개선된 스마트 배터리 수명 예측 방법

전 기 소, 김 지 홍
서울대학교 전기.컴퓨터공학부
컴퓨터구조 및 내장형시스템 연구실
서울특별시 관악구 신림 9 동 산 56-1
Tel : 02-880-1861 Fax : 02-871-4912
Email: {kkiso, jihong}@davinci.snu.ac.kr

Abstract — *For battery-operated mobile devices, accurately estimating the battery lifetime is important. With incorrect lifetime information, user may lose important data or experience an unexpected termination of a service. Among possible solutions for estimating the battery lifetime, a smart battery technology is widely adopted for mobile devices such as notebook computers. While the current smart battery technology is good enough for rough gauging of the remaining battery capacity, it is not suitable for fine-grained power-aware computing such as battery-aware scheduling. In this paper, we introduce a precise lifetime prediction approach for lithium-ion batteries, considering battery' s discharging characteristics depending on voltage and current behaviors. Experimental results using a real PDA show that the proposed approach decreases the estimation errors up to 80 %*

I. 서 론

노트북, 스마트폰, PDA 등의 휴대용 기기의 사용이 빠르게 대중화되고 있다. 과거와 달리 한두가지의 단순한 기능이 아닌 다양하고 복잡한 기능들을 지원하게 되었기 때문에 그에 따라 요구되는 전력사용량 역시 증가하고 있다. 대부분의 휴대용 기기가 전력원으로 전지를 사용하는데 전력요구량의 증가속도에 비해 전지의 기술은 느리게 발전하고 있기 때문에 그 차이는 점점 커져가고 있다. 더군다나 휴대성을 위해 전지의 크기에도 한도가 있기 때문에 한정된 전력을 사용할 수 밖에 없다. 따라서 제한된 전지의 용량을 효율적으로 사용하기 위한 방법이 매우 중요한 문제가 되고 있다.

이를 위해 현재 전지가 제공할 수 있는 전력량이 얼마 남았으며, 이 잔량으로 어떤 프로그램을 얼마의 시간동안 수행할 수 있는지를 알 필요가 있다. 시스템에 이런 정보를 알려줄 수 있는 방법으로 스마트 배터리를 사용하는 것이 좋은 해결책이 될 수 있다. 스마트 배터리는 과충전, 과방전을 방지하는 보호회로를 포함하며 전지의 전압, 전류 및 온도 등의 데이터를 수집하고 이를 바탕으로 전지의 잔량과 사용가능시간을 예측하는 기능을 수행한다. 하지만 소모전력에 따라 전지가 제공할 수 있층 총용량이 일정하지 않으며 방전이 진행됨에 따라 같은 프로그램이 소모하는 전력이 일정하지 않고 증가하게 되는 등 다양한 비선형적인 특성을 가지고 있기 때문에 전지의 수명을 예측하는 방법은 간단하지가 않다. 기존의 스마트배터리에서 사용된 방법들은 이런 특성들이 배제되었거나 충분히 고려되지 않았기 때문에 비교적 높은 오차를 가지고 있었다. 본 논문에서는 전지의 전압과 전류의 작용에 기반한 방전특성들을 고려하여 전지의 잔량을 계산하는 방법을 사용하여 보다 정확한 사용가능시간을 예측하는 방법을 제안하고자 한다.

계속해서 본 논문에서는 2 장에서 전지의 방전시의 특성들에 대해 설명하고 3 장에서 스마트배터리의 간단한 구조에 대해 설명한 후 4 장에서는 기존에 사용된 방법들의 문제점을 알아본다. 5 장에서는 방전특성을 고려한 제안된 방법을 다루며 6 장에서 실험결과를 설명한 후 7 장에서 결론을 맺도록 한다.

