



잣나무림에서의 시기별 토층별 토양수분 특성분석

Analysis of Soil Moisture Characteristics in Nut Pine Forest about Seasons and Soil Layers

홍은미* · 최진용**† · 유승환*** · 남원호*

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

ABSTRACT

Soil moisture plays a pivotal role in hydrological processes, especially in the forest which covers more than 64% of the national land. Soil moisture was monitored to analyze soil moisture change characteristics in terms of time and soil layers in this study. 2 Years soil moisture change data was obtained from the experimental nut pine forest and statistical analysis including auto-correlation and cross-correlation among soil moisture data from different soil layers was conducted. Using the monitored soil moisture data, a relationship between soil moisture change and precipitation was analyzed and seasonal soil moisture change characteristics were analyzed. From the result of inter-relationships among soil layers in terms of season and time lag, soil moisture change characteristics in the nut pine forest were upper soil layers were much sensitive than lowers, and seasonal variation if soil moisture for upper soil layers were bigger than lowers showing low correlation with precipitation in winter and spring due to freezing and snowfalls.

Keywords: soil moisture monitoring; soil moisture characteristics; correlation; nut pine forest

1. 서 론

우리나라의 약 64 %를 차지하는 산림은 농업 수문현상, 가뭄, 홍수에 영향을 주는 주요한 토지이용 중 하나이다. 토양수분은 강우, 침투, 유출 및 증발산 순환의 연결고리를 하는 기본 인자로서, 산림에서의 토양수분변화는 작물의 생육, 생태계 변화 뿐 아니라 농업유역의 전반적인 수문순환에도 영향을 미친다 (Kim et al., 2006; Hong et al., 2009; Hong et al., 2011). 이러한 토양수분은 강우 및 강설에 의해 토양 내 재분배되며, 수목의 생육에 따른 증산과 토양증발에 의해 소비되기 때문에, 수목 생육 단계, 강우 패턴, 기온 등 기상조건 및 지온에 영향을 받는다 (Robinson et al., 2008; Sutinen et al., 2008; Bales et al., 2011). 4계절이 뚜렷한 우리나라는 생육기에는 강우에 의한 토양수분 증가와 소비로 인한 토양수분 감소현상이 뚜렷하나, 비생육기에는 토양수분의 증가·감소경향이 기상조건에 의해 다양

하게 반응할 수 있다 (Wilson et al., 2005, Longobardi, 2008). 특히, 겨울철에는 지온과 기온이 낮아지면 수목 뿌리 흡수가 저하되기 때문에 강수에 의한 토양수분 충전될 수 있으나, 기온이 낮은 경우 토양수분의 이동이 어렵기 때문에 (Joo et al., 2011), 겨울철 강수량이 적을 경우 봄 가뭄에 영향을 줄 수 있다. 또한 수목의 증발산이 활발한 봄과 가을에 강수가 발생하지 않는 경우 일시적인 토양수분 부족현상이 나타날 수 있다 (Hong et al., 2011). 따라서 산림 수문환경을 이해하고 향후 우리나라 유역 특성에 맞는 토양수분 모델을 구축하기 위해서는 장기 토양수분 모니터링을 기반으로 한 산림사면에서의 토양수분 분포특성 및 변화에 관한 기초연구가 필요하다 (Grayson et al., 1997; Choi et al., 2008; Hong et al., 2011).

국내외에서 토양수분 모니터링 및 기초연구는 다음과 같이 진행되었다. 국외에서는 Longobardi (2008)는 향후 토양수분 모델을 위하여, 평균, 변동계수, 확률분포 등을 활용하여 2004-2007년 토양수분 월별 특성을 분석하였으며, Mahmood et al. (2012)는 지표면 (0-2.5 cm)과 근근역 토양수분과의 상관관계를 분석하였다. 국내에서 Choi et al. (2008), Joo et al. (2010)은 상관분석을 통해 토양수분의 특성을 파악하였는데, Choi et al. (2008)은 광릉수목원 소유역에서 2007년 5, 9월 10 cm 깊이의 토양수분 함량과 강우량과의 상관관계를 통해 봄 (5월)에 가을 (9월)보다 토양수분이 더욱 복잡한 형태로 변화함을 밝혔다. 또한, Joo et al. (2010)은 강수 후 10 cm 표층에서 강우 후 토양

* 서울대학교 생태조경·지역시스템공학부 대학원
 ** 서울대학교 조경·지역시스템공학부 부교수, 농업생명과학연구원 겸 임연구원
 *** 서울대학교 농업생명과학대학 연수연구원
 † Corresponding author Tel.: +82-2-880-4583
 Fax: +82-2-873-2087
 E-mail: iamchoi@snu.ac.kr

2012년 6월 13일 투고
 2012년 6월 27일 심사완료
 2012년 6월 28일 게재확정

수분 감쇄경향을 지온, 기온, 비습, 풍속데이터를 활용하여 상관관계를 도출, 회귀식을 산정하여 토양수분을 예측하였다. 하지만 국내에서는 광릉수목원, 설마천 유역 등 한정된 지역 모니터링 데이터를 기반으로 특정 깊이, 특정 기간에 초점을 맞춰 진행된 연구가 많았다. 따라서 유효토층 내의 다양한 토층에서 산림 토양수분 모니터링 데이터를 기반으로 기상조건 및 생육단계에 따른 토양수분의 변화에 대한 기본적인 특성 분석 연구는 미비하다.

Hong et al., (2011)은 본 연구의 선행연구로서 월별 토층별 토양수분의 감쇄현상을 분석한 결과, 생육기에는 지수함수 형태로 토양수분이 규칙적으로 감소하는 것으로 분석되었다. 하지만 선행연구에서는 강우사상과 토양수분변화에 대한 특성 분석 및 시기별 전반적인 토양수분 변화에 대한 특성분석에는 한계가 있었다. 또한 비생육기 토양수분 변동은 비강우기에도 일부 증가하거나 또는 급격하게 감소하여 불규칙적인 특성을 보였다. 이는, 강설량, 지온, 기온 등 기상조건 영향을 받는 것으로 판단되어 이에 대한 추가적인 연구가 필요하였다.

따라서 본 연구에서는 서울대학교 태화산 침엽수 잣나무조림지에서 토양수분을 모니터링 하였으며, 토양수분의 자기상관분석, 교차상관분석 그리고 토양수분 변화량과 강수량의 교차상관분석을 통해 시기별 토층별 토양수분 변화 특성을 분석하였다.

