

# 설마천 유역 범륜사사면의 토양수분 시공간 집중변화양상의 측정 Spatial-temporal Distribution of Soil Moisture at Bumreunsa Hillslope of Sulmachun Watershed Through an Intensive Monitoring

이 가 영 / 김 기 훈 / 오 경 준\* / 김 상 현\*\*

Lee, Ga Young / Kim, Ki Hoon / Oh, Kyung Joon / Kim, Sang Hyun

## Abstract

Time Domain Reflectometry (TDR) with multiplex system has been installed to configure the spatial and temporal characteristics of soil moisture at the Bumreunsa hillslope of Sulmachun Watershed. An intensive surveying was performed to build a refined digital elevation model (DEM) and flow determination algorithms with inverse surveying have been applied to establish an efficient soil moisture monitoring system. Soil moisture data were collected through intensive monitoring during 380 hrs in November of 2003. Soil moisture data shows corresponding variation characteristics of soil moisture on the upper, middle and lower parts of the hillslope which were classified from terrain analysis. Measured soil moisture data have been discussed on the context of physical process of hydrological modeling.

**keywords** : Soil Moisture, Monitoring System, TDR

## 요 지

국내 산지사면에서의 토양수분의 시공간적 분포를 파악하기 위한 동축 다중체계의 TDR (Time Domain Reflectometry)을 설마천 유역의 범륜사 사면에 구축하고 토양수분 집중 모니터링을 실시하였다. 대상사면을 정밀 측량하여 정밀 수치지형모형(Digital Elevation Model)을 구축하고 흐름분배알고리즘에 적용하여 측정지점을 선정하였고 역 측량을 통한 효율적인 측정 체계를 구축하였다. 2003년 11월중의 380시간 동안의 집중 모니터링을 통한 토양수분 자료를 확보하였다. 확보된 토양수분자료는 대상사면의 지형분석을 통해 구분된 상부, 중부, 하부사면의 변화 특성을 보여주고 있다. 물리적 수문 모형의 구성과정에서 중요한 의미를 부여하는 토양수분 실측치와의 유의성을 논의하였다.

**핵심용어** : 토양수분, 집중 모니터링, TDR

## 1. 서 론

토양수분은 식물의 생장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 요소로서 토양 층 상부의 수 m 내에 존재하는 수분의 양을 일컫는다. 토양수분과 토양수분의

공간적 시간적 특징들은 증발, 침투, 지하수 재충전, 토양 침식, 식생 분포 등을 지배하는 중요한 요소이다 (Zhang과 Berndtssm, 1991). 강우 등으로 인한 지면과 지표하에서의 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정과 증발산 등은 모두 비포

\* 정회원, 부산대학교 환경공학과 석사과정

Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea

\*\* 교신저자, 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735, Korea  
(e-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

화대(vadose zone) 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 된다(Western 등, 1998). 또한, 비포화대 수분의 중요성은 대부분의 오염물들이 지표 가까이 있는 비포화 토양층에 방출되어져 아래에 있는 대수층(포화대)으로 흘러든다는 사실에서 찾을 수 있다. 따라서 비포화대에 대한 토양수분 함량의 시공간적 분포 양상을 파악하는 것은 강우, 증발산, 유출 등의 일련의 수문학적 과정들을 규명하고 지하수로의 오염물 이송 경로를 파악하는데 중요하다.

토양수분을 조사하는 방법은 크게 인공위성이나 비행기 등을 이용해 측정하는 원격측정법과 대상구역에서 직접 측정을 시행하는 현장측정법으로 나눌 수 있다. 원격 측정에서는 극초단파등을 이용하여 토양수분을 추정하는데 이는 짧은 시간에 대단위의 넓은 지역을 조사할 수 있는 장점이 있으나 지표하 5cm 정도의 얇은 층에 대해서만 조사가 가능하며 그 신뢰성이 낮다. 현장 측정법에는 결보기 유전상수를 이용하는 Theta probe, 토양내의 부압을 이용한 장력계, 유전상수에 따른 파의 반향시간(travel time)의 차를 이용한 TDR (Time Domain Reflectometry), 전기전도도를 이용한 EM 등을 사용하는 방법들이 있다. 현장측정법은 비교적 정밀하고 정확한 값을 얻을 수 있으나 그 범위가 국소 지역에 국한되는 제한점이 있다. 이 중에서 TDR을 이용한 방법(Topp, 1980)은 여러 개의 탐침을 매설하여 일정시간 간격으로 토양수분의 공간적 분포를 얻어낼 수 있어 토양수분의 시공간적 특성 파악에 매우 유용하다.

토양수분 함량에 영향을 미치는 인자로는 투수계수, 비피압 대수대, 공극률, 우선흐름경로 등의 토양특성과 수리 경사의 측정치로써 국소 경사, 잠재 최대 흐름량의 측정인 상부사면 기여면적, 흐름의 수렴과 발산 속도 측정치로써 등고선구배와 수리 경사의 변화율인 윤곽구배, 경사에 따른 태양복사량의 영향과 증발산의 고려를 위한 흐름 방향과 지형적인 음영 등의 지형과 지표 식생(surface cover)과 물 사용 특성 변동 등의 식생 그리고, 순 강수량, 순 복사량, 바람, 온도 등의 기상 조건이 있다(Barling 등, 1994). 이 중에서 지형의 토양수분 함량에 대한 영향을 특성화한 습윤지수가 Topmodel 등의 수문 모의에 도입되었다(Beven 과 Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986). 지형을 표현하는 인자로서 상부사면 기여면적과 경사도의 비로서 계산되어지는 습윤지수는 토양수분의 공간적 분포 양상 및 유출 모의에 널리 사용되어지고 있는데 Beven 과 Kirkby (1979)가 제안한 습윤지수는 정상상태를 가정하고 있으며 Barling 등 (1994)은 이 정상상태 가정의 한계를 극복하고 이를 완화하기 위하여 반동력학적 습윤지수(quasi-dynamic

wetness index)를 도입하였으며 한지영과 김상현 등 (2003)은 반동력학적 습윤지수를 발전시켜 동력학적 습윤지수(dynamic wetness index)를 제안하였다.

본 연구에서는 TDR을 이용하여 토양수분의 공간적 분포 양상을 집중적으로 모니터링 함으로써 토양수분의 시공간적 분포 양상을 파악, 분석하였다. 이를 통해 습윤지수로 구별되는 사면의 특성에 따른 분류와 분석을 수행하였고, 물리적인 수문모형의 구축을 위해 필요한 토양수분의 현장에서 측정치에 대한 유의성 및 제한점을 분석하였다.

