

ISSN 2733-7529 (Print)
ISSN 2733-7537 (Online)

POLES & GLOBE

극지와 세계

2024 MARCH
VOL. 01



미래 북극 해빙과
탄소중립정책의 관계

민승기
포항공과대학교

남극의 해빙 감소가 황제펭귄의
멸종위기를 재촉한다

김정훈
극지연구소
생명과학연구본부

「기후변화감시예측법」 등의
제정·개정과 시사점

현대호
한국법제연구원



SNAPSHOT

03p 민승기 포항공과대학교

미래 북극 해빙과 탄소중립정책의 관계

북극 해빙은 전 지구 기후 시스템의 상태를 나타내는 중요한 지시자 중 하나로, 미래에 다가올 변화를 정확히 예측하는 것은 기후변화의 영향 및 적응에 있어 매우 중요하다. 북극 해빙은 면적이 연중 최소인 9월을 기준으로 할 때 지난 수십 년 동안 절반으로 줄어들었다. 최근 연구에 따르면 대부분의 기후모델들이 관측보다 북극 해빙 감소를 작게 모의하고 있으며, 이러한 모델의 과소 모의를 고려할 경우에 미래 북극 해빙은 향후 온실가스 저배출 시나리오에서도 2050년대에 사라질 수 있다고 보고되었다. 또한 고배출 시나리오에서는 2030년대에 북극 해빙이 소멸할 수 있고, 2060년대에는 9월뿐만 아니라 여름철 수개월에 걸쳐 해빙이 없는 상태가 될 수 있음을 경고하였다. 아울러 북극 해빙이 더 빠르게 줄어들면 북극 온난화가 증폭되고 한반도가 속한 중위도 지역에 이상기후가 더 빈번해질 수 있다. 따라서 이러한 피해를 막기 위해서는 더욱 강력한 탄소저감 정책이 필요하다.

06p 김정훈 극지연구소 생명과학연구본부

남극의 해빙 감소가 황제펭귄의 멸종위기를 재촉한다

황제펭귄은 번식을 위해 1년 중 9개월가량을 해빙 위에서 생활하는 종이다. 최근 들어 급격한 지구온난화로 남극에서 해빙이 감소하는 추세에 있으며 황제펭귄이 서식하는 일부 지역에서는 해빙의 유실로 번식에 실패하는 상황이 현실로 다가왔다. 온실가스 배출을 통제하지 못해 지구온난화가 가속된다면 2100년에는 황제펭귄의 약 81%가 사라지게 될 것이다. 파리기후변화협약(Paris Agreement)에 따라 온실가스 배출을 줄이고, 황제펭귄을 남극특별보호종으로 지정하려는 남극조약협약당사국회의 환경보호위원회(ATCM-CEP)의 노력에도 불구하고 일부 회원국들의 이해관계 충돌로 실질적인 환경보존에 대한 조치는 제자리걸음이다. 대한민국은 장보고과학기지를 거점으로 빅토리아랜드의 북부 연안에 있는 황제펭귄 번식지 세 곳에서 장기 모니터링을 수행 중이다. 우리나라의 황제펭귄 연구에 대한 역사는 짧지만 유의미한 결과가 도출되면 ATCM-CEP 및 CCAMLR 등의 국제기구에서 남극의 환경보전 이슈에 선도적으로 대응하고 꾸준한 과학 연구로 남극 환경보호에 실질적으로 기여할 수 있을 것이다.

10p 현대호 한국법제연구원

「기후변화감시예측법」 등의 제정·개정과 시사점

지구상에서 사람들은 기상현상과 기후변화에 따른 자연생태계에 적응할 수밖에 없으며, 이를 위한 법제도로 「기상법」과 「기후변화감시예측법」이 있다. 「기상법」은 한반도에 거주하는 사람들에게 기상현상에 적응할 수 있도록 하는 동시에 「기후변화감시예측법」의 기후변화 감시·예측의 바탕이 된다. 「기후변화감시예측법」은 기후변화의 감시 및 예측을 통한 기후변화 적응을 넘어 「탄소중립기본법」에 따른 기후위기 대응도 지원하는 역할을 하는데, 여기서 기후위기 대응은 사람의 경제활동으로 인해 발생한 탄소의 감축을 의미한다. 「기후변화감시예측법」은 해양과 극지의 기후변화 감시 및 예측도 규정하고 있는데 「기상법」·「해양조사정보법」 및 「극지활동 진흥법」 등과의 관계에서 해석상 어려움이 예상되나, 올해 시행 예정인 「기후변화감시예측법」의 시행령(안)과 시행규칙(안)을 통하여 해소될 것으로 사료된다. 「기후변화감시예측법」과 같은 법 시행령 및 시행규칙의 제정은 기후변화 감시 및 예측에 관한 업무(해양과 극지 포함)를 안정적으로 수행할 수 있는 법제도 기반을 마련한 것으로 볼 수 있으며, 한반도 및 전 지구상에서 나타나는 기후위기 대응 지원도 기대된다. 또한 산림, 농업 등 분야별로 기후변화 감시 및 예측, 적응 등에 관한 법률의 제정 및 개정도 추진되고 있으며, 해양과 극지 분야도 분법될 가능성이 높다.

