

시공간 대표성을 고려한 토양수분 모니터링 system의 구축 및 운영

Establishment and Operation of a Soil Moisture Monitoring System Considering Temporal and Spatial Features of Representation

김기훈* / 김상현** / 김형섭*** / 김원***

Kim, Ki Hoon / Kim, Sang Hyun / Kim, Hyung Sub / Kim, Won

Abstract

A soil moisture measuring method of a 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 distribution pattern of the measurement sensors was determined to maximize representative features of spatial variation of soil moisture. Inverse surveying provides appropriate information to install the waveguides in the field. Measurements were performed at the right side hillslope of Bumrunsa located at the Sulmachun watershed. A multiplex monitoring system has been established and spatial-temporal variation of soil moisture data has been measured for a rainfall-runoff event. Acquired soil moisture data show that physical hydrologic interpretations as well as the effectiveness of monitoring system. Lack of connectivity in vertical distribution of soil moisture suggests that preferential flow and macropore flux are important components in the hillslope hydrology.

Keywords : Soil moisture, Measurement system, Flow Distribution Algorithm

요 지

국내산지사면의 토양수분 시공간적 분포상황을 파악하기 위한 토양수분 측정법을 개발하였다. 대상유역을 정밀 측량하여 수치고도모형을 구성한 다음 흐름분배 알고리즘을 적용하였고 역측량을 통한 대상 유역의 흐름분배 알고리즘의 유의성을 판단하였다. 이를 통한 공간적 변화의 대표성을 최대화하기 위한 장기 모니터링 시스템을 구축하였으며, 토양수분의 정확한 측정을 위해 TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용하였다. 측정은 설마천 유역의 범륜사 우측사면에서 수행되었다. 강우사상에 의한 시공간적 토양수분의 변화 자료를 성공적으로 획득하였다. 획득된 토양수분자료는 측정시스템의 효용성과 사면유출의 과정에 대한 물리적인 과정을 나타낸다. 불연속적인 토양수분의 연직분포 양상은 사면 수문과정에서 선행흐름이나 대공극 흐름의 중요성을 의미한다.

핵심용어 : 토양수분, 수치고도모형, 흐름분배 알고리즘, 역측량, 모니터링 시스템, TDR

* 부산대학교 환경공학과 석사과정

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

** 교신저자, 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수

Associate Professor, Dept. Environ. Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea

(e-mail: kimsangh@pusan.ac.kr)

*** 수석연구원, 한국건설기술연구원

Research Fellow, KICT, Koyang, Kyungido, 411-712, Korea

1. 서론

기반암위에 존재하는 지표층에서의 토양수분의 정확한 산정은 수자원의 효율적 관리에 가장 필수적인 요소이고, 대기층에서의 잠열순환 등 지구표면에서의 가용에너지 등 기상학적 연구의 중요한 변수이면서 침투와 유출의 구분에 있어서도 결정적인 역할을 하는 중요한 수문학적인 요소이다. 보다 구체적으로는, 강우 등으로 인한 지면과 지표하층에서 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정과 증발산 등은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 되며, 시공간적으로 변화하는 토양수분의 분포양상의 파악은 상당히 중요한 의미를 지니게 된다(Western 등, 1998).

토양수분 측정을 위한 상당히 많은 방법들이 제시되고 있지만, 그 중에서 가장 신뢰성 높은 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 수분함량을 추정하는 방법이다. 이 방법을 활용하면 원하는 구역에 여러 개의 탐침을 설치함으로써 동일한 시간에 많은 지점의 토양수분 값을 동시다발적으로 측정할 수 있다. 따라서, 상부에서 대상 유역으로 흐름의 유입경로가 없는 독립적인 사면에서 TDR에 의한 토양수분변화 양상의 측정이 행해진다면 여기서 얻어진 결과를 통해 국내유역의 산지사면에서 강우사상에 따라 달라지는 유출의 특성을 가늠할 수 있는 효과적인 현장측정이 예상된다. 또한 장기 모니터링 시스템의 운영을 통해 강우사상에 의한 토양수분의 변화뿐만 아니라 유출형성과정 그리고 계절별 토양수분 변화의 대표적인 기작을 파악할 수 있다. 그러나 한정된 수의 센서를 대상유역에 설치하는 위치를 결정하는 문제는 성공적인 토양수분 측정시스템을 구축하는 기반기술과 연계되어 있다. 따라서, 본 연구에서는 흐름분배 알고리즘을 연구대상 지역에 적용하여 모니터링 시스템 설치에 활용하였으며, 대상유역에 대해 실측량과 역측량을 실시하여 구축된 1 m 해상도의 수치고도모형(Digital Elevation Model)을 구축하고 이를 센서 위치 의사결정과정과 연계함으로써 산지사면에서 시공간적인 대표성을 지니는 토양수분 측정시스템을 설치하고자 하였다. 또한, 강우사상에 의한 토양수분의 변화와 유출형성, 지체기간 등을 관찰하고자 하였다.

