

## 플렉스 타워에서 관측된 광릉 산림 소유역의 미기후학적 특징

최태진<sup>1</sup> · 임종환<sup>2</sup> · 천정화<sup>2</sup> · 이동호<sup>1</sup> · 김준<sup>1</sup>

<sup>1</sup>연세대학교 지구환경연구소 대기과학과

<sup>2</sup>국립산림과학원 산림생태과

(2005년 1월 24일 접수; 2005년 3월 29일 수락)

## Microclimatological Characteristics Observed from the Flux Tower in Gwangneung Forest Watershed

Taejin Choi<sup>1</sup>, Jong-Hwan Lim<sup>2</sup>, Jung-Hwa Chun<sup>2</sup>, Dongho Lee<sup>1</sup> and Joon Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Global Environment Laboratory, Department of Atmospheric Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea

<sup>2</sup>Division of Forest Ecology, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712 Korea

(Received January 24, 2005; Accepted March 29, 2005)

### ABSTRACT

Microclimate of Gwangneung forest watershed is characterized by analyzing wind, radiation, profiles of air temperature and humidity, soil and bole temperature, precipitation and soil water content measured at and around the flux tower from April 2000 to September 2003. Mountain-valley wind was prevalent due to the topographic effect with dominant wind from east during daytime and relatively weak wind from west during nighttime. Air temperature reaches its peak in July-August whereas monthly-averaged incoming shortwave radiation shows its peak in May due to summer monsoon. Albedo ranges from 0.12 to 0.16 during the growing season. Monthly-averaged bole temperature is in phase with monthly-averaged air temperature which is consistently higher. Monthly-averaged soil temperature lags behind air temperature and becomes higher with leaf fall. With the emergence of leafage in April, maximum temperature level during midday shifts from the ground surface to the crown level of 15-20m in May. Profiles of water vapor pressure show a similar shift in May but the ground surface remains as the major source of water. Vapor pressure deficit is highest in spring and lowest in winter. Monthly averaged surface soil temperatures range from 0 to 20°C with a maximum in August. Monthly averaged trunk temperatures of the dominant tree species range from -5.8 to 21.6°C with their seasonal variation and the magnitudes similar to those of air temperature. Annual precipitation amount varies significantly from year to year, of which >60% is from July and August. Vertical profiles of soil moisture show different characteristics that may suggest an important role of lateral movement of soil water associated with rainfall events.

**Key words** : Gwangneung forest watershed, Microclimatological characteristics, Flux tower

### I. 서 언

한반도의 약 64%가 산림임을 고려할 때 산림 미기후에 대한 정확한 이해는 생태수문학적 연구에 매우 중요하다. 현재 산림에서의 미기상·미기후 관측은 기상

예보 또는 기상 환경이 숲의 생장 및 대기와의 상호작용에 미치는 영향을 이해하기 위해 이루어지고 있다. 예를 들면, 기상청의 자동 기상 관측(AWS)은 중규모 기상(강수량, 기온, 습도, 풍속, 풍향)을 관측할 수 있는 20km고해상도 관측망(예, Choi *et al.*, 2002)을

유지하고 있는데 산악 지형에 위치한 AWS는 약 20대이다(KMA, 2002). Chon and Shin(1999)과 Shin and Kim(2002)은 기온, 습도 및 강수 자료를 이용하여 지역 미기후가 잣나무 초기 성장에 미치는 영향을 조사하였다. Park(2001)은 광릉 낙엽활엽수림과 혼합림에서 증발산 조절 인자를 비교평가하기 위해 복사, 포차 등을 분석하였다. Park *et al.*(2003)은 광릉 혼합림에서 2001년 9월부터 2002년 8월까지 토양 온도와 토양열 플럭스의 변동을 분석하였다. Kim *et al.*(2003)은 광릉 혼합림에서의 2001년 복사, 기온, 습도, 강수량 및 엽면적 지수의 계절 특성을 연구하였고, 같은 관측지에서 Cho *et al.*(2003)은 2001년 9-12월 동안의 나무 온도와 열 저류량의 변동을 평가하였다. Choi *et al.*(2003)은 광릉 낙엽활엽수림에서 2002년 여름철 CO<sub>2</sub> 교환에 영향을 미치는 변수를 분석하였다. 그러나 이러한 기존의 관측과 분석은 기간이 제한되어 있거나 분석이 일부 변수에 제한되어 있다.

광릉 국립수목원에서는 2000년 4월부터 에디 공분산 방법을 이용하여 낙엽활엽수림과 대기간의 탄소, 에너지 및 물의 교환과정을 이해하기 위한 연구가 시작되었다. 30m 관측 타워에 에디 공분산 시스템이 설치되었고, 현열, 잠열 및 운동량 플럭스의 관측이 시작되었다(Park, 2001). 이와 함께 에너지와 물질 교환에 어떤 인자가 중요한 역할을 하는가를 평가하고, 생태수문/생물리 모형의 입력 및 검증 자료를 확보하기 위해 복사, 기온과 습도 프로파일, 토양 온도와 수분, 나무 온도, 풍향, 풍속 및 강수량 등의 관측이 함께 이루어지고 있다. 2002년 국내의 주요생태계의 플럭스 타워 관측을 연결한 KoFlux 지역 관측망이 구축되었고, 광릉 수목원의 낙엽활엽수림은 KoFlux DK 관측지로 지정되었다(Kim *et al.*, 2002). 같은 해 9

월부터 광릉 활엽림이 대기 중 CO<sub>2</sub>에 대해 강한 흡원으로 작용하는지를 평가하기 위해 CO<sub>2</sub> 플럭스 관측이 추가되었다. 안전상의 문제로 40m 높이의 새 타워가 기존 타워로부터 약 60m 동쪽에 설치되었고, 2003년 11월 말에 관측 기기들이 새 타워로 옮겨져 관측이 지속되고 있다. 본 연구의 목적은 3년 6개월간 관측된 광릉 산림 소유역의 미기후 자료들을 처리 분석하여 국내외 연구자들에게 자료 기반을 제공하고, 물과 탄소 순환에 관련된 관측 실험 설계와 생태수문 모형의 보정과 검증에 유용한 정보를 제공하는 것이다.

