

총 설

태양 지구공학의 현황과 전망

Current Status and Perspectives of Solar Geoengineering

김세빈^{1),2),†}, 신현서^{1),2),†}, 권태희¹⁾, 조예원^{1),2)}, 정석희^{1),*}

¹⁾전남대학교 환경에너지공학과 광주캠퍼스,

²⁾전남대학교 바이오에너지공학과 광주캠퍼스

Sebin Kim^{1),2),†}, Hyeonseo Shin^{1),2),†}, Taehee Kwon¹⁾, Yewon Cho^{1),2)},
Sokhee P. Jung^{1),*}

¹⁾Department of Environment and Energy Engineering, Chonnam National University,
Gwangju, Republic of Korea

²⁾Department of Bioenergy Science and Technology, Chonnam National University,
Gwangju, Republic of Korea

접수일 2026년 4월 2일
수정일 2026년 6월 30일
채택일 2026년 7월 13일

Received 2 April 2026
Revised 30 June 2026
Accepted 13 July 2026

[†]These two authors contributed
equally to this work as co-first authors.

*Corresponding author

Tel : +82-(0)62-530-1857

E-mail : sokheejung@chonnam.ac.kr

Abstract The rapid climate change in the Earth system is recognized as a global crisis, and scientific and policy efforts to address it are ongoing. With the surge in greenhouse gas emissions since industrialization, the average global temperature reached $1.55 \pm 0.13^\circ\text{C}$ above the 1850~1900 average in 2024, marking the warmest year in 175 years of observational record (WMO, 2025). Against this backdrop, solar geoengineering is emerging as a potential supplementary response. Solar geoengineering refers to Solar Radiation Modification (SRM) techniques that reduce the amount of sunlight entering the Earth to lower the planet's temperature. Some SRM approaches, particularly stratospheric aerosol injections, are expected to affect global temperature relatively rapidly, potentially within months to about a year after deployment (Robock *et al.*, 2009). The major techniques include: 1) Stratospheric Aerosol Injection (SAI), 2) Marine Cloud Brightening (MCB), 3) Cirrus Cloud Thinning (CCT), 4) Space-Based Sunshades, and 5) Surface Albedo Modification (SAM). Current research primarily focuses on evaluating the potential effects and risks through climate modeling and natural observations. Along with the potential benefit of mitigating short-term climate emergencies, various potential side effects are raised, including continued ocean acidification, regional precipitation changes, ozone layer damage, ecosystem disruption, and termination shock. For actual implementation, the following are essential: 1) scientific and technical verification, 2) establishment of international norms and governance, and 3) securing ethical and social acceptability. This research aims to seek necessary response strategies for the era of climate crisis by comprehensively examining the scientific basis of solar geoengineering and the associated social discourse.

Key words: Stratospheric aerosol injection, Marine cloud brightening, Cirrus cloud thinning, Space-based sunshades, Surface albedo modification

1. 서 론

지구 온난화로 인한 기후 위기는 전 인류가 직면한 가장 심각한 환경 문제 중 하나로, 이미 다양한 가시적 피해를 초래하고 있다. 최근에는 전 세계적으로 폭염, 가뭄, 산불, 집중호우와 홍수 등 극단적인 기후 현상이

빈번해지면서 사회적, 경제적 피해가 심화되고 있다. 산업혁명 이후 화석연료 중심의 에너지 사용은 대기 중 온실가스 농도를 급격히 증가시켜, 2024년 전 지구 평균 지표면 온도는 1850~1900년 평균 대비 $1.55 \pm 0.13^\circ\text{C}$ 높아, 175년 관측 역사상 가장 더운 해로 기록되었다(WMO, 2025). 다만 이는 단일 연도 기준이며,

파리협정이 규정하는 장기 온도 목표 달성 실패를 의미하지는 않는다. 특히 기후 취약성이 높은 저위도 개발도상국(이른바 Global South)을 중심으로 빙하와 해빙의 감소, 생태계 변화, 해수면 상승 등 다양한 환경적 변화가 가속화되고 있으며, 기후변화의 영향은 이제 대부분의 인류가 직접 체감할 정도에 이르렀다.

국제사회는 파리협정을 비롯한 다양한 협약을 통해 지구 평균기온 상승을 1.5°C 이내로 억제하고자 노력하고 있으나, 각국의 이해관계 충돌, 정책 이행 지연, 기술적 제약 등으로 인해 목표 달성 가능성은 점차 낮아지고 있다. 또한 최근 연구에서는 기존 감축 전략이 지닌 구조적 한계까지 지적하고 있다.

재생에너지 확대와 화석연료 감축은 기후변화 완화의 핵심 전략이다. 다만 전력계통 유연성, 저장기술 확대, 송배전망 보강, 정책 및 투자의 불확실성 등 시스템 통합의 난제가 여전히 존재하며, 이로 인해 저탄소 전환의 속도와 지역별 이행 수준에는 차이가 나타나고 있다. 기술적 여건 속에서 화석연료 사용을 완전히 배제하기는 어려우며, 결과적으로 대기 중 이산화탄소 배출이 당분간 지속될 수밖에 없음을 시사한다(Lee et al., 2022).

현재의 정책과 국가감축목표만으로는 1.5°C 경로와 상당한 격차가 존재하며, 이에 따라 추가적인 대응수단에 대한 관심이 확대되고 있다. 그러나 이러한 논의는 감축과 적응의 필요성을 약화시키는 방향이 아니라, 기존 대응의 한계를 보완적으로 검토하는 방향에서 이루어져야 한다. 이에 따라 IPCC를 비롯한 국제학계는 온실가스 저감과 더불어 기후 시스템에 직접 개입하여 지구 온도를 낮추는 기술적 접근을 검토하기 시작했으며, 이러한 흐름 속에서 ‘지구공학(Geo-engineering)’이 보완적 대안으로 주목받고 있다.

지구공학은 지구 온난화를 막기 위해 기후 시스템을 인위적으로 조절하거나 제어하는 과학 기술 분야로, 크게 두 가지 범주로 구분된다. 첫째는 대기 중 이산화탄소와 같은 온실가스를 줄이는 이산화탄소 제거 기술(Carbon Dioxide Removal, CDR), 둘째는 지구로 들어오는 햇빛의 양을 줄여 지구의 온도를 낮추는 태

양복사 관리(Solar Radiation Management, SRM)이다. 본 연구에서는 ‘태양 지구공학(Solar Geoengineering)’과 SRM을 동일한 개념으로 사용하며, 이후에는 편의상 SRM으로 통칭한다. CDR은 순배출 제로 달성에 필요한 요소로 평가되지만, 대규모 확장에는 시간·비용·인프라 제약이 따른다. 이에 따라 SRM은 감축과 CDR을 대체하는 수단이 아니라, 제한적 보완 가능성을 둘러싸고 논의되는 기술군으로 부상하고 있다. 따라서 본 연구는 SRM에 대한 논의를 중점적으로 다루고자 한다.

SRM은 대기 중 온실가스 농도를 직접 감소시키지 않고, 태양복사 에너지의 일부를 반사하거나 차단하여 지구의 복사 에너지 수지를 조절함으로써 기온 상승을 완화하려는 기술이다. 지표면이나 대기 상층부의 알베도(반사율)를 증가시켜 음의 복사강제력을 유도하고, 순 복사강제력을 감소시키는 방식으로 작동한다. 복사강제력은 외부 요인에 의해 대기 상단(TOA; top of atmosphere)에서 발생하는 순 복사 에너지 변화(W/m^2)를 의미하며, 양의 복사강제력은 온난화 경향을, 음의 복사강제력은 냉각 경향을 유도한다. 이는 태양 상수($\sim 1,361 W/m^2$)와 구형 지구의 단면적 비율을 고려한 기본 복사수지 계산에 근거한 것으로(Arias et al., 2021), 행성 알베도가 0.005 증가할 경우 약 $-1.7 W/m^2$, 0.01 증가 시에는 약 $-3.4 W/m^2$ 에 해당하는 복사강제력 변화가 유도될 수 있다.

특히 SAI와 같은 성층권 개입 방식은 배치 후 수개월에서 약 1년 이내에 지구 평균기온을 낮출 수 있는 빠른 냉각 효과를 지닌 것으로 기후모델 연구를 통해 제시되고 있으며(Robock et al., 2009), 탄소 감축·적응·복원 정책이 충분히 작동하기 전까지 일시적으로 기후 안정성을 유지하는 보완적 역할을 수행할 수 있다. 그러나 이 기술은 대규모 기후 시스템에 인위적으로 개입한다는 점에서 부작용과 불확실성을 동반한다. 예전대 SAI는 온도 저감 효과가 있는 반면, 강수 패턴 교란 및 오존층 손상 가능성이 제기되고 있다. 이러한 불확실성은 SRM이 단순한 기술적 대안이 아니라, 과학적 검증과 사회적 논의가 병행되어야 할 복합적 연

구 대상임을 보여준다.

본 연구는 SRM의 현황과 전망을 학문적, 정책적, 사회적 측면에서 종합적으로 고찰함으로써 기술의 잠재력과 한계를 균형 있게 조망하는 것을 목적으로 한다. 첫째, 학문적 측면에서 SRM의 원리, 효과, 잠재적 위험요인을 체계적으로 정리함으로써 향후 심화 연구의 방향을 제시하는 기초 자료를 제공하고자 한다. 둘째, 정책적 측면에서는 SRM의 국제 거버넌스 구축 필요성과 윤리적, 외교적 쟁점을 검토함으로써 단기적 효과와 장기적 위험 간의 정책적 균형을 모색한다. 셋째, 사회적 측면에서는 SRM에 대한 대중의 인식과 이해를 확산시켜 기후위기 대응 방안에 대한 공론의 장을 확대하는 데 기여한다.

