

VRFB용 바나듐 전해액 최적 공정개발

손정선¹, 노선균^{2*}

¹조선대학교 자유전공학부, ²호남대학교 소방행정학과

Optimal Process Development of Vanadium Electrolyte for VRFB

Jeong Sun Sohn¹, Seon-Gyun Rho^{2*}

¹Division of Undeclared Majors, Chosun University

²Department of Fire Service Administration, Honam University

요약 온실가스 감축과 부족한 전력난 해소 방법 중 하나는 에너지 저장장치를 이용하여 야간에 전기를 저장한 후 전력 피크시간에 전기를 사용하면 전력난과 환경문제를 동시에 해결할 수 있는 가장 효과적인 방법 중 하나이다. 바나듐 레독스 흐름 전지(VRFB)는 리튬전지에 비해 폭발의 위험성도 없으면서 용량설계의 유연성을 갖춘 대용량 에너지저장장치이다. 그러나 값비싼 전해질 가격 등으로 현재 실용화에 많은 걸림돌로 작용하고 있다. 따라서 본 연구에서는 폭발의 위험성이 없고 대용량인 바나듐 레독스 흐름 전지에 사용되는 전해질의 효율향상을 위한 최적 공정을 개발하는 연구를 수행하였다. 일반적으로 제조되는 방법에 지지전해질인 황산용액의 첨가 방법을 변형하여 전해질 용액을 제조하였다. 연구결과 전해액 제조 시 초기 황산농도를 1M을 사용하여 제조한 후 최종 황산용액을 2M 첨가하는 공정으로 제조하였을 때 에너지효율이 4.6% 증가함을 알 수 있었다.

Abstract One of the ways to reduce greenhouse gas and tackle deficits in electricity generation is to use energy storage devices to store electric power at night when demand is low for subsequent use during peak demand hours. A vanadium redox flow battery (VRFB) is a large-capacity energy storage system offering flexibility in capacity design and no risk of explosion thus comparing favorably with lithium batteries. However, the high price of the electrolyte used presents obstacles to commercialization. Therefore, this study examines an optimal process for producing the electrolyte solution used in the VRFB. The electrolyte solution was prepared by changing the method of addition of sulfuric acid solution by supplementing the usual production process. The results of this study showed that this technique increased the energy efficiency by 4.6% when the initial sulfuric acid concentration was prepared using 1M and then the final sulfuric acid solution added was 2M.

Keywords : VRFB, Vanadium, Electrolyte Solution, Vanadium Concentration, Energy Storage

1. 서론

현대사회에서 화석연료의 사용은 기후 온난화와 화석 연료의 고갈 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 이런 이유로 온실가스의 감축과 화석연료의 사용 자제를 위하여

화석연료를 대신하는 에너지원을 개발하는 많은 연구가 진행 중에 있다. 그중 대표적인 에너지원이 태양에너지, 풍력, 수력, 원자력 에너지이다. 그러나 전기에너지는 생산량에 비해 저장에 많은 한계점을 노출하고 있다. 이를 보완하기 위하여 에너지저장장치가 등장하였다. 현재 전

본 논문은 본 과제(결과물)는 2020년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업과 2018년도 호남대학교 학술연구비 지원을 받아 수행되었음.

*Corresponding Author : Seon-Gyun Rho(Honam Univ.)

email: skno@honam.ac.kr

Received June 4, 2021

Revised July 9, 2021

Accepted October 1, 2021

Published October 31, 2021

기에너지 생산은 전력 예비용으로 항상 더 많은 양의 전기를 생산하는 문제점이 있다. 1년 중 전기수요예측을 넘어서는 날은 1~2일에 불과하지만 이로 인해 화력발전소를 건설해야만 한다. 이런 문제를 해결하는 방법이 에너지저장장치의 구축이다. 500MW 에너지저장장치를 구축하면 보령화력발전소 1곳을 대신할 수 있으며 전력통계정보시스템에서 발표한 2019년 평균 무연탄의 전력단가(67.2원/kwh)를 환산하면 연간 약 2900억원을 절감할 수 있고 이에 해당하는 대기오염 양을 줄일 수 있다.

