외권형 정삼투 막모듈의 성능 분석

Performance Analysis of a Spiral Wound Forward Osmosis Membrane Module

전종민 · 최준영* · 손진식** · 김수한†

Jongmin Jeon · Joon Young Choi* · Jinsik Sohn** · Suhan Kim†

부경대학교 토목공학과 · *(주)효림산업 · **국민대학교 건설시스템공학부

Department of Civil Engineering, Pukyong University

*Hyorim Industries Inc.

**Department of Civil and Environmental Engineering, Kookmin University

(Received November 22, 2018; Revised December 4, 2018; Accepted December 18, 2018)

Abstract : Performance of a spiral wound forward osmosis (FO) membrane module was analyzed to provide basic knowledge to design real-scale FO system. The module used in this work is FO8040 manufactured by Toray Chemical Korea, Inc. The water flux of the module is smaller than that of a coupon made from the same material, which is not only because of diluted draw solution (DS) and concentrated feed solution (FS), but also because of a structural characteristics of the module. Pressure drops along both FS and DS channels occur in the module and they increase at higher channel flow velocity values. Thus, FS and DS supply pump should be designed to overcome these pressure drops. Since the patterns of pressure drops along FS and DS channels are different, it is inevitable to have trans-membrane pressure (TMP; the difference between FS and DS pressures) inside the module. Fortunately, the positive TMP enhances water flux of the spiral wound module with a considerable amount (e.g., $> 10 \text{ l/m}^2\text{h}$ with TMP of 1-2 bars), which recommends the FO system designers to set a positive TMP when spiral wound FO modules are used for their systems.

Key Words : Forward Osmosis, Spiral Wound Membrane Module, Pressure Drop, Trans-Membrane Pressure

요약 : 본 연구를 통해 외권형 정삼투 막모듈의 성능을 분석하여 실규모 정삼투 시스템을 설계하기 위한 기본 지식을 제공하고자 한다. 연구에 사용된 모듈은 Toray Chemical Korea, Inc.의 FO8040 모델이다. 막 모듈의 여과 플럭스는 동일한 막 재질로 만들어진 쿠폰보다 작는데, 이는 막 모듈 내 유도용액 희석/원수 농축 효과뿐 아니라 모듈의 구조적 특성 때문으로 추정된다. 원수와 유도용액 유로에는 수두손실이 발생하는 데, 이는 유속이 증가할수록 커진다. 따라서, 공급 펌프는 이러한 수두손실을 극복하도록 설계되어야 한다. 원수 및 유도용액의 수두 손실 패턴이 다르므로 모듈 내부의 막간차압(원수와 유도용액의 압력 차)은 필연적으로 발생한다. 긍정적인 면은, 막간차압이 외권형 막 모듈의 여과 플럭스를 상당한 정도(TMP 1-2 bar 범위 시 $10 \text{ l/m}^2\text{h}$ 이상)으로 향상시킨다는 점이다. 그러므로, 외권형 정삼투 막 모듈이 실규모 시스템에 반영될 때는 적정 범위의 막간 차압을 고려하여 설계하는 것이 유리하다.

주제어 : 정삼투, 외권형 막 모듈, 수두손실, 막간차압

1. 서론

막여과 공정은 해수담수화, 물 재이용 등 다양한 수처리 분야에서 널리 사용되어 오고 있다. 막여과 공정은 기계적인 압력을 구동력으로 활용하는데 기존 증발법 대비 에너지 소모량이 낮으며, 생산수 수질이 높은 장점이 있다.¹⁾ 하지만 역삼투(reverse osmosis, RO) 공정은 높은 압력이 필요하여 전력 소비량이 높을 뿐 아니라, 유지관리 측면에서 파울링과 같은 막 오염으로 인한 플럭스 저하도 문제가 된다.²⁻⁴⁾

역삼투 공정의 대안으로 차세대 해수 담수화 기술인 정삼투(forward osmosis, FO) 공정이 위 문제들을 해결할 기술로 주목받고 있다. 정삼투 공정은 반투과성 막을 사이에 두고 저농도의 용액과 고농도의 용액이 흐를 때, 삼투압만을 구동력으로 해서 저농도 용액 안의 물 분자가 고농도 용액으로 투과된다. 그러므로, 정삼투 공정은 에너지 소모량이 낮으며, 역삼투 공정에 비해 파울링의 영향이 낮다는 장점이

