

## Improvement of charging efficiency of AGM lead acid battery through formation pattern research

Sung Joon Kim<sup>\*,\*\*</sup>, Jeong Hun Son<sup>\*\*</sup>, Bong-Gu Kim<sup>\*\*\*</sup> and Yeon Gil Jung<sup>\*\*,\*\*\*,†</sup>

<sup>\*</sup>Sebang Global battery Co., Ltd., Changwon 51537, Korea

<sup>\*\*</sup>School of Nano & Advanced Materials Eng., Changwon National University, Changwon 51140, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Department of Materials Convergence and System Eng., Changwon National University, Changwon 51140, Korea

(Received January 18, 2021)

(Revised January 21, 2021)

(Accepted February 1, 2021)

**Abstract** In order to improve fuel economy and reduce CO<sub>2</sub>, HEV adopts ISG system as a standard. This ISG system increased the electric load that the battery had to bear, and the number of starting increased rapidly. AGM Lead Acid batteries have been developed and used, but the charging time is about three times longer as the electrolyte amount control during formation must be maintained at a higher level compared to conventional lead-acid batteries. In this study, we tried to shorten the charging time by increasing the charging efficiency through the optimization of the formation pattern. In order to optimize the Formation Pattern, 10 charging steps and 6 discharging steps were applied to 16 multi steps, and the charging current for each step was controlled, and the test was conducted under 4 conditions (21 hr, 24 hr, 27 hr, 30 hr). As a result of simultaneous application of multi-step and discharge step, it was verified that minimizing the current loss and eliminating the sudden polarization during charging contributes to the improvement of charging efficiency. As a result, it showed excellent results in reducing the charging time by about 30 % with improved charging efficiency compared to the previous one.

**Key words** AGM lead acid battery, Formation pattern, HEV, ISG

## Formation pattern 연구를 통한 AGM 연축전지의 충전 효율 향상

김성준<sup>\*\*\*</sup>, 손정훈<sup>\*\*</sup>, 김봉구<sup>\*\*\*</sup>, 정연길<sup>\*\*,\*\*\*,†</sup>

<sup>\*</sup>세방전지(주), 창원, 51537

<sup>\*\*</sup>창원대학교 신소재공학과, 창원, 51140

<sup>\*\*\*</sup>창원대학교 소재융합시스템공학과, 창원, 51140

(2021년 1월 18일 접수)

(2021년 1월 21일 심사완료)

(2021년 2월 1일 게재확정)

**요약** CO<sub>2</sub> 가스 발생 감소와 연비향상을 위해서 HEV 차량은 ISG 시스템을 채용하고 있다. 이 ISG 시스템은 배터리가 감당해야 하는 전기 부하를 증대시켰고, 시동 횟수도 급격히 늘어나게 하였다. 이를 위해 AGM 연축전지가 개발되어 사용되고 있으나, 종래의 연축전지에 비해서 formation 중 전해액량 조절이 더 높은 수준으로 유지해야 됨에 따라 충전시간이 약 3배 가량 길어지게 되었다. 본 연구에서는 formation pattern의 최적화를 통해서 충전효율을 증대시켜 충전시간을 단축하고자 하였다. formation pattern의 최적화를 위해서, 16개 multi step에 10개 충전 step과 6개의 방전 step을 적용하고, step별 충전 전류를 조절한 4가지 조건(21 hr, 24 hr, 27 hr, 30 hr)으로 시험을 진행하였다. 그 결과 24 hr 시험 조건이 PbO<sub>2</sub> 변환율이 가장 높게 분석되었고, 용량 103.3 %, 저온시동성능 38 sec, 충전수입성 37.36 A로 나타났다. Multi-step과 방전 step을 적용한 충전 프로그램의 결과, 충전 중에 국부적으로 급격히 발생된 분극화를 제거하고 전류의 손실을 최소화함으로써 충전효율을 증가시킬 수 있음을 검증하였다. 이렇게 충전효율을 증가시킴으로써 본 연구에서는 충전시간을 기존에 비해서 약 30 % 감소시키는 탁월한 결과를 얻을 수 있었다.

<sup>†</sup>Corresponding author

E-mail: jungyg@changwon.ac.kr

### 1. 서 론

CO<sub>2</sub> 등 배기가스 감축을 위한 연구가 자동차업체 전반에 걸쳐서 연구가 진행되고 있으며, 이를 위한 새로운 기술들이 개발 및 적용되고 있다[1]. 이러한 기술 중, 자동차에 사용중인 대표적인 기술이 ISG(Idle Stop & Go) 시스템이다. ISG 시스템은 HEV 차량에서 기본 시스템으로 채용 중이며, 도심 혼잡한 교통상황에서 연료 불연소 구간인 신호 대기중 엔진이 공회전을 해야 할 상황일 때, 엔진을 정지하고, 정지 중 필요한 전력을 배터리에서 공급되도록 하는 시스템이다. 출발을 위해 역셀을 밟는 순간 시동이 걸리는데 이로 인해 종래의 자동차보다 시동 횟수가 대폭 상승하는 작동 환경이다[2]

