

하·폐수 처리용 MBR 분리막 기술 및 산업동향과 발전방향

조 일 형 · 김 지 태[†]

경기대학교 환경에너지시스템공학과 하·폐수고도처리기술개발사업단
(2012년 12월 4일 접수, 2013년 2월 14일 수정, 2013년 2월 20일 채택)

Trends in the Technology and Market of Membrane Bioreactors (MBR) for Wastewater Treatment and Reuse and Development Directions

Il Hyoung Cho and Ji Tae Kim[†]

Department of Environmental and Energy Systems Engineering, R&D Center for Advanced Technology of Wastewater Treatment and Reuse, Kyonggi University, Suwon 443-760, Korea

(Received December 4, 2012, Revised February 14, 2013, Accepted February 20, 2013)

요 약: MBR 기술은 지난 20여 년 동안 처리성과 효율성 그리고 비용절감 측면에서 빠른 속도로 발전하고 있다. 또한 안정적인 하수처리와 하수재이용관점에서 핵심기술로 널리 인식되고 있다. 본고에서는 MBR 기술의 개발과 상업적 응용에 관한 발전과정을 재조명하고 세계 시장의 전망을 제시하고자 한다. 주요 적용기술에 대해 다음 5가지 측면에서 검토하여 제시하였는데 1) MBR 기술의 진화, 2) MRBs의 상업용 기술, 3) 대용량 MBR 플랜트 설치 사례, 4) MBR 시장의 성장, 5) 기술의 발전방향 순으로 제시하였다. 마지막으로 MRBs에 대한 경제적, 환경적, 그리고 기술적 측면에서 향후 발전방향을 1) 초기투자비, 2) 처리 수질, 3) 분리막 소재/모듈, 4) MBR 장비와 공정, 5) 운영비용, 향후 6) 혐기성 MBRs 공정과 같은 차세대 기술 분야로 나누어 제시하였다.

Abstract: The MBR technology has evolved rapidly over the past two decades with significant gains in performance and reliability, and reductions in costs. Membrane bioreactors (MBR) technology is widely recognised as offering a key option for enhanced wastewater treatment or reuse. The objective of this paper is then to critically review the remarkable achievement on the research and commercial applications of membrane bioreactor (MBR) technology and to present current and potential MBR markets on a global scope. This brief review of the technology incorporates five key aspects : 1) evolution of MBR practice, 2) the commercial technologies of MBRs, 3) the largest MBR installations globally (e.g. > 10,000 m³/day), 4) MBR market growth, and 5) directions for future research. Finally, the development directions of economical, environmental and technical aspects in MBRs; 1) investment costs; 2) effluent water quality; 3) membrane materials and modules; 4) MBR equipment and treatment process; 5) operating costs (higher energy & chemical consumption); and 6) sustainability such as anaerobic MBRs in the coming years were addressed.

Keywords: MBR technology, application, MBR market, development directions, sustainability

1. 서 론

분리막 생물반응기(Membrane Bio-Reactors; MBR)는 기존의 채래식 활성슬러지 공정(Conventional Activated Sludge; CAS)보다 소요부지 면적이 적고 수질규제에 능동적으로 대응할 수 있으며 효율적으로 시스템을 운

영할 수 있는 것으로 평가된다. 또한 인구증가와 도시화로 인해 물 수요의 증가로 보다 엄격해지는 수질규제에 맞추기 위해 MBR 기술은 지속적으로 증가될 것으로 전망하고 있다[1]. 유럽은 초장기 MBR 시장이 급격히 성장된 지역 중 하나이며 현재 북미와 중국, 일본 등과 함께 다양한 상업용 MBR 제품이 설치·운전되고 있다. Fig 1은 유럽의 MBR 시장에 영향을 미치는 긍정

[†]교신저자(e-mail: jtkim221@kyonggi.ac.kr)

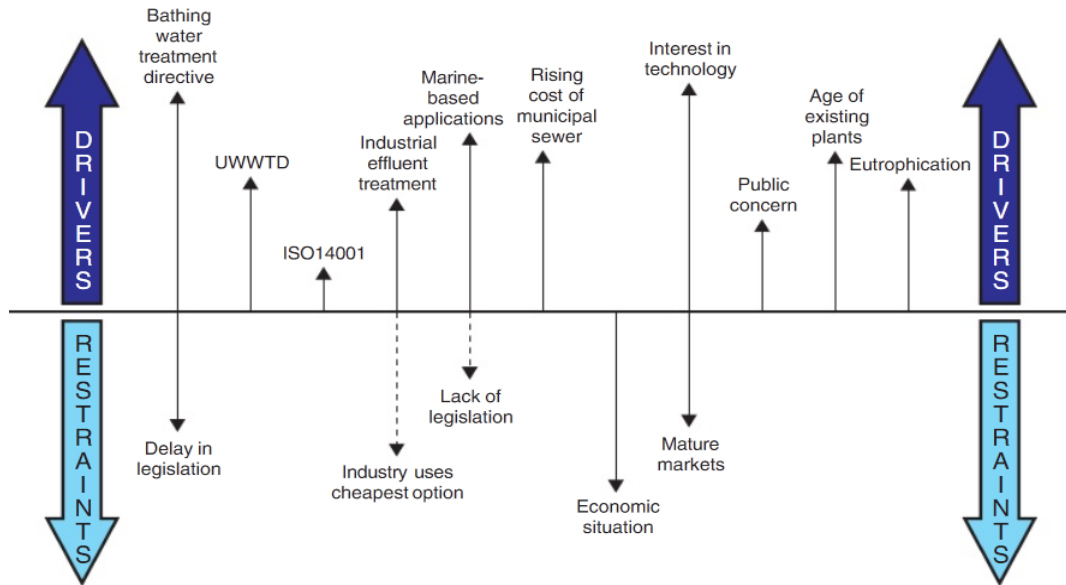


Fig. 1. Forcefield analysis, growth drivers and restraints for MBR market. Factors influencing the market both positively (“drivers”) and negatively (“restraints”) are shown, the longer arrows indicating the more influential factors. Dotted lines indicate where the influence of a particular factor on the European market is subsiding.

적인 요인과 제한요인을 제시하였다. 긍정적인 성장요인으로는 병원성 미생물(pathogenic micro-organism) 관리와 수질강화를 위해 1976년에 제정되어 2006년에 개정된 「EC Bathing Water Directive」이 중요한 성장계기가 되었다. 또한 도시 하수 처리수의 병원성 세균, 영양물질(N, P) 및 유해물질 등 부정적인 환경영향을 최소화하기 위해 처리시설의 용량과 수계의 민감도에 따라 수준별로 방류수 허용치를 규제해야 한다는 내용으로 1995년에 시행된 「Urban Wastewater Treatment Directive」 등도 중요한 성장배경 중 하나이다. 특히 「EU Water Framework Directive」는 국가의 범위를 넘어서 유럽전체의 수자원 보호와 효율적 이용을 도모하는 계획으로 평가된다. 이러한 제도적 여건 하에서 수자원 보호는 물론 대체수자원 확보 측면에서 MBR 공정이 효율적인 기술 대안으로 자리 잡고 있다[2].

국내의 경우는 하·폐수 재이용을 정책적으로 선도하기 위해 2010년 「물의 재이용 촉진 및 지원에 관한 법률」이 제정되었고 ‘물 재이용 기본계획(2011~2020)’이 수립되어 본격적인 하·폐수 재이용을 추진함에 따라 국내 MBR 시장이 급성장할 것으로 예상된다[3]. 이러한 성장의 배경은 첫째, MBR이 처리안정성이 높아 수질개선 효과가 크고, 하수 재이용에 대한 관심이 높아지면서 수요처에 양질의 처리수를 공급하는데 유리하

기 때문이다. 둘째로는 분리막 공법의 설치·운영비가 기술발전에 따라 저감되면서 타 공법과의 경쟁력을 갖기 시작했다는 점을 들 수 있다. 이러한 비약적인 기술발전과 수요증가에 따라 현재 세계적으로 적용되는 MBR 시설용량은 10,000 m³/일 이상의 중대형 플랜트로 확대되고 있는 추세이다[4,5]. 또한 처리공정에서 분리막 적용시 큰 장애요인이었던 초기 설치비 부담과 기술신뢰성 문제도 점차 해소되는 추세로 2003년 이후 MBR의 세계시장은 연 11.6~12.7%의 높은 성장률(CAGR 기준)을 보이고 있으며 9~10%의 성장률을 나타낸 해수담수화 RO시장 보다 높은 증가세를 보이고 있다[6,7]. 시장분석 기관인 Global Industry Analysis (GIA)와 BBC Research의 보고서에 따르면 2010년 현재 세계 MBR 시장은 3.37억 달러 수준이며, 2017년에는 8.88억 달러에 달할 것으로 수준으로 급성장할 것으로 예상된다[8,9]. 또 다른 시장분석 기관인 Frost & Sullivan은 GIA와 British Broadcasting Corporation Research & Development (BBC) Research와 달리 세계 MBR 시장규모가 2008년 8.38억 달러에서 2018년에는 34.4억 달러에 달할 것으로 전망하고 있다[10]. 기관별 MBR 시장전망 차이는 GIA와 BBC Research는 세계 선도적 MBR 제조사(공급자)와 공법사의 수처리 장비와 시스템(Treatment Equipment) 매출 기준으로 조사하

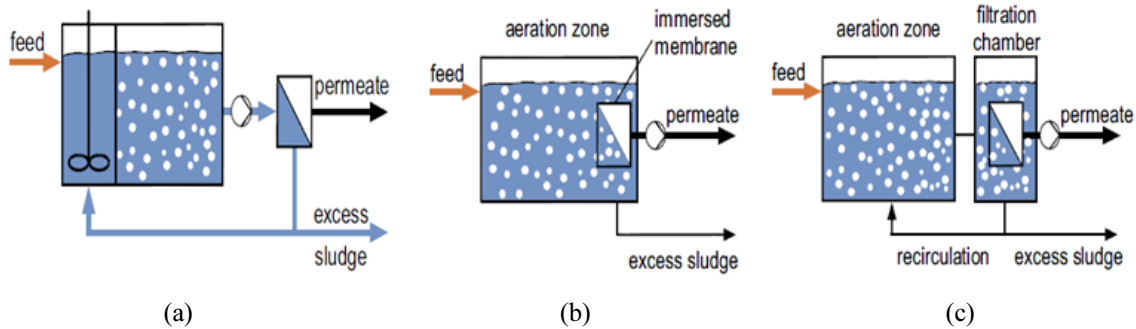


Fig. 2. Configurations of MBRs: sidestream (a) and immersed membranes (internal (b) / external(c) installations).

였고 Frost & Sullivan은 국가별 MBR 프로젝트의 설계, 구매 및 건설(Engineering, Procurement and Construction, EPC) 기준의 매출실적을 토대로 조사함에 따라 차이가 발생한 것으로 판단된다. 현재 MBR 시장은 유럽과 북미지역 주도하던 시장 구조에서 탈피하여 중동과 아시아-태평양 지역의 하수재이용과 엄격한 수질규제에 따라 급성장하고 있다. 또한 MBR 공정을 포함한 MF/UF/NF/RO 분리막의 시장규모는 2010년 52억 달러에 달할 것으로 전망되고 2015년까지 8% 이상의 연평균 성장률을 나타낼 것으로 예상된다[10].

세계적으로 MBR 제조는 중공사막(Hollow fiber, HS)을 기반으로 한 GE Zenon사와 평막(Flat sheet, FS)을 기반으로 한 Kubota사를 중심으로 선진국의 11개 주요 분리막 제조사가 주도하고 있으며 수년 전부터 중국과 한국 등 자국 시장을 기반으로 MBR 제조에 참여하고 있다[2],[4,5]. 초장기 하·폐수 처리용 분리막의 소재는 주로 PS (Polysulfone), CA (Cellulose Acetate), PE (Polyethylene) 및 PP (polypropylene) 재질을 사용하였으나 최근에는 PVDF (Polyvinylidene fluoride)를 중심으로 한 불소계 고분자와 PES (Polyethersulfone, PES) 재질의 소재가 많이 사용되고 있다[2],[4]. 세계 상업용 분리막 시장은 선진국의 선도적 제조사 11개 중 9개 기업의 막 소재가 전체 시장의 약 75%를 점유하고 있다[2]. 최근에는 평막보다 중공사막이 막 재질·모듈과 기공 크기의 다양성을 확보하면서 대용량 MBR 플랜트로 확대 적용되고 있으며 평막은 중소규모 MBR 플랜트로 주로 설치되는 추세이다[5],[11].

