

접지층에서 대기난류의 역할과 에너지 평형

권 병 혁* / 김 근 회** / 김 광 호*** / 강 동 환****

Role of Atmospheric Turbulences and Energy Balances in the Atmospheric Surface Layer

Byung Hyuk Kwon* / Geun Hoi Kim** / Kwang Ho Kim*** / Dong Hwan Kang****

요약 : 연안습지 생태계에서 열에너지 교환 과정은 매우 중요하다. 지표 열에너지 평형을 이루는 요소인 순복사 플럭스, 현열 플럭스, 잠열 플럭스 그리고 토양열 플럭스를 전라남도 고흥에 위치한 수평적으로 균질하다고 판단되는 지역인 고흥만 간척지에서 관측하고 분석하였다. 열의 수송을 평가하기 위해서 5회의 집중관측 기간에 대기 난류를 측정하였고, 특히 갈대로 덮여있는 간척지에서 지표층 열에너지 수지를 분석하기 위해서는 물과 매우 미세한 입자로 구성된 토양 그리고 계절에 따라 색깔과 밀도가 변하는 식생캐노피를 고려하였다. 순복사 플럭스, 현열 플럭스, 잠열 플럭스, 토양열 플럭스를 기존의 에너지 수지방정식에 적용하여 식생과 토양과 같은 지표면 특성에 따른 열 플럭스의 특징을 조사하여 습지의 기온조절 효과에 대해 알아보았다. 에너지 수지비로 식생 성장기에는 주로 잠열 플럭스에 의해 열이 대기로 전달되는 것을 알 수 있었다. 또한 식생층은 열을 저장하여 기온의 일교차를 줄이는 역할을 한다. 여름철에 집중관측지의 기온이 주변 지역의 기온보다 보다 낮고 겨울철에는 다소 높게 나타난 결과는 식생층을 포함하는 연안습지가 열환경을 조절함을 보여주었다.

핵심용어 : 연안습지, 열에너지 평형, 식생 캐노피, 열 플럭스

Abstract : Heat energy exchange is very important processes in the coastal wetland ecosystems. We observed and analyzed the net radiation flux, the sensible heat flux, the latent heat flux and the soil heat flux, which are balanced in the heat energy balance, over a reclaimed land covered with reeds at Goheung, Jeonllanamdo where is horizontally plane. The atmospheric turbulence had been measured in order to estimate the heat transfer during 5 intensive observation periods (IOPs). It was considered that the soil consists of water, fine particles, and vegetation canopy that changes color and density according to the season. We examined the characteristics of the heat flux and the vegetation effect on the air temperature control. It was noted that the heat was transported mainly by latent heat flux in the summer season and the vegetation canopy decreased the daily temperature range due to the heat storage. The air temperature was lower at the IOPs site than near urban area. This showed that the coastal wetland covered with the vegetation control the thermal environment.

Keywords : Coastal wetland, heat energy balance, vegetation canopy, heat flux

1. 서 론

연안습지는 가장 생산적인 생명 부양의 생태계로써 습지보호는 생물학적·수리학적·경제적 이

유에서도 매우 중요하다. 또한 습지는 거시적인 측면에서 대기 중으로의 탄소 유입을 차단하여 지구온난화의 원인인 이산화탄소를 적절히 조절 해주며, 미시적 측면에서 해당 지역의 기온 및 습

+ Corresponding author : bhkwon@pknu.ac.kr
* 정희원 · 부경대학교 환경대기과학과 교수
** 비희원 · 부경대학교 환경대기과학과 석사
*** 비희원 · 부경대학교 환경대기과학과 박사과정
**** 정희원 · 부경대학교 환경지질과학과 계약교수

도 등을 조절하는 기후 조절 기능이 있다. 이러한 특성을 이용하여 특히 도심 지역에서는 열대야현상이나 급격한 일교차를 줄이기 위해 인공습지를 조성하기도 한다.

