

2022. 8. 31.

팀 명: 인턴

김동우, 이하민

건국대학교 기계공학부

지도교수: 김창완 교수님



# 히트 싱크 최적설계

Altair Optimization Contest 2022 전기자동차 인버터의 냉각 성능 개선 및 압력 강하 저감을 위한

### Contents

| 1. 서론          | 1.1 연구 개요                     |
|----------------|-------------------------------|
|                | 1.2 연구 목표                     |
|                | 1.3 해석 절차                     |
| 2. 인버터 열 유동 해석 | 2.1 열 유동 해석 개요                |
|                | 2.2 지배 방정식                    |
|                | 2.3 해석 모델                     |
|                | 2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석         |
|                | 2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study   |
| 냉각 성능 및 압력 강하에 | 3.1 최적 설계 개요                  |
| 대하 히트 싱크 치전하   | 3.2 최적화 Process in HyperStudy |
|                | 3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석         |
|                | 3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화      |
|                | 3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화      |
|                | 3.6 최적화 결과                    |
| 4. 결론          | 4.1 결론                        |

Multiphysics Analysis and Design Optimization Laboratory



3.

### Contents

| 1. 서론                          | 1.1 연구 개요<br>1.2 연구 목표<br>1.3 해석 절차  |
|--------------------------------|--|
| 2. 인버터 열 유동 해석                 | 2.1 열 유동 해석 개요<br>2.2 지배 방정식<br>2.3 해석 모델<br>2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석<br>2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study  |
| 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | <ul> <li>3.1 최적 설계 개요</li> <li>3.2 최적화 Process in HyperStudy</li> <li>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석</li> <li>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화</li> <li>3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화</li> <li>3.6 최적화 결과</li> </ul> |
| 4. 결론                          | 4.1 결론   |

3.

### 1.1 연구 개요

### ▶ 연구 배경

**ALTAIR** 

- 세계 각 국의 연비 규제가 심화됨에 따라 전기차의 수요가 상승
- 전기차의 수요가 상승하면서 전기차 Power Electric System의 주요 구성품인 인버터 개발의 중요도가 커짐
- 인버터는 스위칭 소자인 IGBT와 정류 소자인 Diode를 이용해 배터리 직류 전원을 3상 교류 전원으로 변환

<전기차 PE 시스템>

4

- 인버터의 **고효율화**, **고출력화** 요구가 지속되고 있음







<전기차 인버터>







### 

\*출처: Zhao, Tiefu, et al. "Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems." 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. IEEE, 2007.



#### <전기차 인버터 내부 소자 소손(열에 의한 고장)으로 인한 리콜 안내, 현대>



- 대부분 인버터의 경우 수냉식 **히트 싱크**를 사용하여 인버터를 냉각시킴
- IGBT와 Diode의 전기적 손실에 의한 발열이 내열 한계 이상의 고온을 발생시켜 인버터의 고장 원인이 됨
- 일반적으로 IGBT와 Diode는 398 K (125 °C)의 **내열 한계**\*를 가짐
- IGBT 및 Diode에서 저항에 의해 발생하는 도통 손실과 On-Off 시 발생하는 스위칭 손실에 의한 열 발생
- ≻ 연구 배경

### 1.1 연구 개요

### 1.1 연구 개요

- ≻ 연구 배경
  - 히트 싱크의 형상 설계를 통해 냉각 성능 개선이 지속 요구 되고 있으며 이것은 히트 싱크 압력 강하 증가로 이어짐
  - 냉각 수로에서의 압력 강하 증가는 워터 펌프의 펌핑 파워 증가로 이어져 동력 손실을 발생 시킴
  - 대부분의 선행연구에서 인버터 냉각 성능과 냉각수 압력 강하의 Trade-off\* 관계를 고려하지 않음
  - 히트 싱크는 냉각 성능 최대화와 압력 강하 최소화라는 상반된 성능을 동시에 만족시켜야 함



### 인버터 냉각 성능 개선 및 냉각수 압력 강하 저감을 위한 <mark>히트 싱크 최적 설계</mark> 필요

\*출처: HAN, Feng; GUO, Hong; DING, Xiaofeng. Design and optimization of a liquid cooled heat sink for a motor inverter in electric vehicles. Applied Energy, 2021, 291: 116819.





