



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

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

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



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

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 2월
석사학위 논문

적외선 열화상 기법을 이용한
물류이송 자동화 로봇용
리튬이온 배터리팩 방열 설계 및
성능평가에 관한 연구

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

김 은 지

적외선 열화상 기법을 이용한
물류이송 자동화 로봇용
리튬이온 배터리팩 방열 설계
및 성능평가에 관한 연구

A Study on Heat Dissipation Design and Performance
Evaluation of Lithium-ion Battery Pack for Automated
Logistics Robot Using Infrared Thermal Imaging
Technique

2021년 2월 25일

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

김 은 지

적외선 열화상 기법을 이용한
물류이송 자동화 로봇용
리튬이온 배터리팩 방열 설계
및 성능평가에 관한 연구

지도교수 김 재 열

이 논문을 공학 석사학위신청 논문으로 제출함

2020년 10월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

김 은 지

김은지의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 김 경 석



위 원 조선대학교 교수 이 성 준



위 원 조선대학교 교수 김 재 열



2020년 11월

조선대학교 대학원

목 차

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| LIST OF FIGURES | iii |
| LIST OF TABLE | v |
| ABSTRACT | vi |
| | |
| 제 1 장 서론 | 1 |
| 제1절 연구 배경 | 1 |
| 제2절 연구 동향 | 2 |
| 제3절 연구 목적 및 필요성 | 3 |
| | |
| 제 2 장 이론 | 4 |
| 제1절 리튬이온 배터리 개념 및 구조 | 4 |
| 제2절 리튬이온 배터리 발열 특성 | 7 |
| 1. 배터리 발열 이론 | 7 |
| 2. 배터리 발열의 화재 위험성 | 9 |
| 제3절 적외선 열화상 기술 | 11 |
| | |
| 제 3 장 리튬이온 배터리팩 방열 최적설계 | 16 |
| 제1절 배터리팩 내부 방열 설계 | 16 |
| 1. Cell Holder 설계 | 16 |
| 2. Graphite Sheet 적용 | 19 |

| | |
|---------------------------------|-----------|
| 3. Silicone Sheet 적용 | 22 |
| 제2절 CASE 설계 | 24 |
| 제 4 장 방열 설계 성능 실험 | 27 |
| 제1절 실험 장치 구성 | 27 |
| 제2절 실험 방법 | 33 |
| 제 5 장 실험결과 및 고찰 | 34 |
| 제1절 열화상 이미지 결과 분석 | 34 |
| 제2절 Thermocouple 측정 결과 분석 | 42 |
| 제 6 장 결론 | 47 |
| 참고문헌 | 48 |

LIST OF FIGURES

| | |
|--|----|
| Fig. 1-1 World Market Scale for Logistics Robots | 2 |
| Fig. 2-1 The structure of the Lithium-Ion Reattery | 4 |
| Fig. 2-2 Range of electromagnetic waves | 12 |
| Fig. 2-3 Radiation Contributions to the General Measurement Situation | 13 |
| Fig. 2-4 Passive method | 14 |
| Fig. 2-5 Active method | 15 |
| Fig. 3-1 Thermal Runaway Diffusion Experiment According to Cell Spacing | 17 |
| Fig. 3-2 Cell Holder 2D Modeling | 17 |
| Fig. 3-3 Cell Holder | 18 |
| Fig. 3-4 Applied Graphite Sheet | 21 |
| Fig. 3-5 Electronic Device Application of Graphite Sheet | 21 |
| Fig. 3-6 Electronic Device Application of Silicone Sheet | 22 |
| Fig. 3-7 The Structure of the Silicon Sheet | 23 |
| Fig. 3-8 Battery Pack 2D Modeling | 24 |
| Fig. 3-9 Modified Complementary Design | 25 |
| Fig. 3-10 Battery Pack for Logistics and Transport Automation Robot | 26 |
| Fig. 4-1 Experiment Equipment Configuration | 28 |

| | |
|--|----|
| Fig. 4-2 FLIR T640..... | 30 |
| Fig. 5-1 1Cycle-Charge..... | 35 |
| Fig. 5-2 3Cycle-Charge..... | 35 |
| Fig. 5-3 1 st Experiment Infrared Thermography Temperature Graph | 36 |
| Fig. 5-4 2 nd Experiment Infrared Thermography Temperature Graph | 38 |
| Fig. 5-5 Thermocouple Attachment of Experimental Devices..... | 43 |
| Fig. 5-6 Thermocouple Temperature Graph..... | 44 |

LIST OF TABLE

| | |
|--|----|
| Table 2-1 Type of Battery According to Material Composition | 5 |
| Table 2-2 Classification of Infrared Rays by Wavelength | 12 |
| Table 3-1 Graphite Sheet Composition | 20 |
| Table 3-2 Silicone Sheet Specification | 23 |
| Table 4-1 Battery Pack Heat Dissipation Design Application Stage | 29 |
| Table 4-2 FLIR T640 Specifications | 31 |
| Table 4-3 Heat Dissipation System Design Applied Battery Pack Specifications | 32 |
| Table 4-4 Experimental Method | 33 |
| Table 5-1 1 st Experiment Infrared Thermography Temperature Data | 37 |
| Table 5-2 2 nd Experiment Infrared Thermography Temperature Data | 39 |
| Table 5-3 1 st Experiment Infrared Thermography Temperature Range Data | 41 |
| Table 5-4 2 nd Experiment Infrared Thermography Temperature Range Data | 41 |
| Table 5-5 Thermocouple Temperature Data | 45 |
| Table 5-6 Thermocouple Temperature Range Data | 46 |

ABSTRACT

A Study on Heat Dissipation Design and Performance Evaluation of Lithium-ion Battery Pack for Automated Logistics Robot Using Infrared Thermal Imaging Technique

Kim Eun-Ji

Advisor : Prof. Kim Jae-yeol, Ph.D.

Department of Mechanical System &
Automotive Engineering,

Graduate School of Chosun University

The second logistics revolution in distribution centers, factories, hospitals, airports, restaurants, etc. Logistics robot use has rapidly increased 24 hours of continuous operation, even a battery that is used as the rapid development of technologies that can dramatically increase the uptime of the production equipment. Various and high-level technology development is urgently required. In the past, batteries were simply used in a full discharge or full charge method, but as autonomous driving becomes possible, rapid charging using a short time and wireless charging technology that can be charged while moving are required. Logistics robots have a wide variety of shapes depending on the usage, and can flexibly cope with the battery design for each type, and the size of the battery must be small but the energy density must be increased.

In this study, we propose a heat dissipation design and performance evaluation to improve heat generation that may occur when using high energy density, continuous rapid charging (4C-rate) and continuous high power (2C-rate) of an automated robot battery pack for logistics transportation. It is intended to be utilized in the development of battery technology for automated logistics robots in line with the expansion of the logistics robot market by improving the speed and efficiency of logistics

equipment operation by improving the fire risk and battery performance degradation problems caused by heat generation.

The cell holder used in the existing logistics transfer robot battery was designed to be inserted at 1mm intervals between cells, but the cell holder was designed to be 1.5mm in order to increase the natural air conditioning effect and reduce the heat increase rate at high output. A heat dissipation sheet of the battery pack size, weight, and price as a way to get the radiation without the use of water-cooling or air-cooling method in order to increase competitiveness in terms of effect Graphite Sheet (high temperature diffusion for the graphite sheet) and the silicon material of was additionally applied. CASE design to increase heat dissipation performance increased the heat transfer power by changing the thickness of the internal structure and removing unnecessary structures and attaching a heat sink, and improved heat circulation by changing the cell stack structure and increasing the height of the product.

Through this study, the heat dissipation performance of the lithium-ion battery pack for the logistics and transport automation robot to which the heat dissipation optimal design was applied was compared and verified, and the excellent heat dissipation performance was confirmed. It is intended to be utilized in the development of battery technology for automated logistics robots in line with the expansion of the logistics robot market by increasing the speed and efficiency of logistics equipment operation by improving the risk of fire due to heat generation and the resulting degradation of battery performance.

제 1 장 서론

제1절 연구 배경

최근 과도한 화석연료 사용으로 인한 지구온난화 문제를 해결하고자 전기구동 이동수단에 대한 높은 관심과 함께 이와 관련된 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있다. 이에 따라 전기구동 이동수단의 에너지원인 배터리 시장 또한 EV자동차와 무선 전자제품 등의 발전으로 급속도로 성장하고 있다.

제2 물류혁명으로 물류 센터, 공장, 병원, 공항, 식당 등에 물류 로봇 사용이 급격히 증가하고 있으며 특히 자율주행 등 자동화 시스템으로 발전하면서 국내·외 물류 로봇 시장은 더욱 활발해지고 있다. 온라인 쇼핑의 급증으로 물류 현장과 공장이 24시간 연속 가동이 필요함에 따라 생기는 인력부족 문제 해결 및 물류센터의 효율 향상 등 전세계적으로 물류 효율이 각국의 산업 경쟁력을 좌우하며 현재 물류 산업은 미래의 핵심 사업으로 등장 하였다. 물류이송 로봇의 기술 개발에 맞추어 자율적으로 짧은 시간을 활용한 급속충전 및 이동 중에도 충전할 수 있는 무선충전 기술개발 등 배터리를 포함한 관련부품의 기술개발도 요구되고 있다.

로봇의 주요 에너지원은 충·방전이 가능한 2차 전지(Secondary Battery)인 납축전지, 리튬이온 배터리, 연료전지 등과 같은 전기 에너지를 사용한다. 이들 2차 전지 중 기존 납축전지와 비교하여 에너지 밀도가 높고 잦은 충·방전에도 성능저하가 적은 리튬이온 배터리가 전기자동차 및 전기자전거 등과 같은 전기구동 이동수단에 주요 에너지 공급원으로 사용되고 있으며 물류이송 로봇 또한 대부분 리튬이온 배터리가 사용되고 있다. 그러나 리튬이온 배터리의 높은 에너지 밀도와 높은 충·방전량으로 배터리 온도가 매우 높이 올라가게 되는데 그에 따른 성능 변화가 발생한다. 특히 전기구동 이동수단과 같이 높은 방전량을 요구하는 가혹 조건에서는 온도가 올라감에 따라 성능이 매우 떨어지는 것으로 연구되었으며, 리튬이온 배터리의 발열로 인해 최근 발화 및 폭발사고 사례가 늘어나고 있는 만큼 화재 위험성에 있어 사용함에 주의가 필요하다.^{(1),(2),(3)}

제2절 연구 동향

Fig. 1-1 은 물류로봇 세계시장 규모를 나타내는 그래프로 2016년~2019년 예상 판매 대수 기준으로 물류로봇은 전문 서비스 로봇의 53%를 차지하여 전문 서비스 로봇 중 가장 유망한 분야이다. 2015년 7.8억불(1.9만대) 규모에서 2016년~2019년 53.3억불(17.5만대) 규모로 연평균 22.6%(36.3%) 고성장이 예상되며, 2019년의 시장은 2015년 대비 판매대수 기준 약 340%, 시장규모 기준 약 220% 성장이 예상된다. 물류 로봇의 세계 시장 규모는 점점 증가하고 있지만, 물류로봇의 대당 판매가격은 2019년 약 27,000달러로 2015년 가격 41,000달러의 70%이하 수준으로 단위가격은 낮아지고 있어 소형 셀을 이용한 본 연구의 물류이송 자동화 로봇용 배터리 팩은 높은 에너지밀도 및 높은 전기적 성능에 대한 장점뿐만 아니라 셀을 이용한 패키징으로 원가 및 제작단가로 인한 가격경쟁력 측면에서도 매우 유리한 시장 경쟁력을 가지고 있다.^{(1),(2)}

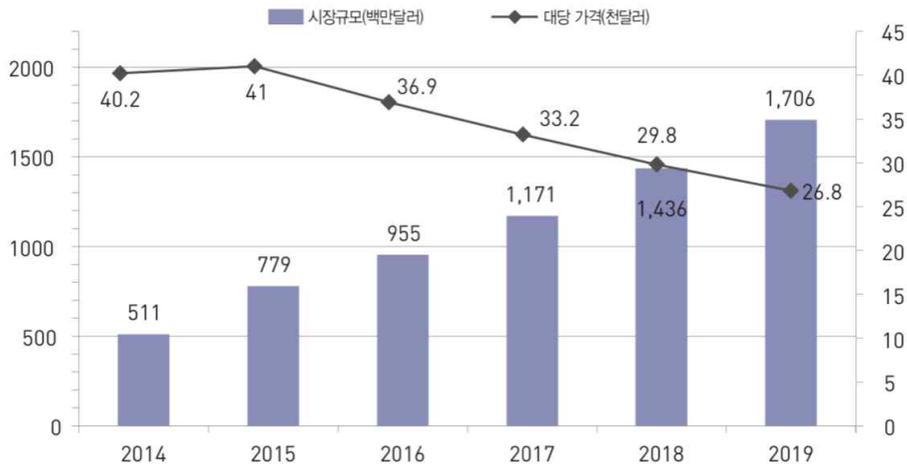


Fig. 1-1 World Market Scale for Logistics Robots

국내 물류 로봇 시장의 경우 2016년 99억 원 규모에서 2021년 181억 원 규모로 증가할 전망으로 AGV 및 물류이송 자동화 로봇을 연구하는 기관과 제조 기업은 늘어나고 있으나, 국내에 리튬배터리를 직접 개발 및 제작하는 중소기업은 비교적 매우 적어 개발하고 있는 로봇에 적합한 배터리를 구하기 어려운 실정으로 기술 수준 향상과 배터리의 상용화 제품개발이 시급하다.