습지와 같은 지표면의 영향이 쉽게 식별되는 지표 대기층의 가장 아랫부분인 접지층에서 에너지 교환은 분자 확산보다 대기난류에 의해 대부분 이루어지고 있다(Arya, 2001). 대기난류는 열과 수분을 효과적으로 전달하여 인간은 물론 동·식물이 살기 좋은 환경을 유지시켜 준다. 지표면과 대기 사이의 질량 교환 과정은 지표면 부근에서 복사 평형과 열에너지 평형에 중요하게 작용한다. 지표면에 입사되는 태양 복사에너지는 지표면과 대기 사이의 온도 차이에 의해 수송되는 현열, 물이 수증기로 상태변화를 하면서 방출하는 잠열 그리고 토양으로 전도에 의해 이동하는 열의 합과 평형을 이룬다. 맨땅 또는 포장된 지표면 위에서는 현열 플럭스에 의한 대기로의 열전달이 중요하고 증발에 따르는 잠열의 수송은 매우 미약하다(Stull, 1988; Arya, 2001). 반면 해양과 호수 등 물 위에서는 현열 플럭스 보다는 잠열 플럭스에 의해 열이 전달된다(Kwon et al., 1998). 특히, 식생 캐노피에 저장되는 열에너지를 고려하면 순복사 에너지는 현열, 잠열, 토양열, 식생 열저장, 광합성 에너지의 합으로 표현된다. 토양열 플럭스의 경우, 식생의 구분에 따라 다양한 크기를 보이며, 산림 식생 캐노피에서는 순복사 에너지의 약 10%로 알려져 있다(Fitzjarrald and Moore, 1994; Kustas et al., 2000; Wilson and Baldocchi, 2000; Ogee et al., 2001). Meyers and Hollinger (2004)에 따르면 경작지에서 식생과 토양에 저장되는 열은 순복사 에너지의 약 15%로 조사되었다. 광릉 숲에서 측정된 식생에 의한 열저장이 순복사 에너지의 0.05 - 0.2로 나타난 것과 같이 색생의 열저장은 접지층 에너지 수지에서 무시될 수 없다.

본 연구에서는 열저장율이 비교적 높은 갈대 식생 캐노피를 포함하는 접지층에서 열에너지의 평형을 이해하기 위하여 고흥만 간척지에서 계절

별 집중관측으로 수집한 자료를 분석하였다. 지표면 위의 장·단파 복사에너지, 토양으로 전달되는 토양열 플럭스 그리고 식생 캐노피에 저장되는 저장열을 측정하여 분석하였다. 또한 지표-대기 상호 교환되는 현열 플럭스와 잠열 플럭스, 열을 저장하는 식생층이 대기의 온도에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 관 측

관측은 전라남도 고흥(34.36°N, 127.12°E)에 위치한 고흥만 간척지에서 이루어졌다. 동서 방향으로 약 3 km, 남북 방향으로 약 10 km의 규모로 주변에 지형지물이 없다. 표면은 균질한 식생 캐노피로 지표층 대기의 특성 연구를 위한 매우 이상적인 실험 조건을 제공하고 있다. 관측지는 간척사업으로 물이 빠진 갯벌 위에 부분적으로 황토 복토 공사가 진행되고 있으며 대부분의 지면은 갈대로 덮여 있고, 일부 지역은 벼농사 농지로 사용되고 있다. 지중은 완전한 배수가 이루어지지 않아, 갯벌 층에는 항상 충분한 수분이 있는 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 캐노피 위와 차이가 있다.

2003년 7월부터 관측 지점에 Fig. 1과 같이 자동기상관측시스템을 설치하여 온도, 습도, 풍향, 풍속 등을 측정하여 자료를 상시 수집하였다. 10 m의 기상 관측 탑을 설치하여 10 m의 풍향, 풍속, 온도, 습도를 측정하고, 3 m의 풍속, 온도, 습도를 측정하였다. 측정된 자료는 10분 평균을 하여 자료 집록기 CR10X (Campbell Sci. Inc.)에 저장되었다. 자동기상관측 시스템을 통한 관측 외에 5차례의 특별 관측을 통하여 각 계절별 에너지 플럭스의 특성을 조사하였다. 각 계절의 특성을 파악하기 위해 특별 관측 기간은 강수가 없는 맑은 날을 선택하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 순복사 에너지와 토양열

순복사 에너지는 하향 단파 복사 에너지의 영향이 가장 크기 때문에 24시간 주기의 일변화를 보이고, 지구 공전에 따른 태양고도의 변화에 기인하는 계절 변화를 보인다. 갈대 캐노피 위에 도달하는 장파, 단파 복사에너지와 지표면에서 대기로 반사되거나 방출되는 장파, 단파 복사에너지의 합으로 결정되는 순복사 에너지(R_N)는 현열(H), 잠열(λE), 토양열(G) 그리고 갈대층에 저장되는 열(Res)의 합과 평형을 유지하는 에너지 수지방정식으로 표현된다.

