



# 재생에너지 출력제어 완화를 위한 해수이용 흐름전지 성능평가

김우현<sup>1),2)</sup> · 서보석<sup>1),2)</sup> · 김종오<sup>3)\*</sup> · 김한기<sup>4)\*</sup>

## Evaluation of the Performance of a Seawater-based Flow Battery to Reduce Renewable Energy Curtailment

Woohyun Kim<sup>1),2)</sup> · Boseok Seo<sup>1),2)</sup> · Jong-Oh Kim<sup>3)\*</sup> · Hanki Kim<sup>4)\*</sup>

Received 7 April 2025 Revised 28 July 2025 Accepted 2 September 2025 Published online 17 September 2025

**ABSTRACT** Long-duration energy storage (LDES) is an essential technology for reducing renewable energy curtailment induced by intermittent and imbalanced renewable power supplies. Seawater-based energy storage is an emerging candidate for use in LDES because it is both scalable and economical. A Blue-Battery is a flow battery that generates power by separating NaCl in seawater into acid (HCl) and base (NaOH) and discharges by the neutralization reaction of the acid and base. In this study, the performance of a lab-scale Blue-Battery stack was evaluated based on the applied electrical potential and the flow rates. Increasing the applied electrical potential during charging increased the concentrations of acid and base solutions. However, by increasing the flow rate, the concentrations of the acid and base solutions decreased because of the reduced retention time in the Blue-Battery stack. By estimating the energy potential and efficiency of the lab-scale Blue-Battery stack, an energy efficiency of 21.0% was achieved at a flow rate of 4.1 mL/min.

**Key words** ESS(에너지저장시스템), LDES(장주기 에너지저장시스템), Curtailment(출력제어), AB-FB(산염기-흐름전지), Blue Battery(블루배터리)

### Nomenclature

OCV : open circuit voltage, V  
EBCT: empty bed contact time, t  
n : number of cell pairs  
 $\alpha$  : permselectivity of ion-exchange membrane  
R : gas constant, 8.314 J/mol·K  
T : absolute temperature, K  
z : charge valence value  
F : Faraday constant, 96,485 C/mol  
a : ion activity

1) Student Research, Distributed Energy Team, Jeju Global Research Center, Korea Institute of Energy Research

2) Master's Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

3) Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

4) Senior Researcher, Distributed Energy Team, Jeju Global Research Center, Korea Institute of Energy Research

**\*Corresponding authors:**

hankikim@kier.r.e.kr (H.K. Kim), Tel: +82-64-800-2256

jk120@hanyang.ac.kr (J.O. Kim), Tel: +82-2-2220-0325

- A : acid
- B : base
- N : neutralized solution
- P : power, W
- $R_i$  : internal resistance of Blue-Battery,  $\Omega$

### Subscript

- NDC : nationally determined contribution
- ESS : energy storage system
- LDES : long duration energy storage
- AB-FB : acid base flow battery
- CEM : cation exchange membrane
- AEM : anion exchange membrane
- BPM : bipolar membrane
- AEL : anion exchange layer
- CEL : cation exchange layer
- HRT : hydraulic retention time

## 1. 서론

무탄소전원으로 에너지전환은 국가온실가스 감축목표 이행에 있어 중요한 역할을 한다. 전 세계적으로 2000년부터 2023년까지 신규 건설된 신재생에너지 발전설비는 752 GW에서 3,865 GW로 5배 이상 증가하였으며, 특히 2023년 한 해에만 태양광 346 GW, 육상풍력 104 GW의 신규 발전설비가 추가되었다.<sup>[1]</sup>

우리나라는 파리협약 이후 제출한 국가결정기여(Nationally Determined Contribution, NDC)를 이행하기 위하여 2030년까지 신·재생에너지 발전비율을 21.6% 이상으로 향상시키고자 노력 중이다<sup>[2]</sup>. 하지만, 2023년 현재 우리나라의 신·재생에너지 평균 발전 비중은 9.67%에 그치고 있다<sup>[3]</sup>. 반면, 제주특별자치도의 재생에너지 평균 발전 비중은 2024년에 19.96%로 전국 최고 수준이지만, 재생에너지의 변동성 및 간헐성에 의하여 재생에너지 출력제어(curtailment) 문제가 발생하고 있다. 2022년에 제주특별자치도에서 발생한 출력제어 횟수는 총 132회로, 2021년(65회)에 비하여 두 배 이상 증가하였다. 2024년 이후 전력거래제도의 변화

및 제주-내륙 간 제3 전력 연계선 개통으로 인하여 제주특별자치도 내 출력제어의 문제는 일부 감소한 것으로 보이지만 재생에너지의 변동성과 간헐성을 보완할 수 있는 유연성 자원을 빠르게 확보되어야 한다.

