

물부족 해결을 위한 해수담수화와 물 재이용 기술

김인수 · 오병수*

광주과학기술원 환경공학과 · *해수담수화플랜트사업단

Technologies of Seawater Desalination and Wastewater Reuse for Solving Water Shortage

In S. Kim · Byung Soo Oh*

Department of Environmental Science & Engineering, Gwangju Institute of Science and Technology

*Center for Seawater Desalination Plant

1. 해수담수화기술의 배경

현재 전 세계는 지구온난화가 현실로 나타남에 따라 태풍, 가뭄, 계절의 변화, 생태계의 변화 등에 어려움을 겪고 있는 실정이며, 특히 인간이 현재와 미래에서 사용할 수 있는 물과 에너지는 연구와 사업의 가장 중요한 핵심 키워드로 부각되고 있다. 향후 전 세계적으로 인구증가와 산업의 발달 및 오염의 확산으로 지표수 및 지하수에 의한 용수의 공급은 심각한 위기를 맞을 것으로 예상된다. 2025년이 되면 거의 모든 국가들이 물 부족을 겪게 되며 그 중 절반의 국가들은 물자원의 고갈을 맞을 것으로 예견된다. 우리나라의 경우도 물 부족이 예상되며, 따라서 수자원 공급에 대한 국가적 대책마련이 필요하다.

지구상에 존재하는 물의 양은 약 13억 8,500만 km³으로 추정되며, 이 수자원 중 97%를 차지하고 있는 해수의 활용은 오래전부터 관심의 대상이 되어 왔다. 나머지 3%인 민물은 대부분이 빙산, 빙하, 지표수, 지하수, 대기 등에 분포한다. 현재 인류가 사용할 수 있는 민물의 양은 6,500 km³이다. Fig. 1은 지구상의 물 분포 현황을 나타낸다. 지구상 수자원의 대부분을 차지하는 해수를 통한 수자원 확보는 매우 중요한 의미를 지닌다.

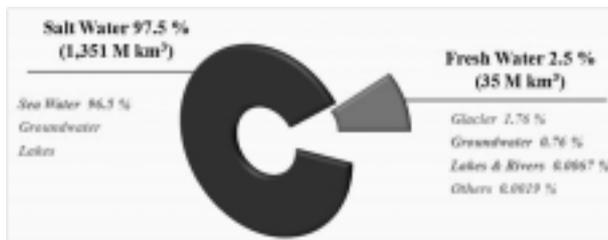
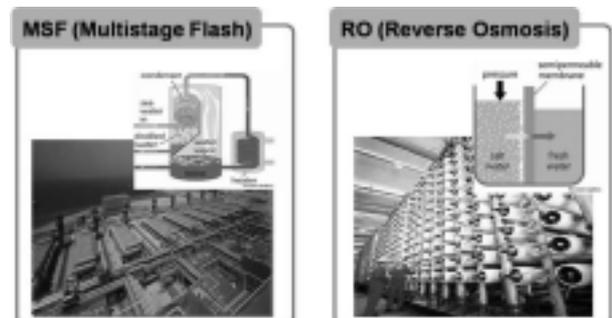


Fig. 1. 지구의 수자원 분포.

2. 해수담수화기술

해수담수화의 가장 대표적이고 주로 사용하는 기술은 증발법과 역삼투법이다(Fig. 2). 증발법은 에너지 가격이 안정되고 값싼 중동지역에 편중되어 사용되고 있으며, 그 이외의 지역에서 증발법에 의한 담수생산 가격은 비교적 높은 편이다. 최근에는 해수담수화플랜트의 대형화 추세에 따라 담수·발전복합플랜트를 이용한 담수화 플랜트의 건설이 시도되고 있다. 중동지역의 경우, 담수가 필요한 지역은 동시에 전기도 필요한 곳이 많기 때문에 발전플랜트와 담수플랜트를 개별적으로 건설하기보다는 2종의 플랜트를 동시에 병합시켜 건설하여 에너지 이용율을 증가시킨다. 통상적으로 발전소 배기 스팀을 재이용하고, 복수기의 냉각수열을 담수화 플랜트의 열원으로 활용하고 있다. 담수화 방법 중에서 역삼투법에서는 물은 투과시키지만 물에 용해되어 있는 용질(이온, 분자)은 거의 투과시키지 않는 성질을 가진 반투막을 염수와 담수를 접하게 하면 담수가 염수측에 이동하여 희석하려고 한다. 이러한 화학적 포텐셜에 의한 자연현상을 삼투작용이라고 한다. 물의 이동으로 용질의 농도가 높은 염수측에 작용하는 압력을 삼투압이라고 한다. 이러한 삼투압 이상의 압력을 해수쪽에



(a) 증발법

(b) 역삼투법

Fig. 2. 증발법과 역삼투법.

