

다양한 농도 공급원의 조합을 통한 역전기투석 장치의 성능 평가

권길성* · 박병호* · 김덕한* · 김대중**

* 서강대학교 기계공학과

Evaluation of Reverse Electrodialysis System with Various Compositions of Natural Resources

Kilsung Kwon*, Byung Ho Park*, Dukhan Kim* and Daejoong Kim**

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received January 9, 2015 ; Revised April 8, 2015 ; Accepted April 8, 2015)

Key Words: Reverse Electrodialysis(역전기투석), Salinity Gradient Power(농도차 발전), Renewable Energy(신재생에너지), Brine(브라인), Desalination(담수화)

초록: 농도차발전은 전 세계적으로 높은 잠재적 에너지량으로 인하여 최근 많은 주목을 받고 있다. 본 연구에서는 양이온과 음이온의 선택적 분리를 통하여 전기를 생성하는 역전기투석을 이용하여 다양한 농도 공급원의 조합으로부터 성능을 평가하였다. 역전기투석 장치의 분극곡선은 전류가 증가할 때 전압이 선형적으로 감소하였고, 최대출력밀도는 내부저항과 외부저항이 일치하는 부분에서 얻어졌다. 내부 유로두께가 감소하고 공급유량이 증가할 때 역전기투석 장치에서 생성되는 출력이 증가하는 것을 발견하였고, 공급유체의 펌핑에 의해 발생하는 출력 손실을 고려한 정미출력은 공급유량이 22.5mL/min 에서 최대값을 가졌다. 최종적으로 담수화 브라인, 해수, 강물, 폐수, 기수를 조합하여 역전기투석 장치의 성능을 평가하였고 정삼투 과정에서 발생하는 브라인과 강물을 이용할 때 1.75W/m²으로 최대값을 얻었다.

Abstract: Salinity gradient power (SGP) has attracted significant attention because of its high potential. In this study, we evaluate reverse electrodialysis (RED) with various compositions of available resources. The polarization curve ($I-V$ characteristics) shows linear behavior, and therefore the power density curve has a parabolic shape. We measure the power density with varying compartment thicknesses and inlet flow rates. The gross power density increases with decreasing compartment thickness and increasing flow rate. The net power density, which is the gross power density minus the pumping power, has a maximum value at a compartment thickness of 0.2 mm and an inlet flow rate of 22.5 mL/min. The power density in RED is also evaluated with compositions of desalination brines, seawater, river water, wastewater, and brackish water. A maximum power density of 1.75 W/m² is obtained when brine discharged from forward osmosis (FO) and river water are used as the concentrated and the diluted solutions, respectively.

- 기호설명 -

C : 농도 [mol/m³]
 F : 패러데이상수 [96485 C/mol]
 I : 전류 [A]
 Q : 유량 [m³/s]
 R : 저항 [$\Omega \cdot m^2$]
 R_g : 기체상수 [8.314 J/mol·K]
 T : 온도 [K]
 V : 전압 [V]

p : 출력밀도 [W/m²]
 z : 이온의 원자가 [-]

그리스문자
 α : 선택 투과성 [-]
 β : 개방비 [-]
 γ : 활동도 계수 [-]
 δ : 유로두께 [m]

1. 서론

최근 신재생에너지 기술 중 하나로 강하구에서 믹싱에 의해 소산되는 에너지를 회수하는 농도차

† Corresponding Author, daejoong@sogang.ac.kr
 © 2015 The Korean Society of Mechanical Engineers

발전(salinity gradient power, SGP)에 대한 관심이 급증하고 있다.⁽¹⁾ 농도차 발전은 사용되는 막에 따라 크게 압력지연삼투 (pressure retarded osmosis, PRO)와 역전기투석(reverse electrodialysis, RED)로 나눌 수 있다.⁽²⁻⁸⁾ 이 중, 역전기투석 발전은 구동부가 존재하지 않아 높은 신뢰도를 가진다는 점과 직접적인 에너지 변화 과정으로 인해 높은 효율을 가진다는 장점이 있다.^(2,5-8)

