역삼투 공정 설계 프로그램의 신뢰성 평가

Reliability Assessment of Reverse Osmosis System Projection Programs

정재학 · 김누리 · 전종민 · 김수한*

Jaehak Jung · Noori Kim · Jongmin Jeon · Suhan Kim*

부경대학교 토목공학과

Department of Civil Engineering, Pukyong University

(Received December 12, 2018; Revised January 2, 2019; Accepted January 15, 2019)

Abstract : RO system projection programs are provided by the membrane manufacturers to design RO systems. If an RO module is selected for the system design, there are no alternatives except the program developed by the manufacturer. Therefore, it is important to understand the reliability of RO system projection programs. In this work, the trends of the projection results are analyzed to find out if they show reasonable patterns or not. Five RO system projection programs were tested. We have simulated RO systems for seawater desalination with 10 different SWRO membranes from the manufacturers who provided the five projection programs. While feed pressure decreases at higher temperature conditions in most cases, feed pressure increases as temperature increases in some cases of the simulations. This is because the increase in osmotic pressure surpassed the increase in water permeability as temperature increased in these simulation conditions. The various changing rates of feed pressure and salt rejection with temperatures are not dependent upon membrane characteristics. In addition, only one RO projection programs account for the effect of feed water pH on salt rejection. Therefore, using the projection programs to design RO system in the conditions with variable temperature and pH needs some cautions.

Key Words : Reverse Osmosis (RO), RO System Projection Program, Reliability, Temperature, pH

요약 : 역삼투 공정은 담수화 공법 중 가장 많이 채택되는 공정이다. 역삼투 공정 설계 프로그램은 막 제조사에 의해 제공되고 공정 설계를 위해서는 반드시 이를 사용해야 하기 때문에, 역삼투 공정 설계 프로그램의 신뢰성 유무가 매우 중요하다. 다양한 설계 조건에 대한 실제 데이터를 프로젝션 결과와 비교하는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 본 연구에서는 시뮬레이션 결과의 경향을 분석하여 합리적인 패턴을 보여 주는지 아닌지 확인하는 것으로 설계 프로그램의 신뢰성을 간접 평가하고자 한다. 5개의 역삼투 공정 설계 프로그램(CSMPRO Ver 5.0, IMS Design, ROSA 9.0, LG Chem NanoH2O 및 Toray DS2)을 테스트했고, 이를 제공한 막 제조사에서 출시하는 10개의 해수담수화용 역삼투 막모듈(고투수율 막, 저투수율 막 5개씩)을 사용하여 해수담수화 역삼투 공정을 모의했다. 대부분의 경우, 고온 조건에서 공급 압력은 감소하지만 일부 시뮬레이션 조건에서는 온도가 높아짐에 따라 공급 압력이 증가하는 현상이 나타났다. 이는 온도 증가에 따른 삼투압의 증가가 막 투수율의 증가치를 넘어섰기 때문이다. 온도에 따른 공급 압력 및 염 제거율의 변화 정도는 막의 종류에 따라 다양하게 나타났는데, 뚜렷한 경향성을 나타내지 않았다. 또한, 염분 제거에 대한 원수 pH의 효과를 반영하는 프로그램은 5개 중 하나뿐이다. 따라서, 다양한 온도와 pH 조건에서 가동되는 역삼투 공정을 설계하기 위해서는 막 제조사에서 제공하는 프로그램이 제시하는 결과만으로는 부족하다.

주제어 : 역삼투, 역삼투 공정 설계 프로그램, 신뢰성, 온도, pH

1. 서론

역삼투(reverse osmosis, RO) 공정은 물 부족 현상을 해결하기 위한 해수담수화 및 물 재이용 등 다양한 분야에 적용되고 있는 수처리 공정이다.^{1,2)} 특히 해수담수화 세계 시장에서는 증발법 대비 높은 경제성을 평가받아 점유율을 점차 증가시켜가는 추세이다.³⁻⁵⁾ 역삼투 공정은 일반적인 수처리 공정 대비 탈염을 위한 높은 압력이 필요하고, 공정 운영 시 에너지 소모량 및 막 교체 비용을 상승시킬 수 있는 파울링에 대한 주의를 필요로 한다.^{6,7)}

