



액상 비료를 유도 용액으로 사용하는 정삼투 기반의 해수 담수화

Forward Osmosis Based Seawater Desalination using Liquid Fertilizer as Draw Solution

박성직* · 안희경*

Park, Seong-Jik · An, Hee-Kyung

ABSTRACT

The present study explored the way to desalinate seawater for agricultural irrigation using forward osmosis (FO) process using liquid fertilizer as draw solution. FO experiments were performed in a cross flow mode using flat sheet FO membrane. The effect of membrane orientation, flow rate, and draw solution concentration on the performance of forward osmosis was investigated by measuring water flux of forward osmosis membrane. The water flux when the draw solution was placed against the membrane active layer was lower than the water flux when the feed solution was placed against the membrane active layer. This results indicated that the decrease of effective osmotic pressure by dilutive internal concentration polarization was less than that by concentrative internal concentration polarization. Increasing flow rate from 66.7 to 133.1 cm³/min resulted in increase of the water flux when the membrane active layer orient to draw solution and feed solution, respectively. The reduction of resistance to water flow increased water flux at higher flow rate. The water flux of FO membrane increased with increasing draw solution concentration from 10000 to 30000 mg/L. The water flux for KH₂PO₄ draw solution was similar to that for commercial fertilizer. Optimization of FO process would contribute to economically desalinate brackish water for agricultural use.

Keywords: Forward osmosis; agricultural water; FO membrane; draw solution; concentration polarization

1. 서 론

가용할 수 있는 물의 확보는 21세기에 전세계가 직면하고 있는 가장 심각한 문제 중의 하나이다 (Shannon et al., 2008). 이미 인류의 생활, 농업, 공업을 위해 필요한 물은 부족한 실정이며, 전세계 인구의 34.7 %에 해당하는 인구가 물이 부족한 지역에 살고 있으며, 2050년 이 수치는 44.9 %까지 증가할 것으로 UN은 보고하고 있다 (UNEP, 2006). 2008년 6월 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)의 보고에 따르면 물이 부족한 지역의 인구는 지속적으로 증가할 것이라고 하였다 (Bates et al., 2008). 우리나라는 지역별, 계절별 편차가 심하여 여름에는 홍수가 빈발하고 겨울과 봄에는 가뭄이 지속되어 안정적인 용수확보에 어려움이 있다. 근래에는 기후변화로 인하여 홍수 및 가뭄의 발생 빈도가 증가하고 있으며, 이로 인한 안전한 용수확보에 어려움은 더 커질 것으로 전망된다. 현재 전

세계적으로 담수의 70 %가 농업용 관개용수로 사용되고 있으며 (WBCSD, 2005), 국내에서는 그 보다는 낮지만, 2003년 47 %로 수자원의 절반이 농업용수로 사용되고 있다 (MLTM, 2006). 이러한 농업용수의 높은 비율은 기후 변화로 인한 수자원 부족 시 농업에 대한 영향은 더 클 것으로 사료된다. 또한 기후온난화로 인한 해수면 상승은 하구 지역에 위한 농업지역의 관개에 있어서 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

그 동안 관심 밖이었던 기수 (brackish water)나 하수를 효율적이고 경제적으로 처리할 수 있는 기술이 개발되지 않는다면 이러한 문제의 상황은 더욱 더 심각해질 것이다. 해수 (기수와 해수 포함)는 지구에 존재하는 물의 97 %를 차지하고 있으며, 해수로부터 담수를 생산하는 기술의 개발이 절실하다. 해수를 이용하여 담수를 생산하는 방법은 증발법과 멤브레인을 이용하는 방법이 있다. 증발법의 대표적 방법인 다단플래쉬법은 중동지역에서 많이 사용되며, 에너지 소비가 많다는 단점 있다. 멤브레인을 이용한 방법 중에서 역삼투 (Reverse osmosis, RO) 멤브레인인 수처리, 담수화, 재이용을 위한 가장 상업적으로 우수한 기술이다. RO는 높은 압력 (50-70 bar)을 반투과 멤브레인에 가하여 순수한 물은 통과시키고 이온 및 유기물과 같은 용존성 물질은 걸러낸다. RO 방식은 고압을 이용하므로 담수를 얻기 위해서 다단플래쉬법 보다는 적지만 이 역시 많은 에너지 (3~4

