

목 차

- I. 성 과 점 검 기 준 표
- II. 증 병 자 료
- III. 부 록



I. 성과점검기준표

- I. 전년도 지적사항 조치내용
- II. [총괄] 성과점검기준표
- III. [2차년도] 성과점검기준표

II. 증빙자료



Research papers

Extension of cosmic-ray neutron probe measurement depth for improving field scale root-zone soil moisture estimation by coupling with representative in-situ sensors



Hoang Hai Nguyen, Jaehwan Jeong, Minha Choi*

Environment and Remote Sensing Laboratory, Department of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Republic of Korea

ARTICLE INFO

This manuscript was handled by C. Corradini, Editor-in-Chief, with the assistance of Renato Morbidelli, Associate Editor

Keywords:

Cosmic-ray soil moisture
Root zone soil moisture
Merging framework
Temporal stability analysis
Original linear combination of forecasts
Linear autoregressive model

ABSTRACT

Accurate estimation of field-scale root-zone soil moisture (RZSM) is essential for hydro-meteorological and agricultural management. The cosmic-ray neutron probe (CRNP) is an innovative technique for field-scale soil moisture observation. However, it is limited at deeper depths, and requires suitable methods for scaling the CRNP effective depth to represent the root-zone layer (up to 100 cm depth). A merging framework was developed in this study for improving field-scale RZSM with the CRNP via coupling the representative ancillary RZSM information with cosmic-ray soil moisture. By using ancillary RZSM retrieved at the most time stable location, this approach alleviates the problems associated with lack of independent datasets, while maintaining scale representativeness. A linear autoregressive model was adopted to forecast the errors between two input datasets (the cosmic-ray soil moisture and ancillary RZSM) and a reference product, which was computed by spatially weighting the deepest in-situ soil moisture measurements apart from the most time stable location. The variances of estimated errors were then used to compute a suitable weight for each single product by following the original linear combination of forecasts, and subsequently merging the ancillary RZSM and cosmic-ray soil moisture. Performance of the merged RZSM in comparison to input datasets and exponential filter-based RZSM over three different environments was evaluated against the reference RZSM product. The results indicated that differences in vegetation coverages related to total aboveground and belowground biomass accumulation, root water uptake rate and canopy density are the major factors controlling the temporal variation in merged RZSM, and they can be partly interpreted via the framework procedure. Superior performance achieved by the merging framework demonstrated its robustness in improving field-scale RZSM measurement compared to other products. This study also underlines the strong relationship between input data quality and the performance of the selected merging method, with respect to variations of CRNP effective depths. Overall, the merging framework is simple to apply, enables unrestricted-use in different environments, and is flexible to combine further standalone data sources.

1. Introduction

Soil moisture plays a fundamental role in governing the exchange of water and energy fluxes between the land surface and atmosphere (Brocca et al., 2011; Vereecken et al., 2008); and was listed as an Essential Climate Variable (ECV) when characterizing the Earth's climate (GCOS, 2010). The soil moisture status in the root-zone (frequently up to 100 cm depth) is a storage variable that controls the partitioning of important hydrological processes such as infiltration, runoff, and evapotranspiration (Choi and Jacobs, 2007; Das and Mohanty, 2006). Knowledge of root-zone soil moisture (RZSM) is crucial for better understanding of plant available water, root water uptake and water

deficit, which are the major factors affecting plant growth and vigor in the ecosystem (González-Zamora et al., 2016; Santos et al., 2014). Therefore, accurately capturing RZSM variability at relevant scales contributes to effective hydro-meteorological and agricultural monitoring in accordance with natural disasters mitigation (Entekhabi et al., 2010; Vereecken et al., 2008), weather and climate prediction (Zohab et al., 2017), agriculture management (Barker et al., 2017; Pardossi et al., 2009), drought monitoring (Bolten et al., 2010; Han et al., 2014), flood forecasting (Brocca et al., 2012), and dust outbreak risk assessment (Kim et al., 2017; Kim and Choi, 2015).

Various methods have been developed to predict RZSM from near surface soil moisture at shallower depths, and they are fundamentally

* Corresponding author.

E-mail address: mhchoi@skku.edu (M. Choi).

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.02.018>

Received 27 September 2018; Received in revised form 3 February 2019; Accepted 5 February 2019

Available online 18 February 2019

0022-1694/ © 2019 Elsevier B.V. All rights reserved.

산악 지형에서의 토양 수분 관측소 구축을 위한 연구(2): Cosmic-Ray Sensor를 활용한 지역 규모 토양 수분 측정

A Study on the Establishment of a Korean Soil Moisture Network (2): Measurement of Intermediate-Scale Soil Moisture Using a Cosmic-Ray Sensor

정재환* · 조성근** · 백종진*** · 최민하****

Jeong, Jaehwan*, Cho, Seongkeun**, Baik, Jongjin***, and Choi, Minha****

Abstract

Efforts for the retrieval of soil moisture data using satellites are continuing, but there is a lack of reference data that can represent the characteristics of a watershed. In this study, weighted average in situ soil moisture was estimated and the calibrated CRNP soil moisture was validated through comparison with rainfall events. The weighted average in situ soil moisture adequately represented that of all stations. The corrected neutron intensity was less affected by air pressure and humidity than the raw data, and the standard deviation decreased from 96.22 cph to 76.25 cph. Additional correction for the mountainous terrain will be possible if data are accumulated, and the CRNP soil moisture can be used as reference data for soil moisture retrieval using satellite data and as basic data for national water management.

Key words : Soil Moisture, Cosmic-ray, FDR, Weighted Average Soil Moisture

요 지

최근 유역의 특성을 대표할 수 있는 위성을 활용한 토양 수분 자료의 복원을 위한 노력이 지속되고 있으나, 이를 위한 기준이 되는 자료가 부족한 실정이다. 본 연구에서는 Cosmic-Ray Neutron Probe (CRNP)를 활용하여 가중 평균 지점 토양 수분 자료를 생산하였고, 이를 활용해 CRNP 토양 수분을 교정하여 강우와 비교하였다. 가중 평균 지점 토양 수분은 전체 지점 관측소에서 관측된 토양 수분을 적절히 대표하고 있는 것으로 나타났으며, 보정된 중성자 세기는 원시 자료에 비해 기압과 습도의 영향이 감소했고, 표준 편차가 96.22 cph에서 76.25 cph로 감소하였다. 향후, CRNP 자료가 누적되면 산악지형에 대해 보다 정교한 교정이 가능할 것이며, 유역특성을 대표하는 자료로서 위성 자료의 기준 자료 및 국가 물 관리를 위한 기초자료로 사용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 토양수분, Cosmic-ray, FDR, 가중 평균 토양 수분

*정회원, 성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 박사과정(E-mail: jhjeong15@skku.edu)

Member, Ph.D. Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University

**성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과 석사과정(E-mail: skcho025@skku.edu)

M.S. Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University

***성균관대학교 건설환경시스템공학과 수공학 박사(E-mail: jjbaik@skku.edu)

Ph.D. School of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University

****교신저자, 정회원, 성균관대학교 수자원전문대학원 교수(Tel: +82-31-290-7539, Fax: +82-31-290-7549, E-mail: mhchoi@skku.edu)

Corresponding Author, Member, Professor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University



A study on the analyzing of uncertainty for actual evapotranspiration: flux tower, satellite-based and reanalysis based dataset

Baik, Jongjin^a · Jeong, Jaehwan^b · Park, Jongmin^c · Choi, Minha^{d*}

^aPh.D, Center for Built Environment, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^bPh.D Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

^cPh.D Candidate, Department of Civil and Environmental Engineering, University of Maryland, College Park, USA

^dProfessor, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University, Suwon, Korea

Paper number: 18-087

Received: 18 September 2018; Revised: 30 October 2018; Accepted: 30 October 2018

Abstract

In this study, the actual evapotranspiration products of Global Land Data Assimilation System (GLDAS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM) and MOD16, which are satellite- and reanalysis-based dataset, were validated at the flux tower sites (i.e., CFK and SMK) managed by Korea Institute of Hydrological Survey, and the uncertainty and correlation analysis were conducted using Triple Collocation (TC) method. The result of validation with the flux tower showed better agreement in the order of GLEAM>GLDAS>MOD16. At the result of three combinations (S1: flux tower vs. GLDAS vs. MOD16, S2: flux tower vs. GLDAS vs. GLEAM, S3: flux tower vs. GLEAM vs. MOD16), the order of best to worst is GLEAM, GLDAS, MOD16, and flux tower for CFK (GLDAS>GLEAM>MOD16>flux tower for SMK). Since the error variance and correlation coefficients of the flux tower show relatively worse performance in TC analysis than the other products, By applying TC method to three products (GLDAS vs. GLEAM vs. MOD16), the uncertainty of each dataset were evaluated at the Korean Peninsula. As a results, the GLDAS and GLEAM performed reasonable performance (low error variance and high correlation coefficient), whereas results of MOD16 showed high error variance and low correlation coefficient at the cropland.

Keywords: Triple collocation, Evapotranspiration, Satellite, Flux tower, Reanalysis dataset

실제증발산 자료의 불확실성 파악에 관한 연구: flux tower, 인공위성 및 재분석자료

백종진^a · 정재환^b · 박종민^c · 최민하^{d*}

^a성균관대학교 건설환경연구소 박사후연구원, ^b성균관대학교 수자원전문대학원 박사과정, ^c메릴랜드대학교 건설환경공학과 박사과정,

^d성균관대학교 수자원전문대학원 교수

요 지

본 연구에서는 인공위성 및 재분석 자료인 Global Land Data Assimilation System (GLDAS), Global Land Evaporation Amsterdam Model (GLEAM), MOD16의 실제증발산량 산출물을 활용하여 한국수자원조사기술원(Korea Institute of Hydrological Survey, KIHS)에서 관리하고 있는 청미천(cheongmicheon farmland site, CFK)과 설마천(seolmacheon site, SMK) flux tower에서 검증하였고, Triple collocation (TC) 방법을 활용하여 자료간의 불확실성 및 상관성분석을 수행하였다. 플렉스타워와의 검증 결과에서는 전반적으로 GLEAM>GLDAS>MOD16순으로 좋은 결과를 나타내었으며, 세가지 산출물의 조합(S1: flux tower vs. GLDAS vs. MOD16, S2: flux tower vs. GLDAS vs. GLEAM, S3: flux tower vs. GLEAM vs. MOD16)을 통한 TC 결과에서는 청미천(설마천)에서 GLEAM>GLDAS>MOD16>flux tower (GLDAS>GLEAM>MOD16>flux tower)순으로 좋은 결과를 나타내었다. TC 분석 결과에서 Flux tower의 error variance와 correlation coefficient가 상대적으로 좋은 결과를 나타내지 못하였으므로, 한반도 지역에서 인공위성과 재분석 자료(GLDAS vs. GLEAM vs. MOD16)만을 활용하여 TC를 적용하였다. 그 결과, GLDAS와 GLEAM이 한반도 영역에서 낮은 error variance와 높은 correlation coefficient를 나타낸 반면, MOD16의 경우, 농지에서 낮은 correlation coefficient과 높은 error variance를 나타내었다.

핵심용어: Triple collocation, 증발산, 인공위성, Flux tower, Reanalysis dataset

*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7539

E-mail: mhchoi@skku.edu (M. Choi)

© 2019 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

Article

산악지형에서의 CRNP를 이용한 토양 수분 측정 개선을 위한 새로운 중성자 강도 교정 방법 검증 및 평가

조성근¹⁾ · 능엔 호앙 하이²⁾ · 정재환³⁾ · 오승철⁴⁾ · 최민하⁵⁾†

Modified Traditional Calibration Method of CRNP for Improving Soil Moisture Estimation

Seongkeun Cho¹⁾ · Nguyen Hoang Hai²⁾ · Jaehwan Jeong³⁾ ·
Seungcheol Oh⁴⁾ · Minha Choi⁵⁾†

Abstract: Mesoscale soil moisture measurement from the promising Cosmic-Ray Neutron Probe (CRNP) is expected to bridge the gap between large scale microwave remote sensing and point-based in-situ soil moisture observations. Traditional calibration based on N_0 method is used to convert neutron intensity measured at the CRNP to field scale soil moisture. However, the static calibration parameter N_0 used in traditional technique is insufficient to quantify long term soil moisture variation and easily influenced by different time-variant factors, contributing to the high uncertainties in CRNP soil moisture product. Consequently, in this study, we proposed a modified traditional calibration method, so-called Dynamic- N_0 method, which take into account the temporal variation of N_0 to improve the CRNP based soil moisture estimation. In particular, a nonlinear regression method has been developed to directly estimate the time series of N_0 data from the corrected neutron intensity. The N_0 time series were then reapplied to generate the soil moisture. We evaluated the performance of Dynamic- N_0 method for soil moisture estimation compared with the traditional one by using a weighted in-situ soil moisture product. The results indicated that Dynamic- N_0 method outperformed the traditional calibration technique, where correlation coefficient increased from 0.70 to 0.72 and RMSE and bias reduced from 0.036 to 0.026 and -0.006 to -0.001 m^3m^{-3} . Superior performance of the Dynamic- N_0 calibration method revealed that the temporal variability of N_0 was caused by hydrogen pools surrounding the CRNP. Although several uncertainty sources contributed to the variation of N_0 were not fully identified, this proposed calibration method gave a new insight to improve field scale soil moisture estimation from the CRNP.