역삼투 공정의 설계는 목표 수질과 생산량을 만족시키기 위해 역삼투 막모듈을 선정, 배열하는 과정인데, 막 제조사들은 자신들이 제조한 막을 배열하기 위한 소프트웨어를 웹을 통해 공개, 배포하고 있다. 이러한 소프트웨어를 역삼투

공정 설계 프로그램(RO system projection program)이라 칭한다(본 논문에서는 설계 프로그램으로 축약하여 부르기로 한다). 역삼투 공정 설계는 (1) 설계 목표치(생산수 수질, 에너지 소모량 등) 설정, (2) 막 제조사 및 제품(모듈) 선정, (3) 해당 제조사에서 제공하는 설계 프로그램을 이용한 막 모듈 배열 및 시뮬레이션 (4) 설계 프로그램에서 제시하는 성능(생산수 수질 및 원수 공급 압력)의 설계 목표치 만족 여부 확인(불만족 시 3번 단계로 돌아가 배열 조건을 바꾸거나 2번 단계로 돌아가 제조사나 제품을 바꿀 수 있음), 네 단계로 나누어 볼 수 있다.

이와 같이 역삼투 공정 설계 단계에서 설계 프로그램의 역할은 절대적이므로, 그 신뢰성은 매우 중요한 요소가 된다. 설계 프로그램의 신뢰성을 확인하는 가장 좋은 방법은 프로그램에서 선택할 수 있는 모든 모듈에 대해서 시행한 다

* Corresponding author E-mail: suhankim@pknu.ac.kr Tel: 051-629-6065 Fax: 051-629-6063

양한 배열에 대한 실험값과 시뮬레이션 결과를 비교해 보는 것이지만, 이는 현실적으로 불가능하다. 본 연구에서는 이러한 실험 없이 각 막 제조사의 설계 프로그램의 결과 값을 분석함으로써 이들의 신뢰성을 간접적으로 평가해보고자 한다. 시뮬레이션을 시행하기 전에 우선적으로 생각해 볼 수 있는 문제는 자사의 막모듈의 우수성을 홍보하기 위해 그 성능을 설계 프로그램 내에서 과대평가할 수 있다는 점인데, 이 경우에는 막모듈 공급 계약 시 성능 보증을 못해 회사에 손해를 끼칠 수도 있다. 즉, 자사 막모듈 과대평가로 인한 설계 프로그램의 신뢰성 저하 요소는 없다고 보는 것이 합리적이다.

설계 프로그램에서 나타나는, 막모듈의 성능에 영향을 주는 요소는 막 자체의 재료적 특성뿐 아니라, 수온, pH, 파울링 등이 있다. 파울링의 경우 프로그램 내에서 설계자가 파울링 인자를 임의로 설정(예: 투수율, 염투과율 등의 저하 비율 설정)하는 부분이라 신뢰성을 논하는 것이 의미가 없다. 설계 프로그램을 이용해서 시스템을 설계할 줄 아는 사람이라면 누구라도, 프로그램 내에서의 파울링 인자가 현장에서 발생하는 파울링을 제대로 반영한다고 보지 않는다.

역삼투 공정에서 수온이 높아지면 점성계수가 낮아지고 역삼투막의 공극이 팽창하여 투수율과 염투과율이 높아지고,⁸⁾ pH가 높아지면 막표면의 카르복실기(-COOH)에서 수소이온이 떨어져 나와 막표면이 음전하를 띄게 되어 염 제거율이 높아지는 경향이 있다.^{9,10)} 실제 플랜트는 다양한 원수 수온, pH 조건에서 운영되기 때문에 이들의 영향이 제대로 설계 프로그램에 반영되었는지의 여부를 확인하는 것이 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 각 제조사의 설계 프로그램을 이용해서 다양한 원수 수온과 pH 조건에 대한 공정 시뮬레이션을 수행하여, 수온과 pH의 변화에 따른 설계 프로그램의 결과값(원수 공급 압력 및 염 제거율)의 변화 패턴의 합리성 유무를 분석하여 이들 프로그램의 신뢰성을 간접적으로 평가하였다.

