



다중선형 회귀모형과 천리안 지면온도를 활용한 토양수분 산정 연구

Estimation of Soil Moisture Using Multiple Linear Regression Model and COMS Land Surface Temperature Data

이용관* · 정충길* · 조영현** · 김성준*[†]

Lee, Yong Gwan · Jung, Chung Gil · Cho, Young Hyun · Kim, Seong Joon

Abstract

This study is to estimate the spatial soil moisture using multiple linear regression model (MLRM) and 15 minutes interval Land Surface Temperature (LST) data of Communication, Ocean and Meteorological Satellite (COMS). For the modeling, the input data of COMS LST, Terra MODIS Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), daily rainfall and sunshine hour were considered and prepared. Using the observed soil moisture data at 9 stations of Automated Agriculture Observing System (AAOS) from January 2013 to May 2015, the MLRMs were developed by twelve scenarios of input components combination. The model results showed that the correlation between observed and modelled soil moisture increased when using antecedent rainfalls before the soil moisture simulation day. In addition, the correlation increased more when the model coefficients were evaluated by seasonal base. This was from the reverse correlation between MODIS NDVI and soil moisture in spring and autumn season.

Keywords: Soil moisture; multiple linear regression model; COMS; land surface temperature; Terra MODIS

1. 서 론

지구온난화에 의한 기온상승, 강수일수의 감소와 강수량의 규모 및 패턴의 변화는 유출량의 변화와 증발산량의 증가의 원인이 되며 이로 인해 토양수분의 변화가 예상된다. IPCC 4차 보고서 (IPCC, 2007)에 따르면, 지구온난화로 인해 지난 100년 (1906~2005) 동안 전 세계 평균 기온은 약 0.74 °C 상승하였으며, 이러한 추세는 1990년 이후 더욱 급속해져 지금도 진행 중인 것으로 보고되고 있으며, 향후에도 지속적으로 진행되고 가속화 될 것으로 판단된다. 이러한 변화는 궁극적으로 수문순환의 변화에 큰 영향을 미치게 되며 효과적인 수자원의 활용을 위해서는 이러한 수문순환의 변화에 대한 정확한 파악이 필수적이다 (Ahn et al., 2009).

물 순환 구조에서 토양수분이 차지하는 정량적인 비중은 작음에도 불구하고, 강수의 침투, 유출, 증발산 등의 지표와 대기 사이의 질량과 에너지에 관한 분포와 이동에 관여하는 중요한

요소로 각각의 상호작용에 의해 수자원 및 수문순환에 직접적인 영향을 미치며 관련 연구가 진행되어 왔다 (Aubert et al., 2003; Qiu et al., 2003; Zribi et al., 2005). 지상관측을 통한 토양수분 측정 방법은 중량측정법, 원자력방법, 시간영역반사계 (Time Domain Reflectometry, TDR) 방법, 토양수분장력측정법 등이 있다. 국내에서는 농업기상정보시스템 (<http://weather.rda.go.kr>)을 통해 토양수분 지상 관측 자료를 제공하고 있으나, 관측기간이 짧고 보유한 관측 자료 역시 장비 노후화로 인해 결측된 지점이 많아 신뢰할 수 있는 토양수분 관측 자료가 부족한 실정이며, 이를 이용한 한반도 전체의 토양수분 변화를 분석하기에도 매우 비효율적이다 (Park and Kim, 2011).

최근에는 지상관측 자료의 공간적인 한계를 극복하기 위해 원격탐사 기술을 활용한 공간적인 스케일의 토양수분 관측에 관련된 연구가 수행되고 있으며, 특히 MODIS와 같은 궤도 위성을 활용한 연구가 다양하게 이루어지고 있다. Farrar et al. (1994)과 Narasimhan et al. (2005)은 NDVI와 토양수분의 상관성을 분석한바 있으며, Hutchinson et al. (2006)은 MODIS NDVI와 LST를 이용해 연속적인 토양수분 분포도를 작성하였다. Hong et al. (2009)는 충주댐 유역을 대상으로 SWAT 모형을 통해 모의한 토양수분과 MODIS NDVI와의 상관성을 분석하였으며, Park et al. (2014)은 소양강댐을 대상으로 SWAT 모형의 모의 토양수분과 MODIS NDVI, LST와의 상관성을 분석하여 제시하였다. 또한 몇몇 알고리즘은 AMSR-E와 WindSat 위성 자료를 활용해 토양수분 추정

* Konkuk university, Department of Civil, Environmental and Plant Engineering

** Hydrometeorological Cooperation Center, K-water

† Corresponding author

Tel.: +82-2-444-0186 Fax: +82-2-444-0186

E-mail: kimsj@konkuk.ac.kr

Received: April 7, 2016

Revised: September 27, 2016

Accepted: October 11, 2016

위한 방법을 제시하였다 (Jackson et al., 2004; Owe et al., 2008; Li et al., 2010). 이러한 알고리즘은 다양한 종류의 관측 자료와 방법을 활용해 유효성을 평가받은 바 있다 (Wagner et al., 2007; Draper et al., 2009; Jackson et al., 2010; Crow et al., 2010; Li et al., 2010). 이러한 알고리즘에서 LST는 토양수분 추정을 위한 필수적인 입력 자료로 고려되었다. 특히, Holmes et al. (2009) 및 Wang et al. (2010)은 LST와 토양수분과의 선형적인 관계성에 기초해 토양수분 추정을 한 바 있다 (Kim and Park, 2010; Parinussa et al., 2011). 선행 연구에 활용된 이러한 궤도 위성은 전 지구적 변화를 관측하기에는 용이하나 일관된 시간해상도로 인해 한 지역에서의 시간적 변화에 대한 관측에는 제한이 있다 (Lee et al., 2016).

정지궤도 위성은 일정한 위치에서 고도를 유지하며 관측하는 위성으로 특정 지역의 변화 양상을 관측하기에 용이한 위성이다. 따라서 정지궤도 위성을 활용하여 공간 토양수분 모의에 적용할 경우 궤도 위성 자료를 활용한 토양수분 모의보다 시간적 변동성에 대한 고려가 가능하여 보다 상세한 시간해상도의 토양수분을 모의할 수 있다. 이에 앞서 본 연구에서는 정지궤도 위성 자료의 적용성을 검토하기 위해, 토양수분 산정에 주요한 입력 자료인 LST를 우리나라의 대표적인 정지궤도 위성인 천리안 위성 (COMS)의 자료를 이용해 지상 관측지점에서의 토양수분을 다중선형회귀모형을 활용해 모의하기 위한 회귀식의 개발을 검토하였다. 그러나 천리안 위성의 경우 탑재한 센서에 근적외 파장역이 제외되어 토양수분과의 상관성이 높은 식생 관련 인자를 생산할 수 없다. 따라서 식생지수는 MODIS 위성의 NDVI 자료를 구축하여 대신 하였으며, 지상 기상관측자료를 활용해 2013년 1월부터 2015년 5월까지의 토양수분을 모의하고 수립된 회귀식의 적용성을 평가하였다.

