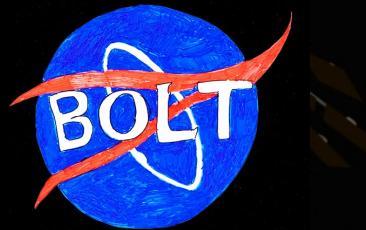




우주태양광 발전을 위한 집광 위성 설계



김은유 | 강선우 | 서혜인 | 김강건 | 최민준

멘토 장건익

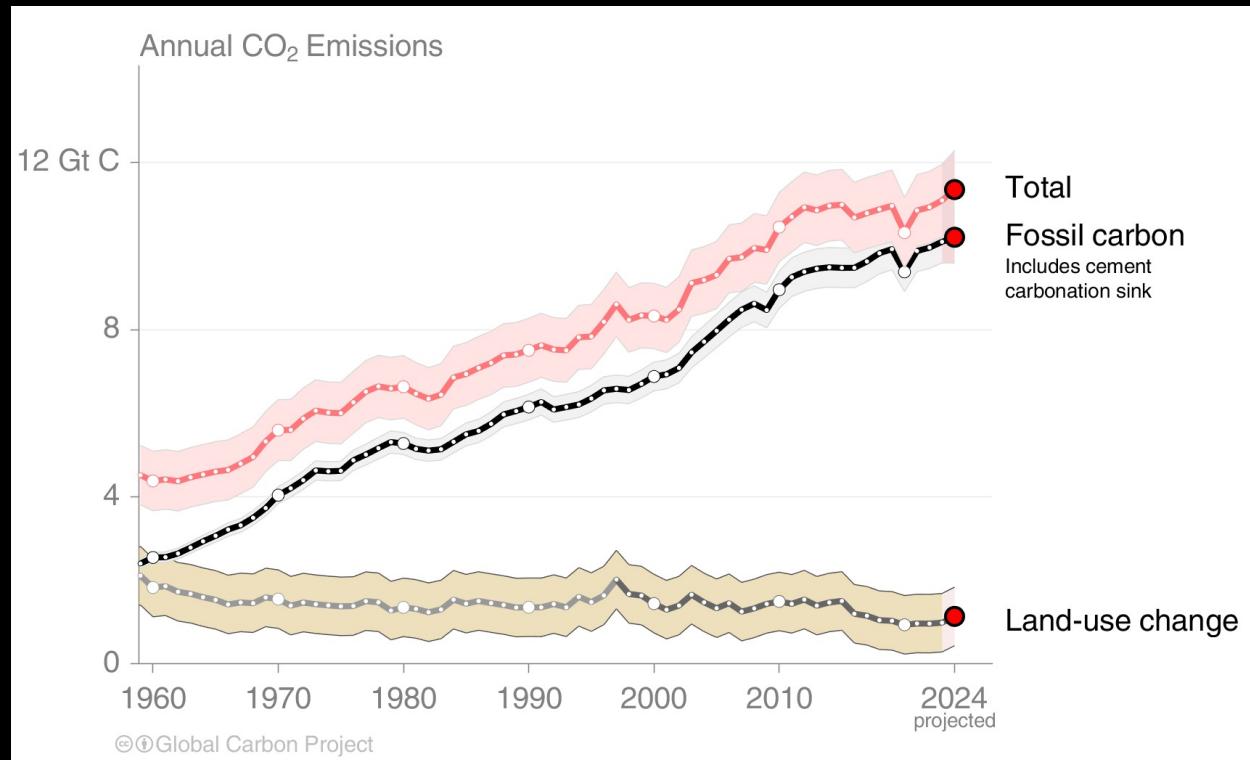
목차

1. 서론
2. 발전 형태 선정
3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험
4. 집광 위성 구조 설계
5. 집광 위성 건설 및 발사 계획
6. 결론

1. 서론 – 지구의 현재



1960년 이후 연간 탄소 배출량 변화



- 현 시대에서 인류가 살아가기 위해서는 전기가 필수적으로 자리매김 → 전기는 대부분 화석 연료를 사용하여 생산
- 화석연료의 사용으로 인한 이산화탄소 배출량은 산업혁명 이후 급격하게 증가

| 1. 서론 – 에너지의 발전의 조건

친환경 에너지

재생 가능한 에너지



일정한 발전량

예측 가능한 발전량

높은 효율의 에너지



태양광 발전

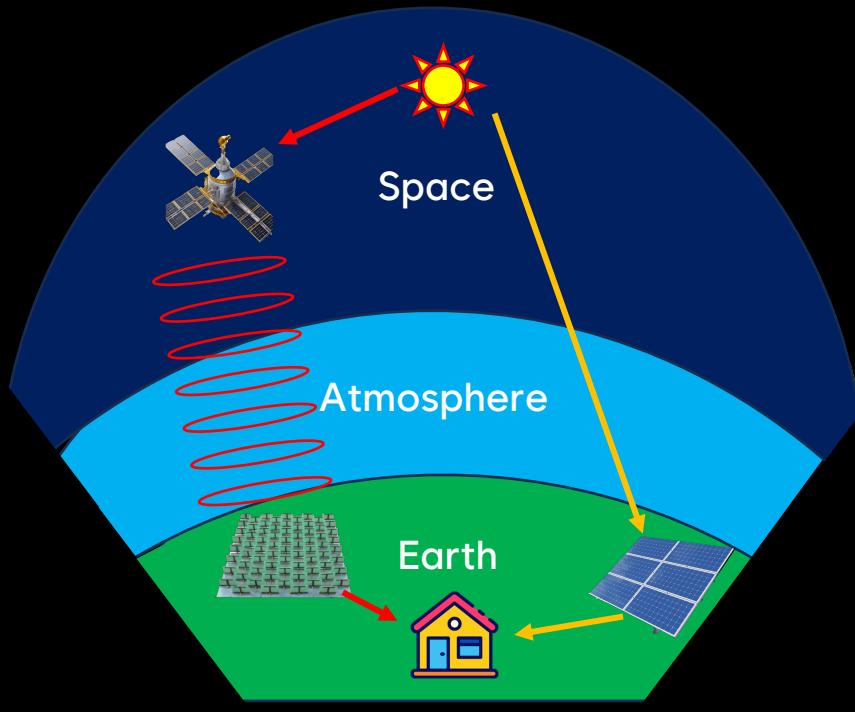


1. 서론 - 우주태양광 발전 vs 지상 태양광 발전

우주에서의 평균 일조량 :
32.8 kWh/m²/day

Factors	Efficiency	System Efficiency
Solar Energy Collection and Conversion	0.29	0.4
Power transmission and management	0.854	0.248
Microwave power conversion and emitting	0.833	0.207
Microwave power transmission	0.9	0.186
Microwave power receiving and conversion	0.765	0.143
Electric power regulation	0.97	0.138

전력 생산량:
4.53 kWh/m²/day



한국 평균 일조량 :
3.99 kWh/m²/day

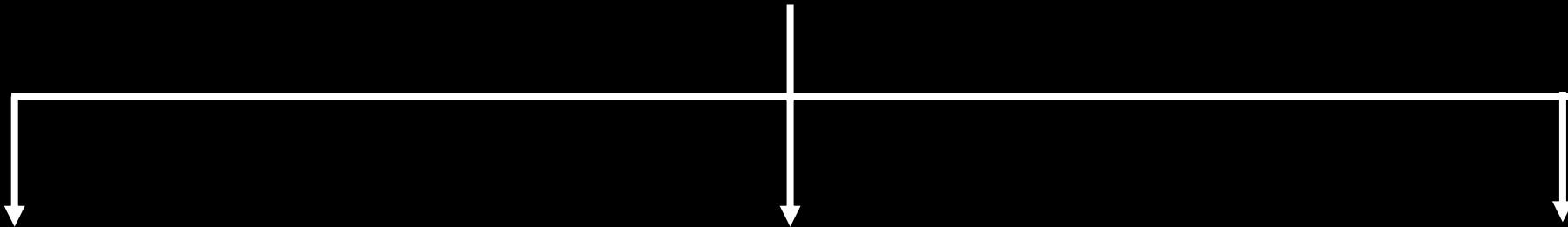
Factors	Efficiency	System Efficiency
Solar Energy Collection and Conversion	0.336	0.336
Electric power regulation	0.97	0.330

전력 생산량:
1.32 kWh/m²/day

우주/지상
전력 생산비 :
3.4

| 1. 서론 - 연구목표

우주 태양광 발전을 위한 **집광 위성** 설계



발전/전송 방식 선정

발전 형태 및 방식

에너지 전송 방식

실험 및 필요 면적 계산

프레넬 렌즈를 활용한 집광 효율 계산 실험

목표 발전량(1GW)을 충족시키기 위한

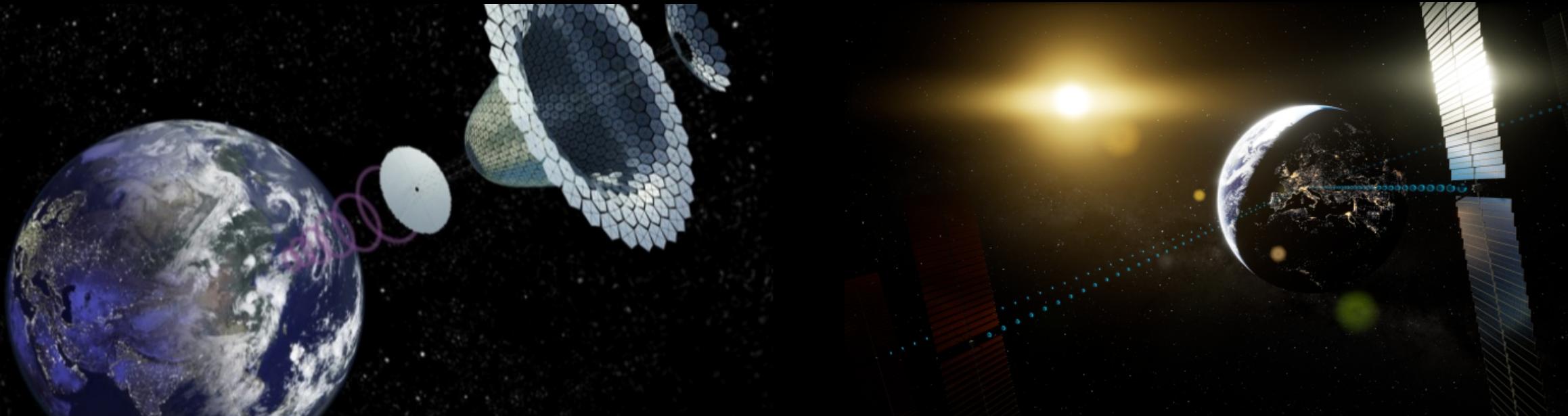
프레넬 렌즈 면적 계산

집광 위성 설계

전개형 프레넬 렌즈 및 송신기 설계

모듈식 단계별 발사 계획 수립

| 2. 발전 형태 선정 - 태양광 발전 방식 선정



Concentrated (집광형)