이 ISG 시스템은 배터리에 전기 부하를 증가시키고, 빈번한 시동에 의한 고전류 방전특성등을 요구함에 따라 기존의 일반 연축전지(Flooded type Lead Acid Battery)로는 고전류 방전특성과 수명을 만족시키기 어려워 이런 특성이 개선된 AGM(Absorbent Glass Mat) LAB(Lead Acid Battery)를 적용하고 있다[3-7]. AGM LAB는 사용되는 전해액을 glass fiber로 만들어진 격리판에 흡습을 시켜서 셀간압(Cell pressure)을 유지하고, 충/방전 특성을 향상시킨 전지이다. 그렇기 때문에 한정된 전해액을 한정된 공간에 적용하다 보니 미화성 전지에 전기적 특성을 부여하는 formation 공정에서 충전 중 전해액량을 제어하기 어려워 긴 시간 충전을 하고 있다. 일반적으로 일반 연축전지 대비 약 3배 가량의 충전시간이 소요되며, 충전 중 발생하는 저항열에 의해 분극 현상이 발생하여 충전 효율이 저하될 수가 있다[8]. 이런 증가된 충전시간등에 의해 AGM LAB의 제조원가가 일반 연축전지 대비 2배 이상 높아지는 요인으로 작용한다. 이런 충전시간을 단축하기 위해서 Gu 등은 정전류 충전 중의 전압거동과 전해액 농도의 변화에 대해 연구했다[9]. Maja 등은 극판 형태, 산의 양, 활물질의 다공도 같은 다양한 변수의 효과를 바탕으로 충/방전 시뮬레이션을 연구했다[10]. Calasanzio 등은 활물질의 다공도가 충전에 영향을 주는 것을 확인했으며, 정전류 충전 뿐만 아니라 휴지기 존재에 따른 단계별 충전에 대해 연구했다[11]. Lam 등은 연축전지의 고속 충전을 위해 펄스 전류 기술과 정전류 재충전을 비교했다[12]. 본 연구에서는 이런 방법들을 AGM 연축전지 Formation의 충전패턴에 적용하여 충전전류의 다중 step과 충전 중 분극 제거를 위한 휴지 step과 방전 step의 영향에 대한 연구를 진행하였다. 이런 충전패턴의 연구로 최적의 충전조건을 찾고, 향상된 충전효율로 formation 시간의 감소를 추진하였다. 각 step별 전류의 크기를 달리하여 충전시간을 조절하면서, formation 후 활물질 형상 및 변환량, 용량, 충전수입성, 저온 고율방전, 수명시험등을 통해 전지의 성능을 비교 고찰하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1. AGM 연축전지 제작

##### 2.1.1. AGM 연축전지 제작

현재의 양극 극판과 음극판을 AGM 격리판과 서로 한장씩 배열하여 셀을 구성하였으며, 6개의 구분된 공간으로 이루어진 케이스에 2 V 셀을 차입하고 직렬로 용접하여 연결하였다. 전해액으로 황산 수용액을 사용하여 충전을 통해 극판 활성화를 진행하였다. 20시간을 용량 70 Ah 제품으로 제작하였으며, AGM 연축전지의 전반적인 제조 공정을 Fig. 1에 나타내었고, Fig. 2는 전지 외관 형상을 보여주고 있다.

##### 2.1.2. Formation pattern별 충전

상기 전지 제조 시 충전 조건을 Table 1와 같이 휴지와 방전 step을 각각 반영하여 AGM 연축전지를 제조하여 영향성을 활물질 변환율로 평가하였다. 이 pattern 연구로 얻어진 결과를 반영하여 Table 2과 같이 step을 충

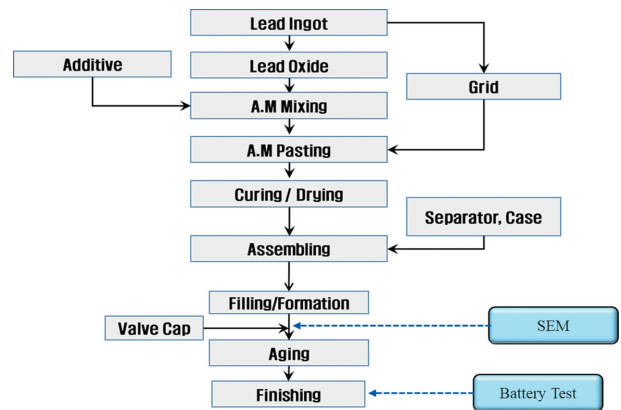


Fig. 1. The manufacturing process of AGM battery.

