

남극 세종기지에서의 지표 플럭스 관측: II. 2002-2003년 남반구 여름 기간의 열과 수증기의 난류 교환

최태진* · 이방용* · 이희준** · 김성중* · 홍성민*

*한국해양연구원 부설 극지연구소

**기상연구소 예보연구실

Surface Flux Measurements at King Sejong Station in West Antarctica: II. Turbulent exchanges of sensible heat and latent heat in the austral summer of 2002-2003

Taejin Choi* · Bang Yong Lee* · Hee-Choon Lee** · Seong-Joong Kim* · Sungmin Hong*

*Korea Polar Research Institute, KORDI, Korea

**Forecast Research Lab., Meteorological Research Institute, Korea

ABSTRACT

Turbulent fluxes of sensible heat and latent heat were analyzed at King Sejong station in the austral summer of 2002 (December) and 2003 (January and February). Monthly mean air temperatures of January and February (2.2°C) were similar to those averaged over 1988 to 2001. Precipitation was less in January and greater in February than those averaged over last 14 years. In December of 2002 and January, there was precipitation primarily when easterly wind blew usually. The frequency of snowfall was equal to or larger than that of rainfall. In the mean while, precipitation primarily in forms of rainfall occurred with westerly wind in February. In addition, while for easterly wind, temperature and humidity was low, temperature and humidity were high in case of westerly wind. Based on flux footprint, measured flux mainly came from within 300 m with maximum of 40 m upwind, indicating the insignificant role of the sea around the study site. Half-hourly downward short wave radiation amounted up to ~ 1000 Wm⁻² and net radiation ranged from -50 to 600 Wm⁻². Half-hourly sensible heat flux was positive at daytime with maximum of ~ 400 Wm⁻², except the 27th and 28th in February of 2003 when it was negative all day despite of positive net radiation at short daytime. Latent heat flux was positive with maximum of ~ 130 Wm⁻². Depending on wind direction, the partitioning of net radiation into the sum of sensible heat flux and latent heat flux was larger than 0.8, indicating the strong source of the land surface for the atmospheric heating. The daytime averaged Bowen ratio (=sensible heat flux /latent heat flux) was significantly greater than 1, indicating that sensible heat flux was the main source to heat the atmosphere over the site.

Key words

King Sejong Station, eddy covariance, sensible heat flux, latent heat flux

1. 서론

식생을 포함한 지면과 대기 간의 스칼라(예, 에너지와 수분, 이산화탄소 등)와 운동량의 교환은 기상, 기후, 수문, 생태 등에 매우 중요한 역할을 한다. 이로 인해 다양한 지역에서의 에너지 및 수분 플럭스를 관측하고 그 메커니즘을 이해하기 위한 연구가 이루어지고 있다

(Baldocchi *et al.* 2001). 남극에서의 지표 에너지 및 수분의 교환은, 남극 면적의 약 98%가 만년설과 얼음으로 덮여있다는 지역적 특수성 때문에 이들 연구는 주로 배수풍(drainage wind) 및 질량 균형(mass balance)과 관련되어 이루어져 왔다(Bintanja *et al.* 1997; Reijmer and Oerlemans 2002; Van As *et al.* 2005). 즉, 지면(surface)의 강한 복사 냉각은 지표층(surface layer) 내

대기에서 지면으로 현열의 이동을 일으켜 지표층의 공기를 냉각시키고, 냉각된 지표층의 공기가 경사진 방향으로 이동하여 강한 배수풍을 발생한다. 그리고 배수풍은 지면에 쌓여 있는 눈을 재 분배하는 질량 균형에 영향을 미친다. 그리고 이 과정은 지면 얼음의 삭마(ablation)에 영향을 미친다.

남극 반도의 북서 해안과 그 주변의 섬들은 식물 지리대(phytogeographic zone) 구분에 의하면, 한랭하지 않은 해양성 기후대에 속하며(Stonehouse 1989), 일부 지역은 남반구 여름철에 지면이 드러나고 식생이 두드러져 남극 내륙의 지면 상태와 상당히 다르다. 남극 반도는 아남극 편서풍 지대에 있으며, 서쪽에는 Bellingshausen 해, 동쪽에는 Weddell 해가 있다. 반도의 지상에서는 Bellingshausen 해의 반영구적 저기압으로 인해 북서풍 계열의 따뜻하고 습한 바람이, Weddell 해의 동쪽에 자리잡은 저기압으로 인해 찬 남동풍이 발생한다(Martianov and Rakusa-Suszczewski 1989; King *et al.* 2003). 지형적 특징과 함께 이 성질이 다른 바람들로 인해 반도의 서해안과 동해안은 큰 온도차이를 보인다. 또한 남극 반도 지역은 현재 지구 전체로 볼 때 온난화가 가장 크게 일어나고 있는 지역 가운데 하나이다. 예로, 몇몇 지점(Faraday, Bellingshausen, Esperanza 그리고 Orcadas 기지)에서의 온난화는 1962-2001년 기간에 약 0.3-0.4°C/decade의 기온 증가율을 보인다. 그리고 이러한 온난화는 특히 남극반도 서부지역에서는 겨울철에 그리고 동부지역에서는 가을철에 보다 뚜렷하게 나타난다(Lee *et al.* 2002). 이에 대한 원인으로 대기 순환의 변동, 바다에서 얼음이 차지하는 면적과 해양 과정 그리고 온실 기체 증가로 인한 지구 온난화에 대한 지역 기후 반응이 주요한 원인으로 제시되고 있다(Vaughan *et al.* 2001, King *et al.* 2003). 하지만 그 원인 규명은 이곳에서의 짧은 관측 기록 역사 때문에 어려움을 겪고 있다. 내륙에 비해 이 지역에서의 지표 에너지 및 수분 교환에 대한 연구는 내륙에 비해 상대적으로 드문데 Bintanja (1995)는 1990-91년 남반구 여름철 세종기지(62°13'S, 58°47'W, 해수면 고도 9.87m)가 있는 King George섬의 Ecology Glacier에서 태양 단파 복사 에너지가 얼음의 삭마(0.75 m/month)의 주요 원인으로 평가하였다. 남극 반도는 남극권에서 지구 온난화에 의해 빙하가 가장 먼저 녹을 수 있는 가장 북쪽에 해당되어 중요한 의미를 갖는다.

