

전기자동차 배터리 시스템 개발을 위한 전산설계기술

정 승 훈*

전남대학교 기계공학부

Computational Design of Battery System for Automotive Applications

Seunghun Jung*

Department of Mechanical Engineering, Chonnam National University,

77 Yongbong-ro, Buk-gu, Gwangju, 61186, Republic of Korea

(Received 2020.10.19 / Accepted 2020.11.17)

Abstract : Automotive battery system consists of various components such as battery cells, mechanical structures, cooling system, and control system. Recently, various computational technologies are required to develop an automotive battery system. Physics-based cell modeling is used for designing a new battery cell by conducting optimization of material selection and composition in electrodes. Structural analysis plays an important role in designing a protective system of battery system from mechanical shock and vibration. Thermal modeling is used in development of thermal management system to maintain the temperature of battery cells in safe range. Finally, vehicle simulation is conducted to validate the performance of electric vehicle with the developed battery system.

Key words : electric vehicle (전기자동차), battery system (배터리 시스템), thermal management system (열관리장치), battery management system (배터리관리장치), Li-ion battery (리튬이온배터리), computational design (전산설계)

1. 서론

높은 에너지밀도와 출력밀도를 가진 리튬이온전지의 기술발전으로 인해 이를 동력원으로 하는 전기자동차가 각광받고 있다. 전기자동차용 배터리 시스템은 에너지원인 배터리셀, 배터리셀을 외부의 충격과 진동으로부터 보호하는 기계적 구조물, 배터리셀의 작동 시에 발행하는 열을 배출하고 외부의 영향을 차단하여 배터리셀을 열적 위험으로부터 보호하는 열관리시스템(thermal management system, TMS), 배터리의 충전과 방전을 제어하고 배터리를 보호하는 배터리관리 시스템(battery management system) 등으로 이루어진다.

최근에는 전기자동차 및 관련 기술의 발전에 따라

전기자동차용 배터리 시스템의 점차 고도화되어가고 있으며 개발주기가 단축되는 추세이다. 이로 인해 배터리셀로부터 배터리 시스템, 그리고 전기자동차의 개발에 이르기까지 다양한 전산설계기술이 이용되어 제품개발의 시간을 단축하고 원가를 절감하며 제품성능을 최적화하고 있다.

본 논문에서는 전기자동차용 배터리 시스템의 각 부문에 어떠한 전산설계기술이 적용되어 활용되고 있는지 알아보려고 한다.

2. 본론

본 논문에서는 크게 i)배터리셀, ii)배터리팩 하우징, iii)열관리시스템, iv) 차량시스템의 개발에 사용되는 전산설계 기술에 대해 설명하고자 한다.

*Corresponding author, E-mail: shjung@chonnam.ac.kr

2.1 물리기반 배터리셀 모델

리튬이온전지는 크게 양극재, 음극재, 분리막, 전해액으로 구성되어 있다. 전기자동차의 종류 (HEV, BEV, PHEV)에 따라 요구되는 전지의 사양에 맞추어 전지개발자는 전극을 구성하는 활물질의 종류와 양, 전극과 분리막의 두께, 전해액의 농도 등을 다양하게 변화시키면서 최적화를 수행하게 된다. 이렇게 다양한 조합을 모두 실험하고 검증하기는 어려우므로 배터리셀의 물리적 거동을 지배방정식을 통해 예측하고 배터리셀의 설계변수를 바꿔가며 목표로 하는 성능을 갖는 최적의 설계방안을 도출할 수 있다.

