

봄, 가을철 시공간적 특성을 고려한 사면에서의 토양수분 거동파악

Soil Moisture Monitoring at a Hillslope Scale Considering Spatial-Temporal Characteristics

오 경 준 / 이 혜 선 / 김 도 훈* / 김 상 현** / 김 현 준*** / 김 남 원***

Oh, Kyoung Joon / Lee, Hye Sun / Kim, Do Hoon / Kim, Sang Hyun /
Kim, Hyun Jun / Kim, Nam Won

Abstract

In order to analyze movement of soil moisture, Time Domain Reflectometry(TDR) with multiplex system has been installed at the Bumreunsa hillslope of Sulmachun Watershed to configure spatial-temporal variation pattern considering seasonal characteristic. 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 an intensive and long term monitoring 380 hrs in November of 2003 and 1037 hrs in May and June of 2004. Soil moisture data shows corresponding variation characteristics of soil moisture on the up slope, buffer, main channel zones of the hillslope which were classified from terrain analysis. Measured soil moisture data were discussed in conjunction with flow characteristic through terrain analysis. Regardless season, immediate responses of soil moisture about rainfall looks similar but recession and recharge are primary characteristics of intermediate soil moisture variation for spring to summer and fall to winter season, respectively.

keywords : TDR Soil Moisture, DEM

요 지

토양수분의 거동을 파악하기 위해서 설마천 유역의 범륜사 사면에 TDR(Time Domain Reflectometry)을 설치하여 시공간적, 계절적 특성을 파악하였다. 대상유역을 정밀 측량하여 수치지형 모형(Digital Elevation Model)을 구축하고 이를 흐름분배 알고리즘에 적용하여 흐름범위 안에서 역측량을 통해서 측정지점을 선정하여 모니터링 시스템을 구축하였다. 2003년 11월에 380시간, 2004년 5월 6월에 1037시간 동안의 장기적인 집중 모니터링을 통해 토양수분 자료를 획득하였다. 획득한 토양수분 자료는 지형분석을 통해 상부와 중간지점, 수리지점으로 구분하여 변화 특성을 파악하였다. 지형분석을 통한 흐름특성과 토양수분 실측치의 유의성을 논의하였다. 토양수분은 계절별 강우에 대한 변화 양상은 비슷하나 봄에서 여름으로 가는 시기에는 감쇄 현상이, 가을에서 겨울로 가는 시기에는 충전현상이 일

* 정희원, 부산대학교 환경공학과 석사과정

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

** 교신저자, 정희원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수

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

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

*** 한국건설기술연구원 수자원연구부 수석연구원

Research Fellow, Dept. of Water Resources Research, Korea Institute of Construction Technology

어나는 것을 알 수 있었다.

핵심용어 : TDR, 토양수분, DEM

1. 서 론

우리나라의 과거 100년간 연강수량 추이를 보면 최저 754 mm (1939년)와 최고치 1,782 mm (1998년)로 2.4배 차이가 나고 도서지역을 포함한 우리나라의 연평균강수량은 1283 mm로 과거 약 100년에 걸친 추세를 보면 약간 증가하는 경향이 있다. 하지만 연평균 강수량은 세계 평균의 1.3배에 이르지만, 높은 인구밀도로 인해 1인당 강수량은 연간 2,750 m³ 로 세계평균의 약 12%에 불과하다(건설교통부, 2001, pp. 5-13). 동시에 한해에 내리는 강수량의 2/3 가 6~9월에 집중되고 국토 또한 경사가 급한 산악지형이기에 강수가 짧은 시간 내에 바다로 흘러가게 되어있다. 이에 강수량은 많으나 물 부족 국가인 우리나라에서 수자원의 효율적 관리와 지하수 이용의 증가에 따라 산지에서의 토양수분의 이동경로 파악과 토양 함수량의 정확한 산정의 중요성이 대두되고 있다.

토양수분이란 토양 중에 존재하는 물이라고 정의되어 있으며, 식물의 생장 및 가용수자원 산정 등에 있어서 중요한 요소로서 토양층 상부의 수 m 내에 존재하는 수분의 양을 일컫는다. 토양 수분의 정확한 산정을 위해 강우에 따른 토양수분 분포의 시간적 공간적 특성 파악이 중요하다. 강우사상 이전과 이후에 토양수분은 식생분포 양상에 따른 차단과 간섭에 따른 영향, 증발에 따른 영향, 포화대에서는 지표유출과 비포화대(vadose zone)에서는 지하로의 침투가 생겨나는 현상, 지하수 함량에 따른 변화와 토양 침식 등에 따라 영향을 받으면서 변해간다.

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 et al., 1994). 이 중에서 지형의 토양수분 함량에 대한 영향을 특성화한 습윤지수가 Topmodel 등의 수문 모의에 도입되었다(Beven and Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986). 지형을 표현하는 인

자료써 상부사면 기여면적과 경사도의 비로서 계산되어지는 습윤지수는 토양수분의 공간적 분포 양상 및 유출 모의에 널리 사용되어지고 있는데 Beven and Kirkby (1979)가 제안한 습윤지수는 정상상태를 가정하고 있으며 Barling et al.(1994)은 이 정상상태 가정의 한계를 극복하고 이를 완화하기 위하여 반동력학적 습윤지수(quasi-dynamic wetness index)를 도입하였으며 한지영 등(2003)은 반동력학적 습윤지수를 발전시켜 동력학적 습윤지수(dynamic wetness index)를 제안하였다.

또한 우리나라의 계절적 특성에 따라 토양수분의 특성을 파악하는 것도 함께 진행되어야 할 것이다. 봄에서 여름으로 진행되는 시기에 식생들의 활발한 증식과 기온의 상승에 따른 토양수분의 변화와 가을에서 겨울로 진행되는 시기에 이와 반대로 식생들의 증식이 둔화되고 기온 역시 내려감으로서 토양수분의 변화 양상이 각 계절마다 어떠한 특성을 보이는지 규명하는 것 역시 중요한 요소이다. 이러한 과정을 통해 포괄적인 수문학적 과정을 이해하고 정확한 모형의 구현을 위해서는 토양수분의 시공간적, 계절적인 특성을 파악하는 것이 중요하다.

