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

1. 서 론

수문 기상 인자 중 하나인 토양 수분 함량은 토양 내 함유된 수분의 양으로 정의되며, 국가 물 관리를 위한 수자원 계획을 위한 물 순환 과정의 규명, 물 수지 분석, 홍수 및 갈수 예보, 유출 해석 및 강우-유출 모형의 개발, 작물의 소비수량 산정, 가뭄이나 산사태와 같은 자연재해, 기상예보 정확도 향상 분야 등 다목적으로 활용된다(Wagner et al., 2007). 토양 수분 함량은 식생의 성장 및 변동의 원인과 결과를 동시에 제공하기도 하며, 대기의 상호작용 및 총체적인 물 수지와 관련되며 지표면의 침투, 증발산 등 다양한 분야에서 중요한 인자로 인식되고 있다(D'Odorico et al., 2007). 다른 수문 인자와 비교해 보았을 때, 토양 수분 함량이 수자원 부존량에 차지하는 비중은 극히 적은 양이지만 유출 특성을 지배하는 주요 인자로 작용하여 홍수량의 규모에 크게 영향을 미친다. 따라서 토양 수분 함량을 조사하는 것은 국가 물 관리 정책 수립 등에 기초자료를 제공할 수 있는 매우 중요한 사항이다. 특히 이수나 치수, 즉 홍수 및 갈수 예보, 가뭄분석 등에 능동적으로 대처하기 위해서는 일관성 있고 정확도 높은 토양수분 자료의 생산이 요구된다(Western et al., 2004).

현재 우리나라에서 토양 수분 함량을 관측하기 위해 주로 활용하는 방식은 Time Domain Reflectometry (TDR)과 Frequency Domain Reflectometry (FDR)과 같은 유전율식 장비를 이용하는 것이다. 이 방식은 지점에서 매우 높은 정확도를 가진 토양 수분 자료를 생산 할 수 있다는 장점이 있으나, 자료의 활용 측면에서 볼 때 다목적 활용을 위해서는 대상유역을 대표할 수 있는 자료가 필요하다(Herkelrath et al., 1991). 따라서 이를 위해서는 점 단위 개념의 토양 수분 함량보다는 면 단위 개념의 토양수분 자료가 요구되지만, 유전율식 방식은 점 단위 개념의 자료이므로 다양한 분야에서의 활용에 제약을 받고 있다. 따라서 인공위성이나, Cosmic-Ray와 같이 공간적인 대표성을 띠는 토양 수분 자료를 생산하는 것이 요구되는 실정이다.

토양 수분 함량은 대상유역의 토지피복, 유효토심, 토양공극 등 다양한 인자의 영향으로 인해 시공간적으로 매우 상이한 특성을 갖기 때문에 많은 수의 지점 기반 관측소를 설치 및 운영한다고 하더라도 전국단위를 대표할 수 있는 토양 수분 자료를 생산하는 데는 한계가 있다. 이를 극복하기 위해 지상 관측소에서 생산된 자료를 검증자료로 활용하여 인공위성 기반으로 복원되는 토양 수분 자료의 신뢰도를 향상시키는 것이 필요하다. 이미 전 세계적으로는 International Soil Moisture Network (ISMN)과 같이 FDR, TDR, Cosmic-ray 센서 기반의 지점 토양 수분 관측망을 구축하고 관측 된 자료의 품질 관리에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다(Dorigo et al., 2011) 특히 구축 된 지점 토양 수분 관측망의 자료들은 위성을 통한 토양 수분 복원 연구에 있어 기준을

제공하여 검증에 활용 되는 등 매우 중요한 역할을 하고 있다. 특히 TDR, FDR과 같은 지점 자료들의 한계로 지적되는 공간적인 대표성을 갖고 있는 Cosmic-ray 토양 수분 자료가 중간 규모의 토양 수분 관측치를 제공함으로써 전 세계적으로 이슈가 되고 있다(Köhli et al., 2015).

토양 수분을 중간 규모로 관측 할 수 있다는 것은, 지점 자료를 얻는 것에 비해 유역 단위의 물 관리에서 매우 유리하다고 볼 수 있다. 앞서 언급된 바와 같이 토양 수분은 지형이나 식생, 유효 공극 등 다양한 특성에 의한 영향이 크게 작용하므로 지점 자료의 활용에 있어서 한계점으로 작용하게 된다. 반대로 광범위한 범위에서 관측할 수 있는 위성 자료 등은 공간적인 대표성을 충분히 내포하고 있다고 볼 수 있으나, 실제로 자료가 요구되는 적용 대상 지역에 비해 너무 광범위하며 자료의 정확도가 떨어진다는 단점이 있다. 이를 극복하기 위해 중간 규모의 수문 인자를 관측하는 것이 요구되는데, Cosmic-ray를 이용하면 반경 300 m 정도의 중간 규모 토양 수분을 관측할 수 있다. 특히 산악 지형에서의 토양 수분 관측은 지점 관측소를 설치 및 운영하는 것에서부터 많은 제약이 있으므로, Cosmic-Ray Neutron Probe (CRNP)를 활용하여 토양 수분을 관측하는 것이 매우 유용하다.

