

남극 세종 기지 주변의 복사, 기온 및 풍향의 특징

최태진 · 이방용 · 김성중 · 박유민 · 윤영준

한국해양연구원 부설 극지연구소

The Characteristics of Radiation, Temperature and Wind Direction around King Sejong Station, Antarctica

Taejin Choi, Bang-Yong Lee, Seong-Joong Kim, Yoo-Min Park and Young Jun Yoon

Korea Polar Research Institute, KORDI

Songdo-dong, Yeonsu-gu, Incheon 406-840, Korea

요 약 남극 반도와 그 주변에서의 온난화는 시간적, 공간적 변동이 크기 때문에 이 지역에서의 국지 기후를 이해하는 것이 필요하다. 이 연구의 목적은 남극 세종 기지 주변에서의 지표 복사, 기온 그리고 풍향의 특징을 밝혀내고, 그 변수들간의 상관 관계를 조사하는 것이다. 연구지는 연간 15-20 Wm²의 복사 에너지를 흡수하지만, 여름 (12월-1월)에는 평균적으로 85 Wm²의 복사 에너지를 흡수하였다. 이 흡수량은 남극의 다른 지역에 비해 상당히 큰 값이다. 월 평균 기온은 -7.7-2.8°C 이었으며, 매년 다른 변동을 보였다. 북서, 서 및 동풍이 주풍이었으며, 풍향의 변동이 기온 변동을 설명할 수 있었다. 찬 동풍과 따뜻한 북서 및 북풍 빈도의 변동이 특히 여름철 지표 복사 수지에도 크게 영향을 주었으며, 이 시기의 대기와 지면 간의 에너지 교환에 풍향이 중요한 역할을 하는 것으로 보인다.

주요어 남극 반도, 세종 기지, 순복사, 기온, 풍향

ABSTRACT

Due to the temporal and spatial variability of the warming at and near the Antarctic Peninsular, it is required to better understand local climate at the issued region. The purpose of the study are to characterize surface radiation, air temperature and wind direction and investigate their relations at the King Sejong Station near the Antarctic Peninsular during last three and half years. While the study site was a weak radiative energy sink (positive net radiation) with annual mean of 15-20 Wm⁻², it played a role as a strong sink in summer (December to January) with mean of 85 Wm⁻², a magnitude that was significantly larger than those at other surface covered with snow or ice in Antarctica. Monthly averaged air temperature ranged from -7.7-2.8°C and the variations of monthly averaged air temperature showed the distinct differences with year. Northwesterly, westerly and easterly were dominant and the variability of air temperature could be explained by the variability of the frequency of wind direction with cold easterly and warm northwesterly/northerly to some degree, which in turn influenced radiation budget through albedo in summer.

Key words

the Antarctic peninsular, King Sejong Station, Net radiation, Air temperature, Wind direction

1. 서 론

지난 50년 동안 남극 반도에서는 뚜렷한 온난화가 진행되었으며, 특히 Faraday/Vernadsky 기지에서는 0.56 °C/10년 그리고 겨울철에 1.09 °C/10년의 증가율을 보

였다(Turner, 2005). 하지만 남극 반도 및 그 주변의 기온의 증가는 크게 두 가지의 특성을 보인다. 첫째, 기온 증가의 시간적 공간적 변동성이 크다. 예로, 남극 반도의 뚜렷한 기온 증가에 비해 이웃한 South Shetland Islands의 기온 증가는 매우 낮았다(예, Braun *et al.*,

2001, Smith *et al.*, 1996). 둘째, IPCC (2001)의 보고서에 근거하면 북극 등의 다른 지역에 비해 남극 반도의 기온 증가는 모형에 의해 모사되지 못한다(예, Vaughan *et al.*, 2003). 남극 반도 주변 온난화에 대한 원인으로 몇 가지 가능성만 제시될 뿐이며, 따라서 다양한 시공간 규모에서의 연구가 요구된다. 남극 반도 주변 온난화를 이해하기 위한 연구는 반도를 포함한 보다 큰 규모에서의 그 변동 양상과 원인을 살펴보는 것도 필요하지만(예, 이 등, 2003) 온난화의 시공간적 변동성이 큰 것을 고려하면 국지 규모의 기후를 이해하는 것도 필요하다. 이 연구는 또한 미래의 기후 변동에 대한 이 지역의 반응을 예측하기 위해서도 필요하다. 이런 점에서 남극 반도 주변에 위치한 남극 세종 기지에서서의 기상 관측 자료를 활용한 연구는 그 의미가 크다.

남극 세종 기지는 남극 반도 서안의 킹 조지섬에 위치해 있다. 1988년 기지가 구축된 이후 기온, 풍향/풍속, 강수 등의 기본적인 기상 변수와 태양 복사, 성층권 오존 농도, 지중 온도 등의 관측이 함께 이루어져 왔으며(예, 이 등, 2006; 이 등, 2005; Hand and Jung, 1992), 이에 근거한 국지 규모 수준에서의 연구 결과들이 발표되고 있다. 이 등(2006)은 17년간(1988~2004)의 전천 일사량, 기온, 운량 등의 관측 자료를 이용하여 연 평균 전천 일사량이 $-0.21 \text{ Wm}^{-2}\text{yr}^{-1}$ 로 감소한 반면, 운량은 $0.02 \text{ oktasyr}^{-1}$ 로 증가하여, 전천 일사 감소의 원인이 운량에 있음을 보였다. 한편, 연평균 기온은 $0.03 \text{ }^{\circ}\text{Cyr}^{-1}$ 로 증가하였으며, 태양 복사량과 기온의 변화 사이에는 특별한 관계는 발견하지 못하였다. 김 등(2006)은 관측된 하향 단파/장파 복사, 지중 온도 그리고 추정식을 이용하여 1996~2004년의 세종 기지에서서의 지표면에서의 복사 에너지의 과부족이 지중열이 아닌 현열과 잠열에 의해 평형이 유지됨을 보였다. 그러나 보다 정확한 평가를 위해서는 상향 단파/장파 복사, 현열, 잠열 및 지중열 플럭스에 대한 장기 관측을 지적하였다. 이 등(2005)은 복사 모형과 관측 자료를 이용하여 2000년 3월부터 2001년 12월까지의 세종 기지 주변 태양 복사와 적외 복사의 연직 분포를 분석하였다. 그 결과 분석 기간 동안의 세종 기지에서서의 기온 감소가 지표 근처 기층의 복사 냉각과 밀접한 관계가 있을 것으로 추정하였다. Han and Jung (1992)은 1991년 12월~1992년 2월 세종 기지에서 지상(두 높이)과 지중(다섯 깊이)에서 관측된 온도 자료를 이용하여 지표면 온도 변화에 따른 동토층의 온도 반응을

분석하였다. 하지만 일부 연구들은 관측 자료의 부족으로 연구에 제약이 있었다. 또한 기온의 변동이 가열/냉각과 이류에 의하기 때문에 이 두 가지를 동시에 평가하는 연구가 필요하다. 한편, 이 등(2003)은 남극 반도 주변의 기온 변동에 풍향의 빈도가 중요한 역할을 함을 보였는데 세종 기지에서는 아직 이와 관련된 연구가 없었다.

