

# 산지사면의 효과적인 토양수분 측정을 위한 흐름분배 알고리즘과 TDR을 이용한 토양수분 측정망의 구성

## Development of Soil Moisture Monitoring System System for Effective Soil Moisture Measurement for Hillslope Using Flow Distribution Algorithm and TDR

강창용\* / 김상현\*\* / 정성원\*\*\* / 김원\*\*\*\*

Kang, Chang Yong / Kim, Sang Hyun / Jung, Sung Won / Kim, Won

### Abstract

A soil moisture measuring method of hillslope for Korean watershed is developed to configure spatial-temporal distribution of soil moisture. Intensive surveying of topography had been performed to make a digital elevation model(DEM). Flow distribution algorithms were applied and a measurement system was established to maximize representative features of spatial variation. Soil moisture contribution mechanisms of rainfall-runoff process have been derived. Measurements were performed at the right side hillslope of Buprunsa located at the Sulmachun watershed. A Multiplex system has been operated and spatial-temporal soil moisture data have been acquired. Relatively high correlation relationship between flow distribution algorithm and measurement data can be found on the condition of high humidity.

**Keywords** : Soil moisture, Measurement system, Rainfall Runoff Process, Flow distribution algorithm

### 요 지

국내산지사면의 토양수분 시공간적 분포상황을 파악하기 위한 토양수분 측정법이 개발되었다. 대상유역을 정밀측정하여 수치고도모형을 구성한 다음 흐름분배 알고리즘을 적용하고 공간적 변화의 대표성을 최대화하기 위한 측정체계를 구축하였다. 토양수분이 강우-유출형성과정에 기여하는 기작을 표현하는 유도과정도 전개되었다. 측정은 설마천 유역의 범륜사 우측사면에서 수행되었다. 다중 측정망의 운영을 통하여 시공간적으로 변화하는 토양수분 자료를 획득하였다. 습한 조건에서 토양수분이 토양수분 추정 알고리즘과 비교적 높은 상관도를 보여주었다.

**핵심용어** : 토양수분, 측정체계, 강우-유출형성과정, 흐름분배 알고리즘

\* 부산대학교 환경공학과 석사과정  
Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Kore  
\*\* 정희원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수  
Associate Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea  
\*\*\* 수석연구원, 한국건설기술연구원  
Research Fellow, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea  
\*\*\*\* 수석연구원, 한국건설기술연구원  
Research Fellow, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea

## 1. 서론

토양수분은 식물의 성장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 요소로서 토양 층 상부의 수  $m$  내에 존재하는 수분의 양을 일컫는다. 강우 등으로 인한 지면과 지표하에서의 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정과 증발산 등은 모두 비포화대(vadose zone) 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 된다. 따라서 시공간적으로 변화하는 토양수분의 분포양상의 파악은 상당히 중요한 의미를 지니게 된다(Western 등, 1998).

토양수분의 공간적 분포를 규명하기 위한 지면에서의 직접적인 토양수분의 측정은 상당히 노동집약적인 과정이다. 토양수분함량을 직접적으로 결정하는 유일한 방법은 토양샘플의 강열 건조 전, 후의 질량차이를 비교하여 분석하는 방법(채토건조법)인데, 이러한 과정은 상당한 시간이 소모되고, 동시에 측정이 가능한 양에도 한계가 있기 때문에 공간적 경향의 직접적인 추정은 불가능하다. 이 외에 다른 방법들(Neutron Probe 분석, TDR분석, 전자기유도 측정 방법)은 감마선의 감쇄효과나 매질의 유전율 혹은 토양의 전기전도도등을 이용해서 간접적으로 토양수분을 결정하게 되는데 채토건조법으로 결정된 값과의 보정 과정이 필요하다

위에 제시된 방법 중에서 가장 신뢰성 높고 간편한 방법 중의 하나가 TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용하는 방법(Topp, 1980)인데, 이는 다른 매질과 차별성이 있는 물의 유전상수를 이용하여 일정 주파수의 파를 전송한 후 반향되어 오는 파를 분석함으로써 토양내의 수분의 함량을 추정하는 방법이다. 이 방법을 활용하면 원하는 구역에 여러 개의 탐침을 설치함으로써 동일한 시간에 많은 지점의 토양수분 값을 동시에 다발적으로 측정할 수 있다. 그러나 TDR에 의한 방법도 점 측정(point measurement)에 국한되어 다양한 스케일에서 공간적 대표성 확보에 문제가 있으며, 탐침과 TDR을 연결하는 Wave Guide의 길이 한도 내에서만 측정이 가능함으로써 상대적으로 좁은 측정구역이라는 문제점이 있다(Western and Grayson 1998). 그럼에도 불구하고 상부에서 대상 유역으로 흐름의 유입경로가 없는 독립적인 사면에서 TDR에 의한 토양수분 변화양상의 측정이 행해진다면 여기서 얻어진 결과를 통해 국내유역의 산지사면에서 강우사상에 따라 달라지는 유출의 특성을 가늠할 수 있는 효과적인 현장측정이 예상된다. 본 연구에서는 대상사면에 대하여 정밀한 측량을 통해 구축된 1m의 해상도를 가지는 수치표고모형(Digital-Elevation Model)을 구축하여 산지사면에서 시공간적인 대표성을 지닐 수 있는 토양수분의 측정방법론을 제시

하고자 한다.

## 2. 방법론

본 연구에서는 대상사면에 대한 토양수분 측정지점의 결정을 위하여 흐름분배 알고리즘을 통해 도출된 우선흐름 경로를 이용하였다. 즉, TDR탐침의 매설지점을 측량을 통해 구축된 DEM을 기반으로 흐름분배 알고리즘을 적용시켜 도출된 주된 흐름경로에 배치하여 토양수분 관측의 실효성을 제고하였다. 토양수분을 직접적으로 수문모형에 활용하려는 시도는 분포형 모형구조의 유출해석의 형상화를 통해 이루어지고 있다. 또한 진행되고 있는 토양수분추정 알고리즘과 유출모형의 구조를 종합함으로써 토양수분과 관련된 연구방향을 제시하고자 한다.

