

# 기후 변화에 따른 남·북극 용빙변화와 해수면 상승 이슈

극지연구소 빙하환경연구본부  
윤숙영 선임연구원

## 필자의 말

2000년대 초 만해도 기후변화를 이야기 할 때 미래를 이야기했던 것으로 기억한다. 50년 후에는, 100년 후에는 지구가 어떻게 될 것이다. 읽을 때는 걱정이 되었지만 뒤돌아서면 잊고 현실을 살 수 있었다. 그러다 언제부턴가 양상이 달라졌다. 지금의, 오늘의 이야기가 설렘 없이 쏟아지기 시작했다. 북미와 중동에서는 폭염으로 집과 차가 녹고 있고 독일에서는 1000년 만의 폭우가 내렸다고 한다. 20년 전에 보고 지나쳤던 경고가 오늘의 뉴스로 나오고 있다. 이제 전문가가 아니더라도 모두가 느끼고 있다. 살벌하게 공이 오가는 피규게임이 본격적으로 시작되었고 아직은 아슬아슬하게 피하고 있지만 언제 무시무시한 강속구가 이쪽으로 날아와 우리를 탈락시킬지 모른다.

해수면 상승에 대해서는 아직까지는 미래의 이야기를 하고 있다. 2050년에는 2100년에는 얼음이 녹아서 어디가 잠긴다더라. 가끔 그런 이야기를 듣는다. “좀 높은 지대에 올라가서 살면 되지.” 해수면 상승은 서서히 진행될 것이고 충분히 대비할 수 있을 것이라고 생각한다.

우리는 해수면 상승을 충분히 구체적으로 이해하고 있는가? 해수면 상승은 우리를 더 좁은 곳에 몰아넣고 공의 위력을 올릴 것이다. 더 강력하고 빈번한 홍수와 해일, 식량 위기, 도시가 완전히 잠기기도 전에 다양한 경로로 우리를 공격할 것이다.

미래를 이야기할 때 대응하지 않으면 어떻게 되는지 오늘날의 뉴스에서 확인할 수 있다. 본격적으로 해수면 상승이 빨라지고 피해가 가시화될 때가 아니라, 지금 미래를 직시하고 적극적으로 대응해야한다.

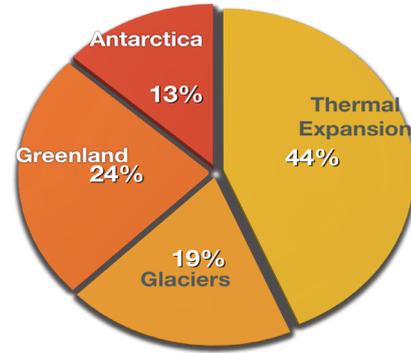
- I. 해수면 상승 레이스는 이제 시작이다.
- II. 2100년 해수면 상승 예측과 불확실성
- III. 남북극 주요 빙상의 용빙 현황과 전망
- IV. 용빙 예측 정확도 향상을 위한 노력 : 운명의 날 빙하 스웨이츠 빙하 연구
- V. 빙상 용융과 해수면 상승으로 인한 피해
- VI. 빙상 용융과 해수면 상승에 대응하는 우리의 노력



### I. 해수면 상승 레이스는 이제 시작이다.

지구온난화에 의한 해수면 상승은 수온이 점점 올라가면서 부피가 늘어나는 열팽창과 육상의 얼음이 녹아 물이 유입되면서 발생하는 물의 절대적인 질량 증가로 나눌 수 있다. IPCC\*에서 2019년에 발표한 “변화하는 기후에서의 해양 및 빙권 특별보고서”(SROCC : Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate)에 따르면 지난 2006년에서 2015년까지의 전지구 평균해수면 상승의 44%는 해수의 열 팽창에 의해 발생하였고 나머지 56% 중 북극 그린란드의 용빙에 의해 24%, 기타 육빙이 19%, 남극 대륙은 13%로 해수면 상승에 기여하였음을 밝혔다.(그림1)

〈그림 1〉 2006~2015년까지의 전세계 평균 해수면 상승 기여율 (자료 출처 IPCC 해양 및 빙권 특별보고서)



국립해양조사원에서 발표한 우리나라의 지난 30년 (1990~2019년) 간의 평균 해수면 상승 속도는 연간 3.12 mm/yr로 특히 남해안과 동해안의 상승속도가 빠르며 지난 30년에 비해 최근 10년의 상승속도는 약 1.35배 빨라졌다. (그림 2) 전세계 평균 해수면은 2006~2015년 동안 평균 3.6 mm/yr 속도로 상승하였는데 이는 1901~1990년 동안의 속도인 1.4 mm/yr의 약 2.5배에 달하는 속도이다. (IPCC 해양 및 빙권 특별보고서) mm 단위의 상승 속도가 어찌보면 그리 크지 않은 것처럼 느껴질 수도 있겠지만 이 상승이 누적되고 있고 점점 더 빨라지고 있음을 주목해야 한다. 해수면 상승 속도의 증가는 그린란드와 남극을 비롯한 빙상에서의 용빙이 주원인으로 지목되고 있으며 앞으로도 빙상용융이 해수면 상승의 지배적인 원인이 될 것으로 예측하고 있다.

NASA에서는 중력을 측정하는 GRACE와 후속 위성인 GRACE-FO를 이용하여 2002년부터 2020년 기간동안의 용빙에 의한 빙상과 빙하의 질량유출 평균값을 발표하였는데 북극 그린란드에서는 매년 평균적으로 279 기가톤이, 남극에서는 평균적으로 149 기가톤의 얼음이 유출되고 있으며 그 양이 점점 증가하고 있음을 밝혔다. 특히 2007년을 기준으로 그 이전의 10년과 이후의 10년을 비교해본 결과 그린란드는 이전 10년에 비해서 2배 많은 양이 유출되었고 남극에서는 이전보다 3배나 더 많은 질량이 유출되면서 빙상용융에 의한 해수면 상승이 갈수록 가속화되고 있음을 보여주었다. (IPCC 해양 및 빙권 특별보고서)

〈그림 2〉 2019년 국립해양조사원에서 발표한 국내 연안의 연평균 해수면 상승률

구분	평균 해수면 상승률 (mm/년)		30년 대비 10년간의 상승률 비율	세부지역 (21개 조위관측소)
	'90~'19(30년간)	'10~'19(10년간)		
제주 부근	4.20	5.69	1.35	제주, 서귀포, 거문도
동해안	3.83	5.17	1.35	울산, 포항, 묵호, 속초, 울릉도
남해안	2.65	3.63	1.37	추자도, 완도, 여수, 통영, 가덕도, 부산
서해안	2.57	1.79	0.70	인천, 안흥, 군산, 보령, 위도, 목포, 흑산도
<b>전연안</b>	<b>3.12</b>	<b>3.68</b>	<b>1.18</b>	

