

# 온도의 영향성을 고려한 리튬폴리머 전지의 절대용량 추정 방법

김한경<sup>1)</sup> · 광기호<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제5기술연구본부

## Absolute Capacity Estimation Method with Temperature Effect for a Small Lithium-polymer Battery

Hankyong Kim<sup>1)</sup> · Kiho Kwak<sup>\*,1)</sup>

<sup>1)</sup> The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 August 2015 / Revised 5 January 2016 / Accepted 15 January 2016)

### ABSTRACT

Military devices and systems powered by batteries need to operate at extreme temperature and estimate the available capacity of the battery at different temperature conditions. However, accurate estimation of battery capacity is challenging due to the temperature-sensitive nature of electrochemical energy storage. In this paper, Peukert's equation with temperature factor is derived, and methods for estimating the absolute capacity of lithium-polymer battery and the state-of-charge(SOC) with respect to varying currents and temperatures are presented. The proposed estimation method is experimentally verified under three different discharge currents(0.5 A, 1 A, 3 A) and six different temperatures ranging from -30 to 45 deg. C. The results show the proposed method reduces the Peukert's estimation error by up to 30 % under or at extreme condition.

Key Words : Battery Fuel Gauge(전지 연료게이지), Lithium-polymer Battery(리튬폴리머 전지), Absolute Capacity(절대 용량), Residual Capacity(잔존용량)

### 1. 서 론

전지는 휴대가 가능한 전원장치로서 다양한 분야에서 폭 넓게 이용되고 있다. 특히, 재충전이 가능한 2차 전지계열의 리튬폴리머 전지는 단위체적당 에너지 밀도가 높아 민수용, 군용 및 우주항공과 대규모 플랜

트의 고용량 전원공급장치 등에 사용될 정도로 그 이용도가 넓고 다양하다. 전지를 이용하는 시스템은 운용하는데 있어 잔존용량을 정확히 추정하는 것은 필수적이다.

전지를 사용하는 시스템의 운용에 있어서 온도조건(화염, 우천, 계절에 따른 온도 변화)은 전지의 용량 변화를 추정하는데 있어 매우 중요한 변수이다. 전지는 화학적 에너지 저장장치이며 화학반응에 의하여 전원을 생성하고 저장된 에너지는 노후화 변수를 제외하

\* Corresponding author, kkwak.add@gmail.com  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

면 일정한 온도에서 일정한 용량을 갖는다. 하지만 운용온도가 상승할 경우 잔존용량이 늘어나고 온도가 하강할 경우 용량이 줄어드는 일반적 특성을 가지고 있다. 즉, 다시 말하면 온도에 따라 전지의 용량은 달라지며 온도와 전지의 용량은 서로 밀접한 관계를 가지고 있다는 것이다. 이러한 현상은 전지를 연료로 보았을 때에 온도에 따라 연료게이지(battery fuel gauge)가 일정한 용량 정보를 줄 수 없다는 뜻이며 이 정보는 운용자에게 신뢰도를 떨어뜨릴 수 있는 직접적인 요인이 될 수 있다. 따라서 다양한 환경에 노출되는 장비의 원활한 운용을 위해서는 온도 변화와 관계없이 연료게이지는 항상 일정한 용량을 나타낼 수 있도록 절대적인 기준을 제공해야만 한다.

정확한 잔존용량을 추정하기 위해서는 앞에서 언급한 바와 같이 온도 조건에 따라서 용량이 달라지기 때문에 온도의 영향을 반영하여야 한다. 최근까지 정확한 잔존용량을 추정하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔으며 그 추정 방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다.

첫 번째 추정 방법은 전극의 재료 및 구조, 전해질의 재료, 확산 계수, 전달 계수, 반응률 계수 등을 이용한 화학적 모델을 이용하는 방법이다<sup>12)</sup>. 현재까지 잔존용량을 추정하는 방법 중에서 가장 정확한 성능을 나타낸다. 그러나 화학적 모델 방법은 고려해야 할 많은 요소들과 복잡한 화학 수식의 계산과정을 수행해야 하기 때문에 실질적 시스템 적용에는 제한이 있다.

두 번째 추정 방법은 경험적 시험모델을 이용한 방법으로 전지의 어떠한 특성을 이용하느냐에 따라 다시 두 가지로 나눌 수 있다. 첫 번째가 개방전압과 용량의 관계를 이용하는 방법으로 온도에 따른 전지의 상태마다 개방전압과 잔존용량의 관계를 시험을 시행하여 데이터 맵을 작성하고 이를 토대로 잔존용량을 추정하는 방법이다<sup>13,14)</sup>. 이 방법은 정확도를 높이기 위해 전지의 휴지기간을 일정하다고 가정하고 전지의 종류가 단일하다는 가정 하에 추정하는 방법이기 때문에 휴지조건이 달라지면 추정하기 어렵고 데이터 맵의 정보를 저장해야하는 큰 메모리가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 두 번째 방법은 전지의 방전 특성을 이용하여 용량을 추정하는 방법이다. 이 방법은 전류를 누적하는 방법이기 때문에 초기 용량 추정오차에 따라 오차가 발생하는 단점이 있으나 접근 방법이 매우 간단하여 시스템 적용이 쉬운 장점을 가지고 있다. 방전특성을 이용하여 용량을 차감하는 방식으로 잔존용량을 추정하는 방법으로 푸커트 방정식(Peukert's

Equation)을 대표적으로 언급할 수 있는데 1897년 푸커트가 다양한 납축전지의 방전실험을 이용하여 방전 용량과 전류와의 관계를 간단한 수식으로 표현하였다. 푸커트 방정식은 무척 단순하고 직관적으로 이해하기 쉽다는 장점을 가지고 있어 실제 전원공급장치의 전원 감시용으로 적용하려는 연구들이 있었다.

