

Note

20세기 재분석 자료(20CR)를 이용한 남극대륙의 기온 변화

조일성¹ · 지준범^{2*} · 이규태¹ · 채남이³ · 윤영준³

¹강릉원주대학교 자연과학대학 대기환경과학과
(210-702) 강원도 강릉시 지변동 대학로 120

²국립기상연구소 응용기상연구과
(156-720) 서울특별시 동작구 여의대방로 16길 61

³한국해양연구원 부설 극지연구소
(406-840) 인천광역시 연수구 갯벌로 12 갯벌타워

Change of Temperature using the Twentieth Century
Reanalysis Data (20CR) on Antarctica

Il Sung Zo¹, Joon Bum Jee^{2*}, Kyu Tae Lee¹, Namy Chae³, and Young Jun Yoon³

¹*Department of Atmospheric & Environmental Sciences, Gangneung-Wonju National University
Gangneung 210-702, Korea*

²*Applied Meteorology Research Division, National Institute of Meteorological Research
Seoul 156-720, Korea*

³*Korea Polar Research Institute, KORDI
Incheon 406-840, Korea*

Abstract : Antarctica is very sensitive to climate change but the number of stations is not sufficient to accurately analyze climate change in this region. Model reanalysis data supplements the lack of observation and can be used as long term data to verify climate change. In this study, the 20CR (Twentieth Century Reanalysis) Project data from NCEP/NCAR and monthly mean data (temperature, solar radiation and longwave radiation) from 1871 to 2008, was used to analyze the temperature trend and change in radiation. The 20CR data was used to validate the observation data from Antarctica since 1950 and the correlation coefficients between these data were determined to be over 0.95 at all stations. The temperature increased by approximately 0.23°C/decade during the study period and over 0.20°C/decade over all of the months. This increasing trend was observed throughout the Antarctica and a slight increase was observed in the Antarctic Peninsula. In addition, solar radiation (surface) and longwave radiation (surface and top of atmosphere) trends correlated with the increase in temperature. As a result, outgoing longwave radiation at the surface is attenuated by atmospheric water vapor or clouds and radiation at the top of the atmosphere was reduced. In addition, the absorbed energy in the atmosphere increases the temperature of the atmosphere and surface, and then the heated surface emits more longwave radiation. Eventually these processes are repeated in a positive feedback loop, which results in a continuous rise in temperature.

Key words : climate change of antarctica, 20CR NCEP/NCAR reanalysis data, temperature, solar radiation, longwave radiation

1. 서 론

현재의 기후변화는 산업혁명 이후 인간의 생산 활동에 의한 지구 온난화이며 온실가스 농도 증가가 온난화의 주 원인이다(IPCC 2007). 이 중 극 지역은 인간들의 생활터전과 다소 떨어져 있음에도 불구하고 극 지역의 대기 변화는 중위도 지역까지 직·간접적으로 영향을 미친다(Studing et al. 2005). 따라서 중위도 지역에서 발생한 온난화의 영향들은 인위적인 배출이 일어나지 않고 있는 극지역까지 영향을 미치고 있다. 특히 남극 대륙에는 지구에서 존재하는 담수의 약 70% 이상이 만년빙의 형태로 보존되고 있어 이 빙하가 전부 녹는다면 해수면은 지금보다 60 m 이상 상승할 수 있으며 대기 대순환적으로는 해양의 염분 농도 감소를 가져와 수문 순환 약화로 인한 기후시스템의 변화를 가져올 수 있다(Thomas et al. 2004; 한국해양연구원 부설 극지연구소 2009).

남극에 대한 관측 연구는 Orcadas(위도: 60.66°S, 경도: 44.66°W, 1904년 아르헨티나 건설) 기지에서 시작되었으며, 이후 여러 국가들은 남극의 기상학적 연구뿐만 아니라 대륙지체구조, 빙하, 운석, 천문우주과학, 극저온 생명과학 등 남극의 특성화 연구를 수행하고 있다. 이들 연구에서 남극 기후변화에 대한 연구들은 크게 남극반도의 온난화 및 남극대륙의 한랭화 현상과 남극 대륙 전체의 온난화 현상으로 나누어진다. 전자를 주장하는 분석 결과들은 WMO 산하기관인 AGCS(Antarctica and Global Climate System 2008)에서 1951년부터 2006년까지의 남극 유인 관측소(18개소) 자료를 이용하여 분석한 결과 남극반도에서는 온난화가 확연히 나타나는데 반해 남극 대륙에서는 약한 한랭화 현상이 나타났으며 이 현상은 빙상을 이용한 연구에서도 유사하게 나타났다(Ramillien et al. 2006; Velicogna and Wahr 2006). 또한 과거 30년 동안 남반구의 해양관측자료를 분석한 결과 중 남극반도에서 강한 온난화가 일어났음을 확인할 수 있는 증거들이 확인되었다(Qinghua et al. 2011). 후자의 주장을 뒷받침하는 연구로는 1957년부터 2006년까지의 지표면 관측 자료와 위성 자료 분석을 통해 남극대륙 전체에 걸쳐 뚜렷한 온난화가 진행되어 왔음을 확인하였으며 이는 지역 규모의 대기 순환과 관련된 해빙과 해수온도의 변화에 의한 것이라고 분석하였다(Steig et al. 2009). 또한 지난 50년 동안의 관측 자료 분석을 통하여 남극 대륙의 연중 기온은 급속하게 상승하였으며 특히 남극 서부 연안의 경우는 일평균 기온이 영상을 기록하는 날들이 70% 정도 증가하고 있음이 확인되었다(Vaughan et al. 2003; Trenberth et al. 2007; Turner et al. 2005). 그리고 해빙의 지속적 감소와 Bellingshausen 해의 온난화에 대한 연구들이 후자의 주장을 뒷받침해 주고 있다(Parkinson 2002; Meredith and

King 2005).

