한국대기환경학회지 제 19 권 제 3 호
J. KOSAE Vol. 19, No. 3 (2003) pp. 285~296
Journal of Korean Society for Atmospheric Environment

광릉수목원 혼합림에서 복사 에너지의 계절 변화 특성

Characteristics of the Seasonal Variation of the Radiation in a Mixed Forest at Kwangneung Arboretum

김연희* · 조경숙[1] · 김현탁 · 엄향희 · 최병철[1]
기상청 기상연구소 응용기상연구실, [1]기상청 기상연구소 지구대기감시관측소

(2003년 1월 9일 접수, 2003년 5월 7일 채택)

Yeon-Hee Kim*, Kyung-Sook Cho[1], Hyun-Tak Kim,
Hyang-Hee Um and Byoung-Cheol Choi[1]
Applied Meteorology Research Laboratory, Meteorological Research Institute, KMA
[1]*Korea Global Atmosphere Watch Observatory, Meteorological Research Institute, KMA*

(Received 9 January 2003, accepted 7 May 2003)

Abstract

The measurement of the radiation energy, trunk temperature, leaf area index (LAI), air temperature, vapor pressure, and precipitation has been conducted under a mixed forest at Kwangneung Arboretum during the period of 2001. Characteristics of the diurnal and seasonal variation of the radiative energy were investigated. The aerodynamic roughness length was determined as about 1.6 m and the mean albedo was about 0.1. The downward shortwave radiation was linearly correlated with the net radiation and its correlation coefficient was about 0.96. From this linear relation, the heating coefficient was calculated and its annual mean value was about 0.21. The albedo and heating coefficient was varied with season, surface characteristics, and meteorological conditions. The diurnal and seasonal variations of radiation energy were discussed in terms of the surface characteristics and meteorological conditions. In the daytime, during clear skies, net radiation was dominated by the shortwave radiation. In presence of clouds and fog, the radiation energy was diminished. At night, the net radiation was entirely dominated due to the net longwave radiation. There was no distinct diurnal variation in net radiation flux during the overcast or rainy days. The net radiation was strongest in spring and weakest in winter. The seasonal development in leaf area was also reflected in a strong seasonal pattern of the radiation energy balance. The timing, duration, and maximum leaf area and trunk temperature were found to be an important control on radiation energy budget. The trunk temperature was either equal or warmer than air temperature during most of the growing season because the canopy could absorb a substantial amount of sunlight. After autumn (after the middle of October), the trunk temperature was consistently cooler than air temperature.

Key words : Net/shortwave/longwave radiation, Trunk temperature, Albedo, Heating coefficient, LAI

* Corresponding author
Tel : +82-(0)2-846-2850, E-mail : kyh@metri.re.kr

1. 서 론

이상적인 지표와 대기 시스템에서의 복사(radiation) 에너지 수지는 단파(shortwave)의 산란 · 반사(28%)와 지표와 대기로부터 장파(longwave) 방출(72%)의 합이 태양 복사 에너지와 균형을 이룬다고 알려져 있다(Arya, 1988). 실제 지표에서는 순단파(net shortwave) 복사가 순장파(net longwave) 복사보다 커서 지표와 대기 사이의 복사 에너지 수지는 균형 상태가 아니다. 이러한 지표로부터 대기로의 가용 에너지는 현열과 잠열로 변환되어 대기 운동에 원동력을 제공한다.

복사는 군락 내에서의 에너지와 광합성에 중요한 영향을 주어 식물의 성장 과정에 주된 역할을 한다. 특히 단파 복사는 군락(canopy) 내의 주된 에너지 근원이다(e.g. Heitor *et al.*, 1991). 장파 복사는 낮 시간의 에너지 수지에 중요한 요소이나 주로 밤 시간의 에너지 수지를 지배한다. 국외의 많은 연구에서는 군락 내부에서의 복사의 흡수, 반사, 투과, 방출에 의해 군락내의 복사 전달 과정은 아주 복잡할 뿐 아니라 군락의 구조 및 기상 상태 또한 복사에 영향을 미친다고 알려져 있다(e.g. Cho *et al.*, 2002; Hassika and Berbigier, 1998; Flint and Childs, 1987). 그러나 국내의 경우는 산림에서의 복사 에너지 변화 특성에 관한 연구가 많지 않다.

순복사는 지표면에서 복사 수지의 결과이다. 낮 시간의 순복사는 주로 단파 복사가 기여하여 지표면으로 향하는 반면, 밤 시간에는 주로 지표면에서부터 대기로 에너지를 방출한다. 복사 에너지의 특성은 기상 상태나 지표면의 상태와 시간에 따라 달라질 수 있다(김연희 등, 2002). 알베도(albedo)는 입사되는 단파 복사에 대한 반사되는 단파 복사의 비로 태양 고도각, 구름, 지표면 상태, 대기 혼탁도 등의 영향을 받는다. 특히 산림에서의 알베도는 위에서 언급된 요인 이외에 군락의 구조, 수종, 군락 높이, 잎 면적 등의 생태학적 요인의 영향을 받는다(e.g. Schmid *et al.*, 2000; McCaughey, 1987).

군락 내에서의 복사 에너지의 흡수, 반사, 전달, 발산은 순복사 강도와 알베도 그리고 군락 내의 나무 온도와 잎 면적 등의 변화를 통하여 감지할 수 있다(Baldocchi *et al.*, 1997). 군락 위에서의 가용 에너지는 순복사 에너지에서 군락의 열 저류항(canopy storage term)과 토양열 플럭스를 뺀 값으로 현열과 잠열 플럭스의 합과 평형을 이룬다(Verma *et al.*, 1986). 이 중 군락의 열 저류항은 측정이 어렵고 다른 에너지 항에 비해 작다고 알려져 있다. McCaughey (1985)는 온타리오(Ontario) 주의 Petawawa의 혼합림에서 군락 열 저류항을 조사하여, 군락이 건조하고 순복사 에너지가 강할 때 열 저류항이 순복사의 2~3%이나, 밤 시간과 일출 및 일몰 시간에는 증가하며, 흐린 날 또는 비가 온 직후에는 그 양이 순복사의 10% 정도에 이른다고 하였다. 이처럼 복사 에너지와 군락 열 저류의 관측은 기상 상태에 따른 지표와 대기 상호간의 에너지 교환을 설명하기 위해 필수적이므로 본 연구에서는 나무 온도 측정을 통하여 군락 열 저류 측정의 기반을 확립하고, 상 · 하향 단 · 장파 복사와 순복사, 알베도, 엽 면적 지수(LAI; Leaf Area Index), 나무 온도 자료의 일변화와 계절 변화 및 기상 요소와의 관계 조사를 통하여 혼합림에서의 복사 에너지 특성에 대해 살펴보고자 한다.

