

# Polarimetric Scanning Radiometer 와 In-situ를 이용한 토양수분 자료의 통계분석

## Statistical Analyses of Soil Moisture Data from Polarimetric Scanning Radiometer and In-situ

장선우\* · 전면호\*\* · 최민하\*\*\* · 김태웅\*\*\*\*

Jang, Sun Woo · Jeon, Myeon Ho · Choi, Minha · Kim, Tae-Woong

### Abstract

Soil moisture is a crucial factor in hydrological system which influences runoff, energy balance, evaporation, and atmosphere. United States National Aeronautic and Space Administration (NASA) and Department of Agriculture (USDA) have established Soil Moisture Experiment (SMEX) since 2002 for the global observations. SMEX provides useful data for the hydrological science including soil moisture and hydrometeorological variables. The purpose of this study is to investigate the relationship between remotely sensed soil moisture data from aircraft and satellite and ground based experiment. C-band of Polarimetric Scanning Radiometer (PSR) that observed the brightness temperature provides soil moisture data using a retrieval algorithm. It was compared with the In-situ data for 2-30 cm depth at four sites. The most significant depth is 2-10 cm from the correlation analysis. Most of the sites, two data are similar to the mean of data at 10 cm and the median at 7 cm and 10 cm at the 10% significant level using the Rank Sum test and *t*-test. In general, soil moisture data using the C-band of the PSR was established to fit the Normal, Log-normal and Gumbel distribution. Soil moisture data using the aircraft and satellites will be used in hydrological science as fundamental data. Especially, the C-band of PSR will be used to prove soil moisture at 7-10 cm depths.

**Keywords :** *Soil moisture, SMEX02, PSR, Correlation analysis*

### 요 지

토양수분은 강우-유출, 에너지 수지, 증발 및 대기의 기후와 기상에 큰 영향을 미치고, 수문학적 거동에 중요한 역할을 한다. 미국의 NASA와 USDA는 전 지구 토양수분 관측을 위해 2002년부터 2005년까지 매년 Soil Moisture Experiment (SMEX)의 실험 실측, 항공기, 원격탐사를 이용한 토양수분 자료를 평가하여 지표와 대기의 수문학적 연구를 위해 기초가 되는 자료를 제공하고 있다. 본 연구의 목적은 SMEX02에 따른 항공기 원격탐사를 이용한 토양수분 데이터와 In-situ를 이용한 토양수분 데이터와의 상관관계를 분석하고, 항공기를 이용한 데이터의 활용성에 대해서 분석하는 것이다. 미국의 Iowa 주 Walnut Creek 유역을 대상으로 항공기를 이용한 Polarimetric Scanning Radiometer(PSR)의 C-band와 In-situ에 의한 데이터의 시공간적 스케일을 조합하여 4개 지점(WC15, WC16, WC23, WC24)에서 관측된 10일간의 토양수분 자료를 비교, 분석하였다. PSR의 C-band와 4개의 지점에 대한 7개 깊이의 In-situ 토양수분 데이터와의 상관성을 분석한 결과, 2-10 cm 깊이에서 상호 상관성이 가장 유의함을 보여 주었다. Rank Sum test와 *t*-test의 결과, 유의수준 10%에 대해 4개 지점 모두 10 cm에서 평균이 같고, 7 cm와 10 cm에서 중앙값이 같았다. 또한 확률분포의 적합도 검정을 위해 PPCC test를 실시한 결과, PSR에 의한 토양수분 데이터는 대체적으로 정규분포, 대수분포, Gumbel 분포 모두 성립하였고, 대상 지역별 깊이에 따라 토양수분의 분포형은 10 cm 깊이에서 정규분포보다 대수정규분포와 Gumbel 분포가 더 유의하였다. 본 연구를 통하여 PSR 토양수분은 7 cm와 10 cm 깊이의 관측 토양수분 자료로 대체될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 우리나라에서도 항공기 및 인공위성을 이용한 토양수분 자료를 활용하여 수문학적 연구에 기초가 되는 자료로서 활용이 가능하며, PSR의 C-band를 이용하여 토양수분 관측 시 약 7-10 cm에 대한 토양수분을 증명할 수 있을 것으로 판단된다.

**핵심용어 :** 토양수분, SMEX02, PSR, 상관성 분석

\*한양대학교 대학원 건설환경공학과 석사과정 (E-mail : jjang6878@naver.com)

\*\*정희원 · 한양대학교 대학원 건설환경공학과 석 · 박사과정 (E-mail : dektol79@naver.com)

\*\*\*정희원 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : mchoi@hanyang.ac.kr)

\*\*\*\*정희원 · 교신저자 · 한양대학교 건설환경공학과 조교수 · 공학박사 (E-mail : twkim72@hanyang.ac.kr)

## 1. 서 론

토양수분은 지표와 대기의 상관관계, 에너지 평형, 강우-유출 등 지구의 수문순환 과정을 이해하는데 중요한 변수 중의 하나이다. 특히 강우사상에 따른 침투와 침투에 따라 유출변화에 큰 영향을 끼치기 때문에 물 순환 체계의 이해를 위해서 강우와 증발산에 관련된 연구와 동시에 토양수분에 대한 연구가 수반되어야 한다(김광섭, 2007). 토양수분은 지표면으로부터의 깊이에 따라 변동성의 차이를 보이고, 식생 조건과 기후의 조건에 따라서 서로 상이한 차이를 보이고 있다. 이에 따라 토양수분에 대하여 시공간에 따른 연구와 기후조건 등 외부의 환경적 요인을 고려한 연구들이 선행되어야 한다. 또한 토양수분은 전 지구를 대상으로 실제 관측하기에는 어려움이 많기 때문에 최근 인공위성을 통한 원격탐사를 이용하여 토양수분을 관측하는 방법으로 자료를 구축하고 있다.

