



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](#)

博士學位論文

폐배터리의 셀 적층 구조에
무관한 BMS 개발에 관한 연구

濟州大學校 大學院

에너지응용시스템학부 전기공학전공

安 珍 洪

2022 年 2 月

폐배터리의 셀 적층 구조에 무관한 BMS 개발에 관한 연구






指導教授 金 一 煥

安 珍 洪

이 論文을 工學 博士學位 論文으로 提出함

2021 年 12 月

安珍洪의 工學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長	이	개명	
委 員	최	영권	
委 員	진	영규	
委 員	고	희상	
委 員	김	일환	

濟州大學校 大學院

2021 年 12 月

A study on the development of BMS
independent of the cell stack structure of
waste batteries

Jin Hong Ahn
(Supervised by professor Eel-Hwan Kim)

A THESIS SUBMITTED IN PARTIAL FULFILLMENT
OF THE REQUIREMENTS FOR THE DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCE

MAJOR OF ELECTRICAL ENGINEERING
FACULTY OF APPLIED ENERGY SYSTEM
GRADUATE SCHOOL
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

2022. 2.

목 차

그림 목차	iii
표 목차	vi
SUMMARY	viii
I. 서 론	1
2. 리튬이온 배터리의 구성과 전기화학 반응	3
2.1 리튬이온 배터리의 구성	3
2.2 리튬이온 배터리의 전기화학 반응	4
2.3 리튬이온 배터리의 수학적 모델링	6
3. BMS 구성 및 기능	13
3.1 BMS의 구성	13
3.2 BMS의 기능	14
3.2.1 셀 밸런싱	14
3.2.2 충전과 방전	18
3.2.3 전압, 전류, 온도 계측	21
3.2.4 상태 진단 및 보호	23
4. 폐배터리 적용을 고려한 BMS 시스템 제안	24
4.1 제안된 BMS의 시스템 구성	24
4.2 제안된 폐배터리 적용 BMS 알고리즘	28
5. 제안된 BMS의 검증 및 분석	33
5.1 BMS 성능 및 배터리 고장 조건 시험	33
5.1.1 BMS의 계측 시험	33
5.1.2 BMS의 밸런싱 시험	38
5.1.3 배터리 고장 조건에서 BMS 동작 시험	41
5.2 BMS의 성능 시험 결과 분석	57
6. 제안된 BMS의 연계 시험 및 분석	58
6.1 충·방전 시뮬레이터 연계 시험 및 분석	59

6.1.1 폐배터리 연계 충전 시험	59
6.1.2 폐배터리 연계 방전 시험	64
6.1.3 폐배터리 연계 밸런싱 시험	68
6.2 폐배터리 연계 시험 결과 분석	72
7. 연계 시험 결과 비교 분석	73
7.1 충전 시험 결과 비교 분석	73
7.1.1 2P4S 구조의 시험 결과 비교 분석	73
7.1.2 2P6S 구조의 시험 결과 비교 분석	74
7.1.3 2P10S 구조의 시험결과 비교 분석	75
7.2 방전 시험 결과 비교 분석	77
7.2.1 2P4S 구조의 시험 결과 비교 분석	77
7.2.2 2P6S 구조의 시험 결과 비교 분석	78
7.2.3 2P10S 구조의 시험 결과 비교 분석	79
8. 결 론	82
참 고 문 헌	84

그림 목 차

Fig. 2.1 Electrode insertion/detachment process in lithium secondary battery	3
Fig. 2.2 R-series equivalent model of lithium-ion battery	7
Fig. 2.3 R-C Series Equivalent Model of Lithium-Ion Batteries	8
Fig. 3.1 Typical BMS block diagram	13
Fig. 3.2 Comparison of cell balancing technologies in the state of charge of lithium-ion batteries	15
Fig. 3.3 Passive balancing circuit	16
Fig. 3.4 Active balancing circuits (capacitors, inductors, transformers)	17
Fig. 3.5 Full capacity	17
Fig. 3.6 Mismatched discharge	18
Fig. 3.7 CC/CV(Constant Current/Constant Voltage)curve	19
Fig. 3.8 Comparison between open circuit and closed circuit	20
Fig. 3.9 Battery cell voltage measurement	21
Fig. 3.10 Current measurement method	22
Fig. 3.11 BMS health diagnosis and configuration of protection	23
Fig. 4.1 Proposed BMS block diagram	25
Fig. 4.2 Typical BMS passive balancing and cell voltage measurement circuits	26
Fig. 4.3 Proposed balance and voltage measurement circuit	27
Fig. 4.4 Proposed BMS board	28
Fig. 4.5 Algorithm for checking cell stack structure	31
Fig. 4.6 Balancing and failure algorithms	32
Fig. 5.1 Confirmation of 2P4S cell stack structure and status in the HMI	35
Fig. 5.2 Confirmation of 2P6S cell stack structure and status in the HMI	36
Fig. 5.3 Confirmation of 2P10S cell stack structure and status in the HMI	37
Fig. 5.4 Check cell stack structure errors and status in the HMI	38
Fig. 5.5 Check the balancing status of 2P4S in the HMI	39

Fig. 5.6 Check the balancing status of 2P6S in the HMI	40
Fig. 5.7 Check the balancing status of 2P10S in the HMI	41
Fig. 5.8 Check the over voltage status of 2P4S in the HMI	42
Fig. 5.9 Check the over voltage status of 2P6S in the HMI	43
Fig. 5.10 Check the over voltage status of 2P10S in the HMI	44
Fig. 5.11 Check the low voltage status of 2P4S in the HMI	46
Fig. 5.12 Check the low voltage status of 2P6S in the HMI	47
Fig. 5.13 Check the low voltage status of 2P10S in the HMI	48
Fig. 5.14 Checking the charging over current status of 2P4S in the HMI	49
Fig. 5.15 Checking the charging over current status of 2P6S in the proposed HMI	50
Fig. 5.16 Checking the charging over current status of 2P10S in the HMI	51
Fig. 5.17 Checking the discharging over current status of 2P4S in the HMI	52
Fig. 5.18 Checking the discharging over current status of 2P6S in the HMI	53
Fig. 5.19 Checking the discharging over current status of 2P10S in the HMI	54
Fig. 5.20 Check the temperature abnormality of 2P4S on the HMI	55
Fig. 5.21 Check the temperature abnormality of 2P6S on the HMI	56
Fig. 5.22 Check the temperature abnormality of 2P10S on the HMI	57
Fig. 6.1 Flow chart of charging/discharging test linked to waste battery	58
Fig. 6.2 Configuration diagram of charging/discharging test linked to waste battery	59
Fig. 6.3 2P4S cell charging graph using battery charger/discharger	60
Fig. 6.4 2P4S cell charging SOC	60
Fig. 6.5 2P6S cell charging graph using battery charger/discharger	61
Fig. 6.6 2P6S cell charging SOC	62
Fig. 6.7 2P10S cell charging SOC	63
Fig. 6.8 2P10S cell charging graph using battery charger/discharger	63
Fig. 6.9 2P4S cell discharging graph using battery charger/discharger	64
Fig. 6.10 2P4S cell discharging SOC	65

Fig. 6.11 2P6S cell discharging graph using battery charger/discharge	66
Fig. 6.12 2P6S cell discharging SOC	66
Fig. 6.13 2P10S cell discharging graph using battery charger/discharge	67
Fig. 6.14 2P10S cell discharging SOC	68
Fig. 6.15 Cell balancing graph in 2P4S structure	69
Fig. 6.16 Cell balancing graph in 2P6S structure	70
Fig. 6.17 Cell balancing graph in 2P10S structure	71
Fig. 7.1 Comparison of charging test results in 2P4S structure	73
Fig. 7.2 Comparison of charging test results in 2P6S structure	74
Fig. 7.3 Comparison of charging test results in 2P10S structure	76
Fig. 7.4 Comparison of discharging test results in 2P4S structure	78
Fig. 7.5 Comparison of discharging test results in 2P6S structure	79
Fig. 7.6 Comparison of discharging test results in 2P10S structure	80

표 목 차

Table 2.1 Types of lithium-ion batteries	4
Table 4.1 Register settings in hwinit.c	29
Table 5.1 Proposed cell stacking discrimination metrology test configuration of BMS	33
Table 5.2 Waste battery performance test items	33
Table 5.3 BMS status display items displayed on the software	34
Table 5.4 Check 2P4S structure and battery status using software	34
Table 5.5 Check 2P6S structure and battery status using software	35
Table 5.6 Check 2P10S structure and battery status using software	36
Table 5.7 Check cell structure errors and battery health using software	37
Table 5.8 Check balancing status in 2P4S structure using software	39
Table 5.9 Check balancing status in 2P6S structure using software	40
Table 5.10 Check balancing status in 2P10S structure using software	41
Table 5.11 Check over voltage status in 2P4S structure using software	43
Table 5.12 Check over voltage status in 2P6S structure using software	44
Table 5.13 Check over voltage status in 2P10S structure using software	45
Table 5.14 Check low voltage status in 2P4S structure using software	45
Table 5.15 Check low voltage status in 2P6S structure using software	46
Table 5.16 Check low voltage status in 2P10S structure using software	47
Table 5.17 Check charging over current status in 2P4S structure using software	48
Table 5.18 Check charging over current status in 2P6S structure using software	49
Table 5.19 Check charging over current status in 2P10S structure using software	50
Table 5.20 Check discharging over current status in 2P4S structure using software	51
Table 5.21 Check discharging over current status in 2P6S structure using	

software	52
Table 5.22 Check discharging over current status in 2P410S structure using software	53
Table 5.23 Check temperature abnormality in 2P4S structure using software	54
Table 5.24 Check temperature abnormality in 2P6S structure using software	55
Table 5.25 Check temperature abnormality in 2P10S structure using software	56
Table 6.1 Cell charging test results in 2P4S structure	61
Table 6.2 Cell charging test results in 2P6S structure	62
Table 6.3 Cell charging test results in 2P10S structure	64
Table 6.4 Cell discharging test results in 2P4S structure	65
Table 6.5 Cell discharging test results in 2P6S structure	66
Table 6.6 Cell discharging test results in 2P10S structure	68
Table 6.7 Cell balancing test results in 2P4S structure	69
Table 6.8 Cell balancing test results in 2P6S structure	69
Table 6.9 Cell balancing test results in 2P10S structure	70
Table 7.1 Comparison of charging test results in 2P4S structure	74
Table 7.2 Comparison of charging test results in 2P6S structure	75
Table 7.3 Comparison of charging test results in 2P10S structure	76
Table 7.4 Comparison accuracy of charging test results in 2P10S structure	77
Table 7.5 Comparison of discharging test results in 2P4S structure	77
Table 7.6 Comparison of discharging test results in 2P6S structure	78
Table 7.7 Comparison of discharging test results in 2P10S structure	80
Table 7.8 Comparison accuracy of discharging test results in 2P10S structure	81

SUMMARY

In this thesis, I would like to describe an integrated BMS (Battery Management System) that is not affected by the cell structure of the battery. Waste batteries that have been used for electric vehicles have 70-80% of their capacity compared to general new batteries, and because they are 1/10 of the price, they have a competitive edge in being able to be reused in other areas. BMS is the most basic technology because it is used to monitor the cell voltage, internal temperature and current status in real time in conjunction with the battery.

Of course, there is a BMS used for electric vehicles, but it is difficult to access other than the manufacturer and needs to be reconfigured so that it can be used in the application field to be applied. Most of the batteries for electric vehicles used in Korea have three cell structures: 2P4S, 2P6S, and 2P10S, and the BMS applied accordingly is different. If the same cell structure cannot be secured when applying the battery after use to various applications such as ESS, UPS, and agricultural machinery, it must be composed of a combination of different cell structures, but there are many restrictions because different BMSs must be used for each. As the demand for waste batteries increases and expectations for their use increase, we would like to propose an easy-to-access BMS for use in other fields by combining batteries without being constrained by the cell structure.

The proposed BMS is divided into power, communication, balancing and measurement, and micro-controller parts in hardware, and was designed using OrCAD. The power is used by converting the power of the associated battery to the required power level of the BMS board. For external communication, RS232 method was used and Renesas' RL78/G13 micro-controller was applied. The balancing of the connected battery was applied passively. The conventional method used a FET-type PWM switching device, but the

proposed BMS minimized switching noise and power loss by using a high-insulation photocoupler device. In addition, cell voltage measurement is monitored by the INA149 insulating element connected in parallel with the cell. If the cell voltage differs by more than 0.2V, the remaining cells lower the voltage through passive balancing based on the low cell voltage. At this time, since the magnitude of the discharge current is as small as 125mA, the discharge time is long. During discharge, the connected LED turns on to indicate that it is a balancing section.

In addition, temperature management is very important because the performance of the battery varies greatly depending on the temperature. The thermistor sensor that exists inside the battery is used. The temperature calculation uses the Steinhart-Hart formula, which is calculated by reading the resistance value. And the current of the battery is managed in real time by connecting a current sensing device (ACS721) to the BMS power supply. The SOC (State of Charge) measurement of the battery in the proposed BMS was estimated by applying the current integration method, which is calculated by integrating the current during the charge/discharge cycle of the battery to the initial SOC value of the battery as a method of counting the amount of charge. To increase the accuracy of external input signals such as cell voltage, temperature, and current, a first-order low-pass filter and moving average function were additionally applied to these signals.

The verification of the proposed BMS confirmed its accuracy, safety, and reliability through three tests.

Before linking the proposed BMS to the battery, the DC Power Supply was used to verify the accuracy of the input value measurement of the monitoring voltage to verify the performance of the developed product. In the failure (overvoltage, undervoltage, overcurrent, temperature abnormality) test and battery status (temperature, current cell voltage, operation status) measurement, the fault level signal was arbitrarily set in the program and the value displayed on the HMI was compared with the input value.

The following is a BMS test in connection with charging/discharging equipment. In all cell structures (2P4S, 2P6S, 2P10S), the cell voltage is in the range of $4.0V \leq \text{Cell Voltage} \leq 3.6V$. The corresponding SOC was carried out while applying a charge/discharge current of $\pm 5A$ in the 95-85% section. The cell balancing test was confirmed by arbitrarily applying a balancing operation signal. The proposed BMS stability was confirmed through this test.

Finally, the reliability of the proposed BMS system was verified through comparison with the charge/discharge data of waste batteries.

I. 서 론

탄소중립사회 전환에 세계적인 관심이 증가함에 따라, 친환경 이동수단과 동력원에 대한 연구가 지속적으로 진행되고 있으며, 특히 전기차 산업의 핵심 분야인 리튬이온 배터리 시장이 급성장하고 있다. 2021년 상반기 플러그인 하이브리드(PEV)와 하이브리드차(HEV)까지 포함한 전기차 리튬이온 배터리의 사용량은 총 65.9GWh로 2020년 동기간 사용량인 24.8GWh보다 45.9%의 사용량이 증가하였으며, 국내의 경우 21.1GWh이다[1]. 전기차의 리튬이온 배터리는 일반적으로 10년 정도 사용하면 성능이 급격히 저하된다. 1회 충전 시 주행가능 거리가 300~400km를 기준으로, 15만~20만km의 주행거리를 운행하였을 때, 전기차 배터리로써의 수명이 70~80%가 남게 되며 주행거리의 감소 및 충·방전 속도 저하 등으로 인해 전기자동차 용도로의 사용이 어렵게 되면 폐배터리가 된다[1].

폐배터리는 재사용(Reuse)을 목적으로 배터리 시험기관에서 시행하는 성능검사 및 등급분류(A,B,C,D)를 통해 재사용 여부를 판단한다[2]. D등급 및 외부 손상이나 크랙 등으로 인한 리튬이온의 화학적 특성 변화의 우려가 있을 경우 유가금속 회수 공정기술로 배터리를 분해하여 코발트, 니켈, 망간 등을 추출한다[1]. 재사용은 A, B, C 등급에 따라 신재생에너지용 소규모 ESS, 전기 선박, 양식장 UPS, 가정용 ESS, 서버용 UPS 뿐만 아니라 캠핑용 배터리 뱅크, 전기자전거, 전동스쿠터, 농업용 분야의 트랙터, 리프트카, 지게차, 전동리어카 등 다양한 산업에 걸쳐 활용이 가능하다[2].

폐배터리는 리튬이온 배터리로써, 양극과 음극 소재의 산화·환원 반응으로 인해 화학 에너지를 전기에너지로 만들어 내며, 낮은 자기방전율, 긴 충·방전수명, 높은 충·방전 전류량 등의 강점이 있으나, 과충전, 과방전 및 온도 변화에 의한 배터리의 급격한 수명저하, 폭파 및 화재로의 안전성 문제가 대두되고 있다. 이러한 이슈를 극복하기 위해서는 안정적인 운영의 BMS(Battery Management System, 이하 BMS)가 반드시 필요하며, 전기차 배터리를 재사용 및 재제조를 할 경우 상대적으로 강인한 제어 알고리즘이 반영되어야 한다[3]. BMS는 리튬이온 배터리가 충전과 방전의 동작 동안 과충전 및 과방전, 셀 간의 불균형 문제를 방지하기 위한 실시간 전압측정을 통한 평형화, 배터리 제어기로의 상태 데이터

전송 등의 기능을 보유해야하며, 이를 바탕으로 배터리의 온도, 전압, 전류 측정, 충·방전 제어, 충전상태(State Of Charge, 이하 SOC), 건강상태(State Of Health, 이하 SOH), 출력전력 예측, 적용 대상과의 인터페이스 및 통신 등을 관리할 수 있어야 한다[3].

전기차의 배터리는 가속과 감속, 오르막, 내리막, 운전거리 등의 운전자의 성향과 온도, 습도, 먼지 등의 환경적인 요인으로 인한 배터리의 출력 특성이나 용량에 변화가 생길 수 있기 때문에, 전기차에 사용이 종료 된 배터리를 다른 어플리케이션에 적용하여 재활용하기 위해서는 기존 배터리의 셀 전압 및 SOC 관리에 각별한 노력이 필요하다. 따라서 BMS의 동작 성능 개선이 필요하며, 또한 좁아진 동작영역을 일부 보상하기 위한 BMS 구성 소자들의 소비전력 저감 방안도 추가적으로 고려해야할 필요가 있다. 그리고 다른 한편으로는 폐배터리 간의 다른 셀 적층 구조 결합에 대한 문제도 존재한다. 국외의 경우 생산자책임제도에 따른 자동차 제조사의 산업장악으로 동일 배터리의 셀 구성 조합의 이점을 가지고 폐배터리 시장이 형성되고 있다. 하지만 국내의 경우 공공 기반 시설 및 중·소기업 중심의 어플리케이션 활용 시장이 형성되었기 때문에 차종별, 연식별, 제조사별 배터리의 구성과 출력특성이 상이함을 고려하여, 안정적인 운영을 위한 통합 관리시스템이 마련되어야 한다[4].

본 논문에서는 폐배터리의 BMS 원활한 활용을 위해서 셀 밸런싱과 계측의 구조적인 개선을 통하여 절연 보강과 스위칭 노이즈에 인한 오류 발생 저감 방안을 제안하고, 폐배터리의 셀 적층 구조에 영향을 받지 않는 제어 알고리즘과 필터의 이중화를 통한 계측의 정확도와 안전성을 높이는 방안을 제안한다.

제안된 BMS의 검증은 셀 적층 구조 확인, 전압, 전류, 온도의 계측과 고장 상황에 따른 동작상태 확인과 수동형 셀 밸런싱의 성능 시험을 통하여 정확성을 확인하며, 충·방전 시뮬레이션 장비를 활용하여 실제 2P4S, 2P6S, 2P10S에 제안된 BMS를 연계하고 충전과 방전 및 셀 밸런싱 시험을 통하여 안전성을 확인하고자 한다.

마지막으로 본 시험을 통하여 얻어진 결과를 제주테크노파크에서 진행한 동일 폐배터리 규격의 충·방전 시험 결과와의 비교를 통하여 제안된 BMS의 연계 시험 결과에 대한 유효성을 확인한다.

2. 리튬이온 배터리의 구성과 전기화학 반응

2.1 리튬이온 배터리의 구성

리튬이차전지는 가역적으로 리튬이온의 삽입 및 탈리가 가능한 물질을 양극 및 음극으로 사용하고 양극과 음극사이에 유기 전해액 또는 고분자 전해액을 넣어 리튬이온의 원활한 이동을 가능하게 하며, Fig. 2.1의 양극 및 음극에서 삽입/탈리될 때 일어나는 전기화학적 산화, 환원 반응에 의하여 발생하는 전자가 전기에너지를 생성한다[5][6].

리튬이차전지는 일반적으로 전이금속산화물(transition metal oxide)을 양극 소재로, 탄소를 음극소재로 사용하며, 전해질로 액체전해질을 사용할 경우 이를 리튬이온전지(lithium-ion batteries, LiB)라 하며, 고분자 전해질을 사용하면 리튬이온폴리머전지(lithium-ion polymer batteries, LiPB)라 부른다[7].

리튬이온 배터리의 형태에 따라, Table 2.1과 같이 원형, 각형, 파우치형으로 구분된다. 리튬이온 전지에서 원통형 배터리는 원통 형태의 고용량/고에너지 배터리로, 순간적으로 많은 전력을 요구하는 가드닝 공구 및 전동 공구 등에 사용된다. 하지만, 소형화가 어려워 소형 IT 기기에 적합하지 않아, 얇은 형태의 각형 배터리가 개발되었다.

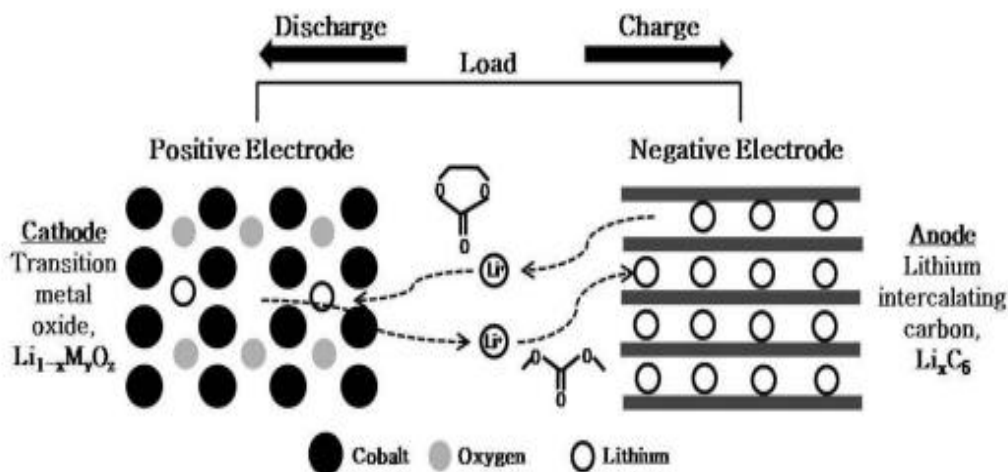


Fig. 2.1 Electrode insertion/detachment process in lithium secondary battery[5]

Table 2.1 Types of lithium-ion batteries[8]

cylindrical	square	pouch type
		

각형 배터리는 알루미늄 캔으로 이루어졌기에 구조적 안정성이 필요한 전기차용 배터리에도 보급되고 있다. 파우치형 배터리는 외관이 얇아, 모양 설계가 원형 및 각형 대비 용이하다. 또한, 제조 공정이 간단해 대량생산이 가능하고 용도에 따라 크기 및 용량 변화가 가능해 급속도로 성장 중이다[8].

리튬이차전지의 구성요소는 다음과 같다. 양극의 경우 리튬이 격자 구조의 일부분을 이루고 있다가 탈리 시에 이온의 형태로 빠져나오기 때문에 구조적으로 안정한 전이금속계 산화물 소재를 주로 사용하고 있으며, 음극은 양극에서 빠져나온 리튬이온을 안정하게 저장하고 큰 기전력을 제공할 수 있도록 그 표준 환원 전위가 리튬과 크게 차이가 나지 않는 물질을 사용한다. 전해질의 경우 작동전압 범위 내에서 전기 화학적 안정성을 유지하고 열 및 화학적 안정성이 높은 리튬염과 유기 용매를 사용한다. 이 외에 양극과 음극의 전기적 접촉에 의한 단락을 방지하기 위한 분리막으로 고온에서 용융될 수 있는 고분자 또는 세라믹 물질을 사용한다[7].

2.2 리튬이온 배터리의 전기화학 반응

리튬이온 배터리가 방전 시, 전지에서 전기화학 반응은 전지가 생산해 낼 수 있는 전기적 에너지와 상관관계를 가진다. 주어진 전극에서 전기화학 반응식 다음과 같이 표현된다.



여기서 p, q, r, s 는 A, B, C, D 화학종에 대한 각각의 양론계수를 의미한다. 위

반응식에 관한 Gibbs 자유에너지 변화를 활동도 a 에 관한 식으로 표현할 수 있으며, 식(2.2)와 같다[9].

$$\Delta G = \Delta G^0 + RT \ln(a_C^r a_D^s / a_A^p a_B^q) \quad (2.2)$$

전지가 평형상태에서 얻을 수 있는 일(W_{rev})은 최대의 일(W_{max})에 해당하며 식(2.3)과 같이 나타낼 수 있다. 전기화학 반응 진행 동안의 Gibbs 자유에너지 ΔG 로 나타낼 수 있으며 다음 식(2.4)와 같이 표시된다.

$$W_{rev} = W_{max} \quad (2.3)$$

$$-W_{max} = \Delta G \quad (2.4)$$

한편, 전기적 에너지는 전지 내를 흐르는 전하 Q (charge, 단위: coulomb, C) 및 전위차(E)는 다음과 같은 관계가 있다.

$$-W_{max} = QE \quad (2.5)$$

이때 Q 는 전지 내 전자의 개수와 전자의 전하량(e) 곱으로 식(2.6)과 같이 나타낼 수 있다. 전자 개수(n_e)는 전자의 몰 수와 아보가드로수($N_A, 6.023 \times 10^{23}$)의 곱에 해당하며, Q 를 전자의 몰 수(n)와 전자의 전하량으로 나타내면 식(2.7)과 같다.

$$Q = n_e e \quad (2.6)$$

$$Q = n N_A e \quad (2.7)$$

또한, 전하 Q 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = n F \quad (2.8)$$

여기서 F 는 Faraday 상수로서, 전자 1몰에 해당하는 전하량($96,485 \text{ C/mol}$)이다. 따라서 전지의 두 전극이 서로 다른 전위를 갖는다면 그 전위차로 인해 n 몰의 전자가 이동할 때 전지가 행하는 전기적 일은 식(2.9)로 나타낼 수 있다.

$$W_{\max} = nFE \quad (2.9)$$

식(2.10)은 전지에서 일어나는 전기화학 반응에 의한 평형상태에서의 Gibbs 자유 에너지 변화와 전지로부터 얻을 수 있는 기전력과의 관계를 보여준다.

$$\Delta G = -nFE \quad (2.10)$$

전기화학 반응에 참가하는 반응물과 생성물들이 모두 표준상태인 경우에 전지의 전위는 표준 전위, E^0 로 나타낸다.

$$\Delta G^0 = -nFE^0 \quad (2.11)$$

식(2.2)와 식(2.11)로부터 다음과 같이 Nernst식이 얻어지고, 전위차는 전기화학 반응에 참여하는 성분들의 농도에 의해 영향을 받는다[7].

$$E = E^0 - RT/nF \ln(a_C^r a_D^s / a_A^p a_B^q) \quad (2.12)$$

따라서, 실제적으로 배터리의 특성을 반영하여 그 동특성을 반영하려면 앞서 언급한 모든 내용이 회로분석 및 시뮬레이션 시 포함되어야 한다. 하지만 이는 연산량 증가 및 공학적 직관확보에 어려움을 주기 때문에, 등가화 된 회로를 이용한 수학적 모델링을 일반적으로 많이 사용한다[10][11].

2.3 리튬이온 배터리의 수학적 모델링

Fig. 2.2는 리튬이온 배터리의 등가 직렬 모델이다. 배터리의 SOC를 정량화하려면 완전히 충전되었을 때의 셀이 보유하고 있는 전하량과 완전히 방전되었을 때 남아 있는 전하량을 알아야 한다. 따라서 셀의 총 충전 용량을 $z=100\%$ 에서 $z=0\%$ 로 셀을 방전할 때 제거된 총 전하량으로 정의된다. 총 용량은 일반적으로 Ah 또는 mAh로 측정되며 기호 Q 로 표시되며, 상미분 방정식을 통하여 식(2.13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\dot{z}(t) = -\eta(t)i(t)/Q \quad (2.13)$$

여기서 시간에 대한 도함수를 나타내기 위해서 'dot'를 사용하며, $\eta(t)$ 는 셀의 쿨롱 효율 또는 전하효율이고, $i(t)$ 의 부호는 방전 시 양수이다. 따라서 양(방전)의 전류는 셀의 SOC를 낮추고, 음(충전)의 전류는 셀의 SOC를 증가 시킨다. 여기서 $i(t)$ 는 암페어로 측정되며, 호환이 가능하려면 Q 를 쿨롱(암페어-시간)으로 변환해야한다.

본 모델은 배터리의 개회로전압(Open Circuit Voltage, 이하 OCV)를 나타내는 직류전압원과, 기생직렬저항 R_0 로 구성된다. R_0 가 존재하기 때문에 충전 시 외부에서 인가되는 전압보다 개회로 전압이 낮아지며 마찬가지로 방전 시 부하에 인가되는 전압은 실제 개회로 전압보다 낮아진다. 부하와 연결되는 단자 전압은 식(2.14)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t) = OCV(z(t)) - i(t)R_0 \quad (2.14)$$

$v(t) > OCV(z(t))$ 일 때 $i(t) < 0$ (충전 할 때)이고 $v(t) < OCV(z(t))$ 일 때 $i(t) > 0$ (방전할 때)이다. 이것은 실제 셀 성능에 중요한 부분이며 이산 시간에서 등가 모델은 셀의 총 충전용량 식(2.13)과 단자 전압 식(2.14)는 식(2.15)와 식(2.16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$z[k+1] = z[k] - \frac{\Delta t}{Q} \eta[k] i[k] \quad (2.15)$$

$$v[k] = OCV(z[k]) - i[k]R_0. \quad (2.16)$$

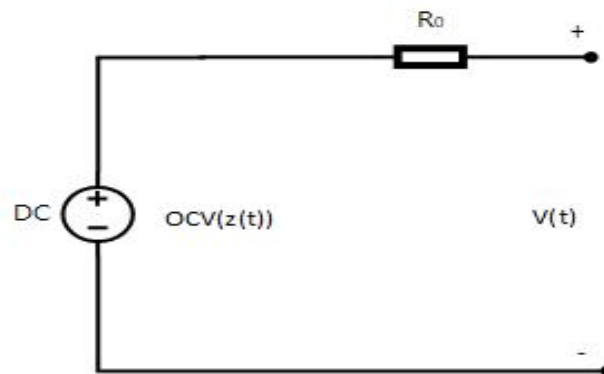


Fig. 2.2 R-series equivalent model of lithium-ion battery

R_0 는 전압강하 이외에 전력손실에도 기여할 수 있어 효율을 감소시키며, 또한 열을 발생시켜 배터리의 수명 단축에도 영향을 미친다. 등가 직렬 저항 R_0 의해 소비되는 전력은 $i^2(t) \times R_0$ 로 표현될 수 있다. 본 관계를 통해서 알 수 있듯이, R_0 는 배터리의 동작특성보다는 손실에 의한 열 발생 그리고 일차함수 관계에 있는 전압강하만 유추 가능하며, 배터리 셀에 흐르는 전류가 개방 회로 전압에 미치는 영향인 분극현상을 유추할 수는 없다. 따라서 RC 직렬 등가모델이 제안되었으며 Fig. 2.3과 같다. 본 모델은 R_0 이외에도 분극 현상을 나타낼 수 있는 직렬 기생저항 R_1 과 커패시터 C_1 을 포함한다. 그러므로, 실제 배터리 셀을 표현하기에는 충전과 방전시의 특성 및 분극현상을 간단하게나마 표현 할 수 있는 본 모델을 사용하는 것이 전체 시스템의 동작특성 고려에 도움이 된다.