본 연구는 FDR을 통해 관측된 점 단위의 자료를 CRNP를 통해 관측되는 면 단위의 자료와 연계하여 토양 수분 함량을 복원하고자 하였다. 본 연구를 통해 2018년 7월 중순부터 Cosmic-ray와 FDR이 설치되었으며, 2개월 정도의 데이터가 생산된 현 시점에서 자료들을 초기 교정하고 평가하였다. 생산된 자료들은 강우 자료와의 반응성을 통해 토양 수분 자료로써 적합한 값들을 보여주고 있는지 검증되었다. 연구 기간이 아직은 짧으나, 추후 긴 자료의 축적이 이루어지고, 계절적인 특성이나 유역의 특성이 자료와 함께 사용할 수 있는 시기에 보다 정밀한 교정 작업을 통해 완성도 높은 토양 수분 함량 자료를 생산할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 향후 다양한 현장조건을 갖는 시험 유역을 운영하여 나아가 한반도 전체에 적용 가능한 토양 수분 계측 시스템이 개발될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 연구지역 및 자료

2.1 연구지역

본 연구의 실험 지역은 경기도 파주시 감악산 내에 위치한 설마천 유역에서 이루어 졌다. 설마천은 임진강의 제1지류로서 동경 126° 52'44"~126° 58'40", 북위 37° 55'00"~37° 58'05"에 위치하며, 유역면적 18.56 km², 유로연장 10.77 km로서 임진강 전체 유역면적(A = 8,117.5 km², L = 254.6 km)의 약 0.2%를 점하고 있다. 설마천 유역 내 동경 126° 57'17", 북위 37° 56'20"에는 한국수자원조사기술원에서 관리 및 운영 중인 Flux tower가 있으며, 이 Flux tower에 Cosmic-ray를 설치하였다. Cosmic-ray는 일반적으로 반경 300 m의

관측 범위를 갖고 있으므로, 관측 반경 내 9개의 FDR 지점 토양 수분 관측소를 설치하여 활용하였다(Fig. 1, Table 1). 설치된 FDR은 위치에 따라 구분하였으며, Sector C에는 CRNP와 FDR 1이 위치해 있으며, Sector 1에는 FDR 2, 3, 4, Sector 2에는 FDR 5, 6, 7, Sector 3에는 FDR 8, 9가 각각 속해 있다.

2.2 연구자료

2.2.1 Cosmic-ray neutron probe (CRNP)

설마천 유역의 토양수분 측정을 위해 사용된 CRNP는 미국의 Hydroinnova LLC 사(社)에서 개발한 CR200X 모델로, 저온 고속 중성자에 대한 감도를 높이기 위해 헬륨 가스가 채워져 있는 단일 저밀도 폴리에틸렌으로 설계된 중성자 검출기를 사용하고 있다. Cambell Scientific에서 설계한 데이터 로거를 사용하고 있으며 1시간 간격으로 반경 300 m의 고속 중성자 세기를 기록하고 있다.

본 연구에서는 Cosmic-ray가 설치된 날인 2018년 7월 20일부터 2018년 9월 6일까지의 시간 당 중성자 세기 자료를 활용하였다. 보다 정확한 CRNP 교정을 위해 2015년부터 2016년에 한반도에서 Cosmic-ray를 통한 토양 수분 함량을 적용한 바 있는 Nguyen et al. (2017)의 연구를 참조하였다.

2.2.2 In-situ soil moisture

Cosmic-ray 관측 범위 내의 지점 토양 수분 측정을 위해

사용된 장비는 Decagon Devices 사(社)에서 개발한 5TM FDR을 사용하였다. Degagon Devices (2010)에 따르면 이 센서는 토양 수분 및 온도자료를 제공하며 70MHz 오실레이터를 사용하여 $\pm 0.03 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ 정확도로 토양 유전율 측정으로 수분 함량을 관측할 수 있으며, Famiglietti et al. (2008), Brocca et al. (2010), Bircher et al. (2012), Nguyen et al. (2017) 등 다양한 선행연구에서 현장에서의 토양 수분 측정의 활용성이 검증되었다.

각 지점에서 FDR 센서들은 10, 20, 30, 40 cm의 4가지 깊이로 설치되었으며, 실험 유역의 지리적인 특성에 따라 CRNP 관측 범위 내에 위치한 사면에 비 균일하게 분포되어 있다(Fig. 2). FDR로 관측된 지점 토양 수분 자료는 CRNP 관측 기간 동안의 시간당 용적 토양 수분 함량 자료가 사용되었다.

