

세가지 다른 형태의 탄소촉매 적용에 따른 바나듐레독스흐름전지 성능 변화에 관한 연구

추천호¹ · 정상현¹ · 정주영² · 천승규¹ · 이진우² · 권용재^{1†}
¹서울과학기술대학교 에너지환경대학원, ²포항공과대학교 화학공학과

A Study on The Effects of Three Different Carbon Catalysts on Performance of Vanadium Redox Flow Battery

CHEOUNHO CHU¹, SANGHYUN JEONG¹, JOOYOUNG JEONG², SEUNG-KYU CHUN¹,
JINWOO LEE², YONGCHAI KWON^{1†}

¹Graduate School of Energy and Environment, Seoul National University of Science and Technology, 232 Gongreung-ro,
Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

²Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), 77 Cheongam-ro,
Nam-gu, Pohang, Kyungbuk 790-784, Korea

Abstract >> In this study, we carry out a study on how to improve performance of vanadium redox flow battery (VRFB) through promoting reaction rate of rate determining vanadium reaction ($[\text{VO}]^{2+}/[\text{VO}_2]^+$). In order to do that, three different carbons like Vulcan (XC-72), CMK3 and MSU-F-C are adopted as the catalysts, while their catalytic activity and reaction reversibility are evaluated using half-cell tests. Their topological images are also measured by TEM. For estimation of the VRFB performance, multiple charge-discharge curves of VRFBs including the catalysts are measured by single cell tests. As a result of that, MSU-F-C shows relatively excellent catalytic activity and reaction reversibility as well as large surface area compared to those of Vulcan (XC-72) and CMK3. Also, in terms of the performance of VRFBs including the catalysts, VRFB including MSU-F-C indicates (i) low charging/discharging overpotentials and low internal resistance, (ii) high charge/discharge capacities and (iii) high energy efficiency. These VRFB performance data are well agreed with results on catalytic activity and reaction reversibility. The reason that MSU-F-C induces superior VRFB performances is attributed to (i) its large surface area and (ii) its hydrophilic surface functional groups that mainly consist of hydroxyl bonds that are supposed to play active surface site role for facilitating $[\text{VO}]^{2+}/[\text{VO}_2]^+$ redox reaction. Based on the above results, it is found that adoption of MSU-F-C as catalyst for VRFB results in improvement in VRFB performance by promoting the languid $[\text{VO}]^{2+}/[\text{VO}_2]^+$ redox reaction.

Key words : Vanadium redox flow battery(바나듐레독스흐름전지), MSU-F-C catalyst(다공성 탄소 촉매), $[\text{VO}]^{2+}/[\text{VO}_2]^+$ redox reaction(바나듐 4가 및 5가 레독스반응), Charge-discharge curve(충/방전 커브), Energy efficiency(에너지 효율)

[†]Corresponding author : kwony@seoultech.ac.kr

Received: 2015.04.07 in revised form: 2015.04.28 Accepted: 2015.4.30

Copyright © 2015 KHNES

1. 서 론

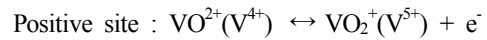
화석연료의 고갈과 CO₂ 감축의무에 따라 새로운 신재생에너지 관련 연구가 상당히 많이 진행중이며, 또한 대규모/대용량의 풍력발전이나 태양광 발전의 설치가 점점 증가하고 있는 상황이다. 하지만 대규모/대용량의 신재생에너지는 주어진 환경에 따라 Power 출력이 심하게 변동하기 때문에 일정하지 않은 Power 출력으로 인해 여러 가지 문제점들이 나타날 수 있다. 이를 해결하기 위한 방법중의 하나로 대용량 이차전지 개발이 제안되어 졌고 현재 많은 기초 연구 및 실증이 진행되고 있다. 또한, 에너지를 거의 전량 수입하고 있는 우리나라의 특성상 에너지를 효율적으로 이용하고 신재생에너지를 효과적으로 사용하는 것은 매우 중요한 기술이다.^{1,2)}

