

미래 능동형 수자원 확보 기술



홍 승 관 ▶▶▶

고려대학교 건축사회환경공학부 교수
skhong21@korea.ac.kr

1. 서론

우리나라의 수자원은 댐 및 저수지를 통해 원수를 확보하고 이를 대규모 정수장에서 처리하여 소비자에게 공급하는 중앙 집중형 시스템으로 관리·운영되고 있다. 이를 위하여 전국에 약 18,000개소의 댐 및 저수지를 건설, 운영 중이며 약 90% 이상의 수자원이 유출을 통한 취수로 얻어지고 있다. 하지만 현재의 중앙 집중형 물 공급 시스템은 다양한 수자원의 활용이 어렵고 소비자의 요구에 따른 다양한 수질의 생산수 공급이 불가능하며, 취수점에서 급수점까지의 긴 유로로 인하여 높은 에너지 손실 및 누수율이 불가피하다. 또한 특정 취수원의 지나친 의존도로 인하여 홍수, 가뭄 등의 자연재해 및 수원의 오염과 같은 돌발상황에 대한 대처 능력이 매우 낮은 문제점도 안고 있다.

최근 들어 지구온난화와 맞물린 이상기후 현상의 증가는 수자원 확보의 불확실성 문제를 가중시키고 있다. 따라서 기후변화에 대비한 지속적이고 안정적인 물공급을 위해 수자원 관리의 급격한 패러다임 변화가 오고 있다. 특히 미국, 호주, 싱가포르 등 주요

선진국들은 심각한 미래의 지역적, 시간적 물공급 불균형 문제를 해결하고자 스마트 워터 그리드(Smart Water Grid; SWG)기술을 개발하고 있다. SWG는 일반적으로 IT기반의 지능형 물(수자원)관리 시스템으로 정의할 수 있는데 다양한 수자원의 개발, 통합, 운영 최적화가 핵심 기술이라고 할 수 있다. 구체적으로 기존의 자연형 수자원과 함께 물의 재이용 및 해수 담수화 등 최근 중요성이 부각되고 있는 능동형 수자원을 통합 운영 관리하여 지역내 물 격차를 해소하고 안정적인 물공급을 실현시킬 수 있는 최적화된 지능형 물공급 인프라 구축을 목표로 하고 있다. 본 논문에서는 이러한 SWG기술에 대한 국내외적인 관심에 발 맞춰 능동형 수자원 확보 기술의 현황 및 미래에 대해 체계적으로 정리해 보았다.

2. 국내 능동형 수자원 확보의 중요성

능동형 수자원 확보에 있어 가장 중요한 핵심은 예측 가능한 다양한 수자원을 개발함과 동시에 쓰고 버리는 물을 최소화 하여 단위 구역별(Grid) 물 관리 능력을 증진시킴에 있다. 즉 지역 특성을 고려한 최적의 수자원을 개발하여 단위 지역별 수자원 자립도를 높이는 동시에 급변하는 이상기후 및 재난 상황에 능동적으로 대처함으로써, 생존의 기본 수단인 물에 대한 안전성을 높이고자 한다. 더불어 수자원 관리에 Smart IT 및 첨단 수처리 기술을 도입하여 다양한 소비자의 요구를 충족함은 물론 낭비되어 버려지는

수자원을 최소화하는 물 순환 통합 관리 시스템 구축 및 효율 증대를 포함하고 있다.

하수 재이용량은 430,000m³/일로 이는 전체 하수 중 약 10%도 미치지 못하는 수치이다. 이처럼 수자원의 재생능력은 떨어지는데 반해 대부분의 수자원을 유출에 의한 취수원에 의존하고 있는 현재 수자원 시스템은 물 공급의 불확실성 문제를 가중시키고 있다. 능동형 수자원 확보를 통해 전반적, 국지적 물 부족 현상을 해결할 수 있을 뿐만 아니라, 물의 활용 용도에 따라 품질을 조절하여 불필요한 수처리 비용을 줄일 수 있다. 또한 취수에서 급수까지의 관망 최적화를 통해 수자원 확보 및 공급에 있어서의 비용 및 에너지 절감할 수 있다. 물 재이용을 통한 첨단 수자원 확보 및 관리는 다음과 같은 파급 효과를 가질 수 있다.

