

## 위성관측 토양수분과 지상관측망 자료의 상관성 분석\*

김광섭<sup>1</sup> · 김종필<sup>1</sup>※

### Correlation Analysis Between Soil Moisture Retrieved from Satellite Images and Ground Network Measurements\*

Gwang-Seob KIM<sup>1</sup> · Jong-Pil KIM<sup>1</sup>※

#### 요 약

원격탐사자료로부터 추정된 토양수분자료의 우리나라 지역에 대한 적용성을 평가하기 위하여 NASA와 VUA-NASA의 AMSR-E 토양수분자료를 수집하여, 2008년 5월 16일부터 8월 19일 까지 용담댐 유역내 6개 지상관측지점의 토양수분자료와 비교분석을 수행하였다. 시계열 분석결과, 지상관측 토양수분자료의 평균은 약  $0.218\text{m}^3/\text{m}^3$ , NASA 자료의 평균은 약  $0.119\text{m}^3/\text{m}^3$ , VUA-NASA 자료의 평균은 약  $0.402\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 나타나, NASA의 토양수분자료는 용담댐 유역에 있어서 과소 추정되었으며, VUA-NASA 자료는 과대 추정되었다는 것을 알 수 있었다. 지상관측자료와의 상관성 분석결과, NASA 알고리즘을 이용한 토양수분자료보다 VUA-NASA의 토양수분자료가 지상관측자료와 더 높은 상관성을 보여주었다. 그러나 C-band 원격탐사 토양수분자료가 가지는 한계가 존재함을 알 수 있으며, 원격탐사 토양수분 자료의 활용성을 높이기 위하여 다양한 토지피복, 식생 등에 대한 지상관측 토양수분을 활용한 편의보정 등 후처리가 필요한 실정이다.

주요어 : 원격탐사, AMSR-E, 토양수분, 상관성 분석

#### ABSTRACT

The soil moisture data of the National Aeronautics and Space Administration(NASA) and the Vrije Universiteit Amsterdam(VUA) in collaboration with NASA, retrieved from Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth observing system(AMSR-E)

2011년 3월 22일 접수 Received on March 22, 2011 / 2011년 4월 28일 수정 Revised on April 28, 2011 / 2011년 5월 6일 심사완료 Accepted on May 6, 2011

\* 본 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설기술혁신사업(08기술혁신F01)에 의한 차세대홍수방어기술개발연구단의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

1 경북대학교 건축토목공학부 School of Archi. and Civil Engineering, Kyungpook National University

※ 연락처자 E-mail: jpkim@knu.ac.kr

brightness temperature, were collected to evaluate the applicability of the remote sensed soil moisture in South Korea. The averages of the soil moisture by in-situ sensors, by NASA and by VUA-NASA are approximately 0.218, 0.119, and 0.402 m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, respectively. This indicates that the soil moisture of NASA was underestimated and that of VUA-NASA was overestimated. The soil moisture products of VUA-NASA showed a better relationship with the in-situ data than that of NASA data. However, there are still limitations of C-band soil moisture measurements. To improve the applicability of satellite soil moisture measurements, bias correction and other post processings are essential using in-situ soil moisture measurements at various surface conditions.

**KEYWORDS:** Remote Sensing, AMSR-E, Soil Moisture, Correlation Analysis

## 서론

토양수분은 식물의 성장과 관련된 농업분야, 강우-유출해석 등의 수자원 분야 그리고 대기와 지표면 사이의 상호작용을 연구하는 기상분야 등 다양한 학문분야에서 중요한 요소로 고려되고 있으며(유철상, 1997), 특히 수문기상학적으로는 침투나 침루를 통하여 강우와 지하수를 연결하는 동시에 강우사상에 따른 유출특성에 직접적인 영향을 미치고 증발산을 통하여 에너지 순환을 연결하는 핵심 고리역할을 한다(김광섭과 이을래, 2004). 다시 말해서 토양수분은 수문학적 모델링, 기후변화 예측, 홍수나 가뭄 모니터링 등에 있어서 없어서는 안 될 매우 중요한 변수이다. 하지만 이러한 토양수분의 중요성으로 말미암아 여러 국가 기관에서 관측을 실시하였음에도 불구하고 관측기기 신뢰성의 한계, 인력, 비용 등의 한계 등으로 인해 토양수분에 대한 신뢰성 높은 장기적인 현장 관측은 수행되지 못하고 있다.

원격탐사기술이 발달하면서 토양 내 수분 정도에 따른 유전상수(dielectric constant)와 의 상관특성이 제시되고, 다양한 지표상태와 식생피복에 따른 관측가능성을 가진 마이크로파(microwave)를 이용하여 광범위한 영역에 대한 토양수분의 관측이 수행되고 있다. 2002

년 C-band와 X-band Advanced Microwave Scanning Radiometer - Earth observing system(AMSR-E) 센서가 AQUA 위성에 탑재되어 발사되면서 전 지구 규모의 토양수분 자료를 획득할 수 있게 되었다. C-band 마이크로파를 이용한 관측방법은 토양수분이 약 30% 이상이 되는 조건에서 그 관측심(penetration depth)이 약 1cm 정도 밖에 되지 않으며(Nolan and Fatland, 2003), 토지피복, 식생, 지형 등의 영향에 매우 민감하다는 단점을 가지고 있다. 그러나 이러한 한계성에도 불구하고 마이크로파 스펙트럼(spectrum) 중에서 주파수가 낮을수록 식생의 영향에 대한 민감도가 떨어지기 때문에(김광섭과 이을래, 2004; Njoku *et al.*, 2003; Draper *et al.*, 2009), AMSR-E는 현 시점에서 인공위성을 이용한 토양수분 관측에 가장 적합하다고 할 수 있겠다. 또한 이를 통하여 관측된 휘도(밝기)온도 자료로부터 추정된 토양수분자료는 지구의 물순환을 연구하는데 유용하게 활용될 수 있을 것이며, 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 등의 보조자료를 이용한 상세화(downscaling)를 통하여 보다 현실적인 토양수분 추정결과를 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