하지만 강우로 인한 지면과 지표하에서의 순간적인 포화공간의 형성 및 유출의 생성 등을 포함하는 과정과 증발산 등은 모두 비포화대 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존한다(Western et al, 1998). 또한 비포화대 수문의 중요성은 대부분의 오염물질이 지표 가까이 있는 비포화 토양층에 방출되어져 아래에 있는 포화대(aquifer)로 흘러든다는 사실에서 찾을 수 있다. 따라서 비포화대에 대한 토양수분 함량의 시공간적 분포 양상을 파악하는 것은 강우, 증발산, 유출 등의 일련의 수문학적 과정들을 규명하고 지하수로의 오염물질이송 경로를 파악하는데 중요하다.

비포화 토양에서 토양수분을 측정하는 방법에는 걸보기 유전상수를 이용하는 Theta probe, 토양내의 부압을 이용한 장력계, 전기전도도를 이용한 EM, 유전상수에 따른 파의 반향시간(travel time)을 이용한 TDR (Time Domain Reflectometry)등을 사용하는 방법들이 있다. 이 중에서 TDR을 이용한 방법(Topp et al., 1980)은 여러 개의 탐침을 매설하여 일정시간 간격으로 토양수분의 공간적 분포를 얻어낼 수 있어 토양수분의 시공간적 특성 파악에 매우 유용하다.

따라서 본 연구에서는 2003년 가을과 2004년 봄에

대상구역에서의 실 측량과 역 측량을 실시하여 도출한 수치고도모형(DEM, Digital Elevation Model)을 바탕으로 TDR 모니터링 시스템을 구축, 운영하여 강우사상 전후로 동적으로 변화하는 토양수분 자료를 시간단위로 획득한 후 자료를 집중적으로 분석하여 강우사상에 의한 토양수분의 계절적인 특성 변화과정들을 규명하고자 하였다.

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 DEM을 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 소구역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료에 대한 지속적 관측과 자료 측정을 위해 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험유역으로 운영되고 있으며 설마리에 위치한 영국군 전적비교를 출구로 하는 설마천 중상류 유역이 시험유역이다. 설마천 시험유역의 위치는 동경 127° 55' 54" - 126° 54' 57" 북위 37° 54' 57" - 37° 56' 23" 이고, 유역면적 8.50 km², 유로연장 5.80 km, 연평균 강수량은 1600 mm, 고도는 최저 59 m에서 최고 67 m, 유로경사 2%인 전형적인 급경사 산지 사행 하천 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(전적비교, 비룡포대, 설마리, 범륜사, 감악산)와 수위관측소 2개(전적비교, 사망댐)와 기상관측소 1개(비룡포대)이며 10분마다 강우와 수위가 관측되고 있다(한국건설기술연구원, 2004).

Fig. 1은 설마천 유역내의 범륜사 부근에 새로이 선정된 대상사면의 지도로서 이 소유역은 상부로부터의 유입이 불가능한 독립적인 사면이며 주변에 우량관측소

(범륜사)가 있어 정확한 강우량 산정이 가능하다.

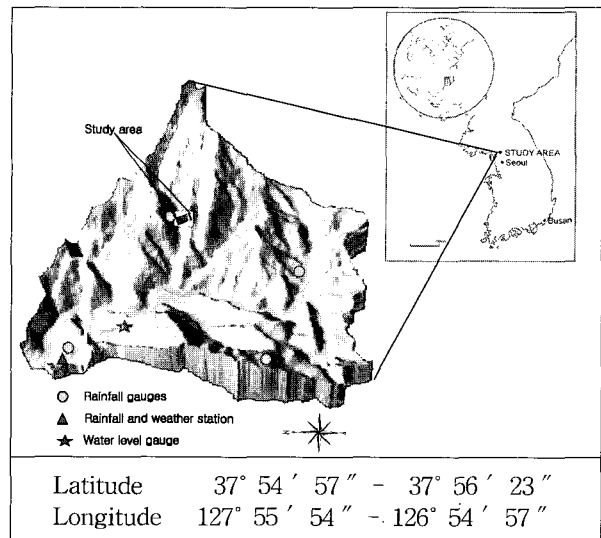


Fig. 1. Study Area

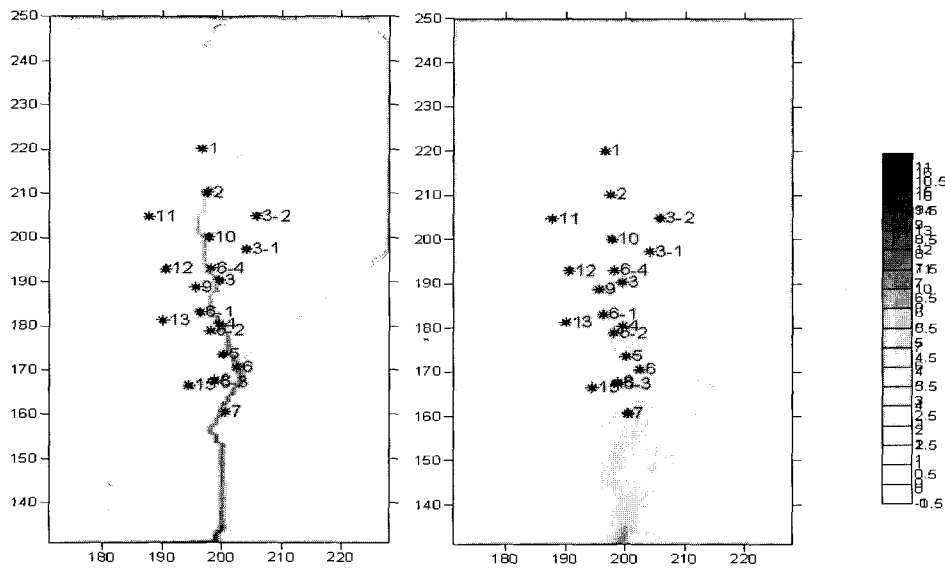
2.2 토양수분 장기 모니터링을 위한 시스템 구축

최적의 토양수분 측정망을 구축하기 위해서는 강우 유출 사상시 발생하는 흐름 경로를 예측하고, 공간 유출 특성을 감지할 수 있는 의사결정과정을 수행해야 한다. 이를 위해서는 현장 사면에 정밀 측량을 수행하여 이를 바탕으로 흐름 발생경로를 계산하여 토양수분 센서의 공간적 분포를 결정할 필요가 있다.