E-mail: iskim@gist.ac.kr

Tel: 062-970-3881

Fax: 062-970-2584

가하여 반투막을 통과시켜 담수를 얻는 방식을 역삼투법이라고 한다. 증발법에 비하여 역삼투법은 에너지 소모량이 낮고, 설치 및 운전방식이 비교적 쉽다는 장점이 있다. 역삼투법의 이러한 장점 때문에 최근 역삼투식 해수담수화기술에 대한 관심이 매우 높아지고 있다.

역삼투식 해수담수화플랜트의 기본 공정은 Fig. 3과 같이 취수-전처리-역삼투막처리-후처리로 크게 나누어 볼 수 있다. 이러한 기본 공정에서 전처리 공정이 차지하는 비중은 운영 효율적인 측면에서 바라볼 때 매우 큰 역할을 담당하고 있다. 기존의 표준 전처리 공정의 경우 일반적인 수처리에 적용되고 있는 혼화/응집 공정과 여재(media)를 이용한 여과공정을 결합하여 운영되고 있으며, 여과공정의 효율을 높이기 위하여 여재의 구성을 달리하는 MMF (Multi Media Filtration) 방식이 널리 적용되고 있다. 최근에는 수처리 공정에 급속도로 적용되고 있는 정밀여과막/한외여과막(MF/UF) 공정을 활용한 전처리 공정 적용방안이 새로운 개념의 해수담수화 전처리 기술로 고려되고 있다. 이러한 전처리 공정의 운영 결과는 해수담수화의 핵심 공정인 역삼투막 공정에 직접적인 영향을 미치기 때문에 이에 대한 최적화가 매우 중요하게 고려되어야 한다.

본고에서 다루고 있는 “막중심”이라는 표현은 해수담수화기술에서는 전처리공정과 주공정을 막을 활용하는 것을 의미할 수 있다. 그러나 전처리의 경우, 앞서 설명한 주공정의 증발법과 역삼투법과 같이 명확하게 성능의 구분을 하여 설명하기는 다소 어려운 점이 있다. 그 이유는 해수담수화 공정에서 현재까지 표준화된 전처리 공정이 규정되어 있지는 않으며 해수의 수질에 따라 여러 조합의 전처리 방법이 사용된다. 즉, 해수담수화플랜트로 유입되는 수질 조건을 고려하여 각 단위 공정을 최적으로 조합하는 것이 가장 중요하다고 할 수 있다. 따라서 최근에 막중심 전처리 공정에 대한 관심이 높아지고 있기는 하나, 기존 여재를 이용한 전처리 공정의 효율을 향상시킬 수 있는 집적화 등의 연구 역시 활발하게 진행되고 있다. 따라서 본고에서는 세계 해수담수화기술의 시장 현황과 예측, 그리고 발전 전망에 대하여 명확하게 구분지어 살펴볼 수 있는 막중심(역삼투식) 해수담수화플랜트에 대하여 주로 다루고자 한다.

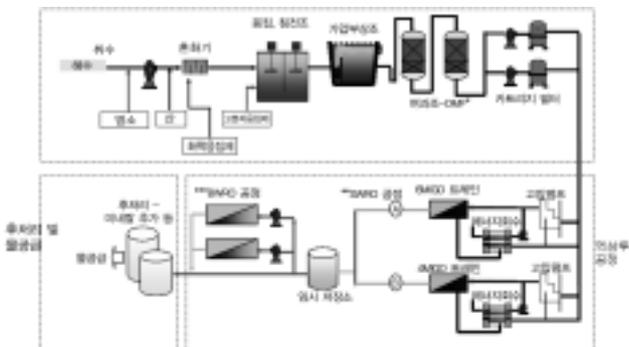


Fig. 3. 해수담수화플랜트 공정도 예.
 (*DMF - Dual Media Filtration, **SWRO - Seawater Reverse Osmosis, ***BWRO - Brackish Water Reverse Osmosis)

