

膜 : 수처리 공정의 새로운 전환

제 3 부 - 막과 오/폐수처리 -

글 __ 이정학 교수 · 박종상 서울대학교 응용화학부 물환경-막분리연구소



2003년 여름호 __ 제 1 부 - 막분리 공정의 기초

2003년 가을호 __ 제 2 부 - 막과 정수처리

2004년 신년호 __ 제 3 부 - 막과 오/폐수처리

오/폐수 처리 분야에서 분리막은 비교적 오래전부터 여러 산업 분야에서 다양한 목적으로 사용되어 왔다. 전통적으로 분리막 기술이 오/폐수 처리에 적용된 것은 오/폐수에 함유되어 있는 회수할 가치 있는 물질의 회수나 물의 재이용을 목적으로 한 경우이다. 예를 들면, ① 염색공정에서 한외여과(UF)를 적용하여 호발제(Sizing Agent)를 회수, ② 크리스탈 유리 가공 공정에서 정밀여과(Microfiltration, MF)와 결합된 나노여과(Nanofiltration, NF) 공정을 적용하여 폐수를 고도처리하여 공정수로 재이용, ③ 자동차 공장에서 세척수를 재이용할 목적으로 전통적인 폐수처리 시스템을 거친 처리수를 원수로하여 UF와 역삼투막(Reverse Osmosis, RO)의 혼성공정을 사용하는 경우이다. 이러한 예들은 대부분 기존의 전통적인 처리방법으로는 그 목적을 달성할 수 없는 틈새(Niche) 시장에 분리막 기술의 선택적 분리기능을 적용시킨 면이 있다. 즉, 분리막 이외에는 마땅한 처리 방법이 없거나 혹은 분리막 기술이외의 방법으로는 그 처리 목적을 달성하는데는 훨씬 고비용이 들기 때문에 비교적 고가의 분리막 공정을 적용하여도 기존의 전통적인 처리 혹은 기타의 처리 방법에 비해 경쟁력이 있기 때문이었다. 다시 말하면, 분리막 가격이 고가이더라도 그 투자비와 분리막의 운전 및 교체비용을 포함하는 운영비가 기타 다른 공정에 비해 경쟁할 수 있을 정도의 경제성이 있었기에 가능했던 측면이 있다. 한편, 또 다른 막분리 공정의 중요한 응용 예로는 오/폐수를 처리하고 처리된 물의 재이용까지 가능하게 해주는 MBR (Membrane Bio-Reactor)를 들 수 있다. 이 MBR 공정은 세계적으로 1980년대 중반부터 실용화/상용화되기 시작하여 현재 우리나라에서만 700개 이상이 가동되고 있을 정도로 기존의 전통적인 처리 공정을 대체 또

는 보완하고 있다. 이번 연재에서는 오/폐수 처리를 위한 분리막 공정 중에서도 MBR 공정에 초점을 맞추어 기술하고자한다.

1. 오/폐수처리 분야에서 MBR 공정 도입의 역사

1970년대에는 생물학적 폐수처리 후에 그 당시에 적용 가능한 분리막 여과기술로 처리수에서 미생물(Biomass)을 분리하고자하는 '개념(Concept)' 을 가지고 MBR에 대한 연구가 시작되었다. 그러나 그 당시의 분리막 재질은 심한 막오염과 막의 파손 때문에 신뢰할 수 없었다. 1980년대에 들어와서 북미와 캐나다, 유럽, 그리고 일본 등의 개척자들에 의해서 이러한 문제점이 점차 개선되기 시작했다. 하지만 당시 까지만 해도 분리막 세계(Membrane World)에서 수많은 문제점들이 노출되었으며 특히 분리막의 신뢰성과 분리막 모듈의 파손 등이 가장 큰 문제로 대두되었고 고가의 분리막을 오/폐수 처리에 활용할 수 있는지에 대한 부정적인 이미지가 여전히 남아 있었다.

1980년대 후반과 1990년대 초반에 이르러서 좀더 신뢰할 만한 분리막이 출현했다. 십자흐름형 방식을 사용하는 관형 분리막(Tublar Membrane)이 충분한 기계적 강도(내구성)를 갖고 가격 또한 저렴해짐으로써 새로운 시장의 문을 열게 된 것이다. 이와 같이 개선된 관형 분리막은 식음료 공정(Food Processing)이나 고가의 제약공정(Drug Processing) 이외에도 미생물의 분리를 위한 여과가 가능해짐으로써 진정한 의미의 MBR 개념(Concept)이 실현되었다.

그 후 MBR은 많은 소규모(Small Scale)의 산업폐수 처리 분야와 하수처리 분야에 건설되었으나 시장은 주로 고농도 폐수(High Concentration Wastewater) 분야에 제한되어 왔고 그 시장 규모도 매우 적었다. 양질의 처리수, 설치공간의 절약, 폐수의 재이용에 대한 요구가 증대되어 분리막의 보급이 크게 확대되리라 기대하였지만 'MBR의 Boom' 이 기대대로 이루어지지 않은 것은 분리막의 교체 비용과 에너지 소모율이 높기 때문이었다.

