

# 설마천 소유역 내 사면에서의 토양수분의 시계열 관측연구

## Soil Moisture Monitoring at a Hillslope located Sulmachun Watershed

주승효\*, 김상현\*\*, 곽용석\*\*\*, 이진원\*\*\*\*, 정성원\*\*\*\*\*

Seung Hyo Joo, Sang Hyun Kim, Yong Seok Gwak, Jin Won Lee, Sung Won Jung

### 요 지

유역에서의 강우사상에 따른 일련의 수문학적 과정의 규명과 수자원의 효율적 관리를 위한 토양함수량을 산정하는데 토양수분의 시공간적 분포특성을 파악하는 것은 매우 중요하다. 연구유역은 경기도 파주시 적성면 설마리의 설마천 유역 내에 위치한 소유역이다. 대상유역의 정밀측량을 하여 수치고도모형(DEM)을 획득하였다. 이 수치고도모형에 사용하여 수치지형분석을 통해 총 21지점을 선정하였다. 토양수분의 연직방향 변화를 알아보기 위해 각 지점의 10, 30, 60cm 깊이에 센서를 설치하여 토양수분을 측정하는 TDR (Time Domain Reflectometry) 방식인 MiniTRASE를 이용하여 총 50채널을 통해 매 2시간 간격으로 토양수분의 변동을 관측하였다. 토양수분의 시공간적 분포특성을 분석하기 위해 획득된 자료를 바탕으로 시계열의 공간 분석 및 통계분석을 수행하였다. 토양수분 시계열에 대한 공간분석은 토양수분의 사면에서의 공간적인 분포가 사면의 지형적인 형상에 의해서 영향을 받는다는 것을 보여주고 있다. 그리고 통계분석을 통해 평균치의 표준편차가 대상 기간 동안 일정한 것으로 나타났고, 이는 대상사면에서의 토양수분 분포 특성이 기후나 식생의 변동성에 영향을 받지 않고, 지형이나 토질 같은 정적인 인자에 주로 영향을 받는다는 가설을 뒷받침한다. 이 결과는 토양수분의 시공간적 분포양상의 파악과 국내 사면에서의 수문기작들을 규명하는데 기여를 할 것으로 판단된다.

**핵심용어** : 토양수분, DEM, TDR, 시계열분석

### 1. 서 론

토양수분과 토양수분의 공간적 시간적 특징들은 강우의 침투(Infiltration), 강우사상 후 토양수분의 재분포(Redistribution), 증발산(Evapotranspiration)과 불포화대(Vadose Zone)에서 오염물의 이송을 예측하는데 필요하다 (Zhou 등, 2001). 토양수분은 식생의 상호작용으로 인하여 토양수의 균형과 생태수문학(ecohydrology)의 가장 중요한 인자임으로 (Rodriguez-Iturbe 2000), 토양수분의 공간적인 구조와 이의 시간에 대한 변동양상은 식생의 원인과 결과를 동시에 제공하고 있으며, 이는 대기와의 상호작용으로 인하여 관련된 총체적인 물 수지와 직접적인 연관을 가지고 있다 (Porporato 와 Rodriguez-Iturbe, 2002). 유역 지형이 70% 이상 산지로 이루어져 있어서 지형의 변화가 토양수분의 공간적 분포에 상당한 영향을 줄 것으로 예상되는 국내 유역의 특성을 고려하여, 본 연구에서는 산지사면의 토양수분을 체계적으로 측정하는데 필요한 시스템의 구축을 위한 기초조사, 사전 분석 및 시스템의 설치와 운영에 대한 일련의 연구를 수행하였다. 우수한 토양수분 측정 장비인 TDR 장비 매설에 앞서 경기도 파주시 적성면 설마리의 설마천 유역내 감악산 범륜사 우측 산지 사면을 측정대상 사면으로 선정하였다. 관측된 토양수분의 시계열 자료는 토양수분의 대상사면의 시공간적 분포를 보여줌과 동시에, 국내 사면에서의 다양한 사면 유출 기작을 보여주고 있다.