2002년 12월에 세종기지 주변 지역에서의 지표면과 대기와의 상호작용을 통하여 지표면의 변화가 남극 대기에 어떤 물리적 영향을 미치는지 규명하고자 하는 연구를 시작하였다(최태진 등 2004). 최태진 등(2004)은 관측지에서의 전반적인 난류의 성질 분석 및 그에 근거한 플릭스 자료의 품질 관리 조건 제시를 통한 장기 에디 공분산 관측의 가능성을 진단하였다. 그리고 1년 이상의 기간에 대해 하향 단파 복사 및 현열 플릭스의 변동을 보였다. 본 연구에서는 보다 구체적으로 지표면이 드러나고, 지표면과 대기간의 교환되는 에너지가 활발한 2002년-2003년 남반구 여름철 세종 기지에서 미기상 환경의 특징을 분석하고, 시간적, 공간적 미기상 환경 변동에 따른 에너지 교환이 어떻게 달라지는가에 대해 논의하고자 한다. 이곳은 지구상에서 가장 온도가 증가가 빠른 남극 반도 옆에 위치하고 있다는 점과 여름철 지면이 드러나는 곳이라는 점에서 앞에서 언급된 남극에서의 지표 에너지 교환과는 달리 큰 의미를 갖는다. 이곳에서의 지표 플릭스의 장기 연속 관측은 지구 온난화와 지역간의 상호 작용 변화에 대한 중요한 자료(예, 지역 기후 모형의 검증 자료로의 활용 등)를 제공할 수 있다.

2. 재료 및 방법

이론적 배경

에디 공분산 방법

임의의 스칼라(χ)의 연직 플릭스, F 는 보존 방정식에 근거하여 산출된다. 관측지가 균질하고, 편평하며, 정체성을 만족하면서, 그 스칼라의 발원과 흡원이 없다고 가정하면, 연직 플릭스는 아래 식과 같이 연직 풍속(w)의 변동분과 그 스칼라의 변동분 간의 공분산으로 산출된다[e.g., Swinbank, 1951].

$$F = \overline{\rho_a w' \chi'} \quad (1)$$

여기서 ρ_a 는 건조 공기의 밀도, “-”는 시간 평균 그리고 “’”는 평균으로부터의 변동분을 가리킨다.

플릭스 발자취 분석

미기상 플릭스 관측 타워의 임의의 높이에서 에디 공

분산 방법으로 관측된 연직 플럭스는 가중 평균된 풍상측 지표 플럭스이다. 플럭스 발자취(footprint)란, 풍상측 지표면에 존재하는 각 (플럭스)발원 요소가 관측된 플럭스에 대한 기여의 정도를 나타낸다. 따라서 관측된 플럭스는 풍상측 발원지를 발자취 함수로 가중한 것의 총합이며, 다음과 같이 표현할 수 있다(Schmid 1997)

$$F(0, 0, z_m) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_0^{\infty} Q(x, y, z = z_0) f(x, y, z_m - z_0) dx dy, \quad (1)$$

여기서 $F(0, 0, z_m)$ 는 지면으로부터의 관측 높이(z_m)에서 관측된 연직 플럭스, $Q(x, y, z_0)$ 는 풍상측 지표면의 임의의 위치(x, y)에서의 발원의 강도, z_0 는 거칠기 길이, $f(x, y, z_m - z_0)$ 는 관측 높이 z_m 에서의 플럭스 발자취 함수이다. 만약 관측이 산림과 같은 곳에서 이루어지면 영면 변위(d)가 고려되어야 하며 z_m 대신에 $z_m - d$ 가 사용되어야 한다. 플럭스 발자취 함수는 크게 1) 이류 확산 방정식의 해석해, 2) 라그랑지 통계 모사, 3) 큰 에디 모사 (Foken and Leclerc 2004)에 근거하여 추정할 수 있다. 이 연구에서는 이류-확산 방정식의 해석해를 근거한 플럭스 발원지 모형(FSAM, flux source area modeling)을 이용하였다(Schmid 1997; http://www.indiana.edu/~climate/SAM/SAM_FSAM.html). FSAM의 입력 변수는 z_m/z_0 , σ_v/u_* , z_m/L 이다. 여기서 σ_v 와 L 은 각각 측면 바람(v)의 표준 편차와 Obukhov 길이이다. FSAM과 입력 변수를 이용하여 관측된 플럭스에 90% 기여하는 풍상측 면적을 평가 하였다. z_0 은 풍향에 따라 다소 달랐지만 여기서는 풍향에 무관한 월 평균 값을 사용하였다.

