

## 최근 남극의 기후변화 고찰

김성중\*, 임창규

한국해양연구원 부설 극지연구소

### A brief review of recent Antarctic climate change

Seong-Joong Kim\*, Chang-Kyu Lim

*Korea Polar Research Institute, KIOST, Incheon, Korea*

**요약** : 화석연료 사용 증가에 의해 북극은 다른 지역보다 온난화가 2-3배 빠르게 진행 중이며 이를 '북극 온난화 증폭'이라 한다 (Overland et al., 2017; Goose et al., 2018). 북극 온난화 증폭과 관련하여 북극 해빙은 급격히 줄고 있고, 그린랜드 빙하도 연안을 중심으로 빠르게 녹고 있다 (State of Climate, 2018). 그렇지만 남극은 기후변화의 양상이 북극과 다르게 나타나는데, 남극 반도와 서남극은 온난화가 빠르고 해빙과 육상 빙하의 감소도 두드러지는데 반해 동남극은 온난화가 거의 없고 해빙과 육상빙하는 약간 증가 추세에 있다. 서남극과 동남극이 이와 같이 대조적으로 반응이 나타나는 원인은 아문젠해 저기압 강화(deepening)에 따른 시계방향의 순환 증가로 따뜻한 해양성 공기가 남극 반도와 서남극으로 유입되면서 서남극의 기온은 올라가는 경향을 보이는데 반해, 동남극은 차고 냉각된 남극 대륙의 공기가 로스해 쪽으로 불어나오며 수온을 낮추고 해빙을 확장시키는 역할을 한다. 또한 성층권 오존 농도 감소에 따라 남극 주변을 시계 방향으로 도는 제트기류가 강화됨에 따라 동남극은 약간의 냉각화가 나타나는 것으로 여겨진다. 본 연구에서는 최근 남극의 기후변화가 북극과 다르게 나타나는 현상을 살펴보고 가능한 이유를 고찰해 보고자 한다.

**주요어** : 기후변화, 남극, 빙하, 해빙, 기온

**Abstract** : In response to the increase in anthropogenic greenhouse gases, the Arctic temperature is increasing rapidly by 2-3 times other regions. This larger Arctic warming than lower latitudes is called 'Arctic Amplification'(Overland et al., 2017; Goose et al., 2018). Associated with the Arctic Amplification, the Arctic sea ice is declining rapidly and Greenland ice sheet is melting rapidly, especially around the coastal margins (State of Climate, 2018). However, Antarctic climate change appears to be different from the Arctic. In the western part of Antarctica, surface temperature is rising rapidly with large sea and land ice melting, but in the eastern part, there is little temperature change with slight increase in sea ice extent. The contrasting east-west temperature response is illustrated by the deepening of the Amundsen Sea Low whose upstream brings warm maritime air to the Antarctic peninsula and Amundsen-Bellingshausen Seas, but downstream air provides cold air to the Ross Sea, increasing sea ice. Besides, the increase in Southern Annular Mode (SAM) phase due to stratospheric ozone reduction enhances westerly winds, pushing sea ice northward by Ekman divergence and cooling

east Antarctica. In this study, we review the recent Antarctic climate change and its possible causes.

**Key words** : climate change, Antarctica, ice sheet, sea ice, temperature

## 1. 남극의 빙하변화 경향

남극은 평균 두께 약 2160m의 빙하로 덮여 있는 백색의 대륙이다. 남극 빙하의 면적은 12.3 x 106 km<sup>2</sup> 이며 (대략 중국과 인도를 합친 면적), 부피는 약 24.7 x 1018 kg으로 남극 빙하가 모두 녹으면 전지구 해수면이 약 58.3m 올라간다 (IPCC, 2013). 약 1억 5천만년 전까지 남극 대륙은 남미, 아프리카, 오세아니아 대륙과 곤드와나 초대륙 형태로 붙어 있어 저위도의 따뜻한 열이 자유롭게 공급되면서 현재보다는 훨씬 더 따뜻했다. 하지만 약 1억 5천만년 전부터 서서히 다른 대륙들과 분리되기 시작하여 3천 4백만 년 전에 남미대륙과 최종 분리되며 현재의 위치에 고립되었다 (Zachos et al., 2001). 남미와 남극이 붙어있을 때는 저위도의 따뜻한 공기가 자유롭게 남극까지 진출하면서 남극의 기온은 현재보다 높았고 빙하도 형성되기 어려웠다. 그렇지만 남미 대륙과 남극이 분리되면서 해양과 대기의 강한 동서 순환, 즉 해양에서는 남극순환류와 대기에서는 남반구 서풍 제트기류에 의해 저위도로부터의 따뜻한 열이 남극으로의 공급이 줄어들게 되고 (Kennett, 1977), 동시에 대기 중 이산화탄소 농도가 서서히 줄어들면서 남극대륙은 차가워지기 시작하였다 (DeConto et al., 2003). 작은 빙하들이 동남극의 여름철에 녹지 않고 살아남아 빙하의 되먹임 효과(눈은 흰색으로 빛의 반사율이 80% 이상으로 높기 때문에 눈이 있으면 지속적으로 냉각 상태가 유지되어 계속 추워지는 현상)를 가져와 빙하가 성장하기 시작하였다. 동남극은 고도가 4000m 이상인데 반해 서남극은 최대 2000m 정도이다. 동남극은 서남극 보다 고도가 높기 때문에 빙하가 먼저 자라기 시작하였

