

신경망기법과 보조자료를 사용한 원격측정 토양수분자료의 Downscaling기법 개발

Development a Downscaling Method of Remotely-Sensed Soil Moisture Data Using Neural Networks and Ancillary Data

김 광 섭* / 이 을 래**

Kim, Gwangseob / Lee, Eul Rae

Abstract

The growth of water resources engineering associated with stable supply, management, development is essential to overcome the coming water deficit of our country. Large scale remote sensing and the analysis of sub-pixel variability of soil moisture fields are necessary in order to understand water cycle and to develop appropriate hydrologic model. The target resolution of coming Global monitoring of soil moisture field is about 10 km which is not appropriate for the regional scale hydrologic model. Therefore, we need a downscaling scheme to generate hydrologic variables which are suitable for the regional hydrologic model.

The results of the analysis of sub-pixel soil moisture variability show that the relationship between ancillary data and soil moisture fields shows there is very weak linear relationship. A downscaling scheme was developed using physically-based classification scheme and Neural Networks which are able to link the nonlinear relationship between ancillary data and soil moisture fields. The model is demonstrated by downscaling soil moisture fields from 4km to 0.2km resolution using remotely-sensed data from the Washita' 92 experiment.

Keywords : Soil Moisture, Downscaling, Ancillary Data, Neural Network

요 지

국내에서 예상되는 물부족 현상을 극복하기 위해서는 수문 현상의 이해를 통한 수자원의 안정된 확보, 관리, 개발 등 수자원 관련 기술력의 발전이 필수적이라 하겠다. 물순환계통의 올바른 이해와 적합한 모형의 개발 및 검증에 위해서는 강우 및 토양수분의 대규모 원격측정이 필수적일 뿐 아니라 관측 격자 내에서 일어나는 변화도에 대한 이해가 필요하다.

가까운 장래에 예상되는 전구 관측 토양수분자료의 격자크기인 10km 는 중·소규모 지역의 수문·기상모델 적용에 한계를 가진다. 목적에 따라 각 모델들이 필요로 하는 입력자료의 격자크기가 다른 반면 각 모델에 대한 적합한 크기의 격자를 가진 다양한 입력자료의 부재는 토양수분자료에 대한 적합한 downscaling 기법을 필요로 한다. 사용

* 경북대학교 공과대학 토목공학과 전임강사
Assistant Professor, Dept.of Civil Engineering, Kyungpook National Univ., Daegu 702-701, Korea
(E-mail: kimg@knu.ac.kr)

** 한국건설기술연구원 선임연구원
Senior Researcher, Water Resources Research Department, Korea Institute of Construction Technology,
Gyeonggi-Do 411-410, Korea
(E-mail: erlee@kict.re.kr)

가능한 보조자료와 토양수분의 선형상관관계는 상당히 낮으므로 이들 상호관계를 선형관계의 합으로 나타내는데 한계를 가진다. 그러므로 본 연구에서는 physically-based 분리기법과 자료들간의 비선형 상관관계를 나타내는데 적합한 신경망 기법을 이용한 downscaling 기법을 개발하였다. 개발된 downscaling 기법은 Washita' 92 실험으로부터 획득된 토양수분 및 보조자료를 사용하여 4km 자료를 0.2km 자료로 downscaling 하였으며 출력자료는 기존의 전형적기법에 의하여 smoothing된 자료보다 개선된 결과를 보여주었다.

핵심용어 : 토양수분, Downscaling, 보조자료, 신경망 기법

1. 서론

국내에서 예상되는 물부족 현상에 대한 사회적 관심과 문제해결을 위한 각 기관 및 학계에서의 연구노력은 어느 때 보다도 활발히 진행되고 있는 실정이다. 이러한 문제를 극복하기 위해서는 수문 현상의 이해를 통한 수자원의 안정된 확보, 관리, 개발 등 수자원 관련 기술력의 발전이 필수적이라 하겠다. 물순환계통의 올바른 이해와 적합한 모형의 개발 및 검증은 위해서는 강우 및 토양수분의 대규모 원격측정이 필수적일 뿐 아니라 관측 격자 내에서 일어나는 변화도에 대한 해석 또한 병행되어야 할 것이다. 특히 토양수분은 여러 수문 현상을 연계하는 주요 변수이다. 예를 들면, 토양수분은 침투나 침투를 통하여 강우와 지하수를 연결하는 기능을 함과 동시에 강우사상에 따른 유출 특성에 직접적인 영향을 미치며 증발산을 통하여 에너지 사이클을 연결하는 기능을 한다. 즉 여러 수문 현상들을 연결하는 중요한 고리 역할을 한다고 하겠다. 이전의 연구결과에 의하면 계절적 기후변화의 예측가능성은 해수면 온도나 토양수분에 의존하므로 초여름 토양수분의 정보는 여름의 기온 예측개선에 영향을 준다 (Rind, 1982). 즉, 육지에서 토

양수분의 기능은 대양에서 해수면 온도기능에 상응하는 중요한 역할을 한다고 하겠다.