## II. 재료 및 방법

### 2.1. 관측지

광릉의 플럭스 타워 관측지는 국립 수목원내의 활엽수림(37°45'25.37"N, 127°9'11.62"S: 290m a.s.l.)에 위치하며, 서쪽에서 동쪽 방향으로 평균 약 10°의 경사가 존재한다. 식생의 높이는 18-20m이고, 졸참나무 (*Quercus serrata*), 서어나무(*Carpinus laxiflora*) 등의 낙엽활엽수림이 주종을 이룬다. 관측지에 대한 식생, 토양 정보는 Lim *et al.*(2003)에 자세히 나와 있다.

### 2.2. 관측 자료

Table 1에 관측 기기, 높이(또는 깊이), 변수 그리고 관측 시작 시간, 자료 수거율이 요약되어 있다. 삼배엽 풍향 풍속계도 설치되었으나 여기서는 삼차원 초음파 풍속계와의 비교에만 사용되었다. 각 변수들은 30분 평균(강수량의 경우에는 적산) 값이다. 계절에 따른 분석을 위해 12월 - 2월(겨울), 3월 - 5월(봄), 6월 - 8월(여름), 그리고 9월 - 11월(가을)로 나누었다.

**Table 1.** Variables measured on and around the flux tower in Gwangneung KoFlux site.

Instruments (Height/depth)	Variables	Starting time	Data availability
CSAT3 sonic anemometer (31m)	Wind speed/ Wind direction	2000. 4 -	92.2%
CNR-1 Radiometer (30m)	Down & Upward short & longwave radiation	2000. 4 -	99.9%
HMP-35 humicap (29, 19, 13, 9, 4m) (0.3m)	Temperature/ Humidity	2000. 4 - (2001. 1 -)	> 90%
TCAV thermocouples (0-0.1m)	Soil temperature	2000. 11 -	99.9%
Thermocouple (1.5, 2.5m)	Bole temperature	2001. 9	98.5%
TE525 (30M) rain gauge	Precipitation	2001. 7	95.2%
CS615 TDR (0~0.1, 0~0.3, 0.3~0.6m)(0 ~ 0.3m)	Volumetric Soil water content	2000. 11 (2001.10)	29.7 - ~98.7%

### III. 품질 관리

플럭스 및 미기상 자료의 품질 평가 기준은 일반적으로 잘 알려져 있다(Foken and Wichura, 1996; Choi et al., 2004). 본 연구에서는 관측에 사용된 기기들이 정상적으로 작동하였는가를 확인하기 위해 30분 평균의 일 단위 시계열을 그린 후 그 변동과 크기가 타당한가를 모형, 기존의 관측값, 또는 관련된 변수들과 비교하였다. 각 변수에 대한 기준은 다음과 같다.

#### 3.1. 풍향과 풍속

풍향과 풍속은 삼차원 초음파 풍속계(CSAT3, Campbell Scientific Inc.)와 삼배풍속계 및 풍향계로 관측되었다. 여기서는 삼차원 초음파 풍속계로 관측된 풍향과 풍속 자료를 분석하였다. 1초에 10번 이상의 고속 관측이 가능한 삼차원 초음파 풍속계는 SDM 방식을 이용하여 CR5000 또는 CR23X 집록기(Campbell Scientific Inc.)에 연결해서 사용한다. 강수, 별레 등에 의한 물리적 조건에 의해 초음파 단자들의 신호에 영향을 미치는 경우, 이때 관측된 값들은 평균, 표준 편차 등의 통계량 계산에서 제외된다. 계산된 풍향과 풍속은 삼배 풍속계와 풍향계의 관측결과와 잘 일치하였다.

#### 3.2. 복사

CNR-1 복사계는 네 개의 독립된 복사계로부터 상향/하향 단파 및 장파 복사를 측정한다. 이 복사계에 대한 자세한 정보는 Moon et al.(2003)에서 찾을 수 있다. 각 복사 성분에 대한 품질 평가는 아래와 같다.

하향 단파 복사 : 지면에 도달하는 직달 복사는 다음의 식을 이용하면 추정할 수 있다(e.g. Lowry and Lowry II, 1989).

$$S_h = S_o(\tau)^{\sec Z} \cos Z \quad (1)$$

여기서  $S_h$ 는 맑은 날 수평면에 도달하는 직달일사,  $S_o$ 는 태양 상수(=1380 Wm<sup>-2</sup>),  $\tau$ 는 천정거리 투과율(습한 중위도지역에서~0.75),  $Z$ 는 천정각이며, 남중한 경우 아래와 같이 계산된다.

$$\cos Z = \cos \phi \cos \delta + \sin \phi \sin \delta \quad (2)$$

여기서  $\phi$ 는 위도,  $\delta$ 는 태양 적위(solar declination) (= (-23.5)cos[(360 degree) (D+10days) / (365.25days)]로 일수(day number, D)의 함수이다. 비교를 위해 관측 자료는 1200-1230h의 평균 하향 단파 복사 자료를 이용하였다.

상향 단파 복사 : 하향 단파 복사 자료가 분석에 이용될 수 있다고 판단된 경우, 상향 단파 복사의 품질 평가를 위해서 낮 평균(i.e., 1000-1400h)된 알베도(=상향 단파 복사/하향 단파 복사)를 계산한 후 다른 산림에서 관측된 값들과 비교하였다.

상향 장파 복사 : 관측된 상향 장파 복사와 아래의 스테판-볼츠만 식을 이용하면 균락 또는 지면 온도를 추정할 수 있으며, 이 값은 19m에서 관측된 기온과 비교하였다.

$$R_{lup} = \epsilon \sigma T^4 \quad (3)$$

여기서  $R_{lup}$ 은 상향 장파 복사(Wm<sup>-2</sup>),  $\epsilon$ 은 방출률,  $\sigma$ 는 스테판-볼츠만 상수(=5.67 × 10<sup>-8</sup> Wm<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>) 그리고  $T$ 는 절대 온도(K)이다. 여기서 방출률은 1로 가정하였다.

하향 장파 복사: 하향 장파 복사는 대체로 그 크기가 상향 장파 복사보다 약 50-60Wm<sup>-2</sup> 정도 적고 매우 작은 일변화를 보이는데, 구름의 유무에 따라 그 값이 달라진다. 상향 장파는 지면온도, 식물균락의 표면온도 또는 식생 밀도에 따른 두 온도의 합성(composite) 온도에 따라 결정되므로, 태양복사의 일변화와 비교해서 다소 지연된 약한 일변화를 보이므로 상대적인 크기와 변동 특성에 근거하여 품질 관리를 수행하였다.

