

울릉도에서 구름 유입시 관측한 해양대기경계층의 열수지에 관한 사례연구

김희종¹ · 윤일희² · 권병혁^{3,*}

¹경북대학교 천문대기과학과, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

²경북대학교 과학교육학부 지구과학교육전공, 702-701 대구광역시 북구 산격동 1370

³부경대학교 환경대기과학과, 608-737 부산광역시 남구 대연3동 599-1

A Case Study on the Heat budget of the Marine Atmosphere Boundary Layer due to inflow of cloud on observation at Ulleungdo

Hee-Jong Kim¹, Ill-Hee Yoon², and Byung-Hyuk Kwon^{3,*}

¹Department of Astronomy and Atmospheric Sciences, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

²Department of Earth Science Education, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

³Department of Environmental Atmospheric Sciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

Abstract: In order to study developments of the marine atmosphere boundary layer in cloud incoming, important parameters like heat advection, surface layer heat flux, and radiation energy were estimated using the rawinsonde, AWS data, satellite images, and buoy data which was installed at the East Sea. We explained the heat variation and the development of mixed layer in terms of surface layer heat flux and long wave radiation under the cloudy sky. The heat flux was obtained by means of the bulk method. Conservation of heat was analysed by heat budget equation, which was consist of buoy data in the East sea, and sounding data at Ulleungdo and at Pohang. During the inflow of cloud, radiative cooling at the surface after sunset was suppressed and long wave radiation from cloud played a role of warming. The surface layer temperature was also remained warm by influence of warm advection from south-easterly direction. The air temperature in night was increased, as a result, mixed layer was not destroyed and The nocturnal boundary layer was composed of the mixed layer and the residual layer.

Keywords: marine atmosphere boundary layer, heat budget, rawinsonde, cloud, bulk method

요 약: 구름이 유입하는 경우 해양대기경계층의 발달을 분석하기 위하여, 울릉도에서 관측한 레윈존데 자료와 AWS 자료, 위성사진, 동해에 설치된 부이 자료를 이용하였다. 이 자료를 이용하여 열의 이류와 표층 열속, 구름 유입에 따른 복사에너지를 추정하였다. 혼합층 내의 열 변화 및 혼합층의 발달을 표층 열속과 구름에 의한 장파복사속으로 설명하였다. 열속의 변화를 알아보기 위해 벌크법을 이용하였다. 울릉도, 동해상의 부이, 포항에서 관측한 자료를 이용한 열수지 방정식으로 대기경계층의 열보존 관계를 분석하였다. 구름의 유입으로 인해 일몰 후 지면의 복사생각이 방해되고, 구름에서 장파복사가 방출된다. 그로 인해 야간에 오히려 기온이 증가하였다. 또 남서쪽으로부터 따뜻한 공기가 이류되어, 하층 대기의 온도를 증가시켰다. 이러한 이유로 혼합층이 파괴되지 않고, 잔류층을 형성하며 남아있었다.

주요어: 해양대기경계층, 열수지, 레윈존데, 구름, 벌크법

*Corresponding author: bhkwon@mail1.pknu.ac.kr

Tel: 82-51-620-6288

Fax: 82-51-625-2529

서론

대기복사의 관점에서 구름은 태양의 단파복사를 산란, 반사하기 때문에 구름이 없는 경우에 비하여 지구-대기계의 반사능이 증가한다. 구름은 장파에너지를 방출하기 때문에 지구-대기계에서 우주로 방출되는 장파복사가 증가하고 동시에 지표에서의 하향복사가 증가하여 구름이 없을 때보다 온실효과가 증가한다(이광목, 2001). 복사평형 온도에 관한 연구가 활발해지면서, 구름이 지표온도 및 대기온도 분포에 미치는 영향을 온실기체, 지표의 반사도, 태양상수, CO₂의 변화 등에 얼마만큼의 민감도를 유지하는가를 조사하였다(Manabe and Moller, 1961). 고층운은 지표와 대류권 및 하부 성층권의 온도를 증가시키는 반면 중층운과 하층운은 그 온도를 감소시킨다. 또한 지구의 평균 구름은 대류권과 지표의 온도를 하강시킨다. 손병주(1996)는 여름철 대기의 자료를 이용하여 지표에서 구름에 의한 장파복사속도에 대한 연구를 하였다. 그 결과, 북반구 중위도에서 장파복사속이 20~45 Wm⁻²에 이르며, 온저 고도가 낮은 하층운과 두꺼운 적란운과 난층운과 같은 적란운의 영향이 크다고 분석하였다. 주간에는 구름이 존재하는 경우 지표면 온도와 표층 온도는 증가하고 표층의 열속 및 운동량속도 증가하는데 그 원인은 구름 유무에 따른 전천일사량의 변화보다는 바람의 강도에 기인한다(Kwon and J'nior, 2004). 야간에는 장파복사로 육상의 지표면 가열을 유발하는 구름은 야간 안정층을 파괴하기도 한다(권병혁, 2001).

