

갈대 서식 연안습지에서의 순복사와 토양열 플럭스

김희종·김동수*·윤일희**·이동인*·권병혁*
경북대학교 천문대기과학과, *부경대학교 환경대기과학과
**경북대학교 지구과학교육과
(2006년 12월 13일 접수; 2007년 2월 20일 채택)

Net Radiation and Soil Heat Fluxes Measured on Coastal Wetland Covered with Reeds

Hee Jong Kim, Dong Su Kim*, Ill Hee Yoon**, Dong In Lee* and Byung Hyuk Kwon*

Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

*Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

**Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

(Manuscript received 13 December, 2006; accepted 20 February, 2006)

In the coastal wetland the mud is consist of fine particles, which means that it is characterized by small gap, and heat transfer is obstructed since moisture is found between the gaps. The relationship between net radiation (R_N) and soil heat flux (H_G) shows a counterclockwise hysteresis cycle, which refer to a time lag behind in the maximal soil heat fluxes. The albedo is independent of seasonal variation of the vegetation canopy which plays very important roles to store and control the heat in the atmospheric surface layer.

Key Words : Radiation, Albedo, Soil heat flux, Hysteresis

1. 서론

한반도는 삼면이 바다로 둘러 싸여 있으며 해안선이 복잡한 서해안과 남해안에 연안습지가 발달되었다. 남한의 갯벌 총면적은 약 2,400 km²이고 전라남도의 해안은 굴곡이 심하여 다른 곳에 비하여 한 곳에 넓은 갯벌이 펼쳐져 있지 않으나 모두 합치면 그 넓이가 946 km²나 되어 전체 면적으로 보아 남한에서 가장 넓다¹⁾. 연안생물의 생태적 가치뿐만 아니라 홍수 조절함과 같은 완충지 역할, 하수처리 능력, 관광 자원과 예술작품의 소재를 제공하는 문화적 가치를 고려하면, 갯벌 1 ha(0.01 km²)당 9,900달러의 경제적 가치는 농경지의 100배에 이른다. 지난 20년간 서남해안 습지의 20%가 매립 등으로 사라졌고, 앞으로 더 많은 연안습지가 사라질 예정이기에 연안습지의 기능에 대한 다방면의 논의가 필요하다.

지면의 영향을 많이 받는 대기 경계층의 하층 10%에 해당하는 수 십 m까지의 층을 지표층 또는 지표경계층(Surface Boundary Layer)라고 하며, 이 층은 지표면의 영향을 직접적으로 받기 때문에 지표경계층 연구에 있어서 지표 특성의 측정은 필수적이다. 지표 특성을 나타내는 인자에는 지표층 난류, 에너지 수지 등이 있다. 국지기상현상은 종관규모 대기 현상과는 달리 지표면의 물리적 성질의 차이, 국지 지형 등의 영향을 받아 복잡하게 나타난다. 국지 순환과 기상 특성은 지표면의 물리적 특성과 지형적 특성에 의해 결정된다²⁾. 토양의 수분과 증발량에 따라 경계층 높이와 특성이 변화한다³⁾. 지표층의 열에너지 수지에서 토양열 플럭스는 지표면온도 예측에 매우 중요한 인자이며 현열 플럭스와 잠열 플럭스로 분배되는 가용에너지에 영향을 미친다⁴⁾.

지면 온도 변화의 주요 인자는 태양 복사의 강도 변화이다. 따라서 토양열 플럭스는 순복사량과 매우 밀접한 관계가 있다⁵⁾. 지면위에 식생이 없다면, 태양 복사의 상당 부분이 지표면에 도달한다. 연안습지에 갈대가 분포하는 경우에는 토양뿐만

Corresponding Author : Byung Hyuk Kwon, Department of Environmental Atmospheric Science, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
Phone: +82-51-620-6288
E-mail: bhkwon@pknu.ac.kr

아니라 식생의 특성도 고려하여 산출되는 토양열 플럭스는 기상예측을 위한 수치모델에 중요하고, 대기과 토양 사이의 에너지 수지 방정식에 있어서 매우 중요한 역할을 한다⁶⁾. 그러나 토양열 플럭스를 정확하게 측정하는 것은 쉽지 않기 때문에 순복사량과 토양열 플럭스의 비(H_0/R_N)를 특성인자로 사용한다⁷⁾. 일반적으로 토양열 플럭스의 일변화와 크기는 일정하지도 않으며, 무시할 정도로 작지 않다. 특히 낮의 길이, 토양의 수분 함유량과 열적 특성, 식생의 특성에 따라 H_0/R_N 이 0.05~0.5까지의 범위를 가진다⁸⁾.

