

## Article

## 남극반도의 최근 온난화와 관련된 지역적 대기순환의 변화

이정순<sup>1\*</sup> · 권태영<sup>1</sup> · 이방용<sup>2</sup> · 윤호일<sup>2</sup> · 김정우<sup>3</sup><sup>1</sup>강릉대학교 대기환경과학과  
(210-702) 강원도 강릉시 지변동 123<sup>2</sup>한국해양연구원 극지연구소  
(425-600) 경기도 안산시 안산우체국 사서함 29<sup>3</sup>세종대학교 지구정보공학과  
(143-747) 서울시 광진구 군자동 98

## Change of Regional Atmospheric Circulation Related with Recent Warming in the Antarctic Peninsula

Jeong-Soon Lee<sup>1\*</sup>, Tae-Yong Kwon<sup>1</sup>, BangYong Lee<sup>2</sup>, Ho-Il Yoon<sup>2</sup>, and Jeong-Woo Kim<sup>3</sup><sup>1</sup>*Department of Atmospheric and Environmental Sciences  
Kangnung National University, Kangnung 210-702, Korea*<sup>2</sup>*Korea Polar Research Institute, KORDI  
Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea*<sup>3</sup>*Department of Earth Sciences  
Sejong University, Seoul 143-747, Korea*

**Abstract :** This study examines the relationship among temperature, wind, and sea level pressure to understand recent warming in the vicinity of the Antarctic Peninsula. To do this, the surface air temperature, NCEP/NCAR reanalysis wind data and sea level pressure data for the period of 40 years are analyzed. The 40-year surface air temperature data in the Antarctic Peninsula reveals relatively the larger warming trends for autumn and winter than other seasons. The variability of the surface air temperature in this region is compared with that of the regional atmospheric circulation. The surface air temperature is positively correlated with frequency of northwesterlies and negatively correlated with frequency of southeasterlies. This relation is more evident in the northern tip of the Antarctic Peninsula for autumn and winter. The trend analysis of wind frequency in the study area shows increasing and decreasing trends in the frequency of northwesterlies and southeasterlies, respectively, in the northwestern part of the Weddell Sea for autumn and winter. And also it is found that these winds are closely related with decreasing of sea level pressure in the southeastern region of the Antarctic Peninsula. Furthermore from the seasonal variation of sea level pressure in this area, it may be presumed that decreasing of sea level pressure in the southeastern region of the Antarctic Peninsula is related with warming in the vicinity of the Antarctic Peninsula for autumn and winter. Therefore it can be explained that recent warming in the vicinity of the Antarctic Peninsula is caused by positive feedback mechanism, that is, the process that warming in the vicinity of the Antarctic Peninsula can lead to the decrease of sea level pressure in the southeastern region of the Antarctic Peninsula and these pressure decrease in turn lead to the variation of wind direction in northwestern part of Weddell Sea, again the variation of wind direction enhances the warming in the Antarctic Peninsula.

**Key words :** 남극반도(Antarctic Peninsula), 온난화(warming), 기온(temperature), 바람(wind), 해면기압(sea level pressure)

\*Corresponding author. E-mail : jslee98@knusun.kangnung.ac.kr

## 1. 서론

최근 IPCC 보고서(2001)에 의하면 지난 20세기에 있어 지구 표면의 온도는  $0.4\sim 0.8^{\circ}\text{C}$  증가하였다. 이러한 온난화의 특징 가운데 하나는 겨울에 뚜렷하게 나타난다는 것이고, 다른 하나는 지역적으로 큰 차이를 보인다는 것이다. 예를 들어 가장 큰 온난화는 겨울에 북유럽, 동아시아 북부, 북미의 동부지역과 남극반도 등에서 나타난다. 비록 이러한 온난화 현상이 무엇에 기인하는지 잘 모르지만, 많은 연구 결과는 이러한 현상이 온실 기체의 농도 증가에 기인하는 지구온난화와 관련되어 있을 것으로 추정하고 있다. 특히 지구 규모의 지구온난화가 국지적인 기후 시스템과 상호 작용할 때 관측되는 지역적인 온난화는 그 민감도에 따라 큰 차이를 보일 것으로 예상된다. 그러므로 장기적이고 규모가 큰 기후 변화(예를 들어 온실 기체의 농도 증가에 기인하는 지구 온난화)는 결과적으로 국지적 기후 시스템의 민감도에 따라 특정 지역에서 급격한 기후 변화로 나타날 것이고 이러한 국지적 기후 변화는 주변 지역의 기후 시스템을 교란시키는 중요한 과정 가운데 하나가 될 것이다.

남극반도는 현재 전지구적으로 볼 때 온난화가 크게 일어나고 있는 여러 지역 가운데 하나이며, 몇몇 지점(Faraday, Bellingshausen, Esperanza and Orcadas)에서의 온난화는 1962-2001년 기간에 약  $0.3\sim 0.4^{\circ}\text{C}/10\text{년}$ 의 기온 증가율을 보인다(<http://www.nerc-bas.ac.uk/icd/gjma>). 이러한 온난화는 남극반도 서부지역에서는 겨울에 그리고 동부지역에서는 가을에 보다 뚜렷하게 나타난다(Lee et al. 2002). 또한 Vaughan and Doake(1996)에 의하면 지난 50년 동안에 남극반도 주변의 여러 빙벽(예를 들어 Wordie Ice Shelf, Prince Gustav Channel Ice Shelf, Larsen Inlet, Larsen-A 등)이 급격히 후퇴했으며, 이러한 빙벽 후퇴는 대기 온난화에 따른 빙벽이 존재할 수 있는 남방 한계선의 남하와 관련이 있다고 보고하였다. 또한 이러한 온난화가 계속될 경우 아마도 Larsen-B 빙벽이 계속 후퇴할 것이며, 궁극적으로 Larsen-C 빙벽 또한 같은 방법으로 후퇴할 것이라고 예측하였다. 최근 TERRA위성의 MODIS(Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) 센서로부터 관측된 2002년 3월 7일 영상은 남극반도의 동쪽에 위치한 Larsen-B 빙벽의 북쪽 부분이 대륙에서 분리되어 부서져 나아가는 장면을 보여준다.

남극반도의 최근 수십 년 동안의 온난화를 이해하기 위해서는 먼저 남극반도 부근의 지형적 특성을 고찰할 필요가 있다. 남극반도는 높이 약 1,200~2,000 m의 폭이 좁고 높은 산악으로 구성되어 있으며, 이 산악은 남극 대륙의 서쪽 부분에서 시작해서 북동쪽으로 뻗어 나와  $63^{\circ}\text{S}$  부근에 이른다(Fig. 1). 이 반도는 남극대륙에서 북쪽의 저위도

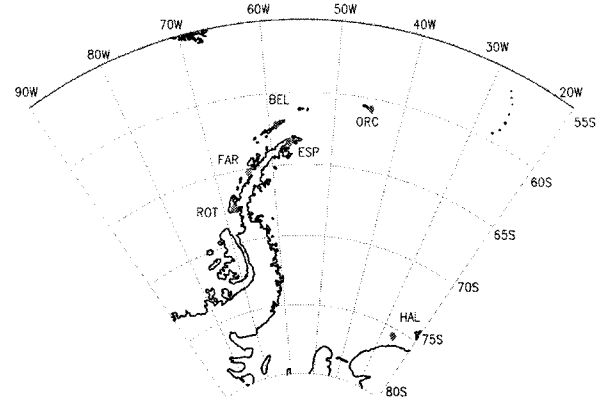


Fig. 1. Location of the stations in the Antarctic Peninsula.

쪽으로 가장 멀리 뻗어 있으며, 이 반도에 의해서 남빙양(Southern Ocean)은 태평양 부분과 대서양 부분으로 나누어진다. 그러므로 남극반도는 남빙양에 있어 태평양과 대서양의 기후 변동을 상호 비교하기에 알맞은 곳이라고 할 수 있다. 남극반도의 기후 특성은 남극반도 양쪽 면의 바람장과 기온장에 나타나는 뚜렷한 대조이다. 남극반도의 서쪽 해안에서는 서풍이 우세한 반면 동쪽 해안을 따라서는 자주 강한 남풍이나 남서풍이 관측된다. 이러한 남풍 계열의 바람은 산악 지대에 평행하게 이동하는 공기 덩어리로 흔히 장벽풍이라 불리며, 높은 산악 지역의 장벽 때문에 발생한다고 알려져 있다. 따라서 남극반도의 서쪽은 장벽풍과 함께 남극대륙으로부터 찬 기류가 불어 들어오는 반도의 동쪽보다 훨씬 온화한 기후를 보인다(Schwerdtfeger 1976, 1979).

남극반도의 급격한 온난화를 설명하는, 즉 이 지역의 기후변화를 증폭시키는 가능한 기작은 다음과 같이 크게 세 가지로 나눌 수 있다(Vaughan et al. 2001). 첫째는 해빙-알베도 되먹임(feedback) 과정이다. 즉 지구 온난화가 해빙이 분포하는 한계 지역인 남극반도 지역에서 해빙-알베도 되먹임 과정에 의해서 증폭된다는 것이다. 다시말해 기온이 상승하면 해빙의 분포는 줄어들고, 해빙의 감소는 알베도의 감소와 태양 복사에너지 흡수의 증가로 나타나며, 결과적으로 기온 상승을 증폭시키게 된다. 둘째는 해양순환의 변화이다. 해양순환의 변화는 상대적으로 따뜻한 남극순환 심층수(Circumpolar Deep Water)를 남극대륙 쪽으로 이동시킬 수 있다. 이러한 심층수의 이동은 빙하의 녹음과 조석 과정에 의해서 해수를 연직으로 혼합되게 하고, 결과적으로 해빙의 감소와 기온의 상승으로 나타날 것이다(Hofmann et al. 1996). 셋째는 대기 순환의 변화이다. 남극반도의 온난화는 이 지역의 해면기압을 감소시키고 그리고 이와 연관되어 따뜻한 공기 이류와 관련된 북풍의 증가로 나타날 것이다. 그리고 이것은 결과적으로 해빙의

감소와 기온의 상승으로 나타날 것이다(Hines *et al.* 2000, King and Harangozo 1998, King 1994, Jacobs and Comiso 1993).

