대한기계학회 2026년 학술대회

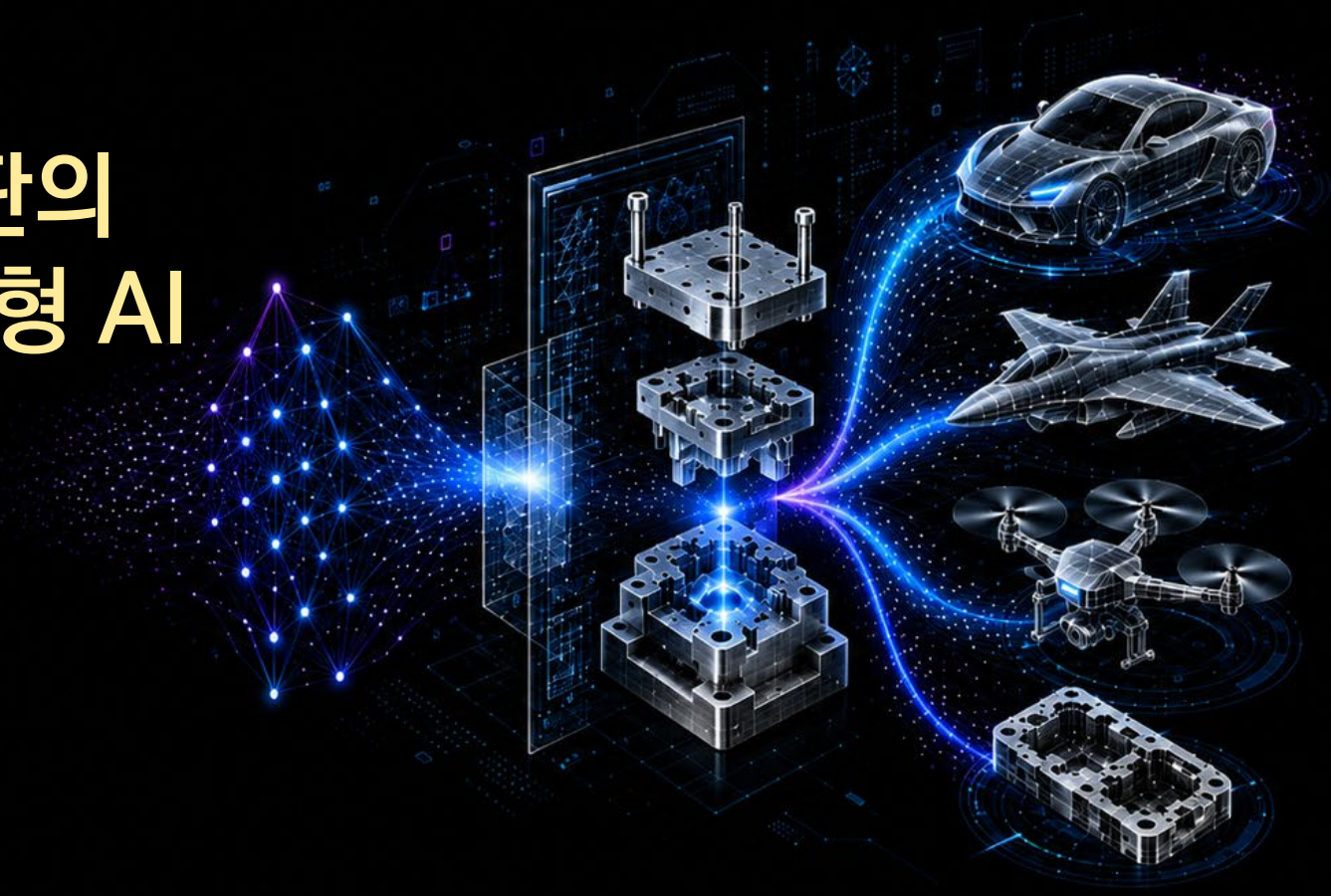
우주 데이터센터 대형 방열판의 유로 유형 다양화를 위한 생성형 AI

하형진[1], 안동균[1], 이상준[2]

(지도교수: 양선웅)[1]

한양대학교 ERICA 기계공학과[1]

Nanyang Technological University[2]



Intelligent Design for Engineering Applications Lab

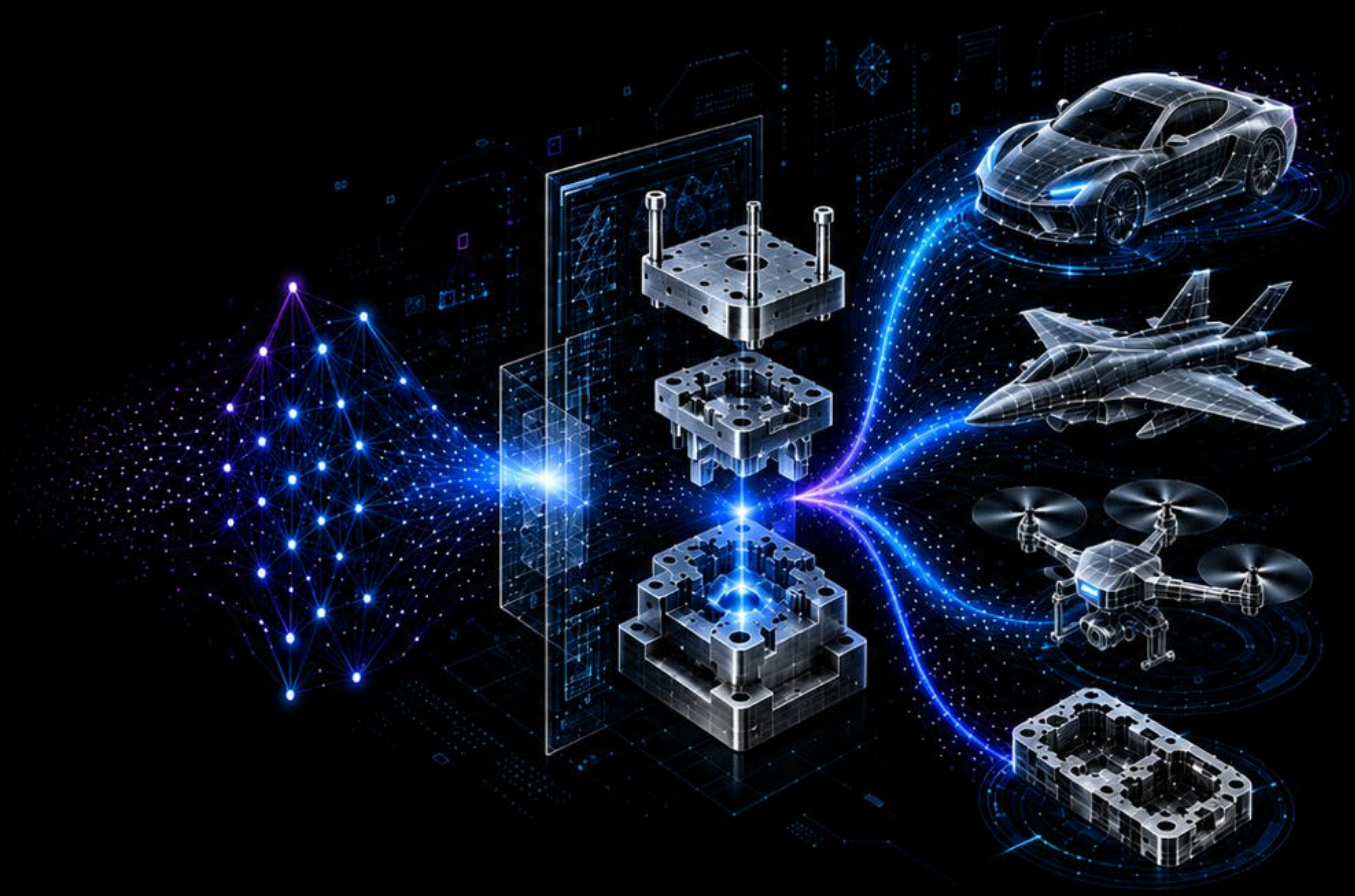
CONTENTS

발표 목차

I Introduction

II Experiments

III Conclusion

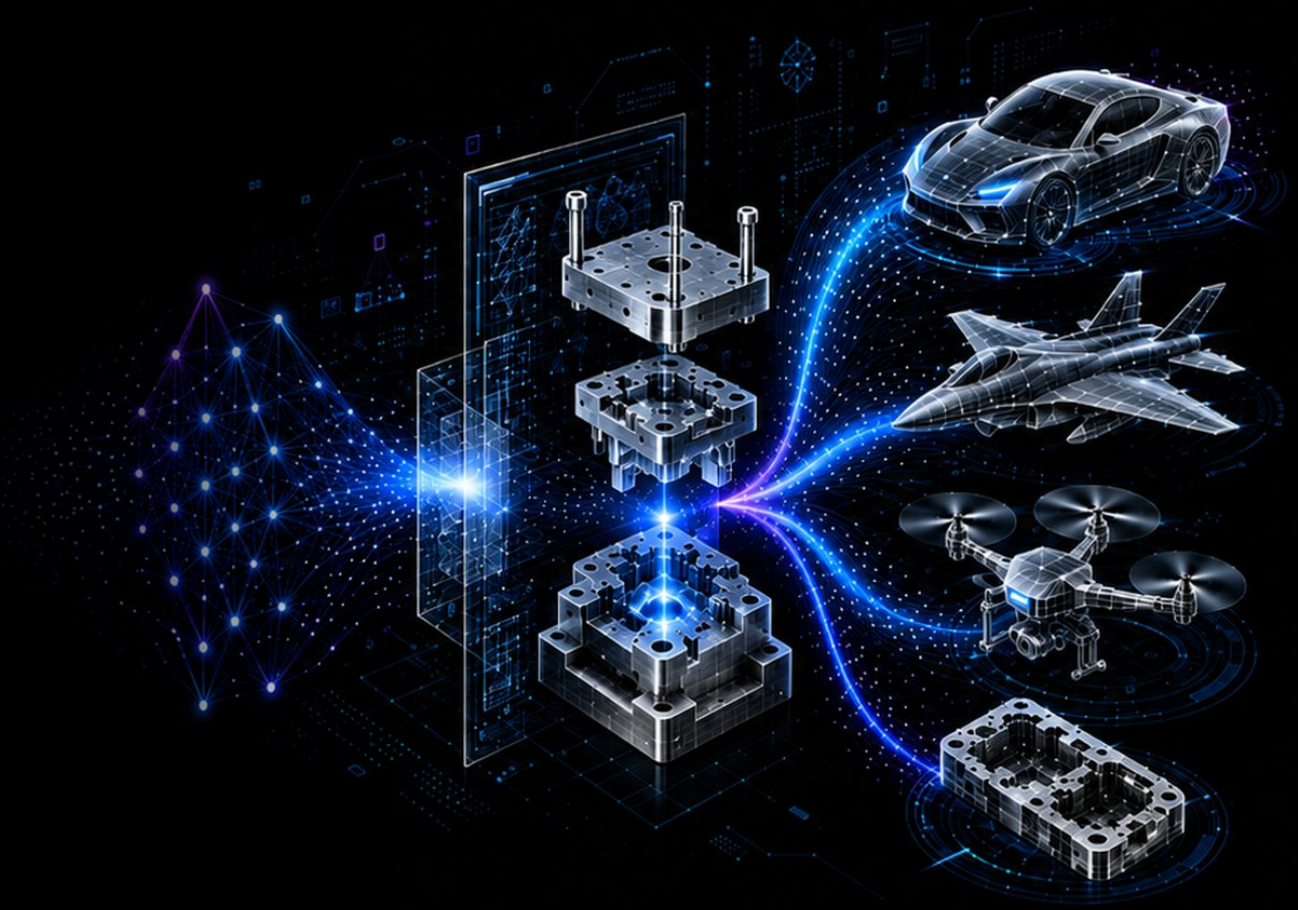


Intelligent Design for Engineering Applications Lab

PART

I

Introduction



- Need for Orbital Data Center
- Radiative Cooling in Space
- Generative AI for Flow Channel Design

