

# 침엽수 산림에서의 토양수분 모니터링

## Soil Moisture Monitoring in Conifer Forest

홍은미\*, 최진용\*\*, 유승환\*\*\*, 남원호\*\*\*\*

Eunmi Hong, Jin-Yong Choi, Seung-Hwan Yoo, Won-Ho Nam

### 요 지

본 연구에서는 침엽수 산림에서 토양수분 변화를 모니터링하고 이를 분석하기 위하여 서울대학교 농업생명과학대학 태화산 학술팀의 잣나무 조림지에 FDR (Frequency Domain Reflection) 토양수분측정장치와 지온센서 등을 설치하였다. 이와 같이 설치한 센서를 이용하여 2008년 4월부터 9월까지 토양수분 자료를 수집하였으며, 경기도 광주시 모현면의 AWS의 기상자료를 이용하여 증발산량, 강우량과 토양수분의 연관성을 분석하였다. 토양수분 모니터링 자료를 활용하여 산림에서의 깊이별, 계절별 토양수분 소비 패턴을 분석하였으며, 토양수분 모니터링 자료 및 강수량 자료를 이용하여 물수지법에 의한 증발산량을 산정하여 제시하였다.

**핵심용어 : 토양수분 모니터링, 침엽수림, 산림 증발산량**

### 1. 서 론

산림은 우리나라의 면적의 70%에 이르고 있으며 이는 가뭄과 홍수 같은 수문현상과 밀접하게 관련이 있을 뿐 아니라 강우에 따른 유출 특성에 기여하는 바가 크며, 강우와 증발산, 침투, 유출에 이르는 다양한 수문현상이 복합적으로 나타나고 있다. 우리나라 면적의 67%에 이르는 660만ha의 산림 중 침엽수림은 273만ha(42.4%), 침엽수와 활엽수가 혼재된 혼효림은 185만ha (28.8%)를 차지하고 있으며 활엽수림은 168만ha(26.0%)을 차지하고 있어 침엽수림이 제일 넓게 분포하고 있다(공우석, 2004).

산림은 수자원을 함양하여 가뭄방지와 홍수방지 그리고 토양유실을 방지하는 효과가 있어 우리나라에서는 1960년 이후 조림에 힘써왔으며 정부의 강력한 산림녹화사업과 산림훼손 방지를 위해서 다각적으로 노력한 결과 우리나라의 임목밀도가 크게 증가하였으나 최근 이에 따른 부작용도 나타나고 있다. 잘 관리된 수목과 조림은 산림에 긍정적인 효과가 있으나 과도한 임목밀도는 오히려 증발산량의 증가, 옆면에 의한 강우 차단량의 증가, 낙엽 및 부식토의 증가 등으로 인하여 가뭄과 홍수 또는 산사태의 원인이 될 수 있으며 수자원함양을 저해하는 요소로 작용할 수 있다.

\* 비회원 · 서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부 석사과정 · E-mail : silbern7@snu.ac.kr  
\*\* 정회원 · 서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부 부교수 · E-mail : iamchoi@snu.ac.kr  
\*\*\* 비회원 · 서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학부 박사수료 · E-mail : crom97@snu.ac.kr  
\*\*\*\* 비회원 · 서울대학교 생태조경 · 지역시스템공학 박사과정 · E-mail : wh531@snu.ac.kr

토양수분 모니터링 및 산림에서의 토양수분 모델링 등에 대한 연구는 해외에서는 우림이나 삼림지에서 토양수분 측정으로 증발산량, 차단량 등을 측정 산림의 수분환경, 수자원과의 연관관계규명을 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 한 등(2003)은 토양수분의 공간적인 분포를 알기위한 준비 작업으로 토양수분과 관련된 인자들에 대하여 검토하였으며, 김 등(2004)은 산지사면에서의 토양수분 결정을 위하여 흐름분배 알고리즘을 통해 도출된 우선흐름 경로를 구성하여 토양수분 관측의 실효성을 제고하였고, 김 등(2005)은 국내산지사면에서 토양수분의 시공간적인 분포를 파악하기 위하여 토양수분 측정법을 개발하였다. 이처럼 국내에서 토양수분에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 산림에서의 토양수분 모니터링을 통한 소비 패턴 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 침엽수림에서의 토양수분 모니터링을 위하여 서울대학교 태화산 학술림에 토양수분 장기 모니터링 시스템을 구축하였으며, 토양수분 모니터링 데이터를 및 기상자료를 활용하여 침엽수림 토양수분 환경을 분석하고 증발산량을 산정하여 소비 패턴을 분석하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상 지역 선정

산림에서 토양수분 모니터링 대상지역으로 서울대학교 농업생명과학대학 태화산 학술림 (경기도 광주시)의 잣나무 조림지를 선정하였다.. 태화산 학술림은 여러 가지 수종의 나무들이 잘 관리되고 있어 토양수분 측정과 기상자료 측정 등 측정 장치의 관리가 용이하여 대상지역으로 선정하였다 (그림 1).



