



Construction and estimation of soil moisture site with FDR and COSMIC-ray (SM-FC) sensors for calibration/validation of satellite-based and COSMIC-ray soil moisture products in Sungkyunkwan university, South Korea

Kim, Hyunglok^a · Sunwoo, Wooyeon^a · Kim, Seongkyun^a · Choi, Minha^{a*}

^aDept. of Water Resources, Graduate School of Water Resources, Sungkyunkwan Univ., Suwon 440-746, Korea

Paper number: 15-097

Received: 1 December 2015; Revised: 28 December 2015; Accepted: 28 December 2015

Abstract

In this study, Frequency Domain Reflectometry (FDR) and COSMIC-ray soil moisture (SM) stations were installed at Sungkyunkwan University in Suwon, South Korea. To provide reliable information about SM, soil property test, time series analysis of measured soil moisture, and comparison of measured SM with satellite-based SM product are conducted. In 2014, six FDR stations were set up for obtaining SM. Each of the stations had four FDR sensors with soil depth from 5 cm to 40 cm at 5~10 cm different intervals. The result showed that study region had heterogeneous soil layer properties such as sand and loamy sand. The measured SM data showed strong coupling with precipitation. Furthermore, they had a high correlation coefficient and a low root mean square deviation (RMSD) as compared to the satellite-based SM products. After verifying the accuracy of the data in 2014, four FDR stations and one COSMIC-ray station were additionally installed to establish the Soil Moisture site with FDR and COSMIC-ray, called SM-FC. COSMIC-ray-based SM had a high correlation coefficient of 0.95 compared with mean SM of FDR stations. From these results, the SM-FC will give a valuable insight for researchers into investigate satellite- and model-based SM validation study in South Korea.

Keywords: Soil moisture, Satellite-based soil moisture products, FDR sensor, Cosmic-ray, Calibration/Validation

위성 토양수분 데이터 및 COSMIC-ray 데이터 보정/검증을 위한 성균관대학교 내 FDR 센서 토양수분 측정 연구(SM-FC) 및 데이터 분석

김형록^a · 선우우연^a · 김성균^a · 최민하^{a*}

^a성균관대학교 수자원전문대학원 수자원학과

요 지

본 연구에서는 수원 성균관대학교 내 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 토양수분 측정 장비 및 COSMIC-ray 중성자 측정 장비를 통한 토양수분 지점 관측 사이트를 확립하였다. 또한 양질의 토양수분 데이터 확보를 위해 연구지역 내 토질실험, 토질별 FDR 토양수분 데이터 및 COSMIC-ray 중성자 개수의 시계열 분석, 관측한 토양수분 데이터와 위성 기반 토양수분 데이터와의 비교분석을 실시하였다. 2014년도부터 6개 지점에서 표층으로부터 5 cm에서 40 cm까지 총 24개의 FDR 센서를 5~10 cm 깊이별로 설치하여 토양수분 데이터를 측정하였다. 해당 지점들의 토질 분석결과, Sand에서 Loamy Sand까지의 다양한 토질이 불균질한 층을 이루어 분포되어 있는 것으로 판단되었다. 측정된 토양수분 데이터는 강우 데이터와 높은 상관성을 보이며, 위성 산출 토양수분 데이터와의 비교에서도 상대적으로 높은 상관관계와 낮은 평균제곱근편차(Root mean square deviation, RMSD)값을 보여주었다. 2014년도 설치 지역 토양수분 데이터의 신뢰도가 확보됨에 따라 2015년도에는 10개의 FDR 토양수분 측정 장비 및 COSMIC-ray 중성자 측정 장비가 추가로 설치되어 성균관대학교의 Soil Moisture site with FDR and COSMIC-ray (SM-FC) 연구지역이 구축되었다. SM-FC에 설치된 COSMIC-ray 중성자 측정 장비의 최초 검증을 위해 2015년 8~11월의 COSMIC-ray 중성자

*Corresponding Author. Tel: +82-31-290-7539
E-mail: mhchoi@skku.edu (M. Choi)

데이터 및 FDR 토양수분 데이터가 활용되었다. 중성자기반 토양수분 값과 전체 지점 FDR 토양수분 평균값을 비교한 결과 매우 높은 상관관계를 볼 수 있었다(상관계수 0.95). 이러한 연구를 통해 성균관대학교 SM-FC는 향후 한반도 지역 위성 및 모델 토양수분 데이터를 검증하는 대표 연구 지역이 될 것으로 기대된다.

핵심용어: 토양수분, 위성 토양수분 데이터, FDR 센서, Cosmic-ray, 보정/검증

1. 서론

토양수분은 지표와 대기를 사이의 상호관계 분석에 있어 매우 중요한 수문기상학적 인자로 인식되어 왔다(Choi and Jacobs, 2007; Cho and Choi, 2014; Kim and Choi, 2015a). 수문순환의 이해를 넘어 각종 자연재해, 예를 들어 가뭄, 홍수, 황사 발생 등에 가장 밀접한 인자로서 각종 재해 분석 및 예측에 필수불가결한 요소로 여겨진다(Jackson et al., 2010; Kerr et al., 2010; Choi and Jacobs, 2008; Njoku et al., 2003; Wagner et al., 1999). 따라서 토양수분의 변동성을 이해하고, 시간적인 특징을 넘어 공간적인 특징을 이해하는 것은 매우 중요하다(Choi et al., 2007). 하지만 지점 토양수분 데이터는 비용 및 시간의 한계점 때문에 많은 제한이 있으며, 공간적인 토양수분을 대표하기에는 한계가 있다. 따라서 지점보다 넓은 지역을 대표할 수 있는 위성 및 COSMIC-ray를 활용한 토양수분 측정은 지역적인 규모에서의 토양수분을 대표할 수 있는 중요한 데이터로 인식되고 있다. 특히 위성에서 산출되는 토양수분 값은 큰 규모에서 일어나는 자연재해(가뭄, 홍수, 황사 등), 기상예보, 전세계 수문인자 산출 등에 활용되고 있다(Brocca et al., 2011; Parinussa et al., 2014; Kim and Choi, 2015b).

토양수분을 측정하는 방법으로는 크게 세가지를 들 수 있는데, 첫째, Time-domain reflectometry (TDR) 또는 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 센서를 활용하여 직접적으로 지점 토양수분을 측정하는 방법, 실험을 통한 토양수분 중량 측정 방법(Dorigo et al., 2011), COSMIC-ray를 측정하여 간접적으로 토양수분을 측정하는 방법(Franz et al., 2013), 그리고 비행기 또는 위성에 탑재된 센서를 활용하여 원격탐사를 통한 토양수분 측정 방법(Kim et al., 2015) 등이 있다. 하지만 간접적으로 측정된 토양수분 데이터는 특정 기준 값과의 비교를 통한 검증과정이 필요하게 되고, 토양수분의 기준이 되는 데이터는 지점에서 측정되는 토양수분 값이 활용되고 있다. 이렇듯 참 값(true value)이라고 인식되는 지점 토양수분 데이터는 간접적으로 측정되는 토양수분 데이터를 보정 또는 검증하는데 널리 사용되고 있다(Dorigo et al., 2013). 따라서 정확한 토양수분 측정과 더불어 지점 토양수분의 거동을 이해하는

것은 최신의 토양수분 관측 기술과 더불어 없어서는 안 될 중요한 분야로 인식되고 있다(Brocca et al., 2010).