이러한 대용량 이차전지 솔루션 중의 하나로 고려되는 레독스 흐름전지는 기존의 이차전지와는 다르게 전해액 중 활물질이 산화 환원되어 충/방전 되는 시스템으로 전해액의 화학적 에너지를 직접 전기에너지로 저장시키는 전기화학적 축전장치이다. 이러한 특성 때문에 다른 이차전지에 비해 수명이 길고, 비용이 적으며 설계의 활용을 유연하게 할 수 있고 그로인해 대용량 에너지 저장이 가능해진다. 또한, 충전과 방전 시스템을 분리할 수 있기 때문에 에너지밀도 및 출력 크기를 마음대로 조절할 수 있다는 장점도 크게 있다. 이러한 장점들로 인해 간헐적인 에너지원인 태양광 에너지나 풍력 등의 신재생 에너지를 저장하여 안정된 전력을 공급함으로써 에너지 전환효율을 증가시키는데 많은 효과를 나타내고 있다.^{3,4)}

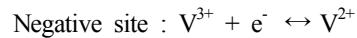
여러 종류의 레독스 흐름전지 중 현재 많이 연구되고 있는 것은 4개의 다른 산화수를 가지는 바나듐 이온들의 레독스반응을 이용하는 바나듐 레독스 흐름전지(Vanadium Redox Flow Battery; VRFB)다. VRFB는 전지의 활물질로 사용되는 양극액과 음극액의 성분으로 모두 바나듐 이온을 이용하고 있기

때문에 이중 활물질을 사용하는 다른 전지에 비해 이온교환막을 통과하는 금속이온의 오염 및 크로스 오버 문제가 완화되며 전해액을 간단히 조절하여 초기 상태로 리셋해서 재사용을 할 수 있으므로 지속적으로 오랫동안 사용이 가능하며, 전해액을 버리지 않으므로 환경적으로도 적절한 시스템이다.^{3,6)}

전극 반응 측면에서 살펴보면, VRFB의 양극에서의 [VO]²⁺/[VO₂]⁺ 커플 반응과 음극에서의 [V]²⁺/[V]³⁺ 커플 반응은 다음과 같으며 이론적인 최대 기전력은 100% 충전상태 시 1.26V이다.



[1.0V vs. SHE]



[-0.26V vs. SHE]

이러한 레독스 흐름전지에서 문제는 양 전극에서의 반응 중 느린반응이 생기게 되고 이로 인해 전체 반응의 반응속도가 느리게 된다는 것이다. 이로 인해 VRFB 성능이 감소하게 된다. 여러문헌들에 의하면 이러한 율속반응은 주로 양극에서의 [VO]²⁺/[VO₂]⁺ 커플 반응인 것으로 알려져있다. 이러한 느린 양극 반응을 활성화 시키기 위해서 다양한 형태의 전극과 축매 물질이 이용되어져왔다.

그중에서도, 순수한 그래파이트 펠트전극이 그것의 높은 표면적과 산 전해질 조건에서의 안정성 때문에 가장 대중적으로 이용되었다. 하지만 [VO]²⁺/[VO₂]⁺ 커플 반응을 더욱 활성화 하기 위해 추가적인 축매의 사용이 오랫동안 고려되어졌다.⁷⁾ 아울러 소수성인 그래파이트 펠트 표면은 바나듐의 커플반응을 느리게 하는 것으로도 알려져왔다.

축매를 이용하여 [VO]²⁺/[VO₂]⁺의 산화환원 반응의 속도를 높이는 방법에는 그래파이트 파우더나 다공성 탄소, 탄소나노튜브 등을 기반으로 하여 탄소 표면에 질소 원자나 붕소원자를 도핑 시켜 표면을

개선하는 방법과 반응성이 뛰어난 Pt와 Ir 같은 귀금속을 촉매로 담지하여 반응성을 극대화하는 방법들이 연구 되고 있다.^{5,8)} 하지만 귀금속의 경우 좋은 성능에 비해 가격이 매우 비싸다는 문제점을 가지고 있기 때문에 이를 대체하기 위한 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

따라서 본 연구는 반응속도가 느린 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 의 산화 환원 반응을 활성화 시키면서 그래파이트 펠트의 비나뭇 산화, 환원 가역성을 늘리는 방법으로 기존의 vulcan 촉매, 나노다공성 탄소인 CMK3, 메조다공성 탄소인 MSU-F-C 라는 탄소물질들을 이용하여 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 반응성 및 가역성, VRFB 성능 향상성등을 평가하여 이들 탄소 촉매들 중에 가장 긍정적으로 VRFB 성능을 향상시킬 수 있는 것을 평가하였다.