3. 연구 방법

3.1 Weighting Procedure

Schrön et al. (2017)에서는 보정 및 검증을 위한 자료의 각 지점에서는 기압, 습도, 토양 수분 함량, 주변의 식생과 같은 요소를 고려하여 물리적 기반의 가중치를 통해 접근하는 것이 필요하다고 제안하였다. 본 연구에서 지점 토양 수분 함량은 CRNP의 관측 반경 내의 9개의 FDR 지점을 통해 측정하고 각 관측소마다 10, 20, 30, 40 cm 깊이로 매설되어 총 36개의 관측치를 제공하고 있으므로, 관측된

Fig. 1. (a) Study area and distribution of FDR stations, (b) CRNP, and (c) FDR.

Table 1. Site Location of the CRNP and FDR Stations

Site name	Latitude	Longitude	Site name	Latitude	Longitude
CRNP	37° 56' 20.18"	126° 57' 16.92"	FDR 5	37° 56' 19.01"	126° 57' 23.84"
FDR 1	37° 56' 20.42"	126° 57' 17.16"	FDR 6	37° 56' 18.55"	126° 57' 24.04"
FDR 2	37° 56' 21.85"	126° 57' 23.76"	FDR 7	37° 56' 18.39"	126° 57' 23.87"
FDR 3	37° 56' 21.49"	126° 57' 23.70"	FDR 8	37° 56' 22.49"	126° 57' 15.12"
FDR 4	37° 56' 21.57"	126° 57' 23.41"	FDR 9	37° 56' 22.50"	126° 57' 14.59"

토양 수분 함량 자료는 평균화하여 사용하기 위해 깊이에 따른 수직 가중치 방법과, CRNP와의 거리에 따른 수평 가중치를 계산하여 적용하였다. CRNP를 통해 측정되는 중성자 신호는 토양 깊이에 따라 다르게 반응하며 특히 토양 표층부에 가까울수록 민감하므로(Zreda et al., 2008; Köhli et al., 2015), 토양 수분 함량 측정치는 깊이에 따른 가중치가 적용되어야 한다. Franz et al. (2012b)에서는 토양 깊이에 따른 선형 관계를 이용하여 가중치를 적용하는 방법을 제시한 바 있다. Schrön et al. (2017)은 중성자가 검출기와 의 거리에 따라 다른 침투 깊이를 갖고 있고, 특정 침투 깊이 이하의 토양 수분 함량(θ)에 의한 영향을 고려할 수 없으므로, 전체 토양의 프로파일을 고려하여 검출기로부터의 거리(r)가 증가함에 따른 토양 유효 침투 깊이의 감소, 기압(p), 식생 높이(H_{veg})를 고려한 수직 가중치 함수(W_d)를 제안하였다(Eq. 1).

$$W_d(r, \theta, p, H_{veg}) = e^{-2d/D} \quad (1)$$

여기서, D 는 유효 침투 깊이로, 중성자의 86%가 토양을 탐사하는 깊이에 기압과 식생 높이에 따른 영향을 반영하여 조정된 거리 항인 r^* 에 따라 아래와 같이 정의된다(Eq. 2).

$$D \equiv D_{86}(r^*, \theta, \rho_{bulk}) \quad (2)$$

$$D_{86} = \frac{1}{\rho_{bulk}} \left(p_0 + p_1 \left(p_2 + e^{-p_3 r^*} \right) \frac{p_4 + \theta}{p_5 + \theta} \right) \quad (3)$$

$$r^* = r F_p F_{veg} \quad (4)$$

$$F_p = p_0 / (p_1 - e^{-p/1013 \text{ mbar}}) \quad (5)$$

$$F_{veg} = 1 - p_0 (1 - e^{-p_1 H_{veg}}) (1 + e^{-p_2 \theta}) \quad (6)$$

여기서, ρ_{bulk} 는 토양 용적 밀도를 의미하며 본 연구에서 토양 용적 밀도는 9개 FDR 지점의 용적 밀도를 평균하여 사용하였고, Schrön et al. (2017)에서 사용된 p_i 매개 변수를 사용하였다.