다양한 수문모형 및 기상모형이 개발되어 적용되고 있음에도 불구하고 Global model은 관측된 토양수분자료가 없으므로 결과들이 실측치에 대하여 검증되지 않은 상태라고 하겠다. 그럼에도 불구하고 토양수분자료의 시공간적인 변화특성에 대한 연구가 이루어져 왔으며 (Kim and Barros, 2002; Western and Bloschl, 1999; Bardossy and Lehmann, 1998; Dubayah et al., 1997) 강우, 지형, 식생피복상태 등이 토양수분의 시공간적 변화에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구 또한 수행되어 왔다 (Kim, 2002). 또한 지상과 대기를 연결하기 위한 연구도 활발히 수행되어 왔다 (Gupta and Waymire, 1990). 토양수분의 관측기술로는 Time Domain Reflectometry (TDR) 및 neutron probe를 이용한 point measurement와 공간자료 획득을 위한 원격측정기술이 날로 발전해 왔다. 그림1은 토양수분자료의 원격측정기술의 발전과정을 보여준다. 1960년도부터 1970년도에 이르기까지 tower-mounted radiometers를 사용한 소유역에 대한 관측을 시작으로 트럭이나 항공기에 장착된 radiometer를 사용한 관측이 70년대 후반부터 80년대에 이르기까지 수행되어왔다. L-band

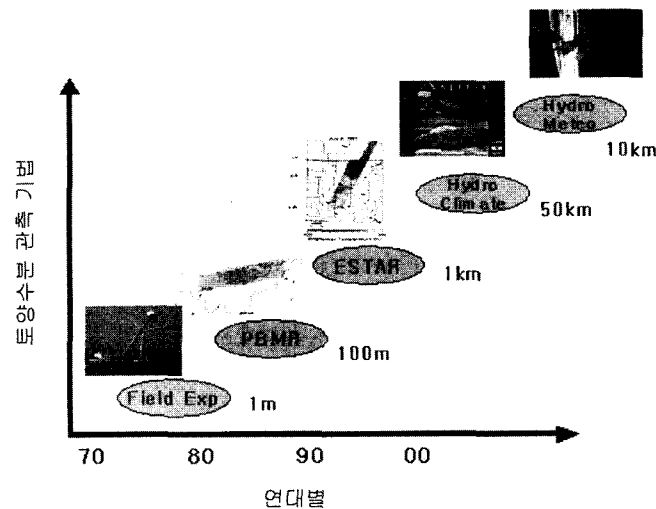


그림 1. 시대별 토양수분 원격관측기술 발달사

Push-Broom Microwave Radiometer (PBMR)가 개발되어 80년도 중반이후 90년대 초까지 airborne 토양수분측정에 사용되어 왔으며 Electronically Scanned Thinned Array Radiometer (ESTAR)의 개발 후 Little Washita 실험(1992)과 Southern Great Plain 1997 Hydrology Experiment (SGP97)에 적용되어 광범위한 지역의 토양수분관측을 위한 가능성을 제시하였다. 관측 결과들은 L-band microwave sensing이 토양수분자료 관측에 가장 적합함을 보여주었다. L-band microwave remote sensing시에 예측되는 Global soil moisture monitoring의 격자크기는 약 50km이며 이후로는 10km자료 획득을 목표로 하고 있다.

