

## 안트라퀴논과 템포 활물질 기반 수계 유기 레독스 흐름 전지에서의 멤브레인 효과

이원미 · 권용재<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 에너지환경대학원  
01811 서울특별시 노원구 공릉로 232  
(2019년 6월 18일 접수, 2019년 7월 12일 수정본 접수, 2019년 7월 16일 채택)

## The Effects of Different Membranes on the Performance of Aqueous Organic Redox Flow Battery Using Anthraquinone and TEMPO Redox Couple

Wonmi Lee and Yongchai Kwon<sup>†</sup>

Graduate school of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology,  
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, 01811, Korea

(Received 18 June 2019; Received in revised form 12 July 2019; accepted 16 July 2019)

### 요 약

본 연구에서는 유기물인 안트라퀴논(AQDS)과 템포(TEMPO)를 활물질로 사용하고 N 중성 전해질 기반 수계 유기 레독스 흐름전지 성능이 멤브레인에 따라 어떻게 영향을 받는지 분석하였다. 안트라퀴논과 템포 모두 중성 전해질인 염화칼륨(KCl) 전해질에 대해 높은 전자전달성(0.068 V의 산화 반응 및 환원 반응의 피크 전위차) 및 셀전압(1.17 V)을 얻을 수 있었다. 성능비교를 위해 사용한 멤브레인으로, 상용 양이온 교환막 중 하나인 Nafion 212를 사용하였을 때, 0.1 M 활물질을 1 M 염화칼륨 전해질에 용해해서 작동한 레독스 흐름전지 완전지 테스트를 통해, 전류효율 97%, 전압 효율 59%의 성능을 나타내었지만, 방전 용량(discharge capacity)은 4 사이클에서 0.93 Ah·L<sup>-1</sup>로 이론 용량(2.68 Ah·L<sup>-1</sup>)의 35%를 도달하였으며, 총 10사이클 동안 방전 용량의 용량 손실율(capacity loss rate)은 0.018 Ah·L<sup>-1</sup>/cycle 이다. 그 외에도 Nafion 117 멤브레인, SELEMION CSO 멤브레인을 사용하여 단전지 성능을 테스트하였을 때, 오히려 저항 증가 및 투과 유도로 인해 더 큰 용량 손실을 이끌었다.

**Abstract** – In this study, the evaluation of performance of AORFB using anthraquinone derivative and TEMPO derivative as active materials in neutral supporting electrolyte with various membrane types was performed. Both anthraquinone derivative and TEMPO derivative showed high electron transfer rate (the difference between anodic and cathodic peak potential was 0.068 V) and the cell voltage is 1.17 V. The single cell test of the AORFB using 0.1 M active materials in 1 M KCl solution with using Nafion 212 membrane, which is commercial cation exchange membrane was performed, and the charge efficiency (CE) was 97% and voltage efficiency (VE) was 59%. In addition, the discharge capacity was 0.93 Ah·L<sup>-1</sup> which is 35% of theoretical capacity (2.68 Ah·L<sup>-1</sup>) at 4<sup>th</sup> cycle and the capacity loss rate was 0.018 Ah·L<sup>-1</sup>/cycle during 10 cycles. The single cell tests were performed with using Nafion 117 membrane and SELEMION CSO membrane. However, the results were more not good because of increased resistance because of thicker thickness of membrane and increased cross-over of active materials, respectively.

Key words: Anthraquinone, TEMPO, Aqueous organic redox flow battery, Neutral supporting electrolyte, Membrane

### 1. 서 론

에너지 저장 시스템(Energy Storage System, ESS)은 신재생에너지의 중요성이 급증하고 있는 상황에서 필수적인 요소가 되었다.

그 종류로는 캐패시터, 리튬 배터리, 레독스 플로우 배터리 등 다양한 것들이 있다[1-5]. 그 중 레독스 플로우 배터리(Redox Flow Battery, RFB)는 활물질의 산화 환원 반응에 의해 전기에너지를 저장하고 생산해내는 방식의 시스템으로, 공간적인 부분에서 독립적이라는 장점이 있으며, 대용량 저장 장치로 유용하다[6-8]. 레독스 플로우 배터리가 나올 때부터 금속 활물질 기반 레독스 흐름 전지에 대한 연구가 많이 수행되었다[9-12]. 예를 들어, 징크와 브롬을 활용한 산 전해질 기반 레독스 흐름 전지, 철과 크롬을 활용한 산 전해질 기반 레독스 흐름 전지, 마나듐을 활용한 황산 전해질 기반 레독스

<sup>†</sup>To whom correspondence should be addressed.

E-mail: kwonyc@seoultech.ac.kr

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

흐름 전지 등이 대표적이다[13-16]. 그 중 바나듐 레독스 흐름 전지의 경우는 바나듐이 2가부터 5가까지 다양한 산화수를 가지며, 두 쌍의 레독스 전위를 가지기 때문에 양쪽 전해질에 모두 쓰일 수 있고, 셀 전압 또한 1.26 V로 높게 나타나기 때문에 성능이 우수하다[15,16]. 하지만, 촉매 사용 필요 또는 온도 제한, 바나듐 가격의 상승 문제로 인해 상용화를 하기에는 어려움이 있다.

