

고열 방지를 위한 열 해석 및 위상최적화를 통한 전기 자전거용 리튬 이온 배터리 팩 최적 설계

사랑의 빠떼리

건국대학교 기계공학부

박종진

지도교수: 김 창 완



서론	배터리 간극 열 해석 및 최적화	배터리 팩 설계 & 열-구조 연성 해석	위상 최적화	최종 설계
연구 주제	해석 개요	Vent 개요	위상 최적화 개요	최종 설계 안
연구 배경	해석 모델	vent 설계	위상 최적화	최종 결론
연구 목적	해석 조건	열-구조 연성 해석	최적화 모델 검증	
연구 절차	해석 결과 & 최적화	해석 분석		
	분석 & 결론			

1. 서 론

- 1) 연구 주제
- 2) 연구 배경
- 3) 연구 목적
- 4) 연구 절차





리튬 이온 배터리 & 팩

■ 배터리 역할

- 차세대 미래 에너지원으로써 다른 배터리에 비해 **가볍고** 높은 에너지 밀도로 **고용량, 고효율** 구현 가능

■ 배터리 팩 역할

- 다량의 배터리 **체결**
- 배터리의 파손 **방지**





- 휴대폰, 자전거, 자동차 양산 시작
- 리튬 이온 배터리가 일상생활에 많이 사용
- 비행기 테스트단계 돌입

4. 추위도, 더위도 배터리 건강에 해롭다

'겨울에는 날이 추워서 배터리가 더 빨리 소모된다'고 하는 사람도 있다. 정확히는 온도가 너무 낮으면 배터리 소모량에는 큰 변화를 주지 않지만 배터리 내 분자 활동이 둔해져 배터리의 총 용량 자체가 줄어든다. 예를 들어 영하 10도에서 배터리 용량은 실온의 50~60%로 줄어든다. 낮은 온도에서는 리튬 이온의 이동 속도가 둔해져 배터리가 빨리 닳는 것이다. 물이 얼면 흐르기 어렵듯 배터리 속 전해질(액체)도 움직임이 느려지는 원리이다.

이럴 경우 핫팩 등을 이용해 배터리를 따뜻하게 만들어주면 성능을 회복할 수 있다. 영하의 온도에 슬기전화를 장시간 노출하는 것은 배터리 성능에 치명적이므로 가방 속에 넣어두거나 헝겊 케이스를 사용하는 것이 좋다. 또한 추위로 전원이 갑자기 꺼지면, 그 자리에서 바로 켜면 기기가 손상될 수 있으니 실내로 들어가 기기가 정상 온도를 되찾은 다음에 전원을 켜는 것이 좋다.

다행히 겨울이 지나고 봄이 왔다. 그러나 겨울보다 여름에 배터리 사용에 더 조심해야 할 수도 있다. 열은 배터리의 수명을 줄이는 가장 나쁜 요소 중 하나이다. 노트북 같은 경우 사용할 때나 켜진 뒤 노트북을 보관할 때는 통풍이 잘 되는 서늘한 곳이 좋다. 특히 더운 여름철 차 안이나 난방이 잘 되는 겨울철 실내에서 노트북을 사용하거나 보관하는 것은 노트북 배터리 성능을 저하시킨다.

출처: 이한영, 「슬기전화, 올바른 배터리 관리는 어떻게?」, 우리 문화 신문, 2019.04.12

J | A | C | S
JOURNAL OF THE AMERICAN CHEMICAL SOCIETY

pubs.acs.org/JACS

Article

Operando Identification of the Chemical and Structural Origin of Li-Ion Battery Aging at Near-Ambient Temperature

Min-Seob Kim,[§] Byoung-Hoon Lee,[§] Jae-Hyuk Park,[§] Hyeon Seok Lee, Wytse Hooch Antink, Euiyeon Jung, Jiheon Kim, Tae Yong Yoo, Chan Woo Lee, Chi-Yeong Ahn, Seok Mun Kang, Jinsol Bok, Wonjae Ko, Xiao Wang, Sung-Pyo Cho, Seung-Ho Yu,* Taeghwan Hyeon,* and Yung-Eun Sung*

Cite This: *J. Am. Chem. Soc.* 2020, 142, 13406–13414

Read Online

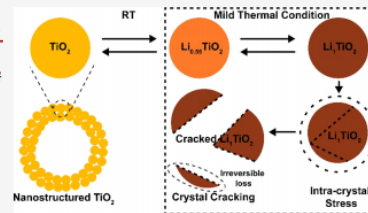
ACCESS |

Metrics & More

Article Recommendations

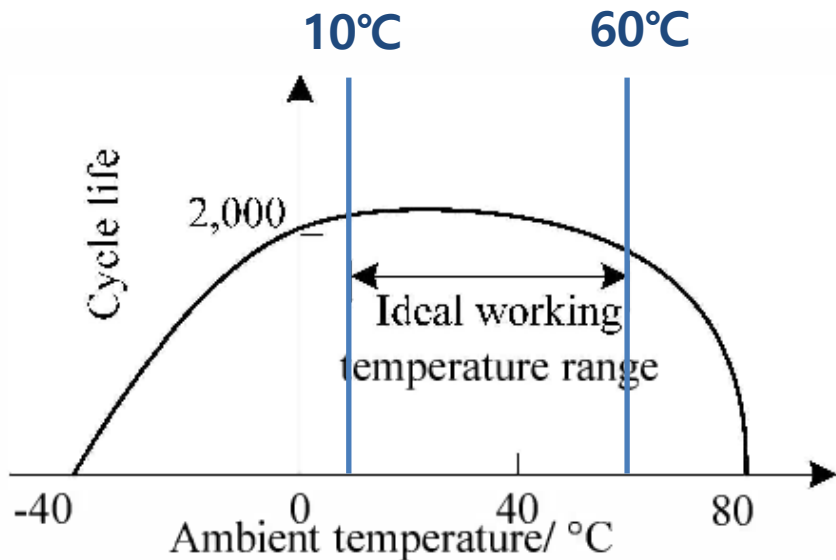
Supporting Information

ABSTRACT: Integrated with heat-generating devices, a Li-ion battery (LIB) often operates at 20–40 °C higher than the ordinary working temperature. Although macroscopic investigation of the thermal contribution has shown a significant reduction in the LIB performance, the molecular level structural and chemical origin of battery aging in a mild thermal environment has not been elucidated. On the basis of the combined experiments of the electrochemical measurements, Cs-corrected electron microscopy, and in situ analyses, we herein provide operando structural and chemical insights on how a mild thermal environment affects the overall battery performance using anatase TiO₂ as a model intercalation compound. Interestingly, a mild thermal condition induces excess lithium intercalation even at near-ambient temperature (45 °C), which does not occur at the ordinary working temperature. The anomalous intercalation enables excess lithium storage in the first few cycles but exerts severe intracrystal stress, consequently cracking the crystal that leads to battery aging. Importantly, this mild thermal effect is accumulated upon cycling, resulting in irreversible capacity loss even after the thermal condition is removed. Battery aging at a high working temperature is universal in nearly all intercalation compounds, and therefore, it is significant to understand how the thermal condition contributes to battery aging for designing intercalation compounds for advanced battery electrode materials.

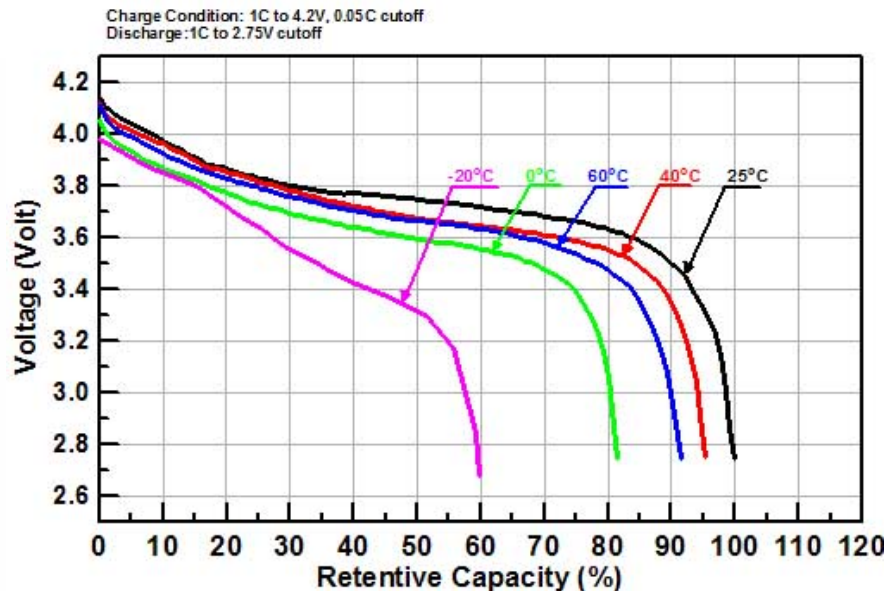


출처: 고려대 공동연구, 「Operando Identification of the Chemical and Structural Origin of Li-Ion Battery Aging at Near-Ambient Temperature」, *JACS*, 2020.08.23

