

## 자동차용 배터리의 방전 특성 연구

서삼희 · 이학우 · 김준범  
화학공학부

### <요약>

본 연구에서는 자동차에 탑재되는 배터리와 전기를 소모하는 부속장비와의 관계를 고찰하기 위하여 시뮬레이션 소프트웨어에 채용할 특정 배터리에 대한 수식적 모델을 제시하고자 자동차 배터리의 방전 특성에 대한 실험을 수행하였다. 배터리의 service history (최근의 충·방전과 정지 시간)는 용량에 영향을 미치므로, 본 연구에서는 일정한 온도와 방전율로 제한된 조건인 한국산업표준규격에 따라 자동차용 배터리에 적용되는 충부하실험 및 경부하실험과 보유용량실험을 수행하였다. 배터리 방전시 전압의 변화를 시간과 cycle에 대한 다항식으로 변환하여 시뮬레이션 소프트웨어의 입력변수로 활용하였다.

## Discharge Behaviour of an Automotive Battery

Samhee Seo, Hakwoo Lee, Junbom Kim  
Department of Chemical Engineering

### <Abstract>

The experiments were conducted to get discharge behavior of an automotive battery. Capacity of battery is affected by the service history, and the life test should be conducted under specific condition of temperature and discharge rate. Life test of heavy load, light load, and reserve capacity were performed under the guidance of Korean industrial standard battery test. The voltage variation of the battery during life test was transformed to polynomial equation to be used as an input variable of simulation software.

### 1. 서 론

근래에 들어 자동차에서 전기를 소모하는 전자장치의 양이 꾸준히 증가하고 있으며, 현재의

전류배선 디자인이 향후에도 이러한 증가에 따라 요구되어지는 출력을 계속 만족시킬 수 있는 가에 대해서 신중한 검토가 이루어져야 한다[1]. 이와 같이 자동차 내에서 필요한 전력의 양이 몇 년 안에 상당히 증가할 것으로 예상되므로 적절한 신뢰도와 복잡한 전기 설비에 대한 새로운 설계개념이 필요하게 될 것이다. 자동차에 탑재되는 부속 장비의 수가 증가하면서 필요한 파워가 증가하므로 더 복잡한 전기 설비가 필요하게 되고 결과적으로 전기회로망에 많은 변화를 가져오게 된다. 파워를 공급해야하는 장치 수가 증가할 뿐만 아니라 공급되는 파워의 질적인 문제와 안정성 그리고 장치설비의 어려움 등의 문제가 발생하게 된다[2~4].

자동차의 전기회로망에 시뮬레이션을 적용할 경우에는 alternator의 전류와 전압, 배터리와 전기 소비장치, 배터리의 충전상태(SOC) 등의 주요 변수들에 대하여 시간에 따른 분석을 할 수 있는 소프트웨어를 사용하여야 한다[3]. 이러한 시뮬레이션 소프트웨어에 채용할 자동차 배터리에 대한 수식적 모델을 제시하는 것이 본 연구의 목적이며, 모델링을 수행하는 과정에는 다음과 같은 두 가지 표준적인 접근방법을 사용할 수 있다. 첫째로, 이론적으로 전개하는 물리적인 접근방법이 있다. 이 방법의 사용에 있어 배터리 prototype의 특성화와 시험을 위한 정확한 수학적 식이 부족하고 성능에 영향을 미치는 변수가 많으므로 그 정확도를 신뢰하기는 어렵다는 단점이 있다[5]. 둘째로, 적용될 배터리를 시험 작동함으로서 전체적인 거동을 직접 확인할 수 있는 방법이 있으며, 이러한 방법은 간단하고, 이론보다는 실험에 의하여 접근할 수 있다는 장점이 있다. 본 연구에서는 두 번째 방법을 사용하여 특정 배터리의 전기적 거동에 대한 실험을 수행한 후 data를 수식화하였다. 이러한 수식화 과정은 일련의 시험규정에 따른 배터리의 거동에 대한 평가를 기초로 하였다. 배터리의 service history (최근의 충·방전과 정지 시간)는 용량에 많은 영향을 미치므로, 본 연구에서는 일정한 온도와 방전율로 제한된 조건인 한국산업표준규격중 중부하실험 및 경부하실험과 보유용량실험을 기준으로 실험을 수행하였다[6]. 본 연구내용은 한국산업표준규격의 자동차용 배터리에 적용되는 위의 실험 과정과 배터리의 충·방전 cycle이 증가함에 따른 전압수준의 변화를 시간과 cycle에 대한 다항식으로 수식화하여 나타내는 상세한 과정을 포함하고 있다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 SLI(automotive) 배터리의 Design

Lead-acid 배터리는 유형별 성능 최대화를 달성하기 위하여 설계 개념이 달라진다. 동력밀도(power density), 에너지밀도(energy density), cycle life, float-service life, 비용 등의 인자들 사이에서 최적의 조건을 위한 조정이 필요하다. 높은 동력밀도를 얻기 위해서는 배터리의 내부저항이 극소화 될 수 있는 grid design, 다공성, 두께, 격리판의 유형, cell 사이의 연결방법 등이 설계개념에 적용된다. 높은 동력과 에너지 밀도를 얻기 위해서는 극판과 격리판이 얇고 porous한 구조를 갖추어야 하며, paste의 밀도가 낮아야 한다. 높은 사이클 수명을 얻기 위해서는 paste의 밀도가 높아야 하고, 내구성이 높은 격리판과 적절한 수준의 방전이 필요하며, 충분한 유지관리와 안티몬(Sb)을 다량(5~7%) 함유한 grid가 요구되어진다[7].