2. 실험방법

2.1 CMK3 합성법

CMK3는 4nm이하의 작은 기공 크기를 갖는 일정한 다공성 탄소 담지체로 그래파이트 펠트와의 기공 크기의 차이를 뒀으므로 추가적인 표면적을 만들고 기공 사이즈의 변화로 인한 유체의 흐름 및 반응성을 개선하는 것을 목표로 한다.⁹⁾

CMK3의 다공성 구조를 만들기 위해서는 SBA-15 라는 실리카 구조를 틀로 사용하여 합성한다.

2.1.1 SBA-15 합성

8g의 P123을 250mL의 1.6M HCl용액에 녹이고 40°C로 가열하여 완전히 투명한 상태의 용액으로 만든다. TEOS를 18.2ml 추가하여 40°C를 유지하며 24시간 동안 교반한다.

기존의 용액을 100°C로 가열된 오븐에서 24시간 수열합성 한다. 수열합성 된 용액은 필터링을 통해

걸러내며 건조 과정을 거친 뒤 550°C에서 공기 분위기 하에서 퍼니스로 4시간 SBA-15를 제외한 다른 물질을 제거하는 과정을 거치면 완성된다.⁹⁾

2.1.1 CMK3 담지체 합성

Oxalic acid(OA)에 furfuryl alcohol(FA)을 FA:OA = 200 : 1(FA 1mL / OA 0.005208g)의 비율로 녹여 SBA- 15 6g에 넣고 함침법을 이용하여 반응시킨다. 이때 함침법에서 사용되는 용액은 SBA-15 기공의 부피에 따라 들어가는 양이 달라진다. 따라서 일정 SBA-15 파우더에 FA와 OA가 혼합된 용액을 천천히 떨어뜨려 주며 섞어주면 노란 빛을 띠는 상태에서 색이 없어질 때까지 조금씩 떨어뜨려 주면서 혼합액과 SBA-15를 섞어준다.

잘 섞인 시료를 85°C로 오븐에 넣어 가열해주면 용액들이 고분자화 되며, 공기 분위기하에서 150°C로 3시간 가열해주면서 안정화를 진행하고 질소분위기 하에서 850°C로 4시간 동안 가열해 주면 탄소화가 이루어지게 된다.

탄소화가 끝난 시료는 시료 질량 당 10wt% HF 10~20ml, 증류수 50ml와 에탄올 50ml를 혼합하여 세척과 여과를 반복하며 SBA-15를 제거한 다음 건조시키면 CMK3가 완성된다.⁹⁾

2.2 MSU-F-C 합성법

다공성 담지체를 사용하여 추가적인 표면적을 만들고 30nm 이하의 기공 사이즈가 추가됨에 따른 변화로 유체의 흐름을 개선하는 방향으로 진행한다. CMK3보다 큰 기공크기를 사용함으로써 기공크기에 대한 비교도 진행한다.

MSU-F-C의 기본적인 합성법은 기존의 논문의 과정을 따랐다.¹⁰⁾

MSU-F-silica를 단단한 구조체로 이용하여 furfuryl alcohol를 탄소 공급원으로 하는 방법으로 MSU-F-

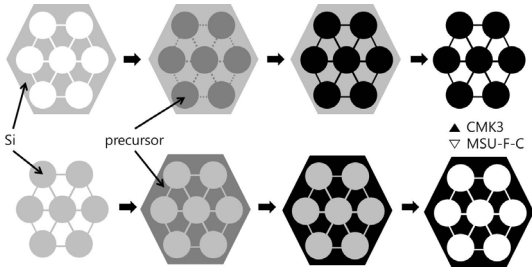


Fig. 1 A schematics showing synthetic procedure of CMK3 and MSU-F-C

silica[19]를 가열을 통해 불순물을 제거하는 작업을 진행하고 furfuryl alcohol과 잘 결합 할 수 있도록 즉, 산성점을 생성하기 위해 $AlCl_3$ 을 $Si/Al=20$ 비율로 혼합 반응을 하여 MSU-F-silica에서 silica 부분에 aluminum을 합성한다. 1g의 Al/MSU-F를 1ml의 furfuryl alcohol과 혼합하여 $85^\circ C$ 에서 4시간 동안 진공 상태에서 함침법을 이용하여 중합반응을 진행한다. 그 후에 $850^\circ C$, 질소 분위기 하에서 2시간 동안 탄소화를 진행한다. 탄소화를 마치면 남아있는 alumino-silicate 구조체를 제거하기 위해 5wt% HF의 용액을 사용하여 반복적으로 행균 처리 한다. 이러한 CMK3 및 MSU-F-C 를 만드는 합성순서는 Fig. 1에 간략하게 정리되었다.