전기에너지 저장장치 중 리튬전지는 대용량의 전기를 저장하는 데 있어 폭발 위험성으로 인한 한계점을 드러내고 있으며, 납축전지는 대용량의 전기를 저장하는 데 단점을 드러내고 있다. 이런 이유들로 인해 대용량의 전기에너지를 저장할 수 있으면서 동시에 폭발로부터 안전한 에너지저장장치의 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다[1-5]. 그 중 하나가 레독스 흐름전지이다. 레독스 흐름전지는 특유의 안정성과 용량설계 유연성 등의 장점으로 대용량 전기에너지 저장장치에 매우 적합하며, 용량설계를 통해 다양한 규모와 분야에 적용 가능할 뿐만 아니라 사용되는 소재들은 재 사용률이 높아 친환경적이다. 특히 많은 공간을 차지하기 때문에 현재까지는 설치 공간에 제약이 없는 편인 대용량 저장장치로 한정되어 사용되고 있다. 최근 할로겐족 원소와 금속 물질을 레독스 커플로 하는 전해액에 대한 많은 연구들이 해외 및 국내에서도 많이 진행되고 있는 실정이다[6-11]. 레독스 흐름전지는 다양한 활물질이 적용 가능하다는 장점을 가지고 있으며 가장 널리 이용되는 활물질중 하나가 바나듐이다. 바나듐은 자연계에서 V(II)부터 V(V)까지 다양한 전자가수 상태로 존재하여 레독스 흐름전지의 음극 및 양극 양쪽 모두에 적용 가능해 활물질의 투과로 인한 전해액의 오염으로부터 영향을 적게 받는 편이며 성능 또한 준수한 편이지만 에너지밀도가 낮은 단점이 있다. 바나듐 전해액의 경우 원자가 밸런스가 균형을 잃을 경우 양극과 음극의 전해액을 혼합하여 다시 사용할 수 있다. 이는 전해액을 영원히 사용할 수 있다는 것을 의미하며 폐기되는 전해액은 발생하지 않기 때문에 매우 친환경적이라 할 수 있다. 그러나 이런 많은 장점에도 불구하고 바나듐 전해액은 스택에서 차지하는 비용중 50% 이상을 차지하고 있는 매우 값비싸고 핵심적인 물질이다. 바나듐 전해질 용액은 안전성을 가지지만 농도의 한계로 인해 낮은 에너지효율을 가지는 한계를 가지고 있으므로 VRFB의 상용화를 추진하기 위하여는 전해액의 에너지 밀도를 향상시키고, 전해질용액을 저가화하기 위한 공정

연구는 매우 필수적이다. 주로 전해액 제조에 사용되는 $VOSO_4(IV)$ 의 경우에는 고가로 거래되고 있어 실험용으로만 사용되고 있다. 이런 이유로 저가화를 위하여 상용화되고 있는 전해액은 $V_2O_5(V)$ 를 사용하여 제조하고 있다.

바나듐 2, 3, 4가 전해액은 열적안정성이 우수한 반면 5가 전해액은 열에 취약하여 높은 온도에서 석출되는 단점이 있다. 또한 낮은 온도에서는 황산에 대한 용해도가 낮아지는 문제점을 내포하고 있어 많은 연구들은 열적안정성을 높이기 위한 연구들을 진행하고 있는 실정이다 [12, 13].

$V_2O_5(V)$ 는 용해도가 낮아 첨가제를 사용하여 제조하고 있으며, 최적의 제조공정 조건을 명확히 확립할 필요가 있다. 최근 연구들에서는 V_2O_5 로부터 전기분해장치를 이용하여 바나듐 3.5가를 제조하여 사용하거나 옥살산을 이용하여 V_2O_5 를 직접 용해하여 사용하는 공정들이 상업화 되어있다[14]. 또한 바나듐 4가로부터 촉매반응을 이용하여 3.5가의 바나듐 전해액을 생산하는 공정을 개발하는 기술도 개발되고 있다[15]. 그러나 전해액 제조의 출발물질은 가격적으로 저렴한 V_2O_5 이며, 바나듐 5가로부터 바나듐 4가의 최적 공정조건 확립은 필수적이다. 이런 이유들로 인해 본 연구는 VRFB에 사용되는 전해액 제조를 위해 V_2O_5 로부터 출발하여 바나듐 4가 전해질 용액을 만드는 공정을 최적화하는 연구를 수행하였다.