2. 연구 대상유역

본 연구의 대상유역으로는 95년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영하고 있는 임진강 하구에서 약 46km 상류의 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역내에 소규모 대상유역을 새로이 선정했다(한국건설기술연구원, 2003). 설마천 시험유역의 위치는 동경 126°55'54" ~ 126°54'57" 북위 37°54'57" ~ 37°56'23" 이고, 유역면적 8.5km², 유로연장 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 구성되어 표토는 얇은 편으로 함양능력이 대단히 낮고 산지사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우시 토석류를 유발한다. 관측소는 우량관측소 5개(유역밀도 1.7km² / 개소, 전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산) 수위관측소 2개(전적비교, 사방댐)와 기상관측소 1개(비룡포대)이며 10분마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 2003). 그림 1은 설마천 유역내에 범륜사 부근에 새로이 선정된 대상사면의 등고선 지도로서 이 소유역은 상부로부터의 유입이 불가능한 독립적인 사면이며 주변에 우량관측소(범륜사)가 있어 정확한 강수량 산정이 가능하다.

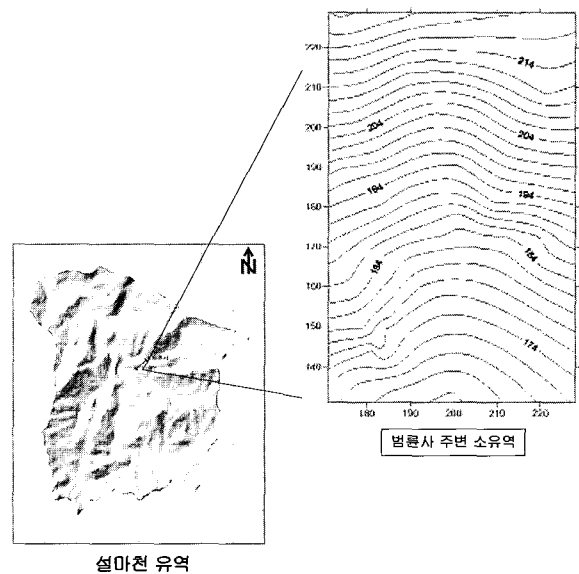


그림 1. 범륜사 부근 대상사면의 정밀 DEM

3. 방법론

본 연구에서는 대상사면에 대한 토양수분 측정지점의 결정을 위하여 먼저 연구 대상지역의 정밀한 측량을 통하여 얻어진 DEM(그림 1)을 이용, 흐름분배알고리즘을 통해 도출된 우선흐름 경로를 파악하였다. 그리고 역측량을 통하여 그 흐름 경로에 탐침을 설치하였다. 즉, TDR 탐침의 매설지점 측량을 통해 구축된 DEM을 기반으로 흐름분배알고리즘을 적용시켜 도출된 주된 흐름 경로에 배치하여 토양수분 관측의 실효성을 제고하였다.

3.1 측정대상사면의 측량 및 역측량

연구 대상사면의 정밀한 DEM(1m×1m) 구축을 위해 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용해 직접측량을 실시하였다. 대상사면의 상부지점에서는 10m 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) 약 32개의 지점에 걸쳐서 측량을 실시하였다. 측량에서 얻어진 각도(수평각, 수직각)와 거리의 각좌표계를 x, y, z 데카르트 좌표계로 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 역측량을 통해 토양수분의 측정지점을 선정했다. TRANSIT (DT-208P, TOPCON)과 줄자를 이용하여 수평각과 수직각, 거리를 측정하였다.

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, top1 ~ 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). DEM의 좌표값은 측량 당시 편의상 대상구역의 중앙지점을 (200, 200)으로 선정하였고 고도 또한 그 지점을 200으로 가정하고 처리하였다. 그림 2와 그림 3은 측량을 통한 DEM 구축알고리즘과 계산결과를 사용하여 역측량을 통한 측정지점 결정 알고리즘의 순서도를 도시하고 있다.

