

리튬이차전지의 고효율 충전법 연구 동향

Research Trend of High-Efficiency Charging Method for Lithium Rechargeable Batteries

IT 융합 · 부품 기술 특집

김광만 (K.M. Kim)	전력제어소자연구팀 책임연구원
이영기 (Y.-G. Lee)	전력제어소자연구팀 선임연구원
양일석 (Y.S. Yang)	전력제어소자연구팀 팀장
김종대 (J. Kim)	NT융합부품연구부 부장

목 차

-
- I. 서론
 - II. 초기 충전방식의 비교
 - III. 부스트 충전법
 - IV. 전류감쇠 충전법
 - V. 다단계 정전류 충전법
 - VI. 펄스 충전법
 - VII. 결론

유비쿼터스 시대의 모바일 전력원으로서 가장 유용한 리튬이차전지의 충전방식은 1991년 리튬이온 전지의 상용화 이후 정전류-정전압 방식의 충전법이 고수되어 왔다. 그러나 압전, 열전 등 신재생에너지에 의한 에너지 하베스팅으로 생성되는 전력의 성질이 전압과 전류의 범위가 매우 다양하므로 이를 효율적으로 저장할 수 있는 에너지 매니지먼트 체계가 필요하다. 이에 대한 기반연구로서 리튬이차전지의 고효율 충전을 위한 다양한 방식이 고려되어 왔으며, 본 동향분석서에서는 이러한 충전 방식에 따라 리튬이차전지 내부 소재가 받는 영향과 여러 충전방식의 장단점을 분석하고, 최적 충전 방식의 기준을 정리한다.

I. 서론

유비쿼터스 시대의 자가충전 전원모듈의 개념에 있어서, 최근 에너지 하베스트 소자와 연계된 리튬이차전지의 충전방식에 관한 새로운 고려가 필요하게 되었다. 즉 태양전지, 압전소자 혹은 열전소자 등의 에너지 하베스트 소자로부터 생산되는 전기의 상태(구체적으로는 시간에 따라 발생하는 전기량의 추이, 즉 전류와 전압의 변화)가 일정하지 못하여, 에너지 저장소자인 리튬이차전지에 직접 충전하기가 매우 어려운 상황에 있다. 즉 충전을 위한 전력소스의 전류와 전압이 계속 변화하고 충전속도 시간도 짧고 그 경향도 불규칙적이다. 이를 이차전지에 안정적으로 충전하기 위해서는 불규칙적인 충전 패턴에 관한 다양한 조건에서의 실험이 충분히 이루어지고, 그 데이터를 종합적으로 검토한 후 최적화된 EMIC 설계에 임해야 할 것이다.

우선 본 동향분석서에서는 리튬이차전지에 충전하는 여러 가지 방식에 관한 초기 연구결과를 전지성능과 관련하여 조사한다. 또한 에너지 하베스트 소자로부터 생산되는 전기의 다양한 상태 중 가장 보편적으로 고려할 수 있는 펄스 충전 방식으로 리튬이차전지를 충전할 때의 전지성능에 주는 영향을 알아본다. 그 외에도 다른 효율적인 충전방식도 포함하여 정리한다. 본 동향분석서는 리튬이차전지를 충전하는 방식에 따라 전지내 소재 구조의 변화나 전지성능에 미치는 영향을 조사 분석하여, 차후 에너지 하베스트 소자로부터 발생하는 복잡다단한 형태의 전기를 충전하는 체계에 대한 기초 데이터로 활용하고자 한다.