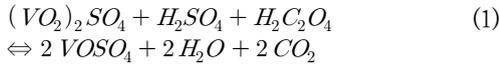
2. 이론

바나듐 전해액은 2~5가로 존재한다. 스택의 충방전에 의해 양극은 4가와 5가로 존재하며 음극은 3가와 2가로 존재한다. 초기 충전은 양극에 4가와 음극에 3가 전해질 용액을 충전하여 사용한다. 그러나 전해질용액의 유통상 불편함을 해소하기 위해 두 전해질을 혼합한 3.5가 전해질을 양극과 음극에 등량으로 사용한다.

Fig. 1은 바나듐 전해액을 제조하는 일반적인 제조 메카니즘을 설명한 그림이다. 출발물질을 $VOSO_4$ 나 V_2O_5 를 사용하여 바나듐 전해액을 제조할 수 있음을 보여주고 있다. $VOSO_4$ 인 경우 V_2O_5 에 비해 4배 이상 고가여서 $VOSO_4$ 로부터 바나듐 전해액을 제조하여 상업적으로 사용하는 것은 불가능하다. 때문에 연구목적으로 한정하여 $VOSO_4$ 를 사용하고 있는 실정이다.

V_2O_5 로부터 제조하는 세부적인 사항은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 V_2O_5 로부터 환원제를 사용하여 바나듐 4

가 전해질 용액을 제조한 후 충전을 통해 음극에서 3가와 양극에서 5가 전해질을 제조한다. 제조된 음극의 3가와 환원된 4가를 혼합하여 3.5가의 전해질 용액을 만들면 최종 전해질 용액이 제조된다. 양극에 존재하는 5가 전해질 용액은 다시 화학적 환원제를 이용하여 4가 전해질을 만든다. V_2O_5 는 지지전해질인 황산용액에 매우 적은 양만이 용해된다. 이런 특성으로 인하여 대부분의 용해는 바나듐 5가를 만들지 못하고 환원제를 사용하여 바로 바나듐 4가 전해질로 환원시켜 사용한다. Eq. (1)은 옥살산을 사용한 환원 조건을 나타낸 환원식이다.



오산화 바나듐과 옥살산의 양은 등몰을 사용하여 반응시키면 4가의 바나듐 전해질 용액을 얻을 수 있다. 또한 VRFB 사용 시 전해액은 양극과 음극에 각각 같은 양을 사용하여 충방전 된다. 이때 정확한 원자기를 제조하기 위해서는 혼합된 바나듐의 정확한 농도가 필요하게 되며 이를 위하여 UV를 사용하여 농도를 분석한다. 특히 N. M. Choi 등은 바나듐 이온 농도를 측정하는 가장 정확한 방법이 UV이며 바나듐 2가의 산화로 인한 농도변화를 UV를 이용하여 측정하였다[16].

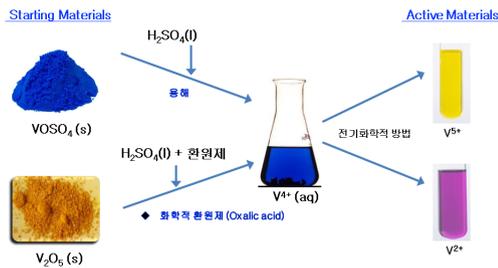


Fig. 1. Vanadium electrolyte solution manufacturing mechanism.

Eq. (2)와 (3)은 양극과 음극 전해액의 전극반응을 나타낸 식이다. 두전극의 차이인 기전력은 1.26V 로서 상용화 가능한 기전력을 보여주고 있다.

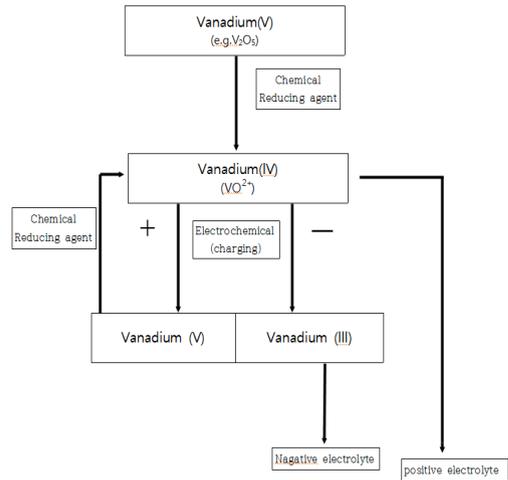
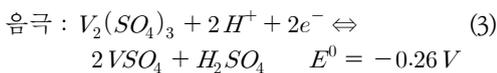
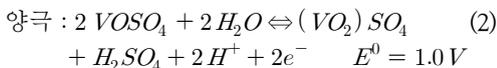


Fig. 2. Mechanism of vanadium electrolyte solution preparation from V_2O_5 material.

