Transactions of KSAE, Vol. 31, No. 2, pp.89-97 (February, 2023)

Check for updates

Copyright © 2023 KSAE / 207-02
pISSN 1225-6382 / eISSN 2234-0149
DOI http://dx.doi.org/10.7467/KSAE.2023.31.2.89

<응용논문>

CAE를 활용한 배터리 케이스 설계 프로세스 개발 사례 연구

김 민 웅* · 최 원 혁 · 정 관 용 · 김 철 호

대주코레스 기술연구소

A Study on Design Process Using CAE of Battery Case

Minwoong Kim* · Wonhyuk Choi · Kwanyong Jeong · Chulho Kim

R&D Center, Daejookores Company, 266 Wanjusandan 6-ro, Bondong-eup, Wanju-gun, Jeonbuk 55316, Korea
(Received 26 September 2022 / Revised 19 October 2022 / Accepted 22 November 2022)

Abstract : The automobile industry is dramatically transforming from using ICE(internal combustion engine) to EV(electric vehicle). As the number of electric vehicles increases, concerns about safety in the event of an accident are also rising. The battery case, one of the important parts of the EV, protects the battery cells and manages the battery temperature through a battery thermal management system. Therefore, a battery case should be designed with safety in mind. Recently, there is a trend to replace aluminum in battery cases with steel to reduce weight. Thus, it is necessary to develop performance standards and design processes for aluminum battery cases. In this paper, the performance standard of aluminum battery cases based on international standards was developed. It also describes the design procedures and methods of manufacturing aluminum battery cases by using CAE.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Battery case(배터리 케이스), Finite element simulation(유한요소 시뮬레이션), Optimization(최적화), CFD(전산유체역학), Aluminum extrusion(알루미늄 압출)

Nomenclature

a	: acceleration
B_i	: bar element
c	: damping coefficient
C_p	: specific heat coefficient at constant pressure
D_{base}	: base displacement
D_{opt}	: optimization displacement
f_n	: resonant frequency
F	: static force
g	: gravitational acceleration
H	: frequency response
j	: imaginary number
Hz_{base}	: base frequency
Hz_{opt}	: optimization frequency
k_s	: spring constant
k_{stiff}	: stiffness coefficient
m	: mass
p	: static pressure
S	: energy sources
$\overline{S_{ij}}$	: components of strain-rate tensor
t	: time
T	: static temperature
T_k	: rigidity
u	: cartesian velocity components
$\vec{u}$	: velocity vector with the components
V_{dv}	: design domain volume fraction
V_{opt}	: optimized volume
x	: cartesian coordinate system
δ	: displacement
ρ	: density
σ	: cauchy stress tensor
τ	: viscous stress tensor

*Corresponding author, E-mail: mwkim@daejookc.com
*This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

τ_{ij}^{R} : components of Reynolds stress tensor
ω : natural frequency
ω_n : undamped natural frequency
Φ : viscous dissipation

1. 서 론

최근 자동차 산업에서는 파리기후변화 협정 및 탄소중립에 따른 환경규제로 인하여 내연기관 자동차의 생산량이 감소하고 있으며, 내연기관에서 전기 자동차 시장의 규모가 Fig. 1과 같이 확장되는 추세이다.[1)]

전기자동차 시장이 성장함에 따라 현재 자동차 업계에서 완성도 높은 요구성능 기준을 확립하고자 활발히 연구 중에 있다.[2)]

현재 전기 자동차는 엔진, 변속장치 등 주요 내연기관 부품 대비 부품수가 내연기관의 70 % 수준이다. 그 중 배터리와 배터리케이스는 전기 자동차에서 가장 큰 비중을 차지한다. 전기 자동차 부품의 약 30 %를 차지하고 있어 가장 주요한 부품이라고 볼 수 있다. 배터리 케이스의 구조는 Fig. 2에 나타낸 것과 같다. 300 kg에 육박하는 배터리 무게 때문에 동일 차종 기준 공차 중량이 내연기관보다 증가된다. 증가된 공차중량은 주행거리와 직결되기 때문에 전기 자동차의 경량화는 필수적이다.[3)]

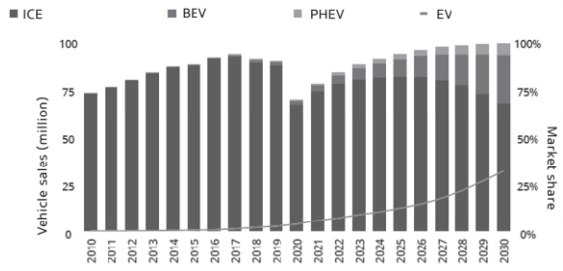


Fig. 1 Global electric vehicle market share by year[5)]

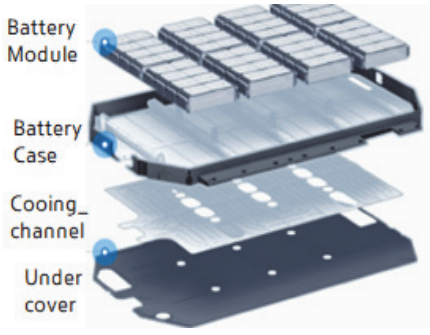


Fig. 2 Overview of battery case structure[6)]

배터리케이스는 차량 사고 시 배터리 셀을 보호하고 냉각 라인을 통해 배터리 온도를 관리해주는 부품이다. 그러므로 배터리 셀을 강건하게 보호할 수 있도록 강건해야 하고 배터리에서 방출되는 열을 외부로 내보내는 방열 특성이 우수해야 한다.