미래 북극 해빙과 탄소중립정책의 관계



민승기 포항공과대학교

북극 해빙은 전 지구 기후 시스템의 상태를 나타내는 중요한 지시자 중 하나로, 미래에 다가올 변화를 정확히 예측하는 것은 기후변화의 영향 및 적응에 있어 매우 중요하다. 북극 해빙은 면적이 연중 최소인 9월을 기준으로 할 때 지난 수십 년 동안 절반으로 줄어 들었다. 최근 연구에 따르면 대부분의 기후모델들이 관측보다 북극 해빙 감소를 작게 모의하고 있으며, 이러한 모델의 과소 모의를 고려할 경우에 미래 북극 해빙은 향후 온실가스 저배출 시나리오에서도 2050년대에 사라질 수 있다고 보고되었다. 또한 고배출 시나리오에서는 2030년대에 북극 해빙이 소멸할 수 있고, 2060년대에는 9월뿐만 아니라 여름철 수개월에 걸쳐 해빙이 없는 상태가 될 수 있음을 경고하였다. 아울러 북극 해빙이 더 빠르게 줄어들면 북극 온난화가 증폭되고 한반도가 속한 중위도 지역에 이상기후가 더 빈번해질 수 있다. 따라서 이러한 피해를 막기 위해서는 더욱 강력한 탄소저감정책이 필요하다.