- 하수를 적절한 용도로 재활용함으로써, 수질기준 강화에 따른 하수처리 비용 증가 문제 해소
- 처리수준별 분산형 수처리 설비의 통합운영관리를 통한 투자 및 운영 효율성 제고
- 소규모 빗물 저장 및 이용시설, 처리수 재이용시설(중수도) 등을 설치 운영하여, 저품질 물 수요를 지역 내에서 자급 할 수 있는 기반 확보
- 수질, 수량적인 측면에서 안정적인 처리수를 공급, 수자원에 대한 소비자의 신뢰 향상

해외에서는 하폐수의 재이용뿐만 아니라 중동지역을 중심으로 해수담수화를 통한 수자원확보가 활발히 이루어 지고 있다. 국내에서는 도서지역에 소규모로 해수 담수화시설이 설치되어 왔을 뿐 수자원으로써의 활용이 미비했는데 최근 국토해양부의 정책과제로 부산에 4.5만톤 규모의 해수담수화 시설이 2013년초 완공을 목표로 건설이 진행 중이다. 특히 삼면이 바다인 우리나라는 지구온난화로 인한 해안 및 도서 지역의 국지적인 가뭄에 대비하기 위해 해수담수화를 통한 미래 수자원확보가 대안으로 대두되고 있다.

3. 능동형 수자원 확보 기술

첨단 막여과 기술을 중심으로 물의 재이용 및 해수 담수화 등의 능동형 수자원 확보 기술을 그림 1에 정리하였고 각 공정별 에너지 비용을 그림 2에 나타내었다. 그리고 물 재이용 및 해수담수화 기술에 대한 소개 및 발전 동향을 아래 단락에 간략하게 설명하였다.

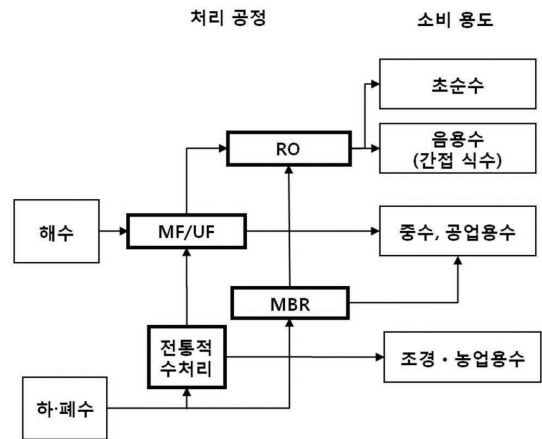


그림 1. 능동형 수자원 확보 기술 및 적용

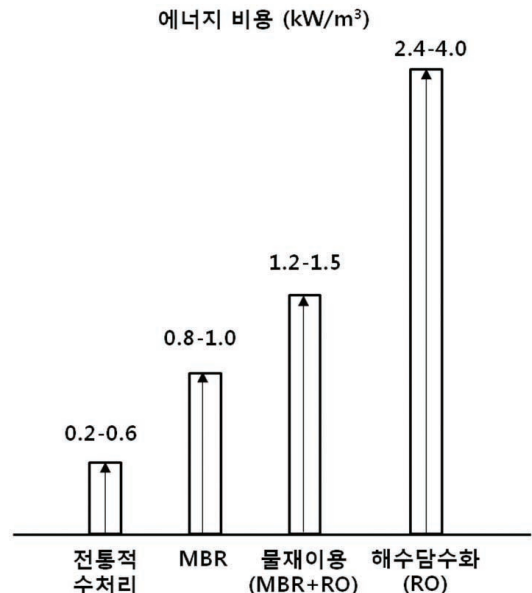


그림 2. 능동형 수자원 확보를 위한 재래식 및 첨단 막여과 기술의 단위생산량당 에너지 비용

3.1 물 재이용 기술

물 재이용은 사용 후 방류된 하폐수를 처리하여 농업용수, 산업용수, 중수 등의 목적으로 재활용함을 의미한다. 물의 재이용이 점차 중요해지는 이유는 기초 수자원의 고갈 뿐만 아니라, 수질 기준이 엄격해지고 그에 따른 재이용수의 활용 용도가 늘어남에서 찾을 수 있다. 해외에서의 물 재이용은 점차 보편화되어 가고 있으며, 현재 전 세계적으로 \$22조 이상의 시장을 이루고 있

다. 용량 면에서 살펴보면 전세계적으로 2000여개 이상의 플랜트에서 연간 약 7.1 km³의 재이용수가 생산되고 있으며 이는 전체 물 공급량의 약 0.2%, 전체 하수의 약 5%를 차지하는 수치이다. 그림 3에서 볼 수 있듯이 전세계적으로 고르게 물 재이용 시장이 확대되고 있음을 알 수 있고 앞으로 매년 최소 6%이상의 성장률이 예상되고 있다.