## 2. 방법론

본 연구에서는 산지가 대부분인 국내 지형을 반영할 수 있는 경사가 비교적 급격한 산지사면을 연구대상 지역으로 선정하여 토양수분의 시공간적 분포 특성 파악에 용이한 TDR을 이용하여 장기 모니터링을 실시하였다. 이 과정에서 측량을 통해 1m 격자의 정밀한 DEM (Digital Elevation Model)을 구축하고 이를 흐름분배 알고리즘에 적용하여 도출된 주요 흐름경로에 측정 지점을 배치시킴으로써 측정의 실효성 및 타당성을 제고하였다.

### 2.1 대상구역

본 연구의 대상구역으로 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역내에 감악산 범륜사 우측 소규모 산지 사면을 선정하였다. 설마천 유역은 산지 소규모의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료에 대한 지속적 관측과 자료 축적을 위해 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있으며 설마리에 위치한 영국군 전적비교를 출구로 하는 설마천 중상류 유역이 시험유역이다. 유역면적 8.50km<sup>2</sup>, 유로연장 5.80km, 유로경사 2.3%로 전형적인 급경사 산지 사행하천이다. 지질학적 형상은 작은 절리가 많이 발달되어 있고, 엽리의 절리로 작용하는 지질구조상 강우초기에는 하천의 수위에 큰 변화를 보이지 않다가 파쇄대를 채운 후에 하천의 수위가 급격히 증가하는 양상을 보인다. 시험유역에는 6개 우량관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 운영되고 있다. 일상적인 관측기기의 유지관리와 수문기상관측 및 관측자료의 검토 등 일련의 수문기상관측 및 관측자료의 검토 등 일련의 수문관측 및 자료처리 과정을 통해 양질의 우량과 유량, 수질, 기상 자료 등을 10분 단위로 생성하고 있다.(한국건설기술연구원, 1998).

그림 1은 설마천 유역내에 범륜사 북쪽 측면 대상 산지 사면의 등고선 지도로서 이 지역은 상부로부터의 유

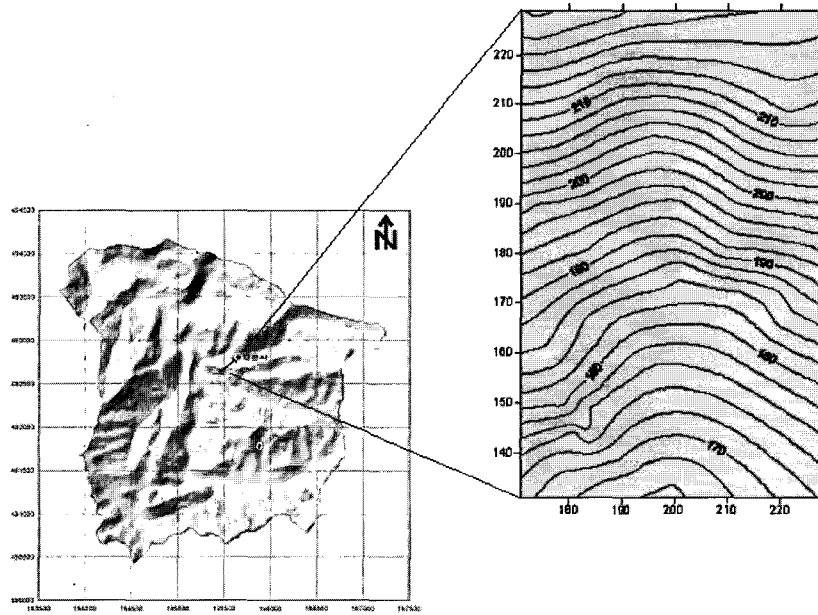


그림 1. 범륜사 부근 대상사면의 정밀 DEM

입이 불가능한 독립적인 사면이며 인위적인 요소들에 의한 영향이 거의 없어 변형되지 않은 자연 산지이다. 또한 주변에 우량관측소(범륜사)가 있어 정확한 강우량 자료를 얻을 수 있다.

## 2.2 토양수분의 집중 모니터링을 위한 시스템 구축

연구 대상 사면의 정확한 지형을 파악하고 1m 간격 정밀 DEM을 구축하기 위하여 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용하여 측량을 실시하였다. 측량을 통하여 얻어진 수평각, 수직각, 거리의 각좌표계 자료를 이용하여 알고리즘을 통해 이를 환산하여 x, y, z 데카르트 좌표계로 변환하여 DEM을 구축하였다. 사면은 가로 약 50m, 세로 약 100m 정도 규모이며 경사도는 약 20°-30° 정도인 비교적 급한 경사를 가진 산지 사면이다. 이를 단방향 흐름분배 알고리즘(SFD) 및 다방향 흐름분배 알고리즘(MFD)에 적용하여 습윤지수(wetness index,  $\ln(a/\tan\beta)$ )를 계산해냈다(O'Callaghan 과 Mark, 1984 ; Quinn, 1991). 두 가지 알고리즘을 모두 고려하여 습윤지수가 높아 주요 흐름선을 형성할 것으로 예상되는 부분을 중심으로 상부로부터 약 10m 간격으로 총 13개 지점을 측정지점으로 선정하였다(표 1, 그림 2). 선정된 측정지점의 데카르트 좌표를 알고리즘을 통해 각좌표계로 변환하여 대상 사면에서 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용해 역측량하여 선정된 측정지점의 정확한 위치를 파악하여 TDR 탐침을 설치하였다. 또한 TDR의 특성상 탐침의 길이(20cm) 범위 내의 영

역만 측정이 가능하다는 제한점을 가지므로 지표 뿐만이 아닌 지표하, 지하 영역에서의 수직적 토양수분 분포 및 변화 양상을 파악하고 지표하 흐름의 존재 여부 및 흐름 경로를 파악하기 위하여 각 측정지점에 깊이 별로 2-3개의 탐침을 설치하였다. 측정 스테이션은 주요 흐름 경로에 걸치지 않으면서 탐침과 TDR 사이의 연결선의 길이를 고려하고 기기의 고정을 위한 평탄함, 안정성을 고려하여 선정된 지점에 설치되었다(표 2). 토