에너지저장장치(energy storage system, ESS)란 외부 전원을 이용하여 충전한 후, 전기가 필요할 때 방전하여 전기를 사용할 수 있는 유연성 자원을 말한다. ESS는 충·방전 원리에 따라 기계적 저장, 전기화학적 저장, 열저장, 전자기 저장 등으로 분류한다.<sup>[4]</sup> 또한, 충·방전 주기에 따라 4~6시간을 단주기(short duration) ESS라 하며, 10시간 이상을 장주기(long duration energy storage, LDES)라고 한다.<sup>[5]</sup> LDES는 재생에너지 간헐성을 극복할 수 있는 기술로 각광받고 있으며, UNFCCC COP26에서 '장주기 에너지 저장위원회'가 설립되어 탄소중립을 위한 LDES의 역할은 점차 강조되는 추세이다.<sup>[6]</sup>

우리나라의 경우 제11차 전력수급기본계획에서 변동성 재생에너지 자원의 백업 설비로써 총 23 GW(내륙 22 GW, 제주 0.5 GW)의 LDES 설치계획을 수립하였으며, 제5차 에너지기술개발계획에서는 늘어나는 신·재생에너지 비율에 맞춰 유연하고 안정적인 에너지망 구축을 위해 에너지 저장장치 기술의 필요성이 강조된 바 있다.<sup>[7]</sup>

LDES가 10시간 이상의 충전 주기를 갖는 동시에 경제성을 확보하기 위해서는 에너지를 저장하는 물질이 저렴하여야 하며, 저장 방식을 기술적으로 구현하기 쉽고 저장 용기의 가격이 저렴해야 한다. 또한, 대용량 시스템을 설치 및 운전하는 과정에서 안전, 건강 및 환경(safety, healthy and environment, SHE) 문제를 발생시키지 않아야 한다.

최근 들어, 해수를 이용한 장주기 에너지저장기술이 많은 관심을 받고 있다. 해수를 이용한 에너지저장은 크게 해수 이차전지,<sup>[8]</sup> 해수를 이용한 흐름식 전지,<sup>[9]</sup> 해수담수화-염분차발전 하이브리드 공정<sup>[10]</sup> 등이 주로 소개되었으며, 일본에서는 해수를 이용한 양수발전 기술이 실증된 사례가 있다.<sup>[11]</sup> 이 중 해수를 이용한 흐름식 전지를 특히 '블루배터리(Blue-Battery)'라고 한다. 블루배터리는 충전 과정에서 풍력, 태양광 등 변동성 재생에너지로부터 생산된 전력을 직류형태로 해수가 흐르는 셀(또는 스택)에 인가하여 해수 내 염분(예: NaCl)을 전하의 종류에 따라 각각 산(HCl)과 염기(NaOH)로 분리하며, 방전 과정에서 각각 생산된

산과 염기를 셀 내부에서 반응시킴과 동시에 셀에 포함된 전극에서 전기화학 반응을 통해 연결된 계통 또는 부하에 직류를 공급한다.

블루배터리는 일종의 ‘산-염기 흐름전지(acid-base flow battery, AB-FB)’로써, 1971년 Körösy 등에 의해 처음으로 소개되었으며,<sup>[12]</sup> Weinstein 및 Leitz 등(1976)에 의해 ESS로의 활용가능성이 제안되었다.<sup>[12,13]</sup> Ramp 등(1979) 및 Emren 등(1983) 연구자들에 의해 AB-FB 연구가 진행되었으나<sup>[14,15]</sup> 상용화를 위한 소재의 기술준비도가 낮고 전력 시장에서 LDES의 수요가 적어 최근까지 기술개발이 지체되었다. 최근들어 재생에너지 간헐성에 대응할 수 있는 경제적인 LDES 개발수요가 전력 시장에서 급증함에 따라 유럽 등 선진국 및 선도적 연구기관을 중심으로 AB-FB의 효율 향상을 위한 최적화 및 핵심소재 기술개발 연구가 빠르게 진행 중이다.<sup>[16,17]</sup> 우리나라의 경우 2021년부터 한국에너지기술연구원제주글로벌연구센터에서 해수를 이용한 LDES 연구를 본격적으로 시작하였으며 2022년부터 과학기술정보통신부와 제주특별자치도의 지원을 받아 블루배터리 실증연구가 진행 중이다.

당 연구에서는 상용 이온교환막과 복극분리막을 사용한 실험실 규모의 블루배터리 스택을 독자적으로 설계하였으며, 블루배터리 스택의 성능을 최적화하기 위하여 해수 및 담수의 공급유량과 인가전압에 따른 산-염기의 분리 성능 및 에너지 효율을 분석하였다.

## 2. 작동원리

### 2.1 단위 셀 구성

Fig. 1은 블루배터리 단위 셀의 개념도이다. 블루배터리 단위 셀은 해수와 담수가 흐를 수 있는 3개의 유로를 포함하며, 각 유로는 양이온 교환막(cation-exchange membrane, CEM), 음이온 교환막(anion-exchange membrane, AEM) 및 복극 분리막(bipolar membrane, BPM)을 사용하여 물리적으로 구분되어 있으나 전기화학적으로는 연결되어 있다. 이러한 구조를 통상 ‘트리플릿(triplet)’ 구조라고 부른다.<sup>[16,17]</sup> 블루배터리는 양극과 음극 사이에 하나 이상의 단위 셀(즉, 트리플릿)을 포함하며, 복수개의 단위 셀을 연속