역전기투석 발전은 1950 년대에 Pattle⁽⁹⁾에 의하여 처음 제안되었다. 그러나 이온을 선택적으로 투과하는 이온교환막(ion exchange membrane, IEM)의 더딘 발전으로 인해 2000 년대 초반까지는 연구가 정체되었고, 2000 년대 중반 이후로 이온교환막의 비약적인 발전과 함께 재조명 받고 있다. Fig. 1 은 역전기투석 장치의 발전원리를 보여주고 있다. 양이온교환막(cation exchange membrane, CEM)과 음이온교환막(anion exchange membrane, AEM)이 교대로 배열된 구조에 고농도용액(해수)과 저농도용액(강물)을 번갈아 공급하게 되면 화학적포텐셜 차이에 의하여 고농도용액으로부터 저농도용액으로 이온이 이동을 하게 된다. 이 때, 양이온은 양이온교환막으로 음이온은 음이온교환막으로 이동하며 역전기투석 발전 장치 내부에 전기적 중립이 깨지게 되고 이를 유지하기 위하여 이온의 이동방향과 반대로 전위가 형성되게 된다. 위와 같은 이온의 흐름은 역전기투석 장치의 양 끝단에 위치하는 전극(electrode)에서의 산화/환원 작용에 의하여 전기적 흐름으로 변환하게 되며, 산화극(anode)에서 발생된 전자가 외부회로를 통하여 환원극(cathode)로 이동하는 과정에서 전기부하를 통해 전기적 출력을 얻을 수 있다.

역전기투석 장치의 성능은 공급유량, 이온교환막, 유로, 용액 농도 등과 같은 다양한 설계변수들에 의해 영향을 받는다. Turek 과 Bandura⁽¹⁰⁾는 유량 변화에 따른 역전기투석 장치의 성능 변화에 대하여 보고하였다. Vermaas 등⁽¹¹⁾은 유로 두께를 변화시켜 가며 역전기투석 장치의 성능을 평가하였고, 유로 두께가 감소할 때 내부저항의 감소로 인하여 출력이 증가하는 것을 보였다. Długołęcki 등⁽¹²⁾은 유로에 삽입되는 스페이서로 인한 내부저항 증가를 줄이기 위하여 이온이 이동이 가능한 스페이서를 적용하였고, 이온이 이동 가능한 스페이서에서 역전기투석 장치의 출력이 증가하는 결과를 얻었다. Güler 등⁽¹³⁾에서는 다양한 상용 이온교환막을 이용하여 역전기투석 장치의 성능을 평가하였다. Kim 등⁽¹⁴⁾에서는 비싼 이온교환막을 대

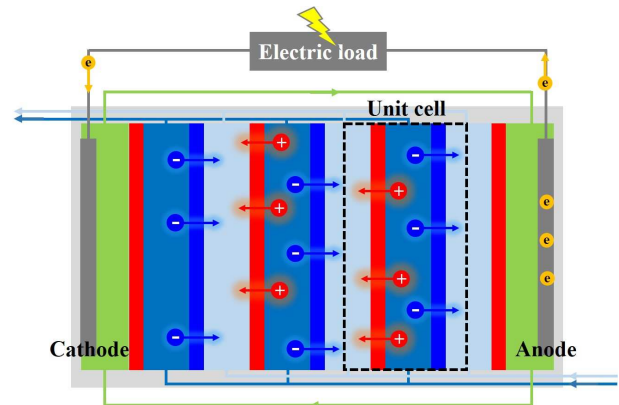


Fig. 1 Schematic illustration of the RED device

체하는 기술로 나노채널을 적용하는 연구를 수행하였고, 나노채널에서 기존 이온교환막보다 상당히 높은 출력밀도를 발생하였다. 그러나 대부분의 역전기투석 장치에 대한 연구에서 농도는 해수와 강물 기준으로 고정된 상태에서 진행이 되고 있으며 농도 차이 발생을 위해 이용 가능한 다양한 공급원에 대한 평가는 이뤄지지 않았다.

본 연구에서는 위와 같은 점에 착안하여, 폐수(wastewater), 기수(brackish water), 브라인(brine)과 같은 다양한 농도 공급원의 조합에 대한 역전기투석 장치의 성능을 평가하였다.