II. 재료 및 방법

본 연구는 지점별 토양수분 산정을 위해 위성 자료로는 천리안 위성, Terra MODIS 위성자료를 구축하였고, 기상 자료로 기상청 농업기상관측관서에서 제공하는 11개 지점의 강우, 일조시간 자료를 구축하여 활용하였다. 위성 자료는 두 위성의 공간해상도의 일치를 위해 Terra MODIS 위성 자료를 천리안 위성의 4 km 공간해상도에 맞게 resample 하였다. 또한 농업기상관측관서 동일 지점의 토양수분 실측자료를 구축하여 회귀식을 산정하였으며, 모든 자료는 2013년 1월부터 2015년 5월까지 구축하여 활용하였다 (Fig. 1).

1. 위성 자료

천리안 위성 (COMS)은 국가우주개발중장기계획에 따라 2003년에 사업을 시작하여 2010년 6월 27일에 발사된 우리나라의 최초의 정지궤도복합위성이다. 이 위성은 기상관측, 해양관측, 통신서비스 임무를 수행하며 지구적도 상공 36000 km 고도, 동경 128.2도에 위치하고 있다. COMS에 탑재된 기상센서 (Meteo Imager, MI)는 시공간적인 고해상도 관측을 통해 기상현상을 연속적으로 감시하고 기상요소를 산출하며, 기본성능은 미국의 GOES 8-13호, 일본의 MTSAT-2에도 탑재되어 있는 센서와 동일하다. MI에는 하나의 가시 채널과 4개의 적외 채널 (단파적외, 수증기, 적외1, 적외2 채널)이 존재하는데, 가시채널의 공간해상도는 $1 \times 1 \text{ km}^2$, 적외채널의 공간해상도는 $4 \times 4 \text{ km}^2$ 이며, 전구관측의 경우 27분, 북반구관측의 경우 15분 이내의 시간간격을 가지고 관측을 수행하며 시공간적으로 양질의 데이터를 취득할 수 있다 (Kim et al., 2014).

COMS에서는 지표면온도 산출 방법 중 대기에 의한 흡수

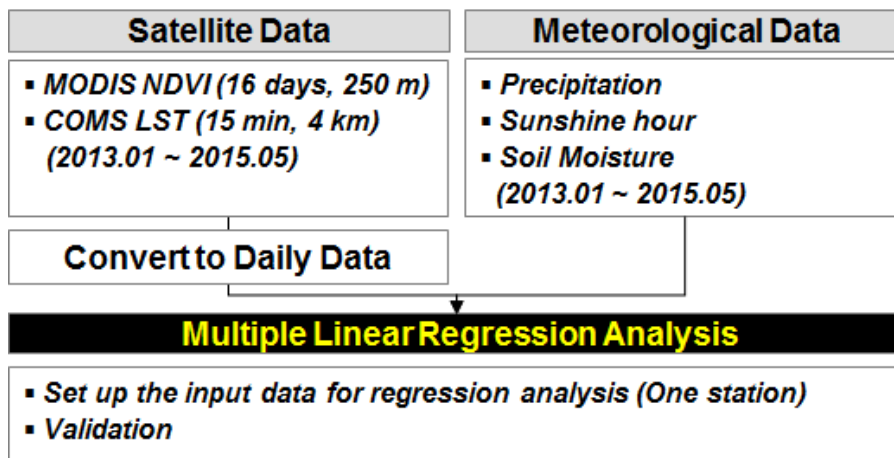


Fig. 1 Flow chart of the study

효과가 상이한 두 파장역 (10.8 μm , 12.0 μm)을 이용하여 대기 효과를 보정해주는 분리대기창 (Generalized Split-Window, GSW) 방법을 이용한다. 두 파장역의 방출율을 계산하기 위해서는 실시간으로 식생지수 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)의 산정이 필요하나 COMS의 탑재 채널 중 VIS2 (0.72~1.10 μm) 파장역이 제외됨에 따라 식생 지수의 실시간 산정이 불가능하다. 따라서 이를 다른 위성용 통해 산정하여, 각 밴드별 화소의 식생비율 (Fraction of Vegetation, FVC)을 구하고, International Global Biosphere Programme (IGBP)에 의한 17개의 지면 피복도양과 식생의 최대 방출률 값을 산정한다. 이를 Vegetation Cover Method (VCM)으로 각 채널별 방출률을 산출하여 지표면 온도 (Land Surface Temperature, LST)를 구한다 (National Institute of Meteorological Sciences, 2007; Hong et al., 2009; Beak and Choi, 2014; Lee et al., 2016). 본 연구에서는 선행 연구 (Lee et al., 2016)에서 일별로 합성한 COMS 지면온도 자료를 활용하였다 (Fig. 2a).

Terra MODIS는 1999년 12월에 발사되어 전 지구를 하루 혹은 이틀에 걸쳐 관측하며, 36개의 분광 밴드로 0.4~15 μm 의 파장영역을 관측한다. Terra 위성은 705 km 고도에서 일 2회 한반도 상공을 지나며, 북쪽에서 남쪽 방향으로 오전 10시 30분경에 적도를 통과한다. 관측범위는 남북방향으로 5,000 km, 동서방향으로 2,300 km이다. MODIS의 공간해상도는 밴드 1과 2는 250 m \times 250 m, 밴드 3부터 7은 500 m \times 500 m 및 밴

드 8부터 36까지는 1 km \times 1 km 등 세 가지 종류가 있다 (Lee et al., 2015). 본 연구에서는 Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC)에서 제공하는 16일의 시간해상도, 250 m 공간해상도의 Normalized Difference Vegetation Index (MOD13Q1)를 구축하였다 (Fig. 2a). 일반적으로 식생의 변화는 일별 변화에 민감하지 않고 계절에 따라 천천히 상승 혹은 하강하는 양상을 나타내며, 일별 자료로의 상세화는 별도의 알고리즘을 통한 계산 과정을 별도로 필요로 한다. 따라서 본 연구에서 일별 토양수분 모의 시 16일 간격의 식생 지수 자료를 활용하는 것은 결과에 큰 영향을 미치지 않는다고 판단하여 그대로 활용하였다.