미국의 NASA(National Aeronautic and Space Administration)와 USDA(United States Department of Agriculture)에서는 전 지구적 토양수분의 관측을 위하여 SGP92(Southern Great Plain 1992)를 시작으로 SGP97, 99의 실험을 통해 Soil Moisture Experiment(SMEX)의 준비 단계를 수행하였고, SMEX02, 03, 04, 05를 통해 원격탐사를 이용한 토양수분과 In-situ를 이용한 토양수분 데이터의 상호관계에 대하여 본격적인 알고리즘을 확립하였다. 이러한 SMEX 실험을 통해 원격탐사를 이용한 토양수분 데이터와 In-situ를 이용한 토양수분 데이터에 대하여 많은 연구들이 진행되어왔다.

van Zyl *et al.*(2003)은 토양조건에 따른 AFSAR와 In-situ에 의한 토양수분 데이터에 대하여 비교, 분석하는 연구를 수행하였고, Bindlish *et al.*(2008)은 SMEX02 실험을 통해 위성관측 장비인 Aqua satellite Advanced Microwave Scanning Radiometer(AMSR-E)의 C-band를 보정 및 증명하기 위하여 항공기를 이용한 PSR의 X/C-band로부터 관측된 밝기 온도(Brightness Temperature)를 이전에 SGP를 통해 증명된 알고리즘을 이용하여 VSM을 산정한 후, 실제 관측된 토양수분과 비교하여 AMSR-E의 C-band를 보정하는 연구를 진행하였다. Das and Mohanty(2008)는 PSR 데이터를 이용하여 농업지역을 대상으로 기후조건에 따른 건조 지역과 습윤 지역을 구분하여 공간적인 변동성과 시간적 거동을 연구하였고, Choi and Jacobs(2007)는 SMEX02와 04 실험으로 부터의 자료를 이용하여 토양의 깊이에 따라 시공간적인 통계적 분석과, 토양수분의 거동과 물리적 모델을 이용한 토양수분의 예측을 증명하는 연구를 수행하였고, Kim and Barros(2002)는 토양수분의 시공간적 변화도와 L-band 관측의 타당성 및 관측 격자크기의 변화에 따른 변화도를 분석하였다. 황교택 등(2010)은 SMEX04 실험을 통해 건조 지역에서의 토양수분의 시간 안정도 분석과 공간적 변동성을 분석한 바 있다.

현재 우리나라에 소개된 원격탐사를 이용한 토양수분에 관련된 연구는 PSR C-band와 ESTAR L-band의 측정치를 사용한 다중 채널의 원격측정 토양수분 자료의 변화도를 비교한 연구가 있다(김광섭, 2006). 이 연구는 AMSR 기기를 이용한 전 지구 관측치를 Downscaling할 때 공간적 스케일

의 변화에 따른 토양수분의 변화 양상에 대하여 분석하였다.

본 연구는 우리나라에 잘 알려지지 않은 항공기를 이용한 토양수분과 In-situ를 이용한 토양수분의 자료의 상관성을 알아보고, 복원 알고리즘(Retrieval Algorithm)에 의해 제공되고 있는 PSR의 C-band에 의해 산정된 토양수분이 In-situ를 이용한 토양수분 자료와의 관계를 검증하였다. 현재 우리나라의 농업기상정보시스템(<http://weather.rda.go.kr>)에서는 토양수분에 관하여 전국을 대상으로 약 120여개의 지점에서 토양수분을 관측하여 자료를 제공하고 있지만, 관측기간이 짧고, 결측 자료가 많아 자료를 이용하는데 한계를 가지고 있으며, 우리나라를 대상으로 2차원 토양수분 관측은 전무한 실정이다(김광섭, 2007).

본 연구에서는 2002년 미국 Iowa 주의 Walnut Creek 유역을 대상으로 SMEX02의 항공기 데이터와 In-situ 데이터의 시공간적 스케일이 부합하는 4개 지점(WC15, WC16, WC23, WC34)을 선정하여, 각 지점의 10일간의 자료를 이용하여 깊이에 따라 상관성 분석, *t*-test, Rank Sum test를 실시하여 PSR C-band와 In-situ 데이터의 깊이에 따른 상관성을 비교, 분석하고자 하였다. 또한 PPCC test를 통해 자료의 분포형태를 결정하여 향후 대상지역과 기후조건이 비슷한 지역에 대한 토양수분의 알고리즘 개발 시 기초 자료를 제공하고자 하였다.

## 2. SMEX02의 연구대상 지역 및 자료 개요

### 2.1 Soil Moisture Experiment in 2002의 연구대상 지역

SMEX02는 NASA와 USDA-ARS(Agriculture Research Service)가 합동으로 2002년 6월 1일부터 7월 31일까지 미국 Iowa 주를 대상으로 광범위하게 토양수분을 관측한 실험이다. SMEX02 실험 이전, 1992년 Washita92 실험을 시작으로 SGP97과 SGP99 실험을 통해 식물의 2 kg/m<sup>2</sup> 이하의 물 함유량에 대해 대기와 토양수분의 관계, 원격탐사 및 항공기 장비를 이용한 관측 및 실제 관측과의 관계를 증명하는 연구들이 선행되었다. SMEX02는 밀집되어 있는 식물들의 4-8 kg/m<sup>2</sup>의 물 함유량 조건에 대해 이전 알고리즘을 개선 및 확장하기 위한 실험이다. SMEX02의 구체적인 목적은 (1) 대기와 토지의 상호관계에 대한 이해 (2) Advanced Microwave Scanning Radiometer(AMSR)의 밝기 온도(T<sub>b</sub>)와 토양수분 복원 알고리즘의 검증 (3) 관측 기기와 토양수분 알고리즘의 관계 확장 (4) 토양수분 원격탐사를 위한 새로운 장비의 평가이며, 위성 관측(AMSR-E)의 알고리즘 개발과 증명을 위해 항공기 관측을 이용하여 토양에서의 실제 관측의 중요한 상호 관계를 도출하기 위한 실험이다.

SMEX02 실험의 대상 지역은 Iowa 주의 약 1/4을 차지하고 있는 Des Moines Lobe이며, Iowa 주의 대표적인 유역으로, 토지 이용은 약 95%가 농업지역으로 사용되고 있고, 이 중 60%가 옥수수를, 40%가 콩을 재배하고 있다. 본 연구의 대상 지역은 Iowa 주 내에 Walnut Creek Watershed로 USDA의 National Soil Tilt Laboratory(NSTL)에서 수문학과 기후화학적 변동성을 모니터링하고 있는 지역이고, 기후대는 약간 습한 지역으로 연평균 강우량은 835 mm를 기록하고 있다(Choi and Jacobs, 2007). U.S. Geological

