원격탐사를 이용한 토양수분산정

김 광 섭 |
경북대학교 건축토목공학부 교수
kimgs@knu.ac.kr

박 정 아 |
경북대학교 공간정보학과 석사과정
parkk@knu.ac.kr

박 진 혁 |
수자원연구소 책임연구원
Park5103@kwater.or.kr

1. 서 론

토양수분은 지구상에서 담수의 약 0.15% 정도로 작은 구성비를 가지고 있음에도 불구하고 증발산, 침투, 유출 등의 수분 이동을 결정하여 지상과 대기, 물과 에너지 상호작용을 연계하는 주요 수문 기상변수로서, 이에 대한 기반기술 확립이 시급하다. 나아가 가용 자료를 활용하여 다양한 수문모형 적용과 수자원 관리에 타당한 시공간 해상도와 공간정보 대표성을 가지는 토양수분 자료를 생산 할 수 있는 기법의 개발이 필요하다.

관측기술의 발달로 인하여 다중 원격관측 자료, 지상관측 자료 및 유역특성 자료의 활용이 가능한 시점임에도 불구하고 우리나라에서는 수문모형 적용과 수자원 관리에 타당한 광역 토양수분에 대한 관측이 미흡한 실정이다. 토양수분관측 관련 선진국에서는 위성관측을 통한 토양수분 생산 알고리즘을 개발하기 위해 공중관측이나 이를 검증하기 위한 대규모 지상 관측을 지속적으로 실시하고 있으며 각종 장마와 같은 각종 수문 기상현상들의 토양수분 상관성을 규명하기 위한 기반기술을 구축되고 있다.

현재 우리나라의 토양수분 관측수준은 TDR(Time Domain Reflectometry) 방법 및 중성자탐사법(neutron probe) 등을 이용한 지점관측을 수행하는 단계이며 관측 비행기를 이용한 공중관측은 실시되지 못하고 있으며 미국이나 일본 및 EU에서 수행하고 있는 위성관측에 참여하고 있지 못한 실정이다. 지상관측방법은 유지에 있어서 많은 인력과 비용을 소요하게 되고, 관측 자료의 품질관리에 있어 일관성을 유지할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 따라서 remote sensing을 이용한 토양수분산정은 이러한 지상관측의 단점을 해소하여 지속적이고 광범위한 자료의 수집으로 가능하게 할 것이다. 현재 운영되고 있는 토양수분관련 위성관측기기들은 AQUA 위성의 Advanced Microwave

Scanning Radiometer(AMSR)와 Soil Moisture and Ocean Salinity (SMOS) 위성의 Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis (MIRAS) 등이 있다. 그러나 AMSR 기기는 근본적으로 토양수분을 관측하기 위하여 설계된 것이 아니며, 기후 및 지형, 식생피복의 영향에 아주 민감하여 토양수분 측정에 이상적인 상황이 아니므로, 경험적 방법이나 이론적 방법 등을 이용하여 식생피복 등의 후방산란(backscattering) 영향을 보정할 필요가 있다. MIRAS를 이용한 L-band 위성 관측의 실현으로 보다 정확한 토양수분 활용이 가능할 것으로 판단된다. 과거의 인공위성 영상 자료를 이용하여 현재까지 구축되지 못한 토양수분 자료를 복원하여 시공간변화도를 분석함과 동시에 토양수분 변동특성 예측 등에 활용이 가능하다. 또한 공간해상도가 높은 MODIS 식생 자료와 지상관측 수문 자료 등 가용 자료를 활용한 수자원 관리를 위해 광역 토양수분 생산 연구가 필요하며, 모형구축에 대한 적합한 크기의 격자를 가진 다양한 입력 자료의 부재는 토양수분에 대한 적합한 downscaling 기법을 필요로 한다.

본 고에서는 토양수분 원격관측기술의 발전과정과 토양수분연구의 발전방향을 살펴보고 downscaling기법과 각종 수문 자료와 위성영상을 이용한 토양수분 자료 생산 모형의 예를 소개하고자 한다. 이를 통해 수문 및 기상모형에 활용 가능한 개선된 시공간 분해능과 공간정보대표성을 가진 광역토양수분 자료의 생산 및 적용 타당성을 제시하였다.