갈대로 덮여있는 간척지에서 지표층의 열에너지 수지를 분석하기 위해서는 물과 매우 미세한 입자로 구성된 토양 특성과 계절에 따라 색깔과 밀도가 변하는 식생 캐노피를 고려하여야 한다. 갯벌 환경에서의 에너지 보존과 저장에 대한 연구가 거의 없었기 때문에 전라남도 고흥에 위치한 수평적으로 균일하다고 판단되는 지역인 고흥만 간척지에서 에너지평형광학측정장비(OEBMS: Optical Energy Balance Measurement System)와 자동기상관측장비(AWS: Automatic Weather System)를 이용하여 토양열 플럭스의 변화와 지표층 열에너지 평형에 미치는 인자를 조사하였다.

2. 관측 지점과 관측 방법

관측 지점은 전라남도 고흥에 위치한 고흥만 간척지이며, Fig. 1과 같다.

검정 실선으로 표시한 간척지 면적은 약 31 km² (3,100 ha)이며, 주변의 산악이나 건물의 영향이 없다. 따라서 관측 지역의 지표 특성과 대기 특성을 잘 설명할 수 있다. 관측지는 간척사업으로 물이 빠진 갯벌 위에 부분적으로 황토 복토 공사가 진행

되고 있으며 대부분의 지면은 갈대로 덮여 있다. 지중은 완전한 배수가 이루어지지 않아, 갯벌 층에는 항상 수분이 많은 상태이다. 지면을 덮고 있는 식생은 계절에 따라 색깔, 수분함유 그리고 단위 면적당 식생의 밀도가 달라진다. 식생의 높이는 계절에 따라 2~3 m이며, 갈대들 사이의 간격은 매우 좁아 식생 내부에서의 바람이나 기온 등은 식생 층 위와 차이가 있다.

순복사량과 복사 성분을 알아보기 위해 순복사계(CNR 1, Kipp & Zonen)를 설치하였다. 단파와 장파를 각각 상향, 하향 방향으로 측정하는 센서를 이용한다. Fig. 2는 설치된 순복사계의 모습이고, 순복사계의 사양을 정리하여 Table 1에 나타내었다. 측정된 4개의 복사 성분은 지표면에서 복사 에너지 수지 방정식을 통하여 순복사량을 계산에 이용된다. 측정 단위는 Wm^{-2} 이다.

$$R_N = R_{S\downarrow} + R_{S\uparrow} + R_{L\downarrow} + R_{L\uparrow} \quad (1)$$

여기서, R_N 은 순복사를 의미하고, $R_{S\downarrow}$ 은 하향 단파복사, $R_{S\uparrow}$ 은 상향 단파복사, $R_{L\downarrow}$ 은 하향 장파복사, 그리고 $R_{L\uparrow}$ 은 상향 장파복사를 의미한다.

지표면 에너지 수지를 설명하기 위해 토양열 플럭스를 측정하는 경우, 토양의 열전도도와 최소한 두 깊이에서 지중 온도를 측정하여 온도의 연직경도를 산출하여야 한다. 이 연구에서는 이러한 복잡한 과정을 단순화하여 네덜란드에서 제작된 열 플럭스 플레이트(HFP-01, Hukseflux)를 이용하였다. 토양열 플럭스 센서는 디스크 모양의 열전도가 잘 되는 재질로 제작되었으며, 지중 10 cm에 매설하였다. 윗면과 아랫면의 온도를 측정하는 기능과 센서 표면에 결빙을 방지하는 가열기로 이루어져 있으며, 온도 경도를 측정하는 원리이다. 토양열 플럭스 센서의 정보를 Table 2에 정리하였다.