2. 연구방법

2.1. 역삼투 공정 설계 프로그램

본 연구에서 사용된 설계 프로그램은 모두 5개(The Dow Chemical Company의 ROSA 9.0, Hydranautics - A Nitto Group Company의 IMS Design-2016, LG Chem.의 Q+ ver. 2.4, Toray Industries, Inc.의 Toray DS2, Toray Chemical Korea, Inc.의 CSMPRO ver 5.0)이다. 시뮬레이션에 사용될 막모듈 제품은 제조사별로 2개씩 채택하였고, 이 중 하나는 고티렉스 제품(투수율이 높아 에너지 효율성이 좋은 최신 막모듈 제품), 나머지 하나는 저플렉스 제품(각 제조사별 초기 모델로 역사가 오래되었으나 투수율은 최신 모델 대비 낮음)이다. Table 1은 본 연구를 위해 채택된 막의 기본 사양을 정리한 것이다. 막 제조사 및 제품명을 명시하지 않는 대신, A-E로

Table 1. Membrane modules simulated in this work

Membrane	Active area (m ²)	Salt rejection (%)	Permeate flow rate (GPD)	Test condition
AH	40.9	99.70	9,900	(1)
AL	40.9	99.75	7,140	(1)
BH	41.0	99.60	9,000	(2)
BL	41.0	99.80	6,600	(2)
CH	40.8	99.80	13,200	(3)
CL	40.9	99.80	9,900	(4)
DH	41.0	99.80	15,070	(2)
DL	41.0	99.85	6,600	(2)
EH	41.0	99.75	9,900	(2)
EL	37.0	99.80	6,500	(2)

- 1) 32,000 mg/L NaCl, 25℃, 5.5 MPa, 8% Recovery, pH 6.5-7
- 2) 32,000 mg/L NaCl, 25℃, 5.5 MPa, 8% Recovery, pH 8
- 3) 32,000 mg/L NaCl, 25℃, 5.4 MPa, 10% Recovery, pH 6.5-7
- 4) 32,000 mg/L NaCl, 25℃, 5.5 MPa, 10% Recovery, pH 6.5-7

제조사 코드를 구분하였고, 제조사 코드 옆에 H와 L을 붙여 각각 고티렉스 막과 저플렉스 막으로 구분하였다.

2.2. 역삼투 공정 시뮬레이션

역삼투 공정 시뮬레이션은 설계인자 입력, 출력 값 계산 단계로 구성된다. 설계인자에는 원수를 구성하는 이온성분 및 그 농도, 막모듈을 배열 형태(벡셀 수, 벡셀 당 모듈 수 등), 목표 회수율(=생산수량/원수량)과 목표 생산수량 등이 있다. 설계인자를 입력하면, 설계 프로그램에서 생산수 수질과 원수 공급압력이 출력 값으로서 계산된다. 상세한 내용은 본 연구팀에서 발표한 국내외 문헌들에 잘 정리되어 있다.¹¹⁻¹⁷⁾

본 연구의 목적이 원수의 온도와 pH가 설계 프로그램 결과 값에 미치는 영향을 분석함으로써 각 설계프로그램의 신뢰성을 간접적으로 평가하는 것이기 때문에, 온도와 pH 외의 조건은 Fig. 1과 같이 동일하게 설정하였다.

막모듈 배열은 회수율 50%의 해수담수화 시스템을 최대한 단순하게 구현하기 위해 벡셀 1개, 벡셀 당 모듈 수 8개로 구성하였고, 플렉스는 13 LMH로 고정, 원수 TDS는 NaCl 기준으로 35,000 mg/L로 고정하였다. 온도 범위는 5℃부터 5℃ 간격으로 최대 30℃까지 변경하였고, pH는 5부터 1 간격으로 최대 9까지 변경하였는데, NaCl로만 구성된 원수에 황산(H₂SO₄)과 가성소다(NaOH)를 주입하여 pH를 조정하는 방식으로 입력 조건을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수 수온 변화에 의한 원수 공급 압력 및 막 투수율 변화

Fig. 2는 10개의 막모듈에 대해 원수 수온 변화가 원수 공급 압력에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 우선 각 제조사별

Fig. 1. Simulation conditions for testing RO system projection program.

