



전기자동차 경량화를 위한
전계-열-구조 연성 해석 기반
버스바 형상 최적 설계

Altair Optimization Contest 2023

팀 명: 강박증
건국대학교 기계공학부
강병호, 박천하
지도 교수: 김창완 교수님
2023.8.29

Contents

I. 서론

- i) 연구 배경
- ii) 연구 목적
- iii) 연구 개요

II. 전계-열-구조 연성 해석

- i) 버스바 형상
- ii) 버스바 물성치
- iii) 버스바 유한요소모델
- iv) 발열량 계산을 위한 전계 해석
- v) 온도 분포 계산을 위한 열 해석
- vi) 열 응력 계산을 위한 구조 해석

III. 형상 최적설계를 통한 질량 최소화

- i) 형상 최적설계 개요
- ii) 설계 변수 선정 및 설계 정식화
- iii) 최적화 결과

IV. 결론

서론



연구 배경

연구 목적

연구 개요

연구 배경

전기차용 버스바의 경량화 필요성

- 버스바는 전류를 전달하는 금속 막대로 전력 손실을 억제하기 위해 전력망에 필수적인 부품임.
- 전기 자동차는 전기 에너지를 고출력으로 사용하는 과정에서, 고전류가 흐르기 때문에 버스바를 사용함.
- 최근 자동차 업계에서는 주행거리 개선을 위한 배터리, 모터의 개발과 더불어 **차량 경량화가 중요 과제임.**
- 그에 따라 전기차에 들어가는 버스바는 기존의 버스바와 다르게 경량화가 필요함.



<전기자동차용 버스바>
출처: 창환단자공업



<아이오닉 5 배터리 팩에 장착된 버스바>
출처: 굿바이카 유튜브 영상

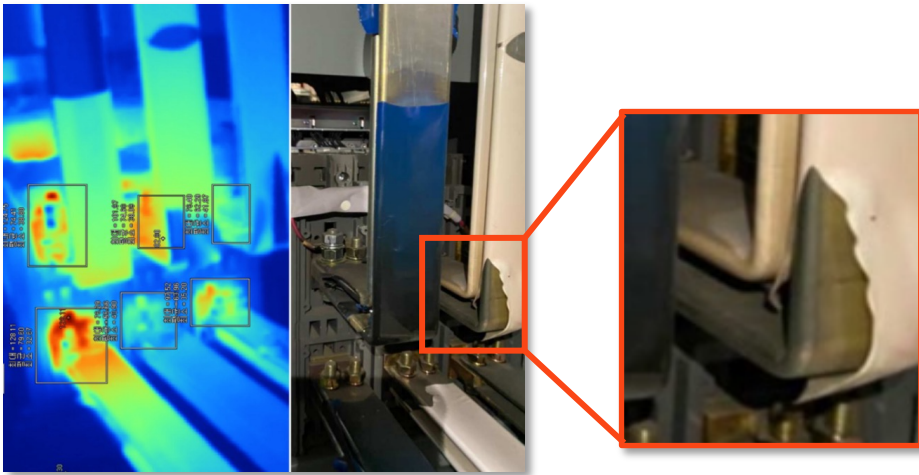
- 연비 성능 4~6% 향상
- 제로백 8% 향상
- 제동 정지 거리 5% 단축
- 핸들 조향 능력 6% 향상
- 샤시 내구 수명 1.7배 증가

<내연기관 승용차(1500kg) 10% 경량화 할 경우>
출처: Auto Journal 2018

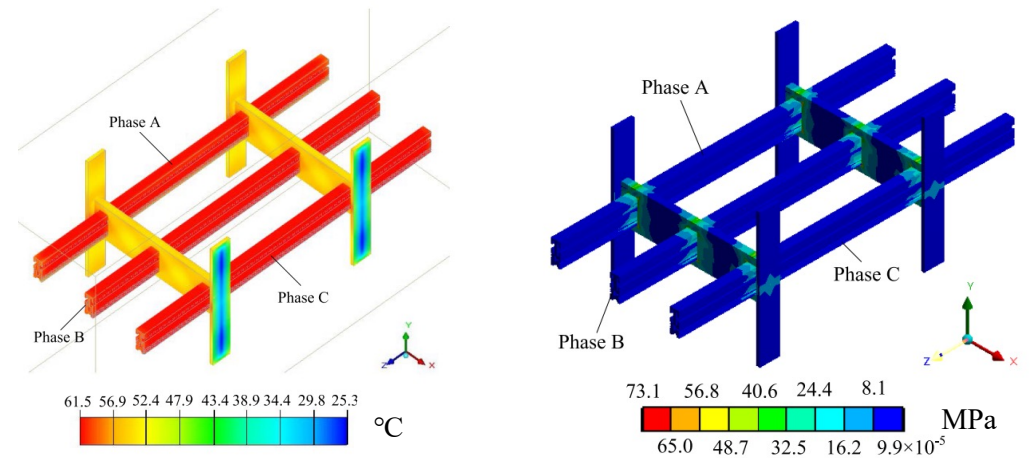
연구 배경

버스바의 형상 설계 시 고려사항

- 버스바의 경량화 방법으로는 재료 선정 및 형상 설계가 있음.
- 그 중 버스바의 형상 설계는 전류 밀도 변화와 줄 손실 밀도 변화와 같은 **전기적 상황**을 고려해야 됨.
- 전기적 상황의 변화로 위치에 따른 발열량에 변화가 발생하고, 이는 **국부적인 온도 상승**을 야기함.
- 이러한 온도 상승은 **피복재를 훼손** 시킬 수 있고, **열 응력을 발생시켜 파손**을 일으킬 수 있음.



<온도 상승으로 인한 피복재 훼손>
출처: 엔이피콘



<버스바의 온도 분포 및 열 응력>

출처: Li, Size, Yu Han, and Chengzhu Liu. "Coupled multiphysics field analysis of high-current irregular-shaped busbar." *IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology* 9.9 (2019): 1805-1814.

연구 목적

전기적, 열적, 구조적 상황을 고려한 버스바 형상 최적설계

- 전기차의 경량화를 위한 버스바의 형상 설계 시, 전기적, 열적, 구조적 상황을 모두 고려해야 함.
- 국부적으로 줄 손실이 크게 발생하는 지점에서의 온도 상승과 그로 인한 열응력을 계산하기 위해 전계-열-구조 연성해석을 수행할 필요가 있음.
- 형상 최적 설계 과정에서 피복재의 허용 온도와 열응력을 고려하여 최적화를 할 필요가 있음.
- 최종적으로 전기적, 열적, 구조적 상황이 모두 고려된 형상 최적설계를 통해 버스바 경량화를 하는 것이 본 연구의 목적임.

