

리튬이차전지 출력측정법의 원리 및 측정법간 비교 연구

이혜원 · 이용민*

한밭대학교 화학생명공학과

(2012년 6월 13일 접수 : 2012년 8월 17일 채택)

Principles and Comparative Studies of Various Power Measurement Methods for Lithium Secondary Batteries

Hyewon Lee and Yong Min Lee*

Department of Chemical and Biological Engineering, Hanbat National University,
Daejeon 305-719, Republic of Korea

(Received June 13, 2012 : Accepted August 17, 2012)

초 록

리튬이차전지의 수요가 소형 휴대용 전자기기에서 중대형 전기자동차와 에너지저장장치로 변화함에 따라, 요구되는 전지 특성도 크게 달라지고 있다. 10년 이상의 장기 신뢰성, 팩 수준의 안전성, 가격 경쟁력 확보 등 기존 소형 전지보다 크게 강화된 요구 조건뿐만 아니라, 고출력 특성도 함께 필요로 한다. 그런데, 출력을 측정하기 위해서는 전압과 전류가 동시에 측정 및 제어되어야 하기 때문에, 기존의 단위셀 용량 측정보다 훨씬 어렵다. 또한, 측정 방법의 선택뿐만 아니라 출력유지시간, 충전상태(State-of-Charge, SOC), Cut-off 조건, 측정온도 등의 측정 조건에 따라서도 그 측정값이 크게 달라지는 경향이 있다. 본 논문에서는 HPPC (Hybrid Pulse Power Characterization)법, J-pulse(Japan Electric Vehicle Association Standards, JEVS D 713)법, 정출력 측정법(Constant Power Measurement)의 측정 원리 및 실제 실험에 어떻게 적용해야 하는지 설명하고, HEV(Hybrid Electric Vehicle)용 단위셀을 이용해 출력법간 측정 결과를 비교 분석한다.

Abstract : As the market of lithium secondary batteries moves from mobile IT devices to large-format electric vehicles or energy storage systems, the strengthened battery specifications such as long-term reliability longer than 10 years, pack-level safety and tough competitive price have been required. Moreover, even though high power properties should also be achieved for hybrid electric vehicles, it is not easy to measure accurate power values at various conditions. Because it is difficult to choose a proper measurement method and its experimental condition is more complex comparing to capacity measurement. In addition, the power values are very sensitive to power duration time, state-of-charge (SOC) of cells, cut-off voltages, and temperatures, whereas capacity values are not. In this paper, we introduce three kinds of power measurement methods, hybrid pulse power characterization (HPPC) suggested by US FreedomCar, so-called J-pulse by Japan electric vehicle association standards (JEVS) and constant power measurement, respectively. Moreover, with pouch-type unit cells for HEV, experimental power data are discussed in order to compare each power measurement.

*E-mail: yongmin.lee@hanbat.ac.kr

Keywords : Power measurement, Hybrid pulse power characterization (HPPC), J-pulse, Electric vehicle, Lithium secondary battery

1. 서 론

소형 리튬이차전지와 비교하여 전기자동차용 중대형 리튬이차전지에서는 고출력 특성이 필요한데, 이는 전기자동차의 전기 모터를 구동하기 위해 필요한 수십 kW의 출력을 제공하기 위함이다. 기존의 소형 리튬이차전지는 고에너지밀도 구현을 목표로 설계되었기 때문에, 수십 개의 단위셀을 팩으로 구성하더라도 상기의 출력 특성을 만족시킬 수 없다. 이로 인해 고출력 전지의 개발이 필요하게 되었고, 전기 소재뿐만 아니라 설계의 변화를 통해 리튬이차전지의 출력 특성을 크게 향상시킬 수 있었다.^{1,2)} 그러나, 전기자동차 시스템에서 요구된 수십 kW 출력을 고출력 단위셀로도 감당할 수 없기 때문에, 다수의 단위셀을 포함한 팩의 구성은 피할 수 없다. 전기자동차 시스템에서 요구된 출력(= 전압 × 전류)을 달성하기 위해서는 팩의 전압 및 전류값을 높여야 한다. 팩의 전압은 단전지의 직렬 연결을 통해 높일 수 있으나, 시스템에서 허용할 수 있는 전압 상한치로 인해 단위셀의 개수가 제한된다. 또한, 단위셀의 허용 전류값을 높이기 위해 고출력 구현이 가능한 전기 설계를 하지만, 이것도 한계가 있기 때문에 현재 시판되고 있는 HEV용 단위셀의 경우 전기 용량을 약 5 Ah 이상으로 높여야만 했다. 이러한 일련의 개발 과정에서 새롭게 주목받는 전기 화학적 특성이 바로 출력이다. 출력은 단위 시간당 한 일의 양으로, SI 단위로는 W(와트) 또는 J/s를 사용하나 전기적 관점으로는 전압(V)과 전류(I)의 곱으로 표현된다.

그러나, 단순한 물리량으로 보이는 출력을 실제 단위셀 또는 팩을 이용해 측정하는 것은 다음의 이유로 그렇게 쉽지 않다. 먼저, 일정량의 출력값을 유지하기 위해서는 전압과 전류를 지속적으로 측정하고 전압과 전류의 곱이 일정하도록 제어해야 하기 때문에 정밀하고 최대 전류 허용치가 높은 장비를 사용해야만 한다. 또한, 해당 출력 값이 얼마나 오랫동안 유지되어야 하는 지에 따라서 출력값이 크게 달라질 뿐만 아니라, 충전상태(State-of-charge, SOC), Cut-off 전압 조건, 측정 온도 등에 민감하게 변화한다. 이는 출력 측정 방법 및 조건을 제대로 이해하고 설정하지 못하면 출력값을 정확히 측정할 수 없다는 것을 의미한다.