이에 따라 몇 년 전부터 활물질을 금속 물질에서 유기 물질로 대체하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다[17-24]. 가장 먼저, Narayaan 그룹에서 퀴논(Quinone)을 활물질로 활용한 산 전해질 기반 레독스 흐름 전지를 연구하였다[18]. 양쪽에 모두 퀴논을 사용하였으며, 그 종류는 링 하나만 달린 벤조퀴논을 양극 전해질에서의 활물질로, 링 3개가 달린 안트라퀴논을 음극 전해질에서의 활물질로 사용하여 셀 전압은 0.76 V로 나타난다. 하지만, 셀 전압이 낮으며, 벤조퀴논의 경우 화학적 구조 변형이 일어난다는 문제점이 있다. 또한, 알칼리 전해질을 기반으로 한 연구가 많이 수행되고 있는데, 그 이유는 관능기의 도입으로 알칼리에서 용해도가 높으면서도 레독스 반응성이 우수한 유기 활물질이 많이 존재하기 때문이다. 그 예로, Aziz 그룹이 연구한 알록사진과 페로시아나이드 조합이 있는데, 알록사진의 경우 KOH 전해질에 대한 용해도는 카르복실기 도입을 통해 크게 향상시킬 수 있었으며, 결과적으로 우수한 에너지 밀도를 이끌어낼 수 있었다[21].

본 연구에서는 중성 전해질을 기반으로 한 수계 유기 레독스 흐름 전지 성능 평가를 진행하였다. 유기 활물질 조합은 안트라퀴논(anthraquinone-2,7-disulfonic disodium salts; AQDS)과 템포(4-hydroxy-TEMPO; TEMPO)이며 그 레독스 반응 구조식은 Fig. 1에서 볼 수 있다. 보조 전해질은 염화칼륨(potassium chloride; KCl)을 사용하였다. 추가적으로 다양한 멤브레인을 사용하여 그 성능을 비교하는 실험을 진행하였으며, 멤브레인으로는 상용적으로 구입이 가능한 Nafion 멤브레인과 SELEMION 멤브레인을 사용하였다.

## 2. 실험

### 2-1. 시약

활물질로 쓰이는 안트라퀴논(Anthraquinone-2,7-disulfonic disodium salt, AQDS, Santa Cruz)와 템포(4-hydroxy-TEMPO, TEMPO, Alfa Aesar)는 별도의 처리 없이 구매한 그대로 시약을 사용하였으며, 전해질로 쓰이는 염화칼륨(Potassium chloride, 95.0%)은 Alfa Aesar에서 구입하여 사용하였다.

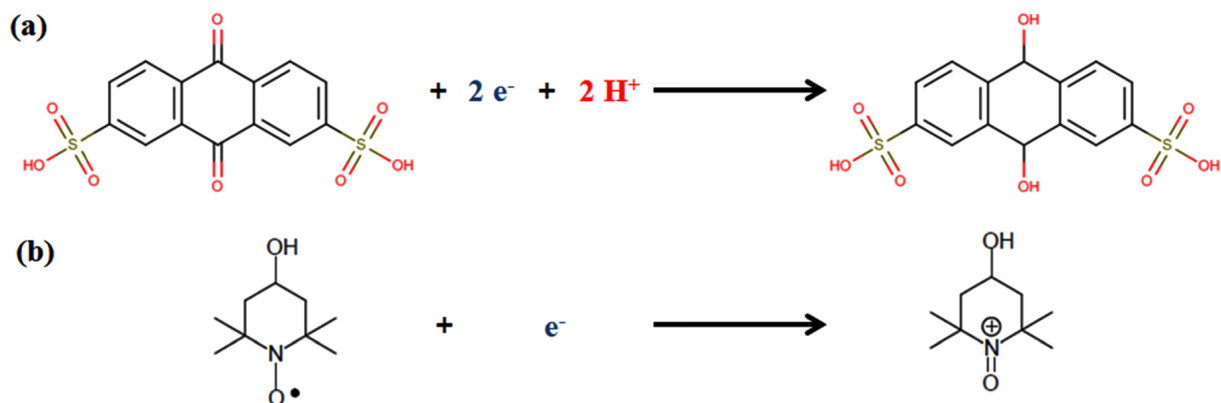


Fig. 1. Scheme of redox reactions of (a) AQDS and (b) TEMPO.

### 2-2. 전기화학측정

안트라퀴논(AQDS)와 템포(TEMPO) 레독스 조합의 성능을 평가하기 위해 정전위기를 이용하여 전기화학적 측정을 진행하였다.

#### 2-2-1. 순환주사전류 측정

정전위기(Potentiostat, SP-240, BioLogic)를 사용하여 삼전극 실험을 통해 순환주사 전류(cyclic voltammogram, CV)를 측정하였고, 상대전극은 백금선, 기준전극은 Ag/AgCl (3.0 M NaCl)을 사용하였다. 작업전극은 글래스 탄소 전극(glassy carbon electrode (지름 5.0 mm, 면적 0.196 cm<sup>2</sup>))를 사용하였다. 중성 전해질에서의 AQDS와 TMEPOL 조합의 셀 전압을 조사하기 위해 보조전해질의 pH는 7-8 사이로, 1 M KCl 용액을 제조하여 사용하였으며, 활물질은 각각 0.01 M AQDS, 0.01 M TEMPO를 제조하였다. 이 제조된 용액에 대해 100 mV/s의 주사 속도(scan rate)로 -1.0 V부터 1.0 V까지 주사하여 순환주사전류 측정 실험을 진행하였다.

