

Diffusion 기반 우주 데이터센터 방열판용

유로 형상 생성

하형진^{*†} · 안동균^{**} · 양선웅^{*}

^{*}한양대학교 ERICA 기계공학과, ^{**}한양대학교 ERICA 로봇공학과

Diffusion-based flow-field generation for orbit data center radiators

Hyeong-Jin Ha^{*†}, Donggyun An^{**}, Sunwoong Yang^{*}

^{*}Dept. of Mechanical Engineering, Hanyang Univ. ERICA, ^{**}Dept. of Robotics, Hanyang Univ. ERICA

Key Words: 우주 데이터센터(Orbital Data Center), 방열판 유로(Radiator Flow Field), 조건부 확산(Conditional Diffusion)

Abstract

Orbital data centers require lightweight, reliable thermal-management systems for rejecting computing heat in orbit. This study presents an SDF-based conditional diffusion framework that generates three radiator flow-field families: single serpentine, parallel straight-channel, and circular pin-fin. Design variables control channel count, width, bend radius, header width, pin arrangement, and pin diameter, while fixed inlet, outlet, and boundaries preserve a common interface. Generated SDFs are binarized and refined through topology-preserving post-processing. A validity pipeline evaluates volume fraction, fluid and wall width limits, domain compliance, inlet-to-outlet connectivity, isolated regions by four-neighbor breadth-first search, family constraints, post-processing fidelity, and novelty against training and accepted samples. The workflow yields traceable, diffusion-ready geometries for CFD labeling, surrogate modeling, and fault-response assessment of orbital data-center radiators.

1. 서 론

인공지능 연산 수요가 증가하면서 지상 데이터 센터는 전력 공급, 부지 확보 및 냉각수 사용에서 제약을 받고 있다. 우주 데이터센터는 태양에너지를 활용하고 우주에서 생산된 데이터를 지상 전송 전에 궤도에서 처리할 수 있어 주목받고 있다⁽¹⁾. 그러나 연산장치의 폐열을 우주 환경에서 제거하는 문제는 장기 운용 신뢰성을 좌우한다.

진공에서는 외부 대류를 이용할 수 없으므로 열 배출은 복사에 의존한다. 폐열을 처리하려면 넓은 방열면이 필요하고, 이는 방열판 질량과 전개 구조 증가로 이어진다⁽¹⁾. 따라서 열을 냉각유체로 회수해 방열판으로 이송하는 펌프 구동 유체루프가 요구된다⁽²⁾. 또한 질량과 펌핑동력에서 성능을 유지하고, 미소운석이나 우주파편에 의한 관통과 누설 이후에도 운용을 지속할 수 있는지 평가해야 한다^(1,2).

방열판 내부 유로는 열전달 면적, 온도 균일성과 압력강하를 결정한다. Single serpentine은 연속 유로가 방열면을 반복 통과해 열적 커버리지와 온도 균일성에 유리하지만, 경로와 굴곡이 늘어 압력손실이 커질 수 있다. 또한 국부 누설이 전체 경로에 영향을 줄 수 있다^(1,2). Parallel straight-channel은 유량을 짧은 경로로 나눠 압력강하를 낮출 수 있지만, header 형상과 경로별 저항 차이에 따라 유량 편차가 발생할 수 있다⁽³⁾. 추가로 circular pin-fin을 제3의 비교 형상군으로 선정하고,

pin 배열 수와 직경 변화가 유효 유동면적, 유동저항 및 정체영역에 미치는 영향을 검토한다.

기존 parametric 설계는 정의된 변수와 형상 문법에 따라 탐색 범위가 제한된다. 위상최적화는 자유도를 제공하지만 반복적인 열유동 해석과 민감도 계산으로 비용이 크다. 이를 줄이기 위해 diffusion model과 surrogate model을 결합한 생성설계가 제안되고 있다⁽⁴⁾. 그러나 이진 이미지에는 경계 계단화, 채널 단절 및 고립 영역이 나타날 수 있어 (computational fluid dynamics, CFD) 해석 전 유효성 검증이 필요하다.