다. 몇 번의 증감을 반복하다 약 2천만 년 전부터 본격적으로 빙하가 성장하기 시작하여 약 천 2백만년 전에 동남극 빙하가 완성되었고, 약 5백만년 전 서남극 빙하도 완전히 성장하여 현재와 비슷한 모습을 갖추게 되었다 (DeConto et al., 2003). 2만년 전 마지막최대빙하기 때는 대기 중의 이산화탄소 농도가 산업 혁명 이전의 농도 (약 280ppm) 보다 약 100ppm 낮은 약 180ppm 정도로 감소하면서 (Monin et al., 2011), 남극 빙하는 곳에 따라 현재보다 1000m 이상 더 두꺼운 지역도 있었다 (Abe-Ouchi et al., 2015). 그렇지만 빙하기가 끝나고 1만 8천년 전부터 기온 및 대기 중 이산화탄소 농도가 올라가면서 남극의 빙하는 다시 줄어들어 현재와 같은 모습이 된 것이다. 1800년대 영국을 중심으로 산업혁명이 일어나 화석연료의 사용이 늘어나고, 이에 따라 대기 중 이산화탄소 농도가 증가하면서 일부 서남극 지역에서는 빙하가 빨리 녹는 추세를 보이고 있다 (Paolo et al., 2015; Shepherd et al., 2018). 이들 연구에 의하면 남극 반도와 벨링스하우젠해, 그리고 아문젠해의 서남극 대부분 지역에서 빙하가 빨리 녹는 추세를 보인다. 하지만 웨델해를 중심으로 한 대부분 동남극 지역은 빙하의 증가 추세가 나타나고 있다. 이와 같이 동서남극에서 빙하의 변화가 다르기 때문에 남극 빙하의 변화가 전지구 해수면 상승에 미치는 영향을 예단하기는 아직 불확실하며, 남극 빙하의 역할을 정확히 파악하기 위해서는 더 정밀한 관측이 필요하다.

## 2. 남극 해빙 변화

남극에는 대륙의 빙하 뿐 아니라 남극 바다

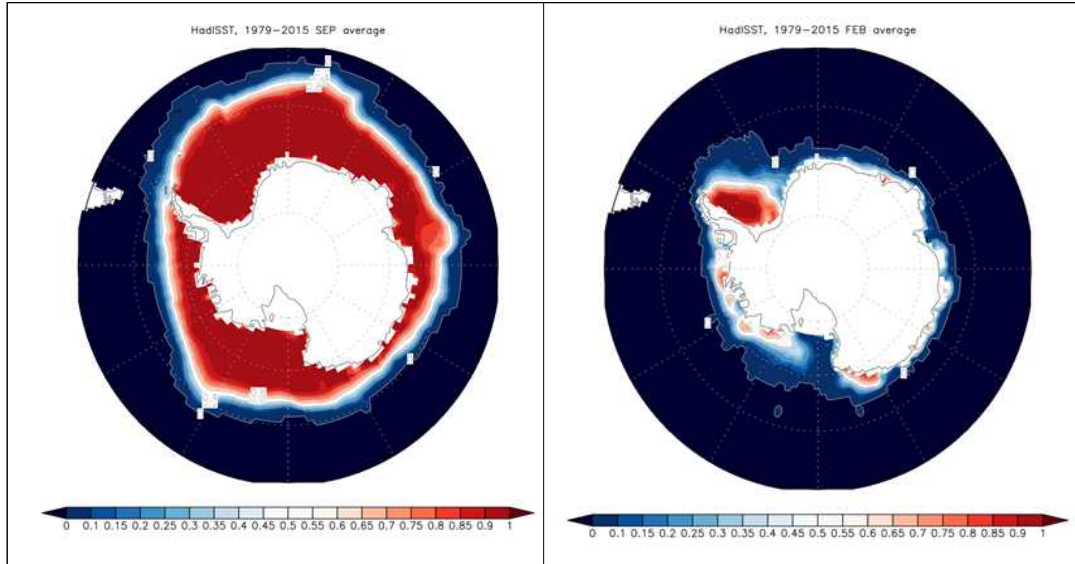


그림 1. 남극 해빙의 9월과 2월의 분포.

