생성형 AI를 활용한 우주 데이터센터용 대형 전개식 방열판 유로 형상 설계

안동균* · 하형진** · 이상준*** · 양선웅**

*한양대학교 ERICA 로봇공학과, **한양대학교 ERICA 기계공학과
***Nanyang Technological University Singapore
Mechanical and Aerospace Engineering

Intelligent Design for Engineering Applications Lab

IDEA Lab website

Presenter's page

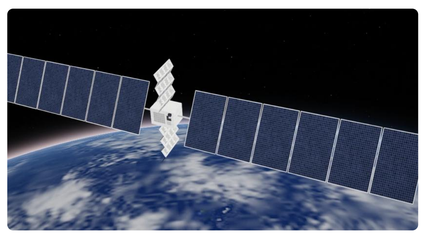
Introduction

● 우주 데이터센터의 필요성



지상 데이터센터의 한계

- AI 연산으로 인한 전력 수요 폭증
- 냉각 한계 · 냉각수 부족
- 부지 확보 · 각종 규제 · 주민 반발



우주 데이터센터 장점

- 태양광 발전을 통한 무한 에너지 공급
- 우주 극저온을 활용한 자연 냉각
- 공간 제약에 대한 자유

● 우주 데이터센터 방열판 형상의 중요성

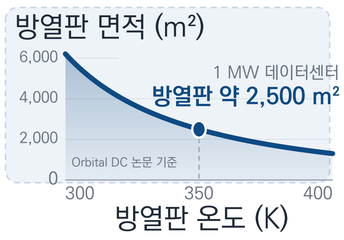
- 우주에는 공기가 없어 열을 **복사로만** 방출
  → 방열판이 커지고, **열저항 · 압력강하**를 좌우하는 유로 형상이 **면적과 질량**을 결정



