

산업용 연축전지의 충전 특성실험에 근거한 충전 효율 개선 알고리즘

論 文

49D - 8 - 4

Algorithm for Improving the Efficiency of Storing Electricity using Experiments of Charging Characteristics for Industrial Lead-Acid Battery

朴 允 鎬* · 全 舜 鏞** · 徐 輔 焯***

(Youn-Ho Park · Soon-Yong Chun · Bo-Hyeok Seo)

Abstract - It is difficult to analyze the charging characteristics of the lead-acid battery, because of the influences by various non-linear and time-variant parameters. In this study, the charging characteristics of high capacity industrial lead-acid battery 630 Ah was investigated through experiments with respect to the variations of temperature and the aged state of battery during the charging process. The database of those characteristics is established from the results of experiments, and the fuzzy logic charging algorithm is suggested using them. The results of experiment shows that the industrial lead-acid batteries can be always fully charged within the saved charging time by the proposed charging control algorithm adapting to the variations of charging condition. This new charging concept will be useful for developing the advanced battery charger improving the efficiency of storing electricity.

Key Words : lead-acid battery, charging characteristics, the aged state of battery, fuzzy logic charging algorithm, efficiency of storing electricity

1. 서 론

연축전지는 특성이 안정되어 있고 가격이 저렴하여 발명된지 140년이 지난 오늘날 가장 널리 이용되는 2차전지로 자리매김하였다. 연축전지는 전체 보급수량의 약 70%는 100 Ah 이하의 소용량으로서 자동차의 SLI(Starting, Lighting and Ignition) 용도로 사용되고 있으며, 최근에는 UPS의 비상전원용과 전동지게차 등의 산업용으로서 1,000 Ah를 넘는 대용량 연축전지의 사용이 증가하는 추세에 있다[1]. 특히, 500 Ah이상의 산업용 연축전지는 전동지게차, 전동케도차량, 골프카 등 다양하게 이용되고 있으며 사용량도 계속하여 증가하고 있다. 전기자동차용 연축전지의 충전기에 대한 연구에서는 급속충전이 주요한 연구과제로 인식되었지만, 산업용 대용량 충전기에 있어서는 급속충전보다는 부족충전과 과충전을 피하고 유해가스의 발생을 억제하여, 축전지 수명을 늘릴 수 있는 충전기 개발이 주요한 연구방향이다[2].

현재 사용되고 있는 충전장치는 대부분 효율이 크게 떨어지는 누설식 충전기이며, 최근 정전류방식의 스위칭식 충전기가 보급되는 추세이지만, 아직은 충전조건 변화에 적응하여 유해가스의 발생을 억제하고 충전시간을 단축하면서 축전지를 항상 만충전시킬 수 있는 충전제어기술은 미흡한 실정이다[2].

연축전지는 충전시 축전지의 온도, 사용기간에 따른 노후

상태, 충전조건에 따라 충전특성이 매우 상이하게 나타나는 데, 이러한 충전특성에 영향을 주는 요소들은 비선형, 시변 특성을 갖고 있어 수학적으로 해석하여 모형화하기는 어려운 문제이다[3,4].

이 논문에서는 충전특성에 영향을 주는 요소들을 여러 가지 조건에서 다양하게 변화시키면서 실험을 반복하여 축전지 특성을 규명하고, 이를 규칙으로 표현하여 새로운 방식의 지능형 충전기 개발에 이용함으로써 충전장치 스스로 충전조건을 판단하여 부하조건에 적용할 수 있는 충전제어 알고리즘을 제안하였다. 또한, 이 논문에서 제안하는 제어 알고리즘을 탑재한 지능형 충전장치를 용량 630 Ah 산업용 축전지에 적용한 결과, 충전시의 온도와 축전지의 상태를 스스로 인식하여 충전전류와 충전시간을 결정함으로써, 상태가 좋은 축전지의 경우에는 충전시간을 단축하고, 노후한 축전지의 경우에는 충전시간을 연장하여 만충전에 도달시키는 우수한 성능을 보여 주었다. 새로운 방식의 지능형 충전기는 부족충전이나 과충전을 방지하고, 유해가스의 발생을 억제하여 축전지 셀에 무리한 영향을 주지 않으므로 축전지의 수명연장에 기여하게 될 것이다.

2. 축전지의 특성 실험과 결과 고찰

2.1 실험장치와 방법

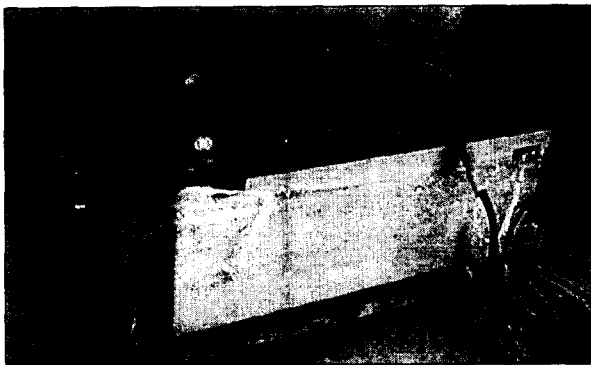
연축전지의 충전제어 알고리즘을 구성하는데 필요한 기초 자료를 획득하기 위하여 축전지의 충전특성실험을 실시하였다. 충전시의 온도, 축전지의 사용기간에 따른 노후상태와 같은 조건들이 충전특성에 미치는 영향을 규명하기 위하여, 충전시의 온도, 축전지 상태에 따라 각각 여러 가지 시료에 대하여 동일한 조건으로 반복하여 실험을 수행하였다.

* 正 會 員 : 國 防 品 質 研 究 所 責 任 研 究 員
** 正 會 員 : 東 洋 大 機 械 制 御 工 學 部 助 教 授
*** 正 會 員 : 慶 北 大 工 大 電 子 電 氣 工 學 部 教 授 · 工 博
接受日字 : 2000年 3月 13日
最終完了 : 2000年 7月 4日

이 충전특성실험에서 사용한 축전지는 그림 1에서 보여주는 것과 같이 대표적인 산업용 운반수송장치인 전동지게차에 사용되는 용량 630 Ah의 연축전지이다. 상태에 따른 실험용 축전지의 시료는 1일 1회 충방전을 기준으로 사용기간이 6개월 이내인 상태가 양호한 축전지와 사용기간이 2년 이상인 노후한 축전지를 각각 선택하였다.

