

유기화합물 첨가제에 따른 철 기반 양극과 polyoxometalate 음극 기반 수계 레독스 흐름 전지의 성능 관계

이서진 · 권병완[†]

강원대학교(삼척캠퍼스) 화학공학전공
(2024년 4월 20일 접수, 2024년 6월 3일 수정, 2024년 6월 3일 채택)

Performance Relationship of Iron-Based Anolyte According to Organic Compound Additives and Polyoxometalate-Based Catholyte in an Aqueous Redox Flow Battery

Seo Jin Lee and Byeong Wan Kwon[†]

Department of Chemical Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25913, Korea
(Received April 20, 2024; Revised June 3, 2024; Accepted June 3, 2024)

초 록

본 연구에서는 음극 활물질로 폴리옥소메탈레이트(polyoxometalate, POM)인 규소텡스텐산(tungstosilic acid, TSA)과 양극 활물질로 염화 철(iron chloride)을 사용하고, 지지 전해질 황산(H₂SO₄) 수용액을 이용한 수계 레독스 흐름 전지(redox flow battery, RFB)를 구성하였다. 운전 결과에 따르면 용량 저하와 낮은 에너지 효율을 보이는 문제점이 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해서 양극 활물질에 유기화합물 첨가제인 말산(malic acid)을 첨가하여, 첨가제에 따른 전기화학적 특성과 셀 충방전 테스트를 진행하였다. 말산은 염화 철 수용액에서 킬레이트제로 작용하였으며, 말산 내 두 개의 카르복실기가 철 이온과 효과적으로 배위결합을 형성한다. 이는, 양극 활물질인 염화 철의 전해질 저항을 줄여들게 하여 화학적으로 안정화되어 용량과 에너지 효율의 증가를 이끌어냈다.

Abstract

In this study, an aqueous-based redox flow battery (RFB) was constructed using tungstosilic acid (TSA), which is a kind of polyoxometalate, as the negative electrode active material and iron chloride (FeCl₃) as the positive electrode active material in a sulfuric acid (H₂SO₄) supporting electrolyte. As a result of the cell's performance, it exhibited capacity fading and low energy efficiency. To address these issues, malic acid (MA), an organic additive, was introduced to the positive electrode active material and then tested for electrochemical properties and single cell performance. The malic acid in the iron chloride aqueous solution is working as a chelate agent, and two carboxyl groups are effectively coordinated with iron ions. It was found that MA reduced the electrolyte resistance of the positive electrode active material, leading to chemical stabilization and an increase in capacity and energy efficiency.

Keywords: Redox flow battery, Polyoxometalate, Iron(III) chloride, Malic acid, Chelate

1. 서 론

전 세계적으로 에너지 소비 증가 문제의 극복 대안과 탄소 배출 문제 대체 에너지와 신재생 에너지에 대한 중요도와 관심이 높아지고 있다. 재생 에너지 시스템은 온실가스 등 오염 물질을 배출하지 않기 때문에 탈탄소화 할 수 있다는 장점이 있다. 재생 에너지로써 풍력, 수력 및 태양광 발전 등의 재생 에너지에 대한 수요와 발전이 점점 확대되고 있다. 하지만, 풍력이나 수력 및 태양광 발전의 경우 기후,

지역 등 환경에 따라 에너지 공급이 크게 변하기 때문에 이에 대한 해결 방안으로 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)의 중요성이 대두되고 있다. 에너지 저장 시스템은 저장이 어렵고 버려지게 되는 에너지를 효율적으로 사용할 수 있도록 저장 및 관리하는 시스템으로 풍력, 수력과 태양광 등과 같이 에너지 공급의 변동이 큰 재생 에너지를 저장하여 에너지 이용 효율을 높일 수 있다[1,18]. 본 연구에서는 에너지 저장 시스템의 종류 중 하나로 전기화학 형태로 에너지가 저장되는 레독스 흐름 전지(redox flow battery, RFB)에 대하여 연구하였다.