에도 많은 얼음이 관측 되는데, 이는 대기의 냉각에 의해 해양의 수온이 내려가고 급기야는 바다가 얼기 때문인데, 겨울에는 약  $16 \times 10^6 \text{ km}^2$  까지 확장 했다가, 여름엔 기온과 수온 상승으로 녹아서 약  $5 \times 10^6 \text{ km}^2$  로 줄어든다 (그림 1). 남극 해빙은 수온이 내려가는 시간이 필요하기 때문에 9월초에 최대로 확장한다. 해빙의 두께는 통상 2.5m이하로 북극 해빙보다는 얇으며 웨델해 서쪽에는 여름에도 두껍게 얼어 있음을 알 수 있다. 해빙은 얼었다 녹았다 반복하기 때문에 해수면에 미치는 영향은 미미하지만 다른 부분에서 기후변화에 중요한 역할을 한다. 첫째, 바다가 얼게 되면 대부분의 염분을 바다로 방출하기 때문에 해빙이 새로 생성된 해빙 바로 아래 바닷물의 밀도가 높아진다. 즉 단위 부피당 표층 해수의 무게가 아래보다 무거워져서, 윗물이 아래로 내려가고 아랫물이 위로 올라와 섞이게 되어 남극의 저층수(Antarctic Bottom Water)를 만드는데 중요한 역할을 한다. 웨델해 서쪽과 장보고기지가 있는 로스해

서쪽이 이런 현상이 일어나는 대표적인 지역이다 (Rintoul, 2018). 둘째, 해빙이 한 지역에서 다른 지역으로 이동했다 녹으면 담수를 공급하는 역할을 하기 때문에 표층의 해수 밀도가 낮아져서 성층화(물이 위는 가볍고 아래는 무거운 매우 안정적인 상태)가 되어 위아래 물이 섞이지 않아 새로운 물이 잘 생성되지 않는다. 참고로 남극에서의 물 생성은 열을 한곳에서 다른 곳으로 전달해 주는 해양 심층순환(컨베이어 벨트 순환이라고도 함)의 일부로서 전지구 기후변화에 중요한 역할을 한다. 셋째, 바닷물이 얼게 되면 알베도(albedo)를 높여 태양 복사에너지의 반사율이 높아져 표면의 냉각을 가져오고 빛을 차단하기 때문에 빛의 투과가 제한되어 광합성에 영향을 주며, 해양에서 대기로 빠져나가는 열이 차단되어 대기의 냉각을 가져온다. 넷째, 해빙의 중간에 얼지 않은 넓게 열린 부분을 폴리냐라 하고 길게 틈이 있는 부분을 리드라고 하는데, 이런 지역에서는 해빙과 대기의 기온차가 크기 때문에 많은 양의 열이 해양에서 대기

## 최근 남극의 기후변화 고찰

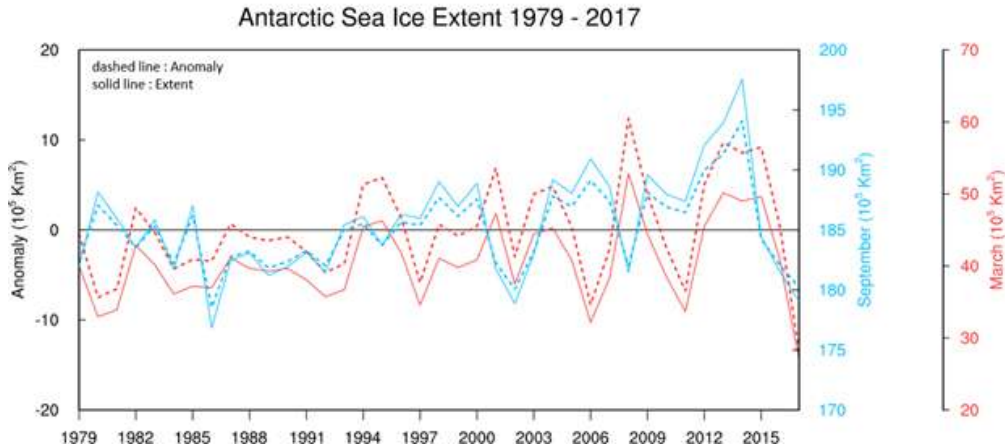


그림 2. 남극 해빙의 겨울(9월)과 여름(3월) 변화 경향.

로 빠져 나가 겨울철 대기로의 열 공급에 중요한 역할을 한다.

1979년 미국 나사(NASA)에서 마이크로파 인공위성 센서를 이용하여 남극과 북극의 해빙에 대한 모니터링을 시작한 이래로 현재까지 해빙의 면적 변화는 비교적 정확하게 파악되고 있다. 언론을 통해 잘 알려진 바와 같이 북극의 해빙은 여름철에 특히 빠르게 줄어들고 있어 빠르면 2050년에는 북극의 여름철 해빙이 모두 녹아 없어질 것으로 예견하고 있다. 반면 남극의 해빙은 북극과는 다른 양상을 보이고 있다. 정부간 기후변화 협의체(IPCC) 제5차 보고서에 의하면 남반구 겨울과 봄에는 남극 반도 주변에서 해빙이 연간 0.5%정도 감소하며, 여름과 가을에는 서남극에서 연간 1%이상 감소하는 것으로 나타난다. 즉 빙하의 감소와 비슷하게 남극 반도와 서남극에서는 해빙의 감소도 뚜렷하게 일어나고 있다. 그렇지만 로스해를 포함한 거의 대부분 동남극 지역에서 모든 계절 해빙이 확장하는 추세를 보여, 남극 전체로 보면 해빙이 증가하는 추세에 있다 (그림 2). 동남극에서 늘어나는 남극 해빙의 변화 양상은 빙하의 증가 양상과 매우 유사함을 알 수 있다.