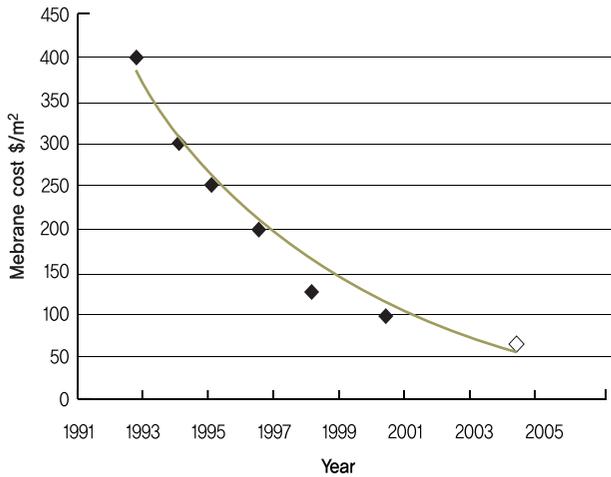


그림 1) Reduction in actual and projected membrane replacement cost per membrane area

1990년대 초반에서 중반에 소위 말하는 침지형 분리막이 일본과 캐나다에서 개발, 발전되어왔는데 이때야 비로소 MBR 공정이 시장에서 새롭게 하나의 장을 열게 되었다. 침지형 MBR 공정(Submerged MBR)은 십자흐름형 MBR 공정에서 필요로 하는 높은 전단 유속이 필요 없지만, 그 대가로 높은 막투과 유속(Membrane Flux)이 희생되었다. 그럼에도 불구하고 비교적 적은 공간에서 더 넓은 막면적을 비교적 적은 크기의 분리막 모듈로 실현가능하게 하여 이와 같은 낮은 막투과 유속의 문제를 극복할 수 있었다. 이 침지형 막모듈은 설치하기에 좀 더 용이하고 저렴하며 운전비용이 적은 장점이 있었다. 이와 같이 침지형 분리막이 출현하면서 관형 모듈을 기반으로 한 MBR(Tubular based MBR) 공정은 오/폐수처리 공정에서 밀려났고 좀더 높은 가격으로 경쟁력이 있는 식품가공, 의약품, 주스 가공 등의 시장으로 다시 돌아갔다. 1990년대 후반에 이르러 침지형 분리막의 가격이 현저히 하락하였다. 그림 1)에서 보면 분리막 교체 비용이 1992년에 400\$/m²에서 2000년에는 100\$/m²로서 1/4로 하락함을 볼 수 있다. 이와 같은 낮은 분리막 가격을 바탕으로 높은 유량-낮은 농도의 오/폐수처리 시장(High Flow-Low Concentration Market)에서 기존의 전통적인 처리 시스템과 경쟁할 수 있게 되었다. 큰 규모의 하수 처리를 위한 수많은 타당성 검토(Feasibility Study)가 수행되었고 그 결과로 침지형 MBR 공정이 경쟁력이 있다는 것이 밝혀졌다.

2. MBR 공정의 최근의 위치

최근까지 전 세계에 걸쳐서 2,000개 이상의 MBR 시스템이 가동되고 있고, 현재 건설 중에 있다. MBR 공정은 일본에서 성장하였는데 세계에서 가동 중인 MBR 시스템의 상당수가 일본과 한국에서 가동되고 있다. 그 외에는 주로 북미와 유럽 지역을 들 수 있다.

| Year | No. of plants | Largest plant (m ³ /d) |
|------|---------------|-----------------------------------|
| 1993 | 4 | 125 |
| 1995 | 20 | 250 |
| 1997 | 70 | 800 |
| 1998 | 150 | 1,907 |
| 1999 | 237 | 7,100 |
| 2000 | | 12,700* |

* : Swanage(독), 하수처리, 2000년 가동

표 1) Number of installed Kubota plants and treatment capacity

98% 이상의 MBR 공정이 호기성 활성슬러지 공정과 결합되어 있고 나머지 2% 이하만이 혐기성 소화와 결합되어 있다. 약 55%가 침지형 분리막을 채택하고 있으며 약 45%가 외부형(Side Stream) MBR을 채택하고 있다.

일본에서의 최초의 MBR 기술의 적용은 1990년에 이루어졌는데 주로 소규모의 오수처리 및 재이용과 몇몇 산업폐수 분야로부터 시작되었다. 산업폐수 분야는 주로 식품과 음료 산업에서 폐수의 농도가 높은 경우가 대부분이었다. 가정하수 처리는 소위 정화조(Johkasou)와 빌딩이나 가정에서의 하수 집수관 시스템의 처리가 대부분이었다. 캐나다와 유럽에서는 주로 산업폐수와 침출수폐수 처리에 초점이 맞춰졌다.

