

토양수분 예측을 위한 수치지형 인자와 격자 크기에 대한 연구 The Resolution of the Digital Terrain Index for the Prediction of Soil Moisture

한 지 영* / 김 상 현** / 김 남 원***

Han, Ji Young / Kim, Sang Hyun / Kim, Nam Won

Abstract

The resolution issue of various soil moisture prediction parameters such as wetness index and curvatures is addressed. The sensitivities of various index are discussed on the base of the statistical aspects. The statistical analysis of three flow determination algorithms on the DEM is performed. The upslope area associated with SFD algorithm appear to more sensitive than the parameters of the other algorithms(MFD, DEMON). The wetness index shows relatively less variation both in resolution and the calculation procedures.

Keywords : The Resolution, The Parameters of Soil Moisture Prediction, DEM, Grid Size

요 지

여러 가지 토양수분의 예측인자에 대한 해상도 문제를 고찰하였다. 다양한 인자에 대한 민감도는 통계적인 분석을 기반으로 논의되었다. 수치지형모형에서 세 가지 흐름 결정 알고리즘의 해상도에 대한 통계적인 분석이 수행되었다. 단방향 흐름알고리즘으로 계산한 상부사면 기여면적은 다른 두 알고리즘(다방향 알고리즘, DEMON)보다 더욱 민감한 것으로 나타났다. 습윤지수의 경우는 해상도나 계산과정의 변화에 상대적으로 민감도가 미소한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 해상도, 토양수분 추정인자, 수치고도모형(DEM), 격자크기

* 부산대학교 환경공학과 석사과정
Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Busan, 609-735 Korea
(E-mail : blanc1107@hanmail.net)

** 정희원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Busan, 609-735, Korea
(E-mail : kimsangh@pnu.edu)

*** 한국건설기술연구원 수석연구원
Research Fellow, KICT, Koyang, 41-712, Korea
(E-mail : nwkim@kict.re.kr)

1. 서론

토양 수분의 공간적인 변화를 파악하는 연구는 강우의 침투, 강우사상 후의 토양 수분 재분포, 증발과 비포화대에서 액체의 오염 수송을 예측하는데 매우 중요하다(Zhou 등, 2001). 특히 최근의 지하수 이용의 증가로 인하여 지하수원의 중요성이 대두되고 있으며, 지표의 오염물질이 토양의 비포화대를 통과하여 지하수원에 도달하기 때문에 토양의 비포화대에서 흐름을 해석하는 것이 필요(박재현 등, 1997)하고, 강우사상 후 토양수분의 재분포를 추적하는 작업은 지표하에서 저류량과 지하수 재충전율을 산정하는데 있어 중요하다. 또한 유역의 유출량에 직접적인 영향을 끼치는 선행함수조건(AMC)을 설정하는데 있어 강우사상 이전의 토양수분 상태가 필요하다(윤용남, 2000). 이러한 수문학적 순환의 중요한 상태변수인 토양수분의 변동성을 파악하기 위해서는 토질, 지형, 식생, 기상에 대한 이해가 필요하다.

국내의 경우 유역 지형이 70% 이상 산지로 이루어져 있어서 토양수분을 예측하는데 지형의 변화가 토양수분의 공간적 분포에 상당한 영향을 줄 것으로 예상된다. 습윤한 지역에 대해 습윤지수와 등고선구배를 조합한 인자를 통해 토양수분과 높은 상관관계를 이끌어 낸 연구(Burt와 Butcher, 1985)와, 추계학적 방법을 이용하여 토양수분과 지형과의 관계를 유도한 연구(Yeh와 Eltahir, 1998)와 그리고 윤곽구배, 등고선구배, 접선구배, 평균구배, 상부사면 기여면적, 경사도, 습윤지수, 태양반사지수의 조합을 통하여 토양수분과 인자들과의 상관관계를 계산한 연구(이학수 외, 2001) 등을 통하여 수치지형인자를 활용한 토양수분의 공간적인 분포 예측의 잠재성을 보여주고 있다. 수치고도모형의 분석에 민감한 문제 중 하나는 적정 격자 크기에 대한 결정이다. 지형데이터의 집성(aggregation)에서 오는 정보 손실(Kuo 등, 1999)과 지형의 잘못된 묘사가 지형 기반의 수문 모형의 모의에 상당한 영향을 미치는 것(Zhang과 Montgomery, 1994)과 같은 낮은 해상도에서 지형의 왜곡과 DEM의 집성이 흐름장에서의 변화를 초래할 때 곡률의 왜곡이 생김으로써 흐름분배 알고리즘의 적용에 있어 흐름 체계의 변화로 해상도의 차이에 의한 결과의 차이를 설명할 수 있다. 따라서 본 연구는 수치고도 모형을 활용한 토양수분 예측 시 발생하는 격자 크기의 문제를 고찰하기 위하여 지형인자와 해상도의 관계를 조사하는 것을 목적으로 한다. 지형인자의 추출

에는 계산 알고리즘의 특성도 중요한 함수임을 고려하여, 해상도의 민감도와 다양한 계산 알고리즘과의 관계 규명도 수행하고자 한다.

2. 토양수분 예측인자

DEM의 경우 고도 자료를 이용해 완성하는 것이 비교적 용이하지만, 토양깊이와 토양특성과 같은 중요한 정보들은 확보가 용이하지 않다. 이런 이유로 유역의 지형에 따라 상관관계가 많은 자료들을 기초로 하여 토양의 특성과 지형을 표현하는 여러 인자들을 연결하는 노력을 해왔다(Sivapalan과 Kalma, 1995). 토양수분의 공간적 분포를 알기 위해서 직접 측정하는 방법은 시간적, 기술적, 노동집약 문제 때문에 많은 제약을 받는다. 유역에서 물의 흐름은 중력의 영향을 받기 때문에 유역의 지형이 흐름에 표현하는데 적절하다고 사료되어지고(Wolock과 Price, 1994), 또한 토양수분의 분포 또한 지형의 영향을 받는다고 고려되어져 지형과 관련된 다음과 같은 인자들로 토양수분 분포의 형태를 설명하고자 한다.

