



## 저작자표시 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.
- 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#) 

2023년 2월  
석사학위 논문

# EV 배터리팩 케이스의 FEM 해석을 통한 냉각 및 충돌 성능에 대한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

이 서 한

# EV 배터리팩 케이스의 FEM 해석을 통한 냉각 및 충돌 성능에 대한 연구

A Study on the cooling and impact  
performance of an EV battery pack case by  
FEM analysis

2023 년 2 월 24 일

조선대학교 대학원

기계시스템 · 미래자동차공학과

이 서 한

# EV 배터리팩 케이스의 FEM 해석을 통한 냉각 및 충돌 성능에 대한 연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학석사학위 신청논문으로 제출함

2022년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

이 서 한

## 이서한의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 지 훈 (인)

위 원 조선대학교 교수 이 성 준 (인)

위 원 조선대학교 교수 김 재 열 (인)

2022 년 12 월

조선대학교 대학원

## 목 차

ABSTRACT .....	vi
제 1 장 서 론 .....	1
1. 연구 배경 .....	1
2. 연구동향 및 연구 필요성 .....	4
가) 국내·외 EV배터리팩케이스의 연구동향 .....	4
나) 연구 필요성 .....	5
3. 연구 목표 .....	6
제 2 장 이 론 .....	8
1. 배터리팩케이스 .....	8
2. Li-ion 배터리의 발열 .....	10
가) 리튬이온 배터리의 열전도 특성 .....	10
나) 배터리 발열량 추정 .....	11
3. 배터리팩 케이스의 냉각기법 .....	13
가) 공랭식 .....	13
나) 침수식 .....	14
다) 간접 수랭식 .....	15
4. 배터리팩 케이스 충돌 안정성 .....	16
가) 배터리 팩케이스 측면 충돌 시험평가법 .....	16
나) 배터리팩 케이스 교체형 사이드 멤버 개념 .....	17
제 3 장 배터리팩 케이스의 냉각 성능 .....	19
1. Li-ion 배터리 발열 해석 .....	19
가) Li-ion 배터리 Cell 단위 발열 해석 .....	19
나) Li-ion 배터리 Module 단위 발열 해석 .....	22

2. 배터리팩 케이스 냉각성능해석 .....	24
가) One channel cooling plate 냉각 해석 .....	25
나) Two channel cooling plate 냉각 해석 .....	33
제 4 장 배터리팩 케이스 측면충돌 성능 .....	38
1. 고속 인장 시험 .....	39
2. 사이드멤버 형상에 따른 충돌해석 .....	42
제 5 장 결론 .....	51
REFERENCE .....	53

## LIST OF TABLES

Table 2 -1 Material following to parts .....	9
Table 3 -1 Material of Li-ion battery .....	19
Table 3 -2 Material of TIM.....	22
Table 3 -3 Coolant boundary condition and material .....	28
Table 3 -4 Compare analysis Model A and B.....	32
Table 3 -5 Compare analysis model A, B and C.....	36
Table 4 -1 Physical properties of aluminium series.....	41
Table 4 -2 Condition of side impact pole analysis.....	42



## LIST OF FIGURES

Fig. 1 -1 The outlook for the vehicle market .....	1
Fig. 1 -2 Thermal runaway process .....	2
Fig. 1 -3 Patent application trends of Tesla .....	5
Fig. 2 -1 Structure of battery pack case .....	8
Fig. 2 -2 Anisotropic thermal conductivity of lithium-ion batteries .....	10
Fig. 2 -3 Air cooling system for battery.....	13
Fig. 2 -4 Immersion cooling system for battery.....	14
Fig. 2 -5 External water cooling system for battery.....	15
Fig. 2 -6 Schematic diagram of side pole impact test.....	16
Fig. 2 -7 Cross section of solid bottom type side member.....	18
Fig. 2 -8 Cross section of assembly type side member.....	18
Fig. 3 -1 Modeling of battery cell heat generation analysis.....	20
Fig. 3 -2 Battery cell heat generation analysis.....	21
Fig. 3 -3 Modeling of battery module heat generation analysis.....	23
Fig. 3 -4 Battery module heat generation analysis.....	23
Fig. 3 -5 Battery pack case cooling system .....	24
Fig. 3 -6 Cooling channel direction and name of battery modules in 1 channel system.....	25
Fig. 3 -7 Section of cooling channel Model A and Model B .....	27
Fig. 3 -8 Flow velocity of Model A and Model B .....	29
Fig. 3 -9 Cooling performance of Model A and Model B .....	30
Fig. 3 -10 Battery temperature dispersion Model A and Model B .....	32
Fig. 3 -11 Cooling channel direction and name of battery modules in 2 channel system.....	34

Fig. 3 -12 Cooling performance of 2 channel cooling system .....	34
Fig. 3 -13 Cooling performance of Model B and C .....	35
Fig. 3 -14 Battery temperature dispersion Model A, B and C .....	37
Fig. 4 -1 Drop impact test .....	38
Fig. 4 -2 High Strain Rate Tensile Test .....	39
Fig. 4 -3 S-S Curve according to aluminium series .....	40
Fig. 4 -4 Analysis of the impact test on the battery pack case .....	43
Fig. 4 -5 Side member cross section according to rib geometry .....	44
Fig. 4 -6 Total deformation on Model X Impact analysis.....	45
Fig. 4 -7 Von-Mises Stress right after impact on Model X.....	45
Fig. 4 -8 Total deformation on Model Y Impact analysis.....	46
Fig. 4 -9 Von-Mises Stress right after impact on Model Y.....	46
Fig. 4 -10 Maximum deformation in the battery mounting section of Model X.....	47
Fig. 4 -11 Maximum deformation in the battery mounting section of Model Y.....	47
Fig. 4 -12 Deformation of Model X and Model Y .....	48
Fig. 4 -13 Internal energy of Model X and Model Y .....	49
Fig. 4 -14 Impact performance of Model X and Y .....	50

## ABBREVIATION

EV	Electric Vehicle
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle
ESS	Energy Storage System
BTMS	Battery Thermal Management System
TIM	Thermal Interface Material
FEM	Finite Element Method
OCV	Open Circuit Voltage
PCM	Phase Change Material
SOC	State of Charge

## NOMENCLATURE

$Q_{flow}$	Flow Rate [L/min]
$T_{inlet}$	Inflow Temperature [ $^{\circ}$ C]
$T_{initial}$	Initial Temperature [ $^{\circ}$ C]
$T_{avg}$	Average Temperature [ $^{\circ}$ C]
$T_{max}$	Max Temperature [ $^{\circ}$ C]
$T_{outlet}$	Outflow Temperature [ $^{\circ}$ C]
$V_{flow}$	Velocity of Flow [m/s]

## ABSTRACT

### A Study on the cooling and impact performance of an EV battery pack case by FEM analysis

Seo Han Lee  
Advisor: Prof. Jae Y. Kim.  
Dept. of Mechanical System & Automotive  
Engineering.  
Graduate School of Chosun University

As environmental regulations are strengthened around Europe, the conversion of existing internal combustion engine vehicles to electric vehicles is noticeable, and the paradigm of automobiles is also changing. Electric vehicles (EVs) are classified as eco-friendly vehicles such as plug-in hybrid electric vehicles (PHEVs) and fuel cell electric vehicles (FCEVs). Accordingly, research and development on eco-friendly automotive parts such as batteries and motors are actively underway. Currently, the most commonly used battery for high power of EV is a lithium-ion battery. Lithium-ion batteries are high-density energy storage systems (ESSs), and have a high risk of event occurrence. So it is required active management.

Recently, as electric vehicle usage has increased, battery-related accidents, including battery degradation, thermal runaway, etc., are increasing. Thermal runaway of the battery is caused by mechanical, electrical, and thermal defects, resulting in a short circuit inside the cell. The battery pack case to protect the battery from these problems was studied in this research.

The EV battery pack case has two main functions. First, protect the battery from external forces. The lithium-ion battery separates the anode material and the cathode

material with a thin separator. And mechanical deformation of the battery due to external force may cause an internal short circuit of the cell due to partial damage such as perforation of the separator.

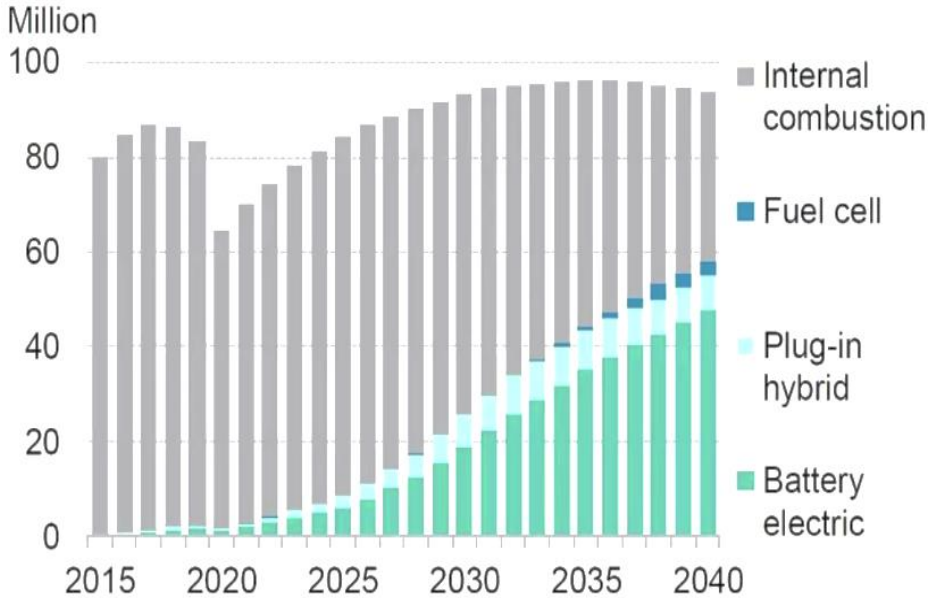
Second, the battery pack case must maintain the proper temperature of the battery. To this end, almost all electric vehicles have a battery thermal management system. Maintaining an appropriate temperature of the lithium-ion battery is an important function in terms of efficiency and stability.

In this study, the cooling performance to maintain a proper battery temperature and the structural aspect of the battery pack case to protect the battery from external force were studied through FEM analysis.

# 제 1 장 서 론

## 1. 연구 배경

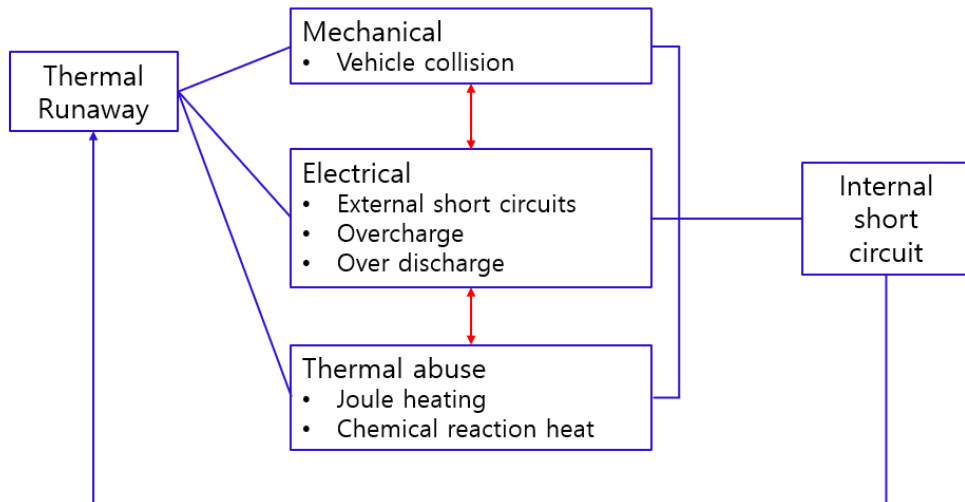
유럽을 중심으로 시작된 전 세계적인 자동차 환경관련 규제 강화로 기존 내연 기관 차량에서 전기자동차로 변환되는 움직임이 눈에 띄고 있으며, 자동차 산업의 패러다임이 변화하고 있다. 전기자동차(EV, Electric Vehicle)는 PHEV(Plug-in Hybrid Electric Vehicle), FCEV(Fuel Cell Electric Vehicle)와 같이 친환경 자동차로 분류되어 배터리와 모터 등 친환경자동차의 부품 연구와 개발이 활발히 진행되고 있다. 전기자동차의 고출력을 위해 현재 가장 일반적으로 사용되는 배터리는 리튬이온 배터리(Lithium-ion battery)이다. 리튬이온 배터리는 고밀도의 에너지 저장 장치(ESS, Energy Storage System)로 에너지 밀도가 높은 만큼 이벤트 발생 시 위험성이 높아 능동적인 관리가 필요하다. [1]



\* 출처: BloombergNEF

Fig. 1 -1 The outlook for the vehicle market

최근 전기자동차 사용량이 증가함에 따라 배터리 열화, 열 폭주 등을 포함한 배터리 관련 사고들도 점점 증가하고 있다. 배터리의 열 폭주는 기계적, 전기적, 열적 결함에 의해 결과적으로는 셀 내의 내부 단락으로 이어져 발생하게 된다. 리튬이온 배터리는 음극재와 양극재를 얇은 분리막으로 분리하고 있으며, 외력에 의한 배터리의 기계적 변형은 분리막에 천공 등 부분적인 파손으로 셀의 내부 단락을 야기시킬 수 있다. 또한 리튬이온 배터리의 전기화학 반응으로 인해 발생하게 되는 열이 기준량을 초과하게 되면, 화재 발생의 원인이 될 수 있으며, 배터리 모듈 내에서 긴밀히 접촉되어 있는 다른 셀에도 연쇄적인 반응을 통해 열 폭주를 야기시킨다. Fig.1-2 에서는 배터리 열폭주에 프로세스를 도식하였다. [2-5]



**Fig. 1 -2 Thermal runaway process**

EV 배터리팩 케이스는 크게 두 가지 기능을 하게 되는데 첫 번째로 외력으로 부터 배터리를 보호해야 한다. 전기자동차의 배터리 열화 및 열 폭주 사례를 보면 테슬라의 대표적인 전기자동차인 모델 S는 미국 교통안전국(National Highway Traffic Safety Administration)에서 실시한 안전 테스트에서 최고 등급인 별 다섯개를 받으며 안정성을 입증하였으나, 2013년 10~11월 2달간 3건의 주행 중 화재가 발생하였으며, 화재발생의 원인은 외력에 의한 배터리 결함 발생 이었다.



두 번째 배터리팩 케이스의 역할은 배터리의 적정온도 유지이다. 이를 위해 거의 모든 전기자동차에는 배터리 열 관리 시스템, BTMS(Battery Thermal Management System)을 갖는다. 리튬이온 배터리의 적정온도 유지는 효율성 안정성 측면에서 모두 중요한 기능이다. 리튬이온 배터리는 적정온도 이하 저온에서 내부저항의 증가로 인해 그 소비전력에 대한 효율이 낮아지게 되며 지나친 경우 방전을 초래한다. 적정온도 이상의 고온에서 배터리는 배터리 수명, 성능, 안정성 저하 등의 문제를 일으키고, 더 나아가 지나친 발열로 인해 열 폭주의 원인이 되기도 한다. 고전압을 필요로 하는 전기자동차용 배터리의 특성상 비교적 높은 발열량을 가지고 있어 배터리 냉각성능이 필수적이다. 뿐만 아니라 전기자동차의 경우 일반적으로 배터리의 중량만 400~450kg에 달하여 전기자동차 부품에 경량화에 대한 연구도 활발히 진행되고 있다.