가장 많이 사용되고 있는 측정법은 미국 Freedom CAR Battery Test Manual에 제안된 Hybrid Pulse Power Characteristics(HPPC) 방법이다.³⁾ 이 방법은

하나의 단전지로 다양한 SOC의 출력값을 신속하게 측정할 수 있는 장점이 있으나, 하나의 전류값에서 측정된 전압 변화로 출력을 예측한다는 근본적인 단점이 있다. 반면, 일본전동차량협회에서 제안한 J-pulse 방법은 HPPC 방법보다 복잡하지만, 하나의 전류가 아닌 고전류에서의 전압 변화도 측정하고 이를 출력치로 환산하기 때문에 정확도가 높다고 알려져 있다.⁴⁾ 또한, 독일 자동차 협회에서 제시한 VDA 방법도 있으나, 이 방법은 정확한 출력 측정보다는 상대적 비교 용도로 적합해 보인다.⁵⁾ 그러나, 상기 방법은 모두 실제 출력을 직접 측정했다기 보다는 짧은 시간에 정출력을 예측할 수 있는 모사법이란 한계가 있다. 따라서, 상기 출력법에 의한 출력 측정이 정출력과 어느 정도 일치하는 지 확인하는 연구가 필요한 것은 당연하다. 특히 최근 들어 HEV, PHEV, EV 등 다양한 전기자동차용 중대형 리튬이차전지 연구가 활발히 진행됨에 따라 출력 및 신뢰성 확보를 위한 평가 기법 연구가 활발히 진행되고 있는 것도 이와 동일한 이유 때문이다.⁶⁻¹⁰⁾

따라서, 본 연구에서는 대표적인 모사 출력 측정법인 HPPC법과 J-pulse 방법의 측정 원리를 설명하고, 이것이 정출력 측정과는 어떻게 다른 지 비교 분석한다. 그리고, 실제 HEV용 단위셀을 이용하여 SOC 및 온도 변화에 따른 각 출력법간 정확도를 비교하였다.

2. 실험방법

2.1. HEV용 단위셀 특성

본 연구에 사용된 단위셀은 HEV급 Pouch 전지로서, 양극 및 음극 Tab이 동일 방향으로 위치되도록 설계되었다. 양극은 LiMn_2O_4 와 $\text{Li}(\text{Ni}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3})\text{O}_2$ 가 혼합된 것을, 음극으로는 표면이 개질된 천연 흑연을 사용하였고, 고출력 특성 구현을 위해 전극 코팅 두께를 낮췄다. 분리막은 고출력 특성 구현을 위해 고기공도 제품을 사용하였으나, 전해질은 일반적인 카보네이트계 유기용매에 LiPF_6 리튬염을 도입된 것을 적용하였다. 본 연구에서는 용량이 $6640 \pm 13.4 \text{ mAh}$, 30°C , SOC50%에서 HPPC 방전 출력은 $1312 \pm 7.3 \text{ W}$ 그리고 충전 출력이 $988 \pm 6.6 \text{ W}$ 인 유사한 단위셀을 선택하여 사용하였다. 또한, 각 정출력 측정시 새로운 단위셀을 적용하여, 단위셀 열화가 정출력 측정에 영향을 주지 않도록 했다.

Temp. (°C)	SOC (%)			
	20	40	60	80
-10				
10				
30				
45				

10 Second Discharge/Charge(Regen) Power

Fig. 1. Experimental conditions of state-of-charge (SOC) and temperature for 10 second discharge/charge(regen) power.

2.3. 출력 측정

HPPC, J-pulse, 그리고 정출력법에 의한 단위셀 출력은 10초 출력을 기준으로 측정되었다. Fig. 1에 나타난 바와 같이 단위셀의 충전상태(SOC)는 20, 40, 60, 80%로, 측정 온도는 -10, 10, 30, 45°C로 변화시켰다. 출력 측정 시 높은 전류값을 약 10초간 흐르게 하면서 전압 변화를 정확하게 측정해야 하기 때문에, 단위셀 리드탭과 도선 연결용 Jig의 접촉 저항도 출력값에 미치는 영향이 크다. 그래서, 토크렌치를 이용하여 리드탭과 도선 연결용 Jig간 접촉 상태를 제어하였다.

충방전기는 PNE사의 5 V/200 A, 5 V/300 A, 5 V/500 A 및 5 V/1000 A급 고전류 기기를 사용하였으며, 출력 측정 방법 및 조건에 적절한 충방전기를 선택하였다. 특히, 온도 변화에 따른 출력 측정 시, 30도 이상의 온도에서는 최소 1시간 이상, 30도 미만에서는 최소 3시간 이상의 안정화 시간을 통해 단위셀의 온도가 측정 온도에 충분히 도달할 수 있는 시간을 확보하였고 이를 Thermocouple를 이용하여 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2(a)에 도시된 바와 같이 휴대전자기기(IT)용 소형 리튬이차전지는 완전 충전 후 저율의 방전만으로 전 SOC 영역을 사용하는 반면, 전기자동차용 중대형 리튬이차전지는 고율의 Pulse형태의 방전과 충전이 좁은 SOC 영역에서 연속적으로 진행된다. 이는 전기자동차에 장착되어 있는 전기모터를 적절히 구동시키기 위해서는 순간적인 높은 출력이 요구되기 때문이다. 특히, 전기자동차에 추가적인 동력이 필요한 경우 리튬이차전지의 방전을 통해 전기모터를 구동시키고, 전기자동차가 감속할 경우 전기모터를 발전기로 이용하여 차량의 운동에너지를 전기에너지로 변환하여 리튬이차전지를 충전하게 된다. 이런 이유로 단위셀의 충전 출력은 방전 출력 못지 않게 중요하게 고려되어야 한다.

