

논문 2016-11-35

간결한 예측 모형에 기반한 납축전지의 정전류-정전압 충전시간 특성화

(CC-CV Charging Time Characteristics of Lead-Acid Batteries Based on Compact Estimation Model)

한 정 건, 신 동 화*

(Jeong-gyeon Han, Donghwa Shin)

Abstract : Modern embedded systems are typically operated by the rechargeable batteries in our daily life. Since charge of batteries is considered as an time consuming task, there have been extensive efforts to manage the charge time from the perspective of materials, circuits, and systems. Estimation of battery charge time is one of the essential information to design the charge circuitry. A compact macro model for the constant-current and constant-voltage charge protocol was recently introduced, which gives us a quick estimation of charge time with similar shape to the famous Peukert's law for discharge time estimation. The CC-CV charging protocol is widely used for Lithium-based batteries and Lead-acid batteries. In this paper, we characterize the lead-acid battery by measurement to extract the model coefficients, which was not covered by the previous studies. By our proposed model, the key coefficient K_{cc} results in 1.18-1.31, which is little bit higher than that of Lithium batteries. The accuracy of our model is within the range of $\pm 10\%$ error, which is compatible with the other studies such as Peukert's law.

Keywords : Compact model coefficient, Charge time, CC-CV charge, Lead-acid battery

I. 서 론

1. 2차전지의 충전 및 방전

오늘날 널리 사용되고 있는 휴대용 내장형 시스템은 대부분 리튬 이온 (Li-ion) 전지, 니켈 수소 (NiMH) 전지, 납-산 (Lead-acid) 축전지 등의 재충전이 가능한 2차 전지를 전력원으로 하고 있다. 2차 전지는 화학적 조성 및 구조에 따라 출력 전압, 용량, 충방전 사이클 수, 가격, 무게 등의 다양한 특

면에서 서로 다른 특성을 보인다. 따라서 시스템상의 요구 조건을 만족시키기 위해서 이러한 전지의 특성이 고려되어야 하며, 이에 따라 충전/방전 회로의 구조 및 용량, 전지 관리 정책 등이 알맞게 개발되어야 한다.

전지는 방전에 앞서 충전되어야 하므로 전지의 충전 동작 역시 전체 전지의 수명 동안 수백회 이상 수행되는 전지의 수명 및 특성의 변화에 큰 영향을 미치는 동작이다. 또한 사용자의 경험에 있어 충전 동작의 영향이 크다. 이는 충전은 사용자가 실제 시스템을 사용하기 전에 요구되는 일종의 예비 동작으로 사용자의 시간 및 주 시스템 외의 추가 장치를 요구하게 되므로 주 시스템을 사용하기 위한 일종의 추가 비용으로 간주되기 때문이다.

하지만 전지의 충전 과정은 대개 정해진 범위의 전류 및 전압, 시간, 온도 등의 조건 속에서 이루어지는 경우가 많아 예측이 힘든 방전에 비해 상대적으로 제어 가능한 동작으로 간주된다. 그 결과 모형화 및 제어 기법 등의 연구에 있어 방전 동작에 비해

*Corresponding Author (dongwashin@yu.ac.kr)

Received: 11 Feb. 2016, Revised: 26 Apr. 2016,

Accepted: 27 May 2016.

J.G. Han, D.H. Shin: Yeungnam University

※ 이 논문은 2015년도 정부 (교육부) 의 재원으로 한국연구재단의 신진연구자지원사업 지원을 받아 수행된 것임 (No. 2015036876)

※ 이 논문은 2015년 영남대학교 연구비의 지원을 받아 수행되었음



그림 1. 여러 종류의 전지와 충전기 실험 환경
Fig. 1 Various types of batteries and chargers

덜 주목받아 왔다. 전지의 방전 동작은 시스템의 성능 및 사용시간에 직결되어 시스템 자체의 성능의 요소로서 평가되므로 다양한 방법으로 최적화 및 관리 기법에 연구되어 온 반면 충전은 시스템 유휴 시간을 활용하기 위한 필수적이지만 부수적인 동작으로 인식되어왔다.