최근의 경향은 내부저항을 줄여서 동력을 극대화시키는 design이 주류를 이루고 있다. Lead-acid cell의 저항은 극판의 크기에 영향을 받게 되는데 이는 방전중의 polarization 저

항의 증가에 기인한다고 볼 수 있다. 방전이 개시되면 ohmic 저항과 polarization 영향에 의하여 전압이 떨어지게 된다. Ohmic 저항에 관련된 전압의 하락은 전류 밀도에 비례하고 지연현상이 없이 나타난다. 내부저항은 남아 있는 전압과 부하를 연결한 직후 전압과의 차이로 계산할 수 있다. 최근에 개선된 design과 새로운 물질의 사용으로 cell의 저항이 줄어들어 engine의 기동성능면에서 상당한 개선이 이루어졌다[8].

## 2.2 Construction

SLI 배터리의 시동능력(cranking)은 극판 표면의 기하학적인 면적에 정비례하며,  $-17.8^{\circ}\text{C}$  ( $0^{\circ}\text{F}$ )에서의 비례인자는 단위 양극판 표면의  $\text{cm}^2$ 당  $0.155\sim0.186$  cold-crank amperes (CCA)이다. Cranking 성능은 일반적으로 높은 온도( $>18^{\circ}\text{C}$ )에서는 양극에 의하여 제한되며, 낮은 온도( $<5^{\circ}\text{C}$ )에서는 음극이 제한요소로 작용한다. Cranking 성능을 극대화하려면 SLI battery를 design할 때 최소한의 전기적 저항을 주기 위하여 grid design이 다양한 방사상으로 확대된 것을 사용하는 것이 중요하다. 그리고 극판은 얇아야 하며 전해액의 농도가 motive-power 배터리나 stationary 배터리보다 높아야 한다.

## 2.3 Standard Test

SLI 배터리의 주요한 기능은 내연기관엔진(internal combustion engine)을 구동시키기 위하여 짧은 시간동안 높은 전류로 방전을 하는 것이다. 일단 engine이 가동되면 generator 즉 alternator system에 의하여 배터리를 재충전하므로 이후의 배터리는 완전히 충전되거나 약간 과충전상태에서 “float” 상태로 유지되게 된다. 근래의 자동차에서는 engine이 작동하지 않는 상태에서도 light, motor, electronics 등의 전기적인 부하로 인하여 점진적인 방전을 일어날 수도 있다. 이러한 요소는 보통의 자가방전과 함께 정상적인 cranking/floating duty cycle에 있어 수명단축의 요인이 될 수도 있다.

SLI 배터리에 관한 표준 실험규격은 낮은 온도와 높은 방전율에서의 전기적 성능, 보유용량, 진동 저항, 충전 수입성, 수명 실험을 포함하고 있다. 미국의 Society of Automotive Engineers (SAE)에서 정의하고 Battery Council International (BCI)이 공포한 시험 조건은 유럽과 일본에서 정의한 표준조건과는 여러 가지 면에서 다르다. 또한 자동차 제조업체들은 공급업체가 맞추어야 하는 고유의 조건을 가지고 있다.

## 3. 실험 순서 및 조건

본 연구에서는 자동차용 납축전지에 적용되는 한국산업표준규격의 중부하 수명실험 및 경부하 수명실험 그리고 보유용량 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 sample 배터리는 12V, 68Ah의 maintenance free type이고 보유용량이 130M, CCP가 540A인 중형 SLI 배터리를 사용하였다. 경부하 수명실험에서 매 428cycle마다 실시하여야 하는 저온시동능력실험 대신에 중부하 수명실험에서 실시하는 보유용량 실험으로 대체하였다. 이 밖의 실험 조건 및 순서는 한국산업표준규격의 규정에 따라 수행하였으며, 자세한 실험 순서 및 조건은 다음과 같다[6].

### 3.1 보유용량실험

자동차의 발전장치 고장시 사용 가능한 축전지의 용량 척도를 표시하는 것으로서, 완전 충전시킨 축전지를  $25 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지하면서 25A로 10.5V까지 연속 방전시킨 경우의 지속시간(분)으로 정의한다. 보유용량(RC)은 다음 조건에 따라 실험을 수행하여야하며, 방전 종지전압에 이를 때까지의 지속시간을 분단위로 구한 값이 기준치의 95% 이상이어야 한다. 다만, 1차 실험에서 기준치의 95% 이상 도달하지 못한 경우에는 2회 더 실험하여 합계 3회의 실험을 하고, 그 중 최대치를 축전지의 보유용량으로 한다.

