

EV 인버터 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 Pin-Fin 히트 싱크 최적설계

Optimal Design of Pin-Fin Heat Sink to Improve Cell Temperature Imbalance of EV
Inverter Power Modules

팀 명: 김수환무

건국대학교 기계공학부
김민수 · 한휘환

지도교수: 김창완 교수님

EV 인버터 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크의 최적설계

Optimal Design of Pin-Fin Heat Sink to Improve Cell Temperature Imbalance of EV Inverter Power Modules

INDEX

1. 서론
 - 1.1 연구 배경
 - 1.2 연구 목적
 - 1.3 연구 절차
 - 1.4 연구 개요
2. 인버터 열 유동 해석
 - 2.1 열 유동 해석 개요
 - 2.2 지배 방정식
 - 2.3 인버터 형상 모델
 - 2.4 인버터 구성 및 물성치
 - 2.5 유한 요소 모델
 - 2.6 경계조건
 - 2.7 열 유동 해석 결과
 - 2.8 설계 인자 선정
3. 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크 최적화
 - 3.1 최적설계 개요
 - 3.2 자동화 스크립트
 - 3.3 MELS 샘플링을 통한 DoE
 - 3.4 민감도 분석 및 ANOVA
 - 3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화
 - 3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화
 - 3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화
 - 3.8 최적화 결과
4. 결론

EV 인버터 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크의 최적설계

Optimal Design of Pin-Fin Heat Sink to Improve Cell Temperature Imbalance of EV Inverter Power Modules

1. 서론

1. 서론

1.1 연구 배경

1.2 연구 목적

1.3 연구 절차

1.4 연구 개요

2. 인버터 열 유동 해석

2.1 열 유동 해석 개요

2.2 지배 방정식

2.3 인버터 형상 모델

2.4 인버터 구성 및 물성치

2.5 유한 요소 모델

2.6 경계조건

2.7 열 유동 해석 결과

2.8 설계 인자 선정

3. 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크 최적화

3.1 최적설계 개요

3.2 자동화 스크립트

3.3 MELS 샘플링을 통한 DoE

3.4 민감도 분석 및 ANOVA

3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화

3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화

3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화

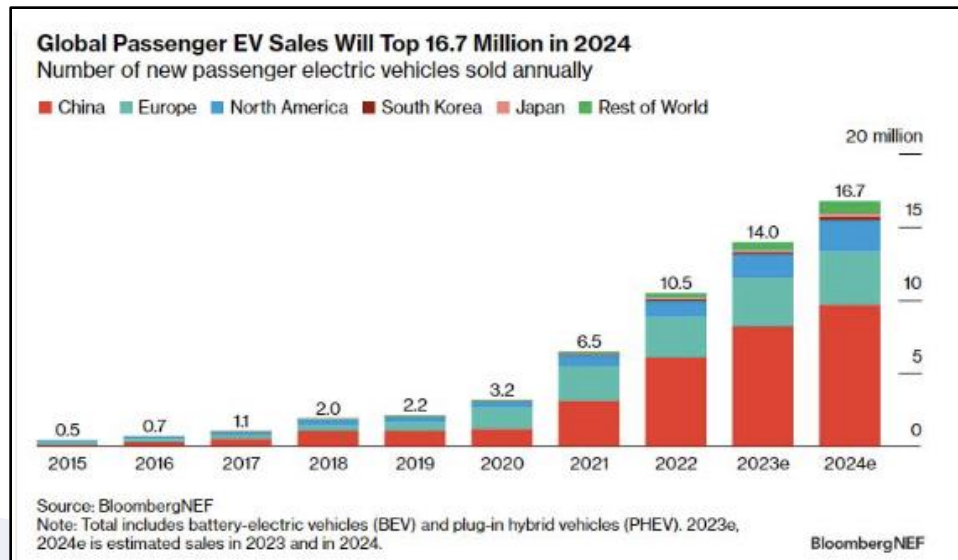
3.8 최적화 결과

4. 결론

1.1 연구 배경

❖ 인버터 냉각의 중요성

- 탄소 중립 사회 전환 목표에 따라 전기자동차에 대한 수요와 그에 관한 연구가 증가하고 있음
- 전기자동차에서 전력 변환과 제어가 필수적이기 때문에 인버터의 역할이 매우 중요함
- 인버터에 적용되는 전력반도체인 IGBT와 Diode는 스위칭 과정에서 고온이 발생하며, 398K^[1]의 내열 한계를 가짐
- 전력반도체에서 내열 한계 이상의 고온은 인버터 고장의 원인이 되기 때문에 냉각이 필수적임



<2024 전기자동차 전세계 판매량 도표^[2]>

□ 테슬라코리아(유)

대상 자동차(모델3)	결함장치(전류 변환 장치(인버터))		
차명(형식)	결함장치	제작일자	대상대수
모델3	전류 변환 장치(인버터) * 전류 변환 장치(인버터) 내부 부품의 제조 불량으로 전류를 제어할 수 없어 동력이 상실되고 이로 인해 주행중 차량이 멈출 가능성	'19.08.03.~'22.07.10.	9,914
합 계			9,914

<Tesla model3 인버터 리콜 기사^[3]>

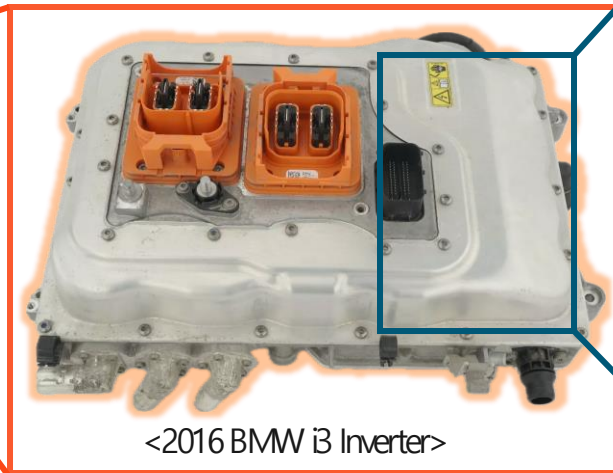
*출처: [1] Zhao, tiefu et al, 2007, "Comparisons of SiC MOSFET and IGBT based motor drive systems.", IEEE

[2] BNEF, 2022, Global Passenger EV Sales Will Top 16.7 Million in 2024

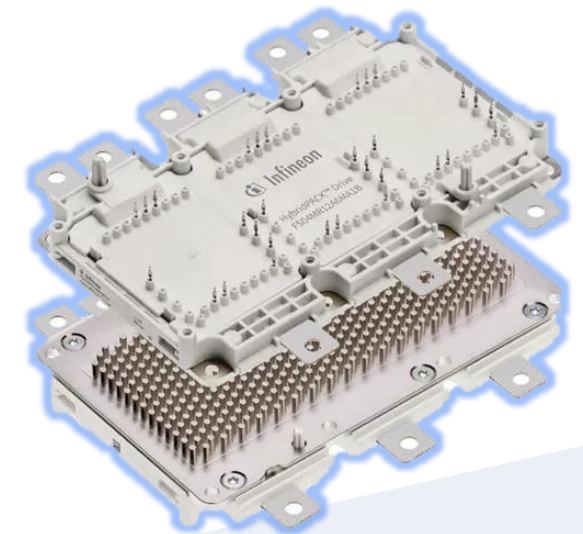
[3] 국토교통부, 2023, "기아 테슬라 벤츠 등 자발적 시정조치(리콜)", 자동차정책과

❖ Pin-Fin 히트 싱크를 이용한 간접 수냉

- 냉각을 위한 열관리 모듈의 확대 및 유량의 증대는 에너지 손실로 이어짐
- 동일한 조건의 유압, 유량에서 보다 높은 방열 특성을 가진 히트 싱크의 설계가 필요함
- **Pin-Fin 히트 싱크**는 동일 체적, 유량, 압력 조건에서 뛰어난 방열 특성을 가져 EV 인버터의 냉각에 많이 사용됨
- 하지만, 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 문제는 완전히 해결되지 않음



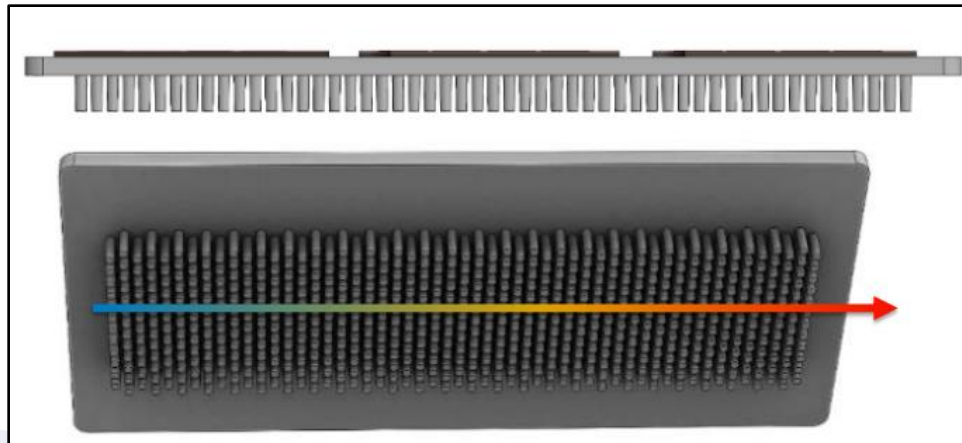
<2016 BMW i3 Inverter>



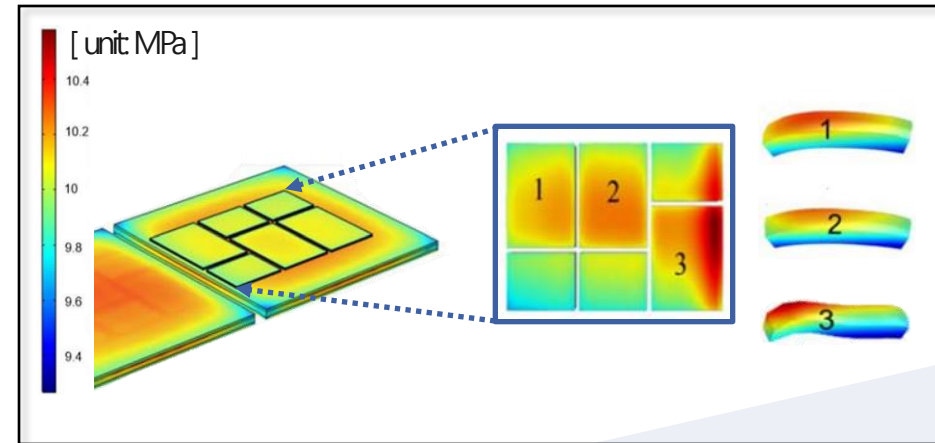
<Infineon HybridPACK 2>

❖ 인버터 전력반도체의 온도 불균형

- 간접 수냉 방식은 열교환으로 인해 냉각수 온도가 유입구대비 점차 높아지게 되고 이에 따라 불균일한 냉각이 이루어짐
- 인버터 내 전력반도체의 수명 및 작동 신뢰성은 **적정 작동온도와 열응력**에 가장 큰 영향을 받으며, 온도에 의한 열응력은 **불균일한 냉각**으로 인해 발생함
- 적정 작동온도 이상 고온에서는 **과도한 전력손실**이 발생함
- 따라서, **냉각 성능과 압력 강하의 Trade-off** 관계를 고려하여 균일한 냉각을 위한 히트 싱크 설계 필요성이 대두됨



<2016 BMW i3 Inverter의 냉각수 유동>



<불균일 냉각에 따른 열 응력 해석^[4]>

❖ 연구 목적

본 연구에서는 EV 인버터 파워 모듈의 셀간 **온도 불균형**으로 인한 전력반도체의 열응력과 전력 손실을 감소하기 위해, 균일한 냉각 성능을 가진 **Pin-Fin** 히트 싱크를 도입하여 **인버터의 수명 및 작동 신뢰성을 향상**시키고자 함

1. Pin-Fin의 직경, 직경 비, 높이 등 각 설계 인자가 **압력 강하와 최고 온도 사이에 미치는 영향**에 대한 민감도 분석 및 **Trade-off 관계** 파악
2. EV 인버터의 파워 모듈의 **셀간 온도 불균형을 개선**한 Pin-Fin 히트 싱크의 최적설계안 도출