여러 연구자들은 AMSR-E 휘도온도로부터 토양수분을 획득하기 위하여 각각 고유의 알

고리들을 개발하여 사용해 왔다. National Aeronautics and Space Administration (NASA), Japan Aerospace eXploration Agency (JAXA), Vrije Universiteit Amsterdam in collaboration with NASA (VUA-NASA) 등에서는 서로 다른 알고리즘을 이용하여 토양수분을 추정하여 제공하고 있으며 (Owe *et al.*, 2001; Njoku *et al.*, 2003; Koike *et al.*, 2004; Owe *et al.*, 2008), NASA, JAXA, United States Department of Agriculture (USDA)에서는 북미와 유럽, 동아시아 지역에 대하여 C-band의 Radio Frequency Interference (RFI)가 나타나기 때문에 X-band 만을 사용하여 토양수분을 추정하고 있고, VUA-NASA의 경우 C-band를 기본으로 하여 RFI가 나타나는 지역에 대해서는 X-band를 사용하기도 한다 (Draper *et al.*, 2009). 그 외에도 최근 여러 연구자들에 의해서 AMSR-E 토양수분의 추정 및 검증과 관련된 연구가 활발하게 수행되었다. McCabe *et al.* (2005)은 Soil Moisture EXperiment 2002 (SMEX02) 기간 동안 미국 아이오와(Iowa) 지역에 대하여 Land Surface Microwave Emission Model (LSMEM)을 이용하여 토양수분을 추정하였으며, 수집된 지상관측자료와의 상관성을 분석한 바 있다. Choi and Jacobs (2008)는 Little River Region에서 관측된 지표토양수분 관측치와 AMSR-E로부터 Common Land Model (CLM)을 이용하여 추정된 토양수분자료를 비교하였으며, 통계적 기법을 이용하여 보정한 결과, 회귀계수 및 결정계수에 있어서 개선된 결과를 얻을 수 있었다. Sahoo *et al.* (2008)은 Land Surface Microwave Emission Model (LSMEM)을 이용하여 AMSR-E로부터 토양수분을 산정하여, Njoku and Chan (2006)의 AMSR-E 토양수분자료 및 Little River Experimental Watershed의 지상관측 토양수분자료와의 비교분석을 수행하였다. Draper *et al.* (2009)은 VUA와 NASA의 공동연구로 도출된 토양수분자료와

호주 대륙에 설치된 12개 관측지점 자료를 비교한 결과 상관계수 0.8이상의 매우 높은 상관성이 있다고 하였다. Wang *et al.* (2009)은 중국 남서부의 매우 건조한 지역을 대상으로 AMSR-E 토양수분을 검증한 결과, AMSR-E를 이용한 토양수분 관측은 현실적이며 수용할 만한 결과를 제시한다고 하였다. Jackson *et al.* (2010)은 NASA와 JAXA의 토양수분자료를 이용하여 미국의 Walnut Gulch, Little Washita, Little River, Reynolds Creek 등 4개 유역에서 관측된 자료와 비교하였다. 분석결과, NASA와 JAXA 토양수분 모두 신뢰성이 떨어지지만, 약한 식생조건에서는 JAXA 알고리즘이, 중간 식생조건에서는 NASA 알고리즘이 상대적으로 더 신뢰성이 높다고 하였다.

이러한 선행 연구들에 의하면 각각의 토양수분 추정 알고리즘이나 모형 그리고 대상지역에 따라 AMSR-E 토양수분자료의 신뢰성은 다양하게 평가되고 있다. 따라서 본 연구에서는 가용한 전구 관측 토양수분자료인 AMSR-E 토양수분자료와 지상관측자료의 상관성 분석에 초점을 맞추었다. 비교적 신뢰성 있는 토양수분 지상관측망을 구축하고 있는 용담댐 유역을 평가 지역으로 선정하였으며, 대상 유역에 대한 토양수분 관측자료를 이용하여 한반도 지역의 AMSR-E 토양수분자료 적용성을 평가하고자 하였다.

## 연구자료 및 대상유역

### 1. 토양수분 관측기술

그림 1에서 보는 바와 같이 1980년대 이전까지는 주로 트럭이나 항공기에 복사계 (radiometer)를 장착하여 관측을 수행하였으며, 1980년대 중반이후부터 1990년대 초반까지는 L-band Push-Broom Microwave Radiometer (PBMR)이 개발되어 토양수분을 관측하는데 사용되었다. 그 후 Electronically Scanned Thinned Array Radiometer



FIGURE 1. 토양수분 관측기술의 발전사

(ESTAR)이 개발되면서 Washita '92 Experiment(1992)와 Southern Great Plain 1997(SGP97) Hydrology Experiment에 적용되어 광범위한 지역에 대한 토양수분 관측의 가능성을 보여주었다(김광섭과 이을래, 2004). 2002년 C-band와 X-band AMSR-E 센서를 이용하면서부터 전구 규모의 토양수분 자료 획득이 가능케 되었다. 그 후 2009년에 발사된 L-band Soil Moisture Ocean Salinity(SMOS)와 향후 발사될 L-band Soil Moisture Active and Passive(SMAP)의 관측자료가 가용할 시점에서는 보다 고해상도, 고정확도의 토양수분자료 생산이 가능할 것으로 보인다. 또한 현재까지는 일반 연구자에 대한 사용의 제한은 있으나, 2009년부터 전구관측이 수행되고 있는 SMOS L-band 토양수분 관측자료가 가용해지는 시점에서는 AMSR-E 기기가 제공하는 토양수분 자료보다 깊은 관측심에 대한 신뢰

성 높은 토양수분 공간정보가 활용될 수 있을 것이다.