2. 2차전지의 충전 표준

전지는 대개 그 특성에 맞는 충전 표준 (Charge protocol) 에 따라 충전된다. 충전 표준은 주어진 전류/전압 조건 및 온도, 시간 등의 외부 변수를 고려하여 전지의 안전하고 효율적인 충전을 보장하기 위해 고안된 연속적인 충전 회로 제어 정책으로서, 대표적인 방법은 정전류-정전압 충전 (Constant-Voltage and Constant-Current (CC-CV) Charge), 온도 변화량 감지 충전 (thermal gradient charge, dT/dt charge), 낙수 충전 (trickle charge), 펄스 충전 (pulsed charge) 등 여러 표준의 고안되었다. 이 가운데 대상 전지의 특성에 따라 적합한 충전 표준이 선택되어 사용되는데, 예를 들어 리튬 기반 전지 및 납축전지의 경우 정전류-정전압 충전이 널리 사용되고 니켈수소 및 니켈 카드뮴 (NiCd) 전지의 경우 온도 변화량 충전 표준이 널리 적용되고 있다.

이러한 충전 표준은 충전회로에 의하여 구현된다. 그림 1은 널리 이용되는 전지 충전기의 예를 보여주고 있다.

복잡한 충전 정책의 경우 부가적인 제어 회로 및 전력 소자가 소요되어 추가적인 비용과 전력 소모를 야기하므로 반드시 정교하고 복잡한 충전 표

준이 종합적으로 더 나은 최종 결과를 보장하지는 않는다. 낙수 충전, 펄스 충전 등 전지의 수명 및 효율에서 우월한 것으로 알려진 다양한 충전 표준이 제안되었으나, 전력 수확 (Energy harvesting) 등 극단적인 환경에서 동작하는 응용이나 군사용 의료용 등 고가의 특수목적 응용에만 제한적으로 적용되고 있다. 정전류-정전압 표준 및 온도 변화량 감지 충전은 과전류-과전압 보호회로와 저렴한 온도 센서만으로도 구현 가능하고, 비교적 합리적인 충전 시간과 효율을 제공하므로 널리 사용되는 충전 표준으로 자리 잡게 되었다.

3. 충전시간 예측

이용자들은 가급적 충전시간을 줄이기를 원하므로 충전시간의 단축은 충전 회로의 설계에 있어 중요한 과제이다. 충전 회로는 충전 시간, 비용, 효율 등 여러 조건을 고려하여 설계 및 최적화 되어야 한다. 충전 표준의 세부적인 조건에 따른 충전 회로의 설계 및 최적화에 있어 총 충전 시간의 예측은 반드시 필요한 정보 가운데 하나이다.

전지에 저장되는 에너지는 전력의 형태로 공급되어야 하고, 전지는 그 특성상 단위 전지 전압은 정해진 범위 내에서 크게 벗어날 수 없으므로 결국 충전 시간을 결정짓는 것은 공급 전류의 크기이다. 충전 시간을 줄이기 위해서는 대전류의 공급이 필요한데, 이는 비용 및 안전의 측면에서 여러 문제를 야기한다.

전지 내부 저항 성분으로 인한 전지 내부 발열량은 전류 크기의 제곱에 비례하여 증가한다. 내장형 시스템용 전지의 경우 대부분 밀폐되고 제한된 크기의 구역에 배치되므로 발열로 인한 수명 및 효율 감소, 안전상의 문제의 해결이 반드시 필요하다. 또한 대전류를 효율적으로 공급하기 위해서는 충전 회로 소자 및 도선의 기생 저항 성분으로 인한 손실을 줄여야 하는데, 이는 비용의 증가를 의미한다.

