

# 교류 리플이 21700 리튬 이온 배터리의 전기적 건강 상태 열화에 미치는 영향 분석

## Analysis of the Effect of Alternating Current Ripple on Electrical State of Health Degradation of 21700 Lithium-ion Battery

곽 봉 우<sup>\*★</sup>

Bongwoo Kwak<sup>\*\*★</sup>

### Abstract

In this paper, the effect of AC ripple on the lifetime of lithium-ion batteries is experimentally analyzed. Bidirectional power conversion system(PCS) is used to increase the efficiency of energy storage systems (ESS). When connected to the grid, a current ripple with a frequency twice the grid frequency is applied to the battery due to its structure. Therefore, to analyze the effect of AC ripple on Li-ion battery aging, cycle life test are performed by applying charge/discharge profiles of DC current and DC+AC current ripple specifications. Based on the experimental results, direct current internal resistance (DCIR), incremental capacitance (IC), and surface temperature were analyzed. As a result, it is confirmed that AC ripple does not directly affect degradation and that battery degradation slows down after a certain cycle. These results can serve as a guideline for optimizing filters to reduce ripple on the battery side in applications where AC ripple occurs.

### 요 약

본 논문에서는 AC 리플이 리튬 이온 배터리의 수명에 미치는 영향을 실험적으로 분석한다. 에너지 저장 시스템(ESS)의 이용 효율을 높이기 위해 양방향 전력변환시스템(PCS)이 사용되며, 계통 연계 시 구조상 계통 주파수의 2배의 주파수를 갖는 전류 리플이 배터리에 인가되게 된다. 따라서, AC 리플이 Li-ion 배터리의 노화에 미치는 영향에 대해 분석하기 위해 DC 및 DC+AC 리플 사양의 충전/방전 프로파일을 적용하여 노화 실험이 수행되었다. 실험 결과를 바탕으로 직류 내부 저항(DCIR), 증분 용량(IC), 표면 온도를 분석하였다. 결과적으로 AC 리플이 노화에 직접적으로 영향을 미치지 않으며 특정 주기 이후 배터리 노화가 둔화되는 것을 확인하였다. 이러한 결과는 AC 리플이 발생하는 어플리케이션에서 전류 리플을 줄이기 위해 적용된 필터를 개선하는 데 도움이 될 수 있다.

*Key words : AC ripple, State of Health, Li-ion battery, Cycle life test, Degradation*

\* Dept. of of Automotive Materials & Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology

★ Corresponding author

E-Mail : bwkwak11@kitech.re.kr, Tel : +82-62-600-6241

※ Acknowledgment

This study has been conducted with the support of the Korea Institute of Industrial Technology as "Development of core technologies of AI based self-power generation and charging for next-generation mobility (KITECH EH-23-0013)". Manuscript received Nov. 24, 2023; revised Dec. 12, 2023; accepted Dec. 13, 2023.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

## I. 서론

에너지저장시스템(ESS)은 부하 변화에 따라 급변하는 전력망에 안정적으로 전력을 공급할 수 있어 많이 사용되고 있다[1]. 리튬 이온 배터리는 높은 전력 및 에너지 밀도, 긴 수명 주기 특성으로 인해 ESS에 많이 사용되고 있다[2]. 직렬 및 병렬 조합이 용이한 원통형 리튬 이온 배터리(18650/21700)가 많이 사용된다.

ESS의 에너지를 효율적으로 사용하기 위해서는 양방향 전력변환시스템(PCS)이 필수적이다[3]. 계통 연계형 PCS에서는 구조적으로 그리드 측 전류주파수의 2배에 해당하는 맥동 성분이 DC 링크측에서 발생한다. 그 결과, DC 링크 측과 동일한 주파수의 전류 리플이 배터리로 전달된다[4-5]. 따라서 AC 리플이 배터리에 어떤 영향을 미치는지 정확하게 분석할 필요가 있다.

AC 전류 리플이 배터리 성능 저하에 미치는 영향에 대한 결과가 보고되고 있으며, [6]은 1~100Hz 주파수 범위에서 AC 리플의 영향을 받는 리튬 이온 배터리의 수명 성능에 대해 연구하였으며, AC 리플이 10Hz 이상이면 충/방전 사이클에 비례하여 배터리 성능이 저하되었다가 보고하였다. 연구[7, 8]에서는 리플 주파수가 증가함에 따라 용량 감소 및 임피던스가 증가하는 것으로 나타났다. 또한, AC 리플이 있는 경우 배터리의 열 확산이 크다 점도 강조하였다. 그러나 이러한 결과들은 DC 오프셋이 없는 주파수를 갖는 전류 기반에서 실험한 결과이다.

DC 오프셋이 있는 AC 전류 리플이 배터리에 미치는 영향에 대한 연구 결과는 [5, 9]에 나와 있다. 이전 연구 [5]에서는 리튬인산철(LFP) 배터리에 대한 120Hz 전류

리플에 대한 영향을 분석했다. AC 리플 전류로 방전 시 셀 내부의 온도가 상승하는 결과를 제시하였다. 배터리 노화 메커니즘은 고온에서 빨라지기 때문에[10], AC 전류 리플이 배터리 노화에 기여한다는 것이 뒷받침 될 수 있다. 그러나 장기주기 실험이 수행되지 않아 노화에 대한 직접적인 결과를 제공하지 못한다. 연구 [9]에서는 100Hz 리플이 배터리 노화에 미치는 영향을 실험적으로 분석했다. AC 전류 리플은 배터리 노화에 거의 영향을 미치지 않는다는 결론이 나왔지만, 전류 리플이 방전 주기에만 적용되어 충전 시 전류 리플에 대한 영향은 알 수 없다. ESS와 계통 연계 PCS 사이의 전류 리플은 DC 전류에 AC 리플이 더해지는 형태로 충전과 방전 모두에 영향을 미친다. 따라서 위의 실험 결과[5-9]는 ESS와 계통 연계 PCS 간 AC 리플의 영향을 정확하게 제시하지 못한다.

