

광릉 활엽수림과 침엽수림에서 에디공분산으로 관측한 하부 균락의 증발산

강민석¹ · 권효정¹ · 임종환² · 김 준^{1,3*}

¹연세대학교 대기과학과/지구환경연구소, ²국립산림과학원 산림보전부,

³동경대학교 GCOE 지속가능한 도시재생센터/산업과학연구소

(2009년 12월 10일 접수; 2009년 12월 30일 수정; 2009년 12월 30일 수락)

Understory Evapotranspiration Measured by Eddy-Covariance in Gwangneung Deciduous and Coniferous Forests

Minseok Kang¹, Hyojung Kwon¹, Jong-Hwan Lim² and Joon Kim^{1,3*}

¹Global Environment Laboratory & Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

²Division of Forest Conservation, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

³Global Center of Excellence for Sustainable Urban Regeneration & Institute of Industrial Science,
The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo, 113-8656 Japan

(Received December 10, 2009; Revised December 30, 2009; Accepted December 30, 2009)

ABSTRACT

The partitioning of evapotranspiration (ET) into evaporation (E) and transpiration (T) is critical in understanding the water cycle and the couplings between the cycles of energy, water, and carbon. In forests, the total ET measured above the canopy consists of T from both overstory and understory vegetation, and E from soil and the intercepted precipitation. To quantify their relative contributions, we have measured ET from the floors of deciduous and coniferous forests in Gwangneung using eddy covariance technique from 1 June 2008 to 31 May 2009. Due to smaller eddies that contribute to turbulent transfer near the ground, we performed a spectrum analysis and found that the errors associated with sensor separation were $<10\%$. The annual sum of the understory ET was 59 mm (16% of total ET) in the deciduous forest and 43 mm ($\sim 7\%$) in the coniferous forest. Overall, the understory ET was not negligible except during the summer season when the plant area index was near its maximum. In both forest canopies, the decoupling factor (Ω) was about ~ 0.15 , indicating that the understory ET was controlled mainly by vapor pressure deficit and soil moisture content. The differences in the understory ET between the two forest canopies were due to different environmental conditions within the canopies, particularly the contrasting air humidity and soil water content. The non-negligible understory ET in the Gwangneung forests suggests that the dual source or multi-level models are required for the interpretation and modeling of surface exchange of mass and energy in these forests.

Key words : Evapotranspiration, Understory, Eddy-Covariance, Decoupling factor, Coniferous forest, Deciduous forest

* Corresponding Author : Joon Kim (joon-kim@yonsei.ac.kr)

I. 서 론

최근에 들어 국내에서도 최첨단의 에디 공분산 방법을 적용하여 지표-대기간 물질 및 에너지 플럭스를 1년 이상 장기관측한 결과와 이를 활용하여 다양한 모델링과 위성 알고리즘을 검증하는 연구들이 보고되고 있다(예, Kang *et al.*, 2009; Kwon *et al.*, 2009; Lee and Lim, 2009; Jang *et al.*, 2009). 이 때 식생 상부의 고층 타워에 설치된 에디 공분산 시스템으로 관측된 증발산은 생태계 전체의 증발산량을 나타내는 것으로서 식생 증산, 토양 증발, 차단 강수 증발로 구성되며, 숲과 같이 키가 큰 경우 하부 식생의 증산이 포함된다. 이렇게 증발산을 구성하는 개별요소들은 환경변화에 서로 다르게 반응하기 때문에, 관측된 증발산을 구성하는 개별 구성 요소로 분할하는 것은 물 순환을 정확히 이해하고, 물, 탄소, 에너지 순환의 연결고리(예, 기공에서 발생하는 증산과 광합성의 연결)를 밝히는데 매우 중요하다.

숲에서 일어나는 증발산은 크게 상부 식생에서 일어나는 증발과 증산, 그리고 토양에서 직접 일어나는 토양 증발로 크게 구분되는데 우리나라의 선행 연구에서는 많은 경우에 군락 하부의 토양 증발의 역할과 기여에 대해서 크게 관심을 기울이지 않았다. 실제로 엽면적지수(leaf area index, LAI)가 2 이하인 다양한 군락의 내부 증발산은 총증발산의 20~50%를 차지한다고 보고되었다(예, Baldocchi and Vogel, 1997; Baldocchi *et al.*, 2000, 2004; Iida *et al.*, 2009). 그리고, LAI가 4 이상인 숲에서도 토양 증발이 총증발산의 10~40%를 차지할 수 있음이 보고되었다 (Denmead *et al.*, 1984).

하지만, 군락 하부에서 토양 증발량을 직접 측정하는 데는 군락 상부에서보다 기술적으로 보다 많은 어려움이 따른다. 이러한 어려움은 일반적으로 군락 내에서 에디 공분산을 이용한 증발산과 같은 지표 플럭스 관측은 낮은 풍속과 비균질한 식생 및 환경조건 등의 문제로 관측의 기본 가정을 위배하기 때문이다. 따라서 대부분의 군락 하부 증발산 연구들은 관측된 자료에 대해 스펙트럼분석을 하거나 에너지 및 물질 수지의 닫힘 등의 다각적 제약(multiple constraints)을 통해 관측의 신뢰성을 확인하게 된다(Baldocchi *et al.*, 2000; Scott *et al.*, 2003; Iida *et al.*, 2009). 예를 들어, Wilson and Meyers(2000)는 활엽수림 군락 내부

에 여러 개의 에디 공분산 시스템을 다양한 방식으로 설치하여 에디 공분산 관측의 불확실성을 평가 했으며, 해당 관측지에서 단일(single) 에디 공분산 관측이 약 10%의 불확실성 내에서 하루 군락 전체를 대표할 수 있다고 결론 내렸다.

본 연구의 목적은 국내의 대표적인 두 곳의 산림생태계에서 하부 군락 증발량이 총증발산에 기여하는 양이 어느 정도인지를 정량화하고 그 계절변화를 조사하는 데에 있다. 이를 위해 한반도의 주요 식생 기능 형태인 활엽수림과 침엽수림에서 각각 이동이 가능한 에디공분산 시스템을 이용하여 군락 상부와 하부에서 2008년 6월 1일부터 2009년 5월 31일까지 1년간 증발산 관측을 동시에 수행하였다. 군락 내부에서 관측한 플럭스 자료의 경우, 스펙트럼 분석을 실시하여 그 신뢰도를 확인하였고, 품질관리를 거쳐 증발산을 정량화 하고 그 계절변화를 살펴보았다. 마지막으로 두 산림생태계의 총증발산에 대한 하부 군락 증발산의 기여도를 평가하였다.

II. 재료 및 방법

2.1. 관측지

KoFlux 광릉 플럭스 타워 관측지는 국립 수목원내 광릉 소유역의 활엽수림과 침엽수림 두 곳에 위치한다(Fig. 1). 광릉 소유역은 서쪽에서 동쪽 방향으로 평균 10°의 경사가 존재하며, 평년 기온은 11.5, 평년 강수량은 1332mm, 평년 유출량은 809mm이다(Kwon *et al.*, 2009). 관측기간 동안 군락 내의 평균 풍속은 활엽수림이 약 0.7m s⁻¹, 침엽수림이 약 0.3m s⁻¹ 이었다. 활엽수림은 복잡 지형에 위치한 다양한 식생이 혼재 되어 있는 자연림으로 주 식생은 졸참나무(*Quercus* spp.)와 서어나무(*Carpinus* spp.)이고, 평균 군락 높이는 약 18m, 최대 식생면적지수(plant area index, PAI)는 여름에 약 6이다. 주 하부 식생은 참회나무(*Euonymus oxyphyllus*)와 산딸나무(*Cornus kousa*)이며, 평균 높이가 5m 이하인 하부 식생이 차지하는 임목의 기저면적(basal area)은 총 기저면적의 약 3%이다(Lim *et al.*, 2003). 군락 내부의 토양 위에 0.05(±0.03)m의 낙엽층이 존재한다. 침엽수림은 활엽수림에 비해 상대적으로 평탄한 지역에 위치한 조림지로 주 식생은 전나무(*Abies holophylla*)이고, 평균 군락 높이는 약 23m, 최대 PAI는 여름에 약 7이다. 주 하부 식생은 층층나무(*Cornus controversa*)와 뽕나무