관측지

남극 세종기지는 남극 반도로부터 약 100km북쪽에 있는 남쉐틀랜드 군도의 킹조지섬 내 바톤 반도 끝 쪽 해안에 위치하고 있다(Fig. 1). 킹조지섬의 남서쪽으로는 Bellingshausen 해가, 남동쪽으로는 Weddell 해가 있다. 세종기지 주변은 10~30 cm 크기의 크고 작은 돌들이 토양을 덮고 있다. 돌 표면 및 돌 사이에 보이는 토양에서는 다양한 지의류 (lichens)와 선태류(bryophytes)가 서식하고 있다. 이 중 *Usnea fasciata-Himantormia*가 우



Fig. 1 The locations of South Shetland Islands including King George Island, Bellingshausen sea and Weddell sea.

점종이다(이주삼 1992). 하계기간 동안에 지의류 분포는 전체 관측지역의 절반 정도를 덮고 있는 것으로 추정된다.

관측 방법

저속 반응 기기

세종기지에서는 1988년부터 다양한 기상 변수들을 관측해 오고 있는데, 이 연구에서 사용된 기기와 측정 높이는 다음과 같다. 풍향/풍속계(skyvane type, Qualimetrics)는 지상으로부터 약 10m 높이에 타워 꼭대기에 있고, 기온과 상대습도를 측정하기 위한 온/습도계(temp./RH Probe, Qualimetrics)는 백엽상 내에 약 2m 높이에 설치되어 있다. 수평면 전천 일사량계(double spectral pyranometer, Eppley)는 지상으로부터 약 1.5m 높이에, 강수량계(tipping bucket type, Qualimetrics)는 약 1m 높이에 각각 별도로 설치되어 있다. 이들 측기들은 모두 기상관측 노장 내에 있으며, 출력되는 자료들은 매 10분 평균 값 (강수량은 30분마다 누적 값)으로 산출되는데 이 분석을 위해 다시 30분 값으로 평균하였다. 한편, 2002년 12월 하순부터 순복사계(CNR1, Kipp & Zonnen), 광량 센서(LI200, Licor), 온/습도계(HMP45C, Campbellsci Inc.)를 추가로 설치하였으며, 30분마다 평균 값으로 산출된다.

고속 반응 기기

에디 공분산 방법을 사용하기 위해 삼차원 초음파 풍

속계(CSAT3, Campbellsci Inc.)와 고속 반응 적외선 분석기(LI7500, Licor)를 지면으로부터 약 2.5m 높이에 설치하였으며, 자세한 설명은 최태진 등 (2004)에 나와 있다.

자료 선정 기준

획득한 에디 공분산 자료의 품질 평가에 대해서는 최태진 등(2004)에 자세히 나와 있다. 최태진 등(2004)에서는 풍속이 1.5 m/s인 자료를 품질이 좋은 자료로 결정하였다. 그러나 이 연구에서는 자료의 수를 늘이기 위해 풍속이 1.0 - 1.5 m/s의 자료도 사용하였다. 이 조건의 완화는 이 풍속 범위에 대해 현열 및 잠열 플럭스의 변동이 순복사의 변동과 잘 일치하여 타당하다 할 수 있다.

잠열 플럭스의 경우, 적외선 기체 분석기로 측정된 수증기 농도를 저속 반응 온도계(HMP45C)와 비교하여, 절대 값이 아닌 그 변동이 비슷한 경우 자료를 택하는 조건을 추가하였다. 적외선 기체 분석기로 관측된 수증기 농도는 온/습도계로 관측된 수증기 농도보다 약 0.5 mgm⁻³ 작았다.

저속 반응 온도계는 과거 자료와의 비교를 위해 백엽상에 설치된 온도 자료를 이용하였으나, 습도의 경우 비 정상적인 값이 산출되는 빈도가 많아 2002년 12월에 설치된 온/습도계(HMP45C) 출력 자료를 사용하였다.

3. 결과

기상학적 조건

복사

지표면과 대기간의 에너지의 교환은 지표 복사 수지(순복사=하향단파복사+상향단파복사+하향장파복사+상향장파복사)의 결과로 나타난 순복사의 현열 플럭스, 잠열 플럭스 그리고 토양열 플럭스의 배분으로 나타난다. 따라서 어느 지역의 지표면과 대기간의 에너지 교환을 이해하기 위해서는 복사 수지에 대한 평가는 기본적으로 요구된다. 낮 동안의 순복사는 지면이 얼음이나 눈으로 덮여있는 있는 경우를 제외하면 하향 단파 복사(즉, 전철 일사)에 의해 결정되며, 야간의 순복사는 상향 및 하향 장파 복사(즉, 지구복사)에 의해 결정된다. Fig.