$$R_N = H + \lambda E + G + Res \quad (1)$$

Fig. 2는 계절별 4회의 집중관측 기간에 측정된 순복사 에너지와 토양열 플럭스(G)의 일변화를 계절별로 나타낸 것이다. 순복사량은 여름철에 약 700 W m^{-2} 로 가장 높고, 겨울철에 500 W m^{-2} 로 가장 낮다. 봄과 가을의 경우에는 약 600 W m^{-2} 으로 비슷한 크기를 보인다. 토양열 플럭스는 봄과 겨울에 가장 높게 측정되었으며, 그 크기는 $50 - 60 \text{ W m}^{-2}$ 이다. 반면에 여름과 가을철의 토양열 플럭스는 20 W m^{-2} 내외의 크기를 보인다. 토양열 플럭스의 시간변화는 순복사 플럭스에 영향을 받는다. 해가 뜨기 시작하면 토양열 플럭스는 점차 증가한다. 점차 증가한 토양열 플럭스는 순복사 플럭스가 최고값을 나타내는 12시부터 1~2시간 후에 최고값을 보인다. 해가 진 후, 토양열 플럭스는 음의 값으로 바뀐다. 순복사와 토양열 플럭스에 대한 비인 G/R_N 은 아침과 저녁에 가장 큰 값을 보인다. 토양열 플럭스는 아침과 저녁 시간에 에너지 수지를 조절하는 중요한 인자이다. 공통된 특징을 살펴보면 순복사량의 최대값이 나타나고 1~2시간 뒤에 토양열 플럭스의 최대값이 나타나는 것을 알 수 있다. 시간지체 현상은 최대값을 나타내는 시각이 차이가 나는 것을 의미하며, 토양열 플럭스에 있어서 시간지체 현상은 토

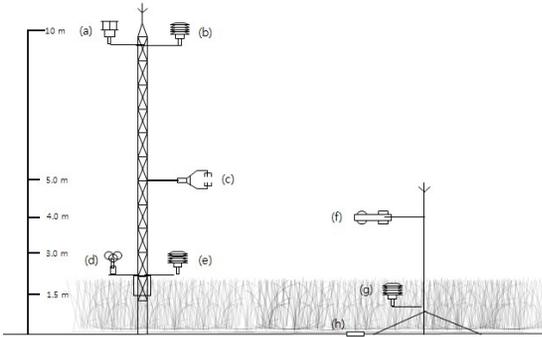


Fig. 1. Schematic diagram of tower instrumentation at the experimental site: (a) two-dimensional anemometer, (b) thermometer, (c) three-dimensional ultrasonic anemometer, (d) three cup anemometer, (e) thermometer, (f) net radiometer, (g) thermometer, (h) soil plate.

대기난류 플럭스 성분을 측정하기 위해서 삼차원 초음파풍속계(CSAT3, Campbell Sci. Inc.), 고속반응개회로 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 적외선 기체분석기(LI7500, LI-COR Inc.)를 사용하였다. 고속반응개회로 $\text{CO}_2/\text{H}_2\text{O}$ 적외선 기체분석기와 같이 빠르게 반응하는 센서로 측정된 습도와 이산화탄소 변동과 CSAT3로 측정한 온도와 연직 바람 속도 변동 간의 상관관계를 구함으로써 수증기와 이산화탄소 플럭스뿐만 아니라 현열과 잠열 플럭스도 구할 수 있다. 실제 현열 플럭스는 초음파로 구한 온도와 연직 바람 속도의 변동과의 상관관계를 구함으로써 결정된다.

토양열 플럭스는 일정 깊이에서 측정된 토양열 플럭스와 지표에서 측정 깊이 사이에 저장되는 열 저장의 합으로 표현된다(Mayocchi and Bristow, 1995). 본 연구에서는 이러한 복잡한 과정을 단순화하여 네덜란드에서 제작된 플레이트(HFP-01, Hukseflux)를 이용하였다. 토양열 플럭스 센서는 디스크 모양의 열전도가 잘 되는 재질로 제작되었다. 윗면과 아랫면의 온도를 측정하는 기능이 있고 센서 표면에 결빙을 방지하는 가열기로 이루어져 있다. 토양열 플럭스 센서는 지중 10 cm에 매설하였다.

양의 종류, 수분함량, 밀도, 전도도 등과 같은 토양특성에 따라 결정된다. 특히 콘크리트나 맨땅 등은 열전도도가 높아서 토양열 플럭스의 최대값이 나타나는 시각이 순복사량 최대값 시각보다 더 앞서거나 비슷하게 관측된다(Santanello and Friedl, 2003; Weber and Kuttler, 2005). 반면에 점토질 토양이나 수분을 많이 함유하고 있는 갯벌과 같은 본 관측지에서는 반대로 열전도도와 열확산도가 작기 때문에 열의 전달이 상대적으로 늦다.

