

L1 지점에서의 군집형 태양 가림막을 통한 지구 기후 제어

1팀 NASA 빠진 조약돌 | 박소이 강민승 김무진 안치후 송태환 김성준 멘토

우주의 조약돌 3기

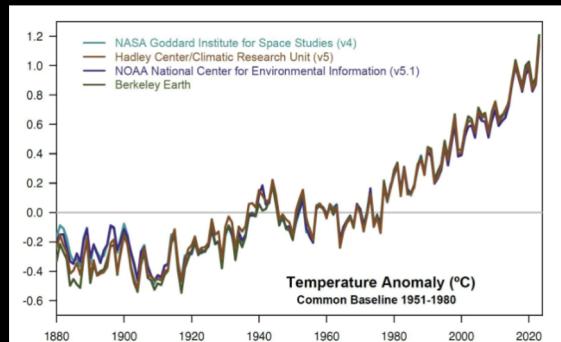
점점 심각해지는 지구 온난화

최근 급격히 상승하는 지구 평균 온도 → 현재 1880년으로부터 약 1.4도 상승*

→ 1880년 기준 지구의 온도가 2도 이상 오르면 치명적인 피해**

→ 인간 활동으로 인해 지구 온도 0.8~1.2도 상승***

온도 상승으로 인한 피해 : 도시 침수 / 농작물 피해 / 생태계 파괴 등



*From: NASA homepage (<https://science.nasa.gov/climate-change/scientific-consensus/>)

** 주블라디보스톡 대학민국 총영사관

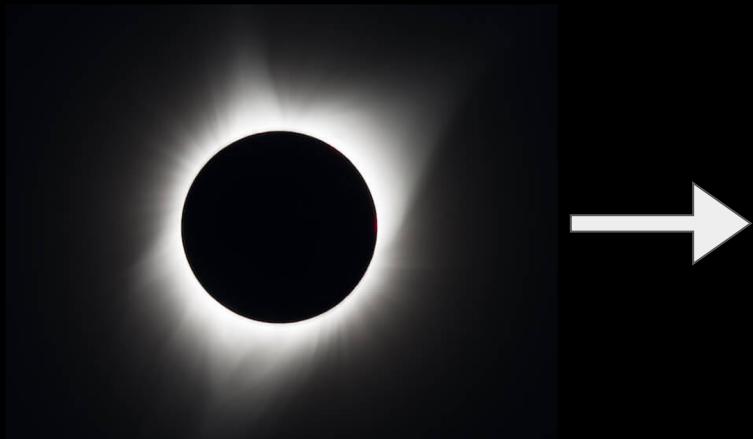
***V. Masson-Delmotte, P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P. Shukla, et al., Summary for policymakers, in: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty, Tech. rep., IPCC, 2018.

개기일식으로 인한 지구 온도 하락 효과

1834년 12월 : 약 15°C 하강 *from: Gettysburg Republican Banner

2015년 3월 : 약 7°C 하강 *from: WeatherSTEM

→ 달이 태양을 가릴 때 일시적으로 지구 온도 낮추는 효과 있음



X축 : 시간 / Y축 : 온도(화씨) 출처 : NATIONAL WEATHER SERVICE

“태양빛을 가리면 지구 온도가 얼마나 내려갈까?”

복사 평형 (Radiative Equilibrium):

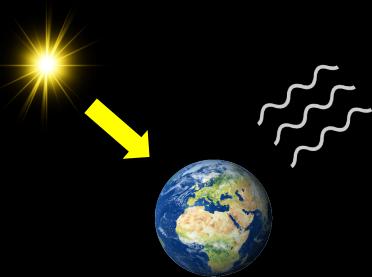
$$\text{지구가 태양으로부터 받는 복사 에너지 } (L_{in}) = \text{ 우주 공간으로 방출하는 복사 에너지 } (L_{out})$$

$$L_{in} = S \cdot (1 - \alpha) \cdot \pi R_E^2$$

S : 태양 상수 (약 1361 W/m²)

