

바나듐 레독스 흐름전지용 열가소성 탄소 복합재료 하이브리드 분리판 개발

임준우[†]

Development of Thermoplastic Carbon Composite Hybrid Bipolar Plate for Vanadium Redox Flow Batteries (VRFB)

Jun Woo Lim[†]

ABSTRACT: The electrical contact resistance between the bipolar plate (BP) and the carbon felt electrode (CFE), which are in contact by the stack clamping pressure, has a great impact on the stack efficiency because of the relatively low clamping pressure of the vanadium redox flow battery (VRFB) stack. In this study, a polyethylene (PE) composite-CFE hybrid bipolar plate structure is developed through a local heat welding process to reduce such contact resistance and improve cell performance. The PE matrix of the carbon fiber composite BP is locally melted to create a direct contact structure between the carbon fibers of CFE and the carbon fibers of BP, thereby reducing the electrical contact resistance. Area specific resistance (ASR) and gas permeability are measured to evaluate the performance of the PE composite-CFE hybrid bipolar plate. In addition, an acid aging test is performed to measure stack reliability. Finally, a VRFB unit cell charge/discharge test is performed to compare and analyze the performance of the developed PE composite-CFE hybrid BP and the conventional BP.

초 록: 스택 체결압에 의해 접촉되는 분리판(BP)과 탄소펠트전극(CFE) 사이의 전기적 접촉저항은 상대적으로 낮은 바나듐 레독스 흐름전지(VRFB) 스택의 체결압 때문에 스택 효율에 큰 영향을 미친다. 본 연구에서는 이러한 접촉저항을 줄이고 셀 성능을 향상시키기 위해 국부 가열 접합 공정을 통해 폴리에틸렌(PE) 복합재료-CFE 하이브리드 BP 구조를 개발하였다. 탄소섬유 복합재료 BP의 PE 매트릭스를 국부적으로 녹여 CFE의 탄소 섬유와 BP의 탄소 섬유의 직접 접촉 구조를 만들어 전기 접촉 저항을 감소시켰다. PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 성능을 평가하기 위해 면적비저항(ASR)과 기체투과도를 측정하였다. 또한 스택 신뢰성을 측정하기 위해 내산성 시험을 수행하였다. 최종적으로, 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP와 기존의 BP의 성능을 비교 분석하기 위하여 VRFB 단위셀 충/방전 시험을 수행하였다.

Key Words: 열가소성(Thermoplastic), 탄소 펄트(Carbon felt), 분리판(Bipolar plate), 바나듐 레독스 흐름전지(Vanadium redox flow battery)

1. 서 론

바나듐 레독스 흐름 전지(VRFB)는 비폭발성, 무제한 전

력 용량 및 긴 수명과 같은 다양한 장점을 가진 가장 유망한 에너지 저장 시스템(ESS) 중 하나이다. VRFB의 이러한 특성은 피크 시간이 아닌 시간에 초과 전기 에너지를 저장

Received 27 October 2023, accepted 7 November 2023

[†]Graduate School of Flexible and Printable Electronics & Department of Mechatronics Engineering & LANL-CBNU Engineering Institute-Korea, Jeonbuk National University, Corresponding author (E-mail: jul170@jbnu.ac.kr)

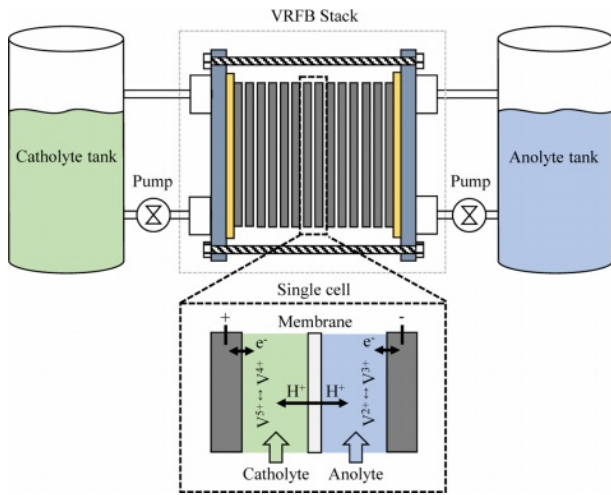
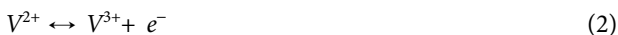
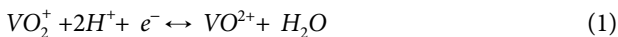


Fig. 1. Schematic drawing of the vanadium redox flow battery system

했다가 피크 시간에 전달함으로써 정전 위험을 줄일 수 있다[1,2]. 일반적인 VRFB 시스템은 Fig. 1과 같이 다수의 셀 (일반적으로 40개 셀), 2개의 펌프, 양극 전해질 및 음극 전해질용 탱크 2개로 구성된다. 단일 셀은 두 개의 분리판(BP), 두 개의 탄소 펠트 전극(CFE), 두 개의 유로 프레임 및 멤브레인으로 구성된다. 전극은 일반적으로 전기 전도성이 높은 탄소 펠트로 만들어져 스택에 반응성 사이트와 전기적 경로를 제공한다. 멤브레인은 셀에서 양극과 음극을 분리하고 양성자 전도 경로를 제공한다. BP는 각 단일 셀을 분리하고 VRFB 스택의 인접한 셀에 전류 경로를 제공한다. 따라서 BP는 높은 전기 전도도와 바나듐 황산 전해질에 대한 낮은 투과성을 가져야 한다[3,4].