2. 관측 장소 및 시스템

2.1 관측 장소

기상연구소에서는 산림에서의 물과 에너지 플럭스의 장기 관측을 위하여 1997년에 플럭스 관측탑을 설치하여 1998년 10월부터 2002년 11월까지 상 · 하향 단파(태양) 및 장파(지구) 복사 플럭스, 토양열 플럭스, 산림내 나무 온도 및 기상 요소 등의 장기 관측을 수행하였다. 플럭스 관측탑은 광릉 국립 수목원 내의(37°45′N, 127°9′E) 해발 342 m 고도(물푸레봉)에 위치하고 있다. 관측탑은 약 15° 경사의 복잡 지형에 위치하고 있으며, 미기상학적 플럭스 관측 시스템이 잘 갖추어져 있다. 이 관측지는 혼합림 지역으로 주된 수종은 *Pinus koraiensis*이며, 군락의 높이는 약 16 m이다.

2.2 관측 시스템

그림 1은 관측탑의 위치 및 모식도를 보여준다. 본 연구에서 사용된 관측 기기는 저속 반응 기기(slow response instrument)이다. 높이에 따라 풍향,

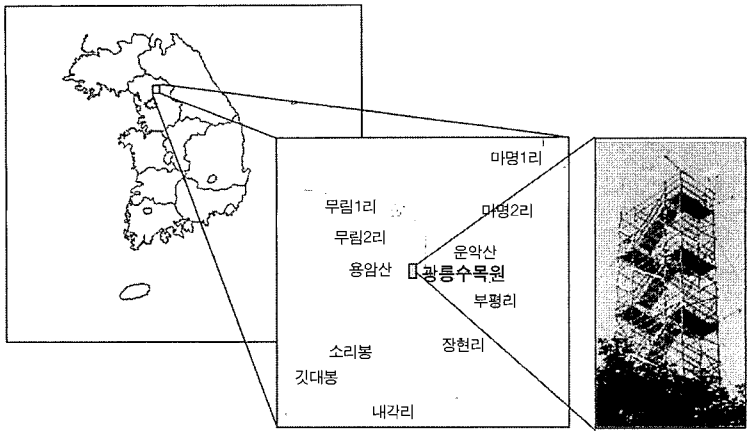

Fig. 1. The location and photography of micrometeorological measurement tower at Kwangneung Arboretum.

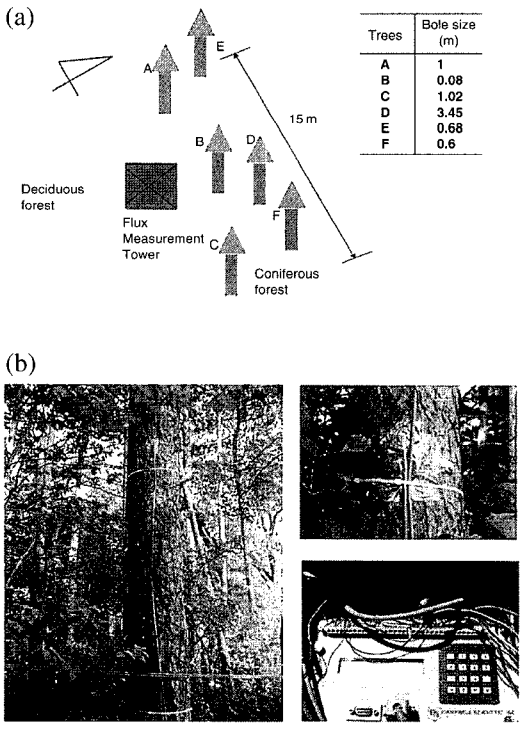

Fig. 2. The locations of sampled trees within a canopy (a) and the canopy heat storage measurement system (b).

풍속계와 통풍식 온·습도계 (HMP45C, Campbell Scientific Instrument, 이하 C.S.I.)를 군락권 경계층 내 (24 m), 군락 바로 위 (16 m), 수목 내 (9 m)에 설치하였다. 그리고 관측탑 상부인 31 m 고도의 남향에는 순복사계 (Net Radiometer; CNR-1, Kipp & Zonen Co.)를 이용하여 상·하향 단·장파 복사를 관측하였다. 나무 온도는 관측탑 주변의 6개 침엽수의 1.5와 2.5 m 높이에 열전대 (thermocouple, C.S.I.)를 나무의 4 cm 깊이에 삽입하여 측정하였다 (그림 2). 나무 둥치 길이는 0.6부터 3.45 m로 군락 내 대표적인 성장 상태를 보여 주었다. LAI는 엽면적지수측정기 (LAI-2000 Plant Canopy Analyser, C.S.I.)를 이용한 관측탑 주변 9개 지점의 관측 평균값이다. 2001년 동안 측정된 LAI는 총 14번이었으나 LAI 값의 공간 대표성을 위하여 같은 장소에서 3번 이상 측정되지 않은 LAI 값은 분석에서 제외시켰다. 측기에 필요한 전원은 태양 전지판과 밧데리를 이용하여 공급하였으며, 매 30초마다 생산되는 원시 자료는 30분 주기로 평균되어 자료 집록기 (CR10X, CR23X, C.S.I.)에 집록된다. 본 연구에서 사용된 자료는 광릉 수목원 내의 2001년의 복사, 나무 온도, LAI, 온·습도와 자동 기상 관측 장비로 관측된 기온과 강수량이다.

산림 구조 특성을 대표하는 조도 길이 (roughness length)를 조사하기 위하여 관측탑 31 m 고도의 삼차원 풍향 풍속계로부터 측정된 평균 풍속과 마찰속도가 대수 함수 형태의 바람장 식에 적용되었다. 영면 변위 (zero-plane displacement)를 군락 높이의 0.8배라고 가정했을 때 (Oke, 1987) 계산된 조도 길

