상용자동차용 직·병렬 AGM 배터리 시스템의 충·방전 거동 모델링

이정빈 · 김의성 · 이재신 · 신치범[†]

아주대학교 에너지시스템 학부

(2012년 9월 21일 접수, 2012년 12월 3일 수정, 2012년 12월 3일 채택)

Modeling of the charge and discharge behavior of the 2S2P(2 series-2 parallel) AGM battery system for commercial vehicles

Jeongbin Lee · Ui Seong Kim · Jae-Shin Yi · Chee Burm Shin[†]

School of Mechanical Engineering, Pusan National University,

Dept. of Chemical Engineering and Division of Energy Systems Research, Ajou University

(Received 21 September 2012, Revised 3 December 2012, Accepted 3 December 2012)

요 약

최근 전 세계가 환경문제와 에너지 자원 고갈 문제에 대해 관심을 집중하고 있다. 이런 문제들을 해결하기 위한 여러 가지 방법들 중 하나가 하이브리드자동차(HEVs)이다. 그래서 하이브리드자동차 기술에 대한 사람들의 관심이 높아지고 있다. 하이브리드 자동차의 에너지 저장 시스템의 후보들은 AGM 배터리, Ni-MH 배터리 및 리튬배터리 등이다. AGM 배터리는 상대적으로 낮은 가격, 높은 충전 효율, 낮은 자가 방전 및 높은 안전성 등이 장점이다. 상용자동차에 하이브리드 자동차 시스템을 적용하기 위해서는 4개의 AGM 배터리를 2개의 직렬과 2개의 병렬로 연결해야한다.

본 연구에서는 상용차용으로 사용될 직·병렬로 연결되어 있는 AGM 배터리 시스템의 충·방전 특성을 예측하기 위하여 AGM 배터리의 충·방전 모델링을 수행하였다. AGM 배터리의 충·방전 모델링을 위해 내부에서 일어나는 전기화학 반응, 전하 보존과 물질 보존 법칙을 통해 배터리의 지배방정식으로 세웠다. 모델링 결과의 정확성을 검증하기 위해 다양한 조건에서의 실험결과와 비교하였다.

주요어 : 직·병렬 배터리 시스템, AGM 배터리, 전기화학 모델링

Abstract - Recent in the world environmental issues and energy depletion problems have been received attention. One way to solve these problems is to use hybrid electric vehicles (HEVs). Therefore, the interest in HEV technology is higher than ever before. Viable candidates for the energy-storage systems in HEV applications may be absorbent glass mat (AGM) lead-acid, nickel-metal-hydride (Ni-MH) and rechargeable lithium batteries. The AGM battery has advantages in terms of relatively low cost, high charge efficiency, low self-discharge, low maintenance requirements and safety as compared to the other batteries. In order to implement HEV system in required more electric power commercial vehicles AGM batteries was connected to 2 series-2 parallels (2S2P).

In this study, a one-dimensional modeling is carried-out to predict the behaviors of 2S2P AGM batteries system during charge and discharge. The model accounts for electrochemical reaction rates, charge conservation and mass transport. In order to validate the model, modeling results are compared with the experimentally measured data in various conditions.

Key words : 2 series-2 parallel battery system, AGM battery, electrochemical modeling

[†]To whom corresponding should be addressed.

Dept. of Chemical Engineering and Division of Energy Systems
Research, Ajou University, Suwon 443-749, Republic of Korea
Tel : 031-219-2388 E-mail : cbshin@ajou.ac.kr

1. 서 론

전 세계가 기후 변화 대응을 위해 관심을 집중하고 있다. EU에서 선언한 신규 등록되는 승용차의 CO₂ 배출량을 '12년부터 130g/km으로 규제하는 등 기후변화 대응을 위한 세계적 환경 규제 강화 되어 감에 따라 수요요인, 공급요인, 외부요인에 더해서 기존의 내연기관 차량에서 친환경·고효율 자동차로 자동차 수요 패러다임이 급변하고 있다. 하지만 전기 자동차 및 연료전지 자동차는 성능 및 수명 불만족, 높은 가격 및 안정성으로 인하여 상용화되기 까지 많은 시간이 요구 된다. 이의 대안으로 기존 자동차 연료의 사용을 고효율로 바꾸고 전기를 이용하는 하이브리드 자동차이다. 여기서 연료 사용을 고효율로 하는 방법들 중 기존 차량에 쉽게 적용하는 방법은 자동차의 공회전을 줄이는 기술인 ISG(Idle stop & go) 기술과 자동차가 주행 중 정지를 할 때 발생하는 에너지를 전기 에너지로 변환하여 저장하는 회생 제동 기술 등을 차량에 적용하는 방법이다. 하지만 고효율 기술이 적용된 하이브리드 자동차는 일반적인 자동차의 운행 패턴보다 엔진 정지 구간이 늘어나게 되어 짧은 시간에 많은 양의 전기에너지를 사용할 수 있고 배터리의 충전과 방전 회수, 사이클 수명이 늘어난 배터리가 요구된다. 그래서 하이브리드 차량용 전지는 기존의 납축전지보다 많은 양의 전기 에너지를 빠르게 사용하고 저장할 수 있으며, 사이클 수명이 늘어난 AGM(Absorbent glass mat) 배터리가 각광을 받고 있다.