최근 세계적인 경제위기로 분리막 시장도 다소 침체되고는 있으나 전반적으로 개도국의 산업화가 가속화되고 기후변화 등으로 인한 수자원 환경 여건이 변화되면서 물 부족 국가를 중심으로 하·폐수 재이용에 대한

관심이 제고되고 있다. 하·폐수 재이용 공정은 안정적인 수질확보와 함께 수요처의 재이용수 사용 동기를 유발할 수 있는 경제성 확보가 필수적이다. 따라서 재이용 공정은 처리수의 용도별로 설치·운영비를 LCA 측면에서 종합적으로 고려하여 경제성을 담보하는 것이 중요하다.

또한 MBR 공법은 기존의 활성슬러지법 보다 부지면적과 수질개선 측면에서는 유리하나 아직까지 경제성 측면에서는 불리하므로[12], 설치비와 운전비를 줄이기 위해 분리막·모듈의 성능 개선, 반응조의 집적화, 에너지 비용과 약품비용 절감 등 설치·운영비를 절감할 수 있는 기술개발이 요구된다. 최근 MBR 기술이 발전되면서 각국에서 10,000 m³/d 이상의 대용량 MBR 플랜트를 설치하는 사례가 증가하고 있으며, 기술발전 속도에 따라 차이는 있겠으나 수질개선 효과와 재이용 효과 등 편익을 종합적으로 고려한다면 대용량 시설에서도 충분한 경제성을 확보할 수 있는 단계에 접어든 것으로 판단된다. 또한 최근 토목공사가 절감되는 지하화 시설과 기존 시설의 개선공사와 연계된 재이용 시설은 매우 높은 기술경제성을 확보하고 있다. 본고에서는 최근 하·폐수처리 및 재이용 분야에 급속히 적용되고 있는 MBR의 기술개발 추이와 관련산업 동향, 국내외 분리막 제조·시공·운영 기술과 특히 수준을 분석하고 향후 기술발전 방향을 제시하고자 한다.

2. MBR을 중심으로 한 수처리용 분리막 기술발전 동향

2.1. MBR 기술의 발전사

MBR 공정은 수질기준이 강화되고 유해성 물질 제거에 대한 관심이 높아지면서 기존의 생물학적 처리공정

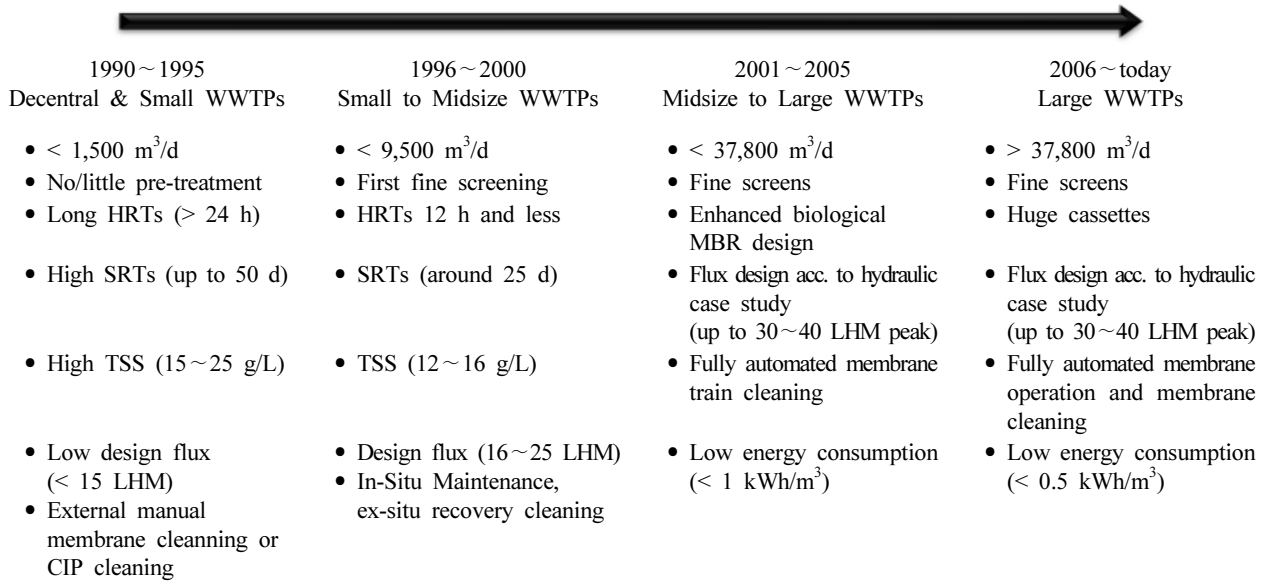


Fig. 3. Generations of immersed MBR systems.

에 분리막을 적용하여 보다 안정적인 처리시스템을 만들기 위해 1990년대부터 본격적으로 도입되기 시작하였다. MBR 공정은 수질개선 측면에서 유리한 반면 통상적으로 경제성이 취약점으로 인식되고 있다. MBR 외에 미량 유기물질 및 용존성 염류 등을 완벽히 제거하기 위해 고압용 NF/RO 분리막을 조합하는 공정도 응용되나 실공정에 적용하는데는 아직 경제성 문제로 한계가 있다[13].

MBR의 장점이 알려지게 된지도 거의 50년이 되었다. 1960년대 후반에 Dorr-Oliver에 의해 재래식 활성슬러지 공정과 결합된 외부루프(External loop)를 이용한 순환식(Sidestream) 한외여과막(UF, Ultrafiltration) 형태의 최초의 상업용 분리막 기술이 도입되었다(Fig. 2(a)) [2],[14]. 1970년대 초반에는 Thetford Systems사의 Sidestream 멀티튜브형(multitube) Cycle-Let[®] 공정이 미국에서 하수 재이용을 위해 처음으로 도입되었다.

1980년대 초반에는 TechSep (Rhone-Poulenc, later Novasep Orelis)사의 Sidestream 평막(Flat sheet) Pleiade[®] 공정이 일본에서 하수 재이용을 위해 상용화되었다. 1980년대 중반에는 일본에서 Nitto-Denko사가 침지식(immersed) 형태의 평막(FS) MBR 공정을 특허출원하였다(Fig 2(b)). 또한 Tokyo 대학에서 침지식 중공사막(HF, Hollow fiber) MBR에 대한 실험을 처음으로 수행한 것으로 알려지고 있다[2]. 1980년 중반까지는 대부분 침지식 대신 순환식 MBR이 주종을 이루었다.

1980년 후반부터 1990년 초기에 일본의 Yamamoto 등 [14,15]이 Side-stream 방식에서 탈피한 침지식(immersed) 중공사 한외여과막 공정(HF UF iMBR process)을 소개하였고 Zenon사(현 GE-Zenon사)는 본격적인 상업용 MBR을 개발하였다. 또한 농기계 제조사인 Kubota사는 침지식 평판형 정밀 여과막 공정(FS MF iMBR process)을 개발하여 상업화하였다. 침지식(immersed type)은 순환식(Sidestream) 보다 상대적으로 낮은 운전압력과 운전비용(에너지 비용 약 1/40~1/10 수준), 높은 플럭스와 투과율 때문에 2003년부터 2005년까지 유럽에서 99% 이상 설치되었다[16]. 또한 막 손상에 따른 효율적인 유지관리를 위해 포기조로부터 별도로 분리막을 설치한 외부형 침지식(external-immersed) MBR 공정이 도입되었다(Fig. 2(c)). 1990년 중반에는 세라믹 기반의 순환식 및 침지식 MBR 공정이 처음으로 하·폐수 처리 분야에 소개되었다.

1990년대에 MBRs 적용이 확산되면서 1,500 m³/일 이하의 소규모 하수 처리장에 주로 설치되었으며 초기 상업용 침지식 분리막의 세계 시장은 평막 기반의 Kubota사와 중공사막 기반의 Zenon사로 양분되었다[17]. 특히 1990년 초기와 달리 중규모 하수 처리장으로 확대되면서 MBR 전처리시설 설치 등을 통해 공정기술도 개선되어 생물학적 체류시간(SRT)이 50% 단축되고 플럭스(Flux)는 60% 이상 향상되었다(Fig. 3).

이후 2000년대부터는 10,000 m³/d 이상(최대 37,800 m³/d)

Table 1. Total MBR Technologies Reviewed

| | Immersed (iMBR) | Sidestream (sMBR) |
|---|--|--|
| <i>Flat sheet</i> | <i>Hollow fiber</i> | <i>Multitube/multichannel</i> |
| A3-MaxFlow ^{DE} | Asahi Kasei-Microzoa ^{®JP} | Berghof-HyPerm-AE; HyPerflux ^{DE} |
| Alfa Laval ^{SE} | Beijing Origin Water Technology Co. ^{CN} | Norit X-Flow-Norit Airlift ^{TMNL} |
| Brightwater-Membright ^{®IRL} | Ecologix-EcoFlonTM, EcoFil ^{CN} | Orelis Environment-Kerasep ^{®FR} |
| Colloide-Sub <i>snake</i> ^{NIR} | ENE Co., Ltd.-Super MAK ^{KR} | MEMOS Membranes Modules Systems GmbH ^{DE} |
| Ecologix- <i>Ecoplate</i> TM , <i>EcoSepro</i> ^{CN} | GE Zenon-Zee Weed ^{®US} | |
| Huber-VRM [®] ; VUM [®] /GreyUse ^{DE} | Hangzhou H-Filtration Membrane Technology Enginnering Co., Ltd.-MR ^{CN} | |
| Hyflux-Petaflex ^{SG} | Koch Membrane System-Puron ^{®US} | |
| Jiangsu Lantian Peier Memb. Co. Ltd. ^{CN} | Kolon Membrane-Cleanfil [©] -S20H/Cleanfil [©] -S30V ^{KR} | |
| LG/KORED-Green Membrane ^{KR} | ECONITY-KSMBR ^{®KR} | <i>Hollow fiber</i> |
| Kubota-ES/EK ^{JP} | Litree-LH3 ^{CN} | Ultraflo-Ultraflo ^{®SG} |
| Microdyn-Nadir- <i>BioCel</i> ^{®DE} | Memos- <i>MEMSUB</i> ^{DE} | Polymen-Imm ^{TMFR} |
| Pure Envitech Co., Ltd.- <i>ENVIS</i> ^{KR} | Memstar-SMM ^{SG} | |
| Shanghai Megavision Memb. Tech. ^{CN} | Mitsubishi Rayon-Sterapore SUR [®] ; Sterapore SADP ^{®JP} | <i>Flat disc ceramic</i> |
| Shanghai SINAP Membrane Science & Technology Co., Ltd. ^{CN} | Philos ^{KR} | |
| Toray-TRM ^{JP} | Porous Fibers S.L.- <i>Micronet</i> ^{®SP} | KERAFOL Keramische Folien GmbH ^{DE} |
| Vina Filter-Vinap ^{CN} | SENUO Filtration Technology Co., Ltd.-SENUOFIL ^{CN} | Grundfos-Biobooster ^{DK} |
| Weise-MicroClear ^{®DE} | Shanghi Dehong Biology Medicine Science & Tech. Development Co., Ltd. ^{CN} | |
| | Siemens Water Tech.- <i>Memjet</i> ^{TM DE} | |
| | Sumitomo- <i>PoreFlon</i> ^{®JP} | |
| | Superstring MBR Tech. Corp.- <i>SuperUF</i> ^{CN} | |
| | Tianjin Motimo- <i>FP AIV</i> ^{CN} | |
| | Vina Filter- <i>F08</i> ^{CN} | |
| | Zena Membrane- <i>P5</i> ^{CZ} | |
| Total : 20 Products | Total : 27 Products | Total : 8 Products |

Note

CN : China/Taiwan; CZ : Czech Republic; DE : Germany; DK : Denmark; FR : France; IRL : Southern Ireland; JP : Japan; KR : Korea; NIR : Northern Ireland; NL : Netherlands; SE : Sweden; SG : Singapore; SP : Spain; US : United States.

의 MBR 플랜트가 도입되고, MBR 전처리 공정, 플럭스 개선, 유지관리 자동화 등 효율적인 소재 및 공정 기술 개발이 이뤄지고 있다. MBR 제조사(공급자)도 기존의 Kubota 사(1990년), Zenon사(현 GE Zenon사) (1993년), Mitsubishi Rayon사(1993년) 외에 Asahi Kasei사(2004년), Huber 사(2001년), Korea Membrane Separation사(현 ECONITY

사, 1998년), Koch사(2001년), Motimo사(2000년), Memstar 사(2005년), MICRODYN-NADIR사(2005년), Norit사(2002년), Siemens사(2002년), Toray사(2004년) 등이 참여하게 되었다. 이후 다양한 분리막 특성을 확보한 새로운 MBR 제조사들이 2000년대 중반부터 시장에 속속 등장하였다[18].