전계-열-구조 연성 해석의 목적

국부적으로 줄 손실이 크게 발생하는 지점에서의 온도 상승과 그로 인한 열응력 계산

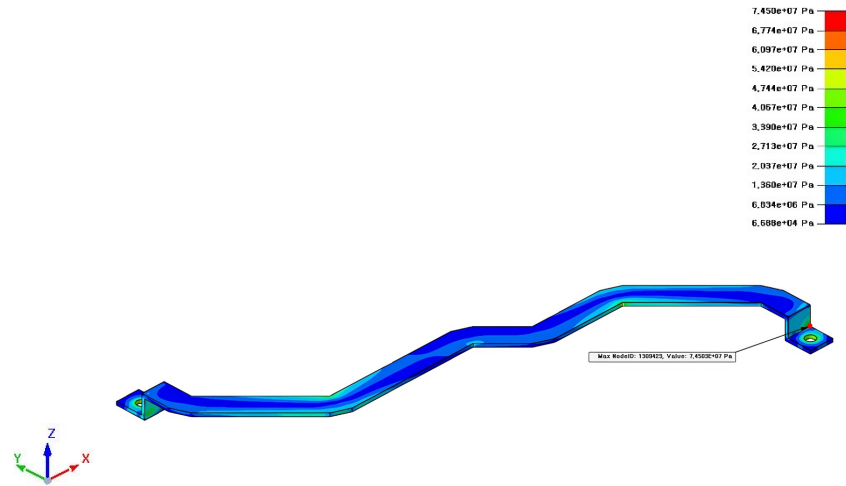
형상 최적 설계의 목적

허용 온도 및 허용 응력을 충족하며, 질량 최소화

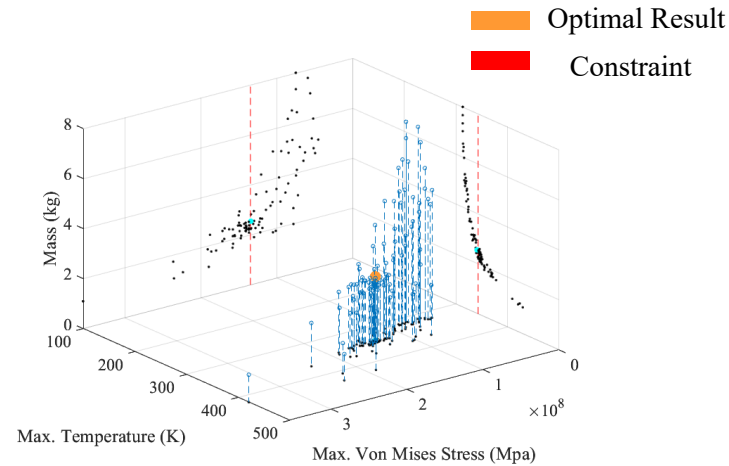
연구 개요

전기자동차 경량화를 위한 전계-열-구조 연성해석 기반 버스바 질량 최소화

- 본 연구에서는 전기자동차의 경량화를 위해 전계-열-구조 연성해석을 기반으로 버스바의 질량을 최소화함.
- 전계-열-구조 연성 해석을 통해, 버스바의 **최대 온도와 최대 Von Mises 응력**을 계산함.
- 형상 최적 설계를 통해 제한 조건을 충족하며 **초기 버스바 대비 1.358 kg (34.8%)이 경량화** 된 버스바를 설계함.
- 6개(아이오닉 5)의 버스바가 장착되는 **전기차 전체 단위**에서 고려하였을 때, **약 8.148 kg 경량화 효과**를 나타냄.



<열 응력 계산 결과>



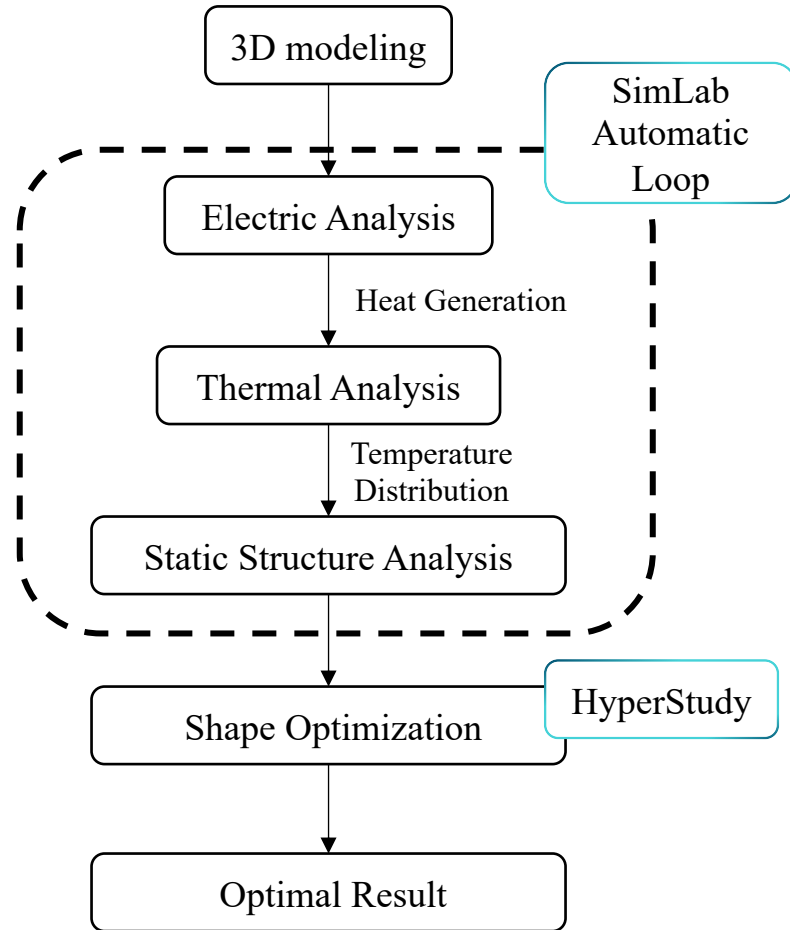
<최적화 과정에서 생성된 데이터 분포>

	초기 버스바	최적화 버스바
Max. Temperature	323.9 K	341.1 K
Max. Von Mises Stress	74.5 MPa	134.1 MPa
Mass	3.900kg	2.542 kg

<초기 버스바 대비 최적화 결과>

연구 개요

전기자동차 경량화를 위한 전계-열-구조 연성해석 기반 버스바 질량 최소화



• 3D 모델링 작업

- CATIA를 이용해 설계 변수의 지정 및 3D 모델링을 수행함.
- SimLab을 이용해 3D 모델링 수정을 자동화함.

• 전계-열-구조 연성해석

- Simlab을 통해 전처리 과정을 수행함.
- Optistruct을 이용해 전계-열-구조 연성해석을 수행함.

• 형상 최적설계

- HyperStudy의 최적화 기능을 적용함.
- GRSM 알고리즘을 이용해 버스바의 질량을 최소화함.

단계	S/W
형상 작업 및 설계 변수 지정	CATIA
자동화, 전처리 및 후처리	SimLab
해석	Optistruct
형상 최적설계	HyperStudy