2. 토양수분 실측자료

농업기상관측은 농업과 밀접한 관계가 있는 기상현상에 대해 행하는 관측으로, 세계기상기구 (World Meteorological Organization, WMO) 기술규정에 따른 기본 농업기상관측관서인 수원기상대 (2015년 이후 수도권기상청)를 비롯하여 전국 각지에 자리잡은 10곳의 보조 농업기상관측관서에서 이루어지고 있다. Kwon et al. (2011)은 농업기상 관측업무의 품질보증과 관련하여 기상청의 기획연구를 수행한 바 있다. 그 내용에 따르면 논 위에 관측타워가 설치된 수원기상대와 2010년 초부터 시험관측을 시작한 여수기상대를 제외한 모든 보조 농업기상관측관서의 장비들이 해당 기상대의 관측노장

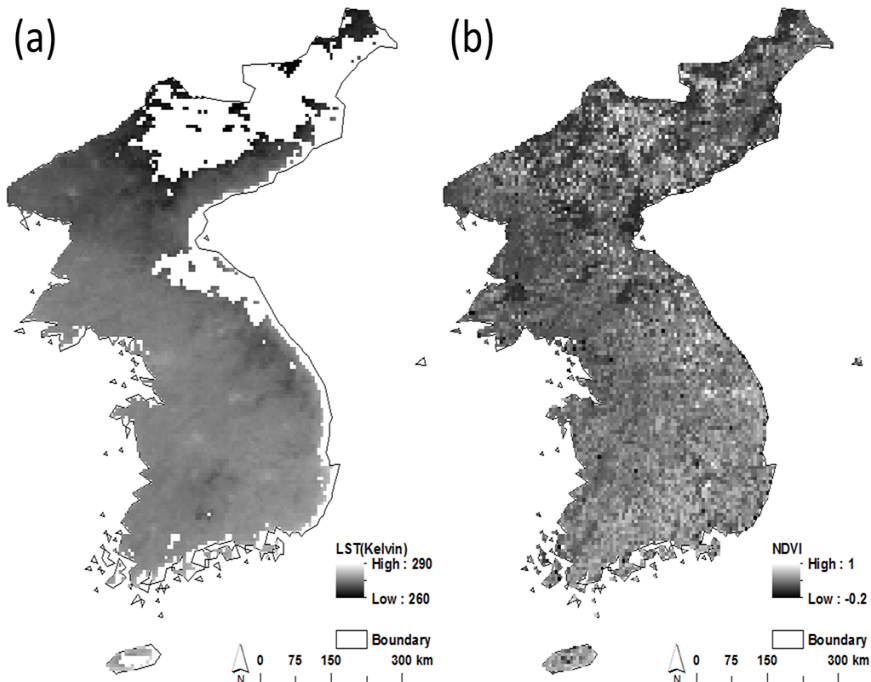


Fig. 2 Example of satellite data at 1 January 2013: (a) LST and (b) NDVI

(잔디밭)에 지상기상관측장비와 중복으로 설치·운영되어 왔다. 주목적인 농경지 위에서의 자료를 생산하지 못하는 실정이었기 때문에 지역 식생을 대표하는 지점으로 기존의 농업기상 관측 장비들을 이전하여 최적의 관측망을 구축하는 방안을 제시하였다. 이 연구의 결과에 따라 2011년 2월 기상청 관측기반국은 “자동농업관측시스템 (Automated Agriculture Observing System, AAOS) 재배치 계획”을 수립하였고, 실제로 서산기상대와 여수기상대를 제외한 나머지 8곳의 보조 농업기상관측관서의 장비들을 새롭게 재배치함으로써 과거보다 더 양호한 농업기상관측환경을 보유하게 되었다 (Choi et al., 2014; Choi et al., 2015). 본 연구에서는 총 11개의 농업기상관측관서 중 토양수분 실측자료가 양호하지 않은 서귀포와 안동 지점을 제외한 9개 지점의 10 cm 깊이의 토양수분 자료를 대상으로 하였다 (Table 1).

3. 다중선형 회귀모형 및 토양수분 산정 시나리오

본 연구에서 토양수분을 산정하기 위해 활용한 다중선형 회귀모형은 통계 모형 중 하나로 독립변수가 2개 이상일 때 종속변수의 변화를 설명하기 위하여 사용하는 선형회귀모형 (Linear Regression Model)이다. 종속변수를 잘 설명하는 n 개의 독립변수 (X_1, X_2, \dots, X_n)를 가지는 다중선형회귀모형은 일반적으로 다음 Eq. (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Y = C + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n \quad (1)$$

여기서, Y 는 종속변수, X_1, X_2, \dots, X_n 는 종속변수에 영향을 주는 n 개의 독립변수, $\beta_1, \beta_2, \dots, \beta_n$ 은 각 독립변수 X_1, X_2, \dots, X_n 에 해당하는 회귀계수이며, C 는 상수항을 의미한다.

Table 1 Agrometeorological observation network of Korea Meteorological Administration and the date of field survey (Choi et al., 2015)

Station Name	Station Number	Tower Site	Location		
			Latitude (N)	Longitude (E)	Elevation (m, AMSL)
Cheorwon	970	Cherowon Agricultural Technology Center	38°12'	127°15'	182
Suwon	971	Suwon Meteorological Station	37°16'	126°59'	34
Suncheon	973	Hwasun Agricultural Technology Center	35°01'	126°57'	40
Jinju	974	Daegok Farm of Gyeongsang University	35°15'	128°09'	21
Jeonju	975	Jeolabuk-do Agricultural Research & Extension Services	35°57'	127°00'	14
Cheongju	977	Chungcheongbuk-do Agricultural Research & Extension Services	36°43'	127°28'	40
Chuncheon	978	Gangwon-do Agricultural Research & Extension Services	37°57'	127°47'	141
Seosan	979	Seosan Meteorological Station	36°46'	126°29'	29
Boseong	981	Boseong Meteorological Observatory	34°46'	127°13'	2

Table 2 Input data scenario for multi linear regression model

Scenario number	LST (K)	NDVI	Sunshine hour (hr)	pcp (mm)					
				n	n-1	n-2	n-3	n-4	n-5
0	○								
1	○	○							
2	○		○						
3	○			○					
4	○	○		○					
5	○		○	○					
6	○	○	○						
7	○	○	○	○					
8	○	○	○	○	○	○			
9	○	○	○	○	○	○	○	○	
10	○	○	○	○	○	○	○	○	○
11 (Seasonal)	○	○	○	○	○	○	○	○	○

토양수분 산정 시나리오는 각 입력 자료의 활용 여부에 따라 총 12개의 시나리오로 나누었다. 본 연구에서는 일별 자료인 LST를 토양수분 산정을 위한 주요 입력 자료로 가정하고 최우선적으로 고려할 수 있도록 시나리오를 선정하였다 (Table 2). Table 2에서 LST는 지면온도, NDVI는 식생지수, Sunshine hour는 일조시간, pcp는 강우를 각각 나타내며, n-1, n-2 등의 pcp자료는 모의일로부터 전일, 전전일의 선행강우를 나타낸다. 0번부터 7번까지의 시나리오는 LST 자료만 사용하여 토양수분을 산정하는 경우, LST와 다른 자료 하나를 같이 사용하여 산정하는 경우, LST와 다른 자료 2개를 같이 사용하여 산정하는 경우 혹은 모든 입력 자료를 같이 사용하는 경우를 각각 나타낸 것이다. 또한 8번부터 11번까지의 시나리오는 모든 자료를 사용한 7번 시나리오에서 선행강우 일수를 추가로 고려하였을 때를 나타낸 것이다. 특히, 11번 시나리오는 10번 시나리오와 동일하게 5일전 선행강우까지 고려할 뿐만 아니라 추가로 계절별로 회귀 계수를 산정하여 입력 자료의 계절별 영향을 분석하고자 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 시나리오별 토양수분 산정 결과

