



보도 희망 일시	☒ 엠바고 없음(즉시)		☐ 엠바고 별도 기재		
연구참여 (문의)	소속	성명	저자구분	연락처	이메일
	서울대학교 지구환경과학부	국종성	교신저자	02-880-6725	jskug @snu.ac.kr
	서울대학교 지구환경과학부	이희지	주저자	010-2257-4251	huiji1129@snu.ac.kr

□ 연구 제목/부제

제목	탄소 중립 늦어지면 남극해 탄소 흡수능력 상실된다 Enhanced carbon loss in the Southern Ocean under mitigation scenarios - 탄소 제거해도 해양 온난화는 지속, 남극해의 강한 바람이 결합해 대기로의 이산화탄소 역방출을 증폭하는 기작 규명-
----	---

□ 연구 요약

연구 필요성	- 남극해는 인간활동으로 배출된 이산화탄소의 막대한 양을 흡수하며 전 지구적 기후 조절에 핵심적인 역할을 해왔으나, 향후 온실가스 감축 노력 이후에도 이러한 탄소 흡수 능력이 유지될 수 있을지는 불확실함 - 기존 연구에서는 대규모 물리적 기후 시스템의 비가역성에 대해서는 비교적 상세히 다루었으나, 기후 완화 정책 이후 뒤늦게 발현될 수 있는 해양 생지화학적 탄소 순환의 '기후 이력 현상'에 대해서는 명확히 규명하지 못해 불확실성이 크게 남아있음 - 최근 다중 모델 평가에서 대기 탄소 제거 시나리오 하에 남극해가 탄소 흡수원에서 배출원으로 바뀔 수 있다는 점이 확인되었으나, 이러한 전환이 왜 일어나는지, 또 어떤 요인이 역방출을 키우는지는 충분히 밝혀지지 않음
-----------	--

연구성과/ 기대효과	▪ 본 연구는 지구시스템모형(CESM2)과 제6차 국제 기후모델 비교 프로젝트(CMIP6) 다중 모델 분석을 통해, 기후변화 완화 이후에도 남극해가 이산화탄소 흡수원에서 배출원으로 전환된다는 사실을 밝힘 ▪ 대기 중 탄소 농도가 감소하는 기후 완화 시기에도 남극해 지역에 지속되는 '해수면 온도 상승'과 전 지구적인 '표층 알칼리도 감소'가 해양의 이산화탄소 분압($p\text{CO}_2$)을 대기보다 높게 역전시켜 탄소 재방출을 촉발함을 규명함 ▪ 특히 남극해 특유의 거센 서풍과 높은 이산화탄소 용해도로 인해 형성된 '높은 가스 교환 계수'가 해양과 대기의 분압차이를 크게 증폭시켜, 이 지역의 강력한 탄소 역방출 지대로 만드는 핵심 요인임을 정량적으로 검증함 ▪ 본 연구는 대기 탄소를 적극적으로 제거하더라도, 남극해 특유의 물리-기후적 조건으로 인해 시간이 지날수록 해양의 이산화탄소 방출이 오히려 커질 수 있으며, 이로써 전 지구적인 장기 기후 완화 노력의 효과가 일부 상쇄될 가능성을 경고함 ▪ 향후 미래 탄소 순환 전망의 신뢰도를 높이고 굳건한 기후 정책을 수립하기 위해서는, 기후모델 내에서 남극해 지역의 가스 교환 요인 및 해양 생지화학적 과정을 보다 정밀하게 모의하는 것이 중요함을 제시함
Abstract (영문)	Professor Kug's team at Seoul National University has identified a critical mechanism driving enhanced carbon loss in the ocean: the transition of the Southern Ocean from a CO_2 sink to a significant source. Even under active climate mitigation scenarios, such as zero and negative emissions, their study shows that the Southern Ocean increasingly outgasses CO_2, indicating that the present-day carbon sink may lose its effectiveness. The researchers found that a persistent regional increase in sea surface temperature (SST) combined with a globally uniform decline in surface alkalinity maintains elevated oceanic CO_2 partial pressure ($p\text{CO}_2$), eventually reversing the air-sea $p\text{CO}_2$ gradient. Moreover, this CO_2 outgassing is amplified by the Southern Ocean's high climatological gas-transfer coefficient, which is primarily driven by the region's strong westerly winds and high CO_2 solubility. The synergy between the warming ocean and these strong physical marine conditions sustains carbon release despite declining atmospheric CO_2 levels. Using idealized emission-driven simulations with the Community Earth System Model version 2 (CESM2), the team demonstrated that substituting the region's high gas-transfer coefficient with a global mean value substantially weakens the projected CO_2 release, underscoring its central amplifying role. These findings highlight that accurately representing regional environmental controls on the gas transfer coefficient and biogeochemical processes in climate models is essential for reliable projections of the future ocean carbon cycle, with important implications for assessing the long-term effectiveness of climate policy and carbon dioxide removal strategies.