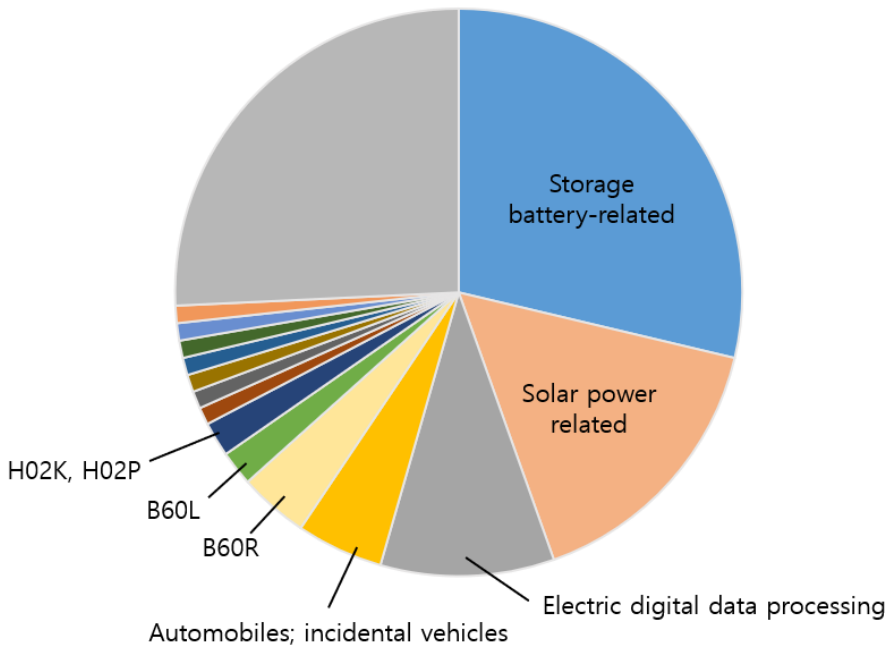
## 2. 연구동향 및 연구 필요성

### 가) 국내·외 EV 배터리팩케이스의 연구동향

전기자동차의 시대가 도래하면서 초기 전기자동차의 경우 1회 충전 당 항속거리는 200~300km에 불과 하였으나, 400~600km 수준의 전기자동차들이 상용화되어 시장에 출시되었다. 최근에는 1000km 수준의 전기자동차 출시를 앞두고 있다. 1회 충전 당 항속거리의 개선을 위해 전기자동차의 부품 경량화에 대한 연구가 진행되었다. EV용 배터리는 충분한 안정성 확보가 필요하여, 충돌안정성 확보와 경량화의 지속적인 추가 연구가 필요하다. [6]

국내에서는 이를 위해 고장력강, 고강성의 알루미늄 적용에 대한 연구를 진행하고 있다. 또한 플레이트형 냉각수 패드의 누유, 알루미늄 계열에 따른 접합 문제 등을 해결하기 위해 마찰 교반 용접에 대한 연구를 진행하고 있다. 현대기아를 비롯한 국내 완성차 및 부품회사에서는 효율적인 배터리 폐열관리, 냉각성능 향상을 위한 플랫폼, 냉각수 분배 및 공급 통합 모듈 등과 같은 기술 개발을 진행해왔다. [7]

해외 완성차 업체는 전기차 시장 주도를 위해 배터리 기술 고도화에 주력하고 있으며, 이의 일환으로 배터리팩 케이스의 경량화 및 충돌 안정성 향상 기술 확보에 다각적으로 노력 중에 있다. 테슬라, 닛산 등은 스틸 소재를 적용하여 배터리팩 케이스를 양산하며, BMW에서는 알루미늄 판재 및 주조기술 등을 적용한 배터리팩 케이스를 개발하였다. 또한 노벨리스는 배터리팩 케이스의 경량화 및 원가 절감을 위해 알루미늄 판재 프레스 성형 중심의 부품 연구를 추진하고 있다. 최근 테슬라에서는 전기자동차의 BTMS(Battery thermal management system)의 개선을 통한 차량 운행 최적화 및 안정성 확보 관련된 특허들이 눈에 띄게 늘어나고 있으며, 그 다음으로는 태양광 에너지 활용과 관련된 특허가 뒤를 이었다. Fig. 1-3에서 테슬라의 최근 특허출원 동향을 원형 차트로 도식하였다.



\*출처: Mark Line

**Fig. 1-3 Patent application trends of Tesla**

## 나) 연구 필요성

EV용 배터리는 전기자동차의 대표적인 고중량 부품으로 전기차의 주행효율을 위해 경량화가 필수적으로 요구된다. 하지만 이에 반하여 스몰오버랩 및 경사충돌 등 다양한 가혹조건에 자동차 충돌시험이 지속적으로 강화되면서 충돌 안전 배터리 기술의 중요성이 부각되고 있다. 따라서 배터리를 보호하는 배터리팩 케이스의 경량화 및 충돌안정성 향상 기술 고도화가 시장 주도의 핵심 기술이 될 것으로 예상된다. 뿐만 아니라 배터리의 발열과 외부 환경으로부터 적정온도를 유지시켜주는 배터리 열 관리 기술 확보를 통해 전기자동차의 1회 충전 항속거리를 증대하고 안정성 확보가 필요하다. [8-10]

### 3. 연구 목표

전기자동차와 관련하여 시작된 초기에는 전기자동차의 가장 큰 단점이었던 1회 충전 당 항속 거리를 늘리고, 비교적 오래 걸리는 충전시간을 단축시키고자 하는 연구들이 선행되었다. 현재 배터리 용량과 에너지 밀도를 증가시키고 고속 고압 충전을 통해 위와 같은 문제점들은 과거에 비해 충분히 개선되었다. 하지만 배터리의 열화, 열폭주와 같은 위험으로부터 충분한 안정성 확보에 대한 연구는 배터리의 소재 치환, 형태 변환 등과 같은 솔루션이 제시되었으나, 현재의 리튬이온 배터리의 에너지밀도를 따라올 수 없어 아직 상용화 되기까지 시간이 더 걸릴 것으로 파악된다. 따라서 본 연구에서는 배터리의 안정성과 성능을 향상시키기 위해 배터리 팩 케이스의 성능을 평가하고 이에 대한 개선안을 도출하고자 한다.

첫번째로 배터리팩 케이스 냉각성능에 대해 고찰하고자 한다. 리튬이온 배터리의 수명을 향상시키고 안정성을 높이기 위해 배터리팩 케이스는 이에 대응되는 열관리 능력이 요구된다. 리튬이온 배터리의 열관리에서 주요 관리사항이 2가지 있다. 모든 셀을 적정온도로 유지시키는 능력이 필요하다. 높은 온도에서는 열화, 열폭주가 발생 가능하며, 이를 방지하기위해 배터리 열을 효율적으로 뺏을 수 있는 냉각시스템이 필요하다. TIM(Thermal Interface Material)을 배터리 셀과 셀 사이, 배터리 모듈/팩과 냉각 플레이트 사이에 골고루 도포하여 냉각 플레이트와 배터리의 열교환이 활발히 이뤄지도록 해야 한다. 뿐만 아니라 리튬이온 배터리의 셀과 셀 사이의 온도 차이를 3~4℃이상 나지 않도록 해야 한다. 본 연구에서는 유한요소해석(FEM, Finite Element Method) 프로그램인 ANSYS Fluent를 사용하여 기존 동일한 유량으로 1개의 Cooling channel을 갖는 냉각시스템과 2개의 Cooling channel을 갖는 냉각시스템의 비교를 통해 기구학적 관점에서 배터리 열관리에 유리한 Cooling channel을 도출하고자 한다.

두번째로 교체형 충격흡수 사이드멤버가 적용된 배터리팩 케이스의 충돌해석을 LS-DYNA를 이용하여 진행하고자 한다. 기존 배터리팩 케이스의 경우 사이드 멤버와 기존 외곽 프레임멤버가 일체형 압출된다. 따라서 경미한 손상에도 배터리팩 케이스 전체를 교체해야하며, 이는 비용, 수단적으로 비효율적인 형상으로 제작되고 있다. 하지만 이를 교체형 멤버로 적용하고 충격흡수 사이드 멤버의 압출 형상에 따른 충돌강성에 대해 비교하고자 한다.

본 연구에서는 전기자동차의 배터리의 효율을 증대하고 수명과 안정성을 높이기 위해 배터리팩 케이스가 가져야하는 냉각성과 충돌 성능에 대해 유한요소 해석을 수행하고, 이를 통해 그 성능을 구조적 설계 변경으로 비교 평가 및 최적설계안을 제시하고자 한다.

## 제 2 장 이 론

### 1. 배터리팩케이스

본 연구에서는 현대자동차에서 개발된 E-GMP 플랫폼을 착안하여 개발중인 배터리팩 케이스 모델링을 사용하고자 한다. 일반적으로 배터리팩 케이스의 구조는 Fig. 2-1과 같으며, 해당 부품들의 재질은 Table 2-1과 같다.

본 연구에서 개발되는 배터리팩 케이스는 경량화를 고려하여 알루미늄으로 설계되었으며 Upper Panel은 기밀, 수밀성을 위해 가스켓과 같이 결합된다. Center Cross Member, Frame Member, Side Member는 배터리팩 케이스에 가해지는 외력을 흡수하면서 강성을 갖을 수 있도록 6000계열의 알루미늄으로 설계하였다. 또한 하단부의 강성확보를 위해 Cooling Channel 바깥으로 Lower Panel이 추가되었다.

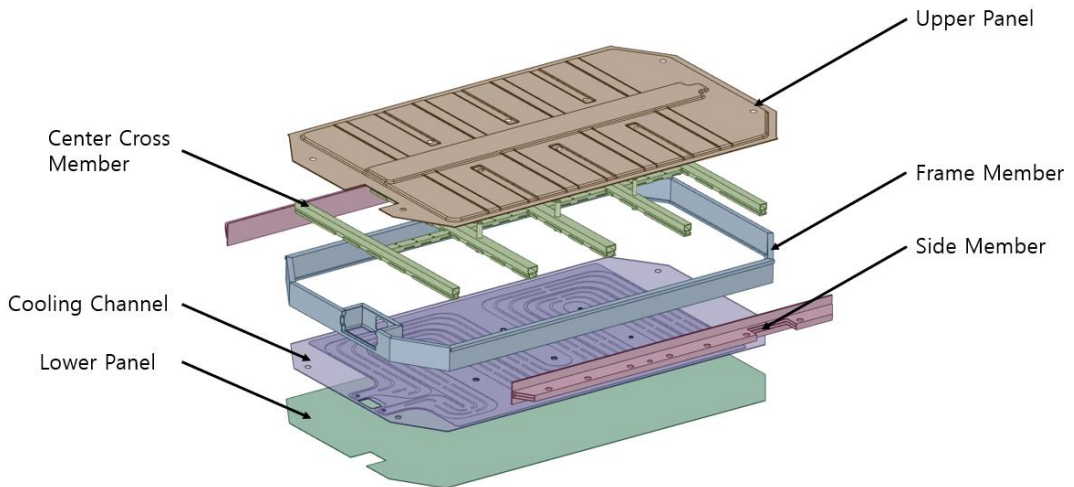


Fig. 2-1 Structure of battery pack case

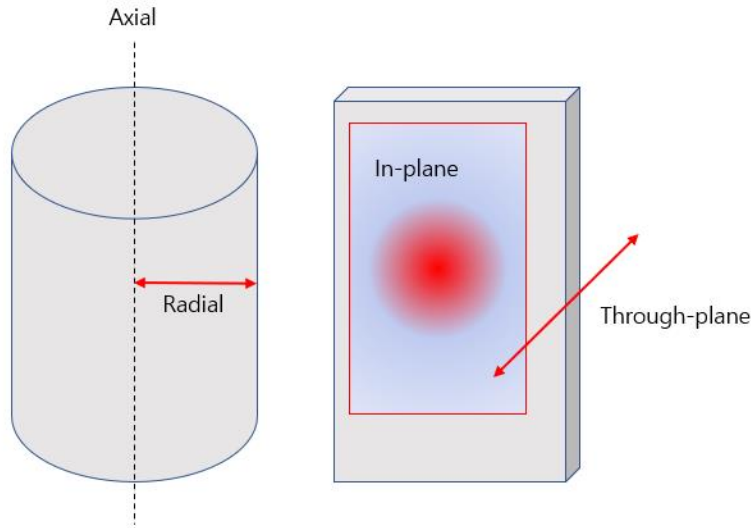
**Table 2 -1 Material following to parts**

Name	Material	Name	Material
Upper Panel	Al 5000 series	Center Cross Member	Al 6000 series
Frame Member	Al 6000 series	Side Member	Al 6000 series
Cooling Channel	Al 6000 series	Lower Panel	Al 3000 series

## 2. Li-ion 배터리의 발열

### 가) 리튬이온 배터리의 열전도 특성

리튬이온 배터리는 열과 매우 밀접한 관계에 있으므로, 셀의 열적 특성, 발열 특성 그리고 이에 따른 전기화학적거동에 대한 이해가 필요하다. 리튬이온 배터리는 등방성 열특성을 갖는 재료의 층으로 구성되어 있어서 방향에 따라 열전도율이 다르다. Fig.2-2에 이를 표현하였다. 원통형 배터리 셀과 파우치형 배터리 셀의 열전도율은 축 방향과 면 방향으로 10-45 W/m이며, 반지름 방향과 면에 수직인 방향으로 0.6-1.5 W/m으로 큰 차이를 보여준다. [11]



**Fig. 2 -2 Anisotropic thermal conductivity of lithium-ion batteries**

본 연구에서는 배터리 셀을 전기적으로 직렬, 물리적으로 병렬로 연결된 모듈 단위로 냉각성능을 해석하고자 하여 본문과 같이 배터리의 방향에 따른 열전도율에 대한 발열 특성 이해가 필요하다.



## 나) 배터리 발열량 추정

리튬이온 배터리는 비가역적이고 가역적인 과정을 통해 열을 발생시키거나 흡수하게 된다. 가역 발열은 셀 내부에서 화학 에너지를 전기에너지로 변환 하면서 발생한다. 이 과정에서 총 에너지에 대해 깁스 자유 에너지 식으로 표현하면 식 (2.1)과 같다. [12]

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (2.1)$$

$\Delta H$ 는 엔탈피의 변화로 화학반응시 전기와 열로 바뀌는 에너지 총량이다.  $T$ 는 온도  $\Delta S$ 는 열로 변하는 가역 반응열이다. 깁스 자유 에너지 방방정식을 이용하면 엔트로피의 변화에 의한 열량인  $Q_{rev}$ 를 얻을 수 있다.

$$Q_{rev} = T_{cell}\Delta S \frac{I_{cell}}{nF} \quad (2.2)$$

$Q_{rev}$ 는 가역적 과정에서 발생하는 열량이다.  $T_{cell}$ 은 배터리의 온도,  $\Delta S$ 는 엔트로피 변화,  $F$ 는 패러데이 상수,  $I_{cell}$ 은 충방전시 셀에 흐르는 전류, 마지막으로  $n$ 는 반응에 대한 화학량론 인수로 리튬이온 배터리일 경우  $n = 1$ 이다.

앞서 언급한 바와 같이 비가역적 과정에서의 발생 열량도 존재한다. 이는 전기, 전기 화학적 저항에 의해 발생하며, 하기 식과 같이 표현된다.

$$Q_{irr} = I_{cell}\Delta V = I_{cell}^2R \quad (2.3)$$

$Q_{irr}$ 은 줄 열(Joule heating)로 비가역 반응열이다.  $\Delta V$ 는 전기화학적 분극에 의한 개회로 전압(Open Circuit Voltage, OCV) 전압의 차이이다. 마지막으로  $R$ 은 셀의 내부 저항이다.

배터리는 현실에서 발열과 동시에 대기와 열교환을 통해 발열량 중 일부를 대기에 발산시킨다. 식(2.5)는 이를 보정하기 위한 대류 열전달 식은 하기와 같다.

$$Q_{com} = Ah(T_{cell} - T_{air}) \quad (2.4)$$

$Q_{com}$ 은 보정을 위한 보상 열량이다.  $A$ 는 대기와 접촉하는 배터리의 표면적,  $h$ 는 대류열전달계수,  $T_{air}$ 는 외부온도이다.

$$Q_{total} = Q_{irr} + Q_{rev} - Q_{com} \quad (2.5)$$

식 (2.2), (2.3), (2.4)를 이용하여 배터리의 총 발열량인  $Q_{total}$ 을 식 (2.5)와 같이 구할 수 있다.