Table 3의 연구 결과는 선정한 시나리오를 토양수분 실측 자료가 양호하고 천리안 위성 자료의 관측 data 수가 많아 모의가 용이한 철원관측소를 대상으로 우선 적용하여 모의한 결과를 나타낸 것이다. 표에서 Con.은 식(1)의 상수항을 의미하여, 각 항목에 표시된 계수는 토양수분을 산정하기 위한 회귀 계수를 의미한다. 모의 결과에 따른 시나리오의 적합성과 상관성을 판단하기 위한 목적함수로는 결정계수 (Coefficient of determination, R^2), 평균제곱근오차 (average mean square error, RMSE), IOA (index of agreement) 및 모형효율성계수 (Nash-Sutcliffe efficiency, NSE)를 사용하였다. 여기서 R^2 , IOA 및 NSE는 값이 1에 가까울수록, RMSE는 0에 가까울수록 모의값과 실측값의 상관성이 높음을 의미한다 (Moriasi et al., 2007). 전체적으로 입력 자료를 많이 활용할수록 R^2 가 상승하는 모습을 보였으며, LST만을 활용한 0번의 경우 R^2 가

Table 3 Regression values of multi linear regression equation according to each scenario at Cheorwon station

Unit: Regression value (p-value)

Sim	Con.	LST (K)	NDVI	SH (hr)	pcp (mm)						R^2	NSE	IOA	RMSE (%/d)	
					n	n-1	n-2	n-3	n-4	n-5					
0	-23,343	0,131	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1766	0,1780	0,9584	3,0836	
1	-8,335	0,074	3,852	-	-	-	-	-	-	-	0,2032	0,2042	0,9744	3,0341	
2	-27,564	0,153	-	-0,245	-	-	-	-	-	-	0,2220	0,2236	0,9612	2,9969	
3	-21,837	0,125	-	-	0,071	-	-	-	-	-	0,2072	0,2089	0,9598	3,0251	
4	-9,800	0,079	3,149	-	0,060	-	-	-	-	-	0,2242	0,2253	0,9602	2,9936	
4-1	-11,234	0,085	1,865	-	0,034	0,066	0,041	-	-	-	0,2661	0,2677	0,9636	2,9106	
5	-25,786	0,145	-	-0,199	0,046	-	-	-	-	-	0,2335	0,2352	0,9616	2,9745	
6	-16,619	0,110	2,649	-0,209	-	-	-	-	-	-	0,2335	0,2342	0,9616	2,9764	
6-1	-17,674	0,114	1,150	-0,180	-	0,064	0,048	-	-	-	0,2827	0,2841	0,9639	2,8778	
7	-16,149	0,108	2,377	-0,172	0,041	-	-	-	-	-	0,2427	0,2437	0,9624	2,9578	
8	-16,960	0,111	1,135	-0,165	0,016	0,062	0,045	-	-	-	0,2839	0,2853	0,9647	2,8754	
9	-17,274	0,112	0,776	-0,170	0,011	0,062	0,034	0,018	0,022	-	0,2901	0,2910	0,9646	2,8638	
10	-16,718	0,111	0,592	-0,174	0,012	0,063	0,032	0,017	0,020	0,017	0,2916	0,2909	0,9644	2,8641	
11	Sp.	46,982 (0,000)	-0,111 (0,000)	-6,822 (0,014)	-0,023 (0,805)	0,128 (0,001)	0,093 (0,000)	0,089 (0,000)	0,091 (0,000)	0,067 (0,014)	0,061 (0,006)	0,4950	0,4919	0,8042	1,2841
	Su.	54,447 (0,004)	-0,147 (0,025)	6,510 (0,000)	-0,109 (0,157)	0,011 (0,311)	0,039 (0,003)	0,022 (0,089)	0,001 (0,848)	0,024 (0,125)	0,016 (0,222)	0,5230	0,5255	0,8246	1,9569
	Au.	57,893 (0,000)	-0,145 (0,000)	-3,779 (0,034)	-0,039 (0,577)	0,052 (0,058)	0,073 (0,001)	0,033 (0,161)	0,046 (0,001)	0,025 (0,085)	0,029 (0,021)	0,4830	0,4814	0,7961	1,5943
	Wi.	-114,752 (0,000)	0,461 (0,000)	10,295 (0,000)	-0,237 (0,004)	0,218 (0,345)	0,222 (0,000)	0,537 (0,000)	0,104 (0,057)	0,305 (0,000)	0,167 (0,054)	0,5920	0,6009	0,8624	2,2717
	To.	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,7993	0,7204	0,9873	1,7985

* Sp.: Spring, Su.: Summer, Au.: Autumn, Wi.: Winter, To.: Total

0.1766으로 가장 낮게 나타났다. LST와 다른 자료 1개를 활용한 1~3번의 시나리오는 0번에 비해 소폭 상승하였으나 R^2 는 각각 0.2032, 0.2220, 0.2072로 낮은 모습을 보였다. LST와 2개의 자료를 추가로 활용한 4, 5, 6번은 1~3번의 시나리오에 비해 R^2 가 약 0.01~0.03의 상승하는 모습을 보였다. 한편, 같은 입력 자료에서 선행 강우만을 추가로 고려할 경우 (4-1과 6-1) 고려하지 않을 때에 비해 약 0.04~0.05의 향상됨을 보였다. 이는 선행강우 고려 시 토양수분 산정을 위한 회귀식의 독립변수가 늘어나기 때문인 것으로 보인다. 7~10의 경우 또한 동일한 입력 자료에서 선행강우 일수가 증가할수록 상관성이 높아지는 모습을 보였다.

한편 시나리오 11번에서 계절별로 회귀 계수를 따로 산정하는 경우 R^2 가 0.483~0.592로 그전 시나리오에 비해 상관성이 약 2배 높게 산정되는 모습을 보였다. 이에 Hong et al. (2009)과 Park et al. (2014)은 SWAT 모형을 이용해 충주댐과 소양강댐 유역에서 Terra MODIS 위성의 NDVI와 토양수분의 계절별 상관성을 분석하였는데, 식물의 생장시기인 3월부터 6월까지의 온도가 증가하여 지표면에서 수분의 증발이 활발하고 NDVI는 식생이 성장하면서 증가하므로 토양수분과 NDVI는 역상관관계가 나타난다고 분석한 바 있다. 또한 가을철에는 식생의 잎이 떨어지며 NDVI가 감소하는 반면 토양수분은 장마 및 태풍으로 인한 강우의 영향으로 증가하며 봄철과 마찬가지로 역상관관계가 나타난다고 분석하였다. 11번 시나리오의 경우 봄 (Sp)과 가을 (Au)에 NDVI의 회귀계수가 음수로 표현되며, 토양수분과 NDVI 사이의 역상관관계가 고려되고 있음을 확인할 수 있다.