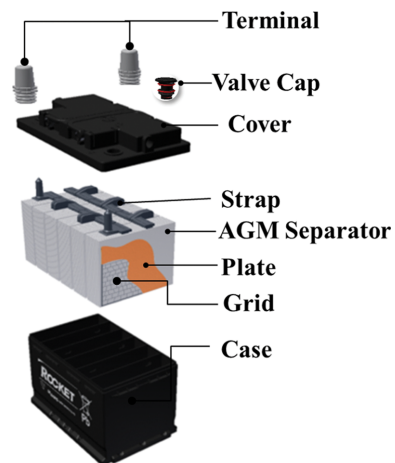


Fig. 2. AGM lead acid battery.

Table 1  
Formation condition (Pause vs Discharge)

Condition 1			Condition 2		
Division	Current [A]	Time [hr]	Division	Current [A]	Time [hr]
Charge	3	1	Charge	3	1
Charge	7	2	Charge	7	2
Charge	10	2	Charge	10	2
Charge	15	2	Charge	15	2
Pause	0	0.5	Discharge	-5	0.5
Charge	17	2	Charge	17	2
Total		10	Total		10

Table 2  
Formation condition according charging time

Step	Condition 1		Condition 2		Condition 3		Condition 4	
	Current [A]	Time [hr]	Current [A]	Time [hr]	Current [A]	Time [hr]	Current [A]	Time [hr]
Charge	1	3	1	3	1	4	1	4
Charge	2	10	3	13	3	15	2	19
Discharge	3	-5	0.5	-5	0.5	-5	0.5	-5
Charge	4	15	5	17	4	20	3	24
Discharge	5	-5	0.5	-5	0.5	-5	0.5	-5
Charge	6	17	3	19	3	20	3	24
Discharge	7	-5	0.5	-5	0.5	-5	0.5	-5
Charge	8	15	4	17	3	20	3	23
Discharge	9	-5	0.5	-5	0.5	-5	0.5	-5
Charge	10	15	3	17	2.5	20	2	23
Charge	11	17	3	19	3	22	2	24
Discharge	12	-5	0.5	-5	0.5	-5	0.5	-5
Charge	13	15	2	17	2	19	2	24
Discharge	14	-5	0.5	-5	0.5	-5	0.5	-5
Charge	15	13	2	13	1.5	17	2	19
Charge	16	4	1	4	1	5	1	6
Total		30		27		24		21

Table 3  
Test sequence and method

No	Test Items	Test method
1	20 hr Capacity	* Battery condition: Full charged battery * Test Temp.: 25°C * Discharge current: 3.5 A (70 Ah, 20 hr-rate) * Until voltage drops to 10.5 V
2	CCA (Cold Cranking Ampere)	* Battery condition: Full charged battery * Test Temp.: -18°C * Discharge current: 760 A (70 Ah) * Until voltage drops to 7.2 V * Battery condition: Full charged battery * Test Temp.: -30°C * Discharge current: 450 A (70 Ah) * Until voltage drops to 7.2 V
3	CA (Charging Acceptance)	* Battery condition: Discharge current 25 A until 80 % of capacity. * Test Temp.: 0°C * Charge voltage: 14.4 V
4	ISG cycle test (SBA S0101)	* Battery condition: Full charged battery * Test Temp.: 25°C * 1 <sup>st</sup> step discharge: 45 A, 59 sec * 2 <sup>nd</sup> step discharge: 300 A, 1 sec * Charge step: 100 A, 60 sec, 14.0 V * Charge/discharge cycles 3600 (5 days) after 48 hr (2 days) pause. * Cut-off voltage (Terminated): 7.2 V

16 step으로 세분화하였고, 방전 step을 적용한 후 step 별 전류의 크기를 조절하였으며, 4가지 조건의 충전시간 으로 구분하여 시료를 제작하였다.

2.2. 충전 후 활물질 성분과 특성 분석

충전 후 연축전지의 충전 상태를 확인하기 위하여 양극 활물질과 음극 활물질의 성분을 습식 분석을 통해 PbO<sub>2</sub>와 Pb, PbSO<sub>4</sub> 함량을 분석하였다. 충전된 활물질의 형상은 SEM을 통해 관찰하여 비교하였다.

2.3. 시험환경 및 평가

제작된 전지는 국내 상용차 업체 규격에 따라 시험을 진행하였고, 시험 방법은 Table 3에 나타내었다. 시험은 낮은 전류로 충전/방전이 되는 용량과 큰 전류로 충전/방전이 되는 저온시동성능 및 충전수입성을 시험을 진행하였고, 수명 중 충/방전 거동을 확인하기 위해서 SBA S0101 수명시험을 진행하였다. SBA S0101 시험은 일본전지공업회 시험 규격이며, ISG 시스템 내구 수명 평가 항목이다. 시험 환경은 Table 3에 제시된 항목별 조건을 적용하였다.