그림 1 연구 대상지역

### 2.2. 토양수분 측정 방법

본 연구에서는 간접측정법중 하나인 FDR (Frequency Domain Reflection)을 이용하여 토양수분을 측정하였다. 본 연구에서는 토양수분을 측정하기 위하여 FDR 센서 18개(10cm, 20cm, 30cm, 60cm, 90cm, 120cm 6개씩 3개공)를 설치하여 토양층별 토양수분 측정할 수 있도록 하였다. 또한 지온은 토양수분과 더불어 토양에서의 에너지 수지나 겨울철 융설과 같은 현상을 파악하기 위한 중요한 요소이다. 본 연구에서는 토양 깊이별 지온을 모니터링하기 위하여 20cm, 40cm, 60cm에 지온 센서를 설치하였다.

### 2.3. 기초자료의 수집

본 연구에서는 기초자료로써 강우자료를 수집하고 토양조사를 실시하였다. 강우자료는 연구지역과 근접한 모현면에 설치된 자동기상측정장치 (AWS, Automatic Weather Station)를 이용하였으며, 토양 130cm 깊이까지 10cm간격으로 샘플링하여 분석하였다.

### 2.4. 산림의 토양수분 변화 분석

본 연구에서는 토양수분 모니터링 자료를 이용하여 토층별, 계절별 토양수분 소비패턴을 분석하기 위하여 토층별 포장용수량 (Field Capacity,  $\Theta_{FC}$ ), 최소 토양수분( $\Theta_{\min}$ ) 및 최대 토양수분 변화( $\Delta\Theta_{\max}$ )를 산정하였다. 여기서, 포장용수량은 포장에 충분한 물을 공급한 후 24시간 정도 경과하여 중력수가 유하하고 난 뒤의 토양함수량을 의미하며(정하우 외, 2007), 본 연구에서는 강수발생 48시간 이후의 토양수분 모니터링 자료에 대하여 분석하였다.

## 2.5. 산림의 증발산량 산정

본 연구에서는 토양수분 모니터링 자료를 이용하여 증발산량을 산정하기 위하여 우선 토층은 0 ~ 150 mm (FDR 10 cm), 150 ~ 250 mm (FDR 20 cm), 250 ~ 450 mm (FDR 30 cm), 450 ~ 750 mm (FDR 60 cm), 750 ~ 1050 mm (FDR 90 cm), 1050 ~ 1500 mm (FDR 120 cm) 총 6개로 나누었으며, 토양수분 함수량과 토양수분의 관계는 다음과 같이 분석하였다(정하우 외, 2007).

$$d = (\Theta \times D) / 100$$

여기서,  $d$ 는 토양수분 양 (mm),  $\Theta$ 는 토양 함수량 (%),  $D$ 는 토층의 깊이를 나타낸다.

본 연구에서는 수목의 근근역에서의 토양수분 변화량을 이용하여 증발산량을 산정하였으며, 산정방법은 다음과 같다.

$$\Delta SMC = ET = S_t - S_{t-1}$$

여기서,  $S_t$ 는 t일의 토양수분량 (mm),  $S_{t-1}$ 는 t-1일의 토양수분량 (mm) 이다.

또한, 각 계절별 토층별로 증발산량에 이용한 토양수분량을 비교하기 위하여  $WWF_i$ (water withdrawal fraction)을 산정하였다.

$$WWF_i = \frac{\sum_{t=1}^T \Delta SMC_{i,t}}{\sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^n \Delta SMC_{i,t}}$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 토양수분 모니터링 사이트 구축

본 연구에서는 토양수분 장기 모니터링을 위하여 그림 2와 같이 토양수분 모니터링 시스템을 구성하였다.

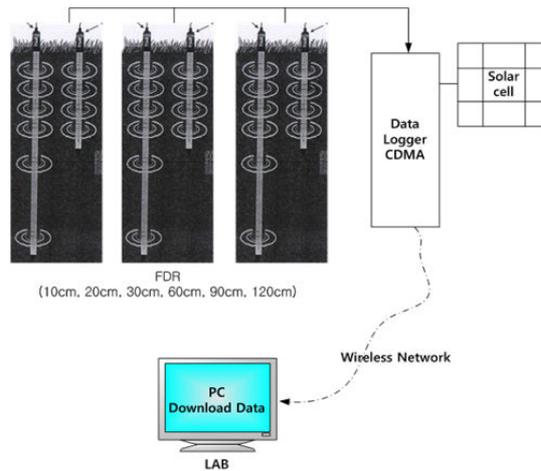


그림 2 토양수분 모니터링 시스템 구성.

