

고출력 18650 리튬이온 배터리의 발열인자 해석 및 실험적 검증

강태우¹, 유기수^{1†}, 김종훈^{2†}

Analysis and Experiment Verification of Heat Generation Factor of High Power 18650 Lithium-ion Cell

Taewoo Kang¹, Kisoo Yoo^{1†}, and Jonghoon Kim^{2†}

Abstract

This study shows the feasibility of the parameter of the 1st RC parallel equivalent circuit as a factor of the heat generation of lithium-ion cell. The internal resistance of a lithium-ion cell consists of ohmic and polarization resistances. The internal resistances at various SOC's of the lithium-ion cell are obtained via an electrical characteristic test. The internal resistance is inversely obtained through the amount of heat generated during the experiment. By comparing the resistances obtained using the two methods, the summation of ohmic and polarization resistances is identified as the heating factor of lithium-ion battery. Finally, the amounts of heat generated from the 2C, 3C, and 4C-rate discharge experiments and the COMSOL multiphysics simulation using the summation of ohmic and polarization resistances as the heating parameter are compared. The comparison shows the feasibility of the electrical parameters of the 1st RC parallel equivalent circuit as the heating factor.

Key words: LIB(Lithium-ion Battery), Internal resistance, ECM(Equivalent Circuit Model), Heating factor, Irreversible heat

1. 서 론

최근 리튬 이온 배터리는 높은 밀도의 에너지, 높은 출력, 낮은 자가 방전율과 긴 수명으로 인해 다양한 전기 자동차(Electric Vehicles, EV)나 하이브리드 자동차(Hybrid Electric Vehicles, HEV)의 전원 공급원으로 사용되고 있다. 전기 자동차의 운행 중 가속상황에서 순간적으로 높은 출력의 전류를 요구하기 때문에 고출력의 배터리가 사용되고 있다. 가속 상황 시 높은 전류가 배터리 셀로 인가된다. 결과적으로 배터리의 발열이 이루어지며 배터리의 온도가 증가한다^{[1]-[3]}. 이는 배터리의

열화와 안전에 악영향을 준다. 따라서 높은 C-rate에서의 리튬 이온 배터리의 정확한 발열량 추정과 예측이 요구된다.

배터리의 발열은 배터리 성능에 뿐만 아니라 사용자 안전성에도 영향을 준다. 배터리의 발열을 해석 및 추정하기 위해서는 대표적인 3가지의 모델링이 있다. 1) 전기화학-열적 모델; 2) 전기-열적 모델; 극한의 상황에서 이루어지는 3) 열 폭주 모델이 있다. 전기화학적 모델은 배터리 내부에서 이루어지는 전기화학적 반응을 통해 배터리의 발열을 해석한다. 이는 리튬이온의 농도, 전류 밀도 및 온도 분포가 결합되어 해석 시 계산 량의 부담이 크다^[4]. 하지만 전기-열적 모델은 전기화학-열적 모델을 간소화한 모델로 화학적 파라미터들을 최소화하며 SOC별 상수로 취급하여 계산 량의 부담이 적다^[5]. 따라서 간단한 식과 파라미터를 이용한 리튬이온 셀의 발열량 예측이 가능하다. 열 폭주 모델은 과 충전, 과방전과 같은 극한의 조건에서의 배터리 셀의 열 분포를 확인하는데 사용한다. 이는 배터리 셀의 열 폭주 임계점과 고장인자 확인에 사용된다^[6].

본 논문에서는 전기적 특성 실험을 통한 저항과 방전 간 발생한 열을 통해 추출한 저항을 비교하여 리튬이온 배터리의 1차 RC 병렬 등가회로의 저항이 발열 인자로서

Paper number: TKPE-2019-24-5-8

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

^{1†}Corresponding author: kisooyoo@yu.ac.kr, Department of Mechanical Engineering, Yeungnam University
Tel: +82-53-810-2445 Fax: +82-53-810-2445

^{2†}Corresponding author: whdgn0422@cnu.ac.kr, Department of Electrical Engineering, Chungnam National University
Tel: +82-42-821-7606 Fax: +82-42-821-7606

¹Department of Electrical Engineering, Chungnam National University

Manuscript received Mar. 12, 2019; revised Mar. 28, 2019; accepted May 14, 2019

— 본 논문은 2018년 추계학술대회 우수추천논문임

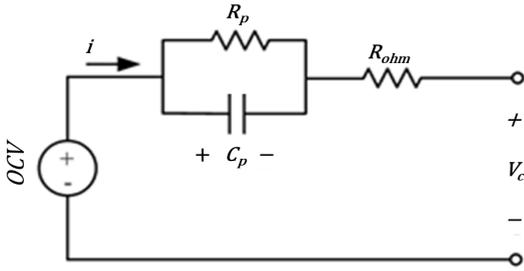


Fig. 1. Equivalent electrical circuit model of a lithium-ion cell.