2는 2003년 1월과 2월의 월 최대 및 평균 하향 단파 복사와 순복사의 일 변동을 나타낸 것이다. 1월의 월 최대 하향 단파 복사는 > 1000 Wm⁻²인 반면에 2월의 월 최대 하향 단파 복사는 ~ 700 Wm⁻² 이었다. 1월의 월 최대 순복사는 ~700 Wm⁻²까지 증가하였으나, 2월의 월 순복사는 ~400 Wm⁻² 이었다. 평균적으로 1월의 순복사는 -25 ~ 315 Wm⁻² 이었으며, 04:30~20:00 (LST)에 양의 값이었다. 반면에 2월의 순복사는 그 크기는 -23 ~ 154 Wm⁻² 이며, 순복사가 양의 값인 시간은 06:00~1900 (LST)로 짧아졌으며, 1월에 비해 주간 순복사 감소가 뚜렷하였다. 전체적으로 2월의 하향 단파 복사와 순복사의 크기는 1월의 약 2/3의 수준이다.

분석 기간 동안의 일 평균 하향 단파 복사와 순복사의 변동을 Fig. 3에 나타내었다. 일 평균 복사량의 변동은 상대적으로 큰데, 이것은 세종기지가 고위도 저압대에 위치하여, 빈번한 기압골의 통과로 강수 현상이 자주 발생하고, 흐린 날이 많기 때문이다. 일 평균 하향 단파 복사와 순복사는 1월말부터 뚜렷한 감소 추세를 보이며, 2

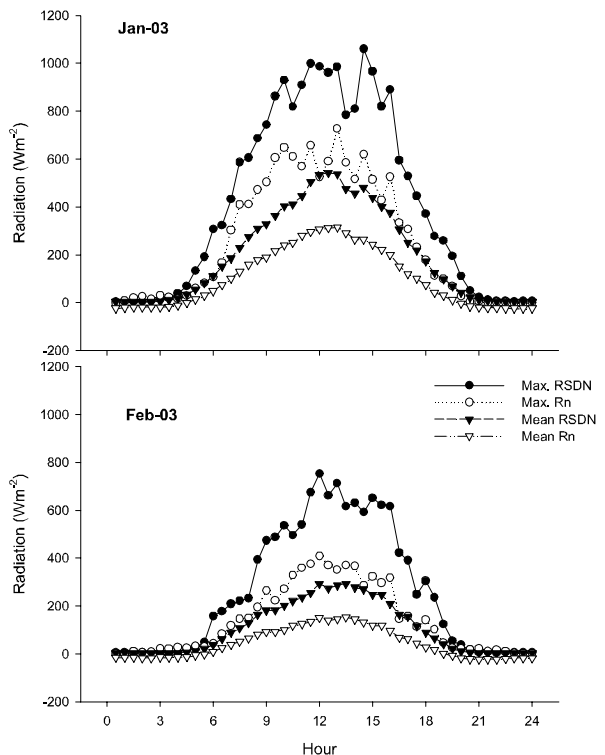


Fig. 2 The diurnal variations of monthly maximum and averaged downward short radiation (Rsdn) and net radiation (Rn) for January in 2003 (top) and for February in 2003 (bottom).

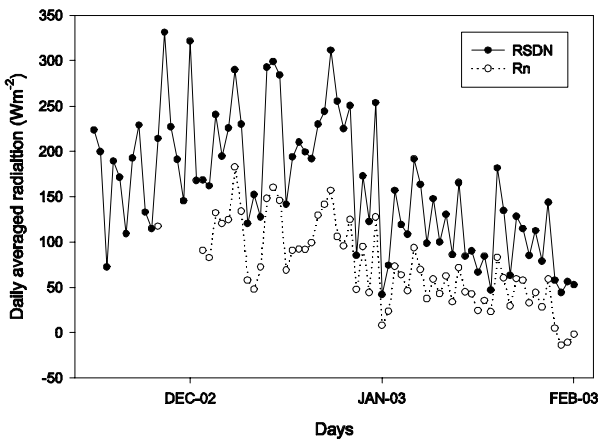


Fig. 3 The variations of daily averaged downward short wave radiation(RSDN) and net radiation(Rn) from Dec. 16, 2002 to Feb. 28, 2003.

월말에 한번 더 감소하였다. 2002년 12월 중순부터 2003년 1월 하순까지 일 평균 하향 단파 복사는 약 202 Wm⁻²였으며, 일 평균 순복사는 하향 단파복사의 약 50%였다. 1월 하순부터 2월 하순까지의 일 평균 단파 복사는 약 109 Wm⁻²였으며, 순복사는 하향 단파 복사의 약 43%로 감소하였다. 2003년 2월 26일~28일의 일 평균 하향 단파 복사는 50 Wm⁻²로 매우 작았으며, 이로 인해 일 평균 순복사는 -14 ~ 0 Wm⁻²였다.

풍향 및 풍속

극지연구소에서 매년 발행하는 세종기지 기상 연보에 근거하여 풍향의 빈도를 16 방향에 대해 분석하였다. 전체 기간 동안 풍향은 서-북북서(W-NNW)가 약 38%, 북동-남동(NE-SE)가 약 39%로 비슷하였다. 평균 풍속은 전자의 경우 약 6.3 ms⁻¹, 후자의 경우 약 5.9 ms⁻¹로서-북북서 계열의 바람이 다소 강하였다. 한편, 12월과 1월의 경우 서-북북서가 전체 풍향의 약 31%, 북동-남동(NE-SE)가 약 45%, 2월의 경우 전자가 약 50%, 후자가 약 30%였다. 두 지배적인 풍향은 이곳에서의 기후학적 풍향(Bellingshausen 해의 반영구적 저기압과 Weddell 해의 동쪽에 자리잡은 저기압)과 잘 일치한다. 또한 풍향은 아래에서 논의되는 바와 같이 강수, 기온 및 습도와 밀접한 관련을 가진다.