최근 저주파 마이크로웨이브 원격측정기술의 발달은 여러 조건의 지형 및 식생피복상태 하에서의 지표면 토양수분자료획득을 용이하게 하였고(Jackson and Le Vine, 1996) 원격측정된 2차원 토양수분자료의 시공간적 변화특성에 대한 연구가 수행되었다 (Kim, 1999). 토양수분자료의 point measurement 및 2D remote sensing 시 영향인자들과 이로 인하여 야기되는 오차연구를 통한 통계학적 특성을 유지하는 최적의 측정설계에 대한 연구도 수행되었다 (Kim, 2002; Kim and Yoo, 2000). Southern Great Plain 1997 (SGP97) Hydrology Experiment기간 동안 광역에 대하여 원격측정된 토양수분자료와 보조자료들 즉 식생피복, 지형, 토양, 토지이용자료를 사용한 연구 결과는 scaling behavior가 파장 10km 정도에서 변화함을 보여주었다 (Kim and Barros, 2002). 결과는 토양수분자료의 scaling behavior는 토양특성과 상관됨을 보여주었다. 그러나 보조자료와 토양수분의 선형상관관계는 매우 낮을 뿐 아니라 대상지역이 넓어질수록 더욱 낮아지므로 이들 상호관계를 선형관계의 함으로 나타내기에는 한계를 가진다. 이러한 토양수분자료특성의 올바른 이해를 위해서는 관측적자 내에서 일어나는 변화도에 대한 정확한 해석을 요구하며 자료해석과 더불어 토양수분자료의 전구계측을 위한 계획격자 크기에 대한 이해도 필수적이다. 우리가 가장 가까운 장래에 획득할 수 있는 지구전체에 대하여 관측되는 토양수분자료는 2005년에 계획된 Soil Moisture Ocean Salinity (SMOS) 계획으로부터 획득하게 될 격자크기 약 50km의 토양수분자료이다. 그러나 50km란 격자변 크기는 지구전체를 대상으로 하는 순환모델 및 기후모델의 적용에는 문제가 없으나 지역의 기상모델 특히 수문모델의 적용에 있어 한계를 가진다. 이렇듯 목적에 따라 각 모델들이 필요로 하는 입력자료의 격자크기가 다른 반면 각 모델에 대한 적합한 크기의 격자를 가진 다양한 입력자료의 부재는 토양수분자료에 대한 적합한 downscaling 기법을 필요로 한다.

본 연구에서는 이러한 필요를 만족하기 위하여 원격측정된 토양수분자료의 downscaling 기법을 개발하고자한다.

2. 원격측정된 토양수분자료 Downscaling 모형 개발 필요성

계획된 토양수분자료의 전구 관측 격자크기는(약 10km) 지역단위 기상모델과 수문모델 등 모형에 따라 요구되는 격자크기의 입력자료를 산정하기위한 downscaling 기법 개발을 필요로 한다. 그러나 복잡한 지형, 식생피복, 토양 등의 변화도는 표준기법의 제시를 어렵게 하였다. 그러므로 소유역내에서의 보조자료와 토양수분간의 상관관계에 대한 연구가 필요하다 하겠다. 본 연구에서는 소규모 유역내에서 발생하는 토양수분의 공간적변화와 보조자료간의 상관관계를 분석하여 토양수분자료의 downscaling 기법개발등에 기초자료를 제시하고자 한다. 전형적인 downscaling 기법으로는 선형평균, Kriging, spline기법 등이 있으며 복잡한 공간적 구조를 가진 자료에 대한 downscaling을 위하여 프랙탈 기법을 사용한 연구가 수행되어왔다(Mandelbrot 1982 등). 예를 들면, Bindlish 와 Barros (1996)는 프랙탈 보정기법을 개발하여 여러 scale에 대한 지형자료의 보정에 사용하였다. 또한 Bindlish 와 Barros(2000)는 동적 프랙탈 보정기법을 개발하여 Numerical Weather Prediction (NWP)모델에 의하여 계산된 강우자료를 보정하는데 사용하였다. Barnsley (1986)은 iterated function systems(IFS)를 이용한 self-affine 자료의 프랙탈 보정 기법을 제시하였으며 이러한 IFS기법은 개선되어 Xie 와 Sun (1997)에 의하여 bivariate fractal interpolation function에 대한 contraction mapping 기법을 이용한 유일해를 구할 수 있는 보정기법이 제시되었다. 또한 Kim 과 Barros (2002)는 contraction mapping 기법과 보조자료의 공간적 특성을 사용하여 토양수분자료의 downscaling 기법을 제시하였다. Kim 과 Barros (2002)에 의하여 제시된 기법은 토양수분 자료의 scaling 거동을 재현하는 유일해를 보여주는 등 downscaling 기법에 있어 개선된 결과를 보여주었다. 그러나 여전히 토양수분자료가 self-similar 하다고 가정하므로 실제 토양수분자료 특성과 차이를 보이는 등 개선의 소지를 내포하고 있다. 또한 소유역에대한 downscaling에 있어 충분하지 못한 격자수는 contraction mapping window 설정을 불가능하게 하므로 기법의 적용에 한계를 가진다.