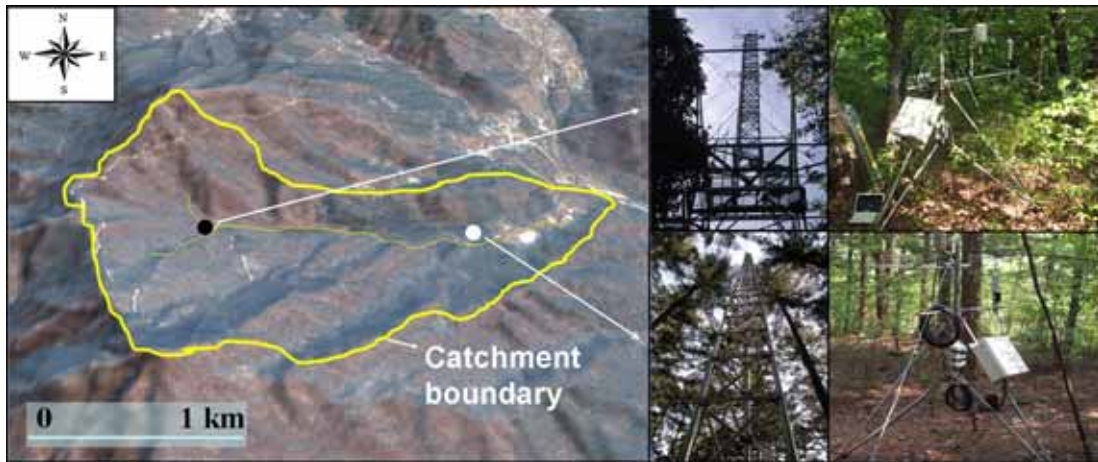


Fig. 1. KoFlux Gwangneung forest catchment. The black and white circles are the locations of the flux towers in the deciduous and coniferous forests, respectively.

Table 1. Summary of instruments at the four measurement locations

	Above canopy deciduous forest (40 m)	Within canopy deciduous forest [†] (2 m)	Above canopy coniferous forest (40 m)	Within canopy coniferous forest [‡] (2 m)
3-D Sonic anemometer/thermometer	CSAT3 ^a	81000 ^b	CSAT3 ^a	81000 ^b
Infrared gas analyzer (IRGA)/ Hygrometer	LI-7500 ^c IRGA	KH20 ^a Hygrometer	LI-7500 ^c IRGA	KH20 ^a Hygrometer
Net radiometer	CNR1 ^d	NR-LITE ^d	CNR1 ^d	NR-LITE ^d
Temperature and relative humidity probe		HMP45C ^a		HMP45C ^a
Soil water content reflectometer (0~0.1m)		CS616 ^a		CS616 ^a
Datalogger	CR5000 ^a	CR5000 ^a	CR5000 ^a	CR1000 ^a

^aCampbell Scientific Inc., Logan, UT, USA

^bR.M. Young Inc., Traverse city, MI, USA

^cLi-Cor Inc., Lincoln, NE, USA

^dKipp and Zonen Inc., Delft, Netherlands

[†]It is located about 50 m west from 40 m flux tower.

[‡]It is located about 10 m south from 40 m flux tower.

*The data were stored on CR1000.

(*Morus alba*)이며, 하부 식생이 차지하는 임목의 기저면 적은 거의 없다. 군락 내부의 토양 위에 낙엽층은 상대적으로 매우 얇다. 관측지에 대한 더 자세한 정보는 Kim *et al.*(2006), Hong *et al.*(2008), Kang *et al.*(2009) 및 KoFlux 홈페이지(<http://koflux.org>)에서 얻을 수 있다.

2.2. 플럭스 관측 자료 및 처리

Table 1에 관측 기기, 관측 높이, 관측 변수가 요약되어 있다. 군락 내부 에디 공분산 시스템의 샘플링 속도는 활엽수림에서는 20Hz 그리고 침엽수림에서는 10Hz로 설정하였다. 군락 하부의 에디 공분산 시스템

은 지면으로부터 2m 높이에 설치되어 토양 증발산량을 대표한다고 볼 수 있다. 에디 공분산 자료는 KoFlux 표준화된 자료 처리방법을 사용하여 자료 처리와 품질 관리를 실시하였다(Hong *et al.*, 2009). 좌표 변환 방법으로는 평면맞추기회전(planar fit rotation) 방법을 적용하였으며(Wilczak *et al.*, 2001), 밀도 변동에 따른 플럭스 교정을 위해 Webb *et al.*(1980)이 제시한 방법을 적용하였다. 군락 내 증발산 관측에는 3차원 초음파 풍향 풍속계(R. M. Young 81000, R. M. Young Company, USA)와 크립톤 습도계(KH20, Campbell Scientific Inc., USA)를 사용하였고, 이에 따른 산소교정을 실시하였다(Tanner *et al.*, 1993). 군

락 하부의 플럭스 관측에 사용된 초음파 풍향 풍속계는 경로 길이가 0.15m, 크립톤 습도계는 약 0.015m이며, 이 두 기기의 관측부 사이의 분리거리는 약 0.15m 이었다. 미기상 자료 빈자료 메우기 방법으로 동일 변수의 다른 관측 자료와의 선형회귀방법을, 플럭스 자료 빈자료 메우기 방법으로 개선된 순람표(advanced lookup table) 방법을 사용하였다. 순람표는 온도, 포차, 순복사로 구성되어 있으며, 각각의 구간 크기는 온도가 2.5°C, 포차가 5hPa, 순복사는 군락 위에서 관측이 이루어진 경우 40W m⁻², 군락 내에서 관측이 된 경우 10W m⁻²가 적용되었다. 자료 처리에 대한 더 자세한 정보는 Hong *et al.*(2009)에서 얻을 수 있다.

2.3. 식생면적지수(plant Area Index, PAI)

플럭스 관측 기간동안 군락 상부 식생의 조밀한 정도를 평가하기 위해 식물군락분석기(Plant canopy analyzer, Model LAI-2000, Li-Cor Inc., Lincoln, NE, USA)를 이용해 두 관측지의 PAI를 관측하였다. 관측은 군락 상부 타워의 플럭스 발자국(footprint) 영역을 고려하여, 활엽수림의 경우 12개, 침엽수림의 경우 9개의 50m×50m 격자점에서 이루어졌다. 활엽수림에는 1, 침엽수림에는 1.6의 가지내 응집계수(within shoot clumping factor)를 곱하였으며, 가지간 응집지수(between shoot clumping factor)는 고려하지 않았다(Bréda, 2003). 관측지점 중 혼효림 지점은 분석에서 제외하였다. 보다 자세한 내용은 Kwon *et al.*(2009)에서 확인할 수 있다.

2.4. 스펙트럼 분석

에디 공분산 방법에서는 한 지점에서 관측된 수증기 농도와 바람의 공분산(covariance)으로부터 증발산을 추정하는데, 실제로는 기기 자체로 인하여 유한한 평균 경로와 기기 거리를 가지게 된다. 이러한 효과는 실제 공분산 값을 감소시키기 때문에 다양한 보정 방법이 제시되어 왔었다(예, Moore, 1986; Massman, 2000). 특히 군락 하부로 내려올수록 난류 수송에 기여하는 에디의 크기가 작아지면서 에너지 스펙트럼 또는 코스펙트럼이 고주파수 영역으로 이동하게 되고, 따라서 군락 상부에서 에디 공분산 관측을 할 때에는 큰 문제가 되지 않던 경로평균(path averaging)이나 삼차원 초음파 풍향풍속계와 수증기 농도 측정 기기간의

분리(sensor separation) 등으로 인하여 발생하는 고주파수 영역의 에너지 손실로 인해서 플럭스 관측의 오차가 증가하게 된다. 특히 많은 경우에 기기간 분리에 의한 효과가 보다 중요하며, 따라서 본 연구에서는 Wilson and Meyers(2000)가 제시한 방법으로 경로평균과 기기 분리로 인해 발생하는 플럭스 오차를 계산하였다.