전계-열-구조 연성해석



버스바 형상

버스바 물성치

버스바 유한요소모델

발열량 계산을 위한 전계 해석

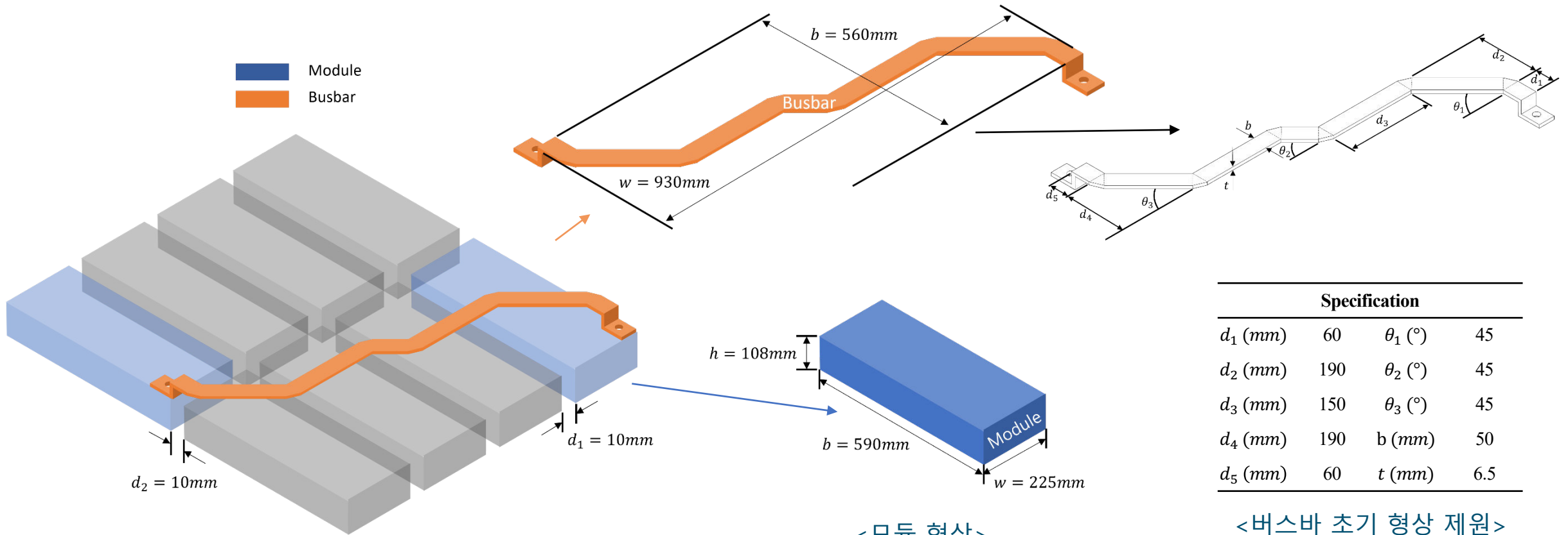
온도 분포 계산을 위한 열 해석

열 응력 계산을 위한 구조 해석

버스바 형상

모듈의 크기 및 배치를 고려한 버스바 형상

- LGES사의 E78 Long Module의 제원을 참고하여, Module의 치수를 선정함.
- 10 mm 간격으로 모듈을 배치하였을 때, 요구되는 버스바의 치수를 적용하여 버스바의 형상을 결정함.



<모듈의 크기 및 배치를 고려했을 때 버스바>

<모듈 형상>

<버스바 초기 형상 제원>

버스바 물성치

KS D 5530에 명시된 버스바 재료의 물성

- KS D 5530에 명시되어 있는 버스바의 재료인 Copper (C1100)를 적용하였고, 전기 전도성이 뛰어난 특징이 있음.

Copper (C1100)	
Density [kg/m^3]	8,933
Elastic modulus [GPa]	110
Poisson's ratio	0.343
Thermal expansion coefficient [K^{-1}]	1.64×10^{-5}
Yield stress [MPa]	202
Thermal conductivity [$W/(m \cdot K)$]	385
Heat capacity [$J/(kg \cdot K)$]	385
Electrical resistivity [Ω]	1.72×10^{-8}

<버스바에 사용되는 Copper(C1100) 물성치>



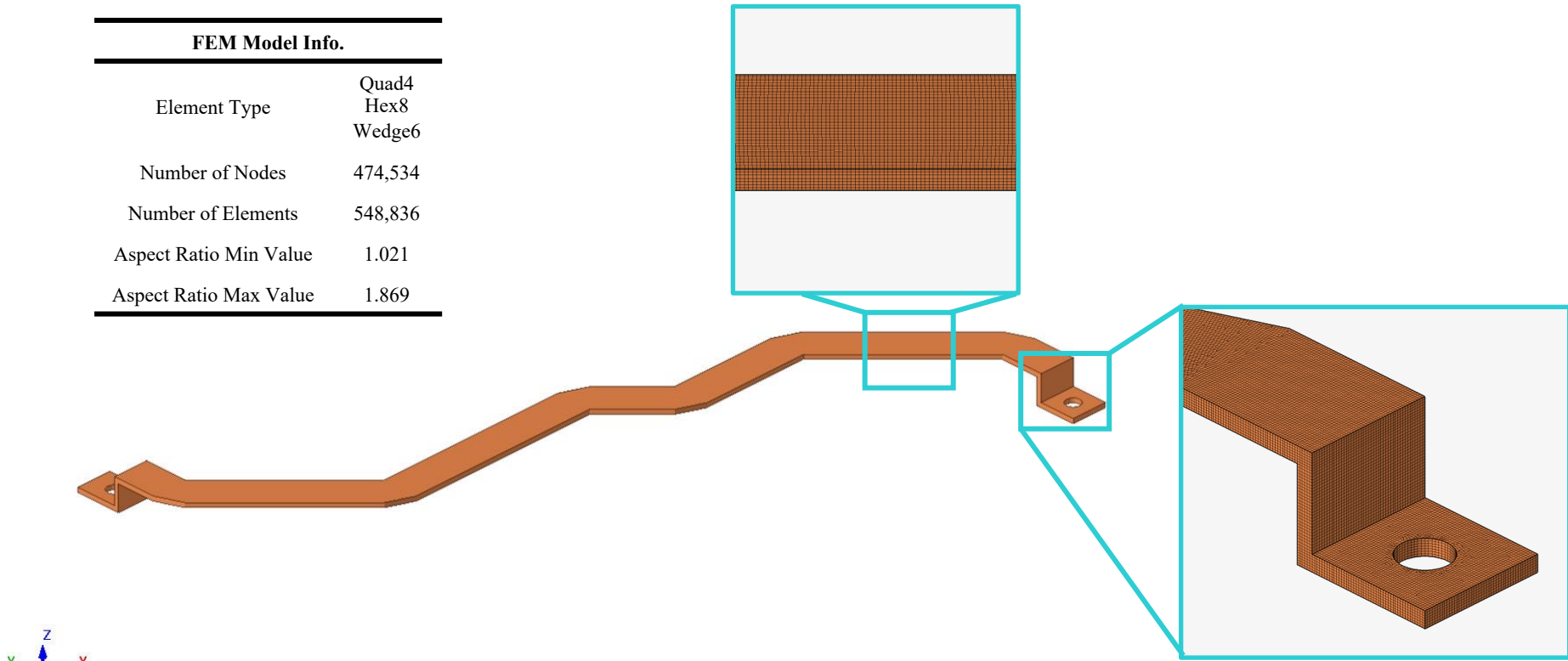
<Copper (C1100)>
출처: 신천 메탈

버스바 유한 요소 모델

초기 버스바에 대한 유한 요소 모델

- 요소 크기를 두께/6 으로 정의하여, 요소의 크기가 두께의 변화를 반영하도록 설정함.
- 초기 버스바는 474,534개의 노드, 548,836개의 요소로 구성되어 있으며, 주로 Quad4, Hex8, Wedge6를 사용함.

FEM Model Info.	
Element Type	Quad4 Hex8 Wedge6
Number of Nodes	474,534
Number of Elements	548,836
Aspect Ratio Min Value	1.021
Aspect Ratio Max Value	1.869



<초기 버스바에 대한 유한 요소 모델>

이론적 배경

전계-열-구조 연성해석

- 전기적 하중을 받는 구조물에 대한 식은 다음과 같음.

$$K_e \varphi = f_c$$

(K_e : 전기 전도도 행렬, φ : 전위차, f_c : 전류)

- 정상 상태에 대한 선형 열전달 해석은 에너지 보존 법칙에 의해 유도되며 식은 다음과 같음.

$$(K_c + H)T = f$$

(K_c : 열 전도 행렬, H : 대류 행렬, T : 온도 벡터, f = 발열량)

- 정적인 하중을 받는 구조물에 대한 식은 다음과 같음.

$$Ku = f$$

위 식을 통해 변위 벡터를 구할 수 있고, 이를 Hook's Law에 적용하여 응력을 계산함.