I II III

우주 데이터센터의 필요성

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

지상 데이터센터의 현실적인 문제





지상의 한계

전력 수요 급증	냉각수 사용 부담	데이터센터 적합 부지 부족
415 → 945 TWh	약 660억 L/년	건설할 땅이 있어도 대규모 전력 공급이 가능한 부지는 제한적

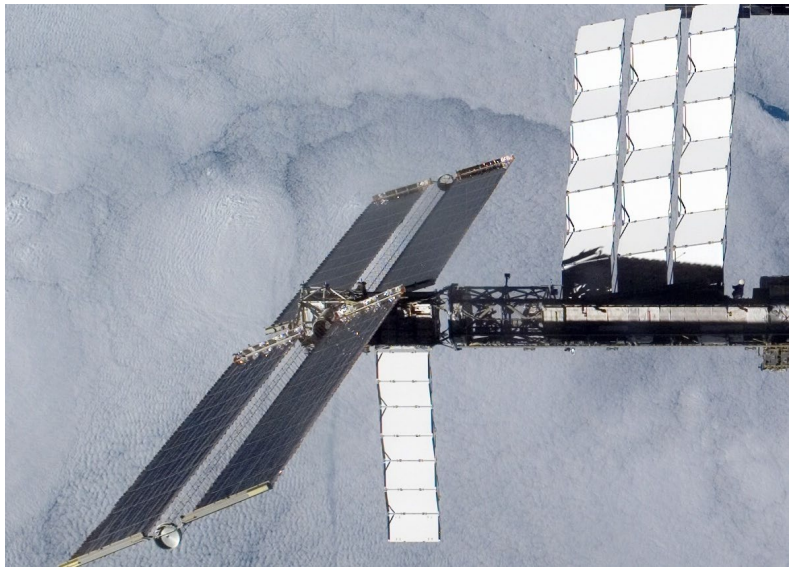
우주의 이점

우주 태양광 활용	대형 방열판 복사 냉각 활용	지상 인프라 의존 완화
지상 대비 높은 태양광 발전 생산성	냉각수 순환 + 우주 공간으로 열복사	지상 부지, 전력망에 의존하지 않는 확장 가능성

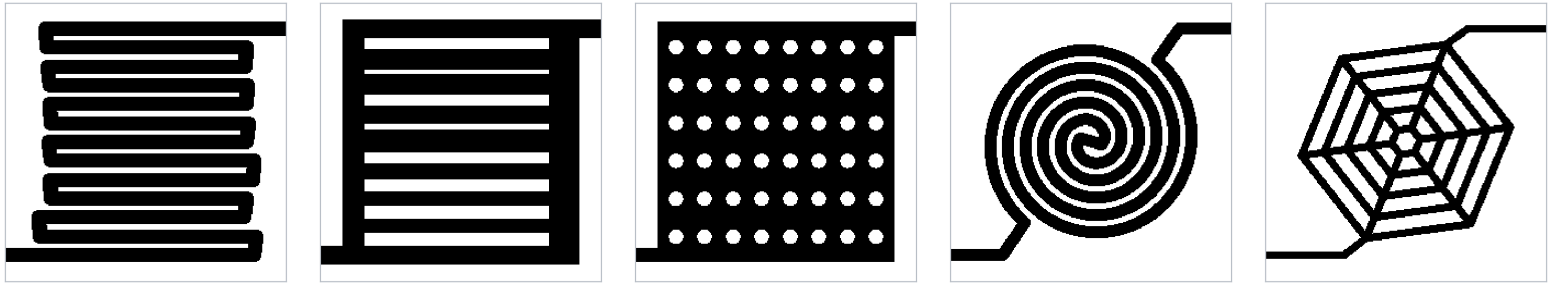
지상과 우주의 열 방출 방식

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

공기가 없는 우주에서는 대류가 불가능해 복사 방식으로 열 방출



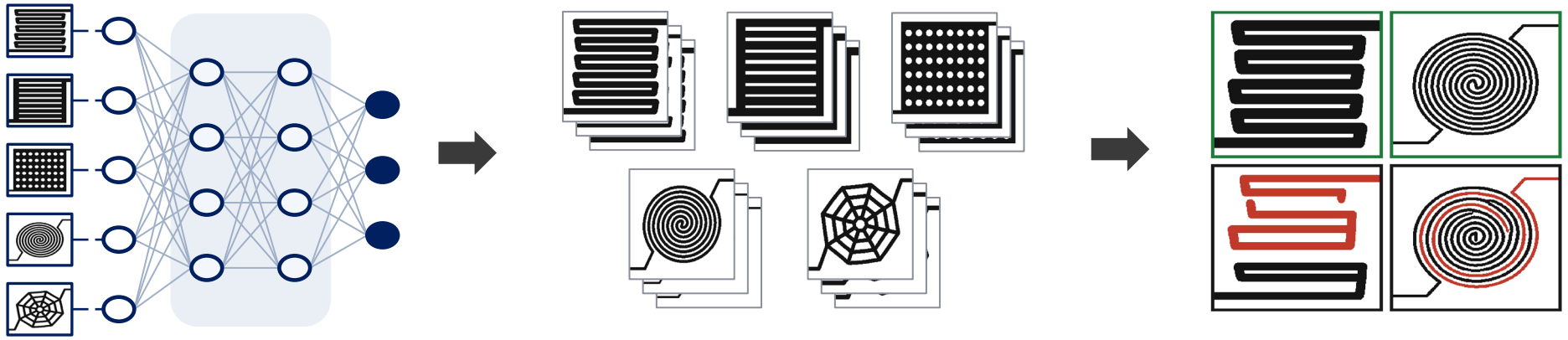
1. **우주에서는 복사 냉각 필수**
   진공 상태에서는 방열판을 통해 열을 우주로 방출
2. **대형 방열판일수록 중요한 온도 분포**
   방열판 전체에 열이 고르게 전달될수록 효과적인 방열 기능
3. **넓은 면적만큼 커지는 설계 자유도**
   형상에 따라 냉각수의 흐름과 온도 분포, 압력 손실이 달라짐



생성형 AI를 활용한 유로 형상 다양화

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

기존 설계의 한계를 극복하기 위한 Generative AI



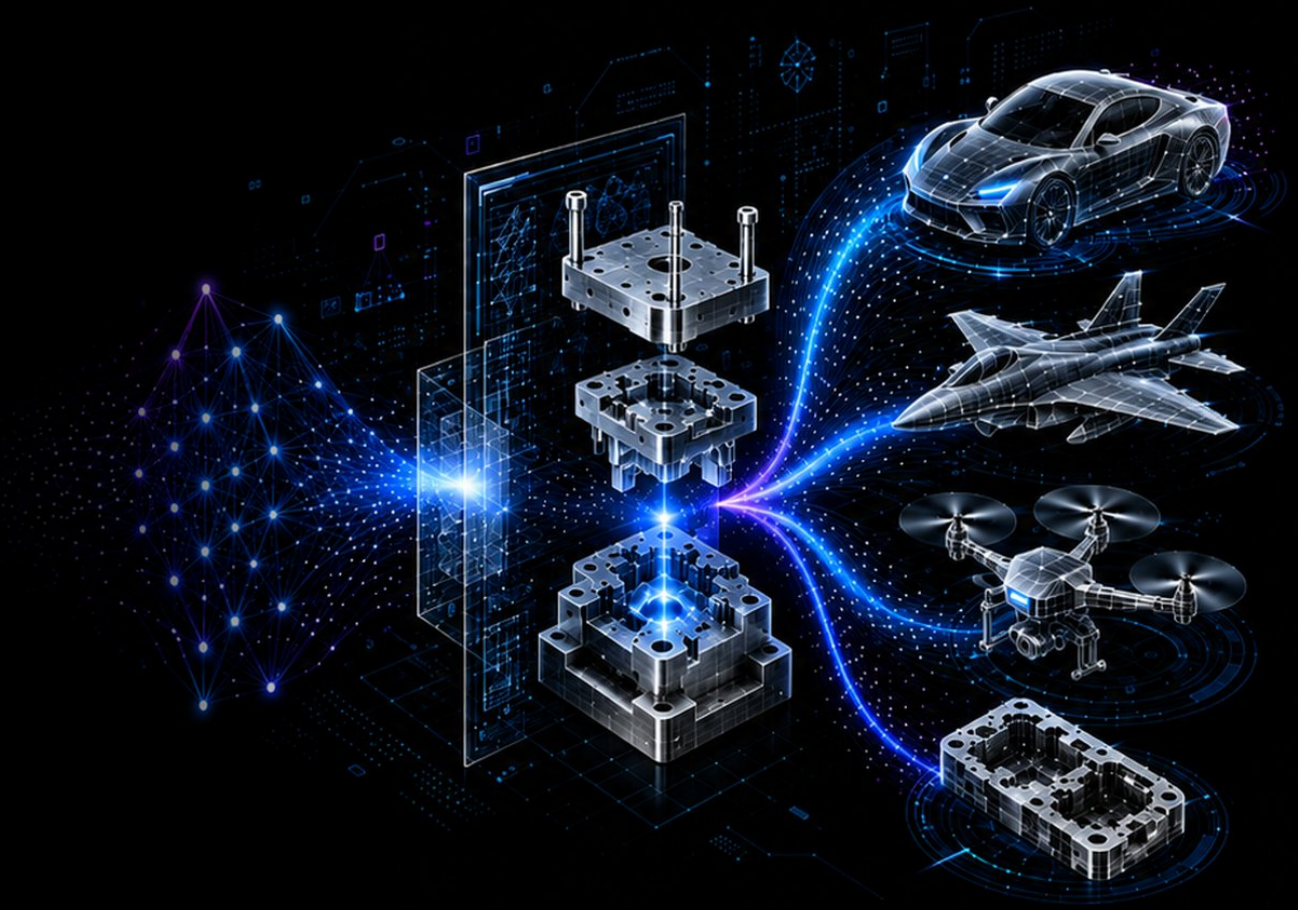
형상 학습 | 다양한 유로 후보 생성 | 불량 검사

반복 설계 및 해석 없이 Parameter 틀을 벗어난 다양한 유로 후보를 빠르게 생성

PART

II

Experiments



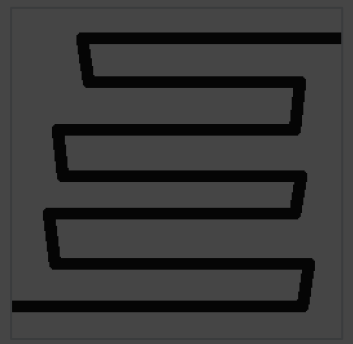
- Dataset & SDF Representation
- Conditional Diffusion Model (U-Net · DDIM)
- Validity Check
- Failure Analysis & Solutions ① ② ③
- Pass Rate by Stage