II. 재료 및 방법

1. 토양수분 모니터링 시스템 구축

본 연구에서는 경기도 광주시의 서울대학교 농업생명과학대학 태화산 학술림을 연구 대상지역으로 선정하고 토양수분 장기 모니터링 시스템을 구축하였다. 평균 흉고직경 11.53 cm, 평균 30년 이상 수령의 잣나무 (*Pinus koraiensis* S. et Z.)로 구성된 인공림으로써, sand 함량이 높은 sandy loam 또는 loamy sand 으로 구성되어 우리나라 일반적인 산림토양의 특성을 가지고 있다 (Hong et al., 2011). 본 연구에서는 FDR (Frequency Domain Reflection)을 설치하여 10, 20, 30, 60, 90, 및 120 cm 토층에서 토양수분을 2시간 간격으로 모니터링 하였으며, 데이터는 데이터이력기록기에 저장, CDMA (Code Division Multiple Access) 모뎀으로 전송, 실시간으로 Hydras 3.0 프로그램을 이용하여 확인하였다. 장기 토양수분모니터링 시스템 구축에 관한 상세한 정보는 Hong et al. (2011)에서 제시하였다.

2. 기초자료 구축

본 연구에서 시기별, 토층별 토양수분 특성분석을 위한 기초자료로 활용하기 위해 강수량, 기온, 습도 및 강설량 등의 기상자료를 기초자료로써 수집하였다. 평균기온과 상대습도는 태화산

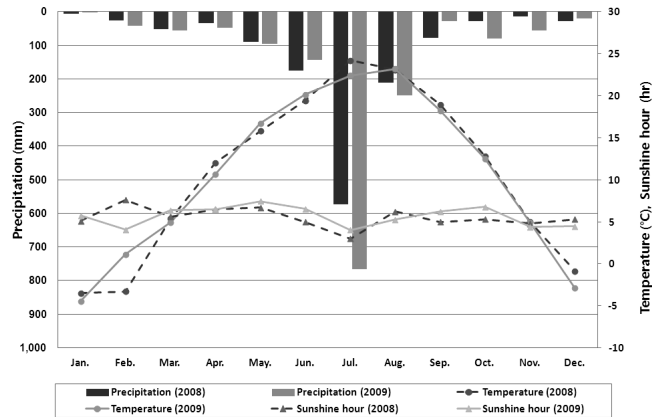


Fig. 1 Monthly total precipitation, average temperature and sunshine hours during 2008-2009

학술림 내에 설치된 자동기상측정장치 (AWS, Automatic Weather Station) 자료를 활용하였으며, 강수량은 태화산 AWS 자료에 결측치가 많아 태화산 AWS 강우데이터와 유사하고 연구대상지역과 가장 근접한 모현 AWS 시단위 (hourly) 자료를 활용하였다. 강설일과 적설심 자료는 이천측후소의 기상자료를 활용하였다.

Fig. 1은 2008-2009년 월 총 강수량 및 월 평균 기온 및 상대습도이다. 2008년 연 총 강수량은 1,313 mm, 2009년은 1,587 mm 이었으며, 대부분 강수는 6-9월에 집중적으로 발생하였다. 2008년과 2009년 7월에 각각 574 mm (43.7 %), 767 mm (48.3 %)로 전체 강수발생량의 40 % 이상 발생하였다. 연평균 기온은 2008년 10.8 °C, 2009년 10.7 °C 로 비슷하였으며, 연평균 일조시간은 5.5시간 (2008년), 5.7시간 (2009년)이었다. 2008년에는 1월 (3회), 2월 (3회), 3월 (2회), 12월 (8회), 2009년에는 1월 (7회), 2월 (2회), 3월 (3회), 12월 (9회) 눈이 내렸으며, 일부 강설은 강우와 함께 발생하였다.

3. 토양수분 상관분석

본 연구에서는 시기별, 토층별 토양수분 특성을 분석하기 위하여 각 토층에서의 토양수분 자기상관분석 (auto-correlation analysis)을 하였으며, 시차 (lag time)에 따른 두 토층 (10:20, 10:30, 10:60, 10:90, 10:120, 20:30, 20:60, 20:90, 20:120, 30:60, 30:90, 30:120, 60:90, 60:120, 90:120)사이의 토양수분 교차상관분석 (cross-correlation analysis)을 하였다. 여기서, 10:20은 20 cm 토층에서의 토양수분과 10 cm 토층에서의 시차별 선행토양수분과의 교차상관관계를 의미한다.

본 연구에서의 분석 시기는 잣나무림의 생육단계를 고려하여 구분하였다. Lee (2011)에 의하면 잣나무 줄기생장은 여름철 정지하지만, 뿌리생장은 대부분 4월에 시작하여 11월 초까지 계속되며, 겨울철에는 일반적으로 생장이 정지된다고 알려져 있다.

따라서 본 연구에서는 4-10월을 생육기간, 11-3월을 비생육기간으로 구분하였다. 4-6월 (AMJ, April-May-June)은 토양수분의 생육이 시작되는 시기, 7-8월 (JA, July-August)은 강수량이 많고 생육이 활발한 시기, 9-10월 (SO, September-October)은 뿌리생장은 진행되지만 줄기생장이 정지하는 시기, 11-12월 (ND, November-December)은 수목 생장이 멈추고 겨울철로 넘어가는 시기, 1-2월 (JF, January-February)은 기온이 0 °C 이하로 내려가며 강설 (snowfall)이 발생하고 적설 (snow cover)이 있는 시기, 3월 (M, March) 기온이 영하에서 영상으로 상승하고 약간의 강설이 발생하지만 적설이 용해되며, 비생육기에서 생육기로 넘어가는 시기로 구분하였다. 또한, 본 연구에서의 토층은 잣나무림의 뿌리깊이를 고려하여 구분하였다. Cha and Ji (2003)에 따르면, 우리나라 잣나무의 뿌리는 10-30 cm 토층에서 뿌리 분포가 가장 많으며, 30 cm 이하 토층에서는 뿌리분포가 감소하지만 약 100-120 cm 토층까지 잣나무 뿌리가 분포하였다. 따라서, 뿌리분포가 많은 0-30 cm 토층에서는 10 cm 간격으로 모니터링 하였으며, 30 cm 이하 토층에서 120 cm 토층까지 30 cm 간격으로 60, 90, 그리고 120 cm 토층에서 토양수분을 모니터링 하였다.

교차상관분석은 서로 다른 두 함수간의 유사성을 살피는 방법으로써, 식 (1)과 같이 산정한다.

$$R_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(Y_{t+k} - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2 \sum_{t=1}^n (Y_t - \bar{Y})^2}} \quad (1)$$

여기서, X_t 는 t 시간의 상부토층 토양수분 함량이며, Y_t 는 t 시간의 하부토층 토양수분함량, \bar{X} , \bar{Y} 는 X , Y 의 평균, t 는 현재 분석의 기준이 되는 시간, k 는 상관관계를 분석하는 두 토양수분사이의 시차 (0,1,2,...,K), R_k 는 t 시간의 토양수분 함량 X_t 와 $t+k$ 시간의 토양수분함량 Y_{t+k} 와의 상관관계의 정도를 나타내는 교차상관계수이다.