- 
- 1950s • MF membranes commercialized for sterilization applications
 - 1960s • RO CA membranes commercialized
 - MBR process developed and introduced
 - 1970s • PS UF flat sheet support used for RO Thin Film Composites
 - PS UF capillary invented with finger pore structure
 - MF/UF/RO/ED all established processes
 - 1980s • Foam or spongy structures developed for PS/PES CA capillary introduced
 - First large scale municipal UF installed in 1988
 - PP/PE MF fiber developed
 - PES/PVP UF developed
 - 1990s • PE FS membrane developed by Kubota and becomes commercial
 - PVDF HF membrane developed by GE-Zenon and becomes commercial
 - Submerged membrane concept developed
 - Treatment of municipal wastewater by MF/UF becomes commercial
 - 2000s • Hydrophilic PES and PVDF membranes introduced by several companies and become commercial
 - Braided PES and PVDF membranes become commercial
 - PTFE membrane introduced by several companies

Fig. 4. Key milestones in UF/MF membrane development.

2000년대 중반 이후부터는 30,000 m³/일 이상의 대용량 MBR 플랜트가 설치되기 시작하고 에너지 소비 절감과 슬러지 감량화에 대한 기술이 집중적으로 개발되기 시작하였다(Fig. 3). 세계 시장에서 MBR 시공·운동을 통해 기술이 입증된 선도적 분리막 제품의 기술 특성을 벤치마킹하여 계량화시킨 중소규모 MBR 공급자(제조사)가 우리나라를 비롯하여 중국, 싱가포르 등으로 확대되어 전세계적으로 하수 처리용 MBR 제조사는 약 40개 이상, 제품 종류는 50개 이상인 것으로 확인되었다.

2.2. 상업용 MBR 분리막 제품 현황

Table 1은 국내·외 상업용 MBR 현황을 침지식와 순환식 방식에 따라 제조사별로 제품을 제시하였다. 우선 침지식 분리막은 평판형(Flat sheet type)과 중공사형(Hollow fiber type)으로 나뉜다. 세계적으로 침지식 평판형 분리막의 공급사(제조사)는 약 16개사로 파악되고 상용화 제품은 약 20개로 나타났다. 평막의 경우 중국과 대만은 Jiangsu Lantian Peier Memb사 등 약 5개, 독일의 경우는 Huber사를 포함한 4개, 일본의 경우는 Kubota사와 Toray사 등 2개, 기타 우리나라의 Pure Envitech사, 스웨덴의 Alfa Laval사, 동아일랜드의 Brightwater사, 북아일랜드의 Colloide사 등이 공급하고 있다.

중공사형(Hollow fiber type) 분리막 제조사의 경우 평판형(Flat sheet type) 보다 많은 23개사에 달하고 제품 종류는 약 27개로 파악된다. 중국과 대만이 Beijing Origin

Water사를 포함한 총 10개의 제조사로 가장 많고, 일본이 Asahi Kasei사, Mitsubishi Rayon사, Sterapore사와 Sumitomo사 등 4개사, 미국은 GE Zenon사와 Koch사가 있으며, 이외 코오롱, 에코니티, 필로스 등 우리나라 기업과 싱가포르의 Memstar사, 스페인의 Porous Fibers사와 체코의 Zena Membrane사 등이 있다.

2010년에 조사된 평막(flat sheet)과 중공사막(hollow fiber)에 대한 지역별 분리막 제조사의 국가별 MBR 공급 분포를 보면 평막의 경우 중국은 5개, 한국은 7개, 일본은 9개, 독일은 13개, 그 외에 유럽은 15개의 분리막 제조사의 제품들이 공급되었다. 중공사막 제조사의 제품의 경우 중국은 9개, 한국은 13개, 일본은 17개, 독일은 18개, 유럽은 19개, 북미는 22개, 싱가포르는 23개가 공급되었다[2],[4].

순환식 MBR은 크게 3가지로 구분되는데 Multitube/multichannel, 중공사막, 평판 디스크 형태의 세라믹(Flat disc ceramic) 등으로 구분된다. 우선 순환식 Multitube/multichannel 방식은 독일의 Berghof사와 MEMOS사, 네덜란드의 Norit X-Flow사(현 Pentair X-Flow사), 프랑스의 Orelis Environment사 등 4개의 제조사가 있다. 그 외 순환식 중공사막(HF) 방식의 제조사로는 싱가포르의 Ultraflo사와 덴마크의 Polymen사가 있고 평판 디스크 세라믹(Flat disc ceramic) 방식의 제조사로는 독일의 KERAFOL사와 덴마크의 Grundfos사가 있다.

Table 2. Cassette Characteristics of Flat Sheet Membrane Products Reviewed

| Supplier | Product Name | Model | Material | Pore size (μm) | Module membrane Area (m ²) | Module length (mm) | Module height (mm) | Module height (mm) |
|---------------------|--------------------|--------------------|----------------|--------------------|--|-----------------------------|--------------------|------------------------|
| Kubota | 510 | ES, EK | Chlorinated PE | 0.4 max 0.2 ave | 60~160, 240~320 | 1,140~2,920, 2,200~2,920 | 600-620 | 2,030, 3,500 |
| Kubota | 515 | RM, RW | Chlorinated PE | 0.4 max 0.2 ave | 217~290, 435~580 | 2,250~2,930 | 575 | 2,490, 4,290 |
| A3 | MMF Maxflow | M70, U70 | PVDF, PES | 0.12, 0.038 | 70 | 736 | 1070 | 716 |
| Alpha Laval | Hollow Sheet | MFM 100-300 | PVDF | 0.2 | 154 m 308~462 | 1,172 | 1,194 | 1,988, 3,080, 4,171 |
| Anua | PuraM [®] | 125~1050 | Proprietary | 0.05 | Varies | Varies | Varies | Varies |
| Brightwater | Membright | - | PES | 0.038 | 46, 92 | 1,120 | 1,215 | 715, 1,420 |
| Colloide ES | Sub-Snake | - | PES | 0.038 | 160 | - | - | - |
| Ecologix | EcoPlate | - | PVDF, PES | 0.08~0.4 | 40~60, 80~320 | 820~3,150 | 610, 660 | 2,100, 3,200 |
| Ecologix | EcoSepro | - | PVDF, PES | 0.08~0.4 | 36~432 | 310~1,810 | 700 | 1,800, 720 |
| Huber | VRM | 20,30 | PES | 0.038 | 9, 48 | - | - | - |
| Huber | MCB | 1 | PES | 0.038 | 3.5 | 800 | 400 | 100 |
| Hyflux | Petaflex | PTF316, 304 | PVDF | 0.1 | 690 | 2,310, 2,500 | 790, 1,000 | 4,300 |
| Jiangsu Lantion | PEIER | 100, 150, 175 | PVDF | 0.1-0.3 | 100, 150~225, 175 | 1,650, 2,350 | 605 | 2,000, 2,660, 2,900 |
| LG | Green Membrane | - | PES | 0.01-0.2 | 100 | 2603 | 600 | 1,730 |
| MICRODYN-NADIR | BIO-CELL | BC100, BC400 | PES | 0.04 | 100, 400 | 1,270, 1,298 | 702, 1,152 | 1,563, 2,763 |
| Pure Envitech | ENVIS | - | - | 0.4 | 15 | - | - | - |
| Shanghai Megavision | FMBR | 1.0, 100 | PES, PVDF | 0.1 or 0.9 | 100 | 1,800 | 715 | 1,770 |
| Shanghai Sinap | SINAP | 80-100, 150-150 | PVDF | 0.1 | 80, 225 | 1,600, 2,350 | 650 | 2,000, 3,000 |
| Toray | MEMBRAY | TMR090, TMR140 | PVDF | 0.08 | 90, 140 | 1,720, 1,620 | 730, 810 | 1,470, 2,100 |
| Suzhou Vina | VINAP | 150 | PVDF | 0.05 | - | - | - | - |
| Weise | Microclear | MC03, MCXL | PES | 0.05 | 3.5, 7 | 492, 490 | 207, 415 | 207 |

2.3. 상업용 분리막 소재 및 모듈 기술동향

수처리에서 활용되는 정밀여과(MF)와 한외여과(UF)의 막 소재는 친수성(Hydrophilic) 재질의 CA (Cellulose Acetate), 소수성(hydrophobic) 재질의 PP (polypropylene)와 PE (Polyethylene, PE) 등과 같은 소재가 있다. 또한 친수성과 소수성 사이에 PS (Polysulfone) / PES (Polyethersulfone), PAN (Polyacrylonitrile)와 PVDF (Polyvinylidene fluoride) 등 다양한 폴리머 소재가 된다[19].

시기적으로 보면 1950년부터 1970년까지가 분리막 제

1세대로 구분된다. 1950년대는 살균목적의 정밀여과막이 처음으로 도입되었고 1960년대는 CA (Cellulose Acetate) 재질을 이용한 RO 분리막이 상용화되었다. 제 2세대라는 불리는 1990년대까지 염소계 PE 재질을 이용하여 평막 제조사인 Kubota사가 정밀여과막(MF)을 개발 및 상용화하였고, 그 외 다수기업들이 다양한 PE/ PS/PES/PAN 등의 소재로 수처리용 분리막을 개발하여 상용화하였다. 또한 GE-Zenon사는 PVDF 재질 기반의 UF 분리막을 상용화시켰다. 초기의 PVDF 재질 분리막은 기

Table 3. Cassette Characteristics of Hollow Fiber Membrane Products Reviewed

| Supplier | Product name | Model | Material | Pore size (μm) | Module membrane area (m ²) | Module length (mm) | Module height (mm) | Module height (mm) |
|-------------------------|-------------------|-------------------------|---------------|----------------|--|--------------------|--------------------|---------------------|
| GE | LEAPmbr | - | - | - | - | - | - | - |
| GE | Zeeweed 500 | C, D, DS | PVDF, braided | 0.04 | 510, 506 | 1,828, 1,744, - | 743, 738, - | 2,085, 2,568, - |
| Asahi Kasei | Microza | MUNC-620A | PVDF | 0.1 | 600 | 1,400 | 920 | 2,900 |
| Beijing Origin Water | MBRU | BSY, RF | PVDF | 0.1, 0.3 | 1,602, 1,650 | 3,334 | 1,760 | 3,076 |
| Canpure | Saveyor | SVM | PVDF | 0.075 | 14, 22, 30/module | 158 | 158 | 997, 1,597, 2,097 |
| Ecologix | Ecofil, Ecoflon | AK12-A, EF12 | PVDF, PTFE | 0.1 | 14, 22, 30/module | 200 dia | | 1,500~300 |
| ECONITY | | KMS-CF | HDPE | 0.4 | 216~2,016 | 784~2,956 | 1,186~1,326 | 1,520~3,240 |
| ENE | SuperMAK | SM-10 | PVDF | 0.4 | 140 | 1,400 | 1,000 | 800 |
| Hainan Litree | | LJ1E-1500-F180 | PVDF | 0.08 | 18~35/module | 721 | 70 | 1,187~2,087 |
| Hangzhou H-Filtration | | MR | PP | 0.1 | 8/module | 525 | 55 | 810 |
| Koch Membrane Sytems | PURON™ | PSH 250, 500, 1500 | PES, braided | 0.05 | 250, 500, 1,500 | 906, 1,662, 2,244 | 893, 893, 1,755 | 2,385, 2,422, 2,530 |
| Koch Membrane Sytems | PURON™ | PSH300, PSH600, PSH1800 | PVDF-braided | 0.03 | 300, 600, 1,800 | 906, 1,662, 2,244 | 893, 893, 1,755 | 2,384, 2,422, 2,530 |
| Micronet Porous Fibers | Micronet | R-MF, R-UF | PVDF | 0.2, 0.05 | 540 | 2,375 | 1,020 | 2,590 |
| Mitsubishi Rayon | STERAPORE | SUR | PE | 0.4 | 210 | 1,142 | 1,538 | 725 |
| Mitsubishi Rayon | STERAPORE | SADF | PVDF | 0.4 | 500 | 1,610 | 1,555 | 3,124 |
| Tianjin Motimo | Plat Plat | FPII | PVDF | 0.1, 0.2 | 800 | 2,000 | 1,400 | 1,700 |
| Philos | Philosep | RCM | PVDF, braided | 0.1 | 51~126 | 700~1,330 | 620 | 1,980 |
| SENUO Filt Tech | SENUOFIL | SN-MBR-0660 | PES, PVDF | 0.1 | 120 | 1,180 | 560 | 2,060 |
| Shanghai Dehong | | | PVDF | 0.06-0.08 | 100 | 900 | 850 | 2,650 |
| Siemens | Mempulse | | PVDF | 0.04 | 608 | 3,960 | 280 | 2,220 |
| Sumitomo | Poreflon | SPMW-05BB10, 06B10 | PTFE | 0.2/0.1 | 100, 200 | 3,900 | 1,050, 2,280 | 840 |
| Superstring Suzhou Vina | Super UF VINAFREE | 15, PP-800 | PP PVDF, PP | 0.05, 0.1, 0.2 | - | 770 | 330 | 1,140 |
| Zena SRO | | P5S | PP | 0.1 | 86 | - | - | - |

존 유기계막과 비교하여 유연성과 강도에서 우수한 성능을 보였으나 가격이 고가였고 장기 운전시 내구성과 내화학성에 문제점이 노출되었다.

