



침엽수 산림에서의 토양수분 감쇄특성 분석

Analysis of Soil Moisture Recession Characteristics in Conifer Forest

홍은미* · 최진용**† · 남원호* · 유승환***

Hong, Eun Mi · Choi, Jin-Yong · Nam, Won Ho · Yoo, Seung-Hwan

ABSTRACT

Forest area covers 64 % of the national land of Korea and the forest plays a pivotal role in the hydrological process such as flood, drought, runoff, infiltration, evapotranspiration, etc. In this study, soil moisture monitoring for conifer forest in experimental forest of Seoul National University has been conducted using FDR (Frequency Domain Reflection) for 6 different soil layers, 10, 20, 30, 60, 90 and 120 cm during 2009~2010, and precipitation data was collected from nearby AWS (Automatic Weather Station). Soil moisture monitoring data were used to estimate soil moisture recession constant (SMRC) for analyzing soil moisture recession characteristics. From the results, empirical soil moisture recession equations were estimated and validated to determine the feasibility of the result, and soil moisture contents of measured and calculated showed a similar tendency from April to November. Thus, the results can be applied for soil moisture estimation and provided the basic knowledge in forest soil moisture consumption. Nevertheless, this approach demonstrated applicability limitations during winter and early spring season due to freezing and melting of snow and ice causing peculiar change of soil moisture contents.

Keywords: Soil moisture recession curve; soil moisture recession constant; FDR; soil moisture monitoring; conifer forest

1. 서 론

토양수분은 토양 내에서 이동하고 재분배되며, 식물에 의해 소비된다. 강우 발생 시에는 침투, 유출 및 토양유실과 관계가 있으며, 비강우기에는 증발산까지 다양한 수문현상에 영향을 주는 농업과 식생에서 중요한 수문 인자 중 하나이다 (Ting and Chang, 1985; Kim et al., 2006). 우리나라 국토 면적의 약 64%를 차지하고 있는 산림에서의 토양수분은 산림식생에 의해 증발 또는 증산되고 지하로 침투되어 산림의 가뭄 및 홍수와 관련하여 수문학적으로 중요한 역할을 한다. 특히, 산림의 증발산량은 다른 작물에 비해 크기 때문에 강수량이 적은 봄과 가을에 토양수분이 일시적으로 건조할 수 있으며, 강수량, 기온, 토층의 깊이, 계절 등의 조건에 따라 산림의 여러 지역에서 생육기간 동안 토양수분 부족현상이 나타날 수 있다. 또한, 산림의 증발산

량은 토양수분 함량과 관련이 있으며, 산림의 토양수분 환경을 분석하고 수문학적 과정을 이해하여, 향후 토양수분 모델을 구축하기 위해서는 산림 토양수분의 장기적인 모니터링과 기초 연구는 중요하다 (Grayson et al., 1997; Choi et al., 2008).

산림의 토양수분 환경을 분석하기 위한 모니터링 연구는 국내·외에서 다음과 같이 진행되었다. Bruno et al. (2006)은 아마존 우림지역에서 2년 동안 토양수분을 모니터링 하여, 월별 계절별 토양수분 패턴, 변화 및 증발산량을 분석하였으며, Lee et al. (2005)은 산지사면에서 토양수분 모니터링 결과를 바탕으로 강우사상 후 토양수분의 감쇄현상과 사면별 습윤지수 (wetness index)와의 연관성을 분석하였다. Oh et al. (2006)은 설마천 유역 범륜사 사면에서 2003년 11월, 2004년 5~6월 토양수분을 모니터링 하였으며, 봄에서 여름 사이에는 토양수분 감쇄현상, 가을에서 겨울로 가는 시기에는 토양수분 충전현상을 확인하였다. Choi et al. (2008)은 광릉수목원에서 2007년 5, 9월에 지표면 10 cm 토층에서 토양수분 모니터링 결과 5월 (봄)에 9월 (가을)보다 토양수분의 공간적 양상과 기후에 따른 변화가 더욱 복잡한 형태로 나타남을 보였다. 이처럼 국내·외에서 위의 연구와 더불어 토양수분 모니터링과 환경 분석에 관한 연구는 다양하게 진행되었다. 하지만 이와 같은 연구들은 단기간 또는 일시적인 분석이 많았으며, 국내에서는 특정 깊이에 초점을

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원

** 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수, 농업생명과학연구원 겸 임연구원

*** 서울대학교 농업생명과학연구원 선임연구원

† Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583

Fax: +82-2-873-2087

E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

2011년 5월 23일 투고

2011년 6월 8일 심사완료

2011년 6월 8일 게재확정

맞춰진 연구들이 대부분으로서 유효 토층 내의 다양한 깊이에서의 토양수분 연구는 미흡한 실정으로, 토층을 고려한 장기적인 토양수분 모니터링 및 분석이 필요할 것으로 판단된다. 감쇄곡선 (recession curve)은 수문곡선의 침투부분을 지나 유출량이 감소하는 부분과 같이 지수감소형태의 곡선으로서 기저유출이나 수문유출곡선 등의 분석 및 예측 분야에서 널리 이용되는 방법이다. 토양수분 모니터링 결과에 감쇄곡선의 개념을 적용하여 분석 할 경우 비강우시 토양수분의 월별, 토층별 소비경향 및 감쇄특성을 파악하고 모형화하여 활용할 수 있을 것으로 판단된다. Lee et al. (2005)도 이와 유사한 연구를 수행하였으나, 두 번의 강우사상에 대하여 특정시기에 대한 모니터링 결과로만 연구가 진행되었으며, 산정결과에 대한 검증이 진행되지 않아 향후 모델링 및 전반적인 침엽수림에서의 감쇄특성 파악에는 한계가 있었다.

따라서 본 연구에서는 혼효림을 포함하여 우리나라 산림면적의 약 70 % 분포하고 있는 침엽수림에서 비강우기 토양수분 감쇄특성을 파악하기 위하여 서울대학교 태화산 학술림 잣나무조림지의 3개 모니터링 지점에서 토양수분 모니터링을 실시하였다. 토양수분 모니터링 자료를 활용하여 토양수분 감쇄구간을 선정, 감쇄곡선 (Soil Moisture Recession Curve) 및 감쇄상수 (SMRC, Soil Moisture Recession Constant)를 산정하여 토층별 월별 토양수분 감쇄특성을 분석하였으며, 모니터링 결과를 바탕으로 감쇄상수 산정결과를 검증하였다.