2. 태양 지구공학의 배경

2.1 기술 태동 배경

SRM에 대한 논의는 20세기 중반부터 시작되었으며, 초기 아이디어로부터 기후 위기 대응 수단으로 본격 검토되기까지 수십 년에 걸친 학문적 발전 과정을 거쳐 왔다. 이와 관련된 최초의 정책 문헌은 1965년에 등장하였는데, 미국 대통령 과학자문위원회 보고서 『Restoring the Quality of Our Environment』는 지구의 알베도를 높여 복사수지를 조절하는 방안을 제시하며 대양 표면의 반사를 증대 및 고층 권운 조절 가능성을 언급하였다(PSAC, 1965).

이후 Budyko (1977)는 성층권 에어로졸 주입의 기반이 된 화산 분출의 냉각 효과를 모방한 개념을 제안하였으며(Budyko, 1977), Early (1989)는 태양-지구 라그랑주 제1점(L1) 부근에 우주 기반 차광체를 배치하는 개념을 제시하였다(Early, 1989). Latham (1990)은 해양 층적운(marine stratocumulus)의 알베도를 높이는 해양 구름 밝히기 구상을 최초로 제안하였다(Latham, 1990). 추후 2009년에는 권운의 온실효과를 줄여 지구의 장파복사 방출을 증가시키는 권운 얇게 하기(Cirrus Cloud Thinning, CCT)가 제안되었으며, 이는 통상적인 태양복사 차단형 SRM과는 다소 구별

되는 복사조절 접근으로 이해하는 것이 더 정확하다(Mitchell and Finnegan, 2009).

SRM 연구가 본격화된 결정적 계기는 1991년 피나투보 화산 분화였다. 당시 약 17 Mt의 SO₂가 성층권으로 주입되어 황산염 에어로졸층이 형성되었고, 북반구에서 최대 0.5~0.6°C, 전 지구적으로도 유의한 단기 냉각 효과가 관측되었다(NASA, 2021; Newhall *et al.*, 1997). 이 사건은 성층권 에어로졸이 태양복사를 산란·반사함으로써 실질적인 기후 냉각 효과를 유발할 수 있음을 자연 실험(natural analogue)으로 입증하였으며, 이를 계기로 SAI 기반의 SRM이 중요한 연구 주제로 부상하였다.

2.2 기후 위기 대응에서 태양 지구공학이 지니는 의미

앞서 살펴본 역사적 흐름에서 알 수 있듯이, SRM은 기후위기 대응의 주류 전략인 온실가스 감축 및 CDR을 대체하기 위해 등장한 기술이 아니다. 오히려 기존 감축 대응만으로는 단기적 기후 위험을 충분히 낮추기 어려울 수 있다는 우려 속에서, 그 보완 가능성을 둘러싸고 논의되는 기술군으로 자리매김해 왔다. 특히 SAI와 같은 성층권 개입 방식은 배치 후 수개월에서 약 1년 이내에 지구 평균기온을 낮출 수 있는 빠른 냉각 효과를 지닌 것으로 기후모델 연구를 통해 제시되고 있으며(Robock *et al.*, 2009), 탄소 감축, 적응, 복원 정책이 충분히 작동하기 전까지 일시적으로 기후 안정성을 유지하는 보완적 역할을 수행할 수 있다. 그러나 근본적인 해결책인 온실가스 감축을 대체할 수는 없으며, 기후 시스템과 사회 시스템 모두에 복합적 영향을 미치기 때문에 신중한 과학적 검증과 국제적 거버넌스 구축이 선행되어야 하는 기술임을 인식할 필요가 있다.

또한 SRM은 인간이 지구 전체를 관리 가능한 시스템으로 보고 직접적으로 기후 시스템에 개입하려 한다는 점에서 새로운 기술적 의미를 지닌다. SRM은 대규모로 성층권이나 해양 구름과 같은 자연적 시스템에 개입하여 지구의 에너지 균형 자체를 재조정하는 기술로서, 인류가 지구 기후의 온도 조절 장치를 직접

조작할 수 있다는 기술적 가능성을 제시한다. 하지만 SRM은 이산화탄소 감축을 대체할 수는 없으며, 가장 적극적으로 논의되는 SAI조차도 탄소 순환을 개선하지 않기 때문에 단기적 기온 완화 효과에 제한적으로 기여한다. 따라서 SRM 기술 연구의 의의는 감축이 충분히 이루어지기 이전 단계에서 전략적 완충 수단으로 활용될 가능성과, 그에 수반되는 위험성을 동시에 규명하는 데 있다.

3. 태양 지구공학의 기술

SRM의 연구는 주로 컴퓨터 모델링과 자연 관측을 통해 잠재적인 효과와 위험을 평가하는 데 집중되어 있다. 최근 SRM 연구에 대한 공공 및 민간 자금은 증가하는 추세이며, 공개 추적 자료에 따르면 2007~2024년 누적 연구자금은 약 2억 달러 안팎으로 추정된다. 특히 영국 ARIA는 ‘Exploring Climate Cooling’ 프로그램을 통해 총 £56.8 m 규모의 연구 포트폴리오를 운영하고 있으며, 현재 22개 연구팀을 지원하면서 기후 냉각 접근법의 실현 가능성, 안전성, 확장성, 거버넌스 가능성에 대한 증거 기반 구축을 목표로 하고 있다 (Symes, 2024). 미국 백악관 과학기술정책실 (OSTP)은 2023년 SRM 관련 5개년 연구 계획과 초기 연구 거버넌스 프레임워크를 제시하였으며 (OSTP, 2023), 이 보고서는 SRM의 시행을 지지하는 문서가 아니라 잠재적 영향과 지식 공백을 평가하기 위한 연구 우선순위를 정리한 문서임이 강조된다. 제6차 유엔환경총회 (UNEA-6)에서는 SRM에 관한 국제적 검토 틀을 마련하는 결의 초안이 논의되었으나 (Jabbour, 2024), 과학적 불확실성, 개발도상국과 선진국 간 역량 격차, 기존 UNFCCC, IPCC 체계와의 관계 등에 대한 이견으로 합의에 이르지 못하고 철회되었다.

3.1 성층권 에어로졸 주입

3.1.1 기술 원리 및 방법

성층권 에어로졸 주입 (Stratospheric Aerosol Injec-

tion, SAI)은 지구 온난화를 늦추기 위해 성층권에 에어로졸을 살포하여 태양복사를 반사하는 SRM 기술이다. 에어로졸은 공기 중에 떠다니는 미세한 고체나 액체 입자를 의미하며, SAI에서는 태양복사를 효과적으로 산란 및 반사할 수 있는 황산염 에어로졸이 주로 논의된다. 1991년 피나투보 화산 분화는 성층권으로 대량의 SO_2 가 주입되어 황산염 에어로졸이 형성되고, 이에 따라 약 $0.5\sim 0.6^\circ\text{C}$ 안팎의 단기 냉각 효과 (NASA, 2001)가 나타난 대표적 자연 유사 사례로 평가된다. SAI는 주로 열대 하부 성층권을 포함한 성층권에 에어로졸 또는 그 전구물질을 주입하여 태양복사를 산란 및 반사시키는 방식이며, 형성된 에어로졸층은 대체로 약 1~2년 정도 유지될 수 있다.

다중 모형 연구에 따르면, SAI를 통해 지표면을 약 1°C 냉각하기 위해서는 연간 약 $8\sim 16 \text{ Tg SO}_2$ 를 성층권에 주입해야 할 수 있으나 (Haywood *et al.*, 2022), 필요한 양은 주입 위치나 입자 특성, 목표 냉각 수준 등에 따라 달라진다. 이는 고고도 항공기와 같은 특수 장비를 통해 구현될 수 있다 (Smith, 2020).

3.1.2 사례

SCoPEX (Stratospheric Controlled Perturbation Experiment)는 하버드대학교에서 진행했던 SRM 연구 프로젝트로, 2014년 하버드대 연구진들이 발표한 논문을 통해 처음 제시되었다. 이 실험은 SAI의 효과와 위험성을 소규모로 검증하기 위한 목적으로 설계되었다. 고고도 풍선을 약 20 km 상공의 성층권으로 띄운 후, 풍선에 탑재된 장비를 통해 매우 적은 양의 물질 (약 $100 \text{ g}\sim 2 \text{ kg}$)을 방출하여 길이 약 1 km, 지름 약 100 m 정도의 교란 기단을 형성한다. 하버드 연구팀은 2021년 스웨덴 우주공사 (SSC)와 협력하여 스웨덴 북부 이스레인지 우주센터에서 플랫폼 점검용 시험 비행을 계획했으나, 지역 공동체와 국제 사회의 반발로 인해 2023년 8월 연구팀은 중단을 결정하고 2024년 3월 공식적으로 중단을 선언하였다 (Jinnah *et al.*, 2024). 이는 향후 SRM 연구에 있어 사회적 수용성과 국제 규범 마련의 필요성을 강조하는 사례로 평가된다 (Siebert *et al.*, 2025).

3.1.3 잠재력 및 전망

기후모델 시뮬레이션에 따르면, SAI를 통해 성층권 에어로졸층이 형성될 경우 전 지구적으로 평균 지표 온도가 낮아지며, 특히 중위도-고위도 대륙 지역에서 여름철 폭염 빈도가 감소하거나 가뭄 위험이 완화될 가능성이 제시된다(Fan *et al.*, 2021; Zarnetske *et al.*, 2021). 다만 이러한 효과는 지역에 따라 비대칭적이며, 현장 실증 데이터가 아닌 모델링 기반 결과임을 유의할 필요가 있다. 경제적 측면에서 SAI는 비교적 낮은 직접 비용으로 전 지구적 냉각 효과를 유도할 수 있다는 점에서 주목받는다. Smith (2020)의 추정에 따르면, 고고도 항공기를 활용한 SAI 배치 비용은 연간 수십억 달러 수준으로, 대규모 인프라 구축이 요구되는 탄소 포집 기술이나 재생에너지 전환에 비해 상대적으로 낮은 수준의 비용으로 평가된다(Smith, 2020).