2.3 특성 평가

기공크기에 따라 달라지는 비표면적을 확인하기 위해 BET식 [Brunauer-Emmett-Teller equation]을 이용한 분석과 정확한 기공의 측정을 위해 Kelvin equation을 이용하여 비표면적 측정에서 나온 압력 변화의 결과를 식 (1)에 대입함으로써 기공의 크기를 추정할 수 있는 BJH 방법을 이용한다⁶⁾.

$$\ln \frac{P}{P_0} = \frac{-2\gamma \bar{V}}{rRT} \cos\theta \quad (1)$$

식 (1)에서 P/P_0^{-1} 은 압력 차에 의한 비를 나타내

며 γ 은 표면장력, V 는 흡착된 기체의 부피, r 은 기공의 반지름, R 은 기체상수, T 는 절대온도와 θ 는 접촉각도를 의미한다.

투과전자현미경(Philips, CM30)을 이용하여 투영한 상을 통해 20만 배 확대된 상을 얻어 기공의 구조와 크기를 확인한다.

담지체의 산화환원 반응성 및 가역성 등을 측정하기 위해 정전위기(CHI 7200, CH Instrument, USA)를 이용하여 다양한 반전지 반응특성을 평가하였다. 주로 반복주사 전압-전류법(Cyclic Voltammetry, CV) 실험을 실시하였다. 반전지 특성 측정을 위한 기준전극으로는 3M의 KCl에 담긴 Ag/AgCl 전극을 상대전극으로는 백금 와이어가 사용되었다. 작업 전극에 담지체를 올리기 위해 촉매입자들을 이소프로판올과 5wt% 나피온(Solution Technology, Inc., 1100EW)용액에 용해시켜 초음파를 이용하여 10분간 섞어준다. 이렇게 제조한 촉매잉크를 유리탄소전극(Glass Carbon Electrode, GCE) 에 적정량을 로딩시킨다. 전해질로는 1M 황산과 1M 황산바나듐을 혼합한 용액을 이용하였다.

반응성 및 가역성 등을 실험한 후에 그 담지체들이 바나듐 흐름전지 내에서 성능에 어떠한 영향을 미치는지 측정하기 위해 완전지 테스트가 진행되었다. 바나듐 흐름전지에 담지체를 적용하기 위해 합성된 담지체는 그라파이트 펠트에 스프레이하는 형식으로 적용하여 실험했으며 유효면적은 $4cm^2$ 이고 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 의 반응을 보다 활성화하기 위해 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 반응이 일어나는 양극 쪽에만 스프레이를 했다. 또한 분리막으로는 나피온 212(Dupont사, 미국)가 이용되었다. 담지체를 스프레이하기 위해 필요한 잉크는 탄소담지체, 5wt% 나피온, 증류수와 이소프로필알코올을 적당량 섞고 초음파로 분산한 후 스프레이건을 이용하여 도포했다.

활물질로는 1M 황산과 1M 황산바나듐을 혼합한 용액을 음극에는 V^{3+} 상태로 15ml, 양극에는 VO^{2+} 상

태로 15ml 넣고 15ml min의 유속으로 흘려주며 충전과 방전시 40mA cm²의 전류밀도로 진행한다.

3. 결과 및 토론

준비된 담지체의 기공크기를 비교하기 위해 TEM 분석과 BET분석을 실시했다.

Fig. 2의 TEM사진에서 vulcan과 다르게 기공이 있음을 육안으로 확인 할 수 있고 기공 크기의 차이를 확연히 알 수 있으며 정량적으로 분석하기 위해 Fig. 3과 Table 1을 통해 비표면적이 vulcan(214m² g⁻¹)에 비해 CMK3(1496m² g⁻¹)와 MSU-F-C(1041m² g⁻¹)가 5~7배가량 크다는 것을 확인 할 수 있었다. 또한 CMK3와 MSU-F-C는 기공을 갖는 형태로 CMK3는 4nm 이내이고 MSU-F-C는 30nm 이내의 불규칙적인 기공이 존재한다.