## 2. AQUA/AMSR-E 자료 수집 및 전처리

AQUA 위성은 지표, 대기 및 해양 등의 상호작용을 통한 지구 물순환을 보다 정확하게 이해하기 위한 목적으로 2002년 5월 4일에 발사된 태양동기 극궤도 위성이다. AMSR-E는 이 AQUA 위성에 탑재된 6개 센서 중 하나로서, 6.9GHz~89.0GHz 사이의 6개 주파수 대역에서 이중편파로 모두 12개 채널로 휘도온도를 관측하고 있다. 또한 관측폭(swath)은 약 1,445km이며, 공간분해능은 89GHz에서 약 5km, 6.9GHz에서는 약 60km로 다양하다. AQUA 위성은 극궤도(polar orbit) 위성이기 때문에 매일 현지시간 01:30 A.M.과 01:30 P.M.에 같은 지역을 두 번 통과하지만, 전구를 커버하는 영상은 극지방 부근의 소규모 지역을 제외하고 대체로 2일 이내마다 상

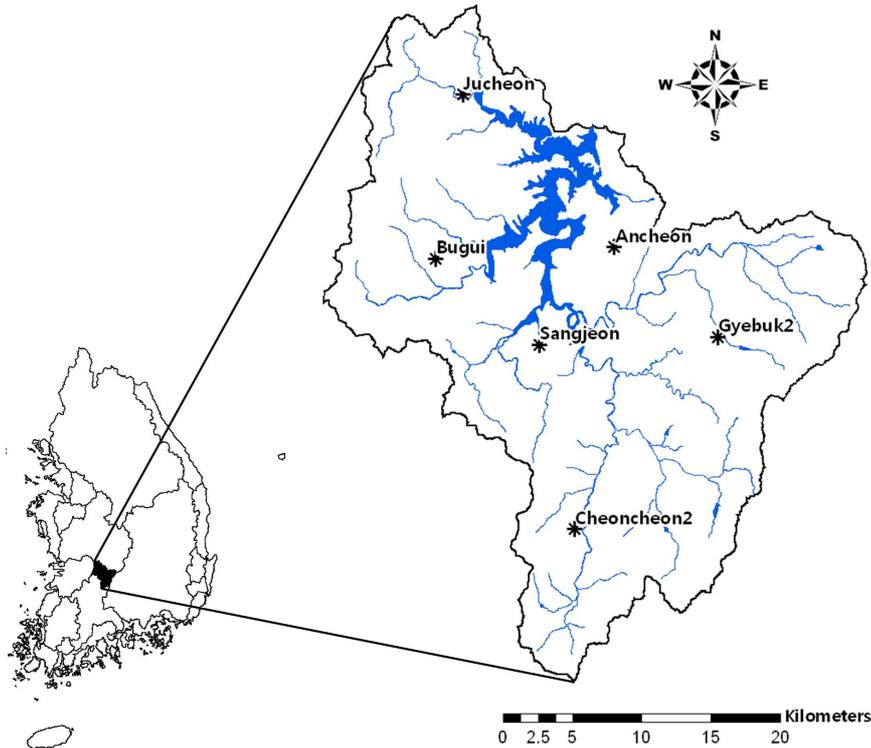


FIGURE 2. 한국수자원공사의 용담댐 토양수분 관측지점

승경로(ascending pass)와 하강경로(descending pass) 자료를 각각 획득할 수 있다(Njoku *et al.*, 2003).

지표면 토양수분은 원격관측된 휘도온도로부터 지표면 복사전달 모형(land-surface radiative transfer model)을 이용하여 추정할 수 있다(Draper *et al.*, 2009). 앞서 언급한 바와 같이 현재까지 많은 연구자들은 AMSR-E 관측자료를 이용한 다양한 토양수분 추정 알고리즘을 제안해왔다. 제안된 토양수분 추정 알고리즘은 다양한 복사전달 방정식을 적용하고 있으며, 그 결과 서로 다른 토양수분 추정치를 제시하고 있다. AMSR-E 휘도온도자료로부터 토양수분을 추정하는 NASA 알고리즘 및 VUA-NASA 알고리즘에 대한 자세한 설명은 Njoku *et al.*(2003)과 Owe *et al.*(2008)을 각각 참고하기 바란다. 본 연구에서는 NASA와 VUA-NASA의

AMSR-E 토양수분자료를 수집하여 분석을 수행하였다. NASA에서 제공하는 AMSR-E 토양수분자료는 National Snow and Ice Data Center(NSIDC)의 Distributed Active Archive Center(DAAC), VUA-NASA 자료는 Atmospheric Data Access for the Geospatial User Community(ADAGUC)로부터 각각 획득하였다. NSIDC로부터 수집된 토양수분자료는 Hierarchical Data Format(HDF) - Earth Observing System(EOS) 파일형식으로 구성되어 있으며, Equal Area Scalable Earth(EASE) - Grid 투영법으로 행 586개, 열 1382개의 정보를 포함하고, 공간해상도는 대략 0.2603° 이다. 또한 VUA-NASA 토양수분자료는 HDF5 파일형식으로 구성되어 있으며, Geographic Coordinate System(GCS)로 행 720, 열 1440개의 토양수분정보를 포함하고 있고, 공간해상도는 대

략 0.2500° 이다. 따라서 HDF와 HDF5 파일을 ASCII 형식으로 변환하였으며, NASA 자료의 경우 EASE 투영체제에서 GSC로 변환하는 과정을 수행하였다.