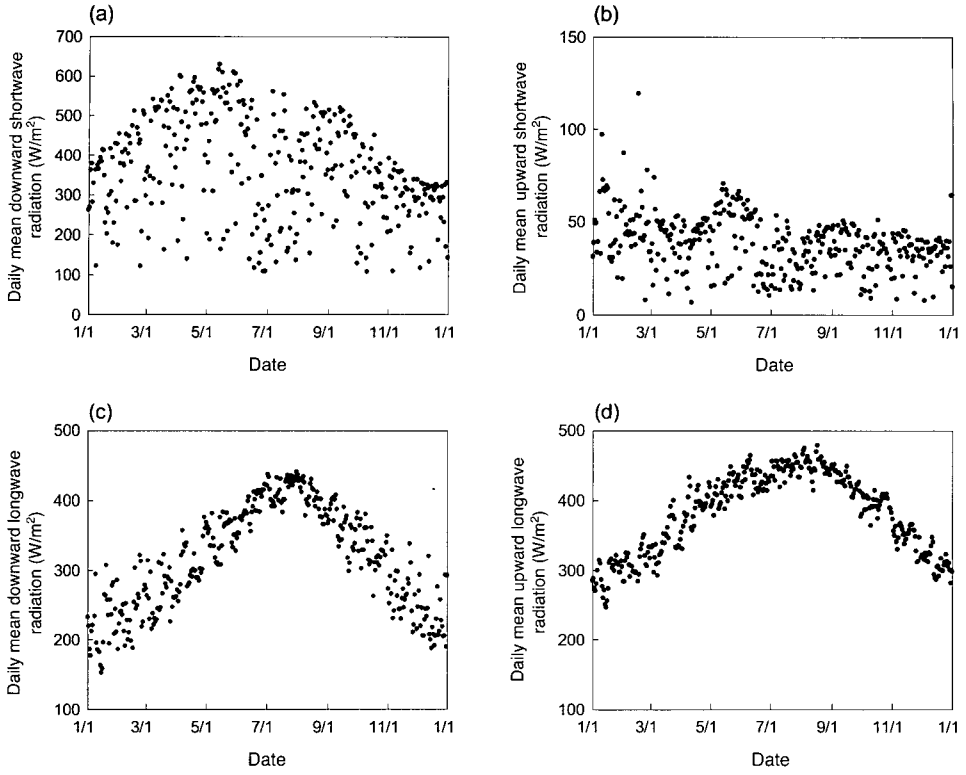

Fig. 3. The time variation of (a) daily mean downward shortwave radiation, (b) daily mean upward shortwave radiation, (c) daily mean downward longwave radiation, and (d) daily mean upward longwave radiation.

이는 약 1.6 m이다. 이 값은 초지 (0.02～0.1 m)나 농작지 (0.04～0.2 m)에 비해 현저히 큰 값으로 경계층의 물리적 특성이 산림에 의해 달라짐을 짐작할 수 있다. 대수 함수 바람장은 중립인 조건에서만 적용 가능하므로 약간의 오차가 있을 수 있다. 또한 지형에 의해 유발된 흐름 특성도 보다 정확한 분석을 위해서는 추가되어야 하나 계산된 값은 다른 연구와 유사하다 (Szeicz, 1974; Sutton, 1953).

3. 관측 결과 및 분석

3.1 단파와 장파 복사

본 연구에서는 일출과 일몰시 낮은 태양 고도각에 의한 관측 오차를 줄이기 위하여 하향 단파 복사 (*Rs_dn*)가 100 W m^{-2} 이상인 자료만을 사용하였다 (Park, 2001). 그림 3은 일평균 상 · 하향 단파와 장파 복사의 계절 변화를 보여준다. 하향 단파 복사 (*Rs_dn*)의 경우 (그림 3a), 그 강도는 관측 기간 동안 평균 약 370 W m^{-2}이고 봄에는 평균 약 460 W m^{-2}, 여름에는 360 W m^{-2}, 가을에는 340 W m^{-2}이고, 겨울에는 320 W m^{-2}으로 계절별로 다르다. 다른 연구에서는 태양 고도가 최고인 여름에 하향 단파 복사가 가장 강하였으나 (e.g. Heitor *et al.*, 1991) 본 연구에서는 봄철의 하향 단파 복사가 가장 강하고 다음으로 여름, 가을, 겨울의 순서를 보인다. 이는 여름철 (6월부터 8월까지)의 빈번한 강수 (장마 기간)와 대기 중의 많은 구름이 하향 단파 복사를 차단시켰기 때문이다. 각 계절별로 평균 값 이하의 하향 단파 복사가 나타난 날은 기상 상태가 좋지 않음을 의미하고 그 빈도수는 여름에 더 많다. 그림 3b의 상향 단파 복사 (*Rs_up*)는 뚜렷한 계절 변화를 보이지는 않으나 봄과 겨울이 다른 계절에 비해 다소 강하였다. 이는 잎 성장 이전인 겨울과 봄에 그 반

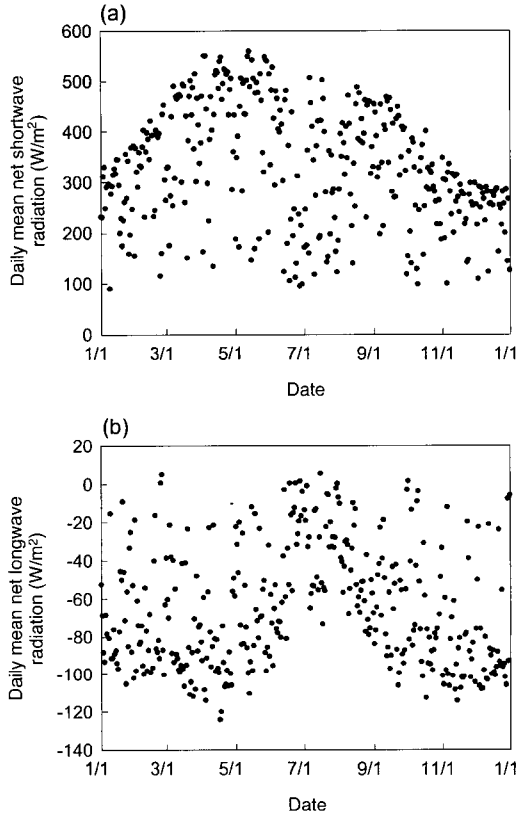

Fig. 4. The time variation of (a) daily mean net shortwave radiation and (b) daily mean net longwave radiation.

사가 다소 커졌고 여름철에 다른 계절에 비해 많은 구름이 입사된 복사를 반사시키지 않고 대기 중에 차폐시켰기 때문이다. 하·상향 장파 복사의 경우(그림 3c, d)는 장마철 이전에 증가하다가 장마철 이후에 감소하는 형태를 보여 여름, 가을, 봄, 겨울의 순서로 감소한다(Heitor *et al.*, 1991; Andre and Viswanadham, 1983). 하향 장파 복사(*Rl_dn*)의 크기는 상향 장파 복사(*Rl_up*)보다 작고, 그 차이는 여름철에 최소이다. 구름은 장파 복사에 대해서 수증기보다도 흡수율이 강하며 두꺼운 구름은 근사적으로 흑체로 간주될 수 있다. 따라서 구름낀 날이 많은 여름철에는 맑은 날이 많은 다른 계절에 비해 하향 장파 복사량이 많기 때문이다. 하향 장파 복사의 최대값(약 440 W m^{-2})은 8월 초경에 나타난 반면, 상향 장파 복사의 최대값(약 480 W m^{-2})은 8월 중순경에 나타나 보름 정도 지연되었다. 여름철의 상·하향 장파 복사는 평균 440, 400 W m^{-2}로 하향 단파 복사(평균 360 W m^{-2})보다 크다. 즉 장파 복사는 다른 계절에 비해 여름철에 대기로 에너지를 공급하는데 중요한 역할을 함을 알 수 있다.