그림 2는 미국 Oklahoma 지역에 1997년 실시된 Southern Great Plain 1997 (SGP97) Hydrology Experiment를 통하여 관측된 토양수분자료와 지형의

상관계수 변화를 나타낸다. 샘플 moving window내에서 토양수분과 지형자료 사이의 상관계수는 동일 지형 조건에서 양의 상관관계와 음의 상관관계가 공존하는 등 일관된 선형상관관계로 설명할 수 없음을 보여주었다. 이러한 공간적변화 특성과 보조자료와 토양수분 사이의 상관관계를 규명하기위하여 보다 소유역 내에서의 변화 특성을 분석하고 이러한 비선형 상관관계를 나타내기위한 기법의 필요성을 인식하게 하였다. 본 연구의 목적은 기존의 downscaling 기법이 가지는 적용성의 한계를 극복하고 토양수분자료의 시공간적 변화 특성을 파악하고 보조자료와 토양수분 변화도의 상사성을 분석하여 원격측정된 수문자료에 적합한 downscaling 기법을 개발하는데 있다. 이러한 토양수분의 실제적인

공간변화특성을 나타낼 수 있는 downscaling 기법의 개발은 수문 및 수문기상모형의 실제적인 입력자료를 제공함으로써 물순환 관계를 정립하는데 큰 도움을 줄 뿐 아니라 강우 및 식생피복자료의 downscaling에도 적용할 수 있을것으로 사료된다. 이러한 자료들은 수문 모델과 기상모델을 연계한 수문모형의 최종목표라고도 할 수 있는 통합모델의 개발 및 적용을 용이하게하고 물순환 관계의 정확한 해석을 통한 수자원의 안정적 확보를 가능하게 하여 국내에서 예상되는 물부족 현상을 극복하기 위한 수자원의 관리, 확보에 큰 도움을 주리라 사료된다. 또한 큰격자 크기의 원격측정 입력자료를 사용할 수 있게 함으로써 원격측정시에 경제·산업적 측면의 막대한 예산절감효과를 기대할 수 있다.

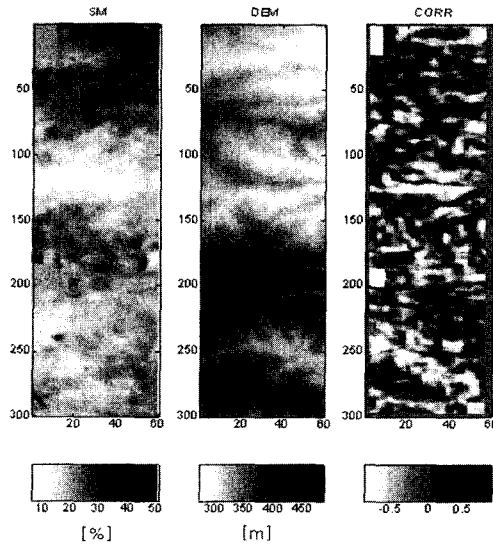


그림 2. 샘플 moving window내에서 (8km×8km) 토양수분(SM)과 지형자료(DEM) 사이의 상관계수(CORR) 변화양상

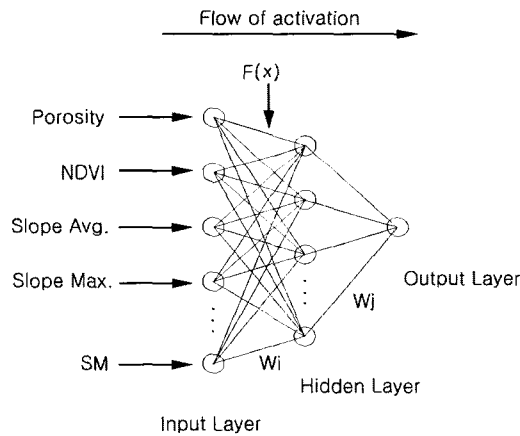


그림 3. 3층 구조를 가진 인공신경망의 기본구조

3. 신경망기법과 보조자료를 사용한 Downscaling 모형 개발

전절에서 언급한 바와 같이 사용 가능한 보조자료와 토양수분의 선형상관관계는 상당히 낮으므로 이들 상호관계를 선형관계의 합으로 나타내는데 한계를 가진다. 그러므로 본 연구에서는 자료들간의 비선형 상관관계를 나타내는데 적합한 신경망 기법을 (Kim and Barros, 2001) 이용한 downscaling 기법을 개발하였다.

그림 3은 본 연구에서 사용될 입력층(input layer), 은닉층(hidden layer) 및 출력층(output layer)으로 구성된 3층 신경망의 기본구조이다.