제 3세대인 2000년대에는 분리막의 내구성을 강화시킨 친수성 PES와 PVDF 분리막이 본격 도입되었다(Fig. 4). 특히 브레이드 위에 PVDF/PES를 코팅하는 방법으로 내구성을 강화시킨 분리막이 GE-Zeon사와 Koch사 등 선도적 제조사에 의해 상용화되었다. 특히 이 소재는 실증플랜트에서 안정적인 플럭스와 막 충전밀도의 상승, 소재 내구성 강화에 따른 막 교체주기를 연장 등을 통해 설치·운전비용을 저감하였다. 우수한 분리막 소재 개발과 공정개선은 MBR이 대용량 하수처리시설에 적용되는 중요한 계기가 되었다[20]. 최근에는 기존 PVDF 소재의 내화학성, 친수성, 내구성을 향상시키기 위한 연구뿐만 아니라 고강도 유지가 가능한 PTFE (Polytetrafluoroethylene) 소재를 이용한 분리막의 상용 연구들이 진행되고 있다. PTFE의 경우 내화학성 등에서 장점이 있으나, 상업용으로 적용되기 위해서는 상당한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

침지식 MBR 분리막을 평막과 중공사막별로 구분하여 Table 2와 Table 3에 제시하였다. 우선 침지식 평막의 경우 기공 크기 0.1~0.05 μm 범위 내에서 정밀여과막(MF)과 한외여과막(UF)까지 다양하게 적용된다. 스폰지 고분자인 PES (Polyethersulfone) 재질은 기공크기 0.01~0.08 μm 범위 내에서 한외여과막(UF)에 대부분 이용되고 있다[21].

이 소재는 PVDF 재질과 대비하여 가격이 저렴하고 다양한 폴리머 소재를 혼합하면 친수성(Hydrophilic) 성능을 가질 수 있으며, 또한 내용제성과 내화학성의 단점을 극복할 수 있어 Brightwater사의 Membright, Colloide사의 Sub-Snake, Ecologix사의 EcoPlate와 EcoSepro, Huber사의 VRM와 MCB, LG사의 Green membrane, MICRODY N-NADIR사의 BIO-CELL, Weise사의 Microclear 등 다양한 제조사에서 상업화하고 있다. 특히 Koch사의 PURON 중공사 한외여과막(UF)은 브레이드 위에 PES를 코팅한 기술을 적용하였다.

PVDF 소재는 기공크기 대략 0.04~0.4 μm 범위의 평판형과 중공사막형 정밀여과막(MF)과 한외여과막(UF)에 사용되고 있다. 전체 침지식 MBR 분리막의 약 55%를 차지하고 있으며 세계 11개 주요 분리막 제조사 중에서 75%가 사용하고 있다[2]. 이 소재는 PES 소재보다 고가이나 내화학성과 내구성이 높아 평막 제조사의

경우 A3사 MMF Maxflow, Alpha Laval사 Hollow sheet, Hyflux사 Petaflex, Jiangsu Lantion사 PEIER, Shanghai Sinap사 SINAP, Toray사 MEMBRAY, Suzhou Vina사 VINAP 제품 등에 사용되고 있다.

또한 중공사막의 경우 GE-Zenon사 Zeeweed 500, Asahi Kasei사 Microza, Beijing Origin Water사 MBRU, Canpure사 Saveyor, Ecologix사 Ecofil, ENE사 SuperMAX, Koch사의 PURON (모델번호 PSH300~18000), Micronet Porous Fibers사 Micronet, Misubishi Rayon사 Sterapore SADF, Tianjin Motimo사 Plat Plat, Philos사 Philosep, Siemes사 Mempulse 제품 등에 다양하게 사용되고 있다. 다른 고분자계 분리막 소재인 PAN (polyacrylonitrile)은 side-stream 방식의 중공사막(HF) 제품에서 사용되고 PVA (polyvinylalcohol)는 침지식 평막에 사용되고 있다. 특히 평막보다는 중공사막에 다양한 소재가 활용되고 있다.

세계적인 평막 기반인 일본의 Kubota사 분리막은 chlorinated PE (polyethylene) 재질의 평막 모듈로 0.4 μm 공극(pore size)의 정밀여과막(MF)을 사용하고 있다[22]. 반면 중공사막 기반의 Toray사 MEMBRAY 제품은 0.08 μm 공극(pore size) 크기의 PVDF 재질로 된 한외여과막(UF)을 사용하고 있다. MEMBRAY 모듈은 기본 소재 PET (Polyster) non-woven 섬유에 기능소재 PVDF를 사용함으로써 물리적 고내구성과 화학적 안정성을 확보하였다. Toray사는 이들 막을 이용하여 중동 지역 등에 하수 재이용 플랜트 약 130개소를 설치·운영 중이다[23].

Huber사의 VRM (Vacuum Rotation Membrane) MBR은 기존의 수직형 평막 공정의 특성과 달리 천천히 회전하는 봉(shaft)에 막이 설치되어 있는 폴리테르술폰(Polyethersulfone, PES) 재질의 평막 모듈로 0.02 μm 공극의 한외여과막(UF)을 사용하고 있다[24]. Huber사의 제품과 유사한 회전형 평막 제조사로는 Alfa Laval사, Colloide사, Microdyn-Nadir사가 있으며 최근 시장에 진입한 AGFA-Vito사도 있다(Table 2).

중공사막(HF) 고분자 소재로는 주로 기공 크기 0.1~0.4 μm 범위에서 PVDF, PP, PTFE, PES, PVA, PE 등 다양한 분리막 소재가 사용된다. 일본의 Mitsubishi사는 중공사막(HF)을 이용한 침지형 MBR 공정을 개발하여 하수 처리 및 재이용 공정에 광범위하게 적용하고 있다. 친수화시킨 PE 중공사막(세공크기 0.1, 0.4 μm)을 가로 방향으로 배열시킨 모듈을 수직으로 반응조에 넣고 폭기에 의해 상향류를 발생시켜 중공사막을 흔들

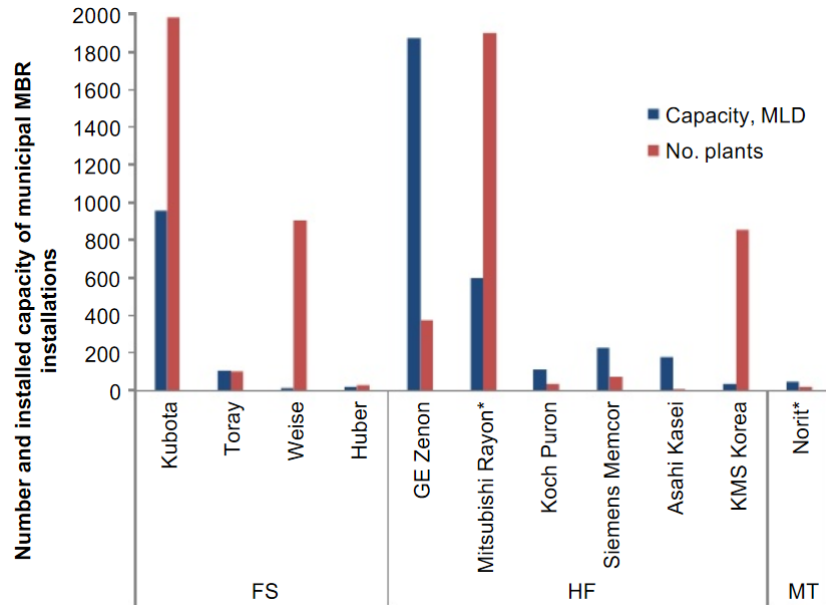


Fig. 5. MBR Municipal Market (Note : KMS Korea-Econity).

어 줌으로써 막의 오염을 제어하고 있다. 2010년 이후 3,000개 이상의 수평형(SteraporeSUR™) 시리즈와 수직형(SteraporeSADF™) 시리즈를 이용하여 MBR 시스템을 설치한 Mitsubishi-Rayon사는 최근 중국시장에 패키지형 시스템을 적용하여 사업화하는 방안을 적극 모색하고 있다(Table 3)[25].

Siemens사는 PVDF 재질인 기공 크기 0.04 μm의 중공사형 한외여과막(UF) 기반의 emPulse MBR 시스템(지멘스 워터테크놀로지)을 개발하였다. 이 시스템의 특징은 모듈의 바닥에서 연속적으로 공기를 유입시켜 플러그 흐름을 유도하며, 정기적으로 펄스를 발생시키는 것이다. 특히 흡입 파이프를 통해 혼합된 액체를 흡입하여 모듈로 방출시킴으로서 기존의 bubble 방식대비 60%까지 공기 소요량을 감소하였다고 제시하고 있다[26].

Koch사의 Koch Membran System (KMS)인 PURON™ 제품은 기공 크기 0.05 μm의 PES 소재와 0.03 μm의 PVDF 소재에 보강재를 넣어 내구성을 강화시킨 중공사형 한외여과막(UF)을 사용한다. Koch사의 MBR 시스템의 특징은 막 모듈을 포기조 내에 설치된 내부 침지식(internal-immersed) 형태의 end-free식이다. 즉 원활한 공기분포와 오염물질 막힘 현상을 줄이기 위해 기존의 Double header 방식에서 Single header 방식으로 구조를 변경시켜 하부포기를 통해 만들어진 기포들이 오염물질을 상부로 이송하면서 상부 Header의 막힘 현

상을 차단하는 특징을 가지고 있다[27].

Table 2와 Table 3에 MBR 시스템 제조사와 제품별로 다양한 형태와 시스템을 표시하였다. 시스템에 따라 전처리(스크린 크기 및 안정조 유무), 에너지 소비량, 약품 주입량, 운전의 용이성, 제어의 복잡성, 세정 주기 및 방법, 분리막 및 타 기기장치들의 내구성, 그리고 운전 및 유지관리 사항들이 상이하게 되므로 국가별·지역별 유입수의 특징과 처리 기준에 적합한 최적 시스템을 구성하는 것이 중요하다.

2.4. 상업용 MBR 설치현황

1990년부터 침지식 MBR이 본격 설치된 이래 세계 주요 11개 MBR 제조기업의 시장 점유율을 보면 평막의 경우 Kubota사가 설치용량 기준으로 전세계 하수처리장 MBR 시장의 39% (약 900,000 m³/day 이상), 중공사막은 GE Zenon사가 46% (약 1,900,000 m³/day 이상)를 차지하고 있으며, Mitsubishi Rayon사가 세계 시장의 약 5~10%을 점유하고 있다.