본 연구에서는 2014년에 한반도 지역 수원에 위치한 성균관대학교 및 성균관대학교 식물원에 설치된 지점 토양수분 데이터 FDR 센서(깊이 별 10 cm, 20 cm, 30 cm, 40 cm) 관측소 6개 지점에 대한 토질 정보 및 토양수분 관측 거동에 대해 분석하였다(캠퍼스 내 2개소, 식물원 내 4개소). 2014년도에 설치된 사이트는 1년의 기간 동안 획득된 토양수분 데이터를 통해, 본 연구지역에서의 지점 토양수분과 위성 토양수분과의 검증 가능성을 분석하여, 연구지역의 토양수분 센서 설치의 적합성을 판단하기 위해서 계획되었다. 6개 지점에서 측정된 토양수분 데이터를 활용하여 MetOp-A 위성에 탑재된 Advanced Scatterometer (ASCAT) 센서로 측정된 토양수분 데이터와의 거동양상을 분석하였다. 뒤를 이어 2015년도 4개의 관측소와 COSMIC-ray 센서를 추가하여 본격적인 연구를 진행하고 있으며, 본 연구에서는 2015년도 8월~11월에 측정된 COSMIC-ray의 Neutron의 개수의 값과 토양수분 센서에서 측정된(10개 관측소, 10 cm 깊이) Volumetric Soil Moisture (VSM)의 값을 이용하여 토양수분과 Neutron의 관계를 Franz et al. (2013)의 식을 이용하여 계산하였다.

2. 연구 지역

본 연구는 두 기간에 나누어 진행 되었다. 2014년도에 설치된 6개 FDR 센서 연구지역은, 2015년도에 설치될 10개의 FDR 센서와 1개의 COSMIC-ray 센서를 설치하기 전, 본 연구지역의 타당성 검증을 위해 설치되었다. 2014년도 연구지역 검증을 통해서 데이터 활용가치가 있는 연구지역이라고 판단되면, 2015년도 10개의 FDR 센서와 1개의 COSMIC-ray 센서를 설치하기 위함이었다. 즉, 2014년도 임시로 설치된 토양수분 데이터는 향후 2015년에 설치할 SM-FC 사이트에 대한 사전 정보를 얻기 위해 설치된 연구지역이다(Fig. 1). 2014년에 조사된 토양수분 값과 지점 토질정보, 그리고 위성과의 상관분석을 통해 계획한 실험지역에서의 토양수분 데이터의 실효성을 평가하였고, 2014년도에 획득한 FDR 토양수분 데이터

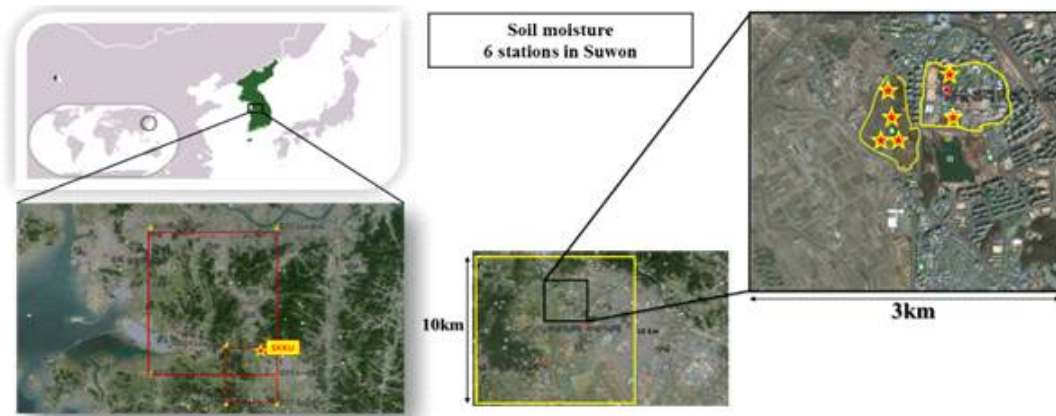


Fig. 1. Six stations for temporary soil moisture site in Suwon, Korea before installing SM-FC soil moisture experiment site in Sungkyunkwan university



Fig. 2. (a) Installation of an array of FDR probes in a soil profile. The wires are sealed in PVC conduit wire to protect from vermin (b) COSMIC-ray station in botanical garden near Sungkyunkwan university

의 실효성이 검증되면, 2015년도에 4개 관측소와 COSMIC-ray 설치 추가가 계획되었다.

3. 재료 및 방법

3.1 토양수분 데이터

3.1.1 FDR

Frequency Domain Reflectometry (FDR) 방식의 지점 토양수분 측정은 Time Domain Reflectometry (TDR) 센서와 마찬가지로 전자기파의 겉보기 유전율 변화를 통해 토양수분 함량을 측정한다. 이러한 방식은 실험을 통한 토양수분 중량 측정과는 달리 토양의 훼손을 최소화 하는 상태에서 한 지점에 대한 지속적인 관측이 가능하다. FDR 센서의 경우 주파수 (frequency) 세기에 따른 정전용량(Electric Capacity) 변화를 통해 유전율의 변화를 측정하며, TDR 센서에 비해 비용이 저

렴하나 수분 함량뿐 아니라 온도나 부피밀도, 점토함량에 더 민감하여 지점의 따라 상대적으로 정확도의 편차가 발생할 수 있다(Robinson *et al.*, 2003; Skierucha and Wilczek, 2010). 이러한 특성 때문에 FDR 센서는 많은 연구 지역에서 토양수분 측정의 밀집도를 높이는 데 이용되며 전세계 토양수분 공유 사이트인 ISMN (International Soil Moisture Network)과 같은 광범위한 지점 관측망을 형성하는데 기여하고 있다(Dorigo *et al.*, 2011).

본 연구 지역의 2014년도 임시 토양수분 사이트에 총 6개의 FDR 센서를 시험 운영하였으며, 2015년도부터 운영되고 있는 SM-FC 사이트에서는 총 10개의 FDR 센서 관측소에서 각 센서 깊이(5 cm, 10 cm, 20 cm, 40 cm)별 토양수분 및 온도를 한 시간 단위로 Fig 2와 같이 구성하여 관측소를 운영 중이다. 본 연구의 토양수분 변동성 및 위성 데이터와의 검증 분석에는 2014년도 5월부터 11월까지의 6개소의 FDR 센서 데이터가 사용되었다.

3.1.2 COSMIC-ray neutron

COSMIC-ray 센서는 4개의 FDR 토양수분 센서와 더불어, 2015년 8월부터 설치되어 데이터를 측정하였으며, COSMIC-ray 분석에 사용된 데이터는 2015년 8월부터 2015년 10월 29일까지의 FDR 토양수분 데이터와 COSMIC-ray 데이터가 사용되었다.

COSMIC-ray를 이용한 토양수분 측정 장비는 토양과 대기, 기타 물질들 내에 존재하는 Cosmic-ray에서 발생하는 고속 중성자를 관별한다. 고속 중성자는 토양수분 내에 함유되어 있는 수소원자에 의해 감속되어 수 백 미터 깊이의 대기 중으로 방출되는데, 이에 본래의 고속 중성자 밀도는 지표면의 토양수분과 음의 상관관계를 갖게 된다. 본 연구 지역에서는 1개의 COSMIC-ray 관측소를 설치, 측정된 고속 중성자 수를 이용하여 시간 별 토양수분을 산정하였다. 지상으로부터 1 m 높이에 설치되는 센서의 원통형 측정기 내에는 저밀도 폴리에틸렌으로 밀폐된 가스(He or BF₃)가 주입되어 있으며, 이는 고속 중성자에 대한 측정 민감도를 높이는 역할을 지닌다. 장비의 측정반경은 해수면 높이에서 지름 600 m의 원형이며, 지름은 대기압과 습도가 증가함에 따라 줄어드는 경향을 보인다(Desilets and Zreda, 2013). Cosmic ray 센서의 유효 측정 깊이는 토양수분 함량에 따라 차이를 보이나 이론적으로는 건조한 토양에서는 76 cm, 포화 토양에서는 12 cm까지의 투과도를 보인다. 그러나 실제로는 이보다 더 적은 유효 깊이를 보이는데 토양내 광물 격자와 토양 유기물 내 수소 함량이 존재하기 때문이다(Zreda et al., 2012). COSMIC-ray 토양수분 측정의 정확도는 측정되는 중성자 개수에 따라 좌우되는데, 시간당 측정 가능한 중성자수가 많을수록 정확도가 높아지며 토양수분 함량이 증가할수록 정확도가 낮아지는 경향이 있다(Knoll, 2000). 측정되는 중성자수와 관측 사이트의 토양수분과의 관계를 도출하여 향후 중성자수로 토양수분 값을 예측할 수 있다. 또한 중성자수와 토양수분과의 관계식에서의 각 계수의 정확도가 향후 관측될 중성자수와 이를 통한 토양수분 데이터 예측의 정확도에 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 본 연구에서는 SM-FC에서 COSMIC-ray에서 관측된 중성자개수와, 10개 관측소의 지표 평균 토양수분과의 관계식을 통한 중성자 수와 토양수분과의 관계를 추가적으로 분석하였다. 본 연구의 주 목적이 COSMIC-ray 중성자와 토양수분 데이터 관계식의 보정은 아니지만, 현재 국내에 본 연구와 같은 사례가 없으므로, 이번 연구를 통해 향후 중성자와 토양수분관계의 분석에 있어 연구자들이 도움을 받을 수 있으리라 사료된다.