2. 실험 방법

역전기투석 장치는 다음과 같이 제작되었다. 전극 하우징 및 전체 스택을 고정하는 역할을 수행하는 엔드플레이트는 30mm 두께의 아크릴을 이용하여 제작되었다. 엔드플레이트에는 작동 유체의 공급을 위한 유로와 체결을 위한 나사 구멍이 가공되었다. 이온의 흐름을 전기적 흐름으로 변화하는 전극은 내식성이 우수한 티타늄 메쉬 위에 이리듐(Ir)과 루테튬(Ru)을 50:50 혼합비로 하여 코팅하였다. 역전기투석 장치의 핵심 부품인 이온교환막으로는 일본 토구시마사의 Neosepta CMX 와 AMX 를 사용하였고, 이온교환막 사이에 유로의 형성과 공급액의 누수를 방지하기 위하여 실리콘 가스켓을 사용하였다. 내부 유로에는 이온교환막 근처에서 발생하는 농도 분극(concentration polarization) 감소와 고른 유동 분포를 위하여 두께에 맞는 SEFAR 사의 격자형 메쉬가 삽입되었다.

Fig. 2 는 역전기투석 장치의 성능 평가를 위한 실험 구성이다. 고농도용액, 저농도용액, 전극액(electrode rinse solution)은 각각 폴리프로필렌(polypropylene, PP) 저장조(reservoir)에 보관된 상태

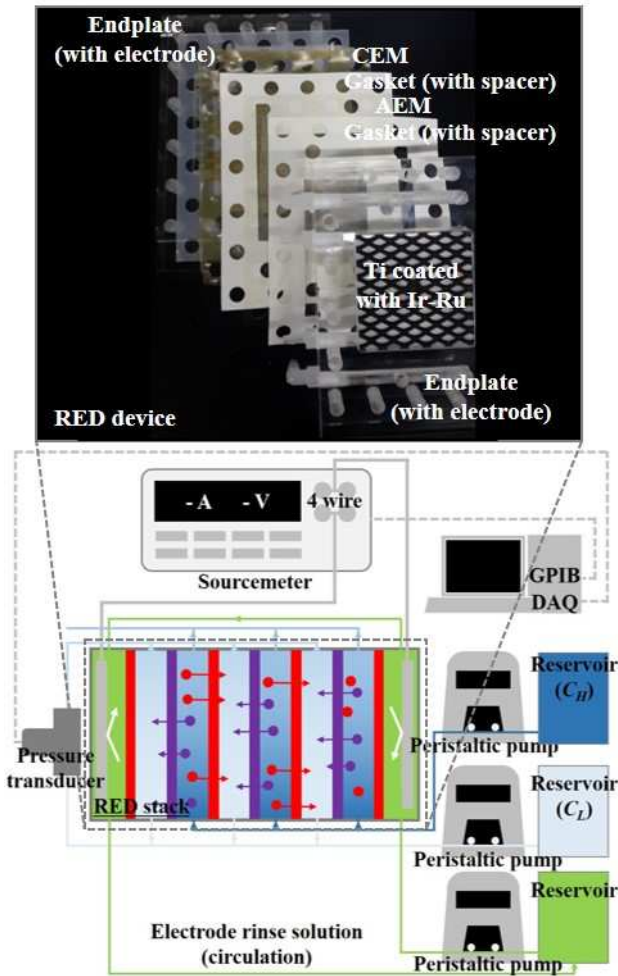


Fig. 2 Digital image of the RED device and schematic diagram of the experimental setup composed of the peristaltic pump to supply working solutions, the reservoir to store the working solutions, the pressure transducer to measure the pressure drop, and the sourceceter to measure the I - V characteristics

로 튜브연동식 펌프(peristaltic pump, EMP-2000W, EMS-tech)를 이용하여 역전기투석 장치에 공급되었다. 역전기투석장치 내부에서의 압력강하는 0-2bar의 측정 범위를 가지는 차압계(UNIK 5000, GE Druck)를 이용하여 측정되었다. 차압계에서 발생하는 전압 신호는 DAQ 보드(USB-6361, National Instrument)를 이용하여 수집되었고, 공급유량과 함께 계산되어 펌핑에 의한 출력 손실을 얻었다. 역전기투석 장치의 성능은 소스미터(sourceceter, 2410, Keithley)를 이용하여 전류-전압 특성을 측정 한 후, 이를 이용하여 출력 밀도를 계산하였다.

