



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](#)

공학석사 학위논문

온도 맵핑과 열 분산 기능이
집적된 열관리 기술

Integrated Thermal Management with
Thermal Mapping and Heat Dissipation

2016 년 8 월

서울대학교 대학원

전기 정보 공학부

전 원 하

초 록

온도 맵핑과 열 분산 기능이 집적된 열관리 기술

서울대학교 대학원
전기 정보 공학부
전원하

모든 전자기기와 회로는 사용 중에 열을 발생시킨다. 산업의 발전에 따라 이들 기기와 회로는 소형화, 고성능화 및 다기능화가 심화되고 있으며, 이로 인하여 이들 기기 및 회로에서 발생하는 단위 부피 당 열의 양은 지속적으로 증가하고 있다. 한편, 전자기기에서 발생하는 과도한 열은 기기의 수명 및 신뢰성을 떨어뜨리고, 또한, 이들 기기의 오작동을 야기시킬 수 있으므로 실시간 온도 모니터링과 과도한 열을 제거하기 위한 방열 및 냉각기술을 통하여 기기 및 회로에 적절한 온도를 유지시켜 주기 위한 열관리(Thermal management) 기술은 필수적이다.

리튬 이온 배터리는 높은 에너지 밀도, 낮은 자기방전율, 높은 출력 전압 또한 메모리 효과가 없으므로 휴대전자기기, 가전, 국방, 우주항공 및 전기자동차 등 매우 다양한 분야에 동력원으로써 사용되고 있다. 하지만 리튬 이온 배터리의 충방전시 전지 내부반응으로 인한 온도 상승은 전지의 성능, 에너지 효율 및 안정성 등에 매우 큰 영향을 미친다. 따라서, 이를 해결하기 위하여 배터리의 표면이나 내부의 온도를 감지하여 열 폭주를 예방하는 방법, 배터리를 직접 냉각시켜서 온도를 낮추는 방법 그리고 열 방출이 쉽도록 열전도도가 높은 물질을 이용하는 방법들이 연구 되고 있다.

본 논문에서는 종래의 열관리 방법과 달리 표면 온도 맵핑과 열 분산 기능을 결합하여 백금 온도 센서 배열과 열전도도가 우수한 그래파이트(Graphite) 열 분산기를 집적한 구조를 제안한다. 온도 맵핑은 실리콘 기판 위에 반도체 공정으로 형성된 백금 저항 배열의 온도에 따른 변화를 측정함으로써 수행되었다. 열 전달 시뮬레이션을 통하여 온도 센서 기판으로 사용된 실리콘과 그래파이트의 두께에 따른 열원의 온도 감소 효과와 표면 내 최대, 최소 온도 차이를 확인하였다. 또한 같은 방법으로 그래파이트 유무에 대해서도 실시하여 그래파이트로 인한 효과를 확인하였다. 그래파이트 열 분산기 도입은 열원의 온도

감소와 표면 내 최대, 최소 온도 차 감소에 효과적이었으며, 두께가 증가할수록 효과는 증대 되었다.

백금 측온저항체와 구리 배선으로 이루어진 온도 센서 배열은 서울대학교 반도체공동연구소를 이용하여 제작하였으며 25 μm 두께의 그래파이트 시트를 열 분산기로 부착하여 열 분산 기능을 결합한 온도 맵핑 소자를 제작하였다. 제작한 열 분산 기능을 결합한 온도 맵핑 소자를 리튬 이온 배터리 표면에 부착하여 전자부품연구원에서 방전 실험을 통하여 표면 온도와 방열 성능을 측정하였다. 그래파이트 부착으로 인한 평면 열전도도 증가로 인하여 7C 로 방전할 경우, 미 부착 시와 비교하여 배터리 내부 최대 온도가 8.9 $^{\circ}\text{C}$ 감소하였으며 또한 배터리 내부 온도 차이 역시 9.4 $^{\circ}\text{C}$ 감소하였다. 결론적으로 온도 센서 배열은 실시간으로 표면의 온도 분포를 정밀한 측정을 가능하게 하였으며 그래파이트 열 분산기는 표면 온도 균일화 및 방열 효과에 좋은 결과를 보였다.

주요어 : 열관리 기술, 열 전달 시뮬레이션, 온도 맵핑, 그래파이트 열 분산기

학 번 : 2014-21667

목 차

제 1 장 서 론.....	1
1.1 연구의 배경.....	1
1.2 열관리 선행 연구 동향.....	8
1.3 논문의 구성.....	14
제 2 장 설 계.....	16
2.1 온도 센서와 열 분산기가 집적된 구조 설계.....	16
2.2 온도센서 설계.....	18
2.3 열 분산 효과 시뮬레이션.....	20
제 3 장 제 작.....	27
3.1 제작 순서.....	27
3.2 제작 결과.....	30
제 4 장 측 정.....	36
4.1 측정 set up.....	36
4.2 온도센서 TCR 측정.....	38
4.3 배터리 방전 실험 및 측정.....	45
제 5 장 결 론.....	51

참고문헌.....	53
Abstract.....	60

표 목차

표 2.1 Pt온도센서와 Cu 배선의 저항비	19
표 2.2 시뮬레이션 Boundary condition	21
표 2.3 시뮬레이션에 사용된 Material 특성	21
표 3.1 제작에 사용된 장비	27
표 3.2 AZ5214를 이용한 음각 사진 공정	30
표 3.3 그래파이트 시트 특성	34
표 4.1 제작한 온도 센서와 상용 thermocouple과의 비교	44
표 4.2 그래파이트의 열 분산 효과	50

그림 목차

그림 1.1 리튬 이온 배터리의 구조.....	2
그림 1.2 온도에 따른 리튬 이온 배터리의 출력	5
그림 1.3 온도에 따른 리튬 이온 배터리의 수명	6
그림 1.4 리튬 이온 배터리의 열 폭주로 인한 폭발	7
그림 1.5 박막형 리튬 이온 배터리 센서 array 시스템.....	9
그림 1.6 센싱 플랫폼이 집적된 리튬 이온 배터리 셀 특허	10
그림 1.7 수랭식 배터리 냉각 시스템	11
그림 1.8 탄소기반으로 이루어진 다양한 다차원 물질 3D-graphite, 2D-graphene, 1D-CNT, 0D-buckyball의 구조	13
그림 1.9 그래핀 열 분산기와 온도센서, 히터 현미경 사진	14
그림 2.1 온도 센서와 열 분산기가 집적된 구조의 모식도	16
그림 2.2 온도 센서와 열 분산기가 집적된 구조의 A-A'단면도	17
그림 2.3 설계된 온도센서	18
그림 2.4 그래파이트 부착 시뮬레이션 구조.....	20
그림 2.5 리튬 이온 배터리 시뮬레이션에서 표면 열원의 위치	23
그림 2.6 실리콘 두께에 따른 표면의 온도 시뮬레이션	23
그림 2.7 그래파이트 두께에 따른 표면의 온도 시뮬레이션	25
그림 2.8 리튬 이온 배터리 표면의 온도 시뮬레이션	26
그림 3.1 제작 순서	28
그림 3.2 Dicing 완료된 웨이퍼	31

그림 3.3 리튬 이온 배터리	33
그림 3.4 그래파이트 시트를 부착한 리튬 이온 배터리.....	34
그림 3.5 제작이 완료된 소자.....	35
그림 4.1 Wiring 완료된 소자.....	37
그림 4.2 측정 set up.....	38
그림 4.3 리튬 이온 배터리 표면 온도 센서의 위치	40
그림 4.4 그래파이트 부착된 소자 TCR 측정 결과	42
그림 4.5 그래파이트 부착되지 않은 소자 TCR 측정 결과	42
그림 4.6 그래파이트 미부착 소자의 시간에 따른 표면 온도	47
그림 4.7 그래파이트 부착 소자의 시간에 따른 표면 온도.....	47
그림 4.8 그래파이트 미부착 소자의 방전 완료 시점 온도 분포	49
그림 4.9 그래파이트 부착 소자의 방전 완료 시점 온도 분포.....	49

제 1 장 서 론

1.1 연구의 배경

모든 전자기기와 회로는 사용 중에 열을 발생시킨다. 20세기 산업화 사회로부터 21세기 현대화 사회로 변화로 인하여 각종 전자기기는 기능과 성능이 비약적으로 발전하였다. 스마트 폰과 노트북 등 휴대용 전자기기는 점점 소형화 되었으며 또한 영화, TV등 동영상 시청, 문서 작성, 게임 등의 기능을 갖게 되었다. 이로 인하여 단위 부피 당 발생하는 열의 양은 지속적으로 증가하고 있다. 한편, 전자기기에서 발생하는 과도한 열은 기기의 수명 및 신뢰성을 떨어뜨리고, 또한, 이들 기기의 오작동을 야기시킬 수 있으므로 실시간 온도 모니터링과 과도한 열을 제거하기 위한 방열 및 냉각기술을 통하여 기기 및 회로에 적절한 온도를 유지시켜 주기 위한 열관리 기술은 필수적이다.

화석연료에 대한 의존도를 줄이고 배기가스로 인한 환경오염 문제에 대한 대책으로서 미국의 각 주 들과 유럽에서는 이차전지를 동력원으로 사용하는 친환경 자동차인 전기자동차 등을 일정량 이상 판매하도록 하

고 있다. 전기자동차의 배터리로는 리튬 이온 배터리가 주로 사용되고 있으며 가벼운 무게, 고 에너지 밀도, 고전압, 낮은 자기 방전을 그리고, 메모리 효과가 없고 수은이나 카드뮴 같은 독성 금속을 사용하지 않는 장점이 있다. 하지만 리튬 이온 배터리는 전지 내의 전기적 화학적 반응에 의하여 열이 발생하며 이로 인한 온도상승은 배터리의 성능과 수명을 크게 저하시킬 수 있으므로 적절한 열관리를 통해 해결해야 하는 문제가 있다[1].

다른 2차 전지들과 같이 단일 리튬 이온 배터리 셀은 집전체 (Collector)와 음극(Cathode), 양극(Anode), 전해질(Electrolyte), 분리막(Separator)으로 구성된다. 그림 1.1는 일반적인 리튬 이온 배터리의 내부 구조를 나타낸다.

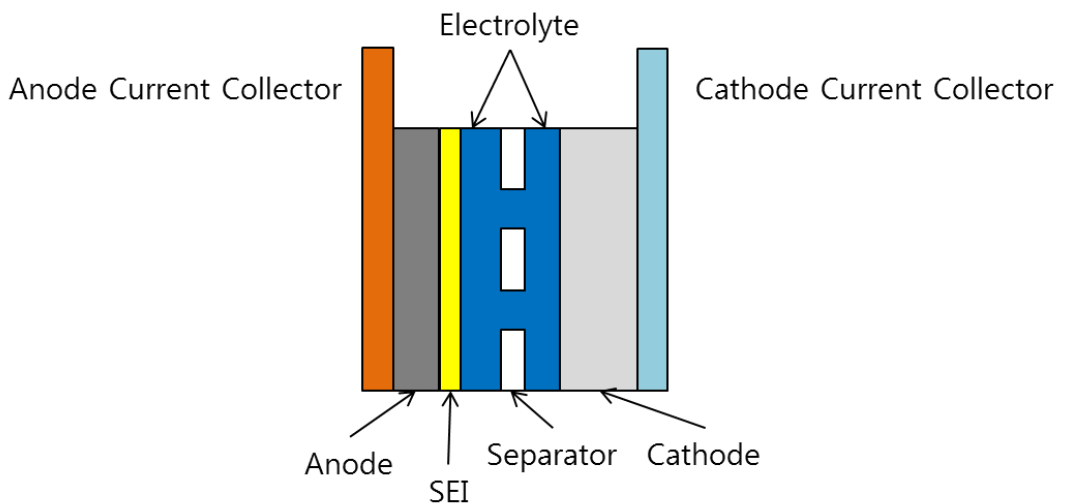


그림 1.1 리튬 이온 배터리의 구조

집전체는 음극과 양극에서 각각 활물질의 전기화학 반응에 의해 생성된 전자를 모으거나 반응에 필요한 전자를 공급하는 역할을 한다. 리튬 이온 배터리의 음극 집전체로는 구리 박막이 사용되며 양극 집전체로는 알루미늄이 사용된다.

음극은 산화된 전극이며 배터리가 방전되는 동안 외부 회로로 이동하는 전자들을 이동시키며 주로 탄소계열 물질이 사용된다.

양극은 외부 회로로부터 전자를 받아들이는 역할을 하며 LiCoO_2 , LiNiO_2 , LiMnO_2 등 리튬 화합물이 사용된다.

전해질은 셀 내부의 전극 사이에서 이온을 전달하며 유기용매에 리튬염이 용해된 전해질이 사용된다.

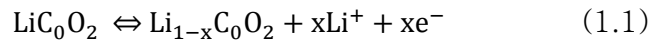
분리막은 음극과 양극이 직접을 단락되지 않도록 분리하며, 리튬 이온 전지에서는 양극 음극을 분리하는 것뿐만 아니라 안전성 향상에도 중요한 역할을 한다.

고체 전해질 계면(Solid Electrolyte Interface, SEI)는 얇은 박막으로서 첫 충전 시 탄소 음극의 표면에 형성되며, 내부 반응속도를 느리게 하며 전류를 감소시킨다.