I II III

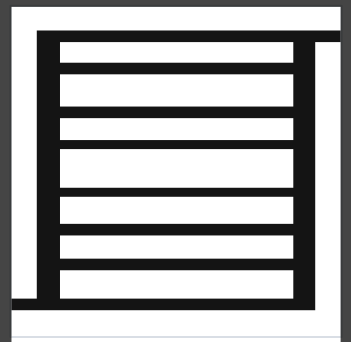
유로 형상과 학습데이터

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

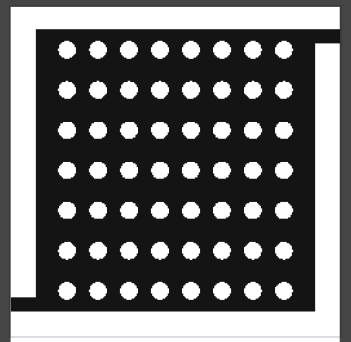
공통 규격의 유로 타일로 구성



Serpentine



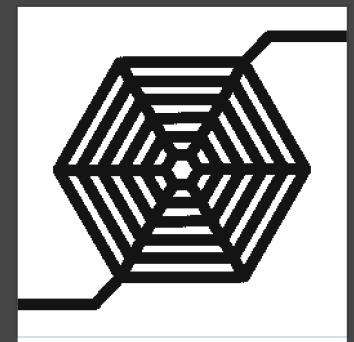
Parallel



Pin



Spiral



Spider Web

학습 데이터

형상당 2,000장

타일 크기

256×256 px

입구, 출구

왼쪽 하단,
오른쪽 상단

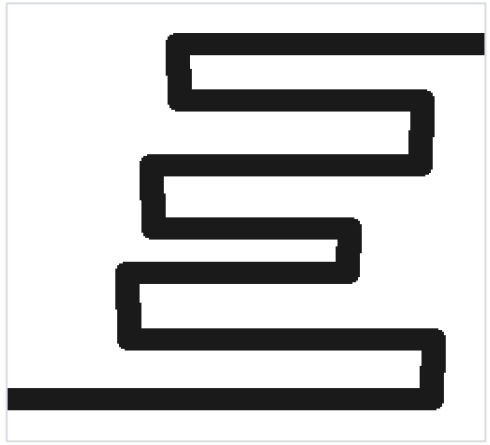
유로 폭

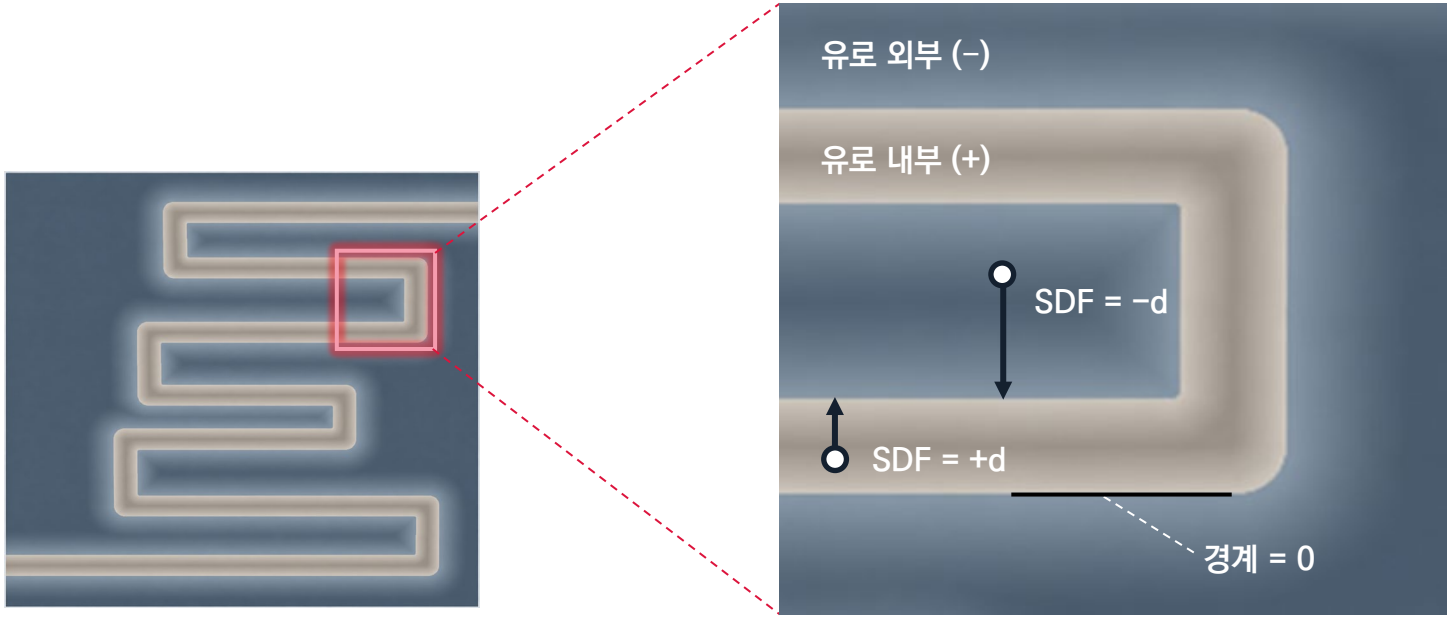
5 ~ 23 px

Signed Distance Function (SDF)

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

유로 경계까지의 거리를 픽셀별로 표현





유로 내부 (+), 외부 (−)

유로와 벽을 부호로 구분

경계 = 0

유로와 벽의 경계 기준

경계까지 거리 d

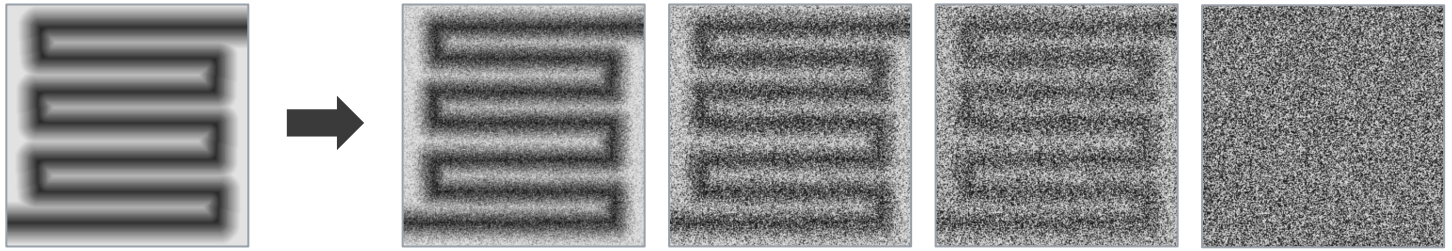
경계로부터 떨어진 거리

Diffusion Model

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

노이즈 제거를 학습해 새로운 유로 생성

학습

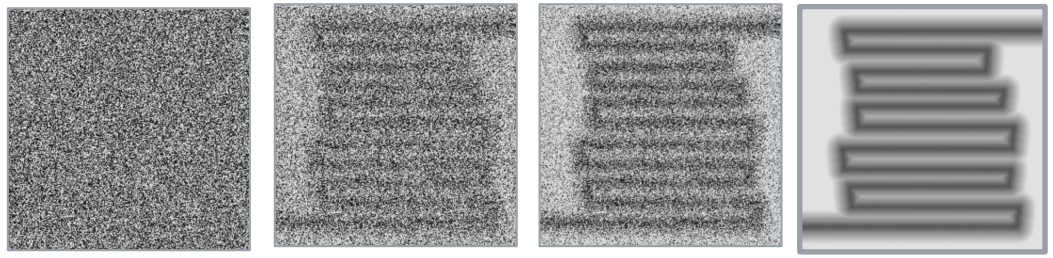


정답 → 노이즈 추가

AI
노이즈 섞인 유로에서
원래 유로를 추정하는 연습

생성

원하는 조건
형상 종류
유로 폭



노이즈 제거 → 자동 검사 → Pass / Fail

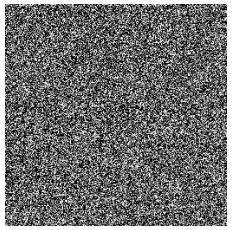
입구에서 출구까지 끊김 없이 이어지는가?
벽이 너무 얇지 않은가?

Acceleration of Denoising Process

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

학습은 그대로, 생성 단계만 1,000에서 100으로 단축

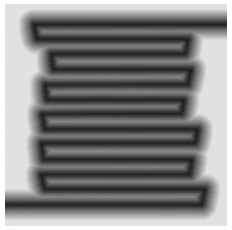
DDPM



노이즈 (t = 1000)

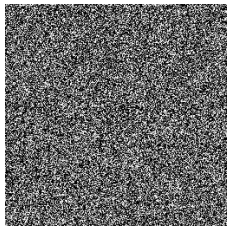


한 단계씩 건너뛰며 1000번에 노이즈 제거



유로 (t = 0)

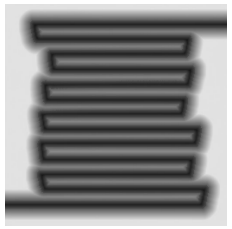
DDIM



노이즈 (t = 1000)



열 단계씩 건너뛰며 100번에 노이즈 제거



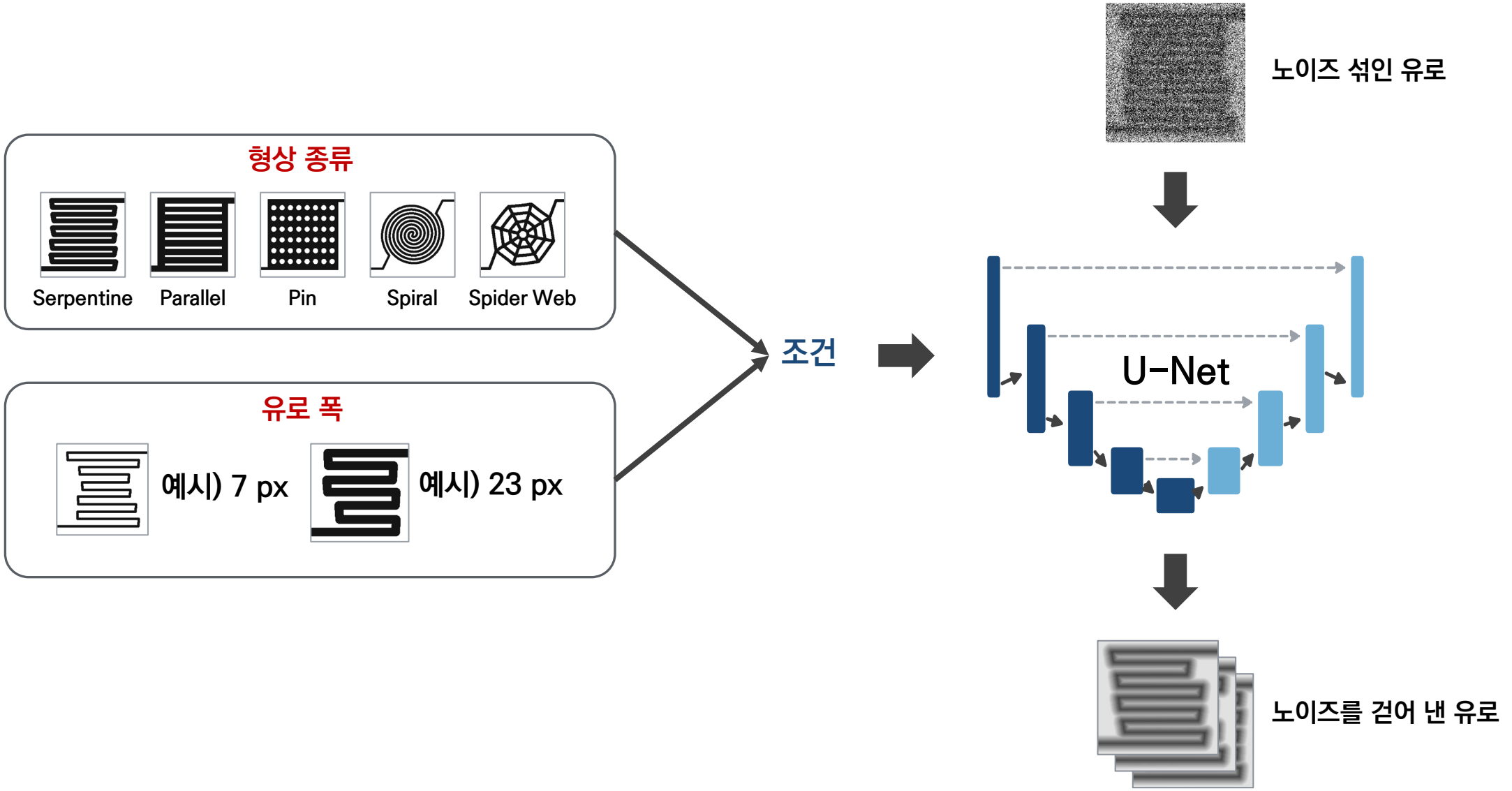
유로 (t = 0)