Fig. 2(b)는 SOC에 따른 방전 및 충전 출력 특성 변화를 모식적으로 나타낸다. 방전 출력의 경우 SOC가 높아짐에 따라 방전 Cut-off 조건에서 멀어지게 되므로 출력값이 증가하게 되는 반면, 충전 출력은 충전 Cut-off 조건에 가까워지게 되므로 감소하게 된다. 따라서, SOC에 따른 방전 출력과 충전 출력은 정반대의 경향성을 갖게 되고, Fig. 2(b)와 같이 X자 형태로 만나게 된다. 그런데, 여기서 주의할 점은 일반적으로 충전 출력은 방전 출력보다 낮은 값을 나타내기 때문에, 충전 출력 축의 Scale은 방전 충전 출력 축의 Scale보다 작게 표시하여 약 SOC50% 근처에서 교점이 만들어지도록 조정한다. 이 때, 전기자동차 시스템이 요구하는 방전 출력과 충전 출력이 같은 높이에 있도록 SOC 축에 평행한 요구 출력선을 그린다. 이 그림에서 실선은 초기 상태(Beginning of Life,

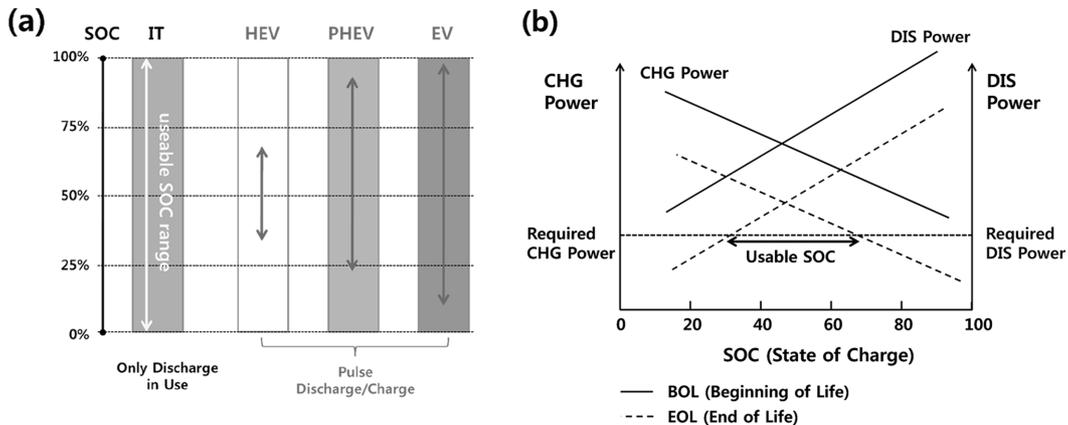


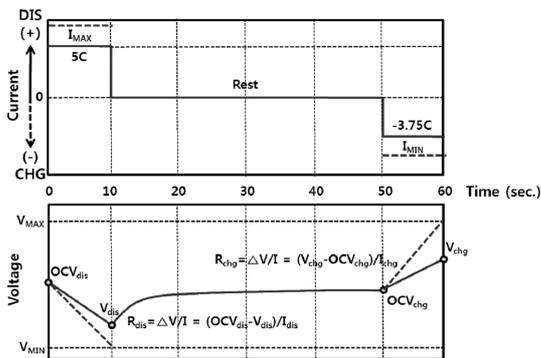
Fig. 2. (a) Battery operation modes as a point of state-of-charge (SOC) according to applications (b) Discharge (DIS) and charge (CHG) power values as a function of SOC at beginning of life (BOL) and end of life (EOL).

BOL)의 SOC변화에 따른 방전 및 충전 출력값을, 점선은 보증 수명 이후(End of Life, EOL)의 방전 및 충전 출력값을 각각 나타낸 것이다. EOL 상태의 방전 및 충전 출력값이 요구출력선과 만나는 두 점이 보증 기간 내 사용이 가능한 SOC 영역이 된다. 따라서, 전기자동차 사용 환경에서 리튬이차전지의 출력 열화 거동을 Fig. 2(b)와 같이 파악할 수 있어야 하기 때문에, 정확한 출력 측정법 개발이 필요한 것이다.

가장 대표적인 출력 측정법인 HPPC법의 측정 원리는 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다. 특정 SOC의 단위셀에 5C의 정전류(Constant Current, CC)로 10초간 방전한 다음 40초 휴지 시간을 주고, 3.75C 정전류로 10초간 충전하면서 전압변화를 측정하면 10초 방전 및 충전 출력값으로 환산할 수 있다. 여기서 10초 방전 출력의 의미는 해당 출력값으로 방전하면 10초 이후에 Cut-off 조건에 도달한다는 것이다. 같은 맥락으로 10초 충전 출력은 해당 출력값으로 충전하면 10초 이후에 충전 Cut-off 조건에 도달한다. 따라서, 동일한 상태의 단위셀이라도 출력 유지 시간이 줄어들면 출력값은 증가하게 되고, 출력 유지 시간이 늘어나면 출력값은 감소하게 되는 것이다.