3. 결 과

3.1. Formation 중 휴지와 방전 step의 영향

Figure 3은 휴지와 방전의 영향을 비교 분석하기 위하여 formation패턴에 휴지 step을 반영한 전지와 방전 step을

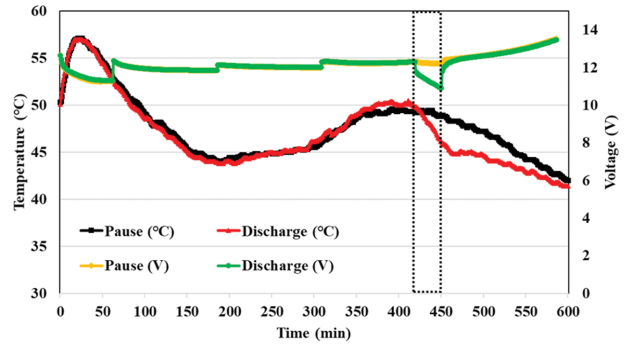


Fig. 3. Temperature & voltage behavior during formation of batteries; (A) Pause step, (B) Discharge step.

Table 4 Components of positive A.M after formation

(+)	PbO <sub>2</sub> (%)	PbSO <sub>4</sub> (%)
PAUSE	78.36	13.63
Discharge	85.36	6.20

Table 5 Components of negative A.M after formation

(-)	Pb (%)	PbSO <sub>4</sub> (%)
PAUSE	70.02	29.01
Discharge	76.28	13.06

반영한 전지의 formation 중 전압과 온도의 결과를 보여 주고 있다. 방전 step을 적용한 전지가 방전 후 온도가 낮아지는 현상을 확인 할 수 있었고, 이는 충전 반응 중 열 발생이 적다는 것을 의미하며, 활물질 내부로의 황산의 확산이 잘 이루어져 국부적으로 황산농도층에 따라 전류밀도가 상승되는 것을 방지한 결과로 사료된다. Table

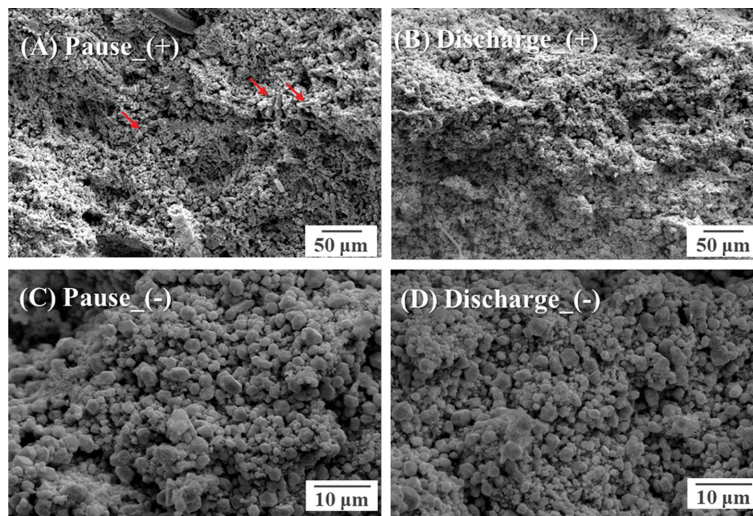


Fig. 4. SEM images of positive & negative active material after formation; (A) Pause step, Positive A.M (B) Discharge step, Positive A.M, (C) Pause step, Negative A.M, and (D) Discharge step, Negative A.M.

4, 5는 formation 후 활물질의 성분을 조사한 결과이다. 방전 step을 적용한 전지가 휴지 step을 적용한 전지보다 약 7% 높은 PbO<sub>2</sub>, Pb 함량을 보여주고 있다. Figure 4는 formation 후 활물질을 주사전자현미경으로 관찰하여 촬영한 결과를 보여주고 있다. 휴지 step을 적용한 전지의 활물질에서는 미 반응된 결정이 관찰되었으나, 방전 step을 적용한 전지의 활물질에서는 반응이 잘 일어난 것으로 관찰되었다. 따라서 방전 step을 적용한 전지가 더 우수한 충전 특성을 보인 것으로 판단할 수 있으며, 분극 해소에 더 효과적이라는 사실을 확인할 수 있었다.

3.2. 충전 패턴별 충전 중 온도와 활물질 성분 및 형상

Figure 5는 16 step에 방전 step을 반영하여 4가지의 충전 시간에 따른 조건으로 formation 진행 중 전지의

Table 6  
Components of positive A.M after formation

(+)	PbO <sub>2</sub> (%)	PbSO <sub>4</sub> (%)
A	91.01	3.32
B	92.03	2.79
C	94.08	1.64
D	91.28	3.75

Table 7  
Components of negative A.M after formation

(+)	PbO <sub>2</sub> (%)	PbSO <sub>4</sub> (%)
A	88.74	4.14
B	90.53	3.81
C	93.38	1.98
D	85.56	2.64