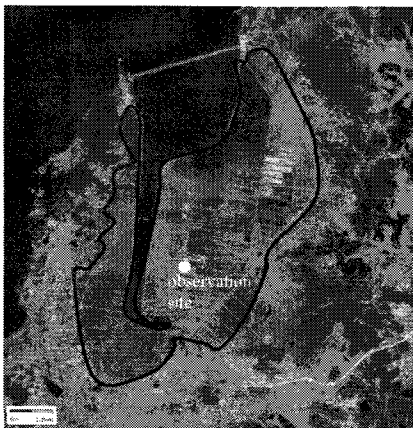


Fig. 1. Observation site at Goheung bay (<http://www.congnamul.com>).

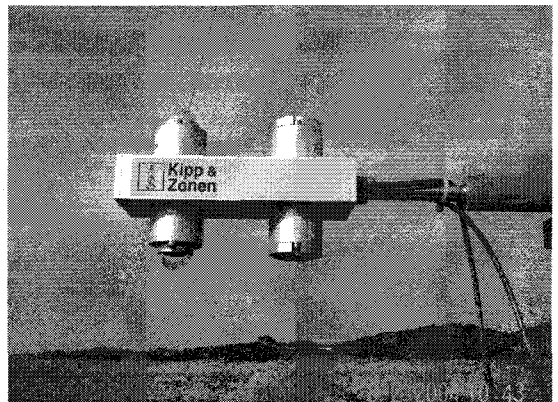


Fig. 2. Net Radiometer (CNR 1).

Table 1. Specification of CNR 1

	Shortwave sensor	Longwave sensor
Response time 95%	18 sec	18 sec
Non-stability	< 1% change per year	< 1% change per year
Non-linearity	Max. dev. 2.5% (0~1000 Wm^{-2})	Max. dev. 2.5% (0~1000 Wm^{-2})
Operating temperature	-40°C ~ 80°C	-40°C ~ 80°C
Spectral range	0.3 ~ 2.8 μm	5 ~ 50 μm
Sensitivity	10~35 $\mu V/(Wm^{-2})$	5~35 $\mu V/(Wm^{-2})$
Expected accuracy for daily sums	$\pm 10\%$	$\pm 10\%$

Table 2. Specifications of soil heat flux plate (HFP-01)

Plate thickness	5 mm
Plate diameter	80 mm
Measurement Range	-100 ~ 100 Wm^{-2}
Accuracy	$\pm 3\%$ of reading
Operation temperature range	Thermopile and plate heater

순복사계로 측정된 값은 10분 평균을 하여 자료 집록기(datalogger) CR 10X(Campbell)에 저장된다. 토양열 플럭스 센서에서 측정된 값은 10분 평균을 하여 자료처리기에서 계산한 후 개인용 컴퓨터에 저장하였다.

봄, 여름, 가을, 겨울에 각각 수행된 계절별 관측 기간은 순복사가 구름이나 강수의 영향을 받지 않는 맑은 무강수일을 선택하여, 계절별 일변화가 잘 나타날 수 있도록 선정하였다. Table 3에는 선정된 관측 기간과 관측 기간의 종관 상태, 주풍향, 주간과 야간으로 나눈 평균 풍속과 기온을 정리하였다. 주간에 풍속이 강하고 야간에 약해지는 전형적인 풍속의 일변화를 보이고, 가을철에 다른 계절에 비해 상대적으로 강한 바람이 관측되었다.

3. 결 과

토양 수분이 많은 경우, 바람, 상대습도, 태양 복사 등에 의한 수분 증발이 잠열 플럭스를 발생시키고, 대기경계층을 발달시킨다. 계속해서 증발이 일어나서 토양 중의 수분량이 감소하면 수분 증발에 의한 잠열 플럭스의 크기도 감소하며, 발달한 경계

Table 3. Intensive observation periods

IOP (Season)	Synoptic State	Wind Direction	$V_m (ms^{-1})$		$T_m (^\circ C)$	
			Day	Night	Day	Night
01~02 Apr. 2005(Spring)	Migratory anticyclone	W, SE	2.2	0.8	15.0	8.5
08~10 Aug. 2006(Summer)	North Pacific anticyclone	W, N	2.7	0.8	32.5	24.7
11~13 Oct. 2005(Autumn)	Migratory anticyclone	SE	3.4	2.3	21.8	16.3
23~24 Feb. 2005(Winter)	Siberian anticyclone	NW	2.4	1.7	6.9	2.3

