

## 산지사면에서의 TDR을 이용한 토양수분 집중모니터링을 통한 토양수분 감쇄특성 분석

이가영 · 김상현 · 김기훈 · 이혜선  
부산대학교 환경공학과 수자원환경실험실  
(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

### Analysis of Soil Moisture Recession Characteristics on Hillslope through the Intensive Monitoring Using TDR

Ga Young Lee, Sang Hyun Kim, Ki Hoon Kim and Hye Sun Lee

Water Resources Environment Lab., Dept. of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan, Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

#### ABSTRACT

The spatial and temporal distribution of soil moisture was characterized from soil moisture data through the intensive monitoring using Time Domain Reflectometry (TDR). The recession of soil moisture after a rainfall event was characterized and the empirical equation was used in the recession curve analysis. Recession analysis provides features of soil moisture variation such as recharge and stability depending upon locations of monitoring. The wetness index was useful for explaining spatial and temporal distributions of soil moisture and recession characteristics at hillslope scale.

**Key words** : Soil moisture, TDR, Flow distribution Algorithm, Recession, Wetness index

#### I. 서 언

사면에서 토양수분의 시간 공간적 분포 특성은 증발, 침투, 지하수 함양량, 토양 침식, 식생 분포 등을 지배하는 중요한 요소이며, 분포형 수문 모형에 있어서 중요한 입력 변수로서 작용하며, 포괄적인 수문과정을 이해하고 정확한 모형의 구현을 위해서 토양수분의 특성 파악은 필수적인 요소이다(Ambrose, 2004). 그러나 비포화대에서의 흐름은 비선형적인 특성으로 인하여 토양수분의 정확한 움직임을 예측하기가 매우 어렵다(Hornberger, *et al.*, 1998). 또한, 사면의 유출기작과 관련해서도 토양수분의 움직임을 파악해야 한다. 토양수분의 움직임을 파악하기 위해 실시하는 추적자 실험은(Trace Test), 경비와 노력이 과대하게 필요하고, 현장의 보전성에 문제가 제기됨으로 토양수분의 측정

을 교란을 줄이는 방법으로 지속적으로 실시해야 할 필요가 있다.

비포화 토양에서 토양수분을 측정하는 방법으로는 전통적으로 모세관 압력을 측정하는 장력계가 널리 쓰여 왔다. 장력계는 원리와 조작이 간단하지만 측정 장치 내의 압력이 정상상태에 도달하기까지는 반응시간이 소요되기 때문에 단시간에 함수량을 측정하는 것은 곤란하다는 단점이 있다. 한편, Topp *et al.*(1980)이 도입한 TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수분 측정 방법은 현장에서 빠른 시간 내에 함수량을 측정할 수 있어 다양한 연구들을 통해 그 효용성과 정확성이 검증되고 있다(Walker *et al.*, 2004). 특히 TDR은 현장에서 토양층의 교란을 최소화하면서 여러 지점의 토양수분을 거의 동시에 연속적으로 측정할 수 있으므로 시간에 따라 변화하는 토양수분의 공

간적 분포 특성을 파악하는데 있어 적합하다. 따라서 본 연구에서는 TDR을 이용하여 국내 산지사면에서 시간에 따른 토양수분의 변화 양상을 장기적으로 모니터링 할 수 있는 측정 체계를 구축하여 강우 사상 전 후에 동적으로 변화하는 토양수분 자료를 시간 단위로 획득하였다. 이러한 집중관측에서 얻어진 자료의 분석을 바탕으로 국내 산지사면에서의 강우 발생에 따른 토양수분 변화와 유출 형성 등 일련의 과정을 파악, 이해하고 그 특성을 규명하고자 하였다. 특히 토양수분 감쇄곡선은 해당지점으로 유입 유출되는 수분의 변화량을 의미하므로 이에 대한 분석은 사면유출기작을 물리적으로 규명하는 시발 연구가 될 수 있다. 이 연구에서는 수문분석에 사용되는 감쇄곡선의 회귀분석을 토양수분 시계열에 적용하고 이를 수치지형분석결과와 연계하여 해석을 시도하였다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 연구대상 유역

본 연구는 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역내에 위치한 범륜사 우측 소규모 산지 사면에서 실시하였다. 설마천 유역은 산지 소유역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초 자료에 대한 지속적 관측과 자료 축적을 위해 1995년부터 한국건설기술연구

원에서 시험유역으로 운영하고 있다. 설마천은 유역면적 8.50km<sup>2</sup>, 유로연장 5.80km, 유로경사 2.3%로 전형적인 급경사 산지 사행하천이다. 지질학적 형상은 작은 절리가 많이 발달되어 있고, 엽리와 절리 등 지질구조상 강우초기에는 하천의 수위에 큰 변화를 보이지 않다가 파쇄대를 채운 후에 하천의 수위가 급격히 증가하는 양상을 보인다. 표토는 얇은 편으로 수분 함양능력이 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중 호우시 토석류를 유발한다. 시험유역에는 6개 우량관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 운영되고 있다. 각 관측소에서는 일련의 연속적인 수문 관측 및 자료처리 과정을 통해 우량, 유량, 수질, 기상 자료 등을 10분 단위로 생성하고 있다(Jung, 2001). Fig. 1은 연구 대상지역인 설마천 유역내에 범륜사 북측 산지 사면을 나타내고 있으며 이 지역은 평균경사도 27.5°의 급경사 사면으로 상부사면으로부터의 수분 유입이 불가능한 독립적인 사면이며 인위적인 요소들에 의한 교란이 없는 자연 산지이다. 또한 주변에 한국건설기술연구원에서 운영하는 범륜사 우량 관측소가 있어 정확한 강우량 자료를 얻을 수 있다.

### 2.2. TDR을 이용한 토양수분 측정

TDR은 전기전도도를 이용하여 토양수분을 측정하는 방법으로 다양한 수문학적 과정들의 규명을 위한 연구

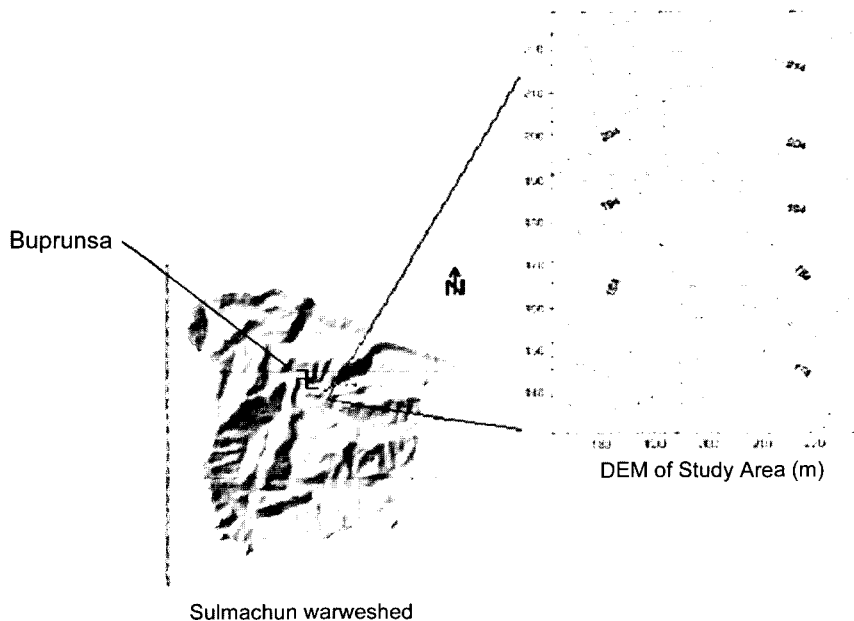


Fig. 1. Sulmachun watershed and study area.