### 2.1 토양수분 추정알고리즘과 유출형성기작의 이론적 전개

분포형 모델인 TOPMODEL은 지형지수를 산정한 후 적절한 수의 매개변수를 이용하여 강우-유출을 모의할 수 있는 유용한 수문 모형인데, 최근에는 토양수분의 시공간적인 변동성 모의를 위한 연구에도 자주 사용되어지고 있다(Pellenq 등, 2003; Todd Walter 등, 2002). 또한, 현장에서 얻어진 토양수분자료와 더불어 지형을 활용함으로써 토양수분의 공간적 분포에 대한 예측을 가능하게 할 수 있는데, 이를 이용한 유역내의 관심 있는 지역에 대한 지하수면이나 토양수분함량 산정은 많은 연구자들에 의해 수행되었다(Quinn 과 Beven, 1993; Nyberg, 1996; Western 등 1999). TOPMODEL은 다양하게 수정되어지면서 여전히 토양내의 수분함량의 변화를 이끌어내는 구성요소들의 산정에 유용하게 쓰이고 있다. 지표 근처의 얇은 층에서의 불량한 모의능에 대한 TOPMODEL의 개념적인 약점은 Todd Walter(2002)등에 의해서 수면까지의 깊이 “ $z$ ”를 수분함량 “ $\theta$ ”로 대체함으로써 보완되어졌다. 기존의 모델(TOPMODEL)이나 토양수분 TOP-MODEL(STOP-MODEL)의 지배방정식은 모의된 시스템에 대한 각기 다른 가정에서부터 출발하지만 유도되는 과정은 유사하다. 식(1)은 기존의 TOPMODEL에 의하여 유역내 특정 지점의 지하수면의 깊이 ( $z_i$ )를 산정한 식이고, 반면 식 (2)는 토양수분함량을 직접적으로 표현할 수 있는 유효 토양수분( $\Omega$ )이라는 개념을 도입한 식이다.

$$z_i = -mln\left(\frac{a_{iR}}{T_0 \tan \beta}\right) \quad (1)$$

$$\Omega_i = -\frac{1}{\alpha} \ln\left(\frac{a_i}{T_s \tan \beta}\right) \quad (2)-1$$

$$\Omega = 1 - \frac{\theta - \theta_d}{\theta_s - \theta_d} \quad (2)-2$$

여기서,  $z_i$  는 유역내 임의 지점에서의 지하수위(  $m$  ),  $x$  는 SMR등에서 쓰여지는 토양변수,  $a_i$  는 임의 지점에서 상부사면의 기여면적(  $m^2$  ),  $\tan\beta$ 는 지하수층의 경사인데 지표경사와 같다고 가정,  $m$  은 지형과 토양 수리특성에 관련한 매개변수(  $m$  ),  $T_0$ 는 임의 지점에서의 투수계수(  $mm^2/day$  ),  $\Omega_i$ 는 유효토양수분함량을 나타내며  $\theta$ 는 토양수분의 함량(%)을 나타낸다.

식 (1)을 유역전체에 대해 적분하여 유역평균 지하수면 깊이  $\bar{z}$ 와의 관계를 산정하여 식(3)에 제시되었다.

$$\frac{1}{m}(\bar{z} - z_i) = \ln(\zeta) - \gamma \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \zeta = \frac{a_i}{T_0 \tan\beta}, \quad \gamma = -\frac{1}{A} \int (\ln(\zeta) - \gamma)$$

$T_0$  는 임의 지점에서의 투수계수(  $mm^2/day$ )이다.

동일한 과정을 사용하여 STOPMODEL에서는 식(4)로써 그 관계가 유도될 수 있다.

$$x(\bar{\Omega} - \Omega_i) = \ln(\zeta) - \gamma \quad (4)$$

$$\text{여기서, } \zeta = \frac{a_i}{T_s \tan\beta}, \quad \gamma = -\frac{1}{A} \int \ln(\zeta) - \gamma$$

TOPMODEL의 적용시 수면까지의 깊이( $z$ )는 저류부 족량(  $S$ )으로 대체되는 반면(Beven 과 Wood, 1983; Ambroise 등, 1996), STOPMODEL에서는 유효 토양수분함량(  $\Omega$ )으로 대체되어진다. 그림 1 에서 보여지는 바와 같이 기존 TOPMODEL에 대한 이러한 수정은 TDR등에 의한 얇은 층에서의 실제 측정값이 모형에 의해 도출된 토양수분의 변화경향과 직접적인 비교, 검증이 가능하다는 점에서 STOPMODEL에 의한 토양수분 모의능력의 우수함을 확인할 수 있다.

Pellenn 등(2003)은 지표와 지표하에서 비교적 정확한 토양수분자료를 모의하기 위하여 지형과 토양층의 깊이를 고려한 연구를 수행하였다. 모의는 TOPMODEL을 기반으로하여 토양-식생-대기-전이모형(Boulet 등, 2000)과의 결합을 통하여 수행되었다. 이 수정된 모형은 식(5)와 같은 지배방정식으로 표현되어진다.

$$\theta_i = \theta_{sat} - \frac{1}{y_i} (D - m(\lambda_i - \lambda^*)) \quad (5)$$

$$\lambda_i = \ln\left(\frac{a_i}{\tan\beta_i}\right)$$

여기서  $\theta$ 는 토양수분함량(%)이며,  $y_i$ 는  $i$  지점에서의 토양층의 깊이(  $m$  ), 그리고  $D$ 는 수분의 저류결핍량이다.