층을 유지하고 더 발달시키는 역할을 현열 플럭스가 하는 것으로 나타났다(Arya, 1998). 토양은 다르지만 식생층이 유사한 경작지에서 관측한 에너지 수지 평형에서 열 저장항의 기여도를 연구한 결과에 따르면, 열 저장항을 식생에 대한 열저장과 토양에 의한 열저장으로 나눌 수 있고 식생에 의한 열저장과 토양에 의한 열저장이 에너지 수지 방정식에서 순복사량의 약 15% 가량을 차지한다¹⁰⁾. 그리고 에너지 저장항을 고려해주는 것이 에너지 수지식의 분산을 약 10% 감소시킨다. 본 연구는 고흡만에서 관측한 자료를 이용하여 계절에 따른 순복사량의 변화와 토양 플럭스를 조사하여 연안습지에서 자라는 갈대의 열보존 효과를 분석하였다.

3.1. 태양복사량

태양고도에 따라 변하는 태양 복사에너지의 일변화를 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 관측 기간에 측정된 하향 단파, 상향 단파, 그리고 장파 복사량을 계절별로 나타낸 것이다. 여름철 입사하는 단파 복사가 주간에 최대 약 $950 Wm^{-2}$ 로 가장 높게 측정되었고, 겨울철 주간에 약 $700 Wm^{-2}$ 로 가장 낮았다. 봄과 가을에는 최대 단파 입사 에너지가 $800 \sim 880 Wm^{-2}$ 로 측정되었다. 상향 단파 복사는 여름철에 약 $150 Wm^{-2}$ 로 가장 높게 나타났으며, 다른 계절은 약 $100 Wm^{-2}$ 로 여름보다 작았다. 관측지에서의 상향 단파 복사는 갯벌 또는 식생에 의해 반사되는 양이므로, 지표 특성을 나타낸다고 할 수 있다. 식생층이 없는 나지에서는 입사량이 많은 하지 전후에 상향 단파 복사량도 최대를 나타낸다. 반사면의 조건이 계절변화에 무관하다면 $R_{S\uparrow}$ 과 $R_{S\downarrow}$ 는 동일한 변화 경향을 보인다⁹⁾. Fig. 3에서 봄과 여름에 $R_{S\uparrow}$ 의 세기에 따라 최고 $140 \sim 150 Wm^{-2}$ 의 $R_{S\uparrow}$ 의 크기를 확인할 수 있으나 $R_{S\uparrow}$ 이 가장 작은 겨울에 $R_{S\uparrow}$ 이 가을보다 높게 나타나기

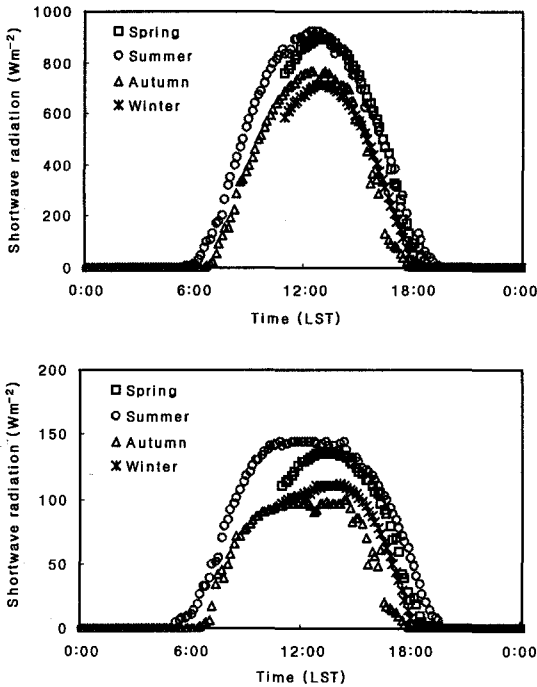


Fig. 3. Time series of down and upward shortwave radiation during IOP.

