



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](#)

2021년 8월

교육학석사(전기교육)학위논문

리튬이온전지 Cell Balancing에 관한 연구

조선대학교 교육대학원

전기교육전공

김 민 창

리튬이온전지 Cell Balancing에 관한 연구

A study on the Cell Balancing
for Lithium-ion Battery

2021년 8월

조선대학교 교육대학원

전기교육전공

김 민 창

리튬이온전지 Cell Balancing에 관한 연구

지도교수 최 연 옥

이 논문을 교육학석사(전기교육)학위 청구논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 교육대학원

전기교육전공

김 민 창

김민창의 교육학 석사학위 논문을 인준함

심사위원장 조선대학교 교수 **조금배** 인

심사위원 조선대학교 교수 **김남훈** 인

심사위원 조선대학교 교수 **최연옥** 인

2021년 6월

조선대학교 교육대학원

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
II. 이론적 고찰	3
A. 리튬전지	3
B. BMS의 기능	9
C. Cell Balancing	11
III. Cell Balancing 회로 설계	16
A. Cell Balancing의 동작	16
B. Cell Balancing 회로 구성	18
IV. 실험 및 결과고찰	21
A. 실험	21
B. 결과 및 고찰	27
V. 결 론	32

참고문헌

표 목 차

표 1. 리튬이온 전지와 리튬폴리머 전지의 특성 비교	6
표 2. 분자의 구조에 따른 리튬전지의 특성	7
표 3. S8211E 데이터 시트	19
표 4. 18650 리튬이온 전지의 데이터 시트	23
표 5. 시간에 따른 Cell Balancing의 측정 결과	30

그림 목 차

그림 1. 지각 원소 구성비율	3
그림 2. 리튬이온 전지의 충방전 메커니즘	4
그림 3. 리튬이온 전지의 충방전 특성	5
그림 4. 리튬인산철 전지의 충방전 과정	8
그림 5. BMS의 기능	9
그림 6. Fixed Shunting Resistor	12
그림 7. Switching Shunting Resistor	13
그림 8. Switched Capacitor	14
그림 9. Single Switched Capacitor	15
그림 10. Timing Chart	16
그림 11. S8211E 블록다이어그램	18
그림 12. Cell Balancing 회로도	19
그림 13. 시스템 구성의 블록다이어그램	21
그림 14. 14.4V 전지 팩 구성	22
그림 15. 충전 모듈의 회로도	23
그림 16. 충전 모듈의 구성도	24
그림 17. 제안하는 Cell Balancing 보드	25
그림 18. Cell Balancing의 시스템 구성	25
그림 19. 실험 장치	26
그림 20. 개별 전지의 완충상태 전압	27
그림 21. 시간 경과에 따른 개별 전지의 전압	28
그림 22. 시간에 따른 Cell Balancing 그래프	31

ABSTRACT

A study on the Cell Balancing for Lithium-ion Battery

Kim Min Chang

Advisor : Prof. Youn-Ok Choi, Ph.D.

Major in Electricity Education

Graduate School of Education Chosun University

This study was conducted to improve the cell balancing performance of a battery management system (BMS) for stable use of lithium-ion batteries. The cell balancing of the BMS takes too much time because the balancing current cannot be increased during the repeated charging/discharging and stabilization operations of lithium-ion batteries. When the BMS bears the current above the specification, the long-term failure and burnout of components can occur due to persistent heat-generation with concerns about a risk of fire if it fails to respond immediately.

The proposed BMS in this thesis aimed to secure stability and increase the speed of balancing by minimizing the heat problem occurring in the cell balancing through passive balancing, which reduces the delay time to reach the nominal voltage from the abnormal voltage in the event of overcharging or overdischarge. Furthermore, the overall resistance was lowered and the heat applied to the load was also reduced to minimize the heat problem by connecting additional resistors in parallel through comparing and analyzing the cell balancing performance of the BMS based on the experimental results, and the excess voltage was divided into several resistors for higher durability.

This thesis can be presented as important data on the design and fabrication criteria of the circuits applying the passive balancing with respect to the heat problem during cell balancing in the BMS.

I. 서론

지난 150년간 인류는 화석연료를 이용함으로써 눈부신 발전을 이루었다. 하지만, 화석연료는 연소시 생성되는 CO₂에 의해 대기오염과 지구온난화 등 각종 환경문제를 야기하였다. 또한, 언젠가는 고갈될 제한된 자원이라는 점에서 인류는 새로운 에너지원에 대한 지속적인 개발과 연구를 수행하고 있으며, 현재 친환경적이며 무한한 자연의 에너지원인 신재생에너지로 기존의 에너지원을 대체하는 연구가 전 세계의 이목을 끌고 있다.

신재생에너지의 사용으로 온실가스와 대기오염 등의 환경적인 문제는 일부 해소하였지만, 신재생에너지의 특성상 출력이 일정하지 않고 외부 요인으로 인한 출력의 변화폭이 넓어 계통연계시 불안정한 현상이 나타나고 있다. 이를 해소하기 위해 마이크로그리드 및 스마트그리드에 적용된 에너지 저장 시스템(ESS : Energy Storage System)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. ESS는 태양광, 연료전지, 풍력 등의 신재생에너지를 통해 생산된 전력을 전력 계통에 저장하고, 에너지 효율을 극대화하여 가장 필요한 시기에 전력을 공급하는 장점을 가지고 있다. 하지만, 짧은 수명과 고가의 장비들로 구성된 ESS를 사용함에 있어서 에너지의 출력 효율을 높이기 위한 필요성이 요구된다[1].

ESS의 구성 중 전지는 어플리케이션의 가장 큰 역할을 담당하고 있는 저장 매체이다. 전지는 직·병렬 연결을 하여 전지 팩으로 제작되며 용도에 맞는 용량으로 사용한다. 중대형 시스템에 사용되는 전지는 팩 단위로 생산되며, 수십 개에서 수천 개까지 직·병렬 연결하여 제작한다. 생산 비용이 절감되고 있지만, 그럼에도 불구하고 전지 팩의 제작 비용은 매우 고가이기 때문에 전지를 사용하는 것에 있어 최대한의 효율을 이끌어내는 기술이 계속해서 연구되고 있다.

사용되는 전지 팩을 효율적으로 운용하고 관리하는 장치를 BMS(Battery Management System)라고 한다. 이러한 BMS의 역할은 전지 팩, 셀의 과충전 보호, 과전류 보호, 과방전 보호, 온도에 의한 보호에 전지의 충전용량 계산, Cell Balancing, 외부와 통신을 연결하여 이 모든 사항을 감시할 수 있는

모니터링 기능을 추가하여 구성할 수 있다. 또한 충전과 방전 사이클을 계산하여 전지의 남은 수명 예측도 가능하다. 특히, Cell Balancing은 BMS에서 가장 중요한 기능으로 셀 각각의 충전전압을 비교하며 설정한 충전전압이 아닌 셀들을 강제로 충전하여 셀 간의 충전전압을 일정하여 유지시켜 전지의 효율과 수명을 극대화할 수 있게 설계한 기술이다[2].

그러나 기존의 BMS는 리튬이온 전지의 충전과 안정화 작업 반복 과정에서 Balancing 전류를 크게 할 수 없어 Balancing의 시간이 길고, BMS의 내장된 스펙 이상의 전류량을 감당하게 될 경우, 지속된 발열로 장기적으로 부품의 고장 및 소손이 발생하며, 빠르게 대처하지 못할 시 화재의 발생이 우려된다.

따라서 본 논문에서는 개선된 전지 모듈 간 Passive Balancing을 통해 기존의 Balancing 도중 발생하는 고질적인 문제인 발열 문제를 개선하여 안정성 확보와 Balancing의 속도를 높임으로 과충전, 과방전 발생시 이상전압 상태에서 공칭전압으로 도달하기 위한 시간 지연을 단축시켜 전지의 손상을 최소화하는 회로를 제안하며 실험을 통하여 제안한 회로의 타당성을 입증하고자 한다.

II. 이론적 고찰

A. 리튬전지

리튬전지는 기존의 납축전지, 니켈수소전지 등의 이차전지와 비교하였을 때 보다 뛰어난 에너지 저장 용량과 높은 수명을 나타낸다. 그림 1은 지각 원소 구성비율을 나타낸 것으로 리튬은 지각 원소의 구성 중 0.01%인 희귀 금속이나 에너지밀도가 가장 높으며 니켈-메탈수소 전지 3개의 출력을 리튬 이온 전지 1개의 출력으로 대체할 수 있을 정도로 작은 부피로 높은 효율을 낼 수 있다. 휴대기기 등의 전원으로 가벼움을 중시하고 있는 지금의 시장에서 리튬전지가 주목받는 이유 중 하나이다. 또한, 풍력, 태양광 등의 친환경 에너지원을 유효 에너지원으로 저장하기 위한 신재생 에너지 시스템의 에너지 저장시스템(ESS)에도 리튬이온 전지가 적용되고 있다. 기존의 화석연료를 사용하였던 내연기관 자동차를 전기자동차로 대체하는 기술이 발달하면서 작은 부피의 높은 에너지를 전지의 요구 수준에 적합하여 리튬이온 전지의 사용은 현재 시장에서 더욱 가속화되고 있다[3]. 신재생에너지를 사용함으로써 화석연료 사용으로 인한 대기의 오염과 지구온난화 등의 환경오염을 줄일 수 있으며, 더 높은 차원의 전지가 연구를 통해 나오기 전까지 리튬전지는 꾸준히 사용될 전망이다.

