BLUE LAB | CONVERGENCE INQUIRY 03

누가 지구의 온도를 정해야 할까?

태양복사 조절의 과학과 기후 의사결정

지구과학 · 물리 · 수학 · 정치 · 경제 · 윤리

핵심 탐구 질문

햇빛 일부를 반사해 온난화를 줄일 수 있다면, 그 효과와 위험을 누가 평가하고 시행 여부를 어떤 절차로 결정해야 하는가?

01
과학적 효과

기온·강수·해양·오존에
미치는 영향을 구분한다.

02
판단의 기준

전체 피해, 취약 지역,
형평성과 권리를 비교한다.

03
결정과 책임

연구·실험·시행별로
권한과 책임을 설계한다.

이 보고서의 관점

기후 개입을 판단하려면 과학적 효과와 불확실성을 밝히고, 영향을 받는 사람들의 참여와 장기간의 책임을 함께 검토해야 한다. 연구와 대규모 시행은 각각 별도의 근거와 정당성을 요구한다.

문헌 검토 + 에너지 평형 계산 + 가상 정책 비교 + 의사결정안 설계

읽는 순서 탐구 개요 2쪽 / 과학적 근거 3-6쪽 / 사회적 판단 7-9쪽 / 제도와 결론 10-12쪽 / 학생 활동 13쪽 / 출처 14-15쪽

대상: 고등학생 · 자료 확인일: 2026.10.31 · 문헌·모형 탐구 예시

질문을 세 층위로 나누어 검토한다

과학이 알려 주는 효과, 사회가 정하는 기준, 제도가 맡아야 할 책임

이 탐구에서 다루는 **태양복사 조절(SRM)**은 주로 햇빛의 반사를 늘려 지구가 흡수하는 에너지를 줄이려는 제안이다. 범위를 성층권 에어로졸 주입(SAI)과 해양 구름 밝게 하기(MCB)에 집중한다. 기술이 완성되어 원하는 기후를 정확히 만들 수 있다고 가정하지 않는다. [2]

> **현재 근거의 위치: UNEP 2026년 5월 검토**
>
> UNEP는 현재의 과학적 지식만으로 SRM을 실행 가능한 기후변화 대응책으로 지지하기 어렵다고 평가했다. 이 보고서는 이를 **실제 시행의 정당성이 확보되지 않았다는 출발점**으로 삼는다. 냉각 원리의 존재와 기술·사회 전체의 실행 가능성은 각각 검토해야 한다. [1]

탐구 질문	확인할 근거	판단의 성격
어떤 변화가 가능한가?	복사 수지, 관측, 과정 연구, 기후 모형	효과·불확실성 평가
무엇을 좋은 결과로 볼까?	지역별 손실, 취약성, 비금전적 가치	가치와 기준의 선택
누가 결정하고 책임질까?	참여, 대표성, 감독, 재원, 구제 절차	제도 설계와 정당성

탐구 방법과 자료의 구분

문헌 근거: 국제 평가보고서, 공공 연구기관 자료, 연구 논문을 대조한다. 자료가 제시한 조건과 결론의 범위를 확인한다.
과학 모형: 반사율과 흡수 태양복사 사이의 관계를 계산한다. 실제 지역 기후를 예측하는 계산은 아니다.
사회 모형: 임의로 만든 지역별 손실 자료에 서로 다른 판단 기준을 적용한다.
탐구자의 제안: 앞의 검토를 바탕으로 결정 절차를 제안하며, 현행 국제 규칙과 구분한다.

검토할 가설: 평균 기온 감소만을 성공 기준으로 삼으면 물순환과 지역별 부담을 충분히 설명하기 어렵다. 따라서 효과의 크기와 함께 분배, 참여, 책임을 평가해야 한다.

기후 대응은 서로 다른 곳에 작용한다

온실가스의 유입, 대기 중 축적, 복사 에너지, 피해에 대한 취약성을 구분한다.