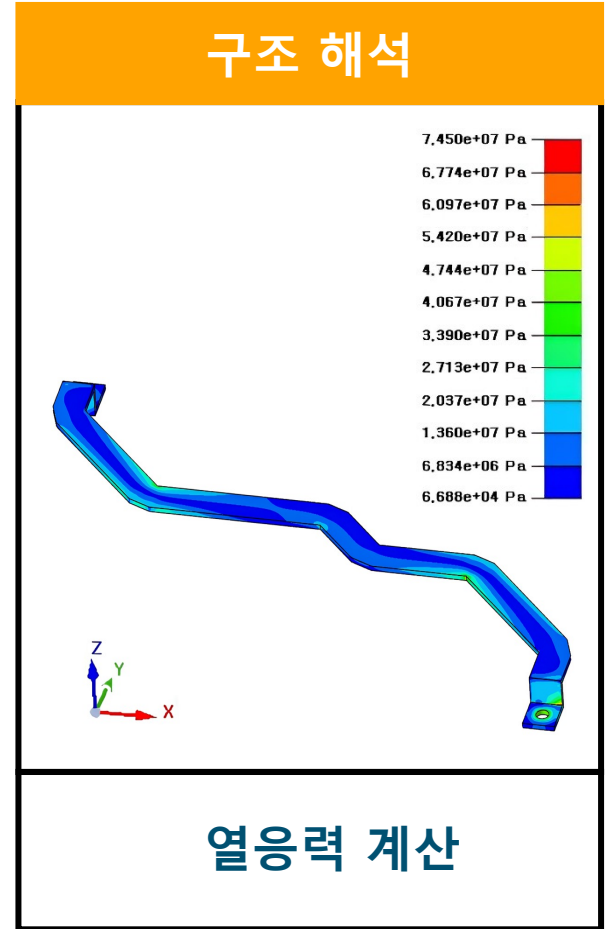
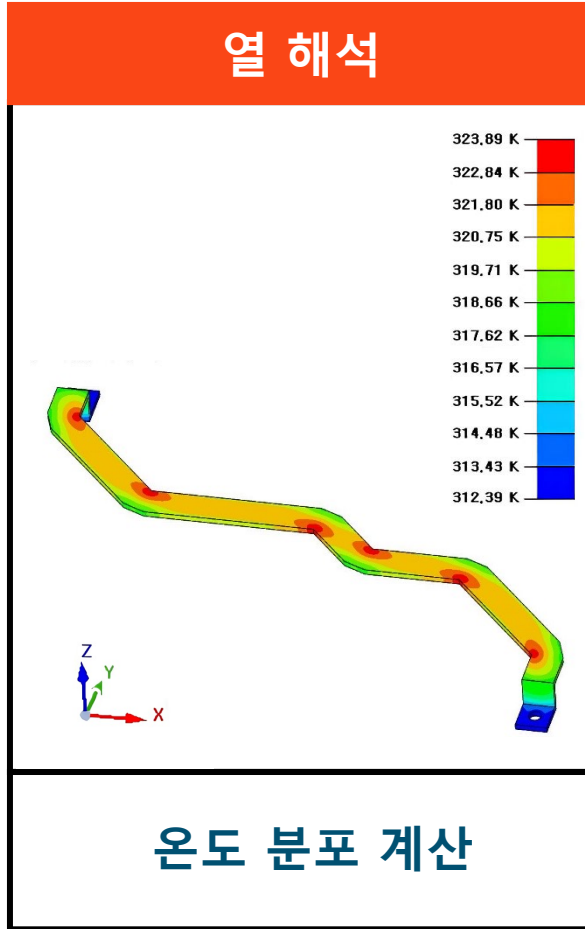
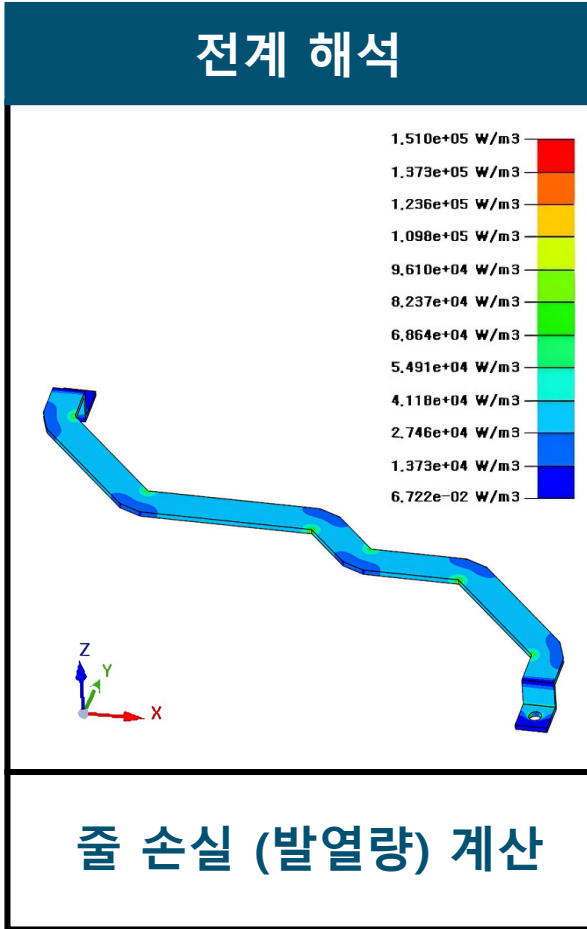
$$\sigma = E \varepsilon_{total}$$

$$\varepsilon_{total} = \varepsilon + \varepsilon_{thermal}$$

(K : 강성 행렬, u : 변위 벡터, f : 하중 벡터, σ : 응력, E : 탄성 계수 행렬, ε : 변형률 벡터, ε_{th} : 열 변형률 벡터)

이론적 배경

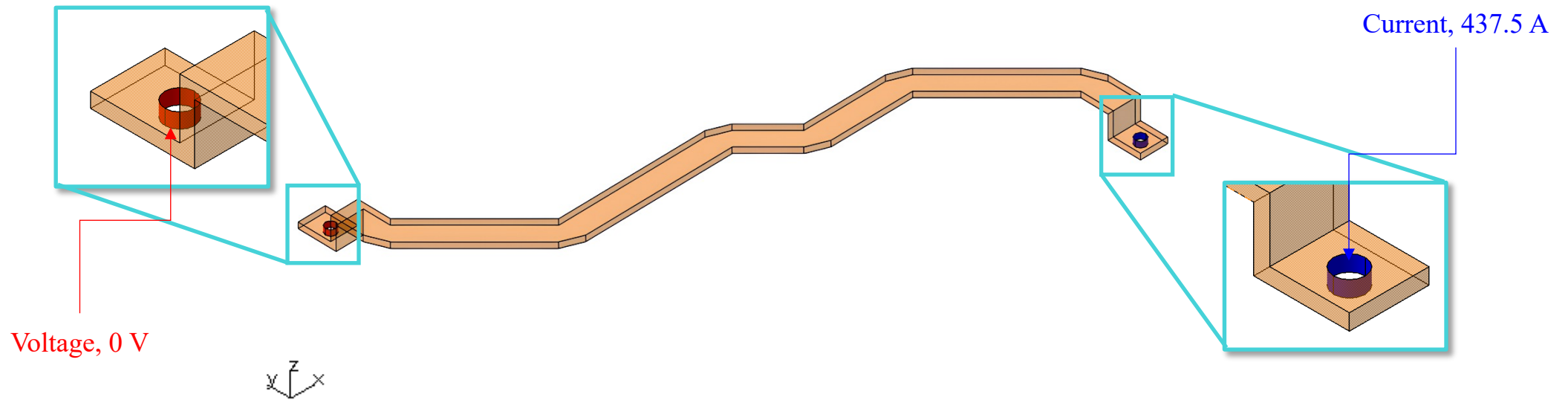
전계-열-구조 연성해석 개요



발열량 계산을 위한 전계 해석

전계 해석 경계조건

- 350 kW급 급속 충전 시, 800 V 전기차 시스템에는 전력공식에 따라, $\frac{350 \text{ kW}}{800 \text{ V}} = 437.5 \text{ A}$ 의 전류가 흐르게 됨.
- 모듈이 전부 직렬로 연결되어 있을 때, 버스바에는 모두 437.5 A의 전류가 흐른다고 가정함.

