

해남 플럭스 타워 지점에서의 Advanced Microwave Scanning Radiometer E 토양수분자료의 검증

허유미 · 최민하[†]

한양대학교 건설환경공학과

Advanced Microwave Scanning Radiometer E Soil Moisture Evaluation for Haenam Flux Monitoring Network Site

Yoomi Hur and Minha Choi[†]

Dept. of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University.

Abstract : In this study, temporal variations of the Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E) soil moisture products were evaluated using ground based measurements from the Haenam flux monitoring network site for two years (2004 and 2006). Even if there were major comparison issues including spatial resolutions, AMSR-E soil moisture production showed a great potential to replicate temporal variability patterns with ground based measurements. Additional intensive validation efforts should be conducted at a variety of field conditions including vegetation type for better utilization of remotely sensed soil moisture and understanding of the land surface-atmosphere interactions in the view of hydrometeorology.

Key Words : Soil moisture, AMSR-E, Temporal Variability, Validation, Remote Sensing

요약 : 본 연구에서는 원격탐사자료인 Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E) 토양수분자료의 시간적 변동성 검증을 위해 해남 플럭스 지점에서 관측된 2년간의 (2004년과 2006년) 토양수분자료를 이용하였다. 지상관측 토양수분자료에 비해 상대적으로 큰 공간해상도를 가진 원격탐사자료 (AMSR-E)는 2년간의 비교/검증에서 지상관측토양수분자료와 시간적 상관성이 있는 것으로 파악되었으며, 차후에 보다 다양한 식생조건과 현장조건에서 심도 있는 검증연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 이를 위해서는 보다 다양한 지역에서 현장측정이 이루어져야할 것으로 사료된다. 이를 통하여 보다 정확한 비교/검증 연구가 수행된다면, 원격탐사 토양수분자료의 활용성을 기대할 수 있으며 또한 수문기상학적 관점에서 지표면-대기의 상호작용에 대한 올바른 이해를 향상시킬 수 있을 것으로 판단된다.

접수일(2010년 11월 30일), 수정일(1차 : 2011년 3월 21일), 게재확정일(2011년 3월 23일).

[†] 교신저자: 최민하(mchoi@hanyang.ac.kr)

1. 서론

토양수분은 토양입자나 공극사이에서 존재하는 수분을 말하며 지표면과 대기에서의 물과 에너지의 교환에 결정적인 역할을 하는 수문기상 인자이다. 토양수분은 증발과 증산을 통하여 대기와 상호작용을 하며 강우에서 유출, 침투, 지면저류를 결정한다 (Pachepsky *et al.*, 2003). 토양 수분의 시공간적 변이에 대한 지역 및 대륙 규모(scale)의 정보는 수문학적 모델링, 정확한 기상 예보, 그리고 홍수 및 가뭄 모니터링에 있어서 매우 중요하다 (Nojku *et al.*, 2003).

그럼에도 불구하고 우리나라의 경우 토양 수분에 관한 현장 관측은 드물게 이루어지고 있는 것이 현실이다. 통상적인 현장 관측기기로는 Time Domain Reflectometry (TDR) 과 Frequency Domain Reflectometry (FDR) 이 있는데 두 가지 모두 토양 속의 유전상수를 측정함으로써 토양수분을 측정한다. 하지만 이러한 현장관측은 조밀하지 못한 관측망으로 인하여 공간적으로 대표적인 토양수분을 제공하는데 한계가 있다 (Choi and Jacobs, 2007). 최근 들어, 위성과 항공관측 기술의 발달로 인하여 대규모 지역에서 토양수분이 관측되어 오고 있으며 특히, 2002년에 발사된 Aqua 위성에 탑재된 Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E) 복사계를 이용하여 5-50 km 격자스케일에서 일단위의 토양수분이 관측되어지고 있다 (Njoku *et al.*, 2003). AMSR-E 복사계는 인공위성에서 다양한 식생피복 조건하에서 토양수분을 측정하기 위한 현존하는 가장 유용한 기기로서 수동마이크로웨이브 관측시스템에서 지표면의 밝기온도 (Brightness Temperature, Tb)을 측정하여 토양수분 복원알고리즘 (Retrieval Algorithm)에 의해 체적 토양수분을 제공하고 있다 (Jackson *et al.*, 1995, 1999). AMSR-E 복사계는 극초단파 복사계로서 기상조건에 관계없이 6개의 주파수 (6.9 GHz - 89.0 GHz)를 이용하여 12개의 채널에서 Tb 를 관측한다.