Key Words: Cosmic-Ray Neutron Probe, Soil moisture, Remote Sensing, Neutron Intensity

Received September 24, 2019; Revised September 30, 2019; Accepted October 11, 2019; Published online October 23, 2019

¹⁾ 성균관대학교 수자원학과 석·박사과정생 (Combined MS/PhD Student, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University)

²⁾ 성균관대학교 수자원학과 석·박사수료생 (PhD Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University)

³⁾ 성균관대학교 수자원학과 박사수료생 (PhD Candidate, Department of Water Resources, Sungkyunkwan University)

⁴⁾ 성균관대학교 토목공학과 학부생 (Undergraduate Student, Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University)

⁵⁾ 성균관대학교 토목공학과 부교수 (Associate Professor, Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University)

† Corresponding Author: Minha Choi (mhchoi@skku.edu)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



A Study for establishment of soil moisture station in mountain terrain (1): the representative analysis of soil moisture for construction of Cosmic-ray verification system

Kim, Kiyong^a · Jung, Sungwon^b · Lee, Yeongil^{c*}

^aTeam Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

^bPresident, Korea Institute of Hydrological Survey, Gyeonggi-do, Korea

^cPrincipal Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

Paper number: 18-097

Received: 23 October 2018; Revised: 20 November 2018 / 26 November 2018; Accepted: 26 November 2018

Abstract

The major purpose of this study is to construct an in-situ soil moisture verification network employing Frequency Domain Reflectometry (FDR) sensors for Cosmic-ray soil moisture observation system operation as well as long-term field-scale soil moisture monitoring. The test bed of Cosmic-ray and FDR verification network system was established at the Sulma Catchment, in connection with the existing instrumentations for integrated data provision of various hydrologic variables. This test bed includes one Cosmic-ray Neutron Probe (CRNP) and ten FDR stations with four different measurement depths (10 cm, 20 cm, 30 cm, and 40 cm) at each station, and has been operating since July 2018. Furthermore, to assess the reliability of the in-situ verification network, the volumetric water content data measured by FDR sensors were compared to those calculated through the core sampling method. The evaluation results of FDR sensors- measured soil moisture against sampling method during the study period indicated a reasonable agreement, with average values of bias = -0.03 m³/m³ and RMSE 0.03 m³/m³, revealing that this FDR network is adequate to provide long-term reliable field-scale soil moisture monitoring at Sulmacheon basin. In addition, soil moisture time series observed at all FDR stations during the study period generally respond well to the rainfall events; and at some locations, the characteristics of rainfall water intercepted by canopy were also identified. The Temporal Stability Analysis (TSA) was performed for all FDR stations located within the CRNP footprint at each measurement depth to determine the representative locations for field-average soil moisture at different soil profiles of the verification network. The TSA results showed that superior performances were obtained at FDR 5 for 10 cm depth, FDR 8 for 20 cm depth, FDR2 for 30 cm depth, and FDR1 for 40 cm depth, respectively; demonstrating that those aforementioned stations can be regarded as temporal stable locations to represent field mean soil moisture measurements at their corresponding measurement depths. Although the limit on study duration has been presented, the analysis results of this study can provide useful knowledge on soil moisture variability and stability at the test bed, as well as supporting the utilization of the Cosmic-ray observation system for long-term field-scale soil moisture monitoring.

Keywords: Soil moisture, Cosmic-ray, FDR, Temporal stability analysis

산악 지형에서의 토양수분 관측소 구축을 위한 연구(1): Cosmic-ray 검증시스템 구축을 위한 토양수분량 대표성 분석 연구

김기영^a · 정성원^b · 이연길^{c*}

^a한국수자원조사기술원 연구개발실 팀장, ^b한국수자원조사기술원 원장, ^c한국수자원조사기술원 연구개발실 실장

요 지

본 연구에서는 Cosmic-ray 토양수분량 관측시스템 구축 시 필요한 검증 네트워크 설계 기법 개발에 목적을 두고 유전율식(dielectric constant) 장비인 Frequency Domain Reflectometry (FDR)와 연계하여 Cosmic-ray 검증시스템을 구축·운영하였다. Cosmic-ray 검증시스템 평가에 필요한 시범지역은 기존 계측 장비와의 연계성과 다양한 수문자료의 활용성을 고려하여 설마천 유역에 구축하였다. 시범지역은 Cosmic-ray 장비와 FDR 센서(10개소)로 구축하였으며 2018년 7월부터 현재까지 운영되고 있다. 본 연구에서는 검증시스템의 신뢰도를 높이기 위해 코어법(soil core sampling method)을 통해 산출한 용적수분함량(volumetric water content)을 유전율식 장비와 정기적으로 검증하였다. 연구기간 중 수행한 코어법과 FDR 센서를 검증한 결과, 두 자료의 통계량이 bias = -0.03 m³/m³과 RMSE = 0.03 m³/m³의 유의한 값을 보였다. 또한 연구기간 동안 FDR 센서의 시계열 특성은 모든 경우에 정상적으로 반응하였다. 그러나 일부 지점에서는 낙엽 및 캐노피의 차단과 상부사면의 유출 등으로 인해 상이한 특성을 보였다. Cosmic-ray 영향원(influence line) 내 FDR 센서의 대표성 분석은 시간 안정성 해석법(temporal stability analysis, TSA)을 이용하여 토심별(10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm)로 분석하였다. 10개소에 대한 토심별 토양 수분량의 대표성을 TSA로 분석한 결과, 토심 10 cm에서는 FDR 5, 토심 20 cm에서는 FDR 8, 토심 30 cm에서는 FDR 2, 토심 40 cm에서는 FDR 1에서 가장 우수한 대표 특성을 보였다. 본 연구의 시범지역 운영 기간이 짧은 한계는 있지만 지금까지의 분석 결과를 토대로 하여 볼 때, Cosmic-ray 관측시스템 구축 시에는 검증 장비로는 유전율식을 활용하고, Cosmic-ray 영향원 내 토양수분량의 대표성 분석은 TSA 방법으로 수행하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

핵심용어: 토양수분, Cosmic-ray, FDR, 시간 안정성 분석

*Corresponding Author. Tel: +82-31-929-0922

E-mail: sugawon@kihs.re.kr (Y. Lee)

© 2019 Korea Water Resources Association. All rights reserved.



An analysis of runoff characteristic by using soil moisture in Sulma basin

Kim, Kiyong^a · Lee, Yongjun^b · Jung, Sungwon^c · Lee, Yeongil^{d*}

^aTeam Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

^bResearcher, Korea Institute of Hydrological Survey Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

^cPrincipal Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Gyeonggi-do, Korea

^dGeneral Manager, Korea Institute of Hydrological Survey, Research & Development Division, Gyeonggi-do, Korea

Paper number: 19-049

Received: 22 July 2019; Revised: 29 August 2019; Accepted: 29 August 2019

Abstract

Soil moisture and runoff have very close relationship. Especially the water retention capacity and drainage characteristics of the soil are determined by various factors of the soil. In this study, a total of 40 rainfall events were identified from the entire rainfall events of Sulma basin in 2016 and 2017. For each selected events, the constant-K method was used to separate direct runoff and baseflow from total flow and calculate the runoff coefficient which shows positive exponential curve with Antecedent Soil Moisture (ASM). In addition to that, the threshold of soil moisture was determined at the point where the runoff coefficient starts increasing dramatically. The threshold of soil moisture shows great correlation with runoff and depth to water table. It was founded that not only ASM but also various factors, such as Initial Soil Moisture (ISM), storage capacity of soil and precipitation, affect the results of runoff response. Furthermore, wet condition and dry condition are separated by ASM threshold and the start and peak response are analyzed. And the results show that the response under wet condition occurred more quickly than that of dry condition. In most events occurred in dry condition, factors reached peak in order of soil moisture, depth to water table and runoff. However, in wet condition, they reached peak in order of depth to water table, runoff and soil moisture. These results will help identify the interaction among factors which affect the runoff, and it will help establish the relationship between various soil conditions and runoff.

Keywords: Soil moisture, Runoff, Rainfall, Response time

설마천 연구지역에서의 토양수분량을 활용한 유출 발생 특성분석

김기영^a · 이용준^b · 정성원^c · 이연길^{d*}

^a한국수자원조사기술원 연구개발실 팀장, ^b한국수자원조사기술원 연구개발실 연구원, ^c한국수자원조사기술원 원장,

^d한국수자원조사기술원 연구개발실 실장

요 지

토양수분과 유출은 매우 밀접한 관계를 가지고 있으며, 특히 토양 내의 여러 요소들에 의해 토양의 수분보유능력과 배수의 특성이 결정된다. 본 연구에서는 2016년, 2017년 설마천 유역에서 총 40개의 사상을 분리하였다. 선정된 사상별로 constant-K 방법을 적용하여 직접유출과 기저유출을 분리하고 유출계수를 산정하였다. 산정된 유출계수는 선행토양수분과 지수함수 형태의 증가를 보였다. 또한 유출계수가 급증하기 시작하는 토양수분의 임계값을 선정하였으며, 이 값은 유출과 지하수면과의 큰 상관관계를 나타내었다. 선행토양수분뿐만 아니라 초기 토양수분, 토양 저류량, 강우량 등 여러 인자들도 유출 결과에 영향을 미치는 것으로 분석되었다. 또한 선행토양수분의 임계값에 따라 강우사상을 건조, 습윤 상태로 분리하여 시작 반응과 침투 반응을 분석해 보았으며, 습윤 상태에서의 반응이 건조 상태에서 보다 빠르게 발생하였다. 건조 상태에 속하는 대부분의 사상에서는 토양수분이 정점에 도달한 후 지하수면과 유출량 순으로 정점에 도달하는 침투 반응이 일어났으나 습윤 상태에서는 반대로 지하수면과 유출량이 토양수분보다 먼저 정점에 도달하였다. 본 연구의 결과는 유출에 기여하는 인자들 사이의 상호작용을 확인하고 토양의 다양한 조건과 유출 사이의 관계를 규명하는 데에 크게 기여할 것으로 판단된다.

핵심용어: 토양수분, 유출, 강우, 반응 시간

*Corresponding Author. Tel: +82-31-929-0922

E-mail: sugawon@kihs.re.kr (Y. Lee)

© 2019 Korea Water Resources Association. All rights reserved.

Article

청미천 논지에서의 증발산량 작물계수 산정에 관한 연구

김기영¹ · 이용준² · 정성원³ · 이연길⁴*

A Study on the Calculation of Evapotranspiration Crop Coefficient in the Cheongmi-cheon Paddy Field

Kiyoung Kim¹ · Yongjun Lee² · Sungwon Jung³ · Yeongil Lee⁴*

Abstract: In this study, crop coefficients were calculated in two different methods and the results were evaluated. In the first method, appropriateness of GLDAS-based evapotranspiration was evaluated by comparing it with observed data of Cheongmi-cheon (CMC) Flux tower. Then, crop coefficient was calculated by dividing actual evapotranspiration with potential evapotranspiration that derived from GLDAS. In the second method, crop coefficient was determined by using MLR (Multiple Linear Regression) analysis with vegetation index (NDVI, EVI, LAI and SAVI) derived from MODIS and in-situ soil moisture data observed in CMC. In comparison of two crop coefficients over the entire period, for each crop coefficient GLDAS K_c and SM&VI K_c , shows the mean value of 0.412 and 0.378, the bias of 0.031 and -0.004, the RMSE of 0.092 and 0.069, and the Index of Agree (IOA) of 0.944 and 0.958. Overall, both methods showed similar patterns with observed evapotranspiration, but the SM&VI-based method showed better results. One step further, the statistical evaluation of GLDAS K_c and SM&VI K_c in specific period was performed according to the growth phase of the crop. The result shows that GLDAS K_c was better in the early and mid-phase of the crop growth, and SM&VI K_c was better in the latter phase. This result seems to be because of reduced accuracy of MODIS sensors due to yellow dust in spring and rain clouds in summer. If the observational accuracy of the MODIS sensor is improved in subsequent study, the accuracy of the SM&VI-based method will also be improved and this method will be applicable in determining the crop coefficient of unmeasured basin or predicting the crop coefficient of a certain area.

Key Words: crop coefficient, evapotranspiration, soil moisture, vegetation index

Received October 28, 2019; Revised October 31, 2019; Accepted November 4, 2019; Published online November 18, 2019

¹ 한국수자원조사기술원 연구개발실 팀장 (Team Manager, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey)

² 한국수자원조사기술원 연구개발실 연구원 (Researcher, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey)

³ 한국수자원조사기술원 원장 (Principal Manager, Korea Institute of Hydrological Survey)

⁴ 한국수자원조사기술원 연구개발실 실장 (General Manager, Research & Development Division, Korea Institute of Hydrological Survey)

* Corresponding Author: Yeongil Lee (sugawon@kihs.re.kr)

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

III. 부록

- A. 각 관측소별 USDA 토성 삼각 분류도
- B. 설마천 DEM
- C. 토양수분량 조사 매뉴얼
- D. 설마천 FDR 일평균토양수분량 DB (Sample)
- E. FDR 관측데이터 통계 분석 결과
- F. FDR 토양수분량 시계열 분석