### 3. 배터리팩 케이스의 냉각기법

배터리팩 케이스의 BTMS는 다양한 방식으로 배터리의 열을 관리하고 있으며, 주요 유형으로는 공랭식(Air cooling), 수랭식(Liquid Cooling), 상변화물질을 활용한 냉각기법(PCM, Phase change materials) 등이 있으며 이는 직접적인 접촉을 통해 냉각을 시키는지, 간접적인 접촉을 통해 냉각을 시키는지 또 냉각하는 방법이 능동적인지 아니면 수동적인지에 따라 많은 방법으로 나뉘어진다. 다양한 냉각방식들은 비용적, 성능, 설계적 측면 등에서 서로 다른 장단점을 가지고 있다. [13]

#### 가) 공랭식

공랭식 냉각시스템은 공기를 이용한 냉각 방식으로 팬과 같은 장치로 강제 대류를 시키거나 자연대류를 통해 배터리를 냉각시키는 방식이 있다. 비교적 공기를 강제적으로 순환시켜 열용량을 높이는 강제대류 방식이 열관리에는 더 유리하다. Fig. 2-3에서 공랭식 냉각 기법을 도식하였다. [14]

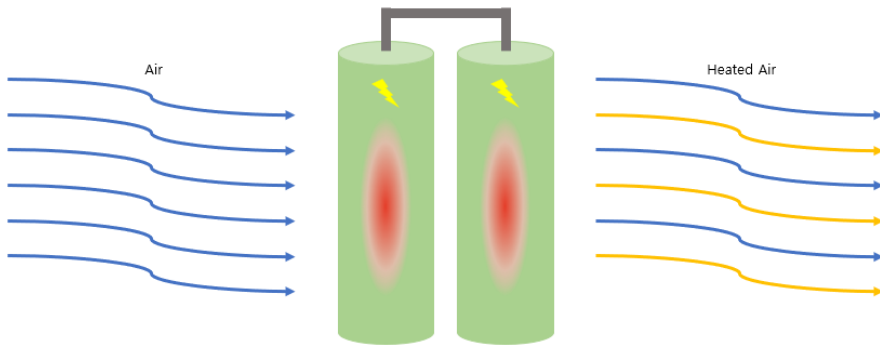
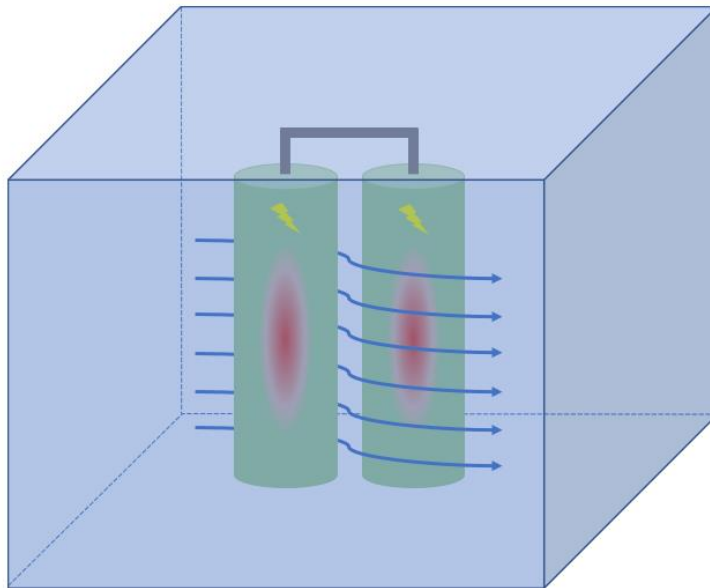


Fig. 2-3 Air cooling system for battery

공랭식 냉각기법은 저렴한 비용, 단순한 설계, 저중량, 쉬운 유지보수 등 많은 장점이 있지만 최근 출시되는 전기자동차들의 초고속 충전과 같이 높은 발열량이 발생하는 경우 적절한 냉각성능을 이끌어내기 어려운 한계가 있다. [15-16]

## 나) 침수식

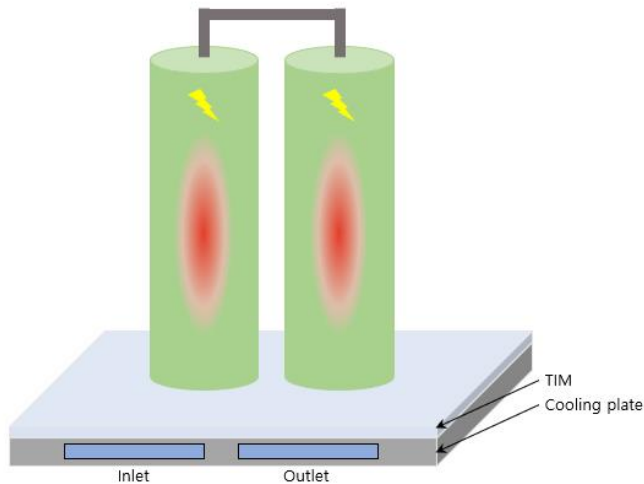
침수식 냉각은 Fig. 2-4와 같이 비전도성 냉각수에 배터리가 직접적으로 접촉하여 배터리를 냉각시키는 시스템이다. 이 냉각 기법은 최근 부상하는 배터리 냉각 기법으로 전기자동차에 적용을 두고 이슈가 되고 있다. 비열이 높은 액체가 직접적으로 배터리와 접촉하여 별도의 열전달에 효과적이다. 또 배터리가 잠기는 만큼 접촉면적이 유연하여 셀 온도를 균일하게 유지시키는데 효과적이다. 하지만 냉각수와 전지가 직접적으로 만나는 만큼 절연성, 난연성 등 유체 선정이 제한적이라 비용이 많이 들어가고 냉각수의 상변화에 대응 하기위해 복잡한 시스템이 필요하여 대량 생산을 요구하는 차량에 적용하기에는 무리가 있다. [17]



**Fig. 2 -4 Immersion cooling system for battery**

## 다) 간접 수랭식

간접 수랭식은 현재 상용화된 EV의 BTMS로 가장 많이 사용되고 있으며, 냉각수 유로를 통해 배터리와 지속적인 열교환을 할 수 있도록 냉각수를 순환시켜 배터리를 냉각시키는 기법이다. 간접 수랭식으로는 셀의 측면을 냉각시키는 방식과 Fig. 2-5와 같이 배터리 셀의 하부에서 냉각시키는 기법이 있다. [18-19]



**Fig. 2-5 External water cooling system for battery**

간접 수랭식 냉각기법은 침수식과 달리 냉각수가 Cooling Plate에 흘러 배터리와의 열전달 성능이 떨어지거나, 배터리의 접촉면적이 제한적이라 TIM(Thermal Interface Material)을 통해 이러한 점들을 보완한다. 냉각 플레이트나 냉각 파이프 형상으로 인해 냉각수가 누출될 가능성이 있으며 유로 형상이 복잡하여 제조가 쉽지 않지만 간접 수랭식 냉각기법은 비용대비 성능이 우수하여 대량생산에 용이하여 가장 많이 사용되고 있다.

## 4. 배터리팩 케이스 충돌 안정성

### 가) 배터리 팩케이스 측면 충돌 시험평가법

본 연구에서는 배터리팩 케이스의 측면 충돌강성 평가를 위해 완성차의 측면 충돌 강성 평가를 복미, 유럽 아시아의 기준으로 기둥 측면 충돌 시험을 (Side pole impact test) 적용하여 모사하여 해석을 진행하였다. Fig. 2-6은 완성차 기준으로 기둥 측면 충돌 시험방법을 도식한 것으로 직각충돌이 아닌 차량기준 L방향을 15° 기울여 시험의 x축과 차량의 T축이 75° 를 이루어 나무 혹은, 기둥과 같은 구조물에 충돌을 모사하는 것으로 대상차종의 무게에 75kg의 인체 더미 무게를 더하여 32±0.5 km/h의 최종 충돌 속도로 충돌하여 차량의 충돌 안정성에 대해 평가를 하게 된다. 본 연구에서는 배터리팩 케이스 부품단위에 대한 평가를 진행하기 위해 적정 충돌 무게 혹은 속도 조절을 통해 충돌에너지에 대한 조정을 통해 부품 단위의 충돌해석으로 평가를 진행을 하였다. [20-21]

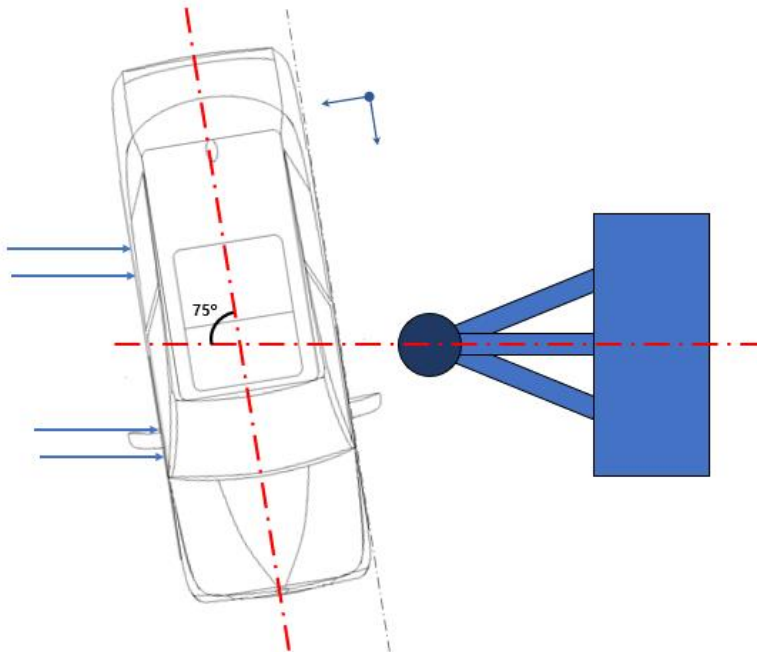
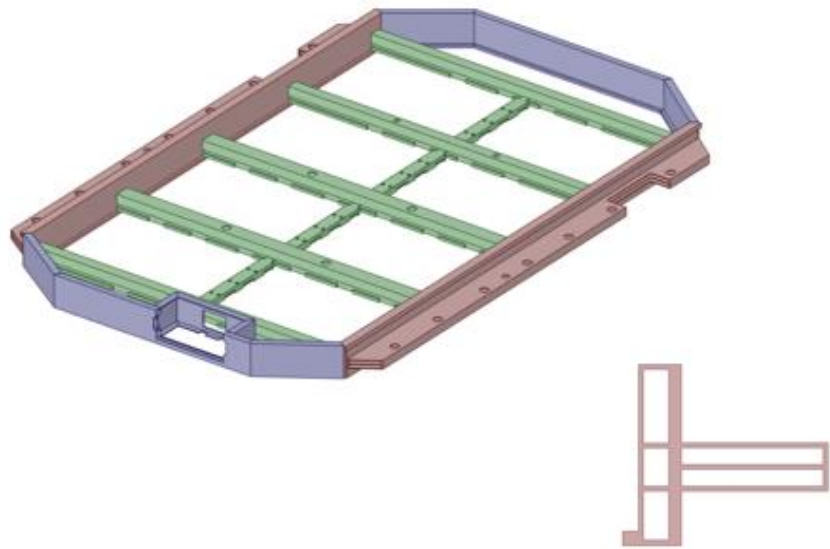


Fig. 2-6 Schematic diagram of side pole impact test

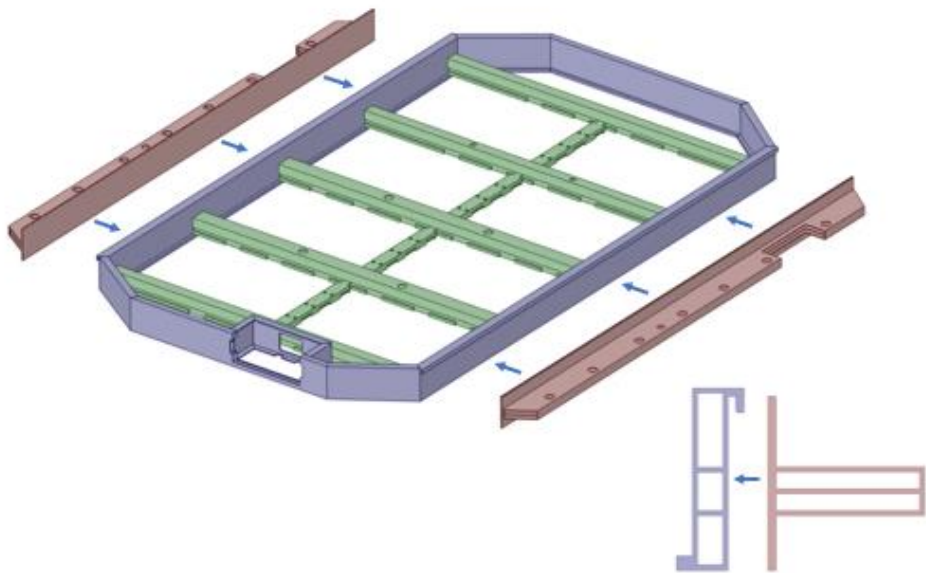
## 나) 배터리팩 케이스 교체형 사이드 멤버 개념

일반적으로 배터리팩 케이스의 사이드 멤버는 외곽 프레임 멤버와 일체형으로 압출되고, 압출된 멤버들을 용접을 통해 프레임을 제작하게 된다. 자동차 부품들은 강성 확보, 경량화, 공정 단순화 등을 위해 부품의 일원화를 하는 추세이지만 EV의 배터리팩 케이스는 한번 충격이 가해져 변형이 발생하면 해당 부분만의 교체가 불가능하여 배터리팩 케이스 전체를 교체해야 한다. 이는 비용적으로 매우 불합리할 뿐만 아니라 전기자동차 무게의 절반 가까이 차지하는 배터리팩 케이스 교체는 그 공정 또한 어려움을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 측면 충돌로부터 배터리를 보호하는 역할을 하는 배터리팩 케이스에 교체형 개념을 도입하여 설계하였다.

Fig. 2-7은 Frame member와 Side member가 일체형으로 압출되어 나온 배터리케이스의 형상과 우측하단에 압출되는 멤버의 단면을 도식하였다. Fig. 2-8은 Frame member와 Side member가 각각 압출되어 교체형식으로 조립되는 형상으로 그 단면을 우측하단에 도식하였다. Fig. 2-7, Fig. 2-8에 나온 사이드 멤버의 리브(Rib) 형상은 실제로 개발하는 멤버 형상이 아니며 실제로 본 연구에서 개발되는 사이드멤버의 리브 형상은 4장에서 다루었다.



**Fig. 2-7** Cross section of solid bottom type side member



**Fig. 2-8** Cross section of assembly type side member



## 제 3 장 배터리팩 케이스의 냉각 성능

### 1. Li-ion 배터리 발열 해석

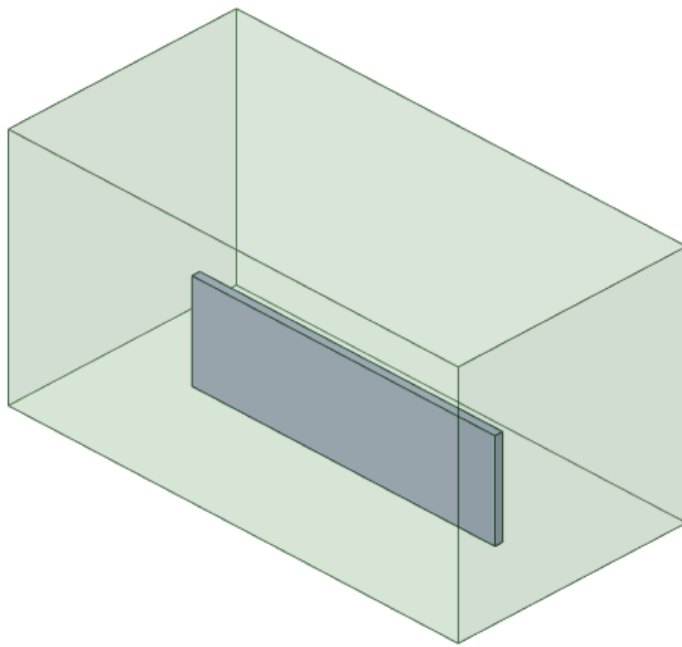
#### 가) Li-ion 배터리 Cell 단위 발열 해석

배터리팩 케이스의 냉각 성능을 해석을 통해 평가하기 위해서는 먼저 Li-ion 배터리의 발열량을 산출하여야 한다. 앞서 소개된 이론식을 이용하여 배터리의 발열량을 추정할 수 있으나, 이를 위해서는 식에 변수에 대한 값들을 SOC(State of Charge)에 따른 많은 실험들을 진행하여야 하며, 온도에 따라 변화하는 리튬이온 배터리의 비열, 저항 등과 같은 변수들을 넣어 배터리의 발열과 냉각 성능에 대한 해석을 하기에는 비용적, 시간적으로 제약이 크다. 따라서 본 연구에서는 리튬이온 배터리가 높은 SOC에서 지속적으로 발열을 유지한다는 가정 하에 냉각성능을 확인하고자 한다. 이를 위해 리튬이온 배터리의 단일 셀 단위로 대기중에 충전된다는 가정으로 역 산출하여 발열량을 추정하였다. 해석에 사용된 Li-ion battery의 열적 물성치는 Table 3-1과 같다. 일반적인 파우치형 배터리 셀에 사용되는 물성치를 사용하였다.

**Table 3-1 Material of Li-ion battery**

Properties	Li-ion battery
Specific heat capacity [J/kg K]	1,400
Thermal conductivity [W/m K] (In-plane)	35
Thermal conductivity [W/m K] (Cross-plane)	0.4

Fig. 3-1은 배터리가 대기에서 발열 시 온도분포를 확인하기 위한 해석의 모델링으로 배터리의 5개 면이 대기와 접촉하는 상태를 모사하여 발열해석을 진행하였다. 대류 열전달을 정상상태로 해석한 결과 Fig. 3-2와 같은 Li-ion 배터리 발열 해석 결과를 얻었다. 전체 시스템에서 최고온도는 44.2℃임을 확인하였고, Li-ion 배터리 셀 표면에서 최고온도 43.1℃ 임을 확인하였다.