이러한 AMSR-E 관측시스템에서 제공하는 토양수분은 많은 이점을 가지고 있으나, 5-50 km 의 비교적 큰 공간해상도로 인해 공간적인 변동성이 높은 토양수분의 특성을 나타내는데 어느 정도의 한계점을 가지고 있으며, 지표하 2 cm 깊이까지 관측되는 한계점 또한

가지고 있다. Njoku *et al.* (2005)은 Radio Frequency Interference (RFI) 에 의해 6.9 GHz (C band)에서 관측된 토양수분자료가 미국, 일본 지에서 부정확함을 보고하였고 10.7 GHz (X band)에 의해서도 일부지역 (영국, 이태리, 일본)에서 부정확성을 나타냄을 보고하였다. 이와 같은 한계점으로 인해 AMSR-E 토양수분의 정확성을 평가하기 위한 복원 알고리즘의 검증 및 개선에 관한 연구는 전 세계적으로 활발히 진행되어 오고 있다. 그 결과 최근에 수행된 많은 선행연구에서 AMSR-E 토양수분이 관측토양수분과 더불어 모형에서의 토양수분과 함께 상당한 수준의 정확성을 가지는 것으로 나타났다 (Choi *et al.*, 2008; Choi and Jacobs; 2008, Gruhier *et al.*, 2008). 하지만 이러한 검증연구가 한국에서는 전무한 실정이며 이의 활용성에 대한 수문학적인 접근도 거의 전무한 실정이다. 이에 본 연구에서는 해남 플릭스 타워에서 관측된 2004년과 2006년의 토양수분 자료를 이용하여 AMSR-E 토양수분 측정자료를 검증하였다.

2. 연구방법 및 절차

1) 연구지역

AMSR-E 검증을 위한 토양수분 관측 연구지역은 전라남도 해남군 해남 기상관측소에 위치한 플릭스 지점 (34° 33' 18" N, 126° 34' 17" E)이며 중부 및 남서부는 분지형 농경지로 주 농작물은 벼, 보리등 주로 혼합적인 농경지 형태를 띤다 (Choi *et al.*, 2010; Kwon *et al.*, 2009). 연평균 강우량은 900-1700 mm 이며 주로 여름 기간에 대부분의 강우가 집중된다. 이 지역의 대표적인 토양통은 가곡(Fine Silty, Aeric Endoaquepts)으로 배수는 약간 불량하고 투수성은 양호하거나 약간 느리다 (National Institute of Agricultural Science and Technology, 2000). 표토의 토성은 주로 미사질 양토로 이루어져 있으며 (Lee *et al.*, 2003) 입단의 크기별로 38.5%의 모래, 31.5%의 미사, 그리고 30%의 점토로 구성되어 있다 (Choi *et al.*, 2010). 해남지역의 에디 공분산 측정은 20 m에서 이루어지며 초음파 풍향·풍속계를 이용하여 측정되고 고속반응 적외선 기체 분

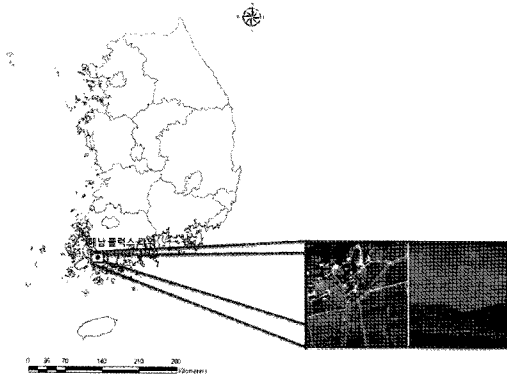


Fig. 1. Haenam Flux Monitoring Network Site

석을 통하여 잠열플럭스, 이산화탄소와 수증기의 농도가 측정 된다 (Choi *et al.*, 2010). 에디 공분산 자료 이외에도 복사, 온도, 습도, 토양온도, 토양수분과 같은 기본적인 기상변수가 측정된다. 토양수분은 토양수분 측정기인 Water Content Reflectometer (Model CS616, Campbell Scientific Inc.)를 사용하여 관측되고 있다. 관측기는 30 cm 의 긴 막대를 사용하여 지표면 아래 평균 토양 절연성 및 유전성을 측정하며 Calibration 방법에 따라 $\pm 2.5\%$ 의 정확도로 수분체적을 제공한다. 측정기에 대한 보다 상세한 정보는 <http://www.campbellsci.com> 에서 찾을 수 있다. 본 연구에서는 0 - 10 cm 깊이에서 관측된 토양수분을 이용하였다.

2) Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E)

2002년 5월 미국 캘리포니아주에서 발사된 Aqua 위성에 탑재된 최첨단 수동 마이크로웨이브 복사계인 Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E)는 6개의 다른 주파수에서 (6.9 GHz - 89.0 GHz) 밝기온도(Brightness Temperature, Tb) 를 측정한다 (Fig. 2). 6개의 주파수중 6.9 GHz (C band)와 10.7 GHz (X band)가 가장 유용하게 사용되어지는 주파수로서 토양수분 복원알고리즘 (Retrieval Algorithm)에 의해 지표면 토양수분자료를 제공하고 있다 (Njoku *et al.*, 2003). AMSR-E 토양수분 자료는

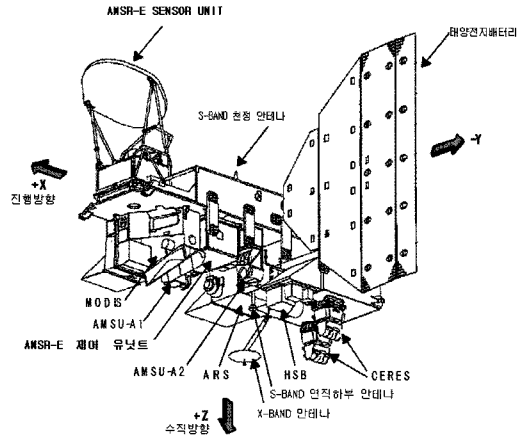


Fig. 2. Aqua Spacecraft (Citation : AMSR-E Data Users Handbook, 2006)

5-50 km 공간해상도를 나타내며 일 단위 토양수분 (Ascending 1:30 pm, Descending 1:30 am local time)자료를 제공하고 있다. AMSR-E 제원에 대한 자세한 사항은 Table 1에 표기되어 있다. 본 연구에서는 National Snow and Ice Data Centre (NSIDC) 와 land parameter retrieval model products by NASA and Vrije Universiteit Amsterdam (VUA)에서 제공하고 있는 두 가지의 AMSR-E 토양수분 자료 (Ascending node)를 이용하였다 (Njoku *et al.*, 2003).

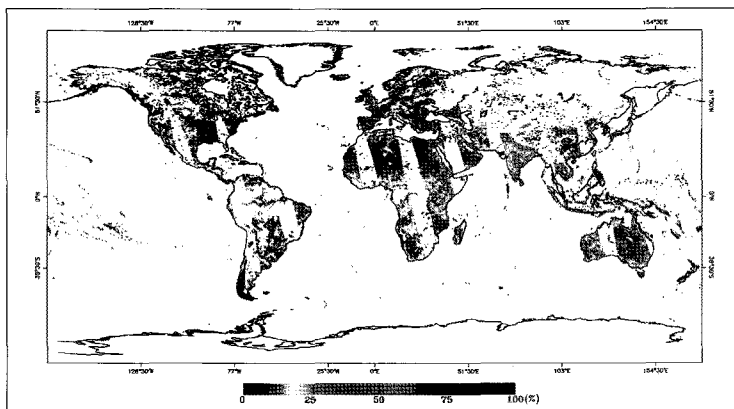
토양수분 복원알고리즘 (Retrieval Algorithm)은 관측 Tb와 계산 Tb를 상호 비교하는 마이크로웨이브 전도알고리즘을 사용하는 반복 다중채널 역방향 알고리즘에 근거하고 있다 (Njoku *et al.*, 2003). Tb는 주로 토양 및 식생에 포함되어 있는 수분함량과 지표면 온도에 영향을 받으며, 균질한 식생-토양층에서의 Tb는 다음 식에 의해 산정된다.

$$\begin{aligned}
 T_{BP} &= T_S [e_{sp} \exp(-\tau) + (1 - \omega_p) [1 - \exp(-\tau)] \\
 &\quad [1 + r_p \exp(-\tau)]] \quad (1) \\
 &= T_S [(1 - r_p) \exp(-\tau) + T_c (1 - \omega_p) [1 - \exp(-\tau)] \\
 &\quad [1 + r_p \exp(-\tau)]]
 \end{aligned}$$

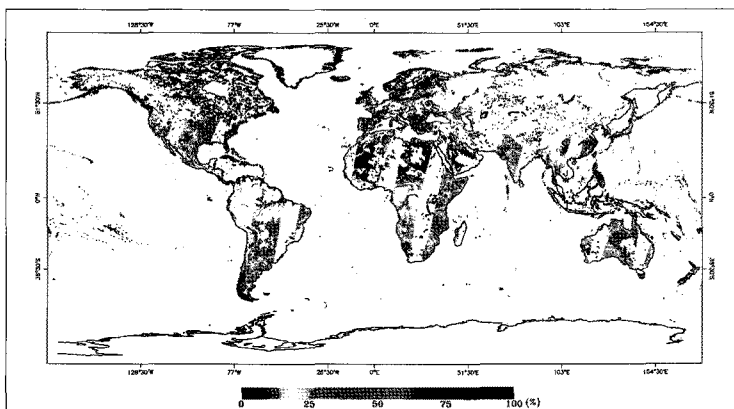
이 식은 X-band로부터 식생과 경지의 빈도에서 마이크로파의 방사율이 연구되어 사용되고 있으며, 여기서 T_S 는 지표면 온도, $e_{sp}(= 1 - r_p)$ 는 토양의 방사율이며, r_p 는 지표토양반사도, τ 는 식생불투명도, T_c 는 식생 온도, ω_p 는 식생분산알베도이다. X-band에 따르면, 식생의 특징 (크기, 모양, 잎과 줄기의 구성 요소)가 ω_p 와