### 3. 남극의 기온변화

남극의 기온변화도 빙하나 해빙의 변화 양상과 거의 일치한다. 그림 3은 지난 50년간 남극의 기온변화를 보여주는데, 빙하의 변화 경향과 같이 동남극의 온난화는 크지 않은데 반해 서남극의 온난화는 더 크게 나타나는 경향이 있다. 자세히 살펴보면 남극반도와 벨링스하우젠해 부근에서는 온난화 경향이 10년에 0.4도 이상 증가하는 경향을 보이며 아문젠해와 로스해 부근에서도 온난화 경향이 뚜렷하다. 하지만 웨델해와 아델리랜드에서는 오히려 냉각화 경향이 나타난다. 전반적으로 동남극 대부분 지역은 서남극에 비해 온난화가 거의 나타나지 않고 있다. Nicolas and Brownwich (2014)의 연구에 의하면 이와 같은 동남극과 서남극의 기온대조는 주로 겨울과 봄에 전형적으로 나타나는 현상이며, 여름에는 이와 같은 대조가 나타나지 않는다. 하지만, 최근의 연구결과에 의하면 2000년대 이후만 고려하면 남극 반도의 온난화 경향은 예전만큼 강하지 않고, 오히려 남극반도의 온난화가 진행되지 않는다는 연구결과도 보고된 바

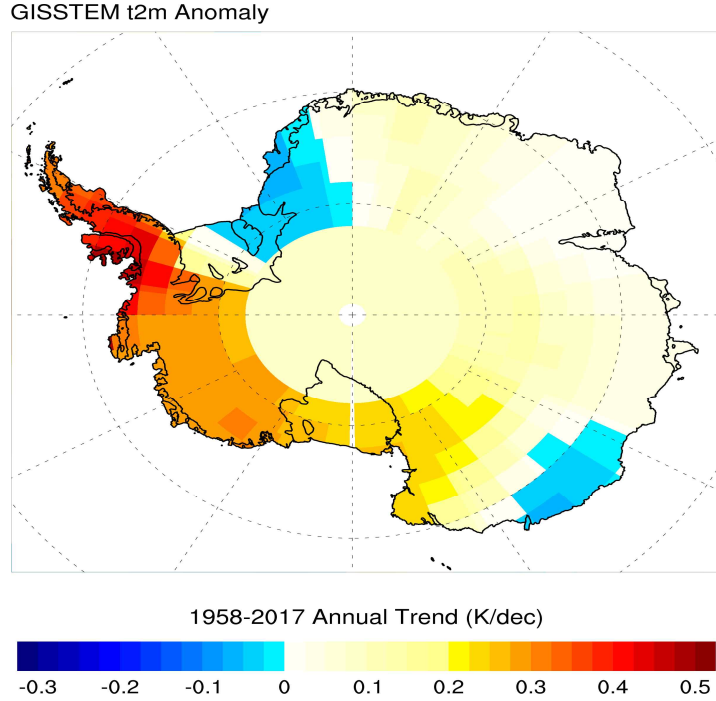


그림 3. 남극기온변화 경향.

있다 (Turner et al., 2016). 이 연구에 의하면 2000년대 이후 남극반도의 해빙도 증가경향을 보이고 있어 분석하는 시기에 따라 남극의 기후 변화 양상이 다르게 나타남을 알 수 있다. 따라서 장기 남극의 기후변화는 서남극의 온난화 동남극의 냉각화로 요약할 수 있다.

#### 4. 남극기후변화 원인

그렇다면 최근 서남극의 급속한 빙하 감소에 반해 동남극의 빙하가 증가하는 원인은 무엇일까? 동남극 빙하가 두꺼워지는 원인은 지구온난화에 의해 극지역에 더 많은 눈이 내리기 때문으로 여겨진다. 지구온난화가 진행되면 양극 기후변화 증폭현상에 의해 저위도보다는 고위도의 온도가 더 크게 올라가며, 이는 대기 중 수