Fig. 2. Effects of feed temperature on feed pressure for simulated membrane modules.

로 고프럭스 막(AH-EH)과 저플럭스 막(AL-EL)의 원수 공급 압력을 각각 비교했을 때, 에너지 절감을 위해 개발된 고프럭스 막이 동일 플럭스(13 LMH) 및 회수율(50%) 조건에서 저플럭스 막 제품 대비 원수 공급압력이 낮은 것을 볼 수 있다.

제조사가 다른 유사 사양의 막모듈을 비교했을 때, 즉, Table 1에 제시된 막모듈 기본 사양 중 생산수 유량(Permeate flow rate)이 유사한 BL, DL, EL 제품을 비교해 보면, 원수 공급 압력이 각각 다른 범위에서 나타난다. EL의 경우, 다른 두 제품 대비 막 면적이 작기 때문에 동일한 테스트 압력(5.5 MPa = 55 bar)에서의 막 평균 플럭스(=생산수 유량/막 면적)가 더 크다. 따라서, 플럭스가 13 LMH로 동일한 Fig. 2의 시뮬레이션 조건에서 원수 공급 압력이 BL, DL의 경우보다 더 낮게 나오는 것이 타당하다.

그러나, BL과 DL의 경우 Table 1에 제시된 투수율(=생산

수 유량/막 면적/운전압력)이 동일함에도 불구하고, Fig. 2의 원수 공급압력 분포(온도에 따른)가 다른 경향을 보인다(BL의 경우 62.6-72.6 bar, DL의 경우 62.7-76.7 bar). 막모듈 성능 테스트 수온인 25°C (Table 1 참조)에서는 BL, DL의 원수 공급압력이 각각 63.1, 63.9 bar로 큰 차이가 없지만, 수온이 5°C로 낮아지는 경우에는 각각 72.6, 76.7 bar로 큰 차이를 보이고 있다.

위 결과에 따르면, 사양이 동일한 역삼투 막모듈이라 하더라도 제조사가 다른 경우 온도의 영향을 다르게 받을 수 있다는 사실을 알 수 있다. 위 결과가 동일한 프로그램을 통한 시뮬레이션을 통해 얻어진 것이라면 신뢰성이 있다고 볼 수 있지만, 서론에서 언급되었듯이 각 제조사의 설계 프로그램은 그 제조사에서 제작한 제품만 적용되도록 개발되었기 때문에 하나의 프로그램으로 제조사가 다른 두 막모듈을 비교하는 것은 불가능하다. BL과 DL의 사양서에서도 온도의 영향에 대한 언급이 없기 때문에, 실제 실험을 거치지 않고는 위 사실을 확인할 방법이 없다.

온도가 역삼투 막모듈의 투수율이나 염제거율에 미치는 영향은 식 (1)과 같은 온도보정계수(TCF)의 도입을 통해 역삼투 공정 시뮬레이션에 적용된다.⁸⁾

$$TCF = \exp \left[K \left(\frac{1}{298} - \frac{1}{273 + T} \right) \right] \quad (1)$$

식 (1)에서 K는 막의 특성을 나타는 상수 계수(3,000 안팎의 값)를, T는 섭씨온도를 각각 의미한다. K 값은 다양한 온도에 의한 실험을 통해 결정되는 것이 원칙이다. BL과 DL 막의 K 값이 다르기 때문에 사양서에 제시된 표준 온도(25°C)의 시뮬레이션 값은 유사하게 나타났지만, 온도를 변화

Fig. 3. Effect of feed temperature on osmotic pressure for simulated membrane modules.

시켰을 때의 값들은 위에 제시된 값들처럼 다르게 나타난 것으로 보여진다.