남극반도의 최근 온난화에 대한 가능한 기작을 이해하기 위해서 남극반도 주변의 대기 흐름, 해수 흐름, 그리고 해빙 분포에 대한 분석이 필요하다. 현재까지의 연구 결과는 대부분 대기의 흐름과 관련하여 남극반도 부근의 해면 기압 자료를 이용하여 계산한 대기 흐름의 남북방향 순환 지수를 분석하였으며, 해빙의 분포와 관련하여서는 해빙이 분포하는 가장자리의 위치자료를 분석하였다(King and Harangozo 1998; King 1994; Jacobs and Comiso 1993). 이들 연구에서 바람 자료는 해면기압 자료로부터 계산한 남북방향 대기순환지수를 사용하였고 해빙 자료는 경도 5° 간격으로 얻어진 해빙이 분포하는 가장자리의 위치자료를 사용하였다. 그러나 이들 자료는 특정 지역의 바람과 해빙 분포를 표현하고자 할 때 그 지역의 대표성과 자료의 정량성에 문제가 있으며, 특히 특정 관측지점의 기온 자료와 비교할 때 어려움이 있다. 이 연구에서는 남극반도 주변에 있어 기온, 바람, 기압의 변동 사이의 관계를 지역적이고 정량적으로 조사하기 위하여 월평균 기온 관측 자료, NCEP/NCAR 재분석 기온, 바람 그리고 해면기압 자료를 사용하였다. 다음 절에서 연구에 사용된 기온 관측 자료, NCEP/NCAR 재분석 기온, 바람 그리고 해면기압 자료를 소개한다. 기온 관측 자료는 남극반도 지역의 관측지점에서 관측된 월평균 기온 자료이며, NCEP/NCAR 재분석 기온, 바람 그리고 해면기압 자료는 NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center에서 제공하는 자료를 사용하였다. 3절에서는 기온 관측 자료 이용하여 남극반도 지역의 최근 온난화의 특성을 분석한다. 4절에서 남극반도 부근의 바람장의 특성을 분석하고 기온과 바람장 사이의 관계를 분석한다. 그리고 5절에서는 남극반도 주변의 해면 기압과 바람 사이의 관계를 조사하고, 또한 해면기압의 계절 변화를 분석함으로써 해면 기압과 기온 사이의 연관성을 추론한다. 끝으로 6절에서 분석 결과

와 관련된 결론을 토의한다.

## 2. 자 료

이 연구에서 사용한 월 평균 지상 기온 자료는 인터넷 웹사이트에서 제공되는 자료를 사용하였다(<http://www.antarctica.ac.uk/met/gjma/>). 자료의 지점은 Orcadas와 Halley를 제외하면 남극반도 또는 킹 조지 섬에 있다. Orcadas 기지는 남극반도 끝에서 멀리 떨어진 섬에 있고, Halley 기지는 웨델해 남쪽의 남극 대륙 연안에 있다(Fig. 1). 이들 관측지점 가운데 Halley, Rothera, Faraday/Vernadsky, Esperanza, Bellingshausen, Orcadas를 포함한 6개의 기지는 40년 이상의 기온 자료를 보유하고 있으며 그 중 Orcadas는 1903년부터 2002년까지 가장 긴 기온 자료를 가지고 있다(Table 1). 분석기간은 자료의 길이와 결측 양에 근거하여 40년으로 선택하였다. 또한 표층기온의 수평 분포를 나타내기 위해 NCEP/NCAR 재분석 기온 자료를 사용하였다.

NCEP/NCAR 재분석 기온, 바람, 해면기압 자료는 역시 웹사이트 (<http://www.cdc.noaa.gov/cdc/data.ncep.reanalysis.html>)를 통하여 제공되는 2.5°×2.5° 해상도의 전구 자료이다. 관측 자료와의 비교를 위해 1962년부터 2001년까지의 40년 동안의 6시간 간격 자료를 사용하였다. 연구 영역은 지상 관측 지점들을 포함하는 50~80°S, 90~20°W 영역으로 정하였다. 바람 자료는 일정한 격자 간격으로 이루어져 있기 때문에 바람과 기온간의 관계성을 분석할 때는 격자점 중에서 각 기지들과 가장 근접한 격자점을 선택하여 해당 기지의 바람 자료로 사용하였다. 제공된 자료는 U-wind(동서성분의 바람)와 V-wind(남북성분의 바람)자료이며, 이로부터 풍향과 풍속을 계산하였다. 계산된 풍향은 크게 4방위(NE, SE, SW, NW)로 분류하여 분석하였으며, 지점별로 기온 자료와 풍향별 빈도율과의 관계성에서는 16방위를 사용하였다. 여기서 바람자료는 6시간 간격 자료를 사용한 이유는 풍향의 빈도를 계산할 때 일자

Table 1. Location of the stations around the Antarctic Peninsula and the period of monthly temperature record used in this study.

	Latitude/Longitude	Years with data	Years with no data
Rothera	67.34°S, 68.08°W	1946 Apr.-2002 Apr.	1950 Feb.-1951 Mar., 1952 Mar.-1955 Feb., 1960 Jan.-1962 Apr., 1976 Jan.-Feb.
Faraday/Vernadsky	65.15°S, 64.16°W	1950 Apr.-2002 Apr.	
Bellingshausen	62.12°S, 58.58°W	1944 Jan.-2002 Apr.	1946 Jan.-Dec.
Esperanza	63.24°S, 56.59°W	1945 Mar.-2002 Apr.	1949 Jan.-1952 Mar., 1979 Jan., Mar., Sep.-Dec.
Orcadas	60.45°S, 44.43°W	1903 Apr.-2002 Apr.	1992 Jan.
Halley	75.35°S, 26.30°W	1957 Jan.-2002 Apr.	

료 보다 정확하게 계산할 수 있기 때문이다.

해면기압과 바람 사이의 관계성을 분석하기 위하여 계절 평균 기압 자료를 사용하였다. 기온 및 바람 자료와 마찬가지로 1962년부터 2001년까지의 40년 동안의 월자료를 사용하였으며, 제공된 월자료로 12, 1, 2월의 평균을 여름평균 자료로 사용하였다. 예를 들어 2000년 여름 평균 자료는 1999년 12월과 2000년 1, 2월의 평균으로 나타낸 것이다. 나머지 계절에 대해서는 3, 4, 5월은 가을, 6, 7, 8월은 겨울 그리고 9, 10, 11월은 봄으로 각각 정하여 사용하였다. 남극반도 주변의 기압 분포의 변화 요인 및 지역별 변화 정도를 알아보기 위하여 계절 평균 자료를 주성분 분석(principal component analysis)방법으로 분석하였다. Hines *et al.*(2000)에 의하면 NCEP/NCAR 재분석 해면기압 자료는 남반구 고위도 지역에서 상당한 오류가 내포되어 있다고 보고하였다. 그러나 지상 기압 관측지점이 상대적으로 많이 분포되어 있는 남극반도 지역에서는 NCEP/NCAR 재분석 해면기압 자료와 지상관측 해면기압 자료가 잘 일치하고 있다고 보고하였다. 따라서 이 연구에서 사용하는 NCEP/NCAR 재분석 해면기압 자료는 특히 남극반도 주변에서 상당한 신뢰성이 있다고 판단하여 사용하였다.

### 3. 남극반도 부근의 온난화 경향

Fig. 2는 5개의 기온 관측 지점(Rothera, Faraday/Vernadsky, Bellingshausen, Orcadas, Esperanza)의 월기온 평균과 월기온 표준편차의 12개월 분포를 나타낸다. 이 연구에서는 종관 시스템의 변동에 기인하는 영향을 줄이기 위하여 3개월 평균값을 이용하였다. 3개월 평균값은 40년(1962-2001) 기간 동안의 월평균 기온 자료를 3개월씩 이동 평균을 취함으로써 계산된 연속적인 3개월 이동 평균값을 사용하였다. 예를 들어 2000년 1월의 값은 1999년 12월 값과 2000년 1월과 2월의 평균이며, 2월은 같은 해의 1, 2, 3월의 평균값이다. 5개 지점의 위치를 살펴보면, 고위도에서부터 저위도쪽으로 Rothera, Faraday, Esperanza, Bellingshausen 그리고 Orcadas 순으로 되어있다. 남극반도를 중심으로 Rothera와 Faraday 그리고 Bellingshausen은 반도의 서쪽에 있으며, Esperanza와 Orcadas는 동쪽에 위치해 있다. Bellingshausen과 Esperanza는 비슷한 위도에 위치해 있지만 가을과 겨울에 약 4°C정도 Bellingshausen 기온이 더 높다(Fig. 2a). Halley 기지는 남극 대륙에 위치한 기지로서 40년 이상의 기온관측자료를 보유하고 있지만, 기온 변동성이 5개 지점에 비해 크다. 또한 Halley 기온은 반도 지점에 위치한 지점들의 평균기온보다 여름에는 약 9°C, 겨울에는 약 19°C정도로 낮게 나타났다. 따라서 반도에 위치한 지점들의 기온보다 상당히

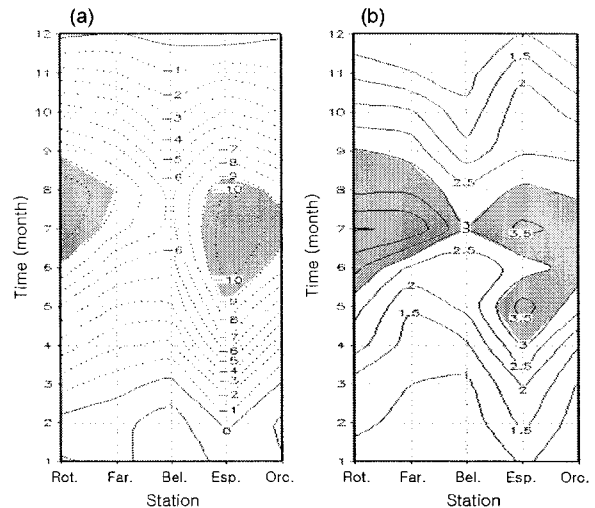


Fig. 2. Annual temperature variations in the Antarctic Peninsula for the period 1962-2001: (a) mean monthly temperature and (b) standard deviation of monthly temperature.

낮은 기온 분포를 보이므로 Fig. 2에서는 제외시켰다.

기온의 연변화를 살펴보면 비록 Esperanza와 Orcadas가 Rothera와 Faraday보다 위도 상으로 4도 정도 북쪽에 있지만, Rothera와 Faraday보다 기온이 낮다(Fig. 2a). 이들 지점에 있어 기온의 최소값은 남반구의 겨울인 7, 8월에 나타나며, 최대값은 여름에 해당하는 1, 2월에 분포한다. 그러나 Rothera, Faraday 그리고 Bellingshausen은 8월에 최소값이 나타나는 반면에 Esperanza와 Orcadas는 최소값이 7월에 나타났다(Lee *et al.* 2002). 이러한 차이는 Rothera, Faraday 그리고 Bellingshausen 지역과 Esperanza와 Orcadas 지역이 가지는 기후의 차이(해양성 기후와 대륙성 기후)에 기인하는 것으로 이해된다. 즉 Esperanza와 Orcadas는 가을과 겨울에 남극 대륙에서 불어오는 찬 기류의 영향을 받아 대륙성 기후를 보일 것이고, 따라서 겨울에 최소값이 나타나는 시기도 해양성 기후와 비교하여 보다 빠르게 나타날 것이다. 이것은 반도의 서쪽에 위치한 Bellingshausen이 해양에서 불어오는 따뜻한 바람의 영향을 받는 반면, 반도의 동쪽에 위치한 Esperanza는 남극대륙에서 불어오는 차가운 바람의 영향을 받고 있기 때문이다. 이러한 결과는 남극반도의 동쪽 지역에 나타나는 가을과 겨울의 남풍 그리고 남서풍의 지표 바람과 잘 일치한다. 따라서 이 연구에서는 남극반도의 서쪽과 동쪽 지역을 대표하는 관측 지점으로 Rothera/Faraday와 Esperanza/Orcadas를 각각 사용하였다. Fig. 2(b)는 5개 지점 모두에서 월기온의 변동은 겨울에 가장 크고, 여름철에 가장 작은 것으로 나타났다. 겨울철 기온의 표준 편차는 약 3.0~4.5°C이고 여름은 약 1.0~1.5°C이다. 이것은 기온의 변동