* 환경대학교 지역자원시스템공학과
 † Corresponding author Tel.: +82-31-670-5131
 Fax: +82-31-670-5139
 E-mail: parkseongjik@hknu.ac.kr
 2013년 2월 12일 투고
 2013년 2월 28일 심사완료
 2013년 3월 4일 게재확정

kW/m³)가 소요되는 단점이 있다 (Elimelech and Phillip, 2011). 또한 높은 압력에서 운전되기 때문에 RO 멤브레인은 생물학적 막오염 (biofouling)으로 인한 운전 비용 및 유지 관리 비용을 증가시킨다 (Shannon et al., 2008).

정삼투 (Forward Osmosis)는 염분과 물을 분리하기 위해 RO와 같이 분리막을 이용하는 공정이지만, 구동력이 압력차가 아니라 농도차를 이용하기 때문에 에너지소비가 극히 적은 (< 1 kWh/m³) 기술이다. 정삼투 공정은 에너지가 적게 소요된다는 장점 뿐만 아니라 회수율이 높고 (70 % 이상), 농축수 배출이 적다는 장점도 있다. 정삼투식 담수화기술의 원리는 원수농도의 10배 이상 되는 유도용질 (draw solute)을 분리막 반대쪽에 주입하여 삼투현상에 의해 원수 내의 물이 멤브레인을 투과하여 고농도 용액 쪽으로 이동하며, 희석된 유도용액에서 물과 유도용질을 분리하여 생산수를 얻고, 농축된 유도용질은 재사용하게 된다 (Cath et al., 2006).

정삼투에 대한 연구는 현재 활발히 진행 중에 있으며, 멤브레인인은 해수담수화 뿐만 아니라 하수 처리를 위한 멤브레인 생물 반응조 (Membrane Bioreactor)와 결합하여 사용되기도 한다 (Cath et al., 2006; Nawaz et al., 2013). 정삼투에 대한 연구는 2000년대 중반부터 본격적으로 연구가 시작되었으며, 현재 연구는 기초 연구 및 개발 단계에 있는 실정이다. 정삼투는 유도용액의 농도 (Gray et al., 2006; McCutcheon et al., 2006), 원수의 농도 (McCutcheon et al., 2006), 원수의 화학적 및 물리적 특성 (Mi and Elimelech, 2008), 멤브레인 활성층 (active layer)의 방향 (Gray et al., 2006), 멤브레인의 두께 (Ng et al., 2006), 멤브레인의 소재 (McCutcheon and Elimelech, 2008), 멤브레인의 구조 (Yip et al., 2010) 등이 정삼투 멤브레인의 투과율 및 이온 제거율에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 정삼투 방식의 해수담수화가 상용화되기 위해서는 농도 분극화 정도가 작은 정삼투 멤브레인의 개발 (McCutcheon et al., 2007)과 삼투압이 높고 회수가 쉬운 유도용액의 개발 (McGinnis and Elimelech, 2007)이 필요하다. 현재, 정삼투를 이용한 해수담수화에서 가장 흔하게 사용되는 유도용액은 Yale대학의 Menachem Elimelech 그룹 (McCutcheon et al., 2005)에서 2005년 제안한 ammonia-carbon dioxide (NH₃/CO₂)이 용해가 잘 되어 높은 삼투압을 유도하고 58 °C 이상의 온도에서 암모니아와 이산화탄소가 용액으로부터 분리되기 때문에 가장 우수한 유도용액으로 인식되어 왔다. 그러나, 이 유도용액 역시 분리하기 위해서 열을 가함에 따라서 물을 생산하기 위해서 상당량의 에너지가 소요된다. 그러나 현재까지 이를 대체할 수 있는 유도용액에 대한 개발에 대한 필요성을 느끼면서도 뚜렷한 결과가 없는 상태이다.

