능성을 높게 평가하여, 수문 조사 및 데이터 활용 연구를 선도하는 국가들에서는 CRNP 기반 토양수분 관측소를 활발히 운영하고 있다.

1) International Soil Moisture Network (ISMN)

- ISMN은 국제적인 지점 토양수분 네트워크로, Vienna University of Technology (TU-Wien)와 ESA를 포함한 전 세계 총 59개국의 2400여개 토양수분 관측소들이 협력하여 구축되었으며, 우리나라의 2개 지점의 데이터(설마천, 청미천 지점) 또한 공유되고 있다. ISMN은 기본적으로 지점 기반 토양수분 자료를 공유하며, TDR 센서, FDR 센서 및 CRNP 센서 기반으로 운영되는 관측소가 주를 이루고 있고, 주로 다른 모델들의 성능을 향상시키거나 원격탐사 기법을 활용한 토양수분 관측 자료를 검증하여 정확도를 올리는 것을 목표로 하고 있다.

2) COsmic-ray Soil Moisture Observing System (COSMOS)

- 앞서 설명한 ISMN 네트워크에도 포함되어 있는 COSMOS는 미국의 애리조나 대학교 (University of Arizona)에서 관리 및 운영을 하고 있는 세계 최초이자 최대 규모의 CRNP 기반 토양수분 관측 네트워크이다. 최초로 대륙 규모 네트워크의 연속적인 데이터를 제공함으로써 COSMOS는 기상, 농업, 생태학 등 다양한 분야의 연구에 도움을 주었다. 또한 이 프로젝트를 통해 Cosmic-ray와 관련된 기술을 과학자와 엔지니어에게 가르치고, 지표수가 날씨와 기후에 미치는 영향에 관한 정보를 대기과학자들에게 제공하는 등, 토양수분 및 동결강수깊이가 기후 변동 및 변화에 미치는 영향을 대중과 정책입안자에게 알리고 있다 (Zreda et al., 2012).
- 미국 전역에 설치된 500개의 CRNP 센서는 토양수분량, 눈 또는 식생의 수분량을 측정하는데 사용되며, 기존 시설에 설치되어 장기적인 운용 및 보수에 용이하고, 탐침의 안정성을 확보했다. COSMOS 네트워크는 데이터 취급에 있어서 반경 약 300 m의 영역과 최대 깊이 50 cm에 걸쳐 평균 토양수분 함량을 측정할 수 있는 기술을 통해, 원격탐사를 활용한 광역적 범위의 토양수분 추정치 값과 지점데이터의 차이를 메워 비교적 정확한 데이터를 제공하는 것을 목적으로 한다. 프로브에서 관측된 토양수분량, 눈의 함수량, 중성자 수, 온도, 압력, 상대습도와 같은 다양한 데이터들은 인터넷을 통해 COSMOS 네트워크에서 제공되고 있다.

3) COSMOS-UK

- COSMOS-UK는 영국 전역에 걸친 물리적조건과 기후조건 등을 고려한 토양수분 데이터를 제공하기 위해 생태수문연구센터 (Centre for Ecology & Hydrology)에서 2013년에 구축되었다. COSMOS-UK는 토양수분 데이터를 영국 전역에서 관측하여 준 실시간으로 제공하고 있다. 공공적으로 접근 가능한 실시간 데이터는 홍수와 같은 자연재해에 대한 예측과 그로 인한 빠른 대책 수립, 농작물의 물 사용 효율성을 향상시킴으로써 더 나은 수확량 예측 및 경제성 확보, 토양수분량에 관련된 기상학적 예측, 토양에서 배출되는 온실가스 배출모델의 입력 데이터 확보 등 더 정확한 기상모델 생성과 더 나은 현재 및 미래의 수자원 정보를 생산하고 있다.
- COSMOS-UK는 장기네트워크를 구축하여 제공되는 정보의 질과 관측 지점의 수를 꾸준히 향상시키고 있으며 현재 50개의 지점에서의 데이터를 제공하고 있다. 각 관측소에서는 Cosmic-ray를 이용해 약 30에이커 (0.121 km²)의 면적에 걸친 토양수분량을 관측할 수 있는 기구가 설치 되어있다.

- 대기압, 습도 등의 데이터를 처리할 수 있는 센서가 CRNP 센서 외에도 지점마다 설치되어 있으며, 일반적인 구성은 Fig. 2.2.1과 같다.

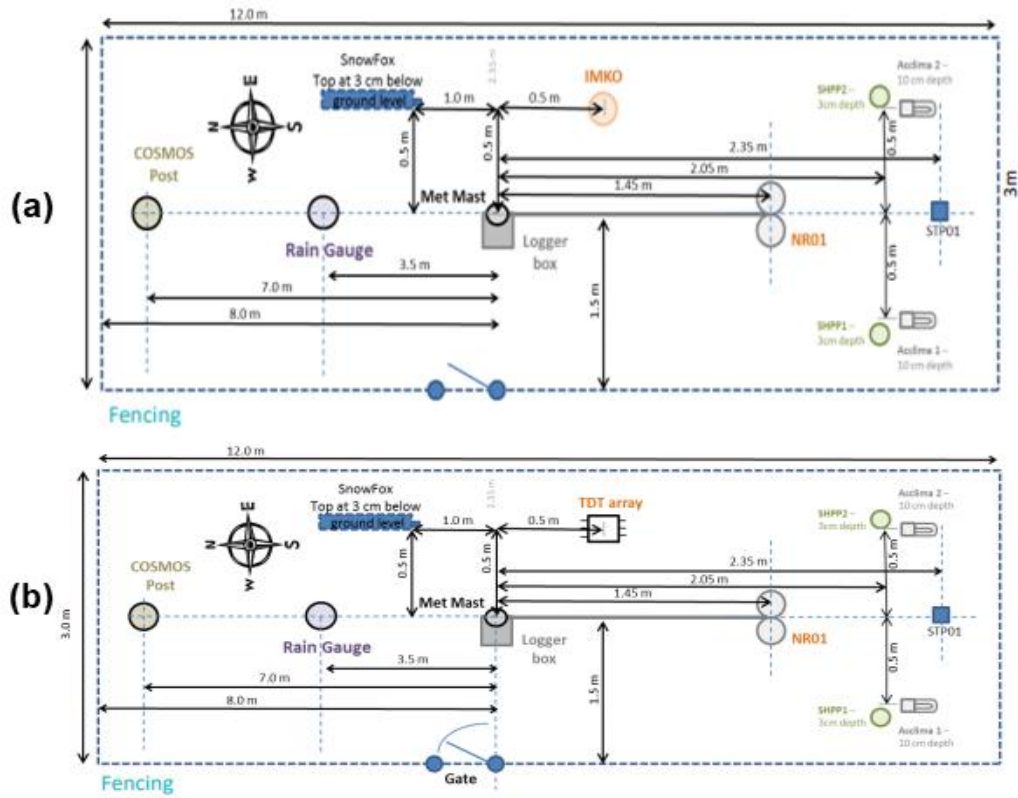


Fig. 2.2.1 (a) 기존의 COSMIC-UK 관측소의 설비배치
(b) 2016년 이후 TDT기술이 도입된 설비배치 (David Boorman et al., 2018)

- COSMOS-UK 네트워크에서 모니터링 하는 데이터는 다음 Table 2.2.1과 같으며, 추가적으로 Table 2.2.2의 자료를 제공하고 있다.

Table 2.2.1 COSMOS-UK에서 모니터링 하는 데이터

데이터 종류	단위	기록 주기[min]
Precipitation	mm	1
Absolute humidity	gm ⁻³	30
Relative humidity	%	30
Air temperature	°C	30
Atmospheric pressure	hPa	30
Incoming longwave radiation	Wm ⁻²	30
Incoming shortwave radiation	Wm ⁻²	30
Outgoing longwave radiation	Wm ⁻²	30
Outgoing shortwave radiation	Wm ⁻²	30
Wind direction	degrees	30
Wind speed	ms ⁻¹	30
3D wind speed data	ms ⁻¹	30
Snow depth	mm	-
Snow water equivalent	mm	-
Volumetric water content at three depths (15cm, 40cm, 65cm) (IMKO Profile)	%	30
Soil heat flux	Wm ⁻²	30
Soil temperature at five depths (2 cm, 5 cm, 10 cm, 20 cm, 50 cm)	°C	30
Soil temperature and volumetric water content (10cm, and up to 4 other depths) (TDT)	°C&m ³ /m ³	30

Table 2.2.2 COSMOS-UK에서 파생되는 데이터

파생되는 데이터 종류	단위	기록 주기
Net radiation(drived from above)	Wm ⁻²	30min
Volumetric water content(CRNS)	m ³ /m ³	Daily/Hourly
Typical sensing depth of CRNS(D ₈₆)	mm	Daily/Hourly
Neutron counts from CRNS(corrected)	cph	Hourly
Potential evaporation	mm	Daily

- 이렇게 측정된 데이터들과 추가적이 계산으로 얻어낸 데이터들의 정확성을 검증하기 위한 데이터 프로세스를 거치며, 데이터 처리과정으로는 Quality control이 현재 COSMOS-UK에서 수행되고 있다 (Table 2.2.3).

Table 2.2.3 COSMOS-UK에서 데이터에 적용되는 Quality control의 종류

시 형	상 세
ZERO DATA	값이 적절한 값이 나오지 않았을 경우 그 값을 0이라고 가정한다. missing data를 0이라고 가정하기 때문에 실제 값이 0인 데이터가 missing data로 처리된다.
TOO FEW SAMPLES	30분 동안의 sample값이 너무 적을 경우 30분 시간단위의 데이터들을 합 하거나 평균하여 처리한다.
LOW POWER	장비의 배터리가 적을 경우 측정값이 소실되거나 신뢰할 수 없는 값이 나온다고 할 수 있다. 특히 11V이하 일 경우 데이터는 소실된다고 볼 수 있다.
SENSOR FAULT	고장난 것으로 판정된 센서와 관련된 측정값
DIAGNOSTIC FLAG	관측기기에 의해 diagnostic flag(진단 플래그)로 할당되는 데이터
OUT OF RANGE	각 site마다 변수의 최솟값과 최댓값이 산정되어 있는데, 데이터가 허용 가능한 범위 값을 벗어난 경우 이 값은 제거된다.
SECONDARY VARIABLE	다른 변수에 의존하는 데이터는 부정확할 수 있다. 예를 들어 측정온도가 허용범위를 벗어날 경우 이에 의존하는 방사선 구성요소의 값들은 신뢰하기 어렵다. 따라서 주 변수가 정확하지 않을 경우 종속변수의 값을 제거한다.
SPIKE	인접한 값과 차이가 나면서 임계값을 벗어난 경우 이 값들은 제거된다.
ERROR CODES	데이터를 기록하는 프로그램에서 센서 또는 프로그램의 고장으로 인해 오류 코드 값을 할당한 데이터는 7999로 기록될 수 있다.

1. 성균관대학교

가. 선행연구 사례 조사

성균관대학교 산학협력단에서는 한국형 토양수분 관측시스템 설계를 위해 토양수분관측 기술에 관한 선행 연구 사례를 조사하였으며, 15건 이상의 인공위성 및 Cosmic-ray를 이용한 토양수분 관측 사례를 조사하는 성과를 거두었다. 조사 자료를 바탕으로 본 연구의 연구지역인 한반도 산악지형에서 면 단위 토양수분 산출을 위하여 고려해야할 사항을 확인하였으며, 이를 통해 연구를 수행하였다.

1) Cosmic-ray 토양수분 관측 원리

- Cosmic-ray는 11년 태양활동주기에 따라 우주에서 들어오는 중성자로 이루어진 전자기파이다. 지구 자기장을 뚫고 지나온 Cosmic-ray 입자는 공기 중 원자와 충돌하여 점점 에너지가 낮아지게 된다. 에너지가 낮아진 중성자는 다음과 같이 세 가지로 구분될 수 있다 (Zreda et al., 2012).
 - High-energy cascade neutrons
 - Fast neutrons
 - Low-energy neutrons
- 대기권에 진입한 primary Cosmic-ray particle은 대기권의 원자와 충돌해 High-energy cascade neutron을 방출한다. 방출된 중성자는 충돌을 거듭하며 더욱 낮은 에너지 준위를 가지게 된다. Fast neutron은 High-energy cascade neutron이 다른 원자핵과 충돌한 결과 나온 1 Mev 수준의 에너지를 가지는 중성자이며, 방출된 중성자는 원자핵과의 충돌을 반복하며 지면과 가까워진다.
- High-energy cascade neutron이 다른 원자핵과 충돌해서 합쳐진 후 불안정해진 원자핵이 붕괴되면서 Fast neutron이 생성되는 현상을 증발이라 한다. Fast neutron은 물질을 투과할 수 있는 에너지를 가지고 있어, 공기 중에서는 수백 미터를 투과 가능하지만, 지표에서는 수십 cm 밖에 투과하지 못한다. 지면으로 들어간 Fast neutron은 여러 원자들과 충돌하게 되며 에너지를 잃게 된다. 낮은 에너지 중성자는 에너지 준위가 0.5 eV 보다 크면 열외(epithermal) 중성자로, 0.025 eV 급 에너지를 가지면 열(thermal) 중성자로 나누어진다. Fast neutron이 원자핵과 부딪혀 에너지를 잃으며 다른 중성자를 방출하는 것을 조정이라고 한다. 조정에서 Fast neutron이 잃게 되는 에너지양은 부딪히는 원소의 stopping Power에 비례해서 늘어난다.

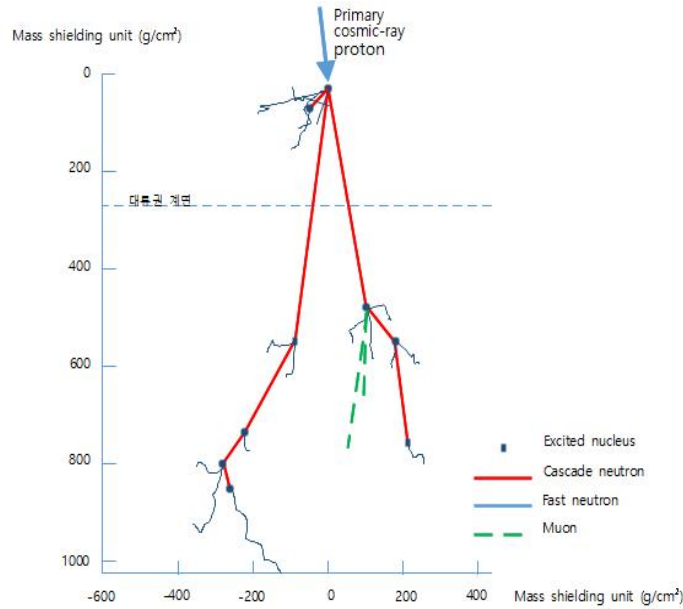


Fig. 3.1.1 Radiation transport code Monte Carlo N-Particle Extended (MCNPX; Pelowitz, 2005) cascade 시뮬레이션 입자 추적 결과

- Fig. 3.1.2은 암석을 지나는 방사선이 받은 전체 Stopping Power에 각 원소가 얼마만큼 기여를 했는지 가장 흔한 4가지 암석의 경우를 모두 보여준다. 수소 원자는 수분의 존재에 크게 영향을 받으므로, 함수량에 따라 4가지 경우로 나눌 수 있다. 그래프에서, 암석의 종류가 바뀌어도, Stopping Power 원소 순위는 바뀌지 않는다. 함수량이 0.01kg/kg 까지 수분량이 줄어들어도 물속에 존재하는 수소 원자가 전체 Stopping Power에 가장 크게 기여하는 것으로 나타난다 (Zreda et al., 2012). 조정 과정으로 인해, 방출된 열외 중성자와 열 중성자는 다시 지표면 위로 분산된다. 수소원자와 충돌이 적은 중성자들은 높은 에너지 준위를 유지할 수 있다. 이러한 중성자들도 지표면 위로 분산된다.

$$SM = \frac{a_0}{\frac{\phi}{\phi_0} - a_1} - a_2 \quad (3.1.1)$$

- Eq. 3.1.1는 측정된 중성자 강도로 토양수분을 산출하는 데 사용되는 교정식이다. Eq. 3.1.1에서 ϕ_0 는 건조 지반 위에서의 중성자 세기이고, a_0 , a_1 , a_2 는 고정 상수이다. 이 식은 토양 수분량이 0.02 kg/kg 이상일 때 유의미한 결과를 나타내기 때문에 일반적인 토양수분 범위를 갖는 대부분의 지역에서 사용 가능하다.
- Fast neutron을 조정하는 수소공급원에는 격자수와 눈, 식생, 대기 중 수증기가 포함되어 있다. 이들을 계산과정에서 고려하지 않으면 토양수분이 큰 오차를 가지게 되므로, 이러한 인자들을 고려하는 과정이 필수적이다. 그 중 격자수는 Fast neutron과 흙의 상호작용에 영향을 주어 CRNP 센서의 유효 깊이를 알게 만들고 토양 수분 측정값 보정식에도 영향을 끼친다.
- Zreda et al.(2012)에서는 격자수와 토양 유기물의 경험적 추정을 통해, Cosmic-ray 관측값을 보정하여 유의미한 토양수분 값을 산출하기도 하였다.

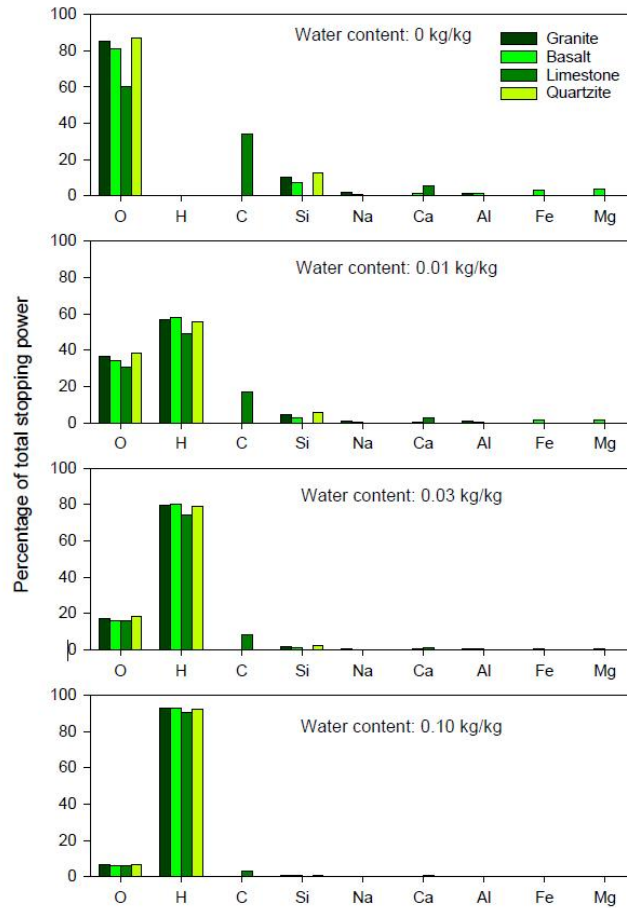


Fig. 3.1.2 4가지 혼한 암석에서 각 원소가 차지하는 Stopping Power 비율 (Zreda et al., 2012)

2) Cosmic-ray 관측기기에 관한 조사

○ Hydroinnoba LLC 사의 Cosmic-Ray 중성자 검출기

- Fig. 3.1.3에는 Cosmic-Ray 관측 기기의 구조가 나타나있다. 3번과 4번은 중성자를 직접적으로 검출하는 중성자 검출기로, 각각 다른 종류의 중성자를 검출한다. 3번은 고속 중성자 강도를 측정하며, 4번은 저속 중성자 강도를 측정한다. 중성자 검출기의 내부는 헬륨 가스로 채워져 있으며 튜브로 감싸져 있는데, 이 헬륨 가스가 중성자 강도와 반응을 통해 중성자 튜브에 이온화를 일으켜 전기적 신호를 생성한다. 이렇게 검출기에서 생성된 중성자 강도는 1번인 Pulse module로 전송된 후, 2번인 Data logger로 전송되어 기록된다. Data logger 내부에는 Iridium satellite modem이 장착되어 있는데, 이는 외부 안테나와 연결되어 있다. 또한, 온도계, 습도계, 그리고 기압계가 역시 Data logger 내부에 설치되어 있다. 이는 Data logger에 기록된 데이터의 품질관리를 위해 사용되며, 데이터의 신뢰도 확보에 있어 주요한 역할을 담당한다. 5번은 Data logger에 파워를 제공하는 battery로, battery 수준 측정을 위한 센서가 함께 장착되어있다. 배터리 수준 역시 데이터 신뢰도 확보에 있어 주요한 역할을 담당한다.
- Fig. 3.1.4은 CRS-1000 모델로, 내부에 기압계를 포함한 센서와 더불어 logger와 Cosmic-ray 중성자 검출기가 전부 포함되어 있는 통합형 모델이다. 통합형이기 때문에 비교적 가볍고 작으며, 파워 소비가 적은 장점을 지닌다.

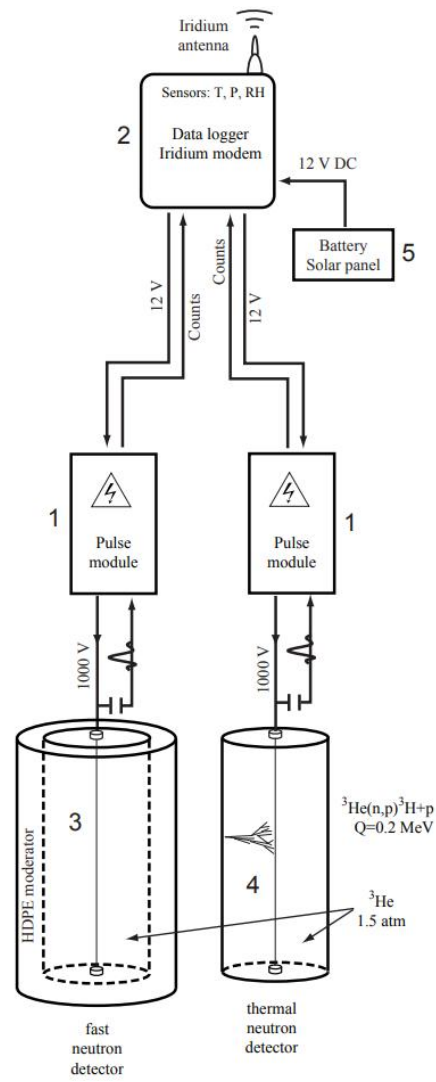


Fig. 3.1.3 Cosmic-ray 중성자 검출기
(Zreda et al., 2012)



Fig. 3.1.4 CRS-1000모델

2) 토양수분과 neutron intensity의 상관성 분석 사례조사

- 앞서 언급했듯이, 격자수와 유기 물질은 중성자 강도를 낮추는 효과가 있다. 중성자는 수소 원자와 반응하여 에너지가 낮아지기 때문에, 수소 원자가 많을수록 세기가 낮아진다. 따라서, 토양수분을 포함하여 다른 수소 공급원들이 많을수록 중성자 강도는 감소한다. Fig. 3.1.5에는 중성자 강도와 토양수분간의 관계가 나타나있다. 격자수를 고려했을 시에 토양수분량이 낮아지는 것을 확인할 수 있는데, 이는 수소 원자에 의한 조정효과로 중성자 강도가 감소했기 때문이다.

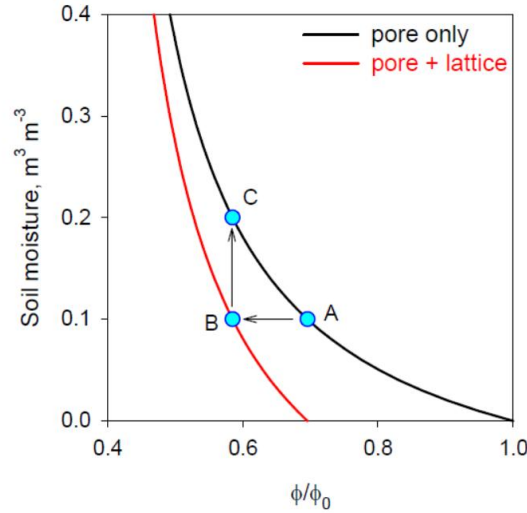


Fig. 3.1.5 토양수분과 중성자 강도의 관계
(Zreda et al., 2012)

○ 관측반경과 유효깊이

- CRNP 센서를 통해 검출된 토양수분은 수평적으로 반경 300 m 에 달하는 관측반경을 가질 뿐 아니라, 지면으로부터 특정 거리만큼의 토양을 대표하는 값이기도 하다. CRNP 센서의 관측 반경과 유효깊이는 Fig. 3.1.6를 통해 표현된다.

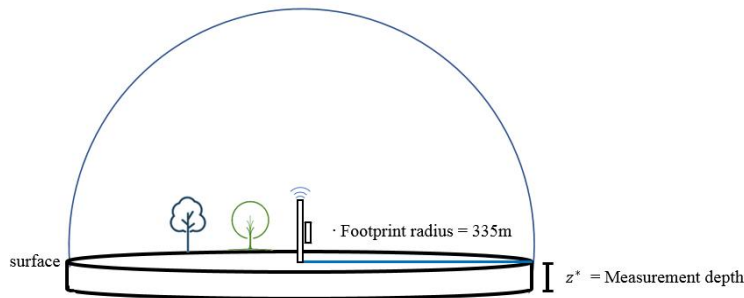


Fig. 3.1.6 CRNP 센서로부터 관측반경과 유효깊이

○ 관측 반경(Footprint radius) 산정

- Fig. 3.1.7을 보면 중성자 검출기 높이에 따른 중성자의 분포를 볼 수 있다. 본 연구지역에 설치된 중성자 검출기는 지면에서 1-2 m 위에 설치되어 있기 때문에, 그림과 같이 반경 약 300 m의 관측범위를 가진다고 할 수 있다. 그러나 이 관측반경은 검출기의 높이 외에도 여러 요인에 의해 영향받기 때문에, 그러한 요인들을 고려하여 관측반경을 산정하여야 한다.
- Köhli et al. (2015)의 연구에 따르면, 관측반경을 좌지우지하는 가장 큰 요인은 습도와 토양수분이다. 선행연구에서는 지형적인 특성에 의해 달라지는 관측반경을 Fig. 3.1.8과 같이 분포도를 통해 분석하였다. Fig. 3.1.8은 토양수분이 5%이며 습도가 5g/m³ 지점에서 측정한 관측반경이다. Fig. 3.1.8 (a)를 보면, 육지에 비해 해상에 있을 때 관측반경이 중성자 강도 분포 범위가 현저히 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 육지에 비해 토양에 도달하는 중성자

강도 역시 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 수소 공급원들의 영향으로 판단된다. Fig. 3.1.8 (b)는 강으로부터 약 50 m 떨어진 지점에 위치한 CRNP 센서의 관측반경을 표현한 그림이다. 토양에 도달하는 중성자 강도와 검출된 중성자 강도 모두 육지와 비슷한 수준인 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.1.8 (c)는 20°의 경사가 있는 지점에서 측정한 관측 반경이다. 경사 위쪽과 아래쪽이 별반 다르지 않은 것을 확인할 수 있다. Fig. 3.1.8 (d)는 콘크리트 도로에서 측정한 관측반경으로, 도로부분이 다른 부분보다 약 10-20%정도 더 많은 중성자를 측정하는 것을 확인할 수 있다(빨간 원). 이는 콘크리트 내부에 수소 원자가 포함되어있어 나타나는 현상이다.

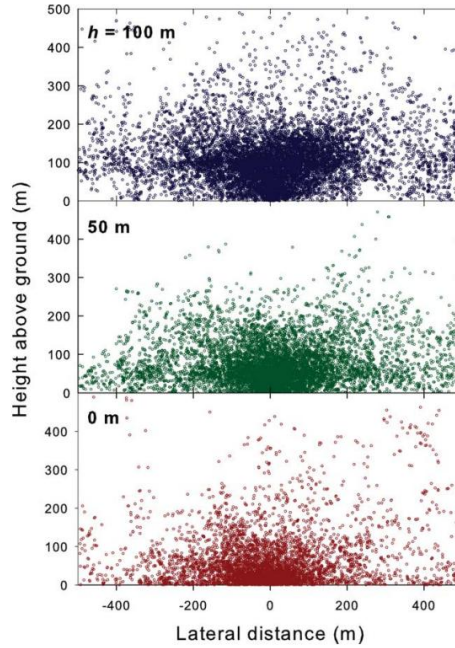


Fig. 3.1.7 CRNP 높이에 따른 중성자 분포도
관측결과

○ 유효깊이 (Measurement depth) 산정

- 유효 깊이 (Measurement depth)란 지표면으로부터 지구중심방향으로의 길이이며, 산정된 토양수분이 수직적으로 대표하는 길이를 의미한다 (Franz et al., 2012). Fig. 3.1.6를 보면, 지표면 위로는 반구형태의 관측범위를 보이지만, 지표면 밑으로는 원기둥 형태를 나타내는 것을 볼 수 있다. 유효깊이의 정의는 CRNP 센서를 통해 검출되는 중성자 강도의 86% 누적량과 반응하는 토양수분 분포 깊이로, 토양수분량과 직접적인 관계성을 가진다.
- Fig. 3.1.9은 깊이에 따른 중성자의 누적비율이다. 유효 깊이는 5.8 cm로, 유효 깊이 산정 식에 기준값으로 사용된다.

$$Length\ of\ water(L_w) = W_s + W_L + W_p \quad (3.1.2)$$

- Eq. 3.1.2에서 W_s 는 지표면에 분포된 수분, W_L 은 격자수를 의미하며 W_p 는 공극 내에 분포된 수분으로 토양수분을 의미한다. 이를 Eq. 3.1.3으로 다시 표현할 수 있다.

$$L_w(z) = W_s + \frac{\rho_{bd}(z)\tau(z)z}{\rho_w} + \theta(z)z \quad (3.1.3)$$

- Eq. 3.1.3에서 ρ_{bd} 는 토양용적밀도를, $\tau(z)$ 는 토양 광물 내에 포함된 격자수의 무게 비를 나타내며, z 는 깊이를 의미한다. $\theta(z)z$ 는 토양수분과 유효깊이의 곱으로 나타난다. 이를 z 에 대

한 식으로 풀면 유효깊이 산정 식을 얻을 수 있다(Eq. 3.1.4).

$$z^* = \frac{5.8}{\rho_{bd}\tau + \theta + 0.0829} \quad (3.1.4)$$

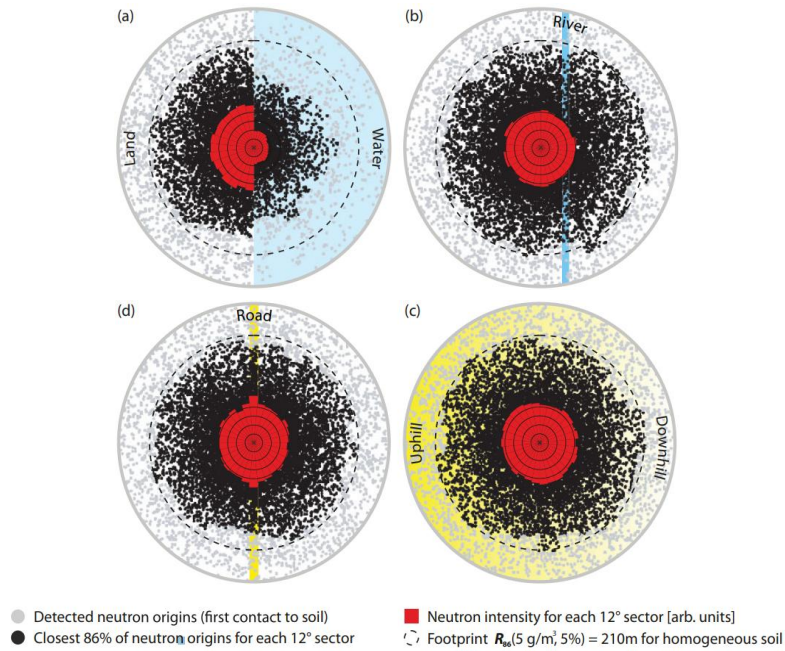


Fig. 3.1.8 지면의 특성에 따른 관측반경의 변화 및 중성자 분포 (Köhli et al., 2015)

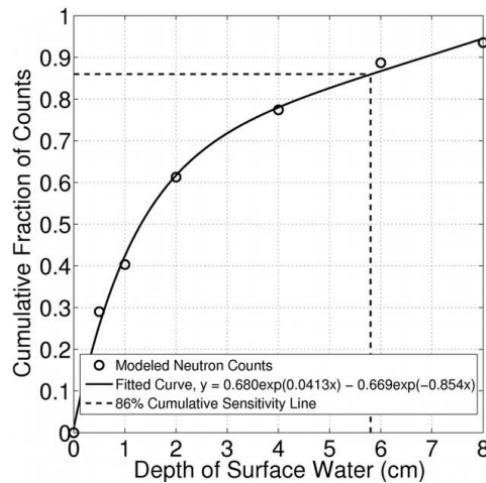


Fig. 3.1.9 CRNP센서의 관측깊이에 따른 중성자의 누적비율

- Fig. 3.1.10은 유효 깊이와 토양수분의 관계를 나타내고 있으며, 격자수의 함량에 따라 그 관계성이 달라지는 것을 확인할 수 있다. 격자수를 포함한 수분이 토양에 없을 경우, 유효깊이는 오로지 토양수분에 의해 결정된다. 따라서, 토양수분에 의한 영향만을 파악하기 위해서는 격자수를 포함한 다른 수소 공급원의 파악이 필수적이다.

3) 평지에서의 조정식

○ 면적 평균으로 토양 수분을 구할 때, 미국에서 이루어지는 COSMOS 프로젝트에서 공식적으로

정한 총 샘플의 개수는 108개이다.

- 이렇게 108개의 샘플을 가지고 평균을 낸 토양 수분값은 오차범위가 $0.01 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ 보다 적다 (Zreda et al., 2012). 거리에 따른 가중치 방법은 평균 토양 수분값에 미미한 영향을 끼칠 뿐이다. 하지만 최근에 비가 와서 습윤점에 도달하거나 토양 밑 30 cm까지 젖었을 경우에는 유효하다(Franz et al., 2012).

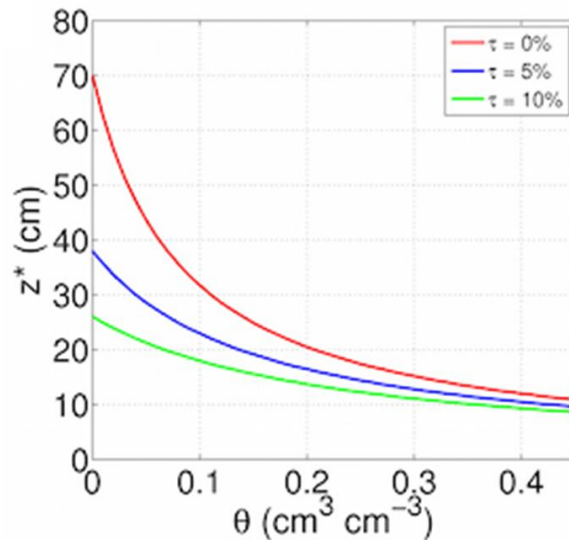


Fig. 3.1.10 유효 깊이와 토양수분의 관계
(Franz et al., 2012)

4) 토양수분과 중성자의 상관성 분석

- Fig. 3.1.1에는 위에서부터 차례로 중성자 강도, 강우, 토양수분이 나타나있다. 강우량과 중성자 강도의 관계를 보면, 9월 중순 부근 강우량이 많은 날에 중성자 강도의 급격한 하락을 관측할 수 있다. 이는 12월 중순 부근에서도 확인할 수 있는데, 이를 통해 간접적으로 강우량과 중성자 강도의 반비례 관계를 유추할 수 있다.

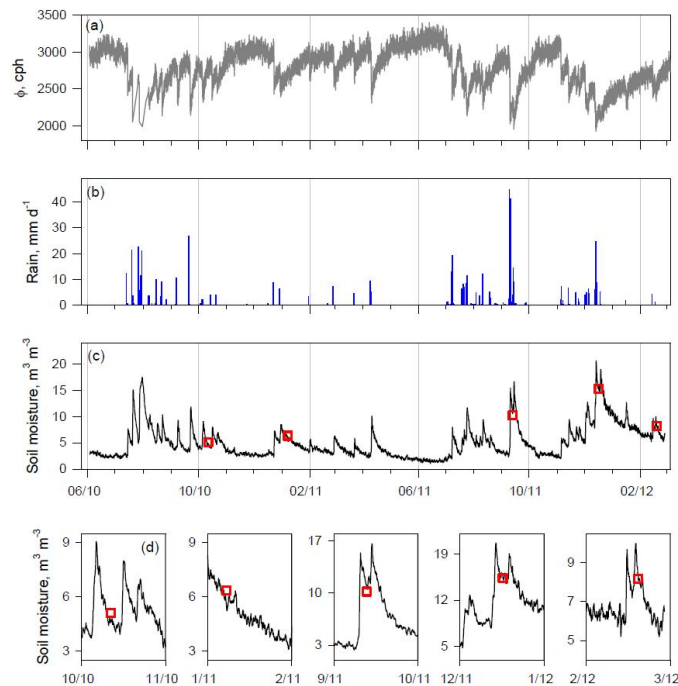


Fig. 3.1.11 시계열에 따른 중성자 강도, 강우량과 토양수분 추이
(Zreda et al., 2012)

- 시계열에 따른 중성자 강도와 토양수분 추이가 Fig. 3.1.11에 표현되어 있다. 먼저 Lemmon Cosmic-ray Laboratory에서 측정한 데이터를 보면, 토양수분과 중성자 강도의 뚜렷한 반비례 관계를 확인할 수 있다.

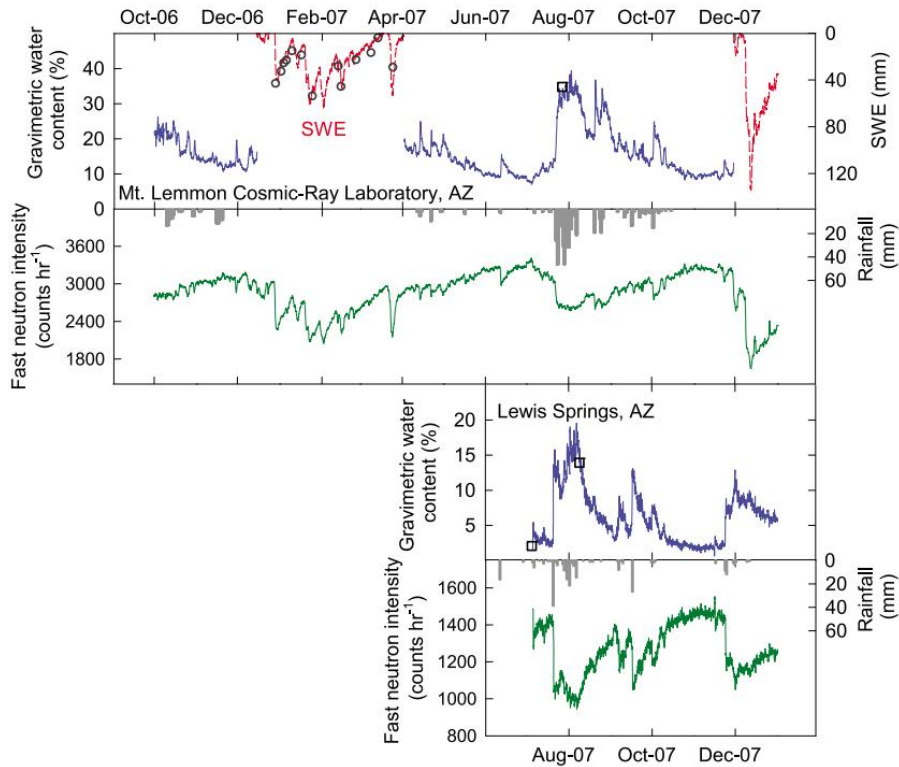


Fig. 3.1.12 시계열에 따른 중성자 강도와 토양수분 추이 (Desilets et al., 2010)

- 시계열에 따른 중성자 강도와 토양수분의 변동을 Fig. 3.1.12을 통해 확인할 수 있다. 고속 중성자 강도와 마찬가지로, 저속 중성자 강도도 비슷한 추이를 보이거나 일부 지역에서 불명확한 반비례 관계를 보인다. 따라서 저속 중성자 강도에 비해 고속 중성자 강도가 토양수분과 명확한 반비례 관계를 가짐을 알 수 있다.

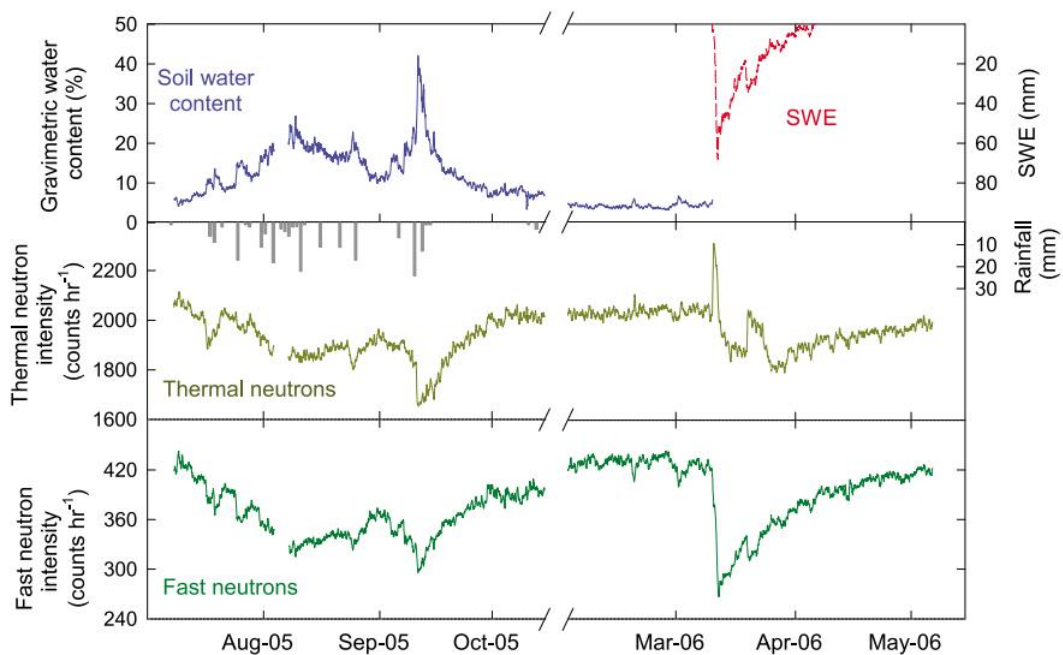


Fig. 3.1.13 시계열에 따른 고속 중성자 강도, 저속 중성자 강도와 토양수분 추이 (Desilets et al., 2010)

- Fig. 3.1.14에는 중성자 강도와 토양수분의 관계성이 표현되어 있다. (a)는 중성자 검출기를 통해 검출된 중성자 강도와 토양수분의 관계성으로, 명확한 반비례 관계를 확인할 수 있다. 검

출된 중성자 강도는 보정을 거쳐야만 보다 신뢰도 있는 데이터로 변환되기 때문에, 보정되지 않은 상태의 중성자 강도는 반비례 관계성이 열어질 가능성이 있으나, 선행연구에서는 뚜렷한 반비례 관계성이 나타났다. (b)는 중성자 강도의 보정을 거친 뒤 토양수분과의 관계성을 표현한 그림으로, (a)보다 명확한 반비례 관계성을 나타낸다. (c)는 중성자 보정을 거친 뒤, 다른 수소 공급원들까지 고려하여 토양수분과의 관계성을 도출한 그림으로, 명확한 반비례 관계성을 확인할 수 있다.

5) Universal calibration function (Franz et al., 2013)

- Franz et al.(2013)의 연구에서는 Universal calibration function이라 불리는 교정 방법을 제안한다. 이 방법은 기존과 같은 방법으로 중성자 강도를 보정한 뒤, 수소 몰분율 (Hydrogen molar fraction)을 추정한다. 중성자 강도는 토양수분을 포함해 모든 수소원에 대해 영향받기 때문에, 수소공급원에 의한 영향을 모두 고려하여 토양수분의 영향을 파악하는 교정 방법이다. 먼저 수소 몰 분율을 획득한 후, 다른 수소 공급원 수치를 정량화하여 식에 대입하면 최종적으로 토양수분량을 산정할 수 있게 된다. 수소 몰분율을 구하기 위한 식은 다음과 같다(Eq. 3.1.5).

$$\frac{N_{corr}}{N_s} = 4.486 \exp(-48.1 \cdot hmf) + 4.195 \exp(-6.181 \cdot hmf) \quad (3.1.5)$$

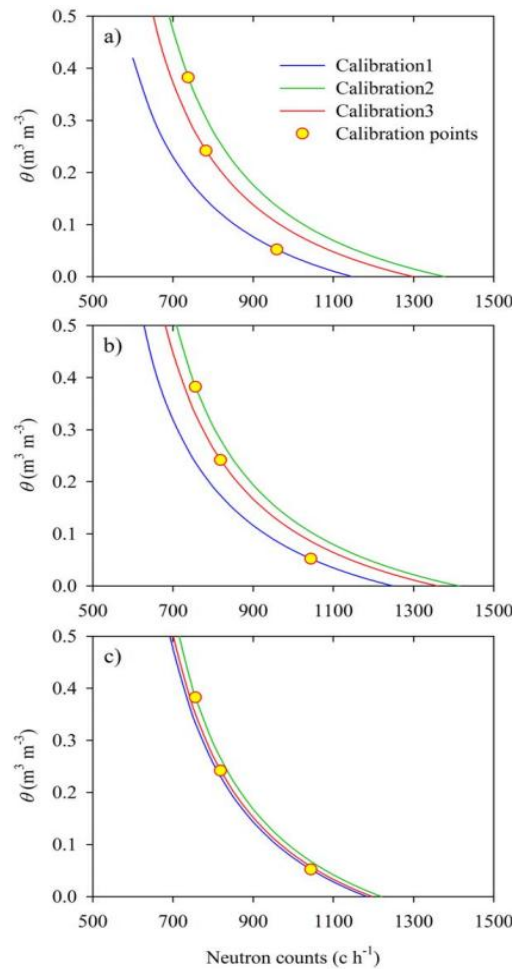


Fig. 3.1.14 중성자 강도와 토양수분의 상관성
(Hawdon et al., 2014)

- N_{corr} 은 보정된 중성자 강도이며, N_s 는 CRNP 센서 설치지점 밑으로 수분만 있다고 가정했을 때의 중성자 강도로 본 실험에서는 1000 cph로 가정하였다. 앞서 얻은 보정된 중성자 강도를

대입하면 수소 물분율이 도출되며, 이를 통해 토양수분을 산정할 수 있게 된다. 수소 물분율(hmf)를 구하는 식은 다음과 같다.

$$hmf = \frac{\sum H_i}{\sum A_i} = \frac{H_\tau + H_{SOC} + H_\theta + H_{AGB}}{NO + SiO_2 + H_2O_\tau + H_2O_{SOC} + H_2O_\theta + C_6H_{10}O_5 + H_2O_{AGB}} \quad (3.1.6)$$

- H_i 는 수소 분자들의 합계로, 이는 격자수의 수소 분자 H_τ , 토양 유기물에 포함된 수소 분자 H_{SOC} , 토양수분에 포함된 수소 분자 H_θ , 그리고 지상 생물량에 포함된 수소 분자 H_{AGB} 로 이루어진다. A_i 는 전체 분자들의 합계로, 이는 격자수의 물 분자 H_2O_τ , 토양 유기물에 포함된 물 분자 H_2O_{SOC} , 토양수분에 포함된 물 분자 H_2O_θ , 그리고 지상 생물량에 포함된 물 분자 H_2O_{AGB} 와 $C_6H_{10}O_5$ 로 이루어진다. 지상 생물량은 해당 부분에 존재하는 식생을 전부 채취해야 측정 가능하며, 식생의 60%는 물로 이루어져있으며 40%는 섬유질로 이루어져있다고 가정하여 반영한다 (Franz et al., 2013).
- NO는 대기에 포함된 질소와 산소 분자로, 생물량 내에 존재하는 대기 등 기체에 존재하는 분자들 중 대부분을 차지하는 질소와 산소를 제외한 분자들은 무시한 분자량이다. SiO_2 는 지면에 존재하는 곡물 및 낱알의 분자량을 의미한다.

6) Universal calibration function 적용 사례 (Batz et al., 2015)

- Batz et al. (2015)의 연구에서는 UCF의 특정 부분을 추가 고려하여 적용하였고, 그에 따른 검증 실시하였다. Table 3.1.1에는 Franz et al.(2013)에서 제시한 UCF와 Batz et al. (2015)에서 사용한 UCF의 차이가 나타나있다. 먼저, Franz et al. (2013)에서는 Zreda et al. (2012)에서 사용한 중성자 강도 보정식을 그대로 사용하였으나, Batz et al. (2015)의 연구에서는 추가적으로 하나의 인자를 더 고려하였다. η_{ref} 는 CRNP 센서의 중성자 검출 효율성을 고려한 인자로, 이를 통해 한 단계 더 보정된 중성자 강도 N_{epih} 를 UCF에 사용한다. 또한, Batz et al. (2015)의 연구에서는 식생 분석에 초점을 맞춰 토양수분을 산출하고자 하였다.

Table 3.1.1 UCF 적용 방법의 차이 (Batz et al., 2015)

		Franz et al. (2013)	Batz et al. (2015)
중성자 강도 보정식		$N_{corr} = N_{raw} \left(\frac{f_p \times f_{vw}}{f_i} \right)$	$N_{corr} = N_{raw} \left(\frac{f_p \times f_{vw}}{f_i} \right)$ $N_{epih} = N_{corr} \cdot \eta_{ref}$ $(\eta_{ref} = N_{ref}/N)$
매개변수	a	4.486	3.007
	b	-48.1	-48.391
	c	4.195	3.499
	d	-6.181	5.396
토양수분 교정 식		$\theta = \frac{a_0}{\frac{N_{corr}}{N_0} - a_1} - a_2$	$\theta = \frac{a_0}{\frac{N_{epihv}}{N_{0,AGB=0}} - a_1} - a_2$

- Table 3.1.1를 보면 토양수분 교정식이 기존 교정식과 큰 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 기존 방법으로 보정한 중성자 강도를 사용하는 대신, N_{epih} 와 $N_{0,AGB=0}$ 를 사용하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 식생, AGB와 BWE를 고려하여 추가적인 보정과정을 거친 값이다.

Table 3.1.2 지역별 수소 공급원 데이터 정량화 (Baatz et al., 2015)

Location	Lw	BWE	AGB _{dry}	N _{epih} [cph]	N _o [cph]
Aachen	0.058	3.3	1.2	631	1188
Aachen	0.063	3.3	1.2	691	1194
Gevenich	0.034	3.7	1.4	744	1216
Gevenich	0.037	3.7	1.4	829	1181
Merzenhausen	0.039	3.6	1.3	808	1217
Merzenhausen	0.035	3.6	1.3	719	1198
Merzenhausen	0.037	3.6	1.3	865	1197
RurAue	0.046	4.9	2.5	673	1166
RurAue	0.047	4.9	2.5	634	1165

- 먼저 연구 지역의 토양 샘플을 채취하며 수소 공급원에 해당하는 데이터를 정량화한다. Table 3.1.2에는 연구지역의 데이터가 나타나있다. 데이터를 정량화한 후, 생물량과 N_o에 대한 회귀 모델을 도출한다.

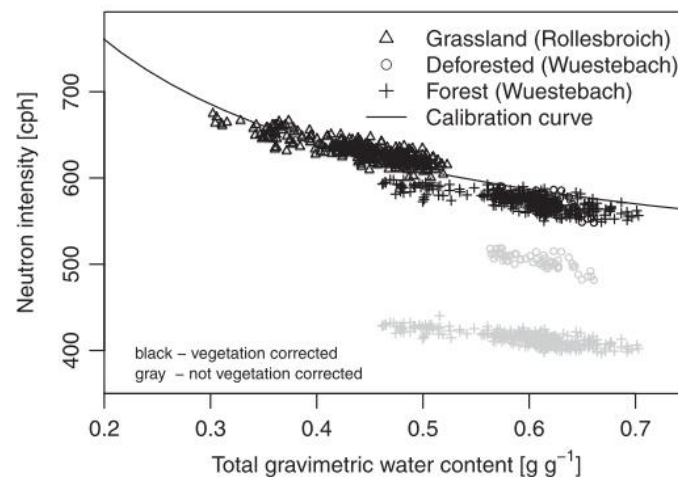


Fig. 3.1.15 기존 UCF와 보정된 UCF의 결과 비교 그래프 (Baatz et al., 2015)

- Baatz et al. (2015)의 연구에서는 기존 UCF와 식생으로 인한 오차를 고려하여 보정된 UCF의 결과를 비교하였다. Fig. 3.1.15는 토양수분과 중성자 강도의 관계성을 나타낸 그래프로, 토양수분과 중성자 강도의 관계성을 검증 수단으로 사용하였다. 회색 점들은 AGB와 BWE를 정량화시킨 데이터로 도출된 값 들이며, 검은 세모는 AGB와 BWE 데이터들을 회귀 모델을 통해 보정하여 도출한 값이다. 검은 세모들은 중성자 강도와 토양수분의 반비례 관계성을 뚜렷하게 나타내고 있으며, 데이터가 연속적이지 않은 구간이 있으나 회귀 모델에 비교적 가까운 데이터를 생산한다. 반면, 회색 점들은 데이터가 두 범위로 나뉘어 나타나는 것을 확인할 수 있어 회귀 모델 산정에 제약이 있을 뿐 아니라, 반비례 관계로 규정하기엔 무리가 있다. 이는 식생의 오차를 고려한 UCF가 중성자 강도와 토양수분간의 반비례 관계성을 뚜렷이 규정하고 있는 것을 보여준다.
- Fig. 3.1.16는 건토중량법을 통해 측정한 토양수분과 중성자 강도의 관계성을 나타낸 그래프이며, 관계성에 두 종류의 UCF가 얼마나 근사한 값을 가지는지 표현한 그래프이다. 검은 점은 식생의 오차를 고려한 UCF로, 연구지역 내에 AGB가 없다고 가정했을 시의 교정 곡선에 근사한 값들을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 십자가 모양의 점들은 식생의 오차를 고려하지 않고 산정한 UCF 데이터들로, 교정 곡선과 별다른 관계성을 보이지 않는 데이터들이 다수 존재한다. 이는 식생을 비롯한 AGB, BWE의 영향이 토양수분 산출 결과에 큰 영향을 줄 수 있음을

암시하며, 따라서 이러한 영향들이 보정된다면 보다 토양수분 산출 결과 개선에 크게 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

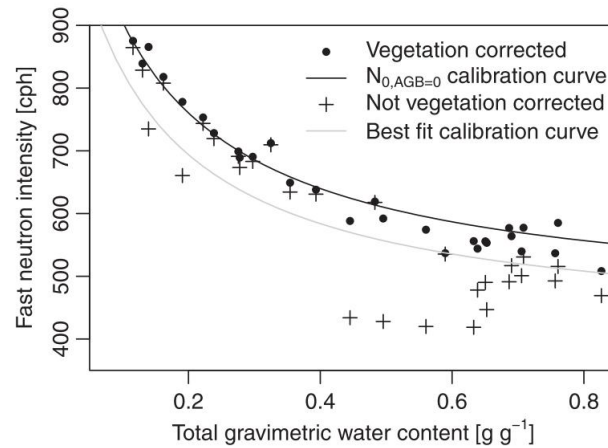


Fig. 3.1.16 기존 UCF와 보정된 UCF의 결과 비교 그래프
(Baatz et al., 2015)

7) 격자수와 토양 유기물을 고려한 지점 가중평균 토양수분 산정 (Baroni et al., 2018)

- 먼저, Baroni et al. (2018)의 연구에서 역시 눈과 얼음에 의해 영향받을 것으로 사료되는 구간은 제외하고 연구를 진행했음을 확인할 수 있다. Fig. 3.1.17의 상단 그림은 강수량, 중간 그림은 보정된 중성자 강도이며, 하단의 그림은 토양수분을 나타낸다. 하단의 그림의 검은 선은 CRNP 센서를 통해 얻은 토양수분이며, 회색 점선은 지점 가중 평균 토양수분을 나타낸다. 연구 기간 전체에 대해서, 보정된 중성자 강도와 토양수분의 뚜렷한 반비례 관계를 관측할 수 있다.

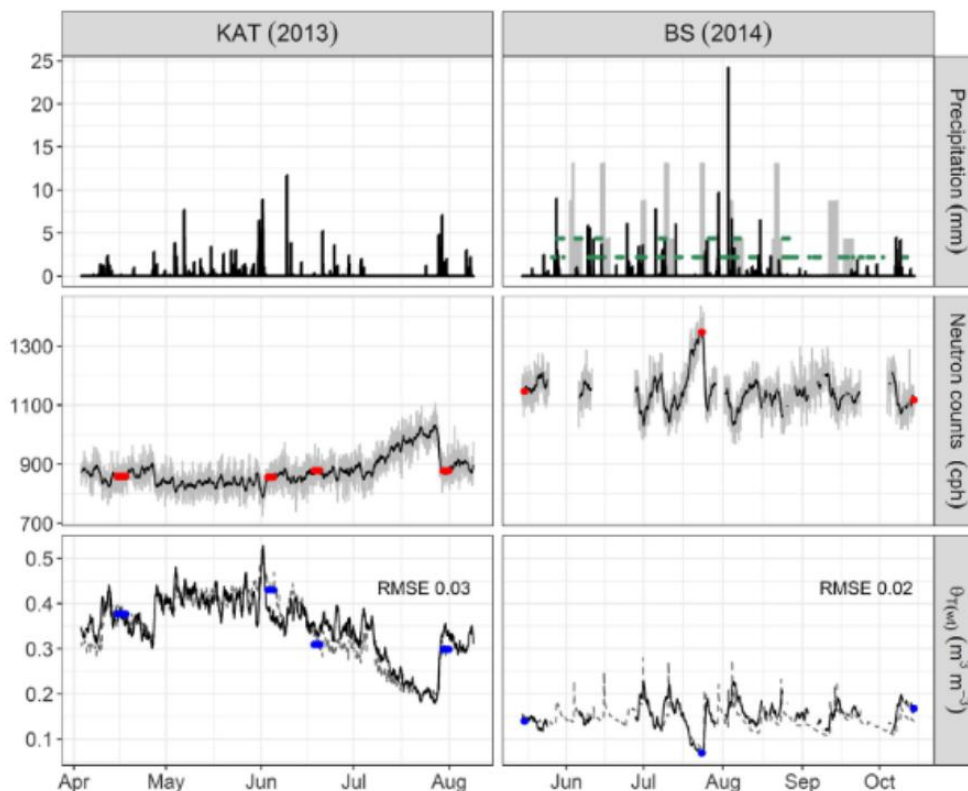


Fig. 3.1.17 시계열로 나타낸 강수량, 중성자 강도와 토양수분 (Baroni et al., 2018)

- Fig. 3.1.18은 연구지역을 나타낸 것으로, 점으로 표시된 지점은 지점 토양수분 측정을 위한 센서의 위치를 나타낸 것이다. 파란 점은 건토중량법으로 측정하기 위해 토양을 측정한 지점

을 표시한 것이다. 선행연구에서는 AGB, LW와 W_{SOC} 의 영향을 고려하여 토양수분을 산정하였다. 선행연구에서 사용한 식은 다음과 같다(Eq. 3.1.7).

$$\theta_{T(wt)} = (\theta_v + LW + W_{SOC})_{wt} \quad (3.1.7)$$

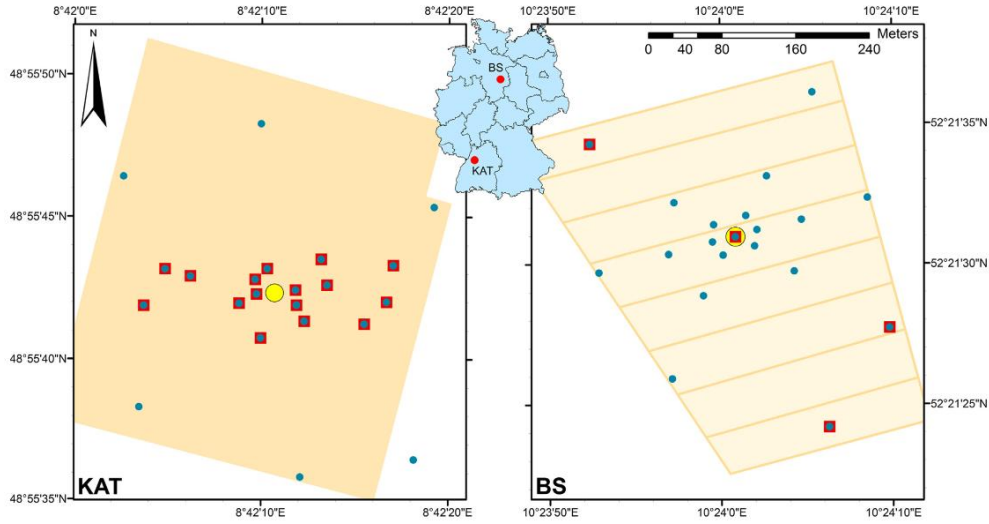


Fig. 3.1.18 선행연구의 연구지역 (KAT, BS) (Baroni et al., 2018)

- Eq. 3.1.7의 θ_v 는 지점 토양수분 센서로부터 얻은 토양수분이며, $\theta_{T(wt)}$ 는 지점 기반 가중 평균 토양수분으로, 지점 토양 수분을 가중 평균 내어 얻은 토양수분 값이다. 선행연구 역시 본 연구와 같은 방법으로 단일 N_0 를 고정하여 토양수분을 산출하고자 하였으나, 다른 수소 공급원의 영향을 고려하기 위해 두 가지 요소를 추가 고려하였다. LW는 격자수를 의미한다. 격자수란 토양 미네랄 내부에 존재하는 수분으로, 지역마다 각기 다른 값을 가지지만 시간에 따른 변동이 비교적 적기 때문에 토양수분 산출에 있어서 최초에 측정된 값을 사용해도 무방하다. Zreda et al.(2012)의 연구에 따르면 수 천 년간 일정한 값을 유지하는 것으로 밝혀졌다. W_{SOC} 는 토양 유기물에 포함된 수소의 영향을 의미하는 것으로, 토양 유기물 내의 수소 역시 LW와 마찬가지로 비교적 적은 변동량을 가진다. 따라서, 측정값을 반영한다면 토양수분 산출에 있어 보다 정확한 결과를 산출할 수 있다. 이러한 결과를 반영하여, 선행연구에서는 지점 토양수분 데이터를 비롯해서 격자수와 토양 유기물에 포함된 수소의 영향을 고려해서 교정식에 대입하는 방법을 선택했다.

$$\theta_{CRNS} = \theta_{T(wt)} = \left(\frac{a_0}{\left(\frac{N_{corr}}{N_0} \right) - a_1} - a_2 \right) \times \rho_{bulk} \quad (3.1.8)$$

- θ_{CRNS} 는 CRNP 센서로부터 얻은 중성자 강도를 보정하여 산출한 토양수분으로, 본 연구에서 보정한 강도와 같다. Eq. 3.1.1과 같은 식임에도 Baroni et al. (2018)의 토양수분 산출 결과가 보다 높은 정확성을 띠는 이유는 이처럼 LW와 W_{SOC} 를 고려했기 때문이다. LW와 W_{SOC} 는 CRNP 센서뿐 아니라 지점 토양수분에도 영향을 미치기 때문에, 지점 가중평균 토양수분 산정 시 이러한 인자들을 고려해 주는 것은 보다 정확한 N_0 산정에 기여하며, 따라서 CRNP 센서를 통해 산정하는 토양수분 데이터 역시 높은 정확성을 띠게 되는 것이다.

8) CRNP 관측 반경에 따른 FDR 센서 위치 설정

- Zreda et al. (2012)에서 설치한 지점 CRNP 센서의 위치는 Fig. 3.1.19와 같다. CRNP 센서를

기준으로 여섯 방향으로 나누었고, 센서로부터의 거리를 각각 25 m, 75 m 그리고 175 m로 산정하였다. 그림과 같이 총 18개의 지점에 6개의 센서를 일정한 깊이로 설치하였다. 따라서 총 108개의 유전율식 센서를 설치해 지점 기반 토양수분을 획득하고자 하였다.

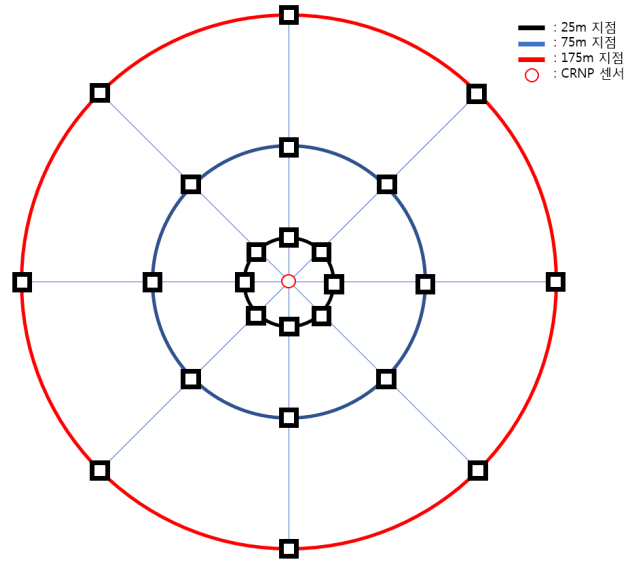


Fig. 3.1.19 CRNP 센서와 지점 센서의 위치

- Fig. 3.1.20은 산지에서의 센서 간 위치를 나타낸 그림이다. 지역의 지점별 고도차가 비교적 적은 편이지만 식생이 매우 두터운 지역으로, CRNP 센서 근처에 하천이 존재하는 지역이다. 식생과 하천의 영향에 따라 토양수분이 극명하게 다른 값을 가지기 때문에 비교적 많은 지점 토양수분 데이터를 설치하였으나, 하천과 지하수에 의한 영향으로 토양수분이 과대 산정되는 지역이 존재하며 식생으로 인해 식생에 의한 간섭이 타 지역에 비해 많아 중성자 강도 역시 현저히 적은 값으로 산정되어 타 지역에 비해 토양수분 산출 결과가 낮은 신뢰도를 나타낸다.

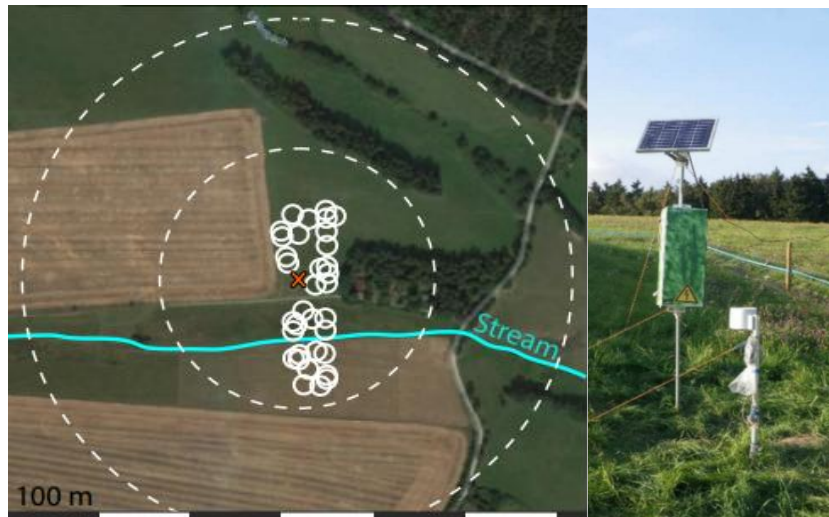


Fig. 3.1.20 산지에서의 CRNP 센서와 지점 토양수분 센서 위치 (Schron et al., 2017)

- Fig. 3.1.21의 연구 지역의 경우 숲에서의 센서간 위치를 나타내었다. 비교적 폭이 얇고 얕은 하천을 가지는 Fig. 3.1.20과는 달리 하천이 없고, 토성 및 식생의 종류가 매우 다양한 지역이다.

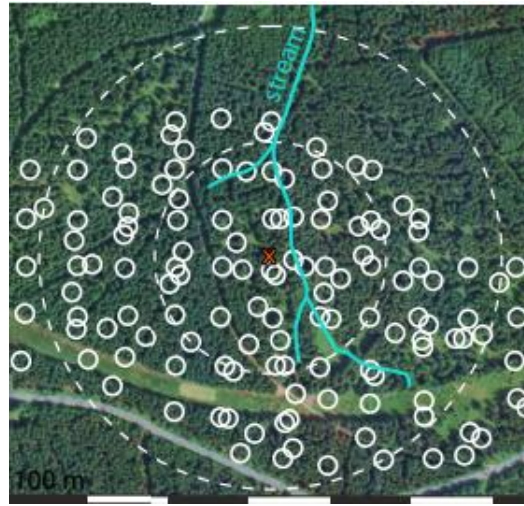


Fig. 3.1.21 숲에서의 CRNP 센서와 지점 토양수분
센서 위치 (Schrön et al., 2017)

- Schrön et al. (2017)에서는 식생의 분포에 따라 지점 토양수분 센서를 설치하였다. 센서의 설치지점이 의미하는 바는 크게 두 가지로, 첫 번째는 관측 반경의 변동이다. 식생의 분포 및 지역에 존재하는 수소 원자에 따라 관측범위는 유동적으로 변하기 때문에, 이러한 요소들을 고려하여 관측 범위를 설정해야 한다.
- CRNP 센서를 통해 산출된 토양수분 데이터는 말 그대로 공간을 대표하는 토양수분 값으로, 이를 검증하기 위해서 지점 토양수분 데이터를 사용한다. 즉, 해당 지역에 존재하는 여러 요소들이 토양수분에 어떠한 영향을 끼치는지 사전에 조사 및 분석을 통해 파악하고, 이를 반영해 지점 토양수분 센서의 설치 위치를 설정하는 것이 곧 정확도 있는 면 단위 토양수분 데이터를 얻는 방법이라고 할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 선행연구들을 바탕으로, 지역적 특성을 고려하여 FDR 센서의 설치지점을 선정하였다.

9) 원격 탐사 기법 적용 사례

- 전 세계적으로 공간 대표성을 가지는 원격 탐사 기반 토양수분 자료가 주목받고 있다. 특히 위성자료의 경우 지점 관측소 설치를 통해 데이터를 구하는 것보다 경제적이고 데이터 취득이 용이하여 여러 연구기관에서 데이터 처리 및 지점 자료와의 융합을 통한 토양수분 데이터 활용성 극대화에 관한 연구를 수행하고 있다.
- 하지만 위성 데이터 토양수분 관측 자료는 공간 해상도와 데이터의 신뢰성에서 부족한 것으로 알려져 있다. 하지만 고해상도(100 m~1 km)의 면 단위 토양수분 자료와 함께 이용될 시 신뢰도를 확보할 수 있으며 적용 가능 분야가 확대될 것으로 보인다.
- 따라서 본 절에서는 한반도에서 사용된 다양한 종류의 원격탐사 자료를 이용하여 토양수분을 산출한 연구 현황을 소개하고 각 자료의 장/단점을 분석하여 Cosmic-ray 기반 토양수분 자료의 활용 가능성을 확인하고자 한다.
- 폴란드 실험 유역에서의 원격 탐사 기반 토양수분 자료와 Cosmic-ray 기반 토양수분 비교
 - Kędzior et al. (2016)은 폴란드에서 COSMOS의 Cosmic-ray 기반 토양 수분값, Centre Aval de Traitement des Donn Soil Moisture Ocean Salinity (CATDS) SMOS의 토양 수분 데이터, GLDAS모델 토양수분 데이터를 비교한 실험을 수행했다.