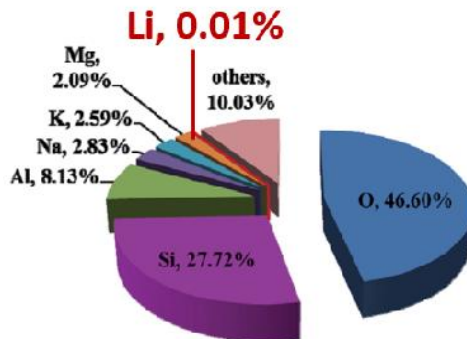


그림 1. 지각 원소 구성비율

리튬전지의 종류는 크게 리튬이온(Li-ion), 리튬폴리머(Li-Polymer), 리튬인산철(LiFePO₄)로 나누어지며 무게, 용도, 안정성을 고려하여 다양한 분야에 적용되고 있다.

1. 리튬이온

리튬이온(Li-ion) 전지의 주요 구성요소는 리튬이온을 양극활물질, 음극활물질, 분리막과 전해질로 이루어져 있다. 그림 2는 리튬이온 전지의 충방전 메커니즘을 나타낸 것으로 리튬이온 전지 충전 시, 양극의 리튬이온이 분리막을 경유하여 음극의 탄소층으로 이동하여 저장되며 충전전류가 흐르게 된다. 리튬이온 전지의 방전 시, 음극의 탄소층 안의 저장된 리튬이온이 분리막을 경유하여 양극으로 이동하게 되며 방전전류가 흐르게 된다.

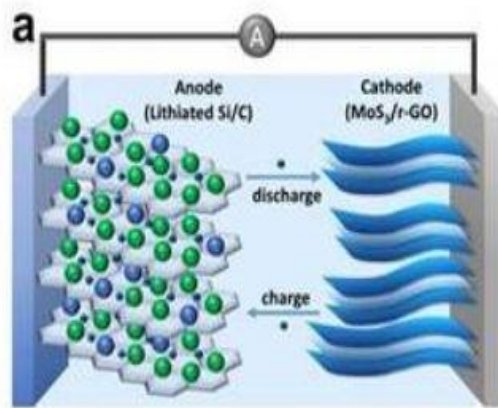
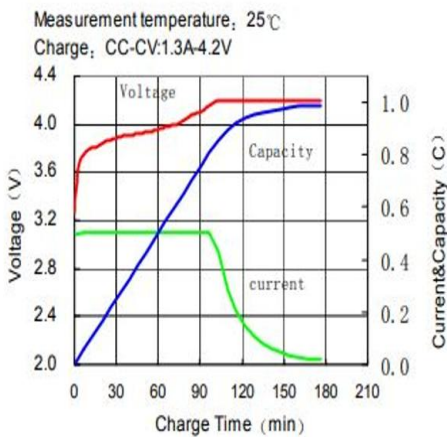


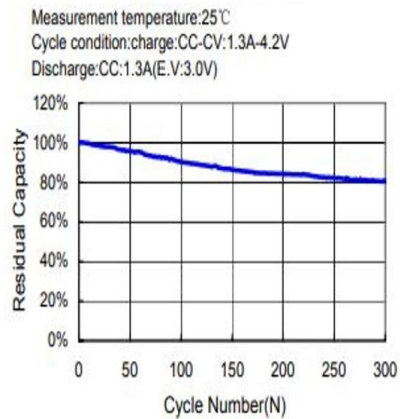
그림 2. 리튬이온 전지의 충방전 메커니즘

리튬이온 전지의 충전은 일반적으로 CC-CV충전 방식인 두 단계로 이루어진다. 그림 3은 리튬이온 전지의 충방전 특성을 나타낸 것으로, 그림 3. (a)는 충전 모듈을 사용하여 CC-CV 충전하였을 때 리튬이온 전지의 충전 특성을 나타내고 있다. 먼저 CC단계에서는 일정전류로 전지의 전압이 최대충전전압에 도달할 때까지 높은 전류를 이용하여 충전되며, 전지의 충전용량(SOC)이 80%에 도달하였을 때, CC단계에서 CV단계로 바뀌게 된다. CV단계에서

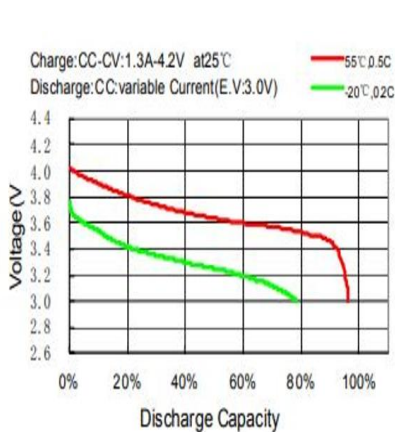
는 전지의 전압이 일정하게 유지되고 충전전류는 급격히 감소한다. 그림 3. (b)는 잔류용량에 따른 사이클 특성을 나타내고 있다. 그림 3. (c), (d)는 온도와 C-rate의 따른 방전특성을 나타내고 있다. 그림 3. (c)는 온도 변화에 따른 방전 용량을 나타낸 것으로, 상온과 고온에서는 큰 차이를 보이지 않지만, 저온에서의 방전시 전지전압의 감소와 함께 방전용량도 감소하는 것을 나타낸다. 그림 3. (d)는 방전전류에 변화에 따른 충방전률(C-rate)의 변화에 따른 방전 그래프이다. 방전전류가 증가할 수록 전지전압과 방전용량이 감소하는 특성을 나타내고 있다.



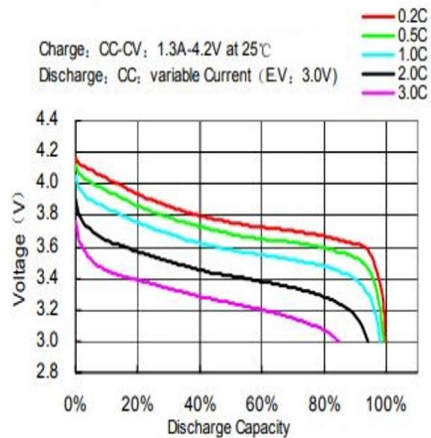
(a) 충전 특성



(b) 사이클 특성



(c) 온도 특성



(d) C-rate 특성

그림 3. 리튬이온 전지의 충방전 특성

2. 리튬폴리머

리튬폴리머(Li-ion Polymer) 전지는 액체로 된 전해질로 구성된 리튬이온 전지와는 달리, 고분자인 Polymer로 젤(Gel) 상태의 전해질을 사용하는 전지이다. 리튬이온 전지는 높은 에너지 저장 밀도와 다른 이차전지(Ni-Cd, Ni-MH 등) 대비 높은 전압 등의 특징을 갖고 있으나, 전해질의 누액으로 인한 화재 및 폭발의 위험이 있다. 그러나, 리튬 폴리머 전지는 액체 전해질을 화학적으로 안정적인 폴리머 상태의 전해질을 사용함으로 높은 안정성을 갖는다. 또한, 보다 얇은 두께나 소형으로 제작이 가능하여 다양한 디자인의 셀 설계가 가능하다. 하지만, 액체 전해질보다 이온의 전도율이 떨어지며 제조공정이 복잡하여 리튬이온 전지보다 고가의 비용의 발생하는 단점이 있다. 표 1은 리튬이온 전지와 리튬폴리머 전지의 특성 비교를 나타내고 있다.

표 1. 리튬이온 전지와 리튬폴리머 전지의 특성 비교

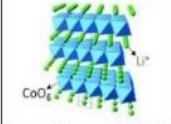
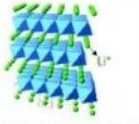
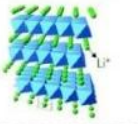

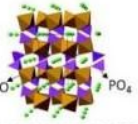
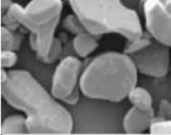
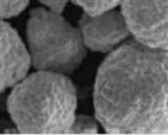
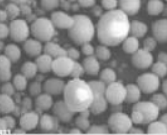
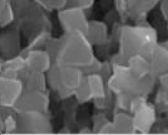
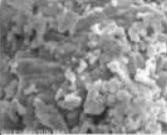
	리튬이온 전지	리튬폴리머 전지
음극	탄소	탄소
양극	LiCoO ₂ , LiNiO ₂ , LiMnO ₄ 등 금속산화물	LiCoO ₂ , LiNiO ₂ , LiMnO ₄ 등 금속산화물
전해질	액체	고분자(Polymer)
전압	3.7V	3.7V
에너지 밀도	높다	높다
라이프 사이클	매우 좋다	좋다
저온특성	좋다	보통
안정성	나쁨	좋다
셀 디자인 특성	나쁨	매우 좋다

3. 리튬인산철

리튬인산철(LiFePO₄) 전지는 기존의 Li-Co, Li-Mn계 전지의 문제점인 발열과 그로 인한 폭발의 위험성을 개선하기 위해 리튬이온 전지 양극에 리튬인산철(LiFePO₄)을 적용한 전지이다. 단일 전지로는 20~700Ah까지 생산이

가능하며 3.2V의 높은 정격전압 및 높은 에너지밀도, 우수한 충방전 특성을 가지며, 환경오염을 유발하는 유해 중금속인 납, 카드뮴, 수은 등을 함유하지 않는 친환경 제품이다. 또한, 이온 전해질을 사용하여 충전효율을 극대화하여 3000회 이상의 충방전 사이클 특성과 기본 구성물질이 올리빈(Olivine) 구조로 되어있다[4]. 올리빈 구조는 육면체의 형태로 층상(Layered)구조를 갖는 기존의 전지와 다른 격자 구조로 안정성이 높고 리튬이온이 이동하여도 결정 구조가 변형되지 않는 특징으로 2차 가공에 용이하다. 표 2는 분자의 구조에 따른 리튬전지의 특성을 나타낸다.