**Fig. 3-1 Modeling of battery cell heat generation analysis**

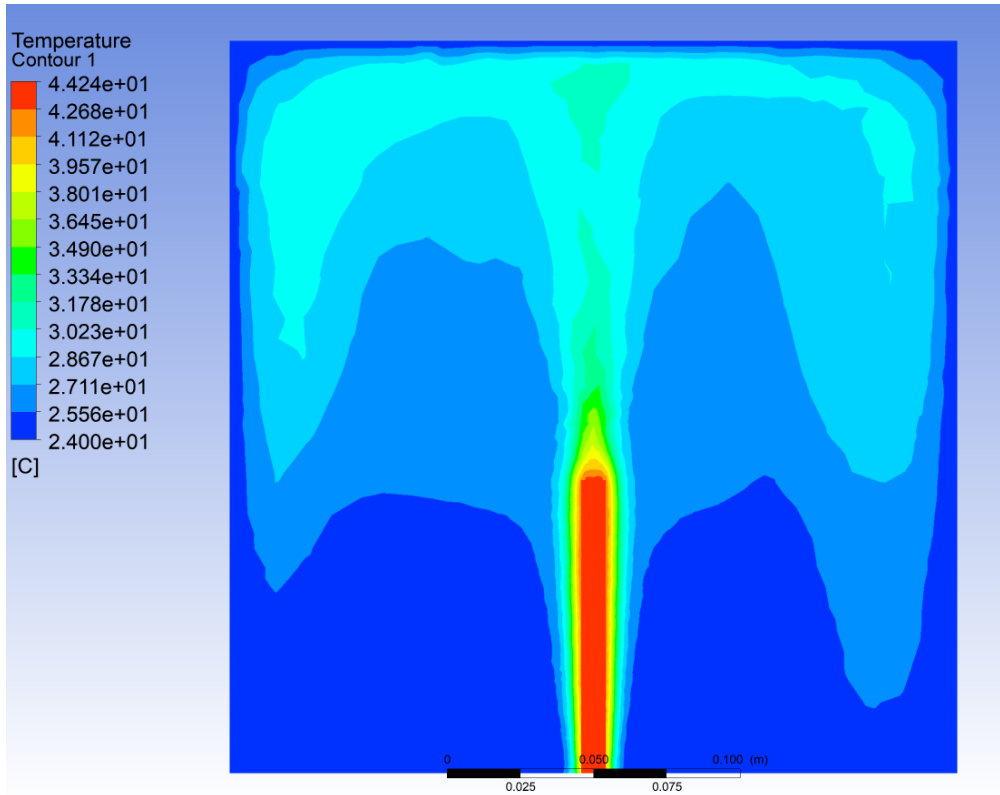


Fig. 3-2 Battery cell heat generation analysis

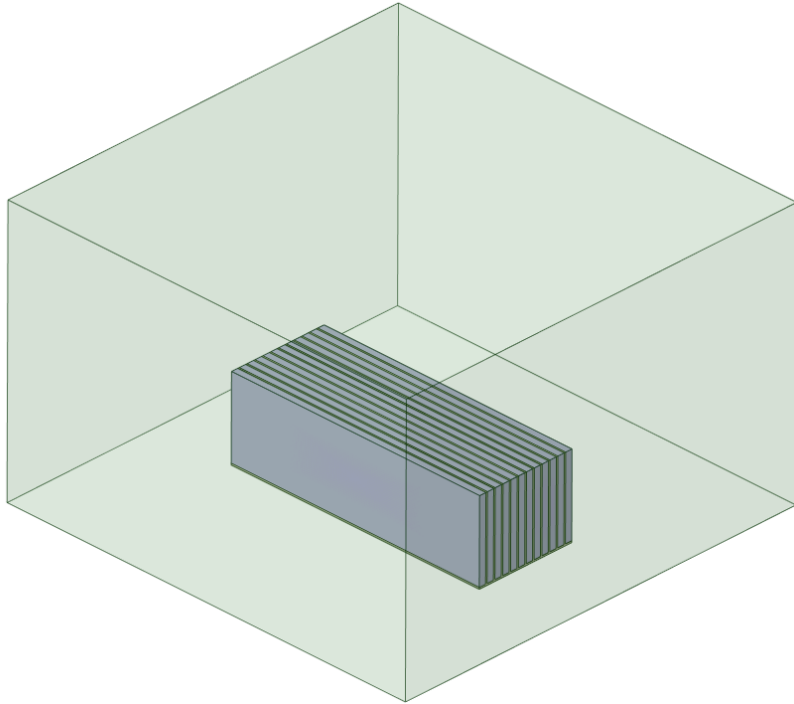
## 나) Li-ion 배터리 Module 단위 발열 해석

EV용 배터리는 셀들을 직렬로 패키징 하여 한 개의 배터리 모듈을 이루며 이러한 모듈을 직렬 또는 병렬로 패키징 하여 배터리 팩을 이루게 된다. 해당 연구에서는 12개의 배터리 셀을 직렬로 연결하여 배터리 모듈을 생성하고 이러한 모듈을 32개를 배터리팩 케이스 장착하여 운용하고자 한다. 배터리 모듈은 셀과 셀 사이, 셀과 냉각 플레이트사이에 TIM(Thermal interface material)을 도포함으로써 리튬이온 배터리의 방열 및 냉각 플레이트와의 열교환이 원활하도록 하였다. Fig. 3-3은 배터리 모듈의 대류 열전달 해석 시스템으로 모듈단위에서 배터리의 발열량을 추정하기 위해 모델링 하였다. 모델링에 사용된 TIM의 물성치는 Table 3-2와 같다.

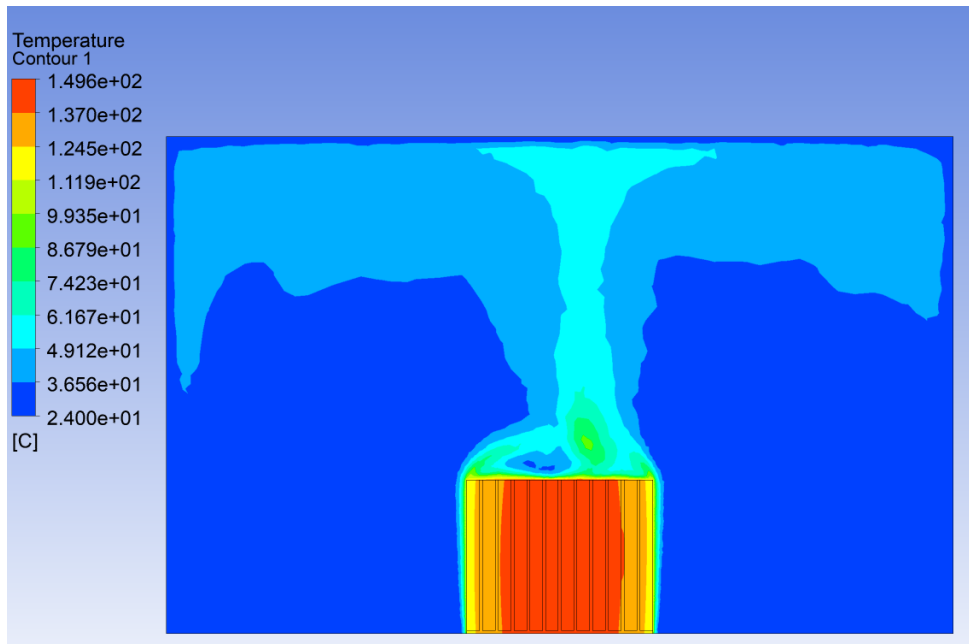
배터리 모듈단위로 대류와 열전달 해석을 한 결과 Fig. 3-4와 같이 얻었으며 셀 간 복사열 등으로 인해 냉각 시스템 없이 장시간 충방전시 모듈 단위에서 배터리의 운용 적정온도(15-35℃)를 벗어난 것을 확인하였다. [22]

**Table 3-2 Material of TIM**

Properties	TIM (Thermal Interface Material)
Specific heat capacity [W/kg K]	1200
Thermal conductivity [J/m K]	5



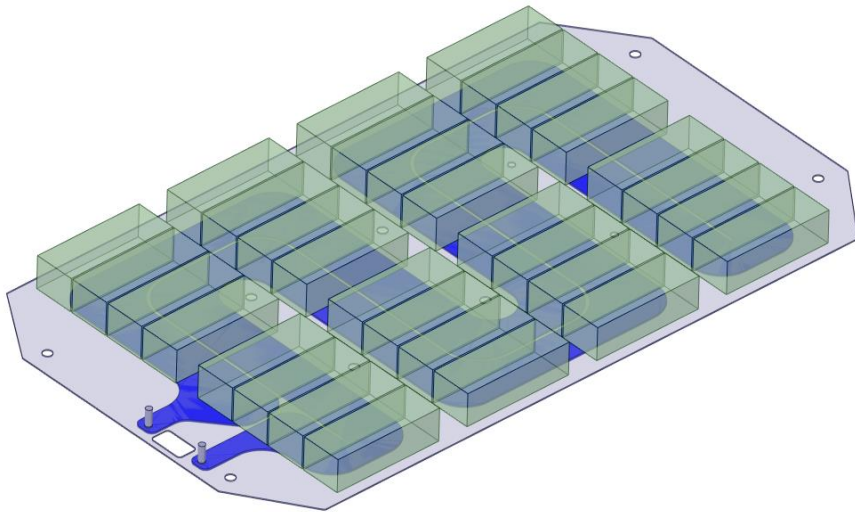
**Fig. 3-3 Modeling of battery module heat generation analysis**



**Fig. 3-4 Battery module heat generation analysis**

## 2. 배터리팩 케이스 냉각성능해석

적용된 EV 배터리팩 케이스의 냉각 시스템은 간접 수랭식 냉각 시스템으로 플레이트형 구조로 배터리의 하단과 접촉하여 배터리를 냉각시키는 시스템이다. Fig.3-5와 같이 시스템을 단순화하였으며 Li-ion battery module, Cooling plate, Cooling channel 이렇게 총 3파트로 나누어 모델링 하였다. 배터리는 모듈단위로 나누어 발열량을 주었다. 전기자동차의 경우 셀에서 모듈, 모듈에서 팩으로 패키징 된다. 셀과 셀은 직렬로 연결되고 모듈과 모듈사이의 연결은 직렬 또는 병렬로 연결되어 모듈마다 발열량이 다른 거동을 보일 수 있다. 하지만 냉각시스템의 성능을 보기위해 모든 모듈은 같은 발열량을 갖는다는 가정하에 해석을 진행하였다. 본 연구에서는 냉각시스템의 전체적인 온도 분포에 따른 냉각성능과 셀간 온도차이가 적어야 하는 리튬이온 배터리의 특성을 고려하여 온도분포가 평이하게 냉각되는지에 대한 관점으로 냉각성능을 분석하였다.



**Fig. 3-5 Battery pack case cooling system**

### 가) One channel cooling plate 냉각 해석

현대자동차의 E-GMP 플랫폼기반의 배터리팩 케이스를 착안하여 개발중인 배터리팩 케이스는 플레이트형 구조를 가지고 있으며, 1개의 Cooling channel을 통해 32개의 배터리 모듈에 대해 열을 관리한다. 1개의 Cooling channel은 Fig. 3-6과 같이 배터리를 순환하며 능동적으로 배터리를 냉각시킨다. 냉각수의 흐름에 있어서 유량을 늘리면 열용량이 증가하여 더 많은 열에 대한 흡열을 통해 냉각에 유리하다. 뿐만 아니라 유량을 늘리게 되면 유속이 증가하여 배터리의 온도 분포에 유리할 가능성이 있다. 전기배터리의 경우 전체적인 온도를 낮추는 냉각성능도 중요하지만 셀과 셀사이의 온도차이를 낮게 하여 Li-ion 배터리의 수명과 안정성을 향상시키는 관점도 중요하다. 하지만 유량을 늘리는 것은 펌프의 교체 등과 같은 추가적인 비용이 발생한다. 본 연구에서는 유량의 변화 없이 열용량이 같을 때, 유로 단면적의 형상 변경을 통해 유속을 바꾸어 Li-ion 배터리에 적합한 열분포를 얻고자 하였다.

Fig. 3-6에는 Cooling channel의 방향을 도식하고 데이터 정리를 위해 모듈단위로 구현한 Li-ion 배터리의 위치에 따른 이름을 표시하였다. 모듈은 배터리팩 케이스에 4개씩 8칸에 들어가는 것을 고려하여 각 칸을 A-H, 각 칸에 속한 모듈을 1-4로 정리하여 네이밍 하였다.

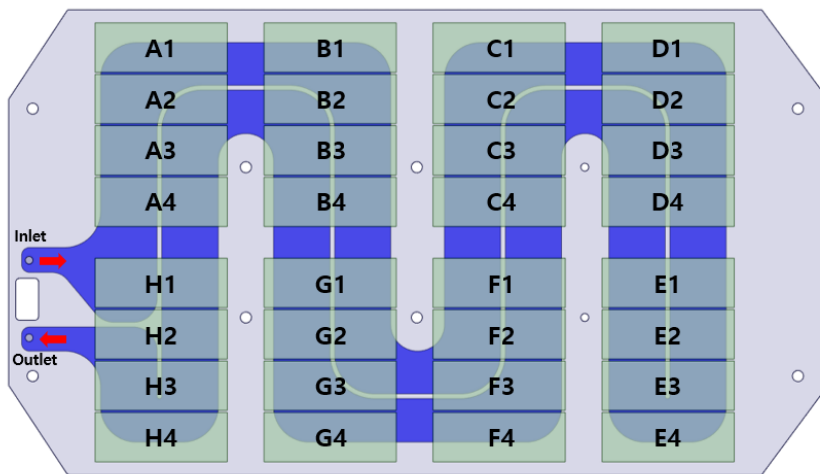
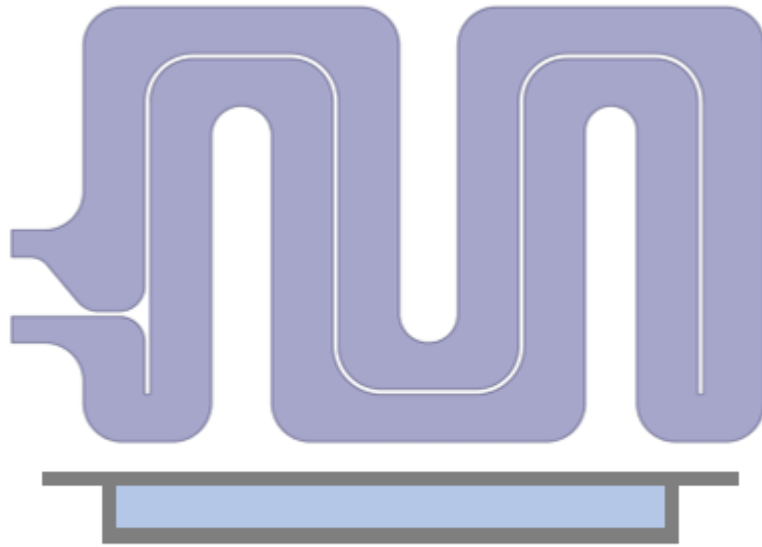


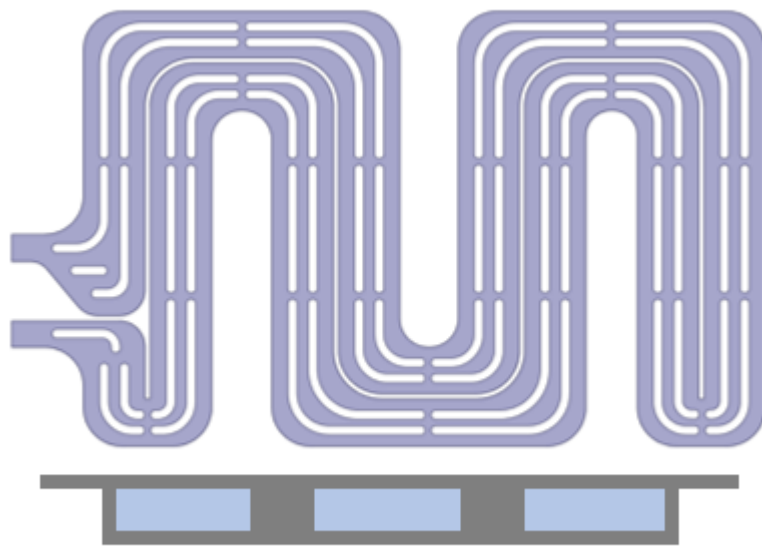
Fig. 3-6 Cooling channel direction and name of battery modules in 1 channel system

1 Channel cooling plate에서는 Fig. 3-7과 같이 유로 단면에 변화를 주어 2개 Case에 대한 해석을 진행하였다. Fig.3-7에서 (a)는 Model A의 유로 형상과 단면, (b)는 Model B의 유로 형상과 단면이다. Model A는 단면 형상의 변화 없이 쪽 직사각형으로 이어져 있다. Model B는 관내 유속을 조절하기 위해 Model A에 2개의 리브 형상을 유로를 따라 반복적으로 생성하여 유로의 단면적을 줄였다. 해석에 사용된 냉각수의 조건과 환경에 대한 조건 Table 3-3과 같으며, 평판 경계층 구조를 갖는 냉각 플레이트의 유체 벽면에서의 거동과 열전달을 확인하기 위해 K-omega SST 난류모델로 해석을 진행하였다. [23]





(a)