3.2 시료채취 및 토질시험

연구지역의 토질특성을 이해하기 위해서는 토질시험자료가 필요하다. 토양층 토양수분 분포는 토층 및 토질특성과 직접적으로 관계가 있다. 특히, 토양의 간극이나 밀도, 투수성 등과 같은 공학적 특성 연관이 있으므로 토양수분 측정과 함께 토질특성을 파악하는 것을 중요한 사항이다. 토양수분 분포와 토질특성간의 상관성에 주안점을 두고 토양수분관측 지점의 토질특성을 비교분석하기 위해서 토층시료를 개별적으로 채취하였다. 토층시료가 균등하게 평가될 수 있도록 하기 위해서 시료는 포토로부터 40~60 cm 깊이에서 스테인리스로 제작한 원통형 몰드를 이용하여 채취하였다. 현장에서 채취한 시료는 보관용 PVC와 포장용 랩을 이용하여 수분 증발과 변형을 최소화하였다. 실험은 채취한 6개 토양시료에 대하여 실내에서 이루어졌으며 밀도, 함수비, 입도, 간극비, 간극률, 포화도, 단위중량 및 액성한계, 소성한계 시험을 실시하였다. 시험방법은 모두 American Society of Testing Materials (ASTM) 기준에 준하여 시험하였다.

4. 연구 결과 및 토의

4.1 토양 특성 시험 결과

Table 1은 연구지역에서 채취한 토층시료에 대한 실내토질시험 결과를 나타낸 것으로 2014년에 설치된 연구지역 6개소를 구분하여 각 시험 항목별 기본물성에 대한 실험결과를 나타내었다. Campus#1과 #2의 채취 당시 자연 함수비는 각각 26.15%, 20.33%를 나타냈으며 비중은 1.23, 1.32이다. Garden내 4개소의 경우 함수비는 각각 22.22%, 19.80%, 22.78%, 55.56%였으며 특히 Garden#4은 가장 높은 함수비와 함께 높은 공극률을 나타냈다. 6개소의 평균 함수비와 비중은 1.23, 27.8%로 나타났다. 액성한계 및 소성한계는 Garden#1에서 비교적 높게 나타났다. Table 1에서 보는 바와 같이 토양 부피에 대한 전체 공극의 비율을 나타내는 공극률에 따라 함수비가 상이하게 나타남으로써 함수비와 토질특성간의 상관성이 있음을 짐작하게 한다.

Fig 3은 토층시료에 대한 시험결과 중 6개 시료의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 입도분포곡선의 기울기가 대체로 완만하고 입자크기 별 비율도 양호한 것으로 평가되었다. 흙의 입도 특성 중 투수성에 특히 영향을 주는 것을 가는 입자의 크기 정도이며, 이를 나타내는 입경인 유효경(D₁₀)은 0.06~0.38의 범위로 평균 0.115로 나타났으며 Garden#4은 0.38로 가장 높은 결과를 보였다. 입도분포를 토

Table 1. Physical and engineering characteristic of the soil in the study area

Content	Sites	Campus#1	Campus#2	Garden#1	Garden#2	Garden#3	Garden#4
Specific gravity		1.23	1.32	1.30	1.25	1.30	1.29
Moisture content (%)		26.15	20.33	22.22	19.80	22.78	55.56
Liquid limit (%)		19.2	24	26.7	23.7	22.3	23.8
Plastic limit (%)		6.6	10.3	20.3	10	14.7	6.8
Void ratio		0.32	0.27	0.29	0.25	0.30	0.72
Porosity		0.24	0.21	0.22	0.20	0.23	0.42
Dry unit weight (g/cm ³)		0.0049	0.0100	0.0036	0.0083	0.0062	0.0016

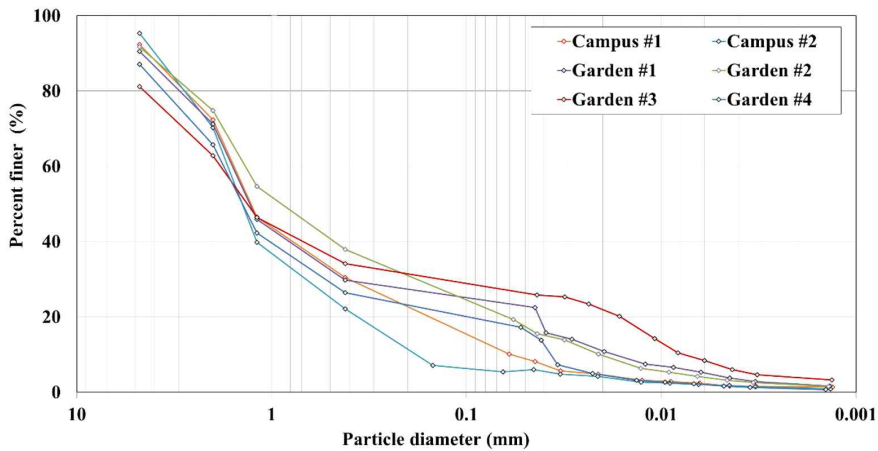


Fig. 3. Grain size distribution curves of the soil in six sites

대로 곡률계수(Coefficient of curvature)는 0.5~5.1의 범위로 평균 2.1을 나타냈으며, 균등계수(Uniformity coefficient)는 4.8~85의 범위로 평균 47.3으로 나타났다. 균등계수는 수치가 클수록 입경의 크기 분포가 넓은 것을 의미하는데, 즉 공극률이 작아지기 때문에 통기저항이 증가된다. Garden#1, #2, #3은 상대적으로 높은 값을 나타냈으며, Garden#4는 가장 낮은 값을 나타내어 입도분포에 따라 공극률 및 함수율이 달라진다는 Giannecchini and Pochini (2003)의 연구결과와 대체로 일치하는 것으로 분석되었다. 한편, Fig. 4는 각 연구지역의 입도시험 결과를 삼각형 다이어그램(Triangle diagram)으로 나타낸 것이다. 전반적으로 모래크기 입자들이 50% 이상으로 구성비가 높고 실트나 점토의 함유비율이 낮은 편으로 특히, 점토크기의 세립토 함유비율이 10% 내외로서 비교적 낮은 편이다. 함수비, 간극비, 공극률이 높게 나타난 Garden#4의 경우 모래크기 입자들과 실트의 함유비율이 90% 이상으로 가장 높게 나타난 것을 확인할 수 있다. Table 2는 삼각형 다이어그램으로 계산된 USDA 토양종류와 통일분류법(Unified Soil Classification System, USCS)에 의한 토양종류를 함께