표 2. 분자의 구조에 따른 리튬전지의 특성

구분	LCO	NCM	NCA	LMO	LFP
분자식	LiCoO ₂	Li[Ni,Co,Mn]O ₂	Li[Ni,Co,Al]O ₂	LiMn ₂ O ₄	LiFePO ₄
구조	층상(Layered) 구조 	층상(Layered) 구조 	층상(Layered) 구조 	Spinel 구조 	Olivine 구조 
					
에너지 용량	145 mAh/g	140~220 mAh/g	180~220 mAh/g	100 mAh/g	150 mAh/g
동작 전압	3.8 V	3.7 V	3.7 V	4.0 V	3.2 V
안정성	높음	다소 높음	낮음	높음	매우 높음
수명	높음	중간	높음	낮음	높음
난이도	쉬움	다소 어려움	어려움	다소 어려움	어려움
용도	소형	소형, 중대형	소형, 중대형	중대형	중대형
제조사	엘앤에프, 코스모신소재, Shanshan, Umicore, Nichia	엘앤에프, 에코프로비엠, 코스모신소재, 포스코케미칼, Umicore, Nichia	에코프로비엠, Sumitomo, Toda, Nichia	포스코케미칼, Nichia, BYD	한화케미칼, Shanshan, BYD, A123

리튬인산철 전지의 충방전 반응은 LiFePO₄와 FePO₄ 두 물질의 사이에서 진행된다. 충전 과정에서 LiFePO₄는 점차 리튬이온을 내보내 FePO₄가 되고, 방전 과정에서 리튬이온이 FePO₄에 들어가 LiFePO₄가 된다.

그림 4는 리튬인산철 전지의 충방전 과정을 나타내고 있다. LiFePO₄ 전지가 충전되면 리튬이온은 인산철-리튬 결정체에서 결정체 표면으로 옮겨 전기

적 작용으로 전해질을 통해 분리막을 뚫고 흑연 결정체의 흑연 격자 속으로 들어간다. 이와 동시에 전자는 전도체를 통해 양극에서 외부회로를 통하여 흑연 음극으로 흘러가 음극의 부하와 균형을 이루게 된다. 리튬이온이 리튬인산철에서 빠져나와 리튬인산철은 인산철로 변환한다[5].

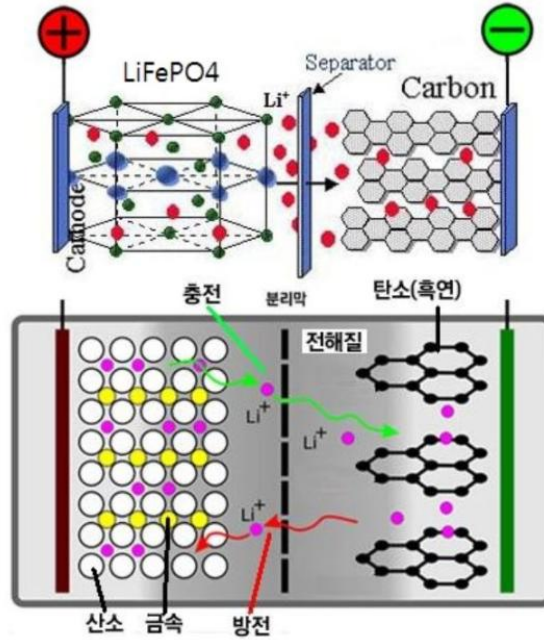


그림 4. 리튬인산철 전지의 충방전 과정

전지가 방전될 때 리튬이온은 흑연 결정체에서 빠져나와 전해질로 들어간 후 분리막을 뚫고 전해액을 거쳐 리튬인산철 결정의 표면으로 옮겨진 후 다시 리튬인산철 격자 안에 박힌다. 이와 동시에 전자는 전도체가 음극에서 외부 회로를 통하여 양극으로 흘러가 양극의 부하가 균형을 이루게 된다. 리튬이온이 인산철 결정체에 박힌 후 인산철은 리튬인산철로 변환한다.

B. BMS의 기능

배터리 관리 시스템인 BMS(Battery Management System)는 전지의 사용에 있어 매우 중요한 기능이다. 기존에 사용되었던 납축전지에 비해 Li-Co, Li-mn, LiFePO₄ 등의 리튬이온 전지는 과충전, 과방전, 외부의 충격, 전지의 과열 등으로 인하여 폭발의 위험성을 가지고 있으나 BMS를 사용함으로써 전지의 모니터링을 통해 동작 상태를 알 수 있으며, 외부 요인으로부터 전지의 손상을 방지하며, 수명을 연장시킬 수 있다[6].

BMS는 PCM(Protection Circuit Module)과 기본적으로 전지를 보호하는 점은 같지만 PCM과 다르게 복합적인 기능을 탑재할 수 있으며, 전지의 운용을 보다 효율적으로 관리 할 수 있다는 장점이 있다. BMS의 기능을 분류해 보면 크게 5가지의 기능으로 나타낼 수 있다. 그림 5는 BMS의 5대 기능을 나타내며 Protection, Performance management, Diagnose, Interface, Auxiliary/application related로 구분이 된다.

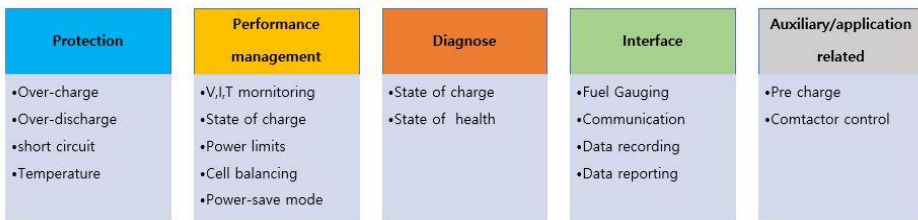


그림 5. BMS의 기능

Protection은 보호에 대한 기능으로 쇼트나 과충전, 과방전, 과열과 같은 전지에 실질적으로 충격을 줄 수 있는 사항에 대해 보호하는 기능이다. Performance management는 온도, 전류, 전압등과 같은 모니터링으로 전력 저장 및 cell에 대한 Balancing과 같은 동작을 관리하는 기능이다. Diagnose은 잔여 용량(SOC:Stage of Charge), 노화 상태(SOH:State of Health)와 같은 진단기능이며 Interface는 BMS의 데이터에 대한 외부 장치에 전송, PC

GUI를 통한 디스플레이와 데이터를 저장하는 기능이다. 마지막으로 Auxiliary/application related는 히터나 팬과 같은 외부 장치를 관리하는 기능이 있다[7].

이러한 기능을 사용하여 BMS는 전지의 전압, 전류, 온도를 측정하며 각 셀의 SOC와 SOH 추정하여 남은 수명을 예측할 수 있으며 데이터 수집, On-board/Off-board와의 통신, 데이터의 모니터링 데이터 기록 저장할 수 있다. 또한, 가장 중요한 기능은 Cell Balancing을 통해 전지의 충방전의 과정을 제어하여 전지를 보호하는 역할을 수행한다.

C. Cell Balancing

리튬이온 전지는 셀, 모듈, 팩, 전지 시스템 등으로 구성할 수 있다. 구성된 각 셀은 2.5~4.2V의 전압값을 유지하여야 하며, 이 범위를 벗어나게 되면 전지의 손상 및 발열로 인한 화재의 위험을 야기하게 된다. 전지 시스템은 이 외에도 냉각팬을 이용하여 전지를 냉각시키며, 릴레이 등을 통해 설정값 이상의 충방전 전류를 차단할 수 있다. 리튬이온 전지는 과충전과 과방전을 방지하기 위해 20~80%의 SOC값을 유지하여 사용하지만, 전지의 제조방법, 모듈의 위치에 따른 발열과 그것을 해소하기 위한 냉각팬의 효율 등 외부적인 요인으로 인한 전압의 편차가 발생하게 되며 그만큼 전지의 이용률과 수명은 감소하게 된다. 따라서 셀 간의 SOC 편차를 줄이기 위한 여러 가지의 방법들이 계속해서 연구중이다[8].

Cell Balancing은 셀 간의 SOC 편차를 줄여주는 기능으로 연결된 전지의 각 셀 전압을 동일하게 맞춰준다. 일반적으로 충전 중일 때 작동하며, 셀 간의 전압이 다를 경우, 전압이 높은 부분만을 방전시켜 전압으로 낮춰줌으로써 다른 셀들과 동일한 전압값을 유지 시키기 위해 직렬로 연결된 전지의 셀 전압을 조정하며 병렬로 연결된 셀에서는 Cell Balancing이 없어도 자동으로 각 셀의 전압이 맞춰진다. Cell Balancing은 크게 초과된 전압을 단순히 소모시키는지 또는 초과된 전압을 이용하여 전압의 낮은 쪽의 셀 전압을 채워주는 것으로 균형을 맞춰주는 것에 구분하여 Passive Balancing과 Active Balancing으로 분류한다[9].

1. Passive Balancing

Passive Balancing은 저항을 이용한 매우 간단한 방법으로 전압이 높은 셀에 연결되어 에너지를 소비하여 나머지 셀들과 전압을 조정하는 원리이다. 이 방법은 시스템을 구성하는 데에 있어 비용이 저렴하고 구현하기에 쉬우며 시스템이 차지하는 부피가 매우 작다. 하지만 Balancing 과정에서 저항이 단순히 열로 소비되기 때문에 에너지의 재사용이 불가능하다. 따라서 에너지의 효율적인 사용에 있어서 큰 단점이라 할 수 있다.

a. Fixed Shunting Resistor

Fixed Shunting Resistor 방식은 모든 전지 셀마다 저항이 고정되어 연결되어 있으며, 고정된 저항으로 셀의 전압값을 조절할 수 있다. 이 방법은 주로 납축전지나 니켈을 기본으로 활용하는 전지들에 사용되며, 회로의 구성에 있어 아주 간단하게 나타낼 수 있어 비용이 매우 저렴하지만, 지속적인 에너지의 소비로 인해 매우 비효율적이며 모든 셀에 연결된 저항의 열들로 인해 시스템 전체적으로 발열이 심하다는 단점이 있다. 그림 6은 Fixed Shunting Resistor 방식의 회로 구성을 나타내고 있다.

