

AI 데이터 센터용 CPU 냉각 전력 최소화를 위한 머신러닝 기반 마이크로채널 히트싱크 최적 설계

팀 명: 정성을 다하여
건국대학교 기계항공공학부
윤정환

지도교수: 김창완 교수님



TABLE OF CONTENTS

01

서론

- 연구 배경
- 연구 목표
- 연구 절차

02

마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키징 열 유동 해
석

- 마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키지 모델
- 지배 방정식
- 유한 요소 모델
- 열 유동 해석을 위한 경계조건
- 해석 결과

03

머신러닝을 활용한
마이크로채널 압력 강하 최소화

- 최적 설계 정식화
- 메타모델 기반 최적 설계
- 기존 메타모델 기반 최적 설계의 문제점
- 베이지안 최적화 기반 최적 설계
- 최적 설계 결과 비교

04

결론

TABLE OF CONTENTS

01

서론

- 연구 배경
- 연구 목표
- 연구 절차

02

마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키징 열 유동 해
석

- 마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키지 모델
- 지배 방정식
- 유한 요소 모델
- 열 유동 해석을 위한 경계조건
- 해석 결과

03

머신러닝을 활용한
마이크로채널 압력 강하 최소화

- 최적 설계 정식화
- 기존 메타모델 기반 최적 설계
- 기존 메타모델 기반 최적 설계의 문제점
- 베이지안 최적화 기반 최적 설계
- 최적 설계 결과 비교

04

결론



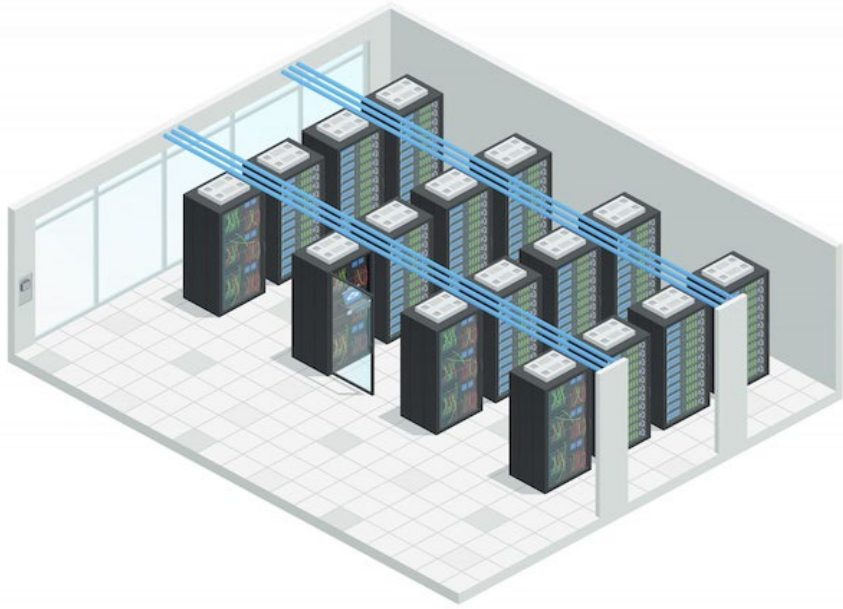
'AI 서버 식히려 선풍기 돌리는 서울대'

- 데이터 센터의 온도 상승 시 CPU/GPU 성능 저하 이슈 발생
- 프로세서 확보에 어려움을 겪는 상황에서 냉방 시설에 투자할 여력이 마땅치 않음.
- 대규모 냉방 시설을 갖추는 것 뿐만 아니라 냉방을 유지하는데 드는 비용도 고려해야함.

최인준·김민기, AI 서버 식히려 선풍기 돌리는 서울대, 조선일보, 2025년 8월 12일

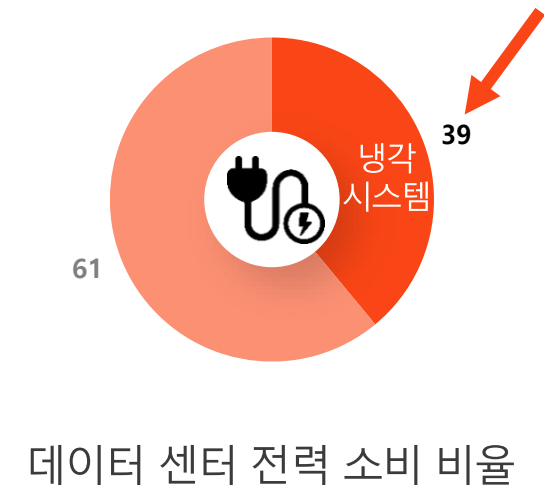
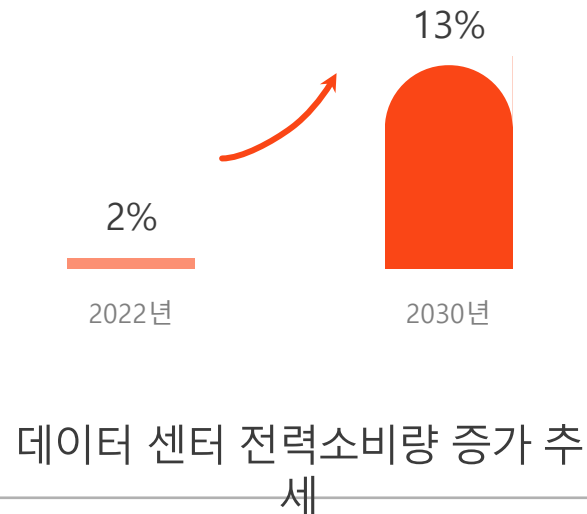
연구 배경 : 데이터 센터 전력 소비량 증가에 따른 냉각 전력 감소 필요성

- 데이터 센터는 대규모의 데이터를 저장·처리·전송하는 시설임.
- 최근 인공지능, 빅데이터 활용 확대에 따른 데이터 센터 수요가 증가함.
- 데이터 센터의 전력 소모량은 2030년까지 전 세계 전력 소비량의 13%정도로 증가할 것으로 예상됨 [1].
- 데이터 센터의 소비 전력 중 **냉각에 소비되는 전력이 40%로 매우 큰 비중을 차지함.**
- 이에 냉각 성능을 확보하면서도 전력 소비 효율을 높이는 냉각 시스템의 구축이 중요해지고 있음.