α : 지구의 태양빛 반사율 (약 0.3)

R_E : 지구 반지름 (약 6378 km)



$$L_{out} = \sigma \cdot A \cdot T^4$$

σ : 스테판-볼츠만 상수 (5.67×10^{-8} W/m²K⁴)

A : 지구의 표면적 ($= 4\pi R_E^2$)

T : 지구 복사 평형 온도 ($= 255$ K)

$$S \cdot (1 - \alpha) \cdot \pi R_E^2 = \sigma \cdot 4\pi R_E^2 \cdot T^4$$

$$S \cdot (1 - \alpha) = 4\sigma T^4$$

“태양빛을 가리면 지구 온도가 얼마나 내려갈까?”

태양빛 1%를 가렸을 때 복사 평형:

$$S \cdot (1 - \alpha) = 4\sigma T^4 \quad \longrightarrow \quad 0.99 S \cdot (1 - \alpha) = 4\sigma {T_{new}}^4$$

태양빛을 가리기 전-후 관계:

$$\frac{{T_{new}}^4}{T^4} = \frac{\frac{0.99 S \cdot (1 - \alpha)}{4\sigma}}{\frac{S \cdot (1 - \alpha)}{4\sigma}} = 0.99$$

$$\left(\frac{T_{new}}{T}\right)^4 = 0.99 \quad \longrightarrow \quad \frac{T_{new}}{T} = \sqrt[4]{0.99} \quad \longrightarrow \quad T_{new} \approx 0.9975 T$$

지구의 온도 변화:

$$T_{new} = 0.9975 \cdot 255 K = 254.36 K$$
$$\Delta T = T_{new} - T = 254.36 - 255 = -0.64 K$$

약 0.6°C 감소 효과

“인공 태양막을 우주에 설치해서 지구 온도를 낮추자”

목표

태양빛을 1% 줄여서 지구 평균 온도 약 0.6도 내리기

방법

인공 태양막 위성을 띠워 태양빛을 가리기



태양 가림막 위성 배치 궤도 후보 : 태양 동기 궤도

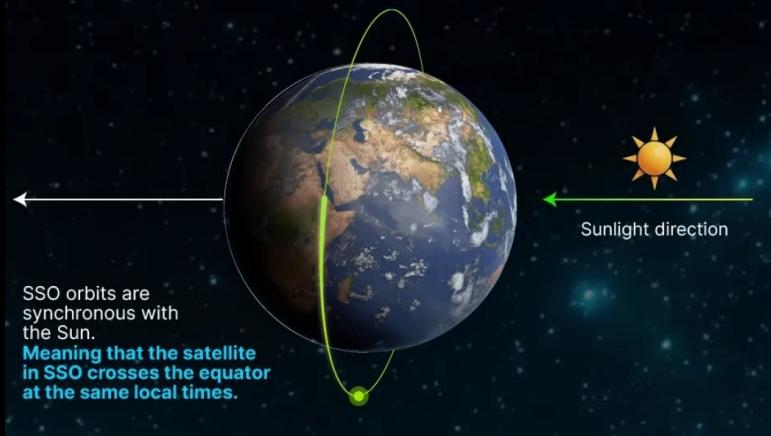
태양 동기 궤도

태양과 위성의 궤도면이 이루는 각도가 항상 일정한 궤도
항상 지구의 특정 지역을 태양으로부터 가림

* 문제점 *

1. 타 위성을 띄울 때 태양 동기 궤도를 많이 이용함 (인기 많음)
→ 태양 가림막 면적이 거대해 **다른 위성에 방해됨**
2. 저궤도 → 태양빛 차단 면적이 낮음 → **더 높은 궤도 필요**

SUN-SYNCHRONOUS ORBIT (SSO)