연구 대상지역인 설마천 범륜사 사면의 정밀한 DEM(1m × 1m) 구축을 위해 Theodolite (DT-208P, TOPCON)을 이용해 직접 측량 하였다. 측량을 통하여 얻어진 각 좌표 정보를 좌표변환 알고리즘에 적용하여 데카르트 좌표로 변환하고 이를 통해 연구 대상사면인 범륜사 북측사면에 대한 1m 간격의 정밀 DEM을 구축한다. 측량을 통해 얻어진 1m 간격 정밀 DEM을 이용하여 토양수분 장기 모니터링을 위한 시스템을 구축하는 과정은 다음과 같다. 구축된 1m 정밀 DEM을 흐름 분배 알고리즘에 적용하여 우선 흐름경로를 파악, 고려하여 측정지점을 선정한다. 선정된 측정지점 좌표들을 역좌표변환 알고리즘에 적용하여 각 좌표로 변환하고 Theodolite를 이용해 역측량 하였다. Table 1은 측량을 통해 얻어진 각 좌표를 데카르트 좌표로 변환된 값과 각 지점별 Wave Guide 개수 즉 탐침수를 Fig. 2는 흐름 분배 알고리즘에 적용시킨 후 각 지점들을 표시한 것이다. Table 2는 토양수분 측정기기인 TDR의 본체가 설치된 위치이다.

Table 1. Soil Moisture Measurement Locations and Number of Sensor

No	X	Y	Z	Waveguide No.
1	196.5500	220.0900	214.3850	2
2	197.5340	210.1900	206.9428	2
3	199.5000	190.3900	193.8380	2
4	199.4991	180.4542	187.9558	2
5	200.2024	173.6500	184.0540	2
6	202.4400	170.5900	182.3309	2
7	200.4800	160.6900	177.4399	2
8	198.7020	167.6832	180.5126	2
9	195.6149	188.7644	192.3547	2
10	197.7631	200.0781	199.4705	2
11	187.8011	204.7512	204.4899	3
12	190.5481	192.9881	196.4938	2
13	189.9919	181.3193	189.8916	3
15	194.3815	166.5686	180.3171	2
3-1	204.0390	197.3690	199.3808	2
3-2	205.8158	204.8731	205.0240	3
6-1	196.3314	183.1461	189.8763	3
6-2	198.1229	178.9263	186.6818	3
6-3	198.6886	167.3483	181.0801	3
6-4	198.1025	193.0543	194.8887	2



(a) Single Flow Direction Algorithm (b) Multiple Flow Direction Algorithm

Fig. 2. Topographic Wetness Index and Locations of Monitoring Points

Table 2. Location of Main Station

	x(m)	y(m)	z(m)
Station Location	202.17	184.54	191.47

본 연구에서는 토양수분의 연속적인 측정을 위하여 TDR장비인 SOILMOISTURE 사의 MINI-TRASE를 사용하였다. 전송선을 따라 이동하는 에너지의 전자기

적 펄스의 속도는 접촉되어 있거나 전송선을 감싸고 있는 매질의 유전상수(K_a)에 의존하게 된다. 일반적으로 토양은 공기, 미네랄과 유기물 입자, 그리고 물로 구성되는데 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 속도는 토양 내의 수분에 크게 의존하게 된다. 마이크로파의 펄스가 전송선을 따라 전달되어 질 때, 전송선과 주변의 물체간의 불연속성의 존재는 마이크로파의 전송선을 따른 반향을 야기한다. 펄스가 전송선의 끝부분에 도착했을 때, 펄스내에 남아있는 모든 에너지는 전송선을 따라 반사되게 된다. 이러한 특징은 마이크로파의 펄스가 알려진 길이의 전송선을 따라 이동하는데 필요한 시간의 측정을 가능하게 한다. 공기-토양-물 의 외전상의 유전상수(K_a)는 다음의 식에 의해 결정되어 진다.

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

여기서 L은 waveguide의 길이(cm)이며, t는 전송시간 (snsseconds. ns), 그리고 c는 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 길이를 가진 Waveguide와 cable로 구성되어 있다.

2.3 대상 지역의 습윤지수와 측정지점의 구분

Beven and Kirkby(1979)에 의해 제안된 습윤지수는 $\ln(a/\tan \beta)$ 로써 지형의 포화정도를 설명한다고 알려져 있으며 자연의 지형 특성을 반영하는 인자으로써 유출 등의 수문 현상을 모의하는데 사용되어 왔다. 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, SFD, (O'Callaghan and Mark, 1984), 경사가 있는 모든 방향으로 흐름을 분배하는 다방향 알고리즘, MFD, (Quinn et al, 1991)이 있다. 이에 두 가지 알고리즘을 모두 고려하여 습윤지수가 높아 주요 흐름선을 형성할 것으로 예상되는 지점을 가장 상단부에 위치하며 다른 상부사면의 기여가 없으며 측정지점으로 선정하였고 (Fig. 2), Table 3과 Fig. 3에서 측정지점에 대한 각 알고리즘을 구한 습윤지수를 나타내었다. 습윤지수의 값이 낮고 상대적으로 상부에 위치한 지점인 1, 2지점을 상부지점으로, 두 가지 알고리즘에 적용한 결과에서 흐름선에 놓여 있으며 SFD 습윤지수의 값도 크며, 측정결과 토양수분의 거동이 활발한 지점인 5, 6, 7, 6-4지점을 수로지점으로, 그 외에 흐름선에는 있지만 측정결과 토양수분의 거동이 활발하지 않은 지점과 흐름선에 놓여 있지 않은 지점들을 완충지점으로 선정하였다.

