

에디 공분산으로 관측된 혼효림과 논에서의 증발산
Evapotranspiration Measurements using an Eddy Covariance Technique
in a Mixed Forest and a rice paddy in Korea

권효정*, 강민석**, 김준***, 이정훈****, 정성원*****

Hyoujung Kwon, Minseok-Kang, Joon Kim, Jung Hoon Lee, Sung Won Jung

.....
Abstract

Evapotranspiration (ET) was measured by eddy covariance method in two key ecosystems in Korea: the Seolmacheon site (a mixed forest in a complex terrain, SMK) and the Cheongmicheon site (a homogeneous rice paddy, CRK). By using the multi-year observations (SMK: Sep. 2007 - Dec. 2009, CRK: Aug. 2008 - Dec. 2009), we quantified ET and analyzed its temporal variations and control mechanisms based on the radiatively coupled combination equation. During the study period, the accumulated precipitation was about 3213 mm for the SMK site, of which about 30% (i.e., 990 mm), returned to the atmosphere as ET. At the CRK site from Jan. - Dec., 2009, the annual ET was 553 mm, which was about 40% of the annual rainfall (of 1401 mm). Both sites showed a characteristic seasonality with mid-season depression in ET that are associated with the reduced amount of available energy during the monsoon season. The decoupling parameter (Ω^*), which indicates the measure of interaction between vegetation and the atmosphere, averaged about 0.4 for the SMK site and the CRK site during the growing season. The ET from both sites was more influenced by air saturation deficit and surface conductance than available energy.

Key words: Evapotranspiration, Eddy Covariance, Seasonal variation, Water Budget, decoupling parameter

* 비회원 · 연세대학교 대기과학과 연구원 · E-mail : hkwon@koflux.yonsei.ac.kr
** 비회원 · 연세대학교 대기과학과 연구원 · E-mail : ms-kang@yonsei.ac.kr
*** 비회원 · 연세대학교 대기과학과 교수 · E-mail : joon-kim@yonsei.ac.kr
**** 정회원 · 유량조사사업단 유량조사실 연구원 · E-mail : ljh0817@kict.re.kr
***** 정회원 · 유량조사사업단 유량조사실 단장 · E-mail : swjung@kict.re.kr

1. 서론

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. 이 연구는 유량 조사 사업단의 설마천과 청미천 유역의 우량, 수위, 유량, 증발산 측정을 통한 기초수문자료 구축 사업의 일환으로서, 설마천 유역에서는 2007년 8월, 청미천 유역에서는 2008년 9월부터 에디 공분산 기술(Baldocchi et al., 1988)을 사용하여 한반도의 대표적 식생 기능형태인 혼효림과 논에서의 증발산 관측을 지속적으로 수행하였다. 본 논문의 목적은 (1) 설마천 유역의 혼효림과 청미천 유역의 논에서 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.

2. 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 4.6 km 떨어진 임진강의 제1 지류로 유역면적 8.5 km² 유로연장 5.8 km 유로경사 2%이다. 산림과 토양의 경우, 설마천 유역의 90% 이상은 주로 20 ~ 40년 수령의 침엽수(잣나무, *Pinus koraiensis*)와 활엽수(굴참나무, *Quercus variaabilis*; 신갈나무, *Quercus mongolica*)로 구성되어 있으며 침엽수는 조림수이다. 청미천 유역은 경기도 이천시 장호원~경기도 여주시 점동에 위치하며 유역의 면적은 569.6 km², 유로연장은 60.8 km, 유역둘레는 185 km, 유역의 평균 폭은 9.5 km, 유역평균표고는 해발 141 m에 이른다. 청미천 유역은 산림 49%, 농경지 43%, 기타 토비 피복 8%로 구성되어 있다.

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 설마천에서는 20 m 높이, 청미천에서는 10 m 높이에 에디 공분산 및 미기상 관측 시스템을 장착하였다 (자세한 정보는 Hong et al., 2009와 Kwon et al., 2009 참고).