지구는 태양복사를 흡수하고 적외선 복사를 우주로 내보낸다. 장기적인 기후는 이 에너지 흐름과 해양·대기·육지의 상호작용에 영향을 받는다. 햇빛의 흡수를 줄이는 조작과 온실가스 부담을 줄이는 조작은 같은 과정이 아니다. [9]

접근	직접 바꾸려는 것	예와 평가할 조건
온실가스 배출 감축	대기로 추가되는 온실가스의 양	에너지·산업·토지 이용에서 배출 감소. 이미 축적된 CO_2가 즉시 사라지는 것은 아니다.
이산화탄소 제거 (CDR)	대기 중 CO_2를 제거하고 지속적으로 저장	직접 공기 포집 후 저장, 생물·지구화학적 제거 등. 전 과정의 순제거량과 저장 지속성을 확인한다. [3]
태양복사 조절 (SRM)	지구가 흡수하는 태양복사	햇빛을 더 반사하여 일부 온난화를 상쇄하려는 접근. CO_2를 직접 제거하지 않는다. [2]
기후 적응	피해에 대한 노출과 취약성	폭염 대응, 물 관리, 재난 대비 등. 같은 기후 위험에서도 피해를 줄이는 조건을 마련한다.

헷갈리기 쉬운 구분

화석연료 발전소의 배출구에서 CO_2를 붙잡는 것은 보통 **배출 감축**에 해당한다. 대기에 있는 CO_2를 제거해 오래 저장하는 CDR과는 작용 지점이 다르다. 포집한 탄소를 곧바로 다시 배출한다면 장기 제거 효과도 따로 계산해야 한다. [3]

비교를 위한 기준선

이 보고서의 정책 비교에서는 **같은 감축·적응 경로를 기본으로 두고** 추가 SRM 여부와 설계를 비교한다. 비교 대상을 '아무 대응도 하지 않는 세계'로만 잡으면 감축·적응 확대나 다른 대안의 가능성을 놓칠 수 있다.

탐구 질문: "얼마나 빨리 식히는가?"와 함께 "무엇을 직접 해결하며, 어떤 문제가 남는가?"를 물어야 한다.

두 방식은 서로 다른 과정을 이용한다

SAI와 MCB의 물리적 원리와 아직 확인해야 할 부분

SAI 성층권 에어로졸 주입

성층권의 입자가 햇빛 일부를 우주로 산란시키도록 하려는 방식이다. 성층권에 입자를 공급한 화산 분출은 관련 과정의 자연적 비교 사례다. 그러나 일회성 자연 현상의 관측이 장기간 인위적 운용의 전체 효과와 안전성을 입증하지는 않는다. [2][5]

MCB 해양 구름 밝게 하기

해양의 낮은 구름에서 에어로졸과 구름방울의 상호작용을 이용해 반사를 늘리려는 방식이다. 구름방울 수가 늘어 구름이 밝아질 수 있다는 근거가 있지만, 구름의 물량·면적·지속 시간도 변한다. 따라서 입자를 늘릴수록 언제나 같은 냉각 효과가 생긴다고 볼 수 없다. [4]

근거의 종류	확인할 수 있는 내용	그 근거만으로 확정할 수 없는 내용
자연·현장 관측	화산 이후 변화, 선박 항적 구름 등 관련 과정	의도적 장기 운용의 전체 효과
실험·과정 연구	입자의 광학·화학 성질과 구름의 반응	전 지구 생태·사회적 결과
기후 모형	특정 배출·운용 조건에서 가능한 반응	특정 국가가 겪을 피해의 확정값
사회·제도 연구	수용성, 대표성, 책임 구조와 갈등	물리적 효과에 관한 검증의 대체

> **탐구에서 지켜야 할 추론의 범위**
>
> 개별 물리 과정에 근거가 있다는 사실, 규모를 키워도 원하는 효과가 나는지, 사회가 그 위험을 감수할 정당성이 있는지는 **각각 따로 확인할 질문**이다. 작은 실험의 성공을 대규모 시행의 승인으로 연결하지 않는다.

자료 분석 활동: 논문이나 기사 한 편에서 “관측된 사실”, “모형의 결과”, “저자의 제안”에 서로 다른 색을 표시해 보자.

평균 기온 하나로는 결과를 설명할 수 없다

같은 평균값이어도 지역·계절·물순환과 생태계의 변화는 다를 수 있다.

