

해안 대기 표층의 난류와 해안 대기 경계층의 구조

권병혁[†]

(부경대학교)

Turbulence of the Coastal Atmospheric Surface Layer and Structure of the Coastal Atmospheric Boundary Layer

Byung-Hyuk KWON[†]

Pukyong National University

(Received November 14, 2005 / Accepted December 1, 2005)

Abstract

The surface energy budget depends on many factors, such as the type of surface, the soil moisture and the vegetation canopy, the geographical location, daily, monthly and seasonal variations, and weather conditions. In the coastal region, the surface is not homogeneous at various scales for instance water, sand, mud, tall grass, and crops. The energy balance over the vegetation canopy was analyzed with the optical energy balance measuring system. The latent heat flux was more intensive than the sensible heat flux. The sensible heat flux was very small in summer due to the canopy effect and higher in spring and autumn. In summer the development of the atmospheric boundary depended on rather the vertical shear of wind than the sensible heat flux.

key words: a tmospheric boundary layer, surface layer, canopy, sensible heat, latent heat, heat flux

I. 서론

대기와 해양 또는 지표면 사이의 에너지교환은 단파복사, 장파복사, 현열과 잠열의 이동에 의해 이루어진다. 현열과 잠열의 이동은 기본적으로 유체의 난류 생성과 소멸 과정에 토대를 두고 있어 이를 직접 관측하거나 추정하는 것은 쉽지 않다. 그럼에도 불구하고 현열과 잠열의 수송은 대기 내에서 다양한 규모의 운동을 직접 유발하기 때문에 이들 물리량을 정확도 높게 관측하는 것은

대단히 중요한 문제이다. 이들 요소의 추정은 그 자체로 대기-해양 사이의 물리 과정을 이해하는데 필요할 뿐만 아니라 각종 모델의 구동에 필요한 경계치 결정에 매우 중요한 부분이다. 대기와 해양의 운동은 기본적으로 대기-해양 그리고 해양대기-내륙대기의 에너지교환에 의해 지배된다. 이러한 에너지 교환의 시공간적인 변화에 의해 기상과 기후변동이 결정된다. 공기, 바다 그리고 육지가 만나는 해안 지역에서 공기의 움직임은 급속하게 변화한다. 수평 거칠기길이, 온도, 습도 등과 같은 지표 상태의 물리적 성질이 균질하면 대기

[†] Corresponding author : 051-620-6288, bhkwon@pknu.ac.kr

※ 이 논문은 2002년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었음.

난류가 평균류에 미치는 영향이 작을 것이다 (Vicker et al., 2001). 그러나 실제적으로 지형은 균질하지 않으며, 지표면의 물리적 성질 또한 균질하지 않다. 지표면의 비균질성으로 인하여 대기 표층에서는 대기 난류가 발달하게 되고, 성질이 다른 표면 위로 공기가 이류 되어 기존의 경계층 내에 이류로 인한 또 다른 경계층인 내부경계층이 형성 된다. 이는 해안 대기경계층의 특성으로 이질 표면이 공존하여 거칠기, 열플럭스 그리고 수분플럭스의 수평 차이가 많은 대륙과 해양의 경계면에서 주로 나타난다(Hsu, 1988).

육지와 해양의 경계 지역은 표층에서 발생하는 운동량플럭스와 열플럭스가 매우 뚜렷한 차이를 보이는 경계이기 때문에 이 지역에서 대기 경계층의 에너지 수송에 직접적인 영향을 미치는 대기 난류의 특성을 이해하는 것은 매우 중요하다 (Mahrt et al., 2001). 대기 난류의 시공간적 특성을 이해하기 위해 아주 정밀한 기기에 의한 정확한 관측이 요구된다. 해안 지역에서 악기상의 감시와 예보는 주로 종관 기상 관측체계를 이용한 기상관측과 예보 시스템에 의존하고 있다. 그러나 이러한 기존의 관측만으로는 대기의 구조나 예측의 정확도 향상에 한계가 존재하기 때문에 특히 해양대기의 밀도 높은 관측을 위하여 위성, 레이더, GPS 자료 등의 원격탐사를 이용한 보완 노력이 계속되고 있다(홍기만 외, 2005).