리튬 이차전지는 용도에 따라 모바일 IT기기에 주로 사용되는 소형전지와 전기자동차 및 대용량 전기저장장치(ESS) 등에 사용되는 중·대형전지로 구분된다. 세계 리튬이차전지의 시장 수요는 2019년 기준 198GWh에서 2030년 3,392GWh로 10년간 약 17배 규모로 중·대형전지 시장은 용량 기준으로 10년간('20~30년) 15배 이상 성장할 전망이며 리튬이온전지 산업은 전기차 시장 확대에 힘입어 급성장하고 있다. 소형전지 수요는 휴대폰 시장 성장둔화 등으로 증가율이 낮은 반면, 중·대형전지는 전기자동차 보급 확대에 2017~2025년 중 금액 기준으로 연평균 10% 이상 성장할 것으로 예상된다.^{(3),(4)}

제3절 연구 목적 및 필요성

최근 물류현장과 공장은 24시간 연속 가동으로 물류장비의 가동시간을 획기적으로 늘릴 수 있는 기술이 급격히 발전함에 따라 사용되고 있는 배터리에도 다양하고 높은 수준의 기술개발이 시급하게 요구되고 있다. 기존에는 배터리를 단순히 완방전, 만충전 방식으로 사용하였지만, 자율주행이 가능해 지면서 자율적으로 짧은 시간을 활용한 급속충전과 이동 중에도 충전할 수 있는 무선충전기술이 요구되고 있다. 물류 로봇은 사용처에 따라 형태가 매우 다양하고 그 형태마다 배터리설계를 유연하게 대처할 수 있으며, 배터리의 크기는 작아지되 에너지밀도는 높일 수 있어야 한다.

본 연구에서는 물류이송용 자동화 로봇 배터리 팩의 높은 에너지 밀도, 연속급속충전(4C-rate)과 연속고출력(2C-rate) 사용 시 발생할 수 있는 발열을 개선하기 위한 방열설계와 성능 평가를 제안한다. 발열로 인한 화재 위험성 및 배터리 성능 저하 문제점을 개선하여 물류 장비운영의 신속성, 효율성을 높이며 특히 가동시간을 크게 늘려 물류 로봇의 시장 확대에 발맞춰 물류이송 자동화 로봇용 배터리 기술 개발에 활용되 고자 한다.^{(5),(6)}

제 2 장 이론

제1절 리튬이온 배터리 개념 및 구조

리튬이온전지(Lithium-Ion Rettery, LIB)는 양극(+)과 음극(-) 물질의 산화환원 반응으로 화학에너지를 전기에너지로 변환시키는 일종의 장치로, 크게 충·방전 전압이 높은 양극(Cathode), 충·방전 전압이 낮은 음극(Anode), 리튬 이온의 이동 매개체인 전해질(Electrolyte), 전기전 단락을 방지하는 분리막(Separator), 4가지의 요소로 Fig. 2-1 과 같이 구성된다. 여기에 절연층(Insulator)과 도전재(Conductor) 등이 추가되어 셀(Cell)을 구성한다.

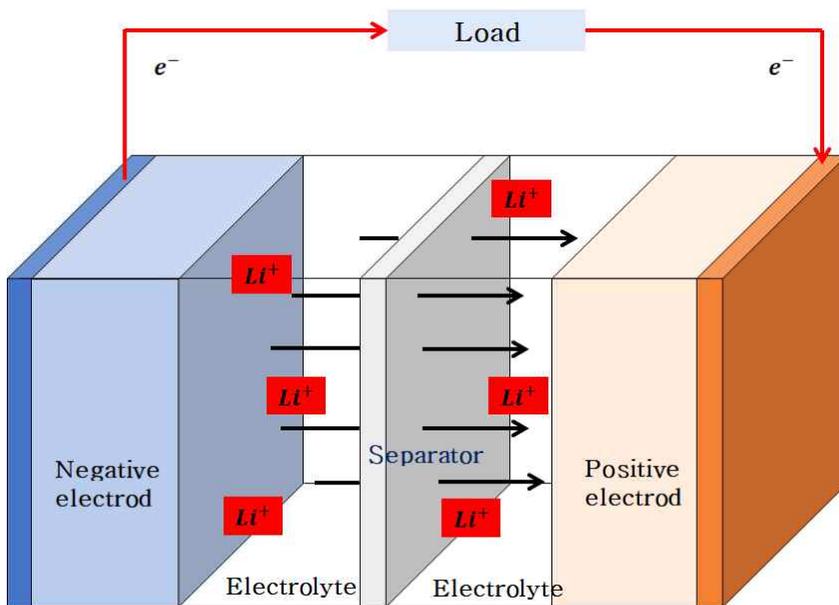


Fig. 2-1 The Structure of the Lithium-Ion Rettery

양극과 음극은 전하를 제공 및 저장하는 중요도가 높은 요소이다. 양극은 리튬(Li)과 산소(O)가 만난 리튬산화물(Li⁺O)로 구성 되며, 충전 시 리튬이온만 빠져나와 음극으로 이동하고 방전 시엔 리튬이온이 양극으로 다시 돌아가며 전기가 발생하게 된다. 음극으로 가장 많이 사용되는 기본 소재는 천연흑연으로 종이와 겹쳐있는 것과 같은 층상구조로, 양극에서 빠져 나온 리튬이온이 이 층상 구조 사이로 들어가면서 배터리가 작용하게 된다.

리튬이온 배터리는 기존 배터리 소재인 카드뮴(Cd), 수은(Hg), 납(Pb) 등의 환경규제물질을 미포함하며, 폐전지로 재활용이 가능하여 친환경적이다. 특히 리튬이온 전지는 출력 전압과 에너지 밀도가 높고 메모리 효과가 없어 충·방전을 반복해도 용량이 쉽게 줄어들지 않아 수명이 길고 자가 방전율이 낮다는 특징이 있다. 에너지 저장 매체로 사용되는 충·방전이 가능한 배터리는 물질 구성에 따라 Table 2-1와 같이 구분된다. 다른 종류의 배터리와 비교하여 리튬-이온 배터리는 수명이 길고 셀 전압과 에너지 밀도가 높은 특징으로 다양한 분야에서 사용된다. 리튬이온 배터리는 자기 용량의 3배로 충전이 가능하며, 급속 충전 시 5배 이상까지도 충전이 가능하다.

Table 2-1 Type of Battery According to Material Composition

| Division | Electrolyte | Voltage(V) | Energy density (Wh/L) | Usage(Cycle) |
|----------|---------------------|------------|-----------------------|--------------|
| Pb | H_2SO_4 | 2.0 | 75 | 200~500 |
| Ni-Cd | KOH/H_2O | 1.2 | 160 | 1,000 |
| Ni-MH | KOH/H_2O | 1.2 | 240 | 1,000 |
| Li-ion | Lix/organic solvent | 3.7 | 300~350 | 1,200 |
| Li-PB | Lix/polyelectrolyte | 3.7 | 250~300 | 1,000 |

리튬이온전지에 저장된 전기는 전압(Voltage), 용량(Capacity), 질량당/부피당 에너지 밀도(Energy Density)등 다양한 파라미터로(Parameter) 표현되는데 전기용량은 전기화학반응을 통해 생성된 전하량으로 정의되며, 전압과 용량에 근거하여 전기에너지의 양(에너지 밀도)을 계산한다. 양적 평가기준 외에도 장기사용안정성, 율성능, 안전성 등을 통해서도 이차전지의 성능을 평가한다.

장기사용안정성(Cyclability)은 전지의 충/방전을 거듭하였을 때 반응 가역성을 나타내는 지표로서, 장기사용안정성이 우수한 전지일수록 사용에 따른 용량감소가 적어 장기사용에 유리하다. 율성능(Rate performance)이 우수한 전지는 급속충전을 가능하게 하며 충/방전 시 소요시간을 절약 가능하다. 최근 전기차 보급이 확대되어 전지의 장기안정성, 율성능의 중요성이 한층 부각되고 있으며 기술향상 요구 또한 급증하는 추세이다. 안정성 부분에서 리튬이온전지 내 전해질(액체 또는 겔)은 열폭주(Thermal runaway)에 의한 발화 위험성을 지니고 있으며 다수의 폭발사례가 발행하며 안정성에 대한 우려가 고조되고 있다.^{(2),(4),(5),(7)}

제2절 리튬이온 배터리 발열 특성

1. 배터리 발열 이론

일반적으로 리튬이온 배터리는 체적에너지 밀도가 높고 충전의 효율성이 높아 2차전지 중 가장 널리 사용되고 있지만 역으로 에너지 밀도가 높은 관계로 과충전, 과방전, 과전류 쇼트 시 배터리를 보호할 수 있는 안전성이 보장된 보호회로가 있지 않으면 폭발의 위험성이 존재하게 된다.

리튬이온 배터리는 화학적으로 충·방전을 수행하기 때문에 온도에 많은 영향을 받으며, 충전하는 전류량에 비례하여 온도가 상승하는 특성으로 인해 충전하는 전류가 증가함에 따라 온도 상승률이 증가시키고 저온에서는 배터리 용량이 감소한다. 따라서 충전 효율을 높이기 위해서는 배터리의 이용률을 증가시키기 위해 적정온도인 25~35도 사이에서 충전을 수행하는 것이 가장 좋으며, 온도가 증가함에 따라 배터리의 내부 저항이 증가하기 때문에 40도 이하의 온도에서 충전을 수행해야 한다.

배터리 내부 저항은 배터리의 내부 구조로 인하여 필연적으로 존재한다. 양극과 음극의 두 전극과 전해질 및 분리막으로 구성되어 있으며 전기화학적 산화 환원 반응 과정에서 온도에 따른 내부저항으로 인한 손실이 발생되는데, 충전 시 내부저항에 의해 발열되어 온도가 상승하기 때문이다. 배터리의 내부저항은 아래 식과 같이 나타낼 수 있으며 배터리의 율속 특성을 향상시키기 위하여 배터리 내부의 저항을 최소화 하는 것이 중요하다. 방전율이 높아지면 방전시간은 짧아지고, 배터리 온도 상승은 높아진다.

본 연구에서는 리튬이온전지의 발열을 고려하였다. 이에 따라 리튬이온전지 내의 온도변화를 나타내는 열 전달 방정식을 식(2-1)에 나타내었다.

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P u \nabla T = \nabla \cdot (k \nabla T) + \dot{Q} \quad (2-1)$$

여기서, ρ [kg/m³]는 밀도, C_p [kJ/kg·K]는 열 용량, u [m/s]는 속도벡터, k [W/m·K]는 열 전도도, 그리고 \dot{Q} [W/m³]는 열 생성 항이다.

대류에 의한 냉각효과를 고려할 경우, 열손실량은 아래와 같은 대류 열전달 방정식 으로부터 계산된다.

$$\dot{q} = h(T - T_{ext}) \quad (2-2)$$

여기서, h [W/m²·K]는 열 전달계수이며, T_{ext} 는 외부온도이다. 식 (2-3)의 열 생성 항은 식(2-2)과 같이 리튬이온전지로부터 발생하는 전류와 관련된 식으로 표현될 수 있다.

$$\dot{Q} = i(E_{eq} - E - T \frac{\partial E_{eq}}{\partial T}) \quad (2-3)$$

여기서, $i(E_{eq} - E)$ 는 저항에 의한 열 생성 항이고, $-iT \frac{\partial E_{eq}}{\partial T}$ 는 엔트로피변화에 의한 열 생성 항이다.

$$Q = C_p m \Delta T \quad (2-4)$$

Q는 발열량, C_p 는 셀의 비열, m 은 셀의 질량, T 는 온도 변화량을 나타낸다.^{(8),(9),(10),(11)}

2. 배터리 발열의 화재 위험성

전기자동차 및 대용량 전기저장장치(ESS) 등에 사용되는 중·대형전지의 확산과 함께 배터리 폭발 사고가 발생하고 있으나, 배터리의 손상으로 인해 명확한 화재 원인 규명이 어렵다. 리튬이온전지는 열에 취약하고 발화가 쉬울 뿐 아니라 유기 용매와 산화 금속을 함유하고 있어 소화기나 물에 의한 화재 진압이 어려우며, 배터리 셀 하나에서 단락(합선)이 발생하더라도 연쇄 폭발로 이어져 사고 규모가 커진다. 정상작동 혹은 충전 과정에서의 안전성은 큰 진전을 이루었으나 외부적 충격에 의해 배터리 셀이 분열될 경우에 대한 안정성 확보는 아직까지 어려운 상황이다.⁽¹²⁾

물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리는 팩 단위로 사용되며, 팩 내의 셀들이 평균 온도를 적절히 유지하고, 셀 간 온도편차를 줄이는 것이 중요하다. 셀 간 온도편차로 인해 셀 간 내부저항의 불균형이 생기면 사용 가능한 배터리 셀이 많이 남아있음에도 불구하고, 배터리 모듈을 교체해야하는 문제가 발생한다. 또한 충·방전 시 배터리를 적절한 온도로 유지하지 못하는 경우, 높은 온도로 인한 화재 및 폭발 가능성이 있다. 그뿐만 아니라 전기 화학 반응, 충·방전 효율, 전하 수용성 등에 악영향을 끼치며 결과적으로 배터리의 수명을 감소시킨다. 다양한 운전조건과 과도적인 출력 상황에서 배터리를 적절한 온도로 유지하며, 셀 간 온도편차를 줄일 수 있는 배터리 제어시스템이 필요하다.^{(13),(14)}

일반적으로 리튬이온배터리의 화재원인은 과충전, 인화성 액체 전해질, 내부단락 및 외부단락 그리고 외부수열에 의한 열 충격 등에 의해 발생한다. 보호회로가 정상작동할 경우 과충전 및 외부단락에 대한 보호가 가능하여 화재를 방지할 수 있지만, 내부 단락 및 외부수열에 의한 열 충격은 보호회로와 상관없이 화재로 이어질 수 있다.