II. 초기 충전방식의 비교

1990년대 초반 리튬이온전지의 상용화 시기에 보

편적으로 채택하던 정전류-정전압(CC-CV) 충전방식은 낮은 용량감소, 빠른 충전시간, 작동 편이성, 긴 수명에 대한 낮은 내부저항 등의 장점을 가지고 있었다[1]-[3]. 그러나 이 CC-CV 충전방식을 채택하였을 때 전지 내부의 양극과 음극에서 일어나는 비안정성 상황[2]도 있었다. 즉 인조흑연(MCMB 25-28, Osaka Gas) 음극, LiCoO₂ 양극의 채택시 양극/음극 가역용량비(C/A)=0.985로 조정한 셀에 대해 양극과 음극의 전위를 모니터링하면서 CC-CV 충전을 한 결과, 대부분의 충전조건, 특히 고전류와 저온에서 리튬 도금(lithium plating)이 일어났다. CC 충전범위에서 초차 흑연음극의 전위가 0V(vs. Li/Li⁺) 이하로 떨어졌다. 리튬 도금과 도금된 리튬이 흑연 속으로 재삽입되는 과정이 함께 일어나면서 낮은 충전용량을 보였다. 전류가 일정 수준(0.4C)을 초과하면 전류 증가가 더 이상 충전시간을 줄이지 못하고 리튬 도금을 악화시키고 CV 충전시간만 길어졌다. 게다가 전지온도의 감소는 리튬도금을 더욱 악화시켰다. 즉 -20°C에서 CC 충전은 불가능하고 리튬도금만이 전체 충전 과정을 수반하였다. 향상된 충전성능을 위해서는 최적화된 C/A=0.85~0.90이 유리하다. C/A가 너무 높으면 음극상 리튬도금이, 너무 낮으면 양극의 과충전이 발생하였다.

CC-CV 충전은 CC로 상한전압(4.1~4.2V)에 도달한 후 미리 설정한 낮은 전류치에 도달할 때까지 CV 조건을 유지한다. 이때 CV 조건은 충전시간의 심각한 시간 연장을 동반할 수 있다. 즉 충전 시의 전극내 리튬이온 확산이 율속단계가 되는데, 장시간 확산으로 인해 필연적으로 농도분극을 야기하고, 특히 고율충전시 급속히 상한전압에 도달하기 때문에 활물질이 완전히 소비되기도 전에 전류가 미리 설정한 한계치로 떨어질 수 있다. 이의 극복을 위해 고려된 충전방식이 정전류-개방회로전압(CC-OVC) 방식인데,

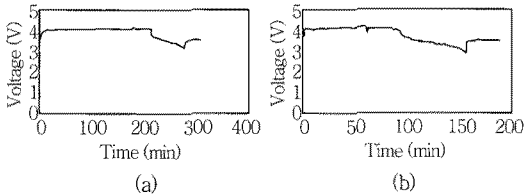
즉 충전시 짧은 완화시간과 짧은 방전 펄스(이 경우는 OCV)를 가하면 농도분극의 해소와 출력전달속도의 증가를 기할 수 있어서 활물질의 사용도를 높이고 충전을 가속화할 수 있다.

즉 공칭용량 900mAh급 US18650(Sony) 리튬이온전지에 대해, (그림 1)과 같이 기존 CC-CV 충전과 CC-OCV 충전을 각각 적용하였을 때의 전극구조 변화에 따르는 전기화학적 성질과 사이클 특성을 조사하였다[4]. (그림 1)에서 보면, CC-OCV의 경우가 짧은 완화시간과 짧은 OCV에 의해 리튬이온의 농도분극이 사라졌기 때문에 상한전압에 이르렀을 때 전

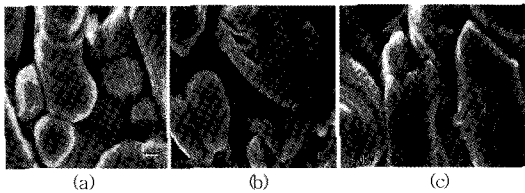
지는 이미 만충전된다. 따라서 CC-OCV 방식이 CV 충전을 제거함으로써 출력전달 속도를 증가시키고 충전시간을 줄일 수 있으며 사이클 특성도 우수하였다. 임피던스 분석에 의하면, 전지의 계면저항이 두 경우 모두 작게 나타났으나, 동일 사이클에서 비교하는 경우에는 CC-OCV 경우가 약간 높았다. 또한 표면관찰(그림 2), (그림 3) 참조)과 결정성 분석을 통하여 이 충전방식은 전극내 양극 활물질 LiCoO_2 의 구조 안정성을 우수하게 유지시켜 주며 탄소음극상의 피복층(SEI) 두께의 성장을 방해함을 밝혔다.