담지체들의 바나듐 용액 내에서 반응성을 확인하기 위해서 바나듐 용액속의 [VO]²⁺/[VO₂]⁺ 반응에 대한 피크를 확인하는 3전극(CV) 실험을 진행했다. [VO]²⁺/[VO₂]⁺ 반응은 이론적으로 1.00 V에서 이루어지나 기준전극을 은/염화은 전극을 사용하기 때문에 약 0.2 V정도 작게 측정될 것이다. 따라서 약 0.8

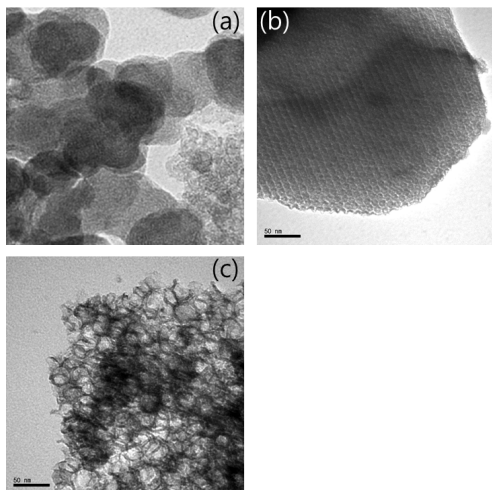


Fig. 2 TEM images of (a) vulcan, (b) CMK3, (c) MSU-F-C supporters.

V에서 측정이 이루어지며 담지체의 고유 저항으로 인한 과전류 혹은 반응에 인한 저항으로 차이가 발생할 수 있다.

Fig. 4는 각 담지체를 유리질탄소전극위에 10μl 올려 건조시킨 뒤 2차원이라는 가정 하에 3전극 측정을 진행한 결과이다.

면적이 작은 vulcan은 반응성이 작으며 산화와 환원의 간격이 가장 넓다. CMK3는 vulcan 과 크게 차

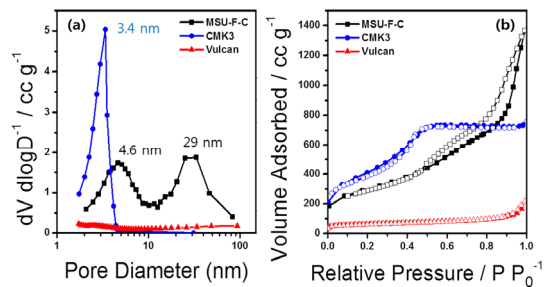


Fig. 3 (a) BJH measurements of vulcan, CMK3 and MSU-F-C, (b) BET measurements of vulcan, CMK3 and MSU-F-C

Table. 1 BET surface area of vulcan, CMK3 and MSU-F-C supporters

	BET Surface Area (m ² g ⁻¹)
MSUF-C	1041
CMK-3	1496
Vulcan	214

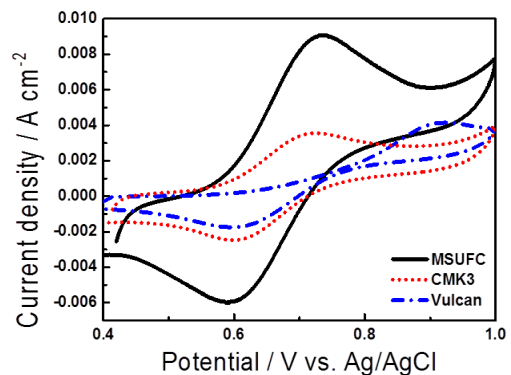


Fig. 4 CV curves of (a) vulcan, (b) CMK3, (c) MSU-F-C supporter on V⁴⁺/V⁵⁺ redox reaction measured by 1M VOSO₄ and 1M H₂SO₄. (Scan rate = 5mV s⁻¹)

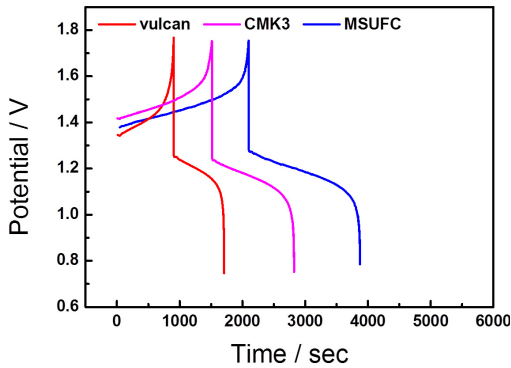


Fig. 5 Charge-discharge curves of VRFB single cells including (a) vulcan, (b) CMK3, (c) MSU-F-C supporters, respectively

이가 없는 정도이고 MSU-F-C에 비해 3배가량 작게 측정된다. CMK3는 다공성이기 때문에 비표면적은 가장 넓었으나 반응성면에서 가장 작게 측정이 되었다. 이는 기공의 크기가 너무 작아서 바나듐 이온이 이동하는 것에 방해가 되는 것으로 예상된다. 다만 산화와 환원의 간격이 작게 측정된 것으로 보아 전자를 전달함에 있어 보다 뛰어나고 산화 환원의 비율이 보다 1에 가까워 가역성이 뛰어날 것이라 예상할 수 있다.

