

# 토양수분을 이용한 산림사면에서의 물 평균체류시간 추정방법

## A Method for Estimating Mean Residence Time of Water using Soil Moisture at a Hillslope on the Forested Catchment

곽 용 석<sup>1)</sup> / 진 성 원<sup>2)</sup> / 김 상 현<sup>3)</sup>  
Yong Seok Kwak / Sung Won Jin / Sang Hyun Kim

---

### 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

---

1) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 수자원환경실험실, E-mail : [kikiken@pusan.ac.kr](mailto:kikiken@pusan.ac.kr)  
2) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 수자원환경실험실, E-mail : [gwe661@naver.com](mailto:gwe661@naver.com)  
3) 정회원, 부산대학교 사회환경시스템공학과 교수, E-mail : [kimsangh@pusan.ac.kr](mailto:kimsangh@pusan.ac.kr)

## 1. 서론

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 있다. 또한, 체류시간은 과거 유입된 수분에 대한 대상유역의 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 실험유역의 현장 실측을 통한 정량적인 분석결과가 부족하며, 국내와 기후, 지형·지질적인 면에서 상당한 차이를 보여 국내 산지사면의 물의 평균체류시간에 관한 연구방안의 고찰이 필요하다. 1970년대 이후 현재까지 보편적으로 방사성 동위원소를 이용한 추적자를 통해 MRT를 구하였는데, 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 쉽다거나, 수직, 수평 흐름이 존재하거나, 정체된 지역, 또는 우선흐름이 존재하는 경우 MRT의 측정이 어렵고, 특히 대기로의 증발산을 고려하면 더욱 복잡해진다(McGuire, 2005). 동위원소를 사용한 MRT의 계측은 아직 국내에서 이루어진 바 없으며, 무엇보다 그 과정이 매우 복잡하고 비싸며, 지속적인 자료의 확보가 곤란하다.

본 연구에서는 산림사면에 적합하고 자료의 집중도가 높은 MRT의 측정을 위한 연구의 일환으로 동위원소를 이용한 방법 대신 단위시간 간격으로 측정·수집되는 토양수분자료를 사용하여 MRT를 산정하였다. 강우 데이터 및 상부유출수를 유입유량으로, 실측한 토양수분감소량을 유출유량으로 하여 지점별로 채취한 토양샘플을 통해 얻어진 공극률과 상관관계에 따른 MRT의 분포양상 및 월별 변화를 고찰하였다.

## 2. 연구방법 및 자료획득

본 연구는 장기간 토양수분의 안정적인 확보를 위해 가장 광범위하게 이용되고 있는 Time Domain Reflectometry(TDR)(Walker *et al.*, 2004)를 사용하였다. 기본적으로 TDR은 원래 하나의 탐침만을 직접적으로 연결하여 사용할 수 있기 때문에 다중연결장치(Multiplexer)을 이용하여 복수(61개)의 탐침으로부터 연구조사지역의 각 지점별 토양수분을 2시간 간격으로 장기간 측정하였다.

사면에서 공극률의 공간적 분포를 알기 위해서 가밀도 실험을 하였다. 그리고 대상유역에 대한 지형분석을 하기 위해 TheoDolite(DP-208P, TOPCON)으로 측량하여 얻은 각 좌표 정보에 좌표 변환 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 파악한 뒤 주 흐름이 형성되리라 예상되는 곳을 위주로 측정지점을 선정하였다.

## 2.1 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(그림. 1).

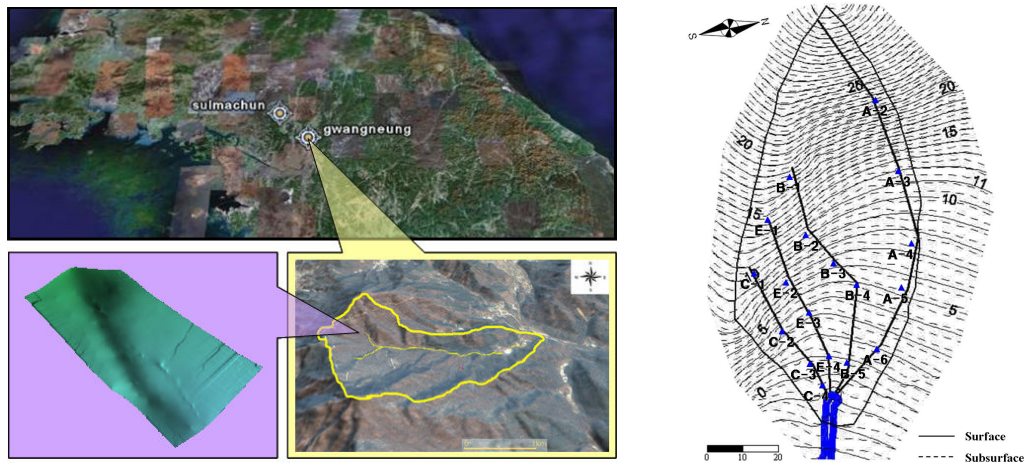


그림 1. 광릉 연구대상유역

## 2.2 토양수분 관측 및 강우량 분석

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.

