



패턴형 이온교환막을 이용한 스택의 셀 수 및 크기에 따른 역전기투석 성능 평가

이동건^{1,2)} · 김한기³⁾ · 정남조⁴⁾ · 목영선⁵⁾ · 최지연^{6)*}

Evaluation of Reverse Electrodialysis based on the Number of Cell Pairs and Stack Size Using Patterned Ion Exchange Membrane

Dong-Gun Lee^{1,2)} · Hanki Kim³⁾ · Namjo Jeong⁴⁾ · Young Sun Mok⁵⁾ · Jiyeon Choi^{6)*}

Received 6 April 2023 Revised 28 April 2023 Accepted 8 May 2023

ABSTRACT Salinity gradient energy can be generated from a mixture of water streams with different salt concentrations by using reverse electrodialysis (RED). In this study, we evaluated the effect of stack size and number of cell pairs on the energy efficiency and specific energy of the RED process. Additionally, we studied the prementioned parameters to maximize the power density of RED. The performance of the RED stack which used a patterned ion exchange membrane, was evaluated as a function of stack size and feed flow rate. Moreover, it was noted that an increase in stack size increased the ion movement through the ion exchange membrane. Furthermore, an increase in feed flow rate led to a reduction in the concentration variation, resulting in an increase in OCV and power density. The energy efficiency and specific energy for 100 cells in the $10 \times 10 \text{ cm}^2$ stack were the highest at 12% and 0.05 kWh/m^3 , respectively, while the power density from 0.33 cm/s to $5 \times 5 \text{ cm}^2$ stack was the highest at 0.53 W/m^2 . The study showed that the RED performance can be improved by altering the size of the stack and the number of cell pairs, thereby positively affecting energy efficiency and specific energy.

Key words Salinity gradient power(염분차발전), Reverse electrodialysis(역전기투석), Ocean energy(해양에너지), Patterned ion exchange membrane(패턴형 이온교환막), Power density(전력밀도), Specific energy(비에너지)

1) Master's Degree Student, Department of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University

2) Master's Degree Student, Korea Institute of Energy Research, Jeju Global Research Center

3) Ph.D, Korea Institute of Energy Research, Jeju Global Research Center

4) Ph.D, Korea Institute of Energy Research, Jeju Global Research Center

5) Professor, Department of Chemical and Biological Engineering, Jeju National University

6) Ph.D, Korea Institute of Energy Research, Jeju Global Research Center

*Corresponding author: jychoi@kier.re.kr

Tel: +82-64-800-2239

Fax: +82-64-805-2204

Subscript

IEM : ion exchange membrane

CEM : cation exchange membrane

AEM : anion exchange membrane

HC : high concentration

LC : low concentration

ERS : electrode rinse solution

1. 서론

화석연료의 고갈과 화석연료로 인해 발생하는 환경문제로 이를 대체할 수 있는 신재생에너지원에 대한 개발 필요성에 따라 해양에너지가 주목받고 있다. 대부분의 해양 에너지 자원과 관련된 비교적 높은 에너지 밀도는 기술적 문제를 극복하고 비용을 절감할 수 있다면 향후 수십 년 동안 해양 에너지가 에너지 공급에 중요한 기여를 할 수 있는 잠재력을 보여준다.^[1] 따라서 해양 에너지의 높은 에너지 밀도를 확보하기 위해 다양한 기술 개발이 진행되고 있다.

그 중 염분차발전(Salinity gradient power, SGP)은 해수와 담수의 염분 농도 차이를 이용해 전기에너지를 생산하는 기술로, 담수가 해수로 자발적으로 혼합되면 지속 가능한 에너지가 생성된다. 염분차발전은 해수와 담수의 순환을 통해 지속 가능성을 확인할 수 있다. 따라서 염분차발전은 CO₂를 전혀 배출하지 않고, 태양광, 풍력, 조력 등의 다른 재생 에너지 자원의 일반적인 불연속성(발전 시간이나 자연 환경)에 영향을 받지 않아 지속적인 전력 생산에 적합하다.^[2] 이러한 장점을 가진 염분차발전은 압력지연삼투(Pressure retarded osmosis, PRO), 축전식혼합(Capacitive mixing, CapMix), 역전기투석(Reverse electrodialysis, RED)의 발전방식으로 나눌 수 있다.

본 연구에서 진행한 RED는 NaCl을 양이온인 Na⁺를 통과시키는 양이온교환막(Cation exchange membrane, CEM)과 음이온인 Cl⁻를 통과시키는 음이온교환막(Anion exchange membrane, AEM)이 교차로 적층되고, 전자의 이동을 위한 전극으로 구성된다. 농도가 다른 해수와 담수를 교차로 흘려

주면 이온농도의 차이에 의해 전위차(Donnan potential)가 형성되고, 양 끝단에 위치하는 전극에서의 산화환원 반응(Redox reaction)을 통해 전자가 이동하여 에너지를 생성한다(Fig. 1 참조).

일반적으로 RED 스택에서 이온교환막은 RED 성능에 크게 기여하는 필수 구성요소이다. RED 공정에 사용되는 이온교환막에는 균질막과 비균질막이 있고, 낮은 막저항과 높은 선택투과도를 요구한다. Yang *et al.*(2019)^[3] 등은 고분자 전해질을 얇은 다공성 지지체의 세공에 충전시킨 세공충진 이온교환막을 사용하여 기존의 상용 이온교환막(Fujifilm Type-1 CEM·AEM)에 비해 높은 성능을 보였고, 또한 Kim *et al.*(2015)^[4] 등은 최대 전력밀도 2.4 W/m²를 달성하였다.