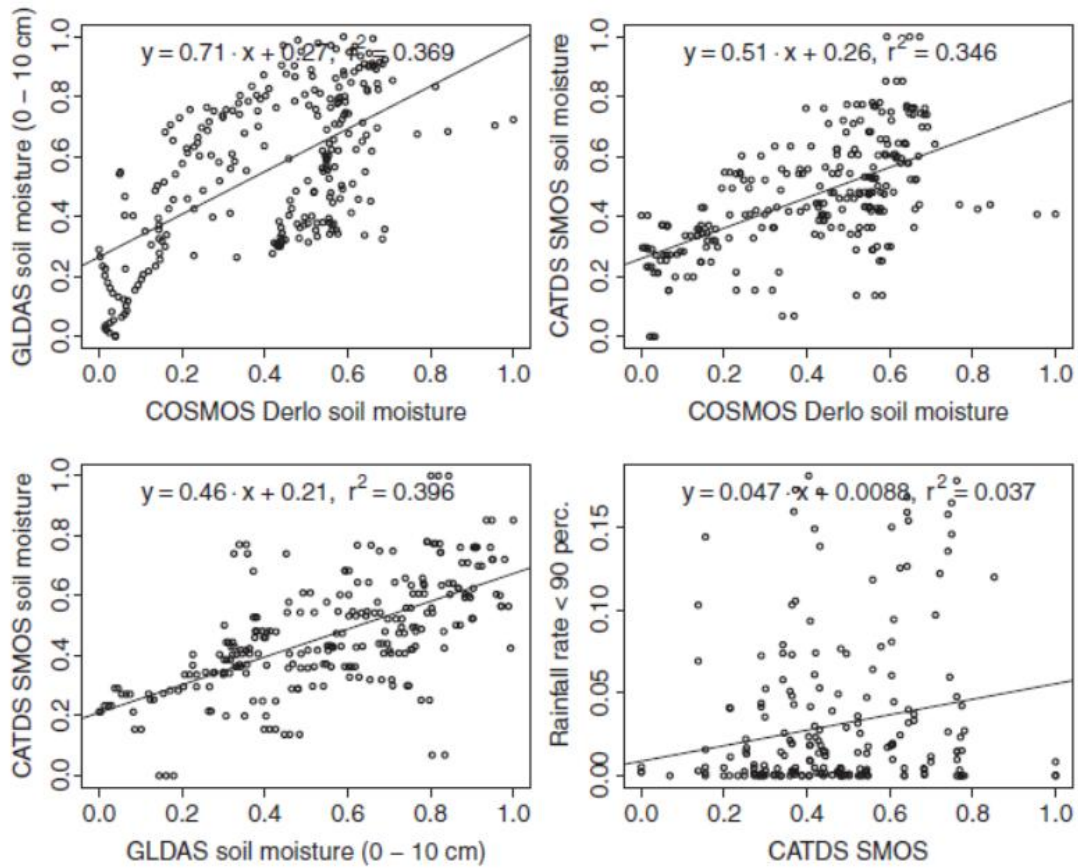


Fig. 3.1.22 GLDAS, COSMOS, CATDS SMOS의 토양 수분 데이터의 3가지 상관관계와 CATDS SMOS 인공위성 토양 수분 데이터 - GLDAS의 강수량 비율의 산포도 (Kędzior et al., 2016)

- Montzka et al. (2017)은 낮은 공간 해상도의 원격탐사 데이터와 현장 지점 토양 수분 데이터 간의 간극을 메꾸기 위해 Cosmic-ray 토양 수분 데이터가 활용 가능한지 알아보고자 CRNP에서 관측한 지표면 토양 수분값을 AMSR2, ASCAT, SMAP, SMOS의 토양 수분 측정값과 GLDAS모델의 토양 수분 추정값을 비교하였다.
- Montzka et al. (2017)에서도 Rur catchment 등 6개 지점에서 원격탐사 기반 토양 수분 데이터와 CRNP의 토양 수분 데이터를 Reference 데이터로 사용하여 통계적으로 분석하였다 (Fig. 3.1.23).
- Montzka et al. (2017)에 의하면, ASCAT, SMAP, SMOS의 토양 수분 데이터는 대부분 지역에서 편차가 0보다 작은 값을 가진다. 이것은 CRNP의 토양 수분 데이터에 비해서 ASCAT, SMAP, SMOS의 측정 방법이 토양 수분 데이터를 낮게 평가하는 경향이 있다는 것을 의미한다.

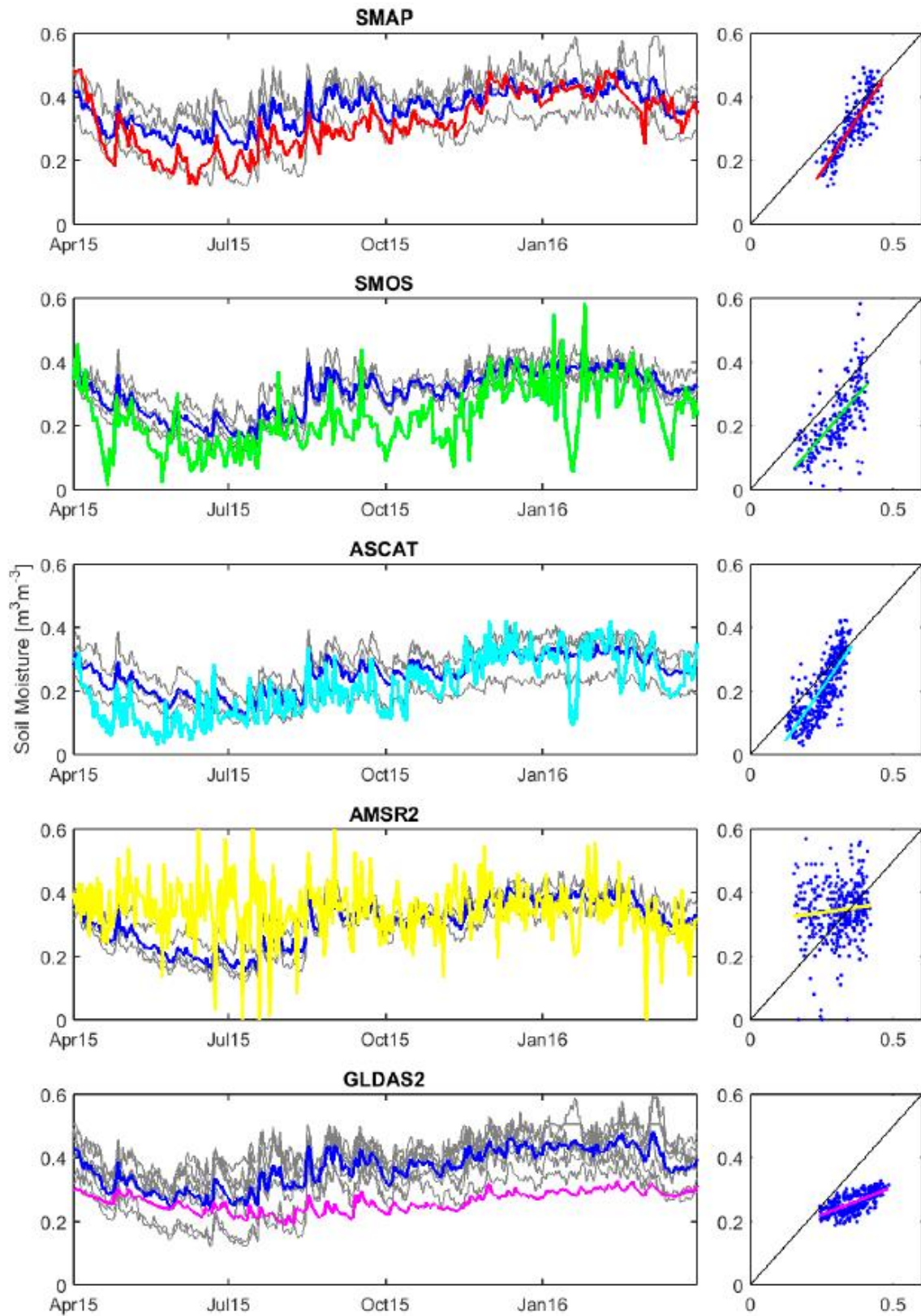


Fig. 3.1.23 Rur catchment 에서 원격탐사기반 토양수분 데이터와 Cosmic-ray기반 토양수분 데이터의 비교 사례 (Montzka et al., 2017)

나. 시험유역 선정 및 토양수분량 계측시스템 위치 확정

- CRNP 센서에서 측정되는 중성자 강도는 다양한 환경조건에 의하여 영향을 받으며, 따라서 센서를 설치할 지역을 우선적으로 확인하여야 한다. 따라서 본 절에서는 설마천 환경 특성 및 가용 가능한 데이터 현황을 소개하고자 한다.
- Cosmic-ray의 교정/보정 시에 사용되는 인자로는 대표적으로 기압, 습도, 고도 등이 있다. 이러한 최적화 과정을 통해 CRNP 센서에서 측정되는 중성자 강도의 보정 및 교정을 수행하면 보다 높은 정확도를 가진 토양수분 데이터를 산출할 수 있음이 밝혀졌다 (Franz et al., 2012). 연구지역은 한반도의 60% 이상을 차지하는 산악지형을 대표하고 이에 따른 다양한 매개변수에 대한 최적화가 이루어질 때, CRNP 기반의 신뢰성 있는 토양수분 자료를 산출할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 본 절에서는 타 연구지역과 비교하였을 때 차이를 보이는 감악산 설마천 지역의 특성에 관하여 다루고자 한다. 또한 이러한 차이로 인해 고려해야 하는 Cosmic-Ray 교정/보정 매개변수를 소개한다. 또한 매개변수를 고려하여 구축한 설마천 토양수분 관측소의 현황을 소개하고자 하며 CRNP 센서 기반의 면 단위 토양수분 관측 시스템의 구성을 살펴보려 한다.

1) 대표성 분석 및 시험유역 선정

○ 설마천 환경 특성

- 앞선 절에서 언급한 바와 같이 전 세계적으로 다양한 지역에서 CRNP 센서를 이용한 토양수분 데이터가 산출되고 있으며, 공동연구기관인 한국수자원조사기술원에서는 시험유역으로 선정된 6개 유역의 각 환경 특성을 비교하였고 그 결과를 기반으로 설마천을 최종 시험유역으로 선정하였다.
- 설마천 토양수분 관측 지역은 파주 감악산 설마천 지역으로 설마천 유역 내에 위치하며 감악산 범륜사를 둘러싸고 있는 4개 사면을 포함하고 있으며 험준한 산악지역에 해당된다. 지역이 존재하는 설마천 유역은 유로 경사가 2.3%로 전형적인 급경사 산지 사행 하천 이고 계절에 따른 강수량의 영향을 받아 유량이 크게 변한다.
- 또한 연구지역은 토양에 암석이 매우 많이 분포된 지역으로 산지의 경사가 매우 급하며 이로 인해 산사태가 발생한 사면이 존재하며 이는 강우 시의 경사에 의한 영향이 클 수 있음을 시사한다. 연구지역에는 CRNP 센서가 설치된 지점 앞으로 하천이 흐르고 있고 이 하천은 강우가 발생할 시 급격히 불어나며 평소에는 작은 개울의 형태를 보인다. 더불어 사면마다 식생이 매우 두텁게 형성되어 있으며 각 사면을 대표하는 식생의 종류가 다양하게 분포되어 있다. 두터운 식생과 산악지형의 비옥한 토양의 영향으로 지면에는 두터운 유기물이 겨울을 제외한 모든 계절에 풍부하게 존재하고, 이는 모든 계절에 있어서 CRNP 센서에서 관측된 중성자 강도의 큰 변동성을 예측할 수 있게 한다. 이러한 특징은 선행연구 지역인 Tonzi-Ranch와 Kendall 지역과 대비되는데 두 지역과 설마천 지역의 가장 두드러지는 환경의 차이는 식생 및 유기물이라 할 수 있다.
- Fig. 3.1.24과 Table 3.1.3과 같이 세 지역은 고도, 토지 피복, 그리고 기후에 있어서 큰 차이를 보이고 있다. 이에 따라서 각 지역의 지점 토양수분 거동 또한 큰 차이를 나타내며 이러한 차이를 통해 산악지형에서의 토양수분 산정을 위해서는 기존의 방식과는 다른 중성자 강도 검/보정 방법이 필요함을 확인할 수 있었다.

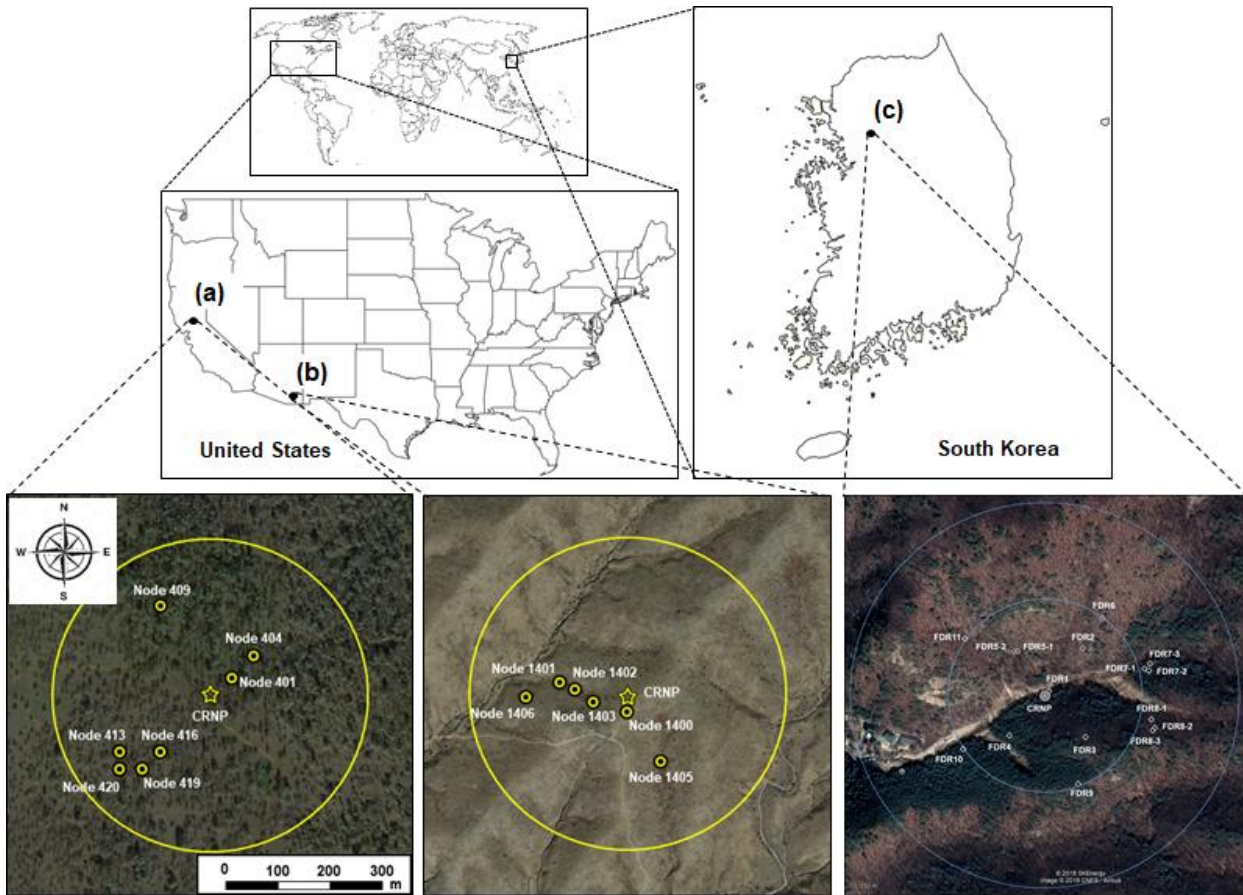


Fig. 3.1.24 Tonzi-Ranch, Kendall 및 설마천 지역 센서 설치 지점

- Nguyen et al. (2019)에서 연구지역으로 선택한 Tonzi-Ranch와 Kendall 지역의 경우 초원 지역으로 Kendall 지역에 비하여 식생이 적어 상대적으로 타 수소공급원에 의한 영향이 적기 때문에 지점 토양수분의 경향과 유사한 토양수분량을 보였다는 결과를 보여주고 있다. 초원 지역의 경우 지표면과 그 상부의 유기물이 관목지인 Kendall 지역에 비하여 적기 때문에, 타 수소 공급원이 적어 지역에서 측정된 토양수분이 대부분 중성자 강도로 설명이 가능하다고 추가적으로 언급하고 있다.
- 반면 본 연구의 시험유역인 설마천 유역의 경우에는 짙은 수목으로 덮여있으며, 급격한 경사의 산악지형에 위치해 있어 앞선 선행연구의 연구지역보다 CRNP 센서 관측 반경 및 기타수소공급원에 의한 영향을 더욱 심도 있게 고려해야한다.

Table 3.1.3 설마천 지역 센서 설치 정보

ID	Lat [°N]	Lon [°E]	Distance [m]	Elevation [m]	Soil Bulk Density [gcm ⁻³]	Soil texture	Vegetation
CRNP	37.9389	126.9547	0	291	0.92	Loamy sand	Needleleaf
F1	37.9390	126.9548	10	291	0.99	Loamy sand	Needleleaf
F2	37.9396	126.9554	97	297	0.75	Sandy loam	Broadleaf
F3	37.9384	126.9554	90	348	0.81	Loamy sand	Broadleaf
F4	37.9384	126.9541	84	274	0.99	Loamy sand	Needleleaf
F5-1	37.9396	126.9542	84	314	0.75	Sandy loam	Broadleaf
F5-2	37.9396	126.9541	91	314	0.75	Sandy loam	Broadleaf
F6	37.9401	126.9557	154	340	0.75	Sandy loam	Broadleaf
F7-1	37.9393	126.9565	164	318	0.93	Loamy sand	Needleleaf
F7-2	37.9393	126.9566	170	329	0.93	Loamy sand	Needleleaf
F7-3	37.9394	126.9566	174	327	0.93	Loamy sand	Needleleaf
F8-1	37.9386	126.9566	172	349	0.81	Loamy sand	Broadleaf
F8-2	37.9385	126.9567	181	373	0.81	Loamy sand	Broadleaf
F8-3	37.9384	126.9566	178	357	0.81	Loamy sand	Broadleaf
F9	37.9377	126.9552	130	318	0.99	Loamy sand	Needleleaf
F10	36.9382	126.9533	156	263	0.99	Loamy sand	Needleleaf
F11	37.9396	126.9537	122	309	0.75	Sandy loam	Broadleaf

- 유기물 외에도 CRNP 센서에서 관측된 중성자 강도에 영향을 미치는 대표적인 요소는 지형이다. 높은 고도와, 평지가 아닌 계곡지형은 중성자 강도 측정에 큰 영향을 미치는데 이로 인해 본 연구에서는 CRNP 센서의 관측 반경을 기존의 연구보다 작게 설정하였다. 또한 사면으로 둘러싸인 CRNP 센서의 위치는 관측 반경 안의 FDR 센서 설치 위치에 영향을 미치게 된다. 이것은 CRNP 센서에 관측된 중성자 강도와 지점 토양수분간의 관계성을 토대로 면 단위 토양수분량을 산정하기 때문인데, 본 연구지역에는 CRNP 센서 관측 반경에 4개 사면이 포함되어 있어 사면에 따라서 식생 특성과 토양수분 거동이 다르게 나타나기 때문에, 이를 고려하여 4개 사면의 토양수분량을 대표하기 위한 FDR 센서를 나누어 설치하였다. 또한 계절에 따라 유량이 변하며 흐르는 하천은 수체로써 수소공급원의 역할을 하여 중성자 강도에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 설마천 연구지역의 특성과 선행 연구의 연구지역 특성의 차이점을 분석하고, 산악지형에서 나타나는 중성자 강도의 특징을 고려하여 산악지형에서의 CRNP 센서를 이용한 토양수분 산출을 위한 중성자 강도 검/보정 기술을 개발하고자 하였다.

○ 설마천에서의 CRNP 센서 관측반경

- 본 연구에서는 지점 기반 토양수분을 산출하기 위해 FDR 센서를 사용했고, Köhli et al. (2015)에서 소개된 지점 기반 가중 평균 토양수분 데이터를 산정했다. 그러나 센서의 위치를 산정함에 있어서는 일정한 간격을 두고 설치하지 못했는데, 그 이유는 본 연구 지역이 선행 연구와는 달리 산악지형을 대상으로 했기 때문이다. 평지에서는 CRNP 센서를 기준으로 FDR 센서 사이 거리가 비교적 일정한 직선거리를 가지지만, 설마천 유역은 CRNP 센서가 위치한 Flux-tower를 기준으로 4개의 사면이 둘러싸고 있는 지형이기 때문에 사면을 구분하여 센서를 설치할 필요가 있었다. Fig. 3.1.25에는 FDR 센서의 설치지점 및 CRNP 센서의 관측반경이 표현되어 있다.
- FDR 7-1,2,3 센서와 FDR 8-1,2,3 센서의 경우 150 m의 원보다 조금 바깥에 위치한 것을 확인할 수 있는데, 이는 해당 지역의 지형적 특성으로 인해 설치 위치를 조정할 필요가 있었

다.

- FDR 5-1,2 센서, FDR 2 센서, FDR 1 센서와 FDR 6 센서는 CRNP 센서로부터 북쪽에 위치해 있는데, 이는 4개의 사면 중 북쪽 사면을 대표하기 위해 설치되었다. FDR 7-1,2,3 센서는 CRNP 센서로부터 동쪽에 위치해 있으며, 역시 동쪽 사면을 대표하기 위해 설치되었다.

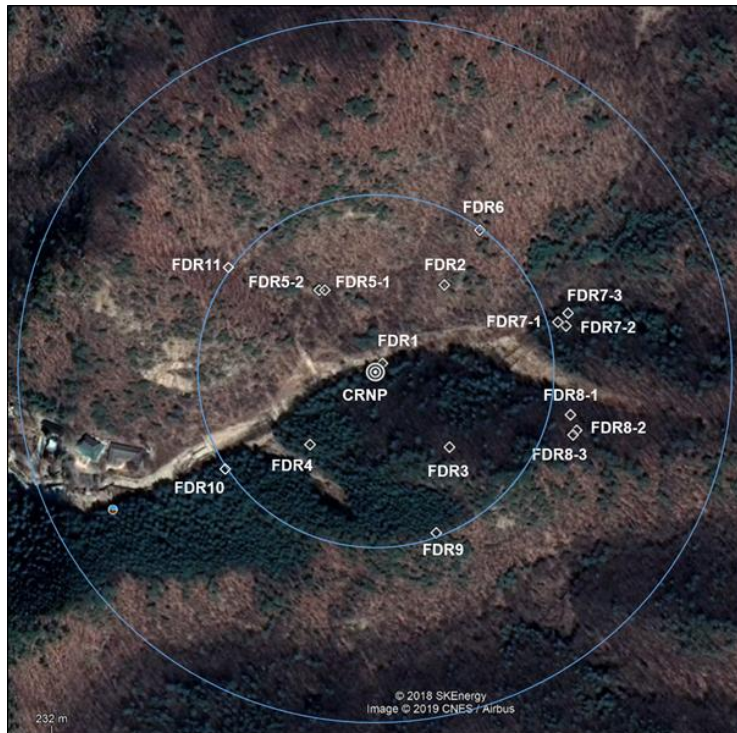


Fig. 3.1.25 CRNP 센서와 FDR 센서 설치지점

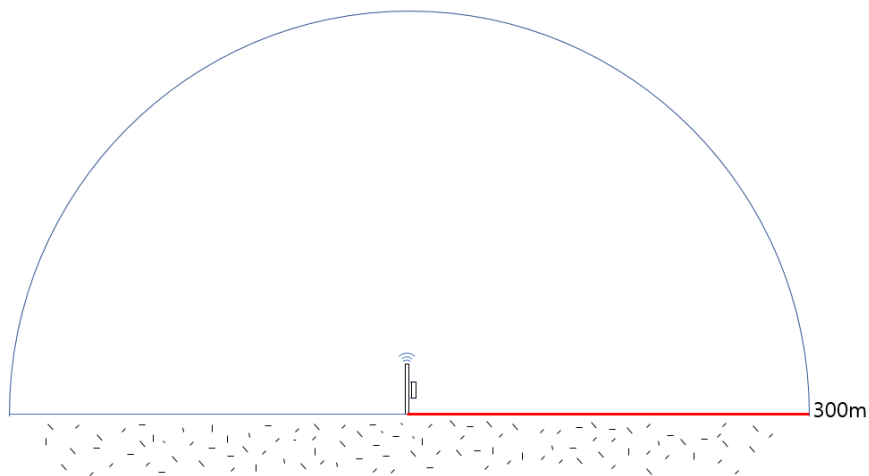


Fig. 3.1.26 평지에서의 CRNP 센서 관측반경

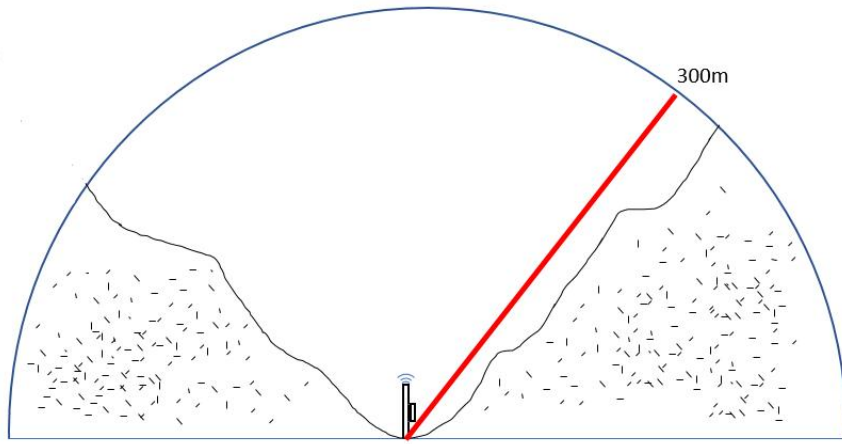


Fig. 3.1.27 산지에서의 CRNP 센서 관측반경

- FDR 3 센서, FDR 4 센서, FDR 9 센서 그리고 FDR 8-1,2,3 센서가 CRNP 센서로부터 남쪽에 위치해 있으며, 이는 남쪽 사면을 대표하기 위해 설치되었다. 총 14개의 FDR 센서를 설치하였으며, 이를 통해 지점 가중 평균 토양수분을 산정하였다. 선행연구지역의 경우 지점 토양수분을 관측하기 위한 센서의 위치를 300 m 까지 설치하였으나, 본 연구에서는 산악지형이므로 고도, 기압 등의 변수를 고려하여 반경 200 m 내에 FDR 센서를 설치하였다. Fig. 3.1.26은 평지에서의 CRNP 센서 관측반경을 나타낸 것이다. Desilets and Zreda (2013)의 연구에 따르면 관측 범위는 고도, 경사 및 기압 등의 환경적인 요인에 의해 조절된다.
- 그러나 Fig. 3.1.27를 보면 산지에서는 평지와는 달리, CRNP 센서와 FDR 센서사이의 고도차로 인해 직선거리와 수평거리가 다른 값을 갖는다. 따라서 실제 관측 범위가 수평거리 200 m 이내에 위치한 지점에 FDR 센서를 설치하여 관측반경 내의 지점 토양수분을 측정하고자 하였다.

2) 현장 조사를 통한 계측 시스템 위치 확정

본 절에서는 연구 수행을 위한 연구 지역 선정 과정에서 고려한 가용 데이터와 CRNP 센서 활용을 위하여 연구지역 특성을 고려한 계측 시스템 구축 초기 단계를 설명하고자 한다.

○ Flux-tower

- 설마천에 설치된 Flux-Tower는 한국수자원조사기술원에 의해 관리되고 있으며 Flux-tower의 위치는 CRNP 센서와 같다. Flux-tower는 에너지 유동과 수문기상학적 인자들을 측정하며, 타워의 높이는 19.2 m이고 순복사계, 초음파 풍속계, 습도계와 온도계가 장착되어 있어 다양한 수문기상인자를 측정할 수 있다. CRNP 센서를 이용하여 관측된 중성자 강도의 보정 및 교정에는 습도와 대기압과 같은 기상인자 관측 데이터가 필수적이며 Flux-tower에서 제공하는 데이터는 CRNP 센서 부근의 기상 인자 데이터를 정확하게 제공한다. Flux-tower에서 제공된 데이터는 중성자 강도 보정에 사용되었으며 이를 통해 산악지형으로 인해 나타나는 기상인자 특성을 고려한 면 단위 토양수분을 산출하였다.

○ 유전율식 토양수분 센서

- 본 연구에서는 CRNP 센서 관측 반경 150 m 안 밖으로 16개의 FDR 센서가 설치되었으며 1차 연도에 설치된 센서는 총 9개 센서이며, 미국의 Decagon Devices에서 개발한 5TM FDR 센서이고, Decagon Devices에서 제공하는 매뉴얼에 따르면 5TM 센서는 70 MHz의 주파수를 지닌 신호가 출력되는 오실레이터를 이용하여 주변부 토양의 유전율을 측정하여 토양 수분을 관측하며 실제 토양 수분 대비 $\pm 3\%$ 의 정확도로 토양 수분 함량 관측이 가능하다. 이와 같이 충분한 수의 토양수분 센서를 연구지역에 설치하여 산악지형에서의 토양수분 산출 알고리즘을 개선하고자 하였다.

- 2차 연도에는 총 7개 센서를 추가로 설치하였으며 설치된 총 16개 센서의 데이터는 가중 평균하여 CRNP 관측 반경을 대표하는 하나의 토양수분량으로 계산하여 사용하였다. 설치된 FDR 센서는 CRNP 센서 관측반경 안의 지형 특성을 고려하여 암석이 적은 지역을 위주로 CRNP 센서로부터 수평거리 150 m 내외에 분포되어 있다.
- FDR 센서의 경우 TDR 센서에 비해 경제성이 뛰어나고 현장에서의 지속적인 토양 수분 관측이 용이하기 때문에 (Skierucha et al., 2010; Mittelbach et al., 2012; Brocca et al., 2010; Heathman et al., 2012; Nguyen et al., 2019) 여러 연구에서 원격탐사 자료를 보완 및 검증하기 위한 자료로써 활발히 사용되어왔으며, 따라서 본 연구에서 16개 FDR 센서를 토양수분 계측 시스템의 주요 유전율식 토양수분 센서로 선정하여 토양수분 관측소를 구축하였다.

○ CRNP 센서

- CRNP 센서는 연구의 목적인 토양수분 계측 시스템에서 현장의 면 단위 토양수분 자료의 생산을 통해 면 단위 계측 시스템 개발을 위한 센서로 기상인자 데이터 획득을 위한 Flux-tower에 설치되었다. Flux-tower의 상단부에는 CRNP 센서가 이용하는 전력을 생산하기 위한 태양전지 기판이 설치되어 있으며, CRNP 센서의 본체와 로거 및 배터리가 Flux-tower 하단부에 부착되어 있다. 본 연구에서는 점 (FDR, TDR)과 면 (Cosmic-ray) 개념의 방식을 연계하여 토양수분 계측 시스템을 구성하였으며 이를 위하여 일정 기간의 시험 유역 운영이 필요하였다. 따라서 CRNP 센서를 연구 초기에 우선적으로 Flux-tower에 설치하였으며 관측 중성자 강도 안정 기간 동안 16개 FDR 센서를 순차적으로 설치하였다.
- 우선적으로 CRNP 센서에서 관측된 중성자 강도가 연구지역에서 토양수분과 반비례 관계를 나타내는지 확인하기 위한 분석이 수행되었으며, 이후 중성자 강도 교정을 통한 토양수분 산출을 수행하였다. Kim et al.(2016)에서는 짧은 연구 기간, 불안정한 토양 수분 데이터와 토질의 특성을 고려하지 못한 토양 수분 산출 시 중성자 강도의 최적화가 필요하다고 언급하고 있으며, 다른 수소 공급원들이 토양 수분 산출 결과의 불확실성을 높일 수 있음을 밝히고 있다 (Bogena et al., 2013). 이러한 데이터 불확실성을 줄이기 위하여 본 연구에서는 CRNP 센서가 설치된 2018년 7월부터 2019년 10월까지 측정된, 약 1년 이상 누적된 고속 중성자 강도 관측 데이터를 분석하고 토양수분 산출에 사용하였다. 타 수소공급원의 경우에는 CRNP 센서 기반 중성자 강도 교정 기법 고도화를 통하여 고려하고자 하였으며 그 결과를 분석하고 평가하였다.

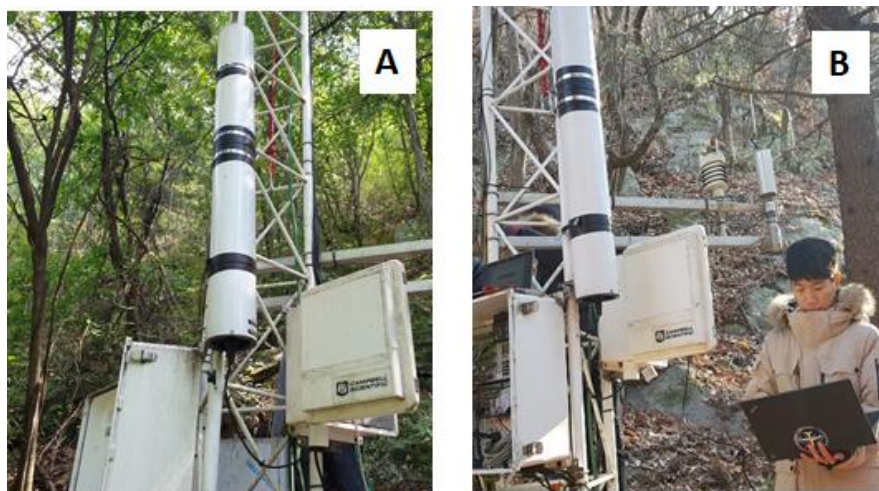


Fig. 3.1.28 A: 설치된 CRNP 센서, B: CRNP 센서 데이터수집

○ CRNP 관측 데이터 품질관리

- Flux-tower에는 CRNP 센서 외에도 여러 기기가 장착되어 있다. 지상으로부터 19.2 m 높이에 온도계, 습도계를 비롯하여 검출기 내부에는 습도기와 배터리 측정기 등이 부착되어 있는

데, 그 이유는 궁극적으로 신뢰도 있는 데이터를 얻기 위함이다.

- 본 연구에서는 Zreda et al.(2012)과 같은 방법론을 사용하여 시험유역에서 관측된 오차값을 가질 가능성이 있는 데이터를 제거하였다. Zreda et al.(2012)에서는 총 4가지 조건을 설정하고, 조건에 해당되는 데이터를 제거하였는데, 그 조건들은 다음과 같다.

- 측정시간이 1시간이 아닐 경우
- 측정값이 직전 중성자 강도 측정값과 20%이상 차이날 경우
- 센서 내의 상대습도가 80% 이상일 경우
- 배터리 수준이 11.8V 이하일 경우

- 본 연구에서 역시 Quality control(품질 관리)를 위한 습도계, 온도계, 기압계 등 여러 센서를 Flux-tower에 부착 후 관측 결과에 따라 데이터를 제외하였다. 검출기를 통해 얻은 logger 데이터의 예시는 Table 3.1.4과 같다.

Table 3.1.4 CRNP 센서 데이터 예시

TIMESTAMP	RECORD	HI_NeutronCt_Tot	HI_ElapsedSe_Tot	HI_CRS_DegC_Avg
TS	RN	Tot	Tot	Avg
2018-07-04 17:00	24990	1447	3580	33.53
2018-07-04 18:00	24991	1428	3600	33.51
2018-07-04 19:00	24992	1449	3595	32.90
2018-07-04 20:00	24993	1396	3570	31.96
2018-07-04 21:00	24994	1461	3570	30.82
2018-07-04 22:00	24995	1396	3600	29.76
2018-07-04 23:00	24996	1489	3600	28.93

- TIMESTAMP는 검출 당시의 시간을 나타내며, HI_NeutronCt_Tot는 검출된 중성자 강도를 말한다. HI_ElapsedSe_Tot는 한 시간 동안 검출기가 실제 검출한 시간을 의미하며, 단위는 sec이다. HI_CRS_DegC_Avg는 센서 내부의 온도를 의미하며, 이 역시 데이터 품질관리를 위해 사용된다.

다. CRNP 센서 기반 토양수분 산출 알고리즘

1) 중성자 강도 보정

- CRNP 센서에서 관측된 중성자 강도를 이용하여 토양수분을 산출하기 위해서는 연구 지역의 대기, Cosmic-ray 입자 수 및 대기 중 수증기량을 고려한 중성자 강도의 보정이 필요하며, 보정된 중성자 강도와 토양수분 간의 관계를 통해 교정 중성자 강도를 계산하여야 한다. 본 절에서는 보다 정확한 토양수분 산출을 위한 매개변수 최적화 방법을 소개하고자 한다.

- 최초에 CRNP를 통해 측정된 중성자 강도는 원시 중성자 강도로, 이 값을 직접적으로 토양수분 산출에 사용하기엔 무리가 있는데, 그 이유는 중성자 강도가 토양수분 외에도 여러 인자들에 의해 영향을 받기 때문이다. 따라서 이러한 요인들을 고려한 보정과정が必要하며, 보정을 거친 보정 중성자 강도 (N_{corr})를 교정 방법에 사용한다. Zreda et al. (2012)의 연구에서 보정식을 통해 보정한 결과는 다음과 같다 (Fig. 3.1.29).

- Fig. 3.1.29를 보면 최초에 CRNP 센서를 통해 얻은 중성자 강도를 기압, 대기 중 수증기량 그리고 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자의 양에 의한 보정식으로 보정한 결과들을 확인할

수 있다. 검출기를 통해 검출된 중성자 강도와 최종 보정된 중성자 강도가 명백한 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있으며, 따라서 본 연구에서는 같은 방법으로 중성자 강도 보정을 수행하였다.

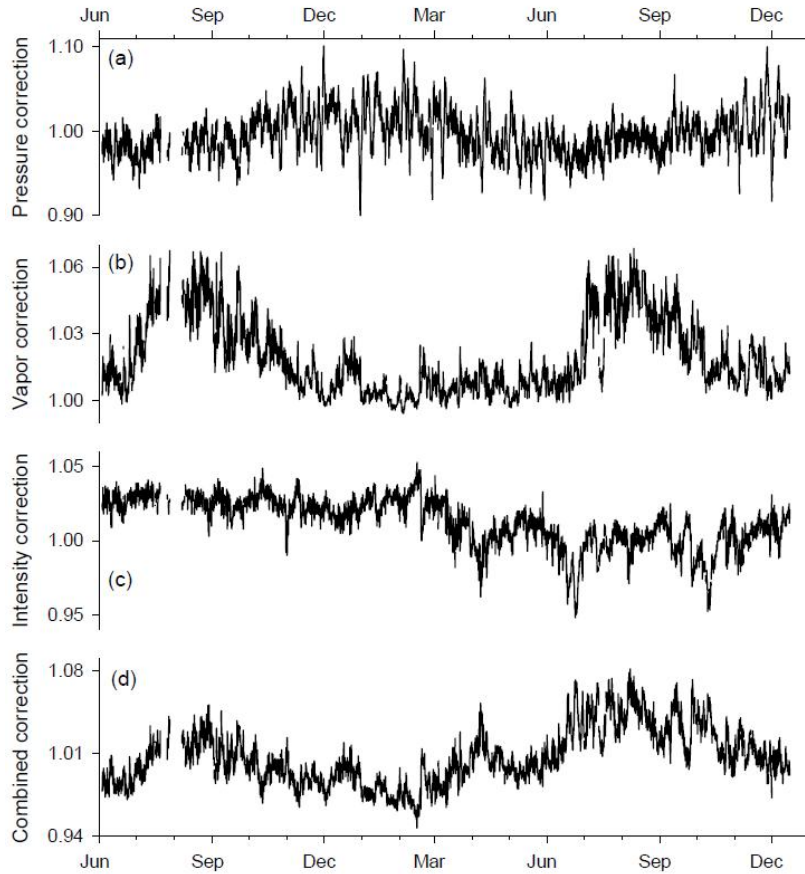


Fig. 3.1.29 보정식을 통해 산정된 보정 중성자 강도(Zreda et al., 2012)

○ 기압에 대한 보정

$$f_p = \exp[\beta(P - P_{ref})] \quad (3.1.9)$$

- Eq. 3.1.9는 기압에 관한 보정식이다. β 는 대기압 보정 계수이며, 센서가 측정한 해당 시간에서 기압(P)과 연구 기간 동안 측정된 기압의 평균값(P_{ref})이 사용된다. 기압은 중성자 강도와 반비례하는데, 그 이유는 기압이 높을수록 중성자가 대기를 관통하기 힘들어지기 때문이다. 이를 고려하기 위해, 연구지역의 Flux-tower에 기압계를 설치하여 기압에 의한 중성자 강도 변동을 보정하고자 하였다.

○ 대기 중 수증기량에 대한 보정

$$f_{wv} = 1 + 0.0054(P_{v0} - P^{ref}) \quad (3.1.10)$$

- Eq. 3.1.10은 대기 중 수증기량에 관한 보정식이다. 대기 중 수증기량은 Cosmic-ray 중성자가 토양 내의 수소 원자와 반응하기 전에 대기에서 먼저 반응하기 때문에, 대기 중 수증기량이 높을수록 대기 중의 고속 중성자 강도가 감소한다. 따라서 중성자 강도 측정 시 대기 중 수증기량에 대한 보정이 필수적이라 할 수 있다. P_{v0} 는 센서가 측정한 해당 시간에서의 습도이며, P_{ref} 는 임의의 기준 시간에서의 습도를 의미한다. 이처럼, 대기 중 수증기량에 관한 보정식은 습도에 관한 함수로 중성자 강도 보정에 적용된다.

○ Cosmic-ray 입자 수에 대한 보정

$$f_i = \frac{I_m}{I_{ref}} \quad (3.1.11)$$

- Eq. 3.1.11은 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자 수에 관한 보정식이다. 일례로, 올해와 작년의 Cosmic-ray 입자수를 비교했을 때 올해가 작년보다 적다면, 올해 검출된 중성자 강도가 작년에 비해 적을 가능성이 농후하다. 이는 토양수분에 대한 영향이 아니므로, 정확한 토양수분 산출을 위해서는 입자 수에 대한 보정이 필수적이다. 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자는 각종 자기장의 영향에 의해 조절되는데, 그 중 태양과 지구 두 행성의 자기장의 영향이 지배적이다(Andreasen et al., 2017; Zreda et al., 2012). 일반적으로 11년의 태양활동주기에 따라 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자의 전체적인 개수가 달라지며, 이는 차단 강성률(cutoff rigidity)이라 불리는 지구 자기장의 영향을 받는다.
- Fig. 3.1.30를 보면, 차단 강성률(빨간 선)과 길이 질량 감쇠 길이 (괄호 안의 값) 및 Cosmic-ray 중성자 관측소(파란 점)이 나타나있다. 적도 부근에서의 차단 강성률이 17이며, 극지방으로 갈수록 그 값이 점점 감소하여 극지방 근처에서는 1의 값을 갖는 것을 확인할 수 있다. 차단 강성률이란 Cosmic-ray 입자가 대기를 관통해 지면에 도달하기 위한 에너지를 수치화한 값으로, R_c 라 한다. 차단 강성률 값이 높을수록 Cosmic-ray 입자가 지면에 도달할 가능성이 적어진다. COSMOS 네트워크에서는 스위스의 융프라우요크 (Jungfrauoch)에 위치한 중성자 관측소의 차단 강성률값을 통해 해당 지역의 차단 강성률을 보정한다.

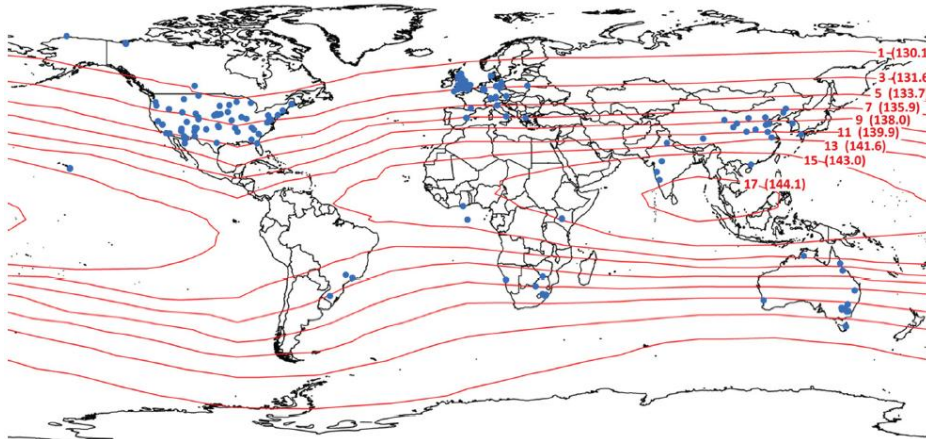


Fig. 3.1.30 위도 별 차단 강성률 값의 차이 (Andreasen et al., 2017)

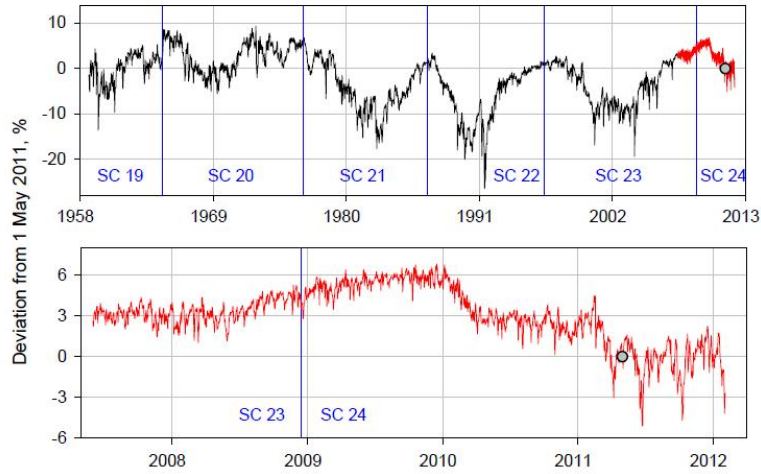


Fig. 3.1.31 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자 수 관측결과
(Zreda et al. 2012)

- Fig. 3.1.31은 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자 수의 변동을 나타내었다. 검은 선의 시간 해상도는 10일이며, 빨간 선은 1일이다. 파란 선은 태양활동주기를 표현한 것으로, 파란 선이 있는 지점이 주기가 시작되는 지점이다. 그림을 보면 파란 선 사이의 거리가 일정하지 않은 것을 확인할 수 있는데, 이는 태양활동주기에 변동이 있음을 시사한다. 실제로 태양활동주기는 9년에서 13년까지 다양해지기 때문에, 주기를 고려한 토양수분 산출 역시 필요하다.

$$R_{cscaled} = -0.075(R_c - R_{c_{avg}}) + 1 \quad (3.1.12)$$

- $R_{c_{avg}}$ 은 융프라우요크 관측소의 차단 강성을 값으로, 4.49 GV이다. 연구 지역의 차단 강성을 R_c 를 대입하여 $R_{cscaled}$ 을 산정한 후, 이를 다음 Eq. 3.1.13에 대입해 최종 보정한다. 엄밀히 구분하면, Eq. 3.1.12는 연구 지역의 차단 강성을 보정한 식이며, Eq. 3.1.13은 이러한 차단 강성을 고려해 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자를 보정한 식이다.

$$f_{iscaled} = (f_i - 1)R_{cscaled} + 1 \quad (3.1.13)$$

2) 보정된 중성자 강도 획득

- 위의 식들을 통해 기압, 대기 중 수증기량과 지구로 들어오는 Cosmic-ray 입자 수에 관한 보정 인자를 구하면 최종적으로 보정된 중성자 강도를 얻을 수 있는데, 해당 식은 다음과 같다.

$$N_{corr} = N_{raw} \left(\frac{f_p \times f_{wv}}{f_{iscaled}} \right) \quad (3.1.14)$$

- N_{raw} 는 검출기에서 측정된 중성자 강도이며, N_{corr} 은 보정된 중성자 강도이다. 위의 식을 통해 N_{corr} 를 얻어, 이를 교정식에 대입해 토양수분을 산정한다. Franz et al.(2012)에서는 교정식을 다음과 같이 정의한다.

$$\theta(N_{corr}) = \frac{0.0808}{\left(\frac{N_{corr}}{N_0} \right) - 0.372} - 0.115 \quad (3.1.15)$$

- $\theta(N_{corr})$ 는 CRNP 센서를 통해 산출된 토양수분을 나타내며, N_{corr} 는 보정된 중성자 강도, N_0 는

건조한 토양에서 측정한 중성자 강도를 나타낸다. 지점 가중평균 토양수분 값이 필요한 이유는 N_0 를 산정하는 데에서 오는 어려움 때문이다. 연구지역을 이상적인 상태만큼 건조하게 만들 수 없기 때문에, N_0 를 추정하여 교정식에 사용하여야 한다.

라. 지점 가중평균 토양수분 산출

1) 지점 단위 토양수분 계측시스템 설계

○ 지점마다 설치된 FDR 센서들은 해당 지점의 토양수분을 대표하는 값을 산출하며, 지점을 대표하는 토양수분 값을 면 단위 토양수분으로 Upscaling 시키기 위해서는 적절한 산정 방법이 필요하다. Schrön et al.(2017)의 연구에서는 지점에 수평, 수직 가중치를 주어 지점 데이터가 가지는 의미가 각각 다르다고 보았다. 본 연구에서는 지점마다 설치된 4개의 센서에 수직 가중치를 부여해 하나의 지점 토양수분 데이터를 획득하며, 그 후 지점마다 수평 가중치를 부여해 면 단위를 대표하는 하나의 토양수분 데이터를 획득하였다.

○ 수직 가중 평균 산정

– Choi et al. (2007)의 연구에 따르면, 토양수분은 지면으로부터의 깊이에 따라 극명하게 달라지기 때문에, 깊이에 대해 같은 가중치를 주어 평균 토양수분을 산정하는 방법은 신뢰성이 떨어진다고 할 수 있다. 수직 가중 평균 산정 방법은 크게 두 가지로 나뉘며, Franz et al. (2012)의 연구에서 사용한 방법과 Schrön et al. (2017)에서 사용한 방법이 있다. Franz et al.(2012)의 연구에서 사용한 방법은 선형 수직 가중평균 산정법으로, 지면으로부터의 깊이 d 와 이에 따른 가중치를 선형모델로 가정하였다. 반면, Schrön et al.(2017)의 연구에서는 d 와 이에 따른 가중치가 지수함수 형태를 띤다고 가정했으며, 이를 지수형 수직 가중평균 산정법이라 명명하였다.

– 선형 수직 가중평균 산정방법

- 면 단위 토양수분 데이터는 지면으로부터 일정 깊이를 대표하는 값으로 정의되며, 선행 연구에서는 이 깊이를 유효 깊이(Measurement depth)라 산정하였다. 따라서 유효 깊이보다 깊은 깊이에 대해서는 가중치를 0으로 주었다.

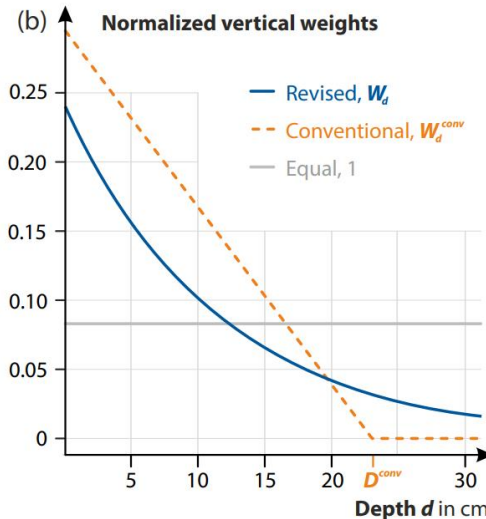


Fig. 3.1.32 수직 가중 평균을 산정하는 2가지 방법의 차이 (Schrön et al., 2017)

$$W_d^{conv} = \begin{cases} 1 - d/D^{conv}, & d \leq D^{conv} \\ 0, & d > D^{conv} \end{cases} \quad (3.1.16)$$

$$D^{conv} \equiv z^* = \frac{5.8}{\theta + 0.0829} \quad (3.1.17)$$

- Fig. 3.1.32의 주황색 선은 함수 W_d^{conv} 를 나타낸 것으로, D^{conv} 이상의 깊이에 대해서는 0의 가중치를 준 것을 확인할 수 있다. 선형 수직 가중평균 산정 방법에는 2가지 결점이 있는데, 그 첫 번째는 CRNP 센서와 FDR 센서의 거리에 따라 산정되는 유효 깊이가 같은 값으로 산정된다는 점이다. 두 번째는 유효 깊이 d 이상의 영향은 무시된다는 점이다. 이를 보완하기 위해서, Schrön et al.(2017)의 연구에서는 지수형 수직 가중평균 산정 방법을 제안하였다.

– 지수형 수직 가중평균 산정방법

- CRNP 센서의 유효 깊이를 고려하기 위하여 본 연구에서는 지수형 수직 가중평균 산정하였다.

$$W_d(r, \theta, p, H_{veg}) = e^{-2d/D} \quad (3.1.18)$$

- r 은 CRNP 센서와 FDR 센서 사이의 거리이며, θ 는 FDR 센서를 통해 측정된 토양수분, p 는 기압, H_{veg} 는 식생의 높이를 의미한다. 기압과 식생의 높이는 센서의 거리에 따른 관계성으로 표현할 수 있기 때문에, 다음과 같은 식으로 간단히 표현할 수 있다.
- 지점마다 수직 가중치 값을 얻게 되면, 깊이 별로 설치되어 있는 FDR 센서에서 도출된 토양수분과 가중치의 곱을 평균 내어 수직 가중평균 토양수분을 산정한다.

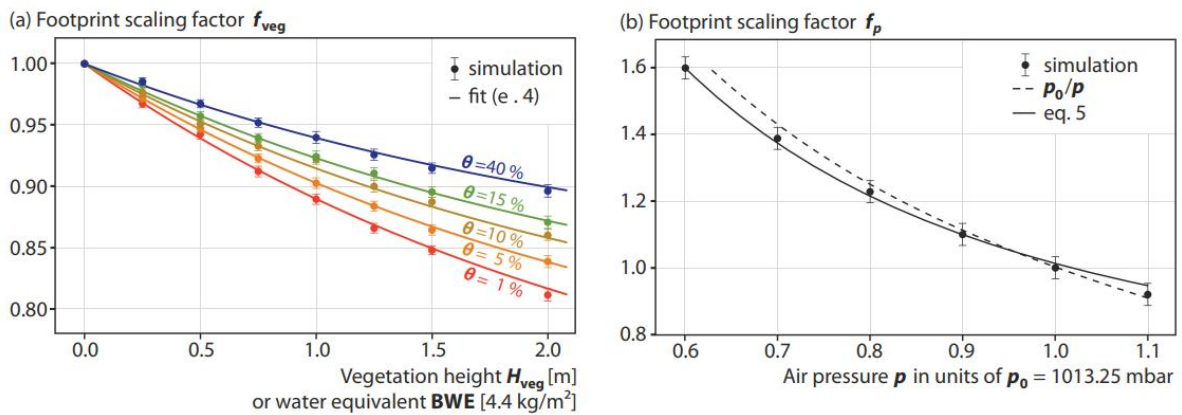


Fig. 3.1.33 p 와 H_{veg} 로 스케일링한 보정인자(Köhli et al., 2015)

○ 수평 가중평균 산정방법

- Köhli et al.(2015)의 연구에서는 수평 가중치를 산정하는데 기압(p)과 습도(h)를 가장 주요한 요인으로 보았다. 선행연구에서는 CRNP 센서와 FDR 센서 사이의 거리에 의해 산정되며, 선행연구에서는 거리를 세 부분으로 나누어 가중치를 다르게 부여하고 있는데, 그 이유는 다음과 같다. Fig. 3.1.33에는 CRNP 센서와 FDR 센서 사이의 거리에 따라 달라지는 중성자 검출 정도 관계성이 나타나있다. 토양수분이 3%일 경우 토양수분이 50%일 경우보다 많은 중성자가 검출되며, 이는 토양수분 많을수록 중성자의 에너지가 낮아지기 때문이다(Zreda et al., 2012). 또한, 거리에 따라 중성자 검출 강도가 낮아지고 있는 것을 볼 수 있는데, 이는 수평 가중평균 산정이 필요한 근거와 정확히 부합한다. CRNP 센서에 가까울수록 중성자 검출 정도가 강해지나, 이는 CRNP 센서로부터 멀수록 적은 중성자가 분포해있다는 의미가 아니기 때문에, 수평 거리에 따른 가중치를 부여해 이를 보정해야 한다.
- $W_r(\theta, h)$ 는 수평 가중치를 의미하는 값으로, 거리에 따라 산정하는 방법이 다르며, 그 경험식은 다음과 같다.

$$W_r = (h, \theta, p, H_{veg}) = \begin{cases} (F_1 e^{-F_2 r^*} + F_3 e^{-F_4 r^*})(1 - e^{-F_0 r^*}) & (0m < r \leq 1m) \\ F_1 e^{-F_2 r^*} + F_3 e^{-F_4 r^*} & (1m < r \leq 50m) \\ F_5 e^{-F_6 r^*} + F_7 e^{-F_8 r^*} & (50m < r \leq 600m) \end{cases} \quad (3.1.19)$$

$$F_0 = p_0 \quad (3.1.20)$$

$$F_1 = p_0(1 + p_3 h)e^{-p_1 \theta} + p_2(1 + p_5 h) - p_4 \theta \quad (3.1.21)$$

$$F_2 = \left((p_4 h - p_0)e^{-\frac{p_1 \theta}{1 + p_3 \theta}} + p_2 \right)(1 + p_3 h) \quad (3.1.22)$$

$$F_3 = p_0(1 + p_3 h)e^{-p_1 \theta} + p_2 - p_4 \theta \quad (3.1.23)$$

$$F_4 = p_0 e^{-p_1 \theta} + p_2 - p_3 \theta + p_4 h \quad (3.1.24)$$

$$F_5 = \left(p_0 - \frac{p_1}{p_2 \theta + h - 0.13} \right) (p_3 - \theta) e^{-p_4 \theta} - p_5 h \theta + p_6 \quad (3.1.25)$$

$$F_6 = p_0(h + p_1) + p_2 \theta \quad (3.1.26)$$

$$F_7 = (p_0(1 - p_6 h)e^{-p_1 \theta(1 - p_4 h)} + p_2 - p_5 \theta)(2 + p_3 h) \quad (3.1.27)$$

$$F_8 = \left((p_4 h - p_0)e^{-\frac{p_1 \theta}{1 + p_6 h + p_6 \theta}} + p_2 \right)(2 + p_3 h) \quad (3.1.28)$$

- Köhli et al.(2015)의 연구에서는 습도와 기압으로 위의 매개변수를 산정했으며, 이를 수평 가중 평균 산정에 대입해 가중치를 부여한다.

$$\theta_{wt} = \frac{\sum_k \theta_k^* W_{r.k}}{\sum_k W_{r.k}} \quad (3.1.29)$$

- 가중치 W_r 을 산정하고 나면, 수직 가중평균 산정 방법과 마찬가지로 가중치를 대입해 수평 가중평균 토양수분을 산정한다.

○ 가중 평균 지점 토양수분 산정 및 분석

- 선행 연구들에 의하면 (Zreda et al., 2008; Franz et al., 2012; Köhli et al., 2015) 중성자 강도는 얇은 깊이의 토양수분에 의해 가장 큰 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다. **설마천 지역의 16개 센서는 CRNP 센서 기반 면 단위 토양수분 산출 및 검증을 위하여 사용되었으며** 본 절에서는 CRNP 센서의 관측 정확도에 영향을 미치는 유효 깊이와 센서로 부터의 거리를 고려하기 위하여 가중 평균 기법이 적용된 토양수분량 거동의 분석을 다루고자 한다.

- 본 연구에서는 FDR 센서마다 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm 별로 총 4개의 깊이에 대하여 센서를 설치하였는데, 이러한 깊이에 따른 가중치를 줄 때 토양수분과 중성자 강도 간의 관계

를 물리적으로 타당하게 해석할 수 있을 것이라 판단하였다. 따라서 FDR 센서 별 수직 가중치를 적용하기 위하여 센서 간 거리에 따른 유효 깊이와 기압, 식생 높이를 고려하였다.

- 수평 가중치의 경우에는 지점 별로 CRNP 센서와의 수평거리를 계산하여 가중치를 구하였다. CRNP 센서를 통해 관측된 중성자 신호는 거리에 따라서 감도가 변동하며 특히 센서 인근의 수 미터에서 중성자 감도가 높다. 이러한 효과가 과소 산정되는 것을 방지하기 위하여 기압, 습도에 대한 의존성을 고려하여 개선된 수평 가중치를 적용하였다.
- 위와 같은 방식으로 수직 가중치와 수평 가중치가 차례로 적용된 토양수분 데이터를 CRNP 센서 기반의 면 단위 토양수분 산출 및 검증에 활용하였다. 토양수분 값은 가중치를 통하여 하나의 값으로 합쳐 사용할 수 있다. 이를 활용해 설치된 9개 유전율식 센서로부터 측정된 토양수분 자료로부터 가중 평균 지점 토양수분을 산출하였다 (Fig. 3.1.34).

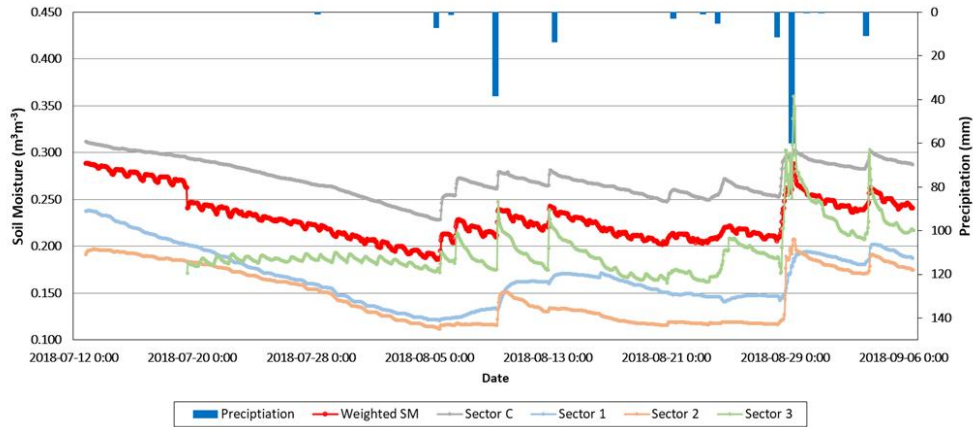


Fig. 3.1.34 1차 연도에 산출된 실험 지역 가중 평균 토양수분 데이터와 지점 토양수분 데이터 (정재환 등, 2019)

마. 교정 중성자 강도 N_0 산정

- 지점 가중평균 토양수분을 $\theta(N_{corr})$ 에 대입하고, 보정된 중성자 강도를 N_{corr} 에 대입하면 CRNP 기반 면 단위 토양수분 자료 산출을 위한 교정 중성자 강도 N_0 가 산정된다.

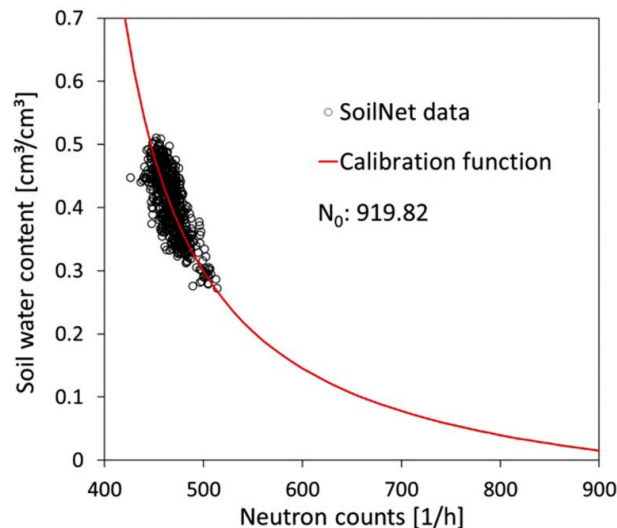


Fig. 3.1.35 토양수분과 중성자 강도 간 관계성 분석 및 교정 중성자 강도 도출 사례(Bogena et al., 2013)

- Fig. 3.1.35는 지점 가중평균 토양수분과 중성자 강도를 대입해 N_0 를 산출한 그림이다. Soil water content는 지점 가중평균 토양수분을 말하며, Neutron counts는 보정된 중성자 강도를 의미한다. 두 변수의 관계는 반비례 관계이며, 이를 통해 N_0 가 도출된다. Fig. 3.1.35처럼 하나의 N_0 를 얻으면, Eq. 3.1.30에 다음과 같이 대입한다. 이 때, N_0 에 대입된 대표값을 단일 N_0 라 한다.

$$\theta(N_{corr}) = \frac{0.0808}{\left(\frac{N_{corr}}{919.82}\right) - 0.372} - 0.115 \quad (3.1.30)$$

- Eq. 3.1.30처럼 N_0 를 식에 고정하면, 보정된 중성자 강도만으로 토양수분을 산출할 수 있게 된다.

바. 시험운영을 통한 단일 교정 중성자 강도 기반 토양수분 산출

토양수분 산출을 위한 중성자 강도 교정을 위해서는 첫째로 중성자 강도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있는 가중 평균 지점 토양수분의 거동 분석이 이루어져야 한다. 이후 가중 평균 지점 토양 수분과 원시 중성자 강도에 대한 분석이 이루어져야 하며, 추가적으로 습도와 식생 높이, 토양 용적 밀도에 대한 기본적인 보정식이 적용된 보정 중성자 강도와 가중 평균 지점 토양수분 간의 비교 분석을 수행하였다.

- Cosmic-ray 기기 관측 원시 중성자 강도 분석 (N_{raw})

- 가중 평균 지점 데이터를 산출하며 CRNP 센서에서 측정된 N_{raw} 에 대한 분석 또한 수행되었다. Fig. 3.1.36에서는 N_{raw} 와 강우량을 시계열로 나타내고 있다. 그래프에서 강우가 발생할 시 중성자 강도가 낮아지는 모습을 볼 수 있다.

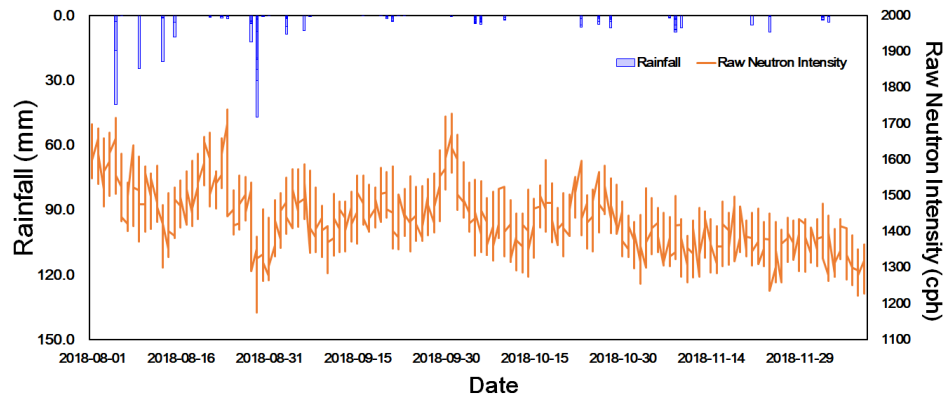


Fig. 3.1.36 시험 운영 기간 내의 연구지역의 강우량과 원시 중성자 강도 시계열 분석

- N_{raw} 의 변동폭과 진동 주기가 굉장히 짧은 것을 볼 수 있는데 이것은 대기압과 습도에 의한 영향이라 볼 수 있으며 산악지형에서 이러한 영향을 고려한 중성자 강도의 보정이 이루어져야 함을 분석 결과를 통해 알 수 있다. Fig. 3.1.37의 결과를 통해 나타난 원시 중성자 강도의 전체 시계열에 대한 범위는 1174-1818 cph이며 표준편차는 100.232로 나타났다.

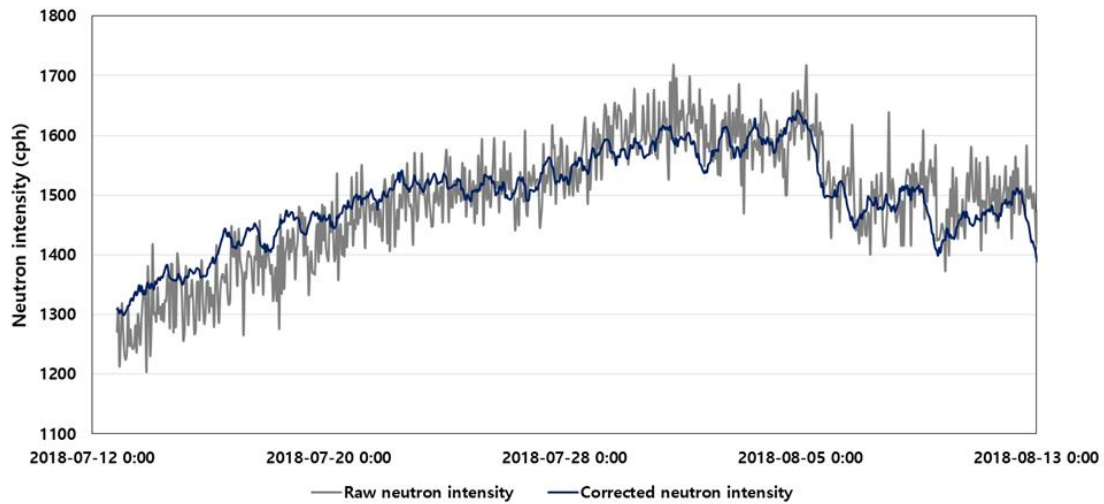


Fig. 3.1.37 1차 연도에 대기 영향 인자를 고려하여 보정된 CRNP 중성자 강도

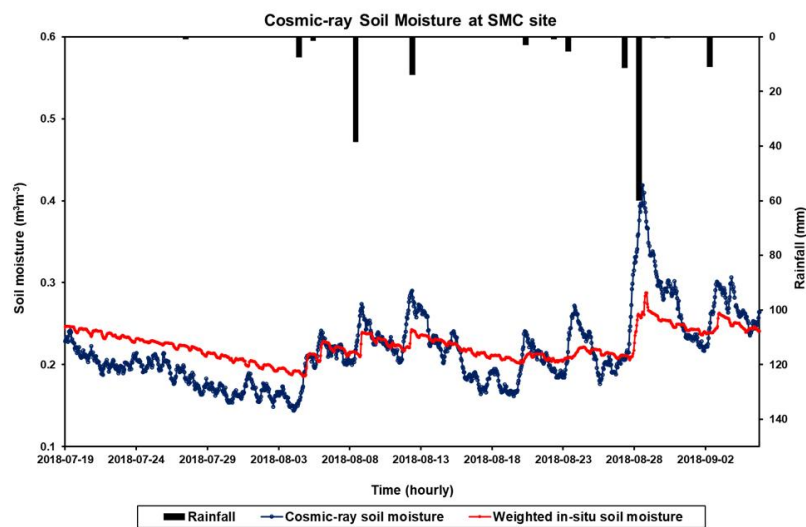


Fig. 3.1.38 1차 연도의 단일 중성자 강도를 이용한 토양수분의 산정과 검증 (정재환 등, 2019)

- 1차 연도의 경우 실험 초기 단계에 수행한 단일 중성자 강도 토양수분량 실제 토양수분 자료들에서 과대·과소 산정되는 구간을 뚜렷하게 확인할 수 있다. 두 지표 모두 강우에 의한 변동을 나타내고 있으나, 지점 가중평균 토양수분에 비해 Cosmic-ray를 통해 산출한 토양수분의 변동성이 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 중성자 강도가 표층 토양수분과 식생에 의한 차단에 대하여 높은 민감도를 나타내기 때문이다. 따라서 토양수분의 거동을 강우 자료와의 비교를 통하여 평가하는 것은 산지에서 발생하는 강우의 차단과 기온, 습도, 유출과 같은 타 지형에 비하여 뚜렷하게 나타나는 효과를 고려하기에는 한계가 있으며, 이외의 인자들을 총체적으로 고려하는 것이 요구된다.

사. 면 단위 토양수분량 계측시스템 구축 (Flow Chart)

본 절에서는 1차 연도 연구 결과를 토대로 면 단위 토양수분량 계측 시스템을 제시한다. Fig. 3.1.39를 보면 연구지역 선정부터 토양수분 획득에 이르는 메커니즘이 단계별로 나타나있으며, 그에 대한 설명은 다음과 같다.

