



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 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](#)

2020년 8월  
석사학위 논문

55kWh급 전기차용  
리튬이온전지의 양극활물질에  
따른 전지 성능 비교 분석

조선대학교 대학원

기계공학과

최희원

55kWh급 전기차용  
리튬이온전지의 양극활물질에  
따른 전지 성능 비교 분석

**Comparative analysis on the battery performance according  
to positive electrode active material for the 55kWh class  
electric vehicle lithium-ion battery**

2020년 8월 28일

조선대학교 대학원

기계공학과

최 희 원

55kWh급 전기차용  
리튬이온전지의 양극활물질에  
따른 전지 성능 비교 분석

지도교수 박 정 수

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 5월

조선대학교 대학원

기계공학과

최 희 원

## 최희원의 석사학위논문을 인준함

위원장    조선대학교 교수    김 창 래 (인)

위    원    조선대학교 교수    이 성 준 (인)

위    원    조선대학교 교수    박 정 수 (인)

2020년 6월

조선대학교 대학원

# 목 차

<b>LIST OF TABLES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LIST OF FIGURES</b> .....	<b>v</b>
<b>ABBREVIATIONS &amp; NOMENCLATURES</b> .....	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>ix</b>

<b>제 1 장 서론</b> .....	<b>1</b>
<b>제 1 절 연구 배경 및 구성</b> .....	<b>1</b>
1. 연구 배경 .....	<b>1</b>
2. 연구 목적 .....	<b>3</b>
3. 논문 구성 .....	<b>6</b>
<b>제 2 절 리튬이온 배터리 이론</b> .....	<b>8</b>
1. 배터리의 구조 및 작동 원리 .....	<b>8</b>
2. 배터리의 종류 .....	<b>10</b>
3. 배터리의 구성 .....	<b>11</b>
4. 배터리의 작동 온도 범위 .....	<b>12</b>
5. 양극활물질의 종류 및 특징 .....	<b>13</b>
가. 층상 구조 .....	<b>14</b>
(1) $\text{LiCoO}_2$ .....	<b>14</b>
(2) $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Mn}]\text{O}_2$ .....	<b>14</b>
(3) $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Al}]\text{O}_2$ .....	<b>14</b>
나. 올리빈 구조 .....	<b>15</b>

(1) $\text{LiFePO}_4$ .....	15
다. 스피넬 구조 .....	15
(1) $\text{LiMn}_2\text{O}_4$ .....	15
제 3 절 EV 구조 및 주행 사이클 .....	16
1. EV의 구조 .....	16
2. 주행 사이클의 종류 및 특징 .....	17
제 2 장 연구 방법 .....	19
제 1 절 시뮬레이션 모델 구축 .....	19
1. 배터리 셀 .....	19
2. 배터리 팩 .....	22
3. EV .....	23
제 2 절 배터리 셀 실험 .....	25
1. 실험 장치 .....	25
2. 실험 방법 .....	27
제 3 장 연구 결과 및 고찰 .....	29
제 1 절 양극활물질 종류에 따른 배터리 셀 특성 해석 .....	29
1. C-rate 조건에 따른 배터리 방전 성능 .....	29
가. 용량 손실 .....	29
나. 온도 변화 .....	30
2. 온도조건에 따른 배터리 방전 성능 .....	33

가. 용량 손실 .....	33
나. 온도 변화 .....	34
제 2 절 양극활물질 종류별 배터리 팩에 따른 EV 특성 해석 .....	36
1. 주행 사이클 적용에 따른 배터리 모델의 특성 비교 분석 .....	36
가. SOC .....	36
나. 배터리 무게 .....	37
다. 용량 손실 .....	38
제 3 절 배터리 셀 단위 실험 결과 비교 분석 .....	40
1. 용량 손실 .....	40
2. 온도 변화 .....	41
제 4 장 결론 및 향후 과제 .....	43
Reference .....	45



## LIST OF TABLES

<b>Table 1. Driving cycle data</b> .....	<b>18</b>
<b>Table 2. LIB electrochemical governing equations</b> .....	<b>19</b>
<b>Table 3. Battery Cell Discretization</b> .....	<b>20</b>
<b>Table 4. Battery cell materials properties</b> .....	<b>21</b>
<b>Table 5. Battery cell specification and operating conditions</b> .....	<b>21</b>
<b>Table 6. The number of cells in a 55kWh battery pack for EV</b> .....	<b>23</b>
<b>Table 7. EV Model specification</b> .....	<b>24</b>
<b>Table 8. Comparison of battery characteristics according to different positive electrode active materials (a) Results of battery cell, (b) Results of battery pack mounting on EV</b> .....	<b>43</b>

## LIST OF FIGURES

Figure 1. EV Market share forecast from 2015 to 2040 (a) Comparison of sales volume by vehicle type, (b) Sales volume of ICEV and EV by year .....	1
Figure 2. Electric vehicle battery cost composition .....	3
Figure 3. Characteristics of Positive electrode and Negative electrode materials of LIB .....	3
Figure 4. Tesla electric vehicle fire accident .....	4
Figure 5. Characteristics According to Metal Composition ratio of Nickel, Cobalt, and Manganese of Ternary System NCM battery .....	4
Figure 6. Flow chart of the Study .....	6
Figure 7. LIB operation principle .....	8
Figure 8. Composition of Positive electrode .....	9
Figure 9. Type of battery (a) Cylindrical, (b) Square, (c) Coin, (d) Pouch .....	10
Figure 10. Cell, Module and Pack unit of LIB .....	11
Figure 11. Optimum operating temperature range for LIB .....	12
Figure 12. Crystal structure of the three lithium-insertion compounds in which the Li <sup>+</sup> ions are mobile through the 2-D (layered), 3-D (spinel) and 1-D (olivine) frameworks .....	13
Figure 13. Structure of EV .....	16
Figure 14. Type of Driving cycle (a) FTP-75, (b) HWFET, (c) WLTC, and (d) US06 .....	17
Figure 15. Battery cell Discretization direction (Thickness and Radial direction) .....	20
Figure 16. Battery cell CC-Discharge test set-up .....	21
Figure 17. EV model with electrochemical battery pack of GT-AutoLion .....	24
Figure 18. Experiment Set-up .....	25
Figure 19. Battery cell used in the experiment (a) 18650 cylindrical battery (LGDBHE21865), (b) Thermocouple attachment point for temperature	

measurement .....	26
<b>Figure 20. Battery cell Charge and Discharge Test Procedure (Discharge at 0.2, 0.5, 1, and 2C-rate) .....</b>	<b>27</b>
<b>Figure 21. Battery capacity loss for each cathode material when discharged at different C-rates (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, (d) LMO ...</b>	<b>29</b>
<b>Figure 22. Battery temperature change according to application of each positive electrode material when discharging at different C-rates: When no thermal model is applied to (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO .....</b>	<b>31</b>
<b>Figure 23. Battery temperature change according to application of each positive electrode material when discharging at different C-rates: When a thermal model is applied to (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO .....</b>	<b>32</b>
<b>Figure 24. Battery capacity loss when discharged at 1C-rate at -20, -10, 0, 25, 45°C of (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO .....</b>	<b>33</b>
<b>Figure 25. Battery temperature change when discharged at 1C-rate at -20, -10, 0, 25, 45°C of (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO ...</b>	<b>34</b>
<b>Figure 26. Comparison of changes in battery SOC according to various driving cycles (a) FTP-75, (b) HWFET, (c) WLTC, and (d) US06 .....</b>	<b>36</b>
<b>Figure 27. Comparison of weight according to the application of each different positive electrode materials of the battery pack mounted in EV ...</b>	<b>37</b>
<b>Figure 28. Comparison of battery capacity loss according to various driving cycles (a) FTP-75, (b) HWFET, (c) WLTC, and (d) US06 .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure 29. Comparison of capacity loss for 18650 cylindrical battery with NCM material according to different C-rate .....</b>	<b>40</b>
<b>Figure 30. Comparison of temperature change for 18650 cylindrical battery with NCM material according to different C-rate .....</b>	<b>41</b>

## ABBREVIATIONS & NOMENCLATURES

- ICEV : Internal Combustion Engine Vehicle (내연기관 자동차)  
 HEV : Hybrid electric vehicle (하이브리드 자동차)  
 PHEV : Plug-in hybrid vehicle (플러그인 하이브리드 자동차)  
 EV : Electric vehicle (전기 자동차)  
 LIB : Lithium-ion Battery (리튬이온 배터리)  
 LCO : Lithium cobalt oxide (리튬코발트산화물)  
 NCM : Nickel cobalt manganese (니켈코발트망간)  
 NCA : Nickel cobalt aluminium (니켈코발트알루미늄)  
 LFP : Lithium iron phosphate (리튬인산철)  
 LMO : Lithium manganese oxide (리튬망간계산화물)  
 TCB : Thermally coupled battery (열 결합 배터리)  
 Ni : Nickel (니켈)  
 Co : Cobalt (코발트)  
 Mn : Manganese (망간)  
 Al : Aluminum (알루미늄)  
 CC : Constant current (정전류)  
 CC-CV : Constant current-constant voltage (정전류-정전압)  
 FTP-75 : Federal test procedure (도심주행 모드)  
 HWFET : Highway fuel economy test (고속도로주행 모드)  
 WLTC : Worldwide harmonized light-duty vehicle test cycle (국제 표준 주행 모드)  
 US06 : United states (최고속·급가감속주행 모드)
- $x$  : Distance in the thru-plane direction (관통면 방향의 거리)  
 $\sigma_s$  : Solid phase conductivity (고체상 전도도)  
 $\phi_s$  : Solid phase potential (고체상 전위)  
 $\phi_e$  : Liquid phase potential (액체상 전위)  
 $a_{dt}$  : Specific interfacial area (비표면적)  
 $C$  : Specific capacitance (비정전용량)

- $j^{Li}$  : Reaction current of Li (반응 전류)
- $k^{eff}$  : Electrolyte effective ionic conductivity (전해질 유효 이온전도도)
- $k_D^{eff}$  : Effective diffusional conductivity (유효 확산전도도)
- $c_e$  : Li<sup>+</sup> concentration in the electrolyte (전해질의 Li<sup>+</sup> 농도)
- $c_s$  : Li<sup>+</sup> concentration in solid (고체의 Li<sup>+</sup> 농도)
- $\varepsilon$  : Porosity (다공성)
- $D_e^{eff}$  : Electrolyte phase Li Diffusion coefficient (전해질상 Li 확산계수)
- $t_0^+$  : Transference number (이온의 전달 수)
- $F$  : Faraday's constant (페러데이 상수)
- $r$  : Particle radius (입자 반경)

## ABSTRACT

### **Comparative analysis on the battery performance according to positive electrode active material for the 55kWh class electric vehicle lithium-ion battery**

Choi, HeeWon

Advisor : Prof. Park, Jungsoo, Ph.D.

Dept. of Mechanical Engineering,

Graduate School of Chosun University

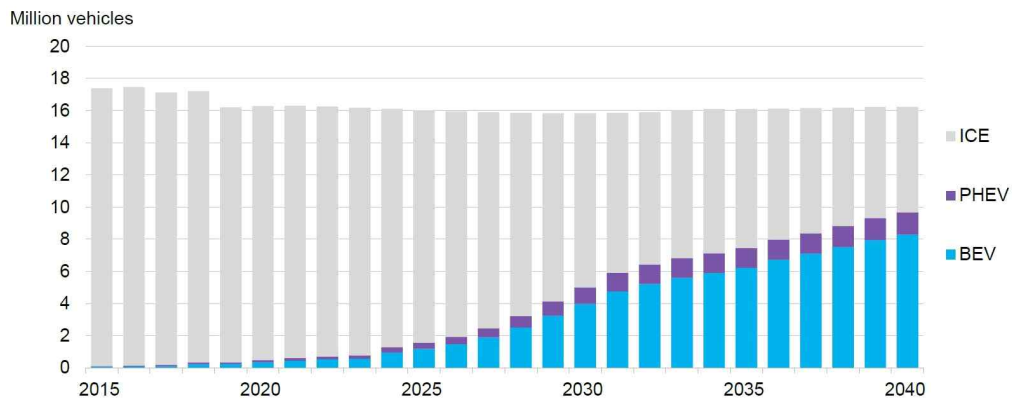
As the demand for EVs has recently increased, the importance of LIB used as a power source for EVs has also increased. The positive electrode material, which is one of the four elements constituting the LIB, is an important factor influencing the performance of the battery by determining the capacity and power of the battery according to the applied material. Therefore, in this study, NCM, LFP, and LMO, which are used as representative positive electrode materials, are applied to the battery cells, and further, the battery characteristics at the system level according to the application of different positive electrode materials are compared and analyzed. To this end, Each of the 18650 cylindrical battery cells was modeled by applying different positive electrode active materials. Battery modeling was based on a database provided by Gamma Technologies' LIB simulation, GT-AutoLion. In order to analyze thermal stability and capacity loss according to the temperature of the battery cell by applying different C-rate discharge and temperature conditions by for each positive electrode active material, an electrochemical-based 0D analysis was performed. In the simulation, the analytical temperature was set at room temperature so that the battery could

perform optimally. Lumped battery pack modeling was performed to extend the modeled battery cell to an EV battery pack. At this time, the battery pack was modeled by individual applying NCM622, NCM811, LFP, and LMO positive electrode active materials in accordance with the capacity standards required by the target EV. The modeled battery pack was combined with GT-Suite, a 1D-based automotive comprehensive simulation software, to build an EV model. The constructed EV model applies the drive cycle measurement method such as FTP-75, US06, and WLTC, etc. to measure fuel efficiency by assuming an environment similar to the actual operating conditions. after that time, EV models equipped with battery packs to which different positive electrode active materials were applied were comparative analysis and verified for reliability. In addition, using the MACCOR 4300 battery charger/discharger, Different C-rate discharge tests of the battery cells were performed under the same temperature conditions as the simulation. the validity of the simulation was verified through this battery cell experiments.

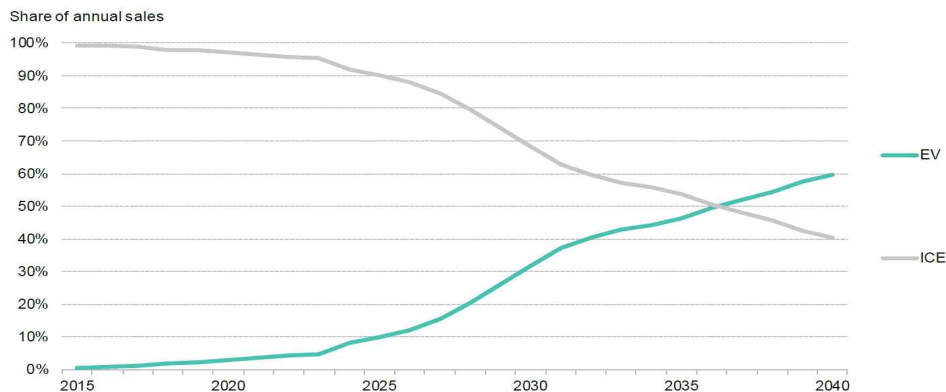
# 제 1 장 서론

## 제 1 절 연구 배경 및 구성

### 1. 연구 배경



(a)



(b)

**Figure 1. EV Market share forecast from 2015 to 2040 [1] (a) Comparison of sales volume by vehicle type, (b) Sales volume of ICEV and EV by year**

최근 환경문제가 이슈화되면서 자동차 산업 또한 변화하고 있다. 에너지 시장 조사 업체인 블룸버그 신 에너지 파이낸스(BNEF : Bloomberg New Energy Finance)의 2019년 전기자동차의 전망에 대한 조사[1]에 따르면 Figure



1. (a)와 같이 기존 자동차 시장에서 가솔린 및 디젤 등과 같은 내연기관 자동차(ICEV : Internal Combustion Engine Vehicle)들이 90%가 넘는 비중을 차지하고, 전기자동차의 경우 2017년까지의 판매량이 수천대 규모 정도로 판매 비중이 매우 저조한 것을 확인할 수 있다. 그러나 최근 환경 규제가 강화됨에 따라 친환경차인 xEV에 대한 개발이 증가하면서 2018년에는 200만대 이상이 판매되어 2017년까지의 판매량보다 급격하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이러한 증가 추세는 지속적으로 성장하여 2040년에는 ICEV의 판매량이 감소하고, 반면에 Figure 1. (b)와 같이 전기자동차의 판매량이 증가하여 자동차 시장에서 전기자동차의 판매 비중이 약 55%를 차지할 것으로 추정하였다. 이는 2040년 기준으로 5,600만대 수준이다. xEV의 수요가 증가함에 따라 전 세계의 자동차 기업에서도 최신 트렌드에 맞춰 GM-Volt, HYUNDAI-Ioniq/ Kona, KIA-Soul/ Niro, TOYOTA-Prius 및 HONDA-Accord 등의 다양한 양산형 HEV 및 EV를 출시하고 있다. 친환경차인 xEV는 차량의 에너지원으로 화석 연료와 전기를 사용하여 배기가스 배출량을 현저히 저감시킨 하이브리드 자동차(HEV : Hybrid Electric Vehicle), 플러그인 하이브리드 자동차(PHEV : Plug-in Hybrid Vehicle)와 전기만을 사용하여 무공해 차량으로 불리는 전기자동차(EV : Electric Vehicle) 등으로 구분된다. 화석연료에서 발생하는 열에너지를 동력원으로 사용하는 내연기관 자동차와 달리 EV는 전력공급원으로부터 공급받은 전기에너지를 동력원으로 사용한다. 전력공급원은 리튬이온 배터리(LIB : Lithium Ion Battery)가 사용되고 있다. LIB는 기존에 휴대폰, 노트북 및 카메라 등과 같은 소형 휴대용 장치(Portable device)에서 주로 활용하였지만 최근에는 중·대형의 EV 및 에너지 저장장치(ESS : Energy Storage System)등으로 확대되면서 중요성이 점차 증대되고 있는 추세이다. 이로 인해 배터리의 열관리를 위한 냉각방법에 관한 연구[2], 배터리의 출력을 향상시키기 위한 소재 개발[3-5], 사용시간과 관련된 배터리의 수명(SOH : State of Health)에 관한 연구[6], 성능과 관련된 배터리의 잔존 용량(SOC : State of Charge) 추정 관련 연구[7] 등 다양한 측면에서 활발하게 LIB에 관한 연구가 진행되고 있다.

## 2. 연구 목적

LIB는 양극, 음극, 분리막 및 전해질 4대 요소로 구성되며, 그중 양극은 배터리의 소재비에서 약 36%의 높은 비중을 차지하는 핵심 소재이다. (Figure 2) 양극이 소재비에서 높은 비중을 차지하는 이유는 배터리의 전극 반응에 관여하는 물질인 양극활물질 때문이다. 양극활물질은 금속성분에 따라 분류되어 층상 구조를 가진 리튬코발트산화물(LCO), 니켈코발트망간(NCM), 니켈코발트알루미늄(NCA)과 올리빈 구조를 가진 리튬인산철(LFP), 스피넬 구조를 가진 리튬망간계산화물(LMO) 등으로 구분된다.