2.1 경사도(Slope)

경사도 s 는 유한차분 방법을 사용하여 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$s_{FD} = \sqrt{z_x^2 + z_y^2} \quad (1)$$

여기서, z_x, z_y 는 미분계수이다.

더 간단한 근사 방법(D8 알고리즘)은 다음과 같이 8개의 가까운 이웃 격자에서 가장 급한 경사를 경사도로써 계산한다.

$$s_{D8} = \max_{i=1,8} \frac{z_9 - z_i}{h\phi(i)} \quad (2)$$

여기서, h 는 격자 길이이고 $\phi(i)$ 는 동, 남, 서 그리고 북인 이웃 격자(그림 1에서 $i = 2, 4, 6, 8$)에 대해서는 1의 값을 가지고 북동, 남동, 남서 그리고 북서인 이웃격자(그림 1에서 $i = 1, 3, 5, 7$)인 경우에는 $\sqrt{2}$ 의 값을 갖는다. Moore, Lewis, 그리고 Gallant (1993)에서 오스트레일리아의 남동쪽에 위치한 Brindabella 연구 지역의 20m DEM에 대해서 D8 알고리즘이 유한차분 접근방법보다 약간 더 큰 평균 경사도를 예측한다고 밝혔다. 유한차분법은 수로에 근접한 곳에서 뾰족한 경사를 포함할 수 있기 때문에 수로의 경사에 초점에 맞

취질 경우에는 D8 알고리즘이 더 유용하다(Gallant와 Wilson, 1996).

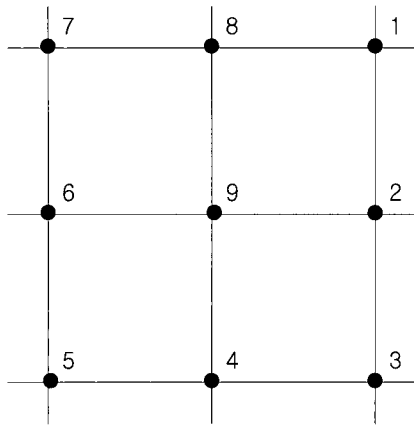


그림 1. 3×3 격자의 격자 번호

경사각 β 는 경사도를 사용하여 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\beta = \arctan(s) \quad (3)$$

2.2 상부사면 기여면적 (upslope contributing area)

상부사면 기여면적을 계산하는 것은 흐름을 분배하는 방법에 의해 결정된다. 흐름 경로를 예측하고 상부사면 기여면적을 계산하는 방법은 단방향흐름(SFD; Single Flow Direction) 알고리즘(O'Callaghan과 Mark, 1984), 다방향흐름(MFD; Multiple Flow Direction) 알고리즘(Quinn 등, 1995)과 DEMON (Digital Elevation Model Networks) 알고리즘(Costa-Cabral와 Burges, 1994)이 있다. SFD 알고리즘은 8개의 이웃격자 중에서 경사가 가장 급한 격자로만 흐름을 분배한다. MFD 알고리즘은 8방향의 경사와 등고선 길이의 곱의 합에 대한 경사와 등고선 길이의 비에 따라 주위 8격자 모두에 흐름을 분배한다. DEMON 알고리즘은 격자 기반의 모델에 있어서 흐름의 점원적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적인 특성임을 고려하여 흐름이 점원이 아닌 면에서 발생하고 그 발생된 흐름은 하경사 방향으로 2차원 흐름관을 형성한다고 가정한다.

2.3 습윤지수(Wetness index)

Beven과 Kirkby(1979)가 제안한 습윤지수(Wetness index)는 $\ln(a/\tan\beta)$ 로 계산된다. 여기서 a 는 2.2에서 언급한 상부사면 기여면적을 격자 크기로 나눈 값을 나타내고 $\tan\beta$ 는 2.1에서 언급한 경사도를 의미한다. 상부사면 기여면적을 계산하는 방법에 따라 습윤지수 또한 SFD 알고리즘, MFD 알고리즘 그리고 DEMON 알고리즘으로 계산할 수 있다. 습윤지수는 토양의 수분부족정도를 표현해 주는 인자로써 TOPMODEL (Beven과 Kirkby, 1979), THALES(Grayson, 1992) 그리고 TOPOG(O'Loughlin, 1986) 등의 분포형 수문 모형의 입력 변수로 사용하고 있으며 사면유출모의에도 널리 사용되고 있다.

2.4 곡률(Curvature)

곡률반경의 역수인 지표곡률(Mitasova와 Hofieka, 1993)등도 중요한 변수이다. 여기서 곡률은 흐름의 가속도와 관련 있는 윤곽구배(K_b , Profile curvature), 흐름의 수렴도와 관련 있는 등고선구배(K_c , contour curvature), 흐름의 수렴도와 관련하여 지형의 기복을 더 잘 표현하는 접선구배(K_t , tangential curvature) 그리고 평균구배(K_m , mean curvature)으로 분류할 수 있다. 각각은 다음과 같이 산정될 수 있다.

$$K_b = \frac{z_{xx}z_x^2 + z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_y^2}{p^{1/2}q^{3/2}} \quad (4)$$

$$K_c = \frac{z_{xx}z_y^2 - z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_x^2}{p^{3/2}} \quad (5)$$

$$K_t = \frac{z_{xx}z_y^2 + z_{xy}z_xz_y + z_{yy}z_x^2}{p^{1/2}q^{3/2}} \quad (6)$$

$$K_m = \frac{K_b + K_t}{2} \quad (7)$$

여기서 z_{xx} , z_{xy} , z_{yy} 는 이차 미분계수이고, $p = z_x^2 + z_y^2$ 이고 $q = p + 1$ 이다. 윤곽구배는 내리막으로 갈수록 경사가 증가하면 음의 값을 가지고 경사가 감소하면 양의 값을 가지며, 산등성이와 같이 흐름이 발산하면 음의 값을 가지고 계곡과 같이 흐름이 수렴하면 양의 값을 가진다. 윤곽구배는 아랫방향으로 최대 경사 방향의 표면에 대한 곡률이고 등고선구배는 격자점에서 그려진 등고선의 곡률이고 접선구배는 흐름선에 대해 수직인 평면에 대해 교차면에 의해 형성된 선의 곡률이다.