IPCC는 SRM이 온난화의 일부 영향을 줄일 가능성과 함께, 지역·계절별 변화가 남거나 과도하게 상쇄될 수 있음을 평가한다. 따라서 특정 목표 기온에 가까워졌다는 사실만으로 기후 전체가 복원되었다고 결론 낼 수 없다. [5]

평가 항목	살펴볼 과학적 쟁점	사회적 판단과의 연결
기온·극한 현상	일부 온난화 위험을 줄일 가능성. 효과는 설계와 배출 경로에 의존한다. [5]	어떤 위험과 지역을 우선할까?
강수·물 공급	대기와 지표의 가열 방식이 달라지므로 평균 기온 상쇄가 강수 복원을 보장하지 않는다. [6]	농업·물 이용의 변화는 어떻게 평가할까?
해양 산성화	햇빛 반사만으로 CO_2 축적의 원인을 제거하지 못한다. [2]	남는 피해와 감축 책임을 어떻게 다룰까?
성층권 오존	SAI의 입자·운용·대기 조건에 따라 화학과 순환에 영향을 줄 수 있다. [7]	온도 밖의 환경 지표도 감시할까?
급중단 이후	높은 온실가스 부담에서 강한 냉각 효과가 급격히 사라지면 빠른 재온난화 위험이 있다. [8]	유지·변경·종료의 책임은 누가 맡을까?

피해가 반드시 같은 방향으로 나오는 것은 아니다

모든 설계가 모든 곳을 악화시킨다고 단정할 근거도 없다. **무엇과 비교하는지, 어떤 효과를 측정하는지, 어느 지역·기간을 보는지**를 밝혀야 한다. 불확실성은 효과를 무시할 이유도, 원하는 결과를 확정할 근거도 되지 않는다.

'급중단 위험'은 대규모 냉각에 의존하는 상황의 문제다. 소규모 연구를 중단하는 것과 같은 위험으로 취급하지 않으며, 시작하면 영원히 끝낼 수 없다고 일반화하지 않는다. [8]

반사율이 바뀌면 흡수 에너지는 얼마나 줄까?

평형을 가정한 단순 모형: 계산할 수 있는 것과 없는 것을 함께 확인한다.

태양복사 세기 S_0 = 1361 W/m²를 사용하고, 행성 전체 반사율 α = 0.300을 수업용 기준으로 둔다. α는 대기·구름·지표를 합친 값이다. [9][10]

계산식

$Q = S_0(1 - \alpha) / 4$
$T_e = [Q / \sigma]^{1/4}$
Q: 전 지구 평균 흡수 태양복사. 1/4은 빛을 받는 원판과 구 전체의 면적비이다.
T_e: 평형에서 우주로 내보내는 복사량을 흑체 온도로 환산한 유효복사온도.
$\sigma = 5.670374419 \times 10^{-8}$ W·m^{-2}·K^{-4}. [11]

반사율 α	흡수 태양복사 Q	유효복사온도 T_e
0.300	238.18 W/m²	254.58 K
0.305	236.47 W/m²	254.12 K
0.310	234.77 W/m²	253.66 K

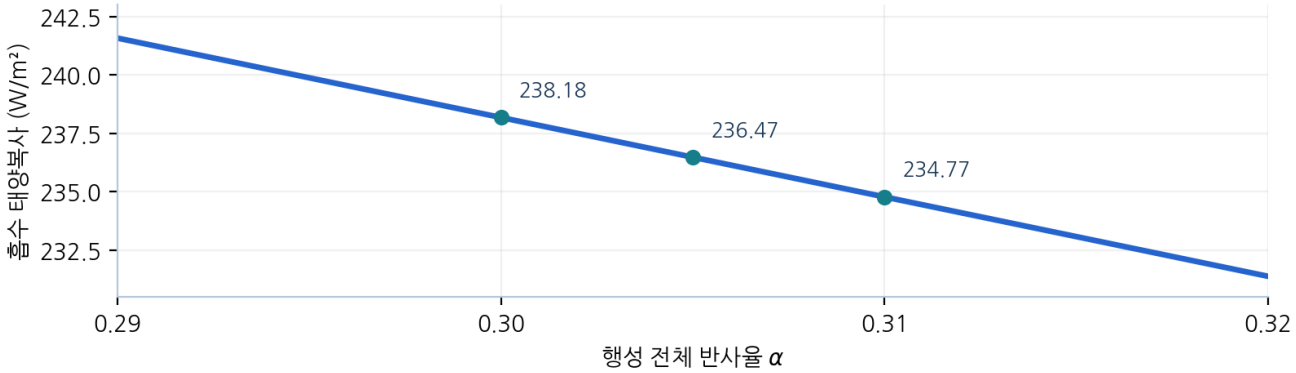

도표: 위 식으로 직접 계산한 값. 관측 추세나 실제 SRM 운용 결과가 아니다.