고농도 및 저농도 수용액은 정제된 염화나트륨(S5586, Sigma-Aldrich)과 탈이온수(deionized water)를 이용하여 만들어졌다. 다양한 공급원의 농도는 총 용존물질량(total dissolved solid, TDS)의 값을 기

Table 1 Concentrations of the natural resources such as river water, wastewater, brackish water, seawater, and desalination brines for the RED device

Natural resources [-]	TDS [mg/L]	Concentration [mol/L]
River water	500	~0.01
Wastewater	3000	~0.05
Brackish water	5000	~0.09
Seawater	35000	~0.6
RO brine	70000	~1.2
FO brine	140000	~2.4

반으로 하여 설정하였다.⁽¹⁵⁾ 브라인의 농도는 막 기반의 담수화 시스템인 역삼투(reverse osmosis, RO)와 정삼투(forward osmosis, FO)에서의 회수율(recovery rate)을 기반으로 계산되었다.^(15,16-18) Table 1은 본 연구에서 사용된 다양한 농도 공급원들의 총 용존물질량과 농도를 보여주고 있다. 전극에서 산화환원 반응에 의한 에너지 손실을 줄이는 역할을 하는 전극액은 고농도용액의 절반 농도에 전기적인 쌍(redox couple)으로 작용하는 페로시안화칼륨(P9387, Sigma-Aldrich)과 페리시안화칼륨(P8131, Sigma-Aldrich)을 녹여서 제조되었다.

실험 전 이온교환막들은 탈이온수를 이용하여 세척한 다음 1mol/L 이상의 염화나트륨 수용액에 24 시간 이상 저장 후 사용되었다. 역전기투석 장치의 실험은 상온(~25°C)에서 수행되었다.

3. 결과 및 토의

Fig. 3은 역전기투석 장치의 전류-전압 특성을 나타내는 분극곡선(polarization curve)과 출력밀도곡선(power density curve)이다. 역전기투석 장치는 3개의 셀로 구성하였고, 실험 조건은 고농도용액(해수, 0.6mol/L)과 저농도용액(강물, 0.01mol/L)의 공급유량이 15mL/min, 전극액의 유량이 50mL/min, 유로두께가 0.2mm로 고정하였다.

연료전지와 같은 일반적인 전기화학 셀은 전극에서 발생하는 활성화 손실(activation loss), 내부저항에 의한 저항 손실(ohmic loss), 연료 또는 산화제의 부족에 의한 농도 손실(concentration loss)을 가진다.^(19,20) 활성화 손실은 저전류 영역에서 급격한 전압 강하를 유발하고, 저항 손실은 전류변화에 따라 선형적인 거동을 보이며, 농도 손실은 고

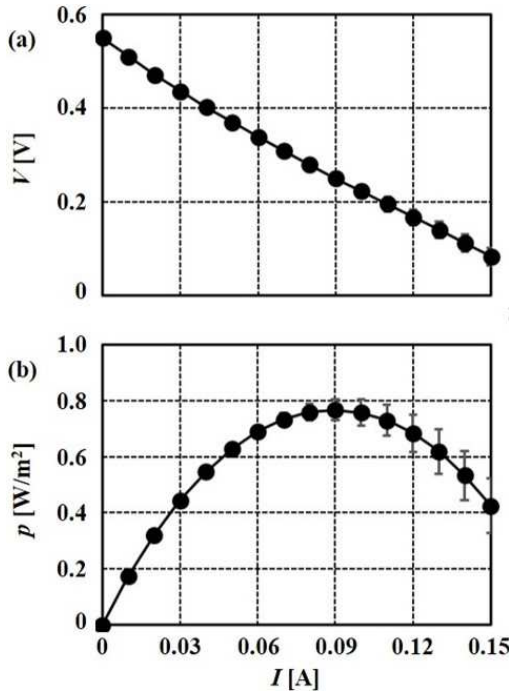


Fig. 3 (a) polarization curve and (b) power density curve: $C_H = 0.6$ mol/L, $C_L = 0.01$ mol/L, $Q_{stack} = 15$ mL/min ($Q_{cell} = 5$ mL/min), $Q_{electrode} = 50$ mL/min

전류 영역에서 급격한 전압 강하로 나타난다. 역전기투석 장치의 분극 곡선은 전류가 증가할 때 전압 강하가 선형적으로 나타났다. 이를 통해, 활성화 손실과 농도 손실보다 내부저항에 의한 저항 손실이 출력에 지배적임을 알 수 있었다.