최근의 연구에서 정전류-정전압 표준에서 충전 전류 및 충전 종료 조건에 따른 총 충전 시간의 빠른 예측을 제공하는 간략화된 모형이 제안되어 리튬-이온 전지에 적용, 검증된 바 있다 [1]. 리튬-이온 전지와 함께 임베디드 시스템에서 널리 사용되는 납축전지의 경우 정전류-정전압 충전 표준이 적용하며, 이에 기반한 다양한 충전 기법상의 연구가 진행되어왔지만 [2], 간략화된 모형에 기반한 총 충전시간 예측에 관한 연구는 수행되지 않았다. 본 논문에서는 납축전지의 개략적인 특성을 실험적으로 파악하여 모형에 이용되는 특성계수를 추출하였다.

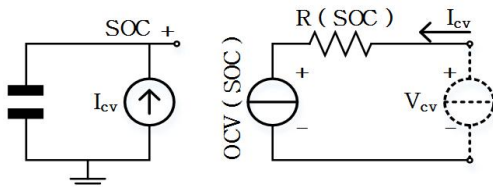


그림 2. 전지 등가회로 모형
Fig. 2 Equivalent circuit model of batteries

이를 위해 3종의 납축전지에 대하여 정전류-정전압 실험이 수행되었다. 추출된 모형 계수에 의한 오차는 ±10% 로서 유사한 형태의 수식 기반 모형들의 일반적인 오차 범위에 근접한 것으로 나타났다.

II. 관련 연구

1. 충전 표준

1.1 정전류-정전압 충전

그림 2 는 널리 사용되는 전지의 등가회로 모형을 보여준다. 전지 내부 상태를 표현하는 원편의 캐패시터에 전하를 채우기 위해 전지 외부에서 전류 및 전압을 조절함으로써 충전이 이루어진다. 이 가운데 정전류-정전압 충전 (Constant Current - Constant Voltage charge)은 앞 문자를 따서 CC-CV 충전으로 부르기도 한다. 전지의 화학 조성 및 설계에 의해 설정된 완충 전압에 도달할 때까지는 정해진 최대 전류값으로 충전하고, 목표한 완충 전압에 도달한 시점부터는 정해진 전압을 유지하면서 전류를 감소시켜 나머지를 충전하는 방식이다. 그림 3은 납 축전지의 CC-CV 충전시의 전류, 전압 추이를 보여주고 있다.

CC-CV 충전은 구형 면에 있어 과전압-과전류 방지 회로의 조합만으로 구현 가능하며, 안전성과 비교적 빠른 충전시간을 보장하므로 여러 전지에 널리 사용된다. 특히 전지 전압과 내부 에너지 상태 (State-of-charge, SOC)의 연관관계가 명확하고, 내부 에너지 상태에 의한 온도 변화의 폭이 크지 않은 전지에 주로 적용되는데, Li-ion Battery, Lead-acid Battery 충전 방식으로 많이 사용 되고 있다 [3].

1.2 온도 변화량 감지 충전

온도 변화량 감지 충전 (Thermal gradient charge, dT/dt charge, ΔT/Δt) 방식에서, 충전 차단은 시간의 변화를 통한 온도의 변화에 의해 결정

