

## 수치 지형인자를 활용한 토양수분분포 예측 Prediction of Soil Moisture Distribution Using Digital Terrain Indices

이 학 수\* / 김 경 현\*\* / 한 지 영\*\*\* / 김 상 현\*\*\*\*

Lee, Hak Su / Kim, Kyung Hyun / Han, Ji Young / Kim, Sang Hyun

### Abstract

Several curvature parameters, solar radiation parameter and topographic flow generation parameters have been summarized and calculated to predict the spatial distribution of soil moisture content. The spatial distribution of soil moisture data can be obtained using Global Positioning System(GPS) and portable soil moisture monitoring equipment, Theta-Probe. Correlation analysis has been performed between the parameters of soil moisture prediction and measured data of soil moisture. Multiple regression analysis of soil moisture prediction shows the potential capability and limitations of existing methods of digital terrain analysis.

*keywords* : Spatial Distribution of Soil Moisture, Parameters of Soil Moisture Prediction, Digital Elevation Model (DEM)

### 요 지

토양수분의 공간적 분포를 예측하기 위하여 지표면 곡률관련인자, 지형흐름인자, 태양에너지 복사인자들을 계산하였다. GPS와 토양수분측정기를 활용한 산지유역에서의 토양수분측정은 토양수분의 공간적 분포자료의 구축을 가능하게 했다. 측정된 토양수분자료와 토양수분 추정인자 사이의 상관관계를 분석하였다. 다중회귀분석을 통한 토양수분 추정인자와 토양수분의 공간적 분포상황에 대한 검토는 수치고도모형(DEM)의 분석을 통한 토양수분 추정능력의 가능성과 한계성을 보여주었다.

**핵심 용어** : 토양수분의 공간적 분포, 토양수분 추정인자, 수치고도모형(DEM)

- \* 부산대학교 공과대학 청정공학협동과정 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Clean Technology, Pusan National Univ. (Email: haksulee@hanmail.net)
- \*\* 부산대학교 환경기술·산업개발연구센터 연구원  
Research Assistant, IETI Pusan National Univ. (Email: validity@pusan.ac.kr)
- \*\*\* 부산대학교 공과대학 환경공학과 석사과정  
Graduate Student, Dept. of Environmental Engrg. (Email: balnc1107@hanmail.net)
- \*\*\*\* 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수  
Assistant Professor, Dept. of Environmental Engrg. (Email: kimsangh@pnu.edu)

## 1. 서 론

사면에서의 유출과정에 대한 연구는 지리정보시스템의 발달과 더불어 수문학적 과정의 공간적인 분포를 모의하는 방향으로 발전되어 오고 있다. 특히, 유역의 지형적 특성을 반영한 수문모형의 발전은 산지사면이 상당수인 국내의 지형에 적합하다(이지영과 김상현, 2000; 조홍제 등, 2000). 대부분의 사면유출모형이 강우-유출과정의 모형구조와 매개변수추정에 집중하고 있으나, 보다 발전적인 분포형 수문모의를 위해서는 토양수분의 공간적인 분포를 예측하는 것이 필요하다. 또한 초기토양수분 상태가 유출과정에 미치는 영향은 강우사상에 의한 영향 다음으로 심각하다(Troch 등, 1993)고 알려져 있다.

유역유출량은 여러 가지 수문과정과 지형, 그리고 다른 영향인자들에 지배받게 된다. 예를 들면 태양복사 에너지의 영향(Moore 등, 1993), 흐름추적과정(Dunne과 Black, 1970; Dunne 등, 1975; Zaslasky와 Sinai, 1981; Beven과 Kirkby, 1979; Moore 등, 1988), 식생분포와 토양특성(Western 등, 1999), 유역형상, 선행토양함수조건(윤용남, 1998) 등이라 할 수 있다. 이러한 여러 영향인자들의 복합적인 거동이 유출형상으로 나타난다면, 유출모의에 앞서 영향인자들간의 관련성을 획득하는 것이 기본적으로 선행되어야 하며, 이렇게 획득한 영향인자들간의 상호관련성과 유출과의 직접적 관련성을 토대로 유역유출모의를 수행해야 한다.

유출영향인자들 중 흐름추적과 관련되는 다방향 흐름알고리즘(MFD, Quinn, 1991), 단방향 흐름알고리즘(SFD, Jenson과 Domingue, 1988), DEMON 흐름알고리즘(Costa-Cabral과 Burges, 1994), 지형적 수렴성과 관련되는 습윤지수(Beven과 Kirkby, 1979), 지형곡률(Mitášová와 Hofierka, 1993), 증발산과 관련되는 태양반사지수(Moore 등, 1993; Dingman, 1994)에 대한 연구는 기존에 많이 이루어졌다. 그러나, 이들 인자들과 공간적으로 분포된 토양수분과의 관련성, 지표토양수분 분포의 예측과 중요도에 대한 연구는 아직 많은 활동이 필요한 부분이라 판단된다(Western 등, 1999; Western 등, 2001). 본 연구에서는 수치지형모형에서 도출될 수 있는 지금까지 연구되어온 여러 가지 인자들을 조합하고 이들을 현장에서 토양수분을 측정할 결과와 비교하여 이들 인자들의 토양수분 예측력을 평가하고 제시하는 것을 주목적으로 한다.