기존의 납축전지와는 달리 AGM 배터리는 전해액을 흡수하고 있는 AGM이라는 특수 격리판을 사용하고 내부압력 조절 배브 사용 등의 설계상의 차이점을 가지고 있으며, 사용 중에는 과충전에 의한 전해액의 물분해로 발생하게 되는 수소와 산소 기체가 내부에서 재결합 반응을 통해 배터리 내부로 환원시키도록 하는 작동상의 차이점을 가지고 있다. 따라서, AGM 배터리의 충 방전 거동을 정확히 예측하기 위해서는 충 방전 시 일어나는 전자 및 이온의 전달현상, 전극활물질의 산화·환원 반응뿐만 아니라 AGM 격리판에 따른 반응속도 변화 및 산소재결합 반응 등과 같은 다양한 현상이 복합적으로 고려되는 전기화학적 모델을 설정하여야 한다. 개발한 모델을 사용하

여 하이브리드 자동차에서의 고려되어야 할 다양한 작동조건에서 AGM 배터리의 충 방전 거동을 예측해야 할 것이다.

Guo 등[1]은 전극의 분극현상, 산소 발생과 물 손실 등을 고려한 1차원 모델을 이용하여 구현하였다. Dimpault-Darcy 등[2]은 2차원 모델을 이용하여 납축전지 내에서 일어나는 전류 밀도의 불균일성과 황산의 층리현상을 연구하였다. Nguyen과 White[3]는 배터리 내부의 격리판 두께와 다공도가 배터리 성능에 미치는 영향을 연구하였다. Bernardi와 Capenter[4], Newman and Tiedemann[5] 및 Tenno[6] 등은 납축전지 내부에서 양극과 음극에서 발생하는 산소와 수소를 통해 야기되는 현상들을 전기화학모델에 적용하였다. 그리고 이 논문들은 기체 발생 때의 화학반응식을 제시하였다. Srinivasan[7] 등은 배터리가 충전, 휴식 및 방전과 같은 동적 거동을 할 때 전기이중층의 중요성을 제시하고 모델에 추가하여 모사하였다. Esfahanian과 Torabi[8,9]는 배터리 내부의 전위를 계산할 때 Kirchhoff의 전류 및 전압 법칙을 사용하여 개선된 알고리즘을 제시하였다. 그리고 개선된 알고리즘은 기존에 제시되었던 모델의 계산 알고리즘보다 계산시간을 단축시켰다.

본 연구에서는 고효율 상용자동차용으로 사용될 직 병렬로 연결되어 있는 AGM 배터리 시스템의 충 방전 특성을 예측하기 위하여 직 병렬 AGM 배터리 시스템의 충 방전 모델링을 수행하였다. 직병렬로 연결된 AGM 배터리 시스템을 구축한 이유는 상용차에서 필요로 하는 배터리의 사양은 24V-160Ah이고 상용차에 적용시키기 위해서 현재 개발되어있는 12V-80Ah 배터리를 직렬과 병렬로 4개의 배터리를 연결하였기 때문이다. 연구 순서는 단(單) AGM 배터리의 충 방전 모델링을 수행하고 실험결과와 모델링 결과를 비교하여 단 AGM 배터리 모델링 결과의 정확성을 검증하였다. 검증된 단 AGM 배터리 모델을 사용하여 직 병렬로 연결되어 있는 AGM 배터리 시스템을 구성하였고 이 시스템 모델 역시 실험결과와 비교하여 모델링 결과의 정확성을 검증하였다. AGM 배터리의 충 방전 모델링을 위해 내부에서 일어나는 전기화학 반응, 전하 보존과 물질 보존 법칙을 통해 배터리의 지배방정식으로 세웠다.