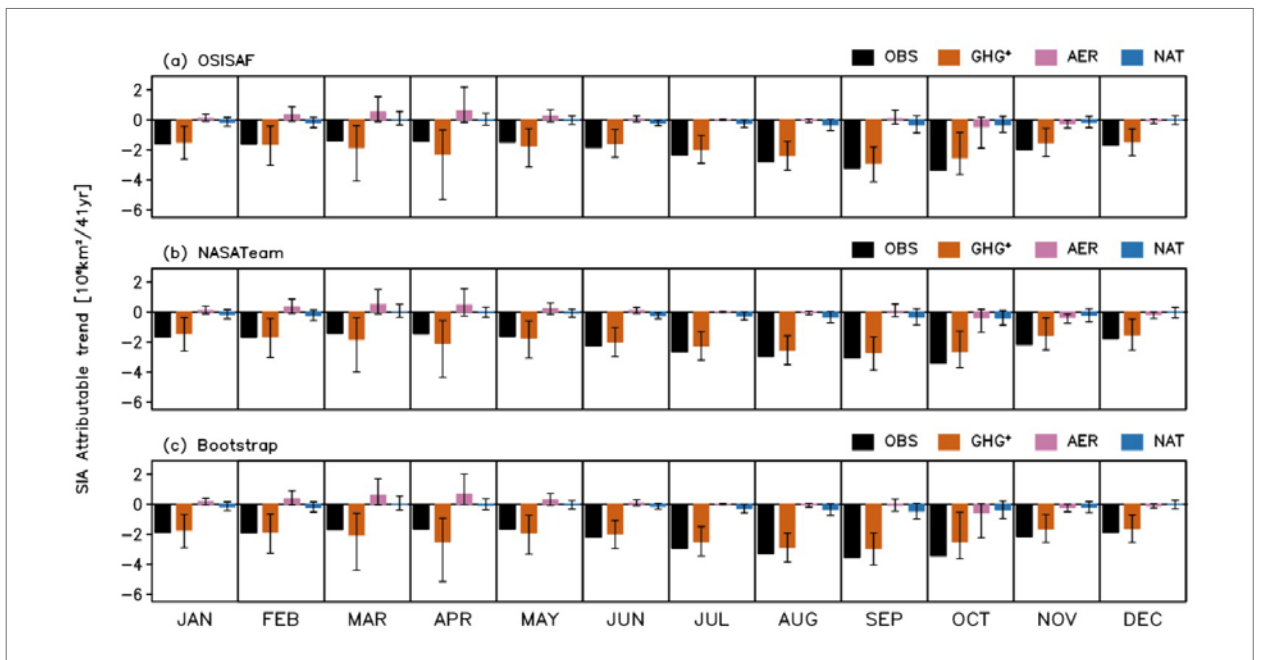
북극 해빙의 전 지구적 중요성

북극 해빙은 지표로 들어오는 태양복사에너지를 반사하고 해양에서 대기로 나가는 장파복사에너지를 차단하여 북극 지역을 차갑게 유지시킨다. 이러한 과정을 통해 북극 해빙은 전 지구 온도의 상승을 막아주는 ‘절연체’ 역할을 하고 있다. 이러한 북극 해빙이 급격히 감소하게 되면 태양복사에너지가 더 많이 유입되면서 ‘북극 증폭’으로 알려진 북극 지역의 온난화 현상이 크게 증가할 것이며 이에 따라 북극권 지역뿐만 아니라 전 지구에 걸쳐 막대한 영향을 줄 수 있다. 위성 관측이 가능한 1979년부터 현재까지 북극 해빙 면적의 변화를 살펴보면, 전 계절에 걸쳐 그 면적이 감소하고 있다. 특히 여름철에 해당하는 8~10월에 매우 큰 폭으로 감소하고 있으며, 10년간 평균 약 12%씩 줄어들어 지난 40여 년간 50% 가까이 줄어든 것

으로 나타났다. 기후변화에 관한 정부간 협의체(IPCC) 6차 평가보고서에 따르면, 북극 해빙은 과거 10년 기간(1979~1988) 대비 최근 10년 기간(2010~2019)에 해빙의 가장자리를 따라 크게 감소하였으며, 온실가스 배출을 급격히 줄이지 않으면 21세기 중반 이전에 연중 해빙이 가장 작은 9월을 기준으로 북극 해빙이 거의 소멸될 것으로 전망하였다.

북극 해빙 감소에 미치는 인위적 온실가스 증가의 영향

미래의 탄소 배출 경로에 따라 북극 해빙이 얼마나 빨리 감소할 것인지를 예측하기 위해서는 과거 관측에 나타난 북극 해빙 감소에 미치는 온실가스 증가의 기여를 정확히 파악하는 것이 중요하다. 기후에 미치는 인간 활동은 온실가스 증가뿐만 아니라 에어로졸 증가도 해당되기 때문에 에어로졸의 영향을 분리



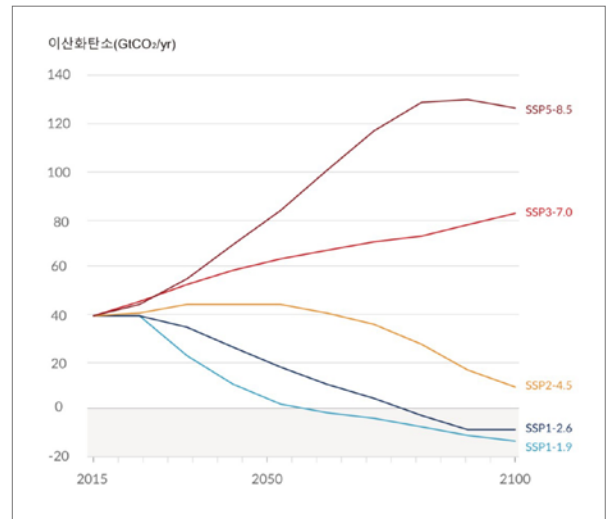
[그림 1] 세 위성 관측(OSISAF, NASATeam, Bootstrap)에 나타난 월별 북극 해빙 감소 추세(1979~2019)와 기후모델에서 예측한 외부강제력별 기여, 검정: 위성 관측 추세, 주황: 온실가스 강제력의 기여, 분홍: 에어로졸 강제력의 기여, 파랑: 자연 강제력(화산 및 태양활동)의 기여. 오차 막대는 강제력별 기여의 90% 신뢰구간을 나타냄. 가로축은 1월부터 12월까지 매월을 나타내며 세로축은 해당 월의 최근 41년간 북극 해빙 면적의 변화 크기(단위: 백만 km^2)를 보여줌. (Kim et al. 2023)