남극에 대한 연구결과의 차이는 남극 관측 자료의 시·공간적 부족에 의한 것과 위성자료 신뢰성에 대한 의문이 존재하기 때문으로 이를 해결하기 위한 방안으로 관측 자료와 위성자료를 동화한 수치예보 모델 결과를 이용한 분석이 수행되고 있다. 수치 모델을 이용한 연구로는 ERA-40 및 NCEP 재분석자료의 기온과 기압장을 이용한 연구(Bromwich and Fogt 2004), MMD(Multi Model Data)와 앙상블에 연 지표면 기온 자료를 이용한 연구(Carril et al. 2005), RCM(Regional Climate Model)을 이용한 연구(Monaghan et al. 2006) 등이 있다. 하지만 이들과 같은 모델 결과 자료는 대부분 기간이 짧은 산업혁명 이후 발생한 온난화 현상에 대한 명확한 분석에 이용하기 어렵다는 단점이 있다.

따라서 이 연구는 최근의 전 지구적 온난화와 관련하여 남극 지역의 관측 자료와 20세기 재분석(20CR) 자료의 상호 검증을 통하여 상호 자료간 신뢰성을 확인하고 최근 제기된 다양한 남극반도와 남극 대륙의 기온변화 경향에 대한 주장들에 대한 검증을 수행하고자 한다.

2. 연구 자료 및 방법

연구 자료

위도 60° 이상의 고위도 지역은 인간이 살아가기에 적합하지 않은 지역으로 저위도 지역에 비해 관측 자료의 기간과 종류가 중위도 이하 지역들에 비해 적은 편이다. 특히 남극은 지구상에서 가장 큰 관측 공백지로 서남극 지역의 경우 상주 기지가 없어 지구 기후계에서 남극 기후가 차지하는 비중에 비해 남극에서의 기후과정에 대한 이해는 여전히 제한적이다(한국해양연구원 부설 극지연구소 2009). 이러한 한계를 해결하기 위한 방안으로 수치모델 자료를 이용하는 방법이 있으며 ECMWF와 NCEP/NCAR 재분석 자료들이 많이 이용되고 있다. 그러나 이들 자료는 기후 분석에 사용될 정도의 자료 축적이 이루어지지 못하여 본 연구의 목적과는 맞지 않는다.

Compo et al. (2011)은 “The Twentieth Century Reanalysis Project(이하 20CR)”를 통해 1871년부터 2008년까지 138년 동안의 기후 자료를 수치모델 기반으로 구축하였다. 20CR에 사용된 모델은 수집된 지표면 기압자료를 이용해 자료동화를 수행하고 경계조건으로 관측된 월별 해수면 기온과 해빙 분포를 이용하였으며 56개의 앙상블(ensemble) 결과 자료를 평균하였다. 자료 동화에 사용된 수치모델은 NCEP GFS(Global Forecast System) 모델로써 NOAA NCEP EMC(Environmental Modeling Center)에서 개발되어(Kanamitsu et al. 1991) 현업 운용되고 있으며 지속적인 개선 및 모수화 방안의 수정이 이루어지고

Table 1. Information of the meteorological stations in antarctica based on the READER (station ID, station name, data period, latitude, longitude, and correlation)

| ID | Station | Period | Lat. | Lon. | R |
|-------|-------------------|--------|---------|----------|------|
| 89050 | Bellingshausen | 1968 ~ | 62.20°S | 58.97°W | 0.92 |
| 89611 | Casey | 1958 ~ | 66.28°S | 110.53°E | 0.97 |
| 89571 | Davis | 1957 ~ | 68.58°S | 77.97°E | 0.98 |
| 89642 | Dumont d'Urville | 1984 ~ | 66.67°S | 140.01°E | 0.96 |
| 88963 | Esperanza | 1948 ~ | 63.40°S | 56.98°W | 0.86 |
| 89063 | Faraday&Vernadsky | 1948 ~ | 65.25°S | 64.27°W | 0.93 |
| 89022 | Halley | 1956 ~ | 75.58°S | 26.50°W | 0.97 |
| 89055 | Marambio | 1970 ~ | 64.25°S | 56.65°W | 0.91 |
| 89564 | Mawson | 1954 ~ | 67.60°S | 62.87°E | 0.94 |
| 89592 | Mirny | 1956 ~ | 66.55°S | 93.02°E | 0.95 |
| 89002 | Neumayer | 1981 ~ | 70.65°S | 8.25°W | 0.95 |
| 89512 | Novolazarevskaya | 1961 ~ | 70.77°S | 11.83°E | 0.95 |
| 88968 | Orcadas | 1948 ~ | 60.75°S | 44.72°W | 0.95 |
| 89062 | Rothera | 1948 ~ | 67.57°S | 68.13°W | 0.98 |
| 89665 | Scott Base | 1957 ~ | 77.85°S | 166.77°E | 0.98 |
| 89532 | Syowa | 1957 ~ | 69.00°S | 39.58°E | 0.93 |
| 89606 | Vostok | 1958 ~ | 78.45°S | 106.87°E | 0.98 |

있다(Moorthi et al. 2001; Saha et al. 2006). 본 연구에서는 앙상블된 월평균 자료(공간 해상도: $2^{\circ} \times 2^{\circ}$) 중 남극이 속한 60°S 이상의 자료에서 육지 지역자료만을 뽑아 사용(총 1657지점)하였다. 사용된 변수는 지표면 기온과 지표면 복사량(하향 태양 복사와 상향 적외 복사) 및 대기 꼭대기 복사량(상향 적외 복사) 자료이다.

20CR 자료의 검증은 남극의 지상 관측소 자료를 수집하여 사용하였다. 지상관측자료는 남극기상관측 자료관리 기관인 READER(Reference Antarctic Data for Environment Research)에서 제공하는 자료로서 월평균 기온을 사용하였다. 남극 반도를 포함한 남극전역의 17개 관측소의 자료로서 1948년 이후부터 최근까지의 관측이다(Table 1).

연구 방법

20CR 자료는 자료동화 및 모델기반의 재분석자료이기 때문에 자료의 정확성이 확보되어야 한다. 따라서 READER에서 제공된 총 17개 지점의 월평균 기온자료를 이용하여 재분석 자료와의 상관성 분석을 하였다. 이때 관측 자료와의 분석을 위하여 20CR 자료를 관측소의 위·경도를 기준으로 내삽하여 비교하였으며 결과는 Table 1에 관측소별로 정리하였다. 대부분의 지점에서 0.9 이상의 높은 상관성(평균 0.95)을 보였고 에스페란자 지점에서 0.86의 가장 낮은 상관성을 보였고 데이비스와 로테라 그리고 스캇 베이스에서 0.98로 가장 높은 상관성을 보였다.