있다.^{5,6)} 이러한 장점 덕분에 최근 정삼투 공정은 담수화나 하수처리와 같은 수처리 관련 분야뿐 아니라 식품 공정 등과 같은 다양한 분야에 적용하고 이를 상용화하기 위한 연구가 이루어지고 있다.^{7,8)}

지난 10여 년간 정삼투 공정에 대한 연구는 매우 활발하게 이루어져 있지만, 대부분 막 쿠폰(coupon)을 사용하는 실험실 규모의 결과들이다.⁹⁾ 정삼투 공정을 실제 현장에 적용하기 위해서는 다수의 모듈을 배열하는 설계를 거치게 된다. 모듈은 막 쿠폰에 비해 면적이 비약적으로 커져 모듈 내부에서 저농도인 원수(feed solution, FS)는 농축되고 고농도인 유도용액(draw solution, DS)은 희석된다. 수많은 문헌에서 쉽게 찾을 수 있는 막 쿠폰의 성능 데이터를 실규모 정삼투 공정 설계 시 그대로 적용하는 것은 적절하지 않기 때문에,¹⁰⁻¹²⁾ 최근 정삼투 모듈 실험과 모델링 연구가 활발히 이루어지고 있지만, 주로 해외 학술지에서만 정보를 접할 수 있다.¹³⁻¹⁷⁾

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

본 논문의 목적은 정삼투 모듈을 실험용 시스템에 설계하기 위한 기본 성능 데이터를 제시하는 것이다. 실험 결과에 대한 설명을 중심으로 쿠폰 대비 낮은 정삼투 모듈의 여과 플럭스, 필연적으로 발생하는 모듈 내 유로의 수도 손실, 다단 직렬 시스템 적용 시 유량, 압력, 농도 변화, 막간차압(Trans-membrane pressure, TMP) 발생 시 여과 플럭스의 변화 등을 다루었다. 이를 통해 추후 정삼투 모듈을 활용하여 대형 시스템을 설계하고자 하는 엔지니어들이 쉽게 정삼투 모듈의 특성을 이해하도록 하고자 한다. 한편, 정삼투 모듈은 평면형, 와권형, 중공사형 등 다양한 형태로 제조되고 있는데,¹⁸⁾ 본 논문에서는 이들 중 와권형 모듈에 대해서 다루기로 한다.¹⁹⁾

2. 실험방법

본 연구에서 사용된 정삼투 모듈은 Toray Chemical Korea, Inc.의 FO8040인데, 아직 개발 초기 단계라 대량 생산이 되지 않는 모델이다. 따라서, 본 논문에 제시된 정량적인 성능 데이터들은 양산 체제 구축 후의 FO8040 모델에서는 바뀔 가능성이 있지만, 정성적인 측면에서는 바뀌지 않을 것이라 예상된다. FO8040은 와권형 모듈로 원수와 유도용액의 흐름 체계와 주요 재원은 Fig. 1과 같다. 유도용액과 원수의 농도를 조정하기 위한 용질로는 염화나트륨(NaCl)을 사용하였고, 수온은 18℃로 설정하였다.

막 모듈 테스트를 위해서는 막 쿠폰 실험과 비교했을 때 높은 원수와 유도용액 유량이 필요하므로 Fig. 2에 묘사된 바와 같이 수돗물 내 포함된 이물질로 인한 데이터 교란이 발생할 수 있기 때문에, 이를 배제하고 순수를 사용하였다. 순수 제조 시에는 수돗물을 4인치 역삼투 모듈(RE4040-SHN, Toray Chemical Korea, Inc.)을 통해 여과하는 방식을 사용하였다. 수돗물에 포함된 염소에 의한 폴리아미드 재질의 역삼투막의 손상을 방지하기 위해 수돗물에 충분한 농도의 SBS(sodium bisulfite)를 주입하였다.

Fig. 2에 묘사된 정삼투 모듈 시스템을 사용한 실험 시, 각

Fig. 1. FO8040 module manufactured by Toray Chemical Korea, Inc.