본 연구는 (signed distance function, SDF) 기반 conditional diffusion model을 이용한 방열판 유로 생성 프레임워크를 제안한다. Single serpentine은 pass 수, 채널 폭과 굴곡반경을, parallel straight-channel은 채널 수, 채널 폭과 header 폭을, circular pin-fin은 배열 수와 pin 직경을 조건변수로 사용한다. 입구는 좌측 하단, 출구는 우측 상단에 고정한다. 생성된 SDF는 이진 마스크로 변환한 뒤, 입·출구 연결성과 형상군의 주요 위상 특성을 유지하도록 제한된 후처리를 적용한다. 이후 체적분율, 최소 유체폭과 벽 두께, 허용영역, 입·출구 연결성, 4-neighbor breadth-first search 기반 고립영역, 형상별 제약, 후처리 충실도 및 신규성을 검증한다. 입력조건, 원본 SDF, 후처리 형상과 Gate 판정을 저장하여 CFD 라벨링, 대리모델 학습 및 성능 평가에 활용할 데이터셋을 구축한다.

[†] Presenting Author, broha@hanyang.ac.kr

2. 이론 및 실험

본 연구에서는 방열판 내부 유로를 256×256 격자의 SDF로 표현하였다. SDF는 유체영역에서 양수, 고체영역에서 음수가 되도록 정의하였으며, 경계로부터의 거리는 ± 14 pixel 범위로 절단한 후 $[-1, 1]$ 로 정규화하였다. 모든 형상은 좌측 하단의 입구와 우측 상단의 출구를 공통 경계조건으로 사용하였다.

학습 형상은 single serpentine(F0), parallel straight-channel(F1), circular pin-fin(F2)의 세 형상군으로 구성하였다. F0은 5-15개의 pass와 6-22 pixel의 채널 폭을 변화시켰다. F1은 6-14개의 병렬 채널, 6.5-15 pixel의 채널 폭 및 12-30 pixel의 header 폭을 사용하였다. 이때 header 폭 W_h 는 채널 폭 w 에 대하여 다음 조건을 만족하도록 제한하였다.

$$\max(12, w) \leq W_h \leq \min(30, 2w) \quad (1)$$

F2는 가로와 세로 방향으로 각각 6-9개의 원형 pin을 배치하고, pin 반지름과 pitch의 비 r/p 를 0.24-0.32로 설정하였다. 이는 직경비 $d/p = 0.48$ -0.64에 해당한다. 각 형상군에서 5,000개씩, 총 15,000개의 SDF를 학습 데이터로 사용하였다.

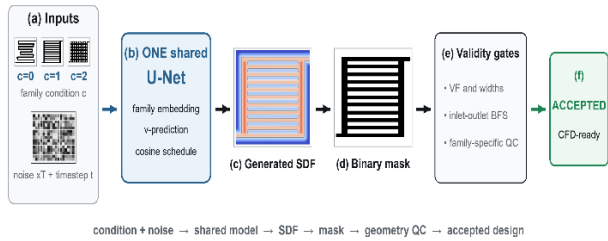


Fig. 1 Flowchart of the unified family-conditioned SDF diffusion and geometry validation framework

세 형상군을 별도의 모델로 학습하지 않고 하나의 U-Net 기반 diffusion model로 통합하였다. 형상군을 나타내는 family ID를 embedding하여 diffusion timestep embedding에 더함으로써 동일한 모델이 F0, F1 및 F2를 구분하도록 하였다. 모델은 v-prediction과 cosine noise schedule을 사용하여 50 epoch 동안 학습하였으며, batch size는 8, learning rate는 2×10^{-4} , exponential moving average 계수는 0.999로 설정하였다. 학습 손실은 첫 epoch의 약 0.0315에서 50 epoch의 약 0.0039까지 감소하였다.