Wilson and Meyers(2000)는 초음파 풍향풍속계에서 얻어진 자료만을 사용하여 계산되는 현열 플럭스는 기기간 분리에 의한 효과가 없기 때문에, 수증기와 현열의 난류 수송 형태가 같다고 가정하면 기기간 분리에 의한 증발산 과소 평가를 다음과 같이 계산 하였다. 먼저 현열 플럭스의 코스펙트럼의 저주파수 영역(F_{wT})을 다음과 같이 계산한다.

$$F_{wT} = \frac{\Delta f_{wT}}{f_{wT}} = \frac{\int_0^{n^1} C_{wT}(n)dn}{\int_0^{n^2} C_{wT}(n)dn} \quad (1)$$

여기서 $C_{wT}(n)$ 는 현열플럭스의 각 자연주파수(n)에 해당하는 코스펙트럼이며, 분모(f_{wT})는 현열 플럭스의 전체 코스펙트럼을 적분한 값이고, 분자(Δf_{wT})는 저주파수 영역만을 적분한 값이다. 열과 수증기 플럭스의 코스펙트럼의 상사성을 가정한다면, 두 플럭스의 코스펙트럼은 동일할 것이다. 따라서 기기 분리로 인한 수증기 플럭스의 손실이 고주파수 영역에서만 일어난다고 가정하면, 현열과 증발산 플럭스의 코스펙트럼의 저주파수 영역의 기여도는 같아야 하는 반면에 고주파수 영역에서는 증발산만 α 만큼의 과소 평가가 발생한다.

본 연구에서 수행된 코스펙트럼 분석에 따르면 이전 연구와 유사하게 대략 0.1Hz 이상의 고주파수에서 현열과 증발산이 차이를 보임을 시사한다(Fig. 2 and 3). 이는 기기간 분리 효과가 0.1Hz이상의 고주파 영역에서 증발산값의 과소 평가를 만들어낸다는 것을 시사하며, 따라서 본 방법에서는 0.1Hz를 저주파와 고주파 영역을 구분하는 기준으로 삼아 기기 분리 효과가 증발산 측정에 미치는 효과를 다음과 같이 정량화하였다:

$$F_{wq} = \frac{\Delta f_{wq}}{(1+\alpha)f_{wq}} = F_{wT} \quad (2)$$

F_{wq} 는 수증기 플럭스의 코스펙트럼의 저주파수 영역이며, 분모(f_{wq})는 수증기 플럭스의 전체 코스펙트럼을 적분한 값이고 분자(Δf_{wq})는 0.1Hz까지의 저주파수 영역만을 적분한 값이다. 즉 기기간 분리에 의한 수증기 플럭스의 고주파수 기여의 손실은 α 에 비례하며,

α 만큼의 수증기 플럭스가 과소 평가되는 것이다. 먹스펙트럼은 대기의 안정도와 풍속에 따라 변하는데, 본 연구에서는 안정도와 풍속 변화가 다양했던 2009년 2월 16일을 선택하였다.

2.5. 비결합 모수

본 연구에서는 증발산을 조절하는 주요 미기상학적 인자인 순복사, *VPD*, 토양수분이 토양 증발 변화에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 비결합 모수 Ω 를 계산하였다. 하루 균락 증발산량 비결합 모수 Ω 를 사용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$ET = \Omega ET_{eq} + (1 - \Omega) ET_{imp} \tag{3}$$

여기서, 비결합 모수, 평형증발산(ET_{eq}) 및 부과증발산(ET_{imp})은 복사결합을 고려하였을 때 다음과 같이 계산된다.

$$\Omega = \frac{p\varepsilon + 1}{p\varepsilon + 1 + g_{aU}/g_{sU}} \tag{4}$$

$$ET_{eq} = \frac{p\varepsilon A^*}{(p\varepsilon + 1)\lambda} \tag{5}$$

$$ET_{imp} = \frac{\rho c_p}{\lambda \gamma} g_{sU} VPD \tag{6}$$

여기서 λ 는 물의 기화잠열, ET 는 증발산, $A^*(=ET+H/p)$ 와 H 는 각각 관측 높이에서의 등온가용에너지와 현열 플럭스, $p=g_aU/(g_aU+g_uU+g_sU)$ 는 전도도의 비, g_{aU} 는 하루 균락의 공기역학전도도, g_uU 는 하루균락의 복사전도도, g_sU 는 하루균락의 저류전도도(~ 0), $\varepsilon=s/\gamma$, s 는 기온에 대한 포화수증기압의 변화율, γ 는 건습구상수, ρ 는 공기밀도, c_p 는 공기의 정압비열, VPD 는 포차, g_{sU} 는 하루균락의 지표(토양 및 하부식생의 기공)전도도이다. 식에서도 알 수 있듯이, 평형증발산(ET_{eq})은 복사 결합이 고려된 현열과 잠열의 합으로 주어지는 등온가용에너지만의 함수이며, g_{sU} 와 VPD 의 함수인 부과증발산(ET_{imp})은 지표 전도도와 포차 (VPD)의 함수이다. 따라서 비결합 모수 Ω 는 실제 증발산에 대한 평형증발산과 부과증발산의 상대적인 기여도를 말해준다 (McNaughton and Jarvis, 1983; Raupach, 2001; Kang *et al.*, 2009).

III. 결과 및 토의

3.1. 먹스펙트럼(power spectrum) 분석

수증기 농도 측정기와 초음파 풍향 풍속계 사이의

거리에 의한 증발산 과소 추정 효과를 알아보기 위하여 관측된 자료들 중 안정도와 풍속에 따라 활엽수림과 침엽수림에서 관측된 각각 4개의 시간에 대해 연직풍속(w), 수증기 밀도(q), 기온(T)의 먹스펙트럼과 수증기 플럭스($w'q'$), 현열 플럭스($w'T$)의 코스펙트럼을 분석하였다(Fig. 2 and 3). 여기서 ‘은 시간 평균으로부터의 편차를 의미한다.

온도와 수증기 밀도의 먹스펙트럼은 경로길이가 다른 두 기기의 상대적인 경로 길이 효과에 대한 정보를 제공한다. 즉, 관측한 q 와 T 의 먹스펙트럼의 고주파 영역에서의 차이는 초음파 풍향풍속계의 경로 길이 효과에 대한 수증기 농도 측정기의 경로 길이 효과의 상대적인 비가 될 것이다. 두 산림에서 모두 q 와 T 의 먹스펙트럼은 관성아범위(inertial subrange)에서 비슷한 형태를 보였으며, 그 기울기가 약 -2/3로서, -2/3 power law를 만족하여 선택된 자료의 품질에 큰 문제가 없음을 알려준다(Fig. 2). 0.1Hz 이하의 저주파수 영역이 분산과 공분산에 기여하는 정도는 풍속과 안정도에 따라 변했는데, 활엽수림의 경우, q 와 T 의 정규화된 저주파수 영역($\Delta f_{qq}/f_{qq}$ 와 $\Delta f_{TT}/f_{TT}$)은 0.8~0.98이었고, 침엽수림의 경우, $\Delta f_{qq}/f_{qq}$ 은 안정도가 중립일 때를 제외하고 0.88~0.96, $\Delta f_{TT}/f_{TT}$ 은 0.92~0.98로 저주파수가 차지 하는 부분이 매우 컸다. 이는 서로 다른 경로 길이에 의해서 만들어지는 두 기기에서 관측한 q 와 T 의 고주파수 영역에서의 상대적 차이를 나타내는 α 가 매우 작은 것에서도 확인된다. 실제로, α 는 활엽수림의 경우 ± 0.01 내외로 매우 작고, 침엽수림의 경우에는, $\Delta f_{qq}/f_{qq}$ 이 매우 작아서 비교가 부적절한 16:30-17:00시 자료를 제외하고 0.06 이하였다(Table 2). 위의 사실들을 바탕으로 초음파 풍향 풍속계와 수증기 농도 분석기의 경로평균 효과는 5% 내외에서 서로 비슷함을 알 수 있다.