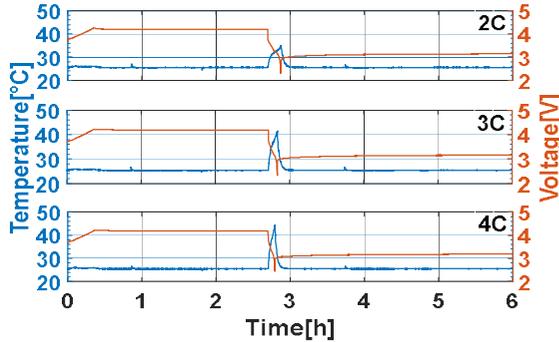


Fig. 2. Discharging voltages and temperatures with various C-rates. (2C, 3C, 4C)

확인됨을 보였다. 따라서 리튬이온 배터리의 발열량 추정 및 예측 시 1차 RC병렬 등가회로의 저항이 리튬이온 배터리의 발열 파라미터로 적용이 가능하다. 마지막으로 전기적 특성실험을 통해 추출된 저항을 발열인자로 사용한 다중 물리해석 프로그램 COMSOL 시뮬레이션을 이용하여 단일 셀 2(5A), 3(7.5A), 4(10A)C 방전 간 발열을 추정하였고 실험간 발열량과 비교하여 추정의 타당성을 보였다.

2. 고출력 18650 리튬이온 배터리의 발열 인자 해석 및 실험적 검증

2.1 Electro-thermal Equations

최근 배터리 열 모델은 에너지 균형을 기반으로 간소화 되었다^[8]. 배터리 내부에서 발생하는 총 발열량 q_{cell} 은 비가역 발열(Irreversible heat)인 q_{irrev} 와 가역 발열(Reversible heat)인 q_{rev} 의 합으로 식 (1)과같이 표현된다. 세부적으로 비가역 발열인 q_{irrev} 는 식 (2), 가역 발열인 q_{rev} 은 식 (3)과 같이 정의된다. 식 (2)에서 i 는 전류, R 은 셀 저항을 의미한다. 식 (3)은 엔트로피의 변화량 (ΔS)과 페러데이 상수(F)와 리튬이온 배터리의 반응 시 이동되는 전자의 수(n), 셀 온도(T_{cell})가 결합된 식을 나타낸다. 가역 발열을 얻기 위해선 앞에서 말한 화학적 파라미터가 필요하다. 이러한 화학적 파라미터들은 실험을 통해서 얻어지며 많은 연구에 의해서 밝혀졌다^[9]. 하지만 식 (2), (3)에서 보이듯 총 발열(q_{cell})에서 비가역 발열이 가역 발열 보다 높은 전류(C-rate)에서 지배적이

다. 본 논문에서는 높은 C-rate에서의 발열량 추정을 하며 가역 발열에 대한 항은 무시할 수 있을 만큼 작다. 또한 측정되는 셀에서 측정되는 총 발열량(q)은 방전 시 생성되는 발열량(q_{cell})과 유지되는 외부 온도(T_{amb})와 대류조건에 의해 발생하는 열 손실(q_{diss})의 합으로 표현된다. 열 손실은 식 (4)와 같이 뉴턴-냉각법칙을 사용하며 A 는 면적, h 는 열전달 계수를 의미한다. 셀 표면에서 측정되는 총 발열량은 식 (5)로 식 (2), (3), (4)의 합과 같다.

$$q_{cell} = q_{irrev} + q_{rev} \quad (1)$$

$$q_{irrev} = i^2 \cdot R \quad (2)$$

$$q_{rev} = i \cdot T_{cell} \cdot \Delta S / (n \cdot F) \quad (3)$$

$$q_{diss} = A \cdot h (T_{cell} - T_{amb}) \quad (4)$$

$$q = q_{cell} + q_{diss} \quad (5)$$

2.2 전기적 등가 회로 모델

리튬이온 배터리의 전기적 등가 회로 모델을 구성할 때에는 최대한 간단할수록 RC병렬회로의 개수가 적어 계산의 부담이 적다. 다양한 리튬이온 배터리의 등가회로 중 NCA계열 배터리는 그림 1에서 보이듯 1차 RC 등가회로 표현할 수 있다^{[7],[10]}. 1차 RC 등가회로는 그림 1에서 보이듯 개방전압(Open Circuit Voltage, OCV), 오믹저항(Ohmic resistance, R_{ohm}), 분극저항(Polarization resistance, R_p), 커패시턴스(C_p)로 구성되어 있다.

본 논문에서는 셀의 발열량 파라미터인 내부저항(R)을 전기적 등가 회로모델과 연결 지어 해석하였다. 이후 2.4절에서 식 (2)와 식 (4)을 이용하여 방전 간 발열량을 통해 추출한 저항(R)과 전기적 특성을 통하여 추출한 저항과 비교하여 1차 RC 등가회로의 오믹저항(R_{ohm})과 분극저항(R_p)의 합이 발열인자로서 타당함을 증명하였다.