하수 처리 분야에서 현재까지의 MBR 채택은 아직 미비한 실정이다. 하수 처리에 적용되는 MBR 공정도 일반적인 도시하수 처리의 환경과는 다른 조건하에서 운전되고 있다. 예를 들면, 일정한 폐수 유입량, 높은 온도, 부스러기(Debris)가 없는 유입수 조건 등이다. 또한 전통적인 하수처리 공정에 비해서는 그 처리 용량이 적은 시설이 대부분이다. 하지만 하수 처리 분야에서 운전되거나 건설되고 있는 MBR 공정의 규모는 최근 몇 년 동안 그 처리 규모가 계속 늘어나고 있다. MBR의 수와 규모가 증가된 것은, Kubota에서 개발한 공정이 지난 몇 년간 설치한 플랜트의 수와 규모를 보면 알 수 있다. 표 1)에서 보면 1993년에 4개에 불과하던 Plant의 수가 1999년에는 237개로 증가하였다. 또한 처리 규모도 125m³/day에서 12,700m³/day으로 크게 증가하였다.

3. 오/폐수처리용 MBR 공정의 종류

MBR 공정은 전통적인 생물학적 처리공정과 막분리 공정을 결합시킨 것이다. 전통적인 생물학적 처리공정에서는 활성슬러지와 처리수를 분리하는데 2차 침전조에서 중력을 이용한 침전(그림 2-a 참조)을 이용하는 반면에 MBR 공정에서는 분리막을 이용한다. 즉, MBR 공정은 통상적으로 부유상태로 성장하는 미생물 반응조

와 분리막 공정을 결합시켜 하나의 공정으로 만들어진 단위 공정이다. MBR 공정은 세 종류로 구분된다. 즉 분리막 공정을 반응조 외부에 설치한 분리형 공정(Side Stream, 그림 2-b 참조), 반응조 내부에 분리막을 침지시킨 내부 침지형 (Internal Submerged, 그림 2-c 참조) 공정, 반응조 외부에 별도의 조를 만들어 분리막을 침지시킨 외부 침지형 (External Submerged, 그림 2-d 참조)이 있다.

제 1세대 MBR은 분리막이 활성슬러지조 외부에 설치되는 분리형(Side stream)으로 시작되었다(그림 2-b 참조). 분리형 MBR에서는 처리하고자 하는 오/폐수가 생물 반응조로 공급되어 미생물과 접촉하여 처리가 이루어진다. 처리가 이루어진 후 미생물 반응조의 혼합액(Broth)은 분리막과 미생물 반응조에 걸쳐서 순환루프(Recirculation Loop)에 설치되어있는 순환펌프를 통하여 분리막으로 공급되며 분리막을 투과하는 처리수는 배출되고 분리막에 의해서 배출된 용액(Retentate)은 다시 생물반응조로 되돌려 보내진다. 이 경우에는 분리막 운전조건을 결정하는 막간차압(Transmembrane Pressure: TMP)과 십자흐름 유속(Crossflow Velocity)은 순환펌프에 의해서 발생되고 결정된다. 분리형 MBR의 가장 큰 특징은 십자흐름형 유체흐름에 있다. 이 방식은 높은 유속을 분리막 표면에 십자 방향으로 흘려주어 분리막 표면에 오염물질이 침적되어 케이크층이 형성되는 것을 방지한다. 이와 같은 운전 방식은 높은 에너지가 요구되고 에너지 소모량이 높기 때문에 하수 처리에는 적합하지 않은 방식으로 생각되어왔다. 또한, 십자흐름을 일으키기 위하여 사용되는 순환펌프는 높은 압력과 과도한 전단력을 발생시키기 때문에 미생물의 플록 크기와 안정성을 저해하는 요인이 되고 있다.

2세대 MBR은 포기조에 분리막을 침지하는 방식으로 개발되었다(그림 2-c, d 참조). 침지형 MBR의 탄생은 MBR 공정의 적용에 아주 중요한 전환점을 만들었다. 침지형 MBR 공정은 순환루프가 없고 분리막을 미생물 반응조 내에 침지한 상태에서 직접 분리가 이루어지며, 이 점이 분리형 MBR 공정과 다른 점이다. 이러한 조건에서는 여과하기에 필요한 막간차압(TMP)은 분리막과 미생물반응조의 수위차에 의한 수두(Water Head)에 의해 발생되거나, 또는 흡입펌프(Suction Pump)를 사용하여 발생시킨다. 분리막의 오염은 통상적으로 포기(Aeration)로 생성된 공기 방울의 이동에 의해 유체 전단력을 분리막 표면 근처에 형성시켜 제어한다. 이 방법은 에너지 소비량을 확실하게 감소시켰다. 투과된 생산수를 뽑는데 필요한 압력은 십자흐름형 방식에 비해서 훨씬 낮다. 침지형 MBR에서도 막표면에 오염물질들이 침적되는 것을 방지하기 위한 방법이 채택되었지만 십자흐름형의 그것과는