차체 분야에서는 효율 향상 및 경량화를 위하여 비강성 및 비강도가 높은 저비중 소재 양산성 검토, 차체구조 최적화, 신공법 등의 기술개발이 활발히 진행 중이다. 이에 따라 성능과 경량화를 동시에 만족시킬 수 있는 알루미늄 합금 부품이 점진적으로 증가되고 있는 추세이다.[4)]

성능 측정을 위하여 성능 기준을 정확하게 파악해야 한다. 하지만 현재 배터리케이스 및 배터리 팩 개발이 내연기관 자동차에서 전기자동차로 교체되는 과도기 단계에 있어 명확한 설계 및 성능 기준이 부재인 상태이다. 현재로서는 기존 내연기관 자동차의 차체를 기반으로 한 개발 기준과 국제 표준 일부를 인용하여 개발 표준을 삼아 개발하는 것이 최선인 실정이다.

이에 본 논문에서는 CAE 활용한 알루미늄 배터리케이스 설계 프로세스의 제안 및 성능 기준 선정에 참고가 되는 정보를 제공하고자 하였다. 배터리케이스 설계프로세스는 크게 3단계로 분류하였으며, 각 프로세스 별로 성능기준이 되는 해석항목들을 소개하였다.

2. 본 론

배터리 케이스 요구 성능을 확립하기 위해 국제표준 등을 근거로 배터리 팩과 관련된 시스템요구도를 분석하였다. 또한 배터리 케이스와 관련된 성능을 확인하여 요구도를 개발 표준으로 선정하였다.

동시병행설계(Concurrent engineering)와 업프론트 엔지니어링(Upfront engineering) 개념을 도입하였고, CAE (Computer-Aided Engineering)를 통해 설계 품질 향상 및 개발 비용, 개발 시간 단축을 사전분석 하고자 하였다.

배터리케이스의 설계 프로세스 및 단계는 Fig. 3에 나타내었다. 1단계는 선행 개발 단계로 명명하고 요소 및 서브 시스템에 대한 개념 개발과 제조 검토를 진행하였다. 2단계는 마스터 개발 단계로서 ASSY 설계된 마스터 모델에 대한 시스템 성능 검증 및 성능 개선을 진행하였다. 마지막 3단계는 디테일 개발 단계로서 설계된 ASSY 모델에 대해 원가 및 중량을 개선하여 경량화 및 가격 경쟁력을 확보하고자 하였다.

2.1 시스템 요구도 분석

배터리 팩 및 케이스와 관련된 국내외 규격은 현재까지도 제정 및 개정이 활발히 추진되고 있다. 배터리 팩과 관련된 대표적인 규격으로 ECE R100, FMVSS 305,

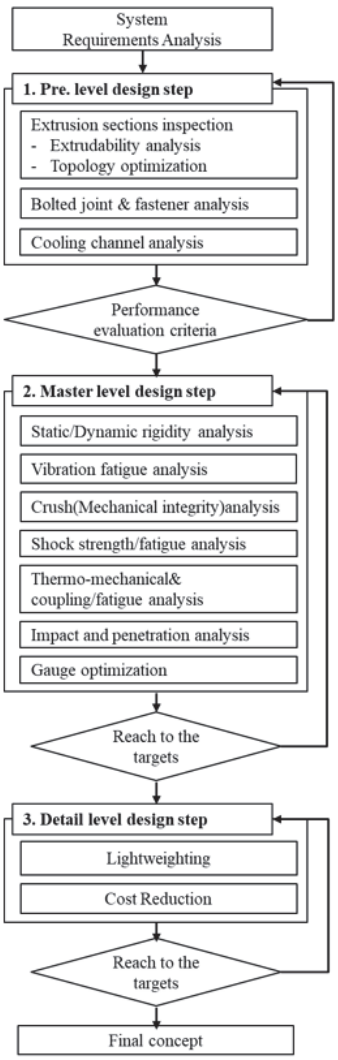


Fig. 3 Aluminium batterycase analysis process

GB/T 31467, UN38.3, KMVSS 등이 있다.

ECE R100의 경우 가장 대표되는 규격 중 하나로, EU에서 전기자동차의 전기 안전에 통용되는 규정이다. ECE R100은 유럽시장에 전기자동차를 판매하기 전 EU 회원국으로부터 반드시 형식승인을 받아야 되는 의무 규정이다. FMVSS305와 GB/T 31467 규정의 경우는 북미와 중국의 대표 성능 시험 규정이다.[7-10)]

국내를 대표하는 규정으로는 KMVSS48과 KS R 1204 등이 있다. 그리고 항공위험물 운송 기술기준인 UN38.3 등이 있으며 이외에 완성차 업체 및 배터리 팩 OEM사 일부 산업체에서는 자체 규정을 일부 개발하여 개발 표준으로 활용하고 있다.[11,12)]

위에서 언급한 해당 규격 내에는 배터리 팩, 모듈, 혹은 셀 단위에 대한 시험들이 언급되어 있으나, 배터리 케이스만을 위한 성능 시험 규격은 명시 되어 있지 않다. 따라서, 배터리 케이스가 성능에 밀접한 관계가 있는 시험 항목들을 Table 1과 같이 분류하였다. 주요 시험 항목들에 대한 성능 목표는 화재, 전해질 누수, 절연저항 등 배터리 셀과 관련된 안전 성능에 관련된 내용들이 주요내용이다.