Fig. 2. FO module system using the spiral wound FO8040 module.

탱크로부터 막 모듈로 원수와 유도용액이 유입되고 각각의 탱크(400 L)로 순환되면서 유도용액이 희석되고 원수가 농축된다. 원수 유량(Q_f), 농축 원수 유량(Q_c), 원수 농도(C_f), 농축 원수 농도(C_c), 유도용액 유량(Q_d) 및 유도용액 농도(C_d)는 실시간으로 측정하였고, 희석 유도용액 유량(Q_{dd}) 및 농도(C_{dd})는 모듈 내부 물질평형 관계를 이용하여 다음 수식을 통해 구하였다.

$$Q_{dd} = Q_d + (Q_f - Q_c) \quad (1)$$

$$C_{dd} = \frac{(Q_d C_d + Q_f C_f - Q_c C_c)}{Q_{dd}} \quad (2)$$

막 모듈 내 원수와 유도용액 유로로 인한 수도손실을 계산하기 위해, 원수 압력(P_f), 농축 원수 압력(P_c), 유도용액 압력(P_d), 희석 유도용액 압력(P_{dd})이 압력계를 이용하여 계측되었다. 막 모듈의 플럭스는 원수 유량과 농축 원수 유량의 차이를 막 면적(15.3 m^2)으로 나누어 계산하였고, 다양한 실험조건을 구현하기 위해 막모듈 전후단에 설치된 밸브를 조작하여 원수 및 유도용액의 초기 유량과 압력 조건을 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 와권형 정삼투 모듈과 막 쿠폰의 여과 성능 비교

실험에 사용된 와권형 모듈(15.3 m^2)의 유효 면적은 쿠폰(0.0066 m^2) 대비 훨씬 커서 여과수량을 무시할 수 없다. 유도용액은 정삼투막을 투과한 여과수를 받아들여 희석되고, 반대로 원수는 여과수를 잃어버렸기 때문에 부피가 줄어들어 농축된다. 이로 인해, 유도용액의 농도가 감소하고 원수의 농도가 증가하여 유도용액-원수 간 삼투압 차가 감소한다. 따라서, 막 모듈 실험 시에는 쿠폰 실험 대비 동일 유도용액 농도에 대한 여과 플럭스가 작아질 것으로 예상되고,

Fig. 3. Comparison between coupon and module tests at 18°C (Coupon test data were obtained from the previous results by our research group).¹⁹⁾

동일 제조사의 동일 재질 막으로 제작된 모듈과 쿠폰의 실험 결과를 나타낸 Fig. 3은 그 경향을 잘 보여주고 있다.

그러나, Fig. 3에 나타난 막 모듈과 막 쿠폰의 플럭스 차이는 단순히 유도용액 희석-원수 농축 현상만으로 발생한 것이라고 보기 어렵다. 우선, 원수로는 순수가 사용되었기 때문에 원수 농축 효과는 없다. 유도용액 농도 1,000 mol/m³의 경우의 막 모듈 플럭스(21.4 l/m²h)보다 500 mol/m³의 경우의 막 쿠폰 플럭스(23.4 l/m²h)가 더 높다. 만약, 막 모듈 내부의 유도용액 농도가 500 mol/m³보다 낮다면 이 현상을 막 모듈 내 유도용액 희석 효과로 설명할 수 있다. 그러나, Fig. 3의 실험에서 막 모듈 외부로 배출되는 유도용액 희석수의 농도가 약 700 mol/m³이므로 막모듈 내부의 평균 유도용액 농도가 500 mol/m³보다 높은 것은 자명하기 때문에, 막 모듈과 쿠폰의 플럭스 차이를 스케일-업에 따른 유도용액 희석 효과로 볼 수 없다.