### 3. 대상구역

현재까지 우리나라에서는 장기간의 토양수분에 대한 관측자료가 구축되어 있지 않으며, 대부분이 연구의 목적으로 특정 기간에 국한되어 토양수분을 관측해왔다. 본 연구에서는 가뭄관리정보체계 수립(건설교통부와 한국수자원공사, 2006)부터 가뭄연구를 목적으로 용담댐 시험구역에서 지속적으로 관측된 토양수분자료를 이용하였다. 이 자료는 토양수분이 토양의 유전율에 따라 변화하는 특성을 활용하는 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 방식으로 관측되었으며(국토해양부와 한국수자원공사, 2008), 표토(0~10cm)에서 관측된 자료를 이용하였다. 토양수분센서의 자세한 설명과 기기의 설치환경 등에 대한 내용은 가뭄정보시스템 보고서(국토해양부와 한국수자원공사, 2008)를 참고하기 바란다. 용담댐 유역은 전라북도 진안군 용담면 월계리의 금강 상류부(북위 35.58° ~36.02°, 동경 127.31° ~127.75°)에 위치하고 있으며, 유역면적은 약 930.43km<sup>2</sup>, 유역평균표고는 510.22m이다. 국가수자원관리종합정보시스템(WAMIS)으로부터 획득된 토지피복도 및 토

양도에 의하면, 용담댐 유역은 전체 유역면적의 약 79.73%가 산림으로 이루어져 있으며, 이 중에서 41.48%가 활엽수림, 36.20%가 침엽수림으로 이루어져 있다. 또한 토양의 종류는 전체 유역면적의 약 65.33%가 사양질 내지 식양질로, 토양의 유효토심은 약 62.09%가 얇은 토심으로 구성되어 있다(김광섭과 박한균, 2010). 그림 2는 용담댐 유역 내에 설치되어 있는 한국수자원공사의 토양수분 관측지점을 도시화한 것이며, 표 1은 각 관측지점의 위치, 강우량 등의 정보를 나타내고 있으며, 표에서 제시하고 있는 강우량 및 토양수분은 대상기간인 2008년 5월 16일부터 동년 8월 19일까지의 통계치를 의미한다.

## 결과 및 고찰

표 2는 각각 하강경로(표 2(a))와 상승경로(표 2(b))에 대한 AMSR-E 토양수분과 지상관측 토양수분 사이의 오차를 나타낸 것이다. 표에서 제시하는 자료의 개수(N)는 분석기간 동안 각 관측지점의 자료에 해당하는 AMSR-E 자료의 수를 나타내는 것으로서, 각 지점별로 다르게 나타나는 이유는 위성의 이동경로와 관측폭에 의해 미관측 영역이 발생하기 때문이다. 또한 지상관측 토양수분과의 비교를 위하여 다음 식들을 이용하여 상관계수(R), 평균제곱근오차(RMSE), 평균절대

TABLE 1. 용담댐 토양수분 관측지점의 특성

지점명	위 치		강우량		지상 관측	토양수분 평균치 (%)			
	경 도 (° ' ")	위 도 (° ' ")	총 합계 (mm)	일최고 (mm/day)		NASA 하강	NASA 상승	VUA-NASA 하강	VUA-NASA 상승
안 천	127-32-48	35-52-01	558	69	12.3	11.2	11.5	44.1	36.6
부 귀	127-24-12	35-51-36	571	76	27.6	11.2	11.5	44.1	36.6
천 천2	127-30-49	35-40-54	584	138	23.3	11.2	11.5	44.1	36.6
계 북2	127-37-46	35-48-27	749	121	25.3	13.5	14.2	45.2	38.6
주 천	127-25-34	35-58-04	705	102	14.4	12.1	11.8	40.0	36.2
상 전	127-29-10	35-48-11	591	86	27.8	11.2	11.5	44.1	36.6
				평균	21.8	11.7	12.0	37.4	36.9

오차(MAE)를 계산하였다.

$$MAE = \frac{1}{N} \sum |S_g - S_s| \quad (3)$$

$$R = \frac{N \sum S_g S_s - \sum S_g \sum S_s}{\sqrt{\{N \sum S_g^2 - (\sum S_g)^2\} \{N \sum S_s^2 - (\sum S_s)^2\}}} \quad (1)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum (S_g - S_s)^2} \quad (2)$$

여기서,  $N$ 은 샘플자료의 개수를 나타내며,  $S_g$ 는 지상관측 토양수분,  $S_s$ 는 AMSR-E 토양수분 추정치를 의미한다.