출력 밀도는 $p = Vi$ 식을 이용하여 계산되었다. 출력 밀도 곡선은 분극 곡선의 선형적인 거동에 의하여 포물선 형태를 보였고, 최대 출력밀도는 내부저항과 외부저항이 일치하는 최대전류의 절반에서 얻어졌다.

유로두께는 아래의 식과 같이 내부저항(internal resistance)에 상당히 영향을 준다.⁽⁸⁾

$$R_{int} = \beta \left(R_{AEM} + R_{CEM} + \frac{\delta_H}{\Lambda_H C_H} + \frac{\delta_L}{\Lambda_L C_L} \right) + R_{CP}, (1)$$

위 식에서, R 은 저항, δ 는 유로 두께, Λ 는 몰랄전도도(molar conductivity), C 는 공급용액의 농도이다. 일반적으로 낮은 농도의 용액은 낮은 몰랄전도도를 가지게 되고, 이로 인하여 내부저항은 대부분 저농도의 유로두께에 의하여 결정된다.

Fig. 4는 유로 두께의 변화에 따른 역전기투석 장치의 출력밀도이다. 실험에서 공급유량은 15mL/min으로 고정하였고, 4가지 다른 유로두께에 대하여 평가하였다. 유로두께가 증가할수록 내부저항의

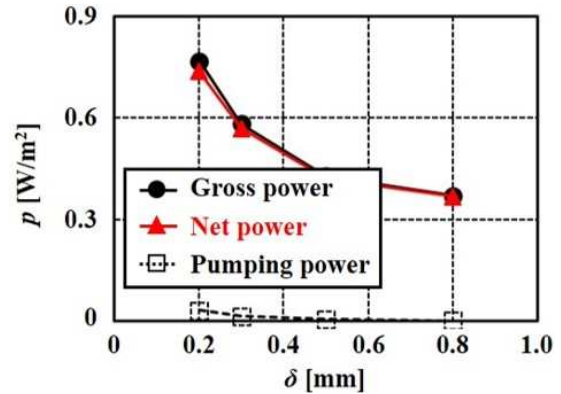


Fig. 4 Power density with the four intermembrane distances: $C_H = 0.6$ mol/L, $C_L = 0.01$ mol/L, $Q_{stack} = 15$ mL/min ($Q_{cell} = 5$ mL/min), $Q_{electrode} = 50$ mL/min. The black line, the red line, and the dot line represent the gross power density, the net power density, and the pumping power density

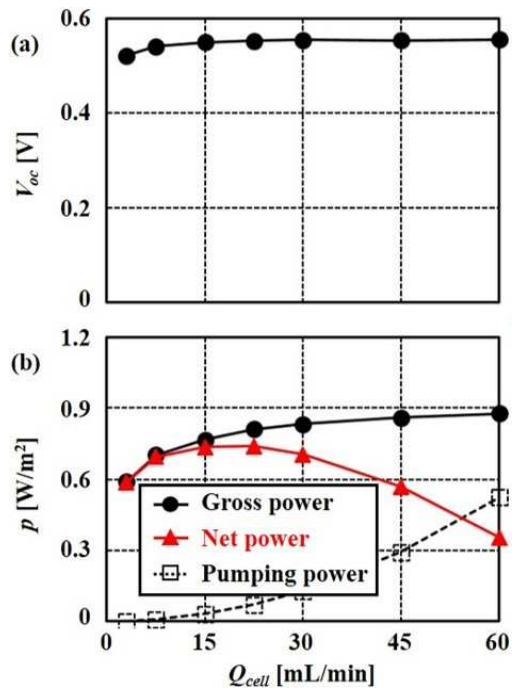


Fig. 5 (a) OCV and (b) power density with the flow rate between 3 and 60 mL/min at the intermembrane distance of 0.2 mm