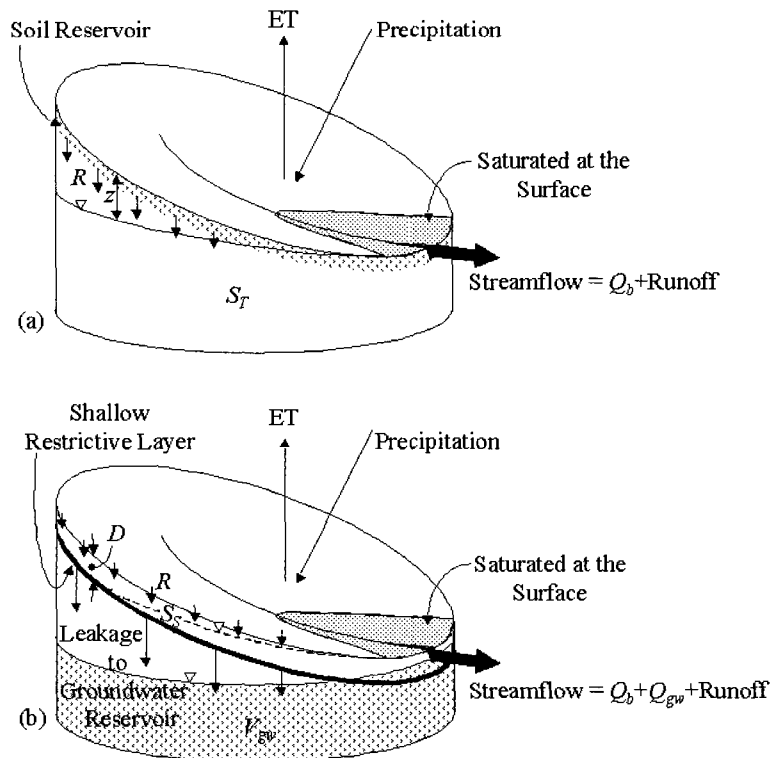


그림 1. TOPMODEL(a)과 STOPMODEL(b)의 개념에 대한 도식

## 2.2 흐름분배 알고리즘

### (Flow Distribution Algorithm, SFD, MFD)

본 연구에서 사용된 흐름분배 알고리즘이란 복잡한 지형을 따르는 흐름분산특성의 정확한 표현을 위해 개발된 알고리즘이다. 이의 표현을 위해 제일 처음 개발된 알고리즘은 O'Callaghan과 Mark (1984)에 의해 고안된 단방향 흐름분배 알고리즘(Single Flow Direction Algorithm, SFD)으로서 수치고도모형의 각 격자에서의 흐름이 주위 8개 격자중에서 가장 경사가 급한 방향의 격자로 형성된다고 가정하는 알고리즘인데 그 과정은 그림 (2)와 같다. 이에 반해 Quinn 등(1991)에 의해 고안된 다방향 흐름분배 알고리즘(Multiple Flow Direction Algorithm, MFD)은 SFD 알고리즘의 단점인 1차원적 흐름경로 표현의 한계를 해결하기 위하여 고도가 낮은 주위격자들로 균등하게 흐름을 분산시키는 알고리즘이며 식 (6)으로 기술되어 흐름을 하류단으로 분배한다. MFD 알고리즘은 산의 봉우리와 같이 흐름이 분산되는 지형에 적합하다고 알려져 있고, 계곡과 같이 경사가 급한 지형에는 SFD 알고리즘보다 적용성이 낮은 것으로 알려져 있다(김상현, 2001).

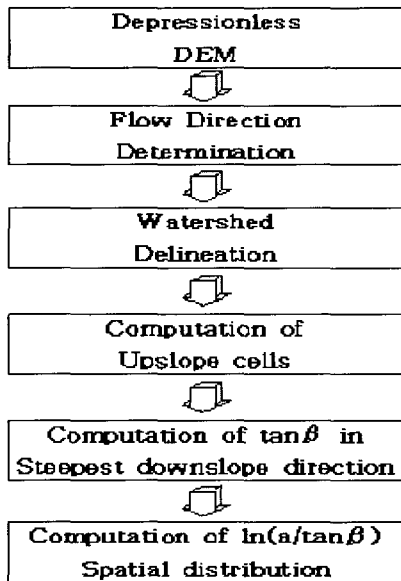


그림 2. SFD 알고리즘을 이용한 지형지수 산정절차

$$f_i = \frac{L_i S_i}{\sum (L_i S_i)} \quad (6)$$

여기서,  $f_i$ 는 대상격자에서  $i$ 격자방향으로의 흐름분배율,  $S_i$ 는  $i$ 격자지점으로의 지표면 경사,  $L_i$ 는  $i$ 격자에 대한 유효등고선 길이로서, 흐름경로를 따른 흐름 폭에 해당한다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 대상구역

본 연구의 대상구역으로는 95년부터 한국건설기술연구원에서 시험구역으로 운영하고 있는 임진강 하구에서 약 46km 상류의 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역내에 소규모 대상구역을 새로이 선정했다. 설마천 시험구역의 위치는 동경 126°55'54" ~ 126°54'57" 북위 37°54'57" ~ 37°56'23" 이고, 유역면적 8.5km<sup>2</sup>, 유로 연장 5.8km, 연평균 강수량은 1,600 mm, 고도는 최저 59 m에서 최고 675 m, 유로경사 2%인 전형적인 급경사 산지 사행하천 지형이며 전형적인 곡류하천이다. 지질은 경기편마암 복합체로 구성되고 단층과 열리가 잘 발달되어 있다. 또한 삼림과 토양은 90% 이상이 주로 20~30년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되고 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우시 토석류를 유발한다. 관측소는 우량관측소 5개(유역밀도 1.7km<sup>2</sup>/개소, 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산)와 수위관측소 2개(전적비교, 사방댐)와 기상관측소 1개(비룡포대)이며 10분마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 1998). 그림 3은 설마천 유역내에 범륜사 부근에 새로이 선정한 대상사면의 등고선 지도로서 이 소유역은 상부로 부터의 유입이 불가능한 독립적인 사면이며 주변에 우량관측소(범륜사)가 있어 정확한 강우량 산정이 가능하다.

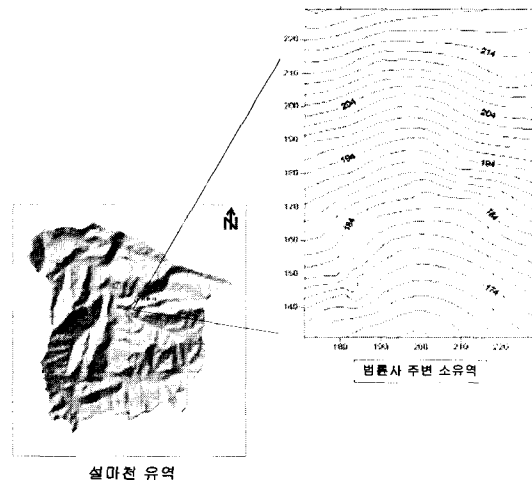


그림 3. 범륜사 부근 대상사면의 정밀 DEM

### 3.2 측정대상사면의 측량

연구 대상사면의 정밀한 DEM(1m\*1m) 구축을 위해 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용해 측량을 실시하였다. 대상사면의 상부지점에서는 10m의 간격을

가지는 40m\*40m의 구역을 설정하였고 여기서 선정된 25개의 각 점점 지점에 대해 우선적으로 측량을 실시했으며 상부에 5개 지점 (10m\*40m)과 하부에 위치한 사면의 유출지점까지 (약 55m 하부에 위치) 약32개의 지점에 걸쳐서 측량을 실시하였다. 측량에서 얻어진 각도(수평각, 수직각)와 거리의 각좌표계를 x,y,z 데카르트좌표계로 변환하여 DEM (digital elevation model)을 구축하였다. 구축된 DEM을 이용하여 단방향 흐름분배 알고리즘(SFD)과 다방향 흐름분배 알고리즘(MFD)에서 습윤지수(wetness index,  $\ln(a/\tan\beta)$ )를 계산해낸다(O'Callaghan 과 Mark, 1984 ; Quinn, 1991). 두 가지 알고리즘을 함께 고려하여 습윤지수가 높은 지점들을 중심으로 약 10m의 간격으로 측정 지점을 선정하여 그 x,y,z좌표를 다시 각좌표로 전환, 현장에서의 역 측량을 통해 토양수분의 측정지점을 선정했다. TRANSIT(DT-208P, TOPCON)과 줄자를 이용하여 수평각과 수직각, 거리를 측정했다.