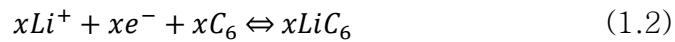
리튬 이온 배터리는 내부의 전기 화학적 반응이 가역적이므로 이차전지로서 재충전이 가능하다. 리튬 이온 배터리가 외부 부하와 연결되어 방전 시에 전자는 음극에서 양극으로 이동하며 충전 시에는

반대로 이동한다. 양극과 음극에서의 리튬 코발트 배터리의 전기 화학적 반응은 다음과 같이 표시된다.

양극 반응(Anode reaction)



음극 반응(Cathode reaction):



다른 양극 활물질을 사용하는 리튬 이온 배터리에서의 내부 전기 화학적 반응은 위와 유사하다.

그림 1.2[2]와 1.3[3]은 동작 온도에 따른 리튬 이온 배터리의 출력과 수명을 나타내며 동작 온도가 리튬 이온 배터리의 성능과 수명에 직결됨을 알 수 있다.

Battery power versus temperature

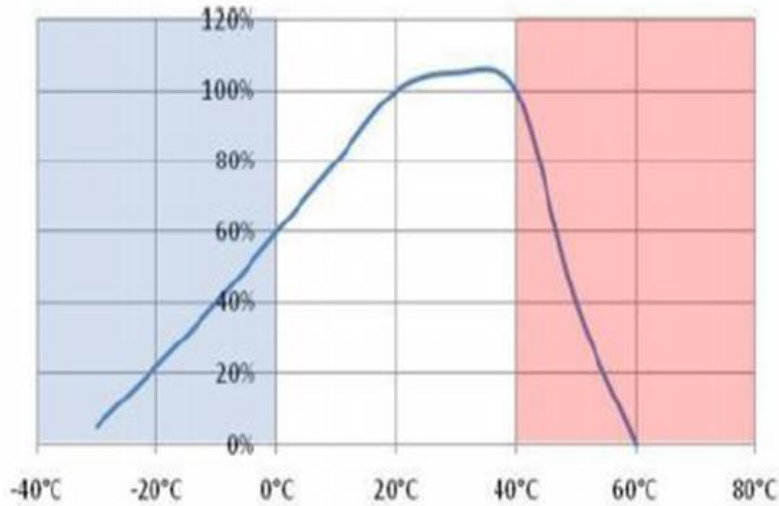


그림 1.2 온도에 따른 리튬 이온 배터리의 출력

리튬 이온 배터리의 적정 동작온도는 $20^{\circ}\text{C} \sim 40^{\circ}\text{C}$ 이며 이 온도 범위에서 배터리의 출력은 최대가 됨을 그림 1.2로부터 알 수 있다. 적정 온도 보다 낮은 온도에서는 리튬 이온 배터리 내부 전해질 분자의 운동 에너지가 감소하여 내부 저항이 증가로 인한 전압 강하로 출력이 감소하게 된다. 반대로 높은 온도에서는 분자의 운동에너지가 증가하게 되고, 그에 따라서 분자 사이의 결합력이 낮아져 에너지를 얻기 위한 내부 화학적 반응에 필요한 물질이 감소하게 되어 출력이 낮아지게 된다.

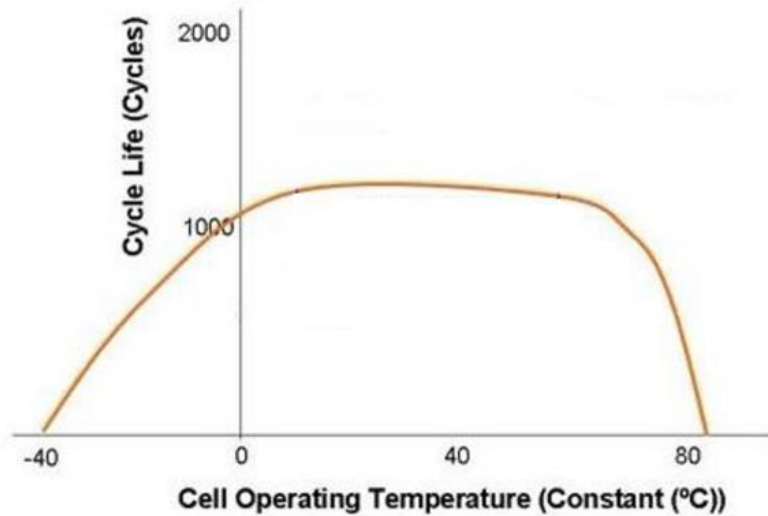


그림 1.3 온도에 따른 리튬 이온 배터리의 수명

그림 1.3으로부터 배터리의 수명은 10°C이하에서 천천히 감소하고 60°C 이상에서 급격하게 감소 하여 80°C를 넘으면 동작이 불가능해 지는 것을 알 수 있다. 저온에서는 음극 표면에 전해질의 환원반응으로 인한 리튬 이온의 축적 때문에 수명이 감소하며 고온에서는 내부 반응 속도의 증가로 인하여 전극 손상이 가속화되어 수명이 급격히 감소한다.

배터리의 온도 균일성 유지 역시 배터리 성능에 중요하며 음극, 양극의 위치, 케이스의 불균일한 열전도도 등으로 인해 국지적인 온도 상승이 일어나면 배터리의 수명을 단축시키게 된다[4].

리튬 이온 배터리가 90°C이상의 고온에서 동작하게 되면 내부의 전해질과 음극, 양극간의 전기 화학적 발열 반응 속도가 증가하여 내부에

서 열이 발생하는 속도가 외부로 배출되는 속도보다 빠르게 되고 결국 내부 발열 반응이 연쇄적으로 일어나게 되어 열 폭주가 발생하여 폭발과 같은 사고의 원인이 되게 된다.



그림 1.4 리튬 이온 배터리의 열 폭주로 인한 폭발

열 폭주를 일으키는 리튬 이온 배터리의 중요 몇 가지 발열 반응은 다음과 같다[5]. 첫 번째는 90℃이상의 온도에서 발생하는 SEI가 전해질로 용해되는 현상이다. SEI가 용해되면 전해질이 양극과 반응하게 되어 이 발열 반응으로 온도가 더욱 상승하게 된다. 120℃ 이상의 온도에서는 양극의 리튬 이온과 전해질이 반응하여 탄화수소 가스를 발생시키

는 반응이 일어나며, 마지막으로 200°C 이상에서는 전해질이 분해되어 이산화 탄소와 열을 배출하는 반응이 일어난다.

1.2 열관리 선행 연구 동향

1.1절에서는 리튬 이온 배터리에서 발생하는 열로 인한 성능, 저하와 폭발 위험성에 대해 서술하였다. 이런 문제들을 해결 하기 위하여 리튬 이온 배터리의 온도 맵핑과 쿨링에 관한 연구가 진행되고 있다. 배터리 온도 맵핑의 경우 온도센서가 배터리 관리 시스템(Battery Management System, BMS)에 연결되어 적정 온도를 넘어선 경우 충, 방전 전류량을 조절하여 열 폭주를 예방할 수 있다. 배터리의 쿨링 방법으로는 active cooling과 passive cooling으로 나뉘어 지며 active cooling으로는 공랭식, 수랭식이 대표적이다. Passive cooling으로는 높은 열전도도를 갖는 물질을 이용하는 열 분산기, heat sink를 이용하여 열을 배출하는 방법과 상변화물질(Phase Change Material, PCM)을 이용하는 방법 등이 있다.

General Electric社가 Department of Energy 산하의 Advanced Research Projects Agency-Energy로부터 지원을 받아 진행하는 사업

에서 기존의 크고, 비싼 센서를 대체하는 저가형, 박막형 센서를 개발 중이다.

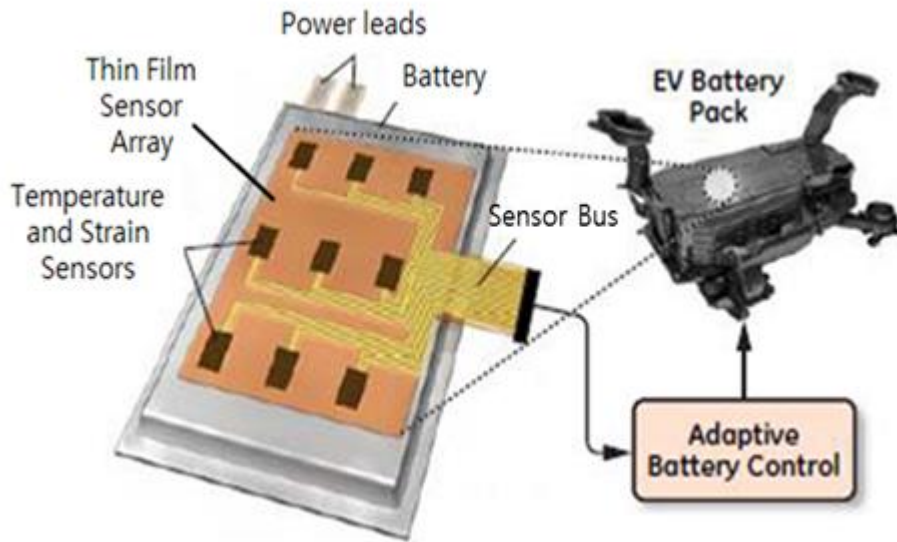


그림 1.5 박막형 리튬 이온 배터리 센서 array 시스템

그림 1.5은 배터리 셀 표면에 온도센서와 strain 센서가 array로 배치되어 있고, 모든 센서의 전선을 모아 배터리 제어 시스템과 연결한 구조이다. 이러한 방법으로 배터리 셀의 온도, strain 분포 정보를 얻어 배터리 고장을 예측하는 데에 도움이 될 것이라고 예상하고 있다[6].

같은 회사에서 이와 관련하여 그림 1.6과 같은 특허가 있다. 센서 플랫폼을 배터리 셀의 양극, 음극, 분리막, 전해질과 함께 패키징하여 셀 내부의 국부적인 특성을 감지할 수 있는 구조를 발명하였다. 배터리 온

도 맵핑의 경우 직접적인 열관리가 불가능하여 별도의 외부 제어 장치가 필요한 단점이 있다.

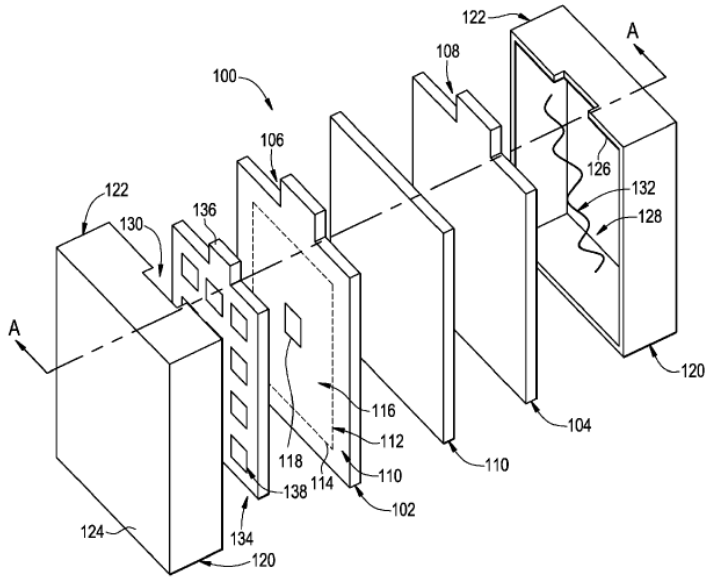


그림 1.6 센싱 플랫폼이 집적된 리튬 이온 배터리 셀 특허
 (센싱 플랫폼 : 134, 배터리 양극 : 102, 배터리 음극 : 104,
 분리막 : 110)

가장 간단한 배터리의 쿨링 방법은 공랭식으로 Rajib Mahamud는 기존의 공랭식 방식의 공기 흐름을 reciprocating flow 방법을 사용하여 전기자동차 배터리에서 시뮬레이션 한 결과 셀 내부 온도 차이를 4℃, 셀 최대 온도를 1.5℃ 감소시키는 결과를 얻었다[7]. 공랭식의 경우, 구

조가 간단하고 값싸게 제작 가능하지만 대류로 열전달이 이뤄지기 때문에 쿨링 효과를 최대화하기 위해서는 표면의 면적이 넓어야 하며 공기의 열용량이 작기 때문에 방열 효과가 적은 문제점이 있다. 수랭식은 공랭식에 비하여 높은 방열 효과를 얻을 수 있다.

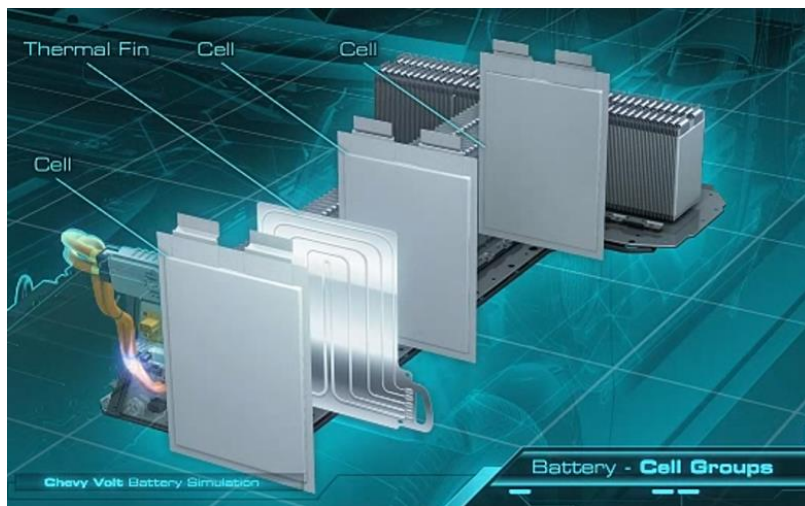


그림 1.7 수랭식 배터리 냉각 시스템

그림 1.7은 Chevrolet사의 전기자동차의 리튬 이온 배터리 팩의 구조이다. 각각의 배터리 셀 사이에 열전도도가 우수한 알루미늄 재질의 Thermal Fin이 있어서 냉각수로서 방열을 하는 방식이다. 공랭식과 수랭식같은 active cooling의 경우 fan이나 냉각수 펌프를 가동하는데 별도의 에너지가 소비되며 추가적 시스템을 설계해야 하기 때문에 구조가 복잡해 지는 문제가 있다.