#### 3.3. 기온과 습도

여섯 높이에서의 기온, 높이에 따른 연직 변화와 일계절 변동을 고려하였다. 상향 장파 복사로부터 추정된 균락 상부 온도와 균락 높이에서 관측된 기온을 서로 비교하였다. 습도의 경우에도 각 높이에서의 관측된 습도의 크기 및 변동을 비교하였다. 그리고 기온 관측은 정상적으로 보이나 습도 관측이 비정상적인 경우, 관측된 수증기압과 기온으로부터 계산된 포화수증기압을 서로 비교하여 수증기압이 포화수증기압보다 큰 경우의 자료는 사용하지 않았다.

**3.4. 토양 및 나무 온도**

네 군데의 0.1m 토양층에서 관측된 토양 온도의 변동과 크기를 상호 비교하였으며, 0.3m 높이에서의 기온과도 비교하였다. 세 그루의 줄참나무 1.5m와 2.5m 높이에서 측정된 각 나무 온도의 크기와 변동을 서로 비교하고, 군락 내의 기온과 비교하였다.

**3.5. 강수량과 토양수분**

집록기의 문제로 다른 변수들에 비해 강수 자료의 손실이 상대적으로 많았다. 강수 자료의 품질 평가를 위해 자료가 손실된 기간에 강수가 없다고 가정하고 일적산 강수량을 계산하여 2km 떨어진 중부 임업시험장의 AWS에서 관측된 값과 비교하였다. 토양수분의 경우, 여덟 장소에서 관측된 값들을 서로 비교하였다. 또한 강수 및 증발산에 따른 토양 수분의 크기와 변동을 타당한 가를 평가하기 위해 강수 자료와 비교하였다.

**IV. 결과 및 토의**

**4.1. 풍향과 풍속**

일반적으로 우리나라는 겨울에 북서풍, 여름에는 남서풍이 강하며, 계절에 따른 풍계가 뚜렷이 나타난다. 관측 타워가 위치한 광릉 산림 소유역은 서쪽에서 동쪽으로 평균 10도의 경사가 있고, 산곡풍이 지배적이다. 즉, 낮에는 동풍이, 밤에서는 서풍이 주풍향이다. 분석 기간 동안의 풍속이 0.5ms<sup>-1</sup>보다 큰 경우, 풍향의 빈도는 계절에 따라 다소 차이가 있지만 서풍 계열이 67%로 동풍 계열 33%보다 두 배 정도 많다 (Fig. 1). 계곡형 지형이므로 북풍이나 남풍이 상대적으로 드물다. 풍향과 함께 나타나는 특징은 약한 풍속으로, 1ms<sup>-1</sup>이하인 경우가 전체의 약 50%(동풍 계열: 약 15%, 서풍 계열: 약 35%)를 차지한다.

강한 기압계의 이동이 있는 경우, 풍속이 강해지고 풍향도 바뀐다. Fig. 2는 2002년 7월 21일부터 30일까지의 기압, 풍속, 풍향의 변화를 나타낸다. 7월 25일까지 하루 평균 약 0.1 kPa내의 변화를 보이며 서서히 감소한다. 이 기간 동안 풍속은 낮에는 강하고, 밤에는 약하며, 풍향은 일 변동을 보여 낮에는 동풍, 밤에는 서풍이 지배적인 산곡풍의 특징을 보인다. 7월 25일부터 28일까지 기압은 97.5 kPa에서 약 1 kPa 증가하였고, 풍속은 상대적으로 강하여 최대 약 6 ms<sup>-1</sup>까지 증가하였고 야간의 풍속도 강하였다. 풍향은

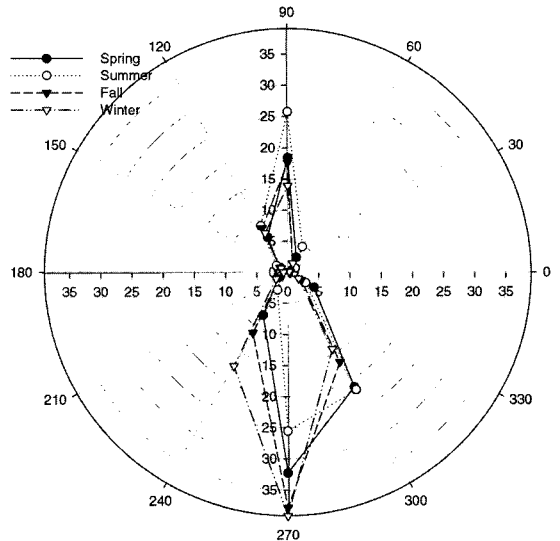


Fig. 1. The distribution of the frequency of wind direction.

사흘간 지속적으로 동풍이었다. 비록 관측지의 바람이 지형의 영향을 크게 받으나 강한 상층 기압계의 변동이 관측지 바람에 큰 영향을 미침을 알 수 있다.

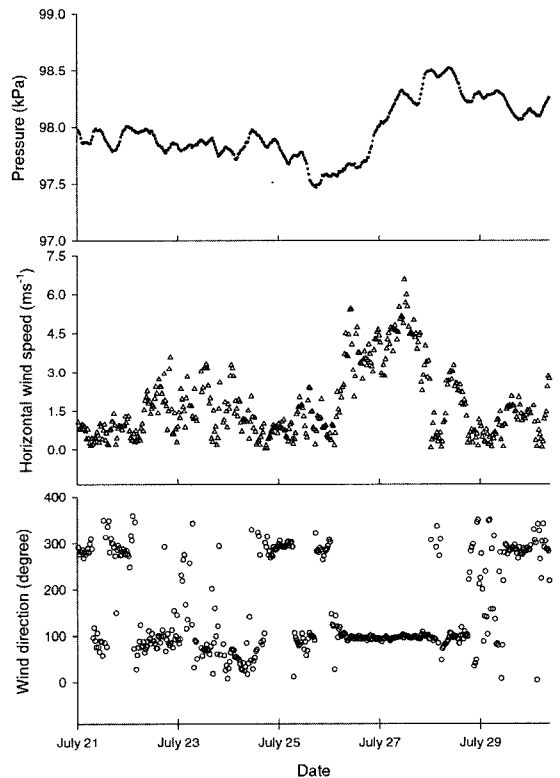


Fig. 2. Atmospheric pressure, horizontal wind speed and wind direction from 21 to 30 July in 2002.