그렇다면, 10초 방전 혹은 충전하면서 측정한 전압 변화로 어떻게 출력으로 환산할 수 있을까? Fig. 3의 아래 그림에서 10초 방전 상황을 고려하면, 방전이 시작되기 직전의 전압(OCV_{dis})과 10초 방전 종료 전압(V_{dis})을 측정할 수 있다. 이 때, 단위셀에 걸리는 저항은 Ohm의 법칙에 근거하여 아래의 식 (1)과 같이 표현할 수 있는데, 이를 DC-IR이라 부른다.

$$R_{dis} = \Delta V / I = (OCV_{dis} - V_{dis}) / I_{dis} \quad (1)$$



$$\text{Discharge Power} = V_{MIN} \times I_{MAX} = V_{MIN} \times (OCV_{dis} - V_{MIN}) / R_{dis}$$

$$\text{Charge Power} = V_{MAX} \times I_{MIN} = V_{MAX} \times (V_{MAX} - OCV_{chg}) / R_{chg}$$

Fig. 3. Principles of hybrid pulse power characteristics (HPPC) power measurement method.

HPPC법의 출력 측정 원리에서 가장 중요한 점은 5C 방전 조건에서 계산된 DC-IR 값(R_{dis})은 전류가 높아지더라도 일정하다고 가정하는 것이다. 한편, 측정은 5C 방전만 측정하지만, 방전 전류 값을 조금씩 높여간다고 생각하면 10초 방전 종료 전압은 점점 낮아지게 될 것이다. 이 때, 임의의 전류값(I_{MAX})으로 10초 방전 시 종료 전압이 정확히 Cut-off 전압(V_{MIN})에 도달한다고 생각할 수 있고, 식 (2)와 같이 전류 I_{MAX}와 전압 V_{MIN}의 곱으로 출력값을 표현할 수 있다. 그러나, 출력값을 계산하기 위해서는 I_{MAX}를 구해야 하는데, 바로 이 때 앞에서 측정한 DC-IR를 사용해야 한다. 전류값 변화에 상관없이 DC-IR이 일정하기 때문에 식 (3)이 성립할 수 있고, 여기서 I_{MAX}를 OCV_{dis}, V_{MIN} 그리고 R_{dis}으로 표현할 수 있어 식 (4)와 같이 출력을 구할 수 있다.

$$\text{DIS Power} = V_{MIN} \times I_{MAX} \quad (2)$$

$$R_{dis} = (OCV_{dis} - V_{MIN}) / I_{MAX}$$

$$\rightarrow I_{MAX} = (OCV_{dis} - V_{MIN}) / R_{dis} \quad (3)$$

$$\text{DIS Power} = V_{MIN} \times (OCV_{dis} - V_{MIN}) / R_{dis} \quad (4)$$

이와 유사한 방법으로 충전 출력도 식 (5)~(8)과 같이 계산할 수 있는데, 방전 시에는 지속적으로 전압이 떨어지기 때문에 일정 출력을 유지하기 위해서는 전류가 증가해야 하는 반면, 충전 시에는 전압이 올라가기 때문에 전류가 감소해야 한다. 이런 이유로 식 (6)에서와 같이 충전 출력이 V_{MAX}와 I_{MIN}의 곱으로 표현되게 된다.

$$R_{chg} = \Delta V / I = (V_{chg} - OCV_{chg}) / I_{chg} \quad (5)$$

$$\text{CHG Power} = V_{MAX} \times I_{MIN} \quad (6)$$

$$R_{chg} = (V_{MAX} - OCV_{chg}) / I_{MIN}$$

$$\rightarrow I_{MIN} = (V_{MAX} - OCV_{chg}) / R_{chg} \quad (7)$$

$$\text{CHG Power} = V_{MAX} \times (V_{MAX} - OCV_{chg}) / R_{chg} \quad (8)$$

이와 같은 HPPC 출력 측정법의 장점은 특정 SOC에서의 방전 출력과 충전 출력을 측정하는 데 60초 밖에 걸리지 않는다는 것이다. 물론, 특정 SOC로 변화시키기 위해 충전 또는 방전하는 시간과 측정 시작 전 단위셀의 전압과 온도가 안정화되는 시간은 필요하지만, 하나의 측정 온도에서 SOC를 변화시키면서 모든 방전 및 충전 출력을 측정하는 데 수 시간이면 충분하다. 하지만, 저온에서 HPPC법으로 출력 측정할 경우에는 안정화 시간을 상온보다 충분히 길게 주어

야 하는데, 이는 SOC를 맞추는 과정에서 발생한 열로 인한 단전지의 온도가 상승해 실제 출력값보다 높을 값을 얻을 수 있기 오차를 차단하기 위함이다. 또한, 전지 특성에 따라 5 C 방전 및 3.75 C 충전 전류값도 저온에서는 낮춰서 적용할 수 있다.

한편, 현장에서 HPPC법으로 중대형 리튬이차전지의 출력을 측정하다 보면, 정확한 출력값을 구하기 쉽지 않다는 것을 체험할 수 있다. 이는 HPPC법이 원리적으로 5 C와 같은 낮은 전류 측정치로 높은 전류가 흐르는 실제 출력을 예측하기 때문이다. 또한, 출력 측정은 온도에 매우 민감한 반면, 아무리 정밀한 항온조라 하더라도 항온조 내 위치에 따라 온도 차가 발생할 수 있기 때문이다. 따라서, HPPC 출력 측정 시 각 단위셀의 온도도 충방전기에서 측정하여 출력 환산 시 보정해주어야 한다. 보정치는 전극 및 전해질 소재의 특성이나 단위셀의 설계에 따라 달라지겠지만, 본 논문에서 사용된 HEV용 단위셀은 온도 1°C 변화에 따라 약 3%의 출력이 달라진다. 따라서, 하나의 단위셀을 특정 항온조 및 도선 연결용 Jig 환경에서 온도 변화에 따른 출력을 측정하고, 이를 바탕으로 보정치를 확보해야 정확한 출력 계산이 가능하다.