강수

1988년부터 2002년까지 세종기지에서의 관측된 연 강

수량은 227-780 mm이다. 이 강수량은 남극 내륙의 강수량 보다 약 10배 많다. Martianov and Rakusa-Suszczewski(1989)는 King George 섬의 해면 고도에서의 연 평균 강수량이 500 mm, Zamoruyev (1972)는 산 정상에서 연 평균 강수량이 약 2000 mm 임을 보였다. 이는 같은 지역이라도 고도에 따른 강수의 경도가 큼을 보여준다. Fig. 4는 분석 기간 동안의 30분 단위의 강수량과 강수가 있었던 시간의 풍향의 변동이다. 2002년 12월과 3003년 1월의 경우, 동풍 계열일 때 강수 현상이 뚜렷하였다. 2002년 12월은 강우보다 강설 횟수가 많았으며, 2003년 1월은 비슷하였다. 반면에 2003년 2월의 경우, 강수는 북-북서풍 계열일 때가 동풍 계열일 때보다 강수가 자주 발생하였으나 2월 25일과 26일은 다시 동풍과 함께 많은 강수가 있었으며, 기온이 떨어졌다. 2월은 강우 횟수가 강설 횟수보다 약 5배 많았다. 2002년 12월 15일 이후 적설 최심(maximum depth snow cover)은 12월이 0.55 m, 2003년 1월은 0.56 m였다. 2003년 2월의 경우, 2월 24일까지는 적설 최심은 0 m이었으나 27일 0.37 m로 다시 증가하였다. 따라서 분석 기간 중 2월의 관측지는 대부분 노출되었다 할 수 있다.

2003년 1월과 2월의 월 적산 강수량은 각각 43.2와 129.1 mm였다. 1988년부터 2002년까지의 1월과 2월의 월 평균 강수량은 각각 53.5 mm와 52mm로 나타났다. 2003년 2월의 강수량은 2월뿐만 아니라 세종기지에서 강수량이 관측된 이래 월 최대 값을 기록하였다. 2003년 2월의 강수가 있었던 날은 18일로 1월의 12일 보다 많

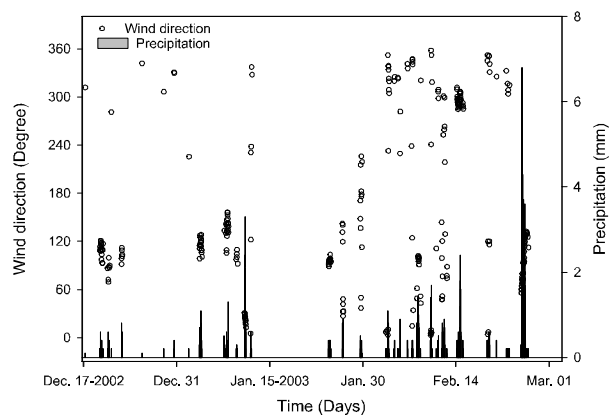


Fig. 4 The variations of precipitation and its corresponding wind direction.

았다. 특히, 2월 25일은 약 59 mm의 많은 강수가 기록되었는데, 이는 세종기지에서 관측 이래 일 최대 값이다. 2월 25일과 26일 강수를 제외한 2월의 강수량은 54.6 mm로 1월 보다 많았다. 결국 2월은 1월보다 강수 빈도도 많고, 강수량도 많았다.

기온 및 습도

1988년부터 2002년 동안 세종기지에서 관측된 연 평균 기온은 -3.0 ~ -0.5°C로 항상 0°C 보다 낮았다. 하지만, 1월과 2월의 월 평균 기온은 0.7 ~ 3°C로 항상 0°C 보다 높았으며, 12월은 다음 해의 1월과 2월에 비해 거의 대부분이 1°C 이상 낮았다. 분석 기간인 2003년 1월과 2월의 월 평균 기온은 모두 2.1°C로 1988년부터 2002년까지의 1월과 2월 평균 기온(2.2, 2.0°C)과 비슷하였다. Fig. 5는 분석 기간 동안의 일 평균 기온 및 수증기압 및 일 주풍향의 변동이다. 여기서의 일 평균 값의 변동에 대한 분석이므로 Fig. 4와 달리 일 단위의 주풍향이 사용되었다. 주 풍향은 풍향 구간을 8개 구간으로 나눈 뒤 일 단위 빈도가 가장 많은 구간을 그 날의 주 풍향으로 하였다. 일 평균 기온은 2003년 2월 25일 이전까지는 0 - 5°C이었으나 26일 이후부터 영하로 떨어졌다. 26일 이후부터는 일 평균 순복사가 음의 값을 가졌다 (Fig. 4). 분석 기간 동안의 일 최대 값은 2003년 1월 12일의 9.2°C였으며, 최저 기온은 2월 28일의 -2.4°C였다. 최저 기온이 0°C 이상인 날은 전체 76일 중 55일이었다 (not shown).