대서양에서 수행된 SOFIA(Surface of the Ocean: Flux and Interaction with the Atmosphere) 실험에서는 구름의 존재가 해양대기경계층에 미치는 영향을 조사하였다. 그 결과, 혼합층은 표층 열속에 지대한 영향을 받아 발달하며, 구름에 의해 불연속을 이루어 표층과 구름층으로 나뉘는 것으로 밝혀졌다(R'chou et al., 1995; Lambert and Durand, 1999). Roach and Slingo(1979)는 북대서양에서 수행된 JASIN(Joint Air-Sea Interaction) 실험 자료와 장파복사전달 수치모형을 이용하여 열평형을 유지하기 위하여 장파복사가 열을 공급함을 보였다. 아조레스 해역에서 항공기 관측 자료와 ARPEGE 수치모형을 이용하여 해양대기경계층에서 산출된 열수지는 구름의 유무에 따른 복사에너지에 고려해야 한다(Kwon et al., 1998).

이 연구에서는 비를 동반한 구름이 존재하는 경우

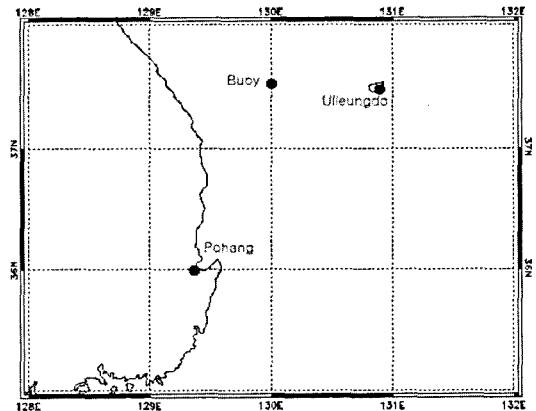


Fig. 1. Location of observation sites.

해양대기경계층의 발달을 분석하기 위하여 부이 자료와 상층대기 관측 자료를 중심으로 열의 이류와 표층 열속을 분석하였다. 또한 구름 유입에 따른 복사 에너지를 추정하였다. 또 혼합층 내의 열 변화 및 혼합층의 발달을 정량화된 표층 열속과 구름의 존재에 기인한 장파복사속도로 설명하였다.

관측 자료

이 연구에서는 울릉도 기상대(37° 28'N, 130° 53'E, 해발고도 220 m)에서 2002년 3월 28일부터 29일까지 3시간 간격으로 총 8회에 걸쳐 Rawinsonde로 관측한 상층대기 자료를 이용하였다. 그리고 지상 기상값을 알기 위해 같은 기간에 해당하는 울릉도 기상대 AWS 자료를 이용하였다. 관측기간의 종관 기상상태를 알아보기 위해 일기도와 적외 영역의 위성사진을 이용하였다. Rawinsonde 자료로부터 기압, 기온, 온위, 혼합비, 풍향, 풍속 등을 얻었으며, AWS 자료로부터 지상의 기온 변화를 구하였다. 열속 계산을 위해 동해에 설치된 부이(37° 32'N, 130° 00'E)와 포항 기상대(36° 02'N, 129° 23'E)에서의 관측자료를 이용하였다. Fig. 1은 관측지점을 나타낸 그림이다.

관측기간 중 28일 야간에 서쪽으로부터 구름이 유입되었고, 29일 약 02 LST부터 강수가 시작되었다. 이 시간의 대기경계층 변화를 통하여 구름 유입에 의한 영향을 알아보았다. Fig. 2는 이 기간에 해당하는 적외 영역의 위성사진이다. 28일 18 LST에 울릉도 서쪽으로 구름이 유입하고 있으며, 28일 21 LST와 29일 00 LST에는 울릉도를 포함한 동해의 대부