3.2 현열 플럭스와 잠열 플럭스

현열 플럭스(H)의 변화는 순복사의 변화와 비슷한 경향을 보인다. 계절별 특성으로 현열 플럭스는 여름이 가장 높고, 겨울이 가장 낮았다. 순복사 플럭스에 대한 현열 플럭스의 비율(H/R_N)은 0.2~0.3의 값을 보였다(Fig. 3). 이는 도심 지역

의 0.4~0.5와 큰 차이를 보인다(Grimmond and Oke, 1995; Oke et al., 1999; Christen and Vogt, 2004). 현열 플럭스는 일반적으로 지표면과 지표면 위의 공기 사이의 온도 차이에 의해서 일어난다. 실제 지표층 내의 온도는 높이에 따라 계속 변하고 연직 온도경도의 크기는 높이에 따라 계속 감소한다. 경계면의 가장 가까운 주변과 소위 말하는 분자 아층(molecular sublayer) 내에서 이루어지는 공기의 주된 열전달 방법은 전도로써 고체에서 이루어지는 것과 유사하나, 경계면으로부터 수 mm 거리만 떨어져도 공기운동에 관여하는 열 교환의 주된 방법은 이류 또는 대류이다(Arya, 2001). 현열 플럭스는 갈대 식생층의 온도가 공기 온도보다 더 높은 시간인 주간에는 식생층에서 대기 쪽으로 향하며, 저녁과 야간에는 반대방향으로 향한다. 결국 현열 플럭스는 평균 온도 경도를 약화시키는 역할을 한다.

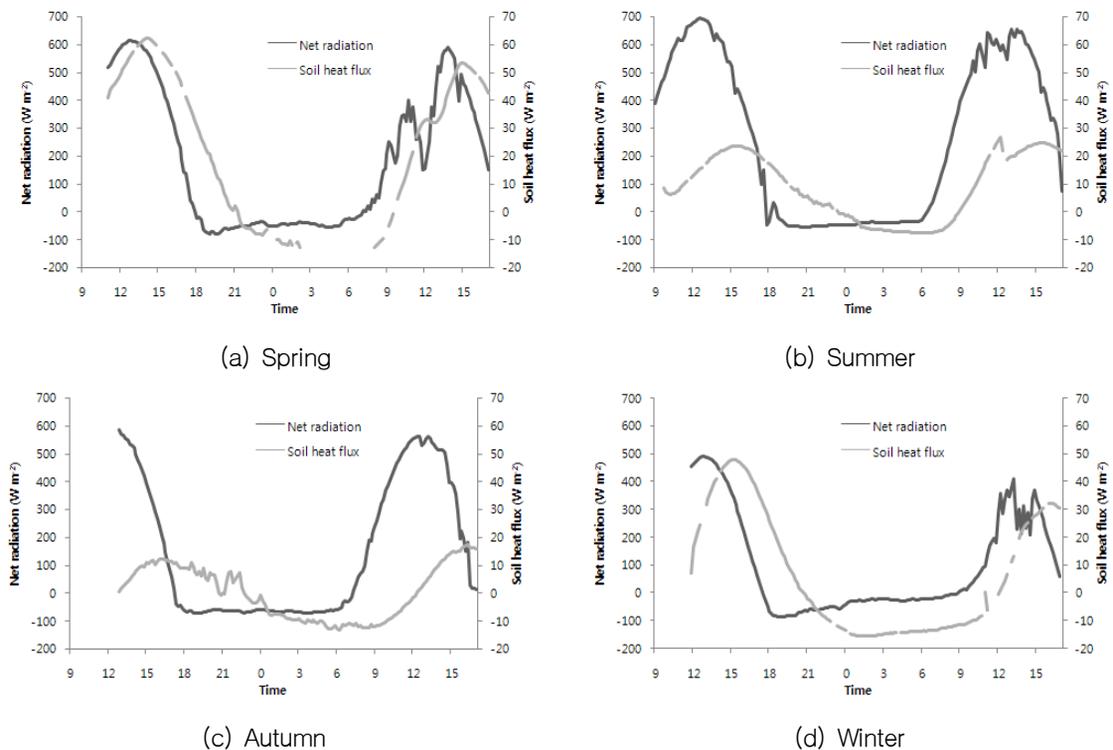


Fig. 2. Diurnal variations of net radiation (R_N) and soil heat flux (G) on four intensive observation periods