III. 부스트 충전법

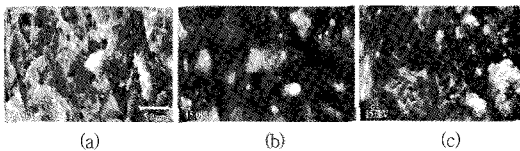
보통 2시간이 넘는 리튬이온전지의 충전시간은 일반적으로 전지의 안전성과 수명 때문이며, 이에서 벗어나면 전지 내부에서 부반응이 일어나 유해성이 증가하는 것으로 알려져 있었다. 그러나 이 부반응은 극단적인 전압조건에서 지나치게 강조된 것 같아, 아무 유해효과 없이 거의 비워져 있는(close-to-empty) 리튬이온전지를 매우 짧은 시간에 고전류로 충전할 수 있는 부스트 충전(boostcharging) 개념[5]이 제안되었다. 즉 초기의 짧은 시간(t_b) 동안 V_b^{\max} 에서 CV 충전(부스트 충전)을 하고 이어서 표준 CC-CV 충전을 행한다. 초기의 부스트 충전기간 동안 초기에 충분히 높은 전류(I_b^{\max})로 시작하여 감소하다가 표준 CC-CV 모드에서 낮은 전류치로 유지 및 감소된다. 초기의 정전압치 V_b^{\max} 는 CC-CV 모드의 정전압치 V_b^{\max} 보다 커야 한다. 초기 부스트 모드의 정전압치가 4.3V이면 흑연과 LiCoO_2 전극 모두 분해가 일어날 염려가 있으나, 최근 기준전극 실험에 의하면 낮은 충전 심도에서의 초기 충전시 리튬금속 도금이 나타나지 않는 것으로 보고되었다. (그림 4)에 이러한 부스트 충전법의 전압-전압 프로파일과 실제 적용 예



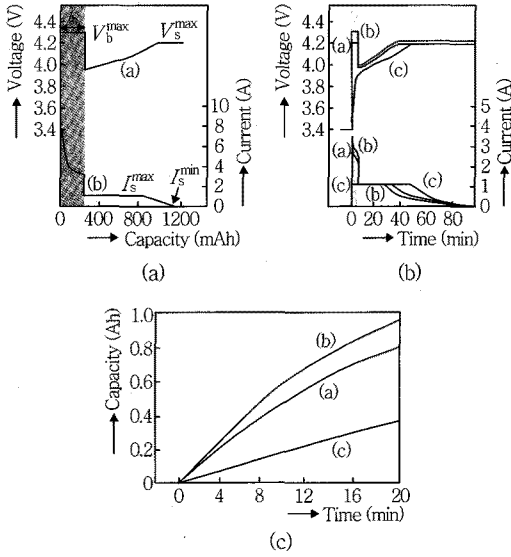
(그림 1) (a) Charge CC@1C Up to 4.2V, CV until 25mA; 30min OCV; Discharge@1C to 3V, (b) Charge CC@1C Up to 4.2V; 30min OCV; Discharge@1C to 3V[4]



(그림 2) Surface Image of Cathode(LiCoO_2) after the Disintegration of US18650. (a) Fresh, (b) CC-CV@1C, after 300 Cycle, (c) CC-OCV@1C, after 300 Cycles[4]



(그림 3) Surface Image of Anode(graphite) after the Disintegration of US18650. (a) Fresh, (b) CC-CV@1C, after 300 Cycles, (c) CC-OCV@1C, after 300 Cycles[4]



(그림 4) (a) Boostcharging Principle: Limited CV Charging(shaded region) Followed by Standard CC-CV Charging, (b) An Example of Practical Experiment, (c) Capacity Build-up Trend[5]

(부스트: $t_b=5$ 분, CV $V_b^{\max}=4.2V$ 와 $4.3V$, $I_b^{\max}=4.5C$) 및 이로 인한 용량 성취 경향이 나타나 있다. 한 예로 초기의 고전류 정전압($4.3V$) 부스트 충전에 의해 CC-CV 충전법보다 전기용량의 충전시간이 매우 단축될 수 있다. 이러한 부스트 충전법은 충전심도가 낮은 경우 고속충전에 효과적이다.

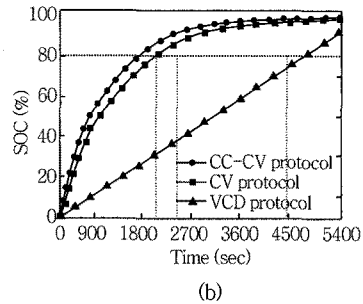
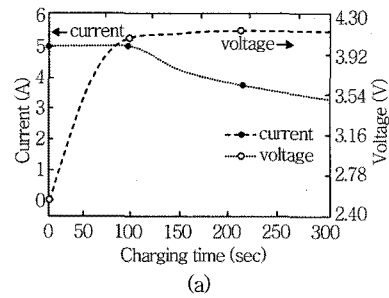
IV. 전류감쇠 충전법