1.3 해석 절차



### Contents

| 1. 서론                             | 1.1 연구 개요<br>1.2 연구 목표<br>1.3 해석 절차  |
|-----------------------------------|--|
| 2. 인버터 열 유동 해석                    | 2.1 열 유동 해석 개요   |
|                                   | 2.2 지배 방정식   |
|                                   | 2.3 해석 모델  |
|                                   | 2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석  |
|                                   | 2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study  |
|                                   |  |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에                 | 3.1 최적 설계 개요   |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | 3.1 최적 설계 개요<br>3.2 최적화 Process in HyperStudy  |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | 3.1 최적 설계 개요<br>3.2 최적화 Process in HyperStudy<br>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석   |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | 3.1 최적 설계 개요<br>3.2 최적화 Process in HyperStudy<br>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석<br>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화   |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | <ul> <li>3.1 최적 설계 개요</li> <li>3.2 최적화 Process in HyperStudy</li> <li>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석</li> <li>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화</li> <li>3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화</li> </ul>                     |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | <ul> <li>3.1 최적 설계 개요</li> <li>3.2 최적화 Process in HyperStudy</li> <li>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석</li> <li>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화</li> <li>3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화</li> <li>3.6 최적화 결과</li> </ul> |



### 🛆 ALTAIR





10

- ≻ 열 유동 해석 절차
- 인버터의 최고 온도 및 냉각수 압력 강하에 영향을 미치는 설계 인자 선정
- 인버터의 주 발열원인 IGBT, Diode의 온도 및 냉각수 압력 강하 계산
- ≻ 열 유동 해석 목적

2.1 열 유동 해석 개요

▷ 연속 방정식: 질량 보존을 의미하며, 연속적인 유체의 운동을 나타내기 위해 필요

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

▶ 운동량 방정식: 운동량 보존을 의미하며, 유체의 운동에서 외력의 영향을 나타내기 위해 필요

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

에너지 방정식: 에너지 보존을 의미하며, 열 전달을 계산하기 위해 필요

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



▶ 해석 모델: Nissan Leaf(2012) Inverter



### - 해석을 위해 모델을 단순화

- 주 발열원인 IGBT, Diode가 포함된 **파워 모듈**과

냉각이 이루어지는 **히트 싱크**에 대하여 해석 수행

- CATIA를 이용하여 3D 형상 설계

- ▶ 인버터 파워 모듈
  - 파워 모듈 = Cell X 3 , Cell = Switch X 2 , Switch = Diode X 3 + IGBT X 3
  - IGBT, Diode에서 도통 손실\* 및 스위칭 손실\*로 인한 발열 발생
     \*도통 손실: IGBT, Diode에 전류가 흐를 때 저항 성분에 의해 발생하는 손실
     \*스위칭 손실: 스위치 소자가 On-Off 시 발생하는 손실



\* Zhao, Tiefu, et al. "Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems." 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. IEEE, 2007.

Multiphysics Analysis and

Design Optimization Laboratory

KU KONKUK UNIVERSITY



- ▶ 인버터 히트 싱크
  - 냉각수를 통해 파워 모듈에서 발생하는 열 방출
  - 효율적인 열 교환을 위해 냉각 Fin을 적용하여 냉각수와 히트 싱크의 접촉 면적을 늘림
  - 히트 싱크 냉각 Fin 형상 치수는 Nissan Leaf(2012) Inverter 기반
    - Fin-개수: 7 개 유로 폭: 40 mm Fin-높이: 23 mm