20CR 자료는 격자 형태로 구성되어 있기 때문에 남극의 대륙 및 반도의 기온변화를 분석하기 위해서는 공간적

인 특성을 반영하기 위하여 격자점에 대한 면적평균을 적용하였다. 면적 평균된 자료를 이용하여 남극 대륙의 전체의 기온변화 및 공간분포를 분석하였다. 그리고 격자별 분석은 각 격자점의 기온 및 복사량의 시계열 자료를 이용하여 과거 130년 동안(1871년부터 2008년까지)의 선형 회귀 분석을 실시하였다. 또한 변수들의 변화 관계성을 살펴보기 위하여 기온과 복사량 사이의 상관성 분석 및 공간분포를 비교분석하였다.

3. 결 과

20CR 자료의 기온 경향을 분석하기 위하여 면적 평균된 월평균 기온 자료의 시계열을 Fig. 1에 나타내었다. 기온의 최대값은 1954년 12월(-18.46°C)에 나타났고 최소값은 2004년 7월(-45.88°C)에 나타났으며 자료기간의 평균 기온은 -35.32°C 이다. 기온의 변화 추세를 살펴본 결과 약 $0.23^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 로 증가함을 확인할 수 있었다. 남극의 월평균 기온은 월별 편차가 크기 때문에 장기적인 기온변화보다 월별 평균기온의 경계가 뚜렷이 나타나 보인다. 이러한 특성은 각 월별로 분리하여 나타낸 Appendix 1을 보면 경계는 사라지며 각 월에 대한 장기적인 기온의 변화경향이 뚜렷이 나타남을 확인할 수 있다. Table 2는 월평균 기온변화경향을 정리한 것으로 모든 월에서 기온의 증가 추세가 나타남을 확인할 수 있었으며 기온 증가는 대부분 $0.20^{\circ}\text{C}/\text{decade}$ 이상으로 Fig. 1의 결과와 유사한 결과가 나타났다. 이 중 기온 증가 경향이 가장 크게

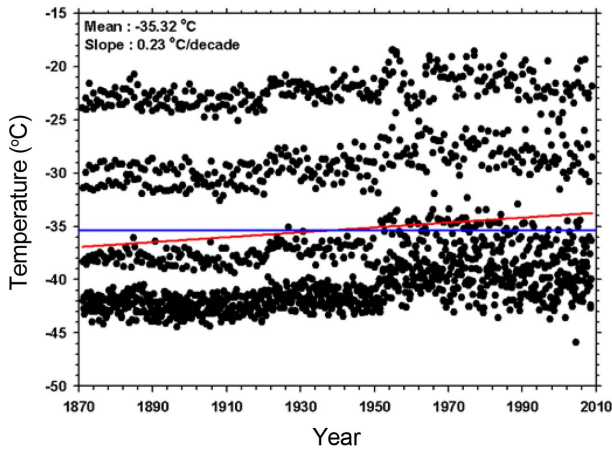


Fig. 1. Monthly mean temperature in the antarctica (1871 to 2008)

나타난 월은 4월(0.31°C/decade)이며 계절적으로 보았을 때 가을철(3월에서 5월까지)이 다른 계절에 비해 뚜렷한 증가 경향을 보였다.

남극 대륙에서의 기온변화 추세를 지역적으로 확인하기 위해 각 지점별 월평균 자료를 이용하여 기온의 경향 분포를 확인하였다(Fig. 2). 남극 대륙의 중앙부에 가까워질수록 기온의 증가 추세가 뚜렷이 나타났으며 남극대륙의 서쪽에 위치한 남극 반도에서도 기온의 증가추세가 확연히 들어났다. 남극의 기온 변화 추세를 월별로 확인하기 위해 Fig. 2와 같은 방법으로 월별 분석을 수행하였고 결과는 Fig. 3과 같다. 대부분의 월에서 남극 대륙 전체에서 기온의 증가 추세가 나타나고 있으며 특히 가을철인 3월부터 5월 사이에 증가 경향이 뚜렷하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 또한 월별 기온 추세가 가장 작았던 1월과

Table 2. Monthly mean temperature and temperature trend from 1871 to 2008

| Month | Mean (°C) | Trend (°C/decade) | Month | Mean (°C) | Trend (°C/decade) |
|-------|-----------|-------------------|-------|-----------|-------------------|
| Jan. | -20.66 | +0.18 | Jul. | -42.00 | +0.22 |
| Feb. | -30.02 | +0.23 | Aug. | -42.17 | +0.24 |
| Mar. | -36.96 | +0.26 | Sep. | -41.35 | +0.22 |
| Apr. | -40.11 | +0.31 | Oct. | -36.57 | +0.21 |
| May | -40.82 | +0.27 | Nov. | -28.40 | +0.21 |
| Jun. | -41.06 | +0.28 | Dec. | -21.76 | +0.12 |