II. 리튬이온 전지의 방전특성

전지는 그 화학적 성질에 따라 여러가지가 있는데 리튬이온 전지는 높은 에너지 밀도와 가벼운 무게 때문에 많은 휴대용 기기에 사용되고 있다. 전지를 구분할 때 큰 요소가 되는 전지의 총용량은 전지의 전압이 차단전압까지 떨어질 동안 전지가 제공한 총전력량을 말한다. 이것은 전지의 양극, 음극에서 산화, 환원 반응으로 생성되는 전하들의 총량이며 전지전압과 밀접한 관련이 있다. 총용량은 전지를 얼마나 사용할 수 있는지에 대한 전지수명시간을 예측하는데 매우 중요한 요소이므로 이를 파악하는 것이 중요하다. 하지만 이것은 일정하지 않고 부하에 따라 그 크기가 달라지기 때문에 계산하기가 쉽지 않다. 그림 1 은 부하 방전전류에 따른 총용량의 변화를 나타내는데, 방전전류가 커지면 총용량이 줄어드는 것을 알 수 있다. 이 때문에 전지용량은 기준 방전전류가 흐를 때 제공할 수 있는 표준용량과 다양한 방전전류들이 흐를 때 제공되는 실제용량으로 구분된다. 이렇게 전지의 총용량이 일정하지 않는 현상은 전지 방전의 특성인 Rate Capacity Effect 와 Recovery Effect 때문이다.[1]

Rate Capacity Effect 는 상당히 큰 전류가 흐를 경우 이온의 확산속도가 필요보다 늦고, 환원반응에 의한 침전물이 빨리 생성되어 이로 인해 추가적인 산화환원 반응을 방해하여 전지전압이 차단전압으로 일찍 감소하여 발생가능한 전하의 양이 줄어들어 제공할 수 있는 전력량이 줄어드는 것을 말한다. 반면 Recovery effect 는 방전전류의 크기가 줄어들거나 없어질 경우, 이온의 확산 정도가 충분해져 전지전압이 증가되어 전지가 제공할 수 있는 용량이 늘어나는 것을 말한다.

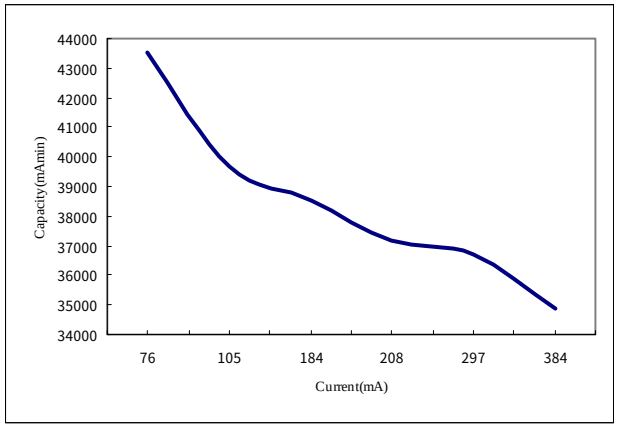

그림 1 방전전류에 따른 전지의 총용량의 변화

또 다른 방전특성으로 일정한 부하전류로 방전했음에도 불구하고 방전이 진행되면서 전지전압이 낮아짐과 동시에 방전전류가 계속 증가하는 경향이 있다. 그림 2 는 초기전류 크기가 290 mA 인 부하를 전지에 연결했을 때 방전이 진행되면서 방전전류가 증가하는 것을 보여준다. 이 현상은 전지가 방전동안에 전압이 낮아지지만 연결된 부하에 동일한 전압을 제공하기 위해 DC/DC 컨버터에서 소모되는 전력이 커져 전류가 증가되어 흐르게 되기 때문이다.[2]