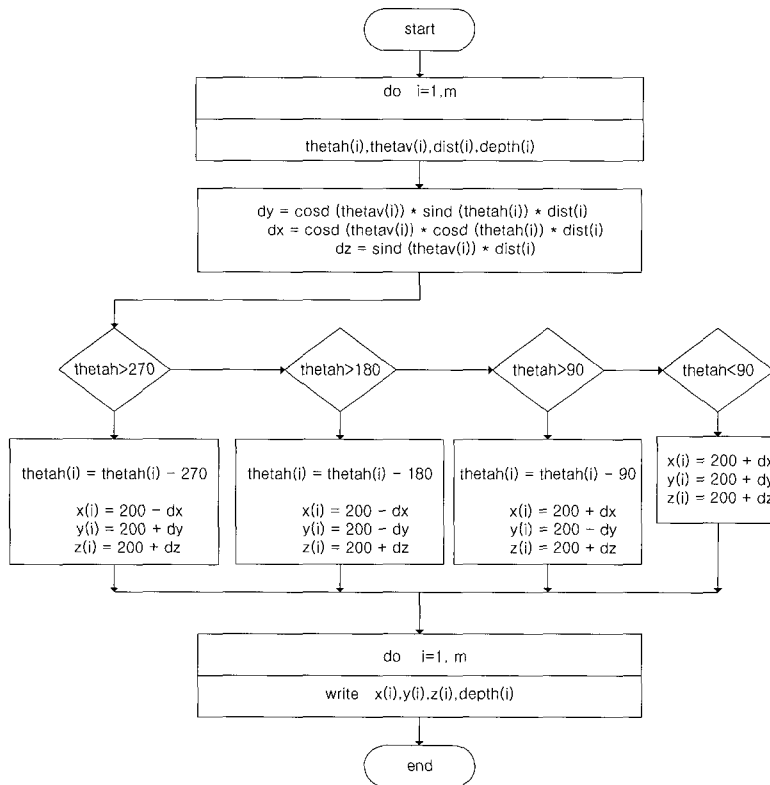


그림 2. DEM 구축 알고리즘

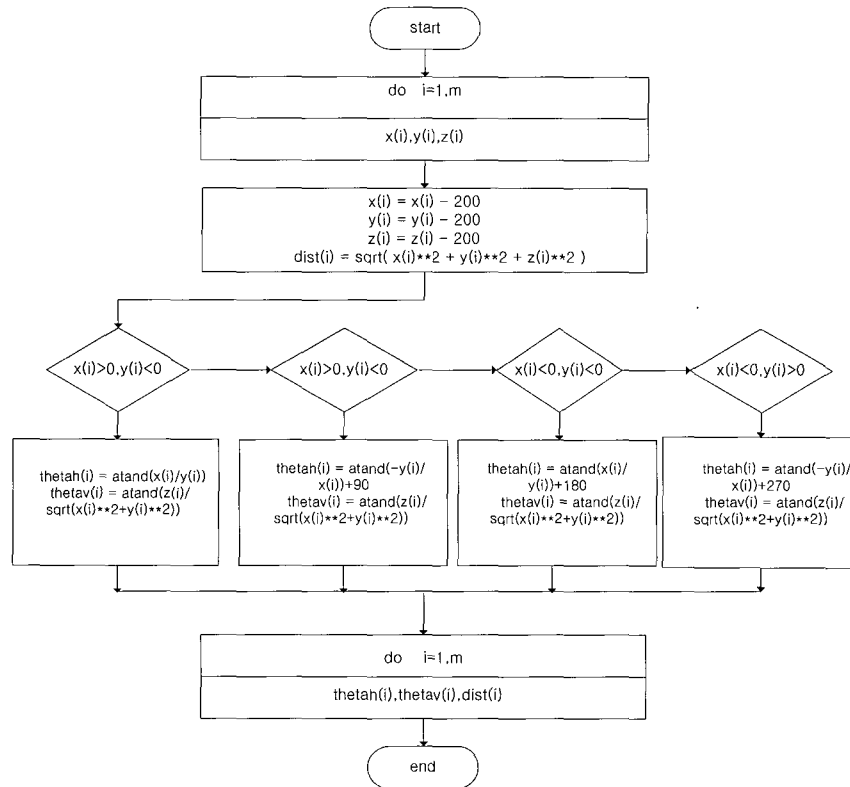


그림 3. 역측량을 위한 각 좌표변환 알고리즘

3.2 흐름분배 알고리즘(Flow Distribution Algorithm)

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 4와 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).

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

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 흐름폭에 해당한다.

그림 5는 위의 흐름분배 알고리즘(SFD, MFD)을 연구대상 유역에 적용하여 도출된 결과이다. 대상유역의 토양수분의 흐름이 중앙으로 집중되어 편재됨을 알 수 있다.

3.3 TDR의 원리

본 연구에서는 토양수분의 연속적인 측정을 위하여 TDR장비인 SOILMOISTURE 사의 MINI-TRASE를 사용하였다. 전송선을 따라 이동하는 에너지의 전자기적 펄스의 속도는 접촉되어 있거나 전송선을 감싸고 있는 매질의 유전상수(K_d)에 의존하게 된다. 일반적으로 토양은 공기, 미네랄과 유기물 입자, 그리고 물로 구성되어지는데 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(waveguide) 내부를 따라 흐르는 에너지의 마이크로파 펄스의 이동