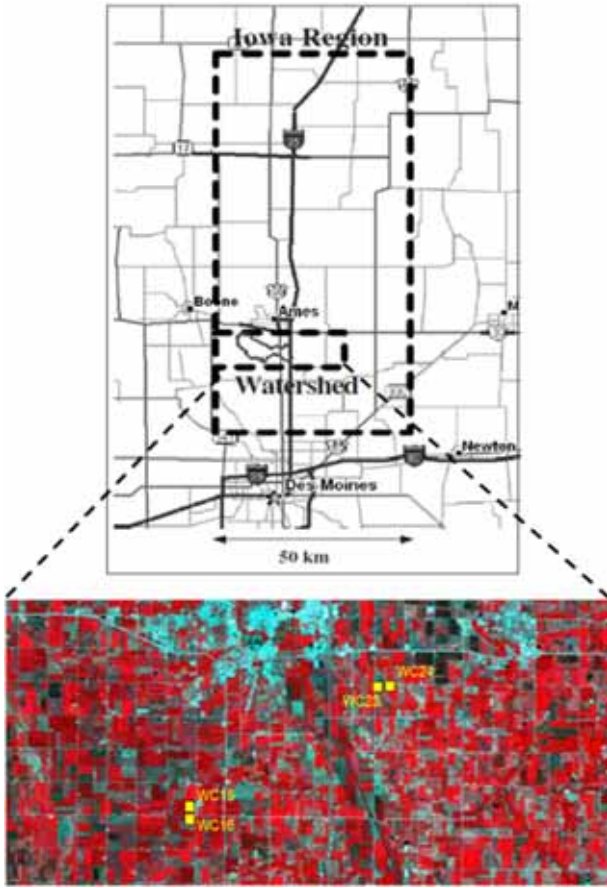


Fig. 1 Landsat TM Image of Walnut Creek Watershed (July 1, 2002) Sources: USDA ARS (<http://hydrolab.arsusda.gov/smex02/landsat2002.php>)

Survey(USGS)에서 25 m 해상도로 Digital Elevation Map (DEM)을 이용하여 지형을 조사한 결과, 상대적으로 적은 표면 배수를 가졌고, 토양 구성은 모래질 양토에서 침투성이

적은 실트질 양토로 분류된 점토로 구성되어 있다.

Fig. 1은 Landsat TM의 Color Composite Image로써 Walnut Creek Watershed 지역의 식생정도를 나타내고 있다. 크게 두 가지로 나누어, Red는 식생을 Cyan은 주거지역 및 도시 지역을 의미하고 있다. 본 연구에서는 SMEX02의 In-situ를 통해 관측하고 있는 WC1-WC33 지점 중, 항공기 데이터와 공간적 스케일이 부합하는 WC15, WC16, WC23, WC24 지점을 선정하여 지역적인 토양수분의 관계와 깊이에 따른 관계를 분석하였다. 4개 지점에 대한 토지 이용을 구분하였을 때 WC15와 WC24는 옥수수를 재배하고, WC16과 WC23은 콩을 재배하는 지역으로, 지역의 경사는 1.14-4.55%로 넓게 뺀 평지에 가깝고, 토양 특성은 대체적으로 점토와 실트로 구분 가능하며, 지역의 구체적인 특성은 Table 1에서 자세히 설명하고 있다.

## 2.2 Ground Soil Moisture(In-situ Data)

SMEX02의 지표 토양수분 측정은 Watershed 표본, Regional 표본, Tower 표본 등 여러 가지 방법으로 연구되었다. 각 표본은 항공기 측정 토양수분과 위성 측정 토양수분의 개선과 검증을 위해 지점의 평균 토양수분량을 제공하고 있다. 본 연구에서는 세 가지 표본 중에서 항공기 관측과 공간적인 관측 지점이 부합하는 Watershed 표본을 이용하였다.

In-situ를 이용한 토양수분의 표본은 공간 스케일이 800 m×800 m로 이루어졌으며, Fig. 2와 같이 두 개의 탐사구(A, B)에서 2, 5, 10, 15, 20, 30 cm 깊이에 Water Content Reflectometer(WCR), Soil Temperature Probes(STP) 센서를 1, 2, 3, 4 cm에 Averaging Thermocouple(TCAV) 센서를 설치하여 측정되었다. A탐사구에서는 식물이 재배되어 있는 방향에 대하여 수평방향으로 장비를 설치하였고, B탐

Table 1. Characteristics of Study Area

Site No.	Coordinate		Crop Type	Slope (%)	Study Area		Ave. LAI	Ave. Height (m)
	Lat(°)	Long(°)			Clay(%)	Sand(%)		
WC15	41.939	-93.664	Corn	1.14~3.43	28.14	27.83	3.75	1.57
WC16	41.934	-93.666	Soybean	1.25~3.63	27.75	27.09	0.65	0.23
WC23	41.991	-93.537	Soybean	2.43~3.55	26.25	30.43	1.56	0.31
WC24	41.991	-93.528	Corn	1.83~4.55	25.41	31.28	3.6	1.68

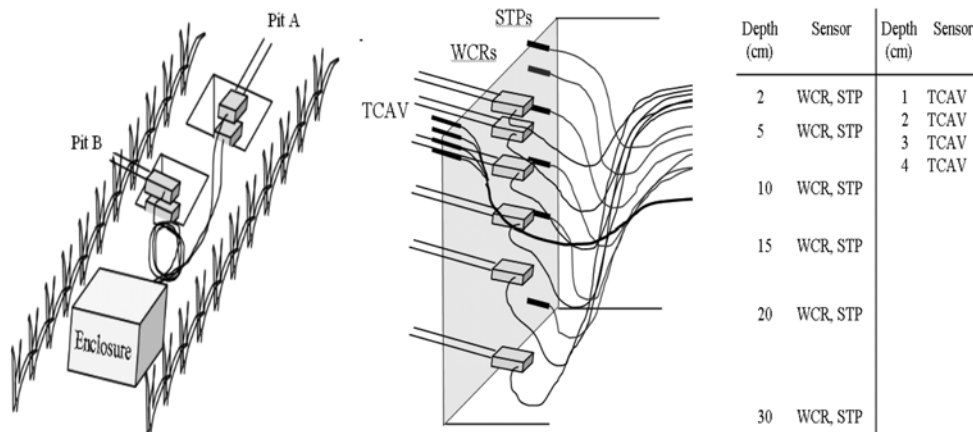


Fig. 2 Installation Structure of Sensors Sources: NSIDC(<http://nsidc.org/>)

Table 2. Information of Sensors

Sensor	Model Name	Variable
Water Content Reflectometer	CS615	Soil moisture
Soil Temperature Probe	107B	Soil temperature
Averaging Thermocouple	TCAV	Upper 5 cm soil temperature
Tipping Bucket Rain Gauge	TE525	Rainfall

사구에서는 수평과 수직방향으로 장비를 설치하여 시간의 변화에 따라 관측된 자료들의 평균값을 이용하여 자료를 구축하였다.