최근 부각되고 있는 물 재이용기술은 막 생물반응조(Membrane Bio-reactor: MBR)공정이다 (Lesjean and Huisjes, 2008). 기존의 생물학적 처리 공정의 생물 반응조와 멤브레인 기술을 결합한 MBR공정은 높은 처리 수질, 급격한 수질변화에 대한 대응력, 적은 슬러지 발생, 간단하고 콤팩트한 시설 구성, 운영 관리의 자동화 용이함 등 여러 장점을 지녀 미래 SWG에 적합한 하수처리 공정으로 인식되고 있다.

최근에는 역삼투 (Reverse Osmosis: RO)기술이 하폐수의 재이용에 적용되고 있다. 역삼투 공정은 기존의 처리방법에 비하여 높은 수질의 처리수를 얻을 수 있기 때문에 고순도의 공업용수나 음용수 수준의 물을 필요로 하는 경우에 효과적이다. 특히 MBR과 RO공정을 결합한 기술이 주목을 받고 있는데 고형물질 등이 MBR막에 의하여 충분히 처리되었기 때문에 역삼투 공정에 적용하는 경우 전처리 비용을 줄일 수

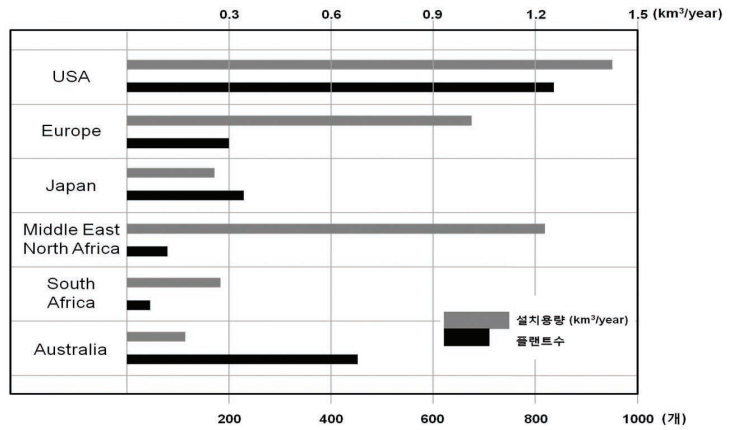


그림 3. 대륙, 국가별 재이용수량 및 물재이용 플랜트 수

있다는 장점이 있다. 이러한 MBR+RO 공정은 물 재이용 시장의 팽창과 더불어 2000년 이후 비약적으로 발전하였다.

3.2 해수담수화 기술

현재 해수담수화 기술 발전 및 시장 확대는 역삼투 (RO)공정을 중심으로 이루어 지고 있다. 1970년대 최초 상용화를 시작으로 점차 기술을 진보시켜 온 역삼투 공정은 소요 에너지를 1970-80년대 약 12 kWh/m³에서 2010년 약 2-2.5 kWh/m³까지 끌어내려 경제성 있는 미래 수처리 공정으로 자리 매김하였다. RO를 통한 해수담수화 설비능력은 1990년대 후반부터 기존의 증발법을 상회하기 시작하였으며 이러한 추세는 앞으로 더욱 확대될 것으로 전망된다. 국제담수협회(IDA)에 따르면, 현재 해수담수화 플랜트 전체 시장 규모는 약 22.6조원에서 2020년에는 약 55조원 시장으로 두 배 이상 급성장할 것으로 예측되고 있다 (그림 4). 전체 해수담수화 플랜트 시장 중에서 역삼투법은 향후 약 33조원 시장을 바라보고 있다.