## II. 2100년 해수면 상승 예측과 불확실성

IPCC에서는 기후변화에 관한 다방면의 방대한 연구를 종합하여 기후변화의 과학적 근거와 정책방향을 제시하는 보고서를 발간하고 있으며 이들 보고서는 유엔기후변화협약(UNFCCC)에서 정부 간 협상의 근거자료로 활용된다. 대략 7년 정도의 주기로 발간되는 평가보고서(AR: Assessment Report)와 특정 주제에 대해서 다루는 특별보고서를 발간하고 있는데 2007년에 4차 평가보고서(AR4), 2014년에는 5차 평가 보고서(AR5)를 발간하였으며 2019년에는 해양 및

빙권 특별보고서, 2021년에는 6차 평가보고서(AR6)를 발간하면서 2100년까지의 전지구 평균 해수면 상승 전망을 제시하였다. IPCC AR4에서 최대 59cm로 예측했던 해수면 상승은 AR5에서는 98cm로, 해양 및 빙권 특별보고서에서는 1.1m, 그리고 가장 최근의 AR6에서는 1.6m 라는 충격적인 예측결과를 제시하였다.(그림 3)

〈그림 3〉 IPCC 보고서 버전별 2100년 전지구 평균 해수면 상승치 예측 최대값의 변화

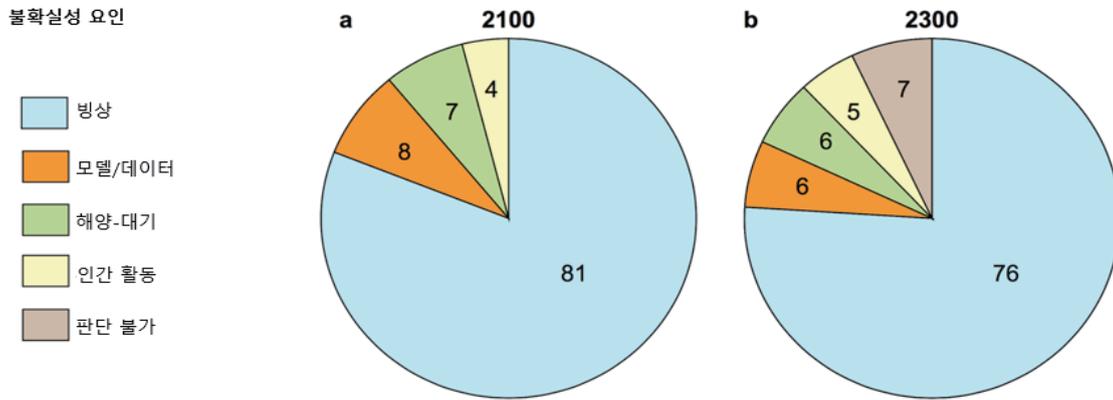


예측값은 왜 갈수록 증가하고 있으며 불확실성은 어디에서 오는 것인가?

원인은 빙상의 융빙 예측 불확실성에 있다. 해양 및 빙권 특별 보고서에서는 AR5에서 누락되었던 남극 빙상 질량 손실을 해수면 상승 예측에 포함시키면서 최대 해수면 상승값이 상향 되었으며 AR6에서는 이전 예측에서는 고려되지 않았던 빙상 안정도 저하기작을 포함하여 계산하면 해수면 상승이 훨씬 더 높아질 수 있음을 보여주었다. 해수면 상승에 관한 전문가들의

예측을 모아 분석한 연구(Horton et al., 2020)에서는 최근 해수면 상승 예측치가 지속적으로 증가하고 있으며 이것이 남극 빙상에 대한 영향력 있는 연구들이 추가된 결과라고 밝혔다. 이들 문헌에서 공통적으로 해수면 상승 전망의 가장 큰 예측 불확실성이 극지 빙상에 대한 제한된 관측, 붕괴와 질량 유출 과정에 대한 부적절한 모델 표현, 그리고 대기-해양-빙상 간의 복잡한 상호작용에 대한 이해 부족으로 기인하였으며 남극 빙상의 거동 예측이 여전히 불확실한 것을 지적하였다. (그림 4)

〈그림 4〉 2100년과 2300년 전지구 평균 해수면 상승 예측 불확실성에 영향을 주는 요인 (Horton et al., 2020)



### III. 남북극 주요 빙상의 용빙 현황과 전망

남극에는 전 지구 해수면을 총 57.9 m 상승시킬 수 있는 얼음이 있으며 그 중 동남극에 52.2 m, 서남극에 5.3 m, 남극 반도에 0.27 m 의 상승분의 얼음이 분포하고 있다.(Moringhem et al., 2020) 그린란드에는 7.42 m (Morlighem et al., 2018) 상승분의 빙상이 존재한다. 해수면 상승 예측 정확도를 올리기 위해서 이들 얼음으로부터 얼마나 많은 양의 물이 얼마나 빠르게 바다로 유입될 것인지를 정확하게 예측할 수 있어야 한다.

각 빙상에 대한 자세한 설명에 앞서 극지 빙하와 빙상 시스템과 관련된 몇 가지 용어를 짚고 넘어가면 이해에 도움이 될 것이다.

- **빙하 (glacier)** : 강설량이 용융보다 많은 지역에서 압축된 눈이 오랫동안 쌓이고 다져져 육지의 일부를 덮고 있는 얼음층이 만들어지고 이것이 한 방향으로 흐르는 것
- **빙상 (ice sheet)** : 빙하와 유사하지만 면적이 50,000 km<sup>2</sup>로 넓고 일정한 한방향으로 흐르지 않고 중심부에서 바깥쪽으로 흐르는 넓은 얼음층
- **빙붕 (ice shelves)** : 빙하로부터 뿔어나와 바다에 떠 있는 두꺼운 얼음판, 이 얼음판이 넓게 퍼지지 않고 길게 형성되는 경우에는 빙설 (ice tongue) 이라고 부른다.
- **지반선 (Grounding line)** : 육상 위 빙하와 바다위에 떠 있는 빙붕의 경계선
- **임계점 (tipping point)** : 미미하게 진행되다 어느 순간 균형을 깨고 무너지거나 변화되는 정점을 의미함. 빙상동역학에서는 빙상 질량 유출이 이전과는 다른 추세로 비선형적으로 진행되기 시작하여 다시 이전으로 돌아갈 수 없는 시점을 의미함

