

## 설마천 유역의 혼효림에서 관측된 증발산의 계절변화

권효정<sup>1,\*</sup> · 이정훈<sup>2</sup> · 이연길<sup>2</sup> · 이진원<sup>2</sup> · 정성원<sup>2</sup> · 김 준<sup>1</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 대기과학과/지구환경연구소, <sup>2</sup>유량조사사업단

(2008년 12월 19일 접수; 2009년 1월 14일 수정; 2009년 2월 6일 수락)

## Seasonal Variations of Evapotranspiration Observed in a Mixed forest in the Seolmacheon Catchment

Hyojung Kwon<sup>1,\*</sup>, Jung-Hoon Lee<sup>2</sup>, Yeon-Kil Lee<sup>2</sup>, Jin Won Lee<sup>2</sup>,  
Sung Won Jung<sup>2</sup> and Joon Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Global Environment Lab, Dept. of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Hydrological Survey Center, 301 KINTEX Zone, Daehwa-Dong, Ilsanseo-Gu,  
Goyang-Si, Gyeonggi-Do, 411-806, Korea

(Received December 19, 2008; Revised January 14, 2009; Accepted February 6, 2009)

### ABSTRACT

The importance of securing water resources and their efficient management has attracted more attention recently due to water deficit. In water budget analysis, however, evapotranspiration ( $\lambda E$ ) has been approximated as the residual in the water balance equation or estimated from empirical equations and assumptions. To minimize the uncertainties in these estimates, it is necessary to directly measure  $\lambda E$ . In this study, using the eddy covariance technique, we have measured  $\lambda E$  in a mixed forest in the Seolmacheon catchment in Korea from September 2007 to December 2008. During the growing season (May-July),  $\lambda E$  in this mixed forest averaged about  $2.2 \text{ mm d}^{-1}$ , whereas it was on average  $0.5 \text{ mm d}^{-1}$  during the non-growing season in winter. The annual total  $\lambda E$  in 2008 was  $581 \text{ mm y}^{-1}$ , which is about 1/3 of the annual precipitation of 1997 mm. Despite the differences in the amount and frequency of precipitation, the accumulated  $\lambda E$  during the overlapping period (i.e., September to December) for 2007 and 2008 was both  $\sim 110 \text{ mm}$ , showing virtually no difference. The omega factor, which is a measure of decoupling between forest and the atmosphere, was on average 0.5, indicating that the contributions of equilibrium  $\lambda E$  and imposed  $\lambda E$  to the total  $\lambda E$  were about the same. The results suggest that  $\lambda E$  in this mixed forest was controlled by various factors such as net radiation, vapor pressure deficit, and canopy conductance. In this study, based on the direct measurements of  $\lambda E$ , we have quantified the relative contribution of  $\lambda E$  in the water balance of a mixed forest in the Seolmacheon catchment. In combination with runoff data, the information on  $\lambda E$  would greatly enhance the reliability of water budget analysis in this catchment.

**Key words :** Water budget, Evapotranspiration, Seasonal variation, Seolmacheon catchment, Omega factor

### I. 서 론

전 세계적으로 '물 부족' 이슈가 풀어야할 당면과제로 대두되면서 수자원의 확보와 효율적인 관리의 중요

성이 더욱 부각되고 있다(Falkenmark and Rockstrom, 2006; Oki and Kanae, 2006). 비록 기후 변화가 아시아 몬순과 같은 물 순환의 변화를 야기시키는 것으로 알려져 있으나 수자원에 미치는 효과는 아직도 불

\* Corresponding Author : Hyojung Kwon (hkwon@koflux.yonsei.ac.kr)

분명하다(Oki and Kanae, 2006). 2008년 한반도에 발생한 지역별 가뭄과 현재 지속되고 있는 가뭄은 물 부족현상과 이에 기인한 물 위기를 극복 할 수 있도록 가용 수자원의 정량화와 수자원 확보 및 효율적인 관리가 시급함을 잘 보여준다(Byun *et al.*, 2008; Kwon, 2009).

수자원 확보의 일환으로 강수량, 유출량, 증발산량, 지하수 및 토양 수분 함량을 정량적으로 측정하여 물 수지 및 순환을 이해하고 그 현황을 올바르게 진단할 수 있어야 한다. 그러나 물 수지에서 중요한 부분을 차지하는 증발산의 경우 다른 성분에 비해 직접 관측이 어려워 물 수지 방정식으로부터 도출하거나 단순한 가정 또는 경험식을 사용하여 추정한다. 국내의 경우, Thornthwaite 방법과 같은 경험식을 이용하거나(Kang, 1984), Morton 방법을 사용하여 기상자료로부터 추정하거나(Kim and Kim, 2004), Penman 또는 Penman-Monteith 방법으로부터 잠재증발산을 추정하고 있다(Kim and Kim, 2004; An and Kim, 2006). 이러한 방법에 의해 추정된 증발산은 오차를 포함하고 있고 신뢰도가 상대적으로 낮을 수 있어서 증발산을 직접 관측하여 정량화하고 확인하는 것이 필요하다.

국내 선행 연구에서 증발산 직접 관측은 증발산량계(lysimeter)를 이용하여 작물의 생육에 사용되는 증발산을 측정하거나(Cho, 1972; Lee, 1973; Chung, 1985), 보엔비(Bowen ratio)방법을 사용하여 증발산을 측정하였다(Lee and Kim, 1990). 그러나 이 연구는 작물에 국한되어 있으며 관측 기간이 짧아 장소와 시간에 따른 증발산의 변동을 연구하는데는 한계가 있다. 최근 들어 물 순환 과정에서 강수량의 상당 부분을 차지하는 증발산의 중요성이 인식되면서 증발산을 정량화하기 위한 연구가 늘어나고 있으며, 특히 미기상학적 에디 공분산 방법을 사용하여 국내 복잡지형의 산림유역과 농경지에서 증발산을 직접 관측하는 기술이 개발되고 있다(Kim *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2007; Hong *et al.*, 2008; Park, 2009; <http://www.hydrokorea.org>). 에디 공분산 방법은 육상생태계에서의 에너지 배분과 물, 탄소 등의 주요 물질의 생지화학적 순환을 정량화하고, 장기적으로 감시하고 진단하는데 사용되는 핵심기술이다(<http://www.fluxnet.ornl.gov>). Kim *et al.*(2006), Hong *et al.*(2008)과 Park(2009)은 에디 공분산 방법을 이용하여 한반도 주요 식생 타입에서 지속적인 관측을 통해 신뢰성 있는 증발산 자료 생산

기법을 개발하였다.