자기상관관계는 동일한 함수에서 t 시간과 $t+k$ 시간에 관찰된 값 사이의 상관관계 정도를 산정하는 것으로써, 식 (2)와 같이 산정한다.

$$\rho_k = \frac{\sum_{t=1}^{n-k} (X_t - \bar{X})(X_{t+k} - \bar{X})}{\sum_{t=1}^n (X_t - \bar{X})^2} \quad (2)$$

여기서, X_t 는 t 시간의 토양수분 함량이며, ρ_k 는 t 시간의 토양수

분 함량 X_t 와 $t+k$ 시간의 토양수분함량 X_{t+k} 와의 상관관계의 정도를 나타내는 교차상관계수이다.

또한, 본 연구에서는 식 (1)을 활용하여 토양수분 변화량과 강수량의 교차상관분석을 하였으며, 강수량과 시기별, 토층별 토양수분의 충전, 중력수 배제 등의 토양수분 변화와의 관계를 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 토양수분 모니터링 결과

서울대학교 태화산 학술림 잣나무조림지에서 2008-2009년 토양수분 모니터링 결과의 전반적인 특성을 분석하였다. Table 1은 토층별 토양의 물리적 성질, 평균 토양수분함량 및 통계적 특성이며, Table 2는 토양수분 모니터링 결과를 활용하여 산정한 모니터링기간 동안 각 토층의 토양수분 자기상관분석 및 토층사이의 교차상관분석 결과이다.

토층의 깊이를 고려하여 토양수분 함량 (θ_{zone})을 산정한 결과, 평균은 20.78 %, 편차는 1.89 %, 최댓값은 37.28 %, 최솟값은 17.01 %, 변동계수는 0.09이다. 토층별 토양수분 평균값을 비교해보면, 10 cm 토층에서는 sand 성분이 78.1 %로 낮아 보수력이 높음에도 불구하고 토양수분 함량은 9.40 %로 가장 낮았다. 토양수분은 토성의 영향도 받지만, 수목의 생육 및 토층 내 흐름에도 영향을 받기 때문에 판단된다. 또한, 잣나무 뿌리분포비율이 높은 10-30 cm 토층에서 sand 성분이 90 cm 토층과 비슷함에도 불구하고 토양수분 함량은 낮았다. 이는 sand 성분이 높을수록 토양수분 보수력이 낮아져 토양수분 함량이 낮아짐과 동시에 잣나무 증발산에 이용되는 토양수분함량도 하부토층보다 많기 때문에 판단된다. 대체적으로 하부토층의 평균 토양수분 함량이 상부토층보다 높았으며, 편차와 변동계수는 작았다. 변동계수는 토양수분 함량이 낮고 건조할수록 높은 경향이 있으며, 토양수분의 변동계수가 크다는 것은 보유한 토양수분 함량에 비해 변동성 크음을 의미한다 (Choi and Jacobs, 2010; Brocca et al., 2012).

Table 2의 토층별 토양수분의 자기상관성을 시차를 고려하여 살펴보면, 시차 1일 토양수분 자기상관성은 전 토층에서 0.9 이상으로 높은 상관관계를 보였으며, 시차 4일까지는 상관관계수가 0.8 이상으로 높았다. 하지만, 시차가 길어질수록 토양수분 자기상관성은 감소하였으며, 30일 시차의 자기상관성은 하부토층에서는 다소 높았으나, 상부토층에서는 낮은 상관성을 보였다. 또한, 자기상관성이 낮은 10, 20 cm 토층의 토양수분 교차상관성은 시차 0일에 약 0.56으로 약간의 교차상관성을 지녔으며, 7일 시차 이후의 교차상관성은 0.4 이하로 상관관계가 낮은 수준인

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil moisture contents for six soil layers during 2008–2009 (Unit : %, v/v)

Samples		10 cm	20 cm	30 cm	60 cm	90 cm	120 cm	θ_{zone}
soil moisture contents (%, v/v)	avg.	9.40	16.31	17.71	25.29	19.59	27.87	20.78
	std.	3.45	2.79	2.92	2.05	1.12	1.50	1.89
	min.	2.12	8.37	11.61	21.43	17.47	25.21	17.01
	max.	34.13	47.26	47.77	42.33	26.53	36.98	37.28
	CV.	0.37	0.17	0.17	0.08	0.06	0.05	0.09
physical properties (%)	sand	78.1	84.5	84.9	81.2	83.4	74.9	-
	silt	13.5	10.2	12.8	13.6	15.3	16.4	-
	clay	8.4	5.3	2.2	5.2	1.3	8.7	-

* avg. : average, std. : standard deviation, max.: maximum, min.: minimum, CV.: Coefficient of Variables

$$\theta_{zone} = \frac{d_1 \times \theta_1 + d_2 \times \theta_2 + \dots + d_n \times \theta_n}{d_1 + d_2 + \dots + d_n} \text{ (Miller et al., 2007)}$$

여기서, θ_{zone} 은 zone weighting 방법 에 의한 토양수분 평균 (%), n 은 토양수분을 측정 한 토층의 수, θ_n 은 n 번째 토층에서의 함수비 (%), d_n 은 n 번째 토양수분 모니터링 지점 이 영향을 받을 토양의 깊이

Table 2 Auto and cross correlation of soil moisture contents among 6 soil layers during 2008–2009

Statistic		Lag time (day)								
		0	1	2	3	4	7	10	15	30
Autocorrelation ^{a)}	10:10	-	.926	.870	.832	.802	.740	.710	.608	.407
	20:20	-	.929	.904	.877	.854	.794	.752	.670	.501
	30:30	-	.909	.896	.870	.846	.777	.744	.672	.538
	60:60	-	.909	.883	.862	.839	.763	.731	.660	.543
	90:90	-	.933	.906	.892	.880	.824	.796	.736	.595
	120:120	-	.933	.914	.905	.893	.842	.814	.758	.616
Crosscorrelation ^{a)}	10:20	.559	.530	.503	.485	.465	.417	.387	.293	.118
	20:30	.970	.901	.888	.858	.834	.774	.738	.662	.510
	30:60	.984	.898	.876	.851	.825	.747	.709	.632	.494
	60:90	.965	.893	.873	.859	.848	.795	.777	.724	.622
	90:120	.979	.918	.899	.895	.885	.844	.828	.782	.664

a) all values are significant at $P < 0.01$ significant level

반면, 하부 토층간의 토양수분 교차상관성은 상부토층 10:20과 비교하여 10일의 시차간격에도 0.7 이상의 높은 상관성을 보였다. 이는 표층의 토양수분이 하부토층의 토양수분보다 기상인자에 직접적으로 영향을 받아 민감하게 반응하였기 때문에 판단되며, 시차가 길어질수록 상관성이 감소하는 이유는 토양수분 변화는 상부토층 및 자기 자신의 선행토양수분함량의 영향도 받으나 강수, 기온 등 기상조건과 계절적 특성에도 영향을 받기 때문에 판단된다.