2. 수학적 모델

2-1 AGM 배터리

Fig. 1은 AGM 배터리의 단면 개략도이다. 배터리는 양극의 PbO_2 , 다공성 격리판, 음극의 Pb 로 구성되어 있다. AGM 배터리의 전해질은 격리판에 함침되어 있다. 방전될 때 음극에서 수소이온이 발생되어 양극으로 이동하게 되고 충전될 때 양극에서 음극으로 수소이온이 이동하게 된다. 다음은 AGM 배터리 내부에서 일어나는 화학반응식이다.

(납축전지 양극에서의 반응)

(납축전지 음극에서의 반응)

(납축전지 전체의 반응)

2-2 지배방정식

전극의 고체부분과 전극에 함침된 전해질 용액의 전하량 보존을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$i_T = i_s + i_l \quad (1)$$

$$\nabla \cdot i_s + \nabla \cdot i_l = 0 \quad (2)$$

충전과 방전 중에 배터리 내부에서 일어나는 총 전류밀도(i_T)는 고체를 흐르는 전류(i_s)와 액체를 흐르는 전류(i_l)의 합과 같다. 그리고 고체 전극에서 흘러나온 전류는 손실 없이 액체 전해질로 흘러간다고 하였을 때 총 전류밀도의 divergence는 0이 된다.

고체전극과 액체 전해질에서 전하 보존 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \cdot i_s = -Aj \quad (3)$$

$$\nabla \cdot i_l = Aj \quad (4)$$

Fig. 1. Schematic diagram of an AGM battery

여기서 A 는 전극 활물질과 전극 기공 속의 전해액과의 계면 넓이를 나타내며 j 는 전달전류 밀도를 나타낸다. 전달전류밀도는 Butler-Volmer의 전기화학 반응속도식으로 정의될 수 있으며 Butler-Volmer식은 다음과 같다.

$$j = i_0 \left(\frac{c}{c_{ref}} \right) \left[\exp \left(\frac{\alpha_a F}{RT} \eta \right) - \exp \left(\frac{\alpha_c F}{RT} \eta \right) \right] \quad (5)$$

여기서 c 는 전해질의 농도를 나타내며, α_a 와 α_c 는 산화/환원 반응의 겉보기 전달 상수이다. 그리고 과전위 η 는 음극에 대하여 $\eta = \phi_s - \phi_l$, 양극에 대하여 $\eta = \phi_s - \phi_l - \Delta U_{PbO_2}$ 로 정의할 수 있다. ΔU_{PbO_2} 는 양극의 평형전위로서 전극과 전해액의 조성도와 온도의 함수이다. 고체전극을 흐르는 전류밀도는 옴의 법칙에 따라 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$i_s = -\sigma^{eff} \nabla \phi_s \quad (6)$$

여기서 ϕ_s 는 고체전극에 걸리는 국부 전위를 나타내며, σ^{eff} 는 공극률을 고려한 고체의 유효전도도이다. 고체의 유효전도도는 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$\sigma^{eff} = \sigma(1 - \epsilon)^{ex} \quad (7)$$

여기서 ϵ 는 고체 전극의 다공도를 나타내며, ex 는 실험적 매개변수이고 본 연구에서는 1.5로 설정하였다. 전극 세공 속 전해액의 전류밀도는 고체전극을 흐르는 전류밀도와 마찬가지로 옴의 법칙에 따라 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$i_l = -k^{eff} \nabla \phi_l - k_D^{eff} \nabla (\ln c) \quad (8)$$

여기서 k^{eff} 는 전해질의 유효전도도이고 k_D^{eff} 는 이온의 확산에 의해 이동하는 하전입자들의 속도로 측정되는 유효확산전도도이다. 식(3)과 식(6) 그리고 식(4)와 식(8)을 각각 합치면 다음과 식으로 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\sigma^{eff} \nabla \phi_s) - Aj = 0 \quad (9)$$

$$\nabla \cdot (k^{eff} \nabla \phi_l) + \nabla \cdot (k_D^{eff} \nabla (\ln c)) + Aj = 0 \quad (10)$$

전기화학반응이 발생할 수 있는 면적을 나타내는 A 는 배터리의 성능을 나타내는 형태인자 중에 하나이다. 전기화학반응이 진행되면서 전극과 전해질간의 화학반응에 의해 물질이동이 일어남에 따라 방전일 때 면적과 충전일 때 면적이 다르다. 각 상황마다 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$(\text{방전}) \quad A = A_{\max} SOC^\xi \quad (11)$$

$$(\text{충전}) \quad A = A_{\max} (1 - SOC^\xi) \quad (12)$$

여기서 $A_{\max}$ 는 활성화된 면적의 최대값이다.