HPPC 출력 측정법의 이러한 단점을 보완할 수 있는 측정법으로 일본전동차량협회에서 제안한 J-pulse 출력 측정법이 있다. HPPC법이 하나의 전류값에서 확보한 DC-IR 값으로 고전류가 흐르는 Pulse 출력 상황을 유추한다면, J-pulse 방법의 특징은 전류값을 점점 증가시키면서 단위셀의 전압 변화를 통해 출력값을 예측한다는 점에서 실제 상황에 더욱 유사하다. Fig. 4(a)에서 도식한 것과 같이, 기준 충방전 전류(I_r)를 정하고 낮은 전류에서부터 높은 전류까지 변화시키면서 10초 방전 또는 충전을 진행한 다음 종료 전압을 측정한다. 본 연구에서는 20, 40, 60, 80A의 전

류값을 선택하여 10초 방전 및 충전 출력을 측정하였고, 10분의 휴지 기간을 주어 단위셀의 전압 및 온도가 충분히 안정화 될 수 있도록 설정하였다. 그러나, 온도가 -10°C인 경우에는 전류값을 10, 20, 30, 40A로 낮춰 측정하였는데, 이는 저온에서는 iR 전압 강하가 크기 때문에 높은 전류 조건에서는 10초 방전 및 충전이 진행되기 전에 Cut-off 조건에 도달하거나 열화가 진행될 수 있기 때문이다.

각 전류값에서 측정된 10초 종료 전압을 각각 x-좌표와 y-좌표로 표시하면 Fig. 4(b)와 같이 도시할 수 있다. 이를 직선의 함수로 회귀선을 그리면, 전류가 흐르지 않을 때의 전압인 OCV(Open-Circuit Voltage)와 10초 방전 및 충전으로 Cut-off 전압에 도달할 수 있는 전류값(I_{MAX} for DIS Power, I_{MIN} for CHG Power)을 구할 수 있게 된다. 그럼 HPPC 방법과 같은 원리로 방전 출력은 V_{MIN} × I_{MAX}로, 충전 출력은 V_{MAX} × I_{MIN}로 구할 수 있다. 단, 각 전류값(I_{MAX}, I_{MIN})를 Fig. 4(b)에서 구한 회귀선의 함수식을 이용하게 되는데, y-좌표가 각각 방전 및 충전 Cut-off 전압일 때의 x-좌표인 전류값을 구한다는 점이 HPPC법과는 다르다. 정리하면, J-pulse 방법에 의한 방전 및 충전 출력을 구하는 방법은 식 (9)와 (10)으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{DIS Power} &= V_{\text{MIN}} \times I_{\text{MAX}} \\ &= V_{\text{MIN}} \times (V_{\text{MIN}} - \text{OCV}_{\text{dis}}) / S_{\text{dis}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \text{CHG Power} &= V_{\text{MAX}} \times I_{\text{MIN}} \\ &= V_{\text{MAX}} \times (V_{\text{MAX}} - \text{OCV}_{\text{chg}}) / S_{\text{chg}} \end{aligned} \quad (10)$$

그런데, J-pulse 방법으로 충전 출력을 측정할 때, SOC가 떨어지는 문제를 고려해야 한다. 예를 들어 80 A의 전류로 10초간 방전하게 되면, 6.5 Ah의 단위

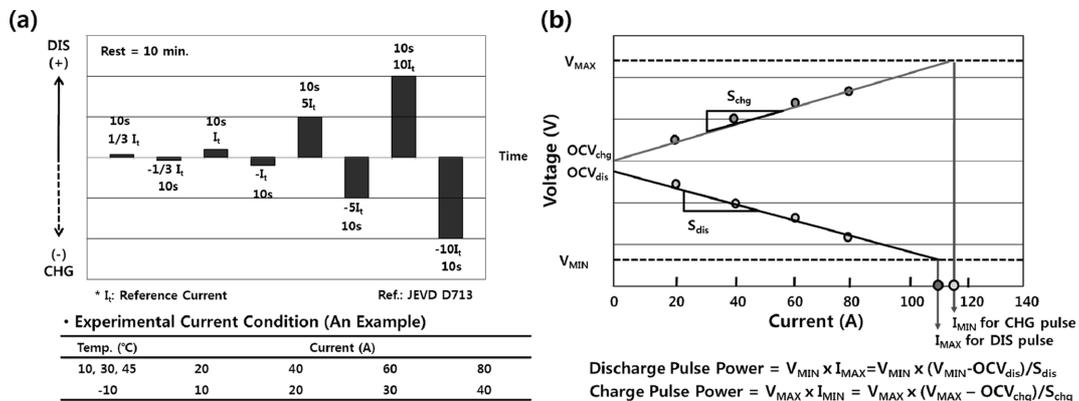


Fig. 4. (a) Current condition for J-pulse power measurement (b) Schematic diagram of J-pulse power measurement method to find out each power value.

셀인 경우 SOC가 약 3.4%의 떨어진 상태에서 충전 출력을 측정하게 되는 것이다. 이로 인해 충전 출력은 예측된 SOC보다 낮은 SOC에서 측정되어, 충전 출력 값이 약간 높게 측정될 수 있다. 따라서, J-pulse법으로 정확한 충전 출력을 측정하기 위해서 충전부터 측정하면 해결할 수 있으나, 실험에 소요되는 자원이 2배나 늘어나는 문제점이 있다.