3. 실험

3.1 바나듐 전해액의 농도 분석

전해질 용액의 운반이나 보관 등을 위하여 정확한 3.5가를 유지하기 위하여는 농도 분석이 필수적이다. 바나듐 전해질 3가와 4가를 등몰로 혼합하면 3.5가의 전해질 용액이 생산된다. 바나듐 용액의 농도분석 실험에서 원료 물질 5가는 Daejung Chemicals & Metals CO.의 V_2O_5 (99%)를 사용하고 4가는 Shinko Chemical CO.(LOT. No. 30012601) $VOSO_4 \cdot xH_2O$ (71.1%)를 사용하여 시료를 제조하였다. 이때 사용된 지지전해질인 황산(98.08%)은 Daejung Chemicals & Metals CO.로부터 구입하여 사용하였다. 3가 전해질용액은 원료물질이 없다. 때문에 4가 전해질 용액을 양극과 음극에 등량을 채운 후 충전하여 음극에서 3가 양극에서 5가가 제조된 전해액에서 음극쪽 전해액을 채취하여 사용하였다. 농도 분석에 사용된 UV는 Shimadzu UV-2401PC를 사용하였다. UV 측정은 Fig. 3에 보인바와 같이 300nm ~ 800nm 파장범위와 바나듐 농도 0~0.3M의 범위에서 흡광도를 각각 측정하여 농도를 분석하였다.

3.2 바나듐 기반의 전해액 최적 생산 공정 개발

바나듐 전해질용액의 최적생산공정은 전체적인 스텝의 효율과 생산단가를 결정하는 매우 필수적인 공정기술이다. 본 연구에서는 지지전해질인 황산의 초기 용해능

도를 달리하여 용해시킨 후 최종 3M을 유지하기 위한 공정을 개발하였다. 초기 1.8M 바나듐 4가 1L 제조방법은 다음과 같다. VOSO₄xH₂O 파우더 412.5g을 황산 168.3ml에 혼합 후 최종 1L가 될 때까지 물을 첨가하여 1일 이상 용해시키면 1.8M VOSO₄ + 3M H₂SO₄인 전해질 용액이 제조된다. 이때 지지전해질인 황산의 농도는 우리가 목표로 하는 3M 공정이다. 그러나 우리는 초기 3M 황산에 바나듐을 용해시키는 대신 초기 황산의 양을 달리하여 제조하였다. 초기 제조공정에서 황산의 양은 1M, 2M, 3M로 바꾸면서 반복 실험하였다. 최종 3M의 황산 농도를 유지하기 위하여 초기제조에 사용한 농도에 각각 2M(112.2ml), 1M(56.1ml), 0M의 황산용액을 첨가하여 최종 완성된 3M 황산의 바나듐 4가 전해질 용액을 제조하는 공정을 완성 하였다. 이렇게 제조된 4가 전해질용액은 충방전기를 이용하여 음극에 3가와 양극에 5가 전해질을 각각 제조한 뒤 3가와 4가 전해질 용액을 등량 혼합하여 3.5가 전해질 용액을 제조하였다.

3.3 전해액의 효율 및 안전성 확보 연구

제조된 바나듐 전해액의 특성 파악은 BioLogic P-150 CV(Cyclic Voltammetry)를 이용하여 전기적 특성 분석을 실험을 하였다. 최종 생산된 전해액은 CV 특성분석을 통해 전해액의 전기적 특성을 파악한다. CV를 측정할 때 Working Electrode는 glassy carbon전극을 사용하였으며, Reference Electrode은 Ag/AgCl 전극을 사용하였고, Counter Electrode은 Pt전극을 사용하여 측정 하였다. 이때 전극면적은 0.07 cm²이고 scan rate는 20mv/sec 이었으며 OCV은 -1.3 ~1.9V 범위에서 실험하였다.

