

# 혼합한 첨가제를 이용한 바나듐레독스 흐름전지용 열적안정성 전해액제조

김용철<sup>1</sup>, 강형선<sup>2</sup>, 강웅일<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>호남대학교 소방행정학과, <sup>2</sup>조선이공대학교 기계설계과

## Preparation of Electrolyte for Vanadium Redox Flow Battery with Thermal Stability Using Mixing Additives

Yong-Cheol Kim<sup>1</sup>, Hyung-Sun Kang<sup>2</sup>, Ung-Il Kang<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Fire Service Administration, Honam University

<sup>2</sup>Department of Mechanical Design, Chosun College of Science & Technology

**요약** 바나듐 레독스 흐름전지용 전해액의 열적안정성을 향상시켜 바나듐 이온의 고온에서 석출이 일어나는 것을 방지하기 위해 전해액에 SPD(Sodium Pyrophosphate Dibasic) 및 SPD/FA(Formic Acid) 혼합한 첨가제를 사용하였다. 최적 농도를 찾기 위해 CV(Cyclic Voltammetry)분석으로 가장 높은 전류 피크를 얻은 0.05M FA 와 0.05M SPD 농도를 선택하였다. EIS(Electrochemical Impedance Spectroscopy)를 통한 전기화학적 실험을 행하여 물질전달 및 전하이동을 분석하였다. 또한 제조한 전해액의 충방전 실험을 진행하여 전류효율, 에너지효율, 전압효율 등을 평가하였다. 고온안정성 분석결과는 SPD/FA 혼합첨가제를 넣어 만든  $V^{5+}$  전해질이 60°C에서 28일 이상이 지나도 침전물 형성이 보이지 않았다. 단위셀 시험을 통해서 첨가제를 혼합 한 것과 하지 않은 것을 비교 했을 때  $V^{5+}$ ,  $V^{5+}/SPD$  및  $V^{5+}/SPD/FA$  전해질에 따라서 EE(Energy Efficiency)이 70.1%, 81.0% 및 81.9% 순으로 나타내었다. SPD/FA 혼합첨가제로 제조한 전해질은 전극과 전해질의 계면에서 확산속도가 증가함에 따라 전극표면에서 발생하는 편극저항이 감소하여 전압손실을 줄임으로서 EE효율이 증가함을 알 수 있었다.

**Abstract** In vanadium redox flow batteries, SPD/FA as mixing additives is used to improve the thermal stability of the electrolyte solution and prevent the precipitation of vanadium ions at high temperatures. The highest current peak determined by CV was obtained at the optimal concentrations of 0.05M FA and 0.05M SPD. The mass transfer and charge transfer obtained through electrochemical experiments were analyzed by EIS. The prepared electrolytes were also evaluated for CE(Current Efficiency), EE(Energy Efficiency), and VE(Voltage Efficiency) by performing charging/discharging experiments. Results of high temperature stability analysis revealed that the  $V^{5+}$  electrolyte made using SPD/FA mixing additives showed no precipitation at 60°C after 28days or more. A comparison of the electrolytes with and without additives revealed EE values of 70.1%, 81.0%, and 81.9% in  $V^{5+}$ ,  $V^{5+}/SPD$ , and  $V^{5+}/SPD/FA$ , respectively. As the diffusion rate increased at the interface between the electrode and the electrolyte, the polarization resistance generated on the electrode surface decreased, and the voltage loss was reduced. Our results indicate that the electrolyte prepared with SPD/FA mixing additives shows increased energy efficiency.

