

# 산림 사면에서 토양수분을 이용한 물 평균체류시간 추정

## Estimation of Mean Residence Time using Soil Moisture at a Hillslope on the Forested Catchment

진 성 원\* / 김 상 현\*\*

Jin, Sung Won / Kim, Sang Hyun

### Abstract

The mean residence time is the time scale for intermediate status between infiltration and runoff and one of the critical factors for understanding runoff response, erosion, and eco-hydrological processes. This research explored a direct method to estimate the mean residence time over existing indirect, isotope tracer method. Spatial and temporal distributions of soil moisture have been monitored for a year with 2-hours monitoring interval. Mean residence time for soil moisture showed apparent increasing tendency to deeper depth and decreasing trend during summer periods, which had intensive rainfall events. The mean residence times obtained from this research showed similar trend to those obtained from other isotope methods, which means the direct method can be an efficient approach to obtain the mean residence time.

**keywords** : mean residence time, soil moisture, hillslope hydrology

### 요 지

유역에서 물의 평균체류시간은 강우에 의해 토양에 강우 등으로 인해 수분이 침투하여 유출되기까지 소요되는 평균 시간이며, 침식, 식생분포, 유출기작 등을 지배하는 수문학적 과정을 이해하는데 중요한 요소이다. 물의 평균체류시간을 산정하는 대표적인 방법인 방사성 동위원소에 의한 추적자법은 계산과정이 복잡하고 많은 비용이 들면서도 간접적인 방법임으로, 본 연구에서는 토양수분의 거동을 관측해 산지사면에서 물의 평균체류시간을 산정하는 보다 직접적인 방법을 고안하였다. 토양수분의 측정을 위해 광릉 국립수목원에 위치한 산림 소유역에 토양 수분 측정장비인 TDR을 설치하고 1년 동안 2시간 간격으로 깊이별 측정을 수행하였다. 토양수분을 이용해 산정된 물의 체류시간은 대상유역의 불투수 지하면에 가까워질수록 상승하는 경향을 보였고 강우가 집중된 여름에 가장 짧은 것으로 나타났다. 실험에서 얻어진 평균체류시간은 기존의 화학적 방법을 통해 산정된 값과 유사한 경향을 보였는데 이러한 결과들은 토양수분의 측정과 분석을 통한 방법이 방사성 동위원소를 이용한 방법보다 더욱 효율성 있는 측정을 할 수 있다는 것을 나타낸다.

**핵심용어** : 평균체류시간, 토양수분, 방사성동위원소, 추적자법, TDR

\* 부산대학교 대학원 환경공학과 석사과정

Master Course of Environmental Engrg., Pusan Univ., Pusan, 609-735, Korea

\*\* 교신저자, 부산대학교 환경공학과 교수

Prof. Dept. of Environmental Engrg., Pusan Univ., Pusan 609-735, Korea

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

## 1. 서 론

토양층에 존재하는 물의 평균 체류시간(Mean Residence Time of Water : MRT)은 물의 저장량과 흐름경로(flow pathways), 그리고 하천 등의 채널에 유출되는 산지사면 물의 원천에 대한 정보를 알려주는 중요 요소이다(McGuire *et al.*, 2005). 물의 체류시간 정량화는 하천 등의 채널에 유출되는 산지사면의 물의 원천에 대한 정보를 추적하며, 수질관리에 있어 중요한 매개변수가 될 수 있는데, 예를 들어 비료나 제초제 등의 이동을 예측하고 대상구역의 작물재배와 같은 토지사용 변경 혹은 환경의 변화에 따른 반응시간을 계산·예측하는 데에 유용하다(Hornberger *et al.*, 2001). 또한, 체류시간은 과거 유입된 수분에 대한 대상구역의 경력을 의미함으로 기후변화와 토지사용에 따른 수문학적 반응을 살피는 대리변수로 유용하게 사용될 수 있다(McGuire *et al.*, 2005).

최근 국제적으로, MRT 측정에 많은 연구가 이루어지고 있으며, 물의 저장량과 흐름량을 정량화하는 모니터링 프로그램들이 개발되었다(Gibson *et al.*, 2002; Aggarwal, 2002; Hooper, 2004). 그러나 실험구역의 현장 실측을 통한 정량적인 분석결과가 부족하며, 국내와 기후, 지형·지질적인 면에서 상당한 차이를 보여 국내 산지사면의 물의 평균체류시간에 관한 연구방안의 고찰이 필요하다. MRT에 대한 중요성에도 불구하고 그 값과 분포를 실험구역에서 직접적으로 구하는 것은 물의 공급량을 제어할 수 있는 경우를 제외하면 매우 곤란하다(Rodhe *et al.*, 1996). 1970년대 이후 현재까지 보편적으로 방사성 동위원소를 이용한 추적자를 통해 MRT를 구하였는데 이 방법은 구역의 자세한 수문학적 특징과 물리적 구조 등을 필요로 하지 않고, 주로 개발도상국이나 미계측 구역에서 자주 사용되었다. 70년대 이후 물 순환과정을 추적하는 이상적인 추적자로서  $^{18}O$ ,  $^2H$ ,  $^3H$  등의 방사성 동위원소가 사용되어 왔다(Kendall and Caldwell, 1998). 다만, 이 방법이 가진 단점은 정상상태(steady state)를 가정한다는 점에 있다. 시간과 공간에 따라 흐름이나 투수율이 변하기 쉽거나, 수직, 수평 흐름이 존재하거나, 정체된 지역, 또는 우선흐름이 존재하는 경우 MRT의 측정이 어렵고, 특히 대기로의 증발산을 고려하면 더욱 복잡해진다(McGuire, 2005). 비정상상태를 고려한 MRT 측정 기술이 발달되고 선보이기도 하였지만(Lewis and Nir, 1978; Niemi, 1978; Zuber, 1986; Rodhe *et al.*, 1996) 계산상의 복잡함으로 인해 거의 쓰이지 않는다.

동위원소를 사용한 MRT의 측정은 아직 국내에서 이루어진 바 없다. 동위원소를 이용한 화학적인 측정방법은 무엇보다 그 과정이 매우 복잡하고 비싸며, 지속적인 자료의 확보가 곤란하다. 그로 인해 여러 수문학자들에 의해 보다 간단하고 신뢰도 높은 측정방법에 대한 연구가 진행되어 왔다(Vitvar *et al.*, 2002). 추적자 방법에 필요한 사전가정들을 최소화하기 위해서는 지하면에 대한 보다 직접적이고 많은 양의 자료가 필요하다.

본 연구에서는 산림사면에 적합하고 자료의 집중도가 높은 MRT의 측정을 위한 연구의 일환으로 동위원소를 이용한 방법 대신 단위시간 간격으로 측정·수집되는 토양수분자료를 사용하여 MRT를 산정하였다. 경기도 포천시 광릉수목원 소유역에서 Time Domain Reflectometry(TDR)를 이용하여 토양수분의 측정 시스템을 구축하고, 시간에 따른 실측 토양수분값을 지점별로 획득하였다. 강우 데이터 및 상부유출수를 유입유량으로, 실측한 토양수분감소량을 유출유량으로 하여 지점별로 채취한 토양샘플을 통해 얻어진 공극률과 상관관계에 따른 MRT의 분포 양상 및 월별 변화를 고찰하였다.

본 연구는 다음과 같이 세 가지 목적에 대한 분석과 결과 고찰을 제시한다. 첫째로, 토양수분을 이용한 MRT의 측정분석의 이론적 배경과 분석 절차를 정리한다. 둘째로, 광릉의 소유역에서 관측된 토양수분의 강우사상시 수문반응에 대한 공간적인 분포를 분석한다. 셋째로, MRT 분석의 계절적 변동성을 파악하여 이에 대한 고찰을 수행한다.