충방전은 Farnetech의 Battery Testing System(5V,6A)을 사용하였다. 그러나 우리가 충방전을 위한 전해액은 3.5가 이므로 4가로부터 양극에서 생성된 5가 전해액을 환원제를 사용하여 4가 전해액으로 환원하여 음극의 3가 전해액과 등량 혼합하여 사용하였다. 이때 사용한 환원제는 Sigma Chemical CO.의 Glycerol(99.8%)을 첨가하여 사용하였다. 열적안전성을 위하여 사용되고 있는 Glycerol의 경우 60℃ 이상의 높은 온도에서는 환원제의 역할을 하기도 한다. 최종 생산된 전해액은 양극과 음극에 각각 50ml 충전하여 충방전 실험을 통해 초기 농도를 달리해 제조된 전해액의 효율들을 측정하였다.

Coulmbic efficiency(CE), Voltage efficiency(VE), Energy efficiency(EE)은 Eq. (4), (5), (6)의 식으로 구

할 수 있다. 쿨롱효율은 충전전류 대비 방전 전류로 측정할 수 있다. 또한 에너지효율은 쿨롱효율과 전압효율을 곱한 값으로 측정된다.

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

$$VE(\%) = \frac{\text{Average discharge voltage (V)}}{\text{Average charge voltage (V)}} \times 100\% \quad (5)$$

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

4. 결과 및 고찰

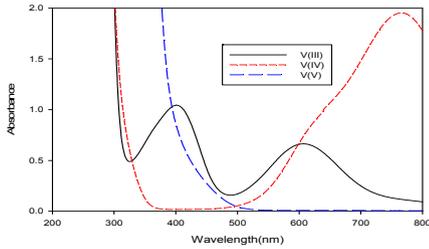
4.1 바나듐 전해액의 UV 특성 및 농도 분석

Fig. 3의 (a)는 바나듐 3, 4, 5가 전해액의 UV스펙트럼의 특성을 나타낸 그래프며 (b)는 흡광도 값에 대한 바나듐 농도를 선형화한 그래프이다. 바나듐 3가 전해질용액은 400nm와 600nm에서 피크가 나타남을 알 수 있다. 일반적으로 바나듐 3가 전해액 생산은 4가 전해액으로부터 충방전에 의해 제조되므로 일반적으로 바나듐 3가는 4가 전해액과 혼합으로 존재한다. 이것은 바나듐 3가 전해액을 분석하기 위해서는 4가 전해액의 UV 스펙트럼의 특성을 고려하여야 하며 두 성분이 혼합되어 존재하므로 4가 전해액의 피크 스펙트럼이 나타나지 않은 400nm에서 3가를 분석하는 것이 매우 타당하다.

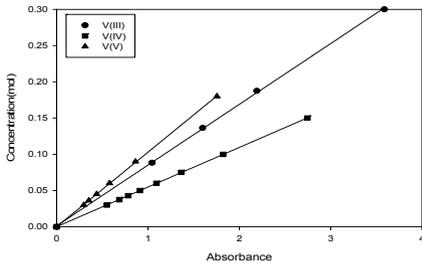
바나듐 4가 전해질 용액은 765nm에서 최고피크를 보이며 400nm 이하와 500nm 이상에서 급격한 흡광도 증가를 보여주고 있다. 이것은 400~ 500nm 이외의 범위에서는 바나듐 4가 전해질의 농도 측정을 위해서는 많은 양을 희석해야 측정할 수 있음을 알 수 있다. 이 결과는 바나듐 3가와 4가 전해질 용액이 혼합되어 있을 경우 바나듐 3가 전해질 용액은 쉽게 농도 분석이 가능하지만 바나듐 4가 전해질 용액은 3가의 765nm에서 피크 만큼의 흡광도 값을 보정해 주어야 농도 분석이 가능함을 알 수 있다.

바나듐 5가 전해질 용액은 약 500nm 이하의 파장에서는 매우 적은 양의 전해질도 매우 큰 흡광도 값을 가지므로 바나듐 5가 전해질의 농도는 400~500nm에서 측정하는 것이 유리함을 알 수 있다. 또한 희석을 통해 측정 가능한 흡광도 값의 범위에서 분석하여야 함을 알 수 있다. 충방전 실험에 의해 완전한 충방전이 일어나지 않

으면 바나듐 5가와 4가가 혼재되어 나타난다. 실제 완전한 충방전은 바나듐 5가 전해액에서 석출현상이 나타나 효율저하의 원인이 된다. 때문에 실제 운전에서는 약 80% 정도의 충방전만을 사용하여 운전한다. 바나듐 5가의 분석은 바나듐 4가의 그래프와 비교하여 분석 파장을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 400nm 영역에서 바나듐 5가 전해질 용액을 분석하여 적용하였다.