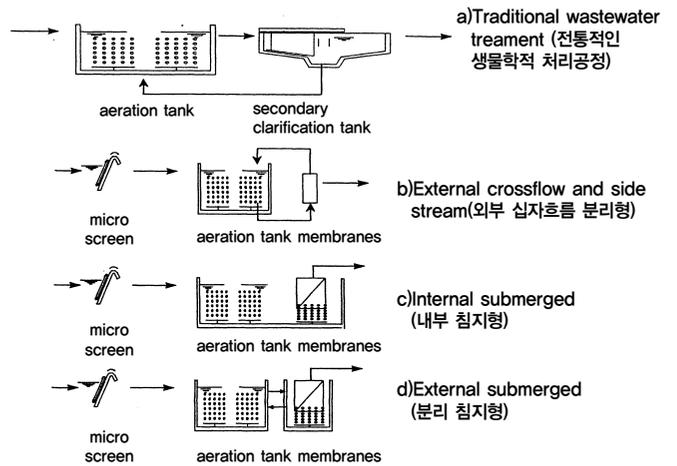


그림 2) Conventional wastewater treatment system and three types of MBRs

다른 것이었다. 분리막 표면에 십자흐름형 유선(Stream Line)을 발생시키기 위해서 낮은 압력의 공기를 이용하였다.

공기의 공급(Aeration)은 내부 침지형 MBR 공정(그림 2-c 참조)에서는 활성슬러지 공정의 한 부분으로 생각되어질 수 있다. 공기의 공급은 두 가지 역할을 한다. 첫째, 분리막 표면을 깨끗하게 해주는 역할을 하며 둘째, 미생물에 산소를 공급해주는 역할이다. 그러나 내부 침지형 MBR 공정에서는 막오염을 억제시키는 역할과 활성 슬러지에 산소를 공급해주는 역할을 동시에 수행하기 때문에 각각에 대한 최적의 공기 공급 조건을 충족시키는 것이 쉽지 않았다. 이런 단점을 극복하기 위해 고안된 방법이 외부 침지형(External Submerged) MBR 공정(그림 2-d 참조)이다. 외부 침지형 MBR은 활성슬러지조와 MBR조를 구분해서 각조에 적합한 공기를 효율적으로 공급해 줄 수 있다.

미생물혼합액(Mixed liquor)에 대한 전단력을 비교하면 공기에 의한 침지형 MBR이 순환펌프에 의한 십자흐름형 MBR에 비해서 현저히 낮기 때문에 슬러지의 막에 대한 여과도 (Filtrability)는 침지형 MBR이 십자흐름형 MBR에 비해 더 좋다.

캐나다의 Zenon사의 예를 들어 분리형과 침지형을 비교해보자. Zenon사는 1994년 미국의 Thetford Systems사로부터 관형 UF막을 이용하는 MBR 기술을 확보하였다. 그러나 1980년 후반부터 Zenon사 자체내에서 새로이 개발한 침지형 중공사막인 ZeeWeed막을 그림 3)과 같이 1993년부터 사용하고 있다. Zenon사는 이 ZeeWeed 분리막으로 기존의 관형 분리막을 점차 대체해가고 있는데 이것은 침지형 여과방식이 에너지가 덜 소비되고 기존의 활성슬러지 시스템을 활용하기가 십자형보다 유리하기 때문이다.

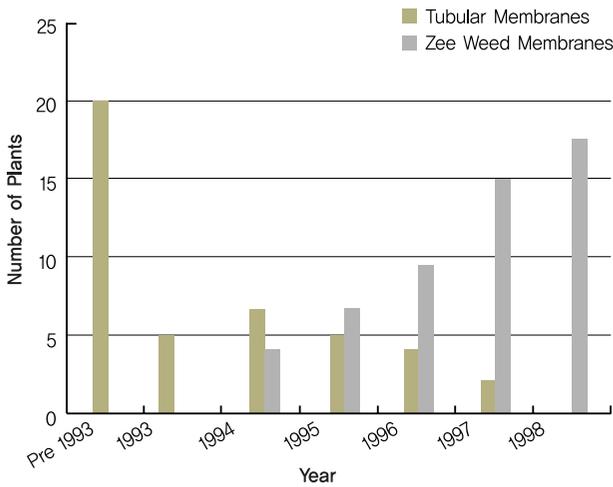


그림 3) Growth ZeeWeed based ZenoGem Systems for Municipal/ Sanitary Wastewater Treatment

4. MBR 공정의 장점과 단점

4.1 장점

(1) 처리수의 수질

MBR 공정의 주요 장점들 중 첫 번째 장점은 처리수의 수질에 있다. 이 시스템은 기본적으로 생물학적인 처리와 소독(Disinfecting)을 동시에 수행한다. 일반적으로 COD, BOD, SS의 처리효율이 각각 95%, 98%, 99% 이상이다. 또한 일반적으로 총 대장균의 제거율은 5~6 로그(log) 이상, 바이러스 일종인 Coliphage의 제거율은 3~5 로그(log)이다.