따라서, 본 논문에서는 ESS와 계통연계 PCS 간의 교류 리플이 리튬이온 배터리에 미치는 영향을 분석한다. 3.3kW급 ESS에서 발생하는 AC 전류 리플의 크기를 선정하였으며, 리플 주파수는 계통(60Hz)의 두 배인 120Hz로 선택하였다. DC 전류 및 DC + AC 전류 사양으로 리튬 이온 배터리가 충/방전되며, 용량 및 내부 저항 확인을 위한 전기적 특성 실험은 20사이클마다 진행되었다. 최종적으로 AC 리플이 배터리에 미치는 영향에 대해서 실험적으로 분석하였다.

## II. 계통 연계형 ESS에서의 전류 리플

그림 1은 배터리 시스템과 계통 연계형 PCS로 ESS 구성을 보여준다. 계통에서 배터리 측으로 전력이 공급될

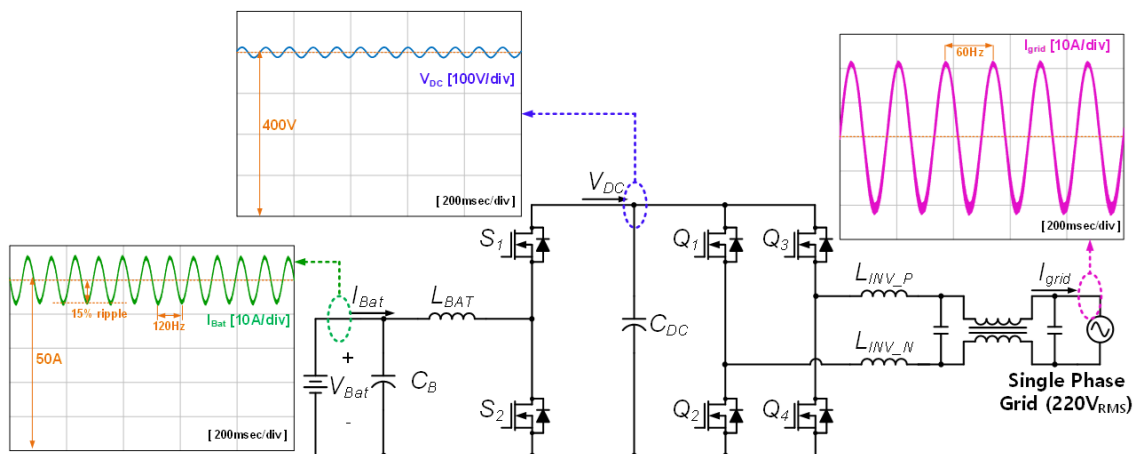


Fig. 1. Circuit of bi-directional PCS and key waveforms for ripple.

그림 1. 양방향 PCS 회로 및 주요 리플 파형

때, 배터리 측에 고조파가 발생된다.[7] DC 링크 단 및 그리드 단의 전력 방정식은 다음과 같다.

$$P_{DC} = V_{DC}I_{DC} \quad (1)$$

$$P_G = V \cos \omega t \times I \cos \omega t = \frac{VI}{2} + \frac{VI \cos 2\omega t}{2} \quad (2)$$

여기서,  $\omega t = 2\pi f$ 이며, 방정식 (1)과 (2)로부터 DC 링크 전류는 방정식 (3)과 같이 계산된다.

$$I_{DC} = \frac{VI}{2V_{DC}} + \frac{VI}{2V_{DC}} \cos 2\omega = I_{DC} + I_{(AC)} \quad (3)$$

위 식에서  $I_{DC}$  및  $I_{(AC)}$ 는 배터리의 DC 및 AC 성분을 나타낸다.

DC 링크 단의 전압 리플  $V_{(AC)}$ 는 DC 전류 리플  $I_{(AC)}$ 에 의해 발생되며 식 (4)와 같다. 결과적으로 배터리와 DC 링크 단에 전력이 전달될 때, 링크 전압의 AC 성분으로 인해 배터리에도 동일한 주파수의 전류 리플이 발생된다.

$$V_{(AC)} = \frac{1}{C_{DC}} \int -I_{(AC)} dt = \frac{VI}{4V_{DC}C_{DC}\omega} \sin(2\omega t) \quad (4)$$

그림 1의 각 파형들은 배터리에서 단상 그리드로 전력을 방전하는 시뮬레이션 결과다. 계통 주파수는 60Hz이며 방전 전력은 3.3kW이다. 링크 측에서 발생하는 120Hz의 리플로 인해 배터리에도 동일한 주파수의 전류 리플이 발생된다.

일반적으로 DC 측의 리플을 줄이기 위해 링크 커패시턴스를 높이지만, 시스템의 크기와 비용이 증가하는 단점이 있다. 따라서 구조적으로 발생하는 리플 현상이 배터리 특성에 미치는 영향에 대해 정확히 분석할 필요가 있다.