### 3.2. 기초자료 구축

모현AWS에서 2008년 4월부터 10월 까지 총 강수량은 1187 mm 로 관측되었다. 토성에 따라 침투율과 포장용수량 등 토양수분 인자가 변화하므로 이를 분석하기 위하여 대상지역의 토양시료를 샘플링하였으며 이를 분석한 토층별 토성의 분석결과는 표 1과 같다. 대상지역의 잣나무 군락은 평균 직경 11.53cm 인 잣나무 조림지로서 평균 30년 정도의 수령을 가진 것으로 조사되었다.

표 1 토양시료 분석결과

Sample	Sand(%)	Silt(%)	Clay(%)	Soil Texture
A-10	78.08	13.48	8.44	sandy loam
A-20	84.48	10.24	5.28	loamy sand
A-30	84.92	12.84	2.24	loamy sand
A-40	83.52	9.96	6.52	loamy sand
A-50	80.36	11.48	8.16	loamy sand
A-60	81.16	13.6	5.24	loamy sand
A-70	81.48	10.8	7.72	loamy sand
A-80	76.12	14.52	9.36	sandy loam
A-90	69.36	22.08	8.56	sandy loam
A-100	74.04	17.32	8.64	sandy loam
A-110	61.36	28.72	9.92	sandy loam
A-120	74.88	16.40	8.72	sandy loam
A-130	76.80	14.76	8.44	sandy loam

### 3.3. 토양수분 변화 분석

2008년 4월부터 10월 까지 토양수분 변화는 그림 3과 같으며, 강수가 비교적 크게 나타난 경우에는 토층전반의 토양수분 변화량에 주는 영향이 크게 나타났으나 강수가 비교적 적은 10mm이하인 경우에는 표층에 가까운 10cm ~ 20cm 토층의 토양수분에 영향을 주는 것으로 나타나 강수량에 따른 토양수분의 재분포나 토양수분의 유효강수 산정에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

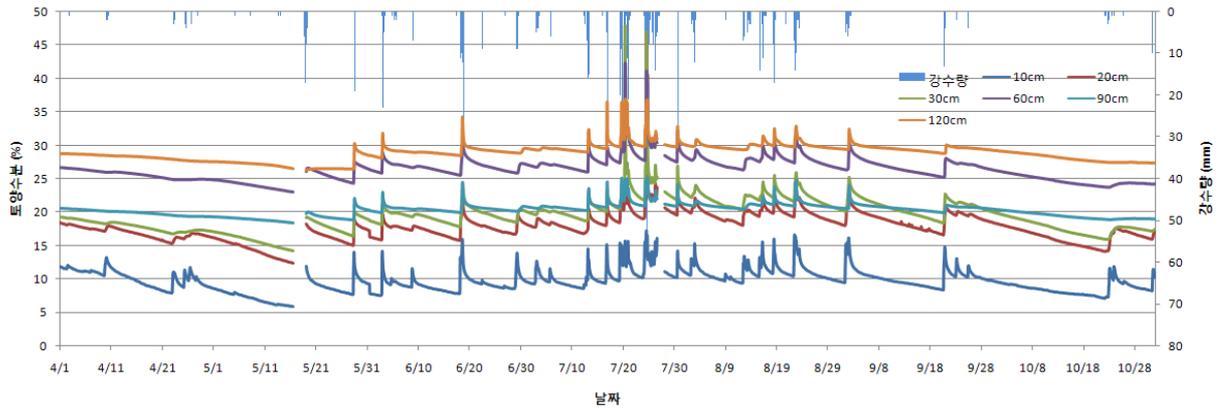


그림 3 토양수분 모니터링 결과

표 2는 월별 토층별 토양수분 평균을 나타낸 것이다. 10, 20, 30cm 토층을 월별 변화가 큰 반면, 60cm 이하 토층은 변화폭이 상부 토층보다 적음을 알 수 있다. 또한, 강우가 적은 5월과 10월의 토양수분 함수량은 다른 월에 비하여 상대적으로 낮은 값을 가짐으로서 봄과 가을의 가뭄에 취약할 수 있음을 나타내었다.