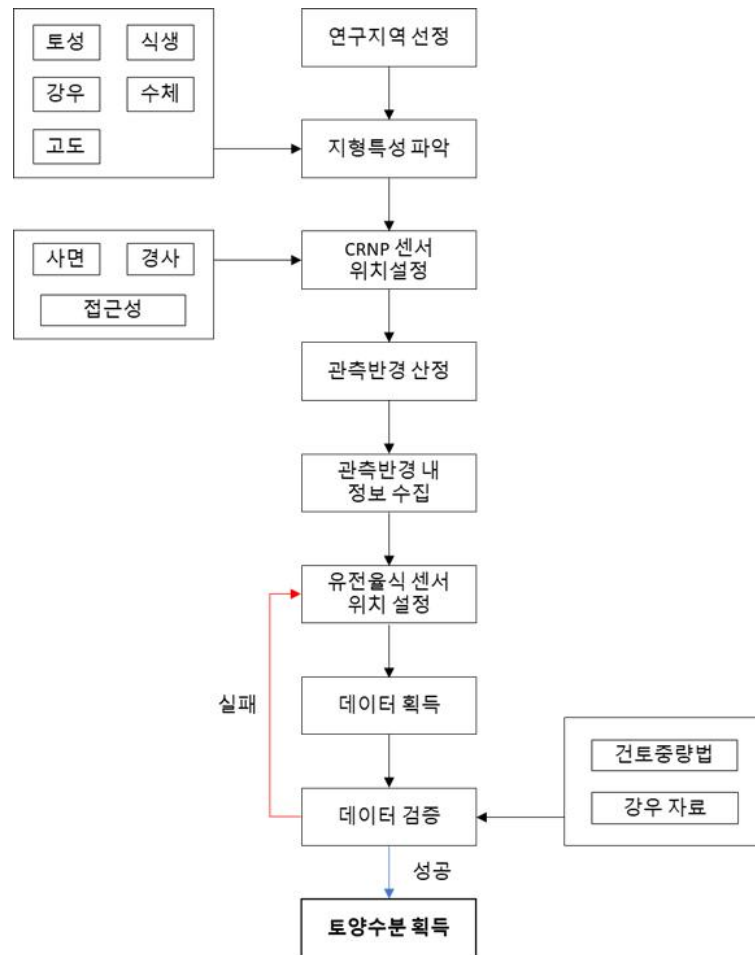


Fig. 3.1.39 CRNP 센서 기반 토양수분 설계 시스템

1) 연구지역 선정

- 토양수분은 수문 모형의 입력 자료나 자연재해 분석에 사용되는 데이터로 사용되는데, 이를 위해 토양수분의 활용 가능성이 높은 연구지역을 선정하였다. 토양수분은 지표면과 대기 사이 수문 순환, 에너지 순환을 조절하는 역할을 하며, 이를 통해 강우, 유출 등과 같은 전반적인 수문 순환 과정에 직접적으로 관여하기 때문에 (Walker et al., 2001), 강우-유출 모형, SM2RAIN 등과 같은 수문 모형에 기본적인 입력 자료로서 활용될 수 있으며, 특히 지점 토양수분 데이터의 경우 특정 유역의 유출 분석에 효과적으로 활용될 수 있다.
- 이로써 토양수분을 추가 고려한 모델이 기존 모델에 비해 보다 정확한 증발산 데이터를 추정할 수 있게 되었으며, 따라서 환경적 변화에 대한 식생의 반응 등 증발산 데이터를 활용한 여러 환경 모델의 정확성에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

2) 지형특성 파악

- 연구지역을 선정하고 나면, 해당 지역에 대한 분석 및 파악이 필수적이다. 연구 지역에 따라 센서의 설치지점부터 많은 부분이 달라지기 때문에 ‘지형 특성 파악’ 단계에서는 지형에 대한 심도 깊은 이해가 요구된다.
- 그러나 연구지역이 산지라면 해당 연구지역의 사면과 경사에 대한 분석을 실시해야 한다. 해당 연구지역이 몇 개의 사면으로 되어있으며, 경사도에 따른 접근성을 파악해 접근 경로를 확보해야 한다.
- Fig. 3.1.41은 연구지역이 산지인 경우의 예시이다. 본 연구에서도 언급했듯이, 사면별로 토양수분이 급격하게 달라지며 사면에 따라 토양수분이 가지는 의미가 달라지기 때문에, 평지에 비해 면밀한 조사가 요구된다. 사면을 분석하여 분류하는 작업이 끝나면, 토성에 대한 분석을

실시한다. 해당 지점이 CRNP 센서나 유전율식 센서를 심기에 적합한지, 접근성 및 경사가 용이한지 등을 고려하여 분석을 실시하며, 그 후 수체에 대한 분석과 식생에 대한 분석을 실시한다. 이러한 변수들에 대한 고려가 마무리되면, 센서의 위치를 산정하게 된다.

3) CRNP 센서 위치 설정

- 연구지역의 관측 범위는 CRNP 센서의 위치를 기준으로 삼기 때문에, CRNP 센서의 위치는 면 단위 토양수분 데이터 산정에서 매우 중요하다. **CRNP 센서는 유전율식 센서에 비해 설치지점 선정에 있어 비교적 자유롭기 때문에, 토양수분의 활용 가능성을 고려하여 센서의 위치를 설정하는 것이 유의미하다.**
- 본 연구에서는 CRNP 센서 위치 설정에 사면, 경사도와 접근성을 고려하였다. 센서 주변을 둘러싼 사면에 대한 분석을 실시하였다. 분석 후에는 사면을 분류하였고, 각 사면을 대표하는 면 단위 토양수분을 산출하기 위해 사면의 대표 지점과 CRNP 센서의 거리를 조절하였다. 해당 위치에 CRNP 센서를 설치함으로써, 북쪽, 동쪽과 남쪽 사면 모두를 대표하는 토양수분 데이터를 산출할 수 있었다.

4) 관측반경 설정

- CRNP 센서의 위치를 설정하고 나면, 센서를 통해 측정한 중성자 강도가 대표하는 관측 범위를 산정해야 한다. CRNP 센서를 사용하면 반경 약 300 m의 지역을 대표하는 토양수분을 산출할 수 있는데, 이를 위한 전제조건은 첫째, 해수면 레벨에서의 반경이어야 하며, 둘째 연구지역을 고도차가 거의 없는 평지로 가정하여야 한다. 그러나 관측반경 내에 고도차가 존재하는 경우에는 수평거리와 수직거리를 조정해야 한다.

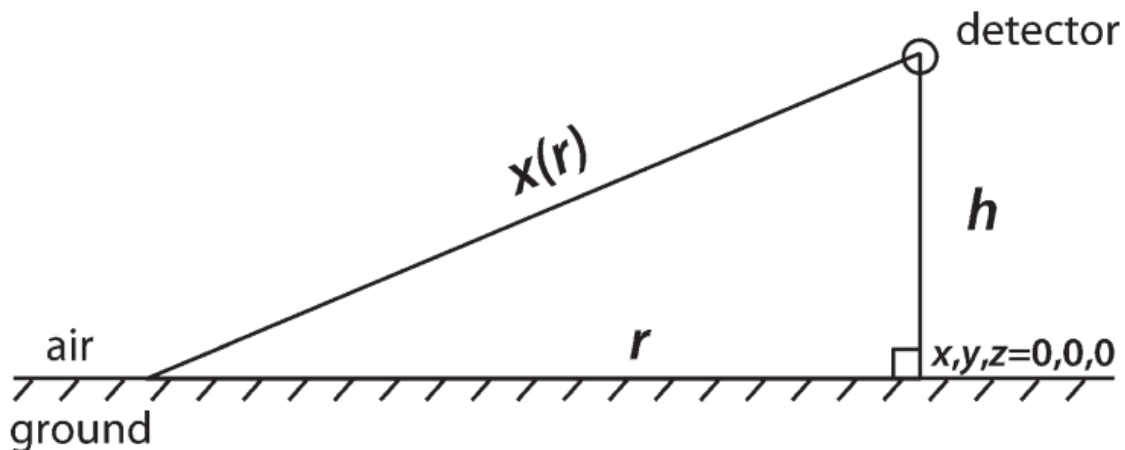


Fig. 3.1.40 평지에서의 관측반경 설정 방법 (Desilets and Zreda, 2013)

- Fig. 3.1.40를 보면 관측반경의 설정 방법이 그림으로 표현되어있다. 관측반경 $x(r)$ 은 CRNP 센서로부터 반경 300 m를 기본으로 하지만, 지면으로부터 떨어진 거리 h 를 고려해 센서로부터의 거리 r 을 산정해야 한다. CRNP 센서는 일반적으로 지면으로부터 1-2 m 위에 설치되며 (Zreda et al., 2012), 본 연구에서도 비슷한 높이에 설치하였다.

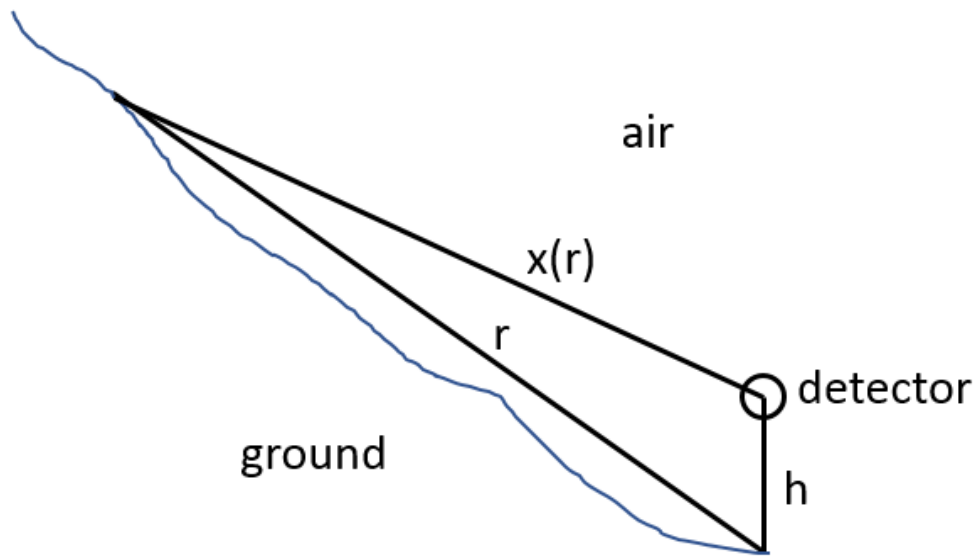


Fig. 3.1.41 산지에서의 관측반경 설정 방법

- 산지일 경우, 관측반경 $x(r)$ 설정 시 센서로부터의 거리 r 산정이 매우 중요하다. 산지에서는 지점 지점마다 CRNP 센서와의 거리가 다르기 때문에, 이를 고려하여 관측반경을 산정해주어야 한다.

5) 관측반경 내 정보 수집 및 유전율식 센서 위치 설정

- 관측반경 설정이 끝나면, 관측반경 내의 정보를 수집한다. ‘지형 특성 파악’ 단계에서 실행한 지형분석과 별개로 관측반경 내 정보 수집 단계가 필요한 이유는 유전율식 센서의 설치지점을 파악하기 위함이다. 유전율식 센서 설치지점은 각 사면을 대표할 수 있는 지점으로 설정한다. 해당 지점들을 설정한 후에, 지점마다 4개의 센서를 설치하였으며 지면으로부터 10 cm 간격을 두어 설치하였다. Fig. 3.1.42는 본 연구에서 설치한 유전율식 센서를 표현한 사진이다. 지면으로부터의 깊이를 측정하여 10 cm 간격마다 센서를 설치하였으며, 총 4개의 센서를 설치하였다.



Fig. 3.1.42 설마천 연구지역에 설치된 유전율식 센서의 깊이와 개수

- 한 지점을 대표하는 토양수분을 산출하기 위해서는 지면으로부터의 깊이에 따라 유전율식 센서를 설치하여 깊이에 따른 토양수분을 산출하는 과정이 필수적이다. 그러나 산지의 특성상 암석이 다량으로 분포되어 있어 일정 깊이 이상으로 굴착이 불가능한 지역이 다수이며, 더욱이 설마천 유역은 암석이 다량으로 분포되어 있기 때문에 보다 깊은 깊이까지 센서를 설치하

는 데에는 무리가 있었다. 즉, 유전율식 센서 설치 시, 센서의 설치에 영향을 미칠 수 있는 요소들을 고려하여 센서를 설치하여야 한다.

6) 데이터 획득 및 검증

- 두 가지 센서를 설치하고 나면, 안정화 기간을 거쳐야 한다. CRNP 센서는 내부에 습도계, 배터리 측정계 및 온도계 등 여러 센서가 부착되어 있어 CRNP 센서의 데이터 확보 없이도 데이터의 품질관리 및 신뢰도를 파악할 수 있지만, 유전율식 센서는 경우가 다르다. 데이터를 직접 열람해서 데이터가 해당 깊이의 토양수분을 산출해내는지 검증하는 절차가 필요하다. 유전율식 센서는 CRNP 센서에 비해 충격에 취약하기 때문에, 암석에 의한 충격이나 야생 동물에 의한 충격에 의해 작동에 문제가 생길 가능성이 존재한다. 즉, 약 2달간의 안정화 기간을 거쳐 유전율식 센서가 해당 지점의 토양수분 데이터를 생산한다고 판단되면, 그 후 CRNP 센서와 유전율식 센서의 연구기간을 정해 데이터를 획득한다. 그러나 안정화 기간을 거친 후에도 유전율식 센서가 유의미한 토양수분 데이터를 획득해내지 못한다면, 유전율식 센서의 위치를 재설정해서 다시금 안정화기간을 거쳐야 한다. 이 과정을 모든 유전율식 센서가 전부 안정화 될 때까지 반복해야 한다. 본 연구에서는 유전율식 센서의 안정화가 보다 늦어져, 최종적으로 FDR 센서의 안정화가 끝난 2018년 7월 31일을 기점으로 그 후로 획득된 데이터를 연구에 사용하였다.
- 본 연구에서는 분기별로 데이터를 획득하였다. 유전율식 센서의 위치가 정해지면, 해당 지점의 토양 샘플을 채취해 건토중량법을 실시한다. 이는 토양수분 데이터가 얼마만큼 정확한 토양수분 데이터를 산출하는지 검증하는 단계로, 이 과정을 거치는 이유는 유전율식 센서를 통해 산출한 지점 토양수분 데이터가 CRNP 센서를 통해 산출한 토양수분 데이터 검증에 사용되기 때문이다. 다시 말해, 유전율식 센서를 통해 산출한 토양수분 데이터가 부정확한 값을 가질수록 CRNP 센서를 통해 산출한 토양수분 역시 부정확한 값을 가진다는 것을 의미한다. 오차범위 내의 지점 토양수분 데이터가 생산된다면 지점 가중평균 토양수분 데이터를 획득한다.
- CRNP 센서를 통해 산출한 토양수분은 면 단위를 대표하는 토양수분을 산출하지만, 유전율식 센서와의 거리에 따라 산출하는 토양수분이 달라진다. 이는 지점마다 다른 토양수분을 가지는 것과는 별개로 CRNP 센서가 가지는 특징이다. 따라서, 지점 토양수분 데이터를 면 단위 토양수분 데이터로 upscaling시 고려해야 할 점은 지점이 가지는 토양수분 데이터에 또한 CRNP 센서의 위치를 기준으로 가중치를 부여해야 한다는 점이다.
- 본 연구에서는 Köhli et al. (2015)의 연구에서 사용한 방법과 같은 방법을 사용하였다. 먼저, 지점마다 설치되어 있는 4개의 유전율식 센서에 가중치를 부여해 지점을 대표하는 하나의 토양수분 데이터를 획득하였으며, 이를 수평 가중평균 내어 면 단위 토양수분 데이터를 산정하였다.
- 지점 가중평균 토양수분 데이터를 획득함과 동시에, CRNP 센서에서 측정된 중성자 강도를 보정하였다. CRNP 센서를 통한 중성자 강도의 검증을 위하여, Zreda et al. (2012)에서 제시한 센서의 물리적 상태에 대한 검증을 실시하였다. 이후 원시 중성자 강도의 대기 및 Cosmic-ray 입자 수를 고려한 보정을 실시하였다.
- 기존 교정 방법에서는 N_0 를 교정식에 고정해 전체 연구 기간에 대해서 단일 값을 사용했으나, 본 연구에서는 Dynamic- N_0 교정 방법을 사용했다. 먼저, N_0 산출을 위한 회귀 모델을 설정해야 한다. 이를 위해서는 지점 가중평균 토양수분과 보정된 중성자 강도 사이의 관계성을 표현해야 하며, 이를 통해 회귀 모델을 도출한다. N_0 는 지점 가중평균 토양수분으로부터 도출되며, 이에 따라 회귀 모델을 산정한다.
- N_0 를 산정하고 나면 보정된 중성자 강도만으로 면 단위 토양수분 데이터를 획득할 수 있게 된다. 지점마다 N_0 는 환경에 따라 변동을 가지나, 토양에 포함된 광물, 토성 및 식생 등 해당 지역의 수소 공급원에 해당되는 인자들이 극명한 변화를 가지지 않는 이상 어느 정도 비슷한 경

향성을 가진다. 따라서, 강우 자료만을 가지고 N_0 의 추이를 예측할 수 있다면, 해당 연구지역의 유전율식 센서들은 더 이상 필요 없게 된다.

$$\theta(N) = \left(\frac{a_0}{\left(\frac{N_{corr}}{N_0} \right) - a_1} - a_2 \right) \times \rho_{bulk} \quad (3.1.31)$$

7) 시험 운영을 통한 계측 시스템 최종 확정

- 위와 같은 CRNP 센서 설치 조건 및 고려해야 할 사항들을 참고하여 감악산 설마천 지역에 CRNP 센서와 유전율식 토양수분 관측 센서인 FDR 센서 9개를 유역 내에 설치하였으며, 이를 통해 설마천 지역 내에 계측 시스템을 구축하였다. 1차 연도인 2018년 7월 CRNP 센서가 설마천 Flux-tower에 부착되었으며, 7월부터 8월 사이 9개 FDR 센서가 추가적으로 설치되었으며 그 후 8월부터 12월까지 3달동안 계측 시스템의 시범운영을 실시하였다.
- 관측기기 성능평가
 - 앞선 절에서 설명한 바와 같은 선행 연구 사례 조사를 수행한 뒤, 기상 자료 및 지점 토양수분량의 기준 값을 구하기 위한 건토중량법을 실시하여, 설마천 연구 환경을 고려하여 설치된 관측 기기의 성능 평가를 실시하였다.
- 지점 센서 토양수분량 자료 적절성 평가
 - 앞서 기술된 바와 같이, 유전율식 센서의 위치 및 개수 선정은 CRNP 센서를 중심으로 이루어진다. 우선, FDR 센서 설치 위치 선정을 위하여 CRNP 센서 관측 반경을 150 m로 설정하였다. 보편적인 CRNP 센서 관측 반경인 300 m 보다 작은 범위를 설정한 이유는 선행 연구 및 본 연구지역의 지형이 산악지형이기 때문에 가지는 특성인 지점 별 큰 고도 차이와 CRNP 센서로부터 지점까지의 수평 거리와 실제 거리 차이 때문이다.
 - 센서 관측 반경을 설정한 후 반경 내에서 일정 한 거리 별로 FDR 센서를 설치하였다. 첫 번째 센서는 CRNP 센서 부근에 한 개 센서를 설치하였으며 이후 두 번째 반경에 5개 센서, 세 번째 반경에 10개 센서를 설치하여 총 16개 센서가 CRNP 관측 반경에 설치되었다. 이것은 CRNP 센서와 가까울수록 수평 FDR 지점 데이터에 대한 수평 가중치가 커지기 때문이며, 이를 고려하여 가장 바깥 반경에 많은 수의 토양수분 센서를 설치하였다.

라. Cosmic-ray 기반 토양수분산출 알고리즘 고도화

- 보정 중성자 강도 분석 (N_{corr})

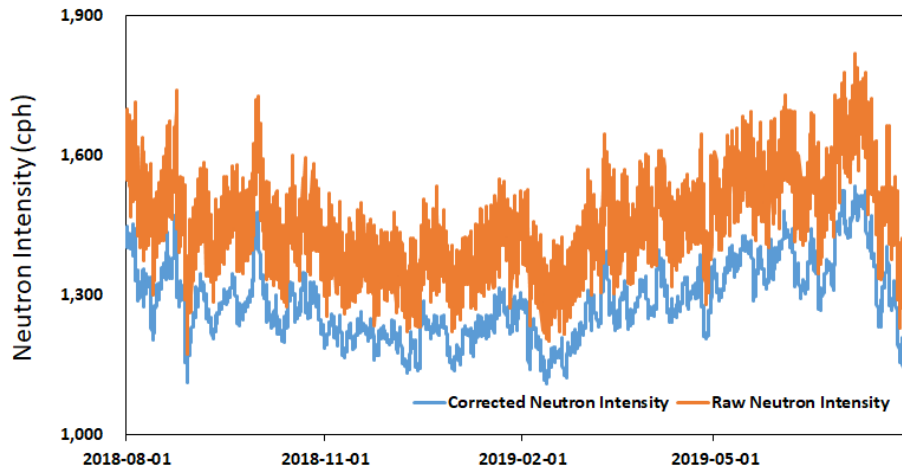


Fig. 3.1.43 영향 인자를 고려하여 보정된 CRNP 중성자 강도

- Fig. 3.1.43을 보면 영향 인자를 고려 중성자 강도의 변동 폭이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 대기 영향 인자가 중성자 강도에 미치는 영향이 상당하다는 사실을 보여주며, 이는 중성자 강도 보정에 있어 영향 인자를 고려하는 것이 필수적임을 암시한다.
- 2018년 8월부터 2019년 8월까지의 연구결과를 보면 보정된 중성자 강도가 원시 중성자 강도에 비하여 확연히 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 3개월의 시험운영기간에 비해 전 기간에 걸쳐서 중성자 강도가 충분히 안정되어 낮아진 모습을 볼 수 있다. 전 시계열에 대하여 중성자 보정된 중성자 강도의 범위가 1053.25~1533.4 cph로 나타났고 평균값은 1284.54 cph로 나타났다. 표준편차의 경우에는 보정된 중성자 강도가 82.193으로 원시 중성자 강도의 100.23에 비하여 현저히 작은 값을 보였다. 이러한 보정 결과는 산악지형에서 실시한 중성자 강도 보정이 유의미한 결과를 나타냈음을 보여준다.

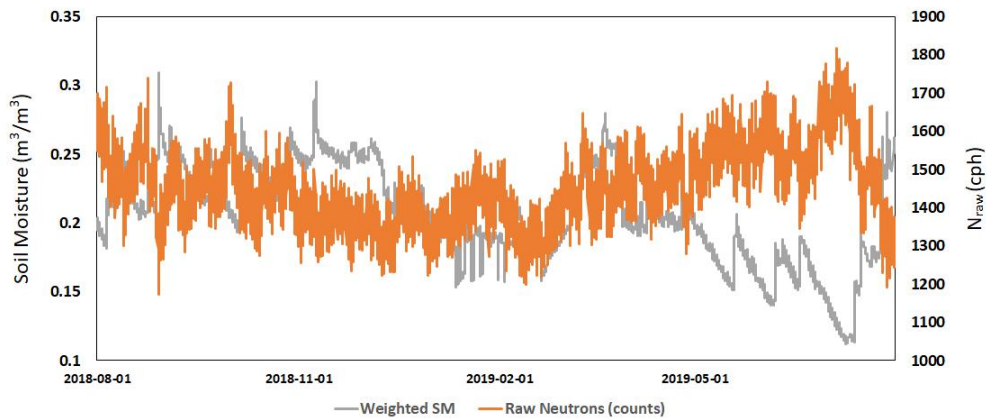


Fig. 3.1.44 시계열에 따른 N_{raw} 와 지점 가중평균 토양수분 추이

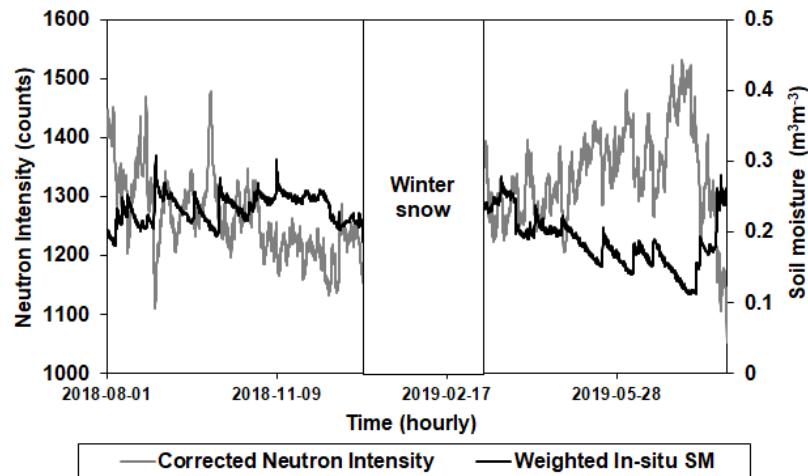


Fig. 3.1.45 영향 인자를 고려하여 보정된 CRNP 중성자 강도와 가중 평균된 지점 토양수분 간의 관계성 분석

- Fig. 3.1.45에서는 보정된 중성자 강도와 가중 평균 지점 토양수분 데이터의 반비례 경향을 확인할 수 있는데, 이를 그래프로 나타내면 Fig. 3.1.46과 같다. 이를 통해 토양수분량과 중성자 강도의 반비례 관계가 산악지형에서 역시 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 여전히 중성자 강도의 변동이 토양수분 변동에 비하여 크게 나타나고 있으며 이 때문에 두 인자의 관계성이 명확하지 않은 것을 확인할 수 있다. 이는 토양수분이 아닌 타 수소공급원에 의해 중성자 강도가 큰 영향을 받고 있음을 시사하며, 중성자 강도에 대한 추가적인 교정이 필요함을 알 수 있다.

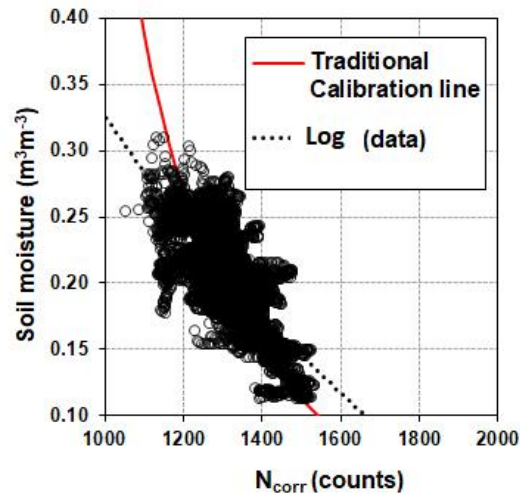


Fig. 3.1.46 토양수분과 중성자 강도가 가지는 관계성
(조성근 등, 2019)

○ Cosmic-ray 자료의 교정 기술 적용 및 산정

- 보정된 중성자 강도가 산악지형에서 토양수분과 반비례 관계를 나타냄을 확인한 후, 보정 중성자 강도와 가중 평균 지점 토양수분 자료를 활용한 기존 중성자 강도 교정 방법 기반의 토양수분을 산출하였다. 또한 이를 기상자료 그리고 가중 평균 지점 토양수분 자료와 비교 분석하여 CRNP 센서 기반 토양수분 자료의 정확성을 검증하고 개선 방안을 모색하고자 하였다.

○ 단일 교정 중성자 강도 (N_0) 산정

- CRNP 센서를 통하여 관측된 중성자 강도는 Desilets et al. (2010)에서 제시된 교정 식을 통해 토양수분으로 변환된다. θ 는 용적 토양수분 함량 (m^3/m^3)을 나타내고, N_{corr} 는 보정된 중성자 강도를 나타내며 N_0 는 동일한 조건의 건조한 토양에서의 중성자 강도를 나타낸다. 앞서 언급했듯, 교정식을 이용하여 토양수분을 산출하기 위해서는 지점 토양수분 데이터를 이용하여 중성자 강도 N_0 를 도출하여야하며, 이 때 N_0 는 CRNP 기반 토양수분 값과 가중 평균 지점 토양수분 값간 최소 RMSE (Root Mean Square Error)를 가지는 값으로 설정한다. 산출된 교정 중성자 강도는 연구기간 전체에 대하여 CRNP 센서 관측 범위 내에서 일정하다고 가정하며, 이 N_0 를 교정식에 대입하여 토양수분을 산출한다. N_0 를 단일 중성자 강도라 한다.

○ CRNP 센서 기반 토양수분 자료와 유전율식 토양수분량 비교 분석

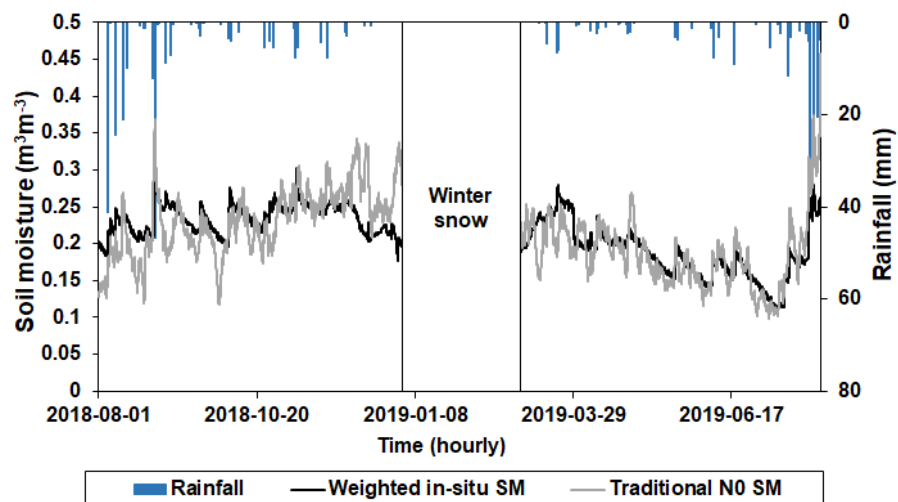


Fig. 3.1.47 단일 중성자 강도를 이용한 토양수분의 산정과 검증 (조성근 등, 2019)

- 1차 연도와 2차 연도 연구기간동안 N_0 를 산정하여 각기 다른 기간에 대하여 면 단위 토양수분을 산출하였으며 그 결과를 강우 데이터, 가중 평균 지점 토양수분 데이터와 비교하였다 (Fig.

3.1.47). 연구기간동안 전반적으로 토양수분이 강우에 영향 받는 것을 확인할 수 있으며 지점 가중 평균 토양수분과 흡사한 패턴을 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 2018년 9월 부근을 보면 강우에 대한 반응이 상이한 것을 확인할 수 있다. 강우에 대한 지점 가중평균 토양수분의 변동폭과 CRNP 기반 토양수분의 변동 폭을 비교했을 때, CRNP 기반 토양수분의 변동폭이 확연히 큰 것을 확인할 수 있다.

- 이는 강우가 오롯이 토양수분으로 흡수되지 않기 때문에 발생하는 현상이다. 강우로 인해 습도, 식생 및 지표면에 존재하는 수분량이 전부 상승하면서 중성자 강도에 큰 영향을 주게 되어 중성자 강도는 큰 변동을 띠게 되지만, 강우가 토양수분에 반영되기 까지 걸리는 시간이나 증발산 등의 영향으로 인해 지점 가중평균 토양수분은 비교적 적은 영향을 받게 된다.

○ 계측자료의 고도화를 위한 전처리

- 강우에 대한 영향 외에도, 중성자 강도는 식생을 비롯한 타 수소공급원들에 의해 영향을 받는다. 본 연구에서는 토양수분을 제외한 수소 공급원들의 영향을 감소시키기 위해 한 시간 단위로 모든 N_0 를 산출하여 단일 N_0 와 비교하였다. Fig. 3.1.48의 검은 선은 단일 N_0 의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이며, 회색 선은 회귀 모델을 통해 재산정한 N_0 이다. 육안으로 보기에 그 변동폭이 감소한 것을 확인할 수 있으며, 단일 N_0 에 비해 현저한 변동폭 감소가 나타나고 있다. 이는 재산정된 N_0 가 단일 N_0 에 비해 타 수소 공급원들의 영향이 감소된 결과라는 것을 단적으로 보여준다.
- 2018년 12월 말 부근에서 역시 중성자 강도가 급격하게 감소하는 구간을 관측할 수 있다. 해당 구간은 적설로 인해 중성자 강도가 급격한 변동폭을 보이는 구간으로, 재산정된 N_0 는 그 값을 반영하지 못한다. 이는 회귀 모델을 사용함으로써 발생하는 오차로, 값에 상관없이 모든 N_0 가 회귀모델로 인해 회귀되어 나타나는 불확실성으로 판단된다. 이렇듯 Dynamic- N_0 교정 방법은 정확한 N_0 와 부정확한 N_0 를 구분하지 못하고 전부 회귀시켜버리기 때문에, 부정확한 토양수분 산출 결과를 도출하는 N_0 를 선택적으로 대입할 수 있게 된다면 보다 정확한 토양수분 산출에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

○ 최적화된 Calibration function 결정

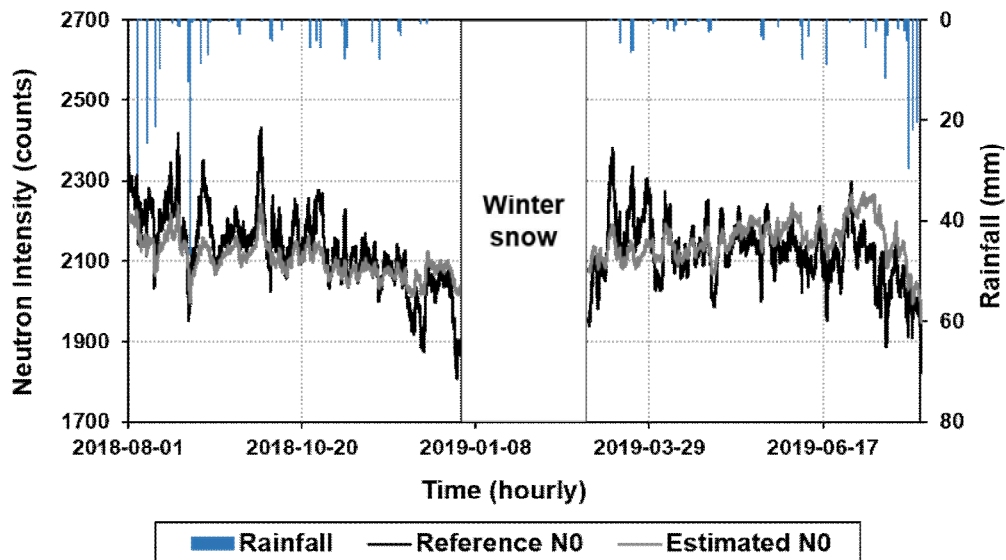


Fig. 3.1.48 시계열로 나타낸 기존 N_0 와 재산정된 N_0 추이

- N_0 는 건조한 토양에서 측정한 중성자 강도 값으로, N_0 를 측정할 수 있을 만큼 건조한 환경을 만들 수 없기 때문에, 이는 지점 가중 평균 토양수분 산출 결과로부터 도출된다. 이 과정에서, Dynamic- N_0 교정 방법은 기존 교정 방법과는 달리 교정식에 하나의 N_0 를 사용하지 않는다. 토양수분은 지점마다 다른 값을 가지며, N_0 역시 지점마다 다른 값을 가지기 때문에 하나의 N_0 를 사용한 토양수분의 산출은 오차를 가질 수밖에 없다. 그러나 본 연구에서 산출한 토양수분은 면

단위 토양수분으로 반경 150 m의 지역을 대표하는 값이기 때문에, N_0 의 정확성을 높여 토양수분 산출 결과의 정확성을 높이하고자 하였다.

- 먼저, 본 연구에서는 N_0 와 N_{corr} 의 관계에 따른 회귀 모델을 도출하였다. 회귀 모델을 도출함에 있어서, 하나의 N_0 를 교정식에 고정하는 방법은 N_0 의 오차와는 별개로 한계가 존재한다고 판단했으며, 따라서 여러 개의 N_0 를 산정해 신뢰도 있는 값을 도출하고자 하였다. 즉, 전체 연구기간 동안 매 시간마다 N_0 를 산정해 이를 회귀 모델을 통해 전부 보정하였다. 산지 특성상 평지보다 N_0 의 변동이 심할 것으로 판단해, 그중 극심한 변동 폭을 가지는 데이터들을 회귀 모델을 통해 보정하고자 했으며, 이를 기존 교정 방법에 의해 산출한 N_0 와 비교하여 개선도를 평가하였다. 또한, 재산정한 N_0 를 사용해 토양수분을 산출했으며, 이를 기존 교정 방법을 이용한 토양수분과 비교분석하였다.

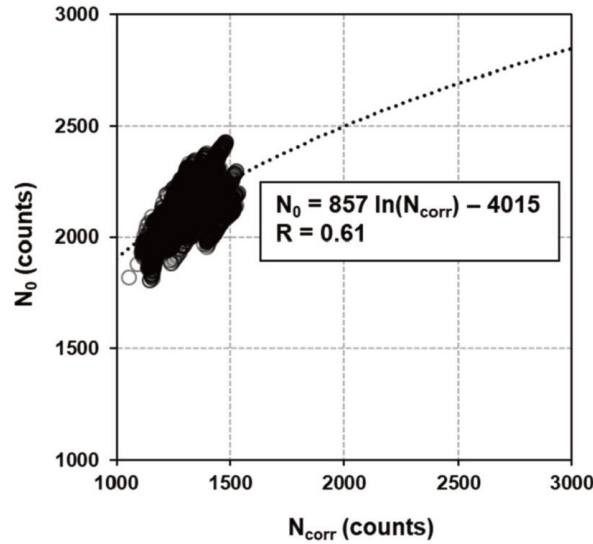


Fig. 3.1.49 설마천 지역에서 보정된 중성자 강도와 시간별로 산정된 N_0 의 관계

- 직접적으로 다른 수소 공급원들을 고려하는 방법이 아닌, 회귀 모델을 통해 수소 공급원에 의한 변동이 감소된 효과를 얻고자 하는 것이 본 연구에서 제시한 Dynamic- N_0 교정 방법의 목표라고 할 수 있다.
- Fig. 3.1.49은 매 시간마다 산정한 N_0 와 그에 따른 N_{corr} 의 관계성을 나타낸 그림이다. 최종적으로 얻은 회귀식과 R값을 그림에 나타내었으며, 점선은 도출한 회귀 모델이다. 회귀 모델을 도출하고 나면, 사전에 측정했던 N_0 는 더 이상 교정식에 사용되지 않는다. 대신, 위의 보정식을 통해 보정했던 중성자 강도 N_{corr} 를 대입해 재산정한 N_0 를 얻으며, 이를 회귀 모델에 대입해 교정식에 사용한다. 위의 회귀식과 그로 인해 바뀐 교정식은 Table 3.1.5과 같다.
- 직접적으로 다른 수소 공급원들을 고려하는 방법이 아닌, 회귀 모델을 통해 수소 공급원에 의한 변동이 감소된 효과를 얻고자 하는 것이 본 연구에서 제시한 Dynamic- N_0 교정 방법의 목표라고 할 수 있다.

Table 3.1.5 회귀 모델을 활용한 N_0 교정 방법

기존 교정 방법	Dynamic- N_0 교정 방법
$N_0 = \alpha(constant)$	$N_0 = 857\ln(N_{corr}) - 4015$
$\theta(N) = \left(\frac{a_0}{(\frac{N_{corr}}{N_0}) - a_1} - a_2 \right) \times \rho_{bulk}$	$\theta(N) = \left(\frac{a_0}{(\frac{N_{corr}}{857\ln(N_{corr}) - 4015} - a_1} - a_2 \right) \times \rho_{bulk}$

○ 고도화된 Cosmic-ray 관측자료의 검증 및 평가

- 본 연구를 통하여 제시된 Dynamic- N_0 교정 방법을 이용하여 토양수분 산출을 2차 연도에 수행하였다.

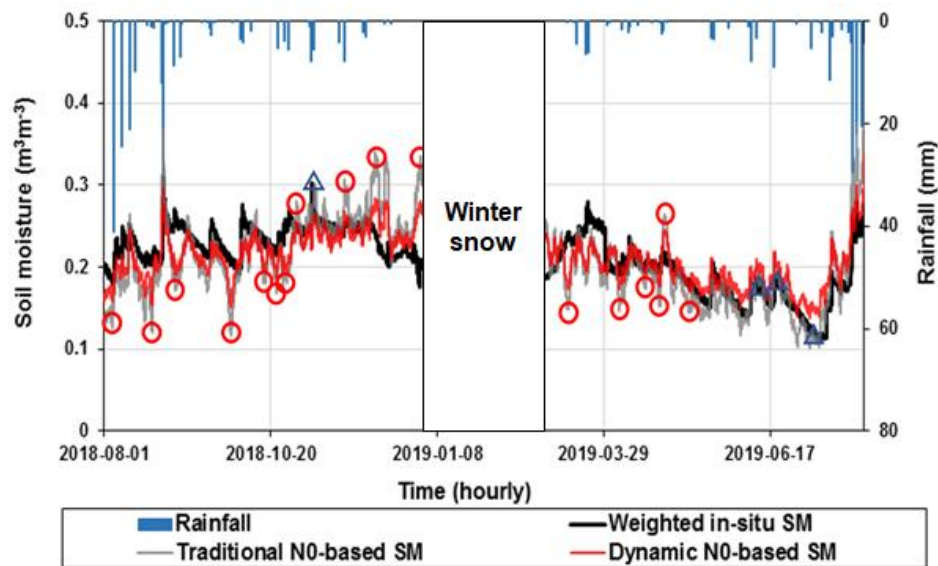


Fig. 3.1.50 단일 N_0 와 재산정 N_0 를 통한 토양수분 산출결과 비교

- Fig. 3.1.50은 N_0 를 통해 산출한 토양수분을 시계열로 표현한 그래프이다. 기존 교정 방법을 통해 산정한 단일 N_0 에 비해 재산정된 N_0 가 보다 정확한 토양수분 산출 결과를 만들어내고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 뚜렷한 값의 차이를 보이는 부분들 (빨간 원)의 변동폭이 감소되었음을 확인할 수 있으며, 이를 통해 Dynamic- N_0 교정 방법이 기존 교정 방법에 비해 정확한 토양수분 산출에 기여하고 있음을 알 수 있다. 그러나, 파란 세모 부분을 보면 기존 교정 방법에 의해 정확한 토양수분이 산출되었음에도 불구하고 회귀 모델에 의해 오차가 발생했다. 이는 본 연구 결과가 차후에 나아가야 할 방향을 제시하며, N_0 의 정확한 산출이 곧 정확한 토양수분을 산출할 수 있음을 암시한다.

- 감소된 변동성을 통해 다른 수소 공급원들에 의해 발생하는 불확실성이 감소되었음을 유추할 수 있다. 이러한 교정 중성자 강도의 변동성 감소는 토양수분 산출 결과에도 반영되었음을 확인할 수 있다.

○ 토양수분 산출 결과의 통계적 분석

- 최종적으로 기존 교정 방법을 이용하여 산출한 토양수분과 시간에 따라 다른 교정 중성자 강도 값을 사용하여 산출한 토양수분, 그리고 본 연구에서 제안하는 Dynamic- N_0 교정 방법을 사용하여 산출한 토양수분 결과를 통계적으로 분석하고 평가하였다. 통계 값으로는 R, RMSE, Bias, IOA 값을 사용하였고 이를 통해 산악지형에서의 Dynamic- N_0 교정 방법을 이용한 토양수분 개선 정도를 수치화하였다.

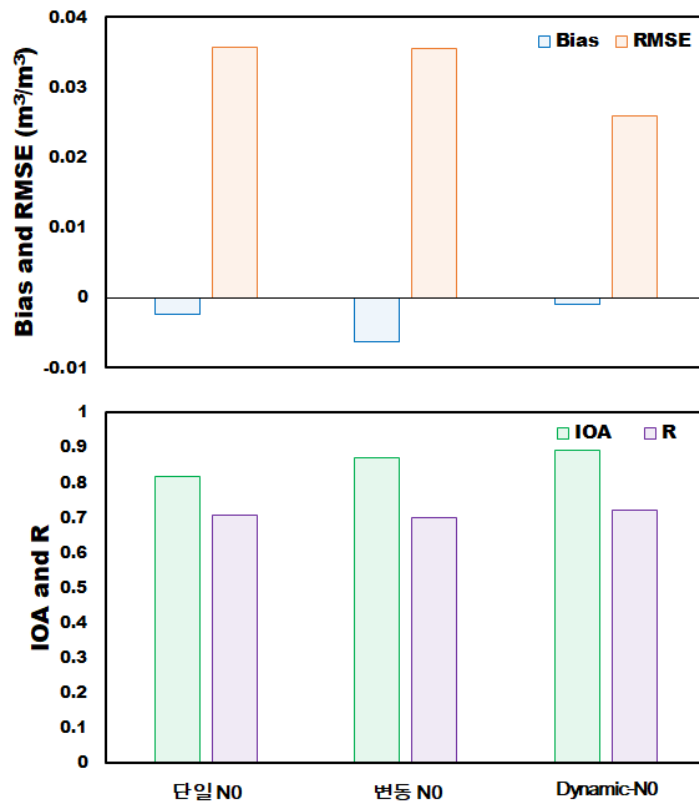


Fig. 3.1.51 토양수분 산출 결과의 통계 분석 결과

- Fig. 3.1.51에 통계 분석결과가 나타나 있다. Bias의 경우 차례로, -0.0024, -0.0063, -0.001의 값을 나타냈다. 이를 통해 Dynamic-N₀ 교정 방법을 이용하였을 때가 기존 교정 방법을 사용했을 때 보다 토양수분을 과대·과소 산정하는 경우가 적다는 것을 알 수 있었다. 이는 교정 중성자 강도의 안정성 확보가 토양수분에 의한 중성자 강도 감소를 가장 정확하게 나타내고 있다는 것을 의미한다.
- Dynamic-N₀ 교정 방법을 이용한 결과가 타 중성자 강도를 이용한 결과보다 낮은 값을 보였으며 이것은 Dynamic-N₀ 교정 중성자 강도와 가중 평균 지점 토양수분 데이터 간의 오차가 가장 적다는 것을 나타낸다. R값의 경우 0.71, 0.70, 0.72로 단일 중성자 강도와 Dynamic-N₀ 교정 방법을 사용한 결과 간 차이가 크지 않았으나 역시 Dynamic-N₀ 교정 방법을 사용한 결과의 우수성을 보여주고 있으며 IOA 값의 경우에는 0.82, 0.87, 0.89로 Dynamic-N₀ 교정 방법을 사용한 결과가 변동 중성자 강도 값을 사용한 결과보다 미세하게 개선된 결과를 나타내는 것을 볼 수 있다. 마지막으로 변동계수 값의 경우에는 기존 교정 강도를 이용하여 산출한 토양수분의 경우 0.238, Dynamic-N₀ 교정 방법을 사용한 경우 0.238로 변동성이 크게 줄어든 것을 볼 수 있었다. 이처럼 본 연구에서 제시한 Dynamic-N₀ 중성자 강도 교정 방법은 가중 평균 지점 토양수분과 비교하였을 때, 산출 토양수분 값의 변동성과 정밀성 면에서 그 결과가 개선되었음을 알 수 있다.

○ 토성에 의한 토양수분 산출 영향

- 토양수분 산정에 있어 토성에 대한 분석이 필요한 이유는 토성이 토양수분의 거동과 밀접한 연관성을 지니기 때문이다. 토성은 기본적으로 Silt, Clay, 그리고 Sand의 비율에 따라 구분하며, 비율에 따라 공극률이 달라지며 이로 인해 토양수분의 투과성이 달라져 토양수분 함유량에 영향을 준다. 토성은 일반적으로 미국 농무부(United States Department of Agriculture, USDA)를 기준으로 분류하며, Fig. 3.1.53의 분류에 따르면 설마천 지역은 loamy sand로 구성되어있다. 즉, 70-90%에 달하는 sand, 0-30%에 달하는 silt와 0-15%에 달하는 clay로 구성되어있다.

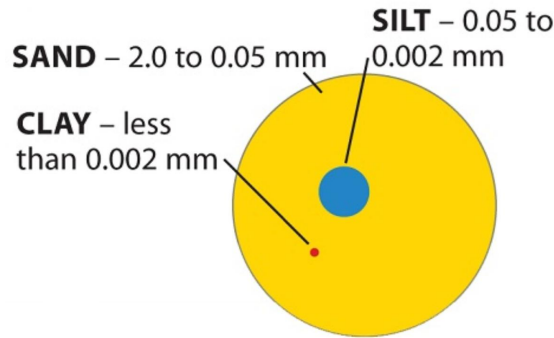


Fig. 3.1.52 토질 구성입자 크기비교

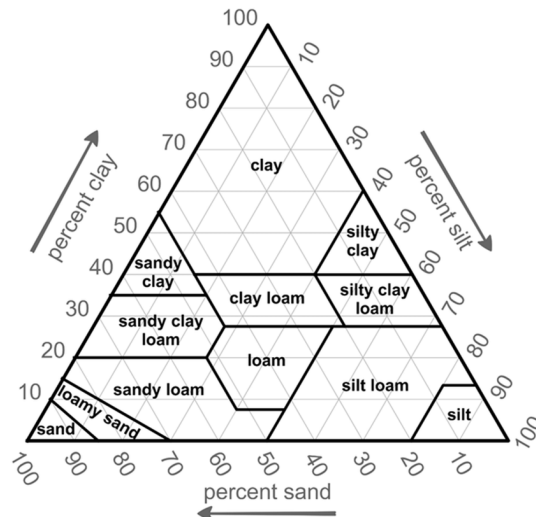


Fig. 3.1.53 USDA 토성분류 기준

Table 3.1.6 연구 지역에 따른 토성 및 수소 공급원의 변화 (McJannet et al., 2014)

Site	Soil Texture / Clay content[%]	Mean Annual rainfall[mm]	Mean Annual PET[mm]	Lattice water [g/g]	SOC [g/g]
Kelso pasture	Clay loam/30	938	2219	0.033	0.012
Kelso mango	Clay loam/30	938	2219	0.026	0.003
Kelso mix	Clay loam/30	938	2219	0.028	0.008
Bluewater	Sandy loam/10	1302	2187	0.016	0.002
Weany Creek	Sandy clay loam/10	659	2056	0.032	0.006
Tullochgorum	Sand/0	649	2017	0.027	0.011
Gnangara	Clay loam/18	610	1048	0.000	0.002
Ross River dam	n/a	938	2219	—	—

- Table 3.1.6에는 McJannet et al. (2014)에서 사용된 토성 분석 자료가 나타나있다. Kelso pasture, Kelso mango, 그리고 Kelso mix는 토성 분류에 의해 같은 토성으로 분류되며, Clay content 역시 비슷한 수준이지만 LW과 W_{SOC} 는 전부 다른 값을 가진다. 이는 토성 분류가 같더라도 silt, sand와 clay가 같은 비율을 이루고 있지 않으며, 토성의 구조에 따라 토양수분의 거동성에 변화가 발생하기 때문이다. 또한, 토성 분류에 따라 토양 내 광물의 조성이 달라지며, 토양 내 광물의 조성이 곧 LW과 W_{SOC} 의 양에 직접적인 영향을 주는 것으로 밝혀진 바 있다 (Zreda et al., 2012). 따라서, 토성에 대한 분석이 단순히 USDA에 대한 분류에 그치는 것이 아니라, 광물 내 수분 함유량 등 중성자 강도에 영향 미치는 여러 인자들을 고려하기 위해 보다 심도깊은 분석이 이루어져야 할 것이다.

○ 각 N_0 교정방법을 이용한 토양수분 산출 비교/분석 및 N_0 산정시의 불확실성 요소

- 본 연구에서는 Köhli et al. (2015)에서 제안한 가중평균 토양수분 산정 방법을 이용해 관측반

경을 대표하는 토양수분의 기준 데이터를 생성하였다. 이를 기존 교정 함수에 대입하여 연구 지역에 최적화된 토양수분 산출 식을 산정하였으며, 이를 Dynamic- N_0 교정 방법과 비교하여 토양수분 정확도를 산출하였다.

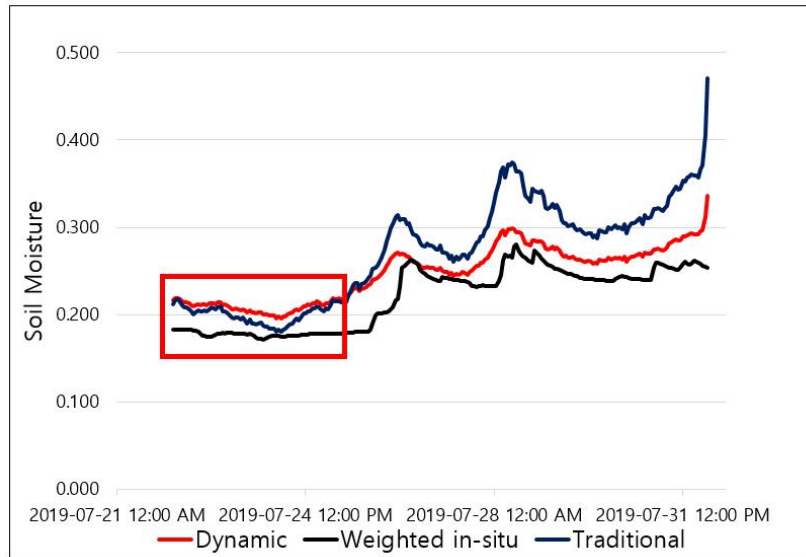


Fig. 3.1.54 설마천 토양수분 산출결과 검증

- Fig. 3.1.54에는 2019년 7월 22일부터 7월 31일간 토양수분 산출결과를 시계열로 나타내었다. 검은 선은 선행 연구에서 사용한 가중평균방법을 통해 산정한 기준 토양수분 데이터이며, 빨간 선은 Dynamic- N_0 교정 방법을 통해 산출한 토양수분 데이터이고, 파란 선은 기존 교정 방법을 통해 산출한 토양수분 데이터이다. 7월 25일부터 7월 31일까지 결과를 보면 빨간 선이 파란 선에 비해 검은 선에 가까운 것을 확인할 수 있는데, 이는 기존 교정 방법에 비해 Dynamic- N_0 교정 방법을 사용했을 때 보다 정확한 토양수분의 산출이 가능함을 보여준다. 그러나, 7월 22일부터 7월 24일까지의 결과를 보면 오히려 Dynamic- N_0 교정 방법을 사용해 산출한 토양수분이 낮은 정확성을 띠는 것을 확인할 수 있다. 따라서, Fig. 3.1.55에서처럼 한 시간 단위로 획득한 N_0 의 구간을 나누어 구간 별 토양수분 산출결과를 비교하였다.

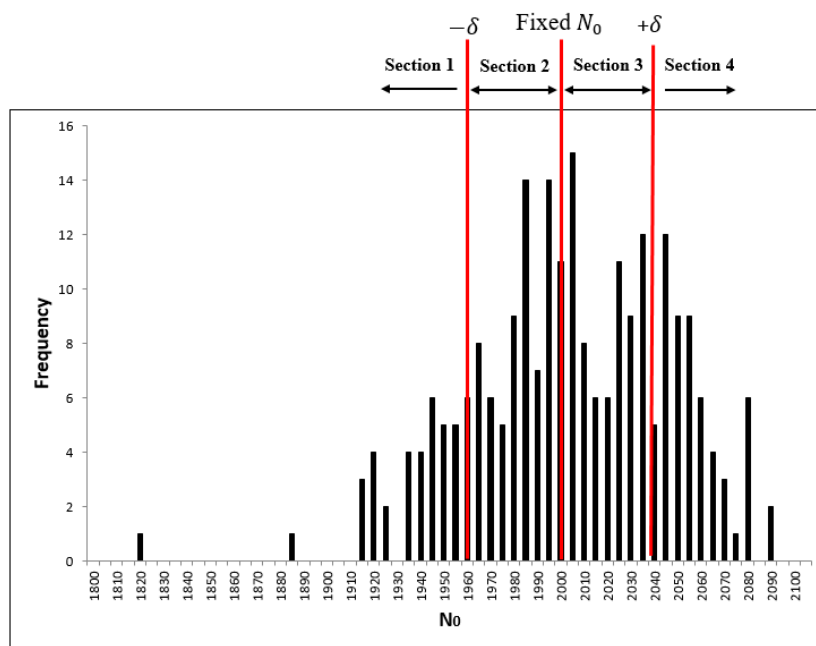


Fig. 3.1.55 설마천 CRNP 관측 교정 증성자 강도 N_0 분류

- Fixed N_0 는 기존 교정 방법에서 고정된 단일 N_0 를 표현한 것이며, 표준편차(42 cph)를 기준으로 총 4개의 구간으로 분류하여 구간 별 토양수분을 검증하였다. Fig. 3.1.56에는 Section 1의 토양수분 검증 결과가 나타나있다. Fig. 3.1.56 (a)는 기존 토양수분 데이터와 기존 교정 방법을 통해 산출한 토양수분 데이터를 비교한 것이며, Fig. 3.1.56 (b)는 기존 토양수분 데이터와 Dynamic- N_0 교정 방법을 통해 산출한 토양수분 데이터를 비교한 그림이다. 먼저, R^2 와 R값이 상승하였으며, RMSE값이 하락한 것으로 보아 Dynamic- N_0 교정 방법을 통해 산출한 데이터가 기존 교정 방법을 통해 산출한 데이터에 비해 개선된 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 3.1.56(a)에서 확인할 수 있는 Outlying 데이터의 변동성이 확연히 감소한 것을 확인할 수 있는데, 이를 통해 Dynamic- N_0 교정 방법이 N_0 의 변동성 감소에 있어 효과적인 것을 알 수 있다. Fig. 3.1.57에는 Section 2의 토양수분 검증결과가 나타나있다.

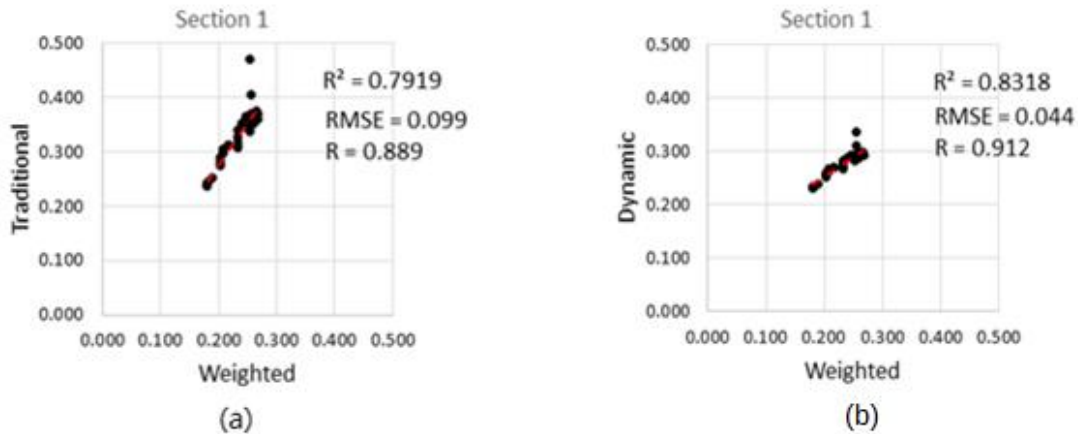


Fig. 3.1.56 Section 1의 토양수분 검증결과 (a) 기존 교정 방법 (b) Dynamic- N_0 교정 방법

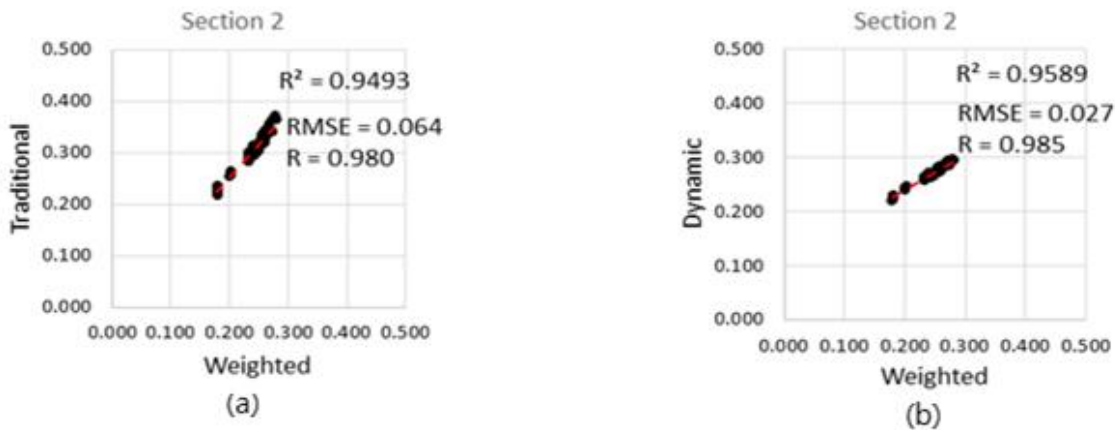


Fig. 3.1.57 Section 2의 토양수분 검증결과 (a) 기존 교정 방법 (b) Dynamic- N_0 교정 방법

- Section 1의 토양수분 정확도에 비해 Section 2의 정확도가 향상된 것을 R^2 , RMSE와 R 값을 통해 확인할 수 있으며, 역시 Dynamic- N_0 교정 방법이 보다 정확한 토양수분 산출결과를 나타내고 있음을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 3.1.58을 보면 기존 교정 방법에 비해 Dynamic- N_0 교정 방법을 통해 산출한 토양수분이 정확하다고 할 수 없다. RMSE는 같은 값을 나타내며, R^2 는 상승했으나 R은 하락하여 두 교정 방법 중 어느 것이 우위에 있다고 말할 수 없다. 이는 Section 4에서 보다 명확하게 드러난다. Fig. 3.1.59을 보면, Dynamic- N_0 교정 방법을 통해 산출한 토양수분이 기존 교정 방법을 통해 산출한 토양수분에 비해 낮은 정확도를 띠고 있음을 확인할 수 있다. R^2 와 R값이 전부 하락했기 때문에, 해당 N_0 가 분포된 구간에 대해서는 기존 교정 방법을 사용하는 것이 보다 높은 정확도의 토양수분을 산출하는 데 기여한다고 말할 수 있다.

- 위의 연구결과를 통해, 먼저 N_0 가 구간에 따라 다른 토양수분 정확도를 가진다는 사실을 확인하였다. 기존 교정 방법을 사용한 토양수분에 대해서는, N_0 의 증가에 따라 토양수분의 정확성 역시 증가하며, 이는 수소 원자와 중성자 강도의 반비례관계로 설명할 수 있다. 기본적으로 N_0 는 건조한 토양에서의 중성자 강도로, 토양수분에 의한 영향을 무시한 지표이나 그 외의 강우, 식생 및 수체의 영향을 N_{corr} 과 같은 강도의 영향을 받으므로 역시 타 수소 공급원들에 의해 변하는 지표이다. 즉, 타 수소공급원의 영향이 강할수록 N_0 역시 보다 부정확한 결과를 나타낼 것이므로, 타 수소공급원의 영향이 낮은 구간에서는 보다 정확한 토양수분을 산출하는 N_0 산정이 가능할 것으로 판단된다. 또한, Section 4에 대해서는 Dynamic- N_0 교정 방법이 보다 낮은 정확성을 나타내었는데, 이는 회귀 모델에 내재된 오차로 판단된다.

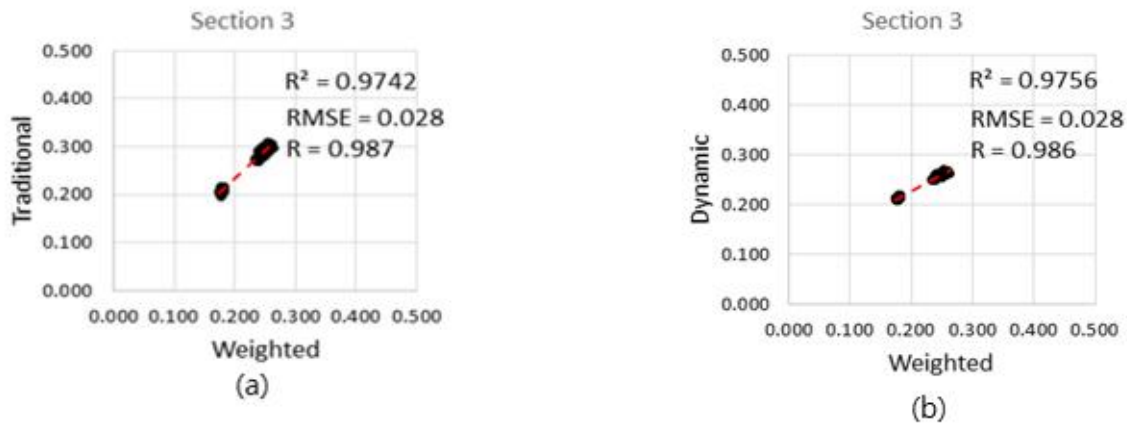


Fig. 3.1.58 Section 3의 토양수분 검증결과 (a) 기존 교정 방법 (b) Dynamic- N_0 교정 방법

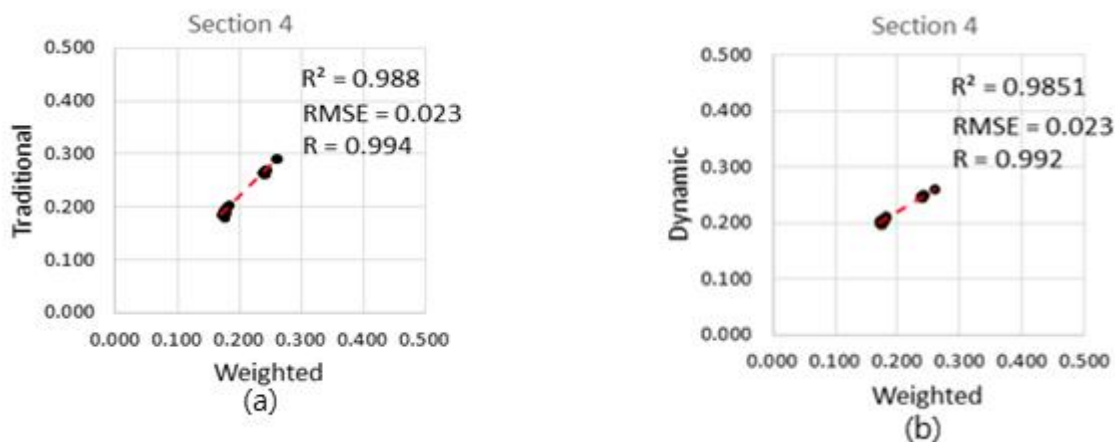


Fig. 3.1.59 Section 4의 토양수분 검증결과 (a) 기존 교정 방법 (b) Dynamic- N_0 교정 방법

○ 토양수분 산출 결과 평가

- 본 연구를 통해 제안된 CRNP 센서 기반 토양수분 산출 고도화를 위한, Dynamic- N_0 중성자 강도 교정 방법은 산악지형에서의 토양수분 산출 결과를 유의미하게 향상시켰으며 이에 대한 분석 결과를 다루고자 한다. 첫째로 산출 토양수분량의 적은 변동성과 향상된 정밀성은 Dynamic- N_0 교정 방법에서 사용한 회귀 모델을 적용한 결과로 볼 수 있다. 본 교정 방법의 착안점은 산악지형에서의 토양수분 산출의 방해요소로 작용하는 타 수소공급원이 보정 중성자 강도뿐만 아니라 교정 중성자 강도에 또한 영향을 미치며 이에 따른 오차를 줄이고자 하는 데 있다. 따라서 이를 줄이기 위해 Dynamic- N_0 중성자 강도 교정 방법에서는 시간 별로 교정 중성자 강도를 계산하여 교정 중성자 강도와 보정 중성자 강도 간의 회귀식을 도출하였고 이를 통해 중성자 강도의 변동성을 줄이고자 하였다. 또한 줄어든 교정 중성자 강도의 변동성이 중성자

강도 감소의 주된 요소인 토양수분에 의한 영향을 보다 잘 나타낼 것이라 판단하였고, 통계적 분석 결과 변동성 감소와 함께 가중 평균 지점 토양수분 값을 보다 잘 나타내는 결과를 얻을 수 있었다. 다만 다른 방식으로 다른 환경조건에서 유사한 중성자 강도 교정 기법을 적용한 Baroni et al. (2018)의 연구결과와 비교하였을 때, 토양수분 산출 결과를 개선한다는 점에서는 결과가 동일하였으나, 개선 정도는 상대적으로 본 연구에서 제시한 Dynamic- N_0 중성자 강도 교정 방법이 더 적게 나타났다.

- 이것은 다음과 같은 환경 요인의 차이로 인한 결과로 보인다. 첫째로, Baroni et al. (2018)에서 연구를 수행한 지역은 농지로 산악지형에 비하여 경사에 있어 차이를 보였다. 선행연구가 수행된 지역은 평지로 FDR 센서 설치 가능 지역이 산악지형에 비하여 자유로웠으며 따라서 교정 중성자 강도 산출을 위한 토양수분 센서의 균일한 배치가 용이했다. 두 번째로 두 지역의 수소 공급원의 종류 및 영향에서 큰 차이를 보였는데, 산지는 농지보다 식생이 훨씬 두터우며, 토양수분뿐만 아니라 식생, 유기물, 습도에 있어서 수분을 보존하는 능력이 강하여 타 수소공급원에 의한 영향이 큰 것으로 판단되었다. 또한, Franz et al. (2013)의 연구에서는 농지를 덮고 있는 식생의 뿌리 부분이 무시할 수 있을 만큼 작다고 가정하여 연구를 진행한 것에 비해 산지를 덮고 있는 식생의 뿌리는 그 생물량을 유추하기 힘들며, FDR 센서 설치 과정에서 확인한 지표면에 존재하는 식생 뿌리는 무시할 수 없을 것이라는 것을 알 수 있었다. 이로 인해 Baroni et al. (2018)에서 나타난 개선 효과와는 차이가 있으나 기존 교정 방법과 비교하였을 때는 유의미한 결과를 얻었다고 할 수 있다.

○ 향후 연구 결과 개선 방향

- CRNP 센서 기반 토양수분 산출 기법 고도화를 통해 CRNP 센서 활용이 어려운 것으로 알려져 있는 산악지형에서 토양수분 산출 결과를 개선하여 한반도 지형에 적합한 고해상도 면 단위 토양수분 예측 시스템 설계가 본 연구를 통해 이루어졌다.
- 하지만 연구 과정을 통해 몇 가지 개선해야 할 점 역시 파악할 수 있었다. 첫 번째로, 산악지형의 주된 토양수분 산출 방해요소인 유기물을 보다 물리적으로 고려한 토양수분 산출 기법 개발이 이루어질 때, 산악지형에서의 토양수분 산출 결과의 정확도를 현 연구 결과보다 다양한 분야에 활용 가능한 수준으로 향상시킬 수 있을 것으로 보인다. 이를 고려하기 위해서는 연구 대상 지역 지표면의 유기물 채집 및 분석을 통해 유기물 양을 계산하고, 유기물 양에 의한 중성자 강도 교란 효과를 중성자 강도 보정 과정에서 제거하는 과정이 추가되어야 할 것으로 보인다.
- 두 번째로, 본 연구에서 적용한 Dynamic- N_0 교정 방법은 교정 중성자 강도를 교정하기 위해 비선형 회귀모델을 사용하였다. 비선형 회귀 모델 적용 결과를 기반으로 이후 인공지능 기법, 다항 회귀 분석 모형과 같은 중성자 강도에 영향을 미치는 여러 인자를 입력하여 고려할 수 있는 기법의 적용을 통해 Dynamic- N_0 교정 방법을 개선할 수 있을 것이다.
- 세 번째로 추가적인 토양수분 관측소 설치를 위해서는 기존 중성자 강도 교정 방법과 Dynamic- N_0 교정 방법의 추가적인 평가 및 선정이 필요할 것으로 보인다. 기존의 교정 방법의 경우 연구지역 내의 단일 N_0 를 계산하여 추후 연구지역에서 지점 토양수분 센서를 운영할 필요 없이 면 단위 토양수분을 산출할 수 있는 반면, Dynamic- N_0 교정 방법의 경우 연구지역 환경이 크게 바뀔 시 토양수분 거동의 변동을 고려하기 위한 새로운 회귀식의 도출이 필요할 수 있으며, 이런 상황에 지점 토양수분 센서 운용 기간이 추가적으로 요구될 수 있다. 향후 연구에서는 연구지역의 특성을 고려한 두 가지 방법의 적절한 적용을 통하여 경제적인 관측소 설치를 구축해 나아가야 할 것이다.
- 네 번째로 산악지형에서의 Cosmic-ray 관측 자료 획득의 한계점을 보다 면밀히 파악하고 이를 해결해야 할 것이다. Franz et al. (2013)에서는 CRNP를 이용한 토양수분 산정 시 타 수소공급원의 중요성에 대해 역설하고 있다. Fig. 3.1.60은 토양수분을 비롯하여 격자수, 토양 유기물과 생물량을 전부 고려하여 중성자 강도와 관계성을 나타낸 그림이며, Fig. 3.1.61은 Fig. 3.1.60에서 생물량을 제외한 관계성을 나타낸 그림이다. RMSE와 R^2 값의 하락 통해서 토양수분 데이터의 정확성이 현저하게 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 토양수분 산출 시 생물

량에 의한 영향이 중요하다는 사실을 확인할 수 있다. 그러나 본 연구지역인 설마천은 경사가 가파르고 암석이 다량 분포되어있는 산악지형으로, 식생을 비롯한 생물량 산출이 어려워 토양수분 산출 시 생물량의 영향을 고려하기가 매우 힘들다. 이는 산악지형의 특성 상 접근이 불가능한 지역이 많고, 지상 생물량 뿐 아니라 지하 생물량 역시 고려해야 하기 때문에, 현실적으로 많은 어려움을 지닌다. 따라서 산악지형에서의 CRNP를 이용한 토양수분 산출에 있어서 이러한 수소공급원들의 영향을 반영할 방법이 요구된다.