에 사용되고 있다. TDR을 토양 수분의 측정에 처음으로 적용한 사례는 Topp *et al.*(1980)에 의해 보고되었다. Jones *et al.*(2002)는 TDR을 이용한 토양수분의 측정 방법이 다른 토양수분 측정 방법들과 비교할 때 가지는 주요한 장점들을 다음과 같이 정리하였다. 첫째, TDR은 1-2% 내외의 토양수분 변화까지 측정할 수 있는 정확성을 가진다. 둘째, TDR은 다른 측정방법보다 보정의 과정이 간편하다. 셋째, 중성자 탐침이나 감마 감쇄법과 같은 방사능 위험이 없다. 넷째, 측정이 쉽고 간단하며 자동 측정 기능과 다중연결 장치(multiplexer)를 통하여 연속 측정이 가능하다. 따라서 TDR은 뛰어난 시간, 공간적 분석력을 가진다. TDR의 토양수분 측정 원리는 길이( $L$ )를 알고 있는 탐침을 땅속에 묻고 전기신호가 지나가는 지점의 유전상수(dielectric constant)가 변형되어 반향 되는 파의 성질을 이용하는 것이다. 발생시킨 신호가 탐침을 지나 되돌아오는 반향시간을 구하여 탐침 주변의 토양의 유전상수를 구해낼 수 있다. 탐침을 둘러싼 토양의 유전상수는 신호의 전파속도( $v = 2L/t$ ) 함수로서 유전상수와 탐침의 길이, 반향시간의 관계는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $c$ 는 진공상태에서 빛의 속도(전자기 신호의 전파속도, 약  $3 \times 10^8 \text{ms}^{-1}$ )이며  $t$ 는 신호가 토양 속에 묻힌 탐침의 길이만큼을 되돌아오는 반향시간,  $L$ 은 탐침의 길이이다. 물의 유전상수( $K_a = 81(20^\circ\text{C})$ )는 토양 속 무기물의 유전상수( $K_a = 3$ )나 공기의 유전상수( $K_a = 1$ ), 얼음의 유전상수( $K_a = 4$ )에 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 수분 측정에 매우 효과적인 방법이 될 수 있다. Topp *et al.*(1980)은 유전상수( $K_a$ )로부터 함수량( $\theta$ )을 추정하는 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\theta = -5.3 \times 10^{-2} + 2.92 \times 10^{-2} K_a - 5.5 \times 10^{-4} K_a^2 + 4.3 \times 10^{-6} K_a^3 \quad (2)$$

여기서  $\theta$ 는 식 (1)에서 제시된 유전 상수  $K_a$ 를 이

용하여 추정된 토양 내 함수량을 의미한다.

### 2.3. 토양수분 모니터링 시스템의 구축

최적의 토양수분 측정망을 구축하기 위해서는 강우 유출 시 발생하는 흐름 경로를 예측하고, 공간 유출 특성을 감지할 수 있는 의사결정과정을 수행해야 한다. 이를 위해서는 현장 사면에서 고도 토심 등에 대한 정밀 측량을 실시하여 이를 바탕으로 흐름 발생경로를 계산하고 토양수분 센서의 공간적 분포를 결정할 필요가 있다. 연구 대상지역인 설마천 범류사 사면의 정밀한 DEM(1m×1m) 구축을 위해 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용해 직접 측량 하였다. 측량을 통하여 얻어진 각 좌표 정보를 좌표변환 알고리즘에 적용하여 데카르트 좌표로 변환하고 이를 통해 연구 대상사면인 범류사 북측사면에 대한 1m 간격의 정밀 DEM을 구축하였다. 구축된 1m 정밀 DEM을 흐름분배 알고리즘(Kim and Lee 2004)에 적용하여 우선 흐름경로를 파악, 고려하여 측정지점을 선정한 후 해당지점에 센서를 매설한다.

일반적으로 토양의 수분함유 정도는 토양의 종류, 공극률 등의 물리적 특성에 영향을 받게 된다. Table 1은 조사지역 내에서 시료채취가 이루어진 13개 지점을 나타낸다. 이 13개 지점은 TDR의 wave guide가 매설된 지점과 일치한다. 토양시료의 특성을 분석하고자 체분석을 실시하여 분석결과를 삼각분포도에 도시하였다(Fig. 2). Sand는 입경 2.0~0.02mm, Silt는 입경 0.02~0.002mm, Clay는 입경 0.002mm 이하를 나타낸다. 체분석을 통한 입경분포 결과에 따라 전체적인 대상사면의 토양성분은 Sandy 성분이 40~80%, Clay 성분이 10~15%, 나머지 Silt 성분이 10~15%로 나타났다. 조사지역은 토양분류에서 loamly sand, sandy loam 내지 loam에 해당되었고 X선 회절분석결과 구성광물의 경우 카올린, 녹니석과 같은 점토광물의 구성비가 비교적 높았다. 이러한 입도분석과 광물조성으로 볼 때 조사지역의 토양은 점토화가 진행되는 과정에 있는 것으로 보인다.

Beven and Kirkby(1979)에 의해 도입된 습윤지수( $\ln(a/\tan\beta)$ )는 지형에 따른 각 지점의 기여면적,  $a$ 와 국부 경사도,  $\tan\beta$ 를 이용하여 토양의 포화 정도를 설명하는 인자이다. 따라서 습윤지수의 모의를 통해 지형에 따른 토양수분의 분포특성과 포화도를 파악하고 포화유출이 발생할 가능성이 높은 우선흐름 경로를 예

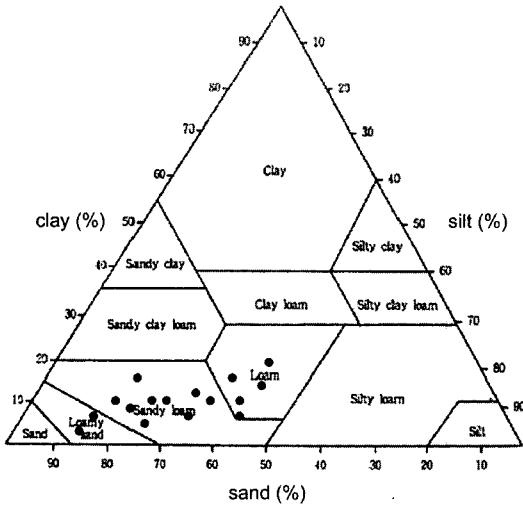


Fig. 2. Soil particle distribution.