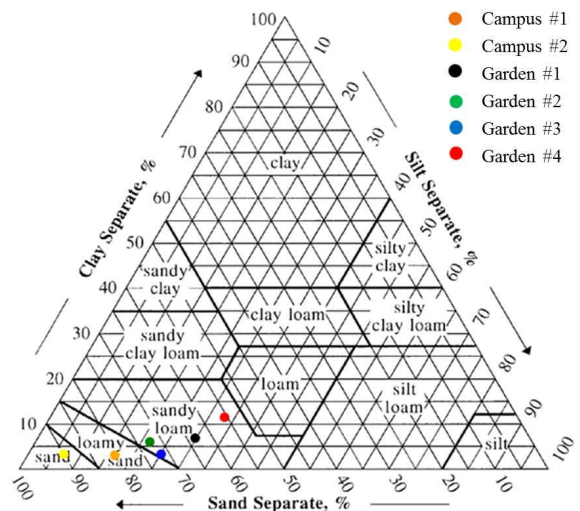


Fig. 4. USDA Soil texture triangle diagram for six sites

나타내어 보다 정확한 분류방법을 적용하여 분석하고자 하였다. 통일분류법은 흙을 입자의 크기와 입도분포, 소성성 등의 기준으로 분류하는 체계로 두 개의 문자 조합으로 흙을 분류

Table 2. Triangle diagram and united soil classification system of the soil in six sites

Content		Sites	Campus#1	Campus#2	Garden#1	Garden#2	Garden#3	Garden#4
Soil Triangle Diagram	Clay (%)		2.38	2.68	5.38	6.20	10.90	2.54
	Silt (%)		15.89	6.09	21.02	29.22	32.46	24.59
	Sand (%)		81.74	91.23	73.60	64.57	56.64	72.87
	USDA Texture		Loamy sand	Sand	Sandy loam	Sandy loam	Sandy loam	Loamy sand
USCS			SW	SW	SP	SW	SC	SP

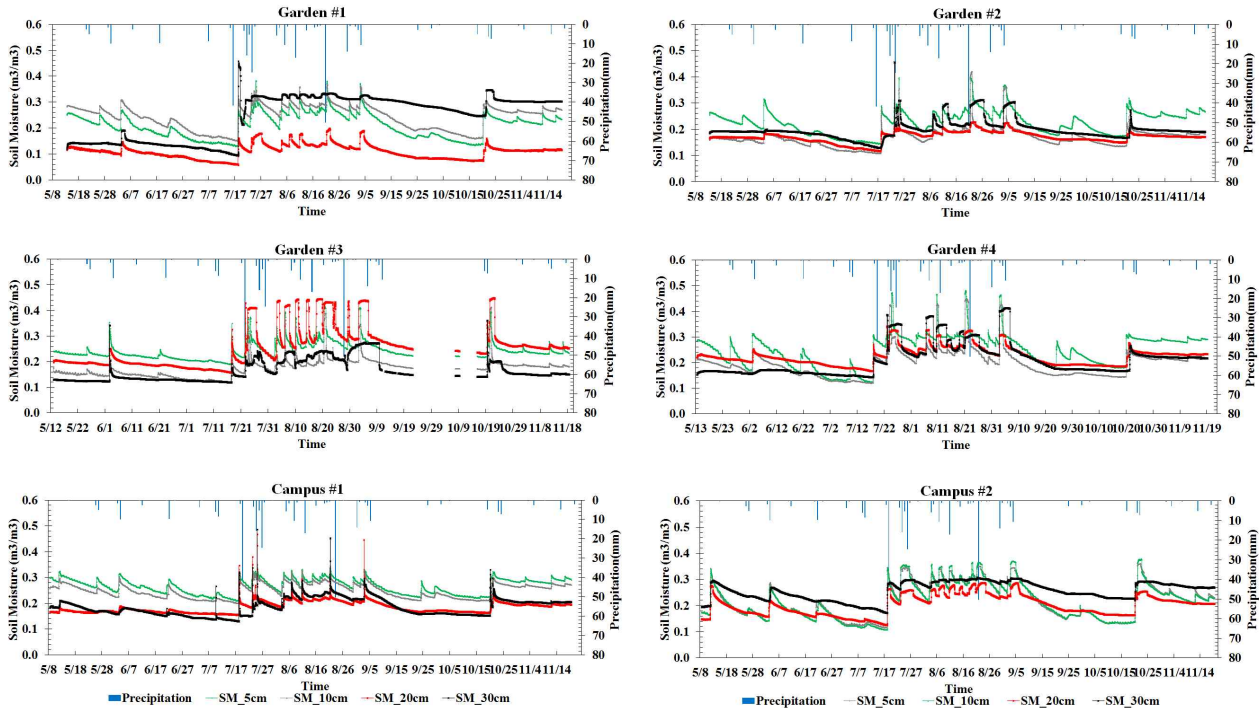


Fig. 5. Soil moisture time series of six stations from May, 2014 to Nov. 2014

하고 있다. 모래와 점토의 구성비로 계산된 USDA의 토양분류의 결과 Campus 지역은 각각 Loamy sand, Sand로 나타났으며, Garden 지역의 4개 지역은 각각 Sandy loam (Garden #1~#3), Loamy sand (Garden#4)로 나타났다. USCS의 통일 분류법에 의한 결과는 Campus 지역은 비교적 입도분포가 양호한 모래의 혼합토로 분류되는 SW(입도 분포가 좋은 모래)로 동일하게 나타났으며, Garden 지역의 경우 각각 SP(입도 분포가 나쁜 모래), SW, SC(점토질이 섞인 모래), SP로 모래 혼합토로 비슷한 특징을 보이나 입도분포 및 소성성에 따른 특징이 반영되어 분류된 것으로 나타났다. 표에서 보는 바와 같이 전반적으로 모래크기의 입자들의 함유비율이 높으나 크게 입도가 양호하거나 불량한 정도에 따라 분류됨에 따라 토질특성과 함수율이 상관성이 높은 것으로 분석되었다.

4.2 토양수분 시계열 분석 결과

Fig. 5는 2014년 5월부터 2014년 11월까지 6개의 토양수분 데이터를 도시한 결과이다. 강우에 대한 토양수분의 반응은 즉각적이며, 깊이 별 유사한 토양수분 증가 양상과, 강우 후 토양수분의 감소 양상이 양호하게 관측되고 있다. 공통적으로 20 cm, 40 cm 깊이의 토양수분(빨강, 검정 선) 값이 5, 10 cm 깊이의 토양수분(초록, 회색 선) 값보다 강우에 대한 민감성이 떨어지는 것을 보았을 때 각 층별 토질의 분포가 다양하다는 것을 알 수 있다(Choi and Jacobs, 2007). Campus#1과 2의 경우 상대적으로 높은 모래 비율로 인해 5 cm와 10 cm의 토양수분 값이 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 이러한 특성은 향후 지표 토양수분의 값을 측정하는 위성에서 모래 비율에 대한 토양수분 값의 깊이 별 지점 토양수분과 위성 토양수분의 상관성 분석에 적용될 수 있을 것이라 판단된다. 깊

이 별 토양수분의 평균 값은 $0.11\sim 0.26 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 까지 다양하게 분포되고 있으며, 이는 비교적 투과율이 좋은 모래 및 로움질 모래(loamy sand)로 토질이 구성되어 있기 때문이라고 판단되었다. 또한 식물원 내에 위치한 지점의 토양수분 데이터 (Garden#1, #3)는 학교 내에 위치한 지점의 토양수분 데이터 (Campus#1, #2)와 비교했을 시 깊이에 따라 변화되는 평균 토양수분 값의 차이가 커짐을 보였다(깊이 별 토양수분 표준편차: 식물원 0.064, 0.045 / 캠퍼스 내 0.042, 0.023). 이는 식물원의 토양이 캠퍼스 내보다 깊이가 별로 더 다양한 토질로 구성되어 있기 때문으로 사료된다. 각 깊이의 토양수분의 표준편차는 $0.021\sim 0.084 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ 이며, Sand의 비율이 91.23%로 가장 높은 Campus#2에서 토양수분의 표준편차가 크게 나타났다(평균 $0.052 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$). 결과적으로, 본 연구지역은 깊이가 별 다양한 토질이 분포되어 있으며, 따라서 향후 깊이가 별 토양에 대한 토질실험을 진행할 예정이다.