또한 축전지의 충전특성을 얻기 위해 실험에 사용한 충전기는 그림 2에서 보여주는 정전류 스위칭 방식의 충전기로 스위칭 주파수 20 kHz 7 kVA 충전기를 사용하였으며, 개발된 충전제어 알고리즘의 성능평가도 동일한 충전기에 변경한 알고리즘을 탑재한 후 동일한 실험을 반복하여 그 결과를 비교하였다. 그림 3은 이 실험에 사용한 축전지의 방전용 부하로서 방전전류와 시간을 임의로 설정할 수 있도록 고안하였다.

2.2 주위온도에 따른 충전특성 실험 결과



(a)



(b)

그림 1 충전특성 실험용 연축전지

(a) 양호한 축전지, (b) 노후한 축전지

Fig. 1 Lead-acid batteries for experiment of the charging characteristics

(a) battery in good state, (b) battery in bad state

축전지는 충전시의 온도변화에 따라 충전특성이 크게 영향을 받는다. 온도변화에 따른 충전특성의 변화를 보상하기 위한 정보를 얻기 위하여 온도변화실험을 실시하였다. 표 1과 표 2는 각각 양호한 축전지와 노후한 축전지에 대한 온도변화특성을 실험한 결과이다. 실험은 축전지의 완전방전 비중

이 1.04이므로 충전 시작점 비중을 1.10 ± 0.01 로 하여 실험하였다.



그림 2 충전특성 실험용 스위칭방식 충전기

Fig. 2 Switching regulator type charger



그림 3 방전용 부하

Fig. 3 Resistor load for discharging

표 1 양호한 축전지의 충전특성 실험결과

Table 1 Experimental results of the charging characteristics for the battery in good state

충전개시비중 (셀평균)	충전종료비중 (셀평균)	평균주위 온도[°C]	충전소요 시간[분]	충전효율 [%]
1.09	1.28	14.40	552	91.8
1.09	1.27	15.20	556	85.6
1.10	1.27	18.50	563	84.6
1.09	1.27	21.27	610	78.1

표 2 노후한 축전지의 충전특성 실험결과

Table 2 Experimental results of the charging characteristics for the battery in bad state

충전개시비중 (셀평균)	충전종료비중 (셀평균)	평균주변 온도[°C]	충전소요 시간[분]	충전효율 [%]
1.14	1.24	11.90	545	48.9
1.12	1.22	17.00	581	45.9
1.12	1.23	19.71	613	47.9
1.10	1.22	21.36	619	51.7

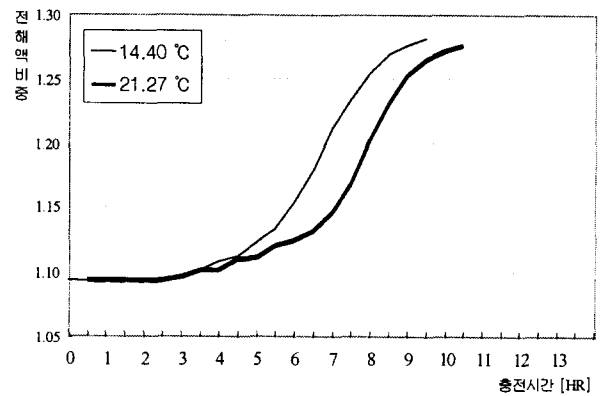
축전지는 사용기간이 오래되어 노후화 되어감에 따라 동일한 조건(충전전류, 충전시간, 온도)에서 충전하여도 축전지 내에 저장되는 전기적 에너지의 양은 감소하게 된다. 이를 정량적으로 표현하기 위하여 이 논문에서 충전효율 (efficiency of storing electricity)이라는 용어를 정의하여 사용하였다. 충전효율은 상온에서 만충전상태의 전해액 비중과 완전방전상태의 전해액 비중의 차이에 대한 충전 중 증가된 전해액 비중의 비율과, 실제 소요된 충전시간에 대한 표준충전소요시간의 비율을 곱한 값을 백분율로 나타낸 것으로 정의하며 식(1)과 같다.

$$\eta = \frac{[\rho_e - \rho_s]}{\rho} \cdot \frac{t_{st}}{t_c} \times 100[\%] \quad (1)$$

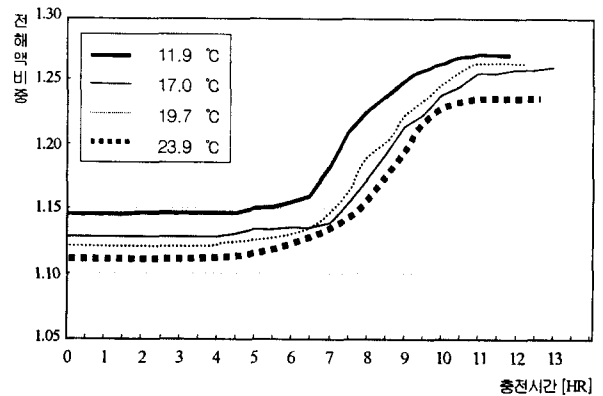
$$= k \frac{\rho_e - \rho_s}{t_c} \times 100[\%]$$

여기서, ρ_s 는 충전개시 비중, ρ_e 는 충전종료 비중, ρ 는 만충전상태의 전해액 비중과 완전방전상태의 전해액 비중의 차이로서 연축전지의 경우 1.280-1.10=0.18이다. 또한, t_{st} 는 표준충전소요시간으로서 5시간을 전류에 의한 충전소요시간으로 연축전지의 경우 8시간이며, t_c 는 실제 소요된 충전시간을 나타낸다. 또한, k 는 t_{st} / ρ 로서 축전지의 종류에 따라 결정되는 충전계수이며, 실험에서 사용한 연축전지의 경우 44.4이다. 식 (1)을 살펴보면, 짧은 충전시간 내에 전해액 비중의 상승폭이 클수록 충전효율은 높아지고, 충전시간이 길어지고 전해액 비중의 상승폭이 작아질수록 충전효율은 낮아짐을 알 수 있다. 충전효율이 충전시 전력변환과정에서 발생하는 전력손실을 고려한 충전장치의 효율을 의미하는 반면, 충전효율은 충전중 축전지 내부에서 전기적 에너지가 화학적 에너지로 변환되는 비율을 의미한다고 볼 수 있다.