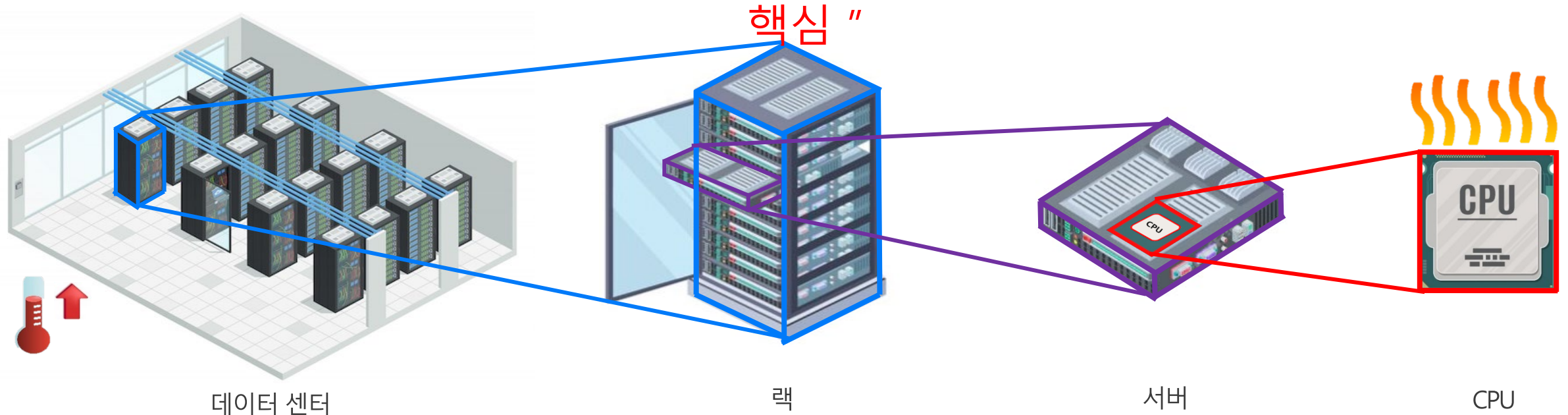
데이터 센터

데이터 센터의 전력 소비 현황



연구 배경 : 데이터 센터 냉각의 핵심 | CPU 냉각

“ 냉각 시스템을 통해 CPU에 의한 발열을 제어 하는 것이 데이터 센터 냉각의



데이터 센터의 구조

- 데이터 센터는 수천~수만개의 랙으로 구성
- 랙은 서버가 적층되어 있는 구조

데이터 센터의 주 발열원

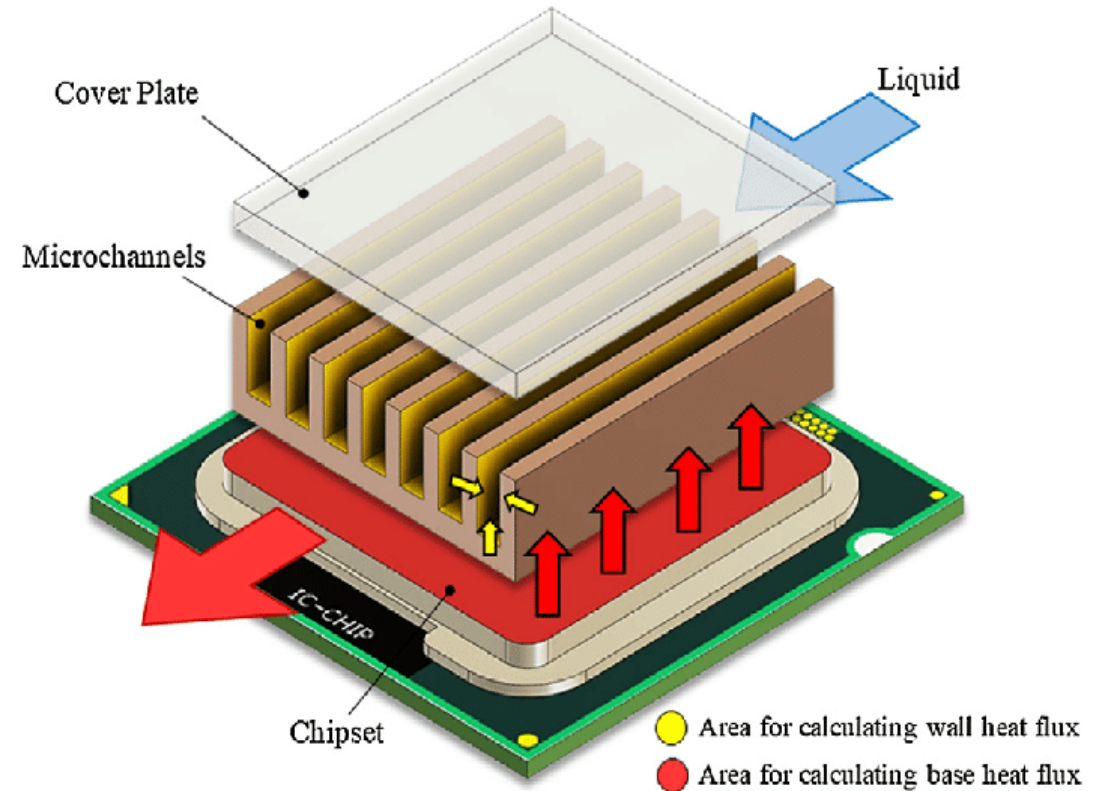
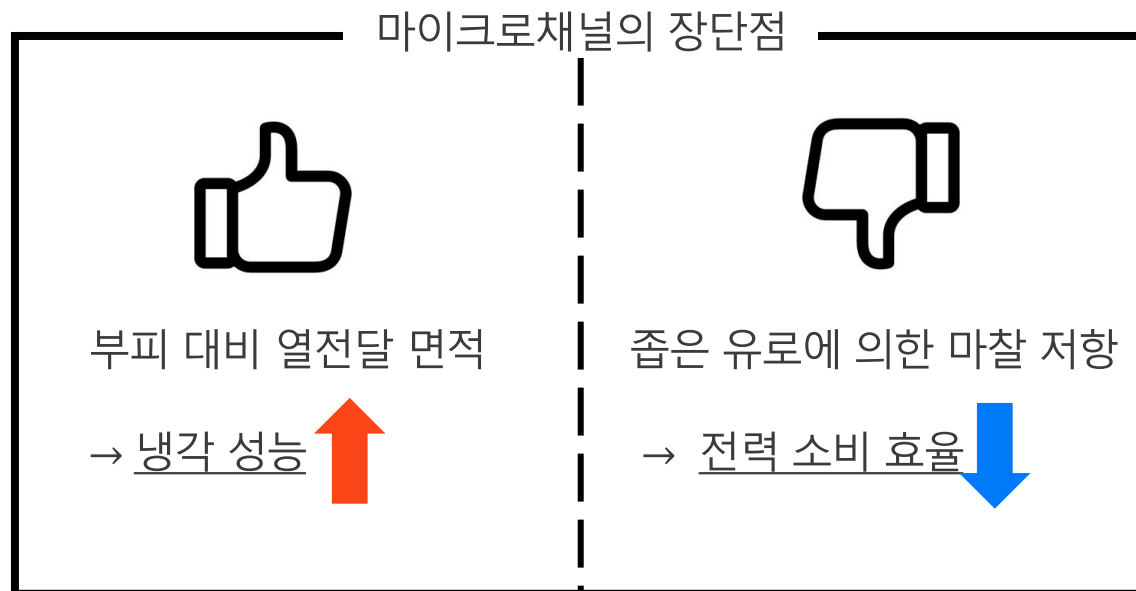
- 서버 내부에 탑재된 고성능 프로세서는 데이터 센터 전체 소비 전력의 40%를 차지하며, 전력의 대부분이 열로 전환 [2]

칩 발열에 의한 데이터 센터 온도 상승

- 열은 서버와 랙을 통해 퍼져나가며 최종적으로 데이터 센터 전체 공간의 온도 상승

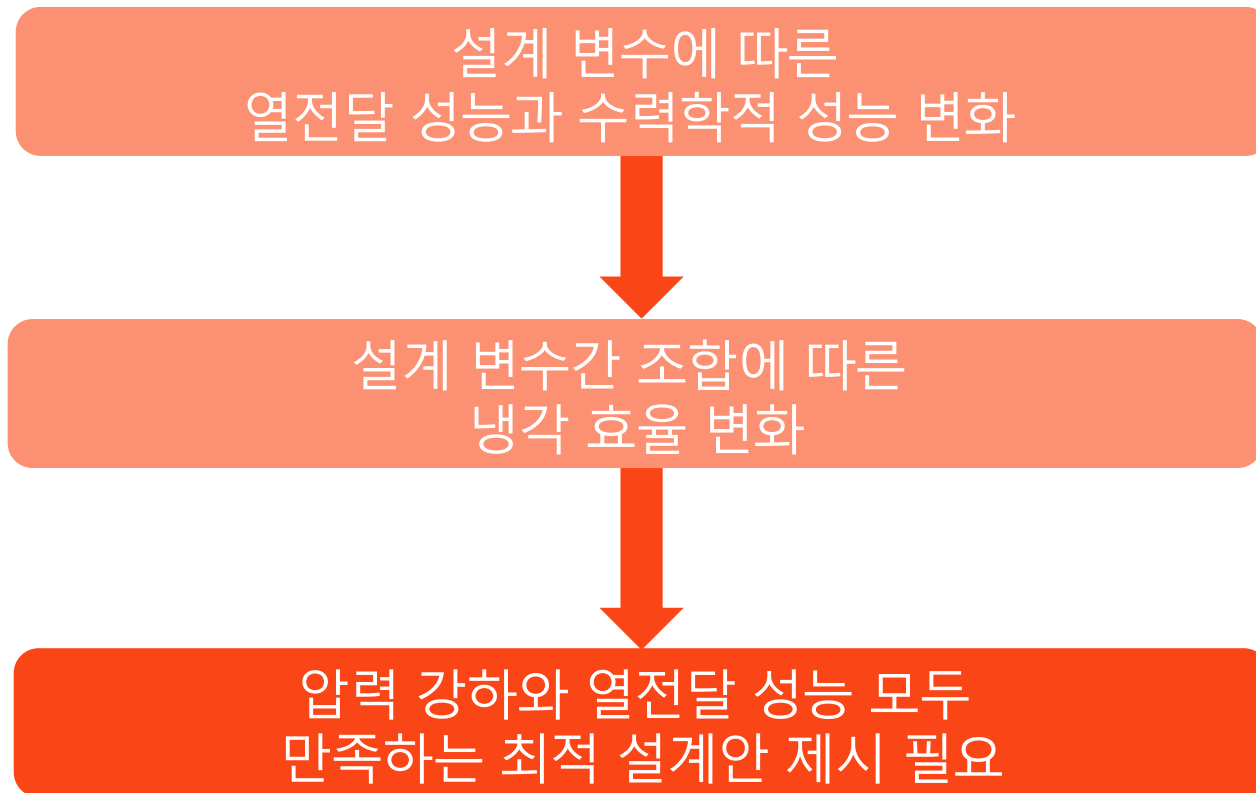
연구 배경 : 마이크로채널 히트싱크를 이용한 CPU 수냉

- 마이크로채널 히트싱크는 협소한 공간에서도 넓은 열전달 면적 확보해 냉각 성능을 높이며 이는 작은 크기의 CPU 냉각에 효과적임.
- 그러나 작은 채널의 크기는 냉각 유체와 벽면의 마찰 저항을 증가시켜 압력강하를 초래함.
- **압력강하의 증가는 냉각에 필요한 펌프의 동력 증가**를 야기함.