일반적으로 위성 등으로 관측된 토양 수분 함량 산출물 등을 검증할 때는 원격 탐사 자료가 그 자체로 공간 대표성을 띄고 있으므로 균등한 값을 적용하여 평균화하게 된다. 그러나 이러한 방식을 CRNP에 적용하면, 거리에 따른 중성자 신호의 영향을 무시하게 된다. 특히 센서 인근의 몇 미터에 대한 중성자 감도가 높으므로 이러한 효과가 과소 산정된다. 이러한 이유로, Köhli et al. (2015)와 Schrön et al. (2017)에서 재조정 거리 r^* 과 기압, 습도에 대한 의존성을 고려하여 개선된 수평 가중치(W_r)를 적용하였다(Eq. 7).

$$W_r(h, \theta, p, H_{veg}) \quad (7)$$

$$= \begin{cases} (F_1 e^{-F_2 r^*} + F_3 e^{-F_4 r^*}) (1 - e^{-F_0 r^*}) \\ , (0m < r \leq 1m) \\ F_1 e^{-F_2 r^*} + F_3 e^{-F_4 r^*} \\ , (1m < r \leq 50m) \\ F_5 e^{-F_6 r^*} + F_7 e^{-F_8 r^*} \\ , (50m < r < 600m) \end{cases}$$

Eq. 7에서 나타나 있듯이, Schrön et al. (2017)에서는 CRNP 측정 반경 1 m 이하의 범위에 대한 가중치 함수의 확장으로 센서와 근접한 곳에서의 중성자 신호의 민감도를 보다 잘 반영할 수 있다고 하였으며 본 연구에서도 같은 방법으로 F_i 를 적용하였다.

3.2 중성자 강도 보정

원시 중성자 강도 자료는 기압이나 습도와 같은 주변 환경에 의한 영향으로 다양한 변동이 포함될 수 있으며 (Hawdon et al., 2014), 토양 특성과 식생 등으로 인해 Cosmic-ray 토양 수분 자료의 불확실성을 유발하기도 한다 (Baroni et al., 2018). Zreda et al. (2012)은 대기압 보정, 습도, 유입 중성자 자속 등을 조정함으로써 COSMOS 관측망의 Cosmic-ray 자료를 보정하는 방법을 제시하였다.

대기압 보정 계수(f_p)는 Desilets et al. (2006)에서 제시된 대기압 계수(β)와 기압(p), 이를 평균하여 얻어진 기준 대기압(p_{ref})를 통해 다음 Eq. 8과 같이 계산된다. 본 연구에서 사용된 기압 자료는 CRNP가 설치되어 있는 flux tower에서 관측된 자료를 사용하였다.

$$f_p = \exp[\beta(p - p_{ref})] \quad (8)$$

대기 수증기 변동에 대한 보정 계수는 Rosolem et al. (2013)에서 제안되었으며 다음과 같다.

$$f_{wv} = 1 + 0.0054(\rho_{v0} - \rho_{v0}^{ref}) \quad (9)$$

여기서, ρ_{v0} 는 관측 시간의 절대 습도($\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$)이며, ρ_{v0}^{ref} 는 전체 연구 기간에 대한 평균 절대 습도이다.

$$f_i = \frac{I_m}{I_{ref}} \quad (10)$$

여기서, I_m 은 주어진 시간 당 측정된 중성자 모니터 강도이며 I_{ref} 는 전체 연구 기간 동안 평균 중성자 모니터 강도로 계산되는 기준 중성자 모니터 강도이다. Hawdon et al. (2014)에서는 일정 위치에 유입되는 중성자 세기에 대한 보정에서는 차단 강성률을 고려하는 것이 중요하다고

하였으며, 융프라우요크(Jungfraujoch) COSMOS 네트워크에서 제안된 방법과 같이 차단 강성을 $R_c = 10.5 \text{ GV}$ 로 스케일링하였다.

$$R_c' = -0.075(R_c - R_{c,Jung}) + 1 \quad (11)$$

여기서, $R_{c,Jung}$ 은 스위스 융프라우요크 중성자 모니터 관측소에서의 차단 강성률이며($R_{c,Jung} = 4.49 \text{ GV}$), 융프라우요크 관측소에서의 중성자 모니터 강도의 시계열은 Neutron Monitor Database (NMDB) 웹사이트에서 제공하고 있다 (<http://www.nmdb.eu/>). 유입 중성자 세기에 대한 보정 계수(f_i')는 아래와 Eq. 12와 같이 계산할 수 있으며, 최종적으로 보정된 중성자 자속(N_{corr})은 Eq. 13에서 얻어진다.

$$f_i' = (f_i - 1)R_c' + 1 \quad (12)$$

$$N_{corr} = N_{raw} \left(\frac{f_p f_{uv}}{f_i'} \right) \quad (13)$$

3.3 CRNP 토양 수분 교정

CRNP를 통해 관측된 빠른중성자 강도는 Desilets et al. (2010)에서 제시한 shape-defining 함수를 통해 용적 토양 수분 함량으로 변환되며 Eq. 14와 같다.

$$\theta = \left(\frac{a_0}{\frac{N_{corr}}{N_0} - a_1} - a_2 \right) \rho_{bd} \quad (14)$$

여기서, θ 는 용적 토양 수분 함량($\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$)이며, N_{corr} 는 중성자 강도(counts per hour, cph), N_0 는 동일한 조건의 건조한 토양에서의 중성자 강도(cph), ρ_{bd} 는 평균 토양 부피 밀도($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) 나타낸다. a_0 , a_1 , a_2 는 토양 특성에 따른 조정 파라미터로, Pelowitz (2005)에서 제안한 Monte Carlo N-Particle eXtended Transport Code (MCNPX)에 의해 실리카 토양에 대해 시뮬레이션 된다. 본 연구에서 평균 토양 부피 밀도는 CRNP 관측 반경 내의 각 FDR 지점에서 얻어진 값을 평균하여 사용하였다.