마지막 출력 측정법으로 단위셀을 일정 출력 (Constant Power, CP)으로 방전 및 충전하면서 출력을 측정하는 방법인 정출력 측정법이다. 정출력법은 단위셀의 출력을 가장 정확하게 측정할 수 있지만, 출력 측정 시 필요한 단위셀 수가 크게 증가하고 고전류 충방전기가 필요하기 때문에 비용과 시간이 많이 드는 단점이 있다. 특정 SOC에서 10초 방전 출력을 측정하기 위해서는 Fig. 5(a)와 같이 최소한 단위셀 4개가 필요하다. 첫번째 단계는 4개의 단위셀을 특정 SOC로 맞추는 것이고, 두번째 단계는 정출력이 진행될 항온조(일반적으로 측정 온도로 먼저 Setting해 놓음)로 옮겨 측정 온도에 도달할 때까지 기다리는 것이다. 마지막 단계는 10초 동안 유지될 출력값을 임의로 예상해서, CP 방전 또는 충전을 진행한다. 이 때, 첫번째 단위셀의 유지시간이 10초 미만이면, 그 다음 단위셀부터는 출력값을 점차 줄이면서 유지시간이 10초 이상이 되도록 조절한다. 반대의 경우면 출력값을 증가시키면서 유지 시간을 측정한다 다음, 내삽 또는 외삽을 활용해서 유지 시간 10초에 해당하는 출력값을 구할 수 있다.

Fig. 5(b)는 30°C에서 SOC40%인 HEV용 단위셀의 정출력 측정시 얻어진 CP 방전 또는 충전에 따른 전압 Profile이다. 방전 출력의 경우 CP 출력값을 1100, 1000, 900, 950 W 순으로 변화시키면서 유지 시간을 측정한다 다음, 내삽을 통해 10초 방전 출력이 992 W라는 것을 얻을 수 있다. 단, 마지막 출력값이 800 W가 아니고 950 W인 이유는 900 W의 유지 시간이 약

12.5초로 너무 길어져, 출력을 높여 10초 근처로 줄이기 위함이다. 이와 같이 실제 실험시에 출력값에 따른 유지 시간의 변화를 실시간 관찰하면서 다음 출력값을 적절히 변화시켜야 한다. 충전 출력 측정도 마찬가지로 방법으로 수행할 수 있는데, 충전 출력은 Cut-off 전압 근처에서 평탄 전압 구간이 형성될 수 있으므로 이 때는 예상 출력값 선택 간격을 줄여야 한다.

한편, CP 출력 측정 초기에 원하는 출력값까지 도달하는 데 약간의 시간이 소요되며, 이는 사용하는 장비 정밀도에 따라 달라질 수 있다. 따라서, 2초 출력처럼 출력 유지 시간이 짧은 정출력 측정을 위해서는 정밀도가 높은 제품을 사용해야 한다. 그렇지 않으면, 정출력 결과가 HPPC나 J-pulse처럼 모사 기법으로 측정된 출력값보다 부정확할 수 있으니 주의해야 한다.

지금까지 세 가지 출력 측정법의 원리 및 측정 방법에 대해 자세히 정리하였다. 리튬이차전지의 단위셀의 정출력을 측정하기 위해서는 단위셀의 개수뿐만 아니라 소요 시간 그리고 필요 충방전기 사양 등 모든 필요 자원이 크게 증가한다. 이런 이유로 실제 개발 현장에서는 정출력보다는 HPPC법이나 J-pulse법을 이용하여 출력값을 측정하고 개발품간 비교 분석을 한다. 그러나, 최종 개발품에 대한 정출력값을 고려해야 하기 때문에 HPPC법이나 J-pulse법 등으로 측정된 출력값이 정출력과 어느 정도 정확도를 확보하고 있는지 파악해야 한다. 이를 위해 HEV용 Pouch 단위셀을 이용하여, 온도 및 SOC 변화에 따른 각 출력법으로 측정된 출력값을 Figs. 6과 7에 나타내었다. 단, 본 실험 결과는 특정 단위셀에 기초로 한 결과로서 전지 Chemistry 및 설계에 따라 크게 달라질 수 있다는 점을 유의해야 한다.

Fig. 6은 온도별 SOC에 따른 방전 출력을 나타내었다. 우선, 모든 측정 온도에서 정출력법으로 측정된 출력값과 HPPC법 및 J-pulse 출력법으로 측정된 출력값 간에 상당한 차이가 확인되었으며, 이는 온도에 따

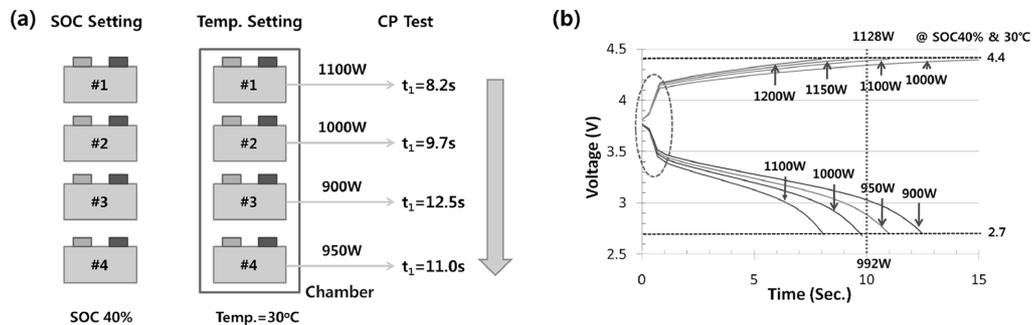


Fig. 5. (a) Procedures to prepare unit cells for constant power measurements (b) Voltage profiles as a function of duration time while changing each power value.