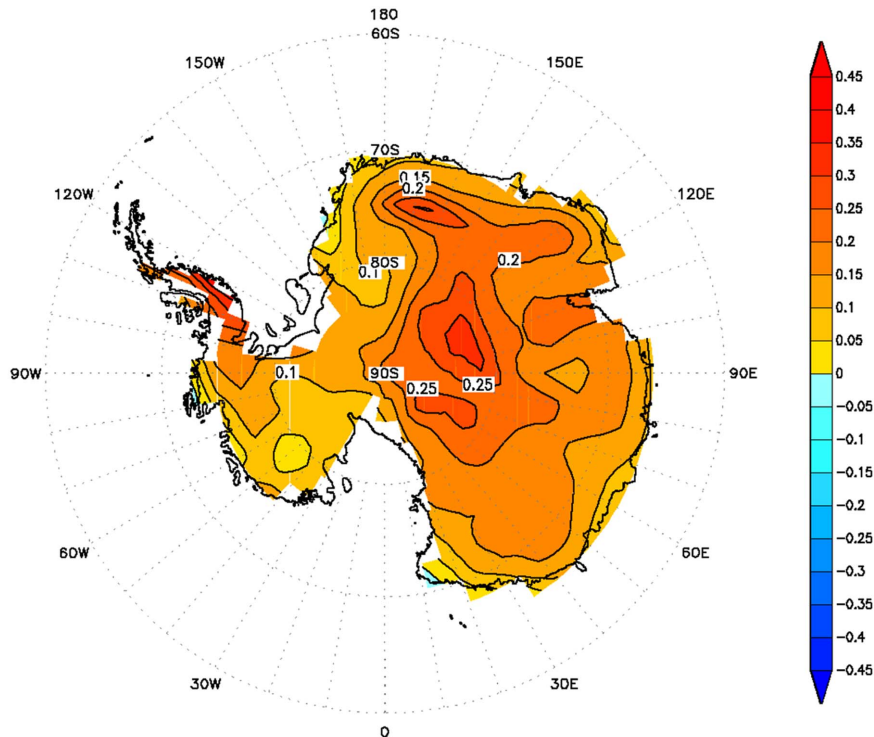


Fig. 2. The temperature trends (°C/decade) in the antarctica from 1871 to 2008

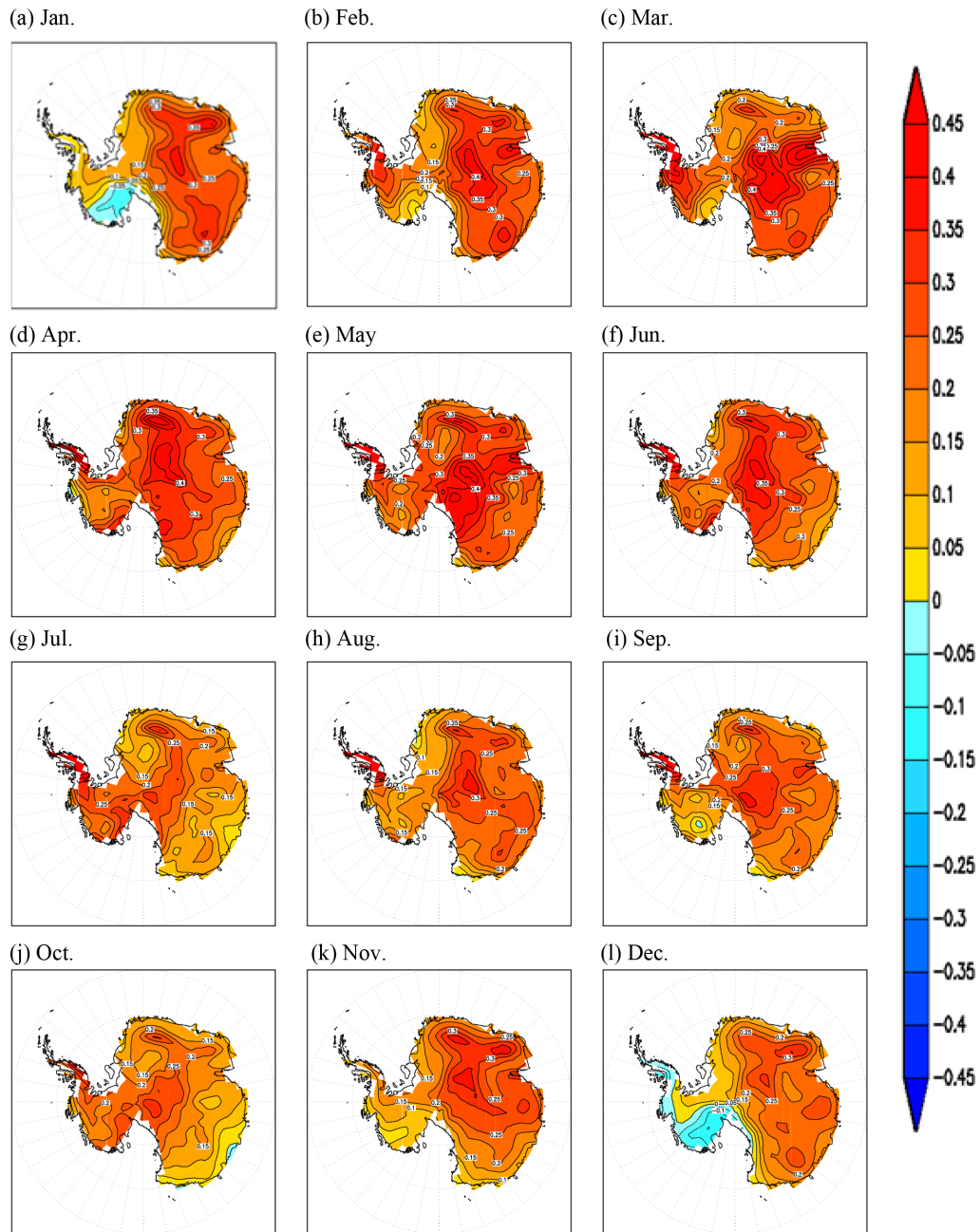


Fig. 3. Monthly temperature trends ($^{\circ}\text{C}/\text{decade}$) in the antarctica from 1871 to 2008

Table 3. Monthly longwave upward radiation flux at the surface from 1871 to 2008

| Month | Mean (W/m^2) | Trend ($\text{W}/\text{m}^2/\text{decade}$) | Month | Mean (W/m^2) | Trend ($\text{W}/\text{m}^2/\text{decade}$) |
|-------|-----------------------------------|--|-------|-----------------------------------|--|
| Jan. | 221.64 | +0.65 | Jul. | 159.49 | +0.63 |
| Feb. | 195.74 | +0.77 | Aug. | 159.06 | +0.66 |
| Mar. | 173.71 | +0.78 | Sep. | 151.51 | +0.61 |
| Apr. | 164.48 | +0.88 | Oct. | 175.76 | +0.62 |
| May | 162.62 | +0.78 | Nov. | 202.19 | +0.69 |
| Jun. | 162.02 | +0.79 | Dec. | 225.38 | +0.46 |