#### 1. 그린란드의 빙상

북극 그린란드는 남극에 이어 두 번째로 큰 빙상이 있는 곳이며 현재 열팽창이 아닌 해수 질량 증가에 의한 해수면 상승에 가장 크게 기여하고 있는 빙상이다. 그린란드는 해안선의 75%가 빙붕으로 이루어진 남극과는 다르게 빙붕은 거의 존재하지 않으며 빙설이 일부 빙하에서 발달되거나 빙하가 후퇴하여 빙하 하류의 땅이 드러난 곳도 많다. 최근 수십년간 지구온난화에 의한 기온상승과 해수 온도 상승으로 인하여 그린란드의 빙하는 급격히 후퇴하여 전세계 평균 해수면을 평균적으로 0.69 mm/yr 의 속도로 상승시켜왔다.(Bamber et al., 2018) 위성관측자료로 계산한 1990년에서 2018년까지의 그린란드의 질량 손실은 39,020 ± 3,420억 톤에 달하며 그로 인해 10.8 mm의 평균해수면이 상승되었다.(The IMBIE Team, 2019) 이러한 그린란드 빙상의 질량 유출은 점점 가속화되고 있으며 NASA 발표에 따르면 기록적인 폭염이 있었던 2019년에는 그린란드의 1992~2018년 기간의 연평균 질량 손실량인 1,480억 톤의 세 배가 넘는 5,320억 톤의 질량이 유실되면서 이전 기록인 2012년의 4,640억 톤 기록을 경신하였다.(Sasgen et al., 2020) 그린란드에서는 빙하가 바다와 직접 접하는 면적이 적기 때문에 따뜻한 대기에 의해 빙하 상부가 녹아 얼음 위에 호수와 하천이 형성되어 물이 빠져나가는 빙하상부용융 (supraglacier melting)이 주요 용빙기작으로 지목된다. 대기온도가 올라 얼음 위에 물웅덩이가 더 많이 생기면 알베도 저하로 태양열을 더 많이 흡수하게 되므로 주변 빙하를 더욱 효과적으로 녹일 수 있게 되어 빙상용융은 더욱 가속화될 수 있다.(Lüthje et al., 2006) 과학자들은 최근 그린란드에서는 용빙 현상이 더욱 용빙을 가속화하는 양의 되먹임(positive feedback) 용융기작이 작동하고 있으며 질량 유실이 가속화

되어 다시 되돌릴 수 없는 임계점을 지나고 있다고 경고하였다. (King et al., 2020; Boers and Rypdal, 2021)

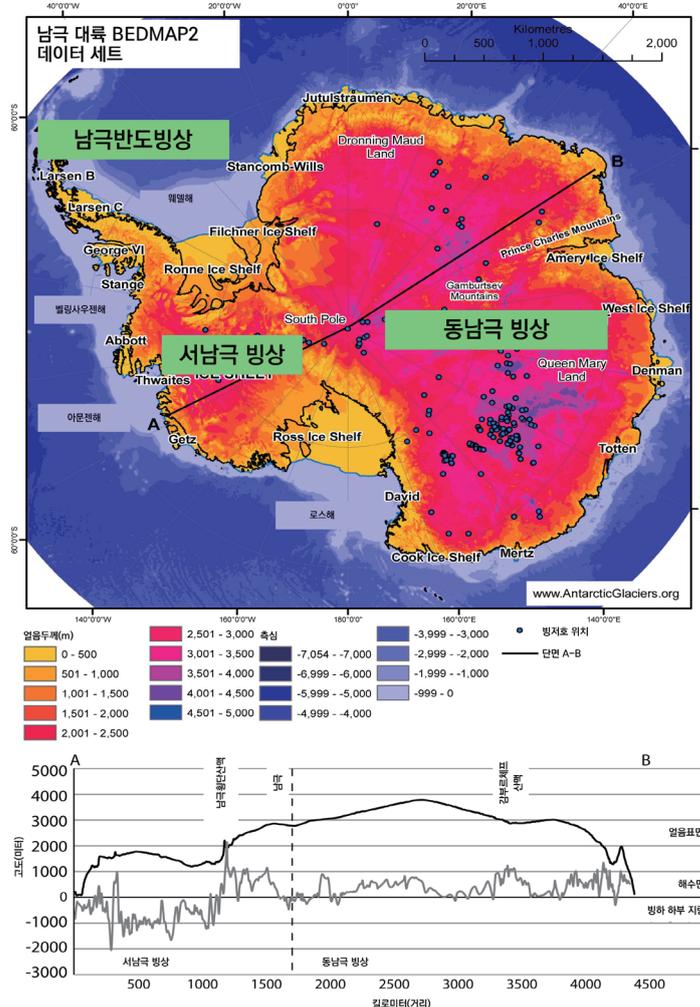
## 2. 남극의 빙상 용융

남극 대륙은 지구에서 다섯 번째로 큰 대륙으로 대부분 얼음으로 덮혀 있으며 지구 담수의 70%인 2,540만 km<sup>3</sup>의 물이 얼음의 형태로 존재하고 있다. 남극은 남극 대륙을 가로지르는 남극횡단산맥(Transantarctic Mountains)을 기준으로 동남극과 서남극으로 나뉜다. 동남극은 지대가 서남극에 비해 높으며 빙상의 두께가 두꺼워 해발고도가 3,000m-4,000m에 달하고 서남극은 얼음 밑 땅의 높이가 해수면보다 낮으며 동남극에 비하여 빙상의 두께도 다소 낮아 빙상 중심부의 해발고도가 1,500m 정도에 달한다.(그림5)