### III. 실험 방법

배터리에 그리드 주파수 2배에 해당하는 전류 리플을 공급하기 위해 그림 2와 같은 실험 세트를 구성하였다. 실험은 온도의 영향을 최소화하기 위해 25°C로 제어되는 챔버 안에서 수행되었다. 배터리 셀의 전압, 전류, 온도를 측정하기 위해 데이터 로거(GL7000)가 사용되었으며, 배터리를 충/방전하기 위해 2채널 벡-부스트 양방향 컨버터를 제작하였다. 충전 모드에서 양방향 컨버터의

전원 공급, 방전 모드에서 부하로 활용하기 위해 12V급 고용량 배터리 팩이 사용되었다. ESS의 3.3kW 출력 규격을 고려하여 배터리 셀의 AC 리플 크기(10%, 15%)를 선정하였다.

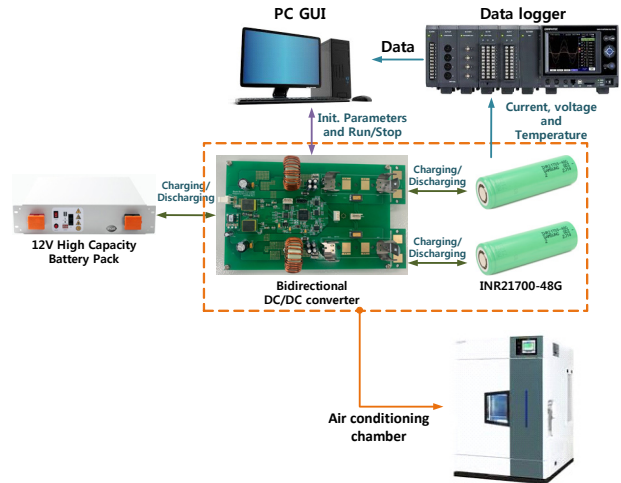


Fig. 2. Configuration of experiment set for battery charging/discharging.

그림 2. 배터리 충/방전 실험 세트 구성

노화 실험에 사용된 배터리는 공칭 용량이 4.8Ah인 Samsung SDI INR 21700 48G 원통형 셀이다. AC 리플의 영향을 분석하기 위해 각 배터리 셀은 충전과 방전에 0%(DC), 10%(DC+AC), 0%(DC), 15%(AC+DC) 전류 리플이 공급된다. 실험에 사용된 배터리 번호와 사양은 표 1에 나와있다.

Table 1. Charge/discharge specifications of experimental battery cells.

표 1. 실험 배터리 셀의 충/방전 사양

Board No.	Cell No.	DC / DC+AC	Magnitude of ripple (Frquency)	Average current
#1	1	DC	-	1C (4.8A)
	2	DC+AC	10% (120 Hz)	1C (4.8A)
#2	3	DC	-	1C (4.8A)
	4	DC+AC	15% (120 Hz)	1C (4.8A)

충전 알고리즘은 정전류(Constant current, CC)-정전압(Constant voltage, CV) 방식이 사용하였다. CC 모드의 충전 전류는 1C(4.8A)이며, 배터리 전압이 4.2V에 도달하면 CV 모드로 전환된다. CV 충전은 배터리 전압을 4.2V로 제어하고 충전 전류를 점차 감소시켜 1C/25에 도달하면 만충전으로 정의한다. 배터리 방전은

1C(4.8A)에서 CC 방전되고, 전압이 2.5V에 도달하면 만방전으로 정의한다. 또한, 충전 모드와 방전 모드 사이에 1시간의 휴지 시간을 두어 배터리를 안정화 시킨다. 그림 3과 같이 충전-휴지-방전-휴지를 한 사이클로 정의한다. 충/방전 전류에는 그림 4와 같이 AC 리플이 존재한다.

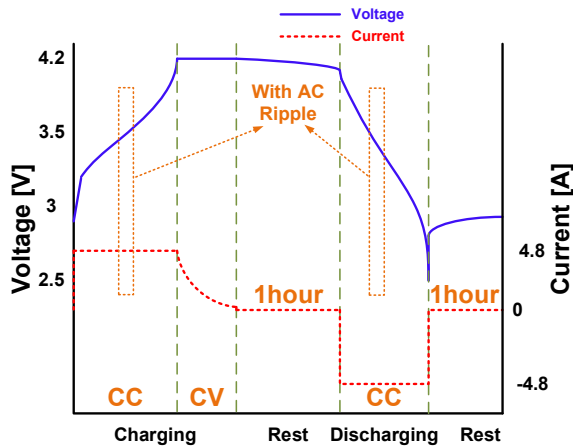


Fig. 3. Profile of battery charging/discharging.  
그림 3. 배터리 충/방전 프로파일

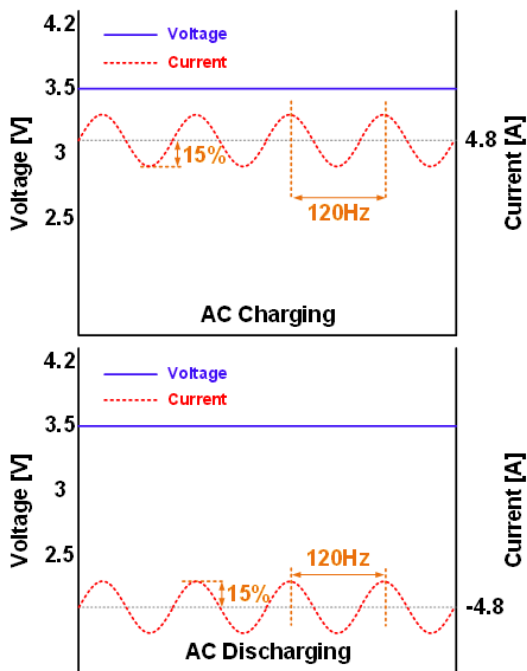


Fig. 4. Charging/discharging profile with AC ripple.  
그림 4. AC 전류 리플이 있는 충/방전 프로파일

노화 실험(Cycle life test)에 앞서 전기적 특성 실험(Reference performance test)이 수행된다. 전기적 특성 실험 및 노화 실험은 다음과 같다.