실험결과를 보면, 노후한 축전지나 양호한 축전지 모두 충전시의 주위온도가 만충전 소요시간에 큰 영향을 미치고 있는데, 표 1에서 알 수 있듯이, 사용기간이 6개월 이내인 상태가 양호한 축전지의 경우, 충전적정온도의 범위에서 주위온도가 7°C 높아질 때 충전소요시간은 약 20분 정도 지연되며, 충전효율은 14%정도 낮아진다. 표 2의 노후한 축전지의 경우에는, 충전시간이 길어지는 정도를 예측하기가 어렵고, 충전효율은 온도 이외에도 다른 요소가 영향을 주고 있는 것으로 보인다.



(a)



(b)

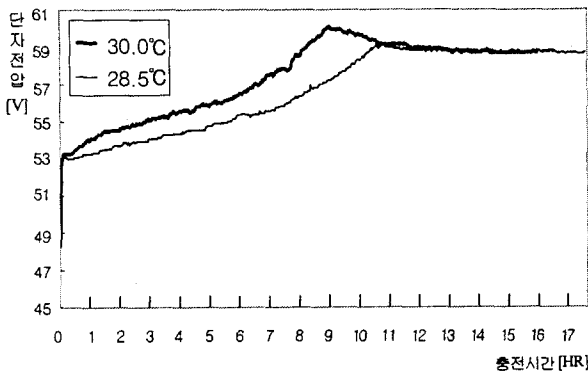
그림 4 온도변화에 대한 충전시 비중특성

(a) 양호한 축전지, (b) 노후한 축전지

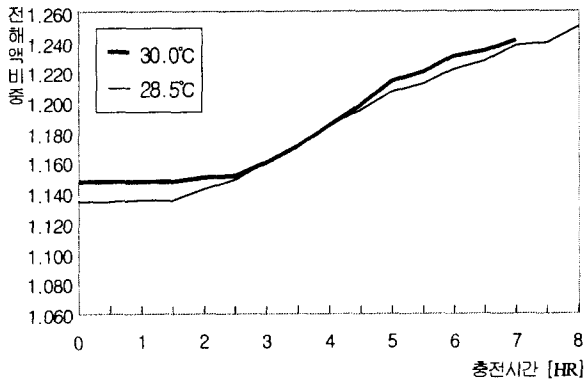
Fig. 4 Specific gravity characteristics for the variation of temperature during the charging process (a) battery in good state, (b) battery in bad state

그림 4는 충전시 주위온도 변화에 따른 비중특성을 보여주는 것으로, (a)는 양호한 축전지의 경우이며, (b)는 노후한 축전지의 경우를 나타내었다. 상태가 양호한 축전지의 경우에는 노후한 축전지에 비해 비중의 변화가 일찍 시작되어 빠른 시간 내에 만충전에 도달하며, 만충전시의 비중도 더 높게 나타남을 알 수 있다. 또한 (a)에서 상태가 양호한 축전지의 경우에도 온도가 낮을 때는 비중의 상승이 더 빨리 일어나며, 더 일찍 만충전에 도달하였다. 즉, 연축전지를 일정전류로 충전시 사용기간이 짧은 양호한 축전지를 낮은 온도에서 충전할 때 충전효율이 가장 높은 것을 알 수 있었으며, 충전특성곡선의 기울기변화를 감지하여 충전종료시점을 결정할 수 있는 중요한 단서를 찾아낼 수 있었다.

충전적정온도의 범위에서는 주위온도에 따라 충전전류를 선형적으로 증감시킬 수 있으나, 30°C를 넘는 온도범위에서는 그림 5의 실험결과에서 알 수 있듯이 선형적으로 결정할 수 없다. 또한, 상태가 양호한 축전지라도 온도가 높은 조건에서는 충전전압의 변화가 마치 노후한 축전지의 경우와 유사하게 나타나는 것을 알 수 있었다. 특히 33°C가 넘는 온도조건에서는 일정전류로 충전시 충전완료시간은 빨라지나 충전종료시의 비중이 1.240으로서 만충전상태의 전해액 비중인 1.280에 도달하지 못함을 알 수 있었다.



(a)



(b)

그림 5 고온에서의 충전특성 실험 결과

(a) 축전지 단자전압, (b) 전해액의 비중

Fig. 5 Experimental results of the charging characteristics at high temperature

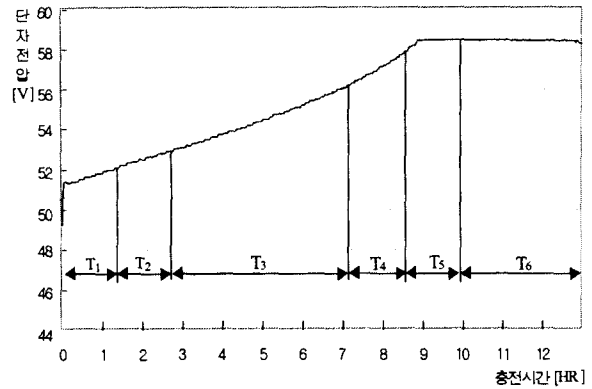
(a) terminal voltage of the battery,
(b) specific gravity of electrolyte

2.3 노후상태에 따른 충전특성 실험 결과

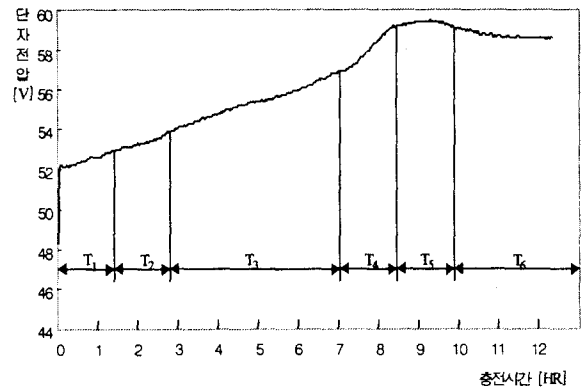
일반적으로 연축전지는 사용하면서 충전회전 횟수가 증가함에 따라 셀이 손상을 입어 충전용량이 감소하는 등 축전지의 상태가 변화한다. 이 실험은 사용중 축전지의 노후화에 따른 축전지의 특성변화를 파악하여, 이를 충전제어 알고리즘에 반영함으로써 충전효율을 개선하기 위한 것이다.