2002년 12월에는 기존 관측의 보완 및 에디 공분산 시스템을 비롯한 추가 관측 시스템이 구축되었다. 최 등(2004)은 2002년 12월부터 2004년 2월까지 에디 공분산 방법을 이용한 현열 및 잠열 플럭스 관측에 근거하여 세종 기지에서서의 에디 공분산 방법을 이용한 난류 플럭스에 대한 장기 연속 관측이 가능하며, 하계 기간 지면이 열 수송을 통하여 대기를 상당히 가열 시킬 수 있음을 보였다. 2005년 12월부터는 상향 장파 및 단파 복사 관측이 추가되어 지표 알베도를 포함한 지표에서의 복사 수지 성분(즉, 하향 단/장파 및 상향 단/장파 복사) 모두가 관측된다. 이러한 관측 시스템은 상시 운영(10분 혹은 30분 마다 연속으로 값이 도출)된다. 한편, 2005년 12월부터는 대기 에어로졸 수 농도 및 제 2차 에어로졸 형성에 대한 집중 관측(Yoon *et al.*, 2006)도 시작되었다. 그리고 앞으로 대기 구성 성분에 대한 물리적/화학적 연구, 대기-해양 간의 상호 작용 연구가 더 추가될 계획이다. 따라서 이러한 관측 하부 구조를 기반으로 모형, 인공 위성 등을 활용한 연구가 활발해 진다면 이곳에서의 기후 변화 연구에 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다.

이 연구의 목적은 2002년 12월부터 2006년 5월까지 관측된 풍향, 풍속, 기온, 복사 자료에 근거하여 세종 기지 주변에서의 이 변수들의 특징을 살펴보고 변수들간의 관련성을 조사하는 것이다. 이 기간에는 기본적인 기상 변수(풍속, 풍향, 기온, 하향 단파 복사 등)에 대한 중복 관측이 이루어져 관련 자료 간의 상호 비교를 통해 분석 자료의 품질을 향상시킬 수 있으며, 손실된 자료에 대한 보충이 큰 오차 없이 가능하다. 그리고 이 지역 국지 기후계에 중요한 풍향, 기온, 복사의 세 성분에 대한 동시 분석이 가능한 이점이 있다. 아울러 본 연구에서는 1988년부터 관측된 변수들을 문서화하여, 세종 기지에서 관측되는 자료를 이용한 연구자들의 연구의 효율 및 편의를 도모하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1 관측지

남극 세종 기지(62°13'S, 58°47'W)는 서남극의 남극 반도 주변의 South Shetland Islands의 킹 조지섬 연안에 위치한다. 기후학적으로는 고위도 저압대에 속하며, 대체로 중위도 편서풍 지역으로부터 유입되는 비교적 온난한 해양성 한대 기단과 남극 대륙으로부터 차고 건조

한 남극 기단이 만나 남극 전성이 형성되는 곳이다. 1988년부터 2004년까지의 관측 자료에 근거하면 연 평균 기온은 -1.6°C, 연 평균 풍속은 8.0 ms⁻¹ 그리고 연 강수량은 484 mm이다.

2.2 관측

2006년 현재 남극 세종 기지에는 기상 관련 측기들이 세 관측 타워(AMOS1, AMOS2 그리고 플렉스 타워)에

Table 1a Description on the variables observed at AMOS1.

Systems	Variables (Unit)	Resolution	Periods	Height	Instruments	Description
AMOS1	WS (ms ⁻¹) WD(Deg)	10 min.	1988 -	10 m	Skyvane type	Wind speed
	Wind direction					
	T (DegC) RH(%)		1988 -	2 m	Temperature Humidity probe	Air temperature
	Relative humidity					
	Td		1988 -	2 m	Dewcell probe	Dew point temperature
	P (mm/30min.)					1988 -
	Ps (hPa)		1988 -	3 m	Analogue barometer	
	RSDN (Wm ⁻²)					1996-
	RLDN (Wm ⁻²)		1996-	2 m	Pyrgeometer	
	Total UV					1996-
UV-A	1996-	1.5 m	UV-A meter	Ultraviolet (320-4000 nm)		
UV-B				1996-	1.5 m	UV-B meter

Table 1b Same as in Table 1a except for AMOS2.

Systems	Variables (Unit)	Resolution	Periods	Height	Instruments	Description	
AMOS2	WS (ms ⁻¹) WD(Deg)	10 min.	2002. 12-	10 m	2-D Sonic Anemometer	Wind speed	
	Wind direction						
	T (DegC) RH(%)			2.0 m	Temperature/ Humidity probe	Temperature/Humidity	
	RN (Wm ⁻²)					2.5 m	Net radiometer
	RSDN (Wm ⁻²)			2.5 m	Pyranometer		
	Ps (hPa)					2003.3-	1 m
	Ts			2003.3-	- 0.05 m		
	P (mm/30min.)					30 min.	2003.3-

Table 1c Same as in Table 1a except for Flux tower.

Systems	Variables (Unit)	Resolution	Periods	Height	Instruments	Description	
Flux Tower	WS (ms ⁻¹)	30 min.	2002. 12-	2.5 m	3-D Sonic anemometer	Wind speed	
	WD (Deg)					Wind direction	
	T (DegC)				3-D Sonic anemometer	Air temperature	
	u* (ms ⁻¹)				3-D Sonic anemometer	Friction velocity	
	H (Wm ⁻²)				3-D Sonic anemometer	Sensible heat flux	
	LE (Wm ⁻²)			3-D Sonic anemometer +	Latent heat flux		
	Fco ₂			2005. 12 -	1 m	Open path gas analyzer (IRGA)	CO ₂ flux
	q (gm ⁻³)					IRGA	Water vapor density
	CO ₂ (gm ⁻³)					IRGA	CO ₂ density
	Ps (hPa)					IRGA	Pressure
	RSDN (Wm ⁻²)					Net radiometer	RS: Shortwave (300-3000 nm)
	RSUP (Wm ⁻²)					Net radiometer	RL: Longwave (5000-42000 nm)
	RLDN (Wm ⁻²)					Net radiometer	UP: Upward
	RLUP(Wm ⁻²)					Net radiometer	DN: Downward
	Rn (Wm ⁻²)					Net radiometer	Net radiation
Albedo	Net radiometer	RSUP/RSDN					

설치되어 운영되고 있다. AMOS1의 경우, 세계기상기구(WMO)에 등록(Index No.89251)되어 종관 기상 관측 업무에 활용되고 있다. 산출 자료는 Table 1a-c에 정리되어 있다. 표에는 각 시스템에서 산출되는 변수, 기간, 관측 높이에 대한 정보가 요약되어 있다. 기상 관측은 1988년부터 시작되었으며, 2002년 12월부터 순복사, 현열 및 잠열 플럭스 등의 관측이 추가 되었다. 2005년 12월부터는 순복사계(CNR-1, Kipp & Zonen)의 설치로 네 복사 성분이 직접 관측된다. 순복사는 하향 단파 복사, 하향 장파 복사, 상향 장파 복사, 그리고 상향 장파 복사의 합 (부호는 하향일 때 “양”, 상향일 때 “음”으로 정의됨)으로 결정되는데 AMOS2에 설치된 순복사계로부터는 순복사가 직접 관측되는 반면, 플럭스 타워에서는 네 성분이 각각 관측되고 이 성분들의 합으로부터 순복사가 계산된다. AMOS1과 AMOS2는 나지 위에 나란히 이웃하여 위치해 있는 반면에 플럭스 타워는 두 타워로부터 약 200 m 남동쪽의 나지가 아닌 크고 작은 돌과 지의류, 이끼 등이 자라는 곳에 위치하는데 이곳이 관측

지의 지표 특성을 대표한다.