한편, 풍향에 따른 기온의 변동과 수증기압의 변동은 잘 일치한다. 서풍 - 북풍 계열에 대해 기온과 수증기압

은 상승한다. 반면에 북동 - 남동풍인 경우 기온과 수증기압은 하강하였다. 풍향에 따른 기온과 수증기압의 변동은 관측지의 기후학적 특징 즉, Bellingshausen 해로부터의 북서풍 계열의 따뜻하고 습한 바람이, Weddell 해로부터의 찬 남동풍과 잘 일치한다(Martianov and Rakusa-Suszczewski 1989; King et al. 2003).

플릭스 발자취 분석

세종 기지는 바톤 반도의 해안가에 위치하여 바다에 인접하다. 비록 플릭스 타워는 해안선에서 300 m 이상의 내륙에 위치하지만 관측된 플릭스의 발원 또는 흡원이 육지인지 바다인지에 대한 평가가 필요하다. 이를 위해 FSAM을 이용하여 플릭스 발자취 분석을 하였다. FSAM의 입력 변수인 z_m/L 의 경우 95% 이상이 $-0.6 < z_m/L < 0.05$ 이었다. 이 중 약 75%가 중립 안정대기($-0.05 \sim 0.05$)에 속하였다. 관측지에서 잠열 플릭스 보다 현열 플릭스가 큼 (대기를 상대적으로 불안정하게 만들며, 뒷부분에서 다시 언급됨)에도 불구하고, 관측 높이(즉, 2.5m)가 상대적으로 낮고 풍속이 강하여 중립안정도가 지배적이다. σ_v/u_* 의 경우 전체 자료의 약 57%가 $2 < \sigma_v/u_* < 3$, 약 21%가 $3 < \sigma_v/u_* < 4$ 이었다. 관측된 플릭스에 90% 기여하는 풍상측의 발원 면적(플릭스 발자취)을 평가하기 위해 30분 시간 단위에 대해 5 m x 5 m 격자 간격으로 플릭스 발자취를 평가하였다. 그런 후 측면 방향 플릭스 발자취를 적분한 플릭스 발자취를 1°간격으로 구분한 후, 해당 풍향의 각 격자에 대해 산술 평균하였다. 각 방향의 플릭스 발자취는 최대 기여 지점을 100으로 하는 정규화된 기여도이다. Fig. 6은 분석기간 동안 평균 플릭스 발자취이다. 플릭스 타워로부터 40 m를 중심으로 산재해 있는 식생은 지의류로는 Usnea, crustous lichens, 그리고 선태류로는 Andreaea, costomum 등이다(김과 정 2002). 플릭스 타워로부터 바다가 가장 가까운 남서쪽이 300 m 이상이기 때문에 이 분석에 근거하여, 관측된 플릭스에 대해 주변 바다의 영향은 크지 않을 것으로 평가할 수 있다.

열, 수증기 및 이산화탄소 교환

난류 에너지 교환

Fig. 7은 분석 기간 동안의 현열 및 잠열 플릭스의 변

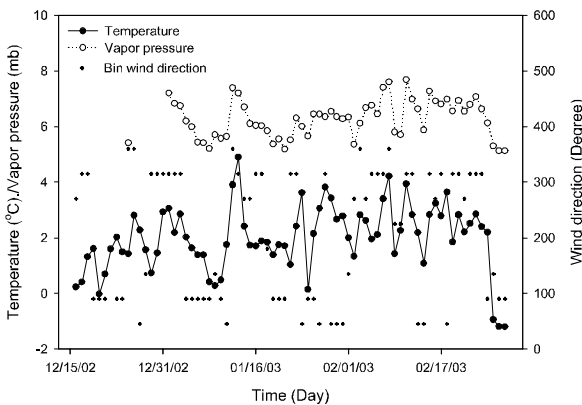


Fig. 5 The variations of daily averaged air temperature and vapor pressure with main wind direction for the analysis period.

동을 보인 것이다. 2월 27일과 28일을 제외하면 전 기간에 걸쳐 현열 플럭스가 잠열 플럭스 보다 컸다. 현열 플럭스는 12월 중순부터 증가하기 시작하여 1월 중순에 가장 컸다. 1월 20일 현열 플럭스는 약 430 Wm^{-2} 까지 증가하였다. 이때 순복사는 약 516 Wm^{-2} , 잠열 플럭스는 약 23 Wm^{-2} 였다. 이후 현열 플럭스는 점차 감소하다

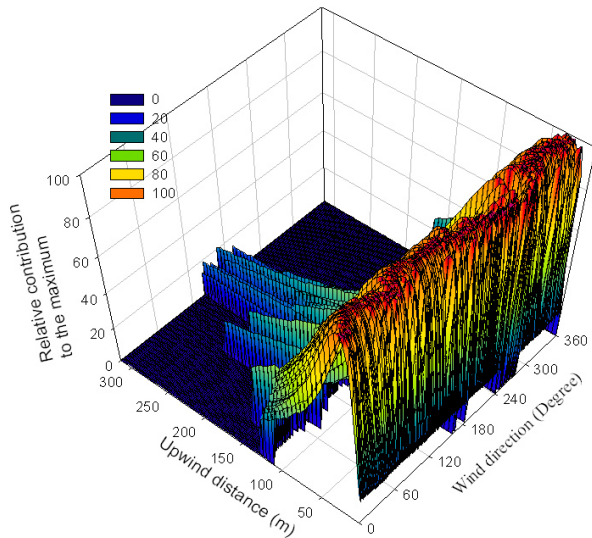


Fig. 6 The relative flux contribution with bin wind direction of 1° . The highest value at each bin wind direction was assigned 100.