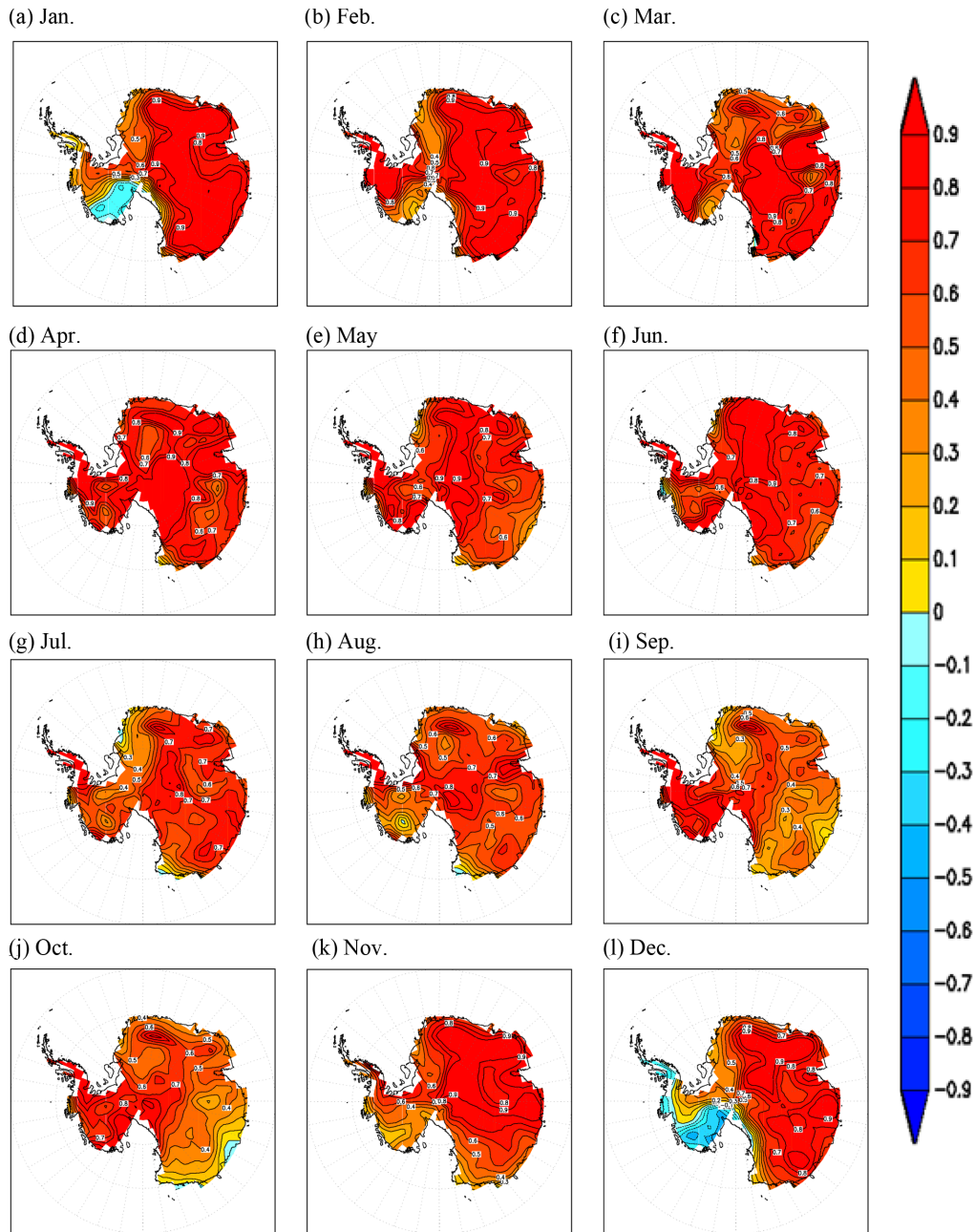


Fig. 4. Monthly upward longwave radiation flux ($\text{W}/\text{m}^2/\text{decade}$) at the surface from 1871 to 2008

12월에서는 지역별로 감소세가 나타나는 것을 확인할 수 있으며 이들 지점은 대부분 서남극 지역에 분포하고 있다. 특히 12월의 경우 기온의 감소영역이 가장 넓게 분포하였다. 이러한 결과는 Steig et al. (2009)의 결과(1957년부터 2006년의 기온변화)와 동일하였고 월별 분석에서도 서남극의 warming은 확연히 들어났으며 동남극의 cooling은 지역적으로 차이를 보였다.

남극대륙의 기온변화의 원인을 분석하기 위하여 지표면(하향 태양 복사와 상향 적외 복사)과 대기 꼭대기(상향

적외 복사) 일사 자료를 이용하여 기온과 같은 방법을 이용하여 일사량 변화를 확인하였다. 먼저 지표면의 기온과 관계성이 높은 지표면의 상향 적외 복사(upward longwave radiation at surface)의 월평균 복사량과 복사량의 변화를 Table 3에 나타내었다. 기온의 변화(Table 2)와 같이 모든 월에서 증가 추세가 나타났으며 가을철에 가장 크게 나타났다. Fig. 4는 월별 지표면 상향 적외 복사의 변화를 나타낸 것으로 1월과 12월에 복사량의 감소가 나타났으며 이 지역은 기온의 감소가 나타난 지점과 일치하였다.