표 2 월별 토층별 토양수분 평균

(단위: mm)

	10cm	20cm	30cm	60cm	90cm	120cm
4월	10.14	16.93	17.89	25.72	19.96	28.28
5월	7.93	15.37	16.79	24.89	19.29	27.22
6월	9.14	17.48	19.42	26.82	20.55	29.14
7월	10.62	19.29	21.62	28.22	21.24	30.18
8월	10.97	19.75	22.02	27.84	21.13	30.02
9월	10.18	18.89	20.68	26.90	20.70	29.57
10월	8.52	16.26	17.62	24.74	19.46	28.10

### 3.4. 증발산량 및 소비패턴 분석

2008년 4월부터 10월까지 토층별 증발산량을 산정하였다. 4월에는 10cm 토층에서 증발산량 소비 비율이 많았지만, 5월부터 9월에는 60cm 토층의 토양수분에서 소비된 증발산량이 가장 많았다. 10월의 경우 30cm 토층에서 증발산량 소비량이 가장 많았다.

표 3 월별 토층별 증발산량 소비 비율

(단위: %)

	10cm	20cm	30cm	60cm	90cm	120cm	Total
4월	<b>27.65</b>	13.82	19.82	17.51	9.68	11.52	100.00
5월	19.90	13.52	20.66	<b>23.72</b>	10.71	11.48	100.00
6월	12.06	10.59	21.76	<b>26.47</b>	11.76	17.35	100.00
7월	12.45	11.16	21.03	<b>25.32</b>	11.59	18.45	100.00
8월	14.87	10.79	23.50	<b>26.86</b>	9.35	14.63	100.00
9월	12.11	11.43	23.32	<b>26.23</b>	10.76	16.14	100.00
10월	12.31	13.08	<b>22.82</b>	20.00	11.28	20.51	100.00

#### 4. 결 론

산림이 우리나라에서 차지하는 비중이 높고 최근 삼림의 밀도가 증가함에 따라 산림과 수문현상, 강우-유출, 가뭄, 홍수의 연관성에 대한 관심이 증가하고 있으며, 산림의 토양수분 변화는 이러한 수문현상에 주는 영향을 주는 주요인으로서 산림에서의 토양수분의 소비패턴과 증발산량을 분석하기 위하여 본 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 2008년 4월 ~ 2008년 10월까지 서울대학교 농업생명과학대학 태화산 학술림의 잣나무 조림지에서의 토양수분 변화를 모니터링하였으며, 증발산량, 강우량과 토양수분의 연관성을 분석하였다. 2008년 4월부터 10월 까지 토양수분 변화는 강우발생에 의하여 10, 20, 30cm 토층을 월별 변화가 크게 나타났으며, 60cm 이하 토층은 변화폭이 상부 토층보다 적게 나타내었다. 5월과 10월 토양수분함수량은 낮은 상태로 나타나 봄과 가을의 가뭄에 취약할 수 있음을 나타내었다. 강수가 비교적 크게 나타난 경우에는 토층전반의 토양수분 변화량에 주는 영향이 크게 나타났으나 강수가 비교적 적은 10mm 이하인 경우에는 표층에 가까운 10cm ~ 20cm 토층의 토양수분에 영향을 주는 것으로 나타났다. 대상지역에서의 증발산량은 토양수분 감소량으로 산정하였고 이를 바탕으로 분석한 토층별 증발산량 소비 패턴은 4월에 10cm 토층에서의 소비가 활발한 반면, 5월부터 9월까지의 60cm 토층에서 10월에는 30cm 토층의 토양수분에서의 증발산량 소비가 활발한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 향후 지속적으로 토양수분을 모니터링하여 산림에서의 유출량 산정 및 토양수분 변화를 모의 조작할 수 있는 모형을 개발할 수 있는 기초자료로 활용할 예정이며, 이를 활용하여 향후 산림의 임목밀도 변화, 기후변화 그리고 지형에 따른 산림의 토양수분 환경 평가할 수 있도록 할 것이다.

#### ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 학술진흥재단 '침엽수 산림에서의 토양수분 변화 모니터링 및 모델링' 과제의 일환으로 수행되었습니다.

#### 참고문헌

1. 공우석, 2004, 한반도에 자생하는 침엽수의 종구성과 분포, 대한지리학회지, Vol. 39 (4), pp.528-543.
2. 김상현, 김형섭, 김원, 2005, 시공간 대표성을 고려한 토양수분 모니터링 system의 구축 및 운영, 한국수자원학회논문집, Vol. 38 (1), pp. 73-82.
3. 김창용, 김상현, 정성원, 김원, 2004, 산지사면의 효과적인 토양수분 측정을 위한 흐름분배 알고리즘과 TDR을 이용한 토양수분 측정망의 구성, 한국수자원학회논문집, Vol. 37 (1), pp. 31-41.
4. 한지영, 김상현, 김남원, 2003, 토양수분 예측을 위한 수치지형 인자와 격자 크기에 대한 연구, 한국수자원학회논문집, Vol. 36 (2), pp. 251-261.