1.3 연구 절차

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 초기 모델 열 유동 해석

해석 모델 선정

형상 설계 및 유한요소모델 생성

열 유동 해석

설계 인자 선정



CATIA V5



SimLab 20221

❖ 최적설계 정식화

자동화 스크립트

MELS 샘플링을 통한 DoE

민감도 분석 및 ANOVA

최적설계 정식화



Python



SimLab 20221



HyperStudy 20221

❖ 최적설계

1차 최적화: 전력반도체의 최고 온도 최소화

2차 최적화: 셀간 온도 불균형 최소화

3차 최적화: 냉각수 압력 강하 최소화

최적화 결과 비교



Python



SimLab 20221

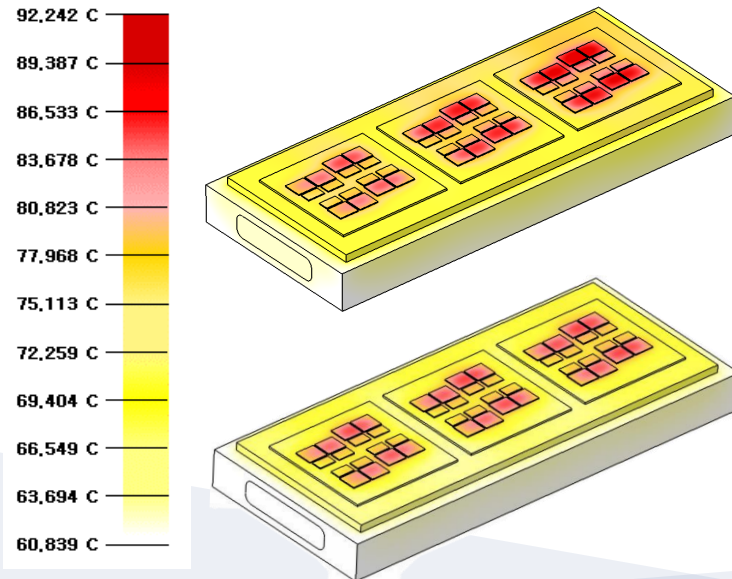


HyperStudy 20221

❖ 연구 개요

- 열 유동 해석을 통해 Pin-Fin 히트 싱크의 방열 성능 및 유동 특성 분석
- 결과 분석을 바탕으로 최고온도 압력에 영향을 미치는 설계인자 선정
- 설계인자에 대한 민감도분석 및 ANOVA
- ARSM을 사용하여 1차, 2차, 3차 최적화

➢ 셀 간 온도 편차가 0.2°C 이내, 기존대비 최고온도 4.455°C, 압력강하 4330.1 Pa 감소한 Pin-Fin 히트싱크 설계



	최고온도 (°C)	표준편차	압력 강하 (Pa)
초기모델	92.242	1.859	20427.3
최적화모델	87.787	0.066	16097.2
변화량	4.455	1.793	4330.1

EV 인버터 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크의 최적설계

Optimal Design of Pin-Fin Heat Sink to Improve Cell Temperature Imbalance of EV Inverter Power Modules

2. 인버터 열 유동 해석

- 1. 서론
 - 1.1 연구 배경
 - 1.2 연구 목적
 - 1.3 연구 절차
 - 1.4 연구 개요
- 2. 인버터 열 유동 해석
 - 2.1 열 유동 해석 개요
 - 2.2 지배 방정식
 - 2.3 인버터 형상 모델
 - 2.4 인버터 구성 및 물성치
 - 2.5 유한 요소 모델
 - 2.6 경계조건
 - 2.7 열 유동 해석 결과
 - 2.8 설계 인자 선정
- 3. 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크 최적화
 - 3.1 최적설계 개요
 - 3.2 자동화 스크립트
 - 3.3 MELS 샘플링을 통한 DoE
 - 3.4 민감도 분석 및 ANOVA
 - 3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화
 - 3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화
 - 3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화
 - 3.8 최적화 결과
- 4. 결론

2.1 열 유동 해석 개요

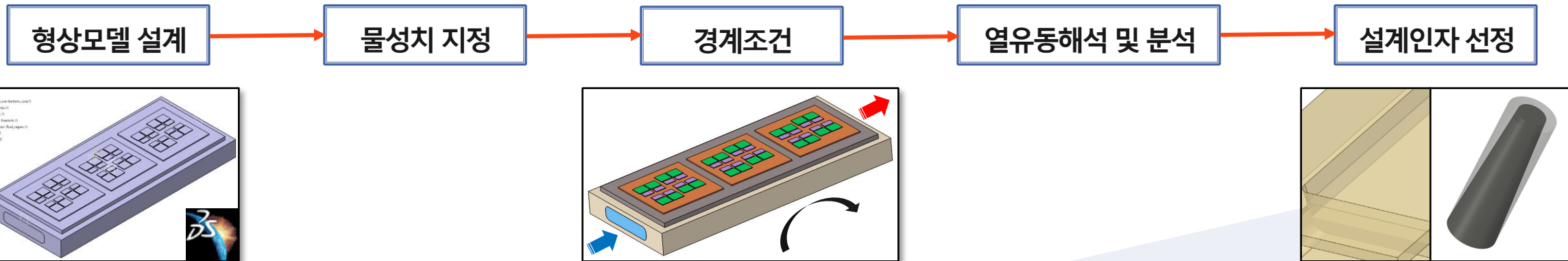
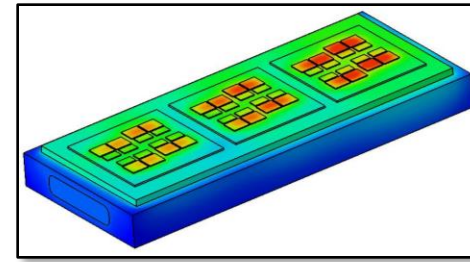
EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 열 유동 해석 목적

- Pin-Fin 히트싱크를 적용한 인버터의 각 셀간 최고온도 및 온도편차, 입출구 사이의 압력 강하량을 계산
- 셀간 온도편차를 감소시킴과 동시에 냉각성능을 향상시키기 위해, 온도변화와 압력강하에 영향을 미치는 설계인자 선정

❖ 열 유동 해석 프로세스

IGBT&Diode	SiC
Plate	Copper
Heatsink	Aluminum
Coolant	WEG (50%)
Case	ABS



▶ 비압축성 유동 해석

- 해석에 적용된 유체는 단상이며, 비압축성의 특징을 가짐
- 중력과 복사에 의한 효과는 무시함

1. 연속 방정식 (Continuity equation)

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

2. 운동 방정식 (Momentum equation)

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

3. 에너지 방정식 (Energy equation)

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

4. 나비에-스토크스 방정식 (Navier-Stokes Equations)

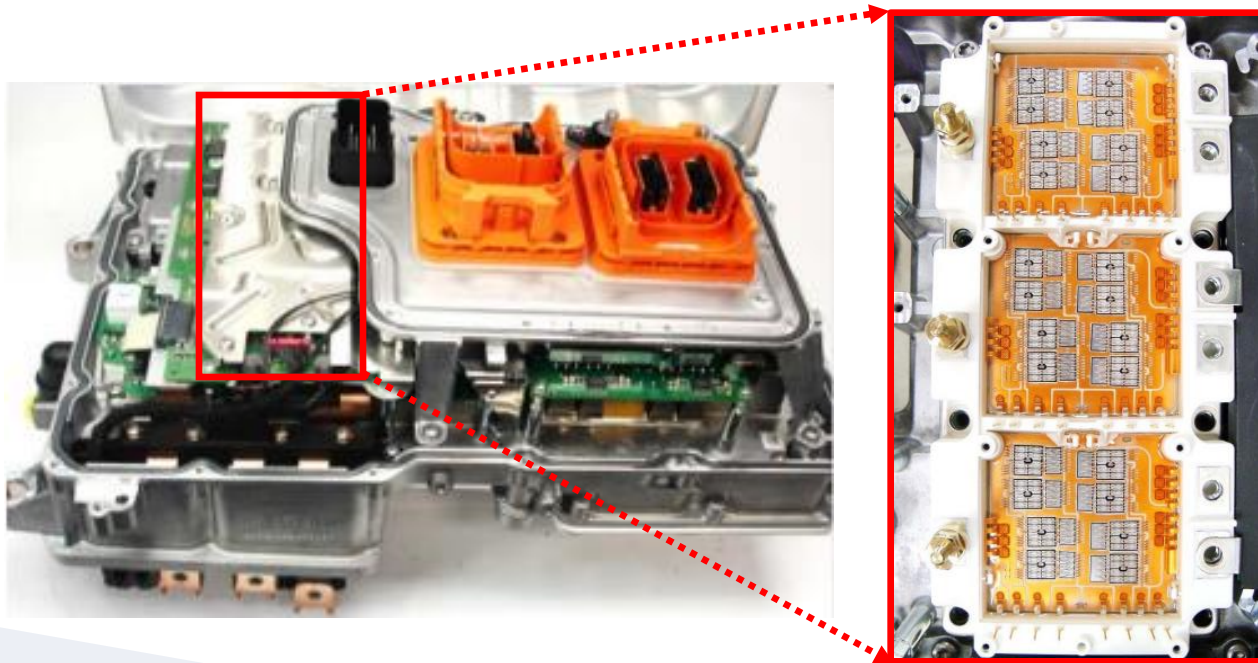
$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\rho \vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} = -\nabla p + \rho g + \mu \nabla^2 \vec{u}$$

2.3 인버터 형상 모델

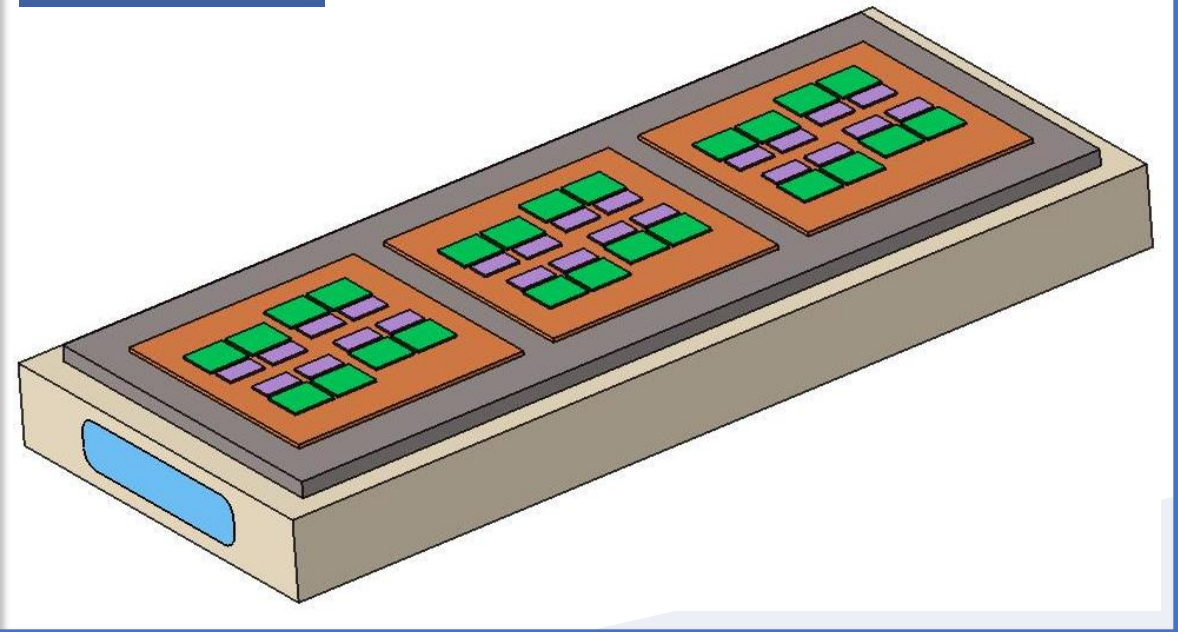
EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 모델 인버터: 2016 BMW i3 인버터

- Pin-Fin 히트 싱크를 사용하는 2016 BMW i3 Infineon HybridPACK 2를 형상 모델로 선정
- Infineon사에서 제공하는 Infineon HybridPACK 2의 제원^[5]을 바탕으로, CATIA V5를 사용하여 실제 치수를 반영하여 모델링



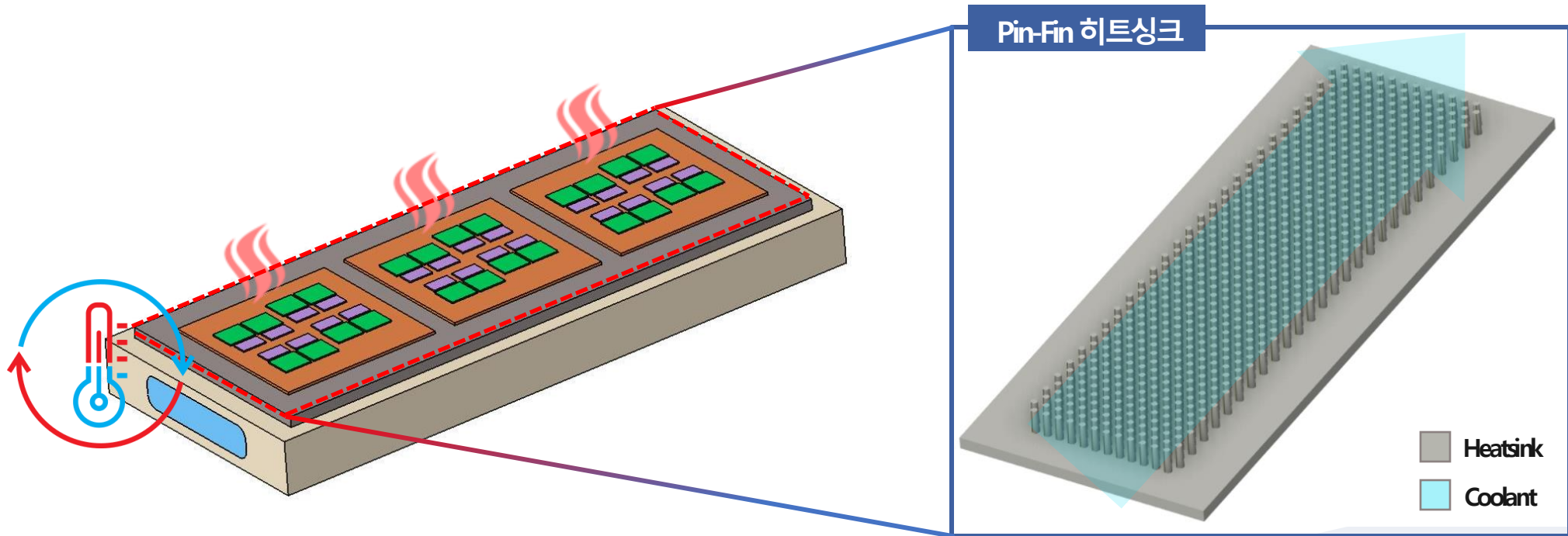
인버터 형상 모델



<2016 BMW i3 Inverter - IGBTs and Diodes of Infineon Inverter Power Module^[6]>

❖ Pin-Fin 히트 싱크

- IGBT 및 Diode에 의해 발생한 열은 전력반도체 하부에 장착된 히트 싱크로 전도되며, 냉각수와의 열교환을 통해 냉각이 이루어짐
- 히트 싱크에 부착된 Pin-Fin은 냉각수와 히트 싱크 간의 접촉면적을 증가시켜 냉각성능을 향상시키기 위해 사용