레독스 흐름전지는 활물질의 산화환원 반응을 이용하여 충전/방전 되는 시스템으로 화학적 에너지를 전기에너지로 변환하여 저장하는 전기화학적 전력 저장 시스템이다. 레독스 흐름 전지의 장점은 다른 이차전지와 달리 두 개의 독립적인 전해액 탱크를 가져 화재 위험성

[†] Corresponding Author: Kangwon National University
Department of Chemical Engineering, Samcheok 25913, Korea
Tel: +82-33-570-6548 e-mail: bwkwon@kangwon.ac.kr

이 낮고, 독립적인 출력 전력과 용량을 갖는다. 용량이 전해액의 부피, 전해액에 녹아 있는 활물질의 농도에 의해 결정되어 용량, 출력의 변화에 용이하여 유연한 설계가 가능하다. 또한 전지 스택과 전해액 저장 탱크의 분리로 공간 활용이 매우 자유롭고 안전한 작동 조건 때문에 스마트 그리드에 적합하여 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 레독스 흐름 전지의 실제 상용화는 낮은 에너지 밀도로 인해 제한되고 있다. 따라서 더 높은 에너지 밀도 저장 물질을 고안하여 전이 금속 산화물 클러스터인 폴리옥소메탈레이트(polyoxometalate, POM)를 활물질로 채택하여 평가하였다[18].

폴리옥소메탈레이트는 가역성이 높고 다중 전자 산화 환원 반응을 갖고 있다. 폴리옥소메탈레이트 중 헤테로폴리산의 특수한 비편재화 구조는 레독스 흐름 전지가 높은 배터리 성능을 달성할 수 있도록 하는 특성인 높은 전기화학적 반응성 및 가역성을 갖도록 한다. 더욱이, 폴리옥소메탈레이트는 Donnan 효과로 인해 양이온 교환막을 통해 투과가 어렵기 때문에 폴리옥소메탈레이트를 활물질로 포함한 전해질을 사용하면 레독스 흐름 전지는 더 나은 사이클 안정성을 달성할 수 있다[2,3,9,11,18,19]. 활물질로 설정한 규소텅스텐 산(tungstosilic acid, TSA)은 케긴형(Keggin-type) POM으로 산화환원 거동이 산에서 의존성이 높다. 또한, 음극에서 다중 산화 환원이 이루어지므로 음극 활물질로써 적합하다[3]. 이러한 특성으로 가용할 수 있는 전압이 높아지며, 전압이 높아지면 전력량이 증가하므로 레독스 플로우 배터리에 적합한 활물질이라고 할 수 있다. 양극 활물질로는 다른 여타 활물질에 비해 상당히 저렴한 염화 철(iron chloride)을 이용하여 레독스 플로우 배터리를 설계 하였으며, 또한 유기 화합물 첨가제인 말산(malic acid)을 선택하여 첨가제 유무에 따른 전지의 성능 평가를 진행하였다[4-10].

2. 실험

2.1. 실험재료 및 시약

양극 활물질로 사용된 염화 철(iron chloride, 대정화금, 한국)과 음극 활물질로 사용된 규소텅스텐산(tungstosilic acid, TSA, Aladdin, 중국)은 별도의 전처리 과정 없이 사용되었다. 지지 전해질로는 2.0 M의 황산(sulfuric acid, Sigma-Aldrich, 미국)을 사용하였으며, 첨가제로는 0.1 M의 말산(DL-malic acid, Sigma-Aldrich, 미국)과 0.1 M의 아세트산(acetic acid, 대정화금, 한국)을 사용하였다.