2. 원격측정기술의 발달

그림 1은 토양수분 자료를 위한 원격측정기술의 발정과정을 보여주고 있다. 1960~1970년대까지는 tower-mounted radiometer를 사용하여 소유역에 대하여 관측을 실시하였고, 1970~80년대에는 트럭이나 항공기에 장착된 radiometer를 사용한 관측이 실시되었으며, L-band와 PBMR(Push-Broom Microwave Radiometer)가 개발된 1990년대 초에는 airborne을 이용하여 측정을 실시하

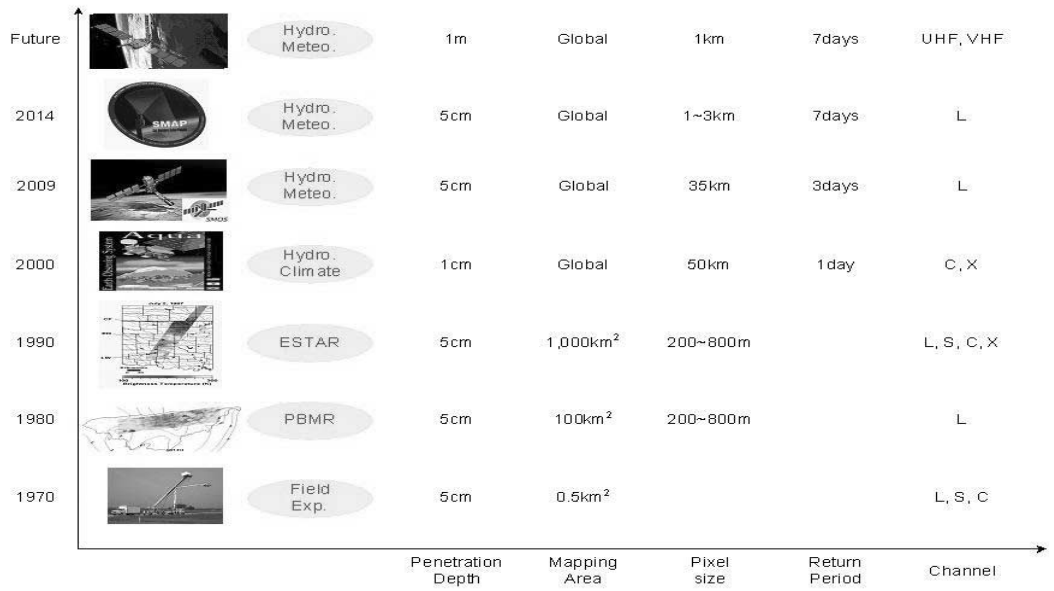


그림 1. 토양수분 원격측정기술의 발전과정

였다. ESTER(Electronically Scanned Thinned Array Radiometer)의 개발 후에 1992년에 Little Washita 실험과 1997년에 SGP97(Southern Great Plain 1997 Hydrology Experiment)에 적용되면서 광범위한 지역에 대한 토양수분관측의 가능성을 제시해주었다. 실험결과 L-band microwave sensing이 토양수분 자료를 관측하는데 가장 적합하다는 것을 보여주었다. 2002년 5월 4일 이후 AQUA 위성에 탑재된 AMSR-E (Advanced Microwave Scanning Radiometer-Earth observing system) 기기를 통하여 토양수분 C-band 전구관측이 이루어지고, 2009년 11월 2일 발사된 SMOS 위성의 MIRAS 기기를 통해 L-band관측의 토양수분 공간적인 분포 및 해양염분관측이 이루어지고 있으며, 이후로는 10 km 자료 획득을 목표로 하고 있으며, 관측깊이 1 m의 수평분해능 1 km 토양수분 자료 생산을 목표로 하고 있다.