측할 수 있다. 본 연구에서는 이러한 습윤지수의 산정을 통하여 우선 흐름 경로를 파악하고 이를 토양수분 측정 지점의 선정과 시스템의 구축에 활용함으로써 측정 지점의 선정에 유의성을 찾고자 하였으며 한정된 탐침을 이용하여 최적의 효율적인 측정 시스템을 구축하고자 하였다. 이러한 습윤지수를 산정하기 위해서는 흐름분배 알고리즘을 통해 기여면적을 계산하여야 하는데 그 방법으로는 단방향 흐름분배 알고리즘, 다방

향 흐름분배 알고리즘, Lea의 방법, DEMON, Dinfinitly 등 다양한 방법이 제시되었다(Kim and Lee, 2004). 또한 습윤지수의 정상상태 가정을 완화한 반동력학적 습윤지수 및 동력학적 습윤지수가 개발되었다(O'Loughlin, 1986). 본 연구에서는 제시되어진 알고리즘 중 흐름의 수렴과 분산을 각각 가장 잘 나타내는 단방향 흐름분배 알고리즘(SFD(Single Flow Direction)) 및 다방향 흐름분배 알고리즘(MFD(Multiple Flow Direction))을 이용하여 습윤지수를 모의하여 대상 사면에서의 포화경도와 분포를 예측하여 보았다(Kim and Lee, 2004). Fig. 3의 (a)와 (b)는 각각 SFD, MFD 알고리즘을 이용한 정적 습윤지수의 적용 결과로서 두 알고리즘의 분포 경향 자체는 유사하지만 SFD는 흐름선의 발달이 두드러져있으며 MFD는 SFD에 비해 분산 특성이 두드러짐을 알 수 있다.

Fig. 4는 측정지점을 사면의 등고선 지도위에 도시화 한 것이며 Table 1은 각 측정지점의 흐름분배 알고리즘(SFD, MFD)를 통한 습윤지수 계산 결과를 보여주고 있다. MFD알고리즘을 이용한 습윤지수 계산 결과가 사면에서 토양수분의 분산 분포 특성을 잘 나타내며 사면의 특성화를 위해 보다 더 적합한 것으로 나타나므로(Kim and Lee, 2004) MFD 알고리즘을 통한 습윤지수 수치에 따라 사면을 상부, 중부, 하부 사면으로 구분하였으며 이러한 구분은 고도의 차이에

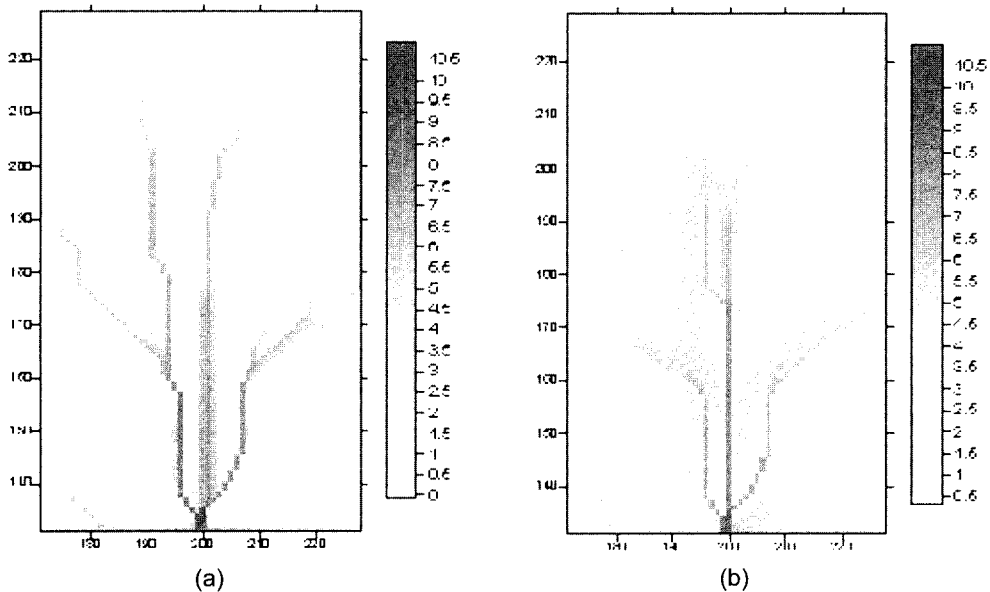


Fig. 3. Wetness index of study area by (a) SFD and (b) MFD.

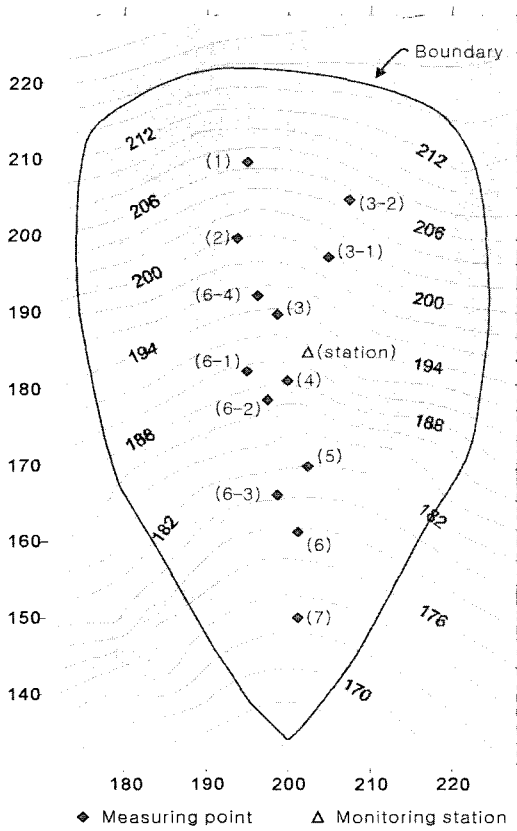


Fig. 4. Soil moisture monitoring positions.

의한 구분과도 거의 일치한다. 예외적으로 6-3 지점의 경우 고도가 5 지점보다 낮아 위치상 하부에 속하지만 습윤지수가 하부지점들에 비하여 차이가 크고 중부

지점들과 유사한 결과를 나타내므로 중부 지점으로 구분하였다. 측정 지점들을 통한 수평적 토양수분의 변화뿐만 아니라 각 지점에서의 토양수분의 수직적 분포 양상과 변화를 파악하기 위하여 TDR 탐침(wave guide)을 각 지점에 깊이에 따라 2, 3개씩 매설하였다. Table 1은 측정지점의 좌표 및 지점별 탐침 설치 현황을 나타내고 있다. 본 연구에서는 Soil Moisture사의 Mini-Trase를 사용하고 다중연결장치(Multiplexer)를 이용하여 13개 지점 31개 탐침에서 거의 동시에 토양수분을 측정하여 1시간 간격으로 집중 모니터링을 실시하였다. 토양수분의 측정은 2003년 11월 6일부터 11월 22일까지 이루어 졌으며 측정기간 중 11월 8일과 9일 사이 28mm, 11일에 19mm, 20일에 8mm 등의 강우가 있었다. 이중 첫 번째 강우와 두 번째 강우가 끝나고 감쇄현상이 분명히 관찰되는 시점부터 각각 69시간 211시간의 토양수분 변화자료를 감쇄곡선의 기초 자료로 사용하였다.