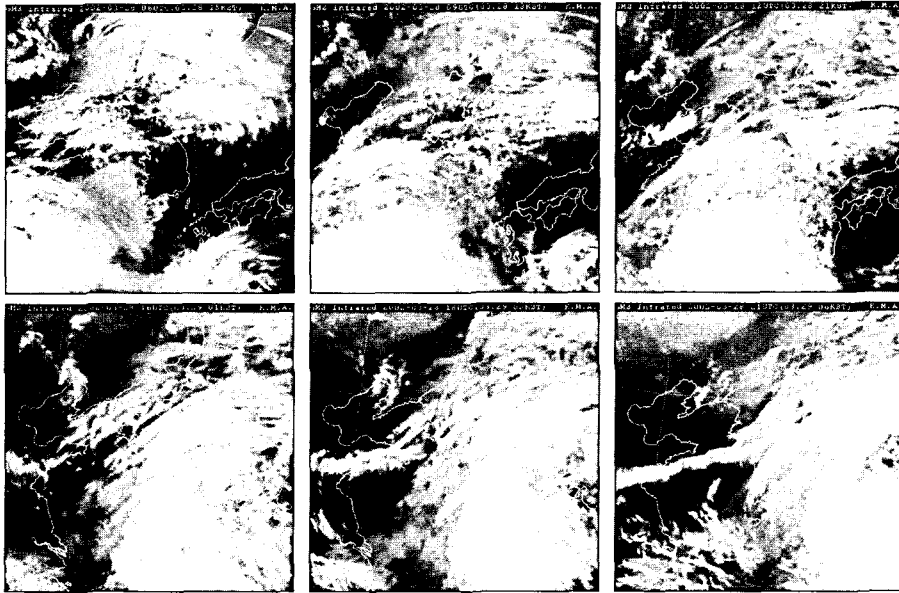


Fig. 2. GMS infrared images from 28 (15, 18, 21 LST) to 29 March 2002 (01, 03, 06 LST).

분이 구름으로 덮였다.

해양대기경계층의 발달

대기경계층의 발달은 표층 난류속의 영향을 받아 육상에서는 현열속과 운동량속에 따라 혼합고의 변화를 추정할 수 있다. 해상에서는 잠열속의 영향을 무시할 수 없는 부력속과 운동량속이 혼합층의 깊이를 결정하는 역할을 한다. 해수면의 균질 거칠기를 고려한 역학 및 해수의 큰 열용량에 기인하는 해수면 온도의 시공간 균일성과 같은 열역학적 성질의 차이 때문에, 해양대기경계층의 특성은 육상에서의 대기경계층 특성과 다른 점을 보인다. 해안 지역이나 해수면 온도의 수평경도가 존재하는 해상에서 혼합층의 발달이 차이를 나타내고 특히 찬 공기가 더운 해상으로 이루어지면 내부경계층 발달을 유발한다(Sweet et al., 1981; La Violette, 1983; Mahrt and Paumier, 1982).

저기압의 영향권에 위치해 있던 한반도와 울릉도 주변해역 사이에서 해수면 온도의 시공간 변화는 각각 0.02°C/h, 0.005°C/km 이하로 나타났으며, 관측기간 동안 남풍 또는 남서풍에 의한 더운 공기 이류에 따른 것으로 추정된다. 3월 28일 1800 LST 이후 구름 유입이 시작되어 29일 00 LST부터 약 2시간 동안 약한 강수가 관측 되었다(Fig. 2). 따라서 울릉도

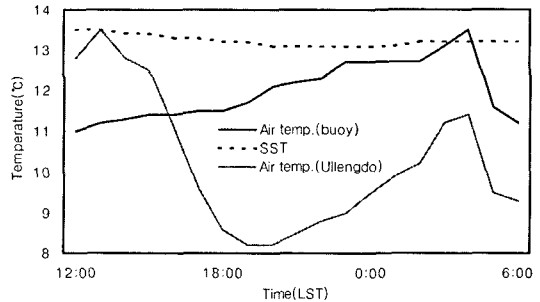


Fig. 3. Variation of temperature (buoy, sea surface, Ullengdo) from 28 (12 LST) to 29 (06 LST) March 2002.

주변해역에서 혼합층의 발달을 더운 공기의 이류와 구름의 유입의 관점에서 분석하였다.

Fig. 3은 28일 12 LST부터 29일 06 LST까지의 부이에서 측정한 기온과 해수면 온도, 그리고 울릉도 기상대에서 측정한 기온을 나타낸 것이다. 야간에 대기복사에서 구름의 역할은 장파복사를 흡수하여 방출한다. 그 결과 구름 하층 대기의 온도가 증가하게 된다(Stull, 1992). Fig. 2의 위성영상으로 확인한 구름의 유입과 Fig. 3의 표층대기의 온도 변화를 비교해보면, 이를 확인할 수 있다. 동해 연안의 해수면 온도는 구름의 유입과 무관하게 일변화를 보이지 않지만 해상 기온은 구름의 영향으로 28일 일몰 이후에도 계속 상승하여 29일 03 LST에 13°C까지 이르고

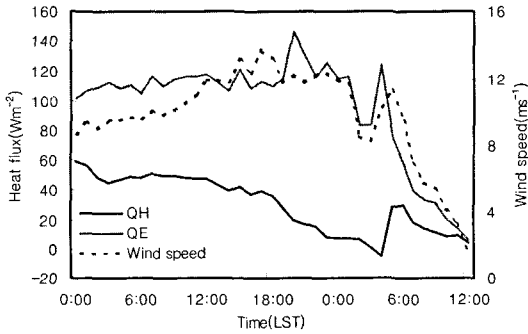


Fig. 4. Sensible and latent heat flux and wind speed from 28 to 29 March 2002 at East Sea (buoy).