발열이 심할수록 배터리 수명 및 성능 저하



출처: A.Hannan, "State-of-the-Art and Energy Management system of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicle Applications: Issues and Recommendations", IEEE, 2018.04.23



- 25°C ~40°C 일 때 최고 효율
- 10°C~60°C 일 때 이상적인 작동 온도 범위
- 40°C 이상온도가 올라갈수록 배터리 수명 단축

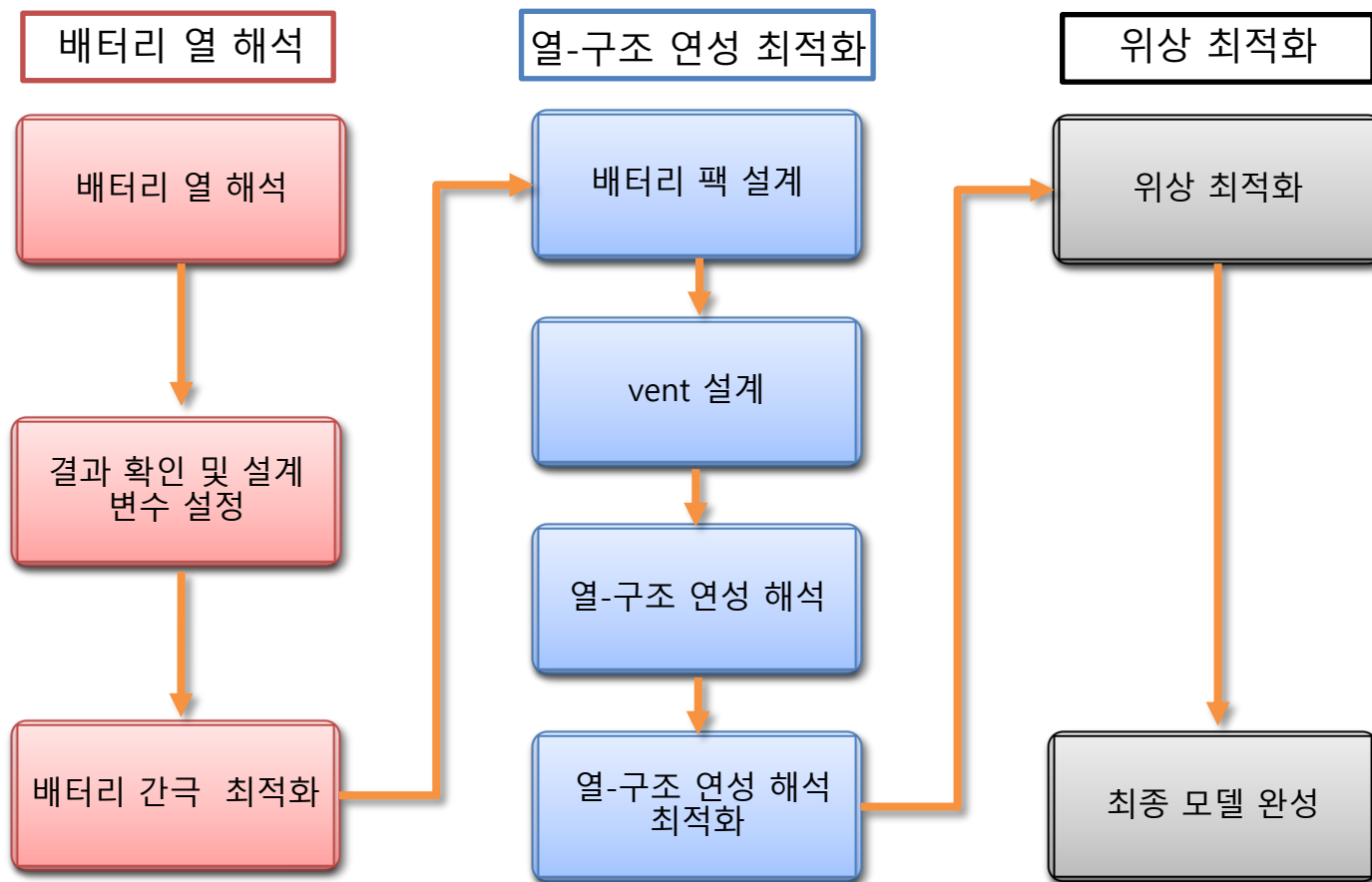


배터리의 **폭발** 상황 방지

배터리 수명 **단축** 방지

배터리 팩 무게 **down**

고열 방지와 경량화를 고려한 배터리 팩 설계



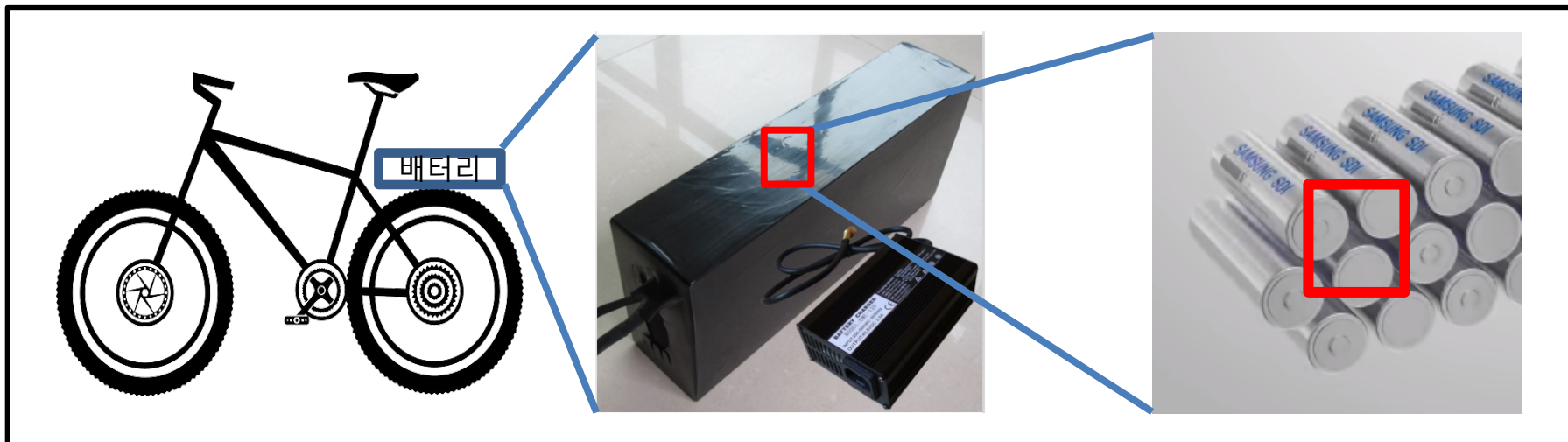
2. 배터리 간극 열 해석 및 최적화

- 1) 해석 개요
- 2) 해석 모델
- 3) 해석 조건
- 4) 해석 결과 & 최적화
- 5) 분석 & 결론



- 해석 개요
 - 팩 모델을 디자인하기에 앞서 배터리의 열 해석 분석
- 해석 목적
 - 배터리 간극에 따른 온도 확인
 - 배터리 온도를 낮추기 위한 배터리 간극 최적화 진행
- 개선 방향
 - 발견된 문제점의 해결 방향으로 진행

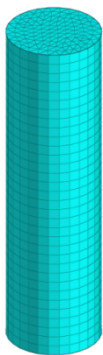




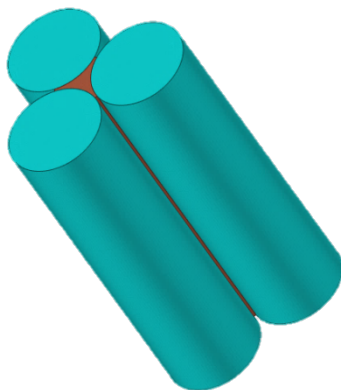
명칭	무게	사이즈 [mm]
360WH 리튬이온 배터리 자전거 팩	3.82kg	270x80x65mm
리튬 이온 배터리	개당 50g	지름 18mm, 높이 65mm