2. 시기별 토층별 토양수분 특성 분석

Table 3은 토양수분의 자기·교차상관성이 상대적으로 낮고 잣나무 뿌리 분포 비율이 높았던 10, 20, 30 cm 토층의 시기별 토양수분 상관분석결과이다. 비생육기 10 cm 토층에서는 자

Table 3 Time-periodic auto and cross correlation of soil moisture contents among 6 soil layers

Periods	Auto-correlation			Cross-correlation						
	10:10 (1) ^{b)}	20:20 (1)	30:30 (1)	10:20 (0)	10:20 (1)	20:30 (0)	20:30 (1)	30:60 (0)	30:60 (1)	
2008	JF ^{a)}	.977**	.995**	.998**	.769**	.785**	.992**	.997**	.997**	.912**
	M ^{a)}	.923**	.921**	.951**	.919**	.933**	.965**	.972**	.988**	.913**
	AMJ ^{a)}	.823**	.913**	.945**	.855**	.780**	.952**	.891**	.993**	.881**
	JA ^{a)}	.603**	.723**	.689**	.930**	.698**	.966**	.701**	.950**	.546**
	SO ^{a)}	.817**	.932**	.944**	.911**	.928**	.975**	.938**	.991**	.925**
	ND ^{a)}	.722**	.972**	.984**	.463**	.569**	.959**	.975**	.977**	.951**
2009	JF	.879**	.961**	.961**	.660**	.706**	.991**	.972**	.984**	.925**
	M	.398**	.793**	.910**	.828**	.762**	.931**	.938**	.979**	.926**
	AMJ	.849**	.792**	.819**	.747**	.736**	.964**	.883**	.988**	.828**
	JA	.493**	.442**	.459**	.897**	.453**	.977**	.447**	.979**	.926**
	SO	.790**	.994**	.998**	.760**	.808**	.990**	.995**	.996**	.951**
	ND.	.899**	.898**	.964**	.235	.274*	.910**	.966**	.941**	.895**

* values are significant at $P < 0.05$ significant level

** values are significant at $P < 0.01$ significant level

a) JF: January, February; M: March; AMJ: April, May, June; JA: July, August; SO: September, October; ND: November, December

b) () : Lag time (day)

기상상관이 낮은 반면, 20 cm 이하 토층에서는 높은 자기상관성을 가졌으며, 교차상관성 역시 10:20에서 낮은 반면, 하부토층에서는 높았다. 생육기인 4-10월 토양수분 자기상관분석 결과, 4-6, 9-10월에는 전체 토층에서 높은 자기상관성을 보인 반면, 7-8월은 자기상관성이 낮았다. 생육기 토층사이의 교차상관성을 보면, 4-8월은 전 토층에서 시차 0일 당일의 자기상관성이 시차 1일과 비교하여 높았으나, 9-10월은 시차 1일의 교차상관성이 더 높아 전반적으로 0일 시차에서 상관성이 가장 높은 것이 아니라 시기별로 차이가 있었다. 본 연구에서는 시기별 토층별 토

양수분 특성을 Table 3의 결과, 강수량과 토양수분함량과의 교차분석결과 및 강설량, 기온 등의 기상자료를 활용하여 분석하였다.

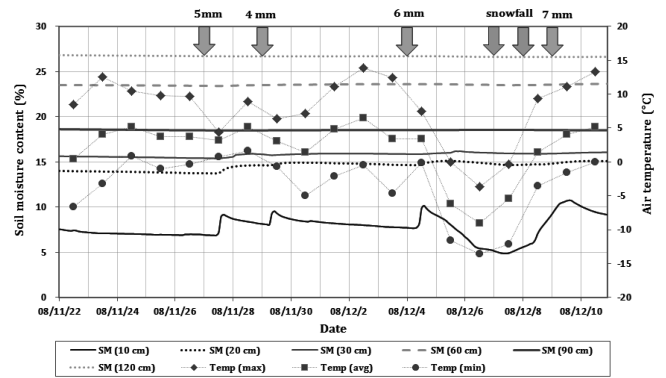
가. 비생육기 토양수분 특성분석

토층별 토양수분 자기상관분석 및 교차상관분석, 그리고 강수, 강설, 기온 등 기초자료를 활용한 비생육기 (ND, JF, M)의 토양수분 특성 분석 결과는 다음과 같다.

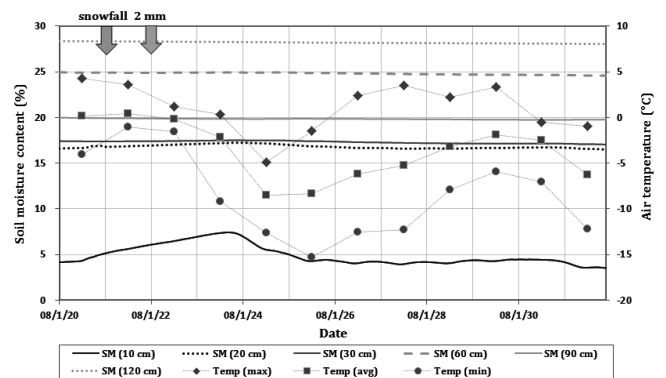
11-12월은 일 평균 강수량이 1.64 mm (2008년), 2.68 mm (2009년)으로 적었는데, Fig. 2(a)의 11월 27일, 29일 12월 4일 강수사상 후 토양수분 변화패턴을 보면, 강수 후 10 cm 토층에서는 토양수분함량이 일부 증가하지만 20 cm 이하 토층 토양수분 변화는 미비하였다. 이는 기온과 지온이 낮아지면서 토양수분의 이동이 느려지기 때문인 것으로 판단된다 (Joo et al., 2010).

