

설마천 유역의 토양수분 장기 모니터링을 통한 토양수분 시공간 변화양상의 특성화

Characterizing the Spatial-temporal Distribution of Soil Moisture for Sulmachun Watershed Through a Continuous Monitoring

이가영, 김기훈*, 김상현**,
Ga Young Lee, Ki Hoon Kim, Sang Hyun Kim

Abstract

Time Domain Reflectometry with multiplex system has been installed to configure the spatial and temporal characteristics of soil moisture in a mountainous hillslope. An intensive surveying was performed to build a refined digital elevation model and flow determination algorithms with inverse surveying have been applied to establish an efficient soil monitoring system. Steady state wetness index, quasi-dynamic wetness index and fully dynamic wetness index have been calculated. Continuous monitoring of soil moisture data were analyzed with wetness indices. Limitations and hydrological interpretations of this approach have been discussed.

Keywords : Soil Moisture, Monitoring System, Flow Distribution Algorithm

요 지

국내산지사면에서의 토양수분의 시공간적 분포를 파악하기 위하여 TDR(Time Domain Reflectometry)을 이용한 토양수분 장기 모니터링을 실시하였다. 대상사면을 측량하여 DEM(Digital Elevation Model)을 구축하고 흐름분배알고리즘에 적용하여 측정지점을 선정, 역 측량하여 효율적인 측정 체계를 구축하였다. DEM을 통하여 대상산지사면의 지형을 파악, 활용하여 정적 습윤지수(steady-state wetness index), 반동력학적 습윤지수(quasi-dynamic wetness index)를 구하였다. 장기 모니터링을 통한 토양수분 자료를 시공간적으로 분석하고 각각의 습윤 지수의 특징을 분석하고 습윤 지수와 토양수분 실측치와의 유의성과 제한점을 비교 분석하였다.

핵심용어 : 토양수분, 시공간적 분포, TDR, 지형, 습윤지수, 반동력학적 습윤지수, 장기 모니터링

1. 서 론

토양수분과 토양수분의 공간적 시간적 특징들은 증발, 침투, 지하수 재충진, 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 비포화대(vadose zone) 혹은 토양층에서의 토양수분의 함량에 크게 의존하게 된다(Western 등, 1998). 따라서 비포화대에 대한 토양수분 함량의 시공간적 분포 양상을 파악하는 것은 강우, 증발산, 유출 등의 일련의 수문학적 과정들을 규명하는 데 있어서 매우 중요한 일이라 할 수 있다. 토양수분을 조사하는 현장측정법에는 Theta probe, 장력계, TDR(Time Domain Reflectometry), EM 등을 사용하는 방법들이 있다. 이 중 TDR을 이용한 방법(Topp, 1980)은 여러 개의 탐침을 매설하여 일정시간 간격으로 토양수분의 공간적 분포를 얻어낼 수 있어 토양수분의 시공간적 특성 파악에 매우 유용하다.

* 정회원, 부산대학교 환경공학과 석사과정
Research Assistant, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea

** 정회원, 부산대학교 공과대학 환경공학과 부교수
Associate Professor, Dept. of Environmental Engrg. Pusan National Univ., Pusan, 609-735 Korea

지형의 토양수분 함량에 대한 영향을 특성화한 습윤지수가 Beven과 Kirkby등(1979)에 의해 Topmodel등의 수문 모의에 도입되었다(Beven 과 Kirkby, 1979; O'Loughlin, 1986). 지형을 표현하는 인자로써 상부사면 기여면적과 경사도의 비로서 계산되어지는 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 장기간에 걸쳐 모니터링 함으로써 토양수분의 시공간적 분포 양상을 파악, 분석하고 지형과 우량 자료를 이용하여 정적 습윤지수(steady-state wetness index)와 반동력학적 및 동력학적 습윤지수를 도출하여 유의성 및 제한점을 비교, 분석하였다.