## 2. 토양수분 추정인자

### 2.1 지표면 곡률인자

지표곡률은 지표와 한 평면의 교선이 만드는 곡률로서 곡률반경의 역수이다. 곡률이 완만한 지형을 작은 값으로, 곡률이 급한 지형을 큰 값으로 표시해 준다. 등고선 방향으로 측정할 곡률은 지표기복(convex, concave)을 표현해 줌으로써, 흐름의 수렴과 발산지역을 표시해 주고, 흐름방향으로 측정할 곡률은 흐름진행 속도의 빠름과 느림에 따른 침식과 퇴적지역에 대한 지표표를 제시해 준다. 지표형상을 이차미분가능한 함수  $z = f(x, y)$ 로서 표현하고 다음 관계들이 정의된다(Mitášová와 Hofierka, 1993).

$$f_x = \frac{\partial z}{\partial x}; f_y = \frac{\partial z}{\partial y}; f_{xx} = \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}; f_{yy} = \frac{\partial^2 z}{\partial y^2}; \quad (1)$$

$$f_{xy} = \frac{\partial^2 z}{\partial x \partial y}$$

$$p = f_x^2 + f_y^2; q = p + 1 \quad (2)$$

$$\nabla f = (f_x, f_y) \quad (3)$$

$$\gamma = \arctan \sqrt{p} \quad (4)$$

$$\alpha = \arctan (f_y/f_x) \quad (5)$$

여기서,  $x$ 는 격자의 가로좌표값,  $y$ 는 격자의 세로좌표값,  $z$ 는 고도를 의미하며,  $\nabla f$ 는 기울기,  $\gamma$ 는 최대경사각,  $\alpha$ 는 흐름방향각(aspect angle)을 의미한다.

$|\nabla f| = 0$  인 지점은 흐름방향이 정의되지 않으며,  $|\nabla f| \neq 0$  인 지점에서 하나의 흐름방향이 결정된다. 평평한 지형으로 고려되는 주어진 최소경사각  $\gamma_{\min}$ 보다 작은 값을 가지는 격자점(singular point)에서 흐름방향선이 끝난다(Mitášová와 Hofierka, 1993). 이렇게 형성된 흐름방향선과 여기에 일직선으로 맞춘 수직평면을 사용하여 윤곽곡률( $K_p$ , Profile curvature)을 구한다. 윤곽곡률은 경사변화율에 대한 측정으로 흐름속도변화와 퇴적물 이송과정의 특색을 표현하는데 유용하다. 등고선 곡률( $K_c$ , Contour curvature)은 등고선을 형성하는 수평평면에서 계산되며, 지형적 수렴과 발산을 표현하여 지형을 다른 물흐

름의 수렴정도를 표시해 준다. 접선곡률( $K_t$ , Tangential curvature)은 기울기에 직각인 방향에 대한 법평면에서 계산되며, 이는 주어진 점의 등고선에 접하는 방향이 된다. 등고선 곡률보다 접선곡률이 지형 기록을 더욱 잘 표현하므로, 흐름의 수렴정도 측정에 더욱 적절하다고 고려되고 있지만(Krcho, 1973, 1991), 불록지형과 오목지역의 공간적 분포는 동일하게 표현된다(Gallant 와 Wilson, 1996). 지표의 한 지점에서의 곡률들은 아래의 일반식에 기초하여 유도된다(Rektorys, 1969).

$$K = \frac{f_{xx} \cos^2 \beta_1 + 2f_{xy} \cos \beta_1 \cos \beta_2 + f_{yy} \cos^2 \beta_2}{\sqrt{q} \cos \theta} \quad (6)$$

여기서,  $\theta$ 는 지표법선과 곡률계산시 사용되는 평면의 사이각이며  $\beta_1$ ,  $\beta_2$ 는 각각 주어진 기준단면의 접선과  $x$ 축,  $y$ 축과의 사이각이다. 윤곽곡률( $K_p$ )은 식(7)과 (6)에 의해 식 (8)로 표현된다.

$$\cos \theta = 1; \cos \beta_1 = \frac{f_x}{\sqrt{pq}}; \cos \beta_2 = \frac{f_y}{\sqrt{pq}} \quad (7)$$

$$K_p = \frac{f_{xx}f_x^2 + 2f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_y^2}{p\sqrt{q}^3} \quad (8)$$

등고선 곡률( $K_c$ )은 식 (9)와 (6)에 의해 식 (10)으로 표현된다.

$$\cos \theta = \sqrt{\frac{p}{q}}; \cos \beta_1 = \frac{f_y}{\sqrt{p}}; \cos \beta_2 = \frac{-f_x}{\sqrt{p}} \quad (9)$$

$$K_c = \frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_x^2}{\sqrt{p}^3} \quad (10)$$

접선곡률( $K_t$ )은 식 (11)과 (6)에 의해 식 (12)로 표현된다.

$$\cos \theta = 1; \cos \beta_1 = \frac{f_y}{\sqrt{p}}; \cos \beta_2 = \frac{-f_x}{\sqrt{p}} \quad (11)$$

$$K_t = \frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q}} \quad (12)$$

$K_t$ 와  $K_c$ 는 식 (13)의 관계를 가지며, 평균곡률( $K_m$ )은 식 (14)로 표현된다.

$$K_t = K_c \sin \beta \quad (13)$$

$$K_m = (K_t + K_p)/2 \quad (14)$$

흐름경사선을 따른 곡률측정은 흐름가속정도를 나타내며, 등고선을 따른 곡률측정은 흐름수렴정도를 표현한다(Mitášová와 Hofierka, 1993).