2.3 전기적 특성 및 발열 실험

본 논문에서는 3개의 18650 HE4 NCA($LiNiCoAlO_2$) 배터리를 사용하여 전기적 특성 및 발열 실험을 하였고 모든 실험은 항온 챔버에서 진행하였다. 유지되는 챔버의 온도는 $(25.1 \pm 0.1)^\circ\text{C}$ 이다. 그림 2는 각 C-rate별 완전 방전 간 측정된 전압과 온도를 보여준다. 3개의 배터리가 각 2C, 3C, 4C-rate의 방전 간 발열량을 측정하기 위해 0.1초의 데이터 샘플링과 충전 전류 0.5C(1.25A), 컷오프 전압 4.2V까지 CC(Constant Current)-CV(Constant Voltage)충전을 하였다. 완전 충전 이후에는 셀 내·외부 온도와 내부 화학반응의 안정화가 충분히 이루어 질수 있는 충분한 휴지시간이 필요하기 때문에 본 실험에서는 완전 충전 이후 3시간의 휴지시간을 설정하였다. 완전 충전 이후 각 C-rate별, 컷오프 전압 2.5V까지 완전 방전하였다. 그림 3에서 보이듯 완전 방전 시점에서

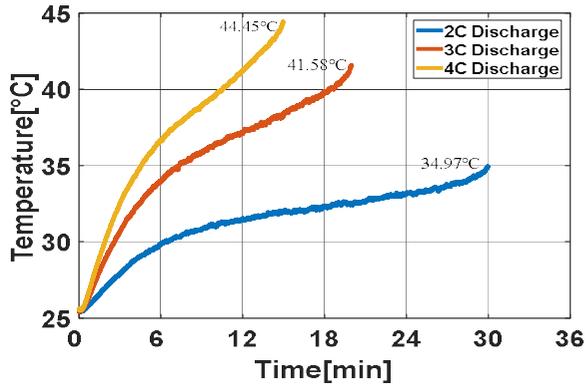
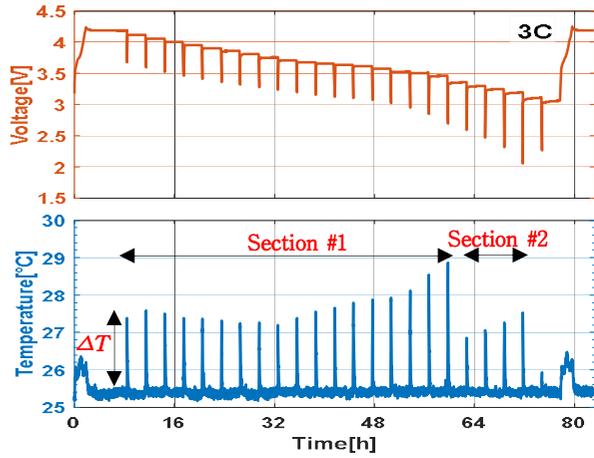
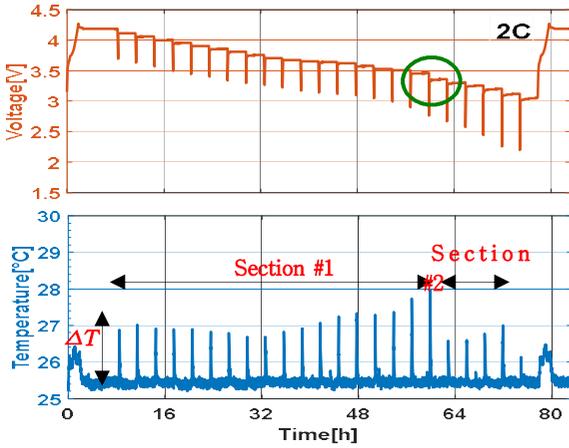


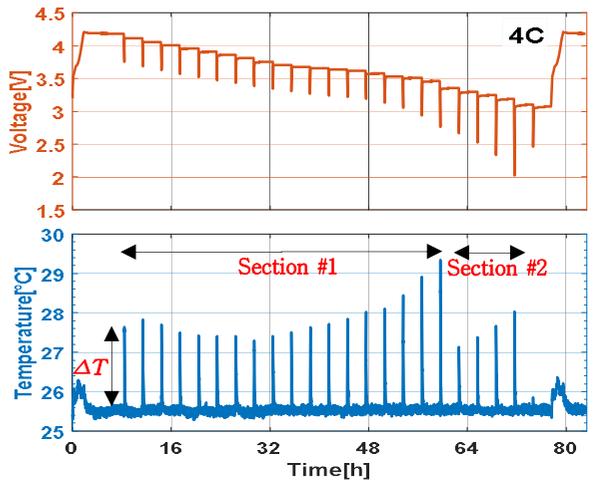
Fig. 3. Cell's surface temperature during discharging from fully-charged state to fully-discharged state with various C-rates. (2C, 3C, 4C)



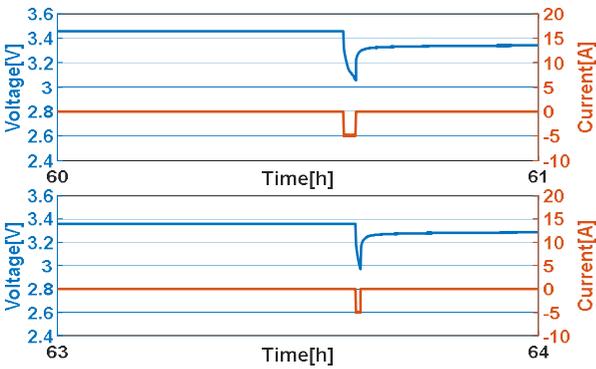
(a) Voltage and cell's surface temperature during OCV test (3C)



(a) Voltage and cell's surface temperature during OCV test (2C)



(b) Voltage and cell's surface temperature during OCV test (4C)



(b) Enlarged figure of the circled voltage part

Fig. 4. Cell's surface temperature with respect to the discharging voltage during 1C-rate OCV test and enlarged figure of voltage part.