일정한 전류와 온도에서 세워진 푸커트 방정식이 현실적으로 변화하는 전류와 온도에 대하여 적용하기 어렵고 이로 인해 오차도 크게 발생한다는 연구결과들이 발표되었다. Doerffel과 Sharkh는 푸커트 방정식의 일정한 온도와 전류의 실험으로 산출된 태생적인 이유로 일정한 온도와 전류가 아니면 잔존용량을 추정할 수 없다는 연구결과를 발표하였고 이후에 Haussman과 Depcik은 푸커트 방정식을 온도에 관한 항을 추가하여 잔존 용량 추정 방법을 제안하였다<sup>5,6)</sup>. 하지만 이 추정 방법은 시험결과에 추정식을 일치시키다보니 초기 용량 설정 방법이 명확하지 않고 설계자의 초기값을 설정하는 기준에 따라 오차가 많은 차이를 나타낼 수 있는 단점을 가지고 있다.

본 논문에서는 푸커트 방정식을 이용하여 운용자로서 하여금 온도가 변화할 때 용량이 변화되어 나타나는 잔존용량을 하나의 연료게이지로 표시할 수 있는 절대용량 추정 방법을 제시하고 운용 전류 및 온도에 따라 전지의 방전 상태를 운용 효율로 표시할 수 있는 방법에 대하여 제안한다. 또한 오프라인에서 연계 되는 계수를 온도 변화에 따라 추정하고 이를 이용하여 기존의 푸커트 방정식으로 잔존용량을 추정할 수 있음을 제안한다. 제안한 방법의 우수한 성능에 대하여 0.5 A, 1 A, 3 A의 3단계 전류와 온도범위 -30 ~ 45 °C의 6지점에서의 실험을 수행하여 보이도록 한다.

2절에서는 기존의 푸커트 방정식을 검토하고 3절에서는 제안하는 방법, 4절에서는 시험환경, 5절에서는 결과 및 고찰, 6절에서는 결과로 마무리 한다. 그리고 절대 기준이라 함은 절대용량을 나타내는 온도 조건을 의미하는 것으로 정의하며 제안하는 방법의 설명을 위해 약어는 Table 1에 정리하였다.

## 2. 푸커트 방정식(Peukert's Equation)

푸커트는 1897년 여러 가지 납축전지를 이용하여 방전 실험을 수행하고 방전전류 크기에 따른 용량과의 간단한 관계식 (1)을 발표하였다.

Table 1. List of abbreviations

$C_{abs}$	절대용량
$C_{conv}$	온도변화 후 상대용량
$\Delta C$	온도변화 전·후의 용량변화
$C_{remain}$	잔존용량
$C_d$	방전용량
$K_{abs}$	절대용량에서의 K계수
$K_{conv}$	온도변화 후 상대용량에서의 K계수
$n$	퓨커트 전류계수
$\alpha$	온도변화 후 전류 확대계수
$\eta$	방전상태 효율
'	온도변화 후의 표기
$T$	온도
$I_d$	방전전류
$I_{abs}$	절대용량에서의 방전전류
$I_{max}$	최대방전전류
$I_{min}$	최소방전전류
$t_{max}$	최대방전전류에서의 방전시간
$t_{min}$	최소방전전류에서의 방전시간

$$C_a = K/I_d^{n-1} \quad (1)$$

이 때,  $C_a$ 는 잔존용량,  $I_d$ 는 방전전류, 계수  $n$ ,  $K$ 는 사용하는 전지의 구조, 물성과 온도특성을 고려한 계수이며 운용전류 범위에서 가장 작은 전류와 가장 큰 전류의 두 지점을 이용하여 구한다. 이때 퓨커트 계수  $n$ ,  $K$ 는 식 (2)와 (3)으로 표현된다.

$$n = \frac{\log t_{min} - \log t_{max}}{\log I_{max} - \log I_{min}} \quad (2)$$

$$K = I_{max}^n \cdot t_{max} = I_{min}^n \cdot t_{min} \quad (3)$$

위 식에서  $I_{max}$ 와  $I_{min}$ 은 운용 전류범위 [ $I_{max}$ ,  $I_{min}$ ]에

서 최대방전전류와 최소방전전류이며  $t_{max}$ 와  $t_{min}$ 은 각각 최대방전전류와 최소방전전류에 대한 방전운용 시간이다. 그리고 식 (3)은 용량과의 관계를 나타내는 식 (4)로 바꿔 쓸 수 있다.

$$K = I_{max} \cdot t_{max} \cdot I_{max}^{n-1} = I_{min} \cdot t_{min} \cdot I_{min}^{n-1} \quad (4)$$