Riza Kizilel은 PCM-graphite matrix를 이용하여 배터리의 passive cooling 성능을 향상 시킨 연구 결과를 2009년에 발표하였다. 이 연구는 Plug in hybrid electric vehicle(PHEV)의 리튬 이온 배터리 팩에 적용하기 위하여 배터리 팩의 빈 공간을 PCM 물질로 채워서 높은 열전도도와 열 용량으로 열을 흡수, 확산 시키는 구조를 제안하였다. 배터리의 방전 실험을 통하여 기존의 air cooling에 비하여 균일한 온도 분포와 온도 감소 효과를 얻었다[8].

같은 passive cooling으로 Zhonghao Rao는 2012년에 배터리의 표면에 구리 heat pipe를 연결하여 열을 배출하는 방법으로 발열량이 50W 이하일 때 배터리의 최대 온도를 50℃이하로 낮추었으며 30W이하의 발열량에서는 배터리 내부 온도 차를 5℃이하로 감소시켰다[9].

Passive cooling의 다른 방법으로는 열전도도가 높은 그래파이트를 열 분산기로 사용하는 것이다. 그래파이트는 탄소 원자로 이루어져 있으며 수평방향으로 매우 높은 열전도도(140 ~ 1500 W/mK)를 수직방향으로는 낮은 열전도도(3 ~ 10 W/mK)를 가진다. 그래파이트 열 분산기는 비등방성 열전도도가 갖기 때문에 수평방향으로 열을 효과적으로 전달하며 열원으로부터 열 전달을 낮춰서 hot spot을 제거할 수 있다[10-15]. 또한 낮은 밀도를 갖기 때문에 무게에 민감한 어플리케이션의 알루미늄이나 구리 열 분산기를 대체하여 사용할 수 있다.

본 연구실에서도 그래파이트를 열 분산기로 사용하는 연구를 진행하였다. Ni 층위에 화학증착법(Cheical Vapoer Deposition, CVD)방식으로 $5\mu\text{m}$ 두께의 그래파이트를 성장시켰으며 그 위에 온도센서와 히터를 제작하였고 그래파이트가 없는 구조와 비교하여 두꺼운 그래파이트의 열 분산 효과를 측정하였다. 히터에 1.276W의 전력을 인가하였을 때 열원의 온도를 54.45°C 에서 47.15°C 로 감소 시켰다[16].

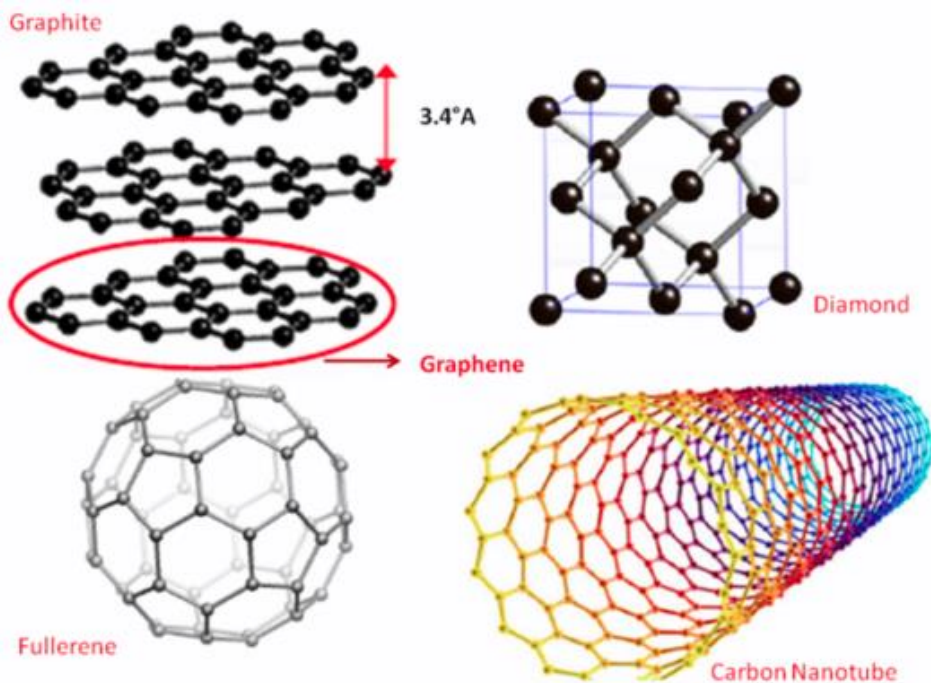


그림 1.8 탄소기반으로 이루어진 다양한 다차원 물질 3D-graphite, 2D-graphene, 1D-CNT, 0D-buckyball의 구조

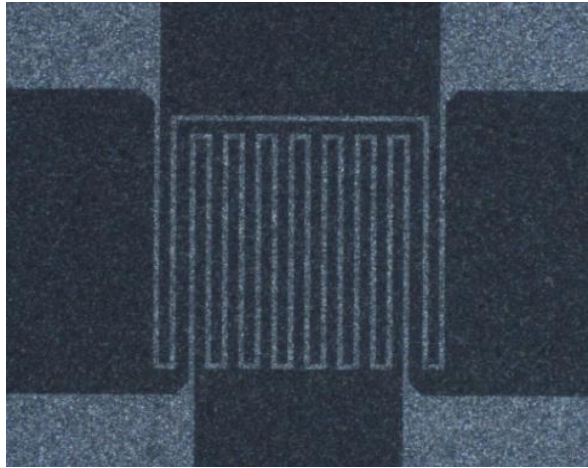


그림 1.9 그래핀 열 분산기와 온도센서, 히터 현미경 사진

1.3 논문의 구성

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 장의 1,2 절에서는 본 연구를 통해서 제안하고자 하는 온도 맵핑을 위한 온도 센서 배열과 그래파이트 열 분산기가 집적된 구조를 설계하였다. 2 장의 3 절에서는 설계한 구조의 기판과 열 분산기의 두께에 따른 열 분산 효과를 시뮬레이션 하여 온도 감소와 표면 온도 균일화 성능과의 관계를 다루었다.

3 장에서는 제안한 구조를 구현하기 위한 공정방법과 순서를 설명하였고 실제 제작에 사용한 물질과 장비, 공정 결과를 나타냈다.

4 장에서는 제작된 소자를 실제 리튬 이온 배터리에 부착하여 온도 맵핑과 열 분산 효과를 측정하였다. 4 장 1 절에서는 측정 장비와 측정을 위한 set up 을 제시하였고, 4 장 2 절에서는 온도 센싱을 위한 온도 센서의 TCR 측정을 진행하였다. 4 장 3 절에서는 방전 실험을 진행하여 표면의 온도를 측정하여 열 분산 성능을 확인하였다.

5 장은 결론으로 그래파이트와 열 분산기가 집적된 구조의 설계, 제작, 방전실험을 통한 측정 및 분석 결과를 요약하였다.

제 2 장 설 계

본 장에서는 전자기기에서 발생하는 열로 인한 기기의 수명 및 신뢰성 저하와 오작동 발생을 해결하기 위하여 리튬 이온 배터리를 대상으로 온도 맵핑과 열 분산 기능이 집적된 구조를 설계하였다. 백금 온도센서 배열과 그래파이트 열 분산기가 결합된 구조이며, 각층의 열 저항을 낮추어 온도 감소 효과를 향상시킬 수 있도록 설계하였다. 설계된 구조의 실리콘 기판과 그래파이트의 두께, 그래파이트의 유무에 따른 표면 온도 시뮬레이션을 통하여 온도 감소 성능을 알아보았다.

2.1 온도 센서와 열 분산기가 집적된 구조 설계

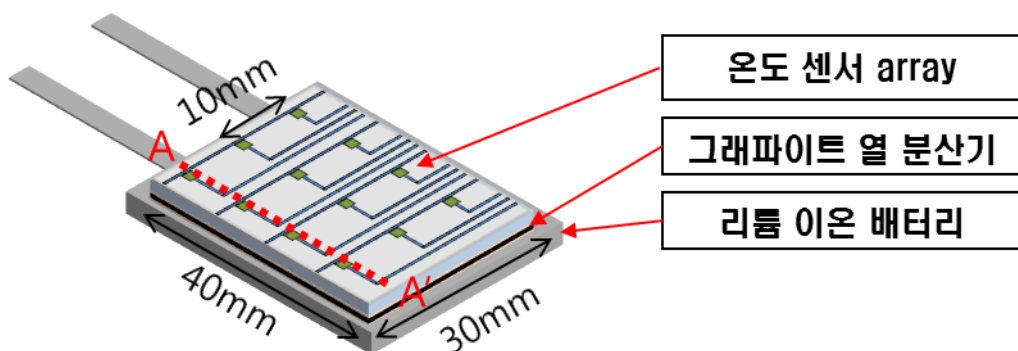


그림 2.1 온도 센서와 열 분산기가 집적된 구조의 모식도

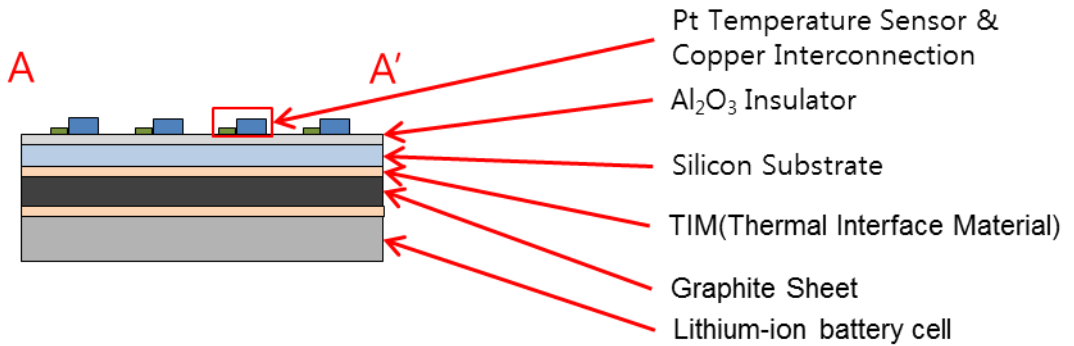


그림 2.2 온도 센서와 열 분산기가 집적된 구조의 A-A' 단면도

그림 2.1은 설계된 구조의 모식도를 나타내며 온도 센서 배열 그래픽이트 열 분산기가 집적되어 리튬 이온 배터리 표면에 부착되어 있음을 보여준다. 그림 2.2는 그림 2.1에서 A-A' 단면도를 나타낸다. 전체 크기는 30mm x 40mm이며 1mm x 1 mm 크기의 온도센서가 10mm 간격으로 12개 배치되어 표면의 전체적인 온도 분포를 측정할 수 있다. 온도센서 배열 아래에는 기관과의 절연을 위한 Al_2O_3 가 10nm 두께로 있다. SiO_2 ($1.3\sim 1.5W/m\cdot K$) 절연막에 비하여 Al_2O_3 ($25\sim 30W/m\cdot K$)는 우수한 열전도도를 가지기 때문에 보다 원활한 온도 전달을 할 수 있다. 실리콘 기관 아래에는 열 분산기로서 평면 방향 열전도도가 우수한 그래픽이트가 있으며 실리콘과 열 분산기의 부착을 위하여 TIM(Thermal Interface Material)이 adhesive layer로 사용되었다. 공기의 열전도도가 $0.025W/m\cdot K$ 로 매우 낮기 때문에 TIM은 그래픽이트와 실리콘 기관

의 adhesion 시 기공을 메워 열 저항을 줄여서 위, 아래 층간의 열 전도를 향상시키는 역할을 한다. 그래파이트 아랫면은 배터리 표면에 TIM을 adhesion layer로 부착되며 리튬 이온 배터리표면의 열을 분산시켜 방열을 수행한다.