Table 1 Specifications related to battery case

Test list	ECE R100	GB/T 31467	KMVSS	UN38.3
Vibration fatigue	●	●		●
Shock impact	●	●		●
Shock fatigue	●	●		●
Penetration		●		
Mechanical integrity	●	●		
Crush		●	●	●
Mechanical drop		●	●	
Thermal shock	●	●	●	

하지만 초기 설계 개발 시 더미셀을 이용하므로 해석 시 직관적 평가 및 확인이 불가능하다. 따라서 구조적 관점에서의 자체 성능 기준을 표준화 하였다.

2.2 선행 개발 단계

선행단계는 요구성능에 대한 평가를 진행하는 단계가 아니며 요소 및 서브 시스템 레벨을 기준으로 초기 설계 완성도를 확보하기 위하여 진행하는 단계이다.

2.2.1 압출단면 검증해석

알루미늄 배터리 팩 메인 구조물 역할을 하는 프레임의 경우 알루미늄 압출재가 주로 사용되기 때문에 알루미늄 압출단면에 대한 형상 설계 및 압출성 검토가 필요하다.

알루미늄 압출재 형상 설계를 위해 단면에 대한 위상최적화(Topology optimization) 해석을 수행하였다.

위상최적화 해석기법으로는 크게 균질화법(Homogenization method)과 밀도함수법 (Density method)으로 분류된다.[13)]

본 개발에서는 Altair사의 Optistruct 솔버를 사용하여 밀도 함수법을 기반으로 식 (1)에 제시된 바와 같은 조건으로 최적화 해석을 수행하였다.

Design variable : V_{dv}

Minimize volume : $V_{opt} \leq 0.8V_{dv}$ (1)

최적화의 목적은 알루미늄 프레임에 대한 전방향 굽힘강성이 적용되는 조건에 대한 압출단면의 형상을 확

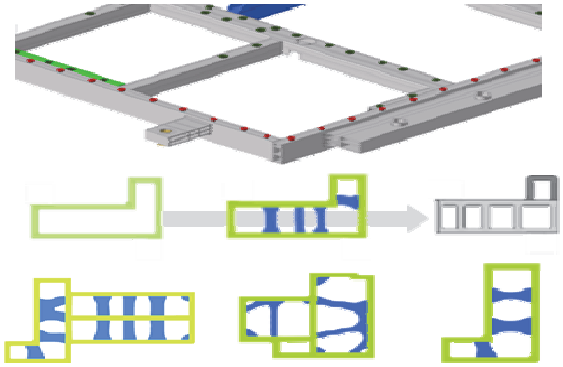


Fig. 4 Aluminum frame topology optimization analysis results

인하는 것으로, 최적화 결과는 Fig. 4와 같다.

압출 공정에서는 압출방법, 마찰, 압출비, 가공온도, 변형속도, 금형 형상 형상 등의 주요인자들이 상호 관련성이 있어 복합적으로 압출성능에 영향을 준다. 따라서, 최적화된 압출 설계 단면이라 하더라도 압출 품질이 불량하거나 압출 수율이 저하된다면, 양산단가 및 품질 비용이 증가되기 때문에, 압출 단면에 대한 공정 검증이 필요하다.

초기 설계 단계에서는 시험을 통해 압출 단면에 대해 검증이 어려우므로 유체-구조연성 해석기법 FSI(Fluid Structure Interaction)을 통해 압출성을 검증하고자 하였다.

압출해석에 사용된 S/W는 Altair사에서 제공하고 있는 Inspire extrude metal를 사용하였다. 상기 프로그램의 경우, ALE(Arbitrary Lagrangian-Eulerian) 기법을 제공한다.

ALE는 라그랑지안과 오일러리안 기법 단점 보완 및 장점을 적용하여 사용하는 기법으로 식 (2) ~ (4)과 같이 질량보존, 에너지보존, 운동량보존 지배방정식을 기반으로 한다.

$$\nabla \cdot u = 0 \tag{2}$$

$$\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u\right) = \nabla \cdot \sigma \tag{3}$$

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + u \cdot \nabla T\right) - \nabla \cdot (k \nabla T) = \Phi \tag{4}$$

Fig. 5는 압출단면에 대한 압출해석에 대한 결과이며 압출 시 출구의 상대속도, 온도, 용접라인 등 자체 기준을 통해 성능을 평가하였다. 기준 초과시 베어링 최적화를 통해 금형 베어링 형상을 보완하여, 압출성을 개선하였다.

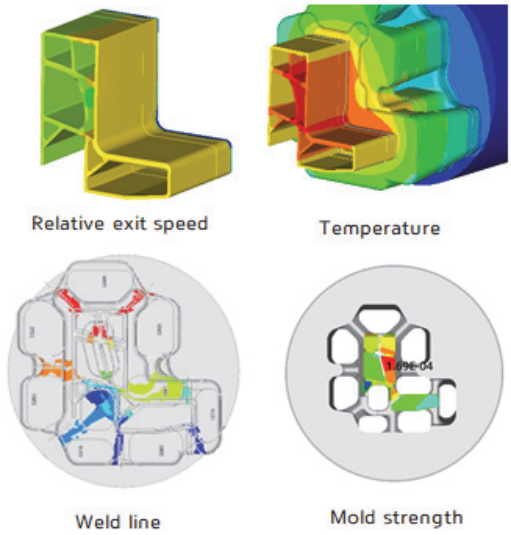


Fig. 5 Aluminum extrude analysis results

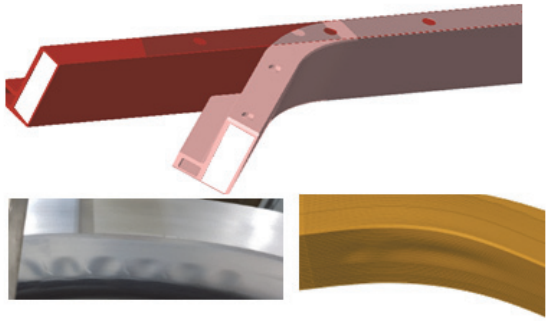


Fig. 6 Aluminum bending analysis results

압출성 판단 기준을 만족하는 압출단면은 최종 설계에 적용하였고, 기준에 불만족한 단면에 대해서는 보완하여 최종 상세설계에 반영하였다.