VRFB는 구조적으로 양성자 교환막 연료 전지(PEMFC)와 유사해 보이지만 기체 연료에서 반응이 일어나는 연료 전지와 달리 액체 전해질에서 화학 반응이 일어난다. VRFB의 전력 용량은 스택 면적의 크기와 스택의 수에 의해 결정되는 반면, 에너지 용량은 전해질의 양에 의해 결정된다[5]. VRFB의 충전과 방전은 환원과 산화(redox) 반응을 통한 바나듐 이온의 전위차에 의해 일어나며 음극과 양극의 반응은 각각 Eq. (1)과 (2)와 같다.



VRFB는 PEMFC 시스템에 비해 에너지 밀도가 상대적으로 낮기 때문에 전해질의 특성을 최적화하여 에너지 밀도와 효율을 높이려는 여러 시도가 있었다[5-8]. 그러나 향상된 전해질을 사용하더라도 시스템 성능을 향상시키기 위해서는 VRFB 스택 내부에서 발생하는 두 가지 주요 에너지 손실을 줄여야 한다. 첫째로 작동 중 탄소 펠트를 통한

전해질의 점성 소산이 발생한다[3]. 또한 PEMFC와 마찬가지로 스택 구성 요소의 전기 저항으로 인해 VRFB 스택에서 저항 손실이 발생하여 VRFB 시스템의 효율이 감소한다. 따라서 BP를 개발하고 최적화하여 스택의 저항 손실을 최소화하기 위한 여러 연구가 있었다. Lim 등은 PEMFC를 위한 높은 모듈러스와 강도를 가진 탄소/에폭시 복합재료 BP를 개발하고 그 성능을 검증하였다[8,9]. Kim 등은 높은 전기 전도도, 높은 내화학적 성능과 높은 성형성을 갖는 복합재료 BP를 개발하였다[10,11].

VRFB 스택 내부의 CFE에 대한 압축 압력은 액체 전해질의 점성 소산을 줄이기 위해 PEMFC의 압축 압력보다 훨씬 작아야 함으로 BP와 CFE 사이의 전기적 접촉 저항이 전지 효율에 크게 영향을 미친다. 따라서 VRFB 스택의 상대적으로 낮은 압축 압력에서 전기 접촉 저항을 줄임으로써 VRFB 스택 효율을 훨씬 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 열가소성 접합을 통해 탄소섬유 복합재료 BP의 PE 매트릭스에 CFE를 접합하여 BP와 CFE 사이의 전기적 접촉 저항을 감소시키기 위해 폴리에틸렌(PE) 복합재료-CFE 하이브리드 BP 구조를 개발하였다. 개발된 하이브리드 BP 구조의 성능을 평가하기 위해 면적비저항(ASR)과 내산성 시험 및 기체투과도를 측정하였다. 또한, 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP와 기존의 BP의 성능을 비교 분석하기 위하여 VRFB 단위셀 충/방전 시험을 수행하였다.

2. 시 험

2.1 하이브리드 분리판 제작

평직 탄소직물(C-120, SK케미칼, 대한민국)과 PE 분말

Table 1. Material properties

Plain weave carbon fabric (C-120)					
Bundle size	Areal density (g/m ²)	Thickness (1ply, μm)	Fiber properties		
			Modulus (GPa)	Strength (GPa)	Density (kg/m ³)
3 k	200	270	240	4.9	1.82 × 10 ³
PE powder (UR644)					
Material	Average particle size (μm)	Density (g/cm ³)	Melting temperature (°C)	Melt flow index (g/10 min)	
LLDPE	10	0.935	124	130	
Carbon black (Ketjenblack, EC-600JD)					
Average particle size (nm)	Apparent bulk density (g/cm ³)	BET surface area (m ² /g)	Ash content (%)	Iodine adsorption (mg/g)	DBP absorption (ml/100 g)
34	0.115	1270	0.1	1050	495 (15 g method)

(UR644, PE 분말, 롯데케미칼, 대한민국)을 사용하여 PE/탄소섬유 복합재료-CFE 하이브리드 BP를 제작하였다. 전도성 입자를 PE 분말과 혼합하여 BP의 벌크 저항을 감소시켰다. 평직 탄소섬유의 섬유 직경이 약 7 μm 임을 고려하여, 섬유 사이의 전도성 입자의 공간을 계산해 평균 34 nm의 직경을 갖는 카본 블랙(Ketjen black 600JD, Mitsubishi Chemical, Japan)을 전도성 입자로 선정하였으며, 사용된 재료의 물성은 Table 1과 같다.

PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP 구조의 제작 공정은 Fig. 2와 같다. 120 mm \times 120 mm 크기의 탄소섬유를 아세톤으로 세척하고 100°C에서 30분간 건조하여 오염물을 제거하였다. PE 분말과 카본 블랙을 손으로 5분간 교반 한 후 믹서를 사용하여 응집된 입자를 5분간 더 분산시켰다. PE 분말/카본 블랙 혼합물은 0 wt.%에서 5 wt.%까지 1 wt.%의 차이로 혼합하였다. 두 번째 단계에서는 PE 분말/카본 블랙 혼합물을 메쉬 번호 100(메쉬 크기: 0.149 mm)인 체를 사용하여 탄소 섬유 표면에 도포하였다. 세 번째 단계에서는 탄소섬유의 PE 분말/카본 블랙 혼합물에 의한 충분한 함침을 위해 밀폐된 압축 몰드에 넣고 핫프레스를 이용하여 160°C를 30분간 유지하였다. 그 후 금형을 20 MPa의 일정한 압력 하에서 2시간 동안 실온(25°C)으로 냉각하였다. 마지막 네 번째 단계에서는 제작된 PE/탄소섬유 복합재료 BP의 양면에 CFE를 배치한 후 핫프레스를 이용하여 BP 표면에 CFE를 접합하였다. 국부 열가소성 접합의 개념은 PE 복합재료 BP의 표면 온도만을 높여 CFE의 섬유가 BP의 표면 수지층을 파고들어 BP의 기계적 특성을 유지하며 PE 복합재료 BP의 탄소섬유와 직접 접촉을 하도록 하는 것이다. CFE의 기계적 물성을 압축 시험으로 측정하여 기계물성 유지를 위한 임계 압력을 1.2 MPa로 결정하였다[11,12]. 압축 시험 수행 전후의 CFE 질량 변화를 측정하여 압축 압력이 1.2 MPa를 초과하면 CFE의 섬유 파손으로 인한 질량 저하가 발생

하는 것을 확인하였다. 따라서 국부 가열 접합 시 인가 압력은 제작 과정에서 CFE가 손상되지 않는 최대 압력인 1.2 MPa로 고정하였으며 가열 지속 시간은 2초씩 증가시키며 시편을 제작하였다.

2.2 전기적 성능

최적의 카본 블랙 양을 결정하기 위해 카본 블랙이 내포된 PE 복합재료 BP의 면적비저항(ASR)을 측정하였다. PE 복합재료 BP 시편의 크기는 100 mm \times 100 mm \times 0.4 mm이며 VRFB 스택 내부의 CFE에 대한 압축 압력이 0.05 MPa인 것을 고려하여 인가 압축 압력은 0.05 MPa로 통일하였다. BP 시편을 CFE 사이에 놓고 전원 공급 장치(ORS-030A, ODA, 대한민국)와 멀티미터(3457A, Hewlett Packard, USA)에 연결된 두 개의 금도금 구리 전극 사이에 위치하였다. ASR은 만능시험기(INSTRON 4469, Instron Corp., MA, USA)를 사용하여 인가된 0.05 MPa에서 측정된 전압으로 계산하였으며 탄소 섬유의 전기 저항에 대한 열적 영향을 방지하기 위해 온도를 대기압에서 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 제어하였다[13]. BP의 전체 저항 $R_{(total)}$ 과 시스템 저항 $R_{(system)}$ 은 Eq. (3)과 (4)로 나타낼 수 있으며 BP의 $ASR_{(BP)}$ 은 전체 저항에서 시스템 저항을 뺀 Eq. (5)와 같다[14].

$$R_{(total)} = 2R_{CU-CFE} + 2R_{CFE} + 2R_{CFE-BP} + R_{BP} \quad (3)$$

$$R_{(system)} = 2R_{CU-CFE} + 2R_{CFE} \quad (4)$$

$$ASR_{(BP)} = 2R_{CFE-BP} + R_{BP} \quad (5)$$

이때 R_{CU-CFE} 는 구리 전극과 CFE 사이의 접촉 저항이며 R_{CFE} , R_{CFE-BP} , R_{BP} 는 각각 CFE의 벌크 저항, CFE와 BP 사이의 접촉저항, BP의 벌크 저항을 나타낸다. Fig. 3과 같이 2 wt.%의 카본 블랙이 내포된 PE 복합재료 BP가 305 $\text{m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 의 값으로 가장 낮은 ASR 값을 나타냈다. 따라서 국부 가열 접합 시편은 2 wt.%의 카본 블랙이 내포된 BP를 이용하여 가열 지속시간을 변경하며 제작하였다. 제작된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 전체저항을 인가 압축 압력을 0.01 MPa에서 0.1 MPa까지 증가시키며 측정하였다.