증기량을 증가시켜 추울 때 보다 극지역의 강설량이 더 늘어나게 된다. 이와 같은 강설량의 증가로 특히 고도가 높은 동남극 지역에서는 온난화가 진행됨에 따라 내륙의 빙하가 자라게 된다. 하지만 빙하가 성장하는 현상은 고도가 높은 지역에만 해당되고, 고도가 낮은 연안에서는 해양 수온의 증가로 인해 빙하의 감소가 나타날 수 있다. 서남극에서 나타나는 급속한 빙하 감소는 지금까지 알려진 대로 대기와 해양의 순환 변화 때문이다. 우선 대기의 순환을 살펴보면, 남반구 중위도(남위 약 30도)에는 고기압대가 위치하며 남극주변(남위 약 60도)에는 저기압대가 위치하기 때문에 남극 주변에는 거대한 서풍 제트기류가 발달하게 된다. 즉, 고기압대에서 저압대로 (남쪽으로) 공기가 흐르는데 지구가 서에서 동으로 자전하기 때문에 공기의 흐름이 진행방향의 왼쪽 즉 동쪽으로 휘게 되는 것이다

### 최근 남극의 기후변화 고찰

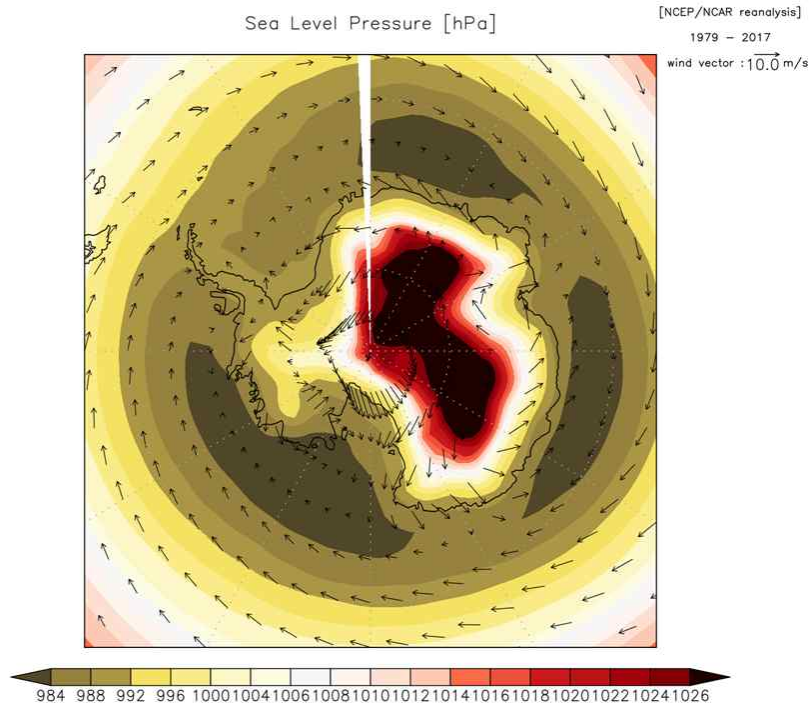


그림 4. 연평균 남극해면기압과 저층 (850hPa) 바람장 분포.

(그림 4). 남극의 서풍제트기류(폴라보텍스)는 대류권 뿐 아니라 20km이상의 성층권까지 연결되어 있고, 서풍제트기류의 세기에 따라 남극의 기온이 오르락내리락 하는 것으로 알려져 있다. 이 거대한 남극의 서풍제트기류는 1970년대 말에서 2000년대 초반까지는 팽팽했다가 이후 현재까지는 느슨해지는 경향을 보인다 (Thompson et al., 2011). 남극서풍제트기류는 지속적으로 팽팽해졌다 느슨해지는 현상이 반복된다. 이런 현상을 남극진동 (Antarctic Oscillation) 혹은 반지처럼 동그랗게 생겼다고 해서 남반구환형모드 (Southern Annular Mode)라 부르기도 하는데 모두 남극 서풍제트기류의 세기 변화를 의미한다. 남극의 서풍제트기류가 2000년대 초까지 더 팽팽해진 이유는 성층권 오존농도 감소와 온실가스 증가 때문으

로 여겨진다 (Thompson and Solomon, 2002). 팽팽해진 서풍제트기류는 저위도와의 열교환을 제한하는 역할을 하기 때문에 서풍제트기류에 갇힌 남극 대륙은 제트기류가 느슨할 때보다 대체로 더 추운 경향을 보인다. 하지만 남극 반도는 북쪽으로 돌출되어 거대한 서풍제트기류의 영향에서 벗어나 있어 제트기류가 팽팽해지면 오히려 더 따뜻해지는 경향이 있다. 서남극까지 빙하가 급속히 녹는 원인을 파악하려면 대기의 순환 뿐 아니라 해양 순환의 영향도 고려해야 한다. 남극대륙 연안의 대부분 지역은 수온  $-1.7^{\circ}\text{C}$ 이하의 아주 차가운 남극대륙붕수(Antarctic Shelf Water)가 대륙붕을 채우고 있지만, 남극 대륙사면은 대서양에서 발원한  $0^{\circ}\text{C}$ 이상의 비교적 따뜻한 남극순환중층수(Lower Circumpolar Deep Water)가 채우고