리튬이온전지의 안정적이고 신속한 충전을 위한 연구의 초기성과 중 하나로서, 선형적으로 감소하는 전류치를 적용하여 충전하면 동일 충전심도에서 기존의 CC-CV 충전법에 비해 충전시간을 줄일 수 있음 [6]이 보고되었다. 이를 응용하여 시간에 따라 다양한 전류감쇠를 적용하여 충전시간을 단축하는 충전법 [7]이 제안되었다. 즉 공칭용량 1400mAh급 US186 50(Sony) 리튬이온전지에 대해, 순간시간 t 에 따라

4.2V까지 아래의 전류감쇠함수 $I(t)$ 가 짧은 펄스형으로 적용되도록 충전하면(이때 I_0 는 초기 전류 5A, k_1, k_2, k_3 는 상수, 총시간 5400s)

$$I(t) = \frac{I_0 + k_1 t^{1/2}}{1 + k_2 t^{1/2} + k_3 t}$$

(그림 5)와 같이 이러한 전류감쇠(varying current decay) 프로토콜은 기존의 CC-CV나 CV 충전법보다 빠른 시간 내에 목적하는 충전심도에 이를 수 있다.



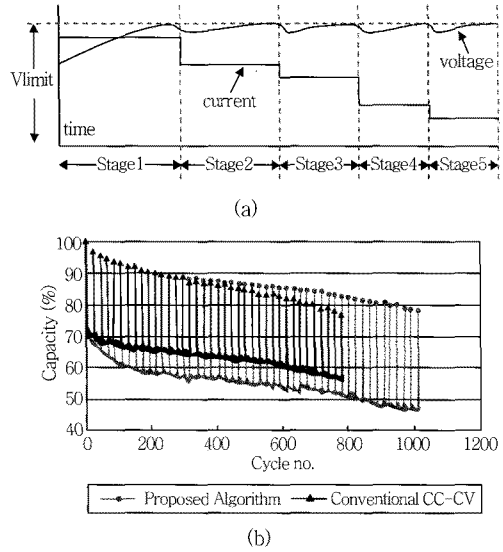
(그림 5) (a) Current-voltage Relationship for the VCD Protocol and (b) Utilization Comparison[7]

리튬이온전지의 용량은 충전방식(charging protocol)에도 영향을 받는다. 충전전류가 크면 짧은 시간에 충전되지만 용량 감소율이 증가할 수 있다. 그러나 상기의 VCD 방식으로는 사이클 경과에 따르는 약간의 과충전이 있지만 전류치의 최적화를 통해 낮은 용량 감소율을 갖는 빠른 충전이 가능하다. 사이클 경과에 따르는 음극전위의 상승 때문에 양극에서 상한전압을 초과할 염려도 있으나 이 VCD 프로토콜을 최적화하면 상한전압 이상으로 전위가 상승할 수 없

도록 조정할 수도 있다. 따라서 과충전에 의한 활물질의 열화 없이 빠른 속도로 안전하게 충전이 가능하다고 한다.

V. 다단계 정전류 충전법

리튬이온전지의 고속충전과 사이클 안정성을 동시에 확보하기 위한 최적 충전방식이 요구됨에 따라 정출력-정전압(CP-CV) 충전법과 다단계(multistage) 정전류-정전압(MCC-CV) 충전법[8]이 제안되었다. CP-CV 충전은 고전류로 시작하여 정출력이 유지되도록 전류치를 감소시키면서 충전하여 4.2V에 이르면 CV 충전하는 방식이다. 반면에 MCC-CV 충전은 낮은 전류치로 CC 충전하여 총 용량의 10% 정도를 충전한 후 높은 전류치로 다시 4.2V까지 CC 충전하고 이어서 CV 충전하는 방식이다. 상용 리튬이온전지 US18650에 대해 기존 CC-CV 충전도 포함하여 시험한 결과(이때 모든 방식에서의 CV는 전류가 0.05C에 이를 때까지 충전함), 결과적으로 전지의 사이클 수명은 동일 충전속도에서도 충전방식에 크게 영향을 받는데, 저속충전(0.5C)인 경우에는 CC-CV 충전이 적당한데 반해 고속충전(1C)인 경우에는 CP-CV 충전이 사이클 수명상 유리하였다. 임피던스 분석에 의하면, 사이클 경과에 따른 용량 감소는 양/음전극의 표면상 피복층이 급격하게 성장하여 전하전달 저항이 증가하는 데 주로 기인하였다. 또한 고속 충전 시에는 리튬이온의 손실과 이에 관련되는 표면 피복층의 성장에 의한 용량감소가 가속화 되는데, 이는 주로 음전극 상에 도금되는 리튬금속과 전해질-전극 계면의 높은 분극성과 관련된다. 또한 MCC-CV 충전시 초기에 저전류로 전지 용량의 10% 정도를 충전하는 과정과 충전 말미에 저전류를 사용하는 점은 사이클 수명 향상에 고무적인 영향을 주었다.