## 4.2. 복사

관측된 하향 단파 복사 값이 타당한가를 살펴보기 위해 모형 값 (식 1)과 비교하였다. 관측된 일 최대 하향 단파 복사의 범위는  $450 - 1000 \text{ Wm}^{-2}$ 이고, 이 값은 모형에서 예측하는 값(하지:  $1009 \text{ Wm}^{-2}$ , 동지:  $382 \text{ Wm}^{-2}$ )과 유사하다. 그리고 두 값의 연중 변화 양상도 유사하기 때문에 관측된 하향 단파 복사 값은 타당한 것으로 보인다. Fig. 3은 2000년부터 2003년까지 4년 동안의 월 평균 하향 단파 복사의 연 변동을 나타낸다. 2000년의 자료를 제외하면 단파 복사는 하지에 있는 6월보다 한달 앞선 5월에 최대 값을 보인다. 이것은 5월이 상대적으로 맑은 날이 많고, 장마가 6월 하순부터 시작되는 것에 기인한다. 식물의 성장이 왕성한 7월과 8월의 경우, 2001년의 경우를 제외하면 4월의 값보다 작았다.

단파 복사 자료의 신뢰성은 알베도를 통해서도 알 수 있다. Fig. 4는 낮 평균(1000-1400hr)된 알베도의 변동이다. 알베도는 잎의 유무, 잎 색깔의 변동, 엽면적의 변동에 따라 변하는데 매년 알베도의 변화 양상이 비슷하기 때문에 여기서는 4년 평균 값을 사용하였다. 잎이 나기 시작하는 4월 중순 또는 하순부터 알베도가 증가하기 시작하며 5월 중에 최대값(약 0.16)을 보인다. 엽면적 지수가 최대(약 3.5)가 되는 7, 8월은 약 0.12였다. Moore *et al.*(1996)은 미국 북동부에 위치한 온대 낙엽 활엽수림에서의 알베도가 약 0.15, Nakai *et al.*(2003)은 일본 북부에 위치한 낙엽 활엽수림의 알베도가 약 0.13임을 보고하였다. 한편, 김연희 등(2003)은 관측지에서 약 1km 떨어진 광릉 혼합림의 성장기 알베도가 0.1임을 보고하였다.

상향 장파 복사를 식 (2)를 이용하여 군락 또는 지면 온도를 구하고, 군락 바로 위 높이인 19m에서의 기온과 비교하였다. 서로 다른 기기로 관측된 온도가 비슷한 크기와 변화를 보이는 것에 근거하면 상향 장파 복사의 값은 타당한 것으로 보인다. 연중 상향 장파 복사의 값은  $250 \sim 550 \text{ Wm}^{-2}$  이었다. 반면에 하향 장파 복사의 범위는  $180 \sim 500 \text{ Wm}^{-2}$ 였다. 결과적으로 네 복사 성분의 합인 순복사는  $-100 \sim 800 \text{ Wm}^{-2}$ 의 범위를 보인다. 순복사의 연중 최대값은 6-8월에 나타났으며, 약  $800 \text{ Wm}^{-2}$ 이었다. 반면에 겨울철 최대 순복사는 약  $300 \text{ Wm}^{-2}$ 이었다. Fig. 5는 봄철 평균된 각 복사 성분의 일변동이다. 한 낮의 순복사는 하향 단파복사의 약 75%를 차지함을 알 수 있다. 상향 장파 복

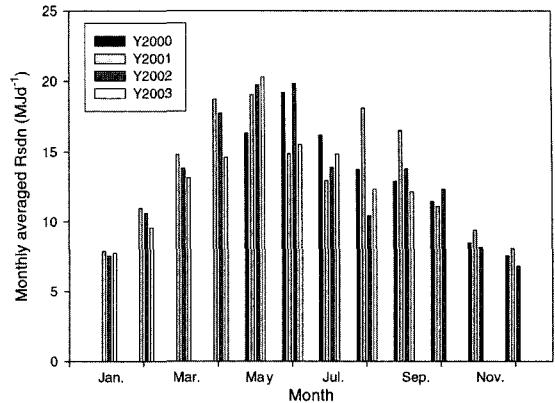


Fig. 3. Monthly averaged downward shortwave radiation from 2000 to 2003.

사는 하향 장파 복사보다 밤에는 약  $50 \text{ Wm}^{-2}$ , 낮에는 약  $70 \text{ Wm}^{-2}$  정도의 차이를 보이고, 관측된 장파의 값으로부터 대략 군락과 대기간의 평균 온도의 차이가 약  $10 \sim 12^\circ \text{C}$  정도임을 알 수 있다. 장파복사는 단파 복사에 비해 작은 폭의 일 변화를 보이며, 다른 계절에도 크기가 다를 뿐 비슷한 양상을 보였다.

## 4.3. 기온과 습도

분석 기간 동안 29m 높이에서의 30분 평균 기온의 범위는  $-22.6 \sim 34.1^\circ \text{C}$ , 군락 바로 위인 19m의 경우  $-23.9 \sim 34.3^\circ \text{C}$ , 수관의 중간부인 14m의 경우  $-24.0 \sim 32.5^\circ \text{C}$ , 수관 아래인 9m의 경우  $-25.0 \sim 32.1^\circ \text{C}$ , 4m의 경우  $-23.7 \sim 31.6^\circ \text{C}$ , 그리고 지면 근처인 0.3m 높이에서의 경우  $-24.8 \sim 30.8^\circ \text{C}$ 이었다. 관측 기간 동안 최저 및 최고 기온은 각각 2001년 1월 15일과 8월 4일