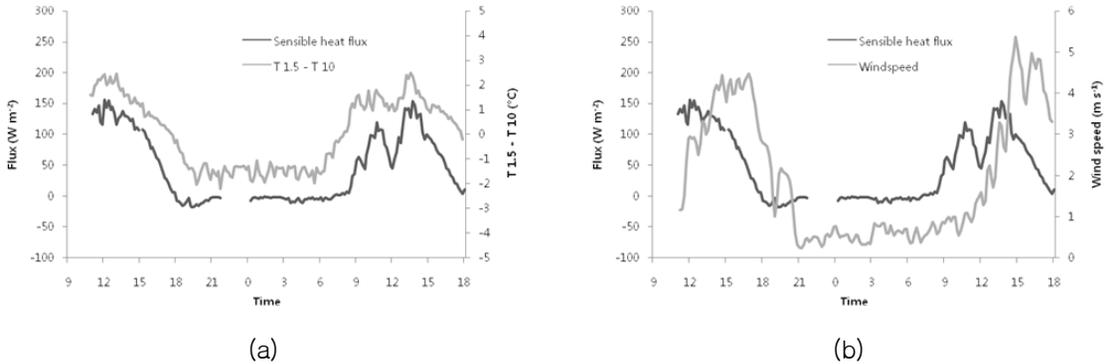


Fig. 3. Diurnal variations of (a) sensible heat flux and temperature difference, (b) sensible heat flux and wind speed on 01 - 02 April 2005

현열 플럭스를 간접적으로 구하는 방법 중에서는 한 고도의 풍속과 두 고도 간의 연직 온도차를 이용하는 벌크법(Bulk method)이 있다. 현열 플럭스를 간접적으로 구할 때 중요한 요소인 10 m의 풍속과 10 m와 1.5 m의 연직온도차를 각각 현열 플럭스와 비교해보았다. Fig. 3(a)는 2005년 봄의 현열 플럭스와 10 m와 1.5 m의 연직온도차를 나타낸 것이다. 온도차의 변화와 현열 플럭스의 변화가 같은 경향을 보이며, 상관계수 역시 0.91로 높게 나타났다. 이는 연직 온도 경도차가 현열 플럭스의 변화에 중요한 요인임을 알 수 있다. 같은 기간의 현열 플럭스와 풍속의 시계열을 보면 현열 플럭스의 최대값이 나타나고 난 후 풍속이 강해지는 것을 알 수 있었다(Fig. 3(b)). 일반적으로 풍속이 강해지면 열교환이 활발하게 이루어져 그로 인해 현열 플럭스가 높게 나타나는 경우인데 관측

지의 경우에는 이와는 반대로 나타났다.

잠열 플럭스(λE)는 2006년 8월과 2007년 10월 2회 관측되었다(Fig. 4). 각각 여름과 가을을 대표하는 자료로써 여름의 잠열 플럭스는 전체 에너지 수지의 약 50%를 차지하며(Fig. 4 (a)), 가을에는 전체 에너지수지의 약 30%를 차지하였다(Fig. 4 (b)). 잠열 플럭스의 교환은 증발 또는 응결에 의해서 일어날 뿐만 아니라 식물 잎의 증산에 의해서도 많은 양이 일어난다. Burba et al.(1999)은 갈대 습지에서 잠열 플럭스를 증발과 증산을 나누어 설명하였다. 여름에는 갈대의 성장으로 잠열 플럭스의 대부분이 증산의 형태로 나타난다. 가을에는 반대로 증산보다 증발의 비중이 커진다. 또한 본 관측지는 다른 습지에 비해 지표면이 수면이 아니라서 증발의 영향이 크지 않은 것으로 사료된다.

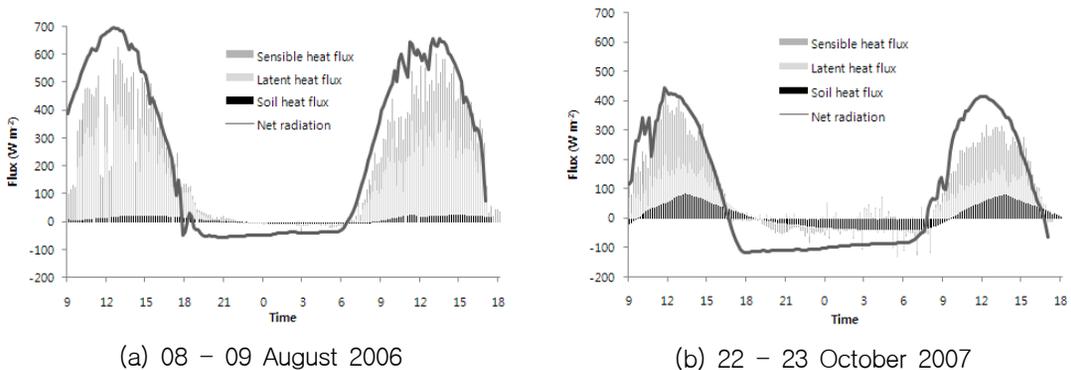


Fig. 4. Diurnal variations of net radiation (R_N), sensible heat flux (H), latent heat flux (λE) and soil heat flux (G)