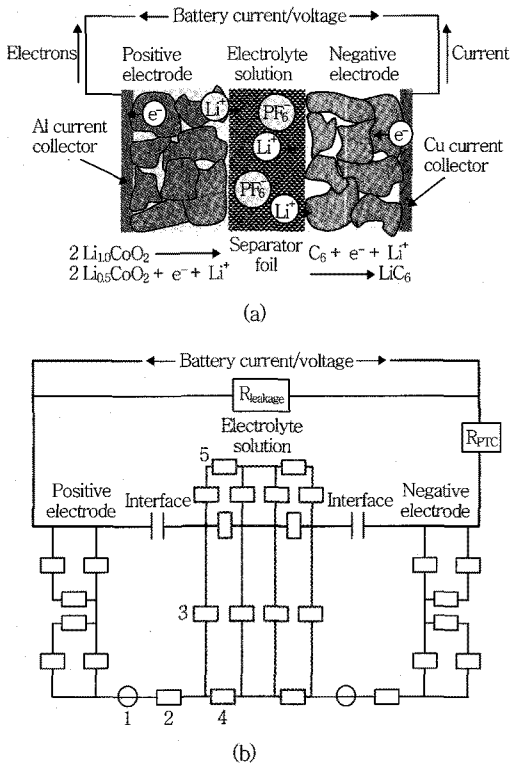


(그림 6) (a) MCC Charging Protocol and (b) Cycling Test Result[9]

저전류부터 고전류로 단계적 상향 CC 충전을 하는 방법과는 달리, 단계를 더욱 세분화하고 고전류에서 저전류로 단계적 하향 CC 충전을 하는 방식도 리튬이온전지의 사이클 수명을 향상시킬 수 있다. 즉 (그림 6)과 같이 5단계 하향 CC 충전방식을 설정하고 각 단계에 해당하는 전류치를 ant-colony-system 기반 알고리즘[9]으로 최적화를 실시한 결과, 30분내 70% 용량의 고속충전이 가능하였으며, 기존의 CC-CV 방식보다 25% 향상된 사이클 수명을 얻었다.

VI. 펄스 충전법

De Jong과 Notten[10]은 리튬이온 전자 네트워크 모델을 이용한 시뮬레이션을 이용하여 리튬이온전지에 대한 펄스 충전 효과를 조사하였다. 즉 (그림 7a)와 같이 리튬이온전지 내부에서 일어나는 충전 메커니즘에 대해 (그림 7b)와 같은 네트워크 모델을 적용하되, 1번의 전압원(voltage source)은 양극(Li_xCoO₂)의 평형전압, 2번 저항은 양극/전해질 계면의 전하전달반



(그림 7) (a) Charging Mechanism in Lithium-ion Battery and (b) Lithium-ion Battery Network Model[10]

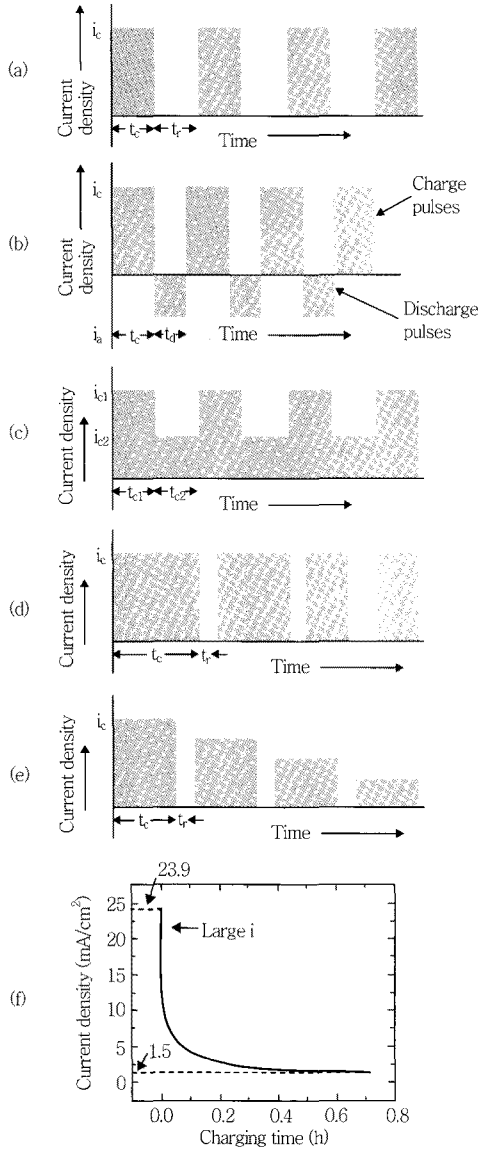
응 속도론, 3번 커패시턴스는 양극과 접한 계면에서의 Li^+ 양이온 농도, 4번과 5번 저항은 각각 Li^+ 양이온과 PF_6^- 음이온의 확산이동 과정을 대표한다.