2.2. 전기화학적 특성 분석

정전위기(SP-50, BioLogic)를 사용하여 Figure 1과 같은 삼 전극 시스템을 통해 순환주사전류(cyclic voltammetry, CV)를 측정하였다[13]. 작업전극을 glassy carbon (지름 3 mm, 면적 0.0707 cm²) 전극을 이용하고, 기준전극으로 Ag/AgCl (3.0 M KCl Buffer solution)과 상대전극으로 백금 선(Pt wire)을 사용하였다. 염화 철과 규소텅스텐 산의 농도를 각각 0.3 M로 고정하여, 2.0 M 황산 전해질에서의 순환주사전류 측정을 위해 전압범위 -0.8 V부터 1.3 V, -0.7 V부터 1.0 V 범위로, 100 mVs⁻¹의 주사 속도로 실험을 진행하였다. 첨가제인 말산은 0.1 M 수용액으로 제조하여 각 활물질에 대해 10 vol%의 부피비로 첨가하여 조사하였다.

규소텅스텐 산의 산화환원 반응은 다음 식 (1)-(3)와 같다.

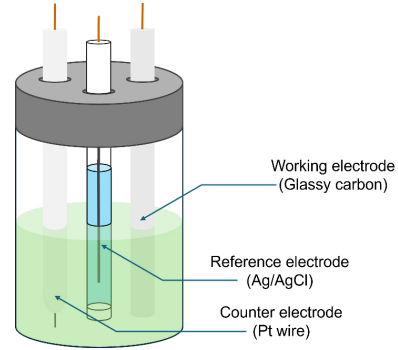
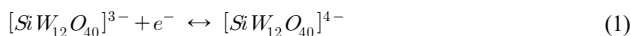
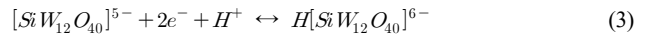
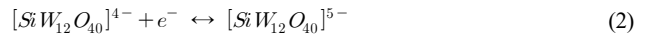


Figure 1. Schematic representation of an electrochemical cell for CV experiments.



염화 철의 산화환원 반응은 다음 식 (4)와 같다.



전기화학 임피던스 분광법(electrochemical impedance spectroscopy, EIS)은 삼 전극 시스템을 통해 10 mV의 진폭 및 10⁵~10¹ Hz 주파수 범위에서 실험을 진행하였다. 초기 충방전 테스트 전의 염화 철 용액을 조사하였으며, 충방전 테스트 도중 용량과 효율이 안정화되고 난 이후의 용액은 ex-situ 방법으로 임피던스를 측정하였다. Ex-situ 임피던스 분석의 경우 주파수 범위는 10⁵~10² Hz로 변경하여 측정 진행하였다.

2.3. 완전지 측정

모든 완전지 측정에 대한 배터리 성능은 충방전장치(WonAtech, WBCS3000S)를 사용하여 정전류/정전류(constant current/constant current, CC/CC) 실험을 진행하였다. 전극은 4 cm² 면적의 탄소 펠트(carbon felt, Toyobo)를 사용하였다. 멤브레인은 양이온 교환막인 Nafion 212 (Dupont)를 사용하였다. 염화 철과 규소텅스텐 산은 서로 다른 전자 수를 가지고 반응하기 때문에 반응속도의 차이 혹은 전도성의 차이로 반응 균형을 맞추기 위하여 음극 전해질은 0.3 M 규소텅스텐 산을 2.0 M 황산 40 mL에 녹여 제조하였으며, 양극 전해질은 0.3 M 염화 철을 2.0 M 황산에 80 mL에 녹여 제조하였다. 컷-오프 전압은 0.0~1.6 V, 전류밀도는 180 mA (30 mA/cm²)로 진행하였다. 말산의 첨가는 염화 철을 활물질로 사용하는 양극 전해질에 첨가하여 완전지 실험을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

염화 철과 규소텅스텐 산 레독스 커플을 2.0 M 황산 전해질에서 순환주사전류(CV) 측정을 한 결과는 Figure 2(a)에 나타내었다. 그림에 따르면, 두 활물질 모두 산화 환원 반응성이 높고, 전자 전달성이 우수한 것을 확인할 수 있다. Figure 2(b)에서 염화 철 양극 활물질에 대해서 말산이 첨가되지 않았을 때와 첨가되었을 때의 CV 그래프를 나타내며, 각 산화-환원 구간에서 전류 밀도 및 전압에 큰 차이가 없는