## 2. 연구방법 및 자료획득

### 2.1 토양 수분 자료 수집 장치

본 연구는 장기간 토양수분의 안정적인 확보를 위해 가장 광범위하게 이용되고 있는 Time Domain Reflectometry(TDR)(Walker *et al.*, 2004)를 사용하였다. 본 연구에서 사용된 TDR은 SOIL MOISTURE회사의 MiniTrase이며 토양수분을 측정하는데 2%의 오차범위를 가진다. MiniTrase는 함수량에 따라 달라지는 전기신호의 반향시간을 이용하여 각 함수량에 따른 유전상수를 계산하여 체적토양수분(%)을 나타낸다. 기본적으로 TDR은 원래 하나의 탐침만을 직접적으로 연결하여 사용할 수 있기 때문에 다중연결장치(Multiplexer)를 이용하여 복수(61개)의 탐침으로부터 연구조사지역의 각 지점별 토양수분을 2시간 간격으로 장기간 측정하였다.

사면에서 공극률의 공간적 분포를 알기 위해서 가밀

도 실험을 하였다. 그리고 대상유역에 대한 지형분석을 하기 위해 TheoDolite(DP-208P, TOPCON)으로 측량하여 얻은 각 좌표 정보에 좌표변환 알고리즘을 적용하여 데카르트 좌표로 변환하고 이를 통해 정밀 DEM을 구축하였다(Fig. 1) 측량을 통해 얻어진 정밀 DEM에 대하여 단방향 및 다방향 흐름분배알고리즘(SFD, MFD)을 적용하고 습윤지수를 산정(O'Callaghan and Mark, 1984; Quinn *et al.*, 1995)하여 우선 흐름 경로를 파악하여 주 흐름이 형성되리라 예상되는 곳을 위주로 측정지점을 선정하였다(Fig. 2).

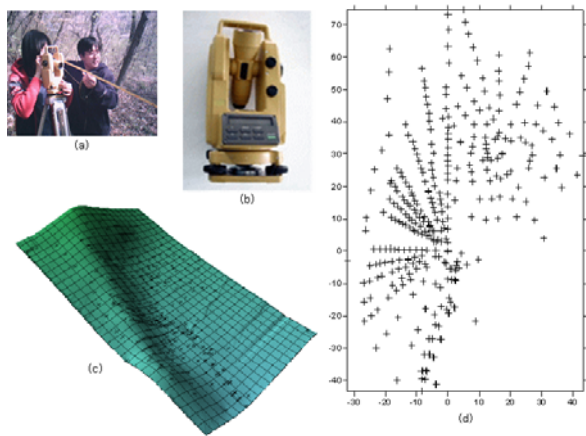


Fig. 1. Data Acquisition for Digital Elevation Model in the Study Area: (a) Intensive Surveying, (b) DP-208P(topcon), (c) Surveying points, and (d) Transformation to Cartesian Coordinate System

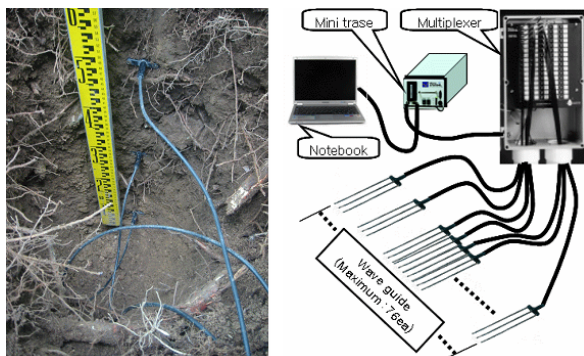


Fig. 2. Sensor Insertion and Equipments

## 2.2 연구조사지역

연구조사지역은 경기도 포천시 광릉슈퍼사이트 원두부 독립사면으로서 유역면적은 7,700m<sup>2</sup>, 연평균 기온은 11.5℃(30년 평균), 연평균강수량은 1,332mm(1982~2004년)이다. 그리고 평균사면경사는 19°이다. 지질 매체는 얇은 토층(40cm~80cm)과 풍화대 암반으로 구성

되어 있으며 토양층은 국제토양학회나 미국농무부에 의해 제안된 토성분류법에 의하면 사양토(모래: 53.2%, 미사: 39.2%, 점토: 7.6%)에 해당된다. 원두부 유역에서의 지표면으로부터 10cm 깊이의 토양공극률은 평균 60.1%이다. 이는 식생의 뿌리층 및 유기물이 다수 존재하며, 토양 소동물의 활동이 활발하기 때문이다. 임상은 졸참나무, 서어나무 등의 낙엽활엽수림이 주종을 이루고 있으며 토양공극률에 영향을 주는 대공극의 형성에 기여한다. Fig. 3은 연구 대상지역인 광릉 슈퍼사이트를 나타내고 있는 위성사진이며, 이 지역은 상부로부터 유입이 불가능한 독립적인 사면이다. Fig. 4는 역측량을 통해 선정된 TDR매설지점이다.

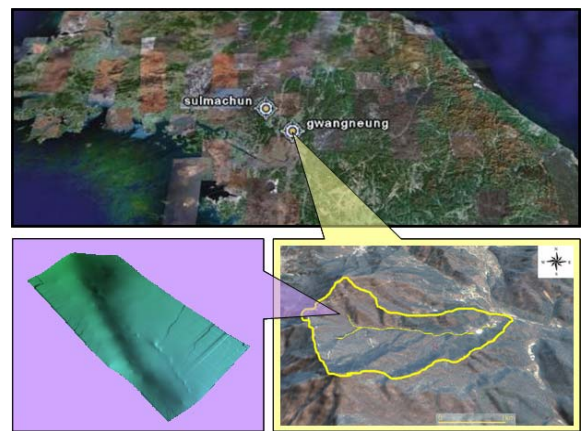


Fig. 3. Satellite Image of the Study Area

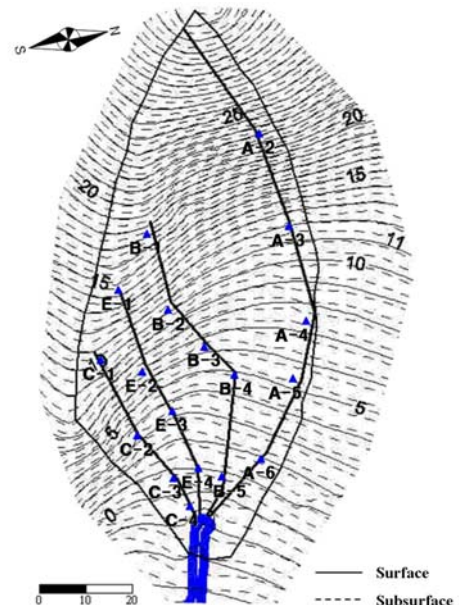


Fig. 4. Spatial Locations of Sensors and DEM for Surface(solid line) and Subsurface(dashed line)

### 2.3 토양수분 관측 및 강우량 분석

2006년 광릉실험유역의 토양수분값과 강우량을 자료를 얻기 위해 2시간 간격으로 각 지점을 측정하여 토양수분과 강우량의 시간적 변화를 관측하였다. 봄의 측정기간은 3월 1일부터 5월 31일까지, 여름은 6월 1일부터 8월 31일까지, 가을은 9월 1일부터 11월 31일까지 그리고 겨울은 1월, 2월 및 12월이다. 기간 내 일부 누락된 자료는 당시 측정기기인 TDR의 전력공급이 원활하지 못하여 발생하였다.