Mitasova와 Hofierka(1993)은 점선구배가 흐름의 수렴과 발산을 연구하는데 있어서 등고선구배보다 더 적절하다고 제안했다.

2.5 DEMON 알고리즘

DEMON 알고리즘(Costa-Cabral과 Burges, 1994)은 해당격자의 흐름방향선(aspect line)을 따라 하격자로 흐름을 분배시켜주는 방법으로서, 격자에서 형성된 흐름은 흐름튜브와 유사하게 이차원 흐름선을 통하여 하격사로 형성시킨다. 등고선에 기초한 모델과 직사각형 격자 DEMs에 기초한 모델 모두에 유리하다. MFD 알고리즘에서 상부사면 기여면적이 지표의 기하학적 대칭성에 의존하며, 실제 흐름방향선을 따른 흐름분배를 행하지 못하는 단점을 보완한 방법이다.

흐름분배율 계산은 다음과 같다.

$$f_E = \frac{A_\Delta}{A} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta y}{\Delta x} \frac{1}{\tan \alpha}, \quad f_s = 1 - f_E \quad (8)$$

여기서, A_Δ 은 그림 2에서 삼각형의 넓이를 나타내고 A 는 격자넓이($\Delta x \Delta y$)이고, α 는 E 방향을 기준으로 반시계 방향으로 측정된 흐름 방향각이다.

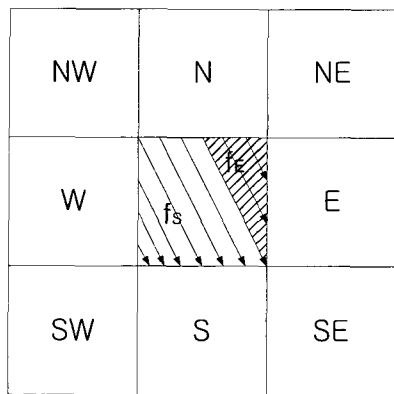


그림 2. 상부사면 기여면적 배분하는 방법

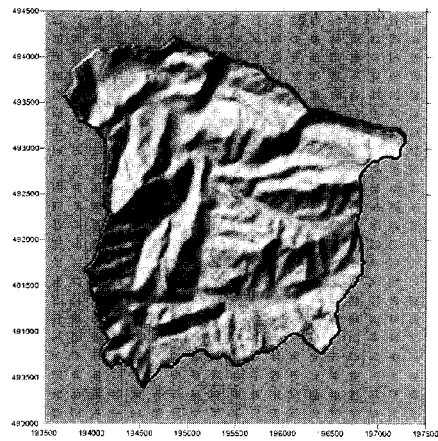
3. 수치고도 모형의 격자 크기

공간적인 수문 과정들을 측정하고 그 측정값들을 분석하는데 가장 빈번히 사용되는 자료는 수치고도모형(DEMs, Digital Elevation Models)이다. DEMs은 각 격자에 고도값을 할당하여 생성한다. DEMs은 대부분 지형지나 지점 조사를 통하여 내삽하기 때문에 잠

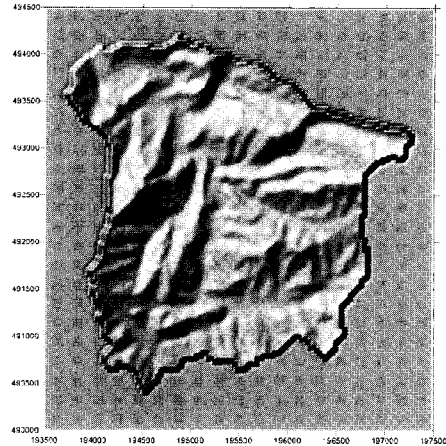
재적인 내삽문제가 삽입되어 있어서 평평한 곳 혹은 웅덩이 같은 곳은 내삽과정에서 임의로 생성될 수 있다(Grayson과 Blöschl, 2000). 따라서 실제 지형을 적절하게 표현할 수 있는 조치가 필요하고 또한 지형을 어느 정도 세부적으로 표현하는지에 대한 한계가 될 수 있는 격자 크기를 결정하여야 한다.

그림 3은 격자 크기에 따른 경기도 파주시에 위치하고 있는 설마천 유역의 음영기복도이다. 격자 크기가 커짐에 따라 지형의 표현정도가 낮아짐을 볼 수 있다. 50m 격자의 경우 요철부분을 표현하기에 어려움이 있고 100m 격자는 그 요철의 정도를 거의 표현 못하고 있다. 하지만 Watson(1998)의 연구에 따르면 지형을 더 자세히 표현해주는 격자 크기가 작은 DEMs보다 오히려 격자 크기가 큰 DEMs이 유출모의에 있어서 더 현실적이라는 결과를 보여주는 것과 같이 항상 지형을 더 자세히 표현하는 작은 크기의 격자가 보다 개선된 결과를 보여주지는 않기 때문에 모델링이 어떤 수문 과정을 모의하는지에 따라 적절한 격자 크기를 결정하는 것이 필요하다.

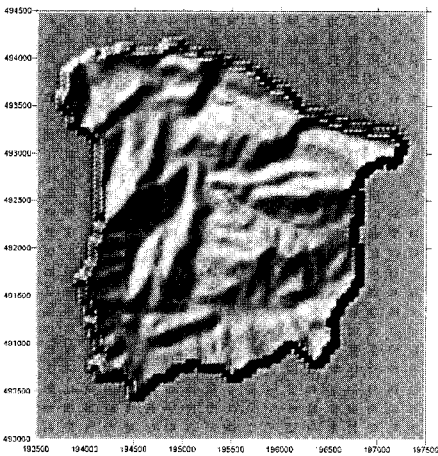
또한 DEMs의 크기의 변화는 경사도나 습윤지수 그리고 곡률 등과 같이 DEMs으로부터 유도된 지형지수들의 값들을 결정하는데 영향을 줄 것이고 지형지수들을 매개변수로 사용하는 모델도 결과적으로 DEMs의 격자 크기의 변화에 대해 의존적이게 된다. 고려하는 수문 과정이 격자 크기보다 더 복잡하다면 그 변화성을 파악할 수 없기 때문에 그것을 사용하는 모의 과정에도 영향이 있다. 따라서 모델의 매개변수 값들이 격자 크기에 따라 변화하는 것을 모델의 교정과 수정 시 고려해야만 한다. 격자 크기를 결정하는 우세한 과정의 변동성의 크기와 특징, 모델 자체의 구조(변동성이 어떻게 명확히 그리고 함축적으로 표현되는지), 과정과 변동성을 특성화하는데 유용한 정보, 모델 개발 목적 등의 조건이 모두 중요한 요소이다(Grayson과 Blöschl, 2000). 어떤 수문 과정의 변동성의 크기를 알 수 있다면 그것에 적절한 격자 크기를 얻어낼 수 있으나 그것을 정의하는 것은 상당히 주관적이고도 난해하며, 각각의 인자들에 따라 교정과 수정으로부터 간접적으로 최적의 값을 얻어내야 한다.