남극의 거대한 빙상은 주요 빙하를 따라 바다로 질량이 유출되고 있는데 남극의 해안선은 93% 이상이 얼음에 덮혀 있

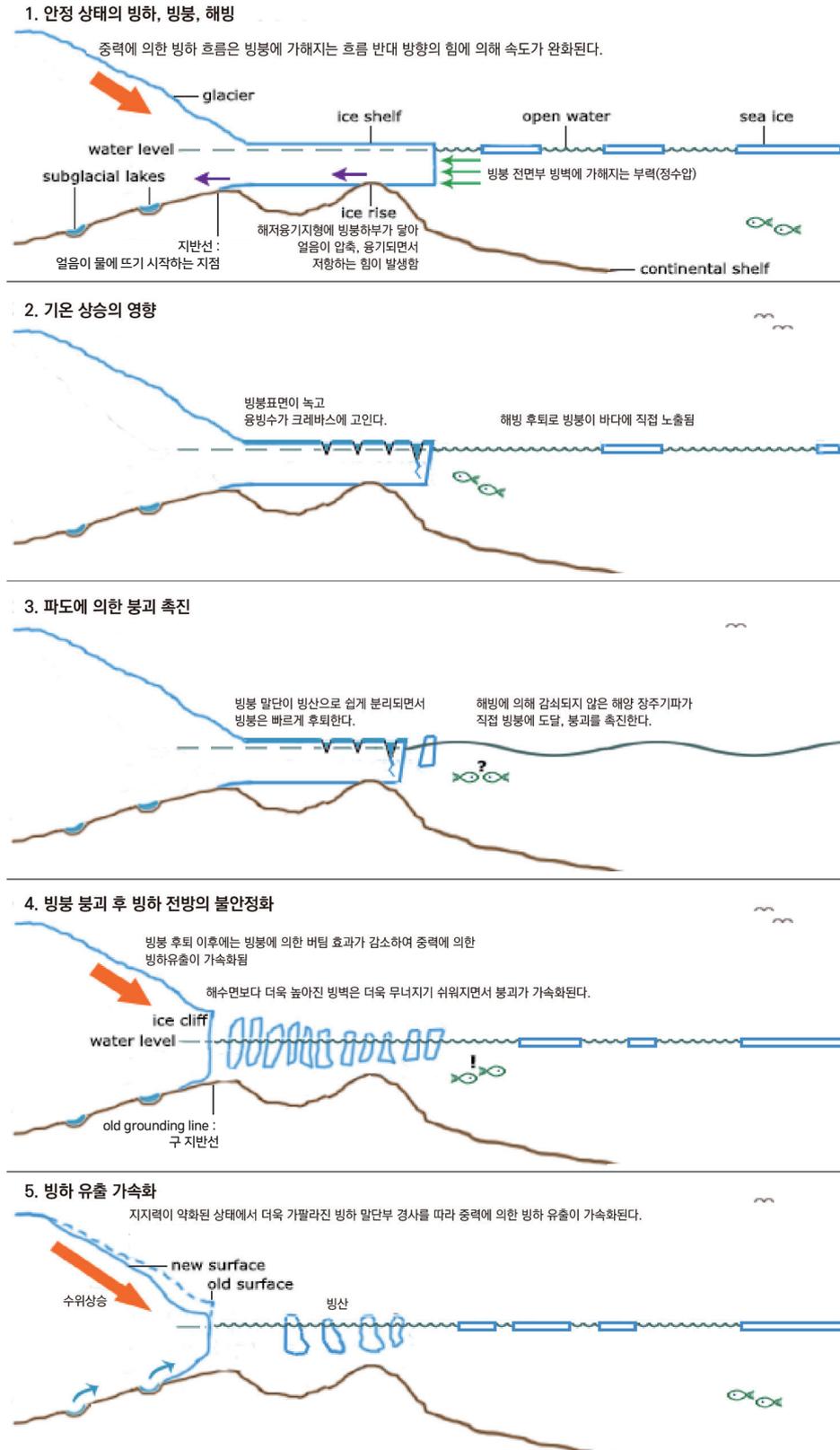
거나 빙붕이나 빙설로 구성되어 빙하 말단부가 바다와 직접 접하고 있다.(Vornberger et al., 2011) 남극의 빙하 말단에는 크고 작은 빙붕이 발달하여 전체 해안선의 75%가 빙붕으로 이루어져 있다. 빙붕은 위로는 대기와 아래로는 따뜻한 바다를 동시에 접하고 있어 땅 위의 빙상이나 빙하보다 더 빠르게 온도 상승에 반응하는 경향이 있다. 빙붕은 따뜻한 바닷물에 의한 하부 용융과 말단 붕괴(Calving)로 인하여 질량이 유실되고 규모가 작아지는데 이미 바다에 떠 있는 빙붕의 붕괴는 추가적인 질량을 바다로 유입시키지 않기 때문에 직접적으로 해수면 상승을 유발하지는 않는다. 그러나 빙붕의 붕괴는 남극의 빙상 안정도와 거동 예측 연구에서 매우 중요하게 다루어지고 있는데, 그 이유는 빙붕 붕괴가 빙하 유출 속도에 직접적으로 관여하기 때문이다.

〈그림 5〉 BEDMAP2를 기반으로 남극의 얼음 두께와 (위) 서남극과 동남극을 가로지르는 단면도(www.AntarcticGlaciers.org)



<그림 6> 빙봉의 붕괴에 따른 빙상 질량유출 가속화 기작

(Image by Ted Scambos and Michon Scott, National Snow and Ice Data Center, University of Colorado, Boulder. Image based on Scambos et al. 2004 and Massos et al., 2018)



지구온난화에 의한 남극의 빙봉 붕괴와 빙하 유출 가속화 기작은 그림 6에 자세히 설명되어 있다. 빙봉이 바다에 넓게 떠 있을 때는 부력을 포함한 정수압(hydrostatic force)에 의해 밀려 내려오는 빙하를 뒤로 밀어 흐름의 속도를 늦춰준다. 이것을 빙봉의 버팀(buttrressing) 효과라고 한다.(그림 6-1) 지구온난화로 빙봉이 빠르게 녹으면서 균열이 생기고, 해빙의 감소로 바다의 장주기 파도에 의해 빙봉이 쉽게 깨지면서 점점 후퇴하게 된다.(그림 6-2, 6-3) 빙봉이 후퇴하면 빙봉에 가해지던 부력이 사라지면서 빙하의 흐름을 막아주던 힘, 즉 버팀(buttrressing) 효과가 약화되고 직접 바다에 노출된 해수면으로부터 높은 빙벽은 더욱 불안정한 상태가 되어 붕괴가 가속화될 수 있다.(그림 6-4) 빙봉이 사라져 버팀(buttrressing) 효과가 사라지고 빙하의 경사가 가팔라지면 빙하의 속도는 빨라지고 질량 유출이 더욱 가속화된다.(그림 6-5) 일련의 과정은 실제로 남극과 그린란드의 빙상-빙봉 또는 빙상-빙설 시스템에서 관찰되었다. 그린란드에서 빙설이 붕괴한 이후에 빙하의 이동 속도가 2-3배 빨라졌으며 (Joughin et al. 2004) 2002년 남극의 라르센 B 빙봉 붕괴 이후에는 남극 반도 인근 빙하가 3배에서 최대 8배까지도 유출 속도가 가속되어 (Scambos et al. 2004; Rignot et al. 2004) 남극의 빙상 질량 유출은 비선형적으로 가속화될 수 있음을 보여주었다.

그림 5에서 보듯이 서남극 지역은 해수면 높이보다 얼음 바닥면의 고도가 더 낮아 빙상 하부가 바다에 잠겨있으며 대륙 안쪽으로 들어갈수록 두터운 얼음층이 땅을 눌러 바닥의 고도가 점점 낮아지는 특성을 가지고 있다. 이렇게 얼음 바닥이 해수면 보다 아래에 있는 빙상을 'Marine Ice Sheet'이라 부른다. 서남극에는 세계에서 가장 큰 Marine Ice Sheet이 존재하고 있으며 동남극 일부 지역과 그린란드에도 Marine Ice Sheet이 존재한다. 이렇게 빙상이 해수면보다 아래에 있고 바닥면의 경사가 대륙쪽으로 기울어진 경우에 따뜻해진 해수가 빙하 하부를 녹이면서 파고 들어가 빙상 붕괴와 질량 유출을 가속화시키는 기작으로 Marine Ice Sheet Instability(MISI) 와 Marine Ice Cliff Instability(MICI) 두 종류의 가설이 제시되고 있다. 그림 7의 왼쪽은 MISI 기작을 설명하는 모식도이다. 따뜻한 해수가 빙봉 하부를 계속해서 녹이면서 파고들게 되면 지반선이 뒤로 후퇴하게 된다. 해수면 상승은 육상 위의 빙상이나 빙하의 얼음이 지반선을 넘어 바다로 유입되는 순간에 유발되기 때문에 지반선의 후퇴만으로도 질량 유출량은 크게 증가하게 된다. 대륙 안쪽으로 땅이 경사진 구조에서는 지반선이 후퇴하면 더 많은 얼음이 물에 잠기게 되고 하부 용융과 지반선 후퇴가 가속화되면서 얼음 유출량이 증가하게 되는데 이것이 그림 7 왼쪽에 설명된 MISI 기작이다. 빙봉이 모두 붕괴된 상태에서 지반선이 후퇴하여 빙벽의

