

Contraction mapping 기법을 사용한 remotely sensed 토양수분자료의 downscaling에 관한 연구

Downscaling of remotely sensed soil moisture using a contraction mapping method

김광섭*

1. 서론

토양수분은 여러 수문현상 즉, 강우-유출, 지형변화, 지표와 대기의 에너지 상호작용 등에 큰 영향을 미친다. Low frequency microwave remote sensing 기술의 개발은 Global scale의 토양수분자료의 획득에 대한 가능성을 제시하였다. global scale의 토양수분자료 monitoring시 예상되는 격자변의 길이는 약 10-20 Km이다. 그러나 global scale climate model과 달리 regional scale weather and hydrology models등은 각각 보다 작은 격자 크기의 입력자료를 필요로 하므로 sub-pixel 변화도를 아는 것은 필수적이라 하겠다(Crow et al., 2000). 전형적인 보정기법인 spline 기법, kriging 기법 등은 자료를 smoothing하는 한계를 가지므로 이를 개선하기 위한 여러 종류의 fractal 보정기법이 연구되고 적용되어 왔다(Bindlish and Barros, 2000). 그러나 random variable을 사용한 기법들은 보정된 값이 입력자료와 같은 통계특성을 보임에도 불구하고 여전히 one realization이므로 실제적 적용에 한계를 가진다. 본 연구에서는 위에서 언급한 문제점들을 해결하기 위하여 contraction mapping 기법을 사용하여 유일해를 얻을 수 있으며 sub-pixel 변화도를 재현할 modified fractal 보정기법을 개발하였다. Southern Great Plain 1997 Hydrology Experiment (SGP'97)로부터 획득된 토양수분자료를 이용하여 주어진 기상조건 하에서의 scaling behavior를 조사하였다. 조사된 토양수분자료의 scaling behavior는 보조자료 즉 토양자료, 식생피복자료, 표고자료 등의 scaling behavior와 관계성이 있음이 밝혀졌으며 따라서 이러한 보조 자료는 downscaling 모델에서 vertical scaling parameter로 사용되었다.

2. Modified Fractal 보정기법

Barnsley (1986)는 여러 fractal 보정함수를 도입함으로써 fractal 보정기법이 진일보 할 수 있도록 하였다. 그러나 random variable을 사용한 보정기법에 의하여 계산된 값들은 여전히 one realization이므로 실제적 적용에 한계를 가진다. 이러한 문제의 해결을 위해 Xie 와 Sun (1997)은

* 경북대학교 토목공학과 전임강사

유일해를 가지는 fractal 보정기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 논문에서는 contraction mapping 기법과 보조자료 즉 토양자료, 식생피복자료, 표고자료를 vertical scaling parameter로 사용한 modified fractal 보정기법을 소개하고자한다. 그림 1은 보정기법의 schematic diagram을 나타낸다.