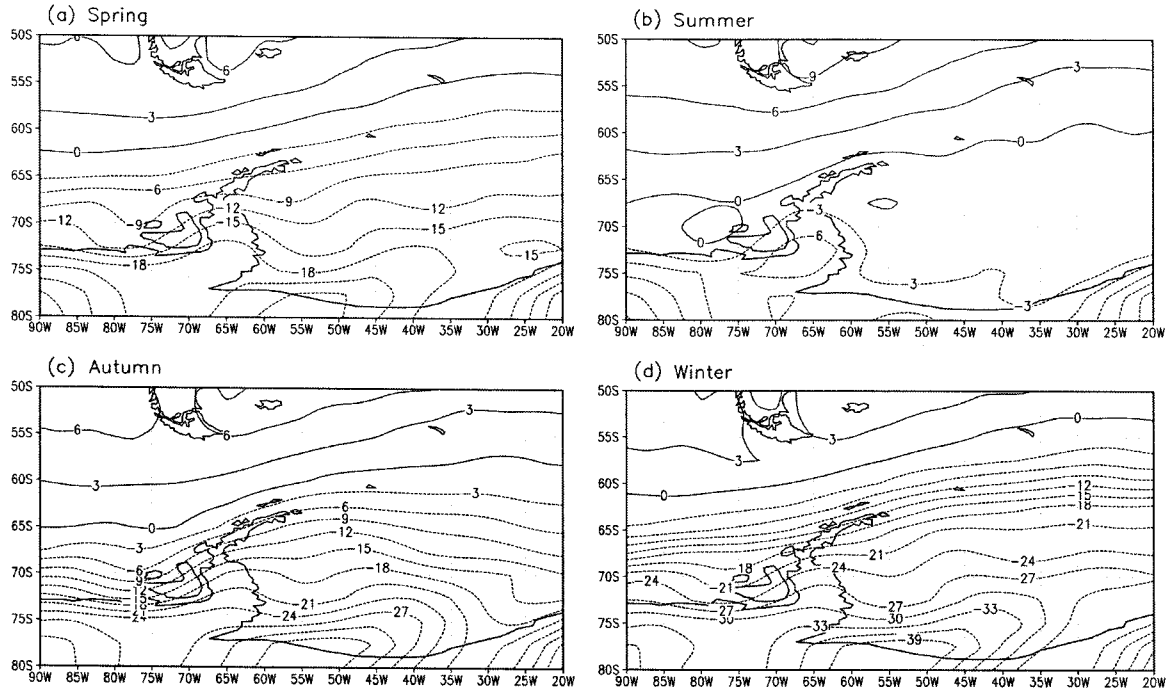


Fig. 3. Distributions of surface air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) for (a) spring, (b) summer, (c) autumn and (d) winter.

폭이 월별로 큰 차이를 보인다는 것을 의미한다. 따라서 서로 다른 월 자료의 편차를 비교할 때에는 주의가 필요함을 알 수 있다. Fig. 3은 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하여 40년(1962~2001년) 동안의 표층기온의 수평 분포를 나타낸 것이다. 남극반도의 남쪽 지역에 해당하는 남극대륙 부근의 기온은 반도의 북서 지역에 비해 상대적으로 낮은 기온 분포를 보인다. 이를 통해 해양에서는 불어오는 바람은 따뜻한 공기를, 남극대륙에서 불어오는 바람은 차가운 공기를 이동시키는 것을 알 수 있다. 또한 남극반도 부근은 가을과 겨울에 다른 계절에 비해 등온선 간격이 조밀하여 공간변동이 큰 것을 알 수 있다.

남극반도 부근의 기온 변화를 분석하기 위하여, 40년 이상의 기온 자료를 보유하고 6개 지점(Rothera, Faraday/Vernadsky, Bellingshausen, Orcads, Esperanza, Halley)에 대해 월별 기온의 추세 분석을 시도하였다(Fig. 4). 추세 분석에서 월 자료는 앞에서와 같이 3개월 이동 평균값을 사용하였다. Halley를 제외한 5개 지점 모두 온난화 추세를 보였으며, 이러한 온난화 추세는 가을과 겨울에 보다 뚜렷하게 나타났다. 온난화 추세의 최대값은 Rothera와 Faraday에서는 5월과 8월 사이에 나타났으며, Esperanza의 경우는 3월과 6월 사이에 나타났다. 가장 큰 온난화는 Faraday에서 7월에  $1.0^{\circ}\text{C}/10\text{년}$  정도로 나타났다(Fig. 4b). 연도와 기온 사이의 상관계수는 온난화 추세의 유의성을 나타내는 것으로 0.3 이상의 경우는 유의수준 5%, 0.4 이

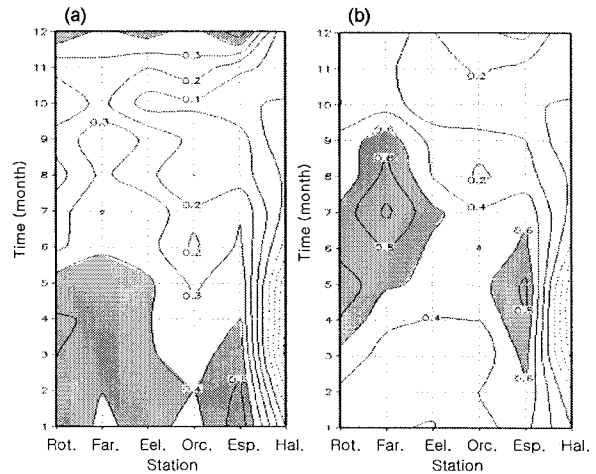


Fig. 4. Temperature variations on the months of the year in the Antarctic Peninsula for the period 1962-2001: (a) correlation coefficient and (b) trend ( $^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ ). Correlation coefficients greater than 0.4 or less than  $-0.4$  and trends greater than  $0.6^{\circ}\text{C}/\text{decade}$  are shaded.

상의 경우는 유의 수준 1%에 해당하는 값이다. 유의 수준을 바탕으로 온난화 추세를 살펴보면, Faraday와 Esperanza의 온난화에 경우 유의 수준 5%에 해당하므로 통계적으로 의미 있는 값을 알 수 있다. 그러나 온난화 추세의

유의성은 5개 지점 모두에서 겨울에 가장 낮았고, 여름에 가장 높게 나타났다. 이러한 이유는 아마도 겨울에 나타나는 큰 폭의 기온 변동 때문으로 생각된다. Halley의 경우 오히려 가을에  $-0.6^{\circ}\text{C}/10\text{년}$  정도의 기온의 감소 추세를 보여준다. Halley를 제외한 나머지 지점에 대해서 40년 동안의 기온 자료에서 남극반도 부근에서 뚜렷한 온난화가 일어났으며, 이러한 온난화는 특히 겨울에 강하게 나타났다는 것을 알 수 있다.

#### 4. 기온과 국지적 바람의 관계

앞 절에서 살펴본 기온의 변동은 크게 두 가지 과정으로 나누어서 생각해 볼 수 있는데 하나는 직접적인 가열 및 냉각에 의한 변화이고, 다른 하나는 대기 이류 혹은 해류에 의한 간접적인 변화이다. 지역적 대기 순환과 관련된 이 연구에서는 대기 이류에 의한 기온의 변동을 조사하기 위해 바람과의 관련성을 조사하였다. 먼저 남극반도 주변의 40년 동안의 계절별 지표 벡터 바람장과 4방위(NE, SE, SW, NW)에 대한 빈도 분포를 살펴보았다. 또한 기온과 바람의 관계성을 조사하기 위하여 지상 관측 월평균 기온 자료와 NCEP/NCAR 재분석 6시간 자료를 통해 계산된 풍향(16방위)의 빈도 사이의 상관 관계를 계산하였다.

남극반도 부근의 계절별 평균 풍향 분포를 알아보기 위

해 지표 바람 벡터장을 Fig. 5에 나타냈다. 분석 영역은 남극반도를 포함하는  $50^{\circ}\sim 80^{\circ}\text{S}$ ,  $90^{\circ}\sim 20^{\circ}\text{W}$  영역으로 정하였다. 남극반도 부근에서 풍향의 변화가 심하게 나타나는 지역은 남극반도의 동쪽 지역이며, 이 지역의 주된 풍향의 변화는 봄과 여름에 바다에서 불어오는 북서풍과 가을과 겨울에 남극대륙에서 불어오는 남풍 혹은 남서풍으로 나타낼 수 있다. 특히 이러한 대조적인 바람 패턴은 여름과 겨울에 뚜렷이 나타난다. 봄과 가을이 서로 유사한 패턴을 보이긴 하지만, 봄에는 북서풍이 좀더 뚜렷하고 가을에는 남풍 혹은 남서풍이 뚜렷이 나타난다. 이와 같이 반도의 동쪽 지역에서 나타나는 남풍 계열의 바람은 흔히 남극반도 중심에 높은 산악 지역과 마주하게 되고 이로 인해 장벽풍이 나타난다. 따라서 이러한 장벽풍으로 인하여 남극반도의 동쪽 지역이 서쪽 지역 보다 한냉한 기후 현상을 보이는 것은 반도 기후의 특성 가운데 하나이다(Schwerdtfeger 1976, 1979). 그러나 Fig. 5에서 잘 나타나지 않은 것은 NCEP/NCAR 재분석 자료의 격자 간격이  $2.5^{\circ}$  간격으로 구성된 것을 고려할 때 이와 같은 지역적 공기의 흐름을 잘 표현하지 못하였을 것으로 생각된다.

계절별 바람의 특성을 좀 더 자세하게 살펴보기 위하여 바람을 4방위(NE, SE, SW, NW)로 나누어 각 풍향별 빈도 분포를 조사하였다(Fig. 6, 7). 여기서는 풍향의 변화가 뚜렷한 여름과 겨울 자료만을 나타내었다. 남극반도 부근

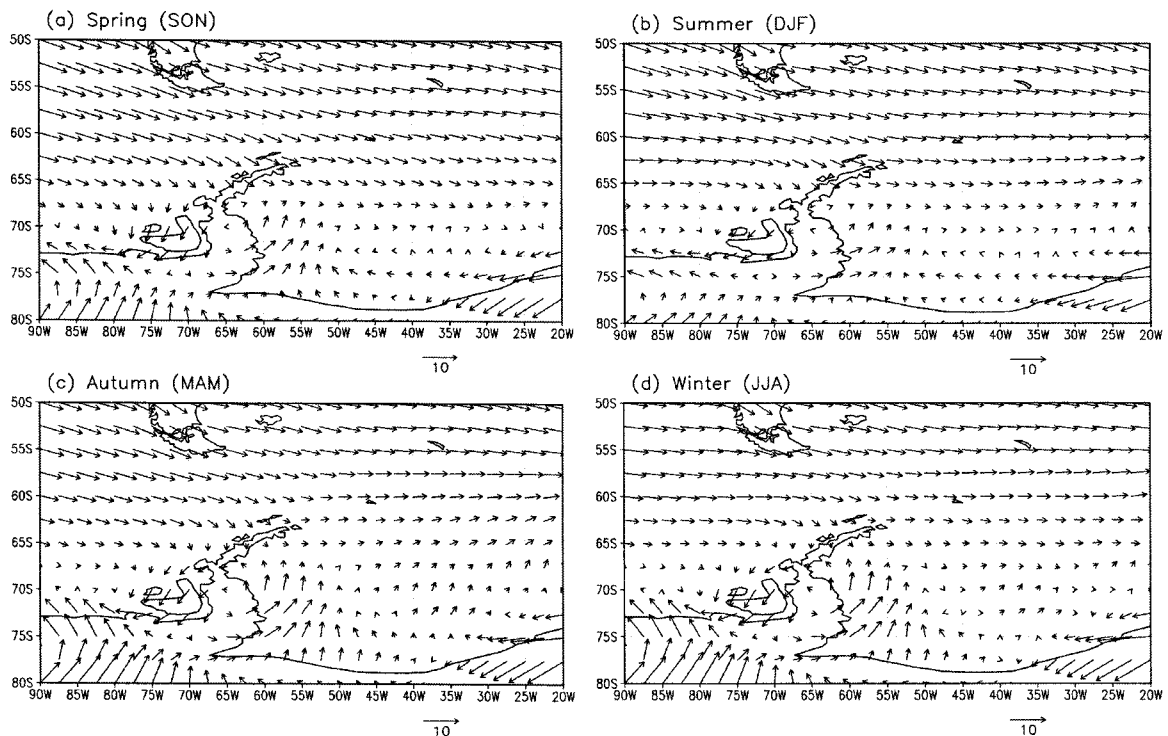


Fig. 5. Surface wind vector in the Antarctic Peninsula (1962-2001).