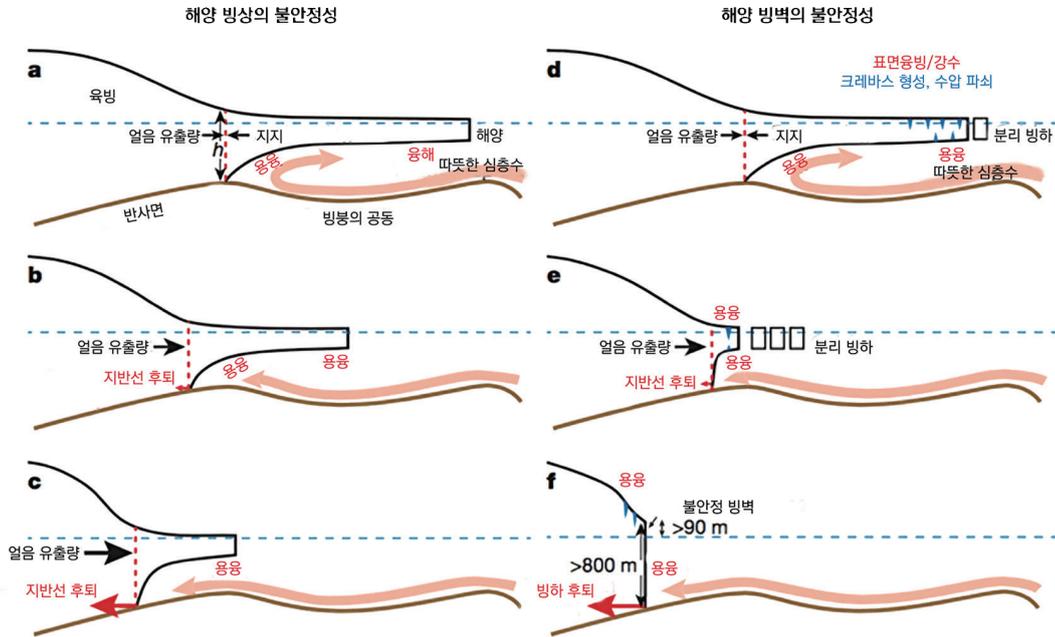
높이가 높아지고 따뜻해진 공기에 의해 빙상 상부 용융이 진행될 경우에는 빙벽이 더욱 쉽게 붕괴하면서 질량유출이 더욱 가속화 될 수 있다. 이것이 그림 7의 오른쪽에서 설명된 MICI 기작이다.(DeConto and Polland, 2016) 이들 기작은 서남극 빙상의 붕괴를 기존 예측보다 더욱 빠르게 앞당길 수 있어 이를 검증하기 위한 많은 연구들이 진행되고 있다.

최근에는 그동안 비교적 안전하다고 생각한 동남극 빙상조차 안정적이지 않다는 연구 결과가 도출되고 있다. 동남극 사브리나 해안에서 탄성파 탐사와 시추 자료를 분석한 연구를 통해 동남극의 오로라 분지 빙상이 계속해서 유지되었던 것이 아니라 과거 수천만 년 동안 여러 차례에 걸쳐 후퇴했었으며, 동남극의 가장 큰 빙하인 토튼 빙하는 따뜻한 해수에 의해 빠르게 녹고 있어 이것이 동남극 빙상 후퇴의 조기 경보일 수 있다는 연구가 발표되었다.(Gulick et al., 2017) 2018년 NASA에서는 위성관측 자료로 빙하의 높이와 속도 변화를 계산하여 토튼 빙하뿐만 아니라 주변 빙하에서 질량이 꾸준히 유출되고 있음을 알려면서 "동남극의 빙하가 깨어나고 있다"고 경고하였는데 최근에는 오로라 분지 빙상의 또 다른 유출 경로인 동남극의 덴먼 빙하에서 1979년부터 2017년까지 5 km에 달하는 지반선 후퇴와 2,680억 톤에 달하는 질량이 손실되면서 용융이 더욱 가속화되고 있음이 보고되었다.(Brancato et al., 2020; Miles et al., 2021) 덴먼 빙하에는 전지구 해수면을 1.5 m 상승시킬 수 있을 만큼 많은 양의 얼음이 있으며 빙하 아래에는 수심 3,500 m에 달하는 협곡이 발달해 있어, 서남극과 마찬가지로 따뜻한 해수에 의한 지반선 후퇴와 용융이 빠르게 진행될 수 있기에 집중적인 관측과 연구가 진행되고 있다.



〈그림 7〉

해양 빙상에서의 불안정 기작 : (좌) Marine Ice Sheet instability (MISI) (우) Marine Ice Cliff Instability (MICI) (DeConto and Pollard, 2016)



#### IV. “운명의 날 빙하” 스웨이츠 빙하 연구

네이처지는 ‘2019년 주목해야 할 과학분야 이슈(What to watch for in 2019) 10선’ 중 1순위로 서남극의 스웨이츠 빙하 연구를 손꼽았다. 스웨이츠 빙하에는 우리나라와 미국 영국이 2022년까지 총 800억 원을 투입하여 남극 연구 역사상 단일건으로는 가장 큰 규모의 국제 공동연구가 진행되고 있다. 그러면 과학자들은 왜 스웨이츠 빙하를 연구하는가?