## 2. 연구 대상사면과 토양수분 측정장비

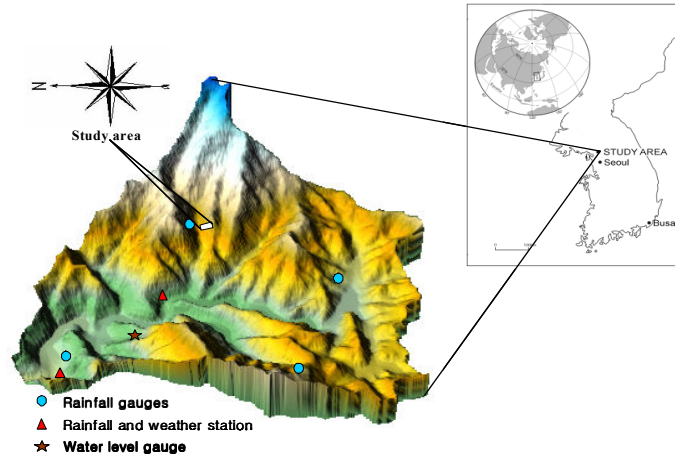


그림 1. 설마천내의 대상사면의 선택과 위치

본 연구의 대상사면은 경기도 과주시 적성면 마지리와 설마리에 위치한 설마천 유역에 위치해 있으며, 산지 소유역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료에 대한 지속적 관측과 자료 축정을 위해 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있다. 유역면적 8.50 km<sup>2</sup>, 유로 연장 5.80 km, 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. 설마천 시험유역에는 6개 우량관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 운영되고 있다. 일상적인 관측 기기의 유지관리와 수문기상관측 및 관측자료의 검토 등 일련의 수문기상관측 및 관측 자료의 검토 등 일련의 수문관측 및 자료처리 과정을 통해 양질의 우량과 유량, 수질, 기상 자료 등을 10분 단위로 생성하고 있다(한국건설기술연구원, 2004, 2005, 2006). 그림 1은 대상유역과 토양수분 측정사면의 지정학적인 위치를 보여주고 있다. 대상유역의 위도와 경도는 각각 37°55'67" 와 126°57'25" 이다. 그림 1에서 나타난 대상사면은 침엽수림과 활엽수림의 혼합으로 구성되어 있으며, 대상사면 전체에 걸쳐 상당한 대 공극 구조가 발달되어 있음을 육안으로 확인할 수 있다. 지질학적으로는 화강암 구조의 기반암위에 편마암 목합체로 구성되어 있으며, 절리나 파쇄대가 발달되어 있으나 그 크기는 미소하고, 이들의 연결성 또한 무시할 수 있을 정도로 작다. 대상지역의 주요 토양들은 FAO 분류기준에 따르면 Leptosols로 구성되어 있는 광물성 토양이다. 대상 사면의 토심의 깊이는 약 40-120cm의 분포를 보이며, 급격한 경사와 낮은 함수능을 보이는 특성을 가지고 있다.

본 연구에 사용된 토양수분 장치는 Time Domain Reflectometry(TDR)로서 파형발생기(pulse generator)에서 발생된 구형(square wave) 전기신호가 전송선(transmission line, cable)을 통하여 흐르게 되는데 이 신호가 전송선을 통하여 흐르는 중 전송선의 단면이 변하면 그 지점의 임피던스(impedance)가 변하게 되어 그 구간에서 전기신호가 반향 되어 오게 된다. 이러한 원리는 길이 ( $L$ )를 알고 있는 탐침을 땅속에 묻고 그때 전기신호가 지나가는 지점의 유전상수(dielectric constant)가 변하면 반향 되는 파의 전파속도가 변하는 성질을 이용하면 토양의 함수량 측정에 응용할 수 있다. 탐침을 둘러싼 토양의 유전상수는 신호의 전파속도( $v=2L/t$ )의 함수로써 유전

상수와 탐침의 길이, 반향시간의 관계는 다음과 같이 표현된다(Topp 등 1980, 2003).

$$K_a = \left(\frac{c}{v}\right)^2 = \left(\frac{ct}{2L}\right)^2 \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 진공상태에서 빛의 속도(진가기 신호의 전파속도, 약  $3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ )이며  $t$ 는 신호가 토양 속에 묻힌 탐침의 길이만큼을 되돌아오는 반향시간이며  $L$ 은 탐침의 길이이다. 반향시간은 반향파형으로 구할 수 있는데, 두 반향점  $x_1$ , 신호가 탐침으로 들어갈 때 거리,  $x_2$ , 탐침 끝에서의 신호의 반향 거리, 사이의 거리와 유전 상수와의 관계는 다음과 같다.

$$K_a = \left(\frac{x_2 - x_1}{V_p L}\right)^2 \quad (2)$$

여기서  $V_p$ 는 사용자 지정 상대적 신호의 속도이며 대개  $V_p=0.99$ 로 둔다. 액체 상태의 물의 유전 상수는 토양 속 무기물의 유전상수나 공기의 유전상수, 냉동수의 유전상수에 비해 훨씬 크기 때문에 토양의 유전상수는 액체 상태의 물에 의해 지배를 받게 된다. 이러한 유전 상수의 큰 차이 때문에 TDR을 이용한 토양수분 측정 방법은 토양 성분이나 구조에 덜 민감하게 되며 따라서 토양의 액체 상태 수분 측정에 매우 효과적인 방법이 될 수 있다.