추가적으로 완전지테스트 전과 후의 전해질 내의 활물질의 크로스-오버(cross-over) 현상 또는 화학적인 변형을 조사하기 위해 전과 후의 용액에 대해서도 100 mV/s의 주사 속도(scan rate)로 -1.0 V부터 1.0 V까지 주사하여 순환주사전류 측정 실험을 진행하였다.

#### 2-2-2. 완전지 측정

충방전장치(Wonatech, WBCS3000)를 사용하여 완전지 측정 실험을 진행하였다. 전극으로는 4 cm<sup>2</sup> 면적의 탄소 펠트(Carbon felt, Toyobo)를 사용하였다. 멤브레인은 다양한 종류를 사용하였으며, 모두 양이온 교환막(cation exchange membrane, CEM) 종류로, i)Nafion 212 멤브레인, ii)Nafion 117 멤브레인, iii)SELEMION CSO 멤브레인을 사용하여 각각의 성능을 비교하였다. 음극 전해질은 0.1 M 안트라퀴논(AQDS)을 1 M KCl 30 mL에 제조하였으며, 양극 전해질은 0.1 M 템포(TEMPO)를 1 M KCl 30 mL에 제조하였다. 컷-오프 전압은 0.4~1.75 V, 전류밀도는 40 mA·cm<sup>-2</sup>로 진행하였다.

#### 2-2-3. 투과도 측정

분자 크기가 더 작은 활물질인 템포(TEMPO)의 투과도를 측정하기 위해 완전지 테스트를 할 때와 동일하게 셀을 조립한 후, 양극 전해질로는 0.1 M 템포(TEMPO)를 1 M KCl 40 mL에 제조하였으며, 음극 전해질로는 1 M KCl 40 mL를 제조하여 사용하였다. 전류 없이 펌프를 통해 플로잉(flowing) 만 24시간 동안 진행하였

며, 24 시간 뒤의 전해질과 맨 처음의 전해질에 대해 100 mV/s의 주사 속도(scan rate)로 -1.0 V부터 1.0 V까지 주사하여 순환주사전류 측정 실험을 진행하여 투과도를 파악하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1. 전기화학적 특성 평가

안트라퀴논(AQDS)과 템포(TEMPO)의 전기화학적 특성과 두 활물질 조합의 셀 전압을 파악하기 위해 순환주사전류를 측정하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 안트라퀴논(AQDS)의 가역성(0.85의 산화 전류 및 환원 전류 비)은 중성 전해질인 KCl 전해질에 대해

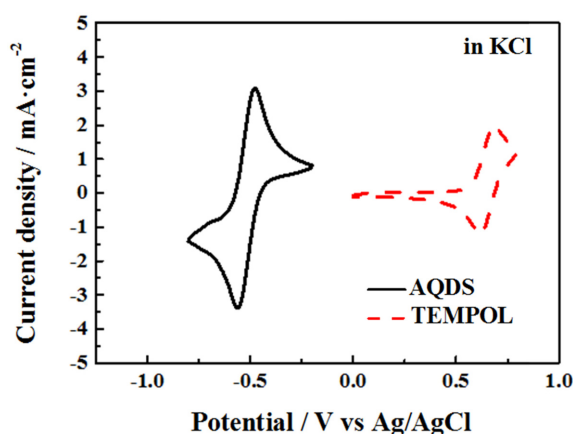


Fig. 2. Cyclic voltammetry results of AQDS and TEMPO measured in KCl supporting electrolyte with a scan rate of 100 mV/s.

우수한 편이며, 전자전달성(0.068 V의 산화 반응 및 환원 반응의 전위차) 또한 이전자 반응을 수반하기 때문에 우수하게 나타난 것을 볼 수 있다. 템포(TEMPO)의 전자전달성 또한 안트라퀴논에서와 비슷한 값(0.068 V의 산화 반응 및 환원 반응의 전위차)을 보였으며, 일전자 반응임에도 불구하고 높은 것을 봤을 때, 템포 자체가 우수한 전자 전달성을 가지는 것으로 판단할 수 있다[23]. 또한, 셀 전압 값은 1.17 V로 높게 나타난다.

#### 3-2. 완전지 평가

레독스 흐름 전지에서 보편적으로 많이 사용되어온 Nafion 212 멤브레인을 사용하여 완전지 테스트를 진행하였다. Nafion 212 멤브레인은 수소 교환 멤브레인(proton exchange membrane)으로, 양이온 교환막(cation exchange membrane)이다. 이에 따라, 환원된 형태에서 (-) 전하를 띠는 안트라퀴논(AQDS)은 전혀 투과되지 않으면서, 전하 전달 매개체인 칼륨 이온( $K^+$ )은 잘 이동할 수 있게 하는 장점을 가진다. 안트라퀴논(AQDS) 및 템포(TEMPO) 활물질의 농도는 모두 0.1 M 이었다. 이러한 활물질 상태 및, 전류밀도  $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$  하에 1 M 염화칼륨 중성 전해질에 대해 완전지 셀 성능을 평가한 결과, Fig. 3에서 볼 수 있듯이 충방전 그래프 상에서는 5사이클까지는 안정적으로 진행되는 것을 확인할 수 있으며, 전류 효율(charge efficiency)은 97%, 전압 효율(voltage efficiency)은 59%를 나타낸다. 하지만, 방전 용량(discharge capacity)은 4 사이클에서  $0.93 \text{ Ah}\cdot\text{L}^{-1}$ 로 이론 용량( $2.68 \text{ Ah}\cdot\text{L}^{-1}$ )의 35%를 나타내었다. 또한, 사이클이 지남에 따라 총 10사이클 동안 방전 용량의 용량 손실율(capacity loss rate)  $0.018 \text{ Ah}\cdot\text{L}^{-1}/\text{cycle}$ 로 손실율이 높음을 알 수 있다.