1) Aqua 위성

최근 원격관측기술의 발달은 광역의 전자기파 스펙트럼 정보를 사용한 다양한 기술에 의하여 토양수분이 관측될 수 있음을 보여주었으며, 근적외선과 마이크로웨이브 파장대를 이용한 위성관측은 위성을 통한 토양수분의 관측 가능성을 보여주었다. NASA(National Aeronautics and Space Administration)에서 시행하고 있는 지구 관찰 시스템(EOS, Earth Observing System)의 일부인 Aqua 위성 AMSR-E 센서는 12개의 채널, C-band 6개의 주파수(6.925, 10.65, 18.7, 23.8, 36.5, 89.0 GHz)를 이용하여 전구 규모의 토양수분 자료를 생산한다. 생산된 토양수분 자료의 평균 25 km인 관측격자 크기와 약 1 cm의 관측심은 수문모형과 수자원 관리 적용에 있어 부적합하며, AMSR-E 관측기기의 물리적 한계로 인해 공간 토양수분의 대표성을 가지는데 한계가 있다. 또한 관측센서가 식생피복, 표면의 거칠기에 민감한 한계를 가지고 있어 토양수분의 낮은 추정치가 산정된다.

2) SMOS 위성

SMOS 위성은 유럽우주국(ESA, Euroupean Space Agency)의 지구 탐사 프로그램(Earth Explorer Opportunity)의 일환으로 개발된 두 번째 위성이며 앞서 2009년 3월에 첫 번째 위성인 GOCE(Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Explorer)를 발사하였다.

2009년 11월 2일 발사된 SMOS 위성은 L-band(1.4 GHz) 센서를 통해 지구관측 업무를 수행중에 있으며 지표면의 토양수분 관측과 해양의 염분측정이 가능하게 되었다. 이는 MIRAS(Microwave Imaging Radiometer using Aperture Synthesis) 기기를 통한 수동 마이크로웨이브 2-D 간섭관측식(Passive microwave 2D-interferometer) 복사계를 이용하여 지표에서 발산되는 마이크로파의 변화를 감지해 계절별 토양의 습도 분포 및 해양의 염분을 측정한다. SMOS 위성을 통해 얻은 자료는 지구 물 순환에 대한 이해를 향상시키고, 극한 사상 예측 및 기상 예측에 도움이 될 것이다.

3) SMAP 위성

SMAP(Soil Moisture Active Passive) 위성은 NASA에서 권장 임무의 첫 번째 단계에 있으며 2014년 11월 발사할 예정이다. SMAP의 임무는 토지 표면의 토양수분과 동결 융해 상태를 측정하는 것이며, 이러한 측정은 지구의 물, 에너지 및 탄소 사이클을 연결하는 프로세스를 이해하고, 물과 에너지 흐름의 추정 및 날씨와 기후 예측 기술의 향상, 홍수 예측 및 가뭄 모니터링 기능을 개선시킬 것이다.

SMAP 위성은 L-band 범위(1.20-1.41 GHz)에서 측정되고 수동 복사계(radiometer)와 활성 합성 영상 레이더(SAR, Synthetic Aperture Radar)로 구성되어 있다. 활성과 수동 센서는 표면 방출과 후방산란 활성 및 수동결합 측정 방식은 레이더의 공간해상도와 복사계의 감지 정확성을 높여 준다.

3. 인공신경망을 이용한 토양수분산정

1) 자료수집 및 모형구축

용담댐 유역은 정밀한 수문관측을 통해 정량적 수문조사와 분석을 하기 위해 2001년 한국수자원공사에서 수자원 시험유역으로 선정되었으며, 장수군, 무주군, 진안군의 경계에 위치한 지리적 특성을 가지고 있다. 북위 36°00′ ~ 35°35′, 동경 127°20′ ~ 127°45′에 해당하는 금강유역의 최상류 지역에 위치한 용담댐 유역의 면적은 약 930.43 km^2이며, 면적의 62.09%가 얕은 토심을 이루고 있으며, 79.9%가 산림지대이다. 그림 2는 대상유역인 용담댐 유역의 토양수분 관측지점을 나타내었으며, 이는 수집된 6개 지점(주천, 부귀, 상전, 안천, 계북2, 천천2)의 토양수분 자료 중 강수발생에 대하여 토양수분의 거동이 잘 반영된 4개의 지점(주천, 부귀, 상전, 천천2)을 선택하였으며, 이를 이용하여 인공신경망모형 적용을 통하여 토양수분 산정모형을 개발하였다.