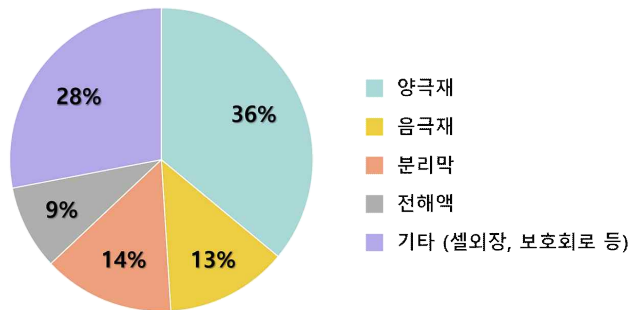


Figure 2. Electric vehicle battery cost composition [8]

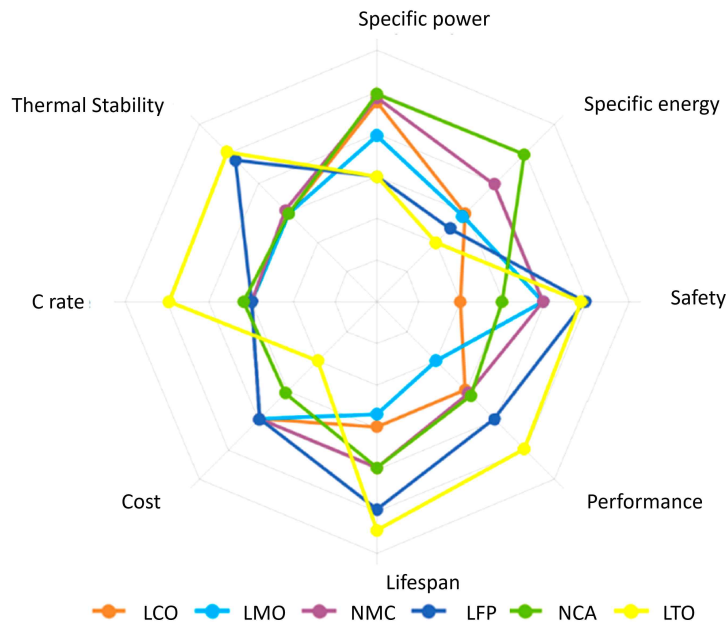


Figure 3. Characteristics of Positive electrode and Negative electrode materials of LIB [9]

Figure 3에서는 각 양극활물질 종류에 따른 에너지, 열적 안정성, 가격 및 수명 등과 같은 배터리 특성을 보여준다. EV에 적용되는 배터리는 고용량, 장수명, 저렴한 가격, 경량화, 고안전성 등을 요구한다. 특히 Figure 4와 같이 사고 발생시 큰 안전사고로 이어질 수 있으므로 안전성 강화는 필수이다.



Figure 4. Tesla electric vehicle fire accident [10]

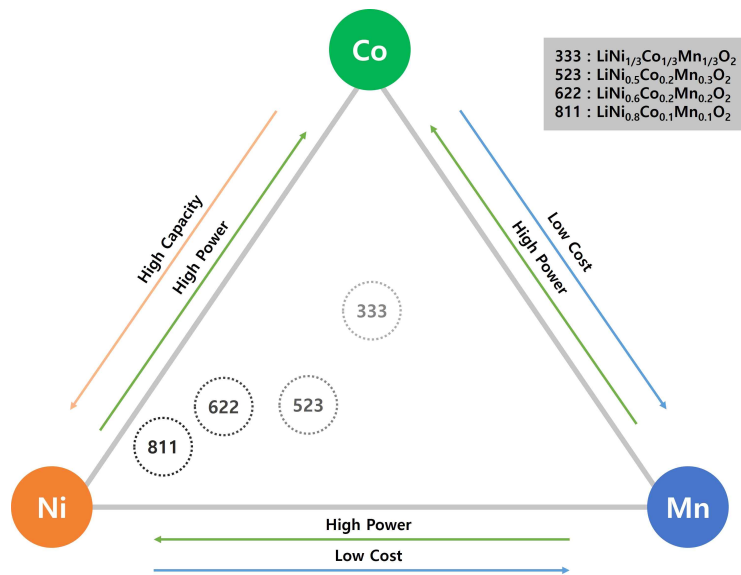


Figure 5. Characteristics According to Metal Composition ratio of Nickel, Cobalt, and Manganese of Ternary System NCM battery

기존에는 LIB의 양극활물질로 주로 양호한 에너지 용량 및 수명특성으로 인해 LCO를 사용하였지만, 현재는 고가인 코발트(Co)의 함량을 낮추어 LCO보다 저렴한 비용 및 우수한 열적 안정성 등과 같은 장점으로 인해 NCM으로

로 대체되는 추세이다. Figure 5는 NCM 소재의 삼성분계를 나타내며 니켈과 (Ni) 코발트(Co), 망간(Mn)의 금속간의 조성비율에 따라서 출력 특성, 용량 및 경제성 등의 배터리의 특성이 결정된다. NCM은 Ni, Co, Mn의 조성비에 따라 다음과 같이 분류된다. 먼저 NCM111(Ni 33%, Co 33%, Mn 33%)부터 NCM523(Ni 50%, Co 20%, Mn 30%), NCM622(Ni 60%, Co 20%, Mn 20%)까지 현재 상용화되어 사용하고 있으며, Ni의 함량을 더욱 증가시킨 NCM811(Ni 80%, Co 10%, Mn 10%)과 Ni의 함량이 90% 이상 되는 하이니켈계 양극재에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. Ni의 함량을 증가시킬수록 에너지 용량이 증가하고, 비교적 고가인 Co의 함량이 감소되어 원가절감이 가능한 장점이 있으나 충·방전 반복시 용량 감소 및 열적 안정성, 부반응과 구조붕괴로 인한 전기화학적 성능이 감소한다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 도핑 및 코팅, 표면 개질을 통한 열적 안정성과 전기화학적 성능향상에 대한 연구[11-16] 및 NCM을 대체할 수 있는 양극활물질 LFP 및 LMO 등에 대해서도 지속적으로 연구가 진행되고 있다. LFP은 기존에 양극활물질의 재료로 주로 이용하고 있는 Co대신 환경친화적인 철(Fe)을 사용하기도 한다. 이는 가격이 저렴하고, 수명특성 및 안전성이 우수하다는 장점을 가지고 있으나, 전자전도도가 낮은 단점을 가지고 있어 도핑 및 나노 입자화, 입자 표면에 탄소막(Carbon) 코팅을 통해 전기화학적 성능을 개선시키는 연구가 진행되고 있다.[17-22] LMO 또한 양극활물질로 Mn을 사용함으로써 저렴한 가격과 친환경적이며, 구조적으로 안정성이 우수하며, 높은 작동전압 등의 장점을 가지고 있다. 그러나 고온에서 구조적 불안정성 및 Mn 용출 등의 문제로 인하여 용량이 감소하는 단점이 있어, 이를 해결하기 위해 표면 코팅 및 이중 금속 도핑, 다른 양극활물질과 혼합 등과 같은 연구가 지속적으로 진행되고 있다.[23-28] 이와 같이 양극활물질은 배터리에서 가장 중요한 용량과 출력을 결정하여, 어떤 양극활물질을 적용했는지에 따라 배터리의 성능이 달라지므로 매우 중요하다. 따라서, 본 연구에서는 현재 가장 많이 사용되고 있는 NCM과 NCM보다 용량 및 에너지 부분에서는 낮지만, 경제성과 안전성이 우수한 LFP 및 LMO 등의 다양한 양극활물질을 적용하여 전기화학을 기반으로 배터리 셀부터 팩 나아가 EV까지 확장하여 배터리 특성을 비교 분석하고자 한다.

### 3. 논문 구성

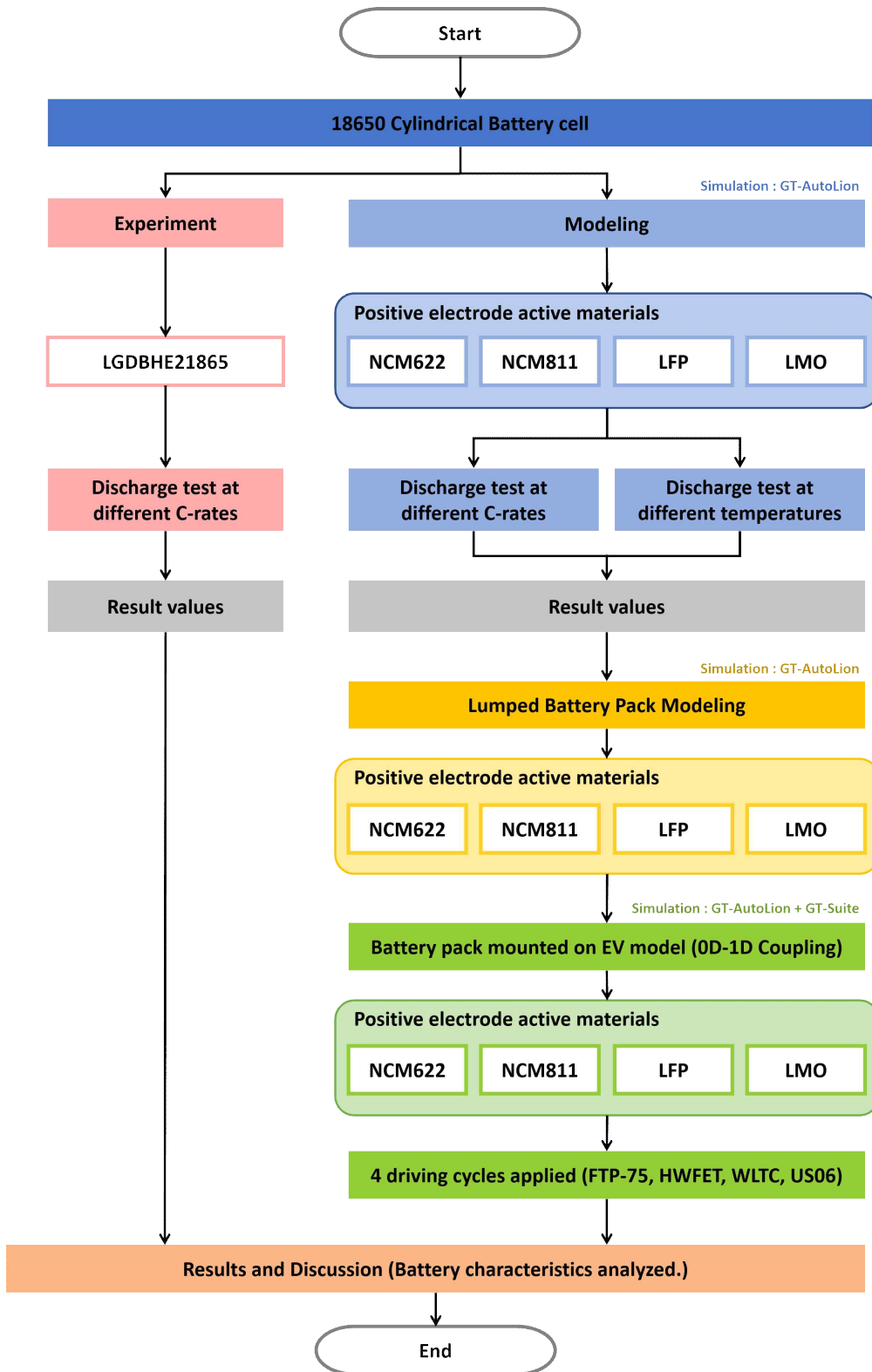


Figure 6. Flow chart of the Study

본 연구 과정을 Figure 6에 나타내었으며, 본 논문의 장 구성은 다음과 같다.

1장 1절에서는 연구의 배경 및 목적과 간략한 개요가 제공된다. 2절에서는 연구 관련하여 기본 이론 배경들을 다음과 같이 소개한다.

- 배터리의 구조 및 작동 원리
- 배터리의 종류 및 단위
- 배터리의 작동 온도 범위
- 양극활물질의 종류 및 특징(LCO, NCM, NCA, LFP, LMO)
- EV 구조, 주행 사이클 종류 및 특징

2장 1절에서는 시뮬레이션 모델과 실험 진행에 대한 연구 방법이 제공된다. 시뮬레이션에서는 전기화학 기반의 LIB 모델링을 할 수 있는 GT-AutoLion 소프트웨어(0D)를 사용하여 배터리 셀 모델을 먼저 구축한 후, 배터리 셀의 결과를 사용하여 EV용 배터리 팩 모델로 확장시킨다. GT-AutoLion을 사용하여 구축된 EV용 배터리 팩과 자동차 플랫폼의 GT-Suite 소프트웨어(1D)을 결합하여 EV 모델을 구축한다. 2절에서는 시뮬레이션 모델의 타당성을 검증하기 위한 NCM 양극활물질이 적용된 18650 원통형 배터리의 실험 방법 및 진행 절차에 대해 제공된다. 배터리 셀 및 EV 모델 구축시 상이한 양극활물질 적용에 따른 배터리의 성능을 비교 분석하기 위해 다음과 같은 조건을 적용하였다.

- 배터리 셀 : 상온에서 상이한 C-rate에서의 방전 테스트와 상이한 온도 조건에서 1C-rate으로 방전 테스트, 2가지의 다른 방전 조건에서 해석을 진행함
- EV : 신뢰성 검증을 위한 상이한 실제 도로 주행 사이클을 적용하여 시스템 레벨에서 해석을 진행함

3장에서는 상이한 양극활물질 적용에 따른 배터리 성능 비교 분석 결과가 제공된다. 1절에서는 시뮬레이션 배터리 셀 모델에서의 2가지 조건 적용에 따른 결과, 2절에서는 시뮬레이션 EV 모델에서의 상이한 주행 사이클을 적용시 EV에 탑재된 배터리 모델의 성능 결과, 3절에서는 실험 및 시뮬레이션의 배터리 셀 모델 결과 비교로 구분된다.

4장에서는 연구 결과를 요약하고 향후 연구의 방향성에 대해 간략하게 제안한다.



## 제 2 절 리튬이온 배터리 이론

### 1. 배터리의 구조 및 작동 원리

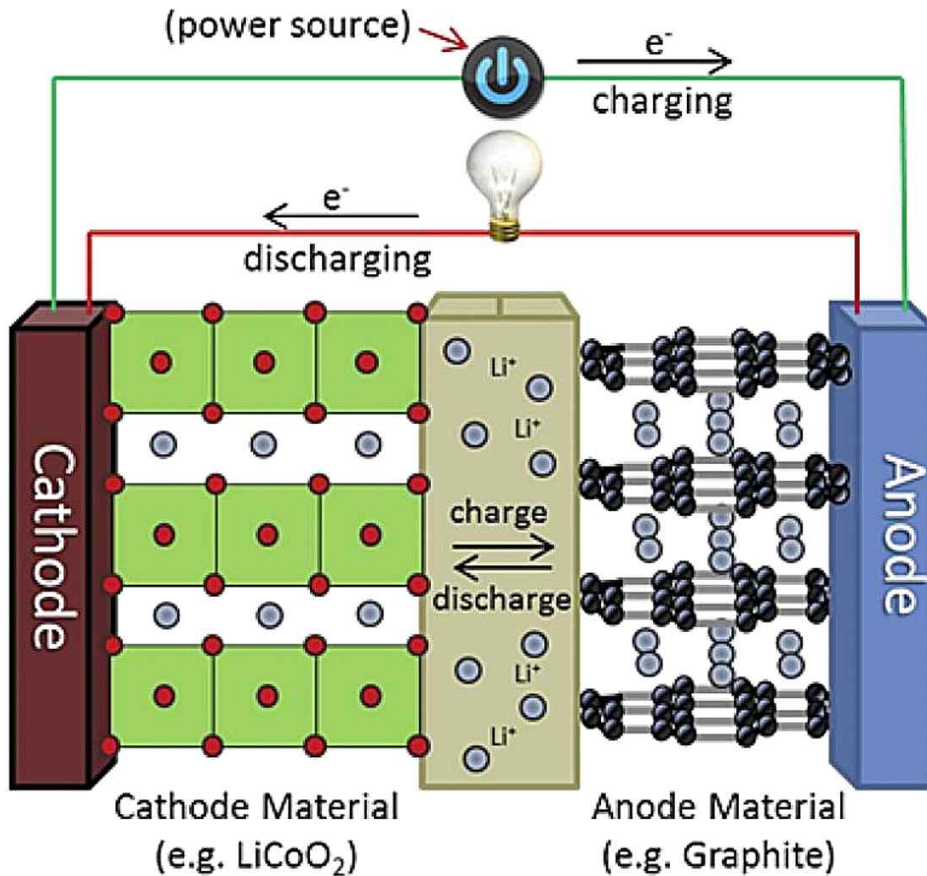
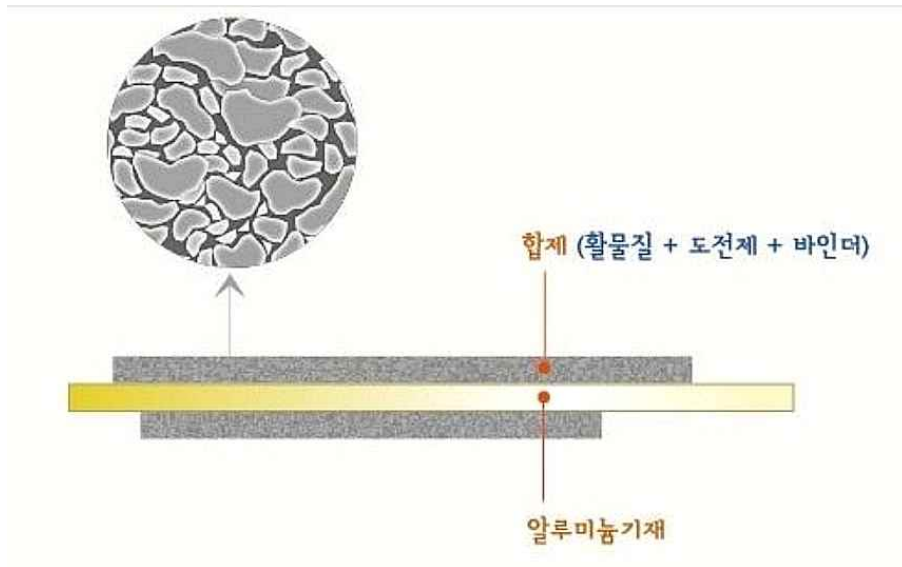


Figure 7. LIB operation principle [29]

LIB는 양극과 음극 물질의 전기화학적 산화·환원 반응에 의해 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 장치이다. 반응물 간의 전자이동으로 발생하는 반응을 산화·환원 반응이라고 하며 산화는 전자를 잃은 것, 환원은 전자를 얻은 것을 의미한다. LIB는 리튬이온의 제공 및 저장하는 역할을 하는 양극 (Positive electrode or Cathode) 및 음극 (Negative electrode or Anode), 양극과 음극의 물리적 접촉을 방지하기 위해 분리시켜주는 역할을 하는 분리막 (Saparator) 그리고 리튬이온이 양극과 음극을 이동할 수 있도록 통로 역할을 하는 전해질 (Electrolyte) 4가지 핵심 소재로 구성되어 있다.



**Figure 8. Composition of Positive electrode [30]**

양극 및 음극은 알루미늄(Al) 및 구리(Cu) 기재와 합제로 이루어져 있으며, 기재의 양쪽 표면에는 합제(활물질+도전재+바인더)가 Figure 8과 같이 코팅되어 있다. Figure 7과 같이 방전시에는 음극에서 리튬이온은 전해질을 통해 양극으로 이동하게 되고, 리튬이온과 분리된 전자는 외부 회로의 Power source를 경유하여 양극으로 이동한다. 반대로 충전시에는 양극에서 리튬이온 및 전자가 음극으로 이동하여 배터리의 충·방전이 진행되는 것이다.



## 2. 배터리의 종류

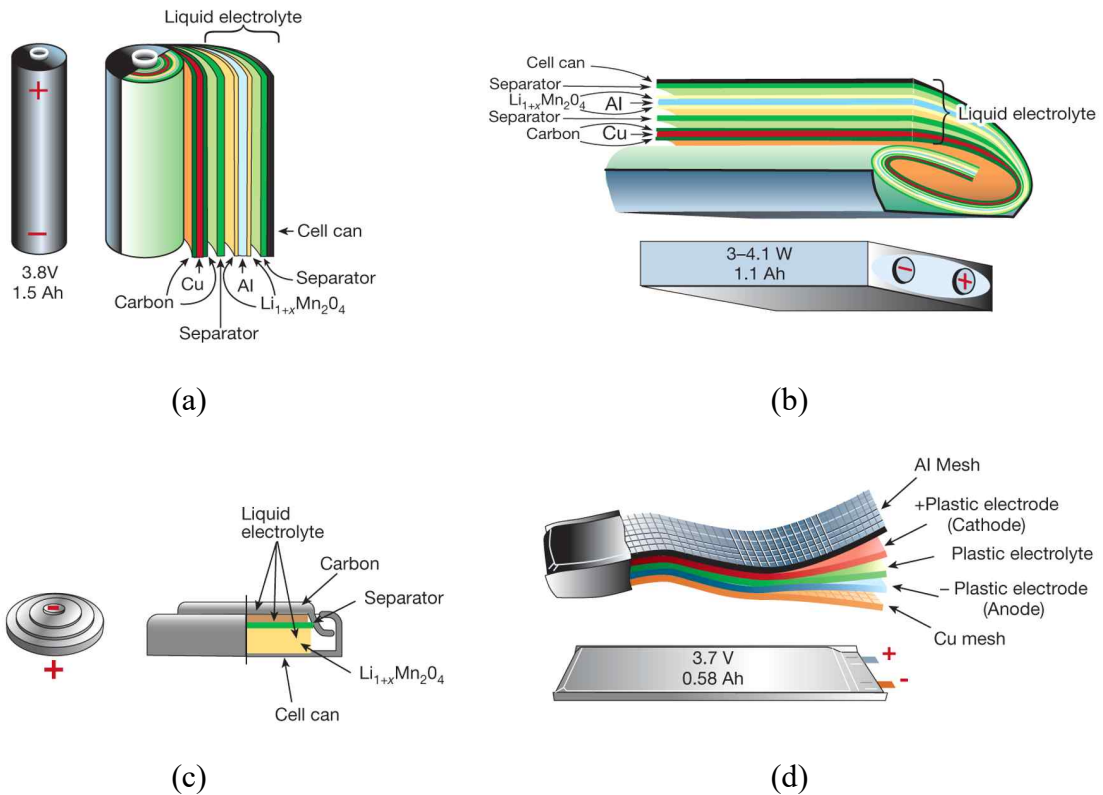


Figure 9. Type of battery (a) Cylindrical, (b) Square, (c) Coin, (d) Pouch [31]

LIB는 형태에 따라서 Figure 9와 같이 원통형, 각형, 코인 및 파우치형으로 구분된다. EV에는 주로 원통형, 각형 및 파우치형 배터리가 사용된다.

