

## 수처리

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

### 오수처리 기술 MBR 공법 소개

#### ▶ 개요

1990년대에 이미 MBR 공법은 국제적으로 오수처리를 위해 널리 응용되어왔다. 중국은 경제와 과학기술이 발전함에 따라, 다양한 기술을 적용하여 오수처리 효율을 향상시키고 있다. 특히 MBR 공법은 원가가 저렴하고 우수한 유출수의 수질 개선 등 장점으로 지속적으로 개발되고 있다. 또한 이 기술은 소형에서 대형의 오수처리장에 적용되고 있어 그 응용범위가 점차 다양해지고 있다. 특히, 유출수의 수질 개선뿐 아니라 슬러지 처리 문제도 해결할 수 있어 많은 관심을 받고 있다.

MBR 공법은 ‘막분리 생물반응기’로도 불리며, 막분리 장치를 생물처리 장치와 유기적으로 결합한 새로운 형태의 수처리 기술이다. 막분리 장치는 생화학 반응조에 있는 활성슬러지와 고분자 유기물을 차단하면서 사용된다. 특히 MBR 공법은 기존방법인 중력침전(重力沉淀)에 의한 고체·액체를 분리시키는 분리장치보다 분리효율을 높일 수 있다.

그리고 MBR 공법은 여러 연구를 통해 유출수의 수질이 전통적인 공법보다 월등히 우수하게 나타났다. 따라서 중국 또한 도시화 건설이 점차 빠르게 진행되고 있고 오수처리에 대한 요구 또한 높아지고 있다. 이에 MBR 공법이 효율적인 오수처리 공정 중 하나로 다양한 응용을 통해 광범위하게 사용될 것으로 전망된다.

#### ▶ MBR 공법 정의

MBR 공법은 ‘막분리 생물반응기(Membrane Bio-Reactor, 膜生物反应器)’ 오수처리 기술은 고효율 분리막의 오수 분리기술과 활성슬러지 공법을 유기적으로 결합된 오수처리 공법이다. 이 오수처리 공법은 모든 오수에 포함된 미생물을 생물반응기에서 차단할 수 있는 장점이 있다. 이로 인해 생물반응기의 슬러지 농도가 높아지지만 이렇게 높아진 슬러지 농도는 슬러지 연령(sludge age, 泥齡)<sup>1)</sup>에는 영향을 미치지 않는다. 따라서 무한한 성장을 통해 유출수 유기오염물의 함량과 농도를 최저로 만든다.

MBR 공법은 오수에 포함된 암모니아와 질소를 효과적으로 제거할 수 있어 공업오수처리에 효과적이다. 특히 전통적인 생물처리법과 비교하면, MBR 공법은 처리 후 유출수의 수질이 좋고, 전체 공정설비의 부지면적이 적다. 또한 설비가 상대적으로 집중되어 있어 체계화·편리화에 용이하다.

1) 슬러지 연령(sludge age, 泥齡) : 최종 침전지에서 분리된 고형물의 일부는 폐기되고, 일부는 반송되어 슬러지는 포기시간보다 긴 시간동안 포기 내에 체류하는 시간이다. 그 값은 포기조 내 MLSS(혼합액 현탁고형물)량을 유입수 내의 SS(부유물질, 입자 지름이 2mm 이하로 물에 용해되지 않는 물질)량으로 나눈 값으로 나타낸다. 고형물 체류시간(SRT, solids retention time)은 포기조 내의 미생물의 평균 체류시간으로 슬러지 연령과 동일한 의미하며, 통상 유출수의 SS농도 값은 대단히 적으므로 무시할 수 있다. (네이버 지식백과, 2020.5.31.검색)

뿐만 아니라, MBR 공법은 응용범위가 광범위하여 향후 다양한 분야의 오수처리에 적용될 것이다. 따라서 중국에서 MBR 공법에 대한 연구는 비교적 늦게 시작되었지만 처리효율 등 장점으로 많은 기업에서 적용되고 있다. 특히 MBR 공법은 동일한 운영현황에서 그 생물반응기의 처리능력이 뛰어나 입자크기가 0.22 $\mu$ m보다 큰 유기오염물을 완전히 차단할 수 있다.