구분	DDPM	DDIM
학습	노이즈 1,000단계	
생성 단계	1,000단계	100단계
생성 시간	13시간	80분

Conditions of Diffusion

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

형상 종류와 유로 폭을 조건으로 넣어 원하는 유로 생성



통과 판정 기준

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

생성된 유로를 세 가지 기준으로 판정

① 연결

유로 끊김

② 벽 두께

옆 유로와의 벽 간격이 너무 얇음

③ 형상 구조

유로 막힘 · 유로 구조 깨짐



통과

입구부터 출구까지 한 줄로 연결

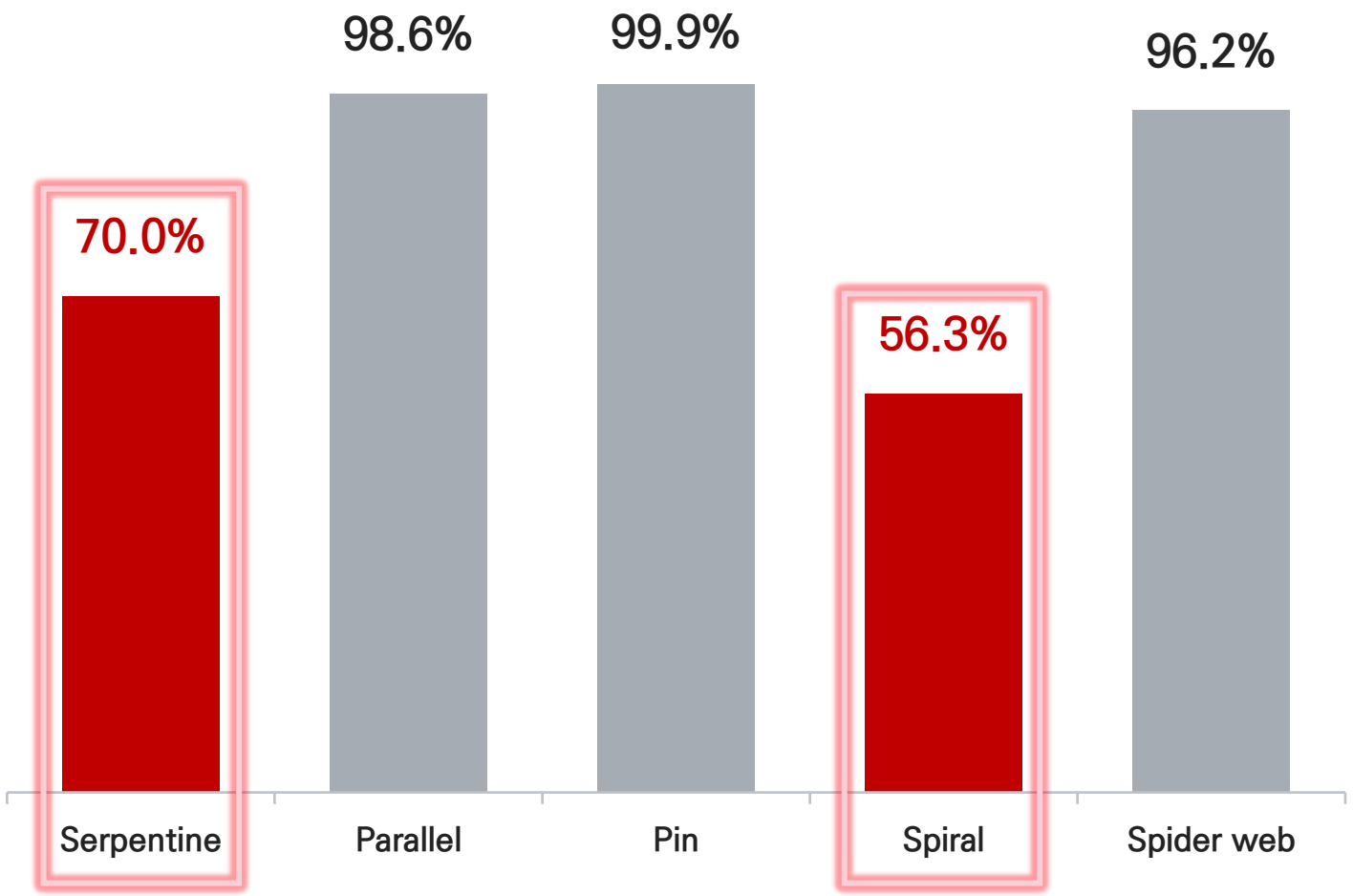
$$\text{통과율} = \frac{\text{통과한 유로 수}}{\text{생성한 유로 수 (형상당 1,000장)}} \times 100\%$$

검사는 생성이 끝난 뒤 판정에만 사용, 생성 과정에는 관여하지 않음

Vanilla Diffusion Model Result

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Serpentine, Spiral 통과율이 크게 낮음



84.2%

전체 통과율

70.0% · 56.3%

Serpentine · Spiral

Failure Cases of Vanilla Diffusion Model

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Pass/Fail은 유로 경계의 몇 픽셀에서 갈림

Serpentine



불량 개수(끊김) 88%

Spiral



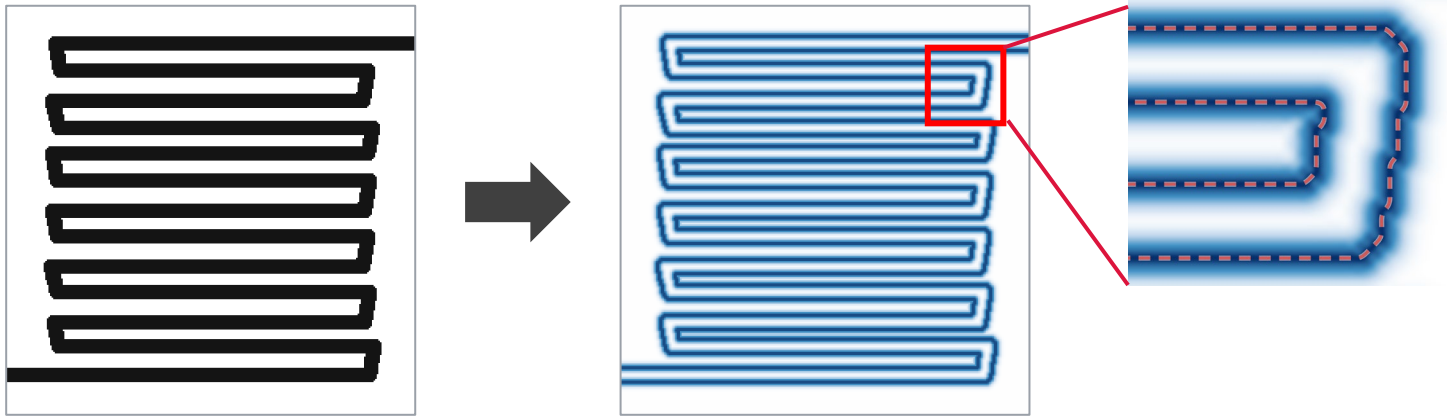
불량 개수(끊김) 66%

끊긴 곳은 아주 작은 틈 → 전체 오차에서 차지하는 비중이 작음 → 유로 경계를 더 엄격하게

Solution ①: Boundary Weighting

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

유로 경계에 가까운 픽셀일수록 가중치를 크게



유로 경계 가중 지도

$$w = 1 + w_b \cdot \exp\left(-\frac{d^2}{2\sigma^2}\right)$$

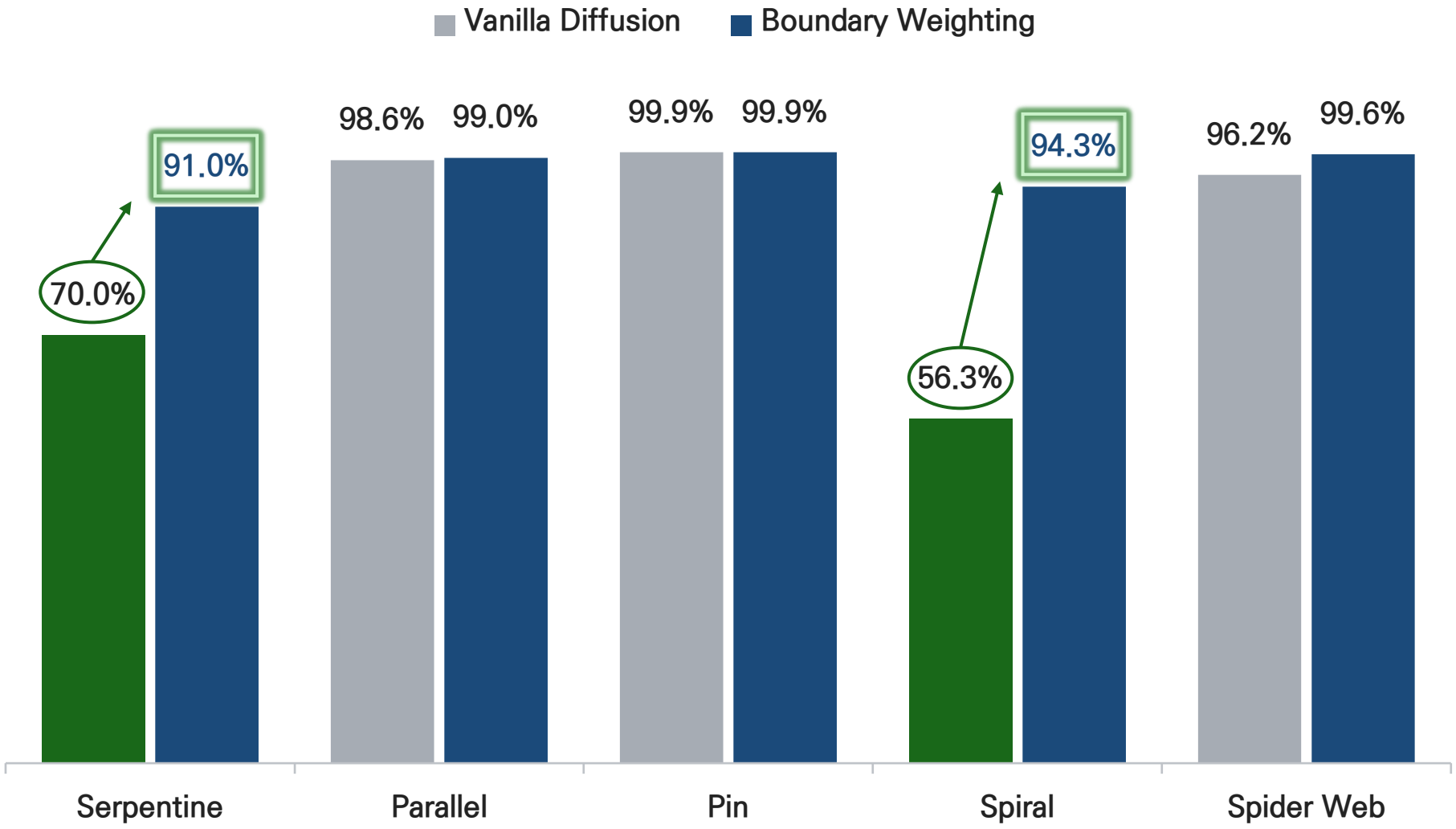
w	Loss 가중치 (보통 픽셀 = 1)
d	유로 경계까지 거리 (px, SDF로 계산)
$w_b = 4$	유로 경계 위 추가 가중치
$\sigma = 2$	가중치가 퍼지는 폭 (px)