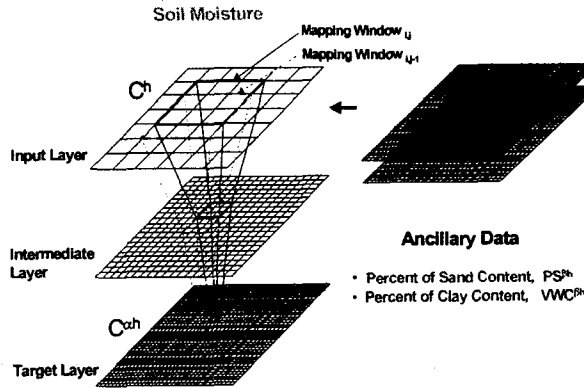


그림 1. Downscaling 기법에 대한 schematic diagram

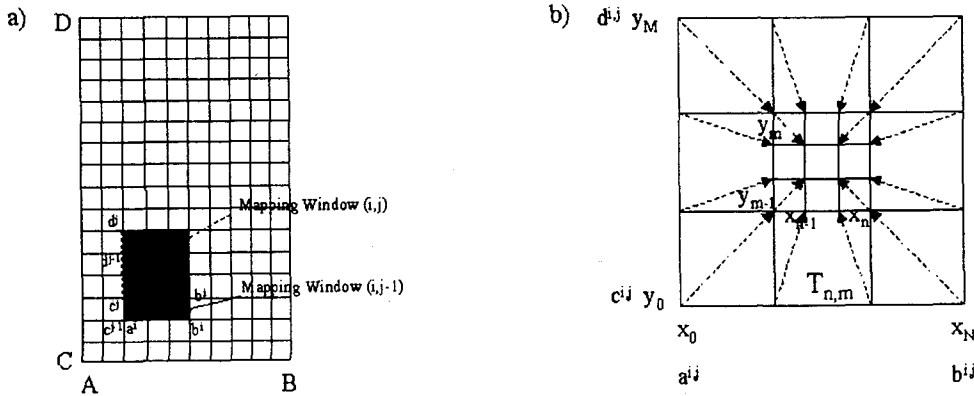


그림 2. Downscaling 기법의 mapping window와 mapping 개요

본 모델이 2차원 보간자료를 만드는 순서의 개요는 다음과 같다. 그림 2a에서와 같이, 토양 수분의 전체적인 도메인은 $CT = XT \times YT = \{(x, y) : A \leq x \leq B, C \leq y \leq D\}$, $XT = [A, B]$, $YT = [C, D]$ 로 정의된다. 좌표시스템 (x, y) , $X^i = [a^i, b^i]$, $Y^j = [c^j, d^j]$ 위에서 $\{C^{i,j} = X^i \times Y^j = (x, y) : a^i \leq x \leq b^i, c^j \leq y \leq d^j\}$ 로 정의되는 subsurface $C^{i,j}$ 를 고려한다. 여기서 i 와 j 는 moving window의 인덱스를 나타낸다. $C^{i,j}$ 는 다음과 같이 크기 Δx 와 Δy 인 이산된 격자로 구성된다.

$$\begin{aligned} a^i &= x_0 < x_1 < \dots < x_N = b^i \\ c^j &= y_0 < y_1 < \dots < y_M = d^j \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 필드 $O^{i,j} = C^{i,j} \times [z_1, z_2] (-\infty < z_1 < z_2 < +\infty)$ 에 대해서 생각하기로 하자. 그러면 토양수분 자료에 대한 downscaling function $H: O \rightarrow R$ 을 공간격자 $\{(x_n, y_m), n = 0, 1, 2, \dots, N; m = 0, 1, 2, \dots, M\}$ 에 구성할 수 있다. 여기서 N 과 M 은 moving window의 크기이다. $X_n^i = [x_{n-1}, x_n], Y_m^j = [y_{m-1}, y_m], C_{n,m}^{i,j} = X_n^i \times Y_m^j, p_n: X^i \rightarrow X^i, q_m: Y^j \rightarrow Y^j$ 로 두면 ($n = 0, 1, 2, \dots, N, m = 0, 1, 2, \dots, M$)

$$\begin{aligned} p_n(x_0) &= x_{n-1}, p_n(x_N) = x_n \\ q_m(y_0) &= y_{m-1}, q_m(y_M) = y_m \\ |p_n(c_1^i) - p_n(c_2^i)| &< k_1 |c_1^i - c_2^i| \\ |q_m(d_1^j) - q_m(d_2^j)| &< k_2 |d_1^j - d_2^j| \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 $c_1^i, c_2^i \in X^i, d_1^j, d_2^j \in Y^j, 0 \leq k_1 \leq 1, 0 \leq k_2 \leq 1$ (그림 2b 참조).

$p_n(x) = a_n x + b_n, q_m(y) = c_m y + d_m$ 이라 두면

$$\begin{aligned} p_n(x) &= x_{n-1} + \frac{x_n - x_{n-1}}{x_N - x_0} (x - x_0) \\ q_m(y) &= y_{m-1} + \frac{y_m - y_{m-1}}{y_M - y_0} (y - y_0) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $n = 0, 1, 2, \dots, N, m = 0, 1, 2, \dots, M$

Bivariate fractal interpolated surface에 대해 반복적 형태는 다음과 같다. $T_{n,m}^{i,j}: C^{i,j} \rightarrow R^2$ 이 2D contraction mapping 함수라면 $T^{i,j}(x_n, y_m) = (p_n(x), q_m(y)), H_{n,m}^{i,j}: O^{i,j} \rightarrow [z_1, z_2]$ 는 연속적이다. 그러면, 함수 H 는 다음과 같은 식을 따른다.