해안 지표면과 해수표면의 영향을 직접 받는 해안 대기의 표층과 경계층의 발달과 특성 분석을 위하여 현장 관측을 수행하였다. 대기 표층의 기상인자 관측은 자동기상관측 장비를 사용하였

고, 특히 표층섭광계(Surface Layer Scintillometer: 이하 SLS로 표기)를 이용하여 난류성분을 분석하였다. 상층의 기온, 습도, 기압, 풍향, 그리고 풍속을 GPS Radiosonde를 이용하여 관측하여 대기경계층의 열역학과 운동역학 연직구조를 분석하였다.

II. 현장 관측

1. 관측지점과 관측기간

관측 지점은 전라남도 고흥(34°36'N, 127°12'E)에 위치한 고흥만 간척지이며, 면적이 약 31 km² (3,100 ha)이다(Fig. 1). 간척사업으로 물이 빠진 갯벌위에 약 2~3 m의 갈대로 덮여 있으며, 토양 특성에 따라 지중은 완전한 배수가 이루어지지 않아 진흙층에는 항상 수분이 있는 상태이다. 지면을 덮고 있는 갈대는 계절에 따라 색깔과 수분 함유량이 달라지고 갈대들 사이의 간격이 매우 좁아 식생 내부에서 바람, 수분과 기온은 식생층 위와 차이가 있기 때문에 식생층의 존재는 대기 표층의 특성을 결정하는 매우 중요한 인자로 작용한다. 동서 방향으로 약 3 km, 남북 방향으로 약 10 km의 규모로 주변에 지형지물이 없고, 표면은 균질한 식생층으로 표층 대기의 특성 연구를 위한 매우 이상적인 실험 조건을 제공하고 있다.

2003년 7월부터 자동기상관측장비(AWS: Automatic Weather System)를 설치하여 온도, 습도, 풍향, 풍속을 실시간 저장하였고, 2005년 10월까지 대기

Table 1. Locations of automatic weather system network

| Site No. | Site Name | Latitude | Longitude | Altitude (m) |
|----------|---------------|----------|-----------|--------------|
| 262 | 고흥 기상관측소 | 34° 37' | 127° 16' | 20 |
| 749 | 도양(읍사무소) | 34° 32' | 127° 08' | 9 |
| 767 | 영남(면사무소) | 34° 36' | 127° 27' | 30 |
| 787 | 도화(138레이더부대) | 34° 27' | 127° 20' | 144 |
| 790 | 나로도(137레이더부대) | 34° 24' | 127° 29' | 128 |

난류 관측을 위해 모두 7회의 집중관측을 실행하였다. Fig. 1과 Table 1은 상시관측과 집중관측이 이루어진 관측지점(observation site)과 주변의 기상관측소 5 지점 기상관측망의 위치를 보여주고 있다.

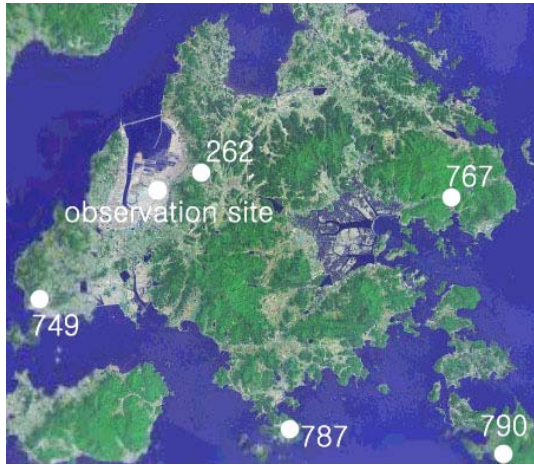


Fig. 1. Observation sites.

2. 관측 방법

2-1. 기상 관측탑과 식생층 내의 기상관측 장비
 10 m 기상 관측 탑을 설치하여 10 m에서 풍향, 풍속, 온도, 습도를 측정하고, 3 m의 풍속, 1.5 m에서 온도와 습도를 측정하였다. 갈대로 이루어진 식생에 대한 영향을 알아보기 위해 식생 위쪽과 내부에 기상 측정 장치를 설치하였다. 식생과 같은 높이에서 풍향과 풍속을 측정하고, 지면으로부터 1.5 m 높이에 식생층 내의 온도와 습도를 측정하였다. 지중온도계와 지면온도계를 토양 1 cm와 10 cm 깊이에 각각 설치하여 토양 내부의 온도와 지면 온도를 측정하였다. 또한 복사량을 알아보기 위해 순복사계(CNRI)를 설치하여 단파와 장파 복사에너지를 각각 상향, 하향으로 측정하였다.