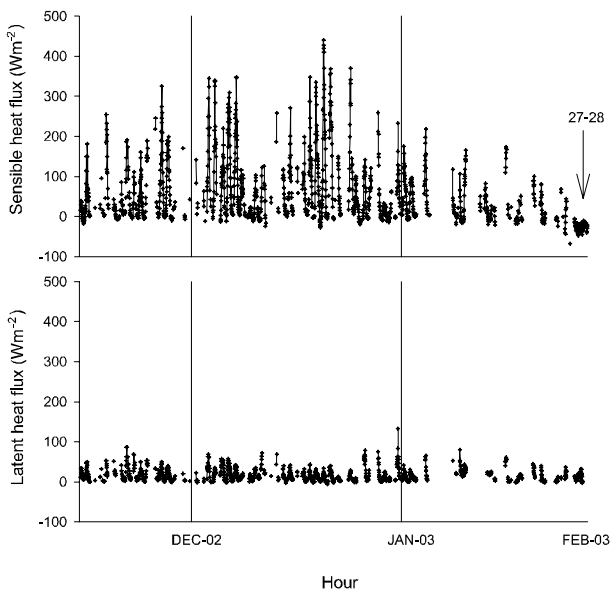


Fig. 7 The variations of half-hourly measured sensible heat and latent heat fluxes averaged over the analysis period.

2월 26일부터 현열 플럭스는 하루 종일 음의 값을 가졌다. 이 기간 동안 순복사는 낮의 짧은 시간 동안 양의 값을 가졌는데 최대 값은 약 37 Wm^{-2} 였으며, 이것은 지면 복사 냉각으로 인해 지표층으로부터 지면으로 열의 전달이 있음을 가리킨다. 상대적으로 잠열 플럭스는 현열 플럭스에 비해 작다. 그 크기는 대부분이 80 Wm^{-2} 를 넘지 않는다. 현열 플럭스가 시간이 지남에 따라 뚜렷한 감소 추세를 보인 반면에 잠열 플럭스의 경우 그 값이 상대적으로 일정하다. 야간에 현열 플럭스는 음의 값을 갖는 반면 잠열 플럭스는 약 0 Wm^{-2} 이거나 작은 양의 값이었다. 또한 현열 플럭스가 하루 종일 음의 값이었던 2월 27일과 28일에도 잠열 플럭스는 약 $-4 \sim 20 \text{ Wm}^{-2}$ 였다. 따라서 분석 기간 동안 시간에 관계없이 증발이 지속적으로 일어났음을 알 수 있다.

Figure 8은 2003년 1월과 2월의 월 평균 풍향에 따른 순복사에 대한 잠열 플럭스 ($\lambda E/Rn$), 현열 플럭스 (H/Rn) 그리고 잠열 플럭스와 현열 플럭스의 합 ($(\lambda E+H)/Rn$)의 비이다. $(\lambda E+H)/Rn$ 가 작아질수록, 토양열 플럭스를 통해 열이 지중으로 전달되거나 얼음이나 눈으로 사용되는 순복사가 많아짐을 의미한다. 2003년 1월의 경우, 전 풍향에 대해 $\lambda E/Rn$ 는 0.2보다 작으며, 상대적으로 SWS에서 다른 풍향보다 그 값이 크다. H/Rn 는 0.4 - 0.7로 풍향에 따른 차이가 큰데, N을 중심으로 NE - WNW 영역에서 $H/Rn \leq 0.4$ 로 가장 작은 반면, SSE-WSW 영역에서 $H/Rn \geq 0.6$ 로 가장 크다. 결과적으로 $(\lambda E+H)/Rn$ 도 풍향에 따라 큰 차이를 보인다. 하지만 1월의 순복사가 크고, 많은 영역에서 $(\lambda E+H)/Rn$ 의 크기가 큰 것을 고려하면 이 기간 동안 현열을 통해 대기과 지면과의 활발한 열 교환이 있음을 알 수 있다. 한편, 2월의 경우 순복사의 잠열로의 배분의 크기는 1월과 비슷하다. 반면에 현열로의 배분은 비슷하거나 줄어들었다. 그리고 순복사의 현열로의 배분이 NE 영역을 제외하면 1월과 달리 상대적으로 풍향에 따른 변동이 작다. NE 영역에 대한 큰 값은 추가적인 분석이 필요할 것으로 보인다. 전체적으로 볼 때 1월과 2월의 풍향에 따른 에너지 배분의 차이가 성질이 바람의 영향이라기 보다는 지면의 균질성의 차이로 보인다. 이것은 비슷한 성질을 가진 바람(W-NNW)에 대해 에너지 배분의 차이가 컸기 때문이다. 또한 1월의 경우 여전히 관측 지에는 눈이 쌓여 있으며, 또한 강설의 횟수가 강수와 비슷하였다. 반면에 2월의 경우 강우 횟수가 강설 횟수