그림 6과 7은 온도조건과 잔존용량을 동일하게 고정하고 정전류로 충전하였을 때 양호한 축전지와 노후한 축전지의 단자전압 변화와 전해액의 비중변화를 각각 보여주고 있다. 여기서, T₁-T₄ 구간은 정전류 충전모드, T₅는 정전압 충전모드, T₆는 정전류 충전모드로 충전하였다. 그림 6의 (a), (b)를 보면 T₄와 T₆ 구간에서 축전지의 상태에 따라 충전특성에 큰 차이가 있음을 발견하였다. 노후한 축전지의 경우에는 양호한 축전지에 비해 충전말기시의 전압상승과 균등충전모드에서의 전압하강이 현저히 다르게 나타나는 것을 알 수 있었다.

또한, 그림 7의 (a), (b)에 나타난 충전시 전해액의 비중변화를 보면, 노후한 축전지의 경우 충전중에는 큰 변화가 없으나 충전종료시점에는 급속히 변화하였으며, 만충전 비중에 미치지 못하는 1.25에서 충전이 종료됨을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 6 노후상태에 따른 충전시 단자전압 특성

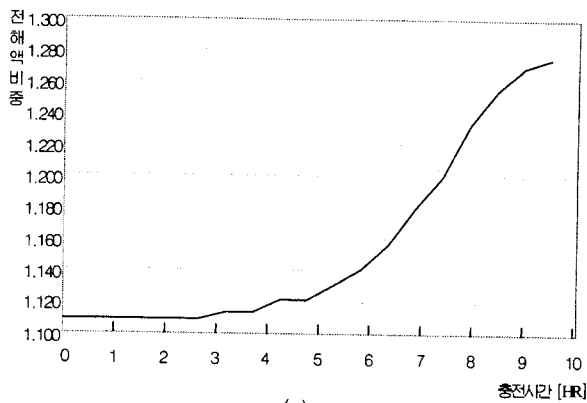
(a) 양호한 축전지, (b) 노후한 축전지

Fig. 6 Characteristics of terminal voltage for the variation of the aged state of battery during the charging process

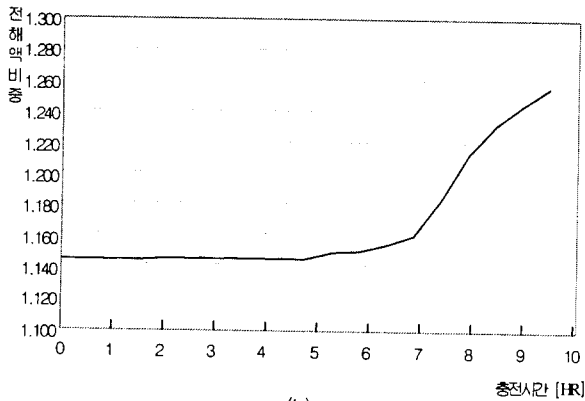
(a) battery in good state, (b) battery in bad state

이상의 실험결과를 요약하면 노후한 축전지의 충전특성은 다음과 같다.

- (i) 노후한 축전지는 충전종료시간이 단축되며, 축전지의 단자전압만 높아진 상태에서 충전이 완료되고, 전해액의 비중은 만충전상태의 비중인 1.280까지 상승하지 않는다.
- (ii) 상태가 양호한 축전지의 경우에는 그림 6의 (a)에 나타난 바와 같이 충전초기의 전압상승 기울기와 말기의 전압상승 기울기가 거의 동일하게 충전이 진행되었으나, 노후한 축전지의 경우에는 그림 6의 (b)에 나타난 바와 같이 충전초기의 전압상승 기울기가 완만한데 비하여 종료시점에서는 급격히 상승하는 것을 볼 수 있다.
- (iii) 노후한 축전지는 그림 6의 (b)에서 보듯이 충전중 전압상승이 전반적으로 균일하지 않고, 기복이 심하게 나타난다.
- (iv) 노후한 축전지는 충전말기의 균등충전모드에서 전압이 떨어지는 현상을 보인다.



(a)



(b)

그림 7 노후상태에 따른 충전시 전해액 비중특성

(a) 양호한 축전지, (b) 노후한 축전지

Fig. 7 Specific gravity characteristics for the variation of the aged state of battery during the charging process

(a) battery in good state, (b) battery in bad state

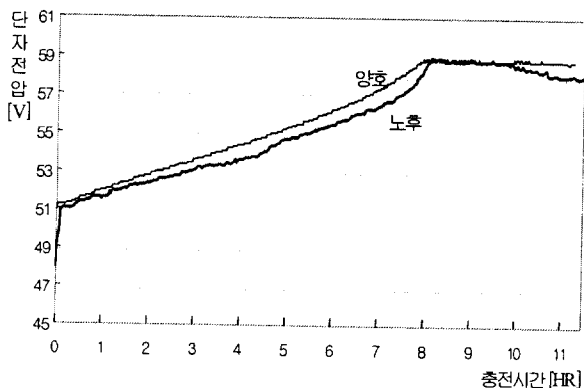


그림 8 노후상태에 따른 축전지 단자전압특성

Fig. 8 Characteristics of terminal voltage for the variation of the aged state of battery during the charging process

그림 8은 양호한 축전지와 노후한 축전지를 동일한 조건에서 실험한 결과를 함께 나타낸 것이다. 상태가 양호한 축전지의 경우에는 충전특성 실험결과가 대부분의 축전지에

확장하여 적용할 수 있도록 일반성을 갖고 있으나, 노후한 축전지의 경우에는 충전특성곡선이 그림 9에 나타난 바와 같이 항상 동일하게 재현되지 않는다는 사실을 발견하였다.

그림 9는 노후한 축전지의 여러 가지 충전전압특성을 보여주고 있는데, 충전시마다 다양한 형태로 나타나며 크게 3가지의 유형을 갖는다. 즉, 그림 9에서 a곡선처럼 전반적으로 불균일하게 충전전압이 상승하다가 충전말기에 급격히 상승하고, 균등충전시에는 전압이 떨어지는 형태, b곡선처럼 비교적 일정한 전압상승 기울기를 유지하고 있으나 매순간 불규칙하게 전압이 변화하는 형태, 그리고 c곡선처럼 초기에는 일정한 기울기로 완만하게 충전전압이 상승하다가 말기에 급격히 상승하는 형태이다.