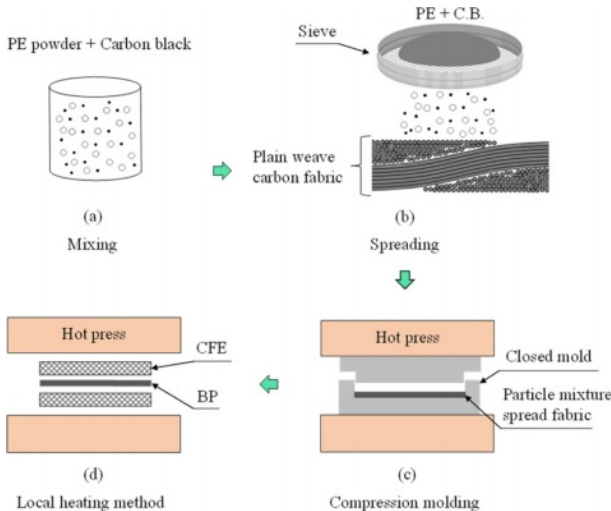


Fig. 2. Fabrication process of the PE composite-CFE hybrid BP

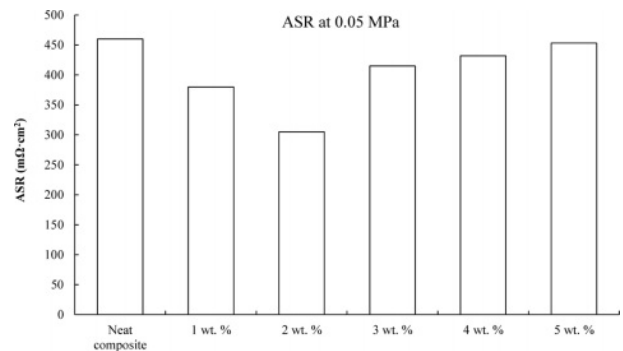


Fig. 3. ASRs with respect to carbon black wt.%

2.3 내산성 시험 및 기체투과도

VRFB 시스템에서는 작동 중 1.4 V의 셀 전위차로 인해 전해질 내 물의 전기분해가 발생할 수 있으며 전해질 흐름 경로를 통한 비정상적 전류가 흐르는 등의 일부 상황에서 BP에 높은 전위차가 발생할 수 있다. 이러한 경우 전해질의 황산은 BP의 산 노화 반응을 가속화할 수 있는 매우 강한 산화제로 반응한다[15]. 결국 이는 BP의 기계적 특성을 저하시키고 BP의 저항을 증가시켜 VRFB의 효율을 감소시킬 수 있다. 또한 음극 전해질과 양극 전해질을 분리하는 역할을 하는 BP의 산 노화로 인한 고장은 전해질의 크로스오버를 유발하여 점성 소실 손실을 증가시킬 수 있다. 이러한 문제들에 대해 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 내구성 검증을 위해 산 노화 가속화 시험을 진행한 후 기체투과도를 측정하였다.

개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP시편을 80°C의 4.0 M 농도 바나듐 황산 전해질에서 100시간 동안 산 노화를 진행하였다. CFE가 국부 가열을 통하여 접합된 시편과 접합되지 않은 시편을 모두 검증하였으며 기체투과도는 Fig. 4와 같이 개발된 장치로 측정하였다. 두 개의 서로 다른 압력 센서(ISE40-01-22, SMC, Japan)를 장착하여 개별의 원통형 챔버의 압력을 측정하였으며 직경 40 mm의 디스크 모양 시편을 양 챔버 사이에 위치하여 양 챔버를 시편으로 분리하였다. 시편의 유효 직경은 30 mm이며 인가 압력에 의한 시편 변형을 방지하기 위해 0.1 mm 두께의 다공성 스테인리스 강판으로 시편을 지지하였다. 일반적인 VRFB의 최대 내부 압력인 0.3 MPa를 챔버 1에 인가하였으며 챔버 2의 압력 변화를 100시간 후 측정하고 두 챔버 사이의 압력 차로 기체투과도를 계산하였다.

실험 결과 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 기체투과도는 6초 이하의 국부 가열 접합을 하였을 때 0인 것으로 나타났다. 그러나 6초 이상의 국부 가열 시간으로 제작된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 높은 투과성을 나타냈으며 이는 BP의 PE 매트릭스의 전반적인 열변화에 의한 것이다.

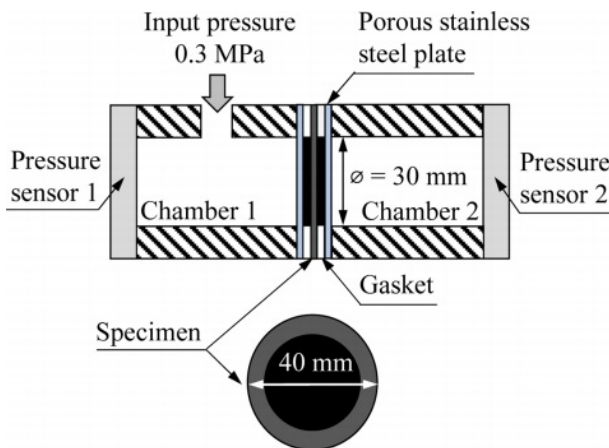


Fig. 4. Schematic drawing of gas permeability setup

2.4 충/방전 시험

개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 성능을 검증하기 위해 단셀 시험장비(Standard Cell-BLUE, Standard Energy Co., Ltd., 대한민국)를 이용하여 충/방전 시험을 수행하였다. 가장 낮은 ASR 측정값을 나타낸 2 wt.%의 카본 블랙이 내포된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP를 사용하여 실험을 진행하고 10 사이클 평균 에너지 효율을 기존 흑연 분리판과 비교하였다.