표 1은 용담댐 유역의 토양수분 관측지점별 토양특성과 관측 깊이를 나타내고 있으며, 수집된 자료의 기간은 2008년 5월 16일부터 8월 19일까지의 일별 자료이다. NASA에서 제공받은 MODIS(MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) NDVI(Normalized Difference Vegetation Index) 자료는 1 km × 1 km의 공간해상도를 가진 16일별 자료로 토양수분 관측 자료 주기와 동일

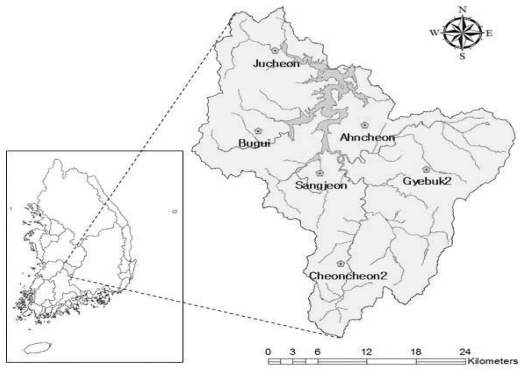


그림 2. 용담댐 유역 관측지점

표 1. 용담댐 유역 토양수분 관측지점별 토양특성과 측정 깊이

지점	토양 피복도	토 양 도[1]				관측 깊이[2]
		종류	명칭	유효토심	배수	
주천	산림	미사사양질 내지식질	회색토, 충적토	보통	불량	14 ㎝
부귀	산림	미사식양질 내지식질	암쇄토	얕음	매우양호 내지양호	13 ㎝
상전	밭	미사식양질 내지식질	암쇄토	얕음	매우 양호	13 ㎝
안천	논	미사식양질 내지식질	암쇄토, 적황색토	깊음	양호	10 ㎝
계북2	밭	미사사양질 내지식질	회색토, 충적토	보통	불량	13 ㎝
천천2	산림	미사식양질 내지식질	암쇄토	얕음	매우 양호	11 ㎝

1) 국가수자원관리종합정보시스템
2) 한국수자원공사

하게 일별로 구성하였다. NDVI는 식생의 존재와 상태를 나타내는 지표로 널리 사용되며, 무차원 값으로 양의 값을 가질 경우 그 지역의 식생이 증가하는 상태라는 것을 나타내며, 비 식생지역이나 수역은 음의 값을 가진다.

2) 토양수분 산정모형 적용 및 결과 분석

인공신경망모형을 적용해 대상지역의 토양수분 산정모형을 구성하기 위해, 용담댐 유역 3개 지점(주천, 부귀, 상전)의 토양수분, 지면온도, 강수량과 MODIS NDVI 자료를 입력 자료로 활용하였다. 각 자료별로 수치의 범위가 다양하여 본래의 자료를

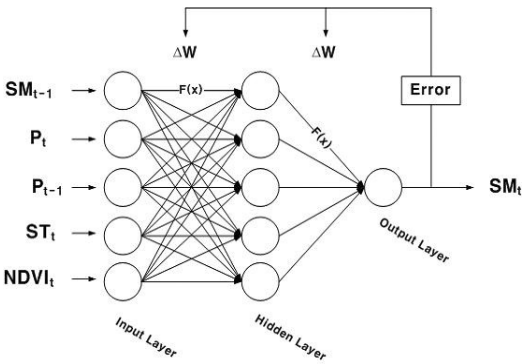


그림 3. 인공신경망모형 구성도

입력 자료로 인공신경망모형을 구성할 시 인공신경망의 효율이 낮아지게 되므로, 모형의 효율을 높이기 위해 원 자료의 변수들을 0에서 1사이 범위의 정규화 과정을 통해 전 처리하여 도출된 데이터를 역변환하는 과정을 거쳤다.

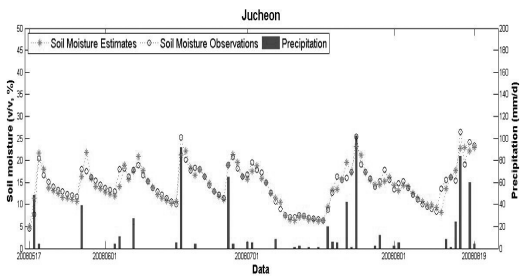
그림 3은 인공신경망모형 구성도를 나타내며, 5개 노드의 입력층, 5개 노드의 은닉층과 1개의 출력층으로 구성하였다. 강수발생시점에 따라 토양수분의 반응정도가 다를 수 있어 추가적으로 전날의 강