RED는 이온을 선택적으로 투과하는 이온교환막뿐만 아니라 스페이서도 이온교환막 사이의 거리를 유지하고, 용액의 이온 분포를 개선하는 중요한 역할을 한다.^[5] Mehdizadeh *et al.*(2019)^[6] 등은 다양한 두께의 서로 다른 구조를 가진 스페이서와 스페이서 체적에 따른 다공성을 적용하여 음영효과(shadow effect)에 대한 영향을 조사하였다. 하지만, 이온교환막과 스페이서가 맞닿는 부분은 음영효과에 의해 유입수와 이온교환막 사이의 접촉을 방해하여 원활한 이온 이동에 영향을 미친다. 음영효과를 최소화하기 위해서는 얇은 두께와 넓은 면적을 가진 스페이서, 이온 전도성 스페이서를 사용하거나, 스페이서를 사용하지 않는 RED 셀을 구성하는 것이 바람직하다.

Vermaas, D.A. *et al.*(2011)^[7] 등은 스페이서 기능을 통합한 프로파일 멤브레인(profiled membrane)을 처음 RED 스택에서 사용했고, Pawlowski *et al.*^[8] 등은 pillar(기둥) 구조와 chevron(V형;갈매기형) 구조를 프로파일 멤브레인으로 비교하였다. 이를 통해 스페이서가 있는 스택에 비해 프로파일 멤브레인 스택이 높은 성능을 보임을 확인하였다. Choi *et al.*^[9] 등은 얇은 세공충진 이온교환막에 패턴 구조를 제작하여 1.39 W/m²의 높은 충전력밀도를 보였다. 이처럼 RED 구성에 있어서 이온교환막의 성능 확보는 시스템 전체에 큰 영향을 미친다.

하지만 전력밀도를 통한 분석 방법은 이온교환막 표면적을 기반으로 측정하므로, 전력밀도를 사용하여 스택 크기에 따른 발전 및 영향을 평가하는 것은 어렵다. 따라서

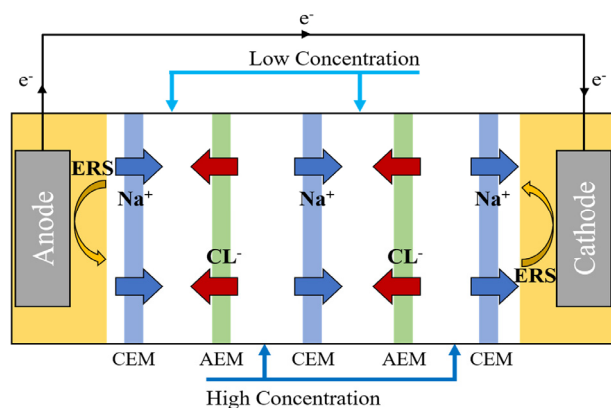


Fig. 1. Schematic illustration of RED stack and electrodes

RED 시스템 및 성능 평가는 공급 용액의 유량을 통해 측정하는 것이 바람직하다.^[10]

비에너지는 RED 스택의 성능을 평가하는데 유용한 지표이다. 비에너지는 저농도 공급 용액의 단위 부피(m^3)당 에너지(kWh)로 정의된다. Kim *et al.*^[10] 등은 100셀 RED 스택의 유량 100 mL/min에서 0.06 kWh/ m^3 의 순비에너지를 달성했다. Nam *et al.*^[11] 등은 가장 높은 순비에너지인 0.058 kWh/ m^3 를 4단 캐스케이드 스택의 선속도 0.25 cm/s에서 달성했고 이는 16%의 에너지효율에 해당한다. 이처럼 RED의 높은 비에너지를 달성하기 위해 계속해서 연구가 진행되어왔다.

앞선 연구에서는 스페이서를 사용한 이온교환막을 사용하여 높은 에너지효율과 비에너지를 얻었다. 본 연구에서는 RED 성능을 개선하기 위하여 기존에 개발되어 높은 성능을 보인 패턴형 이온교환막 스택의 셀 수와 크기에 따른 변화가 에너지효율, 비에너지에 미치는 영향을 확인하고자 했다. 따라서 가장 높은 에너지효율과 비에너지를 생성하는데 필요한 최적의 조건을 결정하기 위해 RED 스택의 성능을 평가하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1.1 실험 재료

해수 제조를 위한 염화나트륨(NaCl), 전극용액 제조를 위한 페로시안화칼륨($K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$)과 페리시안화칼륨($K_3[Fe(CN)_6]$)은 대정화금(South Korea)에서 구매하였다.