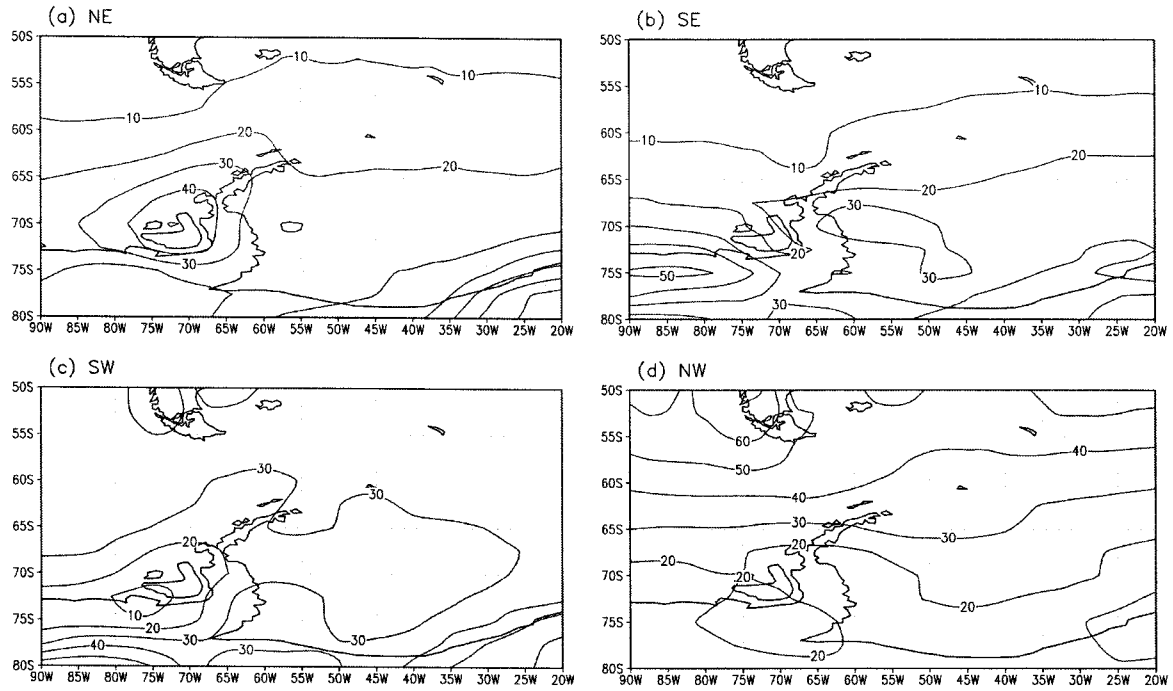


Fig. 6. Frequency distribution of wind direction (%) (a) NE, (b) SE, (c) SW and (d) NW for summer.

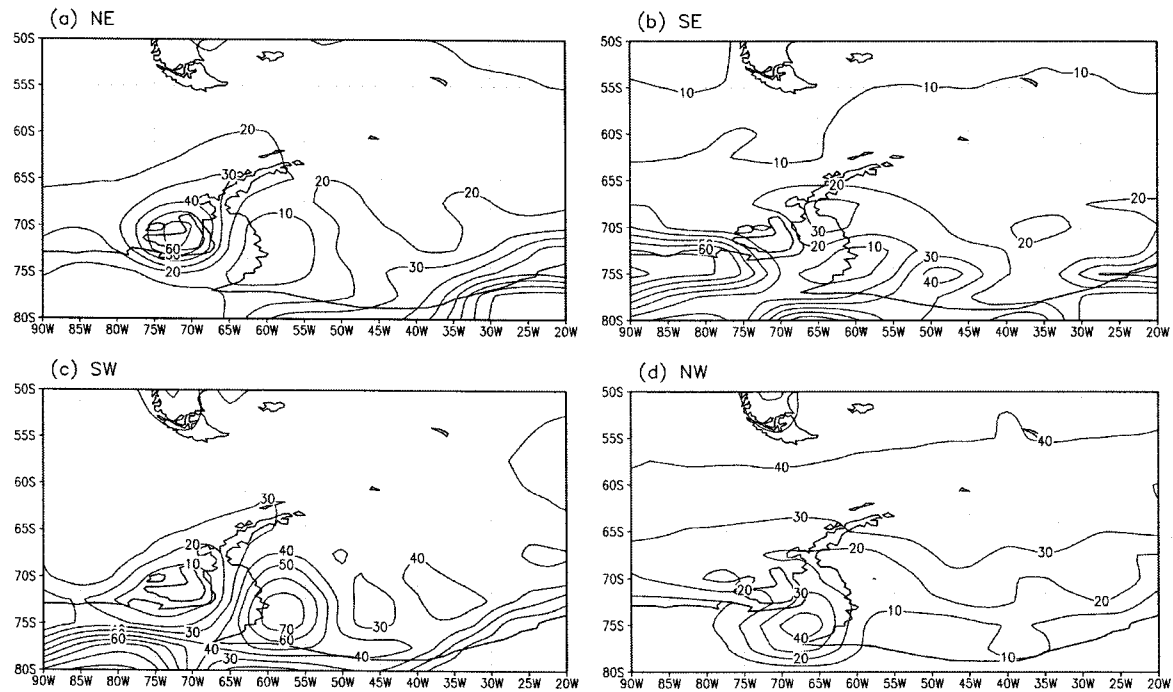


Fig. 7. Same as Fig. 6 except for winter.

에서 여름 바람의 빈도 분포를 살펴보면, 반도의 북단에서 여름에는 북동이 약 20%, 남동이 약 15%, 남서가 약 25~30%, 북서가 약 35% 정도이고(Fig. 6), 반면 겨울에는 북

동이 약 20%, 남동이 약 15%, 남서가 약 30~40%, 북서가 약 30% 정도로 나타난다(Fig. 7). 즉 다시 말해 남극반도의 북쪽 지역에서 여름에는 북서풍의 빈도가 남서풍 보다

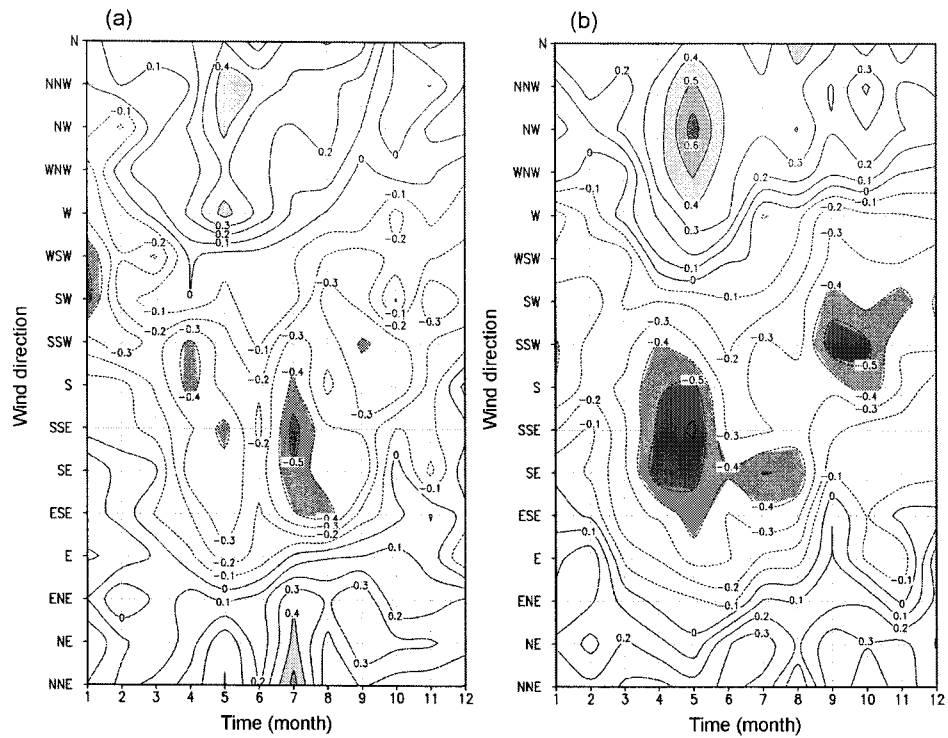


Fig. 8. Correlation coefficient between surface air temperature ( $^{\circ}\text{C}$ ) and frequency of wind direction (%) at (a) Rothera and (b) Faraday for the period of 1961-2001.

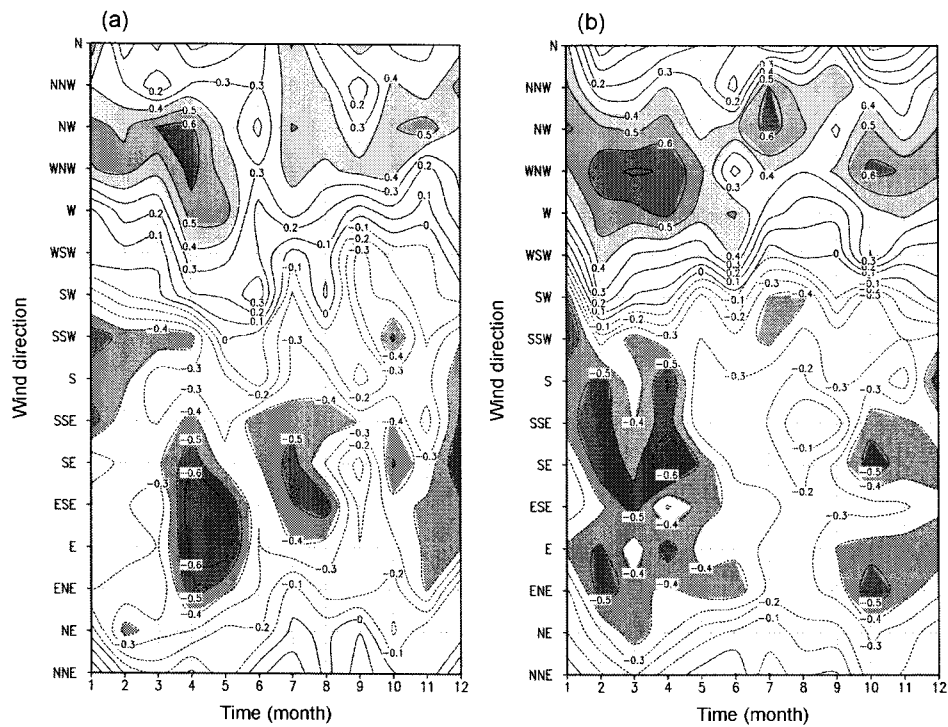


Fig. 9. Same as Fig. 9 except for (a) Bellingshausen and (b) Esperanza.