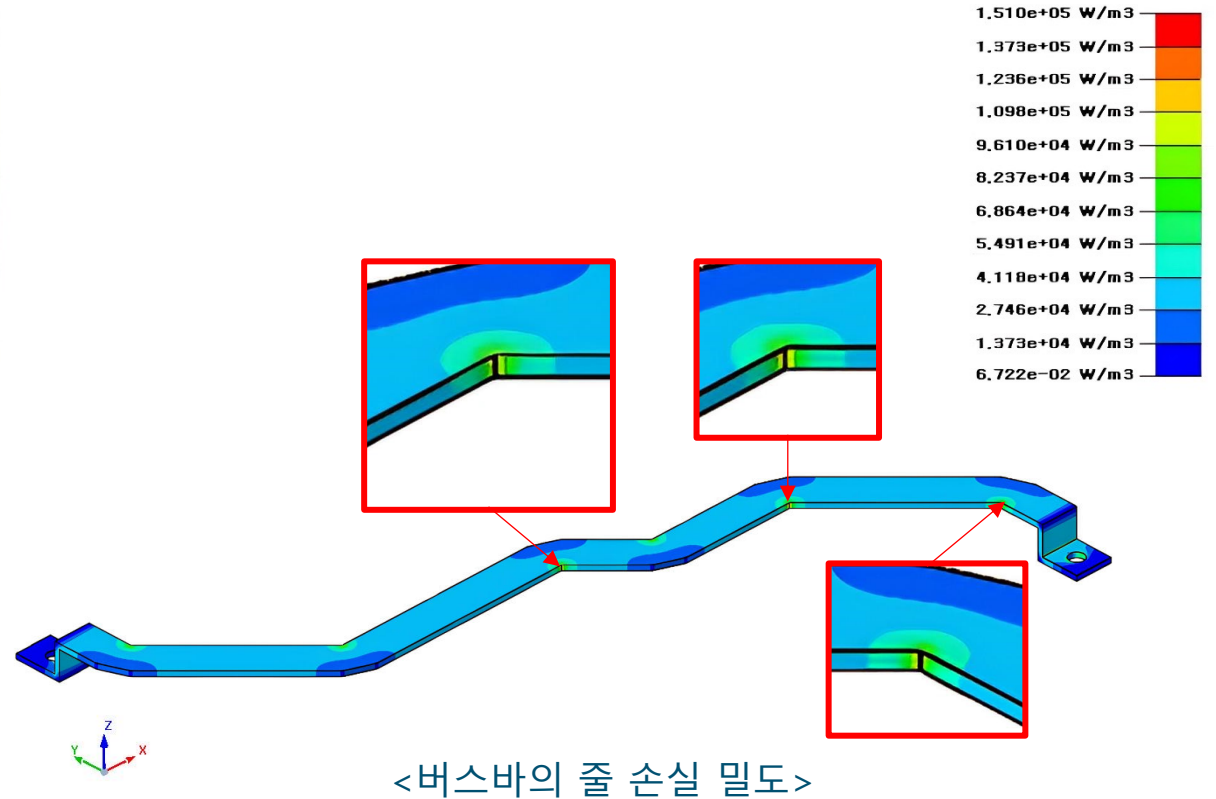
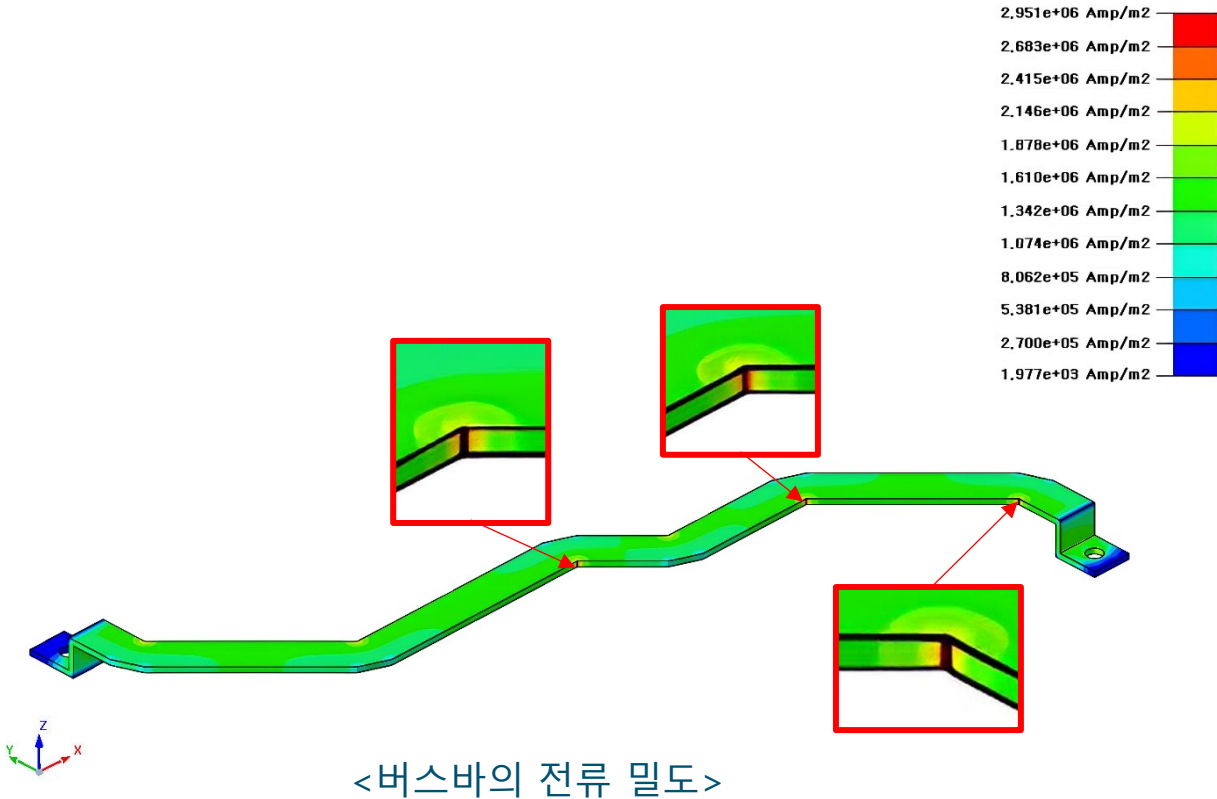


<전류 및 전압 경계조건>

발열량 계산을 위한 전계 해석

전계 해석 결과

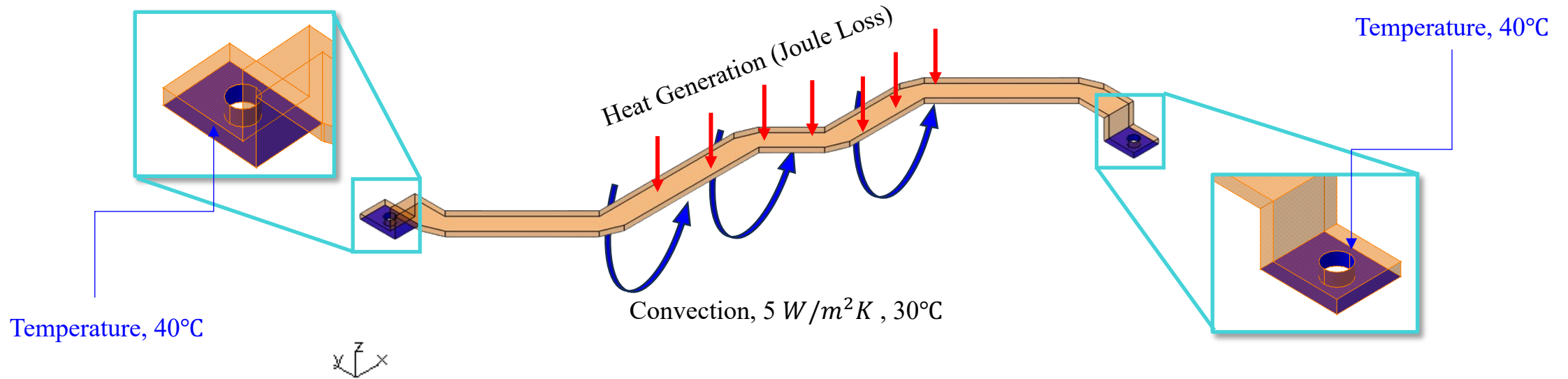
- 정상 상태에 대한 전계 해석 결과, 국부적으로 전류 밀도 및 줄 손실 밀도가 큰 지점이 나타남.
- 줄 손실 밀도 결과를 통해 위치에 따른 발열량을 계산, 이를 열 해석의 발열량으로 인가함.