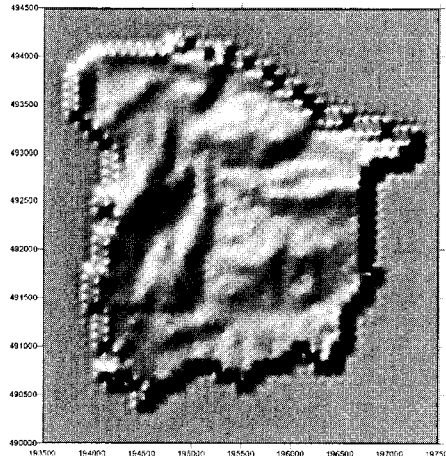
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 3. 격자 크기의 음영기복도(TM 좌표) (a)10m, (b)30m, (c)50m, (d)100m

4. 대상유역

본 연구에서 선정된 설마천은 임진강 하구에서 약 46 km 상류인 경기도 파주시 적성면의 마지리와 설마리에 위치하고 있는 임진강의 제 1지류로서, 전체 유역면적 18.5 km², 유로연장 11.3 km인 하천이다. 설마천 유역의 지도상 위치는 동경 126° 55' 54"에서 126° 54' 57", 북위 37° 54' 57"에서 37° 56' 3"로서 유역면적 8.5 km², 유로연장 5.8 km, 유로경사 2%이다. 전형적인 급경사 산지 사행하천이며 전형적인 곡류하천이다. 또한 여러 수문관측 기기 및 계측에 필요한 여러

자료들이 측정 중이며 이러한 자료는 본 연구를 수행하는데 필요한 정확도가 높은 자료를 제공하고 있어 적절하다고 판단되어진다. 또한 하천(계곡)의 발달이 잘 되었고 개발의 흔적이 타 지역보다 적으므로 자연상태 그대로를 실험 모의하기에 가장 이상적인 곳으로 판단되어 설마천 유역을 본 연구의 중심 지역으로 선정하게 되었다. 단지 설마천 시험유역에 대한 1/25,000 정밀 토양도를 확인한 결과 하천 주위를 따라서 일부분에 대한 조사만 되어 있을 뿐 전체적인 토양구분은 조사되어 있지 않았다. 그림 4는 10 m 격자로 설정된 설마천 유역의 수치지도모형(DEMs, Digital Elevation Mo-

dels)이다.

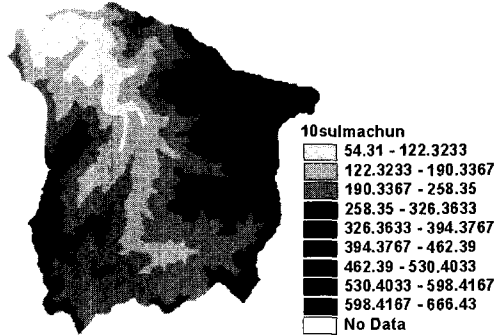


그림 4. 설마천유역 DEM[m]

5. 결과 및 토의

이번 연구에서 수문 해석에 있어서 일반적으로 DEMs의 격자 크기는 50m이하가 적절하다는 Beven (1995)의 연구결과를 고려하여 10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 80m, 100m의 격자크기를 선정하여 고려하였다. 토양수분의 공간적인 분포와 관련되어지는 지형인자들인 경사도, 상부사면 기여면적, 습윤지수, 유곽구배, 등고선

구배, 접선구배, 평균구배를 각각 격자의 크기에 대해 계산하였다.

그림 5, 그림 6 그리고 그림 7은 격자 크기에 따라 각각 SFD, MFD 그리고 DEMON 알고리즘으로 계산한 습윤지수의 결과들을 도시한 것이다. 그림에서 표현되듯이 격자 크기가 커짐에 따라 실제 지형과는 달리 국소 지점의 습윤 정도를 표현하는 정도가 점차로 퇴색되어 짐을 볼 수 있다. SFD 알고리즘(그림 5)의 경우 흐름을 경사가 가장 급한 방향으로 분배하기 때문에 수렴성을 잘 표현해주고, MFD 알고리즘(그림 6)의 경우 흐름을 경사가 있는 모든 방향으로 분배하므로 흐름의 발산 정도를 보다 잘 표현해 줌을 알 수 있다. DEMON 알고리즘(그림 7)의 경우에는 흐름선을 따라 흐름을 분배하기 때문에 보다 현실적으로 표현을 해준다.

그림 8에서는 상부사면 기여면적에 대한 누가분포함수를 보여준다. 각각의 알고리즘으로 계산한 상부사면 기여면적은 모두 격자 크기가 커질수록 상부사면 기여면적이 증가 패턴을 가진다. 하지만 한 지점의 격자보