거울, 렌즈를 통해서 태양빛을 태양전지판에 **집중**시켜서 발전

장점 - 발전 효율이 높다 : 30 ~ 45%

단점 - 구조의 무게, 부피 증가

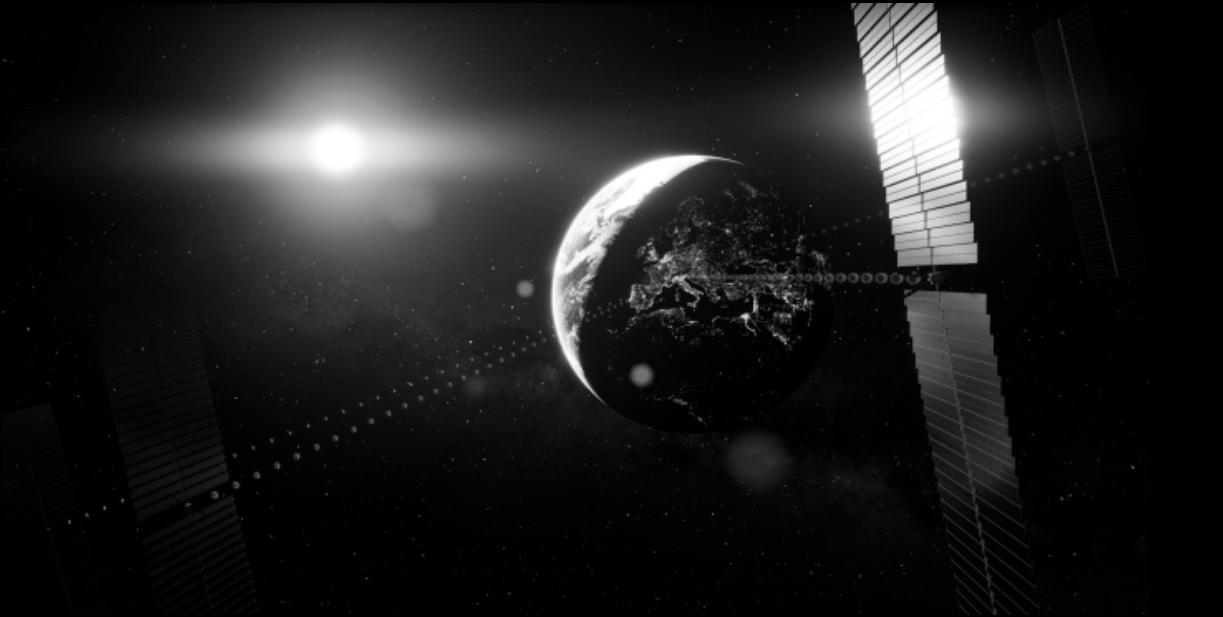
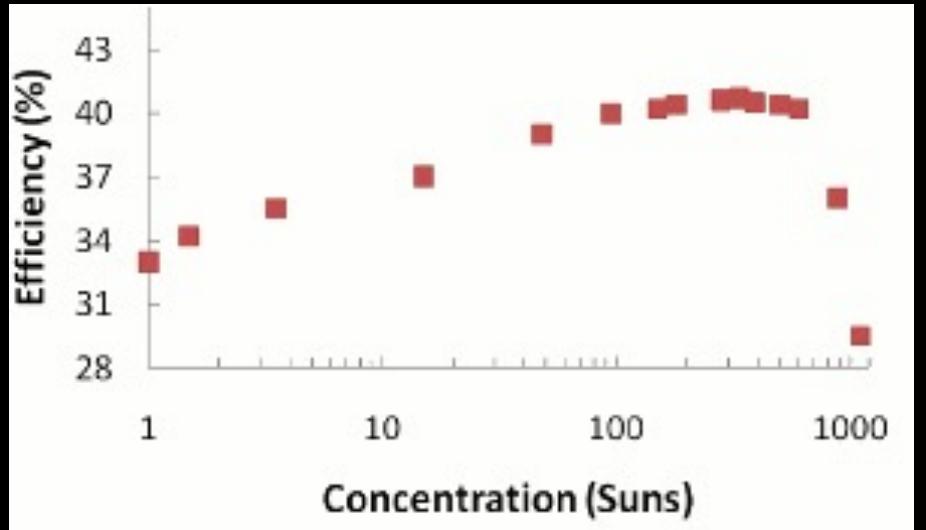
Non-Concentrated (비집광형)

태양빛이 태양 전지판에 직접 도달하여 발전

장점 - 발전 구조가 가볍다, 차지하는 부피가 작다

단점 - 발전 효율 낮다 : 15~22%

2. 발전 형태 선정 - 태양광 발전 방식 선정



Concentrated (집광형)

거울, 렌즈를 통해서 태양빛을 태양전지판에 집중시켜서 발전

장점 - 발전 효율이 높다 : 30 ~ 45%

단점 - 구조의 무게, 부피 증가

Non-Concentrated (비집광형)