4. 연구결과 및 토의

4.1 가중 평균 지점 토양 수분 함량의 산정

서로 다른 9개의 FDR 지점 토양 수분 자료는 CRNP로부터 얻어진 측정치를 토양 수분 함량으로 교정하는데 사용된다. CRNP는 교정 작업이 완료되면 더 이상 지점 토양 수분 자료를 요구하지 않고 독립적으로 토양 수분 자료를 제공할 수 있다. 따라서, 초기 교정 작업에서의 지점 토양 수분 자료의 중요성이 매우 높다고 할 수 있다. 지점 자료들은

각각은 공간적인 대표성을 띄고 있지 않으며 위치에 따라 독립적이므로, 최대한 공간적 특성이 드러나는 곳으로 설치하는 것이 중요하다. 지점 토양 수분 관측 장비는 CRNP가 사용되고 있는 넓은 평야지역이나 초지의 경우, CRNP의 거리와 반경에 따라 원을 그리며 방사형으로 설치하는 것이 일반적이다. 하지만 본 연구의 대상 지역인 설마천 지역은 감악산 내부 산악 지형으로, 고도의 차이, 토성, 사면의 특성 등 여러 가지의 변수가 함께 작용하고 있을 뿐만 아니라 지형과 하천 등 현실적으로 제약이 많다. 따라서 각 사면에 Sector 1, 2, 3을 설정하여 설치하는 것이 오히려 CRNP 관측 반경 내부의 공간적인 특성을 반영할 수 있다고 판단하였으며, 중성자의 반응이 가장 민감하다고 여겨지는 CRNP 인근에 FDR을 추가적으로 설치하여 Sector C로 설정하였다.

Fig. 2의 시계열은 각 Sector의 10 cm 토양 수분 자료를 평균하여 나타낸 것으로 각 Sector가 모두 다른 토양 수분 범위를 갖고 있음을 알 수 있고, 이를 통해 연구 지역 내의 Sector의 분리가 적절히 이루어 졌음을 시사한다. 각 지점에서의 FDR 토양 수분 함량 관측 결과를 보면, 같은 기상 조건 아래에서 발생하는 토양 수분의 변동성이므로 전체적으로 비슷한 패턴을 나타내고 있음을 알 수 있다. FDR로부터 관측 자료가 제공되기 시작한 7월 12일부터 무 강우 일수가 지속됨에 따라 토양 수분은 전체적으로 감소하는 경향을 보이고 있다. 그리고 강우가 발생함에 따라 각 지점에서의 토양 수분 함량이 증가하는 것을 관측할 수 있다. 여기서 Sector 1과 2의 토양 수분 변동성을 보면 8월 9일과 8월 29일에 발생한 40 mm 이상의 강우에서는 크게 증가하는 패턴을 나타내고 있으나, 작은 강우에서는 큰 증가폭을 나타내지 않는 것을 확인할 수 있다. 이는 산악지형에서 주위 식생에 의한 차단 효과로 강우가 토양에 직접적인 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 특히 식생에 의한 차단 효과는 Sector 1의 결과에서 가장 크게 나타나고 있는데, 강우가 발생함과 동시에 토양 수분 함량이 급격히 증가하는 다른 지점과 달리 차단 효과로 인해 강우가 발생한 이후 어느 정도의 시간을 두고 완만하게 토양 수분 함량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 즉 사면에서의 유출이나, 식생의 차단작용 이후 흘러내린 강우가 토양에 침투되어 서서히 토양 수분 함량이 증가 한 것으로 판단 할 수 있다. Sector 2의 결과에서는 Sector 1과 마찬가지로 차단에 의해 강우가 차단되는 효과가 나타났으나, 경사면에 위치해 있는 Sector 1에 비해 차단 이후 유출 등에 의한 토양 수분 증가가 관측되지는 않았다.

비교적 식생이 적게 분포하고 있는 Sector C와 3에서는 10 mm 이하의 강우에서도 토양 수분이 민감하게 반응하고 있음을 확인할 수 있다. Sector 3의 토양 수분 자료의 특성으로는 다른 지점에 비해 일 변화량이 크다는 것과, 강우에 의한 증가폭이 특히 높음을 알 수 있다. 이는 Sector 3의 식생이 비교적 적어 태양과 강우에 의한 영향이 비교적

크다는 것을 의미한다. 또한 전체적인 토양 수분 함량의 범위는 Sector C, 3, 1, 2의 순이며 Sector C가 가장 습한 지역으로 나타났다.