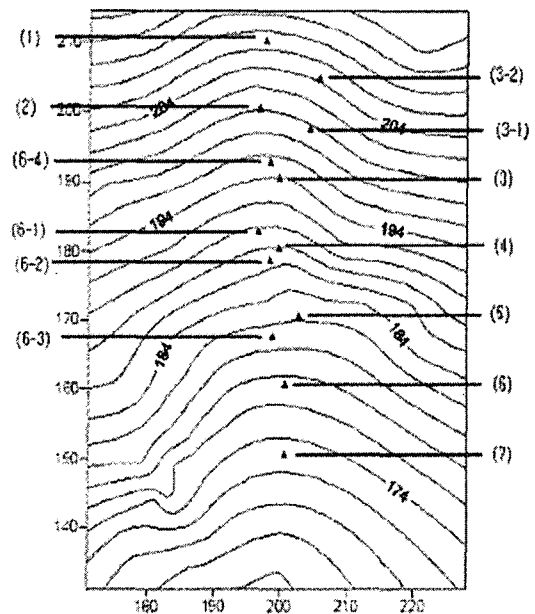


그림 2. 선정된 측정 지점

표 1. 선정된 토양수분 측정 지점 및 깊이별 탐침 설치 현황

지점	x(m)	y(m)	z(m)	wave guide의 깊이별 위치	MFD
1	197.53	210.19	206.94	지표, 지하 30cm	3.563
2	196.55	200.29	200.05	지표, 지하 30cm	4.927
3	199.50	190.39	193.83	지표, 지하 10cm	5.498
4	199.50	180.49	187.89	지표, 지하 30cm	5.764
5	202.44	170.59	182.33	지표, 지하 30cm, 지하 60cm	6.400
6	200.48	160.69	177.44	지표, 지하 30cm	6.476
7	200.48	150.79	173.11	지표, 지하 30cm	6.982
3-1	204.03	197.36	199.38	지표, 지하 30cm	4.437
3-2	205.81	204.87	205.02	지표, 지하 30cm, 지하 60cm	4.379
6-1	196.33	183.14	189.87	지표, 지하 30cm, 지하 60cm	5.657
6-2	198.12	178.92	186.68	지표, 지하 30cm, 지하 60cm	5.981
6-3	198.70	167.68	180.51	지표, 지하 30cm	5.763
6-4	198.10	193.05	194.88	지표, 지하 10cm	5.142

표 2. 데카르트 좌표계로 나타낸 station의 위치

	x(m)	y(m)	z(m)
station 설치 지점	202.17	184.54	191.47

양수분은 2003년 11월 6일 오전부터 11월 22일 오전까지 16일간에 걸쳐 1시간 간격으로 측정되었다. 사면은 MFD 계산결과에 따라 상부 중부 하부 사면으로 구분하였다(김기훈의 2005).

### 2.3 습윤지수

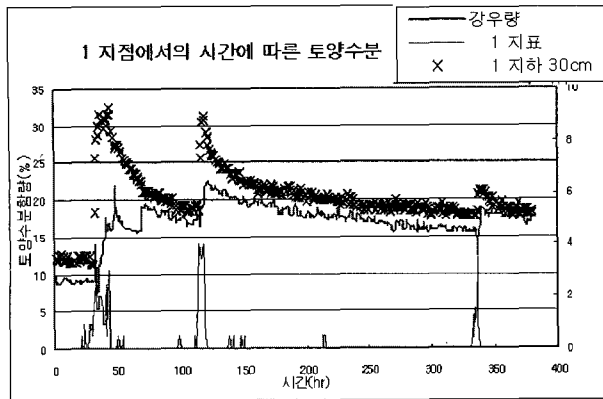
Beven과 Kirkby (1979)에 의해 제안된 습윤지수는  $\ln(a/\tan \beta)$ 로써 지형의 포화정도를 설명한다고 알려져 있으며 자연의 지형 특성을 반영하는 인자로서 유출 등의 수문 현상을 모의하는데 사용되어 왔다. 습윤지수는 포화성향성 혹은 수문학적 상사성을 수치지형모형에서 구현하는 수문학적 대리지수로서 TOPMODEL, THALES, TOPOG 등의 많은 분포형 수문 모형에서 활용되고 있다. a는 상부사면 기여면적이고  $\tan \beta$ 는 경사도를 나타낸다. 상부사면 기여면적은 각 격자가 받을 수 있는 잠재 흐름량을 나타내며, 8개의 이웃격자 중에서 경사가 가장 급한 격자로만 흐름을 분배하는 단방향 알고리즘(O'Callaghan과 Mark, 1984), 경사가 있는 모든 방향으로 흐름을 분배하는 다방향 알고리즘(Quinn 등, 1991), 격자 기반의 모델에서 흐름을 점원적 발생 특성과 흐름 경로의 1차원적인 특성으로 표현하는 것을 고려하여 흐름이 점원이 아닌 면에서 발생하고 그 발생된 흐름은 하경사 방향으로 2차원 흐름선을 형성한다고 가정된 DEMON 알고리즘 등의 흐름 분배 알고리즘 방법으로 계산할 수 있다(김상현, 정선희, 2001; 한지영, 김상현, 2003).