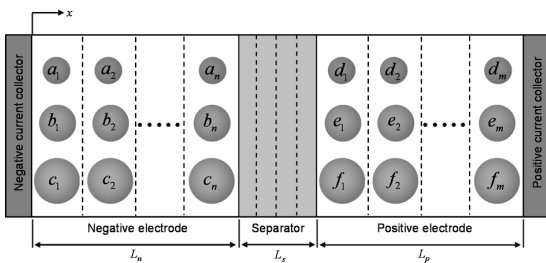


Fig. 1 Schematic of physics-based cell model of lithium-ion battery [1]

Figure 1과 같이 리튬이온전지의 내부를 전극, 분리막, 집전체, 그리고 활물질입자로 구분하고 물질전달 방정식, 포텐셜방정식, 전기화학방정식을 연결하여 계산하게 된다. 이 때 전지를 구성하는 물질들의 기초 데이터를 실험을 통해 확보해야 한다. 특히, 전극활물질들의 평형전압곡선(open circuit voltage)와 용량데이터를 이용하면 다양한 전극활물질이 조합된 경우 예상되는 전지의 전압특성과 용량을 계산할 수 있다. Figure 2는 lithium manganese oxide (LMO)와 니켈-망간-코발트로 이루어진 삼성분계 활물질(NMC)로 이루어

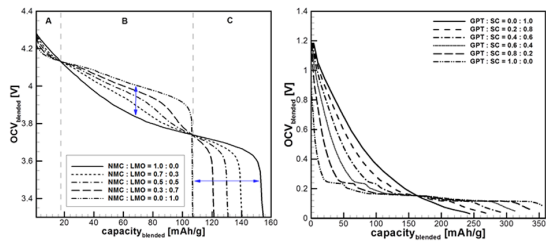


Fig. 2 Effect of material composition on the voltage and capacity of electrodes [1]

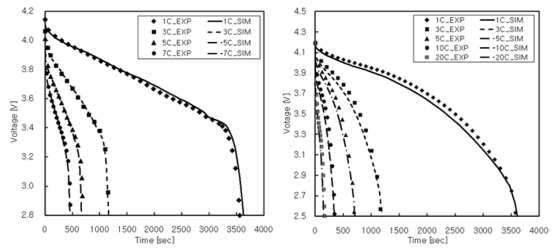


Fig. 3 Experimental validation of physics-based cell model of lithium-ion battery [1]

진 양극에서 두 물질의 비율을 변화시킬 때 예상되는 양극의 전압 및 용량, 그리고 graphite와 amorphous carbon으로 이루어진 음극의 재료조합을 변화시킬 때의 전압특성과 용량을 보여주고 있다.

복합소재로 이루어진 양극과 음극으로 리튬이온전지를 설계하여 예상되는 성능을 도출하고 이를 토대로 실제 전지를 개발하여 그 성능을 검증한 결과를 Figure 3에 나타내었다. 좌측은 용량우선 설계를 통해 도출된 BEV(battery electric vehicle)용 전지이고 우측은 출력 우선 설계를 통해 도출된 HEV(hybrid electric vehicle)용 전지이다. 전산설계로 예측된 성능과 실제 성능이 상당히 일치됨을 볼 수 있다.

용도에 따른 새로운 배터리셀의 개발에는 많은 시간과 비용이 수반되므로 최근에는 기존에 존재하는 여러 가지 성능의 배터리셀을 조합하여 목표하는 배터리 시스템을 사양을 맞추는 연구가 진행되고 있다 [2]. Figure 4는 고에너지 배터리셀과 고출력 배터리셀을 조합하여 전기자동차에서 필요로 하는 용량과 출력을 달성하는 것을 보여준다. 고에너지셀의 개수를 늘리면 배터리팩의 에너지밀도가 증가하고 고출력셀의 개수를 늘리면 배터리팩의 출력밀도가 증가하며 배터리팩의 전압특성은 두 가지 배터리셀의 전압곡선을 혼합한 모양으로 나타난다.

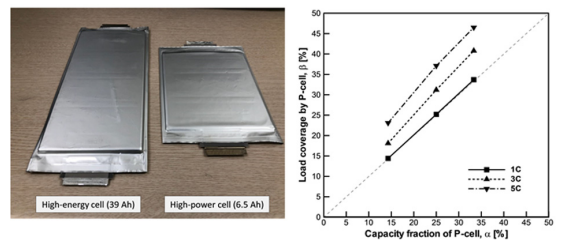


Fig. 4 Two different types of battery and effect of their combination on the cell performance [2]

2.2 배터리팩 구조설계 모델

Figure 5는 전기자동차용 수냉식 배터리팩의 분해도를 보여주고 있다. 배터리셀을 기계적으로 보호하기 위해 배터리팩 외부에는 endplate를 설치한다. Endplate는 배터리셀의 내부저항감소를 위해 팩의 조립단계에서 팩을 일정정도 가압시키며 배터리셀의 퇴화에 따른 팽창을 억제하는 역할도 수행한다. 따라서 endplate는 매우 높은 강성을 가져야 하므로 소재의 선택과 형상의 최적화를 위해 전산설계를 실시한다.