또한 기온이 지속적으로 감소하고 12월 최저기온은 대부분 영하로 내려가면서 10 cm 토층에서 Fig. 2(a)의 12월 4-8일과 같이 토양이 동결되어 토양수분 함량이 급격하게 감소하였다. 12월은 연중 강설일이 8일 (2008년), 9일 (2009년)로 가장 많은 시기로서, 적설은 토양수분 감소에 영향을 미치는데, 강설 후 Fig. 2(a)의 12월 9일과 같이 강우가 발생하고 기온이 상승하면 동결된 토양 및 적설이 용해되면서 10 cm 토층의 토양수분 함량이 증가하는 경향을 보였다. 하지만 강수량이 적고 토양수분 이동속도가 느리기 때문에 20 cm 이하 토층에 영향을 미치지 못한 것으로 판단된다. 12월 20 cm 이하 토층은 수목의 생육도 거의 정지하여 토양수분 소비량 및 침투량이 적어, 높은 자기상관성 및 교차상관성을 보였다. 반면, 10 cm 토층은 기온, 강설 및 강수의 영향으로 토양수분의 동결과 용해가 반복되어 토양수분 함량의 변화가 컸으나 이동속도는 느리기 때문에 자기상관성은 높았으나, 하루 토층과의 교차상관성은 10:20은 2009년에는 0.3 이하, 2008년에는 0.5 정도로 낮았다.

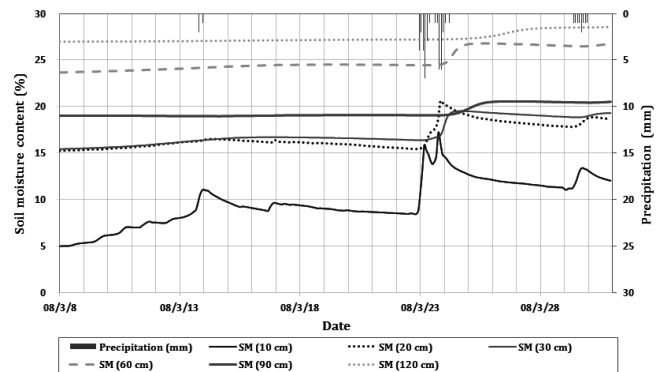
1-2월의 시차 1일의 토양수분 자기상관성을 살펴보면, 10-30 cm 토층에서 대체적으로 0.9 이상으로 상관성이 높았으나, 10:20 토층의 교차상관성은 11-12월과 유사하게 상관성이 낮아 10 cm 토층의 토양수분이 20 cm 토층에 미치는 영향은 미비하였다. 이는 11-12월과 유사하게 일평균 강수량이 3.0 mm (2008년), 4.5 mm (2009년)로 적을 뿐 아니라 12월부터 낮은 기온이 유지되고 표층에 적설이 쌓여있으며, 추가적으로 강설이 발생하면서 표층 토양이 동결되고 지층의 토양수분 이동은 거의 없기 때문으로 판단된다. 또한, Fig. 2(b)의 10 cm 토층 토양수분을 살펴보면, 2 mm/day의 적은 강수량에도 강수 후 12월과 유사하게 토양수분이 지속적으로 증가하였다. 1-2월에 발생하는 강수는 기온이 영상일 때 주로 발생하며 강설이 발생한 이후 또는 강설이 발생하지 않았어도 표층에 눈이 쌓여있는 경우가 많다. 따라서



(a) ND (2008/11/22-2008/12/11)



(b) JF (2008/1/20-2008/2/1)



(c) M (2008/3/8-2008/3/31)

Fig. 2 The time-series of soil moisture and temperature (a, b) or precipitation (c) at 6 soil layers in ND, JF, and M

0 °C 이상의 기온이 유지되고 동시에 강수가 발생하면서 적설이 용설되어 토양수분 함량이 일시적으로 증가하는 것으로 판단할 수 있다. 하지만, 강수량이 적고 기온이 다시 영하로 내려가면서, 토양수분의 전이가 용이하지 않고 수목의 생육도 정지되어 토양수분 소비도 미비하기 때문에, 12월과 유사하게 30 cm 이하 토층에서의 토양수분 변화는 거의 없었다.

3월은 Fig. 2 (c)의 10 cm 토층의 토양수분 시계열 변화에서와 같이, 3월 초 강수가 발생하지 않았음에도 불구하고 토양수분 함량이 증가하는 경향을 보인다. 이는 기온이 오르면서 적설 및 동결된 토양이 용해되기 때문으로 판단된다. 하지만 3월 초는 기온이 0 °C 이하로 내려가는 시기도 많아 토양수분의 용해와 정지를 반복하며 불규칙한 패턴으로 토양수분이 변화되는 것으로 판단된다. 2009년의 경우 2008년 12-2009년 2월까지 강설량이 많아, 3월 용해되는 토양수분 함량이 많고 불규칙성이 증가하였기 때문에 10 cm 토층에서의 자기상관성은 0.4로 낮았다. 반면, 10:20 토양수분 교차상관성은 10 cm 토양수분의 자기상관성과 비교하여 0.92 (2008년), 0.83 (2009년)으로 상관성이 높았다. 지온이 지속적으로 상승하고 10 cm 토층에 용해된 토양수분의 일부 및 강수량이 20 cm 토층으로 이동하였으며, 전일 자신의 선행토양수분 함량에도 영향을 받지만 상부토층의 선행토양수분 변화에도 영향을 받기 때문으로 판단된다. 또한, 3월은 기온이 상승하고 강수량이 증가하면서, Fig. 2(c)와 같이 토양수분함량이 강수에 의해 변화하기 시작하였다. 따라서 강수량과 토양수분 변화량과의 교차상관분석을 통해 강수량이 3월 토양수분함량에 미치는 영향을 살펴보았다 (Table 4). 강수 발생일 10, 20 cm,

1일 후에는 20, 30 cm, 2일 후에는 60, 90 cm, 3일 후에는 90, 120 cm 토층에서 토양수분 변화량과 강수량과의 양의 상관성을 보였다. 또한, Fig. 2(c)에서 3월 17, 18일 40 mm 강수 발생 후 60 cm 이상 토층에서는 토양수분의 증가와 증력수가 배제되는 감소경향을 뚜렷하게 보였으나, 90, 120 cm 토층에서는 강수 발생 약 3일 후 토양수분이 증가하기 시작하였으며, 증가 속도도 느리고 다음 강수가 발생할 때까지 증가하였다. 이는, 지온 및 기온이 상승하면서 토양수분의 이동은 활발해지기 시작하지만 토양수분 소비량이 적고 기온이 생육기보다 낮아 하부토층에서의 토양수분의 이동은 느린 것으로 판단된다.