온도 분포 계산을 위한 열 해석

발열량 인가 및 열 해석 경계조건

- 전계 해석으로부터 계산한 발열량을 대입함.
- 모듈과 접하고 있는 면은 모듈의 온도를 40도로 가정하여 온도 경계조건을 대입함.
- 나머지 면들은 자연대류 상황이므로, 대류 계수 $5 \text{ W/m}^2\text{K}$ 을 가정하고, 외기온도는 30도로 가정함.

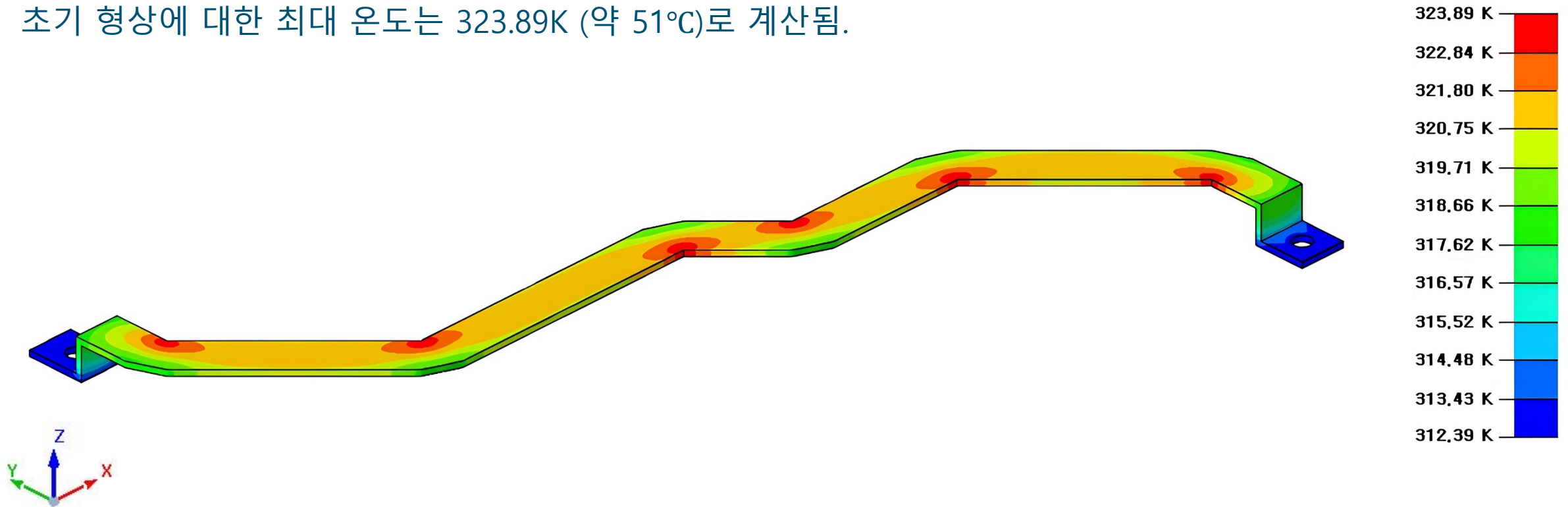


<발열량 인가 및 열 해석 경계조건>

온도 분포 계산을 위한 열 해석

열 해석 결과

- 정상 상태에 대한 열 해석 결과, 전계 해석에서 줄 손실이 높았던 지점들에서 높은 온도가 발생함.
- 열 해석 결과를 통해서 **온도 분포**를 계산하여, 이를 구조해석의 **열 하중**으로 인가함.
- 초기 형상에 대한 최대 온도는 323.89K (약 51°C)로 계산됨.

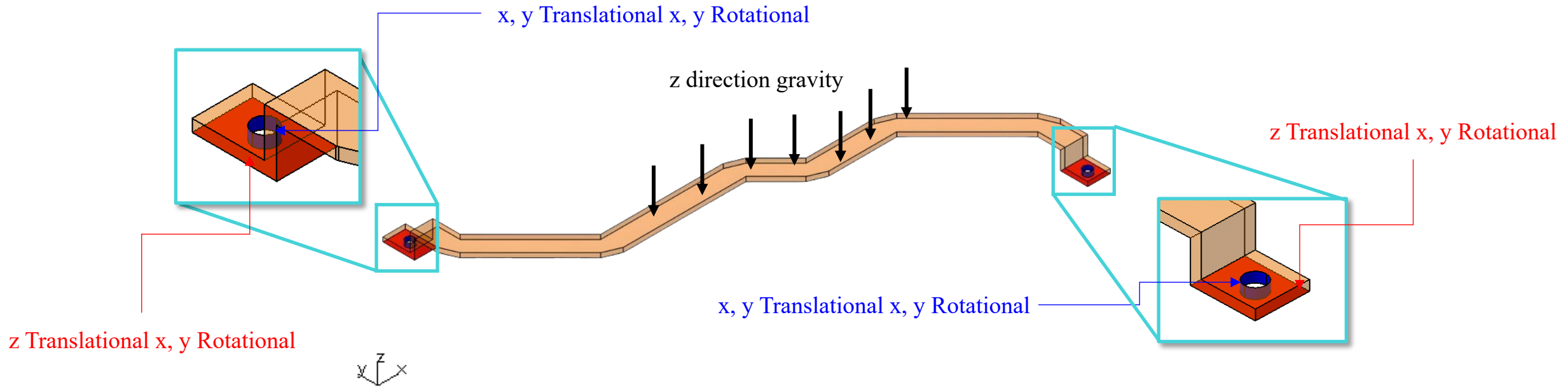


<버스바의 온도분포 결과>

열 응력 계산을 위한 구조 해석

구조 해석 구속조건 및 하중 조건

- 바닥면은 병진 자유도에 대해 z축 방향, 회전 자유도에 대해 x, y축 방향으로 변위 구속 조건을 대입함.
- 안쪽면은 병진 자유도에 대해 x, y축 방향, 회전 자유도에 대해 x, y축 방향으로 변위 구속 조건을 대입함.
- 모듈과 버스바 접촉면에서의 마찰은 고려하지 않고, z축 방향으로 중력을 인가함.