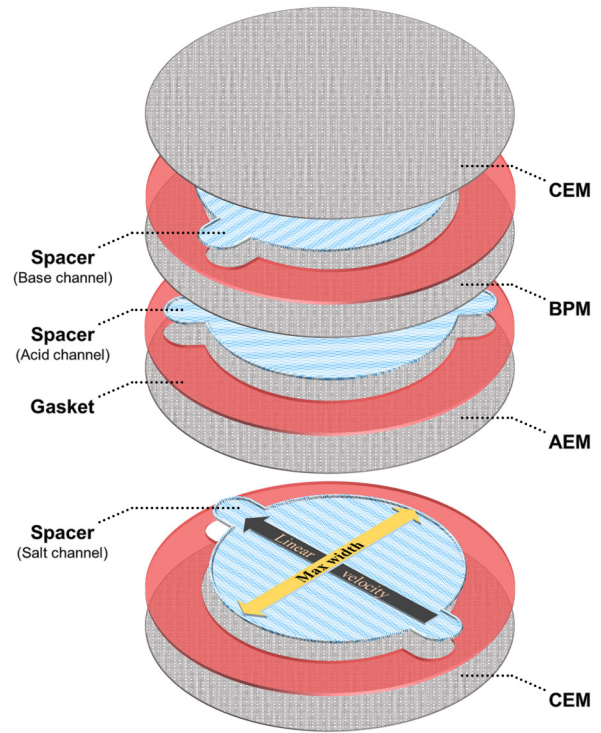


Fig. 1. Illustration of Blue Battery unit cell

하여 배열함으로써 에너지 저장용량과 발전량을 증가시킬 수 있다. 블루배터리 시스템에서 복수개의 단위 셀이 구성하는 전기화학 장치를 스택(stack)이라고 하며, 복수의 스택을 모아 어레이(array)를 구성한다. 블루배터리 단위 셀은 전기화학적으로 연결되어 있으므로 각 이온교환막 간의 접합(junction)을 방지하기 위한 스페이서(spacer)가 유로에 포함된다. 스페이서는 비전도성 소재를 사용하며, 유로의 폐색을 방지하기 위해 직조 타입(woven-type)의 메쉬 소재를 일반적으로 사용한다.<sup>[18]</sup> 스페이서는 블루배터리 유로의 압력을 상승시키는 주요 원인으로 작용하며, 이를 방지하기 위한 패턴형 이온교환막 등이 개발 중이다.<sup>[19]</sup>

### 2.2 충전전 원리

Fig. 2는 해수를 사용하는 경우 블루배터리의 충·방전 원리를 설명한 개념도이다. 블루배터리는 충전과정에서 단위 셀의 외부에서 직류전원을 인가하여 해수에 용해된 염분(즉, 양이온과 음이온)을 각 이온이 갖는 전기적 특성에 따라 각각 양이온과 음이온으로 분리한다. 외부에서 인가된 직류전원의 전기장 세기에 따라 이온 이동속도가 달라지

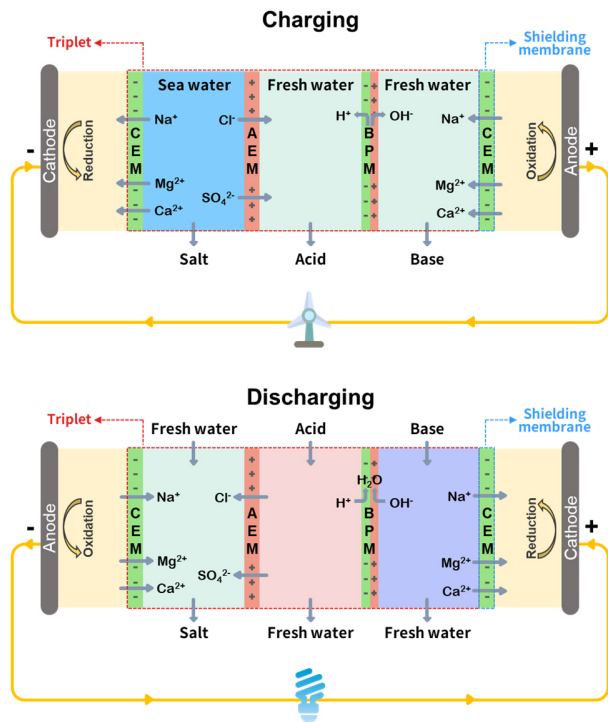


Fig. 2. Conceptual diagram of charging and discharging mechanism on Blue Battery

며, 이온의 선택도 및 전류효율을 향상시키기 위하여 CEM, AEM 및 BPM을 교번하여 배치한다. 특히, 충전과정에서 BPM은 해수로부터 선택적으로 이동한 양이온(예:  $\text{Na}^+$ )과 음이온(예:  $\text{Cl}^-$ )의 전하 중성(charge neutralization)을 위하여 BPM의 음이온 교환층(anion exchange layer, AEL)과 양이온 교환층(cation exchange layer, CEL)에서 물을 분해하여  $\text{OH}^-$ 와  $\text{H}^+$ 를 생산한다. 결국, 충전과정에서 해수 내 염분이 외부전원(즉, 재생에너지 잉여전력)에 의해 산(HCl)과 염기(NaOH)로 이온분리 되어 에너지가 화학적으로 저장된다. 방전과정에서는 저장한 HCl과 NaOH가 전기화학셀에서 화학적으로 반응하며 혼합엔탈피의 변화를 형성하고, 이온교환막에서 혼합엔탈피가 전기화학적 에너지 퍼텐셜로 전환되며, 최종적으로 전극에서 산화환원반응을 통해 직류를 생산한다. 산과 염기의 화학반응을 통해 물과 NaCl이 부산물로 생산되기 때문에 블루배터리 기술은 지속가능한 친환경 에너지저장 기술이다.