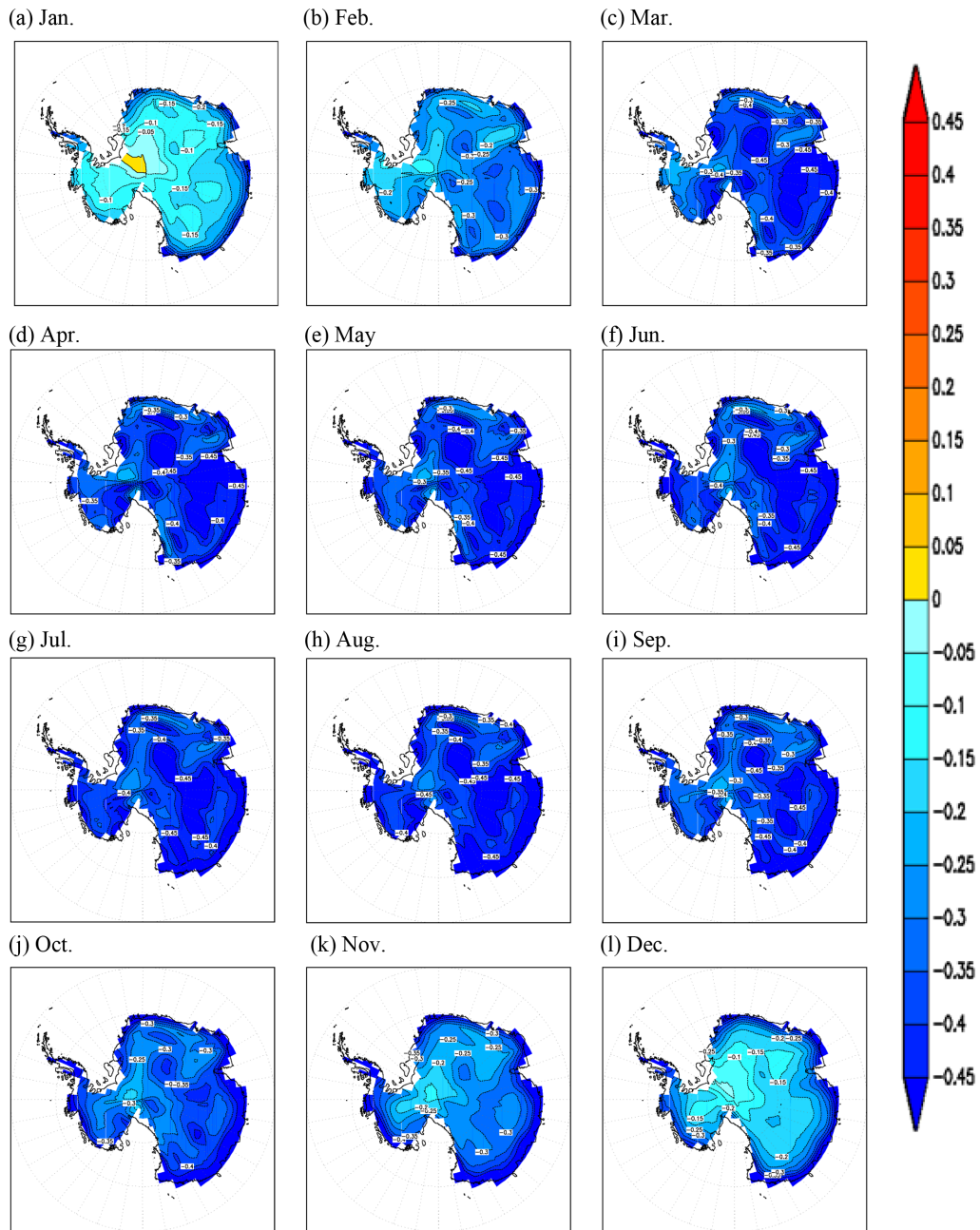


Fig. 5. Monthly upward longwave radiation flux ($\text{W/m}^2/\text{decade}$) at the top of the atmosphere from 1871 to 2008

Table 4. Monthly upward longwave radiation flux at the top of the atmosphere from 1871 to 2008

| Month | Mean (W/m^2) | Trend ($\text{W/m}^2/\text{decade}$) | Month | Mean (W/m^2) | Trend ($\text{W/m}^2/\text{decade}$) |
|-------|-------------------------|--|-------|-------------------------|--|
| Jan. | 8.67 | -0.12 | Jul. | 9.38 | -0.40 |
| Feb. | 8.64 | -0.26 | Aug. | 9.41 | -0.42 |
| Mar. | 9.31 | -0.39 | Sep. | 9.61 | -0.38 |
| Apr. | 9.63 | -0.40 | Oct. | 9.87 | -0.35 |
| May | 9.68 | -0.40 | Nov. | 10.24 | -0.29 |
| Jun. | 9.51 | -0.39 | Dec. | 9.58 | -0.19 |