그림 1의 (a)는 느린 흐름수렴으로서 요면(concave) 윤곽곡률과 요면 접선곡률을 나타내며, (b)는 빠른 흐름수렴으로서 철면(convex) 윤곽곡률과 요

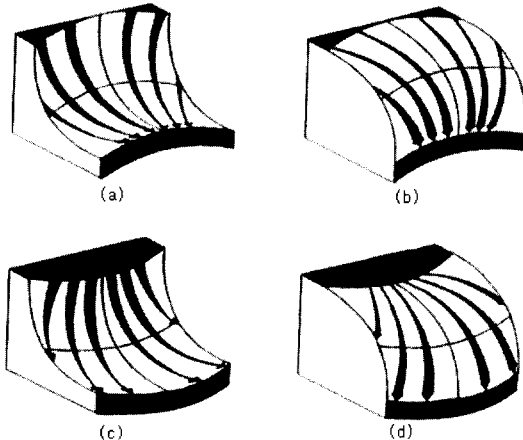


그림 1. 기본적인 지형의 형상과 흐름의 종류(Mitášová 와 Hofierka, 1993)

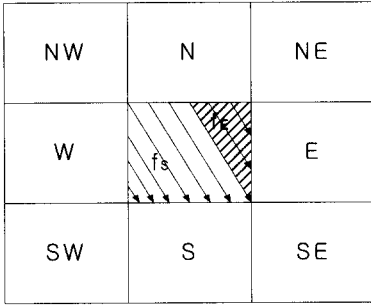


그림 2. DEMON 흐름분배알고리즘에서  
배수면적을 배분하는 방법

면 접선곡률을 (c)는 느린 흐름발산으로서 요면 윤곽 곡률과 절면 접선곡률을 (d)는 빠른 흐름발산으로서 절면 윤곽곡률과 절면 접선곡률을 나타내고 있다. 최대 경사도는 유한차분 방법을 사용하였으며 그림 2의 격자표현방식을 사용하여 식 (15)로 기술된다(Mitášová 와 Hofierka, 1993).

$$\tan \beta = \sqrt{p} = \sqrt{f_x^2 + f_y^2} \quad (15)$$

$$\sqrt{\left(\frac{z_E - z_W}{2h}\right)^2 + \left(\frac{z_N - z_S}{2h}\right)^2}$$

여기서, 하첨자  $E, W, N, S$ 는 격자방위를 의미하며,  $h$ 는 두 격자간 중심거리,  $z$ 는 고도를 의미한다.

## 2.2 태양에너지 관련인자

태양복사는 지표에너지 수지에 관여하는 주요 인자로서, 증발산과 식생분포에 관련성이 크며(Hutchins 등, 1976), 지형의 영향을 크게 받는다(Moore 등, 1993). 지표가 받는 순복사량 ( $R_n$ ) [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ]은 다음 식으로 표현된다.

$$R_n = (1 - \alpha)(R_{dir} + R_{dif} + R_{ref}) + \epsilon_s L_i - L_o \quad (16)$$

$$= (1 - \alpha)R_t + L_n$$

여기서,  $\alpha$ 는 지표반사계수[무차원],  $\epsilon_s$ 는 지표방출계수[무차원]로서 흑체복사방출력에 대한 지표복사방출력의 비이다.  $R_{dir}$ 는 지표로 직접 들어오는 단파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $R_{dif}$ 는 대기중에서 확산된 후 지표로 오는 단파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $R_{ref}$ 는 대기중에서

반사된 단파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $R_t$ 는 전체 단파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ]으로서  $R_{dir} + R_{dif} + R_{ref}$ 에 해당하며,  $L_i$ 는 지표유입 장파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $L_o$ 는 지표유출 장파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $L_n$ 은 순장파복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ]으로서  $\epsilon_s L_i - L_o$ 에 해당한다. 장파복사성분은 아래 식으로 표현가능하다.

$$L_o = \epsilon_s \sigma T_s^4; L_i = \epsilon_a \sigma T_a^4 \nu + (1 - \nu)L_o \quad (17)$$

여기서,  $\epsilon_a$ 는 대기 방출계수[무차원],  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzman 상수 ( $= 5.67 \times 10^{-8}$  [ $\text{Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ ]),  $T_s$ 는 평균지표온도 [K],  $T_a$ 는 평균대기온도 [K],  $\nu$ 는 skyview factor[무차원]이다. 총단파 복사량은 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$R_t = (R_{th} - R_{dh})F + R_{dh}\nu + R_{th}(1 - \nu)\alpha \quad (18)$$

여기서,  $R_{th}$ 는 수평면에 입사하는 총복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $R_{dh}$ 는 수평면에 입사하는 확산복사량 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $F$ 는 잠재태양반사지수 ( $R_s/R_o$ ),  $R_s$ 는 경사면 잠재태양복사열 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ],  $R_o$ 는 수평면 잠재태양복사열 [ $\text{Jm}^{-2}\text{hr}^{-1}$ ]을 나타낸다.  $R_{th}$ 와  $R_{dh}$ 는 대기투과도와  $R_o$ 의 함수로서 표현되며 (Moore 등, 1993), 대기투과도는 대기두께와 대기 구성성분의 함수이다(Lee, 1978).  $R_s$ 는 대기가 없을 경우, 경사지가 받는 복사량으로서 다음 식으로 표현된다.

$$R_s = \frac{24I \cos \phi \cos \delta (\sin \eta - \eta \cos \eta)}{\pi r^2} \quad (19)$$

여기서  $I$ 는 태양상수 ( $= 1,353 \text{Jm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ),  $\delta$ 는 태양편향 $^\circ$ ,  $r$ 는 지구와 태양의 평균거리에 대한 현재 거리비[m/m],  $\phi$ 는 위도와 경사의 함수,  $\eta$ 는 위도와 흐름방향의 함수이다(Lee, 1978).  $R_o$ 는 대기가 없을 경우 수평면에 입사하는 태양복사량으로서 식의 형태는 식 (19)와 동일하다. 본 연구에서  $\alpha = 0.2075$ ,  $\epsilon_s = 0.96$ 을 사용하였다.