MSU-F-C는 반응성은 약 3배, 표면적과 가역성 측면에서 CMK3와 비슷한 모습을 보이며 가장 뛰어난 모습을 확인할 수 있고 담지체로 좋은 영향을 줄 수 있을 것이라 판단할 수 있었다.

3전극 실험이 단위전지 상에서 동일한 영향을 나타내는지 확인하기 위해 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 반응이 이루어지는 쪽에만 그래파이트 펠트에 3가지 담지체 분산액을 뿌려 총 15회의 반복을 진행했다.

Fig. 5는 총 15회의 충전, 방전 중 가장 마지막 충전과 방전을 나타낸 모습이다.

3전극 측정 결과와는 다르게 CMK3의 결과는 산화 환원 반응 크기가 vulcan 보다 작음에도 불구하고 충전, 방전된 정도가 보다 높은 수치로 측정되었다. 3전극 실험에서는 움직임이 없는 실험인 반면에 단위전지 셀의 실험은 흐름으로 인한 지속적인 유체의

움직임이 CMK3의 기공 사이를 지날 수 있도록 도와주는 역할이 생겨서 비표면적 증가에 의한 효과가 적용된 것으로 추측한다.

3전극 결과에서 가장 우수한 MSU-F-C의 결과처럼 충전, 방전의 시간에 따른 전압 그래프도 가장 충전, 방전이 오랫동안 지속되며 이는 충전, 방전량이 더 많을 것이라 예상할 수 있다. 또한 전류는 일정하게 공급이 되기 때문에 충전이 시작되는 시작 전압은 충전이 진행되는 순간의 저항을 확인할 수 있는 요소이며 방전이 시작되는 점은 방전으로 전환되면서 소모된 전압을 확인할 수 있는 척도가 될 수 있다. 즉, 시간이 0초인 부분인 충전이 시작되는 지점에서 전압이 낮을수록 손실되는 양이 작으며 방전이 시작되는 수직으로 떨어지다가 바뀌는 부분의 전압이 클수록 충전에서 방전으로 전환될 때 손실되는 양이 작다고 판단할 수 있다.

MSU-F-C와 CMK3는 비표면적이 넓은 만큼 접촉 저항이 크게 늘어남에 비해 생기는 전압의 손실이 일정량 있지만 비표면적의 증가만큼은 아니며 오히려 방전으로 전환 시 vulcan보다 높은 전압 수치를 통해 내부 저항이 작은 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 3가지 샘플의 전하, 전압, 에너지 효율을 앞의 5회를 제외한 10회를 나타낸 것으로 일정하게 경향이 보이는 10회를 비교 결과로 사용한다. 효율의 결과는 방전/충전 비율을 백분율로 나타낸 것으로 비율상으로는 거의 비슷한 모습을 보이며 이는 3전극 결과에서 산화와 환원의 비율이 비슷함을 통해 비슷한 수치가 나올 것이라는 예상과 일치한다. 피크 크기의 절대량과 산화, 환원 시 전압의 차이는 Fig. 7의 결과에 영향을 준다고 말할 수 있다. 앞의 안정화를 위한 5회 동안 손실된 충전, 방전량이 적용된 결과 담지체로 인한 반응의 최대치가 용량의 결과로 나오게 되는 것이다. 그 후 10회 동안의 충전, 방전 진행 시 앞서 말한 여러 영향들이 복합적으로 작용되면서 용량의 손실이 조금씩 나타나게 된다.