먼저 사면의 출구로부터 수평각 0°, 수직각 27.5°, 거리 73.3m인 곳을 기준점으로 40m\*40m (5m 간격)과 상부 5개 지점 (10m\*10m)를 측량하였다. (1~25번, top 1~top5번). 사면에 식생이 많아 측량의 어려움이 따르는 관계로 하부 사면은 기준점을 사면의 출구(수평각 0°, 수직각 0°, 거리 0 m)와 그로부터 수평각 0°, 수직각

27.5°, 거리 36.3m인 지점으로 각각 기준을 설정하고 측량하였다. (전자는 0-1~0-22, 후자는 1-1~1-10). 본 연구는 대단히 작은 규모(50m\*50m)의 대상사면에서의 지형의 영향만을 고려하려 하였기 때문에 GPS등을 사용한 정확한 고도의 측정은 시도하지 않았고 측량을 통하여 고도의 상대적인 차이만을 이용하였다. DEM의 좌표값은 측량당시 편의상 대상사면의 중앙지점을 (200,200)으로 선정하여 처리하였다.

### 3.3 측정대상사면 토양의 물리적 특성

일반적으로 토양의 수분함유 정도는 토양의 종류, 공극률 등의 물리적 특성에 영향을 받게 된다. 그림 4는 대상사면 내에서 시료채취가 이루어진 25개 지점을 나타낸다. 25개 지점은 3.4절에서 TDR이 매설된 지점과 일치하며 좌측 상부 지점을 1번으로 하였고 우측 하부 지점을 25번으로 정하였다. 표 1은 채취된 토양시료를 채 분석하여 토양 입자를 이루는 구성물질의 비 및 몇 가지 물리적 특성을 도출하여 본 결과이다. 토양의 점토 비와 토양수분과의 상관관계를 나타낸 그림 5에 따르면 토양수분과 점토 비간에 양의 상관관계가 성립함을 볼 수 있는데 이는 토양을 구성하는 입자의 굵기가 가늘수록 입자의 표면적 증가 등의 이유에 의해 부착수가 증가하기 때문이라고 설명될 수 있다.

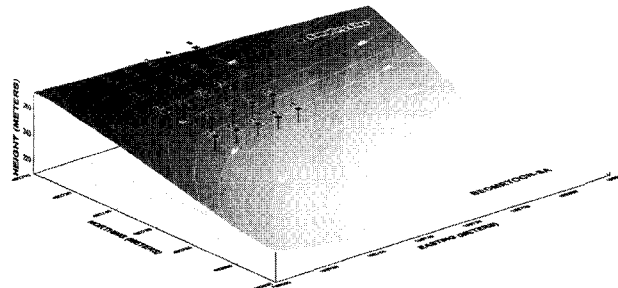


그림 4. 측정대상사면의 시료채취 지점

표 1. 토양의 물리적 특성

샘플 채취 지점	자갈 (%)	모래 (%)	실트 (%)	점토 (%)	포화도 (%)	비중량 (g/cm <sup>3</sup> )	건조 단위중량 (g/cm <sup>3</sup> )	공극률 (%)
1	12.42	40.69	37.53	9.36	25.20	2.62	1.09	58.26
3	21.88	42.02	28.98	7.12	34.38	2.68	1.46	45.54
5	39.74	33.97	23.57	2.73		2.65		
9	29.44	28.59	32.44	9.53	28.71	2.71	1.09	59.80
11	5.65	32.39	51.63	10.33	31.80	2.65	1.10	58.56
13	38.15	35.38	22.02	4.44		2.62		
15	16.12	32.40	42.05	9.43	31.63	2.63	1.18	55.15
21	10.21	38.04	42.69	9.06	22.24	2.60	1.14	55.99
23	15.62	29.86	44.42	10.10	39.18	2.58	1.22	52.72
25	13.04	38.74	39.77	8.45	26.11	2.59	1.08	58.41

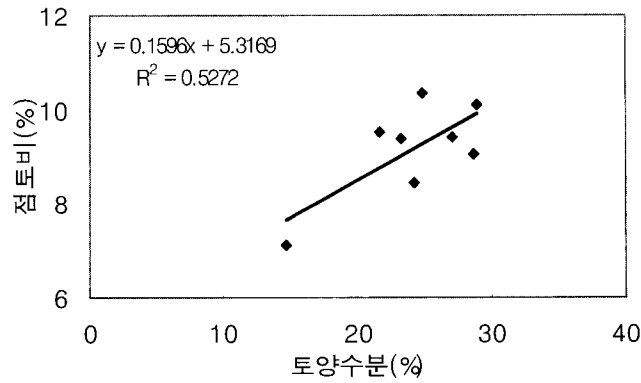


그림 5. 토양수분과 점토성분비간의 상관관계

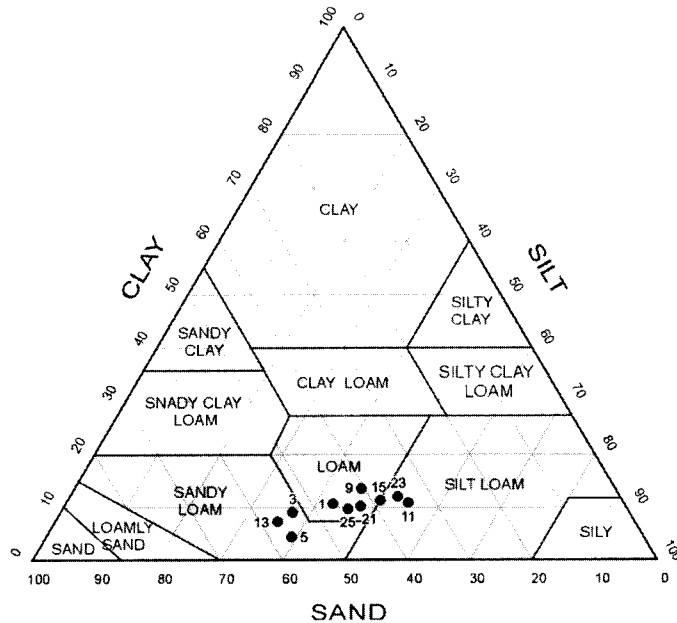


그림 6. 측정대상사면 토양의 삼각분포도

그림 6은 측정대상사면 내에서 채취된 토양시료들의 삼각분포도를 나타낸 것이다. 대상사면은 토양분류에서 sandy loam 내지 loam에 해당되었고 구성광물의 경우 카올린, 녹니석과 같은 점토광물의 구성비가 비교적 높았다. 이러한 입도분석과 광물조성으로 볼 때 대상사면의 토양은 점토화가 진행되는 과정에 있는 것으로 해석할 수 있다.