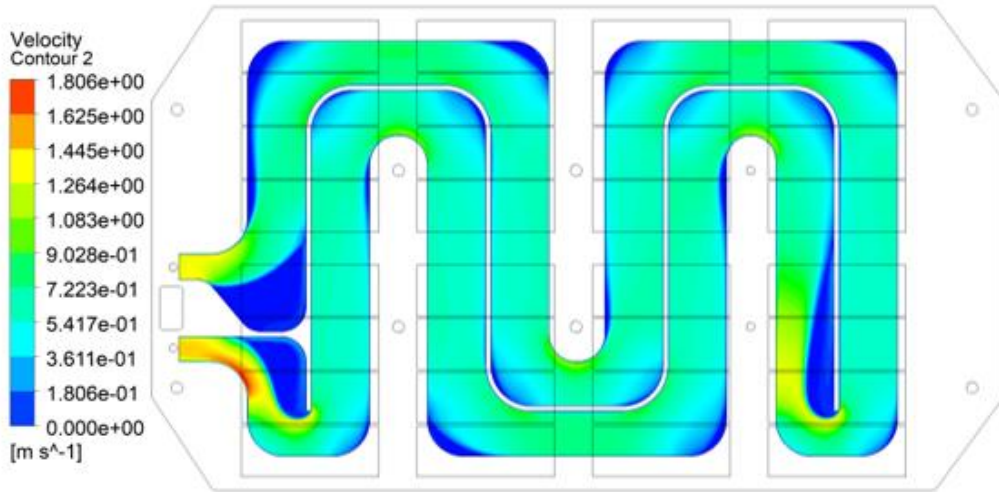
(b)

Fig. 3-7 Section of cooling channel Model A and Model B

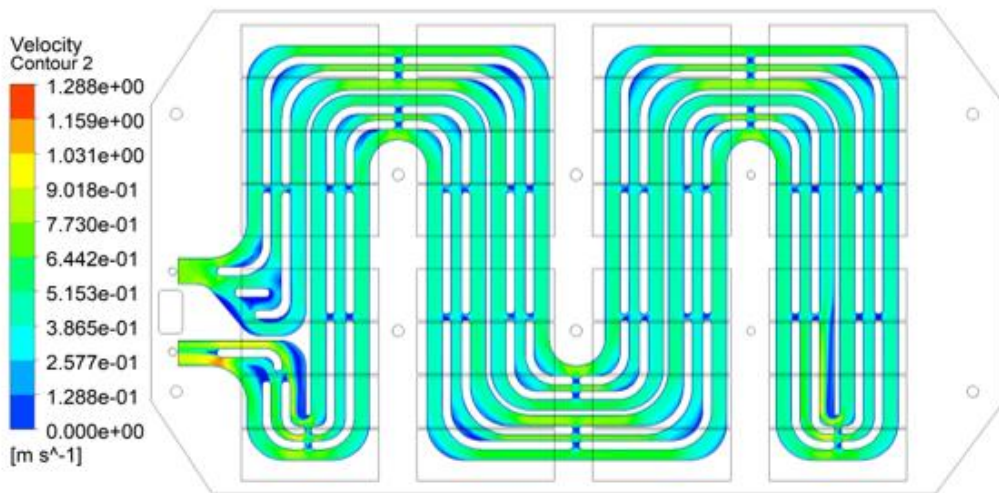
**Table 3-3 Coolant boundary condition and material**

	Value	Input
Flow Rate	25 [LPM]	Inlet Vel
$T_{inlet}$	20 [°C]	Inlet Temp
$T_{initial}$	26.85 [°C]	Total Temp
Density	1000 [kg/m <sup>3</sup> ]	Fluid Mat
Viscosity	0.003 [Pa s]	Fluid Mat
Thermal Conductivity	0.42 [W/m K]	Fluid Mat
Specific heat	3500 [J/kg K]	Fluid Mat

배터리 냉각 시스템의 냉각 해석 결과 Fig. 3-8과 같이 나왔다. Cooling channel 내부 냉각수의 유동을 확인하기 위해 관내 유속 분포를 contour 하였으며, 배터리 모듈의 열적 거동 확인을 위해 모듈 단위로 온도를 contour 하였다. 각 Cooling channel에 따른 모듈단위 배터리의 온도 분포를 비교하기 위해 배터리 모듈의 온도 범위를 20~33[°C]로 하였다. Fig. 3-8의 (a), (b)는 관내 유속에 대한 결과로 Model A는 커브 구간 가장자리에서 유동이 원활하지 않음을 확인하였다. Model B는 비교적 커브구간에서도 원활한 유동을 확인하였으며 속도가 고르게 분포된 것을 확인할 수 있었다. 유동이 원활하지 않은 부분에서 배터리 모듈의 냉각 성능이 저조함을 확인하였다. Fig.3-9의 (a), (b)는 배터리 모듈의 온도 분포이다.

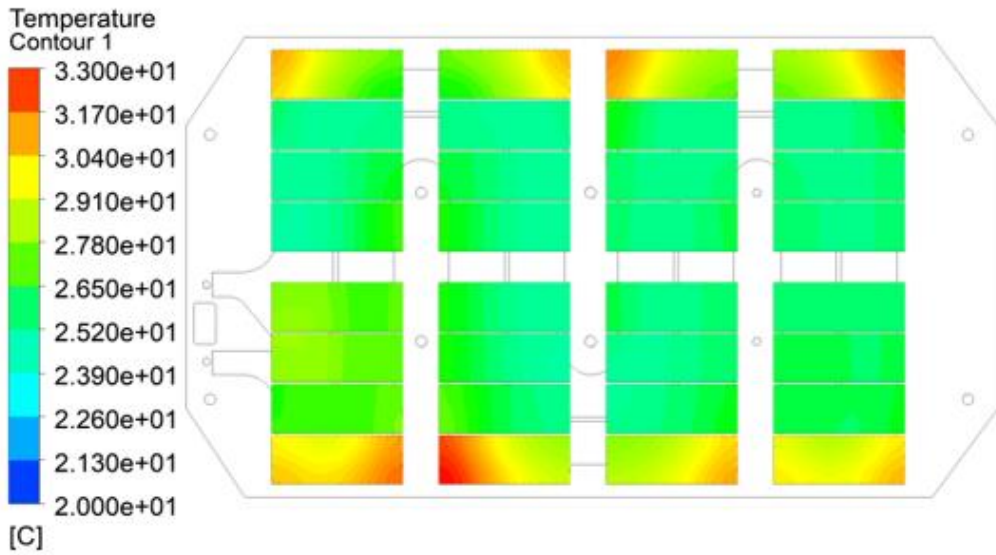


(a)

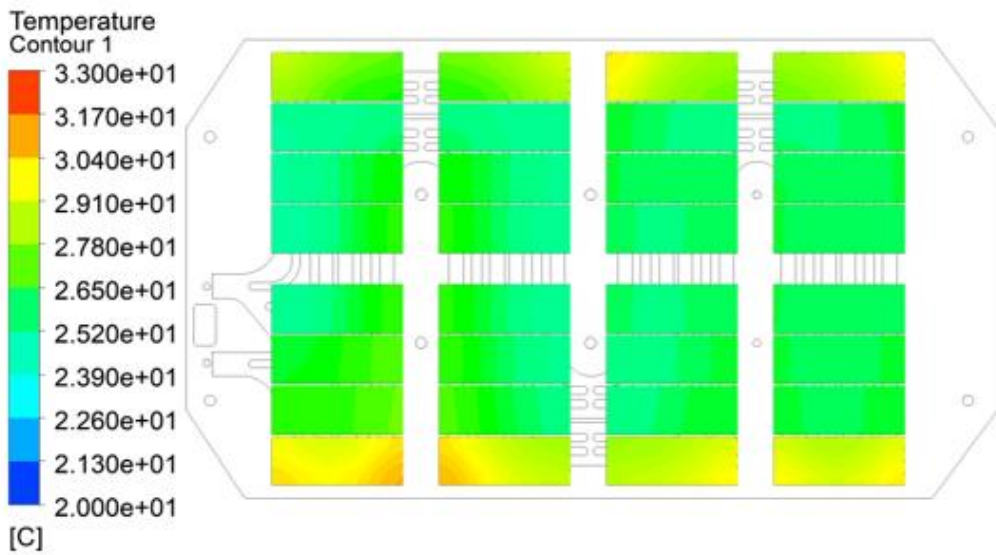


(b)

Fig. 3-8 Flow velocity of Model A and Model B



(a)



(b)

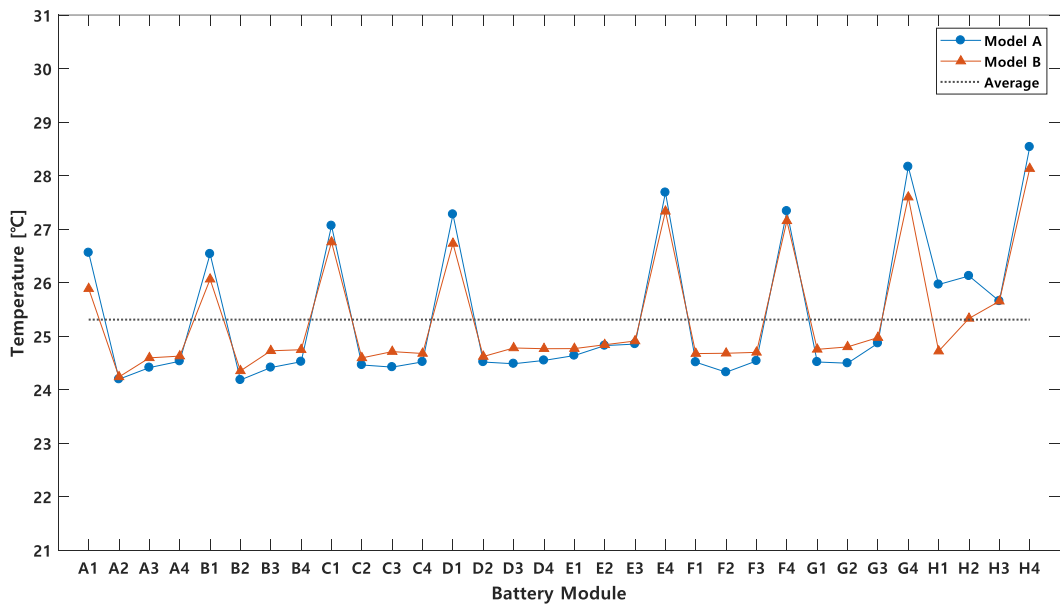
Fig. 3 -9 Cooling performance of Model A and Model B

Table 3-4는 Model A와 Model B의 비교 표로 의도한 바와 같이 Model B의 관내 유속인  $V_{flow}$ 가 더 높게 나옴을 확인하였다. 32개의 전체 배터리 모듈의 평균 온도인  $T_{avg}$ 는 각각 25.4°C와 25.3°C로 거의 동등함을 확인하였다. 이는 두 모델 모두 유량이 같아 같은 열용량을 갖는 경우 전체적인 흡열량이 비슷함을 확인하였다. 하지만 배터리 모듈의 최고 온도인  $T_{max}$ 는 각각 32.0°C, 30.9°C로 1.1°C 정도 차이가 나는 것을 확인하였다.

Fig. 3-10는 A1-H4까지 32개 배터리 모듈의 평균온도를 그래프화 하여 온도 산포 확인을 통해 배터리의 온도 산포를 확인하였다. Model A와 B 모두 온도가 튀는 배터리 모듈은 A1, B1, C1, E4, F4, G4, H4로 모두 가장 바깥쪽에 위치한 배터리 모듈임을 확인하였으며, 냉각수 유로가 흐르는 순서가 뒤로 밀려남에 따라 점차 온도도 증가하여 Model A, B 모두 H4에서 최고 온도를 확인하였다. Model B가 A보다 온도에 대한 산포가 더 적음을 확인할 수 있었다.

**Table 3-4 Compare analysis Model A and B**

	Model A	Model B
$Q_{flow}$	25 [LPM]	25 [LPM]
$V_{flow}$	0.57 [m/s]	0.83 [m/s]
$T_{avg}$	25.4 [°C]	25.3 [°C]
$T_{max}$	32.0 [°C]	30.9 [°C]
$T_{outlet}$	21.95 [°C]	21.95 [°C]



**Fig. 3-10 Battery temperature dispersion Model A and Model B**

## 나) Two channel cooling plate 냉각 해석

앞선 냉각 해석에서 1개의 Cooling channel의 단면적 변경을 통해 온도의 산포를 줄이는 냉각성능의 개선을 확인하였으나 BTMS의 안정성과 배터리의 수명을 균일하게 관리하기에는 비교적 미비한 성능개선으로 사료된다. 이는 1개의 Cooling channel에 냉각수가 Inlet으로 들어가 모든 배터리 모듈을 냉각시키면서 유로의 Outlet에 가까워짐에 따라 냉각수의 온도가 증가하여 Inlet에 가까운 배터리에 비해 열교환이 비교적 원활하지 않을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 같은 플랫폼에 2개의 Cooling channel을 운용함으로써 냉각수 유로의 복잡성과 길이를 줄였다. Fig. 3-11은 2 Channel cooling system의 유로 형상이다. 2개의 Cooling channel은 각각 A1-D4, E1-H4의 배터리 모듈을 16개씩 냉각시키며 U자형 구조로 이루어져 있다. 앞선 1 Channel cooling system의 냉각성능 해석의 비교를 통해 유로에 리브 형상이 균일한 냉각에 유리함을 고려하여 2 Channel cooling system에도 적용하였다. 쿨링 채널이 2개로 늘어남에 따라 유량은 2개의 유로에 각각 12.5 LPM으로 하여 1개의 쿨링 채널이 운용될 때와 열용량은 같도록 하였다. 1 Channel cooling system과 비교를 위해 2 Channel cooling system을 Model C로 하였다.

해석 조건은 1 Channel cooling system과 똑같이 진행하였다. 해석결과 Fig. 3-12과 같은 결과를 얻었으며 Model A, B와의 비교를 위해 온도 범위를 20~33°C로 설정한 결과 Fig. 3-13은 1 Channel cooling system의 해석에서 냉각 성능이 더 좋았던 Model B와 Model C의 Contour 결과 비교로 (a)는 Model A, (b)는 Model B이다.

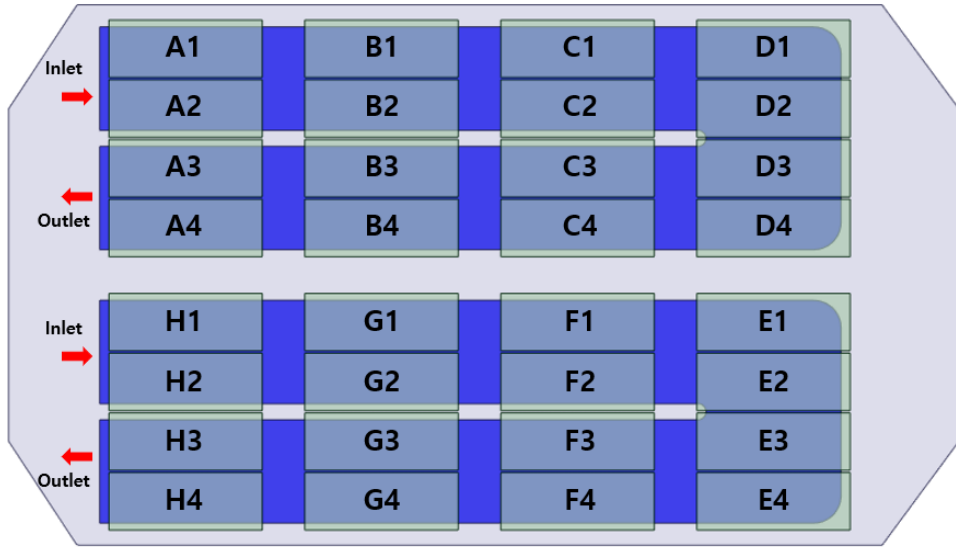


Fig. 3-11 Cooling channel direction and name of battery modules in 2 channel system