2.3 자료

본 연구에서 사용되는 변수는 30분 평균 풍향, 풍속, 기온, 절대 습도, 하향 단파 복사, 순복사이다. 분석 기간은 2002년 12월부터 2006년 5월까지이다. 이 기간 동안 관측 시스템의 재 구축 등으로 일부 자료가 손실되기도 하였지만 자료의 가용률은 약 95%이상이다. 손실된 자료에 대해서는 선형 내삽을 하거나 같은 변수(풍향 등) 또는 관련 변수(하향 단파 복사와 순복사 등)와의 관계로부터 선형 회귀식을 이용하여 채웠다. 분석에서 중복되는 변수는 AMOS1의 자료를 사용하였다. 이는 기존의 연구들이 AMOS1의 자료를 활용했기 때문이다. 분석을 위해 풍향, 풍속, 기온, 단파 복사 자료는 AMOS1, 순복사, 절대 습도는 AMOS2, 알베도는 플럭스 타워 자료를 사용하였다. 2005년 12월부터 순복사는 플럭스 타워에서도 관측되기 시작하였다. 플럭스 타워의 위치가

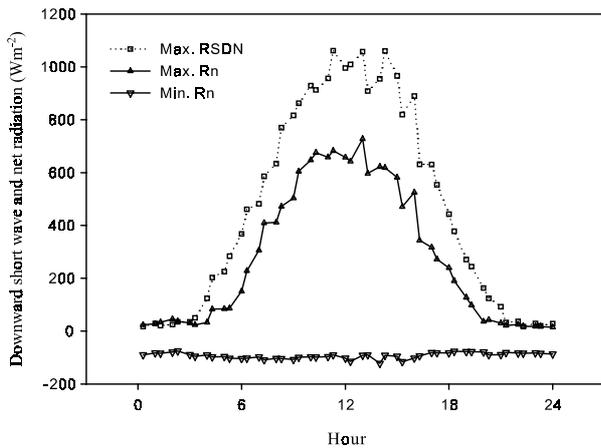


Fig. 1 The diurnal variations of half-hourly maximum downward shortwave (RSDN), and maximum and minimum net radiation (Rn).

관측지를 대표하기 때문에 플릭스 타워에서 관측된 순복사 자료를 사용해야 하지만 관측 기간이 짧아 여기서는 나지에서 관측된 순복사를 사용하기로 한다.

3. Results

3.1 복사

Figure 1은 전체 분석 기간 중 30분 단위 최대 하향 단파복사, 최대 순복사 및 최저 순복사의 일변화 분포이다. 이 그림으로부터 우리는 관측된 30분 평균 하향 단파복사 및 순복사의 범위를 알 수 있다. 최대 하향 단파복사는 약 1060 Wm^{-2} 이었다. 반면에 최대 순복사는 약 720 Wm^{-2} , 최저 순복사는 약 -75 Wm^{-2} 이었다. 세종 기지가 고위도에 위치함에도 단파 복사 값이 큰 것은 남반구 여름철 지구와 태양간의 거리가 북반구 여름철의 거리보다 상대적으로 짧으며, 수증기 농도 및 에어로졸의 농도가 작아서 결과적으로 광학적 두께가 얇기 때문이다. Yoon *et al.*(2006)은 세종 기지에서 관측된 10 nm 이상 크기의 에어로졸의 배경 농도가 약 $200\sim400 \text{ m}^{-3}$ 로 다른 지역에 비해 매우 작음을 보였다. 이것은 세종 기지가 위치한 남극 반도 주변이 인위적으로 발생된 오염물에 의한 영향을 거의 받지 않음을 보여준다.

Figure 2는 월 평균 하향 단파복사의 변동이다. 월 평균 최대 하향 단파복사는 12월 또는 1월에 나타나며 최대 값은 약 210 Wm^{-2} 로, 2005년 12월 값이다. 반면에 최

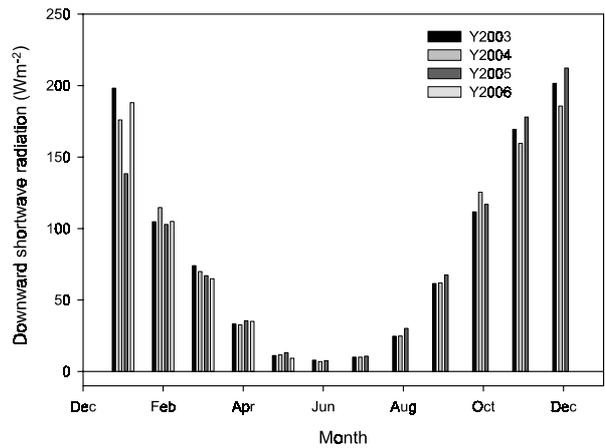


Fig. 2 Monthly averaged downward shortwave radiation from December 2003 to May 2006.

저 값은 6월에 나타났으며 약 7 Wm^{-2} 이다. 2005년 1월 값은 다른 해의 값들에 비해 현저히 낮았다. 연 평균(\pm 추정의 평균 오차) 하향 단파복사는 2003, 2004 그리고 2005년 각각 $84(\pm 21)$, $82(\pm 20)$, $82(\pm 20) \text{ Wm}^{-2}$ 로 비슷하였다. 이 등(2006)은 1996년부터 2004년 동안의 평균 전천일사량이 81.8 Wm^{-2} 임을 보였다. 김 등(2006)는 세종 기지에서 관측된 하향 단파 복사량이 남극점과 남극 대륙 서부 Dronning Maud Land에서 관측된 하향 단파 복사량($120\sim150 \text{ Wm}^{-2}$) 보다 작음을 보였다. Broeke 등(2004)은 남극 대륙 서부 Dronning Maud Land에서 4년 동안 평균 12월과 1월의 하향 단파 복사량이 $> 300 \text{ Wm}^{-2}$

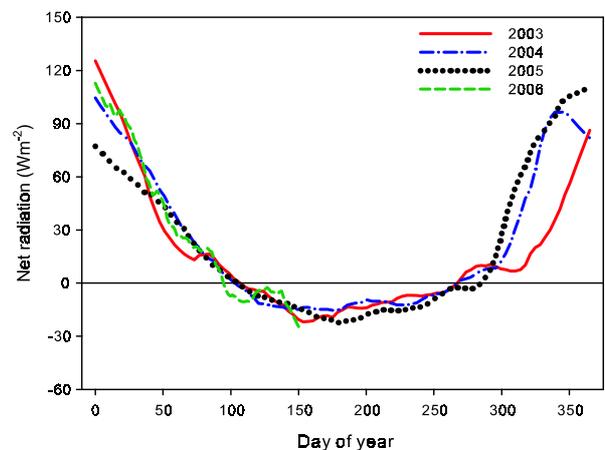


Fig. 3 The variations of daily-averaged net radiation smoothed by polynomial regressions and weights computed from the Gaussian density function (SigmaPlot 8.0, SPSS).

임을 보였다. 이것은 세종 기지 주변에서 맑은 날 하향 단파 복사는 매우 클 수 있지만 기후학적 영향 때문에 연 평균 및 여름철 하향 단파 복사량은 작음을 가리킨다.

Figure 3은 일 평균 순복사의 변동을 나타낸다. 그림에는 변동을 쉽게 확인하기 위해 관측 값을 smoothing 하였다(SigmaPlot 8.0, SPSS). 순복사는 2003~2005년의 경우, 모두 약 100일을 전후로 양의 값에서 음의 값으로 바뀌었다. 반면에 2006년의 경우 5일이 빠른 95일에 음으로 바뀌었다. 2003~2005년의 경우 280일을 전후로 다시 음에서 양의 값으로 바뀌었다. 이 기간 동안 연 평균 순복사의 크기(±추정의 평균 오차)는 2003, 2004 그리고 2005년 각각 $15(\pm 2.1)$, $22(\pm 2.4)$, 그리고 $20(\pm 2.4)$ Wm^{-2} 로, 2003년이 나머지 두 해보다 낮았다. 하지만 세 기간 모두 연 평균 순복사는 양의 값을 가지며, 이것은 세종기지 주변 육상이 복사를 통해 에너지를 흡수함을 보여준다. Broeke 등(2004)은 관측 자료와 문헌 조사를 통해 남극 대륙 내의 고원, 내륙, 연안 및 빙봉에서의 연간 순복사가 $-22.1 \sim 2.8 Wm^{-2}$ 로 복사를 통해 에너지가 손실되고 있음을 보였다. 또한 그들은 여름철(12월과 1월) 순복사가 $5.1 \sim 26.1 Wm^{-2}$ 로 복사로 인해 에너지가 흡수됨을 보였는데 세종 기지에서 관측된 2003~2006년 사이의 12월과 1월 평균 순복사는 $74 \sim 102 Wm^{-2}$ (평균 $85 Wm^{-2}$)로 여름철 상당량의 복사 에너지가 흡수됨을 알 수 있다.