- 원통형의 경우, 캔의 형태를 가지고 있으며, 생산비용이 각형 및 파우치형보다 가장 저렴하고 수급이 용이한 장점을 가지고 있다. 이로 인해 EV뿐만 아니라 휴대기기, 노트북, 청소기 및 전동공구 등 다양한 기기에서 기존부터 사용되어 안정성이 검증되어 있다. 그러나 작은 크기로 인하여 EV에 적용시 다량의 배터리가 필요하다. 대표적으로 테슬라에서 원통형 배터리를 사용하고 있으며 모델 S, X 및 3 차종에 탑재되어 있다.
- 각형의 경우, 각기둥형 금속캔의 형태를 가지고 있어 내구성이 우수하고, 생산 비용이 파우치형에 비해 저렴한 특징을 가지고 있으며, 대량생산이 용이한 장점을 가지고 있다. BMW에서 각형 배터리를 주력으로 사용하고 있으며 i3 및 i8 차종에 탑재되어 있다.
- 파우치형의 경우, 알루미늄 호일에 배터리 구성물들이 싸여있는 파우치

형태를 가지고 있으며, 높은 에너지 밀도와 가벼운 무게와 높은 설계 자유도로 인해 다양한 형태 및 크기로 배터리 제작이 가능한 장점을 가지고 있다. 현대, GM 및 재규어 등의 자동차 업체들이 파우치형 배터리를 사용하고 있으며 코나, 아이오닉, 볼트, I-페이스 등의 차종에 탑재되어 있다.

### 3. 배터리의 구성

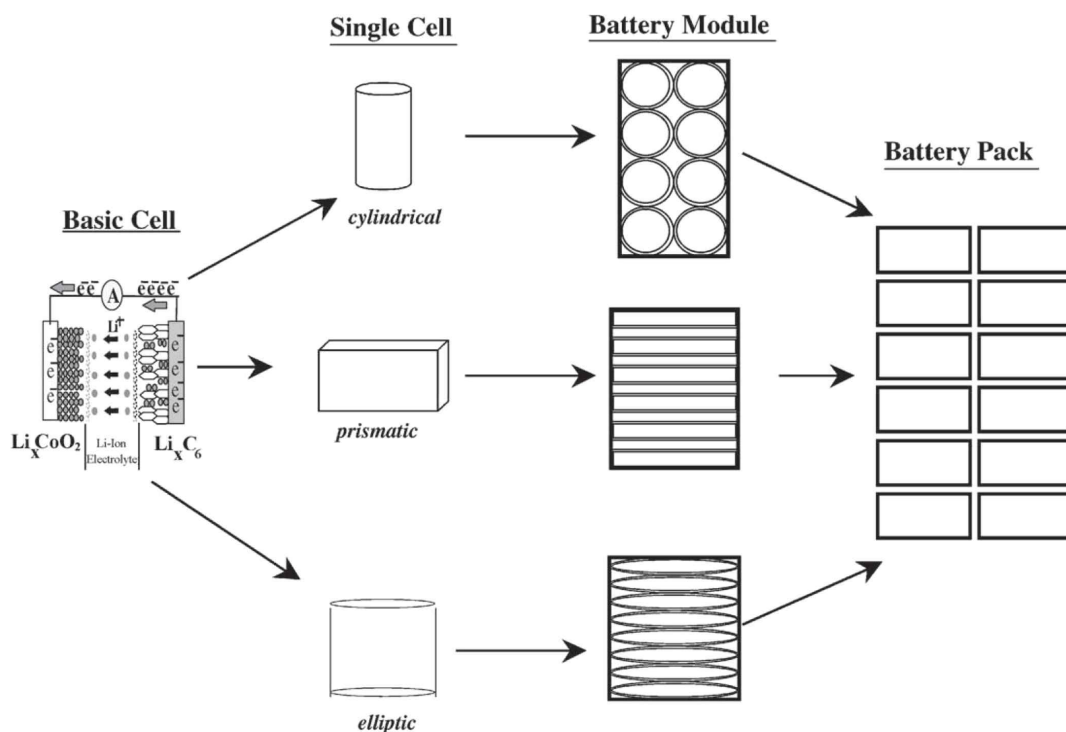


Figure 10. Cell, Module and Pack unit of LIB [32]

EV에 탑재되는 배터리는 Figure 10과 같이 배터리 셀, 모듈 및 팩으로 구성되어 있다. 배터리에서 가장 최소 단위가 배터리 셀이며, LIB의 4대 핵심 요소인 양극, 음극, 분리막, 전해질로 구성되어 있고, 종류로는 1장 배터리의 종류에 소개된 것과 같이 배터리 셀은 원통형, 각형, 파우치형으로 형태에 따라 구분된다. 이러한 배터리 셀을 열, 진동 및 외부 충격 등으로부터 배터리를 보호하기 위해 프레임 안에 다수의 배터리 셀을 직렬 혹은 병렬 연결하여 조립한 것이 배터리 모듈이다. 직렬 및 병렬 연결로 구성된 배터리 모듈과 배터리의 온도 및 전압 등을 관리해주는 배터리 관리시스템(BMS : Battery

Management System), 냉각 시스템 및 제어·보호 시스템 등을 장착하여 배터리 팩을 제작한다. 이렇게 만들어진 배터리 팩을 EV에 최종적으로 탑재하게 된다. 이와 같이 팩 형태를 EV에 탑재하므로 기존에는 배터리 셀 레벨에서 연구가 많이 진행되었지만, 최근에는 배터리 모듈과 팩 레벨에서의 효율 및 성능을 향상시키는 연구가 활발하게 진행되고 있다.[33-35]

#### 4. 배터리의 작동 온도 범위

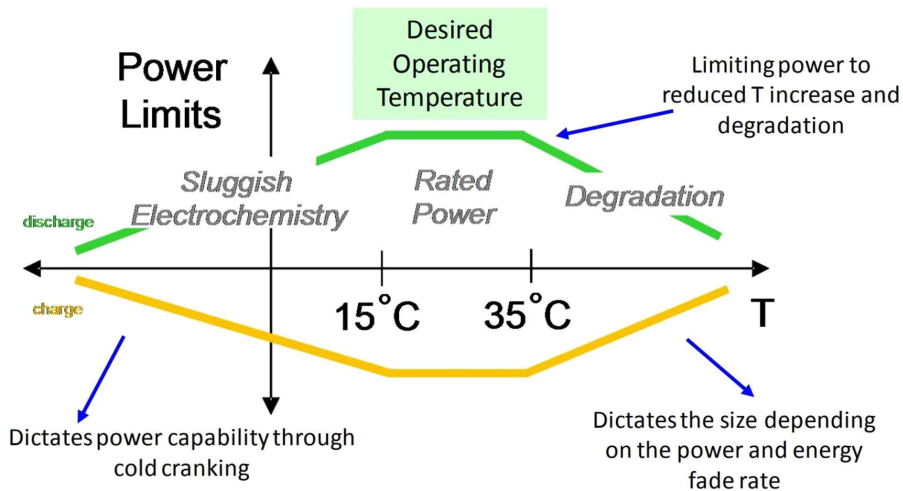


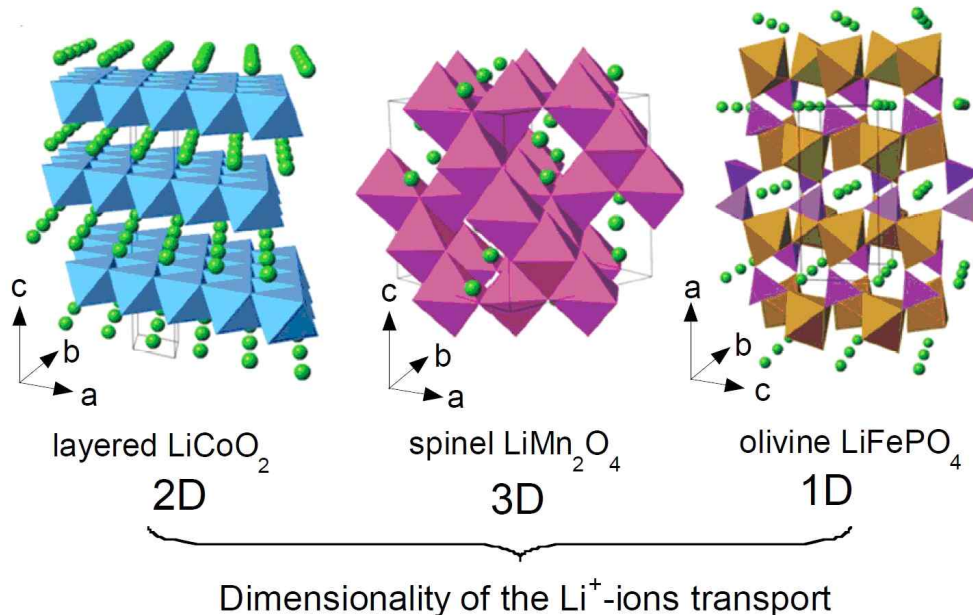
Figure 11. Optimum operating temperature range for LIB [37]

LIB는 화학적인 충전과 방전 과정으로 작동되므로 온도의 영향을 많이 받는다. LIB는 방전시 일반적으로  $-20\sim 60^{\circ}\text{C}$ 까지가 사용 가능한 온도 영역이다.[36] 그러나 Pesaran 외의 연구 보고에 따르면 LIB가 최적의 성능을 낼 수 있는 작동 온도 범위는 Figure 11과 같이  $15\sim 35^{\circ}\text{C}$ 이다.[37] 일반적으로 배터리에 영향을 미치는 작동 온도의 영향은 고온과 저온 2가지로 구분될 수 있다. [38,39] 주로 저온에서는 외부 환경 온도에 더 민감하다. 저온의 경우 전해질의 점도가 증가하면서 이온 전도성이 감소하게 되고, 전하 전달 저항의 증가 및 리튬이온의 느린 확산속도 등과 같은 요인으로 인하여 LIB의 성능에 악영향을 미친다.[40] 반면에 고온에서는 환경 온도의 영향보다는 배터리의 내부 온도가 증가하는 경우에 더 민감하다. 고온의 경우 충전 및 방전 과정에서

배터리 내부의 열 생성으로 인해 발생하게 되고, 이로 인해 배터리의 용량과 전력이 손실된다.[41] 또한 자기 발열 반응에 의해 온도가 급격하게 상승하게 되면 열 폭주(Thermal runaway) 현상으로 인해 배터리가 폭발 및 화재 사고가 발생하게 된다.[42] 따라서 온도의 영향을 많이 받는 LIB를 최적의 작동 온도 유지를 위해 열관리에 대한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.[43-45]

## 5. 양극활물질의 종류 및 특징

LIB의 구성 요소 가운데 배터리의 소재비에서 가장 높은 비중을 차지하고 있는 양극활물질은 배터리의 용량 및 출력을 좌우하는 매우 중요한 요소이다. 이러한 양극활물질은 금속염의 구성 성분에 따라 크게 LCO, NCM, NCA, LFP, LMO 5가지 종류로 구분되고, 구조에 따라 Figure 12와 같이 층상, 올리빈, 스피넬 구조로 구분된다.



**Figure 12. Crystal structure of the three lithium-insertion compounds in which the  $\text{Li}^+$  ions are mobile through the 2-D (layered), 3-D (spinel) and 1-D (olivine) frameworks [46]**

## 가. 층상 구조

### (1) $\text{LiCoO}_2$

$\text{LiCoO}_2$  (LCO)는  $\text{CoO}_2$ 층과 Li층이 연속으로 교차되는 층상의  $\alpha\text{-NaFeO}_2$  구조를 가지고 있다.[47] LCO는 Co의 비싼 원료가격에도 불구하고, 제조가 쉬워 대량생산이 용이하고, 높은 용량, 안전성 및 신뢰성으로 인해 LIB의 개발 초기부터 주요 양극재로 사용되어왔다. 그러나, 배터리가 충전되기 시작하면서 50% 이상의  $\text{Li}^+$ 들이 LCO로부터 탈리시 구조의 불안정성으로 인해 배터리의 용량이 절반정도 밖에 사용할 수 없으며, Co의 높은 가격으로 인해 배터리의 제조비용 감소 및 안정성 강화를 위해 현재 삼원계 NCM으로 대체되는 추세이다.

### (2) $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Mn}]\text{O}_2$

Hexagonal single-phase  $\alpha\text{-NaFeO}_2$  구조를 갖는  $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Mn}]\text{O}_2$  (NCM)은 Ni과 Co, Mn의 3가지 원소를 기반으로 한 삼원계 양극재이다. Co의 함량을 낮추고 Ni을 사용한 NCM은 기존에 주로 사용되던 LCO보다 우수한 안정성과, 높은 용량 및 수명, 저렴한 가격 등의 장점으로 인해 중·대형 장치에 사용되는 LIB의 주요 양극재로 사용되고 있다. Ni, Co, Mn의 조성비에 따라서 NCM111, NCM523, NCM622, NCM811 등으로 구분되며, Ni 함량이 90% 이상 되는 양극재도 개발되고 있다. EV에 탑재하기 위하여 Ni의 함량을 높이는 방향으로 활발하게 연구가 진행되고 있다. 그러나 Ni 함량을 증가시키면 배터리의 용량은 증가시킬 수 있으나, Ni의 높은 반응성으로 인한 충·방전시 다량의 가스 발생 및 잔류 리튬으로 인한 안정성 감소, 양이온 혼합으로 인한 전기화학적 성능 저하 등의 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 표면 개질, 도핑 및 코팅을 통한 전기 화학적 성능 및 열적 안정성 향상에 대한 연구가 진행되고 있다.[11-16]

### (3) $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Al}]\text{O}_2$

$\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Al}]\text{O}_2$  (NCA)는 Ni과 Co, Al의 원소로 구성되어 있는 삼원계 양극재이다. NCA는 타 양극활물질보다 높은 용량과 우수한 출력특성의 장점을 가지고 있으나, 과충전시 구조 붕괴로 인한 열적 안정성 저하, 낮은 수명특성

의 단점을 가지고 있다.[48,49] 이를 해결하기 위해 금속 물질 도핑, 표면 코팅에 대한 연구가 진행되고 있다.[50-52]

## 나. 올리빈 구조

### (1) $\text{LiFePO}_4$

사방정계의 올리빈 구조를 갖는  $\text{LiFePO}_4$  (LFP)는 Co보다 값이 저렴한 Fe을 사용하여 친환경적이며, 우수한 수명특성 및 충·방전시 우수한 구조적 및 열적 안정성의 장점을 가지고 있다. 그러나, 낮은 전기전도도 및 느린  $\text{Li}^+$  확산 속도의 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 나노 입자화, 도핑 및 입자 표면에 탄소막 코팅 등과 같은 연구가 진행되고 있다.[17-22]

## 다. 스피넬 구조

### (1) $\text{LiMn}_2\text{O}_4$

입방정계의 스피넬 구조를 갖는  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  (LMO)화합물에서 산소는 ABCABC 골격의 면심입방구조를 형성하고 있으며, Figure 12와 같이 3차원적 배열을 이루고 있다. Co 대신 친환경적인 Mn을 사용하여 저렴한 가격과 높은 출력, 충·방전시 구조적 안정성이 우수한 장점을 가지고 있으나, 충·방전시 Jahn-Teller distortion에 의한 구조변화 및 고온에서의 Mn 용출로 인하여 용량이 감소하는 단점을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해 혼합 양극활물질, 표면 코팅 및 이중 금속 도핑 등과 같은 연구가 진행되고 있다.[23-28]



## 제 3 절 EV 구조 및 주행 사이클

### 1. EV의 구조

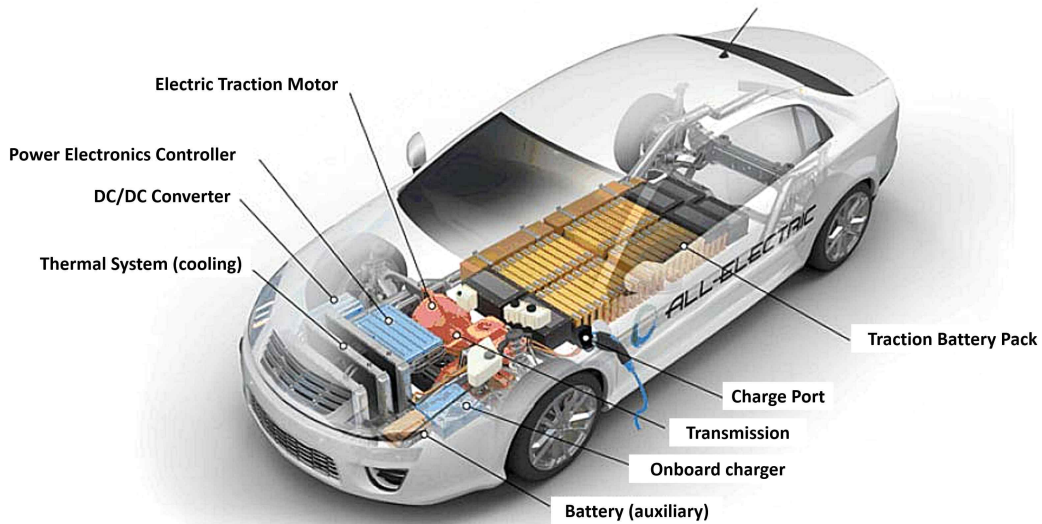
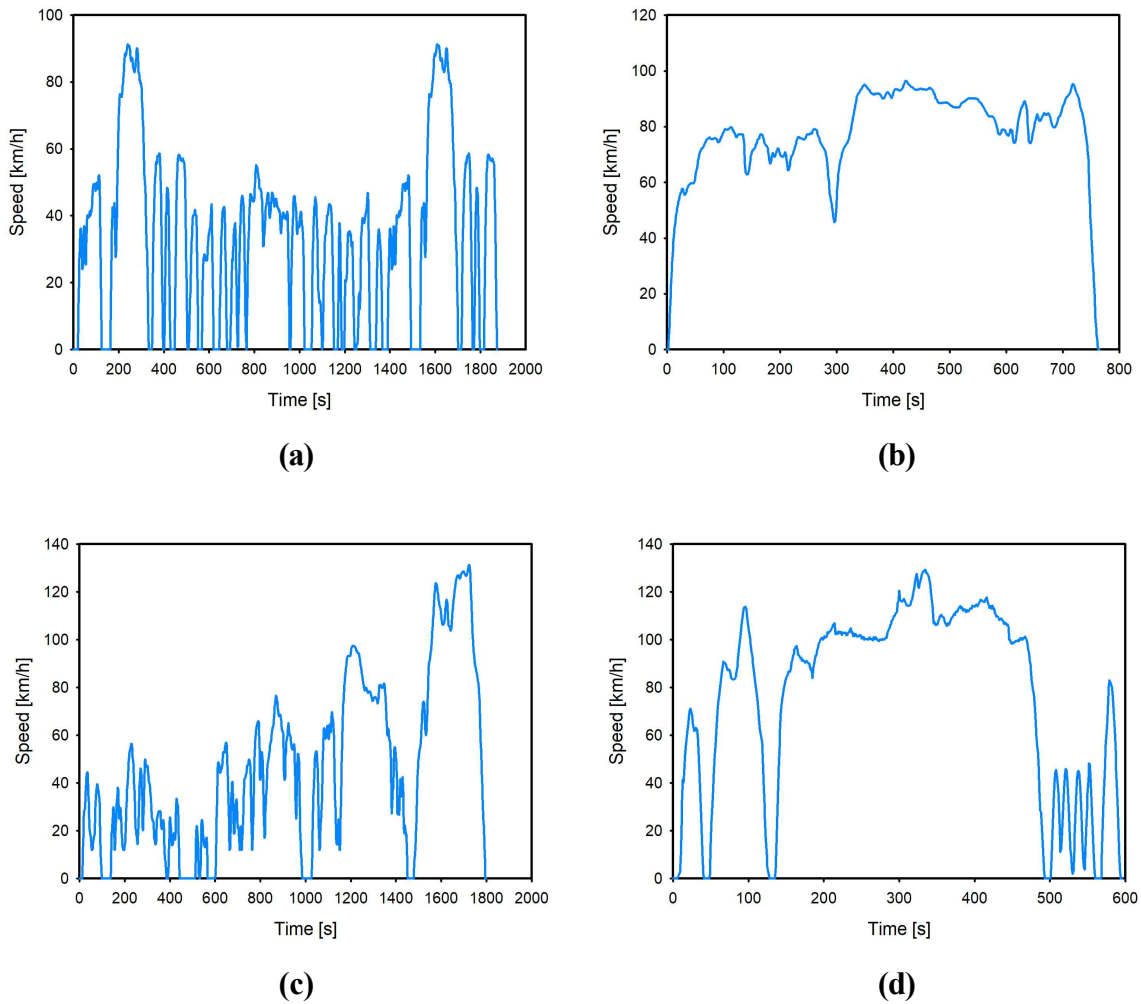