식 (4)에서 방전전류와 방전시간의 곱은 용량을 나타내므로  $I_{max} \cdot t_{max} = C_{max}$ 와  $I_{min} \cdot t_{min} = C_{min}$ 으로 대체할 수 있고 그 관계식은 아래와 같다.

$$C_{max} \cdot I_{max}^{n-1} = C_{min} \cdot I_{min}^{n-1} \quad (5)$$

식 (5)을 용량과 방전전류의 관계를 다시 정리하면 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{C_{max}}{C_{min}} = \left( \frac{I_{min}}{I_{max}} \right)^{n-1} \quad (6)$$

식 (6)에서 잔존용량은  $I_{max}$ 와  $I_{min}$  중에서 하나를  $I_d$ 로 대체하여 계산할 수 있다. 사용한 용량은 방전시간을 누적하여 계산하게 되며 누적하는 식은 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$C_d = \sum(I_d \cdot \Delta t) \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 잔존하게 되는 용량을 추정하게 되는데 현재까지 사용한 용량을 과거까지 사용한 양에서 누적한다. 잔존용량을 추정하는 식은 아래와 같다.

$$C_{remain}(i+1) = C_{remain}(i) - C_d \quad (8)$$

이와 같은 과정을 거쳐 잔존용량을 추정하는 퓨커트 방정식은 운용전류 범위 안의 방전전류를 평균을 적용하여 계산하기 때문에 최대전류나 최소전류에 위치적으로 먼 전류를 사용할수록 오차가 커지게 된다. 이를 보완하기 위해 운용전류의 범위를 다단계로 나누어 각 단계에서 계산된 계수를 사용하는 방법들이 제안되었다. 하지만 이러한 방법들에서 사용하는 기존의 퓨커트 방정식은 일정한 온도와 전류의 조건에 의해 생성된 실험측정치로부터 도출된 식이기 때문에 다양한 온도 및 전류조건을 만족시킬 수 없다.

### 3. 제안하는 방법

제안하는 방법은 첫째로 전지 연료계이지를 표시하기 위해 전지의 운용 온도가 변하더라도 용량을 나타내는 연료계이지는 항상 일정한 용량으로 표시하도록 절대용량으로 환산하도록 하여 운용자가 잔존용량을 판단하는데 있어 직관적 판단의 도움을 주고자하는 것이며 추가적으로 현재 방전되는 상태의 운용효율을 표시하도록 하여 전지의 운용 상태를 알리도록 하는데 목적이 있다. 둘째로 온도변화에 의해 달라지는 용량을 기존의 퓨커트 방정식을 이용하여 추정하기 위해  $n$ ,  $K$  계수를 최적화하고 정확한 잔존용량을 추정하는데 목적이 있다.

#### 3.1 전지 연료계이지를 위한 절대용량 산출방법

퓨커트 방정식에서 제시하는 최대 용량을 갖는 온도에서의 방전전압 곡선은 Fig. 1에서 보이는 바와 같다. 통상적으로 최대방전 용량을 나타내는 온도에서 운용 온도가 내려갈 경우에 용량이 줄어들고 방전전압 곡선의 형태도 다르게 된다.

Fig. 1은 온도가 변경될 경우에 퓨커트 계수  $n$ ,  $K$  와 용량의 변화를 도식적으로 나타낸 것이다. 용량은 단순히 방전전류와 방전시간의 곱으로 표현함으로 방전전류가 일정할 때에 온도가 낮아지게 되면 용량은  $\Delta C = C_{abs} - C_{conv}$  만큼의 차이가 발생하게 된다. 이때,  $C_{abs}$ 는 전지의 절대용량으로 최대 용량을 나타내

는 온도 조건에서의 용량이며  $C_{conv}$ 는 온도가 변화하여 나타나는 상대 용량으로 정의한다. 최대 용량을 나타내는 온도조건에서 방전하던 전지가 온도조건이 변하여 용량이 낮아질 경우에  $I_{max}$  와  $I_{min}$ 의 방전전압 곡선은  $I'_{max}$  와  $I'_{min}$ 의 곡선으로 각각 변하게 되며 이 방전전류들은  $[t_{max}, t_{min}]$ 와  $[t'_{max}, t'_{min}]$ 의 방전시간을 나타내게 된다.

방전전류가 같은 조건에서 온도 조건만 달라져도 용량의 변화를 가져오게 되며 이 변화는  $\Delta C$  만큼의 용량차를 발생시키는 결과를 가져오게 된다. 이러한 온도 변화에 따른 용량변화를 설명하기 위해 일정한 온도 조건에서 방전전류의 크기에 따라 변화하는 용량을 추정하는 방법인 퓨커트 방정식은 태생적으로 어려운 단점을 갖고 있다. 그러나 온도 변화에 따른 영향성을 방전전류와 그 확대계수로 표현하게 되면 일정한 온도에서의 퓨커트 방정식을 이용할 수 있게 된다. 다시 말해서, 온도의 영향성에 따른 용량 변화를 방전시간의 변화로, 방전시간의 변화를 방전전류의 크기 변화로 환산시킬 수 있으며 온도조건의 변화에 따른 방전전류의 크기를 확대계수로 표현하게 되면서 운용범위 안에서 일정한 온도조건의 퓨커트 방정식으로 표현이 가능하게 된다. 온도변화는 퓨커트 방정식의 경우 계수  $n$ ,  $K$ 가 변화하지만 전류의 크기로 환산할 경우 확대계수의 변화만으로 표현이 가능해진다. 또한, 부가적으로 방전전류의 크기 변화로 표현하게 됨으로써 확대계수를 방전상태의 효율로 나타낼 수 있다.