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 블루배터리 스택

블루배터리 스택은 2개의 단위 셀로 구성하였으며 단위 셀은 하나의 양이온 교환막과 음이온 교환막 및 복극분리막을 교번하여 배치하였다. 분리막 간 유로 내부에는 직조 형태의 스페이서(Polyethylene, 두께:  $200\ \mu\text{m}$ )를 삽입하여 이온교환막 간 물리적, 전기화학적 접촉을 방지하였다. 단위 셀에 구성된 유로에서 외부로 누수를 방지하기 위한 가스켓은 유리섬유가 포함된 강화복합 PTFE(두께:  $230\ \mu\text{m}$ )를 사용하였다(Table 1).

Table 1. Configuration of lab-scale Blue-Battery stack

Cell configuration (N: Cell number)	(CEM - BPM - AEM) $N$ - CEM
Number of cell pairs	2
Electrode material	Pt/Ti (Mesh type)
Gasket	$230\ \mu\text{m}$ , Fiberglass reinforced silicon
Spacer	$200\ \mu\text{m}$ , Polyethylene
High concentration solution	0.5 M NaCl
Low concentration solution	Distilled water
Electrode rinse solution	0.2 M $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6/\text{K}_4\text{Fe}(\text{CN})_6 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$

#### 3.2 이온교환막

당 연구에서는 해수 내 NaCl의 선택적 분리를 위하여 Fujifilm membrane에서 제작한 Type-I 상용 이온교환막을 사용하였으며,  $\text{H}^+$  및  $\text{OH}^-$ 를 공급하기 위한 복극분리막으로 Ralex BM 3.1을 사용하였다. 양이온 교환막과 음이온 교환막은 사용 전 0.5 M의 NaCl 용액에 24시간 이상 전처리하여 스웰링 등 충분히 진행한 후 레이저 제단기를 이용하여 유로의 형태에 따라 가공 후 조립하였다. 복극분리막은 별도의 전처리 없이 제조사에서 공급한 상태로 사용하였다. 각 이온교환막 및 복극분리막의 특성을 Table 2에 정리하였다.

#### 3.3 전극 시스템

블루배터리의 전극 시스템은 충전 과정에서 산과 염기를

Table 2. Membrane properties<sup>[20~23]</sup>

	AEM	CEM	BPM
Identifier	Type 1	Type 1	Ralex BM 3.1
Reinforcement	Polyolefin	Polyolefin	-
Thickness dry (μm)	112	114	442 (± 8)
Thickness wet (μm)	126	141	515 (± 3)
Resistance (Ω · cm <sup>2</sup> )	1.22 (± 0.12)	2.10 (± 0.22)	-
Perm selectivity (%)	93.8 (± 0.8)	97.4 (± 1.8)	-
Ion exchange capacity (meq/g)	1.84 (± 0.03)	1.83 (± 0.04)	-
Water uptake (%)	56.6 (± 0.4)	66.2 (± 1.0)	-
pH stability	2 - 10	4 - 12	0 - 14
Temp stability (°Celsius)	40	40	40

생산할 수 있는 직류와 전기장을 인가하며, 방전 과정에서 산화환원 반응을 통해 직류를 생산하여 계통 또는 부하에 공급하는 중요한 역할을 한다. 블루배터리는 충·방전과정에서 양극과 음극이 서로 전환(polarity reversal)하기 때문에 양극과 음극을 같은 소재로 사용하는 것이 일반적이다. 본 연구에서는 높은 전류밀도에서 전기화학적 안정성이 뛰어난 Pt(코팅두께: 3 μm, Wescro Electrode)를 사용하였으며, 집전체로 내부식성과 전기전도성이 우수한 Ti mesh를 사용했다. 블루배터리의 충방전 과정에서 가역적 산화환원반응을 위해 0.2 M Fe(CN)<sub>6</sub><sup>3-/4-</sup>(K<sub>3</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>, K<sub>4</sub>Fe(CN)<sub>6</sub>, Sigma Aldrich)의 전해질을 산화환원쌍으로 사용하였다.

### 3.4 블루배터리 시스템 구성

블루배터리 시스템은 해수와 담수의 안정적인 공급 및 전극 용액의 순환을 위하여 총 4개의 연동펌프(Masterflex® Easy-Load II, USA)를 사용하였다. 인가전압을 조정하고 블루배터리 스택의 전기화학 성능분석을 위하여 다기능 전기화학 측정장비(SP-150, Bio-Logic, France)를 사용하였다. 인가전압은 유량에 따라 각각 2, 4, 6 V로 조정하며 전류밀도와 에너지 효율을 분석하였다. 튜브를 통한 기

체 확산을 방지하기 위하여 타이곤 튜브(GY-06475-16, Masterflex®, USA)를 사용하였다. 각 유체의 유량은 4.1-17.9 mL/min(선속도: 0.3-1.3 cm/s)으로 동일하게 조정하였다. 해수는 0.5 M의 NaCl을 사용하여 모사하였으며, 담수는 3차 증류수를 사용하였다. 유로의 두께 및 폭에 따른 유체의 이동을 셀의 형태에 따라 비교하기 위하여 선속도(linear velocity)를 아래 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.<sup>[24]</sup>

$$Linear\ velocity = \frac{Flow\ rate}{Triplet \times Max\ width \times Thickness} \quad (1)$$