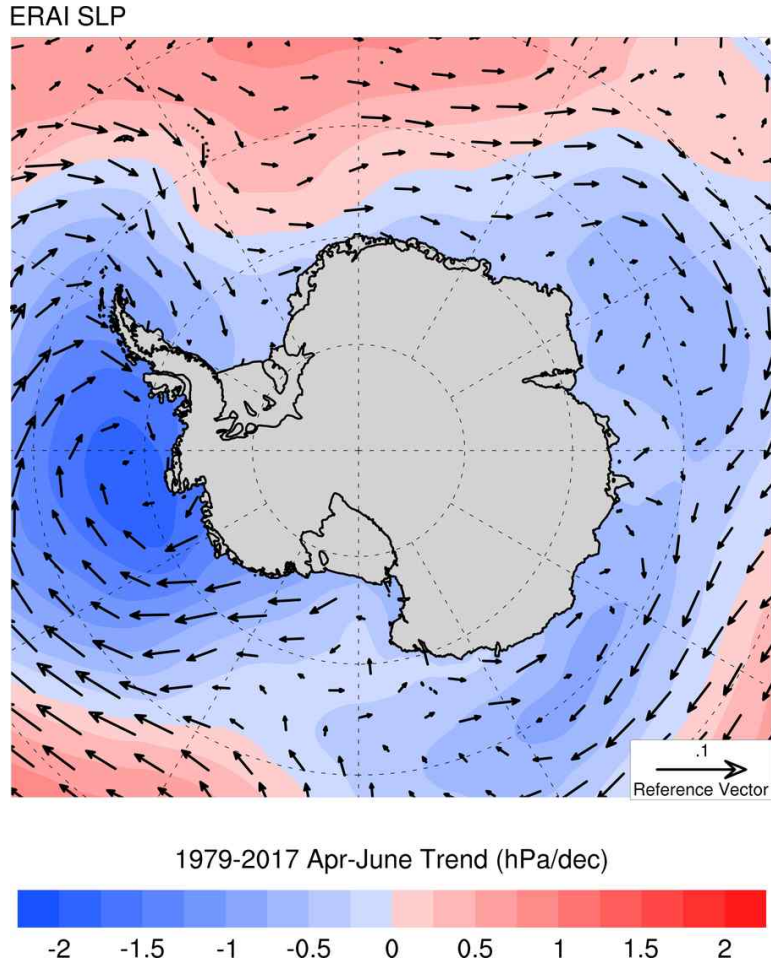


그림 5. 남극의 가을철 (4월-6월) 해면기압과 바람장 변화 경향.

있다 (Whitworth et al., 1998). 그런데 특이하게도 서남극 아문젠해와 벨링스하우젠해에서는 대륙사면 뿐 아니라 대륙붕까지 남극순환중층수가 진출해 있다. (Kim and Lee, 2005). 그렇기 때문에 빙하가 대륙 중심에서 흘러내려 서남극 대륙붕까지 확장하면 녹기 쉬운 환경에 노출된다. 반면에 이외의 다른 대륙붕에서는 빙하가 대륙붕으로 확장해도 잘 녹지 않는다. 전지구 온난화에 따라 서풍 제트기류가 강해지면 남극 주변을 순환하는 동풍의 세기가 강해져 대륙붕

으로 더 많은 따뜻한 남극순환중층수가 진출하고 또한 온난화에 의해 남극해의 수온도 증가하기 때문에 서남극의 빙하 감소가 다른 지역보다 더 크게 일어나는 것으로 여겨진다.

남극의 해빙이 남극반도와 벨링스하우젠해에서 급속히 감소하는데 반해 아문젠해와 로스해에서 증가하는 경향은 저층대기 기압패턴의 변화 때문으로 여겨진다 (Turner et al., 2015). 남극대륙에는 높은 지형적인 영향으로 약한 고기압대가 발달하는데 앞에서 언급한 바와 같이



## 최근 남극의 기후변화 고찰

남극의 연안에는 저기압대가 발달하기 때문에 남극 연안에서는 약한 동풍이 나타나며, 이로 인해 시계방향의 저기압(사이클론)이 발달한다(그림 4). 예로, 벨링스하우젠해와 로스해 사이에는 아문젠해 저기압이 발달해 거대한 시계방향의 대기 순환이 나타나며, 해양에도 영향을 미쳐 로스해와 웨델해에는 시계방향의 거대한 해양 순환(Gyre)이 나타난다. 이와 다른 남극해안 지역에서도 시계방향 순환이 많이 나타난다. 특히, 벨링스하우젠해와 로스해 사이에 발달하는 아문젠해 저기압의 강도가 서남극의 해빙 변화에 중요한 역할을 하는 것으로 보고되고 있다(Hosking et al., 2013). 남극 서풍제트기류가 팽팽해짐에 따라 이 저기압의 중심기압이 깊어지는데, 중심기압이 깊어지면 즉, 기압의 골이 강해지면, 시계방향의 대기 순환이 더 빨라져서 해양의 따뜻한 바람이 남극반도와 벨링스하우젠해로 평년보다 더 강하게 불어가며 이 따뜻한 공기는 남극반도와 벨링스하우젠해의 해빙을 녹이는데 기여한다. 반대로 아문젠해와 로스해에서는 차가워진 대륙의 바람이 더 강하게 불어나오기 때문에 바다 평소보다 더 많이 얼고 강한 바람에 의해 해빙이 외해로 더 많이 밀려 확장된다(Holland and Kwok, 2012). 그림 5는 1979년부터 2017년 까지 남극주변의 바람과 해면기압의 변화 경향을 나타내는데, 서남극의 아문젠해 저기압의 강도가 지속적으로 강해지며 바람도 강해지는 경향을 보여준다. 서남극 뿐 아니라 남극 주변을 순환하는 바람의 세기도 강해지는 경향을 보여, 남극진동의 강화를 의미한다.