- (1) 방전 개시 시기 : 만충전 완료 후 1시간 방치한 다음
- (2) 방전 중 전해액 온도 :  $25 \pm 2^\circ\text{C}$
- (3) 방전 전류 :  $25 \pm 0.25\text{A}$
- (4) 방전 종지 전압 : 10.5V (단전지당 1.75V)
- (5) 표준 온도 이외의 온도에서 시험한 경우 보유용량 환산식

$$M_c = M_r [1 - 0.018(T_f - 25^\circ\text{C})]$$

여기에서  $M_c$  : 표준온도로 환산한 시간(분)

$M_r$  : 지속 시간(분)

$T_f$  : 방전 말기 온도( $^\circ\text{C}$ )

0.018 : 온도 환산 계수

### 3.2 경부하 수명실험

수명실험방법에 있어서 1회의 방전심도가 10% 이하인 경부하 영역에 해당되며, 충전과 방전 사이클을 반복시킬 때의 사이클(회)수 실험은 위의 1, 2의 실험을 완료한 축전지로 다음과 같이 실험하여야 한다.

- (1) 실험할 축전지를 만충전한 후 14일 이내에 실험을 개시한다.
- (2) 실험 중의 축전지 실험온도는  $40 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 하며, 수조의 물높이는 배터리 높이의 75% 이상을 유지하되 단자가 물에 잠기지 않도록 한다.
- (3) 수명실험의 충전과 방전조건은 다음과 같다.
  - (a) 충전
    - (i) 시간 : 10.0분  $\pm 3.0$ 초
    - (ii) 전압 :  $14.8\text{V} \pm 0.03\text{V}$
    - (iii) 전류 :  $25.0\text{A} \pm 0.25\text{A}$
  - (b) 방전
    - (i) 시간 : 4.0분  $\pm 1.0$ 초
    - (ii) 전류 :  $25.0\text{A} \pm 0.25\text{A}$
  - (c) 충전에서 방전 (또는 방전에서 충전)으로 바뀔 때 10초 이상 지연되지 않도록 하여야 한다.
- (4) 축전지를 100~110시간 동안 연속해서 충방전 사이클을 수행한다.(1주당 428회 기준으로 한다).
- (5) 매 428회의 충방전 사이클이 끝나면  $40 \pm 3^\circ\text{C}$  수조 안에서 60~72시간 개로 상태로

방치한다.

- (6) 방치된 축전지를 저온(-18°C) 시동전류(C.C.A) 값으로 30초 동안 방전하여 축전지의 30초 때의 전압이 7.2V 이상인지 확인한다. 이 때 7.2V 이상이면 충전하여 계속 수명실험을 진행하며, 만일 7.2V 이하이면 다시 위의 수명실험을 계속하되, 두 번째 7.2V이하의 값이 확인되면 실험을 종료한다.
- (7) 수명회수의 산정은 (6)의 방전실험시 30초 전압이 7.2V가 되는 시점을 기준으로 하며, 30초 때의 측정된 전압과 연속 충·방전된 사이클(회)수의 관계로부터 구한다.

### 3.3 중부하 수명실험

- (1) 방전은 20A의 전류로 1시간, 충전은 5A의 전류로 5시간 수행하며, 방전과 충전의 1 사이클을 수명회수 1회로 한다.
- (2) 실험 중의 주위 온도는  $40 \pm 3^\circ\text{C}$ 로 한다.
- (3) 실험 중 약 25회 때마다 방전전류 20A, 축전지의 단전지당 평균전압이 1.7V가 될 때까지 방전을 실시하여 방전 지속시간을 측정한다.
- (4) 실험종료는 (3)의 실험에서 측정한 방전시간과 방전전류 20A로 곱한 값이 5시간을 용량의 50% 이하로 저하되어 다시 상승되지 않을 때를 실험 종료로 한다.
- (5) (3)의 방전 후의 충전은 5A로 1시간마다 측정한 단자전압과 전해액 비중이 3회 연속하여 변화가 없을 때까지로 한다.
- (6) (3)의 실험에서 축전지를 개로 상태로 방치하였을 때는 24시간당 충전 전류 5A로 1 시간의 비율로 충전을 실시한 후 개시한다.
- (7) 보액은 정제수로 하고 (3)의 실험 직전에는 보액을 넣어서는 안된다.

## 4. 결 과

Service history (충·방전 및 정지 시간)와 방전전류 및 실험온도 등은 배터리의 용량 변화에 지대한 영향을 미치므로, 본 연구에서는 고정된 온도와 방전율의 조건으로 중부하 실험 및 경부하실험 그리고 보유용량실험을 수행하였고, 시간과 cycle 회수에 대한 방전 전압수준의 변화를 고찰하였다.