3. 해수담수화플랜트기술의 해외 시장 전망

해수담수화플랜트의 총 규모는 1965년부터 지속적으로 성장하여 현재 약 4000만 톤/일 규모이다. 2005년 기준으로 해수담수화플랜트 중에서 역삼투 방식이 45%를 차지하고 있으나 2015년에는 전체의 61%를 차지할 것으로 예상되고 있다. 특히 유가상승에 따라서 상대적으로 에너지 소모량이 적은 역삼투 방식에의 선호도가 높아지고 있다. 해수담수화플랜트 관련 시장의 2005~2015 자료를 바탕으로 하여 국가별 해수담수화플랜트 시장예측을 살펴보면 Fig. 4와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 중동의 비중이 여전히 클 것으로 예상되며, 2015년까지 지역별로 70~180%까지 성장이 예상된다. 운전 유지관련 시장은 플랜트 시장과 밀접한 관련을 맺고 있으므로, 플랜트의 시장 성장과 유사하리라 판단된다.

해수담수화 시장에서 생산수 생산단가를 살펴보면, 실제로 최근의 경향을 살펴보면 규모에 따른 영향도 있지만 2005년 이후에는 톤당 처리단가가 높아지는 현상이 나타난다. 그러나 2006년도 이후 다시 감소하는 경향을 보이며, 2008년에는 약 0.7 US\$/m³로 예측된다(Fig. 5). 기술혁신을 통한 단가상승이 시장을 주도하기 위한 필수조건으로 부각되고 있음을 알 수 있다. 해수담수화 시장은 지속적인