## ▶ MBR 공법의 오수처리 방식

MBR 공법은 주로 생물반응기의 생물막(biofilm, 生物膜)<sup>2)</sup> 모듈(組件), 송풍 폭기(aeration, 曝气)<sup>3)</sup> 시스템과 연결된 배관밸브 등으로 이루어져 있다. 우선 오수 속의 유기물이 수영장 형태의 수족관(池體)을 통과하면 그 안에서 미생물의 분해반응이 일어나 수질을 전체적으로 정화한다. 또한 생물막은 오수 속에 있는 큰 분자, 세균, 활성유기물을 생물반응기에서 차단하여 유출수의 수질을 향상시킨다. 이와 동시에 슬러지의 농도를 높여 생화학반응 속도를 상승시킨다.

생물막은 유기막(organic membrane, 有機膜)<sup>4)</sup>과 무기막(inorganic membrane, 無機膜)<sup>5)</sup> 두 가지 유형으로 분리된다. ▲유기막은 전체적으로 원가가 낮지만 2차 오염 등이 발생할 수 있다. ▲무기막은 원가는 비싸지만 다양한 환경에서 적용가능하며, 수명주기 또한 일정하게 유지할 수 있다. 생물막 모듈은 전체 시스템의 기능에 따라 분리성 MBR(Dissociative MBR, 分離性MBR), 폭기성 MBR(aeration MBR, 曝气性MBR), 추출성 MBR(extractive MBR, 萃取性MBR) 등으로 구분된다.

<생물막 모듈의 기능적 분류>

구분	특징
분리성 MBR	<ul style="list-style-type: none"> <li>전통적인 미생물처리 기술인 2차 침전조와 유사</li> <li>MBR의 차단율(rejection coefficient, 截留率)<sup>6)</sup>이 높아 생물반응기 속 물질의 생물·화학적 농도가 높고 슬러지의 긴 체류시간을 통해 오수처리 후 유출수의 수질 보장</li> </ul>
폭기성 MBR	<ul style="list-style-type: none"> <li>통기성(air permeability, 透气性)<sup>7)</sup>의 생물반응기에서 산소를 공급하고 이때 공급된 산소는 완전히 흡수되어 이용하므로 별도의 기포 생성 없음</li> </ul>
추출성 MBR	<ul style="list-style-type: none"> <li>섬유물질 내 실리콘 관으로 구성</li> <li>끓는 물에 있는 오염물질을 효과적으로 흡수하여 미생물의 흡착을 통해 분해 작용을 진행함</li> </ul>

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 자체 작성, 2020>

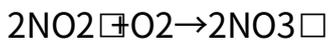
반응기와 막 구성의 결합방식과는 달리 MBR 공법의 생물반응기는 분리형과 일체형 두 가지로 나눌 수 있다. ①분리형 방식은 말 그대로 생물막과 반응기의 설정방식이 분리되어 있고 전체 시스템은 가압펌프를 통해 구동된다. 분리형 방식의 장점은 전체 시스템 운영이 상대적으로 안정적이고 조작·막 세척·교환이 간단하다. 하지만 동력에 대한 요구가 높은 단점이 있다. ②일체형 방식은 생물막 모듈을 생물반응기에 넣고 진공 펌프로 빨아들이는 방식으로 물을 공급한다. 이런 형태의 처리 방식은 운영원가는 낮지만 안정성과 편의성에서 분리형 방식과 차이를 보인다.