연구 추진 배경, 성과, 기대효과 등	The Southern Ocean (SO) plays a pivotal role in the global carbon cycle by absorbing anthropogenic CO₂. Yet, it remains uncertain whether this role will persist under future mitigation efforts. Using idealized emission-driven simulations with the Community Earth System Model version 2 (CESM2), we find that the SO transitions from net CO₂ sink to a significant source during zero and negative emissions phases. This outgassing stems from a persistent regional increase in sea surface temperature and a globally uniform decline in surface alkalinity. Together, these changes maintain elevated oceanic pCO₂ despite decreasing atmospheric CO₂, reversing the air-sea pCO₂ gradient (dpCO₂). Moreover, the SO exhibits a high climatological gas-transfer coefficient, primarily driven by the region's strong wind speeds and high CO₂ solubility, which amplifies the dpCO₂-driven flux and enhances CO₂ outgassing. These results indicate that the present-day SO CO₂ sink may lose its effectiveness during climate mitigation, emphasizing the need to consider regional feedbacks for long-term climate policy effectiveness.
Journal Link	https://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.aee9228

□ 본문

연구 내용	□ 탄소배출 감축에도 불구하고 새롭게 드러나는 남극해 탄소 역방출 위험 ○ 지구시스템모형(CESM2) 기반의 이상화된 탄소 배출 감축 및 제거 실험에서, 대기 중 CO₂ 농도가 초기 수준으로 회복되거나 감소함에도 불구하고 남극해는 기존 탄소 흡수원에서 순 탄소 배출원으로 전환될 수 있음을 확인함 (그림 1) ○ 해양의 이산화탄소 분압 (pCO₂) 변화 기여도 분석 결과, 남극해의 지속적인 해수면 온도 상승과 전 지구적 표층 알칼리도 감소가 해양의 pCO₂를 대기보다 높게 유지해 이산화탄소 방출을 유도하는 주된 원인으로 나타남. 즉 대기 중 탄소 농도가 낮아져도 바다가 품은 열과 화학적 변화가 탄소 역방출을 지속시킬 수 있음 (그림 1) □ 감축 뒤에도 지속되는 해양 내부 열 방출 및 생지화학적 변화 ○ 탄소 배출을 줄인 뒤에도 해양 내부에 축적된 열이 방출되면서, 남극해 해수면 온도 상승이 지속되고, 식물성 플랑크톤에 의한 ‘알칼리도 갇힘 (Alkalinity trapping)’ 현상과 해양 성층화가 겹치면서 표층 알칼리도가 전 지구적으로 감소함 (그림 2) ○ 특히 남극해는 거센 서풍과 높은 CO₂ 용해도로 인해 기후학적 가스교환계수가 전 지구 평균보다 높은 상태임. 이 고유적 특성 때문에 해양 온난화와 알칼리도 저하가 만든 작은 해양과 대기의 pCO₂ 차이 (dpCO₂)의 역전만으로도 대기 중 이산화탄소 방출로 크게 증폭이 됨 (그림 3) □ 남극해의 강한 가스 교환 증폭 효과의 정량적 검증 및 다중 모델 확인 ○ 남극해의 가스 교환율의 영향을 정량적으로 검증하기 위해 남극해, 해당 지역의 가스 교환 계수를 전 지구 평균값으로 대체해 다시 계산한 결과, 남극해의 누적 탄소 방출
--------------	--