각 지점별 두 개의 탐사구에서 관측하는 센서들은 Table 2에서와 같이, WCR(Water Content Reflectometer)은 수분 함유량에 따른 전류 및 전압 등의 측정을 통해 토양수분을 도출하고, STP(Soil Temperature Probe)와 TCAV(Averaging Thermocouple)는 각 깊이에 따른 토양 온도를 측정한다. 또한 TBR(Tipping Bucker Raingage) 센서를 설치하여 강우를 관측하여 자료를 구축한다.

설치된 장비들은 Gravimetric Water Content(GWC)를 관측하여 Water Content Reflectometer(WCR)를 보정하고, 이를 이용하여 VWC(Volumetric Water Content) 자료가 생성된다. VWC의 자료 생성과정은 식 (1)과 같다.

$$t_{cor} = t_{meas} - (T - 22)[t_{meas}(1 - c_1) - c_0] / 15 \quad (1)$$

여기서  $t_{cor}$ 는 온도교정기간,  $t_{meas}$ 는 측정기간,  $T$ 는 토양온도이고,  $c_0$ 는 0.8,  $c_1$ 는 0.1824이다. 계산된  $t_{cor}$ 를 이용하여 아

래의 식 (2)와 같이 GWC가 산정된다.

$$GWC = S \times t_{cor} + I \quad (2)$$

여기서  $S$ 는 기울기고,  $I$ 는 절편이다. 이와 같이 지표 산정을 위해 제공되는 토양수분, 토양 온도, 강우량 등은 2002년 6월 23일부터 7월 23일까지 일 단위로 10초 마다 측정된 데이터를 15분 간격으로 평균한 것이며, 보다 상세한 내용은 미국 National Snow and Ice Data Center([http://nsidc.org/data/amr\\_validation/soil\\_moisture/smex02/index.html](http://nsidc.org/data/amr_validation/soil_moisture/smex02/index.html))에서 참조할 수 있다.

Fig. 3은 4개의 지점(WC15, 16, 23, 24)에서의 강우량과 깊이(2-30 cm)에 따라 토양수분을 6월 25일부터 7월 13일까지 도시한 것이다. 7월 5일과 7월 11일의 전후에서 강우가 발생하였고, 지표와 가까운 깊이의 2 cm와 5 cm에서의 토양수분은 보다 깊은 곳에서의 토양수분 보다 강우에 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 본 연구에서는 PSR 데이터와 비교하기 위해 이 중 10일의 자료만을 사용하였다. Table 3에서는 본 연구에 사용된 10일 간의 각 지점 자료에 대한 기초통계 자료이다.

### 2.3 Polarimetric Scanning Radiometer(PSR) Soil Moisture

NASA에서 2002년 5월에 발사한 토양수분 관측 위성인 AMSR-E(Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth Observing System)를 이용한 토양수분 자료를 검증하기 위해 Georgia Institute of Technology와 NOAA의 Environmental

