에너지효율적인 해수담수화기술을 위한 나노현상의 이해

DOI: 10.3938/PhiT.21.005

정 유 성

Nano Confinement Effects for the Design of Energy-efficient Seawater Desalination Technology

Yousung JUNG

The water shortage problem is a major global challenge that needs immediate attention. In this article, I briefly review currently available desalination technologies and show that most existing technologies have high energy requirements. In addressing this energy inefficiency, nanotechnology (e.g., carbon nanotubes) can be a useful component to be combined with existing reverse osmosis approaches. Some basic understanding of fast water transport phenomenon, an underlying principle that makes the carbon nanotube a possible candidate for a desalination membrane material, is provided.

서 론

물 부족 문제는 21세기 과학자들이 풀어야 하는 문제 중 더 이상 미룰 수 없는 즉각적인 조치를 요하는 전 지구적인 문제가 되고 있다. 유엔의 보고에 의하면, 현재 지구 인구의 3분의 1 이상이 물 부족의 불편함을 느끼면서 살아가고 있다(그림 1). 이는, 지구의 70% 이상이 물로 덮여 있지만 전체 물의 98% 정도가 염도가 높은 바닷물로서 인간이 사용할 수 없는 물이기 때문이다. 또한, 급변하는 기후의 영향으로 국가 간, 지역간의 수자원의 불균형이 심화되고 있어서, 20세기에 오일머니(oil money) 또는 오일전쟁(oil war)이라는 말이 생겨났다면, 21세기에는 워터머니(water money) 또는 물전쟁

저자약력

정유성 교수는 UC Berkeley 화학과(2005) 박사로서, Caltech(2006-2009) 연구원을 거쳐 2009년부터 현재까지 KAIST EEWs 대학원 교수로 재직 중이다. (ysjn@kaist.ac.kr)

Fig. 1. Water-stressed areas of the world. Approximately 2.3 billion people (40% of the world population) currently live in water-stressed areas (IPCC, 2008).

(water war)이라는 말이 생겨날지도 모른다. 따라서 공급량이 무한대에 가까운 바닷물을 처리해서 담수로 만드는 지속가능하고 저렴한 방법만이 갈수록 심화될 물 부족 문제를 궁극적으로 해결할 수 있는 방법이라는 것이 일반적인 전문가들의 의견이며, 그러한 기술을 ‘해수 담수화’라고 부른다. 특히, 눈에 보이거나 상대적으로 분자량이 큰 오염물질이나 유기물질들은 기존에 개발되어 기술의 완성도가 비교적 높은 다양한 막을 이용해 분리해 낼 수 있는 반면, 이온과 같이 매우 작은 염(0.1-1 나노미터)들을 분리하는 것은 매우 어렵다. 따라서 해수 담수화에서의 핵심 기술을, 바로 이렇게 작은 이온들을 어떻게 선택적으로 분리해 낼 수 있는가로 볼 수 있다.

담수화 기술의 분류

현재 사용되고 있는 해수 담수화 방법들은 증발법, 전기투석법, 그리고 역삼투압법 등으로 크게 나뉘볼 수 있다. 이중 개념적으로 가장 이해하기 쉬운 증발법은 해수를 증발시켜 용매인 물만 포집하고 용질인 염은 잔류하게 되는 성질을 이용하는데, 그 근원은 기원전 4세기(그림 2)로 올라가며 근대적 담수화 장치는 19세기 후반 배위에서 이루어진 담수장치가 시초이며, 세계 대전 중 사막 등지에서 물 공급을 위해 활발히 개발되기 시작하였는데 그 후 중동지역에서의 담수화 장치가 본격화 및 대형화되면서 크게 발전되었다(그림 3). 가장 큰 단점은 에너지

Fig. 2. Cartoon for thermal distillation of the seawater in the early days (Image from Wikipedia).

Fig. 3. Multistage flash distillation. (Image from Wikipedia).

소모량이 다른 담수화법에 비해 매우 (가장) 높다는 점이며, 이 때문에 증발과 같이 에너지원이 풍부하거나 저렴한 곳 이외에서는 생산단가가 높아 다른 기술이 선호되고 있다.