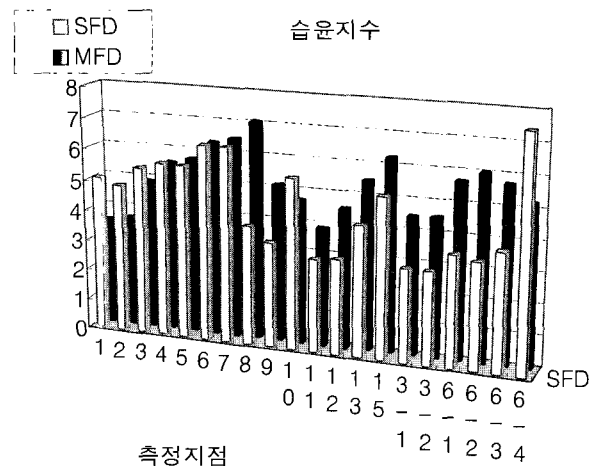


Fig. 3. Wetness Index(SFD, MFD)

Table 3. Topographic Wetness Index of Monitoring Points

No.	SFD	MFD	No.	SFD	MFD
1	5.08	3.53	11	3.03	3.84
2	4.86	3.64	12	3.1	4.55
3	5.49	4.88	13	4.25	5.5
4	5.69	5.56	15	5.23	6.27
5	5.66	5.74	3-1	3.04	4.52
6	6.37	6.32	3-2	3.02	4.55
7	6.36	6.48	6-1	3.60	5.70
8	3.88	7.06	6-2	3.45	6.02
9	3.41	5.13	6-3	3.84	5.73
10	5.57	4.7	6-4	7.55	5.22

2.4 계절적인 요인을 나타내는 인자들

토양수분에 영향을 미치는 계절적인 요인으로는 기온, 강수량, 습도, 식생들의 증식 등이 있다. 강수량은 2003년에 측정기간 동안 3.24 mm/day의 강우가 내렸으며, 2004년에는 3.3 mm/day의 강우가 발생하였다. 또한 아래 Fig. 4는 2003년 11월과 2004년 5월, 6월의 기온 변화를 나타낸 것이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 토양수분 집중 모니터링 결과

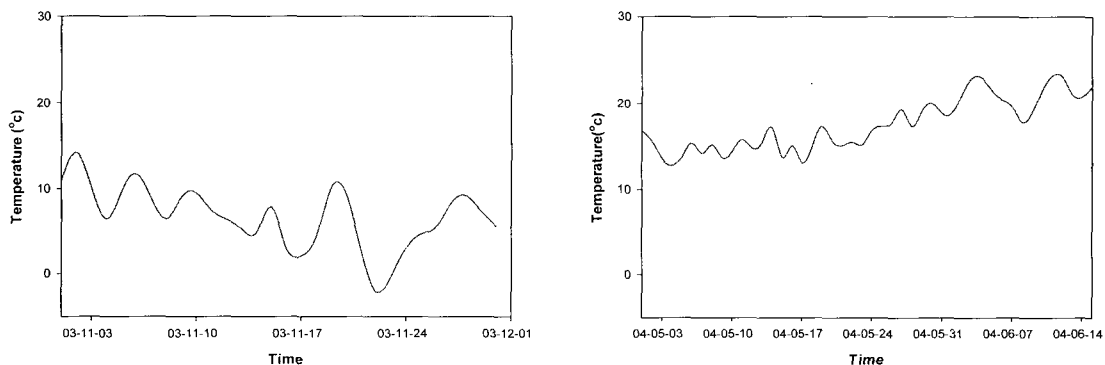
3.1.1 상부지점

Fig. 5는 Fig. 2의 선정된 토양수분 측정 지점의 가장 상부사면인 1, 2지점에서의 토양수분 측정결과이다. Fig. 2에서 보면 알 수 있듯이 1,2지점은 다른 상부사면의 기여면적이 전혀 없는 가장 상단부에 위치해 있다. Fig. 5에 (a), (b)는 각각 1,2 지점에 대해 2003년 11월 5일부터 11월 21일까지 (c), (d)는 2004년 5월 2일부터 6월 14일까지 한 시간 간격으로 TDR을 이용해서 측정한 결과이다. 2003년에는 11월 8일과 9일 사이 28 mm, 11일에 19 mm, 20일에 8 mm 이며 2004년에는 5월 3일에 14.5 mm, 5월 9일과 10일에 38 mm, 5월 20일에 16 mm, 5월 27일과 28일에 60 mm 에 각각 강우가 발생하였다. 상부사면의 토양수분의 전형적인 특징은 비가 오면 토양수분이 급격히 증가하였다가 강우사상 이후에는 빠른 감쇄현상으로 충전효과가 거의 없는 특성이 동시에 일어나는 것이다.

각각의 지점들의 측정 결과를 살펴보면 총 2개 지점 4개의 wave guide를 통해서 측정되어진 상부지점의 토양수분의 측정결과 2003년에는 11월 5일 토양수분을 처음 측정하기 시작한 값과 11월 21일에 끝마칠 때까지의 최종 토양 수분을 비교하면 초기 토양수분은 1지점에서

는 10 cm 와 30 cm 각각 8.9%에서 16.9%로 8%의 증가와 12.2%에서 18.4%로 6.2%의 증가를 보이며 2지점에서는 14.8%에서 24.8%로 10%의 증가와 10.1%에서 20.2%로 10.1%의 증가를 보였다. 또한 2004년에는 5월 2일 토양수분을 처음 측정하기 시작한 값과 6월 14일에 끝마칠 때까지의 최종토양수분을 비교하면 초기 토양수분은 1지점에서는 21%에서 13.1%로 6.9%의 감소와 13.3%에서 9.2%로 4.1%의 감소를 보이며 2지점에서는 22.3%에서 13.7%로 8.6%의 감소와 16.2%에서 9.5%로 6.7%의 감소를 보였다. 절대적인 강수량은 봄이 가을보다 많음에도 불구하고 가을에서 겨울로 가는 시기에는 토양수분의 증가 경향을 봄에서 여름으로 가는 시기에는 감소 경향을 나타내는 것을 알 수 있다. 토양수분에 영향을 미치는 여러 가지 수문 반응이 강우 후에도 일어나지만 그 중에서 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 기온의 상승과 봄에서 여름으로 가는 시기에 식생들의 보다 더 활발한 증발산을 통한 수분소비의 결과라고 생각되어진다.