하여 평가해야 하며, 자연적 요인에 해당하는 태양 및 화산 활동의 영향도 함께 고려해야 한다. 그림 1은 지난 41년간 (1979~2019) 월별 해빙 면적의 장기 추세 관측값과 기후모델 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 기후모델 결과들은 각각 온실가스, 에어로졸, 태양 및 화산활동의 관측 변화값을 입력하여 시뮬레이션한 결과이며, 이를 관측과 비교함으로써 북극 해빙 감소에 미치는 개별 요인들의 기여를 파악할 수 있다. 연중 모든 시기에 걸쳐 북극 해빙이 감소하고 있으며, 이러한 관측된 해빙 감소(검은색)의 대부분은 온실가스 증가(주황색)에 의한 것임을 확인할 수 있다. 온실가스의 영향력에 비해 에어로졸(분홍색)과 태양 및 화산활동(파란색)의 영향력은 매우 작게 나타났다. 또한 여름철을 중심으로 대부분 시기에 기후모델에서 예측한 북극 해빙 감소 추세가 실제 관측보다 작은 것을 볼 수 있는데 이는 기후모델이 실제 기후변화의 속도를 재현하지 못하고 있음을 뜻한다. 이러한 기후모델의 문제는 같은 기후모델을 이용한 미래 탄소 배출 시나리오에 따른 시뮬레이션 결과에서도 마찬가지로 나타날 수 있어 이러한 오차를 해결할 수 있는 연구가 필요하다.

탄소 배출 시나리오에 따른 북극 해빙의 변화

온실가스는 한 번 배출되면 평균적으로 100년 이상 대기 중에 머물면서 온실효과를 일으키는데, 장기간 체류하는 특성으로 인해 전 지구의 온난화 규모는 인류가 산업혁명 이후로 배출한 온실가스의 누적량에 비례하게 된다. 또한 전 지구 온도와 누적 배출량이 밀접한 관련성이 있다는 의미는 탄소중립인 ‘넷제로’ 시점까지 지구온난화가 지속된다는 것이다. 현재 전 지구 탄소 배출량은 40 GtCO₂/yr 정도이며, 향후 인류의 기후변화 대응에 따른 온실가스 배출 시나리오를 살펴보면, 고배출 시나리오(SSP5-8.5), 중배출 시나리오(SSP3-7.0, SSP2-4.5)와 저배출 시나리오(SSP1-2.6, SSP1-1.9)가 있다(그림 2). 여기서 SSP 시나리오는 IPCC 6차 평가보고서를 위해 개발된 공통사회경제경로(Shared Socioeconomic Pathway)로서 2100년을 기준으로 복사강제력 강도와 함께 사회 경제적 구조 및 기후변화 완화 및 적응 노력에 따라 5개의 시나리오로 구분된다(표 1). 이 중 21세기 이내에 탄소중립 달성을 가정한 시나리오는

두 가지가 있다. 그중 SSP1-1.9는 2050년대 후반에, SSP1-2.6은 2070년경에 넷제로에 도달하고 그 이후에는 음의 배출을 가정한다. 또한 SSP1-1.9와 SSP1-2.6 시나리오는 21세기 후반에 파리협정의 목표 온도인 산업혁명 이전 대비 지구 온도 1.5도와 2도 증가에 각각 해당한다.

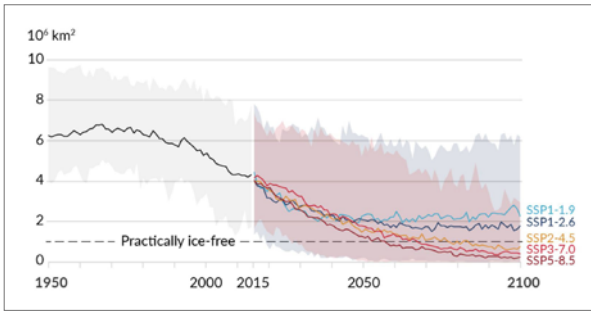


[그림 2] SSP 시나리오별 CO₂ 배출 시계열(IPCC 6차 보고서)