연속 시간의 등가 모델에서 전압 방정식은 다음과 같이 계산 할 수 있다.

$$v(t) = OCV(z(t)) - v_{C_1}(t) - v_{R_0}(t) \quad (2.17)$$

이산 시간의 등가 모델의 경우

$$v(k) = OCV(z(k)) - v_{C_1}(k) - v_{R_0}(k) \quad (2.18)$$

전류의 관점에서 본 연속 시간의 등가 모델의 경우 식(2.19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$v(t) = OCV(z(t)) - R_1 i_{R_1}(t) - R_0 i(t) \quad (2.19)$$

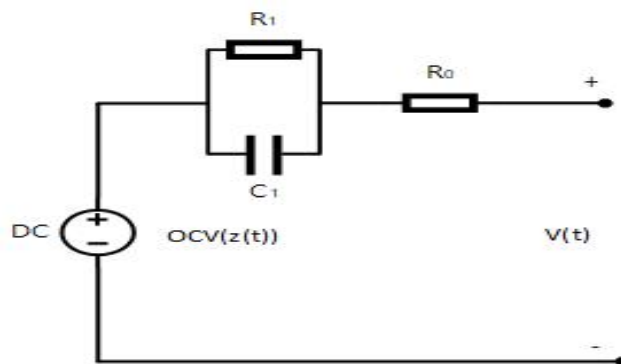


Fig. 2.3 R-C Series Equivalent Model of Lithium-Ion Batteries

이산 시간의 등가 모델의 경우 식(2.20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v(k) = OCV(z(k)) - R_1 i_{R_1}(k) - R_0 i(k) \quad (2.20)$$

저항 전류 $i_{R_1}(t)$ 에 대한 식을 다음과 같이 찾는다. 우선 R_1 과 C_1 을 통한 전류 $i(t)$ 가 같아야 한다면, $i_{C_1}(t) = C_1 \dot{v}_{C_1}(t)$ 이므로, 식(2.21)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{R_1}(t) + C_1 \dot{v}_{C_1}(t) = i(t) \quad (2.21)$$

여기서 $v_{C_1}(t) = R_1 i_{R_1}(t)$ 이므로 식(2.22)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{R_1}(t) + R_1 C_1 \frac{di_{R_1}(t)}{dt} = i(t) \quad (2.22)$$

식(2.22)를 다시 정리하면 식(2.23)과 같다.

$$\frac{di_{R_1}(t)}{dt} = -\frac{1}{R_1 C_1} i_{R_1}(t) + \frac{1}{R_1 C_1} i(t) \quad (2.23)$$

이 미분방정식의 $i_{R_1}(t)$ 을 연속 시간으로 변환하면 식(2.24)와 같다.

$$\dot{x}(t) = ax(t) + bu(t) \quad (2.24)$$

이산 시간 $x(t)$ 는 $t = k\Delta t$ 에서 $x[k] = x(k\Delta t)$ 이다. 입력 $u(t)$ 의 샘플링 간격이 일정하다고 가정한다면 식(2.24)를 식(2.25)와 같이 나타낼 수 있다.

$$x(t) = e^{at} x(0) + \underbrace{\int_0^t e^{a(t-\tau)} bu(\tau) d\tau}_{\text{convolution}} \quad (2.25)$$

식(2.25)를 통해, 상미분 방정식이 응답 초기 조건 $x(0)$ 와 입력신호 $u(t)$ 에 기반한다는 것을 확인할 수 있다. 상미분 방정식이 안정적이라면, $a < 0$ 와 초기 조건의 기여도가 감소하기 때문에 정상상태에서 영향이 지배적인 입력신호의 영향을 확인할 필요가 있다. 정상상태에서 입력신호의 영향은 합성곱 적분을 이용하여 구할 수 있으며, 절차는 아래와 같다. 우선, 식(2.25)를 식(2.26)과 같이 재정렬 한다.

$$\dot{x}(t) - ax(t) = bu(t) \quad (2.26)$$

식(2.26)의 양변에 e^{-at} 을 곱한다.

$$e^{-at}(\dot{x}(t) - ax(t)) = e^{-at}bu(t) \quad (2.27)$$

식(2.27)의 좌변이 $\frac{d}{dt}[e^{-at}x(t)]$ 일 때, 식(2.28)과 같이 쓸 수 있다.

$$\frac{d}{dt}[e^{-at}x(t)] = e^{-at}bu(t) \quad (2.28)$$

적분 내부의 t 를 τ 로 치환한 뒤, 이 방정식의 양변을 시간 0과 t 사이에 대하여 적분하면 다음과 같다.

$$\int_0^t \frac{d}{d\tau}[e^{-a\tau}x(\tau)]d\tau = \int_0^t e^{-a\tau}bu(\tau)d\tau \quad (2.29)$$

$$\int_0^t d[e^{-a\tau}x(\tau)] = \int_0^t e^{-a\tau}bu(\tau)d\tau \quad (2.30)$$

여기서 식(2.30)의 좌변은 식(2.31)과 같다.

$$e^{-a\tau}x(\tau)|_0^t = e^{-at}x(t) - x(0) \quad (2.31)$$

이므로, 식(2.32)로 나타낼 수 있다.

$$e^{-at}x(t) - x(0) = \int_0^t e^{-a\tau}bu(\tau)d\tau \quad (2.32)$$

$x(0)$ 가 우변으로 이동하고 양변에 e^{at} 를 곱하면 앞선 식(2.25)와 같은 결과가 된다. 0이 결과 값을 가지고 이산 시간 관계를 찾으려면 아래와 같다.

$$x[k+1] = x((k+1)\Delta t) \quad (2.33)$$

$$= e^{a(k+1)\Delta t}x(0) + \int_0^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)}bu(\tau)d\tau \quad (2.34)$$

식(2.34)에서 적분항을 두 개로 나누면, 아래와 같고,

$$\begin{aligned} x[k+1] &= e^{a(k+1)\Delta t}x(0) + \int_0^{k\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)}bu(\tau)d\tau \\ &\quad + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)}bu(\tau)d\tau \end{aligned} \quad (2.35)$$

식(2.35)에서 처음 두 항을 $e^{a\Delta t}$ 로 인수분해 한다.

$$\begin{aligned} x[k+1] &= e^{a\Delta t} e^{ak\Delta t} x(0) + e^{a\Delta t} \int_0^{k\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \\ &\quad + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.36)$$

식(2.36)은 식(2.37)처럼 다시 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x[k+1] &= e^{a\Delta t} (e^{ak\Delta t} x(0) + \int_0^{k\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau) \\ &\quad + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \\ &= e^{a\Delta t} x(k\Delta t) + \int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{a((k+1)\Delta t - \tau)} bu(\tau) d\tau \end{aligned} \quad (2.37)$$

마지막으로 이산 시간 표기법을 사용하여 식(2.38)과 같이 나타내었다.

$$x[k+1] = e^{a\Delta t} x[k] + e^{a(k+1)\Delta t} \left(\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{-a\tau} bu(\tau) d\tau \right) \quad (2.38)$$

남아있는 적분에서 $u(t)$ 는 $k\Delta t$ 에서 $(k+1)\Delta t$ 까지 일정하고 $u(k\Delta t)$ 와 같다고 가정하면, 식(2.39)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x[k+1] &= e^{a\Delta t} x[k] + e^{a(k+1)\Delta t} \left(\int_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} e^{-a\tau} d\tau \right) bu[k] \\ &= e^{a\Delta t} x[k] + e^{a(k+1)\Delta t} \left(-\frac{1}{a} e^{-a\tau} \Big|_{k\Delta t}^{(k+1)\Delta t} \right) bu[k] \\ &= e^{a\Delta t} x[k] + \frac{1}{a} e^{a(k+1)\Delta t} (e^{-ak\Delta t} - e^{-a(k+1)\Delta t}) bu[k] \\ &= e^{a\Delta t} x[k] + \frac{1}{a} (e^{a\Delta t} - 1) bu[k] \end{aligned} \quad (2.39)$$

이것은 앞선 식(2.24)의 연속 시간 상미분 방정식에 해당 하는 일반 이산 시간 방정식이다. 이 결과를 배터리 셀 모델에 사용하기 위해 앞선 식(2.24)와 식(2.25)에서 상수 간 대응 관계는 식(2.40)같이 나타낼 수 있다.

$$a = -\frac{1}{R_1 C_1}, \quad b = \frac{1}{R_1 C_1}, \quad (2.40)$$

그리고 신호간의 대응은 식(2.41)과 같다.

$$x[k] = i_{R_1}[k] \text{ 과 } u[k] = i[k] \quad (2.41)$$

저항 전류의 식(2.41)에 대한 이산 시간은 식(2.42)와 같다.

$$\begin{aligned} i_{R_1}[k+1] &= \exp\left(-\frac{\Delta}{R_1 C_1}\right) i_{R_1}[k] \\ &\quad + (-R_1 C_1) \left(\exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) - 1\right) \left(\frac{1}{R_1 C_1}\right) i[k] \\ &= \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) i_{R_1}[k] + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) i[k] \end{aligned} \quad (2.42)$$

결과적으로 Fig. 2.3의 등가 회로를 설명하는 연속 시간의 표현은 식(2.43)으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{z}(t) &= -\eta(t)i(t)/Q \\ \frac{di_{R_1}(t)}{dt} &= \frac{1}{R_1 C_1} i_{R_1}(t) + \frac{1}{R_1 C_1} i(t) \\ v(t) &= OCV(z(t)) - R_1 i_{R_1}(t) - R_0 i(t) \end{aligned} \quad (2.43)$$

회로를 설명하는 이산 시간의 수학적 모델은 다음 세 개의 결합 방정식으로 구성된다.

$$\begin{aligned} z[k+1] &= z[k] - \frac{\Delta t}{Q} \eta(k) i(k) \\ i_{R_1}[k+1] &= \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right) i_{R_1}(k) + \left(1 - \exp\left(-\frac{\Delta t}{R_1 C_1}\right)\right) i(k) \\ v(k) &= OCV(z(k)) - R_1 i_{R_1}(k) - R_0 i(k) \end{aligned} \quad (2.44)$$

마지막으로 셀의 확산 전압에 대한 응답은 일반적으로 셀의 충전 상태와 내부 온도의 함수이기 때문에 R_1 과 C_1 을 $z(t)$ 와 $T(t)$ 의 함수로 수학적 모델링을 한다면 예측의 정확도가 향상될 수 있다[12].

3. BMS 구성 및 기능

3.1 BMS의 구성

BMS(Battery Management System)는 사용자나 적용환경에 따라서, 배터리 모니터링으로 사용되며, 충전 및 방전 중 전압과 전류, 배터리 내부 및 주변 온도와 같은 주요 작동 매개변수 확인에 쓰일 수도 있다. 좁은 의미의 BMS 모니터링 회로는 특정 변수가 한계를 벗어난 경우 경보를 발생시키거나 부하 또는 충전기에서 배터리를 분리하는 보호 장치의 동작신호를 생성하는 회로부를 의미한다. 하지만 넓은 의미에서 BMS는 전반적인 배터리 관리 시스템을 의미하며, 배터리의 모니터링 및 보호뿐만 아니라, 요청 시 최대 전력을 제공할 수 있도록 배터리를 유지하는 방법과 장시간 사용이 가능하도록 하는 관리 알고리즘을 포함하며, 추가적으로 충전 관리 제어에서 계획된 유지 보수기능 까지 수행해야 한다. 특히 이차전지를 사용하는 자동차내의 BMS는 훨씬 더 복잡하고 빠르게 동작하는 에너지 관리 시스템의 구성요소이며, 엔진관리, 기후 제어, 통신 및 안전 시스템과 같은 다른 온보드 시스템과의 인터페이스까지 관리하는 역할을 한다[13].

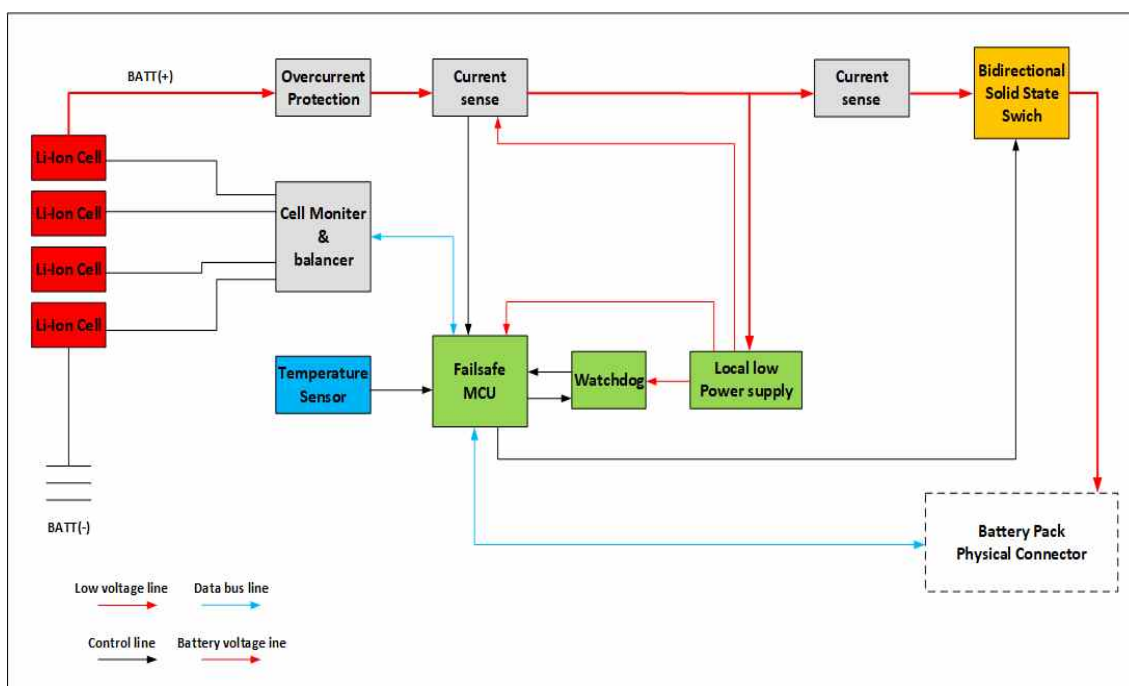


Fig. 3.1 Typical BMS block diagram[14]

Fig. 3.1은 일반적인 BMS의 블록다이어그램이며, 직렬로 셀이 연결되어 있다. BMS의 셀 모니터와 밸런서의 부분은 모든 셀 전압을 계측하고 전압 불평형 발생 시 밸런싱 동작을 통해서 전압을 균일하게 해주며, 충전과 방전 동작에서 셀의 전압이 과전압 또는 저전압 발생 시 MCU로 동작 정지 신호를 보낸다.

퓨즈는 단락 고장이 발생하면 동작하여 셀을 보호해야 한다. 여기서 MCU는 끊어진 퓨즈의 상태를 전달할 수 있어야 하므로 MCU의 전원 공급 장치가 퓨즈보다 먼저 있어야 한다[15].

전류 측정은 전압형태로 변환 되어 MCU로 직접 연결된다. 전류의 계측은 일반적으로 쿨롱 카운터 방식인 전류적산법을 적용하여 배터리의 SOC를 추정한다. 온도 센서는 배터리의 내부 온도를 실시간으로 모니터링하여 그 결과를 MCU로 전송해준다.

3.2 BMS의 기능

앞서 언급했듯이, BMS의 기능은 배터리 시스템의 안정적인 운영을 목적으로 사용된다. 따라서 주된 기능은 배터리와 연계된 어플리케이션의 동작에 따른 정확한 충전과 방전, 셀 간 전압차 발생 시 밸런싱 기술[16]과, 배터리의 열화를 방지하기 위한 일정 수준의 SOC 영역관리, 동작점 이상의 온도 변화 시 검출할 수 있는 기능, 그 외의 외란 발생 시 배터리 셀의 상태를 진단하고 보호하는 기능을 반드시 포함해야 한다. 본 챕터에서는 위의 내용을 아래의 4가지 범주로 나눠 서술하고자 한다.

- 셀 밸런싱
- 충전과 방전
- 전압, 전류, 온도 계측
- 상태 진단 및 보호

3.2.1 셀 밸런싱

셀 밸런싱은 배터리의 모듈 내에 존재하는 셀들이 직렬 혹은 병렬의 적층 구조로 연결되어 있을 때, 전압을 동일하게 맞추는 것이다. 일반적으로 리튬이온 배터리의

셀 전압 범위는 2.5~4.2V 이내에서 유지해야 하며 이를 벗어났을 경우 화재가 발생할 수 있다. 하나 이상의 셀을 사용할 경우, 초기에는 전압이 동일하지만, 빈번한 충전과 방전이 지속됨으로 인해 셀 간 전압 편차가 발생한다. 예를 들어 2개의 셀이 존재하는데 첫 번째 셀의 전압이 4.2V이고 두 번째 셀의 전압이 4.0V이면 첫 번째 셀의 전압이 이미 충분한 상태이기 때문에 충전을 할 수 없게 되므로 점점 전체의 충전용량이 줄어들게 된다. 이런 경우 셀 밸런싱 기술이 사용되며, 일반적으로 밸런싱은 배터리가 충전 모드 진입 전에 셀 간 전압이 오차범위 밖에 있을 경우 밸런싱을 시작하고, 이후 배터리의 충전을 시작하게 된다. 전지 밸런싱에는 수동형과 능동형 방식이 있다. 수동형은 셀 전압 중 제일 낮은 전압을 기준으로 나머지 셀의 전압을 소비하여 맞추는 방식이고, 능동형은 높은 전압의 셀의 에너지를 낮은 전압의 셀로 이동시켜 재분배하는 방식이다[17]. 이 두 가지 방법에 대한 분류는 배터리의 SOC를 기준으로 Fig. 3.2와 같이 나타낼 수 있다. 셀1~4까지 배터리 모듈에서 직렬로 연결되어 있다면, 밸런싱 전 셀의 L1, L2, L3, L4의 SOC 레벨은 각각 40%, 60%, 80%, 100%이다. 수동형 셀 밸런싱 기술은 더 높은 SOC 셀에서 에너지를 소비하여 셀의 SOC를 균등화하여 가장 낮은 셀의 L1 레벨인 40%로 맞춰지게 된다. 마찬가지로, 활성 셀 밸런싱 에너지에서 가장 높은 SOC 셀 4(100%의 SOC L4)에서 가장 낮은 SOC 셀 2(40%의 SOC L1)로 에너지를 전달한다. 그리고 셀 1의 SOC(80%의 SOC L3)를 셀 3의 SOC(60%의 SOC L2)로 전달하므로 모든 셀의 수준은 70%로 동일해진다.

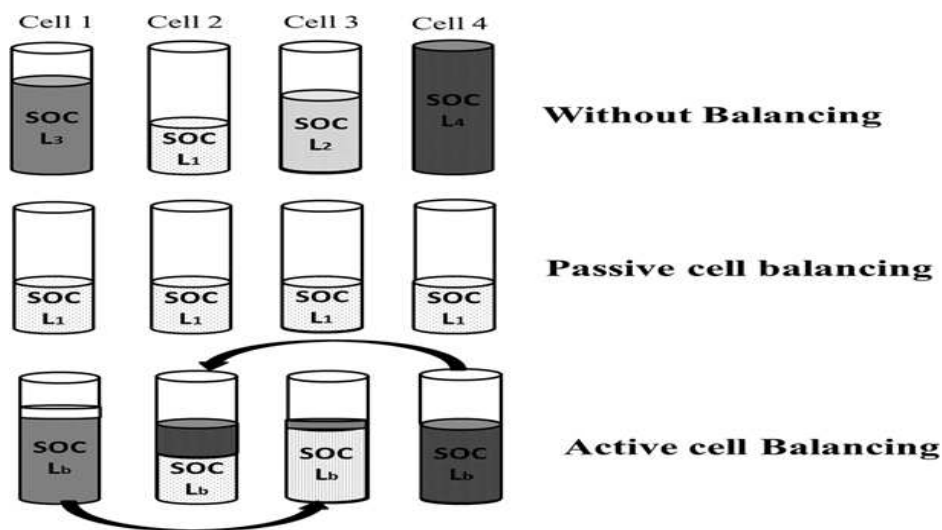


Fig. 3.2 Comparison of cell balancing technologies in the state of charge of lithium-ion batteries[18]

(1) 수동형 셀 밸런싱

수동형 밸런싱은 셀의 연결 구조에서 가장 낮은 전압을 기준으로 나머지 셀의 전력을 저항을 통해 열로 소산시켜 전압을 동일하게 만들어 주는 간단한 구조이다. Fig. 3.3과 같이 모든 셀은 각각 병렬의 스위칭IC와 직렬의 방전저항이 연결되어 있는 간단한 회로 구성으로 되어있어서 신뢰성이 높고 비용도 저렴하다. 여기서 $V_1, V_2, V_3, V_4, \dots, V_n$ 은 직렬 연결된 셀 전압이고, $Q_1, Q_2, Q_3, Q_4, \dots, Q_n$ 은 반도체 스위칭 소자이다. 각 셀과 $R_1, R_2, R_3, R_4, \dots, R_n$ 은 각 배터리의 방전 저항이다. 본 방식은 배터리 셀 간 전압 불균형 발생 시, 반도체 스위치 또는 릴레이를 이용하여 직렬 연결된 저항으로 에너지를 방전시키고, 결과적으로 셀 전압의 균형을 유지한다.

수동형 밸런싱을 사용하면 모든 셀이 동일한 SOC를 가질 수 있지만 저항 값이 크지 않기 때문에 방전시간이 길어질 수 있고, 저항 내에서 에너지가 열로 손실되기 때문에 효율이 떨어질 수 있다.[19]

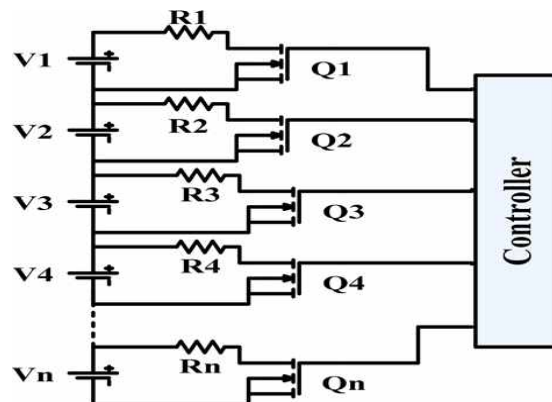


Fig. 3.3 Passive balancing circuit[18]

(2) 능동형 셀 밸런싱

능동형 밸런싱은 저항을 통한 에너지 방전을 하지 않는다. 배터리 내부의 높은 전압을 가진 셀에서 낮은 전압을 가진 셀로 에너지가 재분배 된다. 재분배에는 Fig. 3.4와 같이 콘덴서, 인덕터, 변압기를 활용한 방식 등이 있다. 본 방식은 수동형 밸런싱 방식에 비해 효율 개선 측면에서는 장점을 지니지만, 시스템이 복잡해짐에 따라 제어의 어려움이 발생하고 그에 따른 비용이 상승하는 단점이 있다. 최근에는

능동형 밸런싱 방식이 IC 소자 형태로 출시되어 시스템이 복잡성은 줄어들었으나 여전히 경제성 문제가 있으며, IC 소자의 알고리즘 및 인터페이스가 제조사별로 폐쇄적이라 확장성과 범용성에 한계가 있다.

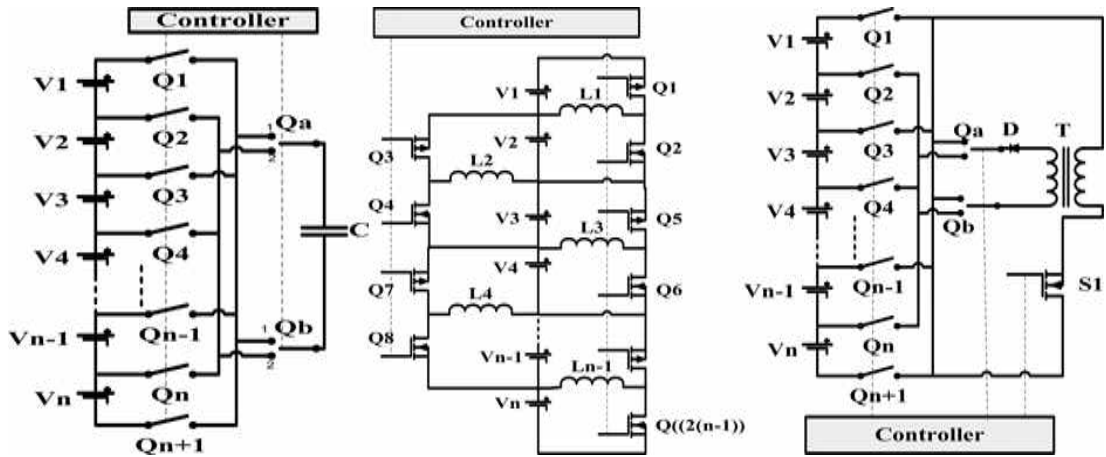


Fig. 3.4 Active balancing circuits (capacitors, inductors, transformers)[18]

능동형 밸런싱을 사용하면 다음과 같은 배터리 관리가 가능하다. Fig. 3.5는 배터리의 모든 셀이 최대 용량에서 시작하는 일반적인 배터리 스택을 나타낸다.

여기서 충전용량을 90%로 선정한 이유는 배터리를 장기간 100%용량 지점 또는 그 근처에서 유지하면 수명이 더 빨리 저하되기 때문이다. 같은 이유로 30%방전은 셀의 과방전을 방지하기 위한 방전 하한선이다.

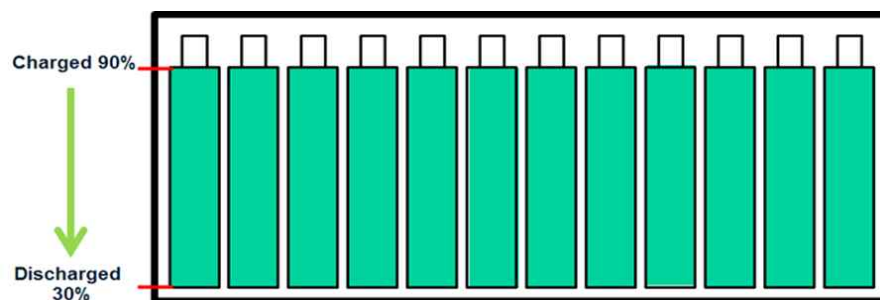


Fig. 3.5 Full capacity[20]

시간이 지남에 따라 일부 셀은 다른 셀보다 약해져서 Fig. 3.6과 같이 방전 프로파일이 생성된다. 여러 개의 셀에 용량이 남아 있지만 약한 배터리로 인해 시스템의 동작을 제한하게 된다. 즉, 배터리 잔존용량의 불일치가 5%면 용량의

5%가 사용되지 못한다. 이 같은 현상은 배터리의 셀 개수가 많은 대용량 시스템과 용량이 큰 배터리 간 결합 시 더욱 심화되며 결국 배터리의 수명을 단축시켜, 배터리 교체 주기가 짧아지는 문제로 이어진다. 능동형 밸런싱을 사용한다면 위와 같은 현상을 방지할 수 있다[20].

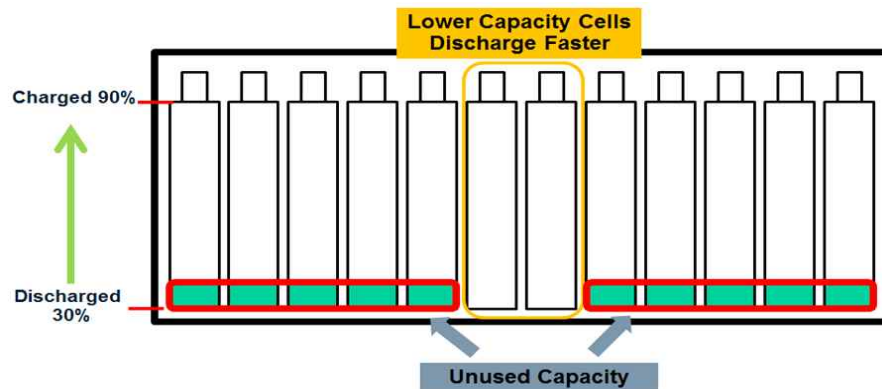


Fig. 3.6 Mismatched discharge[20]

3.2.2 충전과 방전

(1) 배터리의 충전과 방전

일반적으로 배터리의 용량평가는 충전의 경우 CC/CV(Constant Current/Constant Voltage)모드로, 방전의 경우 CC(Constant Current)모드를 수행하며 충전되는 전하량을 적산하여 수행한다. 여기서 충전 시에만 CV모드를 적용하는 이유는 CC 충전만 사용할 경우 충전 마무리 시 발생할 수 있는 과전압 충전 문제와 내부 기생저항으로 인하여 발생한 전압강하를 보상하기 위함이다.

Fig. 3.7은 CC/CV 충전 모드를 나타낸다[7]. 그림을 통하여 확인할 수 있듯이, 초기에 충전은 CC로 진행되며, 미리 정해진 전압 값에 도달 시 CV로 충전모드를 변화시키며 충전전류를 점차 감소시킨다.

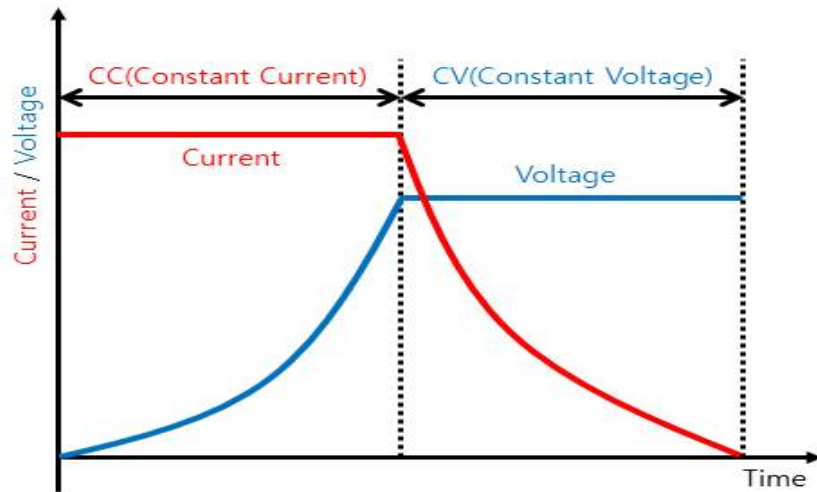


Fig. 3.7 CC/CV(Constant Current/Constant Voltage)curve

(2) 배터리의 용량 추정

SOC는 배터리의 용량을 나타내며, 최근 다양한 방법으로 연구가 진행되고 있지만 전류적산법, OCV(Open Circuit Voltage, 이하 OCV), 칼만 필터, EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy, 이하 EIS)방법 등을 활용하여 SOC를 추정하고 있다[21].

먼저 칼만 필터 기법은 선형 시스템에 대해 시간 지연이 없이 노이즈 제거에 우수한 성능을 보인다. 특히, 시스템을 잘 알고 있는 상황에서 측정값의 미분이나 적분 값을 구하는 경우, 시스템 모델에 파라미터를 관찰할 경우 거의 정확하게 구할 수 있지만 시스템에 대한 적절한 모델링이 요구되며, 상태변수가 많아질수록 계산량이 많아지는 문제가 있다[22-24].

EIS 방법은 측정대상에 대한 임피던스 스펙트럼 결과를 물리적인 의미를 지닌 등가 임피던스 모델로 표현하고, 얻어진 모델 파라미터로부터 배터리의 SOC를 추정하는 방법이다. 비교적 정확한 추정 결과를 얻을 수 있지만, 온도에 민감하고 실시간 사용이 불가능하며 고가의 측정 장비가 필요하다[25][26].

OCV 기법은 SOC의 직접 추종 방식이며, 개방 회로의 전압을 의미한다. Fig. 3.8에 제시된 개방회로와 폐회로의 차이에서 확인할 수 있듯이, 개방회로란 부하가 직접적으로 연결되지 않은 회로이며, 이때의 전압을 OCV라고 한다. 부하를 연결했을 때보다 개방회로 시에는 부하 전압강하가 없으므로 큰 전압을 얻을 수 있다[27][28]. 하지만 전압의 측정이 반드시 평형상태에서 이루어져야 하는 점과,

휴지 시간이 길수록 방전 전압이 상승하여 충전 OCV가 감소하게 되는 점 그리고 휴지 시간의 차이에 따른 SOC 추정 오차가 크다는 점이 본 방식의 단점이다.