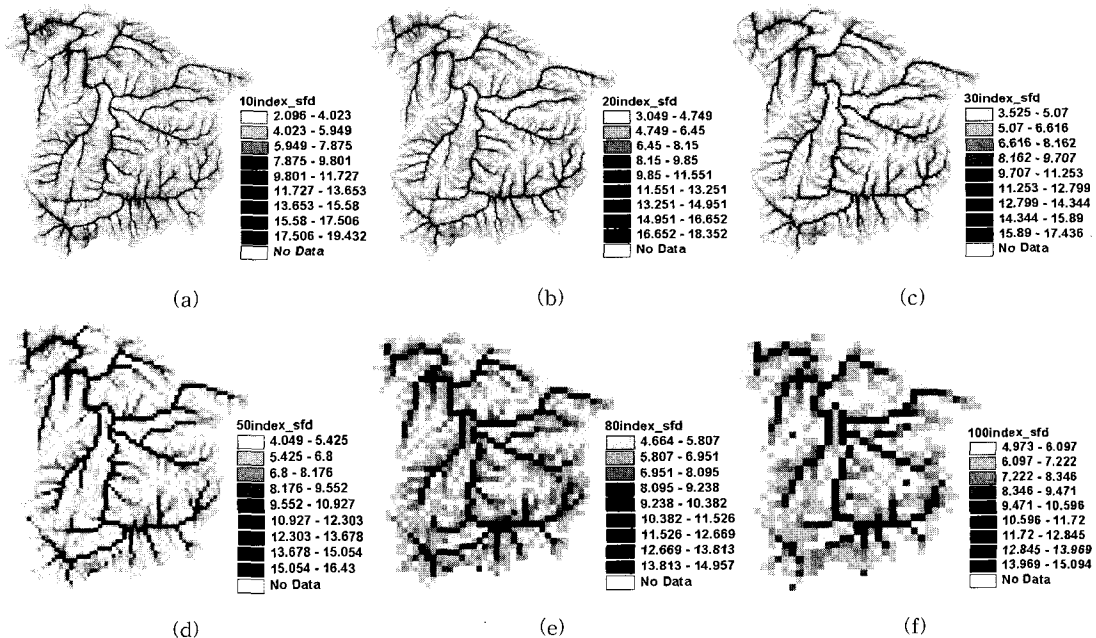


그림 5. 격자 크기에 따른 습윤지수(SFD 알고리즘)

(a)10 m, (b)20 m, (c)30 m, (d)50 m, (e)80 m, (f)100 m

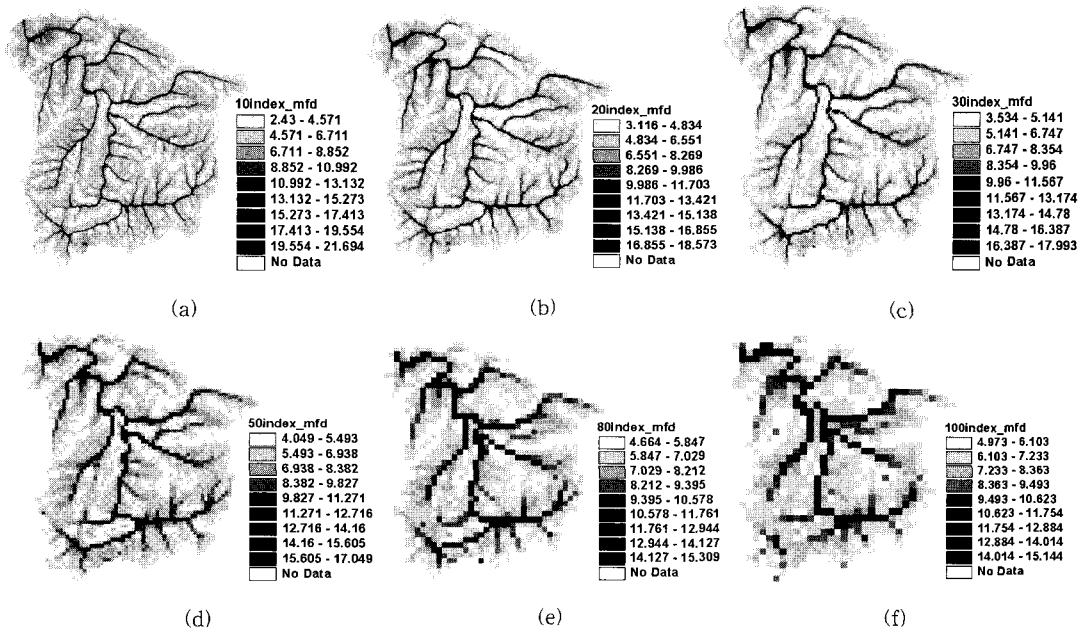


그림 6. 격자 크기에 따른 습윤지수(MFD 알고리즘)

(a) 10 m, (b) 20 m, (c) 30 m, (d) 50 m, (e) 80 m, (f) 100 m

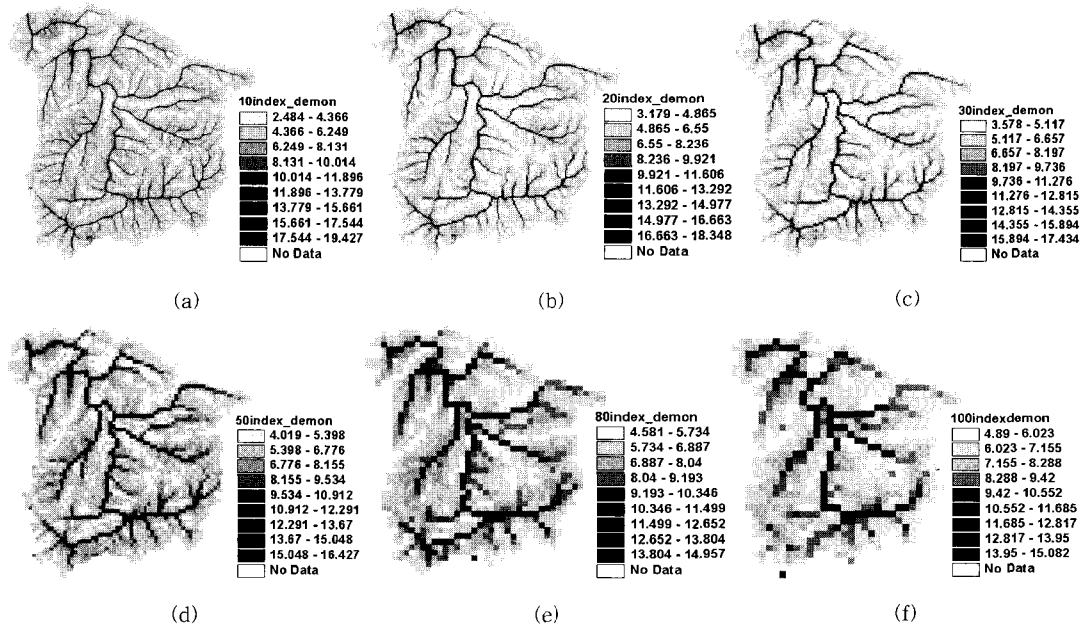


그림 7. 격자 크기에 따른 습윤지수(DEMON 알고리즘)