따라서 본 연구에서는 농업 관개수 생산을 위한 유도용액 회

수 공정이 필요 없는 정삼투 방식을 이용한 해수담수화 방식을 제안한다. 유도용액으로 제1인산칼륨 (potassium phosphate monobasic, KH₂PO₄)과 상업용 비료를 증류수에 녹여서 사용하고, 교차 흐름의 유속, 유도용액의 농도, 그리고 멤브레인 활성층의 방향에 따른 정삼투 멤브레인의 투과플럭스 변화를 살펴보고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료 및 장치 구성

본 실험에서 사용된 멤브레인은 미국 HTI사의 Cellulose Triacetate 재질로 두께는 50 μm이다 (McCutcheon et al., 2005). 멤브레인 표면의 특성을 파악하기 위해서 전계방출주사전자현미경 (Field-Emission Scanning Electron Microscope, FESEM, Hitachi, Japan)을 이용하여 분석하였다. Fig. 1과 같이 실험실 규모의 정삼투 해수담수화 장치를 구성하였다. 평판형 타입의 아크릴로 모듈을 제작하였으며, 멤브레인의 유효 면적은 26 cm² (폭 2.6 cm, 길이 10 cm)이다. 원수와 유도용액은 정량펌프에 의해서 서로 반대 방향으로 유입하여 교차 흐름이 형성되도록 하였다. 투과 유량은 컴퓨터와 연결된 저울 (CUW-6200H, CAS, Korea)을 이용하여 실시간으로 측정하였다. 또한, 유도용액의 농도 변화는 전기전도도계 (CM-31P, DDK-TOA, Japan)를 이용하여 측정하였다.

2. 정삼투 실험

본 실험에서는 유도용액의 농도, 교차 흐름의 유량 변화, 그리고 멤브레인의 활성층 방향에 따른 투과플럭스의 변화를 파악하고자 실험을 실시하였다. 기수를 모사하기 위해서 원수는 증류수에 NaCl을 첨가하여 2000 mg/L 농도로 제조하여 사용하였고, 유도용액은 일정량의 KH₂PO₄를 증류수에 첨가하여 5,000, 10,000, 20,000, 그리고 30,000 mg/L 농도의 유도용액을 제조하였다. 시중에 판매되고 있는 비료 (NK-Mag)는 이탈리아 IDFA

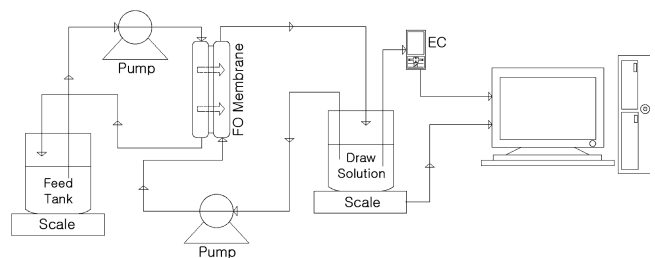


Fig. 1 Schematic diagram of laboratory-scale forward osmosis system

Table 1 Summary of experimental conditions and water flux

Membrane orientation	Flow rate (cm ³ /min)	Concentration of draw solution (mg/L)	Draw solution
Draw solution against active layer	66.7	10,000	KH ₂ PO ₄
Draw solution against active layer	99.2	10,000	KH ₂ PO ₄
Draw solution against active layer	133.1	10,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	66.7	10,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	99.2	10,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	133.1	10,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	133.1	5,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	133.1	20,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	133.1	30,000	KH ₂ PO ₄
Feed solution against active layer	133.1	10,000	Commercial fertilizer
Feed solution against active layer	133.1	20,000	Commercial fertilizer
Feed solution against active layer	133.1	30,000	Commercial fertilizer

사 제품으로 생산자가 제공하는 비료의 성분은 N 13 %, K 13 %, 수용성 고토 2 %, Mn 0.1 %, B, 0.1 %, Fe 0.1 %, 그리고 Zn 0.02 %이다. 상용되는 비료 NK-Mag에 증류수를 첨가하여 5,000, 10,000, 20,000, 그리고 30,000 mg/L 농도로 KH₂PO₄와 동일한 농도의 유도 용액을 제조하였다. 3 L의 비이커에 원수와 유도 용액 각각 2 L를 비이커에 채웠다. 교차 흐름의 유량은 정량 펌프의 펌프 회전 속도 rpm을 50, 70, 100 rpm으로 조절하였으며, 이에 해당되는 교차 흐름의 유량은 66.7, 99.2, 133.1 cm³/min이다. 멤브레인의 활성층 방향에 따른 투과플럭스를 살펴보기 위하여 활성층이 원수 방향일 때와 멤브레인의 활성층이 유도용액을 향할 때 두 가지 조건에서 실험하였다. 본 실험의 조건을 Table 1에 정리하였다. 투과플럭스는 시간에 대한 투과량을 도표로 나타내고 직선의 기울기로부터 투과유량을 산정하였고, 투과플럭스는 투과유량을 멤브레인의 유효면적으로 나누었다.