## 3. 결과 및 고찰

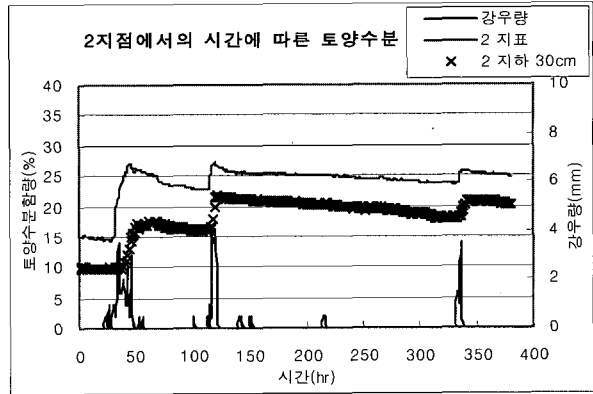
### 3.1 토양수분 집중 모니터링 결과

#### 3.1.1 상단부사면

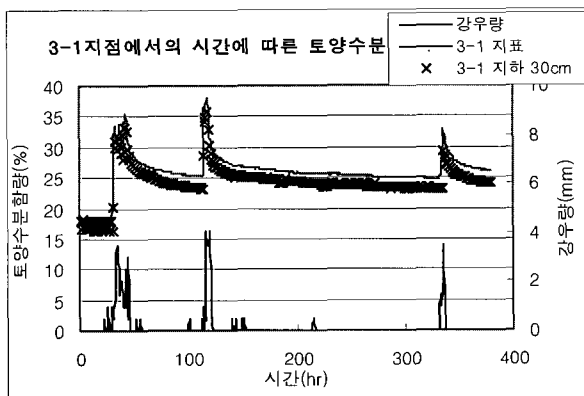
그림 3은 상부사면 지점들 TDR을 이용한 토양수분 측정 결과와 강우량의 시간적 변화를 나타낸 것이다. 측정은 2003년 11월 6일부터 11월 22일까지 한 시간 간격으로 이루어 졌으며 측정기간 중 11월 8일과 9일 사이 28 mm, 11일에 19 mm, 20일에 8 mm 등의 강우가 있었다. 상부 지점들의 전반적인 특징은 강우 사상에 대한 지표 및 지하의 토양수분이 큰 폭으로 증가하였으며 강우 사상이 끝난 이후에 급격한 감쇄 곡선 및 충전 효과를 동시에 보이고 있다는 점이다. 특히 그림 3의 (a) 1 지점에서는 강우에 따른 큰 폭의 수분 증가와 강우 후의 급격한 감쇄 현상을 뚜렷하게 보이고 있다. 다른 지점들과는 달리 1 지점의 경우 지표 보다 지하에서 강우에 대한 반응이 민감하며 변화의 폭이 크고 감쇄가 급격함을 알 수 있다. 이는 1 지점이 사면의 가장 상단부로서 토양층의 침식 등을 통해 표토층이 얇고 토양층의 구조가 단단하지 않다는 사실과 관련이 있다. 대공극을 통한 지하로의 강우의 직접적인 침투가 이루어지거나 지표하 흐름으로 빠르게 수평이동 하였을 가능성을 보여주고 있다. 즉, 토양층에서의 강우의 연직적인 침투 양상이 연속적이지 않으며, 대공극 흐름(macro-pore flux)이나 우선 흐름(preferential flux)이 토양수분의 변화 양상에 중요한 역할을 하고 있다는 것을 암시한다. 또한 (a)의 1 지점 지표의 토양수분 변화를 살펴



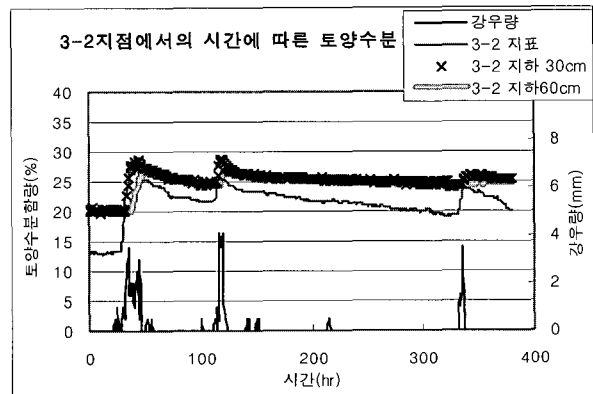
(a)



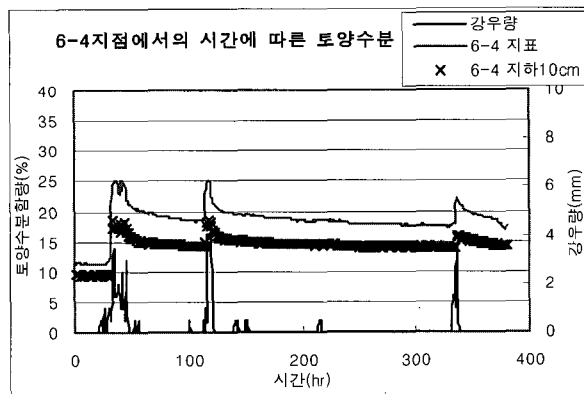
(b)



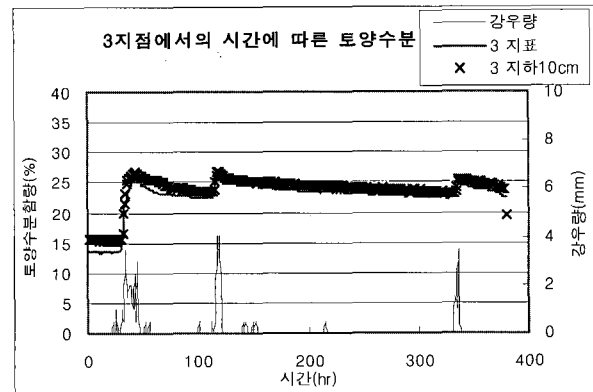
(c)



(d)



(e)



(f)

그림 3. 상단부사면 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화

보면 강우사상 중에 토양수분의 증가와 감소의 변동성이 관찰되며 강우사상 이후에도 급작스러운 변화를 보이고 있다. 이는 TDR 탐침이 측정 가능한 영역 내의 토양구조체의 변화와 대공극의 발생 및 변형으로 설명될 수 있다. 단단하지 않은 표토층이 강우의 영향으로 구조적 변화를 일으키며 강우 중 일시적인 변동성을 가져왔으며 이와 같은 구조체의 변화를 포함하는 일련의 소규모 수문 반응이 강우 사상 이후에도 발생할 수 있음을 나타내고 있다.

그림 3(b)이 나타내는 2 지점을 살펴보면 지하에서의 수분 변화는 지표의 그것에 비해 반응이 느리고 지표가 감쇄하기 시작하는 시점에도 지하에서는 증가하고 있으며 강우사상 이후에도 느리게 증가하고 있다. 이는 지표에서 지하로 수분이 침투되거나 지표하 흐름을 통해 상부사면으로부터 수분을 받는 데 지체되는 시간이며 지표와 지하는 다른 반응 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 (b) 2 지점 지표에서도 강우사상 이후 작은 폭의 일시적인 낙차를 통해 토양구조체가 소규모로 변

화하였을 가능성을 암시하고 있다.

그림 3(c) 3-1 지점과 (e) 6-4 지점은 지표가 지하에 비해 2-5 % 가량 토양수분 함량이 높게 나타나며 강우 사상에 대한 반응은 약 1 시간 정도의 차이를 두고 지표에서 먼저 증가하지만 지하에서는 지표에 비해 급격하게 증가하며 이후의 변화 양상은 거의 흡사함을 알 수 있다. 이는 그림 3(b) 2 지점에서 지하가 지표로부터의 침투나 상부사면으로부터의 기여를 통해 강우 사상 후 지체시간을 가지며 느리고 완만하게 반응하는 것과는 대조적이며 그림 3 (a) 1 지점에서조차 지적하였듯이 토양수분의 수직적 분포가 반드시 연속적으로 일정하게 이루어지는 것이 아니며 대공극 흐름 내지는 우선 흐름을 통하여 주요하게 변화함을 나타내는 것이다.