Table 1. Characteristics of the AMSE-E

Items	Characteristics					
	Observation Frequency	6.925GHz	10.65GHz	18.7GHz	23.8GHz	36.5GHz
spatial Resolution	50km		25km		15km	5km
Band Width	350MHz	100MHz	200MHz	400MHz	1000MHz	3000MHz
Polarization	Horizontal and Vertical					
Incident Angle	55°					54.5°
Cross polarization	less than -20dB					
Swath Width	more than 1,450km					
Dynamic Range	2.7-340K					
Precision	1K(1) as target					
Sensitivity	0.34K	0.7K	0.7K	0.6K	0.7K	1.2K
Quantifying Bit Number	12 bit	10bit				
Data Rate	87.392Kbps					
Electric Power	350 ± 35W					
Weight	324 ± 15kg					
Size	Antenna Unit	1.95 × 1.7 × 2.4m				
	Control Unit	0.8 × 1.0 × 0.6m				



(a)



(b)

Fig. 3. VUA AMSR-E soil moisture map on January 2, 2006 (a)Ascending (b)Descending nodes.

τ 에 영향을 주고 있다.

$$\tau = b \cdot VWC / \cos\theta \quad (2)$$

b 는 식생함수(서로 다른 식생 요소)이며, VWC 는 식생에 포함되어 있는 수분함량, 그리고 θ 는 입사각이다. 다음과 같이 지표토양반사도(r_p)의 산정에 있어 표의 상태에 따른 영향을 고려하기 위해 Wang 과 Choudhury (1981)에 의해 제안된 반-경험식이 사용되어진다.

$$r_p = [Qr_v + (1 - rh)] \exp(-h) \quad (3)$$

여기서 Q 는 복합편광에 관한 인자이며 r_v 와 rh 는 수직방향과 수평방향에서의 편광반사에 관한 인자이다. 또한 h 는 식생에 관련하는 인자이다. 이처럼 AMSR-E는 토양수분 복원알고리즘에 기인하는데, NSIDC AMSR-E 토양수분의 경우 RFI로 인하여 현재는 10.7 GHz (X band)에서만 토양수분의 산정이 이루어지는 반면, VUA AMSR-E 토양수분은 두 가지 밴드 즉, 6.9 GHz (C band)와 10.7 GHz (X band)에서 토양수분이 산정된다. 이와 같은 토양수분 복원알고리즘에 의해 산정된 2006년 1월 2일에 해당하는 AMSR-E 토양수분 (Ascending and Descending nodes)의 공간적인 분포는 Fig. 3에 나타나 있다.

3) 원격탐사 자료의 비교 및 검증

본 연구에서는 AMSR-E 토양수분자료에 대한 평가를 해남 플러스 지점에서 관측된 2004년과 2006년 토양수분 자료를 이용하여 실시하였다. 현장 관측 자료는 AMSR-E Ascending node와 동일한 시간대인 1:30 pm의 자료를 추출하였다. 원격탐사자료인 AMSR-E 토양수분과 현장 관측 자료와의 근본적인 차이점은 다음과 같다. 1) AMSR-E 토양수분 자료는 지표 하 2 cm에서 관측되었으며 현장 관측 자료는 0-10 cm에서 관측된 자료이다. 2) AMSR-E 토양수분 자료의 공간해상도는 5-50 km 인데 반하여 현장 관측 자료는 지점에서 관측되었다. 이와 같은 두 가지 차이점으로 인하여 토양수분의 정량적인 비교에는 어느 정도의 한계를 가진다고 할 수 있다. 이와 같은 절대적인 비교의 한계를 벗어나기 위해 정규 편차 (Normalized anomaly)를 계산하여 비교하였다.

정규 편차는 평균토양수분에서 토양수분의 표준편차를 나누어서 계산하였다 (Gruhier *et al.*, 2008). 뚜렷한

계절성을 나타내는 우리나라의 몬순기후를 고려하여 연구기간을 1, 2, 3월 (JFM), 4, 5, 6월 (AMJ), 7, 8, 9월 (JAS), 그리고 10, 11, 12월 (OND)로 나누어서 비교를 실시하였다.