리튬이온배터리의 과충전 실험에 따르면, 과충전에 의한 내부온도 상승으로 내부압력이 증가되면서 눈에 띄는 부풀음 현상인 스웰링이 발생하고 그 후 지속적인 배터리의 온도 상승 및 압력 증가로 가장 약한 곳인 상부 알루미늄 필름마감 접합부 벤트가 되면 내부온도 상승으로 기화된 전해액이 분출되어 전원공급장치의 전류를 차단하여도 배터리의 지속적인 온도상승이 발생하게 된다. 이와 같은 원인에는 과충전에 의해 무수히 많은 전하들이 채워지면서 압력증가로 인한 급격한 내부열화로 리튬 전극표면에서 비정상적인 상태의 수지상결정(Dendrite)이 형성되고, 이 수지상 결정이 급격히 증식되면서 양극과 음극의 접촉을 차단하는 분리막을 관통하게 되면서 전류가 흐르게 되어 리튬이온배터리 내부 양극과 음극이 단락상태로 진행되어 급격한 열상승을 동반한 열폭주(Thermal runaway)현상이 나타나 급격한 온도상승에 기인한 것이다. 리튬이온 배터리의 열폭주 현상에 의해 급격히 상승된 열에너지가 주변에 형성된 가연성 분위기의 가스를 착화시키면서 화염과 함께 불티를 동반한 폭발적 연소가 나타날 수 있다.^{(15),(16),(19)}

제3절 적외선 열화상 기술

절대온도(-273.15℃ 또는 0 Kelvin) 이상의 온도를 가지는 모든 물체는 적외선 영역의 전자기파를 방출한다. 이러한 적외선 복사에너지는 전도와 대류가 고체, 액체, 기체 등의 매질을 이용하여 열 이동을 하는 것과는 달리 매질을 통하지 않고 복사선에 의하여 열을 이동하는 것을 한다. 복사에너지는 빛의 성질에 의해 물체로부터 3가지의 형태로 조사된 복사열이 일부 흡수가 될 수 있고, 일부는 물체에 의해 반사되고, 일부는 물체를 투과할 수 있다. 이로부터 식(2-5)와 같이 나타낸다.

$$W = \alpha W + \rho W + \tau W \quad (2-5)$$

즉,

$$\alpha + \rho + \tau = 1 \quad (2-6)$$

여기서, α , ρ , τ 는 각각 흡수율(absorptivity), 반사율(reflectivity), 투과율(transmissivity)이며, 식(2-6)은 복사에 대한 키르히호프 법칙이다.

적외선 열화상 기술은 Fig. 2-2 빛이 갖는 다양한 파장대역으로부터 적외선 파장대역 중에서도 1.3 μm 으로부터 12 μm 범위의 적외선을 적외선 검출소자인 센서를 통해 물체 혹은 대상체로부터 방사되어지는 적외선을 탐지하여 온도 혹은 그 자체를 화상으로 보여주는 기술로 열화상카메라는 물체 표면에서 방출되는 적외선을 검출하여 그 물체의 온도분포가 높은 곳은 장파장의 적색으로, 낮은 곳은 단파장의 청색으로 나타낸다. 열적으로 가열된 재료를 적외선 카메라를 통해 구조물의 표면온도 분포를 화상으로 알 수 있을 뿐 아니라 물체의 각 지점에 대한 온도분포까지 측정이 가능하다.

적외선 열화상 카메라는 외부의 광원에서부터 대상 물체에 반사 되어진 적외선 파장을 검출하여 Stefan-Boltzmann Law에 의한 온도와 파장의 관계식을 이용하여 적외선 detector로부터 검출된 적외선 파장을 온도의 함수로 나타내어 온도의 고저를 화상으로 보여주는 것이다. Table 2-2은 적외선 카메라에서 사용되는 적외선의 종류를 표로 나타내었다.

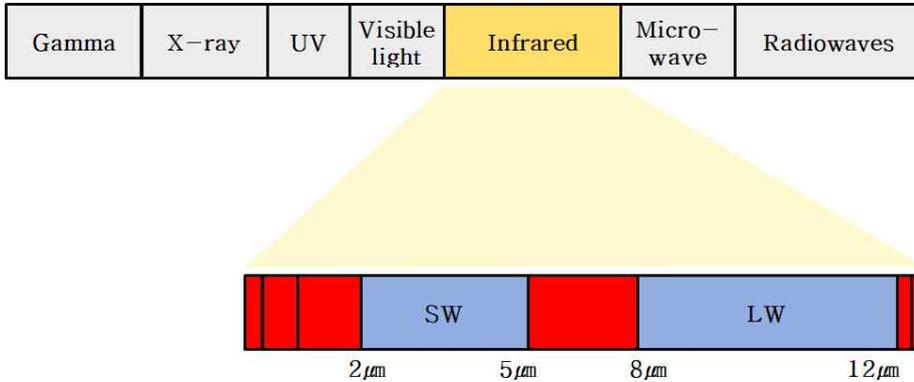


Fig. 2-2 Range of Electromagnetic Waves

Table 2-2 Classification of Infrared Rays by Wavelength

| Infrared Ray | NR (Near Infrared) | SWR (Short Wave Infrared) | MWR (Medium Wave Infrared) | LWR (Long Wave Infrared) |
|--------------|-----------------------|---------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------------|
| Wavelength | 0.7~1 μ m | 0.9~1.7 μ m or 0.9~2.5 μ m | 2~5 μ m | 7.5~13 μ m or 7.5~14 μ m |

Fig. 2-3는 일반 측정 상황에 대한 방사선을 나타내고 있으며, 대기와 물체 방사율에 영향을 미치는 보정은 열상에 존재하는 부수적인 방사에너지와 대기에 의해 감쇄된 피사체의 방사에너지뿐만 아니라 주위로부터의 방사에너지, 즉 대기 자체에서 방사된 방사에너지와 대기에 의한 감쇄와 물체에서 반사되어진 방사에너지로 존재한다. 피사체 방사에너지 강도는 존재하지 않는 완전한 흑체 방사율의 함수와 같으며, 열 측정 공식은 식(2-7)에서와 같이 표현된다. 여기에서 첫 번째 항은 피사체의 방사, 두 번째 항은 주위에서 반사된 방사, 세 번째 항은 대기에서의 방사를 나타내고 있다.

$$I_m = I(T_{obj}) \times \tau \times \epsilon + \tau(1 - \epsilon) \times I(T_{amb}) + (1 - \tau) \times I(T_{atm}) \quad (2-7)$$

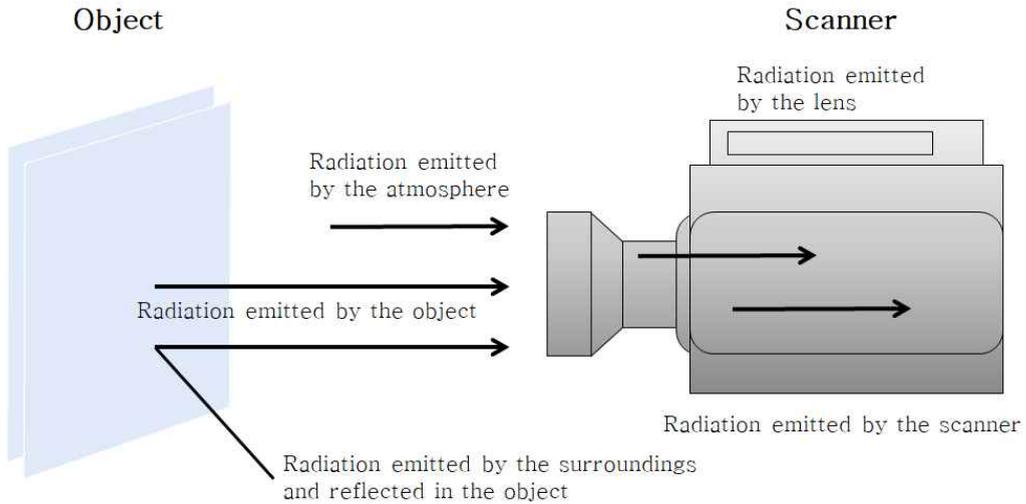


Fig. 2-3 Radiation Contributions to the General Measurement Situation

적외선 열화상 탐상 기법에는 크게 두 가지로 수동적 방법(Passive method)과 능동적 방법(Active method)인 접근법으로 구분할 수 있다. 능동 서모그래피는 외부 가열이나 냉각 등에 의한 열 유동에 의해 일시적 또는 지속적인 자극에 의해 표면의 온도 패턴을 분석함으로써 내부 결함까지 측정할 수 있다. 이에 반해 Fig. 2-4의 수동 기법은 가열이나 냉각이 적용되지 않고, 측정 대상물로부터 자연스럽게 방사되고 있는 적외선 에너지를 검출하는 일반적인 측정방법이다.

수동적 열화상 기법은 일반적으로 온도 패턴을 기초로 산업 공정 및 제도 단계에서의 평가 및 모니터에 적용된다. 수동적인 방법으로의 결함탐지는 검사에 앞서 온도가 환경에 따라 일정하다. 따라서 시험 대상체는 결함 부위에서 기록할만한 온도를 제공하기 위해 가열되거나 냉각되어야 한다. 이 방법은 제어할 수 없는 에너지(태양)와 상호작용으로 대상체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법으로 적외선을 방출하는 모든 물체에 해당하는 사항으로 그 물체가 방출하는 고유의 적외선량을 감지하여 화상으로 나타낸다. 또한, 수동적 방법은 물체 고유의 상태를 파악하는데 사용되는 가장 기본적인 방법으로 측정 대상체의 정량적인 미시적 정밀도를 요구하는 분야보다는 거시적인 측정법에 속한다.

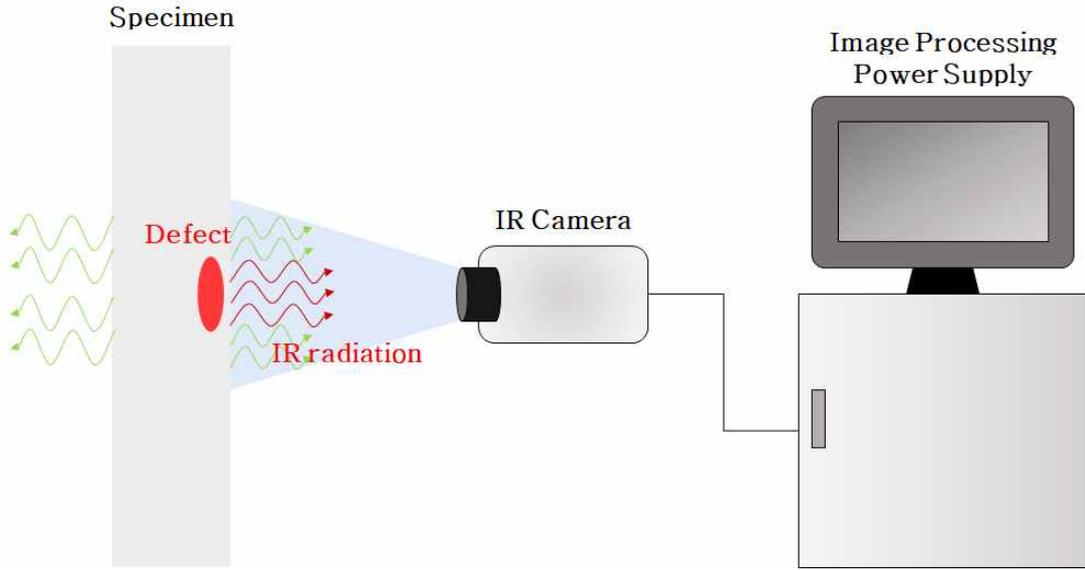


Fig. 2-4 Passive Method

Fig. 2-5의 능동적 검사기법(Active method)은 수동적 검사기법과 달리 검사체 고유의 적외선량에 의존하지 않고 제어 가능한 에너지를 입사하고 그 반응으로 검사체가 방사하는 적외선 에너지를 측정하여 분석하는 기법이다. 이러한 검사기법은 물체표면 방사율, 주변온도, 측정각도, 풍속, 거리에 따른 영향을 제어하여 검사자가 얻고자 하는 결과를 정밀하게 얻을 수 있는 장점이 있다.

능동형 검사기법으로는 대표적으로 광적외선, 진동, 마이크로웨이브, 초음파, 와전류 등 에너지의 입사 종류에 따른 분류와 제어 방법에 따른 분류로 나눌 수 있는데 이러한 검사기법을 통하여 검사체로부터 얻을 수 있는 결과 값이 더욱 정밀해지는 효과가 있다. 또한, 전류를 흘리는 방법이나 전류의 ON/OFF를 공리하여 고장 위치를 알기 쉽게 하는 방법도 이루어지고 있다. 액티브(능동)방식은 일반적으로 측정 대상물에는 전혀 열이 가해지지 않아 온도 분포가 없거나 온도 또는 온도차가 매우 미소한 경우 외부로부터 열을 가함으로써 측정 대상물의 표면의 미세 결함(크랙 등)이나 내부 결함(내부 크랙이나 보이드 = 공극)을 온도 분포로써 부상시켜 검출하는 방법이다.^{(10),(11),(12),(13),(14),(15)}

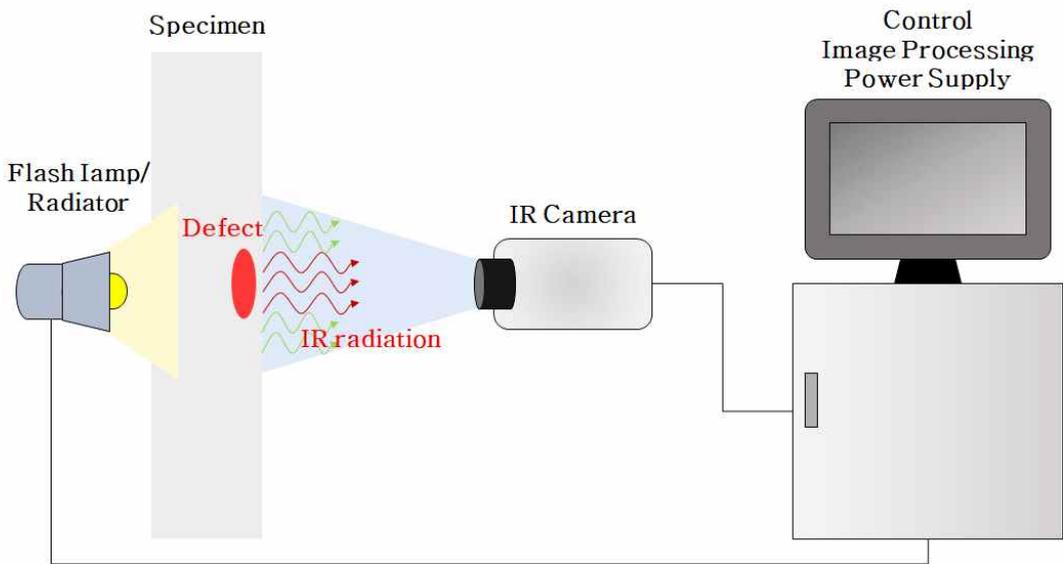


Fig. 2-5 Active Method

제 3 장 리튬이온 배터리팩 방열 최적설계

제1절 배터리팩 내부 방열 설계

1. Cell Holder 설계

기존 물류이송 로봇용 배터리에 사용되었던 셀 홀더는 셀 간격 1mm 간격으로 삽입되도록 제작되었으나 자연 공조효과를 높이고 고출력 시 열 증가율을 낮추기 위해 1.5mm로 셀 홀더를 설계하였다. 셀 간격 증가로 제품의 폭(wide)이 늘어나 배터리팩의 크기의 변동이 있었으나, 셀을 강제 폭발시켜 주변 셀들에 미치는 피해를 확인하는 열 폭주 확산시험으로 방열 효과를 증명하였다.