2.3 에디 공분산 자료의 품질 검증 및 빈 자료 채우기

관측된 에디 공분산 자료의 품질 평가와 관리는 미기상학적/통계학적 분석을 근거로 여러 단계를 거치게 된다. 품질 관리는 튀는 자료 점검, 풍향 계산, 평면 맞추기 회전, Webb-Pearman-Leuning 계산 등을 포함한다(Kwon et al., 2007; 홍진규 등., 2009). 결측된 증발산 자료를 채우기 위해 칼만 필터(Kalman filter) 방법과 평균일변동(mean diurnal variation) 방법을 사용하였다. 칼만 필터 알고리즘은 MATLAB을 기반으로 한 'Captain Toolbox'를 사용하였다(Young et al., 2004; 권효정 등, 2009).

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

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. 칼만 필터는 순복사와 포차가 존재할 때만 증발산을 추정할 수 있기 때문에 순복사와 포차가 결측된 경우 평균일변동방법을 사용하여 증발산을 추정하였으며, 두 방법을 상호보완적으로 사용하여 빈 자료 채우기를 실행하였다 (자세한 정보는 권효정 등, 2009 참고).

2.4 오메가 인자 (Ω)

증발산은 평형증발산(equilibrium evapotranspiration, λE_{eq})과 부과증발산(imposed evapotranspiration, λE_{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 Ω 인자는 식생-대기간의 분리(decoupling) 정도를 나타내는 척도이다.

3. 결과 및 요약

3.1 예비 증발산 분석

Fig. 1은 설마천과 청미천에서 일 증발산과 일 강수량의 변동을 나타낸 것이다. 설마천의 경우, 일 증발산은 $0.1 - 5.7 \text{ mm d}^{-1}$ 의 변동폭을 가지며 연평균 $1.3 \pm 1.2 \text{ mm d}^{-1}$ 였다. 설마천 혼효림에서 증발산은 6월과 8월에 최대값 ($> 4.0 \text{ mm d}^{-1}$)를 보이고 비성장기인 겨울 (1월, 2월, 12월)에 약 0.5 mm d^{-1} 를 보였다. 7월의 일 증발산이 6월과 8월에 비해 작았는데 그 이유는 주로 이 기간에 잦은 강우로 인해 증발산을 조절하는 주요인자인 순복사가 감소했기 때문이다. 청미천의 경우

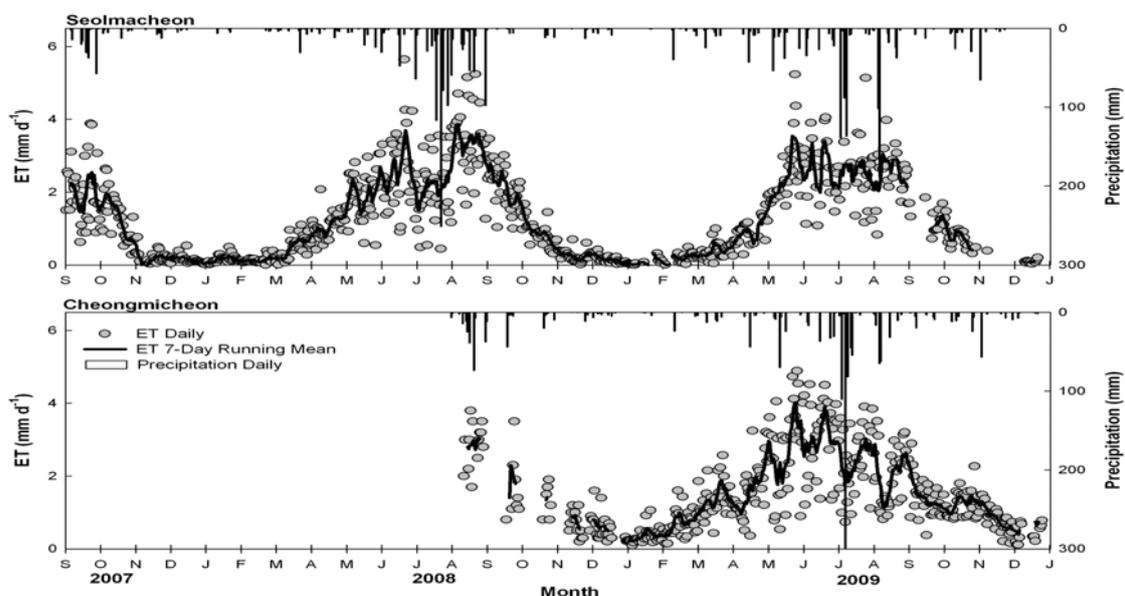


Fig. 1. Temporal variations of daily evapotranspiration (ET) and daily precipitation.