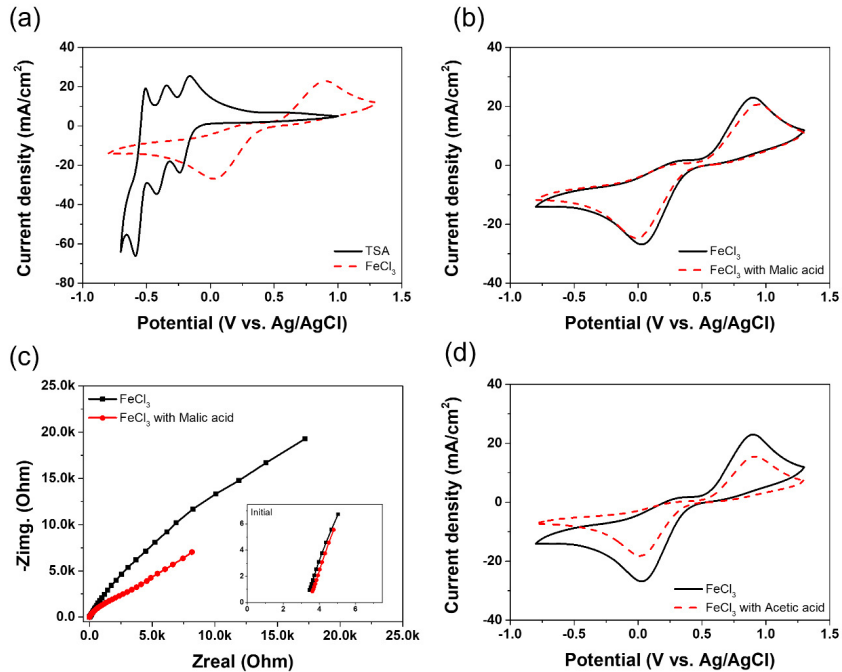


Figure 2. (a) Cyclic Voltammery test results in iron chloride and TSA 2.0 M sulfuric acid supported electrolytes at scan rate 100 mV s^{-1} . (b) Cyclic Voltammery test results of iron chloride (FeCl_3) with and without malic acid at scan rate 100 mV s^{-1} (c) Nyquist plots of iron chloride and malic acid addition to iron chloride. (d) Cyclic Voltammery test results of iron chloride (FeCl_3) with and without acetic acid at scan rate 100 mV s^{-1} .

것을 확인할 수 있다. 이는 말산의 첨가가 염화 철의 전기화학적 성질에는 큰 영향을 주지 않는 것을 확인할 수 있다. 추가적으로, 하나의 카복실기를 가지고 있으며 킬레이트제로 활용될 수 있는 또 다른 유기 첨가제인 아세트산을 염화 철 활물질에 동일한 농도로 첨가하여 측정된 CV 결과를 Figure 2(d)를 통해 나타내었다. 아세트산 첨가의 경우, 산화-환원에 대한 전류밀도가 줄어들었다. 이는, 양극 활물질인 염화 철 수용액에 전기화학적으로 부정적인 영향을 끼치는 것으로 판단할 수 있다. 따라서, 양극 활물질인 염화 철 수용액에서 말산과 아세트산 구조의 카복실기와 하이드록실기가 이온 이동성을 높임으로써 전해질의 전기화학 반응이 향상될 것으로 예상되었으며, 아세트산을 첨가한 전해질은 전류밀도가 감소함으로써 전기화학 반응에 부정적인 영향을 끼친다. 추가적으로, CV에서 확인하지 못한 말산의 영향에 대해서 분석하기 위해 첨가 전 후 용액의 EIS를 측정하여 도시화한 결과를 Figure 2(c)에 나타내었다. 말산 첨가제를 넣은 염화 철 전해질 용액은 첨가제를 넣지 않은 용액보다 옴 저항(ohmic resistance)이 조금 증가하지만, 물질 전달 저항(mass transfer resistance)이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 Figure 3에 나타난 말산의 구조를 통해 확인할 수 있는데, 말산이 철 이온과 결합할 때 말산의 카르복실기 중 하나 또는 두 개가 양성자를 잃고 음전하를 띠게 되어 카르복실기의 산소가 철 이온과 배위 결합을 형성한다. 이때, 말산의 산소 원자가 철 이온의 배위자리를 차지한다. 따라서 철 이온의 두개의 말산 분자와 배위 결합을 형성하여 복합체가 형성된다. 또한, 말산의 첨가에 따라 두 개의 카르복실기 리간드와 하이드록실기의 비공유 전자쌍의 증가로 철 이온과 더 효과적으로 결합할 수 있는 능력을 제공한다. 이 때문에 말산이 아세트산보다 더 강력한 킬레이트제를 형성하여 전하 밀도가 증가하여 전해질 안정성을 변화시키고 전하 이동을 촉진시킨다고 볼 수 있다[16,17].