ISS 방열판

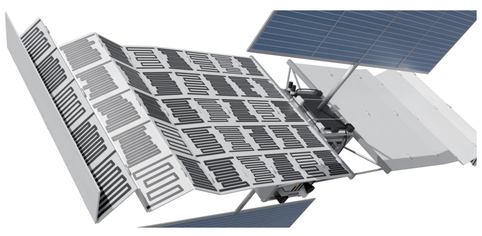


전개형 방열판



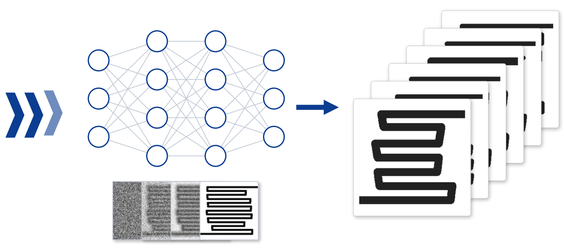
● 생성형 AI로 방열판 유로 형상을 설계하는 이유

MW급 방열판 → 대량의 유로 타일 필요



대형 유로 형상이 방열 성능을 정함
→ 방대한 설계공간 탐색 필요

생성형 AI로 대량 생성



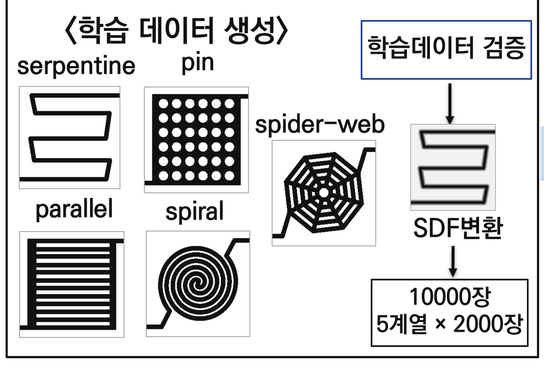
생성형 AI 모델이
다양한 현실적인 유로 형상 대량 생성

Methods

● Diffusion model을 활용한 유로 생성 과정

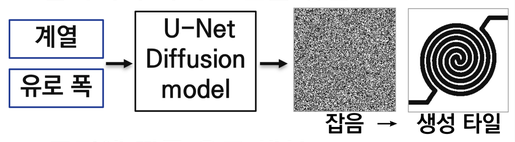
Step1. Training Data Generation

〈학습 데이터 생성〉

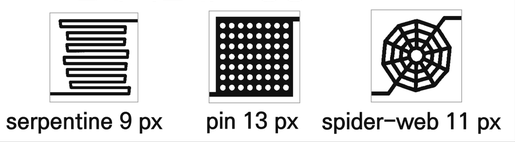


Step2. Conditional Diffusion

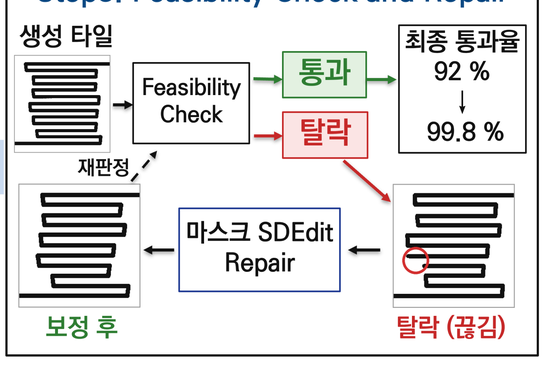
- 입력에 두가지 조건을 넣음



- 조건에 따른 유로 생성

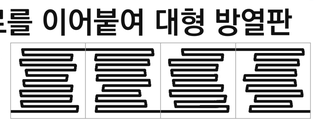