로스해 뿐 아니라 다른 지역에서도 남극해빙이 전체적으로 증가하는 경향을 보이는데, 이는 앞에서 언급한 서풍제트기류가 강해졌기 때문이다. 성층권 오존 농도 감소에 의해 남극 주위를 도는 서풍제트기류가 더 팽팽해지고, 팽팽해진 제트기류가 북쪽으로 해빙을 밀어내는 역할을 한다. 즉, 서에서 동으로 부는 서풍에 의해 해

빙이 동으로 밀리는데 지구가 자전하기 때문에 바람이 부는 방향(동쪽)의 왼쪽(북쪽)으로 해빙의 방향이 북쪽으로 밀리기 때문에 전체적으로 해빙이 증가하게 된다. 또 다른 연구 결과에 의하면 서남극에서 녹아내린 담수가 해양으로 유입되면서 이전보다 더 빨리 얼음을 얼려서 해빙의 증가 효과가 있다고 한다(Bintanja et al., 2013). 통상 바닷물이 얼려면 염분(약 34.5psu) 때문에  $-1.9^{\circ}\text{C}$  이하로 수온이 내려가야 하지만, 담수가 유입되면 이보다 높은 수온에서도 쉽게 얼음이 얼 수 있기 때문이다. 최근 연구에 의하면 남극 해빙의 증가원인이 단기적으로는 남극 진동 증가에 의한 에크만 펌핑 증가로 해양 중층의 차가운 물이 상부로 올라오고 연안의 차가운 물이 외부로 밀려 수온이 내려가 해빙의 증가에 기여하는 것으로 설명하고 있다(Marshall et al., 2014). 그렇지만 남극진동의 강화로 계속 서풍이 강하게 불면 남극 중층의 따뜻한 물이 상부로 공급되어 오히려 해빙을 녹이는 역할을 할 수 있기 때문에 시기적으로 다른 해석이 가능하다. 이상 몇 가지 해빙의 증가 원인에 대해 언급했지만 이는 아직까지 명확하지 않은 가설이며, 남극 해빙의 확장 원인을 밝히기 위해서는 좀 더 심도 있는 연구가 필요하다.

마지막으로 그림 3에 제시된 남극의 기온변화를 자세히 보면 온난화가 남극 반도 뿐 아니라 아문젠해까지 서남극 전체에 걸쳐 일어나는 것을 알 수 있는데, 이는 서풍제트기류가 팽팽해진 것만으로는 설명이 되지 않는다는 의미다. 남극 진동 증가에 의한 서풍제트기류의 강화는 남극 반도 끝 부분을 제외하곤 남극 대부분 지역이 냉각화가 나타나기 때문이다. 이와 같이 남극의 기후변화가 동서로 상반되게 일어나는 원인도 좀 더 심도있게 연구되어야 할 것이다.

## 5. 결론



결론적으로 남극의 최근 기후변화는 북극의 급속한 온난화, 빙하 및 해빙의 감소와 다른 양상을 보여주고 있지만, 결과적으로는 북극의 변화와 같은 원인인 지구 온난화에 의한 것으로 해석할 수 있다. 온실가스 증가와 성층권 오존 농도 감소는 서풍제트기류의 세기를 강화시켜 서남극은 온난화를 동남극은 냉각화를 가져오며 이는 빙하를 서남극에서는 급속히 녹이는데 반해 동남극에서는 확장시키는 결과를 가져온다. 서풍제트기류의 강화는 해빙을 북쪽으로 밀어내는 효과를 가져와 전체적으로 해빙을 확장하는 결과를 초래하게 된다. 현재는 남극의 빙하와 해빙이 일시적으로 증가하는 추세에 있지만 몇 차례 발간된 IPCC 보고서에 의하면 약 100년 후에는 남극의 기온도 오르고, 해빙과 빙하도 감소할 것으로 예측되고 있어 현재 나타나는 현상은 아마도 일시적인 것으로 볼 수 있다. 남극의 빙하가 전체적으로 감소 추세로 돌아서면 북극 그린란드 빙하의 감소와 더불어 전지구 해수면을 올리고 궁극적으로는 많은 경제적 손실을 초래할 수 있기 때문에 지구 온난화를 늦추기 위한 다각도의 노력이 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 극지연구소 주요과제 '남극기후변화의 지역적 차이 원인규명'(PE18010)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고문헌