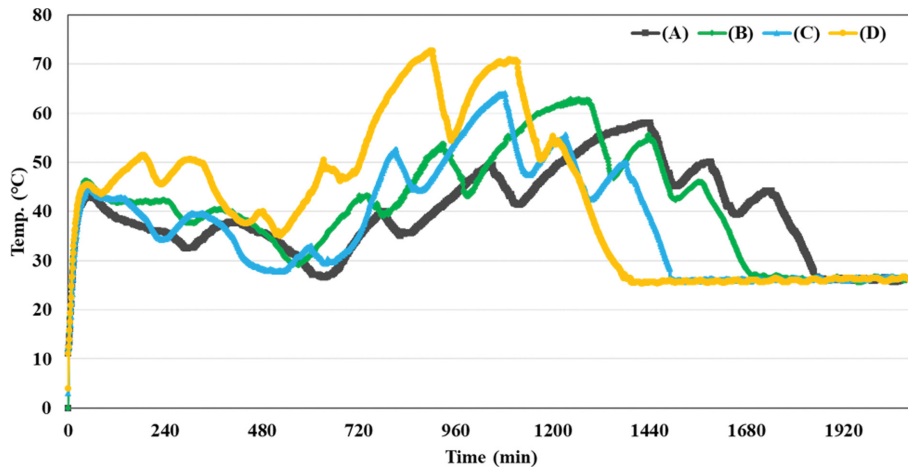


Fig. 5. Temperature behavior during formation of batteries; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

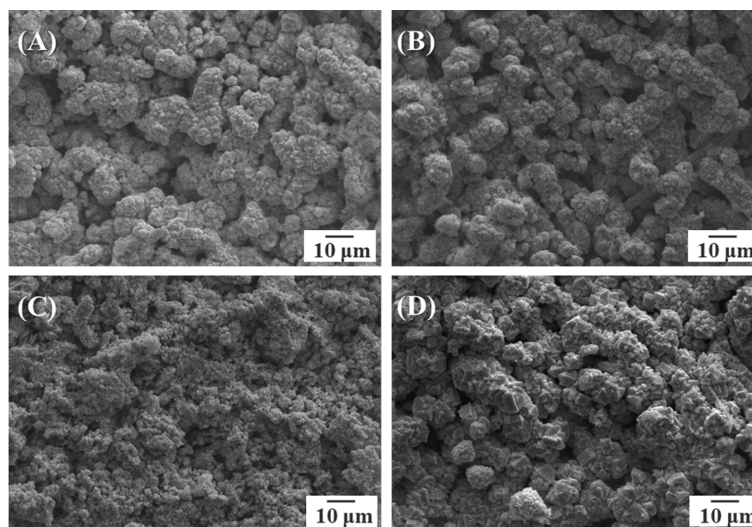


Fig. 6. SEM images of positive active material after formation; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

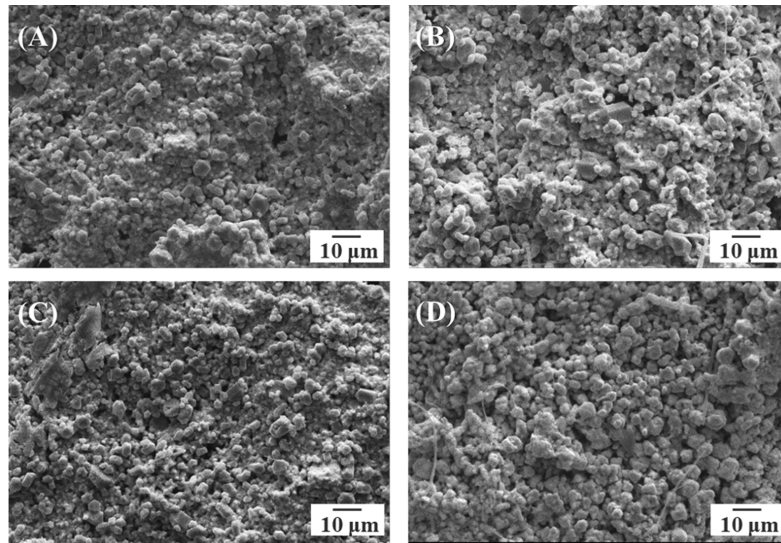


Fig. 7. SEM images of negative active material after formation; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

내부 온도를 관찰한 결과를 나타내고 있다. Figure 5(D)가 가장 높은 온도를 기록하였고, Fig. 5(B), Fig. 5(C)는 60°C 초반의 온도를 나타내었다. Table 6, 7은 formation 후 활물질 성분을 분석한 결과를 보여주고 있다. Figure 5(C) 24 hr 조건이 가장 높은  $PbO_2$ , Pb 함량을 나타냈다. Figure 6는 양극 활물질, Fig. 7 음극 활물질의 formation 후 형상을 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 보여주고 있다. Figure 6(C) 24 hr 조건이 가장 작은 입자들이 관찰되었다. 상기 성분 분석한 결과와 활물질 형상을 관찰한 결과로 판단할 때 Fig. 6(C) 24 hr 조건이 다른 조건에 비해 가장 Formation 효율이 좋다는 것을 알 수 있었다.