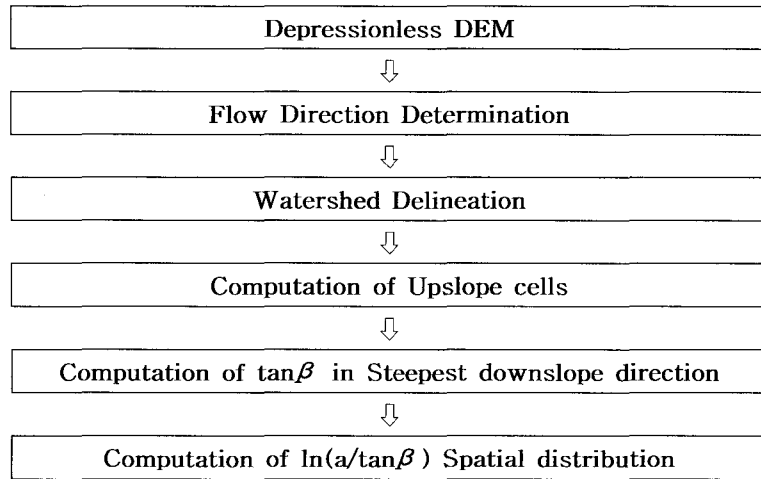


그림 4. SFD 알고리즘을 이용한 지형지수 산정절차

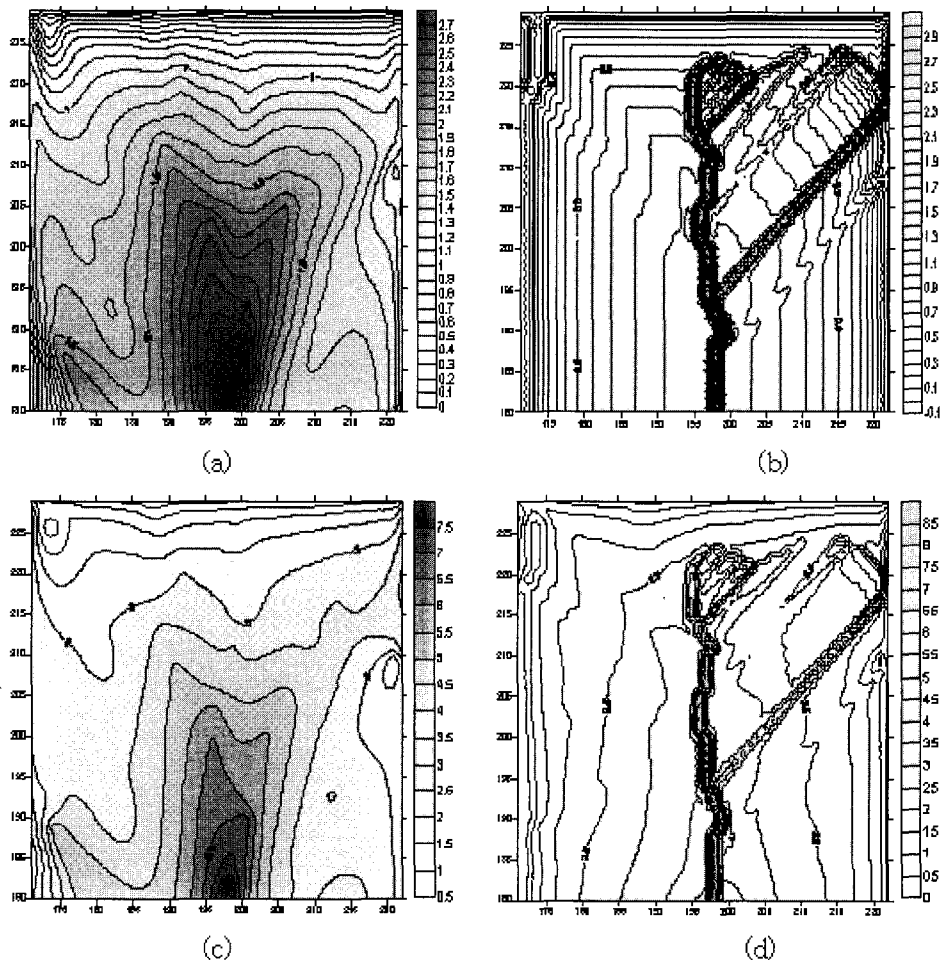


그림 5. 모의된 토양수분

- (a) 다방향흐름알고리즘(습윤지수) (b) 단방향흐름알고리즘(습윤지수)
 (c) 다방향흐름알고리즘(상부사면기여면적) (d) 단방향흐름알고리즘(상부사면기여면적)

속도는 토양 내의 수분에 크게 의존하게 된다. 마이크로파의 펄스가 전송선을 따라 전달되어 질 때, 전송선

과 주변의 물체간의 불연속성의 존재는 마이크로파의 전송선을 따른 방향을 야기한다. 펄스가 전송선의 끝부

분에 도착했을 때, 펄스내에 남아있는 모든 에너지는 전송선을 따라 반사되게 된다. 이러한 특징은 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 외전상의 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(snsseconds. ns), 그리고 c 는 빛의 속도이다(cm/ns). 전송시간은 펄스가 waveguide의 시작서부터 끝부분까지 일방으로 이동하는데 소요되는 시간이다. 이렇게 측정된 K_a 를 기본으로 하여 토양수분이 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 용적수분에 따라 달라지며, 대개 토양의 종류에 크게 의존한다. 탐침의 종류는 6005L 이고 20 cm의 길이 가진 Waveguide와 Cable로 구성되어 있다.

3.4 TDR 모니터링 시스템의 설치

본 연구에서 설치하고자 하는 토양수분의 장기 모니

	x(m)	y(m)	z(m)	wave guide의 깊이별 위치
1	197.534	210.19	206.9428	지표, 지하 30cm
2	196.55	200.2929	200.053	지표, 지하 25cm
3	199.5	190.39	193.838	지표, 지하 30cm
4	199.5	180.49	187.8978	지표, 지하 40cm
5	202.44	170.59	182.3309	지표, 지하 45, 지하 90cm
6	200.48	160.69	177.44	지표, 지하 30cm
7	200.48	150.7979	173.114	지표, 지하 35cm
3-1	204.039	197.3690	199.3808	지표, 지하 60, 지하 90cm
3-2	205.8158	204.8731	205.024	지표, 지하 40, 지하 80cm
6-1	196.3314	183.1461	189.8763	지표, 지하 45, 지하 90cm
6-2	198.1229	178.9263	186.6818	지표, 지하 30, 지하 65cm
6-3	198.7020	167.6832	180.5126	지표, 지하 70cm
6-4	198.1025	193.0543	194.8887	지표, 지하 50cm