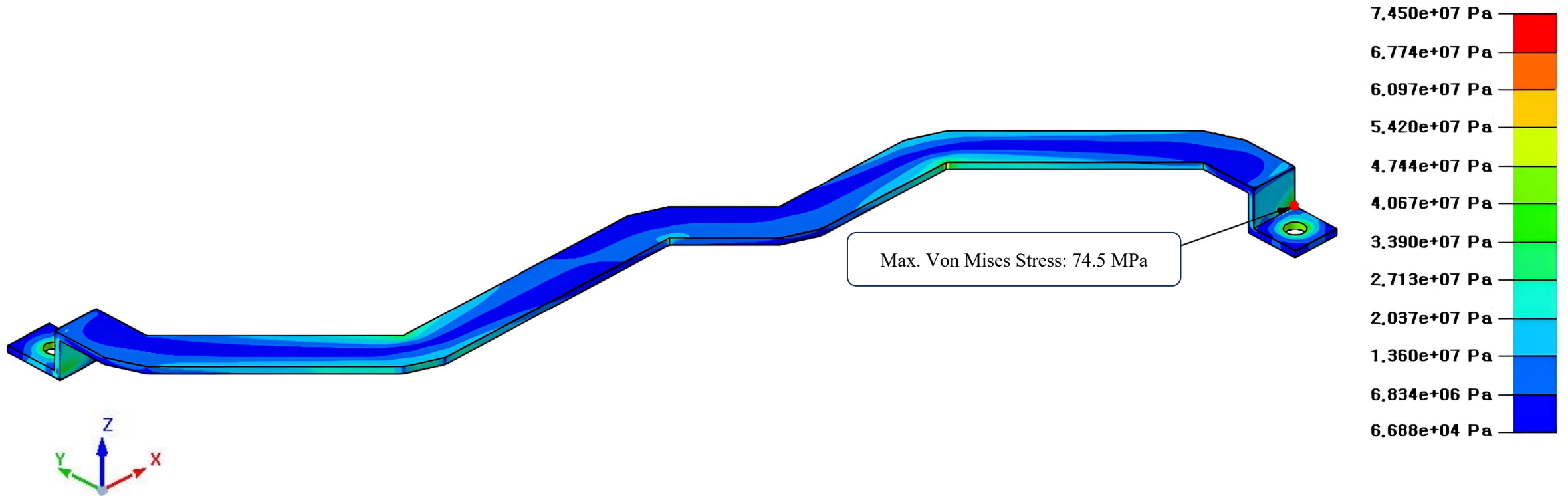


<구속 조건 및 하중 조건>

열 응력 계산을 위한 구조 해석

구조 해석 결과

- 정적 하중에 대한 구조 해석 결과, 모듈과의 거리를 위해 구부러진 지점에서 최대 Von Mises 응력이 발생함.
- 발생한 최대 Von Mises 응력은 74.5 MPa로 ,안전 계수는 2.71임.



<본 미세스 응력 결과>

형상 최적설계를 통한 질량 최소화

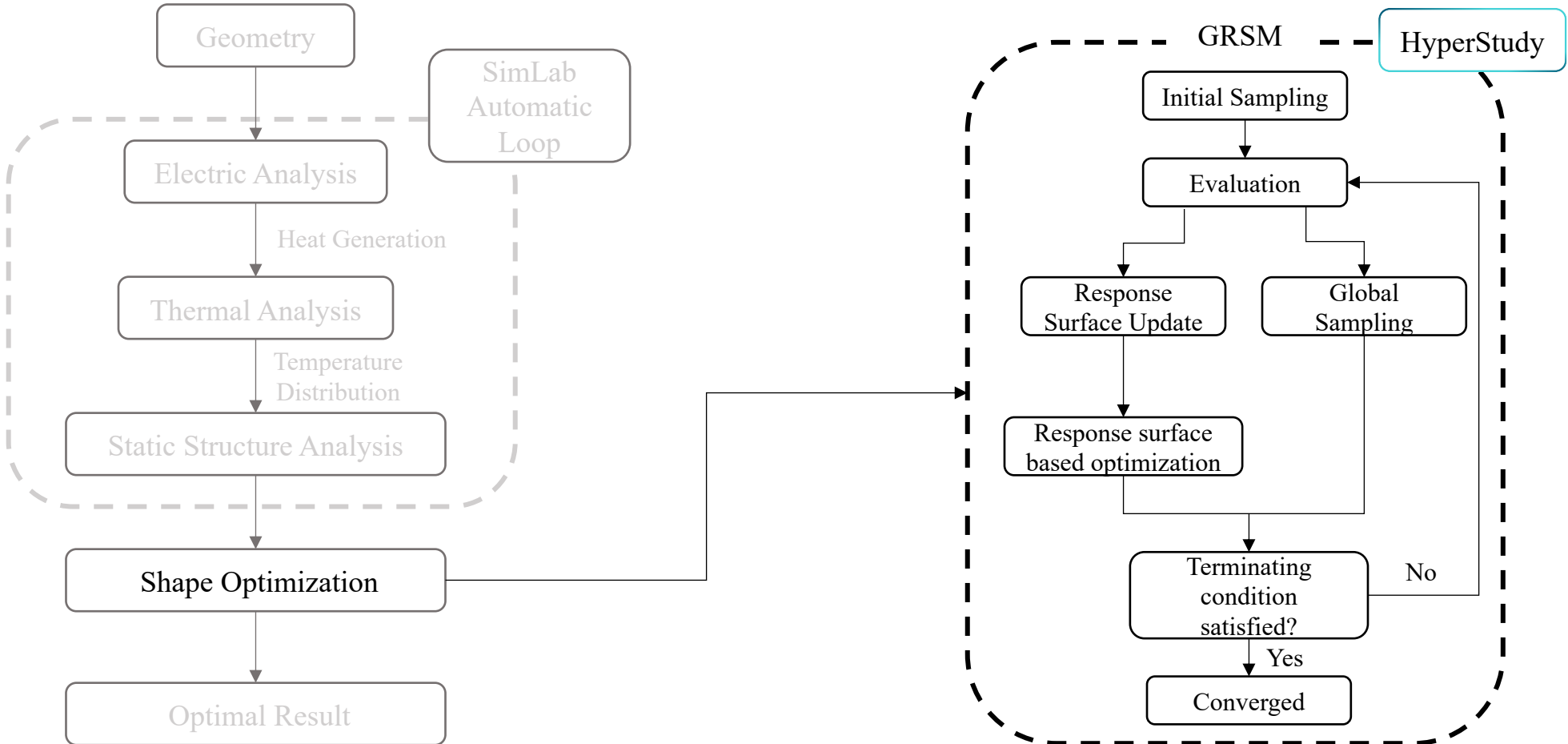


형상 최적설계 개요
설계 변수 선정 및 설계 정식화
최적화 결과

형상 최적설계 개요

Global Response Surface Method를 통한 질량 최적화

- 반응 표면 기반인 Global Response Surface Method(GRSM)을 적용하여 최소 질량에 대한 전역 최적화를 수행함.



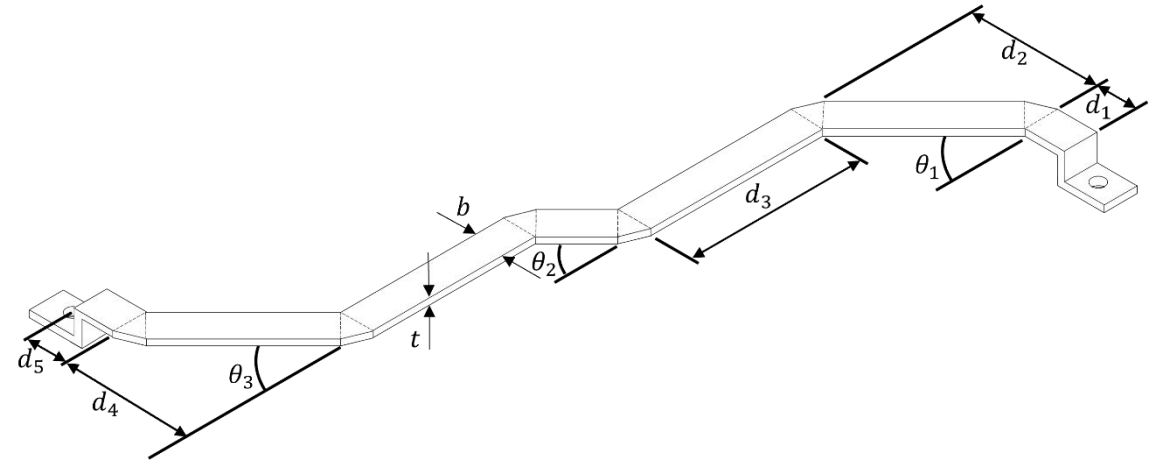
설계 변수 선정 및 설계 정식화

- 아래의 그림과 같이 설계 변수를 선정하였고, 목적 함수는 질량으로 설정하여, 최소화하는 것이 목적임.
- Joseph Vidosic이 제안한 기준으로 안전 계수 1.5를 선정하여 **134.7 MPa의 최대 Von Mises 응력 (σ_{max}) 제한 조건**을 선정함.
- KS C IEC60364-5-52 (피복재의 최대허용온도)를 기준으로 **70도의 최대 온도 (T_{max}) 제한 조건**을 선정함.