하강경로에 대한 AMSR-E 토양수분과 지상관측 토양수분의 시계열 비교결과(그림 3,

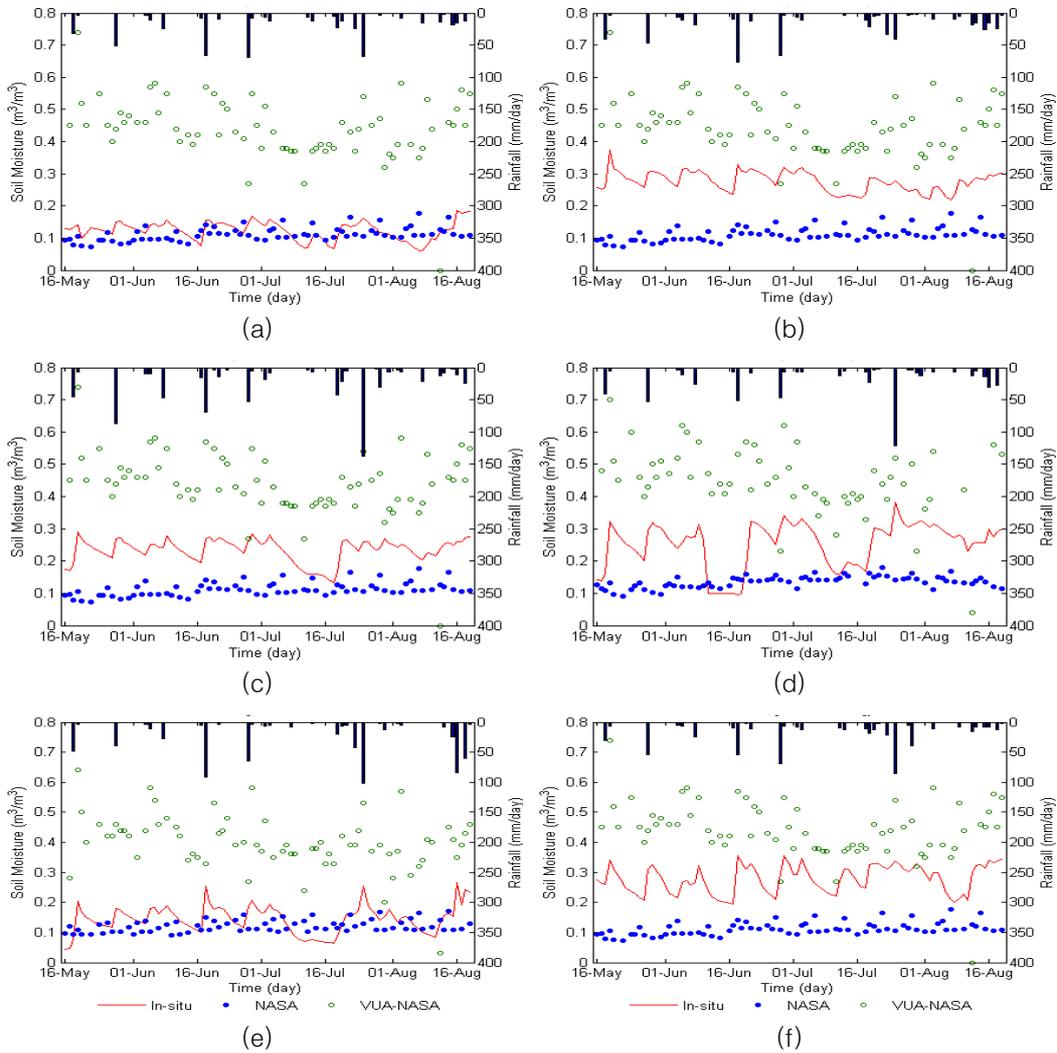


FIGURE 3. 일강수량(막대그래프) 및 하강경로 AMSR-E 토양수분과 지상관측자료 비교결과 (a) 안천, (b) 부귀, (c) 천천2, (d) 계북2, (e) 주천, (f) 상전

표 2(a), 안천지점에서는 지상관측 토양수분의 평균이 약  $0.123\text{m}^3/\text{m}^3$ , NASA 토양수분의 평균은 약  $0.112\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 지상관측치와 비슷한 수준이었으며, VUA-NASA는 약  $0.441\text{m}^3/\text{m}^3$ 으로 약 3.9배 정도 높은 것으로 나타났다. 하지만 지상관측자료와의 상관계수는 반대로 NASA가 약  $-0.124$ 로 음(-)의 상관성을 나타냈으며, VUA-NASA는 약  $0.489$ 로 NASA 토양수분보다 지상관측자료와 더 잘

부합하는 것으로 나타났다. 부귀지점의 경우, 지상관측 토양수분의 평균은 약  $0.276\text{m}^3/\text{m}^3$ 이며, NASA 평균은 관측치 평균의 약 0.4배, VUA-NASA는 약 1.6배로 나타났다. 안천지점과 마찬가지로 NASA 토양수분의 상관계수는 음(-)의 상관관계를 나타냈으며, VUA-NASA 자료의 상관계수는 약  $0.691$ 로 다른 지점들에 비해 가장 높게 나타났다. 천천2지점의 지상관측 토양수분의 평균은 약

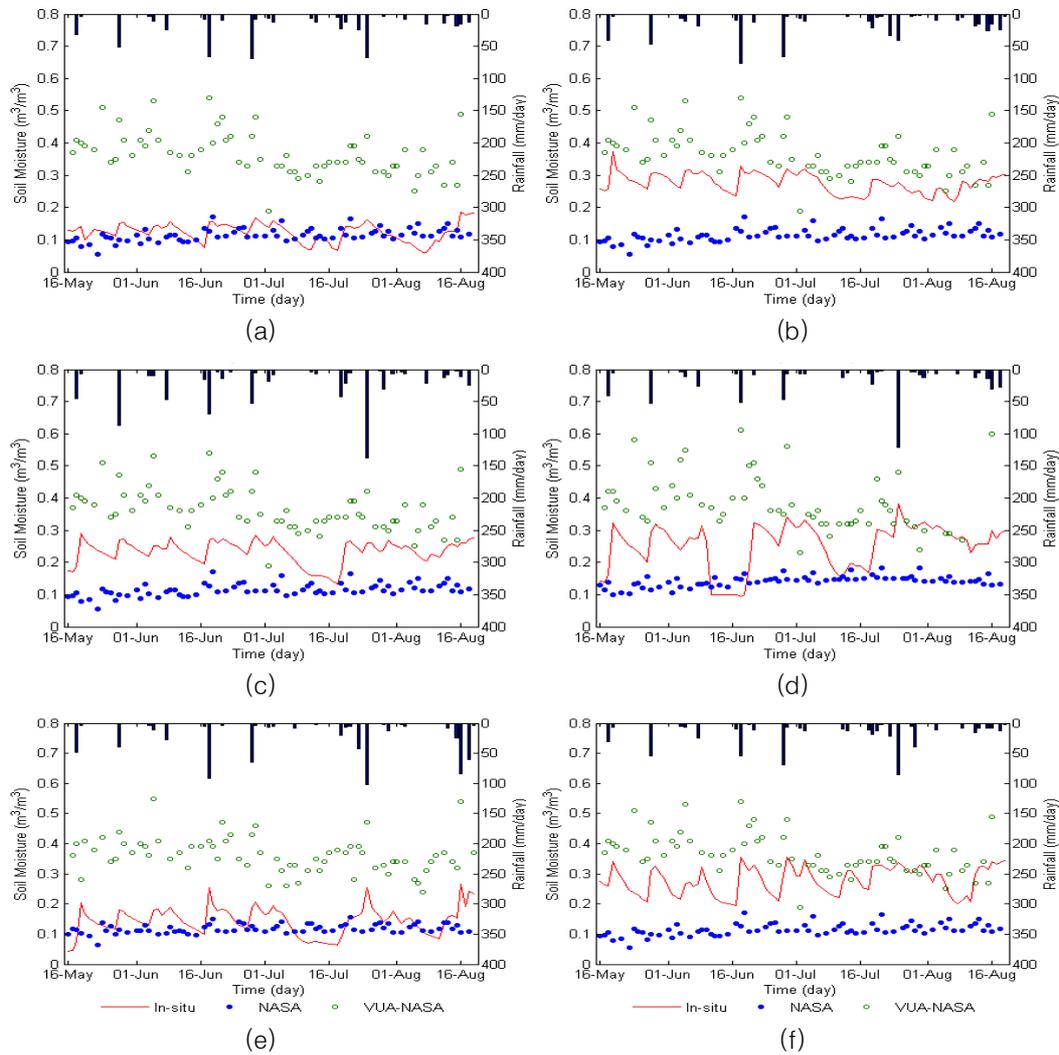


FIGURE 4. 일강수량(막대그래프) 및 상승경로 AMSR-E 토양수분과 지상관측자료 비교결과  
(a) 안천, (b) 부귀, (c) 천천2, (d) 계북2, (e) 주천, (f) 상전