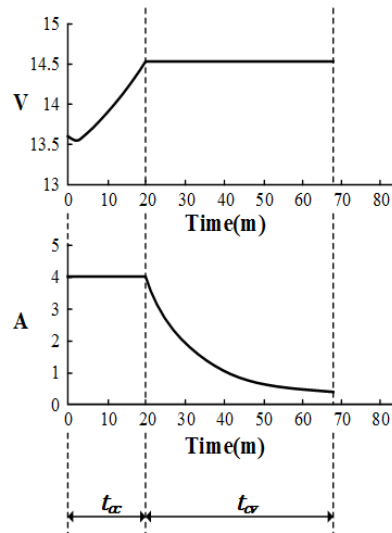


그림 3. 정전류-정전압 충전
Fig. 3 CC-CV charging profiles

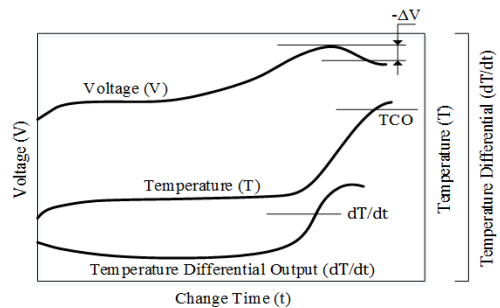


그림 4. 온도 변화량 감지 충전
Fig. 4 Thermal gradient charge

된다 (그림 4). 이는 내부 에너지 상태와 발열량 사이의 관계가 안정적인 충전에 있어 중요한 경우에 적용되는데, 니켈 카드뮴 또는 니켈수소전지 (Ni-MH)의 충전 방식으로 많이 사용 된다[4, 5].

1.3 낙수 충전

낙수 충전 (trickle charge)는 완충되어 있는 전지의 자가 방전 전류로 인한 내부 에너지 손실을 보충하는 충전 표준이다. 이는 통상적으로 매우 적은 전류를 지속적으로 충전하거나, 주기적인 전지 전압 측정을 통해 적절한 시점에 단속적인 전지 충전을 반복함으로써 이루어지며, 전지가 방전되지 않은 상태로 오랫동안 방치되어도 적절한 수준의 내부 에너지를 유지해야 하는 용도로 쓰이며, 충방전

회로의 부가적인 기능으로 구현되어 있는 경우가 많다.

1.4 펄스 충전

펄스 충전 (Pulsed charge)은 정전류 충전을 하는 대신에 전지의 충전 전압과 전류의 최대치 이상의 전압과, 전류를 펄스의 형태로 전력을 주입 함으로써 전지 내에서 일어나는 화학 반응 과정을 조정하여 충전 과정의 효율을 높이고 충전 시간을 단축하고자 하는 방식이다. 충전 전압 설정 후 정전류 충전 후, 설정한 충전 전압이 되면 전류를 펄스의 형태로 충전하는 방법이다 [6].

2. 전지 모형 및 충전 및 방전시간 예측

전지 모형은 이동형 시스템의 시스템 수준 설계에 있어 필수적인 요소로서 기존의 연구를 통해 여러 종류의 모형이 제안된 바 있다 [3].

Peukert's Law는 전지의 방전 시간의 대략적인 예측에 널리 사용되는 오랜 역사를 가진 수식 형태의 모형이다 [7]. 최근의 연구 [1]에서 Peukert's Law와 유사한 형태의 수식으로 정전류-정전압 충전 시간을 예측할 수 있는 간략화된 형태의 모형이 제안되었다.

해당 모형은 리튬 이온 전지 제조사에서 제공하는 정보를 통한 검증 결과 Peukert's Law에 의한 방전 시간 예측과 비슷한 정확도를 보일 것으로 예상되었으며, 본 논문에서는 정전류-정전압 충전 표준이 사용되는 납 축전지에 대하여 측정을 통해 해당 모형의 특성 및 정확도를 살핀다.

III. 정전류-정전압 충전시간 모형

1. 정전류-정전압 충전시간 모형 개요

최근 연구 [1] 에서 제안된 정전류-정전압 충전 시간 모형에서는 정전류 충전시간을 기존의 수식기반 정전류 방전시간 모형인 Peukert's Law와 같은 형태의 수식으로 모형화한다. 이는 충전 동작시간에 영향을 미치는 내부저항 등의 비이상적 (non-idealistic) 특성들이 방전 동작시에 적용되는 것과 유사한 양상을 보인다는 가정 아래, Peuker't law와 같은 형태인 식 1에서 모형 계수인 k_{cc} 를 실제 정전류 충전 시간에 대한 회귀 분석을 통해 추출함으로써 모형을 구성하게 된다.