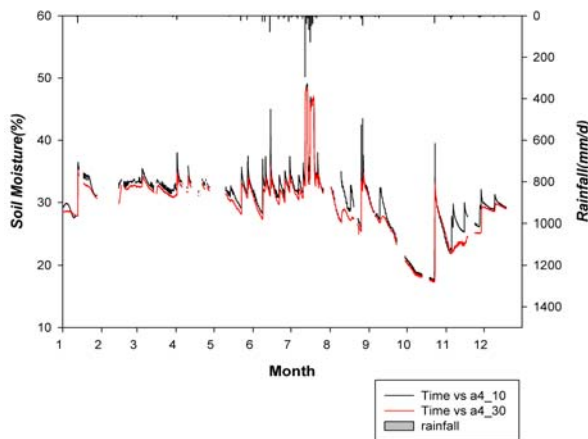
대상사면 내 위치한 A, B, C, E 지점들에서 측정된 토양수분 값은 평균적으로 20~30%의 값을 나타내었으며 A, B, C 지점들은 여름철 우기가 시작되는 7월 중반에 급격한 토양수분 값의 상승을 나타내었다. 우기가 끝나며 점차 감소하여 가을과 겨울에 가장 낮은 토양수분 값을 보인다. E 지점들은 8월부터 측정기기가 운용되어 8월 9일부터 12월 18일까지의 자료가 확보되었다.

Fig. 5는 비슷한 등고선상에 위치한 세 지점(A4, B3, C1)의 2006년도 토양수분을 깊이별로 나타내었다. 강우

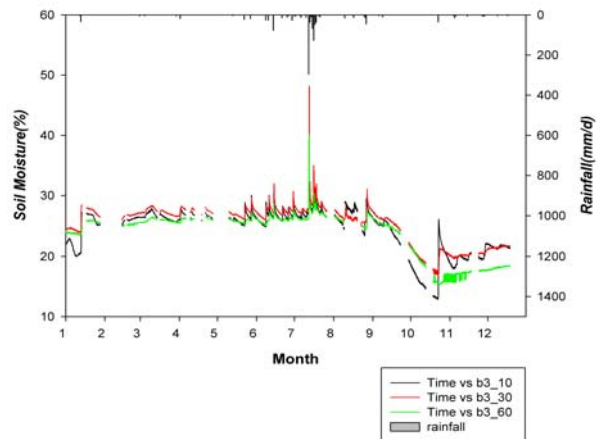
사상에 따른 토양수분의 변화량을 살펴보면 10cm 깊이에서 가장 큰 폭의 증감폭을 보이고, 상대적으로 60cm 깊이에서 작은 변화량을 나타내는 것을 알 수 있다. 이것은 지표면과 가까운 토양층이 침투율이 높고 불투수층에 가까워질수록 수분저장용량이 증가함을 의미하며, 그로 인해 지면과 가까운 깊이일수록 MRT가 낮게 측정될 것이라는 것을 추측할 수 있다. 강우량은 전체적으로 여름철에 집중되어 있으며 특히 7월에 집중되어 있다. 강우량에 비례하는 토양수분의 반응은 깊이가 얇은 곳일수록 빠르게 나타나고 강우가 소멸한 뒤 서서히 감소하는 경향을 볼 수 있다.

### 3. 평균체류시간

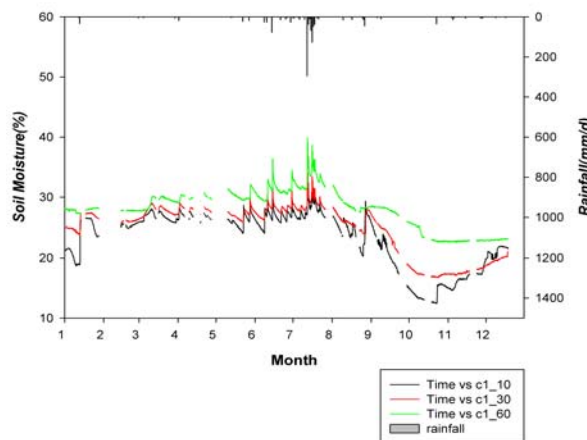
수문학적 순환구조에서 지표면 아래를 통과하는 물이 평균적으로 머무르는 시간인  $T_r$ 은 토양 내 저장된 수분체적  $S$ 를 유출률인  $Q$ 로 나눔으로서 구할 수 있다 (Chow *et al.*, 1998).



(a) A4



(b) B3



(c) C1

Fig. 5. Observed Soil Moistures and Rainfalls

$$T_r = \frac{S}{Q} \quad (1)$$

여기서 S는 유역 토양 내 물이 머무를 수 있는 공간을 뜻하는 유동성의 저장용( $L^3$ )이며, Q는 단위시간에 발생하는 유출률( $L^3 T^{-1}$ )이다. 본 연구에서는 S와 Q, 두 인자를 별도의 유도과정 없이 실측을 통해 구했으며 이로써 높은 신뢰도의 실측값을 획득하게 되었다.

### 3.1 가밀도 실험과 공극률 분포 측정

토양의 가밀도(Bulk density)는 자연 상태의 토양에서 토양입자간의 부피 뿐 만 아니라 공극의 부피를 합한 부피에 대한 비중이다. 토양의 가밀도는 자연 상태의 토양을 파괴하지 않고 시료를 채취하여 토양의 건조 중량을 측정하여 그 중량을 토양전체(공극포함) 용적으로 나눈 것이다. 가밀도는 단위부피분의 토양무게( $g/cm^3$ )로 나타내는데 대부분 미네랄토양의 가밀도는 1.0~2.0  $g/cm^3$ 이고, 깊이에 따라 작아진다(Ventrella *et al.*, 2005). 평균적으로는 1.3  $g/cm^3$  이다.

토양에서의 공극은 토양 부피 중에 고형물과 무기, 유기물질이 차지하고 있지 않는 부분으로서 토양입자 및 토양입자의 집합체가 불규칙한 형태를 하고 있으므로 토양공극이 생긴다. 토양을 파고 들어가는 뿌리, 벌레 및 곤충들에 의해서도 생긴다. 토양의 공극률 및 투수성은 지하층으로 유체와 오염물질의 이동에 영향을 미치는 물리적 특성이다. 공극률은 토양의 총 부피 중에 빈 공간(공극)의 비율을 말한다. 토양의 %공극률은 가밀도와 입자밀도를 이용하여 아래와 같은 Eq.(2)에 의해 구할 수 있다.

$$Porosity = 1 - \frac{D_b}{D_p} \quad (2)$$

여기서  $D_p$ 는 입자밀도(Particle density)로서 일반적으로 실제 토양에서 2.65( $g/cm^3$ )값을 가진다.  $D_b$ 는 가밀도(Bulk density)이다. 가밀도 실험을 위해 100ml 코어(Core)로 채취한 시료를 밀봉하여 실험실로 운반한 뒤 토양시료와 코어의 전 중량을 0.1gr 단위까지 정량하였다. 오븐에 110~120°C에서 24시간~48시간 동안 건조시켜 토양무게(Sd)를 계산하고, 코어부피(V, 100ml)당 건조된 토양무게를 계산하여 가밀도값(Sd/V)을 구했다.

### 3.2 평균 체류시간 분석방법

본 연구에서 MRT를 산정하기 위해서는 강우에 의한 유입량이 지면과 맞닿는 순간 모두 토양 속으로 침투된

다는 가정이 필요하다. 그리고 10cm보다 아래에 위치한 센서들로부터 측정된 수분 유입량은 모두가 상부에 위치한 상부에 위치한 지점들에서 측정된 기저침투량으로 산정하였다. 기저유출량 Q를 구하기 위해서 대상유역에서 2006년 중 약 274일 동안 2시간 간격으로 TDR센서가 설치된 61개 지점에서 측정, 분석하였다. 측정대상유역 지하면에서 유입과 유출에 관여하는 수분의 유동은 크게 토양수분 감소기간에서의 유동과 토양수분 증가기간의 유동으로 분류할 수 있다.