2.1.2 패턴형 이온교환막 제작

세공충진 이온교환막은 이전 연구^[3]에서 설명된 대로 제작되었으며, 패터닝 전에 표면을 600 W의 방전전력으로 60초 동안 에어 플라즈마(Sysco-N-SP100N, System Korea, South Korea)로 처리하였다. 광경화성 비전도성의 잉크로 채워진 제어 주사기(SHOT Master, Musashi Engineering, Japan)는 설계된 패턴에 따라 자동으로 이동하였다. 그 후 잉크를 UV 램프(365 nm, Hoya, Japan)로 경화시켰다. 패턴 높이는 스페이서와 동일한 높이인 100 μm 로 제작하였다.^[8]

2.1.3 스택 구성

Fig. 2는 패턴형 이온교환막이 있는 스택 적층의 개략도이고, Fig. 3은 실제 패턴형 멤브레인 크기를 보여준다. 본 연구에서의 RED는 양극과 음극의 전극, 교차로 적층된 CEM과 AEM 그리고 가스켓으로 구성했고, cross-flow 형태의 스택을 사용하였다. CEM과 AEM은 패턴형 세공충진 이온교환막(KIER, South Korea)을 사용하였고, 가스켓(Alphaflon,

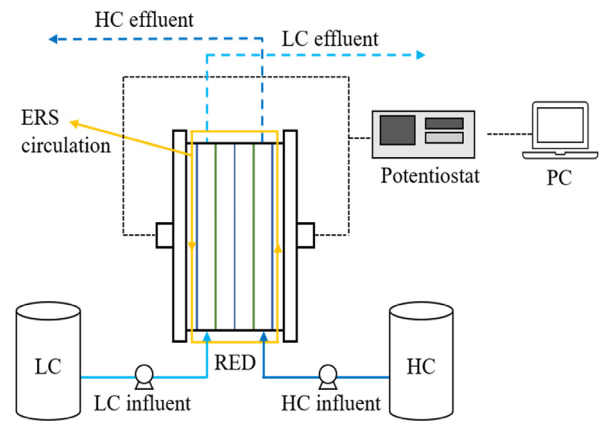


Fig. 2. Schematic illustration of the RED operation process

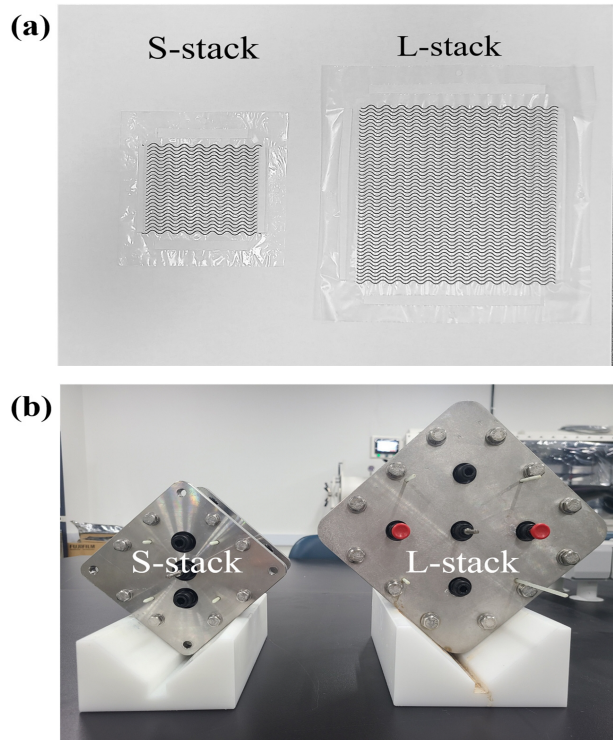


Fig. 3. Photographic images of (a) patterned membranes and (b) stack size as S-stack ($5 \times 5 \text{ cm}^2$) and L-stack ($10 \times 10 \text{ cm}^2$)

South Korea)은 두께 100 um의 PTFE(Poly tetra fluoro ethylene)를 사용하였다. S-스택과 L-스택은 각각 Ir/Ru 과 Pt/Ti(Wesco electrode, South Korea)이 코팅된 전극 을 사용하였다. 해수(전도도 ~48 mS/cm)는 수돗물에 30 g NaCl/L 을 혼합하여 제조하였으며, 담수는 수돗물(전도 도 ~0.18 mS/cm)을 사용하였다. 전극용액은 $K_4[Fe(CN)_6] \cdot 3H_2O$ (50 mM)과 $K_3[Fe(CN)_6]$ (50 mM)을 3차 증류수와 혼합하여 공급하였다. 해수와 담수, 전극용액을 공급하기 위해 연동펌프(L/S Easy load II, Masterflex)를 사용하 였고, 전위가변기(SP-50, Biologic, France)를 사용하 였다.

2.2 실험 조건

이상적인 조건에서 전자의 이동으로 인해 생기는 두 전극 사이의 전위차인 기전력은 Nernst 방정식을 사용 하여 계산할 수 있다(식 (1) 참조).

$$E_{OCV} = \frac{N_m R T}{z F} \ln \left(\frac{\gamma_{HC} C_{HC}}{\gamma_{LC} C_{LC}} \right) \quad (1)$$

E_{OCV} 는 기전력, N_m 은 이온교환막 셀 쌍 수, R 은 이상 기체상수(8.314 J/mol·K), T 는 절대온도(K), F 는 패러 데이상수(96,485 C/mol), z 는 원자가이온(-), γ 는 활성 계수(-), C 는 농도(mol/m³)이다.