스웨이츠 빙하는 서남극의 아문젠해 섹터에 있는 남극에서 가장 빠르게 녹는 빙하 중 하나이다. 이 지역은 전형적인 Marine Ice sheet 구조로 빙상과 지반의 경계가 해수면 아래에 위치하고 지반의 경사가 해양에서 내륙방향으로 급해지기 때문에 아문젠해에서 공급되는 따뜻한 환남극심층수에 의해 지반선이 후퇴하고 있으며, 앞서 설명된 MISI와 MICI 기작에 의해 붕괴가 가속화될 수 있는 조건을 갖추고 있다. 전 세계 극지 과학자들이 스웨이츠 빙하에 주목하는 이유는 전세계 해수면을 0.6 m 올릴 수 있을 만큼 많은 양의 얼음을 보유하고 있으면서 2004년 이후 빙하 유출량이 계속적으로 증가하는 양상을 보이고 있으며 (Mouginot et al., 2014), 붕괴와 후퇴를 막을 수 없는 단계로 접어들었음을 경고하는 연구가 다수 발표되면서 (Joughin et al., 2014; Rignot et al., 2014; Parizek et al., 2013) 우리의 생애주기 내인 수십년 안에 급격한 해수면 변동이 스웨이츠 빙하를 중심으로 촉발될 수 있

음이 확실히 되기 때문이다.(Scambos et al., 2017)

스웨이츠 빙하 연구의 목적은 “얼마나 많은 얼음이 얼마나 빠르게 유출될 지를 보다 정확하게 예측하는 것”으로 각국의 극지 연구자들은 최첨단 기술을 동원하여 빙상에 영향을 미칠 수 있는 다양한 요소와 이들의 변화를 집중적으로 관측하여 대기-해양-빙상 간의 복잡한 상호작용과 용빙 물리기작을 찾아내고 있다. 이러한 노력을 바탕으로 개선된 물리기작이 반영된 빙상모델은 스웨이츠 뿐만 아니라 다른 남극 빙상 예측의 정확도를 향상시키는 데에도 기여하여 궁극적으로는 미래의 해수면 변동 예측 정확도를 올릴 수 있게 될 것이다.

#### V. 빙상 용융과 해수면 상승으로 인한 피해

해수면 상승은 천천히 진행되기 때문에 해수면 상승에 의한 피해를 대비하고 피할 시간이 충분할 것이라는 고정관념이 있으나 해수면 상승은 기상이변과 결합하여 극한 해수면 현상의 형태로 피해를 끼칠 것이다. 최근의 연구결과에 따르면 지구 온난화로 파도의 위력이 갈수록 강해지는 것으로 나타나고 있으며 (그림 9) 또한 열대성 저기압의 강도와 강수량이 앞으로 계속해서 늘어날 것으로 전망되고 있다.(IPCC 해양 및 빙권 특별보고서) 이러한 극한 파도가 해수면 상승과 결합하면 훨씬

강한 위력의 파도가 도시를 덮치는 일이 보다 빈번하게 발생할 수 있다. 이것은 우리가 겪어보지 못한 낯선 현상은 아니다. 해운대의 바다를 끼고 있는 마린시티는 강한 태풍이 올 때 파도가 방파제를 넘어 아파트와 상가를 덮친 전적이 몇 차례 있다. 그림 8은 2016년 태풍 차바 당시 파도가 해운대를 덮친 모습이다. 해운대 지역은 아름다운 백사장이 있는 관광지이자 살기 좋은 주거지역으로 비록 강한 태풍으로 피해를 입었다고 하여도 사람들은 쉽게 발전한 도시를 버리고 이주하지 않는다. 해양 및 빙권 특별보고서에서는 이전에는 세기에 한번 정도만 발생했던 극한 해수면 현상이 점차 빈번해질 것이며, 2050년에는 다수의 저지대 도시들이 1년에 한번 이상 역사적인 극한 해수면 현상을 경험할 것으로 전망하였다. 해운대를 덮친 파도는 역사적인 파도는 아니다. 수년에 한 번씩 겪는 파도일 뿐이다. 이 정도 위력의 파도는 2050년이 되면 훨씬 더 빈번하게 겪는 파도가 될 것이며 우리는 생애에서 단 한 번도 겪어보지 못한 수준의 파도가 도시를 덮쳐 인명피해와 수많은 재산피해를 겪게 될 것이다. 재난은 예상하지 못한 날에 갑자기 발생할 것이며 우리는 큰 피해를 입고 나서야 이전에는 살기 좋았던, 잘 만들어진 도시가 더이상 안전하지 않음을 깨닫게 될 것이다.

파도만이 위험한 것은 아니다. 지구 온난화로 국지성 폭우와 태풍에 의해 극한 강수 이벤트 역시 늘어날 것이며, 해수면 상승으로 자연방류속도가 늦춰진 강은 더욱 빈번하게 범람하여 훨씬 더 큰 규모의 도시 침수가 보다 자주 발생할 것으로 전망된다. NASA에서 2030년에는 달 궤도 변화로 인해 조수간만의

차가 커질 것으로 전망했는데 이것이 해수면 상승과 맞물려 홍수가 더욱 급증할 것이라는 연구결과도 발표 되었다.(Thompson et al., 2021)

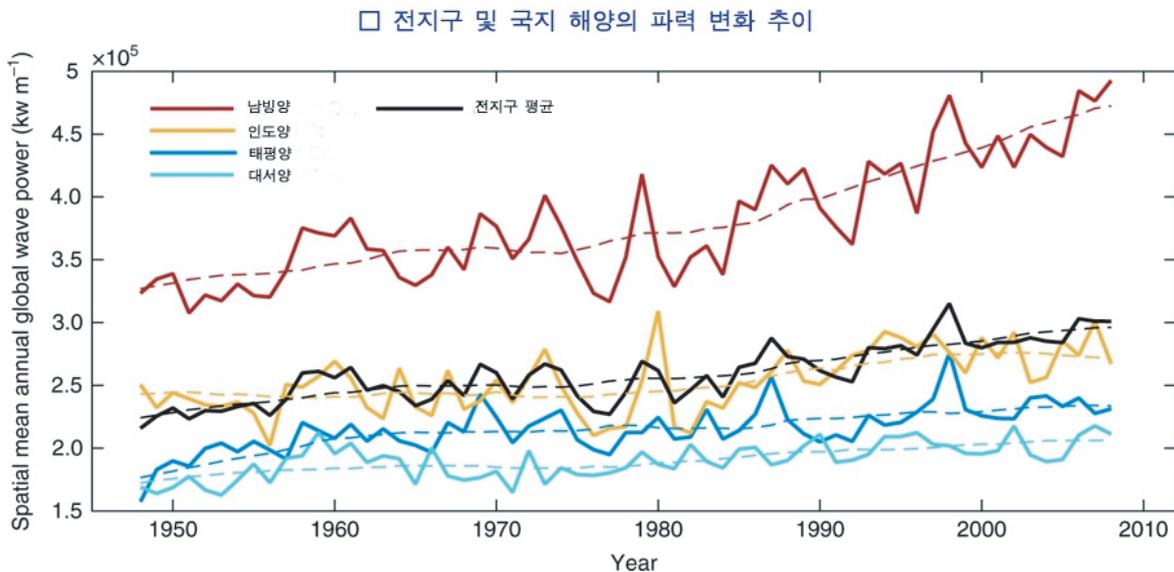
이외에도 이미 해수 수위가 올라가 지하수가 소금물로 변하는 현상이 플로리다와 일부 섬 국가에서 발생하고 있는 데 향후 해수면 상승이 본격화되면 해안 저지대 지역과 섬 지역, 도시 빈민 지역에서는 식수 확보 역시 중요한 문제가 될 것이다. 또한 해수면 상승으로 인하여 경작을 포기해야 할 토지가 늘 어나게 되면 향후 식량 안보는 더욱 큰 문제로 대두될 것이다.