코스펙트럼(예, $w'q'$, $w'T$)의 경우, 관성아범위에서 그 기울기가 -4/3보다 작은 경우가 두 관측지에서 모두 나타났는데, 이는 w 의 스펙트럼의 기울기가 -2/3를 만족하지 못했기 때문이다. 두 코스펙트럼의 고주파수 영역의 차이, α 는 활엽수림의 경우 야간에는 0.15, 주간에는 0.06 내외였으며, 침엽수림의 경우 주야에 상관없이 0.02 내외였다(Table 2). 23:30-00:00시와 16:30-17:00시에 큰 음수값이 계산되었는데, 그 이유는 코스펙트럼의 먹중에 음수값을 갖는 주파수 영역이 넓

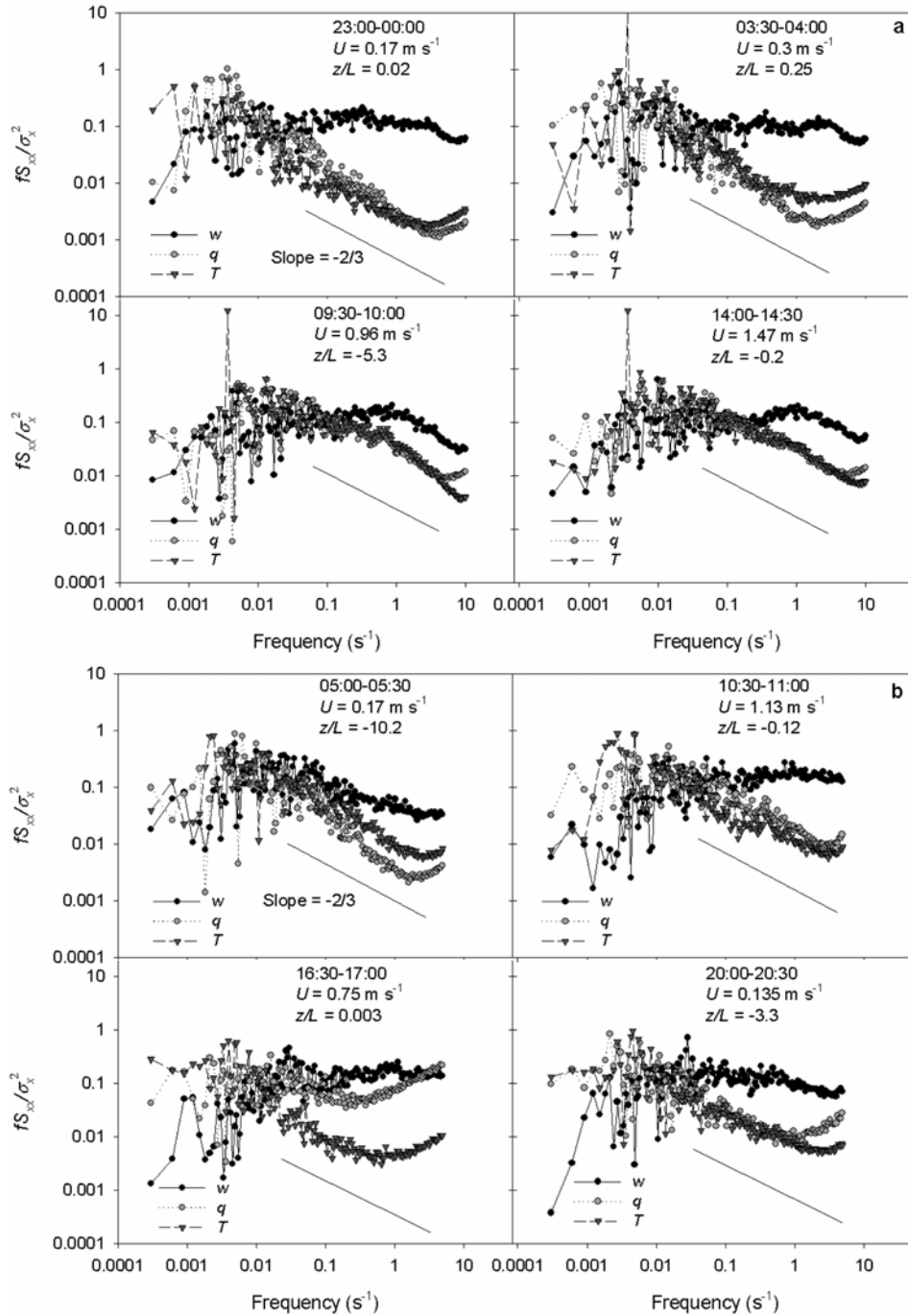


Fig. 2. Normalized power spectra for vertical wind velocity (w), humidity (q), and temperature (T) at 2 m above the ground in the (a) deciduous and (b) coniferous forests.

기 때문이다. 03:30-04:00시에 계산된 α 는 0.15로 상대적으로 컸으나 야간에 관측된 증발산은 주간에 비해 값이 매우 작으므로 연간 총증발산량의 평가시에는 그

영향력이 크지 않을 것이다. 따라서 대체적으로 분석된 수증기 플럭스의 기기분리로 인한 관측의 오차는 활엽수림은 10%, 침엽수림은 5% 미만인 것으로 짐작

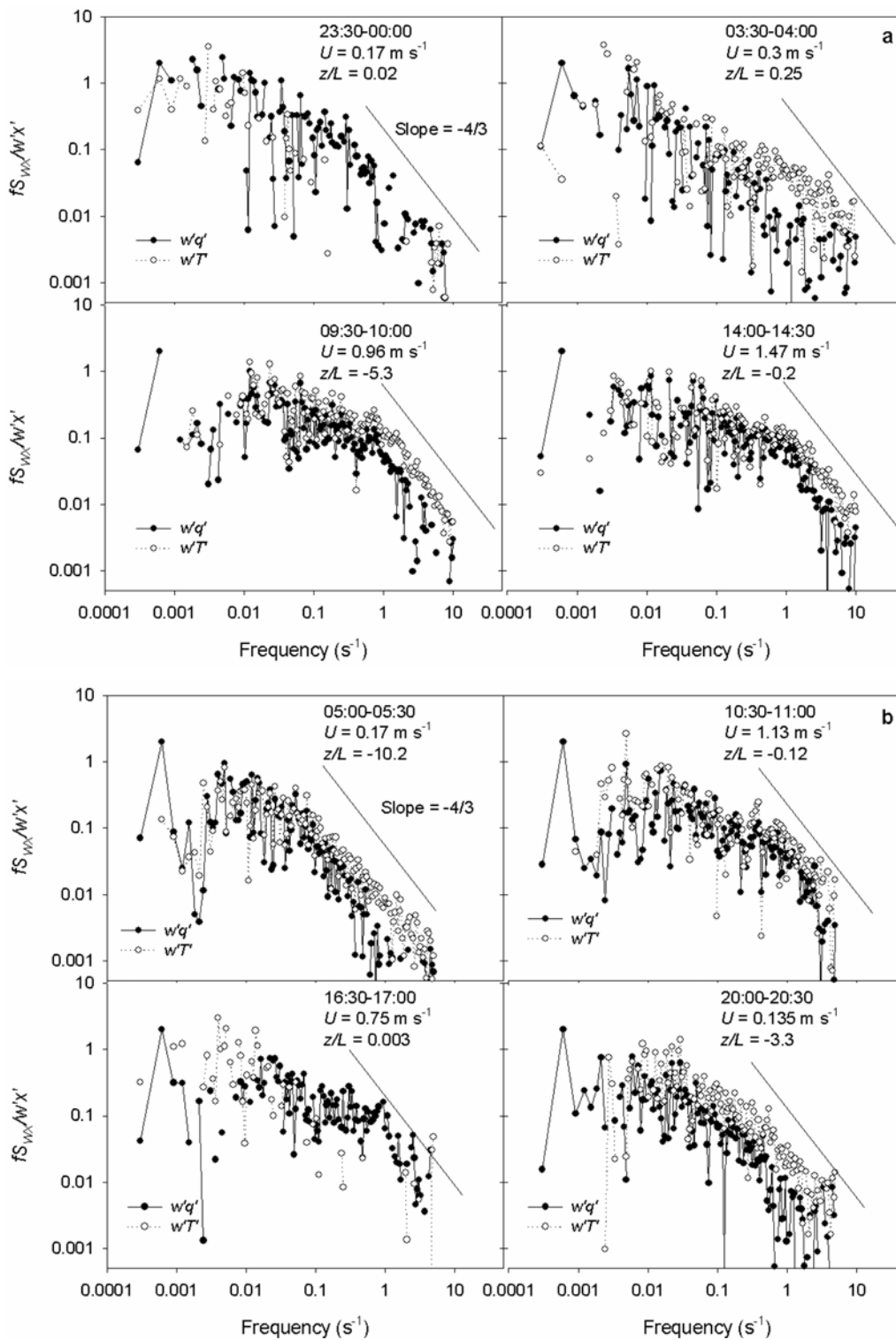


Fig. 3. Normalized cospectra for covariances between vertical wind velocity and humidity ($w'q'$) and vertical wind velocity and temperature ($w'T'$) at 2m above the ground in the (a) deciduous and (b) coniferous forests.