**Keywords** : VRFB, Electrolyte, SPD, FA, SPD/FA Additives

\*Corresponding Author : Ung-Il Kang(Honam Univ.)

email: uikang@honam.ac.kr

Received October 21, 2022

Accepted January 6, 2023

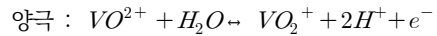
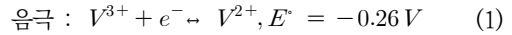
Revised December 12, 2022

Published January 31, 2023

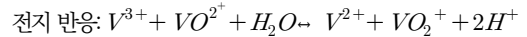
## 1. 서론

전 세계적으로 전기에너지 수요가 증가하는 추세이며, 산업분야 및 실생활에서 쓰이는 전기에너지의 70% 이상이 화석연료와 원자력 연료를 기반으로 만들어 지고 있다. 그러나 이러한 화석연료 사용에 따른 환경오염 및 기후변화가 문제시됨에 따라 이를 해결하기 위한 방법으로 신재생에너지 및 효율적인 에너지 사용에 대한 기술이 주목받고 있다. 신재생에너지는 특성상 자연환경이나 지리적 조건 등에 의해 출력변동이 발생하여 연속적인 에너지 공급이 어려우며, 에너지 생산시점과 수요시점의 시간차가 발생하여 전력망의 품질에 피해를 끼치게 된다. 이에 대한 해결방안으로 사용하지 않은 전력을 저장하다가 필요한 시기에 공급하는 에너지 저장시스템(ESS, Energy Storage System, 이하 ESS)이 대두 되고 있다 [1-4]. ESS는 출력 및 사용용도에 따라 다양하게 나뉘질 수 있으며 그 중에서도 폭발이나 화재에 대한 안정성이 뛰어나며, 용량과 출력을 독립적으로 설계할 수 있는 레독스 흐름전지가 신재생에너지 뿐만 아니라 스마트 전력 계통 연계를 위한 전기에너지 저장장치로 각광을 받고 있다. 레독스 흐름전지는 기존 이차전지가 활물질(active material)이 포함되어 있는 전극에 전기에너지를 저장하는 것과는 다르게 전해액에 용해되어 있는 활물질의 산화/환원반응을 이용하는 전기화학적 축적장치이다. 레독스 흐름전지의 활물질로 사용될 수 있는 물질은 V, Fe, Cr, Cu, Ti, Sn, Zn, Br 등이 있으며, 이외에도 다양한 산가를 가지는 전이금속 등이 이용가능하다. 1974년 미국 NASA(National Aeronautics and Space Administration)의 LRC(Lewis Research Centre)에서 Fe/Cr계의 활물질을 이용한 레독스 흐름전지를 개발 하였으나, Cr 반전지의 가역성 및 분리막을 통한 혼합현상(cross-over)에 의해 수명단축 및 효율저하 등의 문제점이 발생되었다[5]. 이후 1980년대 호주의 Skyllas-Kazacos그룹에서 양극과 음극활물질 모두 바나듐 단일 활물질로 사용하는 연구가 본격적으로 시작되면서 사용화에 대한 전환점이 만들어 졌다[6]. 바나듐을 양극과 음극 전해액으로 사용함에 따라 분리막을 통한 활물질의 투과로 전지의 용량이 감소하더라도 혼액을 통해 용량 및 효율을 회복할 수 있어 레독스 흐름전지 시스템에서 바나듐계 레독스 흐름전지는 상용화에 가장 근접해 있다. 바나듐계 레독스 흐름전지에 사용되는 바나듐 이온은  $V^{2+}$ ,  $V^{3+}$ ,  $VO^{2+}$ ,  $VO_2^+$  등으로 산화/환원이 가능하다. 구체적으로, 전바나듐계 레독스 흐름전지의 반응은 다음

Eq. (1)~(3)과 같다.