3. 결과

Fig. 4는 AMSR-E 토양수분을 2006년 현장 관측 자료와 비교한 것으로서 현장 관측 자료는 강우사상에 대해 증가·감소 현상을 잘 나타내고 있는 것으로 파악된다. NSIDC AMSR-E 토양수분의 경우 전 기간에 걸쳐 매우 작은 시간 변동성을 나타내어 현장관측 자료의 증감현상과 비교적 큰 오차가 존재하는 것으로 파악되었는데, 이와 같은 현상은 다른 지역에서 이루어진 선행 연구에서도 발견되었다 (Choi *et al.*, 2008; Choi and Jacobs, 2008; Gruhier *et al.*, 2008). 이와는 대조적으로, VUA AMSR-E 토양수분의 경우 비교적 높은 시간 변동성을 나타내었다. 특히 봄과 겨울철에 비교적 높은 시간 변동성과 정량적인 값을 나타내었다. 이와 같이 비교적 추운기간에 토양의 물리적인 범위를 벗어나는 값을 나타내는 이유는 토양이 동결되어 있는 기간에 반사계수의 증가로 인해 부정확한 토양수분값을 산정하는 것으로 사료된다. 하지만, 전 기간에 걸쳐 NSIDC AMSR-E 토양수분보다 작은 오차값을 나타내었다 (Table 2).

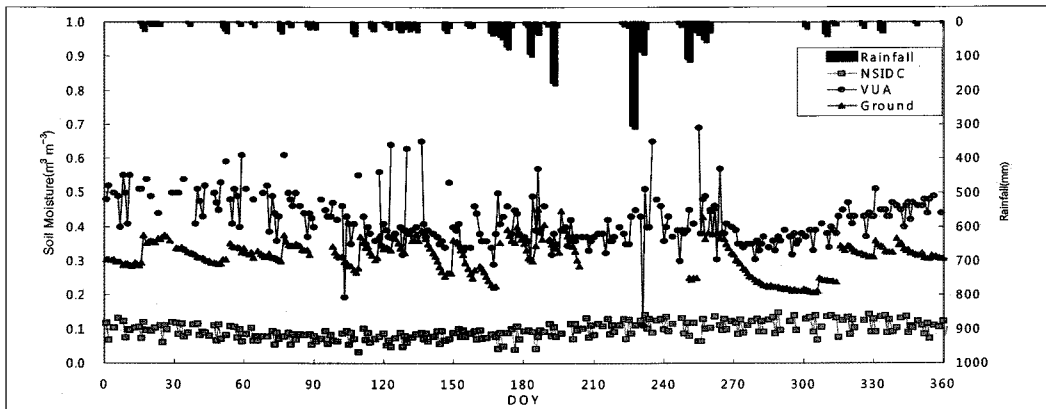
토양수분 자료의 보다 정확한 검증을 위해 정규 편차 (Normalized anomaly)를 계산하였으며 Fig. 5에 나타내었다. 토양수분 자체의 비교시보다 높은 일치성을 나타낼 수 있는데, NSIDC AMSR-E 토양수분의 경우 상당한 수준으로 오차가 향상되었음 (Bias = 0.06 m^3/m^3)을 알 수 있다 (Table 3). 하지만 VUA AMSR-E 토양수분의 경우는 오차의 향상성은 없는 것으로 파악되었다. Fig. 6을 보면 VUA AMSR-E 토양수분이 현장 관측 자료와의 상관성이 높은 것을 파악할 수 있다.

전반적으로 AMSR-E 토양수분은 여러 선행연구에서 제안된 허용 오차범위 (5% 토양수분)에서 현장관측 토양수분과 상관성이 높은 시간적 변동성을 가진다고 할 수 있다. NSIDC AMSR-E 토양수분의 경우 매우 작

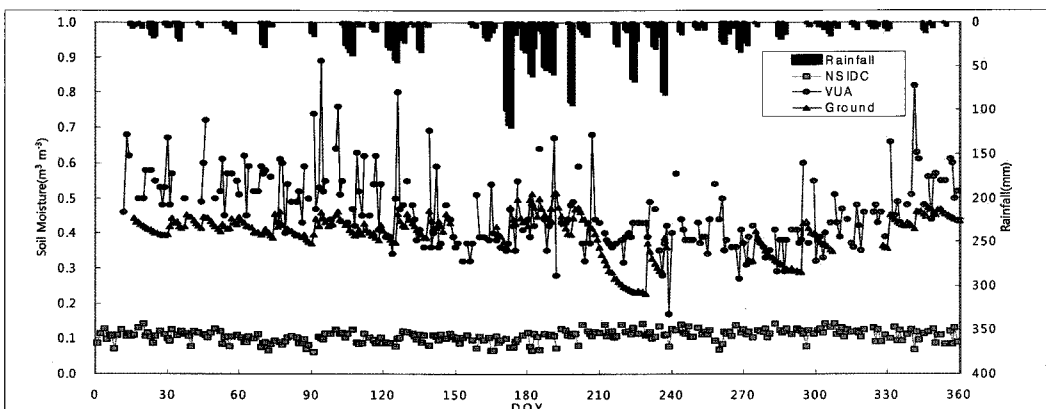
Table 2. Error estimation of AMSR-E soil moisture products [m³/m³] at Haenam flux monitoring network site