(a) UV absorbance versus wavelength



(b) Vanadium concentration versus uv absorbance

Fig. 3. UV spectrum characteristics and correlation corresponding to the concentration of Vanadium electrolyte solution.

4.2 제조 공정 변화에 따른 충방전 효율

Fig. 4는 바나듐 4가 전해질용액의 CV 곡선을 나타낸 그래프이다. 원료물질인 $VOSO_4$ 와 V_2O_5 로부터 각각 제조된 전해질 용액의 전기적 특성이 거의 비슷함을 알 수 있었다. 이 결과는 저가의 V_2O_5 로부터 전해질 용액을 제조할 수 있음을 보여준다.

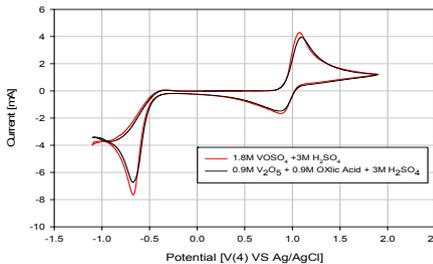
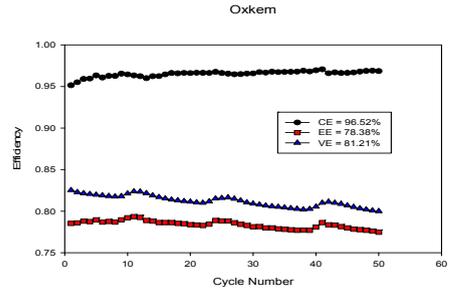
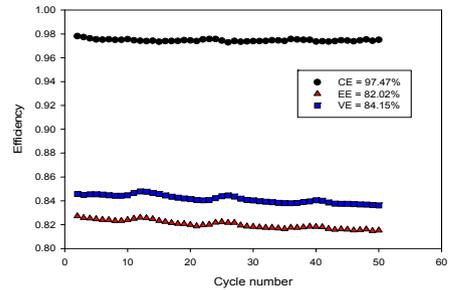


Fig. 4. CV curve of V(IV) electrolyte solution prepared using $VOSO_4$ and V_2O_5 respectively.

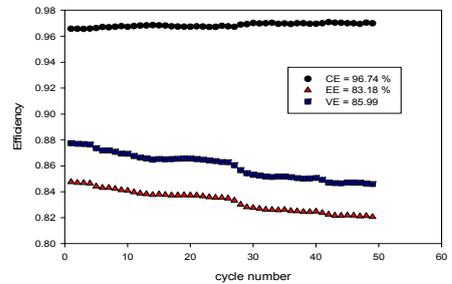
Fig. 5의 (a)는 상용화되어 유통되고 있는 Oxkem의 전해액에 대한 충방전 효율을 실험한 그림이다. 바나듐 농도는 1.6M이며 황산농도는 2.6M의 농도를 가진 전해질 용액이다. 그림에서 보인바와 같이 쿨롱 효율은 95% 이상의 안정적인 성능을 보여주고 있다. 그러나 사이클 횟수가 증가할수록 볼테이지 효율이 조금씩 감소함을 알



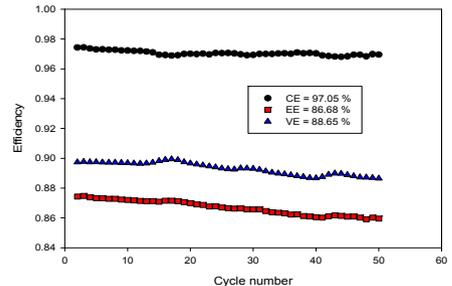
(a) Oxkem electrolyte on sale (1.6M $VOSO_4$ + 2.6M H_2SO_4)



(b) prepared in 1.8M $VOSO_4$ + 3M H_2SO_4



(c) Preparation in 1.8M $VOSO_4$ + 2M H_2SO_4 , then add 1M H_2SO_4



(d) Preparation in 1.8M $VOSO_4$ + 1M H_2SO_4 , then add 2M H_2SO_4

Fig. 5. Charge-discharge efficiency of vanadium electrolyte solution.