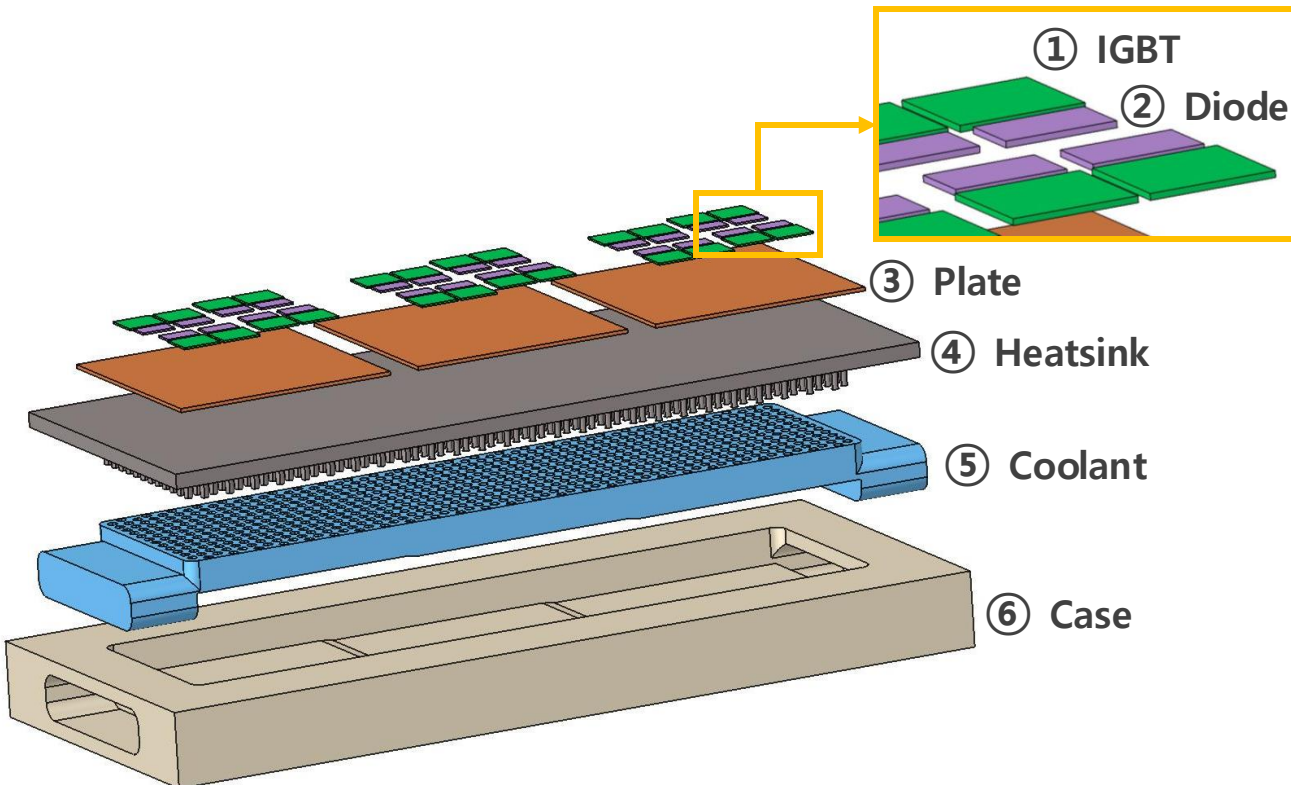


2.4 인버터 구성 및 물성치

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 인버터 구성

- 인버터 해석 모델의 재료 및 물성치는 Table 1과 같이 구성
- 2016 BMW i3 인버터에 사용되는 냉각수 WEG (Water 50% - Ethylene Glycol 50%)를 사용



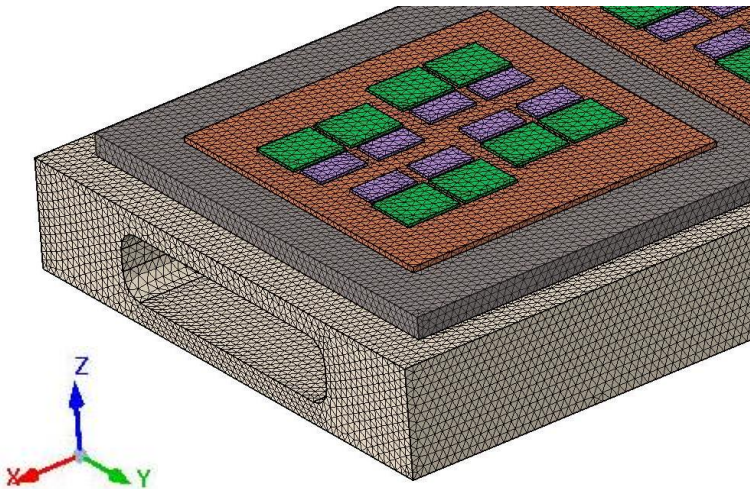
<Table 1. 인버터 물성치>

	구성	재료	밀도 [kg/m ³]	비열 [J/kg · K]	열전도율 [W/m · K]	점도 [N · s/m ²]
①	IGBT	Si	3098.4	657.98	117.4	
②	Diode	SiC	3160	675	490	
③	Plate	Copper	8933	385	401	
④	Heatsink	Aluminum	2770	986	175	
⑤	Coolant	WEG(50%)	1060	3500	0.41	0.0042
⑥	Case	ABS	1014	1260	0.25	

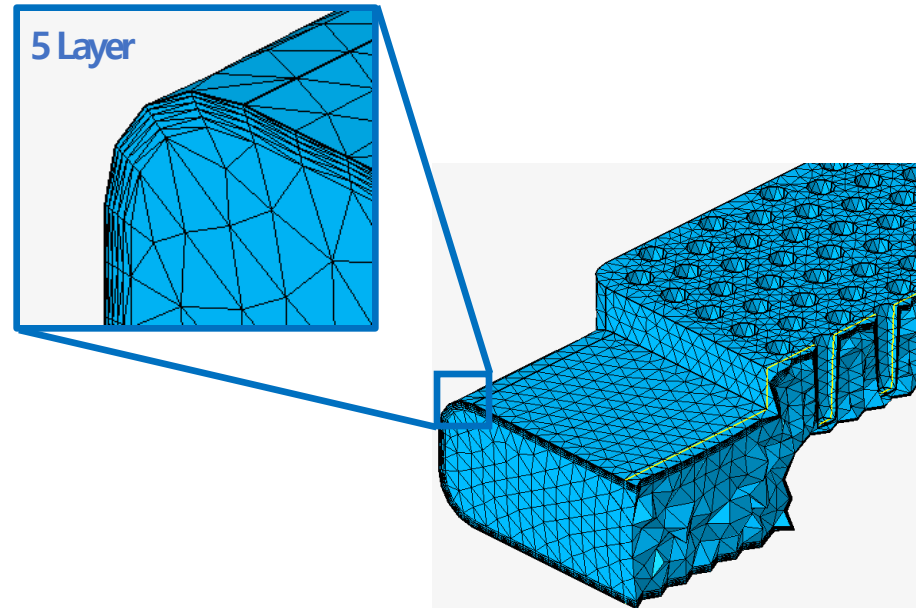
❖ 열 유동 해석을 위한 격자 전략

- 베이스 모델에 대한 유한 요소는 Tetrahedral 격자로 구성하였으며 고체영역은 761,422개, 유체영역은 2,448,285개의 요소로 총 3,209,707개의 요소를 생성
- 유체영역의 경우, 벽면 근처에서 발생하는 급격한 속도차를 고려하기 위해 다섯 층의 Boundary Layer 적용

➤ Solid Region mesh



➤ Fluid Region mesh

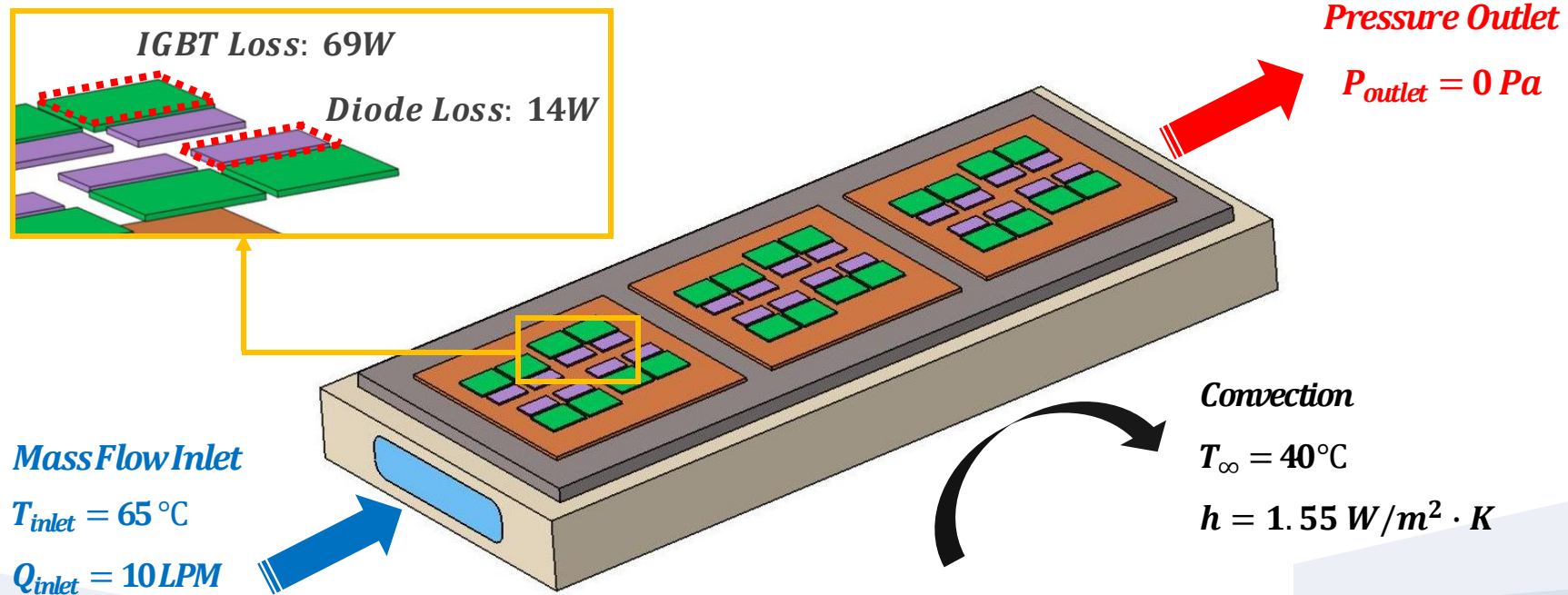


➤ Details of Mesh

Number of Nodes	552,873
Number of Elements	3,209,707
Element Type	<i>Tetrahedral</i>
Boundary Layers	5