그림 4는 일평균 순단파 복사(*Sn*)와 순장파 복사(*Ln*)의 계절 변화를 보여준다. 상향 단파 복사보다는 하향 단파 복사의 강도가 현저하게 크므로 그림 4a의 순단파 복사의 변동은 하향 단파 복사(그림 3a)와 유사하여 봄에 최대값(약 420 W m^{-2}), 겨울에 최소값(약 280 W m^{-2})을 보인다. 순장파 복사(그림 4b)는 상·하향 장파 복사의 차이가 가장 작은 여름철에 가장 크고, 그 차이가 가장 큰 봄에 가장 작아서 다른 연구와 잘 부합된다(e.g. 이희춘, 2001; Heitor *et al.*, 1991; Riahi *et al.*, 1989).

3. 2 복사 성분별 비교

Monteith and Szeicz (1961)은 맑을 때 토양과 농작물 위에서 관측된 순복사는 하향 단파 복사와 선형적인 관계임을 다음 식으로 설명하였다.

$$Rn=(1-\alpha)/(1+\beta)\times(Rs_dn)+Ln \quad (1)$$

여기서 *Rn*은 순복사량, α는 지표면 반사인 알베도, $\beta=-dLn/dRn$는 지표의 가열 계수, *Rs_dn*은 하향 단파 복사량, *Ln*은 순장파복사량이다. $(1-\alpha)/(1+\beta)$는 운량에 독립적이고 *Ln*은 운량에 강하게 의존한다. 운량과 연관된 순복사와 하향 단파 복사와의 상관 관계는 다른 연구에서도 많이 조사되어 있으며, Nielsen *et al.* (1981)는 $Rn=0.65\times Rs_dn-28.4$, Silva and Rosa (1985)는 $Rn=0.68\times Rs_dn-27.5$ (상관계수(r) = 0.96)라는 선형 회귀식을 제시하였다. 하향 단파 복사가 100 W m^{-2} 이상일 때는 대기 중 구름의 영향이 다소 제거되었다고 가정할 수 있으므로 본 연구에서의 하향 단파 복사와 순복사의 선형 회귀식은 다음과 같이 나타났다(그림 5a).

$$Rn=0.74\times(Rs_dn)-7.7 \quad (2)$$

위 식에서 순복사와 하향 단파 복사는 서로 면밀하게 관련되어 그 상관 계수는 0.96으로 순복사는 하향 단파 복사에 의해 약 92% 설명되었다. 즉 순복사는 하향 단파 복사와 직접적으로 연관되었고 다른 연구 결과와도 잘 부합되었다. α는 군락에서 하

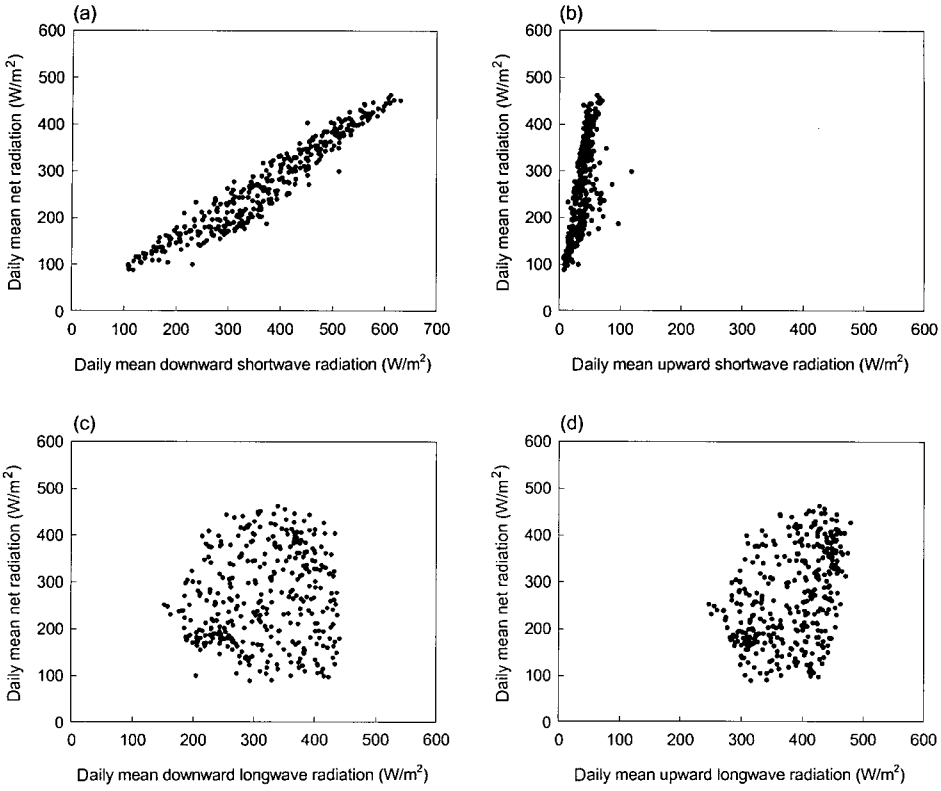

Fig. 5. The relationships between daily mean (a) net and downward shortwave radiation, (b) net and upward shortwave radiation, (c) net and downward longwave radiation, and (d) net and upward longwave radiation.

향과 상향 단파 복사의 비로써 구해진 값으로 연평균 α는 약 0.103이었다. 식 (1)과 (2)로부터 가열 계수를 계산할 수 있어 β는 약 0.21이었다. 계절별로 α는 봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 0.095, 0.079, 0.105, 0.132이고 β는 0.22, 0.24, 0.21, 0.17이다. 알베도가 낮을수록 입사된 단파 복사가 군락이나 대기 가열에 사용되어 가열 계수는 커진다. Monteith and Szeicz (1961)는 0.15 (풀 위)부터 0.41 (건조한 토양 위), Nielsen *et al.* (1981)은 0.15 (풀 위), Silva and Rosa (1985)는 0.16 (온실 안)의 가열 계수 값을 제시하였다. 가열 계수는 대기 상태뿐 아니라 지표 조건에 따라 변하였다. 본 연구에서의 가열 계수가 다른 연구 결과보다 다소 크고 계절별로 차이를 보이는 것은 군락의 구조와 성장 상태의 차이에 의한 것으로 사료되며, 이에 대한 면밀한 연구가 필요하다.