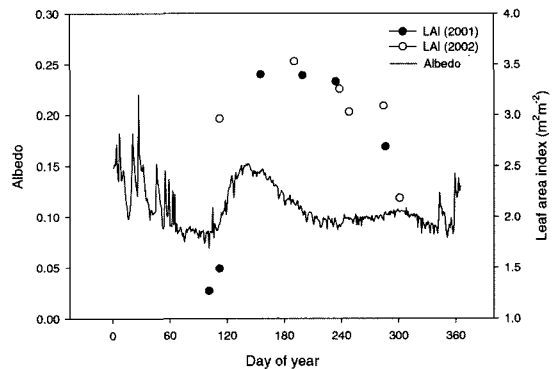
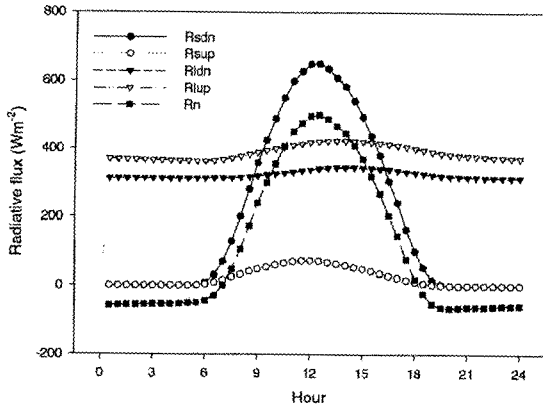


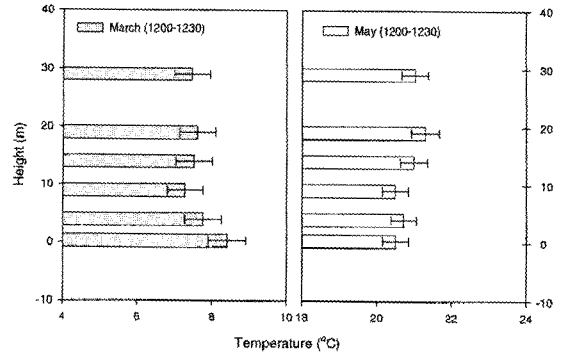
Fig. 4. The seasonal variations of albedo averaged for four years with leaf area index (LAI) of 2001 and 2002.



**Fig. 5.** Diurnal variations of radiation balance in Spring (averaged from 2001 and 2002). Rsdn indicates downward shortwave radiation, Rsup upward shortwave radiation, Rldn downward longwave radiation, Rlup upward long wave radiation and Rn net radiation.

값이며, 관측지에서 가장 가까운 동두천 기상 관측소에서 관측된 일 최고 및 최저 기온은 각각 -26.2과 34.7°C이었다. 29m 높이에서 최대 월 평균 기온은 약 25°C 였고, 7-8월에 기온이 가장 높았고, 최저 기온은 12-1월(> -6.0°C)에 나타났다. 전반적으로 일교차는 봄에 가장 컸으며, 가을, 겨울 그리고 여름 순이었다. 일교차는 15°C보다 작았으나, 일부 기간, 특히 2001년 4월 22일 - 23일 일교차는 22.5°C로 매우 컸다. 11-12월부터 다음 해 4월까지 즉, 잎이 없는 시기에는 지면에 가까운 0.3m에서, 그 외의 기간 즉 성장기에는 균락 바로 상부인 19m 높이에서 일교차가 가장 컸다. Fig. 6은 2001년에서 2003년까지 3년 동안 잎이 나기 전인 3월과 잎이 난 후인 5월 정오 무렵의 평균된 기온의 연직 분포를 나타낸다. 관측지에서는 4월 중순에서 하순 사이에 잎이 나오기 시작하는데 3월의 평균 기온 프로파일은 지면근처에서 기온이 가장 높고 고도가 올라갈수록 기온이 감소하는 모습을 보인다. 반면에 5월 평균 기온의 연직분포는 균락 바로 위의 높이인 19m에서 최대값이 나타나며, 지면 근처에서의 기온이 가장 낮은 것으로 나타났다. 엽면적이 증가하면서 복사 에너지를 가장 많이 흡수하는 산림의 엽면적이 가장 큰 높이에서 기온이 높아지는데, 열 에너지의 발원이 지면으로부터 잎이 밀집된 곳으로 옮겨감을 보여준다.

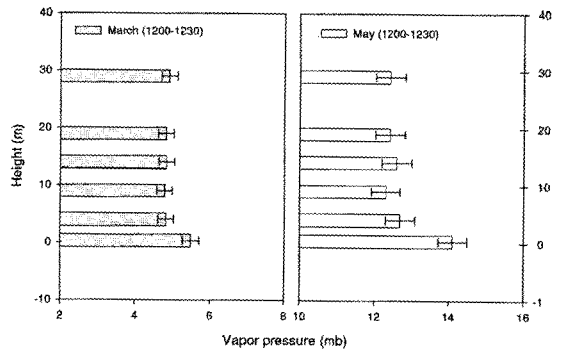
30분 평균 최대 수증기압은 29m 높이에서 약



**Fig. 6.** Averaged temperature profiles at six levels (29, 19, 14, 9, 4 and 0.3m from the top) around noon in March (90 days) and May (93 days) from 2001 to 2003. Error bars indicate standard error of estimate.

32.9mb, 균락 바로 위인 19m의 경우 약 35.5mb, 수관의 중간부인 14m의 경우 약 32.7mb, 9m의 경우 약 34.0mb, 4m의 경우 약 33.8mb, 그리고 지면 근처인 0.3m에서 약 40mb로 가장 높게 나타났다. 기온과 달리 수증기압은 항상 지면 근처에서 가장 높았는데 7-8월에 월 평균 최대값(약 25mb), 12-1월에 약 3mb의 최소값을 보였다. 기온의 연직 분포와 비교할 때, 수증기압은 잎의 출현과 관계없이 지면 근처에서 가장 높았고, 균락 상부에서 다소 증가하는 경향을 보였다. 수증기압이 가장 높았던 2001년 7월 0.3 m에서의 수증기압은 26.6mb로 19m의 25.1mb보다 1.5mb 컸으며, 가장 작은 2001년 1월의 경우 3mb와 2.7mb로 두 높이에서의 차이가 거의 없다(Fig. 7).