❖ 경계 조건 : 발열 조건 & 입출구 조건

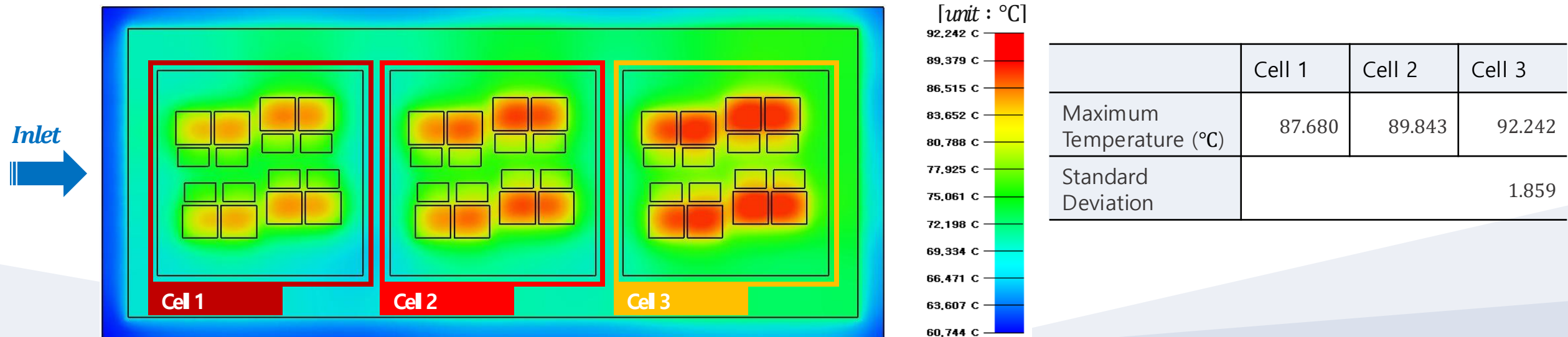
- 냉각수의 유입구 경계 조건은 2016 BMW i3의 실제 냉각수 유량, 10 LPM을 적용
- IGBT와 Diode는 [전압: 400 V, RMS 전류: 130 A, 스위칭 주파수: 8 kHz] 작동 조건에서 발생한 손실 전력[기]을 발열량으로 인가
- 냉각수 온도 65°C, 주변대기 온도 40°C 를 적용하여 실제보다 엄격한 조건에서 평가



2.7 열 유동 해석 결과

❖ 온도 분포

- 각 셀 내의 최고온도는 도통 시 손실률이 높은 IGBT에서 발생하며, 해석영역의 최고온도는 92.242°C 로 Infineon 사에서 제시한 권장 작동온도 95°C^㉞ 를 만족
- 유입구와 가까워 냉각수 온도가 비교적 낮은 Cell 1: 87.680°C 로 상대적으로 낮은 온도 분포를 보이나, 열교환으로 인해 냉각수 온도가 높아짐에 따라 Cell 2: 89.843°C, Cell 3: 92.242°C 로 Cell 1에 비해 냉각성능이 감소
- 최고 온도 편차: $T_{\max_{\text{cell1}}} - T_{\max_{\text{cell2}}} = 2.163^\circ\text{C}$, $T_{\max_{\text{cell2}}} - T_{\max_{\text{cell3}}} = 2.399^\circ\text{C}$, 최고 온도 표준편차: 1.859

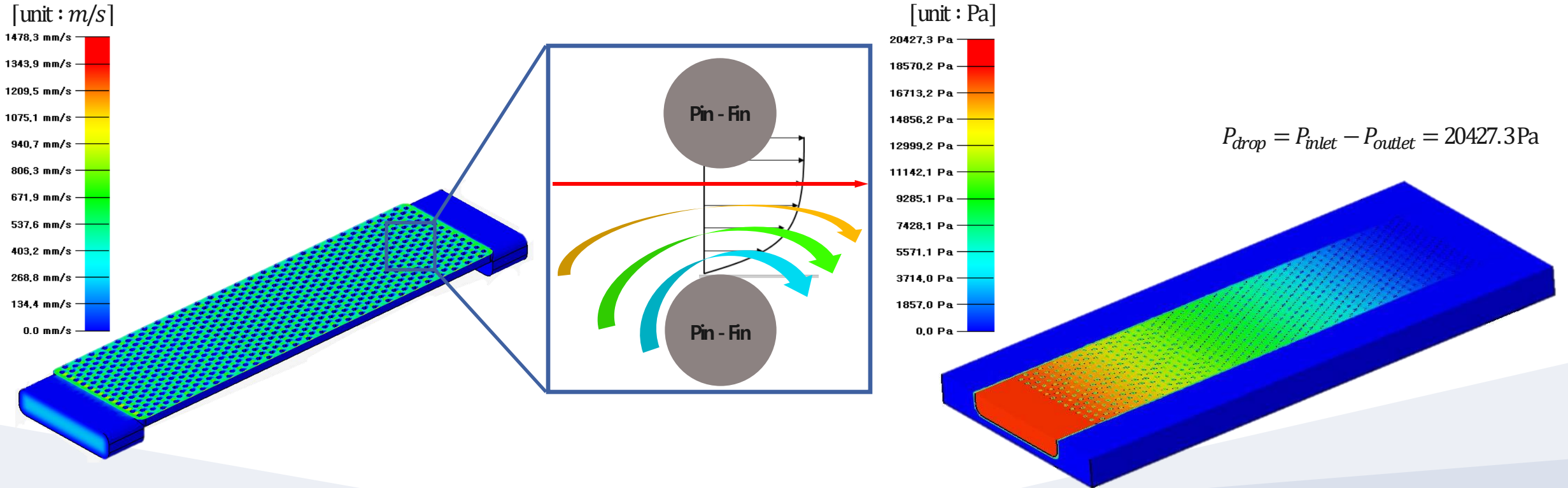


2.7 열 유동 해석 결과

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 압력 강하

- 초기 유입구 대비, Pin-Fin 형상으로 인해 유체영역이 좁아짐에 따라 벽면 근처에서 급격한 속도구배가 존재
- 유체의 속도구배가 존재할 경우 벽 표면에서 전단응력이 발생하게 되며, 이로 인해 입출구 사이의 20427.3Pa의 압력강하가 발생



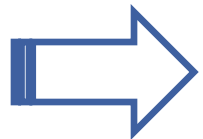
❖ 해석 결과 분석

온도 분포 분석

Pin-fin 형상으로 인해 유체와의 접촉면적이 확장되고, **뉴턴의 냉각법칙**에 따라 Heat flux가 증가하여 냉각성능이 향상
Cell 1에서 열교환이 활발하게 이루어질 경우 Cell 2, Cell3의 냉각성능이 감소하여 각 Cell 간 온도의 편차가 발생

압력 강하 분석

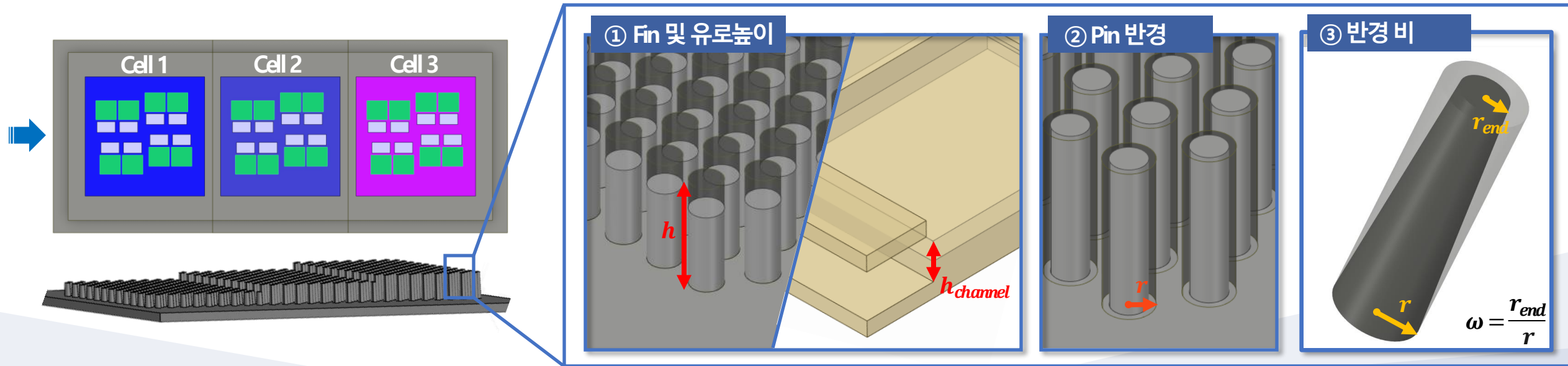
Pin-fin 형상으로 인해 유동영역이 감소함에 따라, 벽면 근처에서 급격한 속도구배가 발생하여 벽 표면에서 전단응력 증가
베르누이 방정식에 따라, 전단응력의 증가는 유체의 운동에너지로 감소로 이어져 압력강하가 증가



셀간 온도 불균형을 개선하기 위해 **각 셀의 Pin-Fin 반경, 반경 비, 높이**를 설계 인자로 설정
냉각 성능과 압력 강하의 Trade-off 관계를 고려하여 Pin-Fin 히트 싱크의 **형상 최적화**

❖ 설계 인자

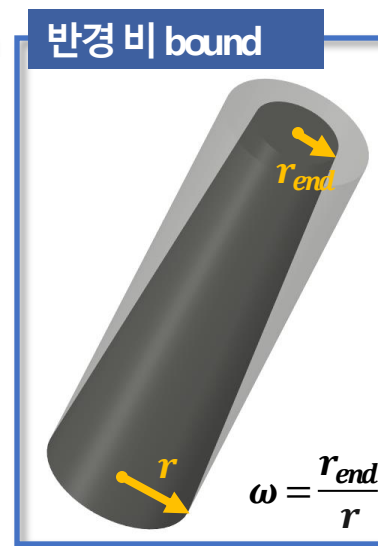
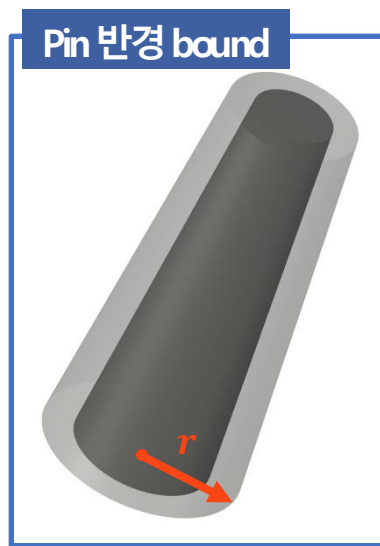
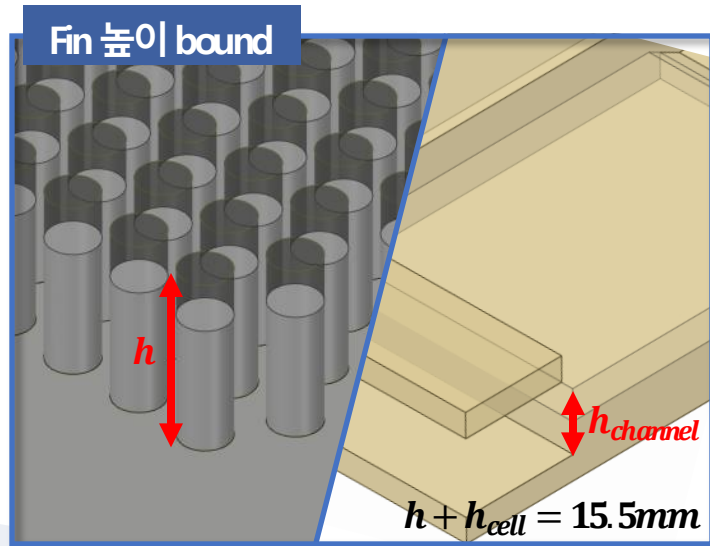
- 셀간 온도 불균형을 완화하기 위해 각 셀에 서로 다른 크기 및 형상의 Pin-Fin을 배치
- 각 셀의 ① Fin 및 유로 높이, ② Pin 반경, ③ 반경 비를 설계인자로 선정
- 냉각수와 유체의 접촉면적을 확장하여 **최대 온도를 감소**시킬 경우, 냉각수가 흐르는 유동영역이 좁아져 유체의 속도구배가 증가함에 따라 **압력 강하는 증가**할 것으로 예측



2.8 설계 인자 선정

❖ 설계 인자 Boundary

- 각 설계인자의 Boundary는 해석 모델의 설계 가능 범위를 제한조건으로 선정하여 형상이 훼손되지 않도록 범위를 조정
- 유입구로부터 거리가 먼 Cell 2, Cell 3의 냉각성능을 향상시키기 위해 **Fin 높이가 증가하도록 제한 ($h_1 \leq h_2 \leq h_3$)**
- 냉각수가 Pin-Fin에 균일하게 흐르게 하도록 Fin과 Case의 간격을 0.5mm로 고정하여 $h + h_{channel} = 15.5\text{mm}$ 로 종속



Design Variable		Lower Bound	Upper Bound
Cell 1	h_1 [mm]	6	10
	r_1 [mm]	1	1.375
	ω_1	0.6	1
Cell 2	h_2 [mm]	6	10
	r_2 [mm]	1	1.375
	ω_2	0.6	1
Cell 3	h_3 [mm]	6	10
	r_3 [mm]	1	1.375
	ω_3	0.6	1

EV 인버터 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크의 최적설계

Optimal Design of Pin-Fin Heat Sink to Improve Cell Temperature Imbalance of EV Inverter Power Modules

3. 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크 최적화

- 1. 서론
 - 1.1 연구 배경
 - 1.2 연구 목적
 - 1.3 연구 절차
 - 1.4 연구 개요

- 2. 인버터 열 유동 해석
 - 2.1 열 유동 해석 개요
 - 2.2 지배 방정식
 - 2.3 인버터 형상 모델
 - 2.4 인버터 구성 및 물성치
 - 2.5 유한 요소 모델
 - 2.6 경계조건
 - 2.7 열 유동 해석 결과
 - 2.8 설계 인자 선정