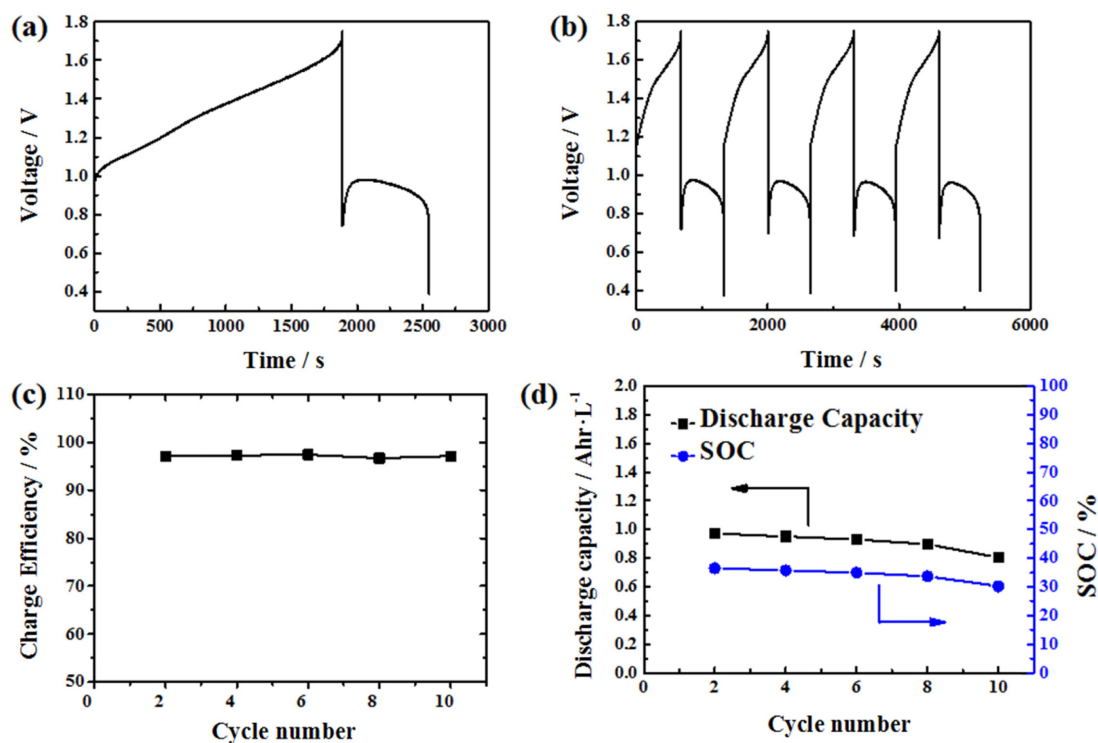


Fig. 3. (a) Charge-discharge curve at 1<sup>st</sup> cycle, (b) charge-discharge curves during 2-5 cycles, (c) charge efficiency curves and (d) discharge capacity and state of charge (SOC) versus cycle number curves of AORFB single cell using 0.1 M AQDS and 0.1 M TEMPO in 1 M KCl supporting electrolytes. Current density used was  $40 \text{ mA}\cdot\text{cm}^{-2}$ , while cut-off voltage range was 0.4–1.75 V with using Nafion 212 membrane.

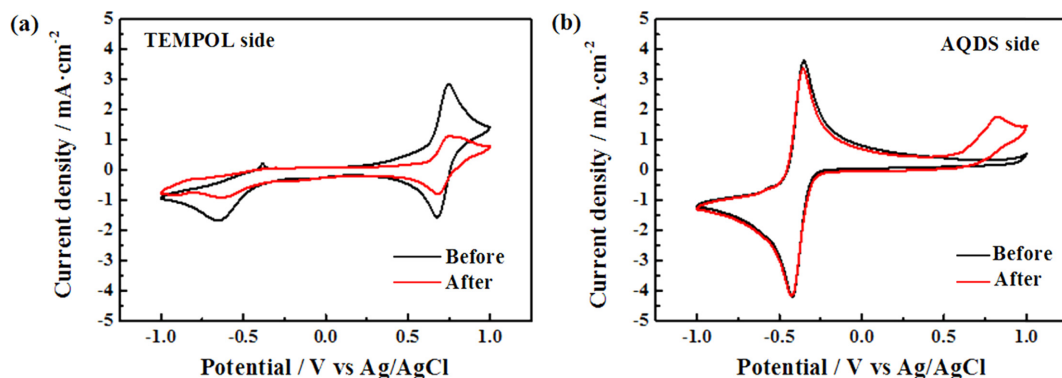


Fig. 4. Cyclic voltammetry comparison between before and after full cell test in (a) TEMPO side electrolytes and (b) AQDS side electrolytes of AORFB single cell using 0.1 M AQDS and 0.1 M TEMPO in 1 M KCl supporting electrolytes with Nafion 112 membrane.