1. 전기적 특성 실험: 배터리의 방전 용량을 측정하기

위해 CC-CV 방식을 통한 만충전과 CC 방식 기반 만방전이 수행된다. 총 2회 수행하여 두 번째 방전에서 방전 용량을 산출한다. 또한, 내부 저항 측정을 위해 SOC 5% 간격으로 방전하는 SOC(State-of-charge)-OCV(Open-circuit-voltage) 실험을 실시하였다. 이때, 배터리 충/방전 전류는 AC 리플 성분이 없는 순수한 DC 전류이다.

2. 노화 실험: 20 사이클 간격으로 배터리 충/방전을 반복한다. 이때, 충/방전 전류에는 10%, 15% 크기의 AC 전류 리플이 추가된다. 그림 3은 AC 리플에 따른 충전/방전 프로파일을 보여준다. 20사이클이 완료되면 전기적 특성 실험(방전 용량 측정 시험, SOC-OCV 실험)이 수행된다.

그림 5는 배터리의 충/방전 시 인가되는 전류 파형이며, 1C-rate 기준 15% 크기의 AC 리플을 확인 할 수 있다.

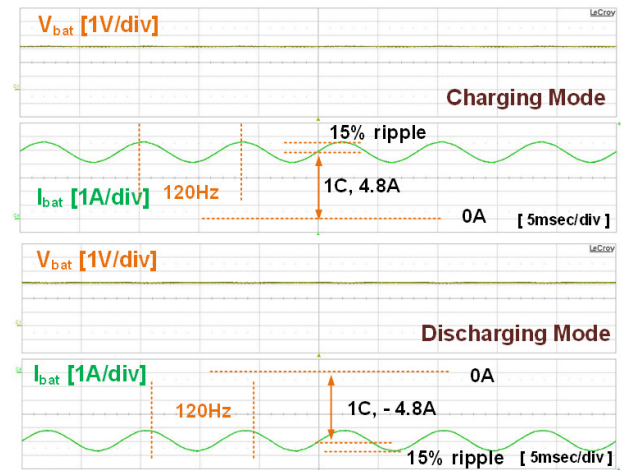


Fig. 5. Current of battery charge/discharge (AC ripple : 15%).

그림 5. 배터리 충/방전 전류(AC 리플 : 15%)

#### IV. 결과 분석

##### 1. State of Health(SOH)

배터리의 노화 실험 데이터를 바탕으로 배터리의 전기적 특성 변화를 분석한다. 그림 6은 DC만 인가된 배터리 셀과 AC 리플이 인가된 배터리 셀의 SOH 특성을 보여준다. SOH는 초기 용량 대비 현재 용량으로 식 (5)와 같으며,  $Capacity_{Current}$ 는 현재 용량,  $Capacity_{Initial}$ 은 초기 용량을 의미한다.