한편, 기존 연구결과에 보고되었듯이⁸⁾ 원수 수온이 증가할수록 점성계수가 낮아지고 역삼투막의 공극이 팽창하여 막의 투수율이 증가하기 때문에, 원수 공급압력이 감소할 것으로 예상할 수 있다. 그런데 Fig. 2에 따르면, AH, BH, CH, CL 등의 막에서 수온이 증가하더라도 원수 공급압력이 감소하지 않거나, 오히려 증가하는 경향을 볼 수 있다. 설계 프로그램에 이상이 있는 것이라는 의심을 가질 수 있지만, 이는 수온 증가에 따른 삼투압 증가(Fig. 3)를 통해 설명할 수 있다. Fig. 3에 따르면 5개 사의 설계 프로그램 모두 수온이 5℃부터 30℃까지 증가하는 동안 약 4 bar의 삼투압이 증가되는 결과를 보여주고 있다. 막 제조사에 따라 삼투압 증가폭이 약간 다른데, 그 이유는 각 프로그램에 설정된 삼투압 수식이 동일하지 않기 때문으로 추정된다. 원수 수온이 증가할수록 역삼투 막여과를 위해 극복해야 할 삼투압이 증가하기 때문에 원수 공급압력이 증가하는 경향과 투수율 증가로 인해 원수 공급압력이 감소하는 경향이 동시에 발생한다. 두 가지 중 전자의 영향이 더 크다면 원수 공급압력이 수온 상승과 함께 증가할 것이고, 후자의 영향이 더 크다면 반대 현상이 나타날 것이다.

수온 변화에 따른 막 투수율의 변화를 좀 더 정확하게 확인하기 위해, Fig. 4는 원수 공급 압력과 농축수 공급압력의 평균값에 Fig. 3의 평균 삼투압을 뺀 NDP (net driving pressure)를 원수 수온 변화 별, 막 제품별로 각각 보여주고 있다. 변화 폭의 차이가 있긴 하지만, Fig. 2에서 나타났던 수온 증가 시 원수 공급 압력이 증가하는 현상은 보이지 않고 있다. 즉, 각 제조사의 설계 프로그램은 모두 수온 증가에 따른 역삼투 막 투수율 증가 현상을 반영하도록 만들어져 있다는 사실을 알 수 있다.

그러나, 수온 변화에 따른 NDP의 변화 폭이 막의 종류에 따라 천차만별인 점은 쉽게 받아들이기 어렵다. 수온이 5℃부터 30℃까지 증가하는 동안 NDP의 변화 폭이 최소 3.3 bar (AH 막)에서 최대 17.9 bar (EL 막)로, 제조사 및 막 제품 종류에 따라 매우 다른 것으로 나타났다. 물론 동일한 폴

Fig. 4. Effect of feed temperature on net driving pressure (NDP) for simulated membrane modules.

리아미드 재질의 역삼투 막이라 하더라도 수온에 따른 막의 성능 변화 정도가 어느 정도 다를 수는 있겠지만, 그 구체적인 차이에 대해서는 국내외 어느 문헌에서도 보고된 바는 없다. 따라서, 각 막 제조사에서 제공하는 설계 프로그램을 다양한 원수 수온에 대해 적용했을 때의 원수 공급 압력 값 변동 폭을 신뢰하기는 어렵다는 가설을 세워 볼 수 있고, 이를 증명하기 위해서는 실제로 수온을 변화시켜가며 실험한 결과와 시뮬레이션 결과를 비교해봐야 할 것이다.

3.2. 원수 수온 변화에 의한 염제거율 변화

기존 연구결과에 보고되었듯이⁸⁾ 원수 수온이 증가하면 이온 확산성이 높아져서 염 투과율이 높아지고, 이로 인해 염제거율이 하락하는 현상을 보인다. Fig. 5에 정리된 시뮬레이션 결과는 이러한 경향을 잘 보여주고 있다. 그러나, Fig. 4의 수온 변화에 따른 NDP 변화와 마찬가지로 막의 종류에 따른 변화 폭이 최소 0.004 (AL 막)에서 최대 0.015 (BH 막)으로 제조사 및 막 제품 종류에 따라 약 4배까지 차이는 나는 것으로 나타났다. 만약 이러한 시뮬레이션 결과를 신뢰할 수 있다면, 역삼투 막모듈 제품에 따라 온도에 따른 염제거율 변화 폭이 다르기 때문에 그 선정에 있어서 주의를 기울여야 한다는 결론에 도달할 수 있다. 그러나, 기존에 발

Fig. 5. Effect of feed temperature on salt rejection for simulated membrane modules.

Fig. 6. Effect of feed pH on salt rejection for simulated membrane modules.