    - Fin-두께: 2 mm (입·출구 인근 직선 구간) Fin-길이: 160 mm



**ALTAIR** 



▶ 인버터 구성 및 물성치



<인버터 구성>

| $\Delta$ | ALTAIR |  |
|----------|--------|--|
|----------|--------|--|



|             | 구성품          | 재질                    |  |  |  |
|-------------|--------------|-----------------------|--|--|--|
| 1           | Housing      | Plastic               |  |  |  |
| 2           | Air          | Air                   |  |  |  |
| 3           | IGBT         | SiC                   |  |  |  |
| 4           | Diode        | SiC                   |  |  |  |
| 5           | Buffer Plate | Copper-Moly           |  |  |  |
| 6           | Copper Plate | Copper                |  |  |  |
| ⑦ Heat Sink |              | Aluminum              |  |  |  |
| 8           | Coolant      | 50/50 Ethylene Glycol |  |  |  |

| 재료                    | 열전도율 [W/m·K] | 비열 [J/kg·K] | 밀도 [kg/m³] |
|-----------------------|--------------|-------------|------------|
| Plastic               | 0.34         | 1250        | 1800       |
| Air                   | 0.026        | 1005        | 1.225      |
| Copper                | 387          | 385         | 8933       |
| Aluminum              | 180          | 896         | 2700       |
| 50/50 Ethylene Glycol | 0.4108       | 3499        | 1050.44    |
| SiC                   | 270          | 675         | 3160       |
| Copper-Moly           | 160          | 270         | 9850       |

▶ 인버터 유한요소 모델



<유한요소 모델 단면>

- Node 수: 2,211,342 개
- Element 종류: Tetrahedral
- 3D Element 개수: 7,300,535 개
- 유체 부분은 벽면과의 마찰을 고려하여

5층의 Boundary Layer 생성



#### 이버터 유한요소 모델 경계조건



- 냉각수 온도와 입력 유량은 Nissan Leaf 인버터의
   작동 조건\* 적용
- 보수적 설계를 위해 주변 온도는 여름철 기온 적용

- 소자 손실은 Nissan Leaf 인버터에 대해 해석을 진행한

논문\*에서 사용한 손실 적용

| IGBT 수 (개)     | 18    |
|----------------|-------|
| IGBT 당 손실 (W)  | 86.83 |
| Diode 수 (개)    | 18    |
| Diode 당 손실 (W) | 28.94 |

\* 출처: SATO, Yoshinori, et al. "Development of high response motor and inverter system for the Nissan LEAF electric vehicle", SAE Technical Paper, 2011.

\* 출처: G. Moreno, et al. "Evaluation of performance and opportunities for improvements in automotive power electronics systems", 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2016.

### 

KU KONKUK

### 2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석





- 최고 온도는 손실이 큰 발열원인 IGBT에서 발생
- IGBT, Diode의 최고 온도는 내열 한계 이하
- 냉각수의 입·출구 온도변화가 발생하는 것으로
   히트 싱크를 통한 냉각이 이루어짐을 알 수 있음

### 2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석

#### ▶ 압력 및 벽면 전단 응력 분포





- 유로의 단면적이 좁고, 냉각 Fin과의 접촉 면적이
   넓은 곳에서 벽면 전단 응력이 집중
- 냉각수의 압력은 **벽면 전단 응력**이 크게 발생하는
   냉각 Fin 사이를 지날 때 뚜렷하게 **감소**함



### 2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study

- > Case Study
  - 유로 단면적 · Fin 면적이 변하는 Case들에 대한 열 유동해석으로 압력 강하 및 최고 온도에 대한 영향 확인
- ➢ Simlab 자동화 Script를 이용한 Case Study 반복 해석
  - 냉각 Fin 면적에 영향을 주는 Fin 길이&Fin 높이, 유로 단면적에 영향을 주는 Fin 두께&유로 폭을 파라미터로 지정