	수평각(°)	수직각(°)	거리(m)
station 설치 지점	171.9792	-28.65147	17.79

	x(m)	y(m)	z(m)
station 설치 지점	202.1783	184.5411	191.47

터링 시스템 구축을 위하여 연구 대상지역의 측량과 더불어 역측량, 그리고 흐름분배 알고리즘을 통하여 TDR의 탐침 설치 위치를 선정하였다(그림 6). 선정된 위치의 토양층 깊이에 따라 탐침을 연직으로 설치하였으며, 지표면의 토양수분은 표면에서 10cm 정도의 깊이에 탐침의 중심이 위치하도록 설치하였다. 그리고 장기 모니터링 계획으로 인해 야기되는 문제점인 비, 바람, 이슬, 야생동물로 인한 피해를 방지하고자 대상지역의 중심지에 텐트를 이용하여 모니터링 스테이션을 구축하였다. 그리고 TDR wave guide의 길이를 고려하여 주변 식생을 손상시키지 않는 평탄한 지형에 설치하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 측정 결과

4.1.1 대상구역 상부사면

그림 7은 측량을 통해 상부사면의 토양수분 측정 결과를 나타낸 것이다. 관측은 10월 19일부터 22일까지 실시하였는데 그림과 같이 초기 강우에서는 토양수분의 별다른 변화를 볼 수가 없다. 이는 실험기간 전의 선행강우도 아주 미비했으며, 일반적인 가을기후의 영향으로 초기 토양수분의 상태가 상대적으로 건조했기 때문이다.

그림 7(a) 와 그림 7(b)는 상부사면의 두 지점에서는 강우사상에 의한 토양수분의 변화가 지하 30 cm 지점까지는 영향을 미치지 못하는 것을 보여주고 있으며, 지점에 따라 수렴하는 토양수분의 정상상태도 지표면과 지표하 30 cm의 양상이 반대로 나타남을 관찰할 수 있다.