2.4. 감쇄곡선분석

강우 유출의 수문곡선에 있어서 감쇄 곡선 분석에 대한 다양한 방법으로서의 접근이 수행되어 왔다. Boussinesq(1877)은 대수층으로부터 하천으로의 부정류 흐름을 해석하는 기본적인 비선형 미분방정식인 Deput-Boussinesq 식을 선형화하여 다음과 같은 지수 함수로 나타내었다.

$$Q_t = Q_0 \exp(-t/C) \tag{3}$$

Table 1. Coordinates, wetness index, vertical depths of monitoring positions.

section	point	x	y	z	wetness index (MFD)	wetness index (SFD)	wave guide position
upper	1	197.53	210.19	206.94	3.563	4.874	surface, subsurface 30cm
	2	196.55	200.29	200.05	4.927	5.791	surface, subsurface 30cm
	3-1	204.03	197.37	199.38	4.437	2.988	surface, subsurface 30cm
	3-2	205.82	204.87	205.02	4.379	2.961	surface, subsurface 30cm, 60cm
	6-4	198.10	193.05	194.89	5.142	6.797	surface, subsurface 10cm
middle	3	199.50	190.39	193.84	5.498	5.911	surface, subsurface 10cm
	4	199.50	180.49	187.90	5.764	5.818	surface, subsurface 30cm
	6-1	196.33	183.15	189.88	5.657	3.498	surface, subsurface 30cm, 60cm
	6-2	198.12	178.93	186.68	5.981	3.402	surface, subsurface 30cm, 60cm
lower	6-3	198.70	167.68	180.51	5.763	3.857	surface, subsurface 30cm
	5	202.44	170.59	182.33	6.400	6.112	surface, subsurface 30cm, 60cm
	6	200.48	160.69	177.44	6.476	6.605	surface, subsurface 30cm
	7	200.48	150.80	173.11	6.982	6.884	surface, subsurface 30cm

여기서  $Q_t$ 는 시간  $t$ 에서의 유출이며  $Q_0$ 는  $t=0$ 일때 유출,  $C$ 는 상수이다. 이러한 지수적 저류-유출 관계는 Beven and Kirkby(1979)에 의해 고안된 TOPMODEL에서 제시되었다. 한편, Horton(1933)은 비선형관계를 제안하여 다음과 같은 식을 제시하였다.

$$Q_t = Q_0 \exp(-Kt^m) \quad (4)$$

여기서  $K$ 와  $m$ 은 상수이다. Hall(1968)은 다음과 같은 거듭제곱법의 저류모델을 사용하여 토양수분 저류로부터의 중력배수를 표현했다.

$$Q_t = Q_0(1 + \mu t)^p \quad (5)$$

여기서  $\mu$ 와  $p$ 는 상수이다. Wittenberg(1994)는 실험적으로 거듭제곱 형태의 모델이 실제 하천의 감쇄곡선을 적절히 표현한다고 보고했다. 노르웨이의 시험유역에서는 실험적 연구를 통해 다음과 같은 경험식을 도출해 내었다.

$$Q_t = \alpha t^{-r} \quad (6)$$

여기서  $\alpha$ 와  $r$ 은 매개변수이다. 최근까지 노르웨이에 서 감쇄 분석 연구는 일반적으로 식 (6)을 토대로 이루어지고 있다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 토양수분 감쇄곡선의 함수화

토양수분의 공간적 시간적 분포 형상은 초기 토양수분 조건, 강우에 의한 반응정도와 속도, 강우 후의 감쇄 특성에 따라 다양한 양상을 보였다. 이러한 감쇄 특성곡선의 함수화 및 재현성, 공간적 변화 특성에 초점을 맞추어 토양수분의 감쇄 곡선을 분석하였다. Fig. 5의 (a)는 1 지점 지하 30cm의 두 번째 강우에 따른 토양수분의 급격한 증가 이후 감쇄되는 부분을 분리한 것이다. 이를 관찰하면 감쇄가 일정한 곡선 형태로 이루어지고 있어 토양수분의 변화와 시간이 함수적 관계를 가지고 있음을 알 수 있다. 시간에 따른 토양수분의 변화를 일반적으로 기술하기 위하여 다음과 같은 거듭제곱 형태의 관계식을 도입하였다.

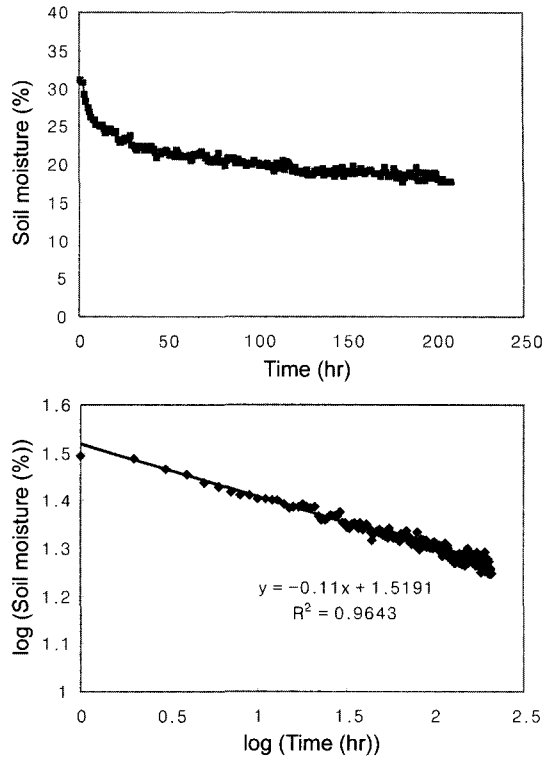


Fig. 5. Soil moisture recession curve at 30cm subsurface point of position 1 (a) and log-log plot (b).

$$\theta = at^b \quad (7)$$

여기서,  $\theta$ 는 토양 함수량(%)이며  $t$ 는 시간(hr),  $a$ 와  $b$ 는 감쇄 관련 계수이다. 이식을 양변에  $\log$ 를 취하면 아래와 같이  $\log \theta$ 와  $\log t$ 가 선형 관계를 가지게 된다.

$$\log \theta = \log a + b \log t \quad (8)$$

따라서 강우 후의 실제 토양수분의 감쇄 양상의 토양수분 축과 시간 축에  $\log$ 를 취해 양 축( $\log \theta$ ,  $\log t$ )의 관계가 선형을 나타낸다면 시간에 따른 토양수분은 식 (7)과 같은 관계를 가지고 있다. Fig. 5(b)는 Fig. 5(a)에서  $y$ 축의 토양수분 항과  $x$ 축의 시간 항을  $\log$ 로 취하고 도식한 결과이다. 감쇄곡선을 선형함수로 근사화를 하면 결정계수,  $R^2$ 가 0.9643으로 높은 상관성을 보이고 있다. 이러한 결과로부터  $\log$ 토양함수량(%)과  $\log$ 시간(hr)이 선형관계에 있음을 알 수 있다. 또한 다

른 지점의 토양수분의 감쇄도도 유사한 결과를 나타내고 있었다. 이것은 사면에서 강우 이후 시간에 따른 토양수분의 감쇄 곡선이 거둬제공 형태의 식 (7)과 실험적, 경험적으로 일치성이 높은 것을 나타내며 토양수분의 일반적인 감쇄 곡선을 식 (7)의 형태로 나타낼 수 있음을 시사한다.