셀의 표면 온도는 2C 34.97°C, 3C 41.58°C, 4C 44.45°C로 측정되었다. 완전 방전 이후 3시간을 휴지하였다.

OCV(Open Circuit Voltage)테스트는 일정한 방전에 따라 배터리의 사용자가 원하는 SOC에서의 내부 변화와 파라미터를 추출하기 위한 실험이다. 본 논문에서는

Fig. 5. Cell's surface temperature with respect to the discharging voltage during OCV test.

전기적 실험을 통하여 얻어진 SOC별 오믹저항(R_{ohm})과 분극저항(R_p)의 합이 발열 파라미터인 저항(R)로써 적합성을 보기 위한 OCV 테스트를 진행하였다. 0.1초의 주기로 데이터를 샘플링 하였고, 그림 4(a), 5(a), (b)와 같이 컷오프 전압 4.2V까지 0.5C의 CC-CV 완전 충전하였다. 완전 충전 이후엔 3시간의 휴지시간을 설정하였다. C-rate별로 SOC 100%~10%구간에선 SOC 5%씩 (Section #1), SOC 10%~2%구간에선 SOC 2%씩 (Section #2) 컷 오프 전압 없이 방전하며 OCV 테스트를 진행하였다. 그림 4(b)는 그림 4(a)의 원형표시 부분인 SOC 5%씩 방전하는 SOC 100%~10%구간(Section #1)의 마지막 방전과 SOC 2%씩 방전하는 SOC 10%~2%구간(Section #2)의 첫 번째 방전이 이루어지는 구간을 확대하여 보여주고 있다. 매 방전 이후에는 셀 내부 온도와 내부 화학반응의 안정화가 충분히 이루어 질 수 있는 3시간의 휴지시간을 설정하였다. 낮은 SOC구간에서

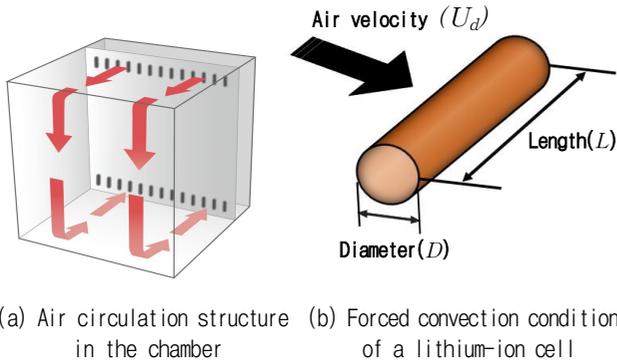


Fig. 6. Scheme of air circulation of chamber and forced convection condition of a lithium-ion cell.

저항은 비선형적 특성을 지니기 때문에 정확한 저항 측정을 위하여 낮은 SOC 구간(SOC 10%~2%, Section #2)에서 SOC 2% 간격으로 방전을 수행하였다. 또한 마지막 SOC 2%에서 컷오프 전압 2.5V까지 방전을 하였다. 그림 4(a), 5(a), (b)는 각각 2C, 3C, 4C의 방전전류를 적용한 OCV 테스트의 프로파일을 나타낸다. 전기적 특성 실험을 진행함과 동시에 온도측정도 같이 진행하였다. 방전 시 전류가 인가되는데 전류가 인가되는 시간 동안 발열이 진행됨을 보이고 있다. SOC 10%~SOC 2%구간에서의 방전 발열량이 SOC 100%~SOC 10% 구간보다 작은 것을 보인다. 이는 SOC 100%~SOC 10%까지는 SOC 5%씩, SOC 10%~SOC 2%까지는 2%씩 방전을 함으로써, 전류가 인가되는 시간의 차이로 인한 발열량의 차이이다. Section #1에서 SOC 5%씩 방전되는 방전시간은 각 C-rate별로 90초(2C), 60초(3C), 45초(4C)이며, Section #2의 SOC 2%씩 방전되는 방전시간은 각 C-rate별로 36초(2C), 24초(3C), 18초(4C)로 설정하였다. SOC 2% 상태에서 마지막 컷오프 전압 2.5V까지의 방전 간 생성되는 열이 상대적으로 작다. 이러한 이유로는 높은 C-rate의 전류가 인가되었을 때 전압 강하가 크게 일어나 컷오프 전압인 2.5V까지 빠르게 도달되어 전류가 인가되는 시간이 앞서 보인 2%씩 방전되는 시간보다 짧아 발열량이 작게 측정되었다. 이를 통해 이후 2.4절에서는 열적 특성들을 통해 발열량에서 저항 (R)을 추출하여 전기적 특성을 통하여 얻어진 저항 값과 비교하여 유사성을 보였다. 따라서 1차 RC 등가회로의 저항이 리튬이온배터리의 발열파라미터로써 사용될 수 있음을 보인다.