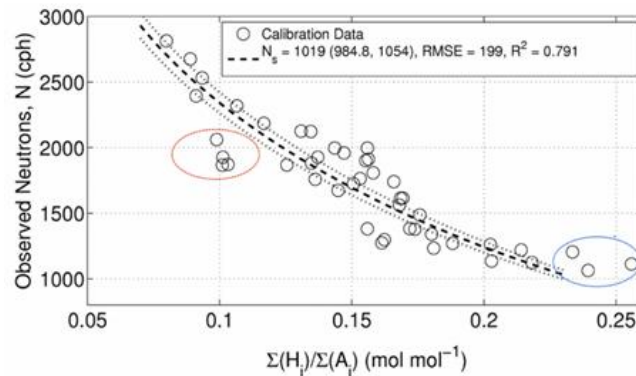


Fig. 3.1.60 UCF를 이용한 중성자 강도와 수소공급원의 관계성 (Franz et al., 2013)

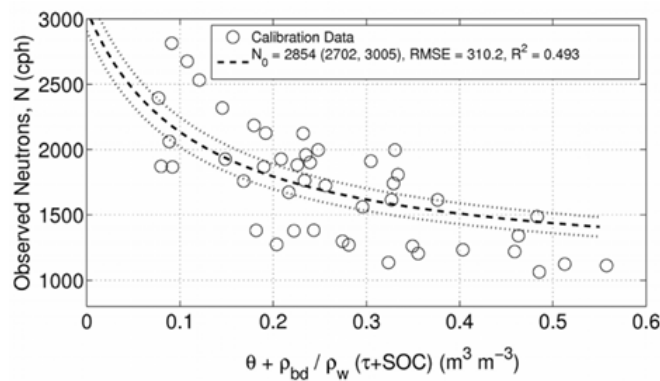


Fig. 3.1.61 UCF를 이용한 중성자 강도와 수소공급원의 관계성(Biomass 인자 제외) (Franz et al., 2013)

마. 토양수분량 계측시스템 설계 기법 개발

본 절에서는 토양수분량 계측 시스템의 최종적인 산출 결과에 해당하는 면 단위 토양수분량 산정에 결정적인 역할을 하는 Cosmic-ray 계측시스템 설계 기법을 다루고자 하며 더불어, 기존 교정 방법을 개선한 새로운 교정 방법 제시를 통하여 토양수분량 산출 결과를 개선하고자 하였다. 이를 통해 산악지형에 적합한 Cosmic-ray 계측시스템 설계 기법을 제시하고자 한다.

○ Cosmic-ray 설치 조건 및 기준

- 본 절에서는 가장 기본적으로 수행되어야 하는 CRNP 센서 설치 조건 및 기준에 관해 다루고자 한다. CRNP 센서는 기본적으로 수채, 급경사에 의해 큰 영향을 받으며 이를 피하여 설치하여야 한다. 또한 CRNP 센서가 토양수분량을 독립적으로 생산하기 위해서는, 관측 반경 내에 FDR 센서의 설치를 통해 교정 중성자 강도 산출 기간이 필요하고, 따라서 지점 토양수분 설치가 힘들 것으로 예상되는 지역을 지양하여야 한다. 또한 수채는 중성자 강도에 굉장히 큰 영향을 미치는 요소로써 지나치게 많은 수채가 위치한 지역 또한 설치 기준에 미달된다 할 수 있다. 이러한 조건이 만족된 이후 센서 설치를 위한 기본적인 접근성이 확보되어 있는지에 대한 여부를 평가해야 하며 센서 설치를 위한 지면이 무너질 수 있는가에 대한 판단이 이루어져야 한다. 이러한 조건들을 만족하였을 때 설치를 수행하여야 하며 이후 중성자 강도 관측 값의 안정성 확보 기간을 거쳐 토양수분 산출 시험 운용을 통해 산출 결과를 검증하여 최종적인 CRNP 센서 설치 지점을 선정하여야 한다.

○ 시계열 N_0 산정

- Dynamic- N_0 교정 방법을 이용해 산정한 N_0 의 시간에 따른 변화가 Fig. 3.1.62에 나타나있다. 2018년 9월 중순을 보면, N_0 가 급격하게 변동하는 구간에 강우량은 미미한 것을 볼 수 있는데, 이는 강우가 아닌 다른 인자가 N_0 에 영향을 미친 것으로 판단되며, 이는 본 연구지역이 여러 수소공급원에 의한 영향을 받는다는 사실을 의미한다.

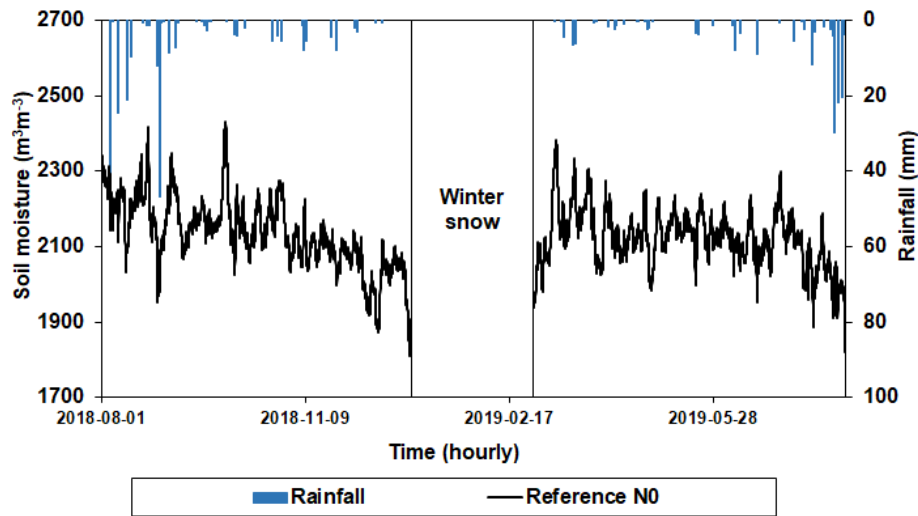


Fig. 3.1.62 단일 N_0 와 강우량의 시간에 따른 변화 추이

- Dynamic- N_0 교정 방법이 기존 교정 방법에 비해 보다 정확한 결과를 산출할 수 있는 이유는 비교적 정확한 단일 N_0 의 산출 때문이다. 단일 N_0 는 다른 수소공급원들에 의해 큰 변동폭을 가지기 때문에, 선행연구에서는 타 수소공급원들 중 비교적 시간에 따라 고정적인 L_w 와 W_{soc} 를 고려함으로써 이러한 영향을 고려해준 것이다.
- Franz et al. (2013)의 연구에서는 단일 N_0 의 변동이 부정확한 토양수분 산출에 영향을 미친다고 밝힌 바 있다. 즉, N_0 의 정확성이 교정식의 정확성에 긍정적인 영향을 미치며, 이에 따라 보정된 중성자 강도를 대입했을 때 비교적 정확한 토양수분 산출이 가능해진다. 그러나 본 연구에서는 지점 가중 평균 토양수분을 산출함에 있어서 L_w 와 W_{soc} 를 비롯한 타 수소공급원들을 고려하지 않았기 때문에, N_0 의 변동이 선행연구에 비해 극심하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 선행연구에서 파악한 수소공급원의 영향비는 다음과 같다 (Fig 3.1.63).

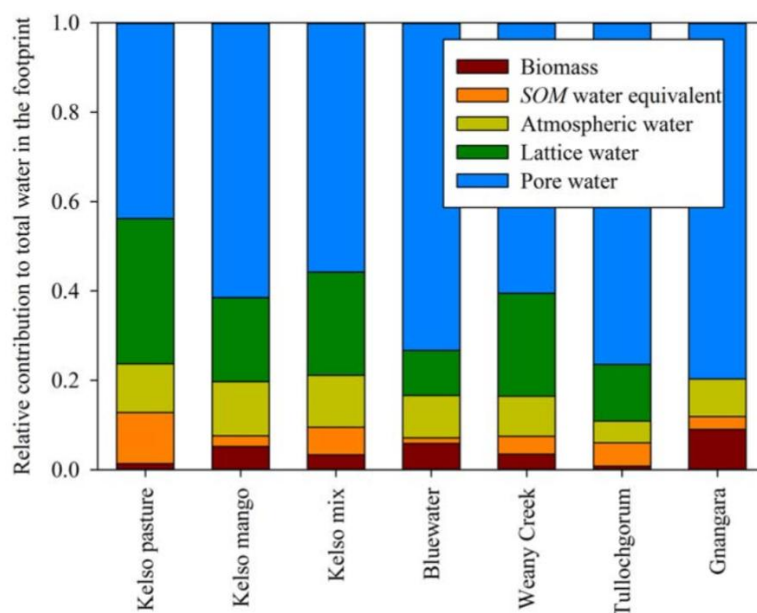


Fig. 3.1.63 지역별 타 수소공급원에 의한 영향 (McJannet et al., 2014)

- 연구 지역들 중 가장 높은 정확도를 가진 토양수분을 산출할 수 있을 것으로 판단되는 지역은

Tullochgorum인데, 그 이유는 생물량에 의한 영향이 거의 없는 지역이며 대기 중 수증기량에 의한 영향 역시 매우 적기 때문이다. 이러한 값들은 변동이 잦은 공급원들로, 실시간으로 측정한다고 해도 즉각적으로 반영이 어려워 정확성 개선에는 여러 추가적인 과정들이 필요한 것으로 판단된다. 선행연구와 같은 방법으로 수소공급원들을 고려해주는 대신, 본 연구에서는 회귀 모델을 통해 극심한 변동을 가지는 데이터들을 보정하고자 하였다.

○ 원격탐사기법과 Cosmic-ray 기법의 연계 방안 제시

- 토양수분을 측정하는 현장 관측 데이터들은 유전율식 센서, 오븐 건조, 전기용량 측정 방법 등이 있지만, 이러한 방법들은 넓은 지역에서 사용하기에는 시간과 금액의 부담이 적지 않다. 이러한 요인은 이 방법들이 공간 대표성을 띠지 않고 한 점에서 측정한 토양수분 값만 나타내기 때문이다. 이렇게 만든 토양 수분 값으로 지역의 토양수분을 유추하기 위해서는 수많은 현장 데이터를 활용하여, 내삽법을 이용하거나, 면적 평균을 사용하는 방법을 써야한다. 하지만, 이러한 산술평균적인 방법으로 나타낸 평균 토양수분은 조사 지역의 토양수분을 제대로 나타내지 못하고 있다 (Crow et al., 2012). 따라서 기존의 인공위성 기반 토양수분 데이터를 보정, 참조 해주던 현장 토양수분 데이터가 부정확할 수 있다. 하지만, 공간 대표성을 지닌 Cosmic-ray 토양 수분 관측 방법은 지역의 토양수분을 충분히 대표할 수 있어서 이러한 문제를 해결할 수 있다. 이를 위해서 필요한 것은 Cosmic-ray 토양수분 관측 방법의 신뢰도 확보이다. 아직까지 Cosmic-ray의 토양수분 측정 방법은 인공위성 데이터와 연계하거나 다른 CLM 모델의 데이터로 활용될 정도의 신뢰성을 확보하지 못했다. 따라서 Cosmic-ray의 데이터를 활용한 신뢰성 확인 실험이 필요하다.
- 공간 대표성 분석을 통한 타 원격탐사기법에 연계 방안 마련
 - CRNP 센서 기반 토양수분 데이터를 사용하면 관측소의 위치의 특수성으로 인해 파생된 문제들을 상당 부분 해결할 수 있다. **지점 토양수분 데이터는 관측소와 현장의 지형 차이, 강수량의 차이, 토성 차이 등으로 생긴 오차를 품을 수밖에 없다.** Cosmic-ray 토양수분은 공간 대표성을 기반으로, 현장의 지형, 토성, 강수량에 따른 토양수분 데이터를 더 잘 반영할 수 있게 되었다.
 - 원격 탐사 방법이 더욱 보편화되고, 다양한 활용방안이 도출되고 있는 현실에서, 그에 따라 원격 탐사 데이터를 검증하고 모니터링하는 데이터들 또한 네트워크화 되고, 발전될 필요가 있었다. Bogena et al. (2013)는 토양 수분 관측에 대한 리뷰에서, 지표 기반 관측 방법 중에서 Cosmic-ray 토양수분 관측 방법에 주목하였다. CRNP는 넓은 관측범위를 가진 토양 수분 관측 방법이다. Bogena et al. (2015)는 CRNP의 토양수분 데이터가 더욱이 신뢰도를 높게 가지고 있어, 인공위성을 활용한 토양수분 관측 값을 보정하고 검증하는데 필요한 데이터로 적합하다고 언급하였다. Cosmic-ray 토양수분 관측 기술은 독일에서의 TERrestrial ENVironmental Observatories [TERENO]나 오클라호마에서의 Marena Oklahoma In Situ Sensor Test-bed [MOISST]과 같은 기관에서 정확도와 정밀도가 다른 타 현장 토양 수분 관측 방법들과 네트워크화 되어, 인공위성 기반 토양수분 데이터를 지속적으로 보정하거나 검증하는 Test-bed의 데이터로써 시험 받고 있다. 광범위하게 지속적으로 토양수분 데이터가 얻어지는 네트워크는 ESA의 Climate Change Initiative (CCI)와 같은 곳에서 장기간 토양수분 값을 도출할 때 기초자료로써 사용될 수 있다 (Liu et al., 2012; Dorigo et al., 2015).
- 면 단위 산출 토양수분과 지점 기반 토양수분 자료의 융합 및 타 원격탐사 토양수분 검증
 - 따라서 본 연구에서는 시험유역인 설마천 유역에서의 위성 및 재분석 자료 기반 토양수분 데이터와 본 연구에서 제시된 Dynamic- N_0 기법을 적용한 Cosmic-ray 센서 기반의 토양

수분 데이터를 비교하여 설마천 시험유역 토양수분 계측 시스템의 정확도 및 검증 기초자료로서의 가능성을 평가하였다.

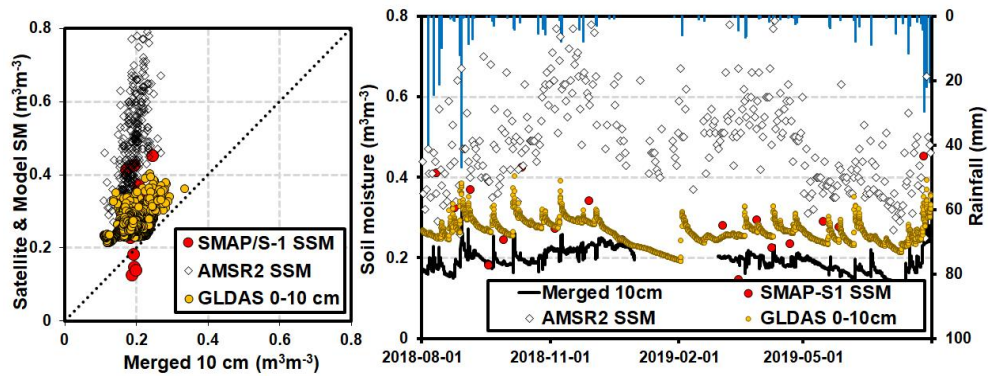


Fig. 3.1.64 연구지역의 Cosmic-ray 기반 토양수분 자료와 AMSR-2, SMAP/Sentinel-1, GLDAS 토양수분 자료간의 비교 분석 결과

- Fig. 3.1.64를 보면 비교를 위하여 Cosmic-ray 센서 기반 토양수분 자료와 연구지역의 10cm 깊이의 지점 토양수분 자료를 융합한 Merged 10 cm 자료를 기타 원격탐사 토양수분 자료와 비교하였으며 그 결과 GLDAS 재분석 자료의 토양수분 자료가 설마천 토양수분 계측 시스템 자료와 가장 높은 관계성을 보였다. GLDAS 토양수분 자료와의 보다 심도 있는 비교/분석을 위하여 20 cm, 30 cm, 40 cm 깊이의 자료 또한 추가적으로 비교/분석하였다(Fig. 3.1.65).

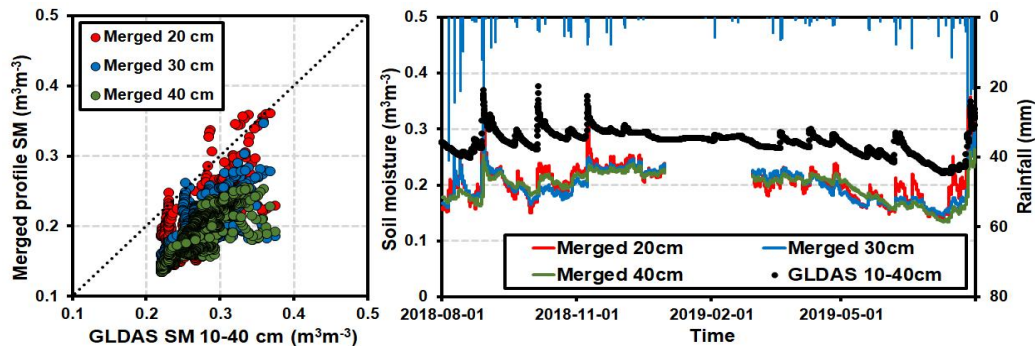


Fig. 3.1.65 연구지역의 토양수분 계측 시스템 자료와 GLDAS 토양수분 자료 간의 깊이 별 분석 결과

- 위와 같은 비교/분석 결과를 통계적 기법으로 분석하였으며(Table 3.1.7, Table 3.1.8), 결과적으로 토양수분 계측 시스템의 산출 결과가 타당한 정확도를 지니고 있으며 이를 이용한 원격탐사 토양수분 자료의 검증이 가능하다는 것을 확인하였다.

Table 3.1.7 기타 원격탐사 자료와 토양수분 계측 시스템 자료 (Merged 10) 간 통계적 비교/분석 결과

Product	R	ubRMSE
SMAP/S1	0.27	0.091
AMSR2	0.51	0.100
GLDAS 0-10	0.56	0.027

Table 3.1.8 GLDAS 자료와 토양수분 계측 시스템 자료의 깊이별 통계적 비교/분석 결과

Product	R	ubRMSE
Merged 20	0.76	0.021
Merged 30	0.72	0.019
Merged 40	0.82	0.015

- 미래의 토양수분량 조사 방안

- Montzka et al. (2017)에 따르면 CRNP의 토양수분 산출 프로세스에서 식생 지수의 변동성이 큰 지역에서 CRNP의 토양수분 데이터가 Reference 데이터로 사용되기 위해서는, 생물량에 대한 고려가 필요하다. 따라서 각 관측소에서의 환경에 따라 생물량에 대한 추가적인 자료를 객관적으로 모니터링 할 수 있는 기술이 요구되며, 타 수소 공급원의 영향에 따른 중성자 강도 변화를 보다 면밀히 검토할 필요가 있다. 이를 통해 보다 정확한 고해상도의 안정적인 토양수분 자료 산출이 가능할 것으로 보인다. 나아가, CRNP의 고해상도 토양수분 데이터를 이용한 위성 자료의 Downscaling 기법과 보다 정확한 수문 모델 구축, 토양수분 동화자료 생산과 같은 보다 높은 활용도를 지닌 수문 자료의 생산이 가능할 것이다.
- 지금까지 CRNP 센서를 활용한 토양수분 계측 연구의 대다수는 비교적 균일한(homogenous) 지역에 국한되어왔으며, 균일한 지역에서의 적용가능성은 이미 다수 입증되었다. 많은 연구가 균일한 지역에서 수행된 이유는 복잡한 지형일수록 토양수분을 제외한 수소 공급원들의 파악이 어렵고, 따라서 지형이 복잡할수록 토양수분 산출 정확도 역시 감소하기 때문이다. 이를 통해 현재 면 단위 토양수분 계측 시스템의 적용 한계를 확인할 수 있다. 그러나 최근 몇몇 연구에서는 고도가 매우 높고 건조한 지역이나 (Zhu et al., 2016) 식생이 매우 짙은 늪지 (Bogena et al., 2013) 등 불균일한(heterogenous) 지역에서 CRNP의 적용가능성에 대한 연구를 진행되고 있으며, 지점 센서의 위치 혹은 CRNP 센서의 높이를 조정하여 토양수분 산출 정확도의 향상을 도모하고 있다. 아직까지 설마천과 같이 관측반경 내의 고도차가 극심한 지역에서 수행된 연구는 전무하며, 본 연구 결과를 토대로 산악지형에서의 토양수분 산출가능성이 제시된다면 이는 불균일한 지형에서 역시 CRNP를 활용할 수 있다는 명제에 대한 반증이 되며, 보다 불균일한 지형에서의 CRNP의 활용도 및 사용가능성이 대두될 것으로 전망된다.
- 따라서 향후 이러한 적용 한계를 극복하기 위해 연구 지역의 유기물 영향 분석, 고도에 따른 기압 차이를 고려한 중성자 강도 보정 및 토양수분 산출을 위한 교정 중성자 강도 분석 등이 추가적으로 수행되어야 할 것이다.

바. 핵심 연구 결과 요약

- 성균관대학교 산학협력단에서는 2년간의 연구기간 동안, 우선적으로 연구 수행을 위한 Cosmic-ray 관측 원리, 토양수분 관측 현황 및 중성자와 토양수분의 관계성에 관한 선행연구 사례 조사를 15건 이상 수행하였음
- 한국수자원조사기술원과의 공동연구를 통해 설마천 유역을 연구의 최종 시험유역으로 선정하였으며, CRNP 센서가 설치된 지역에서 지점 토양수분 관측소를 설치하고 CRNP 데이터의 품질관리를 수행하여 한반도 토양수분 계측 시스템의 기반을 마련하였음
- 앞선 선행 조사를 바탕으로 Cosmic-ray 센서를 이용한 토양수분 산출을 시험적으로 수행하였으며 (Nguyen et al., 2019), 이후 본 연구의 시험유역인 설마천에서 Cosmic-ray 토양수분 센서의 중성자 강도를 기존 중성자 강도 보정 및 교정 방법을 이용하여 토양수분 산출에 사용하여 Cosmic-ray 기반 토양수분 산출 알고리즘을 구축하였음 (정재환 등, 2018)
- 면 단위 토양수분 산출 알고리즘 고도화를 위하여 지형 및 토지 피복에 영향을 받는 N_0 의 시간 별 변동을 고려한 Dynamic- N_0 교정 방법을 개발하여 개선된 결과를 도출하였고 그 결과를 시험유역에 설치된 지점 토양수분 관측기와 비교 검증하였음 (조성근 등, 2019)
- 면 단위 토양수분 자료와 지점 토양수분 자료의 융합을 통해 높은 정확도를 지닌 융합 토양수분 자료를 생산하였으며, 이를 재분석 자료 및 위성기반의 토양수분 자료와 비교하여 원격탐사자료와의 연계 방안을 제시하였음

2. 한국수자원조사기술원

가. 선행연구 사례 문헌 조사

- 한국수자원조사기술원에서는 한국형 토양수분량을 계측하는 기술과 방법, 운영에 대한 가이드 라인을 제시를 목표로 하였다. 토양수분량 관측 기술에 대한 동향 연구는 10건 이상의 다양한 관측소 구축 사례와 운영 기법들을 조사하였다. 조사된 자료를 통해 다양한 조건에서의 관측소 운영사례를 확인 하였으며, 효율적인 관측소 운영을 위해 고려해야할 사항들을 참고하였다.

1) 국제토양수분관측망 구축사례 (Dorigo et al., 2013)

- ISMN은 현재 세계에서 가장 큰 토양수분 네트워크로써, 개인적으로 운영되는 네트워크부터 국가에서 운영 중인 네트워크까지 다양한 주체가 참여하고 있으며, ISMN에서는 전 세계에서 수집된 다양한 토양수분 자료를 취합하고 품질관리 하여 제공하고 있다.
- ISMN에는 OzNet, ICN, COSMOS, AMMA, CALABRIA, CAMPANIA, CHINA 등 대규모 네트워크가 참여하고 있다. Dorigo et al. (2013)에서는 ISMN에 참여하고 있는 토양수분 네트워크를 아래의 Fig. 3.2.1와 같이 현황을 나타내었다. 현재 전 세계 59개 네트워크의 2400여개의 지점이 참여하여 국제토양수분관측네트워크를 구성하고 으며, 우리나라에서도 현재 한국수자원 조사기술원에서 운영하는 설마천, 청미천 지점이 등록되어 있다.

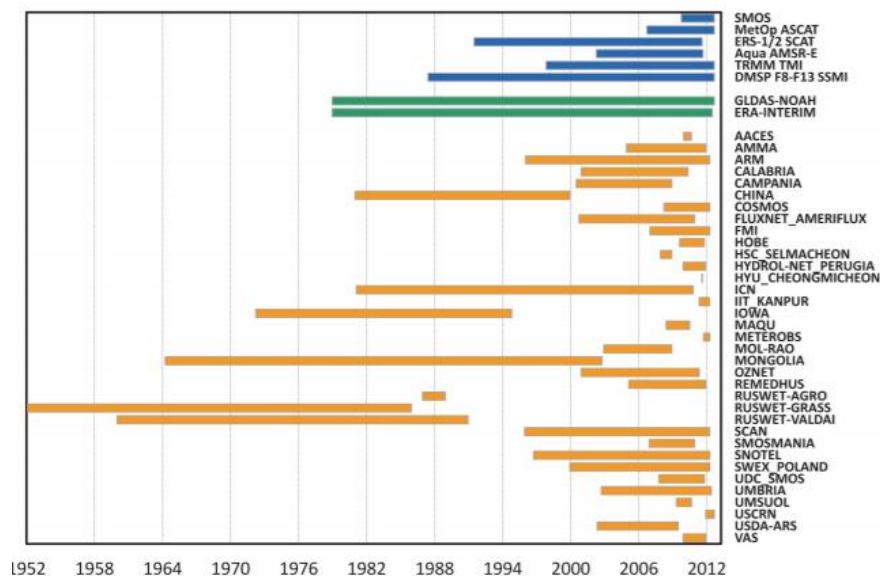


Fig. 3.2.1 ISMN에 참여 네트워크 현황(Dorigo et al., 2013)

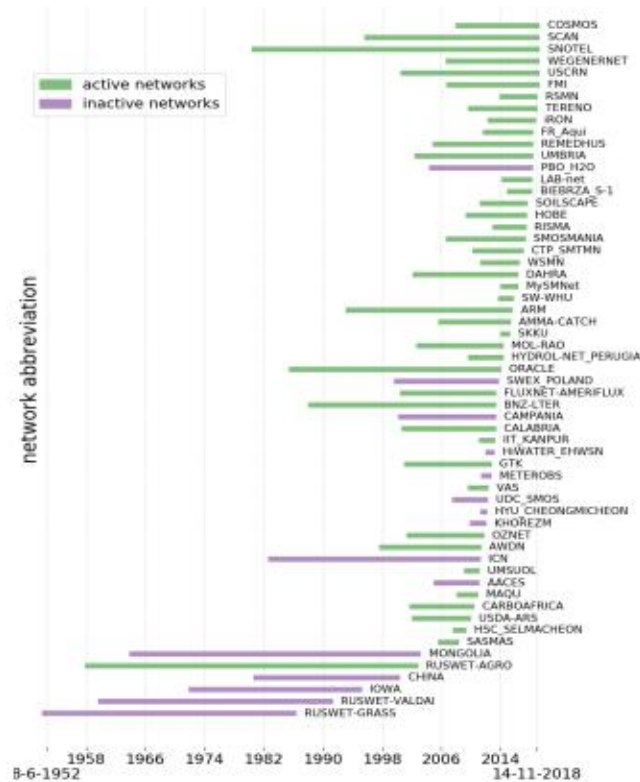


Fig. 3.2.2 ISMN 참여 네트워크 현황 (2019)

- ISMN은 현재 오스트리아에 위치한 빈 공과대학교의 Department of Geodesy and Geoinformation에서 운영하고 있으며, 다른 모델들의 성능을 향상시키거나 원격탐사 기법을 활용한 토양수분 관측자료의 검증 및 정확도 향상에 그 데이터가 활발히 이용되고 있다. 현재 NASA나 ESA와 같은 세계적인 연구기관에서 인공위성기반 토양수분 관측 자료의 검증 및 교정에 ISMN의 토양수분 데이터를 이용하고 있다.
- ISMN 네트워크는 TDR 센서, FDR 센서, CRNP 센서 기반의 관측 지점이 주를 이루고 있으며, 개활지에서의 관측이 주를 이루고 있다. 산림이나 산악지형에 설치된 일부 지점이 있기는 하지만 그 수가 적으며 우리나라와 같은 대륙성 기후의 산악지형이 주를 이루는 지역에서의 관측망은 흔하지 않기 때문에 산악지형에서의 토양수분 관측 자료는 수문연구에 유용하게 쓰일 수 있을 것이라 판단된다.
- ISMN에는 관측 지점의 기상학적 특성, 관측 장비, 관측 단위, 품질관리 기준이 상이한 다양한 지점이 참여하고 있다. 다양한 지점으로부터 일관성 있는 관측자료를 제공하기 위해서 ISMN에서는 품질관리 시스템을 개발하였으며, Dorigo et al. (2013)에서는 그 품질관리 시스템과 관련하여 품질관리 기준 및 방법을 제시하고 있다.

2) 토양수분 지점 네트워크 현황 및 이용 사례 (Mohanty et al., 2017)

- Mohanty et al. (2017)은 토양 수분의 관측에 이용되고 있는 최신 원격탐사 기술 및 기법들과 그 관측결과의 검증에 이용되고 있는 지점 네트워크에 관한 내용을 다루고 있다.
- 지점 센서 관측망으로는 독일의 TERENO (TERrestrial ENVironmental Observa tories), Oklahoma의 MOISST (Marena Oklahoma In Situ Sensor Testbed), Texas의 TxSON (Texas Soil Observation Network) 등이 대표이며, 이러한 관측망은 위성기반 토양수분의 시간 연속성을 평가하는데 활발하게 이용되고 있다.
- 아래의 Fig. 3.2.3은 전 세계에 분포하고 있는 지점기반 토양수분 시험유역과 관측망을 나타내고 있다. 북미지역에는 Walnut Gulch, Reynolds Creek, TxSON, Fort Cobb, Little Washita,

South Fork, St. Josepts, Little River, Carman, Casselman 등의 주요 사이트가 위치하고 있으며, 남미에는 Monte Buey, 유럽에는 REMEDHUS, Valencia, Twente, TERENO 등이 위치하고 있다. 아시아에는 Kuwait, Ngari, Mongolia와 같은 검증 사이트가 위치해 있으며, 호주에는 Yanco, Kyeamba 등의 사이트가 위치하고 있다. Walnut Gulch는 SMAPVEX15 관측망에 포함된 연구지역이며, South Fork와 Carman은 SMAPEX16, Yanco는 SMAPEX에 포함된 연구지역이다.

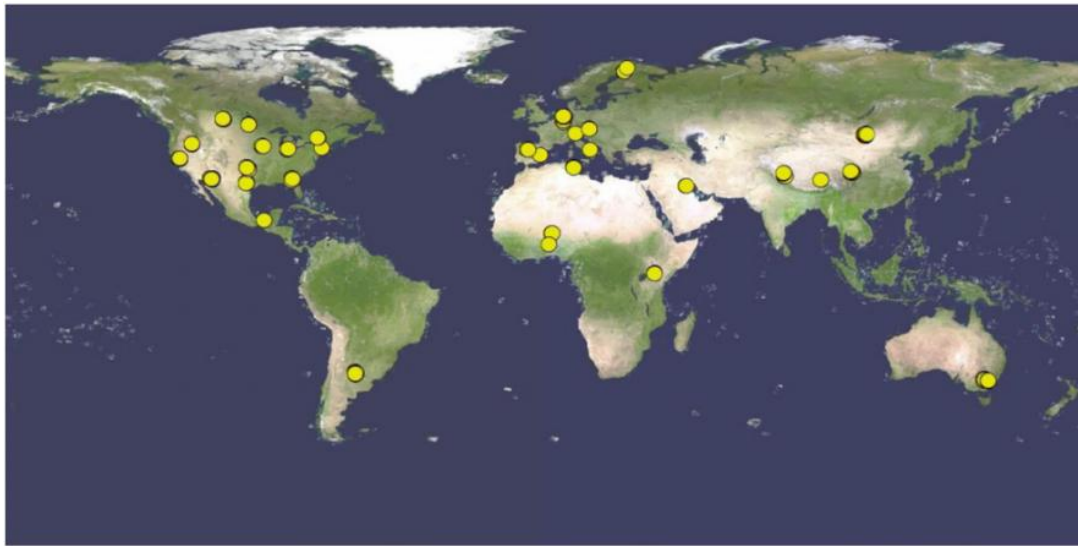


Fig. 3.2.3 지점 기반 토양수분 시험유역 및 관측소의 분포 (Mohanty et al., 2017)

- 소규모로 구축한 관측망인 NOAA's US Climated Reference Network and the USDA's Soil Climate Analysis Network나 한시적으로 운영되었던 SMAPVEX와 같은 특수한 관측망은 위성 기반 토양수분의 검증에 주로 이용되고 있다.
- SMAP mission (Entekhabi et al., 2010)은 지점 관측자료를 이용해 실시간으로 위성 관측자료를 검증한 최초 사례이며, Aqua 위성에 탑재된 AMSRE의 검증을 위해 수행되었던 최초의 large-scale 검증은 몇몇 중간규모의 유역단위 네트워크를 구축하는데 기여하였다. 그러한 유역 네트워크는 SMOS 산출물 검증을 위한 후속 연구나 Aquarius, ASCAT과 같은 위성의 산출물 검증에도 이용되었다.
- 최근에 이루어지고 있는 위성 기반 토양수분량의 검증 연구에는 CRNP 센서 기반 지점 네트워크가 활발하게 이루어지고 있다. 대표적인 CRNP 센서 기반 관측망으로는 COSMOS (Zreda et al., 2012), TERENO (Baatz et al., 2014), COSMOS-UK (Evans et al., 2016)이 있다.
- Pellet and Hauck (2017)와 같이 산지에 지점센서를 설치하여 관측망을 구축한 사례는 일부 발견할 수 있었으나, 산악지형에 CRNP 센서 기반의 관측망을 구축한 사례는 없었기 때문에 산악지역에서의 CRNP 센서 기반 토양수분 관측망을 구축한다면, 산지에 대한 위성 산출물의 검증과 교정에 유용한 자료로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

3) 산지에서의 토양수분 관측소 설치 사례 (Pellet and Hauck, 2017)

- Pellet and Hauck (2017)은 스위스에서 알프스와 Jura산 일대에 토양수분량 관측망인 SOMOMOUNT를 새롭게 구축한 연구사례이다. SOMOMOUNT는 자동화한 FDR 센서와 TDR 센서를 사용해 관측망을 구축하였으며, FDR 센서와 SMT100 센서와 PR2/6 센서, TDR 센서에는 PICO64 센서를 사용했다.
- 아래의 Fig. 3.2.4은 SOMOMOUNT and SwissSMEX project (Mittelbach and Seneviratne, 2012)의 관측소와 ARPA의 관측소의 위치를 나타낸 그림이다.

4) 토양수분량의 수직분포 계측 시스템 구축사례 (Benninga et al., 2017)

- 본 연구에서는 네덜란드의 Raam지역에 토양수분량의 수직분포를 관측하는 계측 시스템을 구축하고, 이를 통해 불포화대에 위치한 지하수의 사용 가능량과 저장 가능량에 관한 정보를 수집하고 분석한 방법을 다루고 있다.
- 해당 지역은 대부분 농경지로 이루어져 있으며, 일부 지역에서는 자연상태의 초지가 분포하고 있다. TDR 장비와 Decagon사의 5TM 센서를 이용해 관측소를 설치하였는데, 토심 5, 10, 20, 40, 80 cm에 센서를 매설하였고, 유역 내에 12개, 유역 바깥에 3개의 관측지점을 설치하였다. 또한, 토양온도, 지하수위, 기상데이터를 추가로 관측하여 자료의 교정 및 검증에 사용하였다.

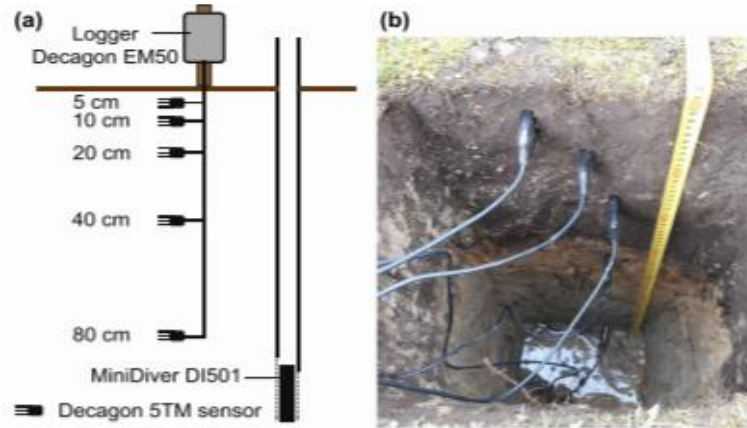


Fig. 3.2.6 (a) Raam유역의 토양수분 센서 설치 단면도, (b) 센서의 실제 설치 모습 (Brocca et al., 2017)

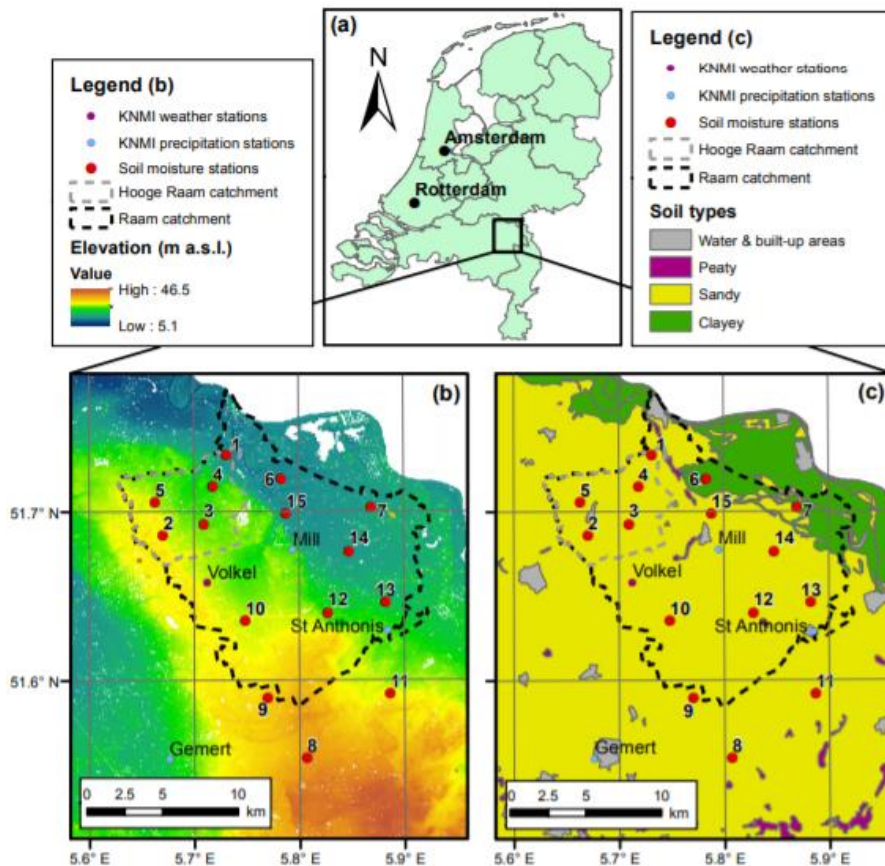


Fig. 3.2.7 네덜란드 Raam지역의 토양수분량 관측시스템 (a) 연구지역의 위치 (b) 연구지역의 표고 (c) 연구지역의 토성 분류 (Brocca et al., 2017)

5) 대표지점 선정을 위한 분석 기법 연구 사례

- Choi and Jacobs (2007)은 시간 안정성 해석(TSA)기법을 이용해 지점 관측망을 대표할 수 있는 지점을 결정한 연구 사례이다. Theta probe를 사용해 SMEX02 (Soil Moisture Experiment 2002)에서 Walnut Creek 유역의 일토양수분량의 프로파일(0-6, 5-11, 15-21, 25-31 cm)을 용적토양수분량으로 측정하고, 그 결과를 통계적 분석, 시간 안정성 해석과 단순 물리모형의 시뮬레이션을 통한 토양수분량 값의 예측에 사용하였다.
- 모든 토심에서의 변동계수는 지수 함수를 이용해 표현한 평균 토양수분량과 잘 들어맞았으며, 모델을 통해 산정한 토양수분량은 관측한 토양수분량과 유사한 변화 패턴을 보였다. 지표면의 토양수분은 건조 기간에는 로그 정규분포의 특성을 보였으나, 강우사상 이후에는 정규분포의 특성을 보였으며, 더 깊은 토심에서는 토양의 상태와 무관하게 토양수분량이 항상 정규분포의 특성을 보였다. 또한, 시간안정성 해석은 샘플링 지점의 공간적 패턴이 시간안정성을 매우 잘 나타내고 있음을 보여주었다.

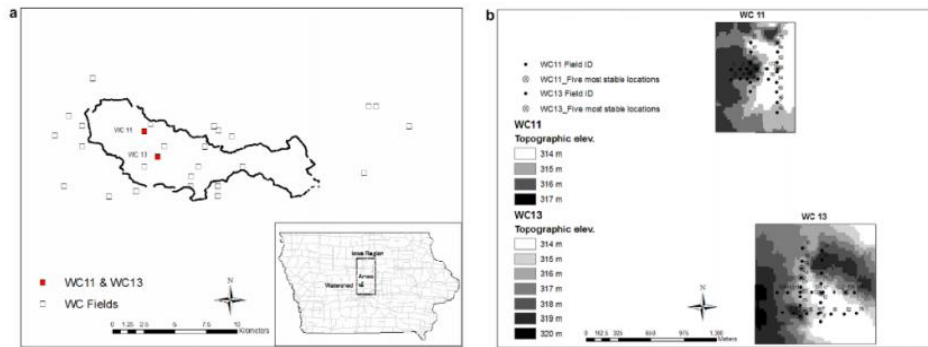


Fig. 3.2.8 (a) Walnut Creek 시험유역, (b) 샘플링 수행 위치 (Choi and Jacobs, 2007)

- Jacobs et al. (2004)에서는 SMEX02의 한 부분으로써 Walnut Creek 유역에서 일일 단위로 토양샘플을 채취하였으며, 이를 이용해 비행체에 탑재한 microwave 장치를 통해 산출된 토양수분량의 검증을 수행하였고, 시간 안정성 해석을 통해 특정 지점이 공간대표성을 가질 수도 있음을 확인하였다.

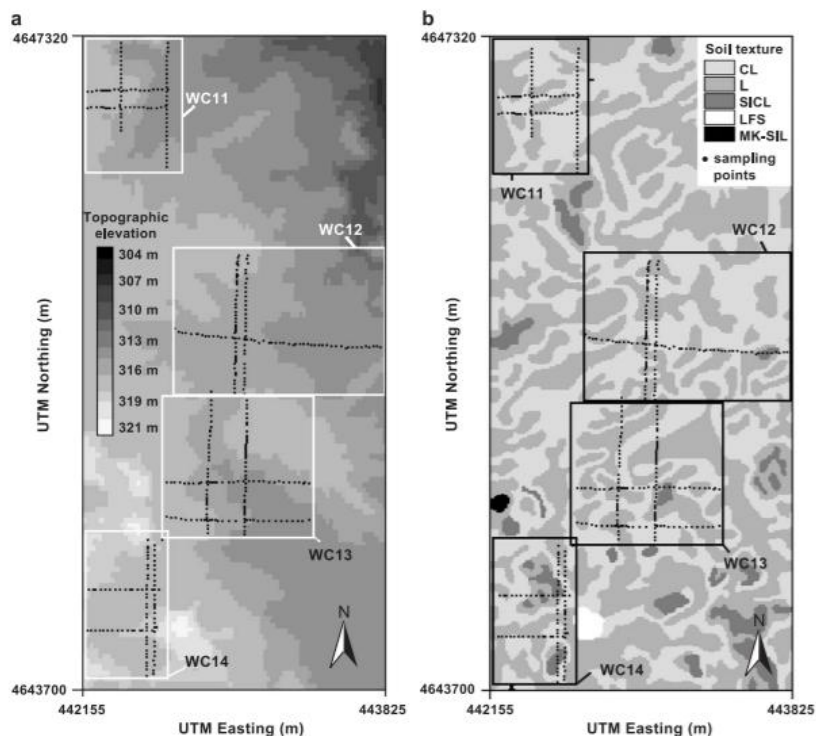


Fig. 3.2.9 Walnut Creek 시험유역의 지형(a)과 토성(b) (Jacobs et al., 2004)

6) 강우, 지형, 토양특성에 따른 토양수분의 변동성 연구(Niu et al., 2015)

- 본 연구에서는 중국 북부의 Horqin 지역에 위치한 5개의 지역에서 강우, 지형, 토양특성에 따른 토양수분의 변동성을 연구하였다. 아래의 Fig. 3.2.10과 같이 5개의 지역은 버드나무 생장지, 목초지, 경작지, 황무지, 관목지로 피복 상태 및 토지 이용유형이 서로 달랐으며, 각 지역의 중앙에는 20 m×20 m 크기의 research plot을 설치하고 4 m×4 m크기의 sample plot 5개를 무작위로 배치하였다.

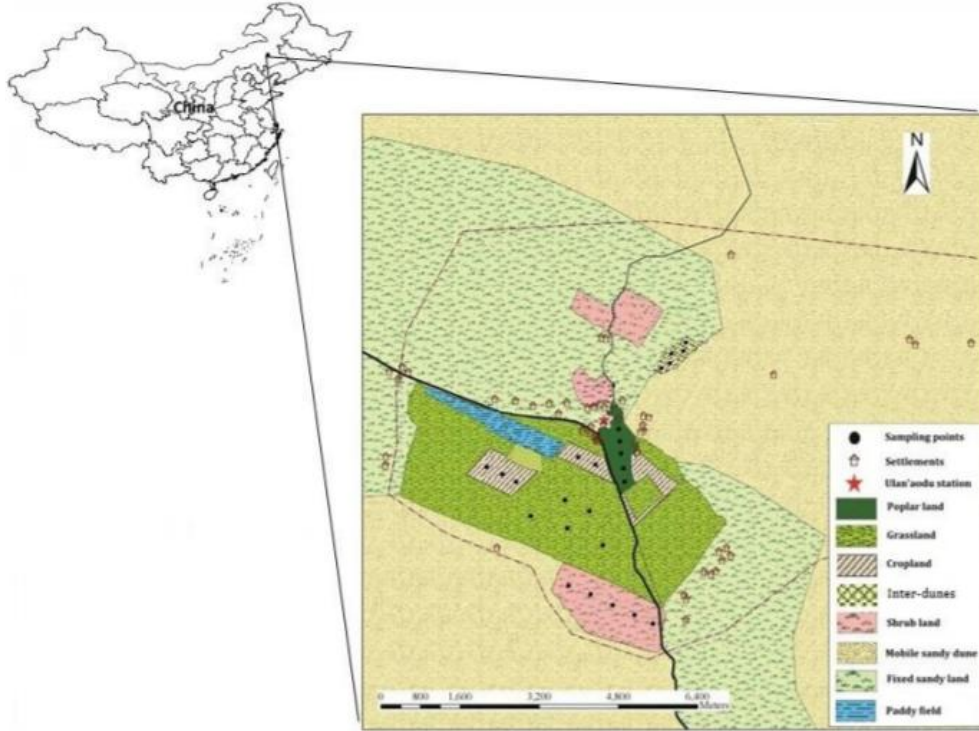


Fig. 3.2.10 중국 북부 Horqin 지역에 위치한 연구지역 (Niu et al., 2015)

- 아래의 Fig. 3.2.11에서는 토양수분량의 시간에 따른 변동을 확인할 수 있는데, 0-20 cm에서는 모든 유형의 토지 피복에서 토양수분량과 강우 사상 간에 양의 상관관계가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 0-80 cm에서는 토양수분량의 시간에 따른 변동이 좀 더 복잡한 추세를 보여주고 있는데, 이는 Sala et al. (1992)을 참고하면 root zone에 분포하고 있는 식물체 뿌리의 영향으로 토양의 체적밀도, 공극, 구성 성분들이 달라짐에 따라 침투, 저류 특성이 변화해 (a)와 다른 특성을 보이는 것으로 판단할 수 있다. 반면, (c)에서는 다른 토심에 비해 상대적으로 부드러운 시간적 변화를 보여주고 있으며, 토심이 깊어져 강우에 대한 반응이 더 늦게 나타나는 것을 명확하게 관찰할 수 있었다.

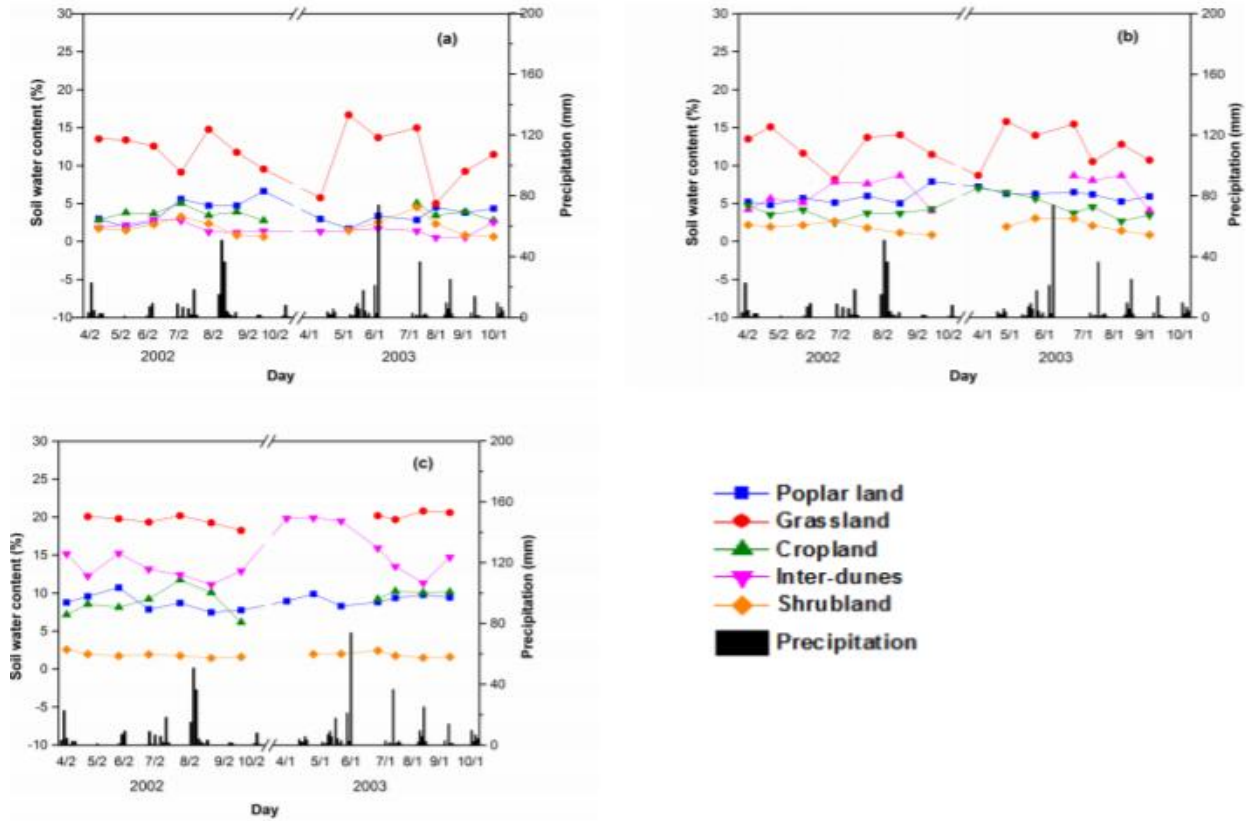


Fig. 3.2.11 토지 이용 유형과 토심에 따른 토양수분량 변동성 비교
(Niu et al., 2015)

7) 누적빈도분포를 활용한 토양수분 수직분포의 추정 연구 (Gao et al., 2017)

- 토양수분의 수직분포는 시간적, 공간적 변동성이 크고 조사에 많은 비용이 소모되어 그 정확한 양을 평가하기 어려운 부분이 있다. Gao et al. (2017)에서는 12개의 지점으로 이루어진 토양수분 관측망인 SCAN에서 관측한 지표면의 토양수분량과 누적빈도분포 방법을 이용하여 토양수분의 수직분포를 추정하고, 그 결과를 평가하여 해당 방법의 타당성을 확인하였다.
- Gao et al. (2017)에서 표토 토양수분량은 토심 5 cm까지의 토양수분량을 의미하며, 프로파일 토양수분량은 0-100 cm까지의 토양수분량을 의미한다. 프로파일 토양수분량 θ_p 는 아래의 Eq. 3.2.1과 같이 5 cm(L_1), 10 cm(L_2), 20 cm(L_3), 50 cm(L_4), 100 cm(L_5)의 토양수분량 θ_i ($i = 1, 2, \dots, 5$)을 토심에 따라 가중 평균하여 구한 값이다.

$$\theta_p = \frac{2\theta_1 L_1 + (\theta_1 + \theta_2)L_2 + (\theta_2 + \theta_3)L_3 + (\theta_3 + \theta_4)L_4 + (\theta_4 + \theta_5)L_5}{2(L_1 + L_2 + L_3 + L_4 + L_5)} \quad (3.2.1)$$

- Exponential filter는 관측 연산자의 성능을 평가하는데 주로 이용되는 방법으로써, 표토층 (surface layer)과 지표층 (subsurface layer)의 토양수분량을 예측할 수 있으며, 이 방법을 통해 계산된 프로파일 토양수분량을 Gao et al. (2017)에서는 Soil Water Index (SWI)로 표현하고 있다.
- 아래의 Fig. 3.2.12에서는 SCAN의 9개의 지점에 대해 표토층에서의 토양수분량과 프로파일 토양수분량간의 상관계수를 토심에 따라 나타내고 있다. 이를 살펴보면, 일부 지점에서는 토심에 따라 비슷한 상관도를 보이고 있는 반면, 일부 지점에서는 그렇지 않은 것을 확인할 수 있다.

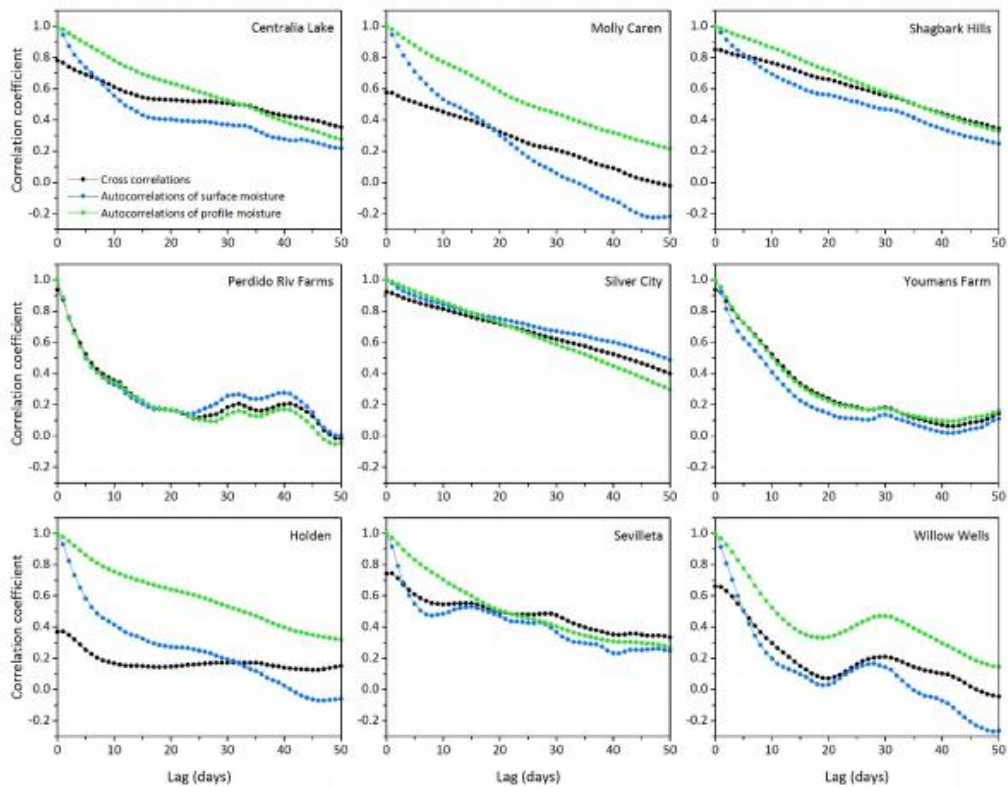


Fig. 3.2.12 지점별 표토층 토양수분량과 프로파일 토양수분량 비교 (Gao et al., 2017)

○ 아래의 Fig. 3.2.13에는 CDF를 통해 예측한 프로파일 토양수분량(파란선)과 Exponential filter를 이용해 예측한 프로파일 토양수분량(검은선)이 나타나 있으며, 이를 실제로 관측한 표토층 토양수분량(회색선)과 비교하고 있다. 일부 구간에서는 CDF를 이용한 예측값과 Exponential filter를 이용한 예측 값은 매우 유사한 거동을 보이고 있으나, 일부 구간에서는 매우 큰 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 앞선 Fig. 3.2.12의 분석결과와 같이 일부 지점에서는 토심에 따라 표토층 토양수분량과 프로파일 토양수분량 간의 상관관계가 역전되거나 심화되는 현상이 있었기 때문인 것으로 판단된다.

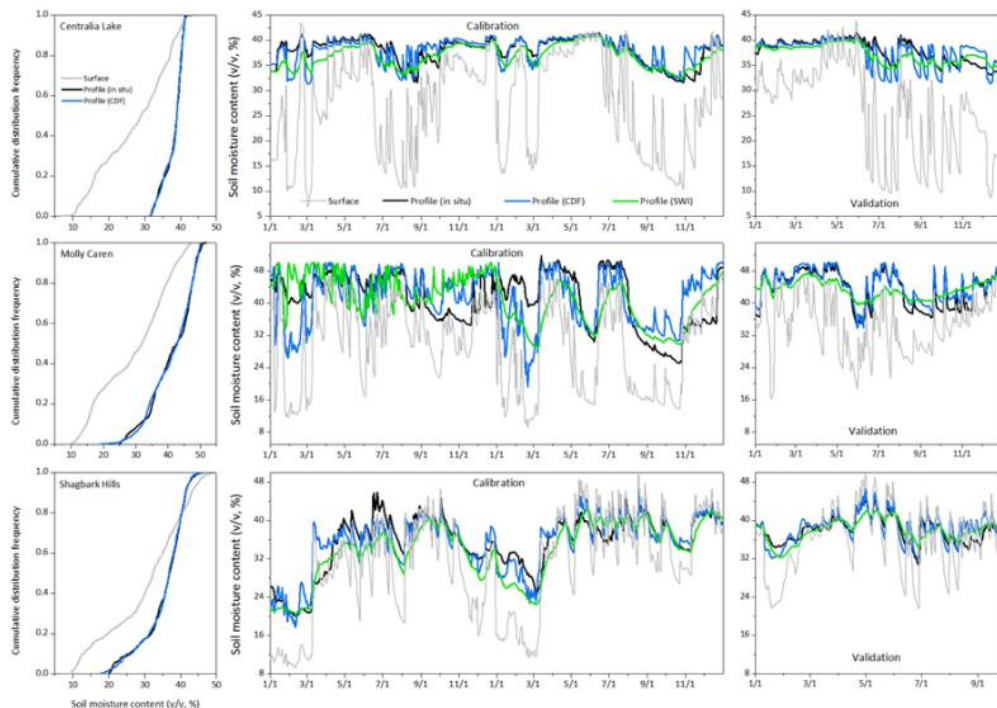


Fig. 3.2.13 CDF방법과 exponential filter 이용해 예측한 토양수분량과 관측된 지표면 토양수분량의 비교 (Gao et al., 2017)

8) 위성과 모델링을 활용한 토양수분량의 관측 연구사례 (Brocca et al., 2017)

- 원격탐사 기법의 대표적인 예로 SMAP, GCOM-W, SMOS, Metop-A와 Metop-B 등의 mission을 소개하고 있으며, Sentinel-1 위성의 SAR센서를 이용한 active 원격탐사 방법을 소개하고 있고, Soil Water Balance Model을 활용한 연구 (Morbidelli et al., 2006)를 소개하고 있다. 그 외에도 휴대용 토양수분량 계측 장비를 통해 중앙 이탈리아의 Colorso 시험구역의 토양수분량을 측정한 연구 (Brocca et al., 2007)나 ESA CCI 토양수분 산출물과 MISDc 강우-유출 모형을 중앙이탈리아의 Niccone 유역에 적용한 연구결과 등을 소개하고 있다.

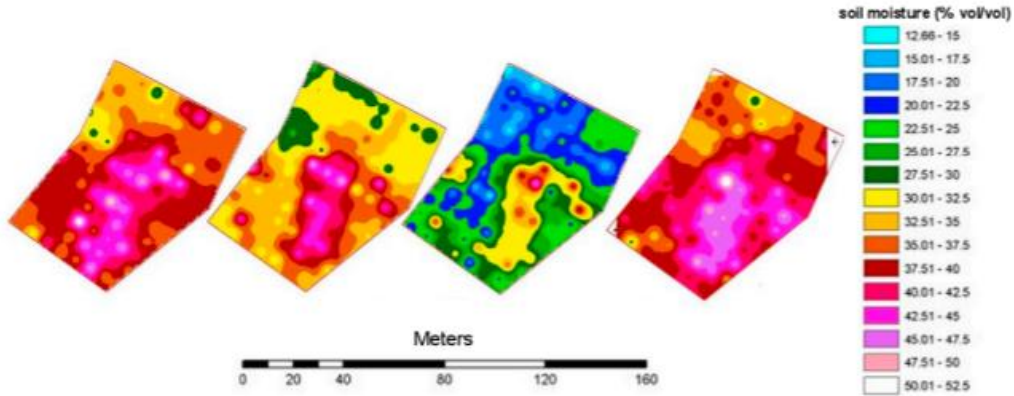


Fig. 3.2.14 대용 토양수분량 계측 장비를 통해 중앙 이탈리아의 Colorso 시험구역의 토양수분량을 측정한 연구 (Brocca et al., 2007)

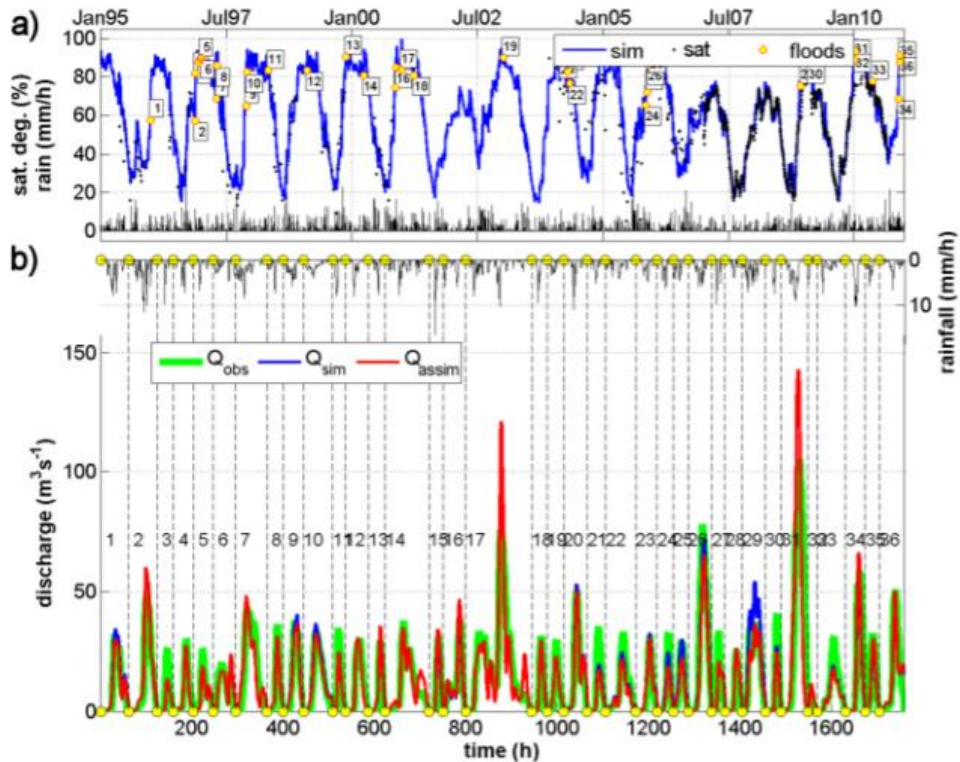


Fig. 3.2.15 ESA CCI 토양수분 산출물과 MISDc 강우-유출 모형 적용 연구결과

(a) 모델링을 통해 산출한 root zone토양수분량

(b) 홍수 사상에서 발생한 유출량의 관측값, 단순 시뮬레이션값, 자료동화 시뮬레이션값

나. 국내 수문 관측소 구축사례 조사

- 본 연구에서는 Cosmic-ray를 이용하여 면 단위 토양수분량을 측정할 수 있는 최적의 시스템을 구축하기 위해 먼저 국가수문관측망 보고서 등에 수록된 정보를 수집하여 그 특성을 파악하였다.
- 토양수분은 유출기구의 특성을 좌우하는 중요한 인자라 할 수 있으며, 또한 대기와 지표 사이의 에너지, 탄소, 물의 상호교환 과정에서도 중요한 매개체가 된다. 우리나라에서는 토양수분량 측정 계획이 2005년 「수문조사선진화5개년계획(건설교통부, 2005)」에 포함되면서 기반이 마련되기 시작하였다.
- 현재에는 토양수분량 조사가 수자원법 제17조 (수문조사의 실시)에 기반을 두고 있으며, 소수의 지점이지만 토양수분량이 정기적으로 측정되고 있다. 또한 정부는 2010년에 「국가수문관측망(국토해양부, 2010)」에 25개의 토양수분량 관측소를 포함하였다. 이와 같은 정부의 노력으로 환경부 홍수통제소, 한국수자원조사기술원, 한국수자원공사 등 관련 기관에서 토양수분량을 측정하고 있다.
- 국가수문관측망 보고서를 분석한 원인은 국가의 토양수분량과 같은 수문자료 생산 계획을 파악하는 데에 있으며, 뿐만 아니라 국가수문관측망 검토를 통해 우리나라의 수문조사의 발전 방향 등과 목적 등도 함께 파악하였다. 국가수문관측망 보고서에 수록된 국가수문관측망의 정의와 목적은 다음과 같다. 첫째, 관측망 보고서에서는 국가수문관측망을 우리나라 수자원을 이수, 치수, 환경 등의 목적으로 활용하기 위한 수문자료를 수집·제공하는 국가차원의 수문조사 기반 네트워크로 정의하고 있다. 둘째 관측망 보고서에서는 홍수관리, 수자원공급과 관리계획, 생태 및 환경, 수문설계계획, 사회적 물 갈등, 방재, 연구지원, 국민여가 생활 지원 등 다양하게 활용되는 수문자료를 객관적이고 공정한 국가수문자료로 제공하는 것에 목적을 두고 있다.

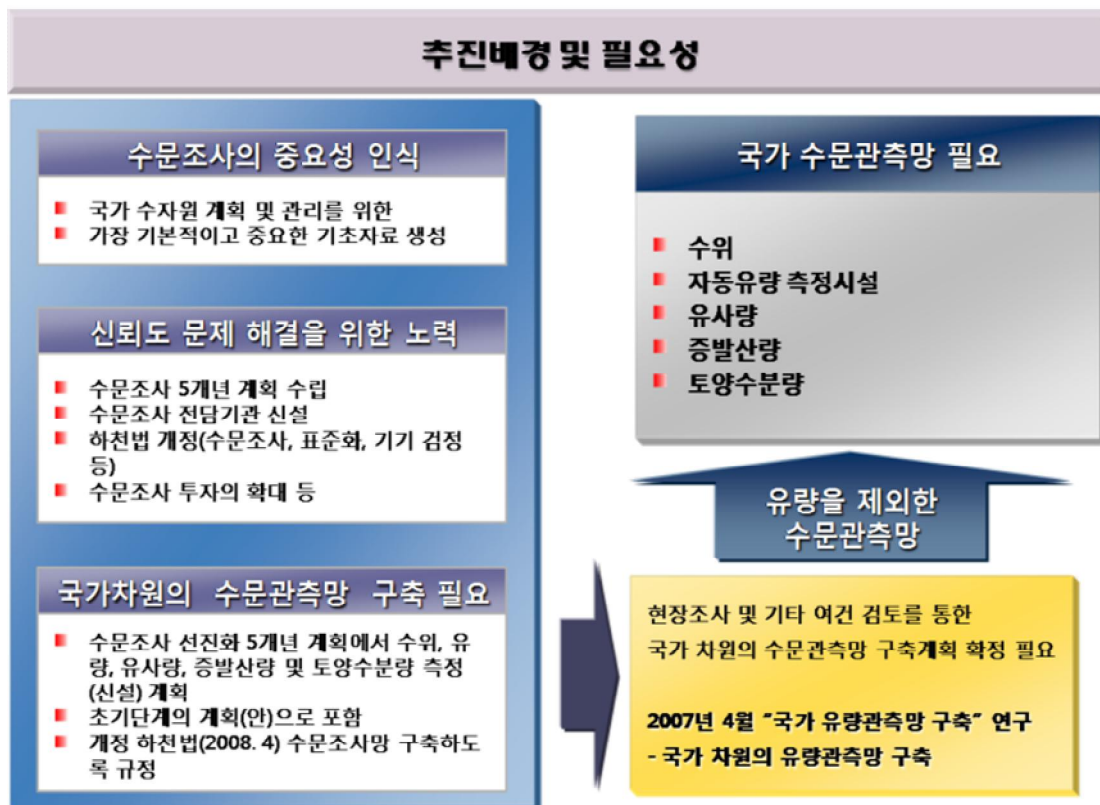


Fig. 3.2.16 국가수문관측망 추진배경 및 필요성

- 국가수문관측망의 활용 목적
 - 홍수관리: 국민과 공공의 홍수피해저감을 위한 홍수예보 등의 홍수관리를 위한 기초자료로서의 수문정보 제공

- 수자원 계획 및 관리: 생활·농업·공업 등 분야의 수자원 사용자와 관리자가 효율적인 운영계획을 수립할 수 있도록 하는 수문정보의 제공
- 생태계 및 환경 보전: 하천 주변과 하천 내에서의 생태계 환경변화와 수질개선 및 관리 등 환경분야에서의 기초자료로서 수문정보의 제공
- 수문설계 및 계획: 수공구조물의 설계, 홍수방재시설의 설계, 중장기 유역개발 계획 등의 수문학적 기초자료로서의 수문정보의 제공
- 수자원 갈등 해소: 수자원 할당과 배분에 관련한 업무를 지원할 수 있는 신뢰할 수 있고 객관적인 중요지점의 수문정보의 제공
- 방재: 도시침수, 댐 방류에 의한 홍수 등 기타 재난저감 및 관리를 위한 방재 목적의 중요지점에서의 수문정보의 제공
- 수리·수문분야와 수자원 관련 연구지원: 수리·수문 분야와 기타 수자원 관련 연구의 기초자료로서 활용 가능한 수문정보의 제공
- 기타 국민여가생활 지원: 하천 주변과 하천 내에서의 여가활동에 참고할 수 있는 수문정보의 제공

○ 국가수문관측망 기본 운영 원칙

- 국가수문관측망은 안정적이고 지속적으로 운영하기 위해 국가예산 또는 공익목적의 기관 예산으로 운영한다.
- 국가수문관측망의 모든 관측설비는 원격전송이 가능하며, 관측시설은 계획홍수량 이상에 견딜 수 있도록 견고하여야 한다.
- 국가수문관측망에서 제공되는 자료는 신뢰성과 공정성을 확보하기 위하여 ‘국가수문관측망의 운영방안’에 따라 생산하고 제공한다.
- 국가수문관측소의 수문자료는 공인과정을 거쳐 ‘한국수문조사연보’ 자료로 매년 발간한다.
- 국가수문관측소의 수문자료는 공공 기초자료로서 모든 국민과 기관에 무료로 제공한다.
- 국가수문관측망은 국가와 관련기관 및 국민의 요구에 맞는 수문자료를 장기적이며 지속적으로 생산할 수 있도록 운영되고 발전시켜야 한다.