2.2 온도센서 설계

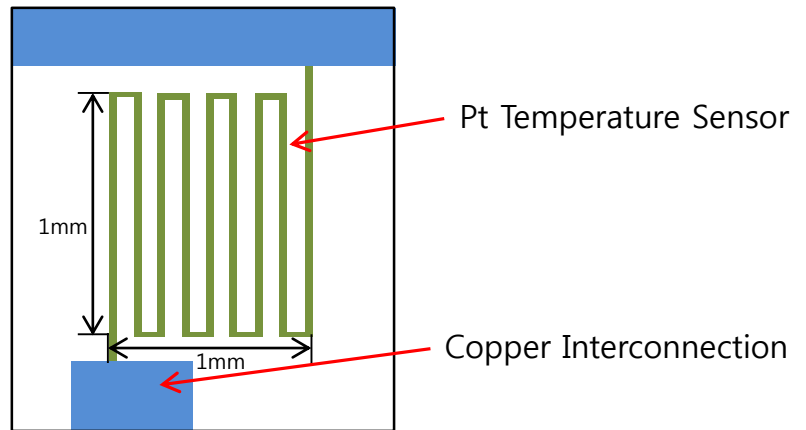


그림 2.3 설계된 온도센서

그림 2.3 은 본 논문에서 설계한 온도센서다. 온도센서로 구불구불한 모양을 가지는 측온 저항체(RTD)로 저항의 변화량으로부터 온도를 측정한다. 측온 저항체의 백금, 구리, 니켈 등의 금속이 주로 사용되며

본 논문에서는 비저항이($105 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$) 크고 선형성이 우수한 TCR(Temperature Coefficient of Resistance)을 가지기 때문에 측정 시 저항에 의한 오차를 최소한으로 줄일 수 있는 백금을 사용하였다. 백금 온도센서의 선폭은 $20 \mu\text{m}$ 이며 두께는 100nm , 총 길이는 10.04mm 이다. 온도센서와 측정기를 연결하는 배선으로는 저항을 작게 하기 위하여 비저항값이 백금의 약 1/6 의 값을 가지는 Cu($16.8 \text{ n}\Omega \cdot \text{m}$)를 사용하였으며 선폭을 $500 \mu\text{m}$, 두께는 200nm 로 백금 온도 센서에 비하여 25 배 크게 설계하여 배선의 저항으로 인한 측정 시 오차를 줄이도록 설계하였다. 표 2.1 은 백금 온도센서와 구리 배선의 저항비를 나타내며 동일한 길이에서 312.5 배의 저항비를 보인다.

표 2.1 Pt온도센서와 Cu 배선의 저항비

Pt			Cu			Pt/Cu 저항비
비저항 ($\text{n}\Omega \cdot \text{m}$)	선폭 (μm)	두께 (nm)	비저항 ($\text{n}\Omega \cdot \text{m}$)	선폭 (μm)	두께 (nm)	312.5
105	20	100	16.8	500	200	

2.3 열 분산 효과 시뮬레이션

설계한 구조에서 그래파이트의 열 분산으로 인한 열원의 온도 감소 효과를 수치적으로 알아보기 위하여 열 전달 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 tool로는 Ansys Icepak(ver 13.0)을 사용하였다. 그래파이트 유무에 따른 열원의 온도 경향을 파악하기 그림 2.4과 같이 구조에서 실리콘의 두께, 그래파이트의 두께를 변수로 하여 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 경계 조건 및 사용된 물질 특성은 표 2.2과 표 2.3에 정리하였다. 온도센서와 배선으로 사용된 백금과 구리, 또한 절연막으로 사용된 Al_2O_3 는 타 물질에 비해 그 두께가 nm단위로 매우 얇기 때문에 시뮬레이션에서 제외하고 진행하였다.

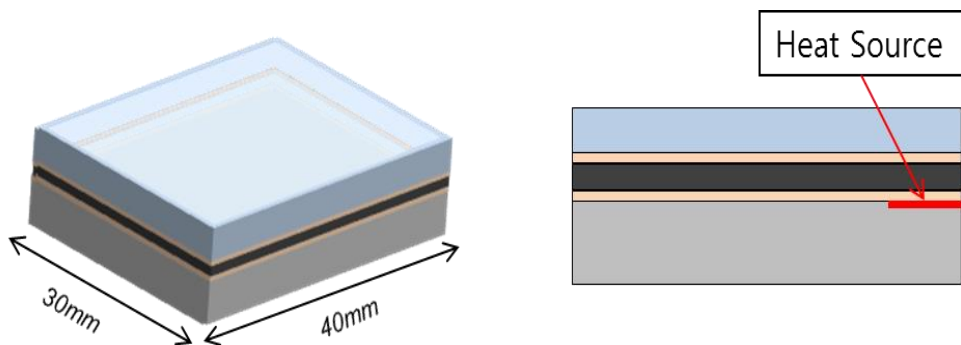


그림 2.4 그래파이트 부착 시뮬레이션 구조

표 2.2 시뮬레이션 Boundary condition

Simulation Conditions	
Ambient temperature (°C)	25
Flow regime	Turbulence (Standard k-ε model)
Gravity vector	-9.8 m/s ²
Meshes	0.8 ~ 1 x 10 ⁶
Iterations	10000

표 2.3 시뮬레이션에 사용된 Material 특성

Material Prosperities			
	Density (kg/m ³)	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
Silicon	2330	660	148
TIM	1600	240	8.9
Graphite	2130	720	1500/10
Lithium Ion Battery	2765	1394	25.7/0.794

시뮬레이션 조건으로는 강제 대류가 없는 natural air cooling 조건으로 설정하였으며 flow regime는 난류로 ANSYS Icepak의 Two equation(Standard k-ε model)을 사용하였다. 난류 유동의 경우 유체

의 운동방정식을 시간 평균하여 얻어지는 레이놀즈 방정식을 이용한다. 레이놀즈 평균 운동 방정식(Reynolds average Navier-stokes:RANS)은 레이놀즈 응력 항을 포함하고 있다. 레이놀즈 응력 항에 대한 보조 관계식을 위한 난류 모델인 standard k- ϵ model 에서는 점성계수 μ 를 난류 운동에너지 k와 단위 질량당 난류에너지 소산률 ϵ 로 나타낸다.

$$\mu = \rho C_{\mu} \frac{k^2}{\epsilon} \quad (2.6)$$

운동에너지와 소산률에 대한 전달 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k - \rho \epsilon \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} G_k - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2.8)$$

각각의 상수 값들은 k- ϵ 모델의 표준 값인 $C_{1\epsilon}=1.44$ $C_{2\epsilon}=1.44$, $C_{\mu}=0.09$, $\sigma_k=1.0$, $\sigma_{\epsilon}=1.3$ 를 사용한다.

유체 영역에서 에너지 방정식은 다음과 같이 나타내진다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \frac{\partial}{\partial x_i} u_i(\rho h + p) = \frac{\partial}{\partial x_j} (k_{eff} \frac{\partial T}{\partial x_i}) \quad (2.9)$$

$$k_{eff} = k + \frac{C_p \mu_t}{Pr_t} \quad (2.10)$$

그림 2.5와 같이 리튬 이온 배터리의 발열을 시뮬레이션 하기 위하여 표면 우측 상단에 1cm x 1cm 크기의 열원을 설정하였으며 0.5W를 인가하였다.

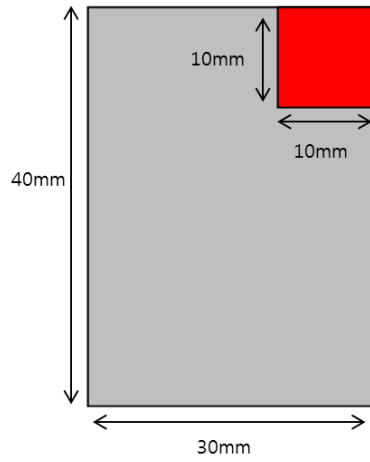


그림 2.5 리튬 이온 배터리 시뮬레이션에서 표면 열원의 위치

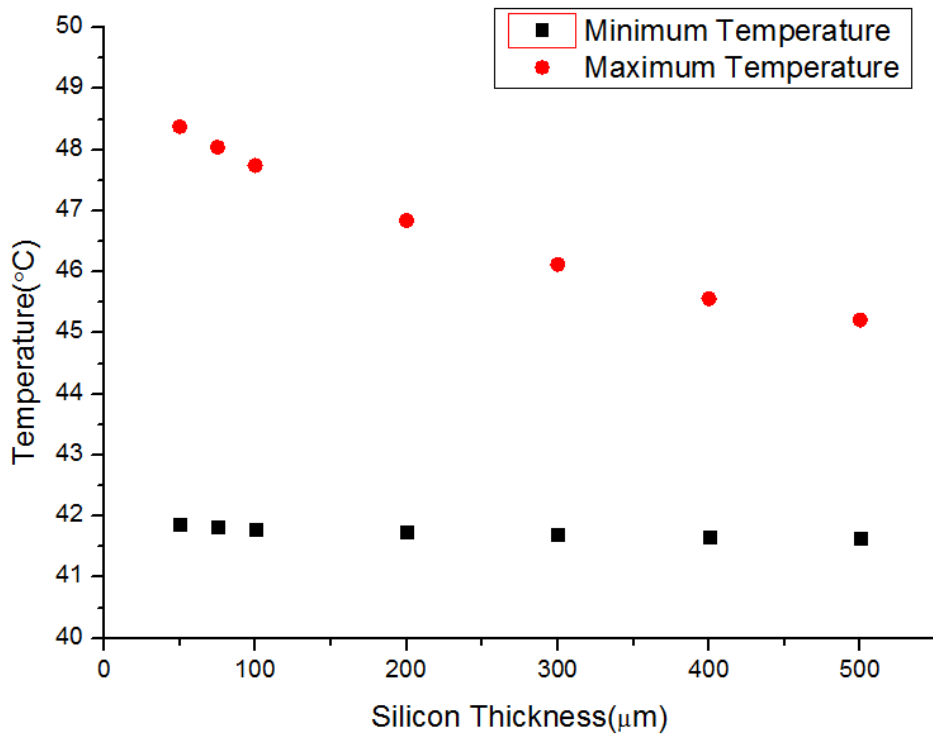


그림 2.6 실리콘 두께에 따른 표면의 온도 시뮬레이션

그림 2.6은 그래파이트의 두께를 $25\mu\text{m}$ 로 고정하고 실리콘 두께를 변경하였을 때, 배터리 표면 온도 시뮬레이션 결과이다. 실리콘의 두께가 커지면 평면방향으로 열이 지나가는 단면적이 커지고 열 저항이 작아지기 때문에 표면 내 최대 온도가 감소한다. 평면방향 열 저항은 두께에 반비례 하기 때문에 동일 전력에서 실리콘의 두께 t 에 따라 $1/t$ 의 함수의 형태로 열원의 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 실리콘 두께를 $50\mu\text{m}$ 부터 $500\mu\text{m}$ 까지 증가시켰을 때, 최대 온도는 3.17°C 감소하지만 최소 온도는 0.23°C 감소하는 것을 알 수 있다. 하지만 실리콘의 두께를 증가시키는 것은 수직 방향 즉 열원과 온도센서가 위치하는 층 사이의 열 저항을 증가시키기 때문에 온도센서가 열원의 온도를 측정하는데 오차가 커지게 된다.

그림 2.7은 실리콘 두께를 고정하였을 때, 그래파이트 두께에 따른 표면 온도 감소 효과 시뮬레이션 한 것으로 그래파이트가 부착되지 않았을 때 최고 온도가 53.7°C 에서부터 그래파이트 두께가 증가할수록 감소하는 것을 확인할 수 있으며, $100\mu\text{m}$ 두께의 그래파이트로 시뮬레이션을 실시한 결과, 최대온도가 45.5°C 까지 감소하였으며, 내부 온도 차이는 2.8°C 가 된다. 실리콘 두께 증가에 비하여 그래파이트의 두께를 증가시키는 것이 온도 감소 폭이 큰 것을 확인할 수 있다. 이는 그래파이트의 열전도도가 실리콘의 10배 정도이기 때문에 두께 증가에 따른 열 저항 감소가 더 크기 때문이다. 또한 실리콘의 두께를 증가시켰을 때와 다르게 표면 열 전도도의 증가로 인하여 최소 온도가 증가하는 것을 볼 수 있다.

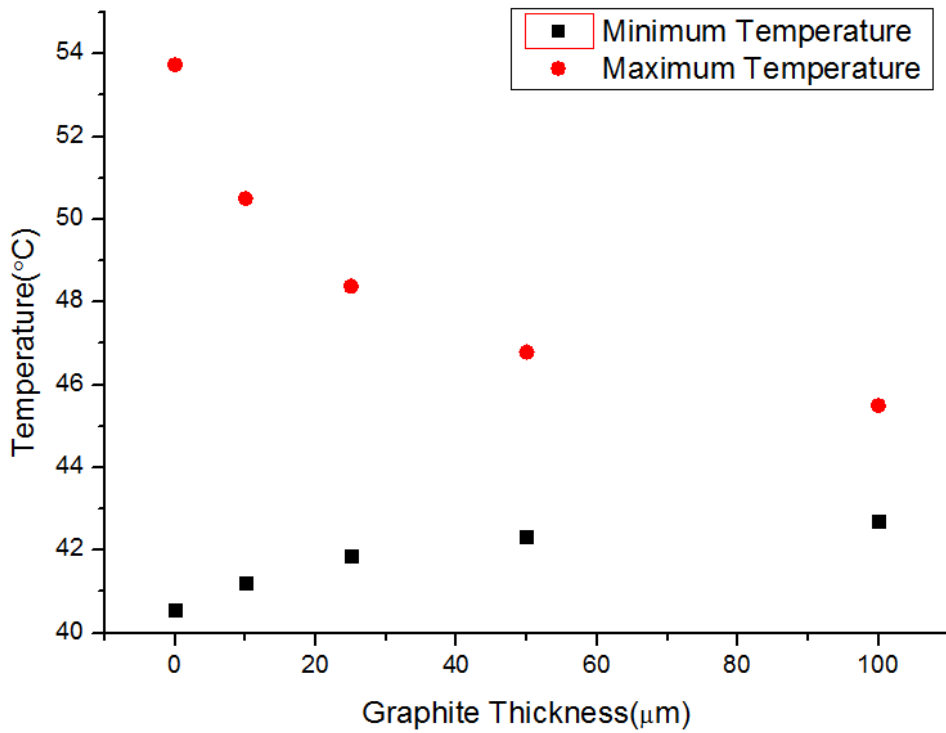


그림 2.7 그래파이트 두께에 따른 표면의 온도 시뮬레이션

그림 2.8은 그래파이트가 없는 구조와 $25\mu\text{m}$ 의 그래파이트가 있는 구조의 시뮬레이션 결과로 그래파이트를 부착함으로써 표면 내 최대 온도 감소와 표면 내부 온도 차이 감소를 확인할 수 있다.