Figure 13. Structure of EV [53]

EV는 열관리 시스템(Thermal System), DC-DC 컨버터(DC-DC Converter), 모터(Electric Traction Motor), 완속 충전장치(OBC : On Board Charger), 충전 포트(Charge Port), 변속기(Transmission), 배터리 팩(Traction Battery Pack) 및 파워 일렉트로닉스 컨트롤러(PCU : Power Controller Unit or Power Electronics Controller) 등의 주요 부품으로 Figure 13과 같이 구성된다. 열관리 시스템은 배터리, 전기모터 및 기타 구성품의 적절한 작동 온도 범위를 유지해주는 역할을 담당한다. DC-DC 컨버터는 구동용 배터리 팩의 고전압 DC 전원을 오디오 및 각종 전자 장비를 작동 및 보조 배터리를 충전하는데 필요한 12V의 저전압으로 변환시켜주는 역할을 한다. 모터는 배터리 팩의 전원을 사용하여 차량 바퀴를 구동시킨다. 완속 충전장치는 외부 에너지원으로부터 전기에너지를 공급받은 AC 전원을 배터리 팩을 충전하기 위해 DC 전원으로 변환하여 공급한다. 충전 포트는 배터리 팩을 충전하기 위해 외부 전원 공급장치에 차량이 연결될 수 있도록 한다. 변속기는 모터의 회전을 최적으로 바퀴에 전달하기 위해 탑재하는 장치이다. 배터리 팩은 모터에서 사용할 전기에너지를

저장하는 장치이며, Figure 13과 같이 주로 EV의 차체 하단에 탑재된다. 파워 일렉트로닉스 컨트롤러는 배터리 팩이 전달하는 전기에너지의 흐름을 관리하여 모터의 속도와 토크를 제어하는 역할을 한다.

## 2. 주행 사이클의 종류 및 특징



**Figure 14. Type of Driving cycle**

**(a) FTP-75, (b) HWFET, (c) WLTC, and (d) US06**

Figure 14는 본 연구에서 사용되는 4가지 주행 사이클이다. EV의 효율 특성은 환경조건, 도로 상황 및 다양한 주행패턴 등 여러 가지 변수에 의해 크게



좌우된다. 각 주행 사이클의 주행 조건들이 Table 1에 요약되어 있다.

**Table 1. Driving cycle data**

Driving cycle	Time [s]	Distance [km]	Max. Speed [km/h]	Avg. Speed [km/h]
FTP-75	1874	17.8	91.2	34.2
HWFET	765	16.5	96.4	77.7
WLTC	1800	23.25	131	46.5
US06	596	12.9	129	77.2

- FTP-75는 도심주행 모드이다. 저속구간과 중속구간으로 나누어 반복하여 1874초간 계속 속도를 변화시켜가며 테스트를 진행한다. 주행코스는 17.8km 길이로 구성되며 이때, 최고 및 평균 주행속도는 91.2km/h 및 34.2km/h이다.
- HWFET는 고속도로주행 모드이다. 고속구간에서 1874초간 테스트를 진행하며, 가감속의 폭이 작은 것이 특징이다. 주행코스는 16.5km 길이로 구성되며 이때, 최고 및 평균 주행속도는 96.4km/h 및 77.7km/h이다.
- WLTC는 국제 표준 주행 모드이다. 저속(0~589초), 중속(589~1022초), 고속(1022~1477초), 초고속(1477~1800초)으로 평균 차속에 따라 4개의 구간으로 구분되어 있는 것이 특징이다. 주행코스는 23.25km 길이로 구성되며 이때, 최고 및 평균 주행속도는 131.0km/h 및 46.5km/h이다.
- US06은 최고속·급가감속주행 모드이다. 도심 1(0~130초), 고속(130~495초), 도심 2(496~596초)구간 주행 순으로 총 596초간 테스트를 진행한다. 주행코스는 12.9km 길이로 구성되며 이때, 최고 및 평균 주행속도는 129.0km/h 및 77.2km/h이다.

## 제 2 장 연구 방법

### 제 1 절 시뮬레이션 모델 구축

#### 1. 배터리 셀

배터리 내부의 화학적 특성을 고려하기 위해 Gamma Technologies의 LIB 시뮬레이션 소프트웨어인 GT-AutoLion을 사용하여 배터리 셀을 모델링 하였다. GT-AutoLion 소프트웨어는 배터리 셀 및 팩 개발을 위한 시뮬레이션 도구들과 전기화학 소재 데이터베이스들을 제공하며 Thermally Coupled Battery(TCB) 모델링 방식을 사용한다. TCB 모델링 방식은 등온모델 기반인 Doyle 외[54] 모델과 열 커플링 기반의 Gu 외[55], Srinivasan 외[56], and Smith 외[57] 모델들을 기반으로 개발되었다. GT-AutoLion은 다른 배터리 모델링의 접근방법과 달리 완전히 결합된 전기화학 및 열 방법을 사용하는 장점을 가지고 있다. 배터리 셀의 내부 전기화학적 반응은 아래와 같이 GT-AutoLion에서 사용되는 Table 2에 나와있는 4개의 지배방정식에 의해 계산된다.

**Table 2. LIB electrochemical governing equations [58]**

Charge Conservation	
(1) Solid-Phase	$0 = \frac{\partial}{\partial x}(\sigma_s^{eff} \frac{\partial \phi_s}{\partial x}) - j^{Li} - a_{dc} \frac{\partial(\phi_s - \phi_e)}{\partial x}$
(2) Electrolyte-Phase	$0 = \frac{\partial}{\partial x}(k_D^{eff} \frac{\partial \phi_e}{\partial x}) - \frac{\partial}{\partial x}(k_D^{eff} \frac{\partial \ln c_e}{\partial x}) + j^{Li} + a_{dc} \frac{\partial(\phi_s - \phi_e)}{\partial x}$
Species Conservation	
(3) Electrolyte-Phase Li+	$\frac{\partial}{\partial t}[c_e] = \frac{\partial}{\partial x}(D_e^{eff} \frac{\partial c_e}{\partial x}) + \frac{1-t_+^0}{F} j^{Li}$
(4) Active Material Li	$\frac{\partial c_s}{\partial t} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r}(D_s r^2 \frac{\partial c_s}{\partial r})$

식 (1) 및 (2)는 고체상 및 전해질에서의 전하 보존을 나타낸다. 식 (3)은 전해질상의  $\text{Li}^+$  종 보존을 제공하며, 식 (4)는 활성 물질 입자에서의  $\text{Li}$  확산을 나타낸다. Newman이 만든 P2D 모델은 유한 제어 체적 방식을 사용하며, 배터리 셀의 지배방정식인 식 (1)~(4)를 이산화하여 모델링한다. 식 (1)~(3)은 음극과 양극 사이 두께 방향으로 이산화되며, 식 (4)의 경우 활물질 입자의 반경 방향으로 Figure 15와 같이 일정한 부피로 이산화된다.

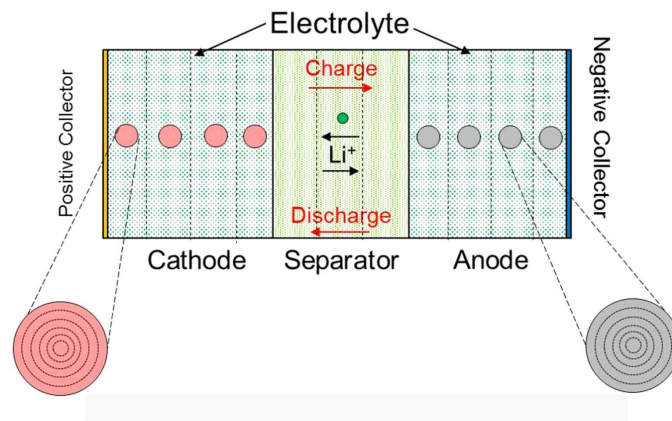


Figure 15. Battery cell Discretization direction (Thickness and Radial direction) [58]

배터리 셀 모델 구축시 Table 3에 정리된 것과 같이 양극과 음극에는 6개의 원소, 분리막은 4개의 원소, 양극과 음극의 활물질에는 12개의 원소로 이산화하였다.

Table 3. Battery Cell Discretization

Cell Discretization	Number of Elements
Positive electrode	6
Separator	4
Negative electrode	6
Positive electrode Particle	12
Negative electrode Particle	12

GT-AutoLion에서 제공되는 전기화학 기반 데이터베이스를 사용하여 Figure 16과 같이 양극활물질을 상이하게 적용하여 배터리 셀의 정전류(CC) 방전 테스트를 진행하였다.

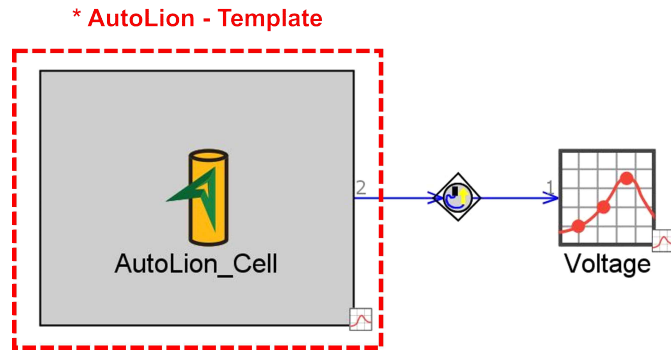


Figure 16. Battery cell CC-Discharge test set-up

Table 4. Battery cell materials properties

Positive Electrode		Negative Electrode	
Foil		Foil	
Material	Aluminum	Material	Copper
Thickness	15 $\mu\text{m}$	Thickness	8 $\mu\text{m}$
Height	59.7 mm	Height	59.7 mm
Active Material		Active Material	
Material	NCM/LFP/LMO	Material	Graphite
Density	4.8/3.6/4.28 g/cm <sup>3</sup>	Density	2.24 g/cm <sup>3</sup>
Weight Percentage	94%	Weight Percentage	94%
Conductive Agent		Conductive Agent	
Material	Carbon	Material	Carbon
Weight Percentage	3%	Weight Percentage	3%
Binder		Binder	
Material	PVdF	Material	PVdF
Weight Percentage	3%	Weight Percentage	3%

Table 5. Battery cell specification and operating conditions

<b>Type</b>	Cylindrical
<b>Diameter</b>	18 mm
<b>Height</b>	65 mm
<b>Positive electrode active material</b>	NCM622/NCM811/LFP/LMO
<b>Negative electrode active material</b>	Graphite
<b>Capacity</b>	2.2/2.1/1.4/1.5 Ah
<b>Discharge Cutoff Voltage</b>	2.5 V
<b>Charge Cutoff Voltage</b>	4.2/4.2/3.65/4.2 V

배터리 모델 구축시 Table 4 및 5에서 요약된 것과 같이 AutoLion 템플릿에 배터리 종류, 치수, 충·방전시 컷오프 전압, 양극, 음극, 분리막 및 전해질과 같은 소재 관련 물성 데이터 등과 같은 해석시 필요한 입력 변수들을 설정한다. 이때, 정확한 소재의 데이터베이스는 높은 정확도의 해석 결과를 도출할 수 있다. 배터리 셀 방전시 온도 및 C-rate에 따른 영향을 비교 분석하기 위해 18650타입의 원통형 배터리를 사용하여 해석을 진행하였다. 4가지 (NCM622, NCM811, LFP 및 LMO) 종류의 양극활물질을 각각 배터리 셀에 적용하여 5가지 온도조건(-20°C, -10°C, 0°C, 25°C, 45°C)에서의 1C-rate 방전과 상온(25°C)에서 상이한 C-rate(0.5~5C-rate)에 따른 방전 테스트를 통해 온도 및 양극활물질의 적용에 따른 배터리 성능을 분석하였다. 배터리의 초기 SOC는 100%로 설정하였으며, 열 모델을 단순화시키기 위해 주변 온도와 초기 온도를 동일하다고 가정하였다. 이때, 열 모델은 자연대류 조건( $h=10\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ )을 적용하였다.

## 2. 배터리 팩

앞서 분석한 배터리 셀 모델을 EV에 탑재되는 배터리 팩 모델로 확장하였다. 환경온도는 배터리의 최적의 성능을 낼 수 있는 25°C에서 해석을 진행하였다. 배터리 팩 모델링시 GT-AutoLion에서 제공되는 Lumped battery pack model 옵션을 사용하여 해석을 진행하였다. 따라서, 본 연구에서는 배터리 시스템이 균일하므로 모든 배터리 셀은 동일한 온도, 전류 및 전압을 가진다고 가정하였다. 필요한 직렬 셀의 수는 식 (5)를 통해 계산하고, 알려진 목표 EV 용 배터리 팩의 에너지를 통해 병렬 셀의 수는 식 (6)을 사용하여 배터리 팩을 모델을 구축하였다.

$$(5) \quad \text{Number of series cells} = V_p/V_c$$

$$(6) \quad E_p = V_p \times I_p$$

이때, 각각의 양극활물질 적용에 따른 배터리 셀( $V_c$ )과 팩의 전압( $V_p$ ), 팩

용량( $I_p$ )에 대한 데이터는 GT-AutoLion에서 배터리 셀을 모델링한 해석 결과 값을 사용하였으며, 배터리 팩의 초기 SOC 조건은 80%로 설정하였다. 상이한 양극활물질이 적용된 배터리 셀은 목표 EV의 제원의 배터리 에너지 용량인 55kWh에 맞춰서 각각 배터리 팩 모델로 확장되었다. Table 6에 각 양극활물질 적용에 따른 EV용 배터리 팩의 직렬 및 병렬 셀의 수가 요약되어 있다.

**Table 6. The number of cells in a 55kWh battery pack for EV**

Positive electrode active material	Number of Cells in series	Number of Cells in Parallel
NCM622	100	70
NCM811	99	73
LFP	108	110
LMO	91	103

### 3. EV

설계된 배터리는 시스템 레벨의 차량 모델링을 통해 HEV, PHEV의 연비 및 배출가스, EV의 배터리 1회 충전 시 주행거리 및 최고속도와 같은 차량의 성능특성, 다양한 주행모드 및 환경조건을 반영한 테스트를 시행하여 보다 높은 신뢰성을 얻을 수 있다. V-Elph 시뮬레이션 소프트웨어를 사용하여 연구한 Butler 외[59], GT-AutoLion 및 GT-Suite 시뮬레이션 소프트웨어를 결합하여 새로운 CAE 방법을 연구한 Wimmer 외[60], AutoLion-ST를 사용하여 경사용차를 주행 조건에서 성능 분석을 연구한 Sripad 외[61]가 시스템 레벨에서 연구를 진행하였다. 이와 같이 신뢰성을 향상시키기 위해서 시스템 레벨에서의 모델링에 관한 연구가 지속적으로 진행되어왔다. 따라서, 배터리 셀 레벨이 아닌 시스템 레벨 수준으로 봐야 한다. 본 연구에서는 0D 전기화학 반응이 고려된 배터리 모델과 1D 차량 모델을 결합하여 시스템 레벨에서 배터리의 특성 비교 분석을 진행한다. Figure 17은 GT-AutoLion에서 만들어진 배터리 팩을 1D 기반의 GT-Suite에 결합하여 만든 EV 모델을 나타낸다. EV 모델은 Figure 17과 같이 12V 배터리, 모터, DC-DC 컨버터, 배터리 팩, 인버터, 모터 및 차량 등으로 구성된다.

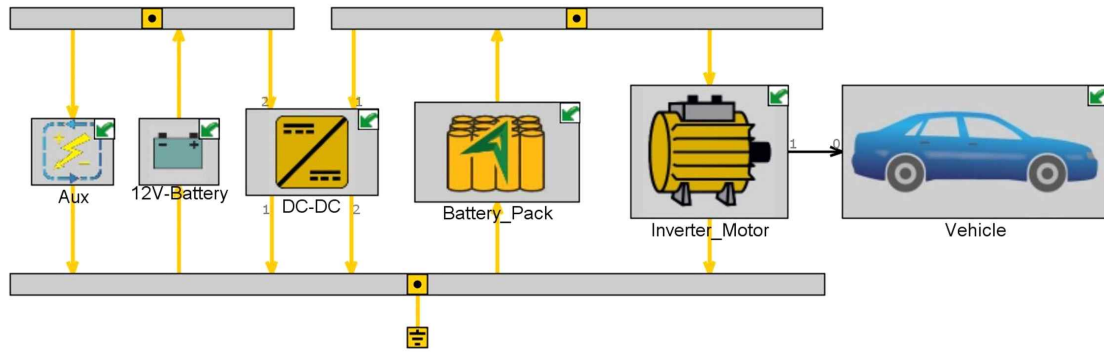


Figure 17. EV model with electrochemical battery pack of GT-AutoLion

이와 같은 EV를 구성하는 요소의 템플릿들을 물리적으로 연결시켜서 모델을 구축한다. 이때, 배터리 팩의 경우 앞서 목표 EV용에 맞춰 구축한 GT-AutoLion의 배터리 전기화학 모델을 결합한다. 최근 주행거리 향상을 위해 EV에 탑재되는 배터리의 용량을 증가시키는 추세이다. 이러한 트렌드에 맞춰 본 연구에서는 양산형 EV인 테슬라 모델 3(표준팩 탑재시), 2020년 출시 예정인 르노의 조에(ZOE) 3세대와 동급인 고용량 55kWh급 배터리 모델로 선정하여 해석을 진행하였다. 해석시, 환경 온도는 25°C로 일정하다고 가정하였다. EV 모델에 들어가는 구성 요소들에 대한 데이터는 Gamma Technologies에서 제공되는 데이터베이스를 사용하였으며 Table 7에 요약하였다.

Table 7. EV Model specification [60]

Vehicle Mass	1600 kg
Vehicle Drag Coefficient	0.21
Vehicle Frontal Area	1.95 m <sup>2</sup>
Tire Specification	215/50R17
Battery Pack energy	55 kWh
Final Drive Ratio	7.05
Traction motor Maximum Brake torque	360 Nm
Traction Motor Maximum Efficiency	97 %
Traction motor Maximum Torque (Continuous)	300 Nm
Traction motor Maximum Power	150 kW @ 4000 RPM

구축된 EV 모델은 실제 운행조건과 유사한 환경을 가정하여 연비를 측정하는 도심주행 모드의 FTP-75와 고속도로주행 모드의 HWFET, 국제 표준 주행 모드의 WLTC, 최고속·급가감속주행 모드의 US06 4가지 측정방법을 적용



하여 상이한 양극활물질(NCM622, NCM811, LFP, LMO)을 각각 적용한 배터리 팩을 EV 모델에 탑재하여 배터리의 특성을 비교하고 신뢰성을 검증하고자 한다.