○ 수문자료 항목별 국가수문관측망 구축 방법

- 본 연구에서는 Cosmic-ray 기반의 토양수분량 관측시스템 구축과 관측시스템이 설치될 위치 등을 결정하는 데에 활용하고자 국가수문관측망에 제시된 수위, 토양수분량 및 증발산량 구축 방법을 파악하였다.

1) 수위관측소망

- 수위관측망은 국내에 이미 설치 운영되고 있는 국토해양부, 환경부, 수자원공사, 한국수력원자력, 한국농어촌공사, 지방자치단체 등의 기관별 관측소와 연계하여 구축한 것으로 분석되었으며, 세부적인 관측망 구축 절차는 Fig. 3.2.17에 나타내었다. Fig. 3.2.17에서 알 수 있는 바와 같이 관측망 구축절차는 크게 총 6단계로 구분된다.
- 첫째, 개념 및 방법론, 관측망의 목표, 기본 운영원칙을 설정하였는데, 이를 위해 WMO, USGS, 일본 및 국내사례 (국가유량측정망) 등을 참고하였다.
- 둘째, 기존관측망 현황조사, 현장조사, 관련계획을 검토하였다. 현장조사는 국토부, 환경부, 지자체 등 1,320여개소를 대상으로 하였으며, 수문조사선진화5개년계획과 기관별 중장기 계획, 4대강살리기사업, 국가유량측정망의 정보를 검토하였다.
- 셋째, 기존관측망의 중요도를 검토하여 이를 토대로 도상망 구축하였다.
- 넷째 도상망 구축 결과를 토대로 다시 현장조사를 수행하여 최종 위치를 검토하였다.
- 다섯째, 기관협의를 통해 각종 국가수위망을 최종 확정하였다.
- 여섯째, 마지막으로 신설계획 및 최적 운영방안 수립 순으로 관측망을 구축한 것으로 분석

되었다.

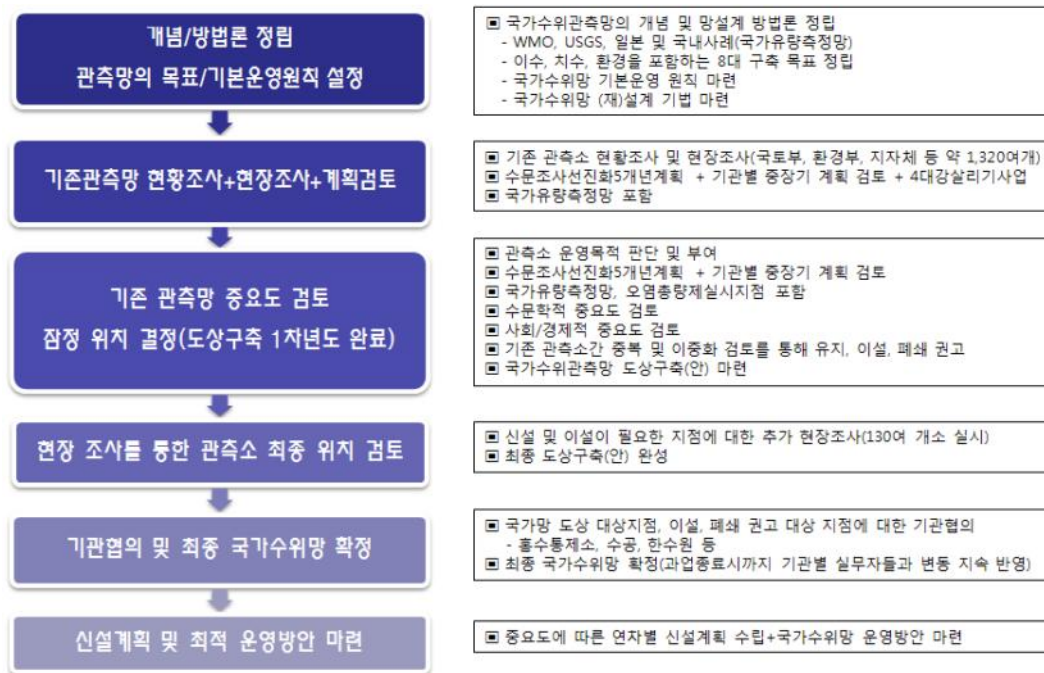


Fig. 3.2.17 국가수위관측망 구축과정

2) 토양수분량 및 증발산량 관측망

- 토양수분량 및 증발산량 관측망은 강우에 의한 유역의 반응으로 발생하는 유출 특성에 주안점을 두고 구축된 것으로 분석되었다.
- 일반적으로 토양 내에 함유되어 있는 토양수분량이 많을수록 직접유출에 기여하는 양이 많고, 토양수분량이 적을수록 직접유출량을 적게 발생시킨다.
- 이와 같이 토양수분량은 유출기구의 특성을 좌우하는 매개변수가 되기 때문에 국가 물관리 업무에 중요한 인자가 된다. 국가 토양수분량 및 증발산량 관측망 구축에 활용된 이론적인 배경은 Fig. 3.2.18과 같다.

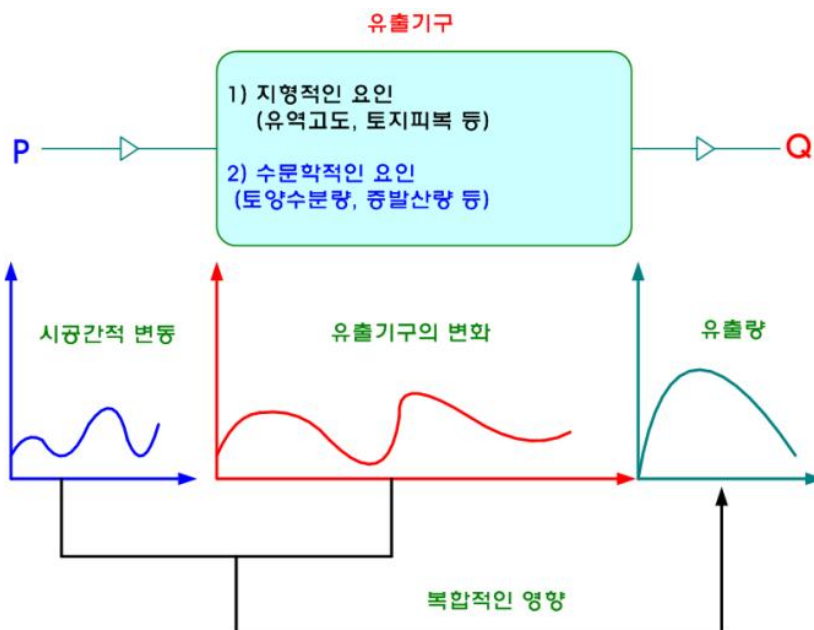


Fig. 3.2.18 토양수분·증발산량관측망 구축 개념

- 본 연구에서는 국가 토양수분량 및 증발산량 관측망 구축 시 적용된 방법과 절차를 파악하

여 Fig. 3.2.19에 나타내었다. Fig. 3.2.19에서 알 수 있는 바와 같이 국가 토양수분량 및 증발산량 관측망은 권역별 대표성 분석, 권역별 관측망 설계, 권역별 관측망 평가, 전국별 관측망 평가, 관측망 구축의 5단계로 구축되었다.

- 권역별 대표성 분석 단계에서는 중권역별로 수계망, 유역고도, 토지이용현황, 임상특성 등을 분석하여 중권역의 대표성을 파악하였다. 권역별 관측망 설계 단계에서는 중권역별 대표성 분석 결과를 토대로 수량 및 공간배치 특성을 고려하여 관측망 설계 인자 등을 결정하였다.
- 권역별 관측망 평가 단계에서는 이전 단계에서 구축된 도상 관측망을 토대로 권역별 대표성을 다시 반영하여 권역별 관측망을 평가하였다. 전국별 관측망 평가 단계에서는 이전 단계에서 설정된 관측망 밀도(수)와 공간배치의 특성을 전국적으로 안배하였다. 전국적으로 관측망 밀도(수)와 공간배치를 안배한 원인은 위성기반 공간매핑에 있었다.
- 마지막 단계에서는 이전 단계에서 구축된 관측망을 목적별로 재평가하여 최종 확정하였다. 토양수분량 및 증발산량 관측망에 포함된 최종 개소수는 각각 25개소이며, 이에 대한 세부적인 내용은 Table 3.2.1과 Fig. 3.2.20와 같다.



Fig. 3.2.19 토양수분·증발산량관측망 구축방법 및 절차

Table 3.2.1 토양수분 및 증발산량 관측망 설계 및 평가 대상 중권역

권역	중권역		대표성	비고 (기존지점)
	중권역코드	중권역명		
합계		25개소		
한강 (8개소)	1001	남한강상류	산림(침엽수)	
	1003	충주댐	산림(침엽수)	
	1007	남한강하류	산림(침엽수)	청미천
	1011	인북천	산림(활엽수)	대관령
	1022	한탄강	산림(활엽수)	광릉
	1014	홍천강	산림(혼효림)	
	1023	임진강하류	산림(혼효림)	설마천
	1101	안성천	논	
낙동강 (8개소)	2001	안동댐	산림(침엽수)	
	2003	안동댐하류	산림(침엽수)	
	2021	밀양강	산림(침엽수)	
	2022	낙동강하구둑	산림(활엽수)	
	2011	낙동왜관	산림(혼효림)	
	2012	금호강	산림(혼효림)	
	2016	황강	산림(혼효림)	
	2019	남강	논	
금강 (5개소)	3008	대청댐	산림(침엽수)	
	3001	용담댐	산림(활엽수)	
	3012	금강공주	산림(활엽수)	
	3005	초강	산림(혼효림)	
	3302	동진강	논	
섬진강 (2개소)	4104	이사천	산림(침엽수)	
	4005	요천	산림(활엽수)	
영산강 (2개소)	5001	영산강상류	산림(침엽수)	
	5006	영산강하류	논	

토양수분 및 증발산량 관측망

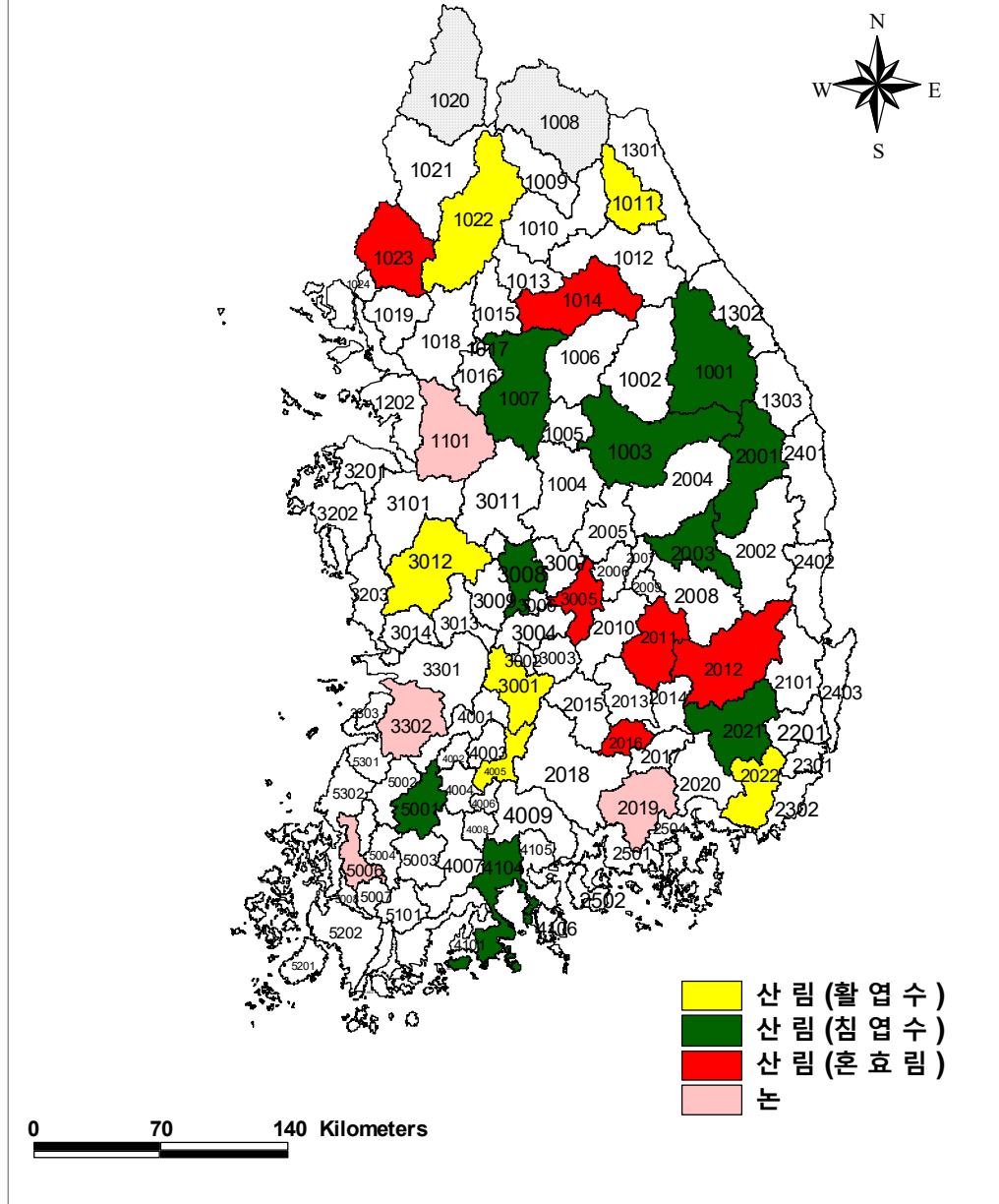


Fig. 3.2.20 토양수분 및 증발산량 관측망

3) 수문 및 토양수분 시험유역 목적, 선정 사례 조사

- 우리나라에서는 2019년부터 다목적 통합적 개념을 가지는 시험유역으로 홍천강 유역, 특수 목적의 연구 성과 도출을 위해 만경한 상류에 위치한 고산-봉동 (한강홍수통제소) 구간과 용담 시험유역(한국수자원공사)을 IHP 시험유역이 운영되고 있다. 본 연구에서는 우리나라 IHP 대표시험유역에서 운영되고 있는 수문관측망에 대해 아래에 기술하였다.
- 연구 사업에서는 UNESCO-IHP 대주제 (물안보 등), 국내 기술 수준, 시험유역 운영의 현실성 등을 고려하여 다목적·통합적 개념으로 대표시험유역의 목적을 설정하였다. 연구사업에서 IHP 대표시험유역 목적에 고려한 사항은 Fig. 3.2.21과 같으며, UNESCO-IHP 주제 (물 안보 등)와 관련 있는 물순환, 강우-유출 (자연유출, 설계수문량), 홍수, 가뭄, 수질, 유사, 수생태, 지하수, 수문조사 기술 개발 등의 다양한 분야에 이른다.



Fig. 3.2.21 IHP 대표시험유역 목적 설정

○ IHP 대표시험유역 선정 방안을 검토한 결과, IHP 연구사업에서는 시험유역 운영 목적에 부합하고 우리나라를 대표할 수 있는 최적의 시험유역과 운영 측면을 고려해 IHP 대표시험유역 선정 방안을 마련한 것으로 분석되었다. IHP 대표시험유역 선정 방안을 기술하면 아래와 같다. 첫째, 시험유역의 목적 적합성 평가를 위해 유역규모, 토지이용, 하천특성, 유로/배수체계, 기존 시험유역과의 연계 가능성, 시험유역 유지관리 용이성 등을 평가지표로 설정하였다. 둘째, 기존 수자원관측시설의 활용성 평가 단계에서는 관측종목의 다양성, 관측밀도, 기존 관측자료의 활용성, 관측소의 안정적 운영 측면을 평가지표로 설정하였다. 셋째, 현장조사/자문결과 반영 단계에서는 이전 단계에서 선정된 예비 후보지를 대상으로 현장조사와 자문을 통해 최종 후보지를 선정하였다.

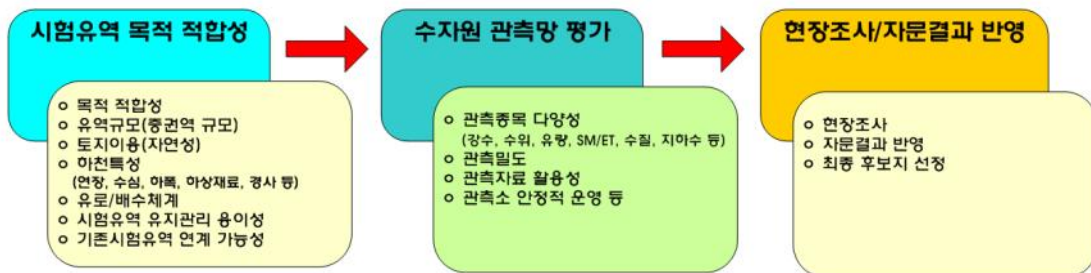


Fig. 3.2.22 IHP 대표시험유역 선정의 주요 절차

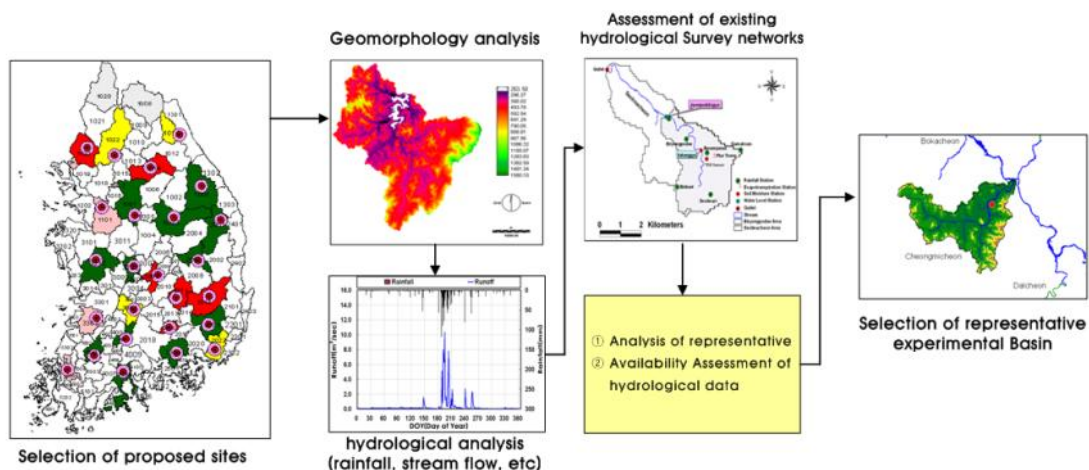


Fig. 3.2.23 IHP 대표시험유역 선정의 도식적 절차



Fig. 3.2.24 주요 평가지표 설정

- 홍천강 유역

- 홍천강 유역은 14개의 표준유역으로 구성되어 있으며, 삼거천 등 33개의 지방하천이 위치하고 있다.
- 수문·수자원 관측시설은 환경부 등 5개 기관에서 운영하고 있으며, 강수량, 수위-유량, 지하수, 수질 등의 자료가 정기적으로 관측되고 있다. 하천유사량은 현재까지 측정 이력은 없으나 국가수문관측망에 2개소가 포함되어 있어 향후 자료 생산이 가능한 지점이다. 특히, 홍천강 본류 구간에는 7개의 유량관측소가 위치하고 있어 본류 중심의 다양한 유출분석이 가능하다.

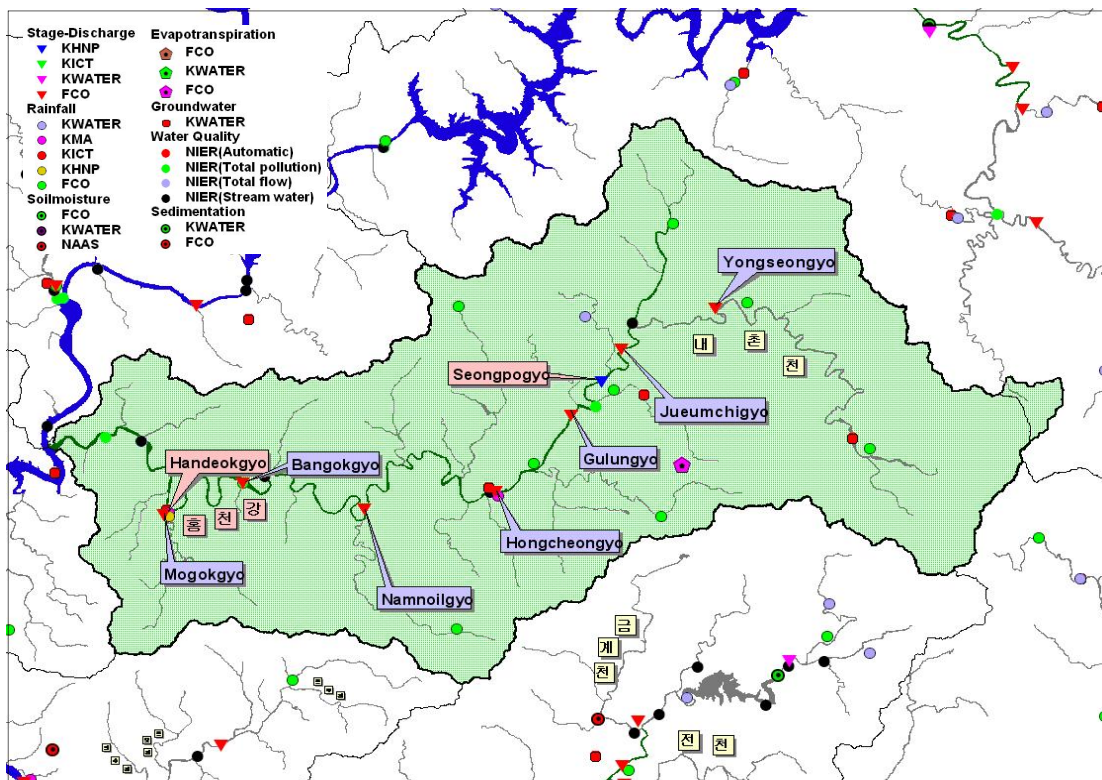


Fig. 3.2.25 홍천강 유역 수문·수자원관측망

Table 3.2.2 홍천강 유역 수문·수자원관측망 현황

Station	ME			KWATER	KHNP	KICT	NAAS	Total
	FCO	NIER	KMA					
Rainfall	9		1		2			12
Stage-discharge	7				2			9
SM	1							1
ET	1							1
Groundwater				4				4
Water quality		6						6
Sediment								
Total	18	6	1	4	4			33

* ME(환경부), FCO(홍수통제소), NIER(국립환경과학원), KMA(기상청), KWATER(한국수자원공사), KHNP(한국수력원자력), KICT(한국건설기술연구원), NAAS(국립농업과학원)

* SM(soilmoisture) 토양수분량, ET(evapotranspiration) 증발산량

- 용담댐 유역

- 한국수자원공사에서는 홍수 시 저수지 유입량 산정 기법의 개발, 수면 증발량 관측 기술의 개선, 증발산량 및 토양수분량 신뢰도 개선을 위해 용담 시험유역을 운영하고 있다. 용담 시험유역에서 계측되고 있는 수문기상관측 자료를 바탕으로 수문 계측 및 품질관리의 고도화 기술 확보를 목표로 하고 있다.
- 본 시험유역 운영을 통해 수문자료 측정기기 및 측정 방법 개선의 연구, 수문자료 분석 방법의 개선 및 고도화, 유역 단위의 수문자료 분석 방법 개선 및 고도화 등의 연구를 진행하고 있다. 이중 수문자료 측정기기 및 측정 방법 개선의 연구는 물수지 인자별로 증발·증발산량 측정, 토양수분량 측정 및 유속 측정으로 세분화되어 있다.
- 용담댐 유역은 댐 건설 전에는 8개의 소유역으로 이루어져 있었으나, 용담댐 건설 후 3개의 소유역은 수몰되어 저수지를 형성하였고 나머지 장계천, 구량천, 진안천, 정자천, 주자천 유역이 유입지천을 형성하고 있다.
- 각 소유역은 정복 방향을 기준으로 용담저수지는 저수지관리 Test-bed, 구량천 유역은 물수지 Test-bed, 금강 본류는 수자원확보 Test-bed, 진안천은 오염원 관리 Test-bed, 정자천 유역은 유입량 Test-bed 그리고 주자천 유역은 생태하천 Test-bed로 운영되고 있다. Fig. 3.2.26과 Table 3.2.3은 용담 시험유역에서 운영 중인 수문·수자원 관측망을 나타낸다.

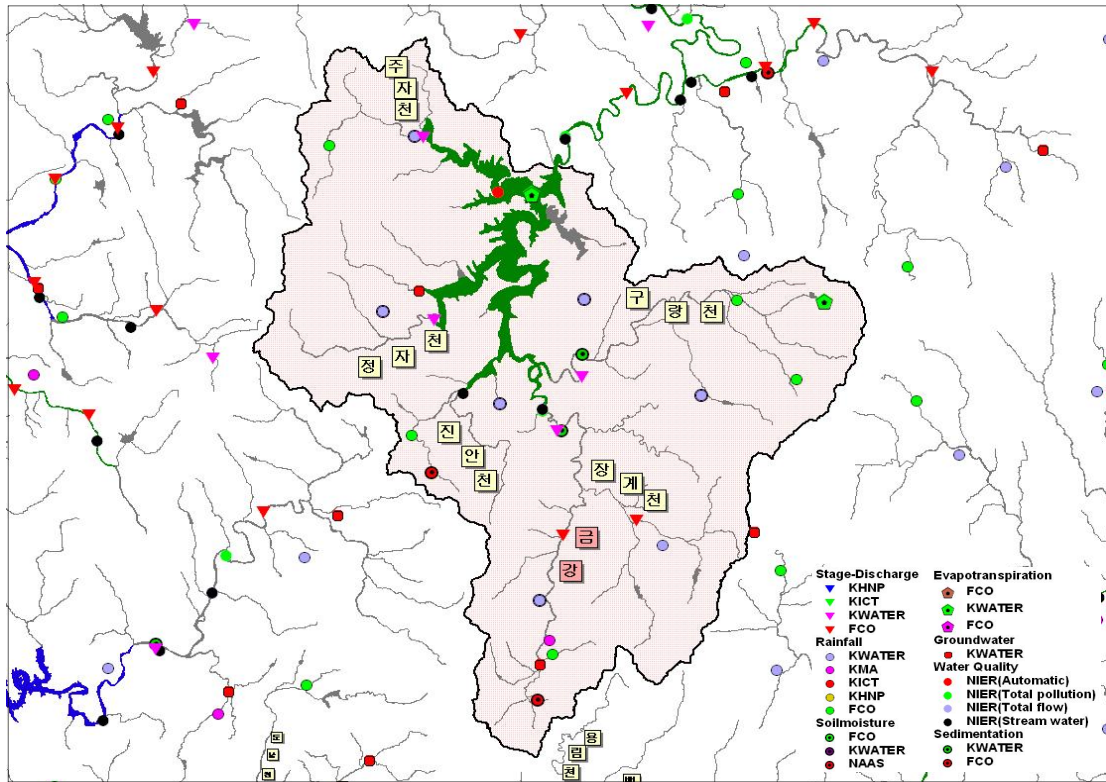


Fig. 3.2.26 용담 시험유역 수문·수자원관측망

Table 3.2.3 용담 시험유역

수계	유역	유역면적 [km ²]	다양한 수문자료 활용성						
			강수량	수위-유량	SM	ET	지하수	유사	수질
금강	용담댐	930.43	13	6	8	2	2	2	5

– 고산~봉동(만경강 상류) 구간

- 환경부 한강홍수통제소에서는 자동유량측정시설 구축 및 운영을 통해 하천수 사용량 계측을 위한 측정시설을 Fig. 3.2.27과 같이 만경강 상류 고산~봉동 구간의 어우보 일원에 설치하여 운영 중에 있다.
- 본 시험하천에서는 취·방류수량 계측 및 취·방류시설물의 최적 운영을 통해 하천수 이용효율 향상기법이 개발될 예정이다. 본 시험유역은 하천수 취·방류수량 실측 및 실측 기반 하천수 관리 모형 개발을 통한 하천수 이용 효율 20% 향상을 최종 목적으로 하고 있다.
- 이를 통해 도출된 연구 성과는 물수요량의 시·공간적 편차 완화 및 다양한 형태의 물 수요에 대응이 가능하도록 하는 물 배분 계획에 활용될 수 있을 것으로 판단된다.



Fig. 3.2.27 만경강 고산-봉동 구간 하천수 이용 현황



Fig. 3.2.28 만경강 어우보의 계측시설 현황

4) 수문 및 토양수분 시험유역 운영, 유지관리 사례 조사

- 본 연구에서는 Cosmic-ray 기반의 토양수분량 설계 시스템의 검증 사이트를 선정하기 위해 우리나라에서 운영되고 있는 시험유역을 조사하였다. Cosmic-ray 기반의 토양수분량 설계 시스템을 효율적으로 운영하고 검증하기 위해서는 강우량, 수위, 유량, 토양수분량, 증발산량 관측소 등의 관측소와 연계하는 것이 무엇보다 중요하다. 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 시험유역에 설치·운영되고 있는 수문관측소에 주안점을 두고 분석하였다.

- IHP 실험유역 운영 사례 조사

- 우리나라에서는 1967년 국제수문10개년 (International Hydrological Decade, IHD)과 국제수문학프로그램 (International Hydrological Programme, IHP) 사업을 통해 경안천 등 10개 IHP 시험유역을 운영하였으며, 2015년부터는 용담 시험유역을 운영하고 있다. 2018년에는 IHP 대표시험유역 특성 분석 및 운영 전략 사업에서 만경강 상류에 위치하는 고산~봉동 구간, 용담댐 유역을 시험유역 선정하였다. 2019년부터 고산~봉동 구간, 용담댐 유역이 우리나라를 대표하는 시험유역으로 운영되고 있다.
- 본 연구에서는 우리나라에서 운영 중에 있는 다수의 시험유역 중에서 비교적 Cosmic-ray 기반 토양수분량 관측 시스템을 운영할 수 있는 설마천 유역, 청미천 유역, 용담댐 유역 등 7개 유역을 조사하여 시험유역 운영 목적과 관측소 현황 등을 조사하여 아래에 기술하였다.

Table 3.2.4 시험유역 운영 사례 조사

구분	운영 목적	비고
설마천	· 수문자료의 수집과 분석 및 수문관측망 운영 · 수문정보시스템 운영 · 수문관측기술 개발	관측개시일 : 1995년
청미천	· 유역 내 신뢰성 있는 고품질의 수문/수리자료구축 · 강우-유출 구조의 이해 · 유역의 수문/수리학적 특성 규명 · 유역과 하도의 계절적/경년적 변화분석 · 자연생태하천 (reference stream)의 상존구간 모니터링 · 홍보와 교육목적의 소유역 운영	관측개시일 : 2007년
용담댐	· 용담댐 운영 및 물수지 분석을 위한 자료 확보 · 수문자료의 수집과 분석 · 모형의 적용성 검토	관측개시일 : 1999년
섬강	· 강우량 및 수위관측 시설 배치의 적합성 검토 · 장·단기 강우-유출 해석 · 수집된 자료를 이용한 수문 및 수리특성분석	관측개시일 : 1999년
이동	· 신뢰성 있는 농촌유역의 수문자료의 확보 · 농업용수관리 목적의 운영 · 수문계측기기 유지관리, 수문관측, 수문특성 분석	관측개시일 : 2000년
중랑천	· 도시호우 및 홍수에 대한 해석 기법 개발 · 도시홍수 설계, 도시홍수예경보 시스템 개발 등을 위한 자료수집 체계 확립 및 자료수집 · 도시배수구역의 유출특성 분석	관측개시일 : 2004년
대동천	· 도시유역 내 신뢰성 있는 고품질의 수문/수리자료구축 · 도시유역의 강우 유출해석 · 홍수예경보시스템 구축을 위한 기초자료 제공 · 도시화에 따른 유출특성의 분석 · 배수계통 (하수관거, 빗물펌프장, 하수처리장, 우수토실 등)에 따른 강우-유출구조	관측개시일 : 2007년

- 설마천 시험유역 운영 사례 조사

- 설마천 시험유역에는 2009년 12월 현재 강우량관측소 6개소, 수위관측소 2개소, 기상 관측소 1개소 및 지하수위관측소 2개소가 설치되어 있다.
- 강우량, 수위관측의 시간단위는 10분이며, 기상, 지하수위관측의 시간단위는 1시간으로 운영된다. 본 유역의 유역면적은 8.48 km²로 강우량관측소의 밀도는 1.41 km²/개소이다. 6개 강우량관측소에 설치된 실시간 전송장비와 설마천 시험유역 홈페이지 (<http://selmacheon.kict.re.kr>)로 구성된 수문정보시스템에 의해 관측된 10분 강우량자료는 1시간 단위로 인터넷을 통해 제공되며, 무선통신장치로도 실시간으로 파악할 수 있다.
- 이와 같은 실시간 수문정보시스템을 운영함에 따라 관측기기의 유지관리가 보다 쉽고 이상 발견 시 신속한 대책을 취할 수 있으며, 실시간 자료 처리가 가능해져 보다 양질의 자료를 생성 할 수 있는 기반을 확보하였다. 또한, 개소 당 2개의 강우량계(범륜사, 비룡포대, 빈배이 제외)에서 2개의 강우량자료를 생성함으로써 결측을 최소화할 수 있으며, 상호 비교 검증을 통해 자료의 품질 수준을 올릴 수 있도록 하였다. 현재 설마천 시험유역의 6개 강우량관측소의 관측기기 내역은 Table 3.2.5과 같다.



(a) 전적비교



(b) 비룡포대



(c) 빈배이



(d) 설마리



(e) 설마리



(f) 감악산

Fig. 3.2.30 강우량관측소(설마천 시험유역)

Table 3.2.5 강우량관측소 관측기기 내역(설마천 시험유역)

지 점	관측기기	자료수집	기록방식	전 원	비 고
전적비교 (010220)	전도형 전도형(실시간)	로거 로거/실시간 전송	전산파일 전산파일	배터리 상용전원, 배터리 겸용	관측개시일 : 1998년
비룡포대 (010230)	전도형(실시간)	로거/실시간 전송	전산파일	배터리	관측개시일 : 1996년
빈배이 (010237)	전도형(실시간)	로거/실시간 전송	전산파일	배터리(태양전지)	관측개시일 : 2001년
설마리 (010240)	전도형 전도형(실시간) 보 통	로거 로거/실시간 전송 현장계측	전산파일 전산파일 점검일지	상용전원 상용전원, 배터리 겸용	관측개시일 : 1995년
범륜사 (010245)	전도형(실시간)	로거/실시간 전송	전산파일	배터리(태양전지)	관측개시일 : 1996년
감악산 (010250)	중량형 전도형(실시간)	로거 로거/실시간 전송	전산파일 전산파일	배터리 배터리(태양전지)	관측개시일 : 1998년
◦ 수수구 제원 - 전도형/전도형(실시간) ·직경 : 200mm/255mm ·높이 : 450mm/310mm ·전도형(0.5mm/0.2mm) - 중량형 ·직경 : 200mm ·높이 : 800mm ·중량형(0.01mm) - 보통 ·직경 : 200mm ·높이 : 600mm ·원통형 구리관					◦ 최소관측단위/간격 · 전 도 형 : 0.5 mm (0.2 mm)/10분 · 중량형 : 0.01mm/10분

Table 3.2.6 하천수위관측소 관측기기 내역(설마천 시험유역)

지 점	관측기기	자료수집	기록방식	전 원	비 고
전적비교 (010220)	목자판	목측	점검일지	-	◦ 최소 관측 단위 및 간격 - 0.1 cm/10분
	음파식	로거	전산파일	상용전원/배터리	
	기포식	로거	전산파일	배터리	
	부자식	로거	전산파일	배터리	
	초음파식 (실시간)	로거/실시간 전송	전산파일	상용전원/배터리	



(a) 전적비교(전경)



(b) 전적비교(수위관측탑)

Fig. 3.2.31 하천수위관측소(설마천 시험유역)

Table 3.2.7 기상관측소 관측기기 내역(설마천 시험유역)

지 점	관측기기	관측자료	자료수집	기록방식	전 원	비 고
설마리 (010240)	자동기상 관측장치 (AWS)	기온, 상대습도, 풍속, 풍향, 일사량, 강우량, 지온, 토양수분 5종, 일조시수, 순복사량	로거	전산파일	상용전원 /배터리	◦ 최소관측간격 : 1시간
	적설계	적설량	목측	점검일지	-	

Table 3.2.8 지하수위관측소 관측기기 내역(설마천 시험유역)

구 분	관측공 깊이 [m]	관측범위 [m]	기준표고 [EL.m]	관측종	비 고
설 마 리	15	10	172.995	기포식	기준표고는 데이터로거 관측함 하단을 기준으로 함.

- 청미천 실험유역 운영 사례 조사

- 청미천 (IHP) 시험유역의 강우량 관측은 기존에 운영중인 국토교통부의 T/M망인 청미천 유역내 삼죽, 설성, 생극과 유역외인 원삼을 사용하기로 하고, 단계별 관측목표와 예산의 여건에 따라 추가적 강우량관측소를 설치하는 것으로 계획되어 있다. 그에 따른 Thiessen망과 계수에 따른 강우량관측소별 지배면적은 Fig. 3.2.32와 같다.

Table 3.2.9 강우량관측소 현황(청미천 시험유역)

관측소	관측종별	자료보유기간	결측년도	관할기관	비고
삼죽	T/M	1990 ~ 현재	-	국도교통부	유역 내
설성	T/M	1990 ~ 현재	-	국도교통부	유역 내
생극	T/M	1975 ~ 현재	-	국도교통부	유역 내
원삼	T/M	1981 ~ 1995, 1998 ~ 현재	1996 ~ 1997	국도교통부	유역 외



Fig. 3.2.32 계측망과 Thiessen 망(청미천 시험유역)

- 청미천 실험유역 운영 사례 조사

- 수위의 관측은 Rating 곡선을 개발하여 관측수위에 따른 유량으로의 환산으로 강우-유출구조를 이해하는데 매우 중요하다. 청미천 시험유역 내에는 청미천 하류와 한강과의 합류부에 환경부에서 운영하는 장호원, 청미와 강천수위관측소가 각각 있다. 수위관측소는 합류부를 중심으로 수위관측소를 설치함을 원칙으로 선정하였다. 상류구간의 죽산천 합류를 중심으로 청미천 상류인 백암교, 죽산천의 일죽 그리고 합류후인 청미천교에 수위관측소를 신설하는 것으로 계획되어 있다. 하류에는 응천과의 합류부로 본류 상류의 앞서 언급한 청미천교 수위관측소, 응천의 총곡교, 합류후의 장호원과 청마수위 표로 새로이 총곡교에 수위관측소를 신설하는 것으로 계획되어 있다. 따라서 남한강 합류부의 강촌 수위표를 제외한 기존의 2개 수위관측소와 새로이 신설하는 4개의 수위관측소로 2개의 합류부에서 수문순환을 이해하고 한강과의 합류부에서의 수문순환 특성을 이해하고자 하였다. 자료의 결측 방지와 보완을 위해서 앞서 언급한 수위계 중 2가지를 병행하여 설치하기로 하였다. 최근 새로이 개발된 영상수위계의 사용을 적극 검토하도록 하였다.

Table 3.2.10 수위관측소 현황(청미천 시험유역)

수위국	위치	신설/기존	비고
백암	본류 백암교	신설	수질국 병행
일죽	죽산천 일죽	신설	
청미천	본류 청미천1교	신설	
총곡	응천 총곡교	신설	
청미	본류 청미교	기존	
장호원	본류	기존	
강천	남한강 합류부	기존	시험유역 외(제외)

– 용담댐 시험유역 운영 사례 조사

- 용담댐 시험유역에는 용담댐 운영을 목적으로 설치된 강우량관측소 7개소, 수위관측소 5개소가 있으며, 평·갈수 유량측정을 위한 Parshall Flume 2개소가 설치되어 있다. 또한 사후 환경영향평가를 위한 자동기상관측시스템이 설치되어 있다. 용담댐 시험유역은 “시험유역 운영방안 연구(1999, 수공)”를 통하여 선정된 시험유역으로서 댐 운영을 위한 수위관측소 외에 추가로 수문관측소를 설치하였다. 이렇게 용담댐 시험유역에는 Fig. 3.2.33과 같이 기상청을 비롯하여 많은 수문기상관측소가 설치되어 밀도 높은 수문자료의 생산이 가능하다. 용담댐 시험유역은 크게 수자원 기초자료 생성과 생성에 필요한 절차를 표준화하기 위한 수자원 표준화 시험유역과 물수지 분석을 위한 시험유역으로 구분하여 표준화 시험유역은 용담댐 유역전체를 대상으로 하고, 물수지 분석을 위한 시험유역은 용담댐 상류의 3개 저수지를 대상으로 선정하였다. 본 연구에서는 표준화시험유역을 연구대상으로 하였다.
- 용담댐의 시험유역에서 활용하는 강우량관측소는 Table 3.2.11과 같이 7개소이다. 이 7개의 강우량관측소는 댐 운영을 위해 설치된 관측소로서 실시간으로 매시간의 강우량을 관측한다. 이렇게 관측소에서 관측된 강우량자료는 인공위성을 통하여 댐 관리단과 한국수자원공사 본사(대전)의 실시간물관리시스템에 저장된다. 이 7개의 강우량관측소 외에 기상청의 장수관측소, 물수지 분석 시험유역의 3개 관측소, AWS(5개소)의 자료를 별도로 확보하여 활용할 수 있다.
- 용담댐 시험유역에는 본댐, 방수로, 안천, 동향, 천천 등 5개소의 수위관측소가 댐 운영으로 기왕에 설치되어 있었다. 수위계는 부자식이 설치되어 있으며, 1 cm까지 관측할 수 있다.
- 용담댐 시험유역은 주자천의 주천교, 진안천의 석정교, 정자천의 상도치교, 장계천의 동정교 4개소가 있으며, 독일 OTT사의 기포식 수위계를 설치하였다. 이 기포식 수위계는 0.5 cm까지 관측할 수 있으며 자체에 로거장치가 포함되어 있어 매 시간의 수위를 측정하고 있다.



Fig. 3.2.33 용담댐 시험유역도

Table 3.2.11 강우량관측소 현황(용담댐 시험유역)

관측소명	구분	관측소 위치			해발고 [EL.m]	관측개시일
		주소	동경	북위		
안 천	T/M	전북 진안군 안천면 신괴리 177-1	127-32-48	35-52-01	313	'99-06-15
주 천	T/M	전북 진안군 주천면 주양리 산17-9	127-25-34	35-58-04	303	'00-01-01
부 귀	T/M	전북 진안군 부귀면 황금리 산118-9	127-24-12	35-51-36	396	'99-06-15
상 전	T/M	전북 진안군 상전면 주평리 579-5	127-29-10	35-48-11	334	'99-06-15
계 북	T/M	전북 장수군 계북면 원촌리 1050-58	127-37-46	35-48-27	453	'99-06-15
장 계	T/M	전북 장수군 장계면 삼봉리 748-4	127-36-03	35-42-54	422	'99-06-15
천 천	T/M	전북 장수군 천천면 장판리 418-1	127-30-49	35-40-54	409	'99-06-15

Table 3.2.12 하천수위관측소 현황(용담댐 시험유역)

관측소명	하천	관측소 위치			영점 표고 [EL.m]	유역 면적 [km ²]	유역평 균고도 [EL.m]	관측개시일
		주 소	동경	북위				
주천교	주자천	전북 진안군 주천면 주양리	127-25-37	35-58-36	272.190	55.3	541.99	'01-09
석정교	정자천	전북 진안군 정천면 월평리	127-26-21	35-52-01	267.100	85.6	457.81	'01-09
상도치교	진안천	전북 진안군 진안읍 운산리	127-26-47	35-48-32	270.168	32.6	407.90	'01-09
동정교	장계천	전북 장수군 장계면 금곡리	127-32-42	35-45-06	324.793	114.0	567.17	'01-09



(a) 주천교



(b) 석정교



(c) 상도치교



(d) 동정교

Fig. 3.2.34 하천수위관측소(용담댐 시험구역)

– 섬강 실험구역 운영 사례 조사

- 섬강 실험구역은 남한강의 제 1지류인 섬강의 횡성댐 상류에 위치하고 있는 지방하천인 계천유역으로서 Fig. 3.2.35에서와 같이 계천과 유동천이 합류하는 부채꼴 형상의 유역으로 구성되어 있다. 본 유역에 대한 유역면적은 유역의 출구인 매일 수위국을 기준으로 164.5 km^2 이고 유로 연장은 22.8km로 대상유역의 지형은 대체로 만장년기 지형으로 주로 산지로 형성되어 있다. 섬강 실험구역에서 운영하는 강우량관측소는 3개소이며, 하천수위관측소는 4개소이다.



Fig. 3.2.35 섬강 실험구역도

Table 3.2.13 강우량관측소 현황(섬강 시험구역)

지점명	측정방식	기록방식	전 원	관측간격	최소측정	전 송	비 고
춘 당	전도형	디지털우량계	상용전원	1시간	0.5mm	T/M	
봉 덕	전도형	디지털우량계	상용전원	1시간	0.5mm	T/M	
매 일	전도형	디지털우량계	상용전원	10분	0.2mm	PCS실시간	신 설

Table 3.2.14 하천수위관측소 현황(섬강 시험구역)

지점명	관측기기	전 원	관측간격	최소측정[mm]	전 송	비 고
매 일	부자식	상용전원	1시간	10	T/M	
매 일	압력식	태양전지	10분	1	PCS실시간	신 설
농거리교	압력식	태양전지	10분	1	PCS실시간	신 설
소군교	압력식	태양전지	10분	1	PCS실시간	신 설

－ 이동 실험구역 운영 사례 조사

- 시험구역의 현장 관측항목은 강우량, 하천수위, 저수지 수위이며 이들 관측항목에 대해 각각의 관측기기를 현장에 설치하여 농촌구역 수문 관측망을 구성하였다.



Fig. 3.2.36 이동 시험구역도

Table 3.2.15 관측소 관측기기 내역(이동 시험유역)

구 분	지점명	설 치 세 부 내 역
강우량관측	용 덕	- 위 치 : 용덕저수지 취수탑 - 형 식 : 전도형 자기우량계
	미 산	- 위 치 : 미산저수지 사통부 - 형 식 : 전도형 자기우량계
	이 동	- 위 치 : 이동저수지 관리사 - 형 식 : 전도형 자기우량계
	은 산	- 위 치 : 은산양수장 인입수로부 - 형 식 : 전도형 자기우량계
수위관측 (저수위)	용 덕	- 위 치 : 용덕저수지 취수탑 - 형 식 : 초음파식 수위계
	미 산	- 위 치 : 미산저수지 사통 - 형 식 : 압력식 수위계
	이 동	- 위 치 : 이동저수지 취수탑 - 형 식 : 초음파식 수위계
수위관측 (하천수위)	덕 성	- 위 치 : 덕성교 (용덕저수지 유출하천) - 형 식 : 초음파식 수위계
	재 인	- 위 치 : 재인교 (미산저수지 유출하천) - 형 식 : 초음파식 수위계

- 시험유역의 강우량관측소는 총 4개소이며, 시험유역의 상류유역에 3개소 (용덕저수지, 미산저수지, 이동저수지) 그리고 관개지역에 1개소 (은산양수장)가 설치되었다. 강우량 관측소의 강우량계 형태는 데이터로거 (data logger)가 자체 내장된 전도형 자기우량계 로써 관측지점의 지점강우량을 측정하도록 하였다.
- 이동시험유역의 저수위관측은 총 3개소로 이동저수지와 이동저수지 상류에 위치한 용덕 저수지, 미산저수지에 수위계가 설치되었다. 저수위관측지점의 수위계 형태는 취수탑이 있는 용덕저수지와 이동저수지에는 초음파식 수위계가 설치되었고 사통형태인 미산저수 지는 압력식 수위계가 설치되었다. 저수위관측지점의 관측시설 전원은 태양열을 전원으 로 하는 태양전지를 사용하였고 관측자료의 저장은 수위계 출력부에 데이터로거를 부착 하여 관측자료를 일정기간 기록, 저장하도록 하였다. 2003년 9월부터는 CDMA를 이용 한 자료전송이 가능한 수위계를 설치하여 병행 운영하고 있다.
- 하천수위관측은 2개소로 이동저수지로 유입하는 주요하천 2개소에 수위계를 설치하였 다. 하천수위관측소의 수위계 형태는 초음파식 수위계이며 센서부를 하천 주 흐름부의 상부 교량 교각부에 설치되었다. 용덕저수지에서 방류되어 이동저수지로 유입하는 진위 천의 수위관측은 덕성교에 설치하고 미산저수지에서 방류되어 이동저수지로 유입하는 진성천의 수위관측은 재인교에 설치하였다. 하천수위관측소의 전원공급은 덕성교의 경 우 한전전원, 재인교의 경우에는 태양전원을 사용하였고 관측자료의 저장은 수위계 출 력부에 데이터로거를 부착하여 관측자료를 일정기간 기록, 저장하도록 하였다. 덕성교의 경우 실시간자료전송장치가 설치된 압력식 수위계가 동시에 관측하고 있다.

Table 3.2.16 강우량관측소 관측기기 내역(이동 시험유역)

지점명	관측기기	측정단위[mm]	자료수집 전 원	설치 위치	기존 관측유무
용 덕	자기우량계 (전도형)	0.2	데이터로거 건 전 지	용덕저수지 (취수탑)	기존관측 (저수형원통식)
미 산	자기우량계 (전도형)	0.2	데이터로거 건 전 지	미산저수지 (관리사)	기존관측 (저수형원통식)
이 동	자기우량계 (전도형)	0.2	데이터로거 건 전 지	이동저수지 (관리사)	기존관측 (저수형원통식)
은 산	자기우량계 (전도형)	0.2	데이터로거 건 전 지	은산양수장 (관리사)	-



(a) 용덕



(b) 미산



(c) 이동



(d) 은산

Fig. 3.2.37 강우량관측소(이동 시험유역)

Table 3.2.17 수위 및 하천수위 관측내역(이동 시험유역)

구 분	지점명	관측기기	전원	설치위치	비 고
저수위	용 덕	초음파식수위계	태양전지	용덕저수지 (취수탑)	
	미 산	압력식수위계	태양전지	미산저수지 (사통부)	
	이 동	초음파식수위계	태양전지	이동저수지 (취수탑)	
하천수위	덕 성	초음파식수위계	한국전력	덕성교	용덕저수지 하류하천
	재 인	초음파식수위계	태양전지	재인교	미산저수지 하류하천



Fig. 3.2.38 저수위 및 하천수위관측소(이동 시험유역)

– 중랑천 실험유역 운영 사례 조사

- 중랑천 시험유역의 수문자료는 Fig. 3.2.39과 같이 서울시 수문관측시스템의 자료와 의정부, 국토교통부 및 기상청에서 운영 중인 지점에 대한 자료를 최대한 활용하여 운영하고 있다.
- 강우관측소는 국토교통부 산하 한강홍수통제소에서 관리 중인 퇴계원, 의정부, 장암, 우이, 상계 등 5개소, 기상청 관할로는 도봉, 동대문, 구리, 신곡동사무소 등 14개소가 설치되어 있으며, 그 외 종로구청, 부암동, 중랑구청, 휘경 빗물펌프장 등 17개 서울시 관할의 관측소와 양주동사무소, 의정부시청, 녹양동사무소, 송산동사무소 등 4개의 경기도 관할 강우관측소가 설치되어 있다. 또한 수위관측소는 국토교통부 한강홍수통제소에서 관할하는 중랑교, 상도교 수위표와 서울시의 홍수정보시스템에 의해 운영되고 있는 월계1교, 성동교, 노원교, 경기도 관할인 호장교, 동막교, 양주교, 신곡교 수위관측소 등 9개의 수위관측소가 운영되고 있다.

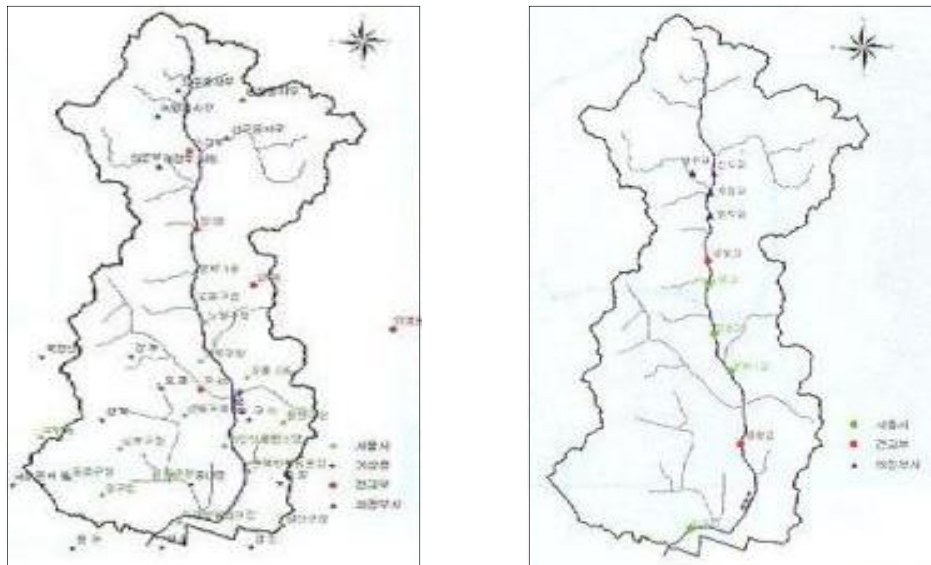


Fig. 3.2.39 강우량관측소 및 하천수위관측소 현황(중랑천 시험유역)



(a) 노원구청



(b) 월계1교

Fig. 3.2.40 운영 강우계(중랑천 시험유역)

– 대동천 실험유역 운영 사례 조사

- 대동천 시험유역내에 강우량관측소는 없고, 대전기상대가 인근에 위치하고 있어, 유역내 2개소(양지초등학교, 대전전자기계고등학교)에 새로이 신설하는 것으로 계획하였다.

Table 3.2.18 강우량관측소 현황(대동천 시험유역)

관측소	관측종별	관할기관	기존/신설	비고
대전	T/M	기상청	기존	유역외
양지초등학교	PCS실시간	국토교통부	신설	유역내
대전전자기계고등학교	PCS실시간	국토교통부	신설	유역내



Fig. 3.2.41 계획망(대동천 시험유역)

- 대동천 내 기존의 수위관측소는 없고 갑천의 회덕 수위관측소가 있다. 따라서 대동천내에 본류를 상류로부터 판암2교, 무명교, 칠갑교에 각각 3개의 수위관측소를 신설한다. 자료의 결측방지와 보완을 위해서 앞서 언급한 수위계 중 2가지를 병행하여 설치하기로 하였다. 최근 새로이 개발된 영상수위계의 사용을 적극 검토하도록 하였다.

Table 3.2.19 수위관측소 현황(대동천 시험유역)

수위국	위치	신설/기준	비고
판암2교	신설	-	
무명교	본류 무명교	신설	-
철갑교	본류 철갑교	신설	수질국 병행

- 대동천과 대전천의 합류부에 현암수위관측소가 위치하고 있다. 시험유역 내에는 철갑교 수위관측소에 수질관측소를 동시에 설치하는 것으로 계획하였다.

다. 시험유역을 선정하기 위한 수문 관측소 현황 파악

- Cosmic-ray 관측시스템을 설치하여 검증하기 위해서는 다수의 수문관측소가 검증유역에 위치하는 것이 바람직하다.
- 이에 본 연구에서는 이와 같은 점을 고려하여 우리나라에서 설치·운영되고 있는 수문자료 항목별 수문관측소 현황을 파악하였다. 본 연구에서는 한국수문조사연보, 기상연보 등에 수록된 강수량, 수위·유량 등과 같은 수문자료 생산 이력과 위치정보를 기관별로 수집·분석하였다. Fig. 3.2.42-48은 수문·수자원자료가 생산되는 관측소의 위치도로서 환경부, 4대강 홍수통제소, 국립환경과학원, 기상청, 한국수자원공사, 한국수력원자력, 한국건설기술연구원, 국립농업과학원의 관측소를 포함한다. 이중 지하수 관측소는 한국수자원공사의 국가지하수정보센터(National Groundwater Information Center; NGIC), 수질관측소는 환경부 물환경정보시스템(Water Environmental Information System)의 위치 정보를 토대로 하였다.
- 수문관측소 현황을 조사한 결과, 우리나라에서는 총 2,899개소(홍수통제소 876, 국립환경과학원 1,026, 기상청 93, 한국수자원공사 810, 한국수력원자력 24, 한국건설기술연구원 11, 국립농업과학원 59)의 관측소가 운영되고 있을 것으로 분석되었다.

Table 3.2.20 기관별 수문관측소 현황

Station	ME			KWATER	KHNP	KICT	NAAS	total
	FCO	NIER	KMA					
rainfall	424		93	181	11	8		717
stage-discharge	392			58	13	3		466
SM	10			6			59	75
ET	10			2				12
ground water				552				552
water quality		1,026						1,026
sediment	40			11				51
total	876	1,026	93	810	24	11	59	2,899

* ME(환경부), FCO(홍수통제소), NIER(국립환경과학원), KMA(기상청), KWATER(한국수자원공사), KHNP(한국수력원자력), KICT(한국건설기술연구원), NAAS(국립농업과학원)

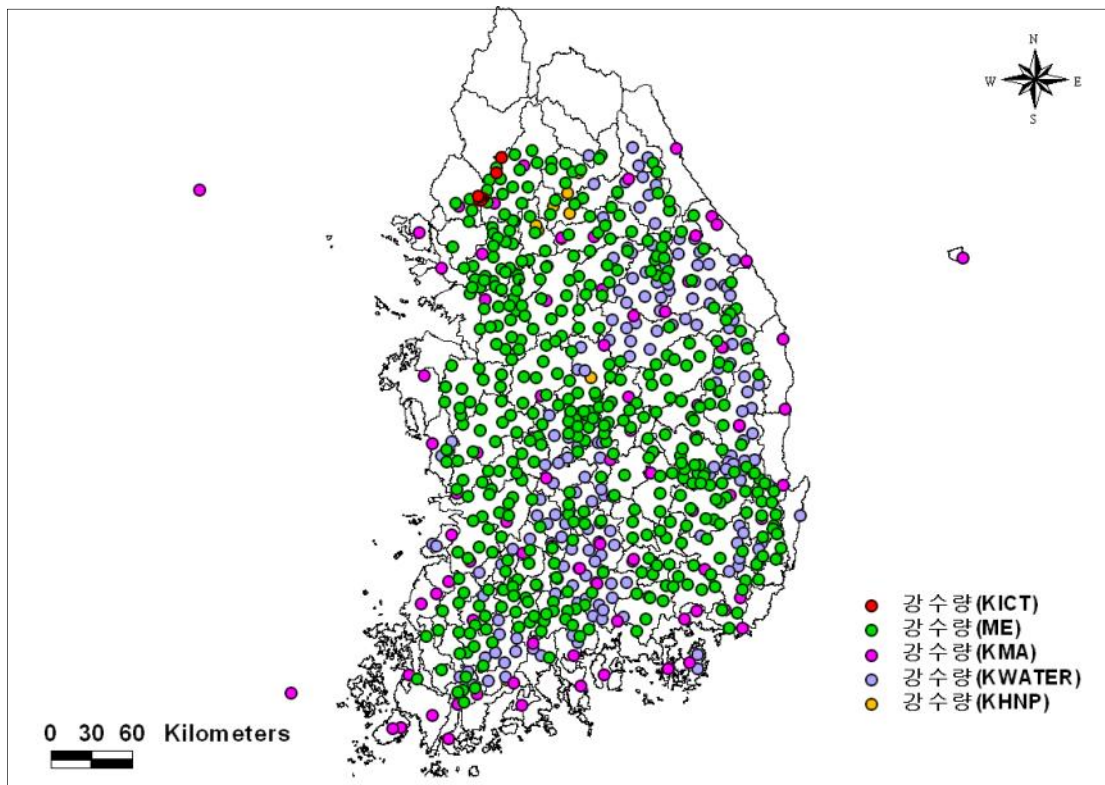


Fig. 3.2.42 강수량 관측소 위치도 (기관별)

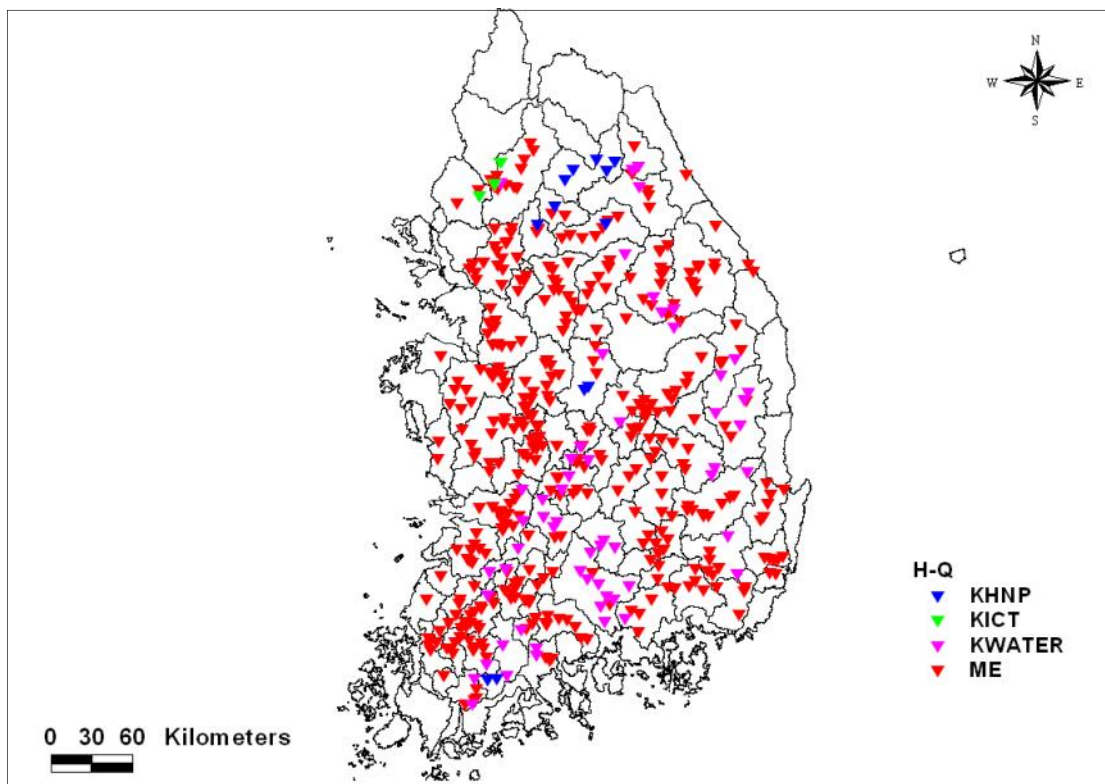


Fig. 3.2.43 수위-유량관측소 위치도 (기관별)

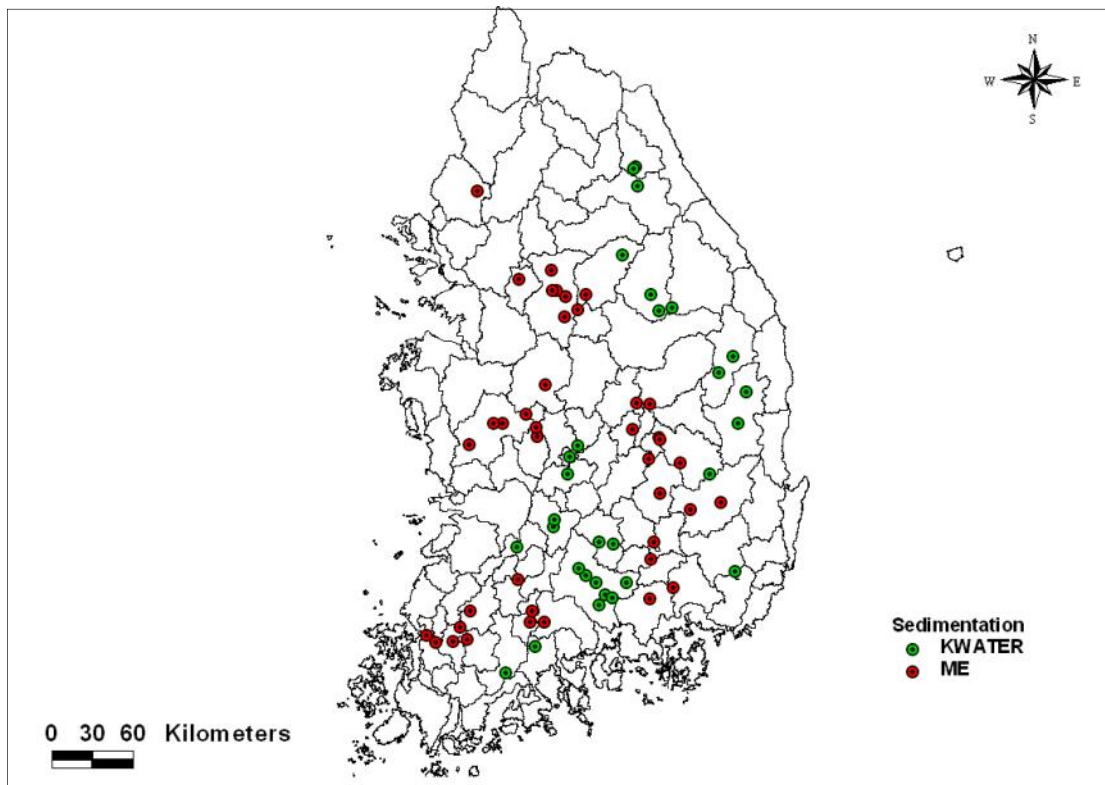


Fig. 3.2.44 유사량관측소 위치도 (기관별)

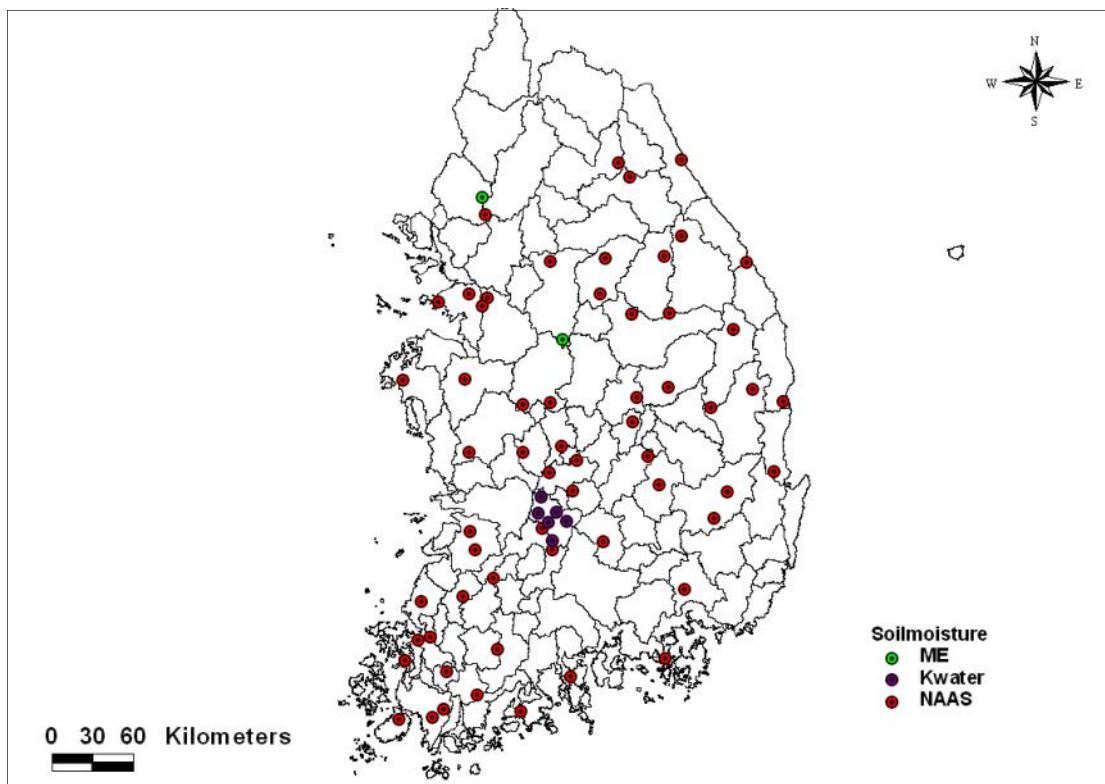


Fig. 3.2.45 토양수분량 관측소 위치도 (기관별)

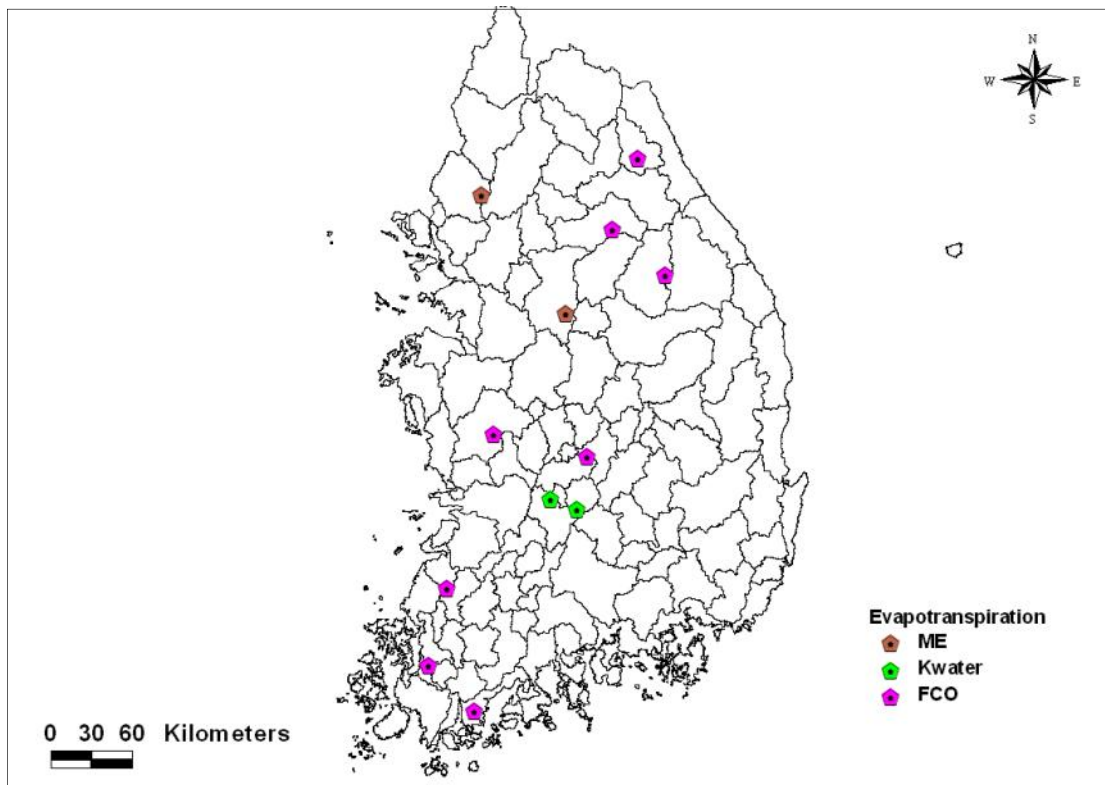


Fig. 3.2.46 증발산량 관측소 위치도 (기관별)

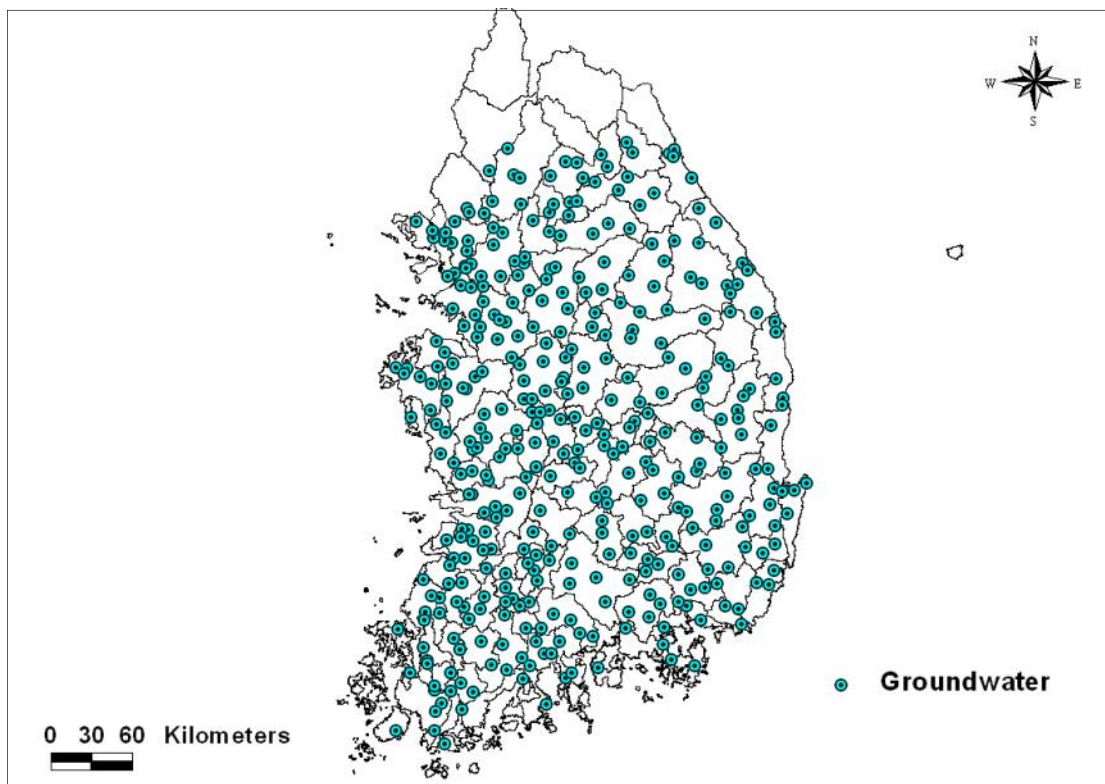


Fig. 3.2.47 지하수 관측소 위치도 (한국수자원공사)

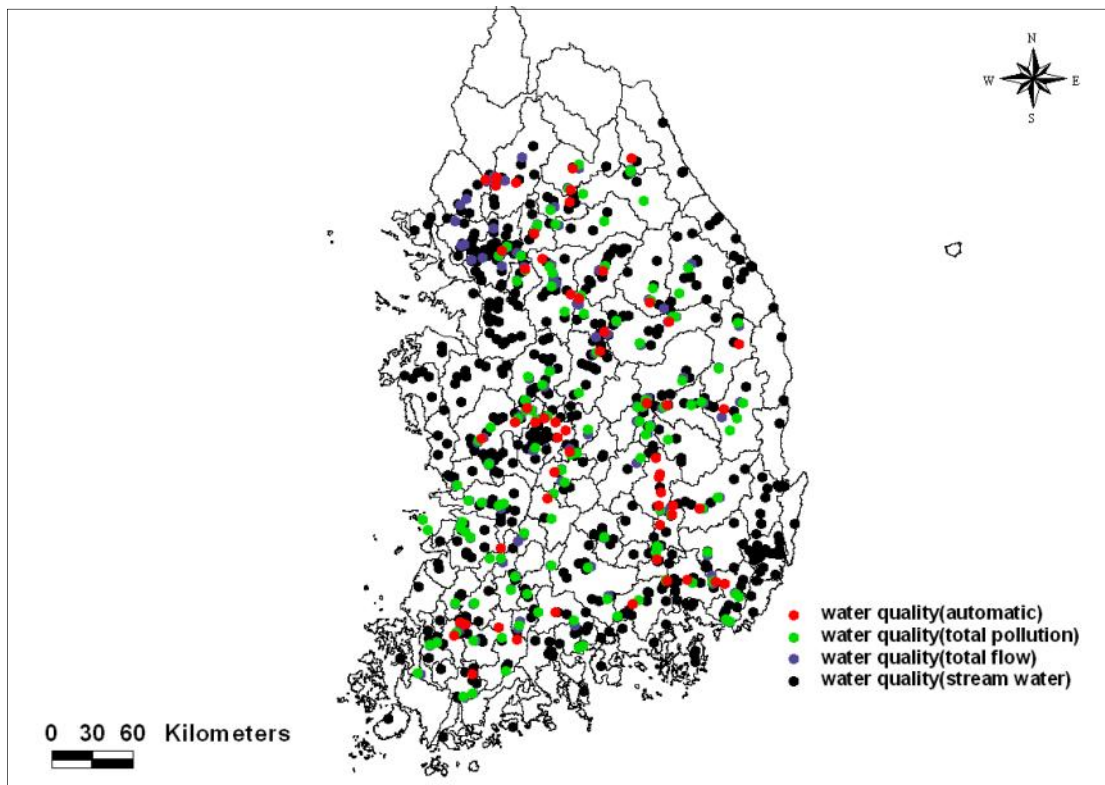


Fig. 3.2.48 수질 관측소 위치도 (환경부)

라. 시험유역 선정 및 토양수분 계측시스템 위치 확정

1) 시험유역 선정 조건

- Cosmic-ray 기반의 토양수분량 설계 시스템의 검증은 물수지 분석이 중요한 항목이므로 이를 충족하기 위한 다양한 수문관측소를 필요로 한다.
- 이에 따라 본 연구에서는 환경부 등 관련기관에서 운영하고 있는 토양수분량 및 증발산량 관측소 등도 함께 조사하였다. 이뿐만 아니라 Cosmic-ray 기반 토양수분량 설계 시스템은 최적화 과정이 수반됨으로 다수의 미기상자료를 필요로 한다.
- 우리나라에서는 미기상자료가 증발산량 관측소에서도 생산됨으로 본 연구에서는 증발산량 관측소, 강수량관측소, 유량관측소 순에 주안점을 두고 검증 사이트를 선정하였다.
- 시험유역 선정과정은 시험유역 선정 계획을 수립하는 단계는 연구개발의 성공을 좌우하는 요인으로서 유역의 대표성, 수문자료의 활용성 등을 종합하여 계획을 세웠다.
- 위의 절에서처럼 시험유역의 선정 사례를 분석한 후 연구의 특성상 다양한 기상관측기기를 설치하여 운영할 수 없기 때문에 기존의 수문자료의 활용성 측면을 고려하여 선정하였으며 특히 되도록 물수지 분석이 가능한 관측기기들이 있는 지역을 선정하였다.
- 또한 본 관측소의 CRNP가 관측이 가능함을 고려하였으며, 대표성 분석 측면도 확인해보았다. 궁극적으로 이러한 관측소에서 나온 산출물들에 대한 자료 활용 가능성을 고려해보았으며, 이러한 관측소가 장기간 유지되도록 유지관리가 용이한 지점에 설치하였다.