(a) 10 m, (b) 20 m, (c) 30 m, (d) 50 m, (e) 80 m, (f) 100 m

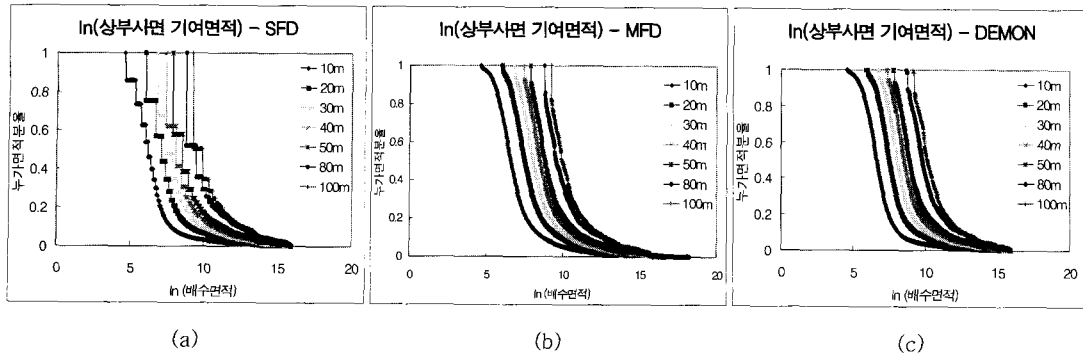


그림 8. 각 알고리즘으로 계산한 상부사면 기여면적의 누기면적함수
(a)SFD 알고리즘, (b)MFD 알고리즘, (c)DEMON 알고리즘

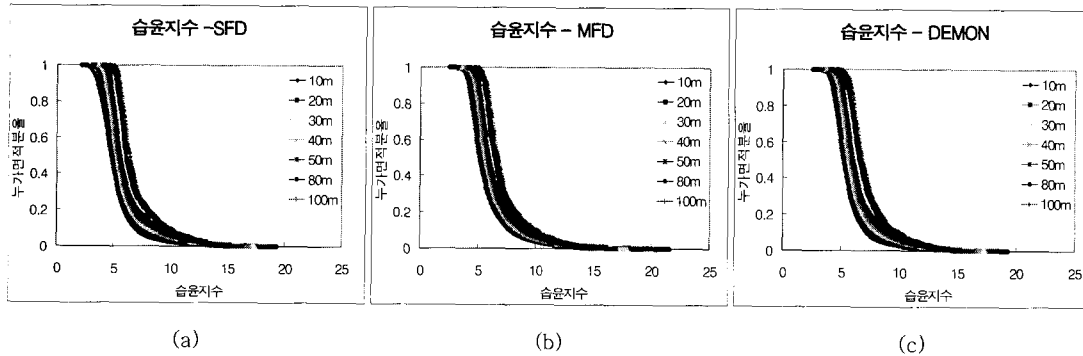


그림 9. 각 알고리즘으로 계산한 습윤지수의 누기분포함수
(a)SFD 알고리즘, (b)MFD 알고리즘, (c)DEMON 알고리즘

다 낮은 모든 방향으로 흐름을 형성시키는 MFD 알고리즘과 흐름선을 따라 흐름을 분배하는 DEMON 알고리즘에 비해 가장 급한 경사를 가진 하나의 격자로만 흐름을 형성하는 SFD 알고리즘의 경우 흐름의 수렴성으로 인하여 격자의 집중성을 나타내며 격자 크기가 커짐에 보다 더 민감한 분포를 보이고 있다.

그림 9는 습윤지수의 누기분포함수를 보여준다. 이 또한 오른쪽으로 분포가 이동하는 상부사면 기여면적과 같은 패턴을 보여준다. 상부사면 기여면적에서 보여준 격자의 집중성은 경사도에 의해 연속적인 패턴으로 변화하여 습윤지수는 흐름의 분산특성을 평균화시키는 경향을 보여준다. 그림 8과 9에서 보여준 결과에 따라 적용 시 다방향으로 흐름이 분산되거나 경사가 급하여 흐름이 한 방향으로 형성되는 것과 같이 지형에 따라 각 알고리즘의 적절한 선택과 선택된 알고리즘의 격자크기에 대한 민감도를 고려해 줄 필요가 있다. 그림 8과 그림 9에서 보여준 결과는 Zhang과 Montgomery (1994)의 연구와 유사한 결과를 보여준다. 이와 같은

형태를 가지는 인자들을 이용한 유출 모의에 있어서 상이한 결과를 보여줬으며 결국 격자 크기에 따라 다른 유출을 보여 줘 유출 모의에 있어서도 격자 크기를 고려해야 한다는 것을 의미한다.

그림 10은 SFD 알고리즘, MFD 알고리즘, DEMON 알고리즘으로 구한 상부사면 기여면적과 습윤지수의 평균이다. 흐름을 한 곳으로만 기여해주는 SFD 알고리즘의 경우 상부사면 기여면적이 흐름을 여러 방향으로 분배해 주는 다른 알고리즘에 비해 격자 크기에 보다 민감하게 평균이 증가한다. 습윤지수의 경우 상부사면 기여면적이 격자 크기가 커짐에 증가하고 경사도는 감소하는 영향을 받아 평균이 점점 증가 추세를 보이며, SFD 알고리즘으로 계산한 습윤지수는 다른 알고리즘들과 평균의 차이가 남을 알 수 있으며 한 지점에서 주위 8 격자의 고도와 비교해 낮은 모든 방향으로 흐름을 분산시키는 MFD 알고리즘의 경우는 상부사면 기여면적을 분산시킴으로써 격자 크기에 대한 민감도가 가장 작다.