유로 길이가 짧으며, 단순한 평판형 구조로 되어 있는 쿠폰의 경우와는 달리, 와권형 모듈은 유로 길이가 길고 Fig. 1에 묘사된 바와 같이 유도용액 유로의 경우 흐름이 U자형으로 복잡하게 형성되도록 설계되어 있다. 이로 인해 15.3 m²라는 유효면적이 100% 활용되기가 어려울 가능성이 있다. 또한, 유로길이가 길면 흐름이 진행됨에 따라 수두 손실이 발생하여 모듈 내 막 위치별로 다양한 막간차압이 발생하여 여과 플럭스에 영향을 미칠 수 있다. 따라서, 정삼투 막 모듈의 성능 데이터는 모듈의 형태와 크기에 따라 크게 달라질 수 있다. 3.2절부터는 막 모듈을 활용한 실험을 통해 파악할 수 있는 성능 데이터를 중점적으로 다루고자 한다.

3.2. 와권형 정삼투 모듈에 의한 수두 손실

일반적으로 역삼투 공정과 비교하여 정삼투 공정을 소개할 때 많이 사용되는 표현 중 하나는 ‘정삼투 공정은 자연 삼투압을 구동력으로 사용하기 때문에 압력이 거의 필요하지 않다’이다. 연구실 규모에서는 맞는 말이다. 그러나, 실제 적용 시에는 역삼투 공정과 마찬가지로 모듈을 여러 개 연결하여 원하는 여과 수량을 만족시켜야 하기 때문에, 원수나

Fig. 4. Pressure values at the inlet and outlet of FS channel (a) and DS channel (b).

유도용액이 흐르는 유로의 길이가 길어지게 되고, 이로 인한 수두 손실이 발생하기 때문에 이를 극복하기 위한 압력이 꼭 필요하다. 따라서, 막 모듈 하나 당 수두 손실이 얼마나 발생할지에 대한 정보를 파악하는 것이 매우 중요하다.

Fig. 4는, 와권형 정삼투 막 모듈의 원수, 유도용액 유로에 모두 순수를 흘려주었을 때, 막 모듈 입출구에 걸리는 압력을 원수 측(Fig. 4(a))과 유도용액 측(Fig. 4(b))으로 나누어 정리한 것이다. 원수 측에서는 입출구 차압($P_f - P_c$)이 0.17-0.34 bar 범위에, 유도용액 측에 입출구 차압($P_d - P_{dd}$)이 0.19-0.49 bar 범위에 있다. 유체가 유로를 따라 흐를 때 발생하는 수두 손실은 유체의 유속이 증가할수록 커지기 때문에, Fig. 4에서 유속이 증가할수록 수두 손실에 해당하는 입출구 차압이 증가하는 것을 관찰할 수 있다. 특기할 만한 사항은, 유도용액 유로의 수두 손실이 원수 유로보다 크다는 것이다(유속 4 cm/s일 때, 원수 유로의 수두손실은 0.23 bar, 유도용액 유로의 수두 손실은 0.37 bar). Fig. 1에 제시된 와권형 정삼투 모듈의 구조에 따르면 원수 유로는 직선형이고 유도용액 유로는 U자형인데, U자형 유로의 경우 유량이 바뀌면서 수두 손실이 더 발생하게 된다. 막 제조사 측에서는 수두손실을 저감하기 위해 유도용액 유로의 두께를 원수 유로보다 2배 크게 했지만, 여전히 유도용액 유로의 수두 손실 효과가 더욱 큰 것으로 나타났다.

정삼투 막 모듈에 의한 수두 손실 데이터는 막 모듈 직렬 배열 시 공급 펌프의 압력을 설정하기 위한 중요한 정보가 된다. 예를 들어, 모듈 1개의 수두 손실이 0.3 bar라면 단순

산술적으로 계산하면 모듈 8개를 직렬연결하기 위해서는 2.4 bar 이상의 공급 압력이 필요하다는 정보를 얻을 수 있다. 하지만, 정삼투 공정에서는 원수 유량은 계속 감소하고 유도용액 유량은 계속 증가하기 때문에, 후단 모듈로 갈수록 원수 유로의 수두손실은 줄어들게 되고 유도용액 유로의 수두손실은 증가하게 된다. 따라서 첫 단 모듈의 유도용액 측 수두 손실이 0.3 bar이라면, 8단 직렬연결을 위한 유도용액의 공급 압력은 단순 산술 계산의 결과인 2.4 bar를 상회할 것이기 때문에 주의가 필요하다.