2-2. SLS와 OEBMS

기기 관측을 통한 난류의 산출은 여러 방법으로 이루어졌으며, 그 중 하나의 방법이 직진하는 빛이 기온, 수분, 운동량 플럭스에 의해 간섭 받는

현상을 이용하여 난류를 측정하는 것이다. 대기경계층을 수평으로 통과하는 빛의 굴절을 이용하여 열, 운동량, 습도의 지면 플럭스를 구할 수 있다 (Hill, 1996). SLS (Surface Layer Scintillometer)는 위의 원리를 이용하여 플럭스와 난류를 구할 수 있는 장비이다. 주변장치로 순복사량, 토양열 플럭스를 측정하는 센서를 연결하여 OEBMS (Optical Energy Balance Measurement System)라고 하며, 에너지 수지 방정식에 따라 잠열플럭스를 계산할 수 있다. OEBMS는 SLS, 순복사 측정기 그리고 토양열플럭스 측정기로 구성되며, SLS는 레이저의 출력부(transmitter), 수감부(receiver)로 이루어진다.

SLS로 측정하는 요소는 굴절을 변동에 의한 구조함수 C_n^2 ($10^{-12} \text{ m}^{-2/3}$)와 굴절을 변동의 내부 규모 l_0 (mm)이며, 이로부터 현열플럭스 H , 모닌-오브코프 길이 L , 마찰속도 u_* 를 산출할 수 있다(Thiermann and Grassl, 1992). 온도 변동에 따른 구조함수 C_T^2 ($\text{K m}^{-2/3}$)는 C_n^2 의 함수이고 현열플럭스와 관련이 있다.

$$C_T^2 = \left(\frac{T^2}{aP} \right)^2 C_n^2 \dots\dots\dots (1)$$

$$C_T^2 = 2.68 \left(\frac{g}{T} \right)^{-2/3} \left(\frac{z}{H_0} \right)^{-4/3} \dots\dots(2)$$

여기서, T =절대온도(K), P =기압(hPa), $a=7.89 \times 10^{-5}$ (K/hPa), 식 (1)은 수분에 의한 변동은 무시한 것이다. 내부 규모 l_0 과 난류 운동에너지의 소산율 ϵ 은 다음과 같은 관계가 있다.

$$\epsilon = \nu^3 \left(\frac{7.4}{l_0} \right)^4 \dots\dots\dots (3)$$

ν 는 기온의 함수인 공기의 동점성도(m^2/s)이

다. 운동량플럭스 u_*^2 이 소산율의 함수이기 때문에 C_n^2 와 l_0 가 측정되면 모닌-오브코프의 상사이론에 따라 대기 난류의 현열플럭스와 운동량플럭스를 구할 수 있다(Thiermann and Grassl, 1992).

$$H = -\rho C_p u_* T_* \dots\dots\dots (4)$$

$$\tau = -\rho u_*^2 \dots\dots\dots (5)$$

III. 대기 표층의 난류

1. 바람과 기온의 평균 성분

고흥반도에서 기상요소의 균질성을 조사하기 위하여 집중관측 지점의 주변 5 지점에서 2003년 1월부터 2004년 12월까지 수집한 기온과 바람의 월평균 자료를 비교하였다. Fig. 2는 월평균 기온과 풍속의 연변화를 보여주고 있다. 기온의 관측 지점별 차이는 여름철에 최고 약 2°C로 겨울철의 차이 약 1°C보다 크게 나타나지만 5 지점에서 평균 기온의 변화 경향은 일치하고 있다. 평균 기온의 차이가 가장 크게 나타나는 262 지점과 749 지점은 각각 수목이 있는 낮은 산기슭과 바다에 인접한 평지에 각각 위치한다. 관측지점별 기온의 차이는 상이한 지형과 수목 분포 등에 기인한다. 특히 바람은 기온보다 지형의 영향을 더 많이 받는 것을 알 수 있다. 월평균 바람의 변화 경향이 개별적이어서 월별 특성을 찾을 수 없고, 풍속도 서로 일치하지 않는다. 지표면으로부터 10 m 이내에서 관측된 평균류의 역학 특성과 열역학 특성이 관측지의 지형과 주변 환경에 영향을 받는 것이 명백하기 때문에 지표면에 직접 영향을 받는 표층 대기에 대한 관측 자료는 대상 지역에서 수집되어야 하고, 지표면 특성을 고려하여 분석되어야 한다.