증가에 의하여 역전기투석 장치에서 생성하는 출력이 줄어드는 것이 발견되었다. 펌핑에 의한 출력손실은 유로두께가 줄어들수록 배압(backpressure)의 증가에 의하여 증가하는 경향을 보였다. 그러나 본 실험조건에서는 상대적으로 낮은 유량에 의하여 펌핑에 의한 출력 손실이 급격하게 증가하지는 않았고, 따라서 역전기투석 장치에서 생성되는 출력에서 펌프 출력 손실을 제외한 정미(net) 출력은 유로두께가 0.2mm 일 때 0.74W/m²으로 여전히 가장 높은 값

을 가졌다.

고농도 용액과 저농도용액의 농도를 0.6mol/L 와 0.01mol/L 로 각각 고정하고, 유로 두께와 전극액의 유량을 0.2 mm 와 50 mL/min 로 한 상태에서, 고농도와 저농도의 공급유량을 3mL/min 에서 60 mL/min 으로 변화시켜 가며 개회로 전압(open circuit voltage, OCV)과 출력밀도의 변화를 측정하였다. Fig. 5 에서는 유량변화에 따른 실험 결과를 보여주고 있다. 역전기투석 장치에서 개회로 전압은 아래의 식과 같이 표현할 수 있다.⁽²¹⁾

$$V_{oc} = (\alpha_{CEM} + \alpha_{AEM}) \frac{R_g T}{zF} \ln \left(\frac{\gamma_H C_H}{\gamma_L C_L} \right), \quad (2)$$

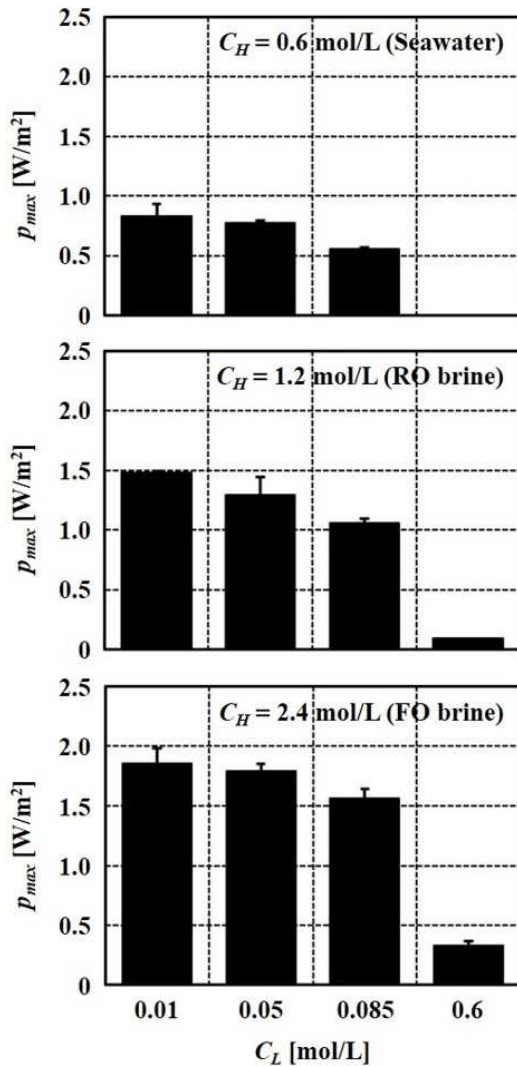


Fig. 6 Maximum power density with compositions of natural resources. We used seawater, RO brine, and FO brine as the concentrated solution: $Q_{stack} = 30 \text{ mL/min}$ and $\delta = 0.2 \text{ mm}$

위 식에서, V_{oc} 는 개회로 전압, α 는 이온의 선택투과도, R_g 는 기체상수(8.314J/mol·K), T 는 작동 온도, z 는 이온의 원자가, F 는 패러데이상수(96485 C/mol), γ 는 이온의 활농도 계수를 나타낸다.