일 증발산은 일 증발산은 $0.1 - 5.0 \text{ mm d}^{-1}$ 의 변동폭을 가지며 연평균 $1.5 \pm 1.1 \text{ mm d}^{-1}$ 였다. 청미천 논에서 일 증발산은 5월 말과 6월 초에 최대값 (약 5.0 mm d^{-1})을 보이다가 점차 감소하는 패턴을 보였다. 청미천에서 일 증발산 또한 설마천과 같이 강우시 감소하는 패턴을 보였다.

관측기간동안 설마천에서 관측된 강수는 3213 mm yr^{-1} 이며 누적 증발산은 990 mm yr^{-1} 로 강수의 약 30%를 차지한다(Fig. 2). 이는 광릉 산림유역의 활엽수림의 강수 대비 증발산(약 25%)에 가깝다(Kang et al., 2009). 청미천은 2009년 한해 동안 관측된 강수는 1401 mm yr^{-1} 이며 누적 증발산은 553 mm yr^{-1} 로 강수의 약 40%를 차지한다. 이는 해남 농경지의 강수 대비 증발산(약 40%)과 같은 기여도를 보인다(Kang et al., 2009).

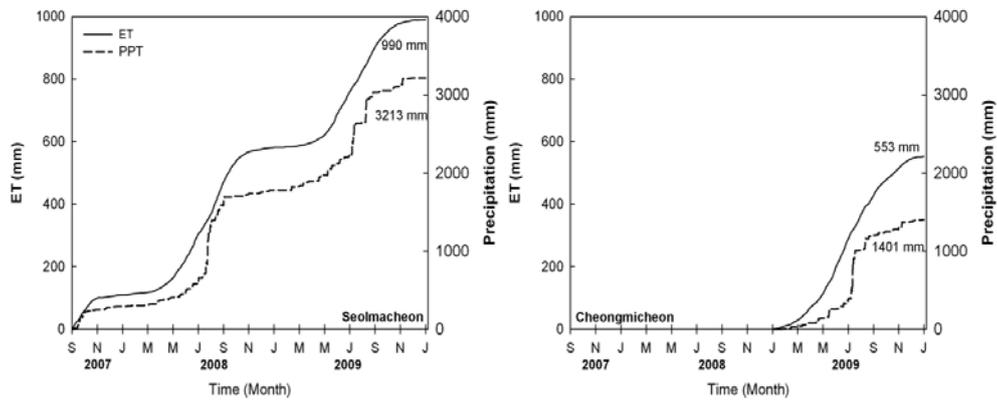


Fig. 2. Cumulative evapotranspiration (ET) and precipitation (PPT) for Seolmacheon (Sep. 2007 – Dec. 2009) and Cheongmicheon (Jan. - Dec., 2009).

설마천 유역의 물 수지를 정량화하기 위해 우량, 유량, 증발산의 월변동과 월별 증발산과 유출량의 합을 강수대비로 나타내었다 (Fig. 3). 이때 장기간 동안 강수대비 지하수의 기여도가 낮을 것으로 가정하고 지하수는 물 수지 계산에 고려하지 않았다. 관측기간동안 증발산과 유출량의 합이 강수대비 94%를 보여 설마천 유역에서 물 수지가 닫힘을 보였다. 이는 에디 공분산 방법으로 관측된 증발산이 신뢰할 수 있음을 보여준다.

