

# 지표토양수분의 공간적인 분포와 지형인자들과의 관련성

○김상현\*, 이학수\*\*, 김경현\*\*\*, 한지영\*\*\*\*

## 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. 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 심각하다고 알려져 있다. 유출량에 영향을 미치는 인자로서는 태양복사에너지, 흐름추적과정, 식생분포와 토양특성, 선행토양함수조건 등으로 말할 수 있는데, 이러한 여러 인자들의 결과로 나타나는 유출을 모의하기에 앞서, 인자들간의 상호관련성과 유출과의 상관도를 먼저 결정해야 함이 필요하다고 판단한다. 따라서, 본 연구에서는 수치모형에서 도출될 수 있는 지금까지 연구되어온 여러 가지 인자들을 조합하고 이들을 현장에서 토양수분을 측정한 결과와 비교하여 이를 인자들의 토양수분 예측력을 평가하고 제시하는 것을 주목적으로 한다.

## 2. 토양수분 관련인자

토양수분의 공간적 분포를 설명할 수 있는 인자로서 다음과 같은 인자들을 선정하였다. 흐름경로를 따른 곡률을 측정하여 토양침식과 퇴적에 관련지어지는 윤곽구배( $K_p$ ), 등고선을 따른 곡률을 측정하여 흐름의 수렴과 발산을 나타내주는 등고선 구배( $K_c$ ),  $K_c$ 에 지표경사( $\sin \beta$ )를 고려하여 흐름의 수렴과 발산을 더욱 명확히 표시해주는 접선구배( $K_t$ ), 흐름의 수렴정도와 토양침식 정도를 함께 고려하는 평균구배( $K_m$ ), 해당격자로의 흐름기여면적을 의미하는 배수면적( $a$ )과 ( $\ln a$ ), 흐름분배정도에 관여하는 경사도( $\tan \beta$ ), 태양복사에너지를 고려해주는 잠재태양반사지수( $R_s/R_o$ ), MFD(Multiple Flow Direction) 흐름분배 알고리즘으로 산정한 습윤지수( $\ln(a/\tan \beta)$ ), SFD(Single Flow Direction) 흐름분배 알고리즘으로 산정한 습윤지수( $\ln(a/\tan \beta)$ ), DEMON(Digital Elevation MOdel Network) 흐름분배 알고리즘으로 산정한 습윤

\* 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 조교수

\*\* 부산대학교 공과대학 첨정공학협동과정 석사과정

\*\*\* 부산대학교 환경기술·산업개발연구센타 연구원 (E-mail : validity@pusan.ac.kr)

\*\*\*\* 부산대학교 공과대학 환경공학과 석사과정

지수 ( $\ln(a/\tan\beta)$ )의 11개 지형인자들을 선정하였으며, 표 1에 정리하였다.

표 1. 곡률 관련인자, 태양에너지 관련인자, 지형흐름 발생인자

	수식	의미	참고문헌
윤곽 구배( $K_p$ )	$\frac{f_{xx}f_x^2 + 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_y^2}{p\sqrt{q^3}}$	흐름속도변화, 퇴적물 이송과정 설명	Mitasova 와 Hofierka [1993]
등고선 구배( $K_c$ )	$\frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{\sqrt{p^3}}$	지형을 따른 흐름의 수렴정도	Mitasova 와 Hofierka [1993]
접선 구배( $K_c$ )	$\frac{f_{xx}f_y^2 - 2f_{xy}f_xf_y + f_{yy}f_x^2}{p\sqrt{q}}$	지형을 따른 흐름의 수렴정도	Mitasova 와 Hofierka [1993]
평균 구배( $K_m$ )	$(K_t + K_p)/2$	지형상 흐름의 평균적 거동	Mitasova 와 Hofierka [1993]
배수 면적( $a$ )	$\sum a$	배수 면적	Mitasova 와 Hofierka [1993]
경사도( $s$ )	$\tan\beta = \sqrt{f_x^2 + f_y^2}$	경사도	Mitasova 와 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]