전기투석법(electrodialysis 또는 capacitive deionization)은, 음극과 양극에 전위차를 걸어주고 그 사이로 물을 흘려보내면서 양이온은 음극표면에 음이온은 양극표면에 모아 물을 정화시키는 원리를 이용한다(그림 4). 전극으로는 다공성 탄소전극이 많이 쓰이는데, 물에 포함된 염의 농도에 따라 에너지 사용량이 증가하므로 전기투석법은 기수담수화에 주로 사용되었고 높은 이온농도를 처리해야 하는 해수담수와 실적은 적은 편이다.

역삼투압법은 기수 또는 해수를 (물은 통과시키고 이온은 걸러내는) 반투막을 통해 통과시킴으로써 염을 제거하는 방법인데, 반투막을 사이에 두고 ‘해수칸’에서 ‘담수칸’으로 통과하는 물의 흐름이 삼투압에 반하는 방향이기 때문에 붙여진 이름이다. 표준해수의 경우 35 g/L의 염류농도를 가지고 있으므로 약 25 bar의 삼투압이 형성되고, 이와 더불어 매우 촘촘한 물질로 되어있는 반투막을 통과시키는데 많은 압력이 추가로 필요해서, 총 약 40–60 bar 정도의 압력이 필요하게 된다. 큰 압력은 고 에너지 소모와 직결되므로, 역삼투압법의 가장 큰 단점 중 하나도 역시 높은 에너지 사용량이라 할 수 있다. 앞서 설명한 증발법, 전기투석법에 비해서는 에너지 사용량이 상대적으로 적어 최근 대규모담수화시설 공법으로 많이 쓰이고 있지만, 여전히 높은 에너지 사용량을 낮추려고 하

Fig. 4. Capacitive deionization. Salts and minerals are removed from water by applying an electric field between two porous (often, carbon) electrodes.

는 연구가 활발히 진행되고 있다.

역삼투압의 이러한 고에너지 소모를 해결하기 위한 방법 중 하나로 최근 들어 미래형 해수담수화기술로 많은 관심을 모으고 있는 방식이 정삼투압법(FO; Forward Osmosis)이다.^[1] 정삼투방식이란 반투막을 사이에 두고 해수보다 염도가 높은 고농도의 유도용액(draw solution)을 해수와 접하게 하여 ‘해수칸’의 담수를 ‘유도용액칸’으로 흡수시킨 후 유도용액에서 담수를 분리시키는 방식이다. 인위적으로 농도를 높인 ‘유도용액칸’으로 삼투압으로 인해 해수가 자연히 흘러들어 가므로 25 bar에 해당하는 해수삼투압을 극복해야 하는 역삼투압법에 비해 최소한 그만큼의 압력을 가할 필요가 없어지므로 에너지 사용량이 급격히 감소한다. 2006년에 미국 예일대학 Elimelech 교수팀에서 파일럿 규모의 해수담수화플랜트를 선보인 후, 다양한 연구들이 곳곳에서 진행되고 있지만, 유도용액에서 담수를 분리시키는 게 용이해야 하고, 정삼투방식에 맞는 막을 새롭게 개발해야 하는 등 이미 성숙한 다른 기술들에 비해 초기 단계에 있는 만큼 많은 기술개발이 필요할 것으로 보인다.

탄소나노튜브 기반의 에너지 효율적인 담수화 기술

위의 기술들을 요약하여 현재의 해수담수화 기술이 나아갈 방향을 생각해보면, 가장 중요한 요소가 높은 에너지 사용량을 낮추는 일이라고 볼 수 있다. 현재 널리 사용되는 역삼투압 플랜트 및 열처리 기반 기술들은 이미 최적화가 상당히 되어 있어 여전히 비싼 해수 담수화 생산 단가를 획기적으로 줄일 수 있을 만큼의 효율 향상을 기대하기에는 이미 많이

REFERENCES

- [1] T. Y. Cath, A. E. Childress and A. Elimelech, Journal of Membrane Science **281**, 70 (2006).