결과: 반사율 0.300 → 0.310은 **1%포인트 증가**이다. 흡수 태양복사는 약 3.40 W/m² 감소한다. 이 계산은 반사율 변화와 에너지 수지의 관계를 보여 준다.

해석의 범위

T_e는 실제 지표 평균 기온이 아니다. 이 모형은 온실효과·구름 피드백·해양의 열 저장과 반응 시간을 계산하지 않는다. 또한 입자 공급량, 지역 강수, 비용, 생태계 영향을 산출하지 못한다.

누구의 위험을 어떤 기준으로 평가할까?

과학적 전망이 같아도 판단 기준과 참여자의 범위에 따라 결론은 달라질 수 있다.

아래는 실제 국가의 입장을 대변하는 표가 아니라, **탐구에서 확인할 이해관계**를 정리한 것이다. 같은 국가 안에서도 직업·지역·소득에 따라 이해관계가 다를 수 있다.

관점	우선 확인하고 싶은 질문
폭염에 취약한 공동체	단기적인 위험을 얼마나 줄일 수 있으며, 다른 피해가 늘어날 가능성은 어느 정도인가?
농업·물 공급에 의존하는 지역	비가 오는 시기, 토양 수분, 가뭄 위험이 어떻게 달라질 수 있는가?
연구 역량이 제한된 지역	자국에 필요한 자료와 모형에 접근하고 평가 과정에 실질적으로 참여할 수 있는가?
미래 세대	유지 비용과 종료 위험, 축적된 온실가스 부담을 어떤 조건으로 넘겨받는가?

다섯 가지 평가 기준

기준	핵심 질문	함께 살필 한계
효과	전체 위험과 손실이 얼마나 줄어드는가?	평균과 합계가 지역의 악화를 가릴 수 있다.
분배	가장 큰 피해와 취약한 집단의 부담은 줄어드는가?	국가 평균이 내부의 격차를 가릴 수 있다.
절차	누가 의제를 정하고 이의를 제기할 수 있는가?	설명회 개최만으로 실질적 참여가 보장되지는 않는다.
권리·생태	돈으로 환산하기 어려운 손실은 무엇인가?	수치화되지 않은 피해를 0으로 처리하지 않는다.
지속성	장기 재원과 수정·종료의 책임이 유지되는가?	현재의 약속이 미래의 이행을 보장하지 않는다.

이 분류는 탐구를 위한 분석 틀이다. UNESCO COMEST의 2023년 전문가 보고서도 이익과 위험의 분배, 참여, 세대 간 책임을 검토한다. 해당 보고서는 회원국 전체의 합의나 구속력 있는 규칙 자체는 아니다. [14]

같은 자료로 서로 다른 정책이 선택된다

아래 수치는 의사결정 기준을 비교하기 위해 만든 가상 자료이다.

공통 조건: 가·나·다는 인구가 같은 세 지역이다. 모든 정책은 같은 온실가스 감축·적응 경로와 같은 미래 평가기간을 전제로 한다. 단위 U는 공통 기준으로 환산한 경제적 손실의 가상 단위이며, 낮을수록 좋다. 단순화를 위해 실행비용의 배분도 손실에 포함했다고 가정한다.

정책	가	나	다	합계	최대	격차
P0 추가 SRM 없음	9	8	7	24	9	2
P1 SRM 설계 1 추가	2	3	11	16	11	9
P2 SRM 설계 2 추가	7	5	8	20	8	3

합계 = 세 지역 손실의 합 / 최대 = 가장 큰 지역 손실 / 격차 = 최댓값 - 최솟값

판단 기준	선택	계산 결과의 의미
전체 손실 최소화	**P1**	합계가 16 U로 가장 작다. 다 지역은 P0보다 악화한다.
가장 큰 지역 손실 최소화	**P2**	최대 손실이 8 U로 가장 작다.
지역 간 격차만 최소화	**P0**	격차는 2 U로 가장 작지만 합계 손실은 가장 크다.