$$E^* = 1.00 V \quad (2)$$



$$E^* = 1.26 V \quad (3)$$

사용 가능한 바나듐 화합물로는  $VCl_3$ ,  $V_2O_5$ ,  $VOSO_4$  등이 있다. 그러나  $VCl_3$ 인 경우 화합물이 전해질과 반응되어 염소가스가 생성되는 문제점이 있고,  $V_2O_5$ 의 경우 낮은 용해도로 인하여 용량이 작은 문제점이 있다[7]. 그래서 현재  $VOSO_4$ 가 많이 사용되고 있다. 바나듐 화합물은 용매에 용해하여 사용하는데 이때 바나듐 이온은 가수는 4가이다. 이 4가 바나듐 이온( $VO^{2+}$ )은 양극전해액에 사용되며, 환원을 통해 만들어진 3가 바나듐 이온( $V^{3+}$ )은 음극 전해액으로 사용된다. 구체적으로 충전 시에는 양극에서 4가 바나듐 이온( $VO^{2+}$ )이 5가( $VO_2^+$ )로, 음극에서는 3가 바나듐 이온( $V^{3+}$ )이 2가( $V^{2+}$ )로 변환되어 충전이 진행되며, 방전시에는 역으로 바나듐 이온의 가수가 변화하여 방전이 진행된다[8]. 그러나 바나듐계 전해액은 충전이 진행되고, 바나듐 농도 및 전해액의 온도 높아짐에 따라 양극전해액  $VO_2^+$ 상에 불용성인 오산화 바나듐( $V_2O_5$ )이 석출물로 발생된다[9]. 석출물인 오산화 바나듐은 전극의 표면에 붙어 산화/환원을 일으키는 반응을 감소시켜 저항을 증가시키게 되고, 석출된 바나듐의 양만큼 용량을 감소시키게 된다. 또한 레독스 흐름전지 셀 내의 석출물은 전해액의 흐름을 방해하여 내부 압력을 증가시켜 누수가 발생하게 된다. 이로 인해 스택의 수명이 단축되어, 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 연구가 진행되고 있다. 석출을 억제하기 위한 방법으로는 대표적으로 충전상태(SOC, State Of Charge, 이하 SOC)를 낮추어 양극 전해액을 완전한 5가( $VO_2^+$ )로 보내지 않는 방법과, 바나듐 농도를 낮게 하는 방법이 있으나 이러한 방법은 출력 및 에너지 밀도를 감소시키는 단점이 있다. 또한 온도에 따른 석출을 억제하기 위한 방법으로 열교환기를 사용하여 온도를 낮추는 방법 등이 있지만, 잦은 열교환기 사용에 따른 시스템 효율 저하의 문제점이 발생하게 된다. 마지막으로 첨가제를 이용하여 석출물을 억제하는 방법 등이 있다[9].

본 연구에서는  $VOSO_4$ 를 활물질로 사용하고, SPD 및 SPD/FA 혼합첨가제를 이용한 전해액을 제조하여 석출 억제 효과를 알아보는 연구를 수행하였다.

## 2. 실험

### 2.1 전해질 제조

Vanadyl sulfate ( $\text{VOSO}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$ , Japan)에 3.0M 황산( $\text{H}_2\text{SO}_4$ , Sigma-Aldrich)을 첨가하여 완전히 용해 될 때 까지 교반하여 1.6M  $\text{VOSO}_4 + 3.0\text{M H}_2\text{SO}_4$  전해액을 제조하였다. 첨가제로 Sodium pyrophosphate dibasic (SPD, Sigma-Aldrich) 및 Formic acid (FA, Sigma-Aldrich)의 일정량을 혼합하여  $\text{V}^{4+}/\text{SPD}$  및  $\text{V}^{4+}/\text{SPD}/\text{FA}$ 의 균일한 전해질을 제조하기 위해 1시간 동안 다시 교반한 전해액을 충전 공정을 통해  $\text{VO}_2^+(\text{V}^{5+})$  전해액을 제조하였다.

### 2.2 열적 안정성 시험

제조된 전해질의 열적안정성은  $60^\circ\text{C}$ 로 hot plate 상에서 진행하였다. 매 1시간 간격으로, 전해질 용액 내부의 침전 상태를 육안으로 관찰하였다. 모든 샘플은 공기 중의 산소와의 접촉을 방지하기 위해 밀봉되었다. 밀봉 전에 전해질 용액내의 산소는 질소 퍼징을 통해 제거하였다.