## 4. 연구결과

### 4.1 인가전압과 유량에 따른 충전성능평가

Fig. 3은 해수와 담수의 유입 유량 및 인가 전압에 따른 블루배터리의 에너지 저장 성능을 산과 염기의 pH로 나타낸 그래프이다. 인가전압이 2 V이고, 해수의 유입 유량이 4.1 mL/min(선속도: 0.3 cm/s)인 경우, 블루배터리 스택에서 생산된 산과 염기의 pH는 각각 2.2 및 12.3 이었으며, 유량이 증가할수록 블루배터리에서 생산된 산과 염기의 pH 차이는 점차 감소하였다. 17.9 mL/min(선속도: 1.3 cm/s)에서 산과 염기의 pH는 3.1 및 11.3로 측정되었다. 인가전압이 4 V일 때, 해수의 유입 유량이 4.1 mL/min인 경우, 블루배터리 스택에서 생산된 산과 염기의 pH는 1.6

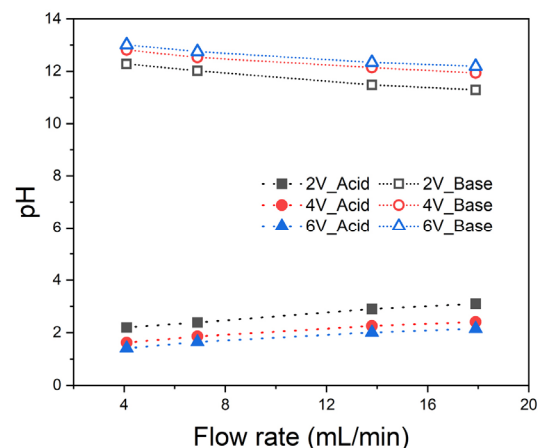


Fig. 3. pH variations of acid and base solutions discharged from the Blue Battery stack according to applied voltage and flow rate

및 12.8이었으며, 유량이 17.9 mL/min로 증가 시 pH는 2.4 및 11.9이 되었다. 인가전압이 6 V인 경우, 유입유량이 4.1 mL/min(선속도: 0.3 cm/s)에서 pH는 1.4 및 13.0이었으며, 유량이 17.9 mL/min(선속도: 1.3 cm/s)으로 증가한 경우 pH는 2.2 및 12.2로 변화였다.

해수와 담수의 유량이 증가함에 따라 산과 염기의 pH 차이가 점차 감소하는 원인은 해수 내 포함된 염분의 이온분리에 필요한 수리학적 체류시간(hydraulic retention time, HRT)의 감소 때문인 것으로 추측된다. 블루배터리에서 유체의 HRT는 유로 내 스페이서에 의한 유체의 저항이 동일하다는 가정하에 스페이서가 없는 유로를 가정하여 EBCT(empty bed contact time)로 유추할 수 있다.

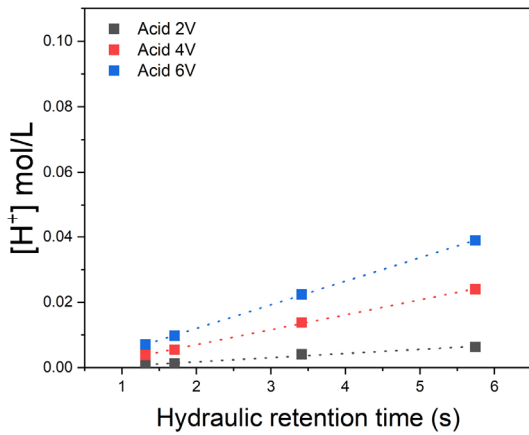


Fig. 4. Concentrations of acid solution ( $[H^+]$ ) discharged from a Blue Battery stack according to hydraulic retention time (HRT)

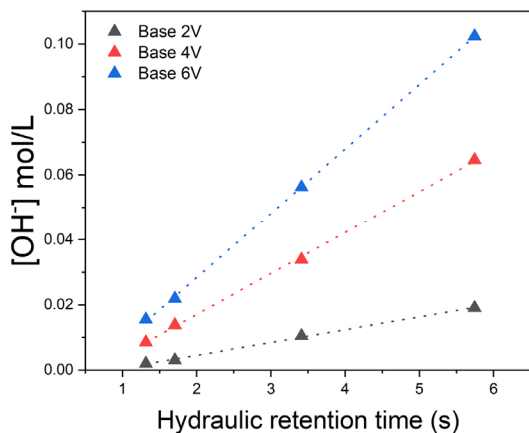


Fig. 5. Concentrations of base solution ( $[OH^-]$ ) discharged from a Blue Battery stack according to hydraulic retention time (HRT)

Fig. 4와 Fig. 5는 HRT와 블루배터리에서 생산된  $[H^+]$ 와  $[OH^-]$ 의 상관관계를 분석한 결과이다. 유속이 4.1 mL/min에서 17.9 mL/min으로 증가한 경우, EBCT는 5.7 s에서 1.3 s로 76.9% 감소하였고, 동일 조건에서 산 용액의  $[H^+]$ 는 2 V에서 87.5%, 4 V에서 83.8%, 6 V에서 81.8% 감소하였으며 염기 용액의  $[OH^-]$ 는 2 V에서 89.8%, 4 V에서 86.8%, 6 V에서 84.9% 감소하였다. 체류시간에 따른 이온농도의 변화의 선형 상관관계를 분석한 결과  $R^2$ 값이 0.97~0.99로 유의하다.