2. 연구 방법 및 이론

2.1 대상구역 및 토양수분의 장기 모니터링을 위한 시스템 구축

본 연구의 대상구역으로 경기도 파주시 적성면 마지리와 설마리의 설마천 유역내에 감악산 범륜사 우측 소규모 산지 사면을 선정하였다. 설마천 유역은 산지 소유역의 특성변화와 수문, 기상 등 기초자료에 대한 지속적 관측과 자료 축적을 위해 1995년부터 한국건설기술연구원에서 시험구역으로 운영하고 있으며 유역면적 8.50km², 유로연장 5.80km, 유로경사 2.3%로 전형적인 급경사 산지 사행하천이다. 시험구역에는 6개 우량 관측소, 2개 수위관측소 및 1개 기상관측소가 운영되고 있다. 일상적인 관측기기의 유지관리와 수문기상관측 및 관측 자료의 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, 2001). 그림1은 연구 대상지역인 설마천 유역과 범륜사 사면의 정밀 수치고도모형이다.

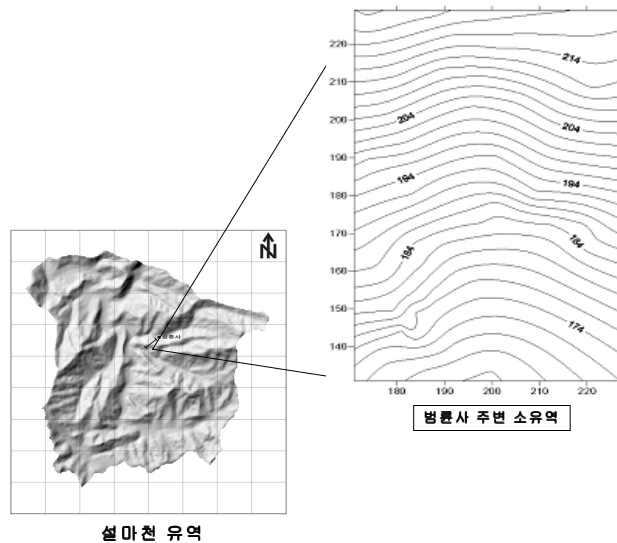


그림 1. 범륜사 부근 대상사면의 정밀 DEM

연구 대상 사면의 정확한 지형을 파악하고 1m 간격 정밀 DEM을 구축하기 위하여 TRANSIT (DT-208P, TOPCON)을 이용하여 측량을 실시하였다 사면은 가로 약 50m, 세로 약 100m 정도 규모이며 경사도는 약 27°-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. 역측량을 통해 선정된 측정지점의 정확한 위치를 파악하여 TDR 탐침을 설치하였다. 또한 지표면 뿐 만이 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. 토양수분은 2003년 11월 6일 오전부터 11월 22일 오전까지 16일간에 걸쳐 1시간 간격으로 30개 탐침으로부터 측정되었다.

2.2 습윤지수

2.2.1 정적 습윤지수 (steady-state wetness index)

Beven과 Kirkby(1979)에 의해 제안된 습윤지수는 $\ln(a/\tan \beta)$ 로써 지형의 포화정도를 설명한다고 알려져 있으며 자연의 지형 특성을 반영하는 인자로써 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. a 는 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 : Single Flow Direction, O'Callaghan과 Mark(1984)), 경사가 있는 모든 방향으로 흐름을 분배하는 다방향 알고리즘(MFD : Multiple Flow Direction, Quinn 등(1991))등으로 계산할 수 있다.(한지영과 김상현, 2003)

2.2.2 유사동력학적 습윤지수 (quasi-dynamic wetness index)

습윤지수의 계산을 위해서는 각 격자에 해당하는 유출량을 계산할 필요가 있는데, 이때 정상상태 가정에 도달하기 위해서는 유역 출구에서 가장 멀리 떨어져 있는 지역의 유출이 유역 출구에까지 기여하여야만 하지만 실제로 지표하 흐름 속도가 매우 작기 때문에 정상상태에 도달하기가 어렵다. 따라서 시간에 따른 기여면적이 변화하는 것을 고려해주는 것이 합당하다. 임의 시간 t 에 임의의 한 격자에 대해 기여할 수 있는 상부 기여 면적은 다음과 같이 줄 수 있다.