II. 재료 및 방법

1. 대상지역 선정

본 연구에서는 토양수분 모니터링과 기초자료 구축 및 관리가

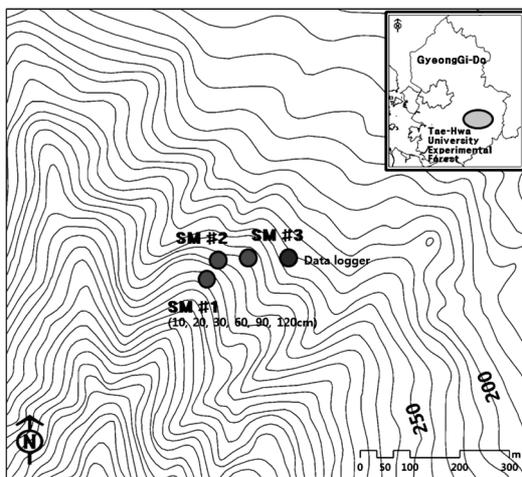


Fig. 1 Location map of soil moisture monitoring site

유리한 경기도 광주시의 서울대학교 농업생명과학대학 태화산 학술림을 연구대상지역으로 선정하였다 (Fig. 1). 본 연구의 모니터링 지역은 잣나무 인공림으로 평균 흉고직경 11.53 cm, 평균 30년 정도의 수령을 가진 것으로 조사되었다.

2. 기초자료 구축

일반적으로 토양수분함량은 토양의 물리적 특성에 영향을 받기 때문에 본 연구에서는 토양시료를 샘플링하여 체가름 분석과 비중법에 의한 입도분석하여 USDA (United States Department of Agriculture) 삼각토양분류법 (Soil Taxonomy)에 의해 Fig. 2와 같이 토성을 구분하였다. 연구지역은 sand 성분이 평균 79.5%로 토양의 대부분을 구성하고 있었으며 sandy loam 또는 loamy sand 토양으로 분류되어 있다.

또한, 기초자료로써 강수량, 기온, 습도 등의 기상자료를 수집하였다. 강수량은 연구지역과 가장 근접한 ‘모현’ 자동기상측정

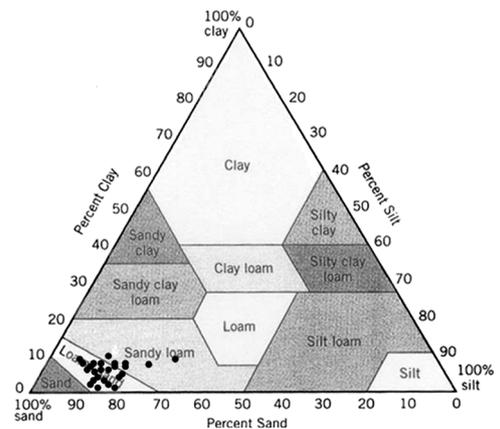


Fig. 2 Soil type selection using USDA Soil Taxonomy

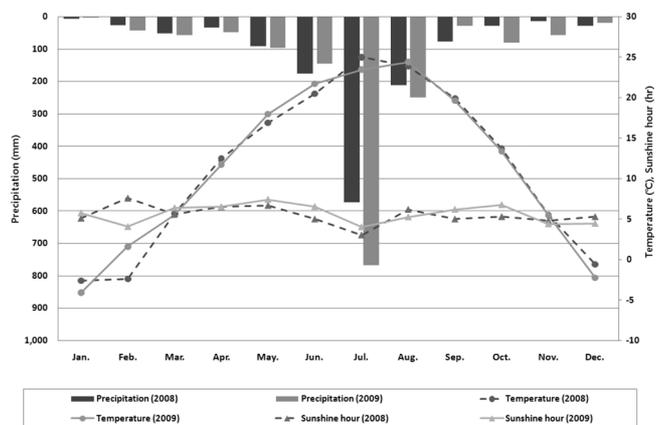


Fig. 3 Two year average of monthly precipitation, and monthly average of temperature and sunshine hours during 2008~2009

장치 (AWS, Automatic Weather Station) 시단위 (hourly) 강우 자료를 활용하였으며, 강우자료 외의 기상자료는 이천측후소의 일단위 (daily) 자료를 활용하였다. Fig. 3은 2008년과 2009년 월 총 강수량 및 월평균 기온, 일조시간으로써, 2008년 총 강수량은 1,313 mm, 2009년 총 강수량은 1,587 mm 이었다. 2008년에는 전체 강수의 43.7 % (574 mm), 2009년에는 전체 강수의 48.3 % (767 mm)가 7월에 발생하여 7월에 강수량이 가장 많았으며, 73 % 이상의 강우가 6~8월에 집중적으로 발생하였다. 이천측후소의 평균기온은 2008년, 2009년 모두 11.6 °C 이었으며, 일평균 일조시간은 2008년 5.5 시간이며, 2009년 5.7 시간이었다.