대기 표층의 난류 분석을 위해 집중관측이 실시된 지역에서 바람은 겨울철에는 주로 서풍 또

는 북서풍이고, 여름철에는 남동풍으로 한반도에서 전형적인 중관 규모의 바람장이 나타나고 있다(Fig. 3). 관측지점의 북단은 고흥만과 접하고 있기 때문에 국지적인 순환이 관측되기도 한다. 주간에는 해수표면보다 가열된 내륙에 접한 공기가 상승하여 기압이 낮아지면 수평 기압경도력이 작용하여 북쪽 해수위의 공기가 남쪽으로 유입되는 해풍과 유사한 공기의 흐름이 나타난다. 이렇게 국지 현상이 지배적일 때 표층에서 대기 난류가 활발하고 연직 방향으로 대기경계층 발달에 중요한 역할을 한다.

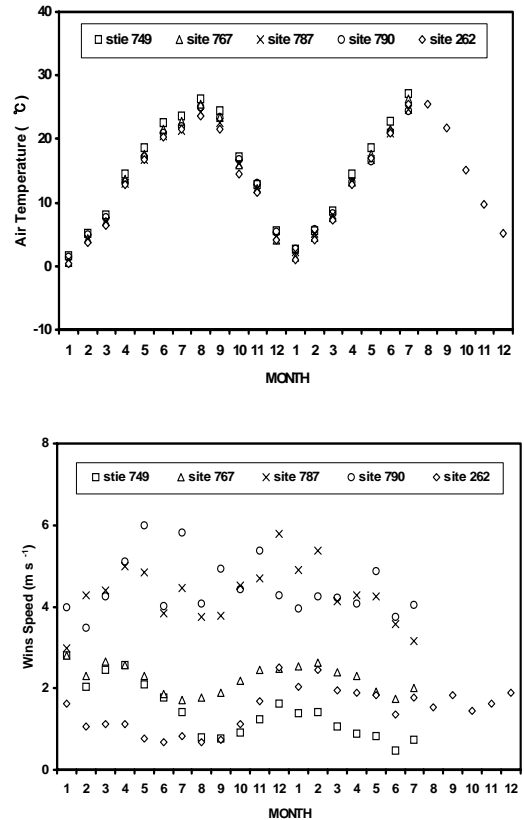


Fig. 2. Variations of monthly averaged air temperature (upper) and wind speed (lower) from Jan. 2003 to Dec. 2004.

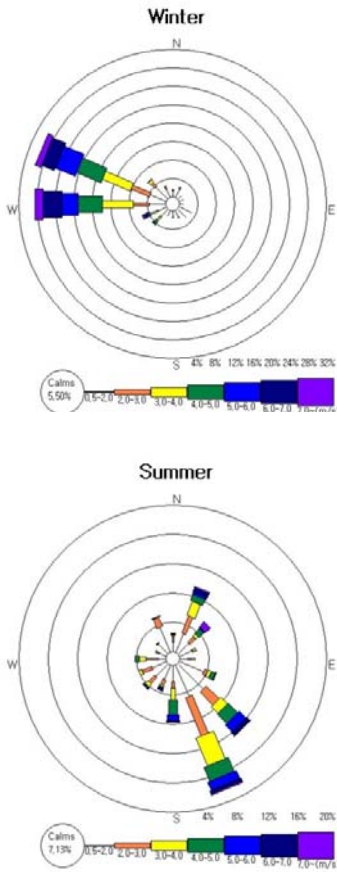


Fig. 3. Wind rose for the winter season and for the summer season.

2. 대기 표층에서 열수지

지표면의 영향을 지배적으로 받고 있는 높이 수백 m에서 1 - 2 km까지의 층을 대기 경계층 (Atmosphere Boundary Layer: ABL), 또는 행성 경계층(Planetary Boundary Layer: PBL)이라고 한다. 특히 지면의 영향을 많이 받는 대기 경계층의 하층 10%에 해당하는 수십 m까지의 층을 지표층 또는 지표 경계층(Surface boundary layer)이라고 한다. 지표층 대기와 지표 사이의 열교환은 분자확산보다 와류에 의해 대부분 이루어지고 있다. 지표면과 해수표면에 입사되는 태양 복사에