그림 3(d) 3-2 지점과 3 지점에서는 강우 사상 이전의 선행 토양수분 함량이 지표보다 지하가 높았으며 강우에 의한 변화는 지표가 지하에 비해 상대적으로 큰 폭으로 증가하였다. 강우에 대한 민감성은 지표로부터 지하로 심도가 깊어질수록 둔하고 완만해져 지하 30 cm 정도에서는 지표와 약 1-2 시간 정도의 시간차를 두고 증가하지만 지하 60 cm에서는 약 6 시간 정도의 차이를 보이고 있으며 강우량이 10 mm 이내인 3번째 강우는 지하 60 cm의 토양층에 영향을 미치지 못하고 있음을 알 수 있다. 토양층의 심도가 깊어질수록 토양수분의 변화는 완만하고 안정적이며 선행토양수분량에 의존적이며 지표와는 상이한 반응 특성을 가진다. 또한 토양수분 함량에 있어 지하 30 cm와 지하 60 cm 사이의 근소한 차이에 비하여 지표 토양층이 보여주고 있는 뚜렷이 구별되는 현저한 차이는 지표와 지하 30 cm 사이에서 대공극 등을 통한 지표하 수평흐름의 발생 가능성을 시사하고 있다.

정리하면 전반적으로 상부사면 지점들은 초기 토양수분은 10-15 % 내외로 대부분 20 % 이내의 분포를 보이며 강우 사상 후 10-15 % 정도의 급격한 증가를 보이는 등 전반적으로 강우에 대하여 민감하고 급격한 반응을 보이고 있으며 급격한 감쇄와 충전효과가 함께 나타났다. 지표와 지하의 반응에 있어서는 지점별로 다양한 특성을 나타내었으며 특히 토양심도가 깊지 않아 표토층이 얇고 탄탄하지 않은 지역에서는 토양층 구조의 국지적 변화와 대공극의 발생과 변화 등이 큰 영향을 미치는 것으로 판단되는 등 공간적으로 상당한 변화성이 존재함을 알 수 있었다.

### 3.1.2 중단부 사면

그림 4는 중부 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화를 나타내고 있다. 그림 4의 (a) 4 지점의 지표에서는

강우사상에 따라 토양수분함량이 5-7 %가량 소폭으로 증가하였다가 감쇄하여 24 시간 정도 후에는 초기 토양수분과 거의 비슷한 값으로 유지된다. 또한 첫 번째 강우 후의 감쇄에서나 세 번째 강우후의 감쇄에서 보는 바와 같이 갑작스럽고 급격한 토양수분의 변동이 발생한다. (a)의 지하는 지표보다 초기 토양수분 함량이 높고 강우에 대한 반응이 지표보다 6-7 시간 정도 느리게 나타나며 증가폭도 5 % 이내로 강우 사상에 대한 토양수분의 증가와 감쇄가 모두 매우 완만하다.

그림 4-2 (b)와 (c)에서도 공통적으로 지하의 초기 토양수분이 지표의 그것보다 높고 강우에 대한 반응은 깊이에 따라 지체시간을 가지며 느리게 나타나고 변화가 완만하다. 그림 4-2의 (d) 역시 비교적 안정적인 변화를 보이고 있는데 지표의 토양수분은 지하 토양수분과 거의 비슷하거나 약간 낮게 나타나지만 강우 사상에 대한 지표의 민감한 반응으로 지표와 지하의 토양수분 함량이 전위되기도 하는 특징을 가지며 다른 중부 지점들과 비교하여 토양수분의 교란이 다소 발생하는 것을 알 수 있다.

중부 지점들의 전반적인 특징은 토양수분의 안정적인 변화라고 할 수 있다. 상부 지점들이 강우사상 전후의 토양수분 증가폭이 대부분 10-15 % 정도로 크고, 큰 폭의 증가에 이어 빠르게 감소하는 것에 비하여 중단부에서는 증가폭도 5 % 정도로 낮고, 토양수분의 증가, 감쇄가 비교적 완만하여 급격한 증가나 급격한 감쇄를 나타내지 않고 안정적이다. 이러한 현상은 초기 토양수분 값의 차이와 관련이 있는데 중부 지점들의 초기 토양수분은 15 % 이상 30 % 미만으로 대체로 상부 지점들에 비해 높은 값을 가진다. 이러한 높은 초기 토양수분 함량과 완만하고 안정적인 변화는 강우사상 이후에도 상부사면으로부터의 지속적인 유입이 이루어지고 있음을 시사하고 있다. 또한 상부에 비하여 훨씬 안정적인 토양수분의 변화 양상과 함께 공간적인 변동성도 적어 강우에 의한 토양 구조체의 변화나 국소지역의 소규모 수문 현상에 의한 토양수분의 변동성과 불확실성은 상부사면에 비해 적은 것으로 사료된다. 중단부 지점들의 전반적인 특징은 토양수분의 안정적인 변화라고 할 수 있다. 중단부가 강우사상 전후의 토양수분 증가폭이 대부분 10% 정도로 크고, 높이가 치솟다가 빠르게 감소하는 것에 비하여 중단부에서는 증가폭도 5% 정도로 낮고, 토양수분의 증가, 감쇄가 비교적 완만하여 급격한 증가나 급격한 감쇄를 나타내지 않고 안정적이다. 중단부와 비교해 볼 때 중단부 지점들은 강우 사상 전 초기 토양수분 함량이 높은 편이고 강우사상 후의 토양수분은 상, 중단부가 거의 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 이는