	량이 대폭 감소하거나 흡수 상태를 유지하는 것으로 나타남 (그림 3) ○ 이는 남극해의 고유의 물리적 환경 (강한 바람과 높은 용해도)이 기후 완화 시기 이산화탄소 역방출을 키우는 핵심적인 증폭 요인임을 증명함 ○ 또한, ZECMIP (탄소 중립 모형 상호비교 프로젝트)의 CMIP6 다중 모델 분석에서도 배출 중단 이후 남극해의 탄소 방출이 점차 강화되는 패턴이 일관되게 확인됨. 다만, 방출 규모의 시점에는 모델별 차이가 있어 정밀 관측과 모형 개선이 필요함. □ 미래 기후 전망 정확도 향상 및 기후 정책을 위한 함의 ○ 현재 기후모델들은 남극해 탄소 흡수량 및 생지화학적 반응 (특히 알칼리도 변화)에 측에 있어 편차가 크며, 이는 미래 해양 탄소 순환 전망의 주요 불확실성 요인임 ○ 본 연구는 탄소제거 정책 이후에도 해양의 자연 반응이 장기 감축 효과를 일부 상쇄할 수 있음을 보여줌. 따라서 더 이른 감축과 함께 남극해 탄소 피드백을 탄소제거 전략과 기후정책 설계에 반영할 필요가 있음 ○ 이는 탄소 제거 목표를 포기하지는 것이 아닌, 그 목표를 실제 달성하기 위해 더 빠른 감축과 더 촘촘한 해양 관측 및 정교한 기후모델이 필요하다는 메시지를 전달함. 또한, 신뢰도 높은 장기 전망을 위해 남극해서 가스 교환과 복잡한 생지화학 과정을 정밀하게 모사하고, 알칼리도 등 해양 탄산염 시스템의 장기 관측망을 확보해야 함
연구 결과	Enhanced carbon loss in the Southern Ocean under mitigation scenarios Huiji Lee(이희지), Jong-Seong Kug*, Yechul Shin*, Dong-Geon Lee, Nadine Goris, Friederike Fröb, Jerry F.Tjiputra, Timothée Bourgeois, and Jörg Schwinger (<i>Science Advances</i>, published) 탄소 배출 저감 노력에도 불구하고 남극해가 기존에는 이산화탄소를 흡수하는 대신 대기로 방출하는 방향으로 전환될 수 있음을 보여준다. 이 과정에서 해수면 가열과 높은 가스 교환율의 시너지가 핵심적인 역할을 한다. 대기 중 이산화탄소 농도가 감소하는 시기에도 멈추지 않는 지역적인 해수면 온도 상승과 전 지구적인 표층 알칼리도 감소는 해양의 이산화탄소 분압($p\text{CO}_2$)을 대기보다 높게 역전시킨다. 여기에 남극해 고유의 거센 바람과 높은 용해도로 인해 형성된 높은 가스 교환 계수가 맞물리면서, 대기로의 이산화탄소 역방출을 크게 증폭시킨다. 지구시스템모형 (CESM2) 시뮬레이션을 통해 남극해의 가스 교환 계수를 전 지구 평균으로 바꾸어 계산할 경우 예상되는 탄소 방출량이 대폭 감소함을 확인함으로써, 해당 물리적 기작이 갖는 결정적인 증폭 역할을 증명하였다. 본 연구는 감축을 늦출수록 해양의 자연 반응이 장기 기후 완화 효과를 일부 상쇄할 수 있음을 뜻한다. 또한 장기 기후 정책과 탄소 제거 전략을 평가할 때 남극해의 지역적 가스 교환과 생지화학적 자연 반응을 정밀하게 고려해야 함을 보여준다.
용어 설명 (선택)	※ 이산화탄소 분압 차이 (Air-sea $p\text{CO}_2$ gradient; $dp\text{CO}_2$) 대기 중의 이산화탄소 분압과 해양 표층의 이산화탄소 분압 간의 차이. 해양 표층의 온난화 등으로 인해 바다의 이산화탄소 분압이 대기보다 높아져 이 차이가 양수(+)로 역전되면, 혼합기체 내에서 압력이 높은 곳에서 낮은 곳으로 흐르듯 바다가 대기로 탄소를 방출하게 됨.