너지는 표면과 대기 사이의 온도 차이에 의해 수송되는 현열, 물이 수증기로 상태변화를 하면서 방출하는 잠열 그리고 토양이나 해수 내부로 전도에 의해 이동하는 열의 합과 평형을 이룬다. 식생층에 저장되는 열에너지를 고려하면 열수지방정식은

$$R_N = H + H_L + H_G + \Delta H \dots \dots \dots (6)$$

여기서, R_N 은 순복사플럭스, H 는 현열플럭스, H_L 은 잠열플럭스, H_G 은 토양열플럭스를 나타내고, ΔH 는 식생층에 저장되는 열플럭스이다. OEBMS로 R_N , H 그리고 H_G 가 측정되고, 식생층에 의한 열저장은 식생층 내부 온도 변화로 추정할 수 있다. 수림지역에서 순복사량에 대한 식생에 의한 열 저장율이 차지하는 비중이 0.05~0.2까지 나타났으며, 0.2인 경우 에너지 수지 방정식에서 열 저장율에 의한 영향을 무시할 수 없다 (Cho et al., 2003). 경작지에서 관측한 에너지 수지 평형에서 식생에 의한 열저장과 토양에 의한 열저장이 에너지 수지 방정식에서 순복사량의 약 15% 가량을 차지하기 때문에 에너지 저장항을 고려해주는 것이 에너지 수지식의 분산을 약 10% 감소시킬 수 있다(Meyers and Hollinger, 2004). 그러나 본 연구에서는 열 저장항을 관측할 수 없어서 열수지방정식 구성에 고려되지 않았다.

Fig. 4는 계절별 열플럭스의 일변화를 보여준다. 순복사 에너지의 최대값은 태양 고도에 따라 2월에 약 500 W m^{-2} 에서 8월에 약 800 W m^{-2} 의 변화를 보이고 있다. 토양열플럭스는 봄철 관측자료가 누락되었지만 그 절대값이 작고, 계절에 따른 변화가 미약하다. 겨울철의 현열플럭스(최대 약 100 W m^{-2})가 여름철보다 크게 나타나는 이유는 대기 온도와 식생층 상부의 온도 차이가 여름철보다 크기 때문이다. 이는 해상에서 겨울철에 현열속의 최대값이 관측되는 경우와 같은 이유이다(홍기만 외, 2005). 그러나 현열플럭스는 여름철

에 매우 작고 봄철과 가을철에 최대 약 150 W m^{-2} 로 해상에서 분석된 현열플럭스의 변화와 상이한 결과이다. 겨울철 대기의 온도보다 높은 식생층 상부의 온도가 식생층 내부의 온도보다 높기 때문에 현열이 대기와 지표면으로 동시에 수송된다. 따라서 현열의 대부분이 대기로 직접 수송되는 해수표면과 모래 해변보다 작은 현열이 식생층 상부에서 대기로 수송되었다.

잠열플럭스는 식 (6)의 열수지 방정식에서 잔류항으로 계산되었다. 열에너지는 보존되기 때문에 현열플럭스가 작은 겨울철과 여름철에는 잠열플럭스에 의해 순복사 플럭스로 받은 열이 대기로 수송된다. 겨울철에는 갈대잎이 말라서 증산 작용이 없고, 지표가 노출되어 수증기는 지표면에서만 증발된다. 반면 여름철에는 지표면에서 증발뿐만 아니라 무성한 갈대잎에서 증산 작용도 활발하기

때문에 잠열플럭스의 역할(H_L/R_N)이 더 크게 나타났다. 봄철과 가을철에는 현열플럭스가 크기 때문에 순복사 플럭스에 대한 잠열플럭스의 비율(H_L/R_N)이 65%를 넘지 않았다. Hsu (1980)는 여름철에 모래 해변에서는 열에너지가 H/R_N 에 의해 60%, H_L/R_N 에 의해 20% 그리고 H_G/R_N 에 의해 20%가 대기로 수송된다는 결과를 제시했다. 즉 지표면 구성 상태에 따라 대기로 열에너지가 전달되는 방식이 다르다는 것을 알 수 있다.