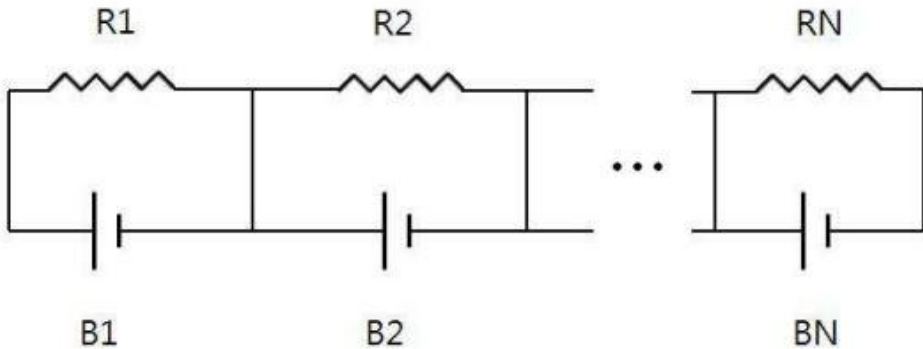


그림 6. Fixed Shunting Resistor

b. Switching Shunting Resistor

Switched Shunting Resistor 방식은 현재 다수의 전지를 충전하는 시스템에서 가장 많이 사용되는 방법으로 셀 당 방전용 저항과 스위치가 한 세트 구성되어 있다. Switching Shunt resistor 방식은 스위치 제어를 통해 셀 충전 시, 셀에 인가되는 전류를 즉각적으로 감소시켜 주변 셀과의 전압을 Balancing 할 수 있으며 방전 시에는 가장 낮은 셀을 기준으로 높은 전압값을 갖는 셀들을 저항을 통해 열에너지로 소모시킴으로써 Balancing을 수행한다. 이러한 동작을 수행하기 위해서는 BMS가 셀들의 전압을 항상 모니터링

을 하며 적절한 구간에서의 스위치 제어가 요구된다. 이러한 특성 때문에 시스템을 설계하는 데에 있어 고전류용 스위치와 저항에서 발생하는 열이 셀에 영향을 미치는 것을 방지하기 위한 발열 관리가 추가적으로 요구되며, 주로 저전류용 충방전 시스템에 적합한 방법이라 할 수 있다. 그림 7은 Switching Shunting Resistor 방식의 회로 구성을 나타내고 있다.

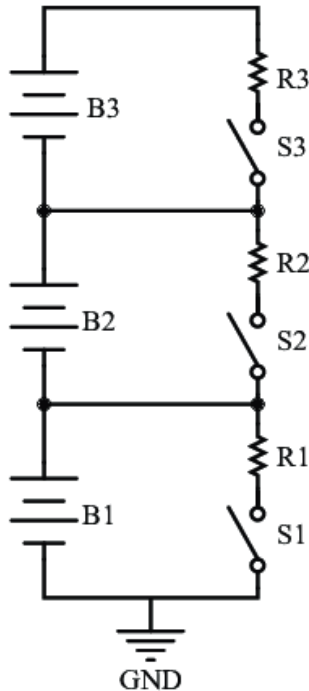


그림 7. Switching Shunting Resistor

2. Active Balancing

Capacitive Cell Balancing은 커패시터를 사용하여 과충전된 전압을 저장하는 방식으로 전지 팩 내부의 셀들 사이에서 에너지를 이동시켜 Balancing을 수행한다. 셀의 전압이 충전된 커패시터의 전압보다 작으면 다른 셀과 동일한 전압이 될 때까지 커패시터로부터 전압을 공급을 받고 반대로 커패시터의 전압보다 셀의 전압이 클 경우, 셀이 커패시터에 전압을 공급하는 원리로 동작한다. 즉, 높은 전압의 셀이 커패시터를 통해 방전하여 전압을 조정하는

동시에, 방전에 이용된 전압을 낮은 전압의 셀에 충전시키는 방식으로 Balancing이 이루어지며 에너지의 소모가 매우 적은 효율적인 방법이다. 하지만 복잡한 구성과 기술력이 요구되어 회로의 구성에 있어 높은 비용이 소요된다.

a. Switched Capacitor

Switched Capacitor 방식에서 커패시터는 두 셀 사이의 에너지를 운반하는 역할을 한다. 커패시터가 셀의 에너지를 운반하기 위해 제어신호는 모든 스위치의 방향을 상향 하향으로 연결해주는데 일정한 주기를 갖고 상향 펄스 하향 펄스로 별도의 제어 없이 진행한다. 각 커패시터의 에너지 차이를 셀이 운반하고 셀의 에너지 차이를 커패시터가 운반하는 방식이다. 제어가 간단한 장점이 있지만 멀리 떨어진 셀 간의 Balancing 진행 시, 각각의 셀들과 여러 개 커패시터를 하나씩 거쳐야 하므로 오랜 시간이 소요된다. 그림 8은 Switched Capacitor 방식의 회로 구성을 나타낸다.

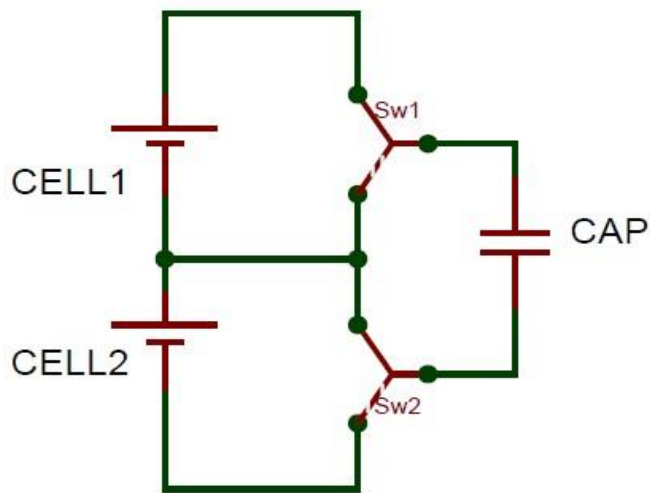


그림 8. Switched Capacitor

b. Single Switched Capacitor

Single switched capacitor 방식은 하나의 커패시터와 다수의 셀들로 구성되며, 커패시터의 방향성 제어를 위해 추가적으로 홀수 셀과 짝수 셀을 구분지어 제어하는 신호가 요구된다. 가장 높은 전압의 셀에서 가장 낮은 전압의 셀로 커패시터가 에너지를 운반하는 방식으로 회로 구성에서 제어가 복잡하다는 단점이 있지만, 셀의 수가 많고 적음에 상관없이 커패시터가 하나만으로도 제어가 가능하며, 셀 간의 Balancing 도중 연결된 커패시터로 통해 운반이 거리에 상관없이 일정하게 시간이 소요됨으로 시간을 절약할 수 있다는 장점을 갖는다. 하지만 Balancing을 해야 하는 셀의 수가 많아질수록 Balancing 도중 특성이 다른 셀들끼리 발생하는 편차에 대한 추가적인 과정이 발생하므로 지속적인 셀 모니터링과 제어가 요구되는 회로이다. 그림 9은 Single Switched Capacitor 방식의 회로 구성을 나타낸다[10].

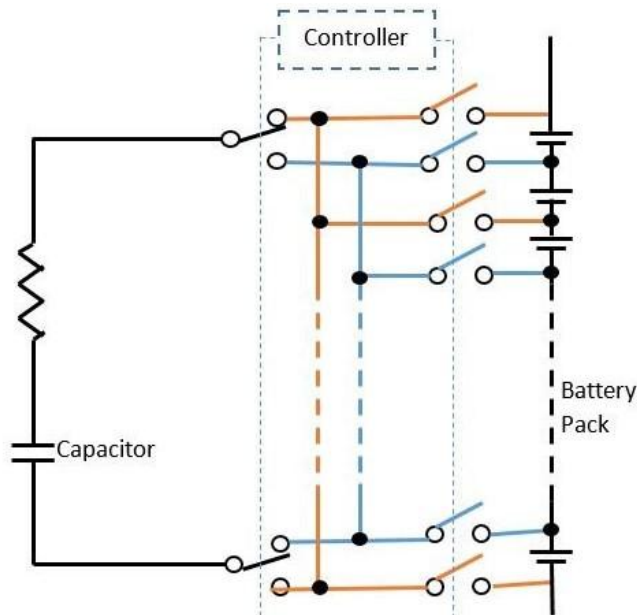


그림 9. Single Switched Capacitor

III. Cell Balancing 회로 설계

A. Cell Balancing의 동작

본 논문에서 제안하는 Cell Balancing 회로는 Passive Balancing의 Switching Shunting Resistor 방식을 응용하여 구성하였다. 그림 10은 Cell Balancing 회로의 Timing Chart를 나타낸다. 전지의 충전 시, 전지가 공칭전압에서 지속적인 충전을 통하여 V_{CU} (Overcharge Detection Voltage)에 도달하면 제어 모듈에 과충전 감지 신호를 보낸다. 이후, 지속적인 충전을 가하여 V_{CL} (Overcharge Release Voltage)를 초과하게 되면 충전은 즉시 멈추게 되며, 초과된 전압에 대하여 제어 모듈이 전압 조정을 실행하게 된다.