III. 결과 및 고찰

1. 멤브레인의 활성층 방향에 따른 정삼투 실험

Fig. 2에서와 같이 멤브레인은 비대칭으로서 활성층과 다공성층 (porous support)으로 구성되어 있다. 멤브레인은 cellulose

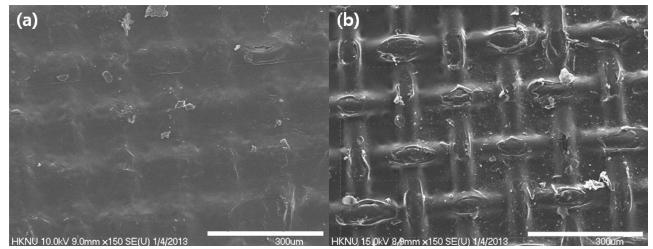


Fig. 2 FE-SEM images of the surfaces of (a) active layer and (b) porous support layer

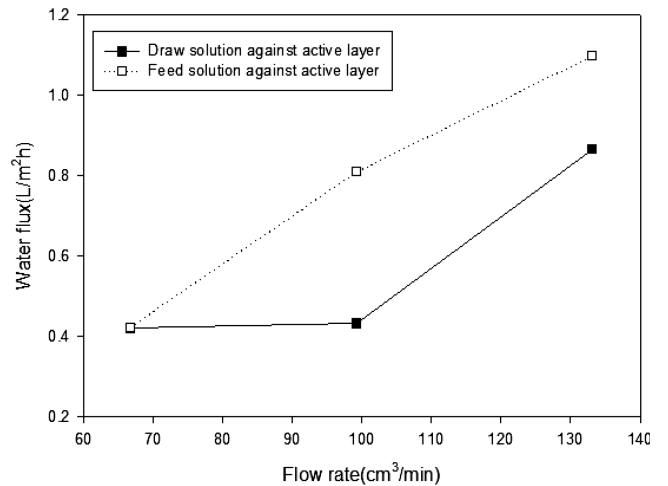


Fig. 3 Water flux as a function of flow rate when draw solution and feed solution were placed against active layer, respectively

triacetate 재질이고, polyester 재질의 격자가 기계적 강도를 유지한다 (McCutcheon et al., 2005). 정삼투 멤브레인은 두께가 50 µm로 일반적인 RO 멤브레인 보다 두께가 얇기 때문에, 정삼투 운전시 RO 멤브레인을 사용하는 것보다 정삼투 멤브레인을 사용하는 것이 효율이 좋다고 보고 되었다 (Cath et al., 2006).

본 실험에서는 멤브레인의 활성층 방향에 따른 투과플럭스를 살펴보고, 이를 Fig. 3에 나타내었다. 교차 흐름의 유량이 66.7 cm³/min으로 설정하고, 멤브레인의 활성층이 유도용액과 원수와 맞닿아 있을 때의 투과플럭스는 각각 0.421과 0.423 L/m²·h이다. 낮은 교차 흐름의 유량에서는 멤브레인의 활성층 방향에 따른 투과플럭스의 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 교차 흐름의 유량이 99.2 cm³/min으로 증가되었을 때, 멤브레인의 활성층이 유도용액과 맞닿아 있을 때의 투과플럭스는 0.433 L/m²·h으로 멤브레인의 활성층이 원수와 맞닿아 있을 때의 투과플럭스 0.810 L/m²·h 보다 낮은 것으로 나타났다. 교차 흐름의 유량이 113 cm³/min일 때 역시 멤브레인의 활성층이 원수와 맞닿아 있을 때의 투과플럭스는 멤브레인의 활성층이 유도용액과 맞닿아 있을 때 보다 높게 나타났다.