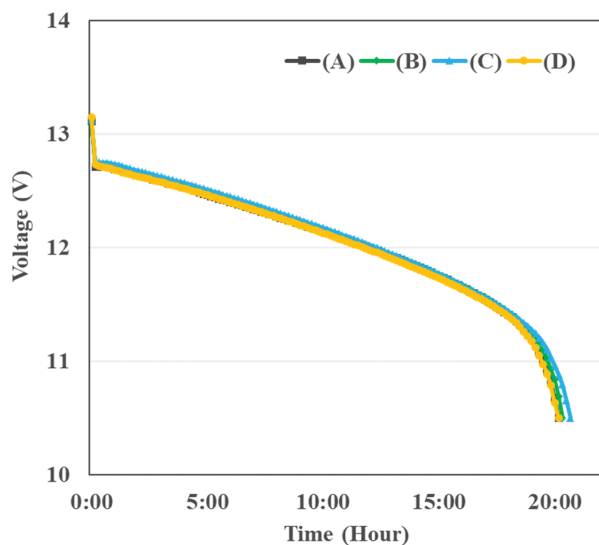


Fig. 8. Voltage behavior during 20 hr capacity test of batteries; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

3.3. 용량, 저온 CCA(cold cranking ampere) 등 전기적 특성

### 3.3.1. 20 hr 용량

이 시험은 battery가 축전 가능한 전기량을 20 hr울의 전류로 평가하는 것으로 Fig. 8은 각 조건별 AGM 연속 전지 평가 결과를 보여주고 있다. 모두 100% 이상의 용량을 가지고 있음을 확인하였고, 30 hr 충전한 Fig. 8(A) 100.8%, 27 hr 충전 Fig. 8(B) 101.6%, 24 hr 충전 Fig. 8(C) 103.3% 점차 증가하다가 21 hr 충전한 Fig. 8(D)가 100.8%로 (A) 결과와 동일한 값을 기록하였다. 24 hr 충전한 Fig. 8(C) 조건이 용량이 가장 높은 것은 step 수와 전류의 크기의 매칭이 잘 되어 충전 효율을 높인 결과로 판단된다.

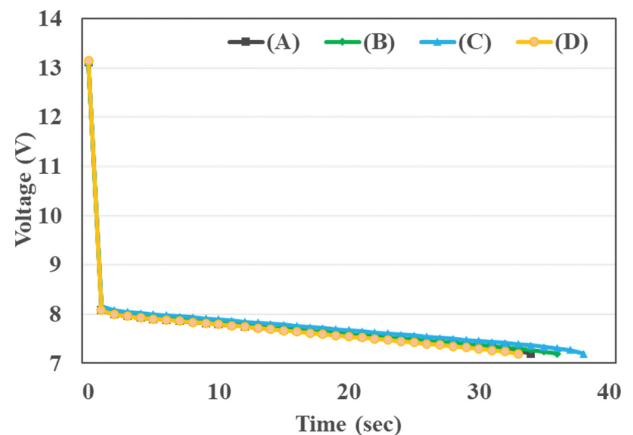


Fig. 9. Voltage behavior during  $-18^{\circ}C$  CCA test of batteries; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

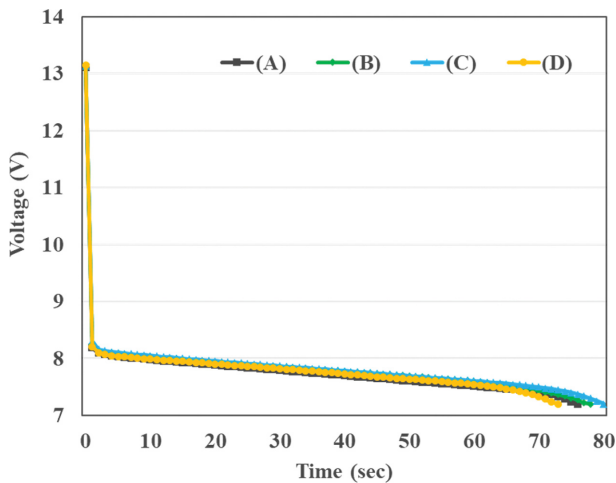


Fig. 10. Voltage behavior during  $-30^{\circ}\text{C}$  CCA test of batteries; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

### 3.3.2. $-18^{\circ}\text{C}$ , $-30^{\circ}\text{C}$ cold cranking ampere

CCA(cold cranking ampere)는 엔진 시동 성능을 표시하는 척도로  $-18^{\circ}\text{C}$  저온에서 방전시켜 30 sec 때 전압을 측정한다. Figure 9는 760 A의 전류로 7.2 V까지 방전할 때 전압의 추이를 보여주고 있다. 방전 시간은 Fig. 9(C)가 가장 긴 38 sec로 가장 짧은 Fig. 9(D)의 33 sec에 비해 약 15 % 높은 결과를 보였다. Figure 10은  $-30^{\circ}\text{C}$  극저온에서 CCA 평가 조건인 450 A로 7.2 V까지 방전할 때 전압 추이를 보여주고 있으며, 이 역시도 Fig. 10(C) 조건이 가장 우수한 결과를 나타내고 있었다. 이렇게 저온 및 극저온에서 대전류 방전 특성이 우수한 것은 Fig. 10(C) 조건이 formation 중 향상된 충전 효율로 인해 미충전 부위가 감소한 결과로 판단된다.