2) 생물막(biofilm, 生物膜) : 미생물이 주된 구성요소가 되어 생성된 막으로 오수에서 오염물질을 처리하는데 사용된다. (네이버 국어사전, 2020.5.31.검색)  
 3) 폭기(aeration, 曝气) : 공기와 액체를 접촉시켜 액체에 산소를 공급하는 것을 뜻한다. (네이버 지식백과, 2020.5.31.검색)  
 4) 유기막(organic membrane, 有機膜) : 유기 고분자 화합물로 이루어진 얇고 평평한 막을 통틀어 이르는 말. 일반적으로 열이나 이물질에 의하여 손상되기 쉬우나 막 면적이 커서 여러 가지 표면 특성을 선택할 수 있다. (네이버 국어사전, 2020.5.31.검색)  
 5) 무기막(inorganic membrane, 無機膜) : 무기물 소재로 된 막을 통틀어 이르는 말. 세라믹막, 탄소막, 유리 막 따위가 있다. (네이버 국어사전, 2020.5.31.검색)  
 6) 차단율(rejection coefficient, 截留率) : 막분리 기술의 중요한 지표이며, 막이 어느 조를 통과하거나 절취하는 능력이다.  $R=(1-C1)/C0 \times 100\%$ 로 구할 수 있고 R(차단율), C1(투과액 농도), C0(유입액 농도)를 뜻한다. (바이두 백과, 2020.5.31.검색)  
 7) 통기성(air permeability, 透气性) : 공기가 통할 수 있는 성질이나 정도를 뜻한다. (네이버 국어사전, 2020.6.1.검색)

## ▶ MBR 공법의 화학반응 및 주요 특징

MBR은 화학적 반세척, 화학적 세척공법을 적용하여 생물막 모듈의 물 생성능력과 막통량(The membrane flux, 膜通量)<sup>8)</sup>을 보장한다. 막횡단 영역(transmembrane domain, 跨膜)<sup>9)</sup>의 압력은 일반적으로 0.01~0.06MPa(메가파스칼)<sup>10)</sup>이다. 또한 사이펀(syphon, 虹吸)<sup>11)</sup> 원리를 이용하여 별도의 물 생성공정이 필요 없어 시스템의 운영비용을 절감할 수 있다.

MBR 공법은 무산소조와 호기성조를 조합한 형식으로 사용된다. 오수는 우선적으로 무산소조에 들어가는데 여기에서 큰 분자의 양을 생화학적 방법으로 소분자 유기물로 분해한다. 이렇게 분해된 유입수는 호기성조로 들어가 유기물의 생물분해를 진행한다. 이와 동시에 생물의 나이트로화(nitrification, 硝化)<sup>12)</sup>를 통해 산소결핍 구역으로 환류함으로 탈질화를 완료한다. 이때, 호기성조의 질화세균(Nitrifying bacteria, 硝化菌)<sup>13)</sup>으로 인해 반응하며, 그 화학반응식은 다음과 같다.



무산소조는 탈질세균(denitrifying bacteria, 反硝化細菌)<sup>14)</sup>에 의해 반응하며 그 화학반응식은 다음과 같다.



또한 MBR 공법은 다음과 같은 특징을 지닌다.

- ① (효과적인 오염물질 제거) MBR 공법은 오수에 있는 현탁(suspension, 懸浮)<sup>15)</sup> 고체입자를 전체적으로 제거한다. 그 생물막 모듈의 구멍은 직경 0.01 $\mu\text{m}$  정도로 막의 공극도(porosity, 孔隙度)<sup>16)</sup>가 작다. 반응기에 있는 모든 현탁 슬러지를 모두 차단하며, 고체·액체의 분리효과가 뛰어나 현탁 입자에 대한 차단율이 99% 이상으로 뛰어나다. 오수의 탁도(turbidity, 濁度)<sup>17)</sup> 처리 또한 90% 이상을 보인다. 따라서 유출수 탁도는 수돗물 탁도와 비교가 가능하다.