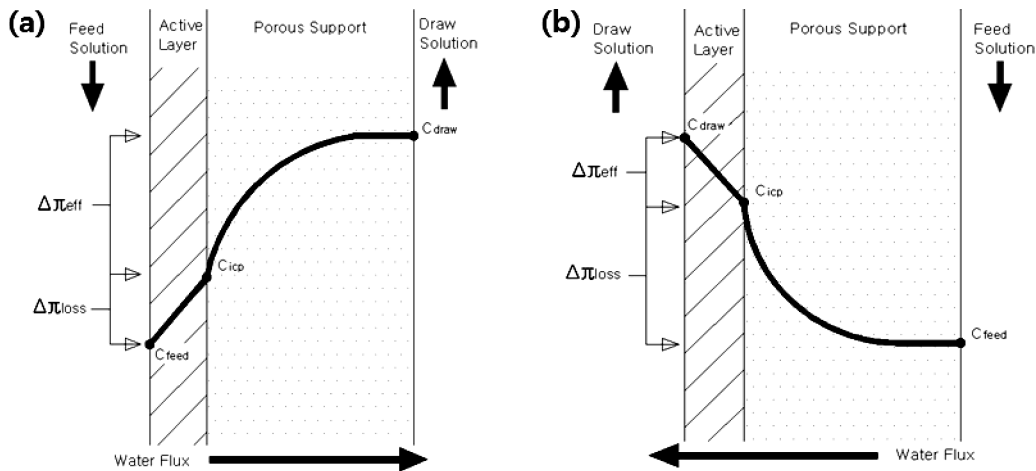


Fig. 4 Schematic representation of (a) dilutive internal concentration polarization and (b) concentrative internal concentration polarization

멤브레인의 투과플럭스는 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 (Pusch and Riley, 1974; Mulder et al., 1996):

$$J = A\sigma\Delta\pi \quad (1)$$

여기에서 A는 물의 투과 계수, σ 는 반사 계수 (멤브레인의 이온 제거율이 100 %이면 1), $\Delta\pi$ 는 유도용액과 원수 사이의 멤브레인에서 발생하는 삼투압 차이이다.

멤브레인의 양면에서 발생하는 삼투압 차이는 실제 유도 용액과 원수의 삼투압의 차이보다 작다. 그 이유는, 멤브레인 활성층에서 외부 농도 분극과 멤브레인의 다공성층에서 내부 농도 분극이 발생하기 때문에, 정삼투 멤브레인 사이의 삼투압 차이는 실제 원수와 유도용액 사이의 삼투압보다 작다 (Cath et al., 2006). 멤브레인의 활성층은 원수와 맞닿아 있고 멤브레인의 다공성층은 유도용액과 맞닿아 있을 경우, 멤브레인의 활성층 표면에는 용질의 농도가 증가함에 따라 원수의 삼투압이 증가하게 되어 원수와 유도용액의 삼투압차가 감소하게 되는 농축 외부 농도분극화 현상이 발생한다. 이 경우, 멤브레인의 다공성층에서는 투과된 물에 의해서 유도용액의 농도가 감소하여 삼투압차가 감소하는 희석 내부 농도 분극 현상이 발생한다. 반대로, 멤브레인의 다공성층은 원수와 맞닿아 있고 멤브레인의 활성층은 유도용액과 맞닿아 있을 경우, 멤브레인의 활성층에서는 멤브레인을 통과한 투과플럭스에 의해 유도용액의 농도가 감소하여 유도 용액의 삼투압이 감소하게 되는 희석 외부 농도 분극 현상이 발생한다. 그리고 멤브레인의 다공성층에서는 원수에 존재하는 용질의 농축에 의한 삼투압이 증가하는 농축 내부 농도 분극 현상이 발생한다. Gray et al. (2006)과 Cath et al. (2006)의 연구에 따르면 외부 농도 분극 현상은 내부 농도 분

극 현상에 비하여 매우 작다. 따라서 Fig. 4와 같이, 멤브레인 활성층이 원수와 맞닿아 있는 경우에는 희석 내부 농도 분극 현상이, 멤브레인 활성층이 유도용액과 맞닿아 있는 경우에는 농축 내부 농도 분극 현상이 멤브레인의 투과플럭스에 영향을 미치게 된다. 따라서 본 실험조건에서는 농축 내부 분극에 의한 삼투압 차이 감소가 희석 내부 분극에 의한 삼투압 차이 감소보다 더 큰 것으로 판단된다.