신경망 계산의 기본 과정은 다음과 같다. 절점 j 에서 효과적인 수신 신호는 모든 입력 신호의 가중 합이다:

$$h_j = \sum_{i=0}^m w_{ji} r_i \quad (j = 1, \dots, n) \quad (1)$$

여기서 m 은 입력층 neuron 총 수, n 은 은닉층 neuron 총 수, w 는 i 에서 j 까지 경로에 부여된 가중치, r_i 는 unit i 로부터의 입력 값, h_j 는 은닉층의 unit j 에서 값이다. 다음으로, 조합된 신호가 출력 신호를 생성시키기 위해 변환함수(transfer function)에 의해 변환된다:

$$o_k = \sum_{j=1}^n w_{kj} f(h_j) = \sum_{j=1}^n w_{kj} f\left(\sum_{i=1}^m w_{ji} r_i\right) \quad (k = 1, \dots, l) \quad (2)$$

여기서, f 는 선택된 변환함수를 나타내고, w 는 j 에서 k 까지 경로에 부여된 가중치, o_k 는 네트워크 출력 값, l 은 출력 layer에 절점들의 총수를 나타낸다.

비선형 변환 함수(sigmoidal 함수)는 신경망에서 입력 데이터와 출력 데이터 사이에 비선형관계를 고려할 수 있도록 해 준다:

$$f(h) = \frac{2}{1 + e^{-h}} - 1 \quad (3)$$

여기서, h 는 절점 입력 값, $f(h)$ 는 절점 출력 값, α 는 입력 데이터의 비선형 거동을 고려하기 위해 사용된 증폭계수(gain)이다.

학습(training)과정은 출력에서의 평균 제곱 오차 E 를 최소화시키는 새로운 가중치들 집합을 결정하는 것으로 구성된다.

$$E = \sum_{k=1}^l (t_k - o_k)^2 \quad (4)$$

여기서, t_k 는 출력 절점 k 에서 얻고자하는 출력 값이다.

변환함수가 비선형함수이기 때문에, 오차 E 는 가중치 w 의 비선형함수가 될 것이다. 최강하법(steepest descent method)이 비선형 최소화 기법으로 채택되었다. 따라서, 가중치들은 다음과 같이 조정된다.

$$\Delta w = -\eta' \frac{\partial E}{\partial w} = -(1-\beta) \eta' \frac{\partial E}{\partial w} + \beta(\Delta w)_{old} = \eta \frac{\partial E}{\partial w_{ji}} + \beta(\Delta w)_{old} \quad (5)$$

여기서, η 는 가중치가 얼마나 빨리 바뀌는가를 네트워크에 말해주는 학습률(learning rate)이고, β 는 가중치에 평균변화율이다. 모멘텀 부분 $\beta(\Delta w)_{old}$ 에는 지역 극소화를 막기 위해 가중치의 조정치를 더해 준다. η 와 β , 둘 다 일반적으로 0과 1사이의 값을 가지고, 시행착오법에 의해 계산된다. 본 모형에서 산정된 η 와 β 값은 각각 0.025와 0.02 이다.

본 연구에서는 Little Washita'92 Experiment에서 측정된 토양수분자료 및 보조자료 즉 지형, 공극률, 식생지수 및 인접격자와의 평균기울기자료 등을 사용하였다. 입력자료와 출력자료의 격자변크기는 각각 4km와 0.2km이며 training은 유역중심을 원점으로 1, 2사분면의 자료를 사용하였으며 downscaling은 3, 4사분면에 대하여 실시하였다.

4. 자료 개요

본 연구에서는 미국 Oklahoma주의 Washita 유역에 1992년 7월 10일에서 7월 18일 사이에 NASA, USDA 및 여러 정부기관과 교육기관의 공조하에 수행된 Washita'92 Experiment를 통하여 관측된 토양수분자료와 지형, 식생피복, 토지이용 및 토양자료를 사용하였다. 이 실험을 통하여 2차원 수문자료 시계열이 획득되었고 이는 원격측정을 통하여 획득한 수문자료의 수문모형에 대한 적용성을 검증하는데 사용되었다. Washita92 실험은 약 848 km² (45.6×18.6 km²)크기의 지역에 격자변의 크기 200m인 토양수분을 Electronically Steered Thin Array Radiometer (ESTAR)를 이용하여 관측하였다. 가용한 자료 및 실험에 대한 보다 상세한 자료는 다음의 USDA web sites에서 얻을 수 있다. <http://hydrolab.arsusda.gov/washita92/wash92.htm>. 그림 4는 Little Washita 지역의 지형, 토양구조, 토지이용, 공극률 및 식생지수 자료와 샘플 토양수분자료를 나타내며 표 1은 Little Washita 유역의 토지이용 및 토양피복상태에 따른 토양수분의 변화특성 즉 전 실험기간에 대한 토양수분의 평균치 및 감쇄계수가 토양성분에 따라 큰 차이가 있음을 보여준다. 대상지역의 식생지수(Normalized Difference Vegetation Index: NDVI)