이 계산이 보여 주는 것

계산이 정확해도 **어떤 결과를 우선할지** 정해야 선택이 나온다. 특히 격차만 작다고 곧바로 가장 공정하다고 결론 낼 수 없다. 피해의 크기, 취약성, 권리, 참여를 함께 살펴야 한다.

자료의 한계: 이 표는 실제 기후 모형 결과나 특정 국가의 미래 피해가 아니다. 6쪽의 반사율 계산으로부터 얻은 값도 아니다. SRM이 반드시 어느 지역을 악화시킨다는 사실을 입증하려고 만든 표가 아니다.

불확실성과 보상을 넣으면 판단은 어떻게 바뀔까?

기준·추정값·분배 조건을 바꾸어 결론의 안정성을 점검한다.

1. 추가 피해를 허용하지 않는 조건

“모든 지역의 손실이 P0보다 커지지 않아야 한다”는 수업용 조건을 추가하면, 다 지역이 악화하는 P1과 P2는 모두 제외된다. 새로운 설계를 제안하거나 조건의 정당성과 현실성을 토론해야 한다. 이는 현행 국제법의 의무를 서술한 것이 아니다.

2. 추정값이 달라질 때의 전환점

P1의 다 지역 손실을 x로 두면 총손실은 **5 + x**이다. P2의 총손실은 20이므로 $x = 15$에서 같아진다. $x < 15$이면 P1, $x > 15$이면 P2의 총손실이 더 작다. 가상 범위를 $8 \le x \le 16$으로 두면, 같은 기준에서도 추정값에 따라 선택이 바뀐다.

8-16은 관측에서 구한 신뢰구간이나 확률분포가 아니다. 다른 수치는 고정한 단순 민감도 분석이며, 실제 영향은 지역·항목 사이의 연관성도 검토해야 한다.

3. 보상은 부담을 재분배한다

P1에서 가와 나가 각각 2 U를 다에게 이전하고, 이전에 따른 비용은 없다고 가정한다.

지역	이전 전 손실	부담 또는 수령	이전 후 순경제적 부담
가	2	2 부담	4
나	3	2 부담	5
다	11	4 수령	7
합계	16	순이전 0	16

보상과 피해 회복을 구분하기

금전 이전 후 부담은 달라져도 총손실 16 U는 줄지 않는다. 실제 기후 노출이나 물리적 피해가 사라지는 것도 아니다. 문화적 상실, 생태계 손상, 권리 문제를 모두 같은 단위로 보상할 수 있다고 가정하지 않는다.

연구·실외실험·시행은 따로 판단해야 한다

연구 허용이 다음 단계의 자동 승인을 뜻하지 않는다.

UNEP의 2026년 검토는 기존 생물다양성·오존층·인권 관련 제도가 일부 적용될 수 있지만, SRM을 포괄적으로 조정·감독하는 체계에는 공백이 있다고 설명한다. “아무 규칙도 없다”거나 “국제기구가 이미 시행을 승인했다”고 이해해서는 안 된다. [1]

활동의 구분	검토할 질문	필요한 관리의 예
관측·모형·실험실 연구	어떤 불확실성을 줄이며, 자료와 이해관계가 공개되는가?	연구 등록, 자금 출처 공개, 독립 검토, 결과 공개
제한적 실외실험	외부 환경에 영향을 줄 필요가 있으며, 다른 방법으로 얻기 어려운 정보인가?	사전 영향평가, 관계 당국의 허가, 참여·통보, 감독
대규모 기후 개입	시행 자체의 과학적·사회적 정당성이 확보되었는가?	국제적 결정 절차, 장기 재원·책임, 관측, 구제와 종료 계획

위 표는 문헌을 참고한 **탐구용 관리 구분**이다. 미국 국립학술원은 2021년 연구 등록·참여·감독을 권고하고, 물질을 방출하는 실외실험에 별도 조건을 제안했다. 이는 전 세계의 통일된 현행 허가 제도를 뜻하지 않는다. [12]