2.4 저항 추출 방법에 따른 SOC별 내부 저항 비교

배터리 내부 저항을 확인하는 방법에는 다양한 방법이 있다. 직렬 저항, 발열량, 교류전류를 이용하는 등 다양한 방법이 존재한다^[11]. 1차 RC 등가회로를 이용하여 추출한 직렬 저항과 OCV 실험 간 발열 값과 식 (2), (4)을 이용하여 추출한 저항 값을 비교하여 리튬이온 배터리

TABLE I
RELATION BETWEEN C AND n ACCORDING TO REYNOLDS(Re)

Re	C	n
0.4~4	0.989	0.330
4~40	0.911	0.385
40~4000	0.683	0.466
4000~40000	0.193	0.618
40000~400000	0.0266	0.805

TABLE II
 ΔT VALUES OF FIG. 4(a) AND FIG. 5(a), (b)

SOC	2C[°C]	3C[°C]	4C[°C]
100% → 95%	1.78	2.29	2.54
95% → 90%	1.92	2.48	2.73
90% → 85%	1.81	2.40	2.60
85% → 80%	1.79	2.29	2.39
80% → 75%	1.79	2.27	2.33
75% → 70%	1.73	2.21	2.31
70% → 65%	1.69	2.14	2.31
65% → 60%	1.59	2.16	2.19
60% → 55%	1.58	2.09	2.31
55% → 50%	1.73	2.29	2.41
50% → 45%	1.81	2.45	2.53
45% → 40%	1.97	2.56	2.62
40% → 35%	2.14	2.69	2.75
35% → 30%	2.24	2.79	2.93
30% → 25%	2.18	2.83	3.00
25% → 20%	2.27	3.01	3.34
20% → 15%	2.63	3.44	3.82
15% → 10%	2.87	3.76	4.24
10% → 8%	1.49	1.75	2.03
8% → 6%	1.50	1.95	2.28
6% → 4%	1.68	2.16	2.56
4% → 2%	1.90	2.42	2.92

의 1차 RC 전기적 등가회로의 저항이 리튬 이온 셀의 발열인자임을 확인할 수 있다.

실험을 통해 측정된 발열량을 기반으로 식 (2)의 저항 (R)성분을 확인하기 위해서는 셀 외부 대류 조건에 의해 소멸되는 발열량, 식 (4)의 영향을 고려해야한다. 식 (4)는 뉴턴-냉각 법칙으로 누셀 수 상관관계(Nusselt number correlations)에 기반을 두고 있다^{[13],[14]}. 배터리에 의한 열 발생은 항온 챔버(25.1°C)에 의해 강제대류 조건을 형성한다. 항온 챔버 내부 공기의 흐름의 간단한 모식도는 그림 6(a)와같이 나타내었다. 챔버 내부 공기의 흐름에 의한 배터리의 강제대류 조건의 모식도는 그림 6(b)에 나타내며 U_d 는 공기의 속도 L 과 D 는 배터리의 높이, 지름을 나타낸다.