| - 📮 Parameters                        | < | CAD | Parameters: 🖈    |          |    |                               | 1 | Regenerate :   |                 |
|---------------------------------------|---|-----|------------------|----------|----|-------------------------------|---|----------------|-----------------|
| -🔂 `fin_thickness`=2mm                |   |     | Name             | Туре     |    | Value/Expression              |   | Dimension Name | Valu<br>2       |
|                                       |   |     | M1               | string   | ~  | aeembly_4mm_coolant_Final.stp |   | 2 flow_width   | 40              |
| - Flow_width = 40mm                   |   |     | M1_fin_height    | length   | *  | 23 mm                         |   | 3 fin_length   | 160             |
| - 🔂 `fin_length` = 160mm              |   |     | M1_fin_length    | length   | ~  | 160 mm                        |   | 4 fin_height   | 23              |
|                                       |   |     | M1_fin_thickness | length   | ¥  | 2 mm                          |   | r i            | -               |
| □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ □ | L |     | M1_flow_width    | length   | ~  | 40 mm                         |   |                | <u>R</u> egener |
| CATIA에서 파라미터 생성                       | - | Si  | mLab으로 Im        | port한 CA | TI | A 파일의 파라미터 연동                 |   | SimLab에서       | 치수              |

- SimLab에서 Automation 기능을 이용하여 Script 생성 및 재생으로 Case 별 해석 반복 자동화



### 🛆 ALTAIR

------> e New Value

Cancel

수정/적용

>

### 2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study

#### Case A: 냉각 Fin 면적 감소에 따른 결과 $\succ$

- 생각 Fin 면적에 영향을 미치는 Fin 길이와 Fin 높이를 변화시키며 결과 확인
- Case가 진행됨에 따라 냉각 Fin 면적은 감소



Multiphysics Analysis and Design Optimization Laboratory



#### Case B: 유로 단면적 증가에 따른 결과 $\succ$

- 유로 단면적에 영향을 미치는 Fin 두께와 유로 폭을 변화시키며 결과 확인
- Case가 진행됨에 따라 유로 단면적은 증가





▶ 냉각 Fin 면적과 유로 단면적의 변화에 따른 결과 분석



**ALTAIR** 

▶ 해석 결과 분석



### 냉각 Fin 면적 및 유로 단면적을 조정하여 최고 온도 및 압력 강하 개선

### Contents

| 1. 서론                             | 1.1 연구 개요<br>1.2 연구 목표<br>1.3 해석 절차  |
|-----------------------------------|--|
| 2. 인버터 열 유동 해석                    | 2.1 열 유동 해석 개요<br>2.2 지배 방정식<br>2.3 해석 모델<br>2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석<br>2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study  |
|                                   |  |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에                 | 3.1 최적 설계 개요   |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | 3.1 최적 설계 개요<br>3.2 최적화 Process in HyperStudy  |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | 3.1 최적 설계 개요<br>3.2 최적화 Process in HyperStudy<br>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석   |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | 3.1 최적 설계 개요<br>3.2 최적화 Process in HyperStudy<br>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석<br>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화   |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | <ul> <li>3.1 최적 설계 개요</li> <li>3.2 최적화 Process in HyperStudy</li> <li>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석</li> <li>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화</li> <li>3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화</li> </ul>                     |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | <ul> <li>3.1 최적 설계 개요</li> <li>3.2 최적화 Process in HyperStudy</li> <li>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석</li> <li>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화</li> <li>3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화</li> <li>3.6 최적화 결과</li> </ul> |

Multiphysics Analysis and KU KONKUK Design Optimization Laboratory

### 3.1 최적 설계 개요

- ▶ 최적 설계 목적
  - 인버터의 **냉각 성능** 개선을 위해 초기 모델에 대하여 **1차 최적화**
  - 인버터의 **압력 강하** 감소를 위해 1차 최적화 모델에 대하여 2차 최적화
- ▶ 최적 설계 절차



➢ SimLab 자동화 Script



➢ SimLab에서 생성한 자동화 Script를 HyperStudy에 적용





- 실험계획법: 적은 실험 횟수로 최대한의 정보를 얻기 위해 실험을 계획
  - FFD (Full Factorial Design): 설계 인자 수준의 가능한 모든 조합을 평가하는 DoE Method
- ▶ 설계 인자 선정