이 연구는 유량조사 사업단의 설마천 유역의 우량, 수위, 유량, 증발산 측정을 통한 기초수문자료 구축사업의 일환으로서, 2007년 8월부터 에디 공분산 기술을 사용하여 한반도의 대표적 식생 기능형태의 하나인 혼효림에서의 증발산 관측을 지속적으로 수행하였다. 본 논문의 목적은 (1) 설마천 유역의 혼효림에서 관측된 증발산의 계절 변동을 보고하고, (2) 증발산량을 정량화하여 물 수지에서 차지하는 상대적인 역할을 평가하고, (3) 증발산을 조절하는 메커니즘을 분석, 이해함으로써 증발산 모델링에 필요한 모수화와 원격탐사 알고리즘 개발할 수 있는 기반을 제공하는 데에 있다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 관측지역

설마천 에디 공분산 타워는 경기도 파주시 적성면의 마지리와 설마리에 위치하고 있으며, 설마천 유역에서 중류부에 위치한다. 설마천은 임진강 하구에서 약 4.6km 떨어진 임진강의 제 1 지류로 유역면적 8.5km<sup>2</sup> 유로연장 5.8km 유로경사 2%이다(Korea Institute of Construction Technology, 2006). 설마천은 전형적인 급경사 산지 사행하천이며 전형적인 곡류하천이다. 설마천 유역은 경기편마암 복합체로 구성되어 있고 단층과 엽리가 잘 발달되었다. 지질구조의 특성상 초기강우 시 소량의 우량에는 하천의 수위에 큰 변화가 없고, 파쇄대를 채우고 난 이후에 하천의 수위가 급격히 증가하는 현상을 보인다.

산림과 토양의 경우, 설마천 유역의 90% 이상은 주로 20-40년 수령의 침엽수와 활엽수로 구성되어 있으며 침엽수는 조림수이다. 설마천 증발산 타워를 기준으로 북서 사면은 굴참나무(*Quercus variaabilis*; cork oak), 신갈나무(*Quercus mongolica*), 졸참나무(*Quercus serrata*; konara oak)가 주종을 이루고 있다. 증발산 타워 기준으로 남동 사면은 잣나무(*Pinus koraiensis*)가 주종을 이룬다. 표토는 알아서 수분 함양능력이 매우 낮고 산지 사면에 산재한 다량의 돌과 자갈은 집중호우 시 토석류를 유발할 수 있다(<http://kict.datapcs.co.kr/catchment/main.htm>). 설마천 유역은 프런티어 사업과 관련하여 수문 관측이 활발히 이루어지는 곳으로, 주변 6개 지점에서 우량관측이 이루어지고 있으며

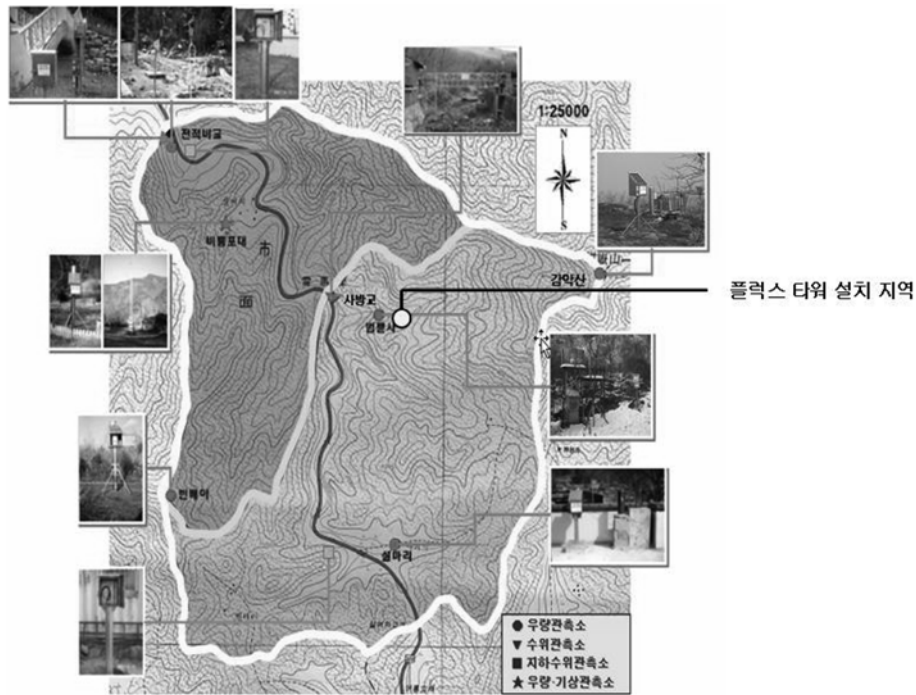


Fig. 1. The locations of the eddy covariance tower and other observations (e.g., precipitation and water levels) in the Seolmacheon catchment.

2개 지점에서 수위 관측이 이루어지고 있다(Fig. 1).