## 제 2 절 배터리 셀 실험

### 1. 실험 장치

코인 셀 테스트를 통해 개발된 전기화학 기반의 해석 소프트웨어인 GT-Auto Lion에서 구축한 18650 배터리 모델이 실제 18650 배터리 셀에 적합한지 확인하기 위하여 4가지 양극활물질 중 NCM 양극활물질이 적용된 배터리의 경향을 예측하여 타당성을 검증하고자 한다.

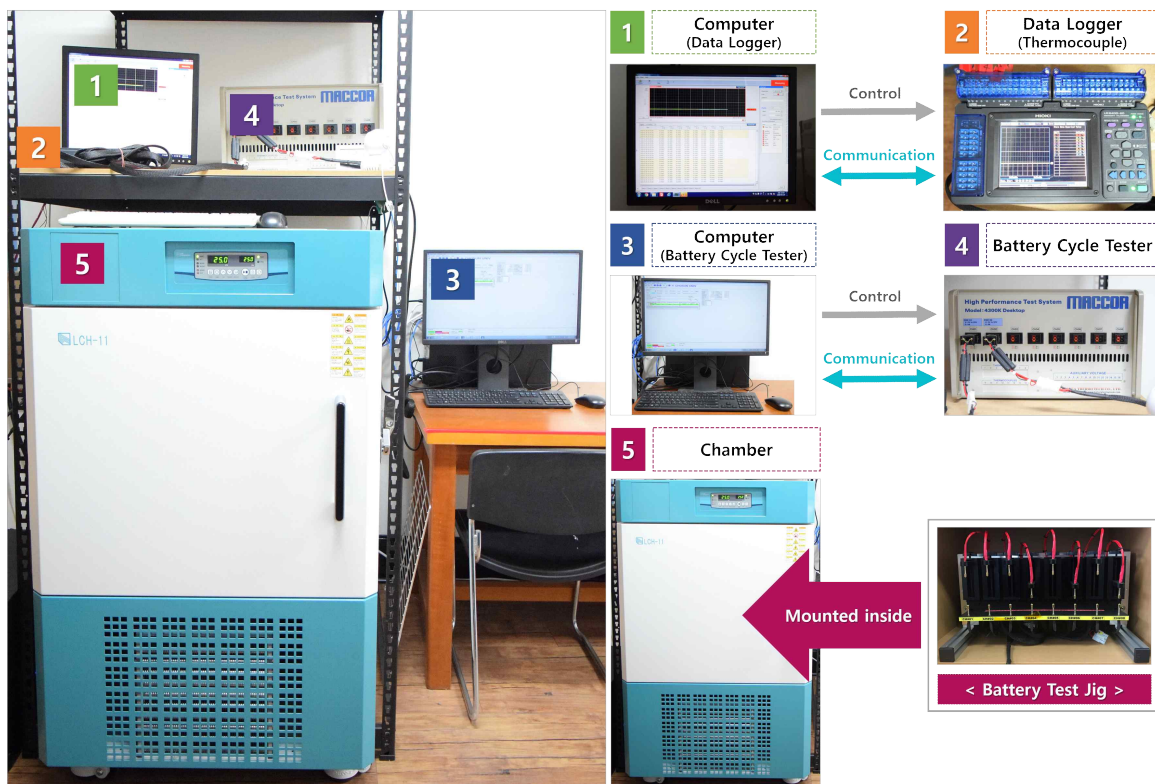
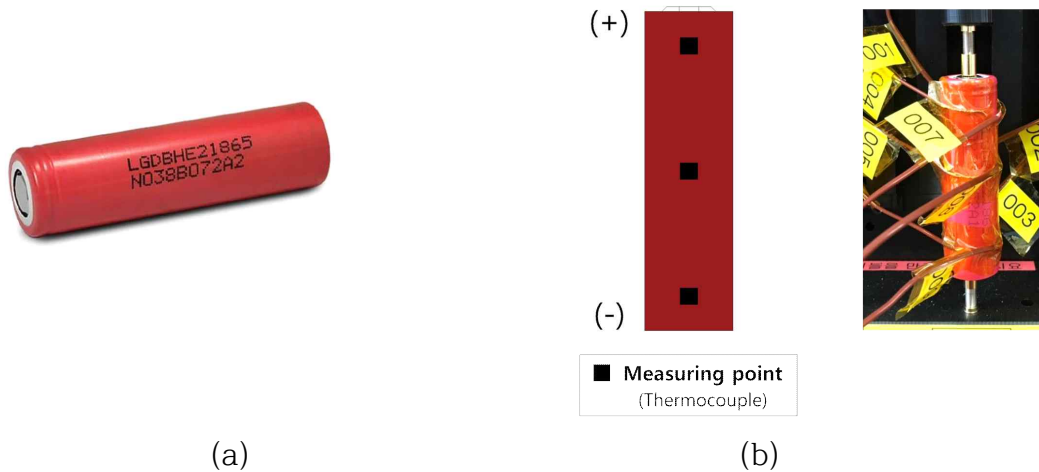


Figure 18. Experiment Set-up



이에 따라, 본 연구에서는 상이한 방전 속도에 따른 배터리 셀의 온도 변화 및 용량 손실을 고찰하기 위하여 배터리 셀 충·방전 실험을 수행하였다. 실험을 수행하기 위하여 Figure 18과 같은 실험 장비를 활용하였다. Figure 18에서 1번 컴퓨터는 2번 데이터로거와 연결되어 있어 데이터로거를 제어할 수 있으며, 온도 데이터를 실시간 기록 및 수집하기 위하여 사용된다. 3번의 컴퓨터는 4번 MACCOR 충·방전기와 연결되어 있어 실시간 모니터링이 가능하며, 충전 및 방전 조건들을 설정 및 제어, 실험 결과 데이터를 수집하기 위하여 사용된다. 일정한 온도 조건에서 실험을 수행하기 위하여 배터리 테스트 지그를 5번 항온 챔버 안에 설치하였다. 모든 실험은 상온인 25°C에서 수행되었으며, 실험이 진행되는 동안 일정하게 유지된다.



**Figure 19. Battery cell used in the experiment**

**(a) 18650 cylindrical battery (LGDBHE21865), (b) Thermocouple attachment point for temperature measurement**

Figure 19. (a)는 LG-화학에서 제조한 2.5Ah 용량의 18650 원통형 배터리 셀 (양극활물질 : NCM, 음극활물질 : Graphite 적용)을 사용하였다. 배터리의 외부 표면 온도를 측정하기 위하여 Figure 19. (b)와 같이 데이터 로거에 장착된 T형 열전대를 Kapton 테이프를 사용하여 배터리의 표면에 부착하였다. 배터리 셀의 상단, 중단 및 하단[62] 각각 3개의 지점에 부착하여 총 9개 지점에서 온도 측정이 진행되었다.

## 2. 실험 방법

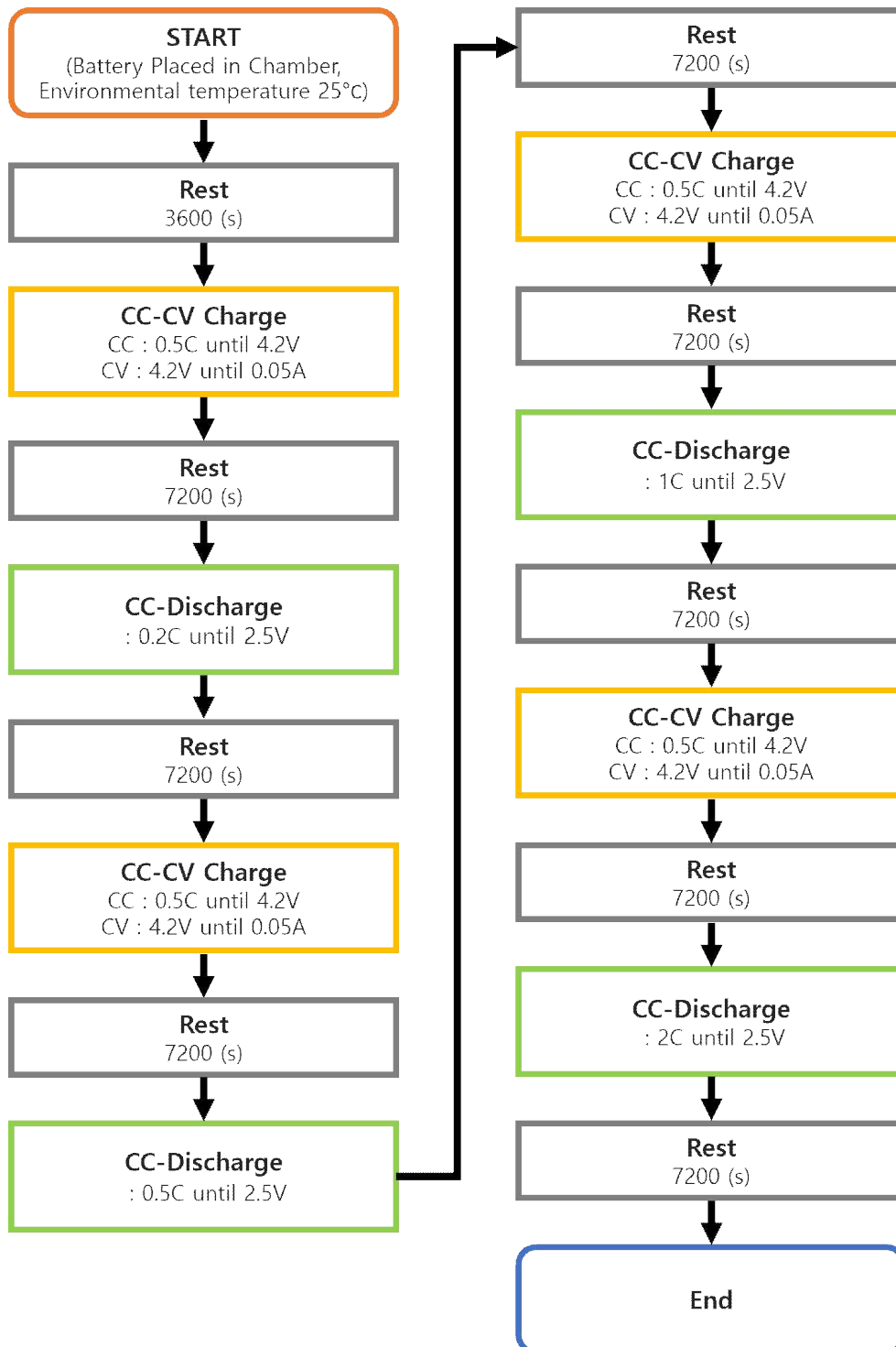


Figure 20. Battery cell Charge and Discharge Test Procedure  
(Discharge at 0.2, 0.5, 1, and 2C-rate)

Figure 20은 실험 과정에 대한 개략도이다. 먼저 배터리 셀의 충·방전 실험을 진행하기 위하여 25°C로 설정한 챔버 안에 배터리를 방치시켜둔 다음 설정 온도에 도달하면 실험을 진행하였다. 배터리 셀의 안정화를 위하여 휴지시간을 1시간으로 설정하였다. 충전방식은 정전류-정전압(Constant Current-Constant Voltage : CC-CV) 방식을 사용하였으며, 충전 초기에는 0.5C의 전류 속도로 충전 상한 전압인 4.2V에 도달할 때까지 정전류(Constant Current : CC) 충전방식으로 진행되고, 이후 정전압(Constant Voltage : CV) 충전방식으로 전류가 감소하여 0.05A에 도달하면 충전이 종료하게 된다. 충전이 완료되면 휴지시간 2시간을 거친 후에 0.2C로 CC 방전을 진행하여 방전 차단전압인 2.5V에 도달하면 방전이 종료하게 된다. 방전이 완료되면 충전 완료시와 마찬가지로 2시간의 휴지시간을 거친다. 이와 같은 방법으로 0.5C, 1C, 2C 순으로 실험을 수행하였다. 실험 진행시 완전 충·방전 과정 이후 휴지시간을 2시간으로 설정하여, 충·방전 과정에서 발생하는 열로 인하여 상승된 배터리 셀의 내부 및 외부의 온도를 충분히 안정시킬 수 있도록 하였다. 해당 실험은 배터리 셀당 3회를 반복하여 총 9회의 평균값으로 산정하였다.

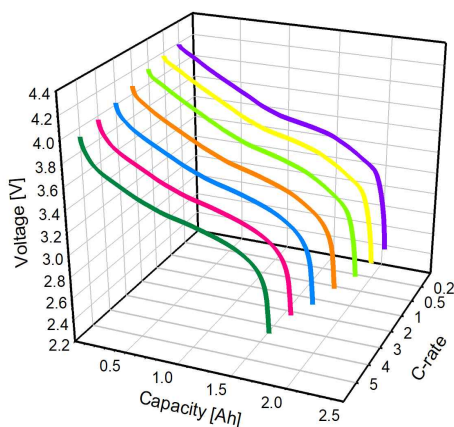
## 제 3 장 연구 결과 및 고찰

### 제 1 절 양극활물질 종류에 따른 배터리 셀 특성 해석

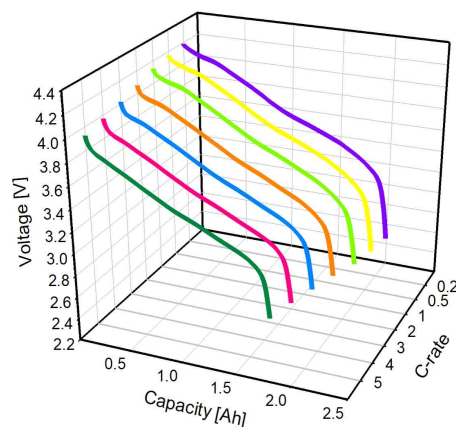
#### 1. C-rate 조건에 따른 배터리 방전 성능

##### 가. 용량 손실

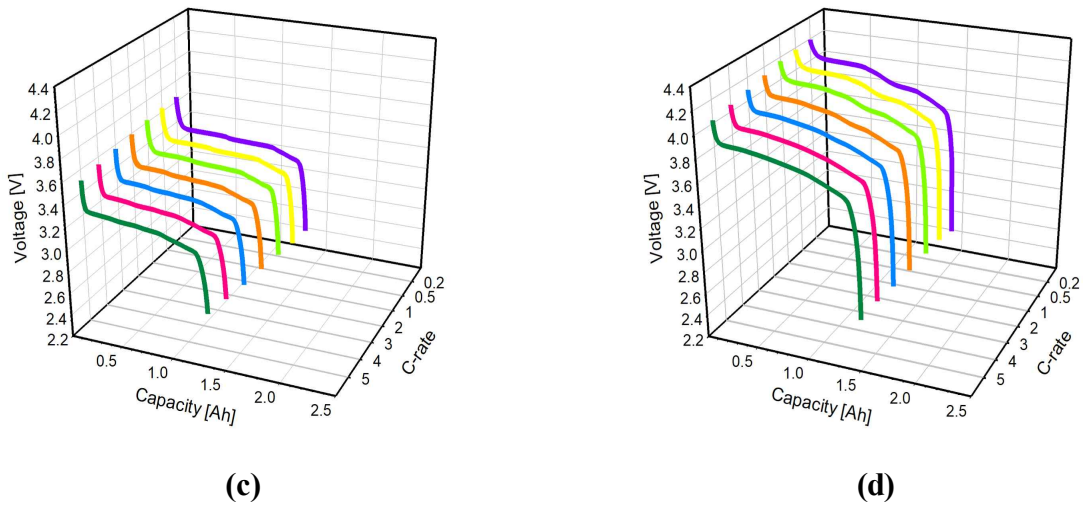
Figure 21은 상이한 양극활물질이 적용된 배터리 셀을 25°C 온도 조건에서 각각 다른 방전 속도(0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5C-rate)로 방전시 용량 손실에 대한 결과를 나타내는 그래프이다. 느린 방전 속도인 0.2 및 0.5C-rate에서는 기존 용량과 대비하여 LFP 및 LMO에서 2.1, 3.0% 및 0.8, 1.4%의 용량 감소가 관찰되었으며, NCM622 및 NCM811의 경우 4.1, 5.4% 및 2.7, 4.5%로 더 크게 감소하는 것으로 나타났다. 1C-rate에서는 LFP 및 LMO에서 4.7, 2.5%의 용량 감소가 관찰되었으며, NCM622 및 NCM811의 경우 7.6% 및 7.1%으로 느린 방전 속도보다 배터리의 용량 변화가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 빠른 방전 속도인 2~5C-rate의 경우에도 마찬가지로 LFP 및 LMO에서 7.7~15.8%



(a)



(b)



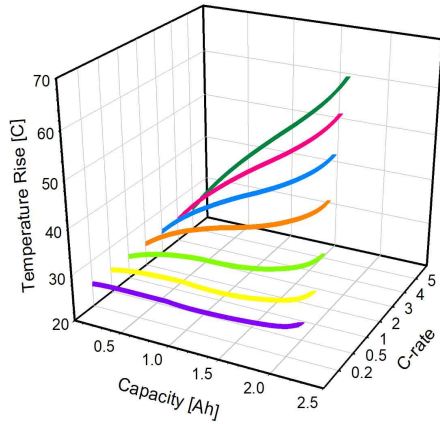
**Figure 21. Battery capacity loss for each cathode material when discharged at different C-rates (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, (d) LMO**

및 5.1~9.8%의 용량 감소가 관찰되었으며, NCM622 및 NCM811의 경우 11.6~22.4% 및 11.4~21.6%로 용량 감소 폭이 더 크게 나타났다. 이와 같이 방전 속도가 빠를수록 배터리의 용량 손실 또한 급격하게 증가함을 확인할 수 있었다. 시뮬레이션 결과, 방전 속도가 증가함에 따른 배터리의 용량 변화는 LFP 및 LMO보다 NCM계에서 더 크게 나타났다.

#### 나. 온도 변화

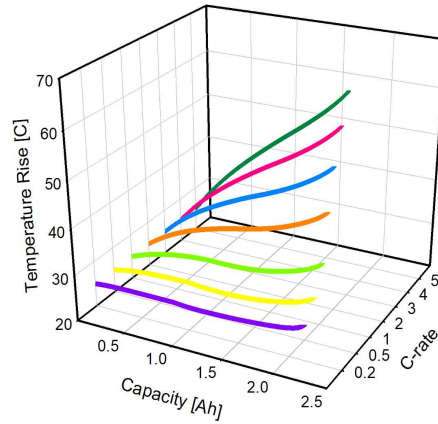
Figure 22는 상이한 양극활물질이 적용된 배터리 셀을 25°C 온도 조건에서 각각 다른 방전 속도(0.2, 0.5, 1, 2, 3, 4, 5C-rate)로 방전시 온도 변화에 대한 결과를 나타내는 그래프이다. 느린 방전 속도인 0.2 및 0.5C-rate에서는 초기 온도와 대비하여 LFP 및 LMO에서는 0.8, 1.5°C 및 1.0, 1.9°C, NCM622 및 NCM811의 경우 2.6, 5.7°C 및 1.8, 4.1°C로 온도 변화가 크게 나타나지 않았다. 1C-rate에서는 LFP 및 LMO에서 2.5, 3.6°C, NCM622 및 NCM811의 경우 10.3°C 및 8.0°C로 느린 방전 속도보다 온도가 더 크게 증가하는 것을 확인할 수 있다.