$$q = m \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (6)$$

$$h = Nu \cdot k/D \quad (7)$$

$$Nu = C \cdot Re^n \cdot Pr^{0.33} \quad (8)$$

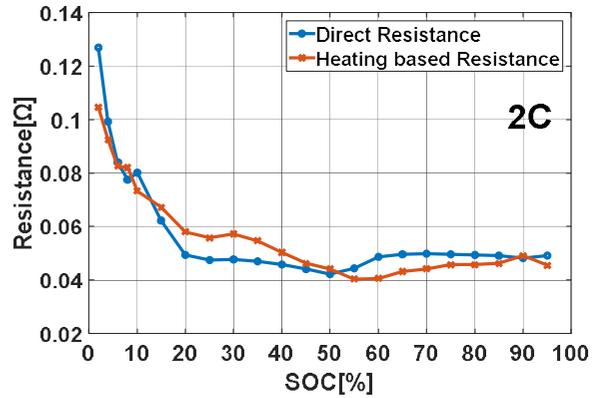
$$Pr = \nu/a \quad (9)$$

$$Re = U_d \cdot D/\nu \quad (10)$$

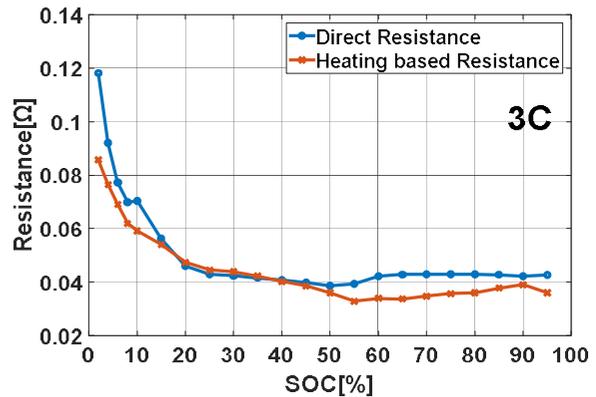
OCV 테스트 간 방전되었을 때 생성되는 열의 최고점 (T_{cell})과 항온 챔버에 의해 유지되는 온도(T_{amb} , 25°C)의 차이를 그림 4(a)에 표시된 ΔT 라 하였을 때 식 (6)에 의해 방전 간 생성된 열을 구할 수 있다. ΔT 는 표 2에 명시하였다. 이때 c_p 는 리튬이온 배터리의 비열, m 은 질량이다. 방전 간 측정되는 온도는 배터리 셀의 발열과 강제대류에 의해 손실되는 열이 합해진 값이다. 측정된 온도가 식 (6)에 의해 구해진 최종 값으로 볼 때, 역으로 측정된 온도에서 식 (2)와 (4)를 이용하여 저항성분 (R)을 구할 수 있다. 식 (4)의 h 는 열전달 계수로 식 (7)을 통하여 결정지을 수 있다. Nu 는 누셀수, k 는 유체의 열전도(Thermal conductivity)도, D 는 배터리의 지름이다. 누셀수는 식 (8)에 의해 결정되는데 Re 는 레이놀즈수, Pr 은 프란틀 수이고 C 와 n 은 변수로써 레이놀즈수가 변함에 따라 달라진다. 레이놀즈수에 따라 변하는 C 와 n 의 값은 표 1에 명시하였다^[13]. Re 와 Pr 은 ν (Kinematic viscosity, 유체의 점도), a (Thermal diffusivity, 열확산률)와 같은 유체의 고유 특성 값을 이용한 식 (9)과 (10)를 통하여 구할 수 있다. 본 논문에서 강제 대류에 의하여 열손실이 일어나는 매개체는 공기로 특성 값은 공기의 특성 값으로 제한할 수 있으며 사용자의 챔버의 사양에 따라 다르지만 본 실험의 공기 유속(U_d)은 3m/s이며, 표 3에 명시하였다. 리튬이온 배터리의 비열, 열전도도와 같은 열적 파라미터는 다양하게 연구 되어 왔으며 표 3에 명시하였다^[12]. 그림 7(a), (b), (c)는 전기적 특성을 이용하여 추출한 저항과 발열량을 기반으로 추출한 저항을 비교하였다. 그림 7(a), (b), (c)는 전기적 특성을 이용하여 구해진 저항과 유사한 경향성을 보인다. 2C와 3C의 OCV 실험간 발생한 열을 기반으로 저항을 추출한 그림 7(a), (b)와 다르게 4C OCV 실험간 발생한 열을 기반으로 저항을 추출한 그림 7(c)는 유사한 경향성을 보여주지만 평균오차 0.012Ω으로 큰 오차를 보이고 있다. 이러한 이유는 실험 간 측정된 온도는 셀의 표면 온도로 셀 내부 중앙의 온도 분포의 불균형의 영향이 있다. 셀의 발열간 표면과 내부온도의 불균형은 높은 C-rate에서 고조된다^{[15],[16]}. 본 논문에서 OCV 테스트 간 측정된 온도는 셀의 표면온도이다. 셀의 표면과 내부의 온도 불균형의 이유로 2가지가 대표적이다. 첫 번째로 외부의 강제대류에 의한 열이 손실, 두 번째로 셀의 내부에서 일어나는 발열량이 셀의 표면까지 전달되는

TABLE III
THERMAL PROPERTIES OF LITHIUM-ION CELL AND AIR

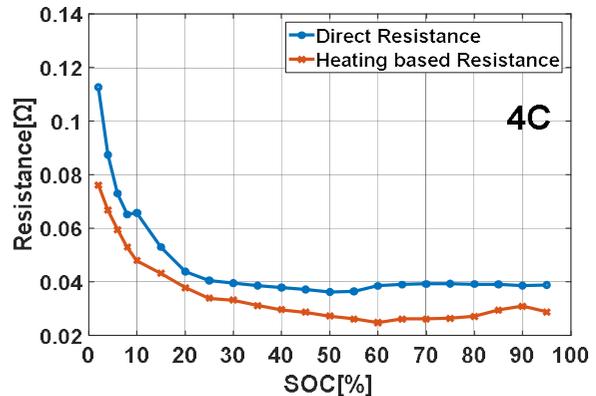
Battery	Density [kg/m ³]	2669.5
	Specific Heat [J/kg °C]	950±20
	Thermal Conductivity [W/mK]	3
Air (at 25°C)	Kinematic Viscosity, ν [m ² /s]	0.00001568
	Thermal Diffusivity, a [m ² /s]	0.00002207
	Thermal Conductivity, k [W/m°C]	0.02624
	Air Velocity, U_d [m/s]	3



(a) 2C



(b) 3C



(c) 4C

Fig. 7. Comparison between the direct resistance and heating based resistance at variable SOC points.