시간에 따른 SOC의 변화를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(SOC)}{\partial t} = \pm \frac{\nabla \cdot i_l}{Q_{\max}} \quad (13)$$

여기서 양극에서는 오른쪽 식의 부호가 +가 되고 음극에서는 식의 부호가 -가 된다. 그리고 $Q_{\max}$ 는 만충전상태(fully charged)에 있는 전극으로부터 사용할 수 있는 최대전하량을 나타낸다. 전극의 다공도는

충 방전이 일어나면서 시간에 따라 변하는 변수이다. 시간에 따른 다공도의 변화를 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \epsilon}{\partial t} - a_1 \frac{Aj}{2F} = 0 \quad (14)$$

여기서 Aj 는 전기화학반응에서 발생된 전류전달을 나타내며 a_1 은 전환된 활물질의 몰당 부피변화이다. 이 값은 양극과 음극으로 구분되어 정의되며 그 식들은 다음과 같다.

$$(\text{양극}) \quad a_1 = \left(\frac{M_{PbO_2}}{\rho_{PbO_2}} - \frac{M_{PbSO_4}}{\rho_{PbSO_4}} \right) \quad (15)$$

$$(\text{음극}) \quad a_1 = \left(\frac{M_{Pb}}{\rho_{Pb}} - \frac{M_{PbSO_4}}{\rho_{PbSO_4}} \right) \quad (16)$$

물질전달현상에 의해 전달되는 전해질 이온의 질량 보존 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial(\epsilon c)}{\partial t} = \nabla \cdot (D^{eff} \nabla c) + a_2 \frac{Aj}{2F} \quad (17)$$

여기서 a_2 는 a_1 과 같이 양극과 음극의 식이 다르게 정의된다. 양극에서는 $a_2 = 3 - 2t_+^0$ 이며 음극에서는 $a_2 = 1 - 2t_+^0$ 이다. t_+^0 는 수소이온의 전달수이다.

2-3 초기조건 및 경계조건

시간에 따라 변하는 변수들은 SOC, 다공도와 농도이다. 따라서 이 세 가지 변수들만 초기조건이 필요하다. 각 초기조건들은 초기 SOC, 초기 다공도 및 초기 전해액의 농도에 해당한다.

$$SOC = SOC_0 \quad (18)$$

$$\epsilon = \epsilon_0 \quad (19)$$

$$c = c_0 \quad (20)$$

배터리의 모든 경계에서 고체와 액체의 전위에 대한 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \phi_l}{\partial n} = \frac{\partial \phi_s}{\partial n} = 0 \quad (21)$$

전해질 노동의 경계조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial c}{\partial n} = 0 \quad (22)$$

2-4 계산방법

수학적 모델에 사용된 편미분방정식의 수치해를 얻기 위하여 유한차분법을 사용하였다. 시간에 대한 적분은 implicit method를 사용하여 해를 얻었다. 모델은 1차원으로 가정하였다. 유한차분법을 위해 나눈 격자는 모델의 계산 속도를 위해 45개로 설정하였다.

3. 단위 배터리 방전 및 충전실험

본 연구에서는 세방전지에서 제조된 차량용 12-V(80 Ah급) AGM 배터리를 사용하였다. 모든 실험은 25℃에서 수행되었으며, 실제 차량에서의 다양한 방전 상태를 대표할 수 있는 4A, 16A, 25A 및 80A의 방전전류에 대하여 종결전압으로 설정한 10.5 V까지 방전실험을 수행하였다. 충전실험은 실제 차량에서의 다양한 충전 상태를 대표할 수 있는 25A, 50A 및 100A의 충전전류로 실험을 수행하였다. 그리고 정전압 충전의 조건인 충전 제한 전압은 14.8V로 설정하고 정전압 충전실험이 끝나는 조건을 충전 전류가 0.5A에 도달하였을 때로 설정하여 실험하였다.

4. 단위 배터리 모델링 결과 및 고찰

Fig. 2는 실험온도가 25℃이고 방전전류가 각각 4A, 16A, 25A, 80A인 방전실험결과와 모델링 결과를 비교한 그림이다. 실험결과는 실선으로, 모델링의 결과를 점으로 표시하였다. 낮은 방전 전류인 4A와 16A에서는 실험결과와 모델링 결과가 비교적 잘 일치함을 확인할 수 있다. 방전 전류가 증가 할수록 방전 초기의 계산 값과 시험 값의 차이가 증가함을 관

Fig. 2. Comparison between experimental and modeling discharge voltage curves at discharge currents of 4A, 16A, 25A and 80A

찰 할 수 있다. 이는 높은 전류로 방전할 때 방전의 초기 방전시간의 경우 모델링 방법이나 모델의 입력 인자의 값에 개선의 여지가 있음을 의미한다. 특히 방전 전류가 커질수록 방전 초기에는 전압이 급격하게 떨어졌다가 짧은 시간 안에 다시 회복되는 coup de fouet 혹은 순간적인 전압강하(voltage-dip) 현상을 모델링으로 구현하기에는 아직까지 확실히 규명되지 않아서 어렵다.