하강하기 시작하여 일출 후 약 11°C를 유지한다. AWS에서 얻은 울릉도 지상 기온은 Fig. 3에서 보여주는 구름의 영향을 받지 않은 28일 18 LST까지를 제외하고 동해 연안의 해상 기온과 유사한 일변화를 한다. 해수면 온도는 해상 기온보다 높게 나타나는데 이는 한반도 주변 해역에서 3월에 나타나는 특성으로써 대기로 지속적인 열공급이 있음을 보여준다 (Park et al., 2003).

표층에서 난류에 의해 상향으로 열의 공급이 이루어지면 대기의 혼합이 원활해지면서 혼합층이 깊어진다. 그러므로 표층 열속 변화는 혼합층의 발달 규명에 필요한 요소이다. 동해 연안과 울릉도에서의 열속 변화를 분석하기 위하여 임의의 두 고도에서의 기온과 풍속의 차를 이용하는 벌크법을 이용하였다.

$$Q(H) = \rho C_p C_h U_a (T_s - T_a) \quad (1)$$

$$Q(E) = \rho L C_e U_a (e_s - e_a) \quad (2)$$

여기서 Q(H)와 Q(E)는 각각 현열속과 잠열속이다. ρ 는 공기밀도로 1.275 kg m^{-3} , C_p 는 공기 정압비열 $1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$ 를 이용하였다. C_h 와 C_e 는 bulk coefficient로 Kondo(1975)의 연구에서 제시한 값을 이용하였다. U_a , T_s 와 T_a 는 고도 s 와 a 에서의 풍속과 기온이다($s < a$). e_s 는 수증기압을 나타낸다. L 은 기온에 따른 증발잠열로 다음과 같이 정의한다(Stull, 1988).

$$L(\text{J kg}^{-1}) \cong (2.501 - 0.00237T(^\circ\text{C})) \times 10^6 \quad (3)$$

Fig. 4는 28일과 29일에 부이에서 측정한 매시간 자료를 이용하여 계산한 현열속, 잠열속, 풍속이다. 현열속의 경우, 29일 약 04 LST까지 감소하다가 다시 증가하고 있으며, 이때의 현열속은 -4.9 W m^{-2} 가

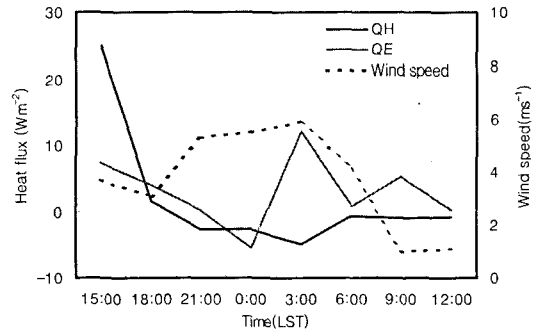


Fig. 5. Same as Fig. 4 but Ulleungdo.

지 낮아졌었다. 잠열속은 29일 01 LST까지는 큰 변동없이 100 W m^{-2} 이상을 유지하다가 02, 03 LST부터 값이 감소하는 양상을 보인다. 연안에서 100 W m^{-2} 이상의 잠열속 때문에 해양에서 대기로 열이 전달되어 혼합층을 심화하거나 유지하는데 기여한다 (Fig. 4). 29일 12 LST에는 현열속과 잠열속의 값이 각각 3.8과 6.1 W m^{-2} 로 낮게 나타났다.

Fig. 5는 울릉도 기상대에서 관측한 값과 레윈존데로 측정된 값을 이용하여 산출한 현열속, 잠열속, 풍속의 값을 그린 것이다. 현열속의 경우, 부이에서 관측한 값으로 계산한 Fig. 4의 결과와는 약간의 차이를 보인다. 지상에서 산출된 현열속은 18 LST 이후 모두 음의 값을 보이고 있다. 따라서 현열속은 잔류층 유지에 기여할 수 없으며 지표층에 열적 안정층이 생성되었음을 내포하고 있다(Fig. 5).