학습된 모델로부터 각 형상군당 256개씩 총 768개의 형상을 (denoising diffusion implicit models, DDIM) 100 step으로 생성하였다. 생성 SDF는 다음과 같이 이진 유체 마스크로 변환하였다.

$$M(x, y) = \begin{cases} 1, & \emptyset(x, y) > 0 \\ 0, & \emptyset(x, y) \leq 0 \end{cases} \quad (2)$$

여기서 $M = 1$ 은 유체영역, $M = 0$ 은 고체영역을 의미한다. Diffusion model이 생성한 SDF를 임계값 0에서 최초로 이진화한 형상을 raw mask로 정의하였다. 이후 유로의 기본 위상과 입·출구 연결구조를 변경하지 않는 범위에서 계단형 경계, 작은 요철 및 pixel noise를 제한적으로 정리한 형상을 post mask로 정의하였다. Raw는 diffusion model의 최초 이진 형상이고, post는 유로의 기본 구조를 바꾸지 않는 범위에서 픽셀 경계만 정리한 gate 평가용 최종 후보 형상이다.

Raw mask에는 SDF 이진화 과정에서 계단형 경계와 국부적인 pixel noise가 발생할 수 있으므로, 형상의 위상과 연결성을 보존하는 제한적 후처리를 적용하였다. F0은 유로 연결성, pass 수 및 벽 두께가 유지되는 범위에서 경계를 평활화하였다. F1은 검출된 header와 채널 수를 유지하면서 채널 경계와 두께를 균일하게 보정하였으며, 단절이나 내부 slit이 있는 형상은 복원하지 않고 탈락시켰다. F2는 pin의 중심과 면적을 보존하면서 경계를 원형으로 정규화하였다.

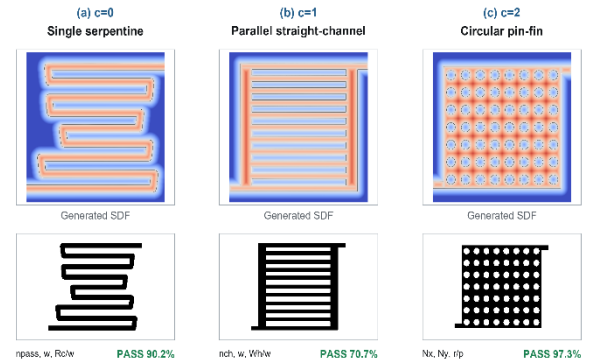


Fig. 2 Generated SDFs and binary flow-field geometries for three conditioned design families

생성 형상의 기하학적 유효성은 공통 gate와 형상별 gate를 이용하여 판정하였다. 공통 gate에서는 유체 체적분율 0.20-0.70, 최소 유체폭 4 pixel, 입·출구 접촉, 허용영역 이탈, 최소 벽 두께 및 고립 유체영역을 검사하였다. 입구와 출구의 연결 여부는 상·하·좌·우 방향만을 허용하는 4-neighbor breadth-first search로 확인하였다.

F0은 최소 벽 두께 3 pixel과 굴곡도 2.5 이상을 추가로 검사하였다. F1은 채널 수와 검출된 유로 수의 일치성, header 연속성, 채널 두께의 변동계수, 최소 채널 간격 3 pixel 및 경계 직선성을 검사하였다. F2는 검출된 pin 수, r/p , pin 간 최소 간격, 원형도, 직경 균일성 및 고정 외곽 구조의 유지 여부를 평가하였다. 이 과정은 열성능을 직접 판정하는 CFD 검증이 아니라, CFD 해석에 투입 할

수 있는 기하학적으로 유효한 형상을 선별하는 과정이다.

총 768개의 생성 형상 중 원본 SDF를 이진화한 raw 단계에서는 734개가 gate를 통과하여 95.6%의 통과율을 보였다. 최종 후처리와 품질검사를 모두 통과한 형상은 661개로, 전체 통과율은 86.1%였다. F0은 231/256개(90.2%), F1은 181/256개(70.7%), F2는 249/256개(97.3%)가 최종 통과하였다.

F0의 주요 탈락 원인은 입구와 출구 사이의 연결 단절 22건, 최소 벽 두께 부족 2건 및 굴곡도 부족 1건이었다. F1에서는 74개 형상에서 일부 열 방향으로 검출되는 채널 수가 달라졌으며, 이는 채널 내부의 긴 1 pixel slit 또는 불균일한 경계가 발생했기 때문이다.