도 한다. $R_{S\downarrow}$ 의 가을 변화 곡선에 나타난 구름의 영향으로 볼 수 있고, 겨울에 마른 갈대가 지면을 노출시켜서 진흙이 반사율을 감소시키는 가능성도 고려되어야 한다. 결국 가을 경우를 제외하고 계절에 따른 식생의 변화와 무관하게 입사하는 태양복사량과 지표면에 의해 반사되어 나가는 태양복사량의 비($Albedo = R_{S\uparrow} / R_{S\downarrow}$)는 0.15~0.2 범위에서 일정함을 알 수 있다(Fig. 4). 이는 풀밭에 의한 보편적인 알베도 0.15~0.25와 잘 일치한다⁹⁾. 따라서 지표층 에너지 수지에서 가장 큰 부분을 차지하는 순복사 에너지 크기는 계절에 따른 식생 특성의 변화와 무관하다.

3.2. 순복사량과 토양열 플럭스

Fig. 5는 관측 지점에서 관측 기간의 에너지 수지 성분 중 순복사량과 토양열 플럭스의 일변화를 계절별로 나타낸 것이다. 순복사량은 여름철이 약 700 Wm^{-2} 로 가장 높고, 겨울이 500 Wm^{-2} 으로 가장 낮다. 봄과 가을의 경우에는 약 600 Wm^{-2} 으로 비슷한 크기를 보인다. 토양열 플럭스는 봄과 겨울에 가장 높게 측정되었으며, 그 크기는 $50 \sim 60 \text{ Wm}^{-2}$ 이다. 반면에 여름과 가을철의 토양열 플럭스는 20 Wm^{-2} 내외의 크기를 보인다. 이와 같은 이유는 토양의 특성에 대한 영향보다는 식생에 의

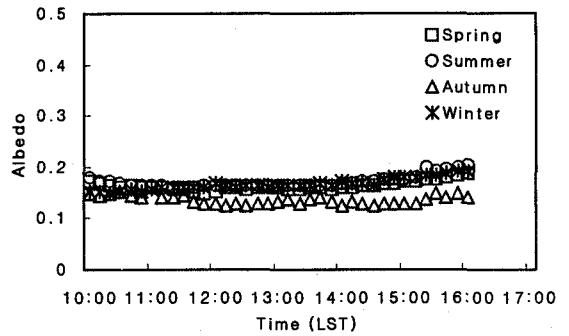


Fig. 4. Variations of albedo in the daytime.

한 영향을 판단된다. 겨울철과 봄철의 식생 밀도가 여름철에 비해 작기 때문에 지면에 도달하는 하향 태양복사가 상대적으로 많아지고, 그에 따라 겨울철과 봄철의 토양열 플럭스를 증가시킨다. Fig. 6에서 식생층의 역할을 파악할 수 있다. 여름 집중관측 기간에 식생층을 제거한 맨땅과 식생으로 덮인 조건에서 토양열 플럭스의 시간변화를 조사하였다. 식생층은 최대 토양열 플럭스를 1/5로 감소시키고 시간지체를 야기한다. 맨땅일 경우 급격한 증가와 감소를 보이고 식생층이 있는 경우에는 매우 완만하게 변화한다.

순복사량과 토양열 플럭스의 계절별 변화에서 사계절 모두 공통적으로 관측된 것이 두 값 사이의 시간지체(time lag) 현상이다. 시간지체 현상은 최대값을 나타내는 시각이 차이가 나는 것을 의미하며, 토양열 플럭스에 있어서 시간지체 현상은 토양의 종류, 수분함량, 밀도, 전도도 등과 같은 토양특성에 따라 결정된다. 토양 특성에 따라 토양열 플럭스 시간지체가 발생하지 않을 수도 있으며, 경우에 따라 토양열 플럭스의 최대값이 관측되는 시각이 최대 순복사량의 관측 시각보다 앞서는 연구 결과도 있다(Santanello Jr. and Friedl, 2003; Vernekar et al., 2003; Verhoef, 2004)^{5,11,12)}. 특히 콘크리트나 맨땅 등은 열전도도가 높아서 토양열 플럭스의 최대값이 나타나는 시각이 순복사량 최대값 시각보다 더 앞서거나 비슷하게 관측된다. 반면에 점토질 토양이나 수분을 많이 함유하고 있는 갯벌과 같은 토양에서는 반대로 열전도도와 열확산도가 작기 때문에 열의 전달이 상대적으로 느다. 고히의 연안습지에서 관측된 순복사량과 토양열 플럭스 사이에 시간지체에 대한 분석은 갯벌의 특성뿐만 아니라 식생층의 역할도 고려되어야 한다.