MBR 플랜트 설치수에서는 Kubota사가 GE Zenon보다 약 6배 이상의 MBR 공정을 설치하고 있으나 설치용량면에서는 GE Zenon사가 약 2배 이상 앞선 것으로 나타났다. 2003년부터 세계 3대 선도 기업인 Kubota사, MRE사와 GE Zenon사가 약 800개 이상의 MBR을 하수처리장에 설치하여 전체 시장의 85~90%을 점유하

Table 4. Top 20 Largest MBR Installations Globally in The Seven Years Between 2002 and 2009

| Rank | Project, Country or US state | Supplier | Date | Capacity (m ³ /day) | |
|------|--------------------------------------|--------------------|------|--------------------------------|---------|
| | | | | PDF | ADF |
| 1 | Wenyuhe, China | Asahi Kasei BOW | 2007 | 100,000 | 100,000 |
| 2 | Johns Creek, Georgia | GE Zenon | 2009 | 94,000 | 41,000 |
| 3 | Beixiaohe, China | Siemens Water Tech | 2008 | 78,000 | 60,000 |
| 4 | Al Ansab, Muscat, Oman | Kubota | 2009 | 78,000 | 56,000 |
| 5 | Peoria, Arizona | GE Zenon | 2008 | 76,000 | 38,000 |
| 6 | Cleveland Bay, Australia | GE Zenon | 2007 | 75,000 | 29,000 |
| 7 | Lusail, Qatar | GE Zenon | 2008 | 60,000 | 60,000 |
| 8 | Cairns North, Australia | GE Zenon | 2009 | 58,000 | 19,000 |
| 9 | Cairns South, Australia | GE Zenon | 2009 | 58,000 | 19,000 |
| 10 | Sabadell, Spain | Kubota | 2009 | 55,000 | 35,000 |
| 11 | San Pedro del Pinatar, Spain | GE Zenon | 2007 | 48,000 | 20,000 |
| 12 | Syndial, Italy | GE Zenon | 2005 | 47,000 | 38,000 |
| 13 | Broad Run WRF, Virginia | GE Zenon | 2008 | 47,000 | 38,000 |
| 14 | Beijing Miyun, China | Mitsubishi Rayon | 2006 | 45,000 | 30,000 |
| 15 | Nordkanal, Germany | GE Zenon | 2004 | 45,000 | 17,000 |
| 16 | Tempe Kyrene, Arizona | GE Zenon | 2006 | 44,000 | 34,000 |
| 17 | Brescia, Italy | GE Zenon | 2002 | 42,000 | 42,000 |
| 18 | Traverse City, Michigan | GE Zenon | 2004 | 39,000 | 27,000 |
| 19 | Linwood, Georgia | GE Zenon | 2007 | 38,000 | 17,000 |
| 20 | North Kent Sewer Authority, Michigan | GE Zenon | 2008 | 35,000 | 23,000 |

Note

PDF : Peak daily (design) flow; ADF : Average daily (design) flow, BOW : Beijing Origin Water.

였다[2],[4],[28]. 2000년대 중반이후 MBR 제조사가 증가되고, 기술개발이 활발해지면서 주요 11개사 외에도 약 20여 개의 신생 MBR 제조사들의 시장에 진출한 것으로 나타났으며 2009년도까지 3,500개의 시설이 설치되어 전체 플랜트 수가 5,000여 개에 달하는 것으로 조사되었다. 또한 하수 처리용 MBR 모듈의 종류도 60여 개에 이른다[2],[4]. 최근에는 중동지역, 중국 및 유럽시장에서 분리막 적용이 급성장세를 보이고 있으며 특히 설치용량 10,000 m³/일 규모의 대용량 MBR 플랜트가 본격적으로 설치되고 있다.

Table 4는 2002년부터 2009년까지 세계 20개 대용량 MBR 플랜트의 설치 현황을 나타내고 있다. 20개 대용량 플랜트 중 15개를 GE Zenon사가 주도적으로 설치하였다[2], [4,5], [21]. 2000년에 Kubota사는 당시 세계 최대 규모인 12,700 m³/d 용량의 침지식 평막 MBR을 영국의 Dorest 지역의 Swange 하수처리시설에 설치하

였고 2006년까지 도시 하수처리장과 산업폐수처리장 약 1,538여 개소(1,138개 + 400개)에 설치하였으며 2009년에는 약 1,900개소에 달하고 있다.

최근에는 중동의 오만 Al Ansab 하수처리장에 침지식 평막 MBR 공정으로 2009년에 개발된 Kubota EK400-Double Deck 멤브레인 모듈(총 121,600 패널)이 78,000 m³/일 규모 하수처리시설에 설치되었다. 또한 2012년 이후에 추가적으로 약 220,000 m³/일 규모의 MBR 공정을 설치할 예정이다[22]. GE Zenon사의 경우 2006년 기준으로 미국, 캐나다, 멕시코 등 북미지역에 약 331개(204개 + 127개)를 설치하였으며 2009년 까지 약 350개 이상을 설치하고 있다[29]. 일본의 Mitsubishi Rayon Engineering (MRE)사는 2006년 기준 주로 동남아시아 지역에 374개(170개 + 204개)를 설치하였다. Koch사는 Koch Membrane Systems (PURON™)을 적용하여 2012년도에 세계 5번째로 큰 규모의 하수재이용시설인 61,000 m³/일 규모의

Table 5. Largest Installations, Operational by 2012, for Individual Technology Providers; Plants > 10,000 m³/day Capacity in the Six Years Between 2006 and 2012

| Rank | Project, Country or US state | Supplier | Date | Capacity (m ³ /day) |
|------|------------------------------|--------------------------|------|--------------------------------|
| 1 | Jumeirah Golf Estates, UAE | GE Zenon | 2010 | 189,000 |
| 2 | Brightwater, WA | GE Zenon | 2011 | 170,000 |
| 3 | Qinghe, China | OW/MRC | 2011 | 150,000 |
| 4 | Wenyuhe, China | Asahi Kasei BOW | 2007 | 135,000 |
| 5 | North Las Vegas, NV | GE Zenon | 2011 | 133,000 |
| 6 | Yellow River, GA | GE Zenon | 2011 | 111,000 |
| 7 | Shiyan Shendinghe, China | OW/MRC | 2009 | 110,000 |
| 8 | Aquaviva, Cannes, France | GE Zenon | 2012 | 106,000 |
| 9 | Busan City, Korea | GE Zenon | 2012 | 100,000 |
| 10 | Guangzhou, China | Memstar | 2010 | 100,000 |
| 11 | Wenyuhe, Beijing, China | OW/Asahi Kasei | 2007 | 100,000 |
| 12 | Guangzhou, China | Memstar | 2010 | 100,000 |
| 13 | John's Creek, GA | GE Zenon | 2009 | 94,000 |
| 14 | Awaza, Turkmenistan | GE Zenon | 2011 | 87,000 |
| 15 | Jordan Basin WRF, UT | GE Zenon | 2012 | 79,000 |
| 16 | Beixiaohe, China | Siemens Water Technology | 2008 | 78,000 |
| 17 | Al Ansab, Muscat, Oman | Kubota | 2009 | 78,000 |
| 18 | Broad Run WRF, VA | GE Zenon | 2008 | 71,000 |
| 19 | Christies Beach, Australia | GE Zenon | 2011 | 68,000 |
| 20 | Gongchon, Korea | Econity | 2012 | 65,000 |
| 21 | Najran, Saudi Arabia | Toray | 2010 | 60,000 |
| 22 | Lusail, Qatar | GE Zenon | 2011 | 61,000 |
| 23 | Ecosama, Sao Paulo, Brazil | Koch | 2012 | 61,000 |
| 24 | Beijing Miyun, China | Mitsubishi Rayon | 2006 | 45,000 |
| 25 | Tianjin Industry, China | Tianjin Motimo | 2007 | 30,000 |
| 26 | Griffith, Australia | KMS Puron | 2010 | 30,000 |
| 27 | Daegu Dalsung, Korea | Econity | 2008 | 25,000 |
| 28 | Ji'an, China | Microdyn-Nadir | 2010 | 20,000 |
| 29 | Palm Jumeirah, UAE | Norit | 2009 | 17,000 |

MBRs을 브라질 상파울로에 설치하였다(Table 5).

Table 5는 2006년~2012년간 10,000 m³/일 용량 규모의 MBR 플랜트 설치현황을 제시하였다. Table 4에서 보듯이 종래 대용량 MBR 플랜트의 설치 점유율은 GE Zenon사가 강세를 보인 반면 최근에는 10,000 m³/일 용량 이상 규모의 플랜트에서 GE Zenon사의 독점 현상을 탈피하여 다양한 분리막 제조사들이 중국이나 중동지역에서 활동하는 것을 확인할 수 있다. 특히 일본의 Asahi Kasei와 Toray사, 중국의 BOW (Beijing Origin Water)사와 Tianjin Motimo사, 독일의 Siemens사와

Microdyn-Nadir사, 네덜란드의 Norit사, 미국의 Koch사, 그리고 한국의 Econity사(구 Korean Membrane Systems) 등 다양한 막 제조사들이 검증된 기술력을 바탕으로 적극적인 사업화를 추진하고 있다.

국내에서도 다양한 형태의 MBR 공정이 상용화되고 있으며, 환경 신기술을 받은 MBR 공정으로는 DMBR, HANT, HS-aMBR, KSMBR, KIMAS 등이 있다. 국내 시장의 경우, 지금까지 대부분 마을 하수도를 비롯한 중·소규모 처리장에 적용되어 왔으나 인천시 공촌 하수처리장에 65,000 m³/일 규모의 침지식 중공사막 MBR

Table 6. Technology Level of Domestic and International Comparative Analysis in Membrane Technology of Advanced Wastewater Treatment and Reclamation/Reuse

| Items | TRL ¹⁾ (%) |
|--|-----------------------|
| High Performance Membrane (RO/NF) Technologies for Water Treatment Applications | 60 |
| Membrane (RO/NF) Module Technologies for Water Treatment Applications | 85 |
| Low Pressure Membrane (UF/MF) and Module Technologies for Wastewater Treatment and Water Reuse | 40 |
| Membrane bio-Reactor (MBR) and Module Technologies for Wastewater Treatment and Water Reuse | 55 |
| Total Solution (EPC ²⁾ + O&M) for Wastewater Treatment and Water Reuse in Large-Scale Membrane Plants | 30 |
| Process Control and Performance Assessment for Membrane Manufacturing Technologies | 40 |
| Total Number of Patent Applications (MF / UF / NF / RO and MBR) | 90 |

¹⁾ TRL : Technology Readiness Level, ²⁾ EPC : Engineering, Procurement and Construction

공정이 2012년까지 설치되는 등 점차 대형화되는 추세이다.

2.5. 국내 MBR 기술수준 및 전망

1990년 이후 분리막을 이용한 물재이용 플랜트기술 분야에 대한 세계특허출원 분포를 보면, 미국 33%, 한국 32%, 일본 21%, 유럽 14%의 출원비율을 차지하고 있다[30]. 한국, 미국, 일본, 유럽 모두 멤브레인 기반의 고도 수처리 플랜트 기술이 압도적인 점유율을 차지하고 있다. MBR을 포함한 분리막의 소재·모듈 및 공정 기술에 대한 국내특허출원 수는 2000년 이후 꾸준히 상승하여 2010년에는 미국, 일본, 유럽과 비슷한 수준의 특허가 출원되었다. 분리막 제조 기술의 경우, 분리막의 재질과 관련된 출원과 화학약품을 이용한 처리기술이 주를 이루고 있었으나, 최근에는 분리막 표면 개질관련 기술의 특허출원이 증가하는 경향을 보이고 있다[31]. 이러한 특허 출원수의 증가는 외국에서 기개발된 기술들이 국내에서 뒤늦게 개발되는 측면도 있으나 다양한 연구개발이 국내기업이나 연구기관에서 활발하게 진행되고 있음을 알 수 있다.

국내 특허는 분리막 기반의 고도 수처리 플랜트를 위한 소재와 모듈 기술중 최근 5년간 분리막 표면 개질, 고기능수 생산기술 관련 특허출원이 급증하였다. MBR 시스템의 운영기술 분야에서는 분리막 포기방법 개선, 슬러지 처리, 활성슬러지 조절 관련 특허가 지속적으로 출원되었으며 분리막 포기방법 개선(에너지절감) 관련 기술이 취약기술로 나타났다. 이러한 특허 출원에도 불구하고 선진국 선도 기업들의 해외특허 장벽은 여전히 높은 것으로 보이므로 질적으로 선진국 수준에 버금가는 기술 확보가 요구된다.

국내의 기술 수준을 특허출원 수, 논문인용 수, 본격적인 기술개발 연도, 국내·외 MBR 관련 분석 자료와 국내 기술의 MBR 설치개소와 용량 등을 종합적으로 고려하여 분야별로 Table 6에 제시하였다[30-32]. 현재 국내 분리막 기술은 선진국 기술과 비교하였을 때 정착 초기단계로 볼 수 있으며 분리막의 운전 및 제어기술 분야에서 선진국과 격차가 큰 것으로 파악된다. MBR, UF/MF 성능, 제막, 막 모듈화와 이에 대한 연속 양산기술도 세계적 분리막 기술 수준에 비해 다소 격차가 있는 것으로 나타났다. 특히 선진국 대비 기술 수준에서 가장 취약한 분야는 하수 고도처리와 재이용에 활용되는 분리막 모듈, 시스템 설계, 운전기술 관련 분야이며, 품질관리 및 성능평가 기술도 약 40% 수준으로 낮은 것으로 나타났다[30,31].