$$\begin{aligned}
 A_i &= \int_0^{s_i} b(s) ds & t_{i-1} < t < t_i & & s_i &= \frac{n(t-t_{i-1})}{K_s \tan \beta} \\
 A_i &= A_{ii} & t > t_i & & s_i &= s_{imax} \\
 A_i &= 0 & t < t_{i-1} & & &
 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서 A_i 는 i 번째 격자의 면적이고, A_{ii} 는 정상상태에 도달했을 때의 기여면적이고, $b(s)$ 는 흐름길이에 대한 함수이고, s_i 는 시간단계 $t-t_{i-1}$ 에서 i 번째 격자에 대한 흐름선이고 t 는 배수시키는 시간이고 t_i 는 i 번째 격자가 정상상태에 도달하는 시간이고, t_{i-1} 는 i 번째 격자에 기여하는데 필요한 시간을 의미한다.

2.2.3 동력학적 습윤지수(dynamic wetness index)

유사 동력학적 습윤지수가 일정한 재 충전율을 사용한 반면 실제 유량을 사용하여, 유출량이 시간에 따라 변화하는 것을 고려하면 포화된 지표하 흐름 $h(t)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$h(t) = \frac{1}{K_s \tan \beta} \int_0^t \frac{da(t)}{dt} r(t-\tau) d\tau \tag{2}$$

여기서 $q(t)$ 는 단위폭 당 유출량이며 $r(t)$ 는 시간 단계 t 에서 재충전율이고, τ 는 적분 변수이다.

3. 비교고찰

3.1 토양수분 장기 모니터링 결과

그림 2의 상단부 지점들 중 2가지 지점의 결과로써 상단부 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 1번 지점에서는 강우에 따른 큰 폭의 수분 증가와 강우 후의 급격한 감쇄 현상을 뚜렷하게 보이고 있다. 1번 지점의 경우 지표 보다 지하에서의 강우에 대한 반응 및 감쇄가 급격하고 변화의 폭이 큰데 이는 1번 지점이 사면의 가장 상단부로서 표토층이 얇고 자갈 및 큰 돌들이 많아 지하로의 강우의 직접적인 침투가 있을 가능성이 있으며, 큰 공극에 의해 지하 30cm-50cm 깊이의 토양

층에서 더 깊은 지하로 수직 이동하였거나 또는 지표하 흐름으로 빠르게 수평이동 하였을 가능성을 보여주는 것이다. 2번 지점을 살펴보면 지하에서의 수분 변화는 지표의 그것에 비해 반응이 느리고 지표가 감소하기 시작하는 시점에도 증가하고 있다. 이는 지표에서 지하로 수분이 침투되거나 상부사면으로부터 수분을 받는 데 지체되는 시간으로 보여지며 지표와 지하는 다른 수문학적 특성을 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한 상단부 지점들에서는 급격한 감소함에도 불구하고 전반적으로 강우 전과 강우 후의 토양수분의 상당한 증가와 충전효과를 볼 수 있다. 이는 중단부 지점들의 특성과 매우 대조적인 것이다.