$$t_{cc} = \frac{C_p}{I_{cc}^{k_{cc}}} \tag{1}$$

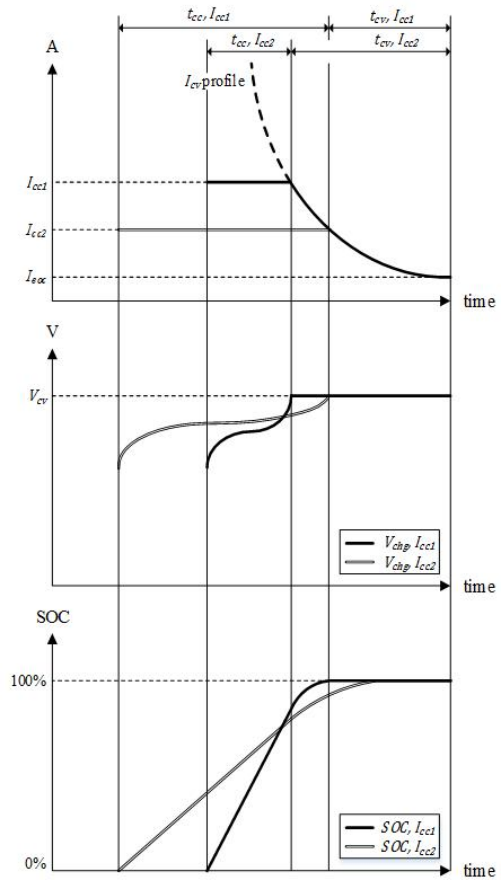


그림 5. 간략화된 정전류-정전압 충전시간 예측 모형
Fig. 5 Concept of the compact CC-CV charge time estimation Model

여기서 t_{cc} 는 정전류 충전시간, C_p 는 1A 방전시 측정된 용량인 Peukert's 용량, I_{cc} 는 정전류 방전에 사용된 전류를 나타낸다. 정전압 충전시간 t_{cv} 는, 전지의 특성이 일정하고, 정전압 충전시 전류의 변화 추이가 일정하다는 가정아래, 식 2를 통해 도출된다.

$$t_{cv} = t_{eoc} - t^* = (I_{eoc}^{1/\gamma_{cv}} - I_{cc}^{1/\gamma_{cv}}) / \alpha_{cv} \tag{2}$$

여기서 t_{eoc} 는 충전 중단까지 소요된 시간, t^* 는 정전류 충전시간, I_{eoc} 는 충전중단 전류를 나타내며, α_{cv} 및 γ_{cv} 는 전지 특성을 나타내는 계수이다. 이의 개념적인 유도 과정은 아래 그림 5에서 제시되어 있다. 만약 정전압 충전이 전체 충전이 정전압 충전



그림 6. 대상 전지
Fig. 6 Target Battery

으로 이루어질 경우 그리게 되는 가상의 전류 곡선인 회색 선을 따라 이루어진다고 할 때, 정전류 충전 구간은 전체 정전압 충전 곡선이 전류 상한선에 의하여 꺾여 잡아 늘어진 (Folded and stretched) 구간으로 간주될 수 있고, 해당 구간동안의 충전 전하량은 전체 정전압 충전 구간 동안의 충전 전하량과 같다.

이 경우 정전류 충전시간 동안의 충전 전하량은 수식 (1)에 의하여 이미 모형화 되었으므로, 전체 정전압 충전 전류 곡선은 식 (1)과 정전류 충전 전류값과의 상관 관계를 통해 도출된다. 도출된 곡선 및 정전압 충전 종료 조건을 통해 정전압 충전이 시작되어 종료조건을 만족시킬 때까지의 시간 t_{cc} 를 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

식 (1)과 (2)에 의해 주어진 정전류, 정전압 충전시간을 합산하여 전체 충전시간인 식 (3)을 얻을 수 있다.

$$t_{charge}(I_{cc}, k_{cc}) = \frac{C_p}{I_{cc}} - C_p \frac{(1 - k_{cc})}{k_{cc}} \left[\frac{1}{I_{eoc}^{k_{cc}}} - \frac{1}{I_{cc}^{k_{cc}}} \right] \quad (3)$$

식 (3)에 의한 충전시간 예측 모형은 리튬 이온 전지의 제조사 제공 정보에 기반한 검증 결과 해당 모형의 오차는 Peukert's law 등 수식 기반 모형이 대체로 보이는 5-10% 수준의 오차를 보이는 것으로 확인되었다 [1].