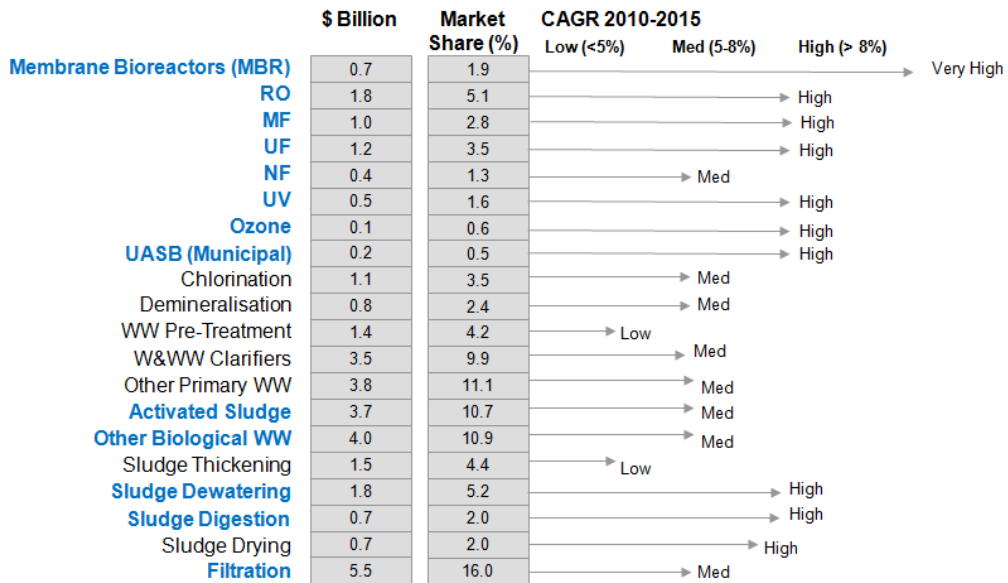
국내 분리막 기업은 대표적으로 웅진케미칼, 코오롱, 에코니티, 퓨어엔비텍, 시노팩스, 필로스 등이 있으며 하수 처리분야에는 마을 하수 처리장 등 소규모 시설을 중심으로 약 1,500여 개의 MBR 플랜트가 설치·운영되고 있다.

국내 MBR 시장은 주로 일본기업과 기타 외국기업의 MBR이 2003년 이전까지 다수 참여해왔으나 이후 중공사막 제조사인 에코니티(케이엠에스(구)), 코오롱, 시노팩스, 필로스 등과 평막 제조사인 퓨어엔비텍이 MBR 시장에 진입하여 주도하고 있다. 설치 초기에 내구성, 막오염 문제, 운영 안전성 등 여러 가지 문제를 나타냈으나, 그간의 시행착오를 거쳐 일부 기업은 상당한 노하우를 축적하였으며 소규모 시설에서는 선진국 수준에 근접하는 설치·운영기술을 확보한 것으로 파악된다. 다만 여전히 고기능성, 고내구성의 MBR 분리막 소재/모듈을 포함한 공정 기술 개발은 미흡한 실정으로

Table 7. Global Water & Wastewater Market forecast by Key Technologies

| Items | No | Revenue Forecasts by Key Technologies |
|--|----|--|
| Global water market : \$425 billion (100%) | 1 | Water & Wastewater Utility : \$246.5 billion (58%) |
| | 2 | Water & Wastewater Solutions & Services : \$178.5 billion (42%) |
| No 2 : \$178.5 billion (100%) | 3 | Build & Service : \$115 billion (64%) |
| | 4 | Solutions (Chemicals, Treatment Equipment, Process Equipment and Pumps) : \$65 (36%) |
| No 4 : \$65 (100%) | 5 | Chemicals : \$15 billion (23.4%) |
| | 6 | Treatment Equipment : \$34.59 billion (53.2%) |
| | 7 | Process Equipment and Pumps : \$15 billion (23.4%) |
| No 6 : \$34.59 billion (100%) | 8 | Other Water & Wastewater Filtration & Purification : \$19 billion (55%) |
| | 9 | Membrane (MBR, MF/UF/NF/RO) : \$5.2 billion (15%) |
| | 10 | Sludge Treatment : \$4.8 billion (14%) |
| | 11 | Biological Wastewater Treatment : \$3.8 billion (11%) |
| | 12 | Disinfection (UV, Ozone, Chlorination, etc) : \$1.7 billion (5%) |
| | 13 | Membrane bioreactor (MBR) : \$0.7 billion (1.9%) |
| No 9 : \$5.2 billion (100%) | 14 | Membrane bioreactor (MBR) : \$0.7 billion (13.5%) |

Total Market Segmented by Technology (Total Global Market Size in 2010 = \$34.59 billion)



Source: Frost & Sullivan

Fig. 6. Water & Wastewater Treatment Equipment Market : Revenue Forecasts by Key Technologies (World), 2010~2015.

향후 국내 하·폐수 처리 시설에 재이용시설 설치가 본격화되는 점을 고려할 때 향후 4~5년간 기술개발에 주력하면 일부 소재·모듈 분야를 제외하면 세계시장에서 경쟁력을 갖춘 기술 확보가 가능할 것으로 예상된다.

3. 하수 처리용 처리장비 및 분리막 시장분석

전세계 물 시장을 기술별로 분류한 시장자료를 Table 7에 제시하였다. Frost & Sullivan 보고에 따르면 전세계 물관련 시장은 2010년 기준 약 4,250억 달러(해수담수화 : 3.3%, 물 재이용 : 0.3%, 공업용수·폐수 : 6.6%, 상

Table 8. Directions for Improvement of MBR Technologies in Wastewater Treatment Plants

| Criteria | Indicators | Improvement needed |
|------------------------|---|--|
| Economic | Investment costs | Membrane purchase costs |
| | | Standardizations of element dimensions |
| Environmental | Effluent water quality | Trace organic compounds such as EDCs (Endocrine Disrupting Chemicals), PPCPs (Pharmaceuticals and Personal Care Products), PhACs (pharmaceutical active compounds) |
| | | Membrane |
| Technical | Equipment | Improvement of membrane materials (New membrane materials/modified membrane surfaces may improve flux) |
| | | Membrane design and performance (Improved efficiency required through better module design) |
| | Process | Equipment standardization |
| | | Efficient pretreatment (screening) system |
| | Operation & Management | Membrane system process design and performance |
| | | Peak flow performance |
| Operation & Management | Membrane fouling (higher aeration cost, increase chemical cleaning) | |
| | Operating costs (higher energy & chemical consumption) | |
| | | Greater mechanical complexity and new technology for many owners and operators make it difficult to visualize new or expanded systems employing MBR technology |

수 : 47.5%, 하수 : 42.3%)로 나타났으며 물 관련 공공 시설(Water & Wastewater Utility) 약 2,465억 달러(58%), 수처리 솔루션과 서비스(Water & Wastewater Solutions & Services) 분야가 1,785억 달러(42%)으로 나타났다[33]. 수처리 솔루션과 서비스(Water & Wastewater Solutions & Services) 시장의 경우 건설·서비스(Build & Service) 시장은 1,150억 달러(64%), 수처리 장비 및 공정장비 분야가 650억 달러(36%)에 달할 것으로 전망하였다. 또한 Table 7에서 보듯이 No 4인 수처리 장비 및 공정장비 시장을 세부항목으로 분류하면 화학제(Chemicals) 시장이 150억 달러(23.4%) 공정장비와 펌프(Process Equipment and Pumps) 시장이 150억 달러(23.4%), 그리고 수처리 장비(Treatment Equipment) 시장은 약 345.9억 달러(53.2%)로 전망하였다(Table 7). Fig 6은 Table 7의 수처리 장비(Treatment Equipment)에 대한 분리막, 살균 설비, 생물학적처리 및 슬러지처리 관련 설비 등으로 구분하여 시장규모와 연평균 성장률(CAGR)을 제시하였다.

수처리 장비(Treatment equipment) 분야의 경우 기타 여과(filtration)와 정화처리 시장이 약 190.2억 달러(55%), MBRs를 포함한 MF/UF/NF/RO 분리막 시장이 51.9억 달러(15%), 슬러지 처리(Sludge Treatment) 시장이 48.43억 달러(14%), 생물학적 하·폐수 처리(Biological Wastewater

Treatment) 시장은 38억 달러(11%), 살균시설(Disinfection) 시장이 17.3억 달러(5%) 규모인 것으로 분석하고 있다. 특히 MBR은 수처리 장비(Treatment Equipment) 분야 중 가장 높은 성장률(10% 이상)을 나타냈다(Fig. 6). 또한 전체 분리막 시장에서 MBR은 약 13.5%의 점유율을 나타냈다.

2012년 The Freedonia Group 보고서[34]에 따르면 필터시장(유기·무기소재 분리막 및 모래여과 포함)의 수요는 2012년 기준 약 151억 달러 규모로 추산하였고 2015년에는 193억 달러 규모로 확대될 것으로 전망하고 있다. 특히 수처리용 MBR을 포함한 MF/UF/NF/RO 분리막 분야의 미국 시장규모는 2016년 약 54억 달러로 성장하여 연간 7.7% 증가될 것으로 예상되고, 미국과 중국이 2010년부터 2015년까지 세계 멤브레인 시장의 46%를 차지할 것으로 전망하고 있다. 이는 Frost & Sullivan 조사 기관에 의해 Table 6와 Fig 7에 제시한 MBR 공정을 포함한 MF/UF/NF/RO 분리막 시장규모는 52억 달러 자료와 유사하였다. 한국시장은 2007년 기준 아시아-태평양 시장 중 중국, 인도, 일본 다음으로 7% 정도의 분리막 시장을 나타냈으며 지속적으로 증가될 것으로 예측되고 있다.

최근 Global Industry Analysts[8]의 시장분석 보고서에서 세계 선도적 MBR 제조 및 공법사인 Aqua-Aerobic

Systems사, Asahi Kasei사, GE Water & Process Technologies사, Keppel Seghers Belgium사, Koch Membrane Systems사, Kubota사, Pall사, Siemens Water Technologies사, Toray사와 Veolia Environnement사 등의 매출실적을 기초로 시장규모를 예측한 결과 MBR 시장은 2010년 기준 약 337백만 달러 규모로 연평균 13.2% (CAGR 기준) 성장하여 2015년에는 627 백만 달러, 2017년에는 약 888백만 달러(8.88억 달러)에 달할 것으로 추산된다[8,9]. 수처리 장비분야(Treatment Equipment) 매출실적과 달리 국가별 하·폐수 처리장의 프로젝트 설계, 조달 및 건설(Engineering, Procurement and Construction, EPC)의 매출실적을 토대로 한 조사는 2008년 8.38억 달러에서 22.4% 연평균 성장률로 2018년에 34.4억 달러로 성장할 것으로 전망하고 있다[10].

MBR 시장은 초기에 형성된 유럽과 북미시장에서 벗어나 중국, 대만, 일본, 인도, 한국 등 아시아-태평양과 중동지역 등에서 엄격한 수질 규제와 처리 시설의 개선, 국가차원의 수질개선 정책 등에 힘입어 연평균 20.2%의 가장 높은 성장률을 보였다[8]. 중국 정부는 제12차 5개년(2011~2015) 계획에서 MBR 재이용 공정확대를 제시하면서 대형 프로젝트 적용과 관련 가이드라인을 수립 중이며 이러한 장려정책에 따라 2017년에는 MBR 설치용량이 약 1천만 톤/일에 달하고 MBR 및 기타 MF/UF 분리막 플랜트에 필요한 기자재, 토목·건축 등을 포함한 시장 규모는 약 14억 달러에 달할 것으로 예상된다[35].

4. MBR 하·폐수 처리기술 동향과 발전방향

지난 20여 년 동안 하·폐수 분야에서 MBRs에 관한 세계의 연구논문 발표 추세를 보면 1990년부터 2009년까지 1,450여 개의 학술논문이 발표되었고, 1994년부터 누적개념 전년대비(year-on-year accumulation) 약 20%씩 증가하고 있으며 파울링 관련 연구가 가장 많았다[36,37]. 발표된 논문을 분석한 결과 학계에서는 반응조내의 막 오염의 입자특성 및 체외 고분자 물질(Extracellular Polymeric Substances, EPS) 등 분리막 파울링에 관심이 많은 반면, 기업에서는 분리막 소재/모듈과 공정기술에 관심이 많았다. MBR 운영시 발생하는 높은 에너지 비용을 저감하기 위한 기술적 대안으로 MBR 공정과 연계된 혼용시스템 관련 논문이 2001년 이후부터 증가 추세이다.