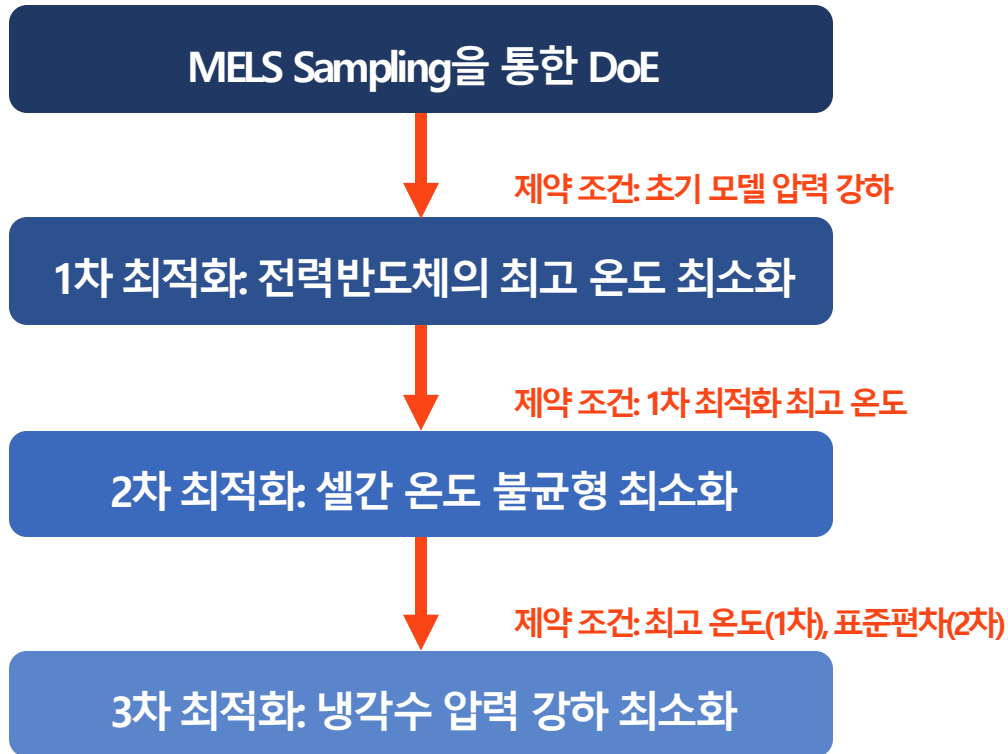
- 3. 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크 최적화
 - 3.1 최적설계 개요
 - 3.2 자동화 스크립트
 - 3.3 MELS 샘플링을 통한 DoE
 - 3.4 민감도 분석 및 ANOVA
 - 3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화
 - 3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화
 - 3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화
 - 3.8 최적화 결과

- 4. 결론

3.1 최적설계 개요

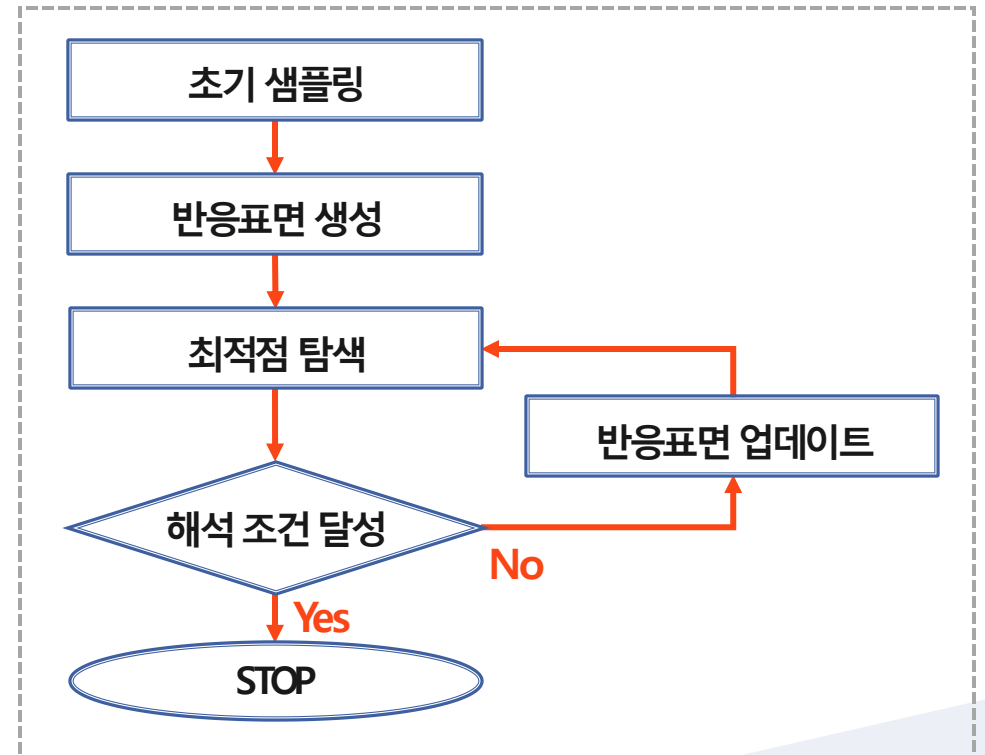
❖ 최적화 프로세스

➢ ARSM를 통한 최적화



❖ 최적화 기법

➢ ARSM (Adaptive Response Surface Method)



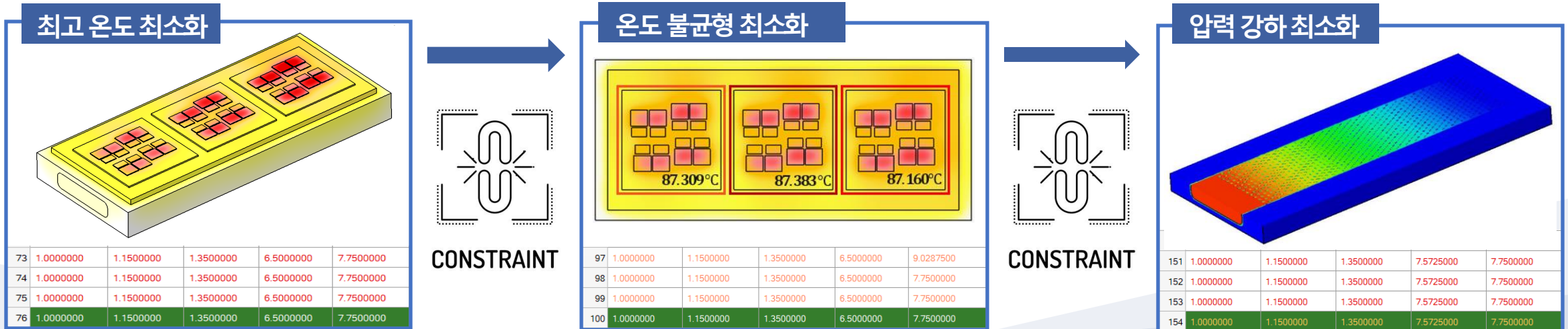
3.1 최적설계 개요

❖ 최적설계 목적

본 연구의 최적설계 목표는 각 셀간 전력반도체의 온도 불균형을 최소화 하는 것임

→ 각 셀의 전력반도체의 **최고 온도 표준편차 최소화**

- 1차 최적화: 전력반도체의 **최고 온도 최소화** [제약 조건: 초기 모델의 냉각수 압력 강하]
- 2차 최적화: 셀간 전력반도체 **최고 온도 표준편차 최소화** [제약 조건: 1차 최적화 최고 온도]
- 3차 최적화: **압력 강하 최소화** [제약 조건: 1차 최적화 최고온도, 2차 최적화 온도 표준편차]

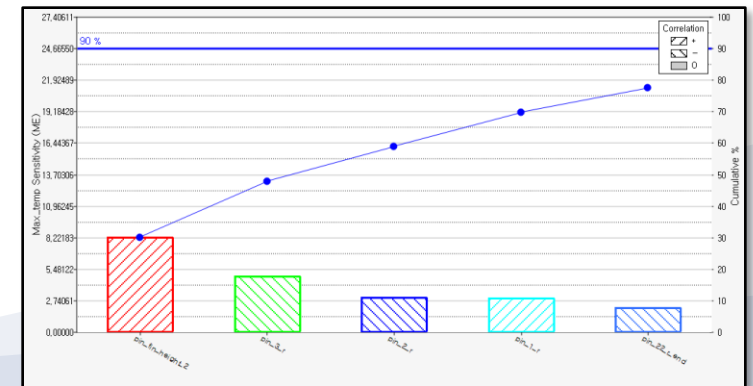
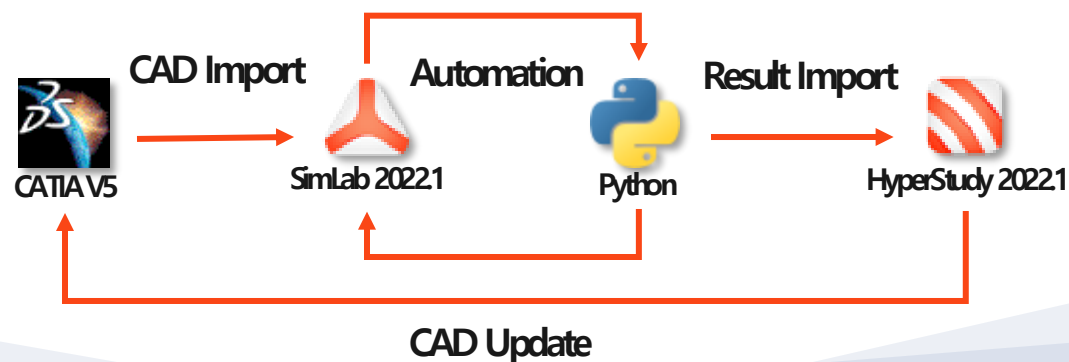
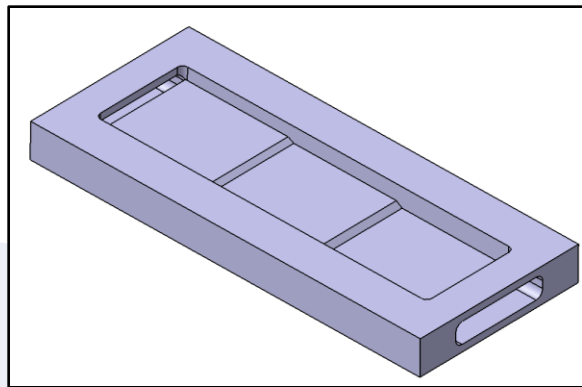
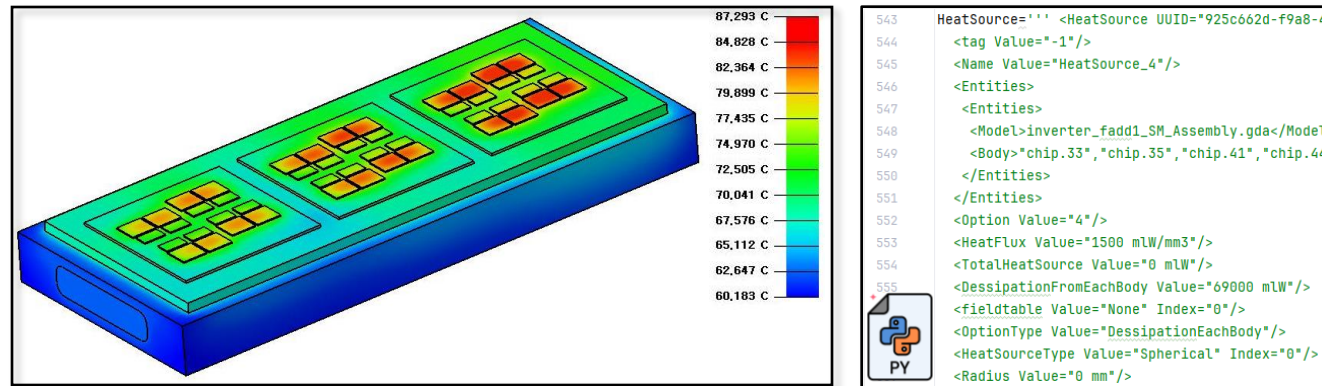


3.2 자동화 스크립트

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 자동화 프로세스

- **Hyper Study**의 DOE 및 최적화 기능을 사용하기 위해 **Simlab**의 Automation Script 레코드를 사용하여 자동화 스크립트 작성
- 설계변수의 치수를 재구성하여 Sampling Point를 구성하고, 각 Case별 해석을 자동적으로 수행하여 반응 값을 Hyper Study로 인가