Figure 6는 배터리셀의 퇴화로 인한 팽창에 의한 반력을 고려하여 배터리팩 endplate의 형상(bead)에 따른 Von-Mises stress를 보여주고 있다. 전산설계에 의해 수직방향 비드가 가장 효과적임을 알 수 있다.

연료전지 전기자동차 (Fuel cell electric vehicle)의 연료전지는 일반적으로 Figure 7과 같은 스택형 구조를 갖는다. 이러한 전지스택의 조립에는 endplate와 tie-rod를 이용하며 체결력에 따라 endplate에 힘이 발생할 수 있다. Endplate의 휨현상이 심하면 전지스택 내부에 적층되어 있는 단위셀 사이의 접촉이 약해지며 이로 인한 저항증가와 성능저하로 이어질 수 있다.

이를 방지하기 위해 전산해석을 통해 각 tie-rod에 가해지는 인장력을 계산하고 이로 인한 반력 및 힘을

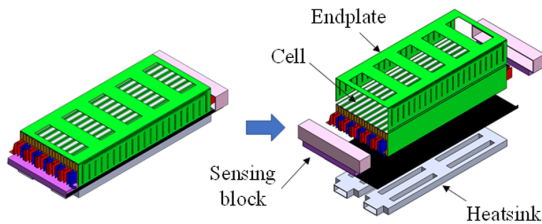


Fig. 5 Exploded view of liquid-cooled battery pack

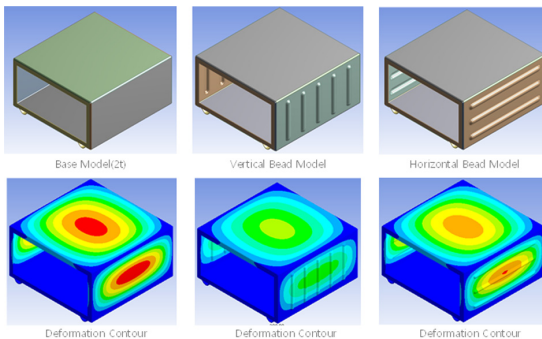


Fig. 6 Structural analysis of endplate of battery pack

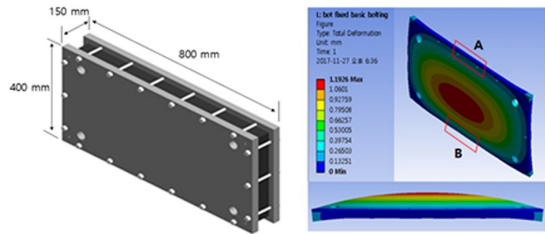


Fig. 7 Structural analysis of fuel cell stack [3]

예측, tie-rod의 개수와 위치, 그리고 endplate의 재질 및 형상을 최적화한다.

2.3 배터리팩 냉각설계 모델

배터리셀은 전기화학반응에 의해 열이 발생한다. 발열의 요인에는 분극현상에 의한 반응열, 저항에 의한 Joule 열, 그리고 엔트로피 열 등이 있다. 배터리 시스템 내부의 배터리셀의 온도는 이러한 발열 및 배터리셀의 열물성(비열, 전도도, 밀도 등)과 작동조건(충방전 속도, 외부온도 등)의 영향을 받게 된다. 배터리팩의 냉각설계를 위해서는 우선 cell characterization을 통해 이러한 주요 물성값을 측정하여 데이터를 준비한다. 다음으로 배터리셀과 팩의 3차원 형상을 고려한 전산해석을 실시하여 열적거동을 분석한다. 특히 배터리팩은 냉각방식(공냉식, 수냉식)에 따라 그 형상이 결정되므로 배터리 시스템의 개발에 있어 냉각설계단계가 매우 중요하다.