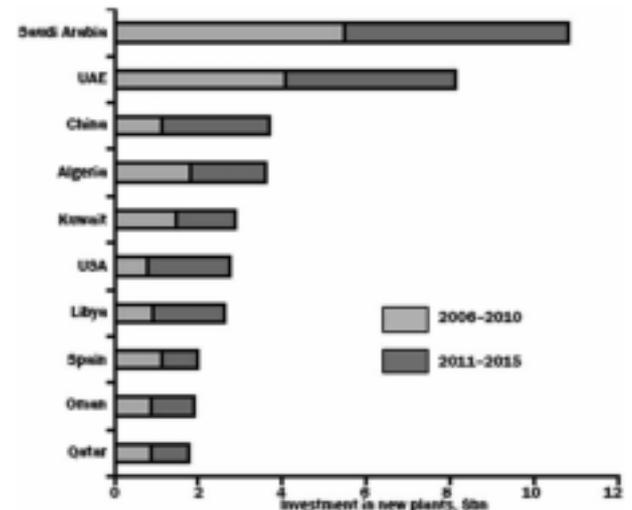


Fig. 4. 국가별 해수담수화 시장예측.¹⁾

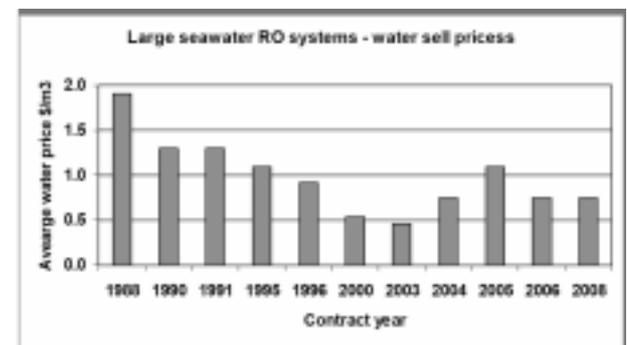


Fig. 5. 해수담수화 처리비용의 변화추세.¹⁾

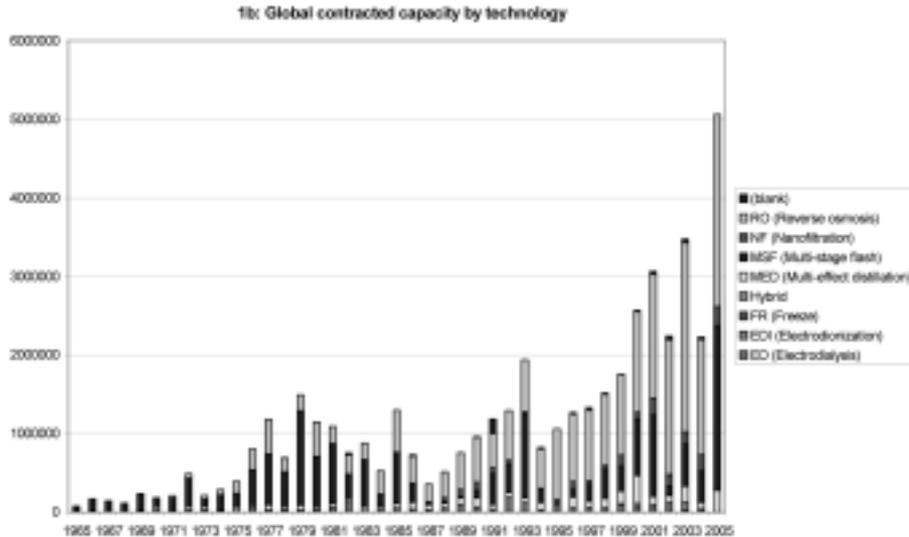


Fig. 6. 담수화 수주 용량.¹⁾

로 증가하는 추세이나 이러한 증가추세를 둔화시킬 수 있는 장애요인들이 있는데, 고유가 및 원자재 비용 상승으로 인한 비용 상승 요인이 발생하고 있으며 이에 따라서 해수담수화플랜트 건설이 제한될 수 있다. 또한 전문인력의 인건비는 지속적으로 상승하고 있어 운영비에 악영향을 미치고 있다.

해수담수화 공정별, 연도별 담수화 수주용량을 살펴보면, Fig. 6에서 보는 바와 같이 전체 담수화 공정에서 차지하는 역삼투방식의 담수화 공정의 증가는 1990년대 후반 이후 뚜렷한 상승세를 보인다. 우리나라의 경우, 두산중공업이 중동국가 등의 담수 설비 시장에서 약 30%의 시장점유로 세계 1위를 점하고 있으며, 해수담수화의 기술 및 공장설비의 기술은 상당한 수준에 도달하고 있다.

4. 해수담수화플랜트기술의 발전 방향

앞서 살펴본 것과 같이 현재 세계 시장에서 해수담수화플랜트 기술은 기존의 증발법에서 역삼투 방식으로 빠르게 전환되고 있다. 여기서 한 가지 중요하게 고려해야 할 점은 여러 선진국의 경쟁업체들이 역삼투식 해수담수화 기술을 확보하고자 노력하고 있다는 것이다. 즉, 고유가와 물가상승을 고려할 때 역삼투식 해수담수화플랜트기술에서도 에너지 효율성을 극대화하는 전략이 반드시 필요한 것이다. 국내의 경우, 이러한 기술력 확보를 위하여 국토해양부에서는 2006년에 새롭게 수립한 건설교통 R&D 혁신로드맵의 “미래차기 창출”이 가능한 10대(VC-10) 과제 중의 하나로 해수담수화플랜트사업단(한국건설교통기술평가원 지원)을 2006년 12월 29일 발족하였다. 사업단의 최종목표는 해외시장에 경쟁력 있는 해수담수화플랜트 기술을 5년의 연구기간 내에 개발하는 것이다. 시장 경쟁력을 확보하기 위해서는 원가를 낮추고 성능은 올리는 전략이 필수적이다. 즉, 해수담수화플랜트 기술의 경쟁력은 건설 및 유지관리 기술의 단가를 낮추고, 담수생산효율을 향상