3. 결과 및 토론

Fig. 3에 나타난 것과 같이 2 wt.%의 카본 블랙이 내포된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP가 $305 \text{ m}\Omega\cdot\text{cm}^2$ 로 가장 낮은 ASR값을 나타냈다. 측정된 BP들의 두께는 카본 블랙 내포 함량과 상관없이 평균 0.4 mm로 유지되었으며 이는 PE 매트릭스 내에서 카본 블랙 입자 분산이 나노 단위로 이루어졌다고 할 수 있다. 많은 연구자들은 입자 간 또는 응집체 간 거리가 전기 전도도를 결정하고 카본 블랙 분산이 전도도를 감소시킨다는 것을 검증하였다[16-19]. 따라서, PE 매트릭스 내에 균일 하게 분포된 카본 블랙 응집체는 낮은 wt.%의 함량으로도 BP의 ASR을 감소시켰다. 그러나 카본 블랙의 함량이 증가함에 따라 Fig. 3의 실험 결과에 나타난 것과 같이 BP의 ASR이 다시 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 PE 매트릭스와 혼합된 카본 블랙 응집체가 BP 제작을 위한 압축과정에서 전단되어 나타나는 현상이다[17-19].

CFE를 국부 가열 접합을 통해 Fig. 5와 같이 2 wt.%의 카본 블랙이 내포된 BP표면에 접합하였다. CFE의 섬유가 PE 수지층의 Local melting에 의하여 파고들어 BP의 섬유와 직

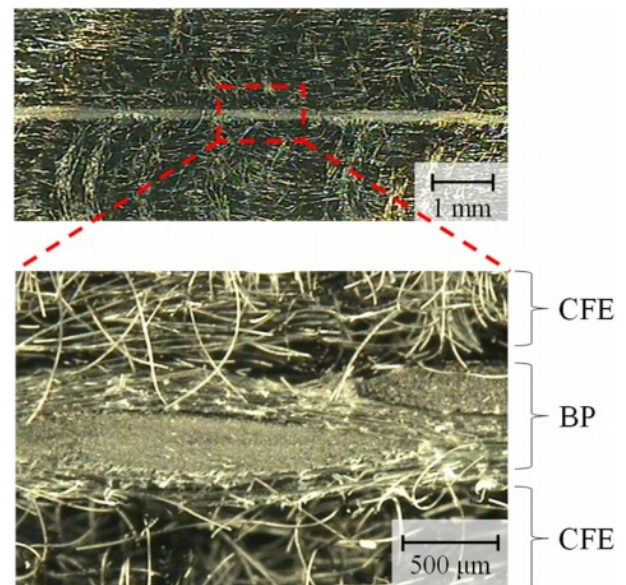


Fig. 5. Electron microscope images of the PE composite-CFE hybrid BP cross-section

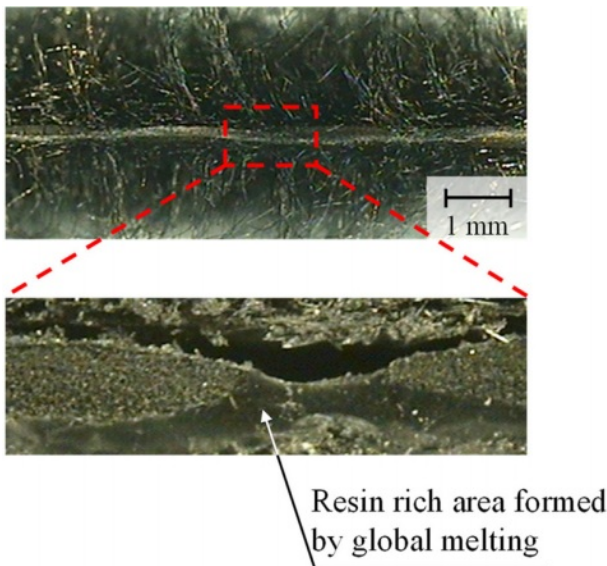


Fig. 6. Electron microscope images of the resin rich area formed by global melting