#### 3.2.1 토양수분 감소기간에서의 유동

첫 번째 경우는 토양수분이 감소하는 동안의 토양수분의 거동이다. 이 감쇄량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$D = O_{re} - I_{re} \quad (3)$$

여기서  $O_{re}$  와  $I_{re}$ 는 각각 토양수분(soil moisture)이 감소하는 동안의 기저침투량( $L^3 T^{-1}$ )과 강우량( $L^3 T^{-1}$ )이다. 그리고 TDR에 의하여 측정된 토양수분감쇄량은 강우에 상관없이 토양의 내 수분의 감쇄율(%)을 토양체적에 곱하여 산출한 양이며 이 값은 직접 측정된 자료로써 본 연구의 신뢰도를 가늠하는 요소이다. 따라서, 첫 번째 경우인 토양수분 감소기간 동안의 기저침투량은 다음과 같다.

$$O_{re} = I_{re} + D \quad (4)$$

$O_{re}$ 를 구하기 위한 두 인자가운데 하나인  $I_{re}$ 는 토양수분 감소 기간 내 내린 강우의 양이며 지표에서의 흐름이 없다고 가정한다면 강우시 토양에 접촉한 물이 지표하로 침투하여 기저침투량에 기여하게 된다. 토양수분이 감소하는 기간 내 내린 강우의 양은 비교적 적지만 이것이 기저침투량에 미치는 기여도는 매우 높다. 이는 다음 Eq.(5)로 나타낸다.

$$I_{re} = (R_{re1} + R_{re2} + R_{re3} \dots + R_{ren}) \quad (5)$$

여기서  $R_{re}$ 은 토양수분이 감소에서 증가로 바뀌기 전까지 내린 비의 양으로써 대상유역에서 10분 간격으로 측정된 강우의 값이다. 강우의 일부는 식물의 잎이나 줄기에 차단되어 식생표면에 저장된다. 잎의 표면에 저장된 수분은 대기 중에 증산되어 유실됨으로써 토양으로의 유입량에서 제외된다. 0.5~2.5mm의 비교적 적은 강우는 식생에 의해 차단되어 질 수 있고(Lull, 1964) 울

창한 산림에서 빗방울이 지면에 도달할 확률은 약 82% 정도이다(Dune and Leopold, 1978). 2.5mm 이상의 강우가 발생했을 때 강우자료(mm)를 부피로 환산하는 수식은 다음과 같다.

$$R = 0.82PA \quad (6)$$

여기서  $R$ 은 환산된 강우데이터( $m^3$ )로  $P$ 는 강우계로부터 측정된 강우자료( $m$ )이며  $A$ 는 지표면적( $m^2$ )이다. 감소수분의 크기는 2시간 간격으로 측정된 토양수분의 함유율(%)를 대상구역의 체적으로 곱하여 구할 수 있다.

$$\bar{D} = (w_{re1}V + w_{re2}V + w_{re3}V + \dots + w_{ren}V) \quad (7)$$

여기서  $w_{re}$ 는 실험기간 내 측정된 수분이 감소하는 기간 동안에 감쇄된 수분함량(%)이며,  $V$ 는 대상구역의 체적( $L^3$ )이다. 그러므로  $\bar{D}$ 은 토양수분이 감소하는 기간 동안에 감소한 수분의 부피를 나타낸다. 위 Eq.(4)에서 구해진  $O_{re}$ 가 분석기간 내 '토양수분이 감소하는 동안의 기저침투량'이 된다.

### 3.2.2 토양수분 증가기간의 유동

대부분의 경우는 강우가 발생하는 시점에서부터 토양수분함유율이 증가하였다. 그러나 강우량이 측정되었지만 토양수분함량이 떨어진 것으로 측정된 경우도 발생하였는데 이는 해당 강우이전에 더 큰 강우사상이 발생하여 상대적으로 과포화된 수분함량이 유출되는 경우이며 Eqs.(4)~(7)에 포함시켜 계산하였다.

두 번째로 토양수분이 상승하는 동안 내린 강우의 양이다. 대상사면내의 토양수분이 상승하는 일수는 2006년 중 측정된 274일 가운데 20~25%인 약 60여일 로써 비교적 짧은 편이지만 한반도의 강우특성상 여름 우기(6월,7월)에 많은 양의 강우가 내렸다. 강우시 표면 흐름이 없다면 이때 내린 강우가 토양속으로 침투되어 기저침투량으로 산정가능하다. 이를 간단히 나타내면 다음과 같다.

$$O_{ri} = I_{ri} - S_{in} \quad (8)$$

여기서  $I_{ri}$ 와  $S_{in}$ 는 토양수분이 증가하는 동안에 내린 강우의 양과 토양수분 증가량이다.

$$I_{ri} = (R_{ri1} + R_{ri2} + R_{ri3} \dots + R_{rin}) \quad (9)$$

$$S_{in} = w_{ri1}V + w_{ri2}V + w_{ri3}V + \dots + w_{rin}V \quad (10)$$

여기서,  $R_{rin}$ 은 토양수분이 증가에서 감소로 바뀌기 전 까지 내린 유효 강우량이다.  $w_{rin}$ 은 실험기간 내 측정된 수분이 증가하는 기간 동안에 감쇄된 수분함량(%)이며  $V$ 는 대상구역의 체적( $L^3$ )이다. 그러므로  $\bar{D}$ 은 토양수분이 증가하는 기간 동안에 감소한 수분의 부피를 나타낸다. 이렇게 구해진  $O_{ri}$ 은 감소기간 동안의  $O_{re}$ 보다 훨씬 큰데 이는 짧은 기간에 많은 양의 비가 내리는 강우특성의 영향이 큰 것으로 보인다. 그 이유는 여름철 내리는 대부분의 강우는 토양이 물을 저장할 수 있는 최대치를 넘어서기 때문이다. 결론적으로 MRT 산출에 필요한 기저침투량에 가장 큰 영향을 미치는 인자를 토양수분증가시에 내리는 강우의 양 혹은, 그 동안에 증가하는 토양수분의 양이다. 위의 두 방법으로 구해진 기저유출량( $O_{re}$ ,  $O_{ri}$ )을 토양수분의 감소 및 증가가 일어난 연 발생일로 나눈 것이 유출률(flow rate)이다.

$$Q_r = \frac{O_{re} + O_{ri}}{d_{re} + d_{ri}} \quad (11)$$

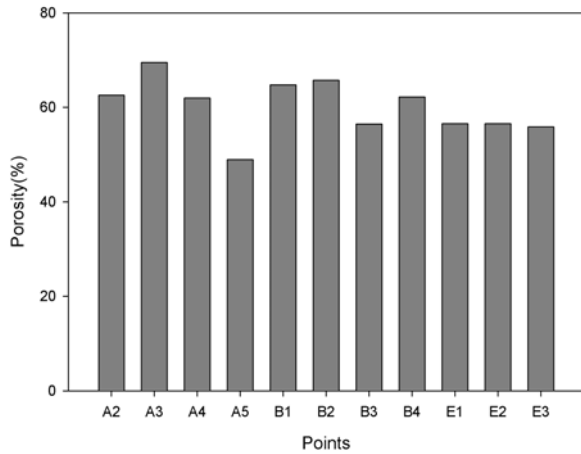
여기서,  $Q_r$ 은 실험기간 내 토양에 유입된 수분의 유출률로써 이것을 공극의 부피인  $S(m^3)$ 로 나눔으로써 MRT를 측정하였다.