### 2.2. 증발산 및 미기상 관측

증발산은 에디 공분산 방법을 사용하여 관측하였다. 이 방법은 균질하고 편평한 지역에서 난류 플럭스 항만을 측정하여 증발량을 추정하는 미기상학적 방법이다(Baldocchi, 1988). 증발산 관측 타워는 관측지의 지형, 식생의 대표성, 플럭스 발자국(footprint), 그리고 접근성을 고려하여 20m 높이의 타워를 설치하였으며, 이 타워에 에디 공분산 및 미기상 관측 시스템을 장착하였다. 증발산 관측을 위해 타워 19.2m 높이에 두 종류의 삼차원 초음파 풍향풍속계(RM-81000, RM Young, Michigan, USA와 CSAT3, Campbell Science Inc., Logan, Utah, USA)를 설치하여 속도의 동서방향 성분( $u$ ), 남북방향 성분( $v$ ), 연직성분( $w$ )과 기온( $T_s$ )을 측정하였다. 이 논문에서는 CSAT3에서 관측된 자료를 사용하였다. 수증기( $\rho_w$ )의 농도를 측정하기 위해 고속 반응 개회로 적외선 기체분석기(모델 LI-7500, LICOR Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 18.8m에 설치하였다(에디 공분산에 관한 자세한 정보는 Hong *et al.*, 2009 참고).

에디 공분산 자료와 함께 복사, 온도, 습도, 토양 온도, 토양 수분 등의 기상 및 토양변수들도 측정하였다. 순복사( $R_n$ )는 군락상부 19.2m 높이에 순복사계(CNR2, Kipp & Zonen, Delft, the Netherlands), 군락하부 2.5m 높이에 순복사계(NR-LITE, Kipp & Zonen)를 각각 설치하여 관측하였다. 토양열 플럭스를 측정하기 위해 깊이 0.03m에 토양열판(HFT3, REBS, Seattle, WA, USA)을 설치하였다. 기온( $T_a$ ), 습도(RH), 강수량(PPT) 또한 군락상부(19.2m)와 군락하부(2.5m)에서 각각 자동 기상 시스템(WXT-510, Vaisala, Helsinki, Finland)를 이용하여 관측하였다. 타워 북동쪽 약 1m 가량 떨어진 곳에서 토양 열전대(TCAV, Campbell Sci.)를 설치하여 깊이 0~0.05m, 0.05~0.1m 그리고 0.1~0.2m에서 토양온도( $T_s$ )를 관측하였다. 토양수분은 토양수분센서(CS616, Campbell Sci.)를 이용하여 깊이 0~0.2m에서 관측하였다. 두 개의 자료 집록기(CR800과 CR3000, Campbell Sci.)를 사용하여 에디 공분산 자료는 10Hz, 저속반응 자료는 30초 간격으로 집록하였고, 평균 시간은 30분으로 하였다. 관측 시스템의 전원공급은 3개의 태양전지판을 이용하여 12V/200A 용량의 배터리를 연속 충전하여 사용하였다. 정

기적인 관측 기기의 관리에 관한 정보는 관측지 야장에 기록하였으며, 자료의 품질 검증 과정에서 관측시 상황을 추정하는데 활용하였다. 삼차원 초음파풍향 풍속계의 영점 점검은 실험실에서 수행하였고, 기체분석기의 영점과 범위 보정은 관측지에서 직접 정기적으로 수행하였다.

본 논문에서 특별히 주목해야 할 것은 분석에 사용된 증발산 자료는 에디 공분산 항 하나에만 근거한 예비 자료로서 복잡지형에서 증발산을 관측할 경우에 포함되어야 하는 저류항과 연직 및 수평 이류항의 기여는 무시할 수 있다라는 가정에서 출발했다는 점이다. Hong *et al.*(2008)이 보고한 바와 같이 광릉 복잡산림의 경우, 이러한 추가적인 항들이 일 평균할 경우 서로 상쇄되고, 또 연직 이류항과 수평이류항의 효과가 서로 상쇄될 수 있음을 고려하여 본 보고서에서는 시간별 증발산 보다는 일일 증발산에 중점을 두었음을 밝혀둔다. 또한 지형이 광릉보다 복잡한 설마천 관측지의 경우, 이러한 가정이 틀릴 수도 있음을 고려할 때, 이에 대한 추가적인 관측과 분석이 필요하다.

### 2.3. 에디 공분산 자료의 품질 및 검증

관측된 에디 공분산 자료의 품질 평가와 관리는 미기상학적/통계학적 분석을 근거로 여러 단계를 거치게 된다. 품질 관리는 크게 두 부분으로 나누어지는데 정확한 플럭스값을 산출하기 위한 계산 과정과 자료의 질의 등급을 결정하고 분류하는 과정으로 이루어져 있다. 품질 관리는 튀는 자료 점검, 풍향 계산, 평면 맞추기 회전(planar fit rotation), Webb-Pearman-Leuning (WPL) 계산, 적분 난류 특성 점검(integral turbulence characteristics test) 등을 포함한다(Kwon *et al.*, 2007).

### 2.4. 빈 자료 채우기

에디 공분산 시스템은 매 30분마다 측정된 자료를 평균하게 되는데 가능한한 결측없이 자료를 집록하는 것이 가장 중요하다. 그러나 전원 공급 차단, 기기 보정, 기기 오작동, 자료 품질관리 과정에서 제거된 자료 등으로 인해 자료에 결측이 생기게 된다. 설마천에서 2007년 9월부터 2008년 12월까지 관측된 증발산 자료의 습득율은 약 66%이었으며, 결측된 증발산 자료를 채우기위해 칼만 필터(Kalman filter) 방법과 평균일변동(mead diurnal variation, MDV) 방법을 사

용하였다.

필터링 방법은 과거 증발산 자료( $t-1$ )를 기초로 현재 시점( $t$ )의 증발산을 추정하고,  $t$  시점의 증발산이 획득되면 이를 토대로  $t+1$  시점의 증발산을 추정하는 방법이다. 칼만 필터는 필터링 방법의 일종으로 관측에도 오차가 있다는 것을 전제로 하며, 증발산의 시계열 자료를 이용하여 추정하는 각 추정시점( $t$ )마다 최적의 증발산 예측을 추구하는 귀납적 알고리즘(recursive algorithm)이다. 이를 위해 칼만 필터는 관측 증발산과 추정된 증발산의 오차를 최소화함으로써 최적의 추정값을 생산해 낸다.