한편, 2003년 순복사는 1일부터 100일 동안 상대적으로 빠르게 감소한다. 반면에 280일을 전후로 양의 값으로 전환된 후에는 약 50일 후인 320일까지 증가하지 않았다. 그리고 320일 후의 증가 속도는 나머지 두 해에 비해 느렸다. 한편, 2006년의 순복사는 다른 기간에 비해 약 5일 일찍 순복사가 양의 값에서 음의 값으로 전환되었다. 순복사는 네 복사 성분의 합으로 결정된다. 순복사의 변동이 어느 복사 성분에 의해 지배를 받는 가를 살펴보기 위해 2005년 12월부터 직접 관측된 네 복사 성분(하향 단/장파, 상향 단/장파 복사)의 크기를 살펴보았다. 여름철 순 단파 복사(하향 단파 복사 - 상향 단파 복사)는 양의 값을, 순 장파 복사(하향 장파 복사 - 상향 장파 복사)는 음의 값을 보였으며, 순 장파 복사의 절대 값은 순 단파 복사 절대 값의 약 25%이었다. 이 결과는 세종 기지 주변의 여름철 순복사는 하향 단파 복사에 의해 지배를 받음을 가리킨다. 따라서 순복사 크기 변동의 차이는 하향 단파 복사 그리고(또는) 알베도의 차이로

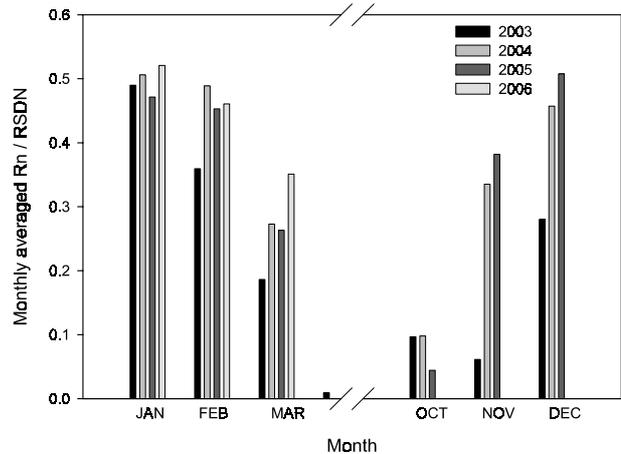


Fig. 4 Monthly averaged net radiation normalized by downward shortwave radiation with $R_n > 0$.

설명될 수 있다. 우선 하향 단파 복사에 의한 차이인지를 확인하기 위해 순복사를 하향 단파 복사로 나눈 값을 살펴보았다. 주어진 하향 단파 복사에 대해 2003년의 순복사는 1월과 10월을 제외하면 현저히 작음을 알 수 있다(Fig. 4). 이는 이 기간 높은 알베도의 영향으로 2003년 1~3월 순복사의 빠른 감소와 11월~12월의 작은 순복사가 관련되어 있다. 한편, 2006년의 1~3월의 경우 나머지 기간에 비해 $R_n/RSDN$ 이 작지 않으며, 3월의 경우 2003년의 2월의 값과 비슷하다. 이것은 다른 기간에 비해 3월까지도 알베도가 크지 않음을 가리키며, 아래와 같이 이 기간 동안의 높은 기온에 의해 잘 설명된다. 한편, 세종 기지 주변에서의 알베도는 지면에 눈이 없는 경우 약 0.1 이었다. 요약하면, 세종 기지 주변의 하향 단파 복사는 기후학적 영향으로 인해 대륙 내에서 관측된 값들보다 여름철 월 평균 및 연평균 값은 작다. 하지만 여름철 상대적으로 낮은 알베도로 인해 대륙 내에서 관측된 값들보다 순복사는 크며, 이는 세종 기지 주변 육상이 복사로 인해 여름철 상당량의 에너지가 흡수됨을 가리킨다.

3.2 온도와 습도

Figure 5-1은 2002년 12월~2006년 5월의 월 평균 기온의 변동을 나타낸다. 월 평균 기온은 $-7.7 \sim 2.8 ^\circ C$ 이었으며, 각 해의 월 평균 기온의 연 변동이 서로 다른 양상을 보인다. 2003년은 1월(약 $2 ^\circ C$)부터 6월(약 $-8 ^\circ C$)까

지 시간이 지남에 따라 기온이 점차 감소한다. 그리고 8월까지 상대적으로 빠르게 기온이 증가한 후 10월까지 일정한 값을 유지하다 다시 증가한다. 2004년과 2005년에 비해 8월 기온이 2°C 이상 높긴 하지만 그 이후엔 비슷하거나 낮았다. 2004년의 경우 4월까지의 2003년과 비슷한 변동을 보인다. 반면에 8월까지 기온은 서서히 감소하여 2003년과 2005년과는 달리 8월에 월 평균 최소값(-4°C)를 기록하였다. 그런 후 서서히 기온이 증가하여 11월과 12월엔 상대적으로 높은 기온을 기록하였다. 2005년의 경우 1월부터 6월까지 그리고 12월까지 지속적인 기온 감소와 증가를 보였다. 2006년의 경우 1월부터 5월까지 다른 해에 비해 기온이 지속적으로 높았다. 반면에 변동의 양상은 2004년과 유사하다. 그리고 특이하게도 3월의 기온이 1월의 기온과 비슷하였다. 최근 4년 동안의 월 평균 기온의 연 변동을 살펴보게 되면 부분적으로 다음과 같은 특징을 도출해낼 수 있다. 첫 번째는 2006년 1월~5월의 기온이 다른 해의 같은 기간의 기온보다 지속적으로 높았다. 두 번째는 2004년의 6월과 7월의 기온이 다른 해의 같은 기간 보다 높았다. 끝으로, 2003년의 경우 8월의 기온이 다른 해의 같은 기간 보다 높았으나 12월까지 온도 증가 폭이 상대적으로 작았다. 연 평균 기온은 겨울철 온도가 상대적으로 높았던 2004년이 -1.21°C로 다른 두 해 즉, 2003년과 2005년의 -1.73°C와 -1.83°C보다 0.5°C 이상 높았다. 이 등(2006)은 1988~2004년의 연 평균 기온이 -1.6°C 임을 보여, 2004년은 17년 평균 기온보다 높은 반면에 2003년과 2005년의 경우 평균 기온 보다 낮았다. 한편, 앞의 순복사에 대한 논의에서 2003년 11월과 12월의 순복사가 상대적으로 작음을 보였다. 이 기간에 월 평균 기온은 -1.4°C와 -0.7°C로 모두 영하의 기온이었다. 이러한 낮은 기온 때문에 지면의 눈과 얼음이 녹지 않고 높은 알베도를 유지시켰으며 결과적으로 순복사가 작았음을 알 수 있다. Fig. 5-2는 풍향별 연 평균 기온의 분포이다. 풍향 구간은 북쪽(N), 북동쪽(NE) 등의 45° 간격으로 8개 구간으로 나누었다. 세 기간의 풍향 별 기온의 크기는 유사하다. 전반적으로 북서풍을 중심으로 기온이 상대적으로 높았으며, 동풍을 중심으로 기온이 상대적으로 낮았다. 이런 현상은 세종 기지의 지리 기후학적 위치에 기인한다. 세종 기지가 있는 남극 반도 주변 지상에서는 Bellingshausen 해의 반영구적 저기압으로 인해 북서풍 계열의 따뜻하고 습한 바람이, Weddell 해의 동쪽에 자