### 2.3 지형흐름 발생인자

습윤지수(Wetness Index)로서  $\ln(a/\tan\beta)$ 를 이용했다(Beven과 Kirkby, 1979). 여기서  $a$ 는 단위 격자 간격당 상부사면면적,  $\tan\beta$ 는 국부적 지형경사이다. 습윤지수 생성시 상격자에서 하격자로의 흐름분배방법에 따라 SFD(single flow direction) 습윤지수(Jenson과 Domingue, 1988), MFD(multiple flow direction) 습윤지수(Quinn 등, 1991), DEMON(digital elevation model network) 습윤지수(Costa-Cabral과 Burges, 1994)로 구분하여 구했다. SFD 알고리즘은 수치고도모형의 각 격자에서, 주위 8개 격자중 가장 경사가 급한 방향의 격자로 흐름이 형성된다고 가정한다(O'callaghan과 Mark, 1984). MFD 알고리즘은 주위 8개 격자중 고도가 낮은 주위격자 모두에게 흐름을 형성시킴으로서 SFD 알고리즘의 1차원적 흐름분배를 개선시킨 방법으로, 흐름분배율은 식 (20)으로 계산된다(Quinn 등, 1991).

$$f_i = \frac{S_i L_i}{\sum S_j L_j} \quad (20)$$

여기서,  $S$ 는 지표경사,  $L$ 은 유효등고선 길이로서 직

교방향에 대해선 0.5, 대각선 방향에 대해선 0.354의 값을 사용한다(Quinn 등, 1991). 흐름방향 알고리즘에 대한 구체적인 설명은 수치고도모형에 관한 연구(김상현과 이지영, 1999)에 자세히 기술되어 있다. DEMON 알고리즘은 해당격자의 흐름방향선(aspect line)을 따라 하격자로 흐름을 분배시켜주는 방법으로, MFD 알고리즘에서 배수면적이 지표의 기하학적 대칭성에 의존하며, 실제 흐름방향선을 따른 흐름분배를 행하지 못하는 단점을 보완한 방법으로서 흐름분배율 계산 예는 다음과 같다(Costa-Cabral과 Burges, 1994).

$$f_E = \frac{A_\Delta}{A} = -\frac{1}{2} \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad (21)$$

$$\frac{1}{\tan\alpha}; f_S = 1 - f_E; f_{SE} = 0$$

여기서,  $A_\Delta$ 은 그림 2에서 삼각형면적,  $A$ 는 격자면적( $\Delta x \Delta y$ ),  $\alpha$ 는 E 방향을 기준으로 반시계방향으로 측정된 흐름방향각이다.  $f_E, f_S, f_{SE}$ 는 각각 중심격자에서 E, S, SE 방위에 위치한 격자로의 흐름분배율로서,  $f_E$ 의 계산에서 값을 양으로 하기 위해 - 부호를 사용하였다. 표 1은 연구에 사용한 관련인자들

표 1. 곡률 관련인자, 태양에너지 관련인자, 지형흐름 발생인자의 의미

항목	수식	의미	참고문헌
윤곽 곡률( $K_p$ )	$\frac{f_{xx}f_x^2 + 2f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_y^2}{p\sqrt{q^3}}$	흐름속도변화, 퇴적물 이송과정 설명	Mitášová와 Hofierka [1993]
등고선 곡률( $K_c$ )	$\frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_x^2}{\sqrt{p^3}}$	지형을 따른 흐름의 수렴정도	Mitášová와 Hofierka [1993]
접선 곡률( $K_c$ )	$\frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_x f_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q}}$	지형을 따른 흐름의 수렴정도	Mitášová와 Hofierka [1993]
평균 곡률( $K_m$ )	$(K_t + K_p)/2$	지형상 흐름의 평균적 거동	Mitášová와 Hofierka [1993]
배수 면적( $a$ )	$\sum a$	배수 면적	Mitášová와 Hofierka [1993]
경사도( $s$ )	$\tan\beta = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$	경사도	Mitášová와 Hofierka [1993]
습윤지수(SFD)	$\ln(a/\tan\beta)$	지형상 흐름의 수렴정도	O'callaghan, Mark, [1984]
습윤지수(MFD)	$\ln(a/\tan\beta)$	지형상 흐름의 수렴정도	Quinn [1991]
습윤지수(DEMON)	$\ln(a/\tan\beta)$	지형상 흐름의 수렴정도	Costa-Cabral 과 Burges [1994]
태양반사지수( $R_s/R_o$ )	$R_s/R_o$	지면 태양 복사 정도	Moore 등 [1993]

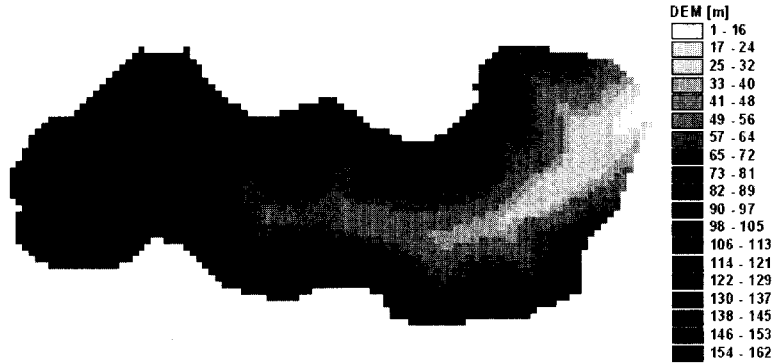


그림 3. DEM

과 그 의미를 정리하였다.