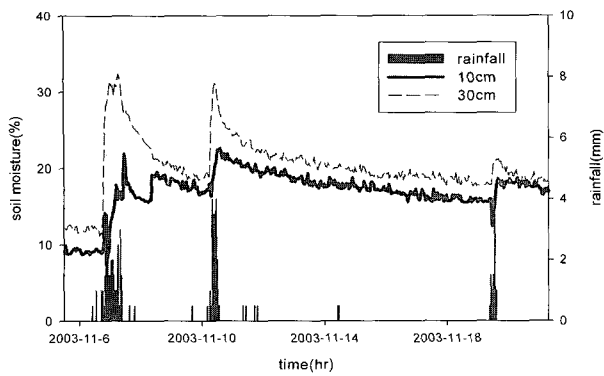
Fig. 5의 (a)와 (c) 1지점에서는 그림에서 확연하게 드러나듯이 강우사상 이후의 거동 양상은 서로 비슷한 모양을 나타내고 있다. 하지만 2003년도 결과에서는 지하 30cm 의 토양수분이 10cm 의 토양수분보다 높은 값을 보이거나 2004년도 결과에서는 깊이별 토양수분의 역전 양상을 나타내고 있다. Fig. 5의 (c)에서 나타난 10 cm 깊이에서의 토양수분은 상당한 고빈도 변동성과 상대적으로 덜 민감한 강우에 대한 반응을 보여주고 있다. 이는 식생의 활발한 활동으로 인한 대공극의 발달과 상부사면 기여면적이 거의 없어서 측방향 흐름이 무시될 수 있는 1지점의 특성으로 설명될 수 있다. 또한 Fig. 5의 (a)에서는 초기 토양수분이 최종 토양수분보다 작으나 Fig. 5의 (c)에서는 반대로 초기 토양수분이 최종 토양수분 보다 높음을 알 수 있다. 이는 기온 상승과 식생들의 증식으로 인하여 이러한 결과가 나타난 것이다.



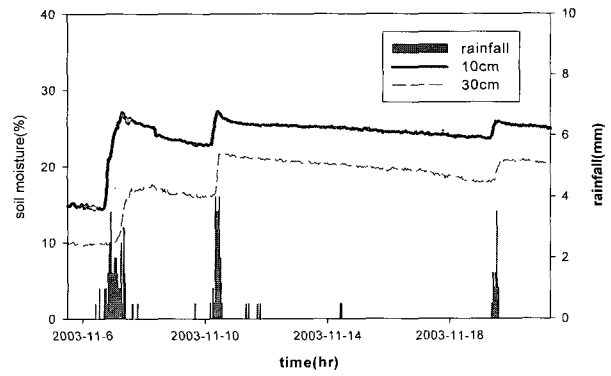
(a) 30일 (2003/11)

(b) 46일 (2004/05 ~ 2004/06)

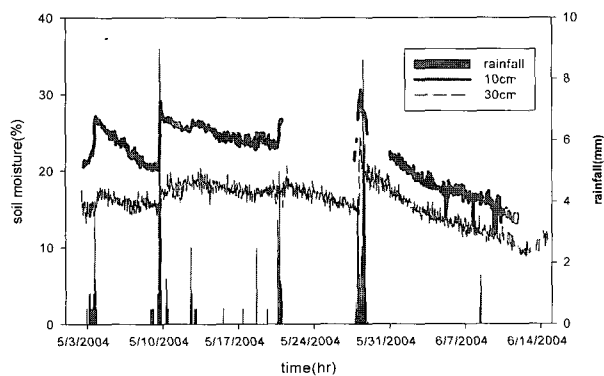
Fig. 4. Temperature Variation (<http://www.kma.go.kr>, 2005)



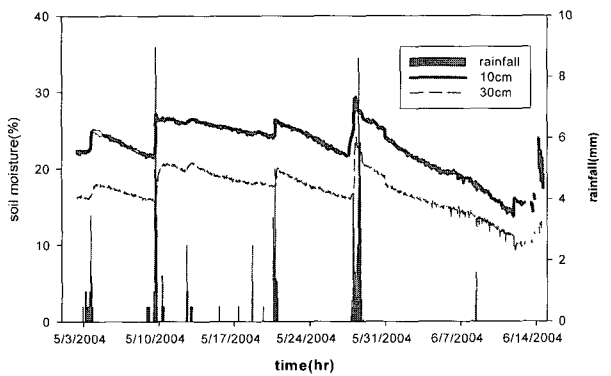
(a) 2003, Point 1



(b) 2003, Point 2



(c) 2004, Point 1



(d) 2004 Point 2

Fig. 5. Soil Moisture of Upper Zone

Fig. 5의 (b)와 (d) 2지점 그림에서도 강우사상 이후의 토양수분의 거동 양상은 유사하게 나타난다. 하지만 Fig. 3의 기온 변화 양상을 살펴보면 샘플링 후반에는 평균온도가 영하를 기록하고 있음을 알 수 있다. 이에 기온이 내려가면서 토양층의 공극의 축소와 토양층이 얼어붙어서 (b) 그림에서 알 수 있듯이 시간이 지날수록 토양수분의 변화 양상이 거의 나타나지 않지만 (d) 그림에서는 이와 반대로 기온 상승으로 인한 토양층의 공극 발달과 활발한 증식 등으로 인해 토양수분이 계속적으로 감소하고 있는 것이다.

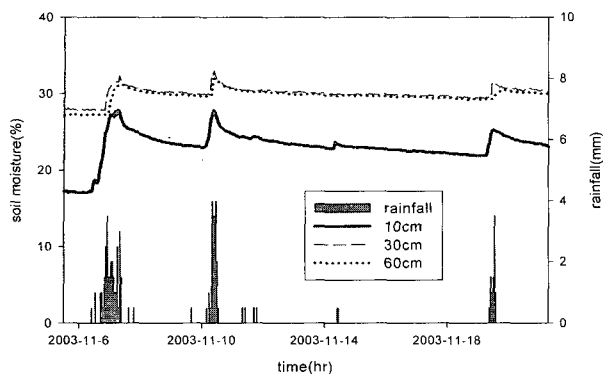
정리하면 전반적으로 상부사면 지점에서는 토양수분이 급격한 증가를 보이는 등 전반적으로 강우에 대하여 민감하고 급격한 반응을 보이고 있으며 토양수분은 지점별로 각기 다른 특성과 계절별로 각기 다른 특성을 보여 주고 있다.

3.1.2 완충대

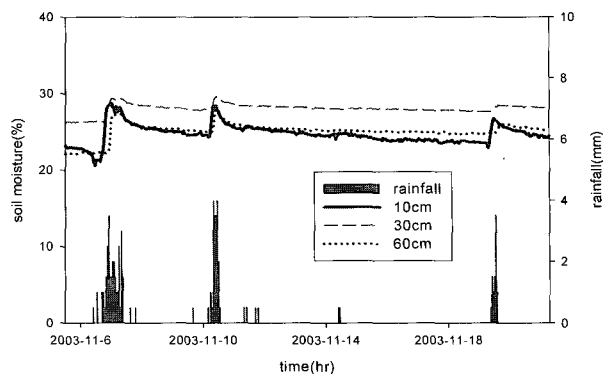
Fig. 6은 완충대에서의 시간에 따른 토양수분의 변화를 나타내고 있다. 완충대에서의 전반적인 특징은 토양수분의 안정적인 변화라고 할 수 있다. 대체적으로 초기 토양수분의 값 역시 상부사면의 기여량으로 인해서

다른 상부사면의 기여가 없는 상단부 지역보다 크게 나타나고 있다.