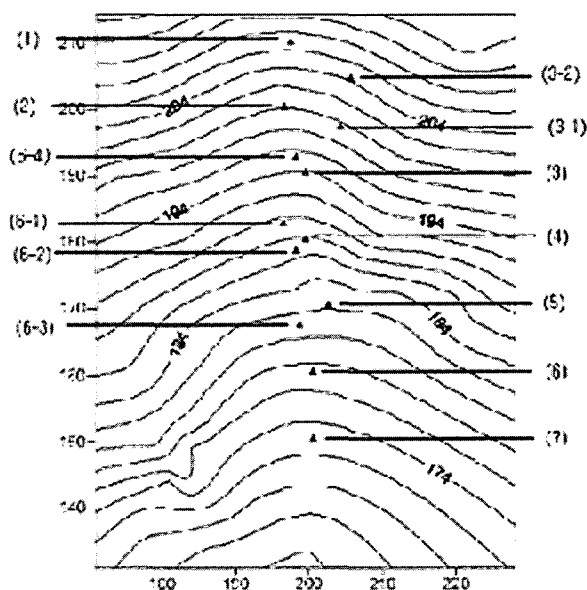


그림 6. TDR 탐침 설치 지점과 스테이션 설치 지점

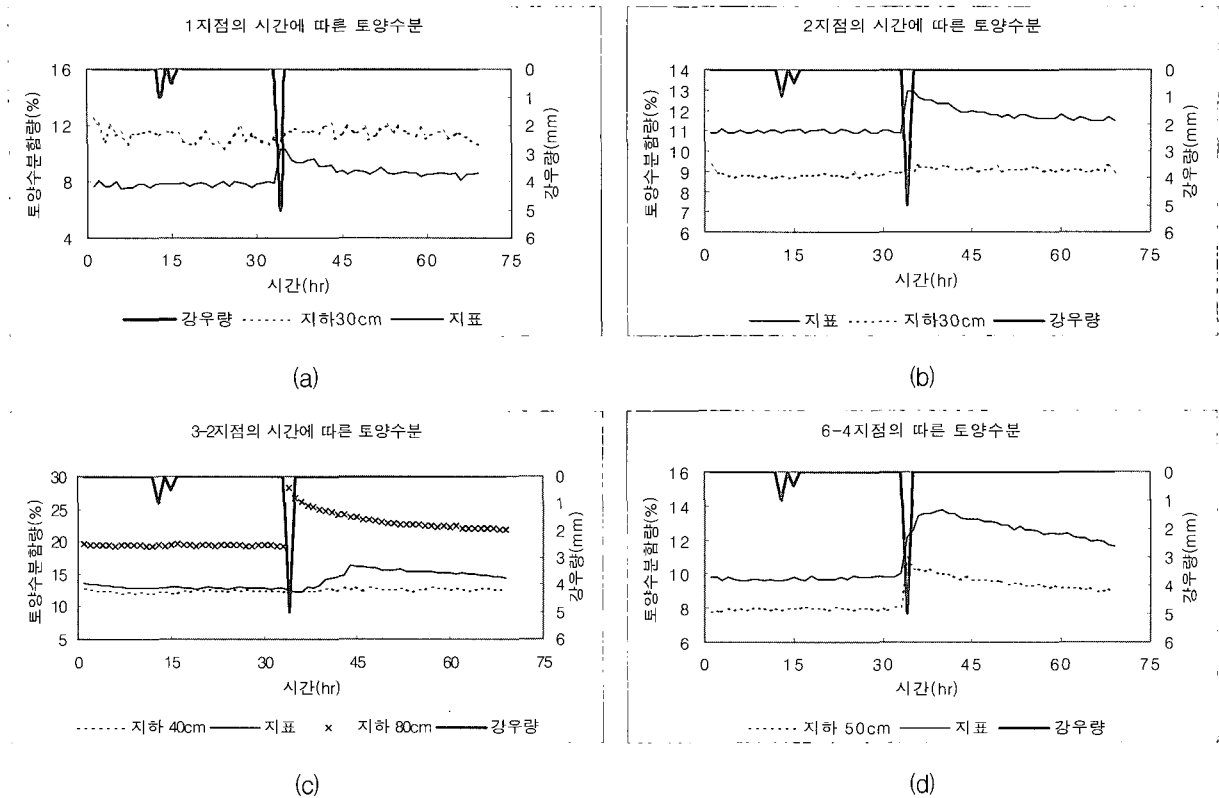


그림 7. 상부사면 토양수분의 변화

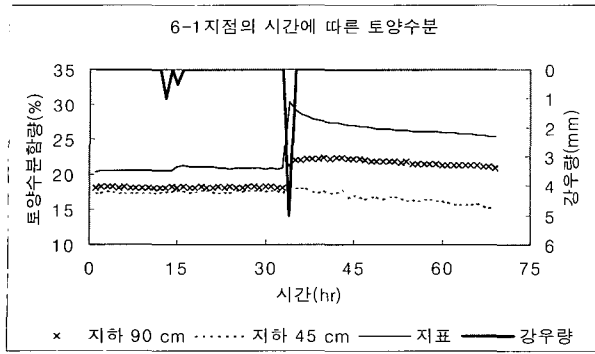
이는 지표부터 지하로 나타나는 전형적인 토양수분의 수직적 변화양상이 산지사면의 상부사면에서도 공간적으로 상당한 변화성이 존재함을 의미한다. 그림 7(c), 7(d)는 그림 7(a), 7(b) 경우 보다 깊은 토양층을 형성하고 있는 지점에서의 토양수분의 변화 양상을 보여주고 있다. 그림 7(c)와 그림 7(d) 모두 지표면의 토양수분의 강우사상에 대한 변화를 보여주고 있으나 그림 7(c) 40 cm 지하의 경우 토양수분이 거의 변화하지 않고 지하 80 cm의 경우나 그림 7(d)의 50 cm 지하의 경우는 지표면의 토양수분 보다 강우사상에 민감한 반응을 보여주고 있다. 이와 같은 산지사면 중 상부사면의 토양수분의 깊이별 변화양상들은 강우사상에 대한 토양층의 연직적인 침투 양상이 연속적이지 않으며, 대공극 흐름(macropore flux)이나 선행흐름(preferential flux)이 토양수분의 변화에 중요한 역할을 하고 있다는 것을 나타내고 있다. 또한, 상부사면에서도 기반암층에 가까운 보다 깊은 토양층에서 토양수분의 급격한 변화는 유출형성과과정에서 토양층의 기저부분이 중요한 역할을 한다는 것을 암시한다.

4.1.2 대상유역 중부사면

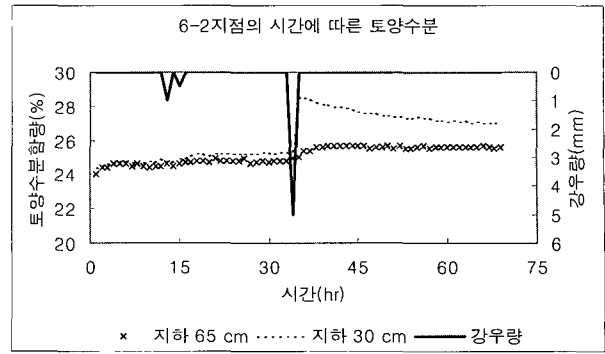
대상유역 중부사면인 그림 8(a)는 지표면에서는 토양수분의 급격한 증가와 지하 45 cm에서의 무 변화양상, 그리고 지하 90 cm 지점의 강우사상에 대한 반응을 관찰할 수 있다. 특히 지하 90 cm에서는 완만한 증가를 관찰

할 수 있다. 그림 8(b) 지하 30 cm지점에서의 민감한 반응과 지하 65 cm지점의 완화된 반응을 볼 수 있고, 그림 8(c)를 통해서도 지표면의 민감한 반응과 지하 45 cm지점의 다소 완화된 변화 양상을 관찰할 수 있다. 이는 상부사면과 유사한 변화 양상의 불균일성을 나타내는 동시에 지하면의 토양수분 감쇄곡선이 상부사면과 다르게 보다 완만히 감소하거나 일정량을 유지하는 특성을 보여주고 있다. 상부사면으로부터 지속적인 토양수분의 유입이 유출 사상 이후에도 지속되고 있다는 점을 시사한다.