### 3. 대상유역과 토양수분 측정방법

#### 3.1 대상유역

본 연구의 대상이 되는 유역은 강원도 삼척시 원덕읍 월천리로 0.286 km<sup>2</sup>의 유역면적에 1%에서 87%의 경사도를 가지고 있는 산지유역이다. 연평균 기온은 연최고 24.6℃, 연최저 -4.7℃이며, 연평균 1,100 mm의 강우량을 기록하고 있다. 월천리 유역은 유역의 출구가 해안과 접해있고, 사면유출흐름의 발달에 대한 관찰과 모의가 용이한 밀폐유역이다. 전체유역의 대부분이 2000년 4월 화재로 식생이 소멸되었고 토양층도 균일하여 흐름이 지형에만 의존하게 되는 이상적인 사면유출 연구대상 유역이다. 대상유역의 DEM은 한국지리원의 1:5,000 지형도에서 등고선을 디지털화(Digitizing)함으로써 확보될 수 있었고, 공간보간과 격자지형정보전환을 통해 10 m 해상도의 수치고도 분포도를 구축하였다. 그림 3은 대상유역의 DEM을 나타낸다.

#### 3.2 토양수분 측정장치와 GPS의 활용

지표토양수분측정은 토양수분 감지기인 Theta-Probe를 사용했으며, 그림 4에 나타내었다. Theta-Probe는 토양내 전압[Volts]을 측정하며, 이 값을 체적함수비(volumetric water content)와 관련지어서 값을 구한다. Theta-Probe의 측정값인 토양내 전압 (V)[Volts]과 체적함수비(θ)[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]의 관계식은 다음과 같다.

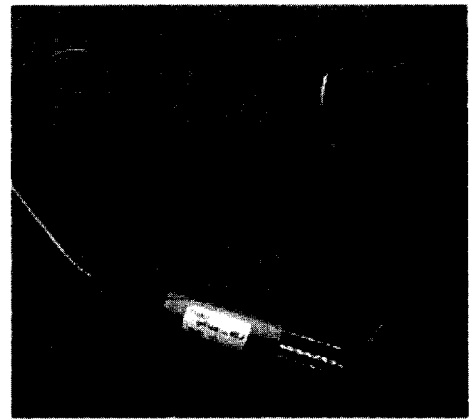


그림 4. 토양수분측정장비. Theta-Probe.

$$\theta = \frac{-0.53 + 6.4V - 6.4V^2 + 4.7V^3}{8.4} \quad (22)$$

위 식의 오차는 ±0.05[m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup>]이다. 토양수분 측정위치 관측은 GPS(Global Positioning System)기인 MARCH II를 사용하였다. MARCH II GPS 수신기는 GPS 위성신호를 추적하여 수신기의 위도, 경도, 고도를 계산가능하게 해 주는 장비이다. 정확한 위치관측을 위하여 나침반과 줄자를 이용한 거리측량, 지도를 이용한 위치확인을 실시하였다. 위치관측과 토양수분 측정방법은 다음과 같다. 먼저, 지형상 구분이 명확한 계곡지점을 GPS를 사용하여 기준위치로 선점한 후, 계곡을 따라 10m 간격으로 위치를 선점해 나아간다. 각 지점마다 반경 1m 이내에 3군데의 측정점을 선택하고 Theta-Probe를 사용하여 토양내 전압을 측정한다. 측정깊이는 지표하 30cm 이내로 선점하였

으며, 여러 지형내에서의 수분거동을 관측하기 위하여 수로, 계곡, 경사지, 봉우리 부분으로 나누어 측정하였다.

#### 4. 결과 및 토의

수치고도모형을 기반으로 식 (1), (2) 그리고 (8)을 활용하여 계산된 윤곽곡률( $K_p$ )은 그림 5에 나타나 있다. 퇴적물의 이송과정을 설명하는데 유용한 것으로 알려져 있는 윤곽곡률은 침식예상 지역과 퇴적예상 지역의 공간적분포가 잘 표현되어 있다. 흐름의 수렴성을 기술하는데 유용하다고 알려진 등고선 곡률( $K_c$ )과 접선곡률( $K_t$ )은 그림 6과 그림 7에 보여진다. 비교적 유사한 분포를 보이는 두 인자는 수렴성의 표현에서 차이를 보이고 있다. 접선곡률( $K_t$ )과 윤곽곡률( $K_p$ )의 평균적인 의미를 표시하는 평균곡률( $K_m$ )은 그림

8에 표시되어 있고 토사이동정보와 흐름수렴정보의 절충된 표현을 하고 있다.