국제 문서를 읽을 때 확인할 것

생물다양성협약 당사국총회 결정 X/33(2010), 8(w)는 충분한 근거와 적절한 관리가 없는 상태에서 생물다양성에 영향을 줄 수 있는 기후공학 활동에 예방적 접근을 요구한다. 동시에 특정 자료 수집을 위해 정당화되고 사전 환경영향평가를 거친 통제된 소규모 연구의 예외도 다룬다. [13]

이 결정을 “모든 관련 연구가 국제법으로 전면 금지되었다”는 문장으로 바꾸어서는 안 된다. 활동의 성격과 규모, 해당 국가의 법과 적용되는 국제 의무를 구분해 검토해야 한다. [1][13]

> **이름보다 실제 활동을 본다**
>
> ‘연구’라고 이름 붙였더라도 목적, 규모, 기간, 반복·누적 영향, 국경 밖의 영향을 함께 살펴야 한다. 어떤 단계에서도 근거가 부족하거나 위험이 크면 진행하지 않는 결론이 가능하다.

권한·평가·감독을 함께 설계한다

아래 내용은 현재 존재하는 세계 정부나 국제 허가 제도를 설명한 것이 아니다.

본 탐구는 **기술 보유자, 평가자, 결정자, 감독자가 서로 견제할 수 있는 구조**를 제안한다. 영향을 받는 지역과 공동체가 평가 기준과 의제 형성에 참여할 통로를 포함한다.

기능	맡을 역할	설계에서 확인할 조건
과학적 평가	독립 연구진의 효과·위험·불확실성 평가	여러 모형과 자료, 지역 연구 역량, 이해충돌 공개
공적 숙의	국가와 영향을 받는 공동체의 의견 검토	의제 제안권, 자료 접근, 이의제기와 답변 기록
공식 결정	합의된 법적 절차에 따른 허용·보류·거부	대표성과 의결 기준, 취약 집단 보호, 이유 공개
운영 감독	목표·관측 기준·변경 조건의 이행 확인	운영 주체와 독립된 검증, 공개 기록과 정기 재검토
책임과 구제	긴급 지원, 원인·책임 검토, 분쟁 해결	재원과 지급 조건, 문화·생태·권리의 별도 고려

의결 방식에도 해결해야 할 문제가 있다

전문가 중심 결정은 지식 활용에 유리하지만 가치와 대표성 문제를 따로 해결해야 한다. **다수결**은 결정을 가능하게 하지만 소수의 큰 피해를 가릴 수 있다. **만장일치**는 반대 의견을 보호하면서도 결정 지연과 협상력 차이를 낳을 수 있다. 어떤 방식도 자동 정답으로 정하지 않는다.

시작 전에 다룰 장기 책임

감축·적응을 유지할 계획, 장기 재원, 비상 상황의 책임, 운용 변경과 종료 계획을 함께 평가한다. 강한 SRM에 의존하는 상황에서는 갑작스러운 중단 자체도 위험할 수 있으므로, 기계적으로 “문제가 생기면 즉시 전부 종료”하는 규칙만으로 충분하지 않다. [8]

구제 제안: 피해자의 긴급 지원과 과학적 원인·법적 책임의 판정은 절차를 구분할 수 있다. 지원의 필요성과 배상 책임을 같게 취급하지 않으며, 재원 조성과 분쟁 절차를 사전에 명시한다.

지구의 기후를 결정할 정당성은 어떻게 생기는가?

자료 검토, 두 모형, 제도 비교에서 얻은 결론

결과 1 물리적 가능성과 시행 가능성을 각각 평가해야 한다

햇빛 반사를 늘리면 흡수 태양복사를 줄일 수 있다. 그러나 실제 지표와 지역 기후의 반응은 더 복잡하다. 특정 반사율의 계산이나 부분적인 과정 연구만으로 대규모 운용의 결과와 안전성을 확정할 수 없다. [4][5][9]

결과 2 과학적 전망만으로 공정한 선택이 자동 결정되지는 않는다

가상 자료에서는 총손실 최소화가 P1, 가장 큰 지역 손실 최소화가 P2, 격차만 최소화하는 기준이 P0를 선택했다. 이 결과는 평가 기준을 공개해야 한다는 점을 보여 준다. 실제 국가의 피해 방향이나 최선의 정책을 예측한 결과는 아니다.