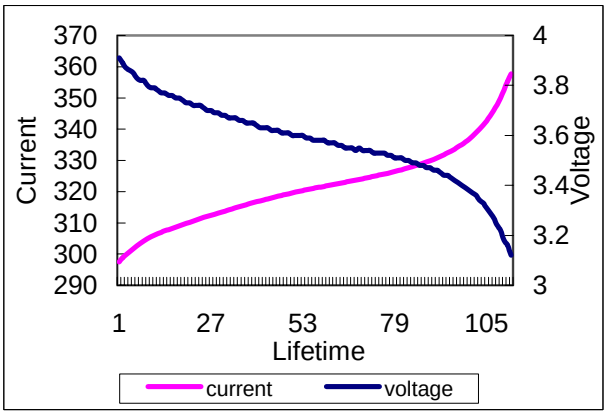

그림 2 방전시간에 따른 전압과 전류의 변화

본 논문에서는 스마트배터리에서 전지의 수명을 예측하는데 위의 다양한 전지의 방전특성을 고려하여 총용량을 계산하는 방법을 제안하고자 한다.

III. 스마트 배터리의 기본 구조

한정된 전지용량을 효율적으로 사용하기 위해서는 현재 전지의 잔량이 얼마인지 그리고 앞으로 사용가능한 전지수명은 얼마인지 아는 것이 중요한데 스마트배터리가 좋은 해결책이 된다. 스마트배터리는 전지의 전류, 전압, 온도 등의 데이터를 수집하고 전지가 제공할 수 있는 전력량과 사용가능시간을 제공하는 기능을 한다.

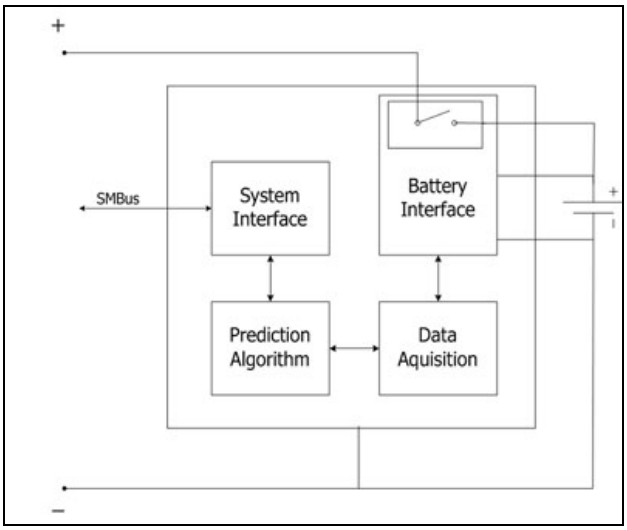

그림 3 스마트배터리의 블록 다이아그램

스마트 배터리는 다음과 같이 구성될 수 있다.[3] 전지의 과충전이나 과방전을 방지하는 보호회로와 전지의 온도, 전압, 전류 같은 데이터를 수집하기 위해 ADC(Analog to Digital Converter) 등으로 구성된 전지 연결 부분, 시스템과의 통신을 위해 표준 SMBus 를 지원하는 시스템 통신 부분 그리고 수집된 데이터를 바탕으로 전지의 잔량과 수명을 예측하기 위한 계산에 필요한 부분이다. 이런 여러가지 기능에 필요한 부분들이 필요하기 때문에 SoC 로의 구현에 좋은 응용이 될 수 있다. 그림 3 은 간단한 스마트배터리의 블록 다이아그램을 나타낸다.

IV. 기존 방법들의 문제점

기존에 전지수명을 예측하기 위해 여러가지 방법이 사용되었다. 본 장에서는 그 방법들을 설명한 후 문제점에 대해 알아본다.

컴팩 Ipaq PDA 에 리눅스 운영체제를 포팅하는 Familiar 프로젝트[4] 에서 사용된 방법은 다음과 같다.

$$LT = \frac{v_b - v_{cutoff}}{v_b^{'} - v_b} \tag{1}$$

LT 는 전지수명시간이고 v_b 는 현재 전지의 전압, $v_b^{'}$ 는 특정 시간 이전의 전지전압이고 v_{cutoff} 는 전지의 차단전압이다. 즉, 특정기간 동안 전지전압이 낮아지는 정도를 이용하여 차단전압까지 떨어지는 시간을 계산하여 수명시간을 예측하는 방법이다. 이 방법은 그림 2 에서 보듯이 전지의 전압하강그래프가 비선형적이기 때문에 상당한 오차를 야기할 수 있다.