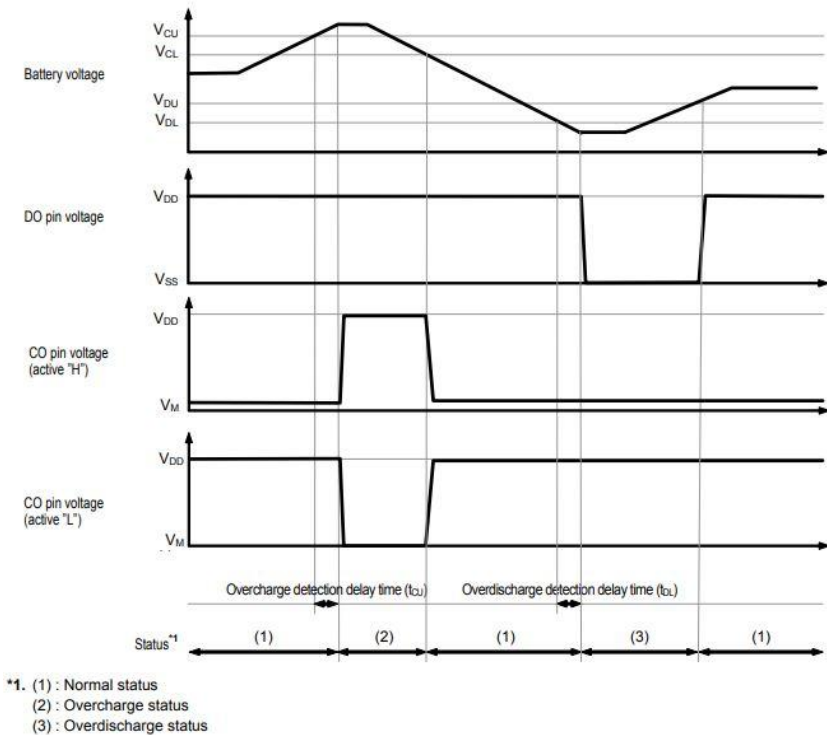


그림 10. Timing Chart

제어 모듈의 동작은 t_{cu} (Overcharge Detection Delay Time)의 Delay Time이 소요된 후 실행되며, 제어 모듈은 Switching Shunting Resistor 방식으로 초과된 전압을 내재되어 있는 저항과 스위치 동작을 통하여 V_{cu} 값 이하의 설정된 제어 모듈의 전압값에 도달할 때까지 전압을 방전시킨다. 전지의 방전시, 지속되는 방전을 통하여 전압값은 V_{Du} (Discharge Detection Voltage)에 도달하게 되며, 마찬가지로 제어 모듈로 방전 전압 감지 신호를 보낸다. 전압이 V_{DL} (Discharge Release Voltage)이하가 되면 t_{cl} (Discharge Detection Delay Time)의 Delay Time 후, 제어 모듈의 전압 조정 기능이 실행되며, 설정된 전압까지 충전 기능을 실행한다.

B. Cell Balancing 회로 구성

회로 구성에서 배터리보호용 IC는 Seiko사의 S8211E를 사용하였다. S8211E는 신뢰성이 높은 전압 보호회로와 delay 회로로 구성되어 있으며, 2차전지인 리튬이온 전지 팩을 구성하는 단위 셀 간의 과충전과 과방전의 모니터링에 적합하다.

그림 11은 S8211E IC의 블록다이어그램을 나타낸다. IC의 VDD와 VSS에 외부전원이 인가될 경우, 연산증폭기는 비교기로 동작하게 된다. 동작된 비교기는 +와 -의 두 개의 입력을 통하여 전압을 비교하며 +값이 크면 1을, -값이 크면 0을 출력하여 Oscillator 제어 회로와 Divider 제어 회로에 신호를 전달한다. 표 3은 S8211E의 데이터 시트를 나타낸 것으로 충전 중 전지의 전압이 $V_{CU} = V_{CL} = 3.60V$ 이상으로 상승하게 되면 1.2s의 시간 지연 후 안정적인 동작을 위해 과충전보호 기능을 수행하게 되며, $V_{DU} = V_{DL}$ 의 값이 2.0V이하로 내려가면 되면 150ms의 시간 지연 후 과방전 보호 기능을 수행하게 된다.

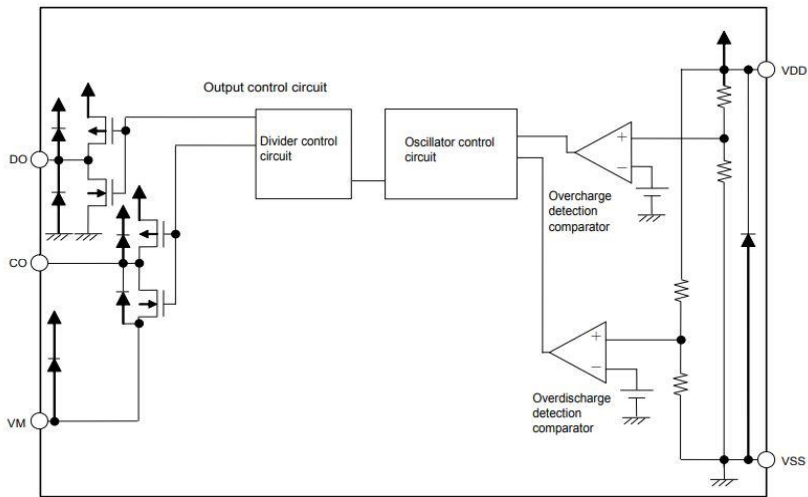


그림 11. S8211E 블록다이어그램

표 3. S8211E 데이터 시트

파라미터		값
Overcharge Detection Voltage[V _{CU}]		3.60V
Overcharge Release Voltage[V _{CL}]		3.60V
Overdischarge Detection Voltage[V _{DL}]		2.0V
Overdischarge Release Voltage [V _{DU}]		2.0V
Delay Time Combination	Overcharge Detection Delay Time	1.2s
	Overdischarge Detection Delay Time	150ms

그림 12는 제안하는 Cell Balancing의 회로도를 나타내고 있다. 회로에 전지를 연결하면 배터리보호용 IC의 2,3번 핀을 통하여 인가된 전압은 내장된 비교기를 통해 전지의 전압 상태를 구분하게 되며, 인가된 전압과 정보를 5번 핀을 통해 MOSFET(AO4407)의 게이트 신호를 발생한다.

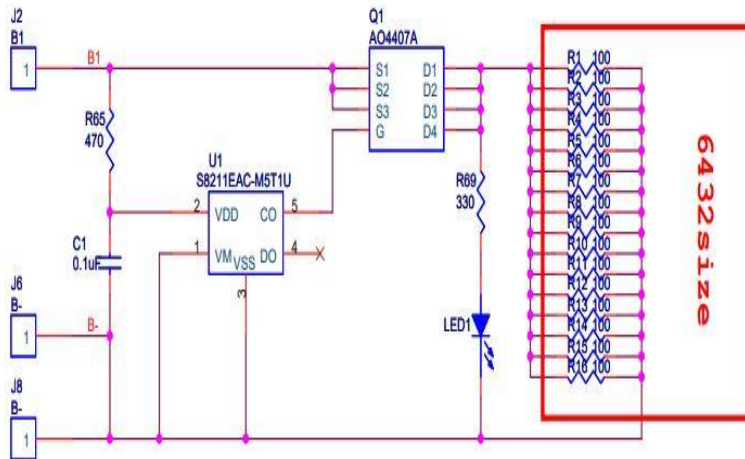


그림 12. Cell Balancing 회로도

연결된 전지가 과충전 시, 전달된 전압은 MOSFET의 스위칭 기능에 의해 드레인 단자를 통해 출력되며, 출력된 전압은 병렬연결된 16개의 6432size의 100Ω 저항을 통해 방전되며, 방전상태를 나타내는 LED는 턴 온 상태가 된다. 방전작업을 마친 전압은 다시 배터리보호용 IC로 인가되며, 설정된 전압값에 도달할 때까지 위와 같은 작업을 반복한다. 반복된 방전을 통해 과충전 상태의 전압값이 설정된 값에 도달 시, LED는 턴 오프 상태가 되며, 해당 전압은 MOSFET의 소스 단자를 통해 출력된다.

IV. 실험 및 결과고찰

A. 실험

실험을 위한 전체 시스템 구성은 그림 13의 블록다이어그램과 같이 설계하였다. 전원공급기에서 인가된 전원으로 충전 모듈이 동작하여 설계된 전압까지 전지 팩을 충전시키며, 충전된 전지 팩의 대한 데이터를 병렬 연결된 BMS에서 종합처리하여 Balancing을 진행하며, 그에 따른 전압과 전류의 변화를 측정기를 통해 나타낼 수 있다.

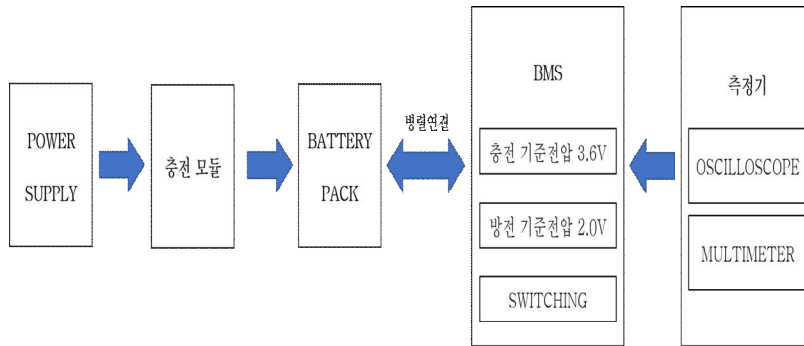


그림 13. 시스템 구성의 블록다이어그램

1. 시스템의 구성

a. 전지 팩

본 논문에서는 3.6V의 리튬이온 전지의 4개를 직렬연결하여 12V의 전압 출력이 가능한 14.4V의 전지 팩을 설계하였다. 그림 14는 18650규격의 리튬이온 전지 4개를 직렬연결하여 전지 팩을 구성한 모습을 나타내고 있다. 14.4V의 전지 팩의 설계를 위해 EMBB사의 18650 규격의 원통형 셀을 사용하였다. 표 4는 사용한 셀의 동작 특성을 나타내는 데이터 시트로 전지 사

용시 전압, 전력, 에너지 소모 등 시스템 요구 조건 충족 검토에 활용할 수 있다. 3.7V의 표준전압일 때, 완충전압인 4.2V에서부터 완방전압인 3.0V까지 0.2C의 방전전류를 적용하여 2600mAh의 용량이 측정된다. 리튬이온 전지는 충전 시, 3.6V ~ 4.2V 정도의 전압으로 충전하게 된다. 4.2V초과시 과충전되어 온도의 상승과 발열로 화재의 위험성이 있으므로 과충전 보호기능이 필요하다. 반대로 방전 시, 전압이 2.0V 이하가 되면, 전지의 기능이 현저히 저하되며 정상적인 동작을 기대하기 어렵고 전지의 수명을 크게 단축시킨다. 이를 해결하기 위해 과충전과 과방전을 방지하는 전지관리시스템(BMS)이 요구된다.