### 4.1 중부하 실험

#### 4.1.1 중부하 방전 실험

한국산업규격의 중부하 수명실험 조건에 따라 sample 배터리에 대하여 100여 회의 충·방전 실험을 수행하였고, 이중 초기 25회까지의 시간에 대한 방전 전압의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 25 cycle이 1 set으로 이루어진 반복실험을 통하여 각 set 별로 방전 특성을 전압의 변화곡선으로 고찰하였다. 실험회수가 증가함에 따라 전체적으로 방전개시 전압이 증가하고 말기 전압이 감소하여 방전 곡선의 기울기가 커지는 것을 관찰할 수 있었다. 25 cycle로 이루어진 각 set의 첫 번째 방전 전압곡선을 다른 것과 비교하여 보면 뒤틀림 정

도가 커서 첫 번째 cycle 이후 거의 linear하게 감소하는 일반적인 경향에서 벗어나는 것을 보이고 있다. 이러한 현상은 25 cycle이 끝날 때마다 배터리의 용량실험을 위하여 10.2V까지 방전 지속시간을 측정하며 방전을 실시한 결과로 인한 것이다. Fig. 1을 보면 5 cycle에서 25 cycle까지 20번의 cycle이 진행되면서 방전 초기전압이 12.739V에서 12.787V로 0.048V 증가하는 것을 보이고 있고 방전말기 전압은 1 cycle을 제외하고 모두 12.35V 부근에서 일정한 값을 유지하고 있어서 cycle 횟수가 증가할수록 기울기가 커지는 것을 알 수 있었다. Cycle 횟수가 늘어남에 따라 방전 말기 전압이 크게 감소하여 79cycle 이후에는 유효전압인 12V이하로 떨어지기 시작하였다.

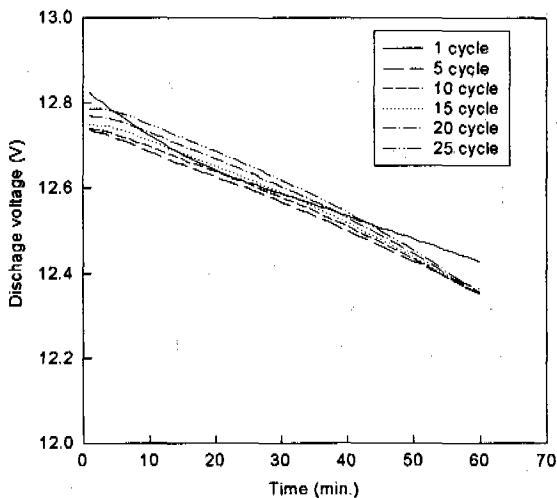


Fig. 1. 중부하 방전실험의 전압곡선 (1~25 cycle)

#### 4.1.2 중부하 실험 data의 수식화

중부하 방전시 전압수준의 변화를 시간과 cycle 회수에 대한 일반식으로 해석하기 위하여 방전 전압곡선을 수식화하는 다음의 과정을 수행하였다. 방전 전압곡선을 시간에 대한 2차와 3차식으로 변환하고 각 cycle에 대하여 수식을 나타내는 parameter를 구하였다. 변환 과정에서 차수가 높을수록 실험 data와 수식이 잘 일치하지만 해석의 어려움이 있으므로 2차와 3차식으로 제한하였다.

$$f(t) = at^2 + bt + c \quad (1)$$

$$f(t) = at^3 + bt^2 + ct + d \quad (2)$$

위의 식(1), (2)는 시간(t)에 따른 방전전압[f(t)]을 나타내고 a, b, c, d는 수식화에 사용되는 각각의 parameter이다. 각 cycle의 방전 전압곡선을 수식화 변환하여 구한 2차와 3차식의 parameter들을 다시 cycle 회수에 대한 각각의 변화로 나타내 보았다. Parameter a는 매 set마다 조금씩 감소하고 있고 그 절대값은 증가하고 있으므로 cycle이 진행됨에 따라 방전곡선이 위쪽으로 불룩한 모양으로 휘어진 곡선의 형태를 보이는 경향과 방전곡선의

뒤틀림이 커지는 것을 알 수 있었다. Fig. 2는 방전곡선을 2차식으로 표현한 수식에서 1차 항의 계수  $b$ 를 cycle 회수에 따른 변화로 나타낸 것이다. 2차식에서 1차항의 계수  $b$ 의 절대치가 클수록 곡선의 전체적인 기울기, 즉 변화의 폭이 크게 나타난다. 각 방전곡선이 비슷한 형태를 보이면서 cycle이 늘어남에 따라 방전시 전압강하가 커지는 결과를 Fig. 2에서 점으로 표시된 parameter  $b$ 의 변화로 확인할 수 있다. 2차식에서 상수항은  $y$ 축의 절편값으로 parameter  $c$ 는 방전을 개시할 때의 방전 초기전압을 의미한다. 각 set의 첫 번째 방전곡선을 수식화 변환하여 구한 parameter는 예외적으로 다른 방전 곡선의 일반적인 경향을 벗어나므로 다음의 모정에서 제외하였다.