2) 시험유역 선정

- Cosmic-ray 선행연구 결과에 따라 시험 유역 대상지는 기상 자료 등을 함께 이용할 수 있는 지점에서 선정되어야 함으로, 본 연구에서는 각종 기상 관측이 가능하며 CRNP 센서와 관측 범위가 비슷한 Flux-tower 관측소가 운용 중에 있는 설마천, 청미천, 무안, 이인, 고창, 장흥 관측소를 우선 후보지로 선정하였다.

- Fig. 3.2.49는 후보지에서 수집한 토양샘플을 수집하여 USDA에서 제시한 삼각토양분류법으로 나타내었다.
- 고창, 이인, 장흥 후보지는 Flux-tower를 2016년도에 설치하였으나 풍향풍속계, 자료집록기 등의 문제가 있었으며 현재 센서 수리 후 가운영 상태이기 때문에 시험 구역에서 제외 되었다. 따라서 나머지 관측소를 우선적으로 위성 및 재분석 자료를 활용하여 현장 관측 자료가 정상적으로 잘 관측이 되고 있는지 보조적으로 확인하였으며, 전반적으로 모든 관측소에서 지점, 위성, 모델링 자료들과 함께 비교해본 결과 우수한 결과들을 보였으며 안정적으로 데이터 관측이 가능할 것으로 우선 판단하였다(Fig. 3.2.50).
- 현장조사 결과 무안 관측소는 농경지에 설치되어있는 관측소로서 논지에 관개를 하고 있어 구역의 수문변동성을 확인하기 어려운 지점이었다. 또한 2018년 태풍으로 인해 타워가 전도되어 관측소를 배재하였다. 청미천 또한 인근 지역이 논으로 이루어져 있어, 관개 등의 영향으로 토양수분 관측 자료의 활용도가 떨어지고 수표면에 의한 Cosmic-ray 자료 오염이 우려되었다.
- 최종적으로 설마천 구역의 Flux-tower를 선정하였는데, 설마천은 오랜 기간 동안 수위, 유량, 토양수분, 증발산, 강우 관측소를 운영하였으며 다양한 수문 기상인자를 획득할 수 있어 최종적으로 실험 대상 구역으로 선정하였다.

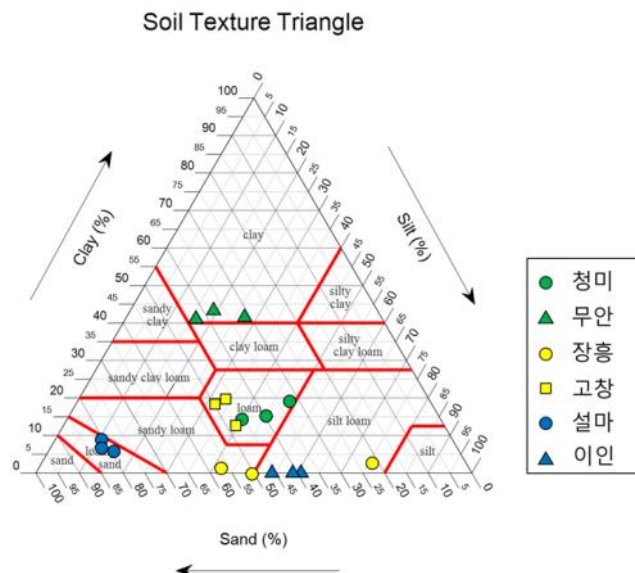


Fig. 3.2.49 각 관측소별 USDA 삼각토양분류법에 따른 토양특성 분석

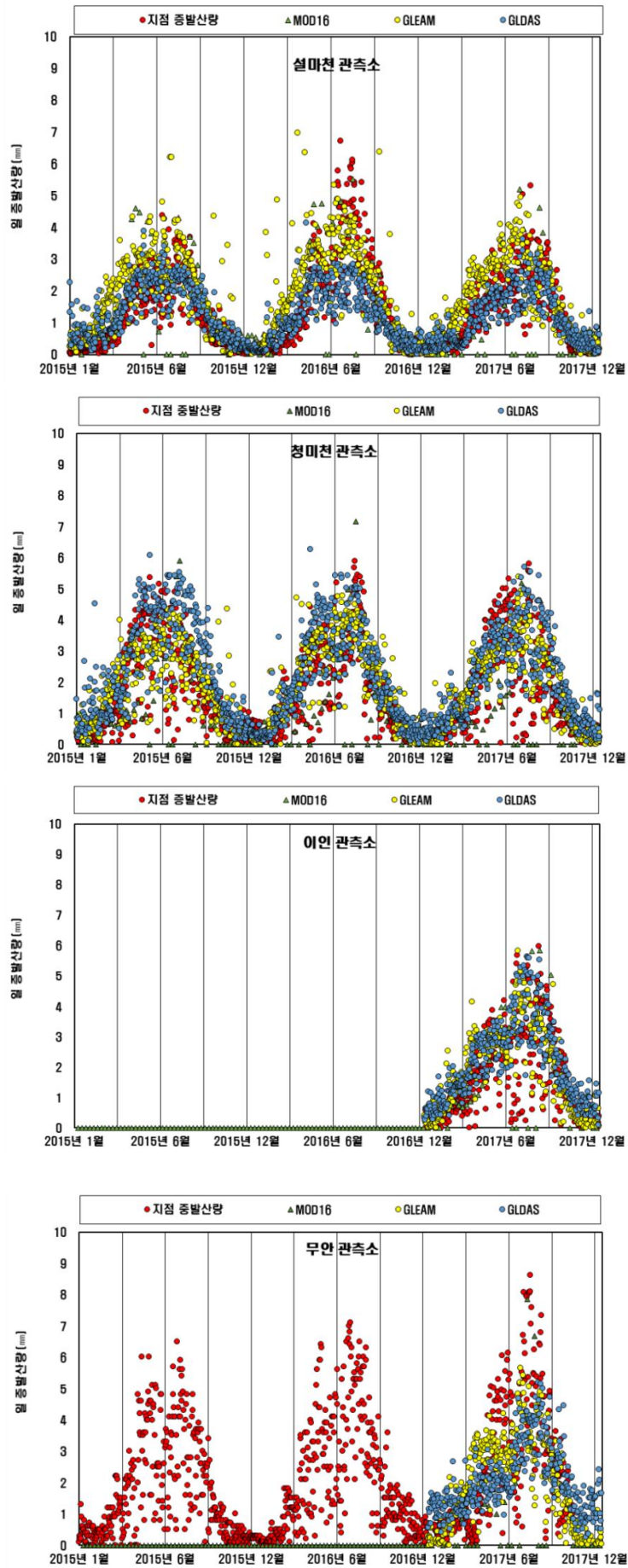


Fig. 3.2.50 flux tower 관측소 인공위성(MODIS), 지형모델(GLDAS, GLEAM) 자료 시계열 분석

마. 토양수분 조사 이론 및 방법

- 전 세계적으로 토양수분 측정 방법에는 일반적으로 Table 3.2.21의 방식을 활용하여 측정하고 있다. 본 연구에서는 그중 가장 정확도가 높으면서 널리 쓰이는 건토중량법과 전자기적 방법을 활용한 유전율식 (TDR, FDR)센서를 이용하였으며 설치 전 우선 이론적인 내용을 다루고자 한다.

Table 3.2.21 토양수분 측정방법

방법		내용
지 상 관 측 법	건 토 중 량 법	○ 현장에서 토양샘플을 채취하여 무게를 측정한 후 건조기에서 건조시킨 후 다시 무게를 측정하는 방식임 ○ 경제적, 직접적인 수분측정 방법은 토성이나 염분에 영향을 받지 않는다는 장점을 가지나 다음과 같은 단점이 있음 - 균질한 토양에서 대표성을 가지는 샘플을 획득하기 힘들 - 돌이 많이 포함된 토양에 대한 샘플링이 어려움 - 관련 자료의 시계열을 얻기 위하여 엄청난 작업량이 필요함 - 보다 건조한 토양에 대해 매우 높은 관측오차를 가짐 - 샘플지점을 훼손시킴
	전 자 기 적 방 법	○ 습윤한 토양의 유전체적인 특성을 이용하여 측정하는 방법으로서, 주로 금속으로 만들어진 탐침으로부터 설치된 토양층에 대해서 전자기파를 발산하면 대응하는 탐침이 전자기파를 탐지하게 되며, 이 파의 진행시간 (TDR) 또는 주파수 (FDR)를 이용하여 토양수분량을 측정하는 방법임 ○ 장점은 시료가 교란되지 않고, 안전성이 높으며, 높은 정확도를 갖는 것이나 장비의 가격이 비교적 고가에 속함 ○ 유전상수를 이용하는 또 다른 방법은 GPR (Ground Penetrating Radar)을 이용한 방법으로서 고주파의 반향을 이용한다는 점에서 원리는 TDR 센서와 유사하나 TDR 센서가 토양 속에 직접 매설되는 것과는 달리 GPR은 토양 속에 매설하지 않고, 지표상부에서 주파를 송신 및 수신하여 측정함 ○ 고정된 장치가 아니기 때문에 TDR 센서에 비해 광역적인 범위에서 사용이 가능하나, 정확성은 상대적으로 떨어지는 것으로 보고되고 있음
	토 양 수 분 장 력 측 정 법	○ 수분장력계는 다공성컵과 진공게이지 및 압력변환기와 같은 압력관측기로 구성되어 있음 ○ 흙이 수분을 함유하고자 하는 에너지나 모관장력을 측정하여 토양분량을 산정하는 방식임 ○ 비교적 저렴한 가격과 관측방법이 쉬우며 관측시 토양의 교란을 최소화한다는 장점이 있으나, 관측치를 토양수분량으로 환산하기 위해 토양수분 보유 곡선을 사용해야하며 토양수분의 정량적 관측을 위해서는 다른 방법과 병행해서 사용해야 함

	원자력 방법	○ 원자력 방법에는 중성자분산법과 감마선감쇄법이 있으나 중성자분산법이 일반적으로 이용되고 있음 ○ 높은 에너지를 가진 빠른중성자를 방사하여 토양층이 내포한 수소원자의 탄성 충돌로 인한 지체된 중성자들을 관측하여 토양수분을 산정하는 방법임
원격 관측 방법	Passive 기법	○ 본 방법은 마이크로웨이브 파장대 (L-, C-, X-band)를 이용하여 토양수분량의 변화를 관측하는 방법임 ○ L-band 토양수분측정치는 약 7 cm에서의 토양수분을 나타낼 수 있고, C-band 토양수분측정치는 약 2 cm 깊이의 토양수분을 나타냄 ○ C-band 토양수분측정치는 토양수분량이 식생피복의 영향에 얼마나 민감한지를 나타냄
	Active 기법	○ Active 관측기기로는 Synthetic Aperture Radar (SAR) 장비가 있으며, 큰 안테나 장비 없이도 관측 목적에 따른 분해능 조절이 용이하다는 장점이 있음 ○ 마이크로웨이브 후방산란은 토양표면의 거칠기, 토양수분, 지표면의 식생상태에 영향을 받음 ○ Active 기법에 의해서 관측된 산란 값을 이용해 토양수분량을 산정하는 방법에는 회귀식, 인공신경망 기법 등이 있음

1) 건토중량법

- 이 방법은 토양수분량의 측정에 가장 대중적으로 이용되는 방법이며, 가장 정확성이 높은 방법 가운데 하나로서 다른 측정방법의 보정에 자주 이용된다.
- 토양시료채취 : 적절한 토양시료를 채취하기 위해서는 우선적으로 설계가 수행되어야한다. 가장 합리적인 토양시료 채취 방법은 조사자에게 표본수를 줄이고 전체 모집단의 특성에 대해 합리적인 추정치를 제공해준다. 즉, 적절한 장비, 기법과 토양시료채취 설계 방법의 선택은 모집단의 특성을 추정하기 위해 우선시 되어야하는 조건이다 (Carter and Gregorich, 2006).
- 채취 장비 : 자연 상태의 토양 특성을 분석하기 위해서는 샘플링 장비가 중요하다. 토양이 되도록 교란이 일어나지 않도록 채취하는 것이 중요하다. 불교란 시료채취 장비는 대표적으로 샘플라이너시료 채취기 (sample liner)와 코어 샘플시료 채취기 (Core sampler)가 있다 (Fig. 3.2.51). 사용법은 확인하고자하는 토양에 오거 (auger)형태나 고무망치를 통해 샘플링을 강제로 주입하여 샘플링 안에 시료를 가득 채운 후 샘플링 마개로 밀봉하는 순으로 진행된다. 샘플 채취 장비는 크롬 (chrome)으로 도금된 장비나 스테인리스 스틸 (stainless steel)로 구성된 장비를 이용해야한다. 아연 (galvanized), 청동 (bronze), 황동 (brass)으로 도금된 공구를 사용할 경우 샘플을 오염시킬 수 있다. 또한 채취 후 마개는 고무 재질보다는 플라스틱 통을 권장한다.

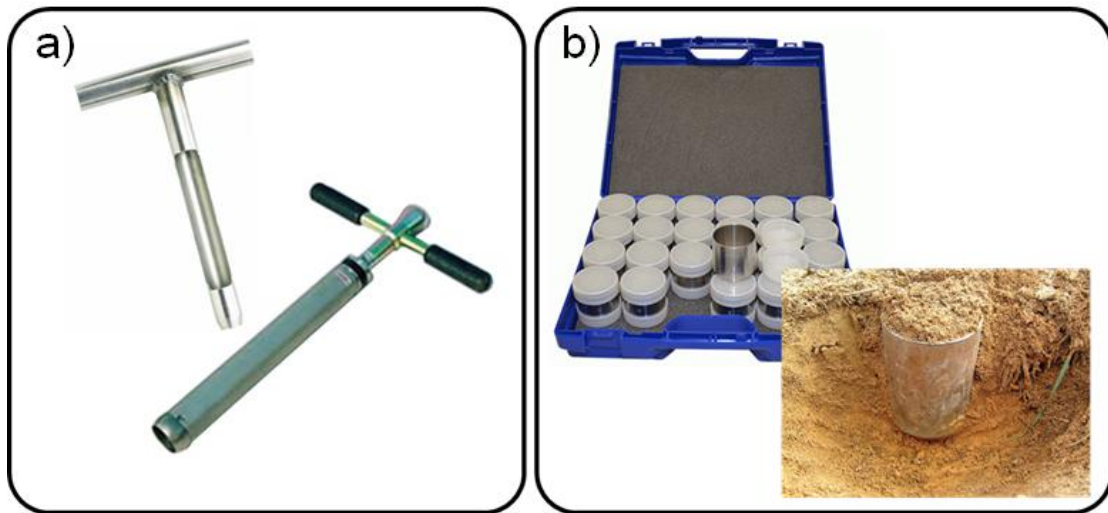


Fig. 3.2.51 a) Sample liner b) Core sampler (C&H)

- 채취 시간 : 샘플 채취 시기는 연중 언제든지 가능하나 되도록 강우가 발생할 시기에는 토양이 흐트러지기 때문에 피하는 것이 좋으며, 연단위로 채취할 경우 같은 시기에 이루어지게 가장 좋다. 채취하는 곳의 위치가 경작지일 경우 비료나 화합물을 사용한지 최소 30일 이후에 채취하는 것을 권장한다.
- 채취 깊이 : 토양의 채취 깊이는 관심 있는 분야에 따라 나뉘지며 제한은 없다. 하지만 샘플링이 너무 얕으면 유기물들이 토양 표면 근처에 집중되는 경향이 있기 때문에 토양 실험 결과에 오차가 발생할 확률이 높다. 또한 토양은 층화되기 때문에 일관성 있게 샘플을 채취하지 않으면 분석 결과에 오차를 발생시킬 확률이 높다.
- 채취 용량 : 채취 용량은 제한이 없으며 체적토양수분량 (Volumetric soil moisture)을 구하기 위해서는 우선 샘플링에 대한 용량을 숙지해야한다.
- 채취 제한 영역 : 채취한 샘플은 토양을 대표할 수 있는 부분에서 수행되어야하며, 샘플 채취 전 표면 파편을 제거해야합니다. 토양의 색깔, 경사, 배수, 과거 토지 사용이력 등으로 토양을 분류하여 채취 제한지역을 선정할 수 있으며, 현장조사 및 항공사진으로 도움을 받을 수 있다. 채취 제한은 아래와 같이 제시할 수 있다.
 - 깊은 고랑
 - 구조물 근처
 - 오래된 노반 또는 석회암 자갈길 근처
 - 상류에서 물이 안정적으로 흘러들도록 유도하는 수로(승수로)
 - 방풍이 발생하거나 눈이 일정지역에 쌓이는 지역
 - 유출 지역
 - 무수 질소를 포함한 비료가 놓인 지역
 - 주변 환경에 비해 비정상적인 지점
- 채취 방법
 - 단순 무작위 채취방법 (Simple Random Sampling method)
 - ◆ 단순 무작위 채취방법은 별도로 구역 분할을 하지 않으며 미리 정해진 표본 크기 외에는 제한이 없다 (Fig. 3.2.52). 무작위 표본은 모집단을 나타내지 않을 수 있고, 무작위 표본의 변동은 단순히 표본오차로 인한 것일 수 있기 때문에 임의표본을 수집하는 것이

다. 표본이 모집단을 진정으로 대표하기 위해서는 편차가 없이 무작위 표본 선택이 전제되어야한다.

- 단순 무작위 채취방법의 장점은 방법이 간단하며, 모집단에 대한 제한된 지식이 제한되어 있을 때 이용하기 좋다. 또한 비용이 효율적이고, 분류 오류가 없으며, 상대적으로 균질한 (homogeneous) 지역에 매우 유용하다. 반면에 단순 무작위 채취방법의 단점은 표본이 불규칙하게 교란되거나 표본사이에 빈공간이 큰 경우 시간이 많이 걸린다는 점이다.

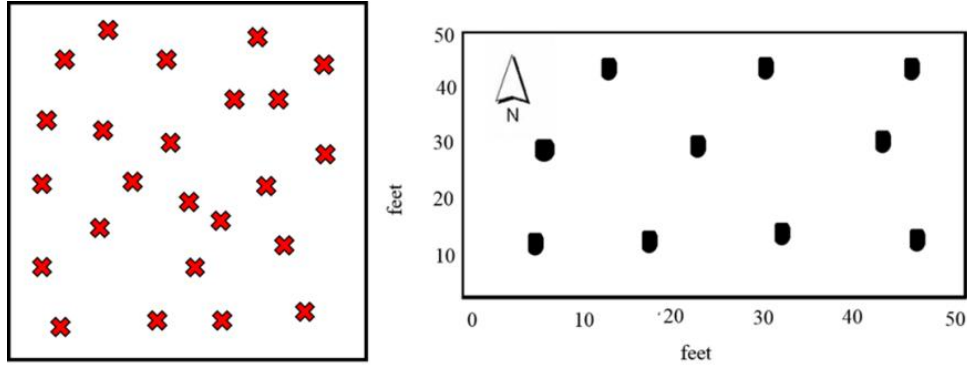


Fig. 3.2.52 단순 무작위 채취방법 모식도와 예시 (Abdul and Othman, 2016)

▪ 계통 채취방법 (Systematic Sampling method)

- 계통 채취방법은 사전에 결정된 계획에 따라 결정된 지점에서 일정한 간격으로 표본을 선택하는 확률 표본 추출의 유형이다 (Fig. 3.2.53). 표본 추출은 미리 정해진 격자의 중심 또는 교차점 (정렬식)에서 샘플을 채취하거나 또는 임의의 비정렬식으로 채취하는 방식이 있다. 단, 가능한 출발점은 무작위로 선택해야 한다.
- 계통 채취방법의 장점은 간단하고 체계적이며, 0 샘플채취의 포인트를 미래에도 쉽게 찾을 수 있으며, 표본들 간의 사이의 이동시간을 줄일 수 있다. 또한 이 채취방법 설계는 공간 및 시간적 추세를 결정하는데 유용하며, 연구영역을 정사각형, 직사각형, 원 등 정의된 격자로 나누어 용이하게 채취할 수 있다. 표본 추출이 완전히 무작위적인 것은 아니므로 변동에 대한 편차 추정치를 구할 수 없기 때문에 추정치의 정확도 정량화가 어렵다. 이 방법은 자료가 일종의 주기성을 가질 때 모집단을 나타내지 않을 수 있다.

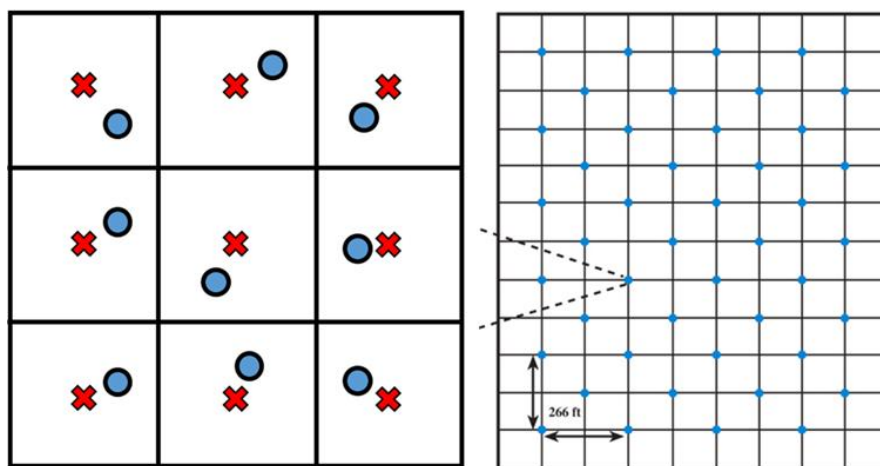


Fig. 3.2.53 a) 정렬식 b)비정렬식 계통 채취방법 모식도와 예시

▪ 계층화 채취방법 (Stratified Sampling method)

- 계층화 채취방법은 같은 계층을 가진 구역 내에서의 변동은 서로가 더 균질한 (homogeneous) 성질을 나타내며, 표본 추출을 토양 속성의 변화가 토양의 속성별로 나누어져 비슷한 속성의 토양을 가진 층간으로 나눈 것이다 (Fig. 3.2.54). 이러한 계층

영역은 공간적, 시간적 근접성에 기초하여 선택할 수 있다. 층을 선택하는 것은 토성 (soil texture)에 따라 지역을 부분적으로 나눌 수 있다. 각 계층에서는 단순 무작위 채취 방법을 사용하여 미리 결정된 수의 토양 표본을 수집한다. 계층화된 표본 추출은 모집단이 여러 개별 그룹이 포함된 영역에 특히 유용하다. 이 채취방법은 각각의 계층의 특성을 유지할 수 있기 때문에 통계적으로도 정확도가 더 높다고 여겨진다.

- ◆ 계층화 채취방법에 대한 단점은 계층을 설명하기에 어려움을 가지고 있으며, 관측 영역에 존재하는 유형에 대해 설명하기 어렵다. 또한 서로 다른 계층 간의 일관성 없는 관계를 보일 때가 있으며 표본 크기가 커질 수 있어 시간이 많이 소요가 된다.

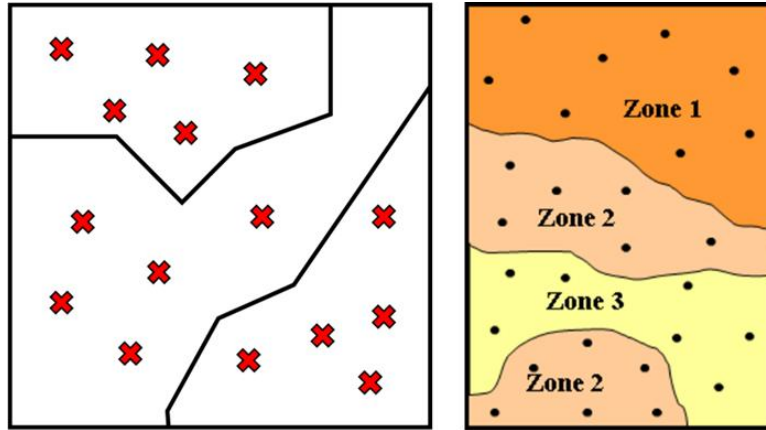


Fig. 3.2.54 계층화 채취방법 모식도와 층화 채취방법 모식도와 예시 (Richard and Gary, 2009)

■ 집락 채취방법 (Cluster Sampling)

- ◆ 집락 채취방법은 그룹 또는 무리에서 미리 결정된 수의 샘플 수집하는 방법으로써, 개별 샘플을 선택하지 않기 때문에 단순 무작위, 계통, 계층화 채취 방법과는 다르다 (Fig. 3.2.55). 계통 채취방법처럼, 시작 샘플을 무작위로 수집한 다음, 무리의 사전에 결정된 분류나 정의에 기초하여 무리에 포함할 수 있는 어떤 임계값에 근거하여 다른 샘플들을 식별한다.

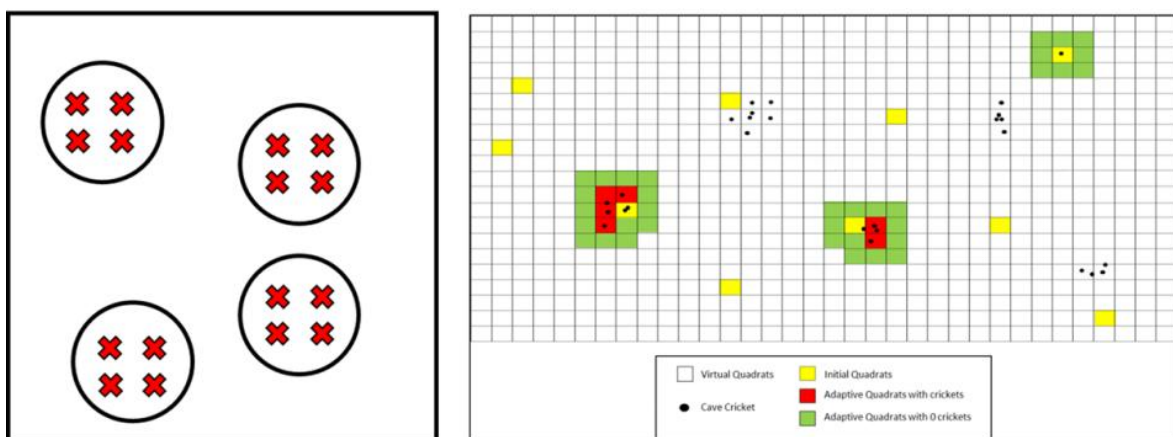


Fig. 3.2.55 집락 채취방법 모식도와 예시 (Helf et al., 2015)

■ 복합 채취방법 (Composite Sampling)

- ◆ 복합 채취방법은 여러 인접 지점의 표본을 하나의 균질 표본으로 결합하는 방법이다 (Fig. 3.2.56). 이 방법의 장점은 분석할 표본의 수가 감소하며 분석 비용의 감소와 표본의 대표성이 커진다. 이러한 방법은 주로 채취하기 어려운 지점이나 분석의 비용이 비쌀 경우 특히 유용하게 쓰인다.

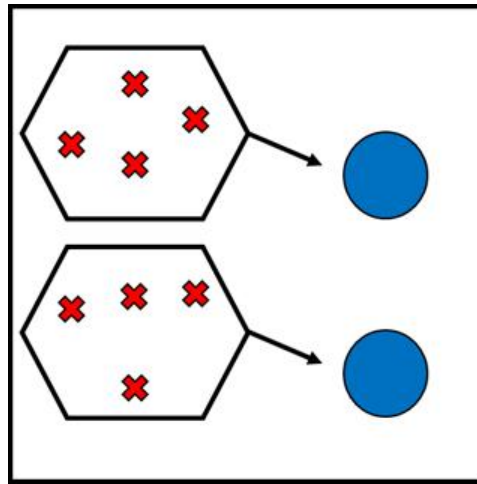


Fig. 3.2.56 복합 채취방법 모식도

■ 실내 토양실험

- ◆ 위의 절에서 채취해온 토양샘플은 실내에서 실험을 거쳐 최종 토양수분데이터를 산출할 수 있다. 우선 중량토양수분량과 체적토양수분량을 확인하기 위해서는 현장시료의 무게와 건조토양의 무게와 토양내의 용적밀도를 확인하는 것이 중요하다.
- ◆ 토양의 용적밀도
 - 자연 상태의 토양의 밀도는 일정 용적의 건조토양의 무게를 단위부피로 나눈 값으로서 무기질 입자 및 부식 외에 토양수분의 무게를 합한 것이다. 토양의 밀도는 입자밀도와 용적밀도로 나누어지며, 입자밀도란 공극을 고려하지 않은 입자만의 밀도로서 비중병을 사용하여 치환된 물의 무게를 기초로 산출하며 용적밀도는 단위부피당 건조토양의 무게로써 Eq. 3.2.2와 같이 계산한다.

$$\text{Bulk density}(\text{g}/\text{cm}^3) = \text{Dry soil weight}(\text{g}) / \text{Soil volume}(\text{cm}^3) \quad (3.2.2)$$

- ◆ 보통 토양별 용적밀도는 조밀한 토양일수록 용적 밀도 값이 높아짐을 Table 3.2.22를 통해 확인할 수 있다. 즉, 공극률과 반비례하며, 토양의 유기물의 함량이 상대적으로 높을 경우 밀도는 1보다 작기 때문에 토양의 용적밀도는 상대적으로 감소한다.

Table. 3.2.22 토양 속성별 용적밀도 값 (Zeri et al., 2018)

Texture Class	Bulk Density[g/cm ³]
Sand	1.65
Loamy sand	1.6
Sandy loam	1.55
Loam	1.5
Sandy clay loam	1.5
Silty clay loam	1.5
Silty Loam	1.5
Clay Loam	1.45
Silty clay	1.45
Sandy Clay	1.4
Clay	1.35

■ 토양시료 건조

- ◆ 토양시료는 105℃에서 건조평형에 이를 때까지 건조기를 통해 건조한다. 토양시료를 건조할 때 평형에 이르는 시간은 토양에 따라 상이하지만 보통 24시간에서 48시간 건조하여 무게를 측정 한다 (Fig. 3.2.57).



Fig. 3.2.57 토양시료 건조기 내부

- ◆ 다음과 같이 측정한 건조 토양무게와 샘플링의 부피를 나누어 용적토양수분량을 계산한 후 물의 무게 대비 건조토양의 무게를 계산한 값에 곱하여 체적토양수분량을 계산한다. 다음을 요약하자면 아래와 같다.

- ① 토양 부피 (V_1) 산정 및 샘플링 무게(w_1) 측정

$$V_1 = \text{샘플링}(\text{cm}^3) = 3.14 \times r^2 \times \text{ringheight}$$

- ② 토양 샘플 채취

- ③ 채취 직후 시료무게 측정(w_2)

- ④ 토양시료 건조 후 건조시료 측정(w_3)

- ⑤ 토양 내 물의 무게 ($w_3 - w_2$)

- ⑥ 용적밀도 산정 ($(w_3 - w_2)/V_1$)

- ⑦ 체적토양수분량 산정 ($(w_3 - w_2) \times (w_3 - w_1/V_1)$)

2) 유전율식 관측 방법

- 유전율식 방법은 토양의 유전성질을 측정하여 토양에 수분이 얼마나 포함되어 있는지 관측하는 방법이다. 토양은 다양한 물질로 구성된 복합체로써, 일반적으로 공기, 무기물 및 유기물 입자, 물로 이루어진다. 각각의 요소의 유전상수는 공기가 1, 무기물 및 유기물이 2~4, 물이 80으로서 물과 다른 요소의 유전상수 크기 사이에는 큰 차이가 있기 때문에 토양의 유전 성질은 토양수분량이 크게 좌우하게 된다. 이러한 원리를 바탕으로 토양의 유전 성질을 측정하여 토양수분을 측정하는 방식을 유전율식 방법이라고 하며, 이는 크게 TDR 센서와 FDR 센서로 나눌 수 있다.

○ TDR 방법

- TDR 방법 측정이론

- TDR 방법은 토양 속에 설치한 탐침에 신호를 보내고, 그 신호가 반향 되어 돌아오는 시간을 측정하여 토양수분량을 측정하는 방법이다. TDR 장비가 연결된 탐침(wave guide)으로 전자파 신호를 보내면 그 신호는 전송선(transmission line)을 따라 전달되고, 탐침의 끝에 도달한 전자파는 반사되어 TDR 장비로 다시 돌아오게 된다. 탐침의 시작점에서 출발한 신호가 반사되어 다시 탐침으로 돌아오기까지 소요된 시간을 주행시간이라고 하는데, 이는 토양의 유전성질에 영향을 받으며, 일반적으로 토양수분량이 높으면 주행시간이 길고 토양수분량이 적으면 주행시간이 짧아지는 결과를 보인다. 유전상수 K_a 는 주행거리와 주행시간에 관한 함수로 나타낼 수 있으며 그 식은 아래의 Eq. 3.2.3과 같다.

$$K_a = \left(\frac{tc}{L}\right)^2 \quad (3.2.3)$$

- 여기서 L 은 탐침의 길이 (cm)를 의미하며, t 는 주행시간 (nanoseconds, ns)을 의미하고, c 는 빛의 속도 (cm/ns)를 의미한다. 토양이 완전히 건조할 때의 유전상수는 일반적으로 2~4의 값을 보이며, 토양수분값이 25%인 경우에는 약 11~12의 유전상수를 보인다.
- 또한, 유전상수와 토양수분량 간의 관계는 토성에 따라 약간의 차이가 존재하기 때문에 아래의 Fig. 3.2.58와 같은 관계를 바탕으로 토양수분량을 결정하게 된다.

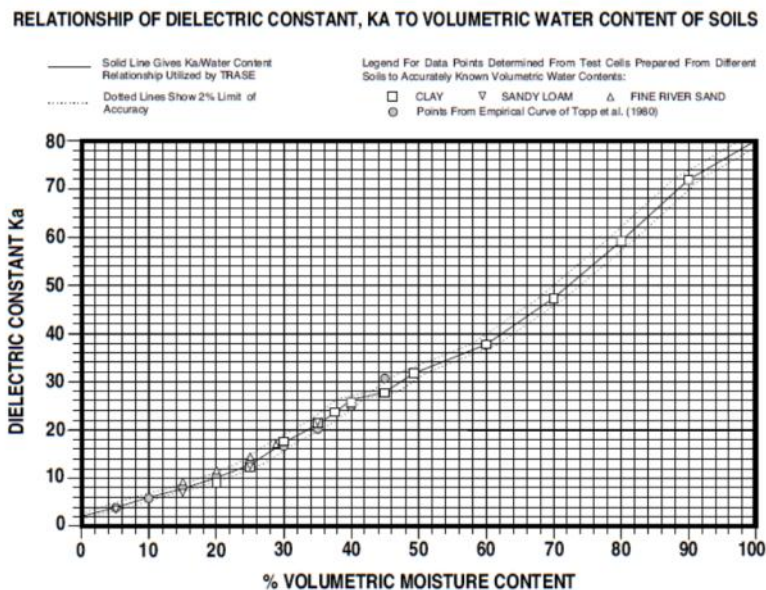


Fig. 3.2.58 TDR 장비에서 측정된 유전상수와 토양수분의 상관관계
(Soilmoisture Equipment Corp, minitraser manual 2012)

- TDR 방식 측정장비

- TDR 장비는 가장 우수한 토양수분량 측정장비로 알려져 있으나, 피코 초 단위로 반향파의 주행시간을 측정하는 정밀한 장비이기 때문에 회로구현이 복잡하며, 관측망의 구축을 위해서는 많은 추가 장비가 필요하기 때문에 상당한 비용이 요구된다. TDR 장비는 기본적으로 아래의 신호처리 역할 수행하는 본체와 전자파 신호를 토양수분량 지점까지 전달하는 탐침으로 구성되며, 아래의 Fig. 3.2.59가 가장 널리 사용되고 있는 TDR 장비이다.



Fig. 3.2.59 TDR 장비 본체 및 탐침

- TDR의 본체는 주행시간을 최고 피코 초 단위로 측정할 수 있어 매우 정밀하다는 장점이 있으나, 자체 배터리와 내장된 메모리의 용량이 작다는 단점이 있기 때문에 외부전원을 연결해 주고, 주기적으로 자료를 백업한 뒤 메모리를 초기화시켜 주어야 한다. 또한, 연결포트가 하나이기 때문에 관측망을 구축하여 토양수분량을 측정하기 위해서는 아래와 같이 다수의 탐침을 다중화기 (MultipleXer, MUX)에 연결한 뒤 이를 TDR 본체와 연결하는 방식으로 관측망을 설치해야 한다.
- 본 연구과제에서 사용된 TDR 장비는 가장 정확성이 높다고 평가되는 Soil Moisture Equipment사의 minitrace 제품으로, 아래의 Fig. 3.2.60과 같이 배터리 및 MUX를 연결하여 운영하였다.



Fig. 3.2.60 설마천 유역 TDR 관측소의 MUX와 배터리

○ FDR 방법

– FDR 방식 관측이론

- FDR 방법은 토양 속에 설치한 센서를 통해 토양의 유전성질에 따른 전기 신호의 주파수 변화를 관측해 토양수분량을 측정하는 방법이다. FDR 센서는 아래의 Fig.3.2.61과 같이 일정한 주기를 갖고 시간에 따라 부호(방향)가 바뀌는 교류 전압을 발생시키며, 일반적으로 100 Mhz의 주파수를 가진다. FDR 센서의 본체와 연결된 센서는 아래의 Fig. 3.2.62와 같이 하나의 회로와 같이 작동하는데, 기기의 본체는 배터리의 역할을 하며, 센서는 Capacitor의 역할을 수행한다고 이해할 수 있다.
- 센서는 두 개의 전기판으로 이루어져 있는데, 약 100 Mhz로 전기진동 (Electric oscillation)하는 전기신호가 센서의 끝에 도달하면 토양의 유전성질에 따라 3-100 MHz

이내의 주파수를 지닌 전기신호로 변해 되돌아오게 된다. 일반적으로 토양수분량이 높으면 주파수가 커지며, 토양수분량이 낮으면 주파수가 낮아지는 특성이 나타난다.

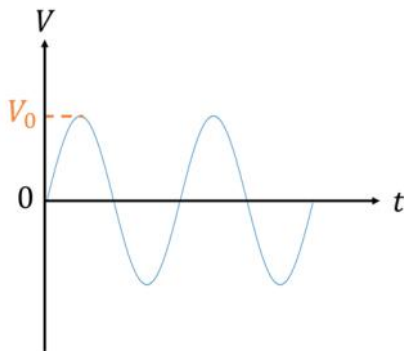


Fig. 3.2.61 교류전압의 예시

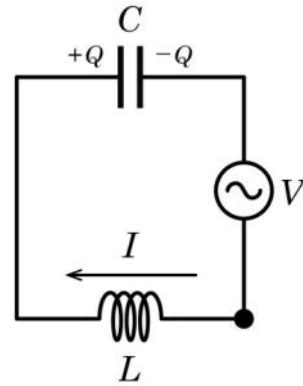


Fig. 3.2.62 Capacitor를 포함하는 회로의 예시

- 주파수 변화를 바탕으로 FDR 로거에서 유전상수를 결정하며, 유전상수 (ϵ)와 θ 는 토양수분량 (Gravimetric)은 교정을 위한 매개변수와 특정 상수로 표현할 수 있다. 본 과제에서 사용한 센서는 Meter (Decagon 합병)사의 5TM 인데, 본 사에서는 해당 기기 사용 시 매개변수 a 와 b 를 아래의 Table 3.2.23과 같이 제시하고 있다.

Table 3.2.23 Meter사에서 제시하는 토양수분량 산정식의 매개변수 값

Material	Parameters of the calibration equations
Mineral soil	$\theta = 4.3 \times 10^{-6} \epsilon_a^3 - 5.5 \times 10^{-4} \epsilon_a^2 + 2.92 \times 10^{-2} \epsilon_a - 5.3 \times 10^{-2}$
Potting soil	$\theta = 2.25 \times 10^{-6} \epsilon_a^3 - 2.06 \times 10^{-3} \epsilon_a^2 + 7.24 \times 10^{-2} \epsilon_a - 0.247$
Rockwool	$\theta = 1.68 \times 10^{-3} \epsilon_a^2 + 6.56 \times 10^{-2} \epsilon_a + 0.0266$
Perlite	$\theta = -1.07 \times 10^{-3} \epsilon_a^2 + 5.25 \times 10^{-2} \epsilon_a - 0.0685$

- 본 연구 과제에서는 설치 지정 인근의 토양 시료를 채취해 토성, 토양용적률과 유기물을 분석한 결과 산악지역으로 구성되어 Sand의 함량이 80%이상을 나타내고 있으며, 토양 용적률은 1.0 g/cm^3 내외로 나타났다(Table 3.2.22). 이러한 근거를 통해 mineral soil로 판단하고 calibration을 진행하였다.
- FDR 방식 측정장비
- FDR 센서는 데이터 로거와 센서로 구성되며, 본 연구과제에서는 아래의 Fig. 3.2.63과 같은 METER 그룹의 데이터 로거와 5TM 센서가 사용되었다.

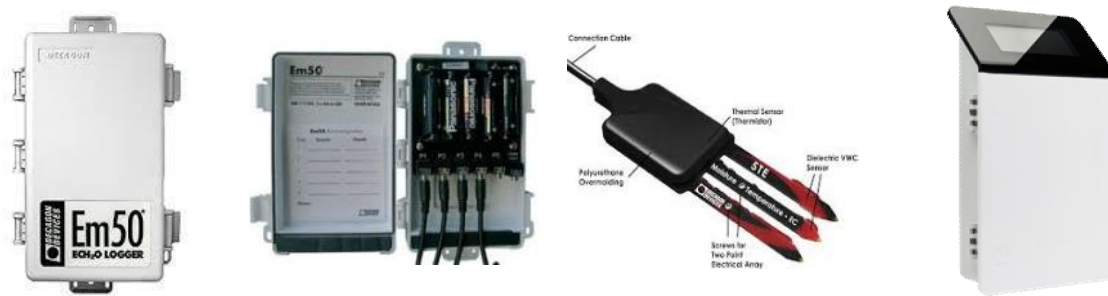


Fig. 3.2.63 FDR방식 데이터로거와 센서

- 데이터로거는 전기신호를 발생시키고 토양수분량을 관측해 기록하는 기능을 하며, 센서는 전기신호를 토양수분량 조사지점까지 전달하는 역할을 한다. 본 연구에서 사용된 장비는 TDR 장비에 비해 가격이 싸고 관리가 쉬우며, 설치가 간단하다는 장점이 있지만, 측정반경이 10 cm의 구형 반경을 대상으로 5 cm 반경에 약 95%의 영향이 있다는 공기의 개입에 측정결과가 쉽게 영향을 받을 수 있다는 단점이 있다.
- FDR 센서는 1차 연도와 2차 연도 두 번에 걸쳐 설치를 수행하였으며, 센서는 1차 연도와 2차 연도 모두 Decagon (Meter와 합병)사의 *ECH₂O*를 설치하였다. 데이터로거는 1차 연도에는 METER그룹의 Em50제품을 설치하였으며, 2차 연도에는 같은 제조사의 ZL6 제품을 사용하였다. ZL6 제품에 관한 자세한 설명은 매뉴얼에서 확인할 수 있다.

바. 계측시스템 설계, 시험 및 설치

- 토양수분량은 강수량, 유량 자료 보다 시공간적으로 변동이 매우 크기 때문에 실제로 관측소의 밀도는 타 수문관측소보다 높아야 한다. 특히 토양수분량은 토양수분을 측정해야 하는 것으로 지질학적인 조건, 수문학적인 조건, 식생의 분포, 토양속의 흐름구조 등이 복합적으로 영향을 주기 때문에 명확한 관측소 배치에 대한 기준을 수립하기가 어려우며, 관측 목적에 따라 배치 또는 위치를 선정하게 된다. 토양수분량 관측소 배치 및 위치선정 기준은 「수문조사 시설의 설치환경 및 유지·관리와 수문자료의 품질관리 기준」을 참고하여 본 연구의 계측시스템 설계에 기준을 아래와 같이 세웠다.
 - 주변지역의 토양·지질·식생·기상 등을 최대한 대표하는 곳으로 선정한다.
 - 비교적 균질한 토양층이 충분히 깊게 발달되어 토양수분의 수평 및 수직의 방향이 공간적 거동을 관측할 수 있는 곳으로 선정한다.
 - 관측시설물의 설치 및 유지관리가 용이한 곳에 설치하도록 한다.
 - 관측시설물의 보호 등 안정성이 보장될 수 있는 곳에서 설치하도록 한다.

1) 수평적 위치 결정 (측점 배치 및 측정수 등)

- 유전율을 활용한 TDR 센서, FDR 센서들의 측정배치는 위의 절에서 토양시료채취 방법과 유사하게 수행하면 된다. 또한 토양수분 관측소를 배치하고자 하는 곳 주변에서 반경 약 1m 정도 부근에서 토양수분 센서가 관측에 방해가 되지 않는지 판단 하에 설치하도록 한다.
 - 본 연구에서는 급경사면으로 이루어진 산지사면에서 이루어진 연구로서 유전율센서를 설치하기에 대표성 및 유지관리의 용이함과 본 연구의 목적인 CRNP의 활용성 검증이라는 측면을 고려해야 한다. 1차 연도에는 사면별 식생 및 토성의 유사함을 통해 계층화 하였으며 토심이 고르지 못하여 설치의 한계점이 있어 복합적 방법으로 몇 지점이 사면을 대표한다는 전제 하

에 Fig. 3.2.64 (a)와 같이 설치하였으며 사면에 대한 분석결과는 Table 3.2.24와 같다. 또한, 2차 연도에는 토양이 균질하지 않지만 CRNP 센서의 관측반경은 구형임에 따라 반경을 설정하고 구역에 따라 계통적 방법으로 설치하였다 (Fig. 3.2.64 (b)).

- 각 지점의 토양 샘플을 채취하여 실내에서 실험을 수행하였다. 실내 실험을 거쳐 얻은 데이터를 구역별로 평균하여 나타내었다.

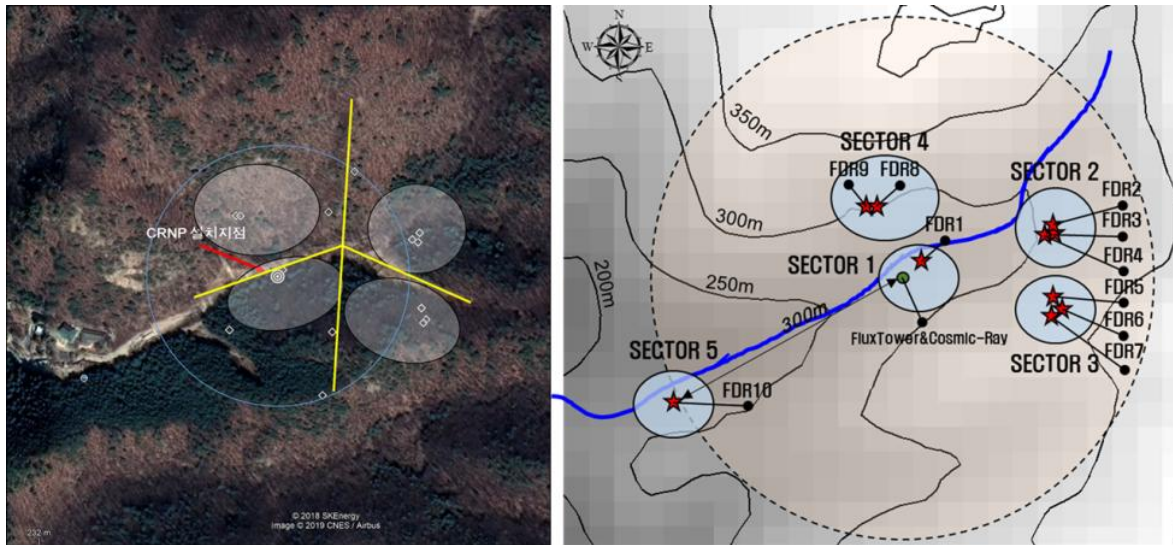


Fig. 3.2.64 (a) 사면별 설치 계획도 (1차 연도) (b) 반경별 설치 계획도 (2차 연도)

○ 유역내 토양의 성질

- 토성 (soil texture)은 토양의 입도분포에 의해 결정되며, 이는 토양의 함수능력, 통기성, 굳어지는 경향 등에 영향을 미친다. USDA에서는 토양의 입자를 크기에 따라 굵은 자갈 (fine gravel, 1.0–2.0 mm), 굵은 모래 (coarse sand, 0.5–1.0 mm), 중간 굵기 모래 (medium sand, 0.25–0.5 mm), 가는 모래 (fine sand, 0.1–0.25 mm), 매우 가는 모래 (very fine sand, 0.05–0.1 mm), 실트 (silt, 0.002–0.05 mm), 점토 (clay, 0.002 mm 이하)로 구분하고 있으며, 토양의 입도분포에 따라 토성을 12개 (sand, loamy sand, sandy loam, loam, silty loam, silt, sandy clay loam, clay loam, silty clay loam, sandy clay, silty clay and clay)로 분류하여 아래의 Fig. 3.2.65와 같은 토성 삼각분류도로 나타내고 있다.
- 토성분석은 입도분석에 기반하여 이루어지는데 대표적인 입도분석 방법으로는 체거름 방법, 비중계법, 레이저 회절법이 있다. 체거름 방법은 연속적으로 배치한 다양한 크기의 체에 시료를 통과시킨 뒤 잔류한 양을 측정해 토양의 입도분포를 분석하는 방법이며, 비중계법은 Stoke's law에 기반하여 입자의 침강을 관측해 입도분포를 분석하는 방법이다. 레이저 회절법은 입자의 크기에 따라 빛이 산란되는 강도와 각도가 달라진다는 Mie 광산란 이론에 기반하여 입도분포를 분석하는 방법이다. 체거름 방법은 가는 입자들에 대해서는 효율성이 떨어지고 비중계법과 레이저 회절법은 굵은 입자들에 대한 효율성이 떨어지기 때문에 본 연구에서는 체거름 방법과 레이저 회절법을 모두 이용하였다. 두 방법을 모두 이용하기 위해 우선은 설마천에 위치한 5개의 관측지점(Sector 1~5)에서 채취한 토양시료에 대해 체거름 실험을 수행했으며, 가장 작은 체에 남은 가는 입자들은 실린더에 넣고 침강하도록 하여 레이저 회절법으로 입도 분포를 분석하였다. 토성분석 결과 Sector 4의 토성은 Sandy loam으로 나타났으며, 나머지 구역에서는 Loamy sand로 나타났다.
- 한편, 모든 구역의 **용적밀도 (bulk density, ρ)**는 **0.67–1.18의 범위**를 보였으며, 평균 용적밀도는 0.92의 값을 보였다. 용적밀도는 자연 토양의 종합된 밀도로서 공기의 유통과 물의 저장능력을 판단하는 기준이 된다. 일반적인 토양의 용적밀도 범위는 1.0–1.2 g/cm³ 범위를 갖는 데에 반해 낮은 용적밀도를 보였다. 특히, 연구지역 중 낙엽수가 위치하고 있는 구역에서

는 낮은 용적밀도를 보였다. 토양 공극률은 57.40–71.36% 범위의 높은 특성을 보였으며, 약 64%의 평균적 특성을 나타내었다. 토양 공극률은 입단화 (soil aggregation)를 통해 그 특성을 유추해 볼 수 있는데 일반적으로 대공극 (macro-pore)과 소공극 (micro-pore)이 증대되는 성향을 갖는다. 본 지형을 함수율과 함께 분석해 볼 때, 식물의 뿌리로 인한 소공극보다는 대공극이 더 발달된 특성을 보였다. 이의 분석 결과를 종합하여 볼 때 본 연구지역은 물을 보유하는 능력보다는 배수 특성이 더 활발할 것으로 판단하였다.

Table 3.2.24 사면별 토양 및 식생 특성

Sites Properties	Sector 1	Sector 2	Sector 3	Sector 4	Sector 5
Sand[%]	77.34	78.35	84.54	65.93	81.12
Silt[%]	16.32	14.23	9.14	23.38	12.25
Clay[%]	6.34	7.42	6.32	10.69	6.63
USDA Texture	Loamy sand	Loamy sand	Loamy sand	Sandy loam	Loamy sand
Vegetation Type	Needleleaf	Needleleaf	Deciduous	Deciduous	Needleleaf
Water content[%]	0.23	0.17	0.28	0.25	0.11
ρ [g/cm ³]	0.99±0.08	0.93±0.08	0.81±0.08	0.75±0.08	1.10±0.08
Porosity[%]	62.80	64.81	69.59	71.60	54.88

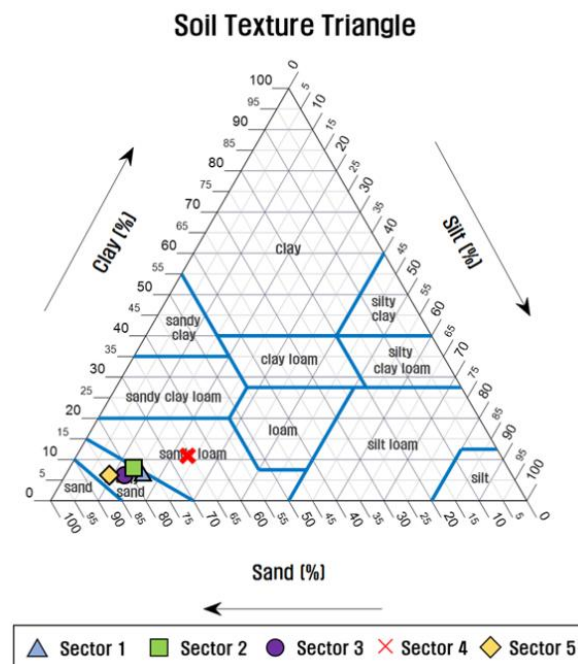


Fig. 3.2.65 USDA 토성 삼각분류도

2) 수직적 위치 결정(측점 배치 및 측정수 등)

- 유전율을 활용한 TDR 센서, FDR 센서들은 물리적으로 삽입하여 관측하기 때문에 관심 있는 부분에 직접 설치하여 측정이 가능하다. 따라서 실제로 알고자 하는 것이 무엇인지 숙지하고 설치하고자 하는 지역의 유효토심 깊이를 파악하는 것이 중요하다. 아래는 설치하고자하는 목적에 따라 설치기준을 제시하였다.

- 농작물 작황상태 및 산림의 임업을 모니터링하기 위해 설치한다면 뿌리의 깊이 특성을 고려하여 설치하는 것이 좋다 (Fig. 3.2.66).

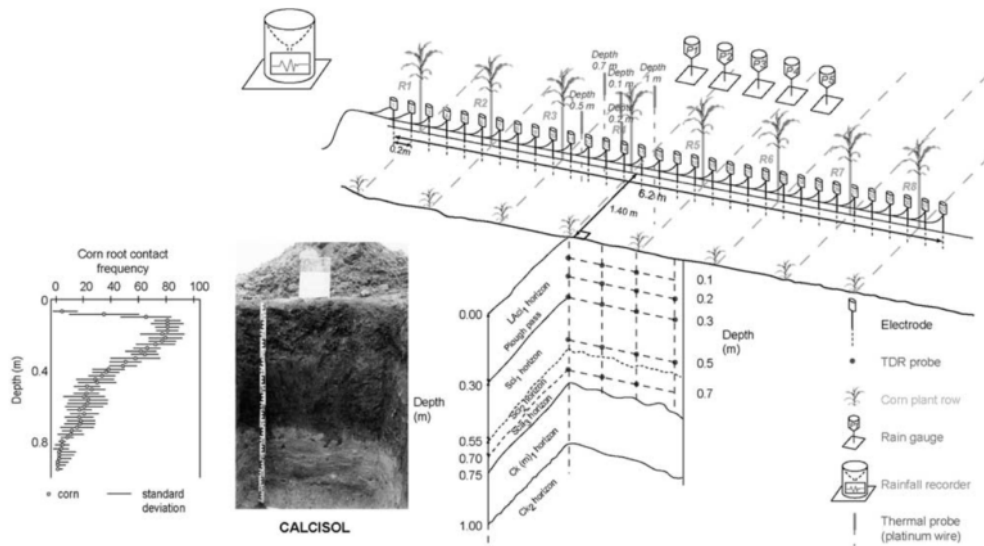


Fig. 3.2.66 작물의 뿌리 상태를 고려한 토양수분 연구 (Michot et al., 2003)

- 토양 내의 수자원의 흐름 등을 보기위해 설치지역의 유효 토심별 특성을 파악하여 설치하는 것이 좋다. 일반적으로 유효 토심 영역에 가깝게 설치하는 것이 토양내의 흐름을 식별하기 쉽다 (Fig. 3.2.67).

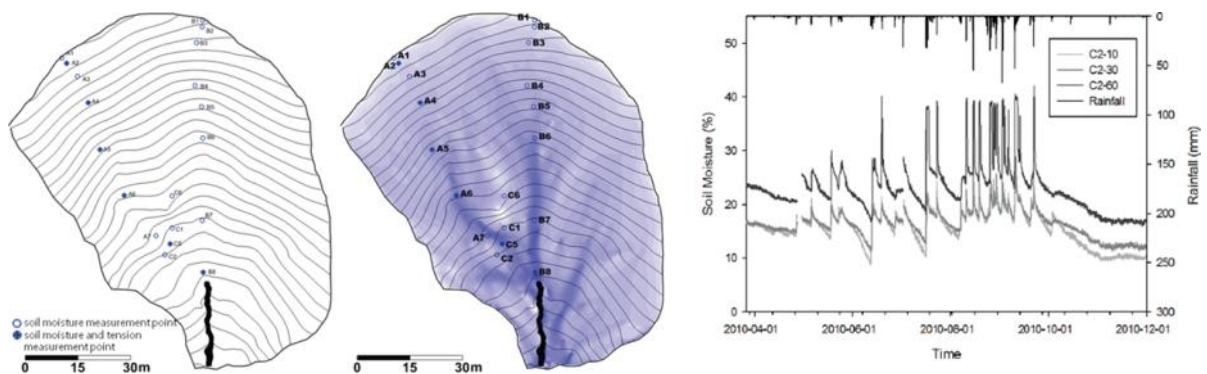


Fig. 3.2.67 토양내 흐름 상태를 고려하기 위한 토양수분 연구 (조민지 등, 2017)

- 인공위성을 활용한 토양수분량을 검증하기 위한 설치는 마이크로파의 투과정도에 따라 설치하는 것이 좋다. 일반적으로 토양 내 마이크로파 투과 정도는 5 cm 정도이며 넓은 공간적인 범위를 가지고 있기 때문에 넓은 범위로 깊이 않은 곳에 설치하는 것을 권장하고 있다 (Fig. 3.2.68).

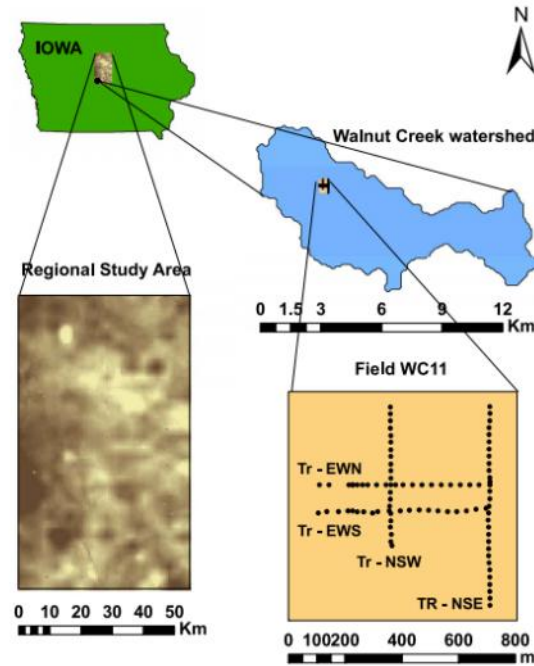


Fig. 3.2.68 공간범위의 인공위성 토양수분 관측값을
검증하기 위한 지점 토양수분 연구
(Joshi and Mohanty, 2010)

- 본 연구는 CRNP를 통한 토양수분량 측정 및 검증하는 목적으로 하고 있다. 보통 CRNP는 토양의 건조량에 따라 측정깊이가 달라지며 표층부터 순차적으로 증가한다. 따라서 센서는 표층부터 순서대로 설치하였다. 관측소에 설치된 토양수분 관측기종은 Meter사의 5TM으로서 Fig. 3.2.69 (a)와 같이 측면으로부터 4.75 cm, 정면으로 5 cm, 상단부 1 cm의 관측 대표성을 갖는다고 알려져 있다. 따라서 센서가 모든 토층의 토양수분의 측정범위를 만족하기 위해 관측 센서를 가로방향으로 깊이 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm순으로 Fig. 3.2.69 (b)와 같이 설치하였다 (토양의 유실을 고려하여 10 cm부터 설치).

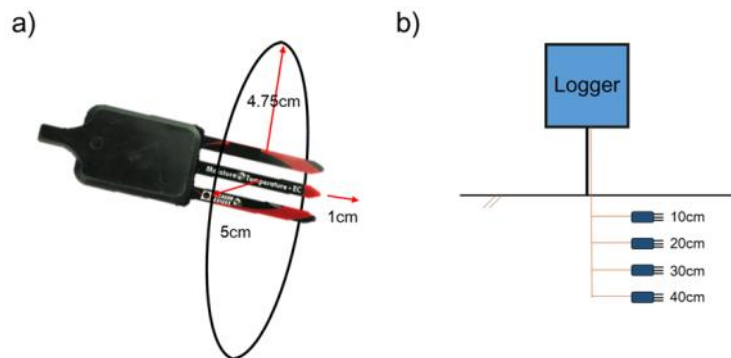


Fig. 3.2.69 (a) Meter사의 5TM 기종의 측정 범위
(b) 토양수분 관측소 토심 설치 모식도

3) 감악산 설마천 토양수분 계측기기 설치

- 사전에 항공 또는 위성영상을 통해 주변 환경에 따라 관측소 배치를 수행하고 있으나 실제 현장에 설치하기 위해서는 많은 제약요소가 존재하여 사전에 계획했던 지점에 설치하지 못하는 경우가 있다. 특히 산악 지역에서는 암석, 식생, 계곡 등 제한적인 지형 때문에 많은 인력과 시간이 소비된다. 따라서 드론 촬영과 현장조사를 통해 적절한 곳에 효율적으로 최종위치를 선정하는 것이 좋다.

– CRNP 설치

- 산악지역에서 관측 장비는 운영하기 위한 전력 확보가 최우선이다. 따라서 기존에 운영 중인 Flux-tower에 CRNP와 태양광 장비를 설치하여 전력을 확보하였다 (Fig. 3.2.70).



Fig. 3.2.70 기존 운영중인 설마천 유역 Flux-tower와 신규 설치된 CRNP

– FDR 지점 관측기기 설치

- CRNP 센서가 설치된 후 FDR 센서를 설치를 수행하였다. 또한 본 연구에서 설치하고자 하는 토심의 깊이 설치기준에 따라 설치하기 위해 토양에 설치 토심까지 공간을 확보하였다. 확보된 공간을 따라 길이를 표시하고 설치하고자하는 토심에 탐침을 설치한다. 단, 탐침의 손상을 방지하기 위해 설치하기 전 Fig.3.2.71 (a)와 같이 탐침이 들어갈 수 있는 공간을 확보하는 것이 좋다.
- 설치된 탐침의 깊이를 최종 확인한 후 토양은 층화 특성을 가지고 있기 때문에 되도록 파낸 토양의 역순으로 다시 매립하는 것을 원칙으로 한다 (Fig. 3.2.71).

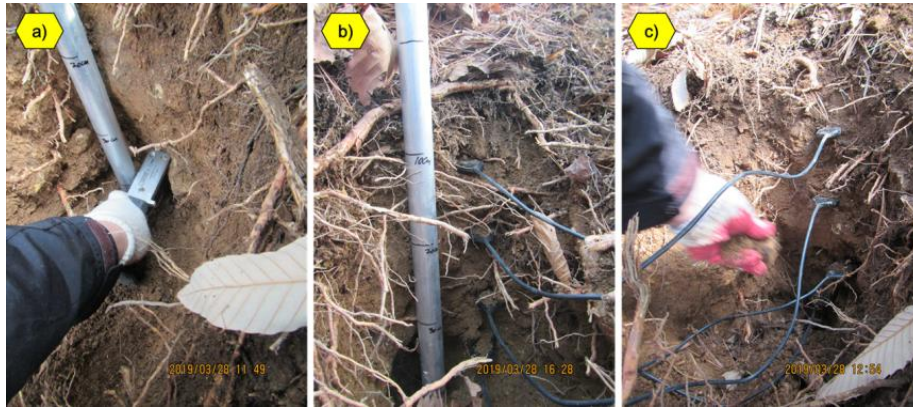


Fig. 3.2.71 FDR 센서 탐침 설치 과정

- 매립 후 탐침의 위치에 깃발 등의 표식을 남겨 센서의 훼손 및 사람의 발자국을 통한 토양의 압밀로 인한 관측오류를 최소화 하는 것이 중요하다 (Fig. 3.2.72).
- 또한 탐침을 설치한 후 케이블을 통해 로거로 데이터가 들어오게 되는데 케이블이 외부에 노출될 경우 야생동물 및 주변 환경에 의해 훼손될 가능성이 높기 때문에 최대한 노출 지중에 노출을 최소화하는 것을 권장 한다 (Fig. 3.2.73).