$$SOH(\%) = \frac{Capacity_{Current}}{Capacity_{Initial}} \times 100 \quad (5)$$

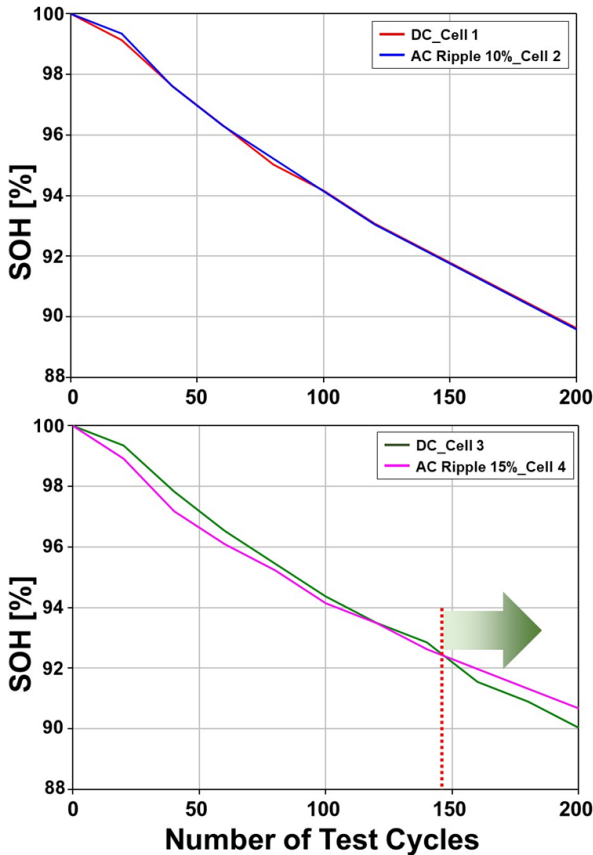


Fig. 6. SOH characteristic curve of battery cell.  
그림 6. 배터리 셀의 SOH 특성 곡선

AC 리플 크기가 10%인 경우 DC 배터리 셀과 AC 리플이 인가된 배터리 셀의 용량 변화가 거의 비슷하게 측정되고 있다. 그러나 AC 리플 크기가 15%인 경우 100 사이클 동안 DC 용량 변화 대비 용량 손실이 더 큰 것이 확인된다. 특히, AC 리플로 인한 초기 용량 손실의 증가는 음극의 SEI(Solid Electrolyte Interphase) 층의 형성과 관련이 있을 수 있다[11]. SEI는 배터리 내부 부반응으로 인해 전해질 분해와 리튬 이온의 소비를 통해 음극에 형성되어, SEI 층이 두꺼워짐에 따라 음극의 저항을 증가시키기 때문에[12], AC 전류 리플이 크면 초기 용량 감소에 영향을 미칠 수 있다.

2. 내부 저항

노화 실험에 따른 배터리의 내부 저항을 확인하기 위해 그림 7과 같이 측정된 방전 용량을 기준으로 SOC 5% 간격을 나누어 방전되며, 전류 인가 시 전압의 변화를 통해 옴의 법칙(Ohm's Law)으로 저항을 측정하였다. 각 노화 실험 주기마다 SOC 50% 영역에서 전기적 등가 회로 모델(Electrical equivalent circuit model):

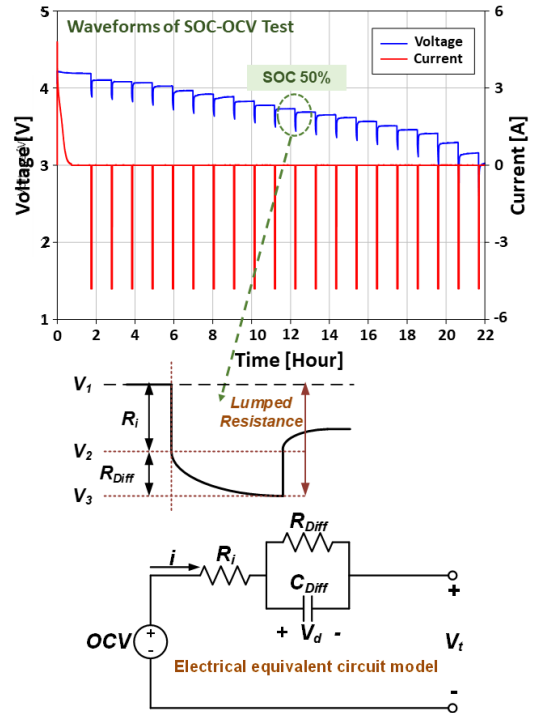


Fig. 7. Measurement method for internal resistance of battery.

그림 7. 배터리의 내부 저항 측정 방법

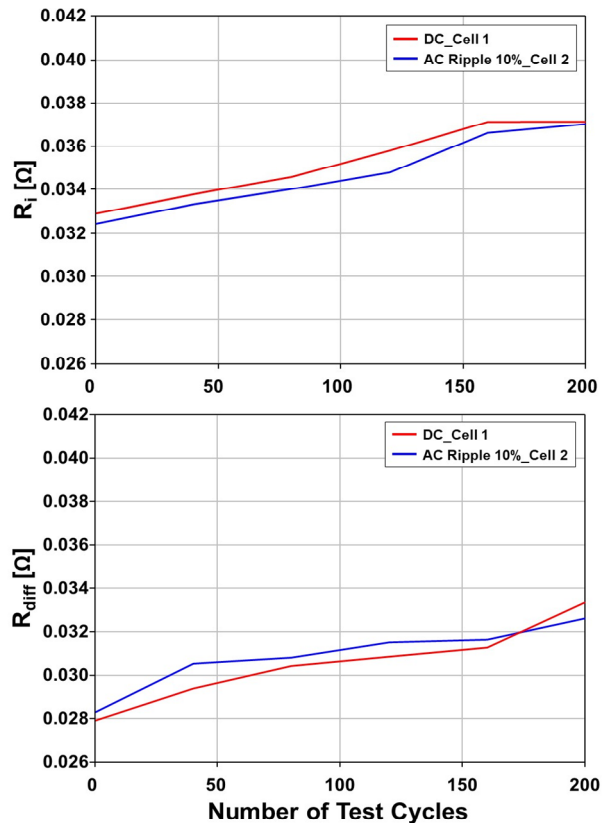


Fig. 8. Internal resistance of battery cell(No. 1, No. 2).  
그림 8. 배터리 셀(1번, 2번)의 내부 저항



EECM)의 파라미터를 추출한다. 방전 전류 인가 시 순간적인 전압 강하로 인한  $R_i$ (Ohmic resistance)와 배터리의 동특성을 나타내는 RC-ladder의  $R_{diff}$ (Diffusion resistance)로 구분된다.