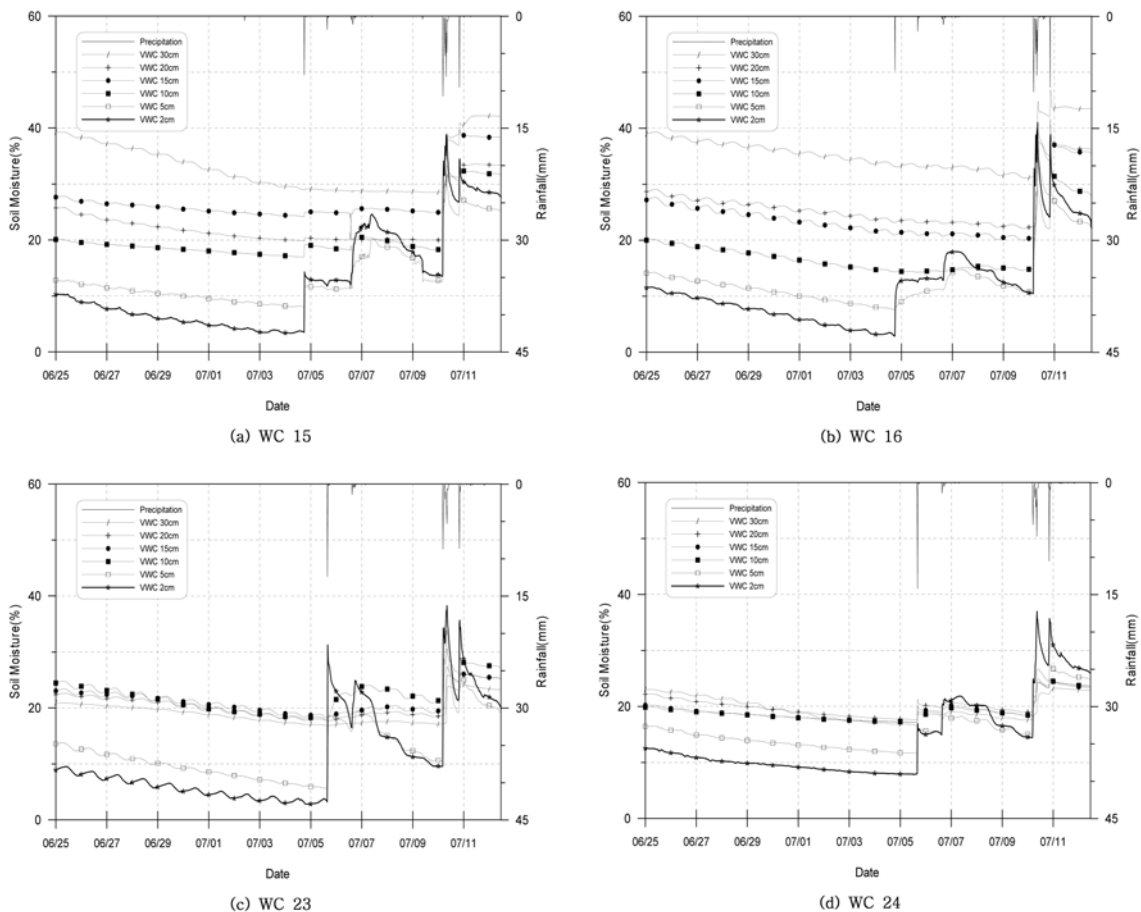


Fig. 3 Rainfall and Soil Moisture Data Observed by In-situ

Table 3. Statistics of Soil Moisture Observed by In-situ

WC 15						WC 16					
Depth	Mean	Min.	Max.	Med.	Std.	Depth	Mean	Min.	Max.	Med.	Std.
2	14.6	3.4	38.8	10.3	9.7	2	13.6	2.8	41.0	11.3	8.5
5	15.5	8.1	32.4	12.6	6.6	5	14.5	7.5	34.9	12.0	6.0
10	21.8	16.9	34.0	19.0	5.7	10	19.7	14.3	38.4	17.6	5.9
15	28.6	24.1	39.8	25.9	5.4	15	26.2	20.0	40.5	24.5	5.9
20	24.3	19.8	34.5	22.2	5.0	20	27.7	22.1	41.7	26.4	5.2
30	34.5	28.5	42.2	34.6	5.0	30	36.9	31.1	46.9	36.7	4.2
WC 23						WC 24					
Depth	Mean	Min.	Max.	Med.	Std.	Depth	Mean	Min.	Max.	Med.	Std.
2	12.0	2.8	38.3	9.4	8.4	2	16.0	7.9	37.0	12.5	7.8
5	13.4	6.0	34.0	11.8	5.9	5	17.2	11.7	27.6	15.7	4.9
10	23.0	18.0	30.6	22.3	3.1	10	19.8	17.2	24.9	18.9	2.4
15	21.9	18.4	27.4	21.5	2.4	15	19.8	17.2	24.6	19.0	2.3
20	21.3	17.8	26.1	20.9	2.7	20	20.7	17.7	25.1	20.0	2.1
30	19.8	17.0	24.3	19.5	2.4	30	20.1	16.8	23.2	19.9	2.3

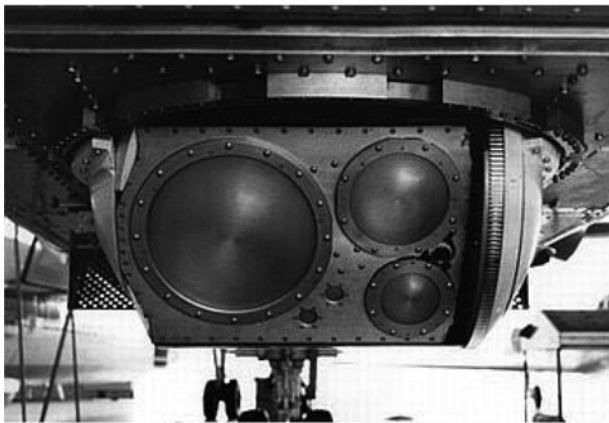


Fig. 4 Observation Equipment (PSR/C, X-band) on Aircraft (WFF P-3B) Sources: NOAA homepage (<http://www.esrl.noaa.gov>)

Technology Laboratory(현재 NOAA/ESRL PSD)에서 개발한 Polarimetric Scanning Radiometer(PSR)의 C/X-band를 이용하였다. PSR은 항공측정 마이크로웨이브 라디오미터로 C(7.32 GHz)/X(10.7 GHz)-band를 이용하여 H(horizontal)와 V(vertical)의 편광으로 밝기온도(Brightness Temperature,  $T_b$ )를 관측 후, 관측된  $T_b$ 를 통해 복원 알고리즘(Retrieval Algorithm)을 이용하여 토양수분을 산정하였다. SMEX02 실험에 사용된 PSR은 2002년 6월 25, 27, 29일과 7월 1, 4, 8, 9, 10, 11, 12일(DOY 176~193)의 총 10일 동안 Fig. 4와 같이 항공기(NASA WFF P-3B)에 탑재하여 관측하였다. PSR의 주파수, 편광 및 빔의 각도는 Table 4에 정리되어 있다.

PSR로부터 생성된 토양수분 자료는 Fig. 5와 같이 항공기에서 관측된 PSR 자료를 ENVI를 이용하여 나타내었다. 적색에 가까울수록 토양이 건조한 것을 의미하고, 파란색에 가까울수록 토양의 수분함양이 많은 것을 의미하며, Fig. 3에서와 같이 7월 8일과 11일 전후에 강우가 발생하면서 토양수분이 증가하여 7월 4일(e)과 8일(f)을 비교하고, 7월 10일

Table 4. PSR/C,X-band Channels to SMEX02

Frequency (GHz)	Polarizations	Beamwidth
5.82-6.15	V, H	10°
6.32-6.65	V, H	10°
6.75-7.10	V, H, U, V	10°
7.15-7.50	V, H	10°
10.6-10.8	V, H, U, V	7°
10.68-10.70	V, H	7°
9.6-11.5 um IR	V +H	7°

(h)과 11일(i)을 비교했을 때, 전체적으로 적색의 비율이 감소하고, 파란색의 비율이 증가하는 경향을 정량적으로 보여 주고 있는 것을 알 수 있다.

### 3. 연구 방법 및 이론

#### 3.1 상관성 분석

##### 3.1.1 Rank Sum Test

Wilcoxon(1945)에 의해 개발된 Rank Sum test는 두 개의 독립성 표본의 자료를 관측된 자료의 기간에서 두 집단의 중앙값이 서로 동일한지를 비교하기 위한 비모수적 방법(Siegel and Castellan, 1988)이다. 두 모집단의 중앙값이 동일하다는 것을 기준( $H_0$ : Prob[xy]=0.5)으로 귀무가설을 통해 검정을 실시한다.

통계량을 검정하기 위해서 두 개의 그룹은 가장 작은 값에서 큰 값으로 순서대로 나열하여 순위를 결정하고, 동일한 값의 자료는 순위의 평균을 이용한다. 두 그룹 중 모집수가 작은 그룹의 순위의 합을 통해 통계량을 결정한다.  $n$ 은 두 그룹 중 자료의 개수가 작은 수,  $m$ 은 두 그룹 중 자료의 개수가 큰 수,  $N$ 은 두 그룹의 자료의 수를 합한 수이며,  $S$ 는 작은 모집단의 크기를 가지고 있는 그룹에 대한 순위의 합을 의미한다. 전체 크기에 대한  $S$ 의 이론적 평균과 표준