이러한 전망이 먼 미래처럼 느껴질 몰라도 최근에 브라질의 기상이변으로 커피 수확량이 크게 감소하여 커피 가격이 하루



〈그림 8〉 2016년 태풍 차바 당시 SNS에 올라온 태풍 피해 실시간 상황

〈그림 9〉 지구 온난화에 의한 파력 증가 추세(Reguero et al., 2019)



새 10%나 급등했던 것을 기억해보자. 해수면 상승은 곡물의 수확량 감소를 유발하여 세계적 식량 대란을 발생시킬 수 있으며 생존을 위한 식량 가격이 폭등한다면 커피와는 비교할 수 없는 혼란이 발생할 것이다. 우리나라는 OECD 국가 중 식량의 해외 의존도가 가장 높은 나라로 전 세계적인 식량 대란 발생 시 막대한 사회 경제적 타격을 받게 될 것으로 전망한다.

## VI. 빙상 용융과 해수면 상승에 대응하는 우리의 노력

기후변화와 관련된 기사와 방송을 접할 때마다 우리는 공포심을 느끼고 지구를 지키기 위한 개인적인 노력들을 한다. 텀블러를 쓴다거나, 덥지만 무더위에 에어컨을 끄고 버텨보고, 장바구니를 쓰고, 콘센트에 코드를 뽑는다. 많은 사람들이 이러한 노력들을 해본 경험이 있을 것이다. 그러나 시간이 지나면서 망각하거나, 성과가 보이지 않음에 지쳐 원래의 생활로 돌아가는 경험 또한 해보았을 것이다. 환경을 보호하고 지구를 지키고 싶은 의욕은 있으나 실천을 지속하기란 힘들다. 이것은 개인의 문제일까?

현대사회에서 기업들은 화석연료를 사용하여 편리와 만족을 저렴한 가격에 제공하고 있다. 소비자는 별다른 추가 금액 없이 일회용 컵에 커피를 마실 수 있고 그리 비싸지 않은 가격에 깨끗하고 안전하게 포장된 물건을 배송받고 저렴한 새 옷을 구매할 수 있다. 편리와 만족은 개인의 환경보호 의지를 쉽게 좌절시키고 기업에게는 이윤을 안겨준다. 기업들 역시 환경을 위해 이윤추구를 포기하기란 쉽지가 않다. 국가는 어떤가? 트럼프 전 미국대통령은 미국 경제의 중요한 축인 석유와 석탄 산업을 중심으로 미국 경제 발전을 유지하기 위해 파리협약을 탈퇴하였고 스위스에서는 최근 탄소세 법안이 부결되었다. 코로나19 사태로 침체된 경기를 회복해야 할 때 법안이 경제에 악영향을 끼칠 것을 우려한 것으로 보인다. 이토록 국가조차도 환경을 위한 결정을 내리기가 쉽지 않은 것을 알 수 있다. 지구 환경 보전이 장기적으로 지속 가능한 발전을 가능하게 한다는 것은 모두가 알고 있지만 당장의 발전을 위해 탄소 감축을 늦추고 조금 더 이익을 추구하기 위한 눈치싸움을 하는 경우가 생기는 것이다. 결국 기후 변화를 막기 위해서는 각국의 개별적인 노력이나 기업의 양심에 의지하지 않고 세계 각국에 동일한 목표를 위해 약속을 이행할 수 있도록 하는 더욱 강력한 국제협약이 필요함을 시사한다. 이러한 국제협약을 만들기 위하여 만들어진 것이 바로 1988년 세계기상기구(WMO)와 유엔환경계획(UNEP)이 공동 설립한 IPCC이다. IPCC에서는 기후변화와 관련된 다방면의 연구결과를 종합하여 기후변화를 위해 노력해야만 하는 과학적 근거를 담은 보고서를 발간해왔으며, 이 보고서를 기반으로 1992년 유엔기후변화협약, 1997년

교토의정서, 2015년 파리기후협정과 같은 국제협약이 체결될 수 있었다. IPCC 보고서는 회차가 거듭될수록 왜 지금 당장 지구 온난화를 막기 위해 전 세계가 적극적으로 노력해야 하는지 각국의 정책결정권자들은 설득할 수 있을 만큼 탄탄한 과학적 근거를 제시하고 있다. 2018년 IPCC 총회에서 '지구 온난화 1.5도 특별보고서'가 승인된 이후 2020년 세계 각국은 2100년까지 온도 상승을 1.5도로 제한하자는 공동의 목표를 선정하였고, 이를 위하여 EU, 미국, 한국, 일본 등은 2050년까지, 중국은 2060년까지 탄소중립 달성을 선언하면서 본격적으로 온실가스 감축 노력에 착수하게 되었다. 같은 해 우리나라에서는 탄소의존 경제에서 저탄소, 친환경 경제로 도약하기 위한 그린뉴딜 정책을 발표하였는데 이는 2050 탄소중립 목표 달성을 위한 구체적인 실천 방안이다. 여기에는 경제 발전 뿐만 아니라 기후 환경 위기 대응 안전망을 강화하고, 기후위기에 취약한 소외된 계층과 지역을 보호하기 위한 정책이 함께 담겨 있으며 특히 기후변화로 인한 피해 경감에 대해서는 “제3차 국가 기후변화 적응대책”을 통해 더욱 구체적인 대응책을 제시하였다.

우리가 지금 당장 온실가스 배출을 적극적으로 완화한다면 지구온난화 관성과 임계점을 지난 빙상 용빙에 의해 해수면 상승은 계속해서 진행될 것이다. 앞으로 많은 연안지역은 해수면 상승으로 직접적으로 피해를 받게 될 것이며 인류는 상승한 해수면과 자연재해에 적응하기 위한 과제에 직면할 것이다. 아이러니하게도 개발이 어려운 저지대의 섬, 북극연안 지역과 고산지역의 사람들은 탄소배출에는 그다지 가담하지 않았음에도 기후변화와 해수면 상승으로 인하여 더 큰 피해를 받게 되었는데 이들은 이를 극복할 수 있는 적응 역량까지 낮은 경우가 많다.

이제는 국제 사회와 국가 차원의 본격적인 움직임이 시작되었다. 개개인 각자의 노력에 그치지 않고 국가 차원의 투자와 독려, 규제를 통한 변화가 이루어질 것이다. 위로부터의 규제와 변화는 우리에게 익숙한 생활을 바꾸도록 강요하고 불편함을 유발하겠지만, 우리는 그 불편을 마주했을 때 그동안 탄소를 배출하며 누렸던 풍요가 지구와 인류에 대한 가해행위였음을 가장 먼저 떠올려야 할 것이다. 이미 시작된 해수면 상승을 비롯한 기후변화로 인한 재난을 완전히 막을 수는 없겠지만 국제사회와 기업, 개개인 모두가 새로운 변화에 적극적으로 동참할 때 인류 공동의 문제를 최소한의 희생으로 풀어나갈 수 있을 것이다.