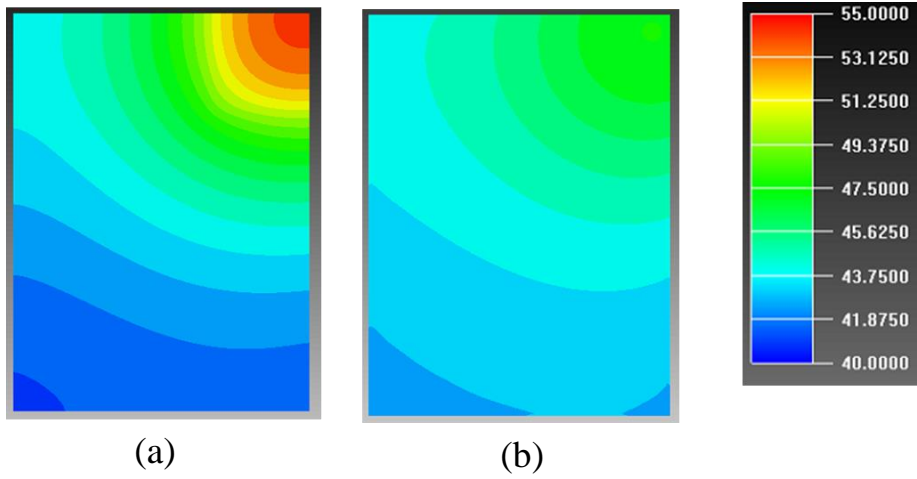


그림 2.8 리튬 이온 배터리 표면의 온도 시뮬레이션
 그래파이트가 없는 구조(a), 25 μm 의 그래파이트가 있는 구조(b)

제 3 장 제 작

3.1 제작 순서

본 논문에서 제안한 온도 맵핑과 열 분산 기능을 결합한 구조를 제작하기 위하여 반도체 공정을 사용하여 온도센서 배열을 제작하였으며 그래파이트 시트를 부착한 다음 배터리 표면에 부착하였다. 온도센서 배열은 4인치 단면 폴리싱 된 p타입 (111) 실리콘 웨이퍼를 기판으로 사용하여 서울대 반도체 공동장비연구소에서 제작하였다. 백금 온도센서와 구리 배선을 형성하기 위하여 2장의 마스크를 이용하여 2번의 노광 공정을 진행하였다. 표 3.1은 온도센서 배열 제작에 사용된 장비를 정리한 표이다.

표 3.1 제작에 사용된 장비

사용된 재료 및 장비	모델 명(제조회사)	장비특성
SNTEK Sputter	PSP5004(SNTEK)	IGZO, Al ₂ O ₃ 증착 가능
감광막	AZ5214	AZ5214-Negative
Aligner	MA-6(Karl-suss)	파장 365nm 단색광
Metal Sputter	MHS-1500(무한진공) SME-200E(ULVAC)	Cr, Mo, Ti, Cu, Al, W, Ni, Pt 증착 가능

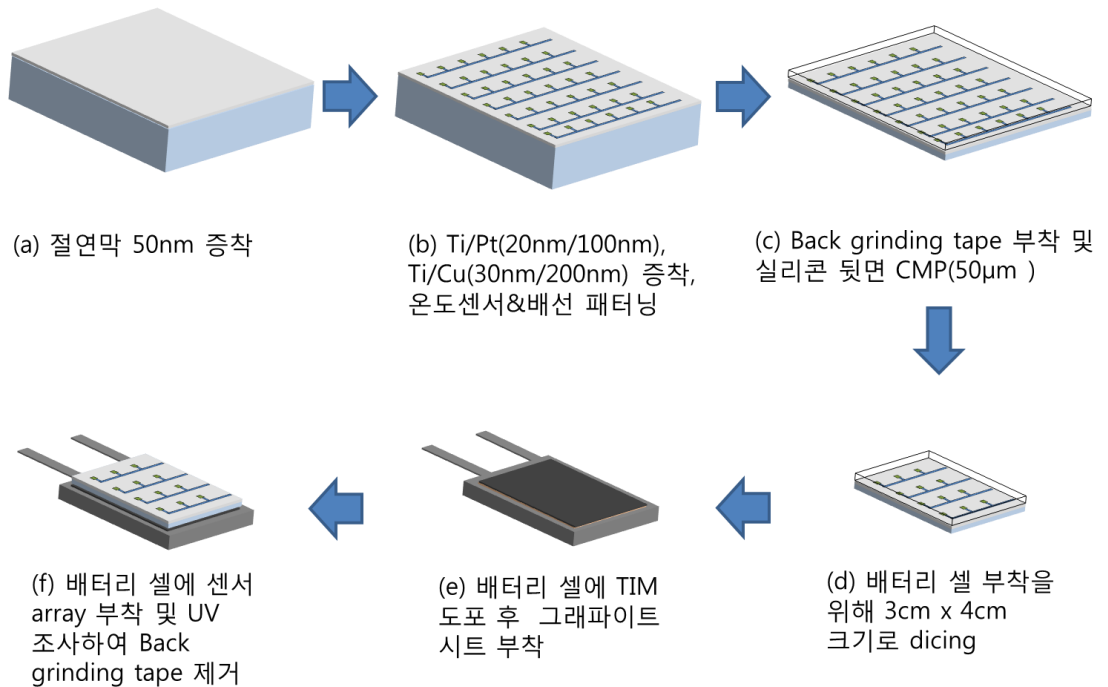


그림 3.1 제작 순서

그림 3.1의 공정흐름도에서 (a) 단면 폴리싱 된 4인치 p타입 실리콘 웨이퍼에 Al_2O_3 막을 50nm 증착한다. Al_2O_3 막은 센서와 실리콘 사이의 전기적 절연을 위해 사용한다.

다음 온도센서로 사용되는 Ti/Pt Lift off 공정을 위해 AZ5214를 사용하여 노광 공정을 진행하고 Ti/Pt를 각각 20nm/100nm로 증착한다. Acetone으로 Lift off 공정을 진행하여 온도 센서 패터닝을 완료한다. Ti/Pt Lift off 공정 후 배선으로 사용될 Ti/Cu를 위한 노광공정을 진행하고 각각 30nm/200nm로 증착하고 Lift off 공정을 진행한다. 센서로

사용되는 Pt의 경우 외부저항을 무시할 만큼 큰 저항을 갖는 것이 온도 센싱에 중요하기 때문에 두께 100nm로 증착하고 배선으로 사용된 Cu의 경우, 저항을 낮추기 위하여 200nm로 두껍게 증착한다. Ti는 Pt, Cu와 Al₂O₃와의 adhesion이 부족하기 때문에 adhesion layer로 사용한다.

다음으로 CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 위하여 back grinding tape를 부착한다. Back grinding tape는 CMP 공정 시 센서의 표면 보호와 공정 후에 얇은 웨이퍼를 배터리 표면에 부착할 때 handling할 수 있도록 부착한다. 사용하는 back grinding tape는 UV type으로 UV를 조사하면 접착력이 약화되어 떼어내기 쉽도록 제작된 것이며 표면에 residual이 적은 것으로 UV 조사 후에 클리닝이 필요하지 않다. Back grinding tape 부착 후, CMP(Chemical Mechanical Polishing) 공정을 진행하여 target thickness 50 μ m 로 실리콘을 얇게 처리하며 리튬 이온 배터리에 부착하기 위하여 3cm x 4cm 크기로 dicing한다.

그 후 리튬 이온 배터리의 active 영역 표면에 TIM을 도포하여 그 래파이트 시트를 부착하고 그 위에 dicing 된 온도센서 배열을 부착한다. 마지막으로 표면에 UV를 조사하여 붙어있는 back grinding tape를 떼어 내어 공정을 완료한다.

3.2 제작 결과

앞서 서술한 공정 순서의 (a), (b)에 해당하는 온도센서의 제작 결과는 다음과 같다. 첫 번째로 실리콘 웨이퍼에 절연막인 Al_2O_3 를 sputtering을 통하여 증착하였고 그 다음 PR AZ5214를 표 3.2의 공정조건을 사용하여 패터닝 한 후 metal sputter 장비를 이용하여 Ti/Pt를 각각 20nm/100nm 증착하였다. 그 후 아세톤에 넣어서 PR을 제거하여 lift off 함으로써 온도 센서를 패터닝하였다. 동일한 방법으로 Ti/Cu 각각 30nm/200nm 증착하고 PR을 제거하여 구리 배선을 제작하였다

표 3.2 AZ5214를 이용한 음각 사진 공정

스핀 코팅	500 rpm 5 초 4000 rpm 35 초
소프트 베이크	95 °C / 210 초
첫 번째 노광	20 mW/s / 6.25 초
하드 베이크	95 °C / 150 초
두 번째 노광	20 mW/s / 22.5 초
현상	6:1 AZ 300, 물 희석액 / 120 초

다음으로 센서면 표면에 back grinding tape를 부착하였고 CMP 공정을 통해 실리콘 웨이퍼의 두께를 50 μm 로 조절 하고 3cm x 4cm 크기로 dicing하였다. 그림 3.2는 dicing 공정까지 완료된 온도센서를 나타내며 현미경으로 관찰한 결과 CMP나 dicing 공정에도 센서나 배선부분의 패턴이 손상되지 않은 것을 확인하였다.

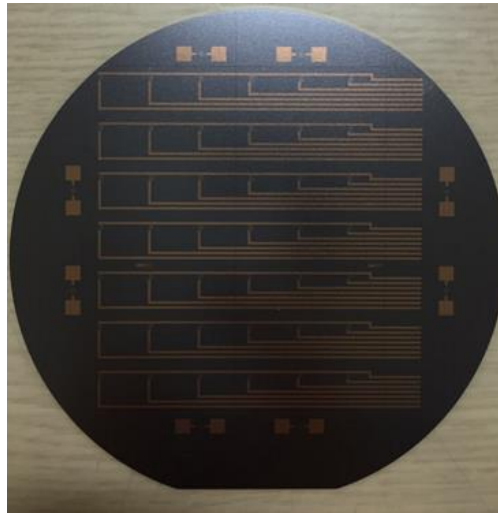


그림 3.2 Dicing 완료된 웨이퍼

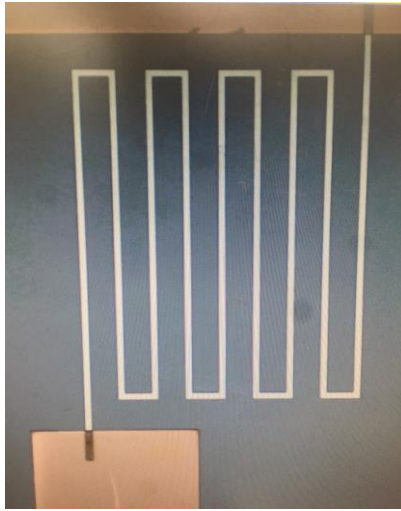


그림 3.3 제작된 온도센서

제작에 사용한 리튬 이온 배터리는 전자부품연구원 차세대전지연구센터에서 제공 받았으며 파우치 타입으로 용량은 약 400mAh이다. 리튬 이온 배터리의 active 영역의 면적은 35mm x 45mm이며 동작 전압은 2.75 ~ 4.2V이다.

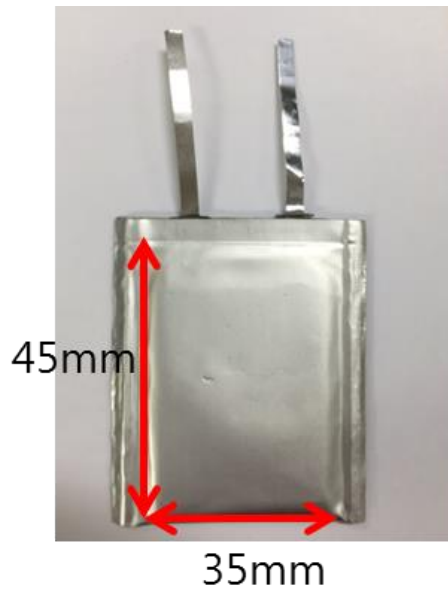


그림 3.3 리튬 이온 배터리

그래파이트 시트는 파나소닉 사의 $1500\text{W/m} \cdot \text{K}$ 의 평면방향 열전도도를 갖는 제품을 구매하여 사용하였으며 리튬 이온 배터리의 active 영역에 부착하였다. 그래파이트 시트는 부착 전에 와이퍼 위에 올려두고 그 위를 와이퍼로 덮은 다음 ironing하여 평탄화하였다. 그래파이트 시트 부착 후 dicing된 온도센서 배열을 부착하였다. 표 3.3은 파나소닉사에서 구매한 그래파이트 시트의 특성이다.