표된 연구논문이나 막 사양서 등에 언급되어 있지 않은 새로운 사실(즉, 온도 변화에 의한 염 제거율 변화가 역삼투 막모듈 제품에 따라 크게 변함)을 시뮬레이션 결과만으로는 입증할 수 없고, 3.1절에서 언급되었듯이 실제 모듈을 이용한 실험 결과가 수반되어야 할 것이다.

3.3. 원수 pH 변화에 의한 염 제거율 변화

기존 문헌에 따르면^{9,10)} 원수의 pH가 증가할수록 염 제거율이 상승하고, pH 9 이상에서는 염 제거율이 하락하거나 변화 경향이 크지 않는 경향을 보인다. 그러나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 5개 막 제조사의 설계 프로그램 중 1개만 이러한 경향을 보이고 있다. E사의 막 모듈 제품들(EH, EL)의 경우, pH가 5에서 8까지 증가하는 동안 염 제거율이 소폭 증가하다가 pH가 9가 될 때 다시 감소하는 현상을 보이는데, 이는 랭스케일 테스트로 진행된 기존 문헌 실험결과 경향¹⁰⁾과 유사하다. E사에서는 다양한 pH로 자사의 막모듈을 테스트한 후 그 결과를 설계 프로그램의 알고리즘에 반영한 것으로 추정된다. A-D사의 경우는 pH의 변화가 염 제거율에 주는 영향을 설계 프로그램에 반영하지 않았기 때문에, 이 경우에는 pH 변화 폭이 있는 원수를 대상으로 역삼투 공정을 설계할 때 주의가 요구된다.

4. 결론

본 논문은 역삼투 공정 설계에 필수적으로 활용되는 막 제조사의 설계 프로그램의 신뢰성에 대해 다양한 시뮬레이션 결과 값들을 기반으로 논의한 내용을 담고 있다. 각 제조사의 설계프로그램에서 제시하는 결과 값인 원수 공급 압력과 생산수 수질(혹은 염 제거율) 수치 자체의 신뢰성은 실제 실험값과 시뮬레이션 값의 비교를 통해서만 확인될 수 있기 때문에 다루지 않았고, 기존 문헌에서 확인된 원수의 온도, pH가 역삼투 막 성능에 미치는 영향이 설계 프로그램에 어떻게 반영되어 있는지를 분석함으로써, 이들 프로그램의 신뢰성을 간접적으로 평가하였다.

원수 수온이 증가할수록 막의 투수율이 증가하는 경향은 테스트된 5개 막 제조사의 설계 프로그램 모두 잘 반영하고 있지만, 수온 증가 시 원수 공급 압력 변화 폭은 막 제조사 별, 제품 별로 천차만별로 나타났고 뚜렷한 경향성을 찾기도 어려웠다. 원수 수온 증가에 따른 염제거율 감소 경향 역시 설계 프로그램에서 잘 반영하고 있지만, 그 변화 폭이 천차만별로 나타났다. 시뮬레이션 결과 값 검토만으로는 이러한 현상이 수온 변화에 따른 실제 막 성능 변화로 인해 나타난 것인지, 설계 프로그램 내의 수온 관련 파라미터 값의 신뢰성 부족으로 나타난 것인지 결론 내릴 수는 없지만, 역삼투 공정 설계자들은 이러한 내용에 대해서 인지하고 주의할 필요가 있다. 한편, 원수 pH 상승에 따른 염 제거율 상승 현상은 대부분의 막 제조사 설계 프로그램에 반영되어 있지 않았다. 실제 설계 과정에서 역삼투 공정 설계 프로그램의 중요성을 감안한다면, 본 연구에서 제시한 신뢰성에 대한 의문 제기는 실제 모듈 실험을 수반한 과정 등을 통해 꼭 해소되어야 할 것이다.

본 논문을 읽는 역삼투 공정 설계자들을 위해 현재까지 얻어진 결론을 요약하자면 다음과 같다. 막 제조사의 설계 프로그램 결과 값을 참고는 하되, 100% 신뢰하지 않는 편이 좋다. 예를 들어, 원수의 수온 변동이 심하거나 정상 pH가 아닌 조건에서 공정 설계를 한다면, 설계 프로그램을 보완하기 위해 실제 모듈 실험 등을 실시하여 설계 인자를 찾는 것을 추천한다.