그림 5b, 5c, 5d에서는 같은 조건에서 일평균 순복사에 대한 일평균 하향 단파 복사, 상향 단파 복사, 하향 장파 복사, 상향 장파 복사의 관계를 보여준다. 선형 회귀를 따르면 순복사에 대한 하향 단파 복사의 상관 계수는 0.96, 상향 단파 복사의 경우에는 0.65, 상향 장파 복사의 경우에는 0.41로 순복사는 하향 단파 복사에 의해 92%, 상향 단파 복사에 의해 42%, 상향 장파 복사에 의해 16%가 설명되고 하향 장파 복사에 의한 회귀는 95% 신뢰 구간에서 통계적으로 유의하지 않다. 즉 순복사는 장파 복사보다는 단파 복사에 의해 주로 설명된다.

앞에서도 제시하였듯이 계절에 따라 기상과 지표 상태가 변화하므로 각 복사 성분들도 이에 따라 계절 변화를 보인다. 전체와 계절별 자료에 대한 순복사와 각 복사 성분들간의 상관 계수를 알아보았다 (표 1). 전체 자료에 대해 순복사는 복사 성분들과 양의 상관 관계를 보이고 하향 단파 복사, 상향 단

Table 1. The correlation coefficients between the net radiation and the shortwave and longwave radiation components. All correlation coefficients are statistically significant at the 95% confidence level.

	All	Spring	Summer	Fall	Winter
Rs_dn	0.96	0.99	0.99	0.94	0.93
Rs_up	0.65	0.86	0.93	0.78	0.62
Rl_dn	0.12	−0.24	−0.46	0.26	−0.40
Rl_up	0.41	0.33	0.66	0.68	−0.05

파 복사, 상향 장파 복사, 하향 장파 복사의 순서로 설명된다. 계절별로는 겨울을 제외한 모든 계절에 걸쳐 하향 단파 복사, 상향 단파 복사, 상향 장파 복사, 하향 장파 복사의 순서로 순복사가 설명된다. 겨울에는 구름에 의한 장파 복사의 산란과 흡수가 현저히 감소하기 때문에 겨울에는 상향 장파 복사보다 하향 장파 복사의 상관 계수가 더 크다. 하향 단파 복사의 경우에는 순복사와 양의 상관 관계를 보이고 그 상관 계수는 봄과 여름에 크고 겨울에 가장 작다. 상향 장파 복사의 경우에도 양의 상관 관계를 보이고, 상관 계수는 여름에 가장 크고 겨울에 가장 작다. 하향 장파 복사의 경우에는 가을을 제외한 모든 계절에서 순복사와 음의 상관 관계를 보인다. 앞에서도 언급되었듯이 하늘이 구름으로 덮여져 있는 흐린 날이 많은 여름에 하향 장파 복사량이 많이 때문에 상관 계수의 크기는 여름에 가장 크고 봄과 가을에 작다. 상향 장파 복사의 경우에는 겨울을 제외한 모든 계절에서 순복사와 양의 상관 관계를 보인다. 그 계수는 가을에 가장 크고 겨울에 가장 작다. 지표면은 장파 복사에 대해 근사적으로 흑체로 간주될 수 있고 식생이 거의 존재하지 않는 겨울철의 상향 장파 복사는 지표면 온도에 비례한다. 그러므로 지표면 온도가 가장 낮은 겨울철에 그 상관 계수가 가장 낮다. 그림 3, 4에서도 보였듯이

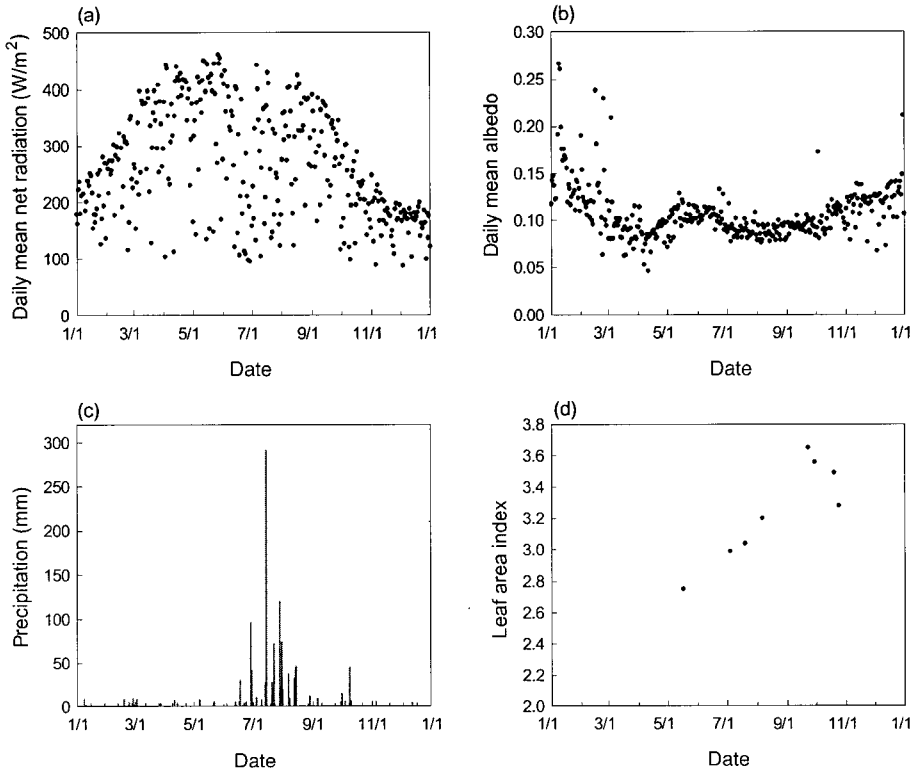

Fig. 6. The time variation of (a) daily mean net radiation, (b) daily mean albedo, (c) daily precipitation, and (d) leaf area index in a mixed forest at Kwangneung Arboretum at 2001.

순복사의 변화는 단파 복사의 변화에 의해 주로 설명되고 여름철에 흑체 역할을 하는 구름에 의하여 단파와 장파 복사의 순복사와의 상관성이 높다.