Dallas Semiconductor 의 DS2437 스마트 배터리 모니터[6] 를 이용한 컴팩 Itsy 포켓 컴퓨터 버전 2.4 에서 사용된 방법은 다음 식과 같다.

$$RC = TC - \sum_{k=0}^{t} i_k \tag{2}$$

RC 는 전지의 잔량, TC 는 전지의 총용량 그리고 i_k 는 방전 당시의 샘플된 전류크기이다. 즉, 계속해서 방전전류를 샘플하고 그 값을 전체용량에서 빼면서 잔량을 측정하는 방법이다. 이때 전지수명을 구하는 식은 다음과 같다.

$$LT = \frac{RC}{\bar{i}} \tag{3}$$

LT 는 사용가능한 전지수명이고 $\bar{i}$ 는 1 분간의 방전전류의 평균이다. 즉, 잔량을 현재 방전전류로 나누어 사용가능한 시간을 에측하는 방법이다. 위의

방법은 전지의 총용량이 부하전류의 크기에 상관없이 일정하다는 가정을 하고 있으며, 전지수명을 구하는데 현재 샘플된 전류의 크기로 계산하기 때문에 전지용량의 변화와 전지전압에 떨어지는데 따른 전류의 상승이 고려되지 않았기 때문에 예측에 큰 오차가 있을 수 있다.

[7]에서 언급된 잔량 계산 방법은 다음 식과 같다.

$$RC = TC + \gamma - \sum_{k=0}^{t} i_k \quad (4)$$

$$\gamma = (TC' - TC) \times \varphi \quad (5)$$

*TC'*는 이전 방전기간 동안 전지가 공급한 총용량, *TC* 는 현재 설정된 총용량, γ 는 변화될 전지용량를 나타내고 φ 는 이전 방전시의 총용량과의 차이의 영향률이다. 즉 이 방법은 부하에 따라서 전지의 총용량에 차이가 있다는 사실을 고려한 것으로 이전의 방전기간 동안 전지가 공급한 총용량을 기록하였다가 현재 설정된 총용량과의 차이를 고려하여 특정 크기만큼 총용량의 크기를 변화시키는 방법이다. 그러나 이전 방전시의 부하전류와 차이가 큰 부하가 연결되었을 때 총용량의 변화를 빠르게 따라갈 수 없어 전지수명을 정확하게 예측할 수 없으며, 회복효과에 의한 용량회복을 고려하지 못하고 있다.

V. 제안된 수명예측방법

2 장에서 언급했듯이 전지의 용량은 표준용량과 실제용량으로 구분된다. 본 논문에서 제안하는 방법은 표준용량을 제공하는 표준전류가 연결됐을 때의 각 방전상태를 나누어 그때의 전지전압을 이용하는 것으로 실제용량을 계산할 때 예측당시의 방전상태의 전지의 전압과 표준방전상태에서의 전지전압을 비교하여 잔량을 예측하는 방법이다. 또한 이 방법은 부하전류에 따라 용량이 변화하는 현상도 고려되고 있다. 제안된 잔량예측방법은 다음과 같다.

$$RC = SC \times \left\{ soc + C \times (1 - soc) + \frac{{v_b}^2 - {v_{ref}}^2}{K_{soc} \times \overline{i_b}^2} \right\} \quad (6)$$

$$soc = \frac{SC - \sum_{k=0}^{t} i_k}{SC} \quad (7)$$

RC 는 전지잔량, SC 는 표준용량, soc*(State Of Charge)*는 표준용량을 기준으로 지금까지 방전된 전류를 뺀 잔량율, v_b 는 전지전압, v_{ref} 는 표준용량일 때 현재 방전상태에서의 전지전압, $\overline{i_b}$ 는 1 분동안의 전지전류의 평균이고, C 와 K_{soc} 은 전지특성 상수이다.