역삼투 공정은 일반적으로 취수-전처리-RO 막분리-후처리-공급의 과정으로 이루어진다 (그림 5). 해수의 수질 및 취수 방법은 역삼투 공정의 전체 효율

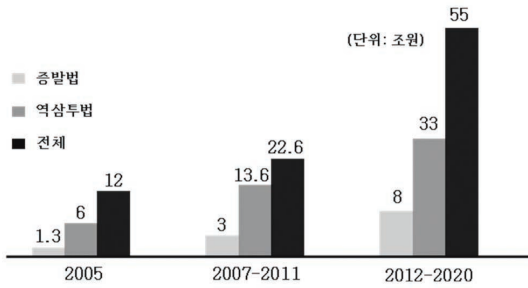


그림 4. 해수담수화 기술별 플랜트 시장 규모

및 처리 비용에 큰 영향을 미친다. 역삼투 공정의 전 처리는 재래식 모래여과나 필터 사용이 가능하지만 최근 들어서는 MF/UF 막을 이용한 전처리가 증가하는 추세이다. 해수 담수화 역삼투 공정의 핵심인 RO 막의 경우 고투과도와 고염분제거율을 달성하기 위한 끊임없는 연구 개발이 이루어지고 있으며(Yu et al., 2010), 병원성 미생물 살균을 위한 염소소독 및 관 부식을 막기 위한 물의 안정화 등 후처리 과정을 거친 후 생산수 공급이 이루어진다.

해수담수화 플랜트의 미래 기술 개발은 에너지 비용 절감에 초점을 맞추고 있다. 저에너지 플랜트 기술은 대용량화, 막오염 저감, 에너지 회수 등을 통해 이루어지고 있다. 구체적으로 대용량 Polyamide(PA)계열의 복합RO 막 모듈, 대용량 펌프 및 대용량 플랜트 설계 기술을 바탕으로 에너지를 저장하고 있다. 또한 Pressure Exchanger 등을 개

발해 에너지를 회수하고 있다. 다양한 평가기술을 이용해 막오염 메커니즘을 규명하고 이에 따른 적절한 RO막 세척기술 개발을 통해 생산성을 향상시키고 있다 (Park et al., 2006).

3.3. 물 재이용 및 해수 담수화 통합시스템

최근 미국 및 일본 등에서 능동형 수자원의 두 축인 물 재이용과 해수 담수화 시스템을 통합하고 이를 통해 에너지를 저장하는 기술을 개발하려는 노력을 경주하고 있다. 그림 6은 그 한 예를 보여 주고 있다. 이러한 통합시스템의 핵심은 정삼투(Forward Osmosis: FO)공정인데 농도 차에 의해 자연적으로 발생하는 삼투압을 이용하여 물을 정제하고 에너지를 저장할 수 있어 기존의 RO막을 이용한 해수담수화 시스템을 보완할 차세대 기술이라 할 수 있다 (Lee et al., 2010). RO-FO통합시스템은 해수를 유도용액으로 FO막을 통해 하수를 적은 에너지로 처리한다 (Cath et al., 2006). 유도용액으로 사용된 해수는 RO 공정을 통해 정제하는데 FO막으로 처리된 하수로 희석되어 일반 해수담수화 공정보다 낮은 에너지에서 물을 생산할 수 있다. 이러한 시스템은 FO와 RO 막 공정을 모두 거치므로 사용 목적에 적합한 최고의 수질을 보장할 수 있을 것으로 판단된다.