0.233m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, NASA 토양수분의 평균은 관측치의 약 0.5배, 상관계수는 약 0.017로 매우 낮았으며, VUA-NASA 평균은 관측치의 약 1.6배였으며, 상관계수는 약 0.516으로 NASA 토양수분보다 지상관측 토양수분과의 상관성이 더 높은 것으로 나타났다. 계북2지점에서는 관측치의 평균이 약 0.253m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>이었으며, NASA의 평균은 약 0.135m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>으로 관측치의 약 0.5배에 불과했으며, VUA-NASA의 평균이 약 0.386m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>으로 관측치의 약 1.5배로 나타났다. 상관계수는 NASA가 약 0.136, VUA-NASA가 약 0.192로 전체 관측지점 중 가장 낮았다. 주천지점의 경우, 지상관측 토양수분의 평균은 약 0.144m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>, NASA는 0.121m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>로 지상관측치의 평균과 비슷하였으며, VUA-NASA 토양수분의 평균은 0.400m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>으로 관측치 평균의 약 3.3배로 매우 높게 나타났다. 상관계수는 NASA가 약 0.060, VUA-NASA가 약 0.375로 매우 낮았다. 마지막으로 상전지점에서 관측된 토양

수분의 평균은 약 0.278m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>으로 가장 높았으며, NASA 평균은 약 0.112m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>(약 0.4배)으로 관측치에 비해 매우 낮았으며, VUA-NASA 토양수분 평균은 약 0.441m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>으로 관측치 평균의 약 1.6배 높았다.

상승경로에 대한 지상관측 토양수분과 AMSR-E 토양수분의 시계열 비교결과(그림 4, 표 2(b))는 전반적으로 하강경로의 결과와 유사하였으나, NASA 토양수분의 경우 계북2와 주천지점을 제외하고는 미미하지만 상승경로의 상관계수가 더 높으며, 최소제곱근오차는 낮은 것으로 나타났다. VUA-NASA의 경우는 반대로 주천지점을 제외하고 하강경로의 상관계수가 더 높았으며, 최소제곱근오차는 높게 나타났다.

그림 5와 6은 각각 하강경로와 상승경로에 대하여 지상관측 토양수분과 AMSR-E 토양수분자료의 산점도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 VUA-NASA의 AMSR-E 토양수분은 전반적으로 과대 추정되고 있음

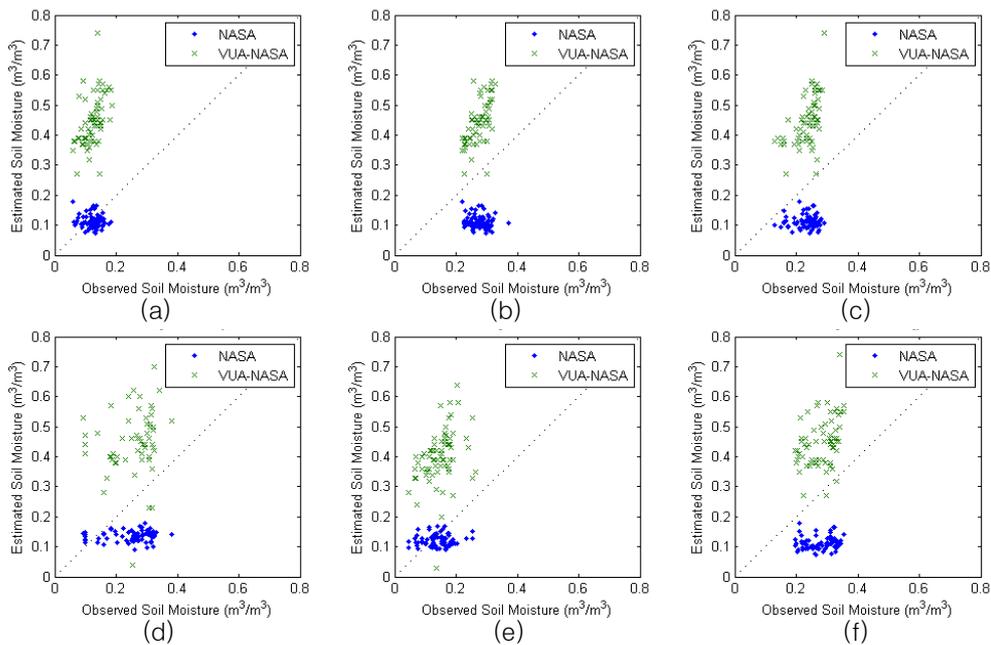


FIGURE 5. 하강경로 토양수분 추정치와 지상관측자료의 산점도  
(a) 안천, (b) 부귀, (c) 천천2, (d) 계북2, (e) 주천, (f) 상전