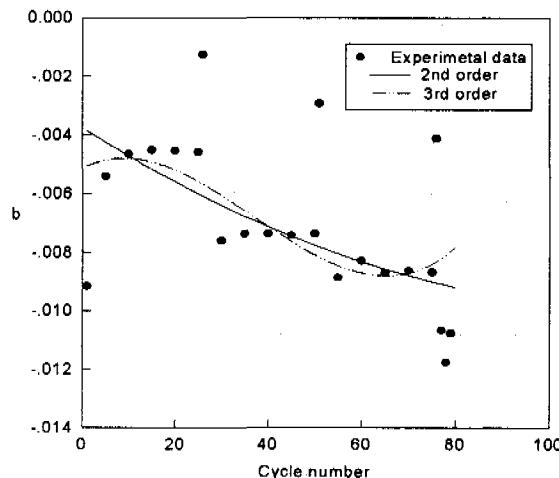


Fig. 2. 2차식의 parameter  $b$ 에 대한 수식화 변환

$$f(C) = kC + l \quad (3)$$

$$f(C) = kC^2 + lC + m \quad (4)$$

$$f(C) = kC^3 + lC^2 + mC + n \quad (5)$$

위의 식(3)~(5)에서  $C$ 는 cycle number를 나타내고,  $k$ ,  $l$ ,  $m$ ,  $n$ 은 수식화 변환에 사용되는 각각의 변수이다. 2차 함수로 나타낸 식의 parameter  $a$ ,  $b$ ,  $c$ 를 cycle number에 따라 각각 도식화하고 그 변화를 다시 cycle number에 대한 식(3)~(5)를 이용하여 수식화 하였다. 방전곡선을 3차식으로 수식화한 경우도 위와 같은 과정을 거쳤다. Table 1은 방전곡선의 변화를 시간과 cycle 회수에 따른 2차와 3차식으로 나타낸 결과이다.

수식화 변환과정을 거쳐 구한 2차와 3차식에 대한 standard deviation을 계산하여 Table 2에 나타내었다. 2차와 3차식으로 도식화하였을 때 두 식 모두 실험결과와 경향이 잘 맞는 것으로 나타났다. Standard deviation의 합을 비교하여 본 결과 각각 0.14361과 0.14582로 약간의 차이를 보였으며, 2차식이 전체적인 경향을 더 잘 표현하고 있음을 확인하였다. Fig. 3은 위의 과정을 거쳐 구한 2차식과 방전곡선 data를 함께 나타낸 것이다. 절대 오차의 평균이 0.0274로 나타나 sample 배터리의 중부하 방전시 전압곡선의 변화를 잘 표현하고 있는 것을 확인하였다.

Table 1. 방전 곡선의 수식화 parameter

		Parameter			
		k	l	m	n
3차 식	a	$-3.519 \times 10^{-8}$	$2.843 \times 10^{-7}$		
	b	$3.223 \times 10^{-6}$	$-4.776 \times 10^{-5}$		
	c	$-1.470 \times 10^{-4}$	$-3.578 \times 10^{-3}$		
	d	$1.751 \times 10^{-6}$	$-1.488 \times 10^{-4}$	$2.465 \times 10^{-3}$	$1.274 \times 10^1$
2차 식	a	$-7.335 \times 10^{-10}$	$7.363 \times 10^{-8}$	$-1.725 \times 10^{-6}$	$-1.956 \times 10^{-5}$
	b	$4.485 \times 10^{-8}$	$-4.981 \times 10^{-6}$	$7.799 \times 10^{-5}$	$-5.136 \times 10^{-3}$
	c	$1.423 \times 10^{-6}$	$-1.171 \times 10^{-4}$	$1.272 \times 10^{-3}$	$1.275 \times 10^1$

Table 2. 2차와 3차식의 standard deviation 비교

Cycle number	Standard deviation	
	3차식	2차식
5	0.00370	0.00206
15	0.00205	0.00211
25	0.01040	0.00992
31	0.00786	0.00850
41	0.00151	0.00151
51	0.01408	0.01393
57	0.00171	0.00199
67	0.00079	0.00200
77	0.00619	0.00447
83	0.09753	0.09512
Total	0.14582	0.14361