태양 가림막 위성 배치 궤도 후보 : L1 라그랑주 지점

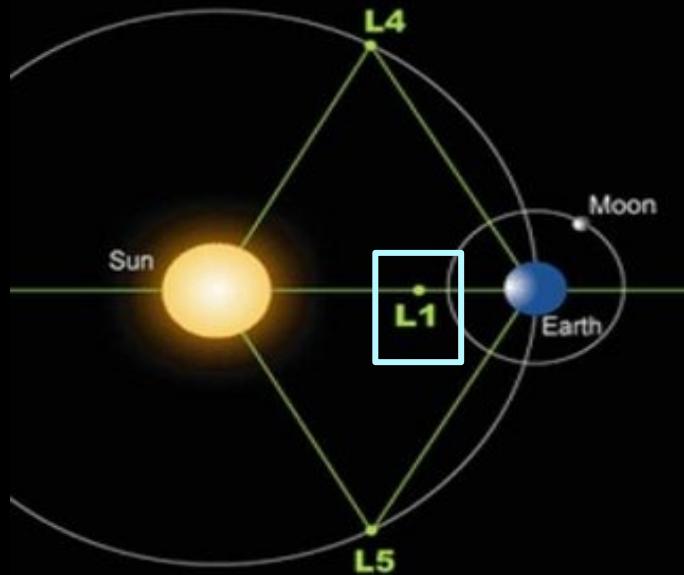
L1 라그랑주 지점

- 지구와 태양의 중력이 위성이 특정 궤도를 유지할 수 있도록 균형을 이루는 위치
- 지구에서 1.5백만 km 떨어져 있음

* 장점 *

1. 위성이 많이 없음
2. 태양에 더 가까움 → 가리는 태양 면적 상승
3. 지속적으로 태양을 가릴 수 있음

→ 최종 배치 궤도로 선정



L1 라그랑주 지점에서의 태양 가림막의 면적

태양빛을 모두 가리기 위해 L1에 배치해야 할 면적

- 지구가 가림막의 본영(Umbra) 안에 들어가야 함
- 비례식으로 필요한 가림막 지름 계산:

$$\frac{D_{shade}}{D_{sun}} = \frac{d_{L1}}{d_{sun}} \longrightarrow D_{shade} = D_{sun} \frac{d_{L1}}{d_{sun}}$$
$$\approx 14,000 \text{ km}$$

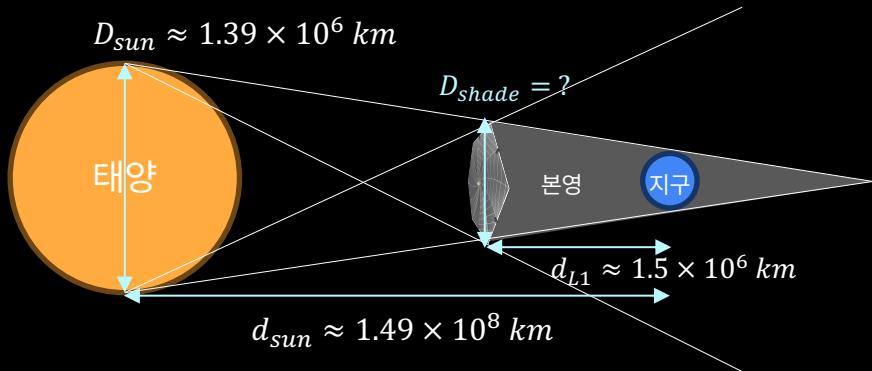
$$\rightarrow \text{배치 면적: } A_{shade} = \pi R_{shade}^2 = \pi \left(\frac{D_{shade}}{2} \right)^2 \approx 1.54 \times 10^8 \text{ km}^2 (= 1.54 \times 10^{14} \text{ m}^2)$$