Fig. 3-1의 (a)셀 간격 1.5mm로 정 가운데 위치한 셀의 폭발을 유도하였을 때, Fig. 3-1의 (b)와 같은 결과로, Fig. 3-1의 (c) 셀 간격 0.5mm 정 가운데 위치한 셀의 폭발을 유도하였을 때, Fig. 3-1 (d)와 같은 결과를 확인하였다. 셀 간격 1.5mm, 0.5mm의 실험 결과를 비교하였을 때, 셀 간격 설계 1mm 차이의 열 폭주 확산의 위험성을 보아 폭주방지 유·무가 결정되는 것을 확인하였다.

Fig. 3-2는 셀 간격 $\geq 1.5\text{mm}$ 을 적용한 Cell Holder의 2D설계 도면으로 Fig. 3-3의 Cell Holder를 제작하였다.

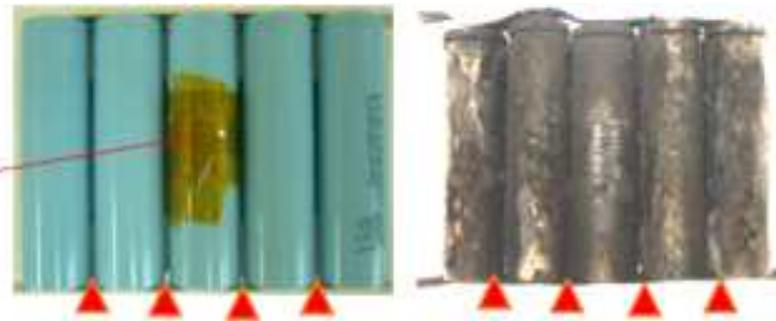
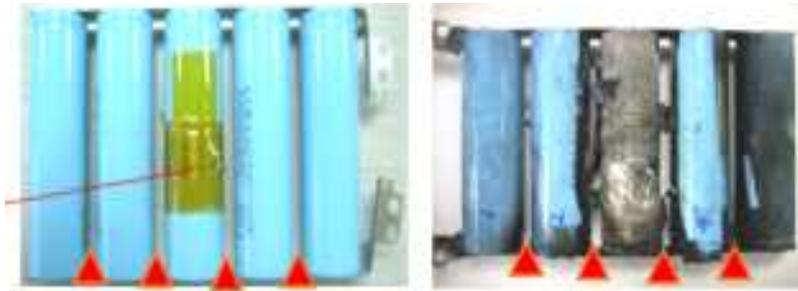


Fig. 3-1 Thermal Runaway Diffusion Experiment According to Cell Spacing

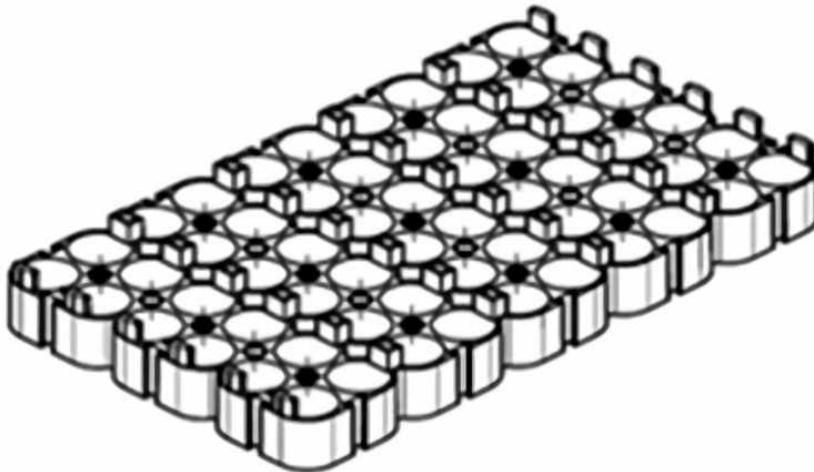


Fig. 3-2 Cell Holder 2D Modeling

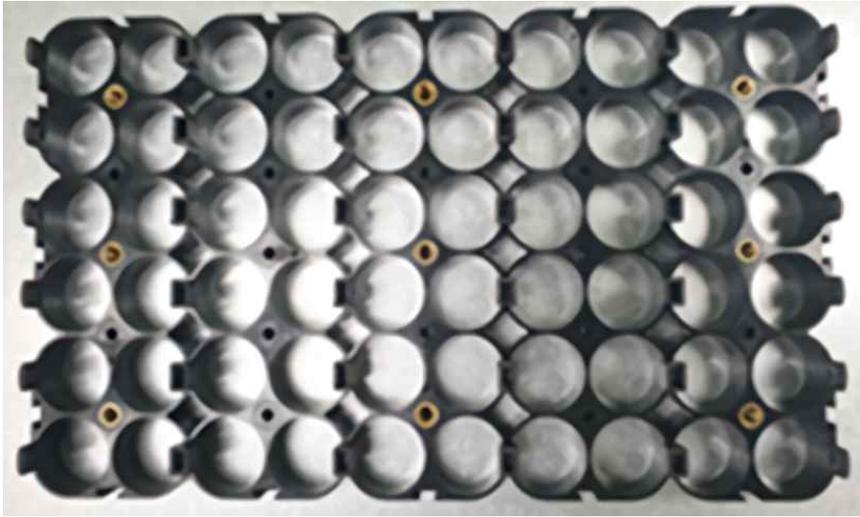


Fig. 3-3 Cell Holder

2. Graphite Sheet 적용

배터리 팩의 크기, 무게, 가격 측면에서 경쟁력을 높이기 위해 수냉 또는 공랭의 방법을 사용하지 않고도 방열 효과를 얻는 방법으로 Graphite Sheet(고열확산용 흑연 시트)를 적용하였다. 연속급속충전(4C-rate) 및 연속 고출력(2C-rate) 사용이 가능한 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리 팩의 연속최대출력 사용 시 발열 문제를 낮추기 위해 Graphite Sheet를 적용하여 평균온도 안정화로 Cell의 열 분포 및 발열 문제를 해결하였다. Graphite Sheet는 노트북, Flat-Panel TV(LCD, LED, PDP) 등의 디스플레이제품과 스마트폰, 테블릿 PC 등의 모바일 기기에서 CPU 등의 열원으로 발생하는 열을 이동시켜 방열시키는 방법으로 사용되고 있으며, 열 전도성이 높고 두께가 얇고 가벼운 특징으로, 관련 연구개발 및 적용 범위가 확대되고 있으며 그 효과가 검증되었다.

Graphite Sheet는 흑연 재질로 절연을 위해 겉면에 투명의 절연지가 부착되어 있으며 Table 3-1는 배터리팩에 적용된 Sheet의 성분을 보여주는 표이다. 본 연구의 시제품에 적용하는 인공 Graphite Sheet는 천연 Graphite Sheet 보다 기계적 강도와 열 전달율이 높다. Fig. 3-4의 Graphite Sheet를 배터리팩 내의 원통형 소형 Cell 사이와 Cell 외부(측면)에 Fig. 3-5와 같이 부착하였으며, 배터리 Cell 상·하의 극판에는 흑시모를 화재 사고방지를 위해 부착하지 않았다.

Graphite Sheet는 두께 방향에 대해 면 방향의 열 전달율이 수십에서 수백배까지의 수치를 보인다. 제품두께는 용도에 따라 다르며 보통 휴대전화 등은 $25\mu\text{m}\sim 50\mu\text{m}$ 전후의 얇은 시트를 사용하고 있고, 노트북과 산업용 기기에는 $0.5\text{mm}\sim 1\text{mm}$ 전후의 비교적 두꺼운 제품이 사용되는데, 본 개발 시제품에는 셀 이격거리를 고려하여 1.5mm 두께로 적용하여 셀 간에 Sheet를 최대한 공백이 없이 부착하여 셀 간 발열 평준화에 더욱 효과를 나타내었다.

Table 3-1 Graphite Sheet Composition

| Width | Thickness | | |
|---------------------------------------|----------------|--------------|--------|
| | T<=0.4 | 0.4<T<=1.0 | T>1.0 |
| +/-3 | +/-10%T | +/-7%T | +/-5%T |
| T: thickness | | | |
| Items | | Data | |
| Density deviation(g/cm ³) | Thickness>=0.4 | +/-0.07 | |
| | Thickness<0.4 | +/-0.1 | |
| Tensile strength(MPa) | | >=4.0 | |
| Compression rate(%) | | 35-55 | |
| Resilience rate(%) | | >=9 | |
| Ash content(%) | | <1.0 | |
| Heat weightlessness(%) | 450 centigrade | <=1.0 | |
| | 600 centigrade | <=20 | |
| S(sulfur) content(ppm) | | <=1200 | |
| Chlorinity content(ppm) | | <=80 | |
| C(carbon) content(ppm) | | >99 | |
| Density(g/cm ³) | | 1.1, +/-0.05 | |



Fig. 3-4 Applied Graphite Sheet



Fig. 3-5 Electronic Device Application of Graphite Sheet

3. Silicone Sheet 적용

통신, 컴퓨터 및 주변 기기, 전력 변환, 발열 반도체와 방열판 사이, 프레임 새시 또는 열을 전달해야 하는 영역의 다른 유형 히트 스프레더 등의 용도로 사용되는 실리콘 방열시트는 내열성과 전기절연성이 우수한 실리콘수지에 열전도성 파우더를 분산 및 혼합하여 박막형태로 제작된다. 열전도체로 발열체(발열 부품)에서 발생된 열을 방열판으로 열을 효율적으로 전달하여 열로 인한 부품의 손상과 기능 저하를 막을 수 있다. 유연성과 탄성이 우수하여 열원과의 밀착성이 좋아 열전도 효과가 높으며, 열전도도가 높은 동박, 금속성 부직포 등 전기전도성 물질에 부착할 경우 열분산 효과와 전자파 차폐 성능을 동시에 확보할 수 있다.

방열 효과를 극대화하기 위해 배터리 Cell 상·하의 극판에 부착 가능한 실리콘 재질의 방열 시트를 추가적으로 Fig. 3-6 과 같이 적용하였다. Table 3-2은 적용한 실리콘 시트의 성분을 표로 나타내었고 Fig. 3-7 은 실리콘 시트의 구조를 보여준다.



Fig. 3-6 Electronic Device Application of Silicone Sheet

Table 3-2 Silicone Sheet Specification

| Property | | Unit | Value | Remark |
|------------------------------|-----|----------|------------------|--------------|
| Standard Color | | - | Gray | Visual |
| Standard Size | W*L | mm | 200*300 | Sheet Type |
| | | | 200*400 | |
| Inherent surface Tack | | - | 2 | 1 or 2 sided |
| Specific gravity | | - | 2.5 | ASTM D792 |
| Hardness | | Share 00 | 60±10 | ASTM D2240 |
| Volume Resistivity | | Ω-cm | 10 ¹³ | ASTM D257 |
| Dielectric breakdown voltage | | KVac/mm | 10 | ASTM D149 |
| Using Temperature | | ℃ | -40~200 | - |
| RoHS Compliant | | - | Yes | SGS |
| Reach Compliant | | - | Yes | SGS |
| Flame rating | | UL94 | V-0 | E306107 |
| Thermal Conductivity | | W/mk | 1.5 | ASTM E1530 |

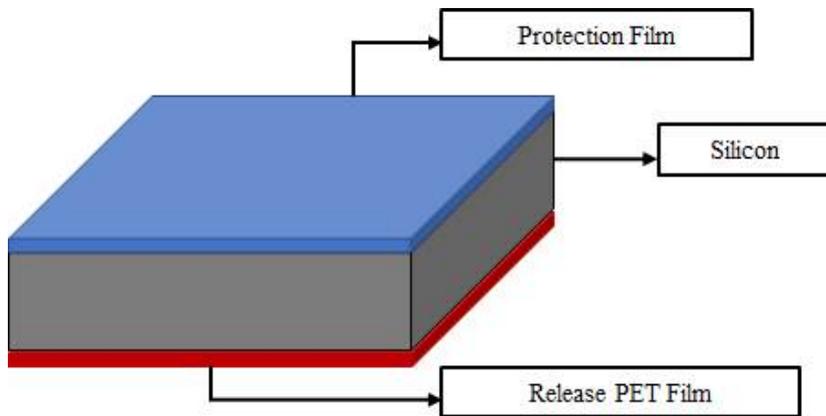


Fig. 3-7 The Structure of the Silicon Sheet

제2절 CASE 설계

Fig. 3-8은 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리 팩의 CASE 설계 도면으로 우측면도, 내부 투시도, 평면도, 측면도로 나타내었다. 방열 성능을 높이기 위한 CASE 설계로 내부 구조물의 두께 변경 및 불필요한 구조를 제거하고 방열판을 붙임으로써 열 전달력을 증가시켰고, 셀 적층 구조 변경 및 제품의 높이를 증가시킴으로써 열 순환이 보다 원활하도록 하였다. 또한 배터리 팩 내부에 BMS, BPU 등의 고정판을 제작하여 공간의 분리로 배터리팩 내 장치간의 발열을 분리 하였다. 또한, 구조물의 재질을 EGI에서 AI로 변경하여 배터리 외관의 열전도율을 높여 방열 성능을 높였다.