360Wh급 배터리는 13 series, 3parallel 39개로 구성

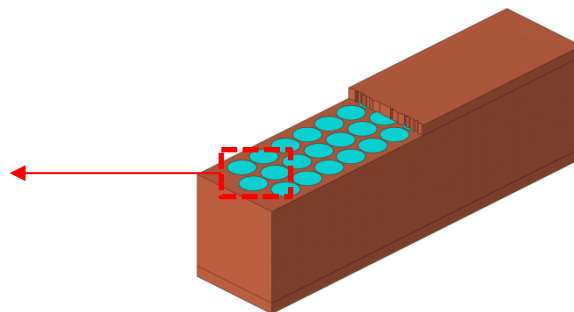
- 배터리 모델
 - 원통형 모델
 - 배터리에서 발생하는 열을 통한 팩의 온도 확인
- 3개의 배터리 간극 팩 모델
 - 배터리의 체결을 위한 모델
 - 배터리 팩 내부 온도 확인



[배터리 3D 모델]



[배터리 간극 3D 해석 모델]



[배터리 팩 3D 모델]

- 열해석을 위한 배터리와 팩의 재료 물성치

명칭	재료	밀도 [kg/m^3]	비열 [$J/kg \cdot K$]	열전도도 [$W/m \cdot K$]
360WH 리튬이온 배터리 자전거 팩	Aluminum	2720	903	237
리튬 이온 배터리	LI-ion	2680	1280	28



- 알루미늄 선정 이유

- 철보다 높은 열전도도



냉각에 유리

- 철보다 낮은 밀도



경량화에 유리

- 재질 자체의 디자인 가능

- 뛰어난 가공 가능

- 배터리의 Heat flux (W/mm^2) 계산

- 배터리의 넓이 계산

$$2\pi rh + 2\pi r^2 = (2 * \pi * 9 * 65) + (2 * \pi * 81) = 4184.54mm^2$$

- 배터리의 개수 (39개)

$$4184.54 * 39 = 163197.08mm^2$$

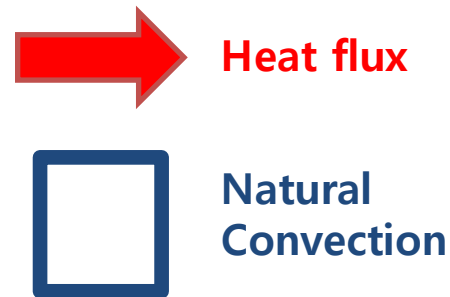
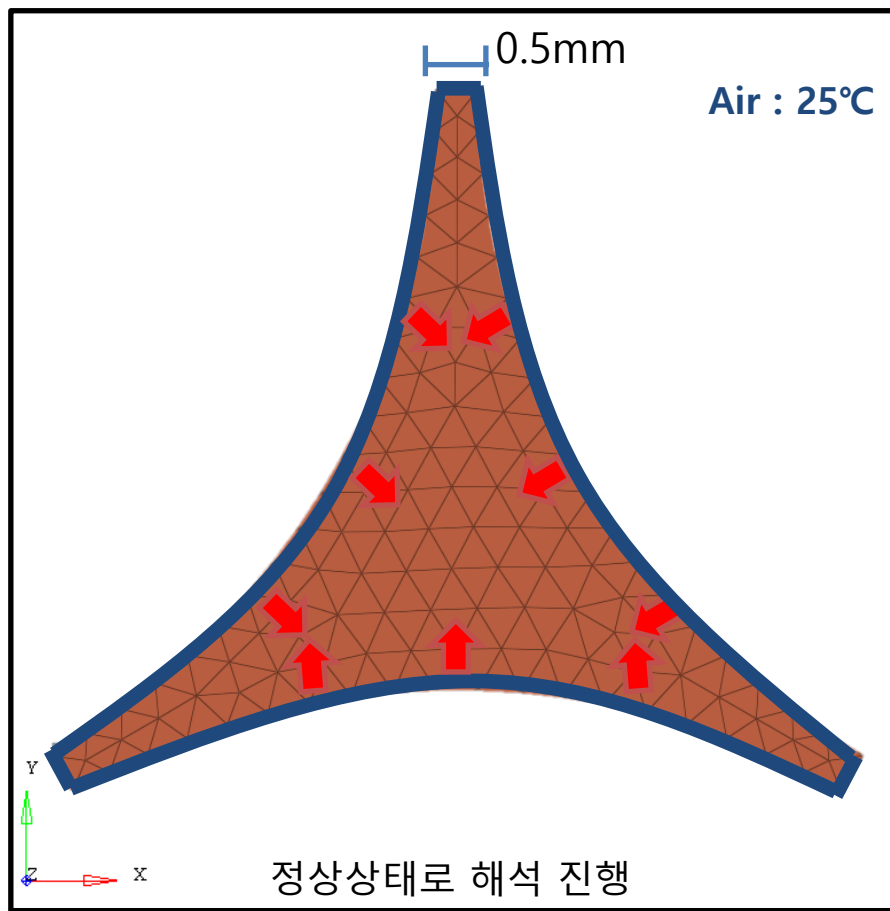
- 배터리 1개 당 Heat flux 계산 값

$$360W / 163197.08mm^2 \approx 0.002 W/mm^2$$

h = 배터리 높이 [mm]

r = 배터리 반지름 [mm]

360W = 배터리 팩 전력



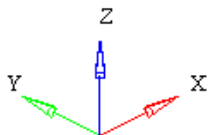
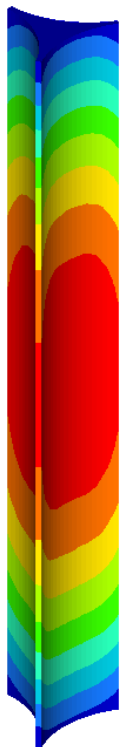
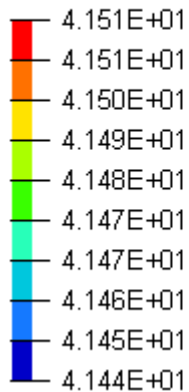
전도 대류 해석

Conduction: 배터리의 heat flux ($0.002\text{W}/\text{mm}^2$) 기입

Convection: 주변온도 (25°C)

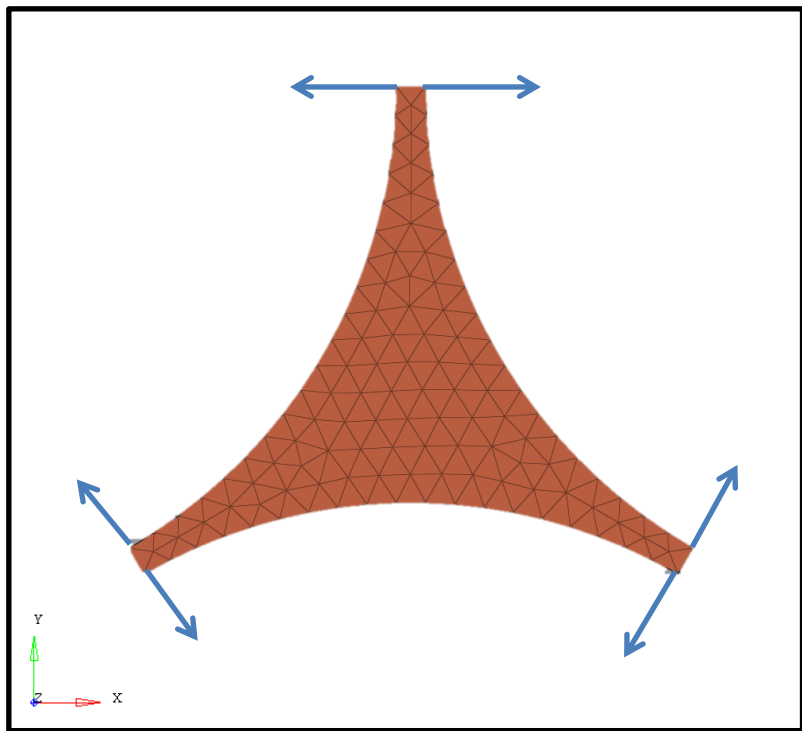
배터리간 초기 거리: 0.5mm 설정

Contour Plot
Grid Temperatures(Temperatures)



- 최고 온도 41.5℃
 - 배터리는 25℃ ~ 40℃ 일 때 보유하고 있는 에너지 100% 활용 가능
- 온도를 40℃ 까지 떨어뜨리는 것을 목표
 - 간극 최적화 진행