시킴으로써 확보될 수 있다. 따라서, 사업단은 이를 위해 Fig. 7과 같이 3L(대형화-Large Scale, 저에너지-Low Energy, 저막오염-Low Fouling)이라는 3대 기술전략을 기반으로 하고 있다. 대형화는 규모의 경제를 이루고자 하는 단위 기술(펌프 및 막모듈)과 역삼투공정의 대형화를 의미하며, 저에너지는 시스템 최적 조합 및 에너지회수장치 적용 등으로 플랜트의 에너지 소모율을 최소화시킬 수 있는 전략을 말한다. 마지막으로 저막오염은 막중심 공정의 가장 큰 문제점인 막 오염을 최소화하는 것을 의미한다. 3 L 중 저막오염은 현재까지도 연구중심의 기술개발 측면이 강하기 때문에 앞으로 해야 할 일이 많은 분야라고 할 수 있다. 저막오염을 이루기 위해서는 전처리의 최적화, 막 재질 및 성상, 막 세정, 막 모듈 구성 등 다양한 접근이 가능하며, 특히 전처리를 통해 역삼투막의 오염을 최소화해야 한다. 이를 위해서는 역삼투막 공정 유입수에 대한 막오염도를 평가할 수 있어야 한다. 현재 역삼투막 공정의 설계지침 시 사용되는 막오염 지수로는 SDI와 MFI 등이 있지만 이를 통해서 막오염의 원인 및 정도 등 구체적인 막오염 현상을 예측하는데 한계가 있다. 이에 따라 수질특성을 고려



Fig. 7. 해수담수화플랜트사업단의 기술 목표.³⁾

한 새로운 이론의 신개념 막오염 지수 예측 모델 개발이 반드시 필요할 것으로 보인다.²⁾

5. 하수 재이용 기술의 개요

세계적인 물부족을 해결하는 다른 하나의 대안은 하수 재이용이다. 하수 재이용이란 하수처리장에 유입되는 하수를 여러 가지 공법을 사용하여 처리한 후 사용 용도에 맞게 재이용하는 것을 말한다. 하수 재이용의 범위는 크게 농업용수, 조경수, 공업용수, 지하수충전용수, 환경용수, 음용수, 그리고 비 음용수 등이 있으며 조경수와 비 음용수를 합쳐서 중수도라고도 한다. 구체적으로, 농업용수에는 농작물용수와 상업용 종묘용수가 있고 조경수에는 공원용수, 골프장용수, 그린벨트용수, 그리고 학교마당용수가 있으며 공업용수에는 냉각용수, 보일러공급용수, 그리고 공정용수가 있다. 지하수충전용수의 경우 지하수재저류용수와 바닷물침입억제용수가 있으며 환경용수의 경우 호수용수, 늪용수, 습지용수, 그리고 하천유지수가 있다. 음용수에는 지하수와 섞는 음용수와 파이프를 통한 직접공급 음용수가 있고 비 음용수에는 화장실용수 등이 있다(Water Reuse, 2006).

6. 하수 재이용의 국내외 현황

국제적으로 사용되고 있는 하수 재이용수 현황은 Fig. 8 도표와 같다. 현재 물 재이용량 혹은 수요량이 가장 많은 국가는 미국이며 그 다음으로 싱가포르이다. 이스라엘, 일본, 그리고 아랍에미리트연방도 물 재이용량 혹은 수요량이 많은 나라이다.

국내의 경우 2006년을 기준으로 Fig. 9와 같이 총 하수처리량은 18,178,677 m³/day이고 그 중 재이용량은 6.8%인 1,242,344 m³/day이다. 그중 청소용수는 117,805 m³/day이고 조경용수는 119,608 m³/day이며 친수용수는 257,248 m³/day이고 농업용수는 110,525 m³/day이며 공업용수는 43,534 m³/day이다. 국내 시도별로 진행되고 있는 하수처리량, 재이용량, 그리고 재이용율은 Fig. 10과 같다. 하수처리량을 볼 경우 서울특별시와 경기도가 각각 4,863,469 m³/day와 3,965,177 m³/day로 제일 많고 부산광역시와 대구광역시가

1,341,222 m³/day와 1,242,909 m³/day로 그 다음으로 많지만 재이용량의 겨우 경기도와 대구광역시가 각각 299,599 m³/day와 208,255 m³/day으로 제일 많고 인천광역시가 148,198 m³/day로 뒤를 이어서 많다. 하수처리수 재이용율은 인천광역시가 21.2%으로 제일 크고 그 다음으로는 충청남도과 대구광역시가 각각 18.7%와 16.8%로 뒤를 잇는다. 서울특별시나 부산광역시의 경우 재이용율은 1.7%와 5%에 불과하다.