- 해석 결과를 바탕으로 Fin 길이, Fin 높이, Fin 두께, <mark>유로 폭</mark>을 설계 인자로 선정
- 2-Level Full Factorial Design을 이용한 민감도 분석을 통해 각 설계 인자가 최고 온도와 압력 강하에 미치는 영향을 확인
- 최고 온도와 압력 강하에 큰 영향을 미치는 설계 인자를 각각 설계 변수로 선정하여 최적화 진행

- ➤ 설계 인자 Boundary 설정
  - 민감도 분석을 하기 위한 설계 인자 2수준 설정
  - 민감도 = 목적 함수 변화율 설계 인자 변화율<sup>,</sup> 민감도가 클수록 목적함수에 영향을 많이 끼치는 설계인자로 판단
  - 설계 인자 별 Scale 차이가 민감도에 영향을 미치지 않도록 동일한 변화율 적용
  - Boundary는 모든 설계 인자에 대해 Geometry의 왜곡이 일어나지 않는 ±2.0% 범위 설정

| 설계 인자       | Initial Model | Lower Boundary | Upper boundary |
|-------------|---------------|----------------|----------------|
| Fin 길이(mm)  | 160           | 156.8          | 163.2          |
| Fin 높이 (mm) | 23            | 22.54          | 23.46          |
| Fin 두께 (mm) | 2             | 1.96           | 2.04           |
| 유로 폭 (mm)   | 40            | 39.2           | 40.8           |

### 🛆 ALTAIR

- ➤ 설계 인자 Boundary 설정
  - 민감도 분석을 하기 위한 설계 인자 2수준 설정
  - 민감도 = <u>목적 함수 변화율</u>, 민감도가 클수록 목적함수에 영향을 많이 끼치는 설계인자로 판단
  - 설계 인자 별 Scale 차이가 민감도에 영향을 미치지 않도록 동일한 변화율 적용
  - Boundary는 모든 설계 인자에 대해 Geometry의 왜곡이 일어나지 않는 ±2.0% 범위 설정

| Case   | Fin-길이 | Fin-높이 | Fin-두께 | 유로 폭 | Case    | Fin-길이 | Fin-높이 | Fin-두께 | 유로 폭 |
|--------|--------|--------|--------|------|---------|--------|--------|--------|------|
| Case 1 | 156.8  | 22.54  | 1.96   | 3.92 | Case 9  | 163.2  | 22.54  | 1.96   | 3.92 |
| Case 2 | 156.8  | 22.54  | 1.96   | 40.8 | Case 10 | 163.2  | 22.54  | 1.96   | 40.8 |
| Case 3 | 156.8  | 22.54  | 2.04   | 3.92 | Case 11 | 163.2  | 22.54  | 2.04   | 3.92 |
| Case 4 | 156.8  | 22.54  | 2.04   | 40.8 | Case 12 | 163.2  | 22.54  | 2.04   | 40.8 |
| Case 5 | 156.8  | 23.46  | 1.96   | 3.92 | Case 13 | 163.2  | 23.46  | 1.96   | 3.92 |
| Case 6 | 156.8  | 23.46  | 1.96   | 40.8 | Case 14 | 163.2  | 23.46  | 1.96   | 40.8 |
| Case 7 | 156.8  | 23.46  | 2.04   | 3.92 | Case 15 | 163.2  | 23.46  | 2.04   | 3.92 |
| Case 8 | 156.8  | 23.46  | 2.04   | 40.8 | Case 16 | 163.2  | 23.46  | 2.04   | 40.8 |