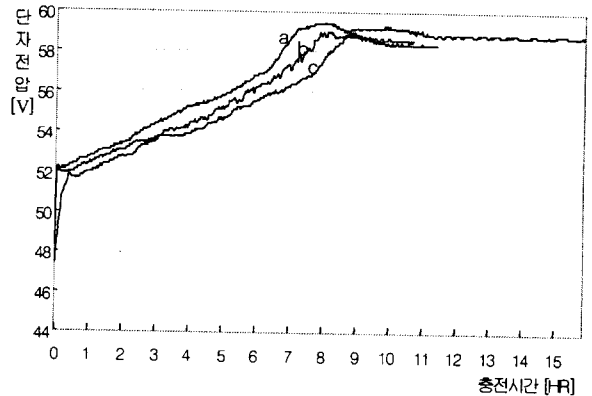


그림 9 노후한 축전지의 여러 가지 충전특성곡선 형태

Fig. 9 Various types of voltage curves in the aged state of battery during the charging process

3. 충전효율을 제고를 위한 충전제어 알고리즘

3.1 충전제어 흐름선도

이 연구에서는 그림 10과 같이 전체적인 충전기의 동작 모드를 유지하면서, 충전 중 대기온도와 축전지의 상태를 충전에 반영하도록 제어알고리즘을 구성하였다. 자기전단 모드에서 결함이 발견되지 않으면, 바로 초기충전모드로 들어가 소프트 충전을 시작한다. 이때, 충전기는 주변의 대기온도를 측정하여, 실험에서 얻은 DB 정보를 근거로 주어진 온도에 적합한 충전전류를 결정하고, 결정된 충전전류를 축전지에 일정하게 공급하는 정전류모드로 충전을 진행한다.

정전류모드로 충전중에는 축전지의 온도변화에 따라 충전전류를 보정하도록 하였으며 온도변화의 간격은 7℃로 하였다. 정전류 충전모드에서는 충전 중 축전지 단자전압 변화율을 감지하여 축전지의 상태를 분석하고, 균등충전모드로 전환하는 충전종료전압을 결정하기 위한 정보를 얻기 위하여 소프트웨어 타이머가 정해진 단자전압에서 작동한다. 정전류충전이 끝나면 이어서 정전압충전을 행하고, 충전전류가 설정한 값보다 작아지면 다시 정전류 모드로 전환하여 충전을 계속하고 설정한 시간이 되면 자동으로 충전을 종료하도록 하였다.

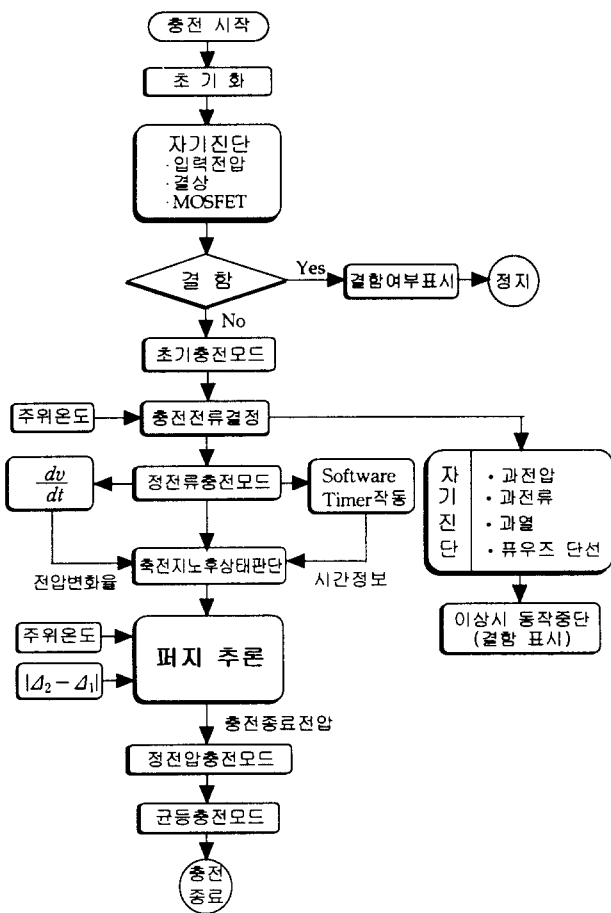


그림 10 충전조건에 적응하는 지능형 충전기의 충전제어 흐름도

Fig. 10 Flow chart of the charging control for intelligent charger adapting to the charging condition

3.2 제어알고리즘의 구성

제어의 목적은 식 (2)와 같이 $t=0$ 인 순간부터 충전을 시작하여 축전지의 충전량 $Q(t)$ 가 환경변화에 관계없이 정해진 값에 이르도록 하는 것이며, 제어기 구성에 있어 $Q(t)$ 는 기준입력으로 볼 수 있다.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} [C_b(t) \cdot V_f(t)] = |Q(t)|, \quad t > 0 \quad (2)$$

여기서, $C_b(t)$ 는 축전지의 용량, $V_f(t)$ 는 단자전압을 나타낸다.

충전시의 축전지온도와 축전지의 가스발생을 억제하기 위한 충전전류의 결정 알고리즘은 식 (3)과 같다.

$$I_{charger}(t) = I_{ref} \pm \Delta I \quad (3)$$

$$\Delta I = \lambda_f(t) \cdot (r \cdot I_{ref}) \quad (4)$$

여기서, I_{ref} 는 18°C에서 상태가 양호한 축전지를 충전할 때의 충전전류를 의미하고, r 는 충전기 설계시 전력공급부

의 하드웨어 허용용량에 따라 결정되는 값으로 대략 0~0.25 정도의 범위를 갖는다. 이는 공급전류의 증가를 회로설계 정격의 25% 범위까지로 제한하는 것을 의미한다. 또한, λ_f 는 실험에서 얻은 결과를 토대로 결정한 전류제어요소로서, 표 3에 결정규칙을 나타내었다.

전류제어요소는 0~1 사이의 값을 가지며, 기준온도는 18°C로 식 (5), 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\lambda_f(t) = \sin(T_s - T_c) \frac{|T_d - 29|}{10}, \quad T_s - T_c \geq 7 \quad (5)$$

$$\lambda_f(t) = \lambda_f(t-1), \quad otherwise \quad (6)$$

여기서, T_s 는 충전시 기준이 되는 주변온도로 대략 18°C 정도로 주어지며, T_c 는 충전중의 주위온도를 나타낸다. 산업용 연축전지에 있어서는 가능한 한 적은 전류로 장시간 충전하여 가스의 발생을 줄이고, 축전지 셀의 손상을 최소화하는 것이 바람직한 충전방법이다. 겨울과 여름의 온도차이는 최고 50°C 가까이 되며, 봄과 가을의 경우에도 7~8시간의 충전중에 최고 20°C 정도의 온도변화가 일어난다. 축전지의 충전특성은 온도변화에 크게 영향을 받으므로 충전중 계속해서 충전전류값을 보정해 주어야 한다.