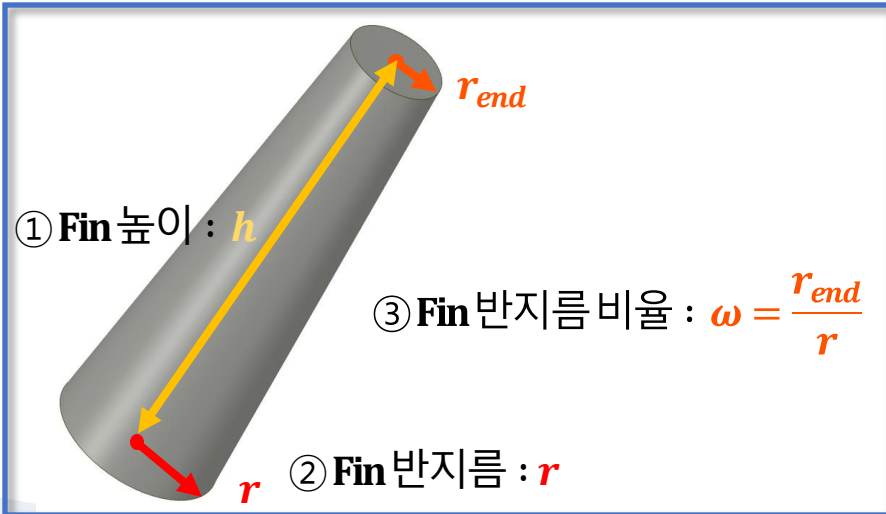


3.3 Design of Experiment

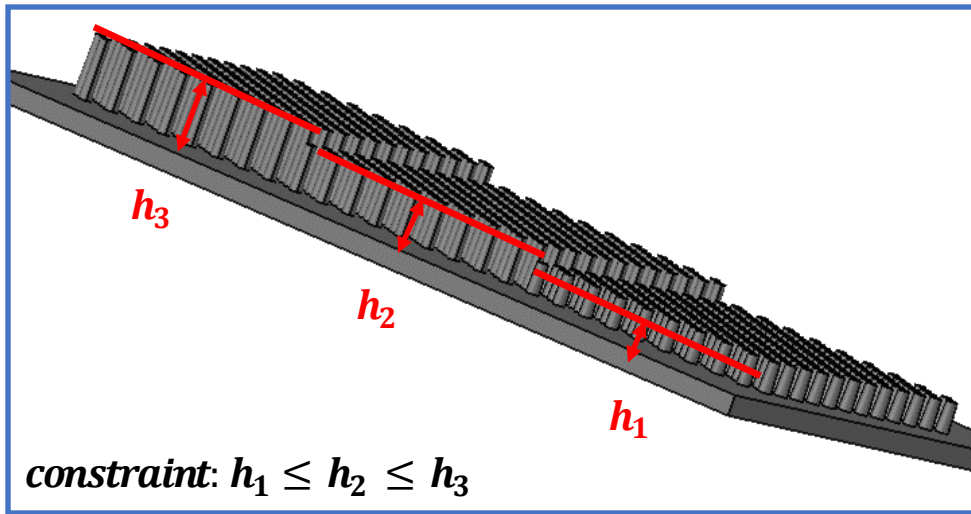
❖ DoE Sampling Method : MELS

- 실험계획법: 설계변수와 반응 간의 관계를 명확하게 이해하기 위해 최소한의 실험으로 최대의 결과를 도출하는 방법
- 설계인자 간의 제약조건과 다수의 설계인자가 존재할 때, 빈공간을 최소화 시키고 균일한 Sampling points를 배치할 수 있는 MELS (Modified Extensible Lattice Sequence) 방법을 사용

➤ Cell 1,2,3의 Pin 높이, 반경, 반경비율



➤ Cell 1,2,3 높이 제약 조건



	Cell 1	Cell 2	Cell 3
설계 인자 ①	h_1	h_2	h_3
②	r_1	r_2	r_3
③	ω_1	ω_2	ω_3

3.3 Design of Experiment

❖ DoE Sampling Method : MELS

- 각 설계변수가 Response에 미치는 영향력을 파악하기 위해 민감도 분석을 진행하였으며, 실험계획법 수행을 위한 Sapling **MELS (Modified Extensible Lattice Sequence)** 방법으로 구성
- MELS는 n차원 공간에 일정한 패턴으로 점을 배열한 뒤, 격자 간격을 조정하여 확장하고 각 점에서의 간섭을 최소화 하기 위해 격자를 수정하여 각각의 **설계변수가 균일하게 분포된 모집단**을 구성
- 안정적인 결과 추출을 위해 **$1.1 * (N+1)*(N+2)/2 = 61$** [N=설계변수의 개수] 개의 Run을 수행하여 민감도 분석을 진행함.

➤ 일정한 패턴 배열

(0, 0)	(1, 0)	(2, 0)
(0, 1)	(1, 1)	(2, 1)
(0, 2)	(1, 2)	(2, 2)

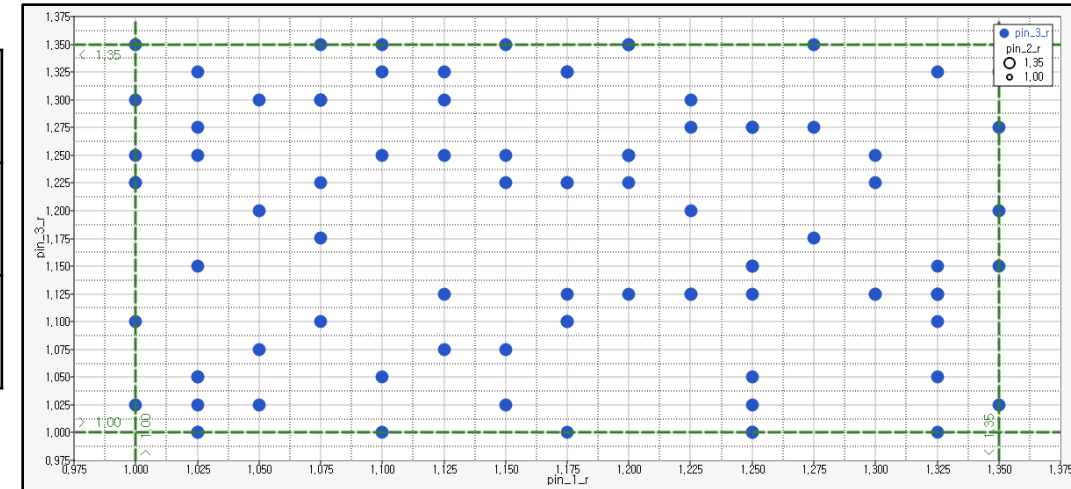
➤ 격자 확장

(0, 0)	(0.5, 0)	(1, 0)
(0, 0.5)	(0.5, 0.5)	(1, 0.5)
(0, 1)	(0.5, 1)	(1, 1)

➤ 격자 수정

(0.1, 0.2)	(0.6, 0.2)	(1.1, 0.2)
(0.1, 0.7)	(0.6, 0.7)	(1.1, 0.7)
(0.1, 1.2)	(0.6, 1.2)	(1.1, 1.2)

❖ 61개 모집단 구성



❖ 민감도 분석

- 민감도 = $\frac{\text{목적 함수 변화율}}{\text{설계 인자 변화율}}$
- 민감도가 클수록 목적함수에 큰 영향을 끼치는 설계인자라고 판단

❖ ANOVA (Analysis of Variance)

- 설계인자의 차이가 목적함수의 변화에 유의한지 판단하는 통계 기법
- F-value가 F임계치보다 크면 설계인자가 유의하다고 판단

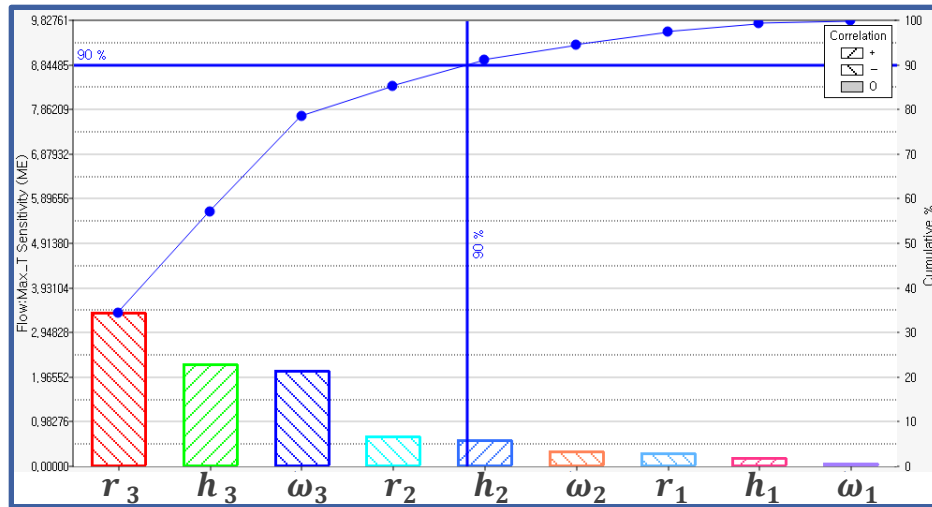
분산의 원천	제곱합 (SS)	자유도	평균제곱 (MS)	F-value
집단 간	$SS_b = \sum_j \sum_i (\bar{y}_j - \bar{y})^2$	$df_b = k - 1$	$MS_b = \frac{SS_b}{k - 1}$	$F = \frac{MS_b}{MS_w}$
집단 내	$SS_w = \sum_j \sum_i (\bar{y}_{ij} - \bar{y}_j)^2$	$df_w = n - k$	$MS_w = \frac{SS_w}{n - k}$	
합계	$SS_t = \sum_j \sum_i (\bar{y}_{ij} - \bar{y})^2$	$df_t = n - 1$		

\bar{y}_j : 각 집단 평균
 \bar{y} : 전체 평균
 \bar{y}_{ij} : 관측치 값
 n : 관측치 수
 k : 집단 수
 MS_b : 집단간 분산
 MS_w : 집단내 분산

3.4 민감도 분석 및 ANOVA

❖ 전력반도체 최고 온도

- 최고 온도 변화에 영향을 미치는 설계 인자는 $r_3 > h_3 > \omega_3 > r_2 > h_2 > \omega_2 > r_1 > h_1 > \omega_1$ 순서로 나타남
- ANOVA 결과, 최고 온도 변화에 유의한 설계 인자는 r_2, r_3, h_3, ω_3 로 확인됨



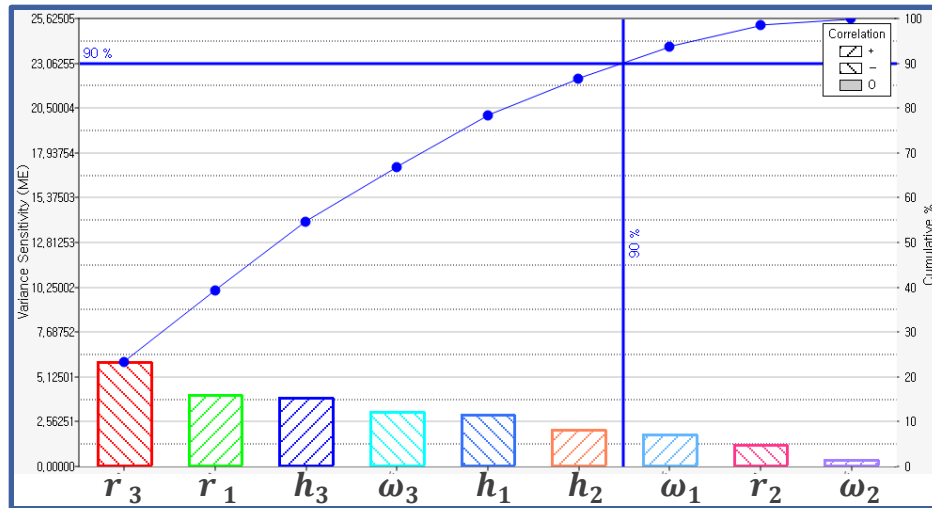
$$F(\alpha = 0.05) = 4.013$$

Factor	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3
F value	1.983	12.874	328.722	0.626	3.470	49.242	0.073	2.148	111.664
유의도	X	O	O	X	X	O	X	X	O

3.4 민감도 분석 및 ANOVA

❖ 셀 최고 온도 표준편차

- 온도 표준편차 변화에 영향을 미치는 설계인자는 $r_3 > r_1 > h_3 > \omega_3 > h_1 > h_2 > \omega_1 > r_2 > \omega_2$ 의 순서로 나타남
- ANOVA 결과, 온도 표준편차 변화에 유의한 설계 인자는 ω_2 를 제외한 $r_1, r_2, r_3, h_1, h_2, h_3, \omega_1, \omega_3$ 로 확인됨