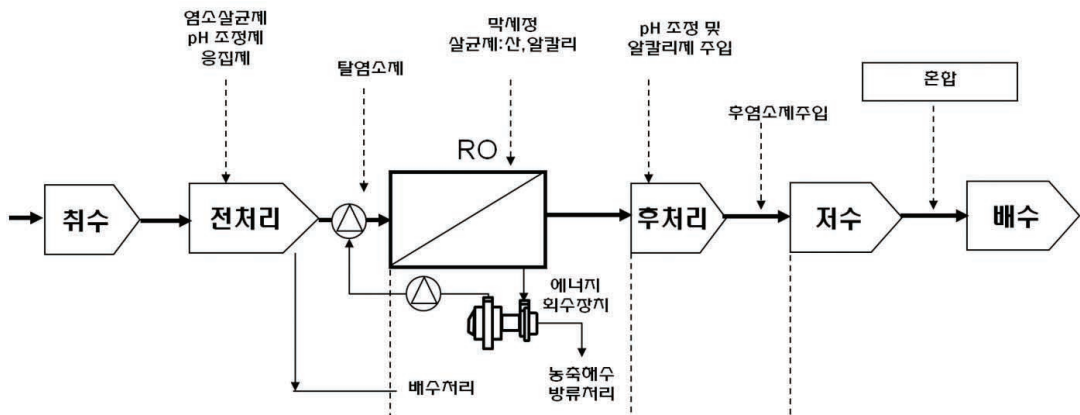


그림 5. RO막을 이용한 해수 담수화 플랜트의 단위 공정

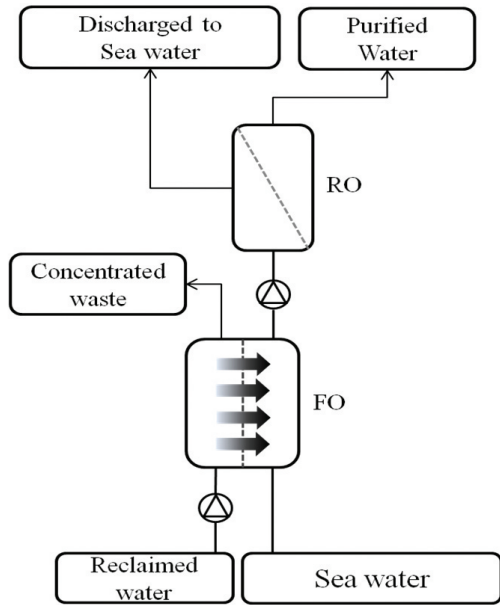


그림 6. FO 공정을 이용한 해수 담수화 및 하수 재이용

4. 결론

전 지구적으로 존재하는 물은 한정되어 있고 수자원은 편재되어 있으므로 안정된 수자원을 확보하는

일은 미래를 위한 국가적 사명이라 할 수 있다. 특히 지구온난화로 인해 심화되고 있는 미래 수자원의 불확실성은 대체수자원, 즉 능동형 수자원 개발을 통해 해소될 수 있다. 따라서 해수 담수화 기술을 개발하여 수자원을 다양화하고 하폐수로부터 깨끗한 물을 얻는 재이용 기술에 대한 수요는 폭발적으로 증가하게 될 것이다. 하지만 지금까지는 이러한 능동형 수자원 확보 기술들이 개별적으로 개발되고 발전되어 왔다. 이제는 개발된 능동형 수자원을 기존의 수자원과 통합 관리하여 수자원의 이용 효율을 최대화하고 에너지 및 처리 비용을 절감하여야 한다. 또한 미국 플로리다의 선행 연구 사례 (Tang et al., 2006)에서 지적된 바와 같이 담수화된 해수 등 능동형 수자원이 기존의 관망 시스템에 미치는 영향을 철저하게 분석하고 통합 배수지 등 안정된 수질을 유지할 수 있는 새로운 물 공급 시스템이 개발되어야 할 것이다. 다양한 차원의 그리드안에서 물 자급률을 극대화하기 위한 지능형 수자원 활용망을 구축하는 스마트 워터 그리드 기술이야말로 물산업 발전을 위해 우리가 선점해야 할 미래형 물관리 기술이다. 🌊

참고문헌

1. Y. Yu, S. Lee and S. Hong, "Effect of solution chemistry on organic fouling of reverse osmosis membranes in seawater desalination", *Journal of Membrane Science*, 351, (2010) 205-213
2. B. Lesjean, E.H. Huisjes, "Survey of the European MBR market: trends and perspectives", *Desalination*, 231 (2008) 71-81
3. C. Park, H. Kim, S. Hong, "Variation and Prediction of Membrane Fouling Index under Various Feed Water Characteristics", *Journal of Membrane Science*, 284 (2006) 248-254
4. S. Lee, C. Boo, M. Elimelech, S. Hong, Comparison of fouling behavior in forward osmosis (FO) and reverse osmosis (RO), *Journal of Membrane Science*, 365 (2010) 34-39.
5. T. Y. Cath, A. E. Childress, M. Elimelech, Forward osmosis: Principles, applications, and recent developments, *Journal of Membrane Science*, 281 (2006) 70-87.
6. Z. Tang, S. Hong, W. Xiao and J. Taylor, "Characteristics of Iron Corrosion Scales Established under Blending of Ground, Surface, and Saline Waters and Their Impacts on Iron Release in the Pipe Distribution System", *Corrosion Science*, 48 (2006) 322-342