(2) 짧은 수리학적체류시간과 긴 슬러지체류시간

MBR 공정은 반응조의 수리학적 체류시간(HRT)과 미생물의 체류시간(SRT)을 완벽하게 분리함으로써 반응조의 조건을 가장 최적화시킬 수 있기 때문에 실제로 사용시에 공정에 대한 신뢰성과 유연성을 동시에 제공한다. 따라서, MBR 공정의 가장 핵심적인 기술은 유입되는 폐수의 유기물 부하량 변동과 유량 변동을 흡수할 수 있는 능력에 있다고 할 수 있다. SRT를 완벽하게 조절할 수 있기 때문에 질산화균(Nitrifying Bacteria) 같이 느리게 자라는 미생물의 성장이 가능하다.

(3) 작은 부지면적

MBR 공정은 중력에 의한 침전 분리에 의존하는 전통적인 활성슬러지 공정에 비해서 훨씬 높은 미생물 농도로 운전될 수 있다. 결과적으로 MBR 공정은 Compact하기 때문에 부지면적을 현저히 줄일 수 있다. 또한, 고분자량의 용존 물질이 분리막을 통과할 수

없기 때문에 이와 같은 물질은 반응조에서 긴 체류시간으로 인해 생물학적 처리 시간이 늘어나게 된다.

(4) 슬러지생산량의 감소

MBR 공정은 전통적인 활성 슬러지 공정에 비해서 슬러지 발생량이 적다. 이와 같이 MBR 공장에서 슬러지 발생량이 작은 이유는 일반적으로 슬러지 체류시간(SRT)이 높고 낮은 유기물 부하량 때문에 슬러지 발생량이 적다고 이해하고 있다. MBR 공장에서 슬러지 발생량은 0~0.34kgMLSS/kgCOD로 보고 되고 있다. 유기물 부하량이 0.01kgCOD/kgMLSS · d 정도의 낮은 경우에는 슬러지가 거의 발생되지 않는 것으로 알려져 있다. 그러나 슬러지 발생량이 전통적인 활성슬러지 공정과 비슷하거나 혹은 약간 더 많다는 보고도 있다. 즉, 현재까지 MBR 공정의 생물반응조에서처럼 완벽하게 제한된 공간에서의 생물학적인 반응에 대한 이론은 아직 밝혀지지 않은 부분이 많다는 점을 시사한다.

(5) 운전인력의 감소

MBR 공정은 기존의 전통적인 폐수처리 시설에 비해서 장치가 Compact하고 설비의 자동화가 용이하기 때문에 운전·유지에 필요한 인력을 절감할 수 있다.

4.2 단점

10년 이전만 해도 실제로 운전되는 MBR 시스템의 수가 많지 않았고, 막분리 기술을 적용하려는 기업도 소수에 불과했다. 그 이유는 아래에 나타냈듯이 당시 일반적으로 인용되던 막분리 기술의 단점 때문이었다.

- 검증되지 않았고 복잡하며, 작은 규모만이 가능하다.
- 운전과 유지에 드는 비용이 잘 알려져 있지 않다.
- 분리막의 수명이 짧을 것이 우려된다.
- 실질적으로 분리막으로 처리해서 얻을 수 있는 수질만큼의 높은 수질이 요구되지 않는다.
- 투자비와 운영비가 비싸다.

그러나 앞에서 언급한 것처럼 점차 이런 부정적인 인식들은 모두 바뀌게 되었다. 상용화된 침지형 MBR은 지금 10년 이상 운전되고 있으며, 매우 안정적이고 운전하기가 용이함이 밝혀졌다. 규모도 100배 이상 증가하였고, 분리막의 수명도 걱정했던 것만큼 짧지 않았다. 또한 규모가 증가함에 따라 비용은 크게 감소하였다.

따라서, 위에 열거한 단점들은 거의 다 보완되거나 해결되었다. 또한 폐수의 방류 기준이 강화되고 용수 사용이 점점 까다로워져서 막분리 기술에 대한 관심이 점점 높아지고 있다. 그럼에도 불

구하고 앞으로 해결해야 할 MBR 공정의 단점이 아래와 같이 남아있는 것도 사실이다.

- 아직도 상대적으로 비싼 분리막의 가격
- 운전비용을 증가시키고 막의 수명을 단축시키는 막의 오염문제

5. MBR공정의 운전 모드(mode)

5.1 생산모드(Process mode)

MBR에서 처리수(or 생산수)를 얻는 공정을 'Process Mode'라 명하고, 이 모드는 보통 즉석세정모드(In-situ Cleaning Mode)와 함께 교대로 운전되기 때문에 'Process Mode'는 간헐적(Intermittent)으로 아래의 그림 4)와 같이 운전된다. 즉석세정모드는 분리막/분리막 공정 제조 회사들마다 매우 다양하게 나타난다. 'Process Mode' 동안에는 분리막에 공기방울을 접촉시켜서 오염물질이 분리막 표면에 침적되는 것을 방지해준다.