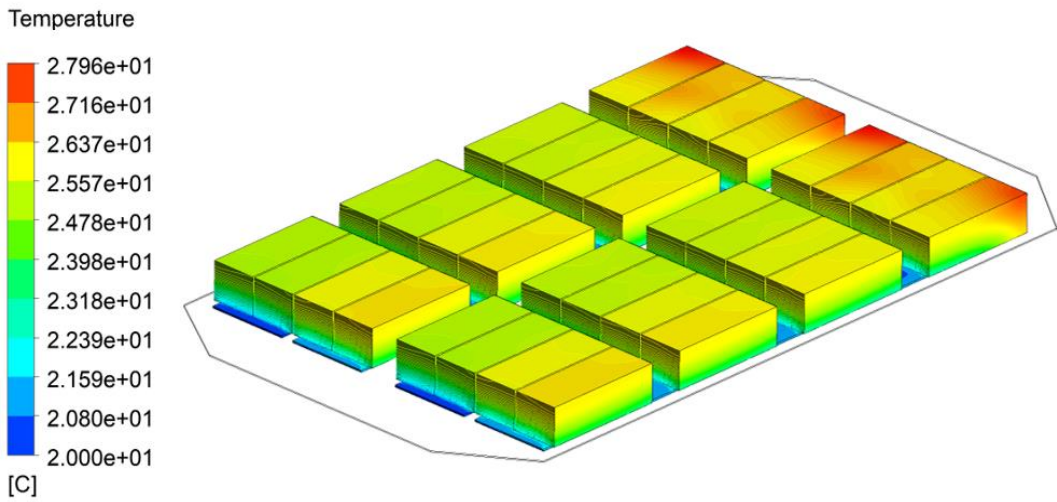
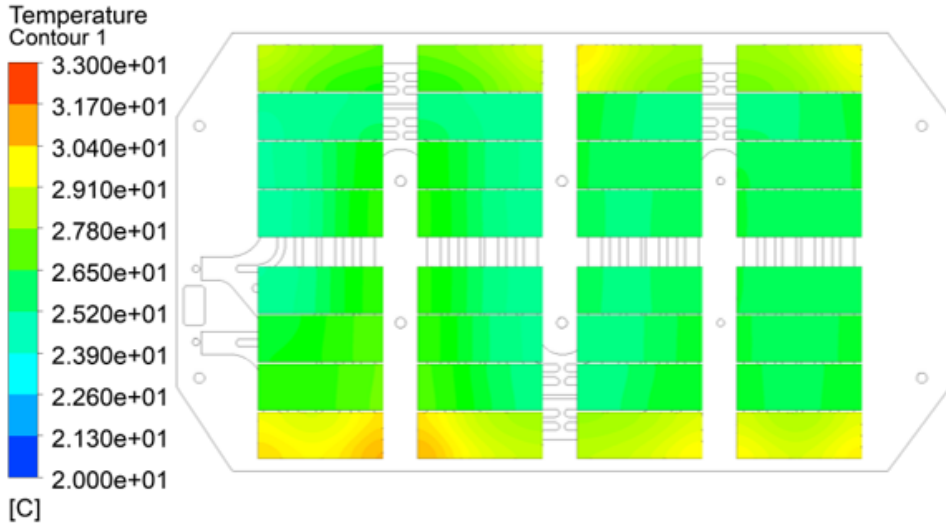
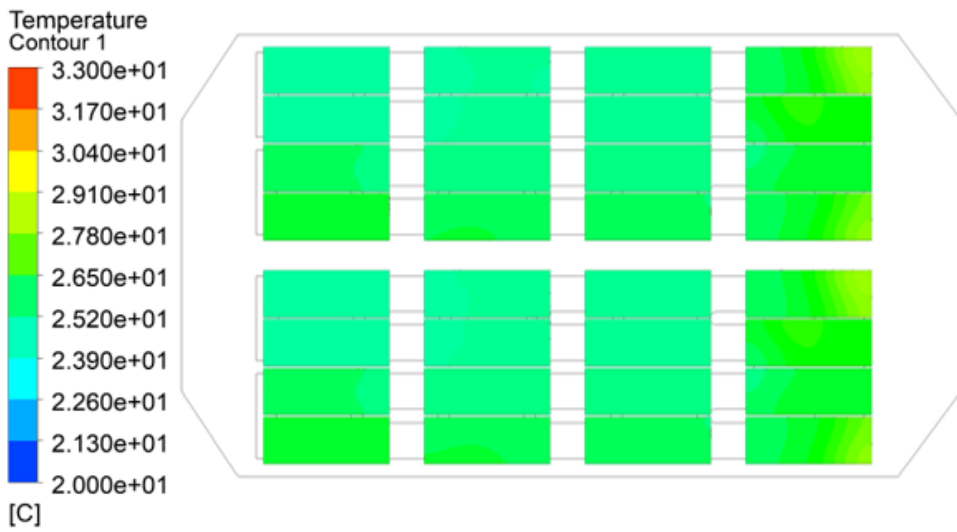


Fig. 3-12 Cooling performance of 2 channel cooling system





(a)



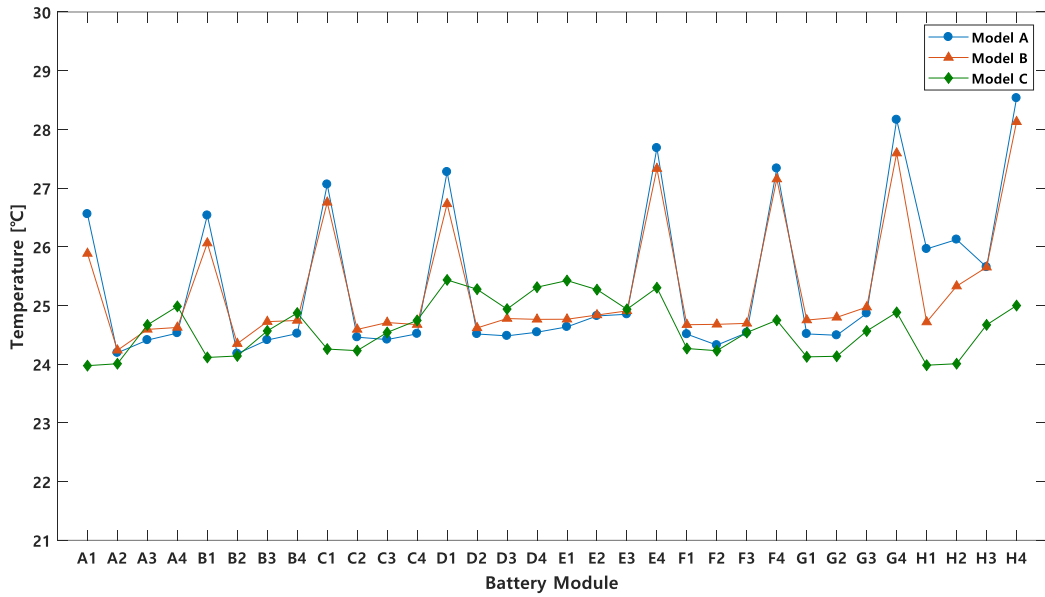
(b)

Fig. 3 -13 Cooling performance of Model B and C

Model C의 해석결과 관내 유속은 0.4 m/s로 3개의 모델 중 가장 느림을 확인하였다. 32개 배터리 모듈 전체의 평균온도는 24.6°C로 제일 낮은 온도를 가지고 있으나 이는 2개 쿨링 채널의 Inlet에서 각각 12.5 LPM씩 일정하게 20°C의 냉각수를 공급한다는 가정하에 진행된 시뮬레이션으로 냉각수가 배터리의 열을 흡열하고 순환하는 과정에서 충분한 발열을 통해 다시 20°C의 온도로 돌아와야 한다. Table 3-5는 Model A, B 그리고 C의 해석결과를 비교하였다. Fig. 3-14는 3개 모델의 온도 산포 비교로 Model C에서 효과적으로 온도 산포를 관리하는 것을 확인하였다.

**Table 3-5 Compare analysis model A, B and C**

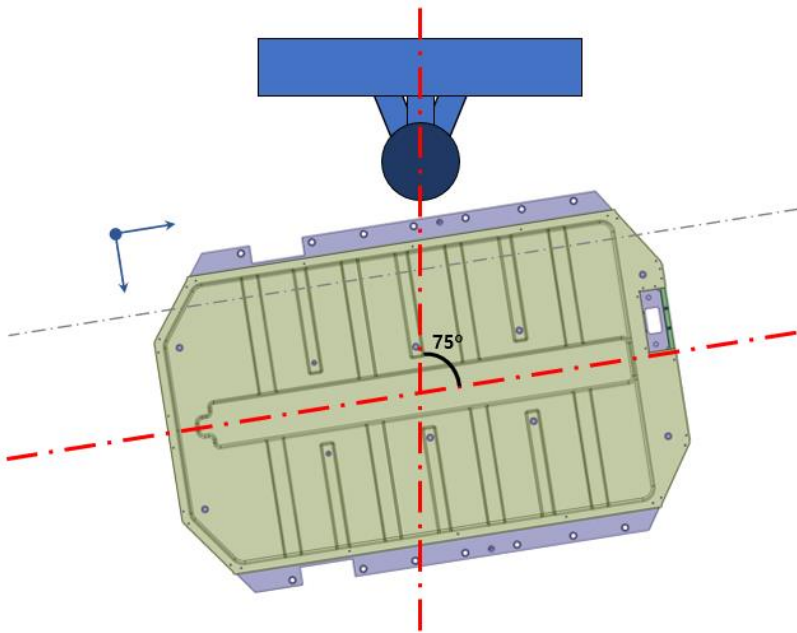
	Model A	Model B	Model C
$Q_{flow}$	25 [LPM]	25 [LPM]	12.5×2 [LPM]
$V_{flow}$	0.57 [m/s]	0.83 [m/s]	0.40 [m/s]
$T_{avg}$	25.4 [°C]	25.3 [°C]	24.6 [°C]
$T_{max}$	32.0 [°C]	30.9 [°C]	28.0 [°C]
$T_{outlet}$	21.95 [°C]	21.95 [°C]	20.95 [°C]



**Fig. 3-14 Battery temperature dispersion Model A, B and C**

## 제 4 장 배터리팩 케이스 측면충돌 성능

배터리팩 케이스의 측면 충돌 강성을 확인하고자 북미, 유럽 아시아의 기준으로 기둥 측면 충돌시험을 (Side Impact Pole Test) 고려하였다. 기둥 측면 충돌시험은 Pole 형태의 강체 구조체에  $32\pm 0.5$  km/h 속도로 대상 차종의 무게로 충돌시켜 강성을 평가한다. 그러나 배터리팩 케이스는 부품단위로 평가를 위해 대차 충돌 시험을 하기에 비용적으로 비효율적이며, 부품단위 평가를 위한 충돌 중량의 조절이 제한적이다. 대신 낙하 충격 시험으로 대체할 수 있다. 낙하 충격 시험은 충돌 강체를 임의의 높이에서 자유낙하 시켜서 시험편에 충격을 가하는 시험으로 충돌에너지를 산출하여 충돌 강체의 중량과 낙하 높이를 조절하여 시험편에 충돌시킨다. 이때 발생하는 에너지와 변형을 확인하여 Data를 얻을 수 있는 시험이다. 본 연구에서는 낙하 충돌 시험을 해석으로 모사하였으며 그 모식도는 Fig. 4-1과 같다.



**Fig. 4-1 Drop impact test**

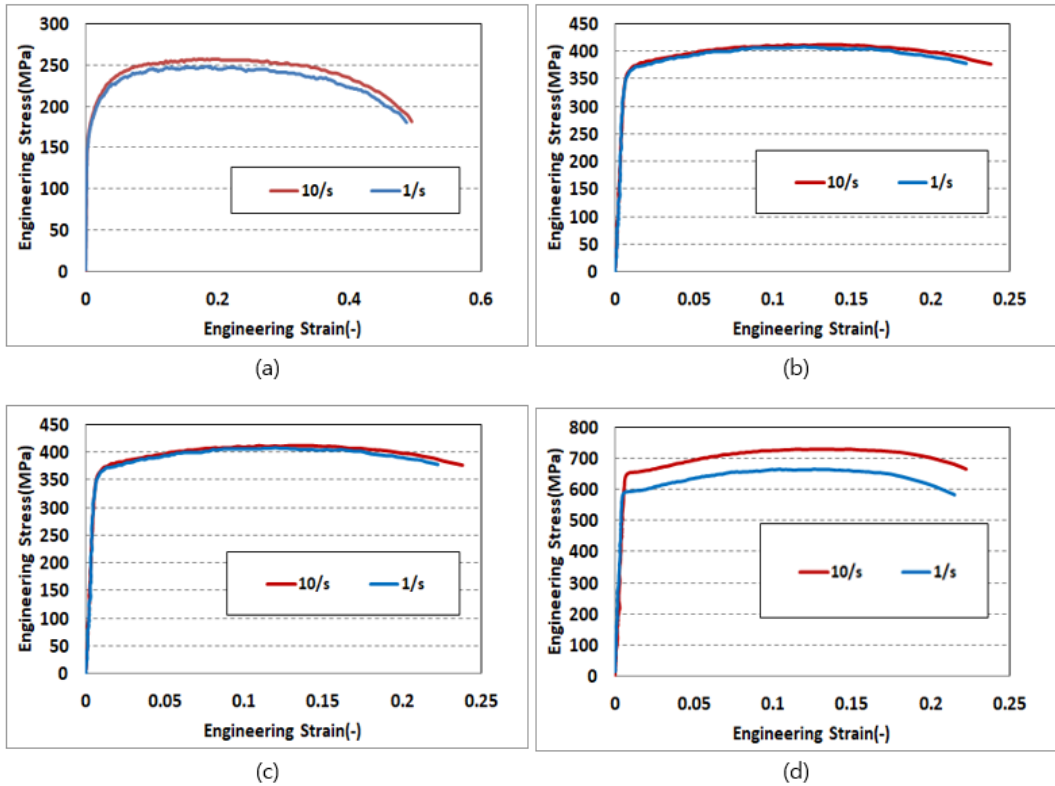
## 1. 고속 인장 시험

충돌의 경우 재료의 변형이 고속이므로 소재에 고속 변형 거동에 따른 물성치 확보가 필요하다. 본 연구에서는 배터리팩 케이스의 주요 소재인 Al 6000계열과 Al 3000계열의 고속 인장 시험을 진행하였다. 시편은 ISO 8256 Type 3 수정시편 규격을 적용하였으며, 고속재료시험기(High Strain Rate Tensile Test, VHS6680, Instron)을 사용하였다. 소재당 변형률 속도를 1/s와 10/s로 하여 측정하여 Stress-Strain Curve를 확보하였다.



Fig. 4-2 High Strain Rate Tensile Test

Fig. 4-2는 고속 재료 시험기이고, Fig. 4-3는 도출한 알루미늄 계열별 S-S Curve이다. Fig.4-3에서 (a)는 Al 3000계열, (b)는 Al 5000계열, (c)는 Al 6000계열 그리고 (d)는 7000계열이다.



**Fig. 4-3 S-S Curve according to aluminium series**

Table 4-1은 고속 인장 시험을 통해 얻은 물성치이다. 개발하는 배터리팩 케이스에 적용되거나 적용 예정인 소재들로 해석을 위해 S-S Curve에는 외삽법을 적용하였으며, 유한요소해석을 위한 Flow Stress Curve를 도출하여 각 소재의 물성에 적용하였다.

**Table 4 -1 Physical properties of aluminium series**

	Strain rate	Yield strength [Mpa]	Tensile strength [Mpa]	Elongation
Al 3000 series	1/s	161.31	248.19	0.49
	10/s	163.58	257.21	0.49
Al 5000 series	1/s	137.63	219.98	0.30
	10/s	145.52	230.14	0.36
Al 6000 series	1/s	355.36	408.38	0.23
	10/s	362.12	411.76	0.24
Al 7000 series	1/s	594.52	665.59	0.22
	10/s	646.41	729.89	0.22

## 2. 사이드멤버 형상에 따른 충돌해석

충돌해석은 ANSYS LS-DYNA를 사용하였으며, Table 4-2는 해석에 고려된 충돌 조건이다. 충돌 중량을 실제 대상 차량의 중량으로 선정하기에는 부품단위 평가에는 적합하지 않을 것으로 사료되어 배터리를 제외한 배터리팩 케이스의 자중과 측면 충돌 시 해당 부품의 영향력을 고려하여 충돌 무게를 산출하였다. 최종 충돌 속도는 32km/h로 기동 측면 충돌시험과 같게 하였다. 배터리팩 케이스의 충돌을 위한 Fixed 조건은 완성차에 조립되는 체결부와, 제작 공정에서 발생한 툴링 홀(Tooling hole)을 사용하였다.