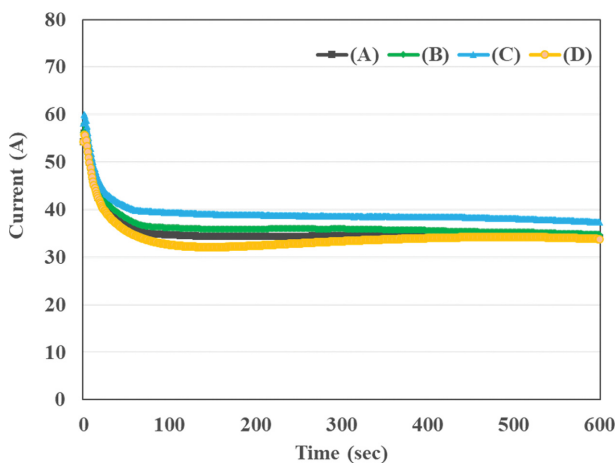


Fig. 11. Charging current behavior during charge acceptance test of batteries; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

### 3.3.3. $-0^{\circ}\text{C}$ charging acceptance

CA(charging acceptance)는 SOC 50 % 수준의 battery를  $0^{\circ}\text{C}$  온도에서 14.4 V 정전압 충전하는 10분 경과 시점의 전류를 측정한다. Figure 11은 CA 시험결과를 나타내고 있으며, Fig. 11(A) 54.32 A, (B) 56.18 A, (C) 58.19 A, (D) 54.19 A로 (C) 조건이 초기 충전 전류값 중 가장 높은 충전 전류값을 나타냈다. 이 값으로 (C) 조건이 가장 낮은 (A) 조건보다 약 7 % 높은 것을 알 수 있었다. 대전류 충전 특성 역시 방전 특성과 유사한 수준의 결과를 보였고, 충전 효율의 향상으로 인한 영향으로 판단된다.

### 3.4. SBA S0101 ISG 수명

SBA S0101 시험은 ISG 시스템이 적용된 차량에서 요구되는 시험 방법이다. Figure 12는 formation 조건별 수명 특성을 확인하기 위해 진행한 결과를 나타내고 있다. SBA S0101 시험은 실제 차량을 운행하였다고 가정하고 시뮬레이션하여 나온 시험 방법으로, 정차 시 전자장치 및 에어컨 등 부하를 유지하는데 필요한 45 A 방전 59 sec, 시동 시 필요한 300 A 방전 1 sec 후 다시 주행하면서 1분간 100 A로 충전하는 방식으로 반복하는 수명시험이다. Figure 12는 각 cycle에서 300 A 방전 시 전압을 나타낸 값이다. 제품 수명 종료는 방전 전압이 70.2 V에 도달하면 시험 종료되며, Fig. 12(A) 28 weeks, (B) 29 weeks, (C) 30 weeks, (D) 27 weeks에 수명 종료되었다. Step 별 충전 전류가 증가할수록 충전시간이 짧아질수록 증가하는 경향을 보이면서 24 hr 충전한 Fig. 12(C)가 가장 긴 수명을 기록하였다. 각 조건별 수명 차이는 CCA, 충전수입성 등 전기적 성능 시험 결과와 유사한 경향을 보이고 있음을 확인하였다.

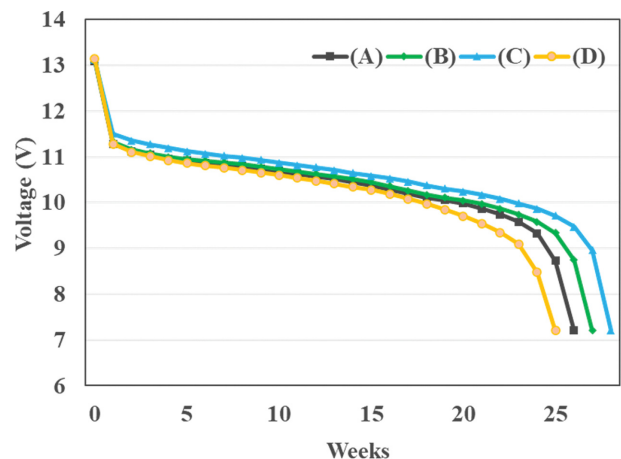


Fig. 12. Voltage behavior during SBA S0101 life cycle test of batteries; (A) 30 hr formation, (B) 27 hr formation, (C) 24 hr formation, (D) 21 hr formation.