포화수증기압과 실제 수증기압의 차이인 포화증발산을 조절하는 주요 인자 중의 하나이다(Monteith, 1965). Fig. 8은 각 높이에서의 월 평균된 포화의 변화를 나타내며, 봄에 가장 크게 나타난다. 여름에는



**Fig. 7.** Same as in Fig. 6 for vapor pressure.

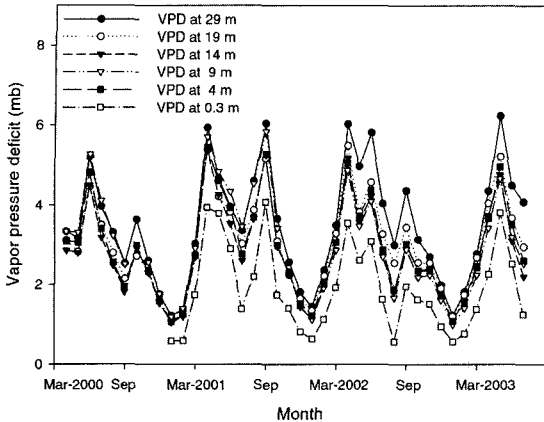


Fig. 8. The variations of monthly averaged vapor pressure deficit at the six levels.

기온이 높음에도 불구하고 잦은 강수로 인해 포차가 작았으며, 겨울에는 낮은 기온(따라서 낮은 포화수증기압)으로 포차가 가장 작았다. 높이 별로는 토양 증발이 활발한 지면 근처에서 포차가 가장 작았으며, 29m 높이인 대기중에서 포차가 가장 컸다.

4.4. 토양 온도

토양 온도는 타워에서 약 3m 남서쪽(plot 1)에 두 군데, 약 1m 남서쪽(plot 2)에 두 군데에서 토양 수분과 함께 관측되었다. 위치에 따른 30분 단위의 토양 온도의 차이는 <math>1^{\circ}\text{C}</math>였으며, 그 보다 큰 경우는 전체 자료의 약 2%였다. Park et al.(2003)은 광릉 혼합림에서 관측된 다섯 군데의 낮 평균 토양 온도의 차이가 <math>1^{\circ}\text{C}</math> 내외였음을 보였다. 네 군데에서 측정된 평균

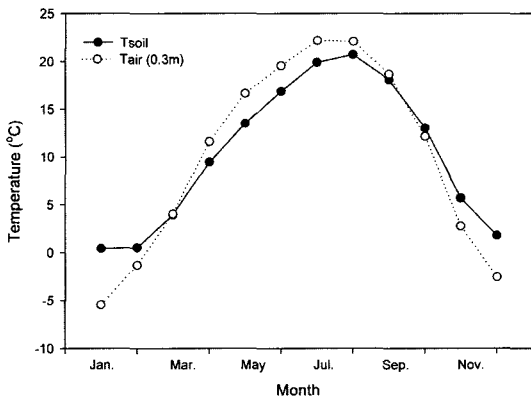


Fig. 9. The seasonal variations of monthly averaged soil and air temperature (0.3m high) over three years (2001 - 2003).

0-0.1m 토양온도의 범위는  $-1.9\sim 24.8^{\circ}\text{C}$ 로, 기온의 변화 폭보다 약  $30^{\circ}\text{C}$ 나 작았다. 2001년부터 2003년까지 평균된 월 평균 토양 온도와 0.3m 높이에서 관측된 기온의 계절 변화를 살펴보았다(Fig. 9). 평균 토양 온도는 1월에 약  $0^{\circ}\text{C}$ 인 반면, 평균 기온은 약  $-6^{\circ}\text{C}$ 로 연 중 가장 큰 차이를 보인다. 3월에 두 온도는 비슷하며, 그 이후에는 기온이 토양 온도보다 높다. 기온은 토양 온도보다 빠른 속도로 증가하여 7월에 최대값을 보이는 반면, 토양 온도는 느리게 증가하여 8월에 최대값을 보인다. 기온은 토양 온도보다 상대적으로 빠르게 감소하며 10월부터 토양 온도보다 낮아졌고, 12월에는 기온이 영하로 떨어졌으나 토양 온도는  $0^{\circ}\text{C}$ 에 머물렀다.

4.5. 나무 온도

여섯 지점의 30분 단위의 나무 온도는 겨울 낮에 가장 큰 차이 (<math>10^{\circ}\text{C}</math>)를 보였다. 이 차이가 일변화를 보이기 때문에 관측 오차이기보다는 잎이 없는 기간 군락 내 단과 복사의 불균질한 분포, 나무의 큰 열 용량, 관측 지점이 바라보는 방향(서향, 남향, 북향) 등의 차이 때문인 것으로 사료된다. 상대적으로 여름에 엽면적이 증가하거나 단과 복사가 없는 야간에는 온도의 차이가 작았다(<math>2^{\circ}\text{C}</math>). 여섯 지점의 평균 온도는  $-17.6\sim 32.1^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 보였고, 기온의 변동 폭보다는 작았고 토양 온도의 변동 폭보다는 매우 컸다. Fig. 10은 월 평균 나무 온도와 0.3 - 19m의 평균 기온의 연 변동이다. 평균 기온은 다섯 높이(19, 14, 9, 4 그리고 0.3m)의 산술 평균값이다. 월 평균 나무 온

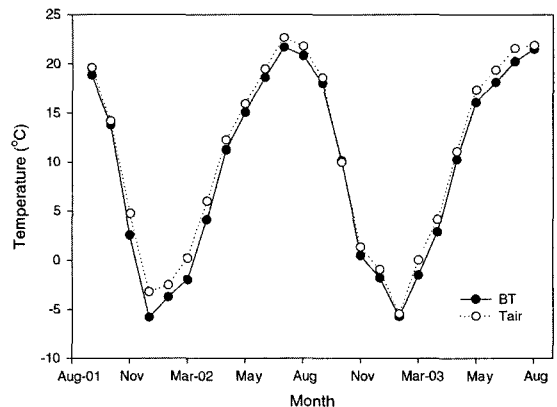


Fig. 10. The variations of monthly averaged bole temperature and air temperature (averaged for 0.3 - 19m layer) from September 2001 to August 2003.