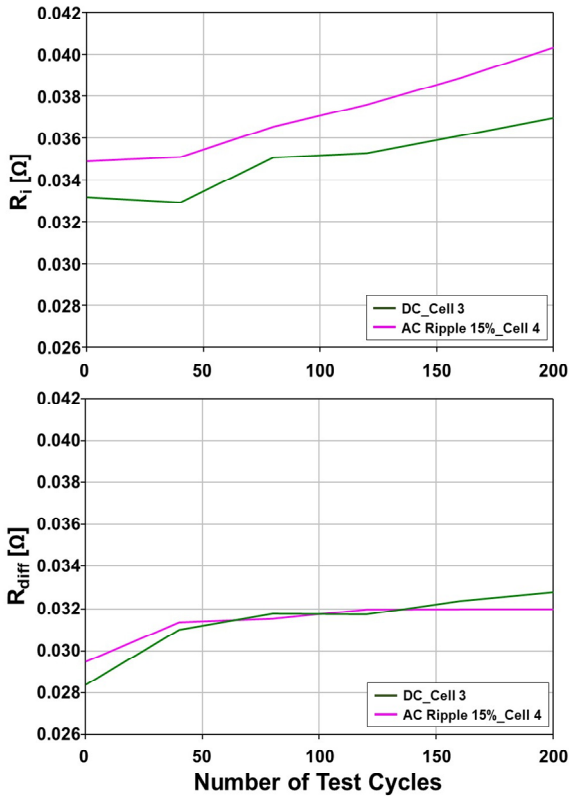


Fig. 9. Internal resistance of battery cell(No. 3, No. 4).  
그림 9. 배터리 셀(3번, 4번)의 내부 저항

그림 8과 9는 AC 전류 리플의 크기가 10%, 15% 조건으로 실험된 배터리 셀의 SOC 50%에서의  $R_i$ 와  $R_{diff}$ 를 보여준다.  $R_i$ 는 노화 실험이 진행됨에 따라 AC 리플이 인가된 셀과 DC 전류만 인가된 셀에서 비슷하게 증가하였다. 또한,  $R_{diff}$ 도 유사한 경향으로 증가하였다. 다만, 160 사이클 이후 DC 전류만 인가된 셀이 AC 리플이 있는 셀에 비해 증가 폭이 더 컸다. 이전 연구[13]에서 DCIR의  $R_{diff}$ 를 음극의 전기화학적 반응과 연관시켰다. 따라서, 그림 6에서 160 사이클 이후 DC 배터리에서만 용량 감소가 증가하는 것은 확산 저항의 증가와 관련이 있을 수 있다. 또한, 배터리가 고주파(100~1,000Hz) AC에 노출되면 DC 전류에 비해 전하 이동 저항이 급격히 감소된다[14]. 이는 고주파 AC 존재 시 이온 이동에 대한 저항이 감소함을 의미하며, 이러한 현상은 고주파 AC 섭동을 이용한 활물질의 활용도가 향상된 것으로 보고 있다[15].

### 3. 증분 용량(Incremental capacity, IC)

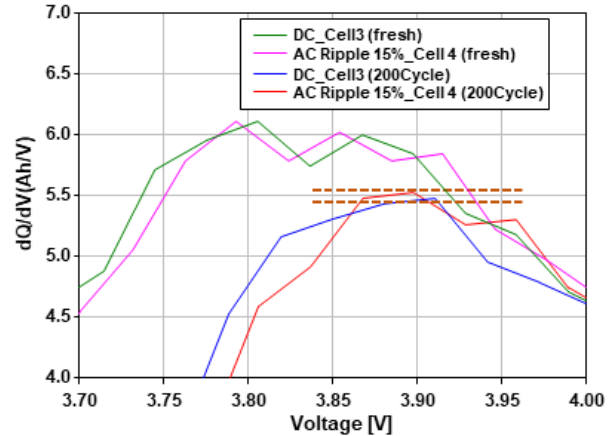


Fig. 10. Incremental capacity results for battery cell(No. 3, No. 4).

그림 10. 배터리 셀(3번, 4번)의 증분 용량 결과

증분 용량 분석(Incremental capacity analysis)은 노화 모드(Degradation mode)를 구분하기 위해 사용되고 있는 분석 방법이다. 노화 모드는 CL(Conductive loss), LLI(Loss of lithium inventory), LAM(Loss of active material)으로 나눌 수 있으며, CL은 접촉 저항을 의미하며, LLI는 이온의 (De)/Intercalation 과정에 참여하는  $Li^+$  이온 수의 감소와 관련 있다[16, 17]. LAM은 활성 물질의 구조적 변형과 전해 분해에서 나타난다[16]. 증분 용량 분석을 활용하여 초기 상태의 배터리와 노화 상태의 배터리를 분석하였다. 그림 10은 15% AC 리플이 있는 배터리 셀에 대한 IC 곡선을 보여준다. 200 사이클 동안 DC 및 DC + AC의 경우 IC 곡선이 오른쪽으로 이동하고 최대 Peak 감소를 확인 할 수 있다. IC 곡선의 Peak 높이가 감소하는 것은 LAM의 영향으로 보고 있다[18]. DC 및 AC 리플이 적용된 셀 모두 160 사이클 동안 LAM 효과로 인해 Peak 감소가 확인되며, 유사한 경향을 보인다. 그러나, 160 사이클 이후 AC 리플이 있는 셀에서 DC 전류만 인가된 셀 보다 LAM 효과가 둔화되는 것이 관찰되었다. 이러한 결과는 AC(120Hz) 리플이  $Li^+$  이온 확산 가속화에 영향을 준 것으로 보인다.