계절별 회귀 분석 시 겨울 (Wi)을 제외한 다른 계절에서 LST의 회귀 계수가 음수로 표현되며, 다른 시나리오에서 양수로 표현되는 것과는 다른 경향성을 보임을 파악할 수 있다. 이는 겨울의 LST 계수가 다른 계절에 비해 절대 값이 0.461로 큰 것으로 볼 때, 계절별 회귀계수를 구분하지 않고 회귀계수를 산정할 경우 겨울의 상대적으로 높은 LST 값의 영향으로 최종 회귀 계수가 양의 값으로 산정되고 있음을 알 수 있다. 11번 시나리오를 종합하였을 때 R^2 는 0.799를 나타내며 다른 시나리오에 비해 높은 상관성을 보였으며, 다른 목적함수 또한 계절별로 회귀계수를 나누었을 때 가장 좋은 결과를 나타냈다.

11번 시나리오에서 회귀계수에 대한 p-value값은 대체로 0.1보다 낮아 90% 이상의 신뢰도를 나타냈으나, 일부 계절에서 특정 회귀 계수의 p-value 값이 특히 높게 산정되며 신뢰도가 유의성이 떨어지는 모습을 보였다. 이는 특정 계절에서 국한된 결과로써 전체적인 각 입력 자료와 토양수분간의 모의 신뢰도는 높은 모습을 보였다. 결과적으로 다중선형 회귀모형을 이용한 토양수분 모의는 계절별로 회귀계수를 선정하

며, 선행강우를 고려하였을 때 상관성이 높게 나타날 수 있음을 확인하였다.

2. 토양수분 산정

철원 관측소의 결과를 바탕으로 다중선형 회귀모형에는 계절별, 관측소별로 회귀계수를 산정하고, 선행강우를 고려하도록 하여 모든 관측소에 적용하였다. 이를 통해 토양수분을 각각 모의하여 회귀식의 적용성을 평가하였다. 이 때 선행강우는 미국 토양보존청 (U.S. National Resources Conservation Service)에서 개발한 SCS 유출곡선지수방법 (SCS-CN)에서 선행토양함수조건을 고려할 때와 동일하게 선행하는 5일 동안의 강우까지 고려할 수 있도록 하여 모의하였다. Terra MODIS NDVI와 COMS LST는 해당 지점에서 값을 각각 추출하였고, COMS LST의 경우 선행논문 (Lee et al., 2016)에 따라 일별 토양수분 자료로 합성하여 이용하였다. Table 4는 각 관측소에 대해 산출한 회귀계수를 p-value와 함께 정리하여 나타낸 것이다. 전주, 서산 관측소에서는 앞서 분석한 철원 관측소와 같이 NDVI의 역상관관계가 잘 나타나고 있다. 순천 (가을), 진주 (봄, 여름 및 가을) 및 청주 (여름)의 경우 NDVI의 회귀계수가 다른 관측소와 달리 크게 산정되었는데, 이는 이 시기의 해당 지역의 NDVI가 작게 측정되어 그에 따라 회귀계수가 커진 것으로 보인다. 그 외의 관측소는 철원 관측소만큼 뚜렷한 역상관관계가 나타나진 않으나, 대체로 봄, 가을에 계수가 음의 값으로 산정되었다. 반면 여름, 겨울에는 양의 값으로 산정되거나 혹은 음의 값으로 산정되더라도 그 절대 값이 봄, 가을에 비해 상대적으로 작은 모습을 보였다. LST의 경우 대체적으로 겨울의 계수가 다른 계절에 비해 크게 나타났으나, 그 차이가 철원 관측소만큼 뚜렷하게 나타나진 보이지 않았다. 춘천의 겨울을 제외하면 전체적인 R^2 는 0.29~0.73로 양호한 상관관계를 나타냈다. 철원 관측소와 마찬가지로 각 회귀계수에 대한 p-value는 대부분 0.1보다 낮게 측정되며 90% 이상의 신뢰도를 보였다. 계절별로 일부 회귀계수가 특히 높게 나타나며 통계적 유의성이 떨어지는 양상을 나타냈으나 전체 자료를 고려할 경우 각 입력 자료에 대한 신뢰도는 높은 것으로 판단된다.

Fig. 3은 Table 4의 회귀계수를 바탕으로 산정한 토양수분과 실측 자료를 강우 자료와 함께 비교하여 나타낸 것이다. 각 지점에서 R^2 가 0.80 (철원), 0.90 (춘천), 0.80 (수원), 0.63 (서산), 0.77 (청주), 0.82 (전주), 0.52 (순천), 0.63 (진주), 0.99 (보성)로 매우 높은 상관성을 보였다. 특히 강우에 의해 변화하는 토양수분의 일별 변동성까지 세세하게 모의하는 모습을 보임으로써 모형의 유효함을 입증하였다. 그러나 일부 관측소의 특정 기간에서는 이상치로 인한 한계가 나타났다. 춘천

Table 4 Regression values of multi linear regression equation with p-value at 8 stations

Unit: Regression value (p-value)