그렇다면, 태양빛 1%를 가리기 위해 L1에 배치해야 할 면적:

$$A_{1\%} = 0.01 \times A_{shade}$$

$$= 1.54 \times 10^{12} \text{ m}^2$$

→ 하나의 위성으로 커버할 수 없음

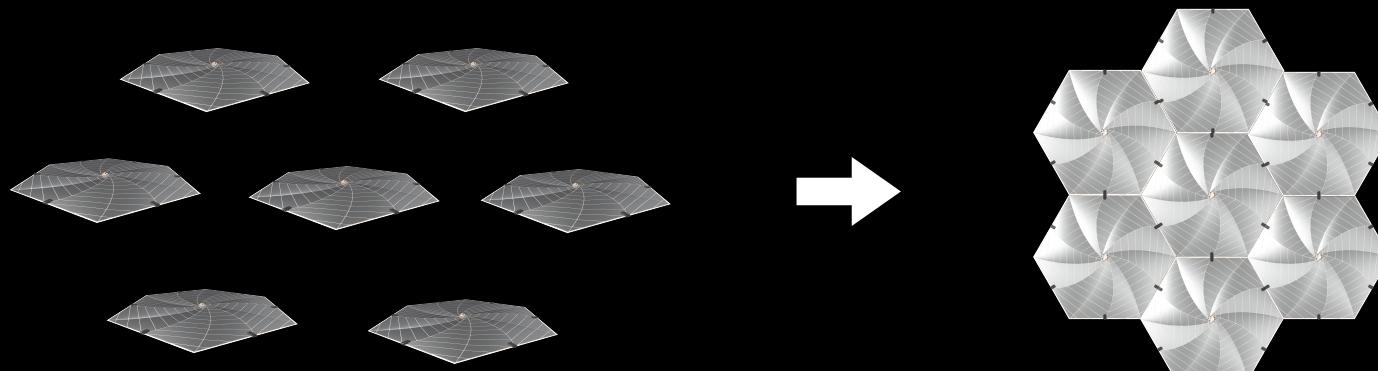


조립형 태양 가림막 위성 설계

대안책 : 여러 위성을 나눠서 보낸 후 궤도상에서 합치는 방법

→ 위성 1기의 면적 = 2500 m^2 가정*

$$\rightarrow \text{총 위성 개수} = \frac{A_{total}}{A_{shade}} = \frac{1.54 \times 10^{12} \text{ m}^2}{2500 \text{ m}^2} = 6.16 \times 10^8 \text{ 기}$$

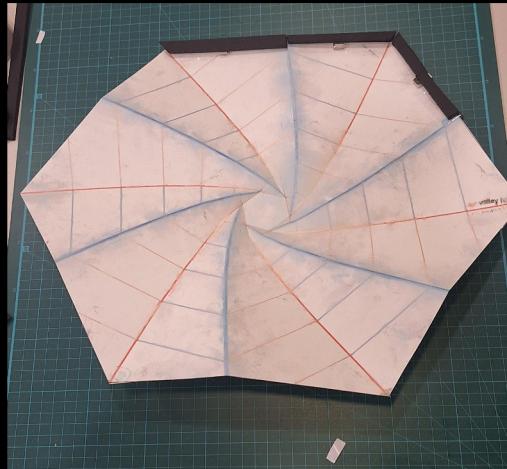
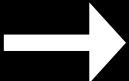
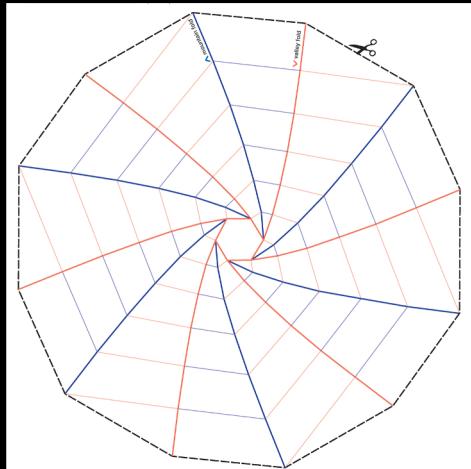


*Fuglesang, C., & de Herreros Miciano, M. G. (2021). Realistic sunshade system at L1 for global temperature control. *Acta Astronautica*, 186, 269-279.