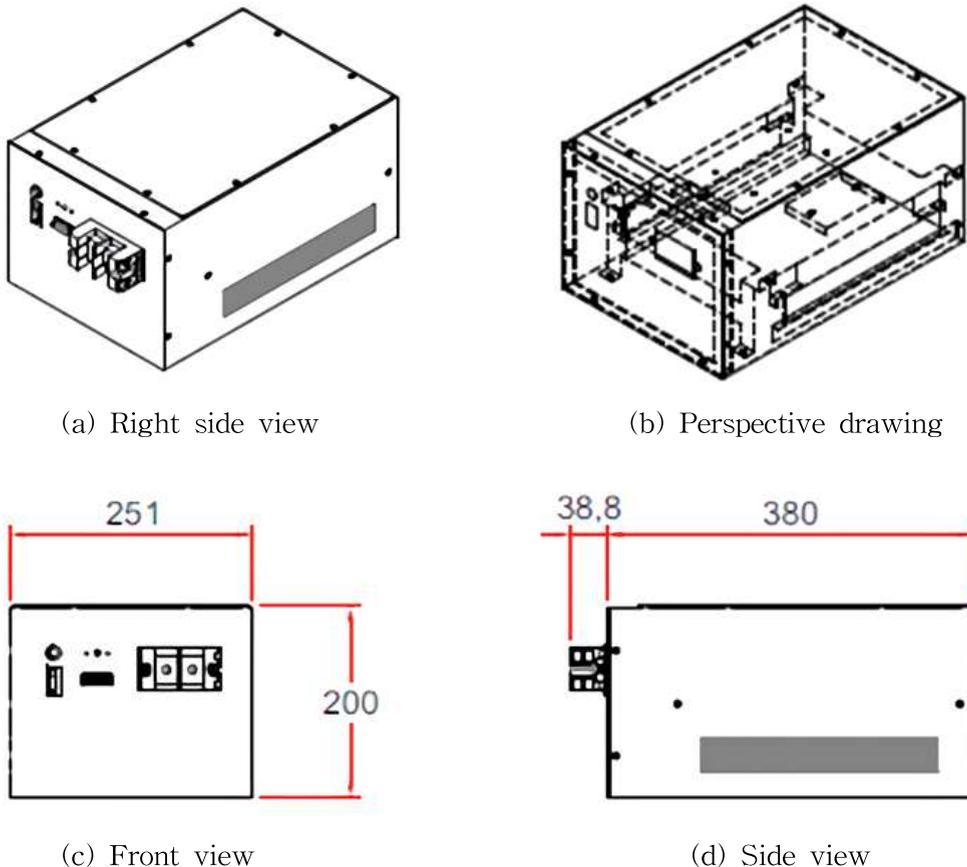
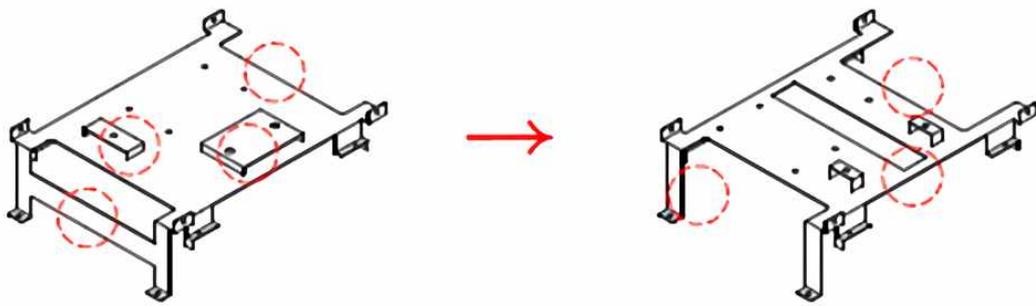
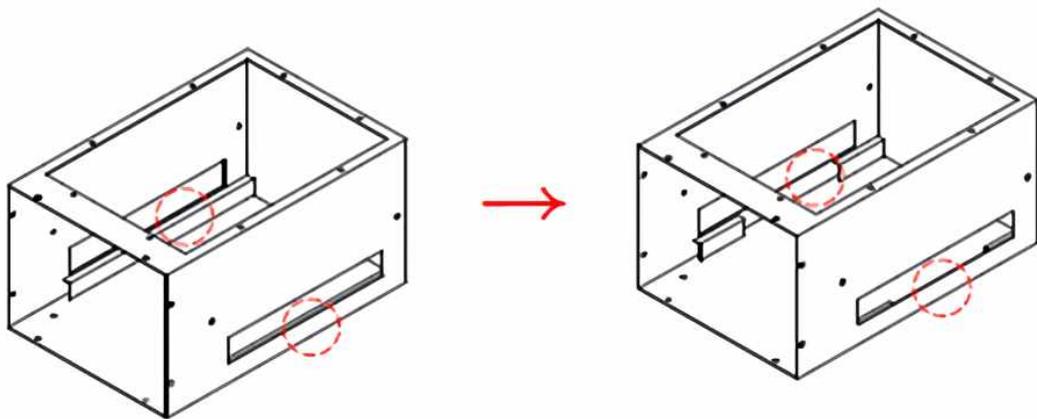


Fig. 3-8 Battery Pack 2D Modeling



(a) Battery pack inner plate



(b) Change outer case thickness

Fig. 3-9 Modified Complementary Design

설계된 CASE 제작하며 발생한 문제점을 보완을 위해 Fig. 3-9와 같이 설계의 수정 보완을 진행하였다. Fig. 3-9의 (a) 배터리 팩 내의 장치분리를 위한 속판과 Fig. 3-9의 (b)외부 케이스의 철판 두께를 EGI 1.2T에서 EGI 1.0T으로 변경 하였으며, 고정 브라켓의 최소화 등의 불필요한 속판살을 제거하였다. 배터리팩 상단의 커버 또한 EGI 1.2T에서 AL 1T로 변경 설계 하였다. 실제 제작한 제품을 Fig. 3-10과 같다.



Fig. 3-10 Battery Pack for Logistics and Transport Automation Robot

제 4 장 방열 설계 성능 실험

충·방전 실험을 연속충전출력으로 만충전-연속방전출력으로 완전방전 후 기록을 측정하는 방식을 채택 하였으며, 실험을 수행할 때 배터리팩 표면의 온도는 측정할 수 있지만 내부의 온도는 측정이 어려워 보다 정확한 온도분포를 확인하기 위하여 Thermocouple를 이용하여 직접 부착 형식의 실험을 동시에 진행하였다. 실험은 약 3 시간동안 진행되었으며, 4월경에 진행되어 당시 주변 온도 17℃로 온도변화가 적은 실내에서 진행되었다.

제1절 실험 장치 구성

본 연구에서는 리튬이온 배터리 팩의 방열설계 검증을 방열 성능평가 실험으로 적외선 열화상카메라와 Thermocouple를 통하여 방열설계 적용 제품과 방열 미적용 제품의 온도분포를 직접 측정함으로써 비교 분석하였다. Fig. 4-1와 같은 실험 장치 구성으로 열화상 카메라, 동일 사양의 방열 설계 적용 배터리팩 1EA & ,방열 설계 미적용 배터리팩 1EA, 급속 충·방전시스템, BMS, Thermocouple로 구성하여 실험을 진행하였으며 Table 4-1과 같이 1차 방열 설계 적용 제품과 방열 설계 미적용 제품의 실험 결과를 바탕으로 추가 보완설계를 진행한 최종 방열 설계 보완 적용 배터리팩으로 총 2회의 실험을 진행하였다.

본 연구의 시제품은 최대출력 6kW (4C-rate:250A)로 충/방전 시 Cell 최대온도/최저온도의 편차를 줄일 수 있도록 Graphite Sheet(고열확산 시트)를 Cell 내부와 외부 그리고 출력부와 자연 공조가 유리한 바깥쪽 Cell의 온도가 최대한 평준화될 수 있도록 Cell 발열 위치별 부착 투입량을 조절하여 Graphite sheet를 부착하였다. 또한 평준화된 열을 배출시킬 수 있도록 추가 방열판 연계구조로 설계를 진행하며, 방열판에 가까운 Cell이 더 낮은 온도가 되지 않도록 Cell 발열 시 중심이 되는 위치(Core의 양 중앙)에서 Sheet와 방열판과 연계 위치로 하여 시료 제작을 진행하였다.

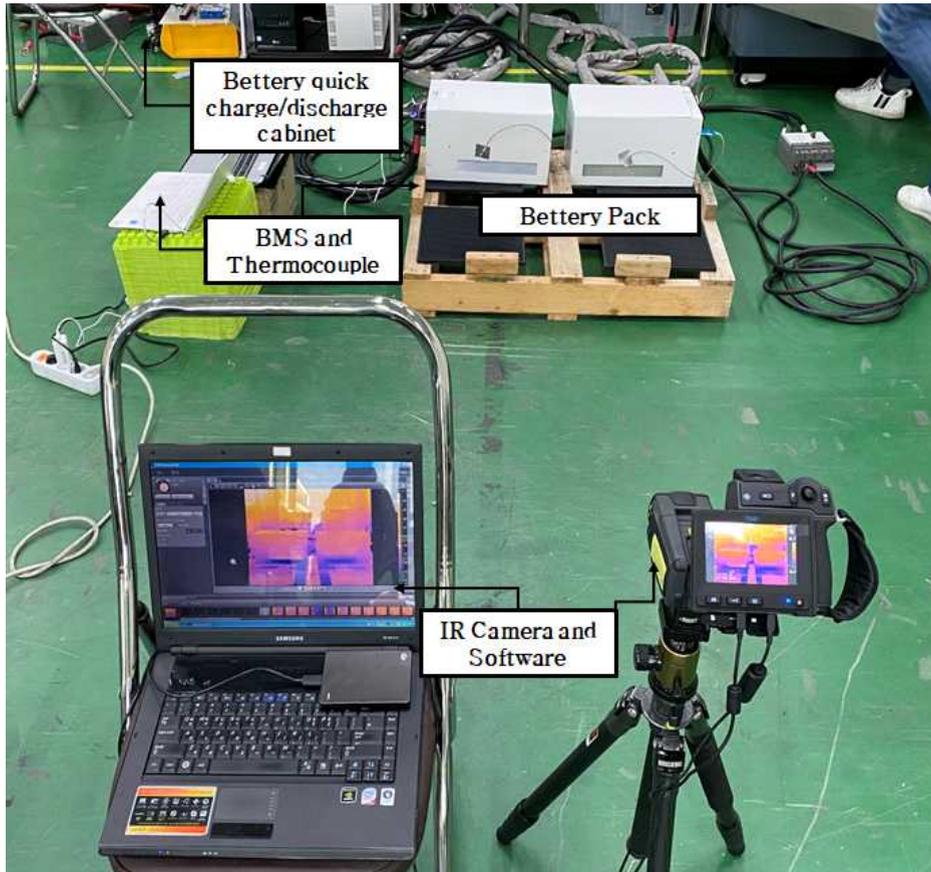
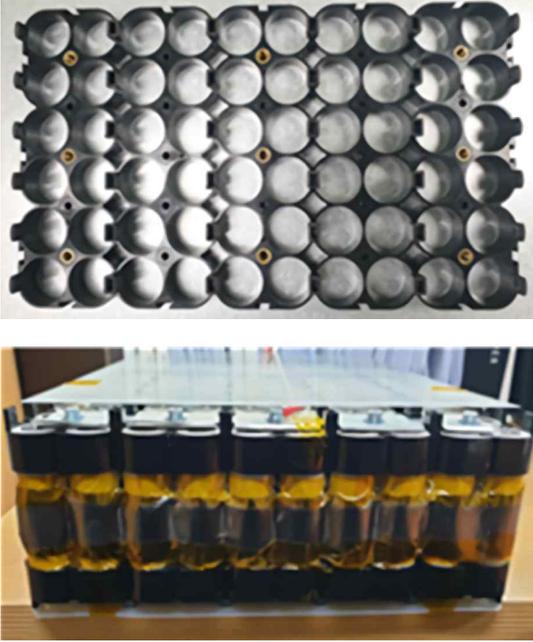
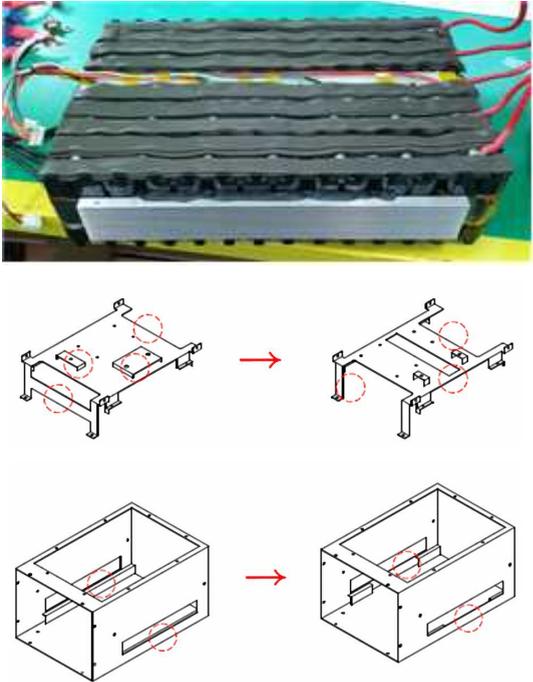


Fig. 4-1 Experiment Equipment Configuration

Table 4-1 Battery Pack Heat Dissipation Design Application Stage

| 1차 방열 설계 적용 | 2차 방열 보완 설계 적용 |
|---|---|
|  |  |
| <p>① 셀 간격 $\geq 1.5\text{mm}$ 적용 Cell Holder ② Graphite Sheet(고열확산용 흑연시트)</p> | <p>① Silicone Sheet ② CASE 보완설계</p> |

실험에 사용된 Thermocouple은 Yokogawa사의 XL100이며, Fig. 4-2 열화상 카메라는 FLIR T640 모델로 주요스펙을 Table 4-2로 나타내었다. 포터블 형태로 이동성이 좋으며 고 해상도, 대형 터치스크린, 높은 온도 분해능, 회전식 렌즈, 뷰 파인더, Wi-Fi 및 블루투스(Bluetooth), USB등 연결 지원이 가능하다. 최고 640×480 픽셀의 IR해상도를 가지고 있으며, 측정 온도 범위는 $-40^{\circ}\text{C} \sim 2,000^{\circ}\text{C}$, 민감도는 30°C 에서 0.035°C 이다. 1 ~ 8× 연속 디지털 줌, 연속 자동 초점 및 수동 초점, 5메가 픽셀의 실 화상 카메라를 내장하여 열화상/실 화상 이미지를 동시 저장이 가능하여 실 화상 내 열화상 삽입(PIP) 및 합성이 가능하다. 또한 USB를 PC에 연결하여 촬영 영상의 녹화 및 스트리밍 가능하다.