4-1 충전 모델링

Fig. 3는 실험온도가 25℃이고 충전전류가 각각 25A, 50A, 100A이며 정전압 충전이 시작되는 충전 전압을 14.8V로 설정한 충전실험 결과와 모델링 결과의 비교이다. 실험결과는 실선으로, 모델링의 결과를 점으로 표시하였다. 시간에 따라 변하는 전압이 실험결과와 모델링 결과가 전반적으로 일치하는 것을 확인할 수 있다. 일정한 전류가 충전되는 정전류 충전 구간을 보면 충전이 진행될수록 배터리 전압의 기울기가 증가하는 것을 볼 수 있다. 이것은 배터리의 내부저항 값이 시간에 따라 증가하는 것에 기인한다.

Fig. 4는 전류가 시간에 따라 변하는 실험결과와 모델링결과를 비교한 그림이다. 실험결과는 실선으로, 모델링의 결과를 점으로 표시하였다. 그림을 보면 충전전압이 14.8V로 도달하였을 때 충전 전류가 감소하는 현상을 볼 수 있다. 정전압 충전 구간에서 충전 전류가 감소하는 현상을 모델링이 실험결과와 거의 차이 없이 묘사하는 것을 볼 수 있다.

Fig. 3. Comparison between experimental and modeling charge voltage curves at charge currents of 25A, 50A and 100A

Fig. 4. Comparison between experimental and modeling charge voltage curves at charge currents of 25A, 50A and 100A

Fig. 5. Schematic diagram of a 2S2P AGM battery system

5. 2S2P AGM배터리 시스템 충·방전 실험

5-1 2S2P AGM배터리 시스템

상용자동차에 적용하기 위해서는 대용량 24V-160Ah/20hr 이상이 필요하지만 현재까지 12V-80Ah/20hr까지 전지가 개발되어 직접 적용이 불가하다. 이로 인하여 본 연구에서는 상용자동차에 적용하기 위해서 12V-80Ah/20hr 배터리 4개를 2S2P(2-Series 2-Parallel)방법으로 연결하였다. 2S2P AGM 배터리 시스템은 총 4개의 AGM 배터리, 2개의 배터리 병렬연결 cable과 2개의 배터리 직렬연결 bar로 구성되어 있다. Fig. 5은 2S2P AGM 배터리 시스템의 개략도를 나타내는 그림이다.

5-2 2S2P AGM배터리 시스템

40℃에서 방전 전류에 따른 2S2P AGM 배터리 시스템의 방전시험을 수행하였다. 방전은 차량에서 일반적으로 많이 사용되는 20A를 수행하였다. 20A 방전전류로 4개의 배터리가 각각 12V의 종지전압까지 방전하는 것으로 정하였다. 2S2P AGM 배터리의 전압 및 전류를 측정하고 각 cell마다 전압 및 전류를 측정하였다.

그리고 40℃에서 2S2P AGM 배터리 시스템의 충전시험을 수행하였다. 충전 전류는 50A로 설정하여 실험을 수행하였다. 충전 전류를 50A만 시험한 이유는 상용차에서 방전 후 충전할 때 한가지 정전류로 충전을 수행하는데 그 전류가 50A이기 때문이다. 충전 제한 전압은 상용차에서 실제 사용되는 전압인 13.8V로 설정하였다. 앞의 방전 시험과 같이 2S2P AGM 배터리의 전압 및 전류를 측정하고 각 cell마다 전압 및 전류를 측정하였다.

6. 2S2P AGM배터리 시스템 모델링 결과 및 고찰

6-1 Current distribution

2S2P AGM 배터리 시스템을 모델링하기 위해서는 단위 배터리의 모델링과는 달리 배터리들이 병렬로 연결되어서 발생하는 전류가 비선형적으로 거동하는 current distribution 현상을 이해하고 추가적으로 모델링을 진행해야 한다.