국외 물 재이용 시장은 2005~2015년 기준으로 19,400,000 m³/day에서 54,500,000 m³/day(또는 US 달러로 280억 capex)로 증가할 것으로 추정하며 국내 시장의 경우 다음 도표와 같이 2016년 기준으로 하수 재이용량은 12.4억톤에 이르고 시장규모는 3,707.6억원에 이를 것으로 추정하고 있

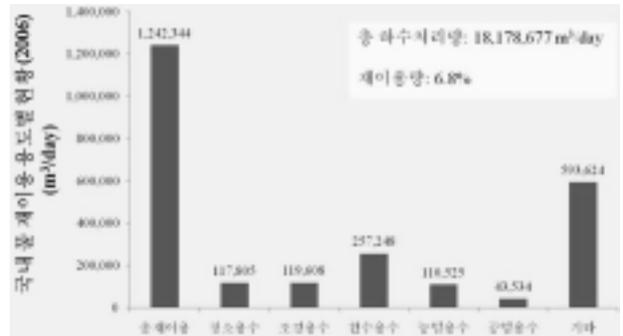


Fig. 9. 국내 물재이용 용도별 현황(하수도통계(2006). 2007_환경부).

시도	하수처리량 (m³/일)	재이용량 (m³/일)	처리수 재이용률 (%)
서울특별시	4,863,469	90,807	1.7
부산광역시	1,341,222	67,191	5.0
대구광역시	1,242,909	208,255	16.8
인천광역시	697,638	148,198	21.2
광주광역시	666,668	21,068	3.2
대전광역시	621,863	8,990	1.4
울산광역시	499,848	19,226	4.0
경기도	3,965,177	299,599	7.6
강원도	466,369	25,071	5.5
충청북도	483,363	36,622	7.4
충청남도	434,880	81,143	18.7
전라북도	683,848	69,024	8.8
전라남도	406,628	35,766	9.0
경상북도	937,168	93,144	9.9
경상남도	849,232	71,982	8.5
제주도	119,382	1,395	1.1

Fig. 10. 국내 시도별 물 재이용량(하수도통계(2006) 2007_환경부).

나라	연도/분현연도	물 재이용량/재이용 수요량 (Mm³/년)	재이용률 (%)
미국(California and Florida)	2002 or 2004	1,482	-
일본	2004	118.9	-
싱가포르	2004	499.7	-
그리스	2004	7.3	-
키프로스	1997	23	11
이스라엘	1995	200	10
쿠웨이트	1997	69	15
아랍에미리트연방	1999	165	9
카타르	1994	25	9

Fig. 8. 국가별 물재이용량 비교.⁴⁾

용도별 구분	재이용량 추정 (억m³)	시장규모 (억원)
공업용수	4.4	1,315.6
생활용수	4.1	1,225.9
하천유지용수	3.3	966.7
농업용수	0.6	179.4
합계	12.4	3,707.6

기준가격: 299원/톤

Fig. 11. 용도별 물재이용량 및 시장 규모 추정.⁵⁾

다. 용도별로는 공업용수, 생활용수, 그리고 하천유지용수가 가장 많은 부분을 차지할 것으로 추정하고 있다.

7. 하수 재이용 기술의 현황

하수를 처리하여 재이용수로 사용하는 경우 처리수의 용도에 따라 처리공법을 다양하게 적용할 수 있다. 광주과학기술원을 주관으로 2001년 10월부터 2007년 3월까지 진행한 용수 재이용 기술 개발과 하수 재이용을 위한 표준 공정 개발은 국가 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환이다. 본 연구는 용도별 용수에 따른 핵심기술 및 표준공정을 개발한 것으로써 하수 재이용수의 용도에 따라 크게 중수도, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수 및 음용수로 나누고 그에 따른 표준공정을 개발했다.