Fig. 4-2 FLIR T640

Table 4-2 FLIR T640 Specifications

| | |
|----------------------------------|--|
| IR resolution | 640×480pixel |
| Temperature range | -40℃~150℃, 100℃~650℃, 300℃~ 2,000℃ |
| Thermal sensitivity/NETD | 40mK @+30℃ |
| Zoom | 1-8×continuous, digital zoom, including panning |
| Focus | Automatic (one shot) or manual |
| Data communication interfaces | USB-mini, USB-A, Bluetooth, Wi-Fi |
| Size (LWH) | 143×195×95mm |
| Weight | 1.3kg |

최종 실험에 진행된 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리팩의 사양은 Table 4-3 표로 나타내었다.

Table 4-3 Heat Dissipation System Design Applied Battery Pack Specifications

| Item | | Specification | Note. |
|-----------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|
| Cell(원통형 21700 Type) | | 3.6V/3.0Ah | INR21700-30T |
| Configuration | | 7S20P | 7Serial, 20parallel |
| Design | Nominal Voltage | 25.2V | 3.6V*7S=25.2V |
| | Nominal Capacity | 60Ah | 3.0Ah*20P=60Ah |
| | Energy | 1512Wh | |
| Recommend | Maximum Charging Voltage | 28.35V | 4.05V/Cell |
| | Discharging End Voltage | 21V | 3.0V/Cell |
| | Charging Method | CC-CV | 1.5A Cut-off(0.025C) |
| | Standard Charging Current | 30A | 0.5C-rate |
| | Max Charging Current | 240A | 4.0C-rate |
| | Standard Discharging Current | -30A | 0.5C-rate |
| | Max Discharging Current | -240A | 4.0C-rate |
| Operating Temperature | Charge | 0~45 | |
| | Discharge | -20~60 | |
| Output Connector | | 2P Terminal | Bolt 8Φ |
| Weight | | 18.5kg | |
| Dimension(W×L×H)mm | | 251×418.8 ×200 | L: 단자포함 418.8mm 미포함 380mm |

제2절 실험 방법

Table 4-4은 실험 방법을 나타낸 표로, 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리팩의 방열 설계 성능 평가를 위해 동일한 사양의 배터리 시료 2개를 방열 설계의 유무로 비교 평가한다.

배터리 팩을 0.5C-rate의 방전전류로 초기 완전방전 후 연속충전출력(6kW, 4C-rate)으로 만충전 시키며 완전방전 전 대기 상태의 온도 안정화율을 위해 15분의 휴지시간을 갖는다. 배터리 팩을 연속방전출력(3kW, 2C-rate)으로 완전방전 실행을 기준으로 총 3 Cycle 진행하여, 마지막 Cycle의 방전 중 가장 높은 Cell 평균온도를 기준으로 비교한다.

1차적으로 방열 설계 제품과 방열 설계 미적용 제품의 적외선 열화상 측정 결과를 바탕으로 추가 보완설계 과정을 거쳐 최종 시제품과 방열 설계 미적용 제품의 실험으로 총 2회 진행하였다.

Table 4-4 Experimental Method

| | |
|--------------|---|
| Test subject | 1차 : 방열 기능 적용 1EA & 방열 기능 미적용 1EA 2차 : 방열 기능 보완 적용 1EA & 방열 기능 미적용 1EA |
| 1Cycle | Charge-Rest-Discharge |
| Charge | CC-CV 28V, 120A, Cut-off: 5A |
| Discharge | CC - 120A, Cut-off: 22.75V |
| Rest | 15min |

제 5 장 실험결과 및 고찰

제1절 열화상 이미지 결과 분석

Fig. 5-1부터 Fig. 5-2까지 적외선 열화상 카메라를 이용해 촬영된 열화상 이미지로 Fig. 5-1은 첫 번째 Cycle의 충전 중, Fig. 5-2은 세 번째 Cycle 충전 중 촬영된 이미지이다. 배터리팩 내 Cell의 발열에 의한 온도분포를 확인하기 위해 열화상 카메라를 이용해 획득한 이미지 데이터를 분석하였다.

방열 설계 적용 제품과 방열 미적용 제품의 온도 분포 비교를 위하여 동일한 위치의 온도 변화 값을 확인하였다. 방열 설계 제품의 방열 미적용 제품의 Heatsink위치에 Spot1, Spot2를 적용, 외관 케이스에 Spot3, Spot4를 적용하였으며 방열 설계 적용 단계별로 실험을 2회 진행하였다.

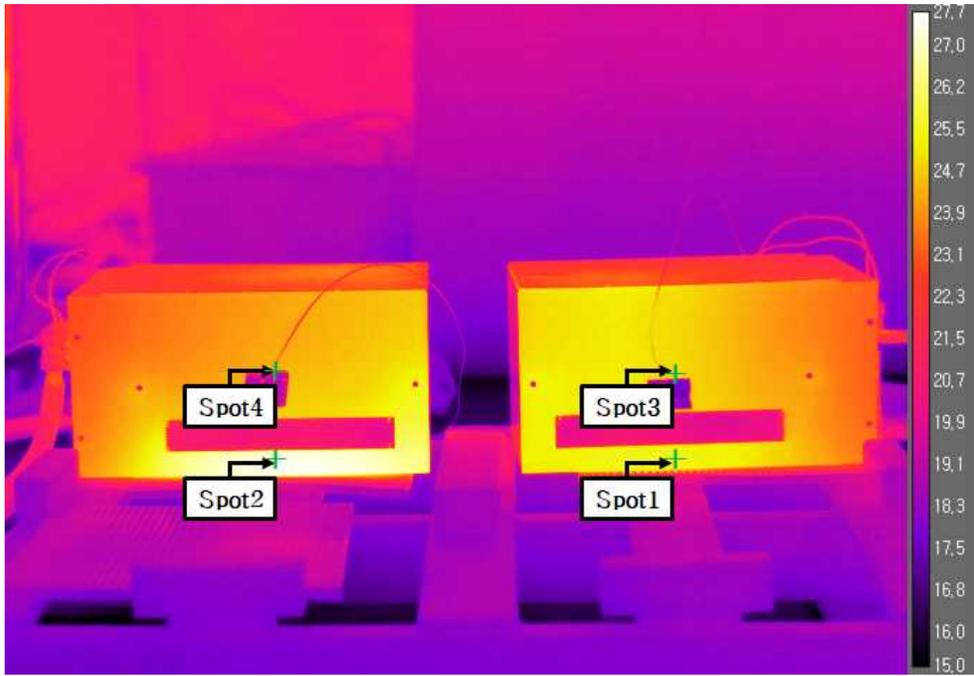


Fig. 5-1 1Cycle-Charge

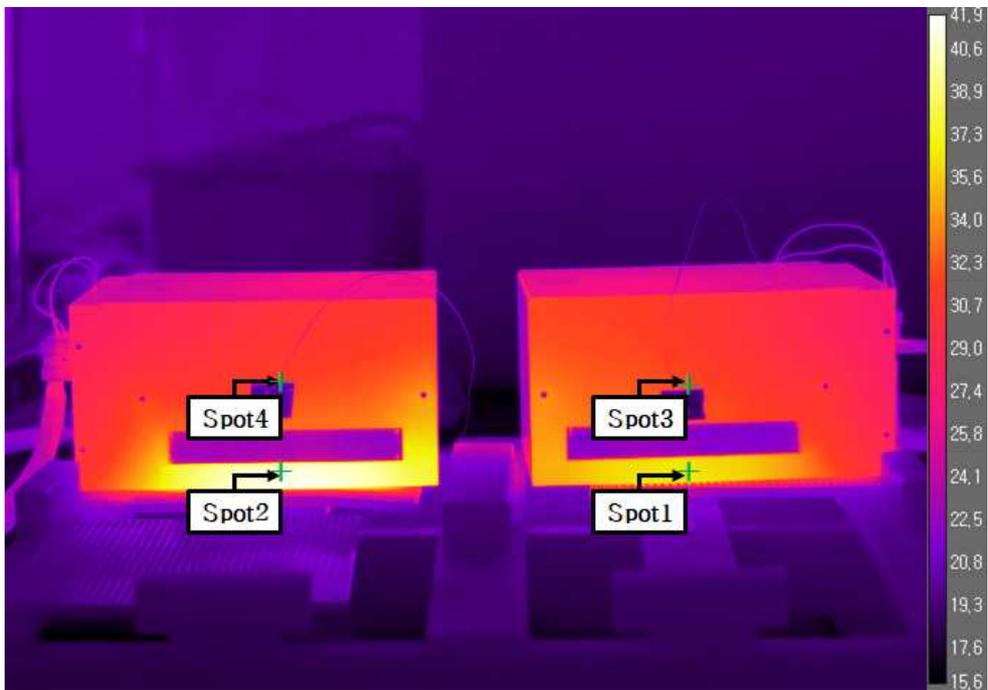


Fig. 5-2 3Cycle-Charge

Fig. 5-3은 Spot1에서 Spot4까지 약 3시간 동안의 온도 변화를 보여주는 그래프로 Spot3와 Spot4 두 제품의 외관 케이스 큰 차이를 보이지 않고 동일한 양상으로 온도가 상승하는 것을 알 수 있으며, Spot1 방열 적용제품과 Spot2 방열 미적용 제품의 Heatsink는 실험 시작 온도 17°C에서부터 상승하여 3Cycle 충·방전 후 각 41.85°C, 38.97°C로 약 3°C의 온도 차이가 있음을 확인하였다.

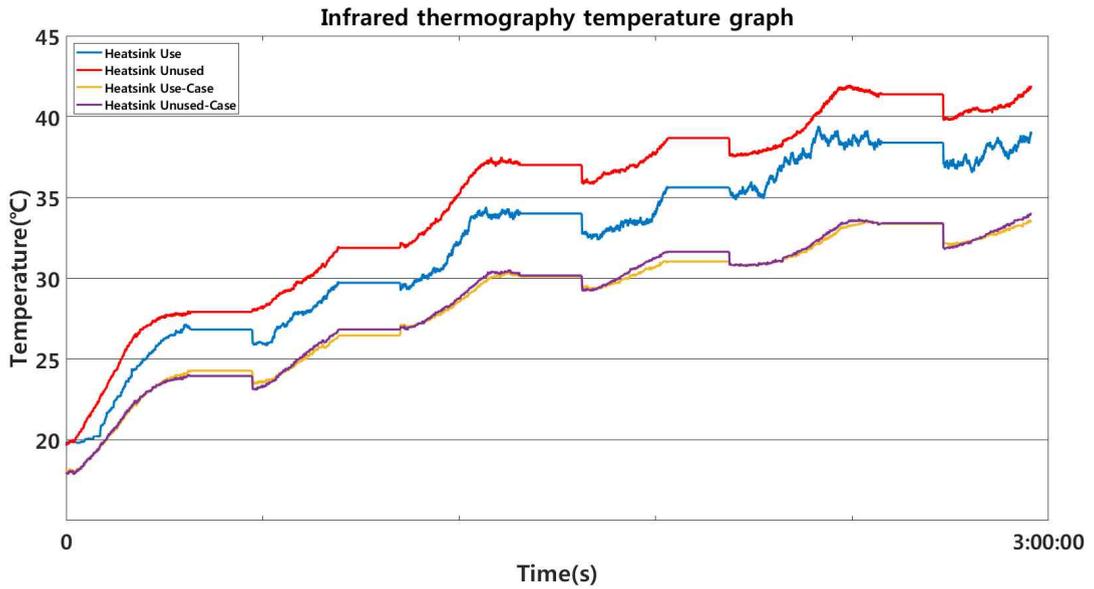


Fig. 5-3 1st Experiment Infrared Thermography Temperature Graph

Table 5-1 1st Experiment Infrared Thermography Temperature Data

| 1차실험 | Spot | 온도 [°C] | 1 Cycle | 1 Cycle | 2 Cycle | 2 Cycle | 3 Cycle | 3 Cycle |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 |
| 방열 미적용 | Heatsink | 최대온도 | 28.00 | 31.99 | 37.50 | 38.67 | 41.97 | 41.91 |
| | | 평균온도 | 24.84 | 29.62 | 35.08 | 36.89 | 39.64 | 40.55 |
| | Case | 최대온도 | 24.06 | 26.85 | 30.55 | 31.67 | 33.69 | 34.04 |
| | | 평균온도 | 21.38 | 24.81 | 28.82 | 30.28 | 32.07 | 32.76 |
| 방열 적용 | Heatsink | 최대온도 | 27.18 | 29.81 | 34.42 | 35.69 | 39.43 | 39.07 |
| | | 평균온도 | 23.38 | 27.55 | 32.10 | 33.39 | 37.32 | 37.70 |
| | Case | 최대온도 | 24.34 | 26.45 | 30.43 | 31.10 | 33.58 | 33.63 |
| | | 평균온도 | 21.39 | 24.73 | 28.66 | 30.03 | 31.95 | 32.66 |

Table 5-1는 방열 미적용, 적용 제품의 위치별 spot에 따른 1차 실험의 온도데이터를 정리한 표로 Cycle의 충·방전에 따른 온도변화를 최대온도와 평균온도로 나타내었다.