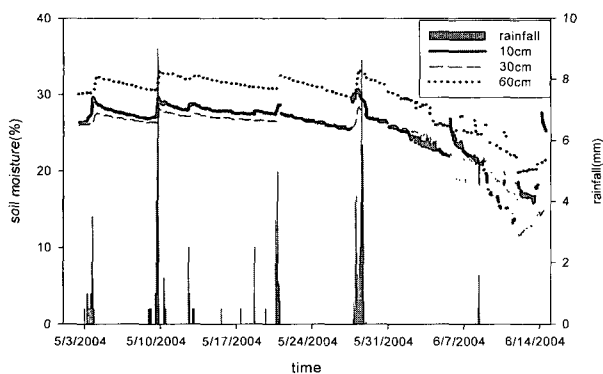
완충대에서의 토양수분 측정 결과 2003년에는 11월 5일 토양수분을 처음 측정하기 시작한 값과 11월 21일에 끝마칠 때까지의 최종 토양수분을 비교하면 초기 토양수분은 6-1지점에서는 10 cm, 30 cm 와 60 cm에서 각각 17.2%에서 23.1%로 5.9%의 증가 28%에서 30.2%로 2.2%의 증가 27.2%에서 29.9%로 2.7%의 증가를 보이며 6-2지점에서는 23.2%에서 24.4%로 1.2%의 증가 26.1%에서 28.1%로 2%의 증가 22.1%에서 25.2%로 3.1%의 증가를 보였다. 또한 2004년에는 5월 2일 토양수분을 처음 측정하기 시작한 값과 6월 14일에 끝마칠 때까지의 최종토양수분을 비교하면 초기 토양수분은 6-1지점에서는 10 cm, 30 cm 와 60 cm에서 각각 26.3%에서 13.2%로 13.1%의 감소 26%에서 14.5%로 11.5%의 감소 30.1%에서 19.8%로 10.3%의 감소를 보이며 6-2지점에서는 27.5%에서 23.9%로 3.6%의 감소 27.8%에서 25%로 2.8%의 감소 24.9%에서 22.2%로 2.7%의 감소를 보였다. 상부지점의 결과와 마찬가지로 봄에서 여름으로 가는 시기에는 감소 경



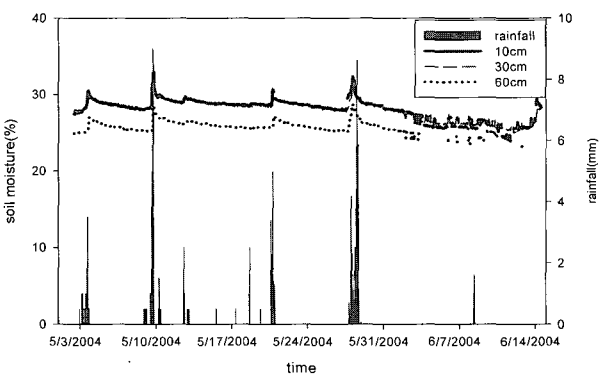
(a) 2003, Point 6-1



(b) 2003, Point 6-2



(c) 2004, Point 6-1



(d) 2004, Point 6-2

Fig. 6. Soil Moisture of Buffer Zone

향을 가을에서 겨울로 가는 시기에는 증가 경향을 보이고 있는 것이다.

Fig. 6의 (a)와 (c) 6-1지점에서의 토양수분의 거동을 살펴보면 2003년 결과인 (a)에서는 10 cm 에서 토양수분이 강우에 대한 민감도가 크며 30 cm 와 60 cm 에서는 그렇지 않음을 보여 주고 있다. 2004년 결과인 (c)에서는 세 지점 모두에서 강우에 대한 민감도가 비슷하게 나타난다. 이러한 결과 역시 대공극 흐름(macropore flux)이나 우선 흐름(preferential flux)이 가을철 보다는 봄철에 더 발달한 결과라고 할 수 있다. 또한 (a), (c) 모두 지하 60 cm 에서의 토양수분이 가장 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 이는 상부사면으로의 지속적인 유입과 지표에서 지하로의 계속적인 침투에 의해 야기된 것으로 사료된다.

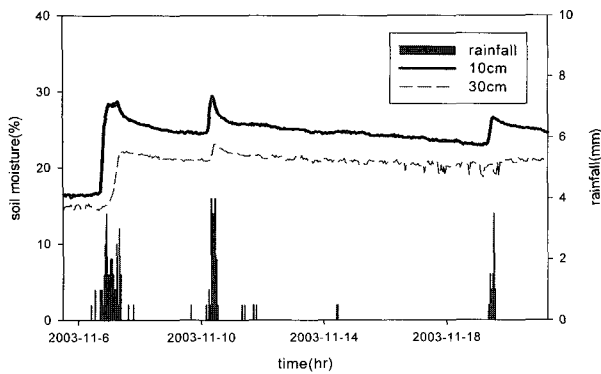
Fig. 6의 (b)와 (d) 6-2지점에서는 완충대의 여타 다른 지점보다는 강우사상 이후 감소되는 양과 충전되어지는 양 모두 3% 내외로 가장 안정적인 특성을 보이고 있다. 이는 상부사면으로의 지속적인 유입과 흐름선을 따라 하부로의 유출이 균형을 이루고 있는 것으로 생각된다. (b)의 지하 30 cm 에서 특히 확연하게 나타나고

있다.