표 3 전류제어요소 결정

Table 3 Determination of the control factor for charging current

온도	λ_f 의 범위
-20°C 이하	1
-19°C - 29°C	식 (5), 식 (6)
30°C 이상	0

또한, 충전종료시점의 결정은 축전지의 상태와 주변온도에 영향을 받아 더욱 복잡한 비선형성을 나타내므로, 주변온도와 축전지 상태를 고려한 퍼지논리를 이용하는 것이 유용한 방법이다.[1,5]

그림 11은 축전지 상태에 따른 충전특성 실험결과의 대표적인 형태를 나타낸 것이다. 축전지는 충전전횟수의 증가와 노후정도에 따라 구간 A에서의 기울기가 실험결과 각각 다른 형태로 나타났으므로, 여기서 축전지의 상태를 파악할 수 있는 중요한 정보를 얻을 수 있었다. 그림 12에서 4개의 점으로부터 얻은 데이터를 활용하기 위하여, 먼저 AB구간에 있어서의 전압변화율 Δ_1 과 CD구간에 있어서의 전압변화율 Δ_2 를 구한다. 충전 중의 전압변화율을 구하기 위해 A점을 54 V로 설정하였으며, 충전전압이 54 V에 도달하면 소프트웨어 타이머가 40분간 작동하여 B점의 전압을 취하도록 하였다. 다음, 충전을 계속하여 축전지의 단자전압이 C점에서 56 V에 도달하면 다시 소프트웨어 타이머가 40분간 작동하여 D점의 전압을 취하여 전압변화율을 계산함으로써 두 구간에서의 전압변화 기울기를 비교할 수 있게 하였다.

소프트웨어 타이머의 작동을 시작하는 시점의 전압은 실험적인 데이터를 통하여 결정한 것으로 축전지의 종류에 따

라 적절히 설정할 수 있는 값이다. 이 실험에서 축전지의 상태를 인식하기 위해 설정한 두 구간은 축전지의 상태에 따른 실험결과의 분석을 토대로 결정하였으며, 충전실험에서 얻은 정보를 알고리즘에 반영한 것이다.

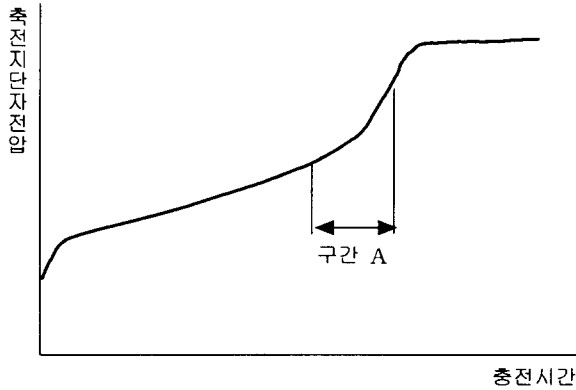


그림 11 노후한 연축전지의 전형적인 충전특성
 Fig. 11 Typical charging characteristics of the lead-acid battery in bad state

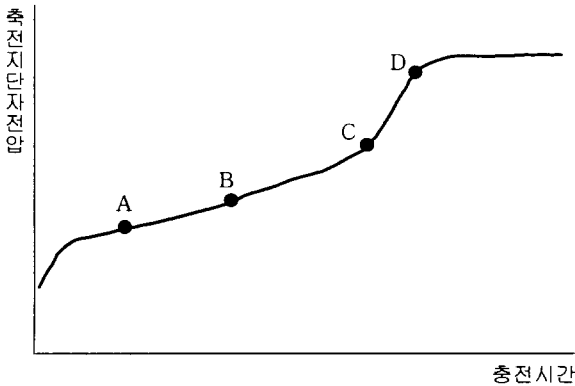


그림 12 축전지 단자전압 변화율
 Fig. 12 Slopes of the terminal voltage for the battery in bad state

점 A의 전압을 V_A , 점 B의 전압을 V_B , 점 C의 전압을 V_C , 점 D의 전압을 각각 V_D 라고 정의하면, 충전종료시점 V_{end} 는 식 (8)에 의해 계산되며, 표 4를 이용하여 결정할 수 있다.

$$\Delta_1 = V_B - V_A \tag{7}$$

$$\Delta_2 = V_D - V_C \tag{8}$$

$$V_{end} = V_n + \lambda_V |\Delta_2 - \Delta_1| \tag{8}$$

여기서, λ_V 는 퍼지추론을 통해 얻은 퍼지 출력변수로서, 충전종료시점의 온도와 전압변화율을 퍼지입력 변수로 하여 추론된 전압제어요소이다.

$$\lambda_V = C_s \cdot [defuzzifier(\lambda_F)] \tag{9}$$

여기서, C_s 는 퍼지화된 양을 물리량으로 변화시킨 후 종료전압 제어범위에 일치시키기 위한 스케일 요소(scale factor)이며, λ_F 는 0과 1사이의 정규화된 퍼지추론 결과값으로서 표 4의 제어규칙과 언어변수에 의해 근사화된다.

표 4 충전종료전압 결정

Table 4 Determination of the battery terminal voltage at the end of charging

$ \Delta_2 - \Delta_1 $	축전지 상태	충전종료전압 V_{end} [V]
0.2 미만	양호	58.5
0.2~0.5	노후	식(4-8)
0.5 이상	매우 노후 (축전지 교환)	

표 5 제어규칙의 정의

Table 5 Definition of the control rules

Number of rule	IF $ \Delta_2 - \Delta_1 $	AND T	THEN λ_F
1	sm	lo	sma
2	sm	mid	mde
3	sm	hi	hg
4	md	lo	mde
5	md	mid	mde
6	md	hi	hg
7	bg	lo	mde
8	bg	mid	mde
9	bg	hi	hg

표 5에서 축전지 단자전압의 기율기 차이에 대한 언어변수 sm(small), md (middle), bg(big), 충전시 주위온도에 대한 언어변수 lo(low), mid(middle), hi(high), 그리고 전압 제어요소에 대한 언어변수 sma(small), mde(middle), hg (high)에 대한 각각의 소속함수(membership function)는 그림 13과 같다.