결과 3 참여와 장기 책임이 결정 절차에 포함되어야 한다

본 탐구는 영향을 받는 사람들의 참여, 독립된 평가와 감독, 감축·적응 유지, 책임과 구제, 변경·종료 계획을 판단의 조건으로 제안한다. 현재의 공백을 고려하면 대규모 시행을 정당화하기에 부족한 근거와 제도를 먼저 밝혀야 한다.

검토할 반론	이 탐구의 답변
기후 피해가 급하므로 신속한 시행이 필요하지 않을까?	지연의 위험도 평가해야 한다. 다만 긴급성이 효과와 부작용의 불확실성, 정당한 절차를 없애지는 않는다.
불확실하니 관련 연구도 모두 멈춰야 하지 않을까?	연구 종류와 영향을 나누어 필요성과 위험을 검토한다. 연구가 시행을 기정사실화하는 경로가 되는지도 평가한다.
전체 이익이 크면 보상으로 해결할 수 있지 않을까?	금전 이전이 물리적 피해나 비금전적 손실을 모두 없애지는 않는다. 사전 위험 감소와 참여를 함께 다룬다.

최종 논지

지구의 기후에 영향을 줄 기술을 가졌다는 사실만으로 결정할 정당한 권한이 생기지는 않는다. **효과의 근거, 위험의 분배, 영향을 받는 사람들의 참여, 장기간의 책임을 함께 검토하는 절차**가 필요하다. 시행을 선택하지 않는 결론도 그 절차의 유효한 결과이다.

근거를 바탕으로 나만의 결정안을 만든다

문헌 검토 → 계산 → 기준 비교 → 제안과 반론 검토

단계	학생이 할 일	남겨야 할 결과
1. 자료 검토	SAI 또는 MCB 하나를 골라 공식 평가자료와 연구 논문을 비교한다. 관측·모형·제안을 구분한다.	주장, 근거 위치, 조건, 한계가 있는 근거표
2. 계산 재현	6쪽의 반사율 계산과 8쪽의 손실 계산을 재현한다. 바꾼 값과 고정한 값을 기록한다.	계산표, 그래프, 해석 가능한 범위
3. 기준 비교	총손실, 최대 손실, 격차, 추가 악화 금지 중 두 가지 이상을 비교한다. x의 변화도 검토한다.	선택이 달라진 조건과 그 이유
4. 결정안 작성	연구·실험·시행 중 어느 활동을 검토하는지 정하고, 참여·감독·재원·구제·종료 절차를 제안한다.	근거를 포함한 결정안과 반대 의견에 대한 답변

보고서에 답할 핵심 질문

1. 내가 제안하는 활동의 범위와 목적은 무엇인가?
2. 과학적으로 확인된 사실과 아직 모르는 것은 무엇인가?
3. 어떤 기준으로 대안을 비교했고, 그 기준을 선택한 이유는 무엇인가?
4. 누가 이익과 위험을 부담하며, 결정에 어떻게 참여하는가?
5. 어떤 새로운 자료가 나오면 내 결론을 수정할 것인가?

> **토론 활동 예시**
>
> 연구진, 물 공급에 민감한 공동체, 폭염 피해 지역, 재원 제공자, 미래 세대의 관점으로 역할을 나눈다. 첫 투표 뒤에 9쪽의 불확실성 조건을 공개하고 다시 토론한다. 바뀐 선택뿐 아니라 **어떤 근거 때문에 바뀌었는지**를 기록한다.

교사가 확인할 탐구의 질

과학적 정확성 / 출처와 가정의 구분 / 계산의 재현성 / 기준 선택의 설명 / 다른 관점과 불확실성의 검토를 함께 본다. 특정한 찬성·반대 입장 자체를 정답으로 채점하지 않는다.

권장 최종 산출물: 근거표 1개 + 계산표 또는 그래프 1개 + 의사결정안 1쪽. 본문에 쓰인 수치와 결론이 어떤 자료 또는 가정에서 나왔는지 연결해 제시한다.

근거와 출처 1

본문의 번호를 누르면 해당 참고 자료로 이동한다. 링크는 원문 또는 공식 소개 페이지이다.

[1] UNEP (2026.05). Solar Radiation Modification: Scientific evidence does not support SRM as a viable climate solution. Working Paper.