A. 각 관측소별 USDA 토성 삼각 분류도

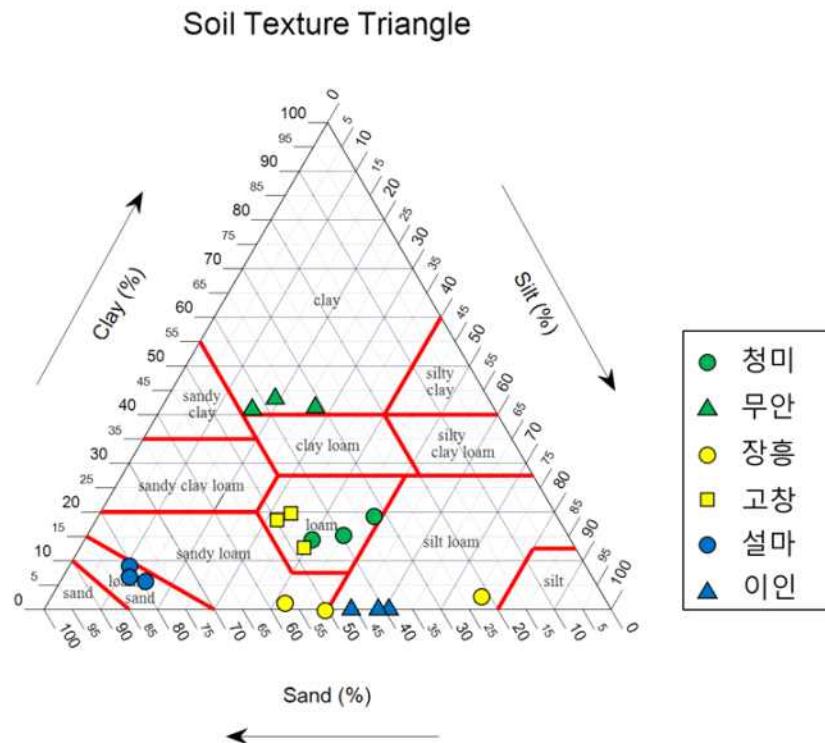
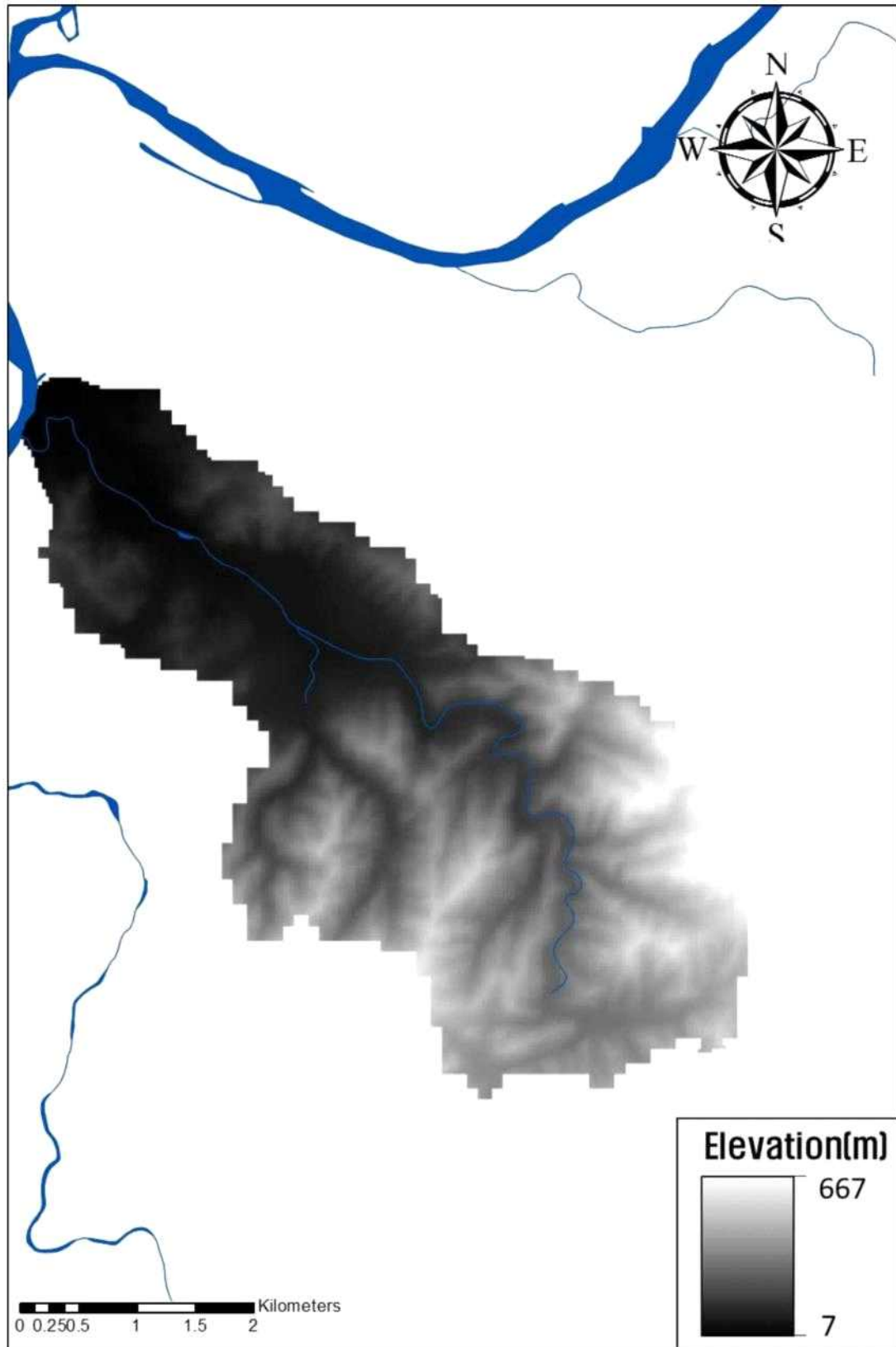


Table 1. 각 관측소별 USDA 토성 삼각분류도

TEXTURE	SAND	CLAY	SILT
장흥1	50.41	0.23	49.36
장흥2	57.12	1.57	41.31
장흥3	21.89	2.87	75.24
고창1	46.13	19.86	34.01
고창2	48.26	12.11	39.63
고창3	49.97	18.27	31.76
설마1	81.12	6.63	12.25
설마2	82.94	7.11	9.95
설마3	81.98	8.92	9.1
청미1	32.71	18.88	48.41
청미2	39.95	15.07	44.98
청미3	46.44	14.29	39.27
이인1	39.1	0.54	60.36
이인2	40.34	1.21	58.45
이인3	45.31	1.12	53.57
무안1	32.12	40.22	27.66
무안2	37.56	43.86	18.58
무안3	42.43	40.12	17.45

B. 설마천 DEM



C. 토양수분량 조사 매뉴얼

<개요 및 목적>

토양수분량은 국가의 수자원 계획 및 개발 등에 기본자료로 이용될 뿐만 아니라 물 순환 과정의 규명, 물 수지 분석, 유출 해석 및 모형 개발, 가뭄분석, 기상예보 정확도 향상, 작물의 소비수량 산정, 산사태 등 여러 분야에 활용되고 있다. 또한 토양수분량은 생태수문학(Ecohydrology)의 가장 중요한 인자로서 식생의 성장 및 변동의 원인과 결과를 동시에 제공한다. 이는 대기의 상호작용 및 총체적인 물 수지에 연관되며 침투, 증발산, 오염물의 이송 및 생태계의 동역학에도 중요한 역할을 한다.

미국 등 여러 선진 외국에서는 오래 전부터 토양수분량조사에 대한 기본 개념을 정립하여 정기적으로 측정해 오고 있다. 최근에는 유전율 방식인 TDR(Time Domain Reflectometry), FDR (Frequency Domain Reflectometry) 장비를 개발하여 실시간으로 측정하고 있다. 또한 자료의 품질 향상을 위한 제반 기술과 자료 처리 및 품질관리 방법 등도 체계화하여 실무에 이용하고 있다. 우리나라에서는 토양수분량 측정 계획이 2005년 「수문조사선진화5개년계획(건설교통부, 2005)」에 포함되면서 기반이 마련되기 시작하였다. 이로 인해 현재 토양수분량 조사가 「수자원의 조사·계획 및 관리에 관한 법률 제9조(수문조사의 실시)」에 기반을 두고 있으며, 소수의 지점이지만 토양수분량이 정기적으로 측정되고 있다. 그러나 토양수분량조사에 적용 가능한 체계적인 매뉴얼은 미비한 실정에 있다. 이에 토양수분량조사에 필요한 사항, 즉 측정계획, 측정장비와 방법, 유지관리, 품질관리, 자료의 저장 관리 등에 이르기까지 전반적인 사항에 주안점을 두고 매뉴얼을 구성하였다.

<매뉴얼 구성>

본 매뉴얼은 토양수분량조사에 대한 기본적인 과정을 이해하고, 토양수분량 자료를 생산할 수 있도록 절차와 방법, 품질관리 내용과 절차, 자료 분석 등을 체계적으로 기술하였다

이 매뉴얼은 고품질의 토양수분량 자료를 생산하는 데에 이해를 돕기 위해 작성하였으며, 추후 더 효율적인 방법과 내용이 전달될 수 있도록 개선해 나갈 것이다.

<관측이론>

토양수분량을 측정할 수 있는 방법과 장비에는 중량법, 유전율식 방법(TDR, FDR), Cosmic-Ray 중성자 측정법 등이 있다. 본 장에서는 중량법, TDR(Time Domain Reflectometry) 방법, FDR(Frequency Domain Reflectometry) 방법, Cosmic-Ray 중성자법에 대해 기술하고자 한다.

<토양수분량 정의>

토양내 함유되어 있는 수분의 양, 즉 토양수분량은 토양의 체적(혹은 질량)과 무게의 비율로 정의되는데 이는 각각 체적함수비와 질량함수비로 구분된다. 일반적으로 질량함수비보다는 체적함수비가 널리 쓰이는데 그 이유는 토양의 질량이 토양의 형상과 조성에 따라 상이해 사용이 복잡한 데에 있다. 질량함수비로 토양수분량을 규정하여 관측할 수 있는 장비는 딱히 없으며, 대부분의 측정장비는 토양수분량을 체적함수비로 정의하고 있다. 체적함수비는 토양과 수분의 유전율(원자가 주변 전기(electric field)의 변화에 반응하는 정도) 차이로 산정되고, 보통 토양의 유전율은 3~8 정도, 물의 유전율은 80 이상을 갖는다.

<토양수분량 측정방법>

체적함수비로 정의되는 토양수분량을 측정할 수 있는 장비는 TDR과 FDR이 가장 대표적이다. 이들 장비는 토양에 전기 신호를 송신하는 원리를 이용하는 것은 동일하지만 돌아오는 신호를 분석하는 방식에 차이가 있다.

반향파의 신호를 분석하는 방식은 시간 영역과 주파수 영역으로 구분되는데 TDR은 시간 영역의 변화, FDR은 주파수 영역의 변화를 이용한다.

1) 중량법

중량법은 토양의 일정 깊이에서 시료를 채취 하여 105℃에서 48시간 이상 건조시킨 후 토양의 무게비로 토양 수분량을 표시하는 방법이다. 중량법은 다른 현장 관측 방법과 비교해 토양수분 측정의 정확성이 높다. 그러나 측정하는데 오랜 시간(평균 2~3일)이 걸리고, 직접 시료를 채취하기 때문에 해당 토양층의 손상이 불가피한 관계로 동일한 위치에서 지속적인 측정이 어렵다는 단점을 가진다.

2) TDR 방법

토양내 설치된 탐침에 전기 신호를 보내면 이들 신호는 센서의 끝 부분에서 본체로 반향되어 온다. 반향되어 오는 시간이 토양의 유전성질에 따라 변화하게 되는데, 이를 토양내 수분과 관계시켜 토양수분량을 측정하는 것이 TDR 방법이다. 초고주파(1.0~3.0GHz)를 이용하여 토양내 유전율 정도에 따라 흐르는 전자파 세기가 달라지고 그에 따라 반사되어 오는 반사파의 세기 정도에 따라 회로내에 걸리는 전압 또는 전류의 세기를 시간으로 변환하여 읽어 토양의 직접 체적 토양수분량으로 환산한다. 토양수분량은 체적함수비로 바로 읽으며 비교적 정확도가 높으며 안정적인 측정 값을 제공한다. TDR 관측시스템은 가장 우수한 토양수분량 측정 장비로 알려져 있으나 상당히 고가 장비이고 이들을 가동하기 위한 추가 장비도 상당히 많다.

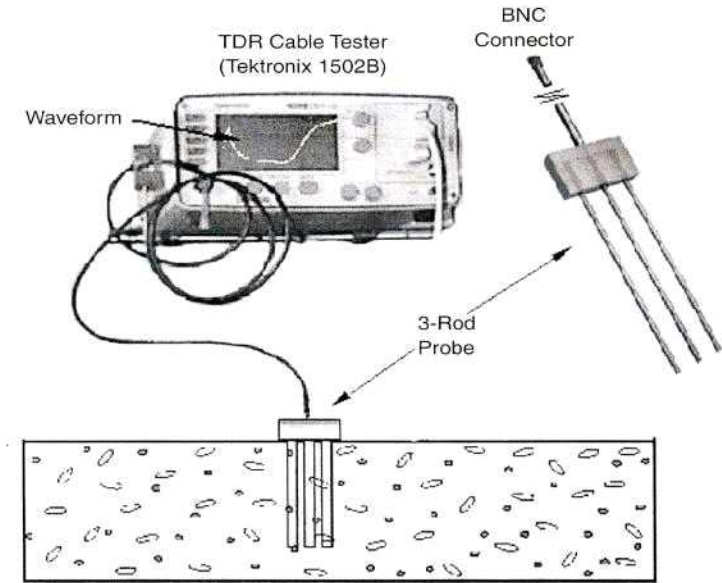


Fig. 1 TDR 본체와 케이블 그리고 3중 탐침 센서

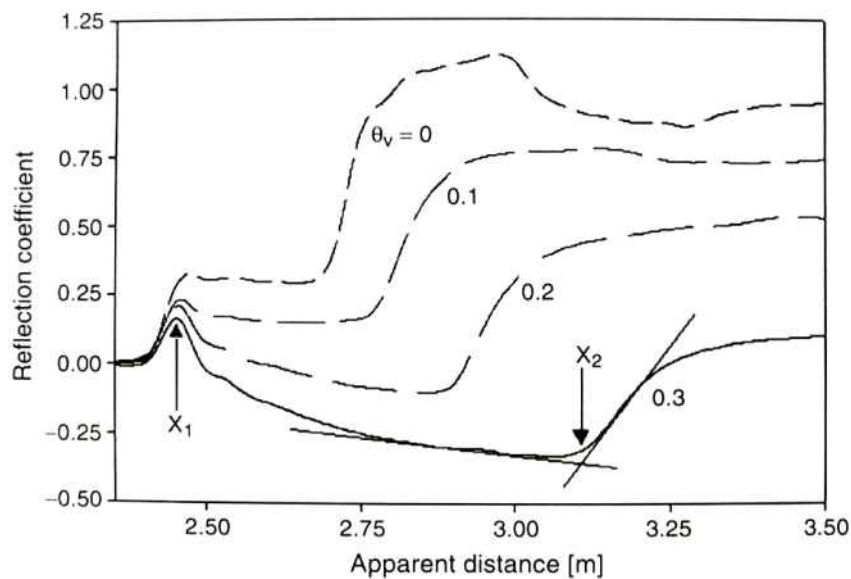


Fig. 2 TDR 반향파형

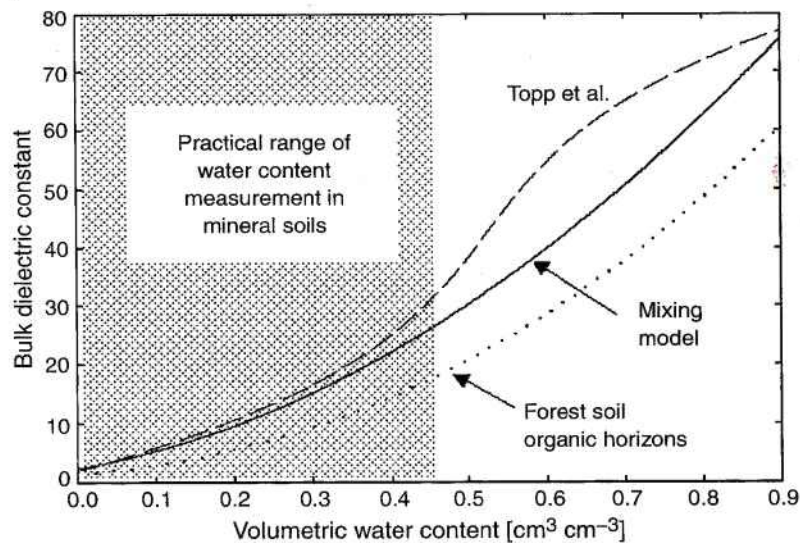


Fig. 3 다양한 토양층에서의 토양수분량과 유전상수와의 관계

3) FDR 방법

고주파(3~100MHz)를 이용하여 토양내 유전을 정도에 따라 측정 회로내에 걸리는 주파수영역에서 콘덴서에 걸리는 정전용량(electric capacity)으로 읽어 토양수분함량으로 환산하여 나타낸다.