- 간극 최적화를 하기 위한 과정



간극 최적화 진행

[목적 함수] – 온도 최소화

[제약 조건] – 온도 40℃ 까지 허용

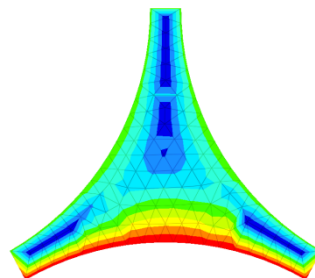
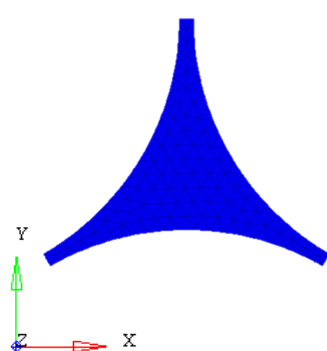
[설계 변수] – 배터리 팩 길이 고려하에 설정

$$0.5\text{mm} < X < 1\text{mm}$$

배터리 팩 길이 270mm

Contour Plot
Shape Change(Mag)
Analysis system

5.000E-01
4.444E-01
3.889E-01
3.333E-01
2.778E-01
2.222E-01
1.667E-01
1.111E-01
5.556E-02
0.000E+00

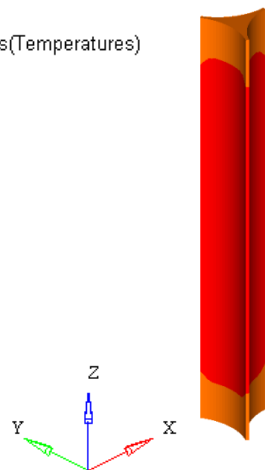


■ 배터리 간극 최적화 결과 값

- X 좌우 축으로 각각 +0.25 변환
- Y축으로 +0.5 변환

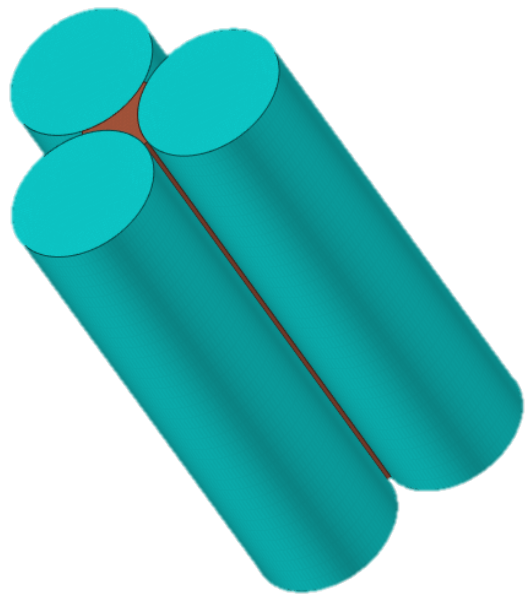
Contour Plot
Grid Temperatures(Temperatures)

4.151E+01
4.147E+01
4.143E+01
4.100E+01
4.079E+01
4.058E+01
4.057E+01
4.056E+01
4.050E+01
4.000E+01



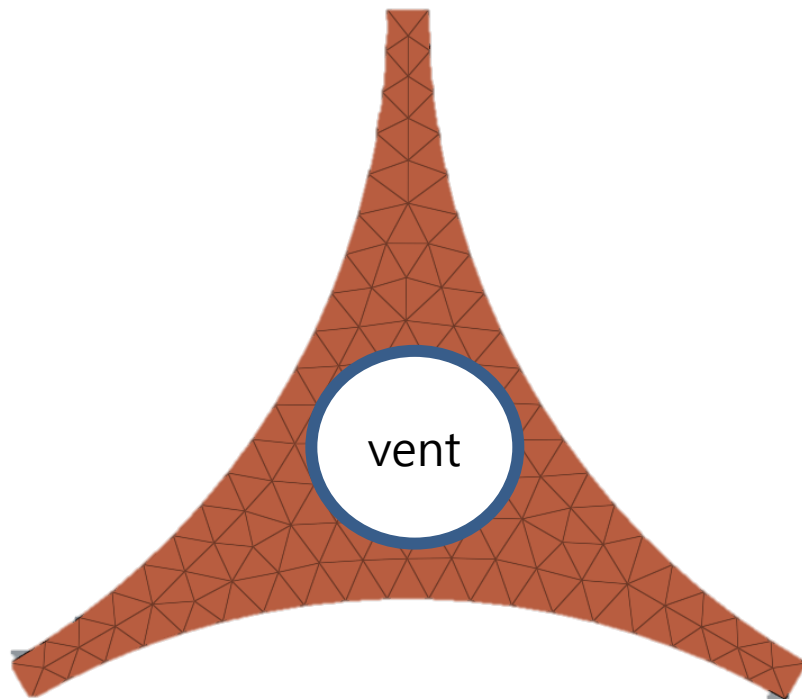
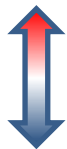
■ 온도 최적화 결과 값

- 41.51°C -> 40.58°C 온도 변환



분석

- 너무 멀어지면 무게, 크기
- 배터리 사이가 멀면 온도
- 자전거에 장착하기에는 **부적합** 판단



결론

- 최적화 결과 바탕 토대로 진행
- 배터리 중간지점 vent 설계 필요

3. 배터리 팩 설계 & 열-구조 연성해석

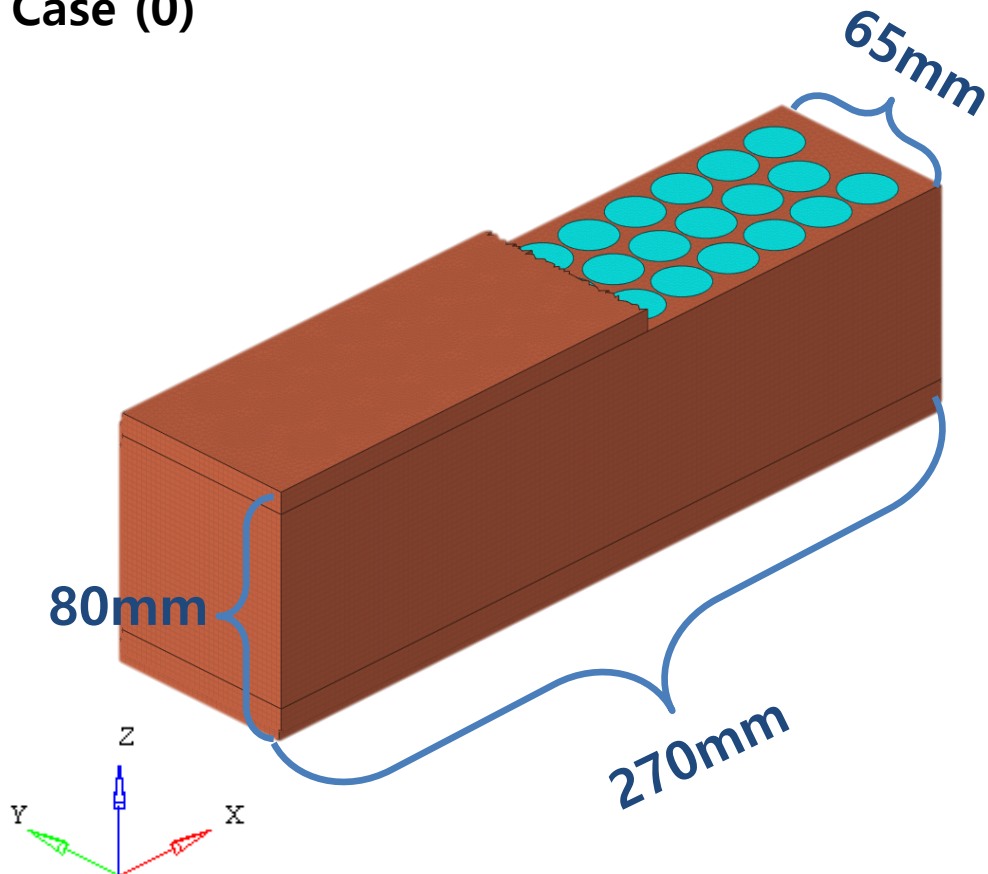
- 1) Vent 개요
- 2) Vent 설계
- 3) 열-구조 연성해석
- 4) 해석 분석



- 해석 개요
 - vent의 지름과 개수에 따른 냉각 성능 최대화
- 해석 목적
 - 최적의 냉각을 위해 4가지 경우 온도와 열 응력 비교
- 선정 기준
 - 4가지 case study 결과 중 온도와 열 응력이 낮은 모델 선정