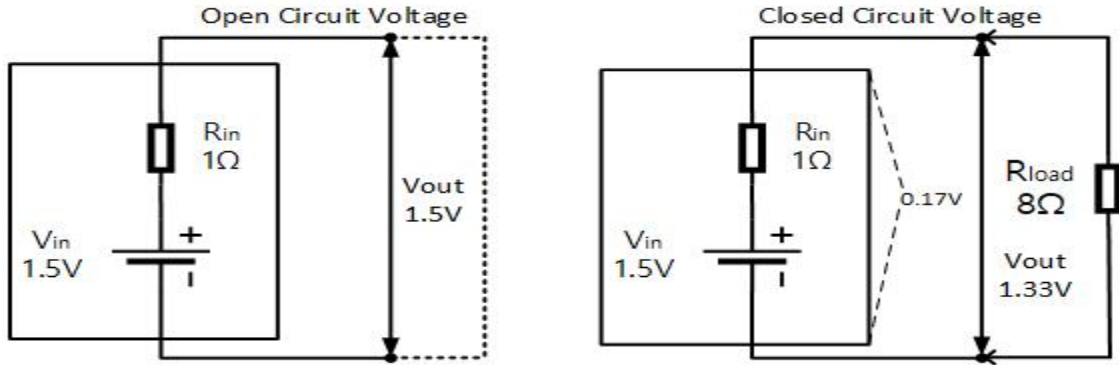


Fig. 3.8 Comparison between open circuit and closed circuit

전류적산법은 쿨롱을 세는 방법으로 SOC 초기 값에 배터리의 충전과 방전 사이클 동안 전류를 적분하여 계산하는 값으로 SOC를 추종하는 방법이다. 초기의 SOC를 임의의 값으로 설정하여 방전 및 충전 전류에 대한 변화를 ΔSOC 로 정의하여 시간의 변화에 따른 SOC 값을 얻게 된다. 이 방법은 구현이 쉬우며 낮은 알고리즘 연산량을 가지고 있어서 실시간 긴 추종이 가능하며 오직 전류의 누적 정보만 이용하기 때문에 시스템에 부담을 주지 않으며 식(3.1)과 같이 수학적으로 나타낼 수 있다.

$$SOC(t) = SOC(0) - \int_0^t \frac{I(t)}{C_n} dt \quad (3.1)$$

$t=0$ 에서 초기 SOC가 100%이고 $i(t)$ 가 방전동안 $I < 0$ 이 적용된 전류라고 가정한다. 배터리 용량 C_n 에 대한 전기적 표현을 위해 커패시터 용량을 결정한다. 완전히 충전된 커패시터는 최대 전하 $Q_{\max} = C_e V_{\max}$, 여기서 C_e 는 패럿 단위의 커패시턴스이고 V_{\max} 는 최대전압이다. 커패시터의 SOC는 식(3.2)와 같다.

$$SOC = \frac{Q(t)}{Q_{\max}} = \frac{C_e V(t)}{C_e V_{\max}} = \frac{-1}{C_e V_{\max}} \int_0^t I(\tau) d\tau \quad (3.2)$$

여기서 충전동안 $SOC(0) = 0\%$ 이고 $I > 0$ 이다. 커패시터의 전압은 전하에 따라 선형적으로 증가하므로 커패시터에 저장된 에너지는 식(3.3)과 같다.

$$E = \int_0^Q V dq = \int_0^Q \frac{q}{C_e} dq = \frac{1}{2} \frac{Q^2}{C_e} = \frac{1}{2} \frac{Q_{\max}^2 SOC^2}{C_e} \quad (3.3)$$

따라서 커패시터의 저장된 에너지는 SOC의 제곱에 비례하며, 배터리의 전지 전압 또한 SOC에 따라 다르다. SOC가 감소함에 따라 전지 전압이 감소하고, Depth Of Discharge(DOD=1-SOC)가 낮은 값을 가지다가 1에 도달하면 빠르게 올라간다. 물론 DOD는 소재에 따라 특성이 다르다. 예를 들어, 일부 화학물질(인산철리튬)은 DOD가 커질 때까지 전압과 비교하여 DOD 곡선이 매우 평평하다가 급격히 떨어진다. 반면에 Pb-C(납-카본) 배터리는 커패시터와 유사하게 선형적인 DOD 곡선을 가지고 있으므로 전지의 종류별로 차이가 있으나, 모든 전지는 DOD와 함께 약간의 전압 감소가 있으므로 SOC 추정 시 이를 고려해야 한다[29][30].

3.2.3 전압, 전류, 온도 계측

일반적인 BMS에서 셀 전압 계측회로는 포토모스 릴레이를 이용한 멀티 채널 스위칭 방식의 회로[31]를 이용한다. 비용을 줄이기 위해 각 셀을 병렬로 모니터링 하는 대신 배터리 모니터링 장치를 Fig. 3.9와 같이 각 셀의 전압을 차례로 아날로그를 디지털 출력으로 전환하는 멀티 플렉싱 아키텍처를 사용한다. 아날로그 제어 및 디지털 샘플링 회로의 수를 줄여 부품 수를 최소로 줄임으로써 비용 절감에 중점을 두었다.

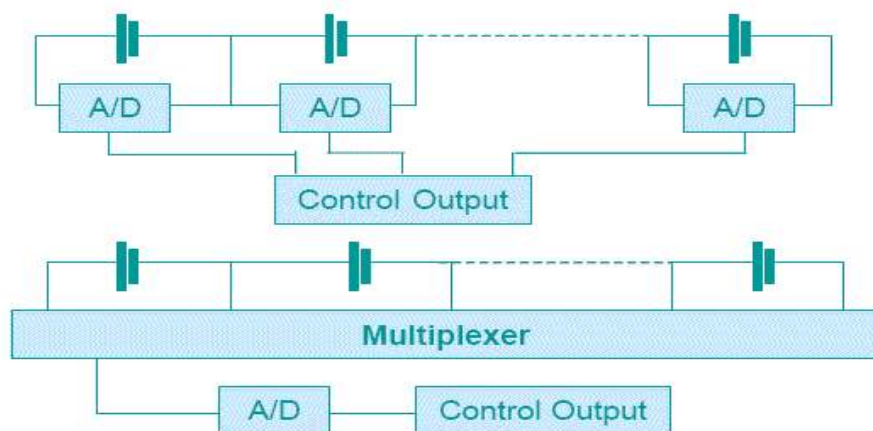


Fig. 3.9 Battery cell voltage measurement[28]

단점은 한 번에 하나의 셀 전압만 모니터링 할 수 있기 때문에, 모든 셀을 순차적으로 모니터링 할 수 있도록 출력 라인을 각 셀로 전환하는 고속 스위칭 메커니즘이 필요하다[15][32].

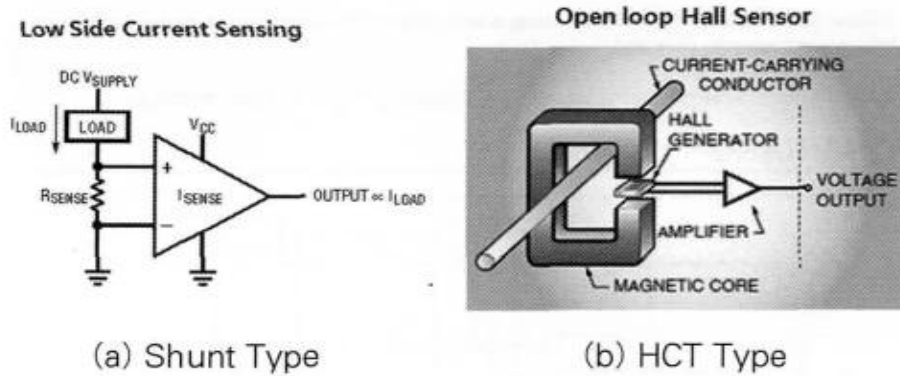


Fig. 3.10 Current measurement method[33]

BMS의 전류 계측은 Fig. 3.10과 같이 구성되었다. 계측방식에는 비절연 형태의 전류 센서인 shunt를 적용하는 방식과 절연 형태의 Hall Sensor를 적용하는 방식이 있다. shunt type은 센서에 전류가 직접 흘러 대전류 인가 시 발열 및 노이즈 측면에서 취약한 단점이 있지만 가격이 저렴하여 저가형 시스템에 많이 적용된다. 반면 고전압의 시스템에는 전자파 특성이 우수하며 절연형태로 사이즈를 최소화할 수 있는 HCT의 Hall Sensor를 적용하여 전류를 측정한다.

리튬이온 배터리는 적정 온도의 범위가 좁고 성능과 안정성이 온도에 매우 민감하기 때문에 정확한 온도 조절이 필수적이다. 배터리 사용에 최적 온도인 25°C는 -20°C에서 효율이 무려 33%까지 차이가 나며, 기계적 손상, 과충전, 과방전, 고온 등으로 인한 배터리 셀 내부 단락, 또는 외부 단락으로 열 폭주가 발생한다[33]. 이처럼 리튬이온 배터리를 효율적이고 안전하게 사용하기 위해서 온도측정이 필수이지만, 현존하는 온도측정에서 대표적인 방법인 thermocouple과 thermistor로 사용하고 있지만, 얻을 수 있는 정보가 제한되어 있다. 두 센서는 비교적 저렴하고 정확하다는 강점이 있지만, 한 점에서의 온도만 측정할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 차량 및 대전력 분야에 적용에서는 해당 센서로 배터리를 모듈 내 모든 셀의 온도 분포를 측정하기 위해 많은 개수의 센서가 필요하지만, 공간상 제약으로 사용이 어렵다[33][34].

3.2.4 상태 진단 및 보호

Fig. 3.11은 BMS의 배터리의 상태 진단 및 보호의 구성에 대하여 나타내고 있다[35]. BMS는 주로 배터리 팩 전압, 전류, 셀 전압, 온도, 절연 및 인터록 등의 모니터링에 중점을 둔다. 결함이 있는 배터리는 충전 시스템에 과전압을 유발할 수 있고 과전압 또는 과전류는 배터리 시스템에 영구적인 손상을 줄 수 있으며, 과충전은 셀이 폭발할 수 있기 때문에 실시간 모니터링이 필요하다[36][37].

따라서, BMS는 외부 환경과 배터리를 포함한 시스템에 인가할 수 있는 외란으로부터 전체 시스템을 보호해야 한다. 시스템의 보호를 위한 BMS의 보호기능에는 동작 모드 감지, 오류 기준 설정, 시스템 인증 및 식별, 팩/셀 과전압 및 과전류 예측, 절연 오류 예측, 고온/저온 감지기능이 포함된다[18].

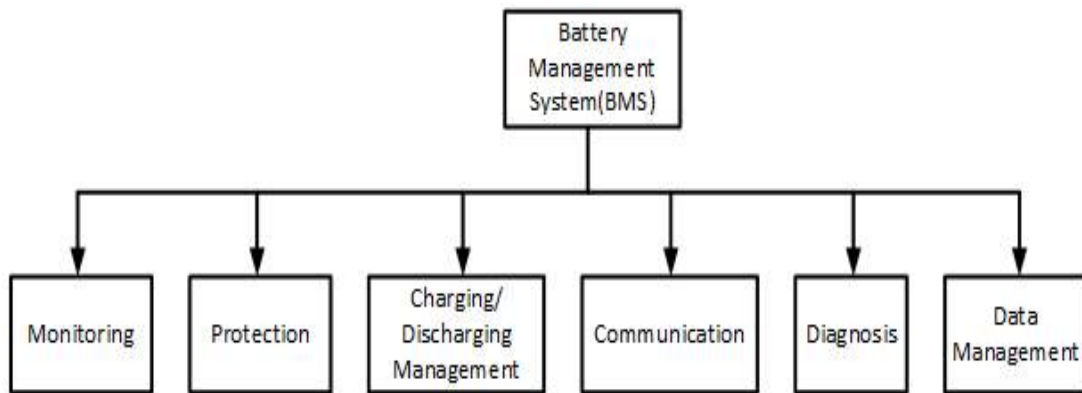


Fig. 3.11 BMS health diagnosis and configuration of protection

뿐만 아니라, BMS는 적용 어플리케이션 별 특성에 맞는 충전 및 방전 절차에 대한 효율적인 방법을 확인해야 하며, BMS는 배터리 수명이 최대화 될 수 있도록 적절한 SOC를 유지하며 사용될 수 있게 관리가 되어야 한다. 여기서 관리는 배터리별로 지정되어 있는 충·방전 회수 및 영역을 사전에 인지하여 충전기 전류 제어, 팩과 부하/충전기 간의 능동적 스위칭 제어, 효율적인 충전 시퀀스 실행, 동적인 상태에서 전력 제한 영역 설정, 그리고 밸런싱 방법의 선택 등을 포함한다[38].

4. 폐배터리 적용을 고려한 BMS 시스템 제안

본 장에서는 폐배터리를 활용한 어플리케이션 적용 시 안정적이고 효율적인 사용을 위하여 시스템 구성과 운영 알고리즘에 대하여 제안하고자 한다. 폐배터리의 좁아진 운전영역을 고려하여, BMS를 구성하는 소자에서 노이즈 및 소비전력 저감 가능한 부분의 개선을 통한 안정적인 폐배터리 활용에 대한 구성을 제시한다. 또한 셀 적층 구조에 영향을 받지 않고 다양한 어플리케이션에 적용할 수 있는 제어 알고리즘을 제안한다[39].

4.1 제안된 BMS의 시스템 구성

제안된 BMS는 크게 전원, 통신, 밸런싱 및 계측, 마이크로컨트롤러로 구분되며 Fig. 4.1과 같이 구성하였다. 구성의 설계를 위해 사용한 프로그램은 OrCAD Capture CIS 및 Layout Puls을 활용하였다. OrCAD는 전자설계의 분야에서 널리 사용되는 설계 소프트웨어로 인쇄 회로 기판(PCB)의 제작을 위한 거버 파일을 생성하거나, 전자 도면과 다이어그램 작성 및 전자회로 시뮬레이션에 사용된다.

본 논문에서는 전자회로 도면을 그리는 Capture CIS와 인쇄 회로 기판을 그리기 위해 전자회로 도면에서 생성된 도면 정보를 사용하여 부품의 배치 및 선을 연결하여 PCB를 만드는 상세 설계 단계의 Layout Plus[40]를 사용하였다.

Fig. 4.1을 참조하며 제안된 BMS 구성을 설명한다. 먼저, ①소자의 전원 공급은 2P4S, 2P6S, 2P10S의 셀 적층 구조의 모든 전압 범위가 포함되고 외부 노이즈 인입에 의한 영향을 최소화한 출력 고정용 DC/DC 컨버터를 적용하여 BMS의 소비전력 효율 및 공급 전압 안정도를 확보하였다.

외부의 연결 인입단에 ②바리스터를 추가하여 제안된 BMS의 구성 소자를 외부 썬치 인입에 대한 보호를 위한 바이패스를 구성하였다[41]. ③전류의 감시는 AC와 DC전류의 정밀 측정이 가능하고 MCU로 아날로그 전압 입력으로 직접 전송이 가능한 모듈형 소자를 채택하여 적용하였다.

④MCU는 르네사스社의 RL78/G13 64pin을 사용하였다. 본 제품은 데이터 플래시 메모리를 가지고 있어 비용, 공간에 제약이 많은 자동차 전장 분야에서 널리 쓰인다. 제안된 BMS에서 2P10S의 셀 적층 구조까지 고려해야하기 때문에 셀

전압의 아날로그 입력은 11개, 온도1개, 밸런싱 신호 동작을 위한 채널 10개 예비 2개의 채널이 필요하다. 이 경우를 고려하면 UART(범용 비동기화 송수신기) 포트도 4개까지 확장가능하고 64핀의 경우 3개까지 사용가능하며, 아날로그 입력 채널 또한 핀 수의 따라 달라지지만 6개부터 최대 26 채널까지이며 64핀은 12채널까지 사용가능하다[42].

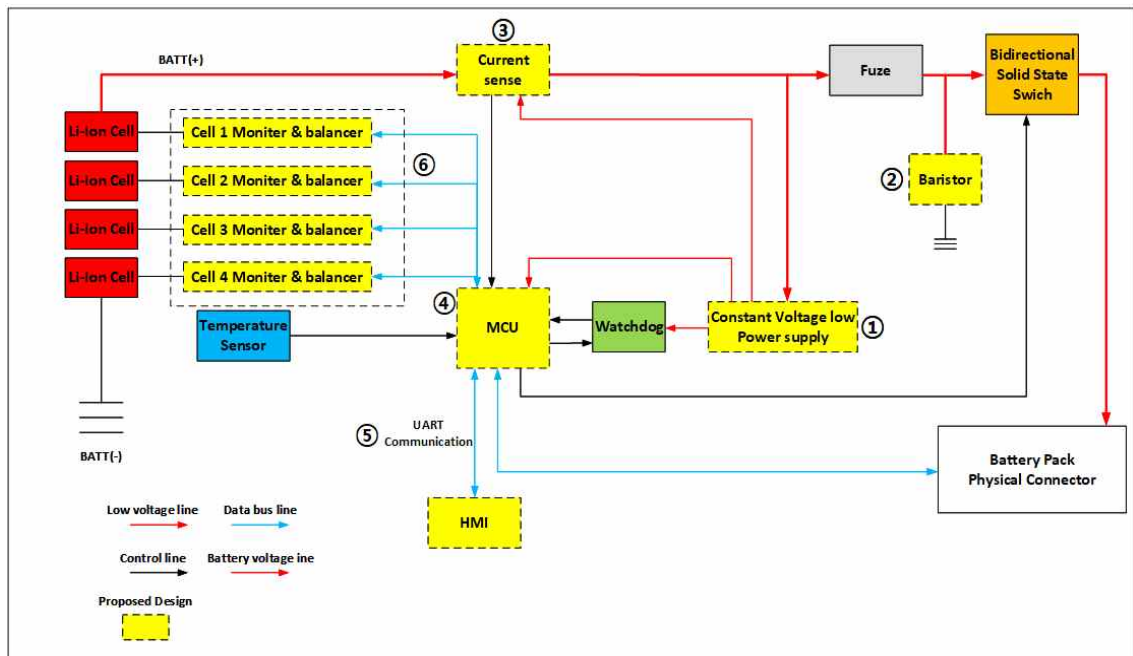


Fig. 4.1 Proposed BMS block diagram

⑤통신은 전기차 전장이나 대전력용과 같은 분야에서 배터리 상태이외에 다른 다수의 제어 및 관리 요소가 산재하기 때문에 많은 정보의 전송을 위해서 무선기반의 CAN통신을 많이 적용한다. 하지만, 폐배터리의 안정성이 확보 되지 않은 시점에서 네트워크 중단과 CAN 통신 에러 문제의 발생에 대한 문제로 시스템 오동작으로 인한 고장 및 사고로 이어질 수 있는 점을 고려하여[43], 제안된 BMS에서는 UART(범용 비동기화 송수신기) 시리얼 방식의 통신을 적용 하였다. RL78/G13와 MAX3232 소자가 연결되고 그것이 HMI(Human Machine Interface)와 RS232 통신으로 정보를 교환한다. MAX3232소자는 5V 구동으로 최대 2개의 RS232 통신이 가능하고 $\pm 15\text{kV}$ 정전기 보호(Electric Static Discharge Protection) 기능이 내장되어 있어 노이즈에도 강점이 있다[44].

⑥전압 계측과 밸런싱의 구현은 하나의 폐회로로 구성이 된다. 일반적인

BMS에서 전압 계측 방식은 Fig. 4.2와 같이 각 셀의 전압을 순차적으로 입력받아 아날로그를 디지털로 전환하는 멀티플렉싱 방식을 사용으로 인해 셀의 전압 순시적인 감시가 제한적이었다. 뿐만 아니라, 전기차에서 사용이 종료된 폐배터리는 기존의 사용 환경에 의해 배터리의 특성변화에 따른 출력이나 용량 감소가 발생하였기 때문에, 셀 전압 및 SOC의 동작 영역의 제한적임을 고려하여 BMS를 구성해야 한다. 특히, 셀 전압 계측 전압의 기준 전위 및 절연 레벨을 2P10S까지의 적용을 고려하여 적용해야 한다. 셀 밸런싱은 능동형 밸런싱이 효율이 좋을 수 있지만, 폐배터리의 내부 특성 변화를 고려하지 않는 셀 간 에너지 이동의 재조합 방식은 오히려 폐배터리를 활용하는 어플리케이션에도 좋지 않은 영향을 미치기 때문에 수동형 셀 밸런싱 방식을 제안한다.

또한 수동형 셀 밸런싱 소자의 경우 일반적인 BMS는 FET 계열의 스위칭 소자로 구성 된다. 이로 인해 반도체 스위칭 소자의 기생 커패시턴스, PCB의 기생 커패시턴스와 패턴의 기생 인덕턴스 간 고주파수 공진이 스위치 on/off시 발생으로 인해 견뎌지지 못한 폐배터리의 계측 오류를 일으켜 고장이 발생 수 있는 경우를 고려해야 한다[45].

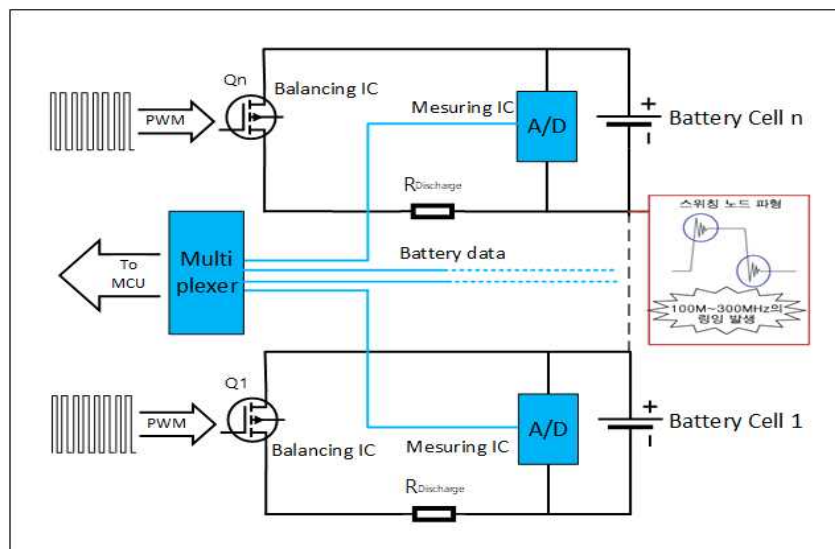


Fig. 4.2 Typical BMS passive balancing and cell voltage measurement circuits

BMS에서 계측 정확도가 폐배터리의 사용에 따른 수명이나 효율성, 또는 안전성에 지대한 영향을 미치기 때문에 Fig. 4.3과 같이 제안된 BMS에서는 배터리

셀 전압 계측에 특화된 고 절연 전압 증폭기의 특성을 가진 고효율, 저전력 구동의 INA149 소자를 채택하였다. 이 소자는 모터 제어나 대전력 전류 측정에도 사용되기 때문에 절연능력과 노이즈에 차단에 우수하다[46].

폐배터리의 셀 적층 구조를 고려하며 수동형 밸런싱과 계측 소자의 개선을 Fig. 4.3과 같이 제안한다. 제안된 수동형 밸런싱은 광신호의 전달방식을 사용하는 포토커플러를 적용하여 스위칭 노이즈가 발생하지 않기 때문에 관련한 오류의 발생 우려가 없다.

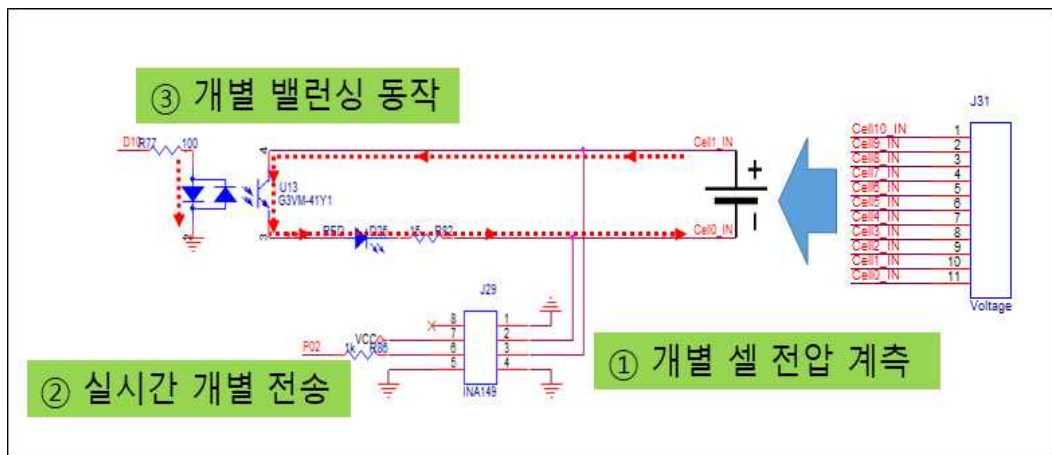


Fig. 4.3 Proposed balance and voltage measurement circuit

Fig. 4.3과 같이 셀 밸런싱과 전압 계측에서 밸런싱 동작은 폐배터리가 적용된 어플리케이션의 활동이 없고 충전상태에 진입하기 전에 휴지상태에서 가장 낮은 셀을 기준으로 밸런싱 동작이 시작된다. 이때 동작 범위는 가장 낮은 전압의 셀과 다른 전압 셀이 0.2V이상의 차이가 발생해야 하며 그것에 대한 계측은 ①INA149 소자가 모든 셀과 각각 병렬로 연결되어 실시간으로 감시하고 있다.

②밸런싱 조건이 감지되면 MCU에서 출력된 밸런싱 ③제어신호가 G3VM-41Y1의 포토커플러 소자로 신호가 인가되어 폐회로가 되며 연결된 셀의 + 전류가 셀 -로 이동하면서 LED가 켜지면 방전이 시작을 의미이며, 방전전류의 크기는 약 125mA이다.

배터리 온도 감시에서 배터리 내부의 온도는 써미스터 센서를 사용하며 저항값을 가지고 현재 온도를 계산하는 Steinhart-Hart 공식을 사용하며 아래와 같이 구할 수 있다. 써미스터 센서는 온도가 올라감에 따라 저항 값이 작아지는 특성을

가지는 NTC(Negative Temperature Coefficient)타입을 적용한다. NTC 써미스터는 100kΩ를 기준으로 온도가 25℃이며 1kΩ에서 1,000kΩ까지 범위에 있다.

$$\frac{1}{T} = A + B \ln R + C(\ln R)^3 \quad (4.1)$$

여기서, T는 온도, R은 T에서 저항이며 A, B, C는 Steinhart-Hart의 계수로, 써미스터의 유형과 모델의 온도 범위에 따라 다르다. 이 식은 실제 온도에 가까운 근사값을 제공하고 센서의 작동 온도 범위에서 정확한 온도 측정을 위해 자주 사용된다. Steinhart-Hart의 계수는 일반적으로 써미스터 제조업체에서 제공된다. 제안된 BMS의 보드는 Fig 4.4와 같이 제작하였으며, 현재 폐배터리의 셀 적층 구조 2P4S, 2P6S, 2P10S까지 변경 없이 통합관리가 가능하도록 설계하였다.

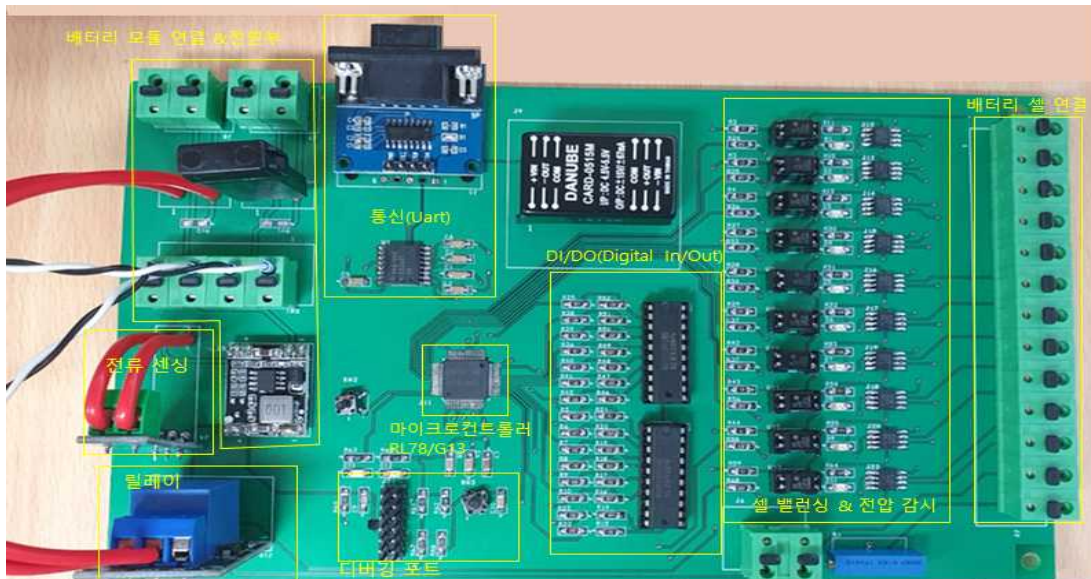


Fig. 4.4 Proposed BMS board

4.2 제안된 폐배터리 적용 BMS 알고리즘

제안된 BMS의 적용 소프트웨어는 e2studio의 MCU제작사와 동일한 르네사스의 컴파일러를 사용하였으며, 구성은 코딩에 선언되는 각종 제어 레지스터에 대한 지정을 하는 hwinit.c와 효과적인 제어 코딩을 위해 인터럽트 관련 제어 등을 위한 inthandler.c 및 메인문 관련 hardware_setup.c로 구분된다[47]. hwinit.c의 레지스터 설정은 Table 4.1과 같이 정의한다.

Table 4.1 Register settings in hwinit.c

Value	Definition
TimerInit	Setting the system clock of the timer of the RL78 MCU
InterruptInit	Set the interrupt settings to synchronize with the timer register.
ADCInit	Variables related to voltage, current, and temperature information of battery cells
UART0Init	Settings for sending and receiving serial data
SSmn	Setting for interlocking the main function with the clock

inhandler.c는 메인함수의 부담을 줄이기 위해서 배터리의 셀 전압, 전류, 온도에 대한 변수를 정의하며, 이 신호들에 대하여 1차 저역통과 필터 공식을 활용하여 얻어진 값을 적용한다.

입력 신호들에 대한 1차 저역통과 필터의 공식이 아래와 같이 정의 된다[48].

$$w_c = 2\pi f_c \quad (4.2)$$

여기서, w_c 는 차단 각주파수이며 한 주기에 차단주파수 f_c 를 곱한 값으로 나타낼 수 있으며, 차단 각주파수를 1차 저역통과 필터의 S-domain으로 식(4.3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(s) = \frac{y(s)}{x(s)} = \frac{w_c}{s + w_c} \quad (4.3)$$

1차 저역통과필터를 디지털 필터로 변환하여 실제 코드로 구현하기 위해서는 이산 함수의 형태인 Z-domain으로 나타내어야 하며, 식(4.4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s = \frac{2}{T_s} \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) \quad (4.4)$$

식(4.3)에 식(4.4)를 대입하고, $f = \frac{1}{T_s}$ 일 때, 식(4.5)와 같다.

$$L(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{w_c}{2f \left(\frac{1 - z^{-1}}{1 + z^{-1}} \right) + w_c} \quad (4.5)$$

식(4.5)는 풀이하면, (4.6)과 같다.

$$L(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{w_c + w_c z^{-1}}{2f - 2f z^{-1} + w_c + w_c z^{-1}} \quad (4.6)$$

식(4.6)은 다시 식(4.7)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & 2fy(z) - 2fz^{-1}y(z) + w_c y(z) + w_c z^{-1}y(z) \\ &= w_c x(z) + w_c z^{-1}x(z) \end{aligned} \quad (4.7)$$

식(4.7)을 풀이하면, 식(4.8)과 같다.

$$\begin{aligned} & (2f + w_c)y(z) - (2f - w_c)z^{-1}y(z) \\ &= w_c x(z) + w_c z^{-1}x(z) \end{aligned} \quad (4.8)$$

식(4.8)에서 좌변은 $z^{-1}y(z) = y^{-1}(z)$, 우변은 $z^{-1}x(z) = x^{-1}(z)$ 이므로, 식 (4.9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} & (2f + w_c)y(z) - (2f - w_c)y^{-1}(z) \\ &= w_c x(z) + w_c x^{-1}(z) \end{aligned} \quad (4.9)$$

결국 식(4.9)는 식(4.10)으로 나타낼 수 있다.

$$y(z) = \frac{w_c}{2f + w_c}x(z) + \frac{w_c}{2f + w_c}x^{-1}(z) + \frac{2f - w_c}{2f + w_c}y^{-1}(z) \quad (4.10)$$

앞서 언급하였지만, 배터리 셀 적층 구조가 2P4S, 2P6S, 2P10S가 있다. 그러므로 셀 적층 구조에 영향을 받지 않기 위해 제안된 알고리즘을 Fig 4.5와 같이 구현하였다.

우선, 배터리가 제안된 BMS의 셀 계측 터미널에 연계되면, IAN149소자에서 셀 전압을 실시간으로 읽은 데이터를 MCU의 A/D채널 데이터로 전송한다. 이 때 실제 셀 전압이 아닌 노이즈 값이 순간적으로 들어와서 셀 적층 구조의 오류 발생 방지를 위해서 초기 500ms동안 셀 전압이 2.0V 이상 레벨의 크기가 지속하는지 여부를 판단한다. 이후, 셀의 개수를 파악하여 적층 구조에 맞게 BMS의 제어

알고리즘이 동작하게 된다.