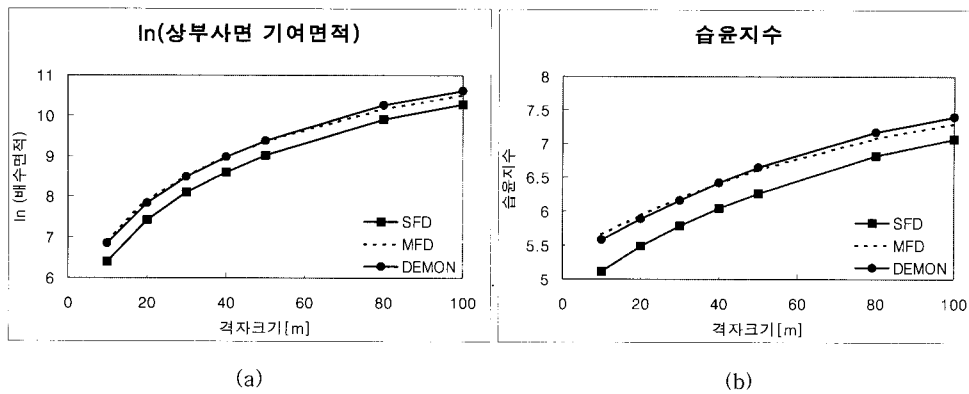


그림 10. 각 알고리즘과 격자 크기에 대한 평균 (a)상부사면 기여면적, (b)습윤지수

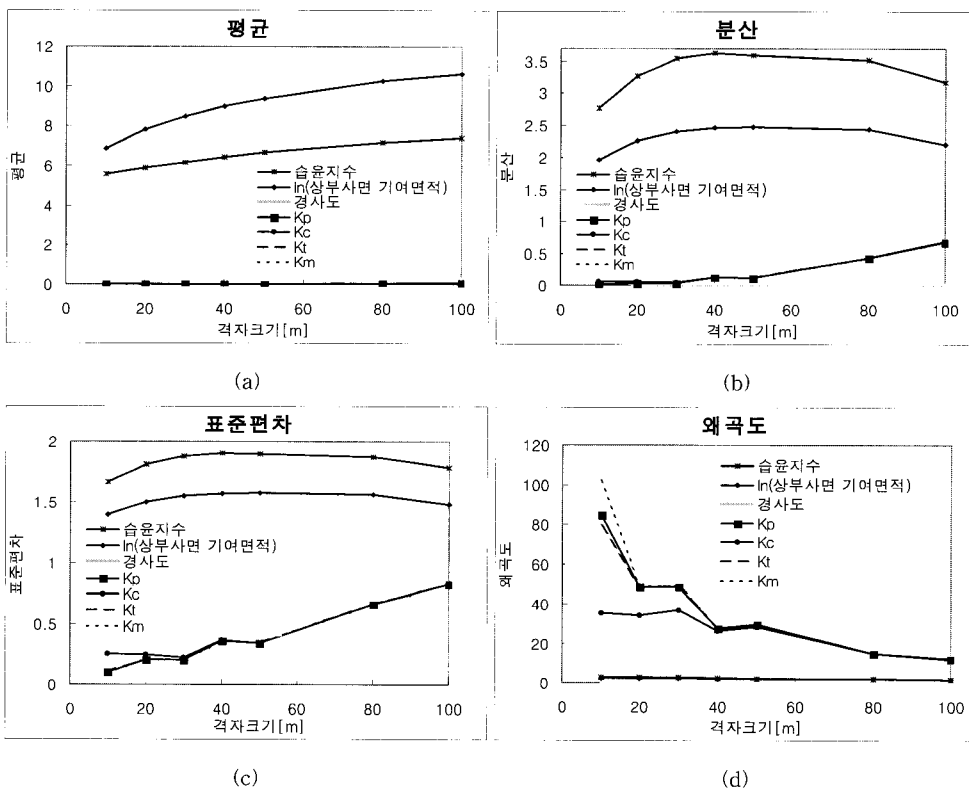


그림 11. 여러 인자에 대한 (a)평균, (b)분산, (c)표준편차, (d)왜곡도

그림 11은 토양수분 예측에 관련된 여러 인자들에 대한 통계값이다. 각 인자들에 대한 평균을 살펴보면 상부사면 기여면적, 습윤지수, 윤탁구배, 등고선구배, 접선구배와 평균구배의 경우 격자 크기의 증가에 따라 평균이 증가하였고 경사도의 경우 격자 크기의 증가에 따라 평균이 감소하였다. 이는 Wolock과 Price(1994)의

연구 결과인 습윤지수와 상부사면 기여면적의 평균 증가 및 경사도의 평균 감소와 유사한 결과를 보이고 있다. SFD 알고리즘과 MFD 알고리즘으로 구한 상부사면 기여면적과 습윤지수 또한 그림 7에서 보여준 DEMON 알고리즘으로 구한 것과 같은 경향을 보인다. 하지만 SFD 알고리즘으로 계산한 상부사면 기여면적

은 격자 크기에 따라 급격하게 변화함으로써 아주 민감한 변화를 보였다. 경사도는 격자의 크기가 커짐에 따라 평균값이 작아짐을 발견할 수 있는데 이는 경사도가 $\sqrt{z_x^2 + z_y^2}$ 로 계산되고 10 m 격자와 100 m 격자의 비교 시 100 m 격자 하나는 10 m 격자 100개가 합쳐진 것이므로 높이가 평균되기 때문이다. 따라서 x, y 좌표에 대한 고도의 미분계수값이 작아지게 되어 전체적으로 경사도가 작아진다. 습윤지수의 평균값이 커지면 수문 모형의 보정 시 수리학적 전도도가 현저히 증가하는 현상을 보이기 때문에 DEMs의 격자크기를 결정하는데 중요한 영향을 끼친다(Saulnier 등, 1997). 분산과 표준편차의 경우 경사도를 제외한 인자들은 격자 크기가 증가함에 따라 증가치를 보이고 있으나 습윤지수와 상부사면 기여면적은 50m 격자크기 이상에서 점차 감소 추세를 보이고 있다. 대칭성에 대한 계수인 왜곡도는 모두 양의 값을 가지며 전체적으로 감소함을 나타내고 있다. SFD 알고리즘과 MFD 알고리즘으로 계산한 결과 또한 DEMON 알고리즘과 똑같은 경향을 보인다. 그림 11은 대상구역의 토양수분 예측 시 필요한 DEMs 분석에 관련된 다양한 인자들에 대한 해상도의 민감성을 종합적으로 보여주고 있다.