### 🛆 ALTAIR

> 압력 강하 및 최고 온도에 대한 설계 인자 효과의 계층분포



<최고 온도에 대한 설계 인자 효과의 계층분포>

<압력 강하에 대한 설계 인자 효과의 계층분포>

- 최고 온도에 영향을 미치는 정도는 Fin 길이 > Fin 높이 > 유로 폭 > Fin 두께 순서
- 압력 강하에 영향을 미치는 정도는 유로 폭 > Fin 높이 > Fin 두께 > Fin 길이 순서
- Fin 길이, Fin 높이, 유로 폭이 최고 온도에 94% 이상의 영향을 미침
- 유로 폭, Fin 높이, Fin 두께가 압력 강하에 95% 이상의 영향을 미침

### 🛆 ALTAIR

**T** KONKUK

### 

- 각 목적 함수에 대해 높은 민감도를 가지는 3개의 인자를 설계 변수로 최적화 진행
- 각 설계 인자들은 압력 강하와 최고 온도에 대해 상반되는 경향의 영향을 미침





### ≻ 설계 인자에 따른 최고 온도 및 압력 강하 민감도 분석

3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석

> 1차 최적 설계 정식화



| 목적 함수 | 최고 온도 <b>최소화</b>     |
|-------|----------------------|
| 설계 변수 | Fin 길이, Fin 높이, 유로 폭 |
| 구속 조건 | 압력 강하 < 507 Pa       |

1차 최적화는 압력 강하를 초기 모델 압력 강하 이하로 제한한
 상태에서 최고 온도 최소화로 진행

- 목적함수는 **최고 온도 최소화**로 설정

최고 온도에 대한 민감도가 높은 Fin 길이, Fin 높이, 유로 폭을
 설계 변수로 선정

- 초기 모델의 **압력 강하를 구속 조건**으로 설정



▶ 1차 최적 설계 변수 Boundary 설정



| 설계 변수          | Initial Model | Lower<br>Boundary | Upper<br>boundary |
|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Fin 길이<br>(mm) | 160           | 145               | 175               |
| Fin 높이<br>(mm) | 23            | 8.05              | 24                |
| 유로 폭<br>(mm)   | 40            | 35                | 45                |

- 최적 설계 진행을 위한 설계 변수 Boundary 설정
- 설계변수의 최대 변화 가능 범위는 기본 모델 치수의
   ±65% 범위 설정
- 시행착오법으로 Geometry 왜곡을 일으키는 Boundary 수정

- ▶ 반응표면법(Response Surface Method)을 이용한 최고 온도 최적화
  - 설계영역에서 설계변수와 특성치 사이 관계를 근사화 하여 어느 설계변수 수준에서 목적함수에 가장 근접한 특성치를 얻는지 확인



- ARSM을 통해 설계영역내에서 국부 최적화를 진행하여 짧은 시간 내에 최적화 결과를 얻을 수 있음
- 7번째 Iteration에서 최적화 수렴
- 최적점에서 압력 강하는 500.25 Pa로 구속 조건 만족하며 구속 조건 내에서 최고 온도는 감소

> 1차 최적화 결과 분석 및 초기 모델과 비교



| · 1차 최적화 전후 히트 싱크 단면 비교 · · · · · · · · · · · · · · · · · · |             |             |             |           |           |            |  |
|---|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|--|
|   | Fin 두께 (mm) | Fin 길이 (mm) | Fin 높이 (mm) | 유로 폭 (mm) | 최고 온도 (K) | 압력 강하 (Pa) |  |
| 초기 모델   | 2           | 160         | 23          | 40        | 392.73    | 506.66     |  |
| 1차 최적화 모델   | 2.00        | 175.00      | 22.542      | 40.102    | 387.85    | 500.69     |  |
| 변화량   | _           | 15.00       | -0.458      | 0.102     | -4.88     | -5.97      |  |
| 변화율   | -           | 9.375 %     | -1.991 %    | 0.254 %   | -1.243 %  | -1.178 %   |  |