수 있다. 이로 인해 에너지 효율도 점점 감소하고 있음을 보여주었다. Fig. 5의 (b)는 바나듐농도 1.8M VOSO₄를 3M H₂SO₄에 용해시켜 전해질 용액을 제조한 전해액을 실험한 그림이다. Fig. 5의 (a)에 비해 더 높은 효율을 보여주고 있음을 알 수 있다. 그러나 이는 바나듐의 농도가 증가함으로써 생기는 현상이다. Fig. 5의 (c)는 바나듐농도와 황산 농도가 Fig. 5의 (b)와 같이 유지 하지만 바나듐을 용해할 때 2M의 H₂SO₄에 용해시킨 후 최종 1M H₂SO₄를 첨가하여 완성한 전해액이다. Fig. 5의 (c)가 (b)에 비해 효율이 개선되어짐을 알 수 있다. 이는 바나듐을 황산용액에 용해할 때 용해시간으로 인해 황산이 증발하고 이런 이유로 지지전해질의 역할이 약화되는 현상을 보여준 결과이다. 이런 단점을 보완하고자 지지전해질인 황산용액의 용해농도를 달리하여 실험한 결과이다. Fig. 5의 (d)는 바나듐을 용해할 때 1M의 H₂SO₄에 용해시킨 후 최종 2M H₂SO₄를 첨가하여 완성한 전해액이다. Fig. 5의 (b), (c), (d)에서 보인바와 같이 전체적인 효율이 개선되어짐을 알 수 있었다. 이 결과는 전해액 제조 시 바나듐의 농도를 높여줌과 동시에 지지전해질 농도도 안정시키는 공정으로 제조하여야 효율적인 전해액을 제조할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결론

바나듐 3, 4, 5가 전해질용액은 UV의 400, 765, 400nm에서 농도를 분석할 수 있었다. 바나듐 3가와 4가 전해질 용액이 혼합되어 있을 경우 3가 전해질 용액은 쉽게 농도 분석이 가능하지만 4가 전해질 용액은 3가의 765nm에서 피크 만큼의 흡광도 값을 보정해 주어야 농도 분석이 가능함을 알 수 있다.

기존 상용화된 전해질용액과 비교했을 때 바나듐 농도를 증가하면 효율이 증가함을 알 수 있었다. 그러나 높은 바나듐 농도는 5가에서 석출을 초래하기 때문에 매우 주의할 기울여야 한다.

바나듐전해질 제조 공정은 바나듐을 1M의 H₂SO₄에 용해시켜 제조한 후 최종 2M H₂SO₄를 첨가하여 완성한 전해액의 에너지효율이 82%에서 86.7%로 가장 좋은 효율을 보임을 알 수 있었다. 이 결과는 전해액 제조 시 바나듐의 농도를 높여줌과 동시에 지지전해질 농도도 안정시키는 공정으로 제조하여야 효율적인 전해액을 제조할 수 있음을 보였다.