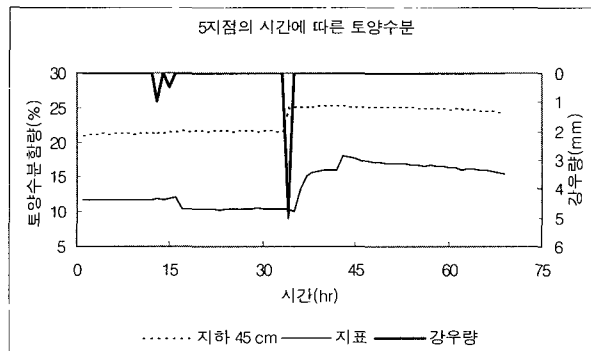
그림 8(c)인 5지점의 경우 소규모 강우사상 이후 토양수분의 일시적인 낙차를 관찰할 수 있다. 강우사상 이후 토양수분의 크기는 작지만 급격한 감소는 이 부분의 토양층 구조의 변화로서 설명될 수 있다. 이는 지표면에 가까운 토양층에서 대공극의 발달이나 토양구조체의 소규모 변형 같은 현상이 소규모 강우 사상이 끝난 이후에도 계속되거나 혹은 시발 될 수 있다는 점을 시사한다. 유사한 형태의 급격한 토양수분의 증가(44 hr)는 토양구조체의 부분적인 변화 같은 유역의 수문 반응이 강우사상 이후의 상당 시점에도 발생할 수 있다는 점을 시사한다. 전체적으로는, 중부사면의 경우 지표면과 지하 토양수분 감쇄곡선의 정도가 현격한 차이를 보이고 있으며 토양수분자료의 교란정도도 상부사면과 비교하여 완화된 특성을 보이고 있다.



(a)



(b)



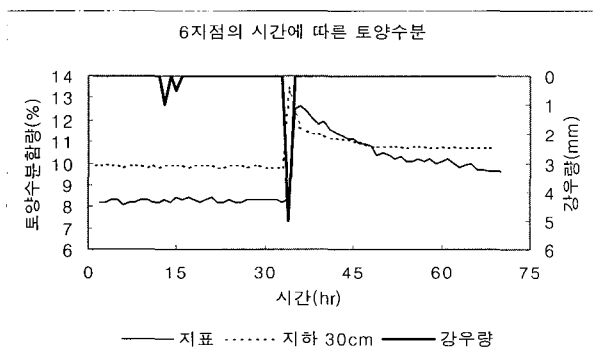
(c)

그림 8. 중부사면 토양수분의 변화

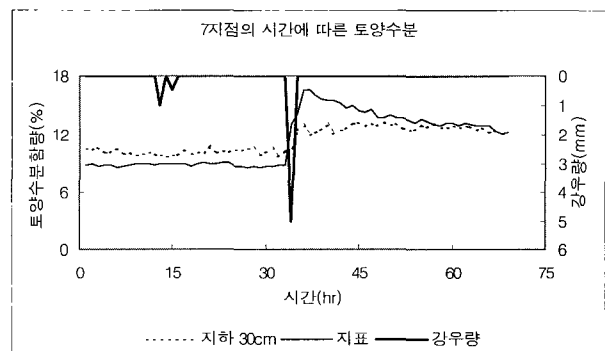
4.1.3 대상유역 하부사면

그림 9(a)는 6지점의 토양수분 변화 양상을 도시하고 있는데, 지하 30 cm에서 급격하고 민감한 토양수분의 변화양상은 감쇄곡선의 기울기가 강우 후에 상당히 변화하는 특성으로 나타나고 있으며, 중간수 유출 지점의 가능성을 보여주고 있다. 강우 사상을 전후로 지하와 지표면사이에서 토양수분의 크기가 서로 교차하고 있으며 이는 상부사면 혹은 중부사면과 구별되는 특성이다. 그러나 시간이 경과하면서 강우사상이전 지표면이 낮고

지하 30 cm가 더 높은 형태의 연직 분포로 수렴하는 경향은 토양수분의 공간적인 분포에는 지점별로 일정한 평형상태를 유지하려는 경향에 대한 추론을 가능하게 하여준다. 그림 9(b)에 나타나는 7 지점의 토양수분 변화 역시 강우사상을 전후로 일어나는 지하 30cm와 지표면의 토양수분 역전 현상이 관찰되었다. 강우사상 이후 시간이 경과함에 따라 지표면과 지하의 토양수분이 강우 이전 상태로 회귀하는 경향 또한 지점별 연직분포의 평형상태의 존재 가능성을 뒷받침 한다.