3.1.4 위험성 및 기술적 한계

SAI에서 방출된 황산염 입자는 지표로 침전되는 과정에서 산성 침적을 유발할 수 있다. 전 지구적 총 산성 침적량은 현재 수준보다 낮을 것으로 예측되지만, 지역별 침전 분포의 불균형으로 일부 고위도 지역에서는 증가 가능성이 있으며, 이로 인해 토양 산성화와 수계 생태계 교란이 발생할 수 있다(Zarnetske *et al.*, 2021). 또한 SAI는 성층권 화학과 순환을 변화시켜 오존층 회복을 지연시킬 가능성이 있다. 오존층은 자외선을 차단해 인체의 피부암과 백내장 발생을 억제하고, 해양 먹이사슬의 안정성을 유지하는 역할을 하므로, 오존층 손상은 인간 건강과 생태계 전반에 간접적 영향을 미친다(Siegert *et al.*, 2025). SAI는 전 지구 평균기온을 낮추더라도 지역별 강수와 대기순환을 균등하게 복원하지 못할 수 있으며(Parker and Irvine, 2018), 특히 ITCZ(열대수렴대)의 위치 변화와 몬순 강수 패턴 교란 가능성은 여러 기후모델 연구에서 보고되어 왔다(Parker and Irvine, 2018; Robock *et al.*, 2009).

또한 장기간 유지되던 SAI를 갑자기 중단할 경우, 성층권 에어로졸의 짧은 체류 시간(약 1~2년)으로 인해 냉각 효과가 급격히 소멸되며 매우 빠른 온난화

가 재개되는 이른바 ‘종료 쇼크(termination shock)’가 발생할 수 있다. 11개 기후모델을 이용한 GeoMIP G2 실험 결과, SAI의 갑작스러운 중단 후 수년 이내에 전 지구 평균기온이 급속히 상승하는 것으로 나타났으며(Jones *et al.*, 2013), 이 위험성은 독립적인 다수의 모델링 연구에서 반복적으로 확인된 바 있다(Parker and Irvine, 2018).

3.2 해양 구름 밝히기

3.2.1 기술 원리 및 방법

해양 구름 밝히기(Marine Cloud Brightening, MCB)는 해양 층적운(marine stratocumulus)의 알베도를 증가시켜 태양복사를 더 많이 반사함으로써 지구 온난화를 완화하는 것을 목표로 하는 SRM 기술이다. 해양 상공의 저층에서 형성되는 층적운은 상대적으로 높은 알베도를 가져 태양복사를 효과적으로 반사하는 특성을 지닌다. MCB는 해양 경계층에 해염 에어로졸을 주입하여 구름응결핵(cloud condensation nuclei; CCN) 농도를 증가시키고, 그 결과 구름 내 물방울 수 농도는 증가하고 개별 물방울 크기는 감소하도록 유도한다. 이를 통해 구름의 알베도를 증가시키는 에어로졸 간접 효과(Twomey effect)를 활용하는 방식이다(Diamond *et al.*, 2020).

3.2.2 사례

2020년 호주 시드니 해양 과학 연구소와 서던 크로스 대학 연구팀은 그레이트 배리어 리프 인근에서 바닷물을 미세 입자로 분사하여 표면 구름을 형성함으로써 수온을 낮추고 산호를 보호하는 연구를 진행하고 있다. 그레이트 배리어 리프에서는 2016년 이후 반복적인 대규모 산호 백화가 발생해 왔으며, 이는 해수 온도 상승과 해양 산성화로 인해 산호가 몸속의 공생 조류를 방출하면서 발생하는 현상이다. 그레이트 배리어 리프를 대상으로 한 최근 현장 연구는 선박에서 생성한 해염 에어로졸이 실제로 저층 해양운의 운저 고도(cloud-base height)까지 도달할 수 있음을 보여주었다(Hernandez-Jaramillo *et al.*, 2025). 이는 MCB의 핵심 전제인 ‘표면 생성 에어로졸의 구름 전달 가

능성'을 뒷받침하는 중요한 진전이지만, 아직 구름 밝기 변화와 냉각 효과의 대규모 실증으로 보기는 이르다.

3.2.3 잠재력 및 전망

MCB의 주요 대상이 되는 해양 층적운은 동부 아열대 해양에 광범위하게 분포해 있어, 이론적으로는 상당한 지역 냉각 효과를 낼 잠재력이 있다. 각 살포선이 비교적 작은 구름 영역에만 영향을 미치기 때문에 본질적으로 국지적인 개입이지만, 더 많은 살포선을 추가하면 더 넓은 지역을 냉각시킬 수 있으며, 큰 규모로 진행될 경우 지구의 온도를 낮출 수 있다(Foster *et al.*, 2025). MCB는 SAI와 같은 다른 SRM 기술들에 비해 더 낮은 고도에서 선박 기반의 분사 장치라는 비교적 덜 복잡한 장치로 실험을 수행할 수 있다는 장점도 있다(Claudel *et al.*, 2024).

3.2.4 위험성 및 기술적 한계

많은 기후모델 시뮬레이션에서 MCB가 상당한 냉각 효과를 낼 수 있는 잠재력을 시사하지만, 여전히 큰 불확실성이 존재한다. MCB는 평균적으로 냉각 효과를 낼 수 있더라도, 배치 위치와 방식에 따라 ENSO, 강수, 지역 순환에 비대칭 반응을 유발할 수 있으며, 일부 전략에서는 La Niña 유사 반응이나 특정 육상지역의 건조화를 초래할 가능성도 제기된다(Wan *et al.*, 2024). 에어로졸과 구름의 상호작용은 복잡하며 기후과학 전체에서 가장 큰 불확실성의 하나이다. MCB는 지구를 한 번에 고르게 냉각시킬 수 없으며, 이러한 불규칙적인 냉각은 대규모로 적용될 경우 지구 강수 패턴에 상당한 변화를 초래할 수 있다(NASEM, 2021). 또한 MCB는 의도적으로 특정 지역을 냉각시키지만, 그 결과로 발생하는 강수 패턴 변화의 피해는 다른 국가가 입을 수 있어 지정학적 갈등을 증폭시킬 수 있다.

3.3 권운 얇게 하기

3.3.1 기술 원리 및 방법

권운 얇게 하기(Cirrus Cloud Thinning, CCT)는 엄밀한 의미의 태양복사조절 기법과는 다소 구별되지만,

지구복사수지를 조절하여 냉각 효과를 유도하려는 밀접한 관련 기술로 볼 수 있다. 권운(cirrus)은 대류권 상층에서 형성되는 구름으로, 주로 -40°C 이하의 낮은 온도에서 형성된 얼음 결정으로 이루어지며, 얇고 섬유상(fibrous) 형태를 가진다. 모든 구름은 태양복사의 일부를 우주로 반사하고, 동시에 지구에서 방출하는 열을 흡수해 가두는 경향이 있다. 권운은 일반적으로 단파 반사 효과보다 장파복사 흡수에 따른 온난화 효과가 더 큰 경우가 많기 때문에, 권운 내 얼음 결정의 수 또는 크기를 조절하여 권운의 광학적 두께를 감소시키고, 그 결과 지구 장파복사의 대기 외 방출을 증가시킴으로써 순냉각 효과를 유도할 가능성이 있다. 얼음 결정이 많고 작을 경우, 권운은 지구 장파복사가 우주로 빠져나가는 것을 막아 온실가스와 유사한 온난화 영향을 미친다. 반대로 얼음 결정의 양이 적어지고 커질 경우, 권운이 얇아져 지구에서 방출된 열을 우주 밖으로 내보낼 수 있다(Geoengineering Monitor, 2021).

CCT는 순온난화 효과를 가진 권운에만 적용되며, 권운이 형성되는 대류권 상층에 빙정핵(ice nuclei; IN) 시딩 입자를 살포하여 더 큰 얼음 입자가 형성되도록 유도한다. 얼음 입자가 커지면 중력에 의해 빨리 떨어져 나가면서 구름이 얇아지거나 사라진다. 즉, 구름의 빙정핵(IN) 농도를 인위적으로 조절하여 권운의 지속 시간과 두께를 줄이는 방식이다. 권운의 장파복사 강제 효과는 어두운 곳에서 가장 크기 때문에, CCT는 특히 극야와 같이 입사 태양복사가 매우 작은 조건에서 상대적으로 유리할 가능성이 있으며, 이러한 이유로 북극 겨울철을 대상으로 한 연구가 집중되어 왔다.

3.3.2 사례

지금까지 CCT 연구는 연구 기관의 권운 역학 분석 및 모델링 연구에 국한되어 왔다. 미국 사막연구소는 권운 내 작은 얼음 결정의 농도와 자연 및 인위적인 에어로졸 농도를 조사하는 5개년 연구를 시작하여 지구 기후모델링 연구를 실시했다. 취리히 연방공과대학교 대기기후과학연구소(ETH Zurich)의 한 연구팀도 지구 기후모델을 이용하여 CCT를 시뮬레이션하였으

며, 독일과 스위스 연구진의 AWiCiT (Arctic Winter Cirrus Thinning) 프로젝트는 북극 겨울철 권운 얇게 하기를 대상으로 실험실, 지역모형, 전지구모형을 결합해 냉각 잠재력과 위험성을 평가하는 연구 프로그램이다(Geoengineering Monitor, 2021). 현재까지의 연구 결과, CCT는 이론적으로 지구를 냉각시킬 잠재력이 있지만 실제 적용의 효과, 안정성, 부작용에 대해서는 상당한 불확실성이 남아 있다.