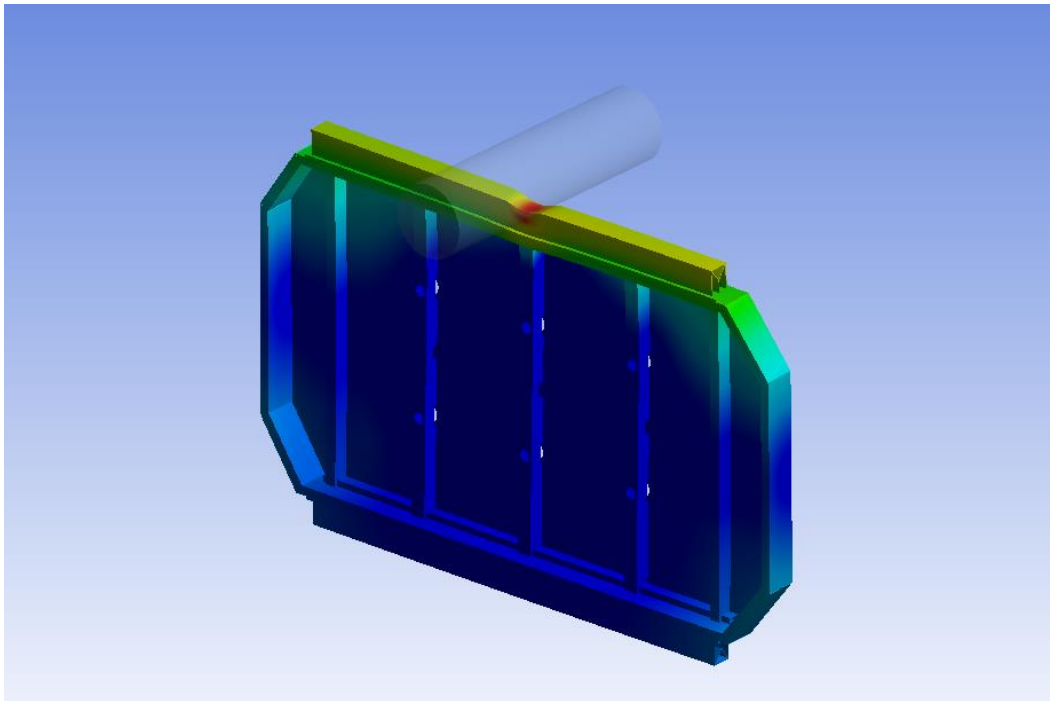
**Table 4-2 Condition of side impact pole analysis**

Condition	Value
Impact velocity	32 [km/h]
Impact weight	280 [kg]
Pole Diameter	254 [mm]
Fixed support	12 [Surface]
End time	0.03 [s]

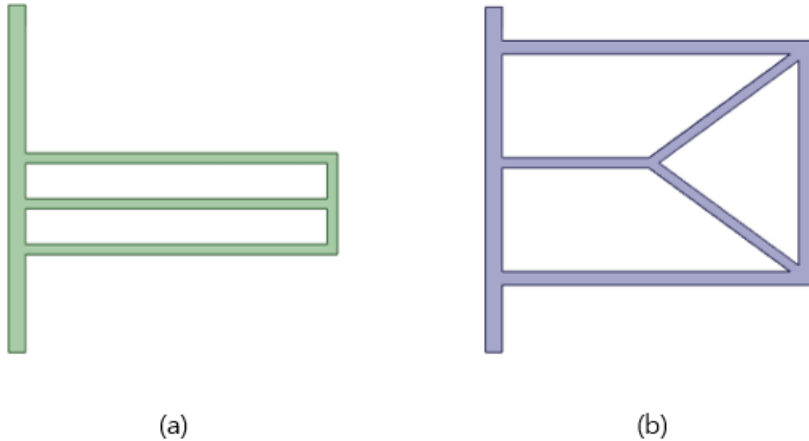
배터리팩 케이스의 주요 역할은 내부 배터리의 보호이다. 따라서 충돌 시 충격을 흡수하여 배터리에 충격 전달을 최소화해야 한다. 또 Li-ion 배터리의 분리막이 찢어지면 내부 단락이 발생하여 열전이, 열폭주로 이어지게 되므로 배터리의 외형 변형이 되지 않아야 한다. Fig.4-4는 충돌해석의 일부로 배터리팩 케이스의 측면 충돌 시 사이드 멤버의 역할비중이 높음을 확인하였다. 배터리팩 케이스의 측면 충돌 강성을 높이기 위해서는 사이드 멤버의 소재도 중요하지만 멤버의 형상 변경을 통



해 최적설계가 가능하다. 본 연구에서는 사이드 멤버의 리브(Rib) 형상을 변경하여 충돌 강성에 적합한 멤버를 도출하고자 한다. Fig. 4-5는 본 연구에서 해석을 진행한 압출 멤버의 리브 형상이다. (a)는 일반적인 압출멤버의 리브 형태로 일자 모형을 가지고 있다. 이형상의 사이드 멤버가 적용된 배터리팩 케이스를 Model X라 지칭하였다. (b)는 Y자 형태의 리브 형상을 갖는 멤버로 해당 형상의 사이드 멤버가 적용된 배터리팩 케이스를 Model Y라 지칭하였다.



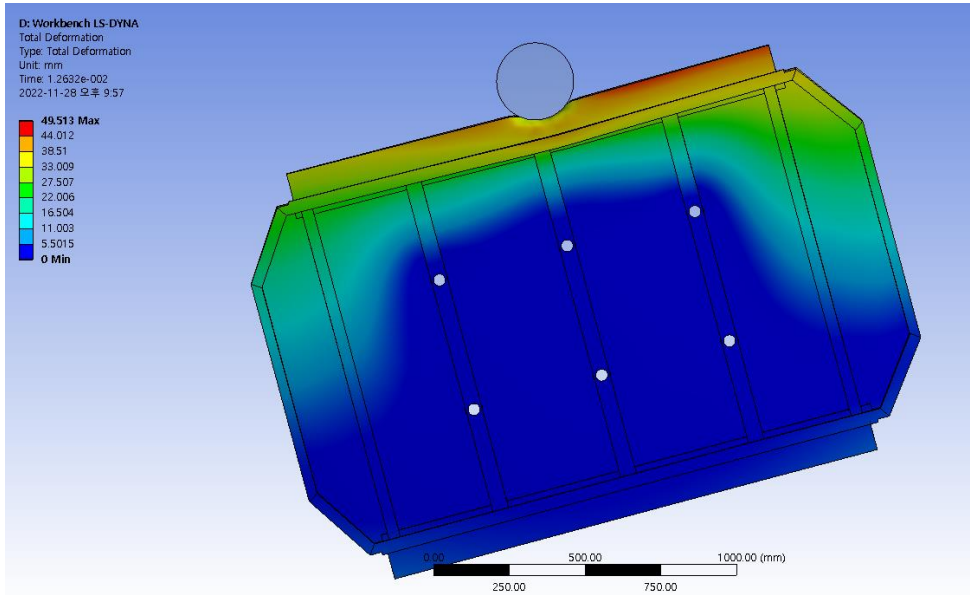
**Fig. 4 -4 Analysis of the impact test on the battery pack case**



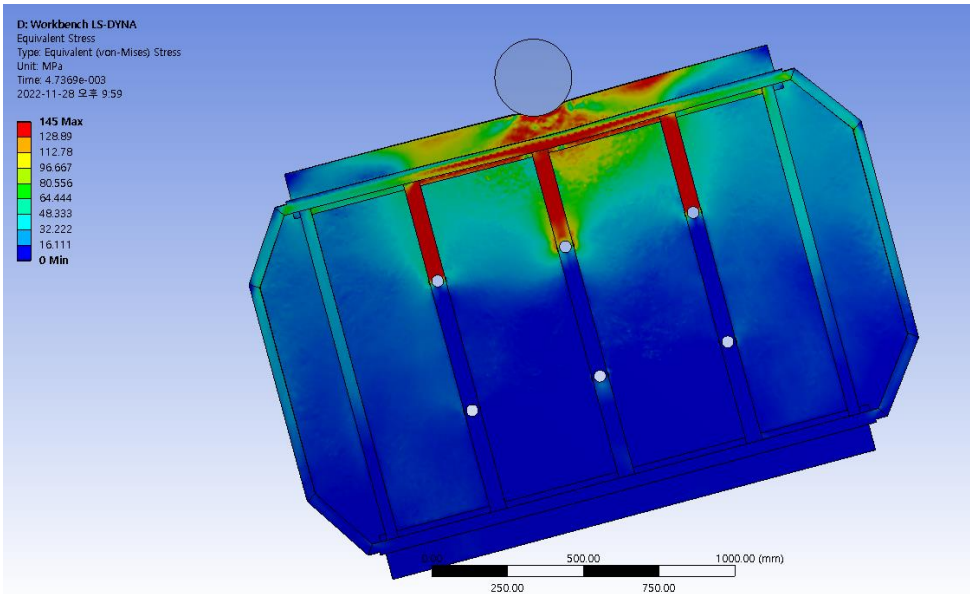
**Fig. 4-5 Side member cross section according to rib geometry**

Fig. 4-6은 Model X의 충돌해석 결과로 변형량을 contour 하였다. 해석 결과 최대 변형량은 49.5mm로 0.012초에 사이드 멤버에서 관찰되었다. Fig. 4-7은 Model X의 충돌 직후 발생하는 Von-Mises 응력으로 사이드 멤버와 센터 크로스 멤버에 집중적으로 부하가 걸리는 것을 확인하였다.

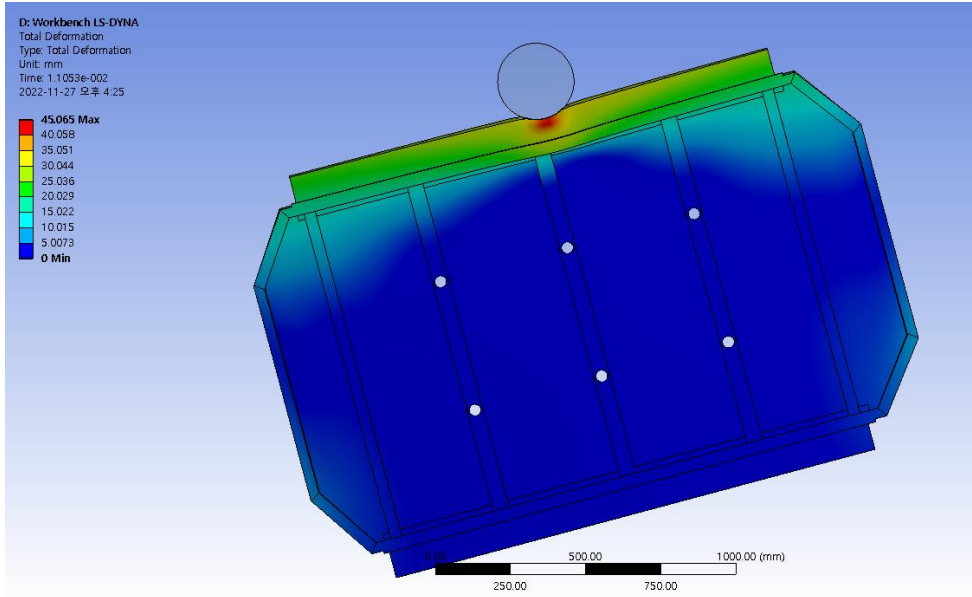
Fig. 4-8은 Model Y의 충돌해석 결과로 변형량을 contour 하였다. 해석 결과 최대 변형량은 45mm로 0.009초에 사이드 멤버에서 관찰되었다. Model X와 비교하였을 때 상대적으로 더 적게 변형이 발생하는 것을 확인하였다. Fig. 4-9는 Model Y의 충돌 직후 발생하는 Von-Mises 응력으로 Model X와 비슷함을 확인 하였으며, Model X와 마찬가지로 사이드 멤버와 센터 크로스 멤버에 집중적으로 부하가 걸리는 것을 확인하였다. 하지만 Model Y의 경우 하단 로어 판넬에서 걸리는 부하 면적이 더 넓게 관찰되었다.



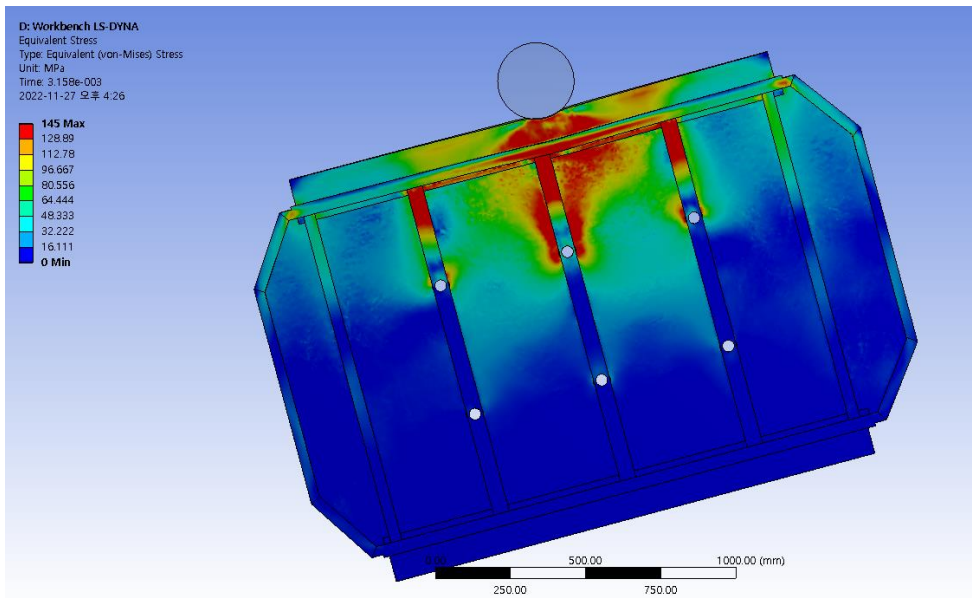
**Fig. 4 -6 Total deformation on Model X Impact analysis**



**Fig. 4 -7 Von-Mises Stress right after impact on Model X**

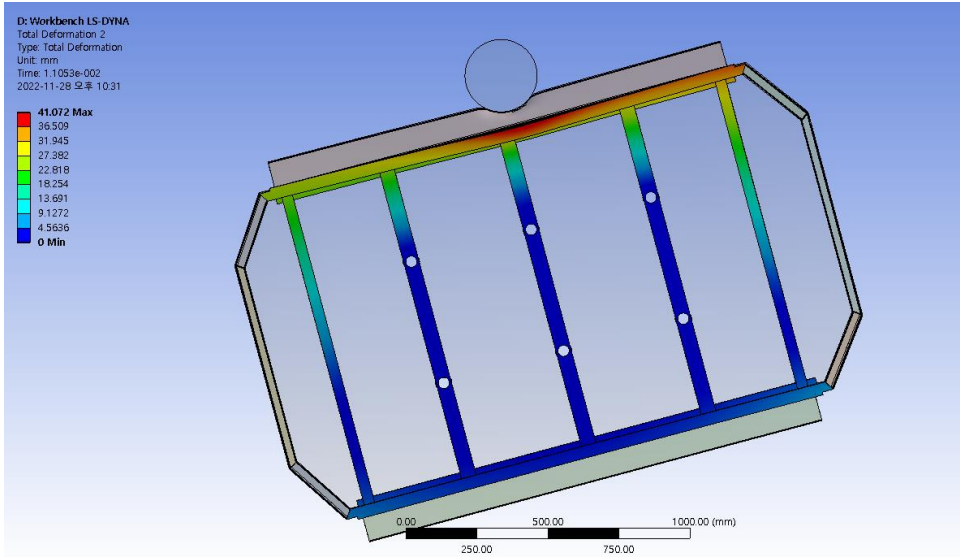


**Fig. 4 -8 Total deformation on Model Y Impact analysis**

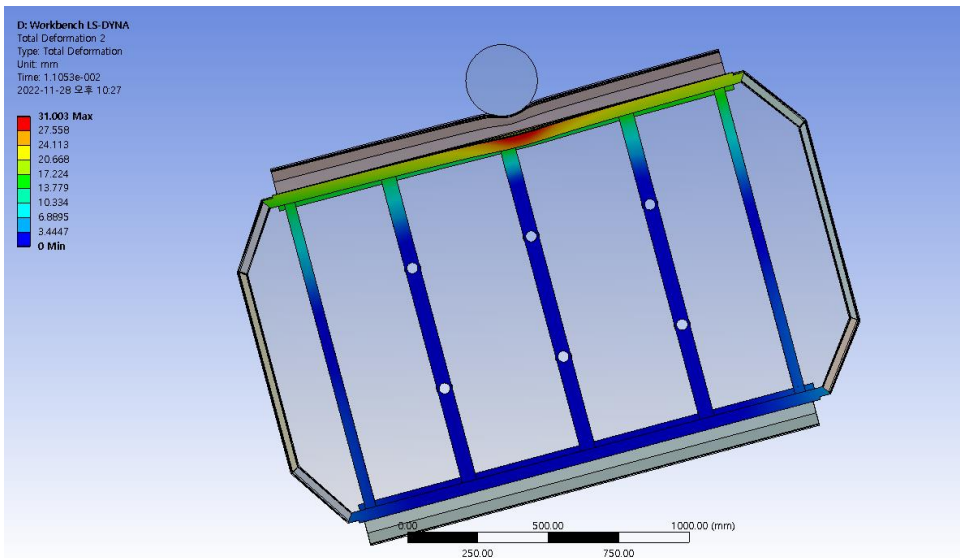


**Fig. 4 -9 Von-Mises Stress right after impact on Model Y**

Fig. 4-10과 Fig. 4-11은 배터리가 장착되는 부분에 변형량 contour 결과창으로 배터리 장착 기준 충돌 침입량은 Model X는 최대 22mm, Model Y는 최대 17mm임을 확인하였다.



**Fig. 4-10 Maximum deformation in the battery mounting section of Model X**



**Fig. 4-11 Maximum deformation in the battery mounting section of Model Y**

Fig. 4-12는 Model X와 Model Y의 시간에 따른 변형량으로 충돌 이후 0.03초까지 Model X의 변형량은 43mm까지 최대 변형량에 비해 6.5mm 줄어들었다. Model Y의 변형량은 31mm까지 최대 변형량에 비해 14mm 줄어들었다. Model X의 경우 충돌 이후 Side Member가 굽힘 형태로 변형되어 Model Y에 비해 복원력이 약한 것으로 사료된다.