이 연구에서는 증발산을 추정하기위하여 동적 선형 회귀(dynamic linear regression)를 사용하였고 칼만 필터 알고리즘은 MATLAB을 기반으로한 'Captain Toolbox'를 사용하였다(Young *et al.*, 2004; <http://www.es.lancs.ac.uk/cres/captain>).

$$\lambda E(t) = \alpha(t)R_n(t) + \beta(t)d(t) + \zeta(t) \quad (1)$$

여기서  $\lambda E(t)$ 는 증발산,  $R_n(t)$ 는 순복사,  $D(t)$ 는 포차,  $\alpha(t)$ 와  $\beta(t)$ 는 모형 변수,  $\zeta(t)$ 는 선형식 오차, 즉 백색 잡음(white noise)이다.

평균일변동방법은 증발산 결측이 있는 시점에 인접한 날에 관측된 증발산 자료를 일정기간(4-15일)동안 일변동을 평균하여 결측을 메우는 방법이다. 평균기간이 15일 보다 길어질 경우 산림 식생의 변동과 기상 변수에 비선형적으로 의존하는 증발산의 변동을 잘 나타낼 수 없다(Falge *et al.*, 2001). 이 연구에서는 산림 식생의 변동을 반영하고 장기 결측을 채울 수 있는 "gliding window" 방법을 이용하여 15일동안의 일변동 평균을 계산한 후 결측 자료를 채웠다. 칼만 필터는 순복사와 포차가 존재할때만 증발산을 추정할 수 있기 때문에 순복사와 포차가 결측된 경우 평균일변동방법을 사용하여 증발산을 추정하였으며, 두 방법을 상호보완적으로 사용하여 빈 자료 채우기를 실행하였다.

### 2.5. 오메가 인자( $\Omega$ )

증발산은 평형증발산(equilibrium evapotranspiration,  $\lambda E_{eq}$ )과 부과증발산(imposed evapotranspiration,  $\lambda E_{imp}$ )의 적절한 조화로 이루어지는데, 설마천에서의 이 두 증발산 성분의 상대적인 기여는 Jarvis와 McNaughton (1986)의 수식으로 나타낼 수 있다:

$$\lambda E = \Omega \lambda E_{eq} + (1 - \Omega) \lambda E_{imp} \quad (2)$$

여기서  $\Omega$  인자는 식생-대기간의 분리(decoupling) 정도를 나타내는 척도이다.  $\lambda E_{eq}$ 는 가용에너지의 함수 ( $=\Delta(R_n - G)/(\Delta + \gamma)$ ); 여기서  $\Delta$ 는 수증기압 곡선의 기울기,  $\gamma$ 는 전습구 상수,  $\lambda E_{imp}$ 는 포차와 기공전도도의 함수( $=\rho \lambda g_c D$ , 여기서  $g_c$ 는 기공전도도,  $D$ 는 포차,  $\lambda$ 는 증발 잠열,  $\rho$ 는 공기 밀도)로 표현된다. 복사적으로 결합된 Penman-Monteith 방정식으로부터  $\Omega$ 는 다음과 같이 정의된다(Raupach, 2001).

$$\Omega = \frac{p\varepsilon + 1}{p\varepsilon + 1 + g_a^*/g_c^*} \quad (3)$$

여기서  $p$ 는 전도도의 비( $=g_a/(g_a + g_r + g_g)$ ),  $g_r$ 는 복사 전도도( $=4\varepsilon_s \sigma T_a^3/(\rho C_p)$ ), 여기서  $\varepsilon_s$ 는 지표방출율,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만 상수,  $\rho$ 는 공기밀도,  $g_a$ 는 공기역확전도도( $=1/(r_{am} + r_b)$ ), 여기서  $r_{am} = U/u^*$ ,  $r_b = 4.626/u^*$ , 그리고  $g_g$ 는 저류전도도로 이 항은 무시하였다.  $g_c^*$ 와  $g_a^*$ 는 각각 복사결합된 기공전도도와 기후전도도이다. 본 논문에서는  $\lambda E_{eq}$ ,  $\lambda E_{imp}$ ,  $\Omega$ 를 계산하기 위해, 마찰속도  $u^* < 0.1 \text{ms}^{-1}$ , 수평풍속  $U < 1 \text{ms}^{-1}$ ,  $R_n < 100 \text{Wm}^{-2}$ 인 경우와 강수가 발생한 30분 자료들은 분석에서 제외하였다.

### III. 결과 및 토론

#### 3.1. 기상자료

설마천 에디 공분산 타워에서 관측된 기상자료의 월변화를 Table 1에 나타내었다. 관측기간동안 군락 상부와 하부 풍속(U)는 각각 평균  $1.9 \text{ms}^{-1}$ 와  $0.5 \text{ms}^{-1}$ 였으며 군락 상·하부 풍속은 겨울이 여름보다 높게 나타났다. 관측지에서 주풍향은 90-150°와 240-300°로 동남과 북서방향으로 형성된 산의 계곡을 따라서 부는 전형적인 산곡풍 패턴을 보였다(자료 보이지 않음). 군락 상부의 기온은 평균  $10.6^\circ\text{C}$ 였고 군락 하부는  $9.8^\circ\text{C}$ 였다. 군락 하부에서 관측된 강수는 잎과 가지에 의해 차단되어 군락 상부에서 관측된 강수 보다 상대적으로 낮았는데 관측기간동안 군락 상부와 하부의 강수량은 각각  $1997 \text{mm yr}^{-1}$ 와  $990 \text{mm yr}^{-1}$ 였다. 2008년 9월 강수가 2007년 9월 강수보다 60mm 감소하였으며 토양수분(SWC) 또한 5% 감소하였다. 2008년 9월의 낮은 강수와 10월 23-31일 사이에 내린 44.8mm의 강수를 제외하고 비가 내리지 않았기때문에, 2008년 10월의 SWC는 급격히 낮아져서 관측기간중 최저인 11%를 보였다.

**Table 1.** Monthly averaged values of wind speed (U), air temperature (T<sub>a</sub>), vapor pressure deficit (D), soil temperature (T<sub>s</sub>), precipitation (PPT), and soil water content (SWC).