Fig. 3.2.72 토양수분 탐침 위치 표식 (깃발)

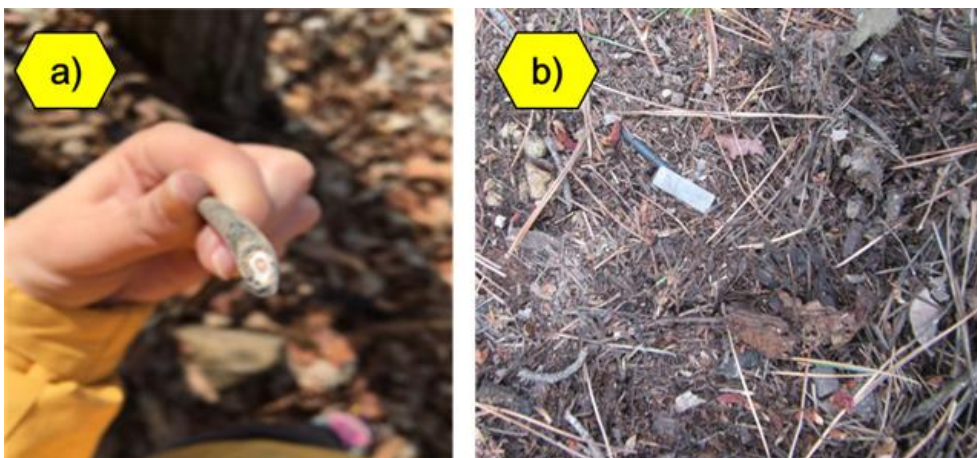


Fig. 3.2.73 (a) 야생동물에 의한 센서 훼손 (b) 토양내로 매립된 탐침 케이블

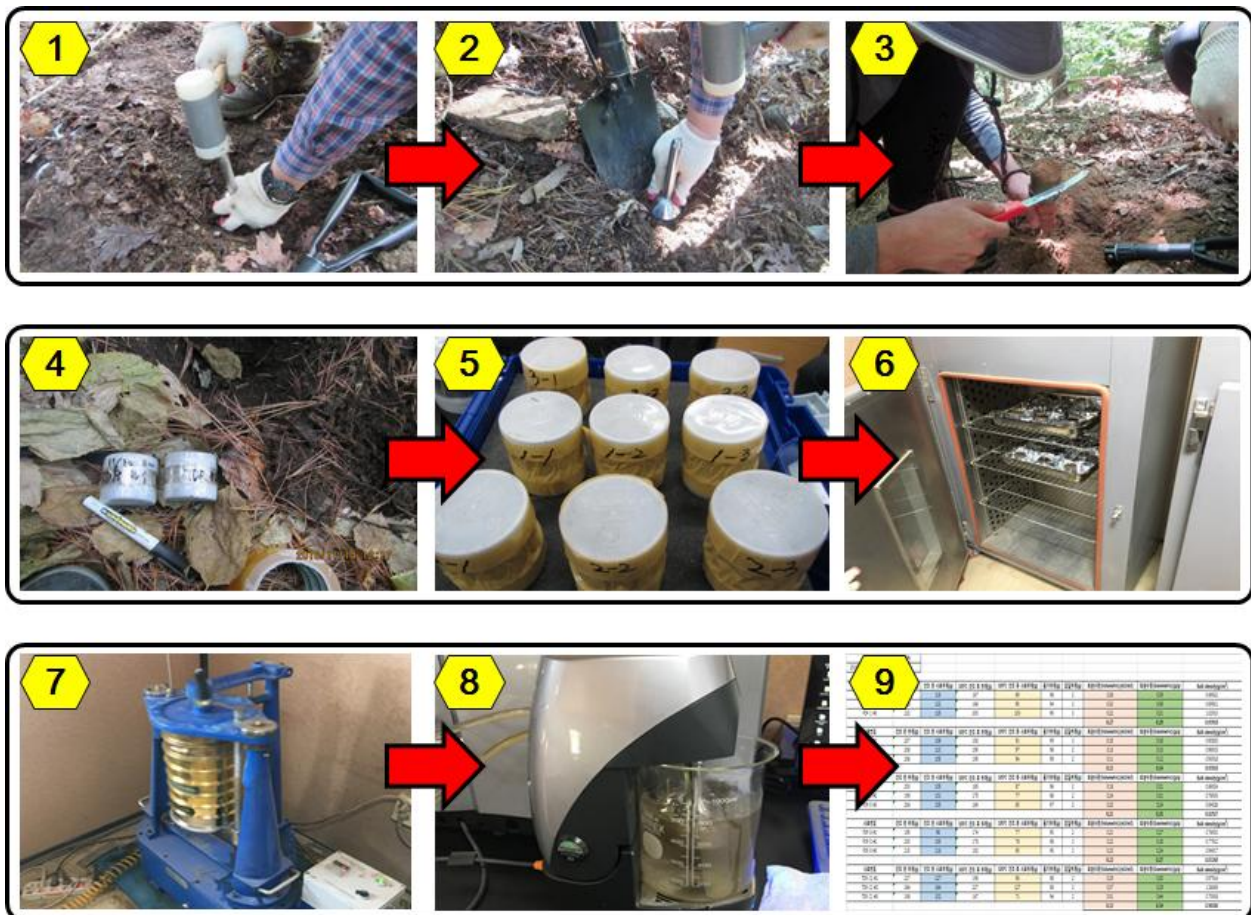
4) 유전율식 관측 기기 성능 평가

- 토양수분을 정확히 측정하기 위해서는 샘플링을 통한 건토중량법을 통해 가능하지만, 자연 상태

- 실내에서 정해진 조건에 따라 어느 정도 정확한 측정비교가 가능하지만 관측기기는 어느 정도의 오차가 포함되어 있음을 숙지해야한다. 관측기기에는 측정 오차가 존재하는데 크게 우연오차 (random error)와 계통오차 (systematic error)가 존재한다.
- 우연오차는 실험측정을 반복할 때 측정값들의 변동으로 인해 불가피한 오차이다. 이러한 오차는 특히 토양수분기지에서 많이 발생한다. 이러한 오차는 측정의 불확실성 (measurement uncertainty)와 같은 확률/통계적 접근이 필요하다. 반면에 계통오차는 장비의 결함, 외부 환경으로부터 발생하는 오차와 잘못된 측정 등으로 발생한다. 이는 교정 및 상쇄 (offset) 값을 통해 오차를 줄일 수 있다.

- 관측 기기 현장 평가 및 검증

- 본 연구에 이용되는 FDR 센서는 관측 방법의 특성상 TDR보다 외부환경 (토성, 염도, 유기물 함량 등)으로부터 계통오차가 생길 확률이 높다.
- 따라서 관측기기를 현장에 설치한 후 시료 샘플을 채취하여 현장의 데이터를 확인하는 것이 필요하다. 현장에서 시료를 채취하여 건토중량법을 수행한 후 관측기와 비교하는 방법은 Fig. 3.2.74을 통해 확인할 수 있다.



- Fig. 3.2.74은 감악산 설마천 관측소에서 수행한 결과로서 토양의 교란을 최소화하기 위해 10 cm 깊이의 토양을 1회에 3개의 표본을 한 세트로 채취하였다. 채취한 표본은 당시의 FDR 센서와 비교하여 Fig. 3.2.75에 산포도와 함께 나타내었다.
- 아래 Fig. 3.2.75에서 알 수 있는 바와 같이 몇몇 표본을 제외한 나머지의 표본은 유효한 범위 내의 관측오차를 보였다.

- 각 지점별 통계적인 특성, 즉 상관계수, bias, RMSE는 Table 3.2.25과 같다. 전체적으로 대부분 bias가 음수 값을 가졌으며, FDR 센서가 코어를 활용한 용적토양수분량에 비해 비교적 과소한 특성을 보였다. 특히, sector 3 지역에서 가장 높은 RMSE를 보였다. 이는 많은 낙엽의 영향으로 발생한 특성이다.
- 상관계수는 전체적으로 0.80 정도를 보였으며 bias와 RMSE는 각각 $-0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 과 $0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 의 특성을 나타내었다. 토양수분 관측기기의 일반 교정오차 $\pm 0.03 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 내에 속하고, 또한 토양수분량 관측기기 검정오차가 $\pm 0.05 \text{ m}^3/\text{m}^3$ 이내인 점을 감안하여 볼 때 현장 적용가능성을 판단하였다.

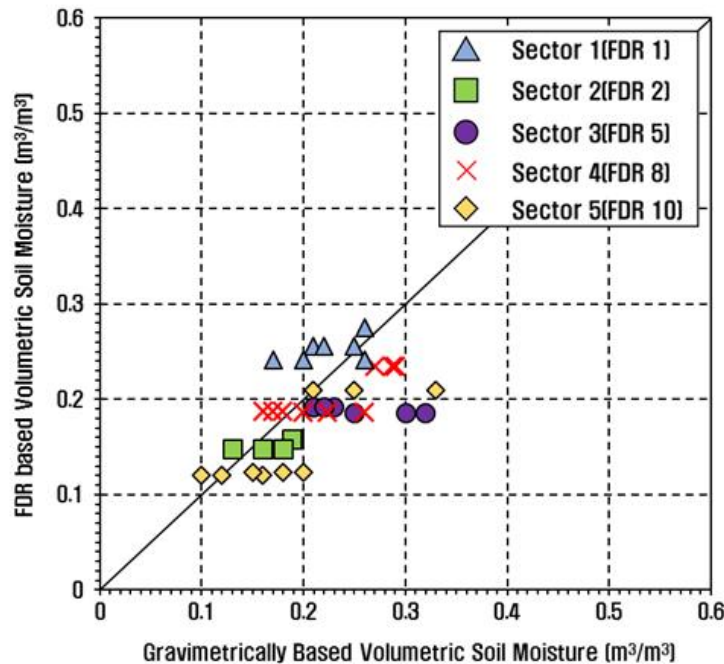


Fig. 3.2.75 설마천 유역내 관측소 현황

Table 3.2.25 설마천 관측소 Correlation coefficient, bias, 및 RMSE

Sites Properties	Sector 1 (FDR 1)	Sector 2 (FDR 2)	Sector 3 (FDR 5)	Sector 4 (FDR 8)	Sector 5 (FDR 10)	Total
Correlation coefficient	0.78	0.75	0.85	0.81	0.81	0.80
Bias[m^3/m^3]	-0.001	-0.02	-0.07	-0.02	-0.04	-0.03
RMSE[m^3/m^3]	0.03	0.02	0.07	0.03	0.01	0.03

5) 감악산 설마천 관측소 정보 수집

○ 지리적 조건 파악 및 측량 조사

- 본 연구에서는 면 단위의 토양수분량을 분석하기 위해 우선적으로 시험유역에 대한 지리적 조건을 파악하고 지점 센서들의 위치를 측량 조사를 진행하였다 (Fig. 3.2.76).
- 연구에서는 관측소의 정확한 위치를 파악하기 위해 RTK (Real Time Kinematic, 실시간 이동 측위)를 활용하여 관측소의 고도 및 위경도를 측정하였다.
- RTK는 우주궤도를 돌고 있는 GNSS (Global Navigation Satellite System)를 활용하여 센티미터 수준의 정확도를 보이나 본 연구지역은 산지형태이기 때문에 정확성을 확보하기 어려워 측정의 오차범위를 30 cm 이내의 좌표 값을 수집하였다.



Fig. 3.2.76 관측소 위치 정보(위도, 경도, 고도) 측정

○ 드론 촬영

- 최근 드론의 활용도가 높아짐에 따라 근접 상공에서 해상도 높은 촬영이 가능하게 되었으며, 다중 촬영을 이용하여 프로그램 합성 및 지형특성을 산출할 수 있게 되었다 (Fig. 3.2.77).
- 본 연구에서도 드론을 활용하여 영상 분석 프로그램을 통해 지형의 특성을 파악하였으나 군사 지역으로 제약이 따랐다.



Fig. 3.2.77 드론 촬영을 통한 식생 및 지형특성 산출

○ 토양유기물 분석

- 본 연구에서는 유기물의 함량이 Cosmic-ray를 통한 토양수분 산정 시에 미치는 영향을 확인하기 위해 지점별, 시기별(봄, 가을) 유기물 함량을 분석하였다.
- 유기물 분석은 한국임업진흥원에 의뢰 하여 건식연소법 (Dry combustion method)을 통해 유기물 함량을 분석하였다.
- 이 방법은 원소분석기를 이용하는 분석법으로 토양과 촉매제를 혼합한 다음 산소를 흘려보내면서 고온 (1000-1500℃)에서 가열 후 발생하는 이산화탄소 양을 측정하는 방법이다. 많은 수의 빠른 시료 분석을 위하여 자동화된 기기를 사용하며, 정확도와 정밀도가 가장 높은 유기물 분석방법이다. 건식연소법에 의한 탄소분석은 일반적으로 전탄소의 형태로 분석되기 때문에, 정확한 유기물 함량을 분석하기 위해서는 전탄소에서 무기탄소의 양을 제한 유기탄소의 양을 측정하여 유기물 함량을 산정하거나, 시료의 전처리를 통해 무기탄소를 제거한 후 직접 유기탄소를 분석해야 한다.

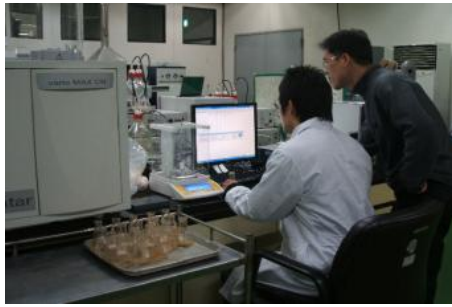


Fig. 3.2.78 원소분석기를 이용한 건식연소법
(한국임업진흥원)



Fig. 3.2.79 Vario Max CN analyzer 원소분석기

- 실험 방법은 0.5 mm를 통과하도록 분쇄한 토양시료 약 1 g을 도가니에 담는다. 시료가 담겨 있는 도가니에 3% HCl 을 몇 방울 떨어뜨린다. HCl 의 주입은 더 이상 기포가 발생하지 않을 때까지 넣는다. 가능하면, HCl 이 시료 전체를 적실 수 있도록 한다. 도가니를 105℃의 건조기에서 24시간 동안 건조시키거나 130℃의 건조기에서 4시간 동안 건조시킨다. 이러한 전처리 과정을 통해 무기물이 제거된 시료를 원소분석기의 sample tray에 투입하고 분석을 시작하면 기기가 약 1000℃에서 시료를 가열한다. 가열된 시료에서는 이산화탄소가 발생하게 되며 분석기는 그 양을 측정하여 시료의 총 탄소량을 측정하게 된다.
- 최종적으로 원소분석기에 투입한 시료는 전처리를 통해 무기탄소가 제거된 상태기 때문에 원소분석기를 통해 측정된 총 탄소량은 유기탄소의 양을 의미하며, 그 값은 %(시료 무게 당 유기물의 양)함량으로 나타내어진다.
- Table 3.2.26를 확인하였을 때 계절에 따른 유기물의 변화량은 큰 의미를 갖지 않는 것으로 나타났다. 따라서 계절에 따른 유기물의 변화량은 고려하지 않아도 될 것으로 판단했다.

Table 3.2.26 설마천 유역에서의 유기물 분석 결과

시료명	유기물 함량(%)	
	2019.03	2019.10
1	10.945	11.049
2	5.401	5.983
3	5.244	8.650
4	1.797	8.313
5-1	7.809	10.784
5-2	3.310	6.224
6	2.942	6.261
7-1	4.039	8.367
7-2	7.794	8.309
7-3	7.190	8.169
8-1	10.647	11.285
8-3	6.576	6.849
9	2.676	3.746
10	5.883	12.343

사. 계측시스템 운영

1) 계측시스템 유지관리 및 자료수집

- 1차 연도에 설치된 토양수분 관측소는 Decagon사의 Em50의 로거를 활용하여 관측을 하고 있기 때문에 직접 현장방문을 통한 자료 취득을 수행하고 있으며, 2차 연도에 추가로 설치하는 관측소에는 Meter사의 Zentra cloud 시스템을 도입하면서 GPS 수신을 통해 원격데이터 수집이 가능해졌다. 이는 접근성이 떨어지는 지역에 설치하여 운영이 쉬워졌으며 자료 상태를 준 실시간으로 관리할 수 있게 되었다.

- Fig. 3.2.80는 설마천 관측소의 설치지점이 표현되어있으며 빨간색 원은 원격이 불가능한 관측소로 2주 간격으로 현장 방문을 하여 데이터를 수집하였다. 초록색 원은 Zentra cloud 원격 접속이 가능한 관측소로 매주 또는 장마와 같은 기상이 불안정한 기간에는 일단위로 유지관리를 수행하였다.

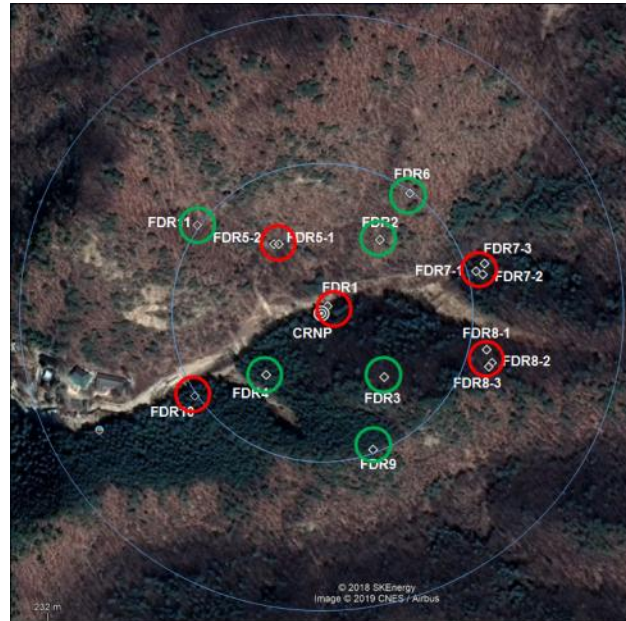


Fig. 3.2.80 설마천 FDR 센서 설치지점

– 현장 방문 데이터 수집방법

- 구형 관측소 로거의 특성상 현장 방문을 수행하고 있으며, netbook, 노트북 등 휴대가 가능한 컴퓨터와 현장의 로거 간에 USB 연결을 통해 직접 자료를 수집하였다.
- 수집된 자료는 현장에서 일차적으로 육안으로 확인할 수 있는 오류들을 확인한 후 복귀 후 강우사상 및 시계열 패턴을 확인한 후에 별도의 컴퓨터를 통해 자료를 축적하였다.

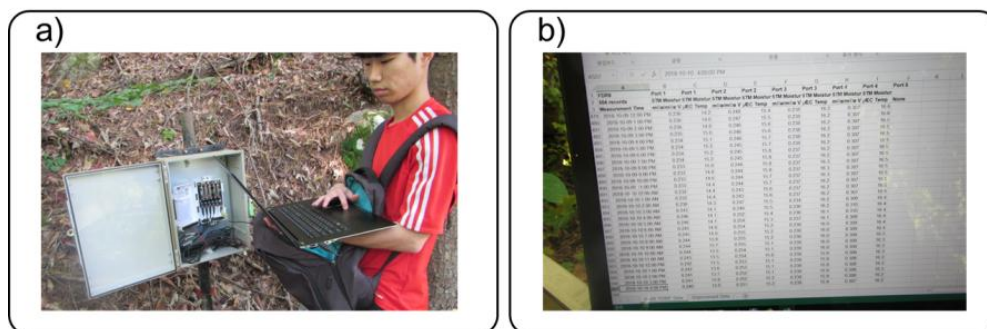


Fig. 3.2.81 현장 방문 데이터 수집 a) 노트북과 로거간의 연결 b) 수집된 자료

– 원격 데이터 수집방법

- 원격데이터 수집은 현재 <https://zentracloud.com>에 접속하여 연동 되어있는 기기의 실시간 설치 위치를 지도를 통해 확인할 수 있다 (Fig. 3.2.82).

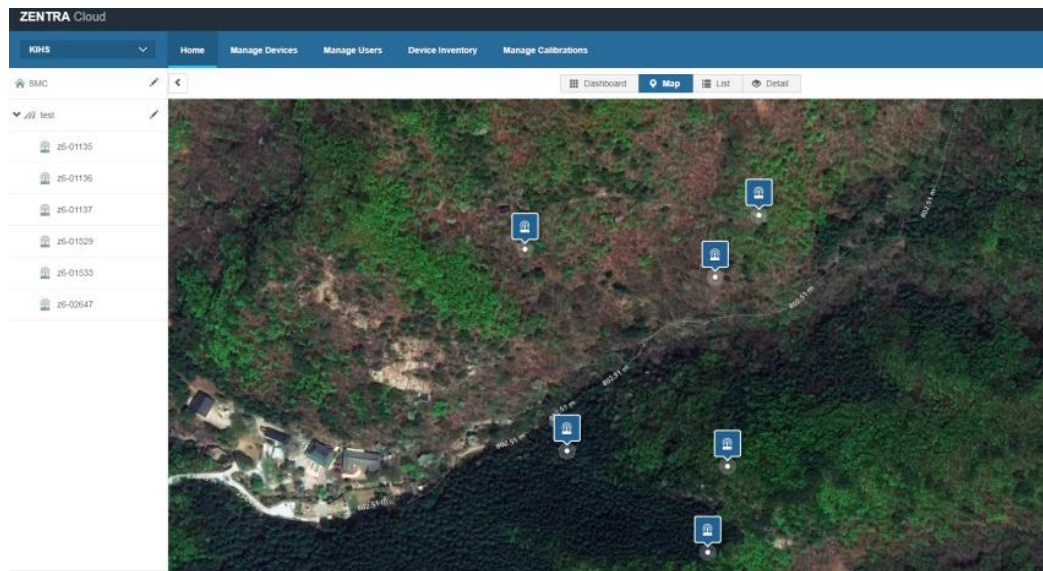


Fig. 3.2.82 Zentra Cloud 초기화면

- 설치된 관측소는 Fig. 3.2.83 (a)처럼 간략한 관측소의 현재 상태를 확인할 수 있으며, (b)에서는 현재 데이터, 배터리, 통신 및 로거의 상태를 상세하게 확인할 수 있다. 또한 c에서는 일주일단위의 연속적인 그래프들을 확인할 수 있으며, (d)에서는 관측소의 GPS 위치를 활용하여 위도, 경도, 고도를 확인할 수 있다. Zentra cloud의 자세한 사항은 매뉴얼로 작성하여 부록 D장에 첨부하였다.

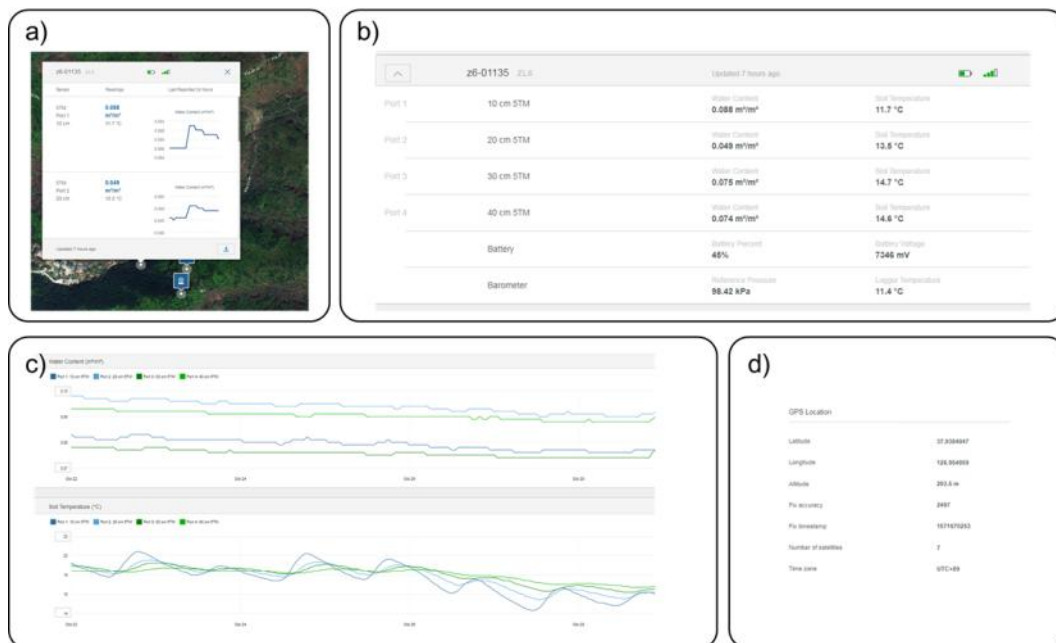


Fig. 3.2.83 Zentra Cloud 제공자료 a) 자료 요약 b) 실시간 상세자료
c) 일주일간 실시간 자료 d) 관측소 좌표 및 고도 정보

- 현장 방문 데이터 수집방법
 - 본 연구에서는 유역의 FDR 관측기기들에서 관측된 데이터들을 2주마다 집록하고 있으며, 토양수분 원시자료의 불량 값 등을 판단하여 일단위로 취합 후 데이터베이스화 하고 있다.
 - 일단위로 취합 된 토양수분량 데이터베이스는 센서가 설치된 2018년 7월 13일부터 작성되었으며, 월최대/최저, 월평균이 계산되어 있다. 각 센서들은 Fig. 3.2.80에 나타나 있는

위치에 설치되어 있으며, 데이터베이스는 각 지점의 깊이 별(10cm, 20cm, 30cm, 40cm) 토양수분량을 나타내고 있다. 데이터베이스 샘플은 부록 D장의 설마천 일평균토양수분량 DB에 제시되어 있다.

- 일단위로 취합한 자료들을 대상으로 통계분석을 실시한 후 결과자료를 부록 E장에 나타내었다.
- 2018년 8월부터 2019년 10월까지의 자료에 대해 분석을 수행했으며, FDR 기기에서 수집한 1시간 단위 토양수분량 자료를 바탕으로 만든 각 지점의 토심별 일평균 토양수분량 자료의 평균 (Mean), 표준편차 (Standard deviation, S.D), 변동계수 (Coefficient of Variance, C.V), 왜도 (Skewness), 첨도 (Kurtosis)를 분석하였다.

아. 계측시스템 산출 자료 분석

○ 토양수분 관측소 지점 대표성 분석 및 최적화 방안

- Time Stability Analysis (TSA) 이론

- Vachaud et al. (1985)에서 제안한 시간 안정성 해석은 주로 관심 있는 지역에 설치된 여러 관측 기기 중 그 지역 전체의 토양수분량을 대표하는 지점을 식별하는데 도움을 주는 분석 방법이다 (Brocca et al., 2010).
- 신뢰성 있는 공간 토양수분량을 생산하기 위해서는 충분한 수의 지상관측소와 함께 대상 유역을 대표할 수 있는 지점에 대한 평가가 선행돼야 한다. 하지만 지점 자료는 불균질한 (heterogeneous) 지형에서 평균적인 특성을 찾기가 어렵기 때문에 영역 전체를 대표할 수 있는 자료로 환산하기가 어렵다. 이러한 이유로 시간 안정성 해석 방법은 여러 지점 중 지역을 대표할 수 있는 지점을 선정하는 분석법으로서 많이 이용되었다 (Jacobs et al., 2004; Brocca et al., 2009).
- 시간 안정성 해석은 특정 시간 t 에 각 토양수분량 측정 지점과 지역 평균 토양수분량 ($\bar{\theta}_t$) 사이에서의 상대적 차이 (relative difference, δ_i)를 평가하는 방식이다(Eq. 3.2.4).

$$\delta_{i,t} = \theta_{i,t} - \bar{\theta}_t \quad (3.2.4)$$

$$\bar{\theta}_t = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \theta_{i,t} \quad (3.2.5)$$

- 여기서, n_t 는 시간 샘플 개수를 나타내며, $\theta_{i,t}$ 는 특정 시간 t 에서 i 지점의 토양수분량을 나타낸다. 또한 상대적 차이의 평균 (mean of the relative difference, MRD, $\bar{\delta}_i$)과 상대적 차이의 표준편차 (standard deviation of the relative difference, SDRD, $\sigma(\delta_i)$)이다 (Eq. 3.2.6, Eq. 3.2.7).

$$MRD(\bar{\delta}_i) = \frac{1}{n_t} \sum_{i=1}^{n_t} \frac{\theta_{i,t} - \bar{\theta}_t}{\bar{\theta}_t} \quad (3.2.6)$$

$$SDRD(\sigma(\delta_i)) = \sqrt{\frac{1}{n_t - 1} \sum_{i=1}^{n_t} \left(\frac{\theta_{i,t} - \bar{\theta}_t}{\bar{\theta}_t} - \bar{\delta}_i \right)^2} \quad (3.2.7)$$

- 전체 지역에서 MRD의 총합은 0을 나타내며, 각 지점 i 에서의 MRD가 음수일 경우 전체 지역에 비해 평균보다 습윤한 상태이고 양수일 경우 건조한 상태인지 판단할 수 있다. 또

한 SDRD가 낮을수록 지점에서의 변동성은 작다. 전체 지역에서 MRD의 총합은 0을 나타내며, 각 지점 i 에서의 MRD가 음수일 경우 전체 지역에 비해 평균보다 습윤한 상태이고 양수일 경우 건조한 상태인지 판단할 수 있다. 또한 SDRD가 낮을수록 지점에서의 변동성은 작다.

- Jacobs et al. (2004)는 최적의 대표성을 선정하는 지수인 ITS (index of temporal stability)를 영역 평균에 대한 상대적인 차이의 평균인 MRD와 지점 오차범위의 편차인 SDRD를 활용하여 Eq. 3.2.8와 같이 표현하여 가장 적합한 위치를 분석하였다.

$$S(\delta_i) = \sqrt{\overline{\delta_i}^2 + \sigma(\delta_i)^2} \quad (3.2.8)$$

- 연구지역에서의 TSA

- 본 연구지역에서 수행한 시장 안정 해석 지역은 토심별(10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm)로 수행하였다. 2차 연도 설치이후부터 모든 설치지점에 대해 수행하였다. 단, FDR 9은 모든 토심에서 데이터가 불안정하여 제외하였으며, FDR 11 센서는 20, 30, 40 cm에서 측정이 되지 않아 제외하였다. **대표지점 선정기준은 ITS가 20%미만인 지점들을 선정하였으며 대표하기에 가장 안정적인 지점이라고 해석할 수 있다.**
- Fig. 3.2.84-Fig. 3.2.87은 각각 토심마다 MRD와 ITS를 오름차순으로 도식화한 그래프와 대표지점으로 선정된 위치를 표시해둔 그림이다. 10 cm에서 MRD는 FDR 10 센서, FDR 7 센서, FDR 8 센서 순으로 상대적 차이가 적었으며 ITS는 FDR 7 센서, FDR 10 센서, FDR 8 센서 순으로 가장 우수한 대표성을 나타냈다. 20 cm에서 MRD는 FDR 2 센서, FDR 10 센서, FDR 7 센서 순으로 상대적 차이가 적었으며 ITS도 마찬가지로 FDR 2 센서, FDR 10 센서, FDR 7 센서 순으로 가장 우수한 대표성을 나타냈다.
- 30 cm에서 MRD는 FDR 10 센서, FDR 8 센서순으로 상대적 차이가 적었으며 ITS도 마찬가지로 FDR 10 센서, FDR 8 센서순으로 가장 우수한 대표성을 나타냈다. 40 cm에서 MRD는 FDR 8 센서, FDR 10 센서순으로 상대적 차이가 적었으며 ITS도 마찬가지로 FDR 8 센서, FDR 10 센서순으로 가장 우수한 대표성을 나타냈다. 분석결과 모든 토심에서 FDR 10 센서, FDR 8 센서가 우수한 대표성을 보였으며 FDR 7 센서는 토심이 깊지 않은 곳에서 우수한 대표성을 보였다.

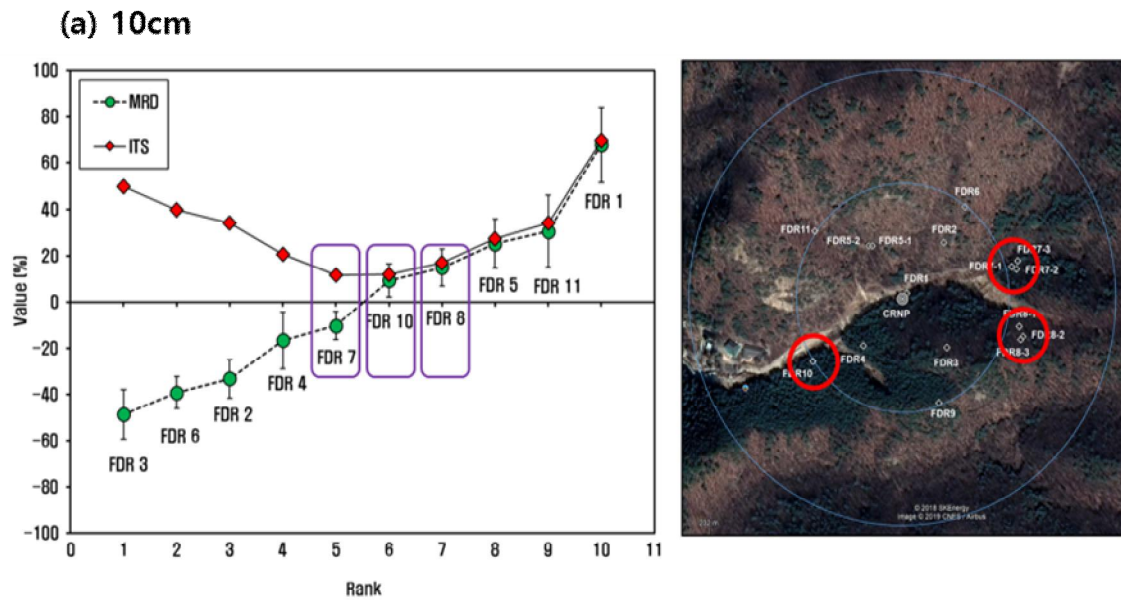


Fig. 3.2.84 10 cm에서 시간 안정성 해석을 통한 대표지점 선정

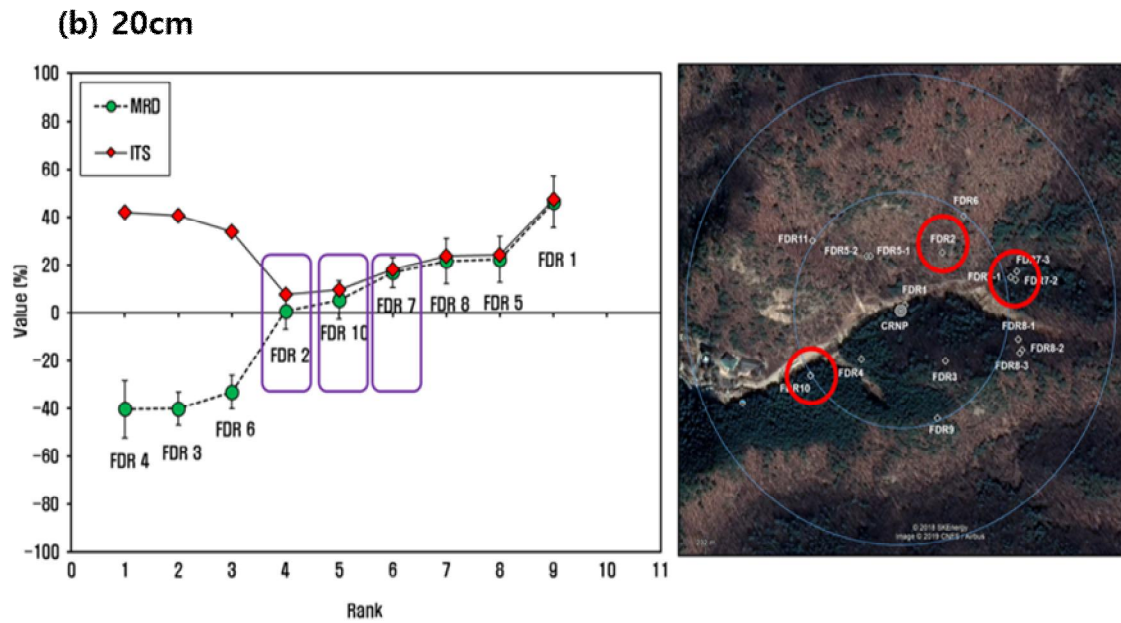


Fig. 3.2.85 20 cm에서 시간 안정성 해석을 통한 대표지점 선정

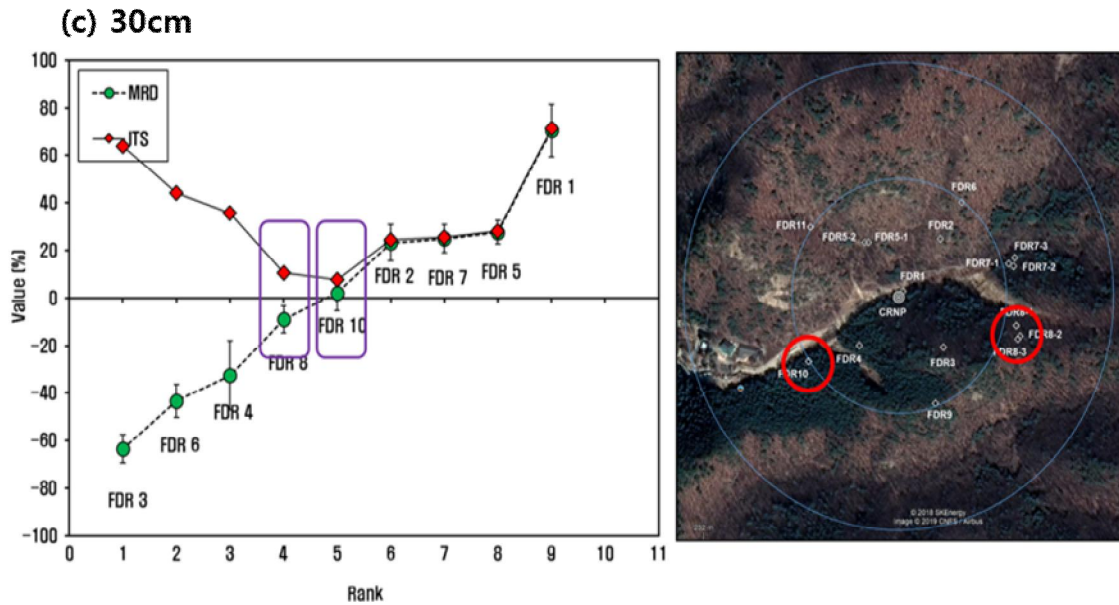


Fig. 3.2.86 30 cm에서 시간 안정성 해석을 통한 대표지점 선정

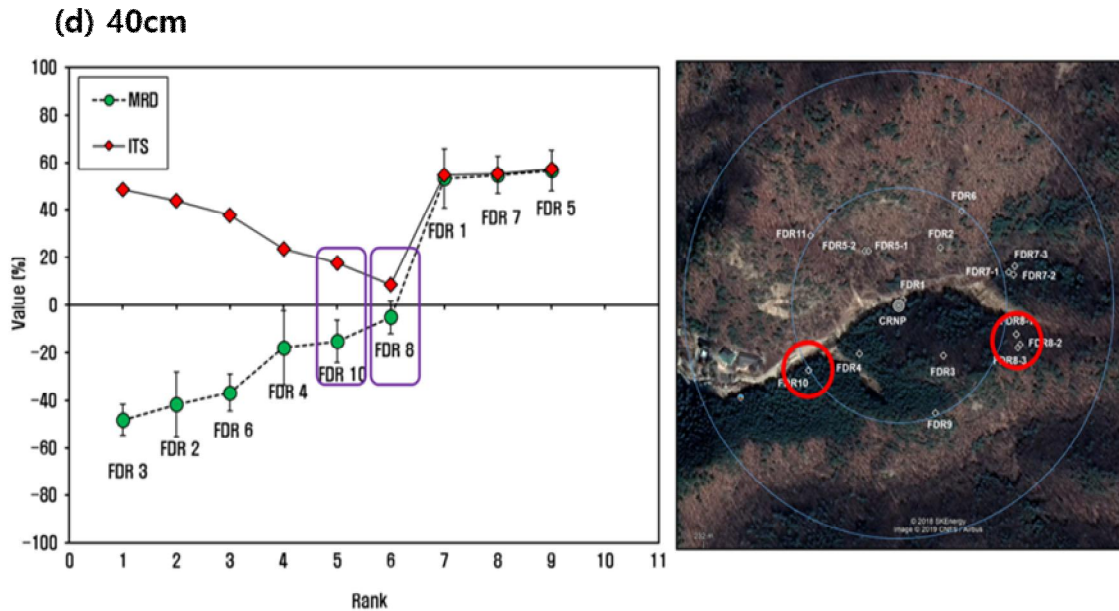


Fig. 3.2.87 40 cm에서 시간 안정성 해석을 통한 대표지점 선정

- Fig. 3.2.88은 토심별로 가장 높은 대표성을 가진 지점과 지점평균값사이의 1:1 대응 그림과 통계를 나타낸 그림으로 10 cm 지점에서는 FDR 7 센서와 지점평균값사이에 결정계수 0.9365, Bias -0.015, RMSE 0.017로 나타났으며, 20 cm 지점에서는 FDR 2 센서와 지점평균값사이에 결정계수 0.8584, Bias 0.000, RMSE 0.012의 값을 보였다. 30 cm 지점에서는 FDR 10 센서와 지점평균값사이에 결정계수 0.8459, bias 0.002, RMSE 0.011의 값을 나타내었으며. 40 cm 지점에서는 FDR 8 센서와 지점평균값 사이에 결정계수 0.7694, bias -0.008, RMSE 0.016으로 모든 위치에서 오차범위가 3% 이내로 적절하게 대표함을 확인할 수 있다.
- 이러한 결과들은 추후 설마천 토양수분량을 대표할 수 있는 관측지점으로 3곳을 제외한 나머지의 관측소를 제거한 후에도 지속적으로 유역의 평균적인 토양수분을 산출할 수 있다. 이는 효율적으로 관측소를 운영할 수 있는 분석 방법으로 사료된다.

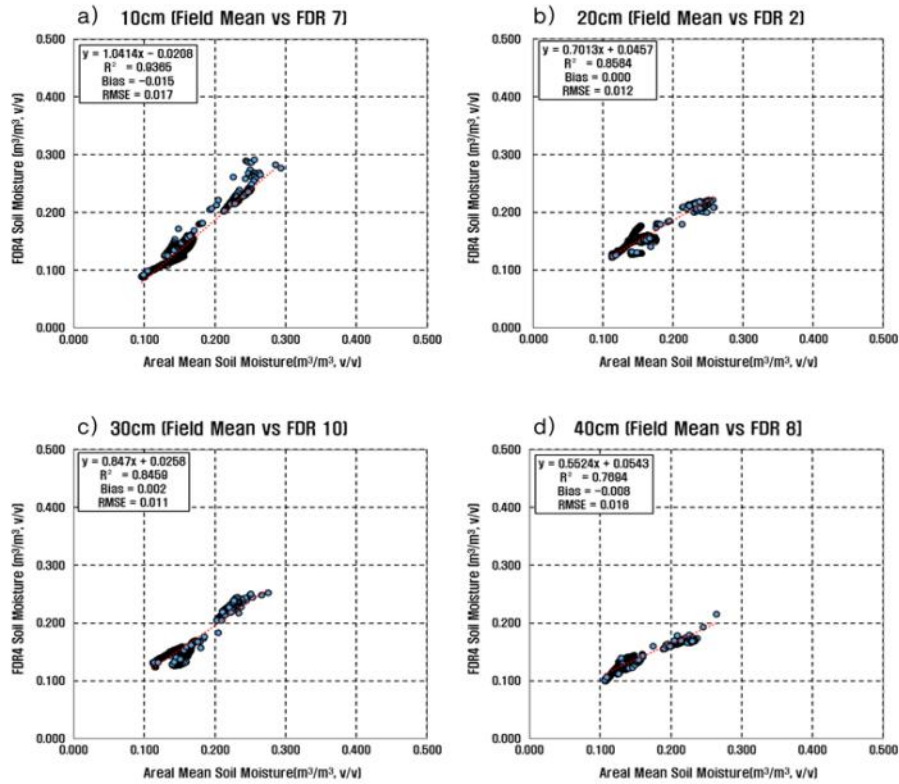


Fig. 3.2.88 토심별 높은 대표성을 가진 지점과 전체 지점 1:1 산점도
a) 10 cm b) 20 cm c) 30 cm d) 40 cm

자. 계측시스템 설계기법 평가

1) 물수지 평가

- 수문자료의 계측의 적절성을 판단하기 위해서는 에너지 수지와 마찬가지로 닫힌 유역에서의 수문자료들을 물수지 합을 계산하는 물수지 평가를 활용하는 방법이 있다. 본래 연구기간동안 운영하여 산출한 자료를 통해 물수지 평가를 수행하려고 했지만 연구기간의 부족으로 2013, 2014년을 예시로 하여 평가하였다.

– 물수지 방정식 이론

- 면적 기반 토양수분량의 신뢰도를 검증할 수 있는 가장 합리적인 방법은 대상유역에서 물수지 (Water Budget)을 따져 보는 것이다. 본 연구에서는 설마천 유역을 대상으로 하여 강수량, 유량, 증발산량 등을 정량화한 후 유역의 저류변화량을 토양수분 변화량이 이를 대표한다고 가정하여 물 수지 기법을 제시하였다.
- 소규모 혹은 대규모 자연하천 유역에 있어 일정 기간 동안 대상유역에 내린 강수량과 지표유출량, 지하수유출량, 증발산량, 유역 내 저류변화량을 알면 물 수지 분석이 가능하다. Eq. 3.2.9는 강수량, 유출량, 증발산량, 유역 내 저류변화량만을 포함하고 있다. 또한 Eq. 3.2.9는 토양수분 변화량이 유역 내 저류변화량을 대표한다는 가정을 포함하고 있다.

$$P = Q + ET \pm \Delta S + G \quad (3.2.9)$$

- 여기서, P 는 강수량 (mm), Q 는 유출량 (mm), ΔS 는 토양 내 저류량 변화량 (mm), G 는 지하수함양량 (mm)이다. ΔS 는 S_f (종기 저류량)에서 S_i (초기 저류량)을 빼면 ($\Delta S = S_f - S_i$) 산정할 수 있다.
- Fig. 3.2.89은 물 수지의 기본 개념을 나타내는 것으로 위에 기술된 5개의 성분을 모두

포함하고 있다. 그러나 이와 같은 성분을 모두 고려하여 물 수지의 특성을 분석할 수 있는 유역은 우리나라에서 극히 제한적이다. 이에 따라 본 연구에서는 산지하천 유역에서 물 수지의 특성을 분석하기 위해 Eq. 3.2.10를 적용하였다.

$$P = Q + ET \pm \Delta S \quad (3.2.10)$$

- 본 연구에서는 대상유역 내에 지하수관측소 1개소가 존재하나 자료의 신뢰도 저하로 지하수 변화량을 물 수지 분석 시 제외하였다. 유역 내 저류변화량 산정 시 적용된 가정과 지하수 변화량을 고려하지 못한 점은 물 수지 분석 시 오차로 나타날 것으로 판단된다.

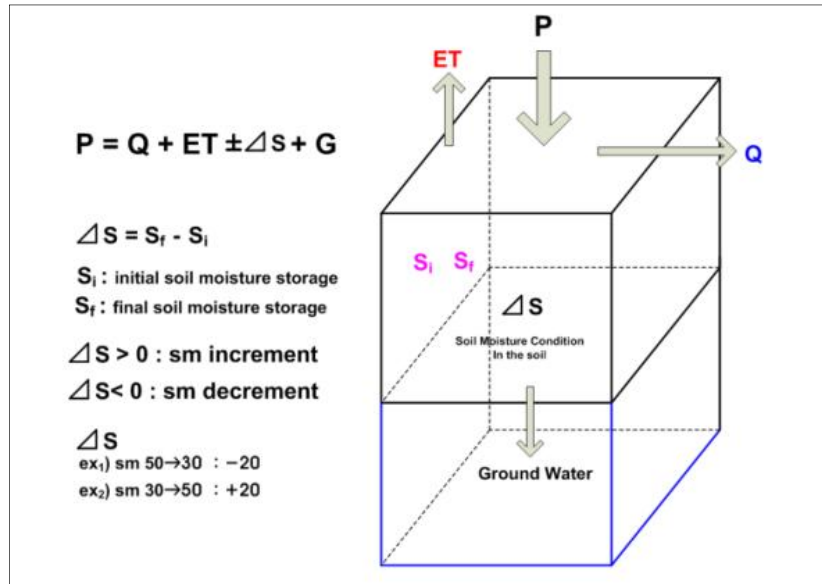


Fig. 3.2.89 물수지 기본 개념

– 저류변화량 산정

- 유역 내 저류변화량은 토양수분 변화량이 유역을 대표한다는 가정 하에 유효토심을 고려하여 산정하였다. TDR 센서는 토양 내 수분량이 차지하는 비율을 측정하기 때문에 양으로 환산하기 위해 유효토심을 산정하였다. 그러나 설마천 유역의 유효토심이 정량화되어 있지 않아 본 연구에서는 TDR 센서가 매설된 위치의 토심 특성을 반영하여 0.8 m로 추정하였다.
- Fig. 3.2.90과 Fig. 3.2.91은 토양수분율로부터 토양수분량을 산정하는 방법을 나타낸다. 본 연구에서는 토심별로 관측된 토양수분량을 단순히 평균하지 않고, 종단적 특성을 반영할 수 있는 방법을 제시하였다. 설마천 토양수분량관측소에는 총 48개 TDR 센서(관측위치 18개소, 토심 10 cm, 30 cm, 60 cm)가 토심별로 매설되어 있다.
- 본 연구에서는 동일 토심별 자료를 산술평균하여 토심 10 cm, 30 cm, 60 cm에 대한 평균값을 구한 후, 여기에 층별로 유효토심을 곱하여 평균토양수분고를 산정하였다. 여기에 유역면적을 곱하여 연평균토양수분량을 산정하였다. 마지막으로 토양수분 변화량은 토심별 평균토양수분 계열을 토대로 종기 값에서 초기 값을 빼서 저류변화량을 산정하였다. 본 연구에서 산정한 저류변화량은 지하수저류 변화량이 반영되지 않는 유효토심 깊이에서의 토양수분 변화량이라는 한계를 갖는다.

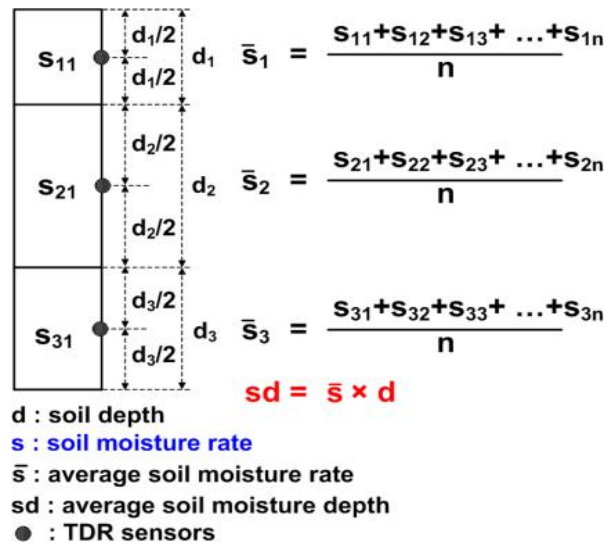


Fig. 3.2.90 Computation of average soil moisture depth

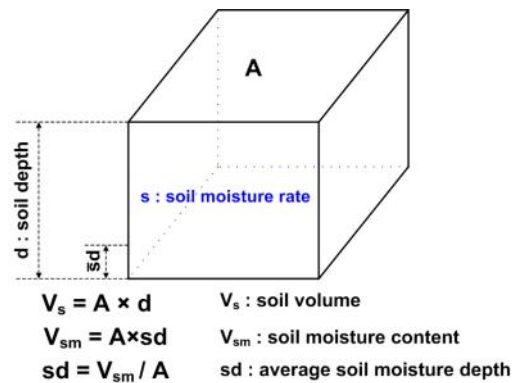


Fig. 3.2.91 Computation of average soil moisture content

- Table 3.2.27, Fig. 3.2.92, Fig. 3.2.93는 각각 2013년, 2014년 연간 토심별 연평균토양수분량의 특성을 나타낸다. Table 3.2.27에서 알 수 있는 바와 같이 평균토양수분량(비율)은 2013년 14.75%, 2014년 11.38%로서, 2013년에 3.38% 큰 특성을 나타내었다. 유효토심 0.8 m을 적용하여 토양수분고 (soil moisture depth, sd)를 산정한 결과, 2013년 0.121 m, 2014년 0.093 m의 특성을 나타내었다. 2013년에 강우량이 많았던 점을 감안하여 볼 때, 본 유역에서 산정된 토양수분량의 특성은 적절한 것으로 판단된다.

Table 3.2.27 토양수분 연평균 특성(2013~2014)

Location of TDR sensors	Average soil moisture rate[s, %]		Soil depth [d, m]	Average soil moisture depth[sd, m]		Yearly soil moisture content[sm, m³]	
	2013	2014		2013	2014	2013	2014
TDR sensor [10 cm]	13.72	10.14	0.2	0.027	0.020	232,614.79	171,963.01
TDR sensor [30 cm]	14.35	11.72	0.2	0.029	0.023	243,297.16	198,811.07
TDR sensor [60 cm]	16.19	12.27	0.4	0.065	0.049	549,301.80	416,071.54
Total (Average)	(14.75)	(11.38)	0.8	0.121	0.093	1,025,213.75	786,845.62

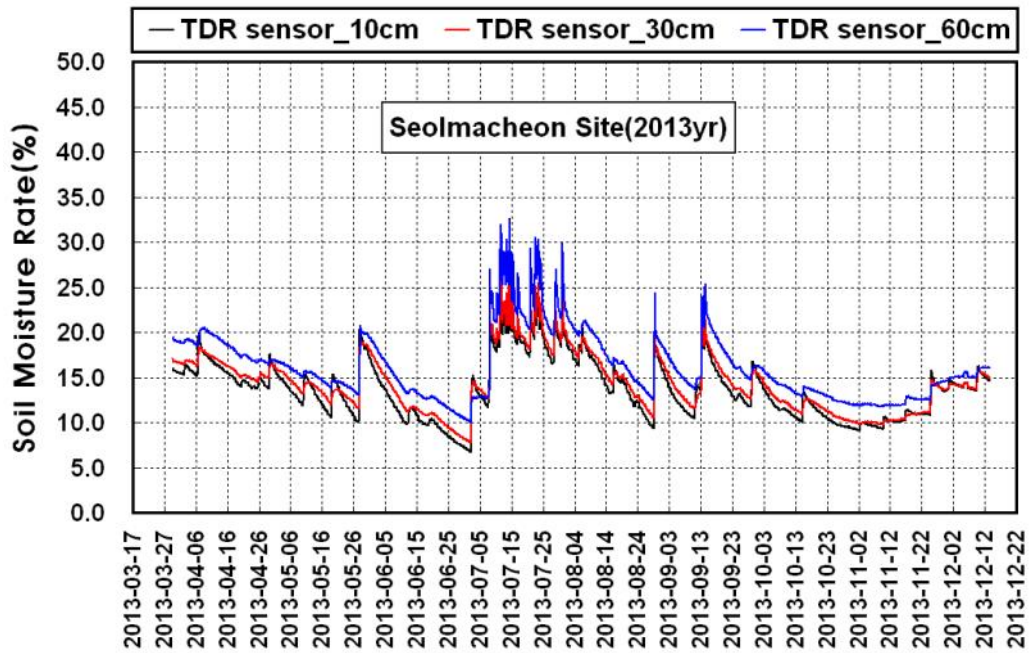


Fig. 3.2.92 깊이별 토양수분량 (2013)

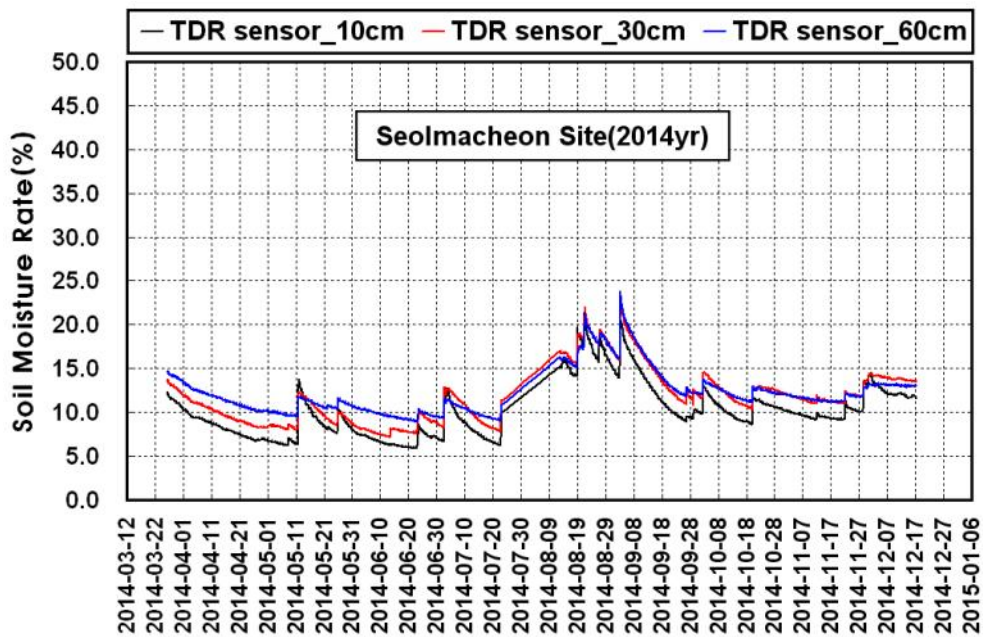


Fig. 3.2.93 깊이별 토양수분량 (2014)

- 본 분석에서는 토심별 평균토양수분 계열로 각각 토양 내 토양수분의 변동량을 산정하였다 (Table 3.2.28). 산정된 토양수분 변동량은 유효토심 0.8 m를 적용한 결과로서 2013년, 2014년 모두 감소 특성을 나타내었다. Table 3.2.28에 수록되어 있는 바와 같이 평균토양수분 변동 비율은 2013년 -2.32%, 2014년 -0.81%로서, 2013년에 1.51% 정도 큰 특성을 나타내었다.

Table 3.2.28 연도별 토양수분 변동량(2013~2014)

Location of TDR sensors	$\Delta S (S_f - S_i)$ [%]		Soil depth [d, m]	Variation depth of soil moisture content[m]		Variation content of soil moisture content[m ³]	
	2013	2014		2013	2014	2013	2014
TDR sensor [10 cm]	-1.38	-0.61	0.2	-0.003	-0.001	-23,461.33	-10,275.76
TDR sensor [30 cm]	-2.22	-0.22	0.2	-0.004	-0.0004	-37,594.67	-3,791.06
TDR sensor [60 cm]	-3.36	-1.61	0.4	-0.013	-0.006	-113,914.67	-54,580.36
Total (Average)	-2.32	-0.81	0.8	-0.020	-0.008	-174,970.67	-68,647.19

2) 물수지 요소 정량화

○ 강수량

- 유역내의 강수량 관측소에서 생산된 자료를 기반으로 Thiessen method을 적용하여 산정한 다. 본 연구에서는 유역내의 6개의 강수량 관측소에서 적용하였으며 한 면적평균강수량은 Table 3.2.29와 같다.

Table 3.2.29 Monthly Areal Rainfall(2013, 2014)

Year Month	2013			2014		
	Monthly rainfall[mm]	Cumulative rainfall[mm]	Ratio[%]	Monthly rainfall[mm]	Cumulative rainfall[mm]	Ratio[%]
1	22.3	22.3	1.5	7.0	7.0	1.1
2	34	56.3	2.3	20.6	27.6	3.2
3	23.8	80.1	1.6	4.6	32.2	0.7
4	61.1	141.2	4.1	16.7	48.9	2.6
5	120.6	261.8	8.2	70.3	119.2	10.8
6	21.3	283.1	1.4	47.4	166.6	7.3
7	810.8	1,093.9	54.9	160.1	326.7	24.5
8	152.2	1,246.1	10.3	142.5	469.2	21.8
9	130.3	1,376.4	8.8	84.0	553.2	12.9
10	22.2	1,398.6	1.5	52.1	605.3	8.0
11	57.7	1,456.3	3.9	42.9	648.2	6.6
12	20.8	1,477.1	1.4	4.5	652.7	0.7

○ 유출량

- 달려있는 유역의 하류부에 유량 관측소를 적용하여 유출량을 산출할 경우 정확도가 높아진다. 본 연구에서도 유역 하류부에 전적비교 지점의 일유출량을 선택하였으며 분석한 결과는 Table 3.2.30, Fig. 3.2.94와 같다.

Table 3.2.30 연도별 유출 특성 (2013, 2014)

Year	Runoff volume[m ³]	Runoff depth[mm]
2013	9,358,070	1,103
2014	1,773,446	209

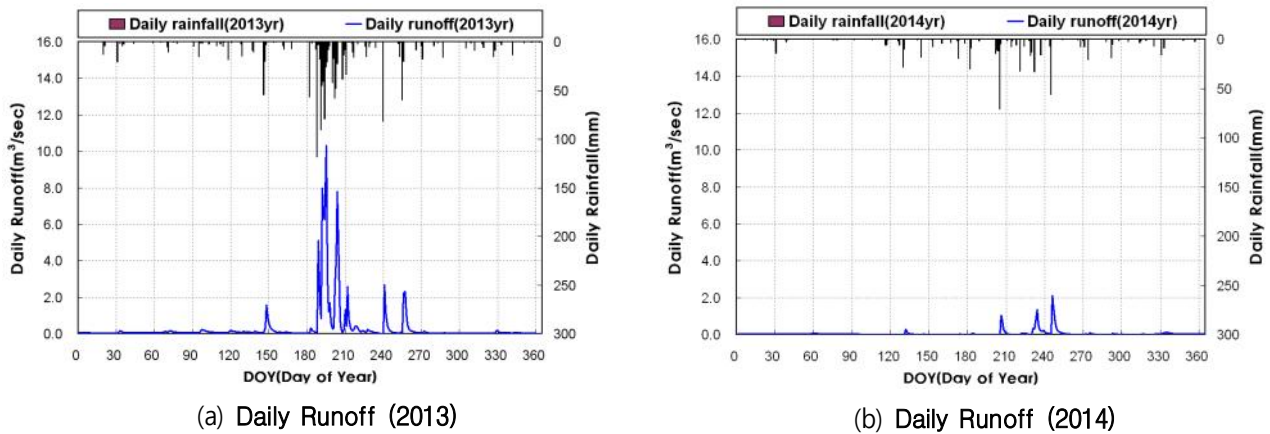


Fig. 3.2.94 연도별 유출 특성 시계열 그래프 (2013, 2014)

○ 토양수분량

- 본 연구에서는 물 수지 분석을 통해 에디공분산 기반의 증발산량 자료의 적정성을 판단하기 위해 토양수분량의 특성을 분석하였다. 설마천 토양수분량의 관측소에서는 토심 10 cm, 30 cm, 60 cm 별로 자료가 생산되고 있기 때문에 본 연구에서는 토심별로 각각 평균하여 토양수분량을 정량화하였다.
- 2013년 설마천 토양수분량 관측소에서 관측된 토양수분량의 통계적 특성은 Table 3.2.31과 Fig. 3.2.95와 같다. Table 3.2.31과 Fig. 3.2.95에서 알 수 있는 바와 같이 평균은 토심 10cm에서 13.72%, 토심 30 cm에서 14.35%, 토심 60 cm에서 16.19% 순의 특성을 보였다. 이는 토심이 깊을수록 토양수분량이 많음을 의미하는 것으로 전반적으로 토심 60 cm에서 가장 큰 특성을 보였다 (Fig. 3.2.96).

Table 3.2.31 토양 깊이별 토양수분량 특성1(2013)

2013	Soil depth_10cm	Soil depth_30cm	Soil depth_60cm
Minimum	6.7	7.8	10.0
Maximum	32.4	29.9	32.4
Mean	13.72	14.35	16.19
Standard Deviation	3.3	3.3	3.7

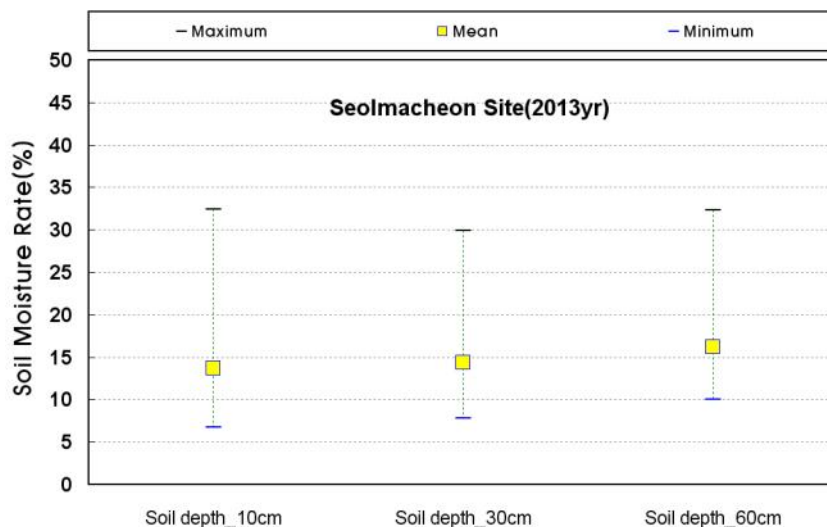


Fig. 3.2.95 토양 깊이별 토양수분량 (2013)

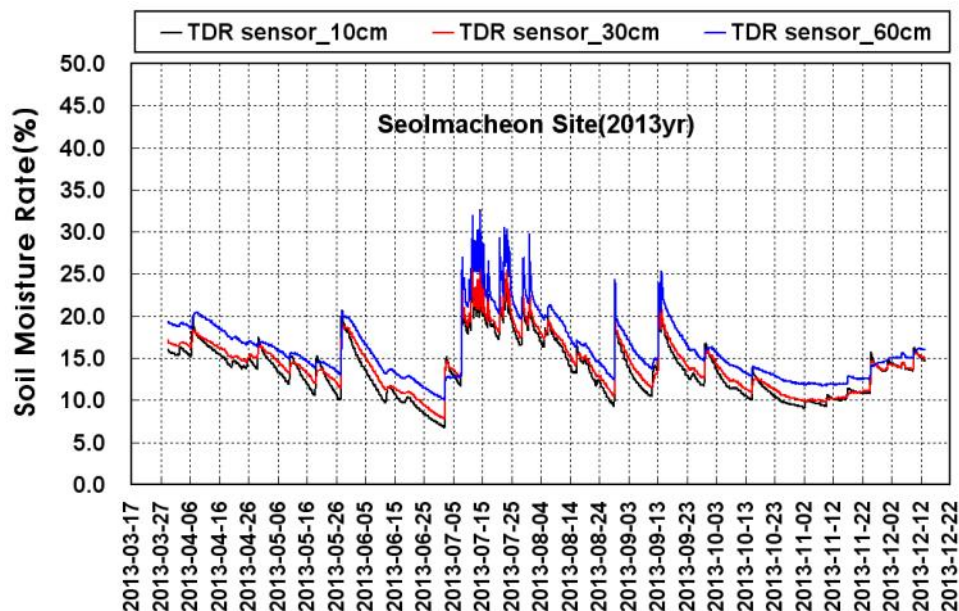


Fig. 3.2.96 토양 깊이별 시계열 토양수분 그래프 (2013)

- Table 3.2.32는 2013년 토양수분량의 변동 특성을 나타낸다. 본 연구에서는 토심별로 각각 토양수분량을 누가하여 초기 토양수분량에서 종기 토양수분량을 차감하여 변동 특성을 분석하였다. 토양수분량의 변동 특성은 토심 10 cm에서 -1.38%, 토심 30 cm -2.22%, 토심 60 cm에서 -3.36%의 특성을 나타내었다.

Table 3.2.32 토양수분량 변동 특성(2013)

2013	Soil Depth_10cm	Soil Depth_30cm	Soil Depth_60cm
Variation[%]	-1.38	-2.22	-3.36

○ 증발산량

- 증발산량은 대표적으로 에디공분산 원리를 이용하여 증발산량을 산출한다. 10 Hz의 고도의 정밀한 장비로 그만큼 주변 기상이나 상황에 따라 결측 및 오측이 자주 발생하기 때문에 연속성 있는 데이터를 산출하기 위해 품질관리는 필수불가결한 단계이다.
- KoFlux 표준화 프로그램을 통해 품질관리된 자료 (Level 1)에 대해 보충 작업을 수행하여 일 증발산량, 월증발산량, 연증발산량의 신뢰도를 향상시킬 필요가 있다. 일반적으로 에디 공분산 방법에 의한 증발산량 산정에서 월평균 약 10% 내외의 결측자료가 발생하며, 많게는 50% 이상의 결측이 발생하는 것으로 알려져 있다 (Alavi et al., 2006). 또한 결측자료가 발생하게 되면 해당 자료의 시계열 분석의 정확도를 저해할 뿐만 아니라, 인공위성 및 지표-대기 모델에서 산정된 증발산량의 검증용으로 사용되는데 한계점이 있다 (Chen et al., 2012).
- 본 연구에서는 결측자료를 보충하기 위해 위에 기술된 방법 중에서 물리식 기반의 증발산량 산정식인 FAO Penman-Monteith(FAO-PM) 방정식 (Allen et al., 1998), 평균일변화법 (Mean Diurnal Variation; MDV), Kalman Filter (Single)를 활용하였다.

Table 3.2.33 연도별 계산방법별 증발산량(2013)

Seolmacheon Site		Yearly evapotranspiration characteristics		
		Rainfall [mm]	Evapotranspiration [mm]	Rate[%]
Eddy Covariance		1,477.1	194.9	–
FAO-PM			315.5	21.4
MDV			301.2	20.4
Kalman Filter			283.5	19.2
Gap-filled ET	FAO-PM		297.4	20.1
	MDV		302.2	20.5
	Kalman Filter		293.3	19.9

Table 3.2.34 연도별 계산방법별 증발산량 (2014)

Seolmacheon Site		Yearly evapotranspiration characteristics		
		Rainfall [mm]	Evapotranspiration [mm]	Rate[%]
Eddy Covariance		652.7	261.8	–
FAO-PM			379.7	58.2
MDV			314.3	48.2
Kalman Filter			350.9	53.8
Gap-filled ET	FAO-PM		412.9	63.3
	MDV		318.0	48.7
	Kalman Filter		360.9	55.3

3) 설마천에서 물수지 분석 결과

- 본 분석에서는 3가지 방법으로 보충하여 정량화된 에디 공분산 기반의 증발산량과 각각의 물수지 성분을 Eq. 3.2.9의 물수지 방정식에 각각 적용하여 물수지의 특성을 분석하였다. 물수지 성분 중 강우량, 유출량, 증발산량, 유역의 저류변화량은 위의 과정에서 산정된 값을 활용하였다. 분석의 편의 상 증발산량 계열에 따라 Case I-III로 구분하여 분석하였다. Case I은 에디 공분산 자료를 FAO-PM으로 보충한 증발산량, Case II는 에디 공분산 자료를 MDV로 보충한 증발산량, Case III는 에디 공분산 자료를 칼만 필터로 보충한 증발산량이다. 본 연구에서는 Table 3.2.35, Table 3.2.36에 설마천 유역(전적비교 지점)의 물수지 분석 결과를 나타내었으며, 분석된 결과는 다음과 같다. 2013년의 경우, 유출량은 총강우량 대비 74.71%의 특성을 나타내었다. 증발산량은 Case I (297.4 mm), Case II (302.2 mm), Case III (293.3 mm)의 특성을 나타내었다. 유역 내 저류변화량은 2013년에 $0.175 \times 10^6 \times \text{m}^3$ (20.6 mm) 정도 감소한 것으로 분석되었다. 각각의 물수지 성분을 물수지 방정식에 적용하여 물수지 분석을 수행한 결과, 방법별로 오차율은 미미하였으나 Case II(6.23%)에서 가장 적게 산정되었다. 2014년의 경우, 유출량은 총강우량 대비 32.03%의 특성을 나타내었다. 증발산량은 총강우량 대비 Case I (412.9 mm), Case II (318.0 mm), Case III (360.9 mm)의 특성을 나타내었다. 유역 내 저류변화량은 $0.069 \times 10^6 \times \text{m}^3$ (8.1 mm) 정도 감소하였다.
- 각각의 물수지 성분을 물수지 방정식에 적용하여 물수지 분석을 수행한 결과, 방법별로 오차율은 비교적 큰 특성을 나타내었으나 Case I (5.96%)에서 가장 적게 산정되었다.

Table 3.2.35 물수지 분석 결과 (2013)

2013	Rainfall P (10 ⁶ ×m ³)	Runoff		Evapotranspiration		Storage variation		Error	
		Q (10 ⁶ ×m ³)	Rate (%)	ET (10 ⁶ ×m ³) (mm)	Rate (%)	ΔS (10 ⁶ ×m ³) (mm)	Rate (%)	(10 ⁶ ×m ³) (mm)	Rate (%)
Case I	12.526 (1,477.1)	9.358 (1,103)	74.71	2.522 (297.4)	20.13	-0.175 (-20.6)	-1.40	0.821 (96.8)	6.55
Case II				2.563 (302.2)	20.46			0.780 (92.0)	6.23
Case III				2.487 (293.3)	19.86			0.856 (100.9)	6.83

Table 3.2.36 물수지 분석 결과 (2014)

2014	Rainfall P (10 ⁶ ×m ³)	Runoff		Evapotranspiration		Storage variation		Error	
		Q (10 ⁶ ×m ³)	Rate (%)	ET (10 ⁶ ×m ³) (mm)	Rate (%)	ΔS (10 ⁶ ×m ³) (mm)	Rate (%)	(10 ⁶ ×m ³) (mm)	Rate (%)
Case I	5.535 (652.7)	1.773 (209)	32.03	3.501 (412.9)	63.26	-0.069 (-8.1)	-1.25	0.330 (38.9)	5.96
Case II				2.697 (318.0)	48.72			1.134 (133.7)	20.49
Case III				3.060 (360.9)	55.29			0.771 (90.9)	13.93

- 물수지의 특성을 연도별로 비교해 보면, 유출량은 강우가 비교적 많았던 2013년(1,477.1 mm)이 2014년(652.7 mm, 2013년 대비 44.2%에 해당)에 비해 7.585×10⁶ m³ 정도 많이 발생하였으며, 이를 유출률로 환산해 보면 2013년 74.71%, 2014년의 32.03%와 같다. 반면 증발산량은 강우량이 풍부한 2013년보다는 강우량이 상대적으로 적은 2014년에 58.5mm 정도 크게 산정되었다. 그러나 보충방법별 증발산량의 특성은 2013년에는 유사하였으나 2014년에는 상당히 상이하였다. 유역 내 저류변화량은 2개년 모두 감소하는 특성을 나타내었다.