4.3 지점 토양수분과 위성토양수분 비교

ASCAT으로 산출된 토양수분 값은 전 세계적으로 토양수분의 변동성이 타 위성에 비해 상대적으로 지점 토양수분과 높은 상관관계를 보여 활발히 사용되고 있으며, 한반도에서도 그 정확도가 타 위성의 토양수분 데이터보다 높아 많이 이용되고 있다(Cho et al., 2015; Kim and Choi, 2015b). 현재 Integrated Climate Data Center (ICDC)에서 MetOp-A 위성 ASCAT 센서에서 획득된 토양수분 데이터를 2D 형식으로 제공하고 있으며, 2014년 6월까지의 데이터 사용이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 지점 토양수분의 설치일인 5월 14일부터 6월 30일까지의 위성 토양수분과 지점 토양수분을 비교하였다. 또한 본 연구에 활용된 ICDC의 토양수분 데이터의 경우 각 날짜에서 -2일과 +2일의 토양수분 값이 평균된 값을 사용하였다. ASCAT 데이터의 토양수분 데이터는 각 픽셀에서 현재까지 관측된 $\sigma^0(40)$ 값에 대한 특정 시간 t 의 상대적인 $\sigma^0(40)$ 값인 $m_s(t)$ 로 계산되며, Eq. (1)을 통해 상대적인 토양수분 값을 추정할 수 있다.

$$m_s(t) = \frac{\sigma^0(40, t) - \sigma^0_{dry}(40, t)}{\sigma^0_{wet}(40) - \sigma^0_{dry}(40, t)} \quad (1)$$

상대적인 m_s 값은 Eq. (2)를 통해 volumetric ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$)의 토양수분 값으로 변환할 수 있다. 즉, 현재까지 측정된 $\sigma^0(40)$ 값의 상대적인 값을 계산하여, 계산된 값에 공극률(ρ)을 곱하여 절대적인 토양수분 값을 산출할 수 있는 것이다(Wagner et al., 1999).

$$\theta = m_s \times \rho \quad (2)$$

연구에서 사용된 공극률은 Harmonized World Soil Database (HWSD)에서 제공되고 있으며, ICDC의 데이터에 또한 적용되어 있는 HWSD 공극률 값을 이용하였다. 추가적으로 ICDC의 데이터에는 Land Data Assimilation System (LDAS)의 공극률도 HWSD 공극률 값과 함께 제공되고 있다.

따라서 본 연구에서는 SM-FC 위치에서의 토양수분이 ASCAT의 토양수분 데이터 분석을 할 수 있는지를 판단하기 위해 연구를 수행하였다. ASCAT의 토양수분 값과 관측된 토양수분 값을 비교하기 위해 Eqs. (3)~(5)를 활용하였다. Fig. 6은 MetOp-A에 탑재되어 운영되고 있는 ASCAT 센서의 토양수분(빨간색 그래프) 데이터와 시험 사이트의 6개 지점에서의 표준 토양수분의 시계열을 나타낸 그림이다.

$$R = \frac{\sum_i^n (SSM_{ASCAT} - \overline{SSM}_{ASCAT})(SSM_{IN-SITU} - \overline{SSM}_{IN-SITU})}{\sqrt{\sum_i^n (SSM_{ASCAT} - \overline{SSM}_{ASCAT})^2 \sum_i^n (SSM_{IN-SITU} - \overline{SSM}_{IN-SITU})^2}} \quad (3)$$

$$Bias = \overline{SSM}_{ASCAT} - \overline{SSM}_{IN-SITU} \quad (4)$$

$$RMSD = \sqrt{(\overline{SSM}_{ASCAT} - \overline{SSM}_{IN-SITU})^2} \quad (5)$$

Table 3에서 ASCAT과 지점 토양수분은 평균 0.4의 상관계수 값을 보여주고 있으며, Campus#2에서 가장 높은 상관계수 값을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Campus#2의 토양수분의 거동이 모래의 비중이(Sand 91%) 높은 토양수분의 거동이며, 이러한 토양수분의 변동양상은 ASCAT의 토양수분 범위인 약 $12.5 \text{ km} \times 12.5 \text{ km}$ 의 픽셀 크기의 면적 대표 토양수분 변동양상과 지점 대표 토양수분 변동양상이 유사함을 시사한다. 이러한 결과를 통해 지점 토양수분의 데이터가 위성 토양수분 데이터를 평가하는데 사용될 수 있음을 알 수 있다. 또한 편차의 경우 평균 -0.016으로 과소 산정되는 결과를 보여주고 있으며, Campus#2의 경우에서만 과대 산정된 결과를 볼 수 있다. 이는 Campus#2의 가장 높은 Sand 비율의 영향으로, 표준 토양수분의 빠른 침투 및 증발에서 기인된 것으로 사료된다. 또한 RMSD의 경우 평균 0.037을 보여주고 있으며 Garden#3에서 가장 낮은 값을 보여주고, Campus#1에서 가장 높은 값을 보여주고 있다. 이러한 경향은 위성에서 측정되는 토양수분의 값은 지점의 토양수분의 값의 평균과 표준편차를 이용하

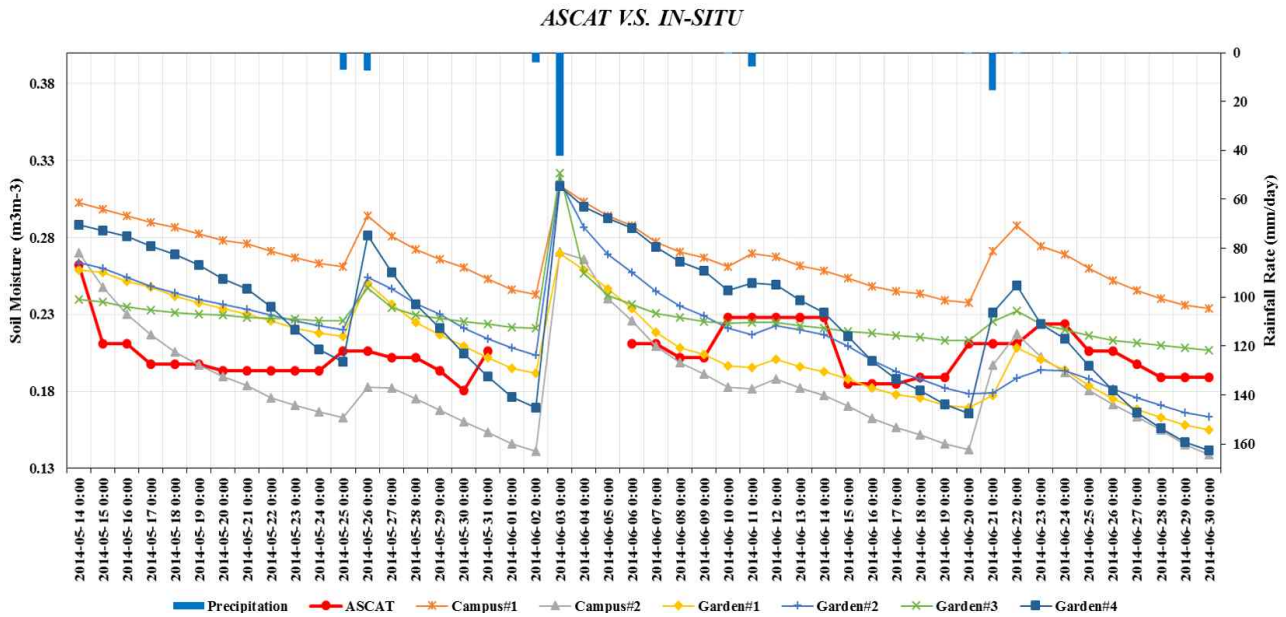


Fig. 6. Time series of ASCAT (Descending) soil moisture and six station's soil moisture at 9:30 a.m. from May. 14 to Jun. 30