스택 내부에서 생성된 전력(P_{gross})과 전력밀도($P_{gross,d}$)는 식 (2), (3)의 값으로 얻을 수 있다.

$$P_{gross} = I^2 R_{ext} = \left(\frac{E_{OCV}}{R_i + R_{ext}} \right)^2 R_{ext} \quad [W] \quad (2)$$

$$P_{gross,d} = \frac{P_{gross}}{A_{mem}} \quad [W/m^2] \quad (3)$$

전력밀도는 전력을 전체 멤브레인 면적으로 나누어 계산 되었다.

R_i 는 내부저항(ohm), R_{ext} 는 외부저항(ohm), A_{mem} 은 멤브레인의 총 면적(m²)이다.

$$\eta = \frac{P_{gross}}{P_{\Delta G_{mix}}} \times 100 \quad [\%] \quad (4)$$

$$P_{\Delta G_{mix}} = 2RT \left(V_{HC} C_{HC} \ln \frac{C_{HC}}{C_M} + V_{LC} C_{LC} \ln \frac{C_{LC}}{C_M} \right) [W] \quad (5)$$

$$C_M = \frac{V_{HC} C_{HC} + V_{LC} C_{LC}}{V_{HC} + V_{LC}} \quad [mol/m^3] \quad (6)$$

$P_{\Delta G_{mix}}$ 는 깁스 자유 에너지(Gibbs free energy)에 따 른 전력(W)이고, V 는 체적(m³), C 는 농도(mol/m³)이다.

체적 V 에 대한 유량 Q (m³/s)를 대입함으로써, 식 (5)에 서 농도혼합 전후의 깁스 자유 에너지를 계산하는데 사용 할 수 있다.

$$X = 2RT \left(Q_{HC} C_{HC} \ln \frac{C_{HC}}{C_M} + Q_{LC} C_{LC} \ln \frac{C_{LC}}{C_M} \right) [W] \quad (7)$$

평균 농도 C_M 은 식 (6)에서 체적 대신 유량을 사용하여 얻을 수 있다. 이처럼 사용가능한 깁스 자유 에너지를 엑서 지(exergy)라고도 한다.

비에너지는 저농도 용액의 유량을 기반으로 계산하였다.

$$\text{Specific energy} = P_{gross} / Q_{LC} \quad [kWh/m^3] \quad (8)$$

3. 실험결과 및 토의

측정한 스택은 ‘스택 크기-셀 수’로 표시하였다. 약어는 스택 크기, 뒤에 오는 숫자는 셀 수를 의미한다. 예를 들어, 10 × 10 cm² 스택의 100셀은 L-100으로 표시하였다.

3.1 OCV, I-V와 I-P 곡선 비교

Fig. 4는 셀 수 및 스택의 크기가 다른 조건에서 공급 용 액의 비율이 일정할 때 open circuit voltage(OCV)를 측 정하였다. OCV는 저항이 무한하고 회로가 개방되어 전류 가 흐르지 않을 때 얻을 수 있다. 이는 양극과 음극 사이에 외부 회로가 연결되지 않음을 의미하며, OCV의 크기는 이 온교환막을 중심으로 용액의 농도차에 의해 결정된다. Fig.

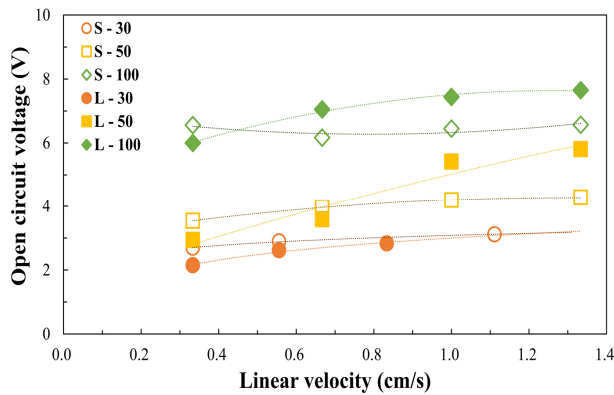


Fig. 4. Open circuit voltage of the S-stack and L-stack with different number of cell pairs (30, 50, 100) as function of linear velocity

4에서 30셀, 50셀, 100셀로 셀 수가 증가할수록 OCV가 증가한다. 또한, 셀 수가 동일하면 스택 크기가 클수록 선속도가 증가하면 OCV는 증가한다. L-30에서 가장 낮은 OCV를 보이고, L-100에서 가장 높은 OCV를 보인다. 해수와 담수의 유량이 증가할수록 S-스택보다 L-스택이 더 높은 OCV 결과를 나타낸다. 더 큰 L-스택의 유로를 따라 증가하는 유체와 이온교환막 표면의 경계층으로 인해 유량의 증가가 필요하다. 짧은 유로의 S-스택의 경우 이온 전달이 빠르게 되고, 확산 경계층 저항(diffusion boundary layer)이 작아 L-스택에 비해 더 유리할 수 있다.^[12] 하지만, S-스택의 OCV는 선속도가 증가할수록 스택 내부에서 빠르게 이온평형에 도달하여 L-스택에 비해 크게 증가하지 않는다. L-스택의 경우, 30셀을 제외하고 50셀, 100셀은 선속도가 증가할수록 크게 증가함을 보이고, S-스택보다 높은 OCV가 측정되었다. 이는 스택의 크기가 증가할수록 더 많은 이온이 이온교환막을 통해 이동할 수 있고 출구 농도가 혼합 농도에 더 가깝기 때문에 더 많은 깁스 자유 에너지(Gibbs free energy)가 활용된다. 이온교환막에서의 농도 분극현상은 이온교환막 표면에 이온이 농축되어 이온의 이동을 감소시켜 발전 효율을 떨어뜨리고, 이를 해결하기 위해서는 유량을 증가시켜야 한다. 유량이 높을수록 농도분극현상이 약해지고 셀 전체의 전기적 저항이 작아져 OCV가 증가한다.^[13]