이 모델에 대해 10ms 펄스 충전을 한 경우(ms 이 내의 펄스로 분류), 전극/전해질 계면의 전기이중층 커패시턴스가 완충역할을 하여 전극전위와 반응전류는 일정하였지만 순간적인 이온 이동은 일어났다. 그러나 각 펄스기간 동안 매우 적은 수의 이온들이 양전극 사이를 오가기 때문에 농도구배는 큰 영향이 없었다. 또한 CC 충전 시와 비교하여 전극전위의 큰 변화가 없어서 부반응 염려도 거의 없으리라 예상된다. 단 펄스 충전시 충전상한 전압이 일시적으로 상승할 수 있지만, 시간평균화된(time-averaged) 전압이 상한전압을 초과하면 안전성 문제가 생길 수 있다.

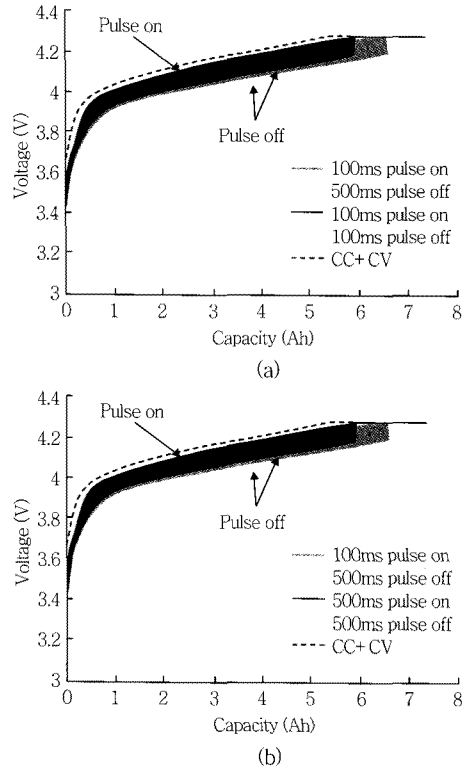
전통적인 CC-CV 충전시 리튬이온은 전해질을 거쳐 흑연/SEI 계면에서 환원되어 흑연 속으로 삽입된다. 그러나 전류밀도가 너무 높으면 계면에서의 환원에 의한 리튬 형성속도가 흑연으로 삽입되는 속도를 초월하기 때문에 계면에 리튬 도금이 축적되고 흑연으로의 삽입을 방해한다.

Purushothaman과 Landau[11]는 여러 가지 펄스 충전 모델을 설정, 해석하여 고속충전이 가능한 펄스파형을 최적화 하였다. 즉 (그림 8)과 같이 충전시간에 따라 다양한 펄스방식으로 충전을 한 결과, 보통 CC-CV 충전이 3~4시간 걸리는데 비하여, (그림 8a~e)에 해당하는 펄스 충전 방식은 대개 0.8~0.9시간에 만충전이 가능하였다. 그리고 초기에 리튬 표면 농도가 최고수준에 이르도록 최대 확산속도에 해당하는 고전류 충전부터 시작하여, 리튬농도 프로파일을 완화시키도록 전류를 급격히 줄이거나 휴지(rest) 시간을 증가시키는 경우 (그림 8f)가 가장 빠른 충전 심도(0.7시간에 만충전 가능)에 이를 수 있었다. 이러한 전류밀도 프로파일은 전적으로 리튬확산에 대한 물질전달계수의 추이와 동일하게 전개한 것이다. 단 한 가지 제한조건으로서, 초기 고전류 충전시 리튬이온전지 내부의 열소산(heat dissipation)이 있을 수 있으므로 이를 주의 깊게 고려해야 한다.