Table 8은 최근의 MBR 기술에 대한 기술 수준과 기

술 발전 방향의 지표를 경제적, 환경적 및 기술적 관점에서 제시하였다[36-39]. 우선 경제적 측면에서 보면 1960년부터 MBR이 상업화되기 시작 한 후 효율적인 장비 개선과 맞춤형 공정의 선택, 에너지절약형 공정개발과 설계 기술의 발전에 따라 설치비가 약 1/3로 감소되었다. 1990년대 이후를 보더라도 1992년에 1 m² 면적당 400달러에서 2005년에 50달러로 약 1/8 수준으로 크게 감소한 것으로 확인되었다[6]. 또한 MBR 플랜트의 설치용량이 380 m³/일에서 3,800 m³/일 규모로 10배 증가할 경우 설치비용이 약 30% 감소로 되는 것으로 확인되었다[37]. 분리막 소재의 내구성과 내화학성이 향상되면서 MBR 공정의 가격 경쟁력이 높아지는 것으로 확인되었다. 특히 막 교체주기가 7년 이상 보장될 경우 12,000 m³/일 이상 대용량 MBR 플랜트는 활성슬러지법 보다 경쟁력이 높은 것으로 나타났다[38]. 이런 설치와 유지관리비의 감소는 공정개선, 운영관리의 전문화와 소재·모듈 기능개선에 따른 막 교체주기의 연장 등에 기인하는 것으로 분석된다. 특히 RO 분리막의 경우 Element 표준화로 동종 막 제품에 대한 호환이 가능함에 따라 추가적인 부대비용이 절감되어 1 m² 면적당 30달러 이하로 절감되었다[38,39]. 따라서 MF/UF 막 가격을 내리기 위해서는 역삼투막(RO)와 같이 막 기술의 Element 표준화가 필요하다.

환경적 측면에서 보면 MBR은 안정적인 방류수질을 확보할 수 있다. 보통 BOD < 2 mg/L, TSS < 0.5 mg/L, NH₃-N < 0.5 mg/L, 탁도 0.2 NTU 이하의 수준까지 가능하다. 또한 침지식 한외 여과막(UF)을 이용한 MBR은 protozoa, 박테리아와 대부분의 바이러스 등 병원균을 제거할 수 있다[1],[39]. 최근 (BNR (SBR), BNR (A₂/O + Media), AS 등 고도 생물학적 처리 시설을 갖춘 11개 하수 처리장을 대상으로 조사한 결과 Iopromide, TCPP, TCEP, Caffeine, Atenolol, Naproxen, Deet, Benzophenone 등 31종에 달하는 의약품 및 항생제 물질들은 약 20~90% 제거되고, MBR 공법은 약 10~100% 제거되는 것으로 나타났다[40,41]. 특히 일부 간질약인 카르바마제핀(Carbamazepine)은 MBR 및 재래식 공법에 의해서도 제거되지 않은 것으로 확인되었다. 향후 공공수역의 독성물질 관리를 위해서는 다양한 분리막 처리 공법의 적용을 포함한 고효율 통합처리기술 개발이 요구된다.

기술적 측면에서 보면 막소재/모듈의 개선, 장비의 표준화, MBR 시스템 공정의 설계와 성능과 운영관리 등 4가지 분야로 요약될 수 있다. 최근 각국 전문가를 대

상으로 MBR와 관련된 연구 관심 분야를 조사한 결과를 보면 분리막의 전처리(Screening/pretreatment)가 22%로 가장 중요한 분야로 나타났고 분리막과 공기주입장치의 막힘 현상(Membrane and aerator clogging)이 19%, 과부하 문제(Overloading/under design)가 17%, 분리막 파울링과 저항도(Fouling/fouling resistance) 등의 문제가 15%로 나타났다[36]. 해결 과제로는 장비의 표준화, 최대유량에 대응능력 문제, 높은 운영비용(에너지와 화학약품) 문제 등도 해결해야 할 문제로 제시하고 있다[36], [42,43]. 특히 MBR 분리막의 설계와 운영에 따라 바이오매스와 수리동력학적 특성이 달라지며 잘못된 설계와 운영조건은 분리막의 파울링을 증가시키고 결국 투과율 손실이 발생하게 된다. 파울링과 막 오염도를 줄이기 위한 연구로 i) 응집제 및 흡착제 등 첨가제(Additives) 투입에 의한 전처리[44], ii) 침지식 분리막에 sponge와 같은 전달체를 이용한 파울링 저감[45], iii) 막간 압력(trans-membrane pressure, TMP) 물리적 지표[46]와 미생물 대사산물(soluble microbial product, SMP) 화학적 지표[47]에 의한 파울링 모니터링 및 제어 및 iv) 다상횡방향유동(Multiphase crossflow)의 최적화[48]와 분리막 모듈의 구조[49]의 개선을 통한 플럭스 저감 등의 연구가 진행되고 있다. 또한 운영자 관점에서 보면 MBR 소재/모듈 및 공정 설계와 성능개선, MBR 자동화 운전시스템과 수질모니터링 도입을 통한 유지관리비 저감분야가 시급히 개선해야 할 것으로 판단된다[50,51].

MBR 기술을 적용하는데 에너지 소비량을 검증하는 것이 매우 중요하다. 하수처리 시스템이 에너지자립형 처리시스템을 지향하게 되므로 기존의 활성슬러지법보다 운영비를 저감할 수 있는 기술개발이 요구되며, 또한 대형화되고 있는 실플랜트의 운영 노하우에 대한 표준화가 요구된다. 하·폐수 처리 수준에 따라 기존의 생물학적 처리방식을 포함한 다양한 공정 선택이 가능하도록 되어야 하고 특히 하수재이용 측면에서 접근시 MBR (MF), UF 및 역삼투막(RO)와 같은 분리막 기반의 처리기술을 조합하는 것이 효과적이다.

통상적으로 UF/MF, RO 등 막을 이용한 하수 재이용 기술은 초기 설치비와 운영비가 상대적으로 높다. MBR은 활성 슬러지법(CAS)과 비교할 때 운전비용(O&M)이 20~50% 높은 것으로 분석된다. 전력비용은 대략 MBR은 하수 처리의 경우 0.4~0.6 kWh/m³, 폐수 처리의 경우 0.6~3 kWh/m³, CAS은 0.3~0.4 kWh/m³으로 나타났

다[52-54]. 대부분 막 오염에 의한 파울링 제어비용과 포기에 필요한 동력비로서 진행되고 있다. 이러한 문제를 해소하기 위해 최근에는 저에너지 제어기술을 중점적으로 개발이 필요하다.

현재 MBR 기술은 안정적인 수질 확보와 슬러지 감량화에 초점이 맞춰져 있다. 차세대 기술의 하나로 에너지 자립형의 고효율 혐기성 분리막 기술이 제시되고 있다. 최근 호기성 생물반응기에서 탈피한 혐기성 MBR 공정에 관한 학술논문이 2005년 15건에서 2010년 45건으로 증가하는 추세이다[55]. 유입하는 하·폐수의 특성과 운전 조건에 따라 외부 루프형 분리막, 외부 gas lift식 분리막 및 내부 침지식 분리막 등 다양한 혐기성 MBR 공정이 개발되고 있다[56-58]. 또한 하수슬러지, 축산분뇨, 음식물쓰레기 등 다양한 바이오매스원을 이용하여 에너지를 생산하면서 안정적인 수질과 슬러지 감량이 가능한 막 결합형 혐기성 기술이다[59,60]. 그 외 유사한 기술로서는 전혐기성 MBR 공정과 일명 Anammox MBR인 혐기성 Ammonium 산화기술 등이 있으며 최근 이와 관련된 연구가 다수 진행되고 있음을 주목할 필요가 있다[61]. 최근에 일본 Toray사는 하수와 해수를 동시에 처리하여 물을 재이용하고 분리막 운전 중에 발생하는 에너지를 최소화하기 위한 기술개발에 착수하였다. 우선 하수를 대상으로 기존의 MBR-고압용 RO 공정대신 MBR-저압용 RO 공정을 적용하여 에너지를 절감하고 발생하는 농축수를 반송하는 대신 해수담수화 UF 분리막 후단에 투입하는 방식의 분리막 기술을 처음으로 적용하는 「The Japanese “Mega-ton Water System”」 프로젝트이다[62]. 이 프로젝트는 New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO) 주관아래 수행 중이며 Toray사는 침지형 MBR, 가압식 UF 및 저·중압형 RO 기술을 약 2,000 m³/일 규모의 실증 Test bed에 설치할 예정이다. 이 기술의 핵심은 하수와 해수를 동시에 투입하여 고기능성 분리막(하수 : MBR + LPRO, 해수 : UF + MPRO)을 적용함으로써 개별 공정에서의 소요되는 에너지와 RO 농축수 문제를 동시에 해결하는 Water-saving Recycling Systems (Innovative RO Membrane, Energy-saving MBR) 기술이라고 할 수 있다.

5. 결 론

선진형 하·폐수 처리시스템은 유해물질을 원천적으로 제거하는 고도처리 개념과 물순환 체계를 확립하고

대체 수자원을 확보하는 재이용 기초로 한다. 따라서 분리막 기반의 처리시스템은 이러한 시대적 기술 수요를 충족할 수 있는 최적의 기술 대안 중 하나이며, MBR 공정이 중심기술이라 하겠다. 하수 재이용이 필수화되는 처리 공정에서는 재이용수 용도에 따라 MBR 공정에 AOP 기술이나 후처리 RO/NF 공정 등이 선택적으로 조합될 수 있을 것이다. 실제 대용량 처리장으로 확대 되는데 있어 에너지 소비를 고려한 고효율 시스템, 파울링 해소기술 등이 반드시 수반되어야 한다.

시장측면에서 보면 분리막 세계 시장이 지속적으로 확대되고 MBR 시장은 2010년 337백만 달러 규모에서 10% 이상의 증가율을 보여 2017년 888백만 달러에 달할 것으로 예상된다. 향후 에너지 가격 상승, 수자원 부족 등의 요인에 따라 하수 재이용이 필연적으로 확대될 것이므로 MBR 시장 전망은 매우 밝다 하겠다. 국내 기업들의 경우 내수시장이 하수 재이용 시설을 중심으로 지속적인 성장세를 보이기는 하겠으나, 하수 처리율이 90%를 상회할 정도로 기초적인 하수 처리 인프라가 구축되어 있음을 고려할 때 20여 년간 국내 하수 처리 시설 설치·운영 노하우를 축적한 관련기업들의 도약을 위해서는 개도국 시장 진출이 필수적이다. 현재 세계적으로 상업용 침지식 MBR 제조사는 약 40개 이상, 제품은 50개 이상이며 10,000 m³/일 이상으로 하수 처리용 MBR 플랜트가 대형화되고 있다. MBR 시장에서 선진국의 선도 기업들의 시장 점유율이 낮아지고 있으며, 아직 기술력이 부족하기는 하나 중국을 비롯한 신흥 개도국 기업들이 부상하고 있는 점을 국내 기업들이 주시해야 할 것이다.

기술적, 수질적 및 경제적 측면에서 보면 우리나라는 MBR 시스템 기술을 포함한 분리막 기반 고도 수처리 플랜트 기술의 경우, 기반기술은 갖췄으나 소재, 모듈, 시스템 분야의 핵심기술에서 다소 미흡한 것으로 분석된다. 다만 선진국과 대등한 특허 출원을 보이고 있어 연구투자 측면에서는 크게 뒤떨어지지 않은 것으로 판단된다. 이러한 기술의 경우 해외특허 장벽이 높게 형성되어 있으나, 국내 하·폐수 처리기술도 상당한 수준을 갖추고 있으므로, 수요자 맞춤형 처리시스템과 에너지자립 시스템을 지향하는 연구개발을 통해 기술경쟁력을 강화해야 한다. 또한 MBR 공정에서 미흡했던 막 설계와 소재 성능강화, 운영비 절감기술, 유지관리기술 등을 집중적으로 개발함으로써 급성장하는 세계 하수 처리 및 재이용 시장에 대응할 수 있을 것으로 판단된

다. 환경적 측면에서 하수 재이용은 대체수자원 확보뿐 아니라 공공수역의 수질 및 수생태 개선에 기여할 것으로 기대되며 여기에는 내분비 교란 화학 물질(Endocrine Disrupting Chemicals), 의약품 및 개인관리용품(Pharmaceuticals and Personal Care Products) 등과 같은 독성물질을 효과적으로 처리하는 고도 처리 기술이 요구된다. 마지막으로 미래시장을 대비한 막 결합형 혐기성 공정과 같은 차세대 에너지 자립형 MBR 기술개발에도 지속적인 투자가 필요한 시점이다.