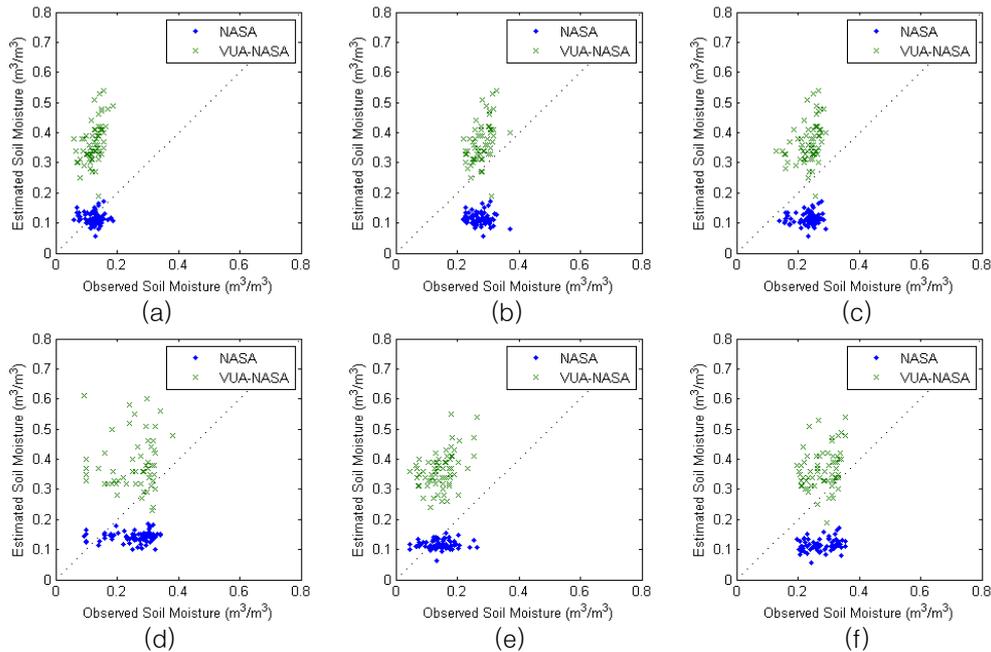


FIGURE 6. 상승경로 토양수분 추정치와 지상관측자료의 산점도  
(a) 안천, (b) 부귀, (c) 천천2, (d) 계북2, (e) 주천, (f) 상전

을 보여주고 있으며, NASA 토양수분의 경우 안천, 계북2, 주천지점의 경우 토양수분이 약  $0.12\text{m}^3/\text{m}^3$  미만의 건조한 조건에서는 비교적 잘 추정되고 있으며, 그 이상의 조건에서는 과소 추정되고 있음을 보여주고 있다. 전반적으로 강수발생에 따른 토양수분의 상승과 무강수 기간 동안의 감소 거동은 VUA-NASA 토양수분 자료가 지상관측자료와 비교적 유사한 거동을 보이거나 전술한 바와 같이 VUA-NASA와 NASA 토양수분 자료 모두 지상자료와는 상당한 편의(bias)가 존재하므로 유역 토양수분 정보로서 활용되기 위해서는 이에 대한 보정이 필요하다.

용담댐 유역 내에 설치된 전체 관측지점(안천, 부귀, 천천2, 계북2, 주천, 상전 등 6개소)의 대상기간동안 토양수분 평균은 약  $0.218\text{m}^3/\text{m}^3$ , 표준편차는 약  $0.043\text{m}^3/\text{m}^3$ 이며, NASA 알고리즘을 적용한 AMSR-E 토양수분 평균은  $0.119\text{m}^3/\text{m}^3$ , 표준편차는 약  $0.020$

$\text{m}^3/\text{m}^3$ , VUA-NASA 토양수분의 평균은  $0.402\text{m}^3/\text{m}^3$ , 표준편차는 약  $0.083\text{m}^3/\text{m}^3$ 로, NASA 알고리즘의 토양수분은 지상관측자료의 약 0.5배로 대체적으로 과소추정하고 있으며, VUA-NASA는 약 1.8배 정도로 과대추정을 하는 것으로 나타났다.

## 결론

본 연구에서는 AMSR-E 센서로 관측된 휘도온도로부터 추정된 토양수분자료의 우리나라 지역에 대한 적용성을 평가하고자, NASA와 VUA-NASA의 토양수분 알고리즘으로 산정된 토양수분자료를 획득하여 용담댐 유역에 설치된 6개 지상관측지점의 토양수분 관측자료와 비교분석하였다. 분석결과, NASA 토양수분의 경우 평균이 지상관측자료의 약 50%로 매우 낮게 나타났으며, 상관계수 또한 매우 낮게 나타났으나, 최소제곱근오차는 오히려 VUA-NASA 토양수분보다 낮게 나타났

TABLE 2. AMSR-E 토양수분 추정치와 지상관측망 자료에 대한 비교결과  
(a) 하강경로

Site	NASA				VUA-NASA			
	N	R	RMSE	MAE	N	R	RMSE	MAE
Ancheon	72	-0.124	0.038	0.032	69	0.489	0.330	0.323
Bugui	72	-0.157	0.168	0.163	69	0.691	0.182	0.172
Cheoncheon2	72	0.017	0.127	0.120	69	0.516	0.223	0.212
Gyebuk2	71	0.069	0.136	0.122	61	0.192	0.228	0.210
Jucheon	72	0.060	0.051	0.043	70	0.375	0.266	0.255
Sangjeon	72	0.097	0.172	0.166	69	0.365	0.183	0.167

※ N : the number of samples, R : correlation coefficient, RMSE : root mean squared error, MAE : mean absolute error

(b) 상승경로

Site	NASA				VUA-NASA			
	N	R	RMSE	MAE	N	R	RMSE	MAE
Ancheon	71	-0.057	0.035	0.029	66	0.486	0.249	0.242
Bugui	71	-0.084	0.164	0.160	66	0.477	0.107	0.094
Cheoncheon2	71	0.101	0.123	0.117	66	0.346	0.146	0.133
Gyebuk2	72	0.049	0.128	0.114	59	0.035	0.174	0.141
Jucheon	72	0.024	0.053	0.043	68	0.426	0.223	0.216
Sangjeon	71	0.195	0.169	0.162	66	0.218	0.111	0.093