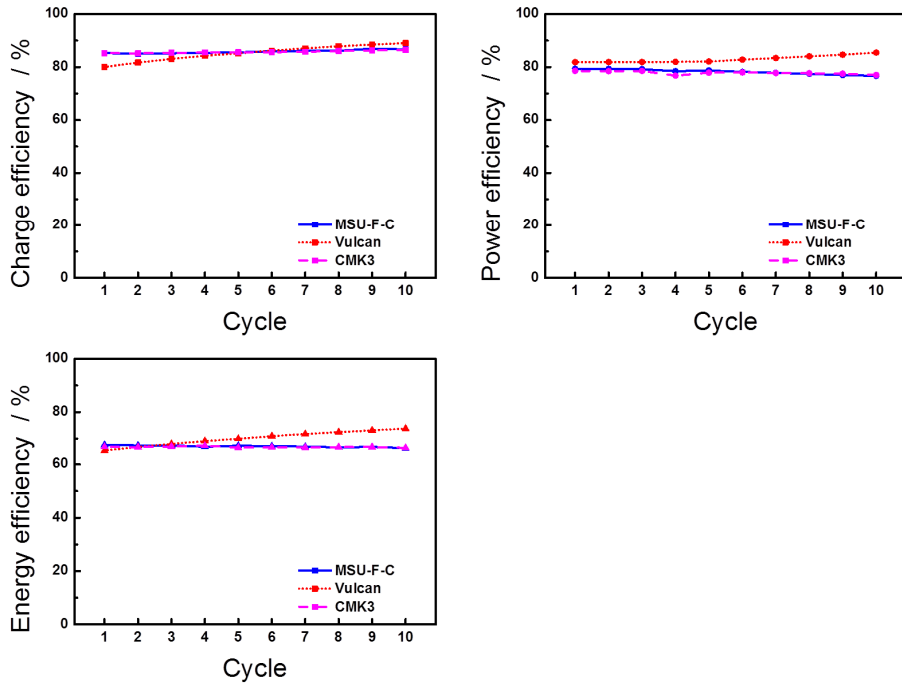


Fig. 6 Three efficiencies (charge, power and energy efficiencies) of VRFB single cells including vulcan, CMK3 and MSU-F-C supporters

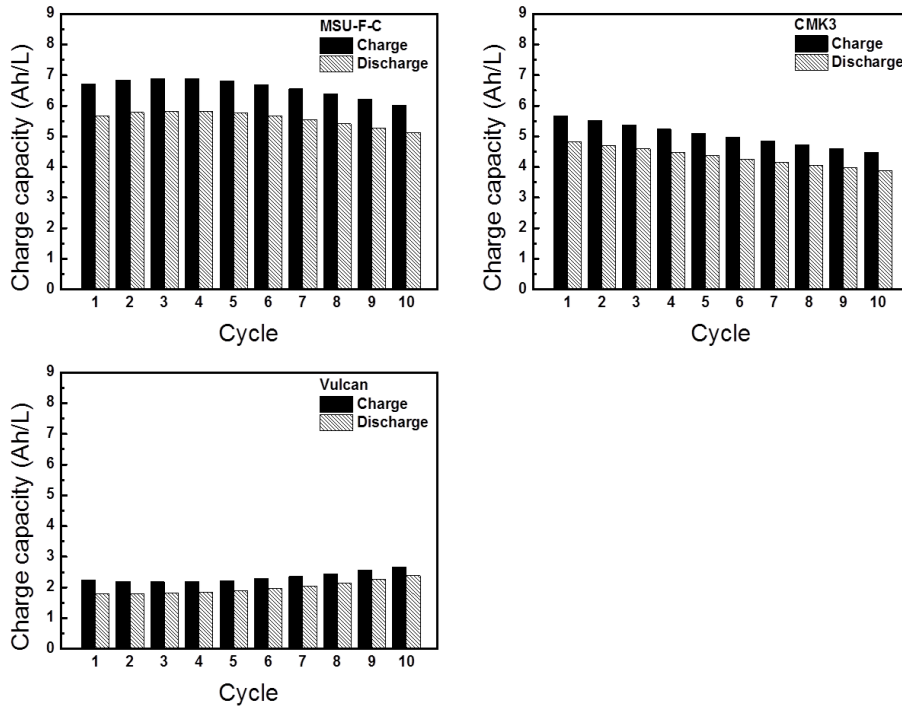


Fig. 7 Charge-discharge capacities of VRFB single cells including vulcan, CMK3 and MSU-F-C supporters

전체적으로 3전극 실험을 통해 담지체의 자체적인 특성을 알게 되고 단위 전지에 적용함으로써 나타나는 새로운 특성들로 검증 할 수 있으며 다공성의 담지체가 보다 효과적으로 나타남을 확인 할 수 있다.