3. 장기 토양수분 모니터링 시스템 구축

장기 토양수분 모니터링을 위해서는 현장에서 매번 데이터를 수집하는 방법보다 자동 모니터링 시스템을 구축하여 실시간으로 토양수분을 모니터링 할 수 있는 시스템의 구축이 필요하다. 본 연구에서는 서울대학교 학술림 잣나무 조림지에 Fig. 4와 같이 토양수분 모니터링 시스템을 구축하였다. 토양수분은 Sentek 사 (Australia)에서 개발한 EnviroSMART FDR (Frequency Domain Reflection)을 이용하여 10, 20, 30, 60, 90, 그리고 120 cm의 6개 토층에 대해 3개 지점에서 모니터링을 하였다. 10 cm 토층의 토양수분 측정값은 0~15 cm 깊이의 대푯값으로, 20 cm 토층의 토양수분 측정값은 15~25 cm 깊이의 대푯값으로, 30 cm 토층의 토양수분 측정값은 25~45 cm 깊이의 대푯값으로, 60 cm 토층의 토양수분 측정값은 45~75 cm 깊이의 대푯값으로, 90 cm 토층의 토양수분 측정값은 75~105 cm 깊이의 대푯값으로, 120 cm 토층의 토양수분 측정값은 105~130 cm 깊이의 대푯값으로 가정하였다. FDR 센서에서 측정

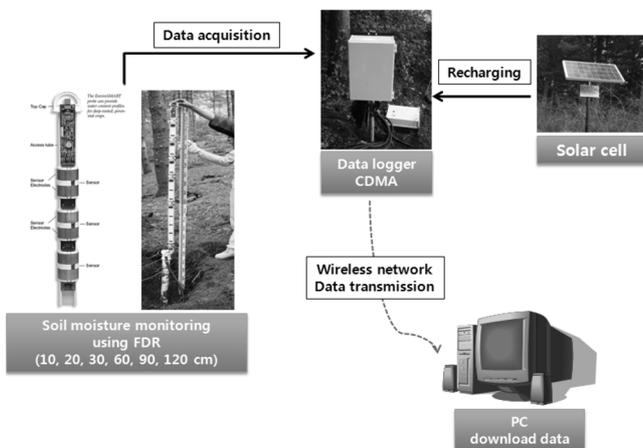


Fig. 4 Automatic soil moisture monitoring and data collection system

한 토양수분 데이터는 2시간 간격으로 데이터이력기록기 (Data logger)에 저장되며 시스템의 전력공급은 태양전지판을 통하여 이루어진다. 토양수분 모니터링 데이터는 CDMA (Code Division Multiple Access) 모뎀으로 연결하여 실시간 전송하였으며, Hydras 3.0(TM) 프로그램을 이용하여 자료를 확인하였다.

4. 토양수분 감쇄곡선 산정 및 감쇄특성 분석

본 연구에서는 식 (1)과 같이 1877년 Boussinesq가 제안한 기저유출 선형 감수식과 식 (2)와 같이 1939년 Barnes가 제안한 기저유출 선형식의 형태로 정리하여 토양수분 감쇄곡선 및 감쇄상수를 산정하였다 (Vogel and Kroll, 1996; Wittenberg, 1999; Hammond and Han, 2006).

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t} \quad (1)$$

$$Q_t = Q_0 k^t \quad (2)$$

여기서, Q_t 는 t 시간 후의 유출량, Q_0 는 초기유출량, α 는 기저유출 저류감수특정상수, k 는 변곡상수이다. 이와 같은 기저유출 선형 감수식과 기저유출 선형식에서 유출량 Q_0 , Q_t 를 토양수분 S 로 대치하여 토양수분 감쇄곡선을 정의할 수 있는데 이를 변환하는 내용은 다음과 같다.

우선, 토양수분의 감쇄특성을 분석하기 위하여 Fig. 5와 같이 토양수분 모니터링 결과에서 감쇄구간을 구분하였으며, 토양수분 감쇄구간을 구분하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다.

- 최종 강우 발생 시점에서 최소 24시간 후 (중력수가 모두 배제된 후)이며, 당일에도 강우가 없는 날
- 시점과 종점 간격이 최소 중력수가 배제하는 기간보다 긴 48시간 이상인 기간

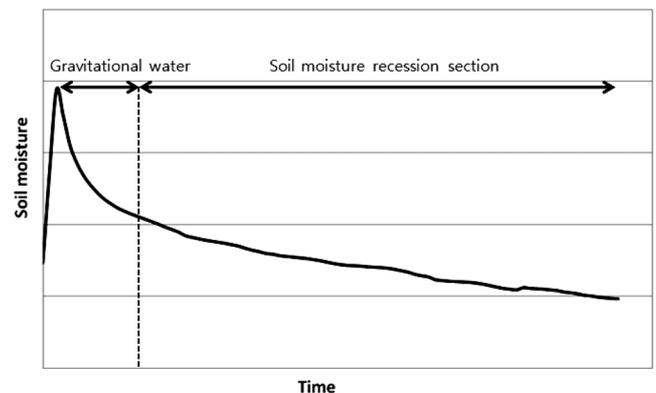


Fig. 5 Conceptual diagram of soil moisture recession curve

위의 가정에 의하여 분리된 감쇄구간은 식 (1)과 식 (2)를 준 용하여 식 (3)~식 (5)와 같은 감쇄곡선 유도가 가능하며, 실측 자료를 이용하여 감쇄곡선 분석 실시하고, 감쇄상수 K 를 산정 하였다.

$$S_t = S_0 e^{-kt} \quad (3)$$

$$K = e^{-b} \quad (4)$$

$$S_t = S_0 K^t \quad (5)$$

여기서, S_t 는 토양수분 감소 시작 후 시간 t 에서의 토양수분함량 (%), S_0 는 강수 발생 24시간 후의 토양수분함량 (%), K 는 감 쇠상수, t 는 시간 (day)이다.

5. 토양수분 감쇄상수 검증

산정된 토양수분 감쇄상수의 적용 가능성을 평가하기 위하여 2007년 8월~12월, 2010년 1월~12월 모니터링 결과를 활 용하여 토양수분 감쇄상수를 검증하였다. 토양수분 감쇄상수 검 증을 하기 위하여 실측 토양수분 데이터와 감쇄상수를 활용하여 모의된 토양수분 결과를 활용하여 결정계수 (R^2)와 상대평균절 대오차 (RMAE, Relative Mean Absolute Error)를 산정하였다. 0.0~1.0 사이의 값을 가지는 R^2 는 1.0에 가까울수록 모의치가 실측치의 경향을 잘 반영하는 것을 의미한다. 하지만, R^2 는 단지 무작위 오차만을 평가하게 되어 오차의 정도를 나타내기 위하여 RMAE를 산정하였다. RMAE는 값이 작을수록 관측 값과 모의값 차이의 오차가 적음을 의미하며, 식 (6)과 같이 산정한다 (Lee, 2007; Kim, 2009).