1 January 2004 to 31 December 2004							
NSIDC				VUA			
Period	RMSE	BIAS	r	Period	RMSE	BIAS	r
Full	0.23	0.22	-0.15	Full	0.13	-0.11	0.35
JFM	0.23	0.23	0.02	JFM	0.17	-0.16	0.03
AMJ	0.25	0.25	0.11	AMJ	0.11	-0.08	0.35
JAS	0.24	0.25	0.08	JAS	0.08	-0.05	0.36
OND	0.18	0.17	-0.11	OND	0.13	-0.13	0.80

1 January 2006 to 31 December 2006							
NSIDC				VUA			
Period	RMSE	BIAS	r	Period	RMSE	BIAS	r
Full	0.30	0.30	-0.33	Full	0.12	-0.08	0.46
JFM	0.32	0.32	0.30	JFM	0.14	-0.12	0.30
AMJ	0.32	0.32	0.10	AMJ	0.13	-0.07	0.38
JAS	0.27	0.26	-0.49	JAS	0.11	-0.06	0.38
OND	0.29	0.28	-0.36	OND	0.10	-0.07	0.68



(a) 1 January 2004 to 31 December 2004



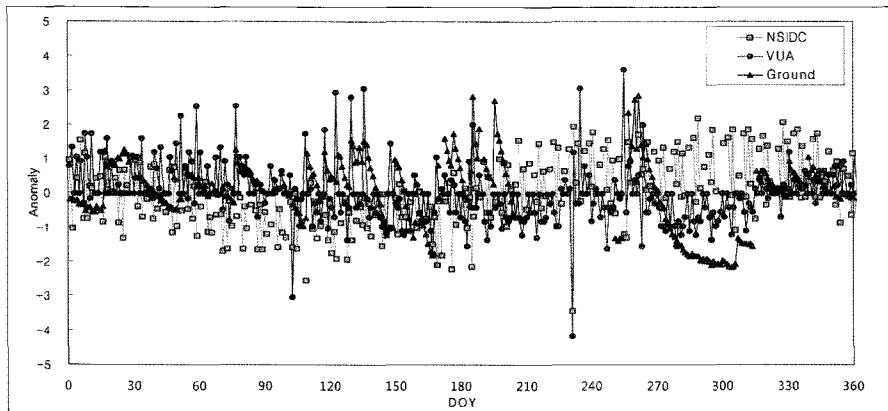
(b) 1 January 2006 to 31 December 2006

Fig. 4. Time series of different soil moisture products at Haenam flux monitoring network site

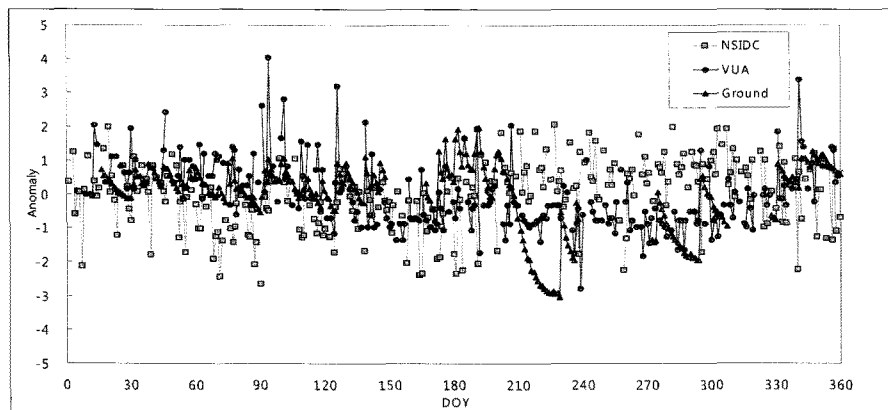
Table 3. Error estimation of normalized anomaly of soil moisture products from AMSR-E soil moisture products[m³/m³] at Haenam flux monitoring network site

1 January 2004 to 31 December 2004							
NSIDC				VUA			
Period	RMSE	BIAS	r	Period	RMSE	BIAS	r
Full	1.50	0.07	-0.15	Full	1.15	-0.04	0.35
JFM	1.00	0.04	0.02	JFM	1.11	-0.70	0.03
AMJ	1.41	0.93	0.11	AMJ	1.20	0.42	0.35
JAS	1.50	0.57	0.08	JAS	1.55	1.06	0.36
OND	1.94	-1.36	-0.11	OND	0.83	-0.53	0.80

1 January 2006 to 31 December 2006							
NSIDC				VUA			
Period	RMSE	BIAS	r	Period	RMSE	BIAS	r
Full	1.62	0.06	-0.33	Full	1.07	-0.15	0.46
JFM	1.08	0.61	0.30	JFM	0.77	-0.49	0.30
AMJ	1.19	0.77	0.10	AMJ	1.08	0.12	0.38
JAS	2.37	-0.88	-0.49	JAS	1.49	-0.23	0.38
OND	1.69	-0.50	-0.36	OND	0.82	-0.10	0.68