기간의 에너지 교환의 변화가 뚜렷하였다. 이런 분석 결과는 관측지가 비록 고위도에 위치하여 남반구 여름철 1-2개월 동안만 지면이 대기로 노출되지만 강한 복사와 이로 인한 활발한 지표면과 대기간의 열 교환이 발생함을 보여준다. King George 섬의 경우 여름철 약 5%가 지면에 노출되는 것과 이 연구 결과를 고려하면 특히 2003년 1월의 경우 지면이 경계층 발달에 지면이 상당한 기여를 할 수 있을 것으로 보인다. 한편, 풍향에 따라 뚜렷한 기상학적 차이가 존재하지만 이 성질이 다른 바람과 지면과의 상호 작용은 분석이 더 필요할 것으로 보인다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소의 ‘북극 환경특성 연구(PE05007)’ 사업, ‘극지기반 첨단 종합기술 개발(PG05010)’ 사업 및 ‘지구대기 연직구조별 대기 환경 특성 및 빙하연구(PE05003)’ 사업의 일환으로 수행되었다. 이 연구에 사용된 자료의 획득 및 플럭스 타워의 관리에 도움을 준 제 17차 월동연구대 이재신님과 제 18차 월동연구대 서태건님, 전수현님께 감사드립니다.

참고문헌

- 김지희, 정호성. 2002. 남극 세종기지 주변 인간 활동으로 인한 환경변화 모니터링: 생물학적 환경 모니터링: 세종기지 주변의 육상식물 식생도 작성: 지의류, 선태류, 담수조류 및 현화 식물. 한국해양연구원 ECPP01-001-B2.
- 이주삼. 1992. 세종기지 주변의 지의류와 선태류의 식생분포. 한국해양연구소 BSPG 00169-5-485-7.
- 최태진, 이방용, 이희춘, 그리고 심재설, 2004: 남극 세종기지에 서의 지표 플럭스 관측: 1) 난류 특성과 현열 플럭스, *Ocean and Polar Res.*, **26(3)**, 453-463.
- Ahmadjian, V. 1993. *The lichens symbiosis*, Wiley, New York. 250 pp.
- Lee, B.-Y., T.-Y. Kwon, J.-S. Lee, and Y.-I. Won. 2002. Surface air temperature variations around the Antarctic Peninsula: Comparison of the west and east sides of the peninsula. *Ocean and Polar Res.*, **24(3)**, 267-278.
- Baldocchi, D., et al., 2001. FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bull. Am. Meteor. Soc.* **82**, 2415-2434.
- Bintanja, R., S. Jonsson, and W.H. Kanp. 1997. The annual cycle of the surface energy balance of Antarctic blue ice. *J. Geophys. Res.*, **102(D2)**, 1867-1881.
- Bintanja, R. 1995. The local surface energy balance of the ecological glacier, King Gerge Island, Antarctica: measurements and modeling. *Antarctic Science*, **7(3)**, 315-325.
- King, J.C., J. Turner, G.J. Marshall, W.M. Connalty, and T.A. Lachla-Cope. 2003. Antarctic peninsula climate variability (eds.) by E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindshadler, P. Convey, and M. Kirby: Antarctic peninsula climate variability and its causes as revealed by analysis of instrumental records, *Antarctic research series*, **79**, 17-30.
- Martianov, V. and S. Rakusa-Suszczewske. 1989. *Ten years of climate observations at the Arctowski and Bellingshausen Station (King George Island, South Shetlands, Antarctica)*. In BREYMEYER, A., ed. GlobalChange Regional Research Centres: Scientific Problems and ConceptDevelopments, Warsaw, 80-87.
- Palmqvist, K., L. Dahlman, F. Valladares, A. Tehler, L. G. Sancho, and J.-F. Mattsson. 2002. CO2 exchange and thallus nitrogen across 75 contrasting lichen associations from different zones. *Oecologia*, **133**, 295-306.
- Reijmer, C.H. and J. Oerlemans. 2002. Temporal and spatical variability of the surface energy balance in Dronning Maud Land, East Antarctica. *J. Geophys. Res.*, **107(D24)**, 4759, doi10.1029/2000JD000100.
- Schmid, H. P. 1997. Experimental design for flux measurements: Matching scales of observations and fluxes. *Agricultural and Forest Meteorology*, **87**, 179-200.
- Schmid, H. P. 2002. Footprint modeling for vegetation atmosphere exchange studies: a review and perspective. *Agricultural and Forest Meteorology*, **113**, 159-183.
- Stonehouse, B. 1989. *Polar Ecology*. Blackie, Glasgow. 222pp.
- Swinbank, W. C. (1951), The measurement of vertical transfer of heat, water vapor and momentum in the lower atmosphere with some results, *J. Meteorol.*, **8**, 135-145.
- Van As, D., M. Van Den Broeke, C. Reijmer and R. Van De Wal. 2005. The summer surface energy balance of the high Antarctic plateau. *Boundary-Layer Meteor.*, **115**, 289-317.
- Vaughan, D.G., G.J. Marshall, W.M. Connolley, J.C. King, and R. Mulvaney. 2001. Devil in the Detail. *Science*, **293**, 1777-1779.
- Zamoruyev, V.V. 1972. Results of glaciological observations at ‘Bellingshausen’ station in 1968. *Trudy Sovetskoy Antarkticheskoy kspeditcii*, **55**, 135-144.