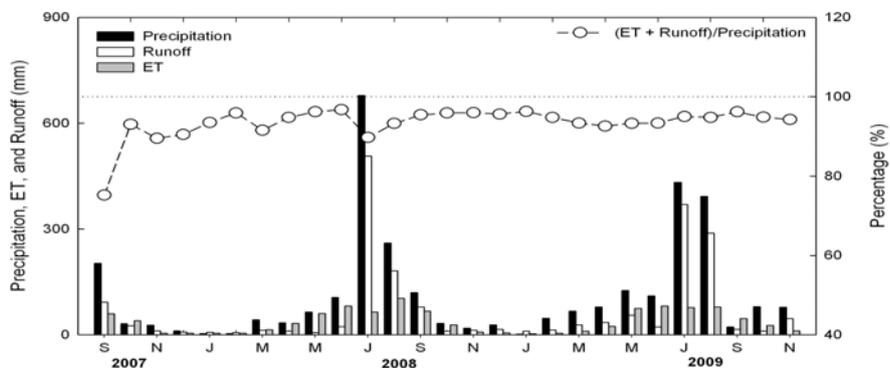


Fig.3. Monthly precipitation, runoff, evapotranspiration (ET), and the accumulated water balance ratio ($WBR = \frac{\sum(ET+Runoff)}{\sum P}$) at Seolmacheon from Sep. 2007 to Dec. 2009.

대기와 식생의 분리(decoupling) 정도를 나타내는 인자인 오메가인자 (Ω^*)는 설마천과 청미천 모두 식생이 잘 발달한 여름에 약 평균 0.4를 보였는데, 이것은 여름에 λE_{imp} 이 λE_{eq} 보다 전체 증발산에 영향을 미치고 있음을 의미하며, 증발산이 순복사보다 포차, 기공전도도 등의 인자들에 의해 끌고루 영향을 받고 있는 것으로 해석할 수 있다.

3. 요약

에디 공분산 방법을 사용하여 설마천 유역 혼효림(2007년 9월부터 2009년 12월)과 청미천 유역 논(2008년 8월부터 2009년 12월)에서 증발산을 조사하였다. 연구 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 설마천 유역의 일 증발산은 $0.1 - 5.7 \text{ mm d}^{-1}$ 의 변동폭을 가지며 연평균 $1.2 \pm 1.2 \text{ mm d}^{-1}$ 였다.
- 청미천 유역의 일 증발산은 $0.1 - 5.0 \text{ mm d}^{-1}$ 의 변동폭을 가지며 연평균 $1.5 \pm 1.1 \text{ mm d}^{-1}$ 였다.
- 설마천 유역의 증발산은 강수량의 약 30%를 차지하였으며, 청미천 유역에서 증발산은 약 40%를 차지하였다.
- 설마천 유역과 청미천 유역의 증발산의 경우, 지표와 대기간의 접합정도를 나타내는 오메가인자(Ω^*) 오메가는 여름에 0.4로 부과증발산이 평형증발산보다 전체 증발산에 기여하는 조금 크을 보였다.

감 사 의 글

본 연구는 유량조사사업단의 증발산량 측정 조사 사업의 지원으로 수행되었다.

참 고 문 헌

1. Baldocchi, D., B. Hicks, and T. Meyers. 1988: Measuring bio-sphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. *Ecology* **69**, 1331-1340.
2. Jarvis, P. G., and K. G. McNaughton, 1986: Stomatal control of transpiration scaling up from leaf to region. *Advances in Ecological Research* 1-49.
3. Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. T. Choi, Y.-J. Choi, and J. Kim, 2009: Evapotranspiration from a Deciduous Forestina Complex Terrain and Heterogeneous Farmland Under Monsoon Climate. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* 45(2), 175-191.
4. 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)
5. 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.

6. 권효정, 이정훈, 이연길, 이진원, 정성원, 김준, 2009: 설마천 유역의 혼효림에서 관측된 증발산의 계절변화. 한국농림기상학회지, 11(1), 39-47.
7. 홍진규, 권효정, 임종환, 변영화, 이조한, 김준, 2009: K oFlux 에디 공분산 자료 처리의 표준화. 한국농림기상학회지, 11(1), 19-26.