Year	Month	U	U	T <sub>a</sub>	T <sub>a</sub>	D	D	T <sub>s</sub>	T <sub>s</sub>	T <sub>s</sub>	PPT	PPT	SWC
		(20m)	(2m)	(20m)	(2m)	(20m)	(2m)	(0-0.05m)	(0.05-0.1m)	(0.1-0.2m)	(20m)	(2m)	(0.1m)
		ms <sup>-1</sup>	ms <sup>-1</sup>	°C	°C	kPa	kPa	°C	°C	°C	mm	mm	%
2007	9	1.7	0.4	19.7	18.9	0.5	0.3	18.7	18.7	18.7	187.6	98.1	21.8
	10	1.8	0.4	13.0	12.2	0.5	0.3	13.4	13.8	14.2	25.1	20.3	21.2
	11	1.9	0.6	4.9	4.2	0.4	0.3	7.1	7.8	8.5	11.3	8.5	18.3
	12	1.7	0.5	-0.5	-1.2	0.2	0.2	2.6	3.3	3.9	0.3	1.1	22.1
2008	1	1.9	0.5	-3.9	-4.4	0.2	0.2	0.2	0.8	1.3	0.6	0.2	19.8
	2	2.3	0.6	-3.3	-3.8	0.2	0.2	-0.6	-0.3	0.2	0.1	1.6	15.6
	3	1.9	0.6	5.4	4.9	0.4	0.3	1.9	1.9	2.0	49.7	24.8	21.6
	4	2.1	0.6	12.4	12.0	0.7	0.6	8.4	8.1	7.7	27.2	15.7	21.1
	5	1.9	0.4	15.6	15.1	0.6	0.5	12.3	11.9	11.5	69.2	47.2	19.4
	6	1.7	0.4	19.2	18.5	0.6	0.5	15.7	15.3	14.8	132.1	80.8	22.8
	7	1.6	0.3	23.0	22.3	0.5	0.3	20.0	19.6	19.1	785.5	421.8	25.3
	8	1.9	0.4	23.2	22.1	0.7	0.4	21.2	21.1	20.8	535.0	163.7	24.1
	9	1.8	0.4	19.7	18.4	0.7	0.4	18.2	18.3	18.3	126.6	84.6	16.7
	10	1.9	0.4	14.4	13.5	0.6	0.4	13.9	14.2	14.4	44.8	21.8	10.9
	11	1.9	0.5	6.2	5.2	0.4	0.3	7.6	8.1	8.7	2.1	0.1	13.3
	12	2.0	0.6	-0.1	-0.5	0.3	0.2	2.6	3.1	3.6	0.4	0.1	20.9

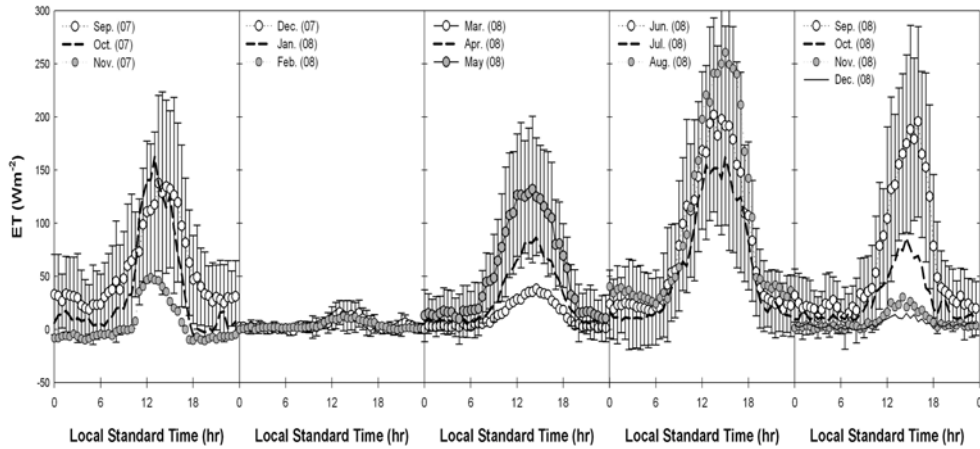


Fig. 2. Diurnal variations of monthly averaged evapotranspiration (ET) from September 2007 to December 2008. The numbers in the parenthesis indicate the measurement year: 07 for 2007 and 08 for 2008.

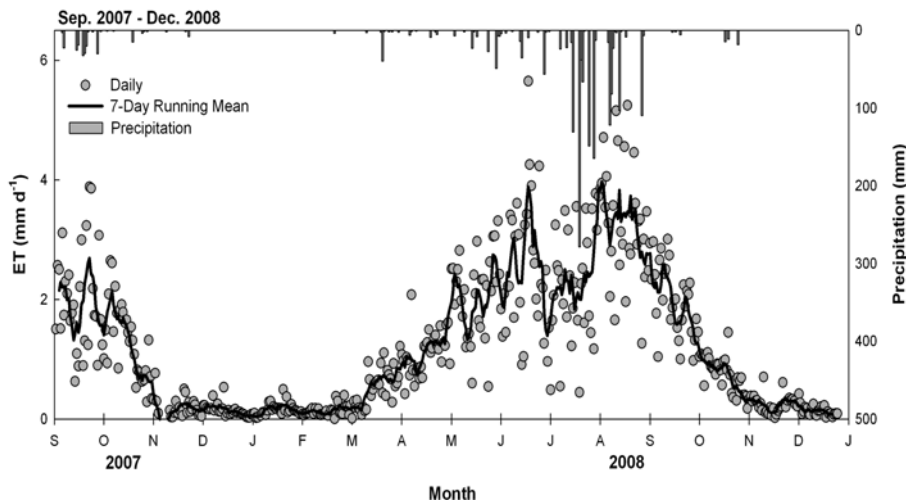


Fig. 3. Temporal variations for daily evapotranspiration (ET) with daily precipitation (PPT).