Step3. Feasibility Check and Repair

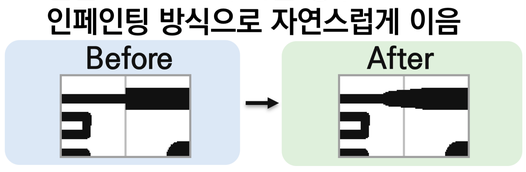


Step4. Deployable Panel Assembly

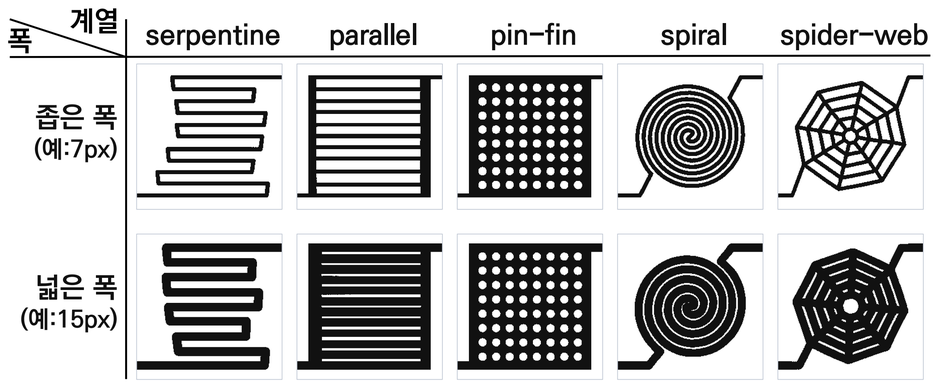
- 같은 폭 유로를 이어붙여 대형 방열판 유로 설계 →



- 접합부끼리 폭이 다를 경우 인페인팅 방식으로 자연스럽게 이음

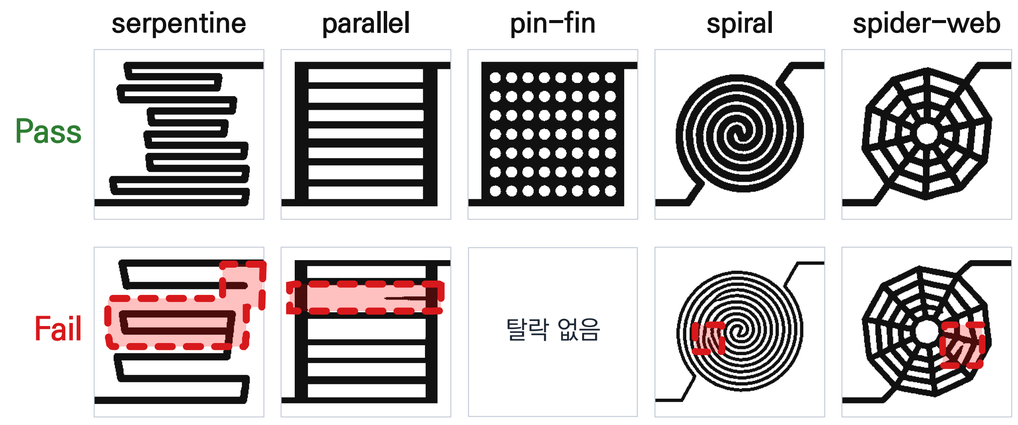


● Conditional diffusion model 입력에 들어가는 두가지 조건



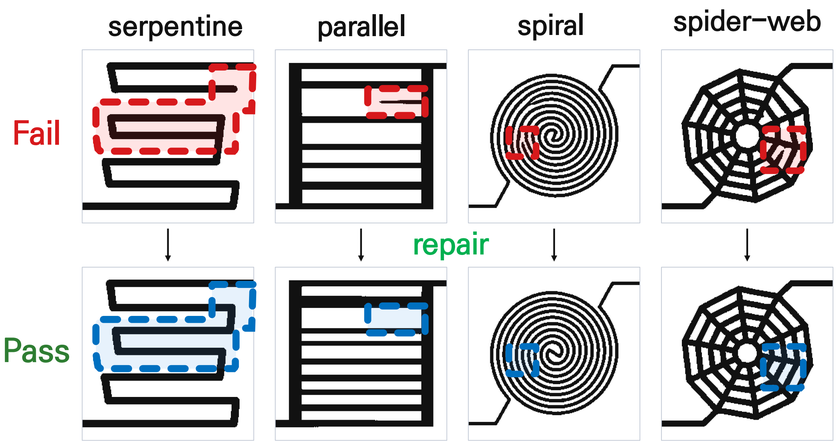
Results

● 첫번째 생성 2500장 (보정 전) – 형상 생성 성공률 총 92.0 %

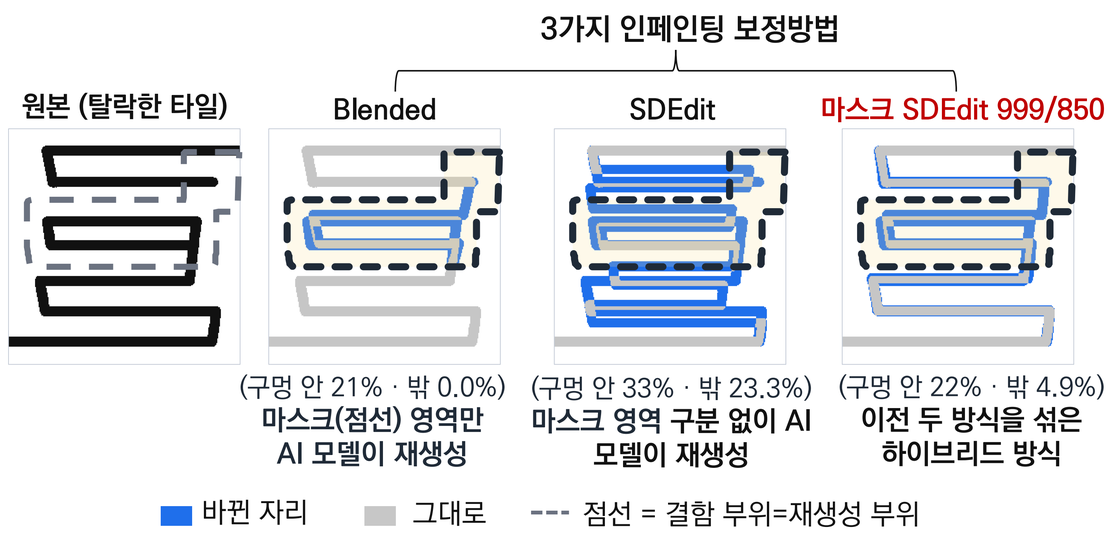


● 보정: 탈락한 타일 대상으로 repair 모델인 마스크 SDEdit 적용

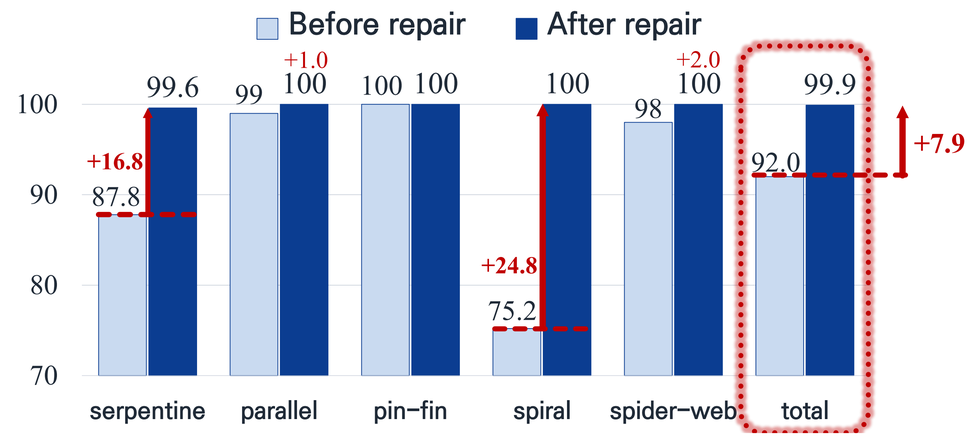
- 위의 탈락한 유로 형상들을 마스크SDEdit 을 사용하여 repair
  → feasibility check → 보정 후 탈락 형상 200개중 198 pass