는 식 6에서와 같이 적색광 및 근적외선 반사도의 관계 비로 나타낸다.

$$NDVI = ((R_{nir} - R_{red}) / (R_{nir} + R_{red})) * 255 \quad (6)$$

여기서, R_{nir} 는 근적외선 반사도이며 R_{red} 는 적색광 반사도를 나타낸다. 그림 4는 토양수분의 공간적 분포와 변화도는 지형자료의 변화 보다 토양피복 및 공극률의 변화도에 의하여 지배됨을 보여준다. 또한 실험기간 동안 발생하는 토양수분의 공간적인 변화 특성의 주변

화양상을 파악하기 위하여 주성분분석을 실시하였다. 그림 5는 Washita'92 토양수분자료에 대한 주성분 분석결과로 제 1주성분과 각 주성분들의 변동특성에 의하여 설명되는 변화도를 나타낸다. 전체변화의 약 87%를 설명하는 제1주성분과 지형자료의 상관계수는 약 0.2인데 반하여 공극률과의 상관계수는 약 0.6이다. 또한 제1주성분의 공간적 특성은 토양피복 및 공극률의 변화도에 의하여 지배됨을 보여준다. 이러한 결과는 중·소규모 유출모형의 토양수분과 표면포화 분포특성을 반영하기 위하여 토양자료를 고려해야한다고 하겠다.

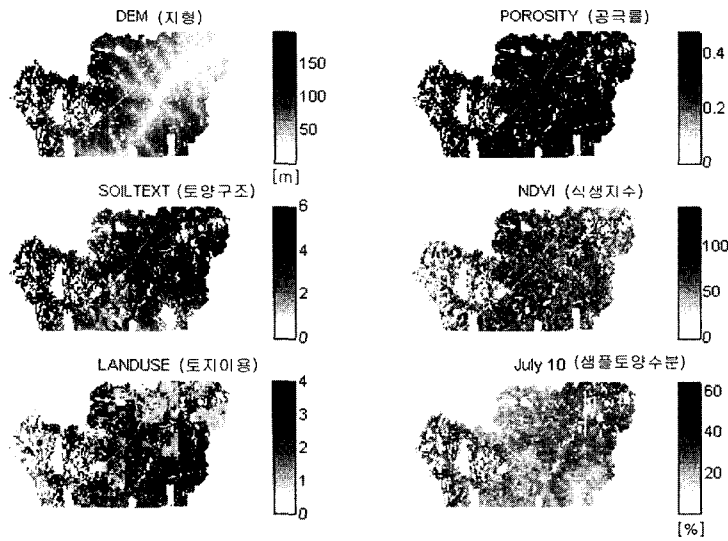


그림 4. Little Washita 지역의 지형, 토양구조(1: 모래; 2: 롬질 미세모래; 3: 미사질의 롬; 4: 롬; 5: 침니질 롬; 6: 점토질 롬), 토지이용(1: 방목장; 2: 농경지; 3: 목초지; 4: 산림지), 공극률 및 식생지수 자료와 샘플 토양수분자료

표 1. 토양구조 및 토지이용에 따른 토양수분자료의 감쇄계수, 평균치 및 분산

	Loss Coefficient (1/day)	Volumetric Soil Moisture		Component Ratio (%)
		Mean (%)	Std Dev. (%)	
Fine sand	0.15	12.45	4.77	7.11
Loamy fine sand	0.14	14.70	5.10	3.86
Fine sandy loam	0.13	15.84	5.54	33.29
Silt loam	0.10	21.90	5.61	14.87
Loam	0.11	22.45	5.92	34.61
Silty clay loam	0.11	25.89	7.58	2.04
Pits, Quarries, Urban	0.11	17.85	5.14	1.08
Gypsum outcrops	0.10	22.88	6.52	1.64
Range land	0.11	20.62	6.96	26.47
Cropland	0.12	19.82	6.87	22.20
Pasture	0.13	18.14	6.78	41.55
Forest	0.14	18.25	3.31	5.61