Pressure (Pa) 696.78E+00

619.14E+00

541.51E+00

463.88E+00

386.25E+00

308.62E+00

230.99E+00

153.36E+00

75.72E+00

> 1차 최적화 결과 분석 및 초기 모델과 비교



- 압력 강하 변화율 대비 최고 온도 변화율이 큰 Fin 길이는 최고 온도를 감소시키는 방향으로 변화
- 압력 강하 변화율 대비 최고 온도 변화율이 작은 Fin 높이, 유로 폭은 압력 강하 증가를 완화시키는 방향으로 변화
- Trade-off 관계를 고려하여 설계 변수 간 최적화가 진행됨



### 초기 모델 대비 1차 최적화 모델 최고 온도 4.88 K 감소

> 2차 최적 설계 정식화



| 목적 함수 | 압력 강하 <b>최소화</b>       |
|-------|------------------------|
| 설계 변수 | Fin 높이, Fin 두께, 유로 폭   |
| 구속 조건 | 최고 온도 < <b>387.9 K</b> |

2차 최적화는 최고 온도를 1차 최적화 모델 최고 온도 이하로
 제한한 상태에서 압력 강하 최소화로 진행

– 목적함수는 압력 강하 최소화로 설정

\_ 압력 강하에 대한 민감도가 높은 Fin 높이, Fin 두께, 유로 폭을
 설계 변수로 선정

- 1차 최적화 모델의 최고 온도를 구속 조건으로 설정



### 3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화

▶ 2차 최적 설계 변수 Boundary 설정



| 설계 변수          | Initial Model | Lower<br>Boundary | Upper<br>boundary |
|----------------|---------------|-------------------|-------------------|
| Fin 높이<br>(mm) | 23            | 8.05              | 24                |
| Fin 두께<br>(mm) | 2             | 0.7               | 2.5               |
| 유로 폭<br>(mm)   | 40            | 35                | 45                |

- 최적 설계 진행을 위한 설계 변수 Boundary 설정
- 설계변수의 최대 변화 가능 범위는 기본 모델 치수의
   ±65% 범위 설정
- 시행착오법으로 Geometry 왜곡을 일으키는 Boundary 수정

▶ 반응표면법(Response Surface Method)을 이용한 압력 강하 최적화



- ARSM을 통해 설계영역내에서 국부 최적화를 진행하여 짧은 시간 내에 최적화 결과를 얻을 수 있음
- 15번째 Iteration에서 최적화 수렴
- 최적점에서 최고 온도는 387.87 K으로 구속 조건 만족하며 구속 조건 내에서 압력 강하는 감소

### 3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화

> 2차 최적화 결과 분석 및 1차 최적화 모델과 비교



|           | Fin 두께 (mm) | Fin 길이 (mm) | Fin 높이 (mm) | 유로 폭 (mm) | 최고 온도 (K) | 압력 강하 (Pa) |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|------------|
| 1차 최적화 모델 | 2.00        | 175.00      | 22.542      | 40.102    | 387.85    | 500.69     |
| 2차 최적화 모델 | 1.9676      | 175.00      | 24.000      | 42.197    | 387.87    | 457.02     |
| 변화량       | -0.0324     | _           | 1.458       | 2.095     | 0.02      | -43.67     |
| 변화율       | -1.619 %    | _           | 6.468 %     | 5.226 %   | 0.005 %   | -8.722 %   |

### 3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화

> 2차 최적화 결과 분석 및 1차 최적화 모델과 비교



- 최고 온도 변화율 대비 압력 강하 변화율이 큰 유로 폭은 압력 강하를 감소시키는 방향으로 변화
- 최고 온도 변화율 대비 압력 강하 변화율이 작은 Fin 두께, Fin 높이는 최고 온도 증가를 완화시키는 방향으로 변화
- Trade-off 관계를 고려하여 설계 변수 간 최적화가 진행됨



1차 최적화 모델 대비 2차 최적화 모델 압력 강하 43.67 Pa 감소



### 3.6 최적화 결과

▶ 최적화 결과 분석



|       | Fin 두께 (mm) | Fin 길이 (mm) | Fin 높이 (mm) | 유로 폭 (mm) | 최고 온도 (K)        | 압력 강하 (Pa)       |
|-------|-------------|-------------|-------------|-----------|------------------|------------------|
| 초기 모델 | 2           | 160         | 23          | 40        | 392.73           | 506.66           |
| 최종 모델 | 1.9676      | 175.00      | 24.000      | 42.197    | 387.87           | 457.02           |
| 변화율   | -1.62 %     | 9.375 %     | 4.348 %     | 5.493 %   | - <b>1.237</b> % | - <b>9.797</b> % |