일부 프레임의 경우, 차체 형상과의 매칭성을 고려하여 곡률 형태로 설계 되어야 한다. 이때 알루미늄 곡률 형태의 압출재 생산을 위해서는 압출 이후 프레스 벤딩 공정을 추가로 거쳐야 한다.

벤딩 공정의 영향을 확인하기 위해 굴곡 형태의 압출재에 대하여 Fig. 6과 같이 벤딩해석을 수행하였다. 준정적해석 기법(Quasi-static analysis)으로 벤딩해석을 수행하였고, 등가응력 및 변형량을 검토하여 벤딩 시 파손 여부와 스프링백을 검토하였다.

2.2.2 체결요소 검증해석

배터리케이스 상부와 하부의 경우, 커버형태로 밀봉

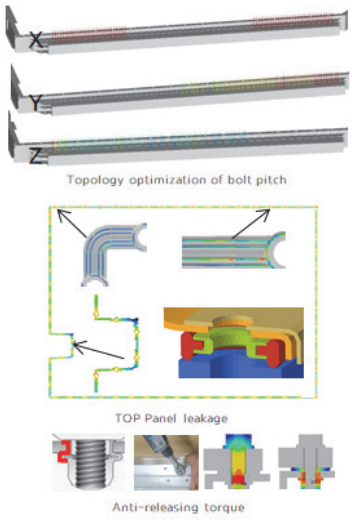


Fig. 7 Bolt pitch and PNL leakage analysis results

되는 구조이다. 상부와 하부케이스는 볼트, FDS 등 기계적 체결요소로 체결되는 구조이며 일반적으로 등간격 체결 피치를 선정하여 적용하고 있다.

체결 위치에 따라 기밀성을 고려한 필요 체결력이 다르기 때문에 이를 고려한 체결 피치 선정이 필요하다. 위치 별 체결피치 간격 선정을 위하여 Fig. 7과 같이 위상최적화 (Topology optimization)를 수행하였고, Leakage 해석을 통해 기밀성을 검토하였다.

볼트 체결 시 조임 및 풀림 강도 성능 예측을 위하여 블라인드 너트 및 볼트에 대한 해석을 수행하여, 적정 규정 토크 값에서의 볼트 풀림 가능성을 예측하였다. 위상최적화 수행조건은 식 (5)에 명시하였다.

Design variable: B_i, Maximize: T_k,

$$1^{st}Hz_{base} \leq 1^{st}Hz_{opt},\ D_{base} \leq D_{opt} \tag{5}$$

2.2.3 냉각채널 해석

전기자동차 배터리 열관리가 원활하지 않을 시 열 폭주 및 과열 등 안전 관련 문제가 발생할 뿐만 아니라 배터리 효율 저하, 내구성능 감소로 인하여 주행거리가 단축되므로 열관리 시스템은 필수적이다.

배터리 케이스의 열관리는 주로 케이스 하부의 냉각채널에 의하여 이루어진다. 냉각채널은 배터리의 허용온도와 온도 편차가 일정 온도 이하로 제어될 수 있는 용량과 형태로써 요구 성능을 만족해야 한다. 이때 요구성능은 최대온도 및 온도편차이다.

열관리의 또 다른 주요 인자 중 하나는 펌프의 용량이

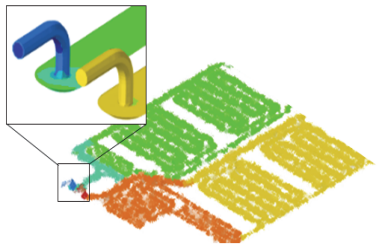


Fig. 8 Differential pressure analysis

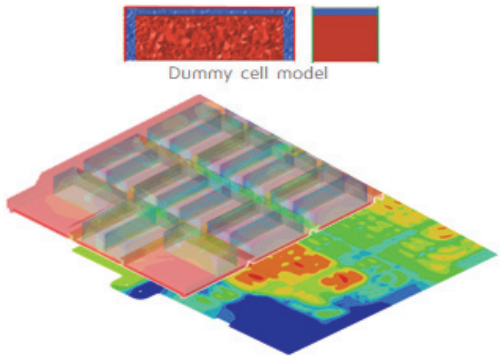


Fig. 9 Cooling analysis results

다. 펌프 용량이 부족할 경우 냉각유로 유동이 난류가 아닌 층류가 되어 열전달률이 감소하기 때문이다. 그러므로 사용 가능한 펌프 용량이 냉각회로에 필요한 용량보다 높아야 한다. 또한 펌프의 용량은 냉각 성능뿐만 아니라, 쿨링 채널 내에 압력 차이에 따라 결정되므로 펌프 소비 전력 기준 이내에 차압 성능도 만족해야 된다.

차압 및 냉각 성능의 검증 및 개선을 위해서 CFD (Computational Fluid Dynamics) 유동해석을 수행하였고, 난류유동, 비압축성, 정상상태를 기준으로 식 (6) ~ (9)와 같이 연속방정식, 에너지 방정식, 운동량 방정식 및 RANS(Reynolds Average Navier Stokes equations)을 기반으로 하였다.