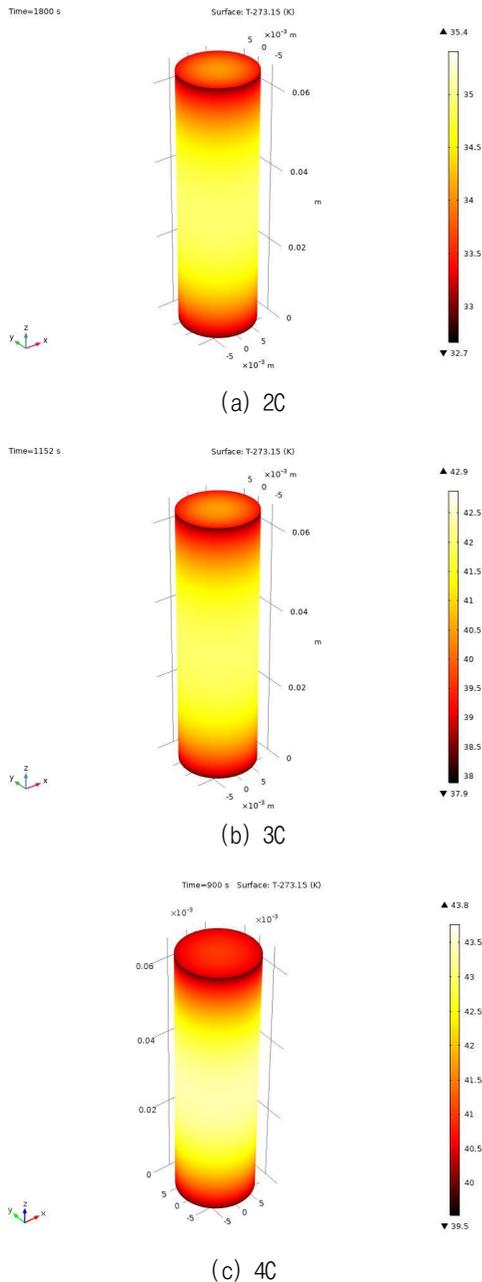


Fig. 8. 3D plots of the simulation results of the heat generation with various C-rates during discharge.

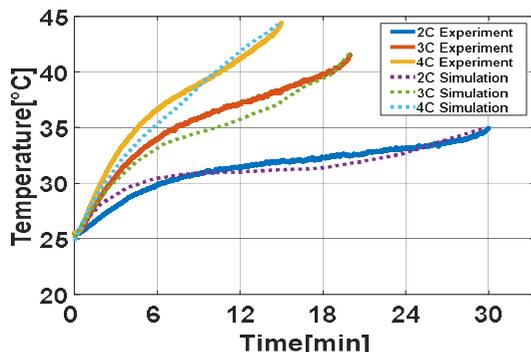


Fig. 9. Comparison between simulation and experiments of the heat generation with various C-rates.

시간의 차이이다. 본 논문에서는 항온 챔버에 의해 형성되는 강제 대류효과를 고려를 하였다. 높은 C-rate에서는 셀에 전류가 인가되어 내부에서 발열되는 시간이 셀의 표면까지 전도되어 측정되는 시간보다 짧아 내부에서 발열이 완료되어 내부에서의 냉각과 외부에서의 냉각이 동시에 진행되어 표면에서 측정되는 온도가 실제 발열량에 의하여 예상되는 온도보다 높은 C-rate에서 작게 나타난다. 이러한 셀의 온도분포 불균형으로 인하여 그림 7(c)에 나타는 오차이다.

실험간 측정된 발열량 기반으로 추출한 저항(R)과 전기적 특성을 이용하여 1차 RC회로에서의 오믹저항(R_{ohm})과 분극저항(R_p)의 합은 높은 유사성과 일치성을 보인다. 따라서 비가역 발열인 식 (2)의 저항(R)은 전기적 특성을 이용하여 산출될 수 있는 R_{ohm} 과 R_p 의 합으로 사용함은 타당하다. 이후 2.5 절에서 R_{ohm} 과 R_p 의 합을 발열인자로 사용한 시뮬레이션과 그림 3에서 보인 C-rate별 방전 실험 간 생성되는 열과 비교하였다.

2.5 시뮬레이션과 실험 비교

본 논문에서는 1차 RC 등가회로의 SOC별 저항 성분을 이용한 COMSOL을 사용하여 C-rate별 방전 간 발열 시뮬레이션을 진행하고, 실험을 통하여 얻어진 그림 3에서 보인 C-rate별 발열 값을 비교하여 시뮬레이션을 검증하였다. 리튬이온 셀의 각 C-rate별 발열 시뮬레이션은 화학적 파라미터를 이용한 발열이 아닌 배터리의 열적 특성 값과 항온 챔버 내부에서 배터리가 방전될 때 갖는 환경 조건을 이용하였다. 배터리의 내부는 표 3에 나타난 열적 특성 값으로 이루어진 고체로 간소화하였고 배터리가 SOC별로 달라지는 저항 값을 적용한 고체이다. 저항 값의 적용 방식은 각 C-rate별 완전 방전되는 시간(2C-1800s, 3C-1200s, 4C-900s)을 SOC별로 나누어 전기적 실험을 통해 추출된 SOC별 저항을 적용하였다. 본 시뮬레이션은 화학적 파라미터와 없이 원리 없이 간단한 식과 파라미터로 리튬이온 배터리의 발열량 추정이 가능함을 보인다.

그림 8은 전기적 특성을 이용하여 추출한 SOC별 내부저항을 식 (2)의 발열 파라미터저항(R)으로 적용하여 2C(5A) 방전구간에서의 발열 시뮬레이션 결과를 3D 형상으로 나타내었다. 그림 9는 그림 3의 시간에 따른 시뮬레이션의 발열과정을 실제 2C, 3C, 4C 방전 실험에서의 발열 과정과 비교하였고 평균 오차는 1%미만이다. 본 시뮬레이션의 검증을 통하여 리튬이온 배터리의 발열인자인 저항(R)은 1차 RC회로에서의 오믹저항(R_{ohm})과 분극저항(R_p)의 합으로 사용함의 타당성을 확인하였다.