이러한 방전 용량의 용량 손실율의 원인을 분석하기 위해, 완전지 테스트 전과 후의 템포(TEMPO) 쪽과 안트라퀴논(AQDS) 쪽의 전해질에 대해 순환주사전류 측정을 진행하여 비교를 한 결과, Fig. 4에서 볼 수 있듯이 템포(TEMPO)의 경우 거의 절반 정도로 레독스 반응을 할 수 있는 템포 물질이 적어진 것을 확인할 수 있었다. 이는 크게 네가지 원인에 기인한 것으로 파악할 수 있다. 첫째, 템포 물질이 레독스 반응을 할 수 없는 다른 물질로 부반응이 일어나면서 변형이 일어났거나, 둘째, Nafion 멤브레인과의 상호작용에 의해 줄어드는 것으로 유추할 수 있다[24]. 셋째, 템포의 분자 크기 자체가 작으며, 완전한(-) 전하를 띄는 형태가 아니기 때문에 양이온교환막인 Nafion 멤브레인을 사용하였을 때, 투과 현상이 일어났을 가능성도 있다. 또한, 넷째로, 안트라퀴논에 대해서도 완전지 후의 반전지 그래프를 봤을 때, 0.8 V 부근에서 새로운 피크가 생긴 것을 확인할 수 있었고, 이는 반대 쪽에 있는 템포가 안트라퀴논 쪽으로 넘어오면서 생겼을 가능성이 높다.

결과적으로, Nafion 112 멤브레인을 사용했을 때에는 템포의 크로스-오버(cross-over) 현상에 의한 성능 저하가 나타났을 수도 있기 때문에 같은 기능을 하면서 두께가 약 3.6배 두꺼운 Nafion 117 멤브레인을 사용하여 같은 조건 하에 완전지 테스트를 진행하였다. (Nafion 112 멤브레인의 두께는 50.8  $\mu\text{m}$ , Nafion 117 멤브레인의 두께는 183  $\mu\text{m}$  이다). Fig. 5에 나와있듯이, Nafion 117 멤브레인을 썼을 때, 오히려 Nafion 112 멤브레인을 사용하였을 때보다 충방전 시간이 더 줄어들었으며, 과전압 (over-potential)도 더 커진 것을 볼 수 있다. 이는 Nafion 117 멤브레인의 두께가 Nafion 112 멤브레인

의 두께보다 더 두껍기 때문에 저항이 커졌기 때문으로 볼 수 있다 [25]. 또한, 완전지 테스트 전과 후의 반전지 그래프를 비교해보면, 여전히 템포의 양이 더 줄어든 것을 확인할 수 있으며, 이는 Nafion 멤브레인을 사용하는 이상 Nafion 멤브레인에서의 관능기 (functional group) 와 템포 사이의 상호작용에 의한 부반응이 없어지지 않는 것을 확인할 수 있었다. 그에 반해, 안트라퀴논 쪽의 전해질은 Nafion 112 멤브레인을 사용했을 때에는 완전지테스트 후에 보이던 0.8 V 부근에서의 peak이 보이지 않는 것을 확인할 수 있으며, 이는 Nafion 멤브레인의 두께가 두꺼워짐에 따라, 템포의 크로스-오버(cross-over) 현상은 막아줄 수 있는 것으로 보인다.

또 다른 양이온 교환막의 상용 멤브레인인 SELEMION CSO 멤브레인을 사용하여 같은 조건 하에서 완전지 테스트를 추가적으로 진행하였다. Fig. 6에서 결과를 보면, 첫번째 사이클에서의 충방전 그래프만 봤을 때에는 SELEMION CSO 멤브레인을 사용했을 때 Nafion 112 멤브레인을 사용했을 때보다 과전압(over-potential) 측면에서 우수해진 것을 확인할 수 있지만, 5 사이클동안 계속해서 충방전 시간이 줄어드는 것을 확인할 수 있으며, 이는 곧 용량 손실이 Nafion 멤브레인을 사용했을 때보다도 더 크다는 것을 의미한다. 완전지테스트 전과 후의 양쪽 전해질 용액에 대해 반전지 테스트를 진행한 결과, 템포쪽 용액에는 완전지 후에 안트라퀴논의 레독스 반응이 보이고, 안트라퀴논쪽 용액에도 완전지 후에 템포 (TEMPO)의 레독스 반응이 보이는 것을 봤을 때, 오히려 안트라퀴논까지 투과를 심하게 시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