IV. 대기 경계층의 구조

대기 경계층의 발달은 지표면 상태의 물리적 성질과 열역학적 변화에 따라 영향을 받는다. 특

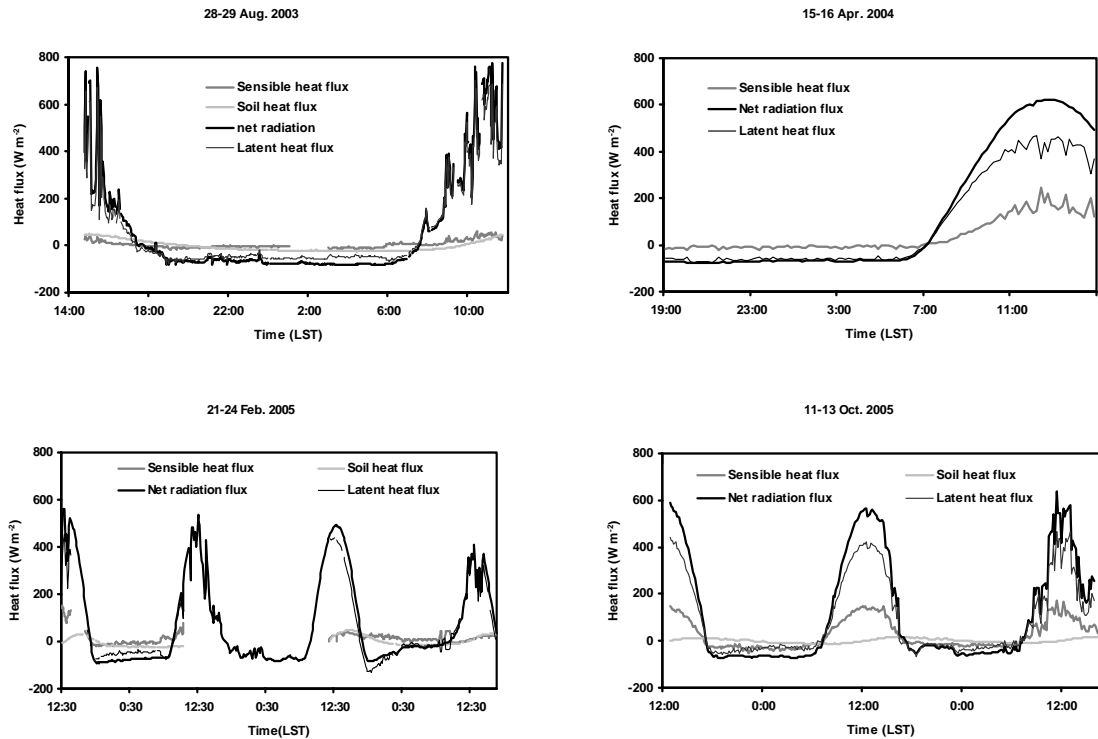


Fig. 4. Variations of heat fluxes over the canopy layer in the reclaimed land (see the observation site in Fig. 1).

히 이 층의 구조는 대기 흐름이 지면에 의해 방향과 속도가 불규칙한 난류의 지배를 받는다. 대기 경계층의 난류 발생 원인은 역학적인 원인과 열적인 원인으로 나눌 수 있으며, 발생한 난류는 운동량과 열, 수증기, 기체 등의 물리량을 수송하거나 확산시킨다. 이런 이유로 대기 경계층을 혼합층이라고도 한다. 그리고 대기 중에 배출되는 대기오염물질의 수송과 확산에도 큰 영향을 준다. 난류는 지형, 지면 온도, 식생 종류나 분포와 같은 지표면 특성에 의해 영향을 받으며, 대기안정도에 대해서도 많은 영향을 받는다. 대기경계층은 인간과 동식물이 호흡하고 생활하는 층이기 때문에 대기환경학적인 면에서 그 연직 발달 범위를 추정하고 예측하는 연구는 매우 중요하다.

일반적으로 대기경계층의 높이(또는 혼합고)는 단열변화 과정에서 변하지 않는 온위와 비습(또는 혼합비)의 연직분포로부터 결정된다. 여름철(2003년 8월 29일) 주간에 관측한 온위의 고도에 따른 변화를 나타내는 Fig. 5에서 혼합고의 일변화를 알 수 있다. 대기 경계층은 1200 LST에 약 1000 m, 1400 LST에는 1400 m 그리고 1700 LST에 1500 m까지 발달한다. 혼합고 변화를 분석한 대표적인 Wangara 실험(Deardorff, 1978)의 결과는 지표에서 현열플럭스가 최대가 되는 1400~1500 LST에 혼합층도 가장 높게 성장하였으나 Fig. 5는 1700 LST에 혼합고가 가장 높았다. 대기 경계층 내에서 온위의 시간에 따른 변화가 없는 것은 미약한 지표면 현열플럭스의 변화도 하나의 원인이다. 토양 수분이 많은 경우에 바람, 상대습도, 태양 복사 등에 의한 수분 증발이 잠열플럭스를 증가시키고, 계속된 증발로 토양층의 수분량이 감소하면 수분 증발에 의한 잠열플럭스의 양도 감소하며, 발달한 경계층을 유지하고 더 발달시키는 역할을 현열플럭스가 한다(Pan and Mahrt, 1987). 그러나 Fig. 4에서 여름철 현열플럭스가 매우 작아서 대기 경계층 발달에 기여하지 못한다. 현열플럭스가 최대값을 지나 감소하는 시간에도 혼합고가 계속 성장하는 것은, Fig. 6에서 확인할 수

있는 것과 같이, 대기 경계층 상부에서 풍속의 강한 연직 층밀림(shear)이 유지되어 대기 난류의 강도가 크기 때문이다(Stull, 1988).