염화 철과 규소텅스텐 산을 황산 전해질에서의 레독스 흐름 전지의

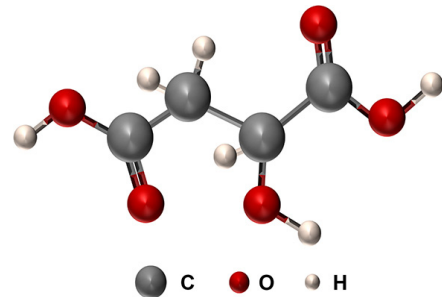


Figure 3. Malic acid structure.

성능을 측정하기 위해 단전지 셀 테스트 실험을 진행하였다. 먼저, 염화 철과 규소텅스텐 산의 농도는 모두 0.3 M, 전류밀도 30 mA cm^{-2} 에서 2.0 M 황산 전해질에 대해 셀 성능 평가를 진행하였다(Figure 4). Figure 4(a)의 경우 컷-오프 전압을 0.0~1.4 V로 설정하였다. Figure 4(b)와 (c)에 따르면 염화 철과 규소텅스텐 산을 황산 전해질에서의 레독스 흐름 전지는 약 3.5 Ah L^{-1} 의 용량을 보이고 에너지 효율이 약 23%의 낮은 효율을 보인다. 성능과 에너지 효율을 개선하기 위해 앞에서 실험한 전기화학적 분석 데이터를 기반으로 말산을 첨가제로 하여 셀 시험을 진행하였다(Figure 5). 말산은 양극인 염화 철에 첨가하여 진행하였으며, Figure 5(a)의 경우 0.0~1.6 V로 컷-오프 전압을 조정하였다. 컷-오프 전압을 조정한 이유는 Figure 6에서 용량과 효율이 안정화 되었을 때 ex-situ 한 EIS 그래프의 나이퀴스트 플롯을 보면 말산을 첨가한 전해질 용액의 전하 전달 저항이 말산을 첨가하지 않은 전해질 용액보다 줄어든 것을 볼 수 있다. 이는 첨가제로 인해 전해질 특성이 변화되어 이온 전도도가 높아져 전하이동이 향상되었기 때문이다. 따라서 첨가제를 넣었을 때 컷-오프 전압을 변화시켜 전지 성능