### 3.2. 예비 증발산 분석

월별 평균한 증발산의 일변화는 뚜렷한 계절 및 식생 변동을 반영하였다(Fig. 2). 식생이 성장하는 3월부터 증발산이 꾸준히 증가하고 성장기인 6-9월까지 상대적으로 증발산이 큰 값을 보이다가 잎이 떨어지기 시작하는 10월부터 증발산이 감소하기 시작하여 잎이 떨어진 후인 11월부터 이듬해 2월까지 증발산이 크게 감소하였다. Fig. 3은 일 증발산과 일 강수량의 변동을 나타낸 것이다. 일 증발산은 0.1-5.7mm d<sup>-1</sup>의 변동폭을 가지며 연평균 1.2±1.2mm d<sup>-1</sup>였다. 증발산은 8월과 9월에 평균 2.0mm d<sup>-1</sup>의 최대값을 보이고 비성장기인 겨울(1월, 2월, 12월)에는 약 0.5mm d<sup>-1</sup>

였다. 6월과 7월의 일 증발산이 8월과 9월에 비해 작았는데 그 이유는 주로 이 기간에 잦은 강우로 인해 증발산을 조절하는 주요인자인 순복사가 감소했기 때문이다.

강수 대비 증발산의 기여도를 알아보기위해 총 누적 강수량과 총 누적 증발산을 Fig. 4에 나타내었다. 관측기간동안 설마천에서 관측된 강수는 1997mm yr<sup>-1</sup>이며 누적 증발산은 581mm yr<sup>-1</sup>로 강수의 약 29%를 차지한다. 이는 광릉 산림유역의 활엽수림의 강수 대비 증발산(약 25%)에 가깝다(Park, 2009). 그러나 관측 기간동안 타워에서 관측된 강수자료와 타워 주변 지역(범륜사와 사방교, Fig. 1)에서 관측된 강수자료를

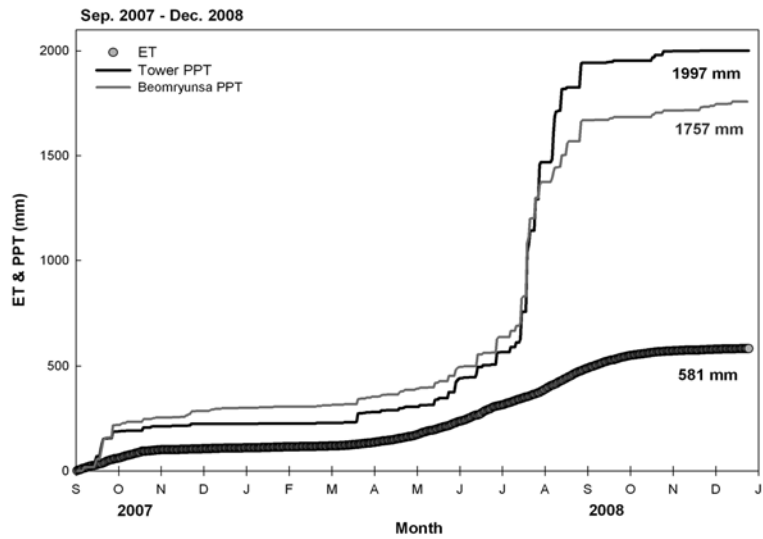


Fig. 4. Cumulative evapotranspiration (ET) and precipitation (PPT) over the measurement period (September 2007-December 2008).

비교해 보면, 타워에서 관측된 강수량이 250~350mm 정도 과대평가되었다. 타워 강수의 과대 평가는 강수량이 많은 2008년 7월(약 100mm)과 8월(약 250mm)에 주로 발생하였다. 타워 강수가 더 많이 관측된 날(7월 31일, 8월 3일, 13-14일)을 중심으로 강수의 일변동을 살펴보았으나 균락상부 강수계에 강수가 기록되었을 때 균락하부 강수계에도 강수 기록을 보여 현재로서는 균락상부 강수 관측의 오차를 판단하기가 어렵다(자료 보이지 않음). 비록 강수 관측에 오차가 있다 할지라도 이 오차는 연 증발산량에 변화를 주지 않고 다만 강수 대비 증발산 기여도에만 영향을 미친다. 주변 강수량을 감안(예를 들면, 범륜사 1757mm yr<sup>-1</sup>와 사방교 1664mm yr<sup>-1</sup>)하면 설마천 혼효림에서의 총 누적 증발산량은 총 누적 강수량의 약 35%를 차지하여, 광릉 침엽수림에서 관측된 강수대비 증발산 비율에 근접한다. 더 정확한 분석을 위해 강수량 관측 오차에 대한 조사를 진행할 계획이다.

설마천 증발산 관측은 2007년 8월 말부터 시작되었기 때문에 2008년에 관측된 자료와 비교하기 위해 같은 기간인 9-12월까지의 증발산 변동을 살펴보았다 (Fig. 5). 9월에는 증발산의 크기, 패턴 및 감소율이 모두 두 해에 비슷하게 관측되었고, 2007년에 비해 강수와 토양 수분이 낮았던 2008년 10월은 증발산 감소 패턴에서 차이를 보였다. 그러나 9월부터 12월까지 적산된 두 해의 증발산 총량은 각각 109mm와

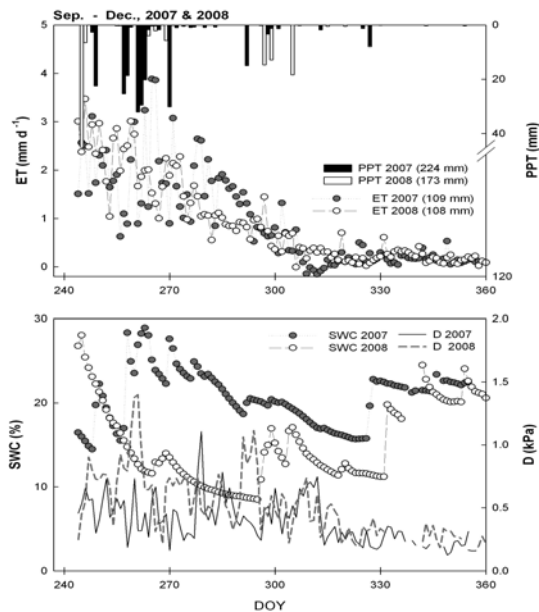


Fig. 5. Comparison of daily evapotranspiration (ET), precipitation (PPT), soil moisture content (SWC), and vapor pressure deficit (D) from September 2007 to December 2008.