Fig. 6은 레윈존데를 이용하여 2002년 3월 28일 15 LST부터 29일 03 LST까지 3시간 간격으로 울릉도에서 관측한 온위의 연직분포이다. 일반적으로 일몰 후에 복사냉각으로 인해 대기 하층부터 안정층이 형성되어 발달하는 경우와 달리 29일 03 LST까지 28일에 형성되었던 혼합층이 파괴되지 않고 잔류층으로 남아있다. 28일 15 LST에 혼합고는 900 m까지 발달하였고, 18 LST에는 지상 기온이 약 3 하강하면서 표층 열속이 감소하여 혼합고가 850 m로 낮아졌다. 21 LST에 표층에서는 지표면의 복사냉각으로 안정층이 형성되고 더운 공기의 이유로 혼합층의 기온은 올라갔으나 구름 유입의 증가로 운저가 낮아지면서 잔류층의 깊이가 낮아졌다(Lambert and Durand, 1999). 29일 00 LST에는 운저가 더 낮아져서 03 LST까지 유지되면서 층적운이 형성되었고, 잔류층의 기온이 1 상승하지만 표층 기온도 같이 상승하여 안정강도의 변화는 없었다(Stull, 1988). 일몰 후에 구름

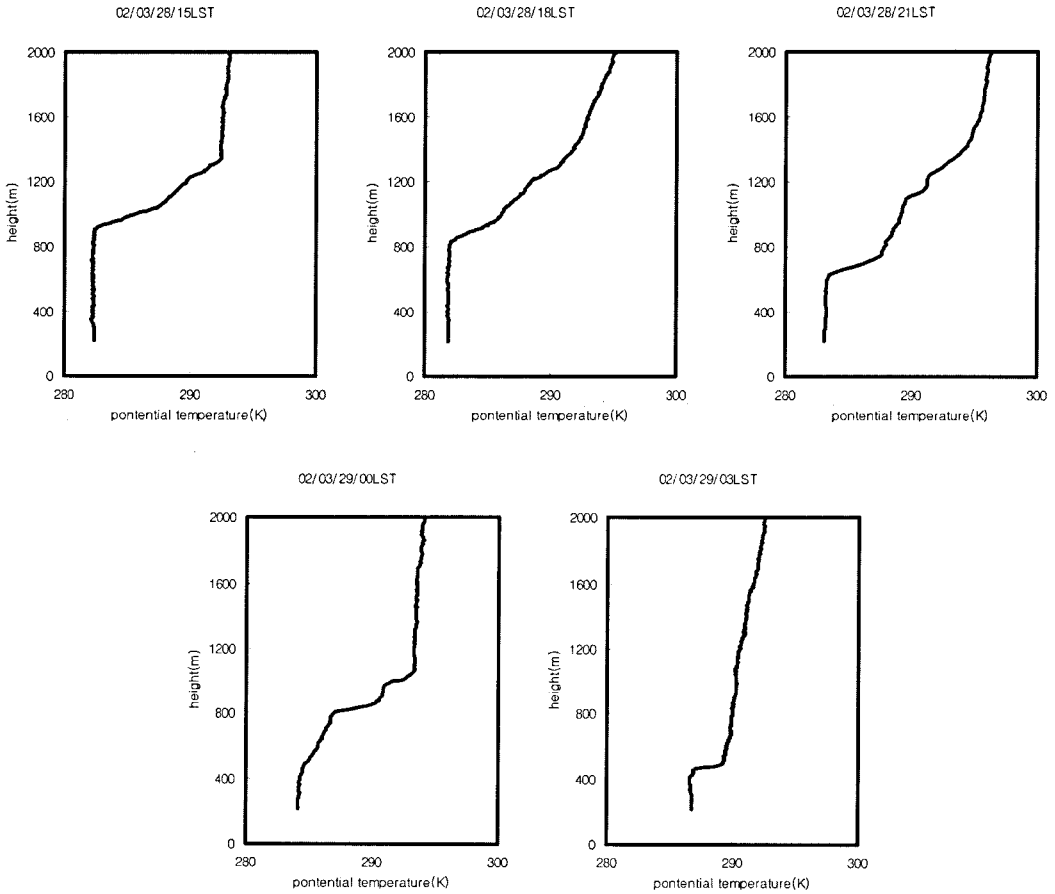


Fig. 6. Vertical profiles of potential temperature from 28 to 29 March 2002 at Ulleungdo.

의 유입으로 표층 복사냉각의 억제는 야간 안정층의 발달을 약화시켰고 잔류층 유지의 원인이 되었다.