공급 유량이 증가할 때 유로를 따라 농도변화량이 감소하는 것에 의하여 개회로 전압은 증가하는 경향을 보였다. 역전기투석 장치에서 생성하는 출력 역시 유량의 증가와 함께 증가하였다. 그러나 유량의 증가와 함께 이차 함수의 형태로 급격한 증가를 보이는 펌핑 출력손실로 인하여, 최대 정미출력(0.74W/m²)은 공급 유량이 22.5mL/min 인 지점에서 얻었다.

Fig. 6 은 다양한 농도 조합에 따른 역전기투석 장치의 출력밀도이다. 고농도용액으로는 해수(0.6 mol/L), 역삼투 담수화 공정을 통해 얻어지는 브라인(1.2mol/L), 정삼투 담수화 공정을 통하여 얻어지는 브라인(2.4mol/L)으로 하였고, 저농도용액으로는 강물(0.01mol/L), 폐수(0.05mol/L), 기수(0.085mol/L)로 고정하였다. 담수화 브라인을 고농도용액으로 사용할 때는 해수를 저농도용액으로 한 실험을 추가적으로 수행하였다. 강물을 저농도용액으로 사용할 때 가장 큰 농도차이를 유발할 수 있어 역전기투석 장치에서 가장 높은 출력 밀도를 얻을 수 있다는 것을 발견하였다. 담수화 브라인을 고농도용액으로 사용할 때 해수를 사용할 때 보다 농도차이를 증가시키는 효과에 의하여 역전기투석 장치에서의 출력이 증가하였다. 본 연구에서는 정삼투 공정이 이상적으로 동작할 때 발생하는 브라인을 고농도용액으로 강물을 저농도용액으로 사용할 때, 최대출력밀도가 1.75W/m² 까지 발생할 수 있음을 실험적으로 얻었다.

4. 결론

본 연구에서는 다양한 농도 공급원의 조합으로부터 발생하는 역전기투석 장치의 성능 변화에 대한 평가를 수행하였다. 역전기투석 장치에서 전압은 전류의 증가에 따라 내부저항에 의하여 선형적으로 감소하는 경향을 보였고, 최대출력밀도는 내부저항과 외부저항이 일치하는 최대전류의 절반에서 얻어졌다. 최대출력밀도는 유로두께가 감소하며 공급유량이 증가할수록 증가하는 경향을 보였고, 정미출력은 유로두께가 0.2mm 에서 공급유량이 22.5mL/min 일 때 0.74W/m² 의 값을 가졌다. 담수화브라인, 해수, 강물, 폐수, 기수를 조합하여 역전기투석 장치에서의 성능 평가를 수행하였고, 이상적으로 동작하는 정삼투 공정에서 발생하는 브

라인을 고농도용액으로 강물을 저농도용액으로 사용할 때 $1.75\text{W}/\text{m}^2$ 의 최대출력을 얻었다.

후 기

본 연구는 미래창조과학부의 중견연구자지원사업(핵심)(과제번호: 2014R1A2A2A01003618)의 지원으로 수행되었음을 밝힙니다.

참고문헌 (References)