이 제안된 방법은 전지의 두 방전 특성인 Rate Capacity Effect 와 Recovery Effect 때문에 야기되는 잔량이 전지전류의 크기에 비례하여 변화되는 현상이 고려되었으며, 방전전류가 낮아지거나 없어질 경우 전지전압이 상승하여 용량이 증가하는 효과도 포함되었다.

전지수명을 예측하기 위해 실험에 사용된 전력소모모델은 D. Rakhmatov 가 제안한 방법[8]을 사용하였다. 이 모델은 방전이 진행됨에 따라 동일한 부하일지라도 전지전압이 낮아짐에 따라 방전전류가 높아지는 효과를 고려하고 있다. 이 전력소모모델은 다음과 같다.

$$RC = \overline{i_b} \times \left(LT + 2 \times \sum_{m=1}^{10} \frac{1 - e^{-\beta^2 m^2 LT}}{\beta^2 m^2} \right) \quad (8)$$

RC 는 전지잔량, LT 은 전지수명, $\overline{i_b}$ 는 1 분동안의 전류의 평균이고 β 는 전지의 비선형성 상수인데 이 값은 여러 번의 실험을 거쳐 알아낼 수 있다.

VI. 실험 결과

제안된 수명예측방법은 실제 휴대용기기인 컴팩 Itsy 포켓 컴퓨터를 사용하여 실험하고 검증하였다. 실험은 서로 다른 크기의 전력을 소모하는 프로그램들의 전지수명을 예측하고 실제 수명과 비교하는 방법을 사용하였다. 실험에 사용된 리튬이온 전지는 표준용량 630mAH 이며, DS2437 스마트배터리 모니터를 사용한 Itsy 의 예측결과와 제안된 방법의 예측결과를 비교하였다. 표 1 은 실험에 사용된 서로 다른 크기의 전력를 소모하는 프로그램을 나타낸다. 방전동안 표에서 나타난 전류의 최소값과 최대값 범위내에서 전류크기가 바뀌게 되며 시스템의 LCD 백라이트의 점등 여부를 달리하여 소모전류의 크기를 다양하게 하였다.

표 1 실험에 사용된 프로그램들의 소모전류

Pro-gram	Workload	Min Current (mA)	Max Current (mA)	Backlight
T1	IDLE	75.92	87.29	No
T2	WAV PLAY	104.62	120.24	No
T3	WAV PLAY	208.36	244.38	Yes
T4	MPEG PLAY	245.28	289.78	No
T5	CPU BOUNDED COMPUTATION	297.43	355.38	Yes
T6	MPEG PLAY	384.34	441.72	Yes

표 2 는 제안된 방법과 Itsy 에서 사용하는 방법이 각 프로그램들의 수명예측한 결과와 실제 실험을 통하여 전지의 수명을 측정한 결과를 비교하여 보여준다. T1~T6 모든 경우에 제안된 방법이 Itsy 에서 사용된 방법보다 실제 측정한 결과와 보다 정확하게 전지수명을 예측하는 것을 알 수 있다.

표 2 프로그램에 따른 전지수명예측 결과

Program	Itsy	Proposed	Measured
T1	476.51	569.9	560.0
T2	344.87	355.5	362.0
T3	175.28	169.0	168.0
T4	148.47	141.9	136.0
T5	122.16	115.5	114.0
T6	95.30	88.7	86.0