여기서, 퍼지추론 방식은 Mamdani의 min-max방법을 이용하였으며, 비퍼지화 방법으로는 면적중심법을 사용하였다.

표 6은 퍼지추론을 통해 계산된 전압제어요소의 look-up 테이블로서 충전제어시 프로그램으로 탑재되는 기준값을 보여주고 있다.

표 6 전압제어요소 λ_V

Table 6 Voltage control factor λ_V

$ \Delta_2 - \Delta_1 $	온도[°C]					
	-19	-9	0	9	19	29
0.2	0.0	1.5	3.0	4.5	6.0	7.5
0.3	1.6	2.6	3.6	4.6	5.6	6.6
0.4	2.5	3.2	4.0	4.8	5.5	6.3
0.5	3.0	3.6	4.2	4.8	5.4	6.0

충전지가 노후화하면 충전시 전해액비중은 만충전비중에 도달하지 못하고 단자전압만 상승한 상태에서 충전이 종료되므로, 충전특성실험을 통하여 얻은 데이터를 이용한 퍼지 추론을 통하여, 충전지의 노후정도에 따라 충전종료전압을 변경시켜 충전소요시간이 다소 연장되더라도 전해액의 비중을 만충전비중에 근접하도록 충전함으로써 충전지수를 증가시키게 된다.

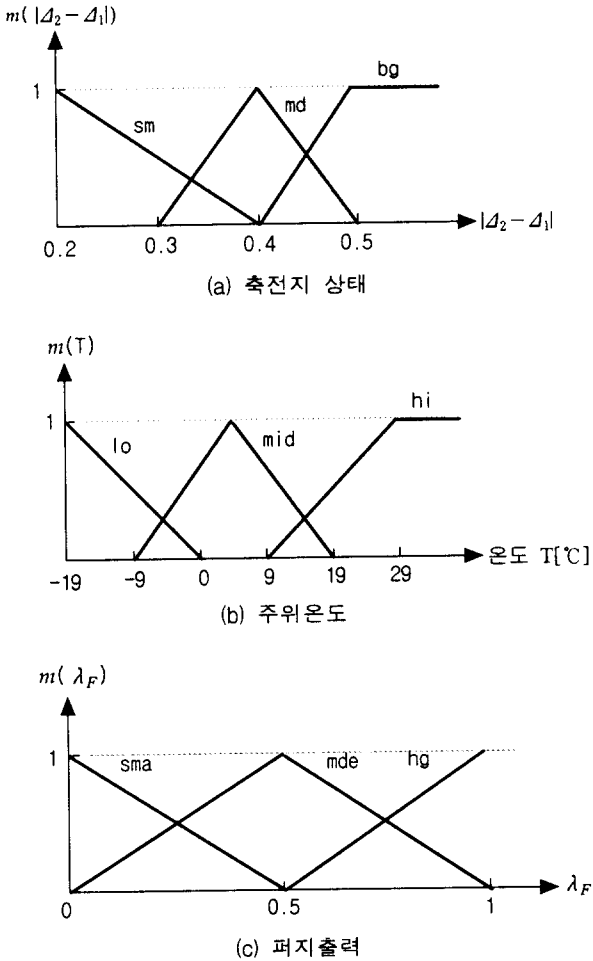


그림 13 충전종료전압 결정을 위한 소속함수 정의
 Fig. 13 Definition of the membership function for determination of the battery terminal voltage at the end of charging

4. 실험 및 고찰

개발된 충전제어 알고리즘의 성능을 평가하기 위하여 프로그램을 마이크로 프로세서에 탑재하고 이를 충전기에 장착하여 충전특성실험을 수행하였다. 실험에 사용한 충전기와 충전지는 앞에서 온도실험과 노후상태실험에서 사용했던 실험장치를 그대로 사용하였다.

실험은 충전중의 온도변화와 충전지의 상태변화에 적용하여 충전제어 알고리즘이 이를 얼마나 적절히 보상할 수 있는지를 평가하였다.

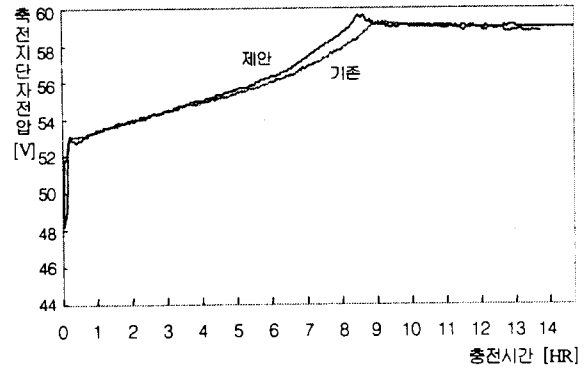


그림 14 충전중 온도변화에 따른 충전지 단자전압 특성
 Fig. 14 Terminal voltage characteristics of the battery for the variation of temperature during the charging process

그림 14는 15°C의 상온에서 충전을 시작하여 충전종료시점의 온도가 0°C로 낮아지는 경우를 온도조건으로 설정하여 기존의 정전류방식 충전기와 개발된 제어알고리즘을 탑재한 충전기의 충전특성을 실험한 것이다. 그림 14에서 '제안'은 제시한 제어알고리즘을 탑재한 지능형 충전기의 실험결과이고, '기존'은 이 논문에서 온도실험과 상태실험에 사용한 기존의 정전류방식 충전기로 실험한 결과이다.

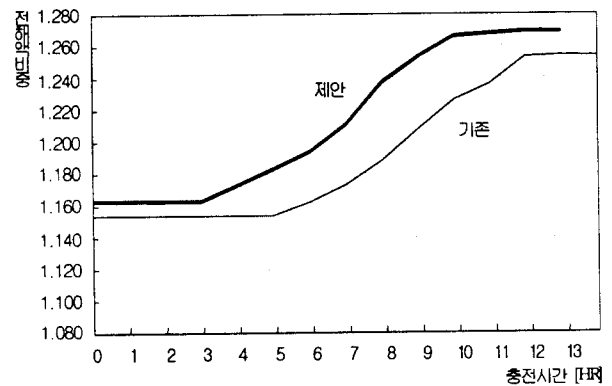


그림 15 충전중 온도변화에 따른 전해액 비중 특성
 Fig. 15 Specific gravity characteristics of the battery for the variation of temperature during the charging process

충전지의 단자전압 상승곡선을 살펴보면 온도보상 알고리즘이 잘 작동되었음을 알 수 있다. 충전 시작 2시간 후부터 온도보상 알고리즘이 작동하여 약간의 전류상승이 있었고, 충전종료시점에서는 상당한 전류보상이 있었음을 보여주고 있다.