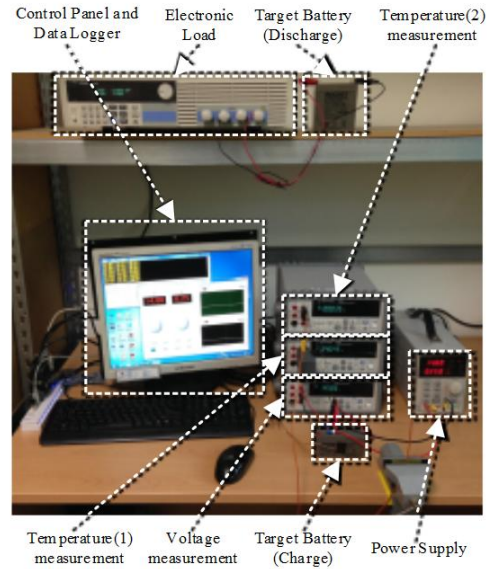


그림 7. 실험 환경
Fig. 7 Experimental setup

표 1. 대상 전지 정보
Table 1. Information of Target Battery

Name	Capacity	Voltage	Brand
① ES2-12	2000mA	12V	Rocket
② ES4-12	4000mA	12V	Rocket
③ ESH5-12	5000mA	12V	Rocket

IV. 실험 및 특성화

1. 실험 환경 및 대상 전지

그림 6과 표 1은 대상 전지 및 정보이다. 로케트사의 2AH (ES2-12), 4AH (ES4-12), 5AH (ESH5-12)를 대상으로 실험 하였다 [8].

그림 7은 실험환경으로, 총 3대의 동일기종 디지털 멀티미터 (Agilent, U3402A)를 이용해 각각 전압, 온도1, 온도2를 측정하였다. 온도1은 전지의 중앙부분에 직접적인 온도를 측정하였고, 온도2는 전지의 주변온도를 측정하였다. 온도2를 측정하는 이유는 항온항습기를 사용하지 않고, 온도2를 통해 주변 온도의 변화에 따른 온도1의 보상을 위해 측정하였다.

DC 파워 서플라이 (MK POWER, MK3010P)를 이용해 CC-CV로 전원 공급 및 전류 측정을 위해 사용하였고, 데스크탑 PC는 각 기기로부터 데이터를

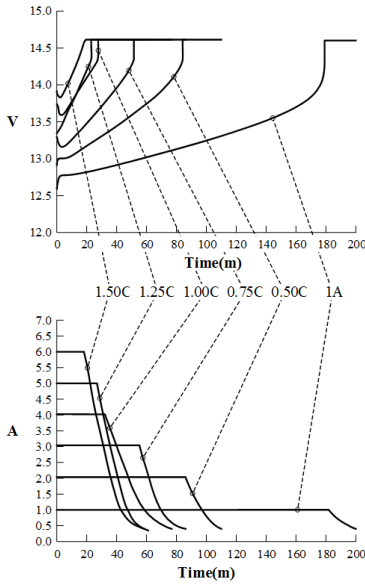


그림 8. ES4-12 실험 결과

Fig. 8 ES4-12 Experiment result

표 2. 정전류 충전시간 및 모형 추출된 모형 계수

Table 2. CC charge time and model coefficient

	Charging current (A)		Measurement t_{cc} (s)	k_{cc}	Average k_{cc}
ES2-12	0.50C	1.003	2690	-	1.236
	0.75C	1.499	2177	1.229	
	1.00C	2.000	1545	1.213	
	1.25C	2.502	1174	1.216	
	1.50C	3.004	872	1.284	
ES4-12	0.50C	2.000	3729	1.142	1.212
	0.75C	3.004	2232	1.186	
	1.00C	4.000	1477	1.239	
	1.25C	4.988	1219	1.188	
	1.50C	5.980	794	1.307	
ESH5-12	0.50C	2.502	4306	1.187	1.217
	0.75C	3.757	2529	1.225	
	1.00C	4.988	1878	1.194	
	1.25C	6.242	1291	1.252	
	1.50C	7.490	1080	1.228	