태양빛이 태양 전지판에 직접 도달하여 발전

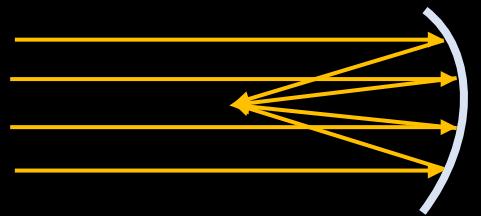
장점 - 발전 구조가 가볍다, 차지하는 부피가 작다

단점 - 발전 효율 낮다 : 15~22%

| 2. 발전 형태 선정 - 태양광 집광 방식 선정

거울형 집광 장치

오목거울형 집광 장치

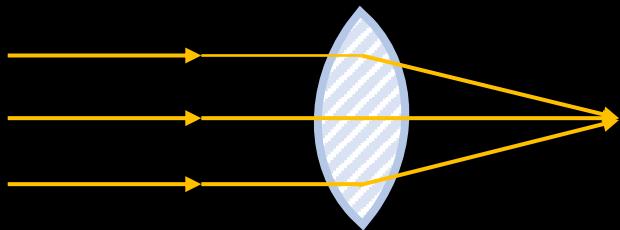


장점 : 태양 에너지를 집중시켜 높은
변환 효율을 달성

단점 : 발전 효율 감소 및
주변 구조물에 영향

렌즈형 집광 장치

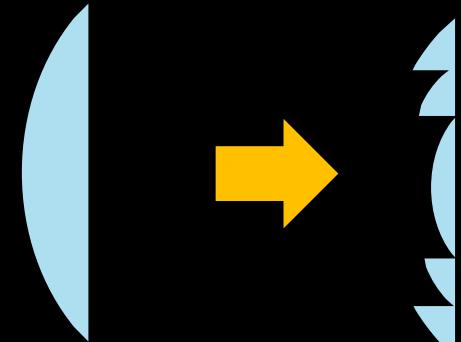
볼록렌즈형 집광 장치



장점 : 높은 에너지 밀도 확보 가능

단점 : 무게가 증가

프레넬 렌즈형 집광 장치



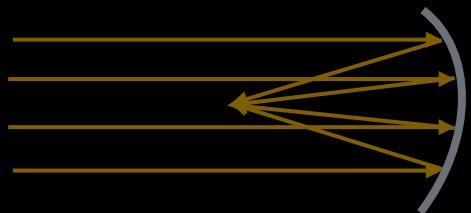
장점 : 볼록렌즈 비해 휴대성 향상

단점 : 빛의 손실이 발생

| 2. 발전 형태 선정 - 태양광 집광 방식 선정

거울형 집광 장치

오목거울형 집광 장치

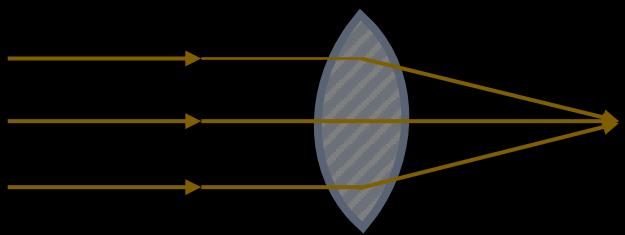


장점 : 태양 에너지를 집중시켜 높은
변환 효율을 달성

단점 : 발전 효율 감소 및
주변 구조물에 영향

렌즈형 집광 장치

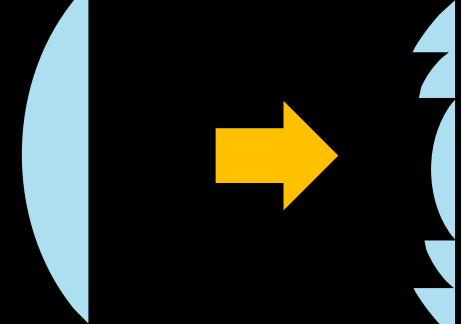
볼록렌즈형 집광 장치



장점 : 높은 에너지 밀도 확보 가능

단점 : 무게가 증가

프레넬 렌즈형 집광 장치



장점 : 볼록렌즈 비해 휴대성 향상

단점 : 빛의 손실이 발생

2. 발전 형태 선정 – 전송 방식 선정

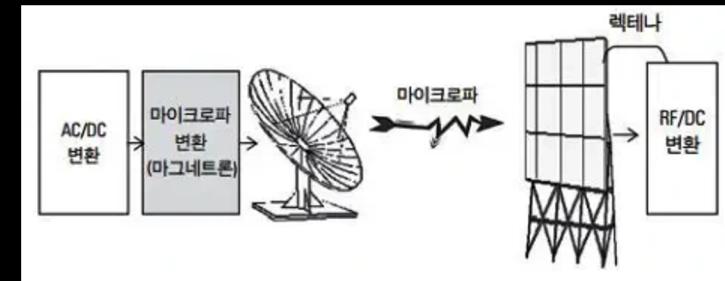
레이저 무선 전력 전송



장점: 전자파 및 통신 간섭 문제에 안전

단점: 고출력의 레이저는 **사람에게 위험**

마이크로파 무선 전력 전송

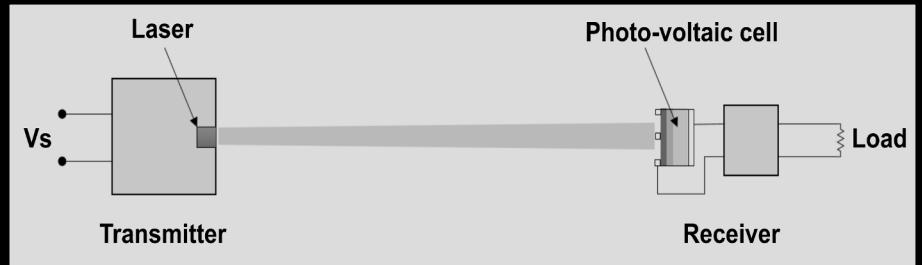


장점: 날씨에 의한 송전 전력의 영향이 적음

단점: 낮은 주파수를 사용할 경우 안테나 크기 커짐

| 2. 발전 형태 선정 – 전송 방식 선정

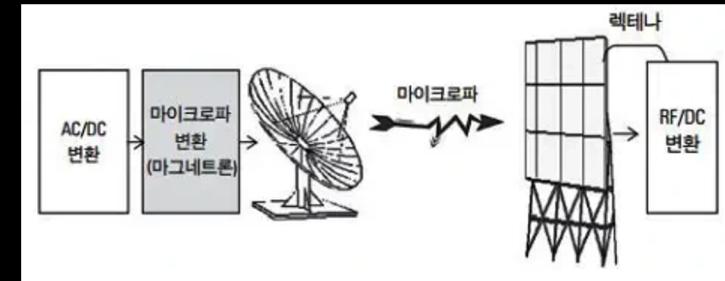
레이저 무선 전력 전송



장점: 전자파 및 통신 간섭 문제에 안전

단점: 고출력의 레이저는 사람에게 위험

마이크로파 무선 전력 전송

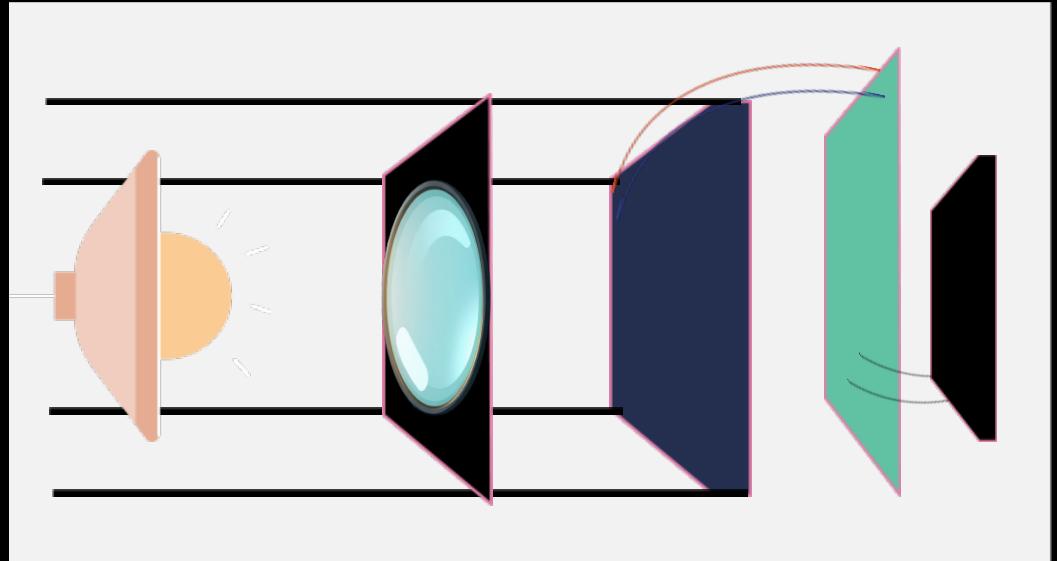


장점: 날씨에 의한 송전 전력의 영향이 적음

단점: 낮은 주파수를 사용할 경우 안테나 크기 커짐

| 3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험 : 실험 장치

실험 목적 : 집광장치의 유무에 따른 발전된 전력의 차이 및 집광 효율 계산 & 1GW 발전량을 충족시키는 프레넬 렌즈 면적 계산

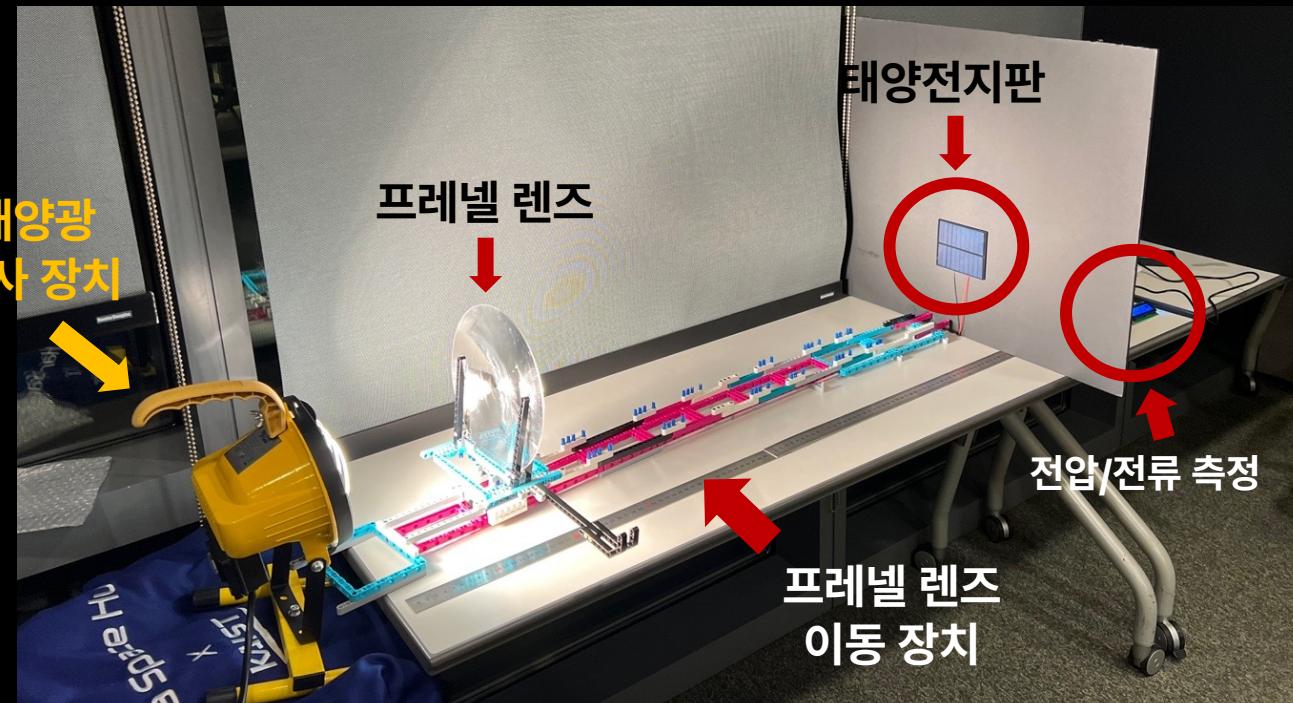


태양광
모사 장치

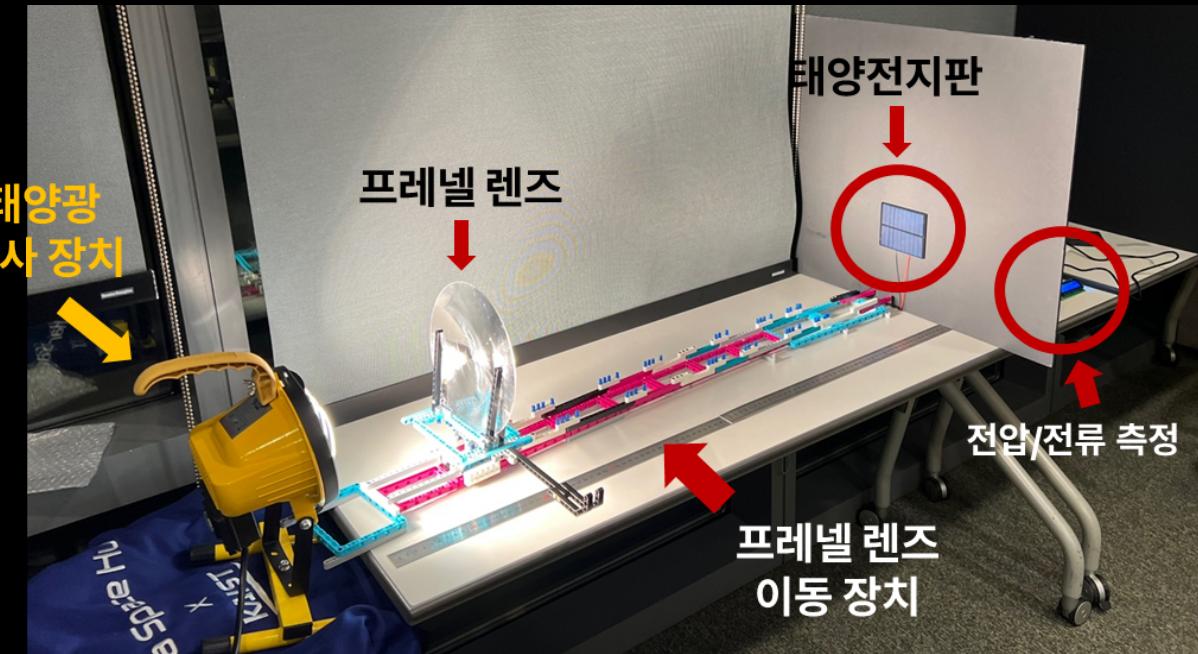
프레넬 렌즈

태양전지판

전압/전류
측정



| 3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험 : 실험 과정



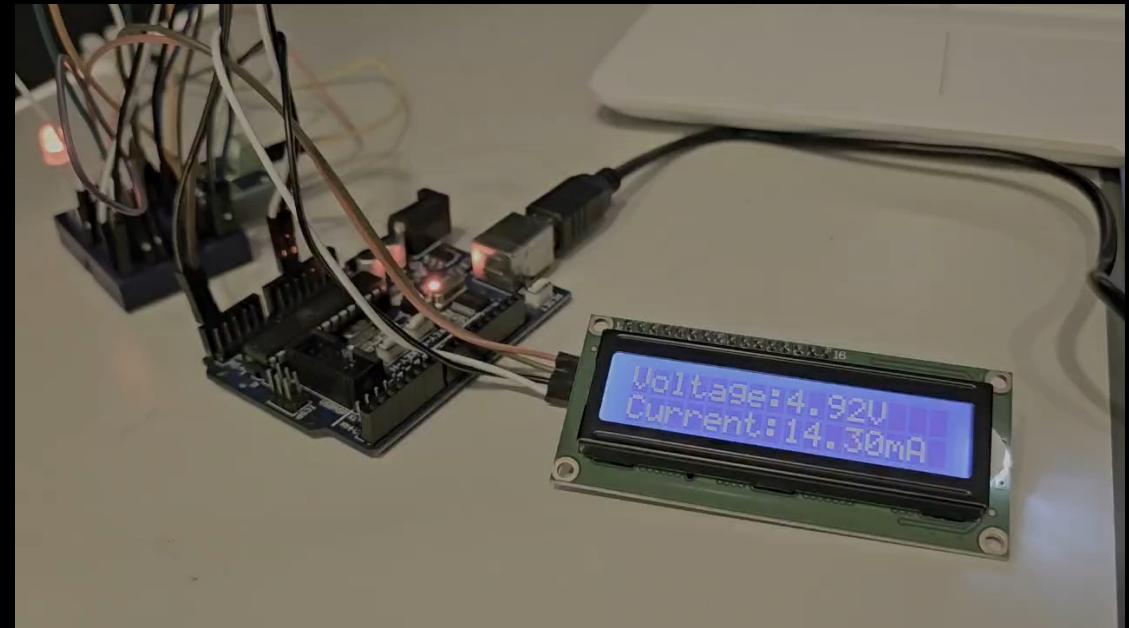
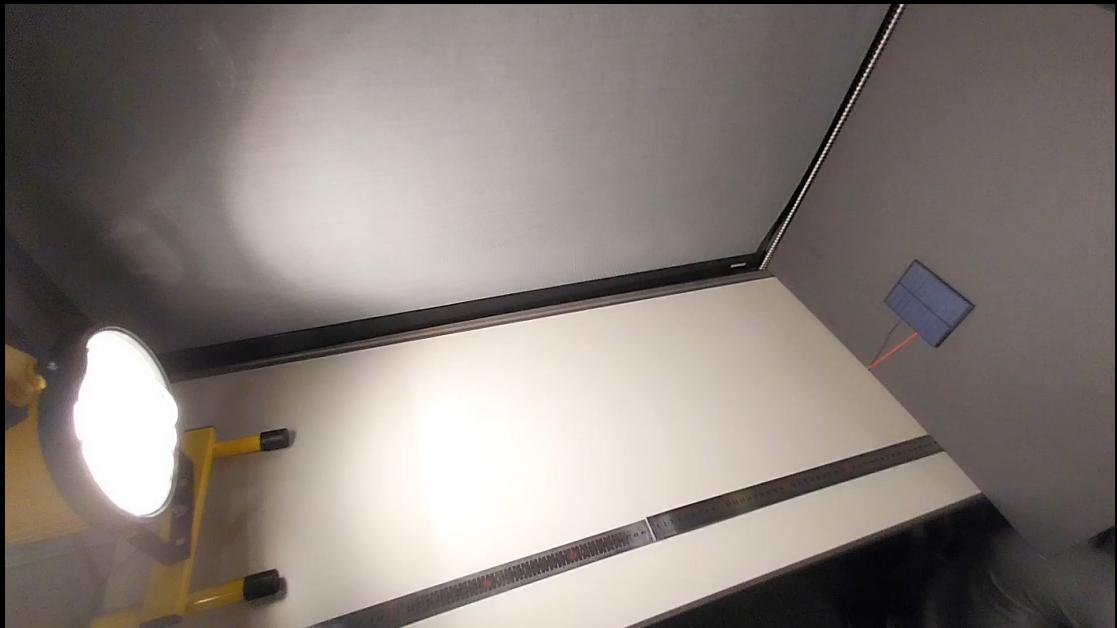
STEP 1. 태양광패널이 생산하는 **전력의 양**을 알기 위해 태양광발전 전류전압 실험키트 조립

STEP 2. 태양광 모사 장치(할로겐 램프)의 높이에 맞춰 **태양광패널**을 폼보드에 부착

STEP 3. 각도기를 이용해 바닥과 폼보드가 **수직**이 되게 부착

STEP 4. 태양광패널의 전류와 전압의 크기를 측정하여 **발전 전력을 계산** ($\text{전력}(P) = \text{전압}(V) \times \text{전류}(I)$)

| 3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험 : 실험 결과



| 3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험 : 실험 결과

	비집광 전력[W]	집광 최대 전력[W]	증가율
직경 200mm/ 초점거리 140mm	4.84	8.928	84.46%
직경 184mm/ 초점거리 170mm	4.84	8.364	72.8%
직경 150mm/ 초점거리 140mm	4.84	8.47	75%

[실험결과 분석]

렌즈의 직경은 200mm이고 초점거리는 140mm인 렌즈의 발전된 전력이 **84.46%로 가장 크게 증가**하였다.