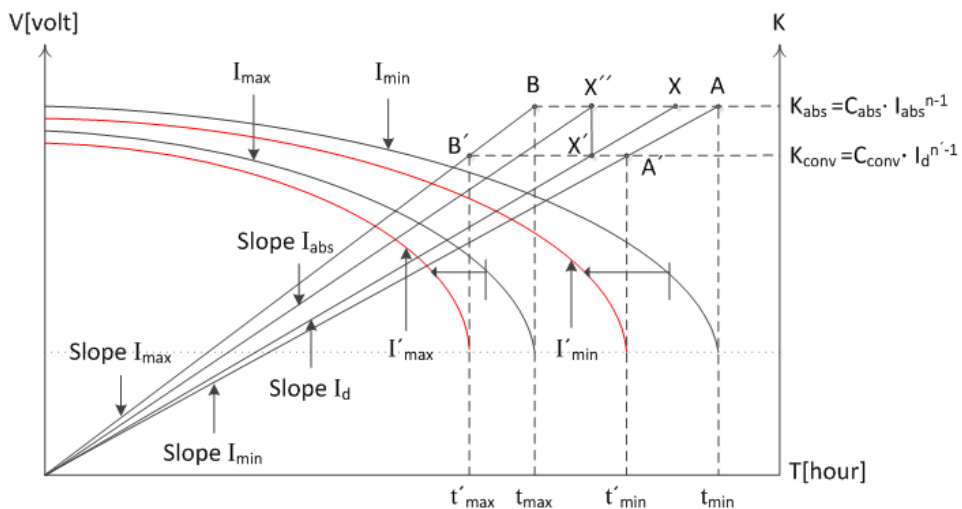


Fig. 1. General change of discharge current curves when temperature is changed

예를 들어, 절대용량을 나타내는 온도조건이 아닌 다른 온도  $T'$ 에서 전지를 운용한다고 가정할 때, 식 (2), (3)에서 나타내는 계수  $n$ ,  $K$ 는 다음과 같이 식 (9), (10)으로 표현할 수 있다.

$$n' = \frac{\log t'_{\min} - \log t'_{\max}}{\log I'_{\max} - \log I'_{\min}} \quad (9)$$

$$K' = I'_{\max}{}^{n'} \cdot t'_{\max} = I'_{\min}{}^{n'} \cdot t'_{\min} \quad (10)$$

온도가 변한 후의 퓨커트의 계수  $n$ ,  $K$ 가 달라짐을 알 수 있다. 계수의 변화는 실질적으로  $I'_{\max} = I_{\max}$ 이며  $I'_{\min} = I_{\min}$ 으로 전류의 변화는 없으며 방전시간만이 변화를 발생시키는 요소가 된다. 이를 이용하여 변화된 용량과의 관계를 도출하면, 온도변화 후의 임의의 방전전류를  $I_d \in [I_{\min}, I_{\max}]$ 라고 할 때, 식 (10)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$K' = I_d^{n'} \cdot t'_d = I'_{\min}{}^{n'} \cdot t'_{\min} = I'_{\max}{}^{n'} \cdot t'_{\max} \quad (11)$$

식 (11)에서 온도변화 후의 퓨커트 계수  $K'$ 는 Fig.1에서  $K_{conv}$ 와 같다. 용량과의 관계를 나타내는 계수  $K$ 축은 식 (5)와 같은 용량과의 관계를 갖고 있다. 임의의  $I_d$ 는 절대용량을 나타내는 온도조건에서는  $X$ 와 만나는 지점의 방전시간을 갖게 되며 온도 변화 후에는  $X'$ 와 만나는 지점에서의 방전시간을 갖게 된다. 여기에서  $X'$ 와 만나는 지점의 방전시간을 절대용량을 나타내는 지점으로 환산하게 되면  $X''$ 가 된다. 원점으로부터  $X''$ 의 지점을 잇는 기울기를 구하게 되면 절대용량에서 사용하는 전류의 크기를 구할 수 있다. 임의의 방전전류의 크기를 절대용량으로 환산하기 위해 다음의 과정을 통해 구한다.

- 1) 온도변화 후의 방전시간을 식 (12)를 이용하여 추정한다.

$$t_d = K' / I_d^{n'} \quad (12)$$

- 2) 위에서 구한 방전시간을 절대용량을 나타내는 관계식 (13)과 (14)을 이용하여 전류값을 구한다.

$$I_{abs}^n = K_{abs} / t_d \quad (13)$$

$$I_{abs} = 10^{\left( \frac{\log \left( \frac{K_{abs}}{t_d} \right)}{n} \right)} \quad (14)$$

- 3) 식 (14)를 이용하여 구한 절대용량으로 환산한 전류  $I_{abs}$ 는 식 (5)를 이용하여 절대용량으로 환산할 수 있다. 온도변화에 의해 달라지는 상대용량을 절대용량으로 환산한 결과는 아래의 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$C_{abs} = K_{abs} / I_{abs}^{n-1} \quad (15)$$