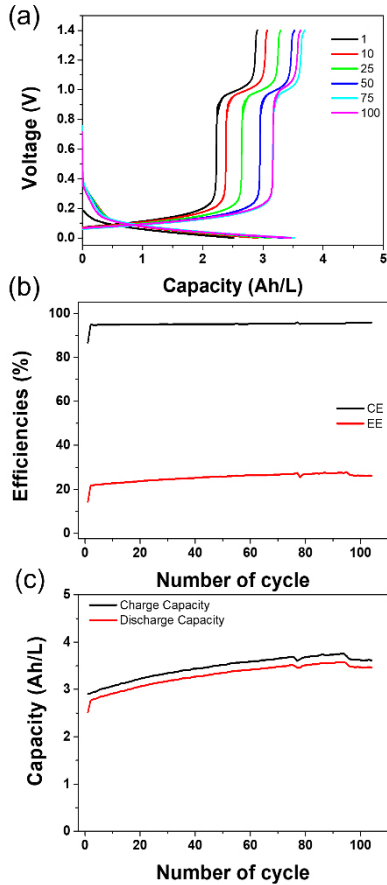


Figure 4. (a) Charge-discharge curve at 1, 10, 25, 50, 75, and 100 cycle using cut-off voltage range from 0.0 V to 1.4 V. (b) Charge efficiency and energy efficiency curves during 100 cycles. (c) Charge and discharge capacity versus cycle number curves of RFB single cell using 0.3 M TSA in 40 mL of 2.0 M sulfuric acid and 0.3 M iron chloride 80 mL of 2.0 M sulfuric acid.

테스트를 하였다. Figure 5(a)에 따르면 80 사이클(cycle)까지는 성능이 계속 증가하는 현상을 보이는데 처음에는 양극에 첨가된 말산이 물질 전달 저항에 영향을 주어 첨가제를 첨가하지 않는 전지보다 낮은 전지용량을 보이지만 충방전 사이클이 지남에 따라 철이 산화환원 과정을 거치면서 산화수 변화가 생기고 이에 따라 적절한 산화수가 되었을 때 첨가제인 말산과의 배위 결합을 할 수 있는 상태가 되고 그 이후에 안정적인 상태로 전기화학반응을 하기 때문에 80 사이클 이후에는 안정적인 상태가 된다. 양극 활물질인 염화 철에 첨가제를 첨가하는 경우 전지 성능과 안정성이 향상된 것을 Figure 5(b)와 (c)에서 확인할 수 있다. 여기에 데이터를 첨가하지는 않았지만 염화 철과 규소텅스텐 산 양쪽 모두에 말산을 첨가한 경우와 규소텅스텐 산에만 첨가제를 첨가한 경우 용량 손실과 효율 저하를 보이며 충방전이 제대로 이루어 지지 않았다. 이를 통해서 EIS 그래프와 같이 철과 말산의 배위결합으로 인해 말산 구조의 카복실기 리간드가 킬레이트제로 역할을 하여 물질을 안정화 시키고 전하 전달 저항을 낮춰 더 빠른 전하 이동 반응을 유도하기 때문이다[16,17]. 또한, 규소텅스텐의 음극의 경우 말산이 첨가됨에 따라 용액 농도에 영향을 미치기 때문에 물질 전달의 저항 증가도 인하여 성능 저하를 일으키기 때문에 성능저하를 야기한다는 것을 발견하였다.