Fig. 5. Solvent flows in FO(Forward Osmosis), PRO(Pressure-Retarded Osmosis), RO(Reverse Osmosis). For FO, "FORCE" is approximately zero and water diffuses to the more saline side of the membrane. For PRO, water diffuses to the more saline liquid that is under positive pressure. For RO, water diffuses to the less saline side due to the hydraulic pressure.^[1]

성숙된 기술들이라고도 볼 수 있다. 특히, 이러한 현재 기술들은 단위부피의 물을 생산하는 데 필요한 전체 비용 중 약 30–50% 이상이 고온 또는 고압을 만들기 위한 에너지 사용량이며, 다른 제반 기술이 발전하더라도 에너지의 가격에 따라 담수 생산 단가가 오하러 올라갈 수도 있는 것이다. 즉, 현 기술의 고 에너지 사용 한계 때문에 21세기 물 문제를 해결하기 위해서 또 다른 지속 가능한 에너지 문제의 해결책에 의존해야 하는 상황이 생기는 것이다. 이는 지속가능한 에너지 문제의 관점에서 현 담수화 기술 역시 지속가능하지 못하다는 것을 의미하며, 담수의 공급을 가장 요하는 빈곤국가에서의 기술적 접근이 용이하지 않다는 것을 의미한다.

최근 들어 나노 및 바이오 기술을 해수 담수화 기술에 접목하여 에너지 소모량을 획기적으로 낮춰보려는 노력들이 많은 관심을 갖기 시작하였는데, 아쿠아포린이라고 하는 생체 세포막 내외부의 물수송을 담당하는 막단백질을 응용하려고 하는 노력과(biomimetic, 그림 6),^[2] 이를 인공적으로 모방한 탄소나노튜브(CNT) 채널을 역삼투압 막으로 사용하려고 하는 노력들이 그것이다(carbon nanotubes, 그림 6).^[3] 본 글에서는 본 연구실에서 얻은 연구결과를 중심으로 에너지 효율적인 해수담수화막을 개발하는데 중요한 나노현상의 이해에 대해 간략히 소개하고자 한다.

생체 내에서 세포막을 통해 움직이는 물의 수송속도는 생명과 직결되는 중요한 작용으로서, 아쿠아포린이야말로 자연계에 존재하는 가장 빠른 물 수송속도를 가진 나노 채널이라고 볼 수 있다. 이러한 관점에서 보면, 아쿠아포린과 비슷한 물 수송속도를 보여주는 CNT는 생체모방형 고효율 인공 나노 수 채널이라고 말할 수 있다. 아쿠아포린이나 나노튜브 내에서의 물의 수송속도가 매우 빠르다는 현상에 착안하여, 이들을 역삼투압법의 반투막으로 사용할 경우 기존의 역삼투-반투막을 통과하는 물의 속도를 크게 향상시켜줌으로써 필요로 하는 압력 및 에너지 요구량을 낮출 것이라는 기대가 핵심 원리이다.

Fig. 6. Three technologies that look promising to reduce the energy requirements of desalination by up to 30 percent. [National Geographic 2010]

Fig. 7. Fast transport of water through the carbon nanotubes. Hummer *et al.*, Nature (2001).

나노튜브 내에서의 물의 수송속도가 생체 단백질인 아쿠아포린에서의 수송속도와 비슷하다는 Hummer의 이론적인 예측이^[4] 실험적으로 실현되고 관측된 것은, 2006년 로렌스 리버모어의 바카진(Orgica Bakajin) 그룹에 의해 직경이 1.3–2.0 nm 되는 CNT를 수직으로 배열하여 막을 제조함으로써 이루어졌다.^[5] 이 실험에 의하면, 1기압 정도의 압력 하에 제조된 CNT 막을 통과하는 물의 수송속도가 Hagen-Poiseuille 관계식으로 고전적으로 얻어지는 같은 크기를 갖는 채널에서의 물의 수송 속도보다 약 100–1000배 이상 빠르다는 것이 실제로 관측되었다. CNT 기반의 막의 경우 기계적인 안정성도 뛰어나서 실용화에 적합할 것으로 보고하였고, 이는 Hummer의 이론 예측과 함께 저압 고효율 해수 담수화막의 개발에 있어 새로운 장을 여는 중요한 실험결과가 되었다.

REFERENCES

- [2] <http://www.aquaporin.dk>.
- [3] <http://www.poriferanano.com>.
- [4] G. Hummer, J. C. Rasalah and J. P. Noworyta, Nature **414**, 188 (2001).
- [5] J. K. Holt, H. G. Park, Y. Wang, M. Stadermann, A. B. Artyukhin, C. P. Grigoropoulos, A. Noy and O. Bakajin, Science **312**, 1034 (2006).

Fig. 8. Schematic of the fabrication of the vertically aligned sub-2 nanometer carbon nanotube based membrane. Holt, Park, *et al.*, Science (2006).

물을 이토록 빠르게 통과시키는 CNT 기반의 막이 해수 담수화에 쓰이기 위해서는, 물만을 통과시키고 원치 않는 이온은 걸러내는 선택성을 함께 가지고 있어야 한다. 이 선택성은 막의 표면을 다양한 화학그룹으로 기능화시킴으로써 가능한데, 리버모어 그룹의 추가실험에 의하면 음이온으로 대전된 카르복실기를 도입함으로써 이온배제 능력을 현저히 늘릴 수 있었다.^[6] CNT 막 입구 부분이 음이온을 띠고 있음에도 불구하고 지역적으로 항상 전기 중성도를 유지하고 싶어 하는 간단한 물리 법칙과 도난(Donan) 효과로 인해 물속에 포함된 양이온과 음이온이 모두 함께 걸러지는 것을 관측할 수 있었다. 특히, 물속의 이온 농도가 증가하면 드바이(Debye) 스크리닝 길이가 짧아지면서 이온배제 현상이 줄어드는 것이 실험으로 측정되었고, 본 연구실에서의 전산모사에서도 같은 현상이 발견되었는데, 이는 곧 이온배제 현상의 주된 원동력이 정전기적 효과임을 나타낸다. 하지만 바닷물에서 가장 높은 농도로 존재하는 NaCl과 같은 1가 이온화합물의 경우 이온배제율이 50%에 그쳐 새로운 기능화 방법이 강구되고 있다. 이러한 일련의 중요한 이론 및 실험결과들은 지난 5년 사이에 쏟아져 나오기 시작했으며 이를 바탕으로 CNT 기반의 해수 담수화 막을 개발하겠다는 벤처 회사가 미국에만 최소 2개가 생겨날 만큼 상용화에 한발 다가가고 있다. 2010년에 출판된 National Geographic에 의하면 2013–2015년 사이 즈음에는 상용화된 CNT 기반의 해수담수화막이 나올 것으로 예측되고 있다. 하지만, CNT를 이용한 해수 담수화 막 개발의 핵심은, CNT 내부공간에서 물의 수송속도를 늘리면서 동시에 입구에서의

Fig. 9. CNT/silicon nitride membrane platform for ultrafast nano-filtration of electrolytes. Fornasiero *et al.*, PNAS (2009).

이온 선택성을 함께 늘리는 것인데, 이러한 성질을 만족하는 물질을 개발하기 위해서는, 먼저 CNT 내부에서 물의 수송속도가 왜 빠른지에 대한 기초적인 이해가 필수적이다.

나노크기의 갇힌 공간에서의 물의 동역학 및 열역학

CNT 내부 공간은 소수성을 띠고 있다. 즉 물이 들어가기에 어려운 환경이다. 열역학적인 직관에 의해 추측해 보자면, 일반적으로 분자가 자유로운 액체 상태에서 제한된 나노 크기에 갇힐 경우, 무질서도와 화학결합이 감소되면서 불안정한 상태가 될 것으로 예상되는 것이 일반적이다. 하지만 실험적으로 살펴보면 CNT 소수성 내부공간 안으로 물은 자발적으로 빨려 들어간다. 즉, CNT 내부의 갇힌 공간에서의 물의 자유에너지가 바깥의 자유로운 액체상태에서보다 낮다(안정하다)는 열역학적 추론이 가능하다. 이러한 현상은 오랫동안 실험적으로 알려져 있었음에도 불구하고 최근까지 그 열역학적 원동력이 이해되지 못하고 있었으며, 이에 본 연구팀에서는 분자동력학 시뮬레이션과 2상-열역

REFERENCES

- [6] F. Fornasiero, H. G. Park, J. K. Holt, M. Stadermann, C. P. Grigoropoulos, A. Noy and O. Bakajin, Proc. Nat. Acad. Sci. **105**, 17250 (2008).

Fig. 10. Schematic of the equilibrated water structure confined in carbon nanotubes (A cut-view).

학(2-Phase Thermodynamics)^[7] 엔트로피 분석을 통해, CNT에 갇힌 물의 경우에는 제한된 공간에서 물 분자 간의 수소결합이 약해지면서 밀도가 낮아지고, 오히려 무질서도가 증가하여 더욱 안정되는 특이한 현상을 나타낸다는 사실을 확인하였다.^[8]

분자동역학(Molecular Dynamics) 시뮬레이션은 원자들의 움직임을 기술함에 있어 전자들에 의한 포텐셜을 경험적인 함수 또는 힘장(force field)으로 나타내고, 이 힘장에서의 원자의 이동은 뉴턴방정식에 따라 기술하는 고전적인 동역학 기술 방법이다. 응축상과 같은 많은 수의 원자를 포함하는 큰 시뮬레이션에 주로 사용되며, 나노, 바이오, 에너지 등 많은 문제들의 원자수준에서의 예측 및 이해를 돕는 강력한 시뮬레이션 기법이다. 하지만 포텐셜을 기술할 때 제1원리 양자계산 대신 경험적인 힘장에 의존하므로, 이 힘장의 정확도를 검증하는 일은 매우 중요하며, 자칫 잘못된 결과를 예측할 수 있으므로 항상 주의해야 한다. 이에, 본 연구에서는, 정확한 양자계산(M06-2X 계산)을 통해 물과 CNT의 상호작용을 기술할 수 있는 힘장을 새롭게 개발하였으며, 이렇게 개발된 힘장의 테스트로서 그래핀(Graphene) 위에서 물방울의 접촉각(Contact Angle)을 실험값과 비교하여 비슷한 결과를 얻음을 확인하였다.^[9]

본격적인 시뮬레이션에서는, 10 nm 길이의 CNT를 14,000 개의 평형상태에 도달한 물-박스에 넣어 무한길이의 CNT를 계산했는데, 이렇게 무한히 긴 나노튜브가 필요한 이유는, 끝이 뚫려있는 경우 물이 CNT 내부와 외부를 왔다갔다함으로 인해 갇힌 공간에서의 물을 정의하는 것이 불가능해지기 때문이다. 총 10개의 다른 지름을 갖는 CNT를 계산하였으며(0.8 nm–2.8 nm), 각각의 크기에 대해 35 ns 동안 시뮬레이션

Fig. 11. Equilibrium structures of water confined in different sizes of carbon nanotubes, from 0.8 nm to 2.7 nm.

을 하였다. 즉, 대략 50,000개의 원자를 갖는 시스템을 350 ns 정도 시뮬레이션하였고, KISTI의 전략과제를 통해 수행하였다. 엔트로피 분석은 2PT 방법을 사용하였는데, 이는 시스템의 Density of States(DOS)를 원자들의 자기속도상관함수(Velocity Autocorrelation Function)의 푸리에변환으로 구하고, 이를 양자통계에서의 조화진동자(Harmonic Oscillator) 분배함수에 삽입함으로써 엔트로피를 구하는 방법이다. 2PT(2-상 열역학)이라고 부르는 이유는, 액체의 DOS를 고체와 기체의 선형결합으로 근사하는 데서 오는 이름이며, 2PT를 이용한 엔트로피 계산방법의 검증은, 순수한 물의 엔트로피 절대값을 계산하여 실험값과 비교함으로써 진행하였다.

시뮬레이션 결과에 따르면, CNT 크기에 따라 내부에 갇힌 물의 특성 및 구조가 크게 변하였다. 매우 작은 지름의 CNT에서는 (0.8–1.0 nm) 물의 유효 밀도가 약 0.5–0.7 g/mL로서 매우 낮으며 수소결합의 개수도 물분자당 약 2개 정도만 가짐으로써 4개의 수소결합으로 인해 움직임이 제한되는 액체 상태에서의 물의 회전보다 훨씬 자유로워졌다. 즉, 0.8–1.0 nm 지름의 갇힌 공간 내에서는 물이 수증기와 비슷한 상으로 존재한다고 볼 수 있다. 이보다 큰 1.1–1.2 nm 사이의 지름에서는, 물이 오각형과 육각형 채널을 각각 형성함으로써 얼음에

REFERENCES

- [7] S. Lin, M. Blanco and W. A. Goddard, J. Chem. Phys. **119**, 11792 (2003).
- [8] T. A. Pascal and W. A. Goddard, Proc. Nat. Acad. Sci. **108**, 11794 (2011).
- [9] T. A. Pascal, N. Karasawa and W. A. Goddard, J. Chem. Phys. **113**, 4114 (2010).

Fig. 12. (A) Free energy of water confined in CNT as a function of CNT diameter. (B) Enthalpy vs. entropy compensation as a function of CNT diameter.

가까운 모습을 보였으며, 강한 수소결합으로 인해 물의 회전 엔트로피가 상당히 감소하는 것 역시 얼음과 비슷하였다. 밀도는 오히려 얼음보다 약간 높은 걸로 계산되었는데, 이는 특정한 크기의 갇힌 공간에서는 물이 더 촘촘히 쌓일 수 있기 때문인 것으로 나타났다. 특히 흥미로운 건, 상온임에도 불구하고, 적절한 크기를 갖는 나노 사이즈의 갇힌 공간에서는 물이 얼음 형태로 존재한다는 것이다. 한편, 이보다 더 큰 지름에서는 (> 1.2 nm) 갇힌 공간에서의 물이 일반 액체상의 물과 크게 다르지 않은 밀도와 회전 엔트로피를 주는 것으로 계산되었다.

열역학적인 분석 역시 앞서 설명한 다양한 구조적 특성들과 합치하는 결과들을 보여주었다. 대부분 지름의 CNT에서, 액체상의 자유로운 물이 CNT 내부로 들어가면서 CNT 내벽과 계면을 만들게 되고 이 과정에서 안정한 물분자와 물분자 사이의 수소결합을 깨야 하기 때문에, 이로 인해 엔탈피 증가(불안정)가 초래되었다. 엔트로피 측면에서는, 대부분의 CNT 내부에서 줄어든 물의 밀도와 좀 더 자유로워진 물의 회전운동으로 인해 엔트로피가 증가하는 것으로 나타났는데, 이러한 반직관적인 갇힌 공간에서 물의 엔트로피의 증가(안정)가 엔탈피의 증가(불안정)를 상쇄시키고도 남아, 전체적인 자유에너지는 줄어들었고, 이 점(엔트로피 증가)이 물이 자발적으로 CNT 내부공간으로 빨려 들어가는 원동력으로 밝혀졌다. 하지만, 1.1–1.2 nm 지름인 경우에는, 앞서 언급한 대로 CNT 내부에서 얼음 구조를 형성하면서 오히려 수소결합이 자유액체 상태와 비교했을 때 증가하였

Fig. 13. Number of H-bonds among water molecules inside the CNT for various sizes of CNT.

고 이로 인해 엔탈피적으로 안정화되었다. 반대로 엔트로피적으로는, 얼음과 같은 비교적 자유롭지 못하고 단단한 구조를 형성함으로 인해 엔트로피가 오히려 감소하였다. 하지만 여전히 큰 엔탈피의 기여로 인해 1.1–1.2 nm의 경우에도 갇힌 물의 총 자유에너지가 자유액체상태보다 낮은 것으로 예측됐다.

이렇듯, 물이 나노크기의 소수성 갇힌 공간으로 자발적으로 들어가는 반 직관적 현상이 엔트로피 때문이라는 결과를 처음 도입부분에서 언급한 해수담수화와 연관시켜 볼 수 있다. CNT 내부에서는 물의 수송속도가 현저히 빨라 에너지 효율적이어야 하므로, 내부 엔트로피를 증가시키는 방향으로 나노튜브를 도핑하거나 다양한 나노구조를 상상해봄으로써 향상된 물 수송속도를 얻을 수도 있을 것이다. 한편, 엔트로피가 물의 자발적 적심현상의 원인이라는 것이 밝혀짐으로 인해, (온도가 올라갈수록 엔트로피의 영향이 엔탈피보다 더 중요해지므로) 온도를 조절함으로써 CNT 내부를 물로 채우거나 비워서 온도 제어에 의한 물 전도도를 제어할 수 있고, 이를 센서와 같은 응용분야에 적용할 수 있을 걸로 예상해 볼 수도 있다.

결론

21세기 물 부족 문제를 해결하고 지속가능한 수자원 공급을 위해서는 현재의 해수담수화 기술의 에너지 효율성을 현저히 낮추는 기술이 필요하다. 이는 또한 도시수출 사업인 담수화 산업이 지속가능하기 위해서 에너지와 환경 문제를 빼놓고 생각할 수 없기 때문이기도 하다. 이를 위해 현재 매우 훌륭한 기술로 평가받고 있지만 고 에너지 사용의 한계가 있는 역삼투압법에서 한 단계 나아가 사고의 전환을 통한 신기술들에 대한 꾸준한 투자와 환경 문제에 대한 체계적인 연구가 있어야 한다. 이에 지난 10–20년간 발전해온 나노 및 바이오 기술을 담수화 공학에 응용하는 노력들과 더불어, 담수화문제 해결을 위한 기초과학적인 이해와 연구가 절실하다고 하겠다.