- 4) 절대용량으로 환산한 전류  $I_{abs}$ 는 가장 좋은 용량을 갖는 온도조건에서의 전류이기 때문에  $I_d$ 보다 항상 크다. 즉, 절대용량조건으로 환산한 전류크기와 방전전류는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$I_{abs} = \alpha \cdot I_d, \alpha \geq 1 \quad (16)$$

위의 관계식으로 중요한 결과를 얻을 수 있다. 방전 전류와 절대용량으로 환산하면서 더 큰 전류를 사용하는 현상으로 볼 수 있으며 식 (16)의 전류의 상수항은 확대계수로 표현이 가능하다. 이 상수항의 역수를 취하게 되면 운용 중인 전류의 상태를 나타내는 효율 정보를 식 (17)의  $\eta$ 로 나타낼 수 있다.

$$\alpha = I_{abs} / I_d, \eta = 1/\alpha \quad (17)$$

### 3.2 온도변화를 반영한 퓨커트 방정식

앞 절에서 언급한 바와 같이 기존의 퓨커트 방정식은 일정한 온도와 방전전류를 사용한 조건에서 도출된 경험적 모델로 온도변화를 반영하기에는 제한적 특성을 가지고 있다. 그러나 목표 오차를 설정하고 운용 온도와 방전전류의 범위를 제한적으로 운용한다면 기존의 퓨커트 방정식을 이용할 수 있다. 제안하는 퓨커트 방정식은 온도에 따른  $n$ ,  $K$ 계수를 방전시험을 이용하여 구하고 이를 계수 추정 곡선으로 이용한다. 전지의 잔량을 추정할 때는 운용하는 전지의 온도변화를 측정하여 계수를 새롭게 갱신하고 사용한 용량을 누적하여 추정하도록 한다. 전지의 잔존용량을 추정하기 위해 다음과 같은 과정을 따른다.

- 1) 운용온도 구간을 설정하고 방전시험을 실시한다.

- 2) 방전시험을 실시한 온도지점에서 식 (2), (3)을 이용하여  $n$ ,  $K$ 계수를 구하고 Least squares 방법을 이용하여 각 계수의 추정 곡선을 만든다.
- 3) 운용하는 전지의 잔량을 추정하기 위해 방전전류와 운용 온도를 측정하고 온도에 맞는  $n$ ,  $K$ 계수를 추정한다.
- 4) 추정된  $n$ ,  $K$ 계수와 식 (12)-(17)을 이용하여 절대용량 기준으로 환산한 방전전류  $I_{abs}$ ,  $K_{abs}$ 와 방전상태효율  $\eta$ 를 계산한다.
- 5) 환산된  $I_{abs}$ ,  $K_{abs}$ 을 식 (15)을 이용하여  $C_{abs}$ 를 구하고 식 (7)과 (8)을 이용하여 잔존용량을 추정한다.

#### 4. 시험 환경

이 절에서는 제안한 방법의 검증을 위해 방전시험과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하여 성능을 검증한다. 방전시험을 위한 시료는 군용전지로 개발된 BB-7201K(리튬폴리머 : Li-polymer) 2조를 사용하였다. 시료는 공칭용량이 5 Ah이며 안전장치로 PCM(Protection Circuit Module)을 채용하였으며 에폭시 몰딩과 V-0 등급의 난연성 외장재질로 구성되어 있다. 과방전 방지를 위해 차단전압은 단전지의 안전전압 2.7 V와 단전지들 간의 전압 균형을 고려하여 21 V로 설정되어 있으며 과충전 방지를 위해 단전지의 최대 충전전압 4.2 V를 고려하여 29.4 V로 설정하고 PCM에서 이를 처리하도록 설계되어 있다. 그리고 방전시험 간의 충전은 제작사의 권고안을 준수하였다.

시험 온도조건은 MIL-STD-810F의 지상 육군 장비를 기준으로 -32~43 °C이나 학술적인 관점과 결과의 직관적 이해를 돕기 위해 -30~45 °C로 운용온도범위를 설정하고 15 °C의 일정 온도구간을 두어 총 6개의 온도 지점에서 방전시험을 시행하였다. 방전전류는 주어진 온도조건에서 전지운용이 가능한 전류범위 중에서 3종류( $C/10 = 0.5$  A,  $C/5 = 1$  A,  $3C/5 = 3$  A)의 전류를 사용하였다. 방전조건은 전자부하기(Array Electronics 3711A, 중국)를 이용하여 각 방전전류에서 C-C(Constant Current) 모드에서 방전하여 방전곡선을 얻었고 방전전류를 측정하기 위해 셉트저항(YOKOGAWA shunt

221510, 일본)을 직렬로 방전선로에 삽입하였다. 온도 환경을 모사하기 위해 온도챔버(Duocom Industries, Inc. THC-1600, 한국)를 이용하였고 시험온도조건에 도달하면 6시간의 온도안정화 구간을 두도록 하였다. 그리고 측정값을 저장하기 위해 데이터 취득장비(Graphtec GL500, 일본)를 이용하여 1 sample/초로 최종 데이터를 취득하도록 하였다. 취득한 데이터는 CSV 파일형태로 저장하였으며 MATLAB를 이용하여 방전곡선 및 시뮬레이션 결과를 나타내었다. Fig. 2는 시험구성을 나타내는 그림이다.