※ 가스 교환 계수 (Gas Transfer Coefficient)

해양과 대기 사이의 가스 교환이 얼마나 활발하게 일어나는지를 나타내는 지표. 풍속에 의해 결정되는 가스 교환 속도와 해수의 이산화탄소 용해도의 곱으로 산출됨.

※ 기후 이력 현상 (Climate Hysteresis)

대기 중 이산화탄소 농도가 줄어들며 기후가 회복되는 과정이 대기 중 이산화탄소가 증가할 때의 경로를 그대로 역순으로 따라가지 않고 다르게 나타나는 지연 현상.

※ 알칼리도 갇힘 (Alkalinity Trapping)

해양 식물성 플랑크톤 등이 생물학적 펌프 작용을 통해 탄산칼슘(CaCO_3)을 형성한 뒤 심해로 가라앉으면서, 바다 표층의 알칼리도가 깊은 곳으로 이동해 갇히는 현상.

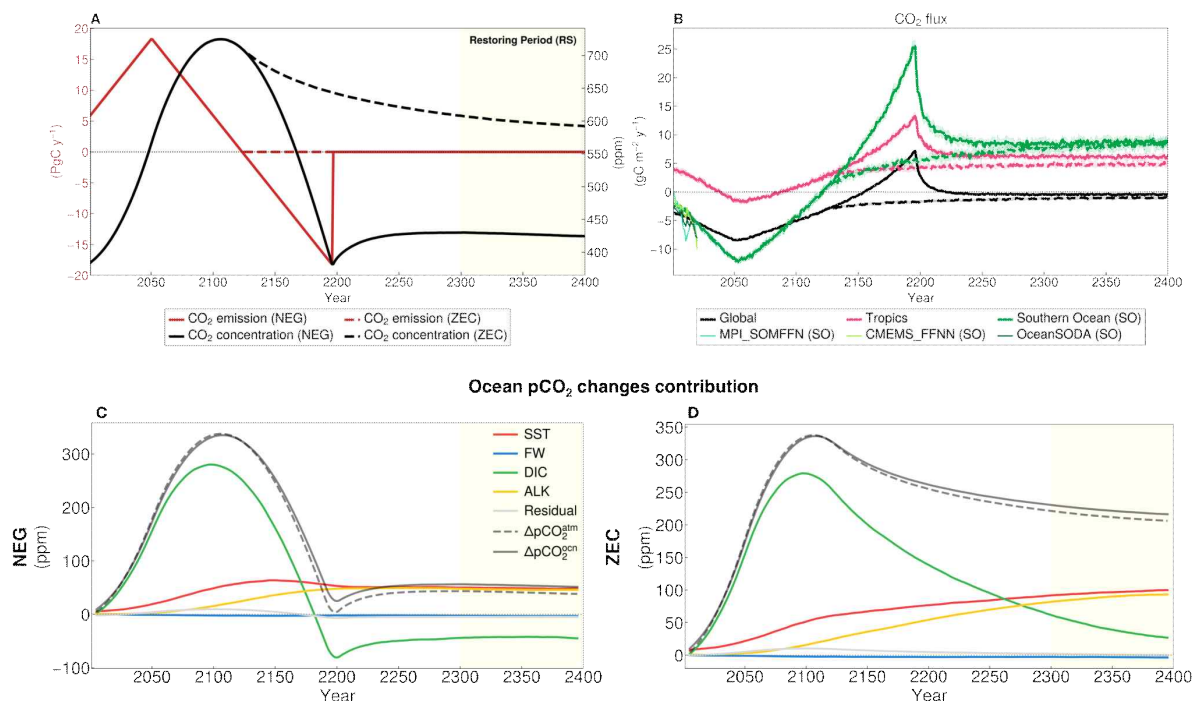


그림 1 | (A) 두 가지 이산화탄소 배출량 경로 (빨간색 선)–Net negative emission:NEG (실선), zero emission:ZEC (점선) 및 대기 CO₂ 농도 시계열 (검은색 선). (B) 지역별 해양-대기 이산화탄소 플럭스 시계열. 전 지구(검은색), 열대 해역(분홍색), 남극해(초록색)의 연평균 CO₂ 플럭스 변화. 음영은 모델 간 편차를 뜻하며, 얇은 초록색 선은 관측 자료 기반의 과거(2001-2020년) 남극해 플럭스를 나타냄. (C-D) 각 시나리오에 따른 남극해 해양 이산화탄소 분압(pCO₂) 변화의 요인별 기여도 시계열. 검은색 실선과 점선은 각각 해양 및 대기의 이산화탄소 분압 변화량을 뜻한다. 색상이 있는 선은 SST(빨간색), 표층 용존무기탄소(DIC, 초록색), 표층 총알칼리도(ALK, 노란색), 담수(FW, 파란색)가 해양 pCO₂ 변화에 미친 기여도를 나타낸다. 용존무기탄소와 알칼리도는 0-100m 상층 해양 평균값을 기준 염분 35 psu로 정규화한 값이다.