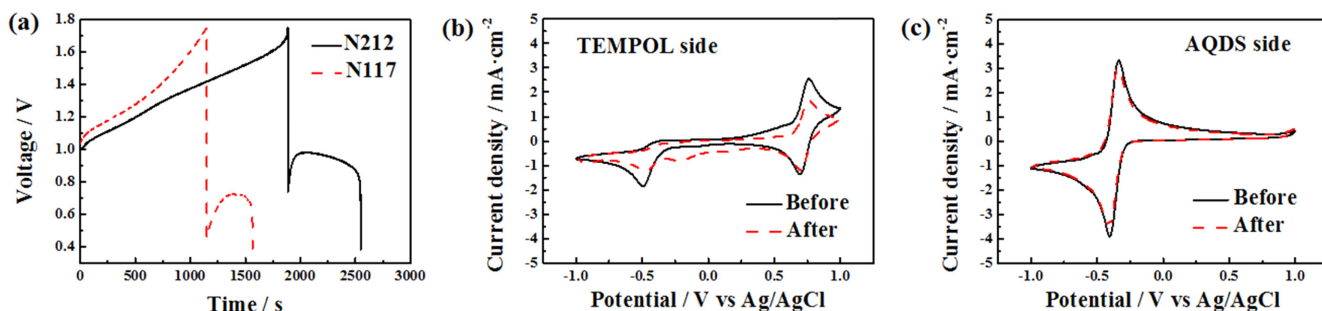


Fig. 5. (a) Charge-discharge curve comparison between the AORFB with Nafion 112 membrane and Nafion 117 membrane at 1<sup>st</sup> cycle and cyclic voltammetry comparison between before and after full cell test in (b) TEMPO side electrolytes and (c) AQDS side electrolytes of AORFB single cell using 0.1 M AQDS and 0.1 M TEMPO in 1 M KCl supporting electrolytes. Current density used was 40 mA·cm<sup>-2</sup>, while cut-off voltage range was 0.4–1.75 V with using Nafion 117 membrane.



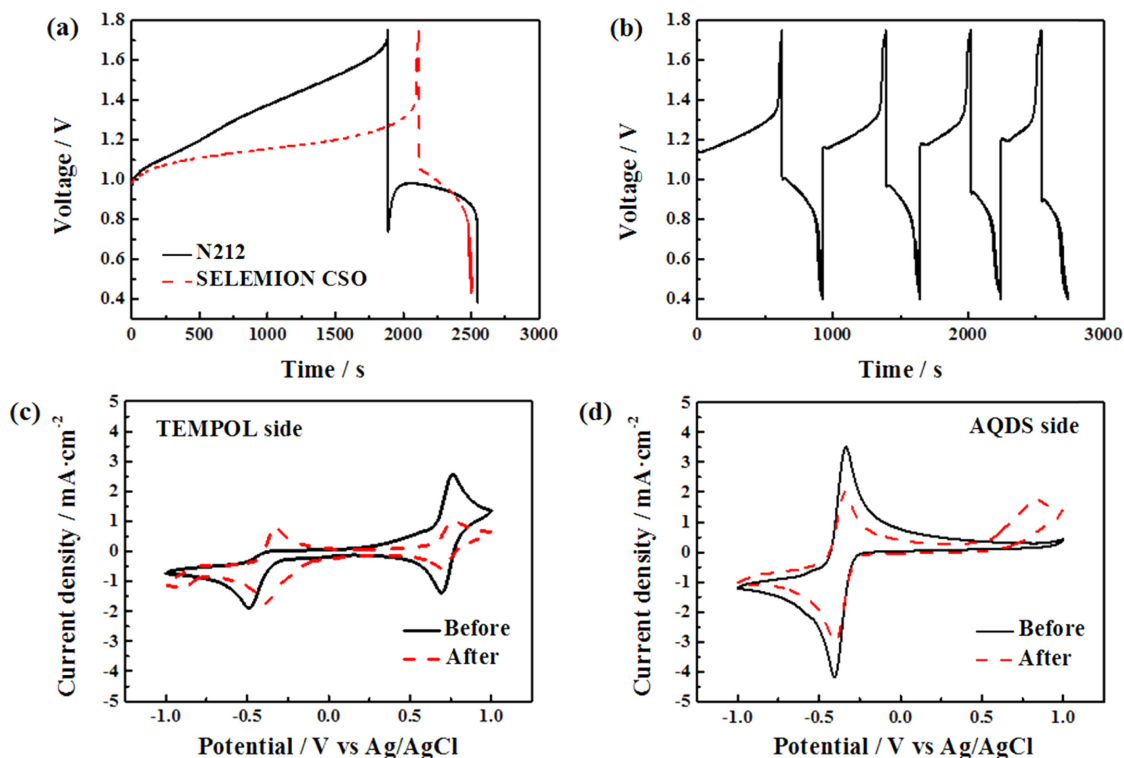


Fig. 6. (a) Charge-discharge curve comparison between the AORFB with Nafion 212 membrane and SELEMION CSO membrane at 1<sup>st</sup> cycle, (b) charge-discharge curves during 2-5 cycles and cyclic voltammetry comparison between before and after full cell test in (c) TEMPO side electrolytes and (d) AQDS side electrolytes of AORFB single cell using 0.1 M AQDS and 0.1 M TEMPO in 1 M KCl supporting electrolytes. Current density used was 40 mA·cm<sup>-2</sup>, while cut-off voltage range was 0.4~1.75 V with using SELEMION CSO membrane.