모든 경우에서 집광형일 때 최소 **72.8% 이상의 전력 증가**

| 3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험 : 결론 정리

실험 결과

1. 집광장치가 있을 때, 없는 것보다 실험 상 최소 **72.8% 이상 전력**을 얻을 수 있다
2. 렌즈의 직경이 200mm 일 때, 150mm보다 실험상 **10% 이상의 전력**을 얻을 수 있었다

실험 결론

1. 우주 태양광 발전할 때 효율을 높이기 위해서 집광장치가 필수적
2. 렌즈의 직경이 클수록 생산되는 전력이 크기에 렌즈의 직경은 증가해야함
3. 렌즈의 집광 시의 **집광 효율은 실험을 통해 85%까지 증가**한다는 것을 확인

→ Beam Collection Efficiency : 0.85

| 3. 집광 위성 구조 설계를 위한 실험 : 프레넬 렌즈 필요 면적 계산

목표 발전량(N) : **1GW** (=10⁹ W)



$$\text{프레넬 렌즈 필요 면적}(A_P) = (N \cdot \eta_T \cdot \eta_{SP} \cdot \eta_{DR} \cdot \eta_{BC} \cdot \eta_{RD}) / I$$

η_T (fresnel Lens Transmission Efficiency) = 0.91*

η_{DR} (DC-to-RF Efficiency) = 0.8*

η_{SP} (Solar Panel Efficiency) = 0.4*

η_{RD} (RF-to-DC Efficiency) = 0.9*

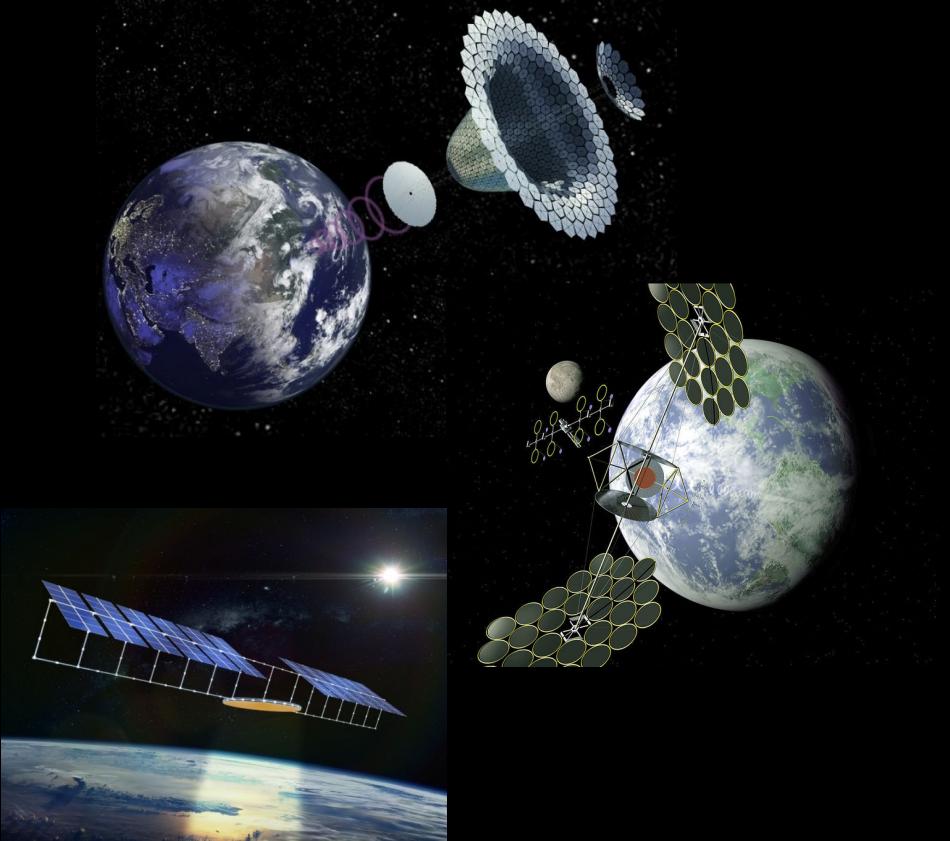
η_{BC} (Beam Collection Efficiency) = 0.85

I (Solar Constant) = 1361 W/m²



프레넬 렌즈 필요 면적 = **3.3km²**

| 4. 집광 위성 구조 설계



집광 위성 구조 설계 시의 무게와 부피 문제 극복 방안

집광 장치의 **배치** 방법

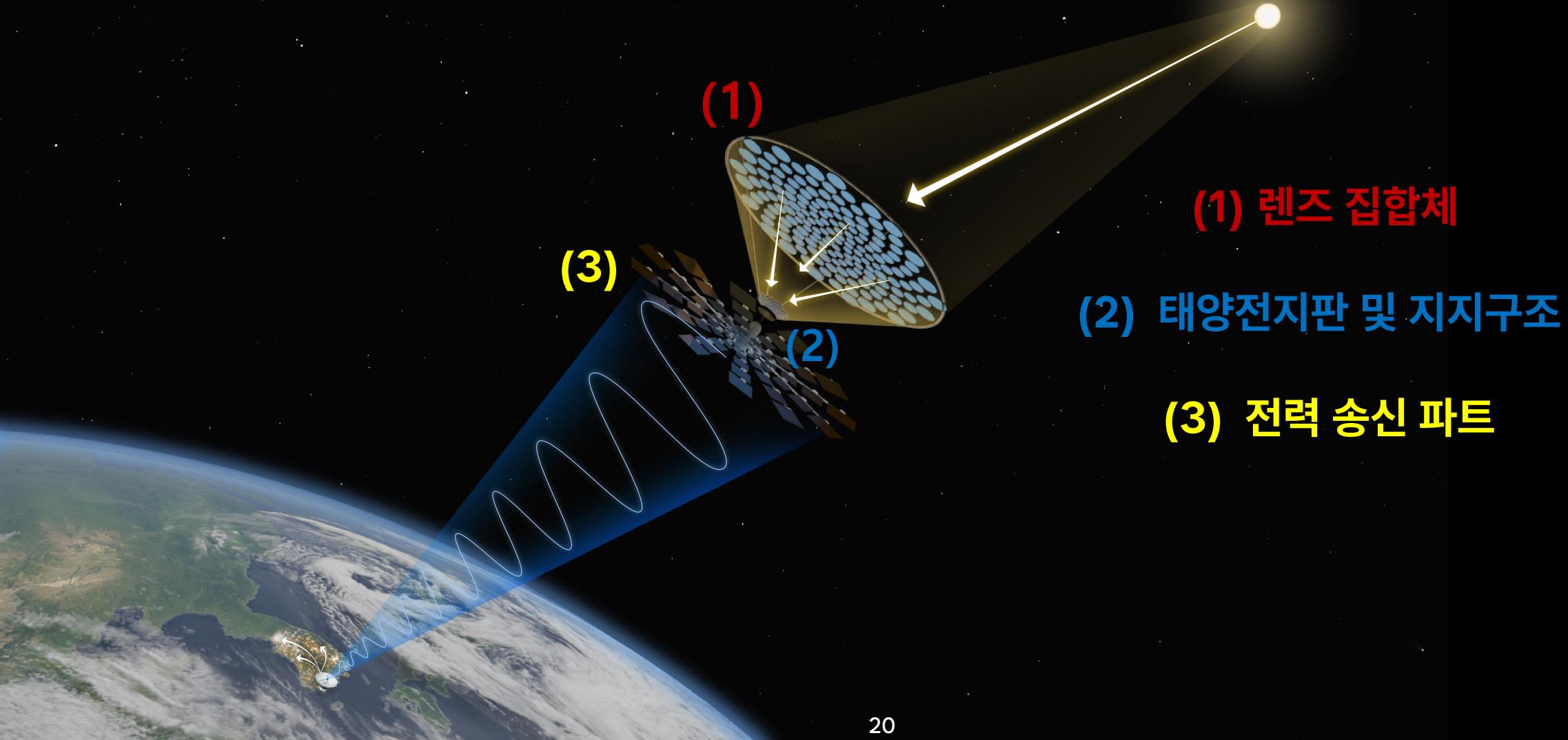
집광 장치의 **수납** 방법

집광 장치의 **연결** 방법

| 4. 집광 위성 구조 설계

PIS – SBSP

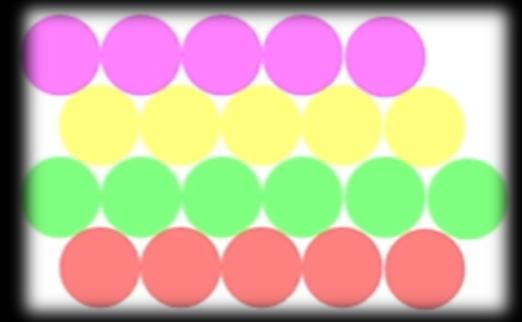
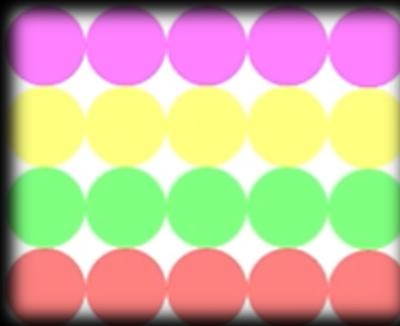
(Pebble In the Sky – Space-Based Solar Power)



| 4. 집광 위성 구조 설계

• 집광 장치의 배치 문제

같은 공간에 그림과 같이 20개의 원형 중에서 전체가 같은 넓이를 유지하며 1개를 더 추가하려면 어떻게 해야 할까?