우선 배터리들이 병렬로 연결되었을 때 발생하는 current distribution 현상의 이유에 대해 고찰해보

Fig. 6. Current distribution in the parallel connection

졌다. Fig. 6을 보면 방전이나 충전을 진행 할 때 입력으로 들어가는 총 전류는 시간에 대해 일정하게 들어가지만 병렬로 연결된 각각의 배터리는 시간에 대해 비선형적으로 거동하는 전류 흐름이 들어가는 것을 볼 수 있다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 배터리의 내부 저항이 시간에 따라 변하기 때문이다. 배터리의 내부 저항 변화에 영향을 끼치는 인자들로는 전극들과 전해질의 ohmic 저항, 전기화학 반응에 의한 전하 전달현상과 전해질에서 일어나는 물질 전달 등이 있다. 따라서 병렬연결로 들어가는 전류는 각 배터리가 시간에 따라 변하는 전압에 의해 distribution이 발생하게 되는데 시간에 따라 변하는 전압은 각 배터리의 SOC(state of charge)와 관계가 있다.[10,11] 즉, current distribution은 SOC의 변화에 따른 내부저항 변화에 대한 결과로 볼 수 있다.

본 연구에서는 current distribution 현상을 모델링하기 위해 충방전 초기 어떤 병렬연결이 더 높은 저항을 가지고 SOC 변화에 따른 배터리 내부 저항에 관한 가정을 하였다.

i) 2S2P에서의 배터리 연결 cable의 저항 때문에 입력으로 들어가는 전류가 다르게 distribution되고 병렬로 연결된 배터리의 전압은 같지 않다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$V_4 + V_1 \neq V_2 + V_3 \quad (23)$$

ii) Cable 저항들 중 current distribution에 큰 영향을 주는 저항은 1,2와 3이다. 왜냐하면 4번 cable의 저항은 배터리에 전류를 입력으로 들어가는 저항이 아니다. 따라서, 각 cable이 갖는 저항들과 초기 배터

Fig. 7. The internal resistance with the current and the state of charge in the 2S2P AGM battery system

리 저항에 편차가 없다면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_2 < R_1 + R_4 \quad (24)$$

여기서 R_i 은 cable의 전기 저항을 나타내며 아래 첨자 i는 연결되어있는 배터리 번호를 나타낸다.

위의 가정들은 세방전지에서 시험한 2S2P AGM 배터리 시스템의 시험 데이터에 기초하여 설정한 가정들이며 이러한 가정들로 current distribution 모델링 algorithm을 만들면 다음과 같다.

i) Cable과 배터리 상관관계를 이용하여 current에 따른 저항을 계산한다.

ii) 계산한 저항을 이용하여 초기 current를 계산한다.

iii) 배터리의 충방전이 진행될수록 SOC에 따라 배터리의 저항이 변하기 때문에 배터리의 저항함수를 SOC의 함수로 만든다.

vi) 배터리의 저항을 배터리 별로 계산 후에 직렬의 총 저항 값을 계산 후 다음 시간에서의 current distribution을 계산한다.

배터리의 전류 및 SOC에 따른 배터리의 저항 함수는 HPPC(hybrid pulse power characterization) 방법을 이용하여 단위 배터리 모델링 통해 배터리의 저항을 functional group으로 하였다. Fig. 7은 모델링으로 구한 전류 및 SOC에 따른 배터리의 내부저항

식을 3D로 그려놓은 그림이다.

6-2 2S2P AGM 배터리 시스템의 방전 모델링 결과

2S2P AGM 배터리 방전 모델링의 정확성을 검증하기 위하여 40℃에서 20A로 방전하였을 때 시간에 따른 전류의 변화에 대한 시험 결과와 모델링으로 얻은 계산 결과를 Fig. 8에 비교하였다. 모델링 결과와 시험 결과를 비교하여 보면 약간의 차이가 존재하지만 시험결과와 같이 모델링의 결과도 시간에 따라 비선형적으로 변하고 경향은 거의 같다고 할 수 있다. 40℃에서 20A로 방전하였을 때 1번 배터리와 4번 배터리의 시간에 따른 전압의 변화에 대한 시험 결과와 모델링으로 얻은 계산 결과를 Fig. 9에 비교하였다. 1번 배터리와 4번 배터리를 같이 묶어서 비교한 이유는 직렬로 연결 되어있어서 3번 전류가 입력으로 들어가기 때문이다. 방전 전압의 최소를 12V로 설정해 놓은 이유는 2S2P 시스템에서 사용될 SOC영역이 50%이기 때문이다. 모델링 결과와 시험 결과를 조금 더 자세히 비교해 보면 단위 배터리에서 모델링 결과와 같이 전압 초기 부분에서 약간의 차이만 갖고 거의 차이가 없는 것을 볼 수 있고 12V에 도달하는 시점도 거의 같다고 볼 수 있다. 40℃에서 20A로 방전하였을 때 2번 배터리와 3번 배터리의 시간에 따른 전압의 변화에 대한 시험 결과와 모델링으로 얻은 계산 결과를 Fig. 10에 비교하였다. 2번 배터리와 3번 배터리를 같이 묶은 이유는 직렬로 연결 되어있어서 2번 전류가 입력으로 들어가기 때문이다. 2번 배터리와 3번 배터리의 모델링 결과 역시 전압 초기 부분만 제외하면 모델링 결과와 시험결과가 일치하는 것을 볼 수 있다.