## 4. 결과 및 고찰

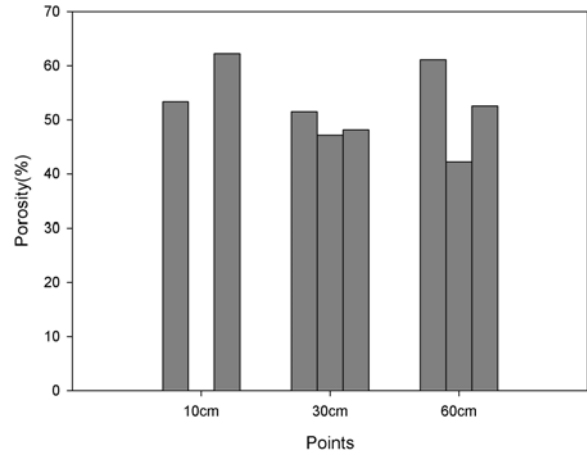
Fig. 6(a)은 실험에 의해 유도된 지점별 가밀도 값을 나타내고 있다. 각 지점에서의 공극률은 평균값이 60.1%이고 변동계수는 9.2%이다. 높은 공극률은 대상구역 내 널리 퍼진 식물뿌리 등 식생이 주된 원인이며 이는 산림사면구역의 특징이기도 하다. 공극률의 각 공간적 분포를 살펴보면 물리적 특징이 유사하며 MRT를 구하기 위해 쓰여진 공극률  $S$ 의 깊이별(10cm, 30cm, 60cm) 공극률은 별도로 실시한 깊이별 가밀도 실험 대상인 P1, P2 지점에서의 값을 사용하였다.

깊이에 따른 공극률을 구하기 위해 대상유역을 대표할 수 있는 고도별 세 지점을 선정하여 샘플을 채취, 위와 같은 방법으로 실험하였다. 각 깊이별 공극률 값을 평균하여 MRT 계산식에 도입하였으며 10cm 및 60cm 깊이에서보다 30cm 부근의 공극률이 비교적 낮았다. 그리고 10cm 깊이에서 측정된 공극률은 57.8%로 전체 지점의 10cm 깊이 평균인 60.1% 보다 약간 낮게 관찰되었으나 대체로 비슷한 값을 보이는 것으로 관찰되었다 (Fig. 6(b)).





(a) Porosity in 10 cm depth



(b) Average porosity in depths of 10 cm, 30 cm, and 60 cm

Fig. 6. Measured Porosity Values

Table. 1. Distribution of MRT in Depths of 10cm, 30cm, and 60cm

(unit : days)

지점 \ 깊이	10cm	30cm	60cm
C1	30	55	102
C2	32	56	102
C3	31	55	
C4	33	58	
B2	31	53	96
B3	34	60	108
B4	34	59	107
B5	31	54	99
A2	31	52	
A3	31	56	101
A4	32	55	
A5	89	151	205
E1	85	148	256(45)*
E2	95	161	277(45)**

\*,\*\* 기반암으로 인해 최대깊이 측정센서가 깊이 45cm에 매설된 경우

Table 1은 대상사면에서 관측된 1년간 토양수분과 강우량을 Eqs. (3)~(11)을 사용하여 연평균 체류시간을 지점별로 계산한 결과이다. C1~A4까지의 10cm지점 2006년 1월 1일부터 12월 31일까지의 자료로 계산된 값이며 평균값이 31.8일, 표준편차는 1.3일이다. A5, E1, E2의 10cm지점 평균체류시간은 상대적으로 높은 값을 보이는데 이는 해당지점이 강우가 거의 발생하지 않는 8월 이후부터 측정이 시작되었기 때문이다. 30cm지점의 평균체류시간도 10cm 지점과 유사한 양상을 보이고 있다. C1~A4까지의 평균값은 55.7일, 표준편차는 2.5일이

다. A5~E2 또한, 10cm 경우와 비교해서 평균값의 2배 정도로 나타났다. 60cm지점의 경우 평균체류시간은 102.1일, 표준편차는 4.2일이다. 하부로 내려갈수록 높은 MRT 평균값과 표준편차를 보였는데 이를 통해 토양층 하부일수록 다소 복잡한 구조를 띠는 것을 알 수 있다 (Fig.7).

대상구역은 수평적으로 고른 MRT 분포를 보이고 있고 사면에서의 위치에 따른 공간적 경향성은 보이지 않았다. 이는 수직적인 물의 이동이 수평적인 이동보다 더 우세하기 때문인 것으로 추측된다.

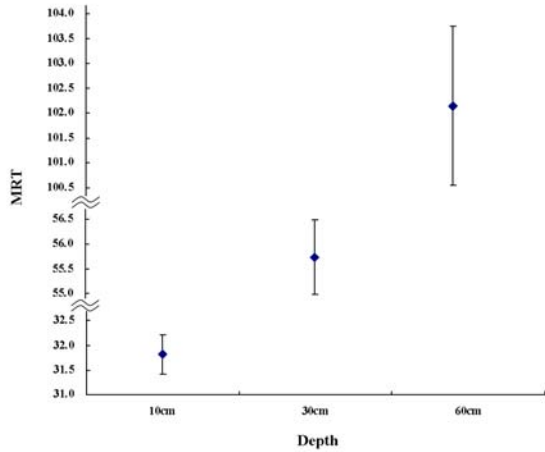


Fig. 7. Distribution of MRT in Depths of 10 cm, 30 cm, and 60 cm

Fig. 8에서 Fig. 11은 A부터 E선상에 이르는 각 지점들의 MRT를 월별로 계산하여 도시한 결과이다. Fig. 8의 A 지점들을 살펴보면 모든 지점에서 깊이별 MRT의 차이를 보이고 있다. 토양 깊이가 얇은 곳일수록 낮은 MRT을 보이며 깊이에 따라 증가하였다. A5와 E1, E2의 경우 측정기기의 가동이 8월 이후부터 가동되어 1월~7월간의 자료는 기록되어있지 않다. 월별 변동특성으로는, 1월에서 3월까지 상당히 높은 값을 보이는데

이는 MRT 값에 가장 큰 영향을 끼치는 경우가 거의 없고 토양에 대한 결빙과 눈의 영향 때문이라고 판단된다. 4월에 들어서며 눈과 얼음이 녹으면서 많은 기저 침투량을 보이며 MRT가 급격히 낮아진다. 강우량이 최대인 7월에 가장 작은 값을 나타냈으며 이후 차츰 높아지는 경향을 보였다.

Fig. 9의 B의 지점들은 A지점들에 비해 겨울철 MRT가 매우 높게 나타났다. 특히 B3, B4에서 높게 나타났는데 이는 대상구역 가운데에 위치하여 강우시 채널을 형성하는 지형적 특징 때문인 것으로 추측된다. B3지점은 다른 지점들에 비해 7월 우기 이후 MRT의 상승이 두드러지게 나타났다. B지점들은 A지점들과 같이 사면 상부와 하부에 대한 MRT분포의 연관성은 찾아볼 수 없었다. Fig. 10의 C지점들의 경우 B3, B4와 같이 C2와 C3에서 1월, 2월, 3월 MRT가 비이상적으로 높게 측정되었다. 그리고 12월 MRT가 급격히 높아지는 다른 지점과는 달리 C2 지점은 11월과 유사한 값을 보이고 있다. Fig. 11의 E지점들은 A와 B지점들의 사이를 지나는데 A5와 같이 8월 이후 측정기기의 가동이 시작되었다. 다른 지점들과 같이 7월 우기 이후 지속적으로 증가하는 경향을 보인다. A3, A4의 1월, B2, B5의 1월, C4의 1월 등 그래프상 누락된 MRT 자료는 유출(Outflow)보다 유입(Inflow)이 큰 경우인데 토양수분의