FDR 센서는 전기용량(capacitance)을 이용한 방법으로 공명 진동수의 변화를 측정하며 발진기로 불리는 전자회로에 의해 반복적인 파장을 생성한다. 사인파의 형태가 일반적인 파장이며 다른 형태로는 삼각파나 바늘 형태의 철편, 사각파 등이 있다. FDR의 파장대역은 직류전원의 유도효과를 피하기 위해 100kHz보다 커야 하며 축전판 사이의 매질을 토양으로 하고 토양수분 함량에 따라 변화하는 주파수의 변화를 탐지하도록 되어 있다. 센서에 비해 비용이 저렴하나 수분함량뿐 아니라 온도나 부피밀도, 점토함량에 더 민감하여 지점의 따라 상대적으로 정확도의 편차가 발생할 수 있다. 이러한 특성 때문에 FDR 센서는 많은 연구 지역에서 토양수분 측정의 밀집도를 높이는데 이용되며 전 세계 토양수분 공유사이트인 ISMN(International Soil Moisture Network)과 같은 광범위한 지점 관측망을 형성하는데 기여하고 있다.

4) Cosmic-Ray 중성자법

COSMIC-ray는 지구 밖 천체에서 발생된 고에너지 입자를 의미한다. 이러한 입자들이 무수한 충돌을 겪으며 지구의 대기층을 통과해 고속의 중성자 형태로 지표에 도달하게 된다. 고속 중성자는 토양수분 내에 함유되어 있는 수소원자에 의해 감속되어 수 백 미터 넓이의 대기 중으로 방출되는데, 이에 본래의 고속 중성자 밀도는

지표면의 토양수분과 음의 상관관계를 갖게 된다. COSMIC-ray 토양수분 측정장비는 바로 이 방출되는 고속 중성자의 개수를 측정한 후, 고속 중성자의 밀도와 지표면 토양수분과의 관계를 이용해 토양수분함량을 산출할 수 있다. COSMIC-ray 중성자 측정장비는 지표에서부터 방출되어 나가는 고속 중성자를 관찰하기 때문에 지표 밑이 아닌 지상으로부터 1m 높이로 안테나와 같이 세워진다. 센서의 긴 원통형 측정기 내에는 저밀도 폴리에틸렌으로 밀폐된 가스(3He or BF3)가 주입되어 있으며, 이는 고속 중성자에 대한 측정 민감도를 높이는 역할을 지닌다. 장비의 측정반경은 해수면 높이에서 지름 600m의 원형으로, 기타 지점 관측 토양수분 장비와 비교해 넓은 범위를 대표하는 토양수분함량을 측정할 수 있다. 장비의 유효 측정 깊이는 지역에 따라 차이를 보이거나 건조한 토양에서는 76cm, 포화 토양에서는 12cm까지의 투과도를 보인다. 그러나 실제로는 이보다 더 적은 유효 깊이를 보이는데 토양 내 광물 격자와 토양 유기물 내 수소 함량이 중성자의 투과도를 감소시키기 때문이다. COSMIC-ray 센서의 토양수분 측정 정확도는 건 토중량법에 버금갈 정도로 매우 높다. 또한 정확도는 측정 가능한 중성자 개수에 따라 좌우되는데, 시간당 측정 가능 중성자수가 많을수록 정확도가 높아지며 평균 토양 수분 함량이 증가할수록 정확도가 낮아지는 경향이 있다. 한편 내구성에 있어서는 TDR, FDR의 경우처럼 지표 밑 토양 내부에 센서를 설치하는 것이 아니라 지상 위에 구조물을 설치하는 방식이기 때문에 폭우에 의한 유실이나 토양 빙결로 부터 안전하다. 이러한 장점에도 불구하고, 비싼 설치비용과 중성자 수 집계를 토양수분 함량으로 변환하는 과정에 대한 이해가 필요하고, 관측의 정확성을 위해 대륙별마다 중성자 모니터링을 할 수 있는 별도의 시설이 필요하다는 점 등에서 우리나라에는 아직 익숙하지 않은 측면이 있다. 그러나 COSMIC-ray 토양수분 측정 장비는 국제적으로 현장 토양수분 관측의 정확성의 향상과 토양수분 네트워크 확장에 크게 기여하고 있다.

<Cosmic-Ray Neutron Probe 방법(CRNP)>

CRNP는 지표면으로부터 반사되는 중성자를 측정하여 면단위 토양수분량을 측정하는 장비지만 중성자와 토양 수분량과의 관계 규명, 즉 최적화를 위해서는 초기에는 다수의 유전율식(FDR, TDR) 장비가 요구된다. 그렇지만 최적화 이후에는 최소의 유전율식 장비가 운영되기 때문에 운영적인 측면에서 매우 유리하다. 사실, CRNP 토양수분량 관측시스템은 CRNP와 유전율식 장비의 결합을 필요로 하기 때문에 초기에는 상당히 어려움이 따른다. 이에 따라 본 연구에서는 약 2개년 동안 설마천 유역에서 도출된 결과와 운영성과를 토대로 CRNP 관측시스템 설계와 운영 등에 관한 사항을 아래에 기술하였다.

토양수분량의 관측소를 설치하기 위해서는 관측소 운영 목적이 어디에 있는지를 파악하는 것이 매우 중요하다. 강우-유출 기반의 국가 물관리(홍수예보, 갈수예보), 가뭄심도 분석, 위성기반 토양수분량 생산을 위한 지상 검증자료 생산 등에 있다면 면단위 측정이 가능한 CRNP 방식으로 관측소를 구축해야 한다. 또한 토성 및 지표면 피복 특성이 일정한 작물의 생육에 목적이 있다면 유전율식 방식으로 설계하는 것이 효율적이다. CRNP 관측시스템 설계 시 필요한 과정은 아래와 같다.

- 1) 목적에 부합하는 사이트 선정
 - 강우-유출 기반 물 관리(홍수, 갈수예보)
 - 가뭄심도 분석 등
 - 수문 및 기상관측소와의 연계성
 - * 인근에 증발산량 관측소 등 기상관측소가 있는 곳
 - 대상유역의 대표성(지형, 토양형, vegetation) 고려
- 2) 토양수분량 관측시스템 설계
 - CRNP 방식+유전율식 방식
 - CRNP 설치 위치, 검증 센서 설치 위치 등
 - * 유전율식 방식은 검증 목적으로 설치하고 CRNP 영향원 고려 설치
- 3) 유전율식 토양수분량 검증
 - 중량법으로 유전율식 방식의 SM 검증

- 월별 1회 시료채취 시행
- 4) 관측시스템 운영
 - 유지관리(2주단위 현장방문)
 - 자료 정상성 확인
 - * 강우에 대한 반응, 토양수분량 곡선이 감쇄 특성 등
 - * 강우와 중성자 관계 특성 확인
- 5) 품질관리 및 분석
 - 2주단위로 품질관리 수행
 - 강우에 대한 반응성, 토양수분량 감쇄특성, 토양수분량의 토심별 특성과 변동성 등
 - 강우와 중성자 관계 특성 확인, CRNP SM 산정, 유전율식 대표 SM 생산
 - CRNP SM과 유전율식 대표 SM 특성 분석
- 6) CRNP 시스템 최적화
 - 유전율식 대표 SM을 이용한 CRNP 관계식 결정
 - 유전율식 대표 SM을 이용한 CRNP 관계식의 매개변수 확정
- 7) 유전율식 설계 시스템 대표성 분석
 - 유전율식 센서수 확정
 - 평균기반 분석
- 8) 최적의 CRNP 관측시스템 도출
 - CRNP+유전율식(위치, 센서수)



Fig. 4 CRNP 토양수분량 관측시스템 구축 과정

<측정계획 수립>

본 매뉴얼에서는 토양수분량 관측소 신설계획, 유지관리계획, 품질관리계획 등에 주안점을 두고 토양수분량조사 계획 수립 시 필요한 사항을 정리하였다.

<신설계획>

토양수분량 관측소를 신설하고자 할 때에는 토양수분량을 생산하는 방식을 먼저 고려해야 안정적으로 자료를 관측할 수 있다. 환경부에서 채택하고 있는 방식은 유전율식 방식(TDR)이기 때문에 본 매뉴얼에서는 유전율식 방식과 CRNP(Cosmic-Ray Neutron Probe) 방식의 관측소 신설 시 고려해야 할 사항을 정리하였다.

관측소 신설 시에는 수문학적인 조건을 고려해야 한다.

- ① 토양수분량 자료의 활용성이 높은 지역
- ② 수문학적으로 유출경로에 대한 정성적, 정량적 평가가 가능한 유역
- ③ 지형학적으로 물 수지의 닫힘이 성립되는 지역
- ④ 토양학적으로 비교적 균질한 토양층이 충분한 깊이로 발달되어 토양수분의 수평 수직 등의 공간적 거동을 관측할 수 있는 지역
- ⑤ 인근지역에 운영되는 강우나 유출 혹은 기상 자료 등의 수문자료를 지속적으로 확보할 수 있는 유역

시스템 운영측면에서는 아래와 같은 사항을 고려해야 한다.

- ① 전원공급이 가능한 곳이 좋다
- ② 시스템 본체를 보호하기 위한 시설물의 설치가 용이한 곳이 좋다
- ③ 산사태 또는 사면 붕괴 등에 의한 장비 손실을 막기 위해 지반이 안정된 곳이 좋다.
- ④ 낙뢰 등의 자연재해 위험을 최소화 할 수 있는 곳이 좋다

유전율식 방식(TDR, FDR)과 CRNP 방식의 토양수분량 관측소 신설 시에는 위에 기술된 고려사항을 만족하는 지에 대한 사전조사가 반드시 필요하다.

사전조사는 다음과 같은 사항을 고려해야 한다.

- ① 관측소 신설 시 고려사항을 만족하는 몇 개의 후보지를 결정한다.
- ② 후보지의 토양형과 토심 특성을 조사한다.
- ③ 후보지가 산지인 경우 지형조사를 통해 경사, 지형지수, 습윤지수 등을 분석한다.
- ④ 후보지의 토지이용과 피복 특성을 분석한다.
- ⑤ 위성영상 자료가 있는 경우 토양수분량의 변동성을 조사한다.
- ⑥ 최종적으로 후보지에 대한 대표성 분석을 수행한다.

몇 개의 후보지를 선정하여 토양수분량 관측 방법 등을 평가하는 사전조사는 반드시 필요하다. 이에 대한 조사는 1년 이상 수행하는 것이 바람직하고 관측된 자료를 통해 대표성 등을 충분히 분석해야 한다. 토양수분량 관측소 신설 시에는 많은 예산이 수반되고 관측소가 구축되면 이설이 어렵기 때문에 위치선정은 매우 중요한 사항이다.

<유지관리 계획>

대상 토양수분량 관측소에서 고품질의 자료를 생산하기 위해서는 그 무엇보다도 유지관리를 정기적으로 수행해야 한다. 이를 위해서는 토양수분량 측정시스템에 대한 완벽한 이해가 필요하다.

원격접속이 가능한 관측소라면 매일 관측소 시스템에 접속하여 관측소의 운영상태 등을 파악(일일 모니터링)

하여 대처해야 한다. 또한 정기적으로 관측소를 방문하여 제어부, 센서부, 시설물 등을 점검하여 문제점 등을 사전해 파악해 신속히 대응해야 한다.

유지관리를 효율적으로 수행하기 위해서는 전년도 운영 및 유지관리 결과를 토대로 개선 및 보강 계획을 수립하는 것이 중요하다. 유지관리 계획은 연초에 수립하는 것이 바람직하며, 유지관리계획에는 관측소 개선 및 보강 계획, 점검계획 등을 포함해야 한다.

연초에 수립된 유지관리 계획을 토대로 관측소를 운영해야 하며, 점검 시에는 반드시 점검일지와 관측소 관리 대장 등을 작성해야 한다. 본 매뉴얼에서는 관측소 유지관리에 대한 세부적인 사항을 제4장(관측소 유지관리)에 기술하였다.

<품질관리 계획>

관측된 자료에는 항상 나쁜 품질을 가지는 자료가 있게 마련이다. 어떻게 보면 이상치를 제거하고 원인을 파악하는 것도 중요하지만, 관측된 자료를 통해 측정장비의 정상성과 문제점을 파악하는 것이 사실 더 중요한 사항이다. 관측된 자료를 수집하여 정기적으로 품질관리를 수행한다면 토양수분량 관측소의 최적 운영이 가능할 것으로 판단된다.

품질관리 계획은 유지관리와 병행하여 수립해야 하며, 자료는 원시자료와 품질관리된 자료로 구분·관리해야 한다. 또한 품질관리 시의 이력은 점검일지 등에 반드시 기록·관리해야 한다.

본 매뉴얼에서는 토양수분량 자료에 대한 품질관리를 자료검토, 자료보충 순으로 구분하여 (자료 품질관리)에 상세히 기술하였다.

<관측소 유지관리>

고품질의 토양수분량 자료를 생산하기 위해서는 관측시스템이 정상적으로 작동하고 있는지에 대한 점검이 무엇보다도 중요하다. 관측시스템의 고장으로 인해서 장기간 운영이 중단된다면 고품질의 자료생산은 사실 불가능하다.

결측이 없고 정상성을 가지는 고품질의 토양수분량 자료를 생산하기 위해서는 관측시스템, 관측된 자료의 점검과 확인 과정이 정기적으로 수반되어야 한다. 그러나 관측소가 현장에 설치되어 있고, 관측된 자료의 양도 방대하기 때문에 관측장비의 점검과 자료의 정상성 검토를 수행한다는 것으로 상당히 어려운 일이다.