σ/W_b	$W_b = 4$	$W_b = 9$	$W_b = 14$
$\sigma = 0.5$	83.9%	92.7%	92.0%
$\sigma = 1$	92.7%	94.7%	95.5%
$\sigma = 2$	96.8%	96.1%	96.2%

Boundary Weighting Result

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

전체 84.2% → 96.8%



Remaining Problems

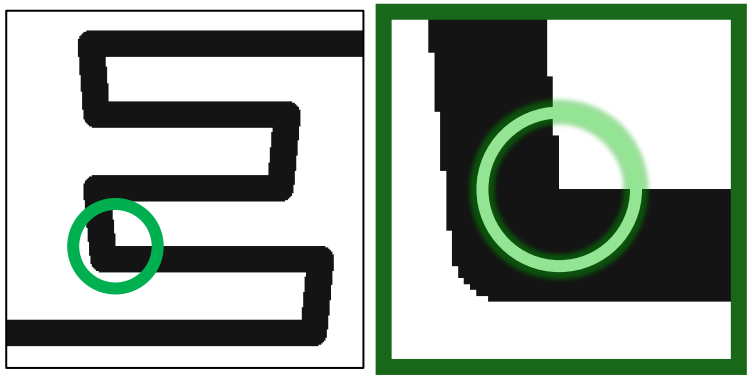
Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

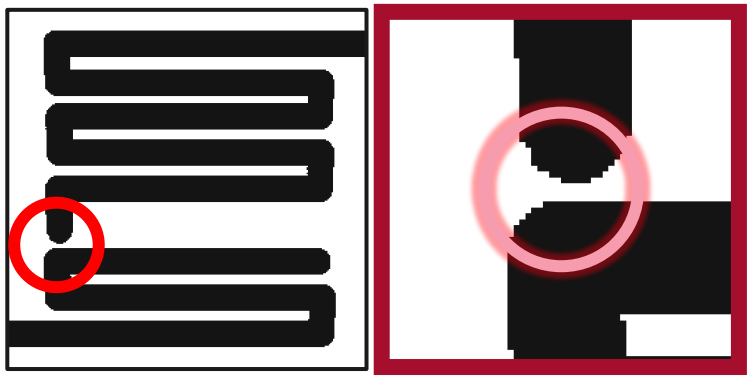
Serpentine, Spiral의 불량률

정상 유로 (학습 데이터)

불량 유로 (경계 가중 후)

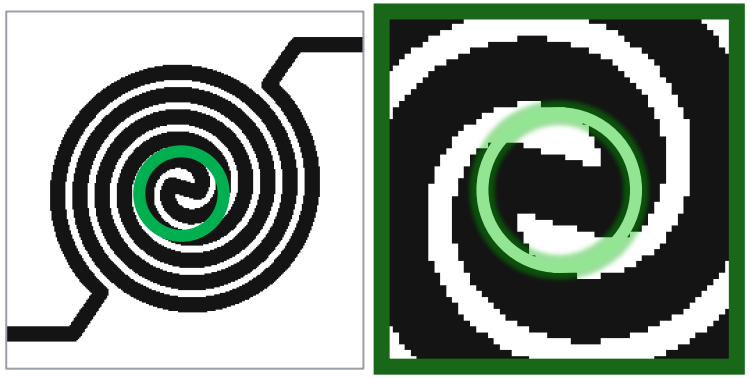
Serpentine

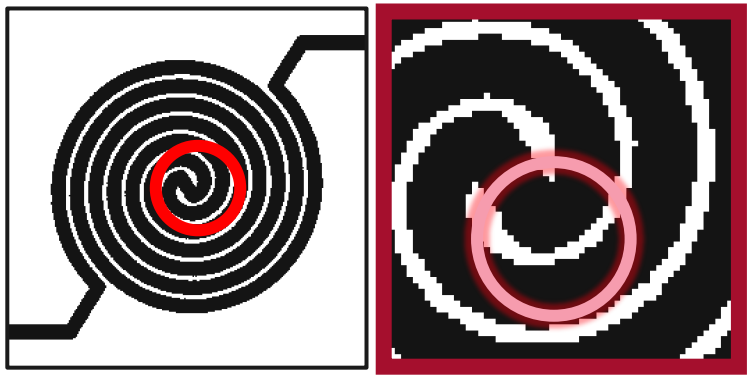




코너 끊김

Spiral



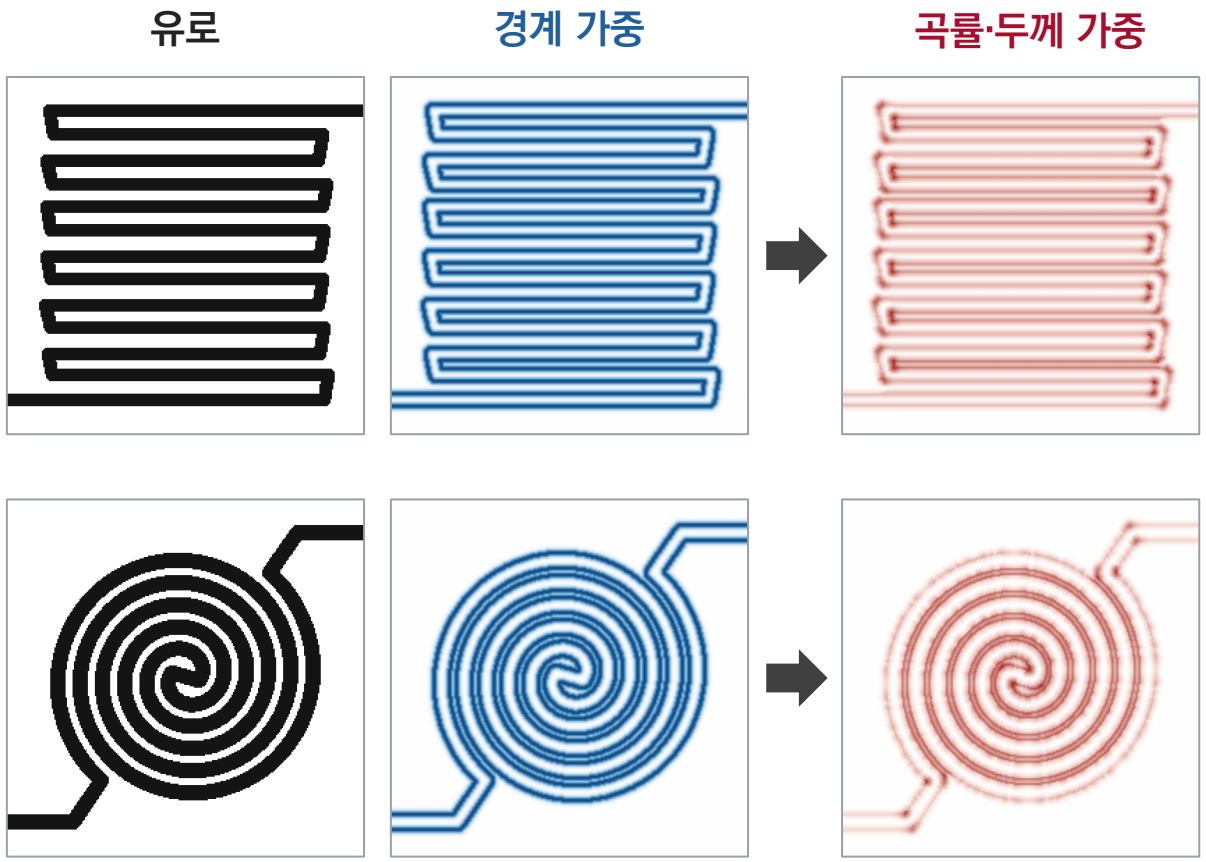


얇은 벽

Solution ②: Corner·Thickness Weighting

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

기존 경계 가중에 곡률과 두께에 한 번 더 반영



$$w = 1 + w_b \cdot \mathrm{b} \cdot (1 + \alpha \mathrm{K} + \beta \mathrm{T})$$