3. 3 산림에서의 순복사, 알베도, 엽 면적, 나무 온도의 특성

그림 6은 일평균 순복사, 알베도, LAI와 일별 강수량을 보여준다. 순복사량(그림 6a)은 5월에 최대치를 보여 약 460 W m^{-2}이다. 평균 하향 단파 복사는 모든 계절에 약 150 W m^{-2} 정도로 거의 비슷한 반면 순복사는 봄에 가장 크고(약 340 W m^{-2}), 겨울에 가장 작다(약 200 W m^{-2}). 여름에 순복사량이 감소하는 이유는 구름에 의한 효과로 볼 수 있으며, 이는 그림 6c의 강수량 분포로 설명할 수 있다. 즉 흐리거나 비가 오는 날은 하향 단파 복사가 산란될 뿐 아니라 상향 장파 복사량이 많아지기 때문이다. 순복사의 변화는 하향 단파 복사의 계절 변화와 유사하여 하향 단파 복사에 의해 주로 설명된다. 알베도(그림 6b)는 1월에 최대이고 모든 계절에 걸쳐 약 0.1 정도이다. 알베도의 계절 변화는 그림 3b의 상향 단파 복사의 변화와 유사하여 겨울에 최대이고 여름에 최소이다. 5월 중순경까지의 잎 성장의 초기 기간 동안 알베도는 약 0.08부터 거의 0.13까지 빠르게 증가한다. 5월 말부터 8월 말까지의 나무의 생장 기간은 최고 성숙 기간으로 계속 유지되므로 알베도가 서서히 감소한다. 알베도의 감소는 단파 복사의 반사보다는 흡수가 많음을 의미하고, 이는 잎 성장과 더불어 잎의 채도(darkness) 증가와 산림 안에서의 다방향 반사에 따른 복사의 트랩에 기여한다(Johnes, 1992). 이런 현상은 5월 말부터 9월 말경까지의 LAI(그림 6d)의 증가로부터 알 수 있다. 9월 중순경의 알베도의 약한 증가는 낙엽 전의 잎의 단풍 현상 때문에 나타난 것으로 사료된다(Schmid *et al.*, 2000). 9월 중순 이후로 잎 성장은 감소하고 10월 초부터 알베도는 점차 증가하여 겨울에 최대이다. 즉 알베도는 태양 고도각, 엽 면적, 기

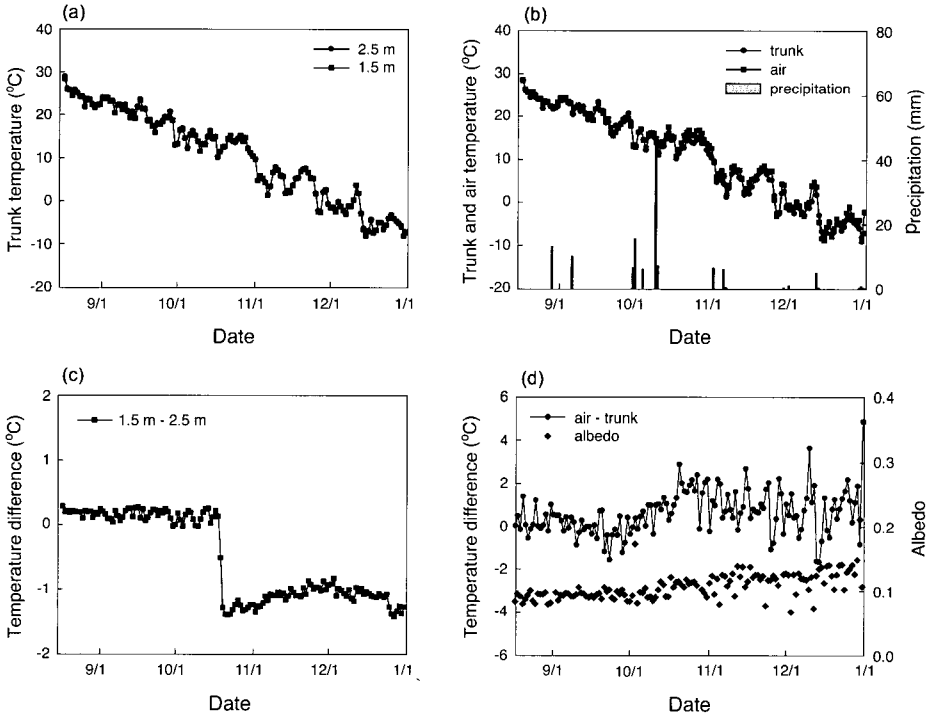

Fig. 7. The time variation of (a) daily mean trunk temperature at a altitude of 1.5 m and 2.5 m, (b) daily mean trunk temperature, air temperature, and precipitation, (c) daily mean trunk temperature difference between at 1.5 m and 2.5 m, and (d) the difference between daily mean air and trunk temperature and the daily mean albedo.

상 상태, 계절에 따라 상당한 차이를 보인다.

나무 온도는 8월 17일 이후부터 여섯 개의 침엽수림의 1.5 m와 2.5 m 높이에서 측정되었다. 그림 7a의 높이별 나무 온도의 변화는 상관 계수가 0.999로 유사하였다. 나무 온도와 기온의 변화도 그 상관계수가 0.99 정도로 거의 일치하였다(그림 7b). 강수가 있었던 날의 나무 온도는 맑은 날에 비해 낮아 기상 상태에 민감하게 반응하였다. 높이별 일평균 나무 온도 차이(그림 7c)는 10월 중순까지는 1.5 m 높이의 나무 온도가 2.5 m 높이의 경우보다 약 0.2 ℃ 정도 크지만, 10월 19일 이후로는 1.5 m 높이의 나무 온도가 2.5 m 높이 보다 더 큰 차이로 작다. 태양 고도가 겨울로 갈수록 낮아져 높이가 높을수록 태양 빛을 흡수할 수 있는 가능성이 더 클 뿐 아니라 군락의 형태 및 구조와도 연관이 있을 것으로 사료되며 이에 대한 보다 자세한 연구가 요구된다. 일평균 기온과 나무 온도의 차이를 살펴보면(그림 7d) 그 크기는 나무 온도가 약간 작았다. 이는 산림이 태양 빛을 어느 정도 흡수하는 능력을 가지고 있기 때문이다(Baldocchi *et al.*, 1997). 10월 초까지는 기온과 나무 온도의 차이는 거의 없으나 10월 초부터 알베도와 온도 차이는 증가하기 시작하여 10월 말경부터는 기상 상태에 따라 변동하며 온도 차이는 양의 평균값을 보인다.