최적화 결과 최고 온도 4.86 K 감소, 압력 강하 49.6 Pa 감소

### Contents

| 1. 서론                             | 1.1 연구 개요<br>1.2 연구 목표<br>1.3 해석 절차  |
|-----------------------------------|--|
| 2. 인버터 열 유동 해석                    | 2.1 열 유동 해석 개요<br>2.2 지배 방정식<br>2.3 해석 모델<br>2.4 초기 모델에 대한 열 유동 해석<br>2.5 설계 인자 선정을 위한 Case Study  |
| 3. 냉각 성능 및 압력 강하에<br>대한 히트 싱크 최적화 | <ul> <li>3.1 최적 설계 개요</li> <li>3.2 최적화 Process in HyperStudy</li> <li>3.3 실험계획법을 이용한 민감도 분석</li> <li>3.4 1차 최적 설계 – 최고 온도 최소화</li> <li>3.5 2차 최적 설계 – 압력 강하 최소화</li> <li>3.6 최적화 결과</li> </ul> |
| 4. 결론                             | 4.1 결론   |



4.1 결론

|          | 열 유동 해석으로 냉각 Fin 면적과 유로 단면적이 최고 온도와 압력 강하에 영향을 주는 것을 확인   |
|----------|---|
|          | 열 유동 해석 결과를 통해 <mark>압력 강하</mark> 와 <b>최고 온도</b> 의 Trade-off 관계 확인 및 설계 인자 선정   |
|          | 실험계획법을 이용한 <mark>민감도 분석</mark> 결과를 통해 설계 인자가 최고 온도와 압력 강하에 미치는 영향을 확인하였고<br>각 설계인자는 최고 온도와 압력 강하에 <b>상반된 영향</b> 을 미치는 것을 확인 |
|          | 최고 온도와 압력 강하의 Trade-off 관계를 고려하여 설계 변수 최적화가 진행된 것을 확인   |
| $\wedge$ | 히트 싱크 형상 최적화 결과를 통해 <b>냉각 성능</b> 과 <b>압력 강하</b> 모두 <b>개선 효과</b> 확인  |

### 참고 문헌

- Reimers, John, et al. "Automotive traction inverters: Current status and future trends." IEEE Transactions on Vehicular Technology 68.4 (2019): 3337-3350.
- Zhao, Tiefu, et al. "Comparisons of SiC MOSFET and Si IGBT based motor drive systems." 2007 IEEE Industry Applications Annual Meeting. IEEE, 2007.
- SATO, Yoshinori, et al. "Development of high response motor and inverter system for the Nissan LEAF electric vehicle", SAE Technical Paper, 2011.
- G. Moreno, et al. "Evaluation of performance and opportunities for improvements in automotive power electronics systems", 2016 15th IEEE Intersociety Conference on Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems (ITherm), 2016.
- Onoroh, F., et al. "Thermal Optimization of Heat Sink for Inverter Applications." IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. Vol. 413. No. 1. IOP Publishing, 2018.
- Park, Kyoungwoo, and Dong-Hoon Choi. "Optimal design of a heat sink using the sequential approximate optimization algorithm." Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering 16.12 (2004): 1156-1166.
- ▶ 김대건, and 김성철. "ISG 구동용 인버터의 열유동 해석에 관한 연구." 한국자동차공학회논문집 21.5 (2013): 145-150.
- ▶ 金京滿, et al. "HEV 용 인버터의 방열을 위한 수냉식 배관구조." 전력전자학회논문지 15.1 (2010): 27-34.

### 🛆 ALTAIR

## Thank You ASB A