Fig. 2에서 가중치가 고려된 평균 토양 수분 함량 값의 변동을 보면 다른 지점에서 나타나는 변동성과 비슷한 패턴을 나타내고 있으며, CRNP와 가장 가까이 설치되어 있는 Sector C에 가장 높은 가중치가 주어지므로 Sector C의 경향과 가장 가깝게 나타나는 것으로 확인된다. 또한 가장 늦은 시기에 설치된 Sector 3의 자료가 제공되기 시작한 7월 20일 경부터 토양 수분 함량의 값이 급격히 낮아짐을 확인할 수 있는데, 이는 Sector 3의 낮은 지점 토양 수분 값이 반영된 것임을 알 수 있다.

이러한 결과를 종합해 보았을 때, 가중치를 고려한 평균 토양 수분 함량이 전체적인 지점 자료의 변동성을 잘 나타내고 있는 것으로 확인되며, CRNP의 교정에 사용하기 적절한

것으로 판단된다. 각 지점에서 관측된 토양 수분 함량은 실험 오차를 포함하고 있지만 실제 FDR이 설치된 위치에서의 토양 수분 함량을 의미하고 있다. 그에 비해, 가중 평균이 적용된 토양 수분은 Cosmic-ray에서 측정된 Neutron Probe 값을 보정하기 위한 참고 자료로 사용하기 위한 값이며 Cosmic-ray의 관측 범위 내의 평균적인 토양 수분을 추정한 값으로 볼 수 있다.

4.2 CRNP 중성자 강도 측정치를 이용한 토양 수분 복원

Fig. 3은 연구 기간 동안 CRNP로부터 관측된 중성자 세기 관측값과 보정된 중성자 강도의 시계열 변화를 보여준다. 원시 중성자의 시간당 개수에서 평균 중성자 강도와 표준 편차가 각각 1480.95 cph와 96.22 cph 인 1174~1739 cph 범위였다. 최대 중성자 수는 8월 24일에 기록되었으며,

Fig. 2. Time Series of Hourly Average in-situ Soil Moisture and Weighted Soil Moisture

Fig. 3. Temporal Comparison of Raw Neutron Intensity and Corrected Neutron Intensity

최소 중성자 수는 8월 29일에 기록되었다. 원시 중성자 강도와 유사한 패턴이 보정된 중성자 강도에서 반복되었음을 알 수 있으나, 최대 중성자 세기가 관측되었던 시기에 보정된 중성자 강도를 확인하면 확연히 낮은 값으로 보정되었음을 알 수 있다. 이는, 강우에 의한 습도가 중성자 강도에 미치는 영향이 보정된 것으로 판단된다. 부분적으로, 보정된 중성자 강도의 시계열 자료의 범위는 1254.17~1641.45 cph에 이르며 평균값은 1482.90 cph로 나타났다. 보정된 중성자의 강도는 원시 중성자의 강도(96.22 cph)보다 낮은 표준 편차(76.25 cph)를 보였다.

보정된 중성자 세기와 가중치를 고려한 평균 토양 수분 함량을 이용하여 중간 규모의 토양 수분을 측정된 결과는 Fig. 4에 나타났다. 중간 규모의 토양 수분 함량을 검증할 수 있는 자료가 전무한 상황이지만, 토양 수분의 변화는 강우에서 증가하며 무강우 시기에 감소하게 되므로 강우에 대한 토양 수분의 반응을 통해 CRNP로부터 얻어진 토양 수분 함량의 거동이 적절한지에 대한 판단이 가능하다. 전반적으로, CRNP를 활용한 토양 수분 함량의 변화 패턴은 강우에 의한 변동성이 잘 반영되고 있는 것으로 확인된다. Fig. 4에서 CRNP 토양 수분은 전체 지점에서 관측된 토양 수분에 비해 큰 변동성을 나타내고 있고, 특히 가중 평균 토양 수분에 비해 적은 양의 강우에도 큰 변동 폭을 그리며 반응하고 있음을 알 수 있다. 이는 고속 중성자 신호가 FDR센서 측정과 비교하여 토양 표면(10 cm)과, 강우 인터셉션에 대한 높은 민감도를 나타내었다. 이러한 결과는 고속 중성자 신호가 FDR을 통한 토양 수분에 비해 표층 토양 수분(10 cm)과 강우 차단에 대해 더 높은 민감도를 나타낸다는 Franz et al. (2012)의 결과와 동일하게 나타났다. 또한 특정 깊이에 설치되어 토양 수분 및 온도를 측정하는 FDR과 달리, 빠른중

성자 세기는 수소에 영향을 받게 되므로 산악 지형 및 하천이 있는 연구 지역에서 다양한 수소 공급원이 추가적으로 존재하는 것으로 생각된다(Nguyen et al., 2017). 따라서 추후 더욱 정확한 결과의 보정을 위해서는 계절성을 파악하고, 그에 따른 식생 등의 생물량(biomass)과 차단(interception)에 의한 효과를 파악할 수 있는 데이터의 누적이 요구된다. CRNP 토양 수분 자료는 가중 평균 토양 수분에 비해 매우 크게 나타나는데, 이는 주변 대기압과 습도에 의한 영향이 작용한 것으로 판단된다.