→ 사선 형태로 배치하면 가능

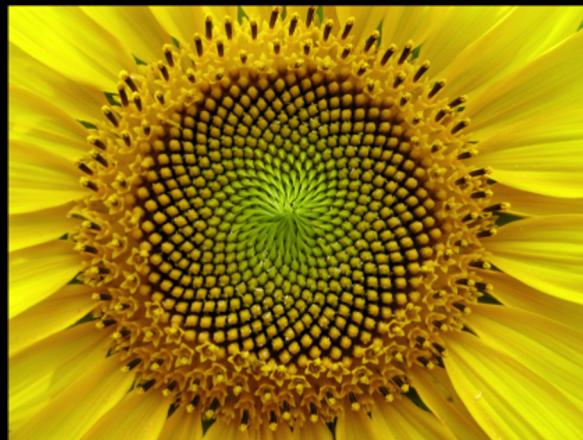
→ 이를 최대한으로 활용한 구조가 페르마 나선

나선구조를 활용한 에너지 발전 사례*
(PS-20)

→ 페르마 나선의 특징 :

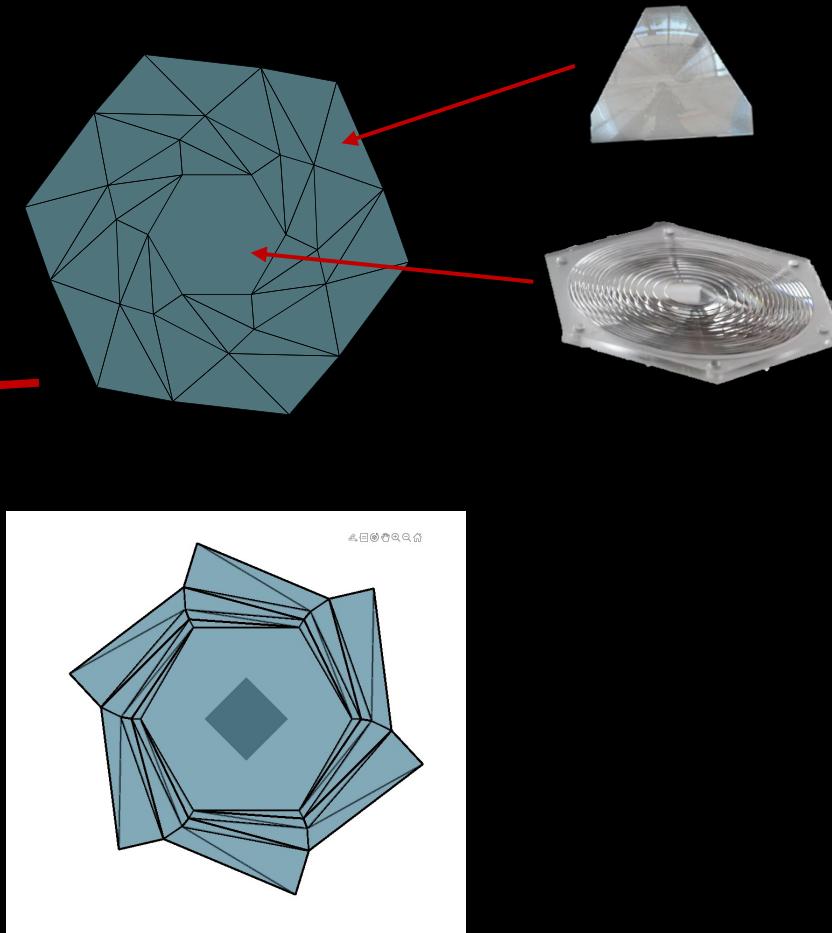
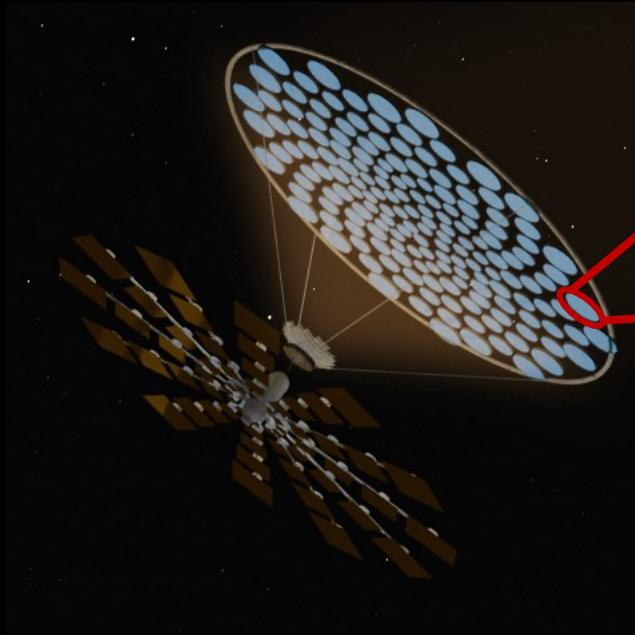
1. 나선 구조체의 나선 팔의 개수는 **피보나치 수열**로 구성
2. 나선 팔에 있는 나선을 구성하는 각각의 점들도 **피보나치 수열**로 구성

우주의 조각들



4. 집광 위성 구조 설계 – 렌즈 구조체 설계

- 집광 장치의 수납 문제 – 개별 렌즈 설계

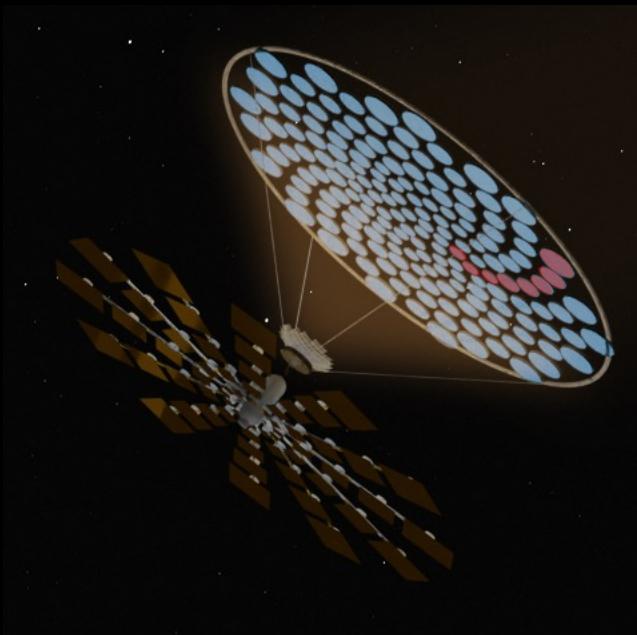


작은 삼각형, 육각형 렌즈로 구성된 전개형 프레넬 렌즈 구조체로 설계

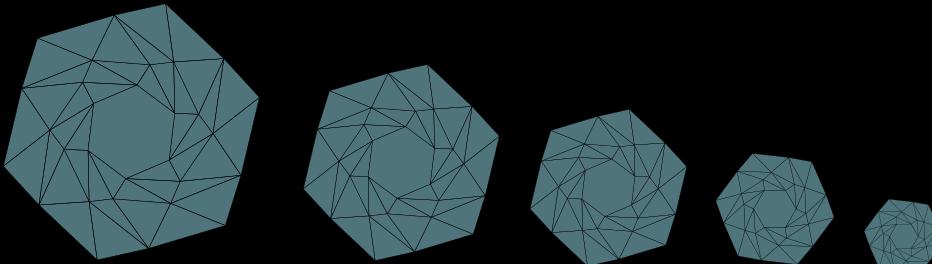
하나 플렉스(HanaFlex)*
종이접기를 활용한 구조 전개 방식
원심력을 이용하여 전개

| 4. 집광 위성 구조 설계 – 렌즈 구조체 설계

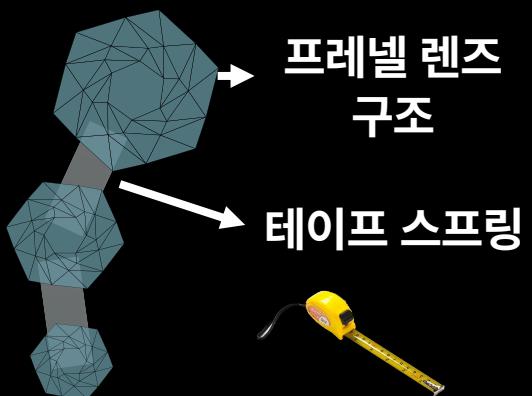
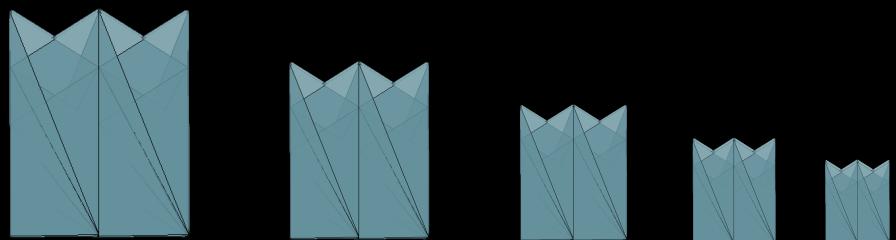
- 집광 장치의 수납/연결 문제 – 렌즈 나선구조 설계