3.3.3 잠재력 및 전망

권운은 태양복사를 반사하는 효과보다 지구 표면에서 방출되는 장파복사를 가두어 온실 효과처럼 지구를 데우는 역할이 더 크다. CCT는 이 구름을 얇게 하여 더 많은 장파복사가 우주로 빠져나가도록 함으로써 온실가스의 영향을 더 직접적으로 상쇄할 수 있다. 일부 모델 연구에 따르면, SAI와 달리 CCT는 물 순환(강수량 패턴)에 대한 부작용을 비교적 덜 일으킬 수 있다고 한다(Storelvmo *et al.*, 2014). 극지방의 겨울은 일조량이 적어 권운의 태양복사 반사 효과는 무시할 수 있지만, 장파복사를 가두는 장파복사 강제 효과는 계속 작용한다. 따라서 CCT를 시행하여 이 효과를 줄이면 가장 효율적인 냉각 효과를 얻을 수 있다는 연구 결과가 제시된다(Storelvmo *et al.*, 2013).

3.3.4 위험성 및 기술적 한계

연구자들은 오늘날 기후에서 빙정핵 시딩 입자가 있거나 없는 상태에서 형성되는 권운의 비율이 얼마인지 확신하지 못한다. 이러한 근본적인 불확실성으로 인해 CCT가 얼마나 효과적인지, 어느 지역에 시딩 입자를 살포해야 하는지, 얼마나 많은 재료가 필요한지 파악하기 어렵다. CCT는 시딩 입자의 종류, 농도, 위치가 부적절할 경우 오버시딩이 발생해 의도한 권운 감소 대신 반대의 미세물리 반응이 나타날 수 있으며, 이에 따라 냉각 효과가 약화되거나 역효과가 발생할 가능성도 배제할 수 없다(Geoengineering Monitor, 2021). CCT와 이산화탄소 농도의 지속적인 증가를 모델링하는 시뮬레이션에서 연구자들은 CCT가 강수에 미치는 영향은 지역별로 상이하며, 다중모형 기반의 추가 검증이 필요하다고 지적한다(Tully *et al.*, 2022). 권운은 높은 고도에 얇게 퍼져 있어 효과적으로 시딩 입자를 살포하고 그 결과를 측정하는 기술적 구현 및 관리가 매우 까다롭다.

3.4 우주 기반 태양 가림막

3.4.1 기술 원리 및 방법

우주 기반 태양 가림막은 태양에서 지구로 입사하

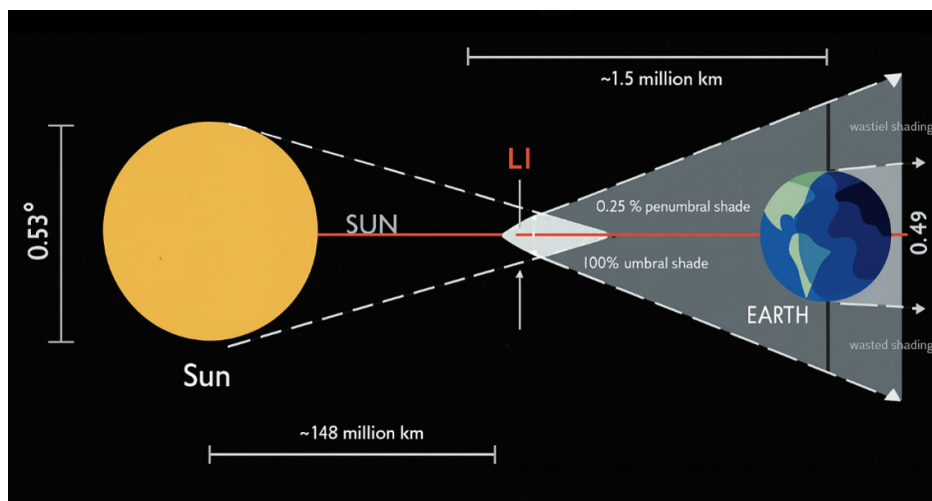


Fig. 1. L1 location (Baum *et al.*, 2022).

는 단파 태양복사량을 조절하여 지구 평균기온 상승을 완화하는 SRM 기술이다. 이 기술의 핵심 원리는 그림 1에 나타난 바와 같이 태양과 지구의 중력이 균형을 이루어 역학적 평형을 유지할 수 있는 태양-지구 L1 라그랑주점(Lagrange point 1, 지구로부터 약 150만 km 거리)에 차광체를 배치함으로써, 태양복사 입력을 직접 차단하는 것이다(Baum *et al.*, 2022).

가림막의 구현 방식은 초박막 필름이나 그래핀 기반의 물리적 차폐막, 또는 빛을 미세하게 굴절시키는 광학적 구조물 등으로 구분된다. 단일 거대 구조물은 충돌 및 고장 시 전체 기능을 상실하는 문제가 존재하므로, 다수의 소형 모듈을 분산적으로 배치하는 방식이 안정성과 제작 가능성을 높이는 방향으로 연구되고 있다. 발사 비용, 우주 쓰레기 충돌 위험, 장기 유지보수의 어려움 등 현실적 제약이 존재하므로 이를 단기 대응 수단으로 보기는 어렵다(Coco *et al.*, 2025).

3.4.2 사례

우주 기반 태양 가림막은 현재 실제 배치 또는 현장 실증 단계에 이르지 못한 개념 설계 수준의 기술로, 관련 연구는 주로 이론적 분석과 시스템 설계 검토에 집중되어 있다. Angel (2006)은 L1 부근에 소형 우주선 군집(fleet)을 배치하여 태양복사의 약 1.8%를 차단하는 개념적 설계를 제시하였고, 이것이 우주 기반 태양 가림막 연구의 현대적 출발점으로 평가된다(Angel, 2006). 이후 Fuglesang and de Herreros Miciano (2021)는 발사 비용 및 궤도 유지 관점에서 실현 가능성을 정량적으로 검토하였다(Fuglesang and de Herreros Miciano, 2021). JAXA의 IKAROS 미션(2010)은 대형 박막 구조물의 전개와 태양광 압력 기반 자세 제어를 우주 공간에서 검증한 태양돛 기술 실증 사례로, 우주 기반 태양 가림막에 요구되는 초박막 구조물 기술의 가능성을 간접적으로 보여주었다는 점에서 참고 사례로 언급된다. 그러나 이는 SRM 목적의 직접적인 실증 실험이 아니며, 실제 차광 효과를 검증한 것으로 해석해서는 안 된다. 개념 설계 연구에서 제안된 배치 시나리오는 일반적으로 정지천이궤도(GTO) 발사 후 태양복사량을 활용한 궤도 전이를 통해 L1 부근 운용 궤도에

진입하는 방식으로 구성된다. 이 과정에서 자세제어 시스템(AOCS)을 통한 지속적인 궤도 보정이 필수적이며, 임무 종료 시 폐기 전략까지 포함한 전 생애주기 운영 계획이 시스템 설계의 핵심 과제로 꼽힌다(Coco *et al.*, 2025). 다만 이러한 시나리오는 현재 개념 수준의 설계 제안에 해당하며, 실현 가능성은 발사 비용, 추진 기술, 국제 거버넌스 등 다수의 제약 요소에 달려 있다.

3.4.3 잠재력 및 전망

우주 기반 태양 가림막은 대기권 내 황산염 주입과 달리 오존층 화학 변화나 산성 침적을 직접 유발하지 않는다는 장점이 제시되지만, 대신 막대한 발사 수요, 우주 쓰레기와 충돌 위험, 장기 유지관리, 국제 거버넌스와 안보 문제를 수반한다(Fuglesang and de Herreros Miciano, 2021). 우주 공간에서 태양복사 입력을 직접 차단하는 방식으로, 관제센터를 통한 원격 조절이 가능하다는 점에서 이론상 정밀한 입사 태양복사량 조절이 가능하다(Coco *et al.*, 2025). 에어로졸과 같은 기술과 다르게, 심각한 부작용이 발견될 경우 즉시 중단이 가능하고 종료 후 영향이 즉시 사라지는 특성이 있다(Baum *et al.*, 2022).

3.4.4 위험성 및 기술적 한계

우주선을 지속적으로 제작 및 발사시켜 큰 범위를 가려야 하는 문제로 인해 천문학적인 비용이 소요될 수 있으며, 소행성 충돌에 대비한 지속적인 유지보수 비용은 경제적 실현 가능성을 낮추는 주요 요인이 된다(Fuglesang and de Herreros Miciano, 2021). 기능을 다한 우주선은 폐기 처분이 필요한데, 이를 회수하지 못할 경우 우주 쓰레기 문제가 심화된다. 이 기술을 특정 국가나 기관에서 관리할 시 발생할 수 있는 군사화, 무기화 위험도 존재한다. 우주 기반 태양 가림막 역시 장기간 유지되던 차광 효과가 갑자기 상실될 경우 빠른 온난화 반등이 나타날 가능성이 있으므로, 장기 운영 책임성과 중단 시나리오를 함께 검토해야 한다(Baum *et al.*, 2022).

3.5 반사 표면 조성

3.5.1 기술 원리 및 방법

평균적으로, 지구는 도달하는 태양복사의 약 30%를 반사한다. 과학자들이 ‘알베도(albedo)’라고 부르는 지구 표면의 반사율은 색상과 질감 등 여러 요인에 따라 달라지며, 색상이 밝고 표면이 매끄러울수록 태양복사를 더 많이 반사한다(그림 2). 알베도가 100%에 가까운 표면은 대부분의 태양복사를 반사하며, 0%에 가까운 표면은 대부분을 흡수한다.