\* NCM622 : Thermal model - Off



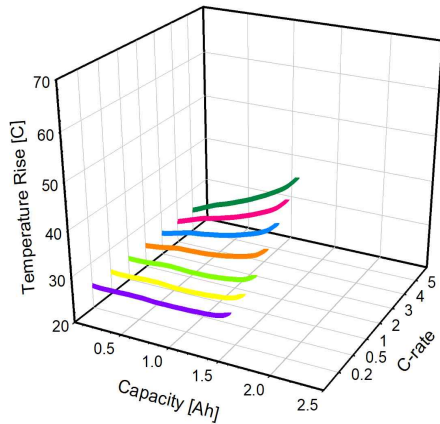
(a)

\* NCM811 : Thermal model - Off



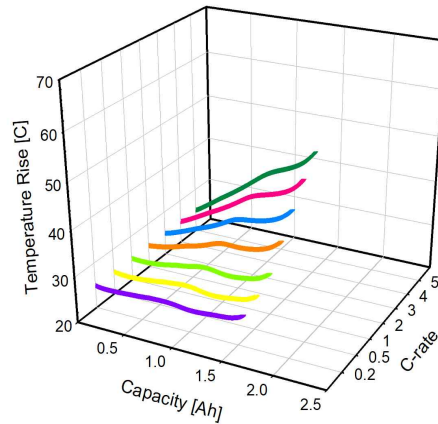
(b)

\* LFP : Thermal model - Off



(c)

\* LMO : Thermal model - Off

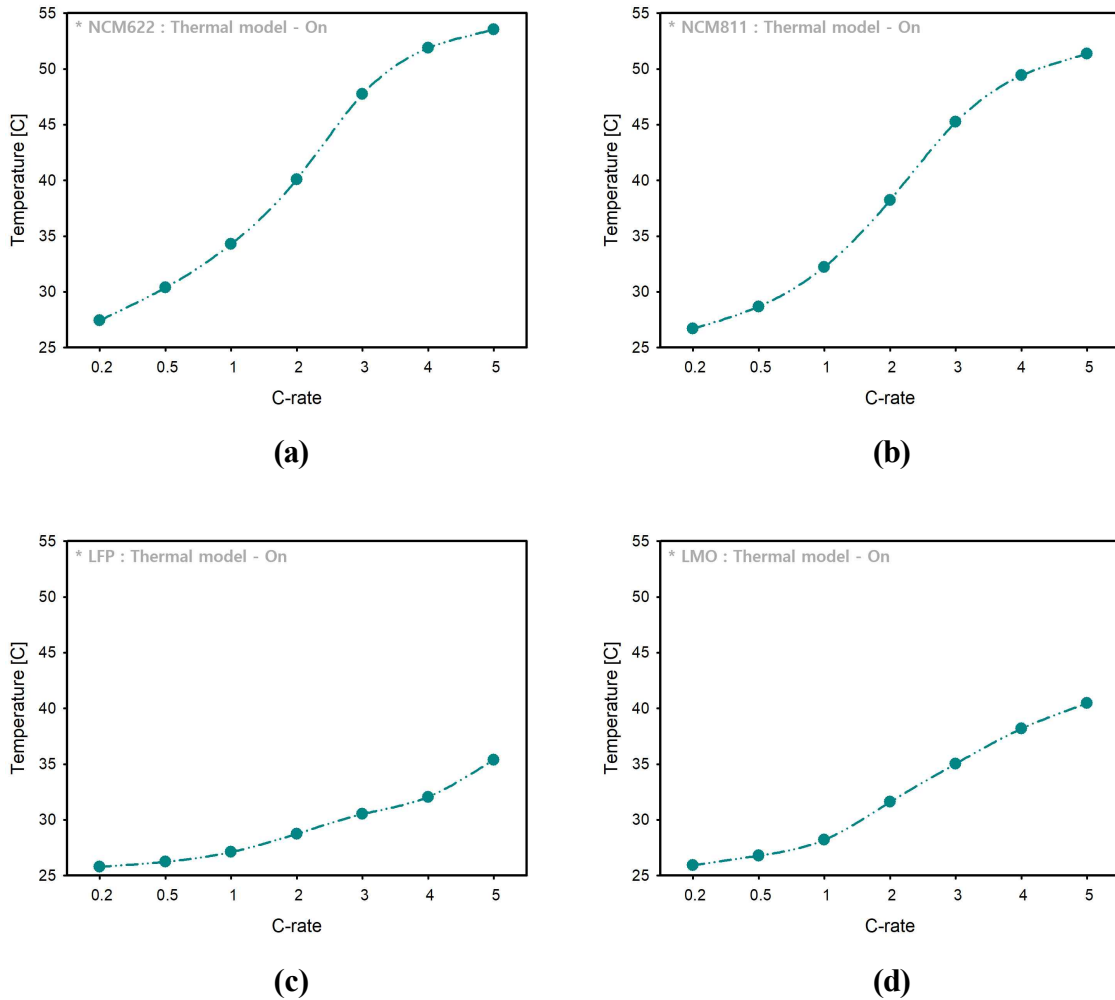


(d)

**Figure 22. Battery temperature change according to application of each positive electrode material when discharging at different C-rates: When no thermal model is applied to (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO**

빠른 방전 속도인 2~5C-rate에서도 마찬가지로 LFP 및 LMO 에서 5.0~12.6°C 및 7.5~19.4°C, NCM622 및 NCM811의 경우 18.5~36.8°C 및 15.6~33.3°C로 방전 속도가 증가함에 따라 온도 변화 또한 크게 나타났다. 방전 속도에 따른 배터리의 온도 변화는 배터리의 내부 열 발생으로 인한 것으로 추정된다.[41] Figure 23은 열 모델이 적용되었을 경우 배터리의 온도 변화를 나타낸 그래프이다. Figure 22와 23에 나타낸 것과 같이 모든 방전 속도에서 열 모델의 적용 유무에 따라 배터리의 온도가 최대 8.3°C가 차이남을 확인하였다. 시뮬레

이전 결과, 방전 속도가 증가함에 따른 온도 상승 폭이 NCM계 및 LMO보다 LFP가 적으므로 열적 특성에서 우수한 소재임을 알 수 있었다. EV의 배터리에서 요구되는 특성 중 하나인 안전성 측면에서 소재를 선정할 경우, 열적 특성이 우수한 소재인 LFP를 선정해야 배터리의 안전성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다.



**Figure 23. Battery temperature change according to application of each positive electrode material when discharging at different C-rates: When a thermal model is applied to (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO**



## 2. 온도조건에 따른 배터리 방전 성능

### 가. 용량 손실

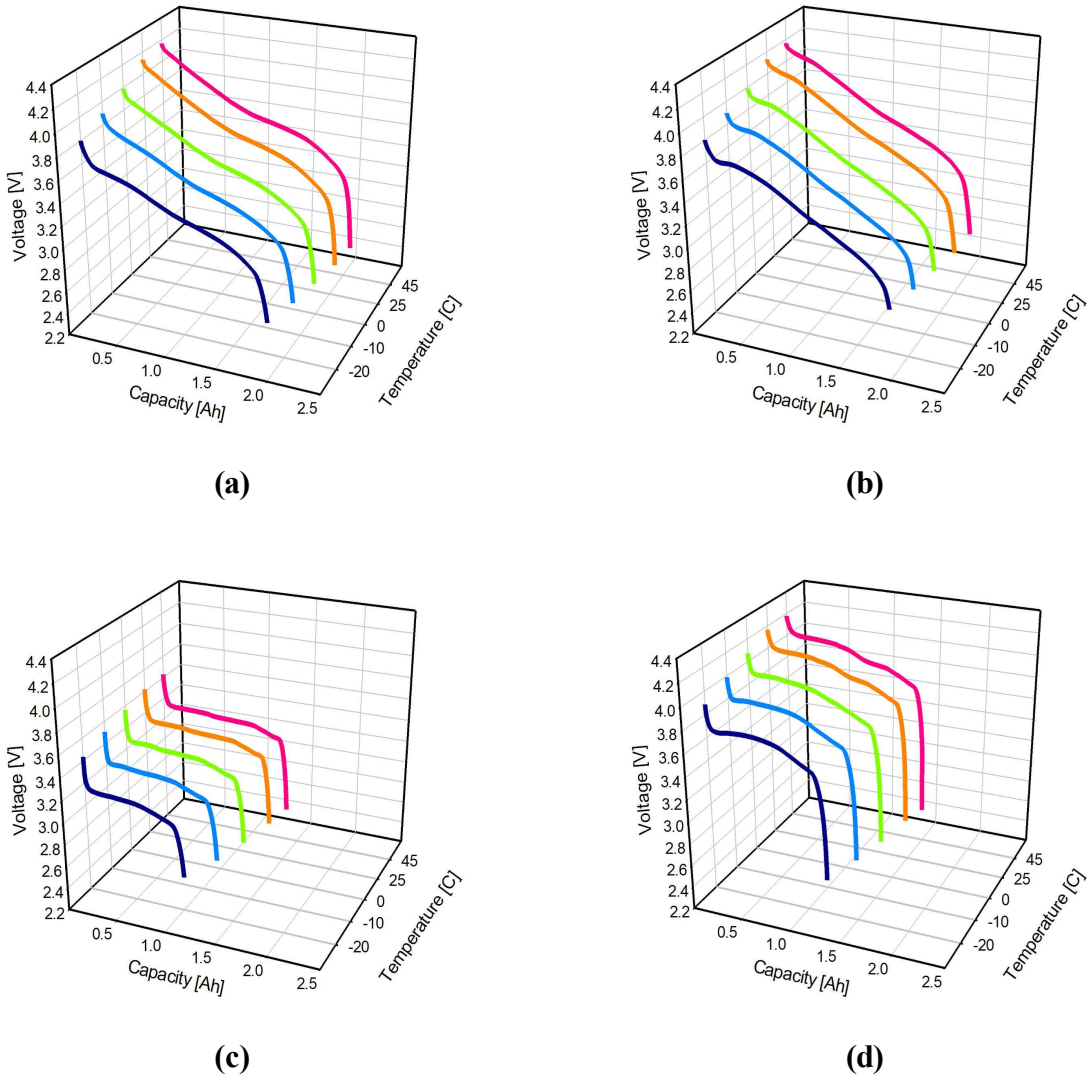


Figure 24. Battery capacity loss when discharged at 1C-rate at -20, -10, 0, 25, 45°C of (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO

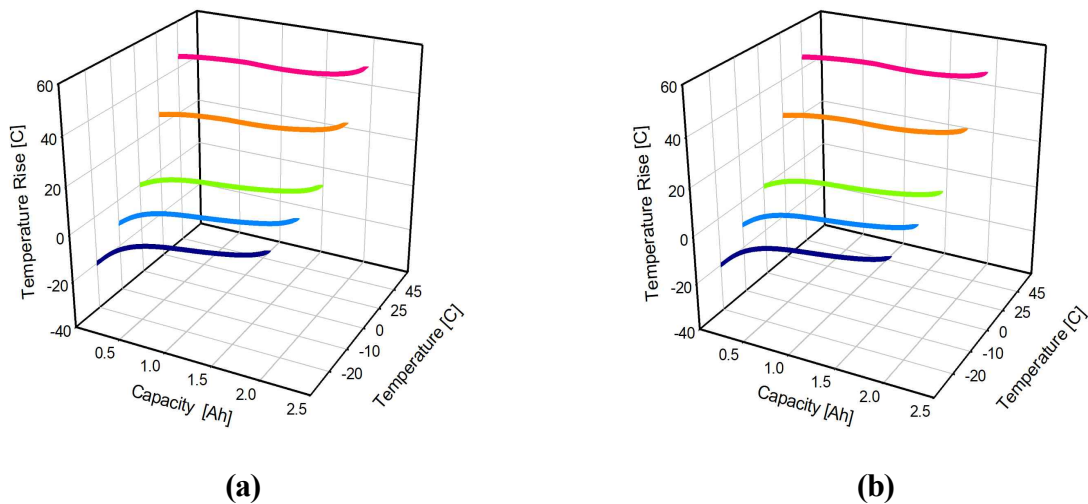
Figure 24는 상이한 양극활물질이 적용된 배터리 셀을 각각 5가지의 다른 온도조건(-20, -10, 0, 25, 45°C)에서 1C-rate으로 방전시 용량 손실에 대한 결과를 나타내는 그래프이다. 저온인 -20, -10, 0°C의 경우 기존 용량과 대비

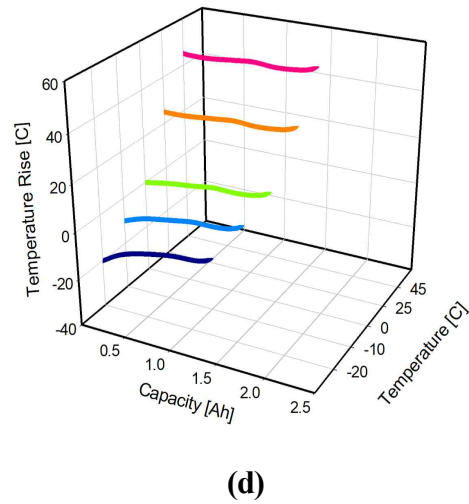
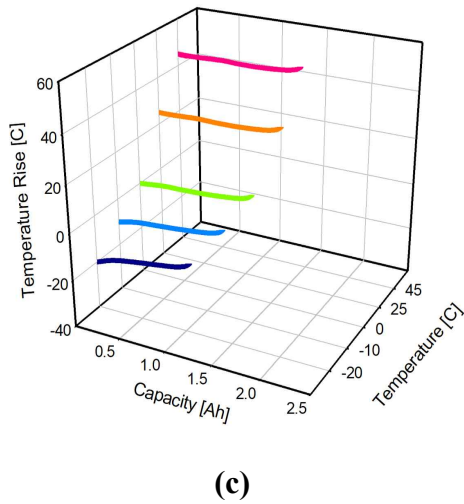


LFP 및 LMO에서 29.1, 18.8, 11.8% 및 21.2, 13.8, 8.5% 용량이 감소하였으며, NCM622 및 NCM811의 경우 17.1, 13.1, 10.4% 및 15.5, 12.2, 9.9%의 배터리 용량 감소가 나타나는 것을 확인하였다. 상온인 25°C 및 고온인 45°C의 경우 기존 용량과 대비 LFP 및 LMO에서 4.7, 2.9% 및 2.5, 1.2% 용량이 감소하였으며, NCM622 및 NCM811의 경우 7.6, 6.7% 및 7.1, 6.2%로 저온에서의 용량 감소보다 더 적은 것을 확인할 수 있다. 저온 환경에서는 배터리의 내부 화학반응 속도가 느려지면서 작동 전압 및 용량 감소가 발생하고 이는 배터리의 성능 저하로 이어진다.[63] 반면에 온도가 상승할수록 내부저항의 감소로 인해 화학반응이 활발해지면서 용량 감소가 적게 나타난다. 시뮬레이션 결과, LIB는 상온 및 고온 영역에서는 LFP 및 LMO 소재가 NCM계 소재보다 용량 감소가 적게 나타났으나 저온 영역에서 급격하게 용량이 감소하므로 NCM 소재가 모든 온도 영역에서 비교적 더 안정적인 것을 확인하였다.

### 나. 온도 변화

Figure 25는 상이한 양극활물질이 적용된 배터리 셀을 각각 5가지의 다른 온도조건(-20, -10, 0, 25, 45°C)에서 1C-rate으로 방전시 온도 변화에 대한 결과를 나타내는 그래프이다.





**Figure 25. Battery temperature change when discharged at 1C-rate at -20, -10, 0, 25, 45°C of (a) NCM622, (b) NCM811, (c) LFP, and (d) LMO**

저온인 -20, -10, 0°C의 경우 초기온도와 대비하여 LFP 및 LMO에서 8.1, 6.0, 4.4°C 및 11.9, 8.9, 6.6°C 온도가 증가하였으며, NCM622 및 NCM811의 경우 22.4, 18.7, 15.7°C 및 20.7, 16.6, 13.4°C의 온도 변화가 나타나는 것을 확인하였다. 상온인 25°C 및 고온인 45°C의 경우 초기온도와 대비하여 LFP 및 LMO에서 2.5, 2.2°C 및 3.6, 2.9°C 온도가 증가하였으며, NCM622 및 NCM811의 경우 10.3, 7.6°C 및 8.0, 5.3°C로 저온에서의 온도 변화보다 더 적게 나타난 것을 확인할 수 있다. NCM 소재의 경우 저온 영역에서 방전시 온도 상승 폭이 LFP 및 LMO 소재에 비해 크기 때문에 용량 감소가 적게 나타난 반면에 LFP 및 LMO 소재의 경우 저온 영역에서 방전시 온도 상승이 미미하여 용량 감소가 크게 나타나는 것으로 사료된다. 따라서, 저온에서 화학반응이 활발하게 일어나는 소재일수록 온도 상승 폭이 크고 전압강하가 낮아 배터리 용량 감소가 적게 나타나는 것으로 사료된다.

## 제 2 절 양극활물질 종류별 배터리 팩에 따른 EV 특성 해석

### 1. 주행 사이클 적용에 따른 배터리 모델의 특성 비교 분석

#### 가. SOC

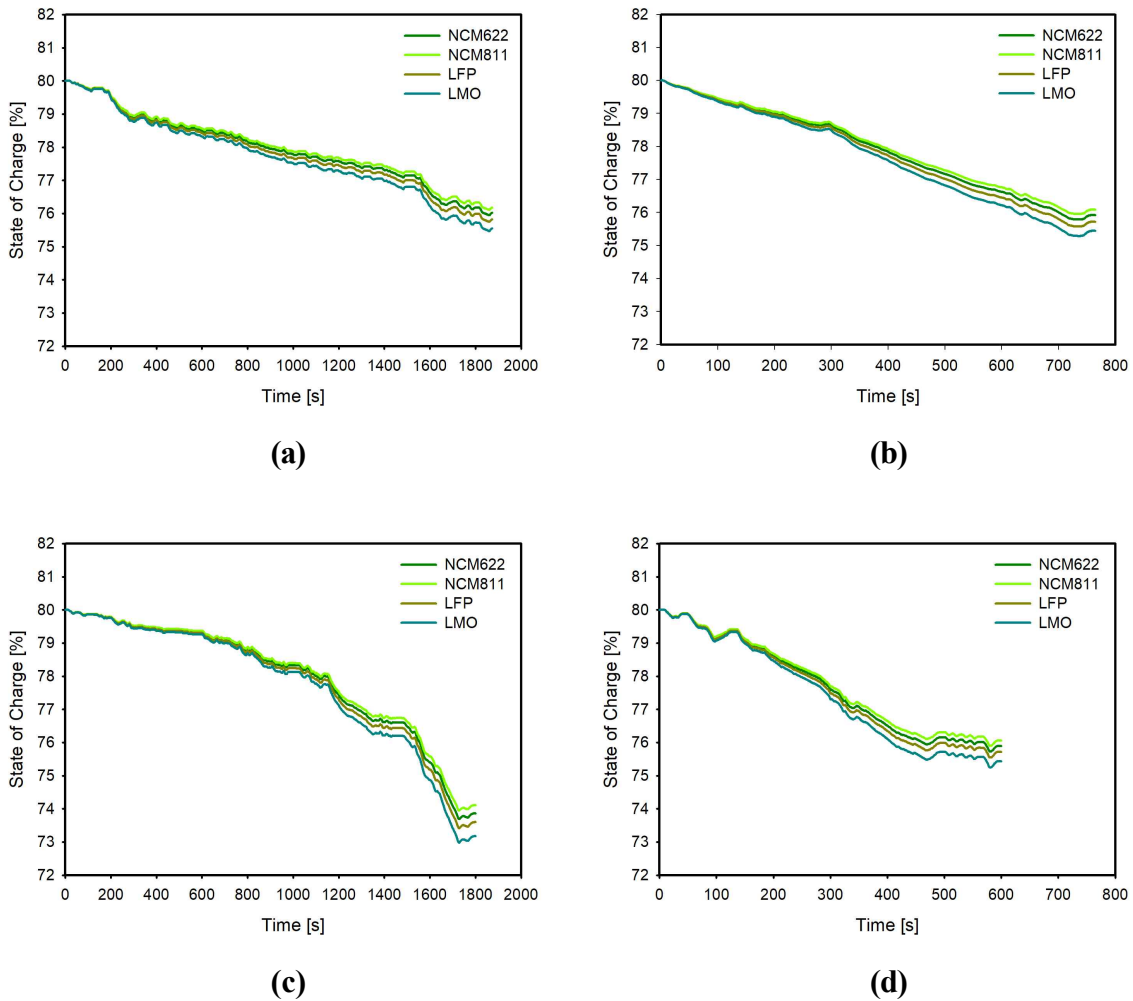


Figure 26. Comparison of changes in battery SOC according to various driving cycles (a) FTP-75, (b) HWFET, (c) WLTC, and (d) US06

Figure 26은 상이한 양극활물질이 적용된 배터리를 탑재하여 4가지의 다른

주행 사이클(FTP-75, HWFET, WLTC, US06) 적용에 따른 배터리 SOC 변화를 나타내는 그래프이다. 각 주행 사이클에서 4가지의 양극활물질을 적용한 결과, 도심주행 사이클인 FTP-75에서는 초기 SOC(80%)와 대비하여 NCM622 및 NCM811의 경우 4.0 및 2.5%가 SOC 감소가 관찰되었으며, LFP 및 LMO는 4.2 및 4.5% 감소하였다. 고속도로주행 사이클인 HWFET 및 최고속·급가감속 주행 사이클인 US06에서는 NCM622 및 NCM811의 경우 2가지 사이클 동일하게 4.1 및 3.9%의 SOC 감소가 관찰되었으며, LFP 및 LMO에서도 4.3 및 4.6%로 FTP-75 주행 사이클과 감소 폭이 비슷하게 나타났다. 저속부터 초고속까지 4가지의 속도로 구분되는 WLTC에서는 NCM622 및 NCM811의 경우 6.1 및 5.9%의 SOC 감소가 관찰되었으며, LFP 및 LMO는 6.4 및 6.8%로 나머지 3가지 주행 사이클에 비해 SOC의 감소 폭이 더 크게 나타났다. 이는 사이클 특성상 타 사이클보다 급격한 속도 변화, 높은 최대 속도, 주행거리 및 더 많은 속도 변화 구간이 SOC 감소에 영향을 주었을 것으로 사료된다.