### 3.4 TDR 모니터링 시스템의 설치

본 연구에서는 토양수분의 연속적인 측정을 위하여 TDR장비인 SOILMOISTURE 사의 MINI-TRASE를 사용하였다. 측량을 통하여 정밀한 해상도를 가진 DEM을 도출한 후 흐름분배알고리즘을 적용함으로써 지형적 특성이 반영되어 주된 흐름이 생성될 것이라고 추정되는 경로의 좌표를 읽을 수 있다. 토양수분의 측

정을 위한 TDR을 위에서 결정된 흐름 경로 주변에 집중시켜 매설함으로써 추정치와 실측치와의 상관도를 검증해 보려했다. TDR(Time Domain Reflectometry)의 기본적인 이론은 다음과 같다. 일반적으로 전송선을 따라 이동하는 에너지의 전자기적 펄스의 속도는 접촉되어 있거나 전송 선을 감싸고 있는 매질의 유전상수( $K_d$ )에 의존하게 된다고 알려져 있다. 즉 유전상수가 높을수록 속도는 더 느려지게 된다. 일반적으로 토양은 공기, 미네랄과 유기물 입자, 그리고 물로 구성되어 있는데 공기는 유전상수가 1정도이며 미네랄 입자는 2에서 4사이, 그리고 수분은 약 80정도의 값을 가진다. 이처럼 토양 내의 다른 물질들과 비교하였을 때, 수분이 가지고 있는 유전상수의 상대적으로 큰 값으로 인하여, 토양 내에 평행하게 묻혀진 전송선(토양속에 묻혀진 waveguide를 언급한다). 내부를 따라 흐르는 에너지의

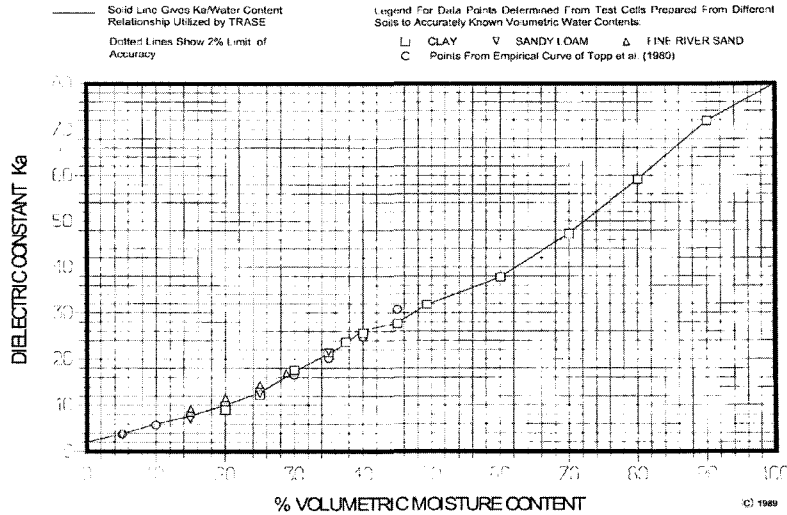


그림 7. 토양수분과 유전상수의 관계

마이크로파 펄스의 이동 속도는 토양 내의 수분에 크게 의존하게 된다. 마이크로파의 펄스가 전송선을 따라 전달되어 질 때, 여러가지 면에서 빛과 비슷한 행태를 보여주게 된다. 전송선과 주변의 물체간의 불연속성의 존재는 마이크로파의 전송선을 따른 반향을 야기한다. 펄스가 전송선의 끝부분에 도착했을 때, 순간적으로 펄스내에 남아있는 모든 에너지는 전송선을 따라 반사되게 된다. 이러한 특징은 섬세한 전자공학기술로서, 마이크로파의 펄스가 알려진 길이의 전송선을 따라 이동하는데 필요한 시간의 측정을 가능하게 한다. 여기서 측정된 전송시간을 이용하여 다음의 (7)식을 이용하여 유전상수( $K_a$ )를 구하게 된다.

공기-토양-물 의 외견상의 유전상수( $K_a$ )는 다음의 식에 의해 결정되어진다.

$$K_a = \left(\frac{tc}{L}\right)^2 \quad (7)$$

여기서 "L"은 waveguide의 길이(cm)이며, "t"는 전송시간(nanoseconds, ns), 그리고 "c"는 빛의 속도이다 (cm/ns). 전송시간은 펄스가 waveguide의 시작서부터 끝부분까지 일방으로 이동하는데 소요되는 시간이다. 이렇게 측정된  $K_a$ 을 기본으로 하여 토양수분값이 추정되어진다. 만약 토양이 완벽하게 건조되어있다면,  $K_a$ 는 2-4의 값을 가지며, 만일 토양수분의 용적비가 25%이며,  $K_a$ 는 거의 11-12의 값을 가질 것이다. 즉,  $K_a$ 값은 주로 토양의 용적수분값에 따라 달라지며, 대개 토양의 종류에 크게 의존한다(그림.7).

### 3.5 측정 결과 및 분석

그림 (8)은 측량을 통해 구축된 DEM을 이용하여 습윤지수( $\ln(a/\tan\beta)$ )와 상부사면기여면적(a)을 각각

SFD와 MFD알고리즘을 통해 실행한 결과를 나타낸 것이다. 그림 (10)과 (11)은 대상유역에 대하여 5m간격으로 정사각형의 격자를 만들고 TDR탐침 25개를 설치하여 토양수분의 시간별 변화경향을 측정하여 공간적으로 표현한 것이다. TDR탐침은 길이가 20cm이며 지표에서 측정이 이루어졌기 때문에 여기서 제시된 결과는 지표면에서 지표하 20cm에 이르는 지점의 토양수분의 변화에 대한 결과이다. 두 자료 모두 약 이틀에 걸친 측정자료이나 측정기간내의 변화가 미소함을 관찰할 수 있으며, 5월 8일부터 시작한 측정자료가 4월3일부터 측정한 자료에 비해 토양수분의 양이 상대적으로 많이 함유됨을 알 수 있는데 이는 측정일 전의 선행강우량에 따른 토양의 수분 저류량의 증가에 기인한다(그림 9). 그림 (8)를 보면 우선 흐름이 생길 것이라고 추정되는 경로가 중앙 상부에서 하부로 이어지며 또한 우측 상부로부터의 지류의 유입이 추정되어진다. 그림(8)와 그림(11)을 비교해 보면 중앙 상부와 우측 상부에 상대적으로 높은 토양수분의 분포경향이 나타나며 중앙의 하부지점으로 그 흐름이 이어짐이 비교적 일치함을 관측할 수 있다. 반면 그림 (10)을 보면 토양수분의 측정값이 추정치와 비슷한 경향을 보이지 못하고 임의적으로 분포되었음을 알 수 있다. 이는 비교적 높은 토양수분의 분포양상이(그림10) 유출형성의 공간적인 분포양상(그림 8) 과 잘 부합하는 것으로 나타났다.