차. 토양수분량 품질관리 및 관측소 운영 가이드라인

- 본 연구에서는 토양수분 관측소 설치 및 운영 수행 결과를 제시하고 있으며, 이를 기반으로 토양수분량 품질관리 및 관측소 운영 가이드라인을 작성하였다.
- 가이드라인은 토양수분량조사 관측이론, 토양수분 자료 생산 절차, 품질관리 내용 및 절차로 구성되어 있으며, 추가적으로 통계기법을 이용한 산출 토양수분 자료 분석 결과가 상세히 기술되어 있다. 보다 상세한 내용은 부록의 C장의 토양수분량 조사 매뉴얼에 명시되어 있다.

카. 토양수분 계측시스템 활용 방안

- 토양입자나 공극사이에 양적으로 내포되어 있는 물로 정의되는 토양수분량은 강우에 대한 유역의 응답 과정에서 발생하는 유출량에 크게 영향을 미치게 된다. 즉 유출기구의 특성을 좌우하는 중요한 인자라 할 수 있으며, 또한 대기와 지표 사이의 에너지, 탄소, 물의 상호교환 과정에서 중요한 매개체가 된다. 토양수분량자료는 국가 물 관리 업무에 활용되는 기초자료로서 국가 물 관리, 가뭄분석, 갈수 및 홍수예보, 물 순환(water cycle) 과정의 규명, 물 수지(water budget) 분석, 유출 해석 및 모형 개발, 기상예보 정확도 향상, 생태계 순환 등 여러 분야에 활용되고 있다. 본 연구에서는 토양수분량 자료 활용 방안을 시급하게 요구되는 요소에 주안점을 두고 국가 물관리, 가뭄분석, 위성기반 토양수분량 생산 분야, 산사태 분야에 국한하여 아래에 제시하였다.

1) 국가 물 관리 분야

○ 최근 물관리 업무가 국토교통부에서 환경부로 일원화되면서 그 어느 때보다도 국민의 관심사로 대두되고 있다. 물관리란 모든 사람과 생명체가 물을 자연환경의 구성요소 및 사회·경제 활동의 필요요소이자 자원으로 보전하고 경제적으로 이용하며, 가뭄·홍수로 인한 재해를 줄이거나 예방하는 일을 말한다. 국가는 물 관리 업무를 효율적으로 수행하기 위해서 수자원 장기종합계획을 수립하여 이에 대응하고 있다. 수자원장기종합계획은 현재 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 법적 기반을 두고 있으며, 환경부 장관은 국가 수자원의 효율적인 이용 및 관리를 위한 20년 단위의 종합계획을 수립하고 5년마다 타당성을 검토하여 필요한 경우에는 그 계획을 변경해야 한다. 이와 같은 수자원장기종합계획을 수립하기 위해서는 장기 유출모형에 의해 미래의 수자원 부존량을 예측하게 되는데, 이 과정에서 토양수분량 등과 같은 많은 수문자료를 필요로 한다. 그러나 우리나라에서는 아직까지 실측기반의 토양수분량이 부족하여 단순 경험공식에 의존하고 있는 실정에 있다. 본 연구에서 도출된 성과로 인해 많은 유역에서 고품질의 토양수분량 자료가 생산된다면 수장기종합계획 수립 시 적극 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 수자원장기종합계획에서 활용하고 있는 모형은 Tank 모형으로 토양수분량을 기반으로 하는 4단 구조를 가진다. 그러나 실측기반의 토양수분량 자료가 전무하여 현재에는 경험공식에 의존하고 있다. 아래의 Fig. 3.2.97은 Tank 모형으로 장기 유출량을 모의한 결과로서 실측치와 상당한 차이를 보이고 있다. 토양수분량 기반의 Tank 모형의 기본 구조는 Fig. 3.2.98과 같다.

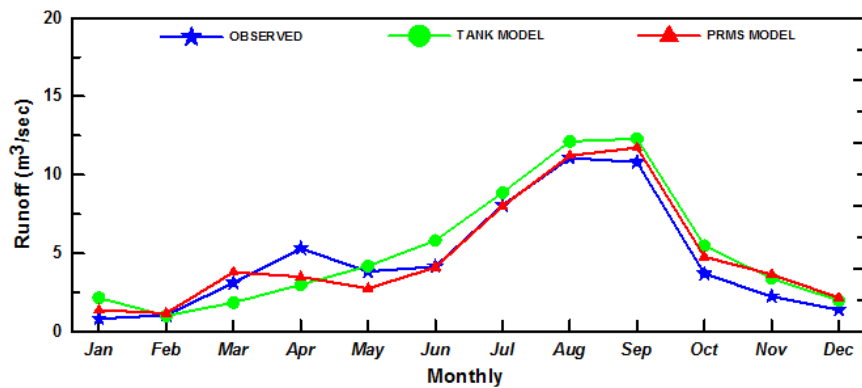


Fig. 3.2.97 Tank 모형의 장기유출 모의 결과

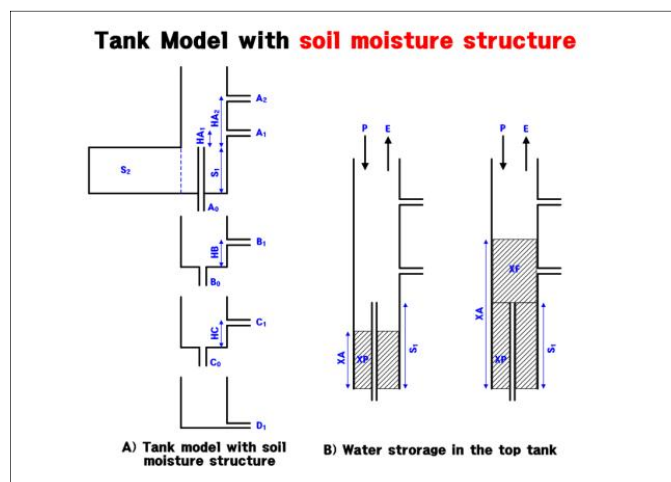


Fig. 3.2.98 토양수분량 기반 Tank 모형의 기본 구조

2) 갈수예보

- 갈수예보는 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」 제8조(홍수·갈수 예보의 실시)에 근거를 두고 현재 환경부 홍수통제소에서 수행하고 있다. 홍수통제소장은 갈수로 인명과 재산의 피해가 예상되는 지역에 대하여 갈수예보를 관심, 주의 경계 또는 심각 단계로 구분하여 발령하여야 한다. 현재의 갈수예보는 갈수예보 지점에서 수위-유량관계를 이용하여 수행하고 있다. 갈수예보 업무를 효율적으로 수행하기 위해서는 대상유역 내의 토양 내에 함유되어 있는 토양수분량을 고려하는 것이 바람직하다.

3) 홍수예보

- 홍수예보는 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」 제8조(홍수·갈수 예보의 실시)에 근거를 두고 현재 환경부 홍수통제소에서 수행하고 있다. 홍수통제소장은 홍수로 인명과 재산의 피해가 예상되는 지역에 대하여 홍수예보를 관심, 주의 경계 또는 심각 단계로 구분하여 발령하여야 한다. 현재의 홍수예보는 홍수예보 지점에서 수위-유량관계를 이용하여 수행하고 있다. 홍수예보 업무를 효율적으로 수행하기 위해서는 대상유역 내의 토양 내에 함유되어 있는 토양수분량을 고려하는 것이 바람직하다. 일반적으로 토양수분량은 대상유역의 유출기구의 특성을 좌우하는 중요한 매개체가 된다. 토양 내 토양수분량이 많은 경우 직접 유출량을 많이 발생하게 하기 때문에 홍수예보를 위한 기초자료로 활용될 수 있다.

4) 가뭄분석

- 최근 기후변화의 영향으로 강우일수는 감소하고, 강수량의 시공간적(계절적·지역적) 편중 현상이 심해짐에 따라 가뭄의 발생빈도 및 기간이 증가하고 있다. 우리나라에서는 가뭄(drought)을 발생특성에 따라 강우의 부족을 의미하는 기상학적 가뭄(meteorological), 농업용수의 공급 부족 및 토양수분의 부족으로 인해 농작물 성장이 저하되는 농업적 가뭄(agricultural), 생·공업용수의 공급과 수요의 불일치로 인한 수문학적 가뭄(hydrological drought), 용수부족으로 인한 사회적 갈등 야기 및 농작물 가격의 상승과 같은 사회·경제적 가뭄으로 구분하여 가뭄에 대응하고 있다. 그러나 가뭄은 홍수, 태풍 등 다른 물 관련 재해와는 달리 그 시작과 끝을 판단하기 어렵다는 점, 피해양상이 매우 점진적으로 진행된다는 점, 직·간접적인 영향으로 인한 사회 및 경제적 피해 규모를 정량적으로 산정하기 어렵다는 특성으로 인해 효율적인 대책 마련이 어려운 게 사실이다 (국회입법조사처).
- 본 연구에서는 실측기반 실시간 토양수분량 자료를 활용하여 가뭄특성을 감시할 수 있는 방안을 기술하였다. 토양수분량은 강우 등 기상·수문자료보다 가뭄특성을 파악할 수 있는 기초자료로서 환경부, 홍수통제소, 국립과학원 등 여러 기관에서 생산하고 있다. 본 연구에서는 가뭄분석 분야에 실시간 토양수분량 자료의 활용성을 평가하기 위해 설마천 유역과 청미천 유역에서 10개년 동안 생산된 토양수분량 자료로 2018년 가뭄특성을 분석하였다. 분석 결과, 실측기반의 실시간 토양수분량 자료는 가뭄발생 시작 시점은 물론 가뭄감시, 가뭄지속 시간, 가뭄심도, 가뭄 해갈 시점 등의 판단을 용이하게 하였다. 이에 따라 본 연구에서는 대상유역을 대표할 수 있는 토양수분량 관측시스템 구축 방안도 함께 기술하였다.



Fig. 3.2.99 가뭄분석 분야 토양수분량 활용 방안

5) 산사태 분야

- 토양수분량의 특성으로 산사태 및 토석류의 성향을 분석하여 볼 때, 토석류는 산사태가 발생한 당일의 토양수분량의 특성보다는 연일 공급된 강우로 인하여 높은 토양수분량이 장기간 지속이 될 때 발생할 확률이 높다.
- 얇은 지점의 토양수분량이 깊은 지점의 토양수분량보다 큰 상태로 지속될 때 산사태의 발생 확률이 높을 것으로 보인다. 얇은 지점의 토양수분량이 큰 상태로 유지되는 것은 토심이 깊은 지점에 토양수분량이 충만하여 더 이상 배수되지 못하여 생기는 현상이다. 이와 같은 역학적 현상은 지표면의 유출수가 더 이상 토양 속으로 스며들지 못해 직접 유출이 발생하여 나타나 것으로 보인다. 이로 인해 하류의 사면에 유출수가 집중되어 지반이 갖는 마찰력보다 커져 산사태가 발생된 것으로 추정할 수 있다.

타. 핵심 연구 결과 요약

- 한국수자원조사기술원에서는 본 연구에서 우선적으로 효율적인 시험유역 설치 및 운영을 위한 시험유역 운영 현황, 토양수분 관측 방법, 해외 토양수분 관측 현황 등의 선행연구 조사를 10건 이상 수행하였음.
- 선행사례를 바탕으로 가장 오랜기간 운영되었고, Flux-tower 및 TDR 센서가 위치하여 가용 가능한 수문 자료가 풍부한 설마천 유역을 성균관대학교 산학협력단과의 협의를 통하여 시험유역으로 최종 선정하였음.
- 이후 시험유역의 지리적, 기상학적 그리고 지질학적 특성의 조사를 수행하여 유역을 파악하였으며(김기영 등, 2019a), 이후 시험 유역 내 유전율식 센서 총 16개를 주관기관과의 협업을 통해 설치하여 면 단위 토양수분 산출을 위한 토양수분 계측시스템의 기반을 마련하였음(김기영 등, 2019a).
- 또한 유역 내 설치된 관측소의 유지 및 관리를 통하여 누적된 경험을 활용하여 토양수분 관측 매뉴얼을 제작하여 향후 국내 토양수분 관측소의 추가적인 설치를 보다 용이하게 하였음.
- 유역 내 토양수분 관측소 별 토양 시료를 채취하여 건토중량법을 실시하였으며, 그 결과를 유전율식 센서와 비교하여 센서의 신뢰도를 확보하였고, 2년의 시험유역 운영을 기간 동안 데이터의 주기적인 수집 및 자료 분석을 통하여 계측시스템의 평가를 수행하였으며(김기영 등, 2019a) 토양수분 데이터베이스를 마련하였음.
- 수집된 토양수분 자료를 활용한 설마천 유역의 유출 특성 파악(김기영 등, 2019b) 및 작물 계

수 산정 (김기영 등, 2019c)과 같은 활용 방안에 관한 연구결과를 도출하였고 토양수분 자료 활용방안을 제시하였음.

제4장. 목표 달성도 및 관련 분야 기여도

1. 목표 달성도

가. 연차별 연구개발 목표 및 결과

1) 1차 연도(2018)

구분	연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
성균관대학교 산학협력단	선행연구 사례 조사	Cosmic-ray 토양수분 산출에 관한 선행연구 조사	선행연구조사를 통해 기존 방식의 Cosmic-ray 기반 토양수분 값 교정방식 및 알고리즘 이해
		원격탐사기법 적용 사례 조사	
		토양수분량 공간매핑을 고려한 연구 사례 조사	
		토양수분량 조사 관련 학술논문 연구	
	토양수분 계측시스템 설계 및 구축	Cosmic-ray 토양수분 계측시스템 설계	CRNP 활용을 위한 조건 분석 및 위치 확정
		면 단위 토양수분량 계측시스템 구축	
		토양수분 계측시스템 시험운영 및 확정	CRNP 초기값 분석을 통한 성능 평가 및 FDR, TDR 토양수분 적절성 평가
		Cosmic-ray 성능 평가	
		토양수분 자료 적절성 평가	
한국수자원 조사기술원	선행연구 사례 조사	토양수분 조사 이론 및 방법에 관한 선행연구 조사	토양수분 계측 시스템 설치 기준, 조사 방식, 시험유역 선정 기법, 시스템 유지관리, 토양수분 자료의 품질관리 매뉴얼에 대한 선행 연구 조사 및 분석, 시험유역 선정에 반영
		유전율식(TDR, FDR) 센서 기반 토양수분 관측 사례 연구	
		국가 수문 관측소 구축사례 연구	
		토양수분 관측소 설치, 운영, 유지관리 사례 조사	
		토양수분 조사 매뉴얼 연구	
		대표 시험유역 선정 계측시스템 설치 위치 확정	
	시험유역 선정 및 토양수분 계측시스템 위치 확정	시험유역 선정 및 조건 적용	대상 유역 토양 특성, 기후, 식생 등 지리적 특성 분석 및 토양수분 계측시스템 설치 위치 확정
		대표성 분석 및 시험유역 선정	
		계측시스템 설치 위치 확정	
	토양수분 계측시스템 설계 및 구축	유전율식(TDR, FDR) 계측시스템 설계	TDR, FDR 센서 위치 결정, 시험운영 시행, 관측기기 성능 평가
		토양수분 계측시스템 시험운영 및 확정	

2) 2차 연도(2019)

구분	연구 목표	연구개발 수행 내용	연구 결과
성균관대학교 산학협력단	Cosmic-ray 매개변수 최적화	CRNP 토양수분 교정 및 보정	Cosmic-ray 기기 관측자료 분석을 통한 매개변수 최적화
		CRNP 관측자료 분석 및 전처리	
		Cosmic-ray 매개변수 최적화	
	CRNP 토양수분 자료 개선을 위한 고도화	Cosmic-ray calibration function 결정	정확성 검증 및 교정함수 보정, CRNP 기반 토양수분 자료의 고도화
		유전율식(FDR, TDR) 자료와 CRNP 기반 토양수분 자료의 정확성 검증	
	토양수분량 계측시스템 설계 기법 개발	CRNP 설치 조건 및 기준 산정	토양수분 자료 품질관리 기준 체계화, 정확도 높은 토양수분 자료 활용 방안 수립
		TDR, FDR 자료 품질관리 기준 정립 및 체계화	
		토양 특성, 기후, 식생 등 타 영향 인자와의 관계성 연구	
		최적 토양수분 자료 산출 방식 분석	
		원격탐사기법 연계 방안 마련	
한국수자원 조사기술원	계측시스템 운영 및 자료 분석	계측시스템 유지관리 및 자료 수집	계측시스템의 안정적인 운영, 지속적 유지관리 및 자료 수집
		토양수분 자료 분석 및 DB화	
		토양수분 자료의 현장 검증	
	계측시스템 최적화	토양수분 관측소 지점 대표성 분석 및 최적화 방안	수문자료 정량화, 월별 토양수분 특성 및 물 수지 분석
		토양수분량 계측시스템 검증 및 평가	
	토양수분량 계측시스템 설계 기법 개발	대표성을 고려한 토양수분량 계측 기법 정립	토양수분 계측 시스템 설계 기법, 유지 관리 및 운영, 토양수분 조사 기법 체계화, 토양수분 자료 활용 방안 수립
		시험유역 선정 기법 정립	
		토양수분 조사 매뉴얼	
		토양수분 자료 품질관리 매뉴얼	
		토양수분 관측소 운영 및 유지관리 매뉴얼	
		토양수분 자료 활용 방안	

나. 정량적 연구 성과 목표 및 달성도

구분		목표	달성도(%)	비고
국외 논문 게재	SCI	1	100	
	비SCI			
	계	1	100	
국내 논문 게재	SCI			
	비SCI	6	100	
	계	6	100	
특허 출원	국내			
	국외			
	계			
특허 등록	국내			
	국외			
	계			
인력 양성	석사	1	100	
	박사			
	계			
기술 이전	계약 건수			
	계약액			
	징수액			
국제 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
국내 표준화	기고서 제출			
	기고서 채택			
	표준안 채택			
등록 · 기탁 대상 성과물	보고서 원문			
	연구시설·장비			
	기술요약정보			
	생명자원	생명정보		
		생물자원		
		신품종		
	소프트웨어			
	화학물			
기타	시제품			
	성과 홍보			
	일자리 창출			

다. 연구 목표 달성도

세부 연구 목표	비중 (%)	달성도 (%)	연구 수행 사항
토양수분량 관측 운영사례를 조사하여 최적의 토양수분 관측 시험유역 선정	25	25	토양수분 뿐 아니라 다양한 수문기상인자의 관측 사례와 자료의 활용도를 고려하여 시험유역 선정 및 관측소 구축
기존의 유전율식(TDR, FDR) 및 Cosmic-ray 관측 기기에 대한 국내/외 선행연구 사례 조사	10	10	선행연구 조사를 통해 TDR, FDR, Cosmic-ray 관측 기기의 활용 방안을 연구, 관측소 구축시 적용
Cosmic-ray 관측 기기를 이용한 토양수분량 변환 및 한반도에 특화된 Calibration 분석	15	15	산지에서의 관측 반경 설정, 기존 교정 방법의 선택적 적용으로 산악지형에 특화된 토양수분량 관측 시스템 제시
유전율식 토양수분 관측 운영 및 평가, 각 토심별 설계에 관한 분석	20	20	주기적인 유지관리를 통해 유전율식(FDR, TDR) 기기 운영 및 현장실험을 통한 토질 특성 파악, 자료 고도화에 활용
Cosmic-ray 관측 자료의 개선을 위한 고도화 및 관측 자료의 검증 평가	10	10	Cosmic-ray 교정식 개발을 통한 토양수분 산출결과 개선
유전율식/Cosmic-ray 관측 기반의 토양수분 DB화 및 통계분석	20	20	회귀 모델을 통한 교정식의 개선도 검증 및 평가, 면 단위 토양수분 데이터 유지관리
합계	100	100	

2. 관련 분야 기여도

가. 관련 분야 기여도

1) 수문 조사 기술 발달 기여

- 지점 데이터를 통한 면 단위 토양수분 산출 기법 개발은 국내 최초이며, 이는 공간 대표성을 지닌 데이터로 수문 조사 기술 분야에 큰 기여가 가능할 것으로 사료됨
- 면 단위 토양수분 계측 시스템을 통해 지점 단위 토양수분 데이터의 한계를 극복하고, 나아가 한반도 전역에서의 토양수분 파악을 가능하게 할 것임
- 면 단위 토양수분 데이터는 지점 단위 데이터와 비교하였을 때, 새로운 관점에서 유역의 물 수지 분석 및 수문 모형 모델링을 가능하게 할 것이며, 이를 통해 국내 유역 조사 및 연구 분야에 크게 기여할 것임
- 지점 단위 토양수분 센서에 제한되어 있던 국내 토양수분 계측 시스템 개발 분야에서 지점 단위 센서를 활용한 적용 분야가 보다 넓은 면 단위 토양수분 생산 기술의 제시를 통해 국내 토양수분 계측 시스템 개발에 기여할 것임

- 현재 여러 기관에서 활용하고 있는 지점 단위 토양수분 센서의 활용 가능성을 높이며, 각 기관 간의 데이터 공유를 촉진하여 수자원 조사 기술의 광범위한 발달에 기여할 것임
- 홍수 및 갈수에 대한 선제적인 대응 방안 제시를 위한 참고자료로써 활용될 수 있으며, 면 단위 토양수분 데이터 자체로 홍수 및 갈수 예보 기술 개발에 공헌할 것임

2) 원격 탐사 토양수분 산출 기술 발달 기여

- 본 연구는 높은 신뢰도를 지닌 고해상도 토양수분 산출에 관한 연구로 현재 학계에서 관심을 갖는 분야로써, 국내 원격탐사 기반 토양수분 데이터의 상세화 및 공간 대표성을 지니는 기준 자료로써 사용될 수 있음
- 향후 국내 토양수분 산출 위성 개발 시 본 연구 결과를 활용하여 한반도 지역 특성 및 요구에 부합하는 토양수분 기준 데이터로써 역할하며, 검증 및 평가를 위해 사용될 수 있을 것으로 기대됨
- 현재 국내 토양수분 산출을 위해 사용되는 위성 기반 토양수분 데이터의 경우 전파 간섭 및 산악지형 식생에 의한 영향으로 정확도를 보장하기 어려운 상황이며, 본 연구 개발을 통해 국내 관측 위성 기반 토양수분 데이터의 정확도 검증 및 데이터 활용 범위를 넓힐 수 있을 것임

3) 다양한 분야에서 활용 가능한 새로운 데이터 제공을 통한 기여

- 농업 분야의 작황 파악 및 토양 건조 정도를 파악할 수 있는 정보를 제공하여 농업 분야 작황 관리 및 가뭄 대응 기술 발달에 기여할 것임
- 본 연구를 통해 산지가 대부분인 한반도에서 매년 발생하는 가뭄, 산사태, 홍수, 산불 등의 자연재난 발생에 토양수분이 미치는 영향을 심도 있게 연구할 수 있는 바탕을 제공할 것임
- 충분하지 않은 시공간 해상도의 토양수분 자료로 인하여 우리나라에서 적극 활용되지 못하는 다양한 원격탐사 분야에 높은 시공간 해상도를 가진 데이터를 제공 할 수 있으며, 기타 분야에서의 원격탐사 토양수분 데이터 활용에 대한 새로운 학문주제가 개척될 수 있음
- 향후 생산된 토양수분 자료의 공공활용을 위해 공동연구수행기관인 한국수자원조사기술원의 웹사이트를 통해 누적된 토양수분 자료의 제공 서비스 구축이 가능하며, 서비스 구축 이전에는 웹사이트에서의 데이터 이용 신청을 통해 데이터 사용 목적, 필요 기간에 맞게 데이터를 제공할 수 있을 것임

나. 기대효과

1) 기술적 · 학문적 측면

- 우리나라 토양수분량 계측 시스템의 완성에 기여할 수 있을 것으로 기대됨
 - 토양수분 관측소 구축의 체계화 가능성
 - 토양수분 조사 기술의 첨단화 가능성
 - 대상 유역의 특성에 맞는 토양수분 센서 개발에 활용될 수 있음
 - 한반도 지형 및 기후 특성에 알맞은 토양수분 자료 교정 기술의 기반을 제공함
- 국가 수문조사기술의 선진화 기반 마련
- 토양수분량 조사에 대한 국가적인 차원의 교육화가 가능함
- 체계적인 품질관리 시스템을 구축할 수 있음
- 토양수분량 자료를 활용한 다양한 분야 연구의 촉매제 역할을 할 것으로 기대됨

-
- 유역 내 강우 유출반응 특성의 분석
 - 가뭄, 홍수 등 관련 자연재난 원인에 대한 심층적 분석
 - 유역 특성에 따른 자연재해 발생 양상에 대한 분석
 - 한반도 특성에 맞는 맞춤형 정보 제공이 가능
- Cosmic-ray 센서 기반 면 단위 토양수분 자료 생산 기술 수준 향상

2) 경제적 · 산업적 측면

- 수재해 저감 및 예방
- 국가 물 관리 정책의 정확도 향상으로 인한 수재해 저감 및 예방 가능
- 고품질의 토양수분 자료 생산
- 대상유역을 대표할 수 있는 토양수분량 자료가 생산되므로, 각종 수자원 계획 및 설계 등의 정확도 향상과 함께 최대 편익이 발생
 - 농업, 임업 분야에의 적용으로 효율적인 작물 및 식생관리가 가능하여, 이를 통한 경제적 효과가 예상됨
- 면 단위 토양수분 산출 기술의 선진화로 개발도상국의 기술 지원 및 관련 산업의 수요 창출 효과를 기대할 수 있음

3) 사회적 · 정책적 측면

- 우리나라 독자적인 토양수분 모니터링 시스템 구축 가능
- 국가 물 관리 정책의 정확도 향상
- 대상유역을 대표하는 토양수분량의 생산이 가능함으로 물 관리 분야의 정확도 향상
 - 자료의 다목적 활용성이 높아짐에 따라 여러 분야에 자료 활용 가능
 - 수문조사사업, 수자원장기종합계획, 하천기본계획, 홍수 및 갈수 예보, 가뭄분석, 산사태 등 방재 분야 활용되어 정책의 정확도 향상에 기여
 - 체계적인 수자원 관리와 개발 가능
 - 농작물 생육, 산림의 육림 등
 - 원격탐사 기법의 검증 자료로 활용되어 토양수분량 자료의 신뢰도 증진
- 물 관리 정책 수립 시의 과학적 근거 및 가이드라인 제시
- 체계적인 시스템의 적용을 통해 수문 정책 및 모니터링 일관성 유지비용 절감
-

1. 전국단위 토양수분 자료의 활용 방안

가. 국가 물 관리 정책

1) 수문조사사업에 활용

- 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」 제9조(수문조사의 실시)에 규정된 국가 수문조사 사업에 활용 가능
- 토양수분량 조사에 관한 사항은 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 규정되어 있으나 아직까지 토양수분량 조사에 대한 계측시스템 설계 및 구축 기준 등이 체계화 되어 있지 않아 활용되지 못하고 있는 실정임
- 전국단위 토양수분 자료의 생산은 이러한 문제점의 직접적인 해결책이 될 수 있음

2) 수자원장기종합계획

- 수자원장기종합계획은 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 규정된 사항으로 국가 수자원 정책에 핵심적인 사항임
- 수자원장기종합계획 수립 시 실측된 토양수분량을 고려하여 장기유출을 모의하여야 하나, 토양수분량 자료가 전무한 관계로 경험식에 의존하고 있는 실정임
- 토양수분 계측 시스템 구축 기법 체계화를 통해 다양한 유역에서의 유출 특성을 분석할 수 있을 것으로 기대됨

3) 하천기본계획

- 하천기본계획은 「하천법」에 규정된 사항으로 국가 치수사업 및 정책에 핵심적인 사항임
- 하천기본계획 수립 시 실측된 토양수분량을 고려하여 강우에 의한 대상유역의 유출량을 산정 후 계획홍수량을 산정해야 하나 토양수분량 자료가 전무한 관계로 이를 못하고 있는 실정임

4) 재난/방재 관련

- 토양수분량은 대상 유역의 유출기구 특성을 지배하는 주요 요소로써, 홍수 예보의 정확성 향상에 기여할 것으로 판단됨
- 홍수예보는 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 규정되어 있는 사항임
- 정확한 홍수예보를 위해서는 대상유역에서 발생하는 유출량의 실시간 산정이 필요하며, 전국단위 토양수분의 관측을 통해 이러한 모니터링 시스템을 구축할 수 있음
- 갈수예보 또한 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률」에 규정되어 있는 사항임
- 정확한 갈수예보를 위해서는 대상유역의 토양 내에 존재하는 토양수분량 파악이 필수적임
- 사면 토양수분의 갑작스러운 증가는 사면, 지반의 강도를 약화시켜 산사태의 원인이 됨
- 면 단위의 토양수분 모니터링 자료는 한국지질자원연구원 등 산사태의 실시간 모니터링 연구를 수행하는 기관에서 기초자료로 활용 가능할 것으로 보임
- 토양수분 모니터링 자료를 활용한 재해/방재 관련 연구가 재해의 발생 원인을 분석하는 중요 자료로써 활용될 수 있음

나. 농작물의 생육

- 우리나라 농경지 및 경작지에서 재배는 되는 작물은 토양 내 존재하는 토양수분량에 의존하여 성장하므로 체계적인 토양수분량 계측은 필수적임
- 작물의 종류에 따라 필요로 하는 소비수량이 상이하기 때문에 과학적인 방식으로 작물을 재배하기 위해서는 토양수분량의 계측이 필수적인 사항임

다. 산림의 육림

- 산림지에 서식하는 식생들을 과학적인 방식으로 관리하기 위해서는 토양수분량 계측은 필수적인 사항임

라. 학계 및 연구기관의 연구 자료

- 현재 전국적으로 운영되고 있는 토양수분 관측소의 개수가 적어, 데이터 활용 가능유역이 소수에 제한됨
- 토양수분 자료가 전국단위로 생산될 경우 다양한 지역에서 물 관리 정책 등의 수립에 과학적 근거를 제시할 수 있을 것으로 기대됨
- 원격탐사 및 모델 기반 토양수분 자료의 검증이 전국적으로 이루어질 수 있음

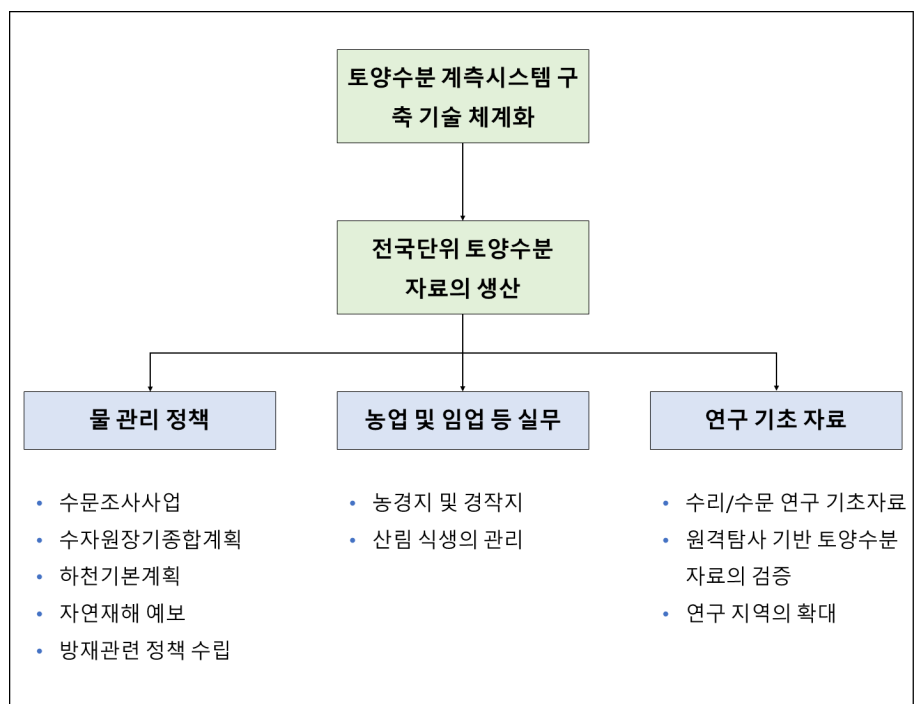


Fig. 5.1.1 전국단위 토양수분 자료의 활용 분야

2. 토양수분량 계측시스템 설계 기법의 활용 방안

- 국가 토양수분량 관측소 확대
 - 2018년 기준 국가 토양수분량 관측소는 2010년 국토교통부에서 구축한 25개소가 있음
 - 토양수분량 계측시스템 설계 기법의 체계화를 통해 전국적으로 통일된 설계 기법을 사용하여 토양수분 관측소 구축이 가능함
 - 단순 관측소의 구축을 용이하게 할 뿐 아니라 관측소 구축 이후 데이터베이스 구축에 있어 전국적으로 일관성 있는 자료의 생산을 가능케 할 것으로 기대됨

- 현재까지 국내에서는 Cosmic-ray를 활용한 계측 시스템 구축 기술이 전무한 관계로 면 단위 토양수분의 관측이 필요한 지역에서 이를 효과적으로 활용할 수 있음

3. 면 단위 토양수분 자료의 활용 방안

- 본 연구를 통해 지속적으로 산출이 가능한 토양수분 자료는, 직경 약 600m의 면적을 대표할 수 있는 면 단위 토양수분임
- 종래의 지점 단위 토양수분 측정에 사용되는 유전율식 센서는 정확성있는 데이터를 제공하나, 관심 구역 내의 토양 구성, 식생 분포 정도, 수체, 지하수위 등을 고려하면 토양수분은 큰 변동성을 가질 수 있기 때문에 지점 데이터를 이용해 면 단위 토양수분 자료를 산출하기에는 한계가 있음

가. 인공위성 및 재분석 자료 개선

- 점 관측 토양수분 자료의 한계를 극복하기 위한 대안으로 인공위성 및 재분석자료의 활용에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있음
- 그러나 대부분의 위성 기반 토양수분 데이터는 상대적으로 낮은 시·공간적 해상도를 가짐 (Table 5.3.1)
- 대부분의 극궤도 위성의 경우 일일 자료 형태로 제공이 되고 있어 일 변동 패턴을 파악할 수 없으며, 공간해상도 또한 수~수십 km로 공간적 변동성을 파악할 수 없다는 한계를 가짐

Table 5.3.1 인공위성 기반 토양수분 자료의 해상도

Name	Spatial Resolution[km]	Temporal Resolution
Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS)	35-50	Daily
Soil Moisture Active Passive (SMAP)	3-36	Daily
Advanced SCATterometer (ASCAT)	12.5-25	Daily
Advanced Microwave Scanning Radiometer 2 (AMSR2)	10-25	Daily
Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS (AMSR-E)	5.4-56	Daily
Sentinel-1	0.01-3	6-12 days

- 추가적으로 Sentinel-1의 경우 250 km의 swath width로 자료를 취득하고 있는데, 이러한 경우 특정 구역 분석 및 점 토양수분 자료와의 검증/보정 연구에 활용하기 위한 자료 수집 및 처리에 많은 시간을 필요로 함
- 또한 원격탐사 기법, 특히 인공위성을 활용하여 토양수분을 산출할 경우 Fig. 5.3.1에 나타난 바와 같이 구름 등의 간섭에 의한 영향을 무시할 수 없음
- 이러한 한계점은 재분석자료의 경우에도 마찬가지로 나타나는데, 관련 연구에서 가장 자주 사용되는 GLDAS의 경우 3시간 단위로 자료가 제공되어 비교적 준수한 시간해상도를 가지지만 25 km의 낮은 공간해상도 때문에 구역 단위 토양수분을 분석하는 데에는 한계를 가짐
- 이러한 장단점들을 고려하였을 때, 특정 농경지 혹은 유역을 대상으로 하는 연구의 경우 유전율식 장비 및 인공위성을 통해 측정 및 추정된 토양수분 자료를 사용하는 것 보다 Cosmic-ray 센서로부터 측정된 면 토양수분 자료를 사용하는 것이 더욱 효과적일 수 있음

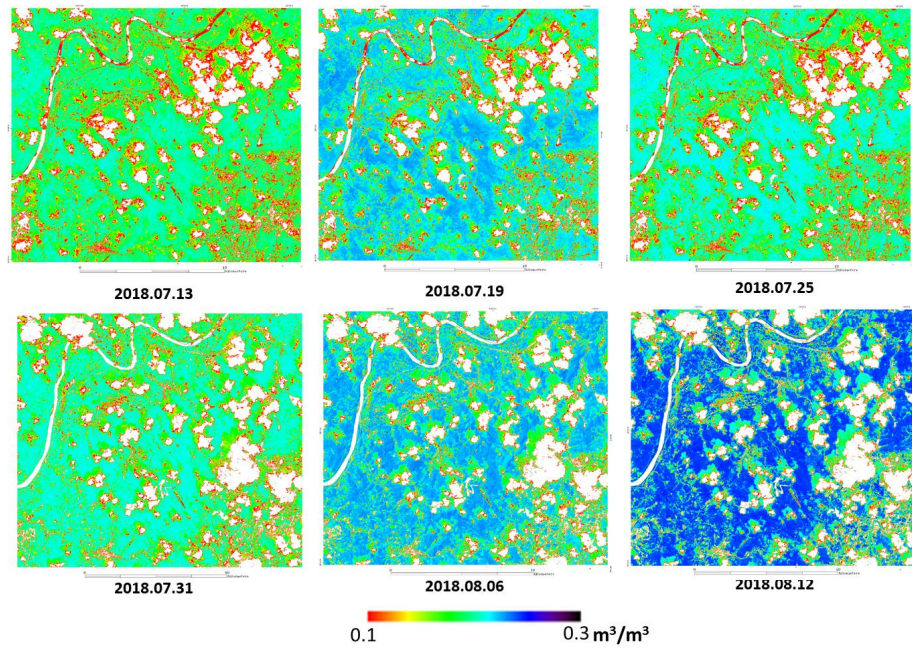


Fig. 5.3.1 Sentinel-1 Synthetic Aperture Radar (SAR) 영상 기반 토양수분 매핑 자료

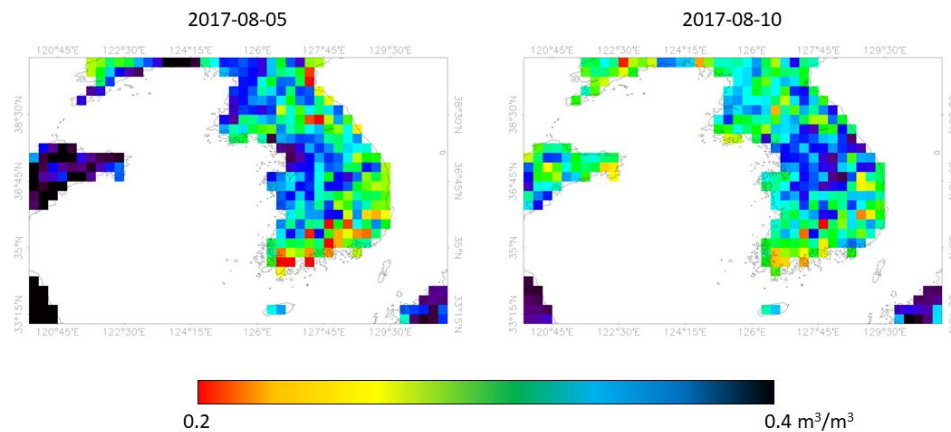


Fig. 5.3.2 GLDAS 토양수분 매핑 자료

나. 가뭄 분석

- 토양수분은 토양 내 함유된 수분의 양을 지칭하는 만큼 가뭄 평가의 직접적인 기준 자료로써 활용이 가능함
- 최근 기후변화와 함께 가뭄의 발생 빈도, 기간 및 피해 규모가 증가하는 추세이며, 발생기간 역시 증가
- 강수량과 같은 기상 정보는 레이더, 지상관측소 등을 통해 관측이 되고 있으나 토양수분량 등 실질적 가뭄의 진행과정을 관리하기 위한 인자들의 생산 및 관측이 부족한 실정임
 - 가뭄은 타 물 관련 재해와는 달리 시작과 끝을 판단하기 어려우며 피해 양상이 매우 점진적으로 진행되는 특징을 갖기 때문에 가뭄 위험 지역에 대한 지속적이고 연속적인 토양수분의 관측이 필요한 실정
 - 현재 COSMOS, COSMOS-UK 등의 해외 Cosmic-ray 기반 토양수분 데이터 네트워크에서는 다수의 Cosmic-ray 센서를 농경지에서 운용중이며, 이를 통해 효율적인 작물 관리를 위한 연구를 진행하고 있음

- 가뭄 분석을 위한 농경지에서의 Cosmic-ray 센서의 활용은 유전율식 장비 및 원격탐사 기법의 사용을 통한 토양수분 관측에 비해 매우 효율적임
- 반경 300 m의 토양수분에 대한 정보를 산출할 수 있기 때문에 유전율식 센서에 비해 농경지 토양수분 대표값을 효과적으로 보여줄 수 있으며, 설치 및 유지관리가 비교적 용이하고 설치 시 토양의 교란을 최소화함
- 본 연구를 통해 가뭄의 분석에 Cosmic-ray 센서 기반 면 단위 토양수분 자료가 활용된다면, 최소한의 설치 소요 및 유지관리를 통해 토양수분량을 파악하여 전국적으로 일관적인 가뭄 정보 시스템 구축의 기반을 마련할 수 있을 것으로 기대됨

다. 홍수 예보

- 토양수분은 지표면과 대기 사이 에너지 순환 및 물 순환을 조절하는 인자로써, 강우 발생 시 침투 비율, 유출 비율을 결정하는 핵심 요소임
- 따라서 특정 유역의 유출기구 특성을 분석하는 데 있어 필수적인 역할을 함
- 현재 전국의 홍수통제소에서는 강수량 관측소 및 수위 관측소에서 수집된 자료를 통해 홍수 예/특보를 발령하고 있으며, 이에 강수량 및 댐 저류량 등을 고려함
- 또한 기상 예보와 연계 시 유역 단위 유출량 예측의 정확도 또한 향상시킬 수 있으며, 따라서 홍수 예보의 정확도를 향상시키는 데에도 기여할 수 있을 것으로 기대됨
- 유역 내 Cosmic-ray 센서 기반 토양수분 관측소 운용 시 최소한의 장비 설치를 통해 유역을 대표하는 토양수분량을 추정할 수 있을 것이며, 이는 점 기반 관측소를 운영하는 경우보다 매우 경제적이고 효율적일 것으로 기대됨

라. 산사태 위험도 평가

- 산사태는 강우 발생 이후 토양수분의 증가에 따라 나타남
- 사면의 토양수분이 증가하면 토양 내 간극 수압이 증가하여 유효 전단 강도가 감소하게 되며, 동시에 토양의 무게가 증가하여 사면의 붕괴로 이어짐
- 산사태를 유발하는 직접적인 원인은 토양수분의 포화로, 사면의 초기 토양수분이 포화 상태에 가까울 경우 적은 양의 강우 발생만으로도 산사태가 일어날 수 있는 환경이 만들어질 가능성이 있음
- 따라서 산사태 발생 위험도를 평가하기 위해서는 강우 자료와 함께 사면의 토양수분을 실시간으로 측정할 필요가 있음
- 비교적 작은 사면일 경우 FDR 센서, TDR 센서 등의 유전율식 장비를 활용함으로써 정확한 토양수분을 관측하고 실시간으로 자료를 취득할 수 있으나, 사면의 경사가 심할 경우 설치가 어렵거나 불가능하며 유지관리 또한 어렵다는 한계점이 있음
- Cosmic-ray 센서의 경우 사면 규모의 토양수분 대푯값을 산정할 수 있을 뿐 아니라 설치 및 유지관리가 용이함
- 특히 사면 경사가 급하고 규모가 클 경우, Cosmic-ray 토양수분 관측 기기를 운용하는 것이 산사태의 위험도를 모니터링 하는 데 적합함

마. 산불 위험도 평가

- 산불은 가뭄의 경우와 마찬가지로 토양의 건조도에 영향을 크게 받는 재난임
- 따라서 최근 기후변화와 함께 산불의 발생 빈도 및 산불에 의한 피해 규모 또한 증가하는 추세를 보이고 있음 (Table 5.3.2)
- 산림청의 산불 통계에 따르면 최근 9년간 발생한 산불의 건수는 433건, 피해 면적은 591 ha에 달함
- 산불은 한 번 발생할 경우 규모가 매우 커질 가능성이 크며 피해 규모 또한 상당히 커질 수 있기 때문에 산불이 자주 발생하는 건조한 시기에는 산림청을 중심으로 전국 300여개 관서에서 산불방지대책본부를 운영함
- 산림청에서는 기온, 실효습도, 평균 풍속, 강우량과 같은 기상정보를 활용하여 산불 위험지수를 제공하고 있으나, 산불의 발생 및 발생 규모에 가장 크게 영향을 미치는 식생 건조 상태, 토양 건조 상태 등의 인자들을 포함한 산불 위험지수는 현재 생산되고 있지 않는 현황임

Table 5.3.2 2010년 이후 국내 산불 발생 현황(산림청)

구분	건수	피해 면적[ha]
2010	282	297
2011	277	1090
2012	197	72
2013	296	552
2014	492	137
2015	623	418
2016	391	378
2017	692	1480
2018	496	894
평균	433	591

- 식생의 건조도를 직접적으로 측정할 수 없는 경우 토양수분 자료는 식생의 건조도를 간접적으로 추정할 수 있는 지표가 됨
- 따라서 산지에서 Cosmic-ray 센서를 운용하여 토양수분 실시간 모니터링이 이루어진다면 보다 정확한 산불 발생 위험지수를 산정할 수 있을 것으로 기대됨

1. 중성자 강도를 이용한 토양수분 및 동절기 SWE 추정

- 현재 위성 기반 수문기상학적 인자들과 직접 취득한 데이터를 바탕으로 snow modelling이 활발히 진행 중이며 (Schattan et al., 2020), 이 과정에서 CRNP를 통해 획득한 토양수분의 활용도가 증가하는 추세이다. CRNP를 통해 획득한 토양수분 데이터가 활용 가능한 이유는 중성자 강도가 수소의 물리적인 상태에 관계없이 영향 받기 때문이다. 즉, 수분이 액체건 기체건 고체건 상태에 관계없이 그 양을 측정하는 데에 중성자 강도를 사용할 수 있다. Fig. 6.1.1과 같이 눈 덮인 설원 지역의 경우, FDR, TDR과 같은 유전율식 센서 설치하기에는 무리가 있으며, 더욱이 관리, 유지 및 교체 역시 제한적임을 유추할 수 있다. 그러나 CRNP의 경우 지면 위에 설치하여 해당 지역의 수문기상학적인 정보를 획득할 수 있다는 큰 장점을 지닌다. 따라서 중성자 강도를 통해 동절기 기간 동안의 토양수분 산출이나 눈, 얼음에 관한 정보를 획득하기 위한 연구들이 진행되고 있다.

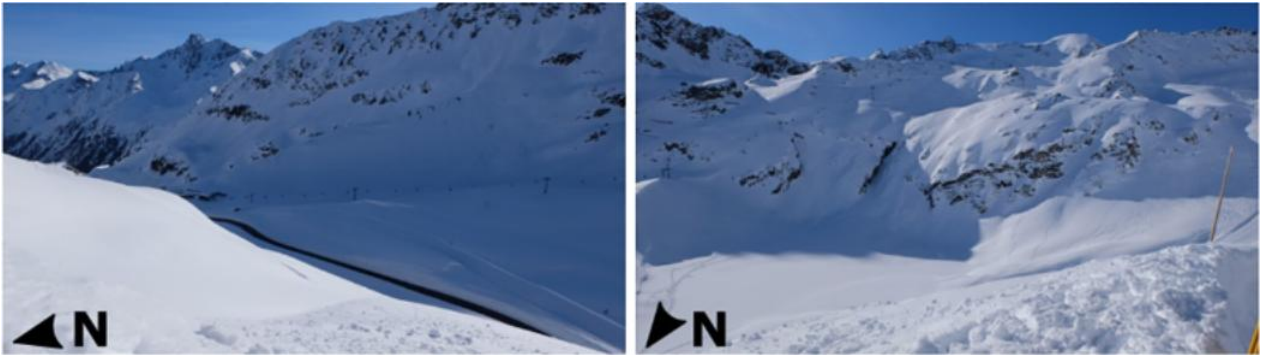


Fig. 6.1.1 Schattan et al. (2020)의 연구지역

- Tian et al. (2016)의 연구에서는 Biomass Water Equivalent (BWE)와 Snow Water Equivalent (SWE)를 관측하기 위해 중성자 비를 사용하였다. 중성자 비는 열수성 중성자 강도와 고속 중성자 강도의 비율을 의미하며, 다음과 같이 표현할 수 있다. 이는 보정과정을 거치지 않으므로 검출기를 통해 측정한 데이터를 간단한 품질관리를 거쳐 사용할 수 있다.

$$N_r = \frac{N_{raw(thermal)}}{N_{raw(fast)}} \quad (6.1.1)$$

- Fig. 6.1.2에는 중성자 비와 SWE, BWE의 변화 추이가 시계열에 따라 나타나있다. 맨 위의 위치한 그림은 고속 중성자 강도의 변화를 기록한 값이며, 2번째 그림은 열수성 중성자 강도의 변화를 기록한 값이다. Eq. 6.1.1를 통해 중성자 비를 3번째 그림과 같이 얻을 수 있다. 4번째 그림은 SWE와 BWE를 나타낸 그림으로, 색으로써 구분하였다. Fig. 6.1.2을 통해 중성자비와 SWE, BWE의 비슷한 경향성을 확인할 수 있다. 따라서, 열중성자 강도와 고속 중성자 강도를 통해 신뢰도 있는 SWE와 BWE 값을 추론할 수 있을 것으로 판단되며, 이는 다른 수문기상학적 모델에 유의미하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

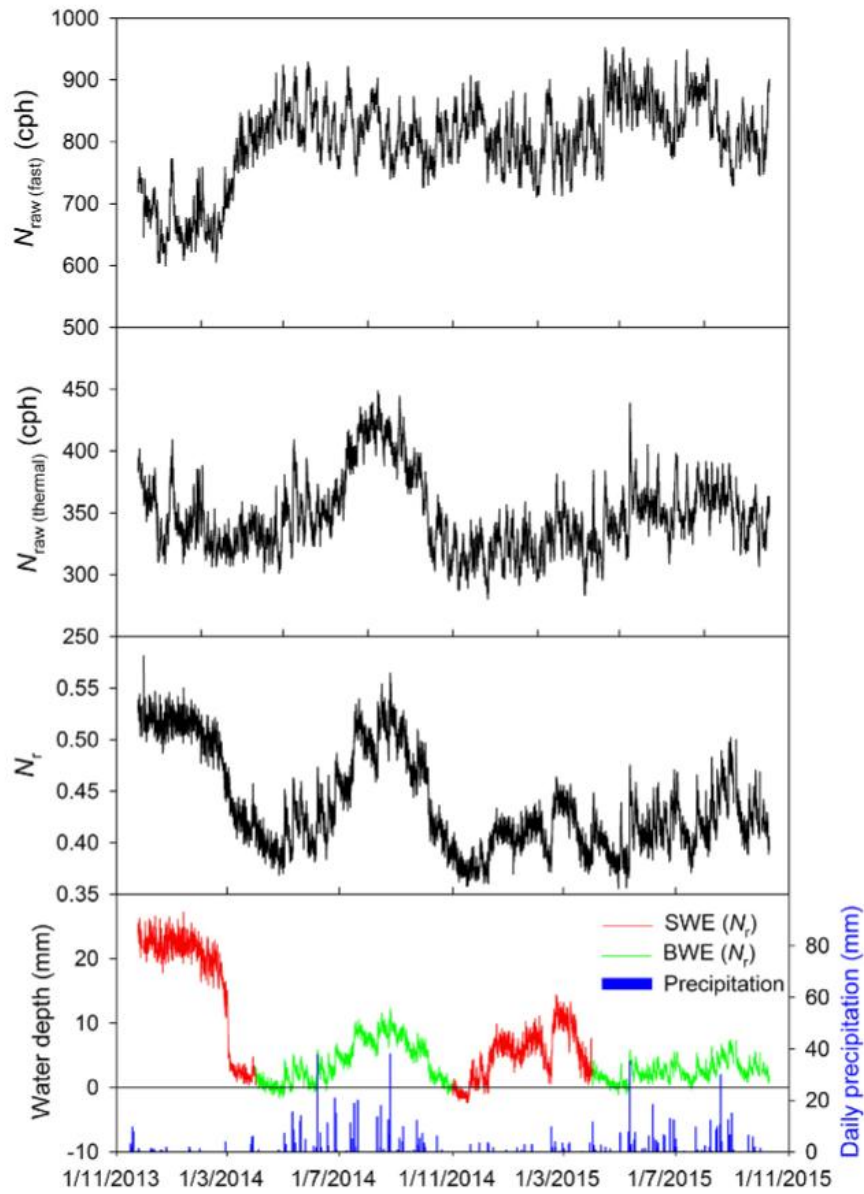


Fig. 6.1.2 시계열로 나타난 중성자 비와 BWE, SWE의 변화 추이 (Tian et al., 2016)

2. Cosmic-ray Neutron Rover

- 토양수분 패턴에 대한 다중 (multi-scale) 분석을 수행하기 위해, 지점에 설치된 센서들은 전체 유역에 대해 공간적으로 대표되는 데이터를 제공할 수 없다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자동차에 중성자 검출기를 장착하여 이동 가능한 CRNS를 적용 할 수 있다.



Fig. 6.2.1 Cosmic-Ray Neutron Rover (ozewex)

- CRNS 로버는 다양한 환경적 조건에서 검증 및 교정 되어 왔다 (Desilets et al., 2010; Chrisman and Zreda, 2013; Jackson et al. 2012; Dong et al., 2014). 검토 결과 공간 상수 매개변수의 가정이 적절하다고 입증된 대부분의 토지 이용 및 식생이 균일한 지형에서 로버의 토양 수분의 추정치가 합리적이었다.



Fig. 6.2.2 CRNS 로버에 장착되는 구성품 들, 주황색으로 표시된 내부는 두 개의 원자로 튜브로 이루어짐 (Schrön et al., 2017)

- 로버에서 사용되는 CRNP 센서는 지점 CRNP 센서의 약 20배에 해당하는 계수율을 가지고 있다. 추가 계수 용량은 로버가 넓은 지역을 구동하면서 중성자 계수 비율의 공간적 변화를 모니터링 할 수 있게 한다. 이 시스템은 중성자 계수율과 결합된 GPS 위치, 공기 온도, 상대습도 및 기압을 측정하여 토양 수분 변동의 공간적 표현을 생성한다. 로버를 사용하면 일반적인 주행 속도인 60 km/h 이상 의 속도에서 토양 습도를 정확하고 지속적으로 측정할 수 있다.
- 로버는 위성에 기반해 생성된 토양 수분과 모델링된 토양 수분 제품의 교보정이 가능하게 한다. 하지만 로버에 장착된 CRNP 센서가 지점에 설치된 CRNP 센서보다 민감도가 높기에 산악지형과 같은 많은 영향 인자들이 있는 지형에서 로버를 활용하여 관측하기가 힘들다. 또한 산악지형은 차량을 운용하기 어려운 지역이라 로버의 기동성이 제한적이게 되고, 로버 자체의 관측반경이 좁기 때문에 산악지형에서는 지점 CRNP 센서를 운용하는 것이 더 넓은 관측 반경을 확보할 수 있다. 더불어 산악지역의 험준한 지형에서 로버를 운용할 때 지점 CRNP 센서로부터 데이터를 수집하는 것에 비하여 위험성이 존재한다. 이러한 한계들을 보았을 때 산악지형에서는 지점 CRNP 센서를 운용하는 것이 적합하다는 결론을 내릴 수 있다. 다만 향후 한반도 농경지에서 CRNP 센서를 운용할 시에는 로버를 적용하는 것이 유리할 수 있다.

제7장. 연구개발성과의 보안등급

보안등급의 분류 및 결정 사유

보안등급 분류	보안	일반
		√
결정 사유		

제8장. 국가과학기술종합정보시스템에 등록된 연구시설·장비 현황

구입 기관	연구시설/연구장비명	규격 (모델명)	수량	구입 연월일	구입 가격 (천원)	구입처 (전화번호)	비고 (설치 장소)	NTIS장비 등록 번호

제9장. 연구개발과제 수행에 따른 연구실 등의 안전 조치 이행 실적

[성균관대학교 수자원원격탐사 연구실]

본 연구실은 관리위험등급 C 등급

(이화학실험을 수행하지 않는 전기, 설계, 컴퓨터 관련 실험실)에 해당

실험실의 안전을 확보하고 종사자의 건강을 보호하여 실험 및 연구 활동에 기여하였고, 또한 연구실 안전 환경조성에 관한 법률에 의거하여 실험실의 환경안전교육이 의무화됨에 따라 이공계열 대학원생 및 관련자 전원은 환경안전교육을 수강하였음.

제10장. 연구개발과제의 대표적 연구 실적

번호	구분 (논문/특허/기타)	논문명/특허명/기타	소속 기관명	역할	논문 게재지/특허 등록 국가	영향력 지수	논문 게재일/특허 등록일	사사 여부 (단독 사사 또는 중복 사사)	특기 사항 (SCI 여부/인용 횟수 등)
1	논문	Extension of cosmic-ray neutron probe measurement depth for improving field scale root-zone soil moisture estimation by coupling with representative in-situ sensors	성균관대학교 산학협력단	주관	Journal of Hydrology	4.405	2019.04.01	단독 사사	SCI
2	논문	산악 지형에서의 토양 수분 관측소 구축을 위한 연구 (2) : Cosmic-Ray Sensor를 활용한 지역 규모 토양 수분 측정	성균관대학교 산학협력단	주관	한국방재학회 논문집	-	2018.12.31	단독 사사	비SCI
3	논문	실제 증발산 자료의 불확실성 파악에 관한 연구: flux tower, 인공위성 및 재분석자료	성균관대학교 산학협력단	주관	한국수자원학회 논문집	-	2019.01.01	단독 사사	비SCI

4	논문	산악 지형에서의 CRNP를 이용한 토양 수분 측정 개선을 위한 새로운 중성자 강도 교정 방법 검증 및 평가	성균관대학교 산학협력단	주관	대한원격탐사학회 논문집	-	2019.10.31	단독 사사	비SCI
5	논문	산악 지형에서의 토양수분 관측소 구축을 위한 연구 (1) : Cosmic-ray 검증 시스템 구축을 위한 토양 수분량 대표성 분석 연구	한국수자원조사기술원	공동	한국수자원학회 논문집	-	2018.07.19	단독 사사	비SCI
6	논문	설마천 연구지역에서의 토양 수분량을 활용한 유출 발생 특성분석	한국수자원조사기술원	공동	한국수자원학회 논문집	-	2019.01.31	단독 사사	비SCI
7	논문	청미천 논지에서의 증발산량 작물계수 산정에 관한 연구	한국수자원조사기술원	공동	대한원격탐사학회 논문집	-	2019.11.18	단독 사사	비SCI

제11장. 기타 사항

제12장. 참고 문헌

1. Andreasen, M., K.H. Jensen, D. Desilets, T.E. Franz, M. Zreda, H.R. Bogena, and M.C. Looms, 2017. Status and Perspectives on the Cosmic-Ray Neutron Method for Soil Moisture Estimation and Other Environmental Science Applications, Vadose Zone Journal, 16(8).
2. Baatz, R., Bogena, H. R., Franssen, H. J. H., Huisman, J. A., Qu, W., Montzka, C., & Vereecken, H. (2014). Calibration of a catchment scale cosmic-ray probe network: A comparison of three parameterization methods. Journal of Hydrology, 516, 231-244.
3. Baatz, R., Bogena, H. R., Hendricks Franssen, H. J., Huisman, J. A., Montzka, C., & Vereecken, H. (2015). An empirical vegetation correction for soil water content quantification using cosmic ray probes. Water Resources Research, 51(4), 2030-2046.
4. Baik, J., Zohaib, M., Kim, U., Aadil, M., & Choi, M. (2019). Agricultural drought assessment based on multiple soil moisture products. Journal of Arid Environments, 167, 43-55.
5. Baroni, G., & Oswald, S. E. (2015). A scaling approach for the assessment of biomass changes and rainfall interception using cosmic-ray neutron sensing. Journal of Hydrology, 525, 264-276.
6. Baroni, G., Scheffele, L. M., Schrön, M., Ingwersen, J., & Oswald, S. E. (2018). Uncertainty, sensitivity and improvements in soil moisture estimation with cosmic-ray neutron sensing. Journal of hydrology, 564, 873-887.

7. Benninga, H. J. F., Carranza, C. D., Pezij, M., van Santen, P., van der Ploeg, M. J., Augustijn, D., & van der Velde, R. (2018). The Raam regional soil moisture monitoring network in the Netherlands. *Earth system science data*, 10(1).
8. Bogaen, H. R., Huisman, J. A., Baatz, R., Hendricks Franssen, H. J., & Vereecken, H. (2013). Accuracy of the cosmic-ray soil water content probe in humid forest ecosystems: The worst case scenario. *Water Resources Research*, 49(9), 5778–5791.
9. Brocca, L., Ciabatta, L., Massari, C., Camici, S., & Tarpanelli, A. (2017). Soil moisture for hydrological applications: open questions and new opportunities. *Water*, 9(2), 140.
10. Brocca, L., F. Melone, T. Moramarco, W. Wagner, and S. Hasenauer, 2010. ASCAT soil wetness index validation through in situ and modeled soil moisture data in central Italy, *Remote Sensing of Environment*, 114(11): 2745–2755.
11. Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., & Morbidelli, R. (2009). Soil moisture temporal stability over experimental areas in Central Italy. *Geoderma*, 148(3–4), 364–374.
12. Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., & Morbidelli, R. (2010). Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resources Research*, 46(2).
13. Brocca, L., R. Morbidelli, F. Melone, and T. Moramarco, 2007: Soil moisture spatial variability in experimental areas of Central Italy. *Journal of Hydrology*, 333, 356–373, doi:10.1016/j.jhydrol.2006.09.004.
14. Choi, M., & Jacobs, J. M. (2007). Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints. *Advances in Water Resources*, 30(4), 883–896.
15. Crow, W. T., Berg, A. A., Cosh, M. H., Loew, A., Mohanty, B. P., Panciera, R., ... & Walker, J. P. (2012). Upscaling sparse ground-based soil moisture observations for the validation of coarse-resolution satellite soil moisture products. *Reviews of Geophysics*, 50(2).
16. David Boorman et al. (2018), COSMOS-UK User Guide, UK Soil Moisture Monitoring Network, p53.
17. Desilets, D., & Zreda, M. (2013). Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and Monte Carlo simulations. *Water Resources Research*, 49(6), 3566–3575.
18. Desilets, D., Zreda, M., & Ferré, T. P. (2010). Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, 46(11).
19. Desilets, D., Zreda, M., and Ferre, T.: Nature's neutron probe: Landsurface hydrology at an elusive scale with cosmic rays, *Water Resour. Res.*, 46, W11505, doi:10.1029/2009WR008726, 2010.
20. Dong, J., Ochsner, T. E., Zreda, M., Cosh, M. H., & Zou, C. B. (2014). Calibration and validation of the COSMOS rover for surface soil moisture measurement. *Vadose Zone Journal*, 13(4).
21. Dorigo, W. A., Gruber, A., De Jeu, R. A. M., Wagner, W., Stacke, T., Loew, A., ... & Kidd, R. (2015). Evaluation of the ESA CCI soil moisture product using ground-based observations. *Remote Sensing of Environment*, 162, 380–395.
22. Dorigo, W. A., Xaver, A., Vreugdenhil, M., Gruber, A., Hegyiova, A., Sanchis-Dufau, A. D., ... & Drusch, M. (2013). Global automated quality control of in situ soil moisture data from the International Soil Moisture Network. *Vadose Zone Journal*, 12(3).
23. Franz, T. E., Zreda, M., Ferre, T. P. A., Rosolem, R., Zweck, C., Stillman, S., ... &

-
- Shuttleworth, W. J. (2012). Measurement depth of the cosmic ray soil moisture probe affected by hydrogen from various sources. *Water Resources Research*, 48(8).
24. Franz, T. E., Zreda, M., Rosolem, R., & Ferre, T. P. A. (2012). Field validation of a cosmic-ray neutron sensor using a distributed sensor network. *Vadose Zone Journal*, 11(4).
25. Franz, T. E., Zreda, M., Rosolem, R., & Ferre, T. P. A. (2013). A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17(2), 453–460.
26. Gao, L., and M. A. Shao, 2012: Temporal stability of soil water storage in diverse soil layers. *Catena* 95, 24–32.
27. Hawdon, A., McJannet, D., & Wallace, J. (2014). Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across Australia. *Water Resources Research*, 50(6), 5029–5043.
28. Heathman, G.C., M.H. Cosh, V. Merwade, and E. Han, 2012. Multi-scale temporal stability analysis of surface and subsurface soil moisture within the Upper Cedar Creek Watershed, Indiana, *Catena*, 95: 91–103.
29. Jacobs, J. M., Mohanty, B. P., Hsu, E. C., & Miller, D. (2004). SMEX02: Field scale variability, time stability and similarity of soil moisture. *Remote sensing of Environment*, 92(4), 436–446.
30. Jeong, J., Cho, S., Baik, J., & Choi, M. (2018). A Study on the Establishment of a Korean Soil Moisture Network (2): Measurement of Intermediate-Scale Soil Moisture Using a Cosmic-Ray Sensor. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(7), 83–91.
31. Joshi, C., Mohanty, B. P., Jacobs, J. M., & Ines, A. V. (2011). Spatiotemporal analyses of soil moisture from point to footprint scale in two different hydroclimatic regions. *Water Resources Research*, 47(1).
32. Kędzior, M., & Zawadzki, J. (2016). Comparative study of soil moisture estimations from SMOS satellite mission, GLDAS database, and cosmic-ray neutrons measurements at COSMOS station in Eastern Poland. *Geoderma*, 283, 21–31.
33. Kim, H., W. Sunwoo, S. Kim, and M. Choi, 2016. Construction and estimation of soil moisture site with FDR and COSMIC-ray (SM-FC) sensors for calibration/validation of satellitebased and COSMIC-ray soil moisture products in Sungkyunkwan university, South Korea, *Journal of Korean Water Resources Association*, 49(2): 133–144 (in Korean with English abstract).
34. Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., & Zacharias, S. (2015). Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 51(7), 5772–5790.
35. Liu, Y. Y., Dorigo, W. A., Parinussa, R. M., de Jeu, R. A., Wagner, W., McCabe, M. F., ... & Van Dijk, A. I. J. M. (2012). Trend-preserving blending of passive and active microwave soil moisture retrievals. *Remote Sensing of Environment*, 123, 280–297.
36. McJannet, D., Franz, T., Hawdon, A., Boadle, D., Baker, B., Almeida, A., ... & Desilets, D. (2014). Field testing of the universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, 50(6), 5235–5248.
37. Michot, D., Benderitter, Y., Dorigny, A., Nicoullaud, B., King, D., & Tabbagh, A. (2003). Spatial and temporal monitoring of soil water content with an irrigated corn crop cover
-

-
- using surface electrical resistivity tomography. *Water Resources Research*, 39(5).
38. Mittelbach, H., I. Lehner, and S.I. Seneviratne, 2012. Comparison of four soil moisture sensor types under field conditions in Switzerland, *Journal of Hydrology*, 430(2012): 39–49.
39. Mohanty, B. P., Cosh, M. H., Lakshmi, V., & Montzka, C. (2017). Soil moisture remote sensing: State-of-the-science. *Vadose Zone Journal*, 16(1).
40. Montzka, C., Bogena, H., Zreda, M., Monerris, A., Morrison, R., Muddu, S., & Vereecken, H. (2017). Validation of spaceborne and modelled surface soil moisture products with cosmic-ray neutron probes. *Remote sensing*, 9(2), 103.
41. Nguyen, H. H., Jeong, J., & Choi, M. (2019). Extension of cosmic-ray neutron probe measurement depth for improving field scale root-zone soil moisture estimation by coupling with representative in-situ sensors. *Journal of Hydrology*, 571, 679–696.
42. Niu, C. Y., Musa, A., & Liu, Y. (2015). Analysis of soil moisture condition under different land uses in the arid region of Horqin sandy land, northern China. *Solid Earth*, 6(4), 1157–1167.
43. Pellet, C., & Hauck, C. (2017). Monitoring soil moisture from middle to high elevation in Switzerland: set-up and first results from the SOMOMOUNT network. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 21(6), 3199–3220.
44. Pelowitz, D. B. (2005). MCNPX user's manual version 2.5. 0. Los Alamos National Laboratory, 76, 473.
45. Rodell, M., Houser, P. R., Jambor, U. E. A., Gottschalck, J., Mitchell, K., Meng, C. J., ... & Entin, J. K. (2004). The global land data assimilation system. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 85(3), 381–394.
46. Schattan, P., Schwaizer, G., Schöber, J., & Achleitner, S. (2020). The complementary value of cosmic-ray neutron sensing and snow covered area products for snow hydrological modelling. *Remote Sensing of Environment*, 239, 111603.
47. Schrön, M., Köhli, M., Scheiffele, L., Iwema, J., Bogena, H. R., Lv, L., ... & Mai, J. (2017). Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors in the light of spatial sensitivity.
48. Skierucha, W., & Wilczek, A. (2010). A FDR sensor for measuring complex soil dielectric permittivity in the 10–500 MHz frequency range. *Sensors*, 10(4), 3314–3329.
49. Vachaud, G., Passerat de Silans, A., Balabanis, P., & Vauclin, M. (1985). Temporal Stability of Spatially Measured Soil Water Probability Density Function 1. *Soil Science Society of America Journal*, 49(4), 822–828.
50. Walker, J. P., Willgoose, G. R., & Kalma, J. D. (2001). One-dimensional soil moisture profile retrieval by assimilation of near-surface observations: a comparison of retrieval algorithms. *Advances in Water Resources*, 24(6), 631–650.
51. Zhu, X., Shao, M. A., Zeng, C., Jia, X., Huang, L., Zhang, Y., & Zhu, J. (2016). Application of cosmic-ray neutron sensing to monitor soil water content in an alpine meadow ecosystem on the northern Tibetan Plateau. *Journal of Hydrology*, 536, 247–254.
52. Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T. P. A., & Scott, R. L. (2008). Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical research letters*, 35(21).
53. 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.

54. 김기영, 정성원, 이연길. (2019a). 산악 지형에서의 토양수분 관측소 구축을 위한 연구 (1):Cosmic-ray 검증시스템 구축을 위한 토양수분량 대표성 분석 연구. *한국수자원학회 논문집*, 52(1), 51–60.
 55. 김기영, 이용준, 정성원, 이연길. (2019b). 설마천 연구지역에서의 토양수분량을 활용한 유출 발생 특성분석, 52(9), 615–626.
 56. 김기영, 이용준, 정성원, 이연길. (2019c). 청미천 논지에서의 증발산량 작물계수 산정에 관한 연구, 35(6–1), 883–893.
 57. 조성근, 능엔 호앙 하이, 정재환, 오승철, 최민하. (2019). 산악지형에서의 CRNP를 이용한 토양수분 측정 개선을 위한 새로운 중성자 강도 교정 방법 검증 및 평가, *대한원격탐사학회 논문집*, 35(5–1), 665–679.
 58. 조민지, 곽용석, 김상현. (2017). 급경사 사면에서의 토양수분 특성곡선과 모형 매개변수 평가. *한국방재학회 논문집*, 17(6), 175–184.
 59. 정재환, 조성근, 백종진, & 최민하. (2018). 산악 지형에서의 토양 수분 관측소 구축을 위한 연구 (2). 1. *한국방재학회 논문집*, 18, 83–91.
-

주 의

1. 이 최종보고서는 국토교통부에서 시행한 국토교통기술촉진연구사업의 연구보고서입니다.
2. 이 최종보고서 내용을 발표하는 때에는 반드시 국토교통부에서 시행한 사업의 연구개발성과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀 유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.