6-3 2S2P AGM 배터리 시스템의 충전 모델링 결과

2S2P AGM 배터리 충전 모델링의 정확성을 검증하기 위하여 40℃에서 50A로 충전하였을 때 시간에 따른 전류의 변화에 대한 시험 결과와 모델링으로 얻은 계산 결과를 그림 98에 비교하였다. 모델링 결과와 시험 결과를 비교하면 모델링 결과가 비선형적인 current distribution 경향을 잘 맞추는 것을 볼 수 있다. 1번 배터리와 4번 배터리의 시간에 따른 전압의 변화에 대한 시험 결과와 모델링으로 얻은 계산 결과

Fig. 8. Comparison between experimental and modeling discharge current curves of 2S2P AGM battery system at discharge currents of 20A

Fig. 9. Comparison between experimental and modeling discharge voltage curves of battery #1 and battery #4 of 2S2P AGM battery system at discharge currents of 20A

Fig. 10. Comparison between experimental and modeling discharge voltage curves of battery #2 and battery #3 of 2S2P AGM battery system at discharge currents of 20A

Fig. 11. Comparison between experimental and modeling charge current curves of 2S2P AGM battery system at charge currents of 50A

Fig. 12. Comparison between experimental and modeling charge voltage curves of battery #1 and battery #4 of 2S2P AGM battery system at charge currents of 50A

Fig. 13. Comparison between experimental and modeling charge voltage curves of battery #2 and battery #3 of 2S2P AGM battery system at charge currents of 50A

를 그림 99.에 비교하였다. 충전 전압을 13.8V로 설정해놓은 이유는 2S2P 시스템에서 설정되는 충전 전압이 13.8V 이기 때문이다. 모델링 결과와 시험 결과를 비교해 보면 모델링 결과와 시험 결과가 거의 차이가 없는 것을 확인 할 수 있다. 2번 배터리와 3번 배터리의 시간에 따른 전압의 변화에 대한 시험 결과와 모델링으로 얻은 계산 결과를 그림 100.에 비교하였다. 2번 배터리와 3번 배터리의 모델링 결과를 비교해보면 초기 부분만 제외하면 모델링 결과와 시험 결과가 일치하는 것을 볼 수 있다. 두 가지 모두 그림을 보면 시험결과에서 current distribution에 의한 CV 구간에서 fluctuation이 생기는 것을 볼 수 있는데 모델링에서 이런 fluctuation을 구현하기는 사실상 불가능 하다. 하지만 fluctuation voltage와 13.8V의 차이는 평균 0.01V로 극히 적다.

4. 결 론

본 연구에서는 2S2P AGM 배터리 시스템의 충전 및 방전거동을 예측할 수 있는 전산모사 소프트웨어를 개발하기 위해 우선 단위 AGM 배터리의 충전 및 방전 거동 모델링을 수행하였다. 수학적 모델에는 AGM 배터리 내부에서 일어나는 전기화학 반응, 전해질의 유동 및 대류에 의한 이온의 전달, 전극의 공극률 등의 여러 현상들이 복합적으로 고려되었다. 개발한 단위 AGM 배터리 모델링 결과와 실험결과를 비교하여 모델링의 신뢰성을 검증하였다. 단위 배터리 모델링을 통하여 2S2P AGM 배터리 시스템 모델링을 진행하였다. 배터리를 병렬로 연결하였을 때 발생하는 current distribution 현상을 모델에 반영하였다. 2S2P AGM 배터리 시스템의 충전 및 방전 모델링 결과와 실험결과를 비교하여 모델링의 신뢰성을 검증하였다. 이를 통해 전기적 등가회로 모델에서 불가능했던 납축전지의 비선형성을 모델링에 반영할 수 있었다. 이 모델링 프로그램은 보다 효과적인 차량 운용과 전기 공급 시스템의 효율성의 향상에 기여할 수 있는 가능성을 확인할 수 있었다.