## 4.2 에너지 포텐셜

Fig. 6은 블루배터리 스택에서 생산된 산과 염기 용액의 pH 값을 통해 블루배터리의 전기화학적 에너지전위(open circuit voltage, OCV)를 Nernst 방정식을 사용하여 계산한 결과이다. 이론적 OCV는 블루배터리의 충전 성능을 검증함과 동시에 방전 시 출력밀도를 예측할 수 있는 중요한 값이다. OCV는 식 (2) 및 식 (3)을 사용하여 계산하였다.<sup>[25]</sup>

$$E = \frac{naRT}{zF} \left[ \ln \left( \frac{aNa_B^+}{aNa_N^+} \right) + \ln \left( \frac{aCl_A^-}{aCl_N^-} \right) + \ln \left( \frac{aH_A^+}{aH_N^+} \right) + \ln \left( \frac{aOH_B^-}{aOH_N^-} \right) \right] \quad (2)$$

$$P = \frac{OCV^2}{4R_i} \quad (3)$$

인가전압이 2 V인 경우, 해수의 유입 유량이 4.1 mL/min

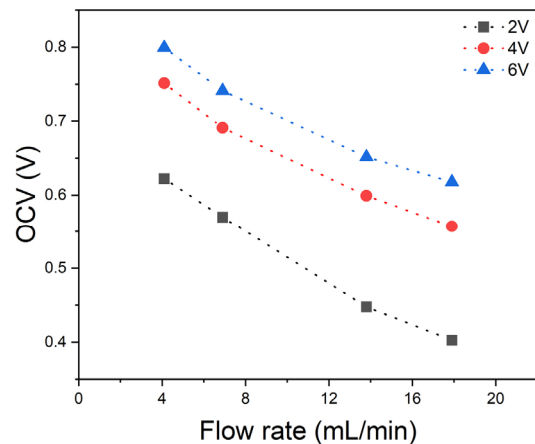


Fig. 6. Variations of OCV on Blue Battery stack according to applied voltage and flow rate

일 때, OCV는 0.60 V였으며, 유량이 증가할수록 OCV는 점차 감소하여, 17.9 mL/min에서 0.48 V로 계산되었다. 인가전압이 4 V인 경우, 유입 유량이 4.1 mL/min일 때, OCV는 0.66 V였으며, 이후 유량이 증가할수록 OCV값이 점차 감소하여 17.9 mL/min에서 0.56 V로 계산되었다. 인가전압이 6 V인 경우, 유입 유량이 4.1 mL/min일 때, OCV는 0.69 V로 가장 높았으며, 이후 유량이 증가할수록 점차 감소하여 17.9 mL/min에서 0.59 V로 계산되었다. 실험 결과 인가전압이 증가할수록 OCV 값이 점차 증가하였으며, 유량이 증가할수록 OCV 값은 점차 감소하였다.

Fig. 7은 산과 염기 용액의 pH로부터 생성 가능한 잠재적 에너지를 계산한 그래프이다. 인가전압이 2 V인 경우, 해수의 유입 유량이 4.1 mL/min인 경우 잠재 에너지량은 44.6 J였으며, 유량이 6.9 mL/min인 경우 잠재 에너지량이 46.3 J로 증가하였고, 이후 유량이 증가할수록 블루배터리의 잠재 에너지량은 점차 감소하여, 17.9 mL/min에서 19.9 J로 계산되었다. 인가전압이 4 V인 경우, 유입 유량이 4.1 mL/min인 경우 잠재 에너지량은 188.4 J였으며, 이후 유량이 증가할수록 잠재 에너지량이 감소하여 유입 유량이 17.9 mL/min에서 잠재 에너지량이 113.5 J로 감소하였다. 인가전압이 6 V인 경우, 유입유량이 4.1 mL/min에서 잠재 에너지량이 316.6 J로 가장 높았으며, 이후 유량이 증가할수록 잠재 에너지량이 감소하여 유입 유량 17.9 mL/min에서 217.8 J의 잠재 에너지량이 계산되었다. 실험 결과 인가전압이 증가할수록 잠재 에너지량이 점차 감

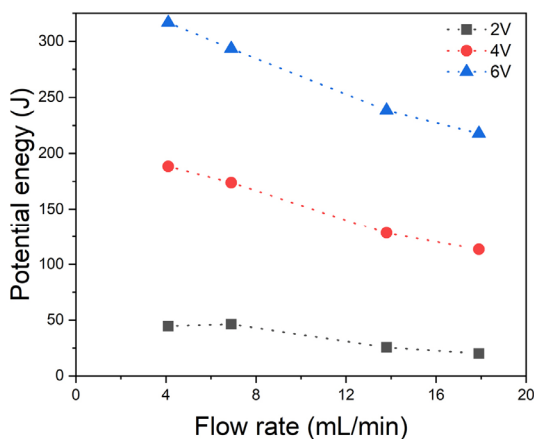


Fig. 7. Variations of Potential energy on Blue Battery stack according to applied voltage and flow rate

소하였으며, 유량이 증가할수록 잠재 에너지량이 점차 감소하였다.