비생육기의 토양수분 특성을 종합적으로 정리해보면, 11-2월은 토양수분의 소비가 거의 발생하지 않으며, 토양수분의 이동도 느려 20 cm 이하 토층에서는 토양수분함량의 변화가 거의 없다. 하지만, 표층에서는 강우량에도 영향을 받지만, 강수 발생 시 기온, 적설심, 선행 강설량 등에 따라 토양수분의 동결, 정지, 용해가 반복된다. 3월은 기온이 상승하면서 동결된 토층 및 적설이 용해되어 토층 내 토양수분을 충전시키는 효과가 나타났다. 따라서 겨울철 적설이 충분할 경우 봄철 토양수분이 충분히 충전되어 가뭄에 큰 영향이 없지만, 겨울철 적설량이 적을 경우 봄철까지 토양이 건조하여 봄 가뭄을 야기할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 4 Cross-correlation between soil moisture changes and precipitation during March

Soil depth (cm)	Lag time (day)			
	0	1	2	3
10	.76**	-.22	-.06	-.46**
20	.52**	.40*	-.27	-.13
30	-.03	.60**	.28	.10
60	-.12	.32	.64**	.25
90	-.09	.02	.67**	.48**
120	-.02	.01	.11	.78**

* values are significant at P<0.05 significant level
 ** values are significant at P<0.01 significant level

나. 생육기 토양수분 특성 분석

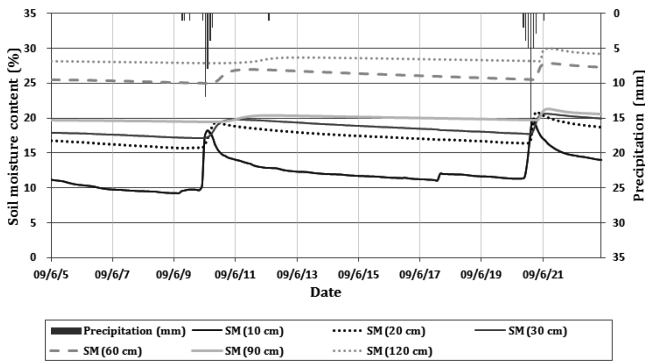
토층별 토양수분 자기상관분석 및 교차상관분석, 그리고 강수량과 토양수분변화량의 교차상관분석을 통한 생육기 (AMJ, JA, SO) 동안의 토양수분 특성 분석 결과는 다음과 같다.

Table 5의 4-6월 토양수분 변화량과 강수량의 교차 상관분석 결과, Fig. 3(a)와 같이 10 cm 토층에서는 강수발생 당일 토양수분 함량이 집중적으로 증가하여 일부는 토층 내에 충전되었으며, 강수발생 1-2일 후 증력수로 배제되었다. 반면, 20 cm 이하 토층에서는 강수발생일에도 토양수분이 증가하였으나, 10 cm 토

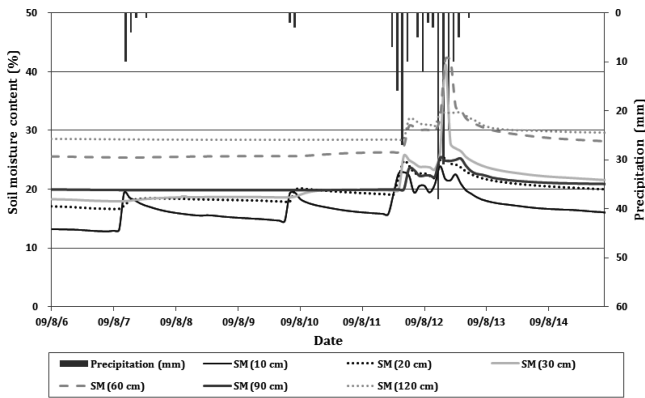
Table 5 Cross-correlation between soil moisture changes and precipitation in growing period

Soil depth (cm)	AMJ				JA				SO			
	0	1	2	3	0	1	2	3	0	1	2	3
	Lag time (day)											
10	.59**	.01	-.35**	-.10	.77**	-.55**	.10	.09	.27	.79**	-.32	.28
20	.47**	.38**	-.41**	-.11	.76**	-.53**	.19	-.01	.12	.85**	-.39*	-.05
30	.36**	.59**	-.27*	-.13	.76**	-.46**	.11	-.01	.03	.82**	-.48**	-.31
60	.31**	.64**	-.19	-.14	.74**	-.41**	.07	-.03	-.04	.76**	-.51**	-.34
90	.32**	.48**	-.21	-.04	.76**	-.49**	.10	.02	-.03	.76**	-.50**	-.28
120	.50**	.49**	-.15	-.01	.16	.40*	-.09	.07	-.02	.01	.11	.78**

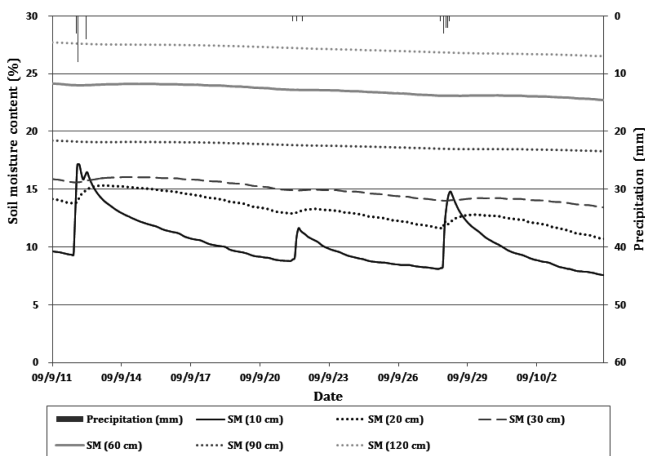
* values are significant at P<0.05 significant level
 ** values are significant at P<0.01 significant level



(a) AMJ (2009/6/5-2009/6/22)



(b) JA (2009/8/6-2009/8/15)



(c) SO (2009/9/11-2009/10/5)

Fig. 3 The time-series of soil moisture and precipitation at 6 soil layers in AMJ, JA, and SO

층에서 주로 중력수가 배제되기 시작하는 강수발생 1일 후 더 높은 상관성을 가지며 토양수분이 증가하였다. 또한, 2일 선행강수에 대해 20 cm 이하 토층에서 중력수가 배제되는 경향을 보였으나, 60 cm 이하 토층에서는 유의성이 낮았다. 4-6월 토양수

분의 시계열 변화를 살펴보면, 10 mm/day 이하의 강수에 대해서는 대체적으로 60 cm 이하 토층의 토양수분 변화에 미치는 영향이 미비하였고, 강수발생일 후 침투되어 하부토층 토양수분을 충전시키는데 2일 정도의 시간이 지체되었으나, 3월보다는 지체 시간이 짧아졌다. 강수 후 충전된 토양수분은 수목의 생육에 의해 지수함수 형태로 규칙적으로 감소하였으며 (Hong et al., 2011), 수목의 생육이 활발해지면서 토양수분 소비에 활용되는 토층도 깊어졌다. 또한 토양수분이 수목의 증발산 및 토양 증발로 감소하는 기간에 비해 강수에 의해 토양수분이 증가하고 중력수가 배제되는 기간은 짧아 전반적으로 전 토층에서 토양수분은 규칙적으로 변화하였으며, 선행토양수분함량에 의해 일정비율로 토양수분이 변화하여 토양수분 자기상관성이 높았다.