표 3.3 그래파이트 시트 특성

Characteristics	Specifications
Withstand temperature	400℃
Thickness	0.025 ± 0.01mm
Density	2.1g/cm ³

그래파이트 시트와 배터리, 온도센서 배열 사이의 부착을 위하여 사용한 TIM(Thermal Interface Material)로 Arctic Silver 사의 Arctic Silver 5 High-Density Polysynthetic Silver Thermal Compound를 구매하여 사용하였다. 사용된 Arctic Silver 사의 Thermal Compound는 비전도성이며 8.89 W/m·K의 열전도도를 가지고 -50℃~130℃까지 사용이 가능한 TIM이다.



그림 3.4 그래파이트 시트를 부착한 리튬 이온 배터리

온도센서 배열 부착 후 표면에 back grinding tape는 UV를 조사하여 떼어내었다. 그래파이트 시트의 열분산 성능을 측정하기 위하여 그래파이트 시트가 부착된 소자와 부착되지 않은 소자, 총 2개를 제작하였다.



그림 3.5 제작이 완료된 소자

제 4 장 측 정

4.1 측정 set up

제작된 소자의 온도센서를 측정하기 위하여 Cu 배선에 Molex사의 wire to board connector를 소자 표면에 부착하였다. 부착 후 connector의 핀과 Cu 배선이 자동적으로 contact되지 않아서 contact를 위하여 silver paste를 도포하고 상온에서 12시간 경화시켜서 contact 시켰다. Connector와 wire의 저항 및 silver paste에 의한 접촉 저항은 온도센서의 저항이 900Ω 이상이 되므로 그 영향력은 0.1% 미만으로 무시할 수 있는 수준이다. 납땜으로 contact 시킬 경우 온도가 200°C 이상까지 올라가기 때문에 배터리 내부 물질에 이상을 일으킬 수 있다. 그러므로 저온에서 경화시켜 contact이 가능한 silver paste를 사용하였다. 그림 4.1은 connector와 silver paste로 기판을 wiring한 것을 나타낸다.

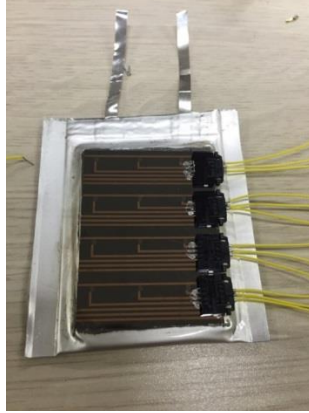


그림 4.1 Wiring 완료된 소자

Wiring된 3 x 4 온도센서 배열의 시간에 따른 온도 변화를 실시간으로 측정하기 위하여 내부 멀티 미터가 내장된 데이터 수집 장치(Data Acquisition device)로 Agilent 사의 34972A 모델을 사용하였다. 20 채널 multiplexer 모듈을 3개까지 장착하여 최대 60ch까지 측정이 가능하며, 60ch/s의 스캐닝 속도를 가진다. 12개의 온도센서를 연결하여 시간에 따른 저항변화를 실시간으로 측정하였다.

배터리의 충방전은 전자부품연구원 차세대전지연구소의 배터리 충방전 시험기(Battery Test System)를 이용하였으며 항온 챔버(Constant Temperature Chamber)의 ambient 온도는 23℃이다.

그림 4.3은 배터리 표면 온도 측정 set up을 나타낸다. 배터리 충방전 시험기의 항온 챔버 내부에 리튬 이온 배터리의 양 단자가 연결되어 방전을 실시하며, 리튬 이온 배터리 표면의 각각의 온도 센서는 데이터 수집 장치에 연결되어 표면 온도 변화에 따른 저항값을 출력한다.

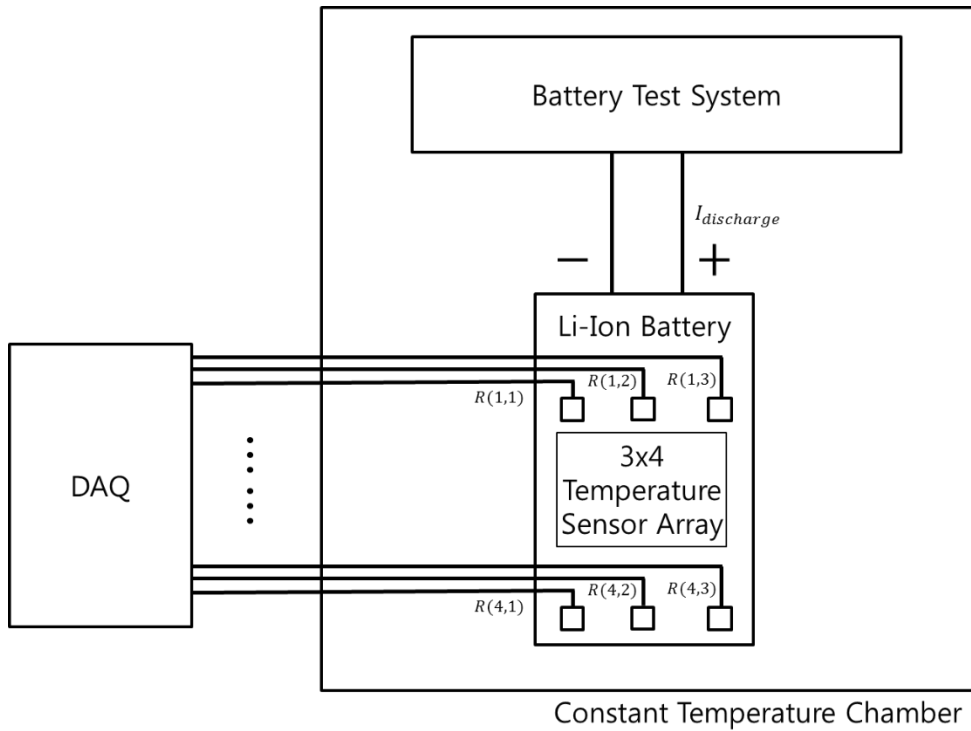


그림 4.2 측정 set up

4.2 온도센서 TCR 측정

도체의 전기 저항은 일반적으로 온도에 의해 변화하는 성질이 있다. 대부분의 그 특성은 온도의 변화와 일정한 관계를 가지고 있으며, 도체인 금속은 외부 요인으로 온도가 변화하게 되면, 그 변화와 동일한 온도

계수(TCR: Temperature Coefficient of Resistance) 특성으로 저항 값이 변화하게 된다. 그러므로 이러한 관계로부터 기존의 온도와 저항 값을 알고 있을 경우, 현재의 변화된 저항 값으로부터 온도의 측정이 가능하게 되며, 이러한 측정이 가능하도록 제작한 온도센서를 측온 저항체(RTD: Resistance Temperature Detector)라 한다. 온도가 t_1 [°C]일 때, 금속의 저항이 R_{t_1} [Ω]이고, 온도가 상승하여 t_2 [°C]일 때의 금속의 저항을 R_{t_2} [Ω]라고 한다면 TCR α 는 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\frac{R_{t_2} - R_{t_1}}{t_2 - t_1}}{R_{t_1}} \quad (4.1)$$

금속은 양의 TCR을 가지고 있으며 그 값은 물질에 따라 값이 다르다. 또한 금속의 TCR은 순도가 높을수록 큰 값을 가진다고 알려져 있다. 측온 저항체로 주로 사용되고 있는 금속에는 백금(Pt), 니켈(Ni) 등이 있으며 대부분의 금속은 선형적인 온도 저항 관계를 가지며 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$R_t = R_0(1 + \alpha\Delta t) \quad (4.2)$$

R_0 는 초기저항이며 R_t 는 온도 t °C에서의 저항이다.

제작된 소자의 충방전 실험 전에 표면 온도센서 배열의 온도에 따른 저항의 변화를 측정하였다. 측정은 미니오븐을 이용하였으며 온도를 80°C까지 가열 후 천천히 식히는 과정을 통해 각각의 온도센서의 저항 변화

를 측정하였다. 그래파이트 시트가 부착된 소자와 부착되지 않은 소자를 각각 측정하였다.

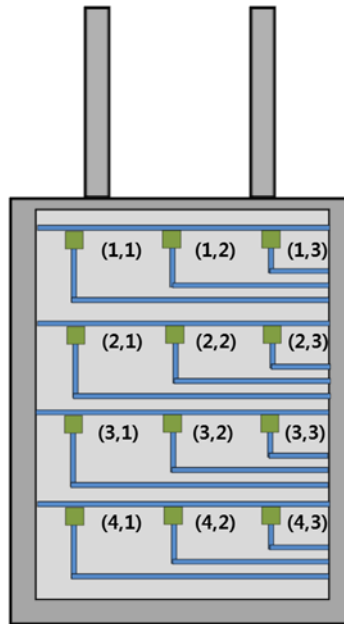


그림 4.3 리튬 이온 배터리 표면 온도 센서의 위치

그림 4.4은 리튬 이온 배터리 표면에 부착된 온도 센서의 위치를 나타낸다. 총 12개의 온도 센서가 있으며, 각각의 센서가 1cm 간격으로 배치되어 있다.

그림 4.5와 4.6는 각각 소자의 3 x 4개의 온도센서의 TCR 측정 결과이다. 80°C에서 30°C까지 미니 오븐의 온도를 내리며 각각의 온도에서 10분의 안정화 시간을 두고 측정하였다. 10 ~ 15 분 사이에 센서 저항 변화가 1% 미만임을 확인하였고 이는 곧 정상상태라고 하여도 무방

하다.

금속의 저항치는 다음 식으로 나타낸다.

$$R = \rho \frac{L}{A} \quad (4.3)$$

온도센서의 저항은 비저항(ρ), 길이(L), 선폭 x 두께(A)로 나타내지며 각각의 설계 값을 넣어서 계산하면 527.1Ω (@ 30°C)으로 각각의 소자에서 측정 값이 설계 값에 비해 약 2배정도 큰 값을 갖는다. 이는 백금을 $1\mu\text{m}$ 이하의 두께로 증착할 경우 grain size가 전자의 평균자유행로(Mean Free Path : MFP)보다 작게 되어 grain boundary scattering이 일어나서 비저항이 커지기 때문이다. 열처리 공정을 하면 grain size를 키워서 저항 값을 낮출 수 있지만 온도센서의 경우 초기 저항 값이 클수록 온도에 따른 저항의 변화가 커지고 grain size의 변화와 센서의 accuracy와는 관계가 없기 때문에 추가적으로 열처리 공정을 진행하지 않았다.

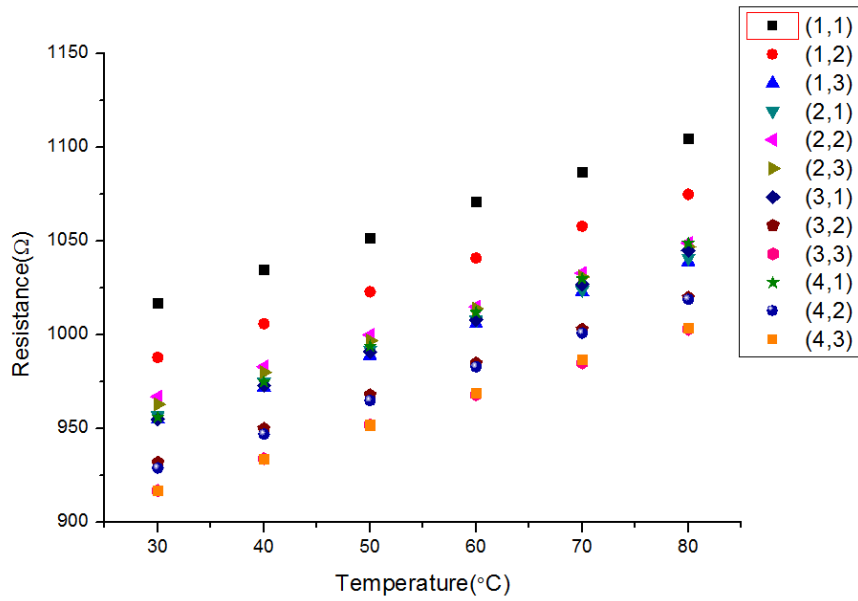


그림 4.4 그래파이트 부착된 소자 TCR 측정 결과

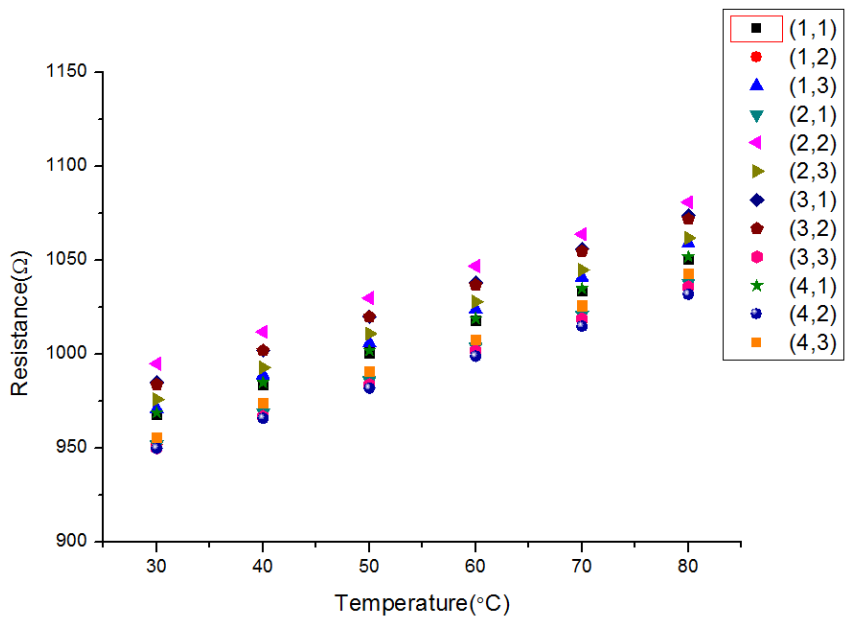


그림 4.5 그래파이트 부착되지 않은 소자 TCR 측정 결과

측정 결과, 그래파이트 시트가 부착된 소자와 부착 되지 않은 소자 각각의 센서의 저항이 온도에 따라 선형성을 유지하며 변화하였으며 그 선형성 계수는 0.99 이상임을 확인하였다. 다만 metal sputter의 웨이퍼 내부에서 non-uniformity로 인한 백금 두께의 차이로 인하여 온도센서의 초기 저항이 다르기 때문에 각각의 온도 센서에 맞는 상관식을 이용하여 보정하였다.