Fig. 2. Test apparatus

#### 5. 시험 결과 및 고찰

Fig. 3-5은 설정 온도에서 0.5 A, 1 A, 3 A를 방전시킨 방전곡선이다. 다른 연구결과에서 볼 수 있듯이 서로 다른 화학재료와 구조가 다르다하더라도 통상적으로 온도에 내려감에 따라 방전시간이 줄어드는 결과를 확인할 수 있다. 취득한 데이터를 이용하여 최소 및 최대 운용전류를 사용할 경우의 퓨커트 계수  $n$ ,  $K$ , 절대용량 조건으로 환산한 전류 크기 그리고 운용 효율을 구하게 되면 Table 2와 같다.

가장 중요한 논점은 온도가 변하더라도 용량의 정보는 변화 없이 일정하게 운용자에게 제공되어야 하며 절대용량 기준으로 잔존용량을 추정해야 한다는 것이다. 즉, 운용 전류범위 [ $I_{min} = 0.5$  A,  $I_{max} = 3$  A]에서 0.5 A로 운용할 때, 30°C에서는 5.4375 Ah를 나타내고 있으며 -30 °C에서는 4.3747 Ah를 나타낸다. 이 결과로 운용자에게 나타나는 정보는 약 29.45 %의 오차가 발

생하게 되며 이 오차는 전지의 용량계이지로 나타나게 되면 운용자에게 혼란을 일으키게 된다. 이 용량을 제한한 방법으로 표현하게 되면 5.3103 Ah로 약 2.35 % 오차로 용량의 표현이 가능하다. 이 오차를 분석해보면 퓨커트 방정식을 이용한 용량은 전류가 클수록 용량이 줄어드는 관계를 나타낸 방정식으로 Table 2에서 절대 기준으로 환산된 전류 값을 찾아보면 0.6605 A와 같다. 그러므로 전류가 커져서 용량이 줄어드는 용량이 표현된 것으로 오차는 훨씬 미미하다. 그리고 이 절대 용량으로 환산하는 과정에서 환산된 전류값 0.6605 A 로써 방전상태를 추정하면  $\alpha$ 는 1.3211배 커진 상태로 표시되어 운용효율  $\eta$ 는 75.69 %가 된다. 이 정보로 인해 운용자는 현재 효율이 좋지 않은 상태에서 운용된다는 것을 직관적으로 알 수 있게 된다. 앞에서 설명한 절대용량으로 환산된 용량을 산정하면 단위 시간에 대한 방전 용량을 알 수 있으며 단위 시간당 방전 용

량에 대하여 시간을 누적하고 사용한 용량을 누적하여 잔존용량을 추정할 수 있다.

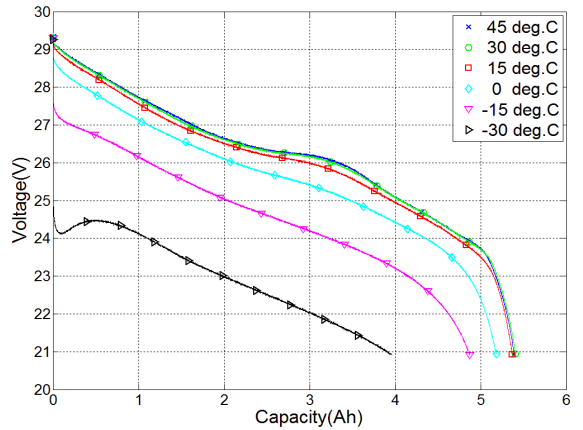


Fig. 4. Discharge curve at 1 A

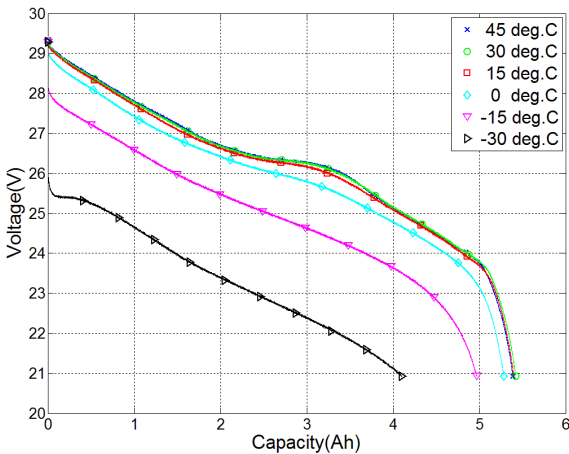


Fig. 3. Discharge curve at 0.5 A

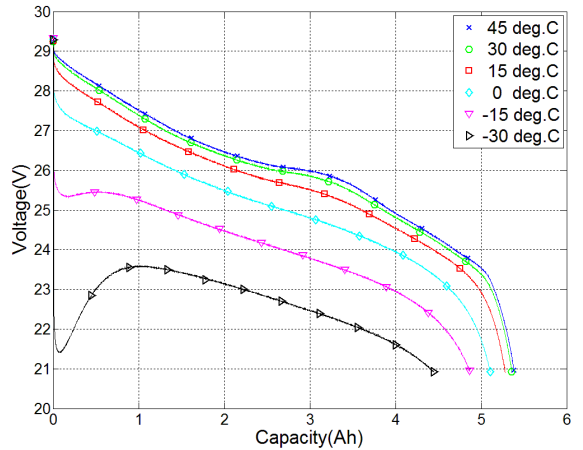


Fig. 5. Discharge curve at 3 A

Table 2. Calculated parameter in operating duration [ $I_{min}$ ,  $I_{max}$ ]