### 2.3 전기화학적 분석

순환전압전류법(CV, Cyclic Voltammetry, 이하 CV)은 3개의 전극을 이용한 PGSTAT 302 전기화학적 워크스테이션을 사용하여 수행하였다. 흑연로드, Pt wire 및 Ag/AgCl 전극(BASI, 3M KCl 용액을 이용한 RE-5B)를 각각 작동전극, 상대전극, 기준전극으로 사용하였다. 전기화학적 속도측정을 위해 제조된 전해질을 사용하였다. Randles-Sevcik 플롯에서, 스캔속도는 0.2와 1.6 사이의 전위 범위에서 5~200 mV/s로 적용하였다. 전기화학적 임피던스 분광법(EIS, Electrochemical Impedance Spectroscopy, 이하 EIS)은 IVIUMSTAT로  $10^{-1}\text{HZ} \sim 10^6\text{HZ}$ 의 주파수 범위에서 개방회로 전위에서 수행하였다.

### 2.4 VRFB 셀 시험

전해질의 성능은  $5 \times 5\text{cm}^2$ 의 활성 전극 면적을 갖는 단일 전지를 사용하여 charge-discharge cycles를 통해 시험하였다. 단일 전지는 멤브레인으로서 Nafion 212, 흑연 펠트 (Nippon carbon, GF-5) 전극 및 두 개의 흑연 양극판으로 구성되었다. 각 양극판은 베이클라이트 플라스틱으로 만들어진 엔드 플레이트에 내장된 황동

집전체와 접촉하였다. 조립하기 전에, 멤브레인을  $\text{H}_2\text{O}_2$ 로 전처리하였다. 흑연 펠트 전극을 셀에 조립할 때 3 mm로 압축하였다. 전해질의 양면 부피는 각각 50 mL이고, 이들은 전기 펌프에 의해 60 mL/min의 유속으로 전지를 통해 순환되었다. 충전 사이클의 차단 전압 윈도우는 0.8 V 내지 1.7 V로 설정되었고, 인가 전류 밀도는  $40\text{mA}/\text{cm}^2$ 로 고정되었다. 충·방전은 10사이클 동안 진행하였으며, 전지의 전류효율(CE), 전압효율(VE), 에너지효율(EE)은 Eq. (4)~(6)을 이용하여 산출하였다.

$$CE(\%) = \frac{\text{Discharge Capacity (Ah)}}{\text{Charge Capacity (Ah)}} \times 100 \quad (4)$$

$$VE(\%) = \frac{\text{Average Discharge Voltage (V)}}{\text{Average Charge Voltage (V)}} \times 100 \quad (5)$$

$$EE(\%) = \frac{\text{Discharge Energy (Wh)}}{\text{Charge Energy (Wh)}} \times 100 \quad (6)$$

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 SPD 및 SPD/FA 시스템을 사용한 전해질의 안정성

잘 알려진 바와 같이, 바나듐 전해질의 안정성은 특히 고온에서  $\text{V}^{5+}$  이온에 대해 열적안정성이 약하다. 그래서 각 온도변화에 대한 열적안정성을 나타내기 위해  $\text{V}^{5+}$  전해질,  $\text{V}^{5+}/\text{SPD}$  전해질 및  $\text{V}^{5+}/\text{SPD}/\text{FA}$  전해질을 핫플레이트에 올려놓고 온도는  $60^\circ\text{C}$ 로 고정하였다. Fig. 1에서 보여준 것과 같이  $\text{V}^{5+}$  전해질은 오랫동안 안정성을 유지할 수 없었지만 SPD 및 SPD/FA 첨가제가 들어간 전해질은 침전물 형성이 늦게 나타나 안정성 시간이 늘어난 것을 알 수 있었다.

더욱이, SPD/FA 첨가제를 넣어 만든  $\text{V}^{5+}$  전해질은 28일 이상이 되어도 침전물 형성이 없었다. SPD/FA 첨가제를 넣은 전해액과 달리, SPD 첨가제만 넣은 전해액은 28일 후에  $\text{V}_2\text{O}_5$ 의 침전물이 형성된 것을 관찰할 수 있었다. SPD를 사용하는 첨가제 시스템은 이미 문헌으로부터 보고되어 있으나, FA의 경우, 직접 전환으로 전해질  $\text{V}^{3.5+}$ 를 생산하기 위한 환원제로서만 사용되었지만, 안정성제로서의 그 효과는 알려져 있지 않다. 또한, 둘 이상의 첨가제를 사용하는 혼합 안정화제 시스템에 대한 문헌은 거의 없다. 상술한 바와 같이, 혼합 안정제 시스템을 통해 기존의 안정화 효과가 크게 증가됨을 알 수 있었다. 그 이유는 첨가제인 FA가 두 개의 수소이온 ( $\text{H}^+$ )