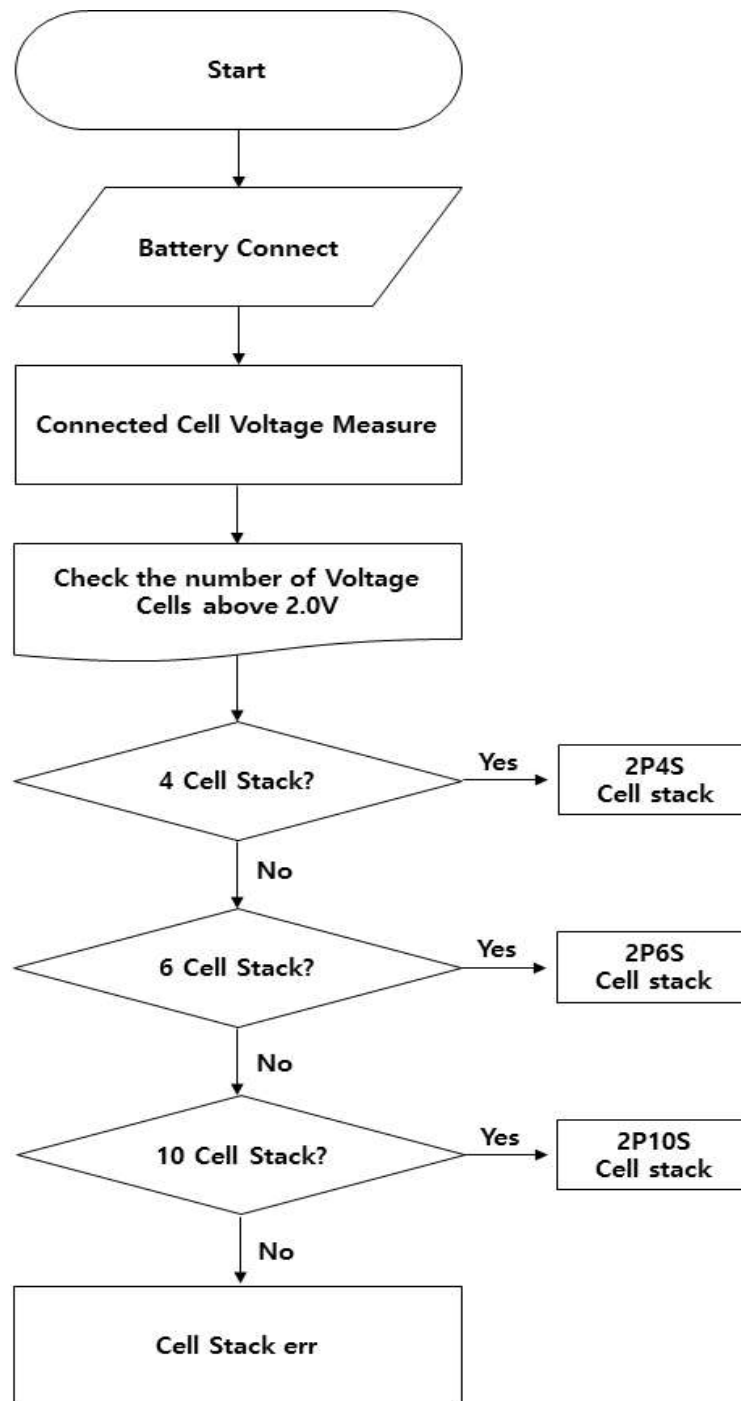


Fig. 4.5 Algorithm for checking cell stack structure

제안된 BMS에서 밸런싱 출력 포트 지정 및 고장조건에 따른 릴레이 동작, 셀 전압의 불균형에 따른 밸런싱 동작 지시 등에 대한 알고리즘은 Fig 4.6과 같다.

처음 시스템이 초기화되면서, 500ms 동안 BMS의 상태가 300, 밸런스 1, 릴레이 투입이 되지 않았다면, 밸런싱이 필요한 셀을 확인하여, 셀 전압이 저전압 레벨인 2.5V다 높다면 밸런싱이 시작되고 저전압보다 낮다면 저전압으로 인한 고장으로 인식하여 시스템이 정지된다. 만약 초기에 밸런싱 신호가 0이라면 연결될 셀의 고장여부를 판단하게 된다. 상태가 100일 때 과전압(4.0v), 200일 때 온도이상(45°C), 300일 때 셀 밸런싱(0.2V), 400일 때 충전 과전류(+6A), 500일 때 방전 과전류(-6A) 600일 때 셀 저전압(2.5V)로 고장에 대한 인식으로 릴레이 투입이 되지 않는다.

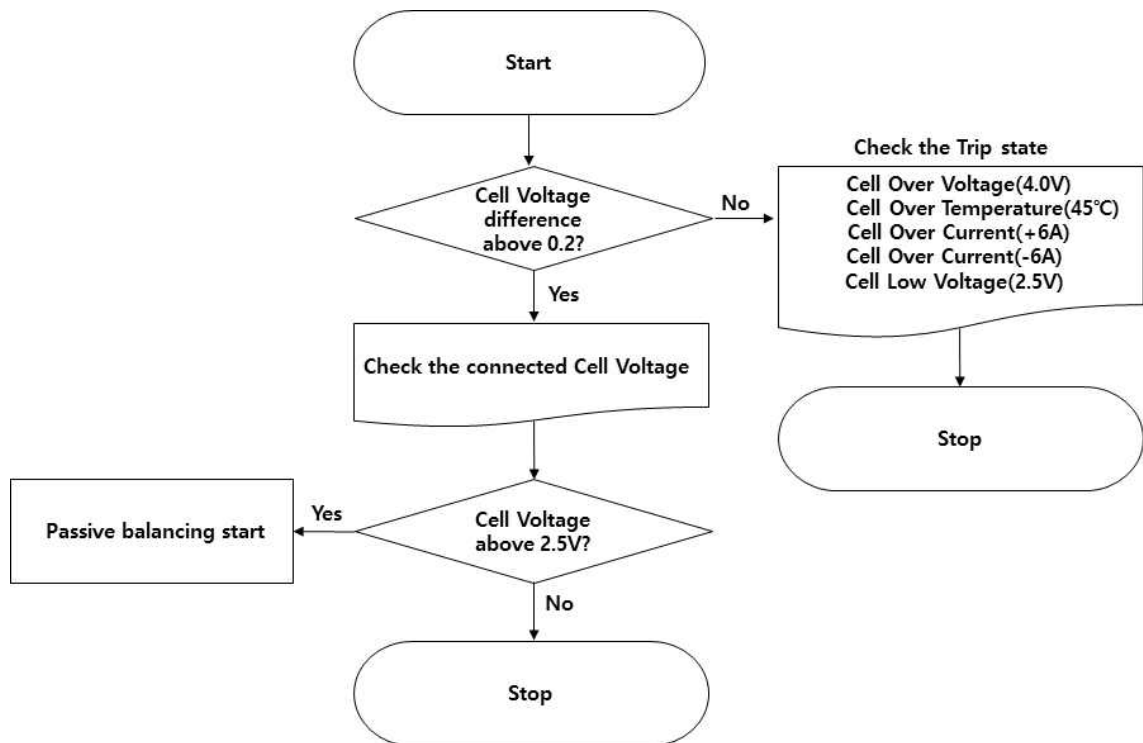


Fig. 4.6 Balancing and failure algorithms

5. 제안된 BMS의 검증 및 분석

5.1 BMS 성능 및 배터리 고장 조건 시험

제안된 BMS의 정확성에 대한 검증을 위해 각 셀 적층 구조에서 전압, 전류, 온도의 계측과 고장 상황에 따른 모의시험을 하고자 한다. 시험 장비는 Table 5.1과 같이 시험환경을 구축하여 진행하며, 아래에 정의된 고장 항목별 시험을 진행하였다. Table 5.2에 정의된 시험에 대한 기준은 제주테크노파크의 폐배터리 시험장비에서 통용되고 있는 기준을 적용하였다[51][52].

Table 5.1 Proposed cell stacking discrimination metrology test configuration of BMS

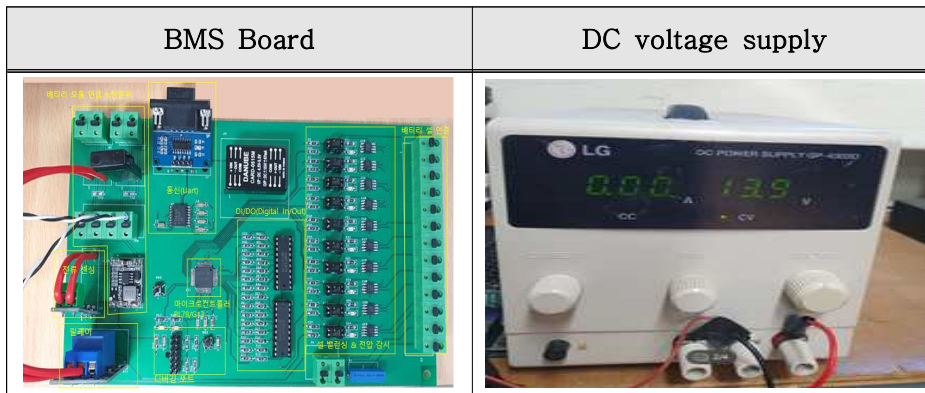


Table 5.2 Waste battery performance test items

Test Items
Cell over-voltage (4.0V)
Cell low-voltage (2.5V)
Abnormal temperature inside the battery (45.0℃)
Battery over-current ($\pm 6A$)
Cell voltage balance (0.2V)

5.1.1 BMS의 계측 시험

Table 5.3에 정의된 항목을 바탕으로 계측 시험에 항목에 따라 입력된

아날로그의 신호를 판단하여 각 셀 적층 구조에 맞게 소프트웨어와 HMI 프로그램에서 알맞게 표기되는지 확인한다.

폐배터리를 연계한 시험을 진행하기 전에 안전성을 고려하여 BMS 전원 공급은 SMPS로 인가하고 배터리 셀 전압 역할은 DC 전원 공급기를 활용하여 BMS 보드에 연결되도록 구성하였다.

Table 5.3 BMS status display items displayed on the software

Value Definition	Contents
state 100	Cell over-voltage
state 200	Abnormal temperature inside the battery
state 300	Cell voltage balance
state 400	Battery + over-current
state 500	Battery - over-current
state 600	cell low-voltage
state 700	BMS initialization state
state 800	BMS Normal Driving state
cell state 910	2P10S Structure
cell state 940	2P4S Structure
cell state 960	2P6S Structure
cell state 999	Cell stack structure abnormal state

먼저 2P4S 셀 적층 구조의 성능 시험을 진행하며, DC 전원 공급기로 13.9V 전압을 4직렬로 인가하였을 때 Table 5.4와 같이 소프트웨어에 표기 되었다.

Table 5.4 Check 2P4S structure and battery status using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	cell_check	4	Cell Number
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.46	Check the Voltage applied to all 4 cells Total Voltage : 13.90V
	AD[1] : cell2	3.45	
	AD[2] : cell3	3.45	
	AD[3] : cell4	3.45	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	-0.10	Normal
Temperature	AD[11]	24.4	Normal

셀 적층 구조에서 cell_state의 940은 2P4S, cell_check의 4는 셀 개수이다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지 전압이 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.4와 Fig. 5.1에 각각 표기된 값의 동일함을 비교를 통하여 확인하였다.

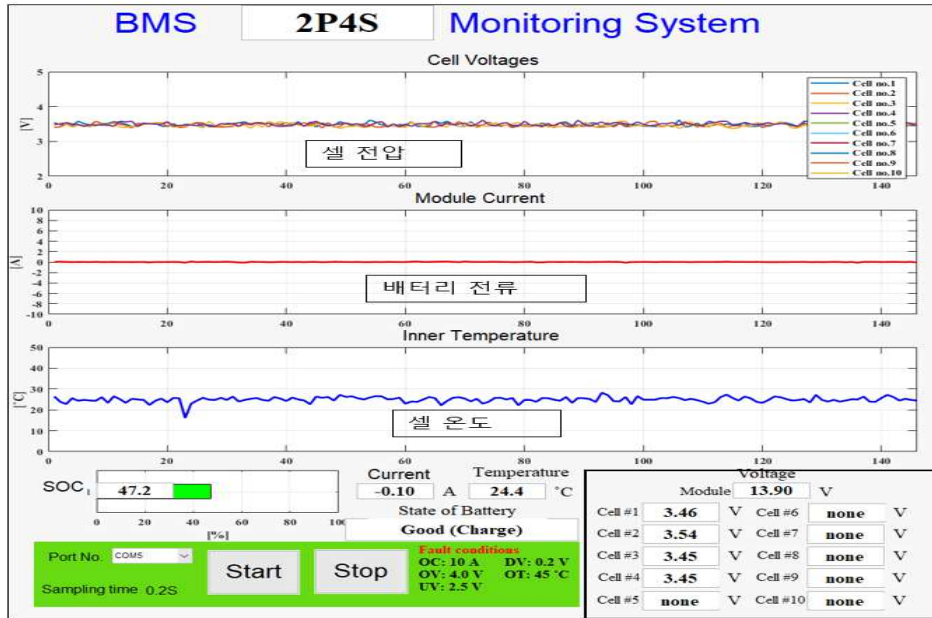


Fig. 5.1 Confirmation of 2P4S cell stack structure and status in the HMI

2P6S 구조의 성능 시험은 DC 전원 공급기로 20.91V의 전압을 6직렬로 인가하였을 때 Table 5.5와 같이 소프트웨어에 표기 되었다.

Table 5.5 Check 2P6S structure and battery status using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	cell_check	6	Cell Number
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.49	Check the Voltage applied to all 6 cells Total Voltage : 20.91V
	AD[1] : cell2	3.51	
	AD[2] : cell3	3.41	
	AD[3] : cell4	3.53	
	AD[4] : cell5	3.51	
	AD[5] : cell6	3.46	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	0.01	Normal
Temperature	AD[11]	24.4	Normal

셀 적층 구조에서 cell_state의 960은 2P6S, cell_check의 6은 셀 개수이다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 전압이 인가되었고 온도 및 전류는 Table 5.5와 Fig. 5.2에 각각 표기된 값의 동일함을 비교를 통하여 확인하였다.

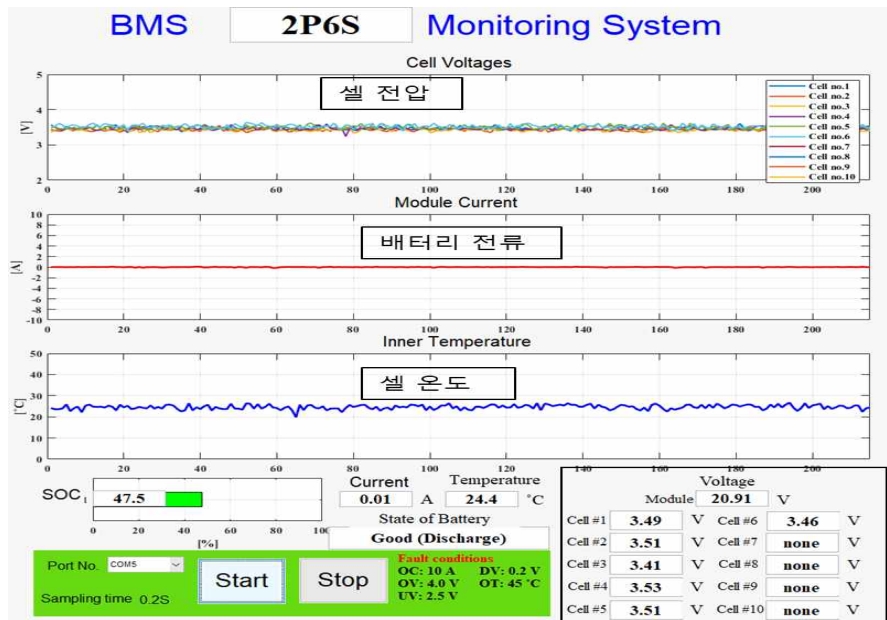


Fig. 5.2 Confirmation of 2P6S cell stack structure and status in the HMI

2P10S 구조의 성능 시험은 DC 전원 공급기로 26.86V의 전압을 10직렬로 인가하였을 때 Table 5.6과 같이 소프트웨어에 표기 되었다.

Table 5.6 Check 2P10S structure and battery status using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	cell_check	10	Cell Number
Cell Voltage	AD[0] : cell1	2.59	Check the Voltage applied to all 4 cells Total Voltage : 26.86V
	AD[1] : cell2	2.61	
	AD[2] : cell3	2.75	
	AD[3] : cell4	2.75	
	AD[4] : cell5	2.64	
	AD[5] : cell6	2.59	
	AD[6] : cell7	2.69	
	AD[7] : cell8	2.75	
	AD[8] : cell9	2.76	
	AD[9] : cell10	2.73	
Current	AD[10]	0.01	Normal
Temperature	AD[11]	24.5	Normal

셀 적층 구조의 cell_state에서 910은 2P10S, cell_check의 10은 셀 개수이다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[9](cell 10)까지 전압이 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.6과 Fig. 5.3에 각각 표기된 값의 동일함을 비교를 통하여 확인하였다.

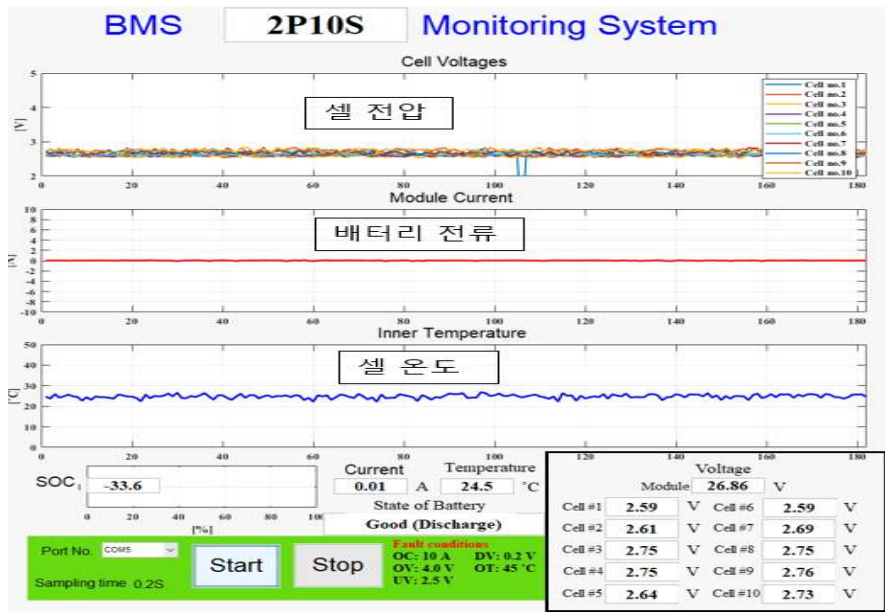


Fig. 5.3 Confirmation of 2P10S cell stack structure and status in the HMI

마지막으로, 셀 적층 구조 오류 시 성능 시험은 DC 전원 공급기로 22.13V의 전압을 9직렬로 인가하였을 때 Table 5.7과 같이 소프트웨어에 표기 되었다.

Table 5.7 Check cell structure errors and battery health using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	999	Cell stack error
	cell_check	9	Cell Number
Cell Voltage	AD[0] : cell1	2.59	Check the Voltage applied to all 9cells Total Voltage : 22.13V
	AD[1] : cell2	2.61	
	AD[2] : cell3	2.75	
	AD[3] : cell4	2.75	
	AD[4] : cell5	2.64	
	AD[5] : cell6	2.59	
	AD[6] : cell7	2.69	
	AD[7] : cell8	2.75	
	AD[8] : cell9	2.76	
AD[9] : cell10	0.00		
Current	AD[10]	0.01	Normal
Temperature	AD[11]	24.5	Normal

셀 적층 구조에서 cell_state의 999는 셀 적층 구조 오류, cell_check의 9는 셀 개수이다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[8](cell 9)까지 전압이 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.7과 Fig. 5.4에 각각 표기된 값의 동일함을 비교를 통하여 확인하였다.

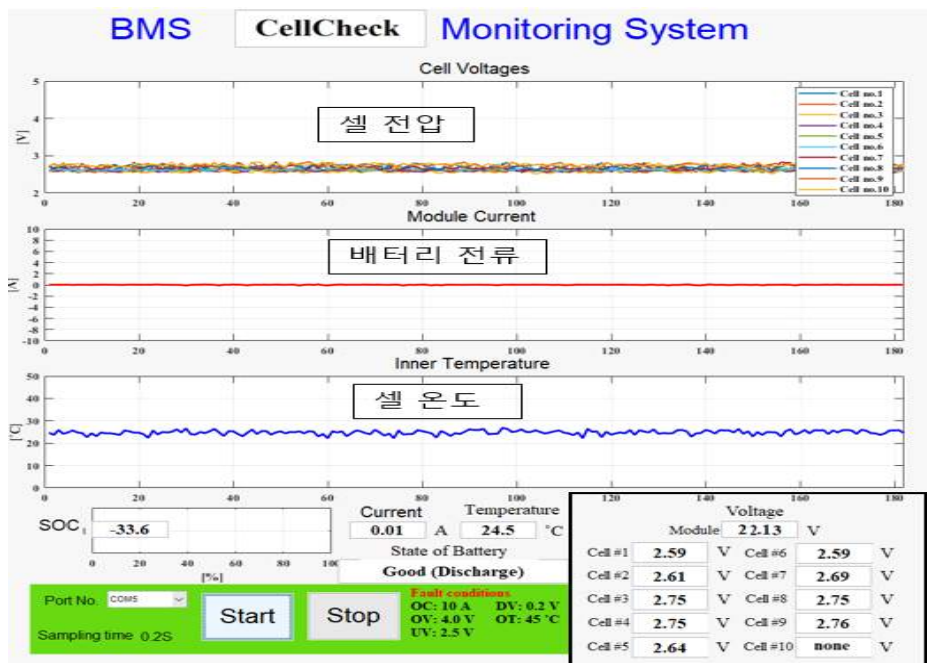


Fig. 5.4 Check cell stack structure errors and status in the HMI

5.1.2 BMS의 밸런싱 시험

앞서 언급하였지만, 2P4S, 2P6S, 2P10S의 셀 적층 구조에서 폐배터리 내부의 셀 간 전압차가 0.2V 이상이 발생 했을 경우 밸런싱 상태로 인식하여 수동형 밸런싱 동작을 수행하여 낮은 전압의 셀로 전압을 맞추게 된다. 이 상황을 폐배터리에 바로 적용하기 전에 프로그램 내에서 임의로 밸런싱 조건을 만들어 제안된 BMS의 동작 상황에 대한 결과를 E²Studio 프로그램 및 HMI에서 표기된 결과를 바탕으로 정상 동작 여부를 확인하도록 한다.

먼저, 2P4S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 프로그램에서 임의로 셀 1번의 전압을 다른 셀보다 0.2V 높게 설정하여 결과를 확인하였다. Table 5.8에서 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 940은 2P4S, state가 300이므로 셀 밸런싱 상태인 것을 확인하였다.. 또한, 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지

전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.8과 Fig. 5.5에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 동일함을 확인하였다.

Table 5.8 Check balancing status in 2P4S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	state	300	Cell Balancing
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.75	Check Cell#1 Balancing Condition Total Voltage : 14.25V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
AD[9] : cell10	0.00		
Current	AD[10]	0.74	Normal
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

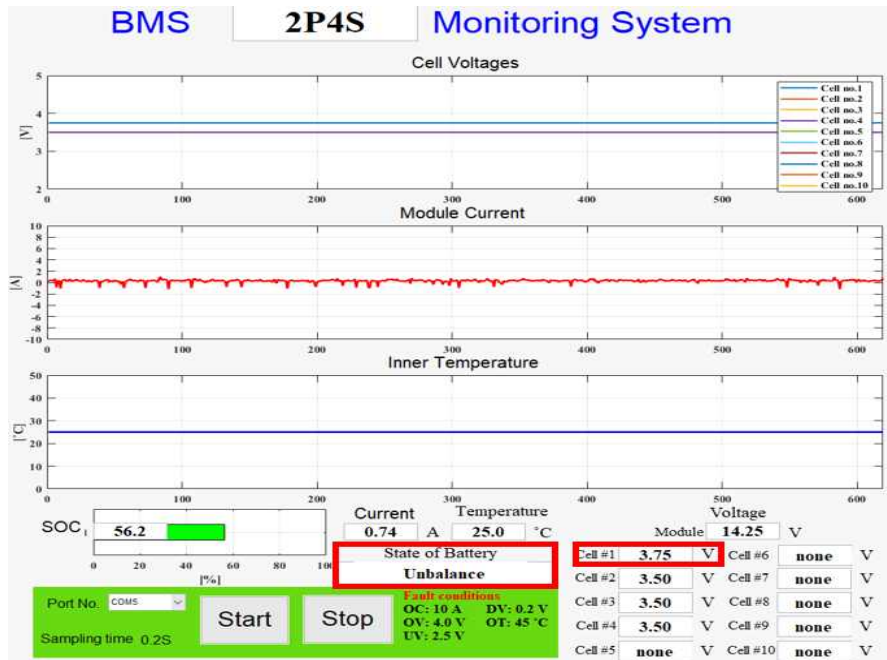


Fig. 5.5 Check the balancing status of 2P4S in the HMI

다음은 2P6S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 프로그램 내에서 임의로 셀 6번을 다른 셀보다 0.2V 높게 설정하여 결과를 확인하였다. Table 5.9에서 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 960은 2P6S, state가 300이므로 셀 밸런싱

상태인 것을 확인하였다.. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.9와 Fig. 5.6에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 동일함을 확인하였다.

Table 5.9 Check balancing status in 2P6S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	state	300	Cell Balancing
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Check Cell#6 Balancing Condition Total Voltage : 21.25V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.75	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
AD[8] : cell9	0.00		
AD[9] : cell10	0.00		
Current	AD[10]	0.35	Normal
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

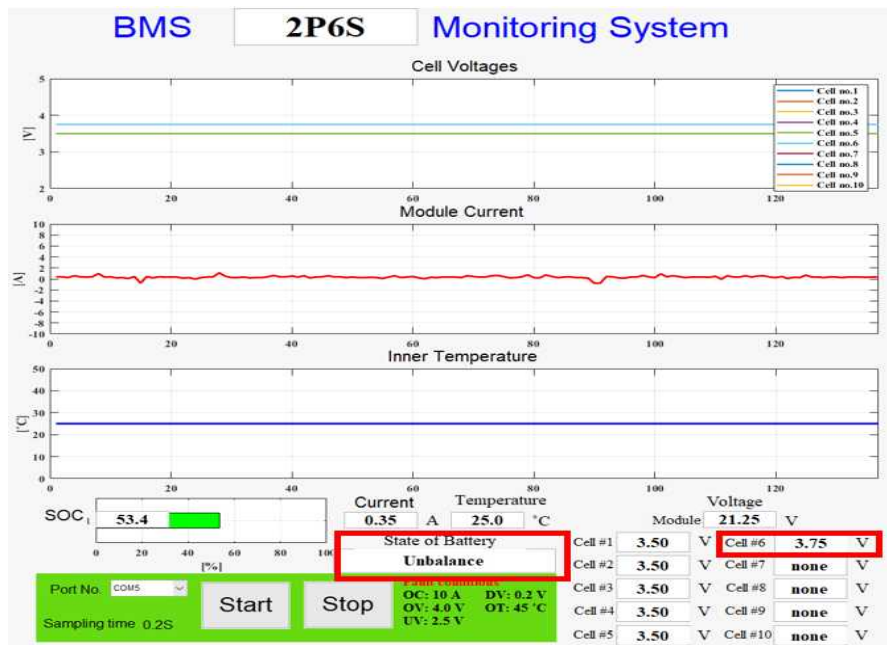


Fig. 5.6 Check the balancing status of 2P6S in the HMI

마지막으로, 2P10S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 프로그램 내에서 임의로 셀 10번을 다른 셀보다 0.2V 높게 설정하여 결과를 확인하였다. Table 5.10에 표기된

값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 910은 2P10S, state가 300이므로 셀 밸런싱 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[9](cell 10)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.10과 Fig. 5.7에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 동일함을 확인하였다

Table 5.10 Check balancing status in 2P10S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	state	300	Cell Balancing
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Check Cell#10 Balancing Condition Total Voltage : 35.26V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	3.50	
	AD[7] : cell8	3.50	
	AD[8] : cell9	3.50	
	AD[9] : cell10	3.76	
Current	AD[10]	0.04	Normal
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

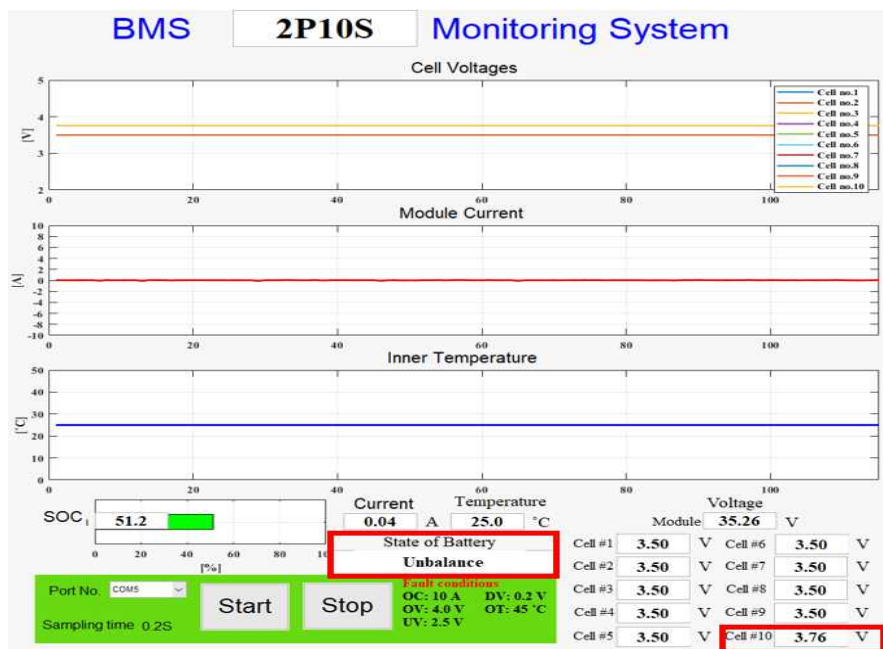


Fig. 5.7 Check the balancing status of 2P10S in the HMI

5.1.3 배터리 고장 조건에서 BMS 동작 시험

2P4S, 2P6S, 2P10S의 셀 적층 구조에서 폐배터리에서 과전압(4.0V), 저전압(2.5V), 충전 과전류(+5A), 방전 과전류(-5A), 온도 이상(45°C)의 고장 상황이 발생했을 경우를 가정하여 프로그램 내에서 각 고장에 대한 조건을 임의로 만들어 제안된 BMS의 동작 상황에 대한 결과를 E²Studio 프로그램 및 HMI에서 고장상태에 대한 결과를 확인하도록 한다.