$$\begin{aligned} s_{n-1, m-1} &= H_{n,m}^{i,j}(x_0, y_0, s_{0,0}) \\ s_{n, m-1} &= H_{n,m}^{i,j}(x_N, y_0, s_{N,0}) \\ s_{n-1, m} &= H_{n,m}^{i,j}(x_0, y_M, s_{0,M}) \\ s_{n, m} &= H_{n,m}^{i,j}(x_N, y_M, s_{N,M}) \end{aligned} \quad (4)$$

$(x_1, y_1; x_2, y_2) \in O^{i,j}$ 와 $(s_1, s_2) \in [z_1, z_2]$ 대해서,

$$|H_{n,m}^{i,j}(x_1, y_1, s_1) - H_{n,m}^{i,j}(x_2, y_2, s_2)| \leq k_3 |s_1 - s_2| \quad (5)$$

여기에서 $n = 0, 1, 2, \dots, N, m = 0, 1, 2, \dots, M, 0 \leq k_3 \leq 1$ 이다.

downscaling function은 다음과 같다.

$$H_{n,m}^{i,j}(x, y, s) = e_{n,m}x + f_{n,m}y + g_{n,m}xy + r_{n,m}s + k_{n,m} \quad (6)$$

식 (4)에 식 (6)을 넣으면 아래의 관계를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} s_{n-1,m-1} &= e_{n,m}x_0 + f_{n,m}y_0 + g_{n,m}x_0y_0 + r_1s_{0,0} + k_{n,m} \\ s_{n,m-1} &= e_{n,m}x_0 + f_{n,m}y_0 + g_{n,m}x_Ny_0 + r_1s_{N,0} + k_{n,m} \\ s_{n-1,m} &= e_{n,m}x_0 + f_{n,m}y_M + g_{n,m}x_0y_M + r_1s_{0,M} + k_{n,m} \\ s_{n,m} &= e_{n,m}x_N + f_{n,m}y_M + g_{n,m}x_Ny_M + r_1s_{N,M} + k_{n,m} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $r_1 = \alpha_1 F1(x, y) + \beta_1 F2(x, y) + \delta_1$ 이다. $\alpha_1, \beta_1, \delta_1$ 은 operational parameters 이고 건조한조건 및 습한조건을 나타내는 sample day에 대하여 계산되고 다른 모의 기간동안 상수로 적용되었다. $F1(x, y), F2(x, y)$ 는 정규화된 field parameters로 모래 비율이나 vegetation water content가 사용되었다. Fractal interpolated surface의 조도는 주변 경사의 가중치로 사용되는 r_1 으로 조정될 수 있다.

식 (7)에서 $g_{n,m}, e_{n,m}, f_{n,m}, k_{n,m}$ 은 아래와 같은 형태로 interpolated data와 vertical scaling parameter의 항으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} g_{n,m} &= \frac{s_{n-1,m-1} - s_{n-1,m} - s_{n,m-1} - s_{n,m} - r_1(s_{0,0} - s_{N,0} - s_{0,M} - s_{N,M})}{x_0y_0 - x_Ny_0 - x_0y_M + x_Ny_M} \\ e_{n,m} &= \frac{s_{n-1,m-1} - s_{n,m-1} - r_1(s_{0,0} - s_{N,0}) - g_{n,m}(x_0y_0 - x_Ny_0)}{x_0 - x_N} \\ f_{n,m} &= \frac{s_{n-1,m-1} - s_{n-1,m} - r_1(s_{0,0} - s_{0,M}) - g_{n,m}(x_0y_0 - x_0y_M)}{y_0 - y_M} \\ k_{n,m} &= s_{n,m} - e_{n,m}x_N - f_{n,m}y_M - r_1s_{N,M} - g_{n,m}x_Ny_M \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $n \in \{1, 2, \dots, N\}$, $m \in \{1, 2, \dots, M\}$

마지막으로, fractal surface를 내삽하는 과정은 다음과 같다. 첫째, downscaling 하는 총 단계 (즉 downscaling layers의 수)를 결정한다. 둘째, 각 downscaling layer에 대한 moving windows의 크기를 결정. window 크기는 목표 셀 주변의 경사가 interpolated surfaces에 영향을 주는 경계를 나타낸다. 셋째, 토양 수분의 scaling 거동을 모사하기 위해서 vertical scaling parameter로 field parameters를 사용한다. 넷째, 하위 layer로 mapping 한다.