Station No. ^[a]		Con.	LST (K)	NDVI	SH (hr)	pcp (mm)						R ²
						n	n-1	n-2	n-3	n-4	n-5	
971	Sp.	17.875 (0.014)	-0.520 (0.000)	-0.055 (0.041)	0.399 (0.000)	0.270 (0.000)	0.597 (0.762)	0.056 (0.017)	0.073 (0.003)	0.043 (0.019)	0.051 (0.016)	0.590
	Su.	2.360 (0.899)	-0.540 (0.001)	-0.004 (0.955)	0.123 (0.294)	0.033 (0.056)	14.314 (0.015)	0.040 (0.007)	0.035 (0.035)	0.026 (0.113)	0.058 (0.020)	0.545
	Au.	61.882 (0.000)	-0.449 (0.000)	-0.187 (0.000)	0.473 (0.000)	0.161 (0.000)	-0.512 (0.889)	0.101 (0.000)	0.040 (0.030)	0.030 (0.067)	0.035 (0.027)	0.650
	Wi.	-33.887 (0.076)	-0.241 (0.070)	0.141 (0.046)	-0.018 (0.876)	0.151 (0.426)	15.817 (0.000)	0.276 (0.000)	0.114 (0.235)	0.114 (0.079)	0.081 (0.280)	0.319
973	Sp.	9.281 (0.389)	1.034 (0.000)	-0.022 (0.594)	-0.783 (0.000)	0.123 (0.013)	16.670 (0.000)	0.112 (0.000)	0.058 (0.000)	0.027 (0.040)	0.029 (0.041)	0.431
	Su.	10.142 (0.428)	-0.252 (0.541)	-0.067 (0.119)	0.109 (0.712)	0.038 (0.013)	19.548 (0.000)	0.055 (0.000)	0.020 (0.006)	0.011 (0.021)	0.035 (0.000)	0.684
	Au.	55.541 (0.000)	-0.208 (0.000)	14.844 (0.000)	-0.041 (0.452)	0.078 (0.298)	0.022 (0.003)	0.053 (0.000)	0.018 (0.010)	0.021 (0.083)	0.011 (0.115)	0.455
	Wi.	22.008 (0.022)	0.262 (0.018)	-0.053 (0.152)	-0.452 (0.000)	0.206 (0.017)	5.150 (0.000)	0.083 (0.006)	0.133 (0.005)	0.006 (0.831)	0.115 (0.005)	0.488
974	Sp.	130.431 (0.000)	-0.456 (0.000)	41.973 (0.000)	0.077 (0.153)	0.128 (0.000)	0.066 (0.000)	0.052 (0.000)	0.056 (0.000)	0.029 (0.024)	0.027 (0.173)	0.579
	Su.	33.506 (0.211)	-0.079 (0.419)	8.987 (0.168)	-0.049 (0.681)	0.023 (0.515)	0.113 (0.000)	0.061 (0.022)	0.044 (0.065)	0.049 (0.055)	0.022 (0.307)	0.383
	Au.	55.388 (0.004)	-0.154 (0.026)	9.153 (0.006)	-0.012 (0.879)	0.072 (0.000)	0.096 (0.000)	0.067 (0.000)	0.049 (0.000)	0.044 (0.002)	0.052 (0.001)	0.557
	Wi.	36.069 (0.404)	-0.557 (0.017)	-0.135 (0.384)	0.322 (0.051)	0.211 (0.000)	49.933 (0.000)	0.153 (0.000)	0.337 (0.000)	0.115 (0.005)	0.446 (0.000)	0.556
975	Sp.	49.634 (0.044)	-2.228 (0.000)	-0.068 (0.461)	1.513 (0.000)	0.779 (0.000)	-49.052 (0.000)	0.293 (0.000)	0.257 (0.000)	0.152 (0.010)	0.170 (0.012)	0.474
	Su.	-20.169 (0.565)	-2.061 (0.000)	0.034 (0.767)	1.102 (0.000)	0.043 (0.283)	33.748 (0.000)	0.112 (0.000)	0.115 (0.000)	0.094 (0.004)	0.098 (0.001)	0.638
	Au.	143.468 (0.000)	-0.302 (0.482)	-0.437 (0.000)	-0.147 (0.637)	-0.008 (0.926)	13.623 (0.073)	0.168 (0.001)	0.214 (0.000)	0.141 (0.002)	0.157 (0.007)	0.500
	Wi.	-100.497 (0.077)	-2.975 (0.000)	0.410 (0.051)	2.419 (0.000)	0.971 (0.058)	7.069 (0.348)	0.918 (0.003)	0.579 (0.140)	0.135 (0.668)	0.342 (0.167)	0.297
977	Sp.	75.806 (0.000)	-0.506 (0.001)	-0.143 (0.031)	0.446 (0.000)	0.498 (0.000)	-81.233 (0.000)	0.250 (0.000)	0.228 (0.000)	0.123 (0.000)	0.152 (0.000)	0.736
	Su.	-34.262 (0.235)	0.128 (0.190)	22.569 (0.004)	-0.155 (0.290)	0.240 (0.001)	0.116 (0.000)	0.090 (0.000)	0.111 (0.022)	0.051 (0.039)	0.124 (0.004)	0.512
	Au.	13.732 (0.527)	0.290 (0.261)	0.059 (0.459)	-0.493 (0.012)	0.076 (0.011)	-26.871 (0.005)	0.107 (0.000)	0.088 (0.000)	0.064 (0.001)	0.060 (0.001)	0.628
	Wi.	-141.780 (0.000)	-0.546 (0.128)	0.531 (0.000)	0.596 (0.054)	0.134 (0.511)	51.973 (0.000)	0.693 (0.000)	0.587 (0.003)	0.153 (0.238)	0.044 (0.767)	0.464
978	Sp.	76.391 (0.000)	-0.416 (0.000)	-0.210 (0.000)	0.296 (0.000)	0.064 (0.253)	-14.885 (0.000)	0.110 (0.000)	0.108 (0.000)	0.079 (0.001)	0.095 (0.004)	0.616
	Su.	-0.679 (0.976)	-0.495 (0.003)	0.006 (0.943)	0.323 (0.005)	0.094 (0.009)	21.066 (0.000)	0.050 (0.005)	0.046 (0.008)	0.029 (0.095)	0.007 (0.630)	0.527
	Au.	14.901 (0.162)	-0.395 (0.003)	0.016 (0.691)	0.333 (0.005)	0.015 (0.660)	-14.845 (0.000)	0.071 (0.000)	0.029 (0.036)	0.039 (0.003)	0.023 (0.132)	0.494
	Wi.	-130.712 (0.000)	0.509 (0.000)	2.386 (0.615)	-0.084 (0.539)	-0.046 (0.646)	0.058 (0.462)	0.242 (0.036)	0.109 (0.136)	0.244 (0.061)	0.046 (0.700)	0.189
979	Sp.	46.044 (0.000)	-0.037 (0.765)	-0.103 (0.005)	0.073 (0.372)	0.236 (0.000)	-18.034 (0.000)	0.237 (0.000)	0.146 (0.000)	0.109 (0.000)	0.104 (0.000)	0.611
	Su.	-28.727 (0.111)	0.160 (0.459)	0.105 (0.097)	-0.095 (0.535)	0.135 (0.000)	13.851 (0.000)	0.105 (0.000)	0.072 (0.000)	0.094 (0.000)	0.041 (0.016)	0.736
	Au.	42.548 (0.039)	-0.093 (0.400)	-0.110 (0.147)	-0.206 (0.012)	0.128 (0.000)	7.021 (0.027)	0.112 (0.000)	0.072 (0.001)	0.055 (0.007)	0.072 (0.000)	0.587
	Wi.	2.424 (0.810)	0.100 (0.280)	0.026 (0.485)	-0.027 (0.733)	0.125 (0.222)	14.380 (0.000)	0.172 (0.000)	0.147 (0.003)	0.119 (0.005)	0.069 (0.052)	0.572
981	Sp.	66.687 (0.003)	0.241 (0.357)	-0.160 (0.054)	-0.301 (0.055)	0.104 (0.111)	8.271 (0.045)	0.115 (0.000)	0.102 (0.000)	0.035 (0.021)	0.043 (0.006)	0.520
	Su.	142.247 (0.000)	0.049 (0.872)	-0.434 (0.000)	0.010 (0.959)	0.134 (0.000)	7.396 (0.310)	0.249 (0.000)	0.065 (0.021)	0.042 (0.056)	0.060 (0.003)	0.719
	Au.	36.829 (0.232)	-0.564 (0.084)	-0.044 (0.696)	0.101 (0.683)	0.071 (0.001)	2.087 (0.597)	0.090 (0.000)	0.048 (0.005)	0.040 (0.013)	0.034 (0.034)	0.493
	Wi.	-13.280 (0.443)	0.347 (0.076)	0.110 (0.086)	-0.406 (0.006)	1.700 (0.001)	17.948 (0.004)	0.335 (0.000)	0.401 (0.001)	0.153 (0.003)	0.297 (0.001)	0.548