Fig. 12는 용도별 용수에 따른 표준공정개발 process이다. 중수도의 경우 생물막반응조(MBR)를 주 process로 하고 염소소독 혹은 AOP 처리하여 국내외 중수도 수질기준에 부합되는 공정을 개발했다. 공업용수의 경우 기존의 MBR 공정에 전처리를 통한 RO 시스템 설치 혹은 NF 시스템 설치를 통해 원하는 수질의 공정을 확립했다. 농업용수에서는 SAT공정과 독성모니터링 공정이 세가지 표준공정에 모두 들어가고 MBR 혹은 AOP 공정을 SAT공정 앞부분에 연결하는 식으로 확립되었다. 하천유지용수의 경우 MBR과 독성모니터링공정이 모두 들어가며 하천유지용수의 수질기준을 위해 그중 두 개의 공정에는 RO 혹은 NF 공정을 추가하는 식으로 진행했다. 음용수의 경우 재이용수의 높은 수질기준이 요구되기 때문에 모든 공정에 MBR, RO (or NF), 그리고 독성모니터링 공정이 적용된다. 그중 한가지 공정에서 AOP 공정을 추가했다.

하수 재이용수를 산업뿐만 아니라 생활가운데서도 폭넓게 사용하려면 그에 따른 재이용수의 안전성이 가장 중요하다. 하수 재이용수가 직간접적으로 생태계 혹은 인체에 부정적인 영향을 준다면 사용자의 입장에서는 거부감이 클 수밖에 없다. 따라서 재이용수 특히 생태계와 인체에 집·간접적으로 사용되는 용수에 대해서는 안정성 테스트를 진행해야 한다. 최근에 가장 문제점으로 떠오르고 있는 것은 재이용수에 포함되어 있는 미량오염물질이다. 이 미량오염물질은 주로 trace organics, 중금속, PPCP, EDC, 그리고 non-degradable chemicals 등이 포함하고 있는데 재이용수에 ng/L(ppb) 혹은 µg/L(ppb) 수준으로 존재한다. 다만 환경농도수준에서 미량오염물질이 생태계 혹은 인체에 어떤 구체적인 영향을 미치는지는 거의 밝혀지지 않았다.^{6,7)} 따라서 미량오염물질에 대한 환경농도수준에서의 구체적인 영향을 밝혀내는 것은 향후 계속적으로 진행해야 할 과제이다. Fig. 13은 향후 하수 재이용에 대한 세 가지 중요한 과제를 제시하고 있다. 하수처리의 경우 미량오염물질의 제거를 고려한 공정이 필요하며 건강관련 평가의 경우 환경농도에서의 영향을 찾는 것이 중요하다. 또한 보다 많은 사람들에게 하수 재이용수에 기본 상식과 안정성에 대해 적극적으로 홍보하는 것이 필요하다.

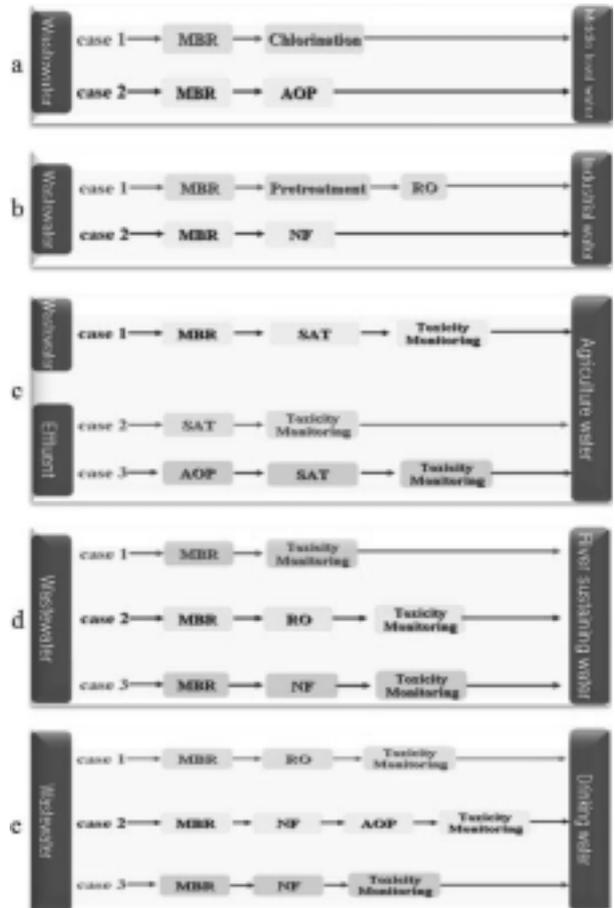


Fig. 12. 용도별 하수처리 공정. (a) 중수도를 위한 공정 (b) 공업용수를 위한 공정 (c) 농업용수를 위한 공정 (d) 하천유지용수를 위한 공정 (e) 음용수를 위한공정.