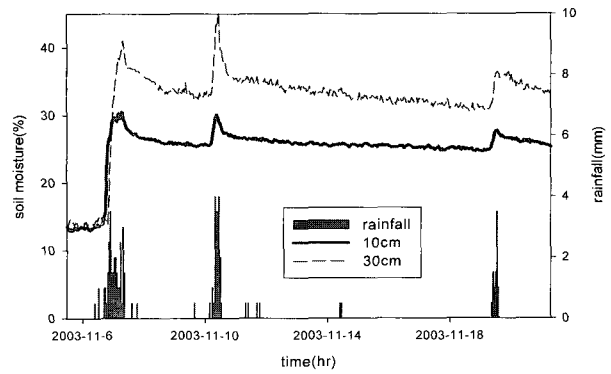
전체적인 완충대의 특징은 토양수분의 증가, 감소가 비교적 완만하여 급격한 증가나 급격한 감소를 나타내지 않고 안정적이다. 그러나 Fig. 6의 (c)인 6-1 지점의 경우는 2004년 6월 7일 부터의 급격한 감소현상을 보이고 있다. 이는 지속되는 비교적 낮은 강우와 기온의 상승으로 인한 효과가 6-1 지점의 완충대 특성을 변화시킬 수 있다는 것을 보여주고 있다. 상부지점과 비교해 볼 때 완충대는 강우 사상 전 초기 토양수분 함량이 높은 편이고 강우사상 후의 토양수분은 상, 중단부가 거의 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 이는 초기 토양수분의 차이가 재 충전량의 차이를 야기하는 것이다.

3.1.3 수로지점

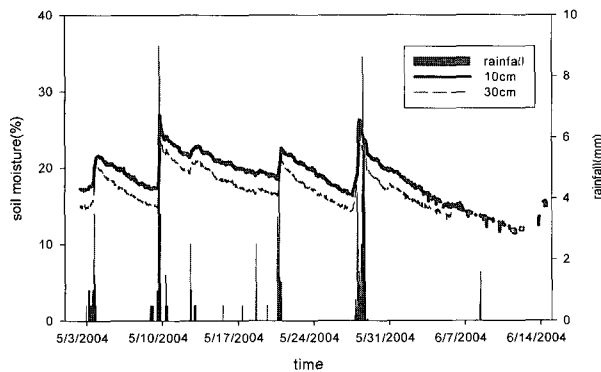
Fig. 7은 수로지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화 양상을 도시한 것이다. 수로지점의 전형적인 특징은 지점들이 흐름선상에 위치해 있으므로 강우사상 후의 토양수분의 증가가 가장 급격하며 가을에서 겨울로 접어드는 시기에는 충전되어지는 양이 가장 많아지며 봄에서 여름으로 접어드는 시기에는 토양수분의 값이 8%~12% 내외로 토양내 보유하는 함수량이 가장 낮게 나타



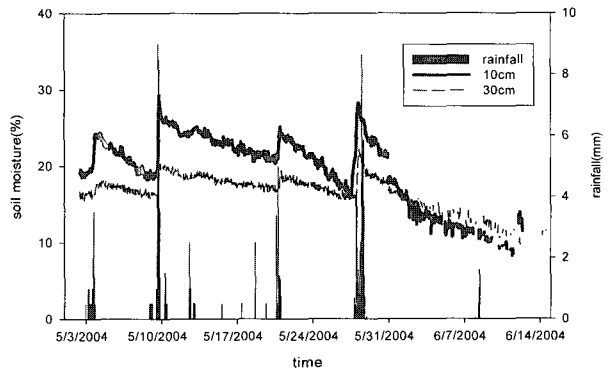
(a) 2003 Point 6



(b) 2003 Point 7



(c) 2004 Point 6



(d) 2004 Point 7

Fig. 7. Soil Moisture for Flow Path Zone

나는 특징을 보이고 있다.

수로지점의 토양수분의 측정결과 2003년에는 11월 5일 토양수분을 처음 측정하기 시작한 값과 11월 21일에 끝마칠 때까지의 최종 토양 수분을 비교하면 초기 토양 수분은 6지점에서는 10 cm 와 30 cm 각각 16.5%에서 24.6%로 8.1%의 증가와 14.4%에서 20.9%로 6.5%의 증가를 보이며 7지점에서는 13.5%에서 25.3%로 11.8%의 증가와 14%에서 32.3%로 18.3%의 증가를 보였다. 또한 2004년에는 5월2일 토양수분을 처음 측정하기 시작한 값과 6월 14일에 끝마칠 때까지의 최종토양수분을 비교하면 초기 토양수분은 6지점에서는 17.1%에서 11.3%로 5.8%의 감소했으며 30 cm 지점은 TDR 기계의 이상 오작동으로 자료획득에는 실패하였다. 7지점에서는 10 cm 와 30 cm 각각 18.5%에서 8.2%로 10.3%의 감소와 15.6%에서 9.6%로 6%의 감소를 보였다. 특히 7지점의 지하 30 cm 에서 가장 많은 충전량을 보이고 있다. 이는 7지점이 상부사면으로부터 많은 기여량을 받을 수 있는 가장 하부에 위치해 있기 때문이다.

Fig. 7의 (a)와 (c) 6지점에서는 상부지점과 완충대와는 다르게 강우사상 이후의 토양수분의 거동 특성이 계

절마다 확연히 달라지는 것을 볼 수 있다. 두 그림을 비교해 보면 강우사상이 발생한 후 증가하는 양상은 비슷하나 감소하는 경향은 완전히 다르게 나타난다. 이는 Fig. 7의 (a) 가을의 경우에는 10 cm 에서의 최대치와 30 cm 에서의 최대치에 도달하는 시간 차이 즉 지체시간이 7~8시간이 있지만 Fig. 7의 (c)에서는 10cm 와 30 cm 에서의 지체시간이 생겨나지 않았다. 이는 가을에는 기온의 감소로 토양 내 공극의 발달이 둔화 된 것이라고 여겨진다.

Fig. 7의 (b)와 (d) 7지점에서 강우사상 이후의 변화양상이 확연하게 다르다는 것을 있다. 가을철의 그림인 (b)에서는 토양수분의 값이 30%이상을 나타내고 있지만 봄철 그림인 (d)에서는 토양수분의 값이 10%이하로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 가을에는 식생들의 증식의 영향도 작게 받으며 토양수분이 계속적으로 충전되어 지지만, 봄철 특히 여름 장마가 시작되기 전 6월달에 우리나라의 기후 특성인 기온이 증가하면서 장마 이전에 비가 거의 내리지 않는 특성으로 인해서 토양 내 보유 함수량이 급격히 떨어지는 것을 알 수 있는 것이다. 수로지점들에서는 봄에서 여름으로 가는 시기

와 가을에서 겨울로 가는 시기에서의 변화 양상이 완전히 다르며 봄에는 토양수분이 흐름라인을 따라 급격히 빠져나가며 가을에는 흐름라인을 따라 계속적으로 충전되어지는 것을 알 수 있다.