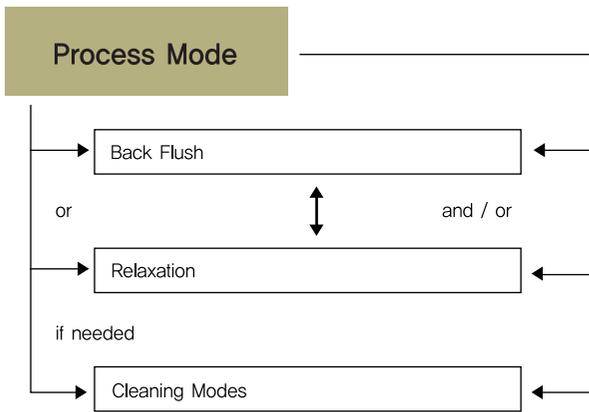


그림 4) Filtration and cleaning modes of MBR process

5.2 휴지모드(Relaxation Mode)

대부분의 분리막은 휴지모드(Relaxation Mode)가 필요하다. 이 'Relaxation Mode'에서는 'Process Mode'로 돌아가기 전에 표면에 쌓인 오염물질들이 떨어지게 해준다. 이 'Relaxation Mode'는 짧은 시간에 투과수의 생산을 중단시켜주는 아주 간단한 모드이다. 분리막은 대부분 원래 탄성적(Elastic)이기 때문에 이러한 공정을 거치면서 원래의 Relaxed state로 되돌리는 기능을 한다. 이와 같은 휴지기에는 분리막에 가하는 포기(Aeration) 상태를 계속 유지시켜줌으로써 분리막 표면 근처의 Biomass를 새 것으로 바꿔주는 역할을 함과 동시에 분리막 표면에 쌓여있는 오염물질들은 분리막 표면으로부터 떨어지게(Scouring) 하는 기능을 한다.

5.3 역세모드(Back Pulse/Flush Mode)

어떤 분리막은 'Back Pulse Mode'를 갖기도 한다. 'Process Mode' 동안 생산된 생산수를 일정부피만큼 CIP(Clean in Place) Tank에 보관한다. 이 CIP 조에는 짧은 기간 동안에 여과 방향과 반대방향으로 생산수를 흘려줄 수 있는 충분한 양의 투과수를 확보한다. 이 공정에서는 분리막 표면에 침적된 오염물질을 털어낸다. 연속적으로 'Process Mode'로 운전되는 분리막이 있는 반면, 어떤 분리막은 규칙적으로 Back Flush and/or Relaxation Mode를 필요로 한다.

5.4 화학세정(Chemical Cleaning)

모든 분리막 시스템은 화학약품으로 세정할 수 있는 장치를 포함하고 있다. 흔히 사용되는 화학 약품에는 차아염소산나트륨(NaOCl), 가성소다(NaOH), 구연산(Citric acid), 옥살산(Oxalic acid), 염산(HCl), 세제 등과 이들을 혼합한 혼합약품이 사용된다. 이와 같은 화학 약품은 오염 물질의 종류와 분리막의 종류에 따라 정해진다.

세정공정은 다음과 같이 MC(Maintenance Cleaning)와 IC(Intensive Cleaning) 두 가지로 구분할 수 있다. MC는 낮은 농도의 화학약품을 사용하는 예방적 차원의 화학세정이며 빈도가 많다. 따라서 IC의 세정사이의 기간(Cleaning Interval)을 길게 연장시켜 준다. IC는 분리막을 오랜 기간 동안 사용한 후에 사용전의 원래의 상태까지로 회복시키기 위한 화학세정이다. 이때는 세정 시 사용하는 화학약품의 농도도 높고 분리막과 세정용액과의 접촉시간도 길다. 따라서 세정 조건이 매우 강(Intensive)하다.

6. MBR 공정의 경제성

6.1 투자비와 운전비

MBR 공정이 여러 가지 장점을 갖고 있음에도 불구하고 시장에서 급속하게 적용되는데 방해요인으로 작용하는 것은 이미 기술했듯이 초기 투자비(Capital Cost)와 운전비(Operating Cost)가 높기 때문이며, 이와 같은 비용의 대부분은 분리막이 차지한다. 분리막의 비용은 플랜트의 크기에 대체적으로 비례하는데, 이점은 전통적인 플랜트에서의 규모의 경제(Economy of Scale) 이론에 상반되며 이는 분리막 공정이 갖는 특징 중의 하나이다. 분리막 가격은 점점 내려가고 있다. 이미 기술한대로 Kubota 시스템의 분리막 교체 비용이 1992년 400 \$/m²에서 2000년에는 100 \$/m²로 약 75% 감소하였다. 더욱 중요한 것은 전체 플랜트에서 분리막 비용이 차지하는 비율이 같은 기간에 54 %에서 9 %

로 감소했다는 것이다.