2. 교차 흐름의 유량에 따른 정삼투 실험

교차 흐름의 유량에 따른 정삼투 멤브레인에서 투과플럭스를 Fig. 3에 나타내었다. 열교환기의 작동 원리와 유사한 교차 흐름으로 설정한 이유는 삼투압 차이가 일정하고, 효율이 좋기 때문이다 (Loeb and Bloch, 1973). Fig. 3에서 멤브레인 활성층이 유도용액과 맞닿아 있을 때, 유량이 66.7에서 133.1 cm³/min으로 증가함에 따라서 투과플럭스는 0.421에서 0.866 L/m²·h으로 약 2배 증가하였다. 또한 멤브레인 활성층이 원수와 맞닿아 있을 때 유량이 66.7에서 133.1 cm³/min으로 증가함에 따라 투과플럭스는 0.422 L/m²·h에서 약 2.6배인 1.098 L/m²·h으로 증가하였다. 멤브레인의 활성층이 유도용액과 원수와 맞닿아 있을 경우 모두에서 유량이 증가함에 따라서 투과플럭스가 증가하였다.

멤브레인의 활성층 방향에 따른 정삼투 실험에서 설명하였듯이, 정삼투 공정에서 멤브레인의 투과플럭스는 원수와 유도용액의 삼투압의 차이에 비례하며, 멤브레인 사이의 삼투압 차이는 실제 원수와 유도용액의 차이보다 작다. 그 이유는 멤브레인 활성층에서 존재하는 외부 농도 분극 현상과 멤브레인의 다공성층에서 존재하는 내부 농도 분극 현상에 의해 멤브레인 사이의

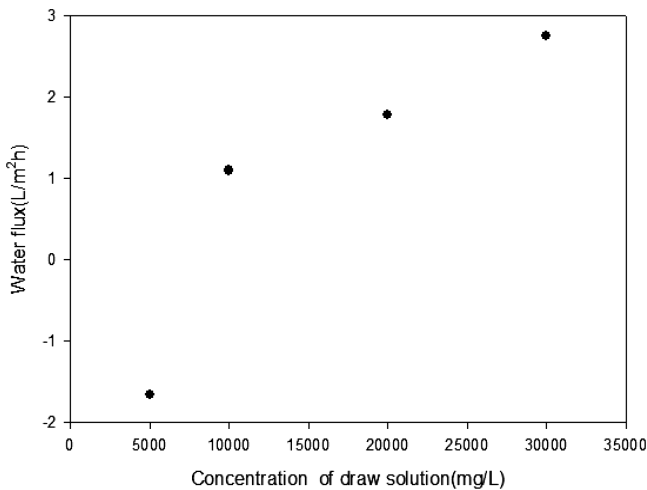


Fig. 5 Water flux as a function of the concentration of draw solution. Experimental conditions: flow rate was 133.1 cm³/min and feed solution was placed against the active layer of membranes

삼투압 차이가 감소한다. 이러한 농도 분극 현상은 멤브레인 표면에 평행한 원수와 유도용액의 흐름속도가 빨라지면, 물질이동 저항이 감소하여 농도 분극 정도가 작아진다. 교차 흐름의 유량 증가로 인하여 농도 분극 정도가 감소되고 멤브레인 사이에 존재하는 유효 삼투압 차이가 커져 투과플럭스가 증가된 것으로 판단된다.

3. KH₂PO₄의 농도에 따른 실험

Fig. 5에서와 같이 유도용액 KH₂PO₄의 농도가 10,000 mg/L에서 30,000 mg/L으로 증가함에 따라서, 투과플럭스는 1.098에서 2.756 L/m²·h으로 증가하였다. 유도용액의 농도가 증가함에 따라서 투과플럭스가 증가하는 것은 식 (1)의 $\Delta\pi$ 가 유도용액의 농도가 증가함에 따라서 증가하였기 때문이다. McCutcheon et al. (2006) 역시 유도용액의 농도가 증가함에 따라서 투과플럭스가 증가한다고 본 연구와 동일한 연구 결과를 얻었고, 원수의 농도 증가로 투과플럭스가 감소한다고 보고하였다.