방열 미적용 제품의 Heatsink spot에서의 최대온도가 41.97°C로 3Cycle 충전 시 가장 높게 나타났으며, 평균온도는 40.55°C로 3Cycle 방전 시 가장 높게 나타났다. Case spot에서의 최대온도는 34.04°C, 평균온도는 32.76°C로 3Cycle 방전 시 가장 높았다.

방열 설계 적용 제품의 Heatsink spot에서의 최대온도가 39.43°C, 평균온도는 37.70°C로 3Cycle 방전 시 가장 높게 나타났다. Case spot에서의 최대온도는 33.63°C, 평균온도는 32.66°C로 3Cycle 방전 시 가장 높았다.

Fig. 5-4은 Spot1에서 Spot4까지 약 3시간 동안의 온도 변화를 보여주는 그래프로 Spot3와 Spot4 두 제품의 외관 케이스 큰 차이를 보이지 않고 동일한 양상으로 온도가 상승하는 것을 알 수 있으며, Spot1 방열 보완설계 적용 제품과 Spot3 방열 미적용 제품의 Heatsink는 실험 시작 온도 17°C에서부터 상승하여 3Cycle 충·방전 후 각 41.91°C, 36.64°C로 약 5°C의 온도 차이가 있음을 확인하였다.

Fig. 5-3과 Fig. 5-4를 비교해 볼 때 1차 방열설계 적용 제품이 보완 설계가 적용된 최종 제품보다 완만하지 못한 온도 변화를 보여주며 균일한 온도분포가 이루어지지 않은 것으로 확인되었다.

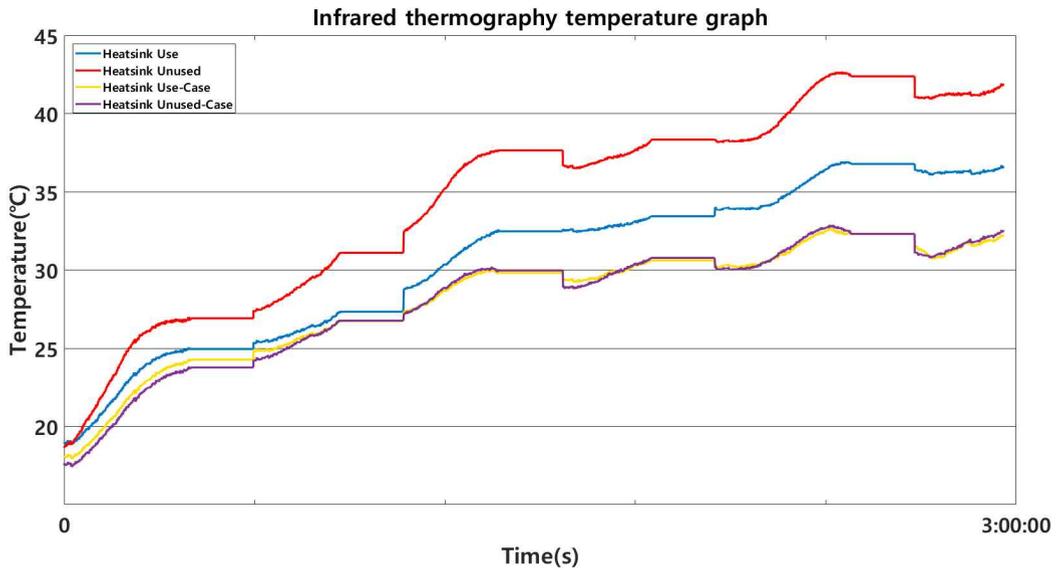


Fig. 5-4 2nd Experiment Infrared Thermography Temperature Graph

Table 5-2 2nd Experiment Infrared Thermography Temperature Data

| 2차 실험 | Spot | 온도 [°C] | 1 Cycle | 1 Cycle | 2 Cycle | 2 Cycle | 3 Cycle | 3 Cycle |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 |
| 방열 미적용 | Heatsink | 최대온도 | 27.00 | 31.13 | 37.68 | 38.33 | 42.68 | 41.93 |
| | | 평균온도 | 23.84 | 28.88 | 35.72 | 37.15 | 41.09 | 41.24 |
| | Case | 최대온도 | 23.84 | 26.82 | 30.20 | 30.81 | 32.88 | 32.55 |
| | | 평균온도 | 20.89 | 25.32 | 29.09 | 29.65 | 31.94 | 31.54 |
| 방열 적용 | Heatsink | 최대온도 | 25.06 | 27.37 | 32.59 | 33.44 | 36.95 | 36.70 |
| | | 평균온도 | 22.38 | 26.09 | 30.82 | 32.78 | 35.62 | 36.28 |
| | Case | 최대온도 | 24.34 | 26.77 | 30.10 | 30.64 | 32.69 | 32.26 |
| | | 평균온도 | 21.39 | 25.55 | 28.95 | 29.79 | 31.74 | 31.42 |

Table 5-2는 방열 미적용 제품과 방열 보완설계 적용 제품의 spot에 따른 2차 실험의 온도데이터를 정리한 표로 Cycle의 충·방전에 따른 온도변화를 최대온도와 평균온도로 나타내었다.

방열 미적용 제품의 Heatsink spot에서의 최대온도가 42.68°C로 3Cycle 충전 시 가장 높게 나타났으며, 평균온도는 41.24°C로 3Cycle 방전 시 가장 높게 나타났다. Case spot에서의 최대온도는 32.55°C로 3Cycle 방전 시 가장 높았으며, 평균온도는 31.94°C로 3Cycle 충전 시 가장 높았다.

방열 보완설계 적용 제품의 Heatsink spot에서의 최대온도가 36.95°C로 3Cycle 충전 시 가장 높게 나타났으며, 평균온도는 36.28°C로 3Cycle 방전 시 가장 높게 나타났다. Case spot에서의 최대온도는 32.69°C, 평균온도는 31.94°C로 3Cycle 충전 시 가장 높았다.

Table 5-3은 1차 실험데이터, Table 5-4은 2차 실험데이터를 바탕으로 방열 설계 적용제품과 방열 미적용 제품의 온도 편차를 표로 나타내었다.

1차 실험 열화상 카메라 측정 결과 Heatsink위치에서의 최대온도편차는 2.98℃, 평균 온도편차 3.50℃로 2Cycle 충전 시 가장 큰 온도차를 보였고, Case 위치에서의 최대온도편차는 0.57℃, 평균온도편차 0.25℃로 나타났다.

2차 실험 열화상 카메라 측정 결과 Heatsink위치에서의 최대온도편차는 5.73℃, 평균 온도편차 5.47℃로 3Cycle 충전 시 가장 큰 온도차를 보였고, Case 위치에서의 최대온도편차는 0.29℃, 평균온도편차 0.23℃로 나타났다.

1차 실험 결과와 2차 실험 결과를 비교해 볼 때, 최종 방열 설계 적용 배터리팩과 1차 적용 배터리팩의 온도차는 약 3℃, 방열 미적용 배터리팩과의 온도차는 약 5℃로 보완 설계를 통한 방열 성능을 검증 하였다.

Table 5-3 1st Experiment Infrared Thermography Temperature Range Data

| 1차실험 | Spot | 온도 [°C] | 1 Cycle | 1 Cycle | 2 Cycle | 2 Cycle | 3 Cycle | 3 Cycle |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 |
| 온도 편차 | Heatsink | 최대온도 | 0.82 | 2.18 | 3.08 | 2.98 | 2.54 | 2.84 |
| | | 평균온도 | 1.46 | 2.07 | 2.98 | 3.50 | 2.32 | 2.85 |
| | Case | 최대온도 | 0.28 | 0.4 | 0.12 | 0.57 | 0.11 | 0.41 |
| | | 평균온도 | 0.01 | 0.08 | 0.16 | 0.25 | 0.12 | 0.1 |

Table 5-4 2nd Experiment Infrared Thermography Temperature Range Data

| 2차실험 | Spot | 온도 [°C] | 1 Cycle | 1 Cycle | 2 Cycle | 2 Cycle | 3 Cycle | 3 Cycle |
|-------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 |
| 온도 편차 | Heatsink | 최대온도 | 1.94 | 3.76 | 5.09 | 4.89 | 5.73 | 5.23 |
| | | 평균온도 | 1.46 | 2.79 | 4.90 | 4.37 | 5.47 | 4.96 |
| | Case | 최대온도 | 0.5 | 0.05 | 0.1 | 0.17 | 0.19 | 0.29 |
| | | 평균온도 | 0.5 | 0.23 | 0.14 | 0.14 | 0.2 | 0.12 |

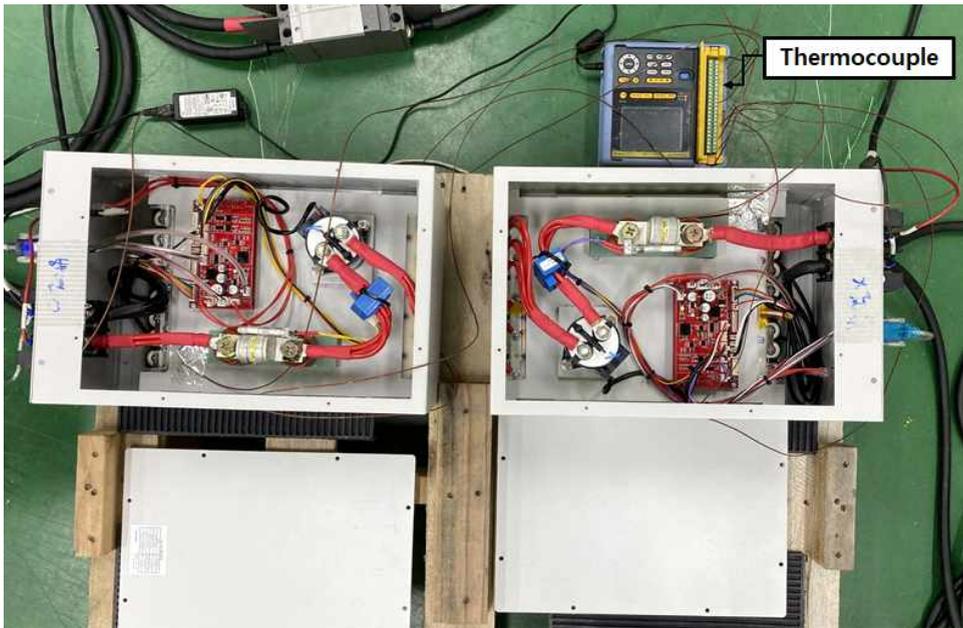
제2절 Thermocouple 측정 결과 분석

Fig. 5-5는 배터리 팩의 발열부인 셀 부분과 열전도를 확인하기 위한 배터리팩 CASE의 온도분포를 촬영하기 위한 장치 구성으로 Thermocouple을 Fig. 5-5 (a)은 배터리팩 외부, Fig. 5-5 (b)은 배터리팩 내부에 열전대를 부착하였다. 보다 정확한 온도 분포를 확인하기 위해 적외선 열화상 카메라를 이용한 실험과 동시에 진행하였으며, Thermocouple를 통한 배터리팩 내부와 외부에 온도 측정 시 열손실을 최소화하기 위해 알루미늄 테이프를 이용하여 열전대 와이어를 부착하였다.

열 순환 및 온도변화 분석을 위해 팩 내부 전면에 센서를 부착하였으며, 방열부의 열전도 및 온도변화 분석을 위해 팩 외부는 발열 집중 포인트(방열판)에 센서를 부착하였다. 적외선 열화상 이미지 온도 데이터와의 비교 분석을 위하여 방열 설계 적용 제품과 방열 미적용 제품의 열화상 이미지 온도 데이터의 Spot과 동일한 Heatsink와 Case에 부착한 온도데이터를 확인하였다.



(a) Experimental Device External



(b) Inside the Experimental Device

Fig. 5-5 Thermocouple Attachment of Experimental Devices

Fig. 5-6은 Spot1에서부터 Spot4까지 약 3시간 동안의 온도 변화를 보여주는 그래프로 열화상 이미지 데이터의 Spot과 동일한 위치에 부착한 열전대의 온도 데이터를 분석한 결과를 보여주는 그래프로 적외선 열화상 온도 데이터와 유사한 수치를 확인할 수 있다. 두 제품의 외관 케이스 큰 차이를 보이지 않고 동일한 양상으로 온도가 상승하는 것을 알 수 있으며, 방열 적용제품과 방열 미적용 제품의 Heatsink는 실험 시작 온도 17°C에서부터 상승하여 3Cycle 충·방전 후 각 40.86°C, 37.32°C로 약 3°C의 온도 차이가 있음을 확인하였다.