Table 3. Statistic results between ASCAT and six sites respectively

	Campus#1	Campus#2	Garden#1	Garden#2	Garden#3	Garden#4
Correlation coefficient	0.43	0.58	0.24	0.27	0.34	0.45
Bias	-0.06	0.02	0.00	-0.01	-0.02	-0.02
RMSD	0.06	0.03	0.03	0.03	0.03	0.04

여 보정해야 함을 시사한다. 이러한 보정을 위해서는 Bias correction 기법이 필요하게 되며, 보정에 대한 연구는 현 연구와는 또 다른 분야이기 때문에 자세한 사항은 Liu et al. (2011)을 참고하기 바란다. 위 결과에서 보았을 때, ASCAT에서 산출되는 토양수분 값은 충분히 SM-FC의 관측된 토양수분 값을 이용하여 평가할 수 있으며, 향후 ASCAT 토양수분 값의 보정 또는 검증에 충분히 활용할 수 있을 것이라 기대된다.

4.4 COSMIC-ray calibration

Cosmic ray는 우주에서 지구로 들어오는 중성자가 지구의 대기와 충돌하는 방사선의 형태로, 고에너지 중성자인 2차 입자들을 생산하게 된다. 생성된 입자들이 지구 지표에 도달할 때 토양 내에서 방출된 수소 원자에 의해 흡수되게 되고, 그 에너지는 줄어들어 대기 중으로 다시 발산하게 된다. 낮은 에너지로 재발산된 입자들은 토양 속으로 급속하게 분산되며 최초 분산된 위치에서 매우 먼 지점까지도 도달한다고 알려져 있다. 따라서 줄어든 에너지의 중성자를 측정하여, 토양수분의 양을 결정할 수 있는데, 이는 토양수분 내의 물이 수소 원자의 양을 주로 결정하기 때문이다. 따라서 토양수분의 양을 추정

할 수 있는 중성자의 개수를 통해 토양수분의 양을 측정할 수 있게 된다. 하지만 측정되는 중성자의 개수(N_{raw})는 고도, 대기압(P), 습도(ρ_0), 온도(T), 수직 차단 강성률(R_c) 등의 영향을 받아 측정된 N_{raw} 의 값으로 바로 적용되는 것에는 한계가 있기 때문에 보정이 필요하게 된다. 현재 토양수분과 중성자 개수는 반비례적인 관계를 보이고 있으며, 중성자 개수에서 토양수분(θ)을 추정하기 위해 널리 사용되는 식은 Eq. (6)과 같다.

$$\theta(N) = \left(\left(\frac{a_0}{\left(\frac{N}{N_0} - a_1 \right)} - a_2 \right) - a_3 \right) \times \rho \quad (6)$$

Eq. (6)은 최근 연구에서 중성자 개수를 통한 토양수분 산출에 가장 많이 사용되고 있으며, 각종 지표인자, 토질인자 등을 고려하여 활발한 보정이 이루어지고 있다(Franz et al., 2013; Hawdon et al., 2014). 또한 토양수분의 설명변수인 N값은 Eq. (7)을 통해 보정될 수 있다.

$$N = N_{raw} \cdot f_p \cdot f_{wv} \cdot (1/f_i) \quad (7)$$

N_{raw} 는 본 기기에서 측정되는 중성자 개수이며, f_p 는 대기압 보정계수, f_{wv} 는 대기 수증기 보정계수, f_i 는 유입 중성자 강도 보정계수이다. f_p 는 Eq. (8)을 통해 계산될 수 있다.

$$f_p = \exp[(\beta \cdot (P - P_0))] \quad (8)$$

P (mb)는 SM-FC 사이트의 대기압이며, P_0 (mb)는 기준압력 값, (mbar^{-1} , $\sim 0.0077 \text{mbar}^{-1}$) 기압보정계수이다. 본 식에서 기준압력(P_0)의 경우 Eq. (9)를 통해 계산될 수 있다.

$$P_0 = P_b \cdot \exp[-(g \cdot M \cdot H) / (R \cdot T_b)] \quad (9)$$

여기서 P_b 는 해수면에서의 표준 대기압(101325 Pa), T_b 는 기준 해수면에서의 표준 온도(288.15 K), g 는 중력가속도(9.8066m/s^2), M 은 건조 공기상에서의 물 질량(0.028964kg/mol), R 은 보편 기체 상수($8.3144 \text{J/(mol} \cdot \text{K)}$), H 는 본 SM-site의 기준 해수면까지의 고도(48 m)이다. Eq. (7)에서 대기 수증기 보정계수(f_{wv})는 Eq. (10)을 통해 계산될 수 있다.

$$f_{wv} = 1 + 0.0054(\rho_{v0} - \rho_{v0}^{ref}) \quad (10)$$

ρ_{v0} 는 절대습도(gm^{-3}), ρ_{v0}^{ref} 는 절대 기준 습도이다. 절대 습도의 경우 Eq. (11)을 통해 계산될 수 있다.

$$\rho_{v0} = e_0 / R_v \cdot T_0 \quad (11)$$

R_v 는 수증기에 대한 기체상수($461.5 \text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$)이며 T_0 는 지표온도이다($^{\circ}\text{C}$). 여기서 e_0 는 Eq. (12)를 통해 계산될 수 있다.

$$e_0 = RH_0 \cdot e_{s0} \quad (12)$$

여기서 RH_0 는 상대습도이다. e_{s0} 의 경우 Eq. (13)을 통해 계산될 수 있다.

$$e_{s0} = 6.122 \cdot \exp[17.67 \cdot T_0 / (243.5 + T_0)] \quad (13)$$

Eq. (6)의 f_i 는 Eq. (13)을 통해 계산되며, f_i 계산을 위해서는 중성자 모니터링을 할 수 있는 별도의 시설이 필요하게 된다.

$$f_i = I_M / I_0 \quad (14)$$

하지만 현재 한국 및 가까운 동아시아 지역조차도 중성자 모니터링 시설의 데이터망이 구축되어 있지 않으므로, 중성자 강도 보정계수(f_i)는 수직 차단 강성률(R_c , GV단위) 고려하여 World Grid IGRF 2000의 Look Up 테이블을 통해 가까운 GV 값을 가진 사이트의 중성자 모니터링 데이터를 통해 계산될 수 있다. 위 사항에 대한 내용은 Smart and Shea (2008), Zreda et al. (2012), Hawdon et al. (2014), 그리고 Franz et al. (2013)에서 상세한 내용을 확인 할 수 있다.