3.2. 토양수분 감쇄곡선 분석

Fig. 6은 사면상부 지점들의 첫 번째 및 두 번째

강우사상 후 감쇄 곡선들을 지점별로 나타내고 있다. Fig. 6의 (a)는 1지점의 첫 번째 강우에 대한 감쇄곡선으로 지하 30cm에서는 추정식과 유사하게 감쇄하는 반면 지표에서는 몇몇 시간대에서 급작스러운 변화가 관찰된다. 이는 토양 내부의 소규모의 대공극구조의 붕괴나 대공극 사이의 소규모 토양유실로 인한 관료형태흐름의 급격한 발달 혹은 국부적인 소규모 사태 발생 등의 토양층 구조의 국소적인 변화를 뒷받침하는 것이며, 이러한 국소적인 변화가 강우가 없는 시점에

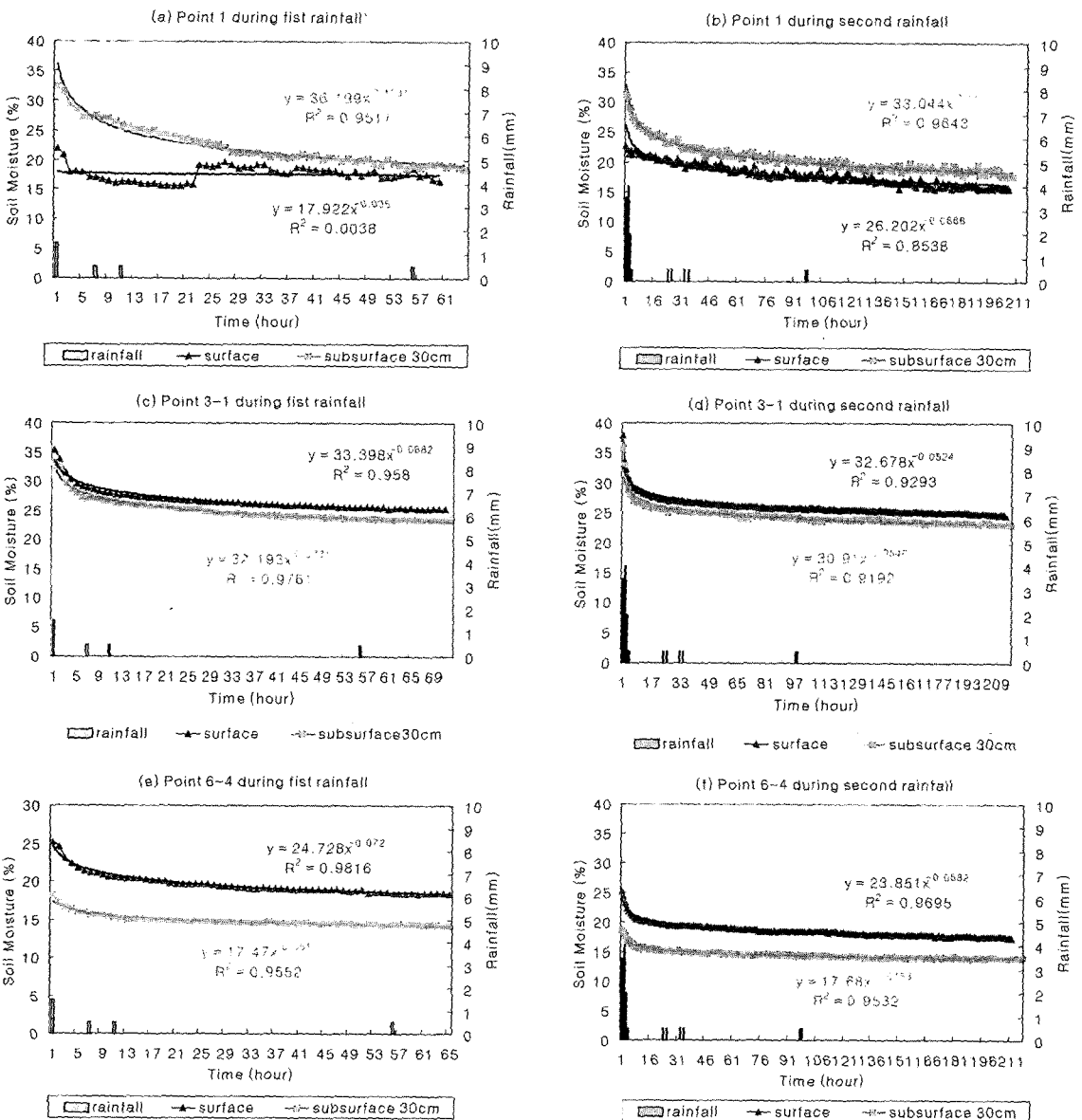


Fig. 6. Recession curves at upper section of study area.

도 발생하고 있다는 것을 나타내고 있다(Uchida et al., 2001). 국소적 변화에 의해 토양수분의 값이 급격하게 변화한 경우에는 단일 감쇄 특성곡선을 따르지 않으며 감쇄 특성 자체도 변화함을 알 수 있다. 1 지점 지표 첫 번째 감쇄 곡선을 제외하고 나머지 다른 사면 상부 지점들의 추정 감쇄 곡선에 대한 상관계수,  $R^2$ , 값은 평균 0.914로 나타나 식 (7)의 상당히 높은 감쇄곡선 재현성을 보여주고 있다. Fig. 6(b) 1 지점 지표의 두 번째 강우에 대한 감쇄를 살펴보면 지하에 비하여 불안정한 변화 추이를 보이며 1 지점 전체가 전반적으로 다른 지점들에 비하여 불안정한 편이지만 첫 번째 강우에 비하여 안정된 모습을 보이고 있다. 1 지점뿐만 아니라 대부분의 지점에서 첫 번째 강우에 대한 감쇄에 비해 두 번째 강우에 대한 감쇄가 추정 곡선에 잘 수렴하며 안정적인 감쇄를 나타낸다. 이는 첫 강우 이전의 초기 토양수분의 상태는 강우가 부족한 가을의 비교적 건조한 경향을 나타내었으나 두 번째 강우 이전의 초기 토양수분은 선행강우의 영향으로 토양수분이 상승하였기 때문이라고 판단된다.

또한 각 지점의 같은 심도에서 강우에 대한 감쇄 곡선 자체가 첫 번째 강우와 두 번째 강우에 대하여 유사하게 재현되고 있음을 알 수 있다. 이는 각 지점에서 고유의 감쇄 곡선 특성을 나타내고 있는 것으로 강우량과 초기토양수분 함량에 따라 증가하는 토양수분량과 증가 추이는 다르지만 강우 후에 나타나는 감쇄 특성은 지점별로 유사성을 가지고 재현되고 있음을 나타내는 것이다. 또한 사면 상부 지점들 중에서 보다 최상류에 있는 1, 2 번과 같은 지점에서는 상대적으로 변화성이 크고 3-1, 6-4 지점 등과 같이 하부로 내려올수록 안정적인 변화와 감쇄곡선을 보다 더 잘 수렴하는 것을 알 수 있다(Fig. 6).