Fig. 5는 S-스택과 L-스택을 동일한 100셀로 유량을 변화하여 측정한 I-V와 I-P 곡선이다. 이는 RED의 성능을 나타내는 주요 지표로, I-V 곡선은 전류의 변화에 따른

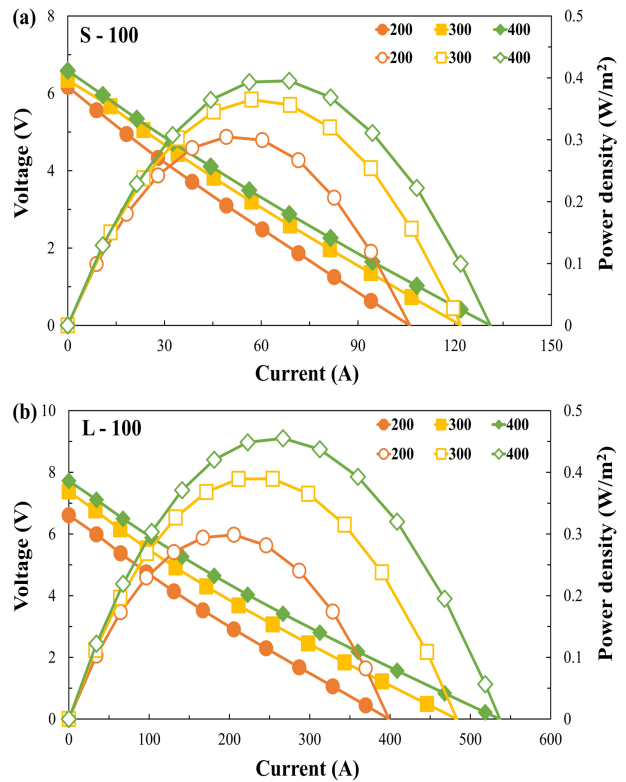


Fig. 5. Current-voltage (I-V) curves (filled symbol) and current-power density (I-P) curves (blank symbol) of RED stacks sizes (a) S-stack and (b) L-stack with 100 cell pairs according to flow rate (mL/min)

전압의 값이고, I-P 곡선은 전류에 상응하는 전력의 값을 확인하고자 하였다. 또한 전력은 각 지점에서의 전류와 전압을 곱한 값으로 $P = IV$ 에 따라 출력을 나타낸다. 일반적으로, RED에서 생산되는 전력은 OCV보다 내부 저항에 따른 영향이 더 크다. 내부 저항은 RED 스택을 구성하는 이온교환막의 두께, 전도도 등의 영향을 많이 받는다.

전압과 전류는 유량에 따라 증가하였으며 비례 관계가 성립된다. L-스택에서 전압과 전류 모두 S-스택보다 높지만, 유량의 증가에 따른 전압은 거의 차이가 없다. 하지만 L-스택의 전류는 S-스택과 비교하여 약 4배의 증가를 보인다. 동일한 유량임에도 크기가 큰 스택일수록 이온교환막에 전반적으로 걸친 유체의 이온 이동이 많아진다. 따라서 더 많은 이온이 스택 내부에 존재하여 전류의 증가를 확인했다. 전력밀도 곡선은 I-V 곡선의 선형 변화도 인해 포물선 모양을 갖는다. 이는 외부 저항이 내부 저항과 동일한 최대 전류 및 최대 전압의 절반 지점에서 최대 전력밀도를 얻었다. 따라서 전압 및 전류가 증가할수록 최대 전력밀도

도 증가하여, L-스택의 유량이 400 mL/min의 경우 가장 높은 전력밀도를 나타냈다.

3.2 전력 및 전력밀도 비교

Fig. 6은 셀 수 및 스택의 크기가 다른 조건에서 전력과 전력밀도에 대한 영향을 확인하였다. 스택 유로를 따른 압력 강하가 고려되지 않았으며, 총전력(gross power) 값만 측정되었다.

Fig. 6(a)에서 S-스택은 셀 수와 상관없이 선속도가 증가함에 따라 전력이 크게 증가하지 않고, L-스택은 셀 수와 선속도가 증가할수록 전력이 증가하였다. 선속도 1.33 cm/s에서 L-100에서 1.2 W, S-스택에서는 0.13 W의 전력이 측정되었다. 스택 내부에 공급되는 유량이 증가함에 따라 이온교환을 위한 체류시간이 더 짧아 셀을 따라 더 높은 농도구배를 유지하기 때문에 공급유량의 증가는 높은 전력의 증가를 보인다. L-스택에서 30셀에서 100셀로 증가함에 따라 전력이 증가한다는 것은 RED 시스템 확장 중에 셀 수

로 인한 전력 생산에 제한이 되지 않았음을 시사했다.^[14] 따라서 증가하는 셀 수를 위해 스택 전체에 동일한 선속도를 유지함으로써 유입되는 유량의 증가와 관련이 있다.