그림 4 는 각 프로그램들의 수명예측한 결과의 오차를 나타낸다. 제안된 방법이 최대 80%까지 오차를 줄여 보다 정확하게 전지 수명을 예측한 것을 알 수 있다. 모든 프로그램에서 방전이 진행되면서 소모전력이 커지는 효과가 있기 때문에 이 현상를 고려한 것이 효과가 있었으며, T1 과 T6 의 경우 오차개선효과가 더 큰 것은 Rate Capacity Effect 에 의해 T1 의 경우 상당히 작은 전력를 소모하므로 전지가 표준용량보다 상당히 큰 전력을 제공하기 때문이며, T6 의 경우 비교적 큰 전력을 소모하기 때문에 표준용량보다 작은 전력을 제공하기 때문이며 제안된 방법이 이 현상을 비교적 정확하게 고려했기 때문이다.

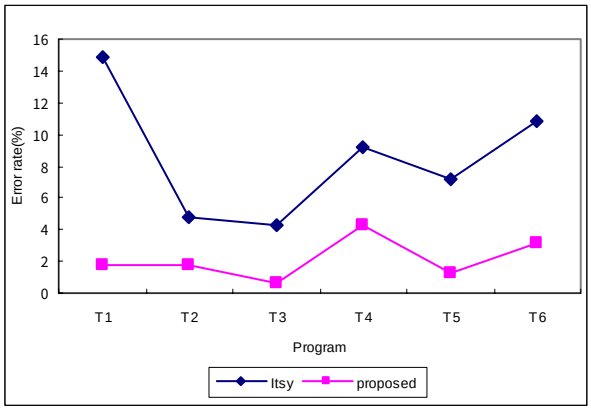

그림 4 프로그램에 따른 전지수명예측 오차

VII. 결 론

본 논문은 휴대용기기의 주 전력원인 전지의 데이터를 수집하고 사용가능한 잔량과 수명을 나타낼 수 있는 스마트배터리에서 이용될 수 있는 잔량예측방법을 제시하였다. 리튬이온 전지는 방전전류의 크기에 따라 제공가능한 전지의 전력의 크기가 일정하지 않고 변화하며, 동일한 프로그램일지라도 방전이 진행됨에 따라 전지전압이 낮아져 소모전류가 상승하는 효과가 있는데 이는 Rate Capacity Effect 와 Recovery Effect 등의 비선형적인 방전특성이 있기 때문이다. 기존의 방법은 이런 현상들이 고려대상에서 배제되었거나 충분히 고려되지 않았기 때문에 비교적 전지수명을 에측하는데 비교적 큰 오차를 가지고 있었다. 본 논문에서 이러한 비선형적인 전지의 특성을 고려한 수명예측방법을 제안하였으며, 실제 포켓 컴퓨터에서 실험하여 검증한 결과 기존의 방법보다 최대 80%까지 오차를 낮출 수 있었다.

참고 문헌

[1] K. Lahiri, A. Raghunathan, S. Dey and D. Panigrahi, “Battery-Driven System Design: A Frontier in Low Power Design” in Proc. Design Automation Conference 2002

[2] Sung Park, Mani B. Srivastava, "Dynamic battery state aware approaches for improving battery utilization," in Proceedings of the International Conference on Compilers, Architecture, and Synthesis for Embedded Systems, October 2002.

[3] http://www.sbs-forum.org/

[4] http://familiar.handhelds.org/

[5] M. A. Viredaz. The Itsy Pocket Computer Version 1.5 : User's Manual. Technical Report TN-54, Compaq's Western Research Lab, July 1998.

[6] Dallas Semiconductor, Dallas, TX(USA). DS2437: Smart Battery Monitor, July 2000

[7] S. Park, A. Savvides and M. B. Srivastava, "Battery Capacity Measurement and Analysis Using Lithium Coin Cell Battery", in Proceedings of International Symposium on Low power Electronics and Design, Huntington Beach CA, August 2001

[8] D. Rakhmatov S. Vrudhula and C. Chakrabarti, “Battery Lifetime Prediction for Energy-Aware Computing” in Proc. Int. Symp. Low Power Electronics and Design 2002