리잡은 저기압으로 인해 차고 건조한 남동풍이 발생한다(예, Martianov and Rakusa-Suszczewski 1989; King et al. 2003). 세종 기지에서 관측된 기온 역시 이러한 특징을 잘 나타내는 것으로 보인다. 한편, 각 구간마다 연 변동도 함께 나타난다. 연 평균 기온이 가장 낮았던 2005년을 기준으로 할 때 2003년의 경우 각 구간마다 기온이 비슷하거나 높았다. 반면에 가장 기온이 높았던 2004년의 경우 SW 구간을 제외하면 기온이 높거나 같았다. SW 구간의 경우 다른 해에 비해 1°C 이상 낮은 것이 흥미롭다. Fig. 5-3은 풍향별 월 평균 온도의 아노말리(구간 별 월 평균 - 월 평균)이다. Fig. 5-2는 연 평균

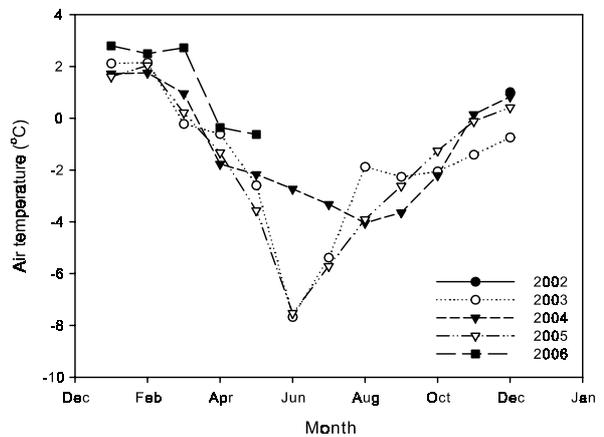


Fig. 5-1 Monthly averaged air temperature from December 2002 to May 2006.

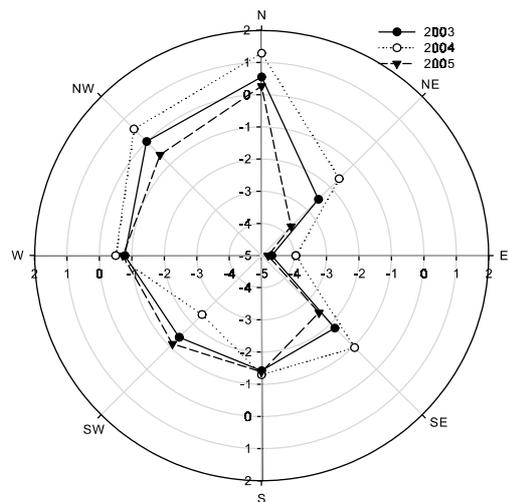


Fig. 5-2 The distribution of air temperature with bin direction each year.

자료에 대한 분석이기 때문에 여름 등의 특정 시기에 특정 풍향에서 부는 바람의 빈도가 많아져 기온의 편이가 있을 수 있다. 따라서 월 단위로 각 풍향 별 기온의 아노말리가 분석되었다. 북서(NW) 및 북풍(N)의 경우 분석 전 기간에 걸쳐 월 평균 기온과 같거나 높았다. 따라서 북풍-북서풍의 빈도가 많아지면 월 평균 기온이 높아진다. 북동풍(NE)의 경우 대부분 음의 아노말리를 보였다. 반면에 동풍(E)인 경우 모든 기간에서 음의 아노말리였다. 2003년 8월에는 동풍일 때의 기온은 월 평균 기온보

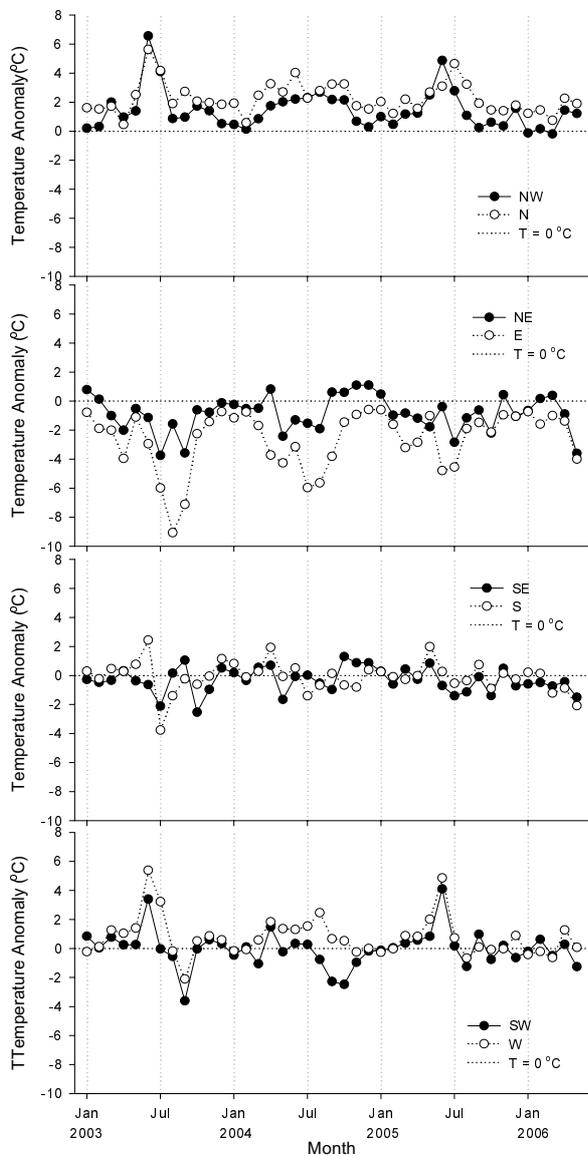


Fig. 5-3 The temporal variations of monthly temperature anomaly with bin wind direction.

다 약 9°C가 낮았다. 결과적으로 북동풍의 빈도가 많아지면 월 평균 기온이 낮아질 가능성이 높으며, 동풍 빈도는 증가는 월 평균 기온을 확실히 낮추는 역할을 한다. 남동(SE) 및 남풍(S)의 경우 평균 값을 중심으로 진동한다. 다른 풍향 구간에 비해 진동의 폭이 작다. 따라서 이 구간에서의 풍향 빈도의 변동은 다른 구간에 비해 월 평균 기온에 미치는 영향이 작을 것으로 보인다. 남서풍(SW)의 경우 남동 및 남풍의 경우처럼 평균을 중심으로 진동한다. 하지만 진동의 폭이 크다. 서풍(W)의 경우 평균 값과 비슷하거나 양의 아노말리가 많이 존재한다. 2004년 하반기를 제외하면 SW와 W의 두 구간에서의 기온의 아노말리는 거의 유사하게 움직인다. 서풍 빈도의 증가는 평균 기온을 상승시킬 가능성이 많으며, 남서풍 빈도 증가는 경우에 따라 월 평균 기온에 영향을 미칠 수 있을 것으로 보인다. 앞에서 2004년의 남서풍이 다른 해에 비해 낮음을 보였다. 이 구간에서 2004년 8월~11월 기간 음의 아노말리가 연속으로 나타났는데 이것은 다른 기간에는 나타나지 않았다.

Figure 6은 월 평균 수증기압의 연 변동이다. 월 평균 수증기압의 크기는 3~7 mb이다. 수증기압의 변동은 기온의 변동과 매우 비슷함을 알 수 있다. 이것은 수증기압 역시 풍향에 대해 매우 의존적임을 가리키며, 따뜻하고 습한 북서풍 계열의 바람과 건조하고 찬 남동풍 계열을 잘 보여준다. 분석 기간 동안 기온과 수증기압의 상관 계수는 0.9였다.