Fig. 7은 Camuffo and Bernardi(1982)의 결과와 같이 순복사 플럭스와 토양열 플럭스의 관계가 시간에 따라 반시계 방향 이력곡선 순환(counterclockwise

갈대 서식 연안습지에서의 순복사와 토양열 플럭스

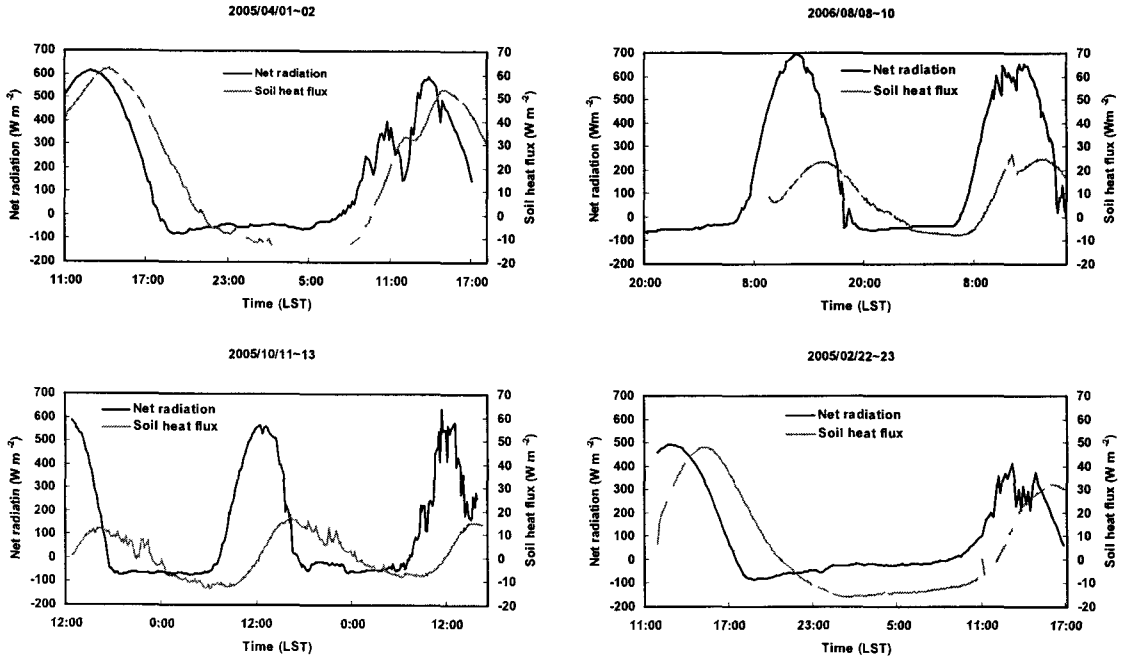


Fig. 5. Net radiation and soil heat flux during IOP.

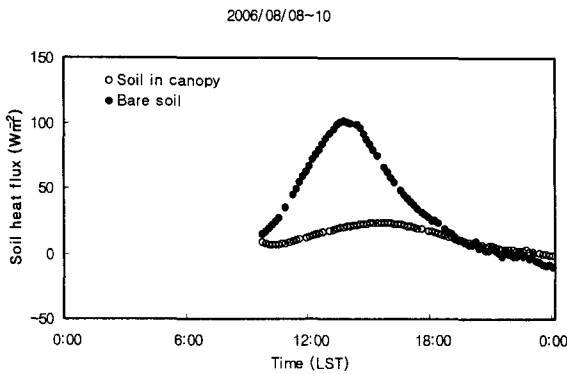


Fig. 6. Soil heat flux with and without the vegetation canopy.

hysteresis cycle)을 보여준다¹³⁾. 또한 Asaeda et al. (1996)도 아스팔트와 콘크리트, 맨땅에서 순복사량과 토양열 플럭스 사이의 시간지체 현상을 반시계 방향의 타원형 이력곡선으로 설명하였다¹⁴⁾. 고흥 연안습지에서도 반시계 방향 변화를 보였고, 토양열 플럭스의 크기에 따라 이력곡선의 형태가 구분된다. 토양열 플럭스가 비교적 큰 봄과 겨울에 이력곡선 장축의 기울기가 크다. 이 경우 하향 복사에 대한 반응속도가 빨라서 식생 밀도가 높은 여름과 가을보다 토양열 플럭스가 비교적 급격히 증가하고 감소한다(Camuffo and Bernardi, 1982). 장축의 기울기가 작을수록 토양

열 플럭스의 완만한 증가와 감소가 진행된다.