토양수분량 관측소를 효율적으로 유지관리하기 위해서는 정기점검과 수시점검으로 구분·수행하는 것이 바람직하다. 정기점검 시에는 각각의 관측시스템의 운영 상태를 확인하고, 일정기간 동안 관측된 자료를 수집해야 한다. 수시점검은 관측된 자료에서 발생한 문제점을 세부적으로 파악하기 위한 현장점검을 의미한다. 어떻게 보면 수시점검은 실제적인 문제를 해결하기 위한 단계이기 때문에 점검 시에는 발생한 문제에 대한 원인을 정확히 파악해야 한다.

간단한 문제의 경우는 현장에서 즉시 조치하고, 그렇지 않은 경우는 전문업체에 의뢰하여 결측이 최소화될 수 있도록 해야 한다. 토양수분량 관측소 유지관리는 Table 1과 같이 정기점검과 수시점검으로 구분해 수행한다.

Table 1. 토양수분량 관측소 유지관리

구분		주기	점검 내용	비고
현장점검	정기	연 2회	- 관측시스템, 자료 정상성 등 - 토양수분량 수집 병행	현장점검대장 작성
	수시	수시	- 발생한 문제의 원인 파악 등 조치 - 비교적 큰 강우 발생 이후 - 토양수분량 수집 병행	현장점검대장 작성
자료수집(현장)		월 2회	- 토양수분량 자료 수집 등 - 관측시스템 운영상태 확인 병행	현장점검대장 작성

본 장에서는 토양수분량 관측소 유지관리 시 필요한 사항을 정기점검, 수시점검으로 구분하여 아래의 절에 기술하였다.

1) 정기점검

정기점검은 관측소 시설 및 관측 기기의 외부 상태 등을 점검하기 위해 실시하며, 현장점검하는 것을 원칙으로 한다. 정기점검 시에는 측정 센서 및 시설물의 상태를 확인하고, 측정된 자료를 저장(다운로드)한다. 측정된 자료를 검토하여 측정 기기 및 Wave guide의 이상 유무도 확인한다. 정기점검 결과는 현장 점검표를 작성하여 점검사항이 누락되지 않도록 하고, 문제가 발생 하였을 시에는 가능한 빠른 시일 내에 해결될 수 있도록 해야 한다.

측정 기기에 대한 점검은 전용 프로그램(TDR의 경우 WINTRASE)으로 수행하고, 기기가 정상 작동되고 있는지를 확인한다. 정기점검 시에는 아래의 내용을 반드시 확인하여야 한다.

- ① 측정 배터리 전압 확인
- ② 측정 장비의 시간 확인
- ③ 측정 장비의 저장 자료 개수 확인
- ④ 측정 장비의 마지막 측정 값 확인
- ⑤ 측정 장비의 Autolog Active 상태 확인
- ⑥ 측정 자료 다운로드(장비의 저장 자료 수 확인)
- ⑦ 측정 자료의 이상 유무 확인(마지막 측정 자료 기준)
- ⑧ 자료에 이상이 발견된 경우 수동으로 이상이 있는 센서의 측정 값을 재차 확인하고, 문제 발생 시 Cable 점검 및 교체

주의할 점은 장비가 구동 중인 상태에서 연결을 시도할 경우 장비에 오류가 발생할 확률이 높기 때문에 주의가 필요하다. 정기점검 시 관측소에서 문제가 감지되면 Table 2에 따른 조치를 수행한다.

Table 2. 정기점검 시 주요 조치사항

점검 항목	이상 여부 판단	조치사항
· 가동 전압 확인(BattVolt_Avg)	· 11V 이하로 측정될 시	· 전력 공급 장치 이상 및 배터리 전압 강하로 배터리 교체 필요
· 자료 결측 및 오측 확인 (모든 측정 자료 포함)	· 측정 자료의 결측 및 오측 확인	· 이상 센서 수동 측정 확인 · 계속해서 이상이 발생한 경우 Cable 및 Waveguide 교체 필요
· 측정 기기 연결이 불가능할 시	· WINTRASE 메인 화면 초기화	· 측정 기기의 교체 (TDR 및 Switchboard)

현장점검 일지

지점명		소속		점검일시				
점검자								
구분	항목	점검사항	점검결과		조치결과		조치내용	
			양호	이상	조치	미처리		
도작 후	현장작업 전 상태 확인	▪ 관측국사 외관 상태						
		▪ 측정 장비 전원상태					전압:	
		▪ 측정 장비 연결상태						
현장 점검	장비 점검 및 자료 다운로드	▪ 측정 장비와 PC 연결시 상태						
		▪ 측정 장비 저장된 자료 상태(숫자 확인)						
		▪ 교체한 배터리 전원 상태					전압:	
		▪ 배터리 교체후 측정 장비와 PC 연결 상태						
		▪ 새로운 자료측정을 위한 설정						
		▪ 측정 장비 정상 작동 확인						
기타	기타	▪ 주변정리 확인						
		▪ 잠금장치 이상 여부 확인						
		※ 항목별 교체물품, 문제 발생원인과 변경사항 등 점검사항의 세부내용 및 점검 외 특이사항 기술.						

Fig. 5 현장점검 일지(점검사항)

<수시점검>

원격접속이 안되는 토양수분량 관측소의 경우는 측정장비가 정상적으로 운영되고 있는지를 판단하기가 어렵다. 이와 같은 관측소의 경우는 잦은 현장점검이 필요하다. 수시점검을 통해 문제점의 원인을 파악하고 신속

한 해결을 통해 토양수분량 관측이 정상적으로 이루어 질 수 있도록 해야 한다. 또한, 현장에서 조치가 불가능한 경우에는 신속한 후속 조치(전문업체 의뢰 등)를 취해야 한다.

또한 수시점검은 비교적 큰 강우가 발생하였을 때 수행하는 것이 바람직하고, 정기점검 수준으로 수행하는 것이 바람직하다. 수시점검 시에도 정기점검과 동일하게 현장 점검표를 작성하여 점검사항이 누락되지 않도록 하여야 한다.

<자료 품질관리>

관측된 자료에는 항상 나쁜 품질을 가지는 자료가 있게 마련이다. 이러한 나쁜 품질의 자료는 기기의 오작동, 관측기기 및 시스템의 불안정, 전원 불안정 등에 의해서 주로 발생한다. 그렇기 때문에 일상적으로 관측된 자료를 검토해서 관측기기에 문제 있는지, 아니면 시스템 상에 결함이 있는지 등을 확인해야 한다.

품질관리 시 고려해야 할 또 하나의 사항은 관측된 토양수분량 자료의 정상성을 검토하는 것이다. 이와 같은 검토는 강수량 자료와 연계해서 수행하는 것이 좋다. 만일 자료의 정상성에 문제가 있을 경우에는 문제의 원인을 정확히 파악하여 이에 대한 대책을 수립해 주어야 한다. 어떻게 보면 관측기기를 정상적으로 운영해서 양질의 자료를 충분히 확보하는 것이 고품질의 자료를 얻을 수 있는 길이라 할 수 있다.

<내용 및 절차>

토양수분량 자료의 품질관리는 자료 검토, 자료 보충(gap-filling)의 2단계로 구분하여 수행하는 것이 바람직하다. 단계별 품질관리 내용을 기술하면 다음과 같다. 첫째, 자료 검토 단계에서는 관측된 자료에 이상치가 발생했는지, 결측된 자료가 있는지, 관측된 자료가 정상적인 특성을 가지고 있는지를 파악한다. 둘째, 자료 보충 단계에서는 자료검토가 완료된 자료를 토대로 결측된 자료와 제거된 자료의 기간을 파악하여 적합한 방법으로 자료를 보충한다.

<자료 품질관리>

1) 관측자료 검토

관측된 토양수분량 자료를 대상으로 기존의 토양수분량 자료(history), 강우기록 그리고 수문학적 개념을 토대로 검토를 수행한다. 기본적으로 Minitrase TDR 장비는 0~100%의 측정범위를 갖지만 적정 범위는 0~50%로 볼 수 있다. 또한 Minitrase TDR이 측정한 토양수분량 자료 중에는 가끔 비정상적인 값이 나오기도 한다. 이러한 자료는 강우기록, 기존의 토양수분량 자료, 다른 지점의 토양수분량 자료 등을 토대로 분석하여 처리한다. 토양수분량 자료의 이상치를 판별하는 기준은 다음과 같이 총 6가지로 구분해 볼 수 있다.

첫째, 관측된 토양수분량이 0%보다 작거나 50%보다 큰 경우는 이상 특성을 의심해 봐야 한다. 이 범위의 값은 통상적으로 현장에서 관측될 수 없는 값이다. 둘째, 강우사상에 대한 정상성을 검토한다. 강우사상이 발생했음에도 토양수분량이 반응하지 않고, 일정하게 유지되거나 감소 특성을 보인 경우는 우선 이상 특성을 의심해 봐야 한다(Fig. 7). 셋째, 강우사상이 없음에도 불구하고 토양수분량이 급격히 변동하게 되면, 자료의 이상 특성을 의심해 봐야 한다(Fig. 7, Fig. 8).

넷째, 일정한 값을 기준으로 교란현상을 보이는 경우다. 이러한 현상은 센서를 연결하는 리드선이 손상(야생동물에 의한 손상)될 때 주로 발생한다. 이 기간 동안에 관측된 자료도 이상 특성을 의심해 봐야 한다. 다섯째, Minitrase TDR이 측정할 수 있는 기온의 범위는 0~40℃로서, 이 범위 밖에서 관측된 자료는 이상 특성을 의심해 봐야 한다. 특히 기온이 급강하하여, 지온이 영하로 내려가면 매질의 유전상수가 변화기 때문에 이상치가 발생하기 쉽다(Fig. 9). 여섯째, 중성자 강도는 토양수분량에 반비례하기 때문에 강우와 중성자 강도 관계를 검토하여 이를 확인한다(Fig. 10). 일곱째, 유전율식 자료와 중성자 강도의 관계를 검토하여 CRNP의 정상성을 확인한다(Fig. 11)

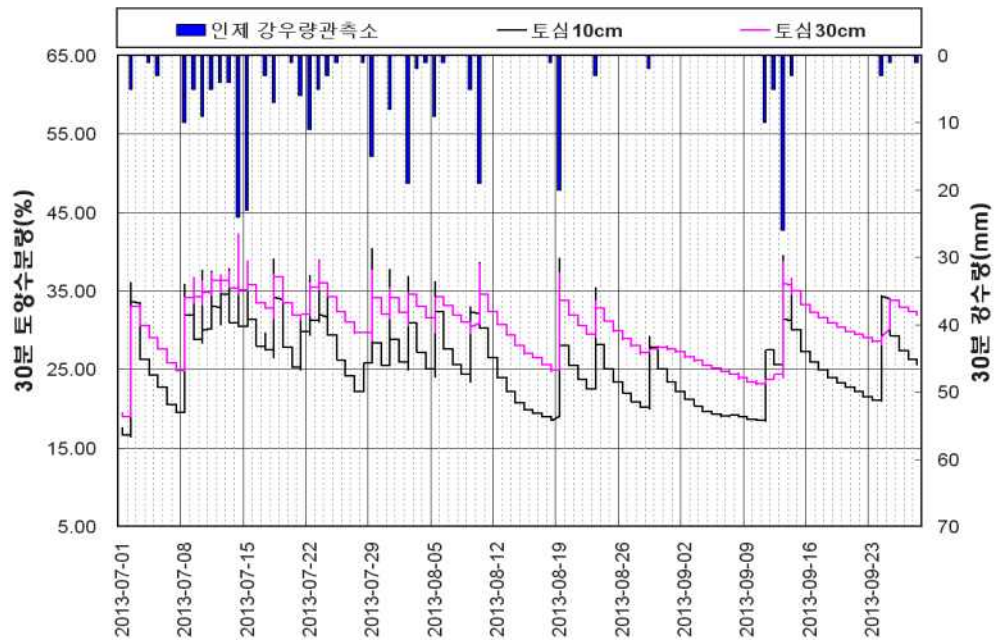


Fig. 6 강우사상에 대한 정상성 검토 사례(유전율식)

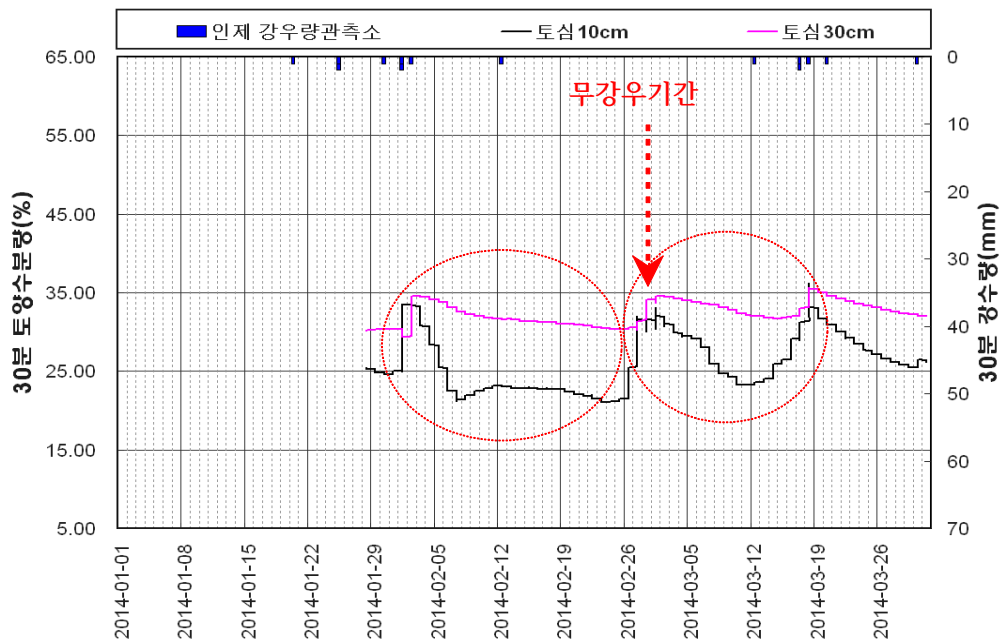


Fig. 7 무강우기간의 정상성 검토 사례(유전율식)(1)