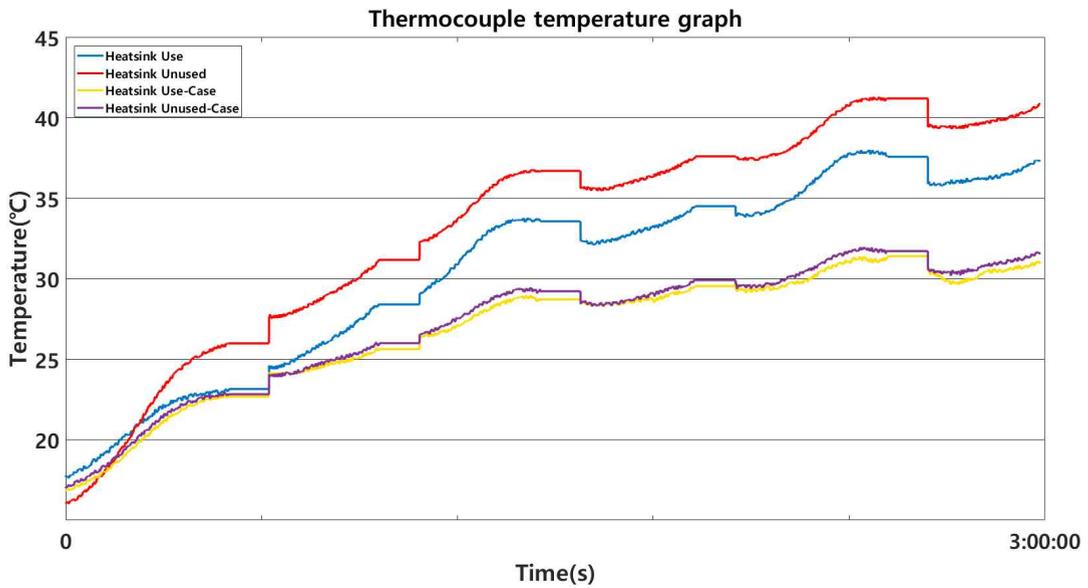


Fig. 5-6 Thermocouple Temperature Graph

Table 5-5 Thermocouple Temperature Data

| | Spot | 온도 [°C] | 1 Cycle | 1 Cycle | 2 Cycle | 2 Cycle | 3 Cycle | 3 Cycle |
|-----------|----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| | | | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 | 충전 | 방전 |
| 방열 미적용 | Heatsink | 최대온도 | 25.98 | 31.21 | 36.78 | 37.59 | 41.30 | 40.90 |
| | | 평균온도 | 21.45 | 28.97 | 34.80 | 36.23 | 39.20 | 39.79 |
| | Case | 최대온도 | 22.95 | 26.03 | 29.45 | 29.95 | 31.97 | 31.69 |
| | | 평균온도 | 20.35 | 24.80 | 28.18 | 28.91 | 30.68 | 30.81 |
| 방열 적용 | Heatsink | 최대온도 | 23.15 | 28.44 | 33.78 | 34.50 | 37.99 | 37.37 |
| | | 평균온도 | 20.92 | 26.10 | 31.97 | 33.00 | 35.96 | 36.33 |
| | Case | 최대온도 | 22.81 | 25.71 | 28.98 | 29.54 | 31.41 | 31.10 |
| | | 평균온도 | 20.06 | 24.63 | 27.74 | 28.71 | 30.22 | 30.33 |

Table 5-5는 방열 미적용, 적용 제품의 spot에 따른 온도데이터를 정리한 표로 Cycle의 충·방전에 따른 온도변화를 최대온도와 평균온도로 나타내었다.

방열 미적용 제품의 Heatsink spot에서의 최대온도가 41.30°C로 3Cycle 충전 시 가장 높게 나타났으며, 평균온도는 39.79°C로 3Cycle 방전 시 가장 높게 나타났다. Case spot 에서의 최대온도는 31.97°C로 3Cycle 충전 시 가장 높았으며, 평균온도는 30.81°C로 3Cycle 방전 시 가장 높았다.

방열 설계 적용 제품의 Heatsink spot에서의 최대온도가 37.99°C로 3Cycle 충전 시 가장 높게 나타났으며, 평균온도는 36.33°C로 3Cycle 방전 시 가장 높게 나타났다. Case spot 에서의 최대온도는 31.41°C로 3Cycle 충전 시 가장 높게 나타났으며, 평균온도는 30.33°C로 3Cycle 방전 시 가장 높았다.

Table 5-6 Thermocouple Temperature Range Data

| | Spot | 온도 [°C] | 1 Cycle 충전 | 1 Cycle 방전 | 2 Cycle 충전 | 2 Cycle 방전 | 3 Cycle 충전 | 3 Cycle 방전 |
|-------|----------|---------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 온도 편차 | Heatsink | 최대온도 | 2.83 | 2.77 | 3.00 | 3.09 | 3.31 | 3.53 |
| | | 평균온도 | 0.53 | 2.87 | 2.83 | 3.23 | 3.24 | 3.46 |
| | Case | 최대온도 | 0.14 | 0.32 | 0.47 | 0.41 | 0.56 | 0.59 |
| | | 평균온도 | 0.29 | 0.17 | 0.44 | 0.20 | 0.46 | 0.48 |

Table 5-6은 실험데이터를 바탕으로 방열 설계 적용제품과 방열 미적용 제품의 온도 편차를 표로 나타내었다.

Thermocouple 측정 결과 Heatsink위치에서의 최대온도편차는 3.53°C, 평균온도편차 3.46°C로 3Cycle 방전 시 가장 큰 온도차를 보였고, Case 위치에서의 최대온도편차는 0.59°C, 평균온도편차 0.48°C로 나타났다.

제 6 장 결론

물류이송 로봇의 기술 개발에 맞추어 자율적으로 짧은 시간을 활용한 급속충전 및 이동 중에도 충전할 수 있는 무선충전 기술개발 등 배터리를 포함한 관련부품의 기술 개발이 요구된다. 그러나 리튬이온 배터리의 높은 에너지 밀도와 높은 충·방전량으로 생기는 배터리의 발열로 인해 최근 발화 및 폭발사고 사례가 늘어남에 따라 현재 국내에서도 배터리의 화재안전을 위해 정부적인 대책으로 다양한 연구가 진행되고 있다. 이러한 화재 위험성뿐만이 아니라, 배터리 발열로 인한 성능 저하와 배터리 이용률 및 수명 개선을 위하여 본 연구에서는 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리 팩의 성능과 수명 및 안정성을 위한 방열 시스템 설계와 설계의 성능 평가를 위한 실험을 실시하여 다음과 같은 결론을 도출 하였다.

1. 적외선 열화상 카메라를 이용한 배터리 팩 발열부의 측정 결과 방열 설계 미적용 제품과 방열 설계 적용 제품의 최대온도가 각각 42.68℃ ,36.95℃, 평균온도는 41.24℃, 36.28℃로, 최대온도편차는 5.73℃, 평균온도편차 5.47℃로 나타났다.
2. Thermocouple를 이용한 배터리 팩 발열부의 측정 결과 방열 설계 미적용 제품과 방열 설계 적용 제품의 최대온도가 각각 41.30℃, 37.99℃, 평균온도는 39.79℃, 36.33℃로, 최대온도편차는 3.53℃, 평균온도편차 3.46℃로 나타났다.
3. 본 연구를 통해 방열 최적설계를 적용한 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리 팩의 방열 성능을 비교 검증 해본 결과 우수한 방열 성능을 확인하였다. 발열로 인한 화재 위험성과 그에 따른 배터리의 성능 저하 개선으로 물류 장비운영의 신속성, 효율성을 높이며 특히 가동시간을 크게 늘려 물류 로봇의 시장 확대에 발맞춰 물류이송 자동화 로봇용 배터리 기술 개발에 활용되고자 한다.
4. 물류이송 자동화 로봇용 리튬이온 배터리팩 뿐 만이 아닌 다양한 형태의 배터리에 서의 방열 설계 적용 가능성을 확인하였다.

REFERENCE

1. Kim, K. H., Kim, J. H., Choei, Y. H., "Logistics Robot Technology Trend and Future Prospect", PD ISSUE REPORT, Vol. 17, No. 7
2. Korea IR Council, "Rapid growth as a major material in the next-generation 4th industry due to increased demand for electric vehicles", 2020
3. Kang, H. J., Park, H. B., Han, K. H., Yoon, D. Y., "A CFD Modeling of Heat Generation and Charge-Discharge Behavior of a Li-ion Secondary Battery", Journal of the Korean Electrochemical Society, Vol. 19, No. 3, pp. 114-121
4. Kim, D. W., Seo, J. H., Kim, H. M., Lee, M. Y., "Numerical Study on the Heat Transfer Characteristics of 360 Wh Li-ionBattery Pack for Personal Mobility", Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 8, pp. 1-7, 2017
5. Kim, S. K., Choi, S. Y., Jin, S. Y., Bang, S. S., "An Experimental Study on Fire Risks Due to Overcharge and External Heat of ESS Lithium Battery", 2019 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved, Vol. 33, No. 4, pp. 59-69, 2019
6. "Robotics in Logistics: A DPDHL perspective on implications and use cases for the logistics industry ([https:// goo.gl/fKsCN6](https://goo.gl/fKsCN6))", 2016, DHL Trend Research
7. World Robotics Report 2016", 2016, IFR(International Federation of Robotics)
8. J. S. Kim, W. Y. Yoon, K. S. Yoo, G. S. Park, "Charge-discharge properties of surface-modified carbon by resin coating in Li-ion battery," Journal of power sources, Vol.104, No.2, 2002.
9. S. E. Yoo and D. H. Shin, "Electric Vehicle Market and Technology Trend," Auto Journal, KSAE, Vol.32, No.8, pp.22-27, 2010.

10. Park, C. E., Jeong Y. H., Kim, K. B., “Effect of Thermal Management of Lithium-Ion Battery on Driving Range of Electric Vehicle”, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, Vol. 18, No. 5, pp. 22-28, 2017

11. Park, H. S., Eom, T. H., Jeong, S. M., Kim, J. H., You, Y. S., Won, C. Y., “Charge Control Method of Li-ion Battery considering Temperature Characteristic for Electric Vehicle”, Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol. 32, No. 4, pp. 102-110, 2018

12. Lee, B. J., Choi, G. J., Lee, S. H., Jeong, Y. M., Park, Y., Cho, D. U., “A Study Explosion and Fire Risk of Lithium-Ion and Lithium-Polymer Battery”, The Journal of Korea Institute of Communications and Information Sciences, Vol. 42, No. 04, 2017

13. Kang, T. W., Yoo, K. S., Kim, J. H., “Analysis and Experiment Verification of Heat Generation Factor of High Power 18650 Lithium-ion Cell”, The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol. 24, No. 5, October 2019

14. Choi, M. Y., Kim, W. T., “The Utilization of Nondestructive Testing and Defects Diagnosis using Infrared Thermography”, JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Vol. 24, No. 5, pp. 525-531, 2004

15. J. K. Park et. al., “Principles and Applications of Lithium Secondary Batteries”, Hongreung Scientific Press, 2010

16. D. Bernardi, E. Pawlikowski, J. Newman, “A general energy balance for battery systems”, J. Electrochem.Soc., 132, 5, 1985

17. M. Doyle, T.F. Fuller, J. Newman, “Modeling of galvanostatic charge and discharge of the Lithium/Polymer/Insertion cell”, J. Electrochem. Soc. 140, 1526, 1993

18. FLIR Systems Korea, “Infrared Thermal Handbook for R&D Professionals”

19. G. R. Stockton and W, M, Road, "Infrared applications everywhere", Inframation 2002 Proceeding, pp. 149-154, 2002
20. Gao, J. C., Kim, J. Y., "Simulation for Improvement of Temperature Distribution Inside Refrigerator" KSMPE, Vol. 18, No. 12, pp. 98-103, 2019.
21. Kim, E. J., Lee, G. I., Kim, J. Y., "A Performance Evaluation of a Heat Dissipation Design for a Lithium-Ion Energy Storage System Using Infrared Thermal Imaging", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 5, pp. 105-110
22. Kim, J. G., "Infrared Thermographic Monitoring for Failure Cgacterization in Railway Axle Materials" KSNT, Vol. 30, No. 2, pp. 116-120, 2010.
23. Kim, J. Y., Sim, J. K., Choi, S. H., . Choi, J. H., "IR Camera Technique Application for Temperature Tharacteristics And Evaluation of Gas Turbine Blades Covering Integrity", The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 10, pp. 324-330, 2008
24. Kim, J. G., Kim, J. H., Jang, C. Y., Jeong, H. G., Song, D. S., "Insulation Performance Measurement according to Imaging Conditions of the Infrared Camera", The Society Of Air-Conditioning And Refrigerating Engineers Of Korea, pp.169-172, 2014
25. Kim, W. T., "Principles and System Configuration of Infrared Thermography", JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY FOR NONDESTRUCTIVE TESTING, Vol. 31, No. 2, pp. 181-188, 2011

감사의 글

저의 대학원 생활의 시작과 끝은 모두 지금껏 이끌어 주시고 보듬어 주시던 김재열 교수의 은혜로 이뤘다고 생각합니다. 항상 아낌없는 지도와 격려를 주신 김재열 교수님께 끝없는 감사인사를 전합니다.

졸업에 앞서 바쁘신 시간을 내주시어 심사를 맡아주신 김경석 교수님, 이성준 교수님께 진심으로 감사드립니다.

본 연구개발에 참여하여 본 연구에 많은 도움을 주신 'I'사에 감사인사를 전합니다.

대학원 생활에 격려 해주시고 가르침을 주신 실험실 선배님들과 도움을 준 많은 분들에게 감사인사를 전합니다.

또한 많은 도움을 주었던 동기, 선생님들, 친구들에게 감사합니다.

먼저 떠나 생각지도 못한 길을 열어주고 식견을 넓혀준 특별한, 특출난 그 친구들에게 특히 사랑과 감사의 인사를 전합니다.

끝으로 항상 곁에서 사랑과 믿음으로 전적으로 지지해주는 가족들 엄마, 아빠, 언니, 그리고 은선이에게 사랑과 고마움을 전합니다.