높게 나타나고, 겨울의 경우에는 이와 반대로 남서풍의 빈도가 북서풍 보다 높게 나타나는 것을 알 수 있었다. 따라서 남극반도의 끝 부분에서 여름에는 바다에서 불어오는 따뜻한 북서풍의 영향을 많이 받고, 겨울에는 남극대륙 지역에서 불어오는 차가운 남서풍의 영향을 많이 받는 것을 알 수 있다.

남극반도의 온난화를 이해하기 위하여 반도 부근의 기온과 바람의 관계를 알아보았다. 관측자료가 상대적으로 긴 6개 지점(Rothera, Faraday/Vernadsky, Esperanza, Bellingshausen, Orcadas, Halley)의 월평균 기온과 NCEP/NCAR 재분석 6시간 자료로부터 계산된 풍향(16방위)의 월빈도 사이의 상관 관계를 구하였다. 여기서 상관 관계를 구할 때 바람 자료는 기온 관측 지점과 근접한 격자 지점의 자료를 사용하였다. Rothera와 Faraday에서 가을과 겨울에 기온과 풍향 빈도와의 상관 관계는 북서풍과 남풍에 대해 각각 양과 음의 상관 관계를 보이긴 하지만 대체로 약한 관계성을 나타낸다(Fig. 8). Bellingshausen과 Esperanza에서는 Rothera와 Faraday에서 보다 뚜렷한 특징을 나타낸다(Fig. 9). 기온과 북서풍 빈도와의 상관 관계는 양의 상관 관계를 그리고 남풍과는 음의 상관 관계를 보였으며, 이러한 관계는 특히 가을과 겨울에 잘 나타났다. Bellingshausen에서는 3월, 4월에 북서풍은 0.6 이상의 양의 상관 관계를 보였으며, 남동풍은 4월, 5월에 -0.6

(Esperanza는 -0.5) 이상의 음의 상관 관계를 보였다. 따라서 남극 대륙 쪽에서 불어오는 차가운 바람이 감소하고 바다에서 불어오는 따뜻한 바람이 증가할수록 기온이 증가하는 것을 보여주며, 이것은 따뜻한 공기의 이류에 의한 기온의 증가 즉, 대기 이류에 의한 기온 변화를 잘 설명해 준다. Orcadas의 기온과 북서풍과의 관계 또한 양의 상관 관계가 나타났으며, 남남서풍과는 10월과 11월에 -0.7 정도의 강한 음의 상관 관계를 보였다(Fig. 10). 그러나 Halley의 경우는 북동풍을 제외하고는 기온과 바람사이의 뚜렷한 관계를 가지지 않는다. 이러한 차이는 Halley가 남극반도가 아닌 남극대륙의 웨델해 쪽 연안에 있기 때문인 것으로 이해할 수 있다.

Fig. 11은 6개 지점 중 북서풍과 남동풍의 뚜렷한 특징을 보였던 Bellingshausen에서 가을 지표 기온과 북서풍 그리고 남동풍의 빈도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 지표 기온과 북서풍 빈도와의 상관 계수는 0.53이며, 남동풍과는 -0.62으로 나타났다. 자료 수에 따른 통계적 유의 수준을 고려해 볼 때 이 값들은 유의 수준 1%안에 포함되는 상당히 의미 있는 값임을 알 수 있다.

지표 기온과 4방위에 대한 풍향의 빈도와의 상관관계를 계절별 그리고 지점별로 살펴보기 위하여 Table 2에 이들 상관 관계를 나타냈으며, 통계적 유의 수준 1% 이내의 값들은 음영으로 표시하였다. 남극반도의 서쪽에 위치한

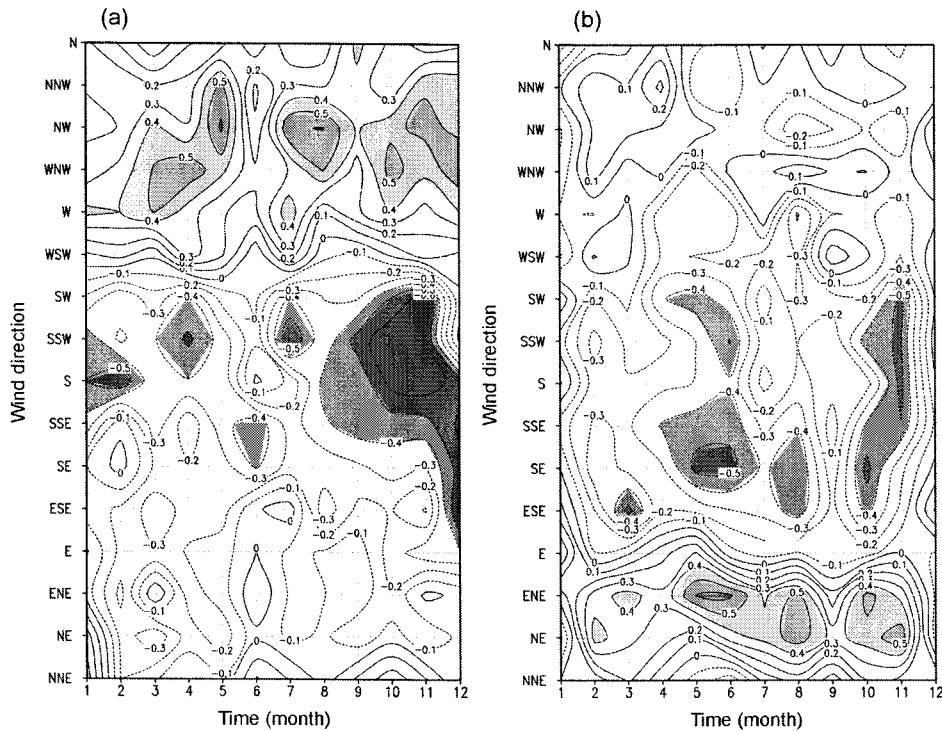


Fig. 10. Same as Fig. 9 except for (a) Orcadas and (b) Halley.

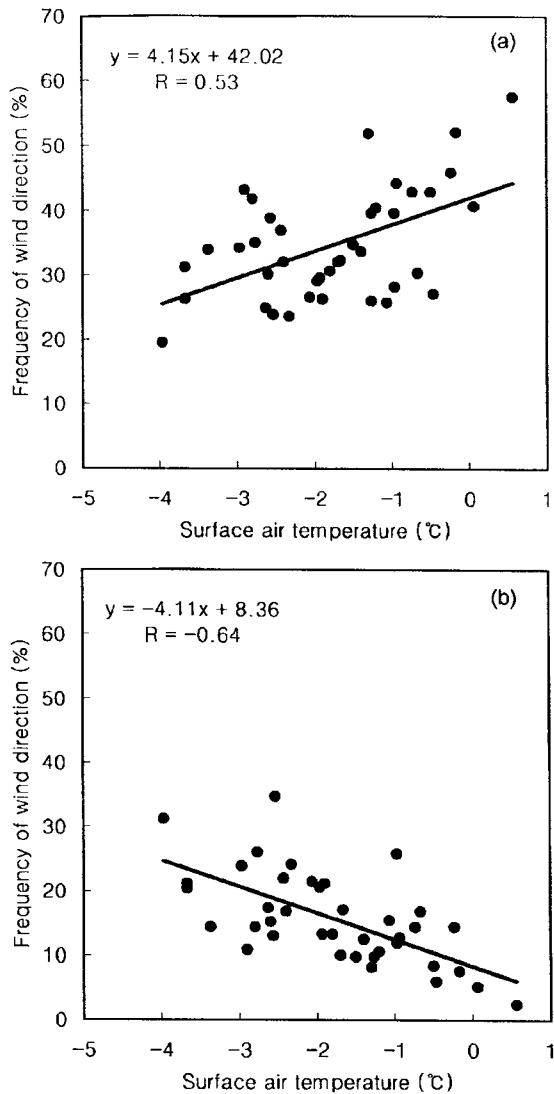


Fig. 11. Relation between surface air temperature (°C) and frequency of wind direction (%) in Bellingshausen: (a) northwesterly and (b) southeasterly for winter.

Rothera와 남극대륙에 위치한 Halley는 거의 통계적으로 의미 있는 값을 가지지 않았다. 이를 제외한 모든 지점에서 겨울에 남동풍은 음의 상관 관계를 북서풍은 양의 상관 관계를 나타낸다. 특히 남극 반도의 동쪽에 위치한 Bellingshausen과 Esperanza 그리고 Orcadas에서 가을과 겨울에 이러한 특징이 뚜렷이 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 기온과 풍향별 상관 관계를 살펴보면 반도의 동쪽 지역에 위치한 Bellingshausen, Esperanza 그리고 Orcadas에서 기온과 남동풍 빈도와는 음의 상관 관계를 보였으며, 북서풍과는 양의 상관 관계를 나타내며 이 값들은 통계적으로 상당한 의미를 가지는 값들이다.

이러한 남극 반도 북동쪽에 나타난 기온과 풍향 빈도 사이의 관계성을 이해하기 위하여 남극반도 주변에서 40년 동안 풍향 빈도의 변화 추세를 분석하였다. 먼저 기온과의 상관 관계가 다른 계절 보다 상당히 의미 있는 값을 가졌던 가을을 살펴보면, 남극반도의 동부 지역에서는 남극 대륙으로부터 불어오는 차가운 남동풍이 약 -5%/10년의 강한 감소 추세를 보였으며, 바다로부터 불어오는 따뜻한 북서풍은 약 4%/10년 정도의 증가 추세를 보인다(Fig. 12). 겨울도 마찬가지로 비슷한 추세를 보이고 있으므로 여기서 겨울 그림은 생략한다. 따라서 남극반도의 북동쪽 지역에서 가을과 겨울에 북서풍의 빈도가 증가했고, 그리고 남동풍의 빈도가 감소하였다. 따라서 앞서 설명한 대기 이류에 의한 기온의 변화와 연관지어 볼 때 남극반도 북동부 지역에서 발생하는 온난화는 따뜻한 북서풍의 증가 그리고 차가운 남동풍의 감소와 밀접하게 연관되어 있을 것으로 생각된다. 남극반도의 남쪽에서 남서풍의 빈도 또한 강하게 일어나고 있으나, 이 지역의 관측 자료가 부족하여 남서풍의 빈도 증가에 대한 이해에 어려움이 있다. 또한 이 연구에서는 풍향뿐만 아니라 풍속에 대해서도 기온과의 상관 관계를 구하였으나 뚜렷한 특징을 보이지 않았다. 따라서 남극반도의 북동부 지역에서는 북서풍이 증가할수록 그리고 남동풍이 감소할수록 기온이 증가하며, 이러한 경향의 대기 순환의 변화가 지속된다면 남극반도

Table 2. Correlation coefficients between frequency of wind direction (%) and surface air temperature (°C) at each station for the period 1962-2001.