3. 4 복사 에너지 수지

그림 8은 계절별(겨울, 봄, 여름, 가을)로 한달씩(2, 5, 7, 9월)의 관측 시간별로 평균된 복사 에너지의 일변화를 보여준다. 하향 단파 복사는 일출 이후로 증가하여 태양 고도가 가장 높은 정오에 최대값을 보이고 점차 감소하여 일몰 이후에는 존재하지 않는다. 상향 장파 복사는 일출 이후부터 일몰 이전까지 약하게 존재하여 그 값은 모든 계절에 걸쳐 하향 단파 복사의 약 10%이다. 장파 복사는 일출 이후부터 일몰 이전까지 약간의 증가를 보이나 거의 일정하게 유지된다. 일별 하향 단파 복사는 각각 약 130, 220, 140, 170 W m^{-2} day^{-1}으로 봄에 가장 크고 겨울에 가장 작았다. 일별 상향 장파 복사는

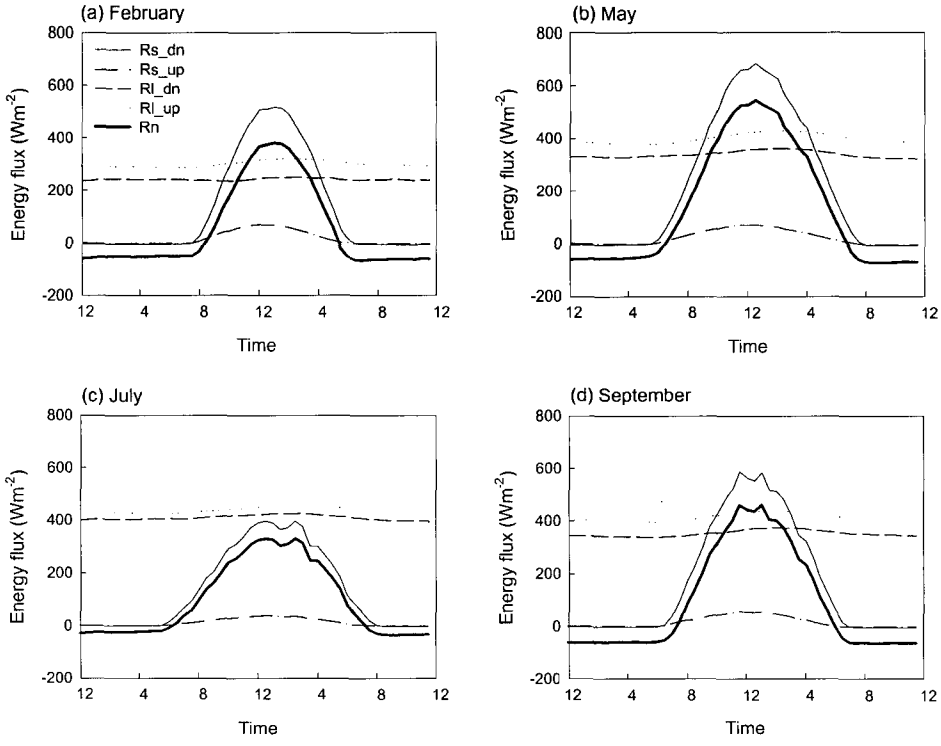

Fig. 8. The radiation energy budget during (a) February, (b) May, (c) July, and (d) September 2001.

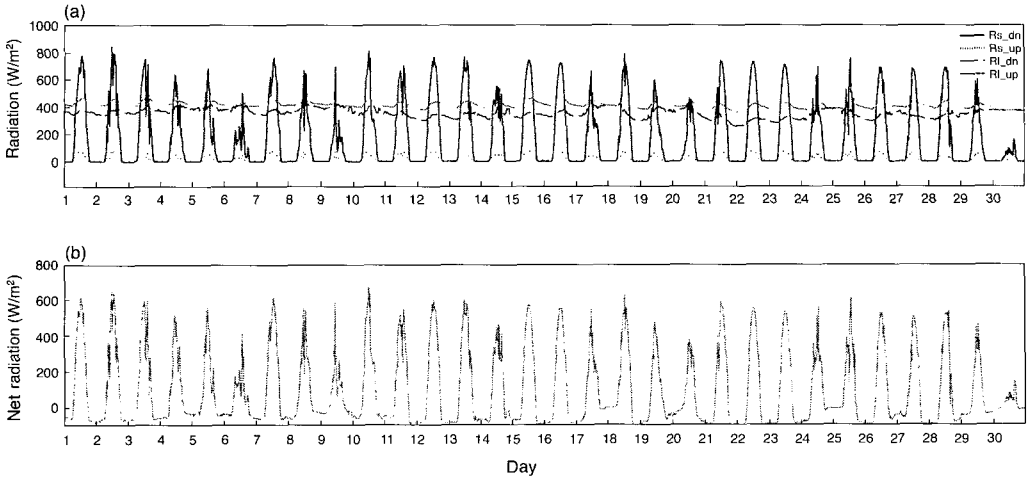

Fig. 9. Observed diurnal course of (a) shortwave and longwave radiation, and (b) net radiation during the intensive observation period of September 2001.

봄에 (약 22 W m^{-2} day^{-1}) 가장 크고 여름에 (약 13 W m^{-2} day^{-1}) 가장 작다. 일별 상 · 하향 장파 복사는 여름에 가장 크고 겨울에 가장 작다. 순복사의 경우는 각각 약 60, 140, 100, 90 W m^{-2} day^{-1}으로 봄에 가장 크고 겨울에 가장 작아서, 하향 단파 복사의 일변화와 유사하다. 겨울(2월)과 봄(5월)의 일별 순복사는(그림 8a, b) 일출 이후에 증가하여 정오에 최대값을 보이고 점차 감소하는 맑은 날의 전형적인 복사 수지 형태를 보인다. 여름(7월)과 가을(9월)에는 하향 태양 복사와 순복사가 정오에 1차 최대값을 보이고 약간 감소했다 다시 증가하여 2차 최대값을 보인 후 감소하는 형태를 보인다. 이러한 현상은 다른 계절보다 여름철에 기상 상태가 양호하지 않은 날이 많았기 때문으로 사료된다.