태양 가림막 위성 디자인 설계

NASA의 종이접기 구조를 기반한 디자인

- 발사체에 비교적 작은 크기로 실을 수 있음
- 효율적 결합을 위해 12각형에서 6각형으로 구조 변경



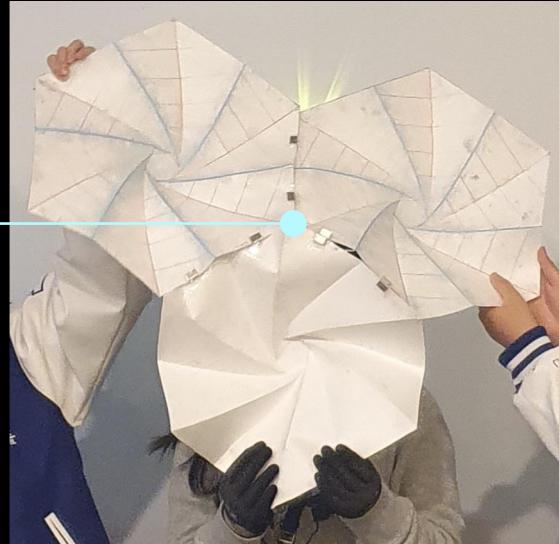
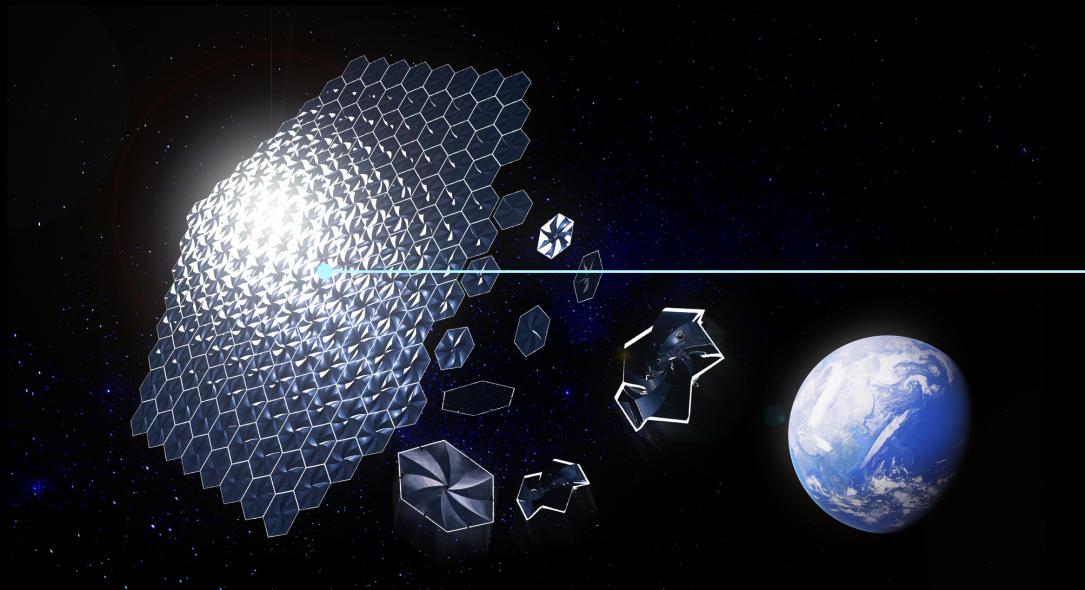
NASA JPL