대상 유역 전체의 특징을 살펴보면 DEM을 기초로 흐름분배 알고리즘에 적용시켜서 선정된 각 지점들이 지점들마다의 고유한 특성을 나타냈다. 또한 현장에서의 실측치인 토양수분의 값들이 모의치인 흐름분배 알고리즘을 기초로 해서 만들어진 측정지점의 지도의 흐름특성과 유사하게 나타났음을 알 수 있다. 하지만 지하 30 cm, 지하 60 cm 사이의 분포 형상은 지점에 따라 상이한 분포 특성을 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 토양의 수분함량은 전적으로 지형에 의존하기보다는 토양층의 깊이(Pellenq et al, 2003)나 토양 내에 존재하는 대공극 흐름 혹은 모세관현상(Beven and Germann, 1982)에 따라서도 많은 변화를 일으킨다는 연구와 유사하다. 또한 똑같은 지점들이 계절에 따라서 다른 양상을 보이는 것은 대상유역이 표토층이 얇고 심도가 깊지 않아서 토양 구조체가 쉽게 변화할 가능성이 크다는 것과 기온의 변화, 식생들의 증발산을 통한 수분소비의 영향 등에 기인되어진 결과라고 여겨진다. 이와 마찬가지로 2003년에 측정기간 동안 3.24 mm/day의 강우가 내렸으며, 2004년에는 3.3 mm/day의 강우가 발생하였지만 일별로 내린 강우량 비율은 봄철이 가을철보다 많음에도 불구하고 봄철에는 토양수분의 지속적인 감소가 가을철에는 충전현상이 나타났다. 본 연구에서 획득되어진 토양수분의 시공간적, 계절적 양상을 파악하는 것은 강우사상 이전과 이후에 끊임없이 토양수분의 값이 변화 하며 계절적으로도 각기 다른 양상을 보이므로 유출 형성과정을 고려한 수문모형의 구현에 토양수분이 포함되어야 할 것이라고 생각한다.

4. 결 론

본 연구의 목적은 산지가 대부분인 국내에 현장에서 빠르고 정확하게 토양수분을 측정 할 수 있는 TDR을 이용하여 소유역 산지에서 장기간 모니터링을 통해 산지 유역에서의 토양수분의 시공간적 계절적 분포 특성을 파악하고 강우에 따른 토양수분의 변화 거동 및 수문학적 반응을 규명, 특성화 이다. 이에 강우와 유출 자료를 쉽게 획득 할 수 있는 설마천 유역을 대상유역으로 선정하고 범륜사 사면을 선정하여 실측량을 통하여 DEM을 구축하고 이를 흐름분배알고리즘에 적용하여 획득된 결과를 통해 측정지점을 선정하여 소유역의 대표성을 최대화하고 효율을 높일 수 있는 장기 측정 체

계를 구축 시행하였다. 이러한 시스템을 통해 2003년 11월 5일부터 2003년 11월 21일까지 2004년 5월 2일부터 6월 15일 까지 경기도 파주시 설마천 상류 사면인 감악산 범륜사 북측사면에서 수평적, 수직적 토양수분의 변화 특성을 실측하였다. 사면에서의 측정지점들을 위치와 특성에 따라 상부지점, 완충대, 수리지점으로 구분하여 분석하였으며 각 사면에서의 시간과 계절에 따른 토양수분의 공간적 분포 특성을 조사 하였다.

1. 상부지점에서는 전반적으로 토양수분이 급격한 증가를 보이는 등 전반적으로 강우에 대하여 민감하고 급격한 반응을 보이고 있으며 토양수분은 지점별로 각기 다른 특성을 보이며 계절별로는 강우에 대한 변화 양상은 비슷하나 봄에서 여름으로 가는 시기에는 감쇄 현상이 가을에서 겨울로 가는 시기에는 충전현상이 일어나는 것을 알 수 있었다.
2. 완충대의 특징은 토양수분의 증가, 감쇄가 비교적 완만하여 급격한 증가나 급격한 감쇄를 나타내지 않고 안정적이다. 상부지점과 비교해 볼 때 완충대는 강우 사상 전 초기 토양수분 함량이 높은 편이고 강우사상 후의 토양수분은 상, 중단부가 거의 비슷해지는 것을 볼 수 있다. 이는 상부사면으로 지속적인 유입의 결과라고 해석되며 계절적인 요인 보다는 공간적인 특성에 더 지배되어진다고 판단된다.
3. 수리지점들에서는 봄에서 여름으로 가는 시기와 가을에서 겨울로 가는 시기에서의 변화 양상이 완전히 다르며 봄에는 토양수분이 흐름라인을 따라 급격히 빠져나가며 가을에는 흐름라인을 따라 계속적으로 충전되어지는 것을 알 수 있다. 또한 일별로 내린 강우량 비율은 봄철이 가을철보다 많음에도 불구하고 봄철에는 토양수분의 지속적인 감소가 가을철에는 충전현상이 나타나는 것을 알 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부와 건설 교통부가 지원하는 수자원 지속적 확보기술개발사업단의 연구지원(과제번호: 2-2-1)에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

건설 교통부 (2001). 수자원의 장기 종합계획
기상청 홈페이지, <http://www.kma.go.kr> (2005).

- 한지영, 김상현, 김남원, 김현준 (2003). "유사 동력학적 습윤지수와 동력학적 습윤지수의 개발과 적용" **한국 수자원학회 논문집**, 제36권, 제6호, pp.961-969
- 한국건설기술연구원 (2004). **시험유역의 운영 및 수문 특성 조사·연구**, 건기연 98-077.
- Barling, R., Moore, I., and Grayson, R. (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 Resources Research*. Vol. 18(5), pp. 1311-1325.
- Beven, K. and Kirkby, M. (1979). "A physically-based, variable contributing area model of basin hydrology" *Hydrological Sciences Bulletin*, Vol. 24, pp. 43-69.
- O'Callaghan, J., 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, E. (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." *Journal of Hydrology*, Vol. 276, pp. 112-127.
- 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.
- Topp, G.C., Davis, J.L., and Annan, A.P. (1980). "Electromagnetic determination of soil water content measurements in coaxial transmission lines." *Water Resources Research*, Vol. 16, pp. 574-582.
- Western, A., Bloschl, G., and Grayson, R. (1998). "Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment." *Journal of Hydrology*, Vol. 205, pp. 20-37.

(논문번호:05-144/접수:2005.11.11/심사완료:2006.06.21)