3. 결론

모델의 수행능력을 조사하기 위하여 6월29일과 6월30일 사이에 발생한 집중강우와 관계된 4일 간의 (6/29, 6/30, 7/1, 7/2) 토양이 습한 날들과 이틀간의 (7/3, 7/12) 건조한 날들에 측정된 SGP'97 토양수분자료를 사용하였다. 면적평균값을 사용하여 10km×10km 격자크기를 가진 입력자료를 만든 후 825m×825m 격자크기를 가진 자료로 보간하였다. 최종격자크기와 동일한 크기의 정량화된 모래구성비 및 식생피복자료를 vertical scaling parameter로 사용하였다.

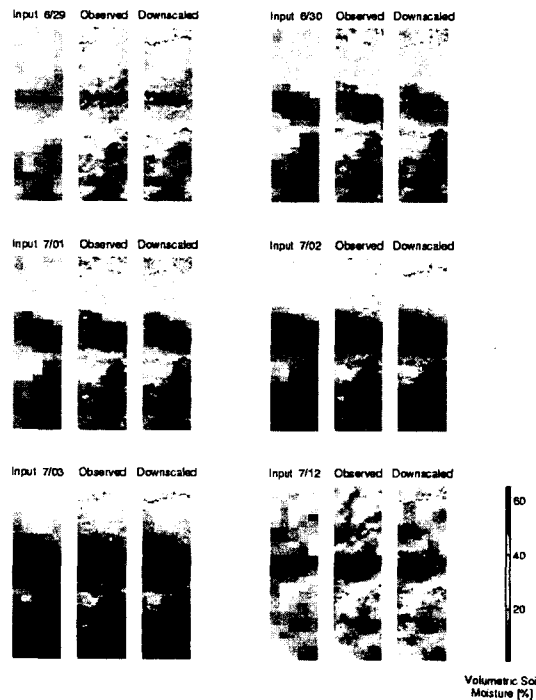


그림 3. Downscaled된 토양수분과 관측된 토양수분자료간의 비교

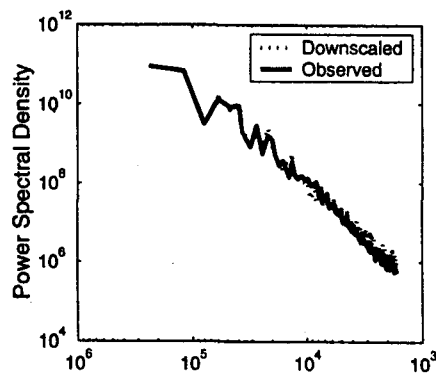


그림 4. Sample day(7/1)에 관측된 토양수분과 downscaled된 토양수분의 scaling behavior 비교

그림 3은 입력자료와 보간된 자료 및 관측치를 나타낸다. 보간된 토양수분자료는 전형적인 방법에서 얻을 수 있는 값보다 실제자료에서 보여주는 비정형성을 잘 나타낸다. 개발된 downscaling 모델을 적용하여 계산된 토양수분자료는 목표하는 기본 통계치 및 scaling behavior를 만족시켰다(그림 4). 보다 자세한 정보는 다음의 문헌에 기술되어 있다 (김광섭, 2001).

6. 참고문헌

- Barnsley, M.F., 1988. Fractal everywhere, Academic Press.
- Birdlish, 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*, 25, 111-132.
- Crow, W.T., Wood, E.F. and Dubayah R., 2000. Potential for downscaling soil moisture maps derived from spaceborne imaging radar data, *J Geophys. Res.*, 105(D2), 2203-2212.
- Hu, Z., Islam, S. and Cheng, Y., 1997. Statistical characterization of remotely sensed soil moisture image, *Remote Sens. Environ.*, 61, 310-318.
- Kim, G and Barros, P.A., 2001. Spatial characterization of soil moisture fields using passive remotely sensed soil moisture images, submitted to *Remote Sens. Environ.*
- Rodríguez-Iturbe, I., Vogel, G.K., Rigon, R., Entekhabi, D., Castelli, F. and Rinaldo, A., 1995. On the spatial organization of soil moisture fields, *Geophys. Res. Lett.*, 22(20), 2757-2760.
- Xie, H. and Sun, H., 1997. The study on bivariate fractal interpolation functions and creation of fractal interpolated surfaces, *Fractals*, 5(4), 625-634.
- 김광섭, 2001. Downscaling of soil moisture fields using a modified fractal interpolation scheme, *KSCE Journal of Civil Engineering*, 5(4), 371-377.