* Sp.: Spring, Su.: Summer, Au.: Autumn, Wi.: Winter

^[a] Station No.: 971 (Suwon), 973 (Suncheon), 974 (Jinju), 975 (Jeonju), 977 (Cheongju), 978 (Chuncheon), 979 (Seosan), 981 (Boseong)

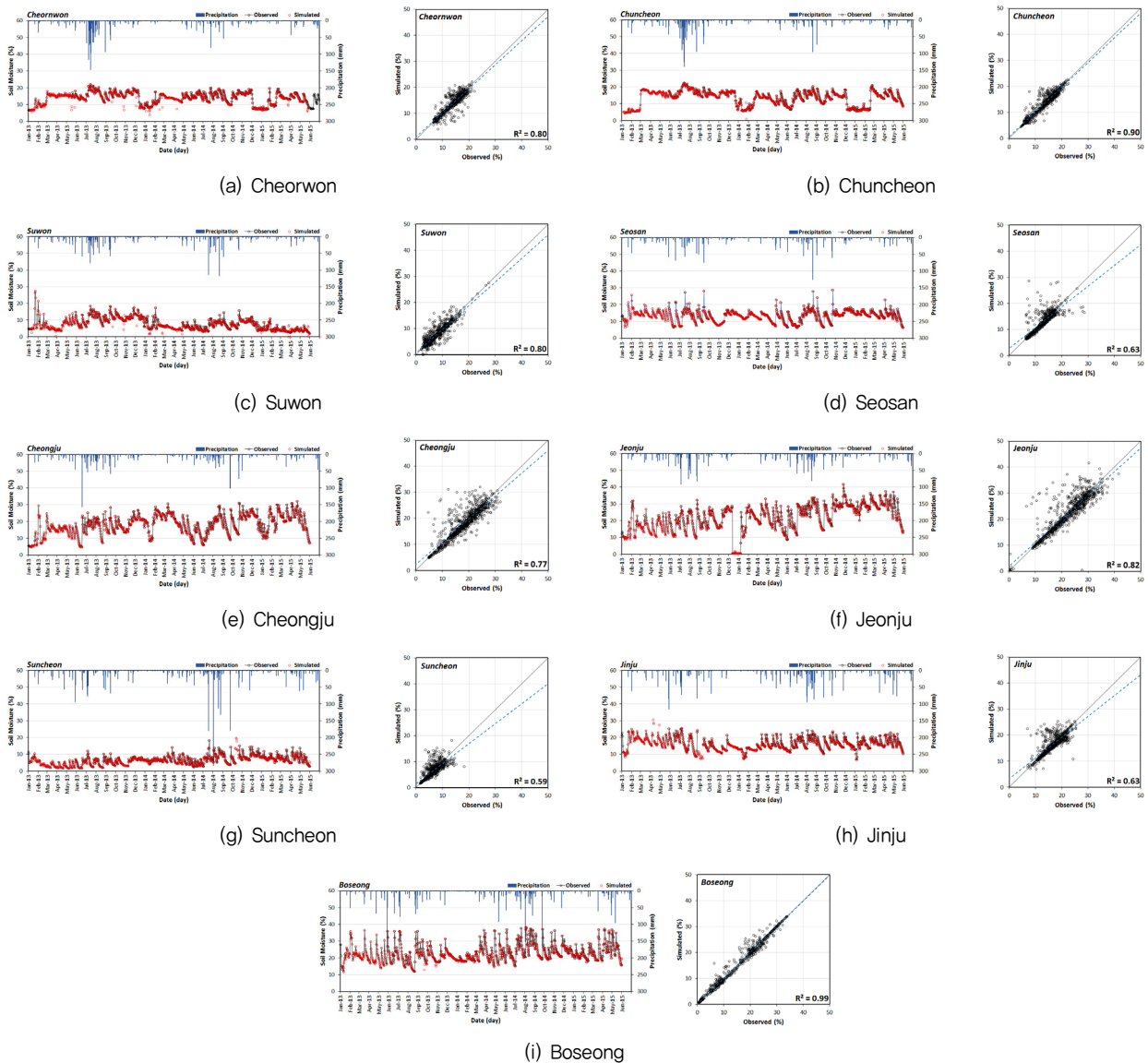


Fig. 3 Comparison between observed and simulated soil moisture at nine stations of AAOS

및 전주 관측소에서는 각각 2014년 12월~2015년 2월 및 2013년 12월~2014년 1월에서 토양수분 실측값이 다른 기간에 비해 연속성이 떨어지는 이상치의 분포를 나타낸다. 모의 토양수분 값은 이러한 이상치도 매우 유사하게 모의하고 있음을 보임으로써, 결과의 신뢰성이 실측 토양수분의 자료의 질에 따라 크게 달라질 수 있음을 보였다.

IV. 결론

본 연구에서는 천리안 LST와 다중선형 회귀모형을 이용

해 농업기상관측관서 11개 지점의 토양수분을 모의하였다. 2013년 1월부터 2015년 5월까지의 모의기간 동안 4 km 해상도의 천리안 일별 LST와 250 m 해상도의 Terra MODIS 16 day NDVI 자료를 구축하였으며, 각 관측소 지점의 강우, 일조시간 자료를 구축하였다. 또한 모의를 위한 토양수분 실측 자료로 10 cm 깊이의 자료를 활용하였다.

구축한 자료의 활용여부에 따라 총 11개의 토양수분 산정 시나리오를 분류한 뒤 관측 자료가 양호한 철원 관측소에 적용하여 모의한 결과, 회귀 모형의 특성상 모의 입력자료의 수가 많을수록 최종 결과의 R^2 가 상승하는 모습을 보였다. 특히, 동일한 자료를 활용했을 때 추가로 선행강우를 고려할 경우

토양수분 결과의 상관성이 높아짐을 확인하였다. 또한 계절 별로 회귀 계수를 산정했을 때 NDVI와 토양수분 간의 역상관관계를 고려함으로써 상관성이 크게 높아지는 모습을 보였다. 철원 관측소의 결과를 바탕으로 9개의 농업기상관측지점에 적용한 결과 각 지점에서의 R^2 가 0.80 (철원), 0.90 (춘천), 0.80 (수원), 0.63 (서산), 0.77 (청주), 0.82 (전주), 0.52 (순천), 0.63 (진주), 0.99 (보성)로 높은 상관성을 보였으나 일부 이상치에 대해서도 매우 유사하게 모의하여 실측 자료에 따라 결과가 크게 달라질 수 있는 한계가 나타났다.