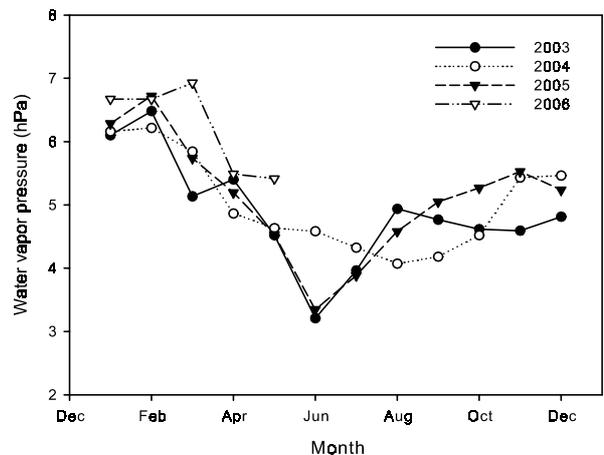


Fig. 6 Monthly averaged water vapor pressure from January 2003 to May 2006.

3.3 풍향 및 풍속

앞에서 기온이 풍향과 매우 밀접한 관련이 있음을 보였다. 그래서 우선, 세종기지 주변의 기온 변동의 주된 요인이 이류적 측면, 즉 풍향에 있다고 가정하고, 월 평균 기온의 변동과 풍향의 빈도 변동과의 상관 관계를 살펴 보았다. 월 평균 기온 변동과 동풍의 빈도 변동의 상관 계수가 -0.37로 가장 높았으며, 다음으로 북서풍 (0.25), 남풍 (0.21), 북풍 (0.20), 북동풍 (-0.19) 순이었다. 이것은 세종기지 주변 기온 변동에 동풍이 가장 큰 역할을 함을 가리킨다. 즉, 북서풍 등의 강화보다는 동풍의 약화가 상대적으로 기온 변동에 더 큰 영향을 준다고 할 수 있다. Fig. 7-1은 2003, 2004 그리고 2005년의 연간 풍향의 빈도 분포이다. 구간에 따른 각 해의 풍향의 빈도는 서로 유사한 양상을 보인다. 빈도가 많은 구간은 북서풍, 서풍, 동풍, 남서풍 순이며, 연 평균 약 22, 21, 20 그리고 12%이었다. 반면에 남풍의 빈도는 연중 4%로 가장 작았다. Fig. 7-2는 구간 별 풍향 빈도의 월 별 변동이다. 북서풍의 경우 2005년 1월을 제외하면 거의 모든 달의 풍향의 빈도가 10% 이상이었다. 2005년 10월 경우 월 평균 풍향의 약 50%를 차지 하였다. 월 평균 북풍의 빈도는 일부 구간을 제외하면 10% 미만이었다. 하지만 2006년 3월의 경우 약 35%까지 증가하였다. 2003년 7-9월까지 북풍의 빈도는 14%에서 26%까지 증가하였다. 북동풍의 경우 전 기간의 34%동안 빈도수가 10%

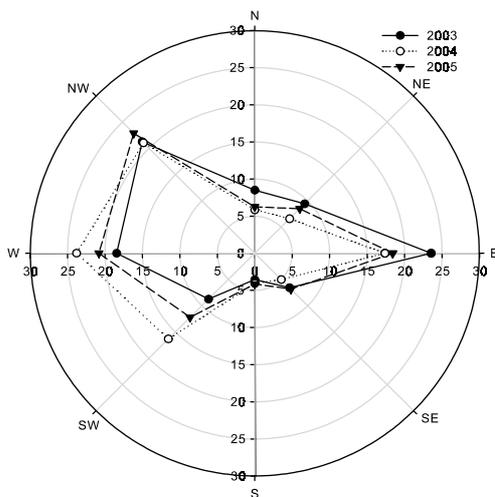


Fig. 7-1 The frequency distribution of wind direction with bin wind direction each year.

가 넘었다. 2005년 5월의 경우 월 평균 빈도는 약 23%까지 증가하였다. 동풍의 경우 전체 기간의 약 76%동안 빈도수가 10%보다 컸으며, 전체 기간의 24%동안 빈도수가 30%가 넘었다. 2003년 6월의 경우 월 평균 빈도수는 약 51%였다. 북서풍과는 달리 10% 미만의 빈도수가 상대적으로 많이 나타났다. 남동풍과 남풍의 경우 월 별 빈도수는 거의 10% 이내였다. 남서풍의 경우 전체 기간의 약 56% 동안 빈도수가 10%가 넘었으며, 최대 빈도는 2004년 8월의 약 28%이었다. 2004년은 남서풍의 빈

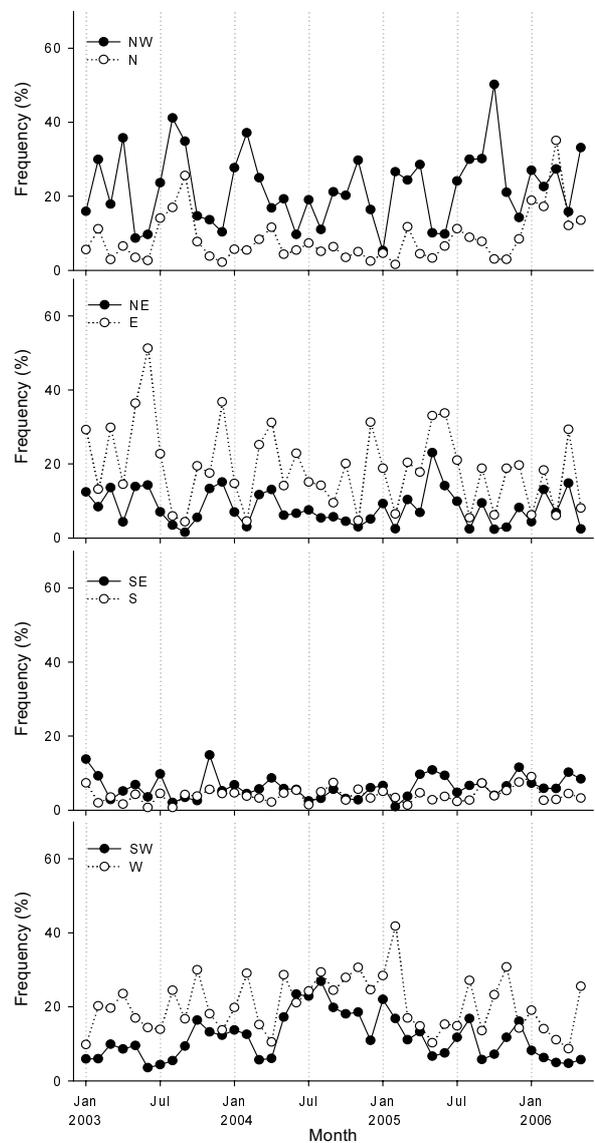


Fig. 7-2 The temporal variations of the wind direction frequency with bin wind direction.

도가 다른 해에 비해 많았는데 특히, 8월~11월의 많은 풍향의 빈도는 이 기간 동안의 연속적인 기온의 음의 아노말리와 함께 이 구간에서의 기온을 낮추는 역할을 하였다. 서풍의 경우 북서풍과 마찬가지로 거의 모든 기간 동안 빈도수가 10%가 넘었으며, 2005년 2월의 경우 최대 빈도인 41%를 기록하였다.