그림 (12)와 그림(13)은 습윤지수( $\ln(a/\tan\beta)$ )와 함께 상부사면의 기여면적(a)을 가지고 SFD와 MFD알고리즘을 계산한 자료를 바탕으로 25개 지점을 선택한 후, TDR을 이용하여 똑같은 지점에서 측정된 25개 지점의 토양수분측정값과 상관관계를 통계적으로 분석한 그림이다.

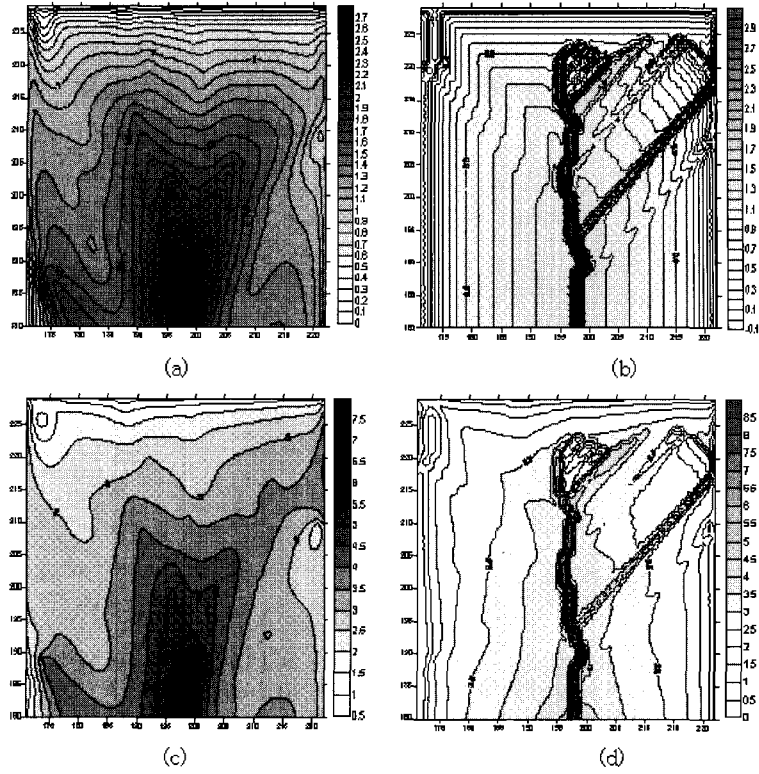


그림 8. 모의된 토양수분

(a) mfd(습윤지수) (b) sfd(습윤지수) (c) mfd(area,m2) (d) sfd(area,m2)

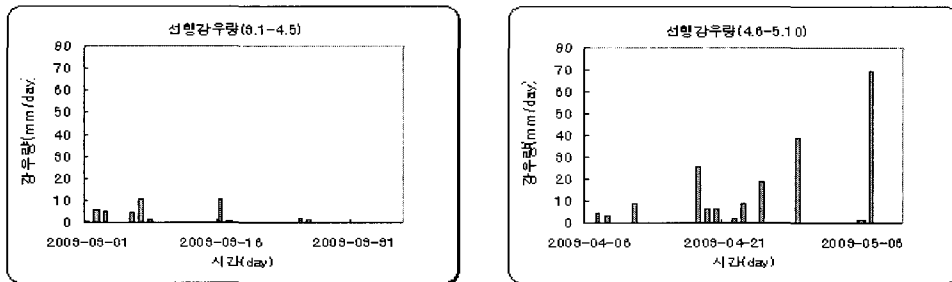


그림 9. 각 측정날자에 대한 선행강우량

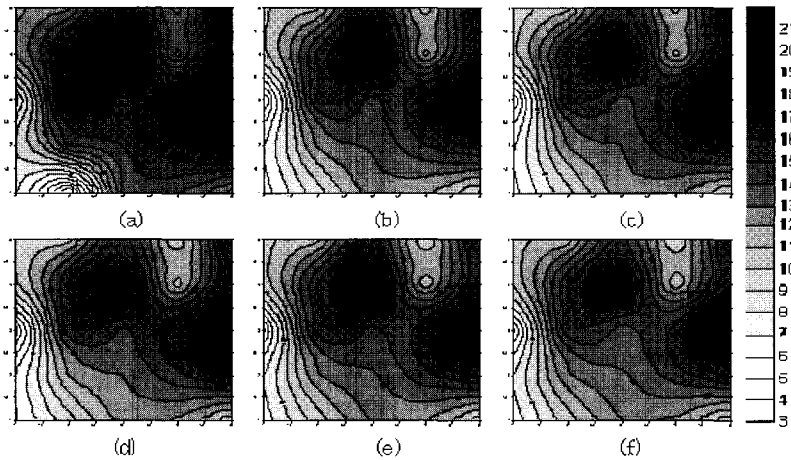


그림 10. 토양수분의 변화 (4월3일 -4월 5일)

(a)4월3일 20시30분 (b)4월4일 04시 (c)4월4일 09시 (d)4월4일 14시 (e)4월4일 18시 (f)4월 5일 07시30분



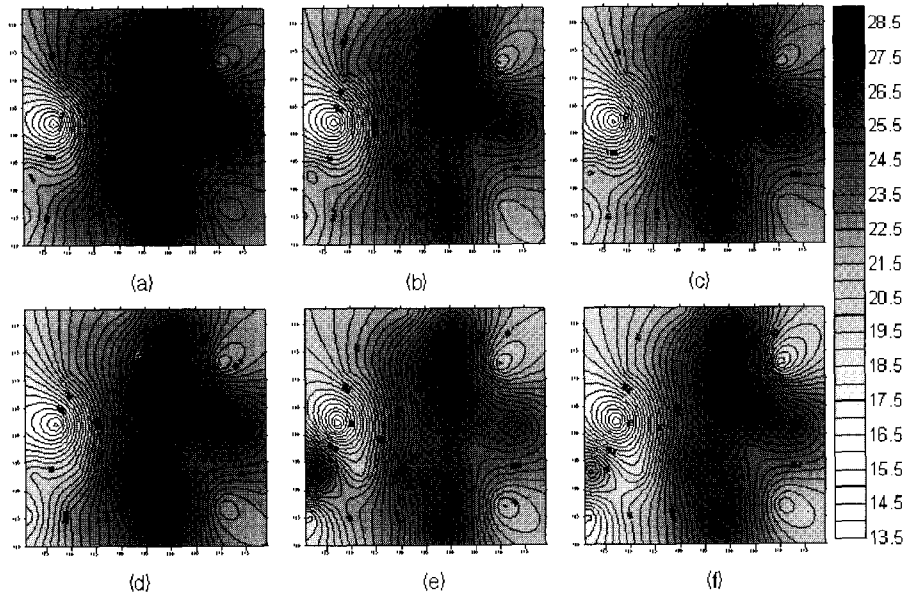


그림 11. 토양수분의 변화 (5월8일 - 5월 10일)