8) 막통량(The membrane flux, 膜通量) : 통량(투과속도)는 막분리 과정의 중요한 공정 매개변수로 단위시간 동안 단위막면적을 통과하는 유체(기체·액체)의 양을 의미하며, 일반적으로 m/s로 표시된다. (네이버 백과, 2020.6.1.검색)

9) 막횡단영역(transmembrane domain, 跨膜) : 막단백질(membrane protein)의 지질 이중막(lipid bilayer)을 관통하여 횡단하는 영역을 말한다. 일반적으로 20-25개의 수소성을 띠는 아미노산으로 이루어진 알파나선(alpha helix) 구조로 막횡단나선(transmembrane helix)으로 불린다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

10) 메가파스칼(MPa) : 압력단위의 일종이며, 1MPa=1\*10<sup>6</sup>Pa이다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

11) 사이펀(syphon, 虹吸) : 파이프, 또는 튜브를 뜻하는 고대 그리스어로부터 유래한 단어로써, 대개 거꾸로 된 U자 모양의 관을 뜻한다. 사이펀을 이용하면 펌프를 이용하지 않고도 유체를 중력에 반하여 끌어올릴 수 있어 수면높이가 다른 두 유체사이의 이동을 위하여 많이 사용된다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

12) 나이트로화(nitrification, 硝化) : 유기화합물에 나이트로기 -NO<sub>2</sub>를 도입하는 반응의 총칭이다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

13) 질화균(Nitrifying bacteria, 硝化菌) : 암모니아·아질산을 산화하여 질산으로 만드는 세균을 뜻한다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

14) 탈질세균(denitrifying bacteria, 反硝化細菌) : 탈질을 일으키는 세균을 말하며 토양, 해양 등 자연계에 널리 분포하지만 그 종류는 그다지 많지 않다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

15) 현탁(suspension, 懸浮) : 액체에 완전히 용해되지 않은 물질이 섞여 있는 것. 또는 그런 현상을 뜻한다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

16) 공극도(porosity, 孔隙度) : 주어진 다공성(물질의 내부나 표면에 작은 구멍이 많이 있는 성질)의 물질에서 구멍의 수와 크기를 나타내는 용어이나 실험실 등에서는 여과지 등의 구멍수와 크기를 나타내기도 한다. (네이버 지식백과, 2020.6.1.검색)

17) 탁도(turbidity, 濁度) : 물이 흐린 정도. 증류수 1리터 가운데에 백토 1mg이 섞여 있을 때를 1도로 한다. (네이버 국어사전, 2020.6.1.검색)

생물막 모듈의 차단작용이 비교적 좋기 때문에 오수 속의 활성슬러지는 모두 반응기의 슬러지 농도가 최대 40~50g/ℓ에 도달할 수 있어 생물반응기 내 슬러지의 부하를 낮출 수 있다. MBR 공법은 생활오수에 대한 화학적 산소요구량(COD)<sup>18)</sup> 제거율은 94% 이상이며, 생화학적 산소 요구량(BOD)<sup>19)</sup> 제거율은 96% 이상이다. 여기에서 주의할 점은 오수처리를 할 때, 공극도가 비교적 적합한 생물막 모듈을 선택해야 한다. 또한 MBR 공법은 다양한 세균 처리도 효과가 있어 오수처리 공정을 간소화할 수 있다.

- ② **(높은 실용성과 유연성)** 오수처리 중 전통적인 처리공정은 전체 공정시간이 길고 설비의 부지면적이 크다. 또한 유출수의 수질을 배출표준 부합을 보장할 수 없다. 하지만 MBR 공법은 공정시간이 짧고 설비의 부지면적이 작아 오수처리를 할 때 유연하게 적용할 수 있다. 유입수의 양을 제어가능하고, 오수처리의 실제 요구에 따라 생물막 모듈의 증감을 통해 유출수 양을 조절가능하다. 그리고 전체 공정과정이 매우 간소화되어 조작이 편리하다.

전통적인 오수처리 공법은 고체·액체 분리를 위해 2차 침전조를 사용하는 것인데 이 방식은 오수의 슬러지가 쉽게 팽창된다. 하지만 MBR 공법은 2차 침전조 사용 없이 고체·액체 분리가 가능해 조작권리의 복잡도가 낮고 오수의 처리효율이 높다. 또한 MBR 공법은 오수처리의 자동화 시스템의 요구를 충족시키고 있다.