### 3. 연구대상유역과 토양수분 측정방법

#### 3.1 연구대상유역

본 연구의 대상이 되는 유역은 강원도 삼척시 원덕읍 월천리로  $0.286025 km^2$ 의 유역면적에 1%에서 87%의 경사도를 가지고 있는 산지유역이다. 연평균 기온은 연최고  $24.6^\circ C$ , 연최저  $-4.7^\circ C$ 이며, 연평균  $1100 mm$ 의 강우량을 기록하는 월천리 유역은 유역의 출구가 해안과 접해있고, 사면 유출흐름의 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 1:5000 지형도에서 등고선을 디지타이징(Digitizing)함으로서 확보될 수 있었고, 공간보간과 격자지형정보전환을 통해  $10 m$  해상도의 수치고도 분포도를 구축하였다. 그림 1은 대상유역의 DEM을 나타낸다.

#### 3.2 토양수분 측정방법

지표토양수분측정은 토양수분 감지기인 Theta-Probe를 사용했으며, 그림 2에 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(  $\theta$ ) [  $m^3/m^3$  ]의 관계식은 다음과 같다.

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

위 식의 오차는  $\pm 0.05 [m^3/m^3]$ 이다. 토양수분 측정위치 관측은 GPS(Global Positioning System)기기인 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 하였다. 위치관측과 토양수분 측정방법은 다음과 같다. 먼저, 지형상 구분이 명확한 계곡지점을 GPS를 사용하여 기준위치로 선점한후, 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 선점하였으며, 여러 지형내에서의 수분거동을 관측하기 위하여 수로, 계곡, 경사지, 봉우리 부분으로 나누어 측정하였다.

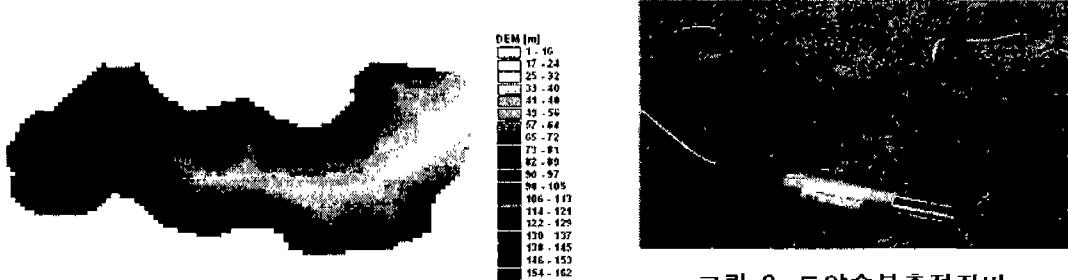


그림 1. DEM

그림 2. 토양수분측정장비.

Theta-Probe.

#### 4. 결과 및 토의

수치고도모형을 이용하여 획득한 월천리 유역 지형인자들의 공간적 분포자료들을 그림 3-10에 도시하였다. 그림 7로 표현된 잠재태양반사지수를 구하는 데 필요한 기상자료로서는 전운량, 일사량, 대기온도, 온도감율, 지표방출계수, 대기투과도 등으로 이들은 물진관측소의 자료를 이용하였다. 흐름추적과정과 관련된 인자들을 나타낸 그림 8, 9 그리고 10은 수로주변으로 형성되는 토양수분의 구조적인 분포경향을 설명해 줄 수 있으며, 그림 7에 표현된 잠재태양반사지수는 태양과의 상대적인 위치에 따른 증발산량의 공간적 분포와 관련성이 있다고 판단한다. 그림 11은 강우사상 2일 후인 2000년 9월 20일에 Theta-Probe로 토양수분을 측정한 장소를 나타낸다. 토양수분의 공간적분포는 단일인자로만 결정되는 것이 아니고, 지형, 토질, 식생 등의 복합적인 요소와 관련이 있을 것으로 판단되며, 이러한 성질을 고려하여 다중회귀분석을 시도하였다. 그림 12는 가장 높은 상관도를 보인 토양수분과 다방향 알고리즘의 지형지수, 평균구배와 태양반사지수의 다중회귀분석 결과이다. 지형지수 인자와 토양수분의 상관도 분석결과보다 개선된 예측력이 산출될 수 있으나 그 차이가 미미하여 다중회귀분석이 토양수분의 공간적 분포를 예측하는데 기여하는 정도에 대한 정량적 판단의 근거가 부족하다. Theta-Probe를 사용한 무기물 토양수분분포와 곡률구배계수들, 누적면적, 경사도, 지형지수들, 태양반사지수들과의 상관도 분석결과가 표 2에 나타나 있다. 전체적으로 지형지수인자가 가장 높은 결정계수 값을 보이고 곡률인자들과 태양반사지수의 순으로 나