Fig. 5는 와권형 정삼투 막 모듈이 3단 연결되었을 경우의 유량(Fig. 5(a)), 압력(Fig. 5(b)), 농도(Fig. 5(c)) 변화를 각각 나타낸 것이다. 첫 번째 모듈의 유입 조건은 원수와 유도용액 별로 (1) 유량 13, 5 l/min, (2) 압력 1.5, 1.2 bar, (3) 농도 10, 600 mol/m³으로 설정하였다. 유량은 원수 농축과 유도용액 희석을 고려하였으며 압력은 직렬3단에 대한 수두손실을 고려하였다. 농도는 유도용액의 경우 해수 원수는 하수처리수의 농도와 유사하도록 설정하였다. 다만 직렬연결 실험을 위해 Fig. 2에 묘사된 바와 같이 모듈 1개로 구성된 시스템을 사용하였는데, 모듈 유출부의 유량, 농도, 압력 조건을 구한 후, 이를 다음 단 모듈의 유입 조건으로 설정하여 반복 실험을 하는 방식을 채택하였다. 즉, 3단 직렬연결 실험을 하기 위해서는 총 3회의 실험을 실시하여야 한다. Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 유도용액과 원수의 삼투압차 때문에 이들이 모듈을 지나갈 때마다 유량이 각각 감소(원수), 증가(유도용액)한다.

Fig. 5(b)에 의하면 모듈별 입출구 압력차가 원수의 경우 각각 0.15 (1단), 0.13 (2단), 0.11 (3단) bar로 후단으로 갈수록 줄어드는 경향을 보이고, 유도용액의 경우 0.11 (1단), 0.15 (2단), 0.20 (3단) bar로 후단으로 갈수록 증가하는 경향을 보인다. 이는 Fig. 5(a)에 나타난 바와 같이 후단 모듈로 갈수록 원수의 유량은 감소하고 유도용액의 유량은 증가하기 때문에, 원수 유로 내 유속은 감소하여 수두손실 효과가 줄어들고 유도용액 유로 내 유속이 증가하여 수두손실 효과가 증가하기 때문이다. 앞서 논의된 바와 같이, 다만 직렬연결을 위해서는 개별 모듈에 의한 수두손실을 고려하여 공급 펌프의 압력을 정해야 하는데, 원수의 경우는 후단으로 갈수록 수두손실 값이 줄어들고, 유도용액의 경우는 그 반대 현상이 나타나므로 설계 시 주의해야 한다.

Fig. 5(c)는 3단 직렬 정삼투 시스템에 의한 원수 농축과 유도용액 희석을 보여주고 있다. 후단으로 갈수록 유도용액과 원수의 농도 차가 감소하여 정삼투 공정의 구동력인 삼투압 차가 줄어들기 때문에 여과 성능 저하가 예상된다. 한편, 원수의 경우 3단 시스템을 거치면서 3.4배 농축, 유도용액의 경우 2.6배 희석되었다. 물론 운전 조건에 따라 원수 농축률, 유도용액 희석률이 달라지기 때문에 이 값들이 최적 조건에서 얻어진 값들은 아니지만, 역삼투 공정 대비 저압으로 운전하여 3배 이상의 원수 농축, 2배 이상의 유도용액 희석이 가능하다는 것은 고무적인 결과이다. 이는 다수의 정삼투 모듈로 구성된 실규모 정삼투 공정의 자원회수

Fig. 5. Experimental results of FO system with 3-stage serial arrangement.

(원수 농축 측면), 저에너지 해수담수화(해수를 유도용액으로 사용하여 희석시켜 해수의 삼투압을 감소시켜 에너지 소모량을 감소) 적용 전망을 밝게 한다.

3.3. 막간차압이 여과 성능에 미치는 영향

3.2절에서 논의되었듯이, 다수의 정삼투 모듈이 적용된 실규모 시스템에서는 수두손실을 고려하여 원수와 유도용액의

Fig. 6. Effect of trans-membrane pressure (TMP) on water flux of spiral wound FO module.