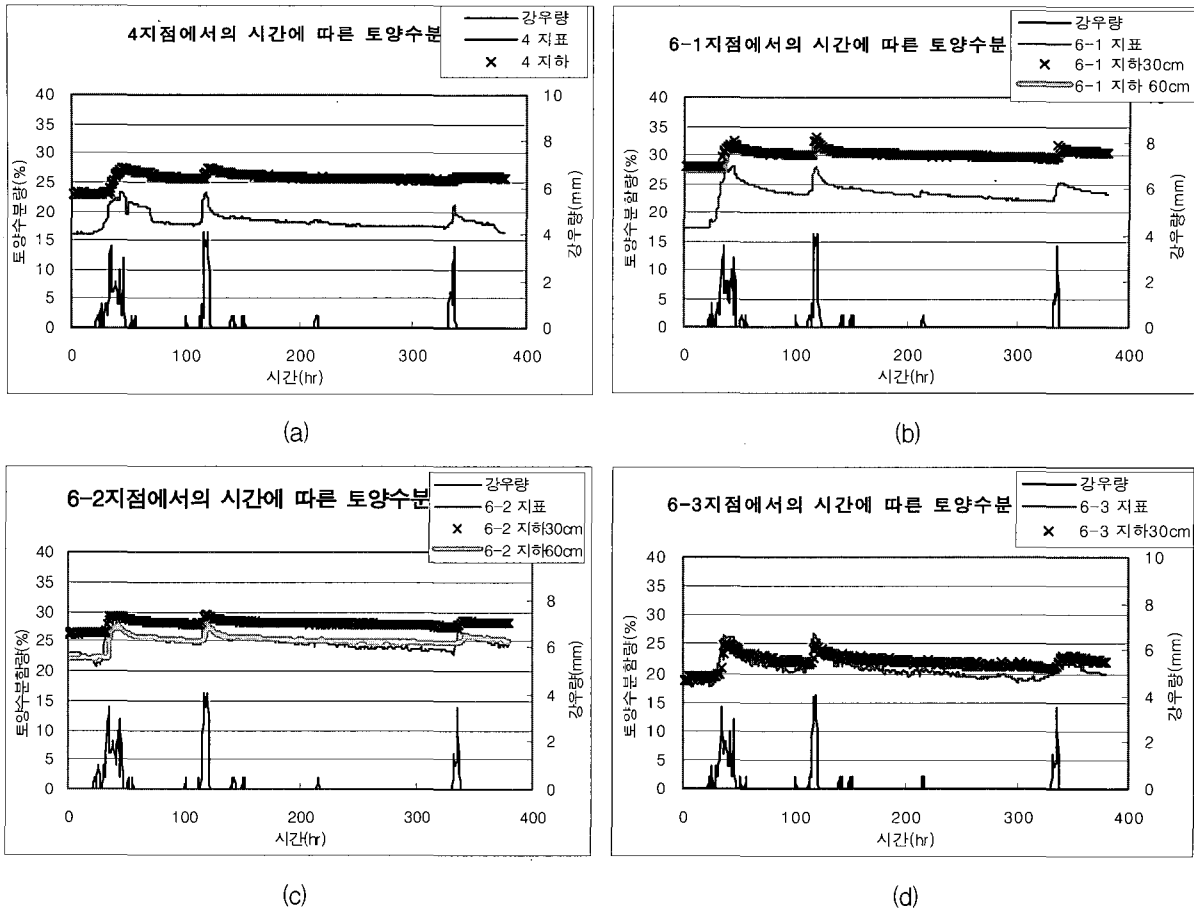


그림 4. 중단부 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화

초기 토양수분의 차이가 재충전량의 차이를 야기하는 요인으로 작용하고 있음을 나타내고 있다.

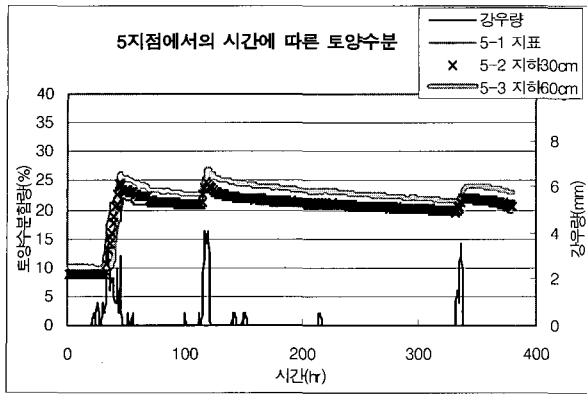
### 3.1.3 하단부사면

그림 5는 하단부사면 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화 양상을 도시한 것이다. 그림 5의 (a)는 5 지점의 지표, 지하 30 cm 및 지하 60 cm 각각의 깊이에서 토양수분의 변화를 나타내고 있는데 강우사상 이전의 초기토양수분은 약 10 % 내외로 지표에서 지하로 갈수록 1-2 % 정도 높게 나타났다. 강우사상에 의한 토양수분의 변화는 지표에서 반응하여 증가하기 시작한 후 지하 30 cm에서는 3-4 시간 지체 후, 지하 60 cm에서는 8 시간 지체 후에 증가하기 시작하였다. 이때 지표에서 강우에 의해 토양수분이 반응, 증가 시작 이후 14 시간 만에 최고치에 도달하며 지하 30 cm에서는 11 시간 만에, 지하 60 cm에서는 9 시간 만에 최고치에 도달한다. 지표에서 지하로 갈수록 증가기울기가 급해지는 것은 지하에서는 지표로부터 침투에 의한 토양수분 증가뿐만 아니라 지표하 흐름을 통한 상부사면으로부터의 기여를 함께 받기 때문에 지하로 갈수록 반응 시작은 지체시간을 가지며 지연되지만 반응시작 이후에는

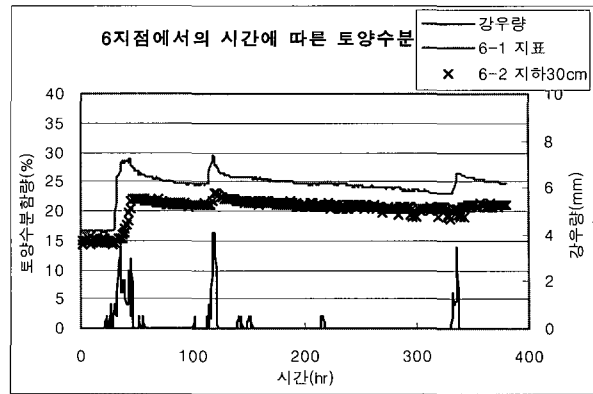
지표보다 빠르고 급격하게 증가하는 것으로 판단된다.

그림 5의 (b)는 6 지점의 토양수분의 변화를 나타내고 있는데 6 지점에서는 초기토양수분이 지하보다 지표가 더 높게 나타난다. 강우에 의한 반응은 지표에서는 다른 지점들과 비슷하게 빠르게 나타나는 반면 지하에서는 7-8 시간 지체되어 반응하며 증가도 느리고 완만하게 이루어지며 증가폭도 첫 번째 강우에 대해서는 7 % 정도, 두 번째 강우에 대해서는 1 % 정도에 그쳤으며 세 번째 강우에는 별다른 반응을 보이지 않는 것으로 나타났다. 그러나 감쇄는 매우 느리게 나타나 이 지점에서는 충전효과가 두드러짐을 알 수 있다. 이는 6 번 지하 30 cm 부분으로 지표로부터 침투되는 수분이 전달되기 전에 상당량이 대공극 흐름이나 우선흐름을 통해 빠져 나갔을 가능성을 시사하며 지표와 지하 사이에 연속적인 연결성의 존재 범위가 지점에 따라 큰 차이를 가진다는 것을 의미한다.