6. 결 론

지형적 특성에 기초한 수문 모형은 일반적으로 기본적인 수문 과정에 대해 많은 것을 고려하고 있다 할지라도 수문 과정을 통제하고 있는 다양성의 원천 해석에 난해함이 존재한다. 이것은 충분치 못한 격자 해상도나 여러 종류의 다양성의 원천의 영향에 대한 이해력의 부족 때문이다(Seyfried와 Wilcox, 1995). 토양수분의 공간적인 분포를 알아보기 위한 준비작업으로 토양수분과 관련되는 인자들에 대해 검토하였다. 격자 크기가 변화함에 따라 지형인자들의 변동성을 알아보았으며 격자의 변화에 따라 인자들의 값들이 변동성이 관찰되었다. 구역내의 국소 지역의 포화정도를 나타내 주는 습윤지수의 평균은 격자 크기가 증가함에 따라 증가하였다. 또한 윤곽구배, 등고선구배, 접선구배와 평균구배의 평균이 증가 추세를 나타내었다. 상부사면 기여면적과 습윤지수의 경우 SFD 알고리즘으로 계산한 결과가 MFD 알고리즘과 DEMON 알고리즘으로 계산한 결과에 비해 격자 크기에 더 민감한 변화를 보여주었다. 이러한 결과들은 지형 변화에 따른 지형 묘사의 정밀성과 흐름 분배에 따른 인자들의 변화가 토양수분의 공간적인 변동성을 포함하는 수문 과정의 모의에 있어 중요한

영향을 주는 것을 나타낸다. 따라서 토양수분 모의에 있어 지형의 특성에 따라 격자 크기를 결정하는데 있어 여러 인자들의 해상도에 대한 민감도의 통계적인 특성들을 고려하여야 한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- 박재현, 윤성용, 김상준, 선우중호 (1997). "TDR (Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수분량의 측정." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제6호, pp. 587-595.
- 윤용남 (2000). 공업수문학, 청문각, pp. 142-152.
- 이학수, 김경현, 한지영, 김상현 (2001). "수치 지형인자를 활용한 토양수분분포 예측." 한국수자원학회논문집, 제34권, 제4호, pp. 391-401.
- Beven and Kirkby (1979). "A physically-based variable contributing area model of basin hydrology." *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43-69.
- Beven, K. J, Lamb, Quinn, Rominowicz. and Freer (1995). "TOPMODEL : Computer Model of Watershed Hydrology.", *Water Resour. Publication*, pp. 625-668.
- Burt and Butcher (1985). "Topographic controls of soil moisture distributions." *Journal of Soil Science*, Vol. 36, pp. 469-486.
- Costa-Cabral and Burges (1994). "Digital elevation model networks(DEMON); A model of flowover hillslopes for computation of contributing and dispersal area." *Water Resour. Res.*, Vol 30, pp. 1681-1692.
- Gallant and Wilson (1996). "TAPES-G: A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences." *Computers & Geosciences*, Vol. 22, No. 7, pp. 713-722.
- Grayson and Blöschl (2000). *Spatial Patterns in Catchment Hydrology*. Cambridge university press, p.61-63.
- Grayson, R. B., Moore, I.D., and McMahon

- (1992). "Physically based hydrologic modeling. 1. A terrain-based for investigative purposes." *Water Resour. Res.*, Vol. 10, pp.2639-2658.
- Kuo, Steenhuis, McCulloch, Mohler, Weintin, DeGloria and Swaney (1999). "Effect of grid size on runoff and soil moisture for a variable-source-area hydrology model." *Water Resour. Res.*, Vol.35, No.11, pp. 3419-3428.
- Mitasova and Hofierka (1993). "Interpolation by Regularized Spline with Tension: II. Application to Terrain Modeling and Surface Geometry Analysis." *Mathematical Geology*, Vol. 25. No. 6. pp. 657-669.
- Moore, I.D., Lewis, A., and Gallant, J. C. (1993). "Terrain attributes: estimation methods and scale effects, in Jakeman." *Modelling Change in Environmental Systems*, John Wiley and Sons Ltd, New York, Ch. 8.
- O'Callaghan and Mark (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Comput. Vision Graphes Image Process.*, Vol. 28, pp. 323-344.
- O'Loughlin and E.M.(1986) "Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis" *Water Resour. Res.*, Vol. 22, No.5, pp. 794-804.
- Quinn, F., Beven, J., Chevallier, P. and Planchon (1991). "The prediction of hillslope flowpaths for distributed modelling using digital terrain models" *Hydrol. Process.*, Vol 5, pp. 59-80.
- Saulnier, Obled and Beven (1997). "Analytical compensation between DEM grid resolution and effective values of saturated hydraulic conductivity within the TOPMODEL framework.", *Hydrol. Process.*, Vol. 11, pp. 1331-1346.
- Seyfried and Wilcox (1995). "Scale and the nature of spatial variability: Field examples having implications for hydrologic modeling." *Water Resour. Res.*, Vol. 31, No. 1, pp. 173-184.
- Sivaplan and Kalma (1995). "Scale issues in Hydrological modelling." *Hohn Wiley & Sons.*, Edited by Kalma and Sivaplan, pp. 1-8.
- Watson, Grayson, Vertessy and McMahon (1998). "Large-scale distribution modelling and the utility of detailed ground data." *Hydrol. Process.*, Vol. 12. pp. 873-888.
- Wolock and Price (1994). "Effects of digital elevation model map scale and data resolution on a topography-based watershed model." *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 77, pp. 3041-3052.
- Yeh and Eltahir (1998). "Stochastic analysis of the relationship between topography and the spatial distribution of soil moisture." *Water Resour. Res.*, Vol. 34, No. 5, pp. 1251-1263.
- Zhang and Montgomer (1994). "Digital elevation model grid size, landscape representation, and hydrologic simulations.", *Water Resour. Res.*, Vol. 30, No. 4, pp. 1019-1028.
- Zhou, Shimada and Sato (2001). "Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No.2, pp. 273-285.
- (논문번호:02-62/접수:2002.08.27/심사완료:2003.03.14)