Acknowledgement

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2017년)에 의하여 연구되었음.

KSEE

References

- Kim, J., Han, J., Sohn, J. and Kim, S.-H., "The outlook for forward osmosis-reverse osmosis (FO-RO) hybrid desalination market," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **30**(5), 521~532(2016).
- Kim, D.-K., Choi, J.-S., Lee, C.-K., Kim, J., Choi, J.-H. and Lee, W., "Removal Characteristics of Organic Matters in Pretreatment and Reverse Osmosis Membrane Processes for Seawater Desalination," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(7), 492~497(2014).
- Ghaffour, N., Missimer, T. M. and Amy, G. L., "Technical review and evaluation of the economics of water desalination: Current and future challenges for better water supply sustainability," *Desalination*, **309**, 197~207(2013).
- Kim, S., Cho, D., Lee, M.-S., Oh, B. S., Kim, J. H. and Kim, I. S., "SEAHERO R&D program and key strategies for the scale-up of a seawater reverse osmosis (SWRO) system," *Desalination*, **238**, 1~9(2009).

5. Choi, H. J., Park, Y. J. and Lee, S. M., "Wastewater Treatment Using Ultrafiltration (UF) and Reverse Osmosis (RO) Process," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **34**(10), 678~683 (2012).
6. Kim, S. and Lim, J.-H., "Effect of gas hydrate process on energy saving for reverse osmosis process in seawater desalination plant," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **27**(6), 771~778(2013).
7. Park, D. J., Oh, E. J., Kim, S. H. and Ahn, K. T., "Evaluation of Developing New-Fusion Eco-Friendly Biocide on the Reverse Osmosis Membranes," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(9), 497~503(2016).
8. Jin, X., Jawor, A., Kim, S. and Hoek, E. M. V., "Effects of feed water temperature on separation performance and organic fouling of brackish water RO membranes," *Desalination*, **239**, 346~359(2009).
9. Qin, J.-J., Oo, M. H. and Conigloi, B., "Relationship between feed pH and permeate pH in reverse osmosis with town water as feed," *Desalination*, **107**, 267~272(2005).
10. Hoang, T., Stevens, G. and Kentish, S., "The effect of feed pH on the performance of a reverse osmosis membrane," *Desalination*, **261**, 99~103(2010).
11. Jeon, J., Park, B., Yoon, Y. and Kim, S., "An optimal design of forward osmosis and reverse osmosis hybrid process for seawater desalination," *Desalin. and Water Treat.*, **57**, 26612~26620(2016).
12. Lee, H., Ryu, H., Lim, J.-H., Kim, J.-O., Lee, J. D. and Kim, S., "An optimal design approach of gas hydrate and reverse osmosis hybrid system for seawater desalination," *Desalin. and Water Treat.*, **57**, 9009~9017(2016).
13. Park, S. H., Park, B., Shon, H. K. and Kim, S., "Modeling full-scale osmotic membrane bioreactor systems with high sludge retention and low salt concentration factor for wastewater reclamation," *Bioresour. Technol.*, **190**, 508~515(2015).
14. Jeon, J., Kwak, K., Kim, N., Jung, J., Son, D.-M. and Kim, S., "Study on the necessity of energy recovery device in small scale reverse osmosis desalination plant," *Korean Chem. Eng. Res.*, **55**(6), 762~766(2017).
15. Ryu, H., Kim, S., Kim, J. and Park, S. H., "Experimental study and modeling of nano-filtration process for controlling mineral concentrations," *Korean Soc. Water Sci. and Technol.*, **24**(6), 65~74(2016).
16. Ryu, H., Kim, M., Lim, J.-H., Kim, J. H., Lee, J. D. and Kim, S., "Evaluation of energy consumption of gas hydrate and reverse osmosis hybrid system for seawater desalination," *Korean Soc. Water and Wastewater*, **30**(4), 459~469(2016).
17. Lee, H., Park, H., Woo, D.-S. and Kim, S., "Design for seawater reverse osmosis plant using water blending in smart water grid," *Korean Soc. Water and Wastewater*, **29**(1), 89~96(2015).