Chin 등[12]은 다양한 크기와 간격을 갖는 펄스 전류와 펄스 전압을 리튬이온전지에 적용하여 충전을 실시한 결과, 4.1V까지는 고속충전 기법으로서의 펄스 충전이 기존 CC-CV 충전에 비해 효율적이지 못함을 밝혔다. 그러나 4.1V 이상에서는 CC-CV의 CV 부분 대신 펄스 충전으로 용량의 80%를 충전할 수 있으며, 특히 저온(0°C)에서는 CC-CV 충전시보다 3배 이상의 용량을 충전할 수 있다. 또한 1시간 이내의 짧은 충전시간 내에서 펄스 충전은 열축적을 감소시키지만, 이때 발생하는 5.5V 정도의 음극 분극전



(그림 8) Various Pulse Sequences. (a) Constant Amplitude Pulsed Current Interspersed with Identical Rest Period, (b) Constant Amplitude Pulsed Current Interspersed with Alternation Constant Amplitude Discharge Pulses, (c) Pulsed Current Consisting of a Sequence of Different Amplitude Charge Current Density Pulses, (d) Constant Amplitude Pulsed Current Interspersed with Rest Periods(Decreasing Pulse Width and Increasing Rest Width), (e) Pulsed Current with Decreasing Its Amplitude Interspersed with Identical Rest Period, (f) Nonlinearly Decreasing Current Density Profile as a Function of Charging Time[11]



(그림 9) Charged Voltage vs. Capacity at Pulse-on Times(100 and 500ms) with Pulse-off Times (100 and 500ms)[13]

위는 리튬도금을 야기할 수도 있다. 펄스시간이 짧고 휴지시간이 길수록 분극을 완화시키며, 고속충전 기법은 주로 흑연 음전극내 전하전달 속도론에 의해 제한받는다. Lin과 Yen[13]은 LiCoO_2 대신 LiMn_2O_4 를 양극재로 사용한 리튬이온전지에 대해 펄스전류를 가해 충전하여 용량 특성을 조사하였다. 펄스시간 200ms 이상, 휴지시간 300ms 이상일 때 용량감소가 발생하였고, 특히 펄스시간 100ms 이상일 때 더 많은 용량이 충전되고 방전될 수 있었다(그림 9) 참조). 그러나 100ms 이하의 펄스시간 내에는 커패시턴스의 완충작용 때문에 전류치에 특별한 제한이 없었다. 또한 평균화된 C-rate(=가해진 C-rate \times 펄스시간/(펄스시간 + 휴지시간))가 0.5 이상일 때 용량감소가 거의 없는 최적 펄스 충전 조건임을 밝혔다.

Ⅶ. 결론

이상에서는 리튬이온전지를 효율적으로 충전하는 방식에 대해 조사하였다. 결과적으로 초기의 CC-CV 충전방식에 비해 펄스 충전 방식이 전지의 용량 유지율에, 다단계 CC 방식이 전지의 사이클 수명에 매우 유리한 방식임을 알 수 있다. 이것은 주어지는 충전전류와 충전전압이 리튬이온전지내 활물질 소재의 구조나 특성에도 영향이 크기 때문이라 생각된다. 따라서 현재의 3.7~3.8V급 리튬이온전지 상용품뿐만 아니라 앞으로 유비쿼터스 사회의 전력원으로써 다양하게 전개될 저전압형(2~3V급) 및 고전압형(3.5~5V급) 리튬이온전지를 구성하는 전극소재에 대한 충전전류와 충전전압의 최적 충전방식이 최적화되어야 할 것이다. 또한 미래 에너지원 중의 하나인 에너지 하베스트 소자와 관련된 에너지 충전도 고려되어야 한다. 이러한 연구 중에는, 예를 들어 마이크로파에 의한 리튬이온전지의 무선충전 연구[14]를 들 수 있다. 이 방법은 발생하는 전력의 특성이 불규칙적인 압전소자나 열전소자와는 달리 일정한 마이크로파의 생성과 전달에 의해 균일한 전력 저장이 가능하다는 장점이 있다. 궁극적으로는 다양한 에너지 하베스트 소자로부터 생성되는 전력의 효율적인 저장방법으로써의 충전방식이 소자별로 개별적으로 이루어질 수 있다. 또한 개별적 충전방식이 아니라 전력생성소자

의 종류에 관계없이 하나의 universal chip 형태로 충전회로가 발전할 것을 기대한다.