K	곡률: 급하게 휠수록 1
T	두께: 벽이 얇을수록 1
α, β	K, T 반영 강도

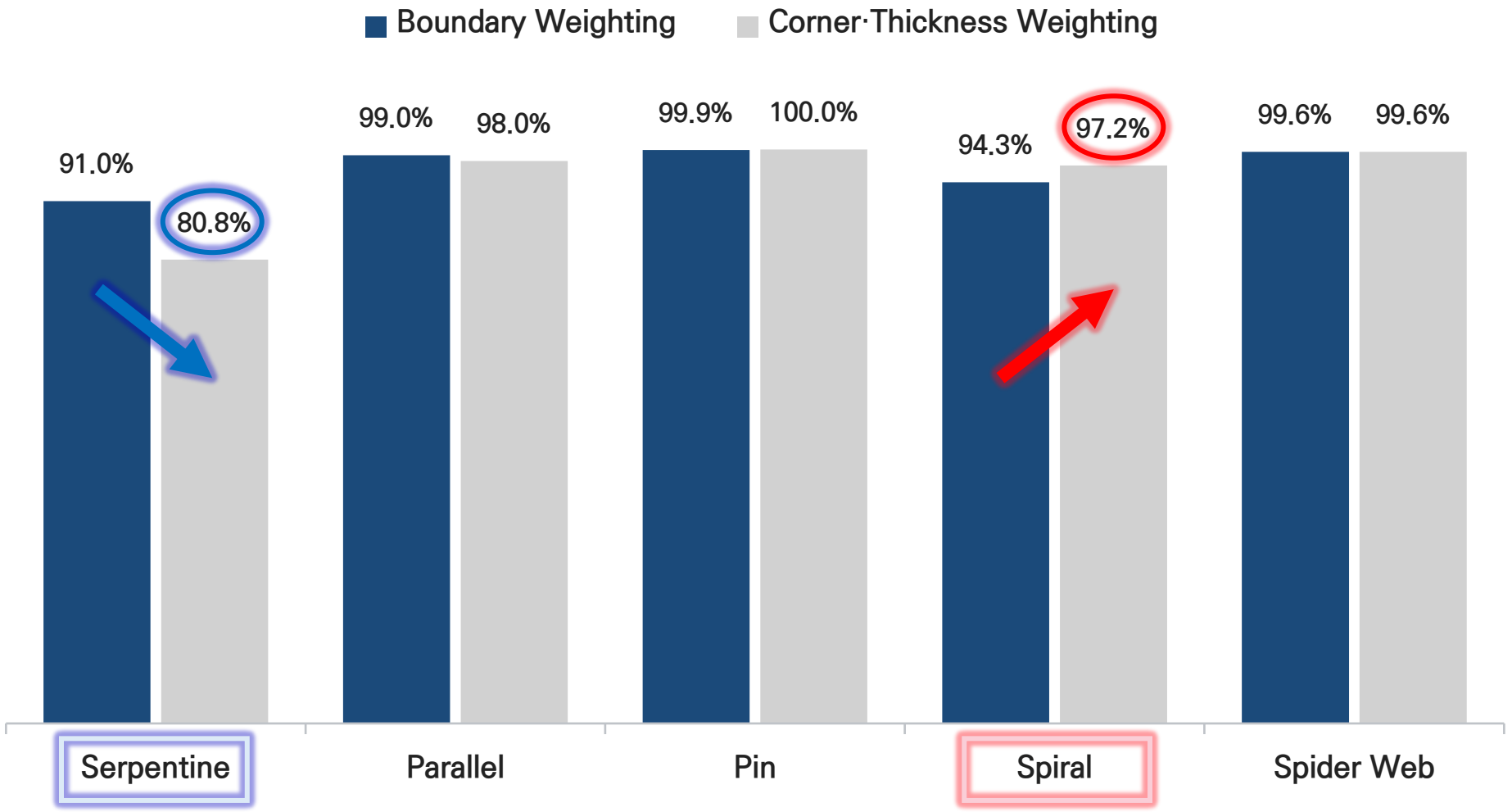
Serpentine, Spiral만 적용

모든 유로 경계를 동일하게 → 코너와 얇은 벽에 가중

Corner·Thickness Result

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

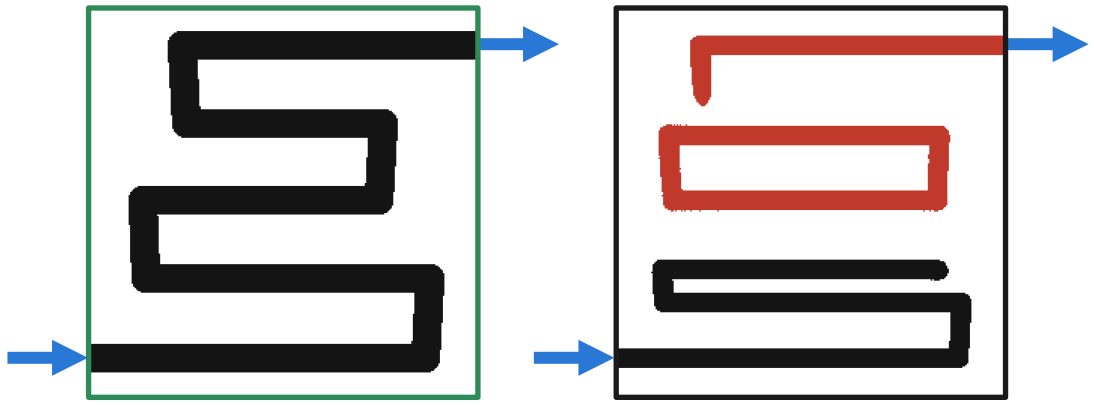
Spiral 94.3% → 97.2%, Serpentine 91% → 80.8%



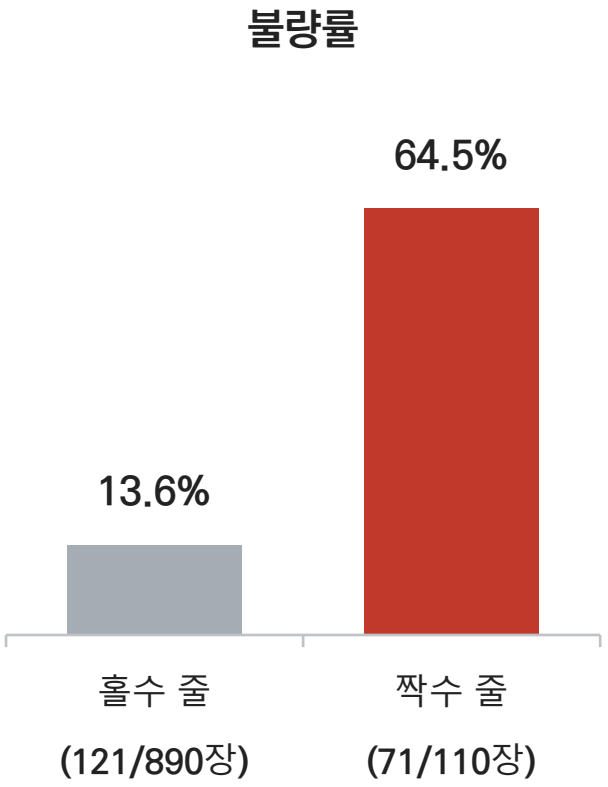
Failure in Serpentine Type

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

학습 줄 개수는 홀수, 생성은 짝수 줄로 어긋남



학습 데이터 (홀수)　　생성 데이터 (짝수)

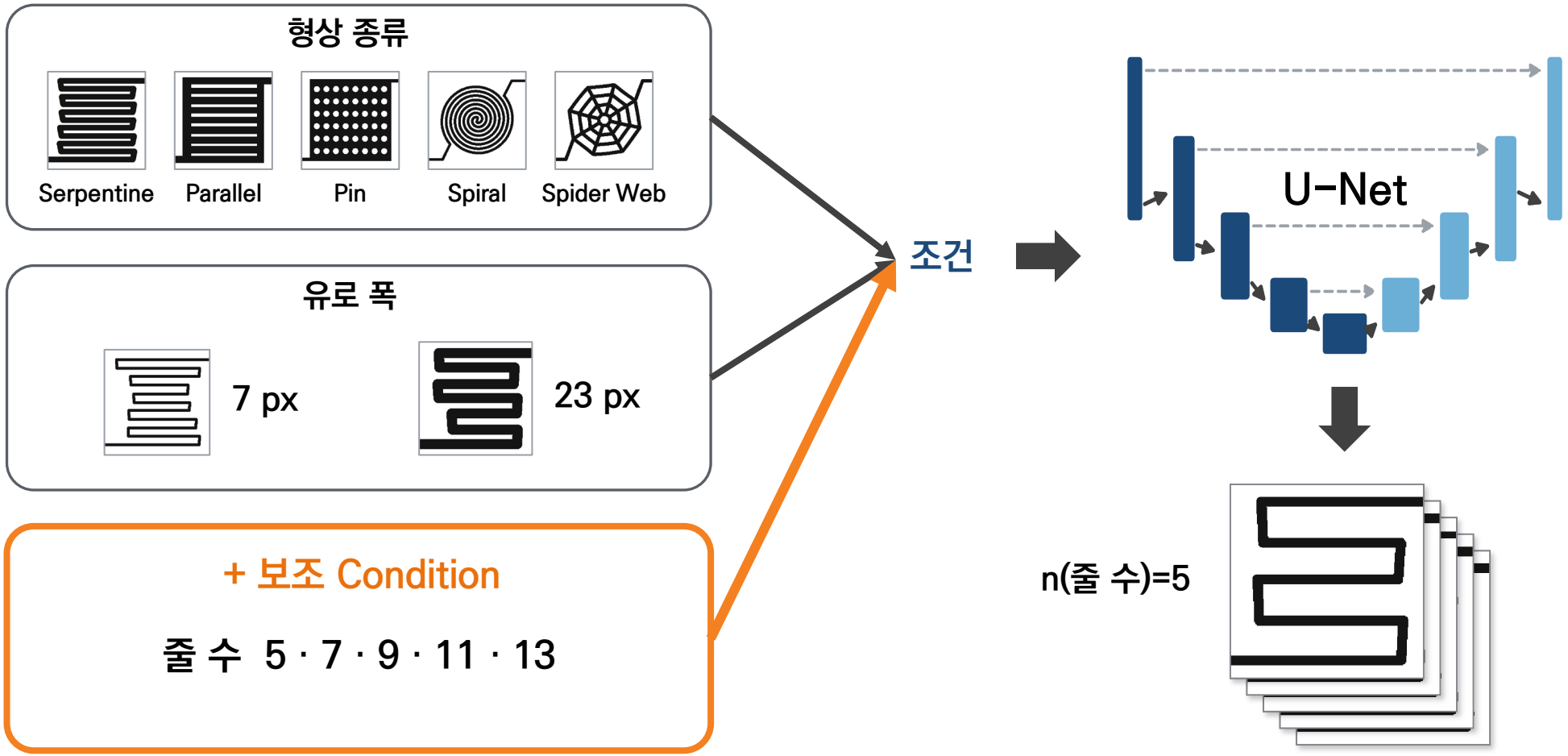


Serpentine은 유로 경계 문제가 아닌 **몇 줄로 생성할지** 알려줘야 하는 문제

Solution ③: Pass-Count Conditioning

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Serpentine에만 줄 수를 알려주는 보조 Condition 추가

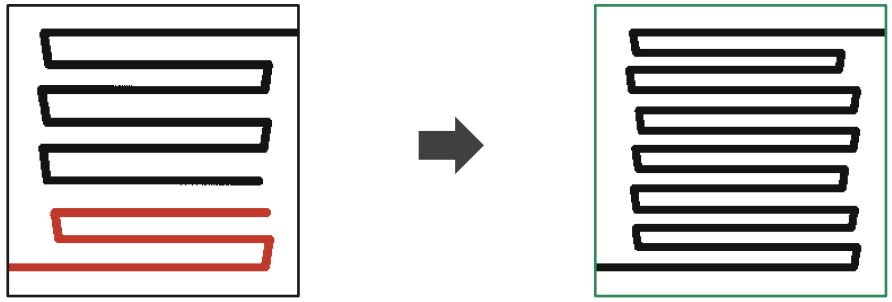


기존 Condition과 U-Net은 그대로, 보조 Condition만 Serpentine 2,000장 새로 학습

Pass-Count Conditioning Result

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Serpentine 80.8% → 99.3%



Before

After



Before



After

Pass Rate by Stage

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

84.2% → 98.8%, 다섯 형상 모두 97% 이상

STEP / TYPE	Serpentine	Parallel	Pin	Spiral	Spider Web	Overall
Vanilla Diffusion	70.0	98.6	99.9	56.3	96.2	84.2
① Boundary Weighting	91.0	99.0	99.9	94.3	99.6	96.8
② Corner·Thickness Weighting	80.8	98.0	100.0	97.2	99.6	95.1
③ Pass-Count Conditioning	99.3	98.0	100.0	97.2	99.6	98.8

Summary

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Boundary Weighting, Corner·Thickness, Pass-Count Conditioning

① Boundary Weighting

문제

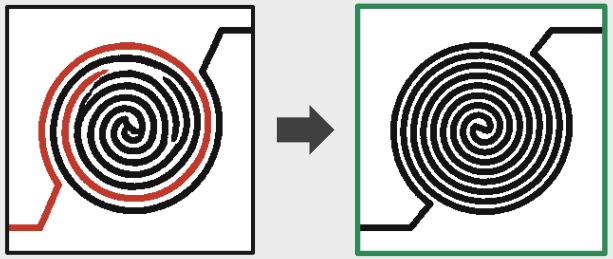
유로 경계가 흐려져 끊기고 섞임

방법

유로 경계를 더 집중해서 학습

결과

전체	84.2 → 96.8%
Spiral	56.3 → 94.3%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