	Spring (SON)				Summer (DJF)				Autumn (MAM)				Winter (JJA)			
	NE	SE	SW	NW	NE	SE	SW	NW	NE	SE	SW	NW	NE	SE	SW	NW
Rothera	<b>0.31</b>	-0.07	-0.25	-0.09	0.14	0.26	<b>-0.46</b>	-0.16	0.14	<b>-0.31</b>	0.05	0.21	<b>0.41</b>	<b>-0.49</b>	-0.10	<b>0.33</b>
Faraday	<b>0.42</b>	-0.10	<b>-0.48</b>	-0.01	0.14	0.00	-0.29	0.14	0.12	<b>-0.56</b>	-0.07	<b>0.37</b>	0.16	<b>-0.53</b>	-0.17	<b>0.49</b>
Bellingshausen	-0.04	<b>-0.41</b>	-0.26	<b>0.45</b>	0.00	-0.20	-0.19	0.26	<b>-0.36</b>	<b>-0.64</b>	0.32	<b>0.53</b>	-0.13	<b>-0.54</b>	0.02	<b>0.64</b>
Esperanza	-0.30	<b>-0.41</b>	-0.08	<b>0.53</b>	-0.28	<b>-0.49</b>	-0.02	<b>0.44</b>	<b>-0.45</b>	<b>-0.62</b>	0.20	<b>0.62</b>	-0.24	<b>-0.37</b>	-0.16	<b>0.51</b>
Orcadas	0.20	<b>-0.43</b>	<b>-0.57</b>	<b>0.62</b>	0.10	-0.23	-0.13	0.23	-0.26	-0.37	-0.09	<b>0.53</b>	0.04	-0.26	-0.16	<b>0.35</b>
Halley	<b>0.43</b>	<b>-0.36</b>	<b>-0.34</b>	-0.21	-0.03	-0.21	0.09	0.22	<b>0.40</b>	<b>-0.37</b>	-0.29	0.15	<b>0.47</b>	<b>-0.38</b>	<b>-0.41</b>	-0.03

Bold characters denote significance at the 5% level and 1% level correlation coefficients are shaded.

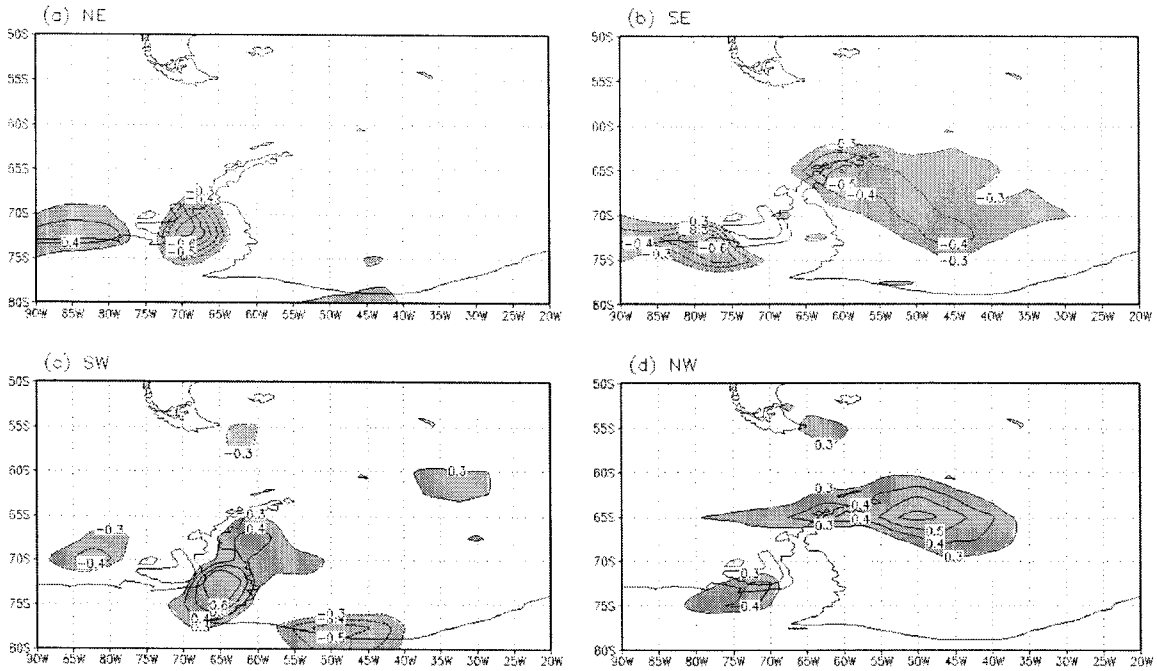


Fig. 12. Rate of change (%/yr) in the frequency of wind direction (a) NE, (b) SE, (c) SW and (d) NW for autumn during the period 1962-2001.

의 북부 지역에서 동서간 기온 차이는 줄어들 것이다.

### 5. 해면기압 변동과 풍향빈도

앞 절에서 남극반도의 끝 부분과 동쪽에 위치한 Bellingshausen, Esperanza, 그리고 Orcadas에서 기온과 풍향 사이에 밀접한 관계성이 나타났다. 이들 지점에서 기온은 특히 가을과 겨울에 각 지점의 북서풍 빈도와 높은 양의 상관 관계를 그리고 각 지점의 남동풍 빈도와는 높은 음의 상관 관계를 각각 보였다. 이러한 관계성을 보다 자세히 이해하기 위해서 이 절에서는 바람과 밀접하게 관련이 있는 해면기압 분포를 분석하였다. 해면기압 자료는 NCEP/NCAR 재분석 월평균 해면기압 자료를 이용하였으며, 계절 평균값을 분석하였다. 먼저 해면기압의 공간 분포를 이해하기 위하여 평균과 표준편차를 계산하였으며, 또한 공간 변동을 조사하기 위하여 주성분 분석을 시도하였다. 그리고 이들 자료를 이용하여 풍향 빈도와 해면기압 사이의 통계적인 상관 관계를 분석하였으며, 해면기압의 공간 분포에 나타난 계절 변화를 이용하여 해면기압과 기온 사이의 가능한 관련성을 추론하였다. 연구 영역은 바람의 경우와 마찬가지로 지상 관측 지점들을 포함하는 50~80°S, 90~20°W 영역으로 선택하였다.

먼저 연구 영역내의 기압 분포를 알아보기 위하여 1962년부터 2001년까지의 40년 기간 동안의 계절 평균을 계산

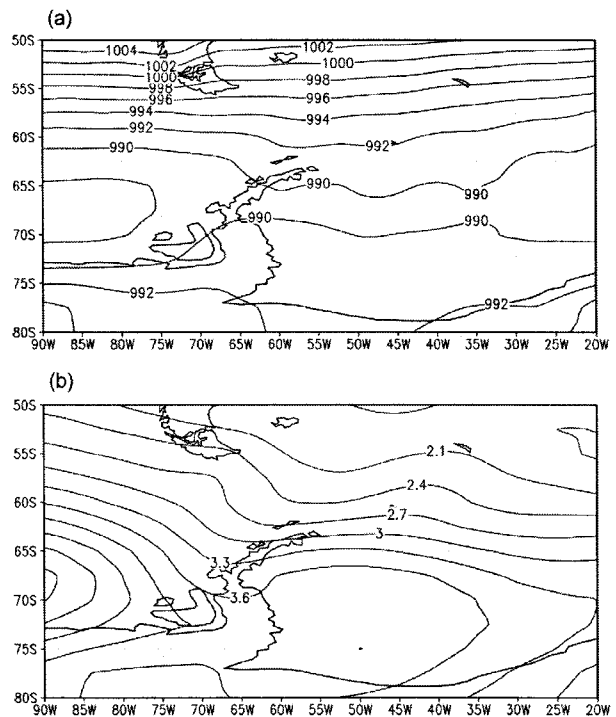


Fig. 13. Distribution of sea level pressure variations in summer: (a) mean sea level pressure (hPa) and (b) standard deviations (hPa) for the period 1962-2001.

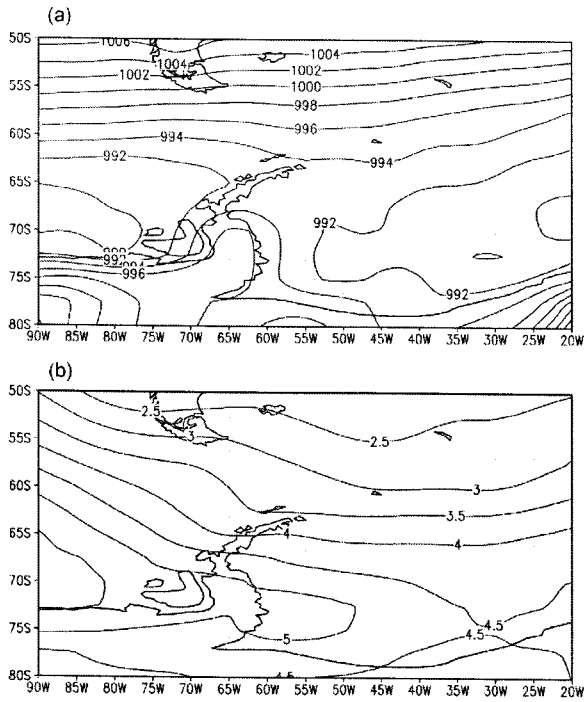


Fig. 14. Same as Fig. 13 except for winter.

하였다(Fig. 13a, Fig. 14a). 남극반도 부근의 계절별 평균 기압 분포를 살펴보면, 65~70°S 부근에서 뚜렷한 저기압대가 나타나고 이 기압대를 중심으로 양쪽 저위도대와 고위도대 방향으로 기압이 상승하는 경향을 보인다. 즉 이러한 저기압대는 남반구 해면기압 분포의 특징인 Deep Antarctic Circumpolar Trough를 잘 보여준다. 이러한 저기압대의 위치는 여름과 가을에는 65~70°S 부근에 위치하고 봄과 겨울에는 약간 남쪽으로 70°S 부근으로 내려가는 것을 볼 수 있다. 이 저기압대의 중심기압은 다른 계절보다 봄에 상대적으로 낮게 나타난다.

앞에서 말한 저기압대를 보다 자세하게 살펴보면 남극 반도를 중심으로 태평양과 대서양 부근에 각각 저기압 중심이 위치하며, 남극반도 주변에는 약한 고기압 능이 위치해 있다. 이러한 고기압 능은 계절에 따라 크게 변화하는데, 가을과 겨울에 뚜렷이 나타나는 반면 봄에는 약하게 나타나고, 여름에는 사라진다. 다음으로 기압의 변동성을

설명해주는 표준편차를 계절별로 살펴보았다(Fig. 13b, Fig. 14b). 사계절 중에서 겨울에 기압 변동이 가장 크고, 여름의 경우는 가장 작게 나타났다. 평균 기압 분포에서 고기압 능이 나타났던 부분과 태평양 부근의 저기압 중심 부분에서의 기압 변동이 크게 나타났다.