5. 결 론

중간 규모의 토양 수분을 관측하기 위한 방안으로, 본 연구에서는 CRNP의 활용을 제시하고 있다. 우선, CRNP를 교정하기 위한 자료를 만들기 위해 9개 지점을 선정하여 4가지 깊이(10, 20, 30, 40 cm)에서 지점 토양 수분 센서인 FDR을 설치하여 이를 기반으로 가중 평균 지점 토양 수분을 계산하였다. 각 지점에서 관측된 토양 수분 자료는 해당 지점의 특성에 따라 강우에 대한 급격한 반응을 보이거나, 차단 효과 등으로 인해 강우에 대해 천천히 증가하는 다양한 특성을 보이고 있었다. 각 9개 관측소의 자료에 수직 및 수평 가중치를 계산하여 얻어진 가중 평균 지점 토양 수분 값은 전반적인 토양 수분의 변동성을 잘 나타내고 있었으며 특히 CRNP와 가장 가까이 설치된 관측소의 값의 영향이 매우 크게 나타났다. 가중 평균 지점 토양 수분 자료는 보정된 중성자 세기 자료와 함께 사용되어 N0 방법을 통해 토양 수분을 복원에 사용 되었다. 교정 결과, 중성자 세기를 통해 관측되는 토양 수분의 변동성이 가중 평균 지점 토양 수분 자료와 비슷하게 나타나며, 강우 이벤트와도 적절한 반응을

Fig. 4. Temporal Variation of CRNP and Weighted Soil Moisture with Rainfall

보이고 있음을 알 수 있어 중간 규모의 토양 수분 자료로 사용하기 적절하다고 판단할 수 있었다. 하지만 아직 실험 초기 단계이므로, 실제 토양 수분 자료들에서 나타나는 강우에 대한 반응에 비해 과대평가되거나 표층 토양 수분이나 차단에 대해 높은 민감도를 보이고 있어 이에 대한 개선이 필요할 것으로 보인다. 특히, 토양 수분 함량의 거동을 강우와의 비교를 통해 검증하는 것은 산지에서 강우에 의해 발생하는 기온, 습도, 유출, 차단 등에 의한 효과를 모두 고려하기에는 한계가 있어 위성이나, 재분석 자료 등을 활용하여 보다 폭 넓은 검증 방법이 요구된다. 현재 실험 초기 단계이므로 긴 기간의 자료가 없으며 계절에 의한 주위 환경에 대한 변동성을 고려하기가 어려움이 있고, 생물량이나 Leaf Area Index (LAI) 등을 사용한 교정이 힘들다. 따라서 추후 연구에서 CRNP자료의 축적이 보다 이루어진다면, 산악 지형임을 고려하여 보다 정확한 중간 규모의 토양 수분 자료를 얻을 수 있을 것으로 예상된다.

실제 산악지형에서는 지점 토양 수분 관측소를 설치 및 운영하는데 많은 제약이 있다. 우선, 첫 번째로 지점 관측소의 설치의 어려움이 있다. FDR센서 자체의 크기는 작고 무게도 가벼워 휴대가 어렵지 않지만, 실제 관측소의 운영을 위해서는 데이터로거 및 로거 보관함이 필요하기 때문에 지형이 험한 산지에서의 설치가 매우 어렵다. 또한 설치를 하더라도 사면에 설치하는 경우 유사 등에 의한 영향을 받을 수 있으므로 지속적인 관리가 요구되며, 데이터의 획득을 위해 전체 지점을 방문하는 것에 시공간적 제약이 있다. 이러한 문제점들 때문에, 산악에서의 지점 관측소를 지속적으로 운영하는 것은 자료의 효율성도 떨어질 뿐만 아니라 비경제적이다. 따라서 CRNP를 활용한 중간규모의 토양 수분 관측소가 유용한 대안이 될 것으로 판단된다. 연구 초기 기간 동안 지점 토양 수분을 활용하여 교정하는 단계가 필요하지만, 교정 작업이 완료된 이후에는 지점 토양 수분 관측소를 운용하지 않아도 되므로 지속적인 비용이 소요되지 않는다는 장점이 있다. 또한 지점에서의 토양 수분 값만을 관측하는 것이 아니라 중간 규모에서 전체적인 토양 수분의 거동을 파악할 수 있기 때문에 실제 유역단위의 물 관리에 있어서 효과적으로 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(18CTAP-C143685-01)에 의해 수행되었습니다.