압력이 직렬로 연결된 모듈들의 수두손실 값의 총합보다 높게 설계되어야 한다. 또한, 원수 유로와 유도용액 유로의 수두손실 정도가 다르기 때문에 필연적으로 원수와 유도용액의 막간차압이 발생하게 된다. 막 제조사에 따르면 가능한 한 유도용액의 압력이 원수보다 높지 않게 관리하는 것이 모듈 손상을 막기 위해 중요하고, 이는 3단 직렬 시스템 실험 시 원수의 압력을 유도용액보다 높게 유지한 이유이다 (Fig. 5(b) 참조).

원수의 압력이 유도용액보다 높다면, 정삼투 공정의 기본 구동력인 삼투압 차뿐 아니라 압력 차도 얻게 되어 여과 플럭스가 더 높아질 것으로 기대된다. Fig. 6은 동일한 실험 조건에서 막간차압이 있는 경우와 없는 경우를 비교한 결과이다. 본 실험에 사용된 막모듈의 수투과계수는 1.6×10^{-11} m/s.Pa이므로,¹⁹⁾ 막간차압 1.3 bar의 경우 7.7 l/m²h의 플럭스 상승 효과를 기대할 수 있다. 그러나, Fig. 6에 나타난 바와 같이 실제 플럭스 상승치는 10-13 l/m²h이므로 압력차로 인한 플럭스 상승효과 이상의 결과를 보였다. 다양한 원인이 있을 수 있겠지만, 가장 유력한 이유는 원수 측의 압력이 유도용액 측보다 높기 때문에 유도용액 유로의 두께가 눌러서 줄어드는 효과가 발생하기 때문이다. 이로 인해, 유도용액 측의 외부농도분극 효과가 감소하여 막간 삼투압 차가 증가하는 효과가 발생하기 때문에 예상보다 높은 플럭스 향상 효과가 나타나는 것이다. 보다 구체적인 실험적 증거와 상세한 설명은 본 연구팀이 출간한 기존 문헌^{16,19)}에 잘 정리되어 있고, Fig. 6은 위 문헌들^{16,19)}에서는 발표되지 않았지만, 동일한 경향을 나타낸다. 1-2 bar 범위의 저압 막간차압으로도 10 l/m²h 이상의 플럭스 상승 효과를 얻을 수 있다는 Fig. 6의 실험 결과는 실규모 정삼투 공정의 적용 전망을 밝게 하는 것이라 볼 수 있다. 정삼투 공정을 포함한 대부분의 막여과 공정의 경제성을 좌우하는 것은 최소의 노력으로 최대의 플럭스를 얻는 것이기 때문이다.

4. 결론

본 논문에서는 다수의 정삼투 모듈을 이용한 실규모 시스

템 설계 시 반드시 알아야 하는 정삼투 막 모듈의 기본 특성에 대해서 다루고, 다양한 실험 결과에 대한 해석을 통해 이를 설명하였다. 첫째, 설계자들은 막 모듈의 여과 플럭스가 유도용액 희석/원수 농축 효과로 인해 막 제조사에서 제공하는 성능 데이터(대부분 쿠펜 실험의 결과를 제공함)보다 낮게 된다는 사실을 알아야 한다. 특히, 이러한 유도용액 희석/원수 농축 효과 외에 모듈의 형태에 따른 추가적인 플럭스 하락 요소가 있을 수 있다. 둘째, 막모듈 내 원수 및 유도용액 유로에서 수두손실이 발생하기 때문에 공급 펌프 설계 압력 설정 시에 주의해야 한다. 특히, 본 논문에서 다루어진 와권형 모듈의 경우 유도용액 유로의 수두손실이 더 크고, 다단 직렬배열 설계 시에는 후단으로 갈수록 유도용액 유로의 수두손실은 증가하기 때문에 이를 고려하지 않으면 원하는 유량의 유도용액 공급이 어렵게 된다. 셋째, 원수와 유도용액 유로에서 발생하는 수두손실은 각각 특성이 다르기 때문에, 막모듈 운전 시에는 필연적으로 막간차압이 발생하게 된다. 희망적인 요소는(와권형 막 모듈에만 해당되는 사실일 수도 있지만), 상대적으로 저압(1-2 bar 범위)의 막간차압으로도 10 l/m²h 이상의 플럭스 향상 효과를 볼 수 있기 때문에 정삼투 공정의 활용도가 높아질 수 있다는 점이다. 따라서, 와권형 정삼투 막 모듈을 이용한 실규모 시스템 설계 시에는 적정 범위의 막간차압을 설계에 반영하는 것이 유리하다.