표 3. 정전류-정전압 충전시간 예측 및 오차

Table 3. CC-CV charge time estimation result

	Charging current		prediction t_{cc} (s) w/ Average k_{cc}	Charge termination current (A)	prediction t_{cv} (s)	Measurement total charge time (s)	Prediction total charging time (s)	Error (%)
ES2-12	0.50C	1.003A	-1)	0.18	-1)	-1)	-1)	-1)
	0.75C	1.499A	2172	0.18	1741	3787	3913	3
	1.00C	2.000A	1521	0.18	1602	2997	3123	4
	1.25C	2.502A	1153	0.18	1659	2721	2812	3
	1.50C	3.004A	920	0.18	2489	3091	3409	10
ES4-12	0.50C	2.000A	3550	0.33	1000	4952	4551	-8
	0.75C	3.004A	2168	0.33	1468	3829	3636	-5
	1.00C	4.000A	1532	0.33	2058	3487	3590	3
	1.25C	4.988A	1172	0.33	1541	2768	2714	-2
	1.50C	5.980A	941	0.33	2925	3830	3866	1
ESH5-12	0.50C	2.502A	4189	0.44	1538	5731	5728	-
	0.75C	3.757A	2554	0.44	2023	4502	4578	2
	1.00C	4.988A	1809	0.44	1734	3339	3543	6
	1.25C	6.242A	1377	0.44	2416	3540	3793	7
	1.50C	7.490A	1103	0.44	2147	3177	3250	2

1) ES3-12 전지의 0.5C 정전류 방전은 Peukert's 용량 산정에 이용되는데, 본 논문에 적용되는 Peukert's 방정식 형태의 모형에서는 방전전류가 1A일 때의 방전시간은 계산될 수 없으므로 결과에서 예측값 및 예측 오차에 해당하는 부분은 도출되지 않았다.

수신해 수집과 제어하는 역할을 하였다. 데스크탑과 디지털 멀티미터 사이는 RS-232 표준으로 연결되었다.

DC 파워 서플라이 전용 프로그램을 이용해 DC 파워 서플라이의 제어 및 데이터 수집을 하였다.

직류 전자 부하장치 (MK POWER, M9713)를 이용해 1C로 방전을 하였다. 방전 후 방전으로 인한 열이 소멸된 후에 다시 실험을 재개하였다. 다음과 같은 방법으로 데이터의 수집을 각 전류별로 0.5C, 0.75C, 1C, 1.25C, 1.5C 에 해당하는 정전류로 충전된 뒤 전원 공급기의 전압이 정해진 완충 전압에도달하면 정전압 충전으로 변환하여 측정하였다.

2. 실험 결과

3종의 납축전지에 대하여 특성화를 수행한 결과 납축전지의 특성 계수는 1.1~1.3 사이의 값을 보이며, 이는 방전시간 예측에 사용되는 계수와 유사한 값이다. 추출된 계수 및 평균값은 표 2에 제시되어 있다. 그림 8은 3종의 납축전지 중에 ES4-12의 실험 결과를 그래프로 나타내고 있다.

추출된 모형 계수의 평균으로부터 정전류 충전 시간 및 정전압 충전시간, 총 충전시간을 예측한 결과가 표 3에 제시되어 있다. 총 충전시간의 오차는 -8% ~ 10%로서 방전시간 예측에서 관측되는 것과 유사한 범위를 보였다. ES2-12 전지의 0.5C 실험의 경우 해당 정전류 충전 전류값이 1A로서 Peukert's 용량 측정에 사용된 1A 값과 같아 모형의 특성상 예측이 불가능한 지점인 까닭으로 제외하였다.