### 4. 배터리 셀 표면 온도

그림 11은 방전 중 배터리 표면 온도의 변화를 보여줍니다. 리플이 10%일 때 배터리의 표면 온도의 차이는  $0.7^{\circ}C$ 로 매우 작다. 그러나 AC 리플이 15%인 경우에는 100 사이클 후 약  $1^{\circ}C$  차이가 발생한다. 이는 특정 주기에서 AC 리플 크기가 클수록 표면 온도가 더 많이 증

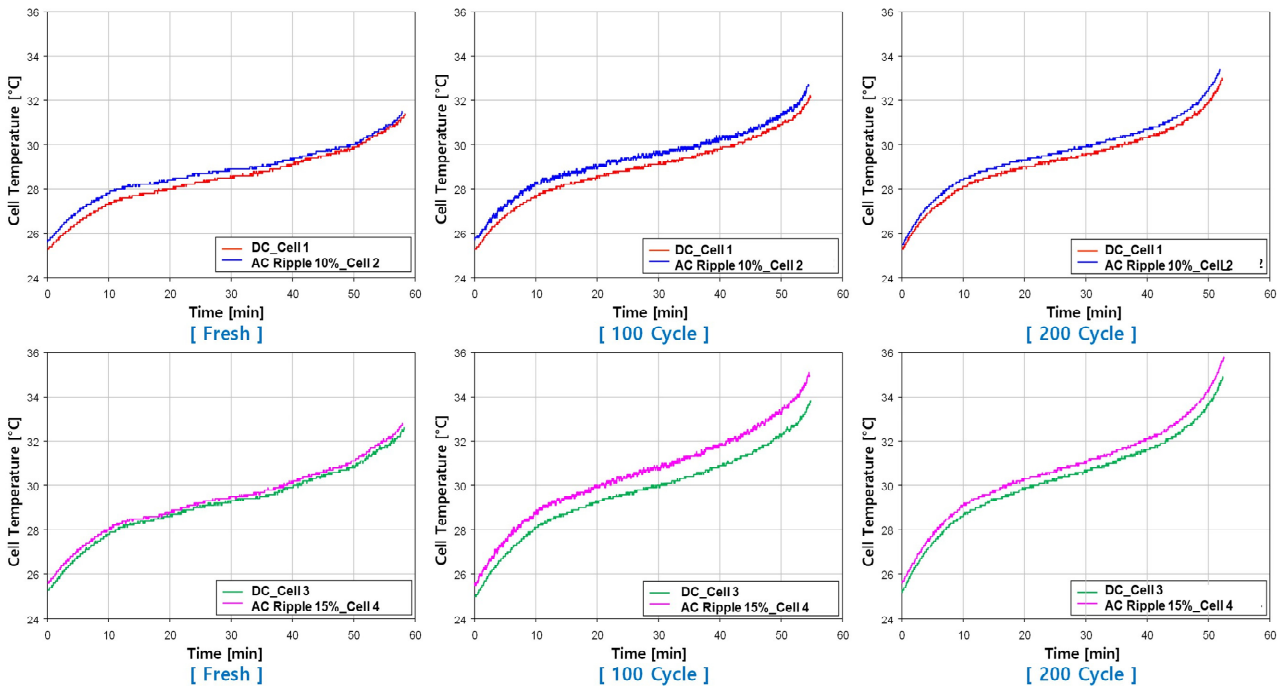


Fig. 11. Surface temperature of battery cells by cycle life test.

그림 11. 노화 실험에 따른 배터리 셀의 표면 온도

가하는 것을 볼 수 있다. 다만, 200 사이클 후에는 그 차이가 감소하였다.

**V. 결론**

본 논문은 AC 전류 리플이 리튬이온 배터리 셀의 전기적 상태 열화에 미치는 영향을 실험적으로 분석한다. AC 리플이 배터리 수명 특성에 미치는 영향을 조사하기 위해 총 200 사이클의 충/방전 실험이 수행되었다. 배터리의 충/방전 시 DC + AC(120Hz) 리플의 영향을 실험한 결과, AC 리플은 리튬 이온 배터리의 노화에 직접적으로 큰 영향을 미치지 않는다. 다만, 배터리 셀 내부 온도 측면에서는 특정 주기 동안 소폭의 온도 상승이 관찰되었다. 이는 팩 수준에서는 발열량이 더 증가할 것으로 판단되며, 배터리 노화에 간접적으로 영향을 미칠 수는 있다고 판단된다. 본 논문에서 제시된 결과는 계통 전력을 사용한 배터리 충/방전 시스템에서 링크 커패시턴스 및 배터리 측 커패시턴스를 최적화하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

향후 다양한 온도 조건에서의 노화 실험을 통해 AC 전류 리플이 배터리 노화에 미치는 영향에 대한 추가적인 검증이 필요하다.

**References**

[1] M. H. K. Tushar, A. W. Zeineddine and C. Assi, "Demand-Side Management by Regulating Charging and Discharging of the EV, ESS, and Utilizing Renewable Energy," *IEEE Trans, on Industrial Informatics*, vol.14, no.1, pp.117-126, 2018. DOI: 10.1109/TII.2017.2755465

[2] M. H. K. Tushar, A. W. Zeineddine and C. Assi, "Distributed real-time electricity allocation mechanism for large residential microgrid," *IEEE Trans, Smart Grid*, vol.6, no.3, pp.1353-1363, 2015. DOI: 10.1109/TSG.2014.2375671

[3] Q. Huang, R. Yu, Q. Ma and A. A. Huang, "Predictive ZVS Control With Improved ZVS Time Margin and Limited Variable Frequency Range for a 99% Efficient, 130-W/in<sup>3</sup> MHz GaN Totem-Pole PFC Rectifier," *IEEE Trnas. On Power Electroincs*, vol.33, no.7, pp.7079-7091, 2019. DOI: 10.1109/TPEL.2018.2877443