을 내놓으면서 전극주변에서 반응이 활성화되고 전압효율이 향상되면서 전해질 표면에서 발생하는 편극저항이 감소되고 또한 carboxyl 기능을 갖고 있어 결정화 속도를 제어하므로 석출을 방지하여 안정성을 향상시키는 것으로 판단된다.

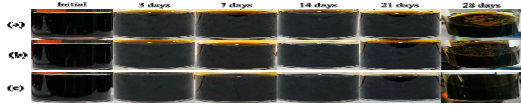


Fig. 1. Stability test images of V<sup>5+</sup> electrolyte (a) pristine (b) with SPD system (c) with SPD/FA system

### 3.2 전해질의 전기화학적 성능

최적화된 안정제 시스템의 농도를 찾기 위해, 0.01, 0.05, 및 0.10 M의 FA를 각각 0.05 M SPD 시스템에 분산시키고, 최적의 농도를 찾기 위해 전기화학적 성능 실험을 행하였다. Fig. 2(a)에 도시된 바와 같이 최상의 전기화학적 성능을 나타내는 샘플을 통해 최적화를 수행하였다. 이 결과로부터, 0.05 M FA 안정제를 사용하고 0.05 M SPD를 갖는 전해질에서 가장 높은 전류 피크가 얻어졌다. Fig. 2(b)에 도시된 나이퀴스트 플롯으로부터, 전하 전달 저항에 대응하는 반원의 크기가 V<sup>5+</sup>만 사용된 것에 비해 감소하는 것을 알 수 있었다[10]. 이는 최적의 FA 농도에서 전기화학적 성능을 향상하므로 전하 전달 저항의 감소에 기인한다고 추론할 수 있다. 그리고 Table 1에 전류 피크가 증가함에 따라, 반응에 참여하는 바나듐 이온이 완전히 가역적이라는 것을 알 수 있었다. 다른 농도의 SPD시스템 및 SPD/FA 시스템의 효과를 더 보기 위하여 EIS 테스트를 통해 전기 화학적 저항을 측정하였다.

전기화학 반응의 동역학에 대한 각 안정제 시스템의 효과를 보기 위해, 스캔 속도를 다르게 하여 CV 곡선을 Fig. 3(a)-(c)에 나타내었다. V<sup>4+</sup> 및 V<sup>5+</sup>의 확산 계수는 Randles-Sevcik 방정식에 의해 계산할 수 있었고, Fig. 3(d)에 각 기울기에 의해 제시되었다.

Fig. 3(d)에서 보듯이, 기울기가 커질수록 전하이동속도가 빠르게 진행되는 것을 알 수 있으며 V<sup>5+</sup>만 사용한 전해질과 V<sup>5+</sup>/SPD 전해질 사이의 산화 반응에 대한 기울기의 차이는 크게 변하지 않았지만 V<sup>5+</sup>/SPD/FA 전해질은 V<sup>5+</sup>만 사용한 전해질과 V<sup>5+</sup>/SPD 전해질에 비해 산화 반응 속도가 증가했음을 보여주었다.

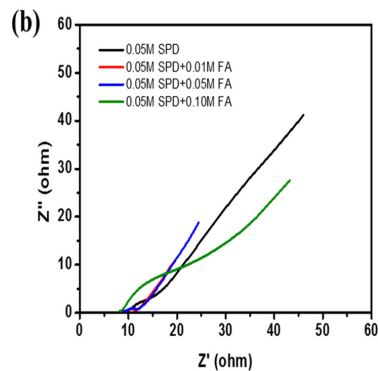
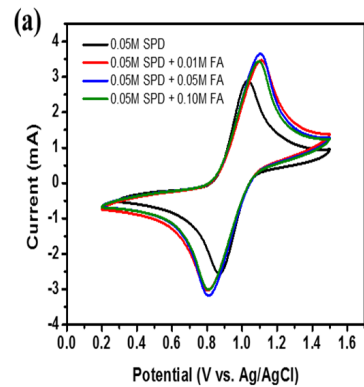