경사면 잠재태양 복사열과 수평면 잠재태양 복사열의 비로 표현되는 잠재태양반사지수는 증발산과 식생 분포에 관련이 깊은 인자로서 그림 9에 공간적 분포상황이 도시되어 있다. 잠재태양반사지수를 구하는 데 필요한 기상자료로서는 전운량, 일사량, 대기온도, 온도감율, 지표방출계수, 대기투과도 등으로 이들은 관측현장에서 약 16 km 남쪽에 위치한 울진관측소의 자료를 이용하였다. 지표면 흐름방향 알고리즘의 수치고도모형의 적용은 흐름의 공간적 분포상황을 파악하는데 필수적이다. 이는 Quinn 등(1991)이 제안한 다방향 알고리즘(MFD), Jenson과 Domingue가 제안한 단방향 알고리즘(SFD) 혹은 Costa-Cabral과 Burges(1994)가 제안한 DEMON 알고리즘등을 활용하여 계산할 수 있는데, 위의 알고리즘의 적용을 통한  $\ln(\alpha/\tan \beta)$



그림 5. 윤곽곡률 ( $K_p$ )



그림 6. 등고선곡률 ( $K_c$ )



그림 7. 접선곡률 ( $K_t$ )



그림 8. 평균곡률 ( $K_m$ )



그림 9. 잠재태양반사지수( $R_s/R_0$ )

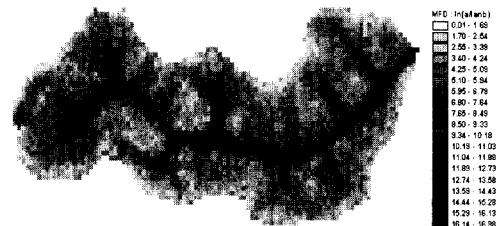


그림 10. MFD  $\ln(\alpha/\tan \beta)$



그림 11. SFD  $\ln(\alpha/\tan \beta)$



그림 12. DEMON  $\ln(\alpha/\tan \beta)$

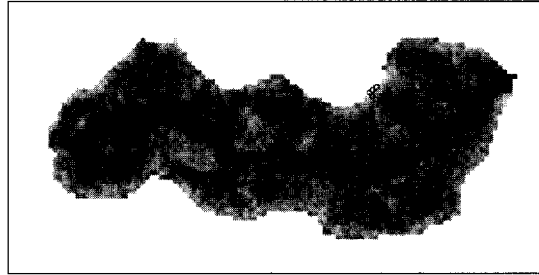


그림 13. 토양수분측정 위치(원)

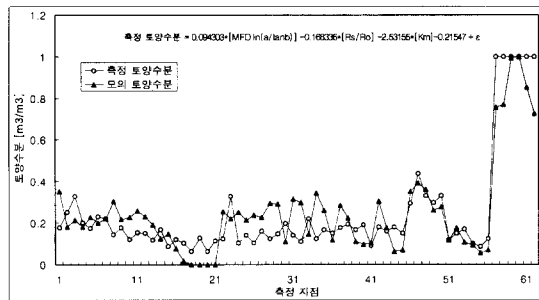


그림 14. 측정 토양수분과 다방향 알고리즘의 습윤지수, 평균곡률과 태양반사지수의 다중회귀분석 결과

지수의 공간적 분포상황은 각각 그림 10, 11 그리고 12에 나타나 있다. 흐름의 수렴성을 잘 표현하는 단방향 알고리즘 결과와는 달리 다방향 알고리즘은 흐름의 분산도를 잘 표시하고 있고, DEMON 알고리즘은 흐름 분배를 보다 현실적으로 구현하고 있다. 위의 습윤지수,  $\ln(\alpha/\tan \beta)$ 의 계산과정에서 도출될 수 있는 누가면적의 공간적 분포나 경사도 등도 토양수분예측을 위한 기초자료로 활용되었다.

그림 13은 대상유역의 강우사상 2일후의 토양수분 측정지점을 도시하였다. 요면과 철면, 경사면 등을 균등하게 분할한 후, Theta-Probe를 활용하여 토양수분을 측정하였다. 측정된 토양수분의 공간적분포와 토양수분인자들과의 상관도 분석이 실시되었다. Theta-

Probe를 사용한 무기물 토양수분분포와 곡률계수들, 누적면적, 경사도, 습윤지수들, 태양반사지수들과의 상관도 분석결과가 표 2에 제시되어 있다. 표 2와 3에 표시된 결정계수는 통계 프로그램인 SAS로 선형회귀 분석을 실시하여 구하였다. 전체적으로 습윤지수인자가 가장 높은 결정계수 값을 보이고 곡률인자들과 태양반사지수의 순으로 나타나 있다. 이러한 결과는 지형적 굴곡을 따라 구조적으로 분포하는 토양수분의 경향성을 말해주고 있으며, 증발산의 공간적 분포는 임의성 (randomness)이 강하여 예측하기가 매우 어려움을 제시하고 있다. 토양수분의 공간적 분포는 단일인자로만 결정되는 것이 아니고, 지형, 토질, 식생 등의 복합적인 요소와 관련 있을 것으로 판단된다. 그림 14는



**표 2. 결정계수  $R^2$ 로 나타낸 지형인자와 무기물 토양수분 함량( $\theta$ )과의 상관도 분석결과**

구분	항목	$R^2$
지표면 곡률인자	윤곽곡률 ( $K_p$ )	0.2151
	등고선곡률 ( $K_c$ )	0.2309
	평균곡률 ( $K_m$ )	0.1975
	접선곡률 ( $K_t$ )	0.0438
	배수 면적 ( $a$ )	0.7187
지형흐름 발생인자	대수 배수면적 ( $\ln(a)$ )	0.5246
	경사도 ( $s$ )	0.2544
	DEMON 습윤지수 ( $\ln(a/\tan\beta)$ )	0.6255
	SFD 습윤지수 ( $\ln(a/\tan\beta)$ )	0.7403
	MFD 습윤지수 ( $\ln(a/\tan\beta)$ )	0.7856
태양에너지 관련인자	태양반사지수 ( $R_s/R_o$ )	0.0431