양질의 자료 생산과 자료의 검증을 위해 기상 상태와 식생 상태가 비교적 양호한 2001년 9월 한달 동안 집중 관측을 실시하였다. 그림 9는 집중 관측 기간 동안의 상 · 하향 단파와 장파 복사의 일변화를 보여준다. 한달간 순단파 복사는 약 150 W m^{-2}, 순장파 복사는 약 −60 W m^{-2}, 순복사는 약 92 W m^{-2}이다. 강수가 있었던 날(6, 30일)의 하향 단파 복사는 다른 날에 비해 현저하게 감소하였다. 흐린 날의 경우에도 하향 단파 복사는 다른 날에 비해 약하다. 즉 복사 성분들 중에 하향 단파 복사가 기상 상태에 가장 민감하였다. 순복사(그림 9b)는 뚜렷한 일변화를 보였다. 일출 이후에 순복사는 급격히 증가하여 정오에 최대값을 보인다. 정오 이후에 감소하기 시작하여 밤에는 지표면으로부터 복사 에너지가 손실된다. 즉 낮에는 태양으로부터 전달되는 강한 하향 단파 복사에 의해서 순복사가 대기로부터 지면으로 향하게 되지만 밤에는 순복사의 크기가 줄어들고 부호가 바뀌면서 지면에서 대기로 향한다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 광릉 수목원 플럭스 관측탑에서의 2001년부터 1년간 복사 에너지, 나무 온도, 엽 면적, 기온, 습도, 풍향, 풍속, 강수량 등의 관측을 통하여 군락 열 저류 측정의 기반을 확립하였고 군락에서의 복사 에너지 계절 변화 특성에 대해 알아보았다.

군락 위에서의 조도 길이는 약 1.6 m로 군락이 복사 에너지와 열 에너지(저류)에 미치는 영향은 매우 컸으며 계절 평균된 알베도는 약 0.1이었다. 순복사와 하향 단파 복사의 선형 관계로부터 가열 계수를 계산하였고 그 값은 약 0.21이었다. 알베도와 가열 계수는 계절 변화를 보여 겨울에 알베도는 최대, 가열 계수는 최소이고, 여름에 알베도는 최소, 가열 계수는 최대였다. 즉 알베도가 낮을수록 입사된 단파 복사가 작게 반사되어 군락이나 대기 가열

에 쓰이므로 가열 계수는 더 커졌다. 복사 에너지는 지표 상태와 기상 조건에 따라 다른 일 변화와 계절 변화를 보였다. 낮 동안(일출 이후)의 맑은 날에는 순단파 복사가 밤 시간(일몰 이후)에는 순장파 복사가 복사 에너지 수지에 지배적이었다. 순복사와 하향 단파 복사는 봄에 가장 강하였고 겨울에 가장 약하였다. 상향 단파 복사는 봄과 겨울에 다소 강하고 여름에 약하였다. 상·하향 장파 복사는 장마철 이전에 증가하다가 그 이후에 감소하여 겨울에 최소로, 일기온의 계절 변화와 유사하였다. 여름철에는 상향 장파 복사가 하향 단파 복사보다 강하여 대기로 에너지를 공급하는데 중요한 역할을 하였다. 순단파 복사의 변동은 하향 단파 복사에 의해 주로 영향을 받아 봄에 최대, 겨울에 최소였다. 순장파 복사는 여름철에 가장 약하였다. 엽 면적과 나무 온도의 변화는 복사 에너지와 알베도의 계절 변화를 반영하였고 복사 에너지 수지에 중요한 역할을 하였다.

본 연구에서는 군락의 구조와 생장 상태가 복사 에너지 및 군락 열 저류에 미치는 영향에 대한 연구가 미흡하였고 향후 이에 대한 면밀한 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 기상연구소의 "한반도악기상집중관측사업", 환경부의 "차세대핵심환경기술개발사업(Eco-technopia 21 project)"과, 과학기술부 기상연구소 국가지정연구실의 "한반도 배경대기 측정 및 기후변화 감시 기술 개발사업"의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

김연희, 조경숙, 김현탁, 엄향희, 최병철 (2002) 광릉수목원 혼합림에서의 기상학적 관점의 대기복사, 알베도, 나무온도, 잎면적, 한국대기환경학회 추계학술대회, 432-433.

이희춘 (2001) 티벳 고원에서의 지표 플럭스의 배분과 에너지 균형, 연세대학교, 석사학위논문, 45pp.

Andre, R.G.B. and Y. Viswanadham (1983) Radiation balance of soybeans grown in Brazil, Agric. For. Meteorol., 30, 157-173.

Arya, S.P. (1998) *Introduction to Micrometeorology*, Academic Press, 307 pp.

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, J. Geophys. Res., 102, 28939-28951.

Cho, K.-S., Y.-H. Park, and B.-L. Lee (2002) Relationship between albedo, trunk temperature, LAI and net radiation in a mixed forest at Kwangneung arboretum. Preprints, *The 2nd International Asia Workshop on Advanced Flux Network and Flux Evaluation*, Jeju island, Korea, 90.

Heitor, A., A.J. Biga, and R. Rosa (1991) Thermal radiation components of the energy balance at the ground, Agric. For. Meteorol., 54, 29-48.

Johnes, H.G. (1992) *Plants and Microclimate*, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 4288 pp.

McCaughey, J.H. (1985) Energy balance storage terms in a mature mixed forest at Petawawa, Ontario-A case study, Bound.-Layer Meteor., 31, 89-101.

McCaughey, J.H. (1987) The albedo of a mature forest and a clear-cut site at Petawawa, Ontario. Agric. For. Meteorol., 40, 251-263.

Monteith, J.L. and G. Szeicz (1961) The radiation balance of bare soil and vegetation, Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 87, 159-170.

Nielsen, L.B., L.P. Prahm, R. Berkowicz, and K. Conradsen (1981) Net incoming radiation estimated from hourly global radiation and/or cloud observations, J. Climatol., 1, 255-272.

Oke, T.R. (1987) *Boundary Layer Climates*, Routledge, 435 pp.

Park, Y.-H. (2001) Evapotranspiration and its controlling factors in the two adjacent forests in Kwangneung Arboretum, Yonsei University, Thesis for master.

Riahi, M.A., A.A. Karaghouli, A.M. Hasson, and A.W.A. Kayssi (1989) Relations between radiation fluxes of a greenhouse in semi-arid conditions, Agric. For. Meteorol., 44, 329-338.

Silva, A.M. and R. Rosa (1985) Radiative environment inside a greenhouse, Agric. For. Meteorol., 33, 339-346.

Schmid, H.P., C.S.B. Grimmond, F. Cropley, B. Offerle, and H.-B. Su (2000) Measurements of CO_2 and energy fluxes over a mixed hardwood forest in the mid-western United States, Agric. For. Meteorol., 103, 357-374.

Sutton, O.G. (1953) *Micrometeorology*, McGraw-Hill, New-York, 335 pp.

Szeicz, G. (1974) Solar radiation in crop canopies, J. Appl. Ecol., 11, 1117-1131.

Verma, S.B., D.D. Baldocchi, D.E. Anderson, D.R. Matt, and R.J. Clement (1986) Eddy fluxed of CO_2, water vapor, and sensible heat over a deciduous forest, Bound.-Layer Meteor., 36, 71-91.