Table 2. Normalized low frequency fraction ($\Delta f_{xx}/f_{xx}$) of humidity (q), temperature (T), sensible heat flux ($w'T$), and water vapor flux ($w'q'$) and α^\ddagger

	Time	U (m s ⁻¹)	z/L	$\Delta f_{qq}/f_{qq}$	$\Delta f_{TT}/f_{TT}$	α^\ddagger (q, T)	$\Delta f_{wq}/f_{wq}$	$\Delta f_{w'T}/f_{w'T}$	α^\ddagger ($w'q', w'T'$)
Deciduous forest	23:30-00:00	0.17	0.02	0.98	0.98	0.01	0.85	0.95	-0.11
	03:30-04:00	0.3	0.25	0.97	0.96	-0.02	0.92	0.80	0.15
	09:30-10:00	0.96	-5.3	0.81	0.80	-0.01	0.68	0.64	0.07
	14:00-14:30	1.47	-0.2	0.82	0.81	-0.02	0.70	0.66	0.06
Coniferous forest	05:00-05:30	0.17	-10.2	0.96	0.92	-0.04	0.95	0.92	0.03
	10:30-11:00	1.13	-0.12	0.88	0.94	0.06	0.76	0.77	0.02 [‡]
	16:30-17:00	0.75	0.003	0.65	0.98	0.49	0.55	0.72	-0.23
	20:00-20:30	0.135	-3.3	0.94	0.96	0.02	0.85	0.83	0.02

[†] α was used in Eq. (2).

[‡]The dataset was divided into four subsets at every 450s of time length. Each subset was used to calculate cospectra and the cospectra of each subset were averaged. The averaged cospectra were used to calculate α . The original value is -0.02

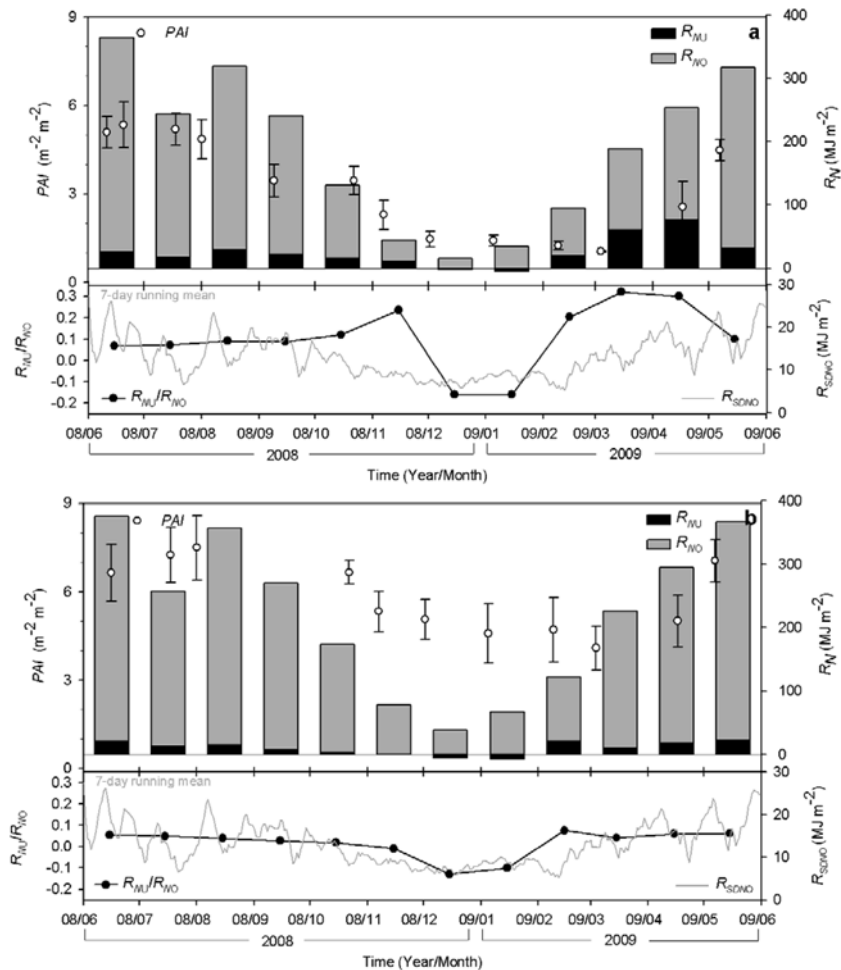


Fig. 4. Seasonal variation of plant area index (PAI), monthly net radiation above the plant canopy (R_{NO}) and net radiation at the forest floor (R_{NU}), the ratio of R_{NU} to R_{NO} , and incoming solar radiation above the plant canopy ($R_{SD,NO}$) for the (a) deciduous and (b) coniferous forests.

된다. 이를 바탕으로 군락 내 에디 공분산 방법을 이용한 증발산 관측에서 발생할 수 있는 오차들이 선형적으로 작용한다고 가정하면, 연 적산 증발산의 오차는 약 10% 내외로 평가된다.

3.2. 식생면적지수(plant area index)의 계절 변화와 하부군락의 순복사

군락 내부로 입사되는 복사는 하부군락의 증발산의

크기와 변동을 결정하는 주요 인자로서 군락 상부의 태양복사는 물론, 태양의 고도와 PAI 등의 영향을 받는다. Fig. 4는 PAI와 군락 내부에서 관측된 순복사(R_{NU})와의 관계를 보여준다. 먼저 활엽수림의 PAI는 6월말에 최대값(~5.3)이 나타났고, 점차 감소하여 12월부터 이듬해 3월까지 1~1.5의 값을 다. 순복사가 매우 작은 12월과 1월을 제외하면, PAI가 감소(증가)하면 군락 내부와 상부의 순복사 비(R_{MU}/R_{NO})가 증가