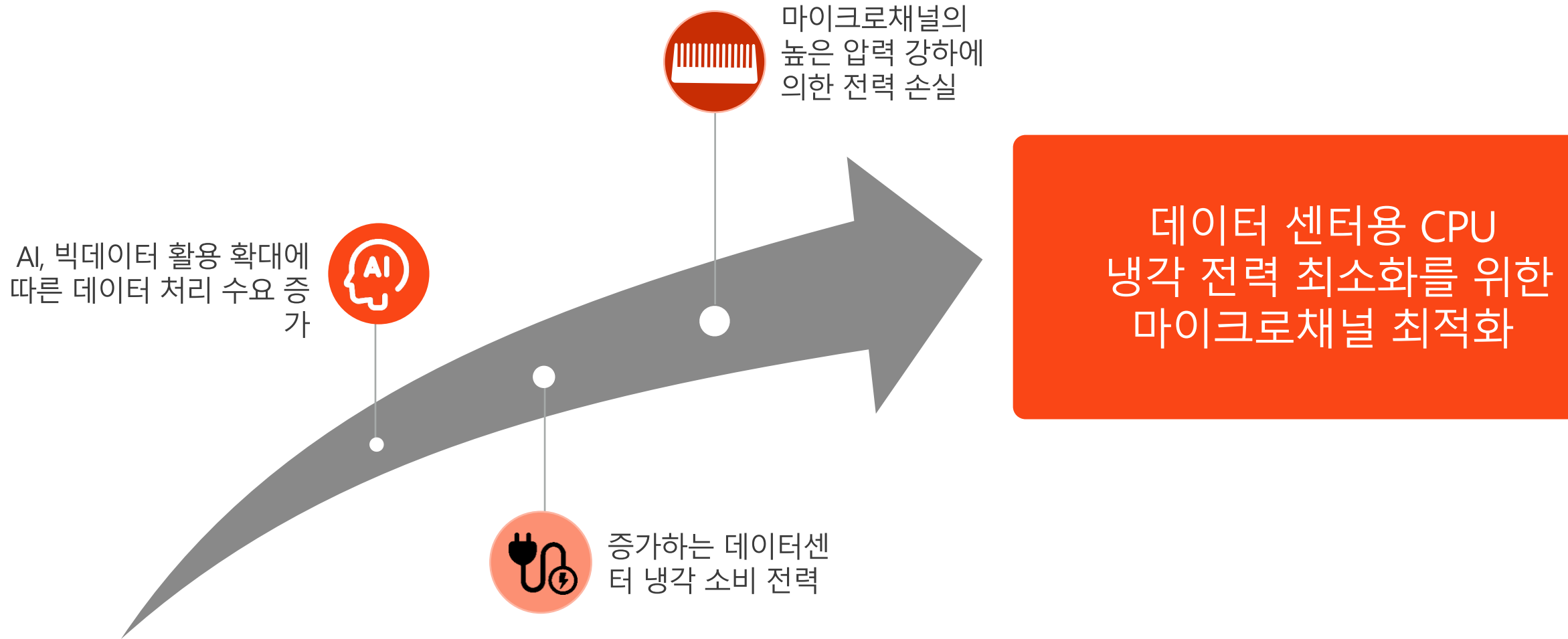
연구 배경 : 수냉식 CPU 마이크로채널 최적 설계의 필요성

- 채널의 단면 형상, 수력직경, 채널의 길이 등과 같은 설계 변수는 열전달 성능과 수력학적 성능 모두에 직접적인 영향을 미침.
- 이러한 변수들은 독립적으로 작용하지 않고 서로 조합되는 방식에 따라 냉각 효율이 달라짐.
- 따라서 압력강하와 열전달 성능 모두 만족하는 최적 설계안이 제시되어야함.



서론

01 연구 목표



01

CPU 패키지 열유동 해석

- ✓ 해석 모델 선정
- ✓ 유한요소모델 구축
- ✓ 열 유동 해석
- ✓ 해석 결과 분석



CREO



Simlab



Python

02

메타모델 기반 최적 설계와
머신러닝을 활용한
최적 설계 수행

- ✓ 최적 설계 정식화
- ✓ GPR 기반 메타모델 생성
- ✓ 베이지안 최적화를 통한
최적점 도출



Hyperstudy



AI studio



Python

03

기존 메타모델 기반 최적 설계와
머신러닝을 활용한
최적 설계 비교

- ✓ 최적화 검증
- ✓ 최적화 결과 비교



Simlab



AI studio

TABLE OF CONTENTS

01

서론

- 연구 배경
- 연구 목표
- 연구 절차

02

마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키징 열 유동 해석

- 마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키지 모델
- 지배 방정식
- 유한 요소 모델
- 열 유동 해석을 위한 경계조건
- 해석 결과

03

머신러닝을 활용한
마이크로채널 압력 강하 최소화

- 최적 설계 정식화
- 기존 메타모델 기반 최적 설계
- 기존 메타모델 기반 최적 설계의 문제점
- 베이지안 최적화 기반 최적 설계
- 최적 설계 결과 비교

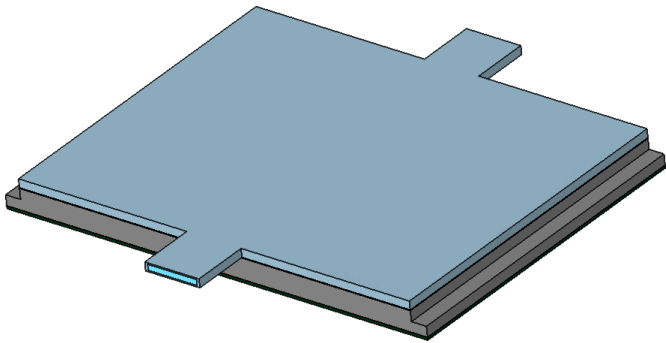
04

결론

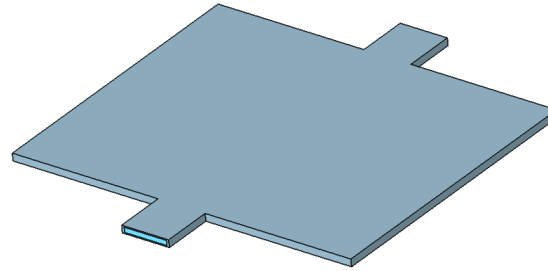
마이크로채널 히트싱크가 결합된 CPU 패키지 모델

- 본 연구에서는 Intel 사의 서버용 프로세서 Xeon 6780E 모델의 패키지 제원을 참고하여 모델링함[3].
- 패키지 빈 공간의 내부 공기는 좁은 공간에서 전도에 의한 열전달만을 고려하여 고체로 모사함.

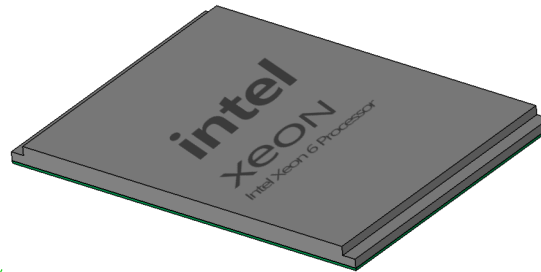
히트싱크가 결합된 CPU 패키지



히트싱크



CPU 패키지

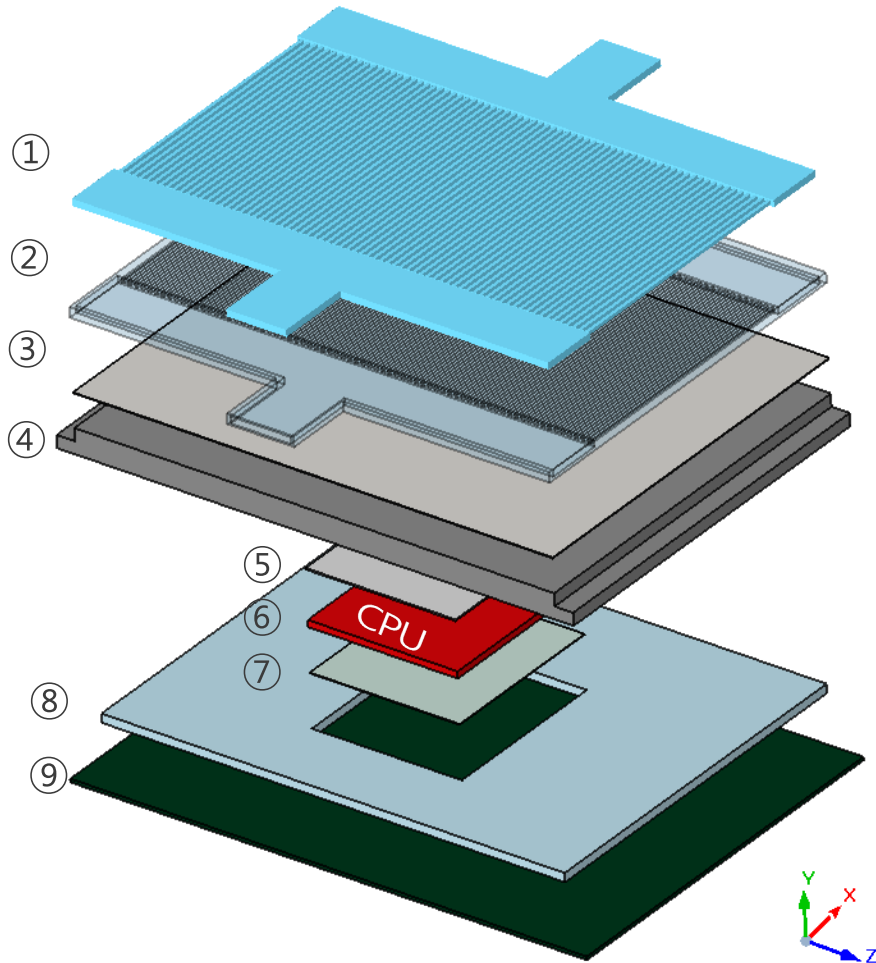


< Intel 사의 Xeon 6780E >



마이크로채널 히트싱크가 결합된 CPU 패키지 모델

- CPU 패키지 구성과 구성요소별 물성은 다음과 같고 Solder Bump와 Substrate는 등가 물성을 적용하였음[4].