[4] U. R. Prasanna, A. K. Singh and K. Rajashekara, "Novel Bidirectional Single-phase Single-Stage Isolated AC-DC Converter With PFC for Charging

- of Electric Vehicles,” *IEEE Trans. on Transportation Electrification*, vol.3, no.3, pp.536-544, 2017.  
DOI: 10.1109/TTE.2017.2691327
- [5] S. Bala, T. Tengner, P. Rosenfeld and F. Delince, “The Effect of Low Frequency Current Ripple on the Performance of a Lithium Iron Phosphate (LFP) Battery Energy Storage System,” *In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp.3485-3492, 2012.  
DOI: 10.1109/ECCE.2012.6342318
- [6] M. Uno and K. Tanaka, “Influence of high-frequency charge-discharge cycling induced by cell voltage equalizers on the life performance of lithium-ion cells,” *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, vol.60, pp.1505-1515, 2011.  
DOI: 10.1109/TVT.2011.2127500
- [7] I. Puranik, L. Zhang and J. Qin, “Impact of Low-Frequency Ripple on Lifetime of Battery in MMC-based Battery Storage Systems,” *In Proceedings of the IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)*, pp.2748-2752, 2018.  
DOI: 10.1109/ECCE.2018.8558061
- [8] K. Uddin, A. D. Moore, A. Barai and J. Marco, “The effects of high frequency current ripple on electric vehicle battery performance,” *Applied Energy*, vol.178, pp.142-154, 2016.  
DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.06.033
- [9] F. Chang, F. Roemer and M. Lienkamp, “Influence of Current Ripples in Cascaded Multilevel Topologies on the Aging of Lithium Batteries,” *IEEE Trans. on Power Elec.*, vol.35, no.11, pp.11879-11890, 2020. DOI: 10.1109/TPEL.2020.2989145
- [10] M. Broussely, S. Herreyre, P. Biensan, P. Kasztejna, K. Nechev and R. J. Staniewicz, “Aging mechanism in Li ion cells and calendar life predictions,” *Journal of Power Sources*, vol.97-98, pp.13-21, 2001.  
DOI: 10.1016/S0378-7753(01)00722-4
- [11] K. Uddin, L Somerville, A. Barai, M. Lain, T. R. Jennings and J. Marco, “The impact of high-frequency-high-current perturbations on film formation at the negative electrode-electrolyte interface,” *Electrochimica Acta*, vol.233, pp.1-12, 2017. DOI: 10.1016/j.electacta.2017.03.020
- [12] J. Vetter, P. Novak, M. R. Wagner, C. Veit, K. C. Moller, J. O. Besenhard, M. Winter, M. Wohlfahrt-Meherns, C. Vogler and A. Hammouche, “Ageing mechanisms in lithium-ion batteries,” *Journal of Power Sources*, vol.147, pp.269-281, 2005. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.01.006
- [13] Y. S. Kang, S. Y. Park, K. Ito, Y. Kudo, Y. W. Shin, D. Y. Kim, D. H. Seo, S. J. Kim, J. H. Park, S. G. Doo, M. Koh, J. A. Seo and K. J. Park, “Revealing the structural degradation mechanism of the Ni-rich cathode surface : How thick is the surface?,” *Journal of Power Sources*, vol.490, pp.1-7, 2021.  
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229542
- [14] A. Ghassemi, P. C. Banerjee, A. F. Hollenkamp, Z. Zhang and B. Bahrani, “Effects of alternation current on Li-ion battery performance: Monitoring degradative processes with in-situ characterization techniques,” *Applied Energy*, vol.284, pp.1-16, 2021. DOI: 10.1016/j.apenergy.2020.116192
- [15] M. Abdel-Monem, K. Trad, N. Omar, O. Hegazy, P. Van den Bossch, and J. Van Mierlo, “Influence analysis of static and dynamic fast-charging current profiles on ageing performance of commercial lithium-ion batteries,” *Energy*, vol.120, pp.179-191, 2017. DOI: 10.1016/j.energy.2016.12.110
- [16] P. F. Carols, K. Uddin, G. H. Chouchelamane, W.D. Widanage and J. Marco, “ A comparison between electrochemical impedance spectroscopy and incremental capacity-differential voltage as Li-ion diagnostic techniques to identify and quantify the effects of degradation modes within battery management systems,” *Journal Power Sources*, vol.360, pp.301-318, 2017.  
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.03.042
- [17] J. B. Jorcin, M. E. Orazem, N. Pebere and B. Tribollet, “CPE analysis by local electrochemical impedance spectroscopy,” *Electrochim Acta*, vol.51, pp.1473-1479, 2006.  
DOI: 10.1016/j.electacta.2005.02.128
- [18] A. Barai, K. Uddin, M. Dubarry, L. Somerville, A. McGordon, P. Jennings and I. Bloom, “A



comparison of methodologies for the non-invasive characterisation of commercial Li-ion cells,” *Progress in Energy and Combustion Science*, vol.72, pp.1-31, 2019.

DOI 10.1016/j.pecs.2019.01.001

---

## BIOGRAPHY

---

**Bongwoo Kwak** (Member)



2012년 : MS degree in Electrical Engineering, Mokpo National University.

2023년 : PH. D. degree in Electrical Engineering, Chungnam National University.

2012년~current : Researcher, Dept. of Automotive Materials & Components R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology