

05

정삼투 기술을 이용한 농업용수에서 해수담수화 적용



박 성 직
한경대학교 지역자원시스템공학과 /
부교수
parkseongjik@hknu.ac.kr

1. 머리말 또는 서언

가용할 수 있는 물의 확보는 21세기에 전세계가 직면하고 있는 가장 심각한 문제중의 하나이다(Savage and Diallo, 2005; Diallo and Brinker, 2010). 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 보고 하고 있다(UNEP, 2006). 2008년 6월 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)의 보고에 따르면 물이 부족한 지역의 인구는 지속적으로 증가할 것이라고 하였다(IPCC, 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. 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, 기수로부터 담수를 생산하는 기술의 개발이 절실하다. 농업, 산업, 인간의 활동에 의해서 사용된 물의 80% 이상이 하수의 형태로 되돌려지며, 이 하수를 통해서 깨끗한 물을 생산하는 기술이 필요하다.

현재 전세계적으로 담수의 69%가 농업용 관개용수로 사용되고 있으며, 국내에서는 그 보다는 낮지만, 47%로 수자원의 절반이 농업용수로 사용되고 있다. 이러한 농업용수의 높은 비율은 기후 변화로 인한 수자원 부족 시 그 영향은 더 클 것으로 사료된다. 또한 기후온난화로 인한 해수면 상

승은 하구 지역에 위한 농업지역의 관계에 있어서 악영향을 미칠 것으로 판단된다.

국민소득 및 삶의 질 향상으로 국민들의 안전한 농산물에 대한 욕구는 날로 증가하여 안전한 농산물을 구매하기 위해 기꺼이 높은 가격을 지불할 용의가 있다는 소비자가 증가하는 등 소비자들의 소비의식이 크게 변해가고 있다. 정부에서는 이러한 국민들의 안전한 농산물의 수요 충족뿐만 아니라, 국내 농산물 수출시 유해물질 검출로 인한 통상마찰 방지, 우리 농산품의 신뢰도 확보를 통한 농산물의 수출증대 등 농산물의 품질과 안전성관리의 필요성이 증대됨에 따라 우수농산물관리제도(GAP; Good Agricultural Practices)를 도입하였다(안열, 2004). 이 제도를 통하여 농산물의 생산 및 단순가공 과정에서 오염된 물 또는 토양, 농약, 중금속, 유해생물 등 식품안전성에 문제를 발생시킬 수 있는 요인을 종합적으로 관리한다. 이렇게 안전하고 양질의 농산품을 생산하기 위해서는 수질 기준을 만족하는 수량과 수질의 확보가 필요하다. 이는 높은 수질의 물을 저비용으로 생산할 수 있는 수처리 시스템 개발을 통하여 가능할 것으로 사료된다.

새만금 간척지의 농경지로 활용을 위해서 간척지 토양의 염분제거 및 개량, 간척지에 적응하는 친환경 고부가가치 작물 선발과 재배법 확립이 해결되어야 할 과제로 받아들여지고 있는 실정(공감코리아 2010.06.01보도)이지만, 2012.01.31.일자 서울 신문 보도에 따르면 새만금호의 수질 기준은 농업용수 수질 기준(4급수)에도 못 미치고 있다. 이러한 상황에서 타개하기 위해서는 무엇보다 양질의 물을 다량으로 확보할 수 있는 기술이 필요하다.

2. 기존 해수 담수화 방식의 문제점

역삼투(Reverse osmosis, RO)막은 수처리, 담수화, 재이용을 위한 가장 상업적으로 우수한 기술이다. RO는 높은 압력(50~70 bar)을 반투과막에 가하여 순수한 물은 통과시키고 이온 및 유기물과 같은 용존성 물질은 걸러낸다. 운전 및 관리를 위해서 사용되는 대부분의 비용 및 높은 에너지는 용존성 물질(e.g., 1가 이온)을 제거하기 위해서 가해주는 고압과 관련이 있으며, 고압을 이용하므로 정수를 얻기 위해서 매우 많은 에너지가 소요된다(4~6 kWh/m³). 또한 높은 압력에서 운전되기 때문에 RO막은 생물학적 막오염(biofouling)으로 인한 운전 비용(처리를 감소와 소요 압력 증가) 및 유지 관리 비용(멤브레인 세척 및 교체)을 증가시킨다.

Nanofiltration(NF)은 담수화 및 물재이용 분야에서 RO 시스템의 대안으로써 점점 사용되고 있다(Shannon et al., 2008; Schaefer et al., 2005). NF 막도, RO 막과 같이 오염된 물을 반투과성 막으로 거르기 위해 압력이 소요되지만, RO 막보다는 압력을 덜 필요로(7~10 bar)한다. Interfacial polymerization에 의해서 NF막 분리층은 0.5~1.5 nm 크기의 공극을 가지고 있어서, 2가의 이온(Ca²⁺, SO₄²⁻), 자연적 유기물질, 합성유기물질들을 거르는데(90~99%) 매우 효과적이지만, 1가의 이온(Na⁺, Cl⁻)에 대해서는 제한적인 효율(50~80%)을 갖고 있다. 이러한 이유로, 염수 및 바닷물의 담수화에서의 NF막의 이용도는 제한적일 수밖에 없다.

특히 농업용수는 Na⁺ 이온 농도가 높은 물로 관개할 경우, Na⁺가 Ca²⁺와 치환되어 배수가 불량한 토양이 되며, 식물 성장을 저해한다(Yermiyahu, 2007). 또한, NF막 역시 압력에 의해서 운전되므로 RO막에서의 생물학적 막오염 문제와 동일하

게 멤브레인의 표면에 생물학적 막오염으로 인한 운전 비용 및 유지 관리 비용이 증가하게 된다. 따라서, NF막과 RO막을 이용한 수처리시 생물학적 막오염을 감소시키기 위하여 한외여과막을 이용한 전처리 공정을 일부 실행중이다. RO 및 NF 기술을 이용한 해수담수화는 아직 고비용이 소요되므로 농업에서 활용되기에는 제한적이다.

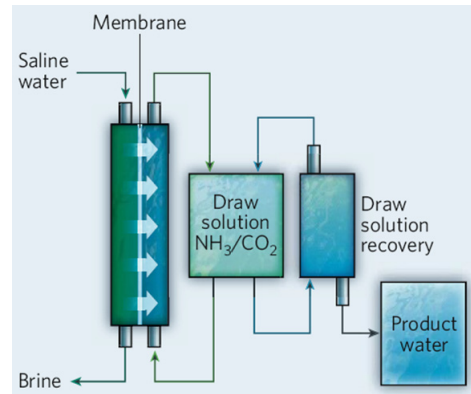
3. 정삼투를 이용한 담수화 및 수처리 기술

RO 방법은 생산수를 얻기 위해 고압펌프를 사용하므로 많은 에너지(4~6 kWh/m³)가 소비되는 반면에, 정삼투(Forward Osmosis) 염분과 물을 분리하기 위해 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.

$$J_w = A(\sigma\Delta\pi - \Delta P)$$

여기에서, J_w 는 물의 플럭스, A 는 멤브레인의 투수계수, σ 는 상수, $\Delta\pi$ 는 삼투압 차, ΔP 는 압력차이다. 정삼투는 ΔP 는 0에 가깝고, 역삼투는 $\Delta P > \Delta\pi$ 이어야 한다.

정삼투식 담수화기술의 원리는 원수농도의 10배 이상 되는 유도용질(draw solute)을 분리막 반대쪽에 주입하여 삼투현상에 의해 원수 내의 물이 멤브레인을 투과하여 고농도 용액 쪽으로 이동하는 것이다. 희석된 유도용액에서 물과 유도용질을 분리하여 생산수를 얻고, 농축된 유도용질은 재사용하게 된다.



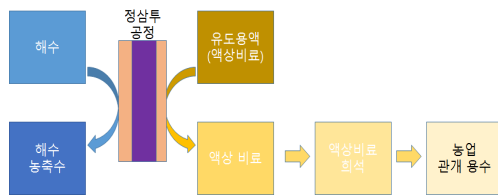
NH₃/CO₂ 유도용액을 이용한 FO공정(McCutcheon et al., 2005)

현재까지 유도 용액으로 Yale대학의 Menachem Elimelech 그룹에서 2005년 제안한 ammonium bicarbonate(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.