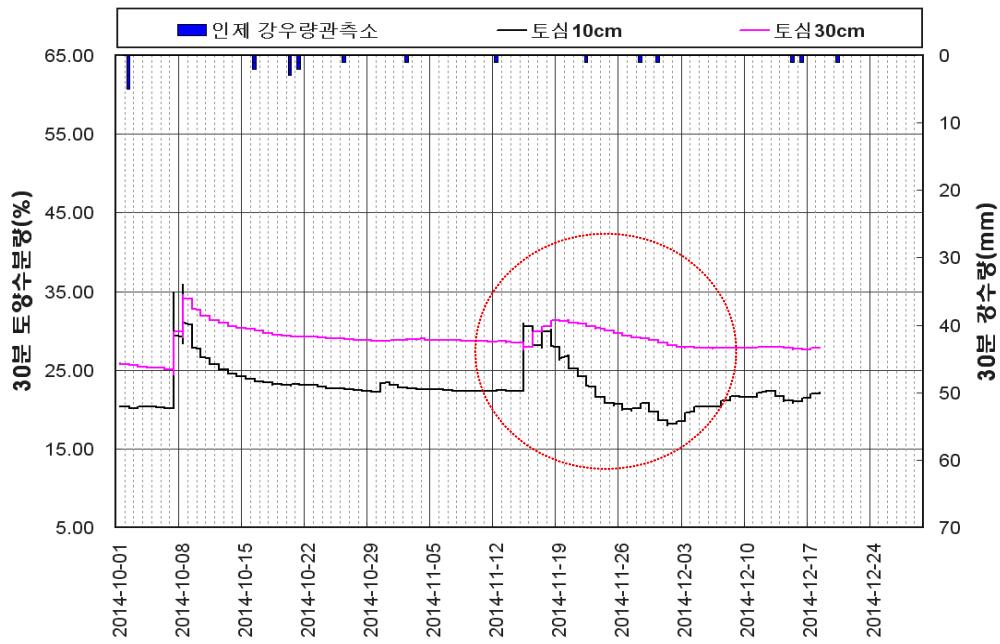


Fig. 8 무강우기간의 정상성 검토 사례(유전율식)(2)

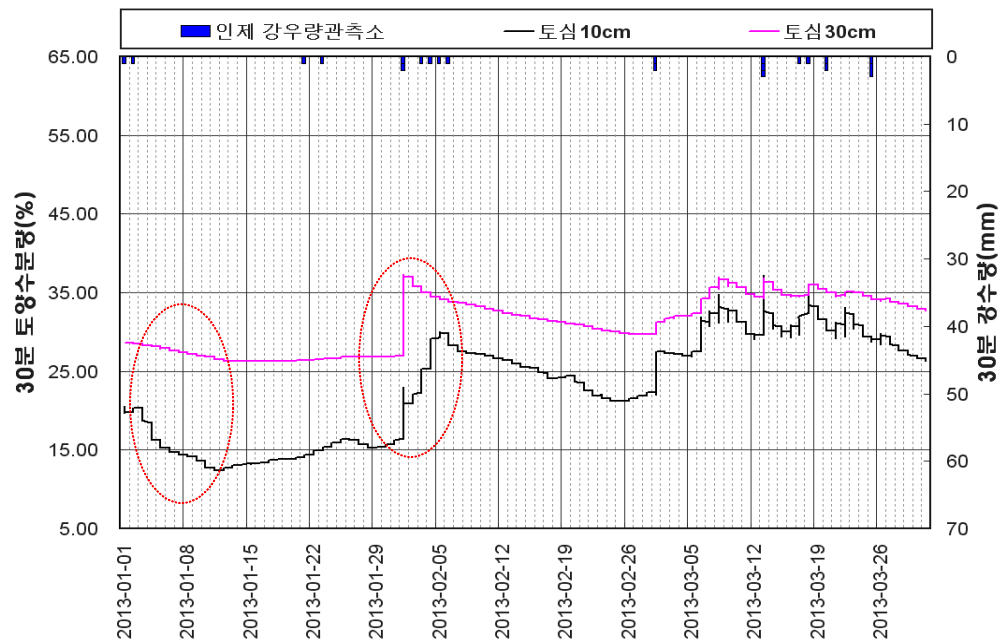


Fig. 9 동절기 정상성 검토 사례(유전율식)

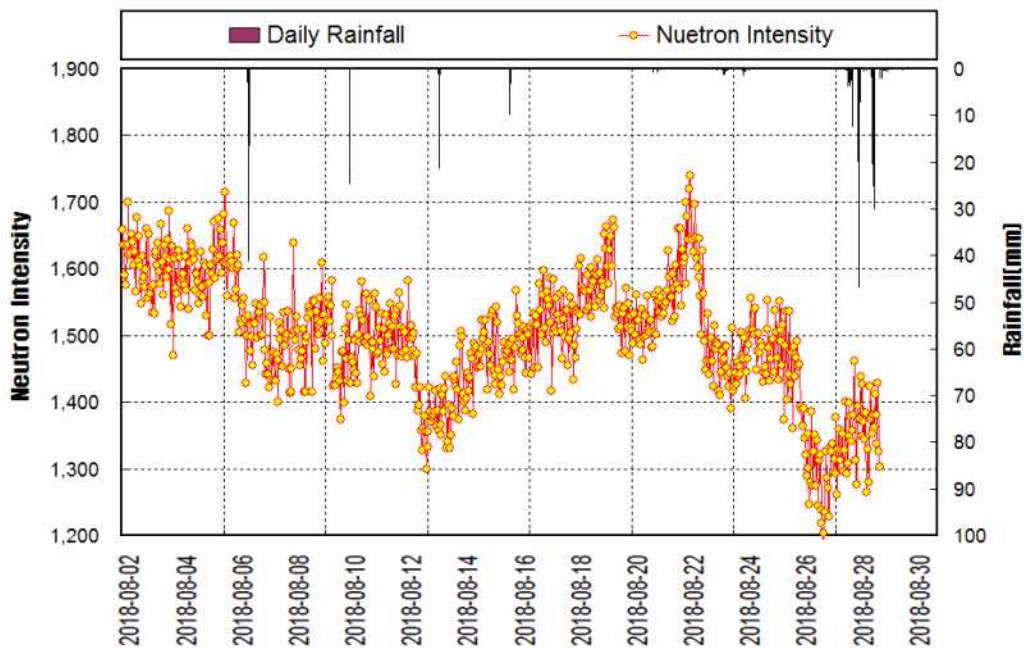


Fig. 10 CRNP Neutron과 강우량의 관계

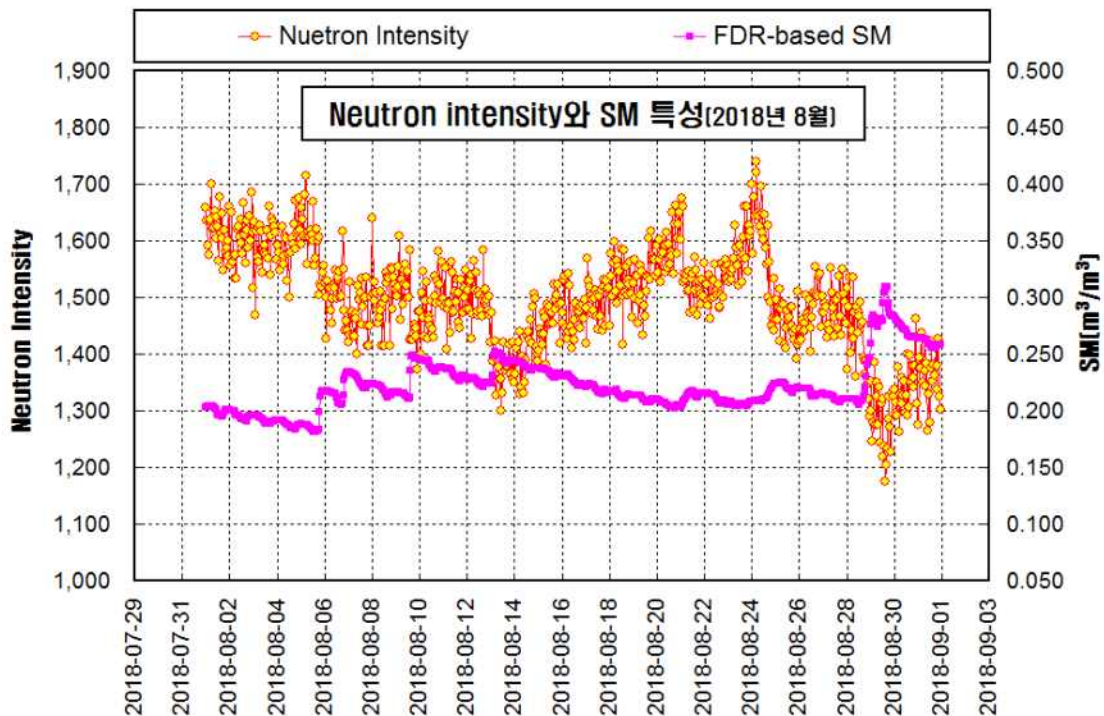


Fig. 11 CRNP Neutron과 유전율식 SM과의 비교

2) 자료보충

토양수분량 자료에 대한 보충(gap-filling)을 수행하기 전에 먼저 결측 자료에 대한 특성을 구분해야 한다. 결측 자료는 자료 수집 시 발생하는 결측, 측정 장비의 오류로 인한 결측, 이상 특성, 강우 발생 시 결측된 자료로 구분하는 것이 좋다. 첫째, 자료 수집 시 발생하는 결측자료는 현장에서 자료를 다운로드 할 경우 발생된다. 이 기간은 매우 짧기 때문에 보통 결측된 전·후의 토양수분량을 평균하여 보충하거나 감쇄곡선의 특성을 분석하여 보충하여도 문제가 되지 않는다(Fig. 12). 둘째, 측정 장비의 오류로 인해 자료에 잡음이 발생하는 경우는 토양수분량의 변화 특성을 이용하면 보충이 가능하다. 그러나 이와 같은 현상이 강우기간에 발생하였다면 자료보충이 어렵다(Fig. 13). 셋째, 강우 발생 시 결측된 자료는 대부분 보충하기 어렵다. 토양수분량은 강우량, 강우강도, 이전 토양수분량, 토양형의 차이, 그리고 전체 사면의 공간적 분포 등에 따라 매우 다양하게 변화된다. 강우가 발생했을 때 결측된 자료를 보충하는 방법(신뢰도가 높은 방법)은 아직까지 존재하

지 않는다. 향후 자료 보충 방법에 대한 연구를 지속하여 이를 보완해야 할 것으로 판단된다.