해양대기경계층의 열수지

구름의 유입이 해양대기경계층의 발달에 미치는 영향을 정량적으로 조사하기 위하여 동해안에서 울릉도에 이르는 대기경계층의 열보존 관계를 분석하였다. 일반적으로 대기경계층 내에서 상변화에 의한 열의 이동이 없다고 가정하면, 난류와 복사에 의한 열의 이동과 이류가 열평형을 유지하는 중요한 역할을 한다. 복사에 의한 열의 이동은 난류에 의한 이동보다 매우 작아서 무시할 수 있지만 구름이 있거나 야간에 복사냉각이 진행되는 표층 대기의 경우 가장 중요한 열보존 요소이다. 구름이 없는 야간 안정층에서는 이류에 의한 열의 이동이 열평형을 좌우하기도 한다(Li et al., 1993). 공기의 이동 방향을 따라 좌표를 설정하고, 대기경계층에서 대기의 밀도 변화는 작

고, 온위의 연직 변화는 없으며(Fig. 6), 난류에 의한 열의 수평이동보다 연직이동이 크기 때문에 열평형 방정식을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} = \frac{\partial \bar{w}'\theta'}{\partial z} + \frac{1}{\rho C_p} \frac{F_N}{\partial z} \quad (5)$$

여기서, ρ 는 공기밀도, C_p 는 정압비열, 그리고 F_N 은 순복사량으로 $F_N = F_{\downarrow} - F_{\uparrow}$ 의 관계로 나타낸다. 일반적으로 해상이나 육상의 대기경계층의 고도별 부력속을 표층 부력속으로 모수화하면 부력속은 고도에 따라 선형으로 감소하여 대기경계층 상부에서 0에 접근한다(Kwon et al., 1998). 식 (4)를 잔류층의 상부까지 적분을 하고, 표층 열속을 식 (5)의 부력속으로 대체하면,

$$\frac{\partial \bar{\theta}}{\partial t} + u \frac{\partial \bar{\theta}}{\partial x} = \frac{1}{\rho C_p} \frac{H_B}{h} + \frac{1}{\rho C_p} \frac{F_N}{h} \quad (6)$$

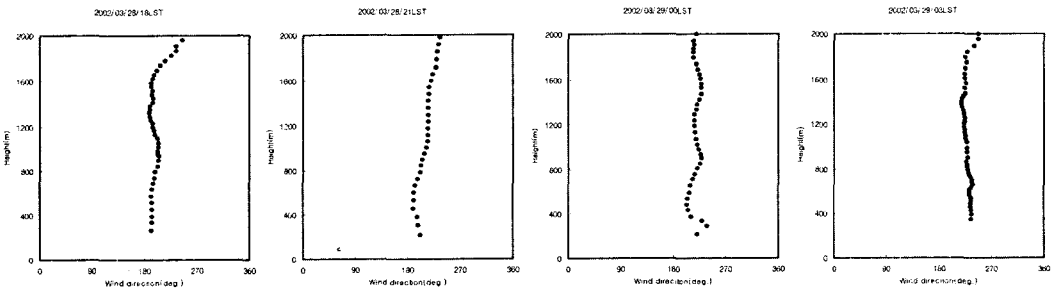


Fig. 7. Vertical profiles of wind direction from 28 to 29 March 2002 at Ulleungdo.

좌변의 첫째 항은 열의 국지 변화율이고 두 번째 항은 이류항이다. 그리고 우변 첫 번째 항은 난류에 의한 열의 이동을 나타내며, 두 번째 항은 복사에 의한 가열을 나타낸다. 온위는 고도에 무관하게 잔류층 내에서는 일정하기 때문에 수평변화도 잔류층에 걸쳐서는 일정하다고 할 수 있다. 따라서 $\partial\theta/\partial x$ 을 상수로 간주할 수 있다.

Fig. 7은 울릉도 지역에서 28일 18 LST에서 29일 03 LST까지 레윈존데로 관측한 풍향이다. 모든 관측에서 고도에 영향을 받지 않고, 일정한 방향으로 바람이 불고 있다. 21 LST에는 동해안과 울릉도 사이에서 남풍 또는 남서풍이 우세하고 00 LST를 지나면서 서서히 남서풍 계열로 바뀌어 03 LST까지 남서풍이 지속되었다. 포항과 속초에서 21 LST에 관측된 상층관측 자료에서도 남서풍이 관측되었다. Fig. 8은 2002년 3월 28일 21 LST에 포항에서 관측한 풍향의 연직성분이다. 지상에서는 남풍이 불며, 상층으로 올라갈수록 남서쪽으로 풍향이 순전되고 있다. 동해에 설치된 부이에서도 28일 21 LST까지는 남풍이 불었으며, 그 시간 이후 남서풍이 관측되었다. 따라서 21 LST에 남서풍이 포항과 울릉도를 잇는 축의 주풍이 되어 포항에서 관측된 자료와 식 (5)를 이용하여 해양대기 잔류층의 열평형을 조사하였다. 그리고 00 LST와 03 LST에는 부이자료와 울릉도에 관측한 자료를 이용하여 열수지를 분석하였다.