4. 상업용 비료의 농도에 따른 실험

KH₂PO₄와 상업용 비료의 농도에 따른 투과플럭스의 차이를 비교하기 위하여 실험을 수행하였고, 이를 Fig. 6에 나타내었다. 상업용 비료의 농도를 10,000 mg/L에서 30,000 mg/L로 증가함에 따라서 KH₂PO₄를 유도 용액으로 사용하였을 때와 비슷한 경향으로 투과플럭스가 1.048에서 2.753 L/m²·h으로 증가하였다. 상업용 비료를 유도 용액으로 사용하였을 때, KH₂PO₄를 유

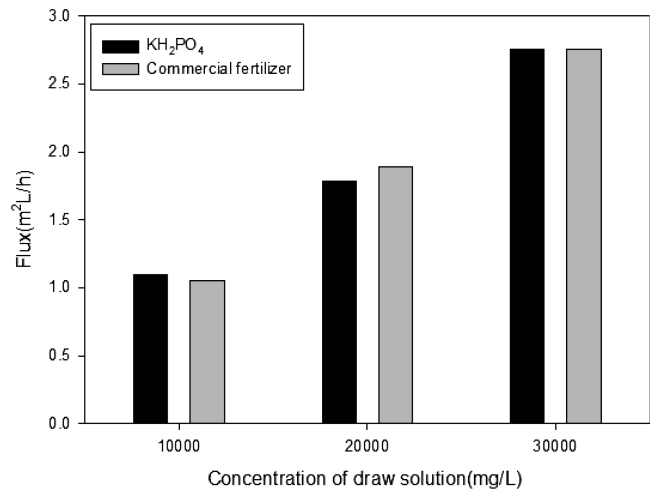


Fig. 6 Comparison of water flux for KH₂PO₄ and commercial fertilizer at different concentrations

도 용액으로 사용하였을 때와 멤브레인의 투과플럭스의 차이는 본 실험 조건에서 뚜렷한 차이가 없는 것으로 나타났다. 10,000, 20,000, 30,000 mg/L 농도에서 상업용 비료의 전기전도도 값은 1.59, 2.95, 6.50 S/m로, KH₂PO₄의 전기전도도 값 1.07, 1.96, 2.70 S/m 보다 크다. 따라서 동일한 농도에서 상업용 비료를 유도용액으로 사용하였을 때 투과플럭스가 클 것으로 판단되었으나, 투과플럭스의 차이가 없었다. 그 이유는 분자량이 클수록 내부 농도 분극 현상을 더 뚜렷하게 발생하는데 (Valencia and González, 2010), 상업용 비료에 포함되어 있는 일부 고분자 물질에 의한 내부 농도 분극 현상으로 유효 삼투압이 감소하였다고 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 비료 성분인 칼륨과 인을 포함하는 수용액 KH₂PO₄ 용액과 상업용 비료를 유도용액으로 사용하였고, 유도 용액의 회수 및 재생 과정이 필요 없는 정삼투 공정에 대하여 개발하였다. 멤브레인의 활성층 방향에 따른 실험 결과 상대적으로 유량이 큰 99.2와 133.1 cm³/min에서는 멤브레인의 활성층이 유도용액과 맞닿아 있을 때 보다 원수와 맞닿아 있을 때 투과플럭스가 높게 나타났다. 따라서 농축 내부 분극 현상에 의한 삼투압 감소가 희석 내부 분극 현상에 의한 삼투압 감소 보다 더 큰 것으로 사료된다. 교차 흐름의 유량이 증가함에 따라서 멤브레인 활성층이 유도용액과 원수와 맞닿아 있는 모든 경우에서 유량이 증가하였으며, 이는 교차 흐름의 유량 증가로 인한 농도 분극 정도가 감소되었기 때문이다. 유도 용액 KH₂PO₄의 농도가 증가함에 따라서 유도용액과 원수의 삼투압 차이가 커져서 투과

플럭스가 증가하였다. 상업용 비료를 유도 용액을 사용하였을 때, 무기물인 KH_2PO_4 를 유도 용액으로 사용하였을 때와 비슷한 펌 브레인의 투과플럭스를 얻었다. 본 연구에서 개발된 정삼투 공정을 통해서 해수 및 기수에서 적은 에너지를 사용하여 농업용수를 생산 가능할 것으로 판단되며, 농업용수의 낮은 공급 단가를 고려할 때 생산 단가를 낮출 수 있는 기술의 진보가 필요하다.