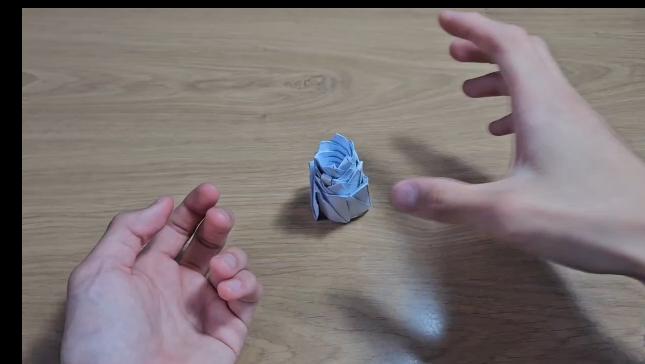
전개 상태



수납 상태



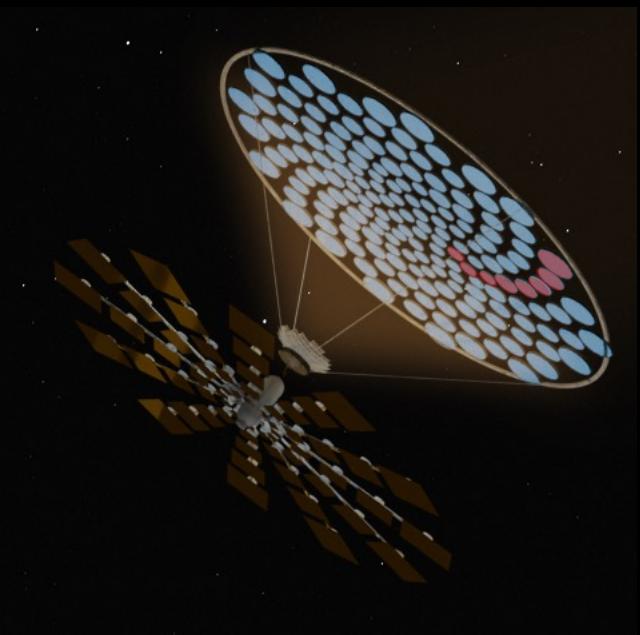
마트료시카
내부 공간에 더 작은 렌즈를
수납할 수 있도록 설계



마트료시카와 테이프 스프링을 활용하여 설계
하나 플렉스 안에 또 다른 하나 플렉스를 넣어서 수납

4. 집광 위성 구조 설계 – 렌즈 구조체 설계

- 집광 장치의 수납/연결 문제 – 렌즈 나선구조 설계



프레넬 렌즈 필요 면적 = 3.30 km^2

페르마 나선의 성질 → 피보나치 수열 ∵ 21개 나선 집합체

나선 팔 1개 면적 : $3.30 \text{ km}^2 \div 21 = 0.1571 \text{ km}^2$

우주의 조각돌

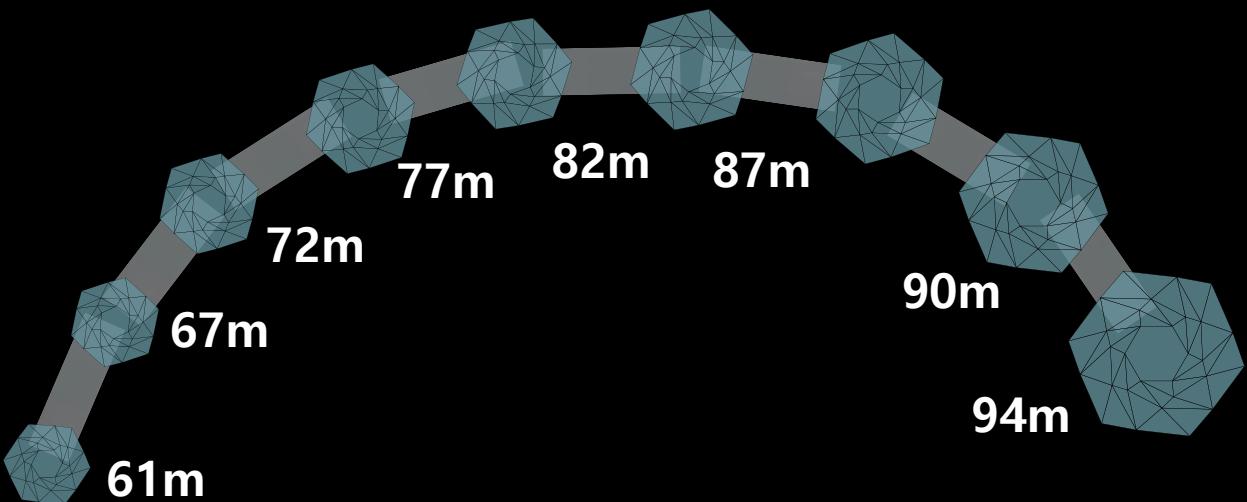
페르마 나선의 성질 → 피보나치 수열 ∵ 8개 렌즈 패널

12:11:10:9:8:7:6:5 모형 제작의 경우 수납 가능 → 비례식 활용

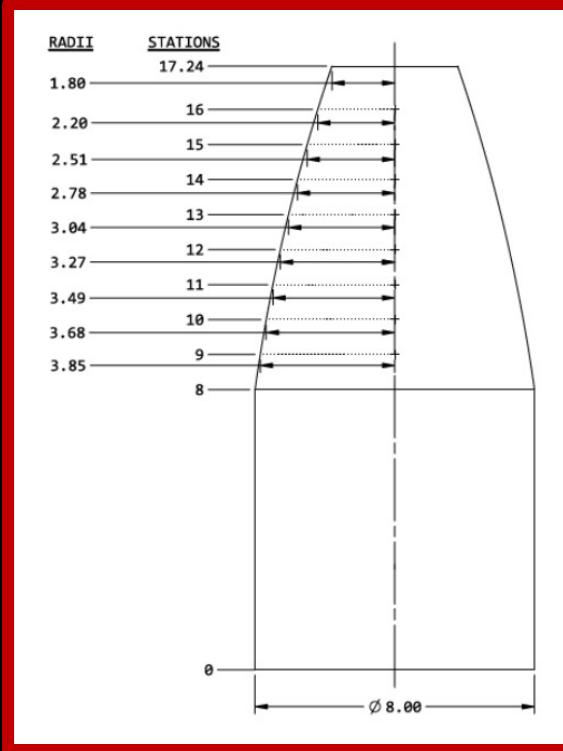
렌즈 각각의 면적(A_i) 계산 : $157100 \times [\frac{12}{68}, \frac{11}{68}, \frac{10}{68}, \frac{9}{68}, \frac{8}{68}, \frac{7}{68}, \frac{6}{68}, \frac{5}{68}]$

$$\text{렌즈의 반지름} = \sqrt{\frac{A_i}{\pi}}, i = 1, 2 \dots 7, 8 \text{ (자연수)}$$

렌즈 반지름 : 94m, 90m, 87m, 82m, 77m, 72m, 67m, 61m

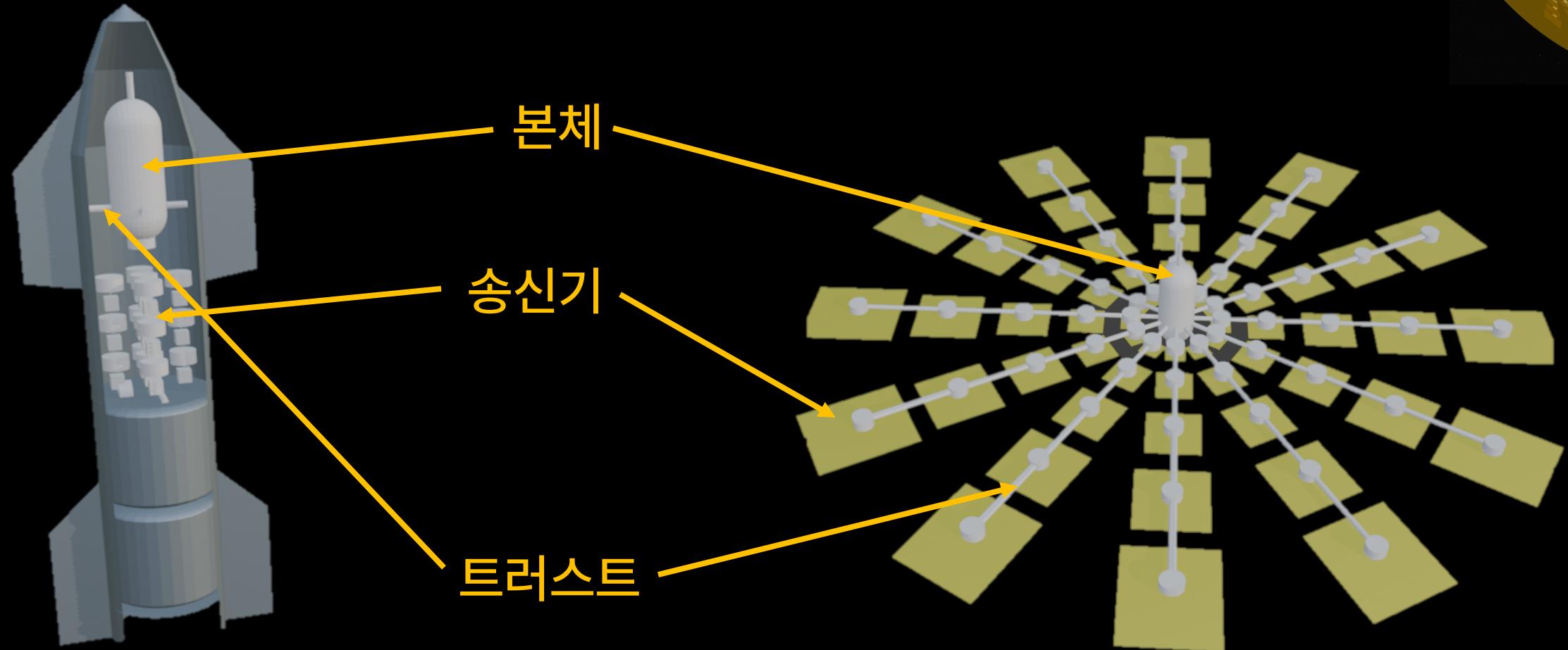
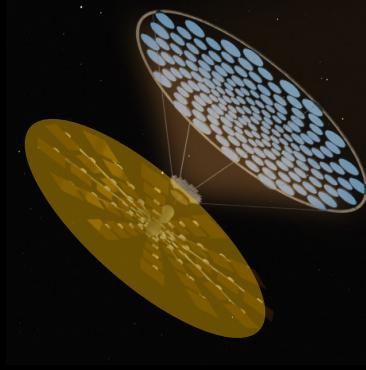


| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획



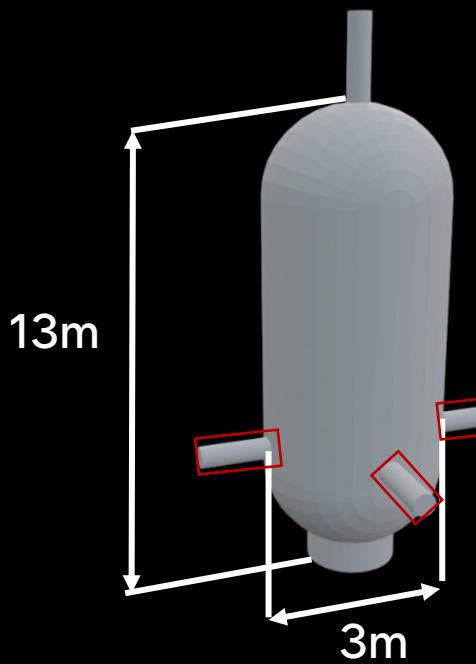
Starship*을 활용하여 집광 위성의 모듈식 단계별 발사 계획 수립

| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 1차 그룹 발사 : 본체&송신기 발사

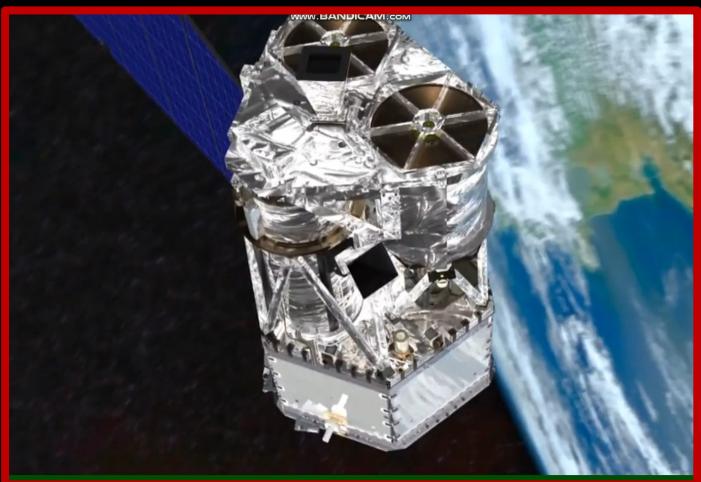


| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 1차 그룹 발사 : 본체&송신기 발사

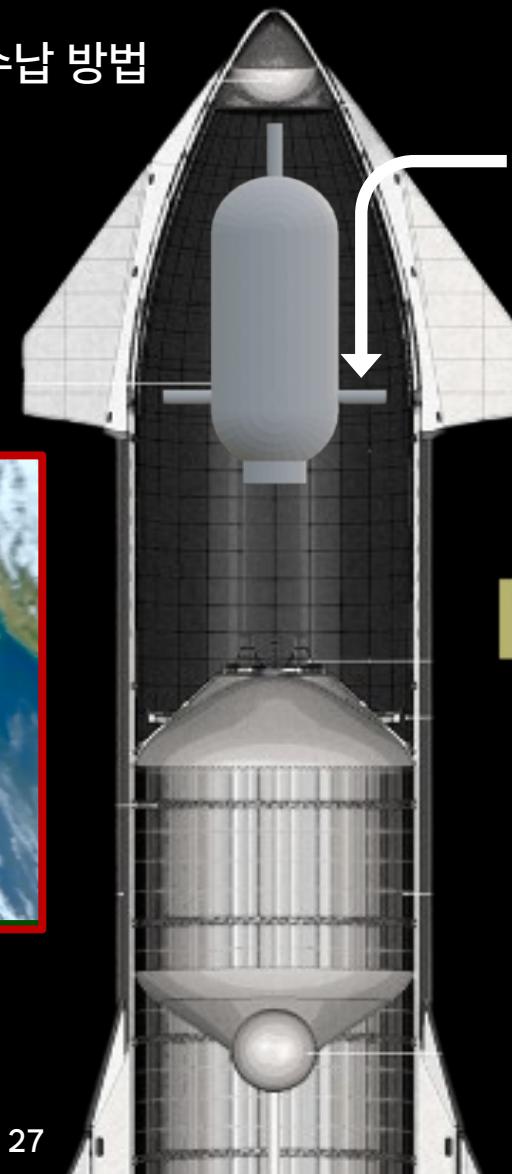
본체 & 트러스트



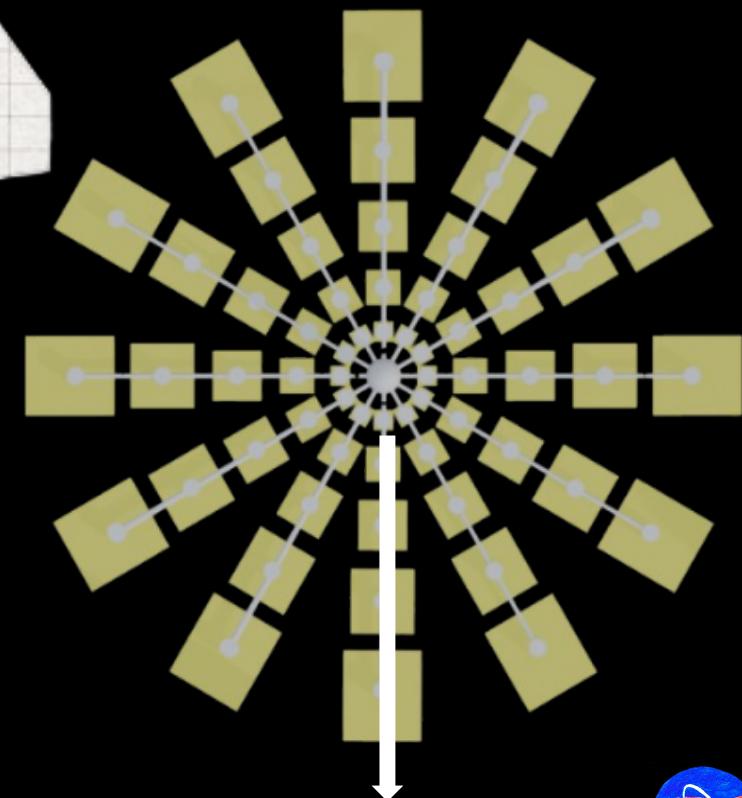
확장형 트러스트 :
30배 까지 확장



수납 방법



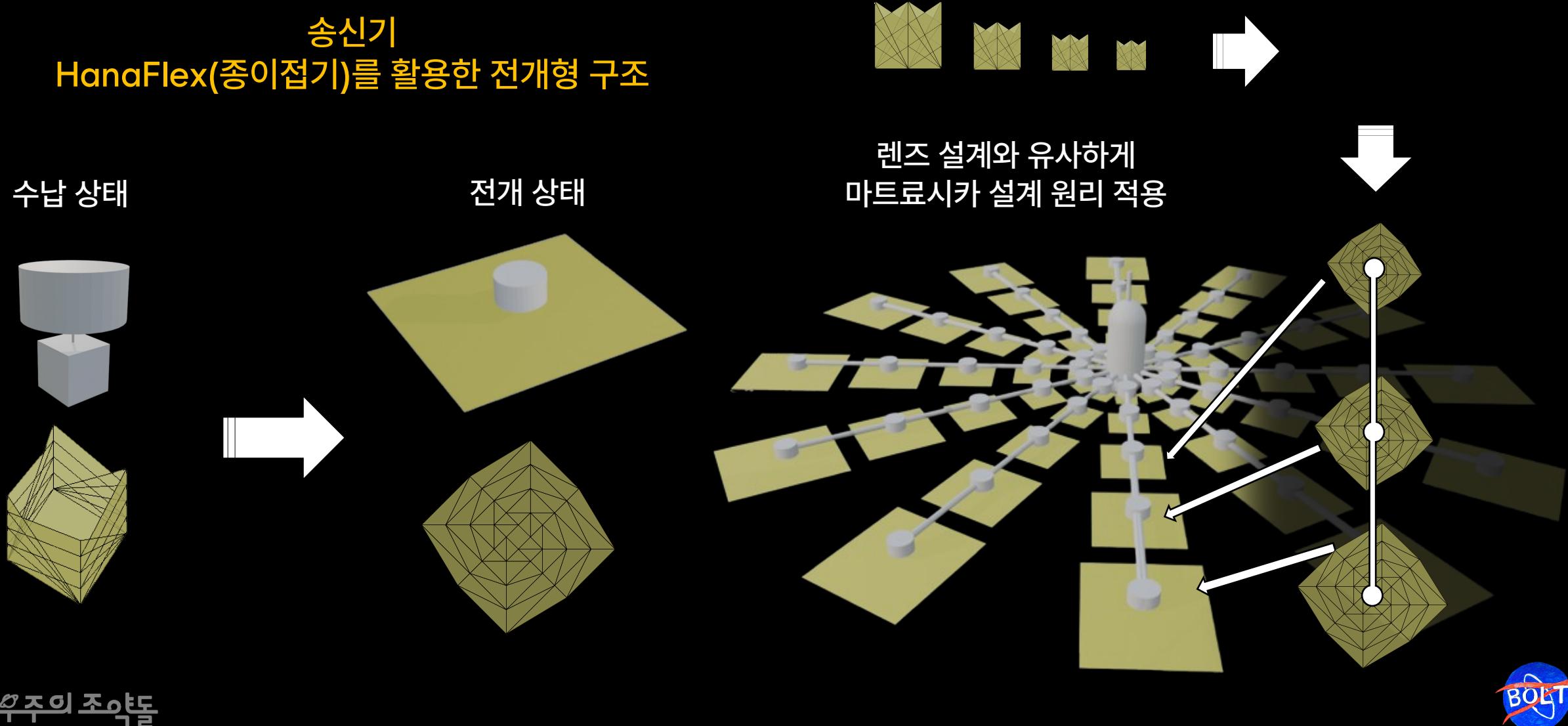
3m → 90m 까지 전개



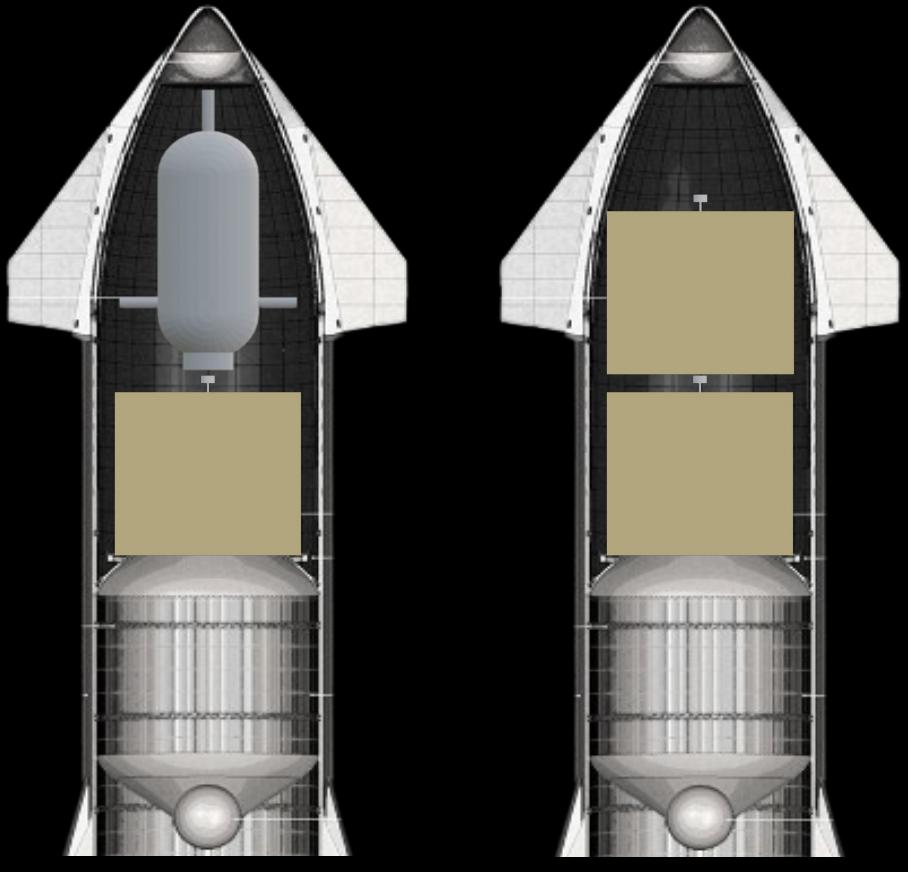
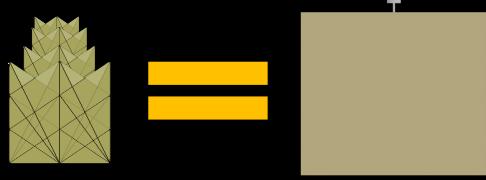
우주의 조약돌



| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 1차 그룹 발사 : 본체&송신기 발사



5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 1차 그룹 발사 : 본체&송신기 발사



필요한 총 송신부 면적(S):
 $1\text{km} \times 1\text{km} = 1\text{km}^2 (= 1,000,000\text{m}^2)$

송신기 모듈 팔 개수(N_a) : 12
송신기 부분에서 사용할 하나 플렉스 길이 전개 비율 : 8배 (**면적(η_s) : 64배**)

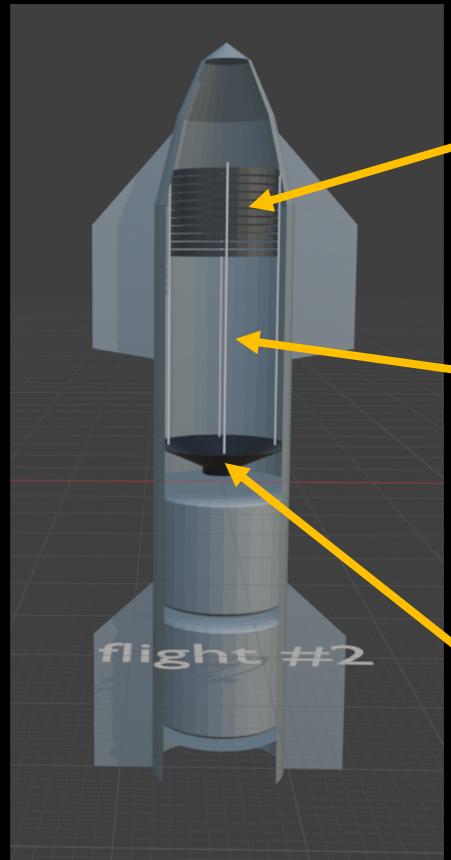
한 변의 길이가 4cm씩 증가하도록 전개형 송신기 제작한다면

$$\frac{S}{N_a \eta_s} \leq \sum_{n=1}^{25} (7 + 0.04n)^2$$

→ 팔 12개, 전개 비율 64, 한 팔에 25개의 송신기로 1km^2 충족 가능

→ 한 번에 팔 2개 (1번째에는 1개) 발사 가능
→ 약 7번의 발사로 송신기 부분 완성

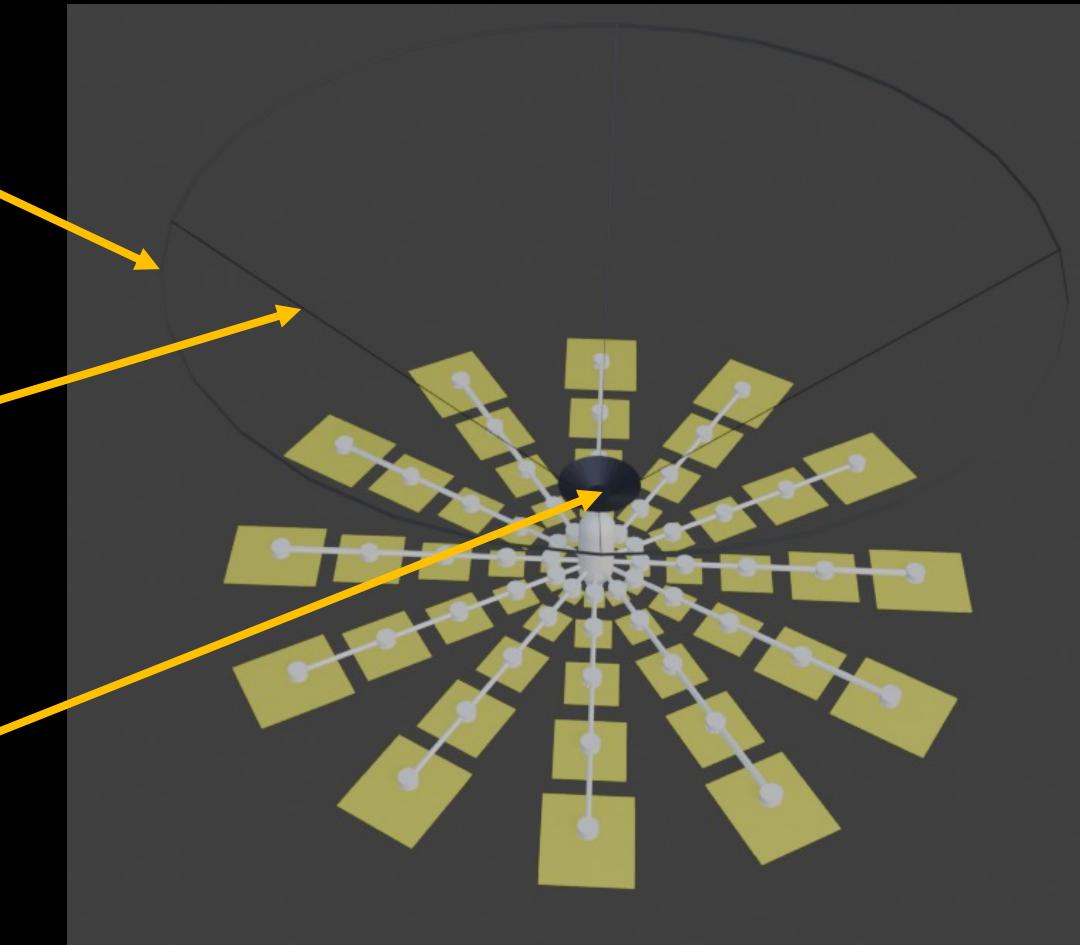
| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 2차 그룹 발사 : 태양전지판 & 구조 트러스 발사