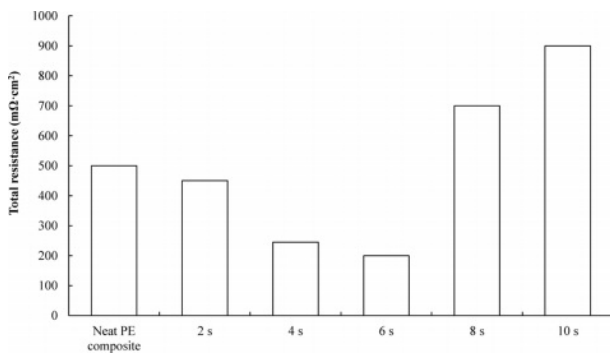


Fig. 7. Total resistances of PE composite-CFE hybrid BP with respect to heat applied duration

접 접촉하고 있는 것을 확인할 수 있다. 열 인가 시간이 6초 이상이 되면 Fig. 6과 같이 BP와 CFE 사이의 Resin Rich 영역을 증가시키는 Global Matrix Melting이 발생하고 PE 복합재료 BP의 변형으로 인해 전기 저항과 기체 투과성이 증가한다. 국부 가열 접합을 위한 열 인가 시간에 따른 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 전체 저항을 Fig. 7에 나타냈다.

PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 전체 저항은 가열 시간이 6초를 초과할수록 다시 증가하는 경향을 보였다. 또한 VRFB의 일반적 체결 압력인 0.05 MPa의 압력 하에서 서로 다른 BP의 전체 저항을 측정하고, Fig. 8과 같이 개발된 2 wt.% 카본 블랙이 내포된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP와 비교하였다. 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP가 여러 BP중 200 mΩ·cm²의 값으로 가장 낮은 전체 저항을 나타냈다.

개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP와 기존 흑연 BP의 인가 압력에 따른 전체 저항 대표 곡선은 Fig. 9와 같다. 전

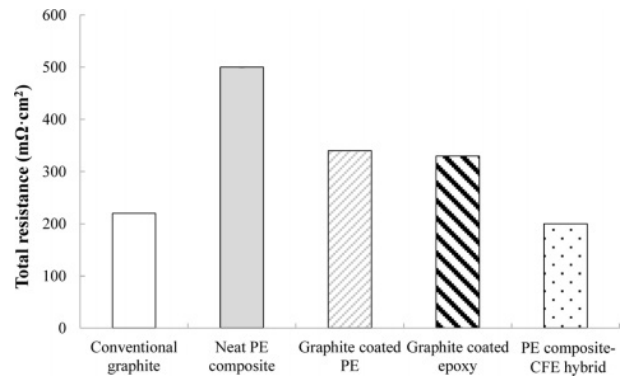


Fig. 8. Total resistances of various BPs under 0.05 MPa

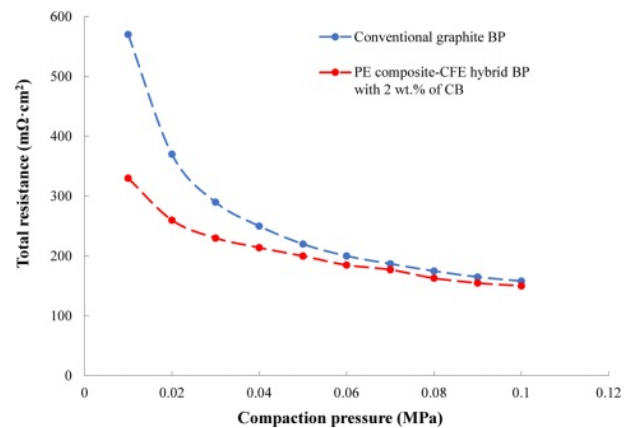


Fig. 9. Representative curves of the total resistance with respect to the compaction pressure

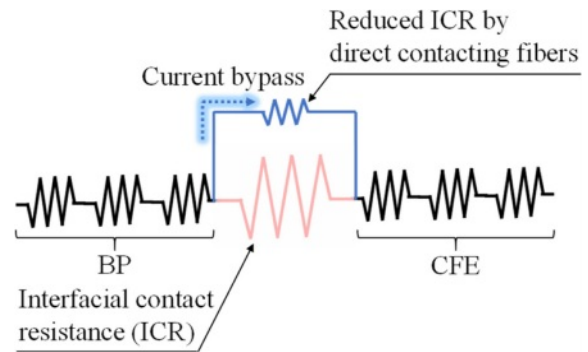


Fig. 10. Equivalent electric circuit of PE composite-CFE hybrid BP

체 저항은 인가 압력이 증가함에 따라 감소하는 동일한 경향을 보였으나 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 경우는 낮은 인가 압력에서도 흑연 BP보다 현저히 낮은 저항 값을 보였다.

이는 국부 열가소성 접합 공정 중 BP의 표면 수지층만이 녹고 CFE 섬유가 압축 압력 하에서 BP 표면으로 압착되어 BP 섬유와 직접 접촉했기 때문이다. Fig. 10은 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 등가 전기 회로를 나타내며 등가 전

기 회로에서 전기 저항은 가장 낮은 전기 저항 구성 요소에 의해 결정된다[20]. 따라서 직접 접촉하는 섬유에 의해 제공되는 바이패스 전기 전도가 BP와 CFE 사이의 계면 접촉 저항과 비교하여 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 전체 전기 저항을 현저히 감소시켰다. 또한 이러한 효과로 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 체결 압력에 의한 영향이 기존 BP 보다 낮아 안정적인 VRFB 성능을 얻는 주요 이점이라고 판단된다.