- (1) Alvarez-Silva, O., Winter, C. and Osorio, A. F., 2014, "Salinity Gradient Energy at River Mouths," *Environ. Sci. Technol. Lett.*, Vol. 1, No. 10, pp.410~415.
- (2) Post, J. W., Veerman, J., Hamelers, H. V. M., Euverink, G. J. W., Metz, S. J., Nijmeijer, K. and Buisman, C. J. N., 2007, "Salinity-Gradient Power: Evaluation of Pressure-Retarded Osmosis and Reverse Electrolysis," *J. Membrane Sci.*, Vol. 288, No. 1-2, pp. 218~230.
- (3) Loeb, S., Hessen, F. V. and Shahaf, D., 1976, "Production of Energy from Concentrated Brines by Pressure-Retarded Osmosis: II. Experimental Results and Projected Energy Costs," *J. Membrane Sci.*, Vol. 1 pp. 249~269.
- (4) Achilli, A. and Childress, A. E., 2010, "Pressure Retarded Osmosis: From the Vision of Sidney Loeb to the First Prototype Installation – Review," *Desalination*, Vol. 261, No. 3, pp. 205-211.
- (5) Yip, N. Y. and Elimelech, M., 2014, "Comparison of Energy Efficiency and Power Density in Pressure Retarded Osmosis and Reverse Electrolysis," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 48, No. 18, pp. 11002~11012.
- (6) Kwon, K., Lee, S. J., Li, L., Han, C. and Kim, D., 2014, "Energy Harvesting System Using Reverse Electrolysis with Nanoporous Polycarbonate Track-Etch Membranes," *Int. J. Energy. Res.*, Vol. 38, No. 4, pp. 530~537.
- (7) Choi, E., Kwon, K., Kim, D. and Park, J., 2015, "Tunable Reverse Electrolysis Microplatform with Geometrically Controlled Self-Assembled Nanoparticle Network," *Lab Chip*, Vol. 15, pp. 168~178.
- (8) Vermaas, D. A., Saakes, M. and Nijmeijer, K., 2011, "Power Generation using profiled Membranes in Reverse Electrolysis," *J. Membrane Sci.*, Vol. 385-386, pp. 234-242.
- (9) Pattle, R. E., 1954, "Production of Electric Power by Mixing Fresh and Salt Water in the Hydraulic Pile," *Nature*, Vol. 174, p. 660.
- (10) Turek, M. and Bandura, B., 2007, "Renewable Energy by Reverse Electrolysis," *Desalination*, Vol. 205, No. 1~3, pp. 67~74.
- (11) Vermaas, D. A., Saakes, M. and Nijmeijer, K., 2011, "Doubled Power Density from Salinity Gradients at Reduced Intermembrane Distance," Vol. 45, No. 16, pp. 7089~7095.
- (12) Długołęcki, P., Dąbrowska, J., Nijmeijer, K. and Wessling, M., 2010, "Ion Conductive Spacers for Increased Power Generation in Reverse Electrolysis," *J. Membrane Sci.*, Vol. 347, No. 1~2, pp. 101~107.
- (13) Güler, E., Elizen, R., Vermaas, D. A., Saakes, M. and Nijmeijer, K., 2013, "Performance-determining Membrane Properties in Reverse Electrolysis," *J. Membrane Sci.*, Vol. 446, pp. 266~276.
- (14) Kim, D.-K., Duan, C., Chen, Y. F. and Majumdar, A., 2010, "Power Generation from Concentration Gradient by Reverse Electrolysis in Ion-Selective Nanochannels," *Microfluid. Nanofluid.* Vol. 9, No. 6, pp. 1215~1224.
- (15) Kim, Y. and Elimelech, M., 2013, "Potential of Osmotic Power Generation by Pressure Retarded Osmosis using Seawater as Feed Solution: Analysis and Experiments," *J. Membrane Sci.*, Vol. 429, pp. 330~337.
- (16) Li, W., Krantz, W. B., Cornelissen, E. R., Post, J. W., Verliefde, A. R. D. and Tang, C. Y., 2013, "A Novel Hybrid Process of Reverse Electrolysis and Reverse Osmosis for Low Energy Seawater Desalination and Brine Management," *Appl. Energy*, Vol. 104, pp. 592~602.
- (17) McGinnis, R. and Elimelech, M., 2007, "Energy Requirements of Ammonia-Carbon Dioxide Forward Osmosis Desalination," *Desalination*, Vol. 207, No. 1~3, pp. 370~382.
- (18) Feinberg, B. J., Ramon, G. Z. and Hoek, E. M. V., 2013, "Thermodynamic Analysis of Osmotic Energy Recovery at a Reverse Osmosis Desalination Plant," *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 47, No. 6, pp. 2982~2989.
- (19) Kwon, K., Kang, H., Kang, S. and Kim, D., 2013, "Evaluation of Reciprocating Electromagnetic Air Pumping for Portable PEMFC," *J. Micromech. Microeng.*, Vol. 23, No. 6, pp. 065007.
- (20) Kwon, K. and Kim, D., 2010, "Air Pumps for Polymer Electrolyte Membrane Fuel Cells," *Trans. Korean Soc. Mech. Eng. B*, Vol. 34, No. 7, pp. 715~720.
- (21) Tedesco, M., Cipollina, A., Tamburini, A., van Baak, W. and Micale, G., 2012, "Modelling the Reverse Electrolysis Process with Seawater and Concentrated Brines," *Desalin. Water Treat.*, Vol. 49, No. 1~3, pp. 404~424.