표 2. 각 지점별 토양수분 산정모형의 검증 통계량

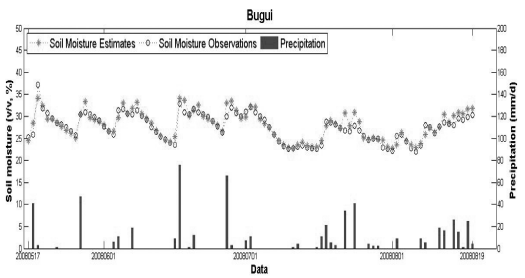
지 점		상관계수	평균제곱근오차	평균경향오차
훈 련	주 천	0.9413	1.5527	−0.1958
	부 귀	0.9350	1.2016	0.3899
	상 전	0.9296	1.7328	−0.2893
검 증	천 천 2	0.8215	4.2077	−3.6310

수량 자료를 추가적으로 입력하였다. 은닉층 수는 넓은 범위의 토양수분 예측이 가능하도록 5개로 정하였으며, 역전파 알고리즘을 이용한 인공신경망의 학습 시 최적의 학습률을 구하기 위해 0.001에서 0.1까지 다양한 적용을 한 결과, 결과값에 큰 영향을 미치지 않는 비슷한 결과를 보였으나 그 중 가장 좋은 결과를 보여준 0.005를 사용하였으며, 모멘텀 상수는 0.95를 사용하였다. Overtraining을 피하기 위해 훈련지점(주천, 부귀, 상전)과 검증지점(천천2)의 서브세트로 구성하여 학습 횟수는 3000회로 하였다.

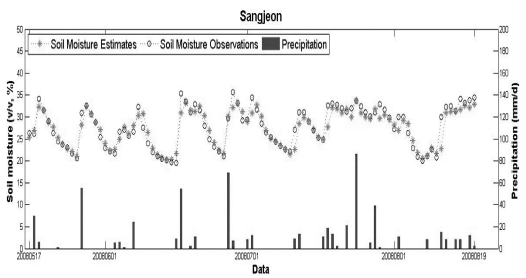
토양수분 관측치와 산정치 간의 상관성을 표현하는 상관계수, 표준편차를 나타내는 평균제곱근오차와 평균경향오차를 이용하여 수립된 토양수분 산정