내구성 검증을 위해 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP를 80°C의 4.0 M의 바나듐 황산 전해질에서 100시간 동안 산 노화 후 기체투과도 실험을 진행하였다. 6초 이상 열을 가한 시편의 경우 산 노화 전후에 손상된 탄소/PE 복합재 BP를 통한 기체 투과가 발생하였다. 그러나 6초 이하의 시편, 즉 열 손상이 없는 시편은 산 노화 후에도 완벽한 기밀성을 유지하였다. 따라서 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 내구성은 바나듐 황산 환경에 서도 유지됨을 검증하였다. 단셀 충/방전 시험에서 개발된 PE 복합재료-CFE 하이

브리드 BP는 Fig. 11과 같이 기존 BP의 82%보다 높은 84%의 에너지 효율을 달성하였다.

이는 기존 흑연 BP에 비해 낮은 전체 저항이 셀 내부 저항을 감소시킨 영향이다. 또한, 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 100사이클의 충/방전 시험 후에도 성능 변화가 없는 것으로 나타났다. 따라서 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 VRFBs 응용 분야에 적합하며 기존 BP를 대체할 수 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 평직 탄소섬유직물 복합분리판(BP)의 매트릭스로 카본블랙을 혼합한 폴리에틸렌(PE) 분말을 사용하였으며 탄소 펠트 전극(CFE)을 국부 가열을 통하여 PE 복합재료 BP 표면에 접합하여 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP구조를 개발했다. 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 전기저항, 기체투과도 및 환경적 내구성을 측정하였다. 또한 성능 평가를 위해 단셀 충/방전 시험을 실시하였다. 2 wt.%의 카본 블랙이 BP의 ASR을 낮추는데 가장 효과적이며 BP-CFE 접합 시 160°C에서 6초의 열 인가가 PE 복합재료 BP의 기계적 물성 저하없이 BP와 CFE 사이의 접촉 저항을 감소시키는데 가장 효과적이었다. 개발된 2 wt.%의 카본 블랙을 내포한 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 VRFB의 일반적 체결 압력인 0.05 MPa에서 여러 BP 중 가장 낮은 $200 \text{ m}\Omega\text{-cm}^2$ 의 전체 저항을 나타냈다. 또한 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 전체 저항은 기존 흑연 BP보다 낮은 압축 압력에서도 낮은 값을 나타냈다. 개발된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 100시간의 산 노화 후에도 기체투과도를 유지하는 것을 실험적으로 검증하였으며 단셀 충/방전 시험을 통하여 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP의 에너지 효율이 기존 BP의 82%보다 높은 84%를 나타내는 것을 확인하였다. 따라서 개발된 2 wt.%의 카본 블랙이 내포된 PE 복합재료-CFE 하이브리드 BP는 VRFB 시스템의 효율을 증가시키기 위한 대체 BP가 될 수 있다.

후 기

이 성과는 과학기술정보통신부와 전라북도의 재원으로 한국과학기술연구원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. 2Z06890-23-P052), 지원에 대해 진심으로 감사드립니다.

REFERENCES

1. Yu, V.K., and Chen, D., "Peak Power Prediction of a Vanadium Redox Flow Battery," *Journal of Power Sources*, Vol. 268, 2014, pp. 261-268.
2. Skyllas-Kazacos, M., *SECONDARY BATTERIES - FLOW SYS-*