Find $d_i (i = 1, \dots, 5), \theta_i (i = 1, \dots, 3), t, b$

Minimize Min Mass (kg)

Subject to $\sigma_{max} \leq 134.7 (Mpa)$
 $T_{max} \leq 343.15 (K)$
 $36 (mm) < d_1 < 84 (mm)$
 $114 (mm) < d_2 < 266 (mm)$
 $90 (mm) < d_3 < 210 (mm)$
 $114 (mm) < d_4 < 266 (mm)$
 $36 (mm) < d_5 < 84 (mm)$
 $27 (^\circ) < \theta_1 < 63 (^\circ)$
 $27 (^\circ) < \theta_2 < 63 (^\circ)$
 $27 (^\circ) < \theta_3 < 63 (^\circ)$
 $30 (mm) < b < 70 (mm)$
 $3 (mm) < t < 10 (mm)$

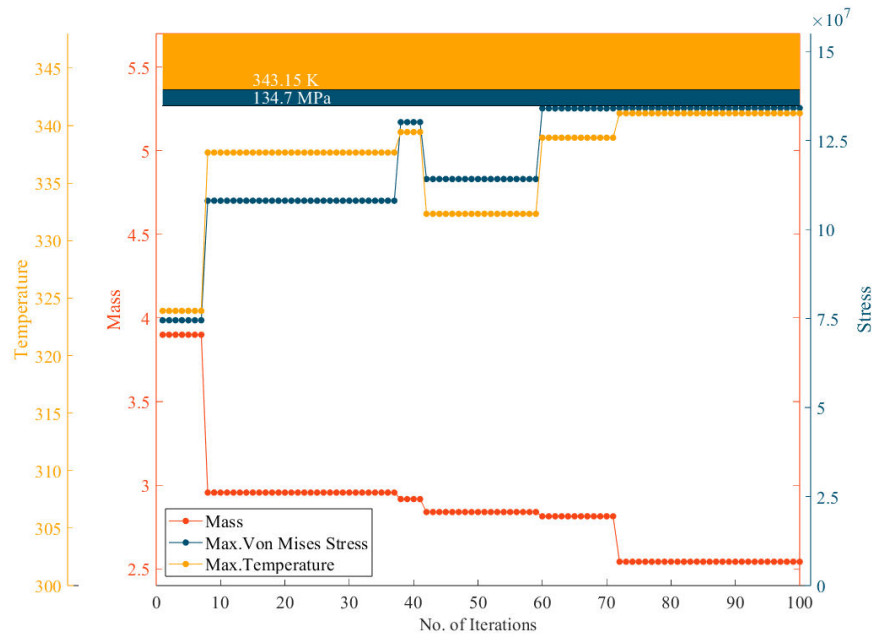


<버스바의 설계 변수>

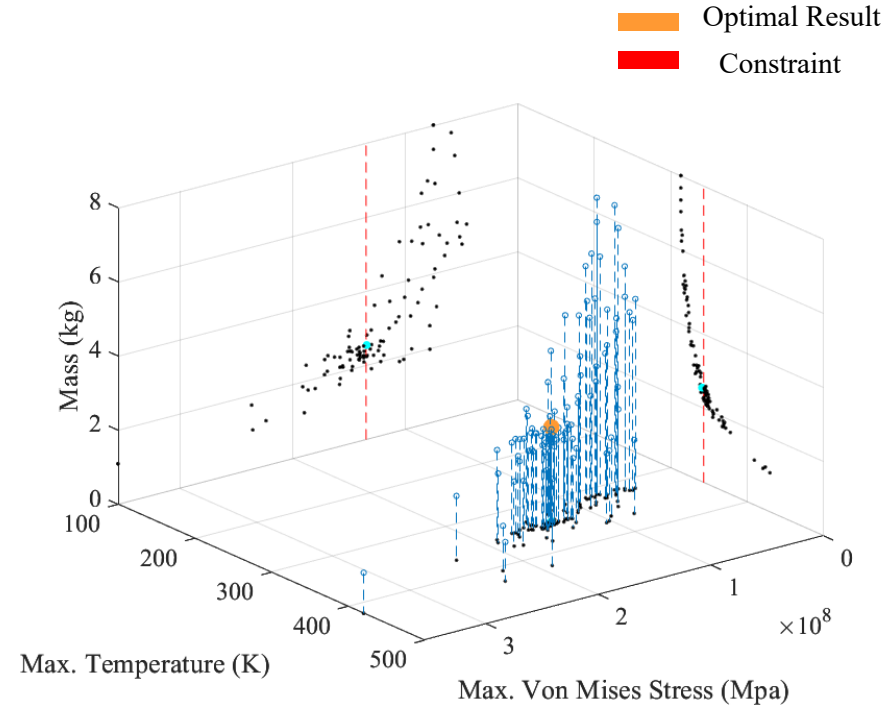
최적화 결과

반복 횟수에 따른 목적함수 수렴 확인 및 최적화 결과

- 반복 횟수는 총 100번을 적용하였으며, **72번째에서 최적 값**을 찾음.
- 제한 조건을 충족하는 값에 대해서 목적 함수의 수렴과정은 아래 그래프와 같음.
- 형상 최적 설계를 통해 최대 온도 341.07 K, 최대 Von Mises 응력 134.1 MPa, **질량 2.542 kg**인 버스바를 설계함.



<목적 함수의 수렴 과정>



<최적화 과정에서 생성된 데이터 분포>

결론

결론

버스바 질량 최소화를 통한 전기자동차 경량화 결과

- 전계-열-구조 연성 해석을 통해 버스바의 형상에 따른 국부적인 온도 상승과 이로 인한 열 응력을 계산함.
- 최적화 결과, 최대 온도 341.07 K, 최대 Von Mises 응력 134.1 MPa, **질량 2.542 kg**인 버스바를 설계함.
- 형상 최적설계 결과, 제한조건을 충족하면서 초기 버스바에 비해 **최대 1.358 kg** 경량화 된 버스바를 설계함.
- 이는 6개(아이오닉 5)의 버스바가 장착되는 전기차 기준으로 보았을 때, **최대 8.148 kg**의 경량화 효과를 나타냄.

Specification			
d_1 (mm)	60	θ_1 (°)	45
d_2 (mm)	190	θ_2 (°)	45
d_3 (mm)	150	θ_3 (°)	45
d_4 (mm)	190	b (mm)	50
d_5 (mm)	60	t (mm)	6.5

<버스바 초기 형상 제원>

Specification			
d_1 (mm)	74.62	θ_1 (°)	43.85
d_2 (mm)	121.9	θ_2 (°)	62.04
d_3 (mm)	133.7	θ_3 (°)	60.78
d_4 (mm)	194.8	b (mm)	56.78
d_5 (mm)	66.40	t (mm)	3.605

<버스바 최적화 형상 제원>

	초기 버스바	최적화 버스바
Max. Temperature	323.9 K	341.1 K
Max. Von Mises Stress	74.5 MPa	134.1 MPa
Mass	3.900kg	2.542 kg

<초기 버스바와 최적화 된 버스바의 성능>



감사합니다

강병호 | Byeongho Kang | ex1067@konkuk.ac.kr
박천하 | Cheonha Park | secop1004@konkuk.ac.kr