(1) 과전압 시험

먼저, 2P4S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 셀 4번에 4.08V의 전압을 입력한다. 과전압 레벨 상태에 따른 결과를 Table 5.11과 같이 소프트웨어에 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 940은 2P4S, state가 100이므로 과전압 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.11과 Fig. 5.8에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

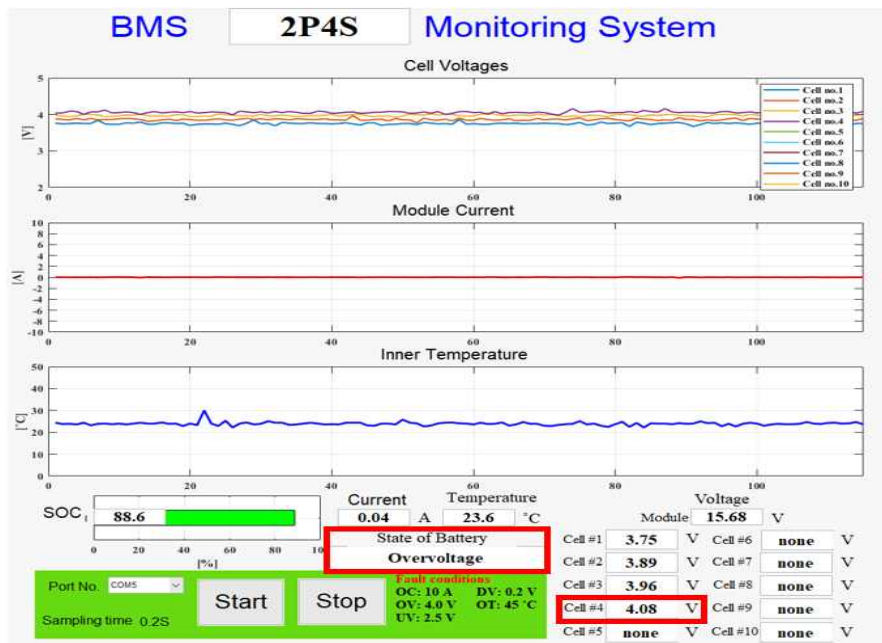


Fig. 5.8 Check the over voltage status of 2P4S in the HMI

Table 5.11 Check over voltage status in 2P4S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	state	100	Cell Over Voltage
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.75	Check Cell#4 Over Voltage condition Total Voltage : 15.68V
	AD[1] : cell2	3.89	
	AD[2] : cell3	3.96	
	AD[3] : cell4	4.08	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	0.02	Normal
Temperature	AD[11]	23.2	Normal

다음은, 2P6S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 셀 2번에 4.1V의 전압을 입력한다. 과전압 레벨 상태에 따른 결과를 Table 5.12와 같이 소프트웨어에 표기 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 960은 2P6S, state가 100이므로 과전압 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.12와 Fig. 5.9에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

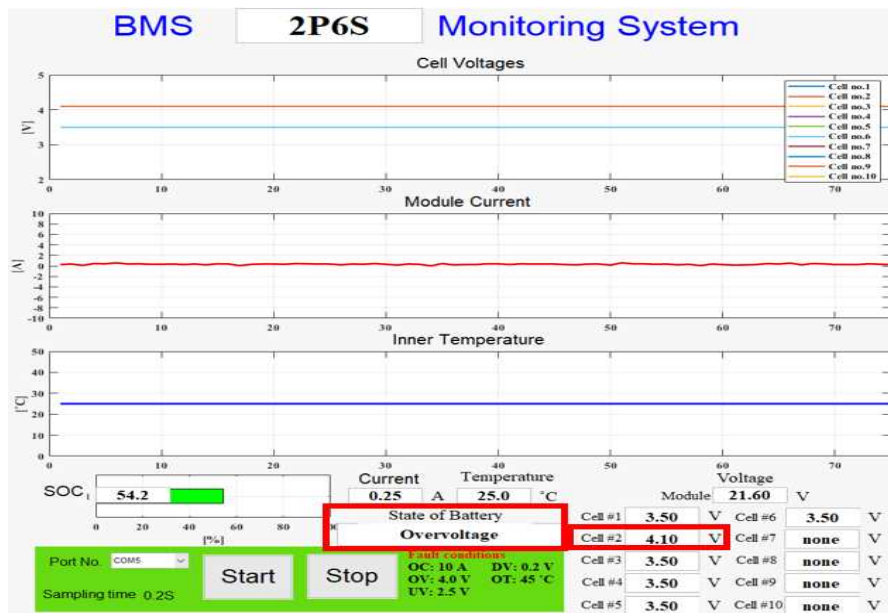


Fig. 5.9 Check the over voltage status of 2P6S in the HMI

Table 5.12 Check over voltage status in 2P6S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	state	100	Cell Over Voltage
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Check Cell#2 Over Voltage condition Total Voltage : 21.60V
	AD[1] : cell2	4.10	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	0.25	Normal
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

마지막으로, 2P10S 구조에서 진행하며, 셀 9번에 4.05V의 전압을 입력한다. 과전압 레벨 상태에 따른 결과를 Table 5.13과 같이 소프트웨어에 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 910은 2P10S, state가 100이므로 과전압 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[9](cell 10)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.13과 Fig. 5.10에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

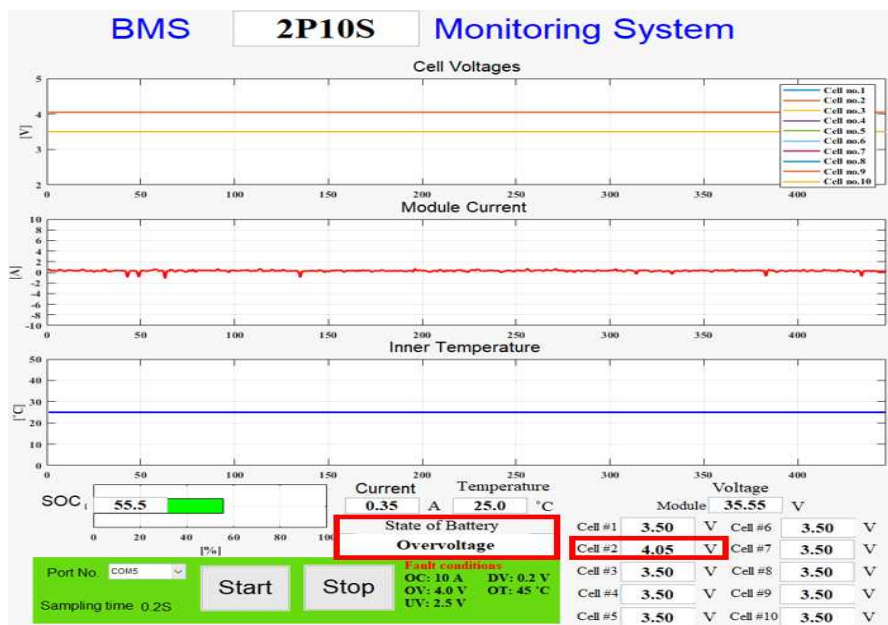


Fig. 5.10 Check the over voltage status of 2P10S in the HMI

Table 5.13 Check over voltage status in 2P10S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	state	100	Cell Over Voltage
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Check Cell#9 Over Voltage condition Total Voltage : 35.55V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	3.50	
	AD[7] : cell8	3.50	
	AD[8] : cell9	4.05	
	AD[9] : cell10	3.50	
Current	AD[10]	0.20	Normal
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

(2) 저전압 시험

먼저, 2P4S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 셀 1번에 2.49V의 전압을 입력한다. 저전압 레벨 상태에 따른 결과를 Table 5.14와 같이 소프트웨어에 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 940은 2P4S, state가 600이므로 저전압 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.14와 Fig. 5.11에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다

Table 5.14 Check low voltage status in 2P4S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	state	600	Cell Low Voltage
Cell Voltage	AD[0] : cell1	2.49	Check Cell#1 Low Voltage Condition Total Voltage : 13.02V
	AD[1] : cell2	3.51	
	AD[2] : cell3	3.53	
	AD[3] : cell4	3.49	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	0.03	Normal
Temperature	AD[11]	23.6	Normal

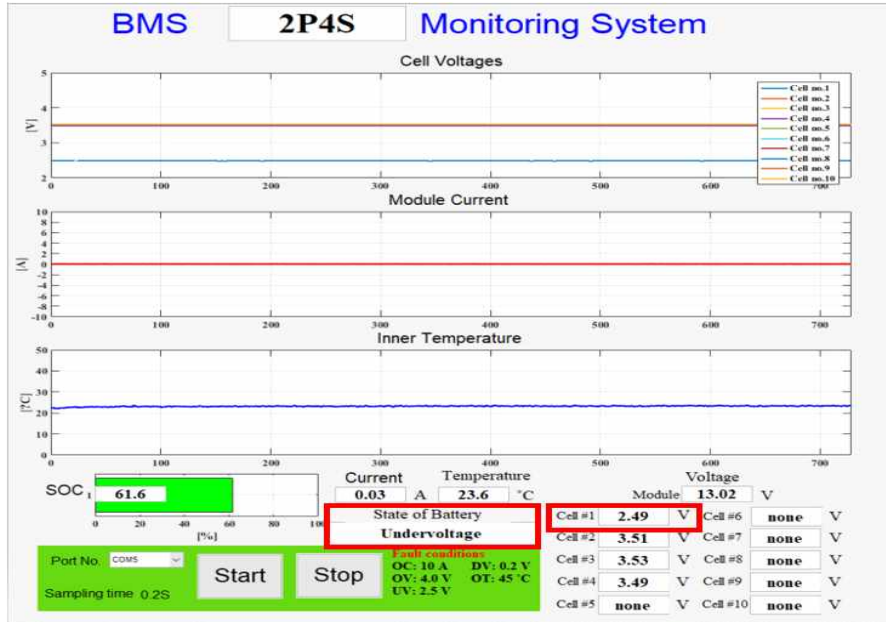


Fig. 5.11 Check the low voltage status of 2P4S in the HMI

다음은 2P6S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 셀 3번에 2.49V의 전압을 입력한다. 저전압 레벨 상태에 따른 결과를 Table 5.15와 같이 소프트웨어에 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 960은 2P6S, state가 600이므로 저전압 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.15와 Fig. 5.12에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.15 Check low voltage status in 2P6S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	state	600	Cell Low Voltage
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.51	Check Cell#3 Low Voltage Condition Total Voltage : 20.05V
	AD[1] : cell2	3.52	
	AD[2] : cell3	2.49	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.51	
	AD[5] : cell6	3.52	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	0.04	Normal
Temperature	AD[11]	24.5	Normal

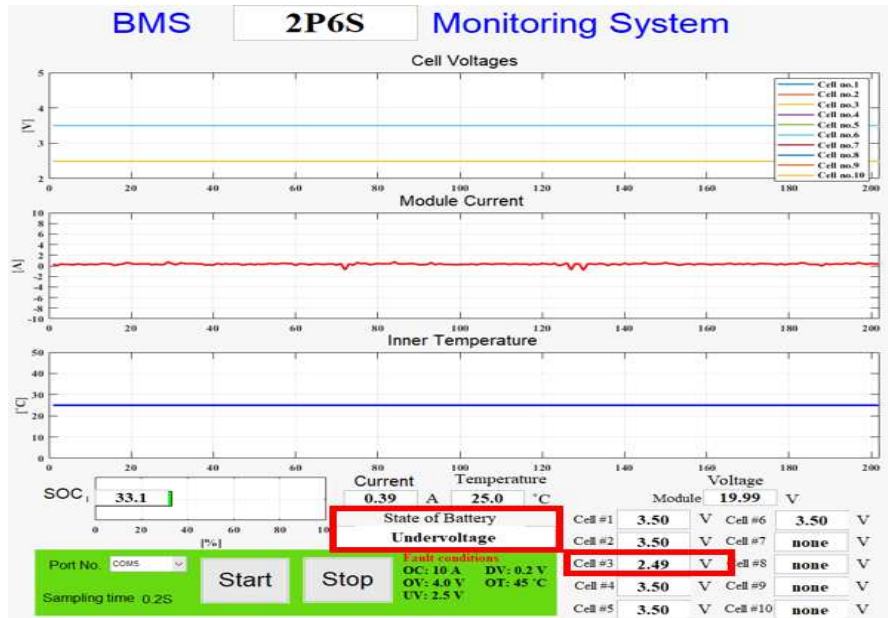


Fig. 5.12 Check the low voltage status of 2P6S in the HMI

마지막으로, 2P10S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 셀 9번에 2.49V의 전압을 입력한다. 저전압 레벨 상태에 따른 결과를 Table 5.16과 같이 소프트웨어에 표기된 값을 보면, 셀 적층 구조에서 cell_state의 910은 2P10S, state가 600이므로 저전압 상태인 것을 확인하였다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[9](cell 10)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.16과 Fig. 5.13에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.16 Check low voltage status in 2P10S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	state	600	Cell Low Voltage
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.51	Check Cell#9 Low Voltage Condition Total Voltage : 33.05V
	AD[1] : cell2	3.52	
	AD[2] : cell3	2.51	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.52	
	AD[5] : cell6	3.52	
	AD[6] : cell7	3.50	
	AD[7] : cell8	3.49	
	AD[8] : cell9	2.49	
	AD[9] : cell10	3.49	
Current	AD[10]	0.04	Normal
Temperature	AD[11]	24.5	Normal

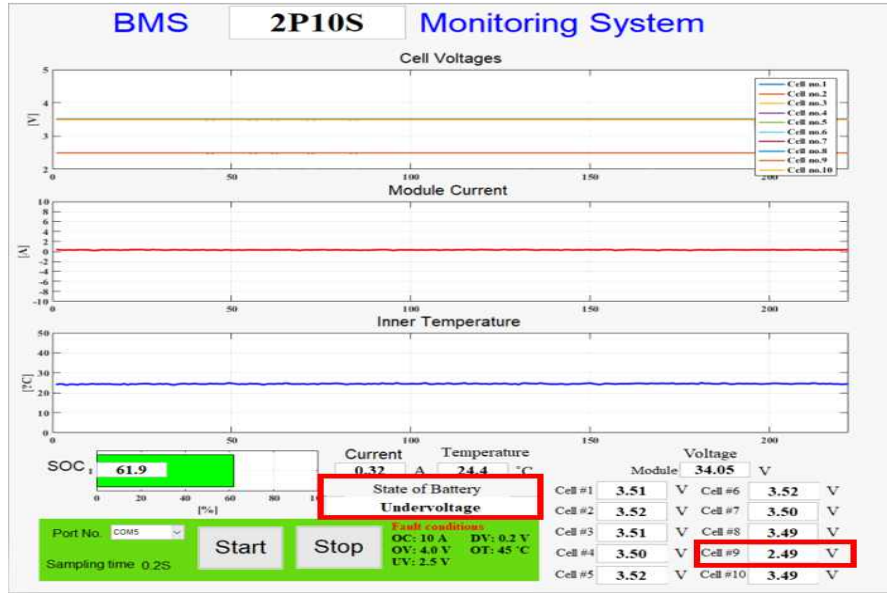


Fig. 5.13 Check the low voltage status of 2P10S in the HMI

(3) 충전 과전류 시험

먼저, 2P4S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 전류를 +5.06A 입력한 결과는 Table 5.17에 기재하였으며, cell_state의 940은 2P4S, state가 400이므로 충전 과전류 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.17과 Fig. 5.14의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.17 Check charging over current status in 2P4S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	state	400	+Over Current
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.52	Total Voltage : 14.08V
	AD[1] : cell2	3.52	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.54	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	5.06	Over Current
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

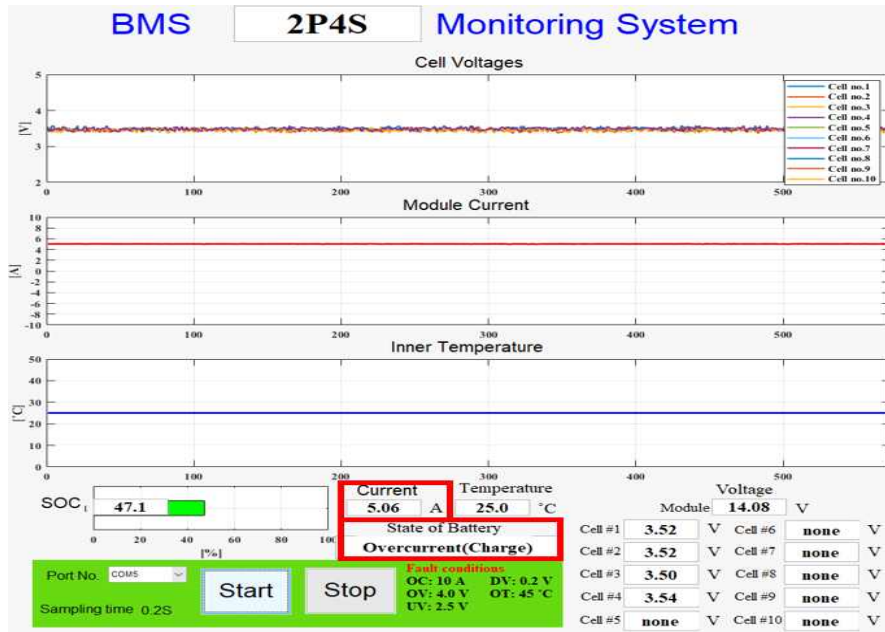


Fig. 5.14 Checking the charging over current status of 2P4S in the HMI

다음은 2P6S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 전류를 +5.02A 입력한 결과는 Table 5.18과 같이 기재되었으며, cell_state의 960은 2P6S, state가 400이므로 충전 과전류 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.18과 Fig. 5.15의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.18 Check charging over current status in 2P6S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	state	400	+Over Current
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Total Voltage : 21.00V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	5.02	Over Current
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

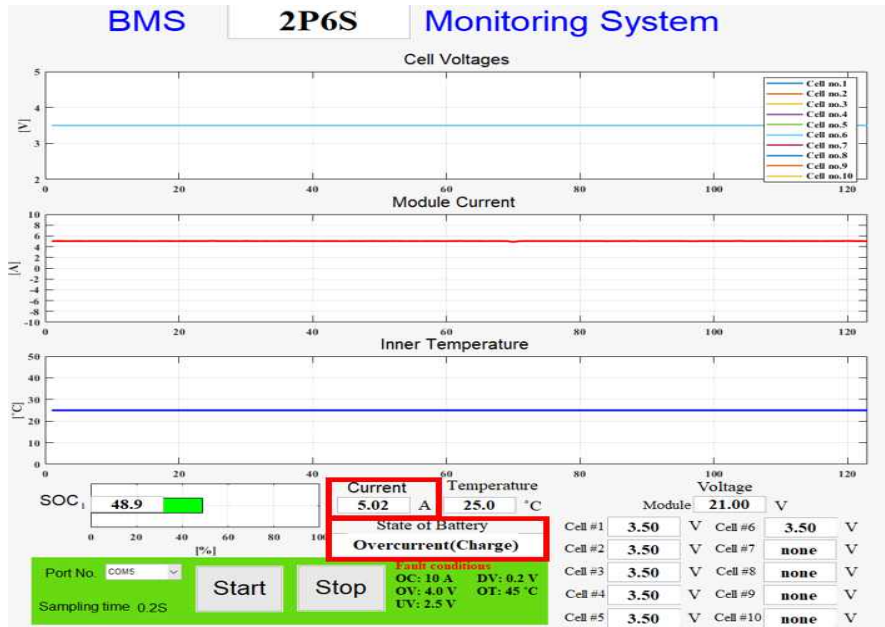


Fig. 5.15 Checking the charging over current status of 2P6S in the HMI

마지막으로, 2P10S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 전류를 +5.14A 입력한 결과는 Table 5.18과 같이 기재되었으며, cell_state의 910은 2P10S, state가 400이므로 충전 과전류 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[9](cell 10)까지 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.19와 Fig. 5.16의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.19 Check charging over current status in 2P10S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	state	400	+Over Current
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Total Voltage : 35.0V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	3.50	
	AD[7] : cell8	3.50	
	AD[8] : cell9	3.50	
	AD[9] : cell10	3.50	
Current	AD[10]	5.14	Over Current
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

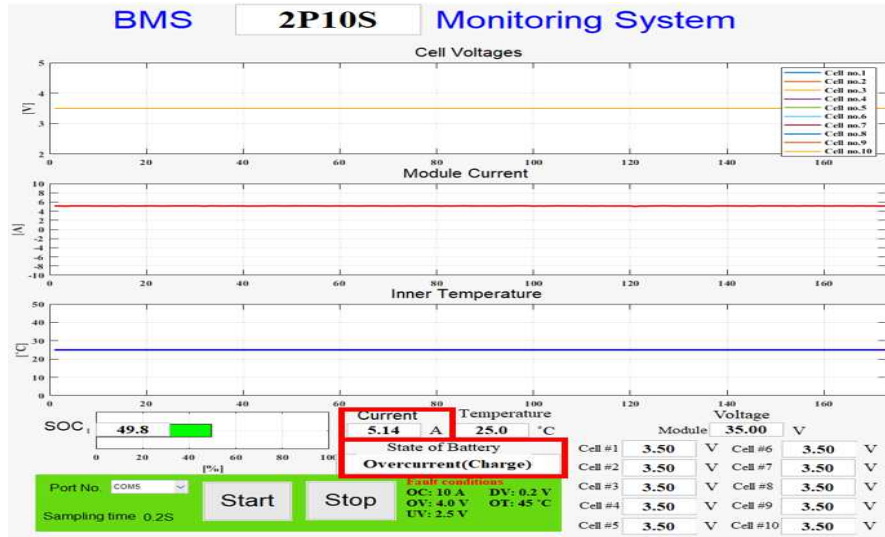


Fig. 5.16 Checking the charging over current status of 2P10S in the HMI

(4) 방전 과전류 시험

먼저, 2P4S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 전류를 -6.01A 입력한 결과는 Table 5.20과 같이 기재되었으며, cell_state의 940은 2P4S, state가 500이므로 방전 과전류 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.20과 Fig. 5.17의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.20 Check discharging over current status in 2P4S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	state	500	-Over Current
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.56	Total Voltage : 14.23V
	AD[1] : cell2	3.54	
	AD[2] : cell3	3.58	
	AD[3] : cell4	3.55	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
AD[9] : cell10	0.00		
Current	AD[10]	-6.01	Over Current
Temperature	AD[11]	24.8	Normal

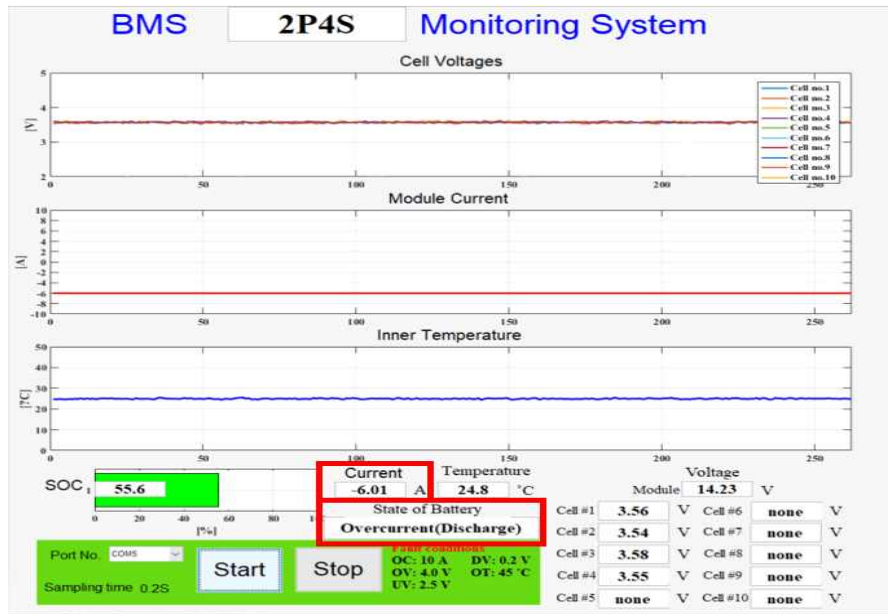


Fig. 5.17 Checking the discharging over current status of 2P4S in the HMI

다음은 2P6S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 전류를 -5.1A 입력한 결과는 Table 5.21과 같이 기재되었으며, cell_state의 960은 2P6S, state가 500이므로 방전 과전류 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.21과 Fig. 5.18의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.21 Check discharging over current status in 2P6S structure using

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	state	500	-Over Current
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Total Voltage : 21.00V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
AD[9] : cell10	0.00		
Current	AD[10]	-5.10	Over Current
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

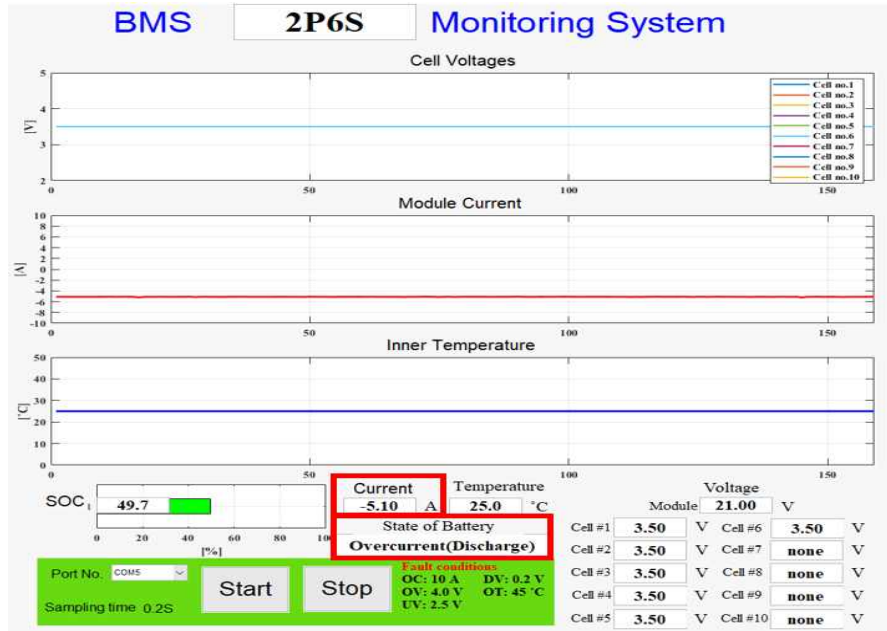


Fig. 5.18 Checking the discharging over current status of 2P6S in the HMI

마지막으로, 2P10S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 전류를 -5.1A 입력한 결과는 Table 5.21과 같이 기재되었으며, cell_state의 910은 2P10S, state가 500이므로 방전 과전류 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[9](cell 10)까지 인가되었고, 온도 및 전류는 Table 5.22와 Fig. 5.19의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.22 Check discharging over current status in 2P410S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	state	500	-Over Current
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Total Voltage : 21.00V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	3.50	
	AD[7] : cell8	3.50	
	AD[8] : cell9	3.50	
	AD[9] : cell10	3.50	
Current	AD[10]	-5.10	Over Current
Temperature	AD[11]	25.0	Normal

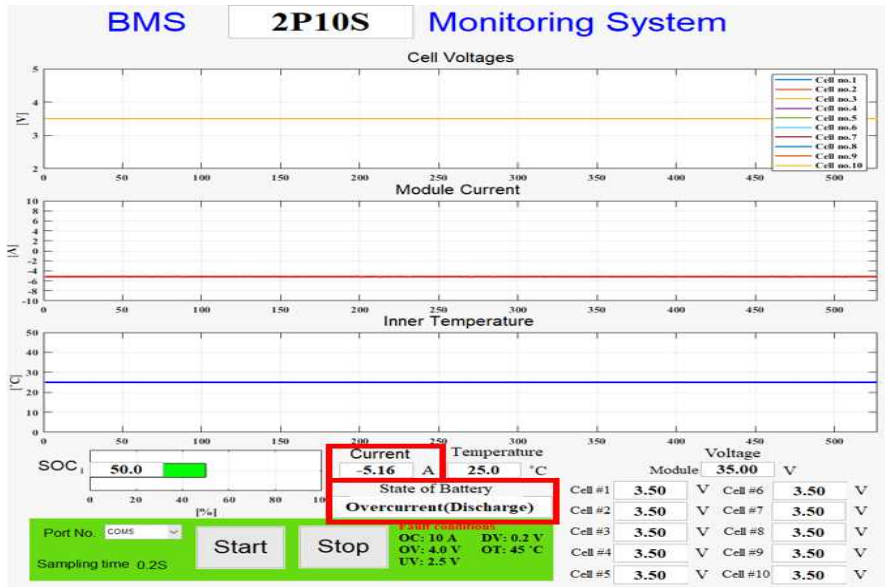


Fig. 5.19 Checking the discharging over current status of 2P10S in the HMI

(5) 온도 이상 시험

먼저, 2P4S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 온도를 45.1°C 입력한 상태에 따른 결과를 Table 5.23과 같이 기재되었으며, cell_state의 940은 2P4S, state가 200이므로 온도 이상 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[3](cell 4)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.23과 Fig. 5.20에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.23 Check temperature abnormality in 2P4S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	940	2P4S
	state	200	Temperature Error
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.56	Total Voltage : 14.29V
	AD[1] : cell2	3.57	
	AD[2] : cell3	3.58	
	AD[3] : cell4	3.58	
	AD[4] : cell5	0.00	
	AD[5] : cell6	0.00	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
AD[9] : cell10	0.00		
Current	AD[10]	0.03	Normal
Temperature	AD[11]	45.1	Temperature Error

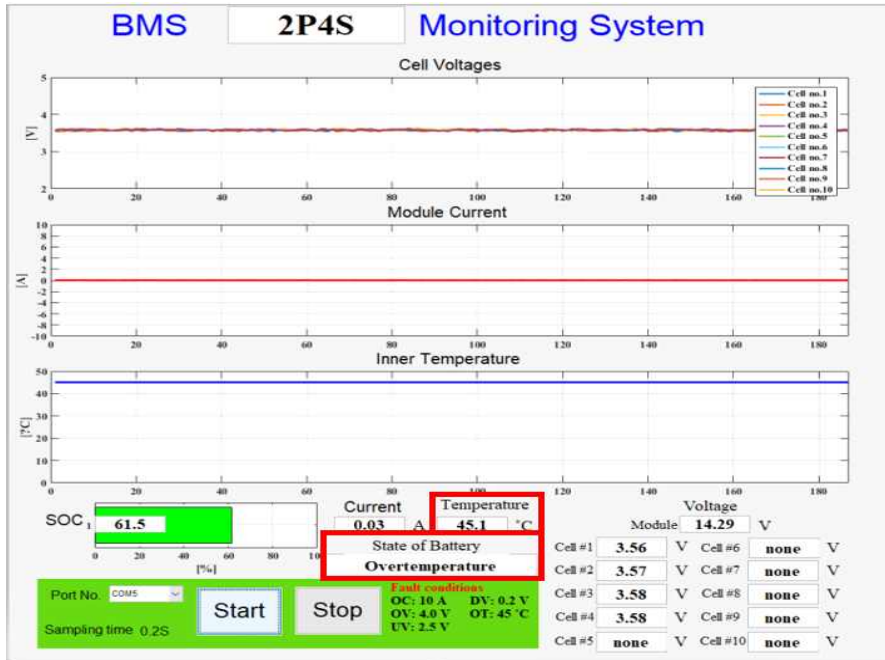


Fig. 5.20 Check the temperature abnormality of 2P4S on the HMI

다음은 2P6S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 온도를 45.1°C 입력한 상태에 따른 결과를 Table 5.24와 같이 기재되었으며, cell_state의 960은 2P6S, state가 200이므로 온도 이상 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.24와 Fig. 5.21에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.24 Check temperature abnormality in 2P6S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	960	2P6S
	state	200	Temperature Error
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Total Voltage : 21.00V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	0.00	
	AD[7] : cell8	0.00	
	AD[8] : cell9	0.00	
	AD[9] : cell10	0.00	
Current	AD[10]	0.39	Normal
Temperature	AD[11]	45.0	Temperature Error

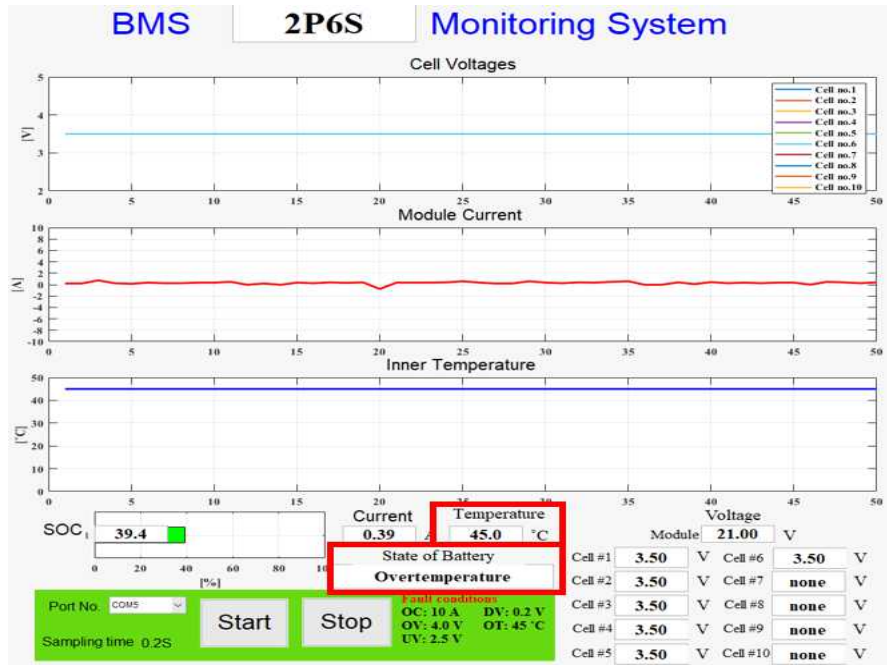


Fig. 5.21 Check the temperature abnormality of 2P6S on the HMI

마지막으로, 2P10S의 셀 적층 구조에서 진행하며, 온도를 45.0°C 입력한 상태에 따른 결과를 Table 5.25와 같이 기재되었으며, cell_state의 960은 2P6S, state가 200이므로 온도 이상 상태를 의미한다. 셀 전압은 AD[0](cell 1)에서 AD[5](cell 6)까지 전압이 인가됨을 확인하였고, 온도 및 전류는 Table 5.25와 Fig. 5.22에 각각 표기된 값의 비교를 통하여 계측 값이 일치함을 확인하였다.