약어 정리

C/A	Cathode/Anode Content Ratio
CC-CV	Constant Current-Constant Voltage
CP-CV	Constant Power-Constant Voltage
EMIC	Energy Management IC
MCC	Multi-stage Constant Current
OCV	Open Circuit Voltage
SEI	Solid Electrolyte Interface

참고 문헌

- [1] G. Nagasubramanian, R.G. Jungst, and D.H. Do-ughty, "Impedance, Power, Energy, and Pulse Performance Characteristics of Small Li-ion Cells," *J. Power Sources*, Vol.83, 1999, pp.193-203.
- [2] S.S. Zhang, K. Xu, and T.R. Jow, "Study of the Charging Process of a LiCoO₂-based Li-ion Battery," *J. Power Sources*, Vol.160, 2006, pp. 1349-1354.
- [3] Y. Saito, "Thermal Behaviors of Lithium-ion Batteries During High-rate Pulse Cycling," *J. Power Sources*, Vol.146, 2005, pp.770-774.
- [4] J. Li, E. Murphy, J. Winnick, and P.A. Kohl, "The Effects of Pulse Charging on Cycling Characteristics of Commercial Lithium-ion Batteries," *J. Power Sources*, Vol.102, 2001, pp. 302-309.
- [5] P.H.L. Notten, J.H.G. Op het Veld, and J.R.G. van Beek, "Boostcharging Li-ion Batteries: A Challenging New Charging Concept," *J. Power Sources*, Vol.145, 2005, pp.89-94.
- [6] S.K. Chung, A.A. Andriiko, A.P. Mon'ko, and S.H. Lee, "On Charge Conditions for Li-ion and Other Secondary Lithium Batteries with Solid Intercalation Electrodes," *J. Power Sources*, Vol. 79, 1999, pp.205-211.
- [7] G. Sikha, P. Ramadass, B.S. Haran, R.E. White, B.N. and Popov, "Comparison of the Capacity

● 용어 해설 ●

리튬이차전지: 리튬이온(Li⁺)이 양극과 음극을 오가는 carrier로 존재하면서 충전과 방전을 가역적으로 행할 수 있는 전지
 리튬이온전지(Lithium-ion Battery): 리튬전이금속 산화물 양전극과 흑연계 음전극이 다공성 올레핀 격자막으로 분리되고 리튬염이 유기용매에 녹아 있는 전해액을 사용하는, 공칭전압 3.7V의 고성능 리튬이차전지로서 1991년 Sony가 세계 최초로 상용화함. 현재 휴대폰, 노트북 PC 등 대부분의 모바일 단말의 주전원으로 사용되고 있음

- Fade of Soony US18650 Cells Charged with Different Protocols," *J. Power Sources*, Vol.122, 2003, pp.67-76.
- [8] S.S. Zhang, "The Effect of the Charging Protocol on the Cycle Life of a Li-ion Battery," *J. Power Sources*, Vol.161, 2006, pp.1385-1391.
- [9] Y.-H. Liu, J.-H. Teng, and Y.-C. Lin, "Search for an Optimal Rapid Charging Pattern for Lithium-ion Batteries Using and Colony System Algorithm," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol.52, No.5, 2005, pp.1328-1336.
- [10] P.E. de Jongh and P.H.L. Notten, "Effect of Current Pulses on Lithium Intercalation Batteries," *Solid State Ionics*, Vol.148, 2002, pp.259-268.
- [11] B.K. Purushothaman and U. Landau, "Rapid Charging of Lithium-ion Batteries Using Pulsed Currents," *J. Electrochem. Soc.*, Vol.153, 2006, pp.A533-A542.
- [12] K.B. Chin, R.V. Bugga, M.C. Smart, K.A. Smith, and S.R. Narayanan, "Evaluation of Rapid Charge Methodologies for Li-ion Chemistry," *ECS Trans.*, Vol.11, No.29, 2008, pp.43-53.
- [13] C.-Y. Lin and S.-C. Yen, "The Application of Pulse Charge for Secondary Lithium Battery," *ECS Trans.*, Vol.11, No.29, 2008, pp.55-62.
- [14] S.-K. Hu, T.-C. Chou, and B.-J. Hwang, "Effect of Cathode Structure on Cell Performance in Wireless Charging Process," *J. Power Sources*, Vol.146, 2005, pp.606-610.