태양 가림막 위성 디자인 설계

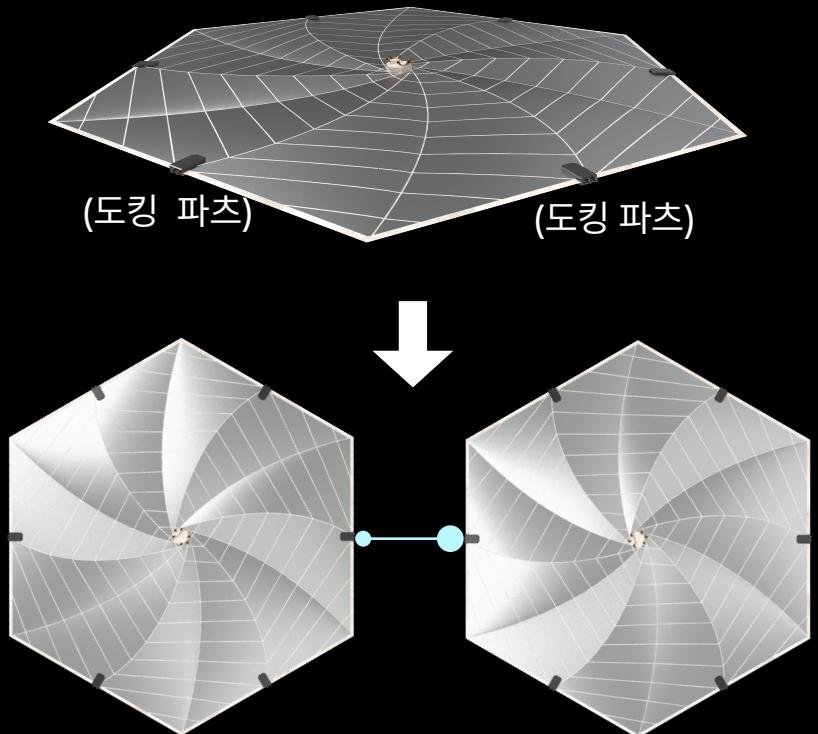
위성을 지속적으로 L1 지점으로 발사

→ 랑데부해서 거대 구조물로 구성

프로토타입 = 자석으로 결합
실제 = 다른 방법 구상 필요

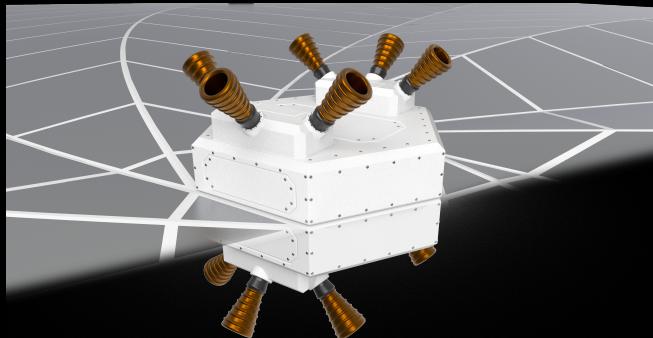


태양 가림막 위성의 도킹 방법



위성 간 연결 방법

- 각 육각형 면 중앙에 도킹 파츠
- 중앙에 정육각형 모양의 추진시스템
- 위성이 기동하여 거대 구조물에 하나씩 추가 결합



위성 1기의 가림막 무게 계산

태양 가림막의 재질: 한쪽은 알루미늄 코팅, 반대쪽은 블랙크롬 코팅, 중간에는 Mylar 막을 사용한 복합 재질*



*Fuglesang, C., & de Herreros Miciano, M. G. (2021). Realistic sunshade system at L1 for global temperature control. *Acta Astronautica*, 186, 269-279.

위성 1기의 가림막 무게 계산

	부피 (m^3)	\times	밀도 (kg/m^3)	=	질량† (kg)
알루미늄	$2.50 \times 10^{-4} m^3$		$2,700 kg/m^3$		$0.675 kg$
				+	
Mylar	$6.25 \times 10^{-3} m^3$		$1,300 kg/m^3$		$8.125 kg$
				+	
블랙크롬	$1.25 \times 10^{-4} m^3$		$7,190 kg/m^3$		$0.898 kg$