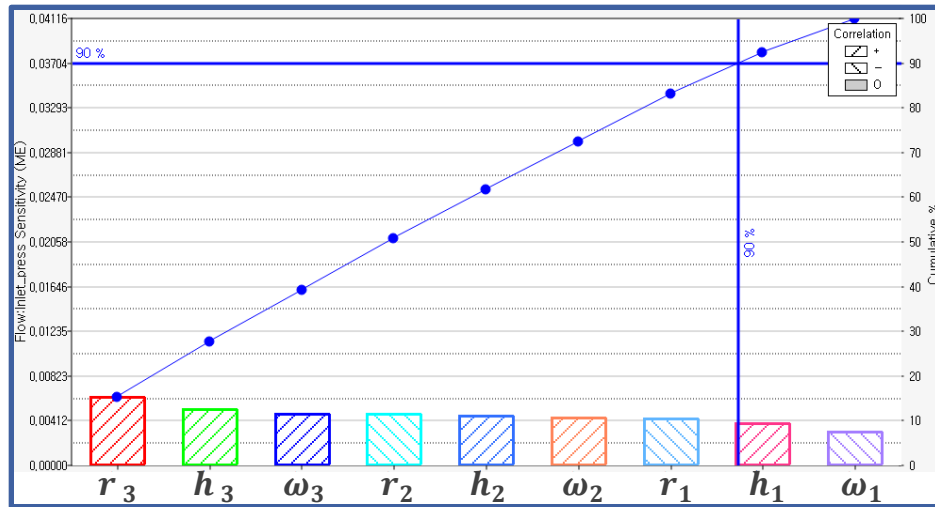
$$F(\alpha = 0.05) = 4.013$$

Factor	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3
F value	45.211	5.276	125.506	19.970	5.587	18.224	8.314	0.365	29.794
유의도	○	○	○	○	○	○	○	X	○

3.4 민감도 분석 및 ANOVA

❖ 입출구 냉각수 압력 강하

- 압력 강하 변화에 영향을 미치는 설계인자는 $r_1 > \omega_1 > r_3 > h_1 > \omega_2 > r_2 > h_2 > \omega_3 > h_3$ 순서로 나타남
- ANOVA 결과, 모든 설계인자가 압력 강하 변화에 유의한 설계 인자로 확인됨



$F(\alpha = 0.05) = 4.013$

Factor	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3
F value	116.366	73.572	84.958	54.934	26.384	12.073	70.507	53.202	50.460
유의도	○	○	○	○	○	○	○	○	○

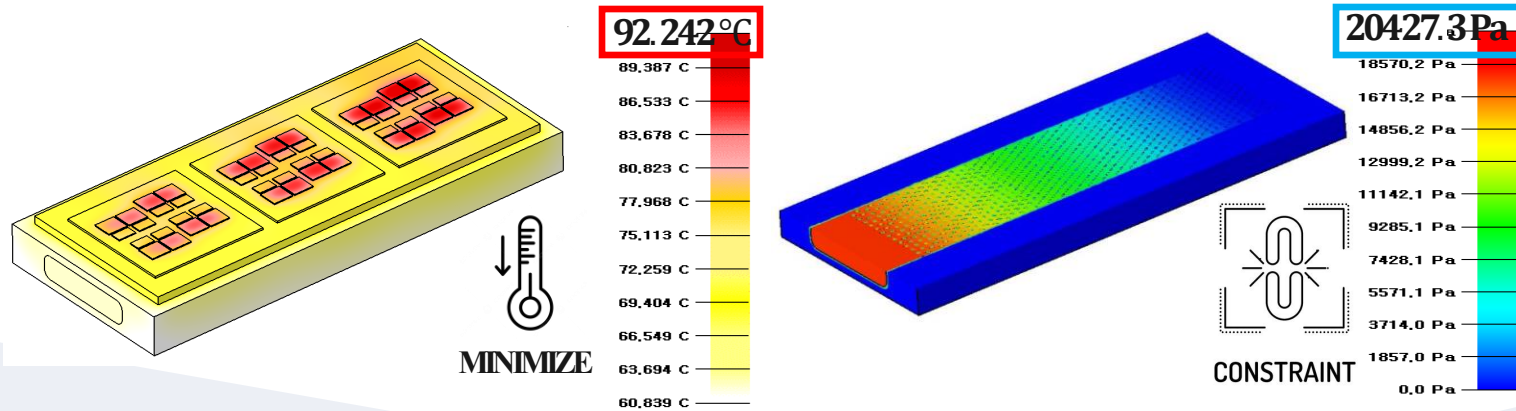
3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 최적설계 정식화 1

목적 함수	최고 온도 최소화 [T_{max} Minimize]			
제약 조건	초기모델 압력 강하 [$P_{drop} \leq 20427.3 \text{ Pa}$]			
설계 변수	Fin 높이	Pin 반경	반경 비	치수제약조건
	$6 \leq h_n \leq 10$	$1 \leq r_n \leq 1.375$	$0.6 \leq \omega_n \leq 1$	$h_1 \leq h_2 \leq h_3$

- 설계문제 정식화1: 본 연구 해석 모델의 냉각성능을 최대화 시키기 위해 최고온도 최소화를 목적함수로 선정
- 초기모델의 압력 강하를 구속조건으로 설정하고 각 셀의 Fin 높이, Pin 반경, 반경 비 총 9개의 설계변수로 최적화 진행

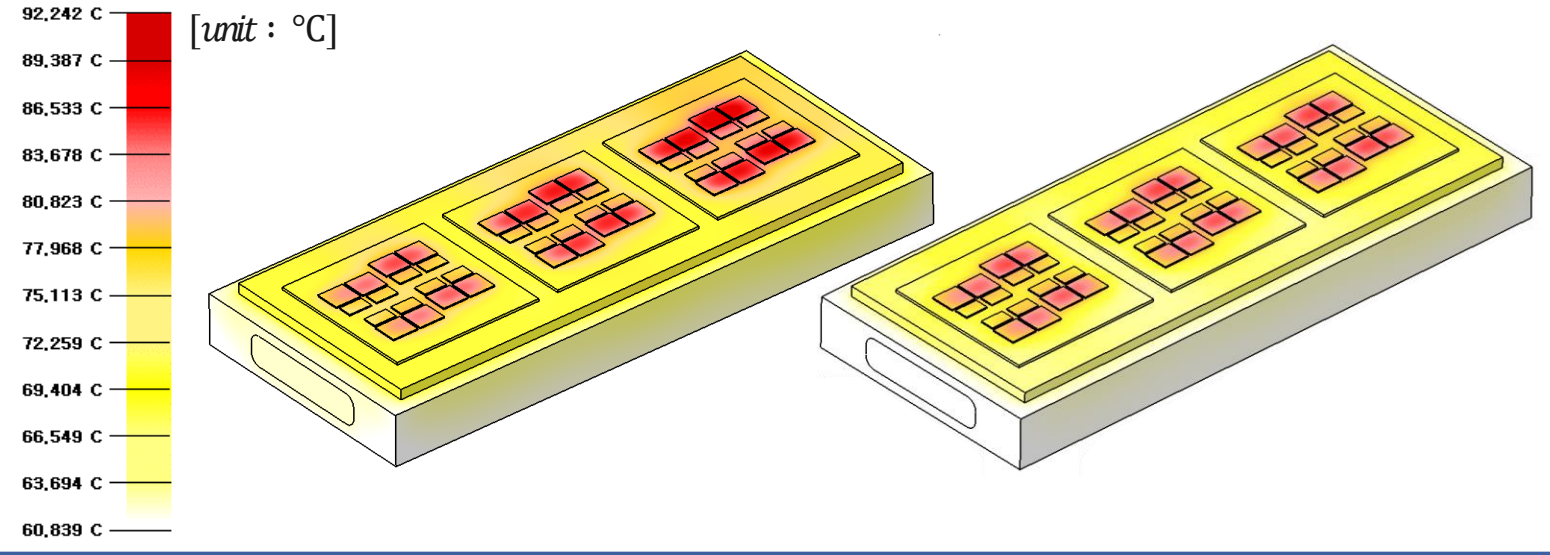


3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ ARSM을 통한 최고 온도 최소화

1차 최적화 온도 분포 비교



단위: [mm]

	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3	최고 온도 (°C)
초기 모델	1.05	1.05	1.05	6.7	6.7	6.7	0.9	0.9	0.9	92.242
최적화 1	1	1.15	1.35	6.5	7.75	9.5	0.75	0.6	0.775	87.773
변화량	0.05	0.1	0.3	0.2	1.05	2.8	0.15	0.3	0.125	4.469

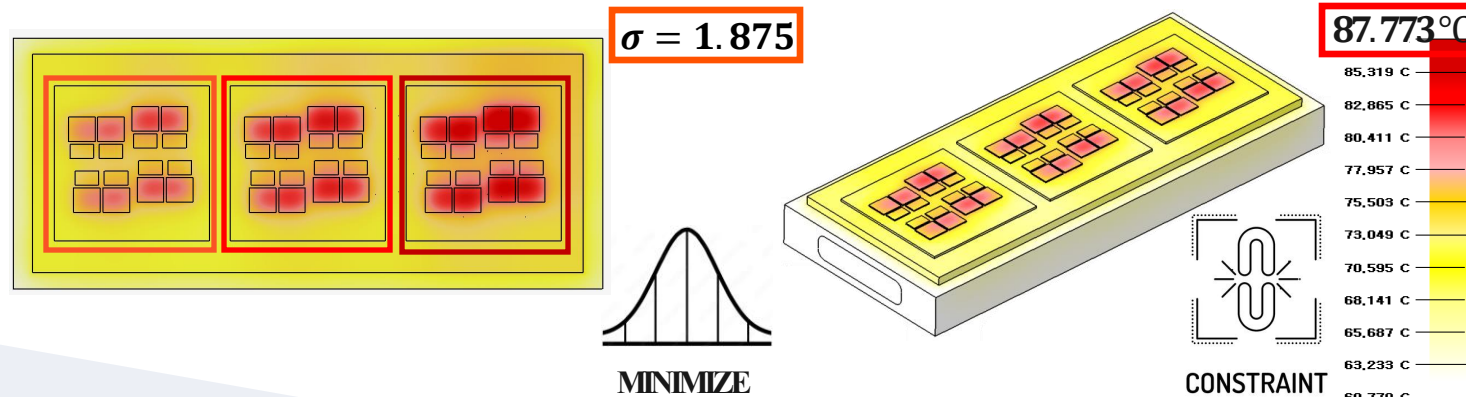
3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 최적설계 정식화 2

목적함수	온도 표준편차 최소화 [σ Minimize]			
구속조건	1차 최적화 최고 온도 [$T_{max} \leq 87.773^\circ\text{C}$]			
설계변수	Fin 높이	Pin 반경	반경 비	치수제약조건
	$6 \leq h_N \leq 10$	$1 \leq r_N \leq 1.35$	$0.6 \leq \omega_N \leq 1$	$h_1 \leq h_2 \leq h_3$

- 설계문제 정식화2: 1차 최적화 모델의 셀 간 온도 편차를 최소화 하기 위해 온도 표준편차 최소화를 목적함수로 선정
- 1차 최적화된 최고온도를 구속조건으로 설정하고 각 셀의 Fin 높이, Pin 반경, 반경 비 총 9개의 설계변수로 최적화 진행

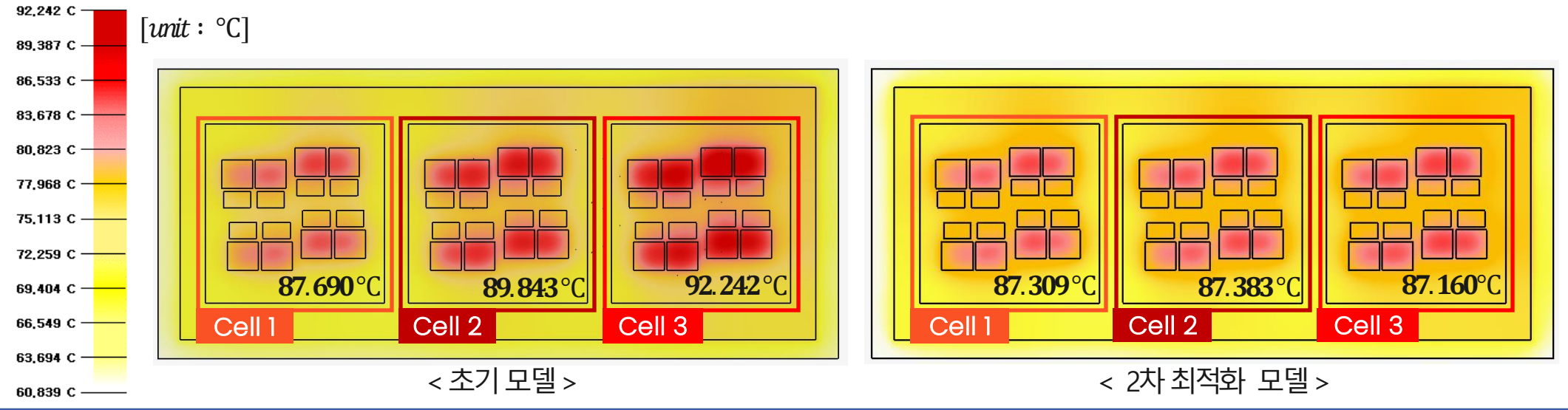


3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ ARSM을 통한 온도 표준편차 최소화

2차 최적화 온도 분포 비교



단위: [mm]

	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3	표준 편차
초기 모델	1.05	1.05	1.05	6.7	6.7	6.7	0.9	0.9	0.9	1.859
최적화 2	1	1.15	1.35	6.5	7.75	9.5	0.625	0.699	0.925	0.093
변화량	0.05	0.1	0.3	0.2	1.05	2.8	0.275	0.201	0.025	1.766