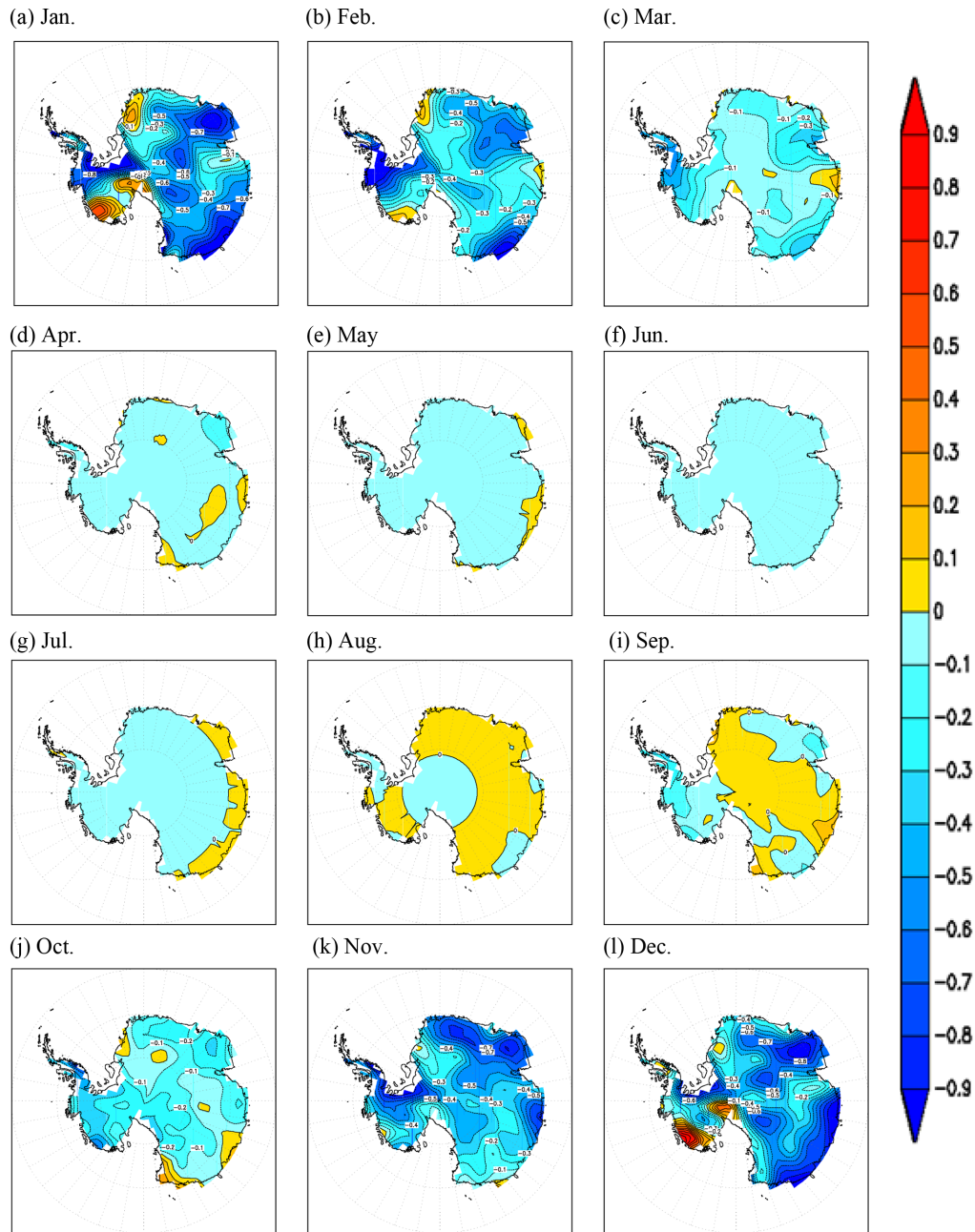


Fig. 6. Monthly downward solar radiation flux ($\text{W/m}^2/\text{decade}$) at the surface from 1871 to 2008

Table 5. Monthly downward solar radiation flux at the surface from 1871 to 2008

| Month | Mean (W/m^2) | Trend ($\text{W/m}^2/\text{decade}$) | Month | Mean (W/m^2) | Trend ($\text{W/m}^2/\text{decade}$) |
|-------|-------------------------|--|-------|-------------------------|--|
| Jan. | 383.18 | -0.40 | Jul. | 0.05 | 0.00 |
| Feb. | 229.41 | -0.34 | Aug. | 2.73 | 0.00 |
| Mar. | 69.42 | -0.11 | Sep. | 31.93 | -0.01 |
| Apr. | 8.13 | -0.01 | Oct. | 158.25 | -0.17 |
| May | 0.31 | 0.00 | Nov. | 336.26 | -0.42 |
| Jun. | 0.00 | 0.00 | Dec. | 429.29 | -0.37 |

또한 Fig. 5는 대기 꼭대기에서의 상향 적외 복사(upward longwave radiation at top of atmosphere)의 월평균 변화 경향을 나타낸 것으로 모든 월에서 감소 경향이 나타났으며 특히 여름철에 감소경향이 뚜렷이 나타났다(Table 4). 지표면과 대기 꼭대기의 상향 적외 복사량의 변화 경향을 분석해보면 지표면에서는 복사량이 증가경향을 보이는 반면 대기 꼭대기에서의 복사량은 감소하는 경향을 보였다. 이는 지구가 방출한 에너지가 대기 중의 온실기체(수증기와 구름 및 이산화탄소 등)에 의하여 흡수되어 대기 외로 방출되는 장파에너지가 감소되기 때문으로 분석된다. 즉, Fig. 4와 5 및 Table 3과 4에서 지표면의 방출 에너지의 증가경향과 비교하여 대기 꼭대기에서 방출에너지의 감소경향이 작은 것은 대기 중의 온실가스가 증가되었기 때문에 지표에서 방출된 에너지를 대기 중의 수증기가 흡수한 것으로 분석된다.

Table 5와 Fig. 6는 지표면 하향 태양 복사량 및 변화 경향을 나타낸 것으로 여름철인 12월에 가장 높은 일사량(429.29 W/m^2)이 나타났고 겨울철인 6월에는 일사량이 0 W/m^2 로 나타났다. 그리고 여름철에는 남극대륙 대부분의 지점에서 일사량의 감소경향이 뚜렷이 나타났으나 이를 제외한 대부분의 월에서 지표면 하향 태양 복사량의 경향은 $0 \text{ W/m}^2/\text{decade}$ 로 변화가 없었다. 지표면에 도달되는 일사량의 약한 감소는 대기중의 수증기 및 구름의 증가로 분석되나 전지구적 기온 상승과 비교하여 그 양이 작은 것으로 분석된다. 즉 남극의 지표 기온의 증가는 지표면과 대기 꼭대기의 상향 적외 복사의 감소와 일치하며 지표면 하향 태양 복사와는 상관성이 작은 것으로 분석된다.

4. 결 론

남극은 지역적인 영향으로 기상관측의 지속기간이 다른 지역에 비해 짧고 현재에도 관측소간의 거리가 매우 멀리 떨어져있어 남극의 기후변화에 대한 연구는 많은 불확실성을 가지고 있다. 이러한 이유로 수치모델을 이용하여 장기 적분된 자료를 통한 분석들이 활발히 진행 중이다. 이 연구에서는 NCEP/NCAR에서 구축한 20CR 자료를 사용하여 기온의 장기 변화와 복사량 사이의 관계성을 분석하였다. 자료의 기간은 138년(1871년부터 2008년)이며 자료의 신뢰성을 검증하기 위하여 READER에서 제공된 월별 기온자료(1948년부터 2008년)를 이용하였다. 검증결과 17개 관측소의 평균 상관계수는 0.95로 높은 상관성을 보여 신뢰성 있는 자료로 분석되었다.

NCEP/NCAR 재분석 자료의 138년 월평균 기온 자료를 분석한 결과 약 $0.23^\circ\text{C}/\text{decade}$ 의 증가추세가 나타났으며 월별 기온 증가는 대부분 $0.20^\circ\text{C}/\text{decade}$ 이상으로 나

타났다. 특히 남극 대륙에서 기온 증가가 뚜렷이 나타났으며 남극 반도에서는 약하게 나타났다. 기온 변화 경향과 비교하여 복사량 변화를 분석하였을 때 지표면 상향 적외 복사의 경우 기온변화와 유사한 증가($0.7 \text{ W/m}^2/\text{decade}$) 경향을 보였고 반면 대기 꼭대기의 상향 적외 복사는 감소($-0.3 \text{ W/m}^2/\text{decade}$)하였다. 그리고 지표면 하향 태양 복사의 경우는 약한 감소($-0.2 \text{ W/m}^2/\text{decade}$)가 나타났다. 남극 대륙의 기온 증가는 적외 복사량과 상관성이 높음을 확인할 수 있으며 지구가 방출한 적외 복사는 대기 중의 온실기체(수증기와 구름 및 이산화탄소)에 의하여 흡수되어 기온을 상승시키고 대기 외로 방출되는 장파복사를 감소시키며 이에 따른 기온상승은 지표기온 상승으로 되먹임(feedback)되어 지표의 방출 적외 복사량을 증가시키는 과정이 반복되는 것으로 분석된다.