IPCC 6차 보고서에서 제시한 다섯 가지 탄소 배출 시나리오별 북극 해빙의 미래 전망을 살펴보면(그림 3), 연중 해빙 면적이 가장 작아지는 9월을 기준으로 중배출(SSP2-4.5, SSP3-7.0), 고배출(SSP5-8.5) 시나리오에서 2050~2070년대에 북극 해빙이 소멸할 것으로 보고되었다. 여기서 해빙 소멸의 기준은 100만 km²를 이용한다. 한편 저배출 시나리오인 SSP1-1.9와 SSP1-2.6에서는 북극 해빙이 남아 있을 것으로 예측되었고, 파리협정 목표인 1.5도와 2도까지만 증가하는 온난화를 달성한다면 북극 해빙 소멸을 막을 수 있음을 뜻한다(표 1). 하지만 이러한 전망은 위 그림 1에서 설명한 대로 기후모델들이 전반적으로 북극 해빙 감소를 실제보다 작게 예측하는 특성을 고려하지 않은 것으로 실제 북극 해빙은 더욱 빠르게 감소할 수 있다.

종류	설명	산업혁명 이전 대비 전 지구 온도 증가 (2081~2100)
SSP1-1.9	화석연료 사용을 줄이고, 재생 가능 에너지와 효율적인 에너지 사용을 추진하는 경우로 파리협정 1.5도 목표에 상응함	1.4°C
SSP1-2.6	재생에너지 기술 발달로 화석연료 사용이 최소화되고 친환경적으로 지속가능한 경제성장을 이룰 것으로 가정하는 경우	1.8°C
SSP2-4.5	기후변화 완화 및 사회경제 발전 정도가 중간 단계를 가정하는 경우	2.7°C
SSP3-7.0	기후변화 완화 정책에 소극적이며 기술개발이 늦어 기후변화에 취약한 사회구조를 가정하는 경우	3.6°C
SSP5-8.5	산업기술의 빠른 발전에 중점을 두어 화석연료 사용이 많고 도시 위주의 무분별한 개발이 확대될 것으로 가정하는 경우	4.4°C

[표 1] SSP 시나리오 구분(출처: 기상청 기후정보포털, IPCC 6차 보고서)



[그림 3] 탄소 배출 시나리오별 9월 북극 해빙 면적 미래 전망 (IPCC 6차 보고서). 가로 점선은 해빙 소멸의 기준인 100만 km²를 나타냄.

10년 빨라진 북극 해빙 소멸과 그 영향

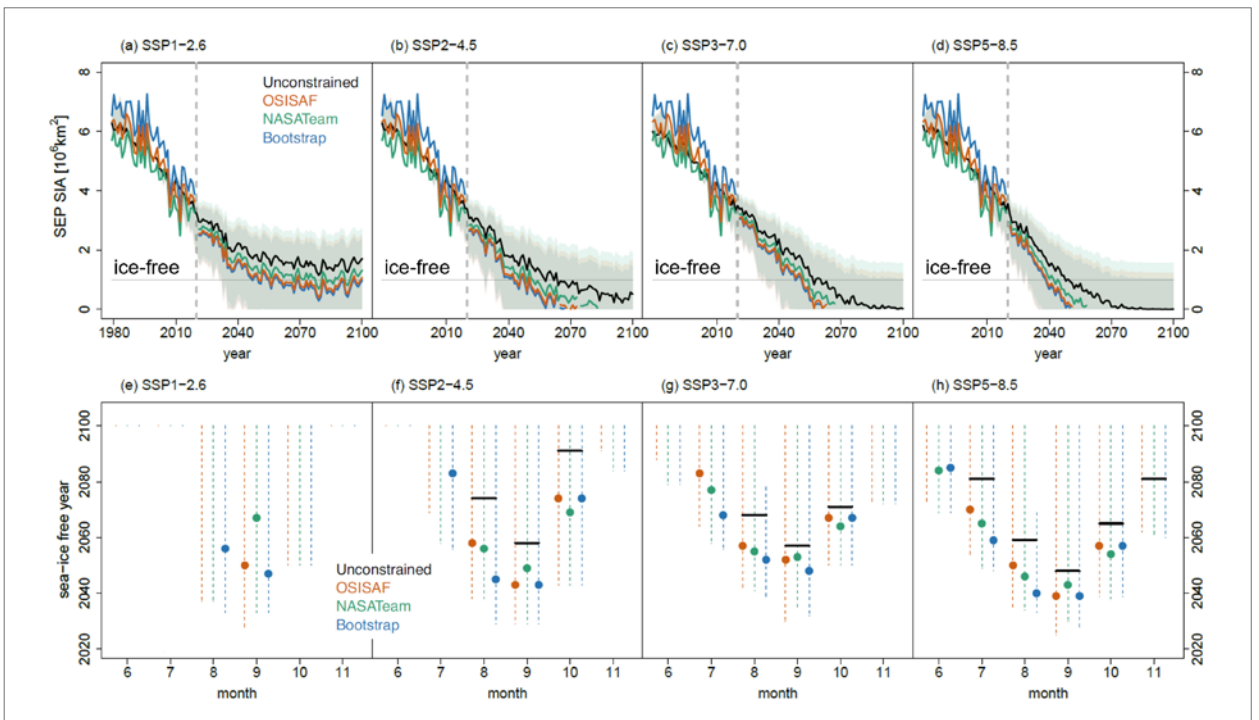
위에서 살펴본 바와 같이 대부분의 기후모델들이 온실가스 증가에 따른 북극 해빙 감소를 관측에 비해 작게 예측하고 있으며 이러한 모델의 특성을 고려하여 미래의 북극 해빙 전망을 새롭게 예측한 결과를 그림 4에 나타내었다. 기후 모델의 북극 해빙 감소 속도를 관측에 맞춰 조정된 결과, 온실가스 저배출 시나리오인 SSP1-2.6에서도 2050년대에 북극 해빙 감소가 나타남을 확인하였다. 또한 중배출(SSP2-4.5, SSP3-7.0), 고배출(SSP5-8.5) 시나리오에서도 기존의 전망보다 10년 정도 빠른 속도로 해빙이 감소하여 고배출 시나리오에서는 2030년대에 북극 해빙이 소멸할 수 있으며, 2060년대에는 여름철 전반(7~10월)에 걸쳐 해빙이 없는 상태가 지속될 것으로 나타났다.