	$n$	$K$	$I_{min,abs}$ [A]	$I_{max,abs}$ [A]	$\eta_{min}$ [%]	$\eta_{max}$ [%]
45°C	1.0039	5.3931	0.5028	2.9970	99.4431	100.0100
30°C	1.0070	5.4112	0.5000	3.0000	100.0000	100.0000
15°C	1.0130	5.3667	0.5020	3.0446	99.5917	98.5319
0°C	1.0193	5.1980	0.5160	3.1642	96.8992	94.8137
-15°C	1.0116	4.9407	0.5455	3.3000	91.6506	90.9091
-30°C	0.9546	4.2392	0.6605	3.6106	75.6945	83.0910

Fig. 6-8는 시험시료 각각에 대하여 온도 조건에 따라 용량의 변화를 나타낸 곡선이다. 각각의 온도 조건에서 전류의 크기에 따른 용량 변화는 푸커트의 가정은 잘 들어맞는 것을 확인할 수 있다. 그러나 Fig. 8의 결과는 모든 온도에서 일정하게 나타나지 않는 것을 확인할 수 있는데 그 원인은 자기발열 효과(self-heating effect)에 의해 기인한다.

자기발열 효과는 Table 2의 계수  $n$ 의 변화로도 알 수 있는데 통상적으로 전지는  $n$ 이 1보다 큰 수를 갖는다. 그러나 계수의 변화를 살펴보면  $-30[^\circ\text{C}]$ 의 결과만을 제외한다면 모든 온도에서 1보다 큰 수를 나타낸다. 이 결과만 본다면 푸커트 방정식이 틀렸다고 볼 수 있지만 전지의 고유의 특성 중의 하나인 자기발열 효과를 간과한 것이다. 이 효과는 용량을 추정할 때

오차를 만드는 주요 원인이 된다.

Fig. 9과 10은 잔존용량을 추정한 결과를 나타낸다. Fig. 9는 기존의 푸커트 방정식을 이용하여 잔존용량을 추정한 결과이며 Fig. 10은 제안한 방법을 이용하여 잔존용량을 추정한 결과이다. Fig. 9에서는 기존의 푸커트 방정식을 이용하여 잔존용량을 추정할 경우에 가장 큰 오차는 약 38 %까지 이르게 되는 것을 알 수 있으며 온도가 낮을수록 운용 최소전류 및 최대전류와 멀수록 오차가 커지는 결과를 알 수 있다.

Fig. 10에서 온도 변화와 관계없이 절대용량으로 환산하고 사용한 용량을 누적하여 잔존용량을 추정한 방법은  $-30^\circ\text{C}$ , 1 A를 추정한 8 % 오차를 제외하고는 1 % 이하의 추정오차를 갖는다. 이 오차가 발생한 이유