그래파이트가 부착된 소자의 경우 $dR/dT = 1.64 \sim 1.85 (\Omega/^\circ\text{C})$, 부착되지 않은 소자는 $dR/dT = 1.66 \sim 1.78 (\Omega/^\circ\text{C})$ 의 기울기를 확인하였으며 이를 선형회귀를 통하여 각각을 일차식으로 근사하였다. 일차식으로 근사함으로써 생긴 최대오차는 그래파이트 미부착 소자가 1.1Ω , 부착 소자가 1.3Ω 으로 온도로 환산하면 0.6°C , 0.7°C 이다.

$$\text{TCR} = dR/dT \times 1/R_0 \quad (4.4)$$

측정된 저항변화를 위의 TCR 식을 통하여 각각의 센서의 TCR을 구하였으며, 각각 $0.00173 \sim 0.00195^\circ\text{C}^{-1}$, $0.00171 \sim 0.00182^\circ\text{C}^{-1}$ 임을 확인 할 수 있었다.

또한 구리 배선으로 인한 영향을 측정하기 위하여 1cm 길이의 저항과 TCR을 측정하였다. 구리배선 1cm의 30°C 에서의 저항은 2.85Ω

이며 $dR/dT = 0.004(\Omega/^\circ\text{C})$, TCR이 $0.001488^\circ\text{C}^{-1}$ 로 온도센서의 저항 변화에 비하여 구리배선의 온도로 인한 저항 변화는 0.1% 미만이기 때문에 무시할 수 있는 수준인 것을 확인하였다.

또한 제작한 온도 센서의 성능을 검증하기 위하여 상용 thermocouple과 비교해 보았다. TCR을 측정하였던 oven에 온도 센서와 상용 thermocouple을 넣고 온도를 변경해 가면서 온도 센서의 저항값으로부터 환산된 온도와 thermocouple에서 표시되는 온도를 비교하였다. 표 4.1은 각각의 온도에서 thermocouple의 온도, 제작한 센서로 측정된 온도를 나타낸다. Thermocouple 온도를 참값으로 하여 제작한 온도 센서의 오차를 계산한 결과, 각각의 온도에서 5%미만의 오차를 보였다.

표 4.1 제작한 온도 센서와 상용 thermocouple과의 비교

Thermocouple	저항	센서 온도	오차
19.3 $^\circ\text{C}$	925 Ω	20.1 $^\circ\text{C}$	4.1%
39.7 $^\circ\text{C}$	958 Ω	40.1 $^\circ\text{C}$	1.0%
59.6 $^\circ\text{C}$	990 Ω	59.6 $^\circ\text{C}$	0.0%
80.2 $^\circ\text{C}$	1023 Ω	79.6 $^\circ\text{C}$	0.7%

4.3 배터리 방전 실험 및 측정

리튬 이온 배터리의 용량은 에너지 단위인 줄(Joule)이지만 일반적으로는 출력 전압을 생략하여 ‘1시간에 사용할 수 있는 전류량’인 mAh 단위로 표기된다.

방전 실험 전에 리튬 이온 배터리를 500mA의 정전류로 충전하여 용량을 확인하였으며, 그 결과 그래파이트가 부착되지 않은 배터리와 부착된 배터리의 용량을 각각 395.5mAh, 389mAh가 측정되었으며 이는 배터리의 평균 출력 전압이 3.6V이므로 약 5.1kJ로 환산할 수 있다.

그래파이트의 방열 성능을 측정하기 위해서 리튬 이온 배터리가 방전할 때 발생하는 열을 증가시켜야 하므로 높은 전류로 방전하였다. 방전 속도를 나타내는 단위로 방전율은 일반적으로 C-rate라고 한다. 1C는 완충된 배터리를 1시간 동안 사용할 전류로 방전하는 것을 의미한다. 그러므로 400mAh의 리튬 이온 배터리를 1C로 방전하는 것은 400mA의 정전류로 방전하는 것을 나타낸다. 7C의 방전율 즉, 2.8A의 정전류로 방전 실험을 진행하였다.

리튬 이온 배터리는 방전이 진행됨에 따라 단자 전압이 4.2V부터 감소하며 cut-off voltage인 2.75V 이하가 되면 방전이 중단되게 된다. 각각의 방전시간은 217초, 206초이며 방전 용량은 166mAh,

157.5mAh로 측정되었다. 높은 방전율로 방전을 진행함으로 인하여 전극에서의 내부 화학 반응속도가 빨라지게 된다. 빨라진 반응속도로 인하여 음극에 표면에서의 전해질 리튬의 고갈, 양극 표면에서의 리튬 이온이 포화되어 석출, 전해질 리튬 고갈 등이 발생하여 내부 저항이 빠르게 증가하게 된다. 내부 저항이 빠르게 증가함과 반대로 단자 전압은 빠르게 감소하게 되어 cut-off voltage에 도달하게 되고 그 결과로 충전된 용량에 비해 현저히 적은 용량만큼만 방전하게 된다.

방전을 진행하면서 표면 온도센서의 시간에 따른 저항 변화를 데이터 수집장치로 측정하였다. 측정된 시간에 따른 온도센서의 저항은 4.2절에서 구해진 TCR과 아래 식을 통하여 온도로 변환하였다. 소자를 방전 시작시점부터 방전이 완료되고 ambient temperature에 도달할 때까지 소자에 대한 측정을 진행하였다.

$$\Delta\text{Temperature} = \Delta R / (\text{TCR} \times R_0) \quad (4.5)$$

4.7, 4.8은 그래파이트 미부착 소자와 그래파이트 부착 소자의 온도센서로부터 측정된 저항을 온도로 환산하여 시간에 따른 온도 변화를 나타낸다. 각각의 그래프에서 빨간 선은 방전 완료 시점을 나타낸다.

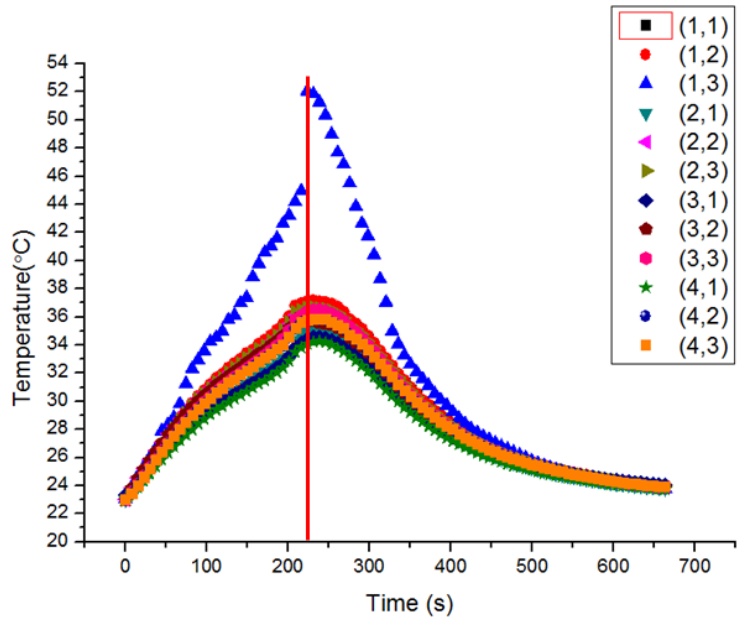


그림 4.6 그래파이트 미부착 소자의 시간에 따른 표면 온도

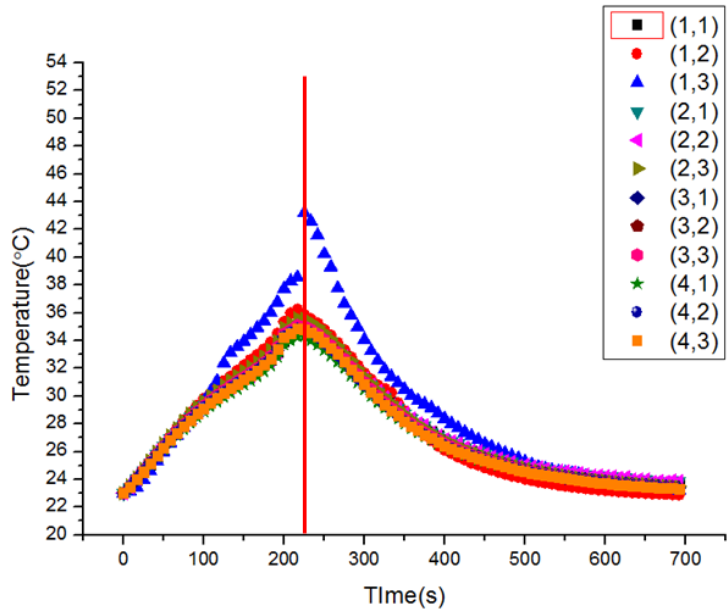


그림 4.7 그래파이트 부착 소자의 시간에 따른 표면 온도

배터리 표면의 온도는 방전이 완료시점까지 증가하며 방전이 완료되고부터 감소하는 양상을 보인다. 방전율이 높을수록 인가 전류량이 크기 때문에 표면 온도가 빠르게 증가하며 배터리의 탭 부분에서 온도가 가장 높으며 탭에서 멀어질수록 낮아지는 것을 확인하였다. 이는 리튬 이온 배터리의 내부 저항으로 인한 발열 반응은 전류 밀도의 제곱에 비례하는데 전류 밀도가 가장 높은 곳이 배터리의 탭 부분이기 때문이다.

그래파이트를 부착하여 평면 열전도도를 증가시킴으로 인하여 수평적으로 분산되는 열이 증가하게 되고 그 결과 최고 점의 온도가 감소하는 모습을 보였으며 내부 온도 차이 역시 감소한 것을 그래프로부터 확인할 수 있다. 또한 그래파이트 미부착 소자경우 열 분산되는 속도가 느리기 때문에 방전이 완료되고도 탭부분인 (1,3)이외에는 온도가 증가하지만 그래파이트 부착 소자에서는 방전 완료시점부터 온도가 감소하는 것을 알 수 있다. 그림 4.9와 4.10은 방전 완료 시점의 온도 분포를 나타낸다. 그래파이트를 부착함으로써 리튬 이온 배터리 표면의 최대온도는 52.1℃에서 43.2℃로 8.9℃ 감소하였으며 배터리 내부의 온도 차이 역시 18.3℃에서 8.9℃로 9.4℃감소하였다.