남극반도 주변의 기압 분포의 변화와 지역별 변화 정도를 알아보기 위해 계절 평균자료를 사용하여 주성분 분석을 적용하였다. 주성분 분석은 가능한 한 최대 분산을 갖도록 하는 서로 관련성이 없는 다변량들의 선형 결합이다. 이러한 주성분 분석 방법을 통하여 남극반도 주변의 기압의 변화에 대한 지역별 가중치 여부와 서로 독립된 요소들이 전체 변화량에 어느 정도 설명해주는지 살펴보고자 한다. 첫 번째부터 세 번째까지의 변화량은 봄과 가을에는 전체 변화량의 약 86% 정도를 설명해 주고 있으며, 여름과 겨울에는 약 90% 정도를 설명해 주고 있다(Table 3). 따라서 계절별로 처음 세 번째 요소까지의 변화량이 전체 변화량의 주된 변화를 설명할 수 있을 것으로 본다. 첫 번째 주성분은 겨울을 제외한 모든 계절에서 전체 기압 변화량의 약 60% 정도를 설명해 주고 있으며, 겨울에는 약 67%를 설명해 준다. 첫 번째 loading 분포의 특징은 전체 계절에서 저위도에서 고위도로 갈수록 가중치가 커져서 남극대륙에 근접한 반도 부근, 즉 70~75°S, 50~90°W부분에서 가장 크게 나타난다(Fig. 15). 그리고 첫 번째 score에 대한 경향 분석에서 사계절 모두 감소하는 것으로 나타났으며, 특히 가을과 겨울에 상관 계수가 각각 -0.54와 -0.65로 크게 나타났다(Fig. 16). 그러므로 첫 번째 주성분의 loading과 score의 분석으로부터 전체 기압 변화 중 기압하강에 의한 변화가 가장 크다는 것을 알 수 있다. 또한 해면 기압의 경향 분석에서 기압 하강이 가장 뚜렷하게 나타나는 지역이 첫 번째 주성분의 loading이 가장 크게 나타나는 곳과 대체로 잘 일치한다. 그리고 이러한 기압 하강은 Hines et al.(2000)이 주장한 남극 반도주변의 기압의 감소 추세와도 잘 일치한다.

두 번째 주성분의 loading에서는, 봄과 겨울에서 반도를 중심으로 동서간의 진동현상이 나타난다(Fig. 17). 이러한 진동현상은 봄과 겨울에 각각 약 17%와 약 15%의 변화량을 설명하고 있다. 여름과 가을의 경우는 세 번째 주성분에서 이러한 동서간 진동현상을 보였고, 전체 변화량의

Table 3. Percentage of variance of the seasonal fields explained by the first 3 seasonal EOF's.

EOF	Spring (SON)		Summer (DJF)		Autumn (MAM)		Winter (JJA)	
	Percent variance	Cumulative variance	Percent variance	Cumulative variance	Percent variance	Cumulative variance	Percent variance	Cumulative variance
1	59.3	59.3	70.0	70.0	59.5	59.5	67.0	67.0
2	17.6	76.9	11.2	81.2	16.6	76.1	14.5	81.5
3	9.8	86.7	8.3	89.5	10.5	86.6	9.1	90.6

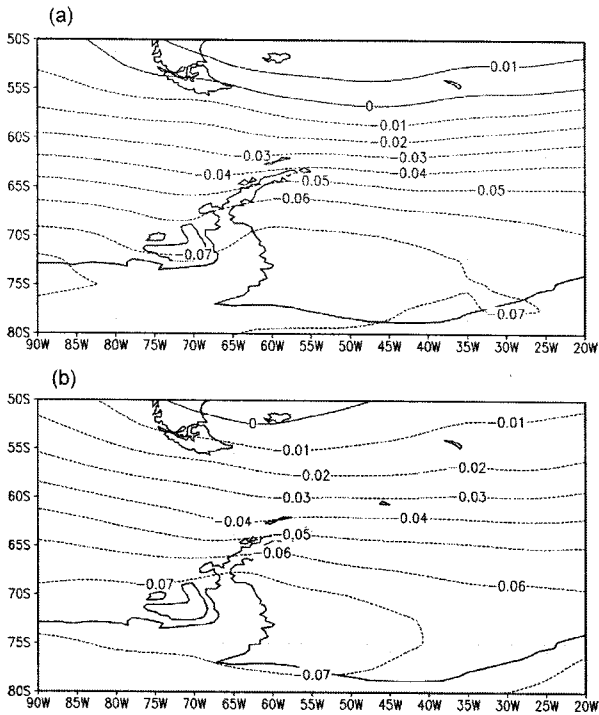


Fig. 15. Distribution of the first loadings (a) autumn and (b) winter for the period 1962-2001 in the vicinity of the Antarctic Peninsula.

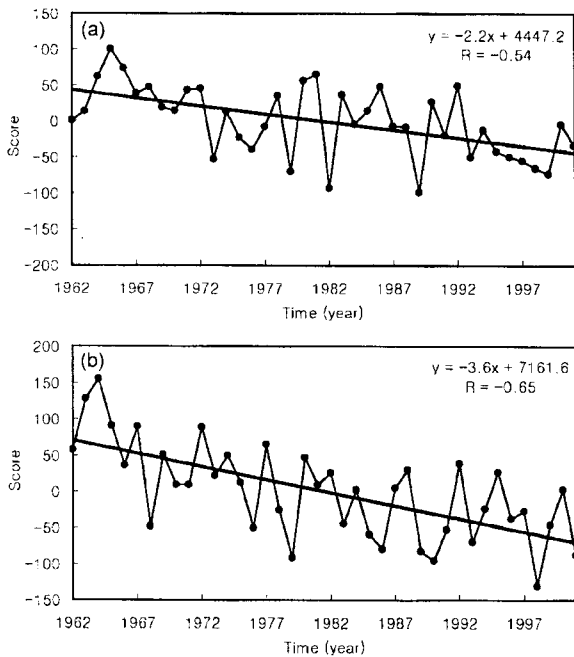


Fig. 16. The first scores of sea level pressure (a) autumn and (b) winter in the Antarctic Peninsula for the period 1962-2001.

약 8%와 약 10%정도를 각각 설명하고 있다. Rind *et al.* (2001) 그리고 Yuan and Martinson(2001)은 남극반도 부근에서의 동태평양과 대서양 지역 해빙과 기온의 변화가 쌍극 패턴을 보이고, 이것은 ENSO(El Niño/Southern Oscillation)와 연관된다고 주장하였다. 따라서 두 번째 주 성분에서 나타난 진동현상은 이러한 쌍극 현상과 관련지어 생각해 볼 수 있다. 이를 조사하기 위하여 두 번째 score 값과 ENSO의 강도를 나타내 주는 NINO 3.4 지역

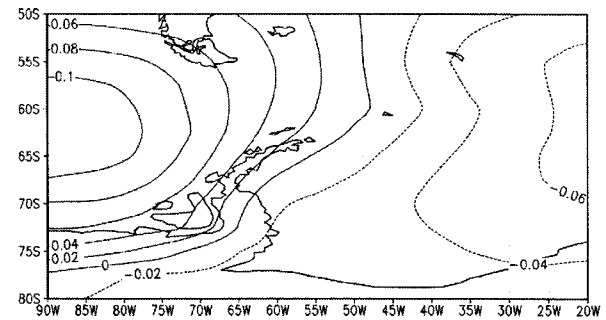


Fig. 17. Distribution of the second loadings in winter for the period 1962-2001 in the vicinity of the Antarctic Peninsula.

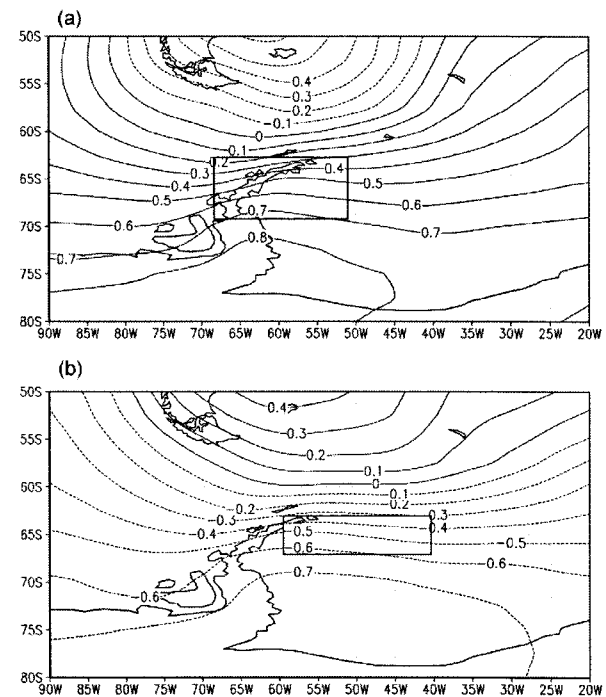


Fig. 18. Correlation coefficient between mean sea level pressure and (a) mean frequency of SE in 62.5-67.5°S, 55-40°W and (b) mean frequency of NW in 62.5-67.5°S, 60-45°W for winter.

(5°N~5°S, 170°~120°W)의 SST anomaly 자료와 상관 관계를 구해 보았다. 이들 두 값의 상관 관계는 겨울철에 약 0.3정도로 나타났으며, 이러한 결과는 Rind *et al.*(2001)과 Yuan and Martinson(2000)의 결과를 뒷받침한다.

해면기압과 풍향 빈도 사이의 변동성을 알아보기 위하여 남극반도 북동쪽 지역에서 변화 추세가 컸던 남동풍과 북서풍 빈도와 해면 기압 사이의 상관 관계를 구하였다. 여기서 남동풍의 빈도와 북서풍의 빈도는 62.5~70°S, 67.5~50°W와 62.5~67.5°S, 60~40°W지역의 계절 평균값을 각각 사용하였다. 이 지역은 가을과 겨울에 풍향 빈도의 변화 추세가 뚜렷이 나타난 곳이다. 해면 기압 자료는 연구 영역내의 계절 평균 격자 자료를 사용하였다. 그리고 풍향 빈도와 해면 기압 사이의 상관 관계는 온난화 경향이 뚜렷이 나타난 겨울에 대해 계산하였다(Fig. 18). 해면 기압에 대한 남동풍 빈도의 상관 관계는 겨울에 남극 대륙과 반도의 경계지점 부근(70~80°S, 35~70°W)에서 최대 0.8정도, 북서풍 빈도와는 -0.7정도로 높은 상관 관계를 나타냈으며, 가을 역시 이와 유사한 분포를 보였다. 이 결과는 남극대륙과 반도 경계 부근의 해면기압이 하강하면, 남극반도의 북동쪽 지역에서 가을과 겨울에 북서풍이 증가하고 남동풍이 감소한다는 것을 의미한다.