$$RMAE = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |O_i - P_i|}{\bar{O}} \quad (6)$$

여기서, O_i 는 모니터링한 토양수분 함량, P_i 는 모의된 토양수분 함량, n 은 자료 수, \bar{O} 은 모니터링 토양수분함량의 평균이다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양수분 모니터링 결과

2008년~2009년 토양수분 모니터링 결과의 토층별 연평균 및

Table 1 Average and standard deviation of soil moisture contents for six soil layers during 2008~2009 (Unit : %)

Section	Year		10 cm	20 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	θ_{zone}
SM #1	2008	avg.	8.52	16.89	18.26	25.56	19.88	28.31	20.70
		std.	2.71	2.07	2.50	1.80	0.97	1.30	-
	2009	avg.	10.25	15.75	17.18	25.03	19.30	27.45	20.26
		std.	3.85	3.25	3.18	2.24	1.17	1.55	-
SM #2	2008	avg.	20.54	22.11	13.10	20.24	23.52	28.57	22.09
		std.	3.44	3.08	2.21	2.50	1.60	2.27	-
	2009	avg.	20.50	23.26	12.91	19.70	22.75	25.82	20.76
		std.	4.29	3.69	2.91	3.05	2.01	2.21	-
SM #3	2008	avg.	11.12	17.61	13.88	26.11	24.28	17.20	19.20
		std.	3.78	2.23	2.01	2.00	1.94	2.18	-
	2009	avg.	11.54	17.40	13.77	25.83	23.82	16.81	18.91
		std.	4.04	3.45	3.07	2.87	2.72	3.03	-

* avg. : average

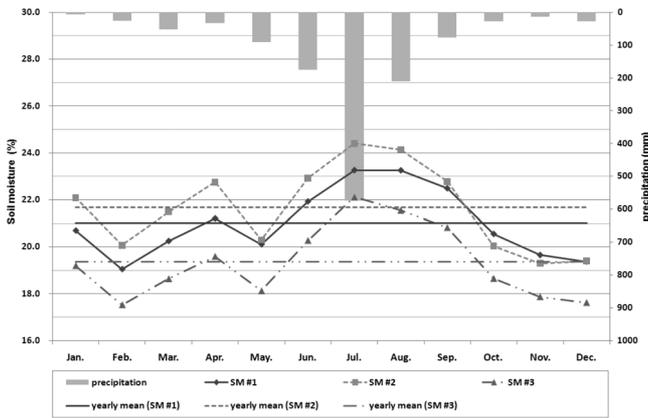
* std. : standard deviation

$$* \theta_{zone} = \frac{d_1 \times \theta_1 + d_2 \times \theta_2 + \dots + d_n \times \theta_n}{d_1 + d_2 + \dots + d_n} \quad (\text{Miller et al., 2006})$$

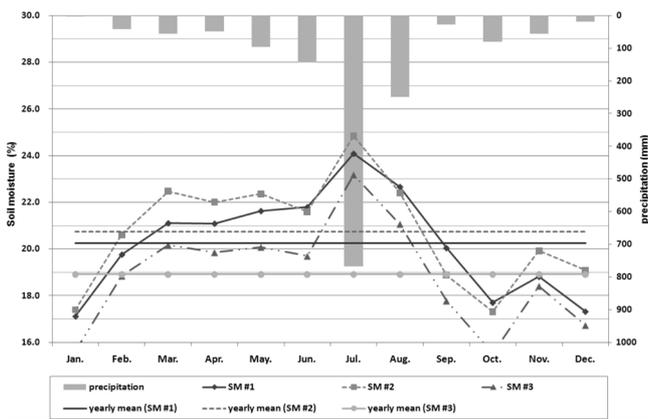
여기서, θ_{zone} 은 zone weighting 방법에 의한 토양수분 평균 (%), n 은 토양수분을 측정된 토층의 수, θ_n 은 n 번째 토층에서의 함수비 (%), d_n 은 n 번째 토양수분 모니터링 지점이 영향을 받을 토양의 깊이

편차는 Table 1과 같다. 3개의 모니터링 지점에서 토층의 깊이를 고려하여 산정한 연평균 토양수분 함량 (θ_{zone})은 SM #2에서는 2008년과 2009년 약 1% 정도의 토양수분 함량의 차이가 있었으나, SM #1, SM #3 지점에서는 평균적인 차이가 거의 없었다. 토층별 토양수분 함량의 연 평균값을 살펴보면, 3개의 모니터링 지점에서 평균 토양수분 함량은 차이가 있었으나 비슷한 경향성을 보였으며, 강수량이 많았던 2009년 토층별 토양수분 편차가 2008년 보다 큰 값을 나타냈다. 60 cm 이하 하부토층에서는 평균 토양수분 함량이 높고 상대적으로 편차는 작았으며, 10 cm 토층에서는 평균 토양수분 함량은 가장 낮고 편차는 가장 큰 값을 나타냈다.

Fig. 6은 2008년과 2009년 월별 토양수분 평균을 나타낸 것으로 연평균 토양수분 함량 (θ_{zone})과 비교해본 결과 2008년에는 1, 3월은 연 평균과 비슷하였으며, 2, 10~12월은 월평균 보다 낮고, 4, 6~9월은 연평균보다 높게 나타났다. 2009년 모니터링 결과도 2008년과 비슷하게 평균 토양수분 함량의 차이는 있었으나, 연평균 토양수분 함량과 비교해본 결과 1, 2, 10~12월은 월평균 보다 낮았으며, 3월부터 6월까지 월평균 토양수분 함량은 비슷하였다. 또한, 2008, 2009년 모두 강수발생이 많은 7월에 월평균 토양수분 함량이 가장 높았다.