(a)5월 8일 11시 30분 (b)5월 8일 20시 30분 (c)5월 9일 07시 30분 (d)5월 9일 18시 30분  
(e)5월 9일 21시 30분 (f)5월 10일 07시 30분

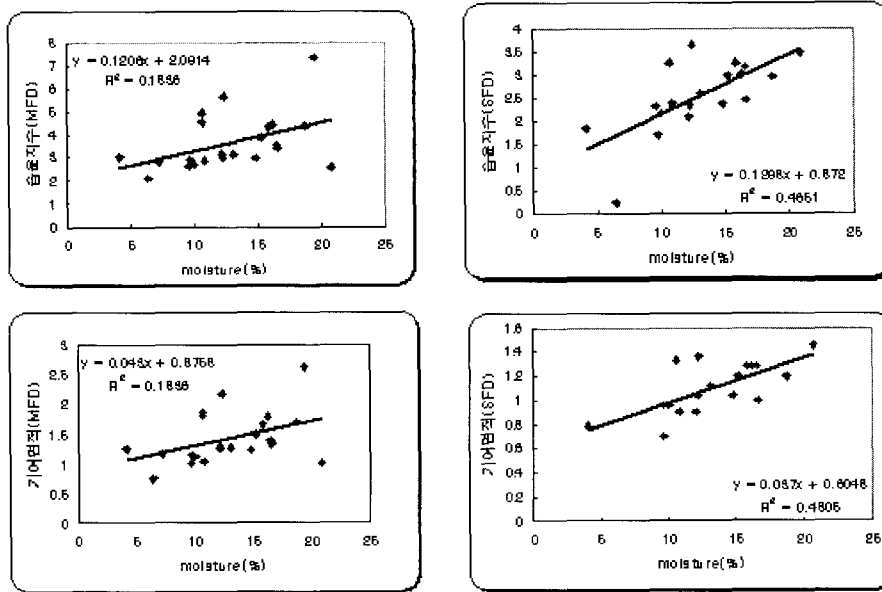


그림 12. 실측값과 모의 값과의 상관관계 (건조한 토양조건, 4월 측정)

그림 (12)와 그림(13)을 보면 흐름분배알고리즘과 토양수분측정치와의 상관관계는 비교적 토양의 상태가 습한 조건에서 높은 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 건조한 때 보다 습한 때가 상대적으로 토양수분의 구조성이 잘 발달되어 있고(Western 등,1991) 식생 등에 의한 영향이 미미하리라 추정되기 때문이다. 하지만 일반적으로 토양의 수분함량은 전적으로 지형에 의존하기 보다는 토양층의 깊이(Pellenq 등, 2003)나 토양 내에 존재하는 대공극 흐름 혹은 모세관현상(Beven 등,1982)에 따라서도 많은 변화를 일으킨다고 알려졌다. 또한 설마천 유

역의 지질이 경기편마암 복합체로 구성되고 단층과 열리가 잘 발달되어 있으며, 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고, 산지 사면에 다량의 돌과 자갈이 산재해 있는 등의 조건 또한 토양수분과 흐름분배 알고리즘간의 높은 상관관계를 형성하는데 장애요인이 된 것으로 보여진다. 토양수분과 관련된 연구를 수행함에 있어서 지형지수와 국지적인 수리상태간에 존재하는 상관성으로 완전히 해석될 수 없는 요인을 요약하면 다음과 같다. 첫째, 측정이 매우 국소적인 스케일에서 이루어졌다. 둘째, 현장의 조건이 매우 건조하여 TOP-

MODEL등의 적용에 무리가 있다. 셋째, 지표근처의 토양수분이 증발산량 등에 의해 크게 좌우되어 지하수면과의 상관성은 낮게 나타났다. 이외에 TOPMODEL등을 사용할 경우 지하수면의 높이 혹은 토양수분함량을 산정하는 데 있어서 TOP-MODEL개념 자체의 한계를 지적하기도 한다. Pellenq 등(2003)은 현실적인 토양내 수분함유량의 분포경향은 일반적으로 토양의 상태가 습한 조건일 때, 토양층의 깊이와 지형적인 정보 등을 함께 이용할 때 그 신뢰도가 높아진다고 주장한다. 여기에서도 토양수분함량의 측정은 TDR을 통한 지표면에서의 측정값을 이용하였는데, 점 측정에 의한 자료와 격자단위로 이루어지는 모형에 의해 도출된 자료와의

비교에 따르는 비교대상의 문제점은 통계적인 해석으로 해결하고 있다. 예를 들면, 해상도가 (20m\*20m)인 DEM자료를 사용할 때, 관측자료와 모의자료와의 상관성은 격자단위를 100m\*100m의 해상도(25격자)로 하여 평균하였을 때, 가장 적절한 분석이 가능함을 보여주고 있다(그림 14). 이에 따라 보다 효율적인 토양수분관련 연구수행을 위해서는 구역내의 토양층의 깊이분포에 대한 자료, 측정지점에 대한 토양구성성분의 도출 및 TDR등을 이용한 토양수분의 수직적 분포에 대한 측정을 통한 대공극 흐름이나 모세관 현상 등의 파악이 향후과제로 판단된다.