Fig. 7은 사면중부 지점들의 첫 번째 및 두 번째 강우사상 후 감쇄 곡선들을 지점별로 나타내고 있다. 사면중부에서는 (a) 첫 번째 강우시 4 지점 지표와 (c) 첫 번째 강우시 6-3 지점 지표를 제외한 지점들에서 추정 감쇄 곡선에 상당히 잘 수렴하는 경향을 보인다. 전체 곡선들의  $R^2$ 값의 평균은 0.94이며 급작스러운 변화가 나타나는 4 지점 지표 첫 번째 감쇄 곡

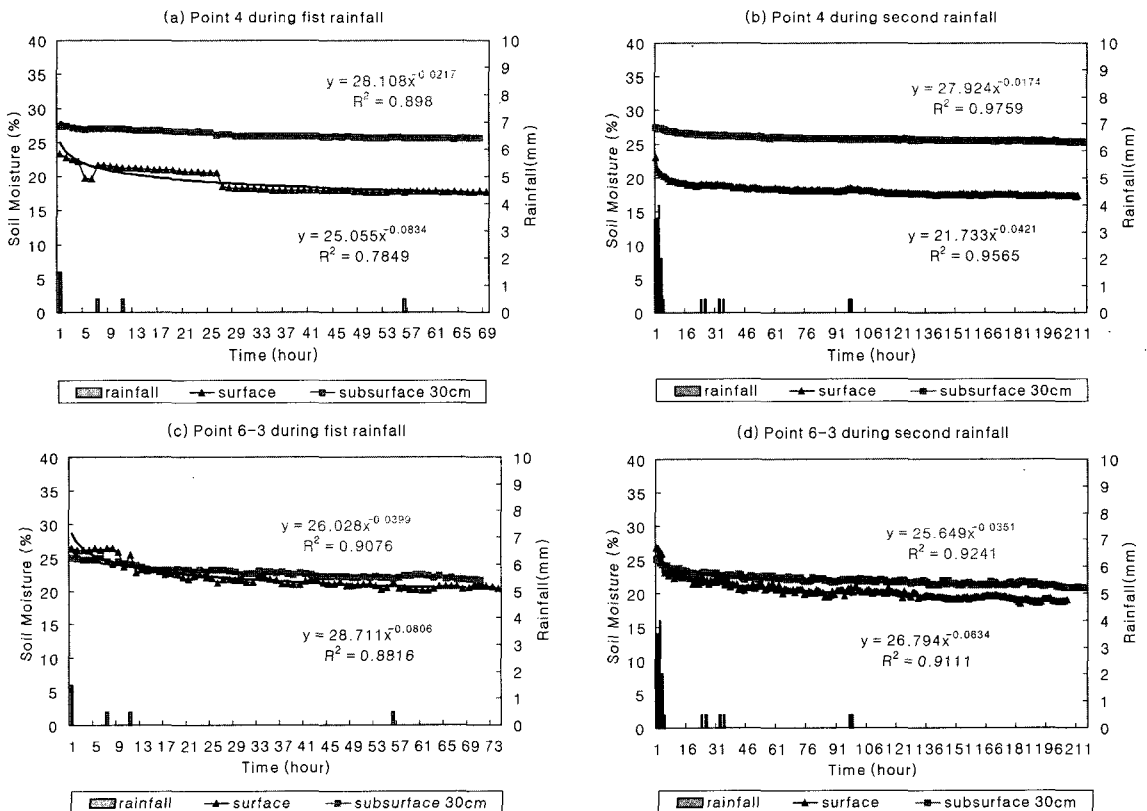


Fig. 7. Recession curves at middle section of study area.



선과 6-3 지점 지표 첫 번째 감쇄 곡선을 제외하면 0.951로 나타나 상부사면에 비하여 높은 경향성과 안정성을 보였다. 또한 전반적으로 감쇄곡선에서 b의 값이 상부는 -0.0276에서 -0.153의 값을 가지지만 사면 중부에서는 -0.0122에서 -0.0806의 범위를 가져 대체적으로 상부에서의 변화폭이 크고 감쇄정도도 급하였다. Fig. 7(a)는 4 지점의 첫 번째 강우 시 감쇄곡선을 나타내는데, 지표의 경우 상부사면 1 지점 지표와 유사하게 갑작스런 증감을 발견할 수 있다. 1 번과 4 번 지점 모두 표층보다 심층이 높은 함수량을 보이며 이는 지하로의 직접적인 유입, 관료적 형태의 유입 가능성을 시사한다. 따라서 상대적으로 구조가 약한 지표에서 부분적 토양 구조 변화에 의한 토양수분의 급격한 변화가 발생하기 쉽게 된다. 한편 두 번째 강우에 대하여서는 지표와 지하가 모두 매우 일관되고 안정적으로 잘 수렴하는 감쇄 곡선을 보인다.

Fig. 8은 사면하부 각 지점에서 첫 번째 및 두 번째 강우에 대한 감쇄 그래프와 감쇄 곡선식을 나타내고 있었다. 사면하부 지점에서는 전반적으로 감쇄 정도가 상당히 완화되고 완만한 특성을 나타내었다. Fig. 9는 사면 상부, 중부, 하부에서의 감쇄 곡선 기울기 절대값의 분포를 나타내고 있다. 사면상부에서는 기울기 절대값이 0.023~0.15의 범위로 그 값과 변화폭이 모두 크게 나타나며 사면중부에서는 기울기 절대값이 0.01~0.06의 범위로 상부에 비해 크게 줄어들고 변화폭도 감소하였다. 사면하부에서는 감쇄 곡선 기울기 절대값의 범위가 0.022~0.049로 중부사면의 감쇄곡선 기울기값 보다는 약간 높게 나타났으며 차이의 변화폭은 상부, 중부에 비해 현저하게 적어 감쇄가 가장 완만한 특징을 보여 하부에서의 충전효과를 확인할 수 있었다. Fig. 8의 전체 하부 지점들의 R<sup>2</sup>는 급격한 변화가 나타난 5 지점 지표 첫 번째 감쇄 곡선을 제

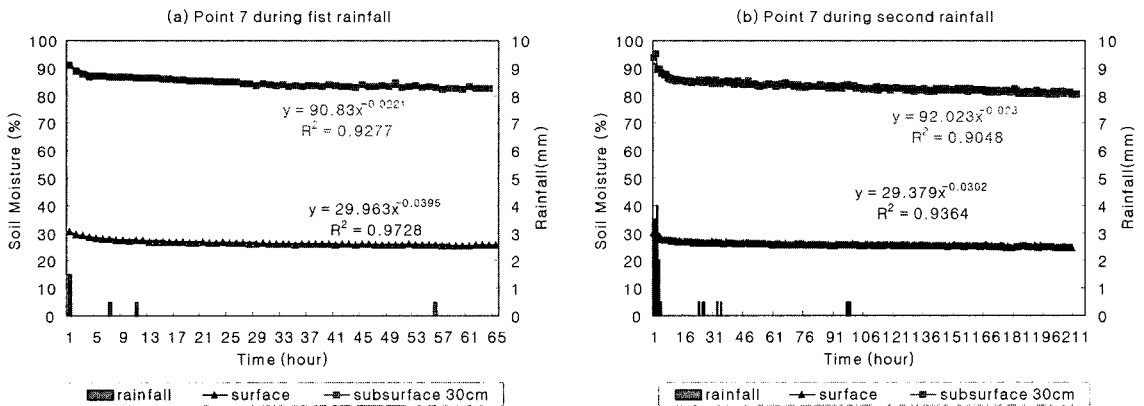


Fig. 8. Recession curves at lower section of study area.