남극반도의 북동쪽 지역의 북서풍과 남동풍의 빈도와 밀접한 연관성을 보이는 해면 기압의 영역은 남극대륙과 반도의 경계 지점에 나타나고, 이 지역은 바로 해면기압의 주성분 분석에서 기압하강이 가장 강하게 일어났던 지역과 잘 일치한다. 따라서 남극 반도의 북동쪽 지역의 북서풍과 남동풍의 빈도 변화는 남극 반도 주변(연구영역 전체)의 해면 기압 하강, 특히 남극대륙과 남극반도의 경계 지점의 기압하강과 관련되어 있음을 알 수 있다. 결론적으로 남극 반도 북동부 지역의 온난화는 대부분 남극대륙과 남극반도 경계 지점의 해면기압 감소와 관련된 반도 북동쪽 지역의 풍향 빈도의 변화와 연관되어 있다고 이해할 수 있다. 해면기압은 기온과 다르게 공간 규모에 있어서 보다 큰 규모로 변화할 가능성이 있기 때문에 해면기압과 기온 사이의 관계성을 국지적인 자료의 일대일 분석으로는 불가능할 것으로 생각된다. 따라서 기온과 해면기압 사이의 관계성을 이해하기 위해 해면기압 분포의 계절변화를 살펴보면, 겨울에 남극대륙과 반도의 경계지점에 약한 고기압 중심이 위치해 있으나 봄과 가을에는 이 고기압이 점차 약화되어 기압능으로 나타나고 여름에는 완전히 사라지는 것을 볼 수 있다. 겨울철에 이러한 고기압은 남극 대륙과 반도의 경계 부근에서 반시계 방향의 바람을 생성하고, 남극대륙에서 불어오는 차가운 공기를 반도의 동쪽 지역으로 보내어서, 남극반도의 동서 사이에 뚜렷한 온도차를 만들어 내는 것으로 이해할 수 있다. 따라서 가을과 겨울에 남극반도의 북동쪽 지역 기온의 증가는 남극대륙

과 반도 경계지점의 뚜렷한 기압 하강과 관련될 것이고, 이러한 기압 하강은 남극반도의 북동쪽 지역의 북서풍의 증가와 남동풍의 감소로 나타날 것이다. 그리고 이러한 풍향 빈도의 변화는 반도의 북동쪽 지역의 기온을 상승시킴으로써 남극반도 온난화는 기온, 바람 그리고 기압 사이의 되먹임 과정으로 이해될 수 있을 것이다.

## 6. 요약 및 결론

이 연구에서는 남극반도 지역에서의 기온, 바람, 기압 사이의 관계를 조사하기 위하여 지상 기온 관측 자료, NCEP/NCAR 재분석 기온, 바람 그리고 해면기압 자료를 분석하였다. 기온 자료는 남극반도에 위치한 관측지점 중 40년 이상의 관측기록을 보유하고 있는 6개 지점(Rothera, Faraday, Esperanza, Bellingshausen, Orcadas, Halley)에 대한 월평균 지상 기온 자료를 분석하였다. NCEP/NCAR 재분석 자료의 6시간별 동서와 남북 성분 바람 자료를 이용하여 풍향을 구하고, 이로부터 계산된 월별 풍향 빈도를 분석하였다. NCEP/NCAR 재분석 자료는 2.5°×2.5°해상도의 격자 자료로 되어 있으며, 이 연구에서는 위도 50~80°S, 경도 90~20°W 영역에서 1962년부터 2001년까지 40년 동안의 6시간 간격 자료를 사용하였다. 해면기압 자료도 바람과 마찬가지로 1962년부터 2001년까지의 NCEP/NCAR 재분석 자료를 사용하였으며, 일자료를 이용하여 계절 평균을 구하고 이를 이용하여 주성분 분석(PCA) 방법을 적용하여 분석하였다.

남극반도에 있어 5개 지점(Rothera, Faraday, Esperanza, Bellingshausen, Orcadas)의 월평균 기온은 지난 40년 동안 겨울과 가을이 다른 계절에 비해 더 큰 온난화를 보였다. 이러한 온난화는 남극반도의 동쪽 보다 서쪽에서 크게 나타났으며, 서쪽은 겨울에 그리고 남극반도의 동쪽은 가을에 더 큰 온난화가 관측되었다.

대기 이류에 의한 간접적인 기온의 변동을 조사하기 위해 바람과의 관련성을 조사하였다. 먼저 남극반도 부근의 40년 동안의 계절별 지표 벡터 바람장과 4방위(NE, SE, SW, NW)에 대한 빈도 분포를 살펴보았다. 또한 기온과 바람의 관계성을 조사하기 위하여 지상 관측 월평균 기온 자료와 NCEP/NCAR 재분석 6시간 자료를 통해 계산된 풍향(16방위)의 빈도 사이의 상관 관계를 계산하였다. 기온과 바람의 관계성을 살펴보면, 기온은 북서풍 빈도와 양의 상관 관계를 나타냈고, 남동풍 빈도와는 음의 상관 관계를 나타냈다. 이러한 특징은 특히 가을과 겨울 남극반도의 동쪽에 위치한 Bellingshausen과 Esperanza 그리고 Orcadas에서 뚜렷이 나타났다. 기온과 풍향 빈도 사이의 관계성을 이해하기 위하여 남극반도 주변에서 40년 동안 풍향 빈도의 변화 추세를 분석하였다. 그 결과 남극반도의

북동쪽 지역에서 가을과 겨울에 북서풍의 빈도가 증가했고, 그리고 남동풍의 빈도가 감소하였다. 따라서 남극반도의 북동쪽 지역에서는 북서풍이 증가할수록 그리고 남동풍이 감소할수록 기온이 증가하며, 이러한 경향의 대기 순환의 변화가 지속된다면 남극반도의 북부 지역에서 동서간 기온 차이는 줄어들 것이다.

기온과 바람 사이의 관계를 더 잘 이해하기 위해서 바람과 밀접하게 관련되어 있는 해면기압을 분석하였다. 해면기압 자료는 NCEP/NCAR 재분석 월평균 해면 기압 자료를 이용하였으며, 계절 평균값을 분석하였다. 해면기압의 주성분 분석에서 첫 번째 주성분은 남극반도 부근의 기압 변화 중 기압 하강과 관련되어 있으며, 이러한 기압 하강은 남극대륙과 반도 경계 지점에서 가을과 겨울에 뚜렷이 나타났다. 해면기압과 풍향 빈도 사이의 변동성을 알아보기 위하여 남극반도 북동쪽 지역에서 변화 추세가 뚜렷했던 남동풍과 북서풍 빈도와 해면기압 사이의 상관 관계를 구하였다. 해면기압과 남동풍과는 양의 상관 관계가 그리고 북서풍과는 음의 상관 관계가 나타났다. 이러한 관계는 가을과 겨울에 남극 대륙과 반도 경계 지점의 기압이 감소할수록 남극 대륙에서 불어오는 차가운 남동풍이 감소하고 해양으로부터 불어오는 따뜻한 북서풍이 증가하는 것으로 설명될 수 있다. 결론적으로 남극반도 북동부 지역의 온난화는 대부분 남극대륙과 남극반도 경계 지점의 해면기압 감소와 관련된 반도 북동쪽 지역의 풍향 빈도의 변화와 연관되어 있다고 이해할 수 있다. 따라서 가을과 겨울에 남극반도의 북동쪽 지역 기온의 증가는 남극 대륙과 반도 경계지점의 뚜렷한 기압 하강과 관련된 남극반도의 북동쪽 지역의 북서풍 증가와 남동풍 감소와 관련되어 있다고 설명할 수 있다. 그리고 이러한 풍향 빈도의 변화는 반도의 북동쪽 지역의 기온을 상승시킴으로써 남극반도 온난화는 기온, 바람 그리고 기압 사이의 되먹임 과정으로 이해 될 수 있을 것이다.

최근 King and Harangozo(1998)와 King(1994)은 남극반도 지역의 온난화는 이 지역의 해면 기압의 하강과 이와 연관된 북풍의 증가 그리고 해빙의 감소와 관련되어 있다고 설명하였다. 이들 연구에서 바람 자료는 해면 기압 자료로부터 계산한 남북방향 대기순환지수를 사용하였고 해빙 자료는 경도 5° 간격으로 얻어진 해빙이 분포하는 가장자리의 위치자료를 사용하였다. 그러나 이들 자료는 특정 지역의 바람과 해빙 분포를 표현하고자 할 때 그 지역의 대표성과 자료의 정량성에 문제가 있으며, 특히 특정 관측지점의 기온자료와 비교할 때 어려움이 있다. 이 연구에서는 보다 지역적이고 정량적인 분석을 위해 풍향의 빈도, 해면기압 자료를 사용하였으며, 이를 통해 기온, 바람, 기압 사이의 관계성을 자세하게 분석할 수 있었다. 풍향의 변화 경향 분석에서 가을, 겨울, 여름에는 남극반도

의 북쪽 부분에서 북서풍의 빈도가 증가했고, 반면 가을과 겨울에는 남극반도의 동쪽 지역에서 남동풍의 빈도가 급격히 감소하였다. 그리고 이러한 풍향 빈도의 변화, 즉 지역적 대기 순환의 변화는 이 지역 기온 변화와 밀접하게 관련되어 있는 것으로 이해된다. 또한 이러한 대기순환의 변화가 앞으로 지속된다면 남극반도에 있어 온난화는 가을과 겨울에 보다 뚜렷하게 나타날 것이며, 남극반도의 서쪽보다 동쪽 지역에서 급격하게 나타날 것이다. 결과적으로 남극반도의 동서간 기온 차이도 줄어들 것이다.

## 사 사

이 연구는 한국해양연구원 극지연구소의 '남극권 고해양 및 고기후 연구(PP03106)' 사업과 '남극 세종기지 주변 환경변화 모니터링(PP03102)' 사업의 지원을 받아 수행되었다. 이 논문을 심사하여 주시고 많은 조언을 해주신 심사위원들께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Hines, K.M., D.H. Bromwich, and G.J. Marshall. 2000. Artificial surface pressure trends in the NCEP-NCAR reanalysis over the Southern Ocean and Antarctica. *J. Climate*, 13, 3940-3952.
- Hofmann, E.E., J.M. Klinck, C.M. Lascara, and D.A. Smith. 1996. Foundations for Ecological Research West of the Antarctic Peninsula. R.M. Ross, E.E. Hofmann, L.B. Quetin, Eds. (American Geophysical Union, Washington, DC, 1996), 70, 61-80.
- IPCC. 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Bases*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, 881 p.
- Jacobs, S.S. and J.C. Comiso. 1993. A recent sea-ice retreat west of the Antarctic Peninsula. *Geophys. Res. Lett.*, 20(12), 1171-1174.
- King, J.C. 1994. Recent climate variability in the vicinity of the Antarctic Peninsula. *Int. J. Climatol.* 14, 357-369.
- King J.C. and S.A. Harangozo. 1998. Climate change in the western Antarctic Peninsula since 1945: observations and possible causes. *Ann. Glaciol.* 27, 571-575.
- 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 Polar Res.*, 24(3), 267-278.
- Rind, D., M. Chandler, J. Lerner, D.G. Martinson, and X. Yuan. 2001. The climate response to basin-specific changes in latitudinal temperature gradients and implications for sea ice variability. *J. Geophys. Res.*, 106, 20161-20173.

- Schwerdtfeger, W. 1976. Changes of temperature field and ice conditions in the area of the Antarctic Peninsula. *Mon. Wea. Rev.*, 104, 1441-1443.
- Schwerdtfeger, W. 1979. Meteorological aspects of the drift of ice from the Weddell Sea toward the mid-latitude westerlies. *J. Geophys. Res.*, 84, 6321-6328.
- Vaughan, D.G. and C.S.M. Doake. 1996. Recent atmospheric warming and retreat of ice shelves on the Antarctic Peninsula. *Nature*, 379, 328-331.
- Vaughan, D.G., G.J. Marshall, W.M. Connolley, J.C. King, and R. Mulvaney. 2001. Devil in the Detail. *Science*, 293, 1777-1779.
- Yuan, X. and D.G. Martinson. 2001. The Antarctic dipole and its predictability. *Geophys. Res. Lett.*, 28, 3609-3612.

---

*Received Oct. 8, 2003*

*Revised Nov. 9, 2003*

*Accepted Dec. 2, 2003*