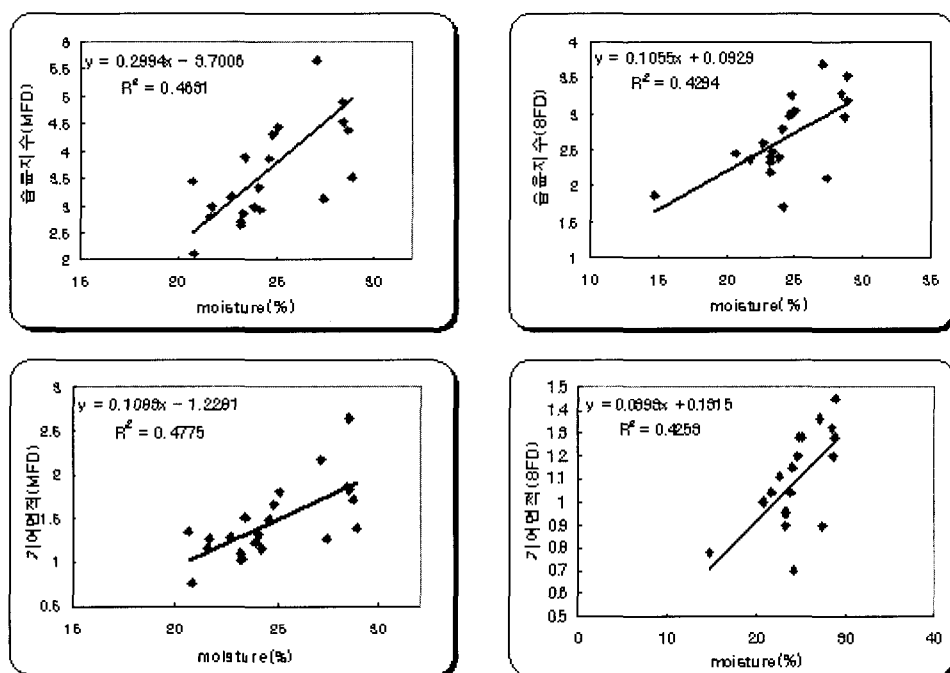


그림 13. 실측값과 모의 값과의 상관관계(습윤한 토양조건, 5월 측정)

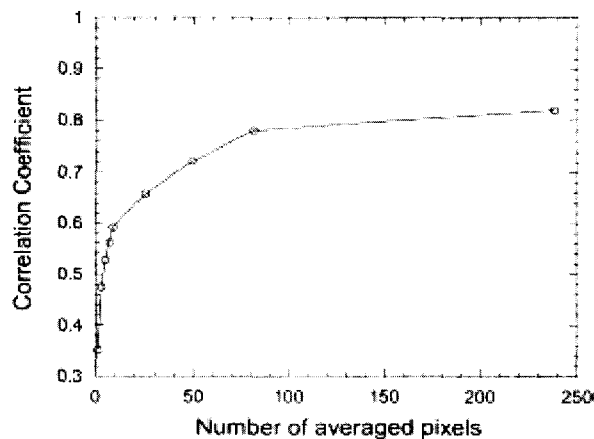


그림 14. 측정값의 평균에 쓰여진 격자갯수에 따른 상관관계의 변화(예, Pellenq 등, 2003)

#### 4. 결 론

본 연구는 소유역에 대한 측량을 통해 도출된 DEM 자료를 이용하여 흐름분배알고리즘을 계산하여 획득된 결과와 TDR로 실측한 토양수분함량과의 비교를 통하여 국내의 산지유역에서 토양수분의 변화경향을 파악하는 해석을 시도한 것으로서 도출될 수 있는 결론은 다음과 같다.

1. 산지가 대부분인 국내의 유역에서는 지형적인 특색이 DEM을 통해 잘 반영될 수 있으므로 대상유역에 대하여 흐름분배알고리즘을 적용하여 토양수분의 분포경향을 추정하는 과정이 효율적일 수 있으며, 여기서 도출된 결과를 TDR등의 측정장비를 이용하여 실측한 자료와 동일좌표에서 비교함으로써, 추정결과와 실측치와의 상관도를 분석할 수 있었다.
2. 흐름분배알고리즘과 토양수분과의 공간 분포의 상관관계는 건조한 조건에서는 국지적인 토양조건이나 식생 등에 영향을 많이 받아 지형에 대한 영향이 미미한 반면, 습한 조건에서는 지형에 영향을 많이 받아 흐름분배알고리즘에 의해 도출된 결과와 유사한 경향을 보여준다.
3. 유출 형성의 공간적인 분포양상을 모의한 결과는 상대적으로 습한조건 토양수분 공간 분포관측 결과와 부합하는 것으로 나타났다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

- 김상현, 김경현, 정선희 (2001) "수치 고도 분석 : 분포형 흐름 분배 알고리즘." 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제3호, pp. 241-251.
- 한국건설기술연구원, (1998) "시험유역의 운영 및 수문 특성 조사·연구", 연구보고서, 건기연 98-077.
- Ambrose B, Beven KJ, Freer J(1996). "Toward a generalization of the TOPMODEL concept: topographic indices of hydrological similarity." *Water Resour. Res.*, vol. 32, pp. 2135-2145.
- Beven K, Germann P(1982). "Macropores and Water Flow in Soils." *Water Resour. Res.*, vol. 18(5), pp. 1311-1325.
- Beven K, Wood E,(1983). "Catchment geomorphology

- and the dynamics of runoff contributing areas." *J. Hydrol.*, vol. 65, pp. 139-158.
- Boulet G, Chehbouni,A., Braud, I, Vauclin,M, Haverkamp, R., Zammit, C.(2000). "A simple water and energy balance model designed for regionalization and remote sensing data utilization." *Agric.Forest Meteorol.*, vol. 105, p. 117-132
- Nyberg, L.(1996). "Spatial variability of soil water content in the covered catchment at *Gardsjon*, sweden." *Hydrol. Process.*, vol. 10, pp. 89-103.
- O'Callaghan, JF., Mark D.M.(1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, vol. 28, pp.323-344
- Pellenq J, Kalma J, Boulet G, Wooldrudge S, Kerry, Chehbouni A(2003). "A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth." *J. Hydrol.*, vol. 276, pp. 112-127.
- Todd Walter, M., Tammo S. Steenhuis., Vishal K.Mehta., Mark Zion, Elliot Schneiderman(2002). "Refined conceptualization of TOPMODEL for shallow surface flows." *Hydrol. Process.*, vol. 16, pp. 2041-2046.
- Topp G.C, Davis JL, Annan AP(1980). "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines." *Water Resour. Res.*, vol. 16, pp. 574-582.
- Quinn, P.,K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydrol. Process.*, vol. 5, pp. 59-79.
- Quinn, P.,K. Beven K,(1993). "Spatial and temporal predictions of soil moisture dynamics, runoff, variable source areas and evapotranspiration for Plynlimon, mid-Wales." *Hydrol. Process.*, vol. 7, pp. 425-448.
- Western, A.W., Bloschl, G, Grayson R.(1998). "Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment." *J. Hydrol.*, vol. 205, pp. 20-37.
- Western, A.W., Bloschl, G(1999). "On the spatial scaling of soil moisture." *J. Hydrol.*, vol. 217, pp. 203-224.

(논문번호:03-82/접수:2003.09.30/심사완료:2003.12.10)