(a) 2008



(b) 2009

Fig. 6 Monthly average soil moisture for 2008 and 2009

2. 토양수분 감쇄특성 분석

2008년과 2009년 토양수분 모니터링 결과를 이용하여 (2.4.)의 가정에 따라 Table 2와 같이 2008년 34개 구간, 2009년 37개 구간 총 71개의 토양수분 감쇄구간을 선정하여 감쇄곡선을 산정하였다. 감쇄곡선 산정결과 11~2월에는 대체적으로 완만한 감쇄곡선형태가 나타난 반면, 5~9월에는 감쇄곡선의 기울기가 상대적으로 가파른 것으로 나타났으며, 10, 20, 30 cm 토층에서의 감쇄현상이 모니터링 3개 지점에서 모두 그 이하 하부 토층보다 더 뚜렷하였다. 다음과 같이 산정된 토양수분 감쇄구간에서의 감쇄곡선을 바탕으로 토층별 기간별 토양수분 감쇄상수를 산정하였다. 감쇄상수 K 는 e^{-b} 으로써 토양수분의 감쇄특성이 뚜렷할수록 더 작은 값을 가지며, 1에 가까울수록 토양수분의 감소현상이 거의 나타나지 않는다. 감쇄상수 산정 결과 감쇄상수는 1월에서 7~8월로 갈수록 작아졌으며 토층별로 차이가 있으나 7, 8월의 감쇄상수가 가장 작았으며, 12월로 갈수록 감쇄상수 값이 커졌다.

Table 2 Selected periods for recession curve analysis

Month	Period	
	2008	2009
Jan.	01/01 ~ 01/11, 01/12 ~ 01/21, 01/23 ~ 02/07	01/01 ~ 01/24
Feb.	02/08 ~ 02/22	01/28 ~ 02/13, 02/14 ~ 02/23, 02/24 ~ 03/03
Mar.	02/27 ~ 03/13, 03/15 ~ 03/22, 03/25 ~ 03/29	03/07 ~ 03/12, 03/14 ~ 03/21, 03/23 ~ 03/26
Apr.	04/03 ~ 04/09, 04/11 ~ 04/22	03/27 ~ 04/15, 04/16 ~ 04/20, 04/22 ~ 04/24, 04/27 ~ 05/02
May	04/28 ~ 05/04, 05/06 ~ 05/13, 05/20 ~ 05/28, 05/29 ~ 06/02	05/03 ~ 05/11, 05/13 ~ 05/15, 05/18 ~ 05/21, 05/24 ~ 06/02
Jun.	06/06 ~ 06/08, 06/09 ~ 06/17, 06/19 ~ 06/22, 06/23 ~ 06/28, 06/30 ~ 07/02	06/04 ~ 06/09, 06/11 ~ 06/20, 06/22 ~ 06/29
Jul.	07/06 ~ 07/12, 07/14 ~ 07/16, 07/28 ~ 07/30	07/04 ~ 07/07, 07/20 ~ 07/24
Aug.	08/04 ~ 08/08, 08/10 ~ 08/12, 08/24 ~ 09/01	07/26 ~ 08/07, 08/13 ~ 08/20, 08/21 ~ 08/27
Sep.	09/03 ~ 09/20	08/31 ~ 09/11, 09/13 ~ 09/21, 09/22 ~ 09/27
Oct.	09/26 ~ 10/22, 10/26 ~ 10/31	09/29 ~ 10/13, 10/15 ~ 10/17, 10/20 ~ 10/31
Nov.	11/02 ~ 11/15, 11/17 ~ 11/21, 11/22 ~ 11/27	11/02 ~ 11/04, 11/09 ~ 11/13, 11/14 ~ 11/25, 11/26 ~ 11/29
Dec.	11/30 ~ 12/04, 12/05 ~ 12/08, 12/12 ~ 12/17, 12/24 ~ 12/31	12/01 ~ 12/05, 12/06 ~ 12/10, 12/11 ~ 12/24, 12/26 ~ 12/31

Fig. 7 (a)~(c)는 10, 20, 30 cm 토층에서 산정된 감쇄구간별 토양수분 감쇄상수 및 감쇄상수의 월별 중앙값으로써, 10 cm 토층의 감쇄상수의 평균은 0.976, 편차는 0.006이었으며, 20 cm 토층에서는 평균은 0.987, 편차는 0.006, 30 cm 토층에서는 평균은 0.990, 편차는 0.005이며, 평균적으로 토양수분 감쇄상수가 가장 작은 10 cm 토층에서 토양수분 소비가 가장 활발함을 알 수 있다. 10 cm 토층에서는 5월과 9월에 토양수분 감쇄상수가 각각 0.969, 0.970으로 가장 작았으며, 그 다음으로는 4, 8월, 6, 7월의 감쇄상수가 작았다. 감쇄상수가 작을수록 토양수분 감쇄특성이 뚜렷한 것으로 4~9월에는 표층에서의 토양수분 소비현상이 뚜렷한 것을 파악할 수 있으며, 전반적으로 그 이하 하부토층보다 토양수분 소비가 많이 이루어지는 토층이 10 cm 토층인 것을 파악할 수 있다. 20 cm 토층에서는 7월과 9월의 토양수분 감쇄상수가 0.980으로 가장 작았으며, 10 cm 토층에서 5, 9월에 비해 상대적으로 감쇄상수가 컸던 7, 8월의 토양수분 감쇄상수는 20 cm 토층에서는 감쇄상수가 작아져 다른 월에 비해 토양수분 소비가 증가하였다. 또한, 10 cm 토층에서 감쇄상수가 가장 작았던 5월의 경우 20 cm 토층에서는 감쇄상수가 다른 월에 비해 약간 높거나 비슷하였으며, 1, 2, 11월과 12월