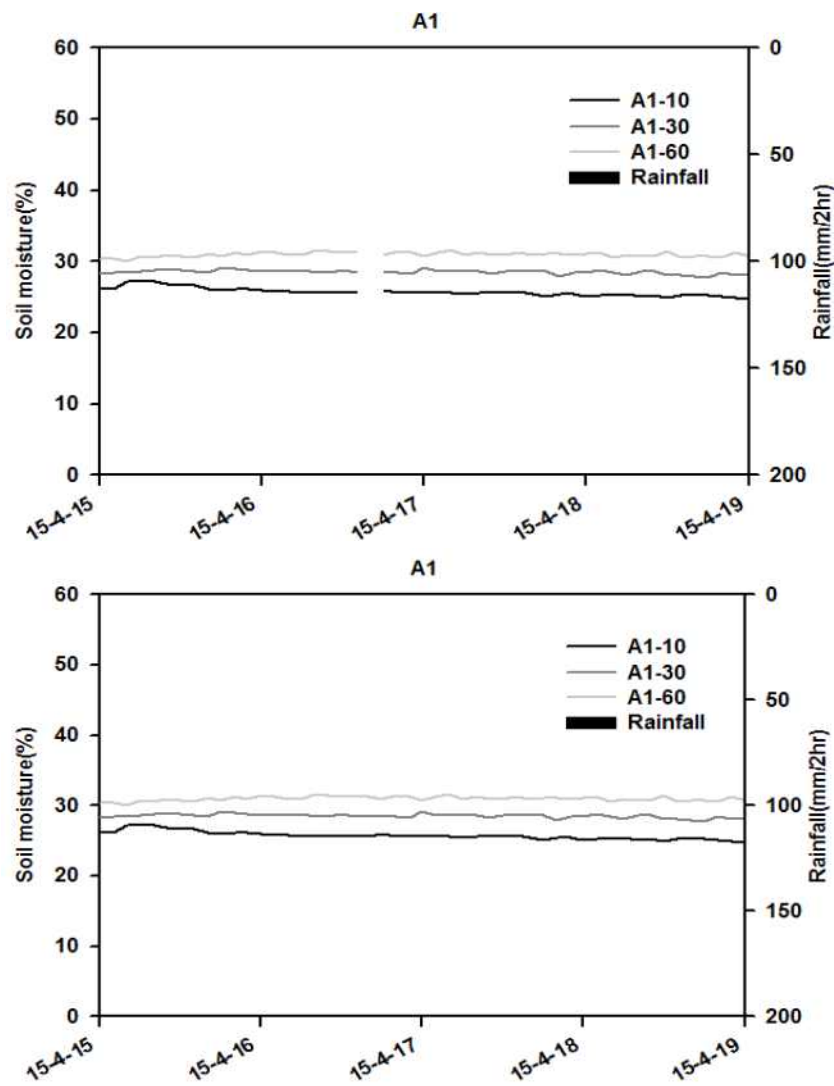


Fig. 12 자료 수집시 발생하는 결측자료 보충

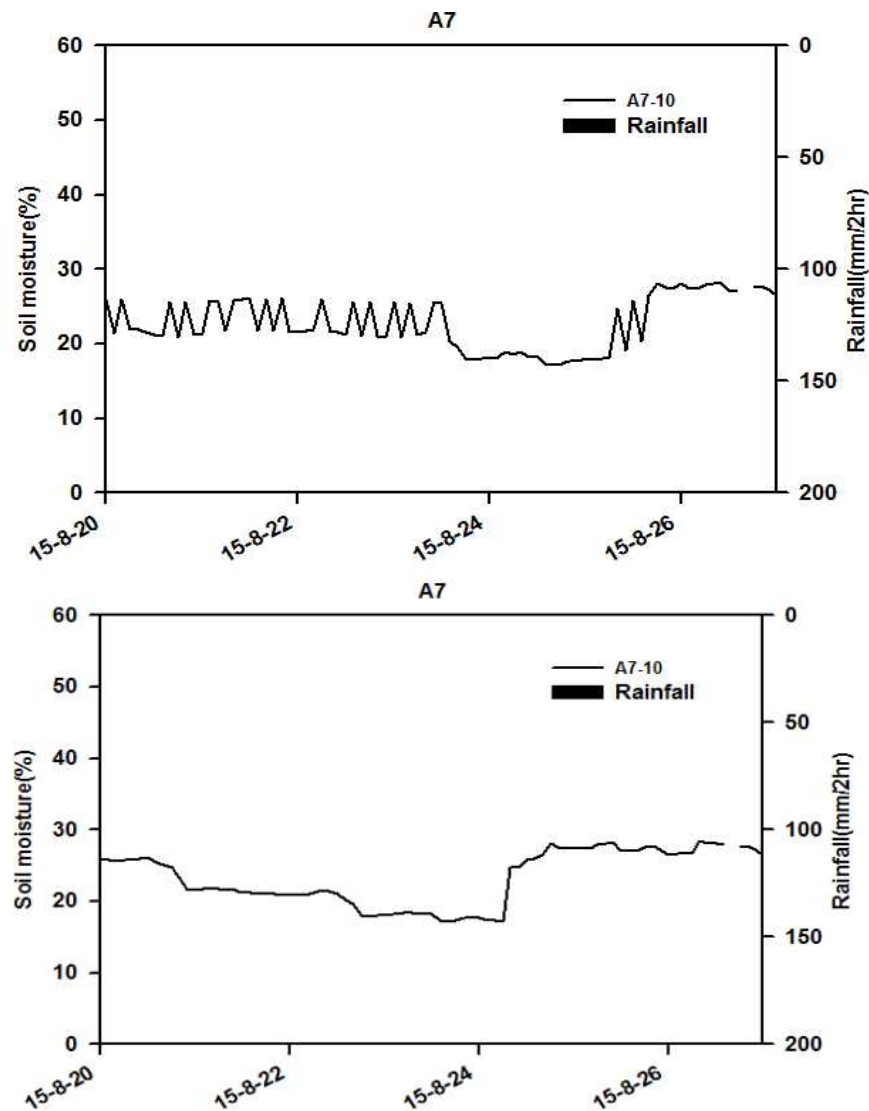


Fig. 13 측정 장비 오류로 인한 결측자료 보충

3) 적정성 검토

관측된 토양수분량 자료에 대한 적정성을 판단하는 데에 가장 합리적인 방법은 대상에서 물 수지(Water Budget)를 따져 보는 것이다. 그러나 대상유역의 물 수지를 분석하기 위해서는 토양수분량 자료뿐만 아니라 강수량, 유출량, 증발산량 등의 여러 실시간 자료가 요구된다. 또한 유역의 저류변화량을 토양수분 변화량이 대표한다는 가정을 필요로 한다.

식 1은 강수량, 유출량, 증발산량, 유역 내 저류변화량만을 포함하고 있다. 또한 식 2는 토양수분 변화량이 유역 내 저류변화량을 대표한다는 가정을 포함하고 있다.

$$P = Q + ET \pm \Delta S + G \quad (1)$$

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. 14는 물 수지의 기본 개념을 나타내는 것으로 위에 기술된 5개의 성분을 모두 포함하고 있다.

$$P = Q + ET \pm \Delta S \quad (2)$$

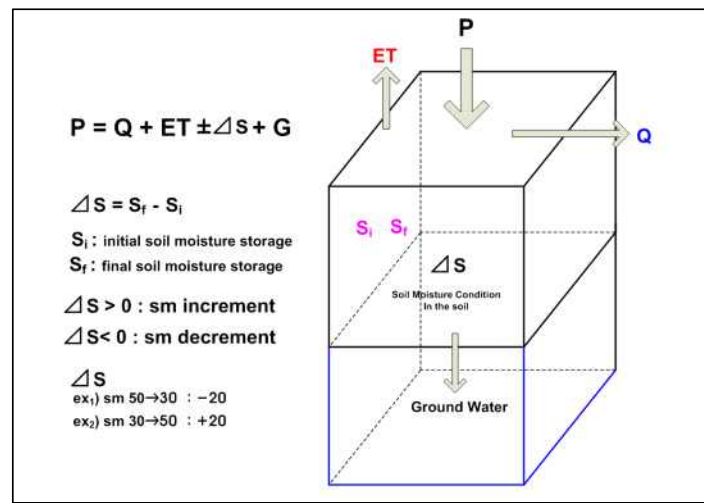


Fig. 14 Basic concept of water budget

Fig. 15은 토양수분율로부터 토양수분량을 산정하는 방법과 절차를 나타낸다. 평균 토양수분량에 유효토심을 곱하면 양적인 토양수분의 산정이 가능하다. 여기에 유역면적을 곱하면 용량단위 토양수분량을 산정할 수 있다. 마지막으로 토양수분 변화량은 종기 값에서 초기 값을 빼면 저류변화량을 산정할 수 있다. 그러나 여기서 산정된 저류변화량은 지하수 저류 변화량이 반영되지 않는 유효토심 깊이에서의 토양수분 변화량이라는 한계를 갖는다.

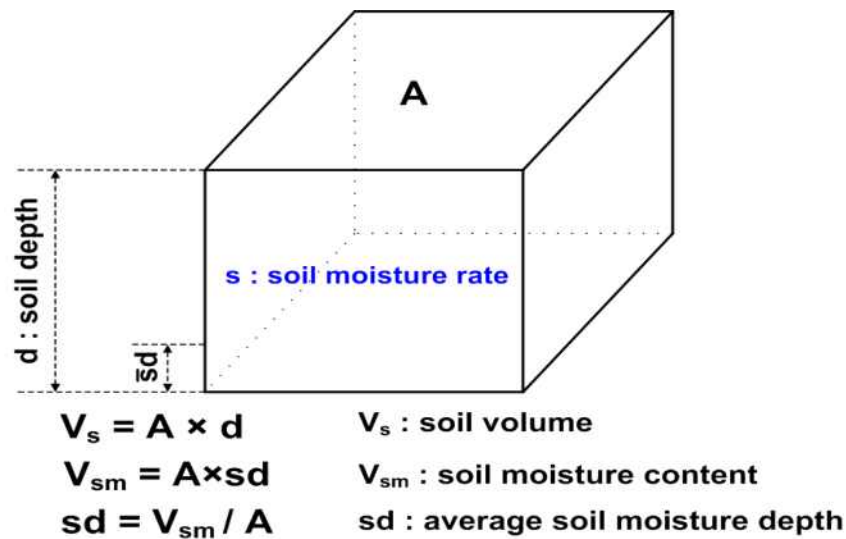


Fig. 15 Computation of average soil moisture content

Table. 3은 실시간 토양수분량으로부터 저류변화량을 산정하여 물 수지 분석을 수행한 결과를 나타낸다. 해당 년에 대한 물 수지 분석을 수행하기 위해서는 강수량, 연간 유출량, 증발산량에 대한 정량화가 요구된다. 물 수지 분석 결과, 오차율이 커서 물 수지가 닫히지 않는다면 토양수분량 자료의 적정성을 의심해 봐야 한다. 그러나 물 수지의 오차는 토양수분량에 의해서만 발생하는 것이 아니므로 해당 연도의 수문·기상학적 특성을 종합적으로 고려할 필요성이 있다.

Table 3. Analysis output of water budget characteristics

2013yr	rainfall P ($10^6 \times m^3$)	runoff		Areal evapotranspiration		storage variation		error	
		Q ($10^6 \times m^3$)	rate (%)	ET ($10^6 \times m^3$) (mm)	rate (%)	ΔS ($10^6 \times m^3$) (mm)	rate (%)	($10^6 \times m^3$) (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

D. 설마천 일평균토양수분량 DB (Sample)

Table 1. 2018년 FDR1 (토심 10cm)

단위(%)												
일 \ 월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1								0.248	0.287	0.258	0.295	0.292
2								0.243	0.285	0.255	0.294	0.291
3								0.238	0.289	0.252	0.293	0.291
4								0.233	0.296	0.248	0.292	0.297
5								0.232	0.291	0.260	0.291	0.296
6								0.257	0.288	0.306	0.291	0.295
7								0.271	0.291	0.298	0.291	0.292
8								0.266	0.289	0.294	0.303	0.289
9								0.268	0.287	0.291	0.307	0.286
10								0.276	0.284	0.293	0.300	0.256
11								0.271	0.282	0.293	0.298	0.214
12							*	0.267	0.279	0.291	0.297	0.202
13							0.309	0.276	0.277	0.290	0.296	0.184
14							0.306	0.273	0.275	0.288	0.295	0.177
15							0.303	0.269	0.273	0.287	0.294	0.167
16							0.302	0.266	0.272	0.286	0.293	0.170
17							0.300	0.263	0.271	0.285	0.292	0.178
18							0.298	0.259	0.268	0.284	0.292	0.177
19							0.295	0.255	0.264	0.283	0.291	0.181
20							0.292	0.250	0.268	0.282	0.290	0.182
21							0.290	0.256	0.291	0.281	0.291	0.185
22							0.286	0.256	0.292	0.280	0.291	0.196
23							0.283	0.251	0.288	0.285	0.290	0.209
24							0.279	0.258	0.284	0.291	0.290	0.200
25							0.275	0.267	0.281	0.290	0.295	0.179
26							0.272	0.261	0.277	0.297	0.296	0.182
27							0.269	0.257	0.274	0.301	0.294	0.160
28							0.265	0.261	0.270	0.303	0.294	0.144
29							0.263	0.298	0.266	0.303	0.293	0.140
30							0.258	0.295	0.262	0.299	0.292	0.138
31							0.253	0.290		0.297		0.137
월 최대							0.309	0.298	0.296	0.306	0.307	0.297
월 최저							0.253	0.232	0.262	0.248	0.290	0.137
월 평균							0.284	0.262	0.280	0.286	0.294	0.212
연평균												

특이사항	-는 결측을 의미 *는 관측시작일을 의미
------	---------------------------

Table 2. 2019년 FDR1 (토심 10cm)

단위(%)

월 일	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
1	0.137	0.139	0.170	0.279	0.282	0.235	0.227	0.295	0.269	0.223	0.221	
2	0.136	0.142	0.174	0.278	0.280	0.232	0.221	0.287	0.264	0.221	0.220	
3	0.136	0.155	0.178	0.277	0.277	0.228	0.216	0.283	0.259	0.243	0.219	
4	0.138	0.165	0.182	0.276	0.275	0.224	0.212	0.284	0.277	0.243	0.218	
5	0.140	0.157	0.189	0.274	0.272	0.221	0.205	0.279	0.299	0.239	0.217	
6	0.137	0.157	0.206	0.274	0.269	0.218	0.200	0.273	0.291	0.236	0.216	
7	0.137	0.161	-	0.282	0.266	0.268	0.194	0.280	0.288	0.270	0.215	
8	0.137	0.140	0.270	0.278	0.263	0.273	0.188	0.281	0.291	0.284	0.213	
9	0.135	0.135	0.272	0.279	0.260	0.267	0.183	0.276	0.285	0.277	0.212	
10	0.137	0.133	0.294	0.298	0.257	0.279	0.178	0.271	0.298	0.272	0.212	
11	0.142	0.134	0.302	0.291	0.254	0.276	0.179	0.264	0.297	0.268	0.222	
12	0.146	0.136	0.298	0.286	0.251	0.271	0.179	0.295	0.288	0.263	0.231	
13	0.146	0.136	0.283	0.283	0.247	0.266	0.187	0.292	0.285	0.259	0.240	
14	0.147	0.135	0.271	0.282	0.244	0.261	0.233	0.286	0.281	0.255		
15	0.148	0.139	0.273	0.281	0.241	0.256	0.235	0.289	0.280	0.251		
16	0.139	0.142	0.286	0.279	0.238	0.251	0.270	0.290	0.276	0.248		
17	0.139	0.141	0.293	0.276	0.234	0.247	0.276	0.283	0.272	0.245		
18	0.139	0.141	0.290	0.275	0.231	0.250	0.270	0.278	0.267	0.242		
19	0.144	0.145	0.290	0.275	0.242	0.281	0.263	0.274	0.263	0.240		
20	0.147	0.148	0.291	0.274	0.286	0.277	0.257	0.270	0.259	0.238		
21	0.141	0.149	0.297	0.273	0.276	0.273	0.261	0.266	0.256	0.235		
22	0.143	0.149	0.290	0.272	0.270	0.269	0.269	0.264	0.253	0.233		
23	0.145	0.152	0.289	0.270	0.264	0.264	0.265	0.260	0.249	0.231		
24	0.143	0.155	0.286	0.269	0.259	0.258	0.263	0.254	0.245	0.229		
25	0.141	0.159	0.286	0.274	0.254	0.252	0.271	0.250	0.242	0.226		
26	0.138	0.157	0.284	0.288	0.250	0.247	0.296	0.246	0.239	0.224		
27	0.138	0.161	0.282	0.283	0.249	0.243	0.285	0.242	0.236	0.222		
28	0.143	0.166	0.281	0.281	0.253	0.239	0.296	0.238	0.232	0.221		
29	0.140		0.280	0.281	0.248	0.235	0.289	0.263	0.229	0.221		
30	0.142		0.280	0.285	0.244	0.231	0.286	0.279	0.226	0.221		
31	0.145		0.281		0.239		0.295	0.273		0.221		
월 최대	0.148	0.166	0.302	0.298	0.286	0.281	0.296	0.295	0.299	0.284	0.240	
월 최저	0.135	0.133	0.170	0.269	0.231	0.218	0.178	0.238	0.226	0.221	0.212	
월 평균	0.141	0.148	0.265	0.279	0.257	0.253	0.240	0.273	0.267	0.242	0.220	
연평균												

특이사항	-는 결측을 의미 *는 관측시작일을 의미
------	---------------------------

E. FDR 관측데이터 통계 분석 결과

Table 1. 2018년 8월 FDR 지점 별 통계 분석 결과1 (설마천 관측소)