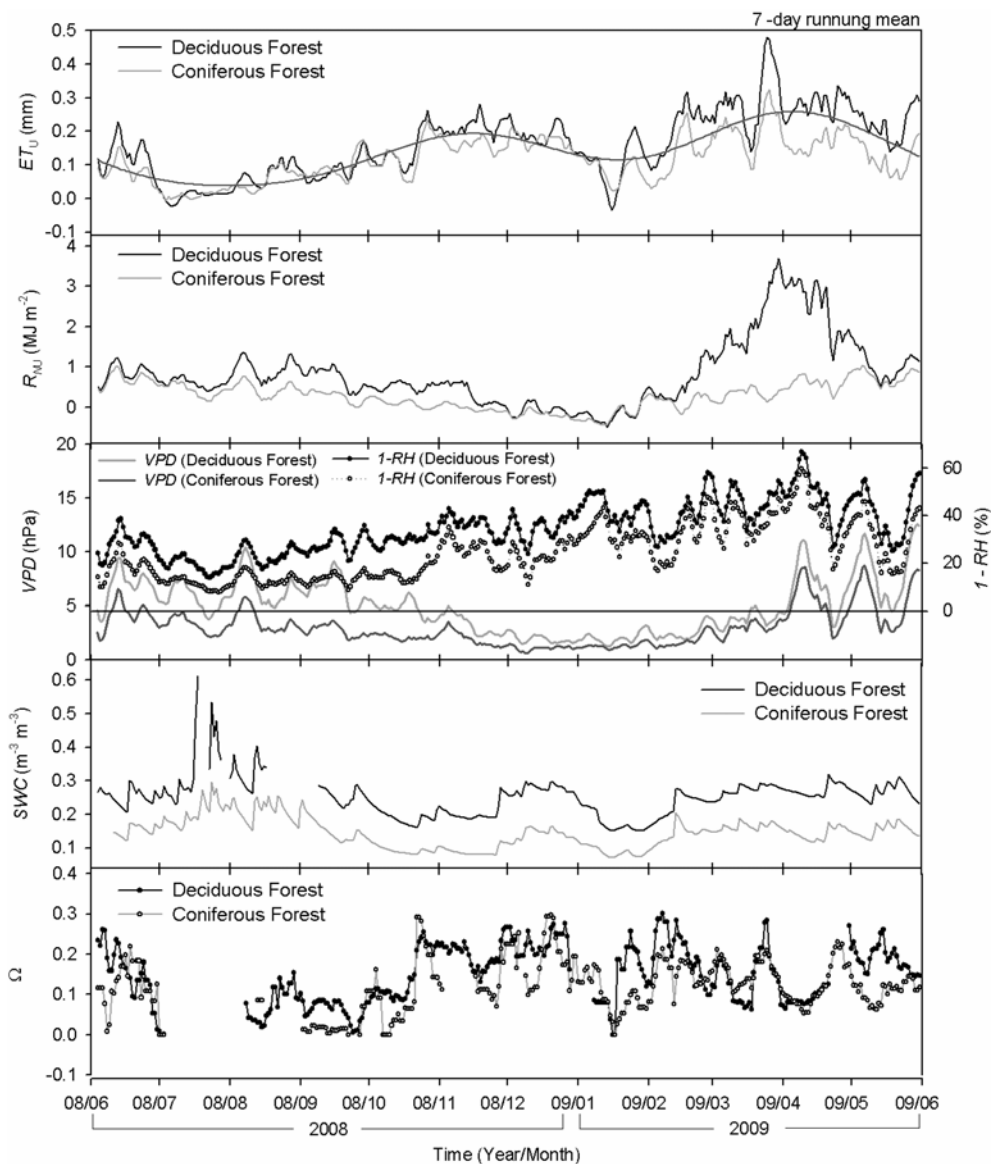


Fig. 5. Seasonal variation of understory evapotranspiration (ET_U), net radiation (R_{MU}), vapor pressure deficit (VPD), relative vapor pressure deficit ($1-RH$), soil water content (SWC), and decoupling factor (Ω) at the (a) deciduous and (b) coniferous forest floors. Thin solid line in the top plot (i.e., ET_U plot) was drawn using an inverse Fourier transform.

(감소)하는 패턴을 보임을 알 수 있다(Fig. 4). PAI 가 3 이상인 5월부터 10월까지는 R_{NU}/R_{NO} 가 0.07~0.12였으며, 그 외의 기간에는 0.23~0.32의 범위를 보였다. 한편, 침엽수림의 PAI 는 8월초에 최대값 7.5가 측정되었고, 이후 점차 감소하여 12월부터 이듬해 4월까지 5 내외의 값이 관측되었다. 활엽수림과는 다르게 R_{NU}/R_{NO} 는 PAI 보다는 R_{NO} 의 변화에 더 민감하였는데 이는 침엽수림의 PAI 가 연중 4 이상으로 식생 밀도가 더 높기 때문인 것으로 판단된다. R_{NU}/R_{NO} 는 2월에 최대값 0.08을 보였고 그 외의 기간에는 0.06 이하였다.

군락상부의 태양복사는 두 군락에서 크게 다르지 않았으나, 순복사는 활엽수림이 침엽수림보다 약 20% 정도 작았다(Fig. 4). 연평균한 일일 순복사의 경우, 활엽수림의 R_{NO} 는 $5.2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, R_{MU} 는 $0.7 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (R_{NO} 의 14.5%)였으며, 침엽수림에서는 R_{NO} 가 $6.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, R_{MU} 가 $0.3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (R_{NO} 의 4%)였다. 두 관측지의 군락 하부의 순복사의 차이는 일평균 $0.6 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 이었으며, 가장 큰 차이를 보이는 기간은 3월과 4월로서 일평균 $1.8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 의 차이를 보였는데 이 두 달동안의 차이는 연간 총순복사의 차이의 60%를 넘는 양이었다.

3.3. 하부군락 증발산의 계절 변동

군락 내 증발산(ET_U)은 두 식생에서 크기는 달랐으나 유사한 변동 패턴을 보였다(Fig. 5). ET_U 는 2008년 7월과 2009년 1월에 값이 매우 작았다. 두 관측지에서 11월 초(두 식생 모두 0.2 mm d^{-1} 내외)와 3월 말(활엽수림은 0.4 mm d^{-1} 내외, 침엽수림은 0.3 mm d^{-1} 내외)에 최대값을 나타내었으며, 활엽수림은 전반적으로 침엽수림에 비해 증발산이 약 0.1 mm d^{-1} 정도 많았다.

ET_U 의 일변동과 R_{NU} 의 일변동은 비슷한 패턴을 보일 때도 있지만(예, 여름), 월 혹은 계절 단위에서는 ET_U 와 R_{NU} 의 변동은 일치하지 않았다(Fig. 5). 특히, 겨울에 R_{MU} 가 줄어들었는데 이와는 반대로 ET_U 는 증가하는 모습도 발견되었는데 포차의 증가와 관련된 것으로 추측된다(Fig. 5). 많은 경우에 ET_U 의 일변동은 포차(VPD) 또는 상대포차($1-RH$)의 계절 변동에 따라 반응하였다. 특히 7월에 나타나는 ET_U 의 최소값은 $1-RH$ 가 20% 이하로 군락 내부의 대기가 거의 포화되었기 때문이다. 토양 수분(SWC)의 경우, 대기가 거의 포화되어 있는 7월을 제외하면, SWC 가 급격히 증가한 직후에 증발산도 증가함을 확인할 수 있으며, SWC 가 최소값을 갖는 1월 중순(활엽수림: 0.16, 침엽수림: 0.07)에 ET_U 도 최소값을 보임을 알 수 있다(Fig. 5).

이와 같이 간접적으로 우리는 관측된 하부 군락 증발산이 R_{MU} 보다는 포차나 SWC 와 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있는데, 실제 복사결합된 PM 복합방정식을 통해 계산된 Ω 를 살펴보면 이런 사실이 더욱 명백해진다. Ω 는 두 식생 모두 모든 기간에 대해 0.3 이하(연평균은 활엽수림이 0.15, 침엽수림이 0.13)이었다(Fig. 5). 이는 R_{MU} 에 의해서 주로 결정되는 평형증발산보다, VPD 나 지표전도도(g_{SU})에 의해서 결정되는 부과증발산의 기여도가 훨씬 많음을 보여준다. SWC 가 급격히 증가한 직후에 Ω 도 급격히 증가함을 확인할 수 있는데(Fig. 5), 이는 SWC 증가로 인해 지표전도도(g_{SU})를 구성하는 토양전도도가 증가했기 때문이다(식(6) 참고). Kang *et al.*(2009)은 같은 관측지의 군락 상부에서 관측된 증발산 분석을 통해 Ω 가 여름에 0.4~0.5임을 보고하였는데, 이와 비교하면 하부 군락의 증발산은 군락 전체의 증발산과는 매우 다른 조절 메

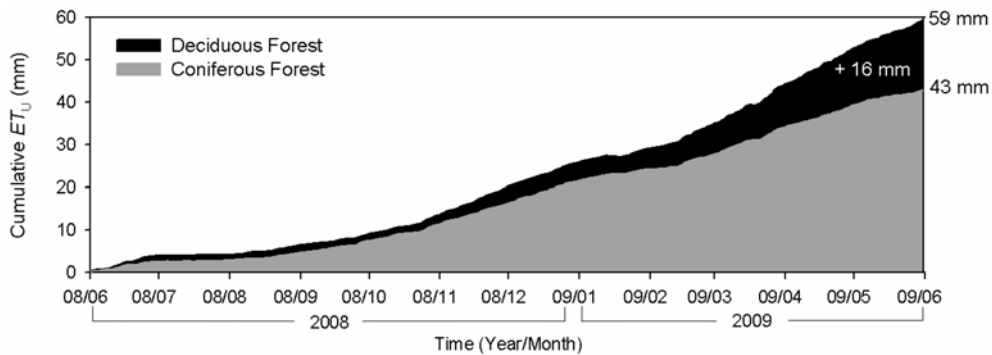


Fig. 6. Cumulative understory evapotranspiration (ET_U) at the deciduous and the coniferous forests.