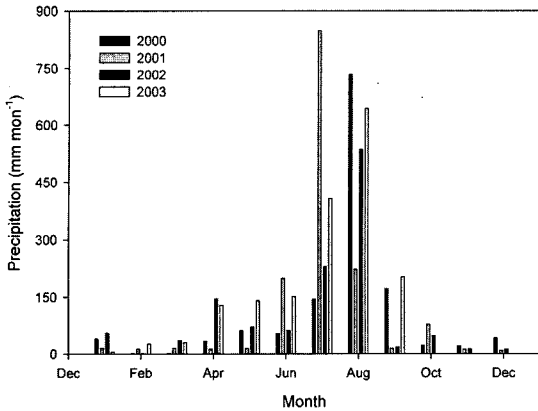


Fig. 11. The monthly accumulated precipitation in 2000 and 2003.

도는 기온 보다 다소 낮으나 기온의 변화와 잘 일치함을 보인다. Cho *et al.*(2003)은 광릉 혼합림에서 2001년 9월에서 12월의 기간 동안 나무 온도가 기온에 비해 9월을 제외하고 낮음을 보였다.

4.6. 강수량

2000년 9월부터 2003년 9월까지의 일 적산 강수량을 중부 임업 시험장 내에 설치된 AWS의 강수량 자료와 비교하였다. 선형 회귀 분석에 의하면 관측지의 강수량과 AWS의 강수량은 약 10% 내에서 일치하였다. 2002년 8월 5일(관측지: 179mm d<sup>-1</sup>, AWS: 101mm d<sup>-1</sup>)와 2003년 8월 24일(관측지: 159 mm d<sup>-1</sup>, AWS: 104mm d<sup>-1</sup>)을 제외하면 두 강수량 자료는 2% 내에서 일치하였다. 차이가 크게 나타난 두

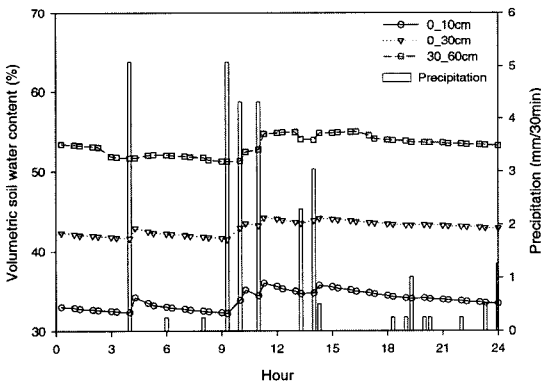


Fig. 12. The diurnal variations of soil water contents in three layers (0-0.1, 0-0.3 and 0.3 - 0.6m) at plot 1 with precipitation on July 22, 2002.

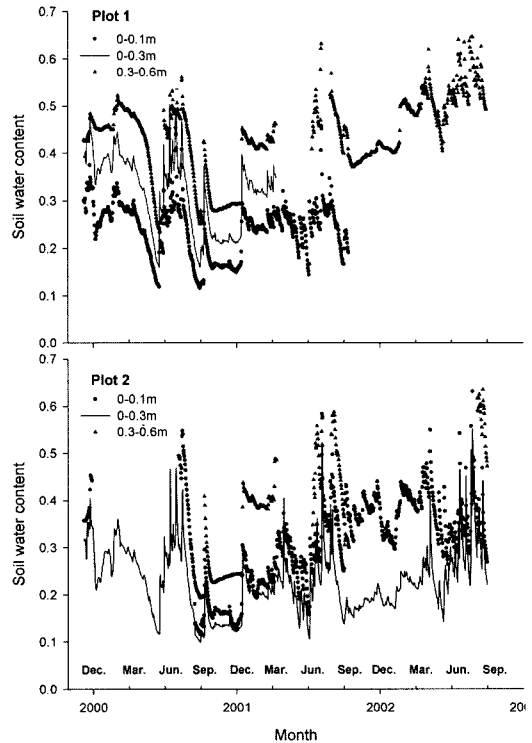


Fig. 13. Daily averaged soil water contents in the three layers (0-0.1, 0-0.3 and 0.3 - 0.6m) at Plot 1 and 2 from 2000 to 2003.

날의 경우, 관측지 강수량 자료의 손실은 없었기 때문에 집중호우의 국지적 변화에 의해 발생한 차이로 사료된다. 2000년부터 2003년까지의 연 강수량은 각각 1334, 1456, 1232, 1740mm로 2003년이 가장 많고, 7-8월의 강수량은 연간 총강수량의 평균 65%를 차지한다(Fig. 11). Lim *et al.*(2003)의 중부 임업 시험장에서 관측된 30년간의 강수 자료에 의하면 이 지역의 평균 강수량은 1,365mm이다.

4.7. 토양 수분

Fig. 12는 Plot 1에서의 강수에 따른 세 층에서의 토양 수분의 일 변동을 나타낸다. 지면에 가깝고 층이 얇을수록 토양 수분 변동이 강수에 상대적으로 빨리 반응하고, 변동폭도 크다. 그러나 지표에서 지하로의 물의 이동이 잘 나타나고 있지 않다. 이러한 수직적인 물의 유동이 적다는 것은 지표에 내린 비가 지하로 들어가지 못하고, 지표 유출을 통해 흘러나감을 의미할 수도 있다. Plot 1과 2의 두 관측 지점의 토양



수분은 다소 차이를 보였다(Fig. 13). Plot 1은 표층에서 심층으로 들어갈수록 수분함량이 40%에서 60%로 증가하는 반면에, Plot 2에서는 0-0.3m의 토양 수분이 지표(0-0.1m) 함량보다 적게 나타났다. 기기의 문제는 아닌 것으로 확인되었고, 0.1-0.3m 층에 macropore가 형성되어 있을 경우 수평방향으로 빠져나가 전체 공극에 남는 수분함량이 적게 나타날 수도 있다. 토양수분은 하층이 높을 수도 있고, 반대로 상층이 높을 수도 있는데, 관측된 수분분포의 정확한 파악과 품질관리를 위해서는 토양수분장력과 토양의 물리적 변수를 이용한 수분 플럭스의 계산이 필요하다.