08mm로서 거의 같았다. 비록 2008년 9월 강수가 전년도와 비교하여 60mm 감소하였지만 대기의 증발 수요를 활발한 증산 작용을 통해 꾸준히 유지할 수 있었기 때문일 것이다. 그러나 10월의 증발산은 2008년이 2007년 보다 감소하였는데, 그 이유는 2008년 10

**Table 2.** Monthly averaged values of aerodynamic conductance ( $g_a$ ), radiative conductance ( $g_r$ ), climatological conductance ( $g_i^*$ ), stomatal conductance ( $g_c^*$ ), and omega factor ( $\Omega$ )

Year	Month	$g_a$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )	$g_r$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )	$g_i^*$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )	$g_c^*$ ( $\text{mm s}^{-1}$ )	$\Omega$
2007	9	19.4	5.2	5.3	5.6	0.4
	10	15.8	4.6	6.9	4.7	0.4
	11	10.6	4.1	7.8	2.8	0.3
	12	9.0	3.8	10.9	3.6	0.3
2008	1	5.2	3.6	24.8	1.2	0.2
	2	6.7	3.6	25.7	0.5	0.1
	3	9.6	4.2	17.3	1.3	0.2
	4	12.3	4.7	12.3	2.2	0.3
	5	13.4	4.9	13.7	3.1	0.4
	6	12.4	5.2	11.6	5.5	0.5
	7	13.6	5.5	7.6	4.6	0.5
	8	14.7	5.5	8.1	6.5	0.6
	9	9.7	5.2	8.8	6.5	0.6
	10	10.7	4.7	9.2	3.0	0.4
	11	8.0	4.2	11.9	1.4	0.2
	12	7.5	3.7	14.6	2.8	0.4

월 중 무강수 일수가 증가하여 토양 수분이 9%까지 감소하였을 뿐만 아니라 증산활동도 감소하여 더 깊은 토양층의 수분을 공급하지 못했기 때문인 것으로 사료된다. 2008년 10월 말에 내린 강수(44mm)로 토양 수분이 증가했지만 이 시기에 이미 낙엽이 지고 휴면기가 시작되었기 때문에 증발산에는 영향을 미치지 못했다. 11월과 12월에는 두 해 모두 증발산의 크기나 변화양상이 크게 변화하지 않았다.

복사결합된 PM복합방정식에 근거하여 설마천에서 관측된 각 전도도  $g_a$ ,  $g_c^*$ ,  $g_i^*$ 를 살펴보면 5월-10월에 각각 12, 5, 10  $\text{mm s}^{-1}$ 의 평균값을 갖는다(Table 2). 따라서 전도도들 간의 비를 계산해보면,  $g_a/g_i^*$ 와  $g_a/g_c^*$ 는 각각 1.2와 2.4 정도가 된다. 공기역학 전도도의 경우, 다른 산림에 비해 크기가 상당히 작으며, 균락전도도의 경우는 비슷하거나 다소 작은 편이다. 계절별로 볼 때,  $g_a$ 는 봄에서 이른 가을(4-10월)까지 대체로 높고, 늦은 가을과 겨울(1-3월, 11-12월)에는 작았다.  $g_i^*$ 는 여름에 낮았고( $\sim 10 \text{mm s}^{-1}$ ) 겨울에 높았다( $\sim 20 \text{mm s}^{-1}$ ).  $g_c^*$ 의 경우, 식생의 엽면적이 증가하면서 서서히 증가하여 최대  $\sim 7 \text{mm s}^{-1}$ 였고, 잎이 없는 겨울에 최저값( $\sim 1 \text{mm s}^{-1}$ )을 보였다. 대기와 식생의 분리(decoupling) 정도를 나타내는  $\Omega$ 인자는 식생

이 잘 발달한 여름에 약 0.4-0.6의 범위를 보였는데, 이것은 여름에  $\lambda E_{eq}$ 와  $\lambda E_{imp}$ 가 대략 비슷하게 전체 증발산에 영향을 미치고 있음을 의미하며, 증발산이 순복사, 포차, 기공전도도 등의 인자들에 의해 끌고루 영향을 받고 있는 것으로 해석할 수 있다. 겨울에는  $\Omega < 0.4$ 였는데, 이것은 식생의 잎이 거의 남아있지 않아  $g_c^*$ 가 매우 작은데 반해서 상대적으로 값이 큰  $g_a$ (즉 높은  $g_a/g_c^*$ 비)로 인해 겨울에 상대적으로 작은 값을 보였다.

## 적 요

물 부족으로 인해 수자원의 확보와 효율적인 관리의 중요성이 커지고 있음에도 불구하고, 물 수지 분석에서 증발산은 다른 성분에 비해 직접 관측이 어려워 물수지 방정식으로부터 어렵되거나 단순한 가정이나 경험식으로부터 추정된다. 그러나 이러한 방법들은 오차가 커서 증발산의 신뢰도를 높이려면 직접 관측이 필요하다. 이 연구에서는 설마천 유역의 혼효림의 증발산을 정량화하기 위해 2007년 9월부터 2008년 12월 까지 에디 공분산 방법을 사용하여 증발산을 직접 측정하였다. 혼효림의 증발산은 성장기(5-7월)에는 평균  $2.2 \text{mm d}^{-1}$ , 비성장기인 겨울에는  $0.5 \text{mm d}^{-1}$ 였다. 2008년 한 해동안의 총 증발산량은  $581 \text{mm y}^{-1}$ 로 연 강수량( $1997 \text{mm}$ )의 약 1/3을 차지하였다. 2007년과 2008년에 관측이 겹치는 기간(9-12월)동안 적산된 증발산 총량은 2008년 가을의 강수량과 강수빈도가 2007년의 같은 기간에 비해 적었음에도 불구하고 두 기간 모두  $\sim 110 \text{mm}$ 로 다르지 않았다. 산림과 대기간의 분리(decoupling) 정도를 나타내는 오메가 인자는 평균 0.5로서 평형증발산과 부과증발산이 전체 증발산에 기여하는 정도가 크게 다르지 않았다. 이는 증발산이 순복사, 포차, 기공전도도 등에 의해 끌고루 영향을 받고 있음을 의미한다. 본 연구에서는 실측에 근거한 증발산 자료를 토대로 설마천 유역의 혼효림에서 증발산이 물수지에서 차지하는 기여도를 조사하였고, 향후 유출량과 함께 사용될 때 설마천 산림유역의 물수지 분석의 신뢰도를 향상시킬 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 유량조사사업단의 증발산량 측정 조사 사업의 지원으로 수행되었다.