부이에서 관측한 자료로부터 얻을 수 없는 잔류층의 평균온위는 잔류층에서 온위가 일정하기 때문에 부이에서 관측한 기온과 기압을 이용하여 산출한 온위로 대체하였다. 이 경우 야간 해양대기안정층의 안정강도에 따라 부이 자료로 산출한 온위와 잔류층의 온위의 차이가 있을 수 있다. 복사냉각에 의한 해수면 온도의 변화가 작아서 표층과 잔류층의 온위차는 작으며, 이 차이가 식 (4)를 적분할 때 연직평균을

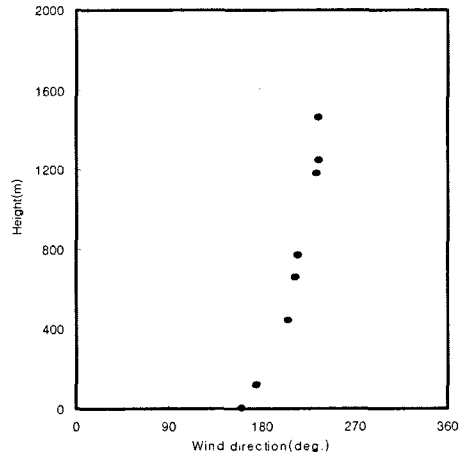


Fig. 8. Vertical profile of wind direction 21 LST 28 March 2002 at Pohang.

취한 온위에 미치는 영향은 미약하다. Fig. 6의 육상에서 관측된 온위의 연직 변화로부터 650 m까지 잔류층의 평균온위와 표층의 온위와의 차이는 1 미만이다. 따라서 해양대기 표층에서의 온위를 잔류층의 온위로 사용할 경우, 이류항의 기여가 과대평가될 수 있다. 저기압 영향권에서 종관 바람장이 지배적이고 울릉도와 부이의 수평영역 100 km 내에서 잔류층의 평균풍속은 차이가 없다고 가정하였다.

식 (6)에서 좌변의 첫째 항인 열의 국지 변화율과 두 번째 항의 이류 그리고 우변 첫 번째 항인 난류에 의한 열의 이동을 21, 00, 03 LST에 각각 산출하였고, 이 값으로 식 (6)에 의해 복사에 의한 가열을 추정하여 Table 1에 나타내었다. 야간 대기경계층의 일반적인 특성인 난류에 의해 냉각이 이루어지고 있으나 그 크기는 다른 항들에 비해 10^{-1} 정도의 크기로써 무시할 수 있다. 세 경우 모두 야간임에도 불구하고 울릉도 지역에서 기온이 상승하였다. 21 LST와

Table 1. The summary of the three case, 21, 00, 03 LST 28~29 March 2002

	$\frac{\partial \theta}{\partial t}$	$u \frac{\partial \theta}{\partial t}$	$\frac{1}{h\rho C_p} \frac{H_B}{\rho C_p}$	$\frac{1}{h\rho C_p} \frac{F}{\rho C_p}$
2002/03/28/21 LST	0.43	-0.36	-0.02	0.09
2002/03/29/00 LST	0.3	-0.2	-0.021	0.12
2002/03/29/03 LST	0.83	0.54	-0.04	1.41

00 LST에는 이류향이 각각 -0.36과 -0.2로 음의 값을 나타냈다. 이는 육상의 야간안정층에서는 무시되는 온난이류가 기온 상승에 가장 큰 기여를 한 것으로 생각된다. 21 LST에는 하향 복사에 의한 미약한 가열이 있었지만 00 LST에는 이류와 대등하게 기온 상승을 주도했다. 03 LST에는 한랭이류가 있었음에도 기온은 더 큰 폭으로 상승하여 복사에 의한 가열이 가장 중요한 요인임을 추정할 수 있다. 03 LST의 복사 가열을 1.41°C/h는 대서양에서 항공기 관측으로 분석한 해양대기경계층의 열평형에 구름이 기여하는 가열 정도와 수치모델의 결과와도 일치한다(Kwon et al., 1998; Roach and Slings, 1979).