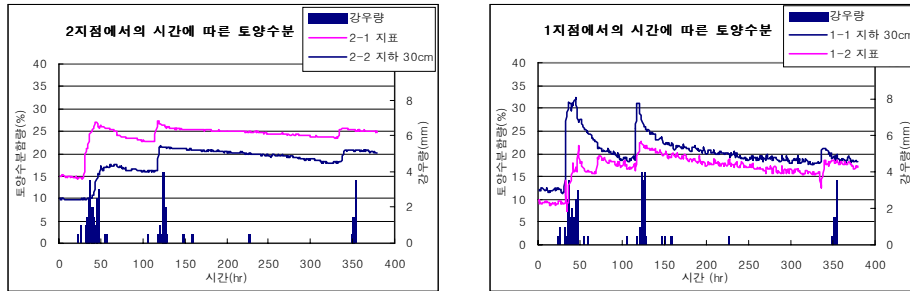


그림 2. 상단부 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화

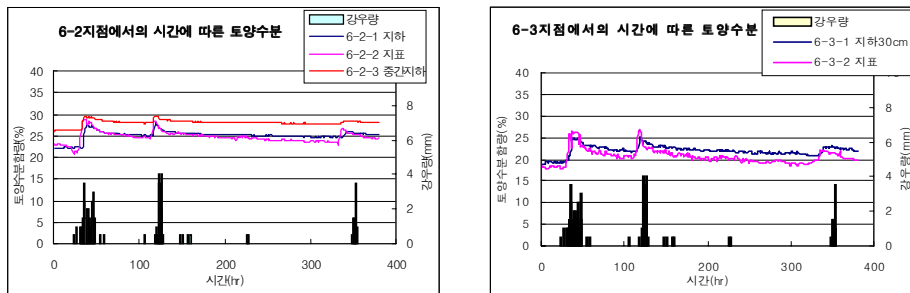


그림3. 중단부 지점들의 시간에 따른 토양수분의 변화양상

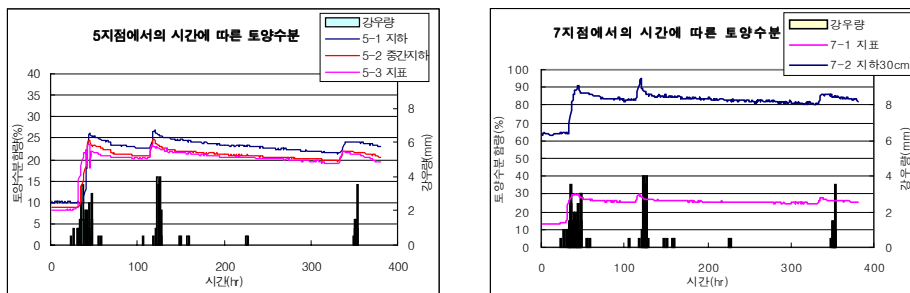


그림4. 하단부 지점에서의 시간에 따른 토양수분의 변화양상

그림 3은 중단부 지점들로서 중단부 지점들의 전반적인 특징은 토양수분의 안정적인 변화라고 할 수 있다. 상단부가 강우사상 전후의 토양수분 증가폭이 대부분 10%정도로 크고, 높이 치솟다가 빠르게 감소하는 것에 비하여 중단부에서는 증가폭도 5%정도로 낮고, 토양수분의 증가, 감소가 비교적 완만하여 급격한 증가나 급격한 감소를 나타내지 않고 안정적이다. 상단부와 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 초기 토양수분의 차이가 재충전량의 차이를 야기하는 요인으로 작용하고 있음을 나타내고 있다.

그림 4는 하단부 지점들로서 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. 특히 7번 지점과 같은 경우에는 지하의 토양수분이 지표의 토양수분에 비하여 훨씬 높아 지표하 흐름을 통한 상부로부터의 기여면적을 확인할 수 있으며, 그 값이 60%-93%정도로써 유출의 형성지점으로 생각되어진다. 실제로 7번의 하부 지점으로부터 강우 후 하나의 흐름으로 유출이 형성되는 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