Fig. 8은 차압해석결과이다. 입・출구 압력 차이에 대한 차압성능 결과로 유동장 내부 벽의 수가 많거나 유량이 증가할수록 압력차이가 커지므로 이를 고려한 설계가 요구된다.

Fig. 9는 냉각해석 결과이다. 더미셀 유한요소모델을 구성하여 계산된 셀 발열량(Heat source)을 부여하였다. 또한 외기온도, 배터리 초기온도, 냉각수 초기온도, 유량 등은 배터리케이스의 개발 기준에 맞게 적용하였다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{u}) = 0 \tag{6}$$

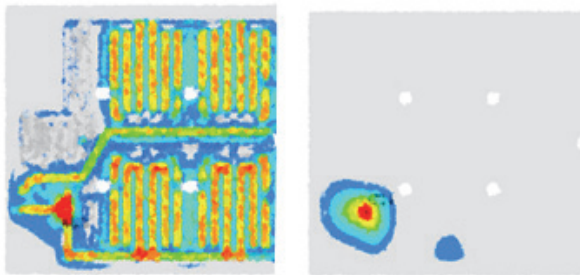


Fig. 10 Cooling channel target pressure analysis results

$$\rho\frac{\partial\vec{u}}{\partial t}+(\rho\vec{u}\cdot\nabla)\vec{u}=-\nabla p+\rho g+\nabla\cdot\tau \tag{7}$$

$$\rho C_p\frac{Dp}{Dt}=\frac{Dp}{Dt}+\nabla\cdot\left(k_{stiff}\nabla T\right)+\nabla\vec{u}\cdot\tau+S \tag{8}$$

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\overline{u_f})}{\partial x_f}=0,\frac{\partial(\overline{u_i u_j})}{\partial x_f}=-\frac{\partial(\bar{p}\delta_{ij})}{\partial x_f}+2\mu\frac{\partial\overline{S_{ij}}}{\partial x_f}+\frac{\partial\tau_{ij}^R}{\partial x_f} \tag{9}$$

냉각채널 성능검토 항목으로 냉각 및 차압성능 외에 기밀성능과 파열성능 항목에 대한 검토가 필요하다. 기밀 성능은 구조해석 관점에서 냉각채널 내부에 압력을 인가하는 방식으로 비선형 정적 해석을 수행하였다. 등가응력, 등가변형률, 변위 값을 분석하여 기밀성, 파열압력, 평면도 등 요구성능에 대한 성능 만족도를 판단하였다. Fig. 10은 기밀, 파열해석 결과이다.

2.3 마스터 개발 단계

마스터 개발 단계는 개념 설계에서 상세 설계로 진행되는 과정에서 CAE를 통해 성능 검증하는 단계이며, 상품성과 요구성능을 검증하고 개선하는 단계로 정의하였다.

2.3.1 정강성 및 동강성 검증 해석

정강성 및 동강성 해석을 통해 설계된 배터리 케이스에 대한 구조강성을 검증하고자 하였다.

정강성은 차량 주행 중 발생하는 굽힘 강성(Bending rigidity) 및 비틀림 강성(Torsion rigidity) 외력에 대한 구조 강건성을 유지하여 주행 민첩성, 내구성, 충돌 성능에 기여하는 성능이다. 또한 차체 체결조건에 따라 성능 차이가 발생하므로 관성을 제거하였다.

관성제거법(Inertia relief)은 구조물이 경계조건이 없는 정적 평형상태에 있다고 가정하여 선형 적정해석을 수행하는 방법이다.[14] 정적 평형상태 관계식은 식 (10)에 나타내었다.

동강성에 대한 관련 식은 식 (11) ~ (12)이며, 가진 주

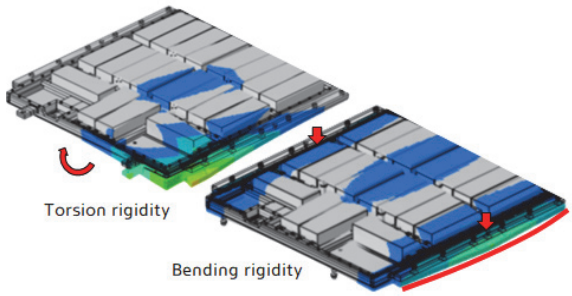


Fig. 11 Static rigidity analysis results

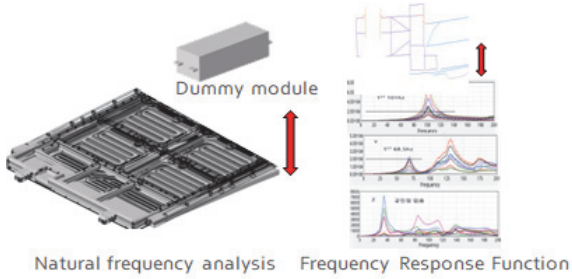


Fig. 12 Dynamic rigidity analysis results

파수 및 시스템 공진에 의한 진동 유발 관점 에서 설계 검증을 위해 고유진동수(Hz)와 모드형상(Mode shape)을 분석하였다. Fig. 11은 배터리케이스의 구조강성 중 굽힘 및 비틀림 강성 해석결과이다.