‘표면 알베도 수정(Surface Albedo Modification, SAM)’이라고도 하는 반사 표면 조성 방법은 지구 표면에 반사율을 높이는 물질로 표면을 조성하여 더 많은 태양복사를 반사하게 해서 지구를 덜 뜨겁게 하려는 방법이다. SAM에는 도시 지붕과 도로, 작물, 사막 및 해빙 표면의 알베도 향상과 같은 다양한 제안이 포함된다. 다만 이들 기술의 실현 가능성과 기후 효과의 규모는 서로 크게 다르다(Arias *et al.*, 2021). 쿨 루프나 일부 쿨 페이브먼트처럼 도시 규모에서 적용되는 방식은 상대적으로 저위험, 저비용의 적용 수단으로 평가될 수 있지만, 사막이나 해빙의 알베도를 대규모로 인위 조절하는 방식은 실현 가능성과 환경 영향 측면에서 훨씬 더 큰 불확실성을 가진다. 본 연구에서는 대표적인 SAM 기법인 도시 표면 밝히기, 작물 밝히기, 해빙 밝히기, 사막 밝히기의 4가지 접근법을 소개한다(Samuels-Crow, 2024).

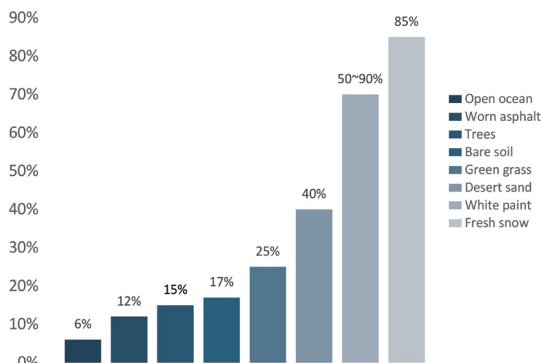


Fig. 2. Surface albedo, the percentage of sunlight reflected (Samuels-Crow, 2024).

• 도시 표면 밝히기: 쿨 루프(Cool Roof), 쿨 페이브먼트(Cool Pavement)

쿨 루프란 흰색이나 밝은 색의 페인트 및 고반사, 고팅출 지붕 자재 등 반사율이 높은 재료/도로로 건물의 옥상을 덮어 태양복사를 반사하는 방법이다. 쿨 페이브먼트란 도로 및 보도에 고반사 아스팔트, 투수성 포장, 특수 코팅 등 태양복사 반사율이 높은 재료를 사용하는 방법으로, 도시 전체의 기온을 저감시켜 스모그와 오존 발생을 억제시키는 효과가 있다.

• 작물 밝히기

작물과 풀은 나무보다 태양복사를 더 많이 반사하며, 특정 품종은 다른 품종보다 알베도가 더 높다(Kala *et al.*, 2022). 작물을 밝히는 방법은 작물 알베도를 극대화하여 기온을 낮추는 것을 목표로 한다. 따라서 작물의 잎이나 식물체의 광 반사율을 높이도록 육종 또는 유전자 조작을 하거나, 재배 방식 또는 잎 배열 등을 조절하여 식물 및 주변의 알베도를 증가시키는 전략이다.

• 해빙 밝히기

해빙 밝히기는 북극 해빙 표면의 알베도를 높여 녹는 것을 최소화하려는 방법이다. 해빙 밝히기 연구에서 가장 널리 논의된 재료는 북극 해빙 위에 살포하는 반사성 실리카 미세구체이다. 다만 이 접근은 아직 초기 연구 단계에 머물러 있으며, 최근에는 생태독성 우려와 사회적 반발로 인해 주요 민간 연구 프로젝트가 중단되는 등 실현 가능성과 환경 안정성에 대한 의문이 커지고 있다(Climate Interventions, 2026).

• 사막 밝히기

사막 밝히기는 사막 지역 표면의 알베도를 반사성 물질을 덮거나, 반사성 입자를 살포하는 등의 방식으로 인위적으로 높이는 방법이다.

3.5.2 사례

뉴욕시의 ‘NYC Cool Roofs’ 프로그램은 대도시 환경에서 SAM 기술이 성공적으로 적용된 대표적인 사례이다. 2009년부터 시작되었고, 자원봉사자와 직업 훈련 참가자를 고용하여 도시 건물, 특히 저소득층 및 비

영리 건물의 평평한 지붕에 흰색 반사 코팅을 하였다(NYC Business, 2025). 이 사례는 인위적인 알베도 증가를 통해 도시 열환경과 건물 냉방 부하를 줄일 수 있음을 보여주는 실용적 사례로 평가된다. 다만 이러한 효과는 주로 국지적 적응 차원에서 의미가 크며, 이를 전 지구적 기후 완화 수단으로 일반화해서는 안 된다.

3.5.3 잠재력 및 전망

도시 열섬 현상 완화 측면에서, 쿨 루프 및 쿨 페이브먼트는 건물 옥상과 포장도로의 알베도를 높이면 도시 지역의 대기 온도를 유의미하게 낮출 수 있다. 건물 유형과 기후 조건에 따라 냉방 부하를 의미 있게 줄일 수 있으며, 일부 연구와 공공 지침에서는 공조 건물의 최대 냉방 수요가 약 11~27% 감소할 수 있다고 제시한다(US EPA, 2024). 특히, 쿨 페이브먼트의 투수성 포장 방법은 열 방출을 감소시킬 뿐 아니라 물 투과성까지 개선하여 홍수 저감 효과도 기대할 수 있다(Park *et al.*, 2024). 작물 알베도 향상에 대한 일부 모델링 연구는 최대 약 0.23°C의 전 지구 냉각 잠재력을 제시하지만, 이는 광범위한 농경지 전환을 가정한 상한 추정치로 현실 적용 가능성은 제한적이다(Irvine *et al.*, 2011). 해빙 표면 알베도가 증가하면 태양복사를 더 많이 반사해 지표면 가열을 줄일 수 있고, 여름철 빙하의 소실 속도를 늦출 수 있다(Field *et al.*, 2018). 이처럼 SAM의 세부기법들은 적용 대상과 규모에 따라 냉각 잠재력이 크게 달라지며, 쿨 루프와 같은 도시 규모 적용은 실현 가능성이 높은 반면, 사막, 해빙 등 광역 대상 기법은 대규모 기후 시스템 교란 위험을 수반하므로 기술별 위험·편익 비교를 바탕으로 우선순위를 설정해야 한다.

3.5.4 위험성 및 기술적 한계

반사 표면 조성 방법은 전 지구적으로 냉각 효과를 주기에는 한계가 있어 지구 온난화 자체를 상쇄하기에는 부족한 방법이며, 국지적으로 기상 변화를 일으킬 수 있다는 한계도 존재한다. 도시 알베도 향상만으로는 전 세계의 모든 도시 포장재와 지붕재를 교체하더라도 기대 가능한 전 지구 평균 냉각 효과는 약 0.11°C 수준의 상한에 머무를 수 있다(Irvine *et al.*, 2011). 작물

반사율 향상을 통해 지구 온도를 낮추기 위해서는 전 세계적으로 대부분의 농작물을 반사율이 더 높은 작물로 대체하는 과정이 필요하며, 이는 현실적으로 매우 어려운 협력 수준을 요구한다(Irvine *et al.*, 2011). 얼음 위에 반사성 실리카 미세구체를 뿌리는 것은 지속적으로 관리해야 하며, 반사 물질이 해양 생태계에 미치는 영향이 매우 불확실하다(Webster and Warren, 2022). 사막 밝히기 방법은 특정 지역의 몬순 강수량을 크게 감소시킬 수 있는 것으로 나타나 수문 순환 교란 위험이 매우 크다(Crook *et al.*, 2015). 종합적으로, SAM 기술군은 지구 온난화에 대한 국지적·보조적 대응 수단으로서 의미가 있으나, 대규모 적용 시 강수 패턴 교란, 생태계 교란, 전 지구 냉각 한계 등의 위험이 존재하며, 온실가스 감축 노력의 대체 수단이 아닌 보완 수단으로 제한적으로 활용되어야 한다.

3.6 각 기술 군 비교

앞서 살펴본 5가지 SRM 기술은 작동 원리와 개입 대상이 다양한 만큼, 냉각 잠재력, 가역성, 비용, 불확실성 등 핵심 평가 기준에서 뚜렷한 차이를 보인다. 표 1은 이를 동일한 기준으로 비교하여 각 기술의 상대적 위치를 정리한 것이다.

표 1에서 확인되듯이, SAI는 냉각 잠재력과 비용 효율 면에서 우위를 보이거나 가역성이 낮고 종료 쇼크 위험이 크며, SAM의 일부 기법은 가역성이 높지만 전 지구적 냉각 기여는 제한적이다. 이처럼 기술별 위험·편익 구조가 상이하다는 사실은, SRM이 단순한 기술 선택의 문제를 넘어 사회적·정책적 판단을 요하는 복합적 쟁점임을 시사한다.

4. 태양 지구공학의 사회적 쟁점 및 전망

4.1 반대 의견

앞서 각 기술별 검토에서 확인된 기술적 불확실성 및 부작용 우려에 더하여, SRM은 사회적·정책적 차원에서 다음과 같은 주요 반대 의견에 직면해 있다.

Table 1. Comparison of major SRM technologies.