② Corner·Thickness Weighting

문제

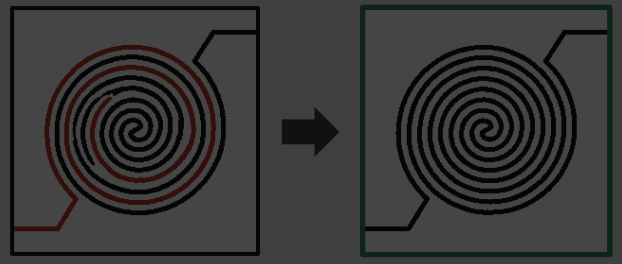
주로 급하게 꺾이는 코너,
얇은 벽에서 끊김

방법

코너, 얇은 벽을 한 번 더 강조

결과

Serpentine	91.0 → 80.8%
Spiral	94.3 → 97.2%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

③ Pass-Count Conditioning

문제

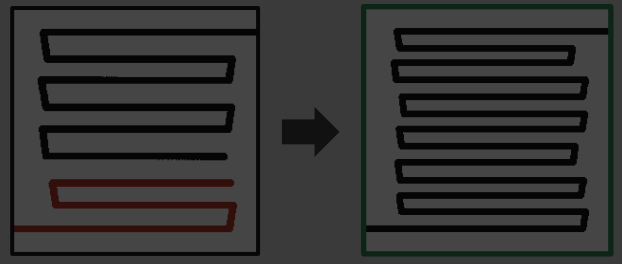
Serpentine이 줄 수를 몰라
코너 구간 막히거나 어긋남

방법

줄 수를 알려 주는 보조 컨디션 추가

결과

전체	98.8%
Serpentine	80.8 → 99.3%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

Summary

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Boundary Weighting, Corner·Thickness, Pass-Count Conditioning

① Boundary Weighting

문제

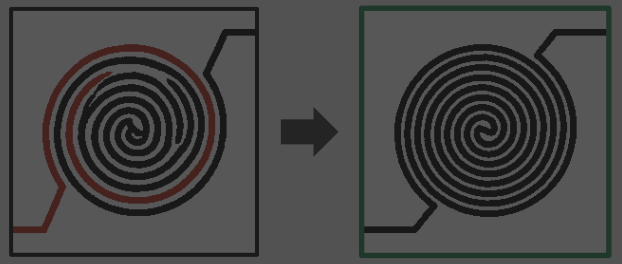
유로 경계가 흐려져 끊기고 섞임

방법

유로 경계를 더 집중해서 학습

결과

전체	84.2 → 96.8%
Spiral	56.3 → 94.3%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

② Corner·Thickness Weighting

문제

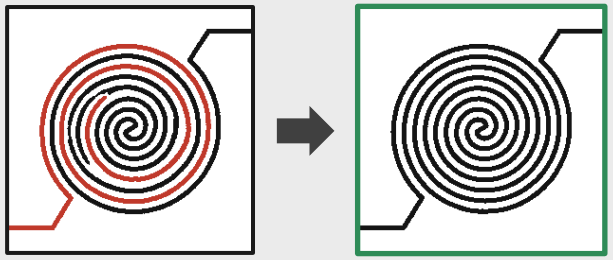
주로 급하게 꺾이는 코너,
얇은 벽에서 끊김

방법

코너, 얇은 벽을 한 번 더 강조

결과

Serpentine	91.0 → 80.8%
Spiral	94.3 → 97.2%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

③ Pass-Count Conditioning

문제

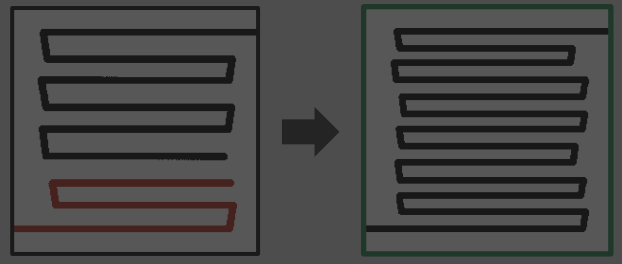
Serpentine이 줄 수를 몰라
코너 구간 막히거나 어긋남

방법

줄 수를 알려 주는 보조 컨디션 추가

결과

전체	98.8%
Serpentine	80.8 → 99.3%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

Summary

Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

Boundary Weighting, Corner·Thickness, Pass-Count Conditioning

① Boundary Weighting

문제

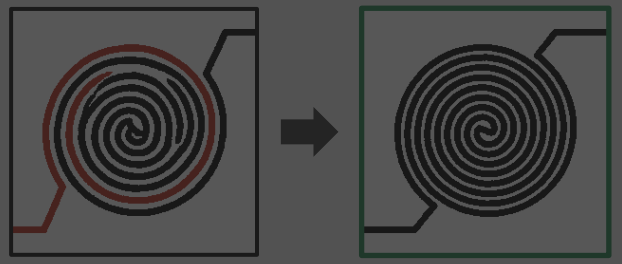
유로 경계가 흐려져 끊기고 섞임

방법

유로 경계를 더 집중해서 학습

결과

전체	84.2 → 96.8%
Spiral	56.3 → 94.3%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

② Corner·Thickness Weighting

문제

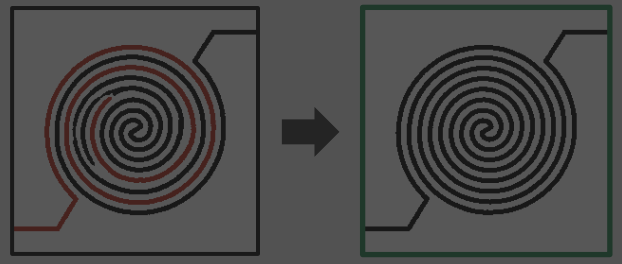
주로 급하게 꺾이는 코너,
얇은 벽에서 끊김

방법

코너, 얇은 벽을 한 번 더 강조

결과

Serpentine	91.0 → 80.8%
Spiral	94.3 → 97.2%



적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

③ Pass-Count Conditioning

문제

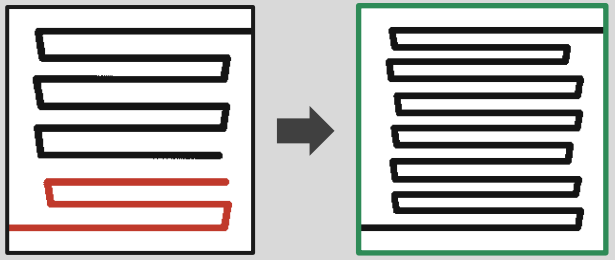
Serpentine이 줄 수를 몰라
코너 구간 막히거나 어긋남

방법

줄 수를 알려 주는 보조 컨디션 추가

결과

전체	98.8%
Serpentine	80.8 → 99.3%



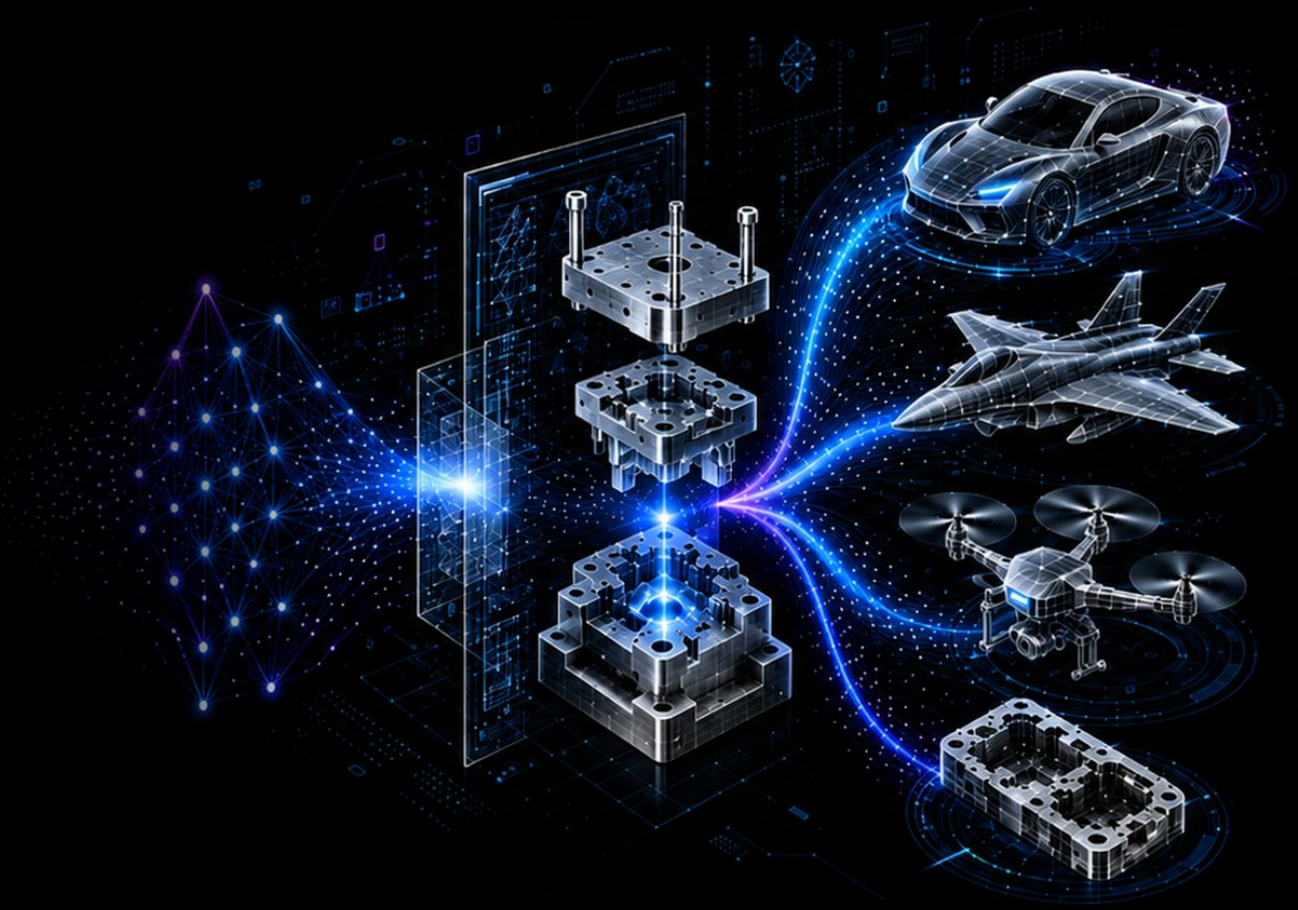
적용 전 (불량) 적용 후 (통과)