하지만, 수목의 생육이 가장 활발하여 토양수분 소비량이 많은 7-8월은 4-6월과 비교하여 토양수분의 자기상관성이 낮았다. 시간당 평균 강수량 (15.1 mm/hr (2008년), 25.4 mm/hr (2009년))이 높은 7-8월은 상대적으로 선행토양수분함량보다 강수량과 강우강도에 영향을 더 많이 받기 때문에, 자기상관성이 상대적으로 낮은 것으로 판단되며, Fig. 3(b)에서와 같이 하부토층도 강수의 영향을 크게 받기 때문에 20, 30 cm 토층의 토양수분의 자기상관성도 상대적으로 낮은 것으로 판단된다. 토층사이의 교차상관성 분석 결과, 시차 0일은 0.9 이상의 높은 상관성을 가졌지만, 상대적으로 1일 시차에 대해서는 0.7 이하로 토층사이의 상관성이 낮았다. 이는 강수량과 토양수분변화량의 교차상관분석에서 볼 수 있듯이, 7, 8월은 강수발생 당일 120 cm 하부토층까지 증가하고, 강수발생 다음날 중력수 배제현상이 뚜렷하게 나타나, 강수 및 상부토층의 토양수분 변화에 심토의 토양수분도 빠르게 반응하기 때문으로 판단된다. Fig. 3(b)은 7-8월의 대표적인 토양수분 시계열 변화로써, 7월 16일 52 mm 강수가 발생하여 강수발생과 동시에 토양수분이 증가하였으며, 토양수분이 침투되는 지체시간도 4-6월과 비교하여 감소하여 2시간 이내에 하부토층에 영향을 주었다. 7월 19일-21일은 3일 동안 비연속적으로 총 193 mm 강수가 발생하였는데, 강우 발생시에는 토양수분이 바로 증가된 후 하부토층으로 배제되는 현상을 확인할 수 있었으며, 시간당 강수량이 많아 2-4시간 이내에 120 cm 토층까지 토양수분변화에 영향을 주고 120 cm 이하 토층으로도 중력수가 빠져나가는 것을 확인할 수 있었다. 7-8월은 전반적으로 시간당 강수량이 많아 강수일 토양수분 함량이 급속하게 증가하고 하부토층으로 침투되어 일부는 중력수로 배제되고 일부는 토양 내 충전되는 경향을 보였다. 그러나 강우강도가 큰 경우 배제되는 강수량이 더 많아 소비에 직접적으로 사용되지 못하고 배제되는 양이 많았다. 오랜 기간 선행강우가 없는 경우는 증발산에 의한 토양수분 부족현상이 발생하여, 많은 강수가 발생하더라

도 하부토층까지 영향을 주지 않고 상부토층 내에서 충전되는 경향도 나타났다. 하지만, 강수발생 전·후의 토양수분 함량을 비교한 결과 토양수분이 토층 내에 충전되었으나, 증발산에 의해 소비되면서 강수 후 3일 이내에 토양수분 함량은 강수 이전과 비슷한 수준까지 감소하였다.

9-10월 토양수분 자기상관성과 교차상관성 분석결과, 4-6월과 유사하게 상관성이 높았으며, 일평균 강수량 (3.35 mm (2008년), 3.96 mm (2009년))이 적어 Fig. 3(c)와 같이 강수 발생시 60 cm 이하 토층에서의 토양수분 변화는 미비하였다. 그리고 4-8월과 비교하여, 강수 후 10 cm 토층에서의 토양수분 증가현상은 뚜렷하였으나, Table 5의 강수량과 토양수분변화량의 교차상관분석결과 강수에 의해 하부토층 토양수분이 충전되는데 2일 이상의 긴 반응 시간이 걸렸다. Kim et al. (2011)의 연구에서도 7, 8월은 강수에 의한 토양수분 반응시간이 짧은 반면, 9, 10월은 흐름이 지체되어 유사한 경향을 보였다.

생육기의 토양수분 특성을 종합적으로 정리해보면, 생육기는 크게 강수에 의한 토양수분 증가와 수목의 의한 토양수분 소비로 토양수분 함량이 변화하게 된다. 수목의 소비에 의한 토양수분 변화는 강수가 발생하기 전까지는 지수함수 형태로 일정하게 규칙성을 가지고 감소하게 된다. 또한 강수 발생 후 토양수분 함량은 급격하게 증가하며 증력수 배제로 감소한다. 하지만 강수는 특이한 패턴으로 불규칙적으로 발생하기 때문에 강수에 의한 토양수분 변화는 강수량 뿐 아니라 Fig. 4와 같이 선행토양수분 및 강우강도에도 영향을 받았다. 토양수분 필요량에 비해 선행토양수분이 상대적으로 적은 4-6, 9-10월은 토양수분 충전효과가 뚜렷하게 나타났으며, 선행토양수분함량 및 강우강도가 큰 7-8월의 경우 많은 양의 강수가 증력수로 배제되었다.

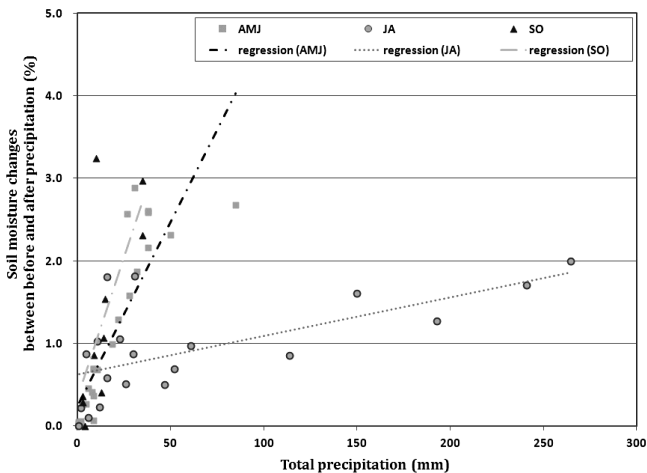


Fig. 4 Comparison of total precipitation and soil moisture changes between before and after precipitation in growing season in 10 cm soil layers

IV. 결 론

본 연구에서는 서울대학교 태화산 학술림 침엽수림 잣나무조림지에 장기 토양수분 모니터링 시스템을 구축하여 토양수분 모니터링을 하였다. 시기별 (JF, M, AMJ, JA, SO, ND), 토층별 (10, 20, 30, 60, 90, 120 cm) 토양수분의 특성을 파악하기 위하여 자기상관분석 및 교차상관분석을 하였다. 또한, 강수량과 토양수분변화량의 교차상관분석, 강설량 및 기온 모니터링 결과를 활용하여 토양수분 변화 특성을 분석하였다.