References

Baroni, G., Scheffele, L.M., Schrön, M., Ingwersen, J., and Oswald, S.E. (2018). Uncertainty, sensitivity and improvements in soil moisture estimation with

- cosmic-ray neutron sensing. *Journal of Hydrology*, Vol. 564, pp. 873-887.
- Bircher, S., Skou, N., Jensen, K.H., Walker, J.P., and Rasmussen, L. (2012). A soil moisture and temperature network for SMOS validation in Western Denmark. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, pp. 1445-1463.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., and Morbidelli, R. (2010). Spatial-temporal variability of soil moisture and its estimation across scales. *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 2, W02516.
- Decagon Devices. (2010). *5TE water content, EC and temperature sensors operator's manual, Version 6*. Decagon Devices Inc., Pullman, WA, USA.
- Desilets, D., Zreda, M., and Ferré, T.P.A. (2010). Nature's neutron probe: Land surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. *Water Resources Research*, Vol. 46, No. 11, W11505.
- Desilets, D., Zreda, M., and Prabu, T. (2006). Extended scaling factors for in situ cosmogenic nuclides: New measurements at low latitude. *Earth and Planetary Science Letters*, Vol. 246, No. 3-4, pp. 265-276.
- D'Odorico, P., Caylor, K., Okin, G.S., Scanlon, T.M. (2007). On soil moisture-vegetation feedbacks and their possible effects on the dynamics of dryland ecosystems. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, Vol. 112, No. G4, G04010.
- Dorigo, W.A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., et al. (2011). The international soil moisture network: A data hosting facility for global in situ soil moisture measurements. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 1675-1698.
- Famiglietti, J.S., Ryu, D., Berg, A.A., Rodell, M., and Jackson, T.J. (2008). Field observations of soil moisture variability across scales. *Water Resources Research*, Vol. 44, No. 1, W01423.
- Franz, T.E., Zreda, M., Rosolem, R., and Ferrea, T.P.A. (2012). Field validation of a cosmic-ray neutron sensor using a distributed sensor network. *Vadose Zone Journal*, Vol. 11, No. 4. doi:10.2136/vzj2012.0046
- Hawdon, A., McJanet, D., and Wallace, J. (2014). Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across Australia. *Water Resources Research*, Vol. 50, No. 6, pp. 5029-5043.
- Herkelrath, W.N., Hamburg, S.P., and Murphy, F. (1991). Automatic, real-time monitoring of soil moisture in a remote field area with time domain reflectometry.

- Water Resources Research*, Vol. 27, No. 5, pp. 857-864.
- Köhli, M., Schrön, M., Zreda, M., Schmidt, U., Dietrich, P., and Zacharias, S. (2015). Footprint characteristics revised for field-scale soil moisture monitoring with cosmic-ray neutrons. *Water Resources Research*, Vol. 51, pp. 5772-5790.
- Nguyen, H.H., Kim, H., and Choi, M. (2017). Evaluation of the soil water content using cosmic-ray neutron probe in a heterogeneous monsoon climate-dominated region. *Advances in Water Resources*, Vol. 108, pp. 125-138.
- Pelowitz, D.B. (2005). *MCNPX User's Manual version 2.5.0*. Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New Mexico.
- Rosolem, R., Shuttleworth, W.J., Zreda, M., Franz, T.E., Zeng, X., and Kurc, S.A. (2013). The effect of atmospheric water vapor on neutron count in the cosmic-ray soil moisture observing system. *Journal of Hydrometeorology*, Vol. 14 No. 5, pp. 1659-1671.
- Schrön, M., Köhli, M., Scheffele, L., Iwema, J., Bogen, H.R., Lv, L., et al. (2017). Improving calibration and validation of cosmic-ray neutron sensors in the light of spatial sensitivity. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 21, No. 10, pp. 5009-5030.
- Wagner, W., Blöschl, G., Pampaloni, P., Calvet, J.-C., Bizzarri, B., Wigneron, J.-P., et al. (2007). Operational readiness of microwave remote sensing of soil moisture for hydrologic applications. *Hydrology Research*, Vol. 38, pp. 1-20.
- Western, A.W., Zhou, S-L., Grayson, R.B., McMahon, T.A., Blöschl, G., and Wilson, D.J. (2004). Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. *Journal of Hydrology*, Vol. 286, No. 1-4, pp. 113-134.
- Zreda, M., Desilets, D., Ferré, T.P.A., and Scott, R.L. (2008). Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmic-ray neutrons. *Geophysical Research Letters*, Vol. 35, No. 21, L21402.
- Zreda, M., Shuttleworth, W.J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., et al. (2012). COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System. *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, pp. 4079-4099.

Received	October 11, 2018
Revised	October 16, 2018
Accepted	November 1, 2018