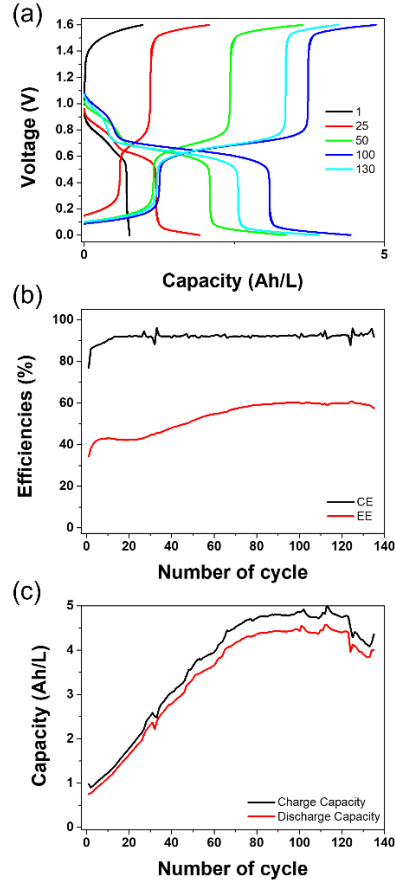


Figure 5. (a) Charge-discharge curve at 1, 10, 25, 50, 75, and 100 cycle using cut-off voltage range from 0.0 V to 1.6 V. (b) Charge efficiency and energy efficiency curves during 100 cycles. (c) Charge and discharge capacity versus cycle number curves of RFB single cell using 0.3 M TSA in 40 mL of 2.0 M sulfuric acid and 0.3 M iron chloride 80 mL of 2.0 M sulfuric acid with using 0.1 M malic acid additive.

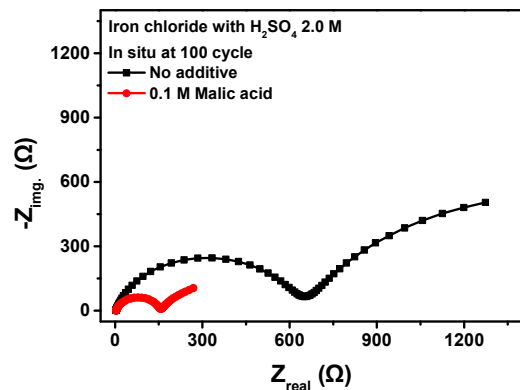


Figure 6. EIS results according to ex-situ method for RFB single cell using 0.3 M TSA in 40 mL of 2.0 M sulfuric acid and 0.3 M iron chloride 80 mL of 2.0 M sulfuric acid with using 0.1 M malic acid additive.

4. 결 론

본 연구에서는 염화 철과 POM 물질인 규소텅스텐 산을 각각 수계 레독스 흐름 전지의 양극 활물질과 음극 활물질로 이용한 산성 전해질 기반으로 수계 레독스 흐름 전지에 대해 유기화합물 첨가제를 첨가하여 성능 테스트를 진행하였다. 셀 성능 테스트를 진행하였을 때, 용량 저하와 낮은 에너지 효율의 문제점을 확인할 수 있었다. 따라서, 유기 화합물 첨가제인 말산을 양극 활물질에 첨가하였다. 결과적으로 말산을 첨가하여 셀 테스트를 진행하였을 때, 첨가제로 인하여 가용할 수 있는 셀 전압이 1.4 V에서 1.6 V로 높아졌으며, EIS의 결과에 따라 첨가제를 넣은 염화 철 양극 활물질 용액이 말산의 킬레이트 영향으로 전자 전달 저항이 더 낮아지고 전해질내의 이온전도도를 높여 전해질 특성을 변화시킨다는 것을 확인하였다. 이러한 결과로 인해 첨가제인 말산이 양극 전해질 내의 화학적 안정성과 전자 전달 특성을 최적화하여 셀의 성능을 높이는 데 중요한 요소임을 확인하였다.

감 사

이 논문은 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(2022RIS-005)와 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원(No.2021R111A3060236)에 의하여 연구하였음.

References

1. J. Mitali, S. Dhinakaran, and A. A. Mohamad, Energy storage systems: A review, *Energy Storage Sav.*, **1**, 166-216 (2022).
2. T. Feng, H. Wang, Y. Liu, J. Zhang, Y. Xiang, and S. Lu, A redox flow battery with high capacity retention using 12-phosphotungstic acid/iodine mixed solution as electrolytes, *J. Power Sources*, **436**, 226831 (2019).
3. I. N. Gumerova and A. Rempel, Synthesis, structures and applications of electron-rich polyoxometalates, *Nat. Rev. Chem.*, **2**, 0112 (2018).
4. K. L. Hawthorne, J. S. Wainright, and R. F. Savinell, Studies of iron-ligand complexes for an all-iron flow battery application, *J. Electrochem. Soc.*, **161**, A1662-A1671 (2014).
5. S. Belongia, X. Wang, and X. Zhang, Progresses and perspectives of all-iron aqueous redox flow batteries, *Adv. Funct. Mater.*, **34**, 2302077 (2024).
6. Alfonso Sáez, V. Montiel, and A. Aldaz, An acid-base electrochemical flow battery as energy storage system, *Int. J. Hydrog. Energy*, **41**, 17801-17806 (2016).
7. B. S. Jayatilake, E. J. Plichta, M. A. Hendrickson, and S. R. Narayanan, Improvements to the coulombic efficiency of the iron electrode for an all-iron redox-flow battery, *J. Electrochem. Soc.*, **165**, A1630-A1638 (2018).
8. X. Liu, T. Li, Z. Yuan, and X. Li, Low-cost all-iron flow battery