- ③ **(슬러지 처리문제 해결가능)** 전통적인 오수처리 공정에서 슬러지 처리는 별도의 공정설계를 해야 하기 때문에 지나치게 공정과정이 까다로워 처리효율을 높일 수 있는 상황이 발생한다. 하지만 MBR 공법은 슬러지를 모두 생물반응기에 남겨 슬러지의 부하를 감소시킨다. 이에 생물 반응기는 영양물질이 부족하여 잔여슬러지의 양이 극도로 낮기 때문에 새로 생성되는 슬러지의 양 또한 적다. MBR 공법은 잔여슬러지의 농도가 매우 높아 처리시, 슬러지의 농축 없이 탈수가 가능하다. 이처럼 슬러지 처리 공정이 감소되어 처리효율을 높일 수 있다. 그리고 오수처리의 공정원가를 절감할 수 있으며, 슬러지 발생 문제를 해결가능하다.

<MBR 공법 특징>

특징	주요내용
효과적인 오염물질 제거	<ul style="list-style-type: none"> <li>공극도가 작아 반응기 내 모든 현탁 슬러지 처리 가능</li> <li>현탁 입자 차단율 99% 이상, 탁도 90% 이상</li> <li>COD제거율 94% 이상, BOD제거율 96% 이상</li> </ul>
높은 실용성과 유연성	<ul style="list-style-type: none"> <li>짧은 공정시간과 적은 설치부지로 유연하게 유출수 제어 가능</li> <li>2차 침전조를 사용하지 않아 복잡도가 낮고 오수 처리효율 높음</li> </ul>
슬러지 처리문제 해결가능	<ul style="list-style-type: none"> <li>슬러지를 모두 반응기에 남겨 슬러지의 부하 감소</li> <li>잔여 슬러지의 양이 적어 추가로 생성되는 슬러지 양이 작음</li> </ul>

<자료 출처 : 북극성 수처리망 내용 KEITI 중국사무소 자체 작성, 2020>

18) 화학적 산소요구량(COD, Chemical Oxygen Demand) : 화학적으로 분해 가능한 유기물을 산화시키기 위해 필요한 산소의 양을 뜻한다. <네이버 백과사전, 2020.6.1.검색>  
 19) 생화학적 산소요구량(BOD, biochemical oxygen demand) : 미생물이 물속의 유기물을 분해할 때 쓰는 산소의 양을 뜻한다. <네이버 지식백과, 2020.6.1.검색>

## ▶ MBR 공법 적용 후 유출수 특징

MBR 공법 적용 후 유출수의 가장 큰 특징은 용존 유기물(DOM, 溶解有机物)<sup>20)</sup>을 포함한다. 오수를 MBR 공법으로 처리 후 유출수에 포함되어 있는 용존 유기물은 천연유기물(natural organic matter, 天然有机物)<sup>21)</sup>, 화학적 합성 유기물과 같은 생물분해가 힘든 물질 등 다양한 종류의 서로 다른 유기물로 이루어진 복잡한 혼합물이다. 특히 오염물질 분해 중 발생하는 산물과 용해성 미생물 대사산물(microbial metabolites, 微生物代谢产物)<sup>22)</sup>은 MBR 공법의 유출수에서 용존 유기물이 생성되는 가장 중요한 구성 요소이다. 미생물 활성은 온도, pH, 용존산소(Dissolved Oxygen, 溶解氧)<sup>23)</sup>, 유기물질부하(organic loading, 有机负荷)<sup>24)</sup>, 반응기 내 슬러지 체류시간(SRT, 污泥停留时间)<sup>25)</sup> 등 다양한 요인에 의해 발생하는데 그중 슬러지 체류시간이 미생물 대사산물에 미치는 영향이 가장 크다.