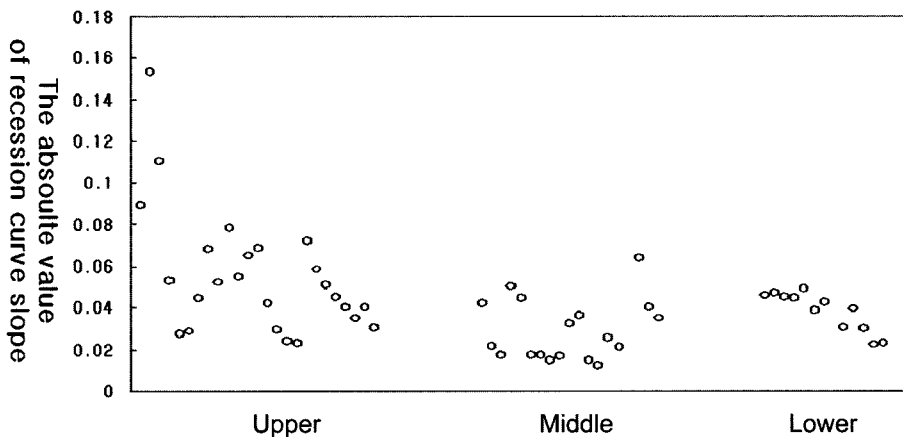


Fig. 9. Recession slopes of upper, middle and lower sections.

외하면 평균 0.911로 나타났으며 특히 사면하부에서는 상대적으로 지표의 변동성에 비해 지하의 변동성이 크다는 것을 알 수 있다. 이는 사면하부에서는 상대적으로 지하에서 다양한 경로를 통한 기여를 통하여 토양 수분의 활성화 정도가 크다는 것을 의미한다. 감쇄곡선에 있어서도 지하부분에서 변동과 변화가 좀 더 활발하게 감지된다. 또한 사면하부에서도 한 지점에서 첫 번째 강우 사상에서의 감쇄 곡선이 두 번째 강우 사상에 대하여서도 유사하게 재현되는 경향이 있어 계수  $a$ 와 관련한 지점에서의 포화정도 및  $b$ 와 관련한 감쇄 정도가 각 지점에서 고유한 특성을 드러내는 것이며 각 강우 사상에 대하여 재현성을 가지고 있음을 나타낸다(Table 2).

### 3.3. 습윤지수와 비교분석

Fig. 10은 지점별 습윤지수와 감쇄 곡선 기울기의 관계를 나타내고 있다. 습윤지수가 약 5.6이하로 상대적으로 낮은 사면상부 지점들에서는 감쇄 기울기 절대값이 0.023~0.15의 범위로 그 값과 변화폭이 모두 크게 나타났다. 습윤지수가 5.6~6.2 정도 사이에 밀집되어 거의 유사한 값을 가지는 사면중부의 경우 기울기 절대값이 0.012~0.064의 범위로 상부에 비해 값이 크게 줄어들고 변화폭도 적어진다. 약 6.2 이상의 높은 습윤지수를 가지는 하부사면에서는 감쇄 기울기의 변화폭이 0.022~0.049로 사면중부의 감쇄곡선 기울기값 보다는 약간 높게 나타났으며 차이의 변화폭은 사면상부, 중부에 비해 현저하게 적어 감쇄가 가장 완만한

**Table 2.** Slope and coefficient of determination,  $R^2$ , of recession curves.

section	point	first rainfall		second rainfall	
		slope	$R^2$	slope	$R^2$
upper	1surface	-0.005	0.004	-0.089	0.854
	1subsurface 30cm	-0.153	0.952	-0.110	0.964
	2surface	-0.053	0.852	-0.028	0.842
	2subsurface 30cm	-0.029	0.846	-0.045	0.692
	3surface	-0.040	0.988	-0.035	0.958
	3subsurface 10cm	-0.040	0.888	-0.030	0.905
	3-1surface	-0.068	0.958	-0.052	0.929
	3-1subsurface 30cm	-0.078	0.976	-0.055	0.919
	3-2surface	-0.065	0.915	-0.069	0.887
	3-2subsurface 30cm	-0.042	0.929	-0.029	0.930
	3-2subsurface 60cm	-0.024	0.871	-0.023	0.934
	6-4surface	-0.072	0.982	-0.058	0.970
6-4subsurface 10cm	-0.051	0.955	-0.045	0.953	
middle	4surface	-0.083	0.785	-0.042	0.957
	4subsurface 30cm	-0.022	0.898	-0.017	0.976
	6-1surface	-0.050	0.988	-0.044	0.969
	6-1subsurface 30cm	-0.017	0.976	-0.017	0.948
	6-1subsurface 60cm	-0.015	0.979	-0.017	0.966
	6-2surface	-0.032	0.978	-0.036	0.931
	6-2subsurface 30cm	-0.015	0.950	-0.012	0.953
	6-2subsurface 60cm	-0.025	0.953	-0.021	0.961
	6-3surface	-0.081	0.882	-0.063	0.911
	6-3subsurface 30cm	-0.040	0.908	-0.035	0.924
lower	5surface	-0.024	0.397	-0.046	0.900
	5subsurface 30cm	-0.047	0.945	-0.045	0.956
	5subsurface 60cm	-0.045	0.926	-0.049	0.922
	6surface	-0.039	0.991	-0.043	0.919
	6subsurface 30cm	-0.019	0.791	-0.031	0.753
	7surface	-0.395	0.973	-0.030	0.936
	7subsurface 30cm	-0.022	0.928	-0.023	0.905



**Table 3.** Soil moisture recharges at monitoring positions.

section	point	soil moisture(%)	section	point	soil moisture(%)
upper	1surface	6.7	middle	6-1surface	4.7
	1subsurface 30cm	5.7		6-1subsurface 30cm	1.5
	2surface	8.8		6-1subsurface 60cm	2.1
	2subsurface 30cm	7.8		6-2surface	0.2
	3surface	8.8		6-2subsurface 30cm	1.5
	3subsurface 10cm	7.7		6-2subsurface 60cm	2.6
	3-1surface	7.7		6-3surface	1.3
	3-1subsurface 30cm	5.1		6-3subsurface 30cm	2.1
	3-2surface	6.1		5surface	11
	3-2subsurface 30cm	4.3		5subsurface 30cm	10.8
middle	3-2subsurface 60cm	4.1	5subsurface 60cm	11.3	
	6-4surface	6	6surface	6.6	
	6-4subsurface 10cm	4.4	6subsurface 30cm	5.6	
	4surface	1.3	7surface	11.3	
	lower	4subsurface 30cm	2.4	7subsurface 30cm	16.9