Fig. 8은 주간의 토양열 플럭스를 순복사 플럭스로 모수화한 H_G/R_N 의 계절별 일변화를 보여준다. 식생 밀도가 높은 경우에 H_G/R_N 의 일변화는 0.1보다 작고,¹⁵⁾ 성긴 식생의 경우에 H_G/R_N 은 토양 종류와 수분 함유 정도에 따라 0.1~0.5까지 범위에서 변화한다. 오후에 서서히 증가하는 경향이 있어서 Santanello and Friedl (2003)가 제시한 식생이 없는 경우에 오후가 되면서 급격하게 H_G/R_N 수치가 감소하는 결과와 차이를 보인다⁵⁾. 식생 밀도가 낮은 겨울철에는 토양열 플럭스가 빨리 증가하고 빨리 감소하여 Fig. 8과 같이 장축의 기울기가 가장 크고 H_G/R_N 가 지속적으로 증가한다(Fig. 9).

3. 결론

갈대가 식생층을 이루는 연안습지에서 복사에너지와 토양열 플럭스를 조사하였다. 구름이 없을 때 알베도는 계절과 무관하게 약 0.17 정도로 일정하여 지표층 에너지 수지를 지배하는 순복사 에너지는 계절에 따른 식생층의 밀도와 색깔의 변화에 민감하게 반응하지 않는다. 식생층의 유무에 따라 토양열속은 약 400%의 차이를 보이고 토양으로 전달되지 않은 열은 식생과 토양 그리고 식생층 내의 공기에 저장된다. 연안습지의 갈대는 대기와 지면 사이에서 급격한 열교환을 조절하는 역할을 한다.