주파수 응답함수(Frequency Response Function)해석은 Fig. 12와 같이 강제 진동 발생에 대한 응답 여부를 평가하였다.

$$\sum F_1-\sum m_i\overline{a_1}=0 \tag{10}$$

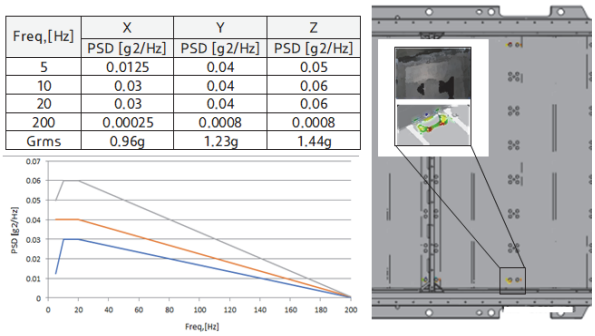
$$f_n=\frac{\omega_n}{2\pi}=\frac{1}{2\pi}\sqrt{\frac{k_s}{m}} \tag{11}$$

$$H(\omega)=\frac{1}{k_s+j\omega c-\omega^2 m} \tag{12}$$

2.3.2 진동내구 검증 해석

배터리케이스의 진동 내구성능은 가장 핵심적인 구조 성능 중 하나로, ECE R100, UN38.3, GB31467, ISO12405-3 등 주요 규격에 모두 관련 성능이 명시되어 있다.

진동내구성능에 대한 시험은 크게 조화응답과 랜덤응답으로 응답형태로 분류된다. 조화응답은 주파수 대



Freq,[Hz]	X	Y	Z
	PSD [g2/Hz]	PSD [g2/Hz]	PSD [g2/Hz]
5	0.0125	0.04	0.05
10	0.03	0.04	0.06
20	0.03	0.04	0.06
200	0.00025	0.0008	0.0008
Grms	0.96g	1.23g	1.44g

Fig. 13 PSD fatigue analysis results

역에서의 시스템 공진 현상과 응답을 확인하고, 랜덤 응답의 경우, 도로 주행시 랜덤 진동에 대한 현상과 응답으로 내구성을 예측하는 방법이다.[15)]

랜덤응답의 경우, 랜덤 신호를 주파수도메인으로 변환한 PSD(Power Spectral Density) 데이터로 시험을 하는데, Fig. 13에 제시한 바와 같이 관련 규격에 명시되어 있다.

배터리 팩 진동내구 항목의 일반적인 성능 요구조건은 전해액 누수, 파열, 화재, 폭발, 절연 등의 기 준 만족이나, 배터리 케이스의 경우, 더미셀 조건으로 개발 하므로 진동내구해석을 통해 구조 취약부를 예측하고 개선하는데 주안점을 두었다.

2.3.3 압축(Crush) 강도 해석

압축강도는 차량이 충돌 상황에서 발생할 수 있는 배터리 팩 내부에 배터리 모듈과 구조물간 접촉에 대한 안전성능을 검증하는 시험 항목이며 ECE R100, GB/T 31467등 규격에 명시되어 있다.

압축강도 해석을 통해 구조물 변형으로 인한 배터리 모듈 간섭 및 이탈을 예측하여 안전성을 검증해야 한다. 압축강도 시험의 경우, 압축판(Crush plate)을 사용하여 시험을 수행한다. 이때, 압축판은 Fig. 14와 같이 반원통 형태로 되어있다.

압축강도 성능요구조건은 100 kN 혹은 2배 수준 하중으로 압축 시 전해질 누수, 화재, 폭발 등이 없어야 한다. 해석 시 100 kN 혹은 2배 수준의 반력 달성 여부와 배터리 케이스의 변형량을 확인하여 모듈간의 접촉 여부로 성능을 판정하였다.

2.3.4 충격 강도 및 충격 내구 해석

관성 하중에 대한 안전성능을 검증하는 것이 충격 강도 및 충격 내구 성능시험의 목적이다. 안전성 검증을 위하여 관성에 의한 케이스 및 모듈 마운팅 부의 파손을 예측하고자 하였다.

충격 강도는 Fig. 15와 같이 충격 하중을 X, Y, Z 각 축에 대해 3회 이상 연속 반복하는 조건으로 과도응답(Transient-Response) 해석을 수행하여 발생한 응력을 분석하여 강도를 평가하고 구조물의 파손 및 취약부를 확인하였다.

충격 내구의 경우, 정현파 형태의 Shock 하중을 적용하여 내구해석을 수행하였고, 발생한 응력을 분석하여 내구수명 및 취약부를 확인하여 내구성을 평가하였다.

충격강도와 충격내구 취약부의 성능목표 만족 여부는 강도지수(Strength index)와 내구지수(Durability index)를 통해 판별한다. 취약부에서의 성능지수가 목표지수 이하일 경우, 해당 취약부 압출 단면에 대해 위상 최적화를 통해 단면 강성 및 강도를 보강하여 성능을 개선하였다.