현재 한반도는 약 11.63 GV 값을 보이므로(위도 35° , 경도 120° 기준), Neutron Monitor Database (NMDB, <http://nmdb.eu/>)를 통해 Eq. (14)의 I_M 및 I_0 값을 추정 할 수 있다. 본 연구에서 전지구적으로 보편적으로 사용되는 $a_0=0.0808$, $a_1=0.372$, $a_2=0.115$, $a_3=0$ 을 이용하여 Franz et al. (2013)과 같이 연구를 수행하였다. 또한 본 연구에서는 데이터의 개수에 대한 부족함과 초기 토양수분 관측 값에 대한 불완전성으로 인해 N 에 대한 보정을 실시하지 않았다. Fig. 7(a)는 2015년 8월에서 11월까지 획득된 중성자 개수 N_{raw} (검은색 그래프)와 10개의 토양수분 사이트의 평균 값(빨간색 그래프, 표층)을 시간에 따라 도시한 그래프이다. 둘의 관중성자 개수와 평균 토양수분의 값이 대체적으로 반대인 상관관계를 보이고 있으며, Fig. 7(b)에서 그 관계를 뚜렷하게 볼 수 있다. 본 관계에서 볼 수 있듯이 토양수분 값이 급격하게 증가함에 따라 중성자의 개수는 줄어드는 것을 확인 할 수 있지만, 그 관계가 선형적인 관계로는 해석되지 않는 것을 알 수 있다. 또한 관측소의 토양수분 값이 강우에 급격하게 반응하는 것에 반해, 관측되는 중성자의 수는 매우 크게 변동하면서 서서히 감소하는 것을 볼 수 있다. 따라서 Eq. (6)의 N_0 를 평균 토양수분의 값과 N_{raw} 값을 이용하여 결정함으로써 N_{raw} 값을 통한 토양수분 값을 추정할 수 있다.

Fig. 8은 계산된 N_0 값과 N_{raw} 값을 이용한 토양수분 값과(검은 그래프), 측정된 평균 토양수분(빨간 그래프) 값을 도시한 결과이다. 두 데이터간 상관계수는 0.954로 매우 높은 결과를 보여주고 있으나, 현재 계산된 N_0 값은 조금 더 최적화가 필요하다고 판단된다. 그 이유는 짧은 연구기간, 안정화되지 않은 관측소 토양수분 값, 10 cm의 토양수분 값만 이용한 것, 토질의 특성을 고려하지 않은 것 등의 이유이다. 이와 관련된 내용은 본 연구 외에 더 자세한 연구가 필요하므로 향후 연구에서 계속 진행할 예정이다. 하지만, 여러 보정이 들어가지 않았음에도 불구하고 두 데이터간 매우 높은 상관계수 그리고 토양수분 변동 패턴을 보았을 때, 향후 COSMIC-ray를 이용한 토양수분 데이터의 활용 가치가 매우 클 것으로 기대된다.

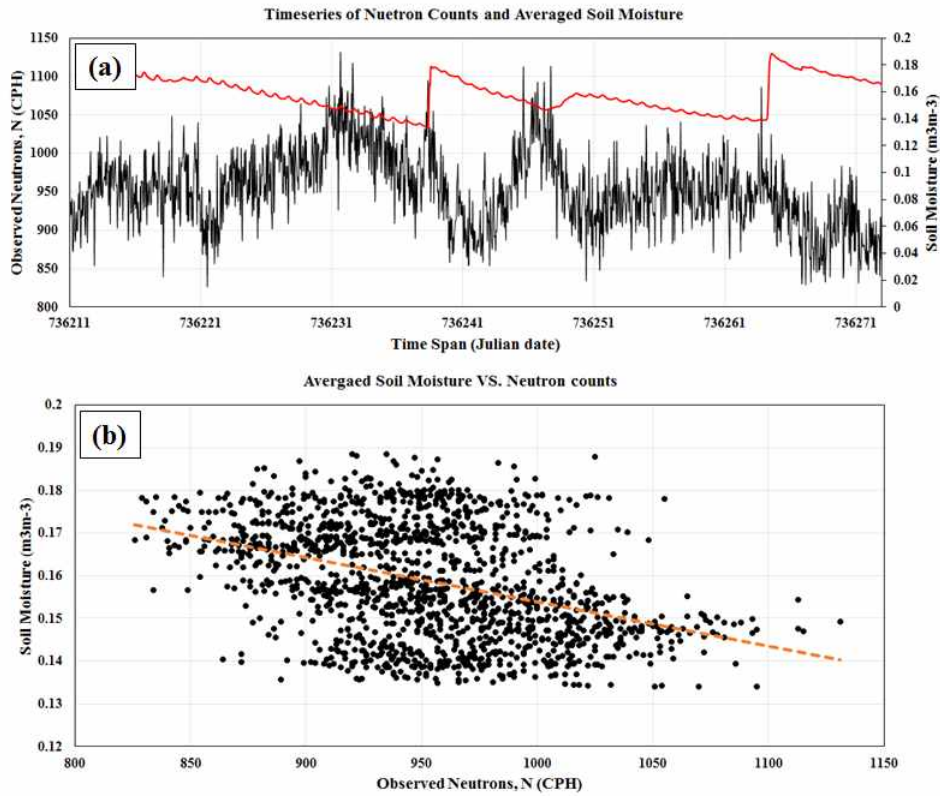


Fig. 7. (a) Time series of raw COSMIC-ray neutron counts (black line) and averaged soil moisture (red line) (b) The relationship between averaged soil moisture and neutron counts

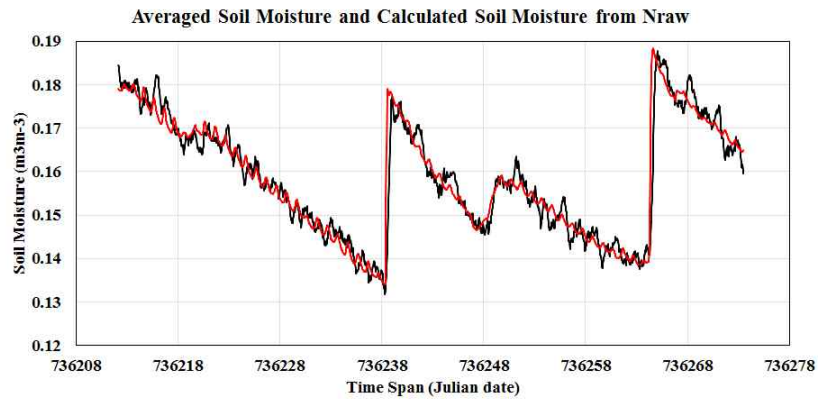


Fig. 8. Black line represents the ten station's averaged soil moisture and red line represents the calculated soil moisture from equation 3.1

5. 결 론

본 연구는 2015년도 토양수분 측정 사이트에 대한 연구로서 2014년도부터 시험 운영된 성균관대학교 수원 캠퍼스 사이트 내의 토질을 실내 토질실험을 통해 면밀히 조사하고, 설치된 6개의 토양수분 사이트의 토양수분 변동성 및 절대값을

분석하여 2015년 설치할 SM-FC 사이트의 적합성을 검증하였다. 검증결과 앞으로 운영될 Soil Moisture site with FDR and COSMIC-ray (SM-FC) 실험 사이트는 관측지역 내 지점 토양수분의 변동성뿐 아니라 중성자를 이용한 토양수분 분석, 더 나아가 위성 토양수분 분석에 있어 매우 유용한 정보를 제공할 것으로 판단되었다. 2015년 8월에 새로 설치된

COSMIC-ray 측정 장비의 경우, 식물원 내의 토양수분의 변동성을 매우 잘 설명할 수 있었으며(상관계수 0.95) 이를 통해 간접적인 토양수분 관측의 가능성을 제시하였다. 하지만 좀 더 정밀한 연구를 위해서는 관측되는 중성자 개수를 보정해야 하는 연구가 차후 진행되어야 할 것이라고 판단되었다. 본 연구를 통해 한반도에서 현재 진행되고 있는 TDR 또는 FDR 센서를 이용한 지점기반 위성토양수분데이터의 검증단계를 넘어, 지역적인 범위에서 측정되는 중성자를 통해 검증이 가능할 것이라고 판단된다. 또한 연구가 계속 진행됨에 따라 현재까지 시도되지 않았던 한반도에서의 중성자를 이용한 위성기반 토양수분 관측 또는 모델 토양수분 데이터의 보정이 본 SM-FC 연구지역을 통해 빠른 시일 내에 이루어 질 수 있을 것이라고 확신한다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 물관리연구사업의 연구비지원(15AWMP-B079625-02)에 의해 수행되었습니다. This research was supported by a grant (15AWMP-B079625-02) from Water Management Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport of Korean government. ASCAT products 2007-2013, Institute of Photogrammetry and Remote Sensing (IPF), Vienna Institute of Technology (TU Wien), Vienna, Austria, provided daily as moving 5-Day mean by: Integrated Climate Data Centre (ICDC, icdc.zmaw.de), University of Hamburg, Hamburg, Germany.