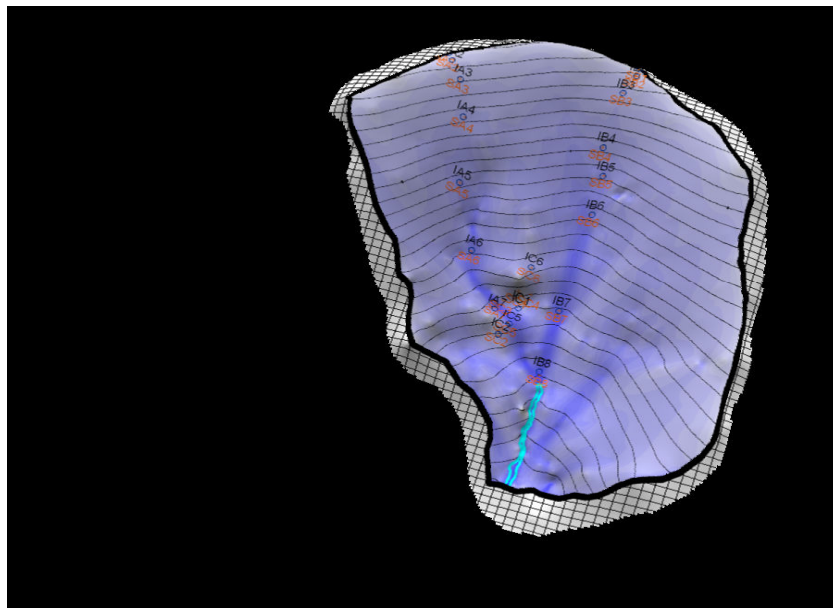


그림 2. 대상사면의 탐침망 설계 및 설치 위치의 공간분포

### 3. 토양수분 측정시스템의 설치와 자료획득

본 연구에서는 토양수분의 공간적 분포를 흐름 분배 알고리즘의 계산결과를 고려하고 사면의 Transact 선상에 위치하는 접근방법을 조합한 토양수분 측정망을 고려하였다. 이와 같은 접근은

토양수분의 지형과 사면유출의 기작을 동시에 고려하는 방법이다. 수치지형분석과 Transact Line 을 조합한 센서위치는 Line A, Line B, 그리고 Line C상의 다수의 지점들로 나타난다(그림 2). 그림 2에 표현된 위치들에 각각 지표면으로부터 깊이에 따라 10cm, 30cm 및 60cm에 탐침을 수평방향으로 설치하였으며, 유역의 중간지점에 다중 동축 시스템인 MiniTrase 본체를 설치하였다.

2007년 6월부터 2007년 12월 10일까지 설마천 토양수분측정 현장을 약 15일에 1회씩 방문하여 자료를 회수하고, 기기 시스템의 관리를 수행하였으며, 이 기간 중 리드선의 교체나, 들짐승에 의해 훼손된 일부 Waveguide의 교체 혹은 문제발생 지점의 센서의 재 매설 혹은 교체 등의 지속적인 관리 작업을 수행하였다. 전체적으로 98% 이상의 양질 토양수분 자료를 획득하였으며, 추후에도 안정적인 자료를 생산할 기반을 구축하였다.

그림 3(a)는 설마천 범륜사 사면의 Transact line A상의 (그림 2 Line A) A1지점의 2007년 6월에서 12월까지의 토양수분 변동을 강우량과 함께 도식한 것이다. 그림에서 보이듯이 강우사상에 따른 증가와 감소가 일정하게 발생하는 것을 관찰할 수 있다. 이는 최상단부의 토양수분이 다른 지점의 영향을 받지 않고, 강우사상의 연직 침투과 증발산 그리고 하경사 방향으로의 횡단흐름에 의해 결정되기 때문이다. 그림 3(a)에서 A1-10은 10 cm 깊이에 매설된 토양수분을 의미하는데, 8월 초까지의 아주 작은 값의 토양수분 관측치가 A1-30인 30 cm 토양수분과 유사한 값으로 전환된 것을 확인할 수 있다. 이는 8월 이전의 A1-10의 자료를 고찰한 결과, Waveguide의 접합점이 사면 최상단부의 공극이 큰 토양지점에 삽입되었다고 판단하여, 매설지점을 동일한 깊이의 인접지점으로 이동한 결과이다. 전체적으로 증가와 감소 패턴이 단순하며, 최대값과 최소값이 일정한 수준에서 유지되는 반응을 보인다.