가림막 1장 무게 = **9.69 kg**

태양빛 1%를 가리기 위한 위성의 총 무게 계산

추진 시스템 무게: 위성마다 약 50 kg으로 가정

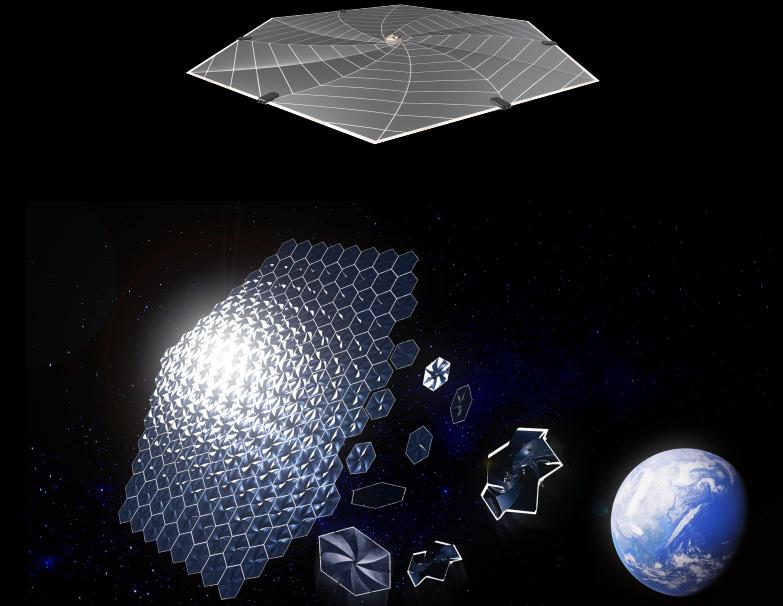
→ 위성 1기의 총 무게 = 가림막 무게 + 추진 시스템 무게

$$= 9.69 \text{ kg} + 50.0 \text{ kg}$$

$$= 59.7 \text{ kg}$$

→ 총 위성의 무게: $(59.7 \text{ kg}) \times (6.16 \times 10^8 \text{ 기})$

$$= 3.67 \times 10^{10} \text{ kg}$$



태양 가림막 위성의 총 발사 횟수 계산

SpaceX Starship으로 발사 가정:

→ 저궤도까지 1회 발사 가능 무게 = 약 150,000 kg*

→ 저궤도에서 연료 재급유 후 L1까지 발사한다고 가정 (Starship 활용 전제 조건**)

→ 저궤도에서 L1 지점까지 필요한 ΔV = 약 3.8 km/s***

$$\text{로켓 방정식: } \Delta V = I_{sp} \cdot g_0 \cdot \ln \frac{M_0}{M_f} \xrightarrow{\text{(재정리)}} M_f = \frac{M_0}{e^{\frac{\Delta V}{I_{sp} \cdot g_0}}}$$

ΔV : 필요 delta-V (= 3.8 km/s)

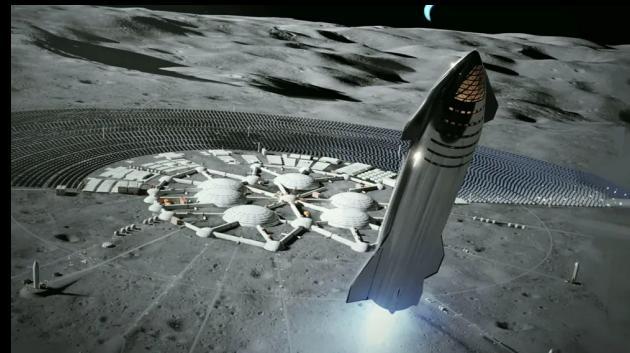
$$= 149,847 \text{ kg}$$

I_{sp} : 엔진 비추력 (= 약 380 s**)

g_0 : 표준 중력 가속도 (= 9.81 m/s²)

M_0 : 연소 전 질량 (= 150,000 kg)

M_f : L1 지점까지 연소 후 질량



*<https://www.americaspace.com/2024/04/20/starship-faces-performance-shortfall-for-lunar-missions/>

**<https://www.spacex.com/media/StarshipUsersGuide.pdf>

***<https://soho.nascom.nasa.gov>

태양 가림막 위성의 총 발사 횟수 계산

SpaceX Starship으로 발사 가정:

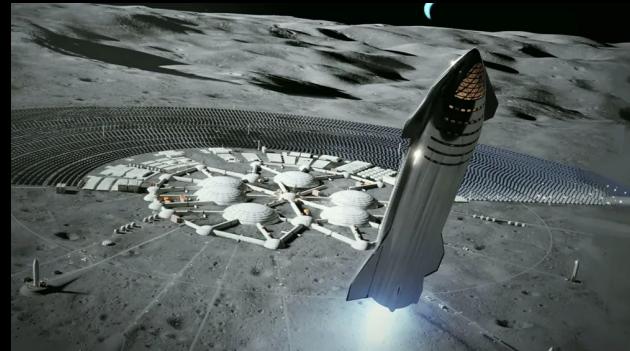
→ 저궤도까지 1회 발사 가능 무게 = 약 150,000 kg*

→ 저궤도에서 연료 재급유 후 L1까지 발사한다고 가정 (Starship 활용 전제 조건**)

→ 저궤도에서 L1 지점까지 필요한 ΔV = 약 3.8 km/s***

$$\text{총 발사 횟수: } \frac{\text{총 위성 무게}}{\text{1회 발사 가능 무게}} = \frac{3.67 \times 10^{10} \text{ kg}}{149,847 \text{ kg}}$$

≈ 245,000회 발사 필요



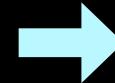
*<https://www.americaspace.com/2024/04/20/starship-faces-performance-shortfall-for-lunar-missions/>

**<https://www.spacex.com/media/StarshipUsersGuide.pdf>

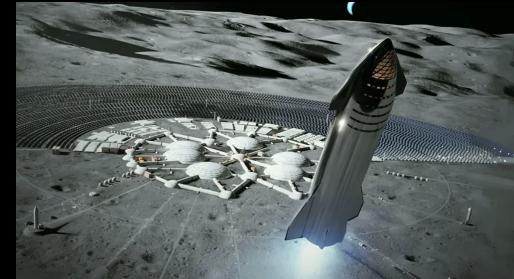
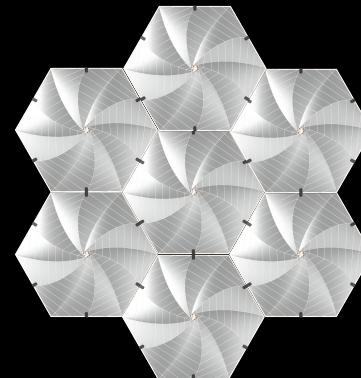
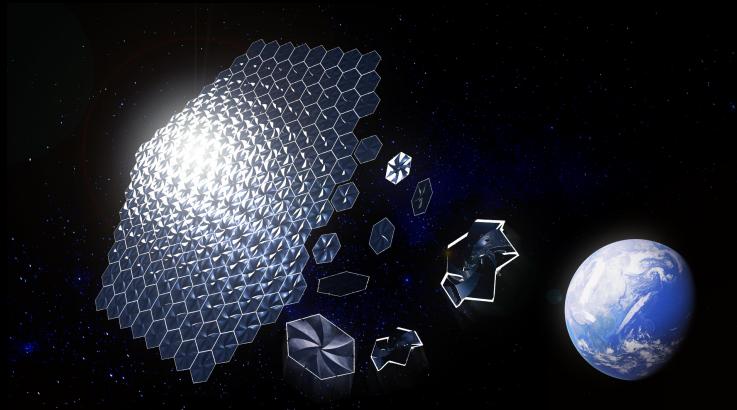
***<https://soho.nascom.nasa.gov>

결론

- 태양빛 1%를 가리기 위한 가림막 위성의 총 면적 = $1.54 \times 10^{12} \text{ m}^2$
- 종이접기 형태의 위성 6.16×10^8 기를 따로 발사하여 거대 구조물로 결합
- 총 $3.67 \times 10^{10} \text{ kg}$ 의 위성을 SpaceX Starship 약 245,000번 발사



지속 가능한 지구!



감사합니다!

박소이

강민승

김무진

김성준 멘토

송태환

안치후