PART

III

Conclusion

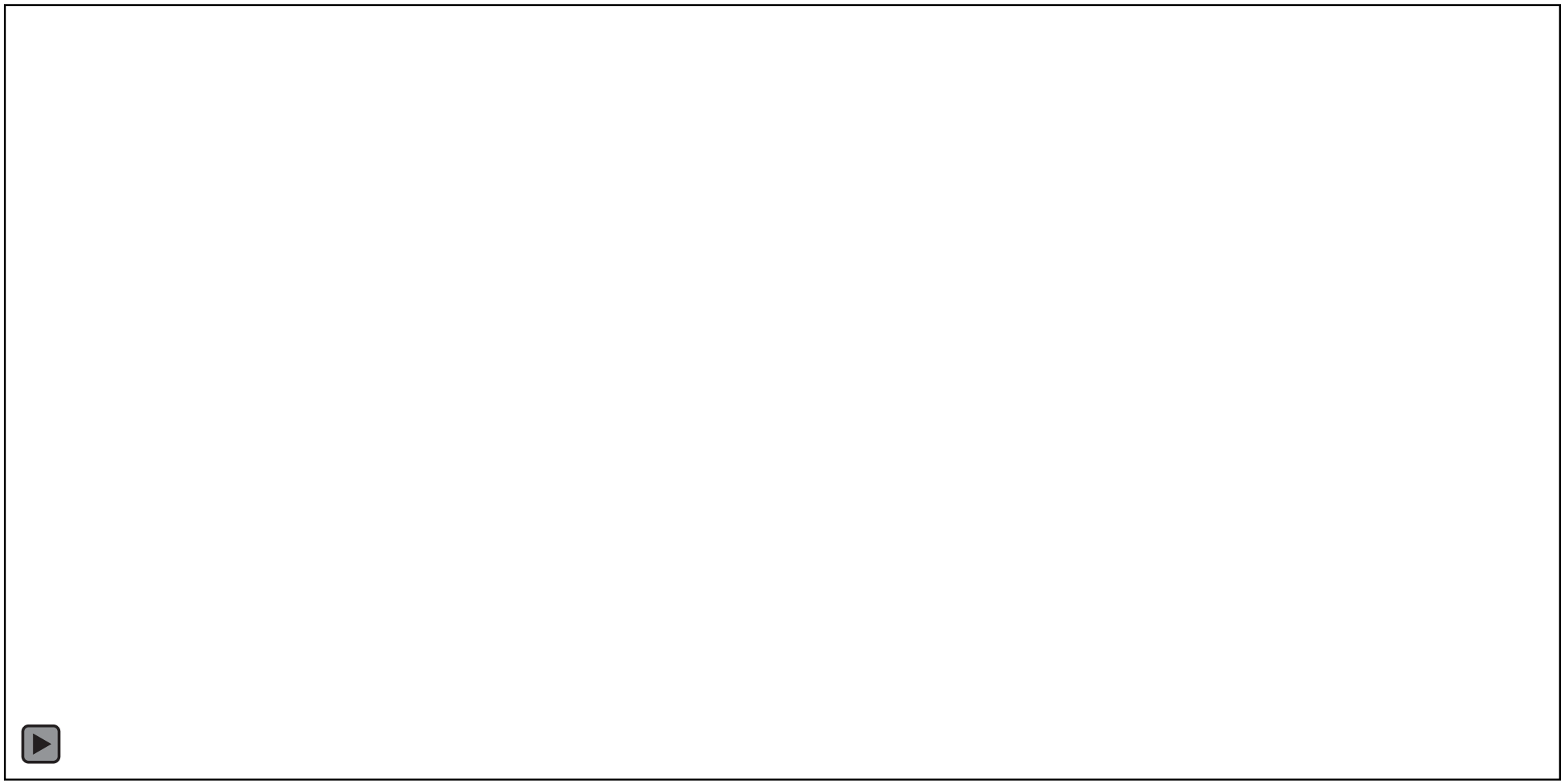
- Demo Website
- Extension to Deployable Radiator



Intelligent Design for Engineering Applications Lab

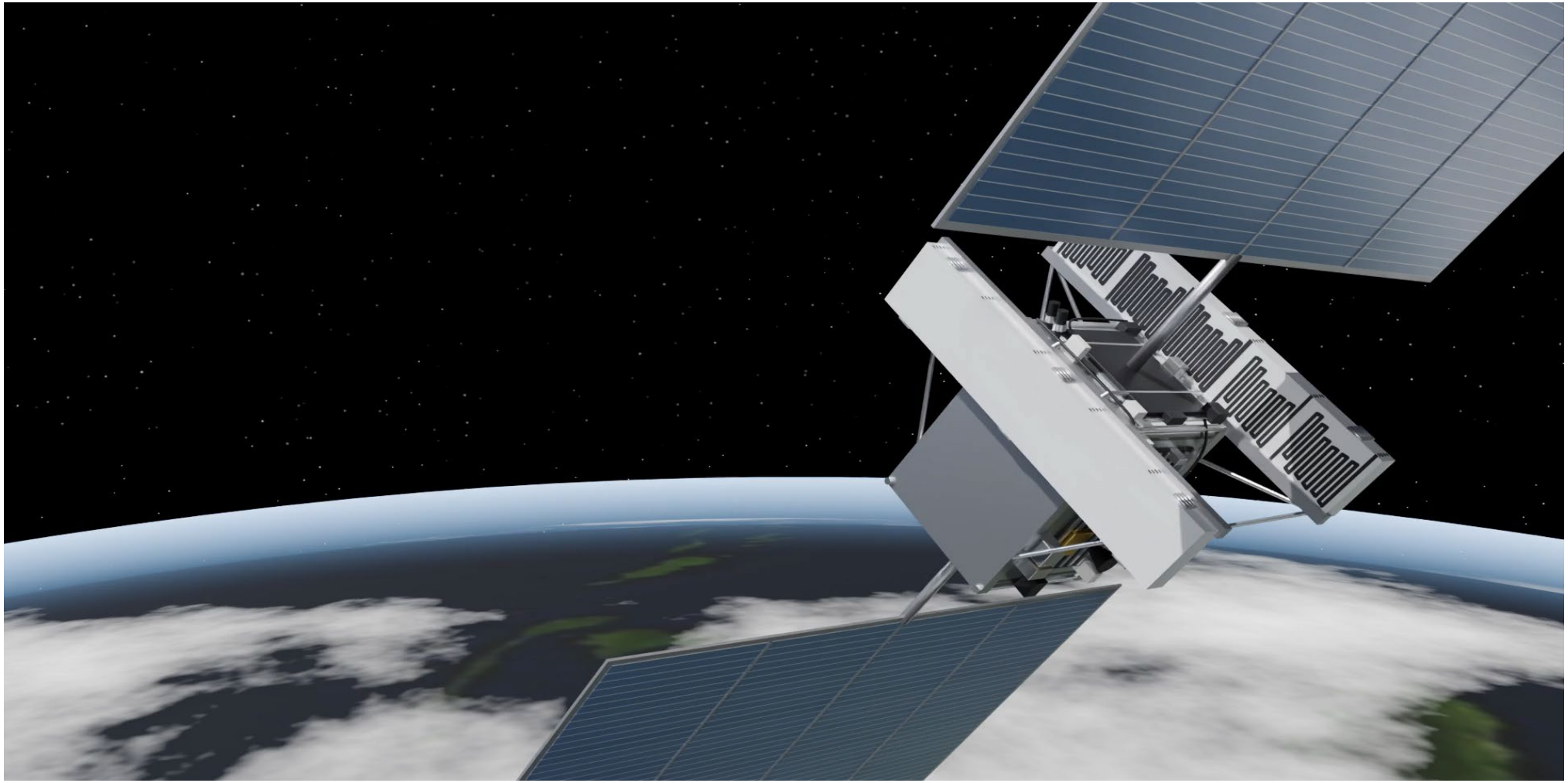
Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

형상 타입을 선택하면 생성 유로 후보들을 확인하는 Demo

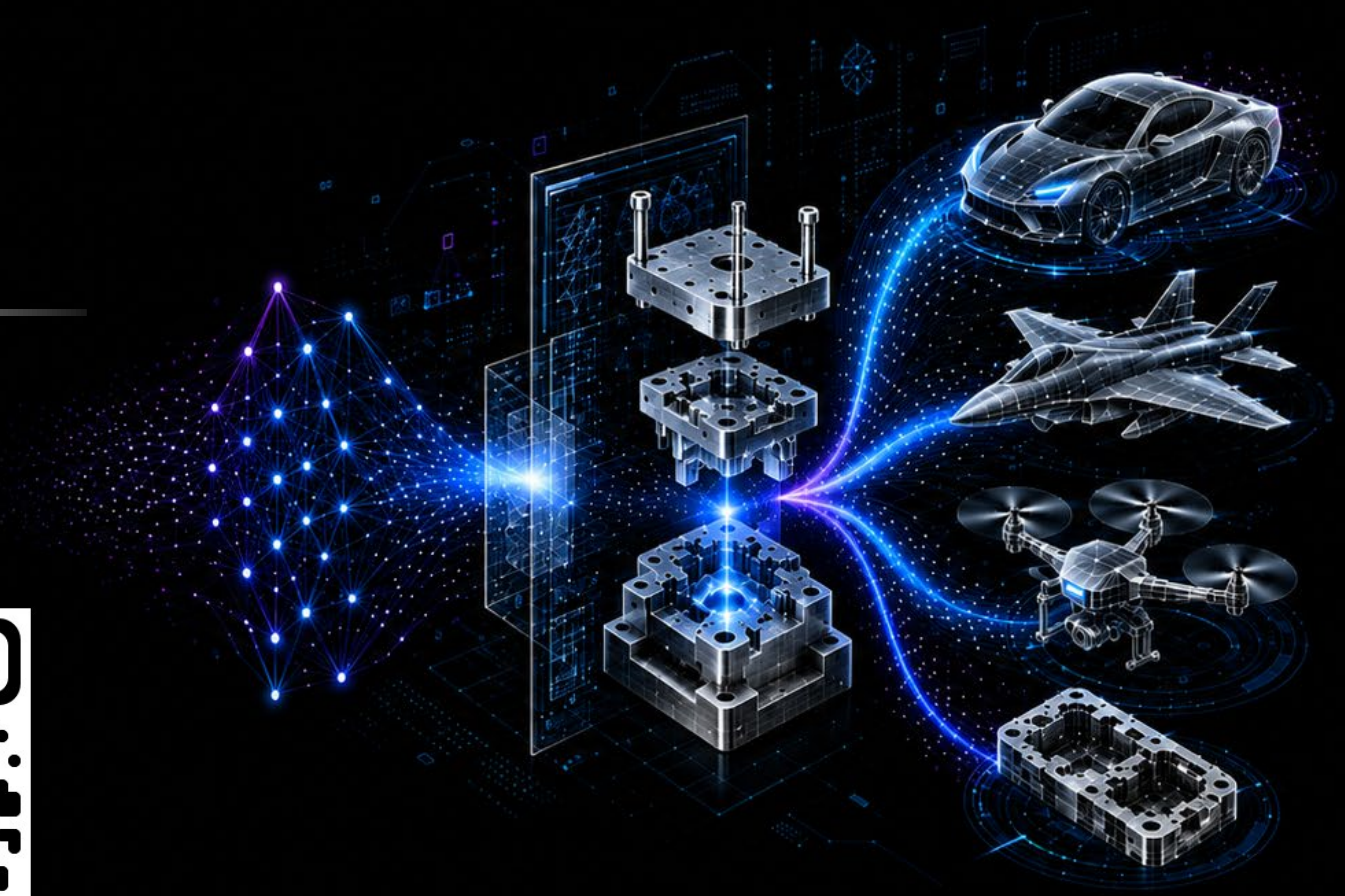


Part 1 Introduction
Part 2 Method
Part 3 Results & Discussion
Part 4 Conclusion

AI가 생성한 유로 형상을 이어 붙여 만든 전개형 대형 방열판



Any Questions?



이름 하 형 진

소속 한양대학교 ERICA 기계공학과

이메일 broha@hanyang.ac.kr

IDEA Intelligent Design for Engineering Applications Lab