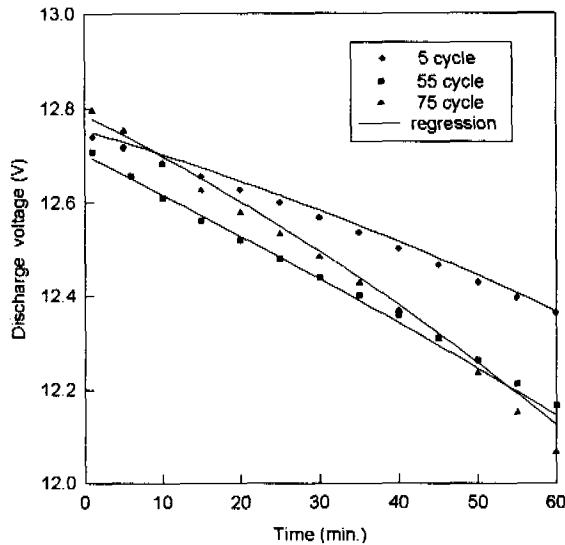


Fig. 3. 중부하 방전 실험 data

#### 4.1.3 중부하 보유용량 실험

중부하 수명실험의 조건에 따라 매 25 cycle이 끝날 때마다 20A 전류로 10.2V 까지 방전을 실시하였다. Fig. 4는 방전 지속시간을 측정한 data를 시간에 대한 voltage의 변화곡선으로 나타낸 것이다. Symbol은 실험 data를 나타내고 있고, 선은 식(6)을 사용하여 regression한 결과이다. 실험 회수가 증가함에 따라 방전 지속시간이 감소하는 것을 관찰할 수 있었으며, 초기에는 방전전압이 linear하게 감소하기 시작하지만 말기에는 급격한 형태로 떨어지는 것으로 나타났다. 103회에서는 배터리의 방전 개시전압이 10.2V 이하로 떨어져 방전실험을 수행할 수 없었다. Cycle 회수에 따른 방전용량(Ah)의 변화를 살펴보면, cycle 회수가 늘어나면서 방전지속시간이 줄어들었고, 결과적으로 Fig. 5와 같이 방전용량

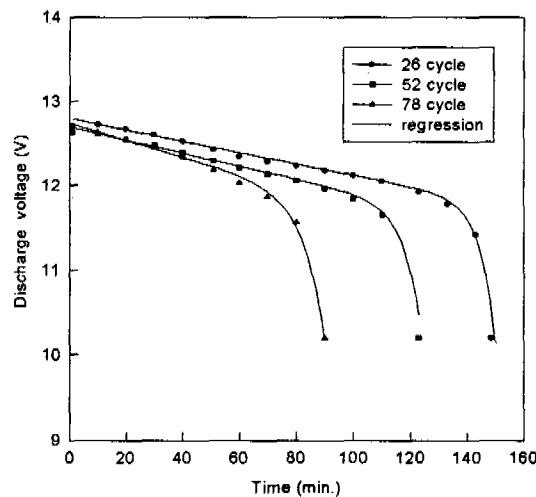


Fig. 4. 중부하 보유용량 실험

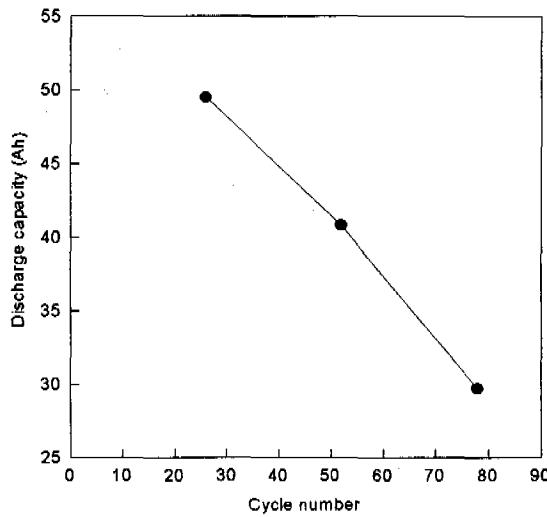


Fig. 5. 중부하 실험시 cycle 증가에 대한 보유용량의 변화

i) linear하게 감소하는 경향을 보였다. 방전용량은 26 cycle에서 49.5 Ah, 52 cycle에서 40.8 Ah, 78 cycle에서 29.7 Ah로 나타났다. 26, 52, 78 cycle에서 방전전압 변화를 시간(t)에 대한 일차함수와 지수함수를 결합시킨 다음 식(6)의 형태로 regression한 후 각각의 parameter를 구함으로서 retention time curve를 일반식으로 나타내어 보았다.

$$E = E_0 - mt - n \cdot \exp(Rt) \quad (6)$$

위의 식(6)에서 E는 방전전압이고  $E_0$ 는 방전 초기전압이다. 그리고 t는 시간을 나타내며, m, n, R은 retention time curve를 수식화 변환하는데 사용되는 변수로 각각의 값을 Table 3에 나타내었다. Standard deviation을 계산해본 결과 26, 52, 78 cycle에서 각각 0.002927, 0.004085, 0.006854로 매우 적게 나타나 식(6)이 실험 data를 비교적 잘 표현하고 있음을 알 수 있었으며, 이를 Fig. 4에서도 확인할 수 있다. 이로부터 향후 연구시 보유용량에 대한 일반식 도출과 변화경향 해석이 가능할 것으로 사료된다.

Table 3. 보유용량 실험의 수식화 parameter

Cycle number	$E_0$	m	n	R
26	$1.28 \times 10^1$	$6.77 \times 10^{-3}$	$1.47 \times 10^{-12}$	$1.85 \times 10^1$
52	$1.27 \times 10^1$	$7.8 \times 10^{-3}$	$2.5 \times 10^{-8}$	$1.63 \times 10^1$
78	$1.274 \times 10^1$	$1.0 \times 10^{-2}$	$1.0 \times 10^{-8}$	$1.355 \times 10^1$

## 4.2 경부하 실험

### 4.2.1 경부하 방전 실험

1회의 방전심도가 10% 이하인 경부하 영역으로 충전과 방전 사이클을 반복한 429 cycle의 경부하 실험과 1회의 용량시험을 1 set으로 반복 수행하여 총 4300 cycle을 실험하였다. 각 set별로 시간에 대한 방전 전압의 변화를 나타내고, 이를 비교하여 전체적인 경향을 고찰하였다. Fig. 6은 실험회수에 따른 방전곡선의 변화를 나타낸 것이다. 경부하 방전시 전압 변화곡선은 중부하 방전시 보다 뒤틀림이 심한 3차곡선의 형태를 보이고 있으며, 첫 번째 방전을 제외하고는 전체적으로 일정한 경향을 보이고 있다. Cycle이 진행됨에 따라 방전 초기전압과 말기전압이 감소하며, 말기 전압의 감소 폭이 초기 전압의 경우보다 크게 나타나고, 전압강하가 커짐을 확인할 수 있었다.