그러나 기온의 증가는 복사량만으로 관련성을 분석하기 어렵다. 특히 적외 복사의 경우는 온실기체 중 수증기 및 구름의 종류와 크기에 따라 변화하기 때문에 더욱 정확한 분석을 위해서는 구름의 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

사 사

이 연구는 한국해양연구원 부설 극지연구소 서남극 기후변화 원인 규명을 위한 남극진동(SAM) 구성 요소 재현 및 관측 연구(PE12010)의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 한국해양연구원 부설 극지연구소 (2009) 대륙기지 활용 정책 기획연구 보고서. 한국해양연구원 부설 극지연구소, BSPE 08150-102-7, 305 p
- Bromwich DH, Fogt RL (2004) Strong trends in the skill of the ERA-40 and NCEP-NCAR reanalyses in the high and midlatitudes of the Southern Hemisphere, 1958-2001. *J Climate* **17**:4603-4619
- Carril AF, Menéndez CG, Navarra A (2005) Climate response associated with the Southern Annular Mode in the surroundings of Antarctic Peninsula: a multi-model ensemble analysis. *Geophys Res Lett* **32**:L16713. doi: 10.1029/2005GL023581
- Compo GP, Whitaker JS, Sardeshmukh PD, Matsui N, Allan RJ, Yin X, Gleason BE, Vose JRS, Rutledge G, Bessemoulin P, Brönnimann S, Brunet M, Crouthame RI, Grant AN, Groisman PY, Jones PD, Kruk MC, Kruger AC, Marshall GJ, Maugeri M, Mok HY, Nordli, Ross TF, Trigo RM, Wang XL, Woodruff SD, Worley SJ (2011) Review article the twentieth century reanalysis

- project. Q J Roy Meteorol Soc **137**:1-28
- Kanamitsu M, Alpert JC, Campana KA, Caplan PM, Deaven DG, Iredell M, Katz B, Pan HL, Sela J, White GH (1991) Recent changes implemented into the global forecast system at NMC. *Weather Forecast* **6**:425-435
- Meredith MP, King JC (2005) Rapid climate change in the ocean west of the Antarctic Peninsula during the second half of the 20th century. *Geophys Res Lett* **32**:L19604. doi:10.1029/2005GL024042
- Monaghan AJ, Bromwich DH, Wnag SH (2006) Recent trend in Antarctic snow accumulation from polar MM5 simulations. *Philos T R Soc Lond S-A* **364**:1683-1708
- Moorthi S, Pan HL, Caplan P (2001) Changes to the 2001 NCEP operational MRF/AVN global analysis/forecast system. NOAA, USA, 26 p
- Parkinson CL (2002) Trends in the length of the southern ocean sea ice season, 1979-1999. *Ann Glaciol* **34**:435-440
- Qinghua D, Steig EJ, Battisti DS, Küttel M (2011) Winter warming in West Antarctica caused by central tropical Pacific warming. *Nat Geosci* **4**:398-403
- Ramillien G, Lombard A, Cazenave A, Ivins ER, Llubes M, Remy F, Biancale R (2006) Interannual variations of the mass balance of the Antarctica and Greenland ice sheets from GRACE. *Global Planet Change* **53**(3):198-208
- Saha S, Nadiga S, Thiaw C, Wang J, Wang W, Zhang Q, van den Dool HM, Pan HL, Moorthi S, Behringer D, Stokes D, Peña M, Lord S, White G, Ebisuzaki W, Peng P, Xie P (2006) The NCEP climate forecast system. *J Climate* **19**:3483-3517
- Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (2007) Contribution of working group I to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University, Cambridge and New York, 996 p
- Steig EJ, Schneider DP, Rutherford SD, Mann ME, Comiso JC, Shindell DT (2009) Warming of the Antarctic ice-sheet surface since the 1957 international geophysical year. *Nature* **457**(22):459-463
- Studinger M, Bromwich D, Csatho B, Muench R, Parish T, Stith J (2005) Science opportunities for a Long-Range Antarctic research aircraft. *EOS Trans* **86**(4):39-40. doi:10.1029/2005EO040004
- Thomas R, Rignot E, Casassa G, Kanagaratnam P, Acuña C, Akins T, Brecher H, Frederick E, Gogineni P, Krabill W, Manizade S, Ramamoorthy H, Rivera A, Russell R, Sonntag J, Swift R, Yungel J, Zwally J (2004) Accelerated sea-level rise from West Antarctica. *Science* **306**:255-258
- Trenberth KE, Jones PD, Ambenje PG, Bojariu R, Easterling DR, Klein Tank AMG, Parker DE, Renwick JA (2007) Observations: surface and atmospheric climate change. In: Solomon S, Qin D, Manning M, Chen Z, Marquis M, Averyt KB, Tignor M, Miller HL (eds) *Climate change 2007: the physical science basis. contribution of working group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, pp 235-336
- Turner J, Colwell SR, Marshall GJ, Lachlan-Cope TA, Carleton AM, Jones PD, Lagun V, Reid PA, Iagovkina S (2005) Antarctic Climate Change during the Last 50 Years. *Int J Climatol* **25**:279-294
- Vaughan DG, Marshall GJ, Connolley WM, Parkinson CL, Mulvaney R, Hodgson DA, King JC, Pudsey CJ, Turner J (2003) Recent rapid regional climate warming on the Antarctic Peninsula. *Climatic Change* **60**:243-274
- Velicogna I, Wahr J (2006) Measurement of time variable gravity show mass loss in Antarctica. *Science* **311**(5768):1754-1756. doi:10.1126/science.1123785

Received Sep. 28, 2011

Revised Nov. 2, 2011

Accepted Dec. 20, 2011

Appendix 1. Monthly temperatures in the antarctica from 1871 to 2008