결론

2002년 3월 28일과 29일에 동해 울릉도에서 풍터를 이용하여 관측한 자료와 AWS, 동해에 위치한 부이에서 관측된 자료 등을 이용하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

일반적인 경우와는 달리 주간에는 형성된 혼합층이 일몰 후 야간까지 소멸하지 않았다. 그 이유는 두 가지로 요약할 수 있다. 첫째, 일몰 후 유입된 구름에 의한 복사 냉각의 억제로 인하여 혼합층이 소멸하지 않았다. 벌크법으로 계산한 결과, 동해에서의 잠열속은 100 Wm⁻² 이상으로 주간에 발달한 혼합층을 유지하고 있다. 둘째, 따뜻한 공기의 이류에 의한 결과이다. 동해에 위치한 부이와 포항에서 관측한 값과 울릉도에서 관측한 값으로부터 이류향을 구한 결과, 혼합층의 잔류가 온난 이류에 의한 영향임을 알 수 있었다. 또한 29일 00~03 LST에는 구름으로부터 방출되는 장파복사로 인한 열속(heat flux)이 하층대기를 가열시켜 오히려 기온을 증가시키기 때문이다.

혼합층은 지표면 열속의 영향을 절대적으로 받는다. 또한 혼합층의 발달과 소멸에 있어서 구름의 영향을 무시할 수 없으며, 구름의 유무에 따라 대기경계층의 일변화는 많은 차이를 나타낸다.

따라서, 구름 유무에 따른 지속적인 관측이 이루어진다면 더 자세한 영향을 알 수 있을 것이며, 더 나아가 해양대기경계층의 특성 연구에 도움을 줄 것으로 생각된다.

감사의 글

이 연구는 민간검용기술개발사업의 하나인 “해양특성정보 통합시스템 구축사업” 과제에서 수행된 것입니다.

참고문헌

권병혁, 2001, 경북지역에서 관측된 야간 대기경계층의 특성, 한국환경과학회지, 10 (5), 329-336.
 손병주, 1996, 구름이 지표 장파복사 수지에 미치는 영향, 한국기상학회지, 32 (2), 229-242.
 이광목, 2001, 대기복사 -장파복사와 응용-, 시그마프레스, 194 p.
 Kondo, J., 1975, Air-sea bulk transfer coefficients in diabatic conditions, Boundary-Layer Meteorology, 9, 91-112.
 Kwon, B.H., Bénech, B., Lambert, D., Durand, P., Druillet, A., Giordani, H., and Planton, S., 1998, Structure of the marine atmospheric boundary layer over an oceanic thermal front: SEMAPHORE experiment, Journal of Geophysical Research, 103, C11, 25159-25180.
 Kwon, B.H. and José Francisco de Oliveira Júnior, 2004, Variations of turbulent fluxes in the Atmospheric Surface layer according to the presence of cloud, Journal of the Korean Earth Science Society, 25(2), 87-93.
 Lambert, D. and Durand, P., 1999, The marine atmospheric boundary layer during SEMAPHORE. I: Mean vertical structure and non-axisymmetry of turbulence, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 125, 495-512.
 La Violette, P.E., 1983, The Grand Banks Experiment: A satellite/aircraft/ship experiment to explore the ability of specialized radars to define ocean fronts. Report No. 49, Naval Ocean Research and Development Activity, NSTL Station, Mississippi.

- Li Xing-Sheng, Gaynor, J.E., and Kaimal, J.C., 1993, A study of multiple stable layers in the nocturnal lower atmosphere, *Boundary-Layer Meteorology*, 26, 157-168.
- Mahrt, L. and Paumier, J., 1982, Cloud-top entrainment instability observed in AMTEX, *Journal of Atmospheric Science*, 33, 41-51.
- Manabe, S. and F. Moller, 1961, On the radiative equilibrium and heat balance of the atmosphere, *Monthly Weather Review*, 12, 503-532.
- Park, M.J., Kim, Y.S., Kwon, B.H., and Han, Y.H., 2003, Characteristics of Heat and Turbulent Kinetic Energy over the Yellow Sea and the South Sea, *Korean Journal of Atmospheric Sciences*, 6(1), 1-11.
- Réchou, A., Durand, P., Druilhet, A., and Bénech, B. 1995, Turbulence structure of the boundary layer below marine clouds in the SOFIA experiment, *Annual Geophysicase*, 13, 1075-1086.
- Roach, W.T. and Slingo, A., 1979, A high resolution infrared radiative transfer scheme to study the interaction of radiation with cloud, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 105, 603-614.
- Stull, R.B., 1992, *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*. Kluwer Academic Publishers, 666 p.
- Sweet, W., Fett, R., Kerling, J., and La Violette, P., 1981, Air-sea interaction effects in the lower troposphere across the north wall of the Gulf Stream, *Monthly Weather Review*, 109, 1042-1052.

2004년 7월 13일 원고 접수
2004년 9월 18일 수정원고 접수
2004년 9월 18일 원고 채택