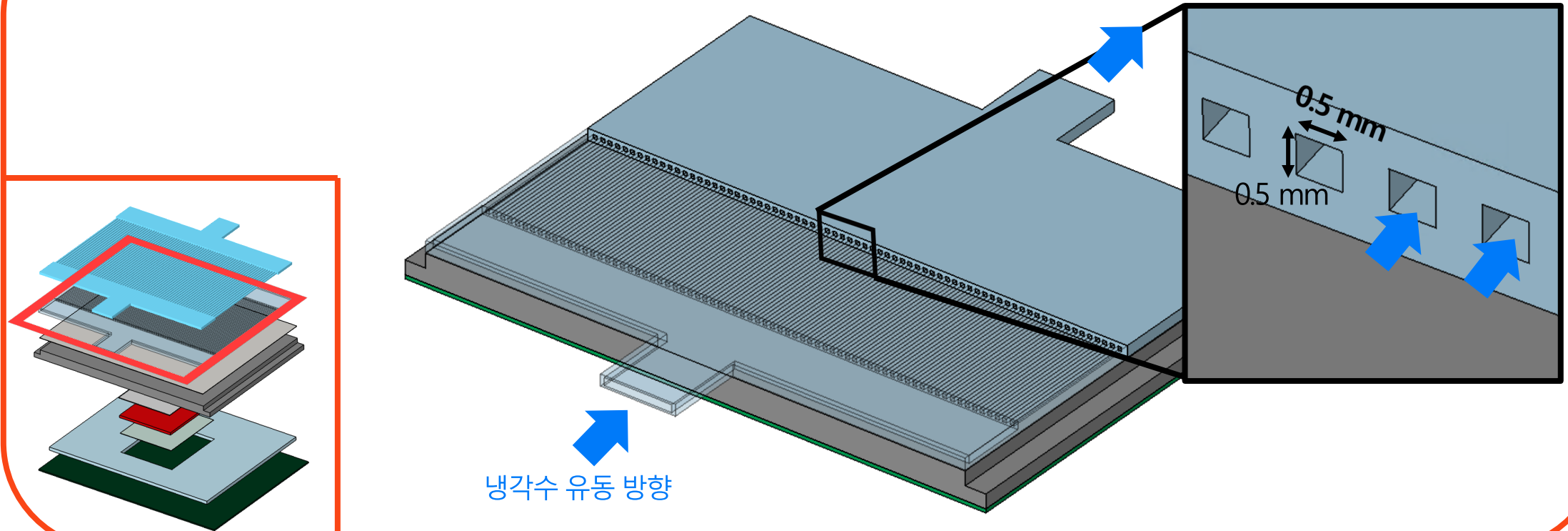


이름 / 재료	열전도도 ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	밀도 ($kg \cdot m^{-3}$)	비열 ($J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)
① Coolant / Water	0.6	998.2	4182
② Heat sink / Cu	202.4	2719	871
③ TIM 2 / Grease	5	2000	1000
④ IHS / Cu	385	8950	385
⑤ TIM 1 / Indium	86	731	230
⑥ CPU / Si	150	2329	712
⑦ Solder Bump	18.2	10100	167
⑧ Air	0.025	1.2	1005
⑨ Substrate	6.5	1800	12540

마이크로채널 히트싱크가 결합된 CPU 패키지 모델

- 마이크로채널의 채널 단면 형상을 정사각형 형태로 설정함.
- 마이크로채널 정의에 따라 각 채널의 수력직경이 1mm가 넘지 않도록 단면의 변 길이를 설정하였음.

마이크로채널 히트싱크 내부 유로



지배 방정식

- CPU에 의한 발열을 마이크로채널 냉각유체를 통해 제거하는 과정을 모사하기 위해서 다음과 같은 지배 방정식을 적용함.

$$\diamond \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0$$

연속 방정식

유체의 질량 보존을 나타내는 식

$$\diamond \rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho \vec{g} + \nabla \cdot \tau$$

운동량 방정식

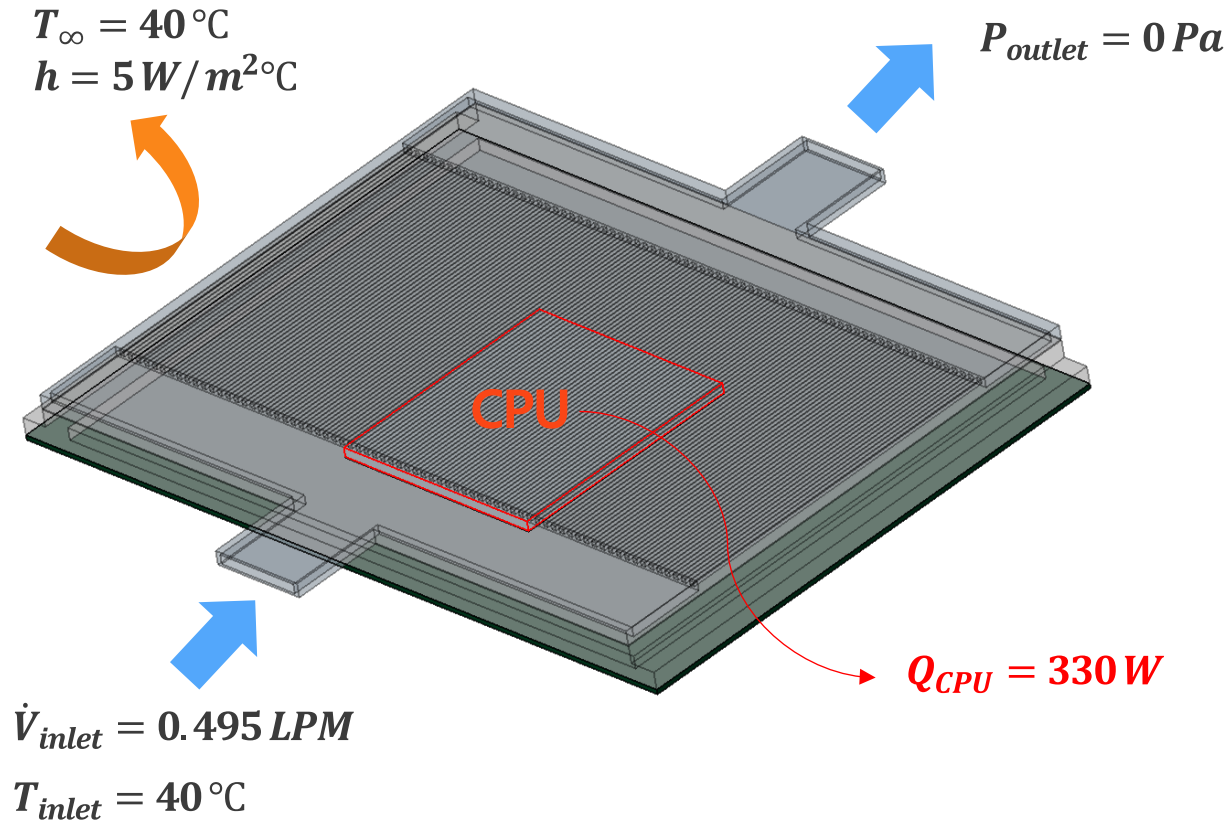
외력(압력·점성·체적력) 유체의 속도와
압력 분포 변화를 나타내는 식

$$\diamond \rho c_p \frac{DT}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \vec{u} \cdot \tau + S$$

에너지 방정식

열전달 및 내부 에너지 변화에 따른
온도 변화를 나타내는 식

열 유동 해석을 위한 경계 조건



발열 조건

Intel Xeon 6780E 모델의 *TDP 값 330 W을 발열량으로 적용[4]

유량 조건

ASHARE (미국공조냉동공학회) 권장 수냉 유량 1.5 LPM/kW를 적용하여 TDP 330 W에 대한 냉각수 유량 설정[5]

외기 온도 조건

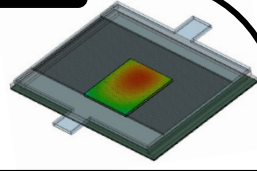
ASHARE 에서 제시한 고밀도 데이터 센터 허용 외기온도를 기준으로 설정[6]

*TDP (Thermal Design Power): 기본 클럭 기준 CPU의 모든 코어 활성화 상태의 평균 전력 소모값으로, 냉각 시스템 설계 기준으로 사용됨.

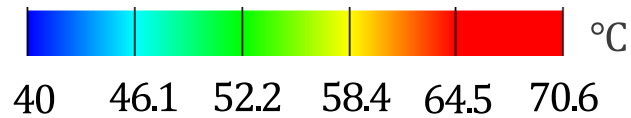
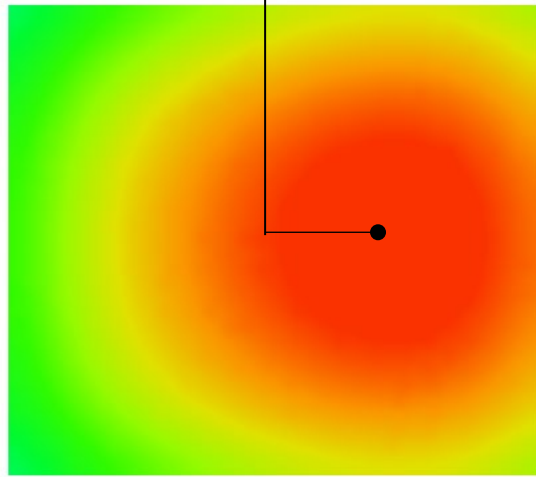
해석 결과

열 유동 해석 결과

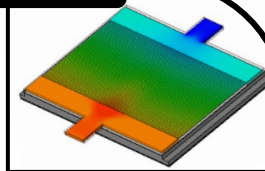
CPU 온도 분포 결과



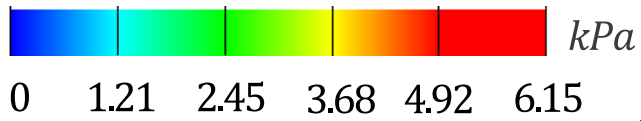
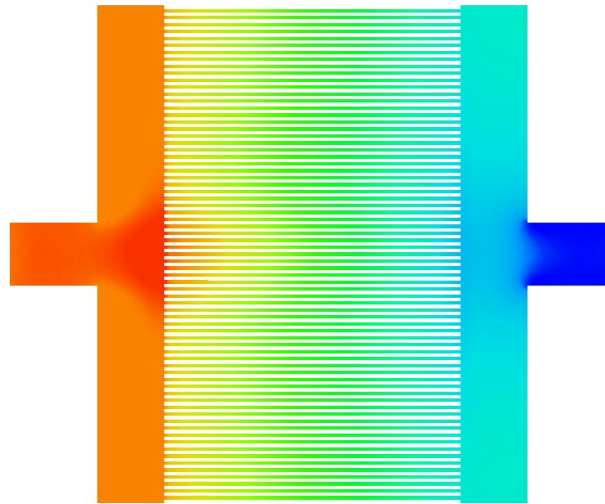
$T_{max} = 70.6\text{ }^{\circ}\text{C}$