### 4.3 블루배터리 효율 분석

Fig. 8은 인가전압 및 유량변화에 따른 블루배터리 에너지 효율을 나타낸 그래프이다. 에너지 효율은 식 (4)를 사용하여 계산하였다.

$$Energy\ Efficiency = \frac{Potential\ Energy}{Input\ Energy} \quad (4)$$

에너지 효율은 충전시 소모된 전력대비 산 염기 용액이 가지고 있는 잠재 에너지를 사용하여 추정하였다. 인가전압이 2 V인 경우, 블루배터리 에너지 효율은 18.8%(4.1 mL/min)에서 유량이 증가할수록 증가하여 6.9 mL/min인 경우 21.0%로 가장 높은 효율을 나타냈다. 이후 유량이 증가할수록 블루배터리의 에너지 효율은 점차 감소하여, 16.6%(17.9 mL/min)로 나타났다. 인가전압이 4 V인 경우, 에너지 효율은 9.0%(4.1 mL/min)이었으며, 유량이 증가할수록 에너지 효율이 증가하여 유입 유량이 17.9 mL/min에서 에너지효율이 10.3%로 증가하였다. 인가전압이 6 V인 경우, 초기 4.8%(4.1 mL/min)에서 유량이 증가할수록 에너지 효율이 증가하여 17.9 mL/min에서 6.0%까지 상승했다. 실험 결과 인가전압이 증가할수록 블루배터리의 에너지 효율이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 인가전압

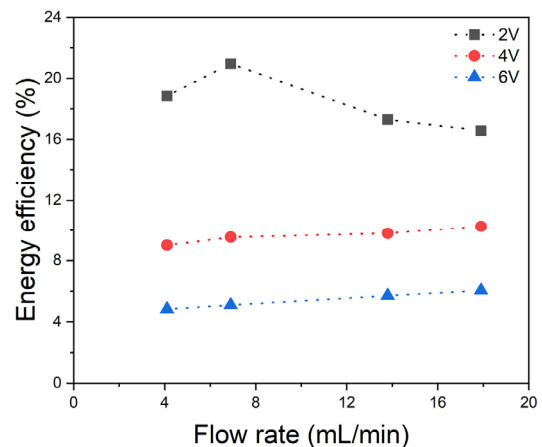


Fig. 8. Variations of energy efficiency on Blue Battery stack according to applied voltage and flow rate

이 2 V인 경우 운전조건에 따른 최적화가 가능하고, 4 V와 6 V에서는 유량이 증가할수록 에너지 효율은 감소하여 대용량 시스템 제작을 위한 운전조건을 제고해야 한다.

## 5. 결론

본 연구에서는 재생에너지 출력제어 문제를 완화할 수 있는 경제적이고 대용량이 가능한 해수 이용 에너지 저장 기술로써 블루배터리의 인가전압 및 유량에 따른 최적화 연구를 수행하였다. 인가전압이 증가할수록 해수로부터 산과 염기를 분리하는 블루배터리 충전 성능은 상승하지만, 스택 내에서 유체의 체류시간이 충전 성능 최적화를 위한 중요한 변수로 확인되었다. 블루배터리 전기화학적 성능을 평가하기 위한 지표로써 OCV를 분석하였으며, 낮은 체류시간에서 인가전압이 높을수록(즉, 저장에너지가 클수록) OCV는 높은 값을 갖는 것을 확인하였다. 블루배터리 효율은 유량과 OCV의 관계를 통해 최적화 가능성이 있음을 확인했으며, 낮은 전압 조건에서 장기 충전을 하는 것이 블루배터리의 효율을 향상시키는 주요 인자임을 확인하였다. 블루배터리의 대용량화를 위해서는 체류시간을 고려한 스택의 설계가 필요하며, 유량과 효율의 상관관계를 통해 향후 대용량 MW급 블루배터리 파일럿 시스템 설계 등을 진행할 예정이다.

## 감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 연구개발특구지원재단의 지역의 미래를 여는 과학기술 프로젝트(2022-DD-UP-0308-03-101)의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

## References

[1] International Renewable Energy Agency (IRENA), 2023, “Renewable power generation costs in 2023”, <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Po>

wer-Generation-Costs-in-2023.