특히 F1은 raw 단계에서 254개가 통과했으나 후처리 이후 181개만 통과하였다. 이는 생성모델의 성능 저하라기보다 일부 직선화 후처리가 유효한 raw 채널에 가느다란 틈을 발생시킨 결과이다. F2에서는 6개가 허용 r/p 범위를 벗어났고, 1개는 pin 사이의 최소 간격이 부족하여 탈락하였다.

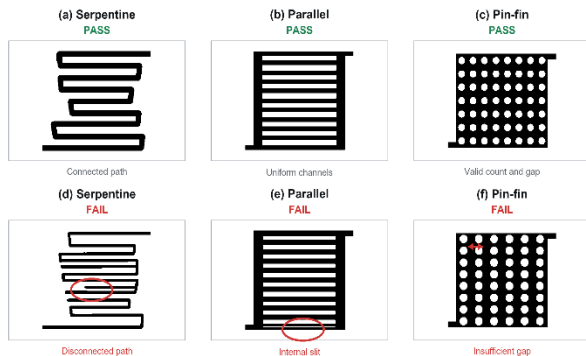


Fig. 3 Representative accepted and rejected geometries identified by family-specific validity gates

따라서 F0과 F2에서는 제한적 후처리가 형상의 연결성과 원형성을 유지하는 데 효과적이었으나, F1에서는 raw 형상이 이미 유효할 경우 직선화 후처리를 생략하거나, 후처리 결과가 품질지표를 악화시키면 raw 형상으로 복귀하는 절차가 필요함을 확인하였다.

3. 결 론

본 연구에서는 우주 데이터센터 방열판의 유로 후보를 생성하기 위한 family-conditioned SDF diffusion framework를 구축하였다. 하나의 통합 u-net에 형상군 조건을 입력하여 single serpentine(F0), parallel straight-channel(F1) 및 circular pin-fin(F2)을 각각 256개씩 생성하였다. 생성 SDF를 raw mask로 이진화한 후 형상별 제한적 후처리와 기하학적 유효성 검증을 수행한 결과, 총 768개 중 661개가 최종 gate를 통과하여 86.1%의 유효율을 나타냈다.

형상별 통과율은 F0 90.2%, F1 70.7%, F2 97.3%였다. F1의 상대적으로 낮은 통과율은 생성 SDF의 경계 변동이 이진화 과정에서 내부 slit과 채널 두께 분균일로 나타났기 때문이다. 본 연구는 생성 SDF, raw mask, post mask 및 gate 관정을 단계별로 기록하여 생성모델과 후처리의 영향을 구분할 수 있는 데이터 구축 절차를 제시하였다.

향후에는 통과 형상에 CFD 기반 온도 및 압력 강하 성능을 부여하고, 체적분율과 세부 설계변수를 직접 조건으로 입력하는 연속조건 diffusion model과 유로 손상에 따른 고장 허용성 평가를 수행할 예정이다.

후 기

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00355857).

참고문헌

- (1) Turyshev, S. G., 2026, "Orbital Data Centers: Spacecraft Constraints and Economic Viability," arXiv Preprint, arXiv:2604.27197 [physics.gen-ph].
- (2) Boeing Integrated Defense Systems, n.d., "Active Thermal Control System (ATCS) Overview: EEATCS (5A-12A.1)/EATCS (12A.1+)," International Space Station Technical Overview, St. Louis, MO, USA.
- (3) Ahmed, M. and Xiong, S., 2024, "Comprehensive Review of Serpentine Flow Fields for Effective Thermal Management of Proton Exchange Membrane Fuel Cell," Heliyon, Vol. 10, Article No. e39793, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39793.
- (4) Keramati, H., Sadeghi, M. and Jaiman, R. K., 2026, "HeatGen: A Guided Diffusion Framework for Multiphysics Heat Sink Design Optimization," International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 261, Article No. 128579, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2026.128579.