## V. 적 요

2000년 4월부터 2003년 9월까지 광릉 산림 소유역의 플럭스 타워를 중심으로 관측된 미기후 자료(바람, 복사, 여섯 높이의 기온과 습도의 연직분포, 토양 및 나무 온도, 강수와 토양 수분)를 분석하였다. 지형의 영향으로 낮에는 상대적으로 강한 동풍이, 밤에는 약한 서풍인 산곡풍이 지배적이고 풍향의 빈도는 서풍이 두 배정도 많다. 하향 단파 복사는 여름 본순으로 인해 5월에 가장 크고, 생육기간의 알베도는 0.12-0.16이며 순복사는  $-100\sim-800\text{Wm}^{-2}$ 의 범위를 갖는다. 29m에서 관측된 월 평균 최고 및 최저 기온(수증기압)은 각각 7-8월에 약  $25^{\circ}\text{C}$ ( $\sim 25\text{mb}$ ), 12-1월에  $-6.0^{\circ}\text{C}$ ( $\sim 3\text{mb}$ )이다. 기온과 수증기압의 연직분포는 식생의 계절변화에 따라 변화한다. 월 평균 포차의 경우, 지면에서 가장 작고( $< 8\text{mb}$ ), 봄에 가장 크고 겨울에 가장 작다. 월 평균 토양 온도는  $0\sim 20^{\circ}\text{C}$ 의 범위를 보이고, 8월에 최대값이 나타난다. 월 평균 나무 온도는  $-5.8\sim 21.6^{\circ}\text{C}$ 이며, 그 변화는 월 평균 기온과 잘 일치한다. 연 강수량은 큰 경년 변동을 보이며, 7-8월의 강수량이 연 강수량의  $> 60\%$ 를 차지한다. 토양 수분은 관측장소에 따라 다른 연직분포를 보이며, 강수와 관련하여 물의 수평이동이 중요할 수 있음을 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 환경부의 차세대 핵심 환경 기술 개발 사업(Eco-Technopia 21 Project)과 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업(과제번호: 1- 8-2), 그리고 국립산림과학원 연구과제 “지

구환경변화에 대응한 장기생태연구”의 지원에 의해 수행되었다.

## 인용문헌

- Korea Meteorological Administration, 2002: Meteorological yearbook. 450pp. (in Korean)
- Kim, Y.-H., K.-S. Cho, H.-T. Kim, H.-H. Um, and B.-C. Choi, 2003: Characteristics of the seasonal variation of the radiation in a mixed forest at Kwangneung Arboretum, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment* **19**, 285-296. (in Korean with English abstract)
- Park, Y., H.-T. Kim, B.-Y. Lee, Y.-H. Kim, H.-H. Um, B.-C. Choi, and S.-B. Ryoo, 2003: The variation of soil heat flux within mixed forest in Kwangneung Arboretum, *Journal of Korean Meteorological Society* **39**, 621-629. (in Korean with English abstract)
- Chon, S.-K. and M. Shin, 1999: Effects of local climatic conditions on the early growth in Korean White Pine (*Pinus koraiensis* Sieb. et Zucc.) Stands Relation between annual increment and local climatic conditions-, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **1**, 47-57. (in Korean with English abstract)
- Shin, M. and Y.-C. Kim, 2002: Effects of local climatic conditions on the early growth in progeny test stands of Korean White Pine, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **4**, 1-11. (in Korean with English abstract)
- Choi, J.-H., Y.-H. Lee, and J.-T. Choi, 2002: The effect of meteorological data assimilation including AWS data on the short-term prediction, Korean Meteorological Society, 25-26, April, Taegu. (in Korean)
- Choi, T., B. Lee, H. Lee, and J.-S. Shim, 2004: Surface Flux Measurements at King Sejong Station in West Antarctica: I. Turbulent Characteristics and Sensible Heat Flux, *Ocean and Polar Research* **26**, 453-463. (in Korean with English abstract)
- Cho, K., Y. Park, B. Lee, and B. Choi, 2001: Characteristics of canopy heat storage within a Kwangneung Arboretum in Korea from September to December 2001, *Korean Journal of Atmospheric Sciences* **6**, 1-9.
- Choi, T., J. Kim and J.-H. Lim, 2003: CO<sub>2</sub> exchange in Kwangneung broadleaf deciduous forest in a hilly terrain in the summer of 2002, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 70-80.
- Foken, Th. and B. Wichura, 1996: Tools for quality assessment of surface-based flux measurement, *Agricultural and Forest Meteorology* **78**, 83-105.
- Kim, J., W. Kim, C. Cho, B. Choi, H. Chung, B. Lee, K. Kim, K. Kim, M. Kim, B. Lee, D. Lee, G. Lee, J. Lee, J. Lim, J. Oh, E. Park, J. Shim, J. Yun, and C. Rho, 2002,

- KoFlux: A new tool to study the biosphere-atmosphere interactions in Asia, in *Ecology of Korea* edited by D. Lee *et al.*, 215-229.
- Lim, J.H., J.H. Shin, G.Z. Jin, J.H. Chun, and J.S. Oh, 2003: Forest structure, site characteristics and carbon budget of the Kwangneung Natural Forest in Korea, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 101-109.
- Lowry, W.P. and P.P. Lowry, 1989: Fundamentals of Biometeorology: Interactions of Organisms and the Atmosphere, Vol. : The Physical Environment, Peavine Publications McMinnville, Oregon, 310pp.
- Monteith, J.L. 1965: Evaporation and the environment. In the movement of water in living organisms, XIXth Symposium. Soc. of Exp. Biol., Swansea, Cambridge University Press.
- Moon, B.-K., S.-B. Ryoo, Y.-H. Youn, J. Kim, and J.-H. Lim, 2003: Field intercomparison and calibration of net radiometers, *Korean Journal of Agricultural and Forest Meteorology* **5**, 128-137.
- Moore, K.E., D.R. Fitzjarrald, R.K. Sakai, M.L. Goulden, J.W. Munger, and S.C. Wofsy, 1996: Seasonal variation in radiative and turbulent exchange at a deciduous forest in central Massachusetts, *Journal of Applied Meteorology* **35**, 122-134.
- Nakai, Y., K. Kitamura, and S. Suzuki and S. Abe, 2003: Year-long carbon dioxide exchange above a broadleaf deciduous forest in Sapporo, Northern Japan, *Tellus* **55B**, 305-312.
- Park, Y. 2001: Evapotranspiration and its controlling factors in the two adjacent forests in Kwangneung Arboretum, Korea, Master thesis. Department of Atmospheric Sciences. Yonsei University, Seoul, Korea. 45 pp.