Case (0)

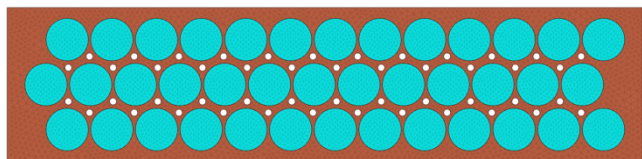
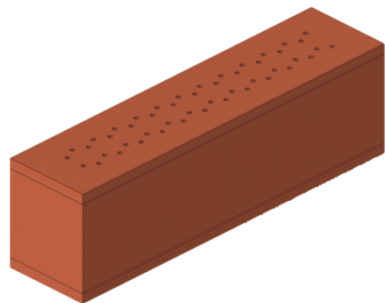


시중에 팔고 있는 360Wh
배터리 팩 사이즈

360Wh 배터리 팩

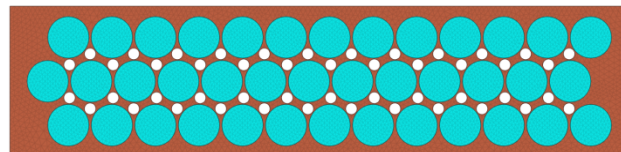
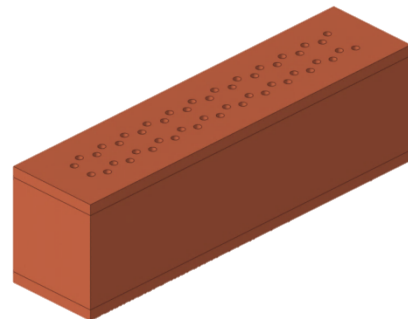
배터리 수: 39개

Case (1)



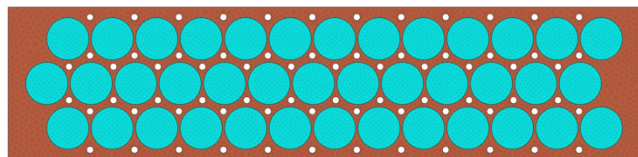
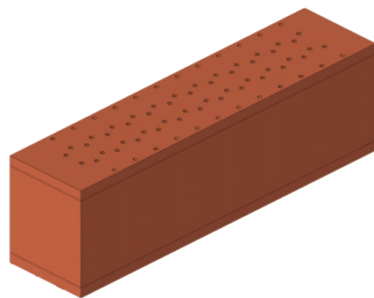
지름: 3mm
개수: 48개

Case (2)



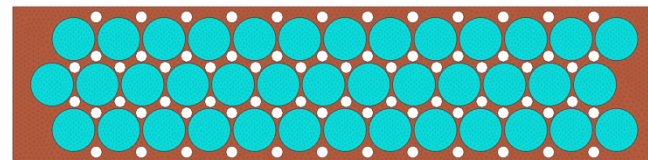
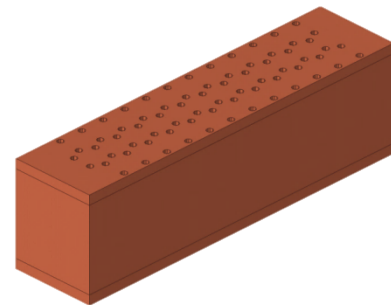
지름: 5mm
개수: 48개

Case (3)

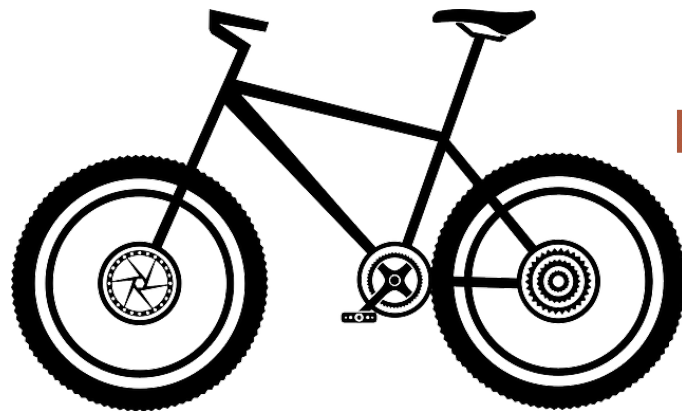
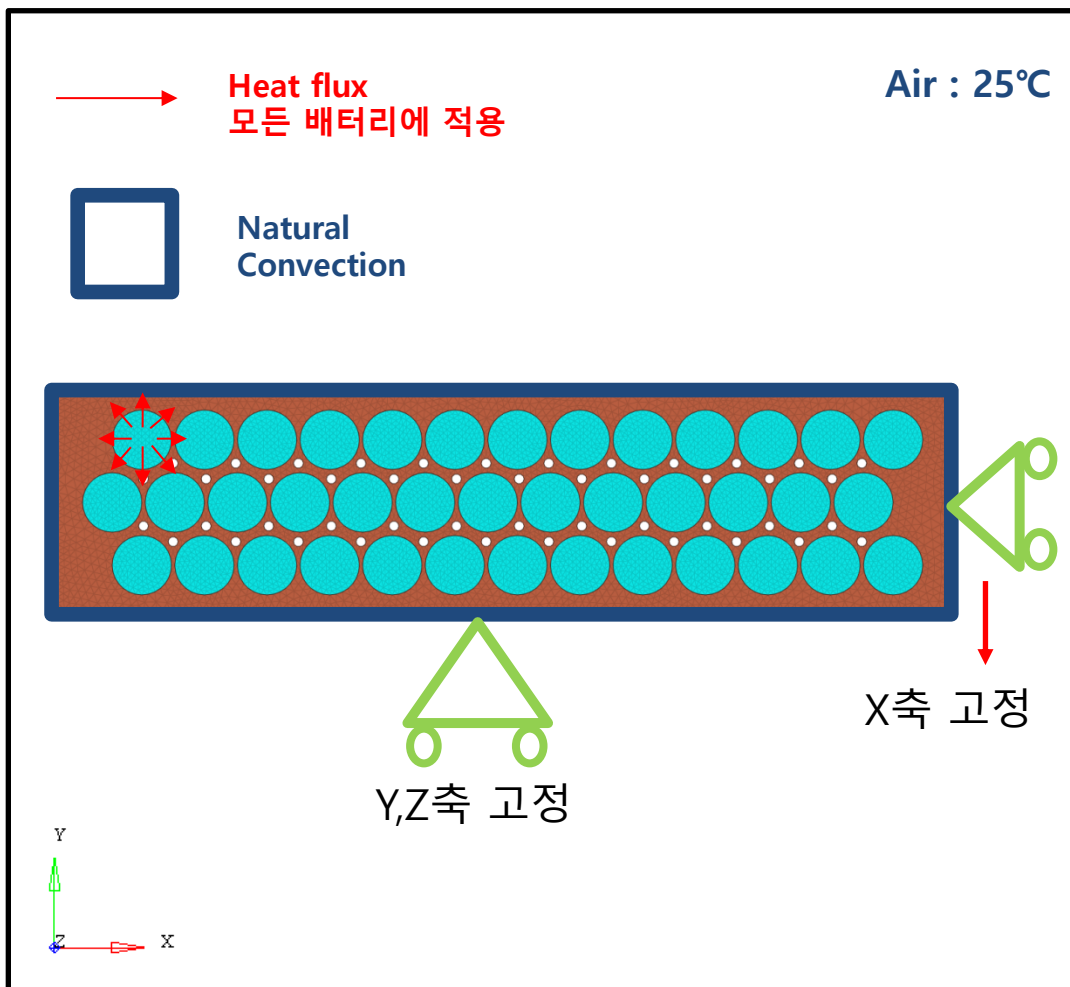


지름: 3mm
개수: 72개

Case (4)



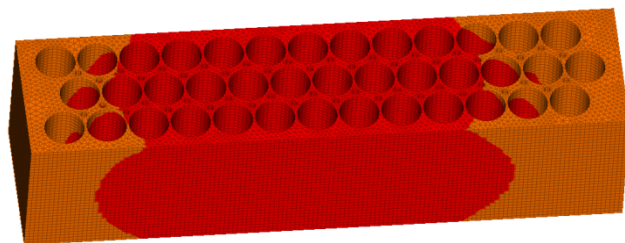
지름: 5mm
개수: 72개



Conduction: 배터리의 heat flux ($0.002\text{W}/\text{mm}^2$) 기입
 Convection: 주변온도 (25°C)