Technology	Cooling potential (Spatial scale)	Time to effectiveness	Reversibility	Cost	Scientific uncertainty	Major side effects
SAI (Stratospheric Aerosol Injection)	High (Global, several °C possible)	Fast (Several months to ~1 year)	Low (Termination shock risk)	Low to medium (Billions of USD/year)	Medium	Disruption of precipitation patterns, ozone depletion, acid deposition, termination shock
MCB (Marine Cloud Brightening)	Medium (Regional to quasi-global)	Fast (Days to several weeks)	High (Rapid decay of effect)	Medium	High	ENSO disruption, regional precipitation asymmetry
CCT (Cirrus Cloud Thinning)	Medium (Mainly effective in polar regions)	Medium (Weeks to several months)	Relatively high	Medium	Very high	Risk of overshooting, regional precipitation changes
Space-based sunshade	Theoretically high (Global)	Very slow (Years to several decades)	Medium (Removable but difficult)	Very high (Trillions of USD or more)	Very high	Space debris, risk of militarization, lack of governance
SAM (Surface Albedo Modification)	Low (Mainly local)	Fast to immediate	High	Varies by method (Low to high)	Varies by method (Low to high)	Local weather changes, ecological disruption (broad-scale methods)

Reversibility: Ease of effect dissipation after termination; cost and uncertainty ratings are qualitative assessments based on existing modeling studies (Smith, 2020; Parker and Irvine, 2018; Irvine *et al.*, 2011).

4.1.1 기존 감축 노력과 SRM의 한계

SRM은 지구복사수지를 조절하여 기온 상승을 완화할 수는 있으나, 대기 중 CO₂ 농도 자체를 직접 감소시키지 못하므로 해양 산성화 등 장기적 탄소 문제를 직접 해결할 수 없다는 근본적인 한계를 가진다. 반면 재생에너지 확대, 전기차 보급, 에너지 효율화 등 이미 검증된 감축 전략들은 지속적이고 구조적인 변화를 이끌고 있다. 이른바 ‘mitigation deterrence’로 명명되는 우려는, SRM 연구 및 논의 자체가 온실가스 감축 정책의 긴박성을 희석시키는 정치적 명분으로 악용될 수 있다는 것으로, 학계에서 지속적으로 제기되어 온 사회적 쟁점이다(Jinnah and Dove, 2025). 따라서 SRM은 단기적 기온 완화 수단으로만 제한적으로 검토되어야 하며, 근본적 감축 노력을 대체하는 수단으로 접근해서는 안 된다.

4.1.2 거버넌스

SRM은 기술적 가능성과 별개로 연구와 운영 과정

에서 거버넌스 관련 쟁점을 수반한다. 특히 관련 연구 자원과 의사결정 권한이 소수의 기관이나 특정 국가에 집중될 경우, 정책 결정의 투명성과 책임성이 충분히 확보되지 못할 수 있다. SRM의 거버넌스는 완전히 부재한 상태라기보다는 기존의 연구 윤리, 국가 규제, 국제 논의가 부분적으로 존재하지만 여전히 분절적이고 지역적으로 편중되어 있다. 특히 연구 자원과 의사결정 능력이 주로 글로벌 북반구에 집중되어 있어 정당성, 대표성, 환경 정의 측면의 문제가 제기된다(Jinnah and Dove, 2025).

4.1.3 생태계와 기후모델 불확실성

SAI를 포함한 SRM 기술은 성층권 내 화학적 교란을 일으켜 오존층 회복을 지연시킬 뿐만 아니라, 지역별 강수 패턴, 해양 순환, 식생 생산성 등에 복합적인 변동을 초래할 수 있다. UNEP (2023)와 최근 유럽 과학자문 검토(Andersen, 2023)에 따르면 SRM의 효과와 위험은 분사 시기, 입자 조성, 고도, 지역적 기후 조

건 등에 따라 크게 달라지며, 특히 지역적 수문 반응과 생태계 영향에 상당한 불확실성이 남아 있다. IPCC AR6 또한 SRM이 온난화를 일부 상쇄할 수 있지만 기후변화의 모든 측면을 복원하지 못하며, 지역별 반응과 부작용 평가에 여전히 큰 한계가 있음을 지적한다(IPCC, 2023). SRM을 둘러싼 반대 의견은 장기적 예측 가능성과 생태적 안전성의 한계에서 기인하며, 이는 정책적 채택 여부를 결정하는 데 있어 중요한 제한 요소로 작용한다.

4.2 정책적 제언

앞서 살펴본 기술적 불확실성과 사회적 반대 의견은 SRM이 단순한 기술 선택의 문제가 아님을 보여준다. 이에 본 연구는 SRM의 잠재적 활용 가능성을 인정하면서도, 기술 개발보다 위험 관리와 제도적 기반 구축에 중점을 둔 다음과 같은 정책 제언을 제시한다.

4.2.1 전 지구적 환경영향평가 연구의 의무화

SAI나 MCB와 같은 대규모 SRM 기술은 전 세계적인 기상 패턴, 강수량, 생태계, 오존층 등에 예측 불가능한 부작용을 일으킬 수 있다. 대기 중 물질 방출을 포함하는 SRM 야외 실험은 허가제, 사전 환경영향평가, 연구 등록제, 이해관계자 참여를 포함한 엄격한 연구 거버넌스 체계 아래에서만 제한적으로 검토되어야 한다. 특히 가뭄 유발 가능성 등 지역적 불균등 효과에 대한 연구를 최우선으로 지원해야 한다.

4.2.2 SAM 기술 연구 지원 강화

고위험의 행성 규모 개입보다는 쿨 루프와 일부 쿨 페이브먼트와 같은 국지적 적응 효과가 비교적 명확한 저위험 기술에 대해 연구 지원을 우선 강화할 필요가 있다. SAM과 같은 기술에 대한 정부 차원의 인센티브 및 표준화를 도입하고, 쿨 루프 소재 개발 및 보급을 위한 R&D 예산을 증액하며, 건축 법규에 반영하여 도시 열섬 현상 완화라는 확실한 국지적 이익을 먼저 확보해야 한다.

4.2.3 '종료 쇼크' 대비책 및 책임성 확보

SRM은 연속적으로 이루어져야 하며, 종료 쇼크의

위험이 따른다(Parker and Irvine, 2018; Jones *et al.*, 2013). 이 기술을 도입할 경우, 연구 단계에서부터 장기 재정 책임, 정치적 지속 가능성, 단계적 종료 시나리오와 같은 종료 쇼크 대응 원칙을 함께 설계해야 한다. 기술 배치는 환경에 미치는 영향을 복원 가능한 범위로 제한해야 한다는 가역성 원칙(reversibility principle)에 대한 충분한 사전 검토 이후에만 이루어져야 하며, 이는 미래 세대에 불가역적 위험을 전가하지 않기 위한 최소한의 윤리적 요건이다.

4.2.4 SRM 논의에서 완화 전략의 분리

SRM에 대한 관심이 근본적 해결책인 온실가스 배출 감축 노력을 약화시키는 도덕적 해이를 유발할 수 있다는 점은 매우 현실적인 우려이다. 모든 SRM 연구 및 정책 논의는 이산화탄소 제거(CDR) 기술을 대체하는 선택지로 제시되어서는 안 되며, 감축 지연을 방지하기 위한 명시적 원칙과 거버넌스 장치를 함께 갖추어야 한다. SRM은 이산화탄소 감축을 대체할 수 없으며, 단지 최악의 상황에 대비하기 위한 보완적 도구임을 정책 문서에 명시해야 한다.

5. 결 론

본 연구는 지구 온난화 완화를 위한 보완적 대응 수단으로 논의되는 SRM 기술군의 과학적 원리, 잠재적 효과, 기술적 한계, 그리고 정책적·사회적 함의를 종합적으로 분석하였다. 그 결과, SRM은 단기간 내 지구 평균기온을 완화할 수 있는 잠재력을 지니지만, 대기 중 온실가스 농도 자체를 감소시키지 못한다는 근본적 한계를 공통적으로 지닌다. 또한 표 1에 정리된 바와 같이, 각 기술은 냉각 잠재력, 가역성, 비용, 과학적 불확실성 면에서 뚜렷이 다른 특성을 보이며, 이를 단일한 기준으로 일괄 평가하는 것은 적절하지 않다.

기술별로 살펴보면, 쿨 루프와 같은 SAM의 저위험 기법은 국지적 열섬 현상 완화 및 에너지 절감 효과가 비교적 명확하고 가역성이 높아 현재 단계에서도 보조적 적응 수단으로 활용 가능성이 있다. 반면 SAI와

같은 고위험 기술은 전 지구적 냉각 잠재력과 비용 효율성에도 불구하고, 지역별 강수 패턴 교란, 오존층 손상 가능성, 그리고 갑작스러운 중단 시 급격한 온난화 반등 (termination shock)이라는 구조적 위험을 내포한다 (Parker and Irvine, 2018; Jones *et al.*, 2013). 이러한 위험들은 현재의 과학적 검증 수준과 거버넌스 역량으로는 충분히 관리되기 어려우며, SAI를 비롯한 고위험 SRM 기술을 기후 대응의 주요 수단으로 채택하는 것은 시기상조이다. 이는 SRM 연구 자체의 중단을 의미하는 것이 아니라, 기술 연구와 배치 결정을 명확히 분리해야 한다는 것이다. 잠재적 기후 비상 상황에 대비한 위험성 평가와 메커니즘 규명 연구는 엄격한 거버넌스 체계 아래서 지속되어야 하며, 이때 연구의 범위와 조건 자체가 중요한 정책적 판단 사항이 된다.