감 사

본 논문은 환경부 글로벌탑 환경기술개발사업 중 하·폐수고도처리기술개발사업의 지원에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다(과제번호 : GT-11-B-01-001-0).

참 고 문 헌

1. K. Sutherland, "The rise of membrane bioreactors", *Filtration & Separation*, **47(5)**, 14 (2010).
2. S. Judd and C. Judd, "The MBR book: Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment", pp. 4-5, 2nd Edition Elsevier, Oxford, UK (2010).
3. Ministry of Environment, "An study on the setup of master plan for water reuse", pp. 1-22, Ministry of environment (2010).
4. A. Santos and S. Judd, "The commercial status of membrane bioreactors for municipal wastewater", *Separation Science and Technology*, **45**, 850 (2010).
5. C. Pierre, A. Zamir, and P. Jeff, "Hollow fiber membrane life in membrane bioreactors (MBR)", *Desalination*, **288**, 145 (2012).
6. British Broadcasting Corporation Research & Development (BBC), "Membrane bioreactors : Global markets", pp. 1-3. BCC Report Code MST047B, Report Category-Membrane & Separation Technology (2008).
7. J. Srinivasan, "MBR still growing in EU wastewater treatment market", *Water and Waste International*, **22**, 43 (2007).
8. Global Industry Analysis (GIA), "Global membrane

- bioreactors market to reach US \$ 888 million by 2017”, pp. 1-2, Available at: <http://www.strategy.com/pressMCP-6137.asp> (2011).
9. Feature, “Global MBR market forecast to reach \$888 million by 2017”, *Membrane Technology*, **1**, 1 (2012).
 10. WaterWorld, “Membrane multiplier : MBR set for global growth”, Available at : <http://www.waterworld.com/articles/wwi/print/volume-27/issue-2//regulars/creative-finance/membrane - multiplier-mbr.html> (2008).
 11. D. F. Ayala, V. Ferre, and S. J. Judd, “Membrane life estimation in full-scale immersed membrane bioreactors”, *J. Membr. Sci.*, **378**, 95 (2011).
 12. T. Asano, F. L. Burton, H. L. Leverenz, R. Tsuchihashi, and G. Tchobanoglous. “Water Reuse: Issues, Technology and Applications”, pp. 1-10, McGraw-Hill, New York, USA (2007).
 13. I. Bemberis, P. J. Hubbard, and F. B. Leonard, “Membrane sewage treatment systems potential for complete wastewater treatment”, *Proc. Amer. Soc. Agric. Eng.*, **71**, 1 (1971).
 14. K. Yamamoto, M. Hiasa, T. Mahmood, and T. Matsuo, “Direct solid-liquid separation using hollow fiber membrane in an activated-sludge aeration tank”, *Water Science Technology*, **21**, 43 (1989).
 15. Water Environment Federation (WEF), “Membrane bioreactors, WEF Manual of Practice”, **36**, 1 (2011).
 16. S. Judd and C. Judd, “The MBR book : Principles and applications of membrane bioreactors for water and wastewater treatment”, pp. 1-5, Oxford OX5, UK, Elsevier (2006).
 17. T. Buer and J. Cumin, “MBR module design and operation”, *Desalination*, **250**, 1073 (2010).
 18. W. Doyen, W. Mues, B. Molenberghs, and B. Cobben, “Spacer fabric supported flat-sheet membranes : A new era of flat-sheet membrane technology”, *Desalination*, **250**, 1078 (2010).
 19. G. Pearce, “Introduction to membranes : Membrane selection”, *Filtration & Separation*, **44(3)**, 35 (2007).
 20. G. Pearce, “ Introduction to membranes : Filtration for water and wastewater treatment”, *Filtration & Separation*, **44(2)**, 24 (2007).
 21. <http://www.thembrsite.com/products.php>, January 1 (2012).
 22. http://www.kubota-mbr.com/resources/KubotaBrochure_2010.pdf. January 1 (2010).
 23. http://www.toray.com/ir/pdf/lib/lib_a265.pdf. October 5 (2012).
 24. <http://www.huber.de/products/membrane-bioreactor-mbr.html>. October 5 (2012).
 25. http://www.mrc.co.jp/sterapore/english/sterapore_02.html. Jun 17 (2012).
 26. http://www.thembrsite.com/feature_mempulse.php. October 5 (2012).
 27. http://www.kochmembrane.com/PDFs/KMS_Sao_Paulo_Brazil_Case_Study.aspx. July 20 (2012)
 28. G. Pearce, “Introduction to membranes - MBRs: Manufacturers’ comparison: Part 1”, *Filtration and Separation*, **45**, 32 (2008).
 29. http://www.gewater.com/products/equipment/mf_uf_mbr/mbr.jsp. May 23 (2012).
 30. J. T. Kim, “Trends of domestic and international for technology and market in wastewater treatment”, pp. 1-200, Research report (version 1), R&D Center for Advanced Technology of Wastewater Treatment and Reuse Publishing (2011).
 31. Korean Intellectual Property Office (KIPO), “Patent Trends in the advanced technology of energy & resources - saving recycling in wastewater treatment plant”, pp. 1-50, Research report, Available at : www.patentmap.or.kr/pm/report/download.asp (2010).
 32. J. T. Kim, H. Y. Hwang, B. P. Hong, H, and S. Byun, “The background and direction of r&d project for advanced technology of wastewater treatment and reuse”, *Membrane Journal*, **21(3)**, 277 (2011).
 33. Frost & Sullivan, “Sustainable water treatment technologies in the 2020 global water market”, pp. 1-20, Available at: <http://www.forburyinvest.com/fileuploads/Frost%20%26%20Sullivan.pdf> (2012).
 34. The Freedonia Group, “World membrane separation technologies to 2015 - market research, market share, market size, sales, demand forecast, market leaders, company profiles, industry trends”, pp. 1-5, Beta Drive Cleveland, Ohio (2012).

35. J. W. Mulder, "Operational experiences with the hybrid MBR Heenvliet, a smart way of retrofitting", Book of Proceedings of final MBR Network workshop, 31 March.1. April, Berlin, Germany (2009).
36. A. Santos, W. Ma, and S. J. Judd, "Membrane bioreactors : Two decades of research and implementation", *Desalination*, **273**, 148 (2011).
37. F. Meng, S. R. Chae, A. Drews, M. Kraume, H.-S. Shin, and F. Yang, "Recent advances in membrane bioreactors (MBRs) : Membrane fouling and membrane material", *Water Research*, **43**, 1489 (2009).
38. F. I. Hai and K. Yamamoto, "Membrane Biological Reactors", Faculty of Science-Papers, pp. 571-613 (2011). Available at: http://works.bepress.com/faisal_hai/6.
39. W. D. Wildea, M. Richard, B. Lesjeanc, and A. Tazi-Pain, "Towards standardisation of the MBR technology?", *Desalination*, **231**, 156 (2008).
40. Y. Yoon, J. Ryu, J. Oh, B. G. Choi, and S. A. Snyder, "Occurrence of endocrine disrupting compounds, pharmaceuticals, and personal care products in the Han River", *Science of The Total Environment*, **408**, **3(1)**, 636 (2010).
41. N. Tadkaew, F. I. Hai, J. A. McDonald, S. J. Khan, and L. D. Nghiema, "Removal of trace organics by MBR treatment : The role of molecular properties", *Water Research*, **45**, 2439 (2011).
42. J. T. Kraemer, A. L. Menniti, Z. K. Erdal, T. A. Constantine, B. R. Johnson, G. T. Daigger, and G. V. Crawford, "A practitioner's perspective on the application and research needs of membrane bioreactors for municipal wastewater treatment", *Bio-resource Technology*, **122**, 1 (2012).
43. J. L. Lim, K. H. Lee, Y. J. Lee, and J. Y. Park, "Optimum coagulation conditions for ceramic microfiltration membrane process", *Membrane Journal*, **22(2)**, 135 (2012).
44. V. Iversen, R. Mehrez, R. Y. Horng, C. H. Chen, F. Meng, A. Drews, B. Lesjean, M. Ernst, M., and Jekel, M, "Kraume fouling mitigation through flocculants and adsorbents addition in membrane bioreactors : comparing lab and pilot studies", *J. Membr. Sci.*, **345**, 21 (2009).
45. H. H. Ngo, W. Guo, and W. Xing. "Evaluation of a novel sponge-submerged membrane bioreactor (SSMBR) for sustainable water reclamation", *Bio-resource Technology*, **99**, 2429 (2008).
46. E. Brauns, D. Teunckens, C. Dotremont, E. van Hoof, W. Doyen, and D. Vanhencke, "Dead-end filtration experiments on model dispersions: comparison of VFM data and the Kozeny-Carman model", *Desalination*, **177**, 303 (2005).
47. R. Mehrez, M. Ernst, and M. Jekel, "Development of a continuous protein and polysaccharide measurement method by Sequential Injection Analysis for application in membrane bioreactor systems", *Water Science Technology*, **56(6)**, 163 (2007).
48. A. P. S. Yeo, A. W. K. Law, and A. G. Fane, "The relationship between performance of submerged hollow fibers and bubble-induced phenomena examined by particle image velocimetry", *J. Membr. Sci.*, **304**, 125 (2007).
49. A. Sofia, W. J. Ng, and S. L. Ong, "Engineering design approaches for minimum fouling in submerged MBR Desalination", **160**, 67 (2004).
50. B. Thomas and J. Cumin, "MBR module design and operation", *Desalination*, **250**, 1073 (2010).
51. P. Le-Clech, A. Fane, G. Leslie, and A. Childress, "MBR focus: the operators' perspective", *Filtration & Separation*, **45(5)**, 20 (2008).
52. B. Swinton, "Membrane technology", *Water*, 36 (2005).
53. G. Pearce, "Introduction to membranes-MBRs : Manufacturers' comparison : part 1", *Filtration & Separation*, **45(2)**, 28 (2008).
54. G. Pearce, "Introduction to membranes : An introduction to membrane bioreactors", *Filtration & Separation*, **45(1)**, 32 (2008).
55. Scopus. Scopus key-word searches and abstracts. Retrieved from : www.scopus.com February (2012).
56. H. J. Lin, W. J. Gao, K. T. Leung, B. Q. Liao, and H. J. Lin, "Characteristics of different fractions of microbial flocs and their role in membrane

- fouling”, *Water Science Technology*, **63(2)**, 262 (2011a).
57. H. Lin, B. LiaO, J. Chen, W. Gao, L. Wang, and F. Wang, “New insights into membrane fouling in a submerged anaerobic membrane bioreactor based on characterization of cake sludge and bulk sludge”, *Bioresource Technology*, **102(3)**, 2373 (2011b).
58. H. J. Lin, K. Xie, B. Mahendran, D. M. Bagley, K. T. Leung, and S. N. Liss, “Factors affecting sludge cake formation in a submerged anaerobic membrane bioreactor”, *J. Membr. Sci.*, **361(1)**, 126 (2010).
59. Y. Kim, D. W. Jun, S. K. Yoon, C. H. Chang, J. H. Bae, K. S. Yoo, and J. H. Kim. “Effect of cross-flow velocity and tmp on membrane fouling in thermophilic anaerobic membrane bioreactor treating food waste leachate”, *Membrane Journal*, **21(4)**, 135 (2011).
60. J. B. Gimenez, N. Marti, J. Ferrer, and A. Seco, “Methane recovery efficiency in a submerged anaerobic membrane bioreactor (SAnMBR) treating sulphate-rich urban wastewater : Evaluation of methane losses with the effluent”, *Bioresource Technology*, **118**, 67 (2012).
61. Y. Tao, D. W. Gao, Y. Fu, W. M. Wu, and N. O. Ren, “Impact of reactor configuration on anammox process start-up: MBR versus SBR”, *Bioresource Technology*, **104**, 73 (2012).
62. M. Kurihara, “Government funded programs worldwide, the japanese “mega-ton water system” project”, The 3rd Osmosis Membrane Summit, April 26 (2012).