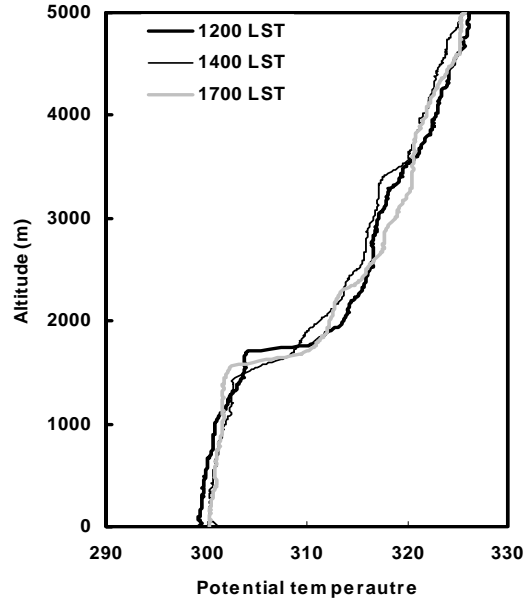


Fig. 5. Vertical profiles of the potential temperature over the coastal region (see the observation site in Fig. 1) on 29 Aug. 2003.

풍속과 풍향의 연직분포는 대기 경계층의 특성을 이해하는데 매우 유용한 정보이다. Fig. 6에서 풍속은 고도에 따라 증가하여 1400 LST에 1400 m에서 최대 풍속을 보이고, 이 고도는 온위의 연직 분포에서 결정한 혼합고와 일치한다. 1700 LST에 혼합고를 1500 m까지 성장시킨 강한 층밀림에 의해 최대 풍속은 혼합고보다 높은 1700 m에서 나타난다. 일반적으로 바람은 지표면의 마찰과 주변 지형지물에 의해 오염되어 고도에 따른 평균류의 특성 파악이 용이하지 않기 때문에 바람의 연직분포로부터 혼합고를 결정하기는 매우 어렵다. Fig. 6에서와 같이 풍속의 연직분포에서 대기 경계층의 발달을 결정할 수 있는 것은 관측 지점 주변에 공기의 흐름을 방해하는 지형지물이

없고, 식생층이 균질하게 분포한다는 방증이 된다. 이렇게 이상적인 조건의 영향은 풍향의 연직 변화에서도 찾을 수 있다. 1400 LST에 지표 수 m 내에서 남서풍이 불고, 고도가 증가함에 따라 시계방향으로 풍향이 바뀌어 약 800 m에서 서풍이 되어 5000 m까지 풍향이 유지 된다. 이는 균질한 환경에서 표면 마찰력, 전향력과 기압경도력이 평형을 이루어 고도에 따라 풍향이 순전하면서 풍속이 증가하는 Ekman층의 특성을 잘 보여주고 있다.

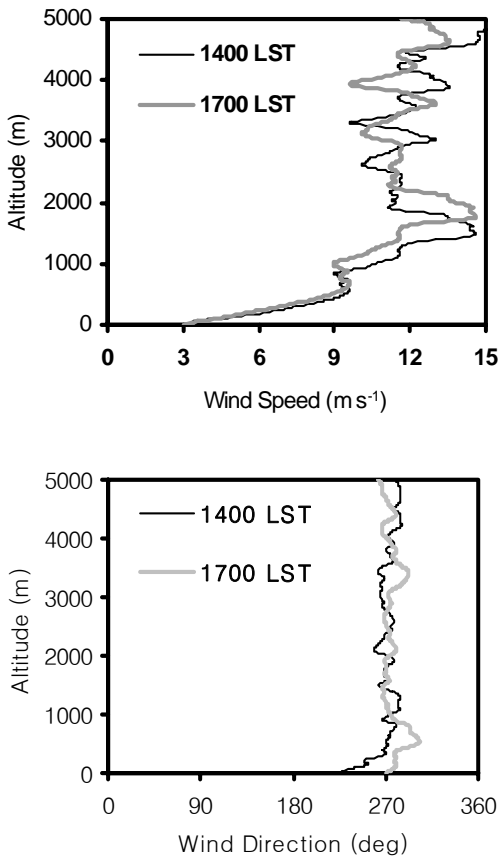


Fig. 6. Vertical profiles of the wind speed and the wind direction over the coastal region (see the observation site in Fig. 1) on 29 Aug. 2003.