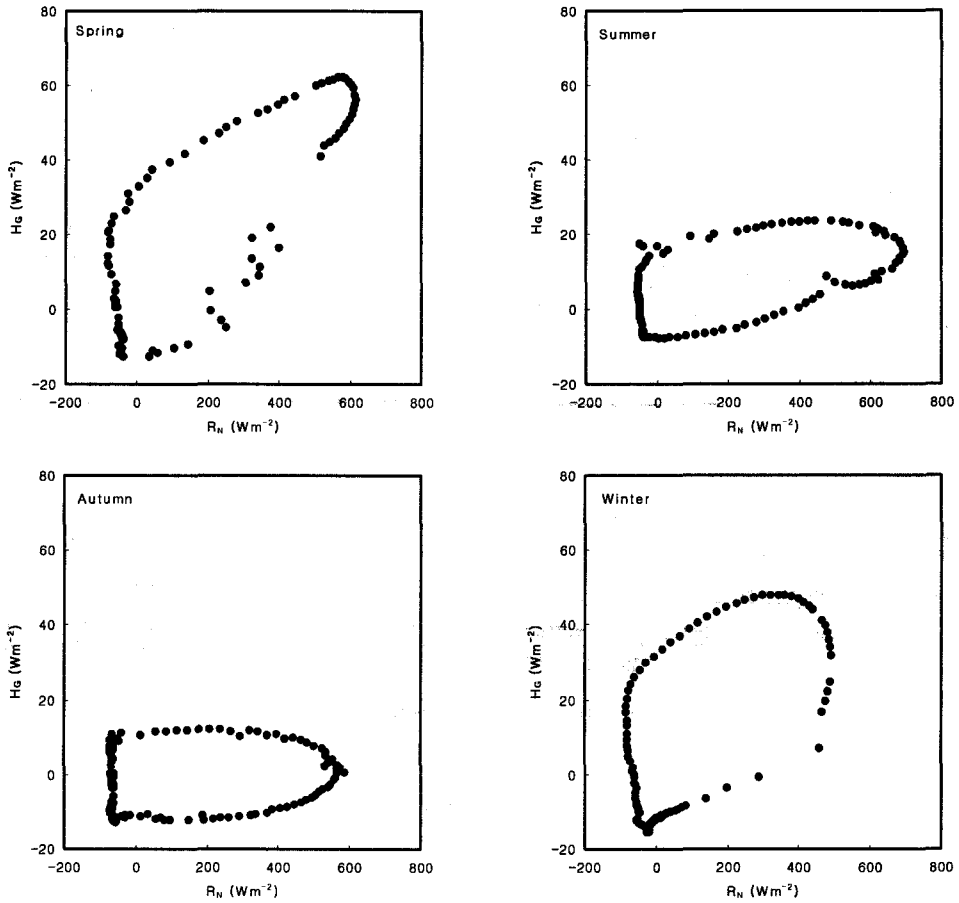


Fig. 7. Diurnal hysteresis pattern between the net radiation and the soil heat flux.

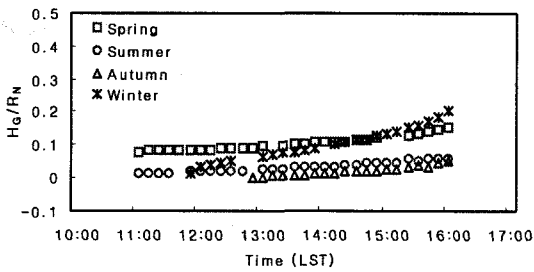


Fig. 8. Normalized soil heat flux by net radiation (H_G/R_N).

감사의 글

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2006-2101)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1) 양재삼, 2000, 갯벌, 어떻게 할 것인가?, 첨단환

경기술, 9, pp. 2-10.

- 2) Park, S. U., and I. H. Yoon, 1987, Diurnal and seasonal variations of radiative fluxes on inclined surface, J. Korean Meteor. Soc., 23(3), 40-53.
- 3) Pan, H. L., and L. Mahrt, 1987, Interaction between soil hydrology and boundary-layer development, Boundary-Layer Meteorol., 38, 185-202.
- 4) Deardorff, J. W., 1978, Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation, J. Geophys. Res., 83, 1889-1903.
- 5) Santanello Jr. J. A., and M. A. Friedl, 2003, Diurnal covariation in soil heat flux and net radiation, J. Appl. Meteor., 42, pp. 851-862.
- 6) Loon, W. K. P., H. M. H. Bastings, and E. J. Moors, 1998, Calibration of soil heat flux

- sensors, *Agric. For. Meteorol.*, 92, 1-8.
- 7) Woodward, F. I., and J. E. Sheehy, 1983, *Principles and Measurements in Environmental Biology*, Butterworths, London, UK, 263.
 - 8) Kustas, W. P., C. S. T. Daughtry, and P. J. van Oevelen, 1993, Analytical treatment of the relationships between soil heat flux/net radiation ratio and vegetation indices, *Remote Sens. Environ.*, 46, 319-330.
 - 9) Arya, P. A., 2001, *Introduction to micro-meteorology*, Academic press.
 - 10) Meyers, T. P., and S. E. Hollinger, 2004, An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean, *Agric. For. Meteorol.*, 125, 105-115.
 - 11) Vernekar, K. G., S. Sinha, L. K. Sadani, S. Sivaramakrishnan, S. S. Parasnis, Brij Mohan, S. Sazena, T. Dharmaraj, M. N. Patil, J. S. Pillai, B. S. Murthy, S. B. Debaje and A. Bagavathsingh, 2003, An overview of the land surface processes experiment (LASPEX) over a semi-arid region of India, *Boundary-Layer Meteorol.*, 106, 561-572.
 - 12) Verhoef, A., 2004, Remote estimation of thermal inertia and soil heat flux for bare soil, *Agric. For. Meteorol.*, 123, 221-236.
 - 13) Camuffo, D. and A. Bernardi, 1982, An observational study of heat fluxes and their relationship with net radiation, *Boundary-Layer Meteorol.*, 23, 359-368.
 - 14) Asaeda, T., V. T. Ca, and A. Wake, 1996, Heat storage of pavement and its effect on the lower atmosphere, *Atmospheric Environment*, 30(3), pp. 413-427.
 - 15) Ogée, J. E. Lamanud, Y. Brunet, P. Berbigier, and J. M. Bonnefond, 2001, A long-term study of soil heat flux under a forest canopy, *Agric. For. Meteorol.*, 106, 173-186.