(a) 1 January 2004 to 31 December 2004



(b) 1 January 2006 to 31 December 2006

Fig. 5. Time series of normalized anomaly of the different soil moisture products at Haenam flux monitoring network site

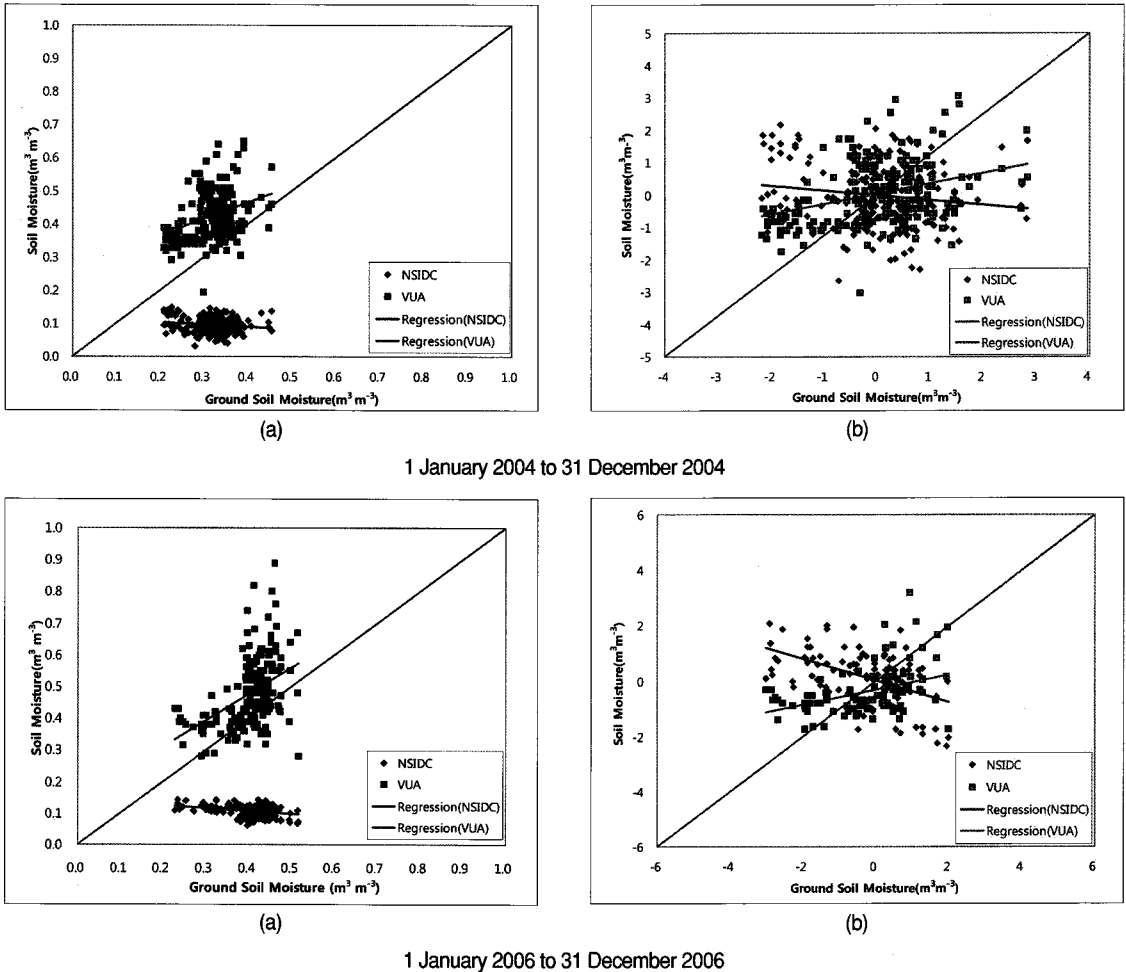


Fig. 6. Soil moisture comparison between ground based measurements and NSIDC AMSR-E and between ground based measurements and VUA AMSR-E at Haenam flux monitoring network site. Note that soil moisture products (a) and normalized anomaly of soil moisture products (b)

은 시간적 변동성을 가지는데 이는 기존의 선행연구에서 제안된 간단한 Bias Reduction 기법 (Choi 와 Jacobs, 2008)을 이용하면 효과적으로 향상될 수 있을 것으로 판단된다. VUA AMSR-E 토양수분의 경우 봄과 겨울기간에 상대적으로 큰 오차를 나타낼 수 있는데 여름기간, 즉 경작시기에는 양호한 시간적 변동성을 나타내는 것으로 파악된다.