그림 15는 그림 14에서와 동일한 조건에서 전해액의 비중 특성을 보여주고 있다. 제안된 충전제어 알고리즘에 의해 충전될 때 기존의 충전방식에 비해 전해액의 비중 상승이 훨씬 일찍 시작되었고, 충전종료시의 전해액 비중도 거의 만충전비중에 가깝게 도달하였으며, 충전소요시간도 30분 정도 단축되었다. 즉, 제안된 충전제어 알고리즘은 동일한 충전조

진에서 기존의 충전방식에 비해 짧은 시간 내에 더 많은 양의 에너지를 축적함으로써 충전중의 온도변화를 보상하고 충전효율을 크게 향상시킬 수 있음이 입증되었다.

다음은, 충전지의 상태에 따른 충전보상특성을 관찰하기 위하여 노후한 충전지에 동일한 실험을 반복하고, 표 7과 같은 결과를 얻었다.

표 7 충전지의 노후상태 보상효과 실험결과
Table 7 Compensating effect at the battery in bad state

구분	충전개시 비중 (셀평균)	충전종료 비중 (셀평균)	평균주변 온도 [°C]	충전소요 시간 [min.]	충전 효율 [%]
기존	1.10	1.22	21.36	619	51.7
제안	1.10	1.26	23.90	663	61.7

표 7에서, 노후한 충전지에 대하여 동일한 잔존용량과 온도조건에서 충전특성실험을 수행한 결과, 제안한 충전방식의 충전소요시간이 기존의 충전방식에 비해 44분 정도 더 소요되었다. 이는 식 (8)의 충전 종료전압을 결정하는 알고리즘이 작동되었기 때문이다. 즉, 충전제어 알고리즘이 충전지의 상태가 노후한 것을 판단하고 충전종료전압을 증가시켜 충전소요시간이 연장되었음을 알 수 있다. 반면, 충전종료시점에서의 전해액 비중은 1.26으로서, 노후한 충전지를 기존의 충전기에 의해 충전하였을 때는 얻을 수 없었던 높은 실험치를 얻었다. 이 실험결과를 식 (1)에서 정의한 충전효율로 비교하면, 제안된 충전방식을 적용했을 때 10%정도 상승되었음을 알 수 있다. 결국 제시한 충전제어 알고리즘은 충전지의 노후정도를 감지하여 충전시간을 연장시켜, 노후한 충전지라도 만충전에 가깝도록 충전시킬 수 있음이 확인되었다.

5. 결 론

대용량 연충전지의 충전특성실험을 통하여, 충전시의 충전지 온도와 충전지의 사용기간에 따른 노후상태가 충전특성에 가장 큰 영향을 미치는 요소인 것을 확인하였다. 그리고, 충전시의 온도조건과 충전지의 노후상태에 적용할 수 있는 지능형 충전제어 알고리즘을 제시하였으며, 이 알고리즘을 충전기에 탑재하여 용량 630 Ah의 산업용 충전지에 충전특성실험을 실시하였다. 실험결과, 충전시의 온도와 충전지의 상태에 따라 충전전류와 충전종료전압이 적절히 제어되면서 충전효율이 향상되는 것을 확인하였다. 실험결과를 정전류 방식 스위칭 충전기와 비교하면, 충전지의 상태가 양호한 경우에는 충전시간이 5%정도 단축되었으며, 충전지가 노후한 경우에는 충전효율이 10%정도 향상되는 것을 발견하였다.

이 논문에서 제시한 지능형 충전제어 알고리즘은 충전조건에 관계없이 충전지를 항상 만충전시킬 수 있으므로 산업현장의 작업능율을 높이며, 충전지의 셀 손상을 막을 수 있어 공해물질인 충전지의 수명을 연장시키므로, 경제적인 측면에서 뿐 아니라 환경보호의 측면에서도 크게 기여할 것으로 기대된다.

앞으로 이 연구의 개념을 확장하여, 충전지의 수명을 단축

시키지 않는 급속충전, 잔존용량의 정확한 산출, 수명종료시점의 판단 등과 같은 과제를 추진하면, 전기자동차를 비롯한 많은 운반수송장치 등에 적용할 수 있는 충전기 개발에 좋은 성과가 있을 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] Y. C. LIANG and T. K. NG, "Design of battery charging system with fuzzy logic controller", Int. J. Electronics, vol. 75, no. 1, pp. 75-86, 1993.
- [2] C. M. Liaw and S. J. Chiang, "Design and Implementation of a Single-Phase Three Wire Transformerless Battery Energy Storage System", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 41, no. 5, October 1994.
- [3] Ming-Tsung Tsai, Chin-E Lin, Senior Wen-Inne Tsai, and Ching-Lien Huang, "Design and Implementation of Demand-side multi-function battery energy storage system", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 6, December 1995.
- [4] Deyuan Fan and Ralph E. White, "A Mathematical Model of a Sealed Nickel-Cadmium Battery", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 7, no. 1, March 1992.
- [5] Yoon-Ho Kim and Hoi-Doo Ha, "Design of Interface Circuits with Electrical Battery Models", IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 44, no. 1, pp. 81~86, February 1997.

저 자 소 개



박 윤 호 (朴 允 鎬)

1952년 4월 28일생. 1980년 충남대 전기공학과 졸업, 1982년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 경북대 대학원 전기공학과 박사과정. 1982년 국방과학연구소, 현재 국방품질연구소 책임연구원

Tel : 02-961-1462

E-mail : unopark2@yahoo.com



서 보 혁 (徐 輔 赫)

1952년 3월 11일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 경북대 공대 전자전기공학부 교수

Tel : 053-950-5604

E-mail : bhsuh@knu.ac.kr



전 순 용 (全 舜 鏞)

1962년 4월 3일생. 1986년 경북대 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1990년~1995년 한라중공업(주) 연구소 근무. 1995년~1996년 김천전문대학 방사선과 전임강사. 1996년~현재 동양대 공대 제어계측공학과 전임강사/산업기술연구소장. 관심분야: 제어응용

(Power-electronics, medical Instrumentations, Textile machine, engine-pump coupled system control 등), System identification, adaptive filter, neural-fuzzy system

Tel : 054-630-1185

E-mail : csy@phenix.dyu.ac.kr