**표 3. 결정계수  $R^2$ 로 나타낸 지형인자들과 무기물 토양수분 함량( $\theta$ )과의 다중회귀 분석결과**

항목	$R^2$
$R_s/R_o, DEMON \ln(a/\tan\beta)$	0.6285
$R_s/R_o, SFD \ln(a/\tan\beta)$	0.7529
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta)$	0.7925
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_c$	0.8032
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_p$	0.7950
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_t$	0.8034
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_m$	0.8065

토양수분과 다방향 알고리즘의 습윤지수, 평균곡률과 태양반사지수의 다중회귀분석 결과이다. 습윤지수 인자와 토양수분의 상관도 분석결과보다 개선된 예측력이 산출될 수 있으나 그 차이가 미미하여 다중회귀분석이

토양수분의 공간적 분포를 예측하는데 기여하는 정도에 대한 정량적 판단의 근거가 부족하다. 표 3은 다중회귀분석의 결과를 보여주고 있는데, 전체적으로 80% 예측력의 한계를 보여주고 있다. 이는 토양수분 측정에 있어 발생하는 오차에 기인하는데 해당격자를 대표하는 토양수분의 추정보다 많은 지점의 측정을 통한 오차의 최소화가 필요할 것으로 예상된다. 단일 지형인자를 이용한 표 2와 비교하면, 토양수분의 공간적인 분포예측은 여러 지형인자들로서 유역내 토양수분 분포의 구조성과 임의성에 대한 해석이 필요함을 제시하고 있다. 다중회귀분석으로 구한 선형회귀식은 표 4에 표시하였다. 표 4에서  $\hat{\theta}$ 는 예측된 토양수분 함량을 의미한다. 또한 본 연구에서는 다루어지지 않았지만, 공간적 토양수분 변화향상의 강우유출 후 시간적 변동상황의 감시도 신뢰성 있는 수문거동 파악을 위해 필요할 것으로 판단된다.

공간적, 시간적인 토양수분의 분포는 항상 구조성(organization)과 임의성(randomness)을 포함하므로, 토양수분의 관측과 구조성을 발견해 내고, 이를 다른 지형인자들과 관련성을 맺는 것이 결정론적으로 수행되지는 못한다. 여기서 구조성은 공간적으로 일정한 경향성을 보임을 말하며(Blößchl, 1999), 임의성은 예측 가능한 통계적 성질들을 가지지만 완전히 해석되지 않는 변동성을 말한다(Western, 1999). 흐름알고리즘과 지형곡률, 습윤지수는 지형적인 구조성으로 유출을 설명하는 인자들이므로 이들을 활용해 강우시 수로주변으로 형성되는 지표토양수분의 구조적인 분포를 최대한 확보할 수 있도록 해야 하며, 이들 인자들이 실측된 지표토양수분의 구조적 분포를 잘 설명하는지에 대한 검토 또한 필요하다고 판단한다. 사면지역에 임의적으로 분포하는 지표토양수분 분포는 증발산과 관련되

**표 4. 지형인자들과 무기물 토양수분 함량( $\theta$ )과의 다중회귀식**

항목	다중회귀식
$R_s/R_o, DEMON \ln(a/\tan\beta)$	$\hat{\theta}=0.138712 \times (DEMON \ln(a/\tan\beta)) - 0.073292 \times (R_s/R_o) - 0.786647$
$R_s/R_o, SFD \ln(a/\tan\beta)$	$\hat{\theta}=0.110912 \times (SFD \ln(a/\tan\beta)) - 0.153158 \times (R_s/R_o) - 0.491516$
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta)$	$\hat{\theta}=0.098955 \times (MFD \ln(a/\tan\beta)) - 0.111903 \times (R_s/R_o) - 0.27942$
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_c$	$\hat{\theta}=0.093888 \times (MFD \ln(a/\tan\beta)) - 0.143471 \times (R_s/R_o) - 0.616129 \times (K_c) - 0.23043$
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_p$	$\hat{\theta}=0.096227 \times (MFD \ln(a/\tan\beta)) - 0.129606 \times (R_s/R_o) - 0.96009 \times (K_p) - 0.250667$
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_t$	$\hat{\theta}=0.098369 \times (MFD \ln(a/\tan\beta)) - 0.158586 \times (R_s/R_o) - 1.96273 \times (K_t) - 0.247073$
$R_s/R_o, MFD \ln(a/\tan\beta), K_m$	$\hat{\theta}=0.094303 \times (MFD \ln(a/\tan\beta)) - 0.168336 \times (R_s/R_o) - 2.53155 \times (K_m) - 0.21547$

는 태양반사지수로서 설명이 되리라 판단하며, 이러한 인자들의 적절한 관련성을 찾는다면 전체유역에 대한 유출해석에 효과적인 것으로 판단한다. 한편 Western 등(2001)의 최근연구는 포화지역의 공간적 분포형태로부터 수문학적 연결성의 존재여부를 판별하는 근거를 제공하고 있다. 이는 본 연구의 결과가 사면유출시 발생하는 유출발생의 공간적 기술헌을 위한 주요근거로 활용될 수 있음을 의미한다.

## 5. 결 론

본 연구를 통해서 도출될 수 있는 점은 다음과 같다.