고정부

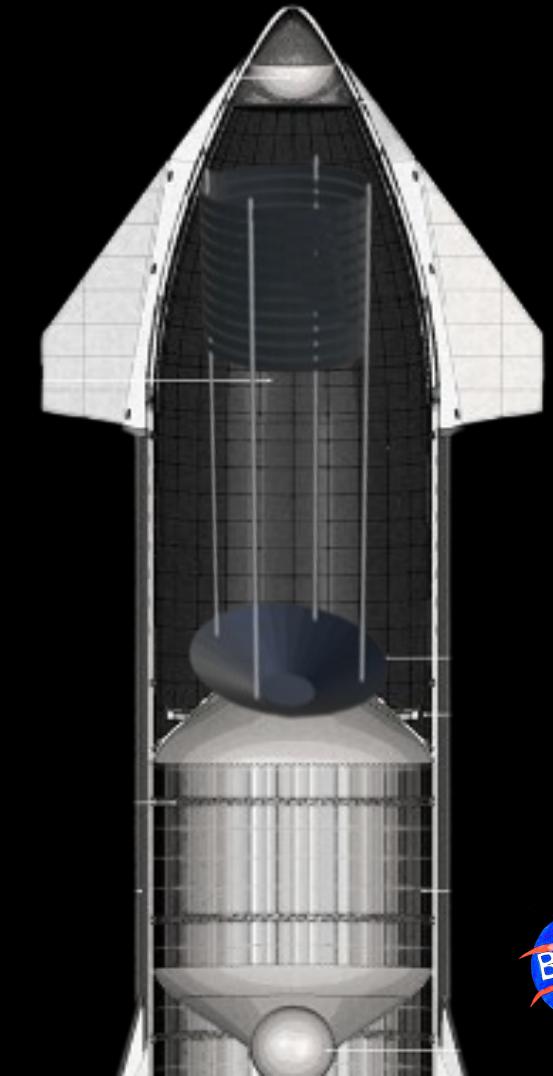
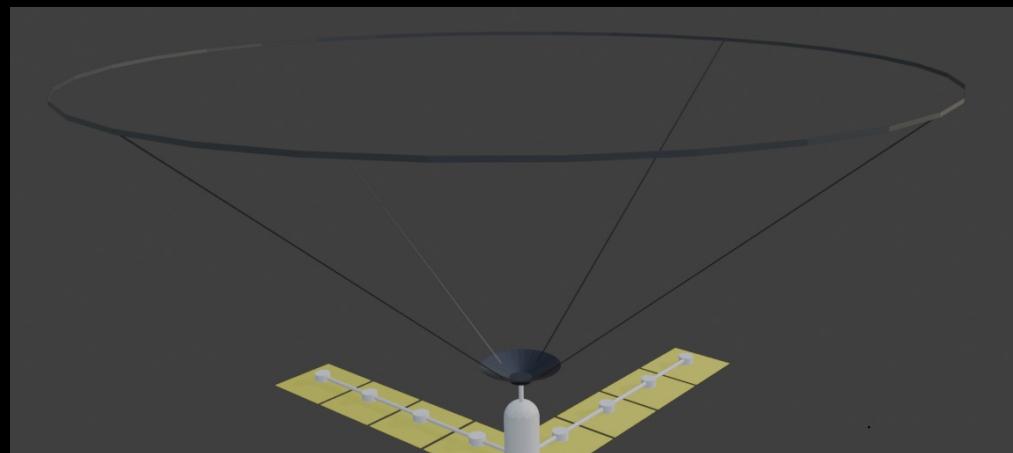
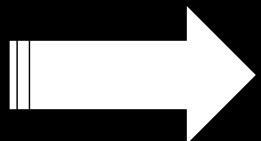
구조 트러스

태양광 전지판



| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 2차 그룹 발사 : 태양전지판 & 구조 트러스 발사

렌즈 고정 트러스(일체형 제작)



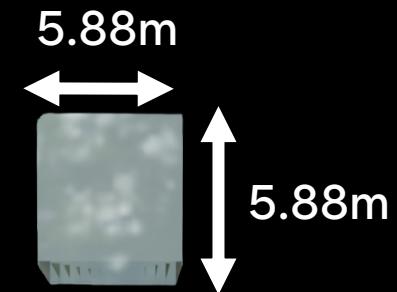
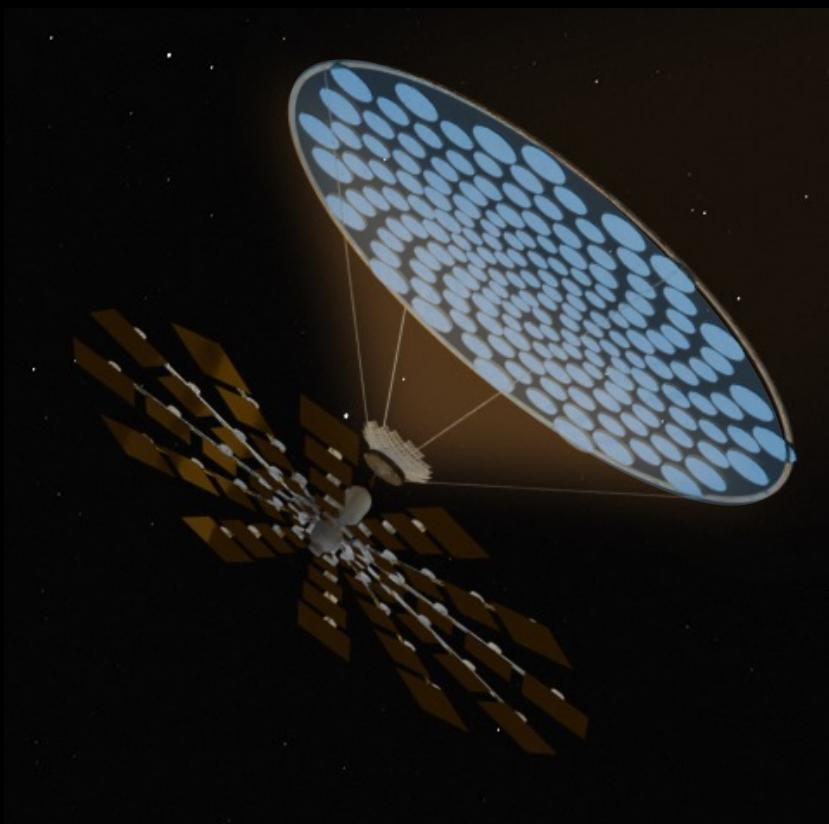
테이프 스프링

평면의 직교 강성을 이용한 전개 방법

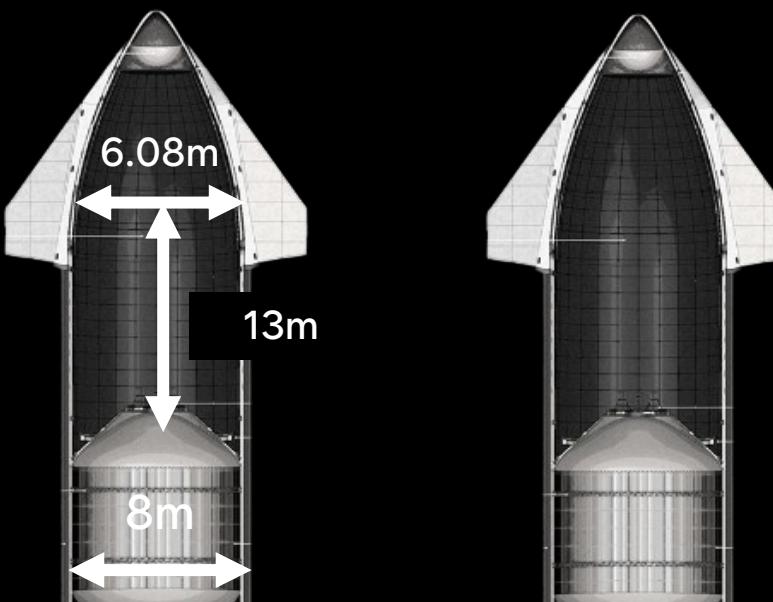
↳ 휘어진 면은 다른 방향으로 잘 구부러지지 않음

| 5. 집광 위성 건설 및 발사 계획 – 3차 그룹 발사 : 렌즈 구조체 발사

렌즈 : HanaFlex & 마트료시카 설계 원리 적용



최 외각 렌즈의 크기 : 반지름 94m
→ 전개 비 32인 구조로 제작하게 될 시 수납 큐브의 한 변의 길이 = 5.88m



나선 구조 팔 총 21개
발사 1번당 팔 2개씩 발사
 $21 \div 2 = 10.5$
총 11번 발사



6. 결론

주요 문제 및 해결책 1

한정된 크기에서 높은 발전량 달성을 위한

집광 발전 방식 채택

집광 효율 : 0.85, 프레넬 렌즈 필요 면적 3.3km^2

주요 문제 및 해결책 3

고에너지를 안전하게 지상으로 전송하기 위해

마이크로웨이브 방식 채택

- HanaFlex 방식의 **마트로시카 종이접기** 구조
+ 테이프 스프링을 활용한 전개형 구조
- 송신기 필요 면적(1km^2)을 만족시키기 위해 개별 팔에
25개의 송신기를 가진 12개의 팔 구조 설계

우주의 조약돌

주요 문제 해결책 2

무게와 부피 문제 극복을 위한 **전개형 프레넬 렌즈**

채택, 페르마 나선을 통한 렌즈 최적 배치

- 렌즈 개별 구조 : 종이접기 방식을 통한 8개 렌즈
- 렌즈 나선 구조 : 마트로시카 + 테이프 스프링을 활용한 21개의 나선 구조

주요 문제 해결책 4

우주 공간 대형 발전소 건설을 위한 **모듈식 단계별 발사 계획 수립**

1차 그룹 발사 :

HanaFlex를 활용한
총 1km^2 의 송신기 + 위성
본체

2차 그룹 발사 :

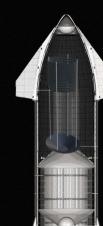
태양전지판 +
테이프 스프링 기반 고정
트리스

3차 그룹 발사:

HanaFlex를 활용한
렌즈 구조체



$\times 6$



$\times 11$





장건익

김은유

강선우

서혜인

김강건

최민준

우주의 조약돌



감사합니다