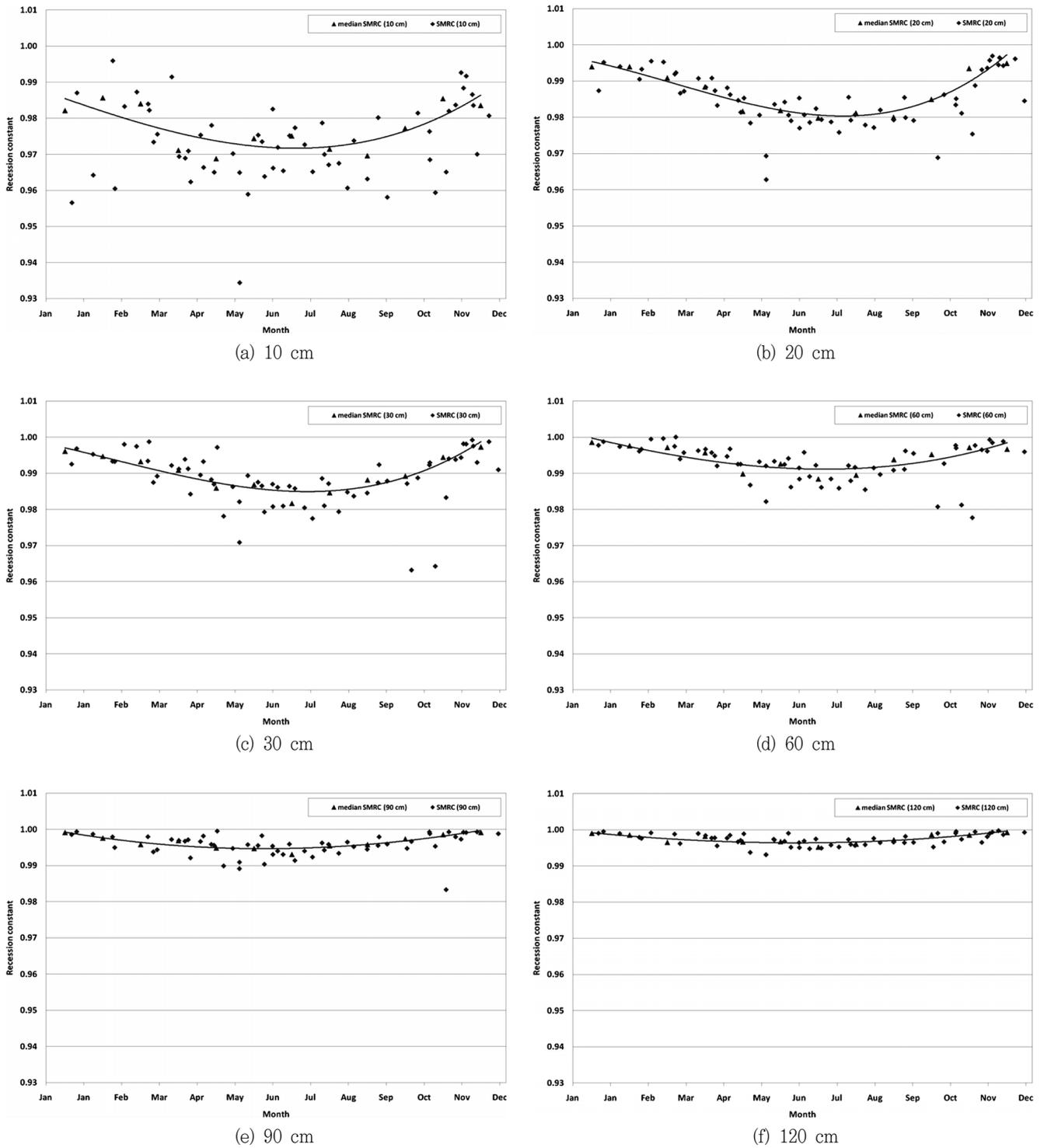


Fig. 7 Monthly variation of soil moisture recession constant (SMRC) for 10, 20, 30, 60, 90 and 120 cm depth layers

의 감쇄상수는 0.994~0.995로써 20 cm 토층에서 가장 큰 감쇄상수가 산정되어 토양수분 소비가 4~9월에 비해 감소하였다. 또한, 전반적으로 20 cm 토층의 토양수분 감쇄상수는 10 cm

토층의 토양수분 감쇄상수보다 증가하여 20 cm에서 소비되는 토양수분 함량이 10 cm 보다 감소하였다. 30 cm 토층에서는 0.982의 가장 작은 감쇄상수를 가지는 7월에 토양수분 소비가 가장

활발함을 알 수 있었으며, 5~10월은 감쇄상수가 0.990보다 작았으나 20 cm 토층 감쇄상수보다 증가하였다. 10, 20 cm 토층과 비교하여 30 cm 토층에서는 증발산량이 제일 많은 7, 8월의 토양수분 소비는 활발한 반면, 그 외의 월에는 토양수분 소비가 감소하였으며, 비 생육시기에는 토양수분 감쇄상수가 높고 비슷하였다.

Fig. 7 (d)~(f)는 60~120 cm 토층에서 산정된 감쇄구간별 토양수분 감쇄상수 및 감쇄상수의 월별 증양값으로써, 60 cm 토층의 감쇄상수의 평균은 0.994, 편차는 0.005이었으며, 90 cm 토층에서는 평균은 0.996, 편차는 0.003, 120 cm 토층에서는 평균은 0.998, 편차는 0.002이었다. 60~120 cm 토층에서의 감쇄상수는 30 cm 이상 상부토층에 비하여 증가하였으며, 하부토층으로 갈수록 평균은 증가하고 편차는 감소하여 토양수분 소비가 감소하는 경향을 보였다. 60 cm 토층에서는 7, 8월의 감쇄상수가 0.988, 0.989로 토양수분 소비량이 가장 많았지만, 10 cm 토층의 최소 감쇄상수보다 큰 값으로 토양수분 소비량이 상부토층에 비해 감소하였음을 확인하였다. 또한, 그 외의 월에서의 감쇄상수는 0.990 이상이었으며, 10~4월에는 월별 감쇄상수의 차이가 거의 없었다. 90 cm 토층에서의 감쇄상수는 7월에 0.993으로 가장 작았으며, 5, 6, 8월은 0.995로 동일하였다. 하지만 7월을 제외하고는 월별 차이가 거의 없어 90 cm 토층에서의 토양수분 소비는 90 cm 이상 상부토층에 비해 양도 감소하지만 월별 차이도 감소함을 알 수 있다. 120 cm 토층 역시 7월 감쇄상수가 0.995로 가장 작았지만 10~2월 감쇄상수

는 0.999로 토양수분 감쇄현상이 거의 나타나지 않았으며, 60 cm 이상 토층과는 다르게 월별 토양수분 감쇄특성의 차이가 미비하였다.