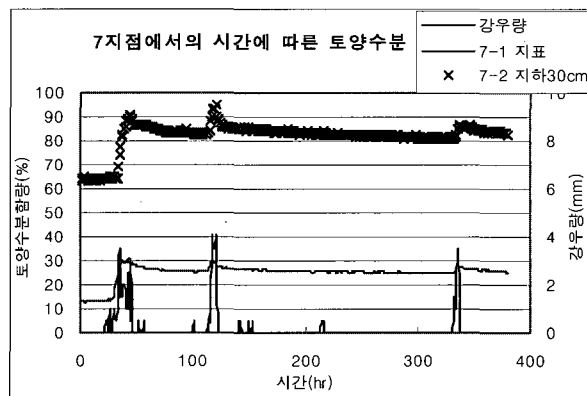
그림 5의 (c)는 측정지점 중 가장 하부에 위치한 7 지점의 시간에 따른 토양수분의 변화를 나타내고 있는데 이 지점에서는 지표의 초기 토양수분은 14 % 정도로 다른 지점들과 비슷하나, 지하 30 cm 부분 초기 토



(a)



(b)



(c)

그림 5. 하단부사면 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화

양수분이 60 %가 넘게 나타나 다른 지점과는 매우 큰 차이를 보이고 있다. 토양수분에 대한 반응은 다른 지점과 비슷하게 나타나 지표에서의 강우에 따른 토양수분 증가 이후 약 4 시간 정도 후에 지하의 토양수분이 증가함을 알 수 있다. 강우사상에 의한 토양수분 증가 폭은 지표에서 17 % 가량, 지하에서는 초기 토양수분이 60 %가 넘었음에도 불구하고 25 % 정도 증가한 것으로 나타났다. 이는 7 지점의 상부 사면으로부터의 기여가 매우 크다는 것을 나타낸다. 7 지점은 대상 사면의 유역 출구에 가깝게 위치하고 있으며 7 지점의 약간 하부에서 강우 사상 후 하나의 흐름으로 유출이 형성되어 지는 것을 확인할 수 있어 7 지점이 유출 형성 흐름선 위에 있음을 시사한다.

하부 지점들인 5, 6, 7 지점에서는 전반적으로 충전효과가 두드러짐을 확인할 수 있다. 즉, 강우 사상 직후 토양수분이 크게 증가하였다가 천천히 감소된다. 이것은 상단부 지점들에서 큰 폭으로 증가하였다가 빠르게 감소하는 것과 대비되는 특성으로 상부사면으로부터의 기여량으로 인한 충전효과로 볼 수 있다.

사면 전체의 전반적인 특성을 살펴보면 지표면과 지하 30 cm, 지하 60 cm 사이의 분포 형상은 지점에 따라 상이한 분포 특성을 보이고 있다. 몇몇 지점에서는 강우 사상에 따라 분포 상태가 일시적으로 역전되고 지하와 지표면 사이의 토양수분의 크기가 서로 교차되는 현상이 관찰된다. 그러나 시간이 경과하면서 강우 사상 이전의 토양수분의 연직 분포 상태로 안정되어 가는 모습을 보여 토양수분의 공간적 분포가 지점별로 일정한 평형 상태를 가지고 있으며 강우 사상으로 인하여 일시적으로 교란되기도 하지만 강우사상이 끝남과 함께 다시 평형상태로 회귀하려는 경향을 가지고 있다는 것을 뒷받침하며 그러한 평형 상태는 각 지점별로 고유한 특성을 나타내고 있는 것임을 확인할 수 있다. 따라서 사면에서의 토양수분 변화 특성은 공간적으로 일정하지 않으며 지점별 깊이별 평형 상태와 관련된 초기의 조건이 사면의 토양수분 변화에 중요하게 작용하고 있음을 알 수 있다. 급경사 산지 소유역의 유출 형성 과정에 대한 Montgomery와 Dietrich의 연구(2002)는 지하의 내습흐름의 시간크기가 선행토양함수



와 불포화층의 반응시간으로 설명될 수 있다는 것을 나타내는데, 이는 토양의 수분함량은 전적으로 지형에 의존하기보다는 토양층의 깊이(Pellenq 등, 2003)나 토양 내에 존재하는 대공극 흐름 혹은 모세관현상(Beven 등, 1982)에 따라서도 많은 변화를 일으킨다는 연구와 유사하다. 본 연구에서 획득된 토양수분의 시공간적 변화자료는 이와 관련된 연구 주제들이 지형의 변화와 함께 토양수분의 결정에 중요한 인자로 인식되어야 함을 보여주고 있다. 또한 사면 유출의 결정적인 변수인 토양수분의 시공간적 양상은 강우 유출 사상 이전과 이후의 상당기간 동안 역동적으로 변화하고 있으며, 이는 유출형성과정을 고려하여 설계하고자 하는 수문모형의 구조에도 포함되어야 할 것으로 판단된다. 이는 유역의 수문과정에 기여 기간과 활성기간을 구분해서 적용해야 한다는 Ambroise (2004)의 주장을 뒷받침하는 결과이다. 또한 상당한 수의 지점에서의 지표의 토양수분보다 상대적으로 민감한 지하지점에서의 강우에 대한 토양수분의 반응은 Uchida (2001) 등이 제시한 관로 흐름형태의 수문과정의 존재 가능성을 보여주고 있다.

#### 4. 결 론

본 연구는 현장에서 빠르게 측정 가능한 신뢰성 있는 토양수분 측정 장치인 TDR을 이용한 산지 소유역에서의 토양수분 집중 모니터링을 통해 산지 유역에서의 토양수분의 시공간적 분포 특성을 파악하고 강우에 따른 토양수분의 변화 거동 및 수문학적 반응을 규명, 특성화 하고자 하였다. 이를 위하여 먼저 산지 소유역을 대상사면으로 선정, 실측량을 통하여 DEM을 구축하고 이를 흐름분배알고리즘에 적용하여 획득된 결과를 통해 측정지점을 선정하여 소유역의 대표성을 최대화하고 효율을 높일 수 있는 장기 측정 체계를 구축하였다. 이러한 시스템을 통해 2003년 11월 6일부터 2003년 11월 22일까지 경기도 파주시 설마천 상류 사면인 감악산 범륜사 북측사면에서 수평적, 수직적 토양수분의 변화 특성을 실측하였다. 사면에서의 측정지점들을 위치와 특성에 따라 상, 중, 하부 사면으로 구분하여 분석하였으며 각 사면에서의 시간에 따른 토양수분의 공간적 분포 특성은 다음과 같다.