References

- [1] F. Changa, C. Hua, X. Liub, L. Liub, J. Zhang, "Coulter dispersant as positive electrolyte additive for the vanadium redox flow battery", *Electrochimica Acta*, Vol.60, pp.334-338, 2012.
<https://doi.org/10.1016/j.electacta.2011.11.065>
- [2] A. Z. Weber, M. M. Mench, J. P. Meyers, P. N. Ross, J. T. Gostick, Q. Liu, "Redox flow batteries: a review", *J Appl Electrochem* Vol.41, pp.1137-1164 2011.
<https://doi.org/10.1007/s10800-011-0348-2>
- [3] G.J. Hwang, Y. H. Oh, C. H. Ryu, H.-S. Choi, "Electrochemical Properties of Current Collector in the All-vanadium Redox Flow Battery", *Korean Chem. Eng. Res.*, Vol.52 No.2, pp.182-186, 2014.
<http://dx.doi.org/10.9713/kcer.2014.52.2.182>
- [4] M. Rychick, M. Sklyllas-Kazacos, "Characteristics of a new all-vanadium redox flow battery", *Journal of Power Sources*, Vol. 22, NO.1, pp.59-67, 1988.
[https://doi.org/10.1016/0378-7753\(88\)80005-3](https://doi.org/10.1016/0378-7753(88)80005-3)
- [5] B. Hwang, K. Kim, "Redox Pairs in Redox Flow Batteries", *Journal of the Korean Electrochemical Society*, Vol. 16, No. 3, pp.99-110, 2013.
<http://dx.doi.org/10.5229/JKES.2013.16.3.99>
- [6] R. F. Gann, N. H. Hagedorn, J. A. Johnson, "Cycling Performace of the Iron-Chromium Redox Energy Storage System", NASA TM-87034, 1985.
<https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19850019076/downloads/19850019076.pdf?attachment=true>
- [7] E. Sum, M. Sklyllas-Kazacos, "A Study of the V(II)/V(III) redox couple for redos flow cell applications", *J. Power Sources*, Vol.15, pp.179-190, 1985. [https://doi.org/10.1016/0378-7753\(85\)80071-9](https://doi.org/10.1016/0378-7753(85)80071-9)
- [8] M. Ulaganathan, V. Aravindan, Q. Yan, S. Madhavi, M. S.-Kazacos, T. M. Lim, "Recent Advancements in All-Vanadium Redox Flow Batteries", *Adv. Mater. Interfaces*, Vol.3, No.1, 1500309, 2016
<https://doi.org/10.1002/admi.201500309>
- [9] J. Zhang, L. Li, Z. Nie, B. Chen, M. Vijayakumar, S. Kim, W. Wang, B. Schwenzer, J. Liu, Z. Yang, "Effects of additives on the stability of electrolytes for all-vanadium redox flow batteries", *J. Appl. Electrochem*, Vol.41, pp.1215-1221, 2011.
<https://doi.org/10.1007/s10800-011-0312-1>
- [10] X. Wu, J. Liu, X. Xiang, J. Zhang, J. Hu, Y. Wu, "Electrolytes for vanadium redox flow batteries", *Pure Appl. Chem.*, Vol.86, No.5, pp. 661-669, 2014.
DOI : <https://doi.org/10.1515/pac-2013-1213>
- [11] S. Roe, C. Menictas, M. Sklyllas-Kazacos, "A High Energy Density Vanadium Redox Flow Battery with 3M Vanadium Electrolyte", *Journal of The Electrochemical Society*, Vol.163 No.1 pp.A5023-A5028, 2016.
<https://doi.org/10.1149/2.0041601jes>
- [12] F. Rahman, M. Sklyllas-Kazacos, "Solubility of vanadyl sulfate in concentrated sulfuric acid solutions", *J.*

Power Sources, Vol.72, pp.105-110., 1998.

[https://doi.org/10.1016/S0378-7753\(97\)02692-X](https://doi.org/10.1016/S0378-7753(97)02692-X)

- [13] M. Skyllas-Kazacos, C. Menictas, M. Kazacos, "Thermal stability of concentrated V(V) electrolytes in the vanadium redox cell", *J. Electrochem. Soc.*, Vol.143, L86., 1996. <https://doi.org/10.1149/1.1836609>
- [14] W. N. Li, R. Zaffou, C. Shovlin, M. Perry, and Y. She, "Vanadium Redox-Flow-Battery Electrolyte Preparation with Reducing Agents", Conference Paper in ECS Transactions · May 2013. <https://doi.org/10.1149/05307.0093ecst>
- [15] J. Heo, J-Y Han, S. kim, S. Yuk, C. Choi, R. Kim, J.H. Lee, A. Klassen, S.K. Ryi and H.T. Kim "Catalytic production of impurity-free V_{3.5+} electrolyte for vanadium redox flow batteries", *Nature Communications*, (2019) online, <https://doi.org/10.1038/s41467-019-12363-7>
- [16] N. H. Choi, S. Kwon, H. Kim, "Analysis of the Oxidation of the V(II) by Dissolved Oxygen Using UV-Visible Spectrophotometry in a Vanadium Redox Flow Battery", *J. Electrochem. Soc.* Vol.160 N.6 A973, 2013. <https://doi.org/10.1149/2.145306jes>

손 정 선(Jeong Sun Sohn)

[정회원]



- 1996년 2월 : 조선대학교 대학원 고분자공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 조선대학교 대학원 고분자공학과 (공학박사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 조선대학교 자유전공학부 교수

〈관심분야〉

고분자공학, 화학공학

노 선 균(Seon-Gyun Rho)

[정회원]



- 1996년 2월 : 전남대학교 화학공학과 대학원 (화학공학석사)
- 2002년 2월 : 전남대학교 화학공학과 대학원 (화학공학박사)
- 2016년 2월 ~ 현재 : 호남대학교 소방행정학과 교수

〈관심분야〉

화학공학, 소방안전, 에너지저장장치