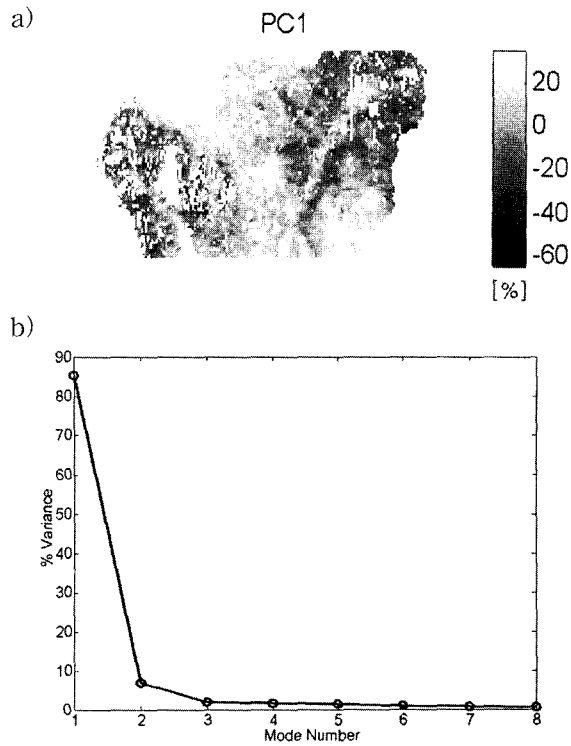


그림 5. Little Washita '92 토양수분자료의 주성분분석 결과 a) 제 1주성분; b) 각주성분들의 변동특성에 의하여 설명되는 변화도

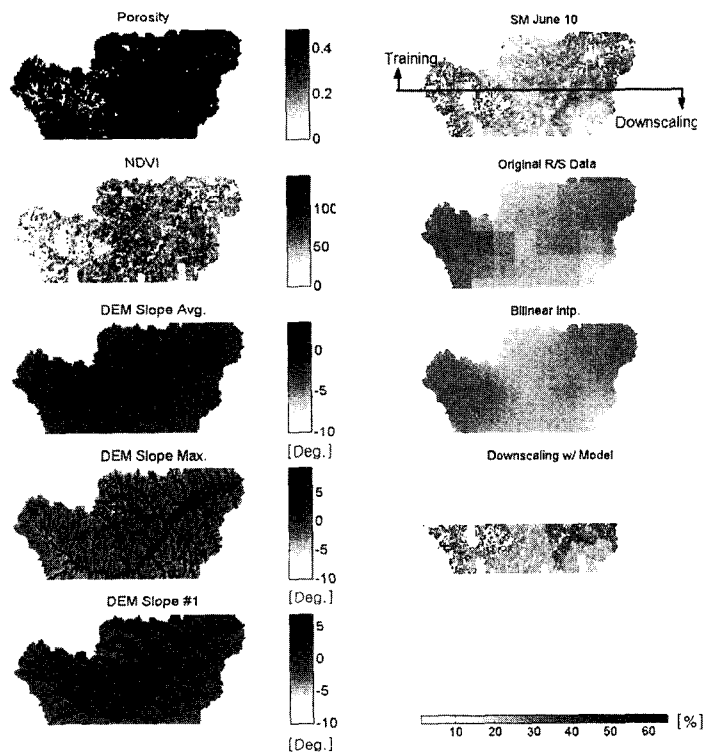


그림 6. 보조자료 (porosity, NDVI, slopes)와 샘플 토양수분자료 및 downscaling한 토양수분출력자료 샘플

표 2. 전형적 기법 및 개발된 기법으로부터 산정된 토양수분자료의 통계치 비교
(RMSE: Root Mean Squared Error, CC: Correlation Coefficient)

Date	Methods	New Model (using NN)			Typical (Bilinear)		
	Statistics	RMSE(%)	CC	Bias(%)	RMSE(%)	CC	Bias(%)
June 10, 1992		4.85	0.6673	3.76	5.12	0.6227	4.00
June 11, 1992		4.35	0.6880	3.40	4.64	0.6422	3.67
June 12, 1992		4.03	0.7156	3.19	4.32	0.6724	3.44
June 13, 1992		3.85	0.7310	3.04	4.16	0.6849	3.32
June 14, 1992		3.89	0.7177	3.02	4.15	0.6776	3.26
June 16, 1992		3.66	0.7067	2.79	3.87	0.6734	3.04
June 17, 1992		3.67	0.6693	2.88	3.86	0.6343	3.05