IV. 결론

본 논문에서는 기존의 연구에서 다루지 않았던 납축전지에 대하여, 정전류-정전압 표준의 총 충전시간의 간략화된 모형을 적용하였다. 3종의 납축전지에 대하여 특성화를 수행한 결과 납축전지의 특성 계수는 1.18~1.31 사이의 값을 보이며, 추출된 모형 계수에 의한 오차는 -8%~10% 로 나타났다.

본 연구에서 수행된 실험적 검증을 통해 충전시간 예측에 사용되는 모형 계수 역시 방전시간 예측에 널리 사용되는 계수의 범위와 유사한 것으로 나타났다으며, 예측 정확도 역시 유사한 형태의 수식 기반 모형들의 일반적인 오차 범위에 근접한 것으로 나타났다.

납축전지의 정전류-정전압 충전 시간 모형을 통

한 예측값은 방전시간 예측 수식 모형이 설계 초기 단계에서 전지 용량의 산정에 이용되듯이, 전지 충전 전류의 산정 및 충전회로의 용량설계에서 유의미한 단서로 이용될 수 있다.

References

- [1] D.H. Shin, A. Sassone, A. Bocca, A. Macii, E. Macii, M. Poncino, "A compact macromodel for the charge phase of a battery with typical charging protocol," Proceedings of the 2014 international symposium on low-power electronics and design, pp. 267-270, 2014
- [2] S. Li, C. Zhang and S. Xie, "Research on Fast Charge Method for Lead-Acid Electric Vehicle Batteries," Proceedings of International Workshop on Intelligent Systems and Applications, pp. 1-5, 2009.
- [3] J.W. Yang, W.C. Kim, J.W. Shim, K. Hur, "Study on Charging methodology to enhance efficiency of Li-ion Battery ESS," Power Electronics Annual Conference, pp. 312-314, 2013 (in Korean).
- [4] IDX, "Charging Methods for Professional Batteries," 2010.
- [5] DURACELL, "Ni-MH Rechargeable Batteries," 2007.
- [6] E.J. Lee, D.Y. Jeong, J.Y. Jeon, S.M. Shin, B.K. Lee, "The Qualitative Analysis of Lithium-Ion Battery Pulse Charging Algorithms for EV/PHEV," Power Electronics Annual Conference, pp. 347-348, 2010 (in Korean).
- [7] N. Omar, P.V. Bossche, T. Coosemans, J.V. Mierlo, "Peukert Revisited - Critical Appraisal and Need for Modification for Lithium-Ion Batteries," Energies, pp. 5625-5641, 2013.
- [8] <http://www.gbattery.com/product/view?id=16>

Jeong-gyeon Han (한 정 겐)

Mr. Han is currently working toward M.S degree in Dept. of computer engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea. His research interest includes embedded systems design and power management.

Email: hanjeonggyeon@ynu.ac.kr

Donghwa Shin (신 동 화)

Prof. Shin received the B.S. degree in Dept. of computer science and engineering, Seoul National University, Seoul, Korea, in 2005. He received the M.S. and Ph.D. degrees in School of Computer Science and Electrical Engineering in 2007, and 2012, respectively. He joined the Department of Computer Engineering, Yeungnam University, Gyeongsan, Korea, in 2014, where he is currently an Assistant Professor.

He was a visiting scholar with the Ming Hsieh Department of Electrical Engineering, University of Southern California, Los Angeles, CA, USA, and a Researcher in the Dipartimento di Automatica e Informatica, Electronic Design Automation Group, Politecnico di Torino, Torino, Italy. His current research interests include system-level low-power techniques for embedded system and hybrid power system design.

Email: donghwashin@yu.ac.kr