- with high performance towards long-duration energy storage, *J. Energy Chem.*, **73**, 445-451 (2022).
9. Y. Cao, J.-J. J. Chen, and M. A. Barteau, Systematic approaches to improving the performance of polyoxometalates in non-aqueous redox flow batteries, *J. Energy Chem.*, **50**, 115-124 (2020).
 10. C. Xie, Y. Duan, W. Xu, H. Zhang, and X. Li, A low-cost neutral zinc-iron flow battery with high energy density for stationary energy storage, *Angew. Chem. Int. Ed.*, **56**, 14953-14957 (2017).
 11. H. D. Pratt III, N. S. Hudak, X. Fang, and T. M. Anderson, A polyoxometalate flow battery, *J. Power Sources*, **236**, 259-264 (2013).
 12. J. Friedl, M. V. Holland-Cunz, F. Cording, F. L. Pfanschilling, C. Wills, W. McFarlane, B. Schrickler, R. Fleck, H. Wolfschmidt, and U. Stimming, Asymmetric polyoxometalate electrolytes for advanced redox flow batteries, *Energy Environ. Sci.*, **11**, 3010-3018 (2018).
 13. N. Elgrishi, K. J. Rountree, B. D. McCarthy, E. S. Rountree, T. T. Eisenhart, and J. L. Dempsey, A practical beginner's guide to cyclic voltammetry, *J. Chem. Educ.*, **95**, 197-206 (2018).
 14. H. E. Lee, D. E. Kim, C. J. Kim, and T. Kim, A Study on the electrochemical performance of Fe-V chloric/sulfuric mixed acid redox flow battery depending on electrode activation temperature, *Appl. Chem. Eng.*, **31**, 639-645 (2020).
 15. S. Xiao, L. Yu, L. Wu, L. Liu, X. Qiu, and J. Xi, Broad temperature adaptability of vanadium redox flow battery—Part 1: Electrolyte research, *Electrochim. Acta*, **187**, 525-534 (2016).
 16. S. E. Waters, B. H. Robb, and M. P. Marshak, Effect of chelation on iron-chromium redox flow batteries, *ACS Energy Lett.*, **5**, 1758-1762 (2020).
 17. J. Liu, S. Liu, Z. He, H. Han, and Y. Chen, Effects of organic additives with oxygen-and nitrogen-containing functional groups on the negative electrolyte of vanadium redox flow battery, *Electrochim. Acta*, **130**, 314-321 (2014).
 18. Y. J. Cho and B. W. Kwon, Relationship between concentration and performance of supporting electrolyte of redox flow battery using polyoxometalate, *Appl. Chem. Eng.*, **34**, 175-179 (2023).
 19. H. E. Lee, D. T. Linh, W. K. Lee, and T. Kim, Study on the improvement of electrochemical performance by controlling the surface characteristics of the oxygen electrode porous transport layer for proton exchange membrane water electrolysis, *Appl. Chem. Eng.*, **32**, 332-339 (2021).

Authors

Seo Jin Lee; B.Sc., Graduate Student, Department of Chemical Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25913, Republic of Korea; sso06071@naver.com

Byeong Wan Kwon; Ph.D., Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Kangwon National University, Samcheok 25913, Republic of Korea; bwkwon@kangwon.ac.kr