5. 결과 및 고찰

개발된 downscaling 기법은 Washita' 92 실험으로부터 획득된 토양수분 및 보조자료를 사용하여 4km 자료를 0.2km 자료로 downscaling 하여 모델의 적용성을 보였다. 그림 6는 training에 사용된 샘플 입력자료와 downscaling된 출력자료를 나타낸다. 개발된 모형에 의하여 downscaling된 출력자료는 기존의 전형적기법에 의하여 smoothing된 자료보다 공간적인 변화를 잘 재현하는 개선된 결과를 획득할 수 있음을 입증하기 위하여 서로 비교하였다. 전형적인 기법으로는 영상처리에서 가장 보편적으로 사용되는 보간기법인 양선형 보간법을 사용하였다. 양선형 보간법(Bilinear Interpolation)에서 생성되는 정보는 네개의 가장 가까운 정보들에 가중치를 곱한 값들의 합이다. 가중치들은 선형적으로 결정되며 각각의 가중치는 각각의 존재하는 정보로부터의 거리에 반비례한다. 표 2는 기본 통계치의 비교를 통하여 제시된 모형으로부터 획득된 자료가 기존의 기법으로부터 획득된 자료보다 개선됨을 보여준다. 연구결과는 수문모델과 기상모델을 연계한 수문현상 모형의 최종목표라고도 할 수 있는 통합모델의 개발 및 적용을 용이하게하여 물순환 관계의 정확한 해석을 통한 수자원의 안정적 확보를 가능하게 하여 국내에서 예상되는 물부족 현상을 극복하기 위한 수자원의 관리, 확보에 큰 도움을 주리라 사료된다. 또한 큰격자 크기의 원격측정 입력자료를 사용할 수 있게 함으로써 원격측정시에 경제·산업적 측면의 막대한 예산절감효과를 기대할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 2002년도 경북대학교의 연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- Bardossy A. and Lehmann, W., (1998). "Spatial distribution of soil moisture in a small catchment. Part 1: geostatistical analysis", *J. Hydrol.*, Vol. 206, pp. 1-15.
- Barnsley, M.F., (1988). *Fractal everywhere*, cademic Press.
- Bindlish, R. and Barros, A., (2000). "Disaggregation of rainfall for one-way coupling of atmospheric and hydrological models in regions of complex terrain", *Global and Planetary Change*, Vol. 25, pp. 111-132.
- Bindlish, R. and Barros, A., (1996). "Aggregation of digital terrain data using a modified fractal interpolation scheme", *Computers & Geosci.*, Vol. 22, No. 8, pp. 907-917.
- Dubayah, R., Wood, E.F., and Lavallee, D., (1997). "Multiscaling analysis in distributed modeling and remote sensing: An application using soil moisture", *Scale in remote sensing and GIS*, ed. Quattrochi, D.A. and Goodchild, M.F., pp. 93-112.
- Gupta, V. and Waymire, E., (1990). "Multiscaling properties of spatial rainfall and river flow distributions". *J. Geophy. Res.*, Vol. 95, No. D3, pp. 1999-2009.
- Jackson T.J., Le Vine, D.E., Swift, C.T., Schmugge, T.J., and Schiebe, F.R., (1995). Large area mapping of soil moisture using the ESTAR passive microwave radiometer in Washita 92 experiment, *Remote Sens. Environ.*, Vol. 53, pp. 23-37.
- Kim, G. and Yoo, C., (2000). Sampling error analysis for soil moisture estimation, *KWRA Water Eng.*

- Res., Vol. 1, No. 3, pp. 209-222.
- Kim, G. and Barros, A.P. (2001). "Quantitative flood forecasting using multisensor data and neural networks", *J. of Hydrol.*, Vol. 246, pp. 45-62.
- Kim, G. and Barros, A.P., (2002). Spatial characterization of soil moisture fields using passive remotely sensed soil moisture images, *Remote Sens. Environ.* Vol. 81, pp. 393-403.
- 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 Sens. Environ.*, Vol. 83, pp. 400-413.
- Kim, G., Valdes, J.B., North, G.R. and Yoo, C., "Sampling error analysis for soil moisture estimation", *J. Hydrol.* (in review)
- Kim, G., (2002). "Spatial and temporal influences on soil moisture estimation", *KWRA Water Eng. Res.*, Vol. 3, No. 1, pp. 31-43.
- Kim, G. (1999). Characterization of the spatial-temporal variability of soil moisture by remote sensing, Ph. D dissertation, Texas A&M University.
- Mandelbrot, B., (1982). *The fractal geometry of nature*, Freeman (Pub.)
- Rind, D., (1982). "The influence of ground moisture conditions in North America on summer climate as modeled in the GISS GCM", *Monthly Weath. Rev.*, Vol. 100, pp. 501-526.
- Western, A.W., and Blöschl, G., (1999). "On the spatial scaling of soil moisture", *J. Hydrol.*, Vol. 217, pp. 203-224.
- Xie, H. and Sun, H., (1997). The study on bivariate fractal interpolation functions and creation of fractal interpolated surfaces, *Fractals*, Vol. 5, No. 4, pp. 625-634.

(논문번호:03-93/접수:2003.10.23/심사완료:2003.12.09)