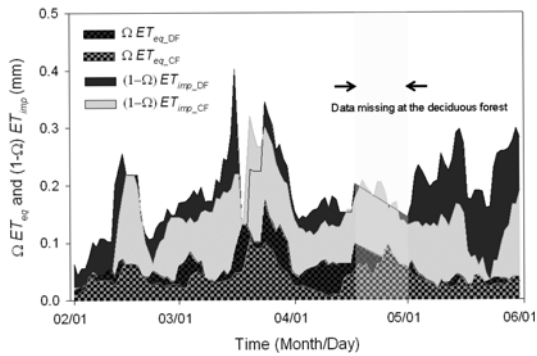


Fig. 7. Weighted equilibrium evapotranspiration (ΩET_{eq} ; checkers) and weighted imposed evapotranspiration ($(1-\Omega) ET_{imp}$; solid) at the deciduous forest floor (subscript DF), and the coniferous forest floor (subscript CF) from February 1, 2009 to May 31, 2009.

커니즘을 보였다

3.4. 식생 형태 별 하부군락 증발산의 차이

두 식생 기능형태에서 관측된 ET_U 의 연간 적산값은

활엽수림이 59mm, 침엽수림이 43mm이었으며, 두 식생 기능형태 간의 차이는 16mm로서 약 40%(침엽수림 기준)이었다. 두 식생간 ET_U 의 차이는 10월 중순부터 증가하기 시작해, 2월초부터는 그 차이가 급격히 증가했다(Fig. 6). 두 식생간 ET_U 의 차이가 급격히 증가하는 현상이 어떤 미기후학적 차이에 의해 발생하는지 알아보기 위해 다음의 분석을 수행하였다.

Ω 에 의해 가중된 평형증발산(ET_{eq})과 부과증발산(ET_{imp})을 살펴보면, 두 식생간 ET_U 의 차이는 2월과 5월은 ET_{imp} 차이에 의한 것이며, 3월과 4월에는 ET_{eq} 의 차이와 ET_{imp} 의 차이가 서로 비슷하거나 전자가 약간 더 컸다(Fig. 7). 따라서 식생의 PAI 차이에 의해 발생한 R_{NU} 의 차이가 매우 큰 3월과 4월에는, 두 식생의 ET_U 차이가 주로 R_{NU} 차이에 의한 평형 증발산량의 차이에 의한 것임을 의미한다. 반면 R_{NU} 의 차이가 크지 않은 나머지 기간에는 대부분 활엽수림지역이 침엽수림지역보다 포차가 더 크고 토양수분이 더 많았으며 따라서 두 식생간의 ET_U 차이는 ET_{imp} 차이

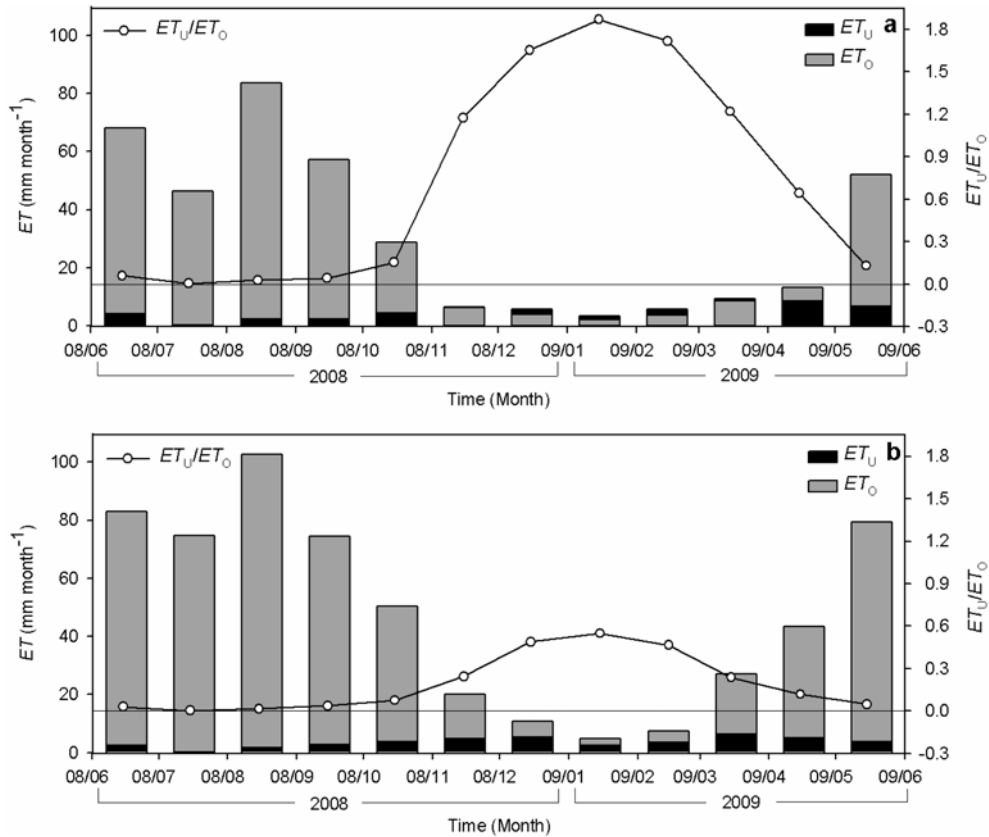


Fig. 8. Monthly evapotranspiration above the canopy (ET_0) and evapotranspiration at the forest floor (ET_U), and the ratio of ET_U to ET_0 in the (a) deciduous and (b) coniferous forests.

에서 기인하였다(Fig. 5).

3.5. 총증발산에 대한 하부군락 증발산의 기여도

관측 기간 동안 활엽수림의 총증발산의 연 적산값은 371mm였으며 이중에서 군락하부의 증발산(ET_U)은 59mm로서 16%를 차지했으며, 침엽수림의 경우, 연적산된 ET_U 는 43mm로서 총증발산(=579mm)의 7%를 차지했다. 이는 군락상부의 식생밀도가 낮은 북방산림(boreal forest, 최대 $PAI=1.6$, $ET_U/ET_0=55\%$; Iida *et al.*, 2009)이나 사바나(최대 $PAI \leq 1$, $ET_U/ET_0=36\%$; Baldocchi *et al.*, 2004)에 비하면 작은 값이며, 적어도 우리가 알기에는 본 연구와 비슷한 PAI 를 갖는 상부 식생이 조밀한 곳에서는 이루어진 연구 결과는 없었다.

ET_U/ET_0 는 PAI 의 변화에 따라 달라지는데, 상부 식생의 PAI 가 최소값을 갖는 11월부터 이듬해 3월까지 활엽수림이 1.40(1.2~1.9), 침엽수림이 0.32(0.25~0.55)이었고, 그 외의 기간에는 활엽수림이 0.08(0.01~0.64), 침엽수림이 0.04(0~0.12)이었다(Fig. 8). 자료 처리에 의한 증발산 추정 오차, 본 연구에서 제시된 기기분리에 의한 오차, 그리고 이류 효과를 감안하면, 겨울에 활엽수림에서의 작은 증발산량은 대부분 토양증발에서 기인하며, 6월부터 9월까지의 여름 기간에는 하부군락의 증발산의 기여는 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 그 외의 기간에는 ET_U 가 ET_0 의 거의 절반을 차지하는 활엽수림은 물론, 그 양이 전체의 대략 10%인 침엽수림에서도 ET_U 를 무시할 수는 없을 것으로 보인다. 따라서 본 관측지에서는, 여름에 관측된 증발산을 해석하거나 증발산을 모델링할 때 군락 상부와 하부의 증발산을 분리하여 분석하여야만 정확한 증발산 메커니즘의 진단과 해석이 가능할 것이다.