- 보정 방법 비교: 탈락한 형상들을 모아 여러가지 인페인팅 방식을 시도
  (이 과정에서 사용된 diffusion model은 새로 학습한 모델이 아닌 기존 모델)



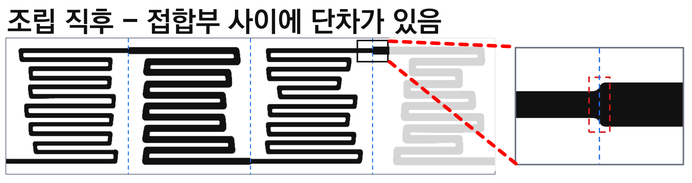
● 최종 형상 생성 성공률(보정 후) – 99.9 %(약 7.9% 증가)



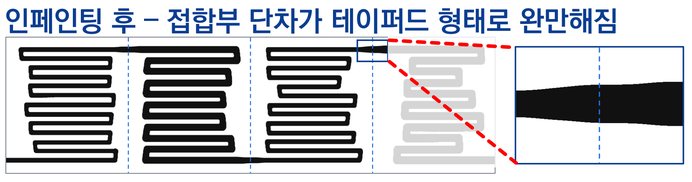
● 전개형 패널 조립

- 접합부의 단차가 0px로 없으면 단순 조립
- 접합부의 단차가 있으면 인페인팅(blended) 모델 사용하여 tapered 형태로 완만하게 이음

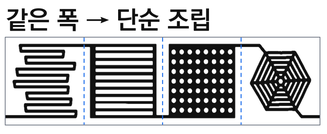
조립 직후 – 접합부 사이에 단차가 있음



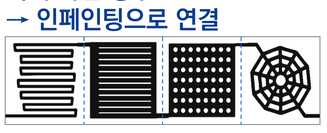
인페인팅 후 – 접합부 단차가 테이퍼드 형태로 완만해짐



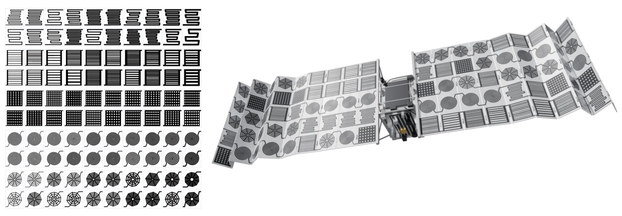
같은 폭 → 단순 조립



폭이 다른 경우
→ 인페인팅으로 연결



Conclusion



● 결과

- Conditional diffusion model + 인페인팅 보정
  : 유로 생성 성공률 **92.0 → 99.8%**
- 한계
  1) 생성 과정에 열·유동 성능(열저항, 압력강하)이 아직 반영되지 않음
  2) 학습 데이터가 5개 계열로 한정되어 있어, 생성되는 위상도 학습 계열 범위를 벗어나지 못함

● 향후 연구 방향성

- 생성된 유로 형상들을 2D-CHT CFD → 대리모델 학습
  → 최적화 알고리즘을 적용하여 유로 형상 최적화

● Reference

[1] S. G. Turyshev, arXiv:2604.27197 (2026).
[2] H. Keramati, M. Sadeghi, R. K. Jaiman, arXiv:2511.09578 (2025).
[3] J. Ho, A. Jain, P. Abbeel, NeurIPS (2020).
[4] O. Ronneberger, P. Fischer, T. Brox, MICCAI (2015).
[5] C. Meng et al., ICLR (2022).
[6] O. Avrahami, D. Lischinski, O. Fried, CVPR (2022).
[7] L. Jeong, Y. K. Lee, N. Kang, arXiv:2609.08387 (2026).
Images: NASA (ISS S1 truss radiator, STS-117, 2007 · HRS radiator, KSC 2010-4174)