냉각수 압력 분포 결과



$\Delta P = 5296.8\text{ Pa}$



압력강하에 의한 펌프 전력 소비 공식

$$P_{loss} = \Delta p \times \dot{V}$$

- 최고 온도는 70.6 °C로 도출
- 안정적인 CPU 작동 온도는 60~80 °C 사이로, 냉각 요구 조건 만족한 것을 확인
- 펌프 전력 소비 공식을 통한 펌프 소요 전력 계산 결과, 계산된 압력강하가 데이터 센터의 냉각 소요 전력에 영향 미치는 것을 확인

압력 강하 최소화
필요성 확인

TABLE OF CONTENTS

01

서론

- 연구 배경
- 연구 목표
- 연구 절차

02

마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키징 열 유동 해
석

- 마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키지 모델
- 지배 방정식
- 유한 요소 모델
- 열 유동 해석을 위한 경계조건
- 해석 결과

03

머신러닝을 활용한
마이크로채널 압력 강하 최소화

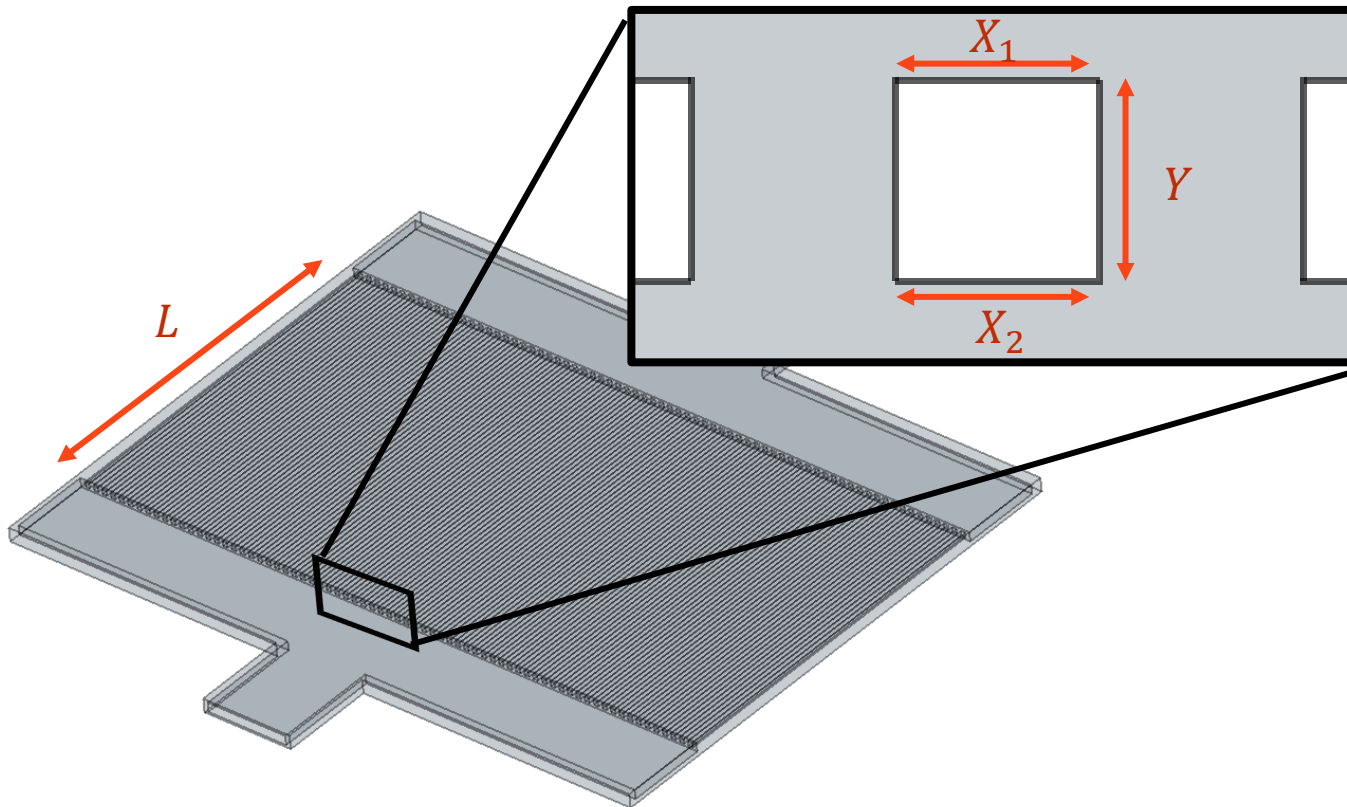
- 최적 설계 정식화
- 기존 메타모델 기반 최적 설계
- 기존 메타모델 기반 최적 설계의 문제점
- 베이지안 최적화 기반 최적 설계
- 최적 설계 결과 비교

04

결론

최적 설계 정식화

- 채널의 단면 형상과 채널 길이는 마이크로채널 히트싱크의 수력학적 성능과 냉각 성능에 영향을 미침[7].
- 냉각 성능은 기존 모델의 CPU 최고 온도와 평균 온도를 통해 평가하고, 수력학적 성능은 압력 강하로 평가
- 냉각 소비 전력 최소화를 위해 압력 강하 최소화를 목적함수로 설정함.



Find $[X_1, X_2, Y, L]$

Min ΔP

s.t. $0.1 \text{ mm} \leq X_1 \leq 0.9 \text{ mm}$
 $0.1 \text{ mm} \leq X_2 \leq 0.9 \text{ mm}$
 $0.1 \text{ mm} \leq Y \leq 0.4 \text{ mm}$
 $25 \text{ mm} \leq L \leq 50 \text{ mm}$
 $T_{max} \leq T_{max,initial}$
 $T_{avg} \leq T_{avg,initial}$

T_{max} : CPU 최고 온도

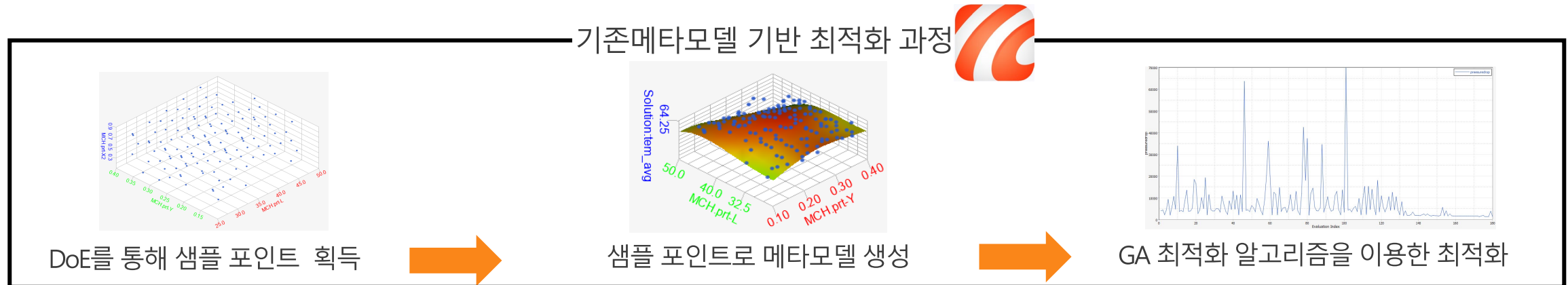
T_{avg} : CPU 평균 온도

ΔP : 압력 강하

기존 메타모델 기반 최적설계

- ✓ MELS: Modified Extensible Lattice Sequence
- ✓ RBF: Radial Basis Function
- ✓ GA: Genetic Algorithm
- ✓ DoE: Design of Experiment

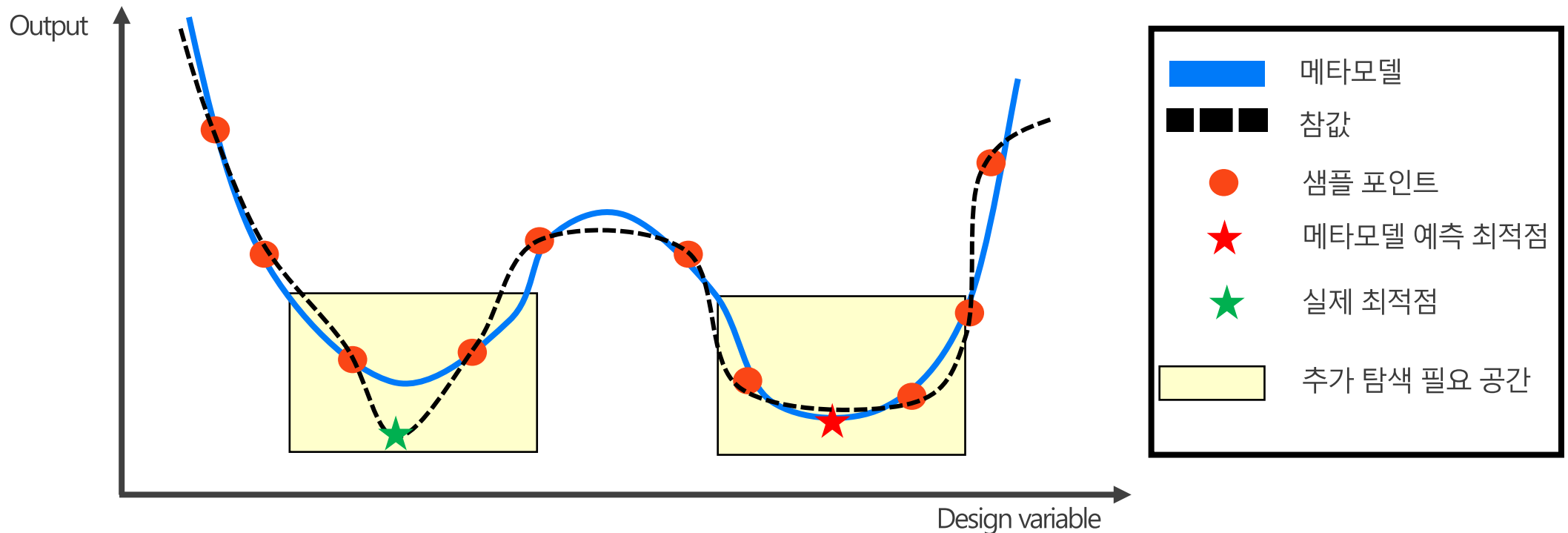
- 균일한 설계 공간 확보를 위해 MELS 방법으로 166개의 설계점을 확보, 메타모델의 결정계수 R^2 이 0.9 이상인 RBF 기반 메타모델을 생성하였음.
- 전역 최적해를 찾기 위해 GA(Genetic Algorithm) 최적화 방법을 활용하여 최적화를 진행함.
- 해석을 통한 최적값 검증 결과, 압력강하의 오차율이 52.7%로 메타모델의 결정계수 R^2 가 높더라도 최적값을 잘 모사할 수 없음을 확인함.