열에너지는 보존되기 때문에 현열 플럭스가 작은 관측지에서는 잠열 플럭스에 의해 순복사 플럭스로 받은 열이 대기로 수송된다. 여름철에는 지표면에서 증발 뿐만 아니라 무성한 갈대잎에서 증산 작용도 활발하기 때문에 잠열 플럭스의 역할($\lambda E/R_N$)이 더 크게 나타났다. 이와는 반대로 여름철에 모래 해변에서는 열에너지가 H/R_N 에 의해 60%, $\lambda E/R_N$ 에 의해 20%, 그리고 G/R_N 에 의해 20%가 대기로 수송되기도 한다(Hsu, 1980). 즉, 지표면 구성 상태에 따라 대기로 열에너지가 전달되는 방식이 다르다는 것을 알 수 있다.

3.3 에너지 수지

연안지역 간척지에 형성된 식생군락을 포함하는 대기 접지층에서 태양 복사로 받은 에너지는 토양열 플럭스와 대기 난류에 의한 현열 플럭스, 잠열 플럭스 그리고 식생층에 저장되는 열에너지로 평형을 유지한다. 식생 캐노피에 의한 열저장은 식생 캐노피 내부 온도 변화로 추정할 수 있다. 수립지역에서 순복사량에 대한 식생에 의한 열저장량이 차지하는 비중이 0.05~0.2까지 나타났으며, 0.2 이상이면 에너지 수지 방정식에서 열저장량에 의한 영향을 무시할 수 없다(Cho et al., 2003). 경작지에서는 식생에 의한 열저장과 토양에 의한 열저장이 에너지 수지 방정식에서 순복사량의 약 15% 가량을 차지하기 때문에 에너지 저장량을 고려해주는 것이 에너지 수지 방정식의 분산을 약 10% 감소시킬 수 있다(Meyers and Hollinger, 2004).

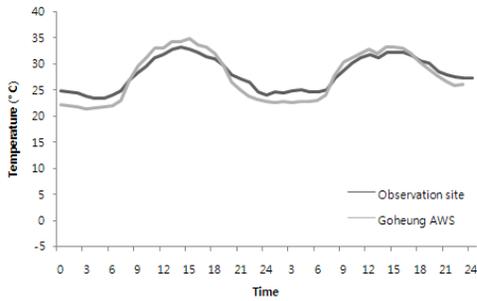
평균 에너지 플럭스 비율을 Table 2에 나타내었다. 여름철 주간 에너지 분배는 잠열 플럭스가 가장 큰 비중을 차지하고 있다. 이는 여름철에

는 식물의 증산과 증발이 활발하기 때문이다. 또한, 높은 식생 밀도는 토양열 플럭스의 비중을 약하게 하였다. 가을철에는 식생의 증산 작용이 약해지고, 식생의 밀도 또한 낮아짐으로서 잠열 플럭스의 비중이 줄어들고 현열 플럭스의 비중이 늘어났다. 토양열 플럭스의 비중 또한 증가한 것을 알 수 있다. 에너지 수지 방정식에 의해 이 잔여항(Res)을 식생의 열저장항으로 볼 수 있으므로, 여름과 가을에 순복사 에너지에 대한 저장열의 비율(Res/R_N)은 각각 16%와 15%이다. Harazono et al.(1998)에 따르면, 벼와 같이 식생의 크기가 작은 경우에도 관계가 된 경우이면 저장열의 크기가 순복사 에너지의 5~8% 정도로 토양열 플럭스와 비슷한 크기를 보였다. 연안 지역 갈대 캐노피와 삼림 캐노피는 유사한 점이 많지만, 크기와 구조면에서 명백한 차이를 보인다. 나무는 갈대보다 키와 부피가 크기 때문에 일변화에서 열저장량은 매우 크게 나타난다. Oke(1987)의 전나무의 에너지 수지 연구에서 순복사 에너지에 대한 열저장량의 비율이 15~20%로 나타났다.