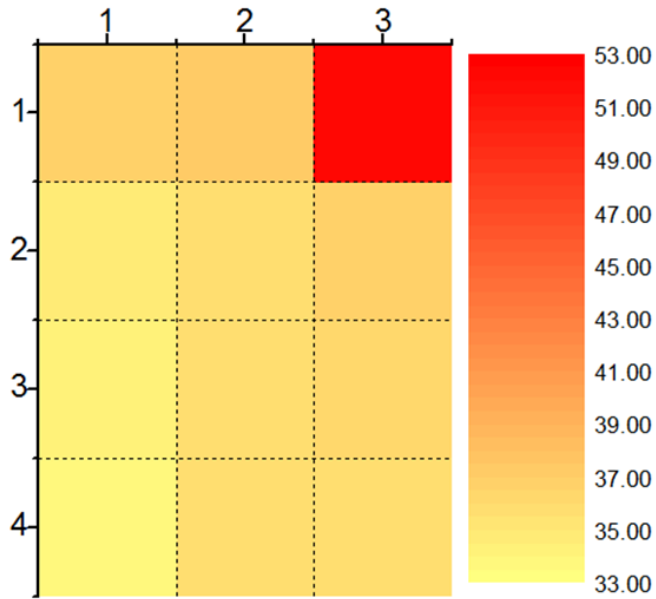


그림 4.8 그래파이트 미부착 소자의 방전 완료 시점 온도 분포

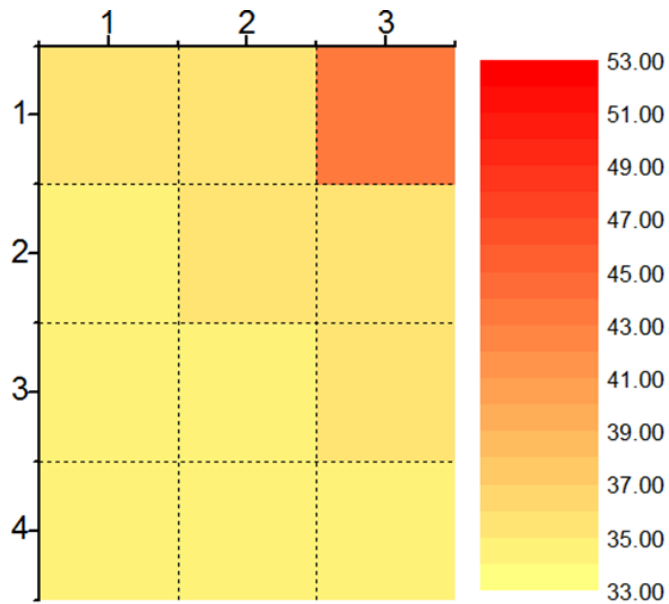


그림 4.9 그래파이트 부착 소자의 방전 완료 시점 온도 분포

표 4.2 그래파이트의 열 분산 효과

방전 완료 시점에서 표면 온도		
	w/o 그래파이트	w/ 그래파이트
Max	52.1℃	43.2℃
Min	33.8℃	34.3℃
Max - Min	18.3℃	8.9℃
최대 온도 감소	8.9℃	
내부 온도 차 감소	9.4℃	

측정된 결과로부터 그래파이트를 부착하여 표면 열전도도를 향상시킴으로써 배터리의 최대 온도 감소 뿐만이 아니라 내부 온도 차이 역시 줄일수 있다는 결과를 얻었다. 측정에서는 소형 리튬 이온 배터리를 사용하여 방전 실험을 진행하였지만 전기 자동차에 사용되는 리튬 이온 배터리의 경우 표면 면적대비 전극의 면적이 작기 때문에 발생하는 열이 증가되어 온도 감소 효과가 증대되리라 생각된다. 또한 25 μ m 이상의 두께의 그래파이트를 부착하고 실리콘 기판의 두께를 줄여서 열전도도를 향상시켜서 열 분산으로 인한 온도 감소와 온도 분포 균일화 성능을 높일 수 있다.

제 5 장 결 론

본 논문에서는 온도 맵핑과 열 분산기가 결합된 구조의 열관리기술을 제안하였다. 표면 온도 맵핑을 위한 백금 온도센서 배열과 열 분산을 위한 표면 열전도도가 뛰어난 그래파이트 열 분산기가 결합된 구조를 설계하였고 열 전달 시뮬레이션을 통하여 온도 감소 효과를 확인하였다. 이를 토대로 소자를 제작하여 온도센서의 성능을 측정하였고 또한 실제 리튬 이온 배터리에 부착하고 방전 실험을 진행하여 표면 온도를 측정하여 그래파이트 열 분산기의 방열 효과를 측정하였다.

열 분산 기능을 결합한 온도 맵핑소자는 실리콘 기판 위에 50nm 알루미늄 절연막을 반도체 공정을 통하여 증착시킨 후 온도센서로 비저항이 높고 온도에 따른 저항 변화가 선형적인 백금을 100nm 두께로 형성하였다. 온도센서의 배선으로는 비저항이 낮은 구리를 200nm 두께로 사용하였다. 그 후, 열 분산기의 효율을 높이기 위하여 실리콘을 CMP 공정을 이용하여 $50\mu\text{m}$ 두께로 식각하였다. 열 분산기로는 $25\mu\text{m}$ 두께의 그래파이트를 사용하였고 열 저항을 낮추기 위하여 TIM을 adhesion layer로 부착하였다. 열 분산 기능을 결합한 온도 맵핑 소자의 성능을 검증하기 위하여 $3.5\text{cm} \times 4.5\text{cm}$ 면적의 active region을 가지

는 리튬 이온 배터리에 부착하여 방전 실험을 진행하였다.

방전 실험 진행 전에 제작된 온도센서 배열을 30~80℃의 온도에서 TCR을 측정하여 온도에 따라서 저항이 선형적으로 변화하는 것을 확인하였고 각각의 온도센서에 맞는 상관식을 이용하여 보정하였다. 또한 실제 thermocouple과 비교를 통하여 20~80℃ 온도 범위에서 5%이내의 작은 오차로 제작된 온도센서의 측정 값은 신뢰성을 갖는 것으로 사료된다.

배터리 충방전 시험기에서 7C의 방전율로 방전 실험을 진행하여 배터리의 표면 온도를 측정한 결과, 그래파이트를 부착함으로써 미부착 시와 비교하여 배터리 내부 최대 온도가 8.9℃ 감소하였으며 또한 배터리 내부 온도 차이 역시 9.4℃감소하는 효과를 얻었다.

참고 문헌

- [1] Wang, Qingsong, et al. "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery." *Journal of power sources* 208 (2012): 210–224.
- [2] Fergus, Jeffrey W. "Ceramic and polymeric solid electrolytes for lithium-ion batteries." *Journal of Power Sources* 195.15 (2010): 4554–4569.
- B3, SDI
- R. Spotnitz and J. Franklin, "Abuse Behavior of High-power Lithium-Ion Cells", *J. Power Sources*, Vol.113, pp81–100, 2003.
- [3] Matthe, Roland, Lance Turner, and Horst Mettlach. "VOLTEC battery system for electric vehicle with extended range." *SAE International Journal of Engines* 4.2011-01-1373 (2011): 1944–1962.
- [4] *Electropaedia*, 2014
- [5] Rao, Zhonghao, and Shuangfeng Wang. "A review of power battery thermal energy management." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15.9 (2011): 4554–4571.

- [6] GE Global Reserch, Control Enabling Solutions with Ultrathin Strain and Temperature Sensor System for Reduced Battery Life Cycle Cost, 2013
- [7] Mahamud, Rajib, and Chanwoo Park. "Reciprocating air flow for Li-ion battery thermal management to improve temperature uniformity." *Journal of Power Sources* 196.13 (2011): 5685–5696.
- [8] Al-Hallaj, Said, et al. "Passive thermal management using phase change material (PCM) for EV and HEV Li-ion batteries." *Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference*. IEEE, 2005.
- [9] Rao, Zhonghao, et al. "Experimental investigation on thermal management of electric vehicle battery with heat pipe." *Energy Conversion and Management* 65 (2013): 92–97.
- [10] S. Ghosh et al., "Extremely high thermal conductivity of graphene:Prospects for thermal management applications in nanoelectronic circuits" , *Applied Physics Letters* 92, 151911, 2008.
- [11] Alexander A. Balandin, "Thermal properties of graphene and nanostructured carbon materials" , *Nature Materials*, Vol.10, 2011.

- [12] Wanyoung Jang et al., “Thickness-Dependent Thermal Conductivity of Encased Graphene and Ultrathin Graphite” , Nano Letters, 10,3909–3913, 2010.
- [13] Jae Hun Seol et al, “Two-Dimensional Phonon Transport in Supported Graphene” , Science 328, 213, 2010.
- [14] Suchismita Ghosh et al, “Dimensional crossover of thermal transport in few-layer graphene” , Nature Materials, Vol.9, 2010.
- [15] D. L. Nika et al, “Lattice thermal conductivity of graphene flakes:Comparison with bulk graphite” , Applied Physics Letters, 94, 203103, 2009
- [16] Kwack, Kyu Hyun. "In-Situ Heat Cooling using Thick Graphene and Temperature Monitoring with Single Mask Process." *센서학회지* 24.3 (2015): 155–158.
- [17] Young, Kwo, et al. "Electric vehicle battery technologies." *Electric Vehicle Integration into Modern Power Networks*. Springer New York, 2013. 15–56.
- [18] Wang, Qingsong, et al. "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery." *Journal of power sources* 208 (2012): 210–224.

APA

[19] Song, Li, and James W. Evans. "Electrochemical-Thermal Model of Lithium Polymer Batteries." *Journal of the Electrochemical Society* 147.6 (2000): 2086–2095.

[20] Keyser, Matthew, et al. "Thermal characterization of advanced lithium-ion polymer cells." *Gen 1* (2003): 4–5.

[21] Guarnieri, Vittorio, et al. "Platinum metallization for MEMS application: Focus on coating adhesion for biomedical applications." *Biomatter* 4.1 (2014): e28822.

[22] Resnik, Drago, et al. "Experimental study of heat-treated thin film Ti/Pt heater and temperature sensor properties on a Si microfluidic platform." *Journal of Micromechanics and Microengineering* 21.2 (2011): 025025.

[23] Wu, Mao-Sung, et al. "Heat dissipation design for lithium-ion batteries." *Journal of power sources* 109.1 (2002): 160–166.

[24] Feng, Bo, Zhixin Li, and Xing Zhang. "Effect of grain-boundary scattering on the thermal conductivity of nanocrystalline metallic films." *Journal of Physics D: Applied Physics* 42.5 (2009): 055311.

[25] Narumanchi, Sreekant. "Advanced Thermal Interface Materials

for Power Electronics." (2007).

APA

[26] Myers, Matthew. "Lithium-Ion Battery Thermal Management Systems Using Flexible Graphite Heat Dissipators." (2012).

[27] Lu, Languang, et al. "A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles." *Journal of power sources* 226 (2013): 272-288.

[28] Chia, Bonnie T., et al. "Temperature sensor using flexible substrate." *Micro Electro Mechanical Systems, 2007. MEMS. IEEE 20th International Conference on. IEEE, 2007.*

APA

[29] Yang, Y-J., et al. "A 32× 32 temperature and tactile sensing array using PI-copper films." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 46.9-12 (2010): 945-956.

[30] Bengtsson, Annika. "Konstruktion av värmespridare med grafit för flygelektronik." (2009).

[31] Ellison, Gordon N. "Maximum thermal spreading resistance for rectangular sources and plates with nonunity aspect ratios." *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*

26.2 (2003): 439–454.

[32] Barua, A., et al. "Thermal Management in 3-D Integrated Circuits with Graphene Heat Spreaders." *Physics Procedia* 25 (2012): 311–316.

[33] Bandhauer, Todd M., Srinivas Garimella, and Thomas F. Fuller. "A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries." *Journal of the Electrochemical Society* 158.3 (2011): R1–R25.

[34] Kim, Ui Seong, Chee Burm Shin, and Chi-Su Kim. "Modeling for the scale-up of a lithium-ion polymer battery." *Journal of Power Sources* 189.1 (2009): 841–846.

[35] Childs, P. R. N., J. R. Greenwood, and C. A. Long. "Review of temperature measurement." *Review of scientific instruments* 71.8 (2000): 2959–2978.

[36] Kim, Jikwang, et al. "A study on the fabrication of an RTD (resistance temperature detector) by using Pt thin film." *Korean Journal of Chemical Engineering* 18.1 (2001): 61–66.

[37] 장성훈, "3차원 집적회로에서의 열 전달 특성 분석 및 열 분산 효과를 높일 수 있는 구조 설계", 서울대학교 석사학위논문, 2013.

[38] 최웅규, "단층 구조에서 두꺼운 그래핀을 이용한 효과적인 열 분산 연구", 서울대학교 석사학위논문, 2014

[39] 박민수, "그래핀을 이용한 열 분산 효과 향상용 구리 기반 복합소재." 서울대학교 석사학위논문, 2015

Abstract

Integrated Thermal Management with Thermal Mapping and Heat Dissipation

Wonha Jeon

Department of Electrical
And Computer Engineering
The Graduate School
Seoul National University

Every electronic device and circuit generates heat during operation. As the industry is developing, the devices and circuits have become miniaturized and had high performances as well as functionalities. Therefore, the heat generated per unit volume increases consistently. These overheated devices lead to lower

lifetime and reliability. Additionally, the heat can cause the malfunction of devices, so cooling technology and real-time temperature monitoring are necessary, in order to maintain the stable temperature.

Lithium ion battery which is used as the power of electric vehicles has superior features: high energy density, high voltage, low self-discharging rate, and high stability. However, this battery is sensitive to operating temperature and heat from chemical reaction inside battery might affect the performance, energy efficiency, and stability of lithium ion cell. To solve the temperature related problem, preventing overheating by sensing the surface or the inside of the battery, direct cooling method, and using high thermal conduction material to efficient dissipation of the heat are studied. In addition, for effective solution in practical application, heat management technique, such as surface temperature mapping and heat spreading should come by together.

This paper shows the structure containing integrated graphite heat spreader with high heat conductivity and the sensor arrays with surface temperature mapping to manage the surface heat of

lithium ion battery. Through the heat transfer simulation, the maximum and minimum temperature difference depending on the thickness of graphite and silicon are verified. The same simulation is done with and without the graphite, so that the cooling performance of graphite is confirmed. The graphite heat spreader decreases not only the temperature of heat source but also temperature difference at the surface.

For temperature sensor, a platinum measurement resistor is made through the Inter-university Semiconductor Research Center, in Seoul National University, and, as a heat spreader, the $25\ \mu\text{m}$ graphite sheets are glued to the surface. The manufactured device on the surface of battery is tested in Korea Electronics Technology Institute, to measure the performance of heat radiation and the temperature by discharge test. When battery discharges with 7C , the decreased maximum temperature is 8.9°C and Also battery interior temperature difference decreased. In conclusion, the temperature sensor array is able to measure the temperature distribution at the surface with high accuracy. The graphite heat spreader increases the uniformity of the surface temperature and

shows satisfactory cooling and heat dissipation result.

Keywords : Thermal management, Thermal mapping, Heat dissipation, Heat transfer simulation

Student Number : 2014-21677