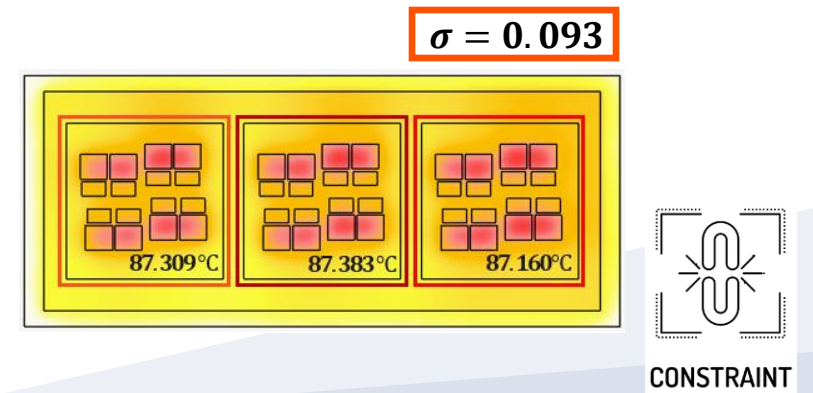
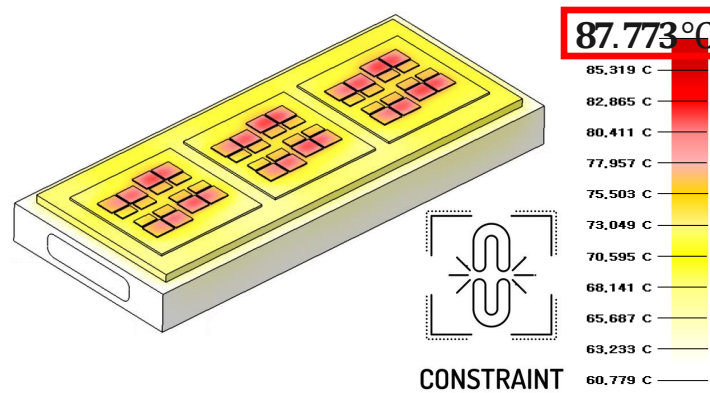
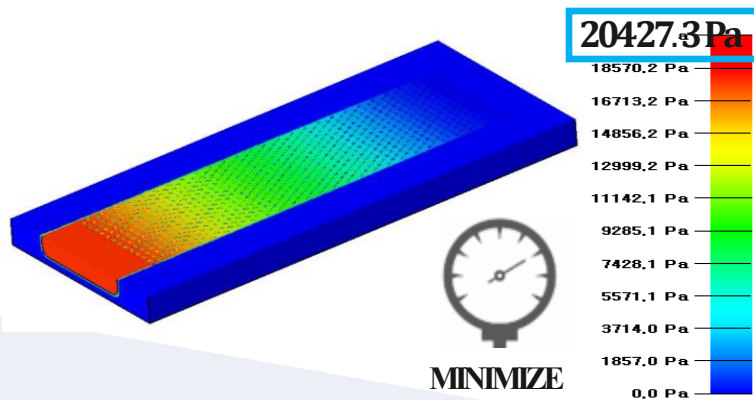
3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 최적설계 정식화 3

목적함수	압력 강하 최소화 [P_{drop} Minimize]			
구속조건	1차 최적화 최고 온도 [$T_{max} \leq 87.773 \text{ }^\circ\text{C}$] 2차 최적화 온도 표준편차 [$\sigma \leq 0.0093$]			
설계변수	Fin 높이	Pin 반경	반경 비	치수제약조건
	$6 \leq h_N \leq 10$	$1 \leq r_N \leq 1.375$	$0.6 \leq \omega_N \leq 1$	$h_1 \leq h_2 \leq h_3$

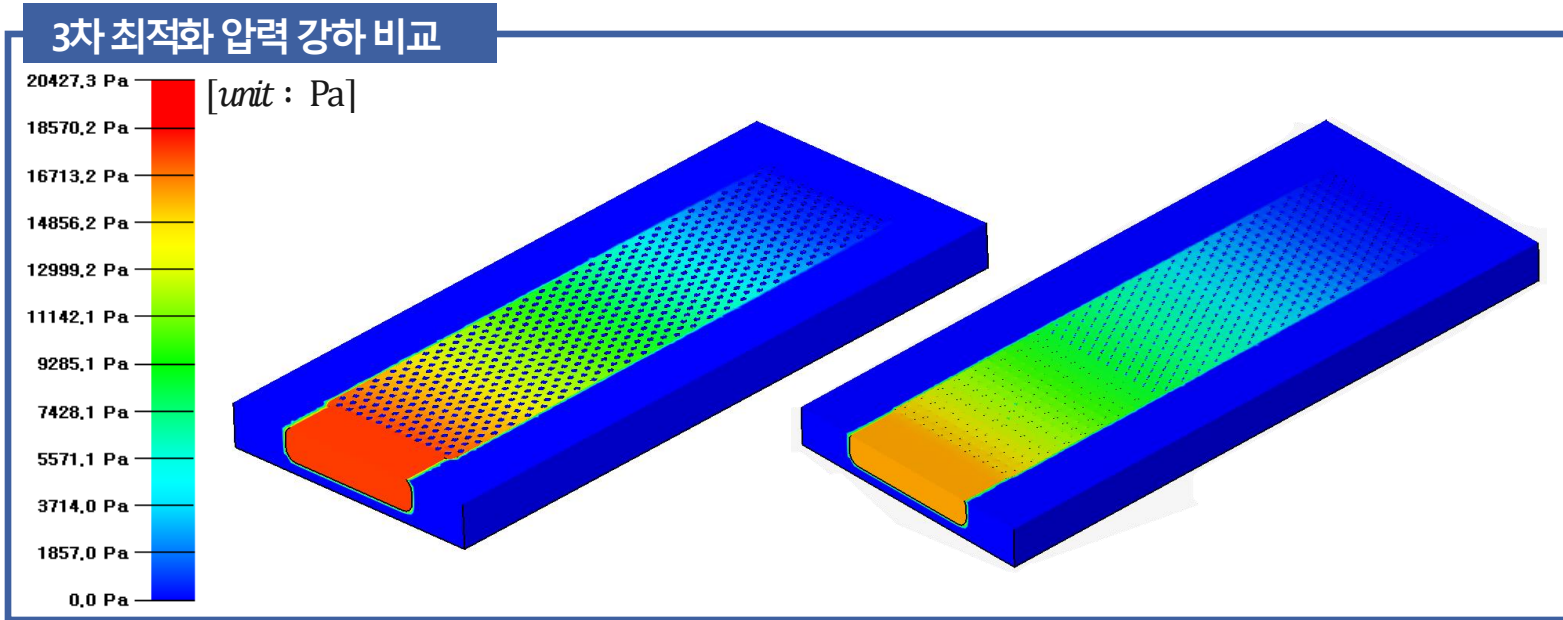
- 설계문제 정식화3: 2차 최적화 모델의 에너지 효율을 최대화 시키기 위해 **압력강하 최소화**를 목적함수로 선정
- 1차 최적화된 최고온도를 구속조건으로 설정하고 **각 셀의 Fin 높이, Pin 반경, 반경 비** 총 9개의 설계변수로 최적화 진행



3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ ARSM을 통한 압력 강하 최소화



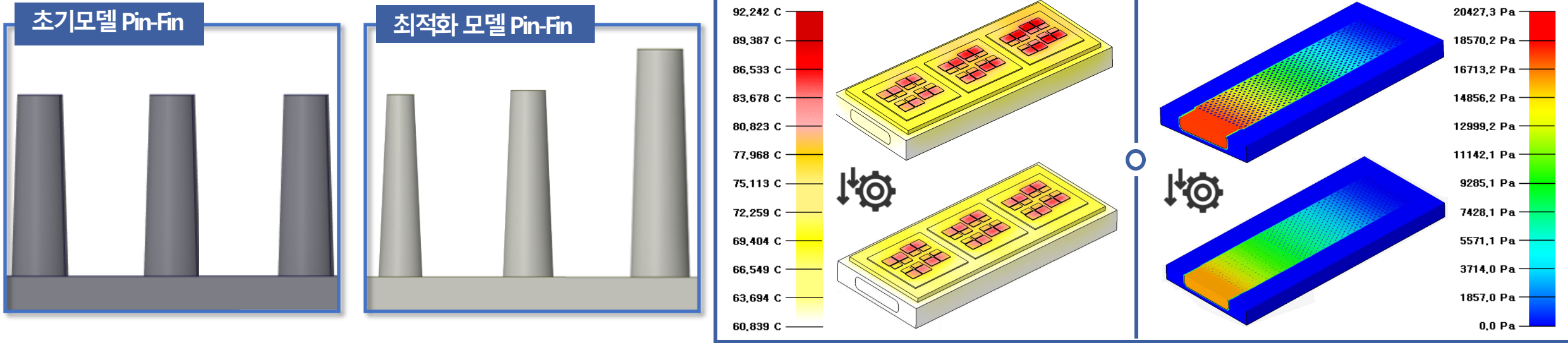
단위: [mm]

	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3	압력 강하 (Pa)
초기 모델	1.05	1.05	1.05	6.7	6.7	6.7	0.9	0.9	0.9	20427.3
최적화 3	1	1.15	1.35	7.5725	7.75	9.5	0.625	0.699	0.772375	16097.2
변화량	0.05	0.1	0.3	0.8725	1.05	2.8	0.275	0.201	0.127625	4330.1

3.8 최적화 결과 비교

EV 인버터의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 냉각유로의 최적설계

❖ 최적화 결과 비교



< 최적화 결과 비교 (상) 초기 모델, (하) 최적화 모델 >

< Table 2. 설계변수 및 결과 비교 표 >

	r_1	r_2	r_3	h_1	h_2	h_3	ω_1	ω_2	ω_3	최고 온도 (°C)	표준편차	압력 강하 (Pa)
초기 모델	1.05	1.05	1.05	6.7	6.7	6.7	0.9	0.9	0.9	92.242	1.859	20427.3
최적화 모델	1	1.15	1.35	7.5725	7.75	9.5	0.625	0.699	0.772375	87.787	0.066	16097.2
변화량	0.05	0.1	0.3	0.8725	1.05	2.8	0.275	0.201	0.127625	4.455	1.793	4330.1

➡ 최적화 결과 최고온도 4.455°C 감소, 압력강하 4.330.1Pa 감소, 셀간 온도 편차는 0.2°C 이하

EV 인버터 파워 모듈의 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크의 최적설계

Optimal Design of Pin-Fin Heat Sink to Improve Cell Temperature Imbalance of EV Inverter Power Modules

4. 결론

- 1. 서론
 - 1.1 연구 배경
 - 1.2 연구 목적
 - 1.3 연구 절차
 - 1.4 연구 개요
- 2. 인버터 열 유동 해석
 - 2.1 열 유동 해석 개요
 - 2.2 지배 방정식
 - 2.3 인버터 형상 모델
 - 2.4 인버터 구성 및 물성치
 - 2.5 유한 요소 모델
 - 2.6 경계조건
 - 2.7 열 유동 해석 결과
 - 2.8 설계 인자 선정
- 3. 셀간 온도 불균형 개선을 위한 히트 싱크 최적화
 - 3.1 최적설계 개요
 - 3.2 자동화 스크립트
 - 3.3 MELS 샘플링을 통한 DoE
 - 3.4 민감도 분석 및 ANOVA
 - 3.5 1차 최적화: 최고 온도 최소화
 - 3.6 2차 최적화: 온도 불균형 최소화
 - 3.7 3차 최적화: 압력 강하 최소화
 - 3.8 최적화 결과
- 4. 결론

1. 사전 논문 조사를 통해 인버터 파워 모듈의 **셀간 온도 불균형 개선 필요성** 확인
2. 열 유동 해석 결과를 통해 전력반도체의 **최고 온도**와 냉각수의 **압력 강하**의 **Trade-off 관계** 확인
3. DoE를 이용한 **민감도 분석** 및 **ANOVA**를 통해 목적함수의 변화에 대한 설계 인자의 **유의도** 확인
4. 히트 싱크 형상 최적화 결과를 통해 **셀간 온도 불균형, 냉각 성능, 압력 강하** 모두 **개선 효과** 확인
5. EV 인버터의 파워 모듈의 셀간 온도 불균형을 개선한 **Pin-Fin 히트 싱크의 최적설계안** 제시

❖ 참고 문헌

- [1] Zhao, tiefu et al, 2007, "Comparisons of SiC MOSFET and IGBT based motor drive systems.", IEEE
- [2] BNEF, 2022, Global Passenger EV Sales Will Top 16.7 Million in 2024
- [3] 국토교통부, 2023, "기아 테슬라 벤츠 등 자발적 시정조치(리콜)", 자동차정책과
- [4] Automotive Innovation, 2020, Thermal Analyses of Power Electronics Integrated with Vapour Chamber Cooling
- [5] Infineon, 2020, HybridPACK 2: General information and mounting instruction
- [6] Department of Energy, 2017, FY 2016 Annual Progress Report for Electric Drive Technologies Program, p197~200
- [7] Infineon, 2022, Duo pack EDT2 IGBT and EmCon3 diode in TO247 Plus package, p23