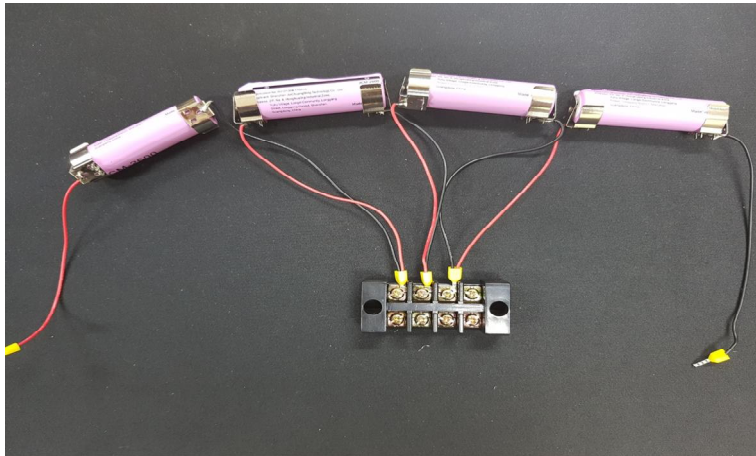


그림 14. 14.4V 전지 팩 구성

b. 충전 모듈

그림 15는 충전 모듈의 회로도를 나타낸다. 리튬전지의 충전방식은 충전 모듈이 전원공급기로부터 전원을 공급받고 해당 전원을 전지 팩에 맞게 충전시키는 구조를 갖는다.

표 4. 18650 리튬이온 전지의 데이터 시트

항목	사양
공칭전압	3.7V
충전전압	4.2V
방전전압	3.0V
용량	2600mAh
크기	18650 (69.5mm x 18.5mm)
무게	47g
충전	일반 4.2V 520mAh이하, 급속 4.2V 1300mAh(Man)
방전	일반520mAh 이하, 고율 2600mAh
운용온도	충전 : 10℃ ~45℃
	방전 : -20℃ ~ 60℃

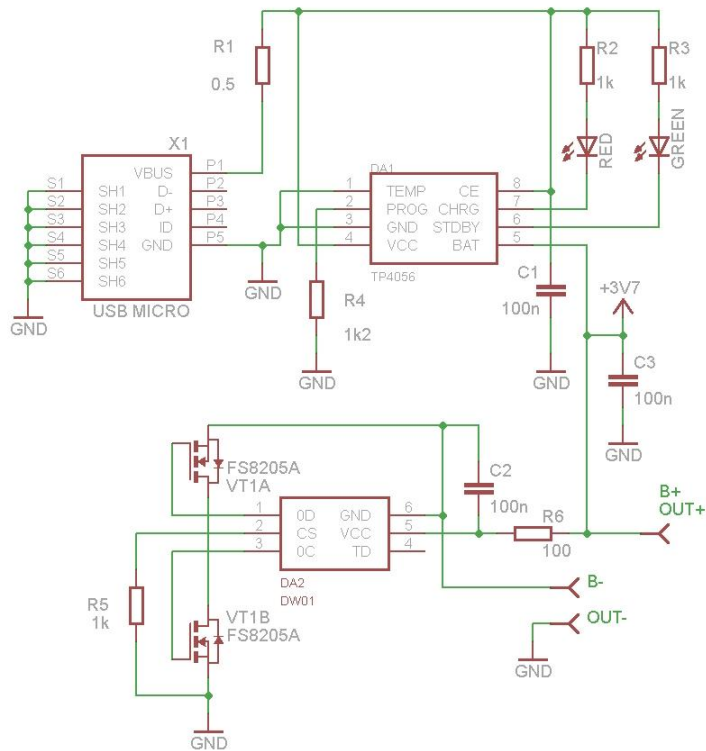


그림 15. 충전 모듈의 회로도

리튬전지의 충전은 과충전 보호회로가 내장되어 있는 TP4056 모듈을 사용하였다. 그림 16은 충전 모듈의 구성도를 나타낸 것으로 왼쪽은 입력측으로 $\pm 5V$ 전원과 MicroUSB를 추가적으로 구성하여 4.5V~8V, 1A의 입력이 가능하다. 우측은 출력측으로 B+, B- 단자에 전지를 연결하여 상단과 하단의 OUT +,-단자를 통해 전지의 출력 부분은 4.2V, 1A의 출력이 가능하여 단자의 전지 전원으로 공급한다. 비충전 시 전지의 출력은 일정하며, Micro 5핀의 전원을 인가하여 충전 시 전지 충전과 동시에 출력 측을 이용하여 전원으로 사용할 수 있다.

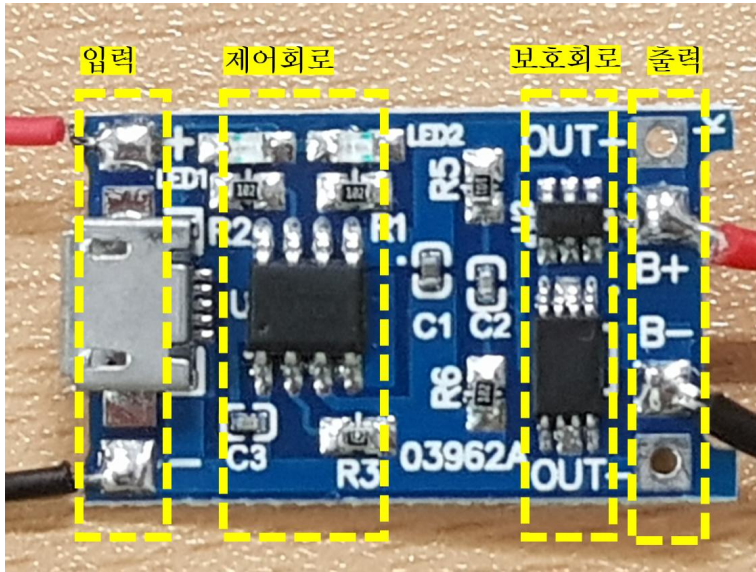


그림 16. 충전 모듈의 구성도

c. Cell Balancing 보드

그림 17은 본 연구에서 제안한 Cell Balancing 보드를 나타내고 있다. 앞서 설명한 배터리보호용 IC S8211E를 메인 MCU로 하였으며, 1개의 전지당 전압 및 전류의 조절을 위한 Gate Drive와 6432size 100 Ω 저항 16개를 1set로 구성하여, 총 4set로 4개의 셀에 대하여 Cell Balancing을 수행한다. 개별 전지 전압이 3.6V에 도달하게 되면 Cell Balancing 기능을 정지하며, 자체 소모전류는 20 μ A로 기기의 동작에 관하여 크게 영향을 주지 않는다. 그림 18은 전지 팩의 Cell Balancing 시스템 구성을 나타낸다.

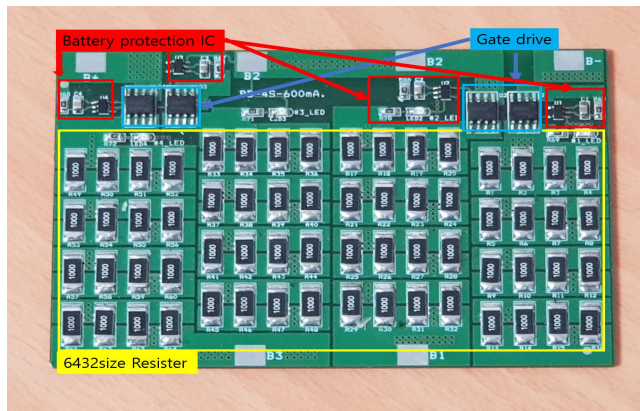


그림 17. 제안하는 Cell Balancing 보드

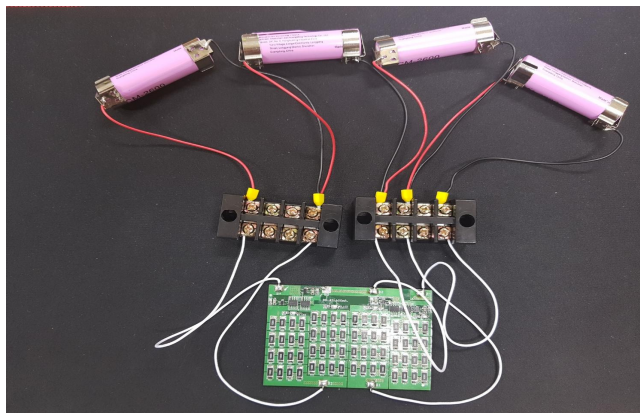


그림 18. Cell Balancing의 시스템 구성

2. 실험 장치

제안하는 회로의 입력 전압을 인가하기 위한 3CH 스위칭 Voltage Source(GWINSTEK사의 SPD 3606), 출력 전압과 전류, 스위치 패턴 파형을 비교하기 위한 오실로스코프(RIGOL사의 DS1104 Z), 각 셀의 전압 및 전지 팩의 전압을 측정하기 위한 멀티미터, 셀의 충전을 위한 리튬이온 전지 충전 모듈로 실험 장치를 그림 19와 같이 구성하였다. 14.4V의 전지팩을 Voltage source를 통해 15.60V 전압으로 충전하였으며, 충전된 전지 팩을 Cell Balancing 보드와 연결하여 Cell Balancing을 진행하였으며, Cell Balancing 도중 시간에 따른 전압의 변화를 오실로스코프 이용하여 측정하였다.