이렇게 북극 해빙이 더 빠르게 줄어들면 검은 바다가 드러나면서 더 많은 에너지를 흡수하게 되어 북극 온난화가 증폭될 것이다. 북극 온난화 증폭이 강해지면 고위도와 저위도 간의

온도 차이가 줄면서 중위도의 대기순환이 요동치게 되며 이에 따라 폭염, 산불, 홍수 등 이상기후 현상이 더 강하고 빈번하게 나타날 수 있다. 또한 해빙이 없는 북극은 해운의 증가로 이어져 더 많은 온실가스 배출과 지역 환경 및 생태계를 파괴할 뿐만 아니라 그린란드 빙상과 영구동토층을 더욱 빠르게 녹여 해수면 상승과 지구온난화를 가속화할 것이다.

이러한 북극 해빙의 급격한 감소로 인한 전 지구적인 피해를 막기 위해서는 더욱 강력한 탄소저감정책이 요구된다. 1.5도 온난화 목표에 해당하는 SSP1-1.9 시나리오에서는 북극 해빙이 남아 있을 것으로 예상되며, 이는 늦어도 2050년대에는 탄소중립을 달성해야 함을 의미한다. 앞으로 보다 정확한 북극 해빙의 미래 전망과 그에 따른 분야별 영향을 평가하고 대응책을 마련하기 위해서는 빙권 지역에 대한 지속적이고 체계적인 관측, 대기-해양-지면-빙권 상호작용에 대한 포괄적인 이해, 그리고 이를 구현할 수 있는 기후모델링 연구가 필수적으로 요구된다. 이와 더불어 우리나라를 포함한 국가별 최신 탄소중립 경로를 실시간으로 반영한 탄소 배출 시나리오를 개발하고, 이를 활용한 북극 지역 기후변화 예측력 확보가 매우 중요한 시점이다.

1) 극 지역에서 온도 변화가 전 지구 평균보다 훨씬 크게 나타나는 현상을 의미한다. 북극 지역에서는 극 증폭의 결과로 온실가스 증가에 따른 온난화 현상이 지구 평균에 비해 두 배 이상 강하게 나타나고 있다.



[그림 4] 북극 해빙 면적의 미래 전망 시계열(위)과 북극 해빙 소멸 시점 전망(아래).

검정: 원래 기후모델 결과, 컬러: 세 가지 위성 관측자료를 이용하여 기후모델의 미래 전망을 보정한 결과. (Kim et al. 2023)



ISSN 2733-7529 (Print)
ISSN 2733-7537 (Online)



발행일: 2024년 3월
발행처: 극지연구소 정책개발실 Tel. 032-770-8453
주소: 인천광역시 연수구 송도미래로 26, 극지연구소 (www.kopri.re.kr)

Copyright© 2014 KOPRI, All rights reserved.
Cover pages photo credit© KOPRI