References

- Brocca, L., Hasenauer, S., Lacava, T., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., Matgen, P., Martinez-Fernandez, J., Llorens, P., Latron, J., Martin, C., and Bittelli, M. (2011). "Soil moisture estimation through ASCAT and AMSR-E sensors: An intercomparison and validation study across Europe." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 115, No. 12, pp. 3390-3408.
- Brocca, L., Melone, F., Moramarco, T., Wagner, W., and Hasenauer, S. (2010). "ASCAT soil wetness index validation through in situ and modeled soil moisture data in central Italy." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 114, No. 11, pp. 2745-2755.
- Cho, E., Choi, M., and Wagner, W. (2015). "An assessment of remotely sensed surface and root zone soil moisture through active and passive sensors in northeast Asia." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 160, pp. 166-179.
- Choi, M., and Jacobs, J. M. (2008). "Temporal Variability Corrections for Advanced Microwave scanning radiometer E (AMSR-E) surface soil moisture: case study in little river region." Georgia, U.S. *Sensors*, Vol. 8, No. 4, pp. 2617-2627.
- Choi, M., and Jacobs, J.M. (2007). "Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints." *Advances in Water Resources*, Vol. 30, No. 4, pp. 883-896.
- Choi, M., Jacobs, J.M., and Cosh, M.H. (2007). "Scaled spatial variability of soil moisture fields." *Geophysical Research Letters*, 34, L01401.
- Desilets, D., and Zreda, M. (2013). "Footprint diameter for a cosmic-ray soil moisture probe: Theory and Monte Carlo simulations." *Water Resources Research*, Vol. 49, No. 6, pp. 3566-3575.
- Desilets, D., Zreda, M., and Ferre, T. (2010). "Nature's neutron probe: Land-surface hydrology at an elusive scale with cosmic rays." *Water Resources Research*, 46, W011505.
- Dorigo, W.A., Wagner, W., Hohensinn, R., Hahn, S., Paulik, C., Xaver, A., Gruber, A., Drusch, M., Mecklenburg, S., Oevelen, P. van., Robock, A., and Jackson, T. (2011). "The International Soil Moisture Network: a data hosting facility for global in situ soil moisture measurements." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, pp. 1675-1698.
- Dorigo, W.A., Xaver, A., Vreugdenhil, M., Gruber, A., Hegyiová, A., Sanchis-Dufau, A.D., Zamojski, D., Cordes, C., Wagner, W., and Drusch, M. (2013). "Global automated quality control of in situ soil moisture data from the International Soil Moisture Network." *Vadose Zone Journal*, Vol. 12, No. 3.
- Franz, T.E., Zreda, M., Rosolem, R., and Ferre, T.P.A. (2013). "A universal calibration function for determination of soil moisture with cosmic-ray neutrons." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 17, pp. 453-460.
- Giannecchini, R., and Pochini, A. (2003). "Geotechnical influence on soil slips in the Apuan Alps (Tuscany): first results in the Cardoso area." *Proceedings International Conference on Fast Movements-Prediction and Prevention for Risk Mitigation (IC-FSM2003)*, Napoli, May, 11-13, 2003, pp. 241-245.
- Hawdon, A., McJannet, D., and Wallace, J. (2014). "Calibration and correction procedures for cosmic-ray neutron soil moisture probes located across Australia." *Water Resources Research*, Vol. 50, pp. 5029-5043.
- Jackson, T.J., Cosh, M.H., Bindlish, R., Starks, P.J., Bosch, D. D., Seyfried, M., David, Goodrich, D.C., Moran, M.S., and Du, J. (2010). "Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. Geoscience and Remote Sensing." *IEEE Transactions on*, Vol. 48, No. 12, pp. 4256-4272.
- Kerr, Y.H., Waldteufel, P., Wigneron, J.P., Delwart, S., Cabot, F.O., Boutin, J., Escorihuela, M.J., Font, J., Reul, N., and

- Gruhier C. (2010). "The SMOS mission: New tool for monitoring key elements of the global water cycle." *Proceedings of the IEEE*, Vol. 98, No. 5, pp. 666-687.
- Kim, H., and Choi, M. (2015a). "Impact of soil moisture on dust outbreaks in East Asia: Using satellite and assimilation data." *Geophysical Research Letters*, Vol. 42, No. 8, pp. 2789-2796.
- Kim, H., and Choi, M. (2015b). "An Inter-comparison of active and passive satellite soil moisture products in East Asia for dust-outbreak prediction." *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 15, No. 4, pp. 53-58.
- Kim, S., Liu, Y.Y., Johnson, F.M., Parinussa, R.M., and Sharma, A. (2015). "A global comparison of alternate AMSR2 soil moisture products: Why do they differ?" *Remote Sensing of Environment*, Vol. 161, pp. 43-62.
- Knoll, G.F. (2000). *Radiation detection and measurement*, Wiley, New York, p. 802.
- Liu, Y.Y., Parinussa, R.M., Dorigo, W.A., De Jeu, R.A.M., Wagner, W., van Dijk, A.I.J.M., McCabe, M.F., and Evans, J.P. (2011). "Developing an improved soil moisture dataset by blending passive and active microwave satellite-based retrievals." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 15, No. 2, pp. 425-436.
- Njoku, E.G., Jackson, T.J., Lakshmi, V., Chan, T.K., and Nghiem, S.V. (2003). "Soil moisture retrieval from AMSR-E. Geoscience and Remote Sensing." *IEEE Transactions on*, Vol. 41, No. 2, pp. 215-229.
- Parinussa, R.M., Wang, G., Holmes, T.R.H., Liu, Y.Y., Dolman, A.J., de Jeu, R.A.M., Jiang, T., Zhang, P. and Shi J. (2014). "Global surface soil moisture from the Microwave Radiation Imager onboard the Fengyun-3B satellite." *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 35, No. 19, pp. 7007-7029.
- Robinson, D.A., Jones, S.B., Wraith, J.M., Friedman, D. Or, S.P. (2003). "A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement in soils using time domain reflectometry." *Vadose Zone Journal*, Vol. 2, No. 4, pp. 444-475.
- Skierucha, W., and Wilczek, A. (2010). "A FDR Sensor for Measuring Complex Soil Dielectric Permittivity in the 10-500 MHz Frequency Range." *Sensors*, Vol. 10, pp. 3314-3329.
- Smart, D.F., & Shea, M.A. (2008). "World grid of calculated cosmic ray vertical cutoff rigidities for epoch 2000.0." *In Proceedings of the 30th International Cosmic Ray Conference*, Vol. 1, pp. 737-740.
- Wagner, W., Lemoine, G., and Rott, H. (1999). "A method for estimating soil moisture from ERS scatterometer and soil data." *Remote Sensing of Environment*, Vol. 70, No. 2, pp. 191-207.
- Zreda, M., Shuttleworth, W.J., Zeng, X., Zweck, C., Desilets, D., Franz, T., and Rosolem, R. (2012). "COSMOS: the cosmic-ray soil moisture observing system." *Hydrology and Earth System Sciences*, Vol. 16, No. 11, pp. 4079-4099.