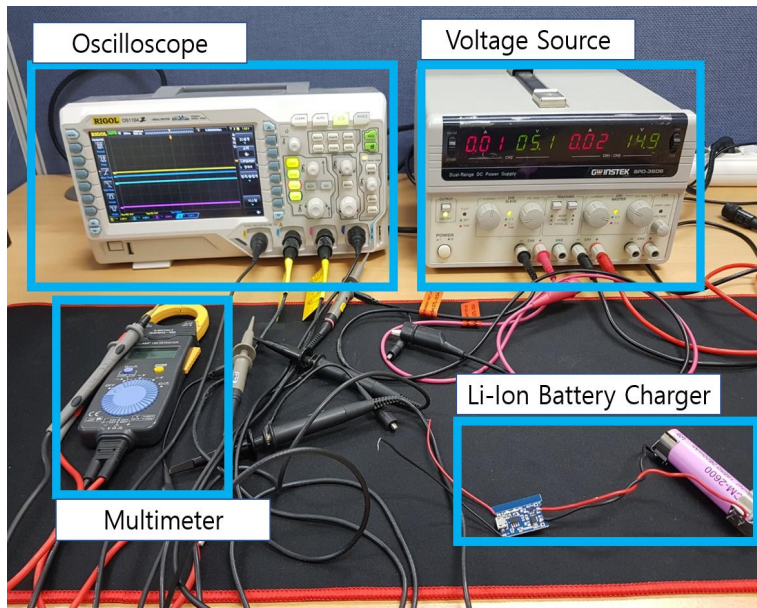


그림 19. 실험 장치

B. 결과 및 고찰

시간에 따른 Cell Balancing의 유효성을 검증하기 위한 실험을 진행하였다. 그림 20은 4개의 전지를 충전 모듈을 이용하여 CH1은 4.0V, CH2는 4.2V, CH3은 4.2V, CH4는 4.0V로 완충한 결과를 나타내고 있다. 본 실험은 제안된 Cell Balancing을 통하여 공칭전압인 3.6V에 도달할 때까지 매 분마다 각 셀의 전압 변화를 측정하는 실험을 진행하였다. 그림 21은 시간 경과에 따라 전압 변화를 나타내고 있다. 그림 21. (a)는 1분 경과시, 전압의 변화가 없는 것을 확인하였다. 그림 21. (b)에서는 2분 경과시, CH2의 전압이 3.8V, CH3의 전압이 4.0으로 감소하며 점차 방전이 진행되는 모습을 보였다. 시간이 경과함에 따라 다른 셀에서도 점차 방전이 진행되는 모습을 보였으며, 그림 21. (h)에서 모든 셀이 3.6V에 도달하는 것을 확인할 수 있었다. 이후 그림 21. (i), (j)와 같이 Balancing이 완료된 이후 추가적인 전압의 변동이 없는 것을 확인할 수 있었다.

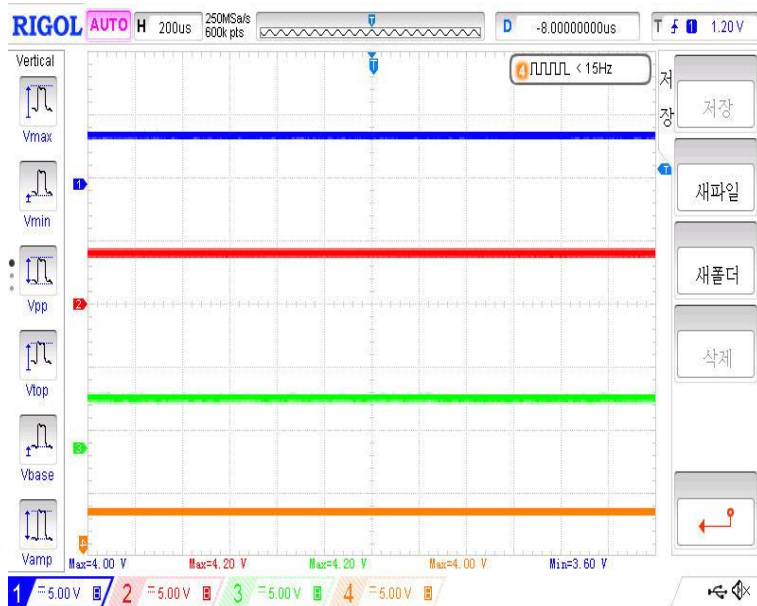
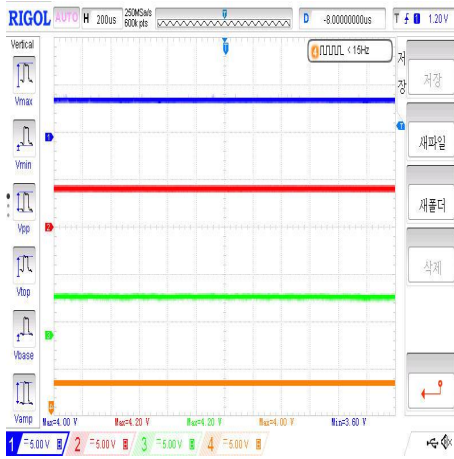
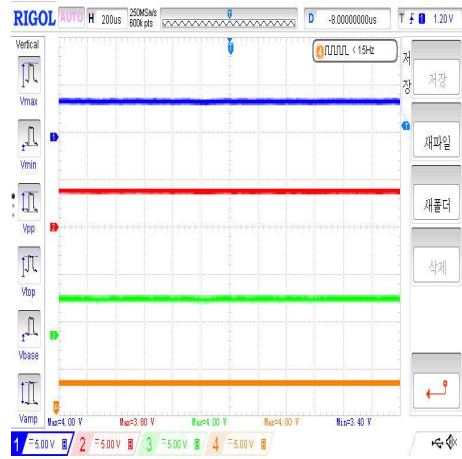


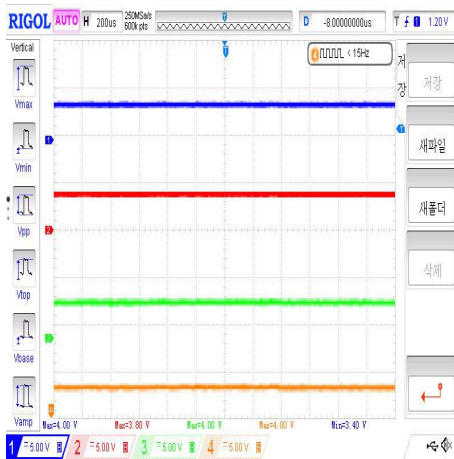
그림 20. 개별 전지의 완충상태 전압



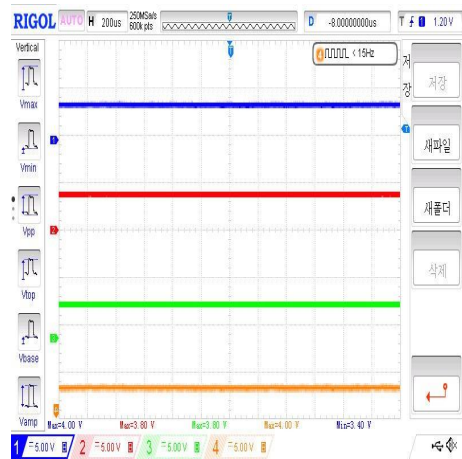
(a) 1분 경과



(b) 2분 경과

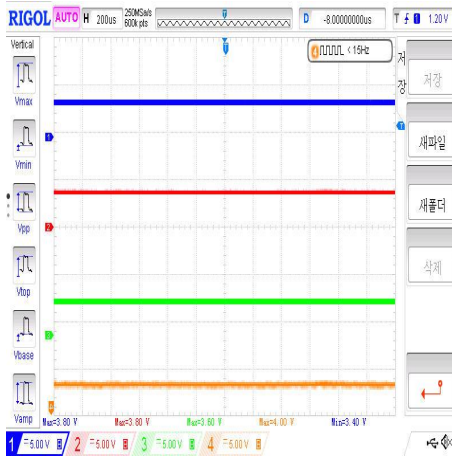


(c) 3분 경과

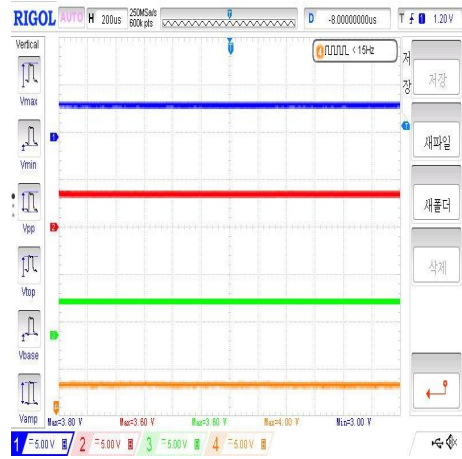


(d) 4분 경과

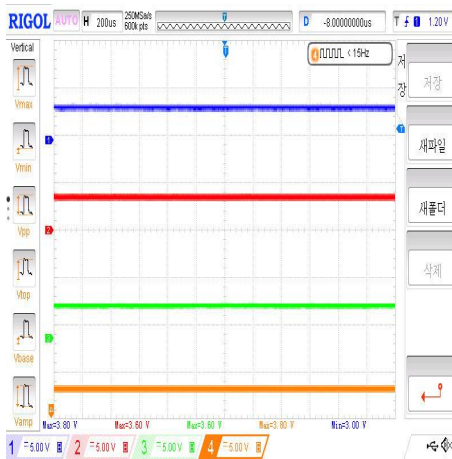
그림 21. 시간 경과에 따른 개별 전지의 전압



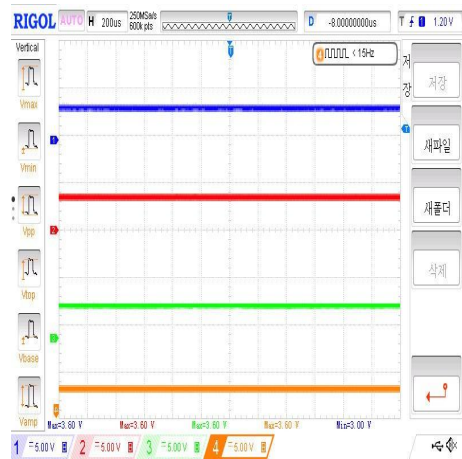
(e) 5분 경과



(f) 6분 경과

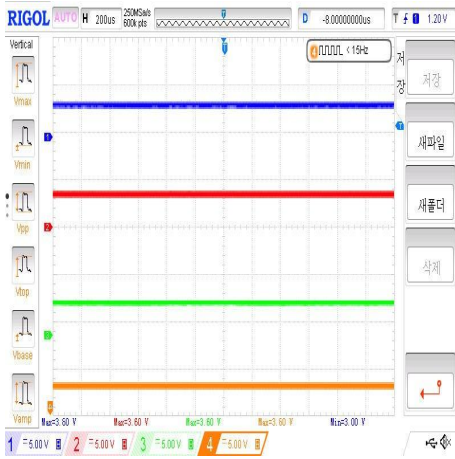


(g) 7분 경과



(h) 8분 경과

그림 21. (계속)