- [2] 2050 Carbon Neutrality and Green Growth Commission, 2023, “1st National Basic Plan for Carbon Neutrality and Green Growth”, <https://www.2050cnc.go.kr/base/board/read?boardManagementNo=2&boardNo=1469&menuLevel=2&menuNo=16>.
- [3] Korea Energy Agency, 2024, “Summary of the results of the 2023 New and Renewable Energy Supply Statistics (published in 2024)”, <https://www.knrec.or.kr/biz/pds/statistic/view.do?no=390>.
- [4] Olabi, A.G., and Abdelkareem, M.A., 2021, “Energy storage systems towards 2050”, *Energy*, **219**, 119634
- [5] Twitchell, J., DeSomer, K., and Bhatnagar, D., 2023 “Defining long duration energy storage”, *J. Energy Storage*, **60**, 105787.
- [6] LDES Council, 2021, “Energy Industry Leaders Sign Agreement to Create Long Duration Energy Storage Council and Accelerate Carbon Neutrality”, Accessed 3 March 2025, <https://www.ldescouncil.com/news/energy-industry-leaders-sign-agreement-to-create-long-duration-energy-storage-council-and-accelerate-carbon-neutrality>.
- [7] Ministry of Trade, Industry and Energy, 2024, “5th Energy Technology Development Plan (‘24-’33)”, [https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilArchiveView.jsp?archive\\_id=1181&#this](https://www.pacst.go.kr/jsp/council/councilArchiveView.jsp?archive_id=1181&#this).
- [8] Lu, Y., Yuan, Y., Liang, T., Jia, H., Meng, L., Zhang, X., Zhang, S., Wen, B., Feng, Z., Yin, T., *et al.*, 2024, “Mechanisms elucidation of secondary seawater batteries: From ion migration to conversion for sustainable energy storage”, *Chem. Eng. J.*, **498**, 155307.
- [9] Zhang, Y., Park, J.-S., Senthilkumar, S.T., and Kim, Y., 2018, “A novel rechargeable hybrid Na-seawater flow battery using bifunctional electrocatalytic carbon sponge as cathode current collector”, *J. Power Sources*, **400**, 478-484.
- [10] Wang, Z., Li, J., Zhang, C., Wang, H., and Kong, X., 2022, “Power production from seawater and discharge brine of thermal desalination units by reverse electro-dialysis”, *Appl. Energy*, **314** 118977.
- [11] Rehman, S., Al-Hadhrani, L.M., and Alam., M.M., 2015, “Pumped hydro energy storage system: A technological review”, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, **44**, 586-598.

- [12] De Körösy, F., and Zeigerson, E., 1971, "Bipolar membranes made of a single polyolephine sheet", *Isr. J. Chem.*, **94**, 483-497.
- [13] Weinstein, J.N., and Leitz., F.B., 1976, "Electric power from differences in salinity: the dialytic battery", *Science*, **191**(4227), 557-559.
- [14] Ramp, F.L., 1979, "Secondary batteries powered by forced ionisation", *Nature*, **278**(5702), 335-337.
- [15] Emrén, A.T., and Holmström, V.J.M., 1983, "Energy storage in a fuel cell with bipolar membranes burning acid and hydroxide", *Energy*, **8**(4), 277-282.
- [16] Loktionov, P., Pichugov, R., and Konev, D., 2023, "Neutralization flow batteries in energy harvesting and storage", *J. Energy Storage*, **72**, 108467.
- [17] Culcasi, A., Gurreri, L., Tamburini, A., Cipollina, A., Cipollina A., Bogle, I.D.L., and Micale, G., 2023, "Improving efficiency and discharge power of acid-base flow battery via a bi-objective optimisation", *J. Energy Storage*, **66**, 107429.
- [18] Mokhtar, I.E., Gurreri, L., Tamburini, A., Cipollina, A., Ciofalo, M., Bouguecha, S.A.T., and Micale, G., 2021, "CFD prediction of flow, heat and mass transfer in woven spacer-filled channels for membrane processes", *Int. J. Heat Mass Transf.*, **173**, 121246.
- [19] Zare, S., and Kargari, A., 2023, "State-of-the-art surface patterned membranes fabrication and applications: A review of the current status and future directions", *Chem. Eng. Res. Des.*, **196**, 495-525.
- [20] Jang, J., 2021, "Ion Exchange Membrane for Reverse Electrodialysis", *Academ. J. Polym. Sci.*, **5**(1), 555654.
- [21] Al-Dhubhani, E., Pärnamäe, R., Post, J.W., Saakes, M., and Tedesco, M., 2021, "Performance of five commercial bipolar membranes under forward and reverse bias conditions for acid-base flow battery applications", *J. Membr. Sci.*, **640**, 119748.
- [22] Yang, S.C., Kim, W.-S., Choi, J., Choi, Y.-W., Jeong, N., Kim, H., Nam, J.-Y., Jeong, H., and Kim, Y.H., 2019, "Fabrication of photocured anion- exchange membranes using water-soluble siloxane resins as cross-linking agents and their application in reverse electrodialysis", *J. Membr. Sci.*, **573**, 544-553.
- [23] Yang, S.C., Choi, Y.-W., Choi, J., Jeong, N., Kim, H., Nam, J.-Y., Jeong, H., 2019, "R2R Fabrication of pore-filling cation-exchange membranes via one-time impregnation and their application in reverse electrodialysis", *ACS Sustain. Chem. Eng.*, **7**(14), 12200-12213.
- [24] Kim, H., Choi, J., Jeong, N., Jung, Y. G., Kim, H., Kim, D., and Yang, S., 2021, "Correlations between properties of pore-filling ion exchange membranes and performance of a reverse electrodialysis stack for high power density", *Membranes*, **11**(8), 609.
- [25] Van Egmond, W.J., Saakes, M., Noor, I., Porada, S., Buisman, C.J.N., and Hamelers, H.V.M., 2018 "Performance of an environmentally benign acid base flow battery at high energy density", *Int. J. Energy Res.*, **42**(4), 1524-1535.