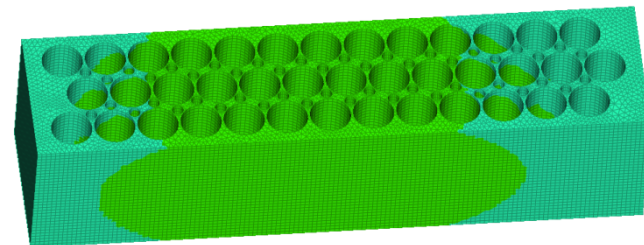
Case (1)

최고온도:63℃



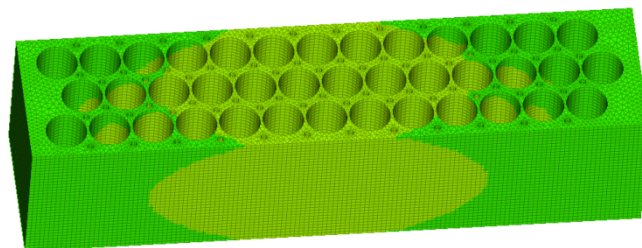
Case (2)

최고온도:57℃



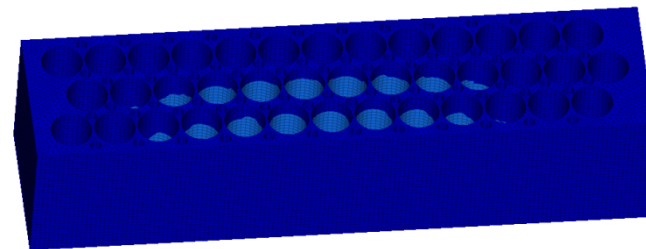
Case (3)

최고온도:58℃

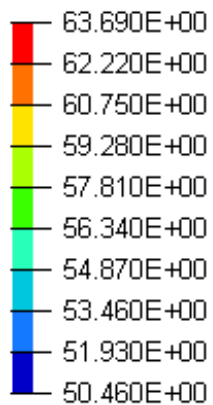


Case (4)

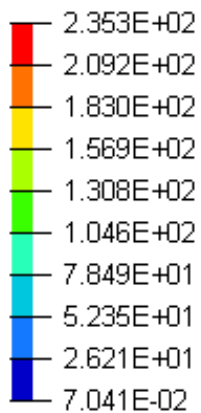
최고온도:52℃



Temperature (°C)



Von-mises (MPa)



Case (1)

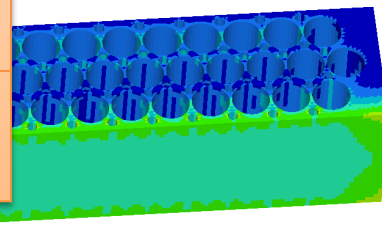
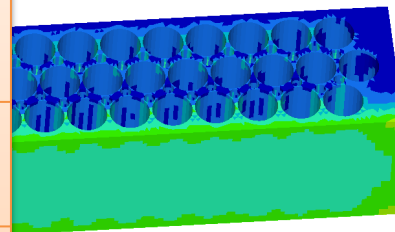
열응력: 224MPa

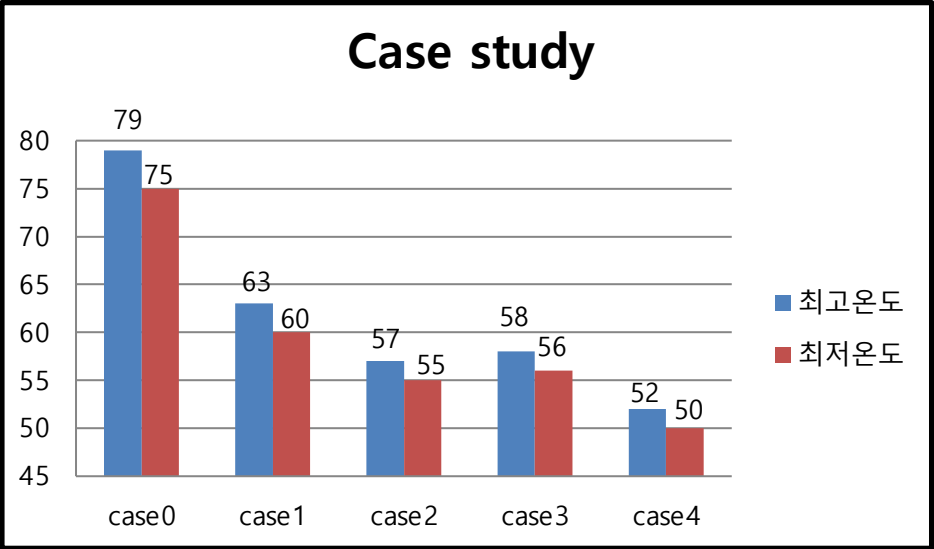
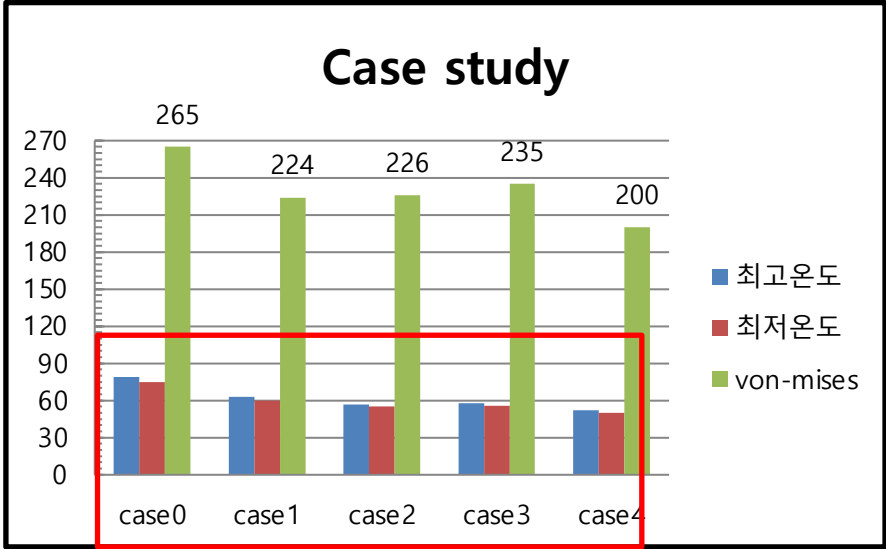
Case (2)

열응력: 226MPa

	최고온도	최저온도	von-mises
case0	79	75	265
case1	63	60	224
case2	57	55	226
case3	58	56	235
case4	52	50	200