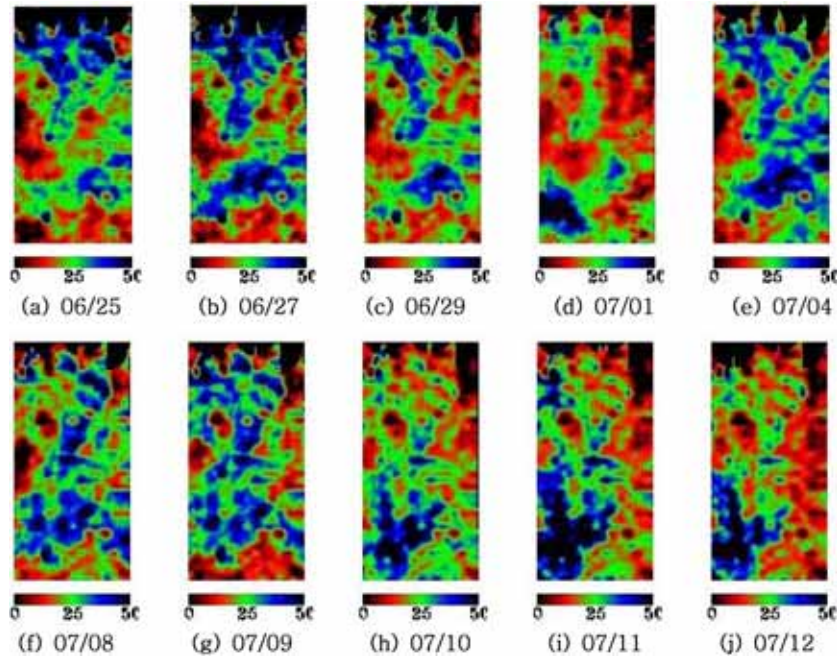


Fig. 5 Soil Moisture Image Observed by C-band of PSR (800 m×800 m)

편차는 식 (3)과 (4)와 같이 계산한다.

$$\mu = \frac{n(N+1)}{2} \quad (3)$$

$$\sigma = \sqrt{\frac{n \times m \times (N+1)}{2}} \quad (4)$$

통계적 검정의 표준화된 형태의  $Z_{rs}$ 는 식 (5)와 같이 계산한다.

$$\begin{cases} \frac{S-0.5-\mu}{\sigma} & \text{if } S > \mu \\ 0 & \text{if } S = \mu \\ \frac{S+0.5-\mu}{\sigma} & \text{if } S < \mu \end{cases} \quad (5)$$

$Z_{rs}$ 는 정규분포를 따른다는 것을 가정하며, 한계 검정 통계량은 유의수준에 따라 표준정규분포표를 통해 계산되어진다.

### 3.1.2 t-Test

t-test는 두 독립적인 모집단의 자료를 비교하는 이론들 중 가장 널리 사용되고 있는 방법이며, 모수적 방법으로서 평균이 일정한지를 검정하는 이론이고, 자료는 정규분포를 따르는 것으로 가정하여 귀무가설을 설정한다. 대립가설은 양측 검정의 경우 평균이 다르다는 것이며, 단측 검정의 경우 한 그룹의 평균이 다른 그룹의 평균보다 크다는 것이다. 표본의 표준편차는 식 (6)과 같이 계산하며, 검정 통계량  $t$ 는 식 (7)과 같이 계산된다.

$$s = \sqrt{\frac{(n-1)s_x^2 + (m-1)s_y^2}{n+m-2}} \quad (6)$$

$$t = \frac{\bar{x} - \bar{y}}{s \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{1}{m}}} \quad (7)$$

여기서  $s_x$ ,  $s_y$ 는 각 모집단의 표준편차이고,  $n$ 과  $m$ 은 각 그룹의 관측 자료 개수이며,  $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ 는 각 그룹의 평균이다. 검정 통계량은  $t$ -분포를 따르며, 단측 검정의 기각역은  $t > t_{\alpha}$ ,

양측검정의 기각역은  $|t| > |t_{\alpha/2}|$ 이다.

### 3.2 PPCC Test

최적의 확률 분포형을 결정하는 방법은 도식적인 방법을 이용한 추상도에 의한 검정, 확률지에 의한 검정이 있고, 유의수준을 기준으로 수학적 방법을 이용한 Chi-square( $\chi^2$ ) test, Kolmogorov-Smirnov(KS) test, Probability Plot Correlation Coefficient(PPCC) test, Cramer-von Mises test가 있다. 이 중 본 연구에서는 현재까지 기각력이 가장 좋다는 PPCC test를 이용하여 확률분포형의 적합도를 검정하였다(신홍준 등, 2009). PPCC test는 유의수준에 따른 검정 통계량을 유도하는 확률 분포형의 적합도 검정으로 Filliben(1975)에 의해 개발되었다. 이 검정은 관측된  $x_i$ 와 Cumulative Distribution Function(CDF)의 역함수인  $M_i$ 의 상관관계를 이용하여 유의수준에 따른 검정한계치를 기준으로 분포형을 검정한다(이재수, 2006).

$$r_c = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(M_i - \bar{M})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (M_i - \bar{M})^2}} \quad (8)$$

여기서  $r_c$ 는 적모멘트계수,  $i$ 는 작은 수에서 큰 수로 나열된 자료의 크기 순서,  $x_i$ 는 관측 자료 계열,  $\bar{x}$ 는 관측 자료의 평균,  $M_i$ 는 이론적으로 얻어진 자료계열,  $\bar{M}$ 는 이론적으로 얻어진 자료계열의 평균이다.

$$M_i = G^{-1}(p_i) \quad (9)$$

$$p_i = \frac{i}{N+1} \quad (10)$$

여기서  $M_i$ 는 CDF의 역함수,  $p_i$ 는 Weibull 공식에 의해 얻어진 초과확률이다. 적모멘트계수  $r_c$ 를 계산한 다음 유의수준  $\alpha$ 에 대한 검정한계치  $r_{\alpha}^*$ 와의 조건에 따라 분포형을 검

정한다.

귀무가설 ( $H_0$ ) : 자료는 특정 분포형을 따른다.

Reject  $H_0$ , if  $r_c < r_{\alpha}^*$

대립가설 ( $H_1$ ) : 자료는 특정 분포형을 따르지 않는다.

Fail to reject  $H_0$ , if  $r_c > r_{\alpha}^*$

#### 4. 결 과

##### 4.1 상관 분석

토양수분은 깊이에 따라 일정하다는 가정에서 마이크로웨이브 파장대의 관입 깊이는 토양수분의 변화에 따라 달라진다(Nolan and Fatland, 2003). Fig. 6은 PSR C-band에 의하여 획득된 토양수분과 각 지점의 In-situ 데이터와의 상관 관계를 나타낸 것이다. 본 연구에서는 이전의 “PSR의 토양수분은 관입 깊이 2 cm에서의 토양수분을 설명할 수 있다”라는 연구결과(김광섭, 2006)와 비슷하게 3개의 지점에서(WC16, WC23, WC24) 2 cm 깊이에 대한 상관성이 가장 좋은 양상을 보이고 있다. 하지만 WC15 지점에서만 10 cm에서 가장 높은 상관관계가 있음을 보여주었다. 이것은 지역에 따른 깊이의 변동은 차이가 있을 수 있기 때문에 보통 2-10 cm의 영역대를 형성하고 있다고 할 수 있다. 관입 깊이가 깊어질수록 WC15 지점과 유사한 상관관계가 형성된다. WC16과, WC23 지점의 경우 약 2-5 cm와 10-30 cm에서 관입 깊이가 비슷한 상관계수를 보이고 있으나 두 그룹 간의 상관계수는 약간의 차이를 보이고 있다.