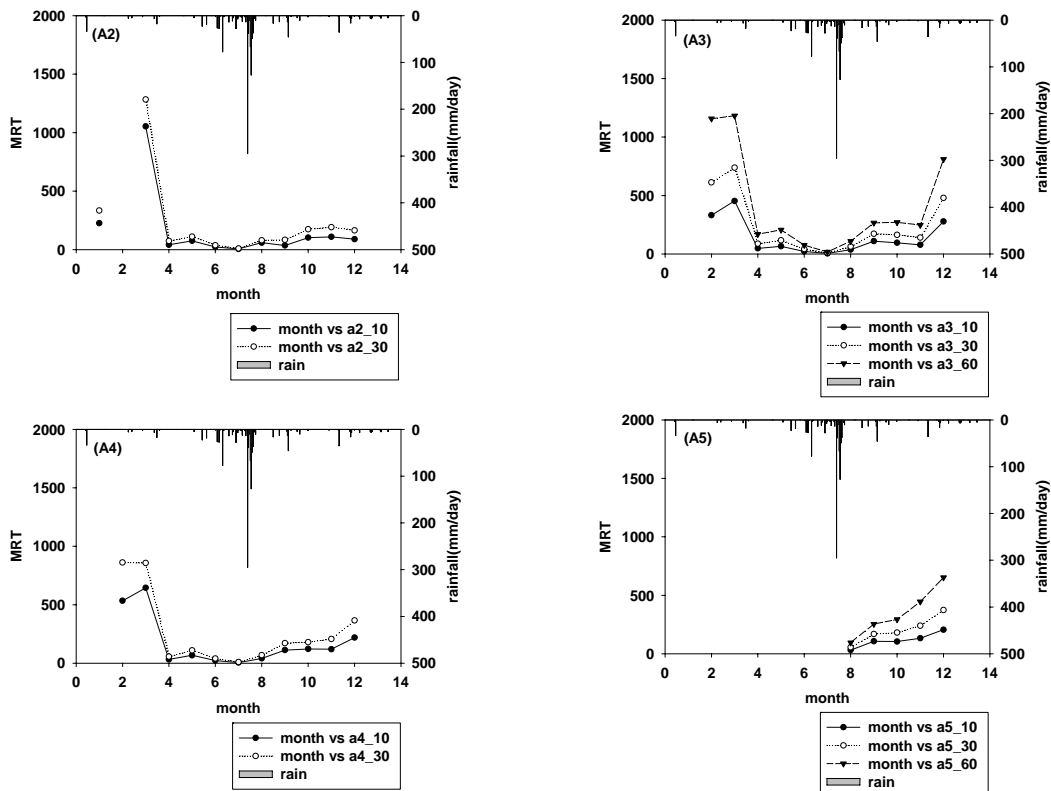


Fig. 8. Monthly MRTs for Points along A Line



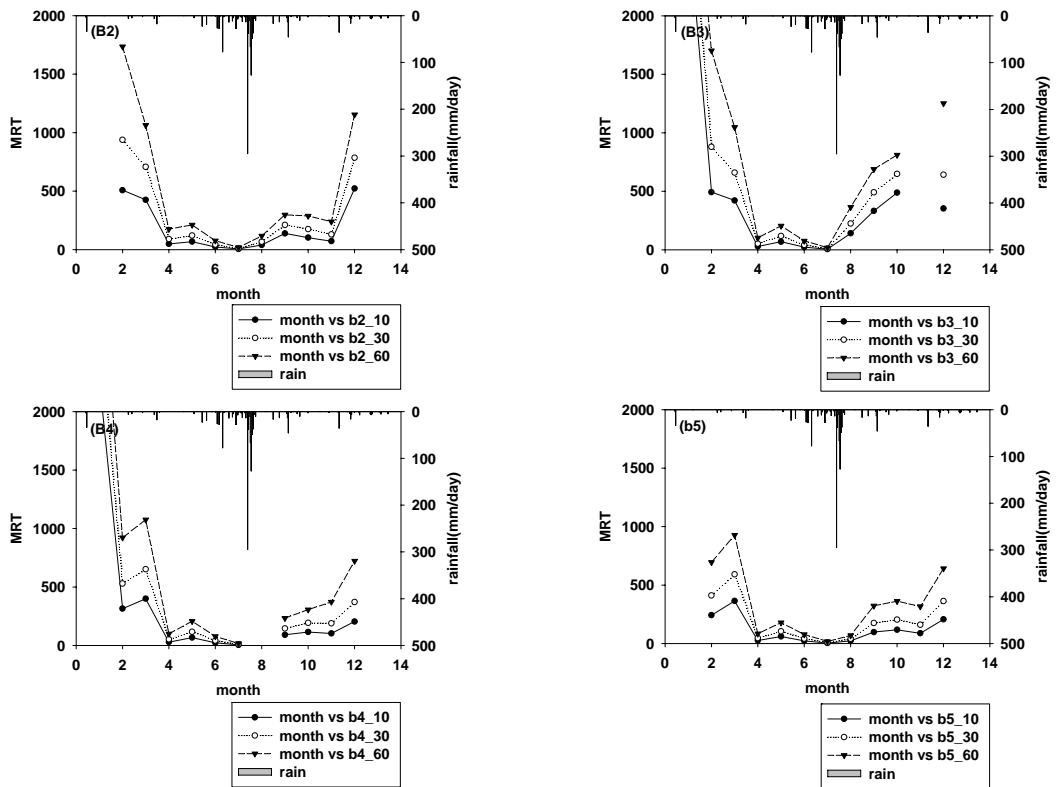


Fig. 9. Monthly MRTs for Points along B Line

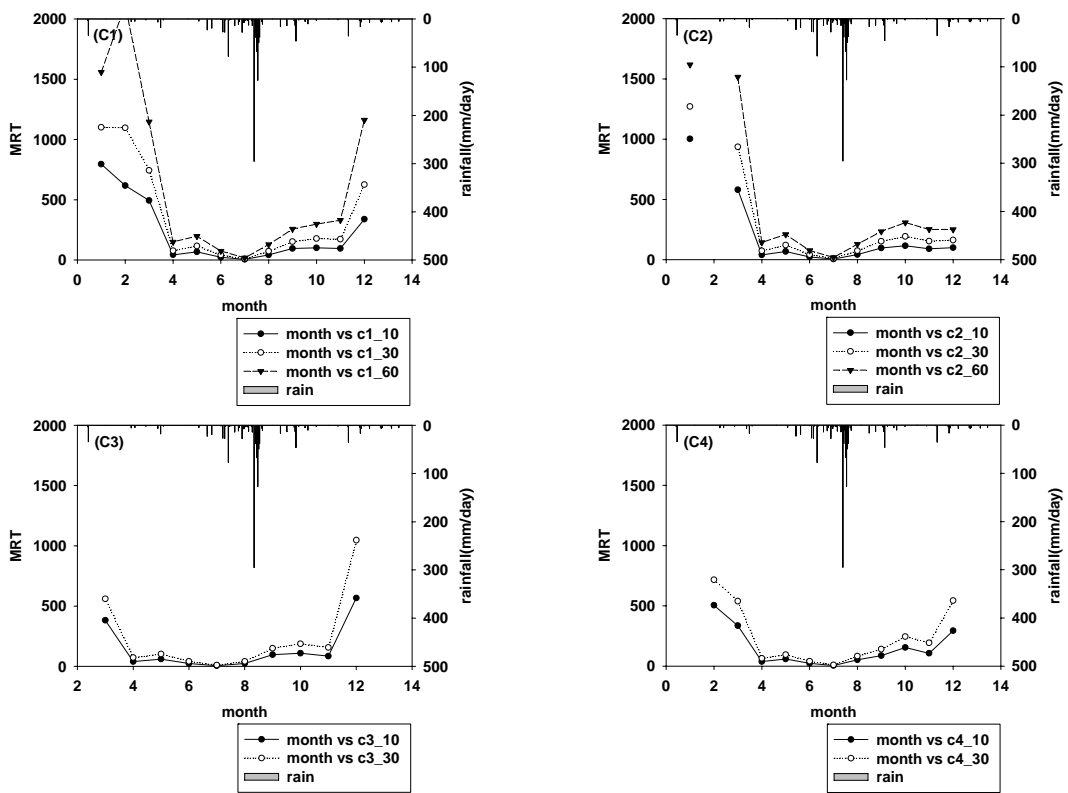


Fig. 10. Monthly MRTs for Points along C Line

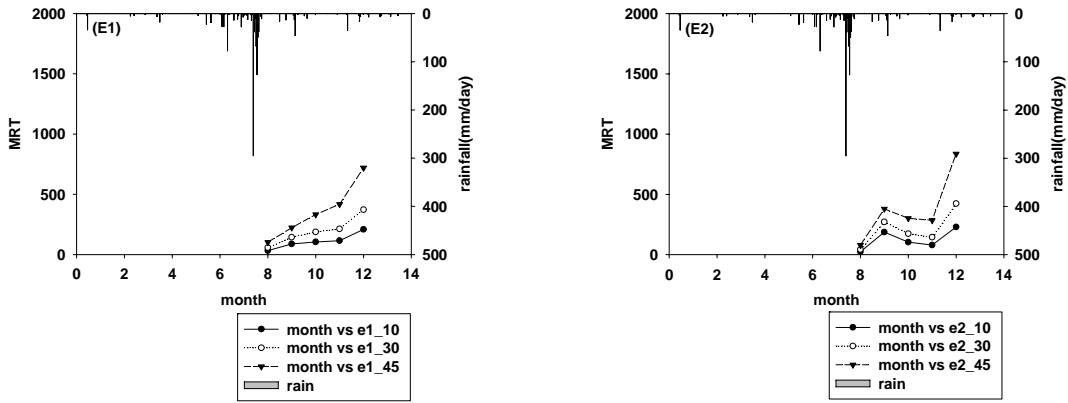


Fig. 11. Monthly MRTs for Points along E Line

증가량이 그 동안 내린 강우량보다 높을 때의 경우를 나타낸다. 각 지점들은 대부분 비슷한 MRT분포를 보여주었으며 깊이에 따라 더 높은 값을 나타내었다.

측정결과 대상구역은 전반적으로 계절적인 특성을 확연히 보여준다. 겨울기간은 MRT가 가장 크게 나타났는데 대부분이 1월에 가장 높은 값을 보였고 B4, B5, C2 등 일부 지점에서는 2월에 MRT 최고치를 기록했다. 봄 기간 전 지점에서 MRT의 급격한 하강이 관찰되었다. 특히 3월을 지나 4월이 되면서 가장 큰 하강 폭을 보였다가 5월에 소폭 상승한 것으로 나타났다. 5월 6일에 100mm가 넘는 강우가 있는 후 점차 감소해 여름 중 7월에 가장 작은 MRT를 보였다. 7월을 기점으로 10월까지 가을기간 내 대부분 작은 MRT를 나타냈으며 11

월 소폭 하기 전까지 점차 증가하는 경향을 띄었다. 겨울이 시작되는 12월은 큰 폭의 상승을 기록하며 3월과 비슷한 수준의 MRT를 나타내었다. 우기와 비우기간의 MRT는 값의 차가 확연하고 해빙기간이 시작되는 3월을 시작으로 겨울과 봄 간의 상이한 측정값을 관찰할 수 있다.