	실제 해석값			최적설계 예측값			오차율		
	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$	$T_{avg}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P(\text{Pa})$	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$	$T_{avg}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P(\text{Pa})$	$\varepsilon_{T_{max}}$	$\varepsilon_{T_{avg}}$	$\varepsilon_{\Delta P}$
기존 메타모델 기반 최적설계 결과	69.4	63.83	2005.5	69.2	63.7	1313	0.29%	0.20%	52.7%

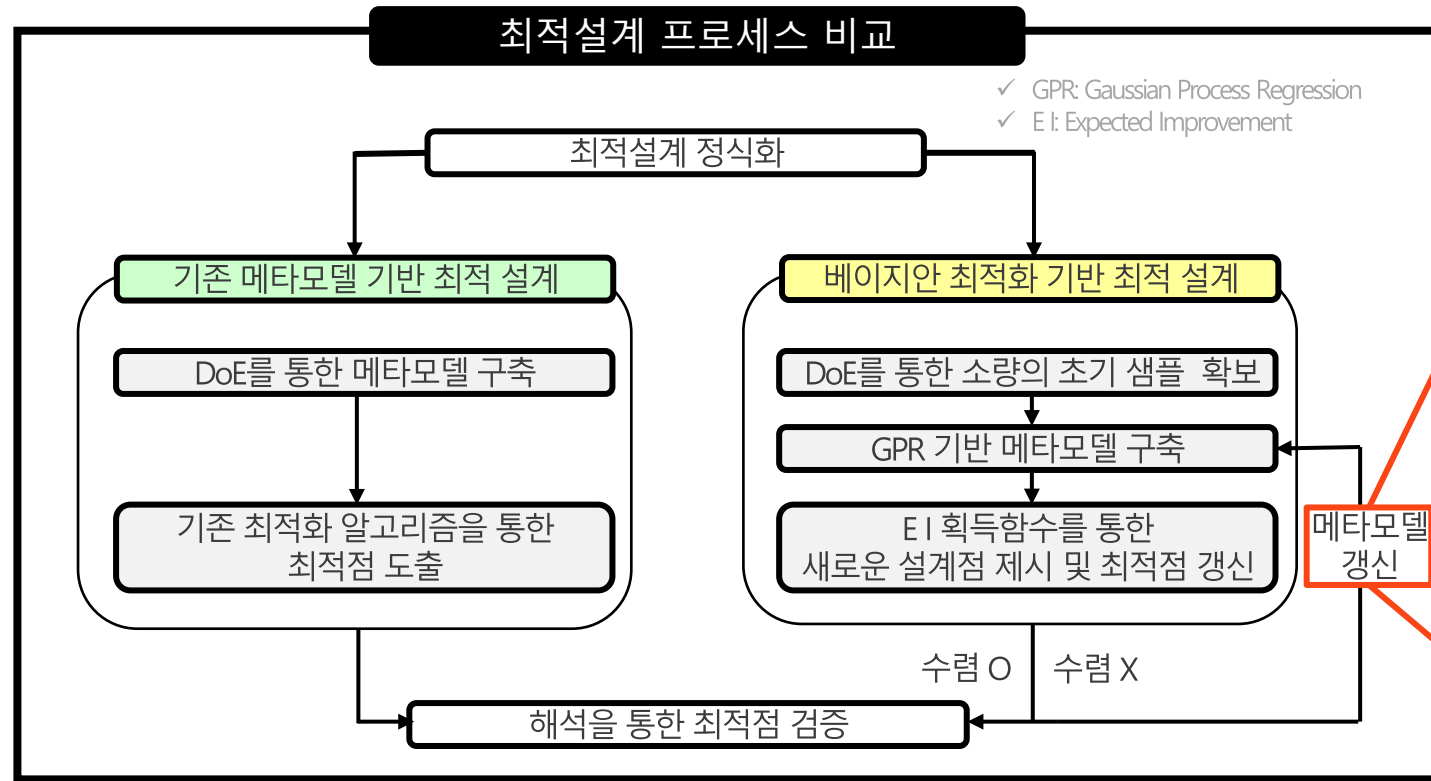
기존 메타모델 기반 최적설계의 문제점

- 일반적으로 기존 메타모델 기반 최적설계는 메타모델의 전역적 정확도(결정계수 R^2)를 기준으로 모델의 정확도를 평가함.
- 그러나 모델의 전역적 정확도가 높더라도 **최적점 근처의 국소적 정확도는 보장되지 않음.**
- 이는 여러 개가 존재하는 최적점 후보 주변의 참값에 대한 오차를 의미하는 예측 불확실성을 야기함.
- 이러한 **불확실성을 고려하지 않으면 실제 전역 최적점 판단은 어려움.**

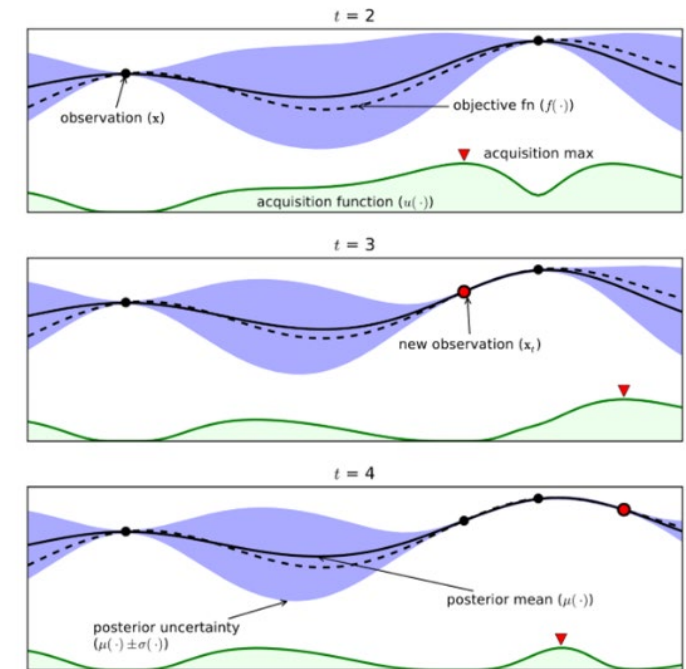


베이지안 최적화 기반 최적 설계

- 베이지안 최적화 알고리즘은 머신러닝을 활용하여 새로운 설계점을 탐색하고 확률 기반의 메타모델을 갱신하면서 목적함수를 최적화하는 알고리즘
- 확률 기반 메타모델에서 참값에 대한 불확실성으로 계산되는 **획득 함수**는 새로운 설계점을 제시하는 기준이 됨.
- 이러한 기준을 통해 **불확실성이 큰 지점 탐색** 또는 **기존 최적점 근처 탐색** 중에 능동적으로 결정하여 새로운 설계점을 효율적으로 제시함.
- **능동적이고 효율적인 추가 설계점 제시**는 **기존 방법보다 적은 설계점으로 정확한 최적값을 얻을 수 있게 함.**