Table 5.25 Check temperature abnormality in 2P10S structure using software

Division	Definition	Value	Note
Cell stack	cell_state	910	2P10S
	state	200	Temperature Error
Cell Voltage	AD[0] : cell1	3.50	Total voltage : 35.00V
	AD[1] : cell2	3.50	
	AD[2] : cell3	3.50	
	AD[3] : cell4	3.50	
	AD[4] : cell5	3.50	
	AD[5] : cell6	3.50	
	AD[6] : cell7	3.50	
	AD[7] : cell8	3.50	
	AD[8] : cell9	3.50	
AD[9] : cell10	3.50		
Current	AD[10]	0.44	Normal
Temperature	AD[11]	45.0	Temperature Error

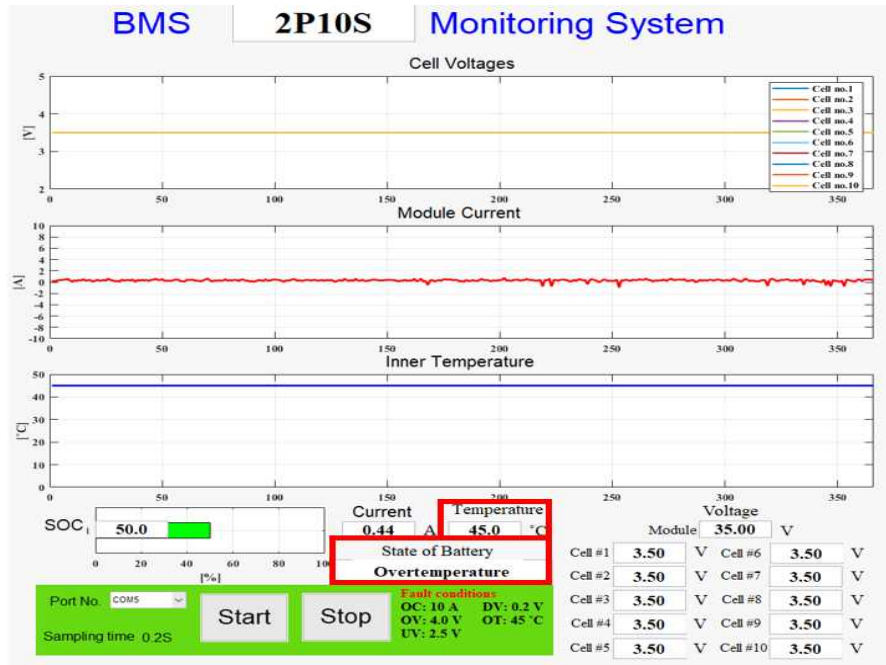


Fig. 5.22 Check the temperature abnormality of 2P10S on the HMI

5.2 BMS의 성능 시험 결과 분석

실제 폐배터리를 연계한 시험 전에 가상의 셀 적층 구조를 대상으로 제안된 BMS의 계측 정확성, 밸런싱 및 고장 동작에 대한 성능 시험을 수행하였다.

먼저 셀 적층 구조 확인 알고리즘의 검증은 위하여 셀 적층 구조를 고려하지 않고 DC 전원 공급기를 활용하여 임의의 셀 적층 구조의 2P4S, 2P6S, 2P10S 및 셀 연결 오류 시험까지 진행한 결과 정확하게 입력 전압에 대한 출력 값을 소프트웨어와 HMI에서 일치함을 확인하였다.

다음으로 모든 셀 적층 구조에 대하여 밸런싱 시험을 진행하였으며, 밸런싱 최저 전압을 기준으로 나머지 0.2V 이상 차이가 발생하는 전압의 셀이 밸런싱 동작을 수행하는 것을 확인하였다.

마지막으로, 과전압(4.0V), 저전압(2.5V), 과전류($\pm 6A$), 온도이상($45^{\circ}C$)의 고장 상황에 대한 시험을 셀 적층 구조별로 진행한 결과 발생한 고장 상황에 대하여 소프트웨어와 HMI에서 정확하게 표시 및 출력되는 것을 확인하였다.

해당 시험을 통하여 제안된 BMS의 계측, 고장 상태 인지, 밸런싱 상황에 따른 동작의 정확성을 확인하였다.

6. 제안된 BMS의 연계 시험 및 분석

6.1 충·방전 시뮬레이터 연계 시험 및 분석

제안된 BMS를 활용하여 충·방전 장비 연계 시험을 통한 개발품의 안전성을 검증하고자한다. 폐배터리의 충전과 방전에 의한 셀 시험에 대한 흐름도는 Fig. 6.1과 같으며, 이 기준을 바탕으로 세 가지 셀 적층 구조 2P4S, 2P6S, 2P10S에 동일하게 적용하여 시험을 진행한다.

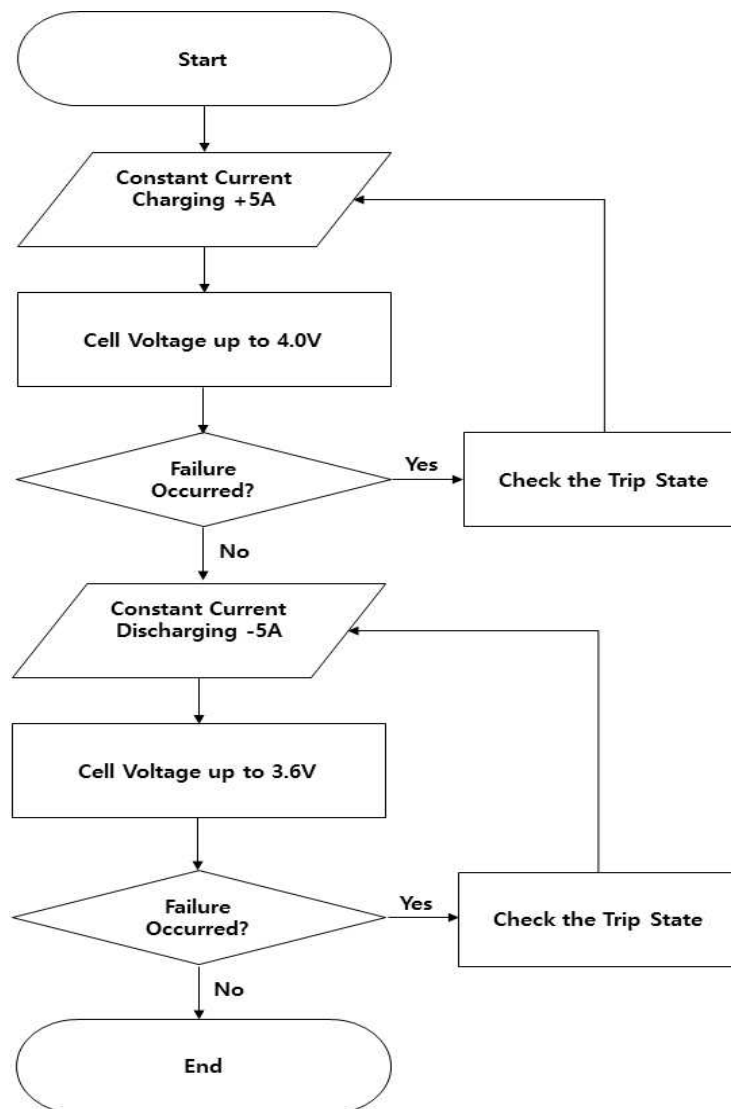


Fig. 6.1 Flow chart of charging/discharging test linked to waste battery

제안된 BMS를 활용한 충·방전 장비 연계 시험을 폐배터리의 셀 적층 구조에 따라 진행되며 셀 전압이 $3.6V \leq \text{Cell Voltage} \leq 4.0V$ 에 해당하는 SOC의 85~95% 영역에서 폐배터리 모듈 충·방전 전류는 $\pm 5A$ CC 모드로 인가되어 제안된 BMS를 연계한 폐배터리 셀 전압의 충전과 방전 시험을 진행한다. 데이터의 결과그래프 표현은 1초 평균값에 대한 표기로 나타내었다.

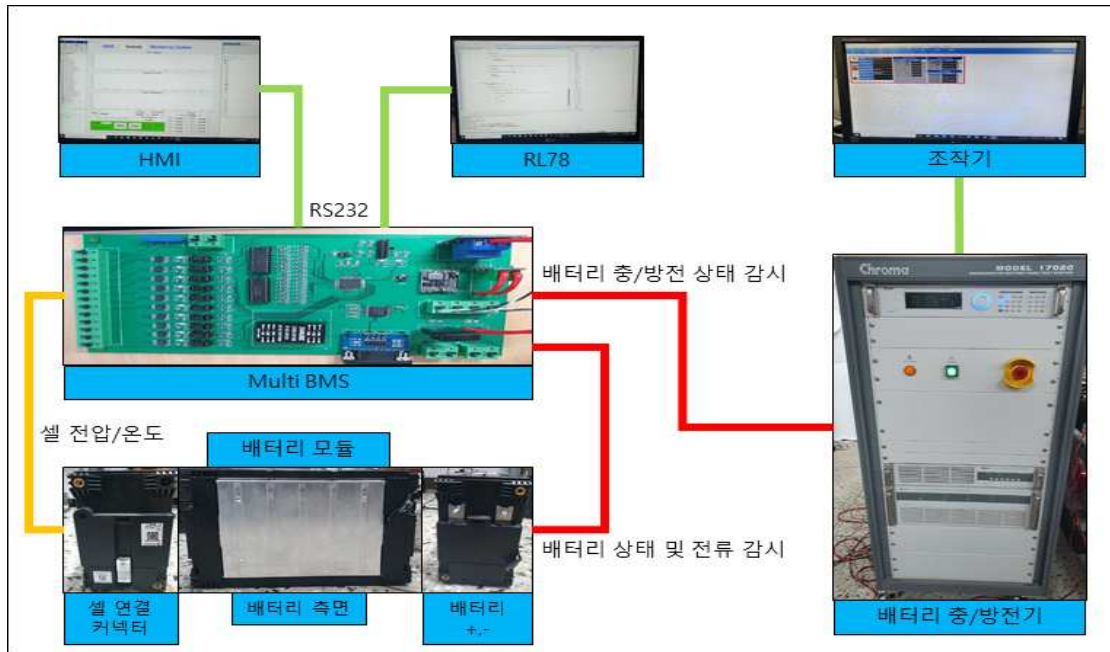


Fig. 6.2 Configuration diagram of charging/discharging test linked to waste battery

폐배터리를 연계 한 셀 전압 시험의 구성은 Fig. 6.2와 같다. 배터리 충·방전기는 BMS를 거쳐서 폐배터리 모듈과 연결되어 있다. 폐배터리의 충·방전에 따른 상태 및 전류 감시뿐만 아니라, 과전압과 과전류 등과 같은 고장 발생 시 신속한 직접 차단을 통하여 사고방지 및 안전예방을 고려하여 설계되었다.

또한, 셀 전압 및 온도의 감시는 왼쪽 측면의 커넥터를 통하여 BMS에 연결되어 셀의 상태는 소프트웨어를 통하여 실시간으로 계측되며, 그 결과가 HMI의 화면에서 확인할 수 있고 데이터의 저장이 가능하도록 설계되었다.

6.1.1 폐배터리 연계 충전 시험

앞서 언급하였듯이, 셀 적층 구조를 고려하지 않고 셀 전압이 $3.6V \leq \text{Cell}$

Voltage $\leq 4.0V$ 에 해당하는 SOC의 85~95% 영역에서 폐배터리의 충전전류는 +5A CC 모드로 인가되어 소프트웨어 및 HMI에서 충전시험에 대한 결과를 확인하도록 한다.

(1) 2P4S 구조 연계 충전 시험

2P4S 구조의 폐배터리를 연계한 시험결과는 Fig. 6.3과 같다.

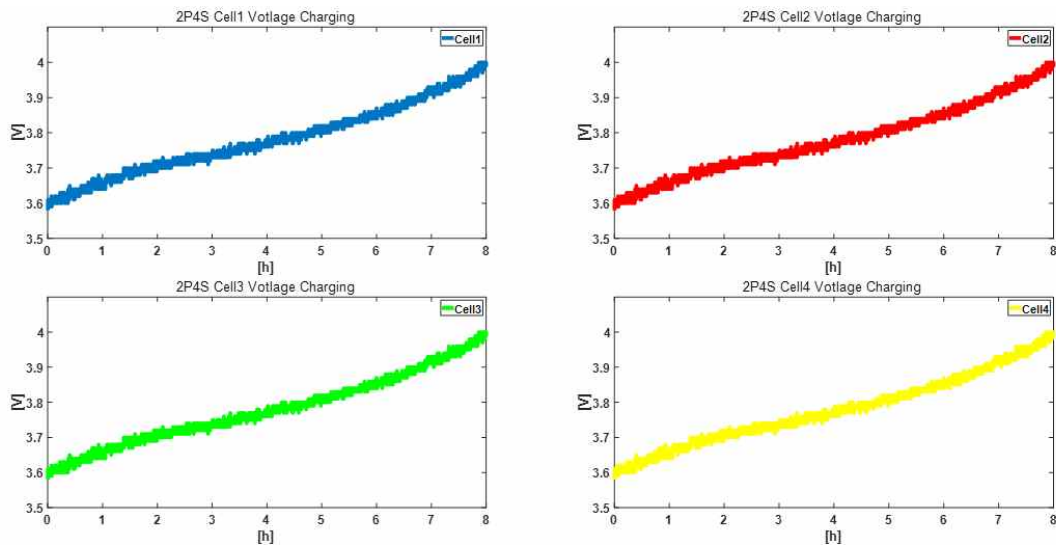


Fig. 6.3 2P4S cell charging graph using battery charger/discharger

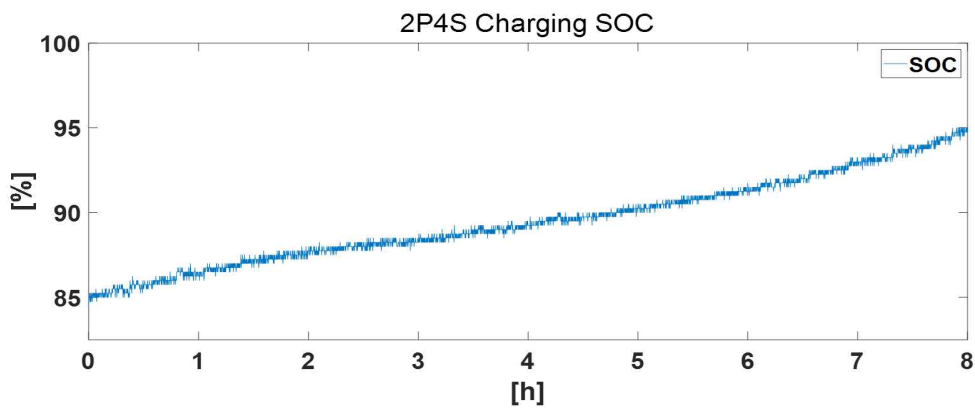


Fig. 6.4 2P4S cell charging SOC

폐배터리의 셀 전압이 Fig. 6.1의 충·방전 시험 흐름도에 따라 최소 3.58V에서 충전을 시작해서 최대 4.02V 지점에서 충전을 종료하였으며, 충전 전압은

8시간동안 0.41V에서 0.43V이 충전이 된 것을 확인하였다. 이 때, 충전 SOC는 Fig. 6.4와 같으며 약85%에서 시작해서 95%에서 종료된 것을 확인하였으며, Table 6.1에 충전 시험의 시작과 종료 및 증가 값에 대한 각 셀의 전압값을 기재하였다.

Table 6.1 Cell charging test results in 2P4S structure

Time[h]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	SOC[%]
8	Start	3.58	3.60	3.60	3.59	85
	Finish	4.01	4.02	4.02	4.00	95
	Increase	0.43	0.42	0.42	0.41	10

(2) 2P6S 구조 연계 충전 시험

2P6S 구조의 폐배터리를 연계한 시험결과는 Fig. 6.5와 같다.

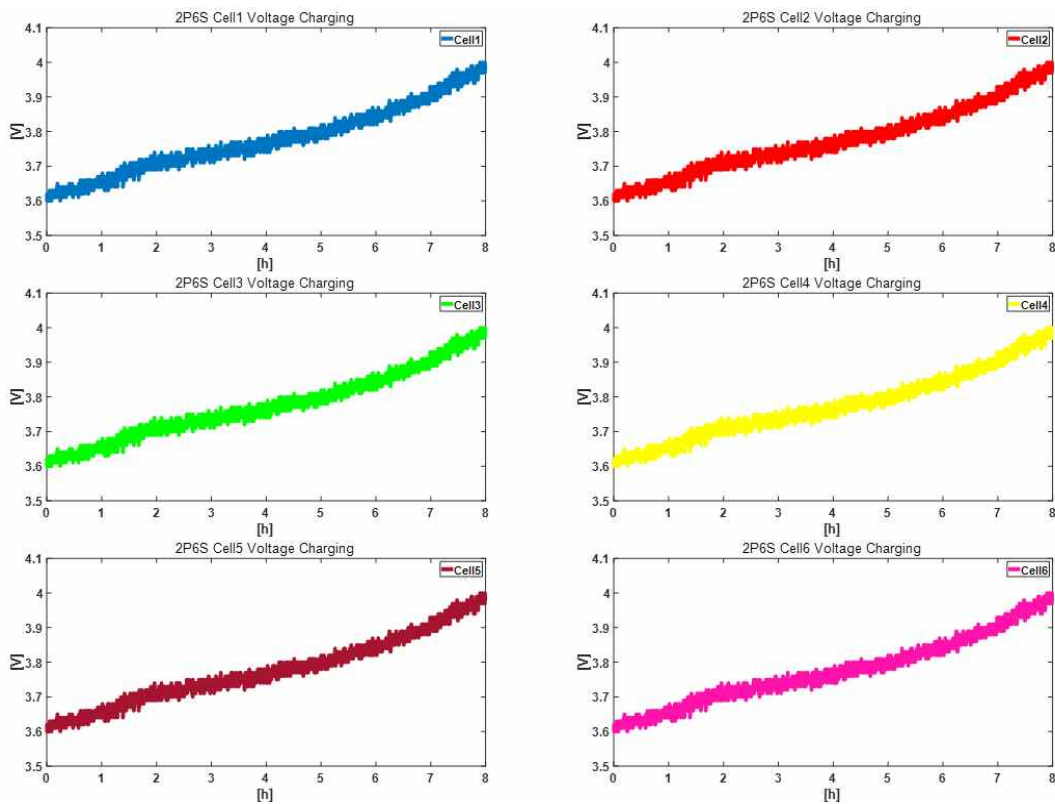


Fig. 6.5 2P6S cell charging graph using battery charger/discharger

폐배터리의 셀 전압이 Fig. 6.1의 충·방전 시험 흐름도에 따라 최소 3.59V에서 충전을 시작해서 최대 4.0V지점에서 충전을 종료하였으며, 충전 전압은 8시간동안

약 0.39V에서 0.4V가 충전이 된 것을 확인하였다. 이 때, 충전 SOC는 Fig. 6.6과 같으며 약95%에서 시작해서 85%에서 종료된 것을 확인하였으며, Table 6.2에 충전 시험의 시작과 종료 및 증가 값에 대한 각 셀의 전압값을 기재하였다.

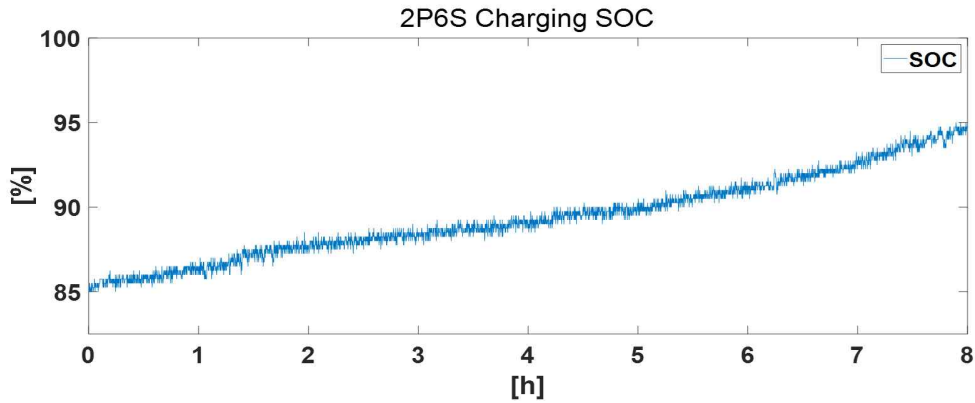


Fig. 6.6 2P6S cell charging SOC

Table 6.2 Cell charging test results in 2P6S structure

Time [h]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	SOC [%]
8	Start	3.59	3.59	3.61	3.61	85
	Finish	3.99	3.99	4.00	4.00	95
	Increase	0.40	0.40	0.39	0.39	10
	Charging	Cell5	Cell6			
	Start	3.61	3.59			
	Finish	3.99	3.99			
	Increase	0.38	0.40			

(3) 2P10S 구조 연계 충전 시험

2P10S 구조의 폐배터리를 연계한 시험에서 충전 SOC는 Fig. 6.7과 같으며 약85%에서 시작해서 95%에서 종료된 것을 확인하였으며, Table 6.3에 충전 시험의 시작과 종료 및 증가 값에 대한 각 셀의 전압값을 기재하였다.

폐배터리의 셀 전압이 Fig. 6.1의 충·방전 시험 흐름도에 따라 최소 3.56V에서 충전을 시작해서 최대 4.02V지점에서 충전을 종료하였으며, 충전 전압은 8시간동안 0.38V에서 0.43V가 충전이 된 것을 Fig 6.8의 그래프에서 확인하였다.

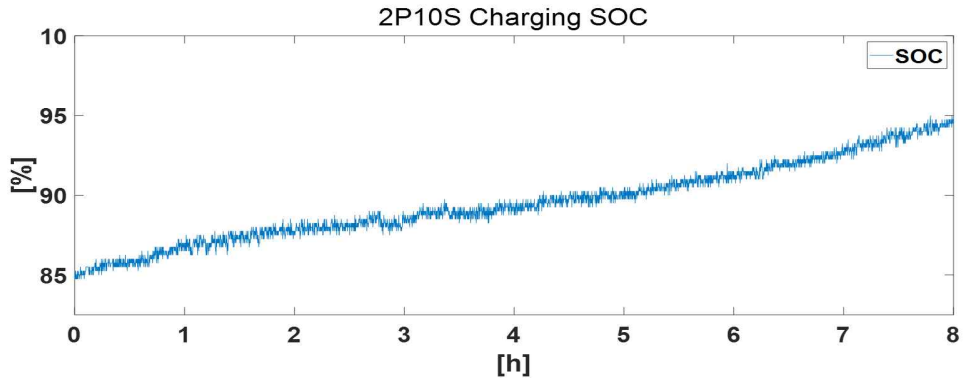


Fig. 6.7 2P10S cell charging SOC

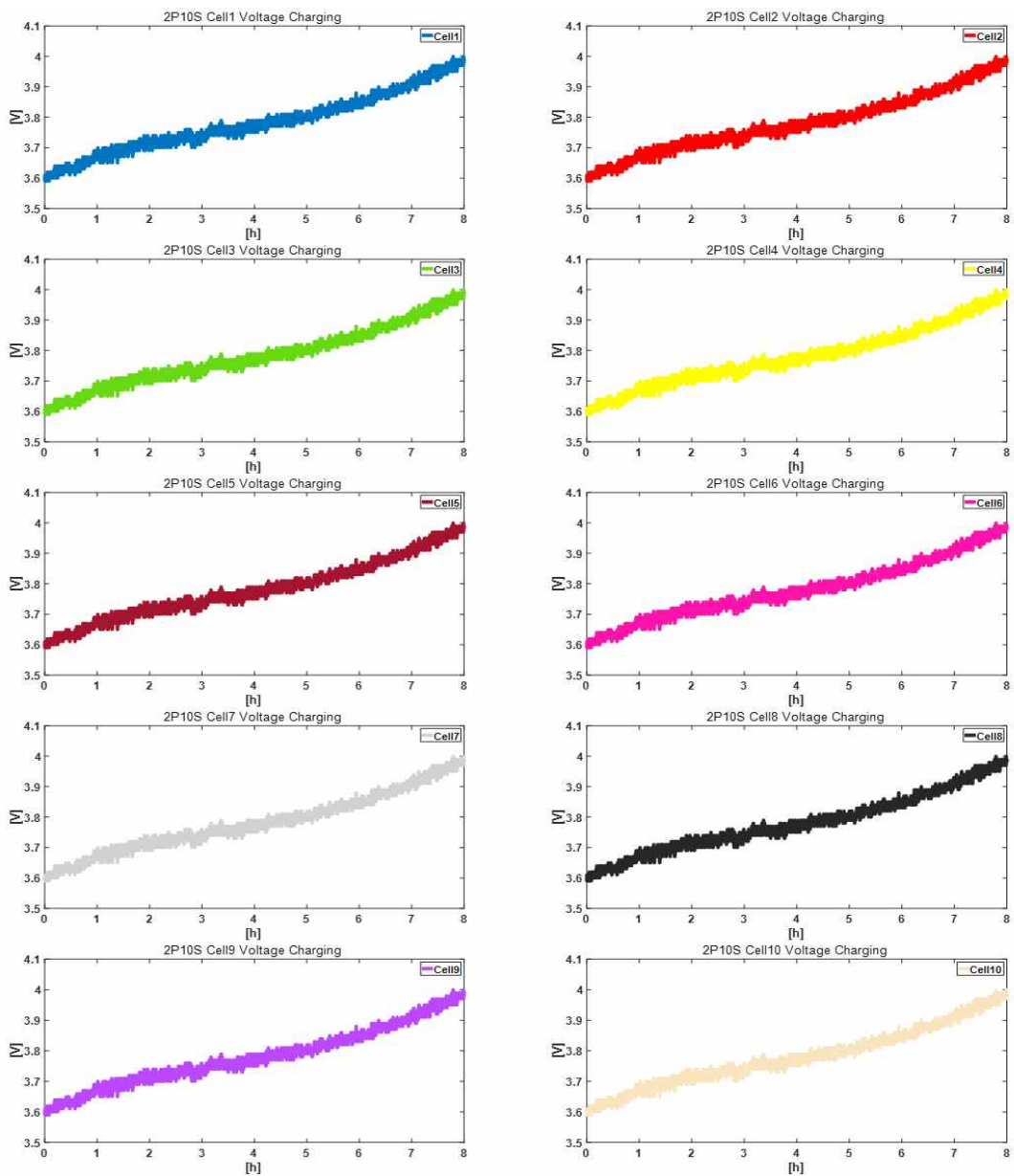


Fig. 6.8 2P10S cell charging graph using battery charger/discharger

Table 6.3 Cell charging test results in 2P10S structure

Time [h]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	SOC [%]
8	Start	3.58	3.60	3.60	3.59	85
	Finish	4.01	4.02	4.02	4.00	95
	Increase	0.43	0.42	0.42	0.41	10
	Charging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8	
	Start	3.56	3.56	3.61	3.62	
	Finish	3.99	3.99	3.99	4.00	
	Increase	0.43	0.43	0.38	0.38	
	Charging	Cell9	Cell10			
	Start	3.61	3.58			
	Finish	4.02	3.99			
	Increase	0.41	0.41			

6.1.2 폐배터리 연계 방전 시험

셀 적층 구조를 고려하지 않고 셀 전압이 $4.0V \geq \text{Cell Voltage} \geq 3.6V$ 에 해당하는 SOC의 95~85% 영역에서 폐배터리의 방전전류는 -5A CC 모드로 인가되어 소프트웨어 및 HMI에서 방전시험에 대한 결과를 확인하도록 한다.

(1) 2P4S 구조 연계 방전 시험

2P4S 구조의 폐배터리를 연계한 시험결과는 Fig. 6.9와 같다.

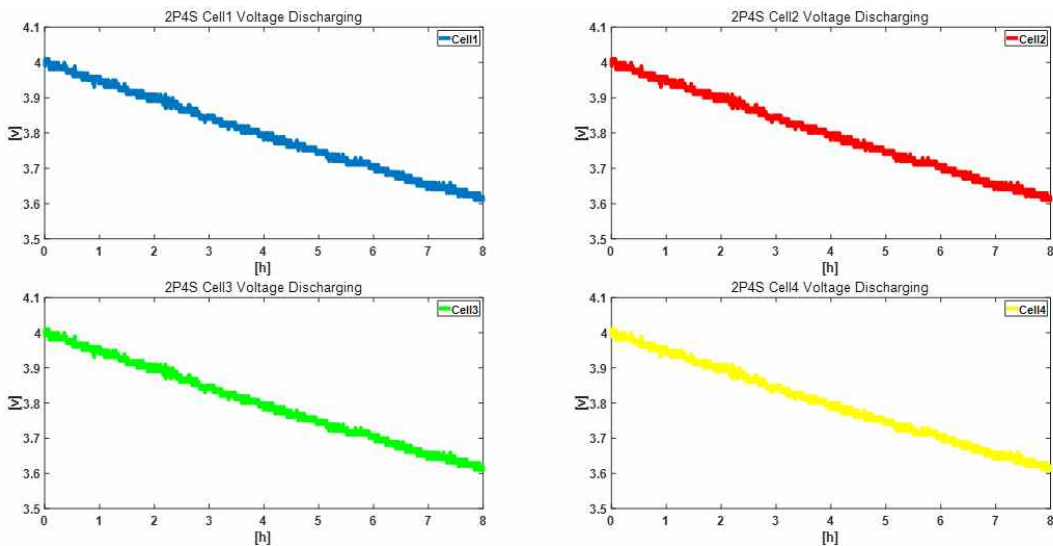


Fig. 6.9 2P4S cell discharging graph using battery charger/discharger

폐배터리의 셀 전압이 Fig. 6.1의 충·방전 시험 흐름도에 따라 최대 4.03V에서 방전을 시작해서 최소 3.60V지점에서 방전을 종료하였으며, 방전 전압은 8시간동안 0.4V에서 0.43V가 방전이 된 것을 확인하였다. 이 때, 방전 SOC는 Fig. 6.10과 같으며 약95%에서 시작해서 85%에서 종료된 것을 확인하였으며, Table 6.4에 방전 시험의 시작과 종료 및 증가 값에 대한 각 셀의 전압 값을 기재하였다.

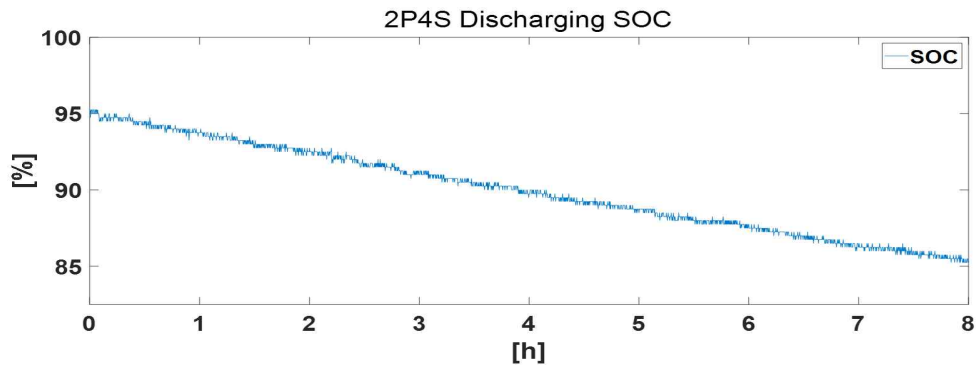


Fig. 6.10 2P4S cell discharging SOC

Table 6.4 Cell discharging test results in 2P4S structure

Time [h]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	SOC [%]
8	Start	4.03	4.00	4.03	4.01	95
	Finish	3.60	3.61	3.61	3.60	85
	Decrease	0.43	0.44	0.42	0.41	10

(2) 2P6S 구조 연계 방전 시험

2P6S 구조의 폐배터리를 연계한 시험결과는 Fig. 6.11과 같으며, 폐배터리의 셀 전압이 Fig. 6.1의 충·방전 시험 흐름도에 따라 최대 3.99V에서 방전을 시작해서 약 3.59V지점에서 방전을 종료하였으며, 방전 전압은 8시간동안 0.37V에서 0.4V가 방전이 된 것을 확인하였다. 이 때, 방전 SOC는 Fig. 6.12와 같으며 약95%에서 시작해서 85%에서 종료된 것을 확인하였으며, Table 6.5에 방전 시험의 시작과 종료 및 증가 값에 대한 각 셀의 전압 값을 기재하였다.