**Table 4.** Statistical features of measured soil moisture results.

section	point	mean	variance	skewness
upper	1surface	16.91	8.68	-1.44
	1subsurface 30cm	20.25	15.05	0.37
	2surface	23.89	8.35	-2.51
	2subsurface 30cm	18.15	11.23	-1.51
	3surface	22.64	8.30	-2.54
	3subsurface 10cm	23.64	6.98	-2.44
	3-1surface	25.82	10.78	-0.65
	3-1subsurface 30cm	24.17	8.00	-0.16
	3-2surface	21.44	8.62	-1.41
	3-2subsurface 30cm	25.038	3.02	-1.61
	3-2subsurface 60cm	24.60	2.59	-1.92
	6-4surface	18.39	6.62	-0.92
	6-4subsurface 10cm	14.27	2.83	-1.49
	middle	4surface	18.31	1.94
4subsurface 30cm		25.70	0.90	-1.65
6-1surface		23.15	4.12	-1.23
6-1subsurface 30cm		30.04	0.72	-0.62
6-1subsurface 60cm		29.72	0.84	-1.35
6-2surface		24.71	1.62	0.39
6-2subsurface 30cm		27.99	0.39	-1.14
6-2subsurface 60cm		25.08	1.16	-1.32
6-3surface		20.63	2.91	1.33
6-3subsurface 30cm		21.98	1.35	-0.39
lower	5surface	19.63	12.30	-2.66
	5subsurface 30cm	20.10	13.65	-2.42
	5subsurface 60cm	21.95	17.74	-2.24
	6surface	24.29	6.68	-1.98
	6subsurface 30cm	20.32	3.88	-2.08
	7surface	25.02	12.87	-2.61
	7subsurface 30cm	81.99	35.59	-2.23

이는 사면 상부는 배수특성이 두드러진 반면, 사면 하부는 충전특성이 부각되고 사면 중부는 두 특성의 적절한 균형으로 설명됨으로, 강우에 따른 충전 토양수분함량을 통한 사면의 특성화에 습윤지수가 유용하게 활용됨을 보여주고 있다.

Table 4는 각 지점의 시간에 따른 토양수분 측정 결과의 평균, 분산, 왜곡도 분석 결과를 나타내고 있다. 토양수분함량 평균은 사면 하부의 7 지점을 제외하면 사면 중부지점들이 약간 높은 편이지만 각 사면 별로 큰 차이는 나타나지 않았다. 반면 분산은 큰 차이를 나타내었는데, 상부에서는 분산이 2.5~15.1, 중부에서는 0.3~4.1, 하부에서는 3.9~35.6로 사면별로 큰 차이를 나타내었다. 특히 주목할 부분은 중부의 분산이 다른 지역 사면에 비하여 매우 작다는 점인데, 이는 사면 중부에서의 토양수분의 안정적 변화 양상을 나타내고 있다. 사면의 상부와 하부에서는 초기 토양수분이 낮고 강우에 의한 토양수분 변화가 컸지만 중부에서는 초기 토양수분이 상대적으로 높고 강우에 의한 변화가 적어 중부지점들의 전체 결과의 분산이 다른 사면에 비하여 상대적으로 매우 작게 나타났다. 왜곡도는 몇 지점들을 제외하면 대부분 음의 값을 나타내어 각 지점별 토양수분 측정 결과가 대부분 평균보다 오른쪽으로 치우쳐 있음을 알 수 있다.

#### IV. 적 요

각 지점의 강우 발생에 따른 토양수분의 감쇄 현상을 특성화 할 수 있는 감쇄 곡선의 경험식을 도출하였다. 시간에 따른 토양수분의 감쇄 곡선은 거의 모든 지점에서 지표와 지하에 걸친 토양수분 측정 자료들과 높은 일치성을 나타내었다. 각 사면에서의 감쇄 특성을 살펴보면 사면 상부에서 하부로 내려올수록 추정된 감쇄 곡선에 보다 더 수렴하는 경향을 보였다. 또한 각 지점별 감쇄 곡선이 각 강우에 대하여 재현되는 경향을 보여 각 지점에서 포화과 감쇄가 각 지점의 고유한 특성을 가지고 있음을 나타내었다. 또한, 강우 발생에 대한 토양수분의 감쇄와 충전 등의 사면의 특성화에 기준이나 지표로서의 습윤지수의 유의성을 확인할 수 있었다. 궁극적으로 사면 유출의 명확한 기작을 규명하는데 있어서 보다 더 객관적인 검증을 위하여 계절별, 연별과 같은 추가적인 토양수분의 측정과 정밀도 있는 자료의 분석이 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원에 의해 수행되었다.

#### 인용문헌

- Ambrose, B., 2004: Variable 'active' versus 'contributing' area or periods: a necessary distinction. *Hydrological Processes* **18**, 1149-1155.
- Beven, K., and J. N. Kirby, 1979: A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Science Bulletin* **24**, 43-69.
- Boussinesq, J., 1877: Essai sur la theorie des eaux courantes du mouvement nonpermanent des eaux sou-terraines. *Academic Science Institute France* **23**, 252-260.
- Hall, F. R., 1968: Base-flow recession-a review. *Water Resources Research* **4**, 973-983.
- Hornberger, G. M., J. P. Raffensperger, P. L. Wiber, and K. N. Eshleman, 1998: *Element of Physical Hydrology* The Johns Hopkins University Press, 189-191.
- Horton, R. E., 1933: The role of infiltration in hydrologic cycle. *Transaction American Geophysical Union* **14**, 446-460.
- Jones, S. B., J. M. Wraith, and O. Dani, 2002: Time domain reflectometry measurement principles and applications. *Hydrological Processes* **16**, 141-153.
- Jung, S. W., 2001: Operation and research on the hydrological characteristics of the experimental catchment - Review of duration of design storm. Korea Institute of Construction Technology.
- Kim, S., and H. Lee, 2004: A digital elevation analysis: a spatially distributed flow apportioning algorithm. *Hydrological Processes* **18**, 1777-1794.
- O'Loughlin, E. M., 1986: Prediction of surface saturation zones in natural catchments by topographic analysis. *Water Resources Research* **22**, 794-804.
- Topp, G. C., J. L. Davis, and A. P. Annan, 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research* **16**, 574-582.
- Uchida, T., K. Kosugi, and T. Mzuyana, 2001: Effect of pipeflow on hydrological process and its relation to landslide: a review of pipeflow studies in forested headwater catchments. *Hydrological Processes* **15**, 2151-2174.
- Walker, J. P., G. R. Willgoose, and J. D. Kalma, 2004: In situ measurement of soil moisture: a comparison of techniques. *Journal of Hydrology* **293**, 85-99.
- Wittenberg, H., 1994: Nonlinear analysis of flow recession curves. FRIENDS: Flow Regimes from International and Experimental Network Data. IAHS Publ. No. 221, 61-67.