#### 나. 배터리 무게

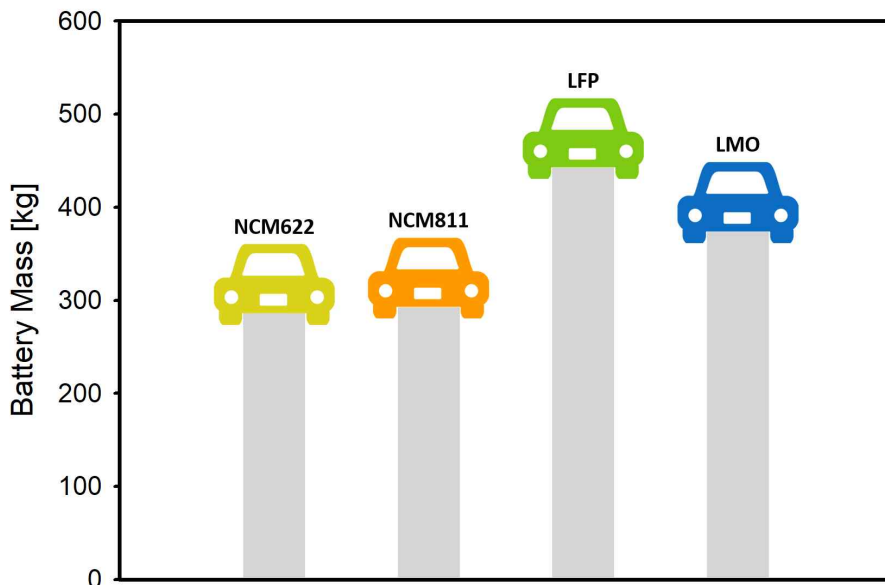
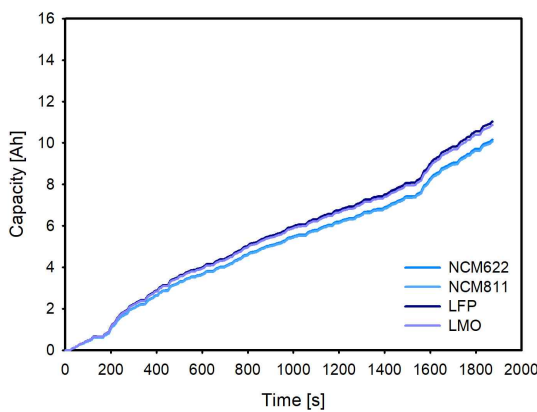


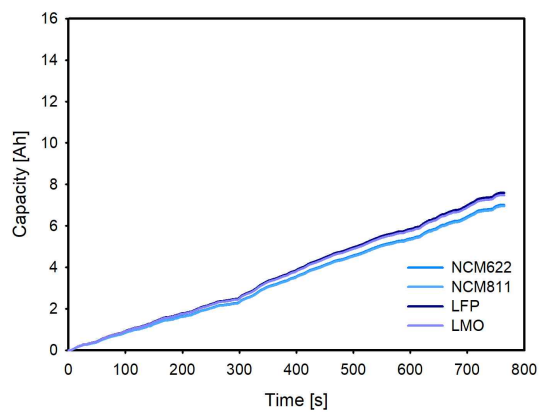
Figure 27. Comparison of weight according to the application of each different positive electrode materials of the battery pack mounted in EV

Figure 27은 상이한 양극활물질 적용에 따른 EV용 배터리 팩의 무게 비교를 나타내는 그래프이다. EV에서 연비를 향상시키기 위해서는 EV에서 핵심 부품인 배터리 팩의 고용량화 및 경량화는 필수이다. 이때, 단순히 배터리 용량만을 증가시키는 것이 아니라 배터리의 에너지 밀도를 증가시켜야 효과적으로 EV의 효율성을 향상시킬 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 배터리의 용량을 좌우하는 양극활물질을 각각 적용하여 배터리 팩의 무게 비교를 진행하였다. 상이한 양극활물질을 목표 EV의 배터리 용량인 55kWh로 동일하게 구축한 결과, NCM622 및 NCM811에서는 293.4 및 299.2kg, LFP 및 LMO의 경우 450.9 및 381.1kg이 도출되었다. 4가지의 양극활물질을 각각 적용한 배터리 팩을 비교한 결과, NCM622 및 NCM811는 LFP 및 LMO 소재에 비해 157.5, 87.8kg 및 151.7, 82.0kg이 더 가볍게 도출되었다. 동일한 배터리 팩 용량과 대비하여 LFP 및 LMO에 비해 상대적으로 높은 에너지 밀도를 가진 NCM계 양극활물질이 더 가벼운 중량으로 동일한 용량을 구축할 수 있다는 장점으로 인해 고용량 및 경량화 측면에서 소재를 선택할 경우, NCM계가 EV 적용에 더 적합할 것으로 사료된다.

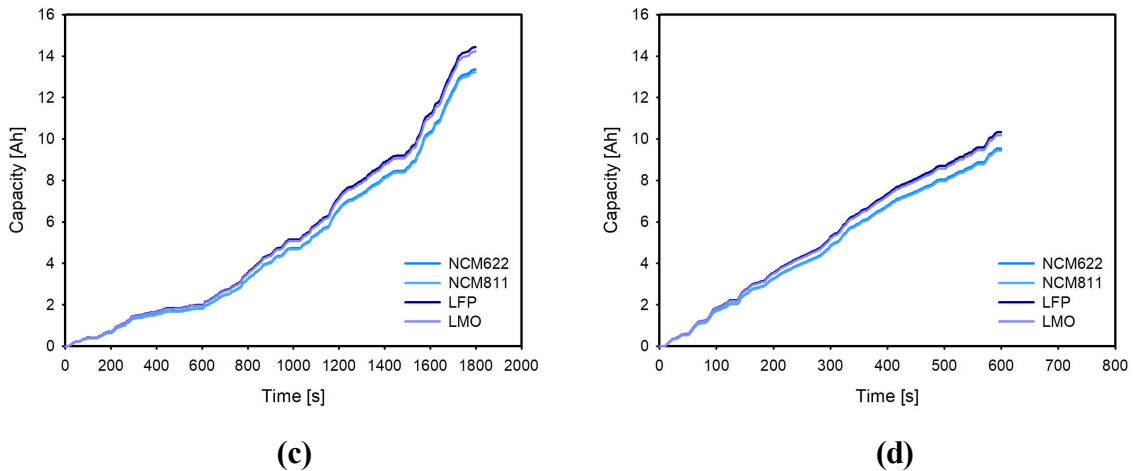
#### 다. 용량 손실



(a)



(b)

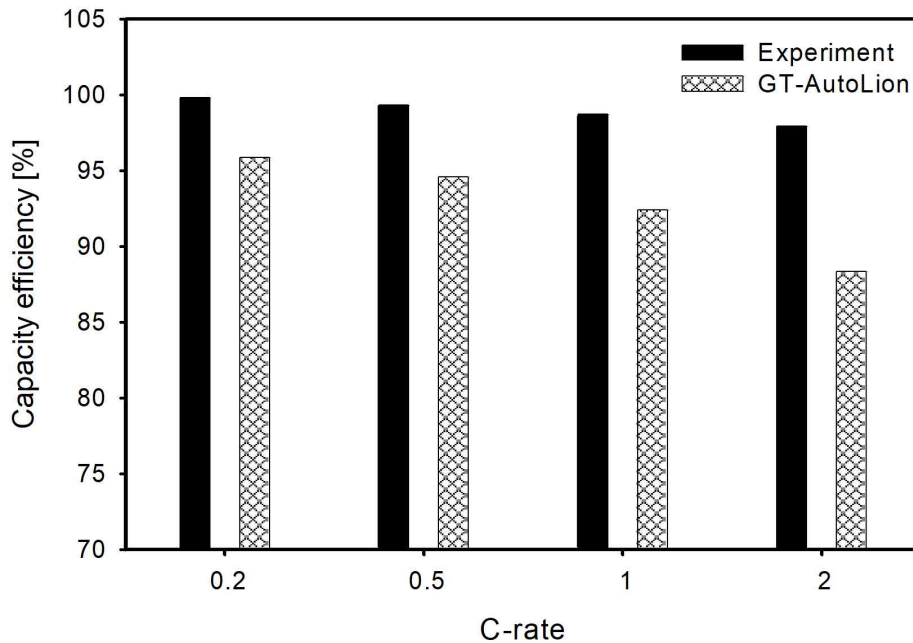


**Figure 28. Comparison of battery capacity loss according to various driving cycles (a) FTP-75, (b) HWFET, (c) WLTC, and (d) US06**

Figure 28은 4가지의 주행 사이클 적용에 따른 상이한 양극활물질이 적용된 EV용 배터리의 용량 변화를 나타내는 그래프이다. 각 주행 사이클에서 4가지의 양극활물질을 적용한 결과, FTP-75에서는 기존 용량과 대비하여 NCM622 및 NCM811의 경우 10.2, 10.1Ah 용량의 감소가 관찰되었으며, LFP 및 LMO는 11.0 및 10.9Ah가 감소하였다. HWFET 및 US06에서는 NCM622 및 NCM811의 경우 7.0, 6.9Ah 및 9.5, 9.4Ah 용량의 감소가 관찰되었으며, LFP 및 LMO는 7.6, 10.3Ah 및 7.5, 10.2Ah가 감소하였다. 4가지 주행 사이클 중 속도 변화가 가장 적은 HWFET이 용량 감소의 폭이 작게 나타났다. WLTC에서는 NCM622 및 NCM811의 경우 13.3 및 13.2Ah의 용량 변화가 관찰되었으며, LFP 및 LMO는 14.4 및 14.2Ah로 다른 3가지 주행 사이클에 비해 더 크게 용량이 감소하였다. 각 주행 사이클 테스트를 수행한 결과, NCM811 소재가 타 소재에 비해 용량이 가장 적게 감소하였으며, 반대로 LFP는 가장 많이 감소함을 확인할 수 있었다. 이러한 결과를 통해  $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Mn}]\text{O}_2$  삼성분계의 금속 조성비에 따른 소재별 특성이 잘 반영되어 있음을 알 수 있다.

### 제 3 절 배터리 셀 단위 실험 결과 비교 분석

#### 1. 용량 손실



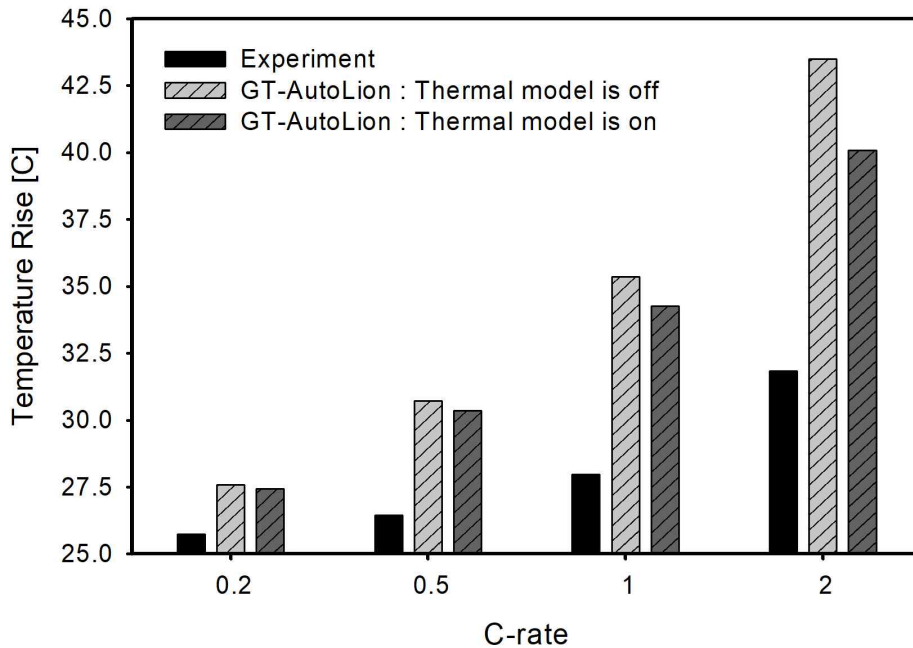
**Figure 29. Comparison of capacity loss for 18650 cylindrical battery with NCM material according to different C-rate**

Figure 29는 NCM 양극활물질이 적용된 배터리 셀을 25°C 온도 조건에서 상이한 방전 속도(0.2, 0.5, 1, 2C-rate)로 방전시 시뮬레이션 및 실험의 배터리 용량 손실 비교 결과를 나타내는 그래프이다. 시뮬레이션의 결과에 대한 타당성 검증을 위해 NCM 양극활물질이 적용된 18650 원통형 배터리를 사용하여 0.2, 0.5, 1 및 2C-rate의 속도에서 충·방전 시험을 수행하고, 방전 속도에 따른 배터리의 용량 변화 비교 분석을 진행하였다. 시뮬레이션과 실험 결과 비교 분석시 현재 EV용 배터리에 많이 탑재되는 양극활물질인 NCM622가 적용된 배터리 셀의 시뮬레이션의 결과 값을 사용하였다. 상이한 방전 속도에 따른 배터리의 용량 손실을 비교한 결과, 0.2C-rate 및 0.5C-rate에서 4.0 및 4.7% 용량의 감소가 관찰되었으며, 1C-rate 및 2C-rate에서는 6.3 및 9.6%로 용량 감소의 폭이 더 크게 나타났다. 실험 및 시뮬레이션 결과를 통해 방전 속



도가 증가함에 따라 배터리 용량 손실이 증가하는 경향이 동일하게 나타남을 확인하였다. 또한, 실험보다 GT-AutoLion을 통해 얻은 용량의 감소 결과 값이 더 크게 나타났으며, 방전 속도가 증가함에 따라 실험과 시뮬레이션의 오차 또한 증가하였으나, 실험과 시뮬레이션의 오차율은 10% 이내로 나타났다. 오차의 발생 원인은 1D 해석의 한계 및 실험에 적용된 양극재와 해석에 적용된 양극재 물성 데이터의 차이로 사료된다.

## 2. 온도 변화



**Figure 30. Comparison of temperature change for 18650 cylindrical battery with NCM material according to different C-rate**

Figure 30은 NCM 양극활물질이 적용된 배터리 셀을 25°C 온도 조건에서 상이한 방전 속도(0.2, 0.5, 1, 2C-rate)로 방전시 시뮬레이션 및 실험의 배터리 온도 변화 비교 결과를 나타내는 그래프이다. NCM 소재가 적용된 18650 원통형 배터리를 0.2, 0.5, 1 및 2C-rate의 속도로 충·방전 시험을 진행하고, 방전 속도에 따른 배터리의 온도 변화 비교 분석을 통해 시뮬레이션의 타당성을



검증하였다. 시뮬레이션에서 열 모델(자연대류 조건 적용,  $h=10\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ ) 적용 유무 및 실험 총 3가지 결과를 비교하였다. 먼저 시뮬레이션에서 열 모델을 적용할 경우와 실험 결과를 비교한 결과, 0.2C-rate 및 0.5C-rate에서는 초기온도( $25^\circ\text{C}$ )와 대비하여  $1.7$  및  $3.9^\circ\text{C}$  차이가 나타났으며, 1C-rate 및 2C-rate에서는  $6.3$  및  $8.2^\circ\text{C}$  차이가 나타났다. 시뮬레이션에서 열 모델을 적용하지 않았을 경우와 실험 결과를 비교한 결과, 0.2C-rate 및 0.5C-rate에서는 초기온도와 대비하여  $1.8$  및  $4.3^\circ\text{C}$  차이가 나타났으며, 1C-rate 및 2C-rate에서는  $7.4$  및  $11.6^\circ\text{C}$ 로 느린 방전 속도(0.2, 0.5C-rate)에서보다 온도 변화가 더 크게 나타났다.

실험 및 시뮬레이션 결과를 통해 방전 속도가 증가함에 따라 배터리의 온도가 증가하는 경향이 동일하게 나타남을 확인하였으며, 시뮬레이션의 결과 값이 실험보다 더 과도하게 해석됨을 알 수 있다. 일반적으로 LIB는 충·방전시 내부 열발생으로 인해 온도구배를 가지게 된다. Zhang 외의 연구 결과에 따르면 충·방전시 배터리의 내부 온도가 표면 온도보다 더 높게 나타나며, 방전 속도가 증가함에 따라 더 많은 열발생으로 인해 온도구배 또한 커지는 것을 알 수 있다.[64] 본 연구에서의 해석과 실험의 온도 차이의 발생 원인으로 해석시에는 배터리의 내부 온도까지 포함된 결과 값인 반면, 실험에서는 배터리의 표면 온도를 측정된 결과 값이므로 온도 차이가 크게 나타난 것으로 사료된다. 또한, 시뮬레이션에서 열 모델이 적용된 경우보다 열 모델이 적용되지 않은 경우가 온도 변화가 더 크게 나타남을 알 수 있고, 방전 속도가 증가함에 따라 배터리의 온도 변화가 더 크게 증가함을 확인하였다.