전력밀도는 스택의 단위 면적당 전력이고, 각 스택의 면적은 Table 1에 나타내었다. Fig. 6(b)에서 전력밀도는 전력과 다른 경향성을 나타낸다. 스택 크기에 따른 비교 시 30셀을 제외하고 50셀, 100셀은 L-스택이 더 높은 전력밀도를 나타낸다. 이는 큰 스택은 용액이 유입되는 구간에서 동일한 체류시간을 달성하기 위해 더 높은 유량을 필요로 하므로 농도분극 효과가 더 약하기 때문이다.^[15] 또한 해수 유량의 증가는 공급되는 이온량의 증가를 보여 전력밀도가 증가하는데 영향을 미친다. 또한 전체유량의 증가는 셀 내부에서 유체의 체류시간 감소를 일으키기 때문에 셀 내부에서 수평과 수직방향으로 생기는 농도변화(R_{BL} 와 $R_{\Delta C}$)를 줄이는 효과도 있는 것으로 보인다.^[16] 선속도 1.33 cm/s에서 S-100이 0.27 W/m²으로 가장 낮은 값을 보이고, L-50이 0.85 W/m²으로 가장 높은 값을 보인다. 가장 낮은 선속도 0.33 cm/s에서는 L-50이 0.11 W/m²으로 가장 낮은 전력밀도를 나타냈다. 이처럼 스택 크기와 셀 수가 동일하지만 선속도에 따라 전력밀도가 크게 차이가 난다. 스택의 크기가 큰 스택의 전력밀도가 높지만, 스택이 수용할 수 있는 에너지의 양이 한정적이기 때문에 항상 증가하지 않는다. 따라서 최적의 셀 수를 파악하는 과정이 필요하다.

3.3 에너지효율과 비에너지 특성

Fig. 7(a), (b)는 셀 수 및 스택의 크기가 다른 조건에서 에너지효율과 비에너지를 보여준다. 에너지효율은 전력과 반대 경향을 보인다.

낮은 유량에서는 평형 농도에 빠르게 다다를 수 있고 유

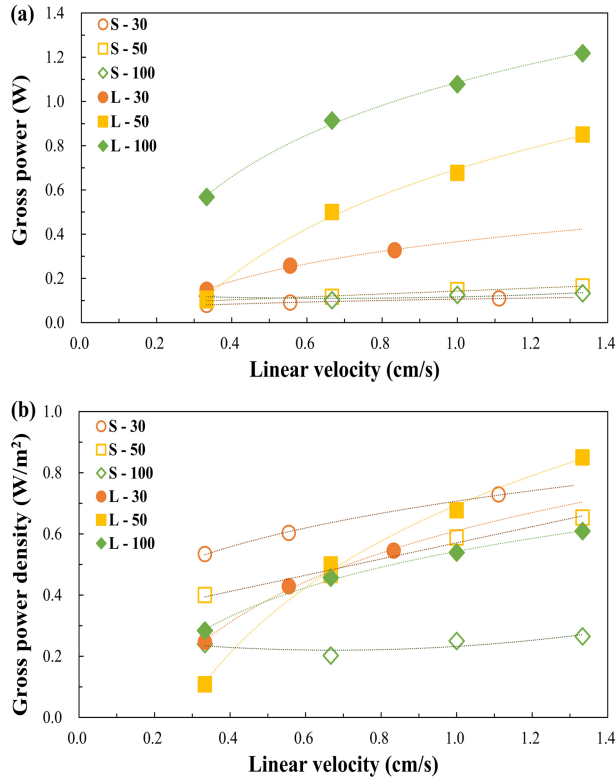


Fig. 6. (a) Gross power and (b) gross power density of the S-stack and L-stack with different number of cell pairs (30, 50, 100) as function of linear velocity

Table 1. RED stack ion exchange membrane area

Symbol	Stack (cm ²)	Cell pairs	Membrane area (m ²)
S	5 × 5	30	0.15
		50	0.25
		100	0.5
L	10 × 10	30	0.6
		50	1.0
		100	2.0

체역학적 전력 손실이 최소화되기 때문에 에너지 효율이 최대일 것이다. 하지만 매우 낮은 유량에서는 co-ion 이동 및 삼투로 인한 손실이 중요한 역할을 한다.^[17] 전력밀도와 에너지 효율은 서로 반대된다. 높은 에너지 효율을 위해서는 낮은 전력밀도의 큰 멤브레인 영역이 필요하다.^[18] RED 스택의 에너지효율은 액서지 형태로 스택에 공급된 총 화학 에너지에 대한 추출된 에너지의 비율로 정의된다. 스택 크기가 증가함에 따라 각 스택에 공급되는 액서지의 양이 증가하고, 유량은 모든 스택에서 동일하고 큰 스택의 유동 면적은 작은 스택보다 크므로 큰 스택에 공급되는 액서지의 양이 더 많다. 스택에 공급되는 액서지는 각 스택의 유입면적과 동일한 유량에 정비례한다. 특히 S-100이 가장 낮은 에너지효율을 보이는데, 동일한 선속도를 위한 유량의 증가로 액서지의 증가를 보이기 때문이다. L-100에서 가장 낮은 선속도(0.33 cm/s)에서 에너지효율은 12%로 가장 높은 값을 나타내고, RED 스택의 에너지효율은 선속도가 증