사용기호

A : Active surface area of electrode [cm^2/cm^3]

a : Coefficient

A_{max} : Maximum specific active surface area

of electrode [cm^2/cm^3]
 c : Concentration of the electrolyte [mol/cm^3]
 c_{ref} : Reference concentration of the electrolyte [mol/cm^3]
 D : Diffusion coefficient of the electrolyte [cm^2/s]
 F : Faraday's constant [$96,487 \text{ C}/\text{mol}$]
 i_0 : Exchange current density [A/cm^2]
 j : Transfer current density [A/cm^3]
 M : Molecular weight of species [g/mol]
 Q : Electrode capacity [$\text{Coulomb}/\text{cm}^3$]
 R : Universal gas constant [$8.3143\text{J}/\text{mol}\cdot\text{K}$] and Internal resistance of a battery [Ω]
 t : Time [sec]
 t_0^+ : Transference number of H^+ with respect to solvent velocity
 T : Absolute temperature [K]
 ΔU_{PbO_2} : Equilibrium potential at c_{ref} for positive electrode [V]
 x : Distance from centre of positive electrode [cm]
 k_D^{eff} : Effective diffusion conductivity [A/cm]

그리스 문자

α : Transfer coefficient
 β : Volume expansion coefficient [cm^3/mol]
 γ : Exponent for the concentration dependence of the exchange current density
 Γ : Diffusion coefficient
 ε : Porosity of electrode
 ξ : Exponent for charge dependence of the specific active surface area
 η : Electrode overpotential [V]
 κ : Electrolyte conductivity [S/cm]
 ρ : Density [kg/m^3]
 σ : Conductivity of the solid matrix [S/cm]
 ρ : density [kg/m^3]
 ϕ_s : electric potential of solid phase [V]
 ϕ_l : electric potential of liquid phase [V]

아래 첨자

D : Pertinent to diffusion
 L : Liquid phase

max : Maximum or theoretical
 0 : Initial value
 Ref : Reference state
 S : Solid phase

위 첨자

eff : Effective, corrected for tortuosity

참고문헌

1. Guo, Y.; Groiss, R.; Döring, H.; Garche J. Rate Determining Step Investigations of Oxidation Processes at the Positive Plate during Pulse Charge of Valve Regulated Lead Acid Batteries. Journal of The Electrochemical Society, 1995, 146, 3949-3957.
2. Dimpault-Darcy, E.; Groiss, R.; Döring, H.; Garche J. Rate Determining Step Investigations of Oxidation Processes at the Positive Plate during Pulse Charge of Valve Regulated Lead Acid Batteries. Journal of The Electrochemical Society, 1995, 146, 3949-3957.
3. Nguyen, T. V.; White, R. E. A Two Dimensional Mathematical Model of a Porous Lead Dioxide Electrode in a Lead Acid Cell. Journal of The Electrochemical Society, 1988, 135, 278-285.
4. Bernardi, D. M.; Carpenter, M. L. A Mathematical Model of the Oxygen Recombination Lead Acid Cell. Journal of The Electrochemical Society, 1995, 142, 2631-2642.
5. Newman, J.; Tiedemann, W. Simulation of Recombinant Lead Acid Batteries. Journal of The Electrochemical Society, 1997, 144, 3081-3091.
6. Tenno, A.; Tenno, R.; Suntio, T. Evaluation of VRLA battery under overcharging: model for battery testing. Journal of Power Source, 2002, 111, 65-82.
7. Srinivasan, V.; Wang, G. Q.; Wang, C. Y. Mathematical Modeling of Current-Interrupt and Pulse Operation of Valve-Regulated Lead Acid Cells. Journal of The Electrochemical Society, 2001, 150, A316-A325.
8. Esfahanian, V.; Torabi, F. Numerical simulation of lead-acid batteries using Keller-Box method. Journal of Power Source, 2006, 158, 949-952.
9. Esfahanian, V.; Torabi, F.; Mosahebi A. An innovative computational algorithm for simulation of lead-acid batteries. Journal of Power Source, 2008, 176, 373-380.
10. Zhang, J.; Ci, S.; Sharif H.; Alahmad, M.; Modeling Discharge Behavior of Multicell Battery. IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION, 2010, 25, 1133-1141.
11. Wu, M. S.; Lin, C. Y.; Wang, Y. Y.; Wan C. C.; Yang, C. R.; Numerical simulation for the discharge behaviors of batteries in series and/or parallel-connected battery pack. Electrochimica Acta, 2006, 52, 1349-1357.