(a)



(b)

그림 9. 하부사면 토양수분의 변화

4.2 고찰

본 연구에서는 흐름분배 알고리즘으로 도출된 주된 흐름경로에 토양수분 측정 시스템을 구축하였고 TDR을 이용하여 강우사상에 의한 수직적, 수평적 토양수분의 변화를 시간적으로 측정하였다. 토양수분의 공간적인 변화 특성은 일정치 않고 지점별 깊이별 평형상태와 관련된 초기조건에 중요성을 보여주고 있다. 이로 인해 흐름분배 알고리즘과 토양수분 측정결과를 이용하여 상부사면과 중부사면 하부사면을 대표하는 위치선정의 중요성을 확인할 수 있었다. 급경사 산지 소유역의 유출형성과정에서 Montgomery와 Dietrich의 연구(2002)는 지하의 내습흐름의 시간크기가 선행토양함수와 불포화층의 반응시간으로 설명될 수 있다는 것을 나타내는데, 이는 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 일으킨다는 연구와 유사하다. 본 연구에서 도출된 토양수분의 변화자료는 이와 관련된 연구 주제들이 지형의 변화와 함께 토양수분의 결정에 중요한 인자로 인식되어야 함을 보여주고 있다. 또한, 사면 유출의 결정적 변수인 토양수분의 시공간적 양상은 강우 유출 사상이전과 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 지점에서 지표의 토양수분보다 상대적으로 민감한 지하지점에서의 강우에 대한 토양수분의 반응은 Uchida(2001)등이 제시한 관로 흐름형태의 수문과정의 존재 가능성을 보여주고 있다.

본 연구에서 수행한 토양 내 수분함유량의 분포경향은 일반적으로 토양의 상태가 습한 조건에서 토양층의 깊이와 지형적인 정보 등을 함께 이용할 때 그 신뢰도가 높아진다(Pellenq, 2003). 이는 정상상태 가정의 분포형 수문 모형의 적용성과 토양수분과의 관계를 의미하는 것으로서 본 연구의 측정결과는 비교적 짧은 기간이었으므로 이에 대한 궁극적인 해답은 추가적인 토양수분의 장기 모니터링 후에 제시될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 소유역에 대한 실측량을 통해 도출된

DEM 자료를 이용하여 흐름분배 알고리즘을 계산하여 획득된 결과와 역측량을 실시하여 소유역의 대표성을 최대화 할 수 있는 모니터링 시스템을 구축하였다. 이를 통해 2003년 10월 19일부터 22일까지 강우사상에 의한 토양수분의 변화를 설마천유역의 범륜사 사면에서 실측하였다. 이는 국내 산지사면유역에서 시공간 대표성을 고려한 토양수분 모니터링 시스템의 구축 및 운영 사례가 될 것으로 판단되며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 산지사면 중 상부사면의 토양수분의 깊이별 변화양상들은 강우사상에 대한 토양층의 연직적인 침투 양상이 연속적이지 않으며, 대공극 흐름(macropore flux)이나 선행흐름(preferential flux)이 토양수분의 시공간적인 변화에 중요한 역할을 하고 있다.
2. 중부사면의 지하 토양수분 감쇄곡선은 상부사면과는 달리 보다 완만히 감소하거나 일정량을 유지하는 특성을 보여 주고 있는데 이는 상부사면으로부터 지속적인 토양수분 유입이 유출 사상 이후에도 지속되고 있다는 점을 시사한다. 또한, 지표면에 가까운 토양층의 대공극의 발달이나 토양구조체의 소규모 변형 같은 현상은 소규모 강우 사상 이후 시점에서도 시작 될 수 있다는 점을 보여주고 있다.
3. 하부사면의 상대적으로 민감한 토양수분 변화양상은 감쇄곡선 기울기가 강우 후에 상당히 변화하는 특성으로 나타나고 있으며, 강우 사상을 전후로 지하와 지표면사이의 토양수분 크기가 서로 교차하면서 일정형태의 연직 분포로 수렴하는 경향은 토양수분의 공간적인 분포는 지점별로 평형상태를 유지하려는 경향이 존재함을 의미한다.
4. 본 연구에서 관측된 토양수분자료는 산지사면에서의 수문과정에 대한 관련연구들이 제시하는 대공극흐름, 관로흐름, 우선흐름이나 지속적으로 변화하는 수문학적 활성상태의 존재를 직간접적으로 확인하여 주고 있으며 추가적인 토양수분의 관측은 사면유출 기작을 밝히는데 필요한 과정으로 판단된다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김상현, 김경현, 정선희 (2001) "수치 고도 분석 : 분포형 흐름 분배 알고리즘." 한국수자원학회 논문집, 제34권, 제3호, pp. 241-251.
2. 한국건설기술연구원, (2003) "시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구", 연구보고서
3. Ambrose B. (2004). "Variable 'active versus 'contributing' areas or periods: a necessary distinction." *Hydrological Processes*. Vol 18. pp. 1149-1155.
4. Beven K, Germann P (1982)."Macropores and Water Flow in Soils." *Water Resour. Res.*, vol. 18(5), pp. 1311-1325.
5. 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
6. Pellenq J., Kalma J., Boulet G., Wooldrudge S., Kerr y., Chehbouni A. (2003)."A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth." *J. Hydrol.*, vol. 276, pp. 112-127.
7. Topp G.C., Davis J.L., Annan A.P. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines." *Water Resour. Res.*, vol. 16, pp. 574-582.
8. 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.
9. Montgomery, D.R., Dietrich, W.E. (2002). " Runoff generation in a steep, soil-mantled landscape." *Water Resour. Res.*, Vol. 38. pp. 7-1-7-8.
10. Uchida, T., Kosugi, K., Mizuyama, 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.
11. 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.

(논문번호:04-58/접수:2004.05.31/심사완료:2004.12.28)