대상사면 내 위치한 A, B, C, E 지점들에서 측정된 토양수분 값은 평균적으로 20~30%의 값을 나타내었으며, 여름철 우기가 시작되는 7월 중반에 급격한 토양수분 값의 상승을 나타내었다. 우기가 끝나며 점차 감소하여 가을과 겨울에 가장 낮은 토양수분 값을 보인다.

## 2.3 평균체류시간의 측정

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).

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

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

### 2.3.1 공극률 분포 측정

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.

### 2.3.2 유출률 측정 방법

본 연구에서 MRT를 산정하기 위해서는 강우에 의한 유입량이 지면과 맞닿는 순간 모두 토양 속으로 침투된다는 가정이 필요하다. 그리고 10cm보다 아래에 위치한 센서들로부터 측정된 수분 유입량은 모두가 상부에 위치한 상부에 위치한 지점들에서 측정된 기저침투량으로 산정하였다. 측정대상구역 지하면에서 유입과 유출에 관여하는 수분의 유동은 크게 토양수분 감소기간에서의 유동과 토양수분 증가기간의 유동으로 분류할 수 있다.

- 토양수분 감소기간에서의 유동

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

여기서  $O_{re}$  와  $I_{re}$ 는 각각 토양수분(soil moisture)이 감소하는 동안의 기저침투량( $L^3T^{-1}$ )과 강우량( $L^3T^{-1}$ )이다. 그리고 TDR에 의하여 측정된 토양수분감쇄량  $D$ 는 강우에 상관없이 토양의 내수분의 감쇄율(%)을 토양 체적에 곱하여 산출한 양이다.

- 토양수분 증가기간의 유동

$$O_{ri} = I_{ri} - S_{in} \quad (4)$$

여기서  $I_{ri}$ 와  $S_{in}$ 는 토양수분이 증가하는 동안에 내린 강우의 양과 토양수분 증가량이다. 대부분의 경우는 강우가 발생하는 시점에서부터 토양수분함유율이 증가하였다. 그러나 강우량이 측정되었지만 토양수분함유율이 떨어진 것으로 측정된 경우도 발생하였는데 이는 해당 강우이전에 더 큰 강우사상이 발생하여 상대적으로 과포화된 수분함유율이 유출되는 경우이다.

위의 두 방법으로 구해진 기저유출량( $O_{re}, O_{ri}$ )을 토양수분의 감소 및 증가가 일어난 연 발생일로 나눈 것이 유출률(flow rate) 이다.

$$Q_r = \frac{O_{re} + O_{ri}}{d_{re} + d_{ri}} \quad (5)$$

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

### 3. 결 론

대상유역 원두부 사면에서 지표면으로부터 10cm, 30cm, 60cm 깊이의 토양수분의 시공간적 변화를 토양 내 공극률, 강우 그리고 유출률간의 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 깊이별 MRT의 양상에 차이가 나타났다(표. 1).

표 1. 깊이별 평균체류시간

(단위 : 일)

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

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 하강을 설명해 준다. 방사성동위원소를 매개체로 이용하여 물의 체류시간을 간접적으로 측정하는 화학적인 방법은 막대한 측정비용과 자원소모로 인해, 통상적으로는 일주일에서 한 달 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.

### 감사의 글

이 논문은 교육인적자원부의 BK21 프로그램과 건설교통부 유량조사사업단에서 지원되었습니다.

### 참 고 문 헌

1. Chow, V.T., Maidment, D.R., Mays, L.W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, pp. 4
2. 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*, 제83권, pp. 616.
3. 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.

4. 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 Resources Research*, 제41권, 제5호, pp. 565-577.
5. O'Callaghan, J.F., D.M. Mark. (1984). "The extraction of drainage networks from digital elevation data." *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 제28권, pp. 323-344.
6. 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*, 제9권, pp. 161-182.
7. Walker, J.P., G.R. Willgoose, J.D. Kalma. (2004). "In situ measurement of soil moisture: A comparison of techniques." *Journal of Hydrology*, 제293권, pp. 85-99.