Fig. 2. The electrochemical performances of V<sup>4+</sup> electrolyte (a) cyclic voltammogram with different concentration of FA at scan rate of 20 mV/s (b) electrochemical impedance spectroscopy with different concentration of FA

또한, 환원 반응의 경우, V<sup>5+</sup>/SPD/FA 시스템 전해질의 확산 속도가 V<sup>5+</sup>만 사용한 전해질과 V<sup>5+</sup>/SPD 전해질의 확산 속도에 비해 증가함을 알 수 있었다. 이러한 결과를 통해 V<sup>5+</sup>/SPD/FA 시스템의 전해질의 확산계수는 전하 전달 저항이 감소함에 따라 증가하며, 전기화학적 성능이 향상되었음을 알 수 있었다.

Table 1에서는 산화피크와 환원피크에 따른 전류와 전위의 변화를 나타내었다. SPD와 SPD/FA를 첨가한 경우 ΔE값이 첨가제를 첨가하지 않은 전해액에 비해 작은 값을 가지며 이는 전자이동이 빠를수록 이 값은 작아지고 전극과 전해액사이의 반응이 가역적임을 의미한다. 또한 IP<sub>A</sub>/ IP<sub>C</sub> 는 전해액의 가역성을 결정하는 인자로 이 값이 1에 가까울수록 전극에서의 가역성 반응이 일어남을 알 수 있었다.

Table 1. The electrochemical parameters obtained from the cyclic voltammetry and the electrochemical impedance spectra

Sample	Scan rate @ 20 mV/s			
	IP <sub>C</sub>	IP <sub>A</sub>	IP <sub>A</sub> /IP <sub>C</sub>	ΔE
	(mA/cm <sup>2</sup> )			(V)
Pristine	2.44	-2.05	0.84	0.223
SPD	2.35	-2.07	0.88	0.221
SPD/FA	2.43	-2.17	0.90	0.221

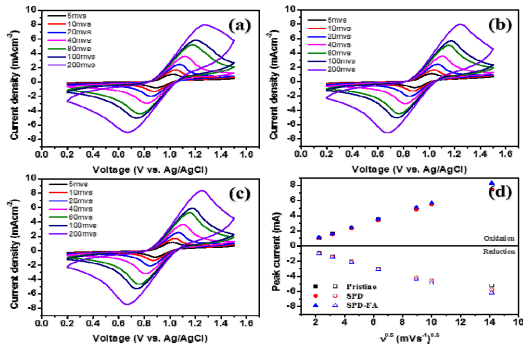


Fig. 3. The electrochemical kinetics of the electrolyte (a) pristine (b) 0.05 M SPD (c) 0.05 M SPD + 0.05 M FA and (d) plots of the redox peak current density versus the square root of the scan rate (slope corresponding to diffusion coefficient)

### 3.3 VRFB의 단일 셀 성능

40 mA/cm<sup>2</sup>에서 각 전해질을 10사이클 돌려서 VRFB의 사이클 능력을 시험하였다. 그리고 에너지 효율 (EE), 전압 효율(VE) 및 전류 효율(CE)을 Fig. 4에 나타 내었다. 무엇보다도 V<sup>5+</sup>/SPD 전해질과 V<sup>5+</sup>/SPD/FA 전해질은 V<sup>5+</sup> 대비 전류효율(CE) 및 전압효율(VE)의 측면 에서 크게 향상되었음을 알 수 있었다. 전류효율(CE)는 각각 V<sup>5+</sup>, V<sup>5+</sup>/SPD 및 V<sup>5+</sup>/SPD/FA 전해질에 따라 91.5%, 96.5% 및 97.7% 순으로 증가하였다. 추가적으로, 전압 효율(VE)의 경우, SPD를 함유하는 전해질은 약 84%에 가까운 평균 효율을 보였으며, 76.5%를 나타내는 V<sup>5+</sup>에 비해 약9% 향상을 나타내었다. 전압효율의 증가는 전극 과 전해질의 계면에서 확산속도가 증가함에 따라 전극표 면에서 발생하는 편극저항이 감소하고 전지 구동시 충방 전에서 발생하는 전압손실을 줄여주는 것으로 판단된다. 이러한 이유로 평균 에너지 효율은 전해질마다 각각 70.1%, 81.0% 및 81.9% 씩 증가하였다. 세 가지 전해질 을 사용한 단일 셀 VRFB의 결과를 Table 2에 제시하였다.