2.3.5 환경온도 해석

배터리 팩 열관리는 성능, 수명, 안전성과 직결되는 매우 중요한 관리 요소이다. 배터리 동작온도범위에 대해 배터리 안전가이드에도 배터리 표면 온도기준으로

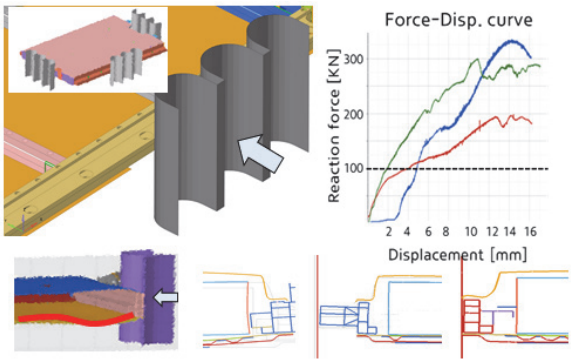


Fig. 14 Mechanical integrity analysis results

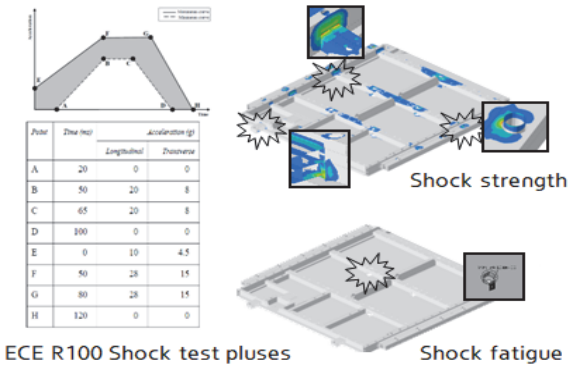


Fig. 15 Mechanical shock analysis results

-20 ~ 75 ℃로 관리되도록 명시되어있다. 또한 ECE R100, UN38.3, KMVSS규격에 관련된 시험 항목들이 명시되어있다.

해당 시험은 고온과 저온 상황에 반복적으로 노출시켜 전해질 누출, 화재, 폭발, 절연감소 등을 평가한다. 배터리 케이스 경우, 구조적인 성능이 중요하다. 따라서 열-구조 연성해석(Thermo-mechanical coupling) 및 내구해석을 통해 구조 관점에서 구조 취약부를 확인하였다.

2.3.6 하부충격 해석

전기자동차는 대부분 배터리 팩이 하부에 장착되는 구조로서 이물질, 과속방지턱 등의 외부 충격으로 손상을 입을 수 있다.

하부 구조가 완전 관통되어 배터리 셀에 충격이 가해질 경우, 화재 위험성까지 있어 배터리 케이스설계 시 Stone impact 등 하부 충격에 대한 구조 성능을 고려해야 한다.

이에 대응하여 하부케이스와 냉각채널 모듈로 구성되는 하부구조에 대해 Fig. 17과 같이 임의 추 형태 강체를 낙하시켜 하부케이스와 냉각 채널의 관통 및 변형량

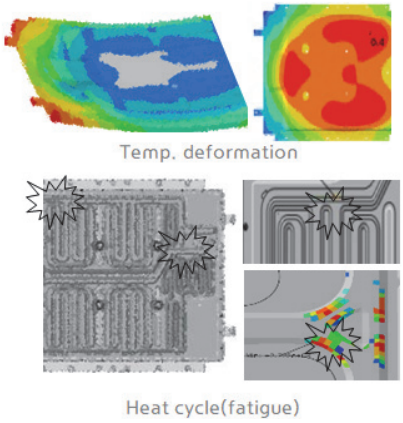


Fig. 16 Relative temperature analysis results

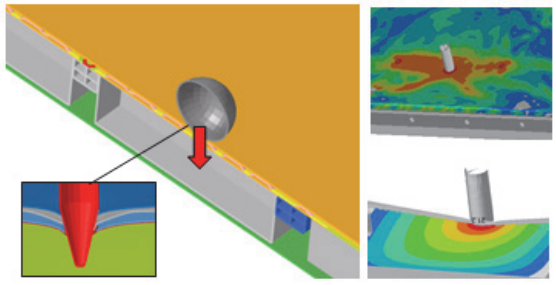


Fig. 17 Plate penetration analysis results

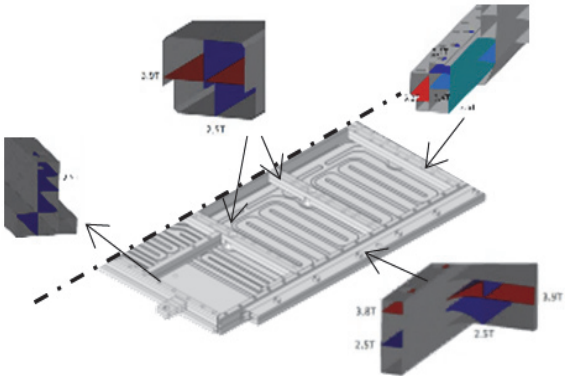


Fig. 18 Gage optimization results

으로 배터리 셀 접촉 여부를 검토하였다.

2.3.7 게이지 최적화 해석

상세 설계된 배터리케이스 모델에 대한 중량 절감을 위해 설계영역 두께를 최적화 하는 방법인 게이지 최적화를 Fig. 18과 같이 수행하였다. 배터리케이스의 경우, 식 (13)과 같이 알루미늄 프레임의 위치 별 두께가 최적화 인자이다. 중량 및 두께를 최적화 설정에 포함하였고, 압축강도와 동강성 성능을 기준으로 최적화를 수행하였다. 압축강도의 경우, 해석시간 단축을 위해 등가정하중법 ESLM(Equivalent Static Loads Method)을 적용하였다. 최적화 결과, 알루미늄 프레임을 기준으로 5 %이상 추가 경량화를 결과를 도출하였다. 진동내구 및 압축강도 등 주요 성능에 대한 요구성능을 재검증하여 성능 신뢰도를 확보하자고 하였다.

$$\begin{aligned} &\text{Find : } X_i\ (i=1,2,\cdots,35), \\ &\text{Minimize : frame mass} \\ &2\ \text{mm} \le X_i \le 5\ \text{mm} \\ &1^{st}Hz_{base} \le 1^{st}Hz_{opt},\ D_{base} \ge D_{opt} \end{aligned} \tag{13}$$

3. 디테일 개발 단계

디테일 단계는 성능 검증된 상세 모델에 대해 원가 및 양산성을 고려하여 설계적 보완하는 단계로서 개선 설계에 대한 검증해석을 수행하여 설계 완성도를 높이는 것을 목적으로 한다.