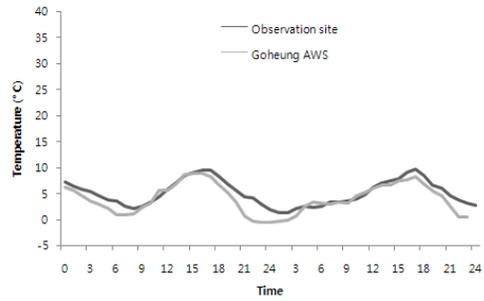
연안 습지의 대기난류에 의한 열에너지의 분배에 따른 열역학적 환경 특성을 설명하기 위해 집중관측이 수행된 고흥만 간척지와 주변지역의 기상요소들을 비교하였다. 비교 지점은 고흥 관측소로 34.36°N, 127.16°E에 위치하고, 집중관측 지점과 약 6 km 떨어져 있으며 주거와 상업지구 가까웠다. 두 지점의 온도 변화를 계절별로 살펴보면 겨울철을 제외하고 주간에는 식생 위의 기온이 고흥 관측소의 기온보다 낮게 나타나고, 야간에는 반대로 고흥 관측소의 기온이 더 낮게 나타났다(Fig. 5 (a)). 겨울철은 주간과 야간 모두 식생 위의 기온이 고흥관측소의 기온보다 높게 나타났다

Table 2. Mean flux ratios for daytime ($R_N > 0$) and nighttime ($R_N < 0$)

		H/R_N	$\lambda E/R_N$	G/R_N	Res/R_N
Summer	$R_N > 0$	0.31	0.48	0.05	0.16
	$R_N < 0$	0.02	-0.15	0.19	
Autumn	$R_N > 0$	0.42	0.28	0.15	0.15
	$R_N < 0$	-	-0.05	0.23	



(a) 09-10 Aug. 2005



(b) 23-24 Feb. 2005

Fig. 5. Temporal variations of the air temperature over the reed canopy (observation site) and near the urban aera (Goheung AWS)

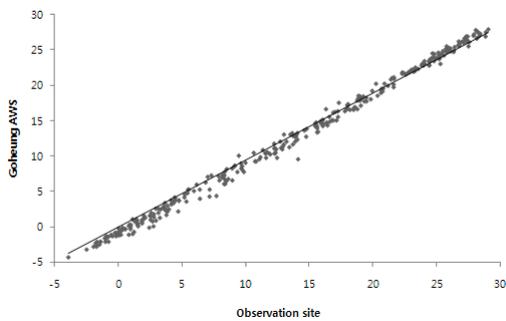


Fig. 6. Comparison of daily mean temperature over the vegetation canopy with that near the urban area from Jan. to Dec. 2005

(Fig. 5 (b)). 주간에 식생 내부와 외부의 온도 차이는 3~8 °C 차이가 난다(김근희, 2008). 식생이 열을 저장함으로써 식생 위의 기온이 주변 지역의 기온보다 낮아진다. 야간이 되면 갈대층 내부에 저장되었던 열이 갈대층 외부로 방출되면서 식생 층 내부의 온도가 외부보다 낮아지게 된다. 겨울철에는 비교적 약한 순복사 에너지로 인하여 여름철과 비교하여 식생층에 저장되는 열에너지가 미약하며 최고온도가 나타나는 시간도 늦어진다. 다른 식생이지만 지표면의 빠른 복사냉각을 완화시켜서 갈대층 위의 기온이 급강하지 않는다. 따라서 오전부터 최고 기온에 이르기까지는 두 지역의 기온이 같고 최고 기온이 나타난 시각 이후에는 그때까지 갈대층에 저장된 열이 대기로 이동하여

두 지역의 기온차를 유발한다. 즉, 식생의 효과는 열의 저장소로 최고 온도는 낮추고 최저 온도를 높여 일교차를 줄이는 효과를 보인다. 이는 연안 습지 위와 고흥 관측소의 기온에 대한 회귀 분석에서 겨울철에 갈대층 위에서 항상 더 높은 기온이 나타나고 있는 결과로도 설명이 된다(Fig. 6).

4. 결 론

갈대로 식생 캐노피가 형성된 연안습지에서 다섯 차례의 특별 집중관측을 통해 접지층에서 대기 난류의 역할과 이에 따른 에너지 평형에 대해 분석하였다. 순복사 에너지플럭스는 계절별에 따라 400~700 W m⁻²의 변동폭을 보이며 여름에 가장 높고, 겨울에 가장 낮았다. 여름에는 갈대가 활발히 성장하면서 잠열 플럭스에 의한 분배가 커지며, 또한 식생 밀도가 높아지면서 태양 복사에너지를 차단하여 토양열 플럭스는 낮게 나타났다. 가을에는 갈대 식생의 성장이 점차 둔화되면서 잠열 플럭스로의 분배보다 현열 플럭스에 의한 분배가 커졌다. 총 에너지 수지비는 여름에는 0.84, 가을에는 0.85로 나타나 약 15%의 오차를 보이고 이를 식생에 의한 열저장으로 간주할 수 있다. 그러나 잔여량은 식생의 열저장량 뿐 아니라 관측 기기오차, 장비설치시의 문제 등에 의한 부분도 있을 수 있다. 에너지 수지 종결 문제를 해결하기 위해서 식생의 열저장량에 대한 정량적인 관측이

절실히 요구된다.