응력: 200MPa





5가지 모델 중 냉각성과 열 응력이 가장 뛰어난
Case 4 모델 설계 결정

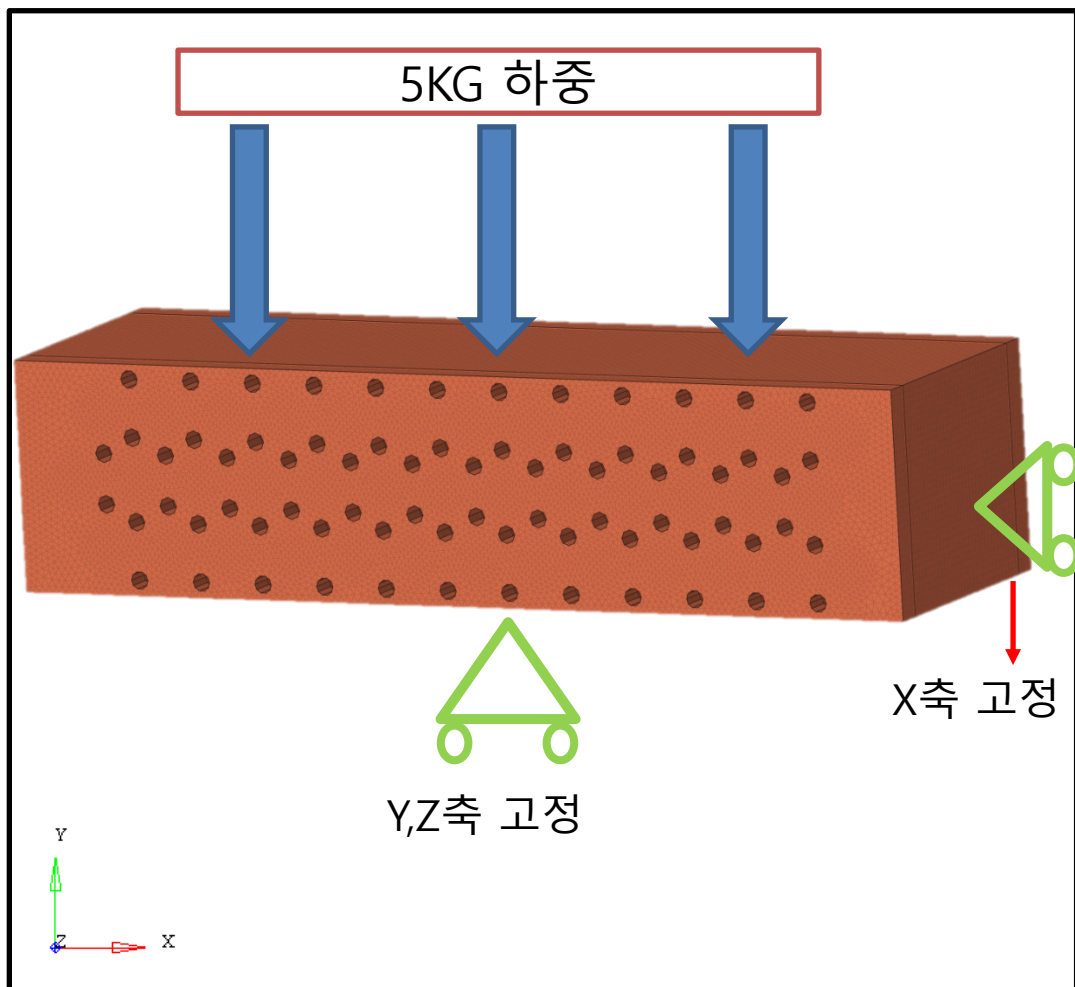
4. 위상 최적화

- 1) 위상 최적화 개요
- 2) 위상 최적화
- 3) 최적화 모델 검증

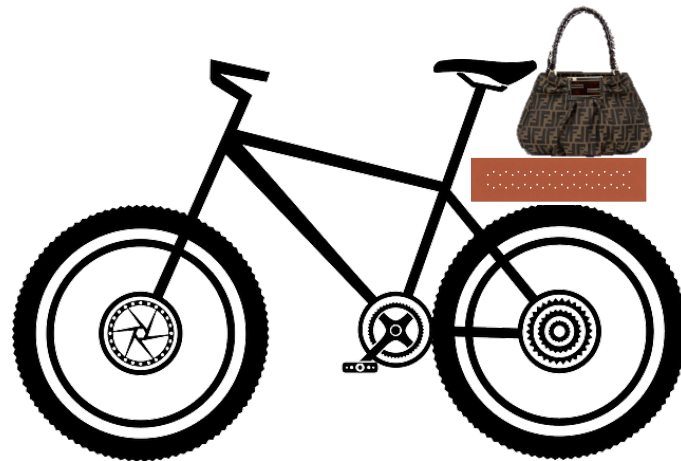


- 해석 개요
 - 하중에 대한 안전성 검토
- 해석 목적
 - 경량화를 위해 팩의 불필요한 부분 제거





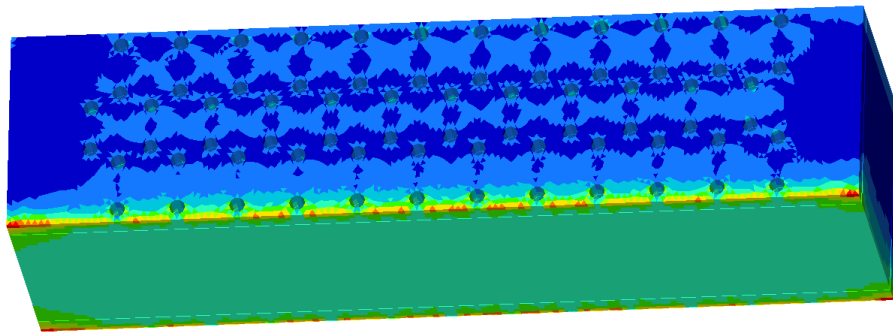
짐을 올린다는 가정 (5kg) 설정



배터리가 과열 된 상태로 진행

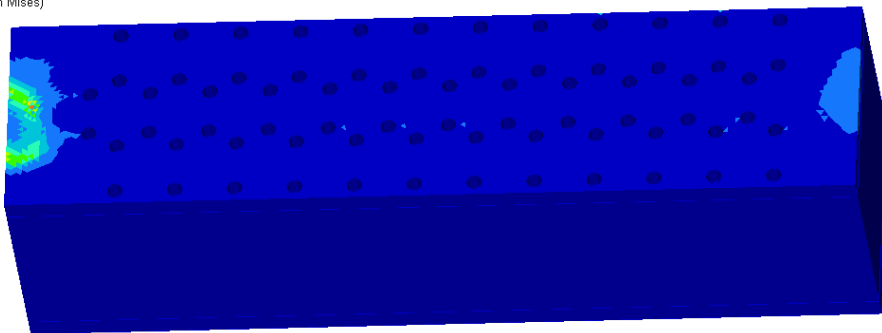
Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Global System

2.307E+02
2.052E+02
1.797E+02
1.542E+02
1.288E+02
1.033E+02
7.783E+01
5.236E+01
2.689E+01
1.424E+00
No result
Max = 2.307E+02
3D 513317
Min = 1.424E+00
3D 529270



Contour Plot
Factors of Safety(Von Mises)

2.218E+02
1.973E+02
1.728E+02
1.484E+02
1.239E+02
9.936E+01
7.486E+01
5.036E+01
2.587E+01
1.370E+00
No result
Max = 2.218E+02
3D 529270
Min = 1.370E+00
3D 513317



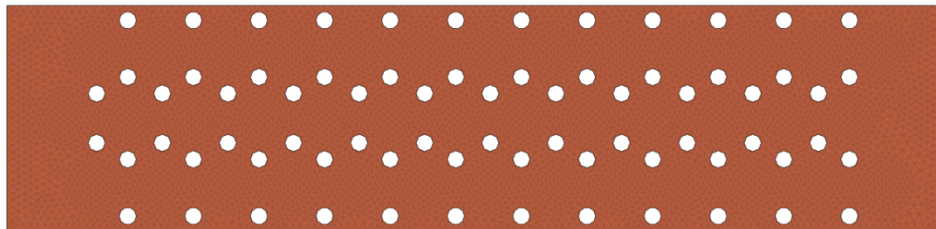
응력: 200MPa -> 230MPa 증가

안전계수	설명
1.25 ~ 1.5	관리가 가능한 조건에서 매우 신뢰성 있는 재료를 사용하고, 작용하는 하중 및 응력의 크기를 정확히 아는 경우, <u>무게의 경량화를 특히 중요하게 고려해야</u> 하는 응용 분야에서 사용
1.5 ~ 2	비교적 일정한 조건에서 잘 알려져 있는 재료를 사용하고, 하중과 응력의 크기가 쉽게 결정될 수 있는 경우.
2 ~ 2.5	평범한 조건에서 보통의 재료를 사용하고, 하중과 응력의 크기를 알아낼 수 있는 경우.
2.5 ~ 3	보통의 환경, 하중, 응력 조건에서 별로 사용되지 않은 재료 또는 취성인 재료를 사용하는 경우.
3 ~ 4	보통의 환경, 하중, 응력 조건에서 사용해 본 적이 없는 재료를 사용하는 경우.
3 ~ 4	잘 알려진 재료이지만 불확실한 환경과 응력 조건에서 사용할 때.