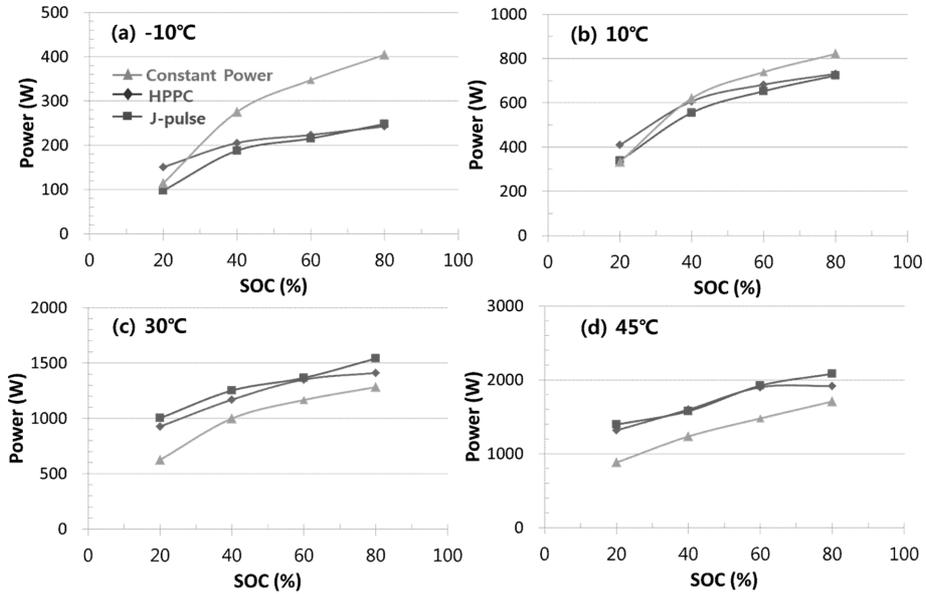


Fig. 6. 10 second discharge power values under different SOC's and temperatures.

라 다른 경향을 나타내고 있다. 30°C 이상에서는 HPPC법 및 J-pulse법으로 측정된 출력값이 정출력값보다 크게 측정된 반면, 10°C에서는 유사하게 그리고 -10°C에서는 정출력값이 더 커지는 경향성을 나타내었다. 이에 대한 원인으로 정출력 측정시 발생하는 열이 고려될 수 있다. 저온에서는 정출력 측정시 발생하는 열로 인해 단위셀의 내부 온도가 상승해서

출력값이 높게 측정된 것으로 생각된다. 이에 대한 근거로 Fig. 6(a)에서 SOC20%인 경우에는 흐르는 전류값이 크지 않기 때문에, 발열에 의한 출력값 상승이 관찰되지 않았다. 그러나, SOC가 높아짐에 따라 정출력값이 HPPC 및 J-pulse법으로 측정된 값보다 크게 증가되는 것이 관찰되는데, 이를 통해 단위셀 발열에 의한 출력값 상승으로 유추할 수 있다. 반면, 온도가

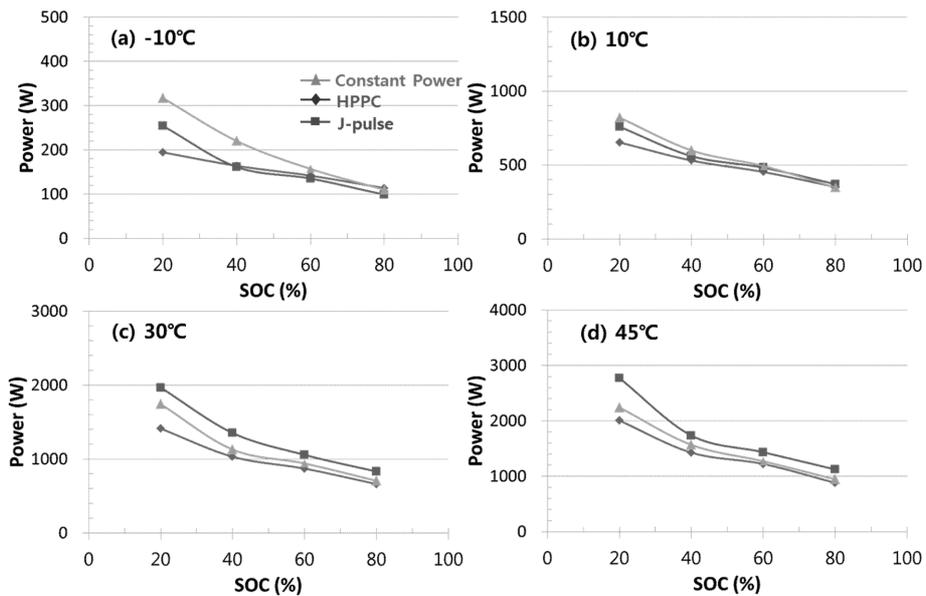


Fig. 7. 10 second charge power values under different SOC's and temperatures.

상온 이상인 경우, 정출력값이 HPPC나 J-pulse로 측정된 값보다 낮게 측정되는 경향이 확인되었다. 이는 HPPC와 J-Pulse가 실제 흐르는 전류 대비 낮은 전류값에서 측정된 실험결과를 기초로 실제 출력을 예측하기 때문이다. 따라서, 상온 이상에서도 실제 출력을 정확히 예측할 수 있도록 HPPC 및 J-pulse 출력 측정법의 적절한 보완이 필요하다.