가할수록 점차적으로 감소한다. 공급된 액서지의 대부분은 소실되거나 사용되지 않은 액서지로 유출수에 남아있다. 스택 크기가 증가함에 따라 시스템에서 추출된 총전력 또는 유용한 에너지가 크게 증가하고 낭비되는 액서지도 증가함을 보였다.^[19]

에너지 효율뿐만 아니라 비에너지도 RED 스택의 성능을 평가를 위해 고려해야 하는 중요한 성능지표이고, 저농도 용액의 단위 부피당(m^3) 에너지(kWh) 기반으로 비에너지를 계산하였다. 비에너지는 유량에 의존하지만 총전력은 유량에 비례하여 증가함에 따라 비에너지에 큰 영향을 미치지 않았다. Fig. 6(b)에서 비에너지는 셀 수의 영향도 크지만, 스택 크기에도 많은 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. S-100이 가장 낮은 비에너지를 보이는데, 동일한 선속도를 위한 유량의 증가로 전력의 증가를 보이지만 작은 스택의 낮은 전력으로 인해, 전반적으로 전력이 높은 큰 스택이 높은 비에너지를 보인다. L-100에서의 선속도 0.33 cm/s에서 가장 높은 비에너지는 $0.05 kWh/m^3$ 로, 12%의 에너지 효율에 해당한다. 낮은 유량에서는 유체가 스택 내부에 오랫동안 존재함을 의미하고, 이온교환막을 통한 이온 이동에 충분한 시간을 제공하여, 전력손실이 최소화되기 때문에 비에너지가 가장 높다. 또한 낮은 전기 저항을 갖는 이온교환막을 사용하여 전극의 활성 표면적을 확대하면 RED 스택의 비에너지를 증가시킬 수 있다.^[10]

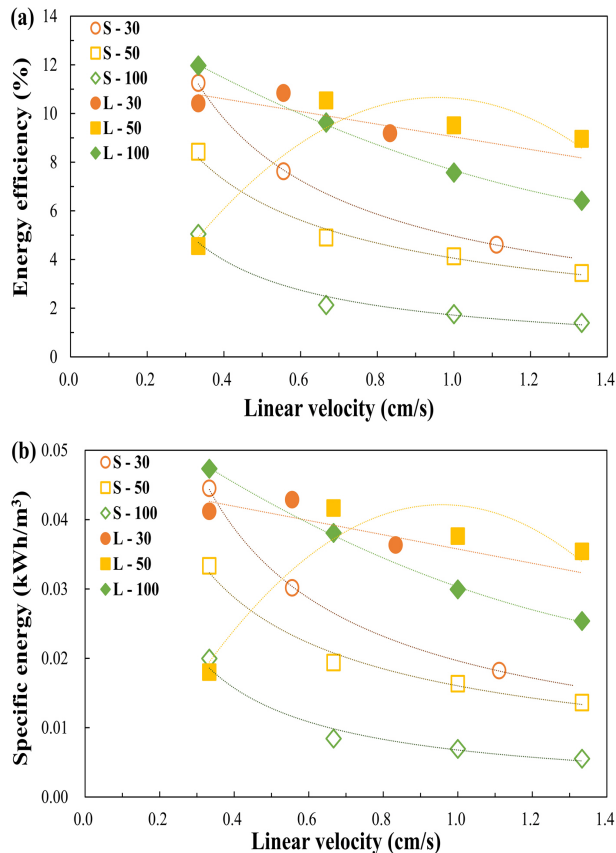


Fig. 7. (a) Energy efficiency and (b) specific energy of the S-stack and L-stack with different number of cell pairs (30, 50, 100) as function of linear velocity

4. 결론

본 연구에서는 해수와 담수가 공급되었을 때 크기가 다른 각각의 스택을 셀 수에 따른 전력밀도에 미치는 영향을 조사하였으며, 셀 수에 따른 전력밀도, 에너지효율과 비에너지의 관계를 확인하고 최적의 RED 스택을 실험적으로 파악하였다. 동일한 유량에서 L-스택이 S-스택보다 OCV와 전력밀도의 증가를 나타냈고, 유량이 증가할수록 선형적으로 증가하는 경향을 보였다. 스택의 크기가 커질수록 더 많은 이온이 이온교환막을 통해 이동하고, 공급 유량의 증가는 셀 내부의 체류시간 감소를 유발하기 때문에 농도 변화를 줄이는 효과를 보여 전력밀도가 증가함을 나타냈다. S-스택이 0.33 cm/s에서 $0.53 W/m^2$ 으로 가장 높지

만, 공급유량의 한계가 있다. L-100이 0.33 cm/s에서 12%의 높은 에너지효율을 보이고, 비에너지도 마찬가지로 0.05 kWh/m³로 가장 높은 값을 보인다. 이러한 실험결과들은 셀 수 및 스택 크기의 변화로 RED 성능을 향상시킬 수 있다는 것을 나타내며, 이는 비에너지의 향상에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 보여주고 향후 RED 연구에서 충분히 고려될 만한 요인으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부 연구개발특구진흥재단의 ‘지역의 미래를 여는 과학기술 프로젝트’의 일환으로 수행되었습니다(과제번호 : 2022-DD-UP-0308-01-101).