옥수수 경작지인 WC15 지점과 WC24 지점의 관입 깊이에 따른 상관관계 그래프 양상이 표면에 가까운 지역은 높

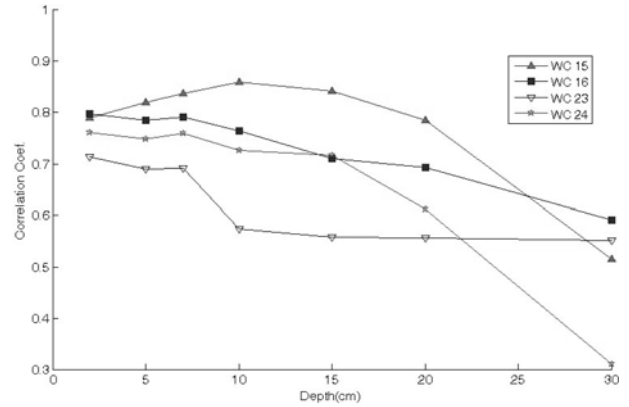


Fig. 6 Correlation Coefficient of Soil Moisture between PSR and In-situ

은 상관관계에서 깊이가 깊어짐에 따라 상관성이 없는 것을 알 수 있다. 콩 경작지인 WC16과 WC23 지점의 그래프의 양상 또한 깊이가 깊어짐에 따라 전체적으로 상관성이 떨어지나 0.55 이상의 일정 상관성을 유지하고 있다. 또한, 관입 깊이 2-10 cm에서 WC15와 WC16 지점이 WC23와 WC24 지점보다 상관계수가 높게 형성된 것을 볼 수 있다.

##### 4.2 t-Test와 Rank Sum Test

PSR의 C-band에 의한 토양수분 데이터와 각 지점별 관입 깊이에서의 토양수분의 데이터에 대해 각각 t-test와 Rank Sum test를 통해 자료의 평균과 중앙값의 상관성을 알아보았다. 본 연구에서 비교하고자하는 항공기 데이터와 In-situ를 이용한 토양수분의 자료의 평균과, 중앙값의 차이를 검증하기 위해 두 집단이 서로 같다는 귀무가설( $H_0$ )을 세우고,

Table 5. Results of t-Test

Depth (cm)	WC15		WC16		WC23		WC24	
	$H_0$	P-value	$H_0$	P-value	$H_0$	P-value	$H_0$	P-value
2	reject	0.075	reject	0.021	reject	0.006	reject	0.046
5	reject	0.042	reject	0.013	reject	0.006	reject	0.034
7	accept	0.299	accept	0.113	reject	0.048	reject	0.058
10	accept	0.977	accept	0.354	accept	0.932	accept	0.142
15	reject	0.021	accept	0.206	accept	0.619	accept	0.142
20	accept	0.374	reject	0.071	accept	0.485	accept	0.277
30	reject	0.000	reject	0.000	accept	0.218	accept	0.178

주) accept : mean이 서로 같다. reject : mean이 서로 같지 않다.

Table 6. Results of Rank-Sum Test

Depth (cm)	WC15		WC16		WC23		WC24	
	$H_0$	P-value	$H_0$	P-value	$H_0$	P-value	$H_0$	P-value
2	accept	0.121	reject	0.075	reject	0.017	reject	0.089
5	reject	0.045	reject	0.042	reject	0.007	reject	0.054
7	accept	0.162	reject	0.299	accept	0.121	accept	0.104
10	accept	0.734	accept	0.977	accept	0.791	accept	0.186
15	reject	0.026	accept	0.021	accept	0.910	accept	0.186
20	accept	0.241	reject	0.374	accept	0.623	accept	0.307
30	reject	0.001	reject	0.000	accept	0.186	accept	0.162

주) accept : median이 서로 같다. reject : median이 서로 같지 않다.

Table 7. Results of PPCC Test

Site	Depth	Coefficient of Variation	Skewness	Kurtosis	PPCC			Fitness of PDF
					Normal	Log-normal	Gumbel	
WC15	2	101.43	0.42	-1.78	accept	accept	accept	N/LN/G
	5	47.35	0.61	-1.52	accept	accept	accept	N/LN/G
	7	71.53	0.50	-1.67	reject	accept	accept	LN/G
	10	36.11	1.06	-0.92	reject	reject	reject	-
	15	32.95	1.06	-0.81	reject	reject	reject	-
	20	28.85	0.88	-0.82	reject	accept	accept	LN/G
	30	26.75	0.09	-1.41	accept	accept	accept	N/LN/G
	PSR	37.46	0.61	-0.69	accept	accept	accept	N/LN/G
WC16	2	71.46	0.68	-1.29	accept	accept	accept	N/LN/G
	5	37.01	0.79	-1.15	reject	accept	accept	LN/G
	7	52.27	0.75	-1.23	reject	accept	accept	LN/G
	10	35.34	0.80	-1.20	reject	accept	accept	LN/G
	15	35.88	0.72	-1.02	accept	accept	accept	N/LN/G
	20	27.91	0.73	-0.87	accept	accept	accept	N/LN/G
	30	17.89	0.29	-0.91	accept	accept	accept	N/LN/G
	PSR	46.46	1.06	0.34	reject	accept	accept	N/LN/G
WC23	2	64.52	0.74	-0.88	accept	accept	accept	N/LN/G
	5	31.21	0.57	-0.88	accept	accept	accept	N/LN/G
	7	46.02	0.69	-0.86	accept	accept	accept	N/LN/G
	10	9.91	0.08	-1.06	accept	accept	accept	N/LN/G
	15	5.52	0.25	-1.24	accept	accept	accept	N/LN/G
	20	6.95	0.38	-1.12	accept	accept	accept	N/LN/G
	30	5.57	0.34	-1.14	accept	accept	accept	N/LN/G
	PSR	66.73	1.08	1.62	accept	accept	accept	N/LN/G
WC24	2	61.93	0.56	-1.48	accept	accept	accept	N/LN/G
	5	24.89	0.77	-1.04	accept	accept	accept	N/LN/G
	7	40.78	0.64	-1.31	accept	accept	accept	N/LN/G
	10	5.81	0.83	-0.93	accept	accept	accept	N/LN/G
	15	5.39	0.73	-1.02	accept	accept	accept	N/LN/G
	20	4.58	0.28	-1.34	accept	accept	accept	N/LN/G
	30	5.29	-0.1	-1.70	accept	accept	accept	N/LN/G
	PSR	33.84	0.26	-0.39	accept	accept	accept	N/LN/G

주) N: Normal, L: Log-normal, G: Gumbel

각각 10% 유의수준으로 검정을 실시하였다. Table 5와 6은 검정결과를 정리한 것이다.