3.2 습윤지수 적용 결과

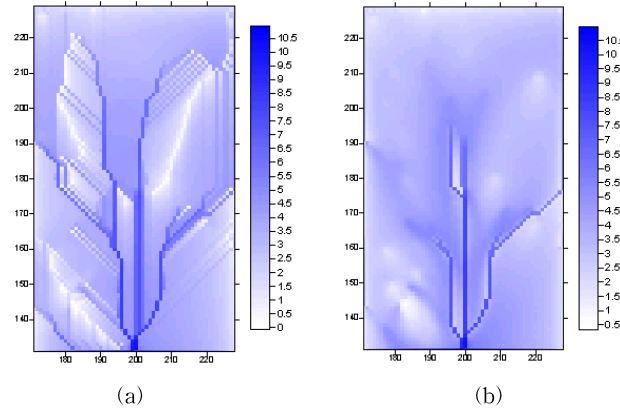


그림5 정적 습윤지수 (a) sfd (b) mfd

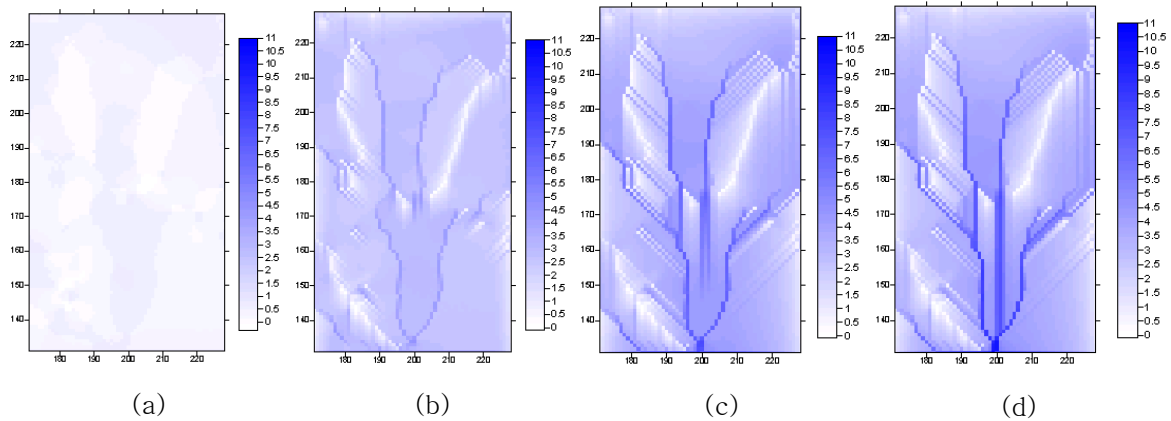


그림6 배수시간별 반동력학적 습윤지수(SFD) (a)10시간 (b)100시간 (c)380시간 (d)10000시간

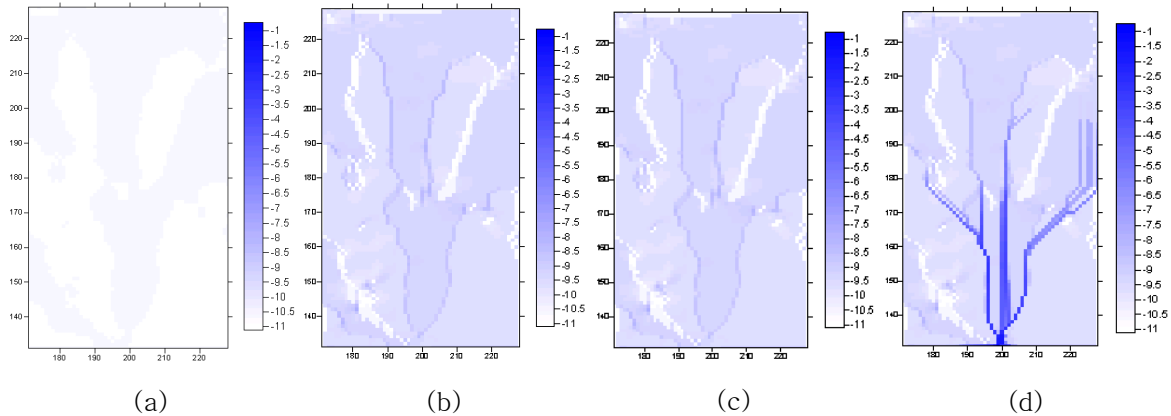


그림7 배수시간별 동력학적 습윤지수(SFD) (a)10시간 (b)100시간 (c)380시간 (d)10000시간

그림 5의 (a)와 (b)는 각각 SFD, MFD 알고리즘을 이용한 정적 습윤지수의 적용 결과로서 두 알고리즘의 분포 경향 자체는 비슷하지만 SFD는 흐름선의 발달이 두드러져있으며 MFD는 SFD에 비해 어느 정도의 분산 특성을 볼 수 있다. 그림 6과 7은 각각 배수시간에 따른 반동력학적 및 동력학적 습윤지수(SFD)를 나타내고 있으며 동력학적 습윤지수의 경우 1999년1월부터 2001년11월까지의 실제 우량을 사용하여 모의한 것이다. 반동력 및 동력학적 습윤지수는 시간에 따른 토양수분의 분포양상의 변화 흐름의 발생 등을 잘 설명하고 있다. 시간이 흐름에 따라 분산되어 있던 토양수분이 흐름선을 형성하며 정상상태로 접근하고 있는데 반동력학적 습윤지수의 경우 동력학적 습윤지수에 비해 빠르게 정상상태로 접근하며 동력학적 습윤지수는 10000시