본 개발에서는 Fig. 19와 같이 압출 부재에 대해 압축강도, 진동내구에 대한 성능 민감도 해석을 수행하였다. 민감도가 낮은 부재를 중량 절감 및 생산성을 향상시킬 수 있도록 설계를 보완 수정하였고, 구조성능 검증 해석을 수행하여 설계 품질을 향상시키고자 하였다.

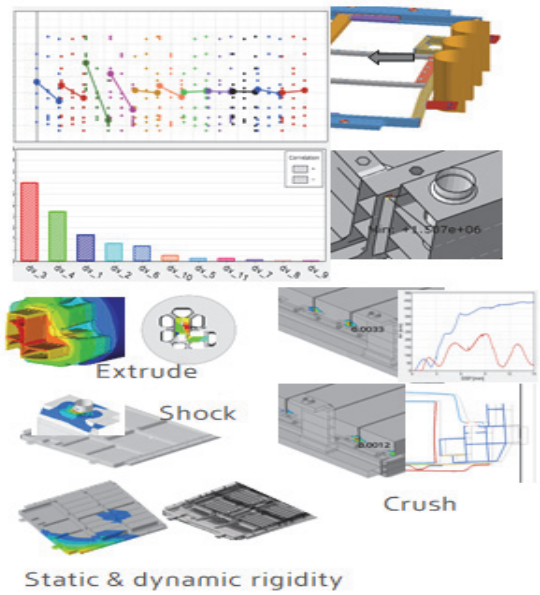


Fig. 19 Analysis results according to modified design

4. 결 론

본 논문에서는 전기자동차 배터리 팩의 핵심 구조물인 배터리 케이스 개발 시, 신뢰성 보장 및 원가 절감 등 설계 품질 향상을 위하여 설계 프로세스를 3단계로 분류하여 제안하였다.

1단계에서는 최적화를 통해 압출 단면구조와 체결요소 피치를 제안하였고, 냉각채널에 대한 성능을 검증하였다.

2단계에서는 배터리케이스 상세 설계 모델에 대해 진동내구, 압축강도, 충격강도 및 내구, 환경온도 등에 대한 성능 검증 및 개선을 하였다.

3단계에서는 원가와 양산성을 고려하여 보완 설계 모델에 대한 전반적인 성능을 검토하였다.

CAE를 활용한 배터리케이스 설계 프로세스 확립하여, 주요 성능 항목에 대한 사전 검증 및 설계 완성도 향상 방향성을 제시하였다.

References

1) J. Hamilton and B. Walton, “Electric Vehicle Market Outlook,” Deloitte Insights, Vol.Special, pp.3-5, 2020.
2) M. Jeong, Y. Kim and G. Park, “Nonlinear Dynamic Response Structural Optimization for the Structure Integrating the Body-In-White and Battery Pack of an Electric Vehicle Considering a Side Pole Impact Test,” Transactions of KSAE, Vol.29, No.7, pp.683-691, 2021.
3) S. -K. Jeoung and J. -U. Ha, “Lightweighting Technology Development and Trends in Automotive,” Auto Journal, KSAE, Vol.40, No.8, pp.30-34, 2018.
4) B. -S. Han, S. -H. Kim, J. -H. Sin, J. -P. Kim, D. -O. Kim and S. -Y. Seong, “Automotive Technology Trends and Lightweight Technology,” Journal of Korea Foundary Society, Vol.42, No.2, pp.97-104, 2022.
5) Deloitte Analysis: Automotive Planning Solutions, IHSMarkit, https://ihsmarkit.com/index.html;EV-volumes.com: The Electric Vehicle World Sales Database, https://www.ev-volumes.com/, accessed 16 June 2020.
6) Hyundaimotorgroup, FCEVs In The Hydrogen Society, https://tech.hyundaimotorgroup.com/kr/article/the-story-of-electric-vehicle-technologies-in-e-gmp, 2022.
7) Regulation No.100, Uniform Provisions Concerning the Approval of Vehicles with Regard to Specific Requirements for the Electric Power Train, 2017.
8) Regulation No.305, Electric-Powered Vehicles, Electrolyte Spillage and Electrical Shock Protection, 2019.
9) Regulation No.31467, Lithium-ion Traction Battery Pack and System for Electric Vehicles, 2015.
10) Regulation No.38-3, Transportation Regulation Test: Lithium Metal and Lithium Ion Batteries, 2015.
11) Regulation No.48, Regulations for Motor Vehicle Safety Standards: Safety Test for Traction Battery, 2012.
12) Regulation No.1204, Traction Battery Packs and Systems for Electric Buses, 2019.
13) W. -G. Lee and J. -S. Kim, “Lightweight Design of Brake Bracket for Composite Bogie Using Topology Optimization,” Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, Vol.39, No.3, pp.283-289, 2015.
14) Y. -M. Lee, J. -S. Ahn and G. -J. Park, “Crash Optimization of an Automobile Frontal Structure Using Equivalent Static Loads,” Transactions of KSAE, Vol.23, No.6, pp.583-590, 2015.
15) H. -S. Lim and P. -R. Sim, “A Study on Vibration Fatigue Analysis of Electric Vehicle Battery Cover Using PSD,” KSAE Annual Conference Proceedings, pp.1015-1016, 2018.