3. 결론

본 논문에서는 18650 단일 셀의 2, 3, 4C-rate 발열량을 추정하기 위한 발열인자 저항을 전기적 특성으로 추

출된 SOC별 저항으로 적용 가능함을 보였다. 전기-열 모델의 파라미터인 저항을 OCV 테스트 기반으로 SOC 5%, 2%별 해당하는 저항과 실험간 발열량에서 역으로 추출한 저항을 비교하여 SOC별 저항이 발열인자로서 타당함을 보였다. 마지막으로 SOC별 저항을 이용하여 리튬이온 배터리의 2, 3, 4C-rate 방전 발열 시뮬레이션 결과와 실험값의 높은 정확성과 유사성을 보인다. 따라서 리튬이온 배터리의 발열인자 저항을 1차 RC병렬 등가회로의 저항을 사용함은 타당하다.

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

References

- [1] M. Densing, H. Turton, and G. Bäuml, "Conditions for the successful deployment of electric vehicles-A global energy system perspective," *Journal of Energy*, Vol. 47, pp. 137-149, 2012.
- [2] K. Hedegaard, H. Ravn, N. Juul, and P. Meibom, "Effects of electric vehicles on power systems in northern Europe," *Journal of Energy*, Vol. 48, pp. 356-638, 2012.
- [3] X. Hu, L. Chaudhari, S. H. Lin, S. Stanton, S. Asgari, and W. Y. Lian, "A state space thermal model for HEV/EV battery using vector fitting," in *Proc. IEEE ITEC*, pp. 1-8, 2012.
- [4] L. H. Saw, Y. Ye, and A. A. O. Tay, "Electrochemical - thermal analysis of 18650 lithium iron phosphate cell," *Journal of Energy Conversion and Management*, Vol. 75, pp. 162-174, 2013.
- [5] X. Lin, H. E. Perez, S. Mohan, J. B Siegel, A. G. Stefanopoulou, Y. Ding, and M. P. Castanier "A lumped-parameter electro-thermal model for cylindrical batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 257, pp. 1-11, 2014.
- [6] Q. Wang, P. Ping, and X. Zhao, "Thermal runaway caused fire and explosion of lithium ion battery," *Journal of Power Sources*, Vol. 208, pp. 210-224, 2012.
- [7] X. S. Hu, S. B. Li, H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, Vol. 198, pp. 359-367, 2012.
- [8] D. Bernardi, "A general energy balance for battery systems," *Journal of the Electrochemical Society*, 1985.
- [9] G. Liu, M. Ouyang, L. Lu, and L. Jianqiu, "Analysis of the heat generation of lithium-ion battery during charging and discharging considering influencing factors," *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol. 116, pp. 1001-1010, 2014.
- [10] L. P. Gregory, *Battery management systems: Battery modeling*, Boston: Artech House, 2015.
- [11] H. G. Schweiger, "Comparison of several methods for determining the internal resistance of lithium ion cells," *Journal of Sensors and Sensor Systems*, Vol. 10, pp. 5604-5625, 2010.
- [12] K. K. Parsons, "Design and simulation of passive thermal management system for lithium-ion battery packs on an unmanned ground vehicle," M.S. thesis, Dept. Mech, California Univ, California, USA, 2012.
- [13] F. P. Incropera, *Principles of Heat and Mass Transfer*, WILEY, 2014
- [14] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10th ed., McGraw Hill Book Company, New York, 2009
- [15] R. R. Richardson, P. T. Ireland, and D. A. Howey, "Battery internal temperature estimation by combined impedance and surface temperature measurement," *Journal of Power Sources*, Vol. 265, pp. 254-261, 2014.
- [16] C. Forgez, D. V. Do, G. Friedrich, M. Morcrette, and C. Delacourt, "Thermal modeling of a cylindrical LiFePO4 /graphite lithium-ion battery," *Journal of Power Sources*, Vol. 195, pp. 2961-2968, 2010.



강태우(姜太宇)

1995년 2월 10일생. 2014년~현재 충남대 전기공학과 학부과정.



유기수(庾麟壽)

1980년 6월 5일생. 한양대 기계공학부 졸업. 2006년 한국과학기술원 기계공학과 졸업(석사). 2015년 워싱턴주립대 기계공학과 졸업(공학박). 2016년 미국에너지기술연구소 박사후연구원. 2016년~현재 영남대 기계공학부 조교수.



김종훈(金鍾勳)

1979년 4월 22일생. 2005년 충남대 정보통신공학부 전기전자전파전공 졸업. 2012년 서울대 전기컴퓨터공학부 졸업(공학박;석박통합과정). 2012년~2013년 삼성SDI ES사업부 책임연구원. 2013년~2016년 조선대 전기공학과 조교수. 2016년~현재 충남대 전기공학과 조교수. 2018년~현재 한국과학기술원 친환경센서스마트자동차연구센터 겸직교수. 2015년~현재 JPE Associate Editor. 2016년~현재 당 학회 편집위원. 2017년 당 학회 학술위원. 2019년~현재 IEEE Senior Member.