1. 토양수분의 예측을 위한 여러 가지 인자를 정리하고 체계화하여 수치지도모형 상에서 활용될 수 있도록 유도하였다.
2. GPS와 Theta-Probe를 활용한 효과적인 토양수분 측정법을 도입하였다. 이동이 용이한 두 장비의 결합은 약간의 보정과정을 거쳐 신뢰성을 확보하였고 간편한 토양수분의 공간적인 분포상황 측정방법이 될 수 있는 기틀을 구축하였다.
3. 회귀분석을 통한 공간분석인자와 토양수분의 공간적 분포 사이의 비교적 높은 상관성을 관찰하였으며, 수치 지형인자들과 무기물 토양수분 함량과의 상관도 분석결과 MFD알고리즘을 이용한 습윤지수가 가장 높은 상관성을 보였으며, 다중회귀분석결과는 태양반사지수, MFD알고리즘 습윤지수 그리고 평균곡률의 조합이 가장 높은 토양수분 예측력을 보여주었다.

## 감사의 글

본 논문은 한국과학재단 지정 환경기술·산업개발 연구센터(RRC-IETI)의 지원(과제 번호 : 00-10-14-99-B-1)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

김상현, 이지영 (1999) “개선된 지형지수산정 알고리즘의 적용에 관한 연구.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제32권, 제4호, pp. 489~499.

이지영, 김상현 (2000) “지형적 특성을 고려한 지형지수 산정 알고리즘에 관한 연구.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제3호, pp. 179~188.

윤용남 (1998) 공업수문학. 청문각, pp. 142~152.

조홍제, 김정식, 이근배 (2000) “TOPMODEL을 이

용한 장기유출해석.” 한국수자원학회논문집, 한국수자원학회, 제33권, 제4호, pp. 393~406.

Beven, K. J., and Kirkby, M. J. (1979). “A physically-based variable contributing area model of basin hydrology.” *Hydrol. Sci. Bull.*, Vol. 24, pp. 43~69.

Blöschl, G. (1999). “Scale and Scaling in Hydrology: A Framework for Thinking and Analysis.” *John Wiley, New York*, in press.

Costa-Cabral, M. C., and Burges, S. J. (1994). “Digital elevation model networks (DEMON): A model of flow over hillslopes for computation of contributing and dispersal areas.” *Water Resour. Res.*, Vol. 30, pp. 1681~1692.

Dingman, S. L. (1994). “Physical Hydrology.” *Macmillan*, New York.

Dunne, T., Moore, T. R. and Taylor, C. H. (1975). “Recognition and prediction of runoff-producing zones in humid regions.” *Hydrol. Sci. B.*, Vol. 20, pp. 305~327.

Dunne, T., and Black, R. D. (1970). “Partial area contributions to storm runoff in a small New England watershed.” *Water Resour. Res.*, Vol. 6, pp. 1296~1311.

Gallant, J. C. and Wilson, J. P. (1996). “TAPES-G: A grid-based terrain analysis program for the environmental sciences.” *Computers & Geosciences*, Vol. 22, No. 7, pp. 713~722.

Hutchins, R. B., Bevens, R. L., Hill, J. D. and White, E. H. (1976). “The influence of soils and microclimate on vegetation of forested slopes in eastern Kentucky.” *Soil Sci.*, Vol. 121, pp. 234~241.

Jenson, S. K., and Domingue, J. O. (1988). “Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis.” *Photogrammetric Engineering Remote Sensing*, Vol. 54, No. 11, pp. 1593~1600.

Krcho, J. (1973). “Morphometric Analysis of Relief on the Basis of Geometric Aspect of

- Field Theory." *Acta UC, Geogr. Physica I, Bratislava*, SPN.
- Krcho, J. (1991). "Georelief as a Subsystem of Landscape and the Influence of Morphometric Parameters of Georelief on Spatial Differentiation of Landscape-Ecological Processes." *Ecology/CSFR*, Vol. 10, pp. 115~157.
- Lee, R., (1978). *Forest Microclimatology*. Columbia University Press, New York, pp. 276.
- Mitášová, H., and Hofierka, J. (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., Norton, T. W., and Williams, J. E. (1993). "Modelling environmental heterogeneity in forested landscapes" *J. Hydrol.*, Vol. 150, pp. 717~747.
- Moore, I. D., Burch, G. J., and Mackenzie, D. H. (1988). "Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies." *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, Vol. 31, pp. 1098~1107.
- O'Callaghan, J. F., and Mark, D. M. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 28, pp. 323~344.
- Quinn, P., Beven, K. J., Chevallier, P., and Planchon, O. (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrologic modelling using digital terrain models." *Hydrologic Processes*, Vol. 5, pp. 59~79.
- Rektorys, K. (1969). "Survey of Applicable Mathematics." *MIT Press, Cambridge, MA*, Iliffe Books Ltd., London, pp. 365.
- Troch, P. A., Troch, F. P., and Brutsaert, W. (1993). "Effective watertable depth to describe initial conditions prior to storm rainfall in humid regions." *Water Resour. Res.*, Vol. 29, No 2, pp. 427~434.
- Western, A. W., Grayson, R. B., Blöschl, G., Willgoose, G. R., and McMahon, T. A. (1999). "Observed spatial organization of soil moisture and its relation to terrain indices." *Water Resour. Res.*, Vol. 35, No. 3, pp. 797~810.
- Western, A. W., Blöschl, G., and Grayson, R. B. (2001). "Toward capturing hydrologically significant connectivity in spatial patterns." *Water Resour. Res.*, Vol. 37, No 1, pp. 83~97.
- Zavlasky, D., and Sinai, G. (1981). "Surface Hydrology, I. Expalanation of phenomena." *J. Hydraul. Div. Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol. 107, pp. 1~16.

(논문번호:00-033/접수:2001.04.16/심사완료:2001.07.06)