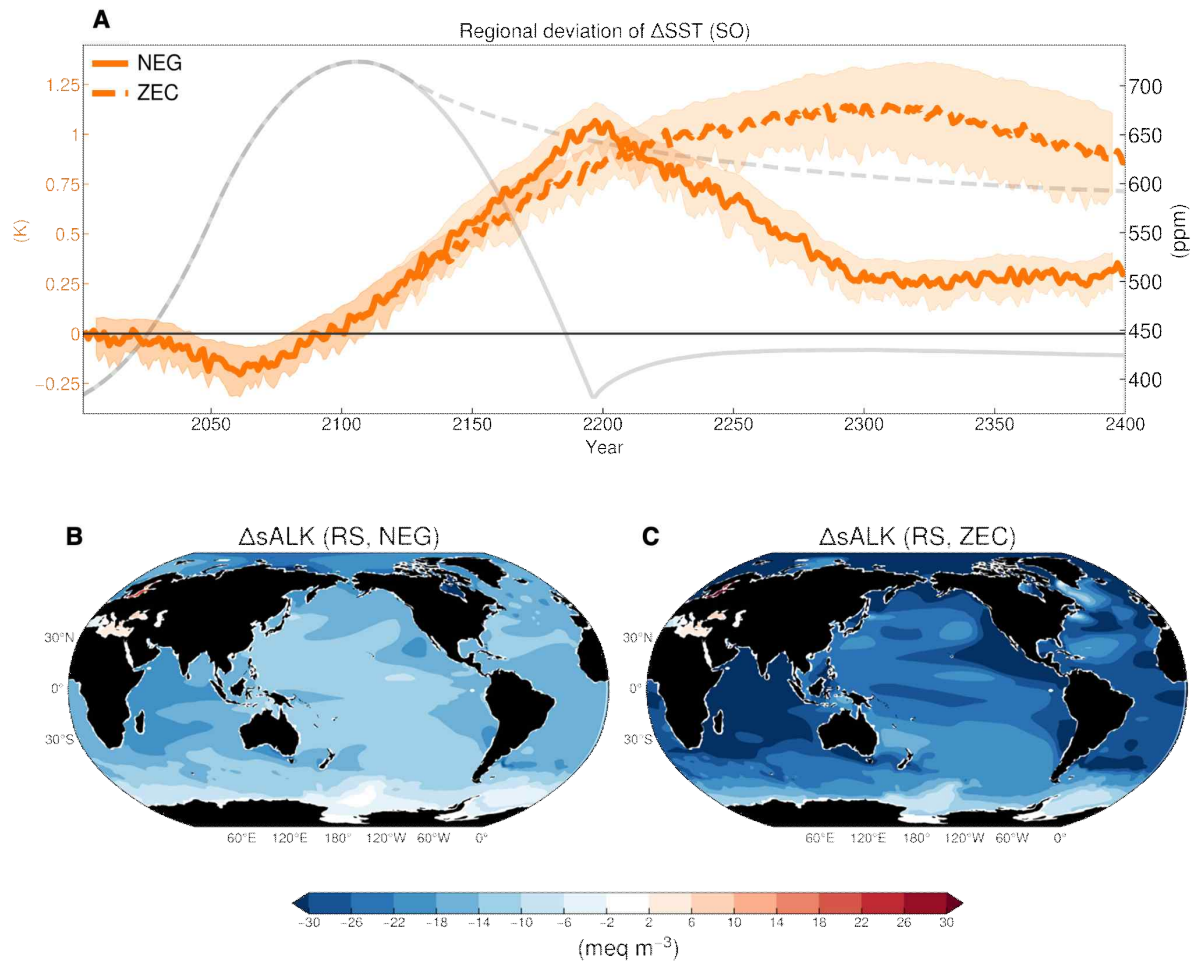


그림 2 | (A) 전지구 평균 대비 남극해 (SO) 해수면 온도 (SST) 편차의 시계열 변화. 실선과 점선은 각각 NEG 및 ZEC 실험의 앙상블 평균을 의미하며, 음영은 모델 간 편차를 나타낸다. 0을 가리키는 검은색 선은 남극해의 온도 변화가 전 지구 평균과 동일함을 의미한다. 회색선 우측 (y축)은 각 실험의 대기 CO₂ 농도 변화를 보여준다. (B-C) 표층 염분 정규화 알칼리도 (sALK) 변화의 공간분포. 실험 초기 (2001-2005년 평균) 대비 회복기 (RS, 2300-2400년 평균)의 표층 알칼리도 변화량이며, 알칼리도는 상층 해양 (0-100m)의 평균값을 기준 염분 (35 psu)으로 정규화하여 산출한다.