정책적 관점에서, SRM은 온실가스 감축 및 CDR을 대체하는 수단이 아닌 보완적 역할에 한정되어야 한다. SRM에 대한 관심이 감축 노력의 긴박성을 희석시키는 이른바 ‘mitigation deterrence’로 이어지지 않도록, 모든 연구 및 정책 논의는 감축 우선 원칙을 명시적으로 전제해야 한다 (Jinnah and Dove, 2025). 아울러 SRM 기술의 개발과 적용은 과학적 타당성뿐 아니라 전 지구적 거버넌스, 형평성, 가역성 원칙을 포괄하는 다층적 검토를 필요로 한다. 현재 국제 규범과 감독 체계가 분절적으로만 존재하는 상황에서, 향후 연구는 고위험 기술의 위험성 정밀 평가와 함께 저위험 기술의 표준화, 확장성 연구, 그리고 국제법적, 윤리적 가이드라인 수립을 병행하는 방향으로 나아가야 한다.

본 연구는 SAI, MCB, CCT, 우주 기반 태양 가림막, SAM의 5가지 SRM 기술군에 대해 동일한 평가 기준을 적용하여 기술적 잠재력과 위험성을 체계적으로 비교, 분석하였다는 점에서 향후 심화 연구 및 정책 논의의 기초 자료로 기여할 수 있다. 다만 본 연구는 주로 기존 문헌과 모델링 결과에 의존한 검토 연구로, 각 기술의 지역별 효과와 장기적 영향에 대한 실증적 근거는 여전히 충분하지 못한 한계를 지닌다. 궁극적으로, SRM을 둘러싼 논의는 기술 선택의 문제가 아니라, 과학적 불확실성, 세대 간 책임, 기후 정의의 문제를

함께 다루는 복합적 과제임을 확인하였다. 감축과 적응을 중심으로 유지하면서, SRM에 대해서는 신중하고 조건부적인 연구 접근을 유지하는 것이 현 시점에서 가장 균형 잡힌 전략적 선택이라 할 수 있다.

태양 지구공학 이외에도 미생물 연료전지와 전기분해전지, 미생물 담수화 및 역전기투석 시스템, 미생물 전기합성 등 온실가스 배출 저감과 자원·에너지 회수를 위한 다양한 공학기술이 발전하고 있다 (Son *et al.*, 2026, 2025; Koo *et al.*, 2025; Kang *et al.*, 2024; Kim *et al.*, 2024; Jung *et al.*, 2023, 2014; Zahid *et al.*, 2022; Karthic *et al.*, 2021). 이러한 기술이 경제성과 규모 확대 가능성을 확보하고 현장 적용으로 이어질 경우, 기후변화 위험을 완화하고 미래 세대에 보다 안전하고 지속 가능한 지구환경을 물려주는 데 기여할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 2026년도 기후에너지환경부 재원으로 중앙녹색환경지원센터(과제번호: 2026-019-01) 및 광주녹색환경지원센터 연구개발사업의 지원(과제번호: 26-04-10-16-12)을 받아 수행되었습니다.

References

- Andersen, I. (2023) One atmosphere. UNEP, Nairobi. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/41903>
- Angel, R. (2006) Feasibility of cooling the Earth with a cloud of small spacecraft near the inner Lagrange point (L1), *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 103(46), 17184-17189. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.0608163103>
- Arias, P.A., Bellouin, N., Coppola, E., Jones, R.G., Krinner, G., Marotzke, J., Naik, V., Palmer, M.D., Plattner, G.-K., Rogelj, J., Rojas, M., Sillmann, J., Storelvmo, T., Thorne, P.W., Trewin, B. (2021) Technical Summary, in: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of*

- the IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, 33-144. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_SummaryVolume.pdf
- Baum, C.M., Low, S., Sovacool, B.K. (2022) Between the sun and us: Expert perceptions on the innovation, policy, and deep uncertainties of space-based solar geoengineering, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 158, 112179. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032122001046>
- Budyko, M.I. (1977) Climatic Changes. American Geophysical Union. <https://doi.org/10.1029/SP010>
- Claudel, C., Lockley, A., Hoffmann, F., Xia, Y. (2024) Marine-cloud brightening: an airborne concept, *Environmental Research Communications*, 6(3), 035020. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2515-7620/ad2f71>
- Climate Interventions (2026) Sea Ice Albedo Modification. <https://climateinterventions.org/interventions/sea-ice-albedo-modification/>
- Coco, M., Matonti, C.L., Cappelletti, C., Chesley, B., Fuglesang, C., Governale, G., Pushparaj, N., Romano, M., Tibert, G., Wilk, L. (2025) Planetary sunshade for solar geoengineering: Preliminary design of a precursor system and mission, *Acta Astronautica*, 235, 452-462. <https://iris.polito.it/retrieve/4a38848a-5b53-40cf-9fa3-1098051289d7/1-s2.0-S0094576525003133-main.pdf>
- Crook, J.A., Jackson, L.S., Osprey, S.M., Forster, P.M. (2015) A comparison of temperature and precipitation responses to different Earth radiation management geoengineering schemes, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 120(18), 9352-9373. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/2015JD023269>
- Diamond, M.S., Director, H.M., Eastman, R., Possner, A., Wood, R. (2020) Substantial Cloud Brightening From Shipping in Subtropical Low Clouds, *AGU Advances*, 1(1), e2019AV000111. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2019AV000111>
- Early, J.T. (1989) Space-based solar shield to offset greenhouse effect, *Journal of the British Interplanetary Society*, 42, 567-569. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1989JBIS...42..567E/abstract>
- Fan, Y., Tjiputra, J., Muri, H., Lombardozzi, D., Park, C.-E., Wu, S., Keith, D. (2021) Solar geoengineering can alleviate climate change pressures on crop yields, *Nature Food*, 2(5), 373-381. <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/37117731/>
- Field, L., Ivanova, D., Bhattacharyya, S., Mlaker, V., Sholtz, A., Deca, R., Manzara, A., Johnson, D., Christodoulou, E., Walter, P., Katuri, K. (2018) Increasing Arctic Sea Ice Albedo Using Localized Reversible Geoengineering, *Earth's Future*, 6(6), 882-901. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2018EF000820>
- Foster, R., Nicole, S., Harrison, D., Fidelman, P. (2025) Governing marine cloud brightening for ecosystem conservation under a warming climate, *Earth System Governance*, 23, 100196. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2589811625000060?via%3Dihub>
- Fuglesang, C., de Herreros Miciano, M.G. (2021) Realistic sunshade system at L1 for global temperature control, *Acta Astronautica*, 186, 269-279. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0094576521001995?via%3Dihub>
- Geoengineering Monitor (2021) Cirrus Cloud Thinning. <https://www.geoengineeringmonitor.org/technologies/cirrus-cloud-thinning>
- Haywood, J., Tilmes, S., Keutsch, F., Niemeier, U., Schmidt, A., Vioni, D., Yu, P. (2022) Stratospheric Aerosol Injection and Its Potential Effect on the Stratospheric Ozone Layer, in *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022. Global Atmosphere Watch Report No. 278*. World Meteorological Organization. <https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/>
- Hernandez-Jaramillo, D.C., Harrison, L., Gunner, G., McGrath, A., Junkermann, W., Lieff, W., Hacker, J., Rosenfeld, D., Kelaher, B., Harrison, D.P. (2025) First generation outdoor marine cloud brightening trial increases aerosol concentration at cloud base height, *Environmental Research Letters*, 20(5), 054025. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/adccd7>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (2023) *Future Global Climate: Scenario-based Projections and Near-term Information*, pp. 553-672. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/downloads/report/IPCC_AR6_WGI_Chapter04.pdf
- Irvine, P.J., Ridgwell, A., Lunt, D.J. (2011) Climatic effects of surface albedo geoengineering, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 116(D24), D24112. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011JD016281>
- Jabbour, J. (2024) Draft resolution on Solar Radiation Modification. United Nations Environment Assembly, Nairobi. <https://www.unep.org/environmentassembly/>
- Jinnah, S., Bedsworth, L., Talati, S., Gerrard, M.B., Kleeman, M., Lempert, R., Mach, K., Nurse, L., Patrick, H.O., Sugiyama, M. (2024) Final Report of the SCoPEX Advisory Committee. Harvard University, Cambridge. <https://salatoinstitute.harvard.edu/wp-content/uploads/2025/>