Acknowledgement

이 연구는 한국 정부의 국토 교통부 플랜트연구개발사업의 연구비지원(과제번호 18IFIP-B088091-05)에 의해 수행되었습니다.

KSEE

References

1. Ko, E.-O., Moon, J.-D. and Park, J.-M., "Status-of-arts of desalination technology," *Membrane J.*, **20**(3), 185~196(2010).
2. 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).
3. Elimelech, M. and Phillip, W. A., "The future of seawater desalination: energy, technology, and the environment," *Science*, **333**, 712~717(2011).
4. Cath, T. Y., Childress, A. E. and Elimelech, M., "Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments," *J. Membr. Sci.*, **281**, 70~87(2006).
5. Kim, B., Boo, C., Lee, S. and Hong, S., "Evaluation of forward osmosis (FO) membrane performances in a non-pressurized membrane system," *J. Korean Soc. Water Environ.*, **28**(2), 292~299(2012).

6. Jeon, J., Park, B., Yoon, Y. and Kim, S., "An optimal design of forward osmosis and reverse osmosis hybrid process for seawater desalination," *Desalin. Water Treat.*, **57**, 26612~26620(2016).
7. Kim, S., Paudel, S. and Seo, G. T., "Forward osmosis membrane filtration for microalgae harvesting cultivated in sewage effluent," *Environ. Eng. Res.*, **20**, 99~104(2015).
8. Achilli, A., Cath, T. Y., Marchand, E. A. and Childress, A. E., "The forward osmosis membrane bioreactor: a low fouling alternative to MBR processes," *Desalination*, **239**, 10~21 (2009).
9. Lee, J. and Kim, S., "Evaluation of water permeability of forward osmosis membranes using osmotically driven membrane test," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **30**(4), 417~425(2016).
10. Kim, J. E., Phuntsho, S., Lotfi, F. and Shon, H. K., "Investigation of pilot-scale 8040 FO membrane module under different operating conditions for brackish water desalination," *Desalin. Water Treat.*, **53**, 2782~2791(2015).
11. Kim, Y. C. and Park, S. J., "Experimental study of a 4040 spiral-wound forward-osmosis membrane module," *Environ. Sci. Technol.*, **45**(18), 7737~7745(2011).
12. Kim, J. E., Blandin, G., Phuntsho, S., Verliefde, A., Le-Clech, P. and Shon, H. K., "Practical considerations for operability of an 8" spiral wound forward osmosis module: Hydrodynamics, fouling behaviour and cleaning strategy," *Desalination*, **404**, 249~258(2017).
13. Lee, J., Choi, J. Y., Choi, J.-S., Yoon, Y. and Kim, S., "A statistics-based forward osmosis membrane characterization method without pressurized reverse osmosis experiment," *Desalination*, **403**, 36~45(2017).
14. Lee, J. and Kim, S., "Predicting power density of pressure retarded osmosis (PRO) membranes using a new characterization method based on a single PRO test," *Desalination*, **389**, 224~234(2016).
15. Jeon, J., Jung, J., Choi, J. Y. and Kim, S., "The performance of the spiral wound and flat sheet forward osmosis elements with thin film composite membrane," *Desalin. Water Treat.*, **77**, 135~141(2017).
16. Jeon, J., Jung, J., Lee, S., Choi, J. Y. and Kim, S., "A simple modeling approach for a forward osmosis system with a spiral wound module," *Desalination*, **433**, 120-131(2018).
17. McCutcheon, J. R. and Elimelech, M., "Modeling water flux in forward osmosis: implications for improved membrane design," *AIChE J.*, **53**, 1736-1744(2007).
18. Kim, B., "Performance evaluation of forward osmosis (FO) hollow fiber module with various operating conditions," *J. Korean Soc. Water and Wastewater*, **32**(4), 357~361(2018).
19. Jeon, J., Jung, J., Choi, J. Y., Kim, J. and Kim, S., "Effect of trans-membrane pressure on draw solution channel height and water flux in spiral wound forward osmosis module," *Desalin. Water Treat.*, **96**, 55~60(2017).