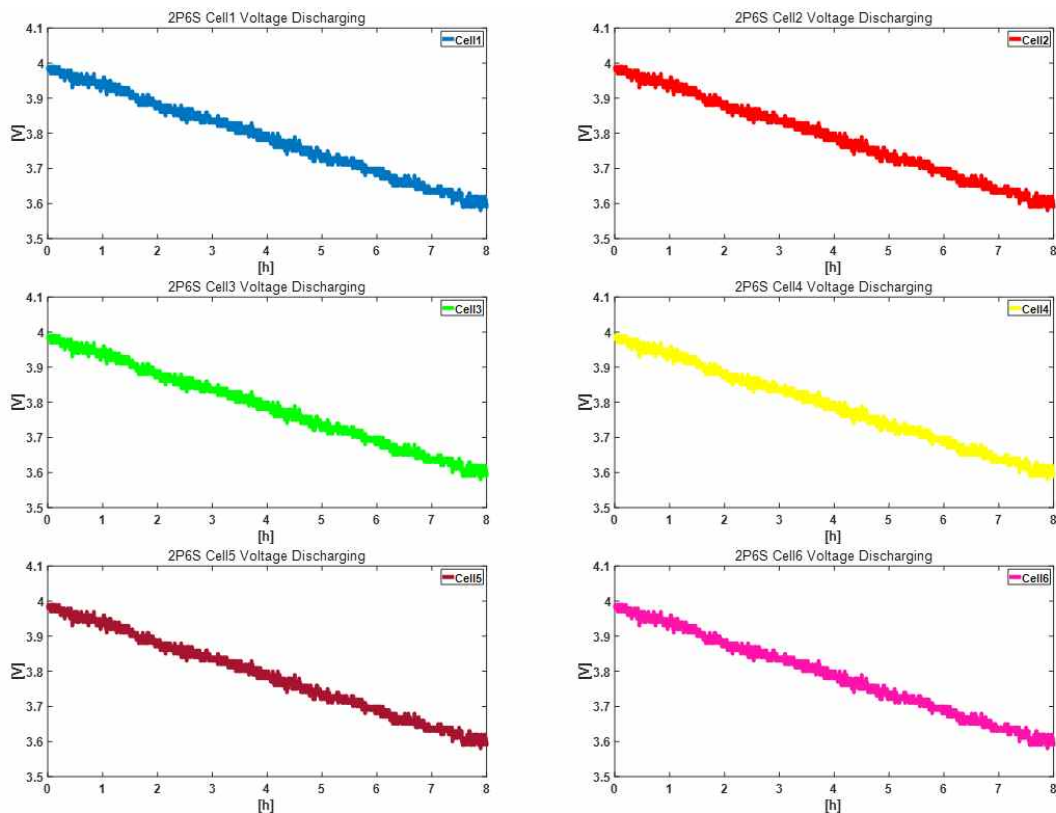


Fig. 6.11 2P6S cell discharging graph using battery charger/discharge

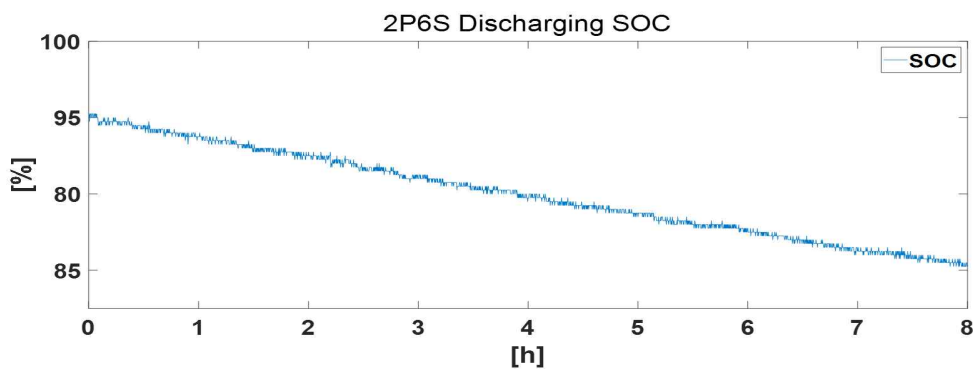


Fig. 6.12 2P6S cell discharging SOC

Table 6.5 2P6S cell discharging SOC

Time [h]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	SOC [%]
8	Start	3.99	3.98	3.99	3.99	95
	Finish	3.59	3.59	3.61	3.60	85
	Decrease	0.40	0.39	0.38	0.39	10
	Discharging	Cell5	Cell6			
	Start	3.98	3.99			
	Finish	3.61	3.61			
	Decrease	0.37	0.38			

(3) 2P10S 구조 연계 방전 시험

2P10S 구조 연계에 대한 시험결과는 Fig. 6.13과 같다.

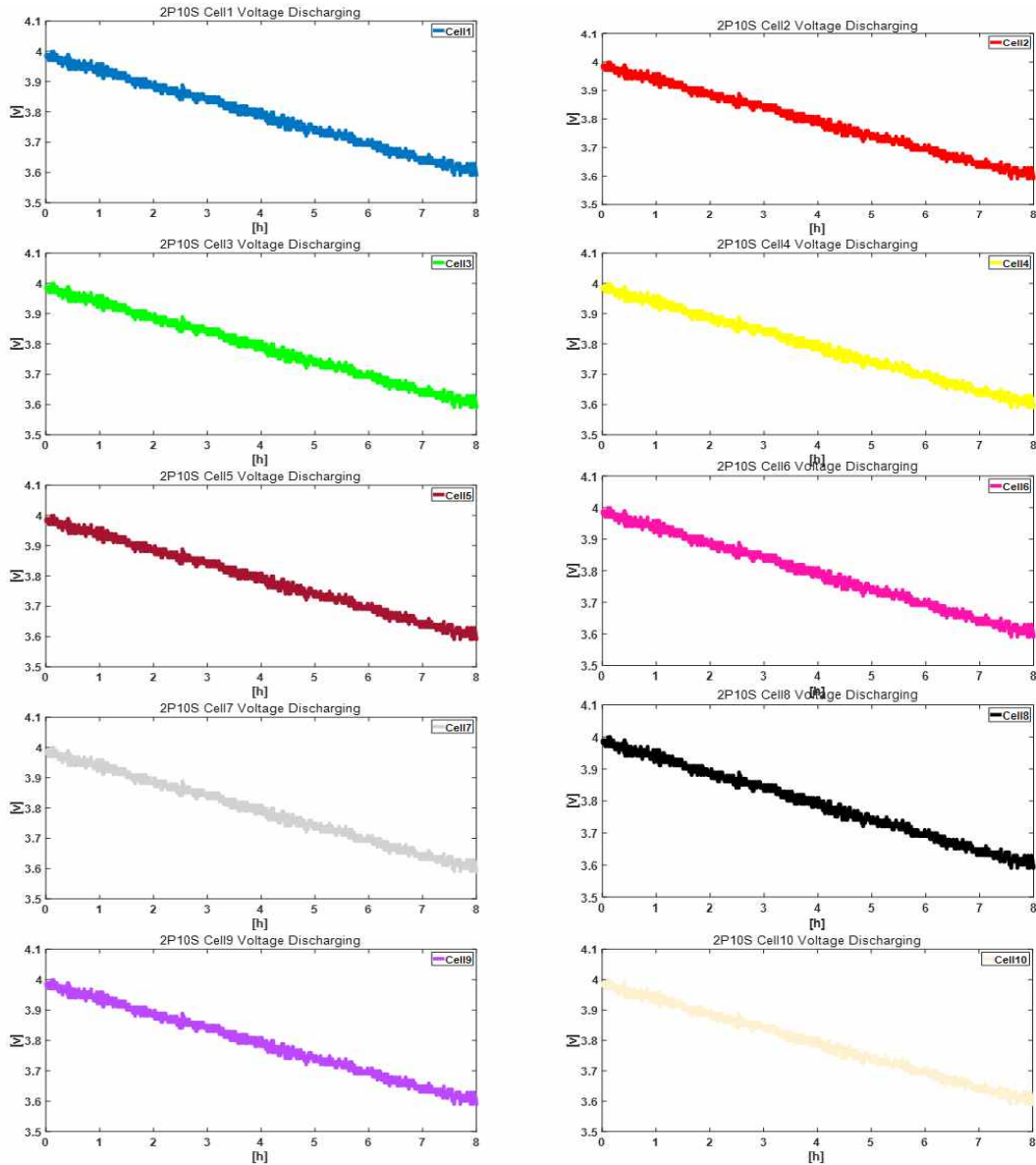


Fig. 6.13 2P10S cell discharging graph using battery charger/discharge

폐배터리의 셀 전압이 Fig. 6.1의 충·방전 시험 흐름도에 따라 최대 4.0V에서 방전을 시작해서 최소 3.56V 지점에서 방전을 종료하였으며, 방전 전압은 8시간동안 0.38V에서 0.43V가 방전이 된 것을 확인하였다. 이 때, 방전 SOC는 Fig. 6.14와 같으며 약95%에서 시작해서 85%에서 종료된 것을 확인하였으며, Table 6.6에 방전

시험의 시작과 종료 및 증가 값에 대한 각 셀의 전압 값을 기재하였다.

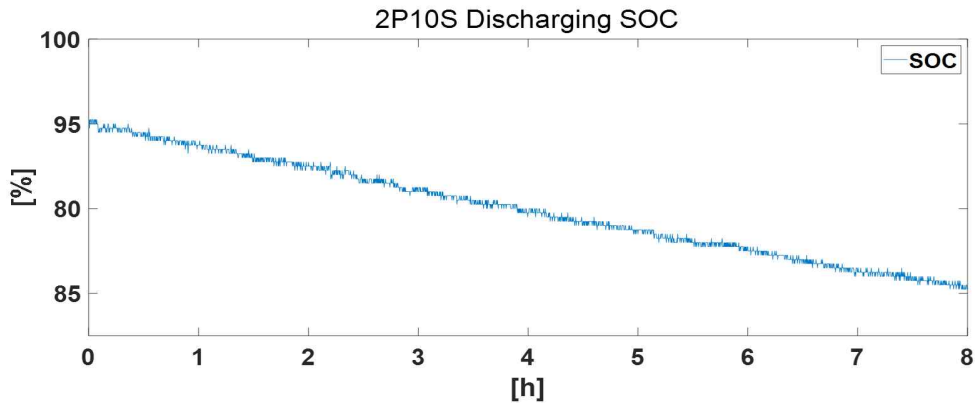


Fig. 6.14 2P10S cell discharging SOC

Table 6.6 Cell discharging test results in 2P10S structure

Time [h]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4	SOC [%]
8	Start	3.99	3.98	3.98	4.00	95
	Finish	3.59	3.62	3.61	3.59	85
	Decrease	0.40	0.38	0.38	0.41	10
	Discharging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8	
	Start	3.99	3.99	4.00	4.00	
	Finish	3.56	3.57	3.58	3.57	
	Decrease	0.43	0.42	0.52	0.44	
	Discharging	Cell9	Cell10			
	Start	4.00	3.99			
	Finish	3.58	3.58			
	Decrease	0.42	0.41			

6.1.3 폐배터리 연계 밸런싱 시험

실제 폐배터리의 셀 적층 구조에서 임의로 셀 전압차를 발생시킨 후 밸런싱 동작 일으켜 그에 대한 결과를 그래프를 통해 확인한다.

(1) 2P4S 구조 연계 밸런싱 시험

2P4S 구조 연계에 대한 시험결과는 Fig. 6.15와 같다. 4번 셀을 기준으로 나머지 셀에서 밸런싱이 시작되었고, 최대 3.90V에서 시작해서 최소 3.80V지점에서 동작이 종료 되었으며, 이 때 전압은 12시간동안 0.09V에서 0.1V의 전압이 감소하였으며 그에 따른 결과를 Table 6.7에 정리하였다.

Table 6.7 Cell balancing test results in 2P4S structure

Time [h]	Balancing	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
12	Start	3.90	3.90	3.90	3.68
	Finish	3.81	3.80	3.80	
	Decrease	0.09	0.10	0.10	

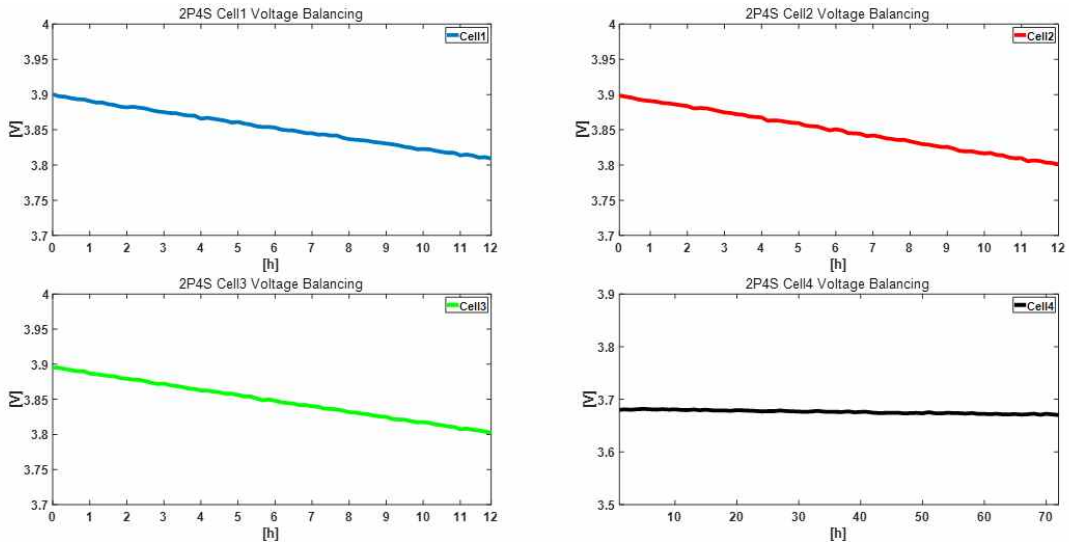


Fig. 6.15 Cell balancing graph in 2P4S structure

(2) 2P6S 구조 연계 밸런싱 시험

2P6S 구조 연계에 대한 시험결과는 Fig. 6.16과 같다. 6번 셀을 기준으로 나머지 셀에서 밸런싱이 시작되었고, 3.90V에서 시작해서 3.80V지점에서 동작이 종료 되었으며, 이 때 전압은 12시간동안 0.10V 전압이 감소하였으며 그에 따른 결과를 Table 6.8에 정리하였다.

Table 6.8 Cell balancing test results in 2P6S structure

Time [h]	Balancing	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
12	Start	3.90	3.90	3.90	3.90
	Finish	3.80	3.80	3.80	3.80
	Decrease	0.10	0.10	0.10	0.10
	Balancing	Cell5	Cell6		
	Start	3.90	3.68		
	Finish	3.80			
	Decrease	0.10			

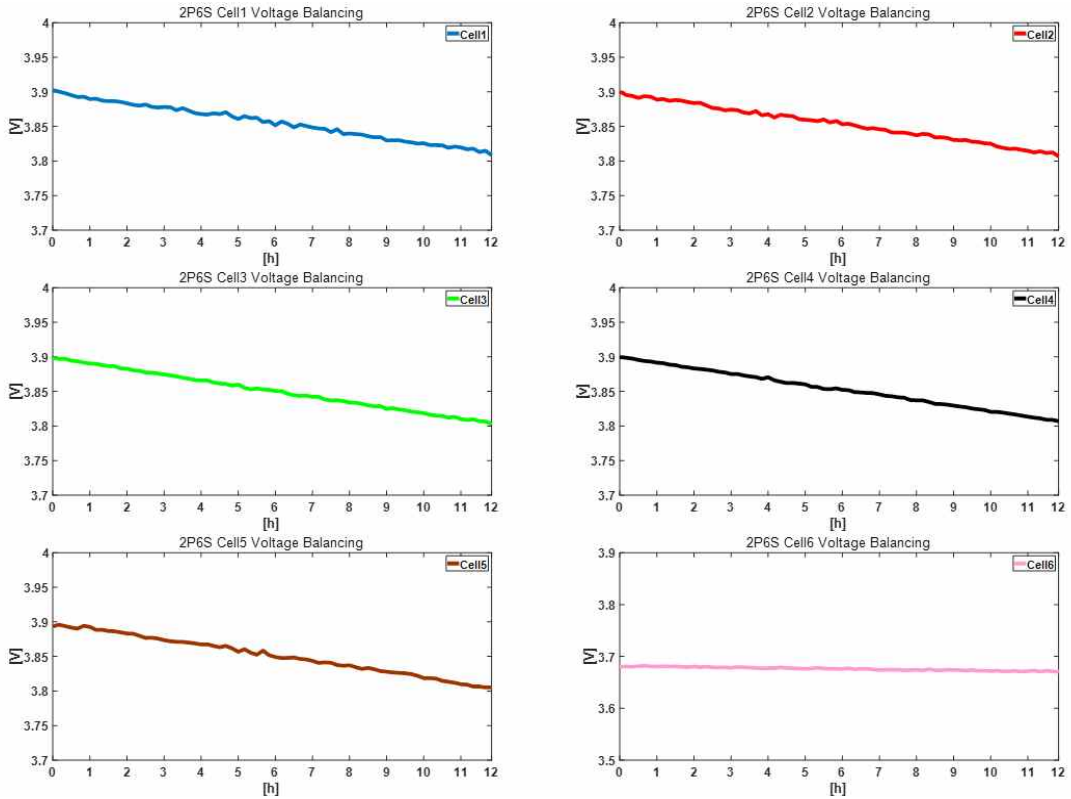


Fig. 6.16 Cell balancing graph in 2P6S structure

(3) 2P10S 구조 연계 밸런싱 시험

2P10S 구조 연계에 대한 시험결과는 Fig. 6.17과 같다. 10번 셀을 기준으로 나머지 셀에서 시작되었고, 3.9V에서 시작해서 3.8V지점에서 동작이 종료 되었으며, 이 때 전압은 12시간동안 0.1V 전압이 감소하였으며 그에 따른 결과를 Table 6.9에 정리하였다.

Table 6.9 Cell balancing test results in 2P10S structure

Time [h]	Balancing	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
12	Start	3.90	3.90	3.90	3.90
	Finish	3.81	3.80	3.80	3.80
	Decrease	0.09	0.10	0.10	0.10
	Balancing	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	3.90	3.90	3.90	3.90
	Finish	3.80	3.80	3.80	3.80
	Decrease	0.10	0.10	0.10	0.10
	Balancing	Cell9	Cell10		
	Start	3.90			
	Finish	3.80	3.68		
	Decrease	0.10			

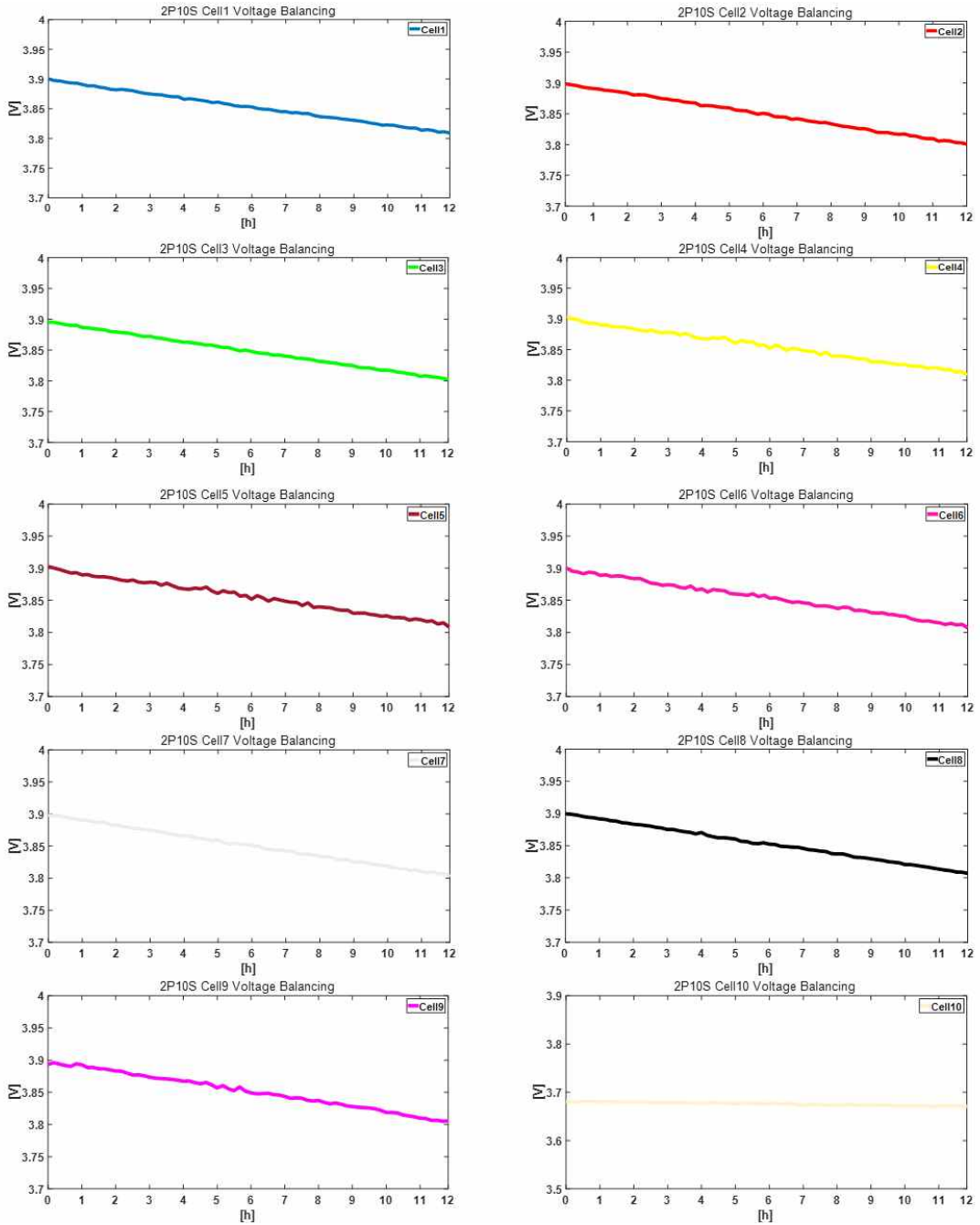


Fig. 6.17 Cell balancing graph in 2P10S structure

6.2 폐배터리 연계 시험 결과 분석

셀 적층 구조 확인 알고리즘을 활용하여 폐배터리의 구조를 고려하지 않은 상태에서 충·방전 시뮬레이터 장비를 연계하여 폐배터리의 충전, 방전 및 밸런싱 시험을 수행하였다.

충·방전 시험에서 셀 전압은 약 3.6V에서 4.0V, SOC는 85%에서 95%의 범위에서 8시간 동안 거의 동일한 패턴과 추세를 보이고 있었으며, 어떠한 고장 상황 없이 안전하게 동작하는 것을 확인하였다.

밸런싱 시험 또한 셀 적층 구조에 상관없이 약 12시간동안 밸런싱 동작을 수행한 결과 셀 전압은 약 3.9V에서 3.8V로 0.1V 하강한 결과 보였으며, 어떠한 고장 상황 없이 모든 구조의 셀에서 유사한 값을 얻을 수 있었다.

해당 시험을 통하여 제안된 BMS의 계측 정확성뿐만 아니라, 셀 적층 구조에 영향 없이, 폐배터리와 연동하여 장시간 동작함에 있어 안전성을 검증하였다.

7. 연계 시험 결과 비교 분석

7.1 충전 시험 결과 비교 분석

제안된 BMS를 폐배터리의 2P4S, 2P6S, 2P10S의 셀 적층 구조에 대하여 충·방전 시뮬레이터를 연계하여 충전과 방전 그리고 밸런싱 시험을 진행하였다. 이 결과를 바탕으로 제주테크노파크에서 2P4S 셀 적층 구조의 폐배터리 규격의 충·방전 시험 데이터와 비교를 통하여 제안된 BMS의 유효성을 검증하도록 한다. 참고로, 실증데이터 주기(1분)와 시험 데이터의 주기(1초)가 상이하기 때문에 시험 데이터 주기를 1분 평균값으로 변경하여 비교를 진행하였다.

제주테크노파크에서 충전 시험 결과와 제안된 BMS를 연계한 셀 적층 구조별 충전 시험에 대한 결과를 비교 분석 한다. 여기서, (R)은 실증 데이터, (T)는 제안된 BMS의 시험의 결과 그래프이다.

7.1.1 2P4S 구조의 시험 결과 비교 분석

2P4S 구조에서 충전 시험 비교 결과는 Fig. 7.1과 같다.

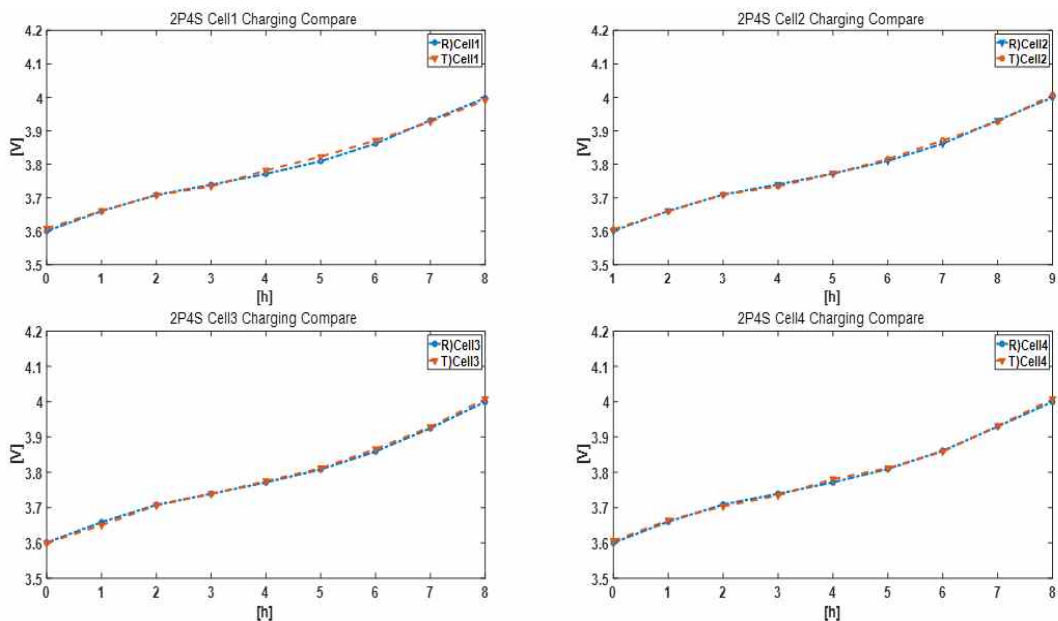


Fig. 7.1 Comparison of charging test results in 2P4S structure

Table 7.1의 결과를 보면, 충전시작 전압은 약 3.6V였으며, 종료 전압값은 4.0V로써, 두 데이터의 충전 시작에서 정확도는 99.4%에서 99.7%이며, 충전종료 전압의 정확도는 99.5%에서 100%이다.

Table 7.1 Comparison of charging test results in 2P4S structure

Test data [V]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.58	3.60	3.60	3.59
Substantiation data [V]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.60	3.61	3.61	3.61
Accuracy [%]	Finish	4.00	4.00	4.00	4.00
	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	99.4	99.7	99.7	99.4
	Finish	99.8	99.5	99.5	100

7.1.2 2P6S 구조의 시험 결과 비교 분석

2P6S 구조에서 충전 시험 비교 결과는 Fig. 7.2와 같다.

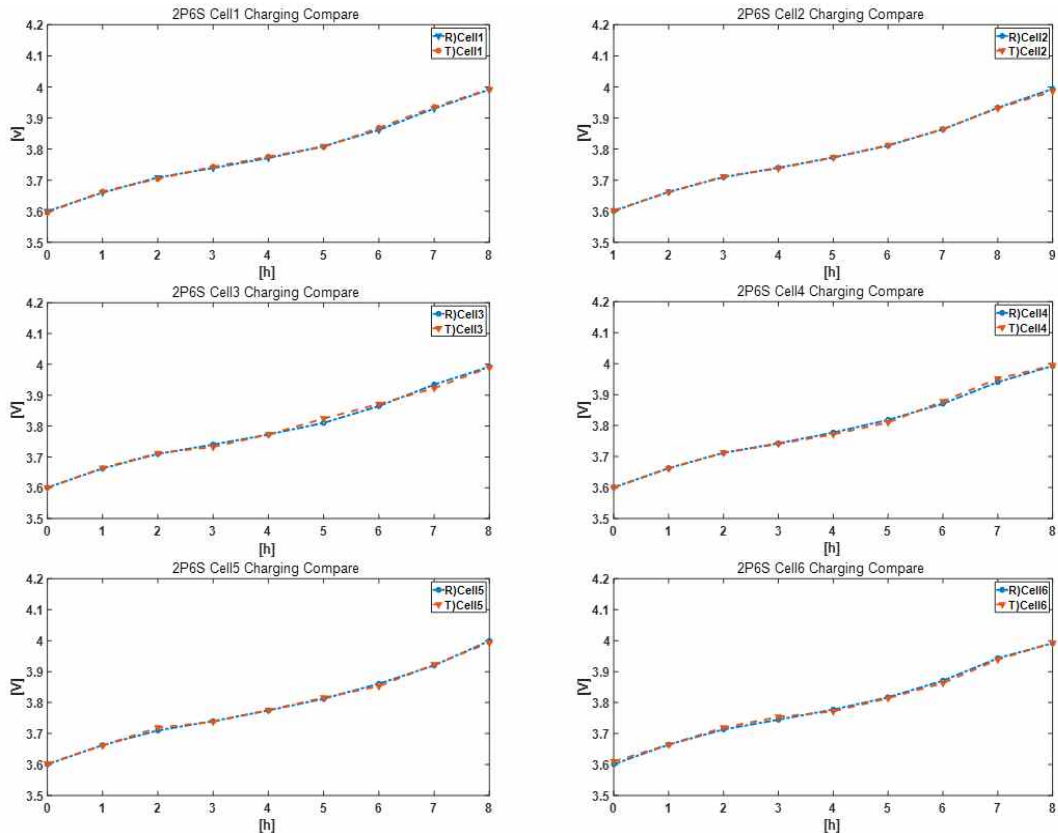


Fig. 7.2 Comparison of charging test results in 2P6S structure

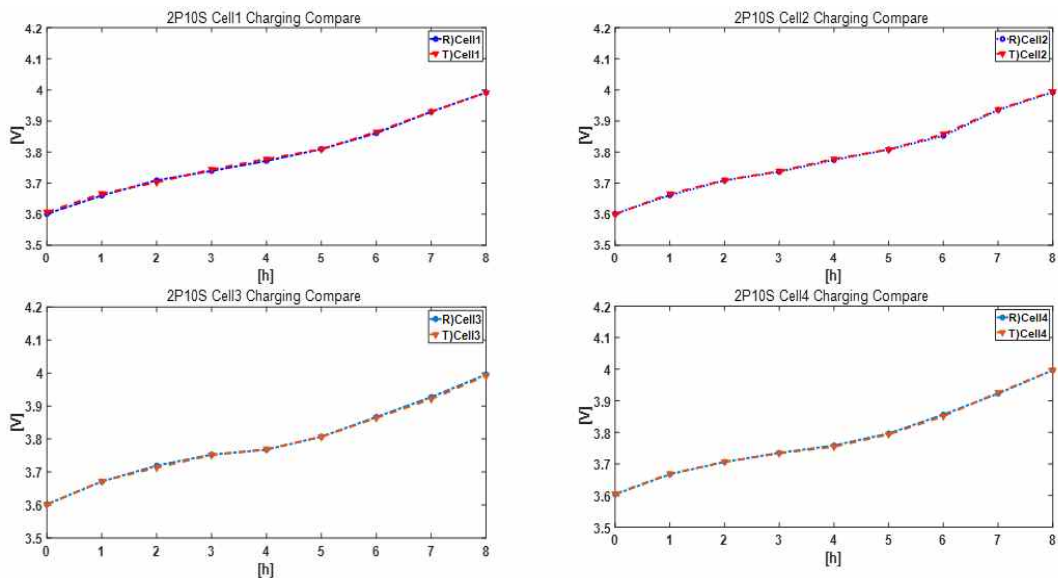
Table 7.2의 결과를 보면, 충전시작 전압은 약 3.6V였으며, 종료 전압은 4.0V로써, 두 데이터의 충전 시작에서 정확도는 99.4%에서 100%이며, 충전종료 전압의 정확도는 99.7%에서 100%이다.