Table 3은 위에서 산정된 토층별 월별 감쇄상수 및 감쇄상수의 토층별 평균, 최솟값 및 최댓값으로써, 하부 토층으로 갈수록 토양수분 감쇄상수가 증가하였으며, 최소, 최댓값의 폭 및 월별 차이가 감소하였다. 본 연구에서 산정된 월별 토층별 감쇄상수는 향후 산림에서의 토양수분 모델링에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

3. 토양수분 감쇄상수 검증

본 연구에서 산정된 토양수분 감쇄상수의 적용 가능성을 판단하기 위하여 토양수분 모니터링 결과 (2007년 8~12월, 2010년 1~8월, 10~12월)와 토양수분 감쇄상수를 활용하여 산정된 토양수분 모의결과를 이용하여 월별 토층별 토양수분 감쇄상수를 검증하였다. Table 4는 감쇄상수를 검증하기 위하여 산정된 토층별, 월별 결정계수 (R^2) 및 RMAE 이다. 2007년 8~11월, 2010년 4~10월은 결정계수가 대부분 0.9 이상이었으며, 특히, 수목의 생육이 활발할 것으로 예상되는 5~9월은 대부분

Table 3 Monthly soil moisture recession constant for each soil layers

Month	Soil Layers					
	10 cm	20 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm
Jan.	0.982	0.994	0.996	0.999	0.999	0.999
Feb.	0.986	0.994	0.995	0.998	0.998	0.999
Mar.	0.984	0.991	0.993	0.997	0.996	0.997
Apr.	0.971	0.988	0.991	0.996	0.997	0.998
May	0.969	0.982	0.986	0.990	0.995	0.997
Jun.	0.974	0.982	0.987	0.993	0.995	0.997
Jul.	0.975	0.980	0.982	0.988	0.993	0.995
Aug.	0.971	0.981	0.985	0.989	0.995	0.996
Sep.	0.970	0.980	0.988	0.994	0.996	0.997
Oct.	0.977	0.985	0.989	0.995	0.997	0.999
Nov.	0.985	0.994	0.994	0.997	0.999	0.999
Dec.	0.984	0.995	0.997	0.997	0.999	0.999
max	0.986	0.995	0.997	0.999	0.999	0.999
min	0.969	0.980	0.982	0.988	0.993	0.995
average	0.977	0.987	0.990	0.994	0.997	0.998

Table 4 Validation result of soil moisture recession constant

Soil layers (cm)	RMAE (%)	R^2								
	Aug. (2007)		Sep. (2007)		Oct. (2007)		Nov. (2007)		Dec. (2007)	
10	0.011	0.964	0.036	0.990	0.046	0.873	0.065	0.884	0.006	0.680
20	0.009	0.984	0.011	0.997	0.006	0.995	0.060	0.967	0.002	0.926
30	0.005	0.994	0.002	0.996	0.007	0.994	0.037	0.979	0.001	0.941
60	0.006	0.963	0.006	0.998	0.019	0.903	0.018	0.972	0.002	0.944
90	0.005	0.967	0.005	0.986	0.017	0.898	0.034	0.811	0.002	0.961
120	0.002	0.986	0.006	0.961	0.016	0.876	0.036	0.889	0.002	0.972
	Jan. (2010)		Feb. (2010)		Mar. (2010)		Apr. (2010)		May (2010)	
10	0.112	0.439	0.296	0.320	0.020	0.883	0.047	0.867	0.044	0.891
20	0.017	0.875	0.048	0.657	0.008	0.923	0.008	0.990	0.012	0.985
30	0.006	0.989	0.021	0.893	0.014	0.820	0.024	0.920	0.017	0.928
60	0.006	0.986	0.018	0.934	0.011	0.768	0.018	0.893	0.017	0.923
90	0.005	0.994	0.020	0.732	0.004	0.889	0.007	0.959	0.016	0.980
120	0.002	0.942	0.009	0.970	0.008	0.890	0.015	0.861	0.015	0.935
	Jun. (2010)		Jul. (2010)		Oct. (2010)		Nov. (2010)		Dec. (2010)	
10	0.021	0.972	0.038	0.965	0.060	0.937	0.019	0.619	0.230	0.056
20	0.013	0.988	0.020	0.966	0.035	0.951	0.011	0.902	0.025	0.365
30	0.008	0.983	0.023	0.961	0.016	0.991	0.005	0.960	0.013	0.440
60	0.006	0.971	0.009	0.951	0.006	0.994	0.001	0.969	0.012	0.443
90	0.007	0.990	0.004	0.946	0.003	0.997	0.005	0.763	0.004	0.650
120	0.004	0.953	0.007	0.936	0.008	0.906	0.005	0.824	0.002	0.810

결정계수가 0.95 이상으로 모의치와 모니터링 결과가 거의 일치하는 것으로 나타났다. 하지만, 12~2월의 경우 10 cm 토층을 중심으로 결정계수가 0.7 이하로 낮은 값을 가졌으며, 10 cm 이하 토층의 경우도 결정계수가 작게 나타났다. 이는 겨울철의 경우 강수 뿐 아니라 강설의 영향으로 기온이 낮을 경우 땅의 일부가 얼어있으며, 기온이 높아지면 융설이 발생하여 토양에 영향을 미치기 때문일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서 산정된 감쇄상수는 강설이 많이 발생하고 기온이 낮은 겨울철 일부를 제외하고는 활용 가능할 것으로 판단되며, 향후 겨울철 융설에 의한 토양수분 변화에 관한 연구도 필요할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 서울대학교 태화산 학술림 침엽수림 잣나무조림지에서 토양수분 모니터링을 실시하였다. 토양수분 모니터링 결과에 수문 감쇄곡선 (recession curve) 개념을 적용시켜 월별 토층별 토양수분 감쇄곡선을 산정하고 감쇄특성을 분석하였다. 또한, 토양수분 감쇄상수를 산정하여 토양수분 감쇄곡선 경험식을 산정하였으며 토양수분 감쇄상수의 적용 가능성을 판단하기 위하여 감쇄상수 산정결과를 검증하였다.