사 사

본 연구는 한국기상산업진흥원 “기상See-At기술개발” 사업의 연구비지원으로 수행한 ‘정량적 수문기상인자 추정 기술개발을 통한 수문순환 모델 적용 체계 구축 [KMIPA 2016-1020-1]’ 과제에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

- Ahn, S. R., M. J. Park, G. A. Park, and S. J. Kim, 2009. Assessing Future Climate Change Impact on Hydrologic Components of Gyeongancheon Watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 142(1): 33-50.
- Aubert, D., C. Loumagne, and L. Oudin, 2003. Sequential assimilation of soil moisture and streamflow data in a conceptual rainfall-runoff model. *Journal of Hydrology* 280(1-4): 145-161.
- Baek, J. J. and M. H. Choi, 2012. Availability of Land Surface Temperature from the COMS in the Korea Peninsula. *Journal of Korea Water Resources Association* 45(8): 755-765 (in Korean).
- Choi, S.-W., S.-J. Lee, J. Kim, B.-L. Lee, K.-R. Kim, and B.-C. Choi, 2014. a: Agrometeorological observation circumstances of KMA and their improvement plan. Proceedings of Autumn Meeting of KMS 315-316 (in Korean).
- Choi, S. W., S. J. Lee, J. Kim, B. L. Lee, K. R. Kim, and B. C. Choi, 2015. Agrometeorological Observation Environment and Periodic Report of Korea Meteorological Administration: Current Status and Suggestions. *Korean Journal of agricultural and Forest Meteorology* 17(2): 144-155 (in Korean).
- Crow, W. T., D. G. Miralles, and M. H. Cosh, 2010. A quasi-global evaluation system for satellite-based surface soil moisture retrievals. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(6): 2516-2527.
- Draper, C. S., J. P. Walker, P. J. Steinle, R. A. de Jeu, and T. R. Holmes, 2009. An evaluation of AMSR-E derived soil moisture over Australia. *Remote Sensing of Environment* 113(4): 703-710.
- Farrar, T. J., S. E. Nicholson, and A. R. Lare, 1994. The influence of soil type on the relationships between NDVI, rainfall, and soil moisture in semiarid Botswana. II. NDVI response to soil moisture. *Remote Sensing of Environment* 50(2): 121-133.
- Holmes, T. R. H., R. A. M. De Jeu, M. Owe, and A. J. Dolman, 2009. Land surface temperature from Ka band (37 GHz) passive microwave observations. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 114(D4).
- Hong, Ki-OK, Myoung-Seok Suh, and J-H Kang, 2009. Development of a Land Surface Temperature-Retrieval Algorithm from MTSAT-1R Data. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 45(4): 411-421.
- Hong, W. Y., M. J. Park, J. Y. Park, R. Ha, G. A. Park, and S. J. Kim, 2009. The Correlation Analysis Between SWAT Predicted Forest Soil Moisture and MODIS NDVI During Spring Season. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 7-14.
- Hutchinson, J. M. S. and T. J. Vought, 2006. Continuous soil moisture mapping using MODIS NDVI and LST products. *Papers of the Applied Geography Conferences* 29: 140-149.
- IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis, IPCC Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (Eds.). Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Jackson, T. J., R. Hurkmans, A. Hsu, and M. H. Cosh, 2004. Soil moisture algorithm validation using data from the Advanced Microwave Scanning Radiometer (AMSR-E) in Mongolia. *Italian Journal of Remote Sensing* 30(31): 39-52.
- Jackson, T. J., M. H. Cosh, R. Bindlish, P. J. Starks, D. D. Bosch, M. Seyfried, ... and J. Du, 2010. Validation of advanced microwave scanning radiometer soil moisture products. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(12): 4256-4272.
- Kim, G. S. and H. G. Park, 2010. Soil Moisture Estimation Using CART Algorithm and Ancillary Data. *Journal of Korea Water Resources Association* 49(3): 263-273.
- Kim, M. J., J. Kim, and J. M. Yoon, 2014. Estimation of Surface Reflectance by Utilizing Single Visible Reflectance from COMS Meteorological Imager. *Korean Journal of Remote Sensing* 30(5): 627-639 (in Korean).
- Kwon, H.-J., J. Kim, J.-I. Yoo, J.-Y. Yoon, and J.-W. Hong, 2011. A Study on the suitability for relocating of agrometeorological observation equipment. *Korea Meteorological Administration*, 59pp (In Korean).
- Lee, Y. G., C. G. Jung, J. W. Lee, and S. J. Kim, 2016. Estimation

- of Daily Land Surface Temperature using COMS in Korea Peninsula. *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers* 58(4): 37-46.
20. Li, L., P. W. Gaiser, B. C. Gao, R. M. Bevilacqua, T. J. Jackson, E. G. Njoku, ... and R. Bindlish, 2010. WindSat global soil moisture retrieval and validation. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 48(5): 2224-2241.
 21. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. Van Liew, R. L. Binger, R. D. Harmel, and T. L. Veith, 2007. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations, *Transactions of the ASABE* 50(3): 885-900.
 22. Narasimhan, B., R. J. Srinivasan, J. G. Arnold, M. D. Luzio, 2005. Estimation of long-term soil moisture using a distributed parameter hydrologic model and verification using remotely sensed data. *Am Soc Agric Eng.* 48(3): 1101-1113.
 23. National Institute of Meteorological Sciences, 2007. Development of Meteorological Data Processing System of Communication. Ocean and Meteorological Satellite, *Korean Meteorological Administration*.
 24. Owe, M., R. de Jeu, and T. Holmes, 2008. Multisensor historical climatology of satellite-derived global land surface moisture. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 113(F1).
 25. Parinussa, R. M., T. R. H. Holmes, M. T. Yilmaz, and W. T. Crow, 2011. The impact of land surface temperature on soil moisture anomaly detection from passive microwave observations. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15.10 (2011): 3135-3151.
 26. Park, J. A. and G. S. Kim, 2011. Estimation of Spatial Distribution of Soil Moisture at Yongdam Dam Watershed Using Artificial Neural Networks. *Journal of the Korean Geographical Society* 46(3): 319-330.
 27. Park, J. Y., S. R. Ahn, S. J. Hwang, C. H. Jang, G. A. Park, and S. J. Kim, 2014. Evaluation of MODIS NDVI and LST for indicating soil moisture of forest areas based on SWAT modeling. *Paddy Water Environ.* 12(s1): s77-s88.
 28. Qiu, Y., B. Fu, J. Wang, and L. Chen, 2003. Spatiotemporal prediction of soil moisture content using multiple-linear regression in a small catchment of the Loess Plateau, China, *CATENA* 54(1-2): 173-195.
 29. Wagner, W., V. Naeimi, K. Scipal, R. de Jeu, and J. Martínez-Fernández, 2007. Soil moisture from operational meteorological satellites. *Hydrogeology Journal* 15(1): 121-131.
 30. Wang, H., X. Li, H. Long, X. Xu, and Y. Bao, 2010. Monitoring the effects of land use and cover type changes on soil moisture using remotesensing data: A case study in China's Yongding River basin. *CATENA* 82(3): 135-145.
 31. Zribi, M., N. Baghdadi, N. Holah, and O. Fafin, 2005. New methodology for soil surface moisture estimation and its application to ENVISAT-ASAR multi-incidence data inversion. *Remote Sensing of Environment* 96(3-4): 485-496.