### 4.2.2 경부하 실험 data의 수식화

방전시 전압수준의 변화를 시간과 cycle 회수에 대한 3차식으로 나타내기 위하여 중부하 실험에서와 같은 방법으로 방전곡선의 수식화 변환과정을 수행하였다. 식(2)를 사용하여 실험 data를 수식화 변환하고, 다시 각 parameter들을 cycle 회수에 대한 변화로 도식화한 후 새로운 parameter를 구하였다. 위의 과정을 거쳐 구한 3차식과 방전실험 data를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. 절대 오차의 평균이 0.0183으로 나타나 sample 배터리의 경부하 방전시 전압수준의 변화를 잘 표현하고 있는 것을 확인할 수 있었다.

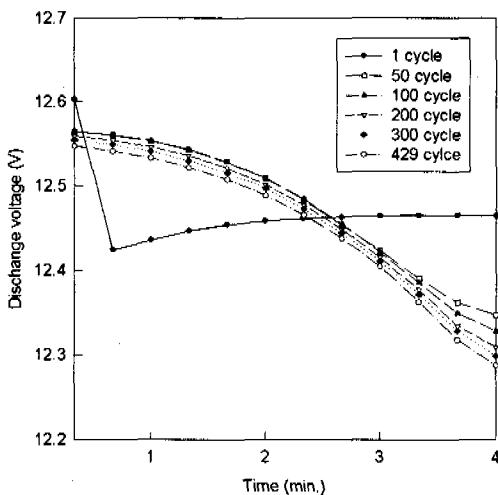


Fig. 6. 경부하 방전실험시 전압의 변화 (7번째 set)

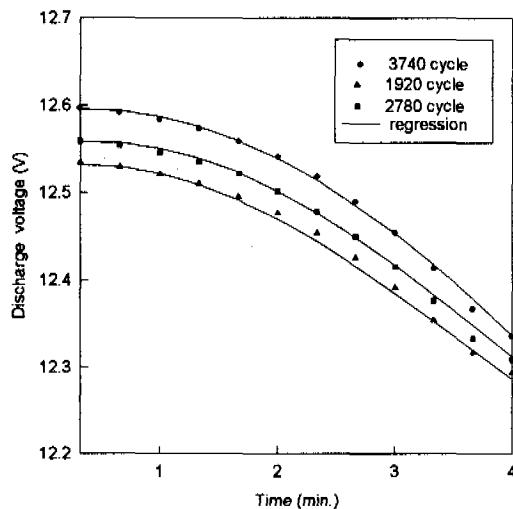


Fig. 7. 경부하 방전실험 data

#### 4.2.3 경부하 보유용량 실험

경부하 수명실험의 절차에 따라 매 430 cycle 마다 20A 전류로 10.2V 까지 방전을 실시하여 보유용량 상태를 확인하였다. Fig. 8은 방전 지속시간을 측정한 실험 data를 시간에 대한 voltage의 변화곡선으로 나타낸것이다. 실험 횟수가 늘어남에 따라 방전 지속 시간이 줄어드는 것을 관찰할 수 있었으며, 초기에는 방전전압이 linear하게 감소하기 시작 하지만 말기에는 급격한 형태로 감소하는 것으로 나타나 중부하 시험에서와 같은 경향을 보였다. Cycle 회수에 따른 방전용량(Ah)의 변화를 Fig. 9에 나타내었고, 초기의 1, 2 set을 제외하고는 cycle 회수가 늘어남에 따라 방전지속시간이 linear하게 감소하는 경향을 보였다.