식생 캐노피의 열저장으로 인해 관측지는 식생 내부와 외부 사이의 연직 온도 차이를 보이며, 이로 인해 주변 지역보다 주간에는 기온이 약 1~2 °C 낮고, 야간에는 약 2~3°C 높았다. 식생이 기온 조절의 역할을 함으로써, 약 3~5°C의 일교차를 줄이는 역할을 하고 있었다. 대기 난류에 의한 열 플럭스의 지속적인 관측을 통하여 연안습지의 식생층이 국지적 열환경을 조절하는 역할과 미기후변화에 미치는 중요성에 대한 보충 연구가 필요하다.

사사

이 논문은 2006학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음(PK-2006-073).

참고 문헌

1. Arya, S. P. (2001) Introduction to micro-meteorology, Academic Press, 420pp.
2. Burba, G. G., S. B. Verma, J. Kim (1999) Surface energy fluxes of Phragmites australis in a prairie wetland, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 94, pp. 31-51.
3. Cho, Kyung-Sook, Y. H. Park, B. L. Lee and B. C. Choi (2003) Characteristics of Canopy Heat Storage within a Conifer at Kwangneung Arboretum in Korea from September to December 2001, *Korean Journal of Atmospheric Science*, Vol. 6(1), pp. 37-45.
4. Christen, A. and R. Vogt (2004) Energy and radiation balance of a central European city, *Int. J. Climatol.*, Vol. 24, pp. 1395-1421.
5. Fitzjarrald, D. and K. E. Moore (1994) Growing season boundary layer climate

and surface exchanges in a subarctic lichen woodland, *J. Geophys. Res.*, Vol. 99, pp. 1899-1917.

6. Grimmond, C. S. B. and T. R. Oke (1995) Comparison of heat fluxes from summertime observations and a local-scale urban meteorological parameterisation scheme (LUMPS), *J. Appl. Meteorol.*, Vol. 41, pp. 792-810.
7. Harazono, Y., J. Kim, A. Miyata, T. Choi, J. I. Yun and J. W. Kim (1998) Measurement of energy budget components during the international rice experiment (IREX) in Japan, *Hydrological processes*, Vol. 12, pp. 2081-2092.
8. Hill, R. J., G. R. Ochs and J. J. Wilson (1992) Measuring surface-layer fluxes of heat and momentum using optical scintillation, *Boundary-Layer Meteorol.*, Vol. 58, pp. 391-408.
9. Hsu, S. A. (1980) Transfer of heat on a tropical beach, *Carrib. J. Sci*, 15, 159-163.
10. Kim, G. H. (2008) Heat energy exchange of reed canopy over Goheung bay wetland, Pukyong national university Master's thesis, 50pp.
11. Kustas, W. P., J. H. Prueger and J. L. Hatfield (2000) Variability in soil heat flux from a mesquite dune site, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 103, pp. 249-264.
12. Kwon, B. H., B. Benech, D. Lambert, P. Durant and A. Druilhet (1998) Structure of the marine atmospheric boundary layer over an oceanic thermal front: SEMAPHORE experiment, *J. of Geophysical Research*, Vol. 103, pp. 25, 159-25,180.
13. Mayocchi, C. L. and K. L. Bristow (1995) Soil surface heat flux : some general

- questions and comments on measurements, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 75, pp. 43-50.
14. 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.*, Vol. 125, pp. 105-115.
 15. Ogee, 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.*, Vol. 106, pp. 173-186.
 16. Oke, T. R. and H. A. Cleugh (1987) Urban heat storage derived as energy balance residuals, *Boudary-Layer Meteorol.*, Vol. 39, pp. 233-245.
 17. Oke, T. R., R. A. Spronken-Smith, E. Jauregui and C. S. B. Grimmond (1999) The energy-balance of central Mexico City during the dry season, *Atmos. Environ.*, Vol. 33, pp. 3919-3930.
 18. Santanello Jr. J. A. and M. A. Friedl (2003) Diurnal covariation in soil heat flux and net radiation, *J. Appl. Meteor.*, Vol. 42, pp. 851-862.
 19. Stull, R. B. (1988) An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 666pp.
 20. Weber, S. and W. Kuttler (2005) Surface energy balance characteristics of a heterogeneous urban ballast facet, *Climate Research*, Vol. 28, pp. 257-266.
 21. Wilson, K. B. and D. D. Baldocchi (2000) Seasonal and interannual variability of energy fluxes over a broad leaved temperate deciduous forest, *Agric. For. Meteorol.*, Vol. 100, pp. 1-18.