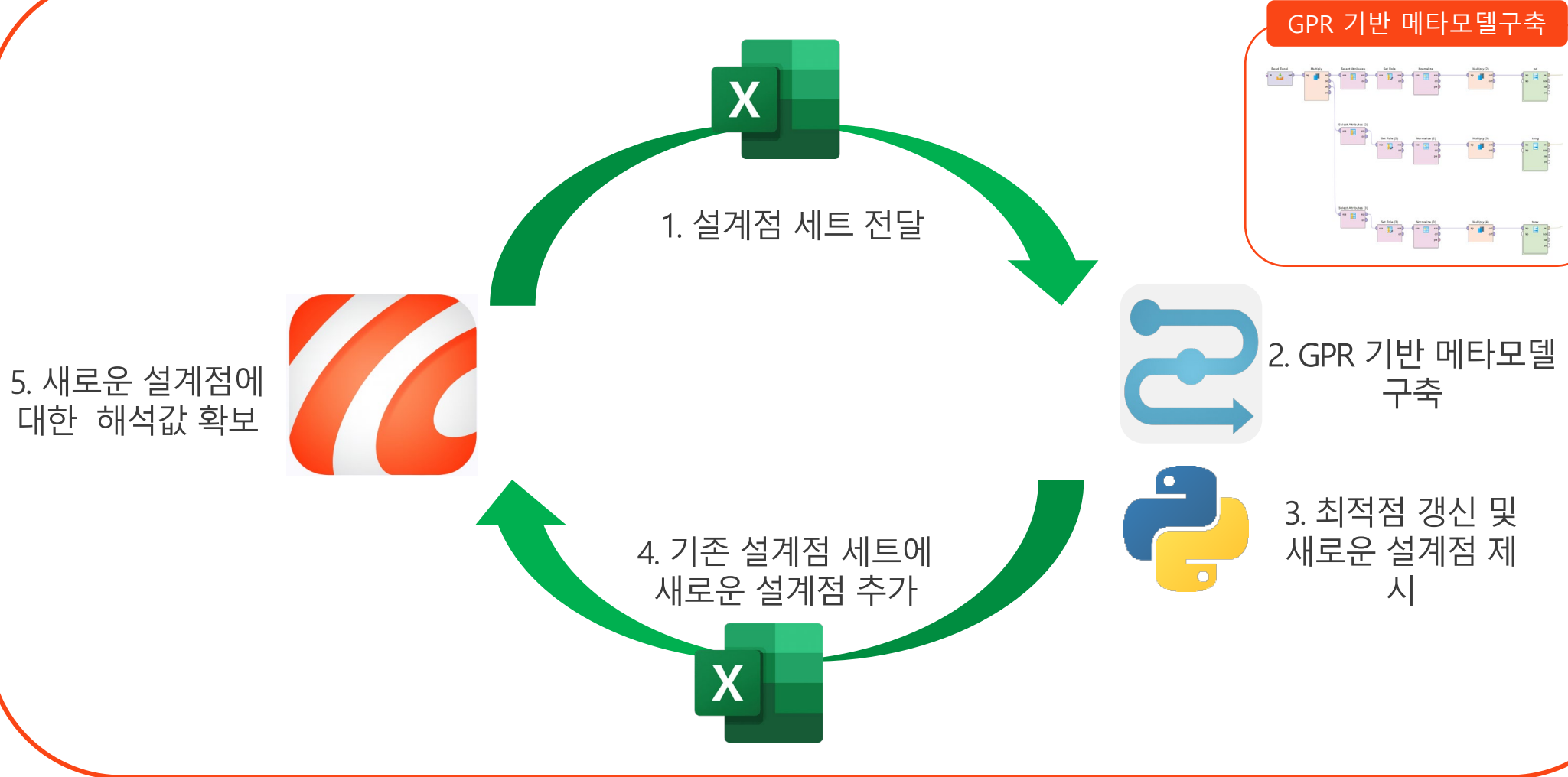


획득 함수 기반 메타모델 갱신



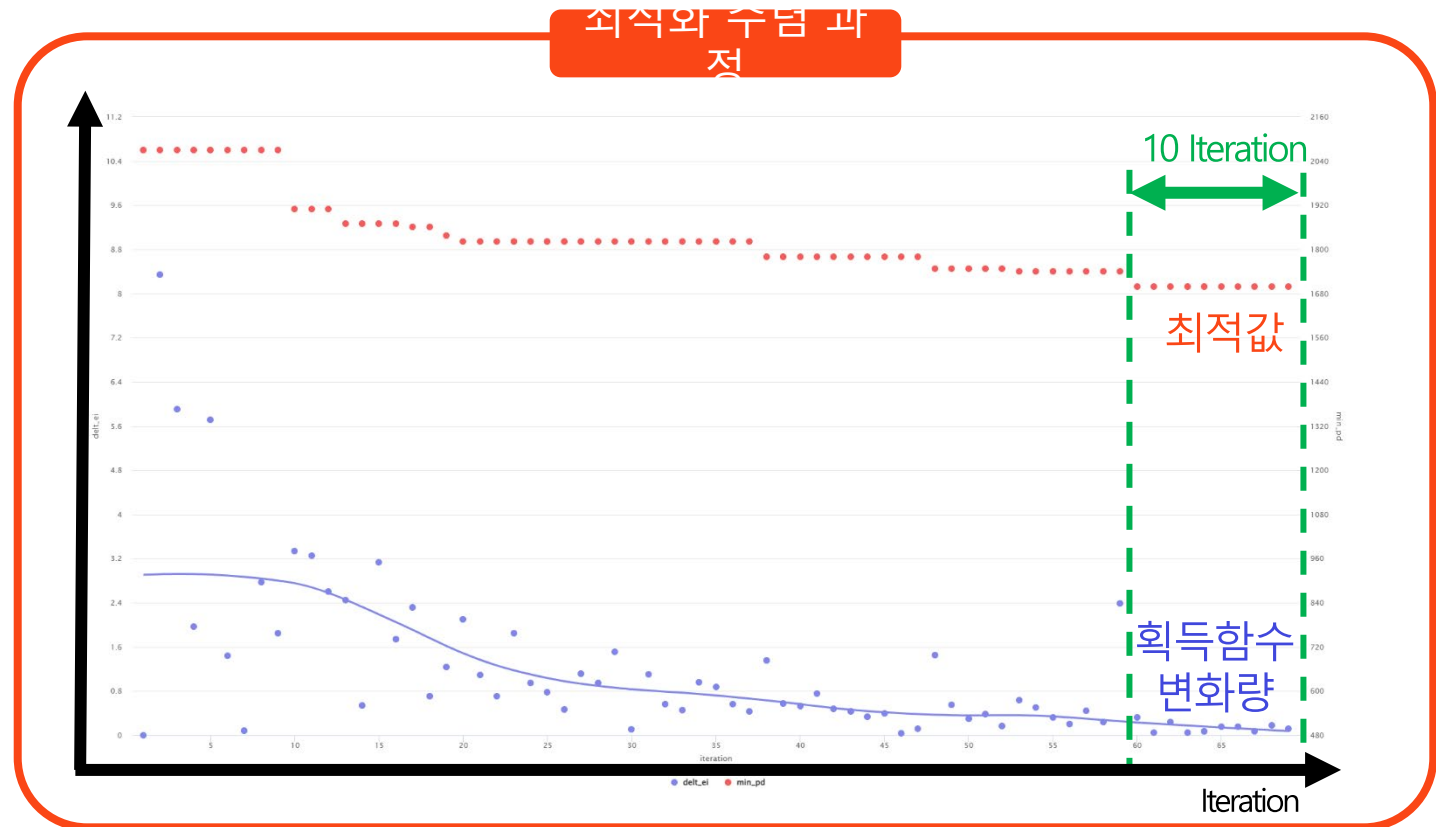
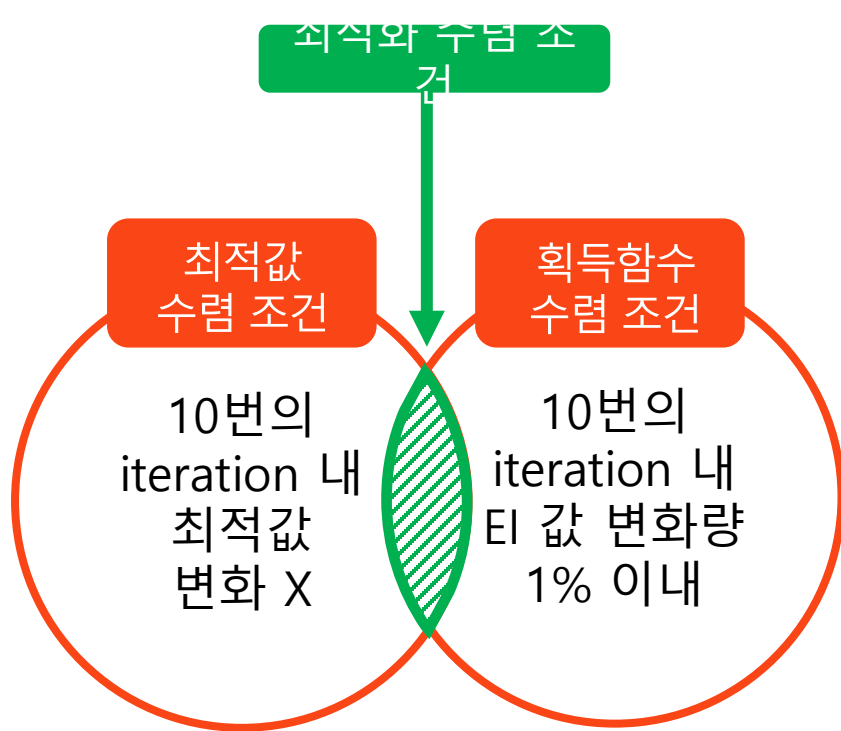
베이지안 최적화 기반 최적 설계