## 4. 결 론

자동차에 ISG 시스템이 적용됨에 따라 사용되는 AGM 연축전지의 충전 시간이 약 3배가 증가되었고, 이를 단축키 위하여 formation pattern에 multi step과 분극해소 방법을 적용하여 최적화 연구를 진행하였다.

충전 step 중간에 휴지 또는 방전 step을 적용하여 비교 분석하였으며, 그 결과 방전 step을 적용한 전지가 휴지 step 적용 전지보다 약 7% 높은 충전 효율을 보였다. 이는 방전 step을 적용했을 때 활물질내의 극부적인 황산층을 제거하여 충전 효율을 증가시킨 것으로 판단된다.

효과가 검증된 방전 step을 16개 multi step에 반영하고 각 step별 전류의 크기를 조절하여 충전시간을 30 hr, 27 hr, 24 hr, 21 hr로 formation pattern을 적용하여 시험을 진행하였다. 그 결과 24 hr 조건이 적용된 전지가 PbO<sub>2</sub> 변환율이 가장 좋고, 용량 103.3%, 저온시동 성능 38 sec, 충전수입성 58.19 A로 모든 성능에서 다른 3가지 조건에 비해 비교우위에 있음을 확인하였다. ISG 수명 시험 결과에서도 30 weeks로 가장 우수한 결과를 보였다.

이렇게 다중 step과 방전 step 2가지를 동시에 적용한 결과 전류 손실을 최소화하고, 충전 중 발생하는 급격한 분극을 해소시키는 것이 충전효율 향상에 기여함을 검증하였다. 이로 인해 기존 대비 향상된 충전 효율로 충전 시간을 약 30% 단축하는 우수한 결과를 가져올 수 있었다.

## 감사의 글

본 연구는 2020년 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이자(2018R1A5A6075959), 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술 평가원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다(No. 2019403020245).

## References

- [ 1 ] K. Kawajiri, M. Kobayashi and K. Sakamoto, "Light-weight materials equal lightweight greenhouse gas emissions?: A historical analysis of greenhouse gases of vehicle material substitution", J. Cleaner Production 253 (2020) 119805.
- [ 2 ] J. Yu, S. Kim, C. Gwon and J. Bang, "Apparatus and method for guiding deactivation of battery sensor of isg vehicles", US Patent Application Publication (2012) US2012/0133500 A1.
- [ 3 ] K. Sawai, T. Ohmae, H. Suwaki, M. Shiomi and S. Osumi, "Idling-stop vehicle road tests of advanced valve-regulated lead-acid (VRLA) battery", J. Power Sources 174 (2007) 54.
- [ 4 ] D. Pavlov, V. Naidenov, Y. Milusheva, S. Vassilev, T. Shibahara and M. Tozuka, "Benzyl benzoate as an inhibitor of the sulfation of negative electrodes in lead-acid batteries", J. Energy Storage 17 (2018) 336.
- [ 5 ] T. Lim, S.J. Kim, S.D. Kim, S. Yang and Y. Jung, "Performance characteristics of AGM lead acid battery with the contents of positive plate incorporating nano-size additive material", J. Korean Cryst. Growth Cryst. Technol. 30 (2020) 123.
- [ 6 ] E. Ebner, D. Burow, A. Borger, M. Wark, P. Atanassova and J. Valenciano, "Carbon blacks for the extension of the cycle life in flooded lead acid batteries for micro-hybrid applications", J. Power Sources 239 (2013) 483.
- [ 7 ] M. Fernandez, J. Valenciano, F. Trinidad and N. Munoz, "The use of activated carbon and graphite for the development of lead-acid batteries for hybrid vehicle applications", J. Power Sources 195 (2010) 4458.
- [ 8 ] S. Kim and W. Hong, "Fast-charging of a lead-acid cell: effect of rest period and depolarization pulse", J. Power Sources 89 (2000) 93.
- [ 9 ] H. Gu, T.V. Nguyen and R.E. White, "A mathematical model of a lead-acid cell: discharge, rest, and charge", J. Electrochem. Soc. 134 (1987) 2953.
- [ 10 ] M. Maja, G. Morello and P. Spinelli, "A model for simulating fast charging of lead/acid batteries", J. Power Sources 40 (1992) 81.
- [ 11 ] D. Calasanzio, M. Maja and P. Spinelli, "Fast charging of lead/acid batteries", J. Power Sources 46 (1993) 375.
- [ 12 ] L.T. Lam, H. Ozgun, O.V. Lim, J.A. Hamilton, L.H. Vu, D.G. Vella and D.A.J. Rand, "Pulsed-current charging of lead/acid batteries — a possible means for overcoming premature capacity loss?", J. Power Sources 53 (1995) 215.