전통적인 공정에 경쟁 가능한 MBR 공정의 최대 크기를 파악하고자하는 시도를 하였다. MBR 공정의 경제성에 가장 중요한 영향을 미치는 것은 처리할 수 있는 최대 가능 용량이다. Davies 등 (1998)에 의하면 영국에서의 기준으로 계산하였을 경우에 12,000 m³/d 이라고 보고하였다. 또한 분리막의 비용이 50% 감소한다면 25,000 m³/d 이라고 보고하였다. MBR 공정으로 최대 가능한 처리 용량이 점점 커져가고 있는 것은 의심없는 사실이다. Churhouse 등에 의하면 침지형 평판형 시스템은 이제 50,000 m³/d 도 가능하다고 보고하고 있다.

6.2 에너지 소비율

- 분리형 십자흐름형과 침지형 MBR의 에너지 소비량 비교

아래의 표 2)는 십자형과 침지형 MBR의 에너지 소비량을 비교한 표이다. 이와 같은 에너지 소비의 계산은 시스템을 어떻게 구성하느냐에 따라, 또한 어떤 규모로 하느냐에 따라 달라질 수 있다. Ueda가 계산한 에너지 소비량은 Pilot-Scale Plant로부터 얻은 것이고 Cote가 계산한 것은 Full-Scale Plant로부터 얻은 것이다. 그러나 계산하는 항목들이 표준화되어 있지 않기 때문에 서로 다른 시스템에 대해 각자가 계산한 결과를 직접 비교할 수는 없다. 그러나 두 경우 모두 침지형 MBR의 경우가 십자흐름형 MBR의 경우보다 에너지가 더 적게 든다는 점에서는 일치한다.

| Process | Average power consumption (kWh/m ³) | |
|---------------------------------------|---|-------------|
| | T. Ueda [5] | P. Cote [6] |
| Conventional Activated sludge process | 0.2-0.3 | - |
| Cross-flow MBR | 3-4 | 4-12 |
| Submerged MBR | 2.0 | 0.3-0.6 |

표 2) Comparison of energy consumption between cross-flow and submerged MBR

- MBR 공정과 활성슬러지 공정의 에너지 소비량 비교

Davies 등이 제시한 바에 의하면 표 3)에서 알 수 있듯이 1,400 m³ 처리 용량의 경우 에너지 소비에 드는 비용이 MBR 공정의 경우에는 10,000 £/year 인데 비해 활성슬러지 공정의 경우에는 13,000 £/year로 MBR 공정의 경우에 약 30% 적은 것으로 제시하였으며, 22,500 m³ 처리 용량의 경우에는 MBR 106,917 £/year 인데 비해 활성슬러지 공정의 경우에는 148,070£/year로 MBR 공정의 경우에 약 38% 적은 것으로 제시하여 처리 용량이 증가 할수록 그 차이가 점점 더 커지는 것으로 계산하여 제시

| Maximum Throughput / Average Throughput | MBR | Activated Sludge |
|---|----------------|------------------|
| 1,400 / 650 m ³ /day | 10,000 £/ year | 13,000£/ year |
| 22,500 / 10,500 m ³ /day | 106,917£/ year | 148,070£/ year |

표 3) Comparison between the power costs of membrane bioreactor and conventional activated sludge (reproduced from W.J.Davies)

하였다. 하지만, 표 2)에서 알 수 있듯이 Ueda는 전통적인 활성슬러지 공정과 MBR 공정의 에너지 비교를 보면 MBR 공정이 전통적인 활성슬러지 공정보다 에너지 소비량이 더 많다고 보고하였다. 이와 같이 에너지 소비량은 계산에 필요한 많은 전제 조건들이 계산 방법에 따라서 달라질 수 있기 때문에 보고되는 비교 수치마다 그 값이 다양하다. 그러나 이와 같은 수치를 직접 비교하는 것은 큰 의미가 없다하더라도 비교적 처리 용량이 큰 경우에도 MBR 공정이 전통적인 활성슬러지 공정에 비교할 때 에너지 비용면에서 경쟁력을 갖춰가고 있다고 판단된다.

7. 국내 MBR 기술의 시장과 수요

MBR 기술은 우리나라의 경우 수자원부족, 수질악화, 환경기준의 강화 요인 때문에 많은 수요가 예상된다. 특히 1989년 폐놀사태 이후 수질 오염에 대한 국민적 관심이 고조됨에 따라 수질오염 방지시설에 대한 수입이 지속적으로 증가하였으며 하·폐수의 고도처리를 위해 막분리 공정기술을 포함한 고급 환경기술에 대한 수요가 급증하고 있다

우리나라의 경우 하·폐수 처리에 적합한 분리막의 제조기술은 단기간에 성장하기 어렵고 시장이 협소하여 연구 개발을 통한 기술 확보와 수입 대체 및 수출의 효과가 낮은 편이다. 반면에 하수 및 폐수의 고도처리 및 재이용 공정, 공정수의 재이용을 위한 MBR 기술수요가 급증하여 시장이 조성되면 이에 발맞춰서 분리막 제조기술도 빠르게 발전할 것으로 기대된다.