4. 비료를 유도용액으로 하는 정삼투 기술

농업에서 정삼투 기술을 이용 시 위에서 언급한 유도용액의 회수 과정 없이 이용이 가능하다. 본 저자가 발표한 논문(Park and An, 2013, An et al., 2016)과 특허(박성직 등, 2016)에서 기술되어 있듯이 유도용액의 회수공정 및 재생공정을 생략할 수 있는 액상비료를 유도용액으로 사용하는 정삼투 기반의 시스템을 이용해서 해수담수화가 가능하다. 개발된 기술을 통해서 적은 에너지를 이용하여 농업 관개수의 생산이 가능하다.

특집 | 정삼투 기술을 이용한 농업용수에서 해수담수화 적용



액상비료를 유도용액으로 사용하는 정삼투 기반의 해수 담수화 시스템

5. 마치면서 또는 결론

이제는 더 이상 해수담수화를 통한 농업관개는 이스라엘과 같은 중동 국가에서만만의 이야기가 아니라고 생각된다. 시설 농업의 경우 물방울 관개를 통해서 적은 양의 관개수로 농작물 재배가 가능하기 때문에 시설 농업에서부터 제한적으로 해수담수화 기술이 적용 가능하다. 또한, 시설 농업 재배 지역에 높은 수질의 농업 용수를 공급함으로써 고부가 가치 농업이 가능할 것으로 판단된다. 수처리 발생 비용(담수화 경우 1톤당 생산 비용은 \$0.55 보고(Yermiyahu et al., 2007) 하수 재이용시 농업 용수 생산 비용은 더 저렴할 것으로 판단)은 고품질 농산물 생산에 따른 소득 증대와 작물 관리 감소에 따른 인건비 감소로 충당 가능할 것으로 판단된다. 앞으로 기후 변화로 인한 물 부족을 대비하여 기술 개발이 시급하며, 우리 학문 분야에서 선제적인 대응이 필요하다.

참고문헌

1. 박성직, 안희경, 홍성구, 강구, 조성욱(2016) 액상 비료를 유도용액으로 사용하는 정삼투 기반의 해수담수화방법. Patent Number: 10-1593266.
2. 안열(2004) 우수농산물 생산을 위한 토양·수질 관리 방안. 농어촌과 환경 14:24-37.
3. An, H. K., Lee, C. G., Park, S. J. (2016) Application of a nanofibrous composite membrane to the

fertilizer driven forward osmosis process for irrigation water use. Accepted in Environmental Technology.

4. Diallo, MS, Brinker, J. (2010) Nanotechnology for Sustainability: Environment, Water, Food and Climate in "Nanotechnology Research Directions for Societal Needs in 2020" (Roco, M, C. Mirkin and M. Hersam, eds.). Springer, Boston.
5. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2008) Climate Change and Water (Bates, BC, Kundzewicz, ZW, Wu, S, Palutikof, JP, Eds.). Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.
6. McCutcheon, JR, McGinnis, RL, Elimelech, M. (2005) A novel ammonia-carbon dioxide forward (direct) osmosis desalination process. Desalination 174:1-10.
7. Park, S. J., & An, H. K. (2013). Forward Osmosis Based Seawater Desalination using Liquid Fertilizer as Draw Solution. Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers, 55(2), 21-27.
8. Savage, N, Diallo, MS. (2005) Nanomaterials and water purification: Opportunities and challenges. Journal of Nanoparticle Research 7:331-342.
9. Schäfer A, Fane AG, Waite, TD. (2005) Nanofiltration: Principles and Applications. Elsevier, New York.
10. Shannon MA, Bohn PW, Elimelech M, Georgiadis J, Marinas BJ, Mayes A. (2008) Science and technology for water purification in the coming decades. Nature 54:301-310.
11. UNEP United Nations Environment Programme. (2006) Challenges to international waters - Regional assessments in a global perspective. UNEP, Nairobi, Kenya.
12. Yermiyahu, U, Tal, A, Ben-Gal, A, Tarchitzky, J, Lahav, O. (2007) Rethinking desalinated water quality and agriculture. Science 318:920-921.