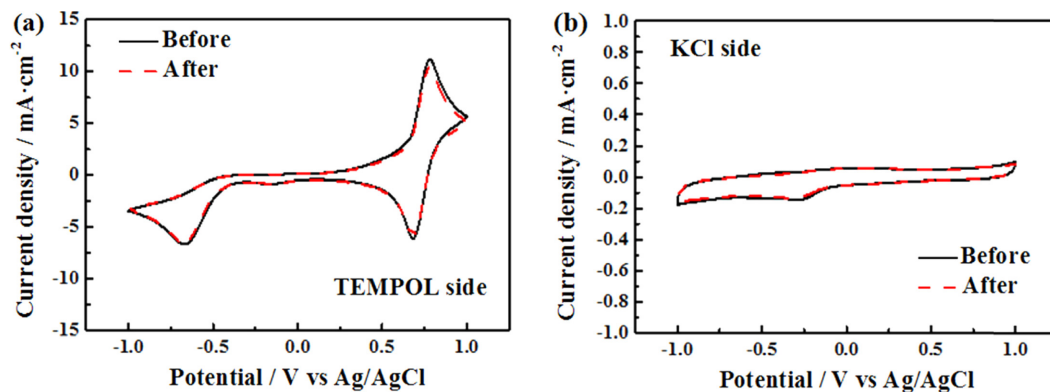


Fig. 7. Permeability results of (a) TEMOL side electrolytes and (b) KCl side electrolytes after 24 hours.

### 3-3. 투과도 평가

Nafion 117 멤브레인을 사용했을 때의 템포의 투과도를 파악하고자, 투과도 테스트를 24시간동안 진행하였고, 결과적으로 Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 반전지 상에서 24시간 동안 템포의 양이 줄어드는 현상이 발견되지 않았기 때문에 투과도 측면에서 큰 용량 손실을 이끄는 것이 아님을 확인할 수 있고 곧, 활물질의 투과도에 의한 용량 손실이 아니라 활물질의 화학적인 구조 상의 변형 또는 멤브레인간의 상호작용에 의한 부반응으로 인한 결과임을 알 수 있다[23].

## 4. 결 론

본 연구에서는 안트라퀴논과 템포를 각각 수계유기레독스 흐름

전지의 음극 활물질, 양극 활물질로 활용한 중성 전해질 기반 수계 유기 레독스 흐름 전지에 대해 다양한 멤브레인을 적용하여 성능 테스트를 진행하였다. 셀 전압은 1.17 V로 높게 나타나며, 상용 양이온 교환막 중 하나인 Nafion 212를 사용하였을 때, 0.1 M의 활물질을 1 M 염화칼륨 전해질에 용해한 후에 수행한 중성 전해질 기반 수계 유기 레독스 흐름전지 완전지 테스트를 통해, 전류효율 97%, 전압 효율 59%의 성능을 나타내었지만, 방전 용량은 4 사이클에서 0.93 Ah·L<sup>-1</sup>로 이론 용량(2.68 Ah·L<sup>-1</sup>)의 35% 밖에 도달하지 않았다. 또한, 총 10사이클 동안 방전 용량의 용량 손실율은 0.018 Ah·L<sup>-1</sup>/cycle로 손실율이 높음을 알 수 있다. 따라서 두께를 높여서 Nafion 117을 이용하여 테스트를 진행하였는데, 그 경우, 템포의 투과는 막을 수 있었지만, 두꺼워진 멤브레인에 의해 저항

이 더 크게 나타남에 따라 용량 손실은 더 커졌음을 확인하였다. 또한, 다른 양이온 교환막인 SELEMION CSO 멤브레인을 사용했을 때에는 오히려 안트라퀴논의 투과까지 유효함에 따라 더 큰 용량 손실을 이끌었다. 이에 따라, 이를 해결하기 위해서는 다른 활물질 조합 또는 멤브레인을 사용하는 방향으로 연구를 진행해야한다.

## 감 사

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20172420108550).