1. 2008-2009년 토양수분 모니터링 결과, 전반적으로 하부토층으로 내려갈수록 평균 토양수분 함량 및 자기상관성은 증가하고, 편차 및 변동계수는 감소하였다. 또한, 토층별 토양수분 교차상관성은 하부 토층간의 토양수분 교차상관성이 상부토층과 비교하여 높은 상관성을 보였다. 비생육기 10 cm 토층에서는 자기상관성이 낮은 반면, 20 cm 이하 토층에서는 높은 자기상관성을 가졌으며, 4-6, 9-10월에는 전체 토층에서 높은 자기상관성을 보인 반면, 7-8월은 자기상관성이 낮았다.

2. 비생육기인 11-2월 토양수분은 소비가 거의 발생하지 않으며, 기온이 낮아져서 토양수분의 이동도 느려 20 cm 이하 토층에서는 토양수분함량의 변화가 거의 없었다. 하지만, 기온이 영하로 내려가면서 10 cm 토층은 동결되며, 강설에 의해 적설이 표층에 쌓이게 된다. 강수발생시 및 기온이 상승할 경우 표층의 토양수분의 융해되어 10 cm 토층은 동결, 정지, 융해 현상을 반복하며 토양수분이 변화하여 자기상관성이 낮았다. 3월은 기온이 상승하면서 동결된 토양이 융해되고 강수 후 표층은 1일 이내 증력수가 배제되었으며, 토양수분이 하부 토층까지 이동하여 토양수분이 충전되었다.

3. 생육기인 4-10월은 수목의 토양수분 소비와 강수량에 의해 전 토층에서 토양수분 함량이 변화한다. 생육기간 소비에 의한 토양수분 소비는 지수함수 형태로 규칙적으로 감소하며, 비생육기와 비교하여 전 토층에서 토양수분 소비가 발생한다. 하지만 강수에 의한 토양수분 증가는 강수량, 강우강도에 영향을 받아 특이한 패턴으로 증가하였다. 강수량에 의해 토양수분이 급격하게 증가하고 증력수가 배제되어 감소하며, 강수량 뿐 아니라 강우강도도 토양수분 충전 및 증력수 배제 현상에 영향을 준다. 4-6, 9-10월은 강수 후 증력수가 배제되는데 2일 정도 시간이 소요된 반면, 강수량 및 강우강도가 큰 7-8월은 강우발생 당일 토양수분이 전 토층에서 증가하고 1일 선행강수에 대해 증력수가 배제되어 토양수분 변화 시간이 짧았으며, 강수량과 비교하여 충전량은 적고 대부분 증력수로 배제되었다.

본 연구에서 시기별 토층별 토양수분 특성 분석 결과, 겨울철 적설은 봄철 토양수분 충전의 긍정적인 영향을 미치는데 겨울철 적설량이 적을 경우 봄 가뭄을 야기할 수 있을 것으로 판단되

었다. 또한 생육기 집중강수는 오히려 빠르게 증력수가 배제되어 토양수분이 충전되는 양은 강수량에 비해 미비하여, 동일한 강수량이 발생하더라도 강우강도가 크고 강수일이 적을 경우 생육기 수목의 생육에 필요한 토양수분 취약성이 증가할 수 있을 것으로 판단되었다.

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

REFERENCES

1. Bales, R. C., J. W. Hopmans, A. T. O'Geen, M. Meadows, P. C. Hartsough, P. Kirchner, C. T. Hunsaker, and D. Beaudette, 2011. Soil moisture response to snowmelt and rainfall in a Sierra Nevada mixed-conifer forest. *Vadose Zone Journal* 10(3): 786-799.
2. Brocca, L., M. Galli, and M. Stelluti, 2005. Preliminary analysis of distributed in situ soil moisture measurements. *Advances in Geosciences* 2: 81-86.
3. Cha, D. S., and B. Y. Ji, 2003. A study on slope stability effects by the tree root systems (III). *Journal of Korean Forest Society* 92(1): 33-41 (in Korean).
4. Choi, D., J. H. Ahn, D. J. Jo, and S. Kim, 2010. Estimating Climate Change impact on drought occurrence based on the soil moisture PDF. *Journal of Korea Water Resources Association* 43(8): 709-720 (in Korean).
5. 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).
6. Choi, M., and J. M. Jacobs. 2007. Soil moisture variability of root zone profiles within SMEX02 remote sensing footprints. *Advances in Water Resources* 30: 883-896.
7. 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.
8. Hong, E. M., J. Y. Choi, W. H. Nam, and S. H. Yoo, 2011. Analysis of soil moisture recession characteristics in Conifer Forest. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 53(4): 1-9 (in Korean).
9. Hong, W. Y., M. J. Park, J. Y. Park, R. Ha, G. A. Park, and S. J. Kim, 2009. The correlation analysis between SWAT predicted forest soil moisture and MODIS NDVI during spring season. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(2): 7-14 (in Korean).
10. Joo, J. Y., M. Choi, S. W. Jung, and S. O. Lee, 2010. Prediction of soil moisture using Hydrometeorological data in Selmacheon. *Journal of Korea Water Resources Association* 30 (5B): 437-444 (in Korean).
11. Kim, O. K., J. Y. Choi, M. W. Jang, S. H. Yoo, W. H. Nam, J. U. 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).
12. Kim, S. H., M. J. Kang, and Y. S. Kwak, 2011. Soil moisture measurements and correlation analysis to understand the runoff generation process for a Bumrunsa hillslope of Sulmachun watershed. *Journal of Korea Water Resources Association* 44(5): 351-362 (in Korean).
13. Lee, G. J. 2011. Tree physiology, ch 3. Growth of tree species, 33-44. St. Gwanak, Seoul, Seoul National University Press (in Korean).
14. Longobardi, A. 2008. Observing soil moisture temporal variability under fluctuating climatic conditions. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 5: 935-969.
15. Mahmood, R., A. Littell, K. G. Hubbard, and J. You, 2012. Observed data-based assessment of relationships among soil moisture at various depths, precipitation, and temperature. *Applied Geography* 34: 255-264.
16. 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.
17. Robinson, D. A., C. S. Campbell, J. W. Hopmans, B. K. Hornbuckle, S. B. Jones, R. Knight, F. Ogden, J. Selker, and O. Wendroth, 2008. Soil moisture measurement for ecological and hydrological watershed-scale observatories: A review. *Vadose Zone Journal* 7(1): 358-389.

18. Sutinen, R., P. Hämmnen, A. Venäläinen, 2008. Effect of mild winter events on soil water content beneath snowpack. *Cold Regions Science and Technology* 51: 56-67.
19. Wilson, D.J., A. W. Western, and R. B. Gryson, 2005. A terrain and data-based method for generating the spatial distribution of soil moisture. *Advances in Water Resources* 28(1): 43-54.