간이 지난 후에도 정상상태와 차이가 확인된다. 한편, 위의 모든 습윤 지수에서 유역 출구의 위치나 대략적 모습은 거의 유사한 형태를 보이고 있다. 유출 형성지점으로 보이는 7번 측정지점은 습윤 지수에서의 출구와 연관성이 있는 것으로 생각되어지며 이 선을 따라 유출이 형성될 것으로 예상 된다. 또한 상부 사면에서의 상대적인 감쇄 효과와 하부 사면에서의 흐름의 축적 및 재충전 효과를 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 유역 특성에 맞는 산지 사면에서 TDR을 이용한 장기 토양수분 모니터링을 함으로써 국내 산지유역의 토양수분의 시공간적 변화 경향을 파악, 분석하였다. 특히 강우 사상에 따른 상, 중, 하단부의 서로 다른 변화 특성을 발견하였다. 상단부는 강우 후 토양수분이 급격하게 증가했다가 빠르고 급하게 감쇄하는 모습을, 중단부는 초기 토양수분이 높은 편이고 강우 후 변화의 폭이 작고 전반적으로 안정적이며, 하단부는 크게 증가했다가 느리게 감소하여 계속해서 상부로부터 재충전되는 것을 볼 수 있었다. 초기 토양수분 함량과 재충전량과의 관련성을 발견하고 감쇄곡선, 안정성, 재충전성의 특성을 대표할 수 있는 위치선정의 잠재성을 확인할 수 있었다. 토양수분에 영향을 미치는 인자 중 지형의 특성을 고려한 습윤 지수를 구하여 지형에 따른 토양수분의 분포를 각 알고리즘별로 비교 분석하였다. 정적 습윤지수는 흐름선의 잘 발달되어 있으며 이중에서도 SFD가 두드러진 흐름선의 형성을 보이고 있다. 반동력학적 습윤지수 및 동력학적 습윤지수에서는 시간에 따른 토양수분의 공간적 분포양상의 동적인 변화를 확인할 수 있었다. 특히 동력학적 습윤지수의 경우 실제 강우를 사용함으로써 보다 더 현실적인 모의의 가능성을 보여주고 있다. 또한 실측 자료에서 상부사면 및 하부사면의 두드러진 특징인 감쇄와 재충전 효과를 모의에서 확인하여 토양수분의 시공간적 분포 양상의 예측에 유의성을 보여주고 있다. 이는 주요한 수문학적 과정해석에 기여하며 증발산의 산정 및 유출 모의 등의 다양한 수문학적 모형에 활용될 수 있다. 또한, 본 연구에서는 토양의 공극 및 토질 등의 토양 특성 및 토양깊이 등에 대해서는 고려하지 않아 이에 대한 지속적인 연구가 요구되며 더 많은 검증 및 분석을 위하여 지속적인 토양수분 시공간 분포 자료의 획득이 필요하다.

감 사 의 글

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

참 고 문 헌

1. 한국건설기술연구원, (2001) “시험유역의 운영 및 수문특성 조사·연구”, 연구보고서, 건기연 98-077.
2. 한지영, 김상현(2003) “유사동력학적 습윤지수와 동력학적 습윤지수의 개발과 적용” 한국수자원학회 논문집, 제36권, 제2호, pp. 251-261.
3. 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
4. Quinn, P., K. Beven, P. Chevallier, and O. Planchon (1991). "The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models." *Hydrol. Process.*, vol. 5, pp. 59-79.
5. Quinn, P., K. 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.
6. 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.
7. Western, A. W., Blöschl, G, Grayson R.(1998). "Geostatistical characterisation of soil moisture patterns in the Tarrawarra catchment." *J. Hydrol.*, vol. 205, pp. 20-37.