## ▶ 시사점

MBR 공법은 혐기성조, 무산소조, 호기성조, 막분리조로 구성되어 있다. 이때, 막분리 모듈이 MBR 공법의 핵심기술이다. 막분리조에서 속이 빈 섬유막으로 이루어진 생물막 모듈이 세균의 통과를 완전히 막고 있기 때문에 현탁입자, 세균, 조류(algae, 藻类)<sup>26)</sup>, 탁도, COD, 유기물 모두 효과적으로 제거할 수 있다. 따라서 부유물이 제로에 가까워 유출수의 수질을 보장할 수 있다.

이처럼 MBR 공법은 막분리 장치를 생물처리 장치와 유기적으로 결합하는 새로운 형태의 수처리 기술이다. 막분리 장치는 생화학 반응조에 있는 활성슬러지와 고분자 유기물을 차단하는 사용할 수 있으며, 기존의 방법인 중력침전에 의한 고체·액체를 분리시켜 분리장치를 대체하며 분리효율 또한 높다. 그리고 실제 MBR 공법의 유출수 수질은 전통적인 방법인 오수처리인 활성슬러지 공법 대비 월등히 우수하게 나타났다.

최근 중국은 도시화 건설이 빠르게 진행되면서 오수처리에 대한 요구도 높아지고 있다. MBR 공법은 효율적인 수처리 공정 중 하나로 도시오수처리 뿐 아니라 공업폐수 처리, 축산폐수 처리 등 응용범위가 광범위하여 다양한 산업에서 적용될 것으로 전망된다.

북극성수처리망(北极星大气网), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200421/1065248.shtml>, 2020.6.2.접속

북극성수처리망(北极星大气网), <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200213/1043051.shtml>, 2020.6.2.접속

중국오수처리공정망(中国污水处理工程网), <https://www.dowater.com/jishu/2018-11-26/843709.html>, 2020.6.1.접속

※ 기술용어 번역·해석이 일부 상이할 수 있으니 반드시 중문본을 확인하시기 바랍니다.

20) 용존 유기물(DOM, Dissolved Organic Matter, 溶解有机物) : 죽은 생물체의 분해, 또는 생물에 의해 합성된 분자의 배출로부터 유래하는 용존 유기 분자이다.(네이버 지식백과, 2020.6.2.검색)

21) 천연유기물(natural organic matter, 天然有机物) : 요약 일반적으로는 자연계에 존재하는 유기물질을 일컫는 말을 뜻한다.(네이버 지식백과, 2020.6.2.검색)

22) 미생물 대사산물(microbial metabolites, 微生物代谢产物) : 미생물이 대사 과정에서 발생하는 다양한 대사산물을 의미한다.(바이두 백과, 2020.6.2.검색)

23) 용존산소(Dissolved Oxygen, 溶解氧) : 물속에 포함되어 있는 산소량을 나타내며 수질오염의 지표로 사용된다.(네이버 지식백과, 2020.6.2.검색)

24) 유기물질부하(organic loading, 有机负荷) : 오수 등의 정화처리용 기계·장치로 걸러지는 유기물질의 부하정도. 활성슬러지법, 살수여상법 등의 호기적 처리에서는 BOD부하를 의미한다.(네이버 지식백과, 2020.6.2.검색)

25) 체류시간(SRT, Sludge Retention Time, 污泥停留时间) : 반응조 내 고형 물질의 체류 시간을 뜻하며 일반적으로 하수처리장에서 미생물이 포기조나 생물반응조에 체류하는 시간을 말하는 것이며, 슬러지 연령이라고도 표현된다.(네이버 지식백과, 2020.6.2.검색)

26) 조류(algae, 藻类) : 흔히 물속에 살고 있는 광합성 생물을 아우르는 용어로, 다양한 진화계통군 생물들의 무리를 가리키는 통상 명칭이다.(네이버 지식백과, 2020.6.2.검색)



**중국환경산업 주간기술동향**

**발행**

2020년 6월 2일 KEITI 중국사무소

**기획총괄**

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

**주저자**

▷ 차목승(cms0522@keiti.re.kr)

**자료제작**

▷ 김종균(jaykim@keiti.re.kr)



중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.  
문의 : +86-10-8591-0997~8