타나있다. 표 3은 다중회귀분석의 결과를 보여주고 있는데, 전체적으로 80 % 예측력의 한계를 보여주고 있다. 이는 토양수분 측정에 있어 발생되는 오차에 기인하는데 해당격자를 대표하는 토양 수분의 추정에 보다 많은 지점의 측정을 통한 오차의 최소화가 필요할 것으로 예상된다. 또한 본 연구에서는 이루어지지 않았지만, 공간적 토양수분 변화양상의 강우유출후 시간적 변동상황의 감시도 신뢰성 있는 수문거동 파악을 위해 필요할 것으로 판단된다.

흐름알고리즘과 지형곡률, 습윤지수는 지형적인 구조성으로 유출을 설명하는 인자들이므로 이를 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 관련되는 태양반사지수로서 설명이 되리라 판단하며, 이러한 인자들의 적절한 관련성을 찾는다면 전체 유역에 대한 유출해석에 효과적일 것으로 판단한다.

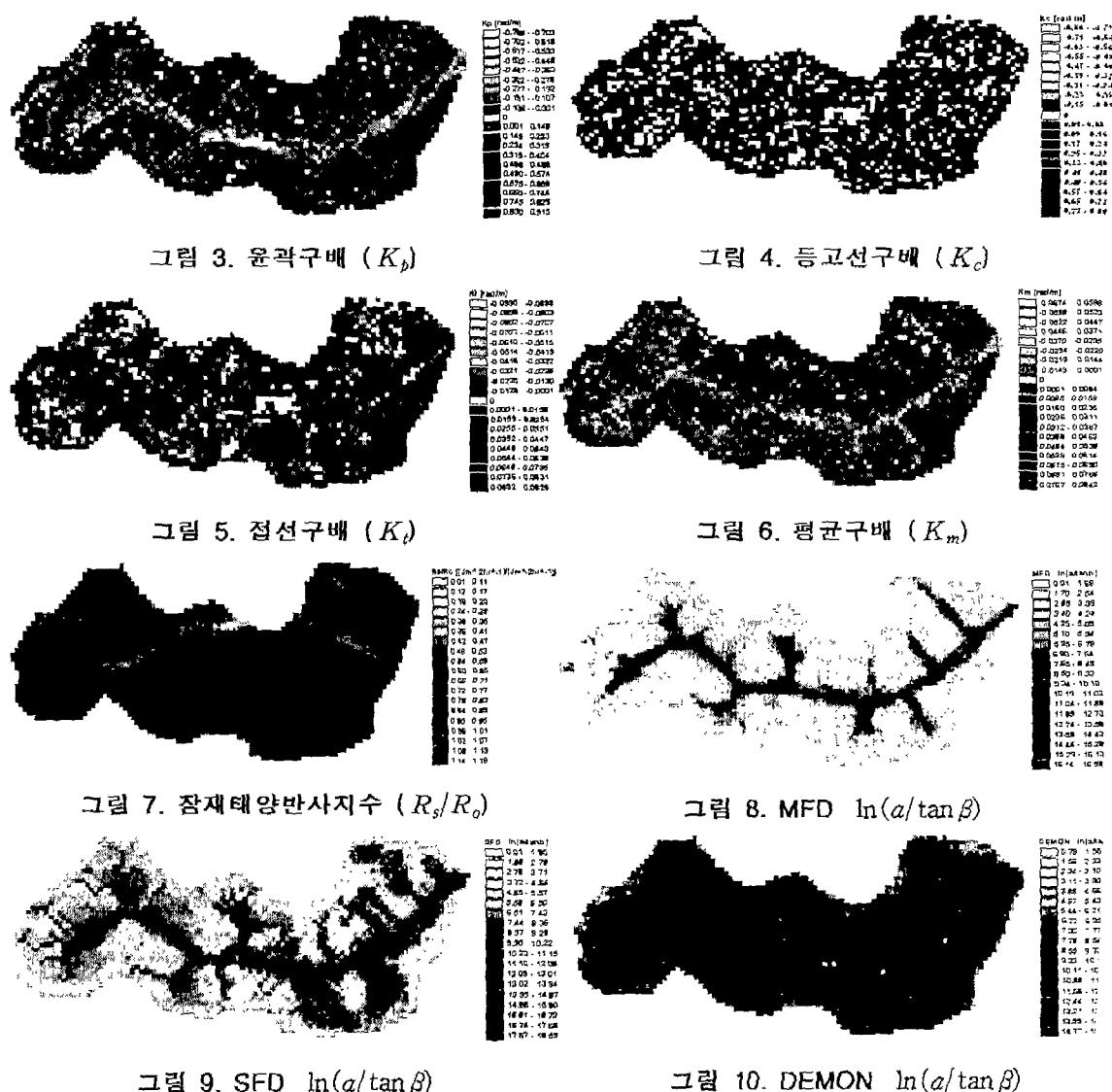




그림 11. 토양수분측정 위치(원)

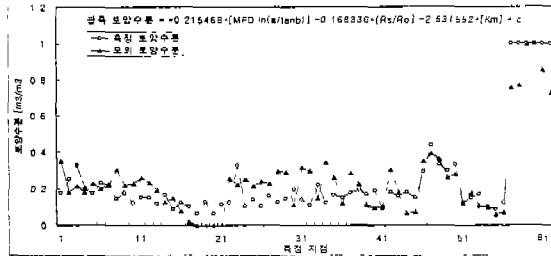


그림 12. 관측 토양수분과 다방향 알고리즘의 지형지수, 평균구배와 태양반사지수의 다중회귀분석 결과

표 2. 결정계수  $R^2$ 로 나타낸 상관도 분석결과

	무기물 토양수분 함량 [ $m^3/m^3$ ]
윤곽구배 ( $K_p$ )	0.2151
등고선구배 ( $K_c$ )	0.2309
평균구배 ( $K_m$ )	0.1975
접선구배 ( $K_t$ )	0.0438
배수 면적 ( $a$ )	0.7187
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
태양반사지수( $R_s/R_o$ )	0.0431

표 3. 결정계수  $R^2$ 로 나타낸 다중회귀 분석결과

	무기물 토양수분 함량 [ $m^3/m^3$ ]
$R_s/R_o, DEMON \ln(a/\tan\beta)$	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

#### 4. 결 론

본 연구를 통해서 도출될 수 있는 점은 다음과 같다.

1. 토양수분의 예측을 위한 여러 가지 인자를 정리하고 체계화하여 수치고도모형 상에서 활용될 수 있도록 하였다.

2. GPS와 Theta-Probe를 활용한 효과적인 토양수분 측정법을 도입하였다. 이동이 용이한 두 장비의 결합은 약간의 보정과정을 거쳐 신뢰성있고 간편한 토양수분의 공간적인 분포상황 측정방법이 될 수 있다.
3. 회귀분석을 통한 공간분석 인자와 토양수분의 공간적 분포 사이의 비교적 높은 상관성을 관찰하였으나, 단위격자의 토양수분 대표성 문제나 토양수분의 시간적 변동성의 파악은 추후의 필수적인 연구과제로 판단된다.

## 5. 참고문헌

김상현, 이지영 (1999) “개선된 지형지수산정 알고리즘의 적용에 관한 연구.” 한국 수자원 학회 논문집, 제32권, 제4호, pp. 489-499.

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.

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.

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.

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.

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.

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.