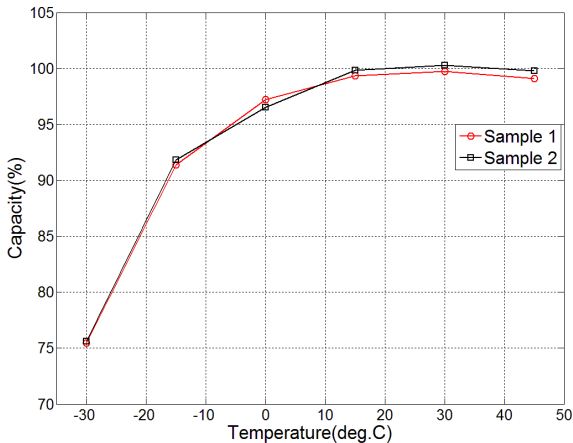


Fig. 6. Capacity variation at 0.5 A

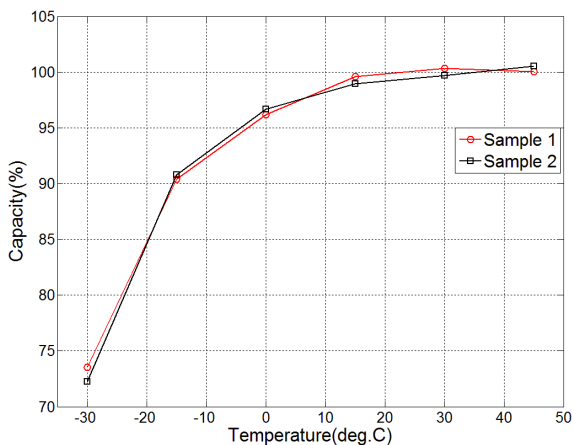


Fig. 7. Capacity variation at 1 A

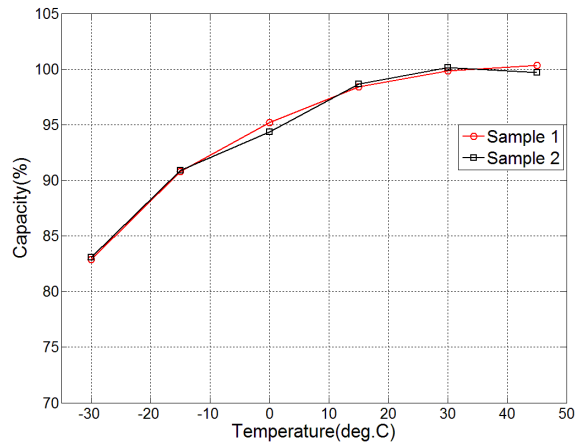


Fig. 8. Capacity variation at 3 A

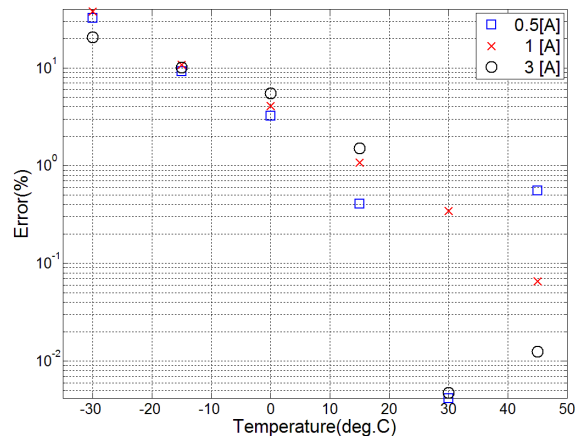


Fig. 9. Simulation results for error prediction with Peukert's method



는 앞에서 언급한 바와 같이 -30 °C에서 3 A의 방전결과가 자기발열 효과에 의해서 푸커트 방정식이 나타내는 관계를 벗어나는 원인이 되었으며 그 결과로 계수  $n$ 이 1보다 낮게 되어 나타난 결과이다.

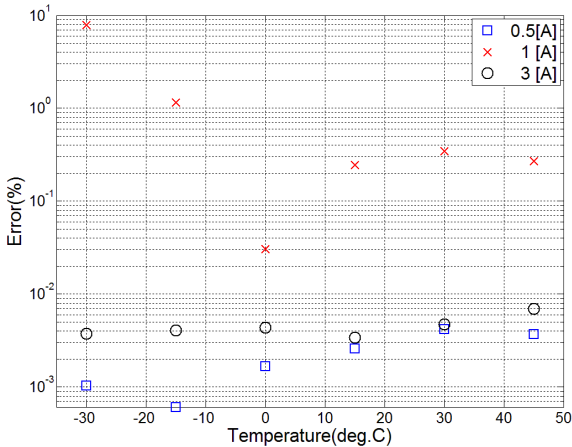


Fig. 10. Simulation results for error prediction with proposed method

## 6. 결론

전지를 주전원으로 이용하는 시스템은 운용자로 하여금 잔존 용량을 직관적으로 판단할 수 있도록 정보를 제공하는 것은 매우 중요하다. 그 잔존용량의 기준은 항상 일정해야하며 온도 조건이 변화한다 하더라도 용량 기준이 변화해서는 안 된다.

본 논문에서는 전지 연료게이지를 전시하는 방법으로 온도 조건에 따라 변화하는 전지 용량의 기준을 일정하게 추정할 수 있는 방법과 방전상태의 효율을 추정하는 방법을 제시하였다. 온도에 따라 간단한 추정 곡선을 구성하고 이를 기존의 푸커트 방정식의 계수를 최신했다. 최종적으로 잔존용량을 추정하는 방법으로 극히 일부분의 추정오차를 제외하고 1 % 내의 오

차를 나타내는 우수한 성능을 나타내는 결과를 보였다. 일부의 추정오차가 발생하는 이유는 자기발열 효과에 기인하며 이 결과로 더욱 정확한 추정을 위해서는 방전크기에 따른 전지 자체의 발열 효과에 대한 연구의 필요성을 확인하였다.

전지 연료게이지를 절대용량으로 표시함으로써 운용자로 하여금 중요한 정보를 직관적으로 얻을 수 있도록 하였다. 이 연구결과는 전지를 주전원 및 보조전원으로 이용하는 시스템에 대하여 중요한 운용 기준이 되며 다양한 응용 분야에 적용할 수 있다.

## References

- [1] W. Gu, C. Wang, "Thermal-Electrochemical Modeling of Battery Systems," Journal of Electrochemical Society, 147, pp. 2910-2922, 2000.
- [2] L. Song, J. W. Evans, "Electrochemical-Thermal Model of Lithium Polymer Batteries," Journal of Electro-chemical Society, 147, pp. 2086-2095, 2000.
- [3] B. Balasingam, et. al., "Performance Analysis Results of a Battery Fuel Gauge Algorithm at Multiple Temperatures," Journal of Power Sources, 273, pp. 742-753, 2015.
- [4] B. Pattipati, et. al., "Open Circuit Voltage Characterization of Lithium-ion Batteries," Journal of Power Sources, 269, pp. 317-333, 2014.
- [5] D. Doerffel, S. A. Sharkh, "A Critical Review of using the Peukert Equation for Determining the Remaining Capacity of Lead-acid and Lithium-ion Batteries," Journal of Power Sources, 155, pp. 395-400, 2006.
- [6] A. Hausmann, C. Depcik, "Expanding the Peukert Equation for Battery Capacity Modeling Through Inclusion of a Temperature Dependency," Journal of Power Sources, 235, pp. 148-158, 2013.