(i) 9분 경과



(j) 10분 경과

그림 21. (계속)

표 5. 시간에 따른 Cell Balancing의 측정 결과

시간 (min)	CH1 (V)	CH2 (V)	CH3 (V)	CH4 (V)	비고
0	4.0	4.2	4.2	4.0	초기값
1	4.0	4.2	4.2	4.0	Cell Balancing
2	4.0	3.8	4.0	4.0	
3	4.0	3.8	4.0	4.0	
4	4.0	3.8	3.8	4.0	
5	3.8	3.8	3.6	4.0	
6	3.8	3.6	3.6	4.0	
7	3.8	3.6	3.6	3.8	
8	3.6	3.6	3.6	3.6	Cell Balancing 완료
9	3.6	3.6	3.6	3.6	
10	3.6	3.6	3.6	3.6	

실험 결과에서의 시간(min)에 따른 각 셀의 전압 변화를 표 5로 나타내었으며, Cell Balancing으로 인한 충전전압에서 공칭전압까지 8분이 소요되었다. 공칭전압에 도달한 후, 추가적인 Balancing은 이루어지지 않았고 셀 들의 전압 또한, 그대로 유지되었음을 알 수 있었다. 그림 22는 시간에 따른 Cell Balancing 변화 그래프를 나타낸다.

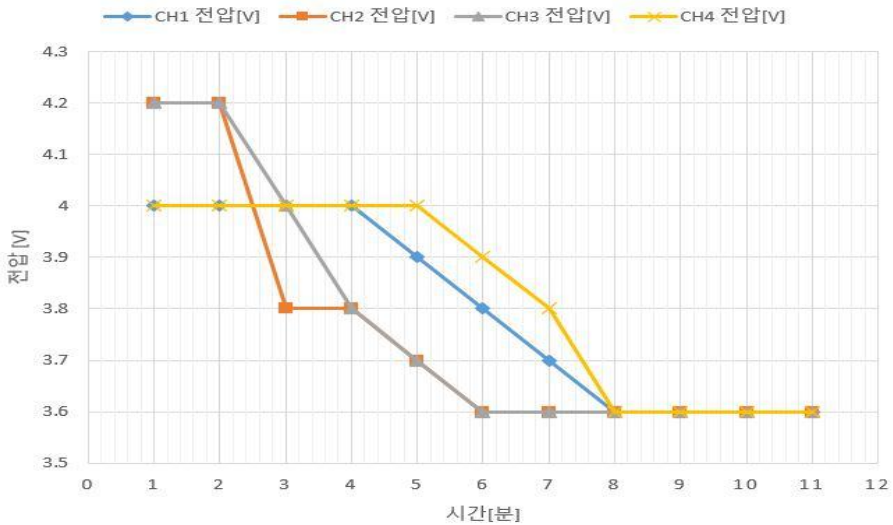


그림 22. 시간에 따른 Cell Balancing 그래프

V. 결 론

본 논문에서는 최근 다양한 응용 분야에서 사용되고 있는 리튬이온 전지의 효율적인 사용 및 문제점 개선을 위하여 BMS의 Cell Balancing 기능을 개선하는 연구를 진행하였다. 이 중 BMS의 Passive Balancing의 고질적인 문제점인 발열을 최소화하여 안정성 확보와 Balancing의 속도를 높임으로써 과충전, 과방전 발생시 이상전압 상태에서 공칭전압으로 도달하기 위한 시간 지연을 단축시키는 Cell Balancing에 관한 연구의 타당성을 검증하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Passive Balancing의 Switching Shunting Resistor 방식의 리튬이온 전지의 Cell Balancing 회로를 제안하였다.
- 2) 제안된 회로는 전지를 회로에 연결하면 배터리보호용 IC를 통하여 인가된 전압은 내장된 비교기에 의해 전압을 구분하게 되고 스위칭소자인 MOSFET의 게이트 신호를 인가하도록 설계하였다.
- 3) 리튬이온 전지의 Cell Balancing을 검증하기 위해 충전 모듈을 이용하여 CH1은 4.0V, CH2는 4.2V, CH3은 4.2V, CH4는 4.0V로 완충된 4개의 전지를 직렬연결하여 전지 팩으로 구성하여 Cell Balancing을 진행한 결과 개별 전지가 3.6V 공칭전압의 도달에 8분이 소요되었으며, 도달 이후 전압의 변동이 없는 것을 확인할 수 있었다.

본 논문의 실험 결과를 바탕으로 Passive Balancing 방식을 적용한 Cell Balancing 도중 발생하는 발열 문제에 대한 대안을 제시하였다. 또한, 간단한 회로 구성으로 BMS의 설계 시, 안정성과 경제성 모두를 고려할 수 있으며, 이후 Passive Balancing을 적용되는 회로의 설계 및 제작 기준의 데이터로 제시될 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] M. M. Thackeray, C. Wolverton, and E. D. Isaacs, “Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries,” *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 7, pp. 7854–7863, 2012.
- [2] T.-H. Kim, J.-S. Park, S. K. Chang, S. Choi, J. H. Ryu, and H.-K. Song, “The current move of lithium ion batteries towards the next phase,” *Adv. Energy Mater.*, vol. 2, no. 7, pp. 860–872, 2012.
- [3] M. Chen and G. A. Rincon-Mora, “Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance,” *IEEE Trans. Energy Convers.* vol. 21, no. 2, pp. 504–511, Jun. 2006
- [4] 김영호, 효율적인 Battery 사용을 위한 BMS(Battery Management System)의 설계, 인하대학교 대학원 석사학위논문(2017).
- [5] K. W. E. Cheng, B. P. Divakar, H. Wu, K. Ding, and H. F. Ho, “Battery management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles,” *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 1, pp.76–88, Jan. 2011.
- [6] 김래영, “리튬이온 전지용 셀 Balancing 기술의 발전 동향” *전력전자 학회지*,19(6), pp.38-44, 2014.12.
- [7] 광채호, Li-ion Battery의 새로운 모델링 방법과 셀 밸런싱 제어, 강원대학교 대학원 석사학위논문(2012).

- [8] S. M. Mousavi G. and M. Nikdel, “Various battery models for various simulation studies and applications,” *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 32, pp. 477-485, Apr. 2014
- [9] H.-G. Schweiger, et al., “Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells,” *Sensors*, vol. 10, no. 6, pp. 5604-5625, Jun. 2010.
- [10] 김재경 외, “전기차 사용 후 전지 거리시장 구축을 위한 정책 연구”, 『에너지경제연구원 기본연구보고서』, 18(16), 2018.

감사의 글

배움의 시간이었던 석사과정이 마무리되며, 이 글귀를 적고 있으니 만감이 교차합니다. 우선 약 2년 6개월이라는 기간 동안 부족한 저를 도와주신 모두에게 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저 석사과정을 진행하며, 많은 가르침과 조언으로 학문에 대하여 보다 다양한 시각으로 연구하는 법을 제시해주신 조금배 교수님, 정형화된 교육을 벗어나 저 자신만의 특색을 일깨워주신 최연옥 교수님, 늘 배려해주시며 용기와 자신감을 주셨던 김남훈 교수님에게 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 또한, 항상 지켜봐 주시고 격려해주신 전기과 교수님들 및 교육대학원 교수님들께도 감사의 말씀드립니다.

학위과정 동안 바쁜 와중에도 저를 챙겨주셨던 청담이형, 서동수 이사님께도 감사의 말씀 드립니다. 대학원 생활에서 늘 활력이 되어주었던 청학이, 혜규, 창림이, 뽕싹꺼얼에게 고맙다는 말을 전하고 싶습니다. 그간 함께 일해 온 태양광발전실험실의 신지혜 선생님, 성균이에게 감사의 마음을 전합니다.

항상 멀리서 대학원 입학부터 졸업까지 응원해주었던 손진수, 박정호, 장진영, 정성훈, 이재남, 송명주, 허권, 이승엽, 배상욱, 이명한, 김학진, 박병욱 친구들에게 고맙고 앞으로도 함께하자는 마음을 전합니다.

마지막으로 늘 제 옆에서 힘이 되어주시고, 이렇게 모자라고 부족한 저를 사랑해주시는 부모님께 항상 감사하며 효도하며 살겠습니다. 표현이 어색한 저를 대신해 부모님을 챙겨드리는 누나와 매형, 이모와 이모부에게 감사함을 전합니다. 하늘에 계신 할아버지께도 아쉬움과 그리움을 담아 이 글을 통해 감사의 마음을 전합니다.

다시 한번 도움을 주신 모든 분들에게 감사의 마음을 전합니다.

2021년 08월

김민창 올림