### 5. 토 의

가장 보편적으로 사용되어지는 방사성 동위원소 추적법에 의해 MRT를 측정된 두 실험과 토양수분을 이용한 본 실험을 비교하여 측정방법과 결과의 타당성에 대해 검증하여 보았다.

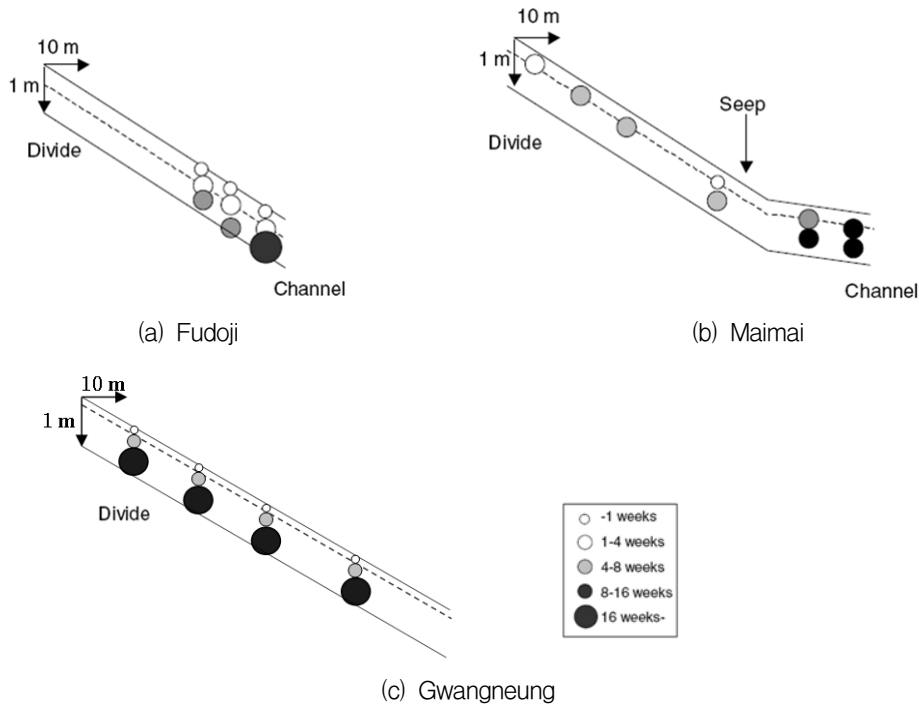


Fig. 12. MRT Distribution of Study Areas : (a) Fudoji, (b) Maimai, (c) Gwangneung

Uchida는 McDonnell에 의해 MRT측정 연구가 이루어진 뉴질랜드 Maimai 유역과 기후, 면적 등 자연조건이 아주 비슷한 일본의 Fudoji 유역에서 방사성 동위원소를 이용해 MRT를 측정하고 비교 분석하였다(Uchida and McDonnell, 2006). 그리고 비록 측정방법은 다르지만 광릉소유역의 측정결과를 Fudoji와 Maimai 유역의 결과와 비교해 보았다(Fig. 12).

광릉소유역의 깊이 40cm에서 MRT가 Fudoji보다 약 20여일, Maimai보다 약 10여일이 크게 나타났고 60cm 부근에서는 대체로 비슷하게 나타났다. 다만, Fudoji 실험유역의 경우는 사면 위 측정지점간의 거리에 거의 경향성을 띄지 않고 깊이에 따른 MRT 증가를 보인 반면, Maimai에서는 깊이에 상관없이 사면의 기울기에 따라 사면 상부와 하부의 값이 달랐는데 본 연구대상지에서는 투수성이 매우 낮은 Maimai 보다 Fudoji에서와 비슷한 경향성을 띠을 알 수 있다. 또한, 연평균 강우량이 Fudoji 1645mm, Maimai 약 2600mm 인 반면 광릉일대는 1000~1100mm 로 상대적 작은 강우가 나타났다. MRT에 가장 영향을 끼치는 강우의 차이는 전체적으로 높은 MRT를 나타내는 광릉소유역의 특징을 보여 준다.