온도별 충전 출력의 경우 Fig. 7에 나타내었는데, -10 및 10°C 의 저온 영역에서는 방전 출력과 유사하였으나 30°C 이상에서는 J-pulse법이 가장 높게 HPPC법이 가장 낮게 측정되었다. -10°C 영역에서는 SOC80%처럼 저전류가 흐르는 영역에서는 정출력값이 HPPC와 J-pulse와 유사하나, SOC가 낮아지게 되면 흐르는 전류값이 상승하고 발열로 인해 정출력이 가장 높게 측정되고, 그 다음으로 J-pulse법이고 가장 낮은 출력값은 HPPC법에 의해 측정되었다. 그리고, 방전 출력 거동과 마찬가지로 10°C 에서 측정시 측정방법에 상관없이 유사한 출력값을 나타내었다. 반면, 30°C 이상에서는 예상과는 다르게 HPPC로 측정된 출력값이 정출력보다 조금 낮게 측정되었는데, 이는 식(5)의 $\text{DC-IR}(R_{\text{chg}})$ 값이 크게 측정된 것에 의한 결과로 생각되지만 정확한 원인은 명확하지 않다. 하지만, HPPC법이 원리상으로는 정확도가 제일 떨어지지만, 본 연구에서는 상온이상의 충전출력 측정에서는 J-pulse보다 상대적으로 정확했다. J-pulse법이 상온 이상에서 높은 충전 출력값을 나타낼 수 있는 이유로, 앞서 언급한 충전 출력 측정시 SOC가 낮은 상태에서 측정되어 출력값이 약간 상승할 수 있는 점을 고려할 수 있다. 그러나, SOC 변화 대비 측정된 충전 출력값 변화가 너무 크기 때문에, 이를 주요 원인으로 해석할 수 없고 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

하지만, 상기의 출력 거동은 특정 단위셀의 거동일 뿐, 보편적인 경향성이 아니란 점을 다시 한 번 강조한다. 그러나, 고출력 단위셀 개발을 위해서는 정확한 출력법 개발이 필요하고, 간단히 측정되는 출력법이 정출력과 어떤 경향성이 있는지 파악하는 것은 연구개발 속도를 높이기 위해 필히 확인되어야 할 부분이다. 따라서, 리튬이차전지 출력 측정법에 대한 이해와 더욱 정확하고 효율적인 측정법 개발이 지속적으로 요구된다.

4. 결 론

리튬이차전지 출력 측정을 위한 HPPC법, J-pulse법, 그리고 정출력법의 원리와 각 측정 방법의 특징을 비교분석하였다. 또한, HEV용 단위셀을 이용해 SOC와 온도 변화에 따른 10초 방전 및 충전 출력을 각 측정

법으로 확인하였다. 이를 통해 저온에서는 단위셀 발열로 인해 정출력값이 HPPC법과 J-pulse 법으로 얻은 출력값보다 크게 측정되고, 상온이상에서는 발열에 의한 전기 저항 증가로 정출력값이 떨어지는 경향을 나타냈다. 그 결과 HPPC법과 J-pulse법으로 측정된 출력값은 약 10°C 근처에서 정출력과 유사한 결과를 나타낼 수 있었다. 한편, J-pulse법이 이론적으로 더 정확할 것으로 예상되었지만, 결과적으로 HPPC법과 유사한 출력값을 나타내었고, 상온이상의 충전 출력에서는 HPPC가 더 정확한 값을 예측해냈다. 그러나, 본 연구 결과는 단위셀의 Chemistry와 설계에 따라 충분히 달라질 수 있어 좀 더 폭넓은 경우에 대한 연구가 필요하지만, 효율적인 고출력 리튬이차전지 개발을 위해 중요한 기초 연구라 생각된다.

감사의 글

본 논문은 2010년도 국립 한밭대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

References

1. M. H. Ryou, Y. M. Lee, J. K. Park, and J. W. Choi, 'Mussel-inspired polydopamine-treated polyethylene separators for high-power Li-ion batteries' *Advanced Materials*, **23**, 3066 (2011).
2. Y. M. Lee, Y. G. Lee, Y. M. Kang, and K. Y. Cho, 'Nature of Tris(pentafluorophenyl)borane as a functional additive and its contribution to high-rate performance in lithium ion secondary battery' *Electrochemical and Solid-state Letters*, **13**(5), A55 (2010).
3. G. Hunt, 'FreedomCAR battery test manual for power-assist hybrid electric vehicles', 24, Idaho National Engineering & Environmental Laboratory, Idaho (2003).
4. Japan Electric Vehicle Association, 'Power density and regenerative power density test procedures of sealed nickel-metal hybrid batteries for hybrid-electric vehicles' JEVs D 713, Tokyo (2003).
5. Verband der Automobilindustrie(VDA), 'Test specification for Li-ion battery systems in hybrid electric vehicles' Berlin (2007).
6. J. Belt, V. Utgikar, and I. Bloom, 'Calendar and PHEV cycle life aging of high-energy, lithium-ion cells containing blended spinel and layered-oxide cathodes' *Journal of Power Sources*, **196**(23), 10213 (2011).
7. I. Belharouak, G. M. Koenig Jr., and K. Amine, 'Electrochemistry and safety of $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ and graphite anodes paired with LiMn_2O_4 for hybrid electric vehicle Li-ion battery applications' *Journal of Power Sources*, **196**(23), 10344 (2011).
8. S. Yoon, I. Hwang, C. W. Lee, H. S. Ko, K. H. Han, 'Power capability analysis in lithium ion batteries using

- electrochemical impedance spectroscopy' *Journal of Electroanalytical Chemistry*, **655**, 32 (2011).
9. J. P. Christophersen, G. L. Hunt, C. D. Ho, D. Howell, 'Pulse resistance effects due to charging or discharging of high-power lithium-ion cells: A path dependence study' *Journal of Power Sources*, **173(2)**, 998 (2007).
10. D.P. Abraham, J.L. Knuth, D.W. Dees, I. Bloom, J.P. Christophersen, 'Performance degradation of high-power lithium-ion cells-Electrochemistry of harvested electrodes' *Journal of Power Sources*, **170(2)**, 465 (2007).