1. 사면을 기여면적의 추적을 통해 확보되는 습윤 지수의 분포에 따라 상부, 중부, 하부 사면으로 구분하고 토양수분실측체계를 구축하여 400여 시간 동안 집중적으로 운영하였다. 토양수분의 변화특성이 습윤 지수와 선형적으로 비례하는 양상을 보여 주진 않았으나, 사면별 반응 특성을 구분하기 위

해서는 습윤 지수에 의한 사면구분이 유효함을 보여준다.

2. 상부사면에서는 전반적으로 시공간적 토양수분의 분포 특성이 중부 및 하부 사면에 비하여 각 지점별로 변동성이 컸으며 특히 표토층이 얇고 토양층이 단단하지 않은 지점에서 국지적인 변화가 많이 발생하였다. 깊이에 따른 연직적인 침투양상이 연속적이지 않았으며 대공극 흐름이나 우선흐름이 토양수분의 시공간적 변화와 강우에 반응하는 거동 특성에 큰 영향을 미친다. 또한 지표보다 상대적으로 강우 사상에 민감한 반응을 보이는 지하지점의 토양수분 분포 특성은 Uchida 등(2001)이 제시한 관로 흐름형태의 수문과정의 존재 가능성을 보여주는 것이다. 또한 토양의 수분 함량이 전적으로 지형에 의존하기 보다는 토양층의 깊이, 토양내에 존재하는 대공극 흐름과 모세관 현상 등에 따라 많은 변화를 가진다는 것을 나타낸다.
3. 중부사면은 상부사면에 비하여 상대적으로 높은 초기 토양수분 함량을 가지며 강우에 대한 증가와 감쇄 역시 완만하고 안정적인 형상을 보이고 있다. 이러한 높은 초기토양수분함량과 강우에 대한 완만한 변화는 강우 후에도 상부사면으로부터의 지속적 유입이 이루어지고 있음을 시사하고 있다.
4. 하부에서는 강우에 의한 토양수분의 증가 폭이 크며 감쇄는 완만하게 나타나 상부로부터의 기여와 충전을 확인할 수 있다. 깊이에 따른 토양수분의 연직 분포와 거동은 지점에 따라 상이한 특성을 보였으며 일부 지점에서는 강우 시에 지표와 지하의 분포 상태가 일시적으로 역전되기도 하였으나 시간이 경과함에 따라 각 지점의 초기 평형 상태로 회귀하려는 경향을 보여 토양수분의 공간 분포가 지점별로 평형상태를 유지하려는 특성을 가짐을 보여주고 있다.

#### 감사의 글

본 연구는 부산대학교 교내학술 연구비(4년)과 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단의 연구비지원(과제번호 2-1-1)에 의해 수행되었습니다.

#### 참 고 문 헌

김기훈, 김상현, 김형섭, 김원 (2005). "시공간 대표성을

- 고려한 토양수분모니터링 System의 구축 및 운영.”  
**한국수자원학회논문집**, 제38권, 제1호, pp. 73-82.
- 김상현, 김경현, 정선희 (2001). “수치 고도 분석 : 분포형 흐름 분배 알고리즘.” **한국수자원학회논문집**, 제34권, 제3호, pp. 241-251.
- 한지영, 김상현, 김남원, 김현준 (2003). “유사 동력학적 습윤지수와 동력학적 습윤지수의 개발과 적용.” **한국수자원학회논문집**, 제36권, 제6호, pp. 961-969
- 한국건설기술연구원 (1998). “시험구역의 운영 및 수문 특성 조사·연구.” **연구보고서**, 건기연 98-077.
- Ambroise B. (2004). “Variable ‘active’ versus ‘contributing’ area or periods : a necessary distinction.” *Hydrological Processes*. Vol. 18, pp. 1149-1155.
- Barling, R.D., Moore, I.D., and Grayson, R.B. (1994). “A quasi-dynamic wetness index for characterizing the spatial distribution of zones of surface saturation and soil water content” *Water Resources Research*, Vol. 30, No. 4. pp. 1029-1044.
- Beven, K., and Germann, P. (1982). “Macropores and Water Flow in Soils.” *Water Resour. Res.*, Vol. 18, No. 5, pp. 1311-1325.
- Beven, K., and Kirkby. (1979). “A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology” *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, pp. 43-69.
- Beven, K., and Wood, E. (1983). “Catchment geomorphology and the dynamics of runoff contributing areas.” *J. Hydrol.*, Vol. 65, pp. 139-158.
- Montgomery, D.R., and Dietrich, W.E. (2002). “Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape.” *Water Resour. Res.*, Vol. 38, pp. 7-1-7-8.
- 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
- O’Loughlin, J.F. (1986). “Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis” *Water Resources Research*, Vol. 22, No. 5. pp. 794-804.
- Pellenq, J., Kalma, J., Boulet, G., Wooldrudge, S., Kerr, Y., and Chehbouni, A. (2003). “A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth.” *J. Hydrol.*, Vol. 276, pp. 112-127.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980). “Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines.” *Water Resour. Res.*, Vol. 16, pp. 574-582.
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P. and Planchon, O. (1991). “The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models.” *Hydrol. Process.*, Vol. 5, pp. 59-79.
- Quinn, P., and 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.
- Uchida, T., Kosugi, K., and Mzuyana, T. (2001). “Effect of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide : a review of pipeflow studies in forested headwater catchments.”, *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 2151-2174.
- Western, A.W., and Bloschl, G. (1999). “On the spatial scaling of soil moisture.” *J. Hydrol.*, Vol. 217, pp. 203-224.
- Western, A.W., Bloschl, G., and Grayson, R. (1998). “Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment.” *J. Hydrol.*, Vol. 205, pp. 20-37.
- Zhang, T., and Berndtsson, R. (1991). “Analysis of soil water dynamics in time and space by use of pattern recognition.”, *Water Resources Research*, Vol. 27, No. 7, pp. 1623-1636.

(논문번호:05-11/접수:2005.01.13/심사완료:2005.04.20)