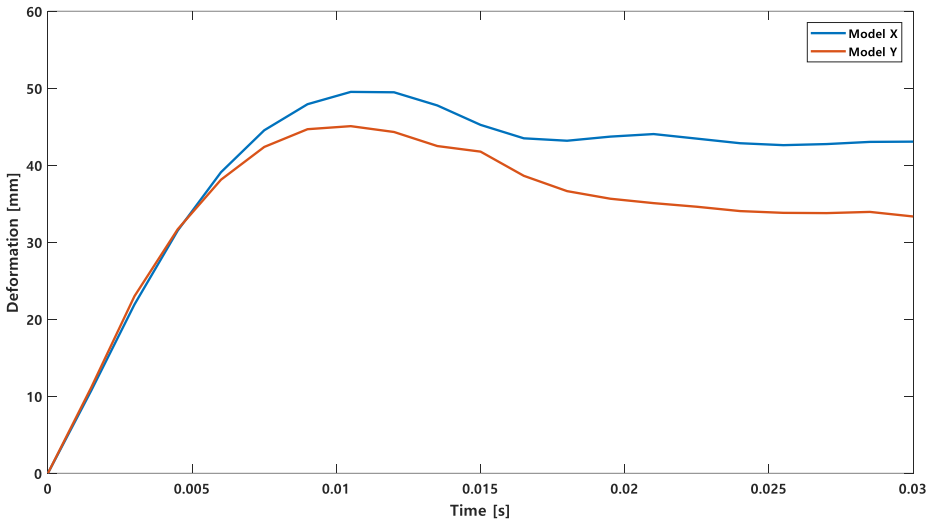
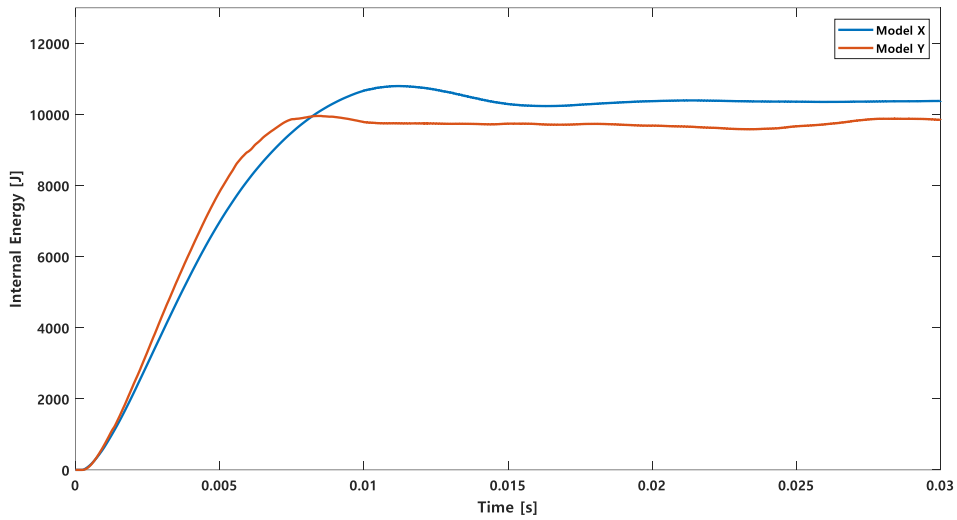


Fig. 4-12 Deformation of Model X and Model Y

Fig. 4-13은 Model X와 Model Y의 내부에너지 변화량으로 Model X는 최대 10799J로 확인하였으며, Model Y는 최대 9958.1J로 확인하였다. 본 연구에서 충돌 해석시 온도에 대한 변수를 입력하지 않았으므로 해당 해석 충돌 시스템 내의 전체 에너지는 식 4.1과 같다고 볼 수 있다.

$$E_{total} = E_{kinetic} + E_{internal} \quad (4.1)$$

식 (4.1)에서  $E_{tot}$ 은 충돌 시스템 내의 전체 에너지,  $E_{kin}$ 은 운동에너지,  $E_{int}$ 은 내부에너지이다. 따라서 충돌 이후 피충돌체의 내부에너지는 충격흡수 에너지와 같다고 볼 수 있다.



**Fig. 4-13 Internal energy of Model X and Model Y**

배터리팩 케이스의 경우 앞서 언급한 바와 같이 충돌에너지를 최대한 흡수하면서 배터리의 분리막 손상을 최소화 하기위해 충돌 시 변형량은 최소화하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 배터리팩 케이스의 충돌강성을 평가하기 위해 차량 사이드 도어의 충돌 강성 평가지표를 활용하고자 한다. 차량 도어의 경우 탑승자 보호를 위해 생존 공간을 확보하고자 변형량 대비 충돌에너지 흡수량을 확인한다.

$$C_{impact} = \frac{E_{internal}}{Def} \quad (4.2)$$

본 연구에서는 식 (4.2)를 활용하여 충돌 성능 지표를 도출하였다. 식 (4.2)에서  $C_{impact}$ 는 충돌 성능 지표, Def는 변형량이다. Fig. 4-14에서 Model X와 Model Y의 충돌 성능을 비교하였다. Model X가 내부에너지의 흡수가 더 높은 것으로 확인하였으나 변형량이 높아 충돌 성능은 Model Y가 더 우수한 것으로 판단하였다.

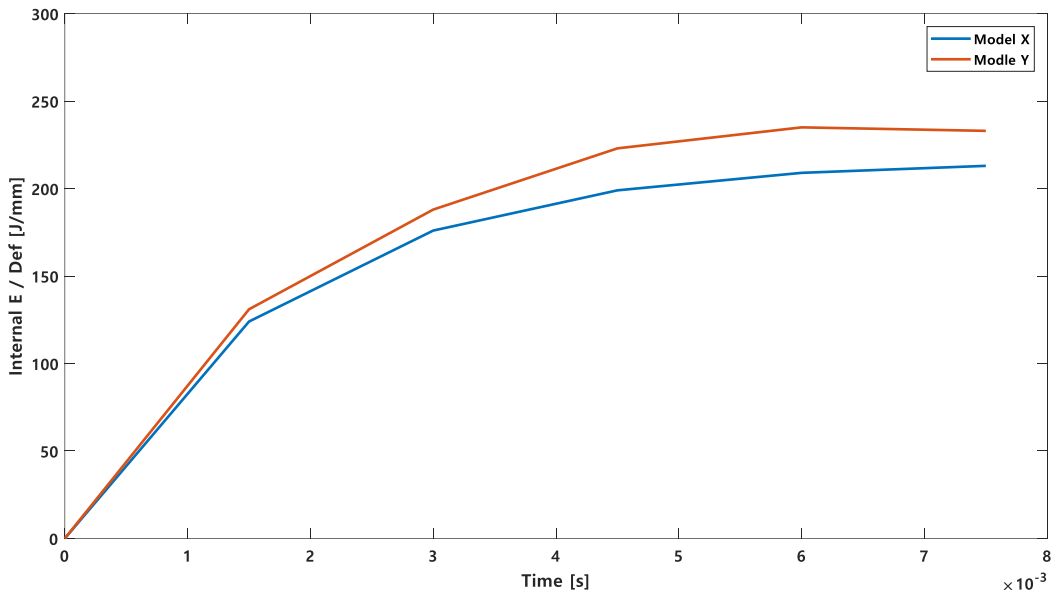


Fig. 4-14 Impact performance of Model X and Y



## 제 5 장 결론

본 논문에서는 배터리팩 케이스의 냉각성능과 충돌강성에 대해 유한요소법을 적용하여 평가하였다. 냉각성능은 1개의 냉각 유로를 운용하는 One channel cooling plate와 2개의 냉각 유로를 운용하는 Two channel cooling plate의 냉각 성능평가를 수행하였다. 또한 배터리팩 케이스의 기둥 측면 충돌 시험(Side impact pole test)를 모사하여 임팩트 빔에 리브(Rib) 형상에 따른 충돌 강성에 대한 평가를 수행하였다. 이에 대한 결론을 다음과 같이 내릴 수 있었다.

1. 배터리의 냉각에 있어 1개의 Cooling channel을 운용하는 Model A, B를 비교하였다. Model B의 경우 Model A와 다르게 Cooling channel에 리브 형상을 추가하여 관내 유속을 높여 냉각수 단위 체적의 접촉시간을 줄임으로써 배터리의 온도 산포를 줄이고자 시도하였다. 그 결과 관내 유속을 높이고 유동이 원활하지 못한 section의 유동을 활성화하였다. Model A의 경우 전체 배터리의 평균온도와 확인된 최대의 온도차이는  $6.6^{\circ}\text{C}$  였으며, Model B는  $5.6^{\circ}\text{C}$ 로 기존 배터리 온도의 산포를 줄이는 데에 성공하였으나, 극적인 성능 개선으로 보기에는 어려움을 확인하였다.

2. 냉각 시스템에서 Cooling channel 1개를 운용하는 경우 유로 단면적의 형상 변경을 통해 효과적인 성능 개선에는 한계가 있음을 확인하였다. 따라서 유로의 길이를 줄여 냉각수 단위 체적의 접촉시간을 효과적으로 줄이고자 두 개의 Cooling channel을 갖는 Model C를 고안하였다. 그 결과 Model C의 경우 배터리의 평균온도와 최대 산포를 갖는 지점과의 온도의 차이는  $3.4^{\circ}\text{C}$ 임을 확인하였다. 뿐만 아니라 같은 유량 같아 열용량은 Model A, B, C 모두 같지만 Model A, B에서 배터리 평균 온도는 각각  $25.4^{\circ}\text{C}$ ,  $25.3^{\circ}\text{C}$ 로 동등함을 확인하였으며, Model C에서의 배터리 평균온도는  $24.6^{\circ}\text{C}$ 로 조금 더 냉각에 효율적임을 확인하였다.

3. 본 연구에서는 배터리의 냉각성능에 있어 미치는 요인 3가지를 확인하였다. 첫째, 배터리의 관내 유속이 변경됨에 따라 온도 산포를 줄이는게 가능하지만, 효과적인 개선으로 보기에는 어려움이 있다. 둘째, 유로의 관내에서 유동이 원활하지 않으면 해당 section에서 냉각성능이 크게 떨어진다. 셋째, Cooling channel의 개수를 늘려 배터리를 관리하는 경우 비용과 설계의 복잡성이 증가하지만 모듈 단위에서 직렬 또는 병렬로 각기 다르게 연결되는 EV 배터리 팩을 고려하였을 때, Cooling channel의 분할을 통한 배터리 온도 관리는 초고속 충전을 요구하는 EV 배터리의 냉각 시스템 관리에 유리한 대안이 될 수 있다.

4. 본 연구에서는 충돌해석을 위해 재료의 변형이 고속임을 고려하여 고속 변형 거동에 따른 물성치를 확보하였다. 알루미늄의 계열 당 변형률 속도를 1/s, 10/s로 하여 측정하였다. 그 결과 AI 계열이 높아짐에 따라 측정값에 오차가 커짐을 확인하였다. 고강도, 고강성 알루미늄의 차체 적용을 통해 차량 경량화를 이루려는 최근 동향을 봤을 때, 고속 인장 시험의 물성치가 고강도 고강성 알루미늄 소재를 적용한 차체부품의 충돌 해석에 신뢰성을 높여줄 것으로 사료된다.

5. 배터리팩 케이스의 기둥 측면 충돌 시험을 낙하 충돌 시험으로 모사하여 해석을 진행하였다. 교체형 사이드 멤버의 리브 형상에 따라 Model X와 Y로 나누어 충돌 시 거동을 분석하였다. 충돌강성에 대한 평가를 위해 두가지 결과값을 확인하였다. 첫째로 충돌이후 침입으로 인한 배터리의 분리막 손상을 최소화 하기위해 변형량을 확인하였으며, 배터리 내부 충격을 줄이기위해 배터리팩 케이스의 충돌 흡수 에너지를 확인하였다. Model X의 최대 변형량은 49.5mm로 최대 변형량이 45mm인 Model Y보다 높게 확인되었다. 내부에너지는 Model X는 최대 10.8kJ, Model Y는 9.96kJ로 확인하였다. 본 연구에서는 배터리팩 케이스의 충돌강성 평가 지표로 변형량으로 충돌 흡수 에너지를 변형량으로 나누어 계산하였다. 그 결과 Model Y가 Model X에 비해 충돌 성능이 더 좋을 것으로 사료된다.

## REFERENCE

- [1] Younh-Wook Son, Gun-Soo Hu, "Technology development trend of domestic and foreign electric vehicle and technology development strategy of domestic electric vehicle core part", The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, 2017, Vol. 22, No. 5, pp. 373-381
- [2] J.S. Edge, S. O’Kane, R. Prosser, N.D. Kirkaldy, A.N. Patel, A. Hales, A. Ghosh, W. Ai, J. Chen, J. Yang, S. Li, M.C. Pang, L. Bravo Diaz, A. Tomaszewska, M. W. Marzook, K.N. Radhakrishnan, H. Wang, Y. Patel, B. Wu, G.J. Offer, "Lithium ion battery degradation: what you need to know", Phys. Chem. Chem. Phys., 2021, Vol. 23, pp. 8200–8221.
- [3] J. Vetter, P. Novak, M.R. Wagner, C. Veit, K.C. Moller, J.O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Mehrens, C. Vogler, A. Hammouche, "Ageing mechanisms in lithium-ion batteries", J. Power Sources, 2005, Vol. 147, pp. 269–281
- [4] 이동원, "xEV 배터리 하우징 산업 동향", 한국과학기술정보연구원, 2016, ISBN 978-89-294-0899-2.
- [5] X. Han, L. Lu, Y. Zheng, X. Feng, Z. Li, J. Li, M. Ouyang, "A review on the key issues of the lithium ion battery degradation among the whole life cycle", ETransportation, 2019, Vol. 1, pp. 100005,
- [6] 국가환경정보센터, 전기자동차의 배터리 관리 시스템 기술 동향, (2016) 118호.

- [7] Center for Automotive Research, Technology Roadmaps: Intelligent Mobility Technology, Materialc and Manufacturing process, and Light Duty Vehicle Propulsion, (2017).
- [8] 한국자동차연구원, 모빌리티인사이트, (2022) 신년호.
- [9] Frank Czerwinski, "Current Trends in Automotive Light-weighting Strategies and Materials, Materials", 2021, Vol. 14.
- [10] 산업통상자원부, 2021년 12월 및 연간 자동차산업 동향, (2022).
- [11] B. Shi, H. Zhang, Y. Qi, L. Yang, "Calculation model of effective thermal conductivity of a spiral-wound lithium ion battery", J. Therm. Sci., 2018, Vol. 27, pp. 572–579.
- [12] K. Onda, T. Ohshima, M. Nakayama, K. Fukuda, T. Araki, "Thermal Behavior of Small Lithium-ion Battery During Rapid Charge and Discharge Cycle", Journal of Power Sources, 2006, Vol.158, pp. 535-542.
- [13] Kim Tae-U, Park Seong-Jin, 전기자동차의 배터리 열관리 시스템. The Magazine of the Society of Air-Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea, 2015, Vol. 44, pp. 28-38.
- [14] Y. Fan, Y. Bao, C. Ling, Y. Chu, X. Tan, S. Yang, "Experimental study on the thermal management performance of air cooling for high energy density cylindrical lithium-ion batteries", Appl. Therm. Eng., 2019, Vol. 155, pp. 96–109.

- [15] K. Chen, Y. Chen, Y. She, M. Song, S. Wang, L. Chen, "Construction of effective symmetrical air-cooled system for battery thermal management", *Appl. Therm. Eng.*, 2020, Vol. 166, 114679.
- [16] Z. Lu, X. Yu, L. Wei, Y. Qiu, L. Zhang, X. Meng, L. Jin, "Parametric study of forced air cooling strategy for lithium-ion battery pack with staggered arrangement", *Appl. Therm. Eng.*, 2018, Vol. 136, pp. 28–40.
- [17] Charlotte Roe , Xuning Feng , Gavin White , Ruihe Li , Huaibin Wang , Xinyu Rui , Cheng Li , Feng Zhang , Volker Null, Michael Parkes , Yatish Patel , Yan Wang , Hewu Wang , Minggao Ouyang , Gregory Offer , Billy Wu, " Immersion cooling for lithium-ion batteries – A review", *Power Sources*, 2022, Vol. 525.
- [18] H. Zhang, X. Wu, Q. Wu, S. Xu, "Experimental investigation of thermal performance of large-sized battery module using hybrid PCM and bottom liquid cooling configuration", *Appl. Therm. Eng.*, 2019, Vol. 159, 113968.
- [19] W. Wu, S. Wang, W. Wu, K. Chen, S. Hong, Y. Lai, "A critical review of battery thermal performance and liquid based battery thermal management", *Energy Convers. Manag.*, 2019, Vol. 182, pp. 262–281.
- [20] 이정민. "한국의 기동측면충돌시험기준에 따른 차체변형 및 인체상해 특성 연구." 국내석사학위논문 아주대학교, 2016.
- [21] Euro NCAP, EUROPEAN NEW CAR ASSESSMENT PROGRAMME (2015), Ver7.0.2

- [22] D. Chen, J. Jiang, G.H. Kim, C. Yang, A. Pesaran, "Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells", *Appl. Therm. Eng.*, 2016, Vol. 94, pp. 846–854.
- [23] Moon C. M., Baek S. G., Park S. O., "Assessment of two-equation turbulent models in FLUENT for a turbulent heated pipe flow" *한국전산유체공학회*, 2003, 158-163.