본 연구는 2012년 한국연구재단의 신진연구지원사업 (과제번호 2012014900)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Bates, B. C., Z. W. Kundzewicz, S. Wu and J. P. Palutikof, Eds., 2008. Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.
2. Cath, T. Y., A. E. Childress, and M. Elimelech, 2006. Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments. *Journal of Membrane Science* 281: 70-87.
3. Elimelech, M. and W. A. Phillip, 2011. The future of seawater desalination: Energy, technology, and the environment. *Science* 333: 712-717.
4. Gray, G. T., J. R. McCutcheon, and M. Elimelech, 2006. Internal concentration polarization in forward osmosis: role of membrane orientation. *Desalination* 197: 1-8.
5. Loeb, S., and M. R. Bloch, 1973. Countercurrent flow osmotic processes for the production of solutions having a high osmotic pressure. *Desalination* 13: 207-215.
6. McCutcheon, J. R., R. L. McGinnis, and M. Elimelech, 2005. A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. *Desalination* 174: 1-11.
7. McCutcheon, J. R., R. L. McGinnis, and M. Elimelech, 2006. Desalination by ammonia-carbon dioxide forward osmosis: Influence of draw and feed solution concentrations on process performance. *Journal of Membrane Science* 278: 114-123.
8. McCutcheon, J. R., and M. Elimelech, 2007. Modeling water flux in forward osmosis: Implications for improved membrane design. *AIChE Journal* 53: 1736-1744.
9. McCutcheon, J. R., and M. Elimelech, 2008. Influence of membrane support layer hydrophobicity on water flux in osmotically driven membrane processes. *Journal of Membrane Science* 318: 458-466.
10. McGinnis, R. L., and M. Elimelech, 2007. Energy requirements of ammonia-carbon dioxide forward osmosis desalination. *Desalination* 207: 370-382.
11. Mi, B., and M. Elimelech, 2008. Chemical and physical aspects of organic fouling of forward osmosis membranes. *Journal of Membrane Science* 320: 292-302.
12. Mulder, M., 1996. Basic Principles of Membrane Technology. Kluwer Academic, Dordrecht.
13. Nawaz, M. S., G. Gadelha, S. J. Khan, and N. Hankins, 2013. Microbial toxicity effects of reverse transported draw solute in the forward osmosis membrane bioreactor (FO-MBR). *Journal of Membrane Science* 429: 323-329.
14. Ng, H. Y., W. Tang, and W. S. Wong, 2006. Performance of forward (direct) osmosis: Membrane structure and transport phenomenon. *Environmental Science and Technology* 40: 2408-2413.
15. Ministry of Land, Transport, and Maritime Affairs (MLTM), 2006. National water resources plan. Available at <http://www.waterplan.go.kr/m52.html>. (in Korean).
16. Pusch, W., and R. Riley, 1974. Relation between salt rejection-r and reflection coefficient-sigma of asymmetric cellulose-acetate membranes. *Desalination* 14: 389-393.
17. Shannon, M. A., P. W. Bohn, M. Elimelech, J. Georgiadis, B. J. Marinas, and A. Mayes, 2008. Science and technology for water purification in the coming decades. *Nature* 452: 301-310.
18. UNEP, 2006. Challenges to international waters - Regional assessments in a global perspective. United nations environment programme, Nairobi, Kenya.
19. Valencia, D. P., and F. J. González, 2010. Understanding the linear correlation between diffusion coefficient and molecular weight. A model to estimate diffusion coefficients in acetonitrile solutions. *Electrochemistry Communications* 13: 129-132.

20. World Business Council for Sustainable Development (WBCSD), 2005. Water facts and trends. Available at <http://www.wbcsd.org/Pages/EDocument/EDocumentDetails.aspx?ID=137&NoSearchContextKey=true>.
21. Yip, N. Y., A. Tiraferri, W. A. Phillip, J. D. Schiffman, and M. Elimelech, 2010. High performance thin-film composite forward osmosis membrane. *Environmental Science and Technology* 44: 3812-3818.