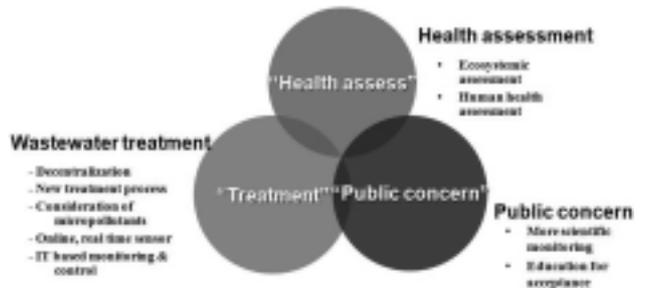


Fig. 13. 물 재이용의 중요 과제.

8. 결론

현재 세계 시장에서 해수담수화플랜트 기술은 기존의 증발법에서 역삼투 방식으로 빠르게 전환되고 있으며 선진국의 경쟁업체들은 역삼투식 해수담수화 기술을 확보하고자 노력하고 있다. 막중심의 역삼투식 해수담수화플랜트 기술은 저에너지 목표 달성을 위하여 부품과 단위 공정의 대형화를 지향하고 있다. 또한, 막중심 기술에서 가장 큰 문제점인 막오염 문제를 해결하는 노력도 계속 기울여야 한다. 국내의 해수담수화플랜사업과 유사한 유럽(이탈리아, 프랑스, 네덜란드, 독일, 이스라엘, 호주 참여)의 MEDINA

(Membrane-Based Desalination: An Integrated Approach) project는 2006년에 시작하였으며 약 60억원의 정부 지원으로 저막오염 기술에 중점을 두고 연구를 진행하고 있다. 국내에서도 이러한 세계 기술 성장과 경쟁하고 우위를 차지하기 위해 체계적인 기술 전략을 세우는 것이 필수적이다.

물 재이용 기술은 현재 정수, 하수 및 폐수뿐만 아니라 해수담수화에 사용되는 기술을 동일하게 적용하여 원하는 수질의 물을 생산할 수 있다. 특히 해수담수화플랜트 기술에서 제시한 RO 처리 기술은 하수 및 폐수 재이용 분야에서 급속하게 성장하고 있으며 수자원 확보에 대한 중요 기술로 부각되고 있다.

해수담수화와 물 재이용 기술은 기존의 먹는물 생산 기술과는 달리 새로운 수자원을 개척한다는 의미가 있다. 한국형 해수담수화 및 하수 재이용 플랜트 기술이 현재 물 산업 육성과 미래의 물부족 문제를 해결하기 위한 중요한 열쇠가 될 수 있을 것으로 기대해 보면서 본고를 마치고자 한다.

참고 문헌

1. IDA, The 19th IDA Worldwide Desalting Plant Inventory, Media Analytics, Oxford, UK(2006).
2. Kim, S., Cho, D., Lee, M-S., Oh, B. S., Kim, J. H., and Kim, I. S., SEAHERO R&D program and key strategies for the scale-up of a seawater reverse osmosis(SWRO) system, *Desalination*, **238**(1-2), 1~9(2009).
3. 국토해양부, 해수담수화플랜트사업단 상세기획 보고서, 2007.
4. Takashi Asano, Franklin L. Burton, Harold L. Leverenz, Ryujiro Tsuchihashi, and George Tchobanoglous, *Water Reuse*. Metcalf & Eddy/AECOM(2006).
5. 환경부, 물순환 이용체계 개선에 관한 연구용역 최종보고서, 2007
6. Kim, S. D., Cho, J., Kim, I. S., Vanderford, B. J., Snyder, S. A., "Occurrence and removal of pharmaceuticals and endocrine disruptors in South Korean surface, drinking, and waste waters," *Water Res.*, **41**, 1013~1021(2007).
7. Ren, X., Lee, Y. J., Han, H. J., Kim, I. S., "Effect of tris(2-chloroethyl)-phosphate(TCEP) at environmental concentration on the levels of cell cycle regulatory protein expression in primary cultured rabbit renal proximal tubule cells," *Chemosphere*, **74**, 84~88(2008).