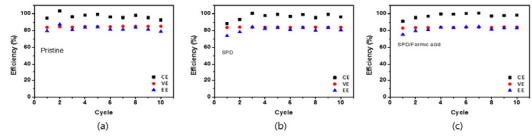


Fig. 4. The results of the CE, VE and EE with each system (a) pristine, (b) SPD, and (c) SPD/FA through single cell of VRFB

Table 2. The average efficiencies of single cell VRFB with different stabilizer system.

Sample	coulombic efficiency	Voltage efficiency	Energy efficiency
	(%)	(%)	(%)
Pristine	91.5	76.5	70.1
SPD	96.5	83.8	81.0
SPD/FA	97.7	83.9	81.9

## 4. 결론

본 연구에서는 열적 안정성 확보를 위해 기존의 우수 한 열적안정성을 가진 SPD와 carboxylic acid 기능을 갖는 화합물 중 간단한 구조를 갖고면서 환원력을 통 해 석출을 방지할 수 있는 FA와 혼합하여 우수한 석출 안정성을 갖는 전해액 제조에 대한 특성을 조사하여 다 음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2종의 다른 안정제를 비교한 결과 안정제를 넣지 않은 전해액의 경우 15일 경과 후 전해액의 내부 에 석출이 일어나기 시작하며 25일 경과 한 후 보 관병 하단에 석출이 육안으로 보일 정도로 진행되 었다. 그러나 SPD를 첨가하여 제조한 전해액의 경 우 20일까지 전해액 내부에 석출이 시작되지 않았 으며 28일 경과 후 전해액 내부에 석출이 시작되 었고 SPD/FA를 첨가한 전해액의 경우에는 28일 이 경과한 후에도 석출이 시작되지 않았으며 60℃ 고온에서도 안정적으로 전해액 상태를 유지 하였 다.
2. SPD/FA가 혼합된 전해액은 수용액상태에서 첨가 제인 FA가 두 개의 수소이온(H<sup>+</sup>)을 내놓으면서 전 극 주변에서 반응을 활성화시키므로 전압효율이 향상되었다. 또한 carboxyl 기능기를 갖고 있어 결정화속도를 제어하므로 석출을 방지하여 안정성 을 향상시키는 것으로 판단된다.

3. CV특성은 첨가제 SPD와 SPD/FA가 첨가된 전해액에서  $I_{PA}/I_{PC}$  값이 1에 가까울수록 가역반응에 가깝고  $\Delta E$ 값이 커짐으로서 가역성이 감소함을 알 수 있었다.
4. SPD와 SPD/FA의 안정제를 도입한 전해액의 전지 성능평가를 진행한 결과 전류효율측면에서 증가는 크지 않으나 전압효율이 향상됨에 따라 전지의 성능이 증가함을 보였다. 전압효율의 증가는 전기화학분석을 통해 평가한 결과, 전극과 전해질의 계면에서 확산속도가 증가함에 따라 전극표면에서 발생하는 편극저항이 감소하여 전지 구동시 충방전에서 발생하는 전압손실을 줄여주는 것으로 판단된다.

the positive electrolyte for all - vanadium redox flow battery, *Electrochim Acta*, Vol. 78, No-, pp.475-482, 2012.

DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.06.065>

- [9] Gang Wang, Jinwei Chen, Xueqin Wang, Jing Tian, Hong Kang, Xuejing, Activation of carbon electrodes for all-vanadium redox flow battery, *Progress in chemistry*, Vol.27, No.10, pp1343-1355, 2015.  
<https://www.researchgate.net/publication/285815809>
- [10] Gang Wang, Jinwei Chen, Xueqin Wang, Jing Tian, Hong Kang, Xuejing, Study on stabilities and electrochemical behavior of V(V) electrolyte with acid for vanadium redox flow battery, *Journal of energy chemistry*, Vol.23, No.1, pp73-81, 2014.  
DOI: [https://doi.org/10.1016/s2095-4956\(14\)60120-0](https://doi.org/10.1016/s2095-4956(14)60120-0)

## References

- [1] A. Parasuraman, T.M. Lim, C. Menictas, M. Skyllas-Kazacos, Review of materials research and development for vanadium redox flow battery applications, *Electrochim. Acta*, Vol.101, pp.27-40, 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2012.09.067>
- [2] M. Skyllas-Kazacos, M.H. Chakrabarti, S.A. Hajimolana, F.S. Mjalli, M. Sallem, Progress in flow battery research and development, *J. Electrochem. Soc.* Vol.158, No.8, pp.55-79, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1149/1.3599565>
- [3] J. Xi, Z. Wu, X. Teng, Y. Zhao, L. Chen, X. Qiu, Self-assembled polyelectrolyte multilayer modified Nafion membrane with suppressed vanadium ion crossover for vanadium redox flow batteries, *J. Mater. Chem.* Vol.18, No.11, pp.1232-1238, 2008.  
DOI: <https://doi.org/10.1039/B718526j>
- [4] P. Leung, X. Li, C. Leon, L. Berlouis, C.T.J. Low, F.C. Walsh, Progress in redox flow batteries, remaining challenges and their applications in energy storage, *RSC Adv.* Vol.2, No.27, pp.2046-2069, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1039/c2ra21342g>
- [5] C.S Jin, J.M. Sim, Electrolyte additive for vanadium redox flow battery, KR patent, 10-1677107.  
<https://patents.google.com/patent/KR101677107B1/en>
- [6] Kazacos, R.G. Robins, Improved perfluorinated membranes and improved electrolytes for redox cell and batteries, EP Patent, 1905117A1.  
<https://patents.google.com/patent/EP1905117A1/en>
- [7] Li S, Huang K L, Liu S Q, Fang D, Wu X W, Lu D, Wu T, Effect of organic on positive electrolyte for vanadium redox battery, *Electrochim Acta*, 2011, Vol.56, No.16, pp.5483-5487, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.03.048>
- [8] Wu X J, Liu S Q, Wang N F, Peng S, He Z, Influence of organic additives on electrochemical properties of

김 용 철(Yong-Cheol Kim)

[중신회원]



- 2005년 2월 : 연세대학교 대학원 도시계획전공 (공학석사)
- 2013년 3월 : 북해도대학 대학원 도시방재학전공 (공학박사)
- 2013년 5월 ~ 2013년 12월 : 국립재난안전연구원 책임연구원
- 2020년 3월 ~ 현재 : 호남대학교 소방행정학과 교수

<관심분야>

건축-도시방재, 재난안전, 소방방재(화재피난)

강 형 선(Hyung-Sun Kang)

[중신회원]



- 1995년 2월 : 조선대학교 대학원 기계공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 전남대학교 대학원 기계공학과 (공학박사)
- 1991년 10월 ~ 2000년 7월 : 화천기공주식회사 책임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 조선이공대학교 기계설계과 교수

<관심분야>

기계시스템설계, FEM(기계구조, 충돌)



강 웅 일(Ung-Il Kang)

[정회원]



- 1991년 2월 : 전남대학교 대학원 화학공학과 (공학석사)
- 2001년 2월 : 전남대학교 대학원 화학공학과 (공학박사)
- 2014년 2월 ~ 현재 : 셀텍(벤처기업) 대표
- 2015년 3월 ~ 현재 : 호남대학교 소방행정학과 교수

〈관심분야〉

신재생에너지, 연료전지, 재난안전, 소방방재