베이지안 최적화 기반 최적 설계 프로세스

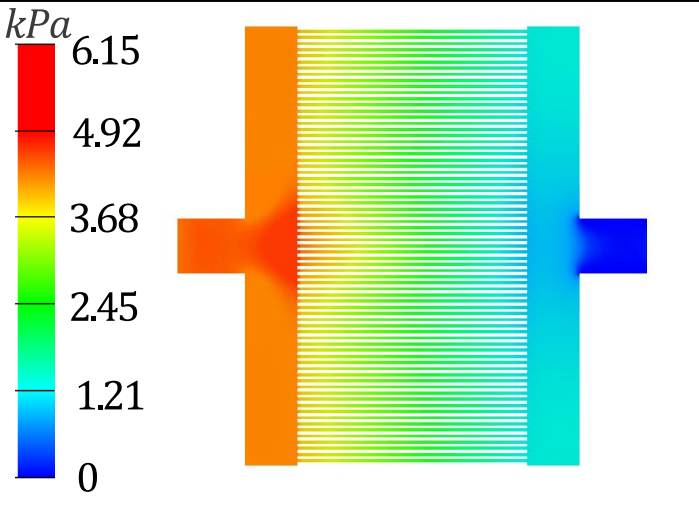
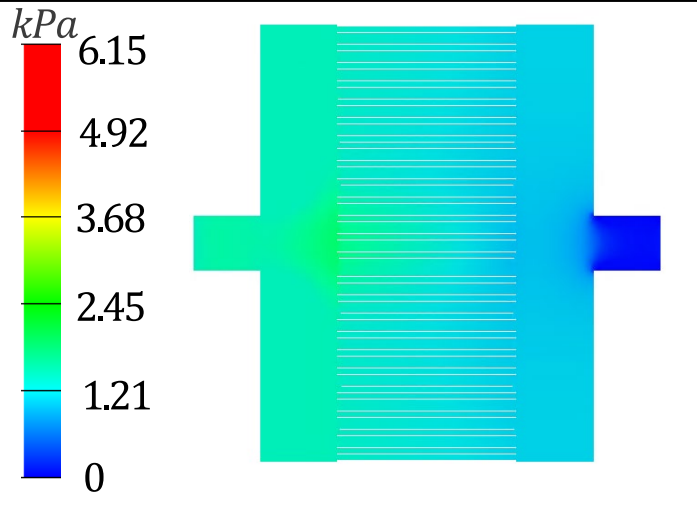
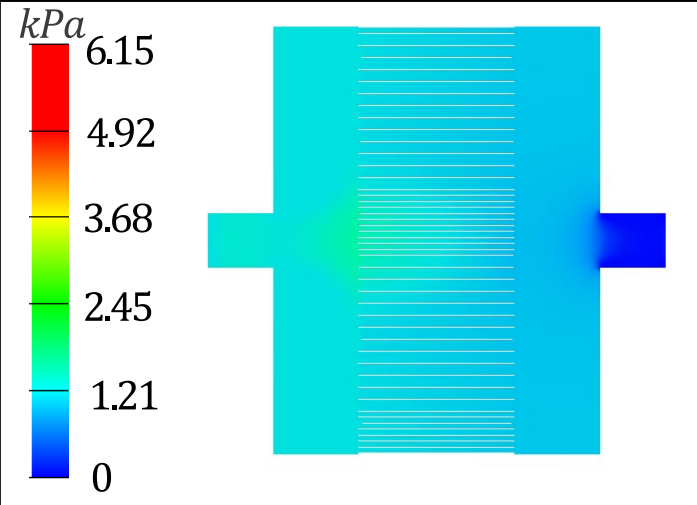
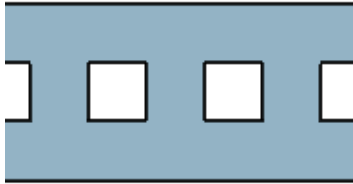
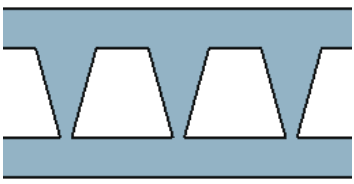
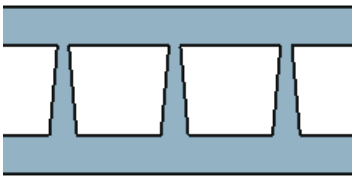


베이지안 최적화 기반 최적 설계

- 10번의 연속적인 Iteration 동안 최적값 유지와 획득함수 변화량 1% 이하 유지를 수렴 조건으로 설정함.
- 총 69번의 iteration 후 수렴 확인
- 초기 GPR 기반 메타모델 구축을 위한 설계점 20개 + 최적점 탐색을 위해 추가된 설계점 69개 = 89개



최적 설계 결과 비교

	초기모델	기존 메타모델 기반 최적 설계 모델	베이지안 최적화 기반 최적설계 모델
냉각수 압력 분포			
$\Delta P(Pa)$	5296.8	2005.5 (-62.1%)	1698.8 (-67.9%)
채널 단면 형상	 $X_1 = 0.5\text{ mm}$ $X_2 = 0.5\text{ mm}$ $Y = 0.25\text{ mm}$ $L = 37.5\text{ mm}$	 $X_1 = 0.46\text{ mm}$ $X_2 = 0.9\text{ mm}$ $Y = 0.4\text{ mm}$ $L = 29.3\text{ mm}$	 $X_1 = 0.9\text{ mm}$ $X_2 = 0.76\text{ mm}$ $Y = 0.4\text{ mm}$ $L = 26.1\text{ mm}$

최적 설계 결과 비교

	초기모델	기존 메타모델 기반 최적 설계 모델	베이지안 최적화 기반 최적설계 모델
CPU 온도 분포	°C 70.6 64.5 58.4 52.2 46.1 40.0 Max Node ID: 18801, Value: 70.5997 C	°C 70.6 64.5 58.4 52.2 46.1 40.0 Max Node ID: 18720, Value: 69.4252 C	°C 70.6 64.5 58.4 52.2 46.1 40.0 Max Node ID: 18717, Value: 69.1131 C
T_{max} , T_{avg}	T_{max} : 70.6 °C , T_{avg} : 64.08 °C	T_{max} : 69.4 °C , T_{avg} : 63.83 °C	T_{max} : 69.1 °C , T_{avg} : 64.05 °C
채널 단면	$X_1 = 0.5\text{ mm}$ $X_2 = 0.5\text{ mm}$ $Y = 0.25\text{ mm}$ $L = 37.5\text{ mm}$	$X_1 = 0.46\text{ mm}$ $X_2 = 0.9\text{ mm}$ $Y = 0.4\text{ mm}$ $L = 29.3\text{ mm}$	$X_1 = 0.9\text{ mm}$ $X_2 = 0.76\text{ mm}$ $Y = 0.4\text{ mm}$ $L = 26.1\text{ mm}$

최적 설계 결과 비교

- 해석값을 통해 검증한 결과, 평균 온도와 최고 온도는 기존 방법과 베이지안 기반 방법 모두 1%내의 오차값을 보임
- 압력강하 부분에서 베이지안 기반 최적 설계 방법이 기존 메타모델 방법 대비 오차가 50.9% 감소하였고 최적점 도출 시간은 46% 단축됨.

	초기모델			기존 메타모델 기반 최적설계			베이지안 최적화 기반 최적설계		
Output	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$	$T_{avg}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P(\text{Pa})$	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$	$T_{avg}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P(\text{Pa})$	$T_{max}(^{\circ}\text{C})$	$T_{avg}(^{\circ}\text{C})$	$\Delta P(\text{Pa})$
최적설계 예측값	-	-	-	69.20	63.71	1313.0	69.06	63.96	1729.4
실제 해석값	70.60	64.08	5296.8	69.41	63.83	2005.5	69.13	64.05	1698.8
오차율 (%)	-	-	-	0.29%	0.20%	52.7%	0.057%	0.14%	1.77%
최적점 도출에 걸린 시간 (설계점 개수)				약 3일 11시간 (166 points)			약 1 일 20시간 (89points)		

TABLE OF CONTENTS

01

서론

- 연구 배경
- 연구 목표
- 연구 절차

02

마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키징 열 유동 해
석

- 마이크로채널 히트싱크가
결합된 CPU 패키지 모델
- 지배 방정식
- 유한 요소 모델
- 열 유동 해석을 위한 경계조건
- 해석 결과

03

머신러닝을 활용한
마이크로채널 압력 강하 최소화

- 최적 설계 정식화
- 기존 메타모델 기반 최적 설계
- 기존 메타모델 기반 최적 설계의 문제점
- 베이지안 최적화 기반 최적 설계
- 최적 설계 결과 비교

04

결론

1. 마이크로채널 히트싱크가 결합된 CPU 패키지를 등가물성을 적용하여 해석 모델 구축
2. 열 유동 해석을 통해 마이크로채널을 통한 CPU 냉각 **압력강하 감소 필요성** 확인
3. 기존 메타모델 기반 최적 설계에서 최적점 부근에서 참값과의 불일치 문제 확인
4. AI Studio를 활용한 **머신러닝 기반 최적화**를 수행하여 기존 최적화 방법 대비 압력강하 **예측 정확도 약 51 %** 개선, **최적 설계 시간 46 %** 단축
5. 최종적으로 초기 모델 대비 냉각 성능은 유지하면서 압력강하 최소화를 통해 **펌프 소비전력 50% 감소된** 마이크로채널 히트싱크 설계 형상 도출

참고 문헌

1. Zhijun Wu, Guanyu Zhang, Shaoan Lu, Pengfei Leng, Yang Yu, Jun Deng, Weidi Huang, A comprehensive review of cold plate liquid cooling technology for data centers, Chemical Engineering Science, Volume 310, 2025, 121525, ISSN 0009-2509
2. B. Ramakrishnan et al., "CPU Overclocking: A Performance Assessment of Air, Cold Plates, and Two-Phase Immersion Cooling," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 11, no. 10, pp. 1703-1715, Oct. 2021
3. 인텔® 제온® 6780E 프로세서 제원, <https://www.intel.co.kr/content/www/kr/ko/products/sku/240362/intel-xeon-6780e-processor-108m-cache-2-20-ghz/specifications.html>
4. Zi-Xing Wang, Wen-Quan Tao, Heat transfer and pressure drop characteristics of microchannel cold plate in commercial CPU-package cooling system, International Journal of Heat and Mass Transfer, Volume 246, 2025, 127060, ISSN 0017-9310
5. Berhanu Wondimu et al, Liquid to Liquid CDU test methodology and performance rating, OPEN Compute Project, August 2024
6. ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9 Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces, and Electronic Equipment Data center power equipment thermal guidelines and best practices, Whitepaper Created By ASHRAE Technical Committee (TC) 9.9 Mission Critical Facilities, Data Centers, Technology Spaces, and Electronic Equipment, ASHRAE (White paper) (2016)
7. Xiaojin Wei and Y. Joshi, "Optimization study of stacked micro-channel heat sinks for micro-electronic cooling," in IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, vol. 26, no. 1, pp. 55-61, March 2003

발표 경청 해주셔서 감사합니다.