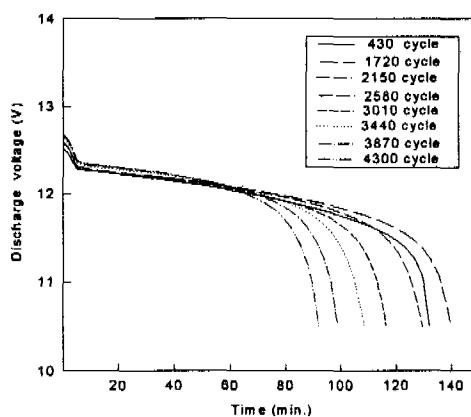


Fig. 8. 경부하 보유용량 실험

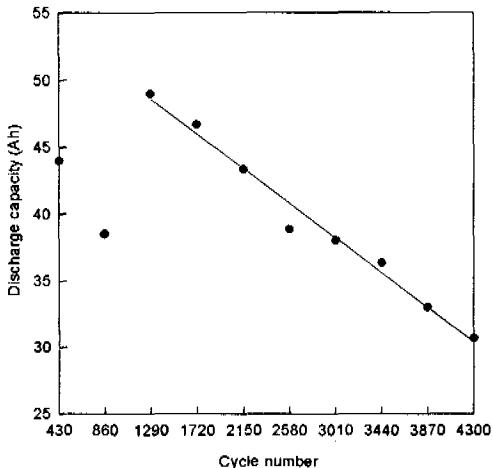


Fig. 9. 경부하 실험시 cycle 증가에 대한 보유용량의 변화

## 5. 결 론

본 연구는 자동차에 탑재되는 배터리와 전기를 소모하는 부속장비와의 관계를 고찰하기 위하여 시뮬레이션 소프트웨어에 채용할 특정 배터리에 대한 수식적 모델을 제시하고자 하는 목적으로 자동차 배터리의 방전실험을 통한 특성을 고찰하였다.

- (1) 중부하 방전실험 data를 다음과 같이 시간과 cycle 회수에 대한 2차함수로 수식화 변환하였다. 절대 평균 오차가 0.0274이므로 전체적으로 중부하 방전시 전압곡선의 변화를 잘 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

$$V = at^2 + bt + c$$

$$a = (-7.335 \times 10^{-10})C^3 + (7.363 \times 10^{-8})C^2 - (1.725 \times 10^{-6})C - (1.956 \times 10^{-5})$$

$$b = (4.485 \times 10^{-8})C^3 - (4.981 \times 10^{-6})C^2 + (7.799 \times 10^{-5})C - (5.136 \times 10^{-3})$$

$$c = (1.423 \times 10^{-6})C^3 - (1.171 \times 10^{-4})C^2 + (1.272 \times 10^{-3})C + 12.750$$

- (2) 배터리를 중부하로 방전시킨 경우 cycle회수에 대한 보유용량의 변화를 알아보았다. 26 cycle에서 49.5 Ah, 52 cycle에서 40.8 Ah, 78cycle에서 29.7 Ah의 보유용량을 나타내었다. 이를 cycle 회수에 대한 일차함수로 나타내었을 때 평균오차가  $1.607 \times 10^{-7}$ 로 적게 나타나 cycle 회수에 대한 보유용량은 linear하게 감소한다는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 방전전압곡선을 시간에 대한 일차함수와 지수함수를 결합시킨 형태로 수식화 변환한 결과 평균 편차값이 0.004를 보여 보유용량은 다음과 같은 형태의 일반식으로 해석 할 수 있음을 확인하였다.

$$E = E_0 - mt - n \cdot \exp(Rt)$$

- (4) 경부하 방전실험에 대한 전압 data를 다음과 같은 일반식으로 표현하였다. 실험값과의 절대 평균 오차가 0.0183로 적으므로 시간과 cycle 회수에 대한 전체적인 경향을 잘 표현하는 결과식을 얻을 수 있었다.

$$V = at^3 + bt^2 + ct + d$$

$$a = (-5.240 \times 10^{-14})C^3 - (1.243 \times 10^{-10})C^2 + (1.188 \times 10^{-6})C + (1.213 \times 10^{-3})$$

$$b = (1.114 \times 10^{-13})C^3 + (2.702 \times 10^{-9})C^2 - (1.479 \times 10^{-5})C - 0.014$$

$$c = (-4.894 \times 10^{-13})C^3 - (3.618 \times 10^{-9})C^2 + (3.094 \times 10^{-5})C - 0.019$$

$$d = (6.795 \times 10^{-13})C^3 + (5.088 \times 10^{-10})C^2 + (1.543 \times 10^{-5})C + 12.491$$

- (5) 경부하 방전실험시 cycle이 진행됨에 따른 보유용량의 변화를 cycle 회수에 대한 일차함수로 나타내었을 때 430, 860cycle을 제외한 1720~4300cycle까지의 평균 오차가  $7.739 \times 10^{-6}$ 로 나타나 전체적으  
로 보유용량이 linear하게 감소하는 것을 관찰할 수 있었다.

## 6. References

1. Falk Beil, "Electronics in cars: consequences for the energy-supply system" , *Journal of Power Sources*, 33 (1991)
2. H. Duval, *Journal of Power Sources*, 53 (1995)
3. H. Duval and C. Brient, "Vehicle electric network simulation software" , SAE Congr., Detroit, MI (1994)
4. H. Bode, *Lead Acid Batteries*, Wiley, New York (1977)
5. H. Duval, "Computer model of the lead/acid starter battery in automobiles" , *Journal of Power Sources*, 53 (1995)
6. Lead-Acid batteries for automobiles, KS, C 8504 (1995)
7. K. Peters, "Automotive battery energy density - past, present and future" , *Journal of Power Sources*, 33 (1991)
8. Clive D. S. Tuck, *Modern Battery Technology*, Ellis Horwood (1991)