4. 결론

본 연구에서는 아직 국내에서 사용되지 않은 인공위성 영상자료인 AMSR-E 토양수분 자료 중, NCIDC와

VUA 알고리즘을 통해 복원된 자료를 해남 플릭스 지점에서 관측된 실측자료와 비교 검증하여 시간적 변동성을 파악하였다. 그 결과 VUA 가 NCIDC 토양수분 자료에 비해 작은 오차값을 나타내었으며, NCIDC 토양수분 자료 또한 정규 편차 방법을 적용하여 상당한 수준으로 오차를 줄일 수 있음을 확인하였다. 전반적으로 이번 연구를 통하여, AMSR-E 토양수분이 현장 관측 자료와의 비교에서 몇 가지 점을 제외하고는 상관성을 가지는 것으로 파악된다. 우리나라의 기후 및 식생, 지형등의 인자가 아직 두 알고리즘에 충분히 반영되지 않았으므로 절대적인 관점에서의 비교에는 무리가 따르지만, 강우 사상에 대한 반응을 포함한 시간적인 변동성에서 AMSR-E 자료는 현장관측이 이루어지지 않는 대부분

의 구역에서의 현장 관측 자료를 대신할 수 있을 것으로 사료된다. 다만 복원 알고리즘에 따른 오차를 줄이기 위하여 정규 편차 방법과 같은 기법들을 찾아내어 적용하는 한편, 다양한 식생조건, 구역조건을 가진 여러 지점에서 보다 심도 깊은 검증연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(2011-0005005)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Japan Aerospace Exploration Agency (JAXA), 2006. AMSR-E Data Users Handbook
- Choi, M., S. Lee, and H. Kwon, 2010. Understanding of Common Land Model (CLM) performance for water and energy fluxes in farmland during a growing season in Korea, *Hydrological Processes*, 24:1063-1071.
- Choi, M., and J. M. Jacobs, 2007. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints, *Advances in Water Resources*, 30(4):883-896.
- Choi, M., J. M. Jacobs, and D. D. Bosch, 2008. Remote sensing observatory validation of surface soil moisture using Advanced Microwave Scanning Radiometer E, Common Land Model, and ground based data: Case study in SMEX03 Little River Region, Georgia, U.S., *Water Resources Research*, 44:W08421, DOI: 10.1029/2006WR005578.
- Choi, M., and J. M. Jacobs, 2008. Temporal variability correction for Advanced Microwave Scanning Radiometer E (AMSR-E) surface soil moisture in Little River Region, Georgia, U.S., *Sensors Journal*, 8:2617-2627.
- Gruhier, C., P. De Rosnay, Y. Kerr, E. Mougin, E. Ceschia, and J.-C. Calvet, 2008. Evaluation of AMSR-E soil moisture product based on ground measurements over temperate and semi-arid regions, *Geophysical Research Letters*, 35:L10405, doi:10.1029/2008GL033330
- Jackson, T. J., D. M. Le Vine, C. T. Swift, A. Y. A. Hsu, C. Oldak, T. Swift, J. Isham, and M. Haken, 1999. Soil moisture mapping at Regional Scales using microwave radiometry: The Southern Great Plains Hydrology Experiment, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing of Environment*, 37(5):2136-2151.
- Jackson, T. J., D. M. Le Vine, C. T. Swift, T. J. Schmugge, and F. R. Schiebe, 1995. Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita'92, *Remote Sensing of Environment*, 53:27-37.
- Kwon H., T. Y. Park, J. Hong, J. H. Lim, and J. Kim, 2009. Seasonality of Net Ecosystem Carbon Exchange in Two Major Plant Functional Types in Korea, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 45(2):149-163.
- Lee, H. C., J. Hong, C.-H. Cho, B.-C. Choi, S.-N. Oh, and J. Kim, 2003. Surface Exchange of Energy and Carbon Dioxide between the Atmosphere and a Farmland in Haenam, Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology*, 5(2):61-69.
- National Institute of Agricultural Science and Technology, 2000. Taxonomical Classification of Korean Soils. Rural Development Administration, Publication No. 11-1390093-000049-01.
- Njoku, E. G., T. J. Jackson, V. Lakshmi, Tsz K. Chan, and S. V. Nghiem, 2003. Soil Moisture Retrieval From AMSR-E. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41: 215-229.

Njoku, E. G., P. Ashcroft, Tsz K. Chan, and L. Li, 2005. Global Survey and Statistics of Radio-Frequency Interference in AMSR-E Land Observations, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43:938-947.

Pachepsky, Y., D. Radcliffe, and H. Selim, 2003.

Scaling methods in Soil Physics, CRC press.

Wang, J. R., and B. J. Choudhury, 1981. Remote sensing of soil moisture content over a bare field at 1.4GHZ frequency, *Journal of Geophysical Research*, 86(C6):5277-5280.