지점	토심	Mean	S.D	C.V(%)	Skewness	Kurtosis
FDR 1	10cm	26.22	1.53	0.06	0.27	0.48
	20cm	23.42	1.66	0.07	0.03	-1.23
	30cm	28.21	1.95	0.07	-0.19	-0.83
	40cm	22.58	0.94	0.04	0.43	0.03
FDR 2	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
FDR 3	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
FDR 4	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
FDR 5-1	10cm	20.90	4.81	0.23	0.93	2.97
	20cm	21.31	6.47	0.30	2.59	8.20
	30cm	23.13	4.63	0.20	2.59	8.53
	40cm	31.04	2.32	0.07	2.87	8.16
FDR 5-2	10cm	19.29	2.72	0.14	2.09	5.06
	20cm	19.33	3.32	0.17	2.29	4.77
	30cm	17.60	2.80	0.16	2.90	7.51
	40cm	16.41	2.57	0.16	1.69	4.66
FDR 6	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
FDR 7-1	10cm	11.35	1.76	0.15	3.42	15.96
	20cm	25.02	1.91	0.08	1.79	4.44
	30cm	22.06	1.97	0.09	2.31	8.81
	40cm	18.16	1.51	0.08	4.01	19.60

Table 2. 2018년 8월 FDR 지점 별 통계 분석 결과2 (설마천 관측소)

지점	토심	Mean	S.D	C.V(%)	Skewness	Kurtosis
FDR 7-2	10cm	22.65	3.30	0.15	1.36	2.84
	20cm	26.13	3.06	0.12	0.59	0.89
	30cm	22.31	3.86	0.17	2.02	5.62
	40cm	29.49	3.62	0.12	0.69	0.25
FDR 7-3	10cm	15.11	1.88	0.12	0.33	-0.33
	20cm	14.36	2.55	0.18	0.61	-0.31
	30cm	18.99	3.60	0.19	1.14	0.48
	40cm	23.43	3.03	0.13	1.27	0.86
FDR 8-1	10cm	18.80	2.56	0.14	1.98	6.94
	20cm	14.69	2.30	0.16	3.28	14.33
	30cm	17.16	2.29	0.13	2.90	12.30
	40cm	15.42	1.87	0.12	4.14	20.37
FDR 8-2	10cm	26.19	2.06	0.08	0.17	-0.53
	20cm	27.32	3.74	0.14	1.07	1.06
	30cm	14.61	2.34	0.16	3.30	14.08
	40cm	15.20	1.85	0.12	4.10	19.80
FDR 8-3	10cm	12.92	2.06	0.16	2.23	4.18
	20cm	13.94	2.30	0.17	2.79	6.45
	30cm	14.44	2.46	0.17	2.70	6.02
	40cm	13.32	1.50	0.11	2.58	5.57
FDR 9	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
FDR 10	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
FDR 11	10cm	-	-	-	-	-
	20cm	-	-	-	-	-
	30cm	-	-	-	-	-
	40cm	-	-	-	-	-
전체 평균		20.07	2.64	0.14	1.92	6.06

F. FDR 토양수분량 시계열 분석

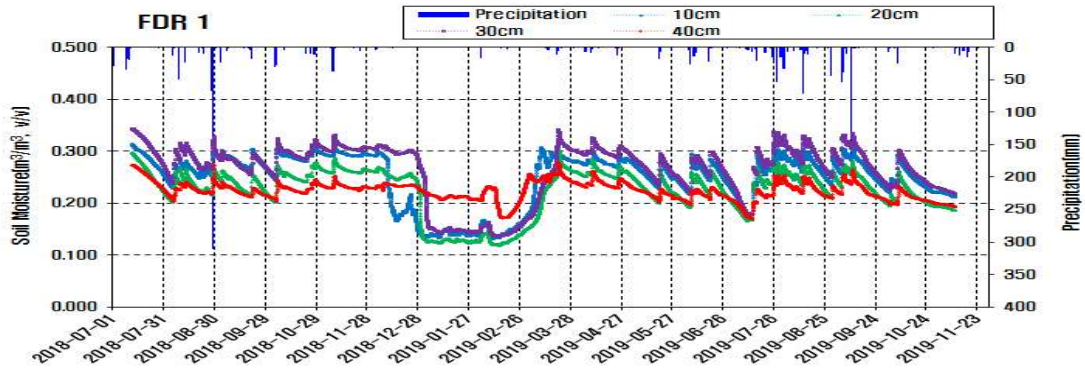


Figure 1. FDR1 토양수분량 시계열 그래프 (2018.07.01.~2019.11.30)

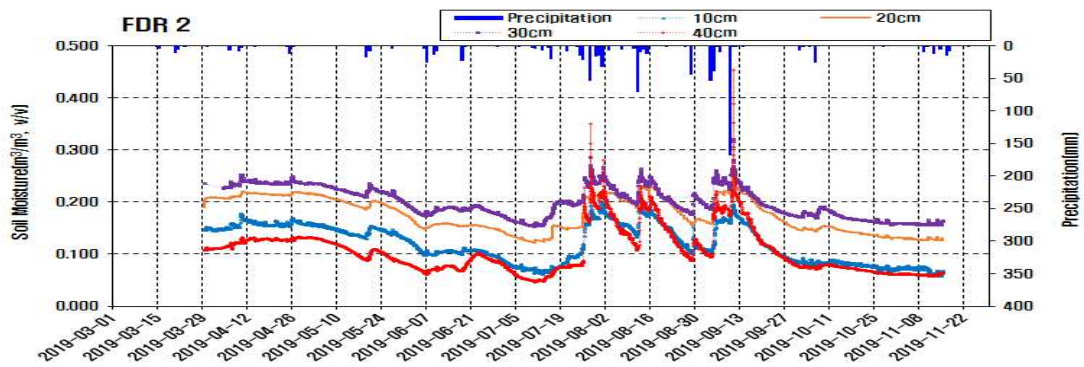


Figure 2. FDR2 토양수분량 시계열 그래프 (2019.03.01.~2019.11.30)

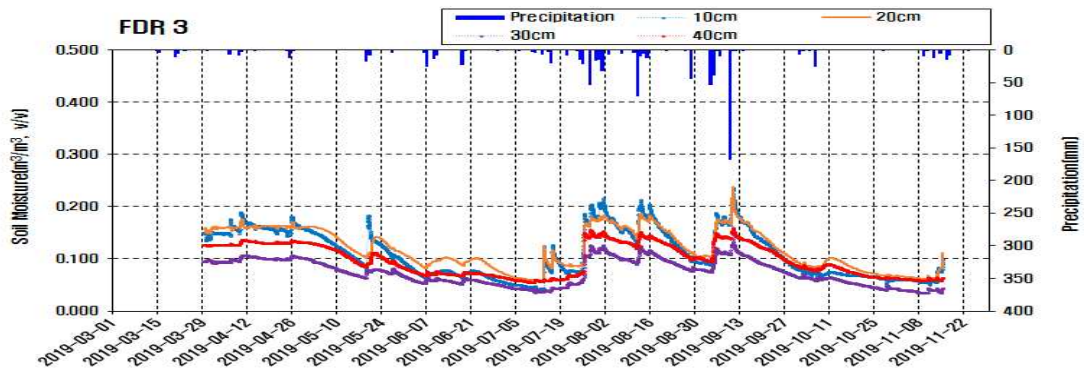


Figure 3. FDR3 토양수분량 시계열 그래프 (2019.03.01.~2019.11.30)

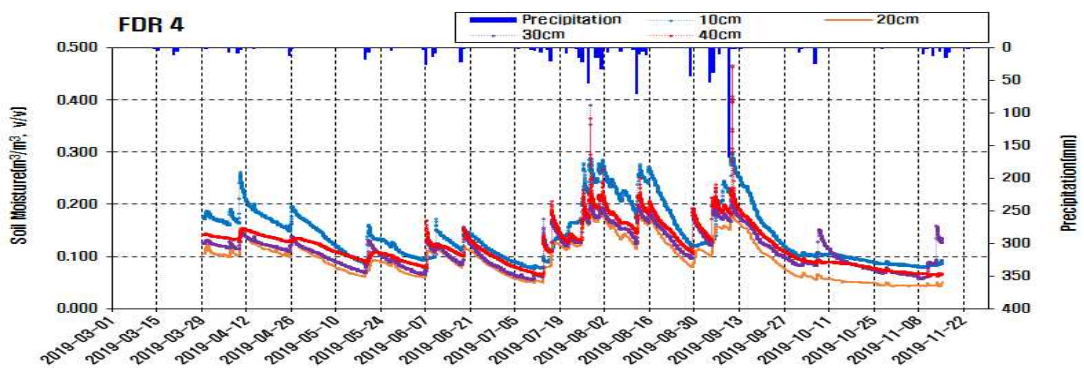


Figure 4. FDR4 토양수분량 시계열 그래프 (2019.03.01.~2019.11.30)

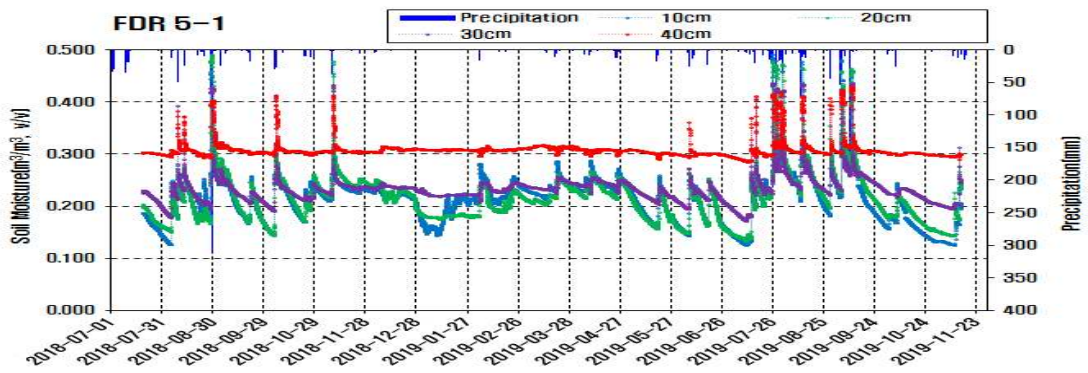


Figure 5. FDR5-1 토양수분량 시계열 그래프 (2018.07.01.~2019.11.30)

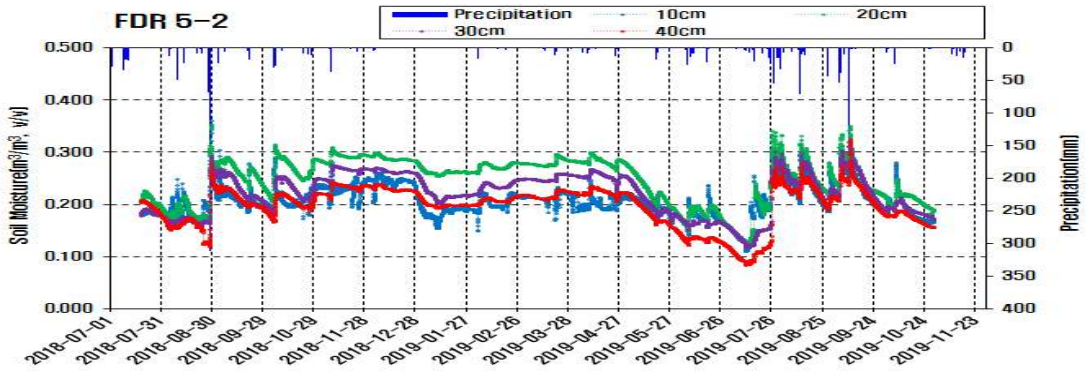


Figure 6. FDR5-2 토양수분량 시계열 그래프 (2018.07.01.~2019.11.30)

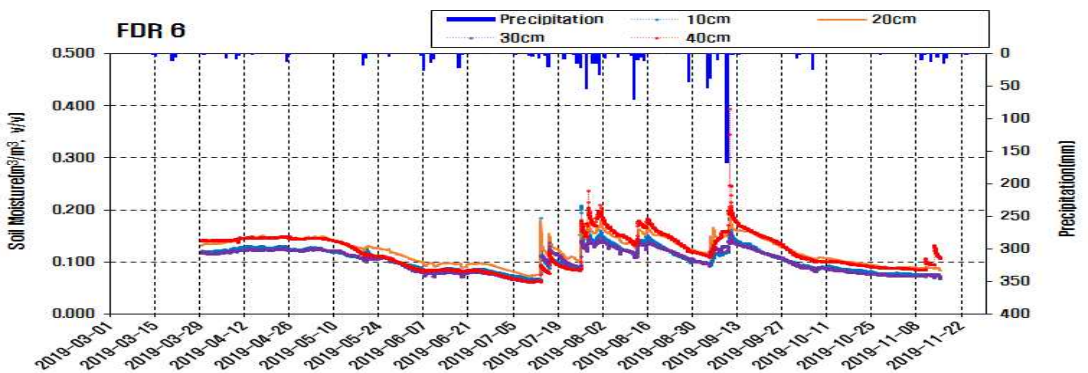


Figure 7. FDR6 토양수분량 시계열 그래프 (2019.03.01.~2019.11.30)

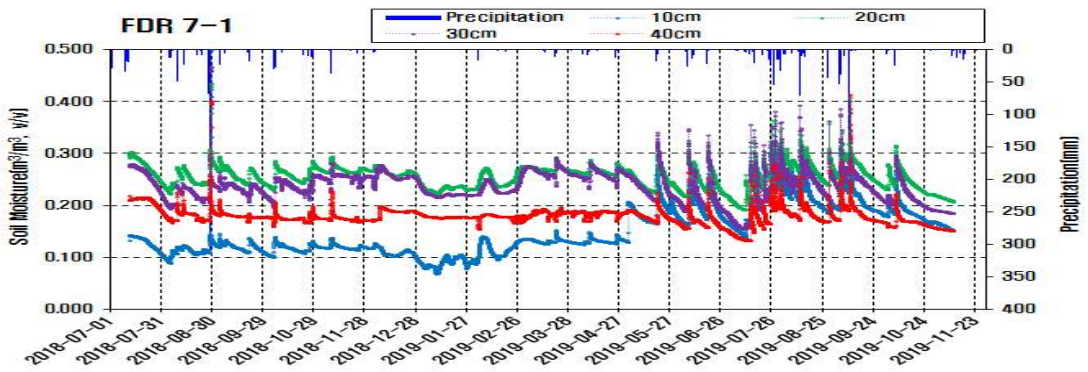


Figure 8. FDR7-1 토양수분량 시계열 그래프 (2018.07.01.~2019.11.30)