## REFERENCES

- Alvai, N., J. S. Warland, and A. A. Berg, 2006: Filling gaps in evapotranspiration measurements for water budget studies: Evaluation of a Kalman filtering approach. *Agricultural and Forest Meteorology* **141**, 57-66.
- An, J. G., and T. H. Kim, 2006: Water balance of a small catchment in the subalpine grassland of Mt. Halla, Southern Korea. *Journal of the Korean Geographical Society* **41**, 404-417.
- Baldocchi, D., B. Hicks, and T. Meyers. 1988: Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* **69**, 1331-1340.
- Byun, H. R., S. J., S. Morid, K. S., S. M., Lee, and D. W. Kim, 2008: Study on the periodicities of droughts in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **44**, 417-441.
- Chou, H. G., 1972: A statistical study on evapotranspiration of paddy-field. *Korean Journal of the Atmospheric Sciences* **8**, 23-29. (in Korean with English abstract)
- Chung, H. W., 1985: Establishment of estimation methods for crop water requirement. Ministry of Agriculture and Fisheries.
- Falge E., D., Baldocchi, R. J. Olson, P. Anthoni, M. Aubinet, C. Bernhofer, G. Burba, R. Ceulemans, R. Clement, H. Dolman, A. Granier, P. Gross, T. Grünwald, D. Hollinger, N.-O. Jensen, G. Katul, P. Keronen, A. Kowalski, C. Ta Lai, B. E. Law, T. Meyers, J. Moncrieff, E. Moors, J. W. Munger, K. Pilegaard, Ü. Rannik, C. Rebmann, A. Suyker, J. Tenhunen, K. Tu, S. Verma, T. Vesala, K. Wilson, and S. Wofsy, 2001: Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. *Agricultural and Forest Meteorology* **107**, 43-69.
- Falkenmark, M., and J. Rockström, 2006: The New blue and green water paradigm: breaking new ground for water resources planning and management. *Journal of Water Resources Planning and Management* **132**, 129-32.
- Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J. H. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research* **44**, W01426, doi:10.1029/2007WR006408.
- Hong, J. K., H. Kwon, and J. Kim, 2009: Measurement of evapotranspiration by eddy-covariance technique. Sustainable water resource research center, 136pp (in submission).
- Jarvis, P. G., and K.G. McNaughton, 1986: Stomatal control of transpiration scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research* **15**, 1-49.
- Kang, M. S., 1984: The trend of the climatic change of South Korea based on Thornthwaite's method. *Geography Research* **9**, 507-519. (in Korean with English abstract)
- Kim, J., 2007: KoFlux 2006 Synthesis: HydroKorea and CarboKorea-Forward. *Journal of Korean Agricultural and Forest Meteorology* **9**, 71-74.
- Kim, J. D. Lee, J. Hong, S. Kang, S. J. Kim, S. K. Moon, J. H. Lim, Y. Son, J. Lee, S. Kim, N. Woo, K. Kim, B. Lee, B. L. Lee, and S. Kim, 2006: HydroKorea and CarboKorea: cross-scale studies of ecohydrology and biogeochemistry in a heterogeneous and complex forest catchment of Korea. *Ecological Research* **21**, 881-889.
- Kim, N. W., and C. K. Kim, 2004: Comparison of Penman-Monteith method and Morton CARE method for estimating areal evapotranspiration. 2004 *Korea Water Resources Association Conference*, Incheon, Korea, 14-15 May, 2004. (in Korean with English abstract)
- Korea Institute of Construction Technology, 2006: Operation and research on the hydrological characteristics of the experimental catchment. *Korea Institute of Construction Technology* 2006-062 182pp. (in Korean)
- Kwon, H., S. Park, M. Kang, J. Yoo, R. Yuan, and J. Kim, 2007: Quality control and assurance of eddy covariance data at the two KoFlux sites. *Korean Journal of Agricultural Forest Meteorology* **9**, 260-267. (in Korean with English abstract)
- Kwon, W. T., 2009: '08/'09 Current drought conditions and its prospect. 2009 *Drought Symposium*, Seoul, Korea, 11 March, 2009. (in Korean)
- Lee, B. W., and B. C. Kim, 1990: Estimation of actual evapotranspiration over paddy rice field. *Journal of Korean Society of Crop Science* **35**, 518-524. (in Korean with English abstract)
- Lee, G. H., 1973: On the evapotranspiration model derived from the meteorological elements and Penman equation. *Magazine of Korea water resources association* **6**, 6-11. (in Korean with English abstract)
- Oki, T., and S. Kanae, 2006: Global Hydrologic cycle and world water resources. *Science* **313**, 1068-1072.
- Park, S. B., 2009: Interpreting evapotranspiration of forest and cropland in Korea based on the radiatively coupled Penman-Monteith combination equation. M. S. Thesis, Yonsei University, Seoul, Korea. (in Korean with English abstract)
- Raupach, M. R., 2001: Combination theory and equilibrium evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* **127**, 1149-1181.
- Young, P. C., C. J. Taylor, W. Tych, D. J. Pedregal, and P. G. McKenna, 2004: The captain toolbox. Centre for Research on Environmental Systems and Statistics. Lancaster University. United Kingdom  
<http://www.es.lancs.ac.uk/cres/captain/> (2008. 4.8)  
<http://www.fluxnet.ornl.gov/> (2009. 3. 5)  
<http://kict.datapcs.co.kr/catchment/main.htm/>(2009. 2.10)