우리는 앞에서 분석 기간 동안의 월 평균 기온 변동의 특징을 세 가지 들었다. 첫 번째는 2006년 1월부터 5월까지의 월 평균 온도가 다른 해 보다 높다는 것이다. 이 기간 동안 2월과 4월은 동풍의 빈도가 20~30% 였으며, 나머지 기간에는 < 8%였다. 반면에 북풍의 경우 12~35%, 북서풍의 경우 16~33% 이었다. 이 기간 동안 동풍이나 북서풍의 빈도는 다른 기간의 변동과 크게 다르지 않았다. 다만 북풍의 빈도는 2003년 6-8월의 세 달 동안 지속적으로 빈도가 10% 보다 컸을 뿐이다. 동풍의 빈도가 상대적으로 많았던 2월과 4월의 경우 다른 해의 월 평균 온도와 큰 차이를 보이지 않았던 반면 동풍이 약했던 3월과 5월은 뚜렷한 차이가 남을 알 수 있다. 따라서 이 기간의 높은 기온은 북풍의 강화와 동풍의 약화로 볼 수 있다. 두 번째는 2004년의 6월과 7월의 기온이 다른 해의 같은 기간 보다 높았다. 2004년 6월의 경우 동풍의 빈도는 약 23%로 2003년 (51%)과 2005년 (33%)에 비해 10%이상 낮았다. 7월의 경우는 15%로 2003년 (23%)와 2005년의 (21%) 보다 낮아 6~7월 모두 동풍의 빈도가 낮았다. 이 기간 남서풍과 서풍이 2003년과 2005년에 비해 10% 이상 컸다. 상대적으로 동풍의 약화가 이 기간 평균 기온을 높인 것으로 보인다. 끝으로, 2003년의 경우 8월의 기온이 다른 해의 같은 기간보다 높았으나 12월까지 온도 증가 폭이 상대적으로 작았다. 2003년 8월의 동풍의 빈도는 6%였다. 하지만 2005년의 8월의 동풍의 빈도는 5.4%로 더 작았다. 반면에 북풍 및 북서풍이 17-41%로 2005년의 경우보다 10% 이상 많았다. 11월과 12월의 경우, 2003년은 동풍 빈도가 18과 37%인 반면에 2004년과 2005년은 4.7과 31%, 19와 20% 로, 2003년의 경우가 동풍의 빈도가 상대적으로 많았다. 반면에 북풍 및 북서풍의 경우 2003년이 2004년 그리고 2005년에 비해 4~6% 가량 적었다. 한편, 이 등(2003)은 남극 반도 주변의 기온의 변동이 북서풍과 양의 상관 관계를 남동풍과 음의 상관 관계를 가짐을 보였다. 하지만 세종 기지 주변에서는 북서풍의 빈도는 기온의 변동과 가장 큰 양의 상관을, 동풍은 가장 큰 음의 상관을 보였

다. 이것은 세종 기지의 지형적 특성 즉, 북쪽을 중심으로 바다가 동서로, 남쪽을 중심으로 산이 동서로 평행하게 발달된 곳에 위치하여 동풍 계열의 풍향이 상대적으로 더 큰 지형적 영향을 받은 것으로 보인다.

Figure 8-1은 풍향 구간 별 평균 수평 풍속이다. 각 해의 구간 별 평균 풍속의 경향은 유사하다. 풍속은 북풍일 때 상대적으로 강하고, 북동풍과 남풍일 때 상대적으로 약하였다. 2003, 2004 그리고 2005년의 연 평균 풍속은 8.1, 8.2 그리고 6.9 ms^{-1} 로 2005년의 풍속이 상대적으로 약하였다. 세종 기지에서 연평균 풍속은 8.0 m/s (이 등, 2006)임에 근거하면 2005년의 풍속이 상대적으로 약해졌음을 알 수 있다. 2005년의 풍속의 약화는 특정 풍향 구간에서 나타난 것이 아니라 전 구간에서 모두 발생하였다. Fig. 8-2는 월별 구간 별 풍속의 아노말리의 변동이다. 북풍일 때 풍속은 월 평균 풍속보다 항상 강하였다. 반면에 북동, 남동, 남풍일 경우 월 평균 풍속보다 약하였다. 동풍일 경우 상대적으로 풍속이 강한 횡수가 많았으며, 북서풍일 경우 월 평균 풍속과 비슷하거나 강하였다. 반면에 남서풍과 서풍은 월 평균 풍속과 비슷하였다.

4. 요약 및 결론

남극 세종기지에서는 1988년 풍향, 풍속, 기온 등의

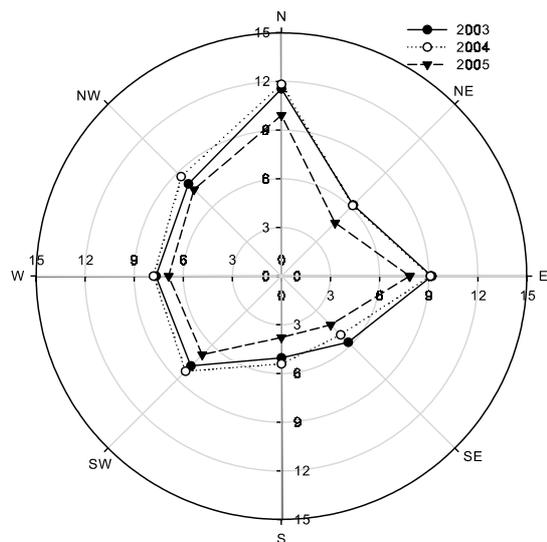


Fig. 8-1 Mean horizontal wind speed with bin direction each year.

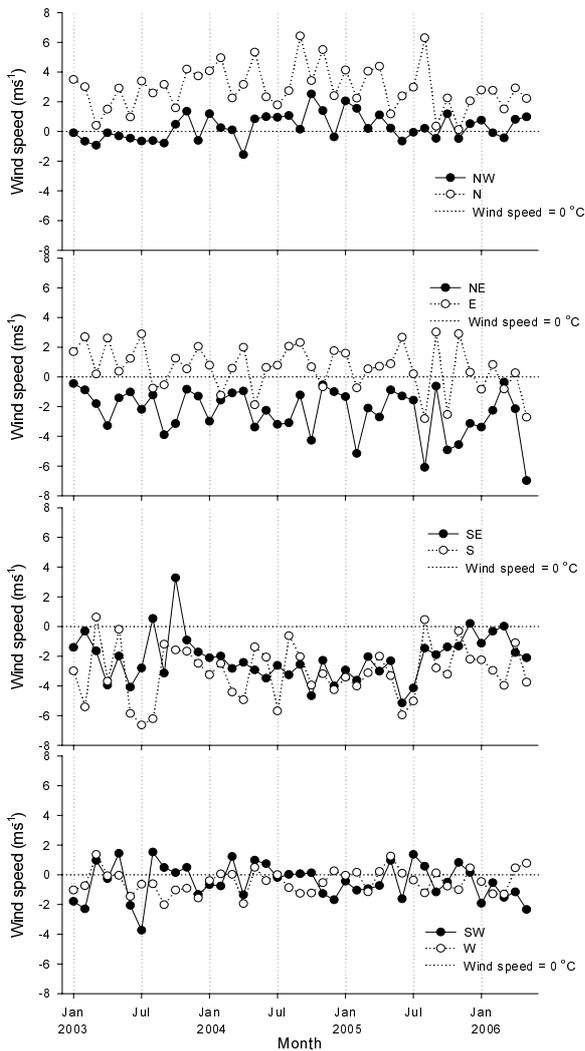


Fig. 8-2 The temporal variations of monthly averaged horizontal mean wind speed with bin wind direction.

관측을 시작으로 2002년 12월에는 순복사, 현열 및 잠열 플럭스, 2005년 12월에 상향 단파 및 장파 복사 관측이 추가되었다. 이 연구에서는 이 변수들을 문서화하였다. 그리고 2002년 12월부터 2006년 5월까지의 지표 복사, 기온, 풍향 그리고 풍속의 변동 특성과 그 상관성을 살펴보았으며 주된 결과는 다음과 같이 요약된다.