- Abe-Ouchi, A., Saito, F., Kageyama, M., Braconnot, P., Harrison, S. P., Lambeck, K., Otto-Bliesner, B.L., Peltier, W.R., Tarasov, L., Peterschmitt, J.-Y., Takashi, K., 2015. Ice-sheet configuration in the CMIP5/PMIP3 Last Glacial Maximum experiments. *Geosci. Model. Dev.*, 8, 3621-3637.
- Bintanja, R., Oldenborgh, G.J., Drijfhout, S.S., Wouters, B., Katsman, C.A., 2013. Important role for ocean warming and increased ice-shelf melt in Antarctic sea-ice expansion. *Nature Geoscience*, 6, 376-379.
- Blunden, J., Arndt, D. S., Hartfield, G., Eds., 2018. State of the Climate in 2017. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 99 (8), Si-S332, doi:10.1175/2018BAMSStateoftheClimate.1.
- DeConto, R.M., Pollard, D., 2003. Rapid cenozoic glaciation of Antarctica induced by declining atmospheric CO<sub>2</sub>. *Nature*, 421, 246-249.
- Goose, H., Kay, J., Armour, K., et al., 2018. Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nature Communications*, 9: 1919.
- Holland, P.R., and Kwok, R., 2012. Wind-driven trends in Antarctic sea-ice drift. *Nature Geoscience*, 5, 872-875.
- Hosking, J. S., Orr, A., Marshall, G., Turner, J., Phillips, T., 2013. The influence of the Amundsen-Bellingshausen seas low on the climate of west Antarctica and its representation in coupled model simulations. *J. Climate*, 26, 6633-6648.
- IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth

## 최근 남극의 기후변화 고찰

- Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp.
- Kim, S.-J., Lee, B.Y., 2005. Distributions and vertical structures of water masses around the Antarctic continental margin. *Ocean and Polar Research*, 27, 277-288.
- Kennett, J.P., 1977. Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic oceans and their impact on global paleoceanography. *J. Geophys. Res.*, 82, 3843-3859.
- Marshall, J. Armour, K., Scott, J., Kostov, Y., Hausemann, U., Ferreira, D., Shepherd, T., Bitz, C., 2014. The ocean's role in polar climate change: asymmetric Arctic and Antarctic responses to greenhouse gas and ozone forcing. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372, 20130040.
- Monin, E., Indermuhle, A., Dallenbach, A., Fluckier, J., Stauffer, B., Stocker, T. et al., 2001. Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations over the Last Glacial Termination. *Science*, 291, 112-114.
- Overland, J.E., Hanna, E., Hanssen-Bauer, I., Kim, S.-J., Walsh, J.E., Wang, M., Bhatt, U.S., Thoman, R. L., 2018. Surface Air Temperature. In: Richter-Menge, J., Overland, J.E., Mathis, J.T., Osborne, E. (eds) *Arctic Report Card 2017*.
- Paolo, F.S., Fricker, H.A., Padman, L., 2015. Volume loss from Antarctic ice shelves is accelerating. *Science*, 348, 327-331.
- Rintoul, S.R., 2018. The global influence of localized dynamics in the Southern Ocean. *Nature*, 558, 209-218.
- Shepherd, A., Fricker, A.H., Farrell, L., 2018. Trends and connections across the Antarctic cryosphere. *Nature*, 558, 223-232.
- Thompson, D., Solomon, S., 2002. Interpretation of recent Southern Hemisphere climate change. *Science*, 296, 895-899.
- Thompson, D.W., Solomon, S., Kushner, P.J., England, M.H., Grise, K.M., Karoly, D.J., 2011. Signature of the Antarctic ozone hole in Southern Hemisphere surface climate change. *Nature Geoscience*, 4, 741-749.
- Turner, J., Lu, H., White, I., King, J.C., Phillips, T., Hosking J.S., Bracegirdle, T.J., Marshall, G.J., Mulvaney, R., Deb, P., 2016. Absence of 21st century warming on Antarctic peninsula consistent with natural variability. *Nature*, 535, 411-416.
- Turner, J., Hosking, S., Bracegirdle, T., Marshall, G., Phillips, T., 2015. Recent Antarctic sea ice. *Phil. Trans. R. Soc. A*, 372, 2014163.
- Whitworth III, T., Orsi, A.H., Kim, S.-J., Nowlin Jr., W.D., Locarnini, R.A., 1998. Water masses and mixing

김성중, 임창규

near the Antarctic slope front. In: Ocean, ice and atmospheric interations at the Antarctic continental margin. Antarctic Research Series, 75, 1-27.

Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K., 2001. Trends, rhythms, and aberrations in global climate 65 Ma to present. Science, 292, 686-693.

2018년 11월 20일 접수

2018년 12월 27일 수정

2018년 12월 27일 승인