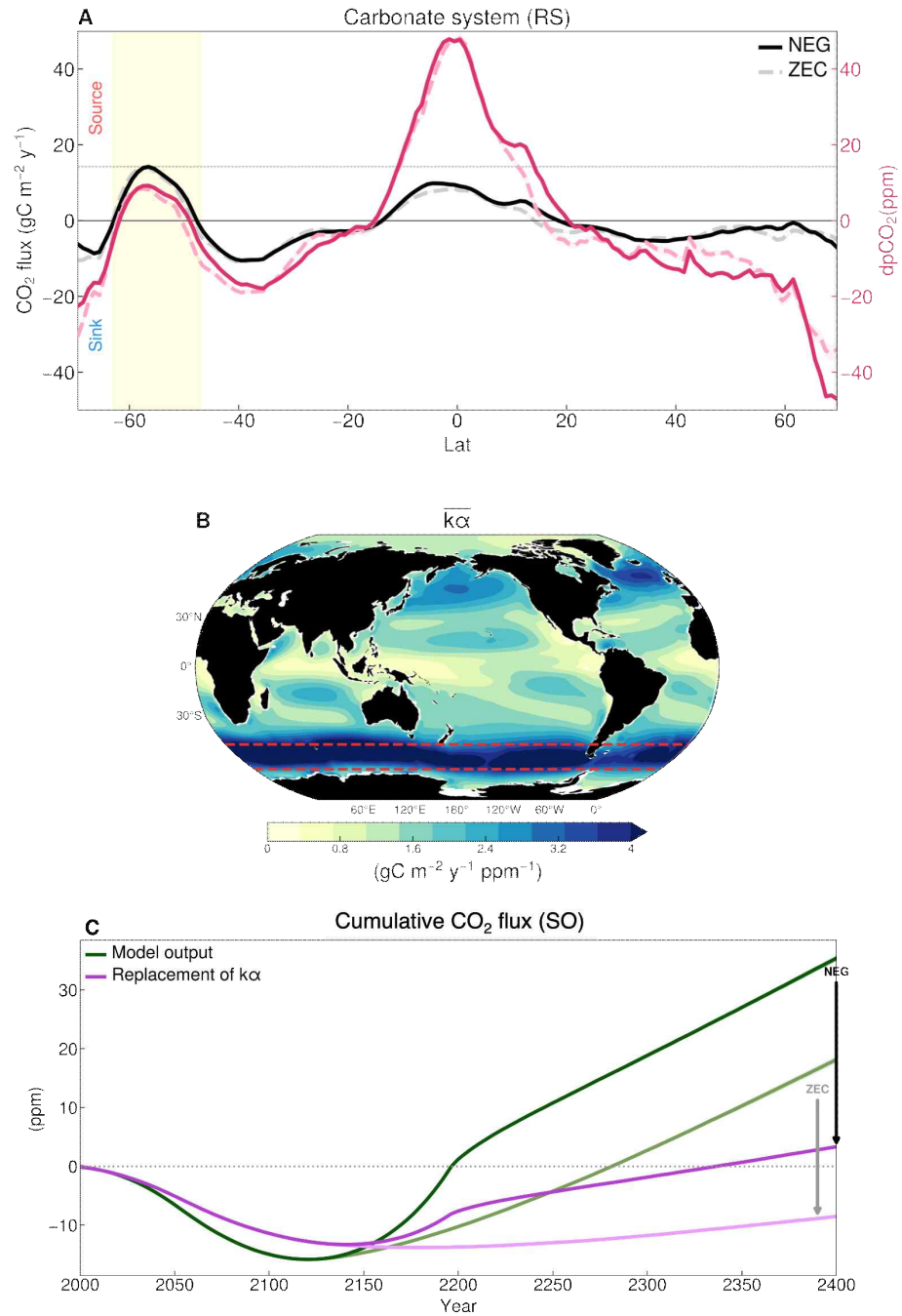


그림 3 | (A) 각 실험의 마지막 100년(회복기, RS) 평균 위도별 CO₂ 플럭스(CO₂ flux, 검은색) 및 이산화탄소 분압차이(dpCO₂, 분홍색). 실선은 NEG 시나리오, 점선은 ZEC 시나리오를 나타내며, 노란색 음영은 남극해 범위를 나타낸다. (B) 실험 초기 5년 평균 기후학적 가스 교환 계수 ($\overline{k\alpha}$). 빨간색 점선은 남극해 경계를 의미한다. (C) 남극해 누적 이산화탄소 플럭스에 대한 가스 교환 계수 민감도 평가. 남극해 누적 CO₂ 플럭스 (ppm 단위 환산)의 시계열 변화이며, 초록색 선은 모델에서 모의된 기존 누적 CO₂ 플럭스 (진한 초록: NEG, 연한 초록: ZEC)을 나타내며, 보라색 선의 경우 가스 교환 계수를 전 지구 평균값으로 대체하여 재산출한 누적 CO₂ 플럭스이다 (진한 보라: NEG, 연한 보라: ZEC).