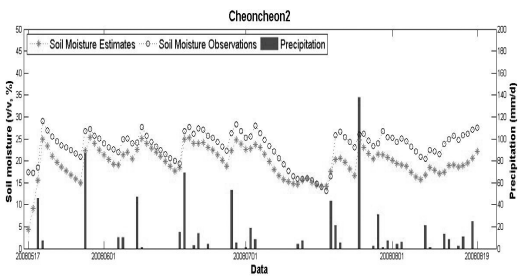
(a) 주천



(b) 부귀

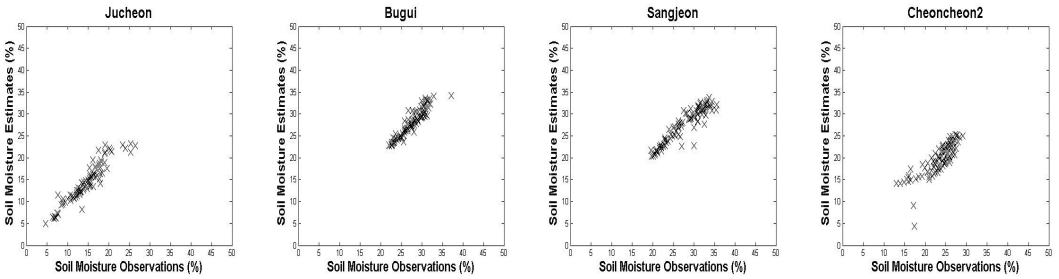


(c) 상전



(d) 천천2

그림 4. 용담댐 유역에 대한 토양수분 산정모형 학습 지점(주천, 부귀, 상전) 및 검증지점(천천2)의 토양수분 관측치 및 산정치 시계열



(a) 주천 (b) 부귀 (c) 상전 (d) 천천2

그림 5. 용담댐 유역 4개 지점의 토양수분 관측치와 산정치의 상관분석

모형의 적용가능성을 평가하였다. 용담댐 유역의 3개 지점(주천, 부귀, 상전)을 이용하여 수립된 토양수분 산정모형을 검증하기 위해 천천2 관측지점의 토양수분을 산정하였으며, 산정된 토양수분을 각 지점별 관측치와 비교 분석한 결과, 표 2와 같음을 확인할 수 있다. 그림 4는 용담댐 유역 각 지점별 일강수량과 함께 토양수분 관측치와 산정치의 시계열을 보여주고 있으며, 그림 5는 각 지점별 토양수분 관측치와 산정치의 상관분석 한 결과를 보여주고 있다.

주천, 부귀, 상전 지점의 토양수분 자료를 이용하여 학습된 인공신경망모형은 주천지점이 약 0.9413의 상관계수, 약 1.5527%의 평균제곱근오차와 약 -0.1958%의 평균경향오차를 보였으며, 부귀지점은 약 0.9350의 상관계수, 약 1.2019%의 평균제곱근오차와 약 -0.2893%의 평균경향오차의 결과들을 보여주어, 용담댐 유역 3개 관측지점의 자료를 이용한 인공신경망모형의 학습이 잘 이루어졌다고 판단되었다. 이를 검증하기 위한 천천2 지점은 약 0.8215의 상관계수, 약 4.2077%의 평균제곱근오차와 약 -3.6310%의 평균경향오차를 보여, 구축된 인공신경망모형이 용담댐 유역의 토양수분을 잘 산정한다고 판단되었다.

4. 결 론

인공위성영상 자료 중 식생 상태를 표현하는 MODIS NDVI 자료와 지상 관측망에서 관측된 토양수분, 강수량, 지면온도 자료를 활용하여 광역의 토양수분정보를 생산하였다. 자료 사이의 비선형 상관특성을 잘 구현하는 인공신경망 기법을 연계한 토양수분 산정기법을 제시하였으며, 토양수분 산정모형은 신뢰성 높은 토양수분 관측망을 가지고 있는 용담댐 유역에 대하여 적용하였다. 또한 상관계수와 평균제곱근오차, 평균오차를 이용하여 용담댐 유역의 각 지점별로 토양수분 관측치와 산정치를 비교함으로써, 수립된 토양수분 산정모형의 적용가능성을 파악하였다. 인공신경망모형의 학습과정에 이용된 주천, 부귀, 상전 지점의 경우 평균 약 0.9353의 상관계수와 약 1.4957%의 평균제곱근오차 결과를 보였으며, 검증지점으로 이용된 천천2의 지점의 경우 약 0.8215의 상관계수와 약 4.2077%의 평균제곱근오차, 약 -3.6310%의 평균경향오차 결과를 보였다. 이와 같이 지점별 상관계수와 평균제곱근오차, 평균경향오차의 결과를 통해 토양수분 산정모형의 적용가능성이 높다는 것을 알 수 있다.

토양수분관측은 대체로 특정 연구기간에 이루어지거나 장비 노후화 등의 이유로 장기관측이 부족한 상황이며, 보다 신뢰성 높은 지상관측 자료의 획득이 요구되는 상황이다. 향후 위성관측기기의 발달로 인해 보다 향상된 공간해상도를 가지는 다양한 인공위성 관측 자료의 추가와 다양한 토지이용 및 지형특성에 대한 지상 관측망 구축을 통하여 보다 정밀한 광역 토양수분산정이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국수자원공사가 시행한 물산업 핵심 분야 연구개발비 지원사업(과제번호 : WI09STU01)으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 국가수자원종합정보시스템. http://www.wamis.go.kr
2. 김영성, 양재린, 이현석, 고덕구. (2007) 용담댐 수자원 시험유역. 한국수자원학회지. 제40권. 6호. 48-53쪽.
3. Claire, L.P. (2003) Aqua: An earth-observing satellite mission to examine water and other climate variables. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 41. No. 2. pp. 173-183.
4. ESA. http://www.esa.int/esaLP/ESAL3B2VMOC_LPsmos_0.html
5. NASA. http://aqua.nasa.gov/about/
6. USDA. http://www.ars.usda.gov/Research/docs.htm?docid=8993