References

- [1] Sharma, R. C., and Sharma, N., 2013, “Energy from the Ocean and Scope of its Utilization in India”, *International Journal of Environmental Engineering and Management*, **4**(4), 397-404.
- [2] Micale, G., Cipollina, A., and Tamburini, A., 2016, “Salinity gradient energy”, *Sustainable Energy from Salinity Gradients*, 1-17, Elsevier, UK.
- [3] Yang, S.C., Choi, Y.W., Choi, J.Y., Jeong, N.J., Kim, H.K., Nam, J.Y., and Jeong, H.J., 2019, “R2R fabrication of pore-filling cation-exchange membranes via one-time impregnation and their application in reverse electro-dialysis”, *ACS Sustainable Chem. Eng.*, **7**(14), 12200-12213.
- [4] Kim, H. K., Lee, M. S., Lee, S.Y., Choi, Y.W., Jeong, N.J., and Kim, C.S., 2015, “High power density of reverse electro-dialysis with pore-filling ion exchange membranes and a high-open-area spacer”, *J. Mater. Chem. A*, **3**(31), 16302-16306.
- [5] Post, J.W., Hamelers, H.V.M., and Buisman, C.J.N., 2008, “Energy recovery from controlled mixing salt and fresh water with a reverse electro-dialysis system”, *Environ. Sci. Technol.*, **42**(15), 5785-5790.
- [6] Mehdizadeh, S., Yasukawa, M., Abo, T., Kakihana, Y., and Higa, M., 2019, “Effect of spacer geometry on membrane and solution compartment resistances in reverse electro-dialysis”, *J. Membr. Sci.*, **572**, 271-280.
- [7] Vermaas, A.D., Saakes, M., and Nijmeijer, K., 2011, “Power generation using profiled membranes in reverse electro-dialysis”, *J. Membr. Sci.*, **385**, 234-242.
- [8] Pawlowski, S., Rijnaarts, T., Saakes, M., Nijmeijer, K., Crespo, J.G., and Velizarov, S., 2017, “Improved fluid mixing and power density in reverse electro-dialysis stacks with chevron-profiled membranes”, *J. Membr. Sci.*, **531**, 111-121.
- [9] Choi, J.Y., Kim, W.S., Kim, H.K., Yang, S.C., and Jeong, N.J., 2021, “Ultra-thin pore-filling membranes with mirror-image wave patterns for improved power density and reduced pressure drops in stacks of reverse electro-dialysis”, *J. Membr. Sci.*, **620**, 118885.
- [10] Kim, H.K., Yang, S.C., Choi, J.Y., Kim, J.O., and Jeong, N.J., 2021, “Optimization of the number of cell pairs to design efficient reverse electro-dialysis stack”, *Desalination*, **497**, 114676.
- [11] Nam, J.Y., Jwa, E.J., Eom, H.J., Kim, H.K., Hwang, K.S., and Jeong, N.J., 2021, “Enhanced energy recovery using a cascaded reverse electro-dialysis stack for salinity gradient power generation”, *Water Research*, **200**, 117255.
- [12] Pawlowski, S., Sstat, P., Crespo, J.G., and Velizarov, S., 2014, “Mass transfer in reverse electro-dialysis: Flow entrance effects and diffusion boundary layer thickness”, *J. Membr. Sci.*, **471**, 72-83.
- [13] Luo, X., Cao, X., Mo, Y., Xiao, K., Zhang, X., Liang, P., and Huang, X., 2012, “Power generation by coupling reverse electro-dialysis and ammonium bicarbonate: Implication for recovery of waste heat”, *Electrochem. commun.*, **19**, 25-28.
- [14] Hulme, A.M., Davey, C.J., Tyrrel, S., Pidou, M., and McAdam, E.J., 2021, “Scale-up of reverse electro-dialysis for energy generation from high concentration salinity gradients”, *J. Membr. Sci.*, **627**, 119245.
- [15] Yip, N.Y., Vermaas, D.A., Nijmeijer, K., and Elimelech, M., 2014, “Thermodynamic, energy efficiency, and power density analysis of reverse electro-dialysis power generation with natural salinity gradients”, *Environ. Sci. Technol.*,

- 48(9), 4925-4936.
- [16] Na, J.C., Kim, H.K., Kim, C.S., and Han, M.H., 2014, "Effect of seawater/fresh water flow rates on power density of reverse electrodialysis", *Journal of Korean Society of Environmental Engineers*, **36**(9), 624-628.
- [17] Veerman, J., de Jong, R. M., Saakes, M., Metz, S. J., and Harmsen, G.J., 2009, "Reverse electrodialysis: Comparison of six commercial membrane pairs on the thermodynamic efficiency and power density", *J. Membr. Sci.*, **343**(1-2), 7-15.
- [18] Veerman, J., Saakes, M., Metz, S.J., and Harmsen, G. J., 2010, "Electrical power from sea and river water by reverse electrodialysis: a first step from the laboratory to a real power plant", *Environ. Sci. Technol.*, **44**(23), 9207-9212.
- [19] Moreno, J., Grasman, S., van Engelen, R., and Nijmeijer, K., 2018, "Upscaling reverse electrodialysis", *Environ. Sci. Technol.*, **52**(18), 10856-10863.