이러한 MSU-F-C 촉매 사용에 따른 우수한 VRFB 결과는 크게 2가지 원인이 있는 것으로 평가된다. 첫째, MSU-F-C 촉매의 큰 표면적, 둘째, MSU-F-C에서 큰 비율을 차지하는 친수성적인 표면관능 그룹들이 그것들이다.⁶⁾

Fig. 3과 Table 1에서 보듯이 MSU-F-C 촉매는 큰 활성 표면적을 가지고 있다. 이러한 큰 표면적은 바나듐 이온들의 반응을 활성화 시킬 수 있는 활성 사이트가 많다는 의미이다. 또한, 참고문헌들에 의하면 MSU-F-C의 표면은 다른 탄소 담지체들보다 친수성 반응기(C-OH, C=O, C-OOH 등)를 표면에 많이 함유하고 있다.⁶⁾ 이러한 친수성 그룹은 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 반응을 활성화 시키는 것으로 알려져 있어 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 반응속도가 향상되고 VRFB 성능이 높아지는 역할을 하는 것으로 평가된다.

4. 결 론

본 논문에서는 반응속도가 느린 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 의 산화 환원 반응을 활성화 시키면서 그래파이트 펠트의 바나듐 산화, 환원 가역성을 늘리는 방법으로 기존의 vulcan 촉매, 나노다공성 탄소인 CMK3, 메조다공성 탄소인 MSU-F-C 라는 탄소물질들을 촉매로 이용하여 $[VO]^{2+}/[VO_2]^+$ 반응성 및 가역성, VRFB 성능 향상성등을 평가하여 이들 탄소 촉매들 중에 가장 긍정적으로 VRFB 성능을 향상시킬 수 있는 것을 평가하였다.

평가 결과, MSU-F-C 촉매가 큰 활성표면적 및 많은 표면 친수성 관능기 함유로 인해 가장 우수한 촉매 반응성, 반응가역성 및 VRFB 성능을 보여주었다. 그리고 분석결과 이것은 MSU-F-C 촉매의 큰 표면적

및 MSU-F-C에서 큰 비율을 차지하는 친수성적인 표면관능 그룹들 때문에 기인함을 알 수 있었다.

후 기

이 연구는 2015년 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

1. R.H. Huang, C.H. Sun, T.M. Tseng, W.K. Chao, K.L. Hsueh, F.S. Shieu, "Investigation of active electrodes modified with platinum/multiwalled carbon nanotube for vanadium redox flow battery", *Journal of the Electrochemical Society* 159 (2012) A1579.
2. N.H. Choi, S.K. Kwon, H.S. Kim, "Analysis of the oxidation of the V(II) by dissolved oxygen using UV-visible spectrophotometry in a vanadium redox flow battery", *Journal of the Electrochemical Society* 160 (2013) A973.
3. K.J. Kim, M.S. Park, J.H. Kim, U. Hwang, N.J. Lee, G.J. Jeong, Y.J. Kim, "Novel catalytic effects of Mn₃O₄ for all vanadium redox flow batteries", *Chemical Communications* 48 (2012) 5455.
4. C. Ponce de León, A. Frías-Ferrer, J. González-García, D.A. Szánto, F.C. Walsh, "Redox flow cells for energy conversion", *Journal of Power Sources* 160 (2006) 716.
5. S. Jeong, S. Kim, Y. Kwon, "Performance enhancement in vanadium redox flow battery using platinum-based electrocatalyst synthesized by polyol process", *Electrochimica Acta* 114 (2013) 439.
6. S. Jeong, S. An, J. Jeong, J. Lee, Y. Kwon, "Effect of mesocellular carbon foam electrode material on performance of vanadium redox flow

- battery", *Journal of Power Sources* 278 (2015) 245.
7. H.Q. Zhu, Y.M. Zhang, L. Yue, W.S. Li, G.L. Li, D. Shu, H.Y. Chen, "Graphite-carbon nanotube composite electrodes for all vanadium redox flow battery", *Journal of Power Sources* 184 (2008) 637.
 8. W.H. Wang, X.D. Wang, "Investigation of Ir-modified carbon felt as the positive electrode of an all-vanadium redox flow battery", *Electrochimica Acta* 52 (2007) 6755.
 9. Kuppan, P. Selvam, "Platinum-supported mesoporous carbon (Pt/CMK-3) as anodic catalyst for direct methanol fuel cell applications: The effect of preparation and deposition methods", *Progress in Natural Science: Materials International* 22 (2012) 616.
 10. J. Lee, K. Sohn, T. Hyeon, "Low-cost and facile synthesis of mesocellular carbon foams", *Chemical Communications* 22 (2002) 2674.