팩 material 허용응력: 316MPa

SOF: 1.37

- 배터리 팩의 위상 최적화



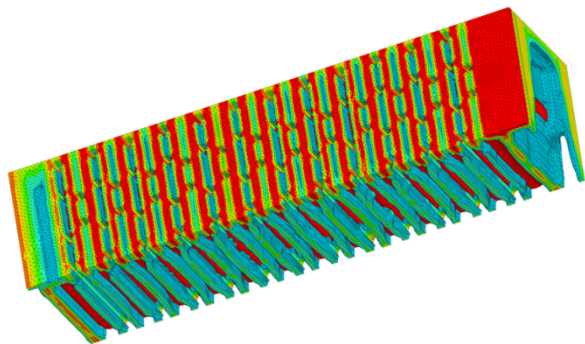
배터리 팩의 불필요한 재료를 제거하여 성능조건을
만족하면서 가벼운 디자인 목적

[목적함수] - Volume 최소화

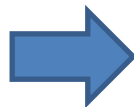
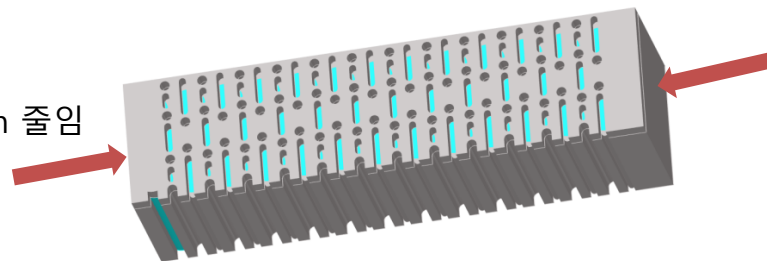
[제약조건] - 배터리 모양 유지 (non-design)

- 최대응력 조건

[설계변수] - 탈형 방향 설정 (아래에서 위)



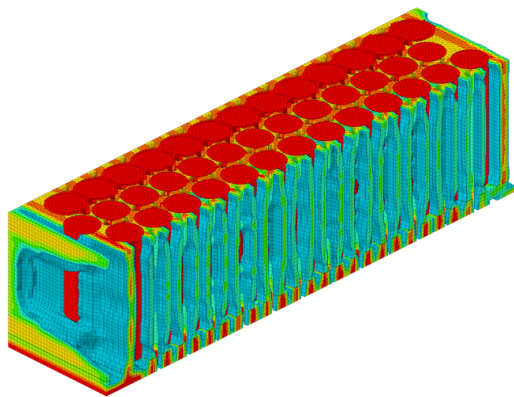
5mm 줄임



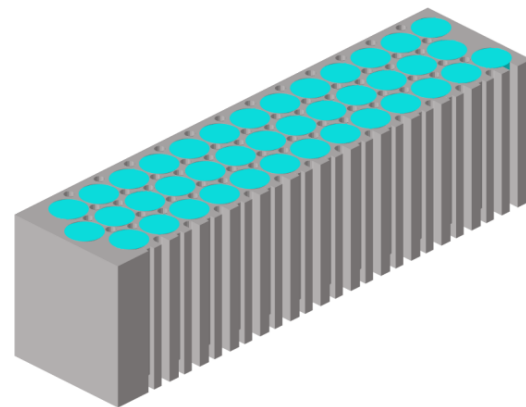
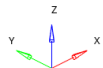
Contour Plot
Element Densities(Density)
Simple Average

1.000E+00
8.900E-01
7.800E-01
6.700E-01
5.600E-01
4.500E-01
3.400E-01
2.300E-01
1.200E-01
1.000E-02
No Result

ISO > 3.000E-01
Max = 1.000E+00
Grids 337
Min = 1.000E-02
Grids 31433



0.3 volume 최적화

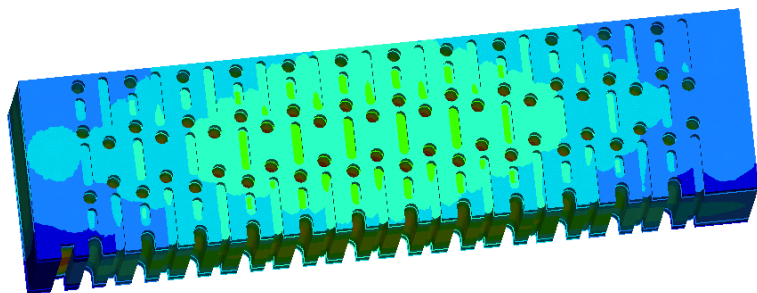


Contour Plot
Grd Temperatures(Temperatures)

4.928E+01
4.905E+01
4.883E+01
4.861E+01
4.838E+01
4.816E+01
4.794E+01
4.772E+01
4.749E+01
4.727E+01

■ No result

Max = 4.928E+01
Grds 278088
Min = 4.727E+01
Grds 376324



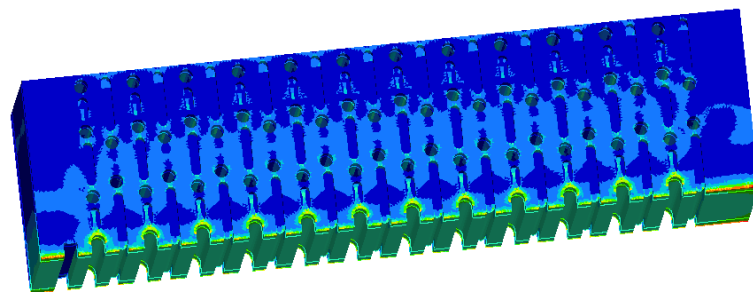
온도 해석 결과

Contour Plot
Element Stresses (2D & 3D)(vonMises)
Global System

2.319E+02
2.061E+02
1.804E+02
1.546E+02
1.288E+02
1.031E+02
7.732E+01
5.156E+01
2.580E+01
4.070E-02

■ No result

Max = 2.319E+02
3D 1261284
Min = 4.070E-02
3D 1261308



응력 해석 결과

	Case 4 모델	최적화 모델
온도	52°C	49°C
응력	230.7MPa	231.9MPa
안전 계수	1.37	1.37

3°C



1.2MPa



변화 없음

	기존 모델과 최적화 모델 비교
무게	5.77kg < 4.624kg
응력	265MPa < 231.9MPa
안전 계수	1.19 < 1.37
온도	79°C < 49°C

1.146kg



33.1MPa



0.18



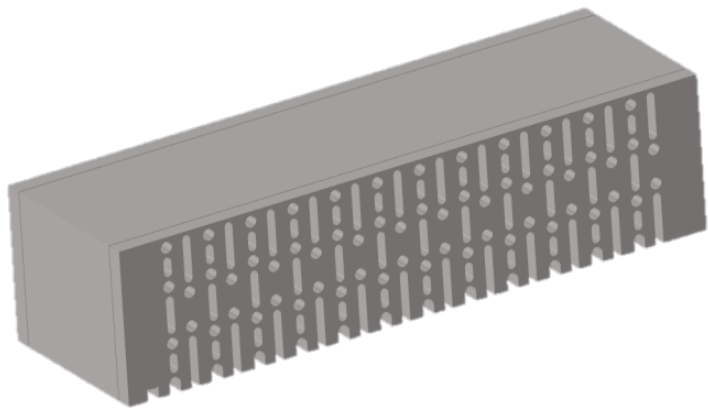
30°C



5. 최종 설계

- 1) 최종 설계 안
- 2) 최종 결론





- 냉각 성능

- 배터리 팩의 온도 Down

확인

- 경량화

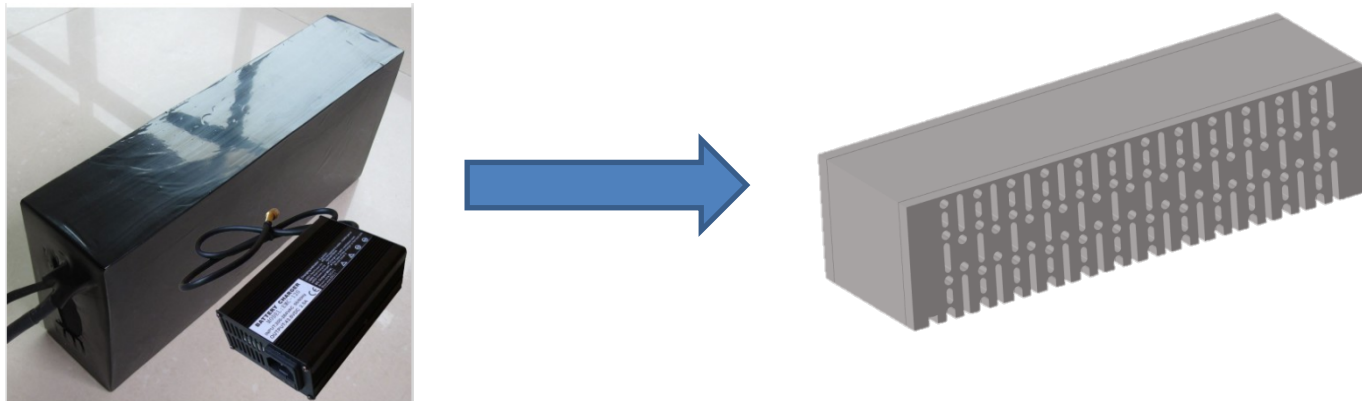
- 위상 최적화

확인

- 새로운 디자인

- 열의 발산

확인



- Shape 최적화와 Topology 최적화를 통한 배터리 팩 제작 수행
- 최종 모델은 원래 배터리 팩의 기능을 잃지 않도록 설계
- 최고 온도 79°C에서 49°C로 낮춤
- 최종 안전계수 1.37
- 배터리 팩 무게 5.77kg 에서 4.624kg 줄임

감사합니다