두 가지 검정 모두 깊이에 따라 다양한 결과가 산정되었지만 공통적으로 10 cm 깊이에서는 모두 10% 유의 수준에서 평균과 중앙값이 같다는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 평균값을 결정하는 검정에 있어서, 지표면에 가까운 2 cm와 5 cm에서는 평균과 중앙값 모두 변동이 큰 것으로 산정이 되었고, WC24 지점에서는 대체적으로 깊이가 커질수록 PSR과 대응하는 값을 가지는 결과를 얻었다.

#### 4.3 PPCC Test

본 연구에서는 10% 유의수준에 대해 기각력이 가장 좋은 PPCC test를 통해 분포형을 검정하였다. 검정하기 위한

대상 분포형은 가장 일반적으로 사용되고 있는 정규분포, 대수정규분포, 그리고 Gumbel 분포를 선정하여 검증하였다. 4개의 지점에서 7개의 깊이와 PSR의 자료에 대하여 검증한 결과는 Table 7에 정리되어 있다. WC23과 WC24 지점에서의 분포형은 3개의 분포형(Normal, Log-Normal 그리고 Gumbel 분포) 모두에 적합한 결과를 얻었고, WC15와 WC16 지점에 대해서는 정규분포 보다는 대수정규분포 및 Gumbel 분포를 따르는 것을 알 수 있다.

#### 5. 결 론

본 연구에서는 토양수분이 깊이에 따라 일정하다는 가정 하에 PSR의 C-band의 Landset 이미지에 의하여 얻은 토양



수분과 In-situ 데이터와의 상관관계 및 그에 따른 상호 통계적 분석을 통하여 상관성을 검증하였다. 상관관계 분석 결과 지표로부터 2-10 cm 깊이에서 높은 상관성을 보이는 결과를 얻었고, 토양수분의 깊이에 따라 *t*-test와 Rank Sum test를 실시한 결과 10 cm에서의 토양 수분이 두 데이터간의 상호 유의하다는 결과를 얻을 수 있었다. 이는 이전 C-band는 2-10 cm 까지 관측할 수 있다는 선행 연구결과에 부합하는 결과를 얻을 수 있었다. 또한 PSR 과 In-situ 자료의 확률 분포형 검정 결과, 두 데이터 모두 정규분포보다는 대수정규분포 및 Gumbel 분포를 따른다는 결과를 얻었다. 이와 같이 항공기 자료와 실제 측정된 토양수분의 자료는 2 cm와 7 cm 깊이를 대표로 상호 유의함을 알 수 있었다. 하지만, 본 연구에서는 SMEX02에 대하여 10일간의 데이터를 4개의 대상지역에서만 연구를 진행하였기 때문에 보다 신뢰성 있고 정확한 알고리즘을 위하여 향후 많은 지역에 적용하여 연구를 시행하여 적용성을 판단하는 연구들이 진행되어야 할 것이다. 또한 현재 우리나라의 토양수분 자료를 적절히 활용하지 못하는 상태에서 PSR 데이터를 활용하여 결측치 및 정확한 자료를 위하여 알고리즘 개발 및 자료 보정을 통해 토양수분과 관련된 연구의 기초 자료가 될 것으로 기대된다.

### 감사의 글

본 연구는 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원(과제번호:2010-0016717과 2010-0009742)에 의해 수행되었습니다.

### 참고문헌

김광섭(2006) PSR C-band 및 ESTAR L-band 측정치를 사용한 다중 채널 원격측정 토양수분 자료의 변화도 비교. **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제26권 제4B호, pp. 329-334.  
 김광섭(2007) 유역관리를 위한 토양수분 분석(I)-토양수분 관측

연구동향. **한국수자원학회지**, 한국수자원학회, 제40권 제1호, pp. 62-71.  
 신홍준, 이원근, 허준행(2009) 경험적 분포함수의 통계량을 이용한 확률분포형의 결정. **대한토목학회 정기학술대회 논문집**, 대한토목학회, pp. 2489-2492.  
 이재수(2006) **수문학**, 구미서관.  
 황교택, 조훈식, 이승오, 최민하(2010) 건조지역 원격탐사 footprint 내 토양수분의 시공간적 변동성 분석. **대한토목학회 논문집**, 대한토목학회, 제30권 제3B호, pp. 285-293.  
 Bindlish, R., Jackson, T.J., Gasiewski, A.J., Klein, M., and Njoku, E.G. (2008) Soil moisture mapping and AMSR-E validation using the PSR in SMEX02. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 103, Issue. 2, pp. 127-139.  
 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, pp. 883-896.  
 Das, N.D. and Mohanty, B.M. (2008) Temporal dynamics of PSR-based soil moisture across spatial scales in an agricultural landscape during SMEX02: A wavelet approach. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 112, Issue. 2, pp. 522-534.  
 Filliben, J.J. (1975) The probability plot correlation coefficient test for normality. *Technometrics(American Society for Quality)*, Vol. 17, No. 1, pp. 111-117.  
 Kim, G. and Barros, A.P. (2002) Downscaling of remotely sensed soil moisture with a modified fractal interpolation method using contraction mapping and ancillary data. *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, Issue. 3, pp. 400-413.  
 Nolan, M. and Fatland, D.R. (2003) Penetration depth as a DInSAR observable and proxy for soil moisture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, Vol. 41, Issue. 3, pp. 532-537.  
 Siegel, S. and Castellan, N.J. (1988) *Nonparametric Statistics for the Behavioral Sciences*. McGraw-Hill., New York, NY.  
 van Zyl, J., Njoku, E., and Jackson, T. (2003) Quantitative analysis of SMEX'02 AIRSAR data for soil moisture inversion. *Proceedings of Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Pasadena, CA USA, Vol. 1. pp. 404-406.  
 Wilcoxon, F. (1945) Individual comparisons by ranking methods. *Biometrics Bulletin*, Vol. 1, No. 6, pp. 80-83.

(접수일: 2010.6.4/심사일: 2010.7.12/심사완료일: 2010.7.12)