## References

- Christwardana, M., Chung, Y. and Kwon, Y., "A Correlation of Results Measured by Cyclic Voltammogram and Impedance Spectroscopy in Glucose Oxidase Based Biocatalysts," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(11), 3009-3016(2017).
- Jo, M. S. and Cho, J. S., "Application of Hierarchically Porous Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanofibers for Anode Materials of Lithium-ion Batteries," *Korean J. Chem. Eng. Res.*, **57**(2), 267-273(2019).
- Dai, Y. and Zhu, X., "Improved Dielectric Properties and Energy Density of PVDF Composites Using PVP Engineered BaTiO<sub>3</sub> Nanoparticles," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(7), 1570-1576(2018).
- Ryu, J. H., "Operation Planning of Energy Storage System Considering Multiperiod Energy Supplies and Demands," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(2), 328-336(2018).
- Shabanian, S. R., Edrisi, S. and Khoram, F. V., "Prediction and Optimization of Hydrogen Yield and Energy Conversion Efficiency in a Non-catalytic Filtration Combustion Reactor for Jet A and Butanol Fuels," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(8), 2188-2197(2017).
- Kim, S. Y. and Kim, H., "Development of Carbon Felt Electrode Using Urea for Vanadium Redox Flow Batteries," *Korean J. Chem. Eng. Res.*, **57**(3), 408-412(2019).
- Lim, W. G., Jo, C., Lee, J. and Hwang, D. S., "Simple Modification with Amine-and Hydroxyl-group Rich Biopolymer on Ordered Mesoporous Carbon/sulfur Composite for Lithium-sulfur Batteries," *Korean J. Chem. Eng.*, **35**(2), 579-586(2018).
- Lee, J. and Moon, J. H., "Spherical Graphene and Si Nanoparticle Composite Particles for High-performance Lithium Batteries," *Korean J. Chem. Eng.*, **34**(12), 3195-3199(2017).
- Lee, W., Jo, C., Youk, S., Shin, H. Y., Lee, J., Chung, Y. and Kwon, Y., "Mesoporous Tungsten Oxynitride as Electrocatalyst for Promoting Redox Reactions of Vanadium Redox Couple and Performance of Vanadium Redox Flow Battery," *Appl. Surf. Sci.*, **429**, 187-195(2018).
- Jung, M., Lee, W., Noh, C., Konovalova, A., Yi, G. S., Kim, S., Kwon, Y. and Henkensmeier, D., "Blending Polybenzimidazole with an Anion Exchange Polymer Increases the Efficiency of Vanadium Redox Flow Batteries," *J. Memb. Sci.*, **580**, 110-116(2019).
- Jung, H. Y., Cho, M. S., Sadhasivam, T., Kim, J. Y., Roh, S. H. and Kwon, Y., "High Ionic Selectivity of Low Permeable Organic Composite Membrane with Amphiphilic Polymer for Vanadium Redox Flow Batteries," *Solid State Ion.*, **324**, 69-76(2018).
- Struzyńska-Piron, I., Jung, M., Maljusch, A., Conradi, O., Kim, S., Jang, J. H., Kim, H., Kwon, Y., Nam, S. W. and Henkensmeier, D., "Imidazole Based Ionenex, Their Blends with PBI-OO and Applicability as Membrane in a Vanadium Redox Flow Battery," *Eur. Polym. J.*, **96**, 383-392(2017).
- Jung, H. Y., Jeong, S. and Kwon, Y., "The Effects of Different Thick Sulfonated Poly(ether ether ketone) Membranes on Performance of Vanadium Redox Flow Battery," *J. Electrochem. Soc.*, **163**(1), A5090-A5096(2016).
- Jung, M., Lee, W., Krishnan, N. N., Kim, S., Gupta, G., Komsysiaka, L., Harms, C., Kwon, Y. and Henkensmeier, D., "Porous-Nafion/PBI Composite Membranes and Nafion/PBI Blend Membranes for Vanadium Redox Flow Batteries," *Appl. Surf. Sci.*, **450**, 301-311(2018).
- Noh, C., Jung, M., Henkensmeier, D., Nam, S. W. and Kwon, Y., "Vanadium Redox Flow Batteries Using meta-Polybenzimidazole-Based Membranes of Different Thicknesses," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **9**(42), 36799-36809(2017).
- Noh, C., Lee, C., Chi, W. S., Chung, Y., Kim, J. and Kwon, Y., "Vanadium Redox Flow Battery Using Electrocatalyst Decorated with Nitrogen-Doped Carbon Nanotubes Derived from Metal-Organic Frameworks," *J. Electrochem. Soc.*, **165**(7), A1388-A1399(2018).
- Lee, W., Permatasari, A., Kwon, B. W. and Kwon, Y., "Performance Evaluation of Aqueous Organic Redox Flow Battery Using Anthraquinone-2,7-disulfonic Acid Disodium Salt and Potassium Iodide Redox Couple," *Chem. Eng. J.*, **358**, 1438-1445(2019).
- Yang, B., Hooper-Burkhardt, L., Wang, F., Prakash, G. S. and Narayanan, S. R., "An Inexpensive Aqueous Flow Battery for Large-scale Electrical Energy Storage Based on Water-soluble Organic Redox Couples," *J. Electrochem. Soc.*, **161**(9), A1371-A1380(2014).
- Lee, W., Kwon, B. W. and Kwon, Y., "Effect of Carboxylic Acid-doped Carbon Nanotube Catalyst on the Performance of Aqueous Organic Redox Flow Battery Using the Modified Alloxazine and Ferrocyanide Redox Couple," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, **10**(43), 36882-36891(2018).
- Lee, W. and Kwon, Y., "Performance Evaluation of Aqueous Organic Redox Flow Battery Using Methylene Blue and Vanadium Redox Couple," *Korean Chem. Eng. Res.*, **56**(6), 890-894(2018).
- Lin, K., Gómez-Bombarelli, R., Beh, E. S., Tong, L., Chen, Q., Valle, A., Aspuru-Guzik, A., Aziz, M. J. and Gordon, R. G., "A Redox-flow Battery with an Alloxazine-based Organic Electrolyte," *Nat. Energy*, **1**(9), 16102(2016).
- Lee, W., Chung, K. and Kwon, Y., "Performance Evaluation of Aqueous Organic Redox Flow Battery using Anthraquinone and Benzoquinone Redox Couple with ammonium chloride electrolyte," *Korean Chem. Eng. Res.*, **57**, 239-243(2019).
- Janoschka, T., Martin, N., Hager, M. D. and Schubert, U. S., "An Aqueous Redox-Flow Battery with High Capacity and Power: The TEMPTMA/MV System," *Angew. Chem. Int. Ed.*, **55**(46), 14427-14430(2016).
- Chang, Z., Henkensmeier, D. and Chen, R., "Shifting Redox Potential of Nitroxyl Radical by Introducing an Imidazolium Substituent and Its Use in Aqueous Flow Batteries," *J. Power Sources*, **418**, 11-16(2019).
- Jeong, S., Kim, L. H., Kwon, Y. and Kim, S., "Effect of Nafion Membrane Thickness on Performance of Vanadium Redox Flow Battery," *Korean J. Chem. Eng.*, **31**(11), 2081-2087(2014).