Table 7.2 Comparison of charging test results in 2P6S structure

Test data[V]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.59	3.59	3.61	3.61
	Finish	3.99	3.99	4.00	4.00
	Charging	Cell5	Cell6		
	Start	3.61	3.59		
	Finish	3.99	3.99		
Substantiation data[V]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.58	3.59	3.61	3.61
	Finish	4.00	4.00	4.00	4.00
	Charging	Cell5	Cell6		
	Start	3.60	3.61		
	Finish	4.00	4.00		
Accuracy [%]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	99.7	100	100	100
	Finish	99.7	99.7	100	100
	Charging	Cell5	Cell6		
	Start	99.4	99.4		
	Finish	99.7	99.7		

7.1.3 2P10S 구조의 시험 결과 비교 분석

2P10S 구조에서 충전 시험 비교 결과는 Fig. 7.3과 같다.



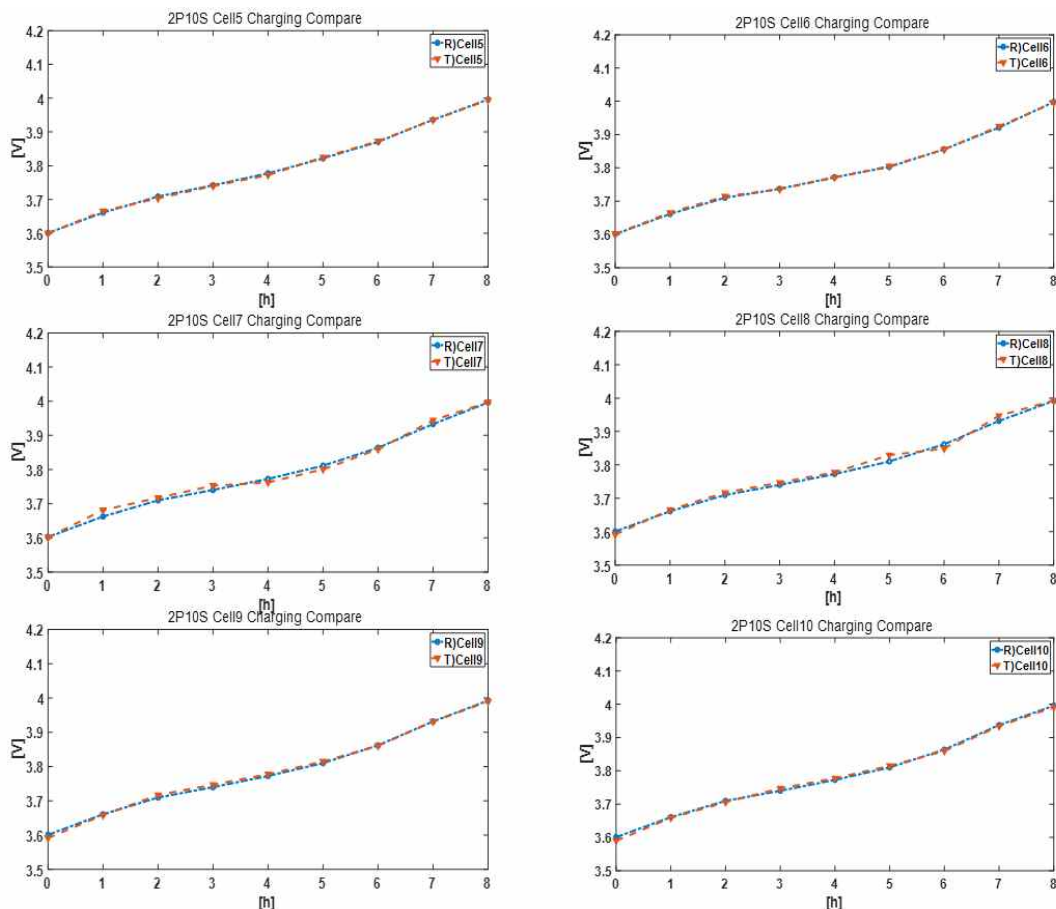


Fig. 7.3 Comparison of charging test results in 2P10S structure

Table 7.3 Comparison of charging test results in 2P10S structure

Test data[V]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.58	3.60	3.60	3.59
	Finish	4.01	4.02	4.02	4.00
	Charging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	3.56	3.56	3.61	3.62
	Finish	3.99	3.99	3.99	4.00
	Charging	Cell9	Cell10		
	Start	3.61	3.58		
Finish	4.02	3.99			
Substantiation data[V]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.59	3.59	3.59	3.60
	Finish	4.00	4.01	4.0	4.01
	Charging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	3.58	3.58	3.59	3.60
	Finish	3.99	3.98	3.99	4.0
	Charging	Cell9	Cell10		
	Start	3.60	3.59		
Finish	4.01	4.0			

Table 7.4 Comparison accuracy of charging test results in 2P10S structure

Accuracy [%]	Charging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	99.7	99.7	99.7	99.7
	Finish	99.7	99.7	99.5	99.7
	Charging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	99.4	99.4	99.4	99.4
	Finish	99.2	99.7	100	99.4
	Charging	Cell9	Cell10		
	Start	99.7	99.7		
	Finish	99.7	99.7		

Table 7.3의 결과를 보면, 충전시작 전압은 약 3.6V였으며, 종료 전압은 4.0V로써, 두 데이터의 정확도는 Table 7.4에 기재하였으며, 충전 시작에서 정확도는 99.4%에서 99.7%이며, 충전종료 전압의 정확도는 99.2%에서 100%이다.

7.2 방전 시험 결과 비교 분석

제주테크노파크의 방전 시험 결과와 제안된 BMS를 연계한 셀 적층 구조별 방전시험에 대한 결과를 비교 분석 한다. 여기서, (R)은 실증 데이터, (T)는 제안된 BMS의 시험의 결과 그래프이다.

7.2.1 2P4S 구조의 시험 결과 비교 분석

2P4S 구조에서 방전 시험 비교 결과는 Fig. 7.4와 같으며, Table 7.5의 결과를 보면, 데이터 주기의 조정을 고려해도 방전시작 전압은 약 4.0V였으며, 종료 전압은 약 3.6V로써, 두 데이터의 방전 시작에서 정확도는 99.5%에서 100%이며, 방전종료 전압의 정확도는 99.7%에서 100%이다.

Table 7.5 Comparison of discharging test results in 2P4S structure

Test data [V]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	4.03	4.0	4.03	4.01
	Finish	3.60	3.61	3.61	3.60
Substantiation data [V]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	4.01	4.0	4.01	4.0
	Finish	3.61	3.61	3.62	3.60
Accuracy [%]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	99.5	100	99.5	99.7
	Finish	99.7	100	99.7	100

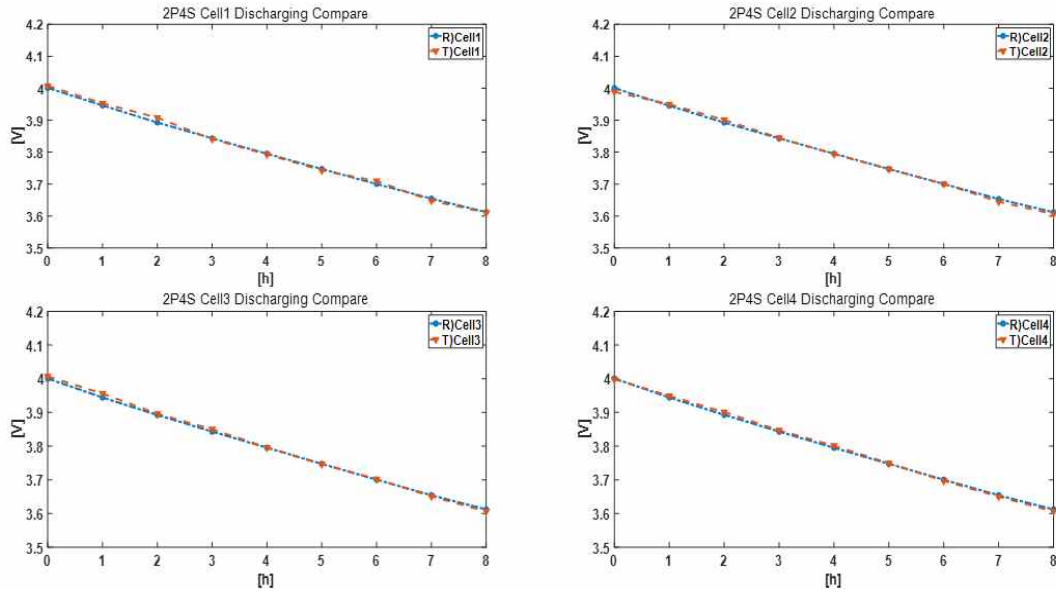


Fig. 7.4 Comparison of discharging test results in 2P4S structure

7.2.2 2P6S 구조 시험 결과 비교 분석

2P6S 구조에서 방전 시험 비교 결과는 Fig. 7.5와 같으며 Table 7.6의 결과를 보면, 데이터 주기의 조정을 고려해도 방전시작 전압은 약 4.0V였으며, 종료 전압은 약 3.6V로써, 두 데이터의 방전 시작에서 정확도는 99.5%에서 100%이며, 방전종료 전압의 정확도는 99.5%에서 100%이다.

Table 7.6 Comparison of discharging test results in 2P6S structure

Test data [V]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.99	3.98	3.99	3.99
	Finish	3.59	3.59	3.61	3.60
	Discharging	Cell5	Cell6		
Substantiation data [V]	Start	3.98	3.99		
	Finish	3.61	3.61		
	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.99	3.99	4.00	4.00
Accuracy [%]	Finish	3.60	3.60	3.61	3.60
	Discharging	Cell5	Cell6		
	Start	3.99	3.99		
	Finish	3.59	5.59		
Accuracy [%]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	100	99.7	99.7	99.7
	Finish	99.7	99.7	100	100
	Discharging	Cell5	Cell6		
Accuracy [%]	Start	99.7	99.5		
	Finish	99.5	99.7		

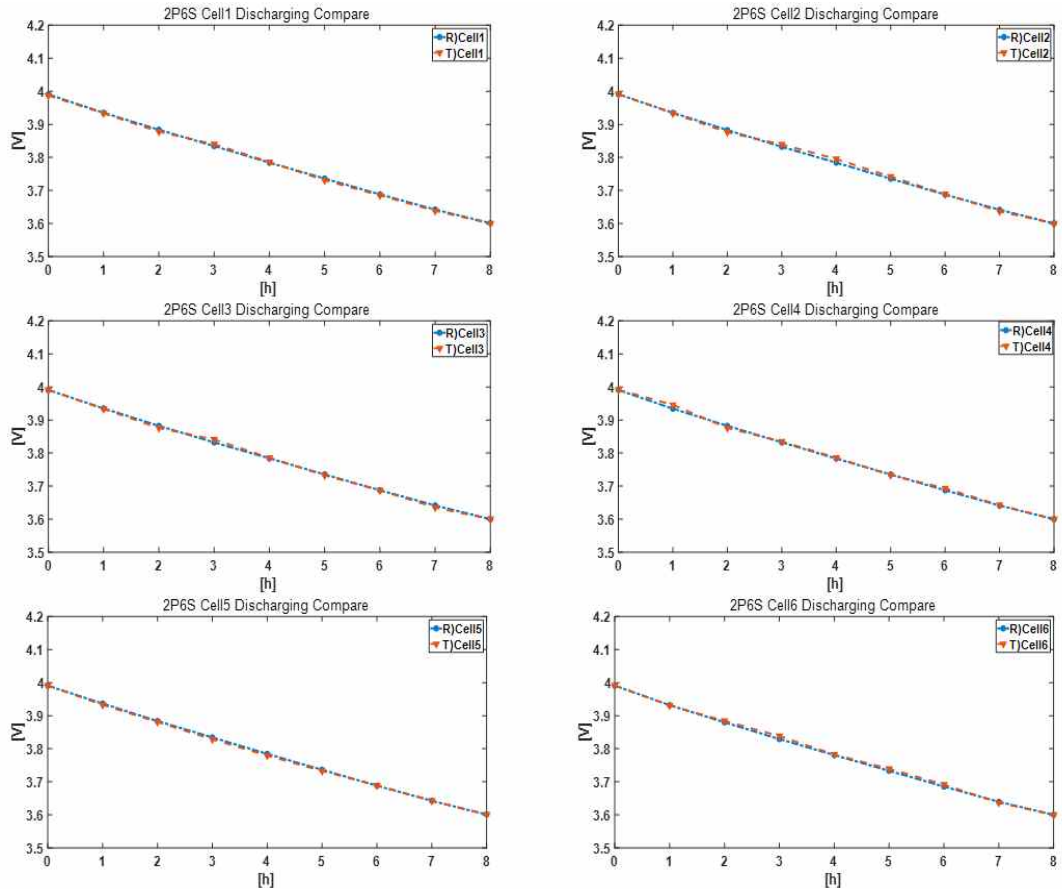
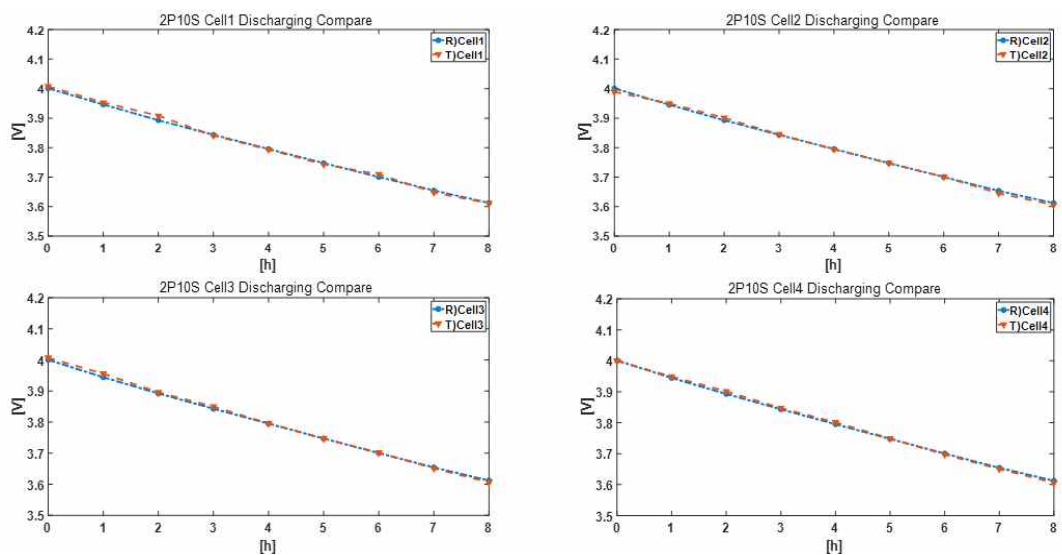


Fig. 7.5 Comparison of discharging test results in 2P6S structure

7.2.3 2P10S 구조 시험 결과 비교 분석

2P10S 구조에서 충전 시험 비교 결과는 Fig. 7.6과 같다.



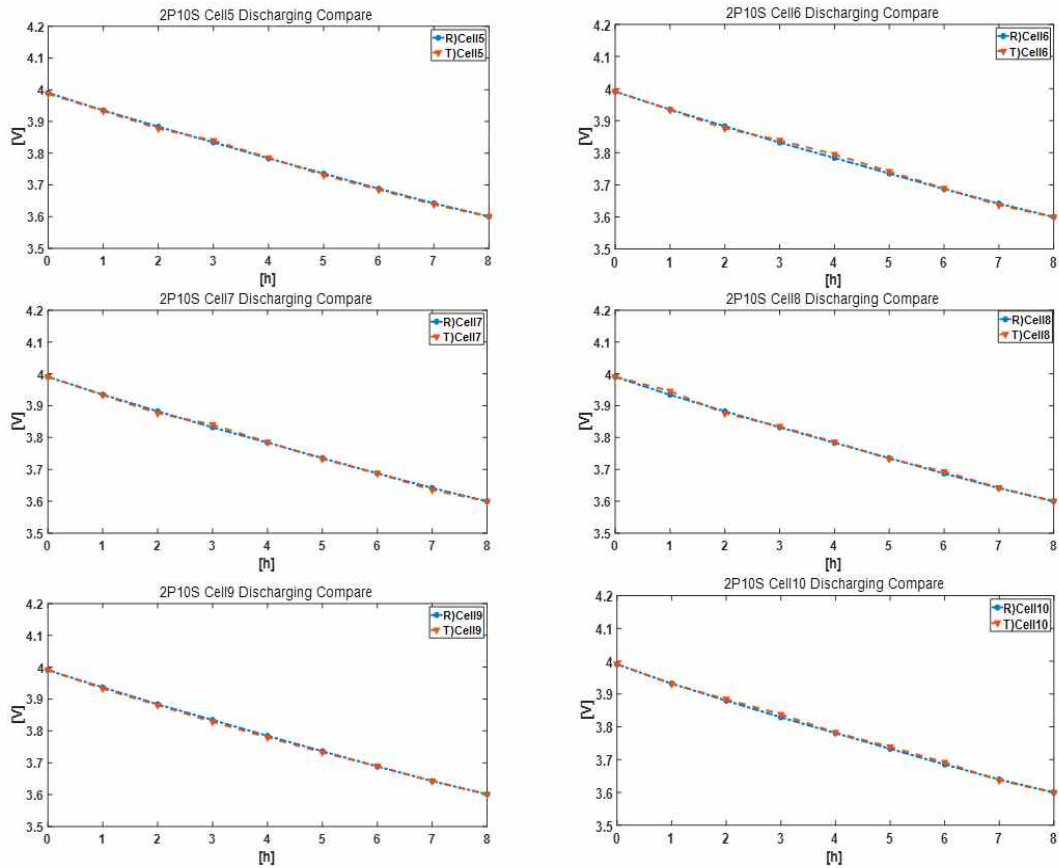


Fig. 7.6 Comparison of discharging test results in 2P10S structure

Table 7.7 Comparison of discharging test results in 2P10S structure

Test data[V]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.99	3.98	3.98	4.00
	Finish	3.59	3.62	3.61	3.59
	Discharging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	3.99	3.99	4.00	4.00
	Finish	3.56	3.57	3.58	3.57
	Discharging	Cell9	Cell10		
	Start	4.00	3.99		
	Finish	3.58	3.58		
Substantiation data[V]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	3.99	3.99	4.0	3.99
	Finish	3.60	3.60	3.59	3.58
	Discharging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	3.99	3.99	3.98	3.98
	Finish	3.58	3.59	3.59	3.59
	Discharging	Cell9	Cell10		
	Start	3.99	4.0		
	Finish	3.59	3.59		

Table 7.8 Comparison accuracy of discharging test results in 2P10S structure

Accuracy [%]	Discharging	Cell1	Cell2	Cell3	Cell4
	Start	100	99.7	99.5	99.7
	Finish	99.7	99.5	99.5	99.7
	Discharging	Cell5	Cell6	Cell7	Cell8
	Start	100	100	99.5	99.5
	Finish	99.4	99.4	99.7	99.4
	Discharging	Cell9	Cell10		
	Start	99.7	99.7		
	Finish	99.7	99.7		

Table 7.7의 결과를 보면, 데이터 주기의 조정을 고려해도 방전시작 전압은 약 4.0V였으며, 종료 전압은 약 3.6V로써, 두 데이터의 정확도는 Table 7.8에 기재하였으며 방전 시작에서 정확도는 99.5%에서 100%이며, 방전종료 전압의 정확도는 99.4%에서 99.7%이다.

8. 결 론

본 논문은 전기차의 배터리로 수명이 종료 된 배터리를 셀 적층 구조(2P4S, 2P6S, 2P10S)에 구매 받지 않고 다양한 어플리케이션 분야에서 활용하기 위한 BMS 개발에 대한 연구를 다루었다.

효율 및 범용성이 개선이 필요한 기존 BMS를 본 논문에서는 FET 계열의 스위칭 소자를 적용하여 밸런싱 동작을 하는 기존 방식에서 포토커플러를 사용하는 방식으로 개선하여 PWM 스위칭 노이즈의 영향 및 소비전력 저감에 대한 이점을 확보하였다.

또한, 범용성을 고려하여 BMS의 알고리즘 개선을 수행하였으며, 셀을 어떠한 구조로 연결하더라도 BMS의 구조적인 변경 없이 BMS의 운영이 가능하도록 구현하였다. 동작 상태에 대한 확인은 MATLAB 프로그램을 활용하여 설계한 HMI로 점검하였다. 이를 통하여, 제안된 BMS에 연계된 배터리의 셀 적층 구조, 온도, 전류, 상태(충전, 방전, 밸런싱, 고장 등) 및 셀 별 전압에 대한 실시간 모니터링이 가능하였다. HMI는 배터리와 연계된 어플리케이션의 운전 패턴 등에 대한 모든 데이터가 텍스트 형태로 저장되기 때문에 자료 확보 방안도 고려하여 설계하였다.

뿐만 아니라, 셀의 전압 감시는 DC 절연 소자 INA149를 사용하여 외부에서 발생하는 노이즈 인입의 차단을 최소화 하였다. 또한, 모든 셀에 LED를 병렬로 연결하여 밸런싱 상태 동안 동작하여 사용자에게 배터리의 현재 상태를 가시적으로 인지할 수 있도록 하였다.

제안한 BMS의 유효성 검증을 위하여 기능 별 성능 시험, 배터리 충·방전 설비 연계 시험 및 실증 데이터의 비교를 통한 검증을 수행하였으며, 정확성과 안전성 측면에서 이점이 있음을 확인하였으며, 상세한 검증 내용은 아래와 같다.

(1) 성능 시험에서는 폐배터리를 연계하지 않고 DC 전원 공급 장치를 활용하여 셀 적층 구조별 전압을 인가시켜 개발 BMS의 전압 계측의 정확도를 확인하였다. 또한, 셀의 전압 고장 관련한 과전압, 저전압, 밸런싱 동작 시험과, 배터리 모듈 내부 온도 이상 시험, 배터리 모듈 단위에서의 충전 및 방전에 따른 과전류 시험을 1차적으로 르네사스에의 E2studio 컴파일러 프로그램을 통하여 확인 하였고

추가적으로 MATLAB 프로그램을 활용하여 제작한 HMI으로 제안된 BMS의 데이터 계측의 정확성을 확인하였다.

(2) 제안된 BMS를 연계한 폐배터리의 셀 적층 구조를 고려하지 않고 충·방전 장비를 활용하여 폐배터리의 충전 및 방전과 수동형 셀 밸런싱에 대하여 연동 시험을 진행하였다. 충·방전 시험에서 인가 전류는 셀 적층 구조에 상관없이 폐배터리 충·방전기 장비로부터 BMS를 거쳐 폐배터리로 인가되는 전류는 충전 시 +5A, 방전 시 -5A이며, 셀의 전압 동작 범위는 3.6V에서 4.0V, SOC 85~95%의 영역에서 8시간 전압의 변화는 약 0.4V, SOC의 변화는 10%의 변동 폭을 가지고 안정적으로 운영되는 것을 확인하였다.

추가적으로, 과전압과 저전압에 대한 고장 시험을 병행하였다. 과전압 범위를 4.0V, 저전압 범위를 3.6V로 설정하여 셀의 시험 전압 범위에서 자연스럽게 전압에 대한 고장 검증도 안정적으로 동작함을 확인하였다. 수동형 셀 밸런싱 시험은 12시간 동안 동일 조건에서 시험한 결과 셀 당 전압강하는 셀 적층 구조에 관계없이 일정하게 0.1V의 변화를 확인하였다. 제안된 BMS를 활용한 장시간 충·방전 및 밸런싱 시험을 진행하였고, 데이터 계측의 정확성과 과전압과 저전압의 고장 시험을 통하여 BMS의 안전성을 확인하였다.

(3) 마지막으로, 제주테크노파크에서 시험한 동일 사양의 폐배터리의 충·방전 결과 데이터와 제안된 BMS를 연계하여 진행된 충전과 방전 시험결과를 비교하였다. 두 데이터는 최소 99.2%의 높은 수준의 정합성을 가지고 있었으며, 이 비교를 통하여 제안된 BMS 시스템의 유효성을 확인하였다.

결론적으로 제안된 BMS는 폐배터리를 다양한 어플리케이션 분야에 활용함에 있어 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 본 연구의 결과가 관련 기술을 필요로 하는 유관기관과 기업에서 널리 유용 될 수 있기를 바란다.

참 고 문 헌

- [1] 구지선, 전기차 폐배터리 활용 현황과 시사점, KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터, pp.4~8, 2019.09.
- [2] 조운상, 폐리튬 2차전지의 Re-Use와 Re-Cycling 산업 및 기술현황, KDB미래전략연구소 산업기술리서치센터, pp.54~75, 2019.11.
- [3] M. Broussely(지음), 박한웅(옮김), 배터리 응용 자동차용에서 우주용 및 에너지 저장용까지, 도서출판 아진, pp.19~33, 2017.04.
- [4] Research Study on Reuse and Recycling of Batteries Employed in Electric Vehicles: Project Report,, API, pp.20~46, 2019.09.
- [5] 정영민, 조원일, 리튬이온 이차전지 기술 동향과 미래 전망, Ceramist v. 13 no.5, pp.7~14, 2010.10.
- [6] 송정용, 허창수, 재사용 ESS를 위한 리튬 배터리 덴드라이트 보호 알고리즘 제안, Journal of the Korean institute of electronic material engineers v.31 no.6, pp.422~426, 2018.09.
- [8] Jung-Ki Park, PRINCIPLES and APPLICATIONS of LITHIUM SECONDARY BATTERIES, WILEY-VCH, pp.12~28, 2014.06.
- [9] 이지훈, 리튬이온배터리, NICE평가정보(주), pp.1~20, 2020.08.
- [10] 박수진, 조민석, 이재락, 산화억제제 첨가에 의한 탄소/탄소 복합재료의 물성에 관한 연구: 4. Gibbs 표면 자유에너지 및 층간 전단강도, Polymer(korea) Vol. 23. No. 5. pp717-723, 1999.09.
- [11] 오승모 저, 전기화학 2판, 자유아카데미, pp.20~45, 2014.02.
- [12] Wendt, H., Kreysa, G, Electrochemical Engineering, Spriger, pp.8~16, 1999.
- [13] Gregory L. Plett, Battery Management Systems Volume I Battery Modeling, ARTECH HOUSE, pp. 29-44, 2015.09.
- [14] Davide Andrea, Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs, ARTECH HOUSE, pp.35~109, 2010.09.
- [15] Enrico Sanino, Introduction to Battery Management Systems, All About Circuits, 2021.08.
- [16] Electropaedis, Battery and Energy Technologies, Woodbank Communications

Ltd, 2005.

- [17] 김래영, 리튬이온 배터리용 셀 밸런싱 기술의 발전 동향, 전력전자학회지 제19권 제6호, pp.38~44(7pages), 2014.12.
- [18] Hemavathi S, Overview of cell balancing methods for Li-ion battery technology, WILEY Online Library, 2020.08.
- [19] Hemavathi S, Modeling of analog battery management system ofr single cell lithium ion battery, Wiley Online Library, 2020.10
- [20] Sam Nork, Kevin Scot, Passive Balancing Allows All Cells to Appear to Have the Same Capacity, Analog Devices, Inc, 2019.09.
- [21] Stanislav Arendarik Roznov pod Radhostem, Active Cell Balancing in Battery Packs, Freescale Semiconductor, 2012.01.
- [22] 배성훈, SOC 밸런싱을 위한 모듈형 전력변환장치의 설계 및 제어, 성균관대학교 석사학위논문, 2015.10.
- [23] 양승용, 전기자동차 모델링 및 확장 칼만 필터를 이용한 배터리 SOC 추정에 관한 연구, 제주대학교 일반대학원 학위논문, 2017.08.
- [24] 김성필, 칼만필터의 이해, 아진, pp.77~124, 2010.09.
- [25] 전창완, 이유미, 자율이동체를 위한 2차 전지의 확장칼만필터에 기초한 SOC 추정기법, 제어로봇시스템학회논문지, 14권, 9호, pp.904~908, 2008.09.
- [26] S. Buller, M. Thele, E. Karden, R. W. D. Doncker, Impedance-based Non-linear Dynamic Battery Modeling for Automotive Applications, Journal of Power Sources, vol. 113, pp.422~430, 2003.01.
- [27] 장기욱, 김혁진, 정교범, 배터리 모델링 및 SOC 추정 기법 비교 연구, 전력전자학회 학술대회 논문집. pp.87~88, 2010.10.
- [28] 장권영, 양갑진, 이창훈, 배터리의 OCV에 따른 설정 기준 연구, 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회, pp.889~889, 2016.11,
- [29] 배경철, 최성춘, 신민호, 김영렬, 원충연, 리튬-이온 배터리의 SOC 추정을 위한 OCV 예측방법, 전력전자학회 학술대회 논문집, pp.528~529, 2014.07.
- [30] 전창윤, 김종훈, 허인녕, 조보형, 한승훈 서울대학교, 삼성테크윈 “전류 적산법 기반의 LiFePO4 배터리 SOC 추정 회로 구현”. 한국조명·전기설비학회, 조명·전기설비학회논문지 제28권 제11호, pp.77~83, 2014.11.
- [31] Christopher D. Rahn and Chao-Yang Wang, Battery systems engineering,

- WILEY, pp.191~229, 2013.01.
- [32] 김규호, 윤진국, 최호열, 정동길, 진호정, 조경록, 전기자동차용 배터리 셀 전압 측정을 위한 아날로그 Front-End 회로 설계, 전자공학회논문지 제57권 4호, pp.33~41, 2020.04.
- [33] 양성오, 이승민, 유지형, 배터리 온도 분포 측정법 탐색 연구, 한국자동차공학회 춘계학술대회, 1044~1047, 2021.06.
- [34] 김재웅, 신영기, 최적운전계획법에 의한 전기차의 고전압 배터리 셀 온도 관리, 한국자동차공학회논문집, 27(7), 509~519. 2019.07.
- [35] 정진용, 강희경, 이현동, 친환경 자동차용 BMS ECU개발, 한국자동차공학회 추계학술대회 및 전시회. pp.2928~2933, 2009.11.
- [36] J. Tharun, J. Vishnupriyan, S. Muthumanickam, K. Chidambarathanu, Intelligent Battery Management System, IEEE, 2021.09.
- [37] 이형규, 김기택, 대용량 무정전 전원장치를위한 배터리 모니터링 시스템, 전기전자학회논문지, 23(2), pp.580~585, 2019.06.
- [38] 김성익, 전기자동차용 배터리 관리 시스템 개발 동향 및 발전 추세, 대한설비공학회 학술대회논문집, pp.315~316, 2018.6.
- [39] 이종학, 최우진, 김형원, 실시간 원격 배터리 점검 시스템의 개발, 전력전자학회 학술대회 논문집, pp.276-268, 2010.07.
- [40] 정대웅, BMS회로 및 SOC 추종 알고리즘에 관한연구, 대구대학교 석사학위 논문, 2020.02.
- [41] 윤왕철, 김규희 공저, 복두출판사, PADS를 이용한 PCB 설계 실무 I 제2판, pp.76~126, 2016.09.
- [42] SMD Transient Voltage Suppressors, SFI Electronics Technology.
- [43] RL78/G13 User's Manual : Hardware, Rev.3.50, Renesas Electronics, 2020.06.
- [44] 강대희, 신민호, 엄태호, 이정, 김준모, 박영훈, 원충연, BMS의 CAN통신 에러를 이용한 배터리 충전기 제어기법, 2016년도 조명전기설비학회 추계학술대회 논문집, pp.25~27, 2016.05.
- [45] MAX3232 Datasheet (PDF) - Texas Instruments
- [46] 스위칭 노드의 링잉(ringing), Tech Web, 2020.01.
- [47] INA149 Datasheet (PDF) - Texas Instruments
- [48] 류대우 저자, 알기 쉽게 풀어쓴 RL78/G13, (주) 뉴티씨 NEXTC, 2019.08.

- [49] Farid Golnaraghi, Benjamin C. Kuo(지음), 정길도, 김동환, 권오민, 심귀보, 지규인, 최재원(옮김), Kuo의 자동제어 10판, pp.87~156, Mc Graw Hill Education, 2018.01.
- [50] 여영구 저, 쉽게배우는 MATLAB 입문과 활용 4판, 도서출판 아진,pp.589~616, 2016.10.
- [51] 단체표준: 전기자동차용 사용 후 리튬이온 배터리의 재제조를 위한 분류 시험 방법, 한국전지산업협회, 2021.04.
- [52] 전기차 사용 후 배터리 잔존가치 시험 연구보고서, (재)제주테크노파크, 2020.06.