V. 결 론

해수와 육지가 만나는 해안은 서로 다른 성질의 표면이 접하는 지역으로 대기 난류가 발생하기 쉬운 조건을 제공한다. 해수를 막아 갈대로 식생층을 이룬 해안 지역에서 대기 표층의 난류 특성을 분석하기 위해 상시관측과 집중관측을 실시하였다.

식생층 위에서 대기로 열의 전달은 주로 증발과 발산에 기인하는 잠열플럭스에 의해 이루어진다. 대기 난류 에너지 생성에 매우 중요한 역할을 하는 현열플럭스가 봄철과 가을철에 크고, 해수면 위의 현열플럭스보다 월등히 큰 것은 육상에서 관측되는 현열플럭스의 특성과 같다. 한편 식생층 위에서 잠열플럭스가 현열플럭스보다 우세한 것은 해수면 위에서 관측되는 열플럭스의 특성과 같다. 따라서 식생층은 해상에서 육상으로 또는 그 반대로 공기가 움직일 때 대기의 급격한 특성 변화를 완화시키는 역할을 할 수 있다.

관측지점 주변이 균질하고 평탄해서 여름철에 바람의 세기가 고도에 따라 증가하여 혼합고에서 최대 풍속이 관측되었는데 이는 대기 경계층에서 전형적으로 나타나는 역학적 특성이다. 지표층에서 부는 남서풍이 고도에 따라 순전하여 혼합고에서 서풍이 관측되어 지균평형 상태에 식생층 표면 마찰이 고려된 Ekman층의 풍향 변화와 일치하였다. 대기 경계층 상부에서 풍속이 최대가 되고, 강한 층밀림은 혼합고 성장을 유도하였다. 식생층은 대기 경계층 발달에 열플럭스의 기여도를 감소시켰지만 연직 층밀림이 강한 바람이 대기 경계층을 육상에서 일반적으로 관측되는 고도까지 발달시켰다.

참고 문헌

홍기만 · 권병혁 · 김영섭, 위성자료를 이용한 한반도 주변 해상 대기표층의 열속, 수산해

- 양교육연구, 17(2), pp.209~217, 2005.
- Cho, Kyung-Sook, Yun-Ho Park, Byong-Lyol Lee and Byoung-Chheol Choi, Characteristics of Canopy Heat Storage within a Conifer at Kwangneung Arboretum in Korea from September to December 2001, Korean Journal of Atmospheric Science, 6(1), pp.37~45, 2003.
- Deardorff, J. W., Observed characteristics of the outer layer, In short course on the planetary boundary layer, American Meteorological Society, 1978.
- Hill, R. J., G. R. Ochs, and J. J. Wilson, Measuring surface-layer fluxes of heat and momentum using optical scintillation, Boundary-Layer Meteorol., 58, pp.391~408, 1996.
- Hsu, S. A., Transfer of heat on a tropical beach, Carrib. J. Sci, 15 pp.159-163, 1980.
- Hsu, S. A., Coastal Meteorology, Academic Press, p.260, 1988.
- Mahrt, L., D. Vicker, J. Edson, J. Wilczak and J. Hare, Boundary-layer transitions in offshore flow, Boundary-Layer Meteorol., 89, pp.385~405, 2001.
- Meyers, T. P. and S. E. Hollinger, An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean, Agric. For. Meteorol., 125, pp.105~115, 2004.
- Pan, H.L. and L. Mahrt, Interaction between soil hydrology and boundary-layer development, Boundary-Layer Meteorol., 38, pp.185~202, 1987.
- Stull, R. B., An introduction of atmospheric boundary layer meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988.
- Thiermann, V. and H. Grassl, The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, Boundary-Layer Meteorol., 58, pp.367~389, 1992.
- Vicker, D., L. Mahrt, J. Sun and T. Crawford, Structure of offshore flow, Mon. Wea. Rev., 129, pp.1251~1258, 2001.