다. VUA-NASA의 경우 지상관측 토양수분의 약 1.8배로 높은 토양수분 산정결과를 제시하고 있으며, 상관계수와 최소제곱근오차 모두 NASA보다 높게 나타났다. 이러한 결과의 예상되는 원인으로서는 지상 관측시점과 위성 관측시점과의 불일치, 센서 자체의 기계적 오차, 지상관측망으로부터 대표하는 토양수분 관측심은 약 0~10cm인데 비하여 C-band 기기가 가지는 관측심은 약 1~2cm로 인한 토양수분 대푯값 깊이의 차이, 대기나 식생 등의 영향, 지표면 거칠기 등 다양한 지상조건에 대한 기기의 관측한계, 지상관측망이 대표하는 면적평균값과 AMSR-E 기기의 해상도 불일치 등 매우 다양한 오차의 복합적 원인에 기인한 것으로 판단된다. 그리고 Njoku *et al.*(2003)에 따르면 NASA 토양수분 알고리즘은 오클라호마(Oklahoma)의

Little Washta, 조지아(Georgia)의 Little Liver, 애리조나(Arizona)의 Walnut Gulch, 아이다호(Idaho)의 Reynolds Creek 등의 유역에서 관측된 토양수분자료를 이용하여 보정되었으며, 마찬가지로 VUA-NASA 알고리즘 또한 특정 지역에 맞도록 설계되었기 때문에 우리나라에서 관측된 토양수분자료와 차이가 있다.

현재 위성탐사 토양수분자료와 지상관측망 자료의 상관분석 결과, NASA나 VUA-NASA의 AMSR-E 토양수분자료를 편의보정이나 2차 처리 없이 유역의 토양수분 상태 파악에 직접 사용하기에는 한계가 있음을 보여주었다. 앞서 언급한 바와 같이 기기의 관측심 한계와 NASA나 VUA-NASA 토양수분 알고리즘은 특정 유역의 토양수분자료에 맞도록 개발되어 있기 때문에 우리나라 실정에는

적합하지 않다. 하지만 여러 AMSR-E 알고리즘의 결과를 조합하거나 편의보정, 필터링 등 다양한 후처리를 통하여 보다 유용한 정보로 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 뿐만 아니라 AMSR-E 토양수분 관측자료의 신뢰성과 활용성을 높이기 위해서는 우리나라의 식생피복, 토지이용, 지형특성을 고려할 수 있는 다양한 상황에 대한 토양수분 지상관측망의 구축이 요구되며 이에 기초한 우리나라 지역 특성에 맞는 AMSR-E 토양수분 산정 알고리즘의 개발과 검증이 필요한 실정이다. 수동 마이크로파를 이용한 토양수분에 대한 원격탐사기술은 광범위한 지역에 대해서 지속적으로 정보를 획득할 수 있다는 점에서 매우 유용하며, 현재 관측이 진행되고 있는 SMOS L-band 토양수분자료가 가용해지고 SMAP 등과 같이 새로운 관측자료의 활용성을 극대화하기 위한 국내 연구가 지속적으로 수행되어야 할 것이다. **KAGIS**

## 참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사. 2006. 가뭄관리 정보체계 수립 보고서.
- 국토해양부, 한국수자원공사. 2008. 가뭄정보 시스템(물공급 Guideline 중심으로) 보고서.
- 김광섭, 박한균. 2010. CART기법과 보조자료를 이용한 토양수분 추정. 한국수자원학회논문집 43(7):597-608.
- 김광섭, 이을래. 2004. 신경망기법과 보조자료를 사용한 원격측정 토양수분자료의 Downscaling기법 개발. 한국수자원학회논문집 37(1):21-29.
- 유철상. 1997. 토양수분 연구와 관련한 원격탐사의 이용. 한국수자원학회지 30(1)64-68.
- Choi, M. and J.M. Jacobs. 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* 8:2617-2627.
- Draper, C.S., J.P. Walker, P.J. Steinle, R.A.M. de Jeu and T.R.H. Holmes. 2009. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment* DOI:10.1016/j.rse.2008.11.011.
- Jackson, T.J., M.H. Cosh, R. Bindlish, P.J. Starks, D.D. Bosch, M. Seyfried, D.C. Goodrich, M.S. Moran, and J. Du. 2010. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(12):4256-4272.
- Koike, T., Y. Nakamura, I. KaiHotsu, G. Davva, N. Matsuura, K. Tamagawa and H. Fujii. 2004. Development of an advanced microwave scanning radiometer (AMSR-E) algorithm of soil moisture and vegetation water content. *Annual Journal of Hydraulic Engineering* 48:217-222.
- McCabe, M.F., H. Gao and E.F. Wood. 2005. Evaluation of AMSR-E-derived soil moisture retrievals using ground-based and PSR airborne data during SMEX02. *Journal of Hydrometeorology* 6:864-877.
- Njoku, E.G., and S.K. Chan. 2006. Vegetation and surface roughness effects on AMSR-E land observation. *Remote Sensing of Environment* 100: 190-199.
- Njoku, E.G., T.J. Jackson, V. Lakshmi, T.K. Chan and S.V. Nghiem. 2003. Soil

- moisture retrieval from AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(2):215-229.
- Nolan, M. and D.R. Fatland. 2003. Penetration depth as a DInSAR observable and proxy for soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 41(3):532-537.
- Owe, M., R.A.M. de Jeu and J.P. Walker. 2001. A methodology for surface soil moisture and vegetation optical depth retrieval using the microwave polarization difference index. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39:1643-1654.
- Owe, M., R.A.M. de Jeu and T.R.H. Holmes. 2008. Multi-sensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research Earth Surface* 113. DOI:1029/2007JF000769.
- Sahoo, A.K., P.R. Houser, C. Ferguson, E.F. Wood, P.A. Dirmeyer and M. Kafatos. 2008. Evaluation of AMSR-E soil moisture results using the in-situ data over the Little River Experimental Watershed, Georgia. *Remote Sensing of Environment* 112:3142-3152.
- Wang, L., J. Wen, T. Zhang, Y. Tian, X. Shi, X. Wang, R. Liu, J. Zhang and S. Lu. 2009. Surface soil moisture estimates from AMSR-E observations over an arid area, Northwest China. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, Vol. 6, pp. 1055-1087.

**KAGIS**