1. 침엽수림에서 토양수분 관측 결과, 관측 지점별로 평균 토양수분 함량은 차이가 있었으나, 편차 및 경향성은 비슷하였다. 60 cm 이하 하부토층은 평균 토양수분 함량은 높았지만 상대적으로 편차는 작았으며, 10 cm 토층에서는 평균 토양수분 함량은 가장 낮았으나 편차는 가장 컸다. 강수발생량이 많은 7월에 월평균 토양수분 함량이 가장 높았으며, 2, 10~12월은 월평균 토양수분 함량보다 낮고, 6~9월은 연평균 토양수분 함량보다 높았다.

2. 2008년 34개, 2009년 37개 구간 총 71개의 토양수분 감쇄구간을 선정하여 감쇄곡선을 산정하고 감쇄상수를 산정하였다. 11~2월에는 감쇄곡선형태가 완만한 반면, 5~9월에는 감쇄곡선 기울기가 상대적으로 급하였다. 토양수분 감쇄곡선을 바탕으로 감쇄상수 산정 결과 토층별로 차이는 있으나 감쇄상수는 1월에서 7~8월로 갈수록 감소하여 7, 8월의 감쇄상수가 가장 작았으며, 12월로 갈수록 감쇄상수가 증가하였다.

3. 토층별 토양수분 감쇄상수를 분석한 결과, 토양수분 감쇄상수가 가장 작은 10 cm 토층에서 토양수분 소비가 가장 활발한 것으로 나타났으며, 하부 토층으로 갈수록 감쇄상수가 증가하여 토양수분 소비는 감소하는 것으로 분석되었다. 10 cm 토층에서는 5, 9월의 토양수분 감쇄상수가 작았으며, 4~8월의 감쇄상수도 상대적으로 작게 나타났다. 20 cm 이하 토층에서는 7, 8월의 토양수분 감쇄상수가 가장 작았으며, 동절기인 11~2월

의 토양수분 감쇄상수가 전반적으로 작게 나타났다. 60~120 cm 토층의 감쇄상수는 30 cm 이상 상부토층 보다 증가하였으며 편차는 감소하여 토양수분 소비가 감소하는 경향을 보였다. 90, 120 cm 토층에서는 7월을 제외하고는 월별 차이가 거의 없었으며 10~2월에는 토양수분 감쇄현상이 거의 나타나지 않았고, 월별 감쇄특성의 차이는 미비하였다.

4. 산정된 토양수분 감쇄상수의 적용가능성을 판단하기 위하여 R^2 와 RMAE를 산정하여 검증하였다. 4~11월은 대부분 계산값과 관측 결과가 유사한 경향성을 보여 적용 가능할 것으로 판단된다. 12~2월은 10 cm 토층에서 R^2 가 작게 나타났는데 이는 겨울철의 경우 강수 뿐 아니라 강설 및 기온의 영향을 받기 때문에, 땅의 일부가 얼어있거나 기온이 상승함에 따라 융설이 발생하면서 영향을 미치기 때문일 것으로 판단된다.

본 연구에서 산정된 토양수분 감쇄상수는 산림에서의 토양수분 소비특성을 나타내는 지표가 될 수 있을 것으로 판단되며, 향후 수문 모델링 시 적용 가능할 것으로 판단된다. 하지만 겨울철 강설, 융설 그리고 해동에 의한 토양수분 변화는 토양수분 감쇄곡선으로 예측하는 것이 한계가 있는 것으로 분석되었으며, 향후 이에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

이 논문은 2008년도 정부 (교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRF-331-2008-1-D00777).

REFERENCES

1. Bruno, R. D., H. R. da Rocha, H. C. de Freitas, M. L. Goulden, and S. D. Miller, 2006. Soil moisture dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes* 20: 2477-2489.
2. Choi, K. M., S. H. Kim, M. Son, and J. Kim, 2008. Soil moisture modelling at the topsoil of a hillslope in the Gwangneung national arboretum using a transfer function. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 10(2): 35-46 (in Korean).
3. Grayson, R. B., A. W. Western, and F. S. Chiew, 1997. Preferred states in spatial soil moisture patterns: local and nonlocal controls. *Water Resources Research* 33 (12): 2897-2908.
4. Hammond, M., and D. Han, 2006. Recession curve

- estimation for storm event separations. *Journal of Hydrology* 330: 573-585.
5. Kim, H. K., 2009. Modeling hydrologic and water quality effects of impervious surfaces in farm and urban watersheds. Ph. D. diss., Seoul, Korea.: Seoul National University (in Korean).
 6. Kim, O. K., J. Y. Choi, M. W. Jang, S. H. Yoo, W. H. Nam, J. H. Lee, and J. K. Noh, 2006. Watershed scale drought assessment using soil moisture index. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 48(6): 3-13 (in Korean).
 7. Lee, E. J., 2007. Assessing impact of non-point source pollution by management alternatives on arable land using AGNPS model. M.S. diss., Seoul, Korea.: Seoul National University (in Korean).
 8. Lee, G. Y., S. H. Kim, K. H. Kim, and H. S. Lee, 2005. Analysis of soil moisture recession characteristics on hillslope through the intensive monitoring using TDR. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* 7(1): 78-90 (in Korean).
 9. Miller, G. R., D. D. Baldocchi, B. E. Law, and T. Meyers, 2006. An analysis of soil moisture dynamics using multi-year data from a network of micrometeorological observation sites. *Advances in Water Resources* 30: 1065-1081.
 10. Oh, K. J., H. S. Lee, D. H. Kim, S. H. Kim, H. J. Kim, and N. W. Kim, 2006. Soil moisture monitoring at a hillslope scale considering spatial-temporal characteristics. *Journal of Korea Water Resources Association* 39(7): 606-615 (in Korean).
 11. Ting, J. C., and M. Chang, 1985. Soil-Moisture depletion under three southern pine plantations in east TEXAS. *Forest Ecology and Management* 12: 179-193.
 12. Vogel, R. M., and C. N. Kroll, 1996. Estimation of baseflow recession constants. *Water Resources Management* 10: 303-320.
 13. Wittenberg, H., 1999. Baseflow recession and recharge as nonlinear process. *Hydrological Processes* 13: 715-726.