Figure 8은 전산해석을 통해 수냉식 배터리팩의 방열과 단열성능을 예측한 것이다. 배터리셀의 열은 하단에 위치한 히트싱크를 통해 원활하게 배출되어야 하며, 히트싱크와 배터리팩의 외부는 서로 단열을 유지해야 한다. 계산결과, 배터리셀과 히트싱크의 사이

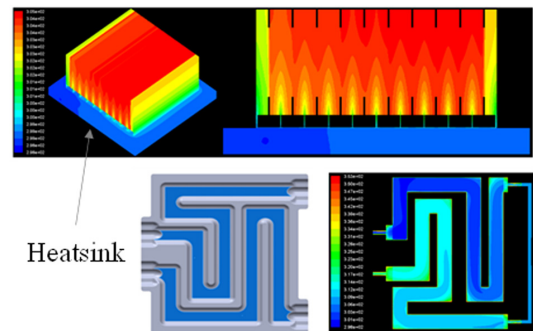


Fig. 8 Thermal analysis of liquid-cooled battery pack

의 열저항은 2.9 K/W, 히트싱크와 외기 사이의 열저항은 30.15 K/W로 예측되어 설계목표에 부합한 것으로 판단된다.

2.4 차량해석 모델

최근에는 배터리 시스템을 차량에 탑재하였을 때 차량의 주행성능을 미리 예측하고 분석하기 위해서 HILS (Hardware In-Loop Simulation)를 이용하는 경우가 많다. 이는 개발한 배터리 시스템을 실제 차량에 직접 탑재하는 대신에 차량을 모사하는 차량해석 모델에 배터리 시스템을 연결하여 주행 프로파일에 따라 시뮬레이션을 실시하여 차량의 주행성능을 예측하고 분석하는 기술이다. Figure 9는 AVL社의 CRUISE 프로그램을 이용하여 하이브리드 자동차의 주행성능을 알아본 것이다.

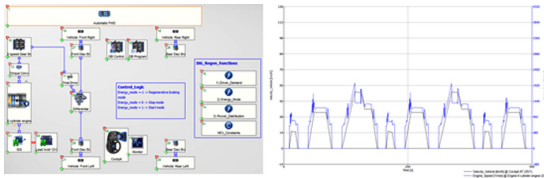


Fig. 9 Driving simulation of hybrid electric vehicle using AVL CRUISE

3. 결론

전기자동차 배터리 시스템 개발을 위한 전산설계 기법에 대해 알아보았다. 배터리셀의 설계에는 물리

기반의 해석모델을 사용하여 다양한 전극소재의 조합과 전지의 형상을 검토하여 전지의 성능과 특성을 미리 예측할 수 있으며 최근에는 서로 다른 전지들을 조합하여 배터리 시스템에서 요구되는 성능을 도출할 수 있다. 그리고 배터리셀을 기계적, 열적으로 보호하기 위한 구조설계와 열설계에 전산해석이 어떻게 이용되는지 살펴보았다. 마지막으로 개발된 배터리팩이 실제 차량에 탑재되었을 때 차량의 성능을 예측하기 위한 HILS에 대해 소개하였다. 배터리 전산설계기술은 전기차 기술이 발전하고 시장이 성장함에 따라 향후 더욱 중요해질 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 한국연구재단(2019R1A2C1090828)과 AVL의 UPP (University Partnership Program)의 지원 하에 수행되었음.

References

- 1) S. Jung, "Mathematical Model of Lithium-Ion Batteries with Blended-electrode System", Journal of Power Sources, 264, pp.184-194, (2014)
- 2) H. Kim, S. Jung, "Battery hybridization for achieving both high power and high energy densities", Int. J. Energy Research, 42(14), pp.4383-4394, (2018)
- 3) W. Lim, S. Jung, "Design and optimization of fixture structure with stiffeners for large-scale battery stacks", J. Mechanical Science and Technology, 33 (5), pp. 2281-2288, (2019)