## 참고문헌

- Bamber, J.L. et al. (2018) "The land ice contribution to sea level during the satellite era." *Env. Res. Lett.* 13. 063008
- Bindschadler, R., Choi, H., Wichlaez, A. et al. (2011) "Getting around Antarctica: new high-resolution mappings of the grounded and freely-floating boundaries of the Antarctic ice sheet created for the International Polar Year." *The Cryosphere* 5, 569-588.
- Brancato, V., Rignot, E., Milillo, P., Morlighem, M., Mouginot, J., An, L., et al. (2020) "Grounding line retreat of Denman Glacier, East Antarctica, measured with COSMO-SkyMed radar interferometry data." *Geophysical Research Letters* 47, e2019GL086291. <https://doi.org/10.1029/2019GL086291>
- Boers N. and Rypdal M. (2021) "Critical slowing down suggests that the western Greenland Ice Sheet is close to a tipping point." *Proc Natl Acad Sci.* 21(118). <https://doi.org/10.1073/pnas.2024192118>
- DeConto, R., and Pollard, D. (2016) "Contribution of Antarctica to past and future sea-level rise." *Nature* 531, 591-597, <https://doi.org/10.1038/nature17145>
- Edwards, T.L., Brandon, M.A., Durand, G. et al. (2019) "Revisiting Antarctic ice loss due to marine ice-cliff instability." *Nature* 566, 58-64. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-0901-4>
- Fretwell, L.O., Pritchard, H. D., Vaughan, D. G. et al. (2013) "Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica." *The Cryosphere* 7, 375-393.
- Gulick, S., Shevenell, A., Montelli, A. et al. (2017) "Initiation and long-term instability of the East Antarctic Ice Sheet." *Nature* 552, 225-229. <https://doi.org/10.1038/nature25026>
- Horton, B.P., Khan, N.S., Cahill, N. et al. (2020) "Estimating global mean sea-level rise and its uncertainties by 2100 and 2300 from an expert survey." *npj. Clim. Atmos. Sci.* 3, 18. <https://doi.org/10.1038/s41612-020-0121-5>
- Huybrechts, P. (2009) "West-side story of Antarctic ice." *Nature* 458, 295-296. <https://doi.org/10.1038/458295a>
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Pachauri, R.K and Reisinger, A. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.
- IPCC, 2019: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, N.M. Weyer (eds.)]. In press.
- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press. In Press
- Joughin, I., Abdalati, W. and Fahnestock, M. (2004) "Large fluctuations in speed on Greenland's Jakobshavn Isbræ glacier." *Nature* 432, 608-610. <https://doi.org/10.1038/nature03130>
- Joughin, I., Smith, B. M. Medley, M. (2014) "Marine ice sheet collapse potentially under way for the Thwaites Glacier Basin, West Antarctica." *Science* 344, 735-738.
- King, M.D., Howat, I.M., Candela, S.G. et al. (2020) "Dynamic ice loss from the Greenland Ice Sheet driven by sustained glacier retreat." *Commun. Earth. Environ.* 1, 1. <https://doi.org/10.1038/s43247-020-0001-2>
- Lüthje, M., Pedersen, L.T., Reeh, N. et al. (2006) "Modelling the evolution of supraglacial lakes on the West Greenland ice-sheet margin." *Journal of Glaciology* 52(179), 608-618.
- Massom, R.A. Scambos T.A., Bennetts, L.G. et al. (2018) "Antarctic ice shelf disintegration triggered by sea ice loss and ocean swell." *Nature* 558(7710), 383-389. [doi:10.1038/s41586-018-0212-1](https://doi.org/10.1038/s41586-018-0212-1).
- Miles, B. W. J., Jordan, J. R., Stokes, C. R. et al. (2021) "Recent acceleration of Denman Glacier (1972-2017), East Antarctica, driven by grounding line retreat and changes in ice tongue configuration," *The Cryosphere*, 15, 663-676, <https://doi.org/10.5194/tc-15-663-2021>

- “More glaciers in East Antarctica are waking up”, <https://climate.nasa.gov/news/2832/more-glaciers-in-east-antarctica-are-waking-up>  
(검색일: 2021: 08.08)
- Morlighem, M., Rignot, E., Binder, T. et al. (2020) “Deep glacial troughs and stabilizing ridges unveiled beneath the margins of the Antarctic ice sheet.” *Nat. Geosci* 13, 132–137.  
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0510-8>
- Mouginot, J., Rignot, E., and Scheuchl, B. (2014) “Sustained increase in ice discharge from the Amundsen Sea Embayment, West Antarctica, from 1973 to 2013.” *Geophys. Res. Lett.* 41, 1576–1584. doi:10.1002/2013GL059069.
- Parizek, K. B. R., Christianson, S., Anandkrishnan, R. B. et al. (2013) “Dynamic (in)stability of Thwaites Glacier, West Antarctica.” *J. Geophys. Res.* 118, 638–655.
- Reguero, B.G., Losada, I.J. and Méndez, F.J. (2019) “A recent increase in global wave power as a consequence of oceanic warming.” *Nat Commun* 10, 205.  
<https://doi.org/10.1038/s41467-018-08066-0>
- Rignot, E., Mouginot J., Morlighem, M. et al. (2014) “Widespread, rapid grounding line retreat of Pine Island, Thwaites, Smith, and Kohler glaciers, West Antarctica, from 1992 to 2011.” *Geophys. Res. Lett.* 41, 3502–3509.
- Sasgen, I., Wouters, B., Gardner, A.S. et al. “Return to rapid ice loss in Greenland and record loss in 2019 detected by the GRACE-FO satellites.” *Commun Earth Environ* 1, 8 (2020).  
<https://doi.org/10.1038/s43247-020-0010-1>
- Scambos, T.A., Bohlander, J., Shuman, C.U. et al. (2004) “Glacier acceleration and thinning after ice shelf collapse in the Larsen B embayment, Antarctica.” *Geophys. Res. Lett.*, 31(18).
- The IMBIE Team. (2020) “Mass balance of the Greenland Ice Sheet from 1992 to 2018.” *Nature* 579, 233–239.  
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1855-2>
- Thompson, P.R., Widlansky, M.J., Hamlington, B.D. et al. (2021) “Rapid increases and extreme months in projections of United States high-tide flooding.” *Nat. Clim. Chang.* 11, 584–590.  
<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01077-8>
- Wise, M., Dowdeswell, J., Jakobsson, M. et al. (2017) “Evidence of marine ice-cliff instability in Pine Island Bay from iceberg-keel plough marks.” *Nature* 550, 506–510.  
<https://doi.org/10.1038/nature24458>