## 제 4 장 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 상이한 양극활물질(NCM622, NCM811, LFP, LMO) 적용에 따른 배터리 성능 비교 분석을 위해 전기화학 0D 기반의 GT-AutoLion을 사용하였다. 원통형 배터리 셀에서 배터리 팩으로 확장한 후, 1D 기반의 차량 종합 시뮬레이션인 GT-Suite과의 결합을 통해 EV 모델을 구축하여 연구를 수행하였다. 이러한 비교 분석 결과를 토대로 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

**Table 8. Comparison of battery characteristics according to different positive electrode active materials**

(a) Results of battery cell, (b) Results of battery pack mounting on EV

양극 활물질	C-rate		온도			
	용량 손실	온도 변화	용량 손실		온도 변화	
			저온	상온/고온	저온	상온/고온
NCM622	-	-	+	o	+	-
NCM811	-	-	+	o	+	-
LFP	++	++	-	+	-	+
LMO	+	+	-	+	-	+

(a)

양극 활물질	배터리 무게	FTP-75		HWFET		WLTC		US06	
		SOC	용량 손실	SOC	용량 손실	SOC	용량 손실	SOC	용량 손실
NCM622	+	+	+	+	+	+	+	+	+
NCM811	+	++	+	++	+	++	+	++	+
LFP	-	-	-	-	-	-	-	-	-
LMO	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(b)

(1) 상이한 C-rate의 방전 시험의 경우, 배터리의 방전 속도가 증가함에 따라 배터리 용량 손실이 커지는 것뿐만 아니라 온도 또한 증가함을 확인하였다. 또한, LFP 및 LMO보다 NCM계가 방전 속도에 영향을 더 크게 받는 것을 확인하였다. (Table 8. (a) 참조)

(2) EV에서 요구하는 특성 중 안전성 측면을 우선적으로 고려할 경우, 열적

특성이 우수한 양극활물질인 LFP를 적용시 NCM계보다 더 높은 안전성을 확보할 수 있을 것으로 사료된다. (Table 8. (a) 참조)

- (3) 상이한 온도조건에서 1C-rate으로 방전할 경우, 상온 및 고온에서는 LFP 및 LMO 소재가 NCM보다 더 적은 용량이 감소한 반면에 저온에서 LFP 및 LMO 소재가 급격하게 용량이 감소함을 보여주었다. 이는 LFP 및 LMO에 비해 NCM이 저온에서도 화학반응이 비교적 더 활발하게 일어나 온도에 영향을 덜 받는 것으로 사료된다. 따라서 모든 온도 영역에서 LFP 및 LMO보다 NCM이 비교적 더 안정적인 것을 확인하였다. (Table 8. (a) 참조)
- (4) WLTC 주행 사이클에서 나머지 3개의 사이클보다 배터리 SOC가 더 크게 감소하였으며, NCM계보다 LFP 및 LMO가 더 감소 폭이 크게 나타남을 확인하였다. 이는 WLTC 사이클 특성상 타 사이클보다 급격한 속도 변화, 높은 최대 속도, 주행거리 및 더 많은 속도 변화 구간이 SOC 감소에 영향을 주었을 것으로 사료된다. (Table 8. (b) 참조)
- (5) EV에 탑재되는 동일한 배터리 팩의 용량일 경우 LFP 및 LMO보다 고에너지 밀도를 가지고 있는 NCM계 소재가 가벼운 중량으로 배터리 팩 모듈을 구축할 수 있다. EV의 연비 향상 측면에서 양극활물질을 고려할 경우 NCM계가 EV 적용에 더 적합한 것으로 사료된다. (Table 8. (b) 참조)
- (6) NCM811 소재는 같은 NCM계의 NCM622를 포함한 LFP 및 LMO에 비해 용량 감소의 폭이 가장 적게 나타난 반면, LFP는 용량 감소가 가장 크게 나타남을 알 수 있었다. 이를 통해 삼성분계인  $\text{Li}[\text{Ni},\text{Co},\text{Mn}]\text{O}_2$ 의 Ni, Co 및 Mn의 금속 조성비에 따른 소재별 특성이 잘 반영되어 있음을 확인하였다. (Table 8. (b) 참조)
- (7) 실험과 시뮬레이션에서 공통적으로 배터리 방전 속도가 증가함에 따라 배터리의 용량 손실 및 온도가 증가하는 경향이 동일하게 나타남을 확인하였다.

EV에 탑재되는 배터리에서 요구하는 사항들을 만족하기 위해서는 기존의 양극활물질 적용만으로는 한계가 있다. 향후 NCM, LFP, LMO 등의 기존 양극활물질에 도핑, 코팅 및 입자크기 조절 등과 같은 방법 적용 및 다른 종류의 양극활물질을 혼합하는 방법[65,66] 등과 같은 성능을 향상시키는 연구가 활발하게 진행되어야 한다.

## Reference

- [1] BNEF, “Electric Vehicle Outlook 2019”, 2019.08.05, <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook>
- [2] Chen, D.; Jiang, J.; Kim, G. H.; Yang, C.; Pesaran, A. Comparison of different cooling methods for lithium ion battery cells. *Appl. Therm. Eng.* 2016, 94, 846-854.
- [3] Kong, J. Z.; Ren, C.; Tai, G. A.; Zhang, X.; Li, A. D.; Wu, D.; Li, H.; Zhou, F. Ultrathin ZnO coating for improved electrochemical performance of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material. *J.Power Sources* 2014, 266, 433-439.
- [4] Rajoba, S. J.; Jadhav, L. D.; Kalubarme, R. S.; Patil, P. S.; Varma, S.; Wani, B. N. Electrochemical performance of  $\text{LiFePO}_4/\text{GO}$  composite for Li-ion batteries. *Ceram. Int.* 2018, 44 (6), 6886-6893.
- [5] He, X.; Li, J.; Cai, Y.; Wang, Y.; Ying, J.; Jiang, C.; Wan, C. Preparation of co-doped spherical spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  cathode materials for Li-ion batteries. *J.Power Sources* 2005, 150, 216-222.
- [6] Andre, D.; Appel, C.; Soczka-Guth, T.; Sauer, D. U. Advanced mathematical methods of SOC and SOH estimation for lithium-ion batteries. *J.Power Sources* 2013, 224, 20-27.
- [7] Ryu, K. S.; Kim, B. K.; Kim, D. J.; Jang, M. S.; Ko, H. S.; Kim, H. C. A State-of-Charge estimation using extended Kalman filter for battery of electric vehicle, *J.Korea Academia-Industrial cooperation Society* 2017, 18, 10, 15-23.
- [8] 조강희, “철강업 불황에 늘렸던 니켈, 이차전지가 살렸다”, 2017.08.21, <http://www.koenergy.co.kr/news/articleView.html?idxno=91634>
- [9] Zhang, R. F.; Xia, B. Z.; Li, B. H.; Cao, L. B.; Lai, Y. Z.; Zheng, W. W.; Wang, H. W.; Wang, W. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. *Energies* 2018, 11, 1820.
- [10] 동아닷컴, “美 전기차 테슬라 안전성 논란” 사고 순간 배터리에 불이”, 2013.10.04, <http://www.donga.com/news/article/all/20131004/58000362/2>
- [11] Do, S. J.; Santhoshkumar, P.; Kang, S. H.; Prasanna, K.; Jo, Y. N.; Lee, C.

- W. Al-Doped  $\text{Li}[\text{Ni}_{0.78}\text{Co}_{0.1}\text{Mn}_{0.1}\text{Al}_{0.02}]\text{O}_2$  for High Performance of Lithium Ion Batteries. *Ceram. Int.* 2019, 45, 6, 6972-6977.
- [12] Wang, Q.; Feng, L.; Sun, J. A Multi-Component Additive to Improve the Thermal Stability of  $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{Mn}_{1/3})\text{O}_2$ -Based Lithium Ion Batteries. *Energies* 2016, 9, 424.
- [13] Kim, Y. Y.; Ha, J. K.; Cho, K. K. Effect of Single and Dual Doping of Rare Earth Metal Ce and Nd Elements on Electrochemical Properties of  $\text{LiNi}_{0.83}\text{Co}_{0.11}\text{Mn}_{0.06}\text{O}_2$  Cathode Lithium-Ion Battery Material. *J.Korean Powder Metallurgy Institute* 2019, 26, 1, 49-57.
- [14] Cho, W.; Kim, S. M.; Song, J. H.; Yim, T.; Woo, S.G.; Lee, K.W.; Kim, J. S.; Kim, Y. J. Improved electrochemical and thermal properties of nickel rich  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$  cathode materials by  $\text{SiO}_2$  coating. *J.Power Sources* 2015, 282, 45-50.
- [15] Kong, J. Z.; Ren, C.; Tai, G. A.; Zhang, X.; Li, A. D.; Wu, D.; Li, H.; Zhou, F. Ultrathin ZnO coating for improved electrochemical performance of  $\text{LiNi}_{0.5}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.3}\text{O}_2$  cathode material. *J.Power Sources* 2014, 266, 433-469.
- [16] Tao, T.; Chen, C.; Yao, Y.; Liang, B.; Lu, S.; Chen, Y. Enhanced electrochemical performance of  $\text{ZrO}_2$  modified  $\text{LiNi}_{0.6}\text{Co}_{0.2}\text{Mn}_{0.2}\text{O}_2$  cathode material for lithium ion batteries. *Ceram. Int.* 2017, 43, 17, 15173-15178.
- [17] Liu, H.; Cao, Q.; Fu, L. J.; Li, C.; Wu, Y. P.; Wu, H. Q. Doping effects of zinc on  $\text{LiFePO}_4$  cathode material for lithium ion batteries. *Electrochem. Commun.* 2006, 8, 10, 1553-1557.
- [18] Shin, H. C.; Park, S. B.; Jang, H.; Chung, K. Y.; Cho, W. I.; Kim, C. S.; Cho, B. W. Rate performance and structural change of Cr-doped  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  during cycling. *Electrochimica Acta* 2008, 53, 27, 7946-7951.
- [19] Ma, Z.; Shao, G.; Wang, G.; Zhang, Y.; Du, J. Effects of Nb-doped on the structure and electrochemical performance of  $\text{LiFePO}_4/\text{C}$  composites. *J.Solid State Chemistry* 2014, 210, 1, 232-237.
- [20] Dominko, R.; Bele, M.; Gaberscek, M.; Remskar, M.; Hanzel, D.; Goupil, J.; Pejovnik, S.; Jamnik, J. Porous olivine composites synthesized by sol-gel technique. *J.Power Sources* 2006, 153, 2, 274-280.

- [21] Zhao, B.; Jiang, Y.; Zhang, H.; Tao, H.; Zhong, M.; Jiao, Z. Morphology and electrical properties of carbon coated  $\text{LiFePO}_4$  cathode materials. *J.Power Sources* 2009, 189, 1, 462-466.
- [22] Shin, H. C.; Cho, W. I.; Jang, H. Electrochemical properties of the carbon-coated  $\text{LiFePO}_4$  as a cathode material for lithium-ion secondary batteries. *J.Power Sources* 2006, 159, 2, 1383-1388.
- [23] Liu, Z.; Wang, H.; Fang, L.; Lee, J. Y.; Gan, L. M. Improving the high-temperature performance of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  spinel by micro-emulsion coating of  $\text{LiCoO}_2$ . *J.Power Sources* 2002, 104, 1, 101-107.
- [24] Xiao, L.; Zhao, Y.; Yang, Y.; Cao, Y.; Ai, X.; Yang, H. Enhanced electrochemical stability of Al-doped  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  synthesized by a polymer-pyrolysis method. *Electrochimica Acta* 2008, 54, 2, 545-550.
- [25] Liu, Q.; Wang, S.; Tan, H.; Yang, Z.; Zeng, J. Preparation and Doping Mode of Doped  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  for Li-Ion Batteries. *Energies* 2013, 6, 1718-1730.
- [26] Singhal, R.; Das, S. R.; Tomar, M. S.; Ovideo, O.; Nieto, S.; Melgarejo, R. E.; Katiyar, R. S. Synthesis and characterization of Nd doped  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  cathode for Li-ion rechargeable batteries. *J.Power Sources* 2007, 164, 2, 857-861.
- [27] He, X.; Li, J.; Cai, Y.; Wang, Y.; Ying, J.; Jiang, C.; Wan, C. Preparation of co-doped spherical spinel  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  cathode materials for Li-ion batteries. *J.Power Sources* 2005, 150, 216-222.
- [28] Jeong, S. K.; Shin, J. S.; Nahm, K. S.; Kumar, T. P.; Stephan, A. M. Electrochemical studies on cathode blends of  $\text{LiMn}_2\text{O}_4$  and  $\text{Li}[\text{Li}_{1/15}\text{Ni}_{1/5}\text{Co}_{2/5}\text{Mn}_{1/3}\text{O}_2]$ . *Mater. Chem. Phys.* 2008, 111, 213-217.
- [29] Texas A&M University, "Transparent Lithium Ion Batteries", 2012.10.22., [http://engineering.tamu.edu/media/350336/fall\\_2012\\_team\\_8\\_executive\\_summary.pdf](http://engineering.tamu.edu/media/350336/fall_2012_team_8_executive_summary.pdf)
- [30] 삼성SDI, "리튬이온 배터리의 4대 요소", 2018.01.08, <https://www.samsungsdi.co.kr/column/all/detail/55269.html>
- [31] Tarascon, J. M.; Armand, M. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. *Nature* 2001, 414, 359-367.
- [32] Al-Hallaj, S.; Selman, J. R. Thermal modeling of secondary lithium batteries

- for electric vehicle/hybrid electric vehicle applications. *J.Power Sources* 2002, 110, 2, 341-348.
- [33] Kizilel, R.; Sabbah, R.; Selman, J. R.; Al-Hallaj, S. An alternative cooling system to enhance the safety of Li-ion battery packs. *J.Power Sources* 2009, 194, 2, 1105-1112.
- [34] Mohammadian S. K.; HE, Y. L.; Zhang, Y. Internal cooling of a lithium-ion battery using electrolyte as coolant through microchannels embedded inside the electrodes. *J.Power Sources* 2015, 293, 458-466.
- [35] Ling, Z.; Wen, X.; Zhang, Z.; Fang, X.; Gao, X. Thermal management performance of phase change materials with different thermal conductivities for Li-ion battery packs operated at low temperatures. *Energy* 2018, 144, 977-983.
- [36] Ji, Y.; Zhang, Y.; Wang, C. Y. Li-Ion Cell Operation at Low Temperatures. *J. Electrochem. Soc.* 2013, 160, 4, A636-A649.
- [37] Pesaran, A.; Santhanagopalan, S.; Kim, G. H. Addressing the Impact of Temperature Extremes on Large Format Li-Ion Batteries for Vehicle Applications (Presentation), NREL (National Renewable Energy Laboratory), 2013.
- [38] Yang, Z.; Huang, Q.; Li, S.; Mao, J. High-temperature effect on electrochemical performance of  $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$  based anode material for Li-ion batteries. *J. Alloy. Compd.* 2018, 753, 192-202.
- [39] Ren, D.; Smith, K.; Guo, D.; Han, X.; Feng, X.; Lu, L.; Ouyang, M.; Li, J. Investigation of Lithium Plating-Stripping Process in Li-Ion Batteries at Low Temperature Using an Electrochemical Model. *J. Electrochem. Soc.* 2018, 165, 10, A2167-A2178.
- [40] Zhang, S. S.; Xu, K.; Jow, T. R. Low temperature performance of graphite electrode in Li-ion cells. *Electrochimica Acta* 2002, 48, 241-246.
- [41] Yuan, Q.; Zhao, F.; Wang, W.; Zhao, Y.; Liang, Z.; Yan, D. Overcharge failure investigation of lithium-ion batteries. *Electrochimica Acta* 2015, 178, 682-688.
- [42] Wang, Q.; Ping, P.; Zhao, X.; Chu, G.; Sun, J.; Chen, C. Thermal runaway



- caused fire and explosion of lithium ion battery. *J.Power Sources* 2012, 208, 210-224.
- [43] Fan, L.; Khodadadi, J. M.; Pesaran, A. A. A parametric study on thermal management of an air-cooled lithium-ion battery module for plug-in hybrid electric vehicles. *J.Power Sources* 2013, 238, 301-312.
- [44] Wang, T.; Tseng, K. J.; Zhao, J.; Wei, Z. Thermal investigation of lithium-ion battery module with different cell arrangement structures and forced air-cooling strategies. *Appl. Energy* 2014, 134, 229-238.
- [45] Karimi, G.; Li, X. Thermal management of lithium-ion batteries for electric vehicles. *J. Energy Res.* 2013, 37, 13-24.
- [46] Julien, C. M.; Mauger, A.; Zaghbi, K.; Griult, H. Comparative Issues of Cathode Materials for Li-Ion Batteries. *Inorganics* 2014, 2, 132-154.
- [47] 조용남, 이규태, “리튬 이차 전지용 산화물 양극 소재 연구 개발”, *NEWS & INFORMATION FOR CHEMICAL ENGINEERS* 2012, 30, 4, 425-429.
- [48] Kondo, H.; Takeuchi, Y.; Sasaki, T.; Kawauchi, S.; Itou, Y.; Hiruta, O.; Okuda, C.; Yonemura, M.; Kamiyama, T.; Ukyo, K. Effects of Mg-substitution in Li(Ni,Co,Al)O<sub>2</sub> positive electrode materials on the crystal structure and battery performance. *J.Power Sources* 2007, 174, 2, 1131-1136.
- [49] Jin, E. M.; Lee, G. E.; Na, B. K.; Jeong, S. M. Electrochemical Properties of Commercial NCA Cathode Materials for High Capacity of Lithium Ion Battery. *Korean Chem. Eng. Res.* 2017, 55, 2, 163-169.
- [50] Wan, D. Y.; Fan, Z. Y.; Dong, Y. X.; Baasanjav, E.; Jun, H. B.; Jin, B.; Jin, E. M.; Jeong, S. M. Effect of Metal (Mn, Ti) Doping on NCA Cathode Materials for Lithium Ion Batteries. *J. Nanomater.* 2018, 2018, 9.
- [51] Chen, T.; Li, X.; Wang, H.; Yan, X.; Wang, L.; Deng, B.; Ge, W.; Qu, M. The effect of gradient boracic polyanion-doping on structure, morphology, and cycling performance of Ni-rich LiNi<sub>0.8</sub>Co<sub>0.15</sub>Al<sub>0.05</sub>O<sub>2</sub> cathode material. *J.Power Sources* 2018, 374, 1-11.
- [52] Zhang, Z.; Zhou, P.; Meng, H.; Chen, C.; Cheng, F.; Tao, Z.; Chen, J. Amorphous Zr(OH)<sub>4</sub> coated LiNi<sub>0.915</sub>Co<sub>0.075</sub>Al<sub>0.01</sub>O<sub>2</sub> cathode material with enhanced electrochemical performance for lithium ion batteries. *J. Energy*



- Chem. 2017, 26, 481-487.
- [53] Bridie Schmidt, “Some traditional auto companies won’t survive EV transition, S&P says”, 2019.02.22., <https://thedriven.io/2019/02/22/transition-to-electric-cars-will-pressure-auto-parts-suppliers-report-says/>
- [54] Dolye, M.; Fuller, T. F.; Newman, J. Modeling of Galvanostatic Charge and Discharge of the Lithium/Polymer/Insertion Cell. *J. Electrochem. Soc.* 1993, 140, 6, 1526-1533.
- [55] Gu, W. B.; Wang, C. Y. Thermal and Electrochemical Coupled Modeling of a Lithium Ion Cell. *J. Electrochem. Soc.* 2000, 147, 8, 2910-2922.
- [56] Srinivasan, V.; Wang, C. Y. Analysis of Electrochemical and Thermal Behavior of Li-Ion Cells. *J. Electrochem. Soc.* 2003, 150, 1, A98-A106.
- [57] Smith, K.; Wang, C. Y. Power and thermal characterization of a lithium-ion battery pack for hybrid-electric vehicles. *J. Power Sources* 2006, 160, 1, 662-673.
- [58] GT-AutoLion User Manual, Version, v2019.
- [59] Butler, K. L.; Ehsani, M.; Kamath, P. A Matlab-Based Modeling and Simulation Package for Electric and Hybrid Electric Vehicle Design. *IEEE Trans. Veh. Technol.* 1999, 48, 6, 1770-1778.
- [60] Wimmer, J.; Papadimitriou, I.; Luo, G. CAE Method for linking electrochemical Lithium-ion models into integrated system-level models of electrified vehicles. *SAE Technical Paper* 2018, 2018-01-1414, 8.
- [61] Sripad, S.; Viswanathan, V. Evaluation of Current, Future, and Beyond Li-Ion Batteries for the Electrification of Light Commercial Vehicles: Challenges and Opportunities. *J. Electrochem. Soc.* 2017, 164, 11, E3635-E3646.
- [62] Saw, L. H.; Ye, Y.; Tay, A. A. O. Electrochemical-thermal analysis of 18650 Lithium Iron Phosphate cell. 2013, *Energy Conver. Manage.* 2013, 75, 162-174.
- [63] Jaguemont, J.; Boulon, L.; Dube, Y. A comprehensive review of lithium-ion batteries used in hybrid and electric vehicles at cold temperatures. *Appl. Energy* 2016, 164, 99-114.

- [64] Zhang, G.; Cao, L.; Ge, S.; Wang, C. Y.; Shaffer, C. E.; Rahn, C. D. In Situ Measurement of Radial Temperature Distributions in Cylindrical Li-Ion Cells. *J. Electrochem. Soc.* 2014, 161, 10, A1499-A1507.
- [65] Li, X.; Choe, S. Y.; Joe, W. T. A reduced order electrochemical and thermal model for a pouch type lithium ion polymer battery with  $\text{LiNi}_x\text{Mn}_y\text{Co}_{1-x-y}\text{O}_2/\text{LiFePO}_4$  blended cathode. *J. Power Sources* 2015, 294, 545-555.
- [66] Golubkov, A. W.; Fuchs, D.; Wagner, J.; Wiltsche, H.; Stangl, C.; Fauler, G.; Voitic, G.; Thaler, A.; Hacker, V. Thermal-runaway experiments on consumer Li-ion batteries with metal-oxide and olivin-type cathodes. *RSC Adv.* 2014, 4, 3633-3642.