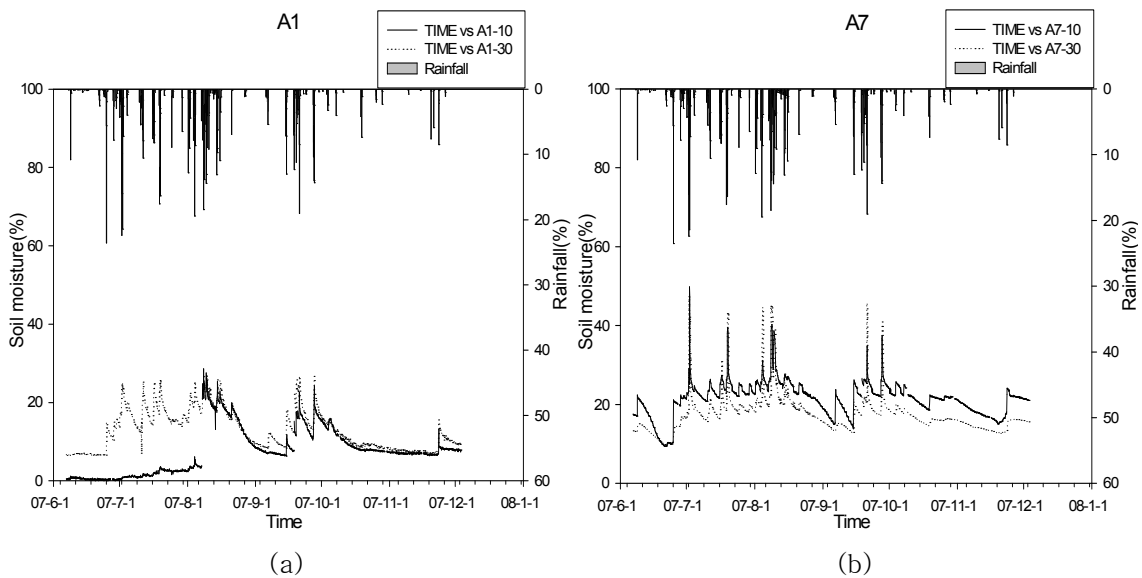


그림 3. A1지점의 토양수분 시계열과 강우사상(2007)

그림 3(b)는 A7 지점에서의 토양수분과 강우의 시계열을 보여준다. A6지점과 비교해서 강우사상에 대해서 더 높은 최고치를 보여주는 반면에 최소치는 상대적으로 낮은 값을 보여준다. 특히 여름철 집중강우에는 50 %에 근접하는 토양수분 포화치를 보여주고 있어서, A7 지점에서의 포화초과 유출의 가능성을 보여준다. 강우후의 감쇄곡선의 기울기가 급경사를 보이는 특이한 반응을 하는 A7지점의 토양수분은 강우사상이후의 유출기작 규명이 중요한 역할을 할 토양수분 변화 자료로

판단된다.

#### 4. 결 론

토양수분 조사량 연구를 약 7개월 정도의 운영기간을 통하여 수행하였으며, 설마천 범륜사 우측사면에 대한, 토양수분 시계열자료를 확보하였다. 확보된 시계열자료의 통계분석과 도식 분석을 통하여 토양수분의 시공간적 분포양상에 대한 해석을 수행하였다. 설치된 측정 시스템으로부터 6월부터 12월초까지의 안정적인 운영을 통해 토양수분의 시공간적인 분포를 시계열 형태로 도출하였으며, 도식을 통해 토양수분의 증가와 감소, 지표면 유출의 발생과 지표하 흐름의 존재양상 및 침식과 대 공극 및 관로 흐름의 존재를 제시해 주는 자료를 확보하였다. 토양수분 시계열에 대한 분석은 토양수분의 사면에서의 공간적인 분포가 지형적인 요소에 의해서 영향을 받는다는 것을 보여주고 있으며, 구현된 시스템은 이와 같은 변동성을 잘 표현하고 있다. 또한 이와 같은 자료는 계절별 구역의 거동특성, 물 보유분포, 연직흐름, 횡 방향흐름, 포화초과유출기작과 토양층과 기반암의 경계면 흐름 등의 기작을 보여주고 있다.

#### 감 사 의 글

본연구는 유량조사단의 토양수분량 조사연구의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원(2004, 2005, 2006), 시험구역의 운영과 수문특성의 조사연구
2. Porporato A, Rodriguez-Iturbe(2002). I. Ecohydrology-a challenging multidisciplinary research perspective. *Hydro. Sci. J.* 47(5), 811-821
3. Rodriguez-Iturbe(2000). I. Ecohydrology: a hydrologic perspective of climate-soil vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 36(1), 3-9.
4. Topp GC, Davis JL, Annan AP(1980). Electromagnetic determination of soil water content:measurements in coaxial transmission lines. *Water Resour. Res.*, vol. 16, pp. 574-582.
5. Topp, G.C(2003). State of the art of measuring soil water content. *Hydrol. Processes* 17, 2993-2996.
6. Zhou, Shimada and Sato(2001). Three-dimensional spatial and temporal monitoring of soil water content using electrical resistivity tomography. *Water Resources Research.*, 37(2), 273-285