본 연구에서 사용한 토양수분자료는 매우 짧은 시간 간격(2시간)으로 측정, 기록되어 기존 방식인 동위원소를 이용한 방법보다 높은 자료의 집중도를 가진다. 그리고 가격과 실험의 지속적인 측면에서 유리하다는 장점을 가지며 상대적으로 저렴한 편이다. 비록 두 방법은 다른 가정 하에 다른 방법으로 실험되었지만 강우와 토양깊이에 따른 MRT의 변화는 유사한 경향을 나타내는 것으로 조사되었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 산지사면에서 수분의 거동규명에 중요한 MRT의 중요성을 고려하여 토양수분을 측정하여 MRT를 산정하였다. 대상유역 원두부 사면에서 지표면으로부터 10cm, 30cm, 60cm 깊이의 토양수분의 시공간적 변화를 토양 내 공극률, 강우 그리고 유출률 간의 상관관계를 통해 해석하여 물이 토양에 체류하는 시간을 도출하였다. 연평균분석 결과 각 관측지점별 MRT는 강우의 영향이 지배적이었다. 그리고 경사나 고도에 큰 영향을 받지 않는 대신 10cm에서 31.8일, 30cm에서 55.7일, 60cm에서 102.1일로 측정되어 깊이 별 값의 차가 뚜렷이 나타났다. 각 지점별 월별분석결과 사면 위치에 상관없이 균일한 분포를 나타내었고 이는 강우나 유출의 흐름이 불투수층에 닿을 때까지

토양 속으로 침투한다는 가정과 부합한다. 겨울과 겨울이 아닌 계절 간에 큰 차이의 MRT를 보이는데 가장 큰 이유는 우기에 집중되는 강우량이다. 그리고 겨울철 최저기온이 영하 18℃, 적설량 7.2cm 에 이르는 대상유역의 특성상 결빙된 토양과 눈에 의해 생성된 불투수 차단층이 형성되어 수분의 침투와 저장을 방해했기 때문이다. 또한 겨울의 짧은 일조시간과 식생의 휴면은 증발산을 감소시켜 토양에 저장된 수분의 유출을 막는다. 이것은 또한, 봄철 식생의 활동이 시작되어 증산활동이 활발해지는 3월과 4월 사이의 급격한 MRT 하락을 설명해 준다.

방사성동위원소를 매개체로 이용하여 물의 체류시간을 간접적으로 측정한 화학적인 방법은 막대한 측정비용과 자원소모로 인해, 통상적으로는 일주일에서 한달 간격으로 수집되어 자료간의 시차가 길며 토양수분과 같이 소유역에 집중적인 공간분석이 어려워 실험유역 일대의 공간적인 변수들을 균일하다고 가정한다. 그러나, 깊이별 토양에 머물러 있는 수분의 양을 직접 측정하여 MRT를 산정하는 본 연구의 접근법은 분석의 신뢰도와 효율성을 재고할 수 있다. 이 연구는 토양수분의 변화를 통하여 강우에 따른 산지 지면의 물에 대한 체류시간과 이동경로를 규명하는 시발 연구이다. 동위원소 추적법과 같은 보다 다양한 실측기법의 병행 사용과 비교해석은 사면에서의 물의 순환특성을 규명하는 중요 연구가 될 것으로 기대된다.

## 감사의 글

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비 (2년)와 교육과학부의 BK21 Program에서 지원되었습니다.

## 참 고 문 헌

- Aggarwal, P.K. (2002). "Isotope hydrology at the International Atomic Energy Agency." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 11, pp. 2257-2259.
- Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, pp. 4
- Dune, T., Leopold, L.B. (1978). *Water in Environmental Planing*. Freeman and Co, San Francisco.
- Gibson, J.J., P. Aggarwal, J. Hogan, C. Kendall, L.A. Martinelli, W. Stichler, D. Rank, I. Goni, M. Choudhry, J. Gat, S. Bhattacharya, A. Sugimoto, B. Fekete, A. Pietroniro, T. Maurer, H. Panarello, D. Stone, P. Seyler, L. Maurice-Bourgoin, A.

- Herczeg. (2002). "Isotope studies in large river basins: a new global research focus." *Eos Trans, AGU*, Vol. 83, pp. 616.
- Hooper, R.P. (2004). "Designing observatories for the hydrologic sciences." *Eos Trans, AGU*, Vol. 85, Jt. Assem. Suppl., Abstract H24B-04.
- Hornberger, G.M., T.M. Scanlon, and J.P. Raffensperger. (2001). "Modeling Transport of dissolved silica in a forested headwater catchment: the effect of hydrological and chemical time scales on hysteresis in the concentration-discharge relationship." *Hydrological Processes*, Vol. 15, pp. 2029-2038.
- Kendall, C., E.A. Caldwell. (1998). "Fundamentals of isotope geochemistry." *Isotope Tracers in Catchment Hydrology*, Edited by C. Kendall, J.J. McDonnell, Elsevier Science Science B.V., Amsterdam, pp. 51-86.
- Lewis, S., A. Nir. (1978). "On tracer theory in geophysical systems in the steady and non-steady state-part II: non-steady state-theoretical introduction." *Tellus*, Vol. 30, pp. 260.
- Lull, H.W. (1964). "Ecological and Silvicultural Aspects." *Handbook of Applied Hydrology*, Edited by V.T. Chow, McGraw-Hill, Chapter 6, New York.
- McGuire, K.J., J.J. McDonnell, M. Weiler, C. Kendall, B.L. McGlynn, J.M. Welker, J. Seibert. (2005). "The role of topography on catchment-scale water residence time." *Water Research*, Vol. 41, No. 5, pp. W05002.1-W05002.14.
- Niemi, A.J. (1978). "Residence time distribution of variable flow processes." *International Journal of Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 28, pp. 855-860.
- O'Callaghan, J.F., D.M. Mark. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, Vol. 28, pp. 323-344.
- Quinn P.F., K.J. Beven., R. Lamb. (1995). "The in  $(a/\tan\beta)$  index, How to calculate it and how to use it within the TOPMODEL framework." *Hydrological Processes*, Vol. 9, pp. 161-182.
- Rodhe, A., L. Lyberg, and K. Bishop. (1996). "Transit time for water in a small till catchment from a step shift in the oxygen 18 content of the water input." *Water resour. Res.*, 32, pp. 3497-3511.
- Uchida, T., McDonnell, J.J., Yuko. A. (2006). "Functional intercomparison of hillslopes and small catchments by examining water source, flowpath and mean residence time." *Journal of Hydrology*, Vol. 327, pp. 627-642.
- Vitvar, T., J. Gurtz. B. Lawrence, J.J. McDonnell, D.M. Wolock. (2002). "Estimation of baseflow residence time in watersheds from the runoff hydrograph recession: method and application in the Neversink watershed, Catskill Mountains, New York." *Hydrological Processes*, Vol. 16, No. 9, pp. 1871-1877.
- Ventrella, D., Losavio, N., Vonella, V., Leij, F.J. (2005). "Estimating hydraulic conductivity of a fine-textured soil using tension infiltrometry." *Geoderma*, Vol. 124, pp. 267-277.
- Walker, J.P., G.R. Willgoose, J.D. Kalma. (2004). "In situ measurement of soil moisture: A comparison of techniques." *Journal of Hydrology*, Vol. 293, pp. 85-99.
- Zuber, A. (1986). "On the interpretation of tracer data in variable flow system." *J. Hydrol*, Vol. 86, pp. 45-57.

(논문번호:08-101/접수:2008.10.14/심사완료:2008.11.12)