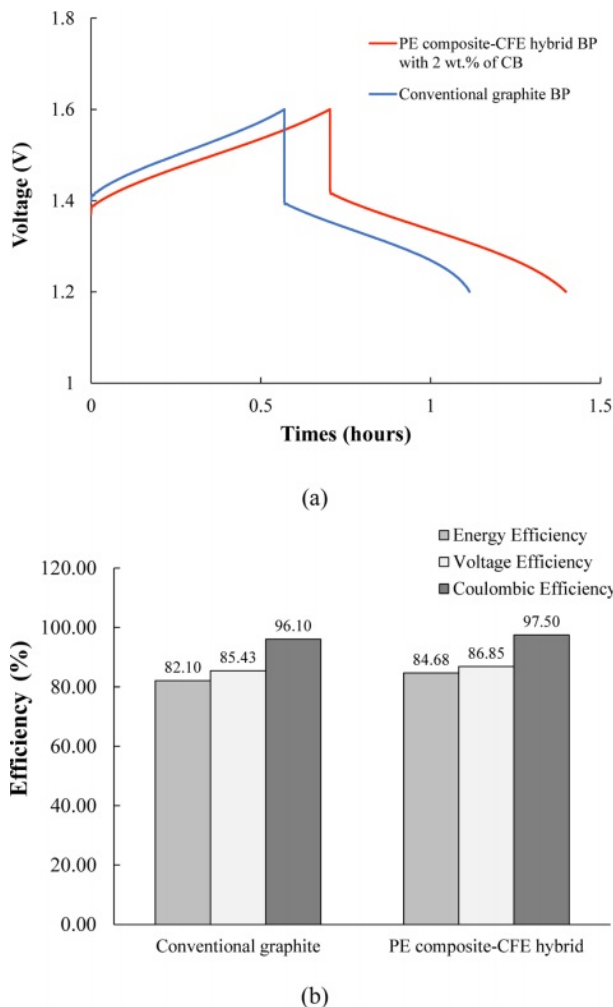


Fig. 11. Unit cell charge/discharge test results: (a) Representative charge/discharge curves; (b) Efficiencies

- TEMS | *Vanadium Redox-Flow Batteries*, Elsevier, Amsterdam, 2009, pp. 444-453.
3. Blanc, C., Modeling of a Vanadium Redox Flow Battery Electricity Storage System: École polytechnique fédérale de Lausanne, 2009.
 4. Larminie, J., *Fuel Cell Systems Explained (Second Edition)*, John Wiley & Sons, Chichester 2003.
 5. Kim, S., Thomsen, E., Xia, G., Nie, Z., Bao, J., Recknagle, K., *et al.*, "1 kW/1 kWh Advanced Vanadium Redox Flow Battery Utilizing Mixed Acid Electrolytes," *Journal of Power Sources*, Vol. 237, No. 2013, pp. 300-309.
 6. Park, S.-K., Shim, J., Yang, J.H., Jin, C.-S., Lee, B.S., Lee, Y.-S., *et al.*, "Effect of Inorganic Additive Sodium Pyrophosphate Tetrabasic on Positive Electrolytes for a Vanadium Redox Flow Battery," *Electrochimica Acta*, Vol. 121, No. 2014, pp. 321-327.
 7. Xu, Q., Zhao, T.S., and Zhang, C., "Effects of SOC-dependent Electrolyte Viscosity on Performance of Vanadium Redox Flow Batteries," *Applied Energy*, Vol. 130, No. 2014, pp. 139-147.
 8. Lim, J.W., Kim, M., and Lee, D.G., "Conductive Particles Embedded Carbon Composite Bipolar Plates for Proton Exchange Membrane Fuel Cells," *Composite Structures*, Vol. 108, No. 2014, pp. 757-766.
 9. Lim, J.W., "A Study on Continuous Carbon/Epoxy Composite Bipolar Plates for PEM Fuel Cells," Daejeon, Republic of Korea: KAIST, 2013.
 10. Kim, K.H., Kim, B.G., and Lee, D.G., "Development of Carbon Composite Bipolar Plate (BP) for Vanadium Redox Flow Battery (VRFB)," *Composite Structures*, Vol. 109, 2014, pp. 253-259.
 11. Choe, J., Kim, K.H., and Lee, D.G., "Corrugated Carbon/epoxy Composite Bipolar Plate for Vanadium Redox Flow Batteries," *Composite Structures*, Vol. 119, No. 2015, pp. 534-542.
 12. Kaur, A., Jeong, K.I., Kim, S.S., and Lim, W.J., "Optimization of Thermal Treatment of Carbon Felt Electrode Based on the Mechanical Properties for High-efficiency Vanadium Redox Flow Batteries," *Composite Structures*, Vol. 290, No. 2022, pp. 115546.
 13. Louis, M., Joshi, S.P., and Brockmann, W., "An Experimental Investigation of Through-thickness Electrical Resistivity of CFRP Laminates," *Composites Science and Technology*, Vol. 61, No. 6, 2001, pp. 911-919.
 14. Lim, J.W., and Lee, D.G., "Development of Composite-metal Hybrid Bipolar Plates for PEM Fuel Cells," *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 17, 2012, pp. 12504-12512.
 15. Inagaki, M., Iwashita, N., and Kouno, E., "Potential Change with Intercalation of Sulfuric Acid into Graphite by Chemical Oxidation," *Carbon*, Vol. 28, No. 1, 1990, pp. 49-55.
 16. Norman, R.H., *Conductive Rubbers and Plastics*, Elsevier Science Ltd, London 1970.
 17. Donnet, J.-B., Bansal, R.C., and Wang, M.-J., *Carbon Black: Science and Technology (Second Edition)*, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel, Hong Kong 1993.
 18. Medalia, A.I., "Morphology of Aggregates," *Journal of Colloid and Interface Science*, Vol. 32, No. 1, 1970, pp. 115-131.
 19. Janzen, J., "On the Critical Conductive Filler Loading in Anti-static Composites," *Journal of Applied Physics*, Vol. 46, No. 2, 1975, pp. 966-969.
 20. Sedra, A.S., and Smith, K.C., *Microelectronic Circuits (Fifth Edition)*, Oxford University Press, New York, 2003.