현재의 지식 공백, 실행 가능성 평가, 기존 규범과 관리 공백. 초록 및 본문 16쪽.

https://wedocs.unep.org/handle/20.500.11822/49509

[2] NOAA Science Council (2024). Solar radiation modification: NOAA State of the Science factsheet.

SRM의 개념과 대표 방식, 해양 산성화 및 장기 운용 쟁점. 보관된 원문을 이용했다.

https://prod-01-asg-www-climate.woc.noaa.gov/news-features/understanding-climate/solar-radiation-modification-noaa-state-science-factsheet

[3] U.S. Department of Energy (2021). Carbon Dioxide Removal: Frequently Asked Questions.

CDR의 정의, 배출원 포집과의 차이, 순제거와 장기 저장. 3-5쪽.

https://www.energy.gov/sites/default/files/2021-11/Carbon-Dioxide-Removal-FAQs.pdf

[4] Feingold et al. (2024). Physical science research needed to evaluate the viability and risks of marine cloud brightening. Science Advances 10, eadi8594.

MCB의 과정 근거와 구름 물량·면적·지속 시간 및 규모 확대의 불확실성.

https://www.pmel.noaa.gov/acg/sites/default/files/atoms/files/feingold_et_al_2024.pdf

[5] IPCC (2021). AR6 Working Group I, Chapter 4: Future Global Climate.

§4.6.3.3: SRM의 효과, 지역·계절별 잔여 변화와 불확실성.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-4/

[6] IPCC (2021). AR6 Working Group I, Chapter 8: Water Cycle Changes.

§8.6.3: SRM의 시작과 종료, 에너지 흐름과 물순환 반응.

https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/chapter/chapter-8/

[7] WMO/UNEP (2022). Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2022, Executive Summary.

Stratospheric aerosol injection 절: SAI의 오존 영향과 시나리오에 따른 차이.

https://csl.noaa.gov/assessments/ozone/2022/executivesummary/

근거와 출처 2

본문의 번호를 누르면 해당 참고 자료로 이동한다. 링크는 원문 또는 공식 소개 페이지이다.

[8] Jones et al. (2013). The impact of abrupt suspension of solar radiation management (termination effect) in experiment G2 of GeoMIP. JGR: Atmospheres. DOI: 10.1002/jgrd.50762.

여러 기후 모형을 이용한 급중단 실험. 특정 운용·온실가스 조건의 결과이다.

https://www.pnnl.gov/publications/impact-abrupt-suspension-solar-radiation-management-termination-effect-experiment-g2

[9] NASA Earth Observatory (2009). Climate and Earth's Energy Budget.

태양복사와 지구복사, 면적 평균, 온실효과와 에너지 수지의 기본 개념.

https://science.nasa.gov/earth/earth-observatory/climate-and-earths-energy-budget/

[10] NASA NSSDC (2024 갱신). Earth Fact Sheet.

태양복사 세기 1361.0 W/m². 반사율 0.300은 이 보고서가 따로 둔 수업용 기준값이다.

https://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/factsheet/earthfact.html

[11] NIST. 2022 CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants.

스테판-볼츠만 상수. 본문의 계산은 제시된 자릿수로 수행했다.

https://physics.nist.gov/cuu/Constants/Table/allascii.txt

[12] National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine (2021). Reflecting Sunlight.

Summary, Recommendations 5.1 and 6.2: 연구 등록·참여·감독, 실외실험의 별도 검토.

https://www.nationalacademies.org/read/25762/chapter/2

[13] Convention on Biological Diversity. Climate-related Geoengineering and Biodiversity.

COP 결정 X/33(2010), 8(w): 예방적 접근 및 제한적 소규모 연구의 조건.

https://www.cbd.int/climate/geoengineering

[14] UNESCO COMEST (2023.11.28). Report on the Ethics of Climate Engineering.

분배·참여·세대 간 책임을 다룬 전문가 보고서. 회원국 전체의 견해를 반드시 대표하지 않는다.

https://unesco.org.uk/site/assets/files/3078/report_of_the_world_commission_of_unesco_on_the_ethics_of_scientific_knowledge_and_technology_comest.pdf

자료 확인일: 2026.10.31. 과거 자료는 기본 원리와 해당 시점의 평가에 사용했으며, 2026년 검토와 구분했다. 모형 계산과 가상 정책 자료는 이 문서에서 직접 구성했다.