- 04/Final-SCoPEX-AC-Report-With-Appendices.pdf
- Jinnah, S., Dove, Z. (2025) Solar radiation management: a history of the governance and political milestones, *Environmental Science: Atmospheres*, 5, 656-673. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2634360625000317>
- Jones, A., Haywood, J.M., Alterskjaer, K., Boucher, O., Cole, J.N.S., Curry, C.L., Irvine, P.J., Ji, D., Kravitz, B., Kristjansson, J.E., Moore, J.C., Niemeier, U., Robock, A., Schmidt, H., Singh, B., Tilmes, S., Watanabe, S., Yoon, J.-H. (2013) The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of the Geoengineering Model Intercomparison Project (GeoMIP), *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118(17), 9743-9752. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/jgrd.50762>
- Jung, S.P., Son, S., Koo, B. (2023) Reproducible polarization test methods and fair evaluation of polarization data by using interconversion factors in a single chamber cubic microbial fuel cell with a brush anode, *Journal of Cleaner Production*, 390, 136157. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136157>
- Jung, S.P., Yoon, M.-H., Lee, S.-M., Oh, S.-E., Kang, H., Yang, J.-K. (2014) Power generation and anode bacterial community compositions of sediment fuel cells differing in anode materials and carbon sources, *International Journal of Electrochemical Science*, 9(1), 315-326. [https://doi.org/10.1016/S1452-3981\(23\)07719-2](https://doi.org/10.1016/S1452-3981(23)07719-2)
- Kala, J., De Kauwe, M.J., Perkins-Kirkpatrick, S.E. (2022) Assessing the potential for crop albedo enhancement in reducing heatwave frequency, duration, and intensity under future climate change, *Weather and Climate Extremes*, 35, 100417. <https://research-information.bris.ac.uk/en/publications/assessing-the-potential-for-crop-albedo-enhancement-in-reducing-h/>
- Kang, H., Koo, B., Chai, H., Jung, S.P. (2024) Impedance characteristics and polarization behaviors of microbial reverse-electrodialysis cells with changes in effective membrane area, intermembrane distance, and flow rates of salinity gradient waters, *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 12(6), 114313. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2024.114313>
- Karthic, A., Pandit, S., Khilari, S., Mathuriya, A.S., Jung, S.P. (2021) Microbial electrosynthesis for harnessing value-added product via carbon dioxide sequestering, in *Bio-electrochemical Systems: Vol. 1 Principles and Processes*. Edited by Kumar, P., Kuppan, C., Springer, Singapore, 277-298. https://doi.org/10.1007/978-981-15-6872-5_12
- Kim, E., Kang, H., Koo, B., Pandit, S., Lee, M.J., Jung, S.P. (2024) Addition of carbon dioxide enhances electrical power production in a microbial reverse electrodialysis cell, *Journal of Water Process Engineering*, 68, 106475. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106475>
- Koo, B., Chai, H., Son, S., Islam, N., Hong, C., Jung, S.P. (2025) Potential-dependent impedance characteristics of bioanodes and performance enhancement using phosphoric acid-treated anodes in continuous-flow microbial fuel cells, *Chemical Engineering Journal*, 519, 165285. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2025.165285>
- Latham, J. (1990) Control of global warming?, *Nature*, 347, 339-340. <https://www.nature.com/articles/347339b0>
- Lee, S., Lee, M., Jeon, W., Son, M., Jung, S.P. (2022) Current Status and Perspectives of Carbon Capture and Storage, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 491-510. <https://www.jksee.or.kr/m/journal/view.php?doi=10.4491/KSEE.2022.44.12.652>
- Mitchell, D.L., Finnegan, W. (2009) Modification of cirrus clouds to reduce global warming, *Environmental Research Letters*, 4(4), 045102. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/4/4/045102/pdf>
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (NASEM) (2021) Reflecting Sunlight: Recommendations for Solar Geoengineering Research and Research Governance, pp. 1-312, <https://www.nationalacademies.org/projects/DELS-BASCP-18-04>
- National Aeronautics and Space Administration (NASA) (2001) Global Effects of Mount Pinatubo, p. 1. <https://earthobservatory.nasa.gov/images/1510/global-effects-of-mount-pinatubo>
- Newhall, C.G., Hendley II, J.W., Stauffer, P.H. (1997) The Cataclysmic 1991 Eruption of Mount Pinatubo, Philippines, U.S. Geological Survey Fact Sheet 113-97. <https://doi.org/10.3133/fs11397>
- NYC Business (2025) NYC CoolRoofs. <https://nyc-business.nyc.gov/nycbusiness/business-services/incentives/nyc-coolroofs>
- Park, J., Lee, J., Kim, J., Kwon, S., Kim, M. (2024) Analysis of Infiltration and Runoff Based on the Volume of Storage Spaces in Storage Permeable Blocks, *Journal of Korean Society of Hazard Mitigation*, 24(6), 43-49. <https://www.j-kosham.or.kr/journal/view.php?number=10678>
- Parker, A., Irvine, P.J. (2018) The Risk of Termination Shock From Solar Geoengineering, *Earth's Future*, 6(3), 456-467.

- <https://doi.org/10.1002/2017EF000735>
- President's Science Advisory Committee (PSAC) (1965) Restoring the Quality of Our Environment. The White House, Washington, D.C. <https://nsarchive.gwu.edu/document/31937-document-2-white-house-report-restoring-quality-our-environment-report-environmental>
- Robock, A., Marquardt, A., Kravitz, B., Stenchikov, G. (2009) Benefits, risks, and costs of stratospheric geoengineering, *Geophysical Research Letters*, 36, L19703. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2009gl039209>
- Samuels-Crow, K. (2024) Surface Albedo Modification. <https://srm360.org/article/surface-albedo-modification/>
- Siegert, M., Sevestre, H., Bentley, M.J., Brigham-Grette, J., Burgess, H., Buzzard, S., Cavitte, M., Chown, S.L., Colleoni, F., DeConto, R.M., Fricker, H.A., Gasson, E., Grant, S.M., Gulisano, A.M., Hancock, S., Hendry, K.R., Henley, S.F., Hock, R., Hughes, K.A., Karentz, D., Kirkham, J.D., Kulesa, B., Larter, R.D., Mackintosh, A., Masson-Delmotte, V., McCormack, F.S., Millman, H., Mottram, R., Moon, T.A., Naish, T., Nath, C., Orlove, B., Pearson, P., Rogelj, J., Rumble, J., Seabrook, S., Silvano, A., Sommerkorn, M., Stearns, L.A., Stokes, C.R., Stroeve, J., Truffer, M. (2025) Safeguarding the polar regions from dangerous geoengineering: a critical assessment of proposed concepts and future prospects, *Frontiers in Science*, 3, 1527393. <https://doi.org/10.3389/fsci.2025.1527393>
- Smith, W. (2020) The cost of stratospheric aerosol injection through 2100, *Environmental Research Letters*, 15(11), 114004. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/aba7e7>
- Son, S., Koo, B., Chai, H., Im, H., Jung, S.P. (2025) Optimization of operation time and efficiency in microbial electrolysis cells based on anode performance and operation time, *Journal of Water Process Engineering*, 73, 107604. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107604>
- Son, S., Koo, B., Chai, H., Jo, G., Jung, S.P. (2026) Effect of anode configuration on hydrogen production and electrochemistry in single chamber microbial electrolysis cells, *Journal of Water Process Engineering*, 89, 110272. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2026.110272>
- Storelvmo, T., Boos, W.R., Herger, N. (2014) Cirrus cloud seeding: a climate engineering mechanism with reduced side effects?, *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 372(2031), 20140116. <https://royalsocietypublishing.org/rsta/article-abstract/372/2031/20140116/58599/Cirrus-cloud-seeding-a-climate-engineering?redirectedFrom=fulltext>
- Storelvmo, T., Kristjansson, J.E., Muri, H., Pfeffer, M., Barahona, D., Nenes, A. (2013) Cirrus cloud seeding has potential to cool climate, *Geophysical Research Letters*, 40(1), 178-182. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2012gl054201>
- Symes, M. (2024) Exploring Climate Cooling. Advanced Research + Invention Agency, UK. <https://www.aria.org.uk/opportunity-spaces/future-proofing-our-climate-and-weather/exploring-climate-cooling>
- Tully, C., Neubauer, D., Lohmann, U. (2022) Cirrus cloud thinning using a more physically based ice microphysics scheme in the ECHAM-HAM general circulation model, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 22(17), 11455-11484. <https://acp.copernicus.org/articles/22/11455/2022/>
- United Nations Environment Programme (UNEP) (2023) One Atmosphere: An Independent Expert Review on Solar Radiation Modification Research and Deployment, UNEP. <https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/41903>
- US Environmental Protection Agency (US EPA) (2024) Using Cool Roofs to Reduce Heat Islands. Heat Island Effect. <https://www.epa.gov/heatislands/using-cool-roofs-reduce-heat-islands>
- Wan, J.S., Chen, C.C.J., Tilmes, S., Luongo, M.T., Richter, J.H., Ricke, K. (2024) Diminished efficacy of regional marine cloud brightening in a warmer world, *Nature Climate Change*, 14(8), 808-814. <https://www.nature.com/articles/s41558-024-02046-7>
- Webster, M.A., Warren, S.G. (2022) Regional Geoengineering Using Tiny Glass Bubbles Would Accelerate the Loss of Arctic Sea Ice, *Earth's Future*, 10(10), e2022EF002815. <https://doi.org/10.1029/2022EF002815>
- White House Office of Science and Technology Policy (OSTP) (2023) Congressionally-Mandated Report on Solar Radiation Modification. The White House, Washington, D.C. <https://bidenwhitehouse.archives.gov/wp-content/uploads/2023/06/Congressionally-Mandated-Report-on-Solar-Radiation-Modification.pdf>
- World Meteorological Organization (WMO) (2025) State of the Global Climate 2024, pp. 1-52. <https://wmo.int/publication-series/state-of-global-climate/state-of-global-climate-2024>
- Zahid, M., Savla, N., Pandit, S., Thakur, V.K., Jung, S.P., Gupta, P.K., Prasad, R., Marsili, E. (2022) Microbial desalination cell: Desalination through conserving energy, *Desalination*, 521, 115381. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2021.115381>
- Zarnetske, P.L., Gurevitch, J., Franklin, J., Groffman, P.M., Harrison,

C.S., Hellmann, J., Hoffman, F.M., Kothari, S., Robock, A., Tilmes, S., Visoni, D., Wu, J., Xia, L., Yang, C.-E. (2021) Potential ecological impacts of climate intervention by reflecting sunlight to cool Earth, *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(15), e19218 54118. <https://www.pnas.org/doi/10.1073/pnas.1921854118>

Authors Information & Contributions

김세빈 (전남대학교 바이오에너지공학과 학사과정 학생,
tpqls0202@naver.com) Writing - original draft,
Writing - review & editing, Investigation

신현서 (전남대학교 바이오에너지공학과 학사과정 학생,
2611shs@naver.com) Writing - original draft,
Writing - review & editing, Investigation

권태희 (전남대학교 환경에너지공학과 학사과정 학생,
kth8633@naver.com) Writing - original draft,
Writing - review & editing, Investigation

조예원 (전남대학교 바이오에너지공학과 학사과정 학생,
jyw040369@naver.com) Writing - original draft,
Writing - review & editing, Investigation

정석희 (전남대학교 환경에너지공학과 교수,
sokheejung@chonnam.ac.kr) Writing - review & editing,
Supervision, Funding acquisition