1) 세종기지의 지정학적 위치 때문에 잦은 저기압이 통과로 월/연 단위 세종기지 주변에서의 하향 단파 복사는 남극 대륙의 다른 지역에서의 값보다 작았다. 하지만,

- 2) 연 평균 순복사량은 약 15~22 Wm²로 복사를 통해 에너지가 흡수되었다. 특히, 여름에는 영상의 기온으로 눈과 얼음이 녹아 알베도가 작아져 여름(12-1월) 평균 순복사는 약 78~103 Wm²로 남극의 다른 지역에 비해 상당량의 복사 에너지가 흡수되었다.
- 3) 월 평균 기온은 -7.7~2.8°C이었으며, 매년 변동이 달랐다. 2003년은 8월에 갑작스런 기온의 증가가 있었으나 그 후 기온 증가는 느렸다. 2004년의 경우 8월에 연중 최소 값이 나타났으며, 2006년 1~5월은 다른 해에 비해 지속적으로 기온이 높았다.
- 4) 풍향의 빈도는 북서풍, 서풍 및 동풍이 주풍이었으며, 남풍의 빈도가 가장 적었다.
- 5) 북풍, 북서풍에 의해 기온의 증가가, 동풍 및 남동풍에 의해 기온의 감소가 나타났으며, 풍향 빈도의 변동이 기온 변동을 어느 정도 설명하였다. 그리고,
- 6) 2003년 11월과 12월은 동풍의 강화로 인해 기온이 상승하지 못하여 지면의 얼음과 눈이 녹지 않았고, 결과적으로 하향 단파 복사의 크기에 비해 순복사가 작았다.
- 7) 절대 습도의 변동은 기온의 변동과 유사하였으며, 기온 변동과 절대 습도 변동의 상관 계수는 약 0.9이었다.
- 8) 북풍일 때 풍속은 항상 평균보다 강하였으며, 북동, 남동, 남풍일 때 풍속은 평균보다 약하였다.

남극 대륙은 복사로 인한 에너지의 손실로 인해 대기로부터 열을 흡수하는 것으로 알려져 있다. 하지만 남극 대륙의 가장 북쪽에 위치한 남극 반도와 그 주변 섬들의 연안 지역은 여름에 상대적으로 높은 기온으로 눈과 얼음이 녹아 지면이 노출된다. 노출된 지면에 위치한 세종기지에서의 관측 결과에 의하면 여름철에 상당한 복사 에너지를 흡수하였다. 하지만 관측지 주변의 기온과 복사 수지가 대기 순환의 변동에 직접적으로 영향을 받는 것으로 나타나 이 지역의 기후에 대기 순환 변동의 큰 역할을 함을 알 수 있다. 한편, Choi *et al.* (2006)은 세종기지 주변이 여름철 대기에 대한 강한 에너지의 발원으로 작용할 수 있음을 보였으며, 지면과 대기 간의 에너지 교환이 복사 에너지에 의해 좌우됨을 보였다. 이러한 결과로 볼 때 이 지역에서의 대기 순환 변동이 지역 기후에 미치는 영향은 크지만 되먹임 과정은 다른 지면(예, 빙하, 빙상 등)에서의 과정과는 상당히 다를 것으로

예상되며, 이 과정들이 남극 반도 및 주변 섬들의 온난화의 시간적 공간적 변동성에 영향을 끼칠 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 여름철 지면이 드러나는 곳과 대기 간의 열 교환이 국지 기후에 어떤 역할을 하고, 그리고 이 국지 기후가 큰 규모의 과정과 어떻게 상호 작용을 하는 가를 이해하는 것이 앞으로의 기후 변화에 대한 남극 반도 및 그 주변 섬들의 국지 기후 변화를 이해하는데 도움이 될 것이다.

사 사

본 연구는 극지연구소 기본 연구사업 “극지 대기 및 기후 변화 연구(PE06030)”에 의해 지원되었습니다.

참고문헌

김준, 조희구, 정연진, 이윤곤, 이방용, 2006. 남극 세종기지의 에너지 평형. 대기, 16(2), 111-124.

이규태, 이방용, 이원학, 지준범, 이민경, 2005. 남극 세종기지에서의 복사 속 및 복사 가열률의 연직 분포. Ocean and Polar Res., 27(1), 87-95.

이방용, 조희구, 김준, 정연진, 이윤곤, 2006. 남극 세종기지에서의 최근 태양 복사, 기온과 운량의 변화. 한국기상학회지, 심사중.

이정순, 권태영, 이방용, 윤호일, 김정우, 2003. 남극반도의 최근 온난화와 관련된 지역적 대기순환의 변화. Ocean and Polar Res., 25(4), 505-518.

최태진, 이방용, 이희춘, 심재설, 2004. 남극 세종기지에서의 지표 플럭스 관측: I. 난류 특성과 현열 플럭스. Ocean and Polar Res., 26(3), 453-463.

Braun, M., H. Saurer, S. Vogt, J. C. Simoes, and H. Goßmann. 2001. The influence of large-scale atmospheric circulation on the surface energy balance of the King George Island ice cap. Int. J. Climate, 21, 21-36.

Broeke, M.V.D., C. Reijmer, and R.V.D. Wal. 2004. Surface radiation balance in Antarctica as measured with automatic weather station. J. Geophys. Res., 109, D09103.

Choi, T. B.Y. Lee, S.-J. Kim, Y.J. Yoon and H.-C. Lee. 2006.

Turbulent energy exchanges at a coastal area in King George Island near the Antarctic Peninsular during summer seasons. Antarctic Science, Submitted.

Han, U. and H.-C. Jung. 1992. Temperature response in the permafrost at the Sejong Station, Antarctica. J. Korean Ear. Sci. Soc., 15(3), 170-176.

IPCC. 2001. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. 881pp. ed. by Houghton, J.T., Y. Ding, D.J. Griggs, M. Moger, P.L.J. Van der Linden, X. Dai, K. Maskell, and C.A. Johnson. Cambridge Univ. Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

King, J.C., J. Turner, G.J. Marshall, W.M. Connolly, and T.A. Lachlan-Cope. 2003. Antarctic peninsula climate variability. p17-30. In: Antarctic peninsular climate variability and its causes as revealed by analysis of instrumental records. ed. by E. Domack, A. Leventer, A. Burnett, R. Bindshadler, P. Convey, and M. Kirby, Antarctic research series.

Martianov, V. and S. Rakusa-Suszczewski. 1989. Ten years of climate observations at the Arctowski and Bellingshausen Station (King George Island, South Shetlands, Antarctica). p 80-87. In: Global Change Regional Research Centres: Scientific Problems and Concept Developments. ed. by A. Breymeyer, Warsaw.

Smith, R.C., S.E. Stammerjohn, and K.S. Baker. 1996. Surface air temperature variations in the western Antarctic Peninsular region. Antarctic Research Series, 70, 101-121.

Turner J., S.R. Colwell, G.J. Marshall, T.A. Lachlan-Cope, A.M. Carleton, P.D. Jones, V.L. Lagun, P.A. Reid, and S. Iagovkina. 2005. Antarctic climate change during last 50 years. Journal of Climate, 25, 279-294.

Vaughan, D.G., G.J. Marshall, W.M. Connolly, C. Parkinson, R. Mulvaney, D.A. Hodgson, J.C. King, C.J. Pudsey, and J. Turner. 2003. Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsular. Climatic Change, 60, 243-274.

Yoon, Y.-J., T. Choi, B.-Y. Lee, S.-S. Yum, and T.-G. Seo. 2006. Atmospheric particle formation events observed at the King Sejong station, Antarctica. In: Proc. 2nd SCAR Open Science Conference, Hobart, Tasmania, Australia, July 12-14. Scientific Committee on Antarctica Research.