요 약

본 연구에서는 국내 최초로 한반도 주요 식생 기능형태인 활엽수림과 침엽수림의 하부 군락에서 에디 공분산 시스템을 이용해 1년간 증발산을 측정하였다. 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 하부 군락의 증발산(ET_U)의 연 적산값은, 활엽수림(최대 $PAI \sim 6$)의 경우 59mm(총증발산의 16%), 침엽수림(최대 $PAI \sim 7$)의 경우 43mm(총증발산의 7%)이

었다. 광릉 활엽 및 침엽수림에서는 PAI 가 최대값의 약 70% 이상이었던 6월부터 9월까지의 기간을 제외하고는, 두 산림에서 모두 총증발산에 대한 하부군락의 증발산의 기여를 무시할 수 없었다.

2. 두 식생 모두 비결합인자(Ω)가 약 0.15 내외로 하부군락의 증발산은 군락 내로 입사하는 순복사보다는 주로 하부군락의 포차와 토양수분에 의해 영향을 받았다. 군락 전체의 Ω 가 여름에 0.4~0.5이며, PAI 에 따라 변화하는 것과 비교하면(Kang *et al.*, 2009), 하부 군락의 증발산은 군락 전체의 증발산과는 매우 다른 조절 메커니즘을 보였다.

3. 활엽수림과 침엽수림간에 나타난 하부군락 증발산의 차이는 순복사의 차이가 주요 원인이었던 3월과 4월을 제외하고는 대부분 하부군락의 포차와 토양수분의 차이 때문이었다.

적 요

증발산(ET)을 증발(E)과 증산(T)으로 배분하는 것은 물 순환과 에너지, 물 및 탄소 순환의 연결고리를 이해하는 데에 매우 중요하다. 산림 군락의 총 증발산은 상부 및 하부 군락의 증산과 토양 및 차단 강수로부터의 증발로 구성된다. 이들의 상대적 기여도를 정량화하기 위해, 에디 공분산 방법을 사용하여 2008년 6월 1일부터 2009년 5월 31일까지 광릉 활엽수림과 침엽수림의 마루에서의 증발산을 관측하였다. 스펙트럼 분석에 따르면, 초음파 풍향 풍속계와 수증기 농도 측정기 사이의 거리에 의한 증발산 과소 평가는 군락 하부에서 연간 증발산량의 약 10%정도였다. 하부군락의 연간 증발산은 활엽수림과 침엽수림에서 각각 59mm와 43mm로, 총 증발산량의 16%와 7%를 차지하였다. 전반적으로 식생면적지수가 최대인 여름 기간을 제외하고는 하부군락의 증발산은 총 증발산에서 무시할 수 없는 부분을 차지하였다. 두 산림지역의 비결합 인자(Ω)는 약 0.15이었으며, 이는 하부군락의 증발산이 주로 포차나 토양 수분에 의해서 조절됨을 보여준다. 두 산림의 하부 군락의 증발산의 차이는 군락 하부의 환경 조건의 차이에 기인하며, 특히 습도와 토양 수분의 차이로 인해 발생하였다. 광릉 하부 군락의 증발산 기여도가 작지 않다는 사실은 이러한 산림의 물질과 에너지 플럭스를 해석하고 모델링하기 위해서는 이원 또는 다중 모형이 필요함을 시사한다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발 사업단의 연구비지원(과제번호:1-8-3) 및 국립산림과학원 “지구환경변화에 대응한 장기생태연구”와 한국연구재단의 A3 Foresight 프로그램의 연구비지원을 받아 수행되었습니다. 논문의 품위를 크게 높여주신 심사위원분들께 깊이 감사드립니다.

인용문헌

- Baldocchi, D. D., C. A. Vogel, and B. Hall 1997: Seasonal variation of energy and water vapor exchange rates above and below a boreal jack pine forest canopy. *Journal of Geophysical Research* **102**(D24), 28,939-28,951.
- Baldocchi, D. D., B. E. Law, and P. M. Anthoni, 2000: On measuring and modeling energy fluxes above the floor of a homogeneous and heterogeneous conifer forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **102**(2-3), 187-206.
- Baldocchi, D. D., L. Xu, and N. Kiang, 2004: How plant functional-type, weather, seasonal drought, and soil physical properties alter water and energy fluxes of an oak-grass savanna and an annual grassland. *Agricultural and Forest Meteorology* **123**(1-2), 13-39.
- Bréda, N. J. J., 2003: Ground-based measurements of leaf area index: a review of methods, instruments and current controversies. *Journal of Experimental Botany* **54**, 2403-2417.
- Denmead O.T., 1984: Plant physiological methods for studying evaporation: Problems of telling the forest from the trees. *Agricultural Water Management* **8**(1-3), 167-189
- Hong, J., J. Kim, D. Lee, and J.-H. Lim, 2008: Estimation of the storage and advection effects on H₂O and CO₂ exchanges in a hilly KoFlux forest catchment. *Water Resources Research* **44**, W01426.
- Hong, J., H. Kwon, J.-H. Lim, Y.-H. Byun, J. Lee, and J. Kim, 2009: Standardization of KoFlux Eddy-Covariance Data Processing. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(1), 19-26. (in Korean with English abstract)
- Iida, S. i., T. Ohta, K. Matsumoto, T. Nakai, T. Kuwada, A. V. Kononov, T. C. Maximov, M. K. van der Molen, H. Dolman, H. Tanaka, and H. Yabuki, 2009: Evapotranspiration from understory vegetation in an eastern Siberian boreal larch forest. *Agricultural and Forest Meteorology* **149**(6-7), 1129-1139.
- Jang, K., S. Kang, H. Kim, and H. Kwon, 2009: Evaluation of shortwave irradiance and evapotranspiration derived from Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS). *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 233-246.
- Kang, M., S. Park, H. Kwon, H. T. Choi, Y.-J. Choi, and J. Kim, 2009: Evapotranspiration from a deciduous forest in a complex terrain and a heterogeneous farmland under monsoon Climate. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 175-191.
- 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**(6), 881-889.
- Kwon, H., T.-Y. Park, J. Hong, J.-H. Lim, and J. Kim, 2009: Seasonality of net ecosystem carbon exchange in two major plant functional types in Korea. *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences* **45**(2), 149-163.
- Lee, Y.-H. and H.-J. Lim, 2009: Evaluation of modified Soil-Plant-Atmosphere Model (mSPA) to simulate net ecosystem carbon exchange over a deciduous forest at Gwangneung in 2006. *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **11**(3), 87-99
- Massman, W. J., 2000: A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology* **104**(3), 185-198.
- McNaughton, K. G. and P. G. Jarvis, 1983: Predicting Effects of Vegetation Changes on Transpiration and Evaporation. *Water Deficits and Plant Growth* Vol. VII, pp. 1-47.
- Monteith, J. L., 1965: Evaporation and Environment, *In The State and Movement of water in living Organisms, Symposium of the Society for Experimental Biology*, Academic Press, NY, 205-234.
- Moore, C. J., 1986: Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology* **37**(1), 17-35.
- Raupach, M, 2001: Combination theory and equilibrium evaporation. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society* **127**, 1149-1181.
- Scott, R. L., C. Watts, J. G. Payan, E. Edwards, D. C. Goodrich, D. Williams, and W. James Shuttleworth, 2003: The understory and overstory partitioning of energy and water fluxes in an open canopy, semiarid woodland. *Agricultural and Forest Meteorology* **114**(3-4), 127-139.
- Tanner, B.D., Swiatek, E., Greene, J. P., 1993: Density fluctuation and use of krypton hygrometer in Surface flux measurements. *Proceeding of the Conference on Management of Irrigation and Drainage Systems*, Park city, UT, 945-952.
- Webb, E. K., G. I. Pearman, and R. Leuning, 1980: Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapor transfer. *Quarterly Journal of Royal Meteorology Society* **106**, 85-100.

- Wilczak, J., S. Oncley, and S. Stage, 2001: Sonic Anemometer Tilt Correction Algorithms. *Boundary-Layer Meteorology* **99**(1), 127-150.
- Wilson, K. B. and T. P. Meyers, 2001: The Spatial variability of energy and carbon dioxide fluxes at the floor of a deciduous Forest. *Boundary-Layer Meteorology* **98**(3), 443-473.