국내의 MBR 시장은 최근들어 급격히 증가하고 있는 추세에 있다. 필자가 조사한 바에 의하면 2002년에 총 MBR 설치 대수가 559개소이었으나 2003년에는 734개소로 1년 만에 31%의 큰 증가를 보였다.

가장 활발한 활동을 하고 있는 한 업체의 예를 들어보면 아직까지는 MBR 기술의 국내 시장에 대한 문제점과 가능성을 동시에 발견할 수 있다. 표 5)에 국내 1위 설치 업체의 MBR 시스템을 용량별로 구분하여 나타냈는데 이 표에서 알 수 알 수 있듯이 전체 MBR 개소의 62%가 처리 용량 50m³/d 이하의 소규모 시설에 집중되어 있다는 것이다. 이것은 MBR 기술이 우리보다 먼저 적용

된 일본, 유럽, 북미 등의 예를 보더라도 MBR 기술의 초기 시장 진입 때 생기는 현상으로 생각된다. 반면에 짧은 역사에도 불구하고 500 m³/d 이상의 MBR 시스템도 17 개소로 전체의 4.2% 를 차지하는 것으로 보아 앞으로 MBR의 중대형 처리 규모로의 적용 가능성을 기대할 수 있게 한다. 최대 처리용량도 2002년에 1,400 m³/d에서 2003년에는 4,000m³/d로 증가했으며 이는 MBR 기술이 오/폐수 시장에서 점차 신뢰를 쌓아가고 있으며 전통적인 처리 시설과 비교하여 중형 규모에서도 경쟁력을 구축하고 있는 것으로 해석할 수 있다.

MBR 기술에 적합한 국산 분리막도 국내 MBR 시장의 성장에 발맞춰 속속 시장에 안착되고 있다. 아래의 표 4)를 보면 전체 설치된 분리막 시스템의 개수 중 순수 국산 분리막이 적용된 것은 170개소에 달해 전체의 약 23 %를 차지하고 있다. 또한, 국산 분리막 기술로 설치된 최대 처리 용량도 600m³/d에 도달해서 기술 수준도 어느 정도 선진국 수준에 근접한 것으로 판단할 수 있다. MBR에 적합한 국산 분리막의 제조가 1~2년 전에 본격적으로 시작된 것을 생각해보면 매우 커다란 발전이며 국내 MBR 기술의 경쟁력 제고에도 커다란 바탕이 될 것으로 생각되며 매우 고무되는 일이다.

결론적으로 MBR 기술은 국내의 경우 21세기에 예상되는 물 부족 현상 및 환경규제강화에 대응하기 위해 고도처리 및 환경친화적

기술개발의 요구에 발맞추어 커다란 성장이 예상되며 이렇게 성장되는 MBR 기술은 수 처리 분야의 핵심 기술로써 중추적인 역할을 할 것으로 기대된다. 또한, 국내의 MBR 공정기술의 축적 및 국산 MBR 분리막 제조 기술의 축적과 현장 적용 경험 등은 향후 선진국 및 중국, 일본, 동남아로의 수출을 가능하게 하여 국가 경제에도 기여할 것으로 기대된다(표 5 참조).

| 용량(m ³ /d) | 개소수 | % |
|-----------------------|-----|------|
| <50 | 248 | 61.6 |
| 50~100 | 66 | 16.4 |
| 100~200 | 44 | 10.9 |
| 200~500 | 28 | 6.9 |
| 500< | 17 | 4.2 |
| 계 | 403 | 100 |

표 5) Number of MBR according to treatment capacity range in Korea

8. MBR 공정의 R&D 방향

막분리 공정을 이용한 고도 수처리 기술의 상용화/실용화에도 불구하고 시스템의 응용을 제한하는 가장 큰 요인은 막오염(Membrane Fouling)이다. 막오염은 원수 및 오폐수 중에 존재하

| 분리막제조사 (국명) | 모듈형태 | 영업사 | Trade mark | 분리막재질 | 사업착수 | 시스템 설치대수 | Highest capacity(m ³ /d) | 여과모드 |
|-------------------|-----------------------|----------------------|-------------|-----------------------------|------|----------|-------------------------------------|------------------------------|
| 미쓰비시 레인온 (일본) | HOLLOW FIBER MEMBRANE | 대한통운& 현대ENG | SMAS & HANT | PE (0.4 μm) | 1997 | 403(300) | 4,000(1,400) | 막힘형 (Dead end filtration) |
| 제논 (캐나다) | | (주)새한 | ZENOGEM | PVDF (0.035 μm) | 2000 | 10(7) | 1,000(300) | |
| 한국분리막 (한국) | | (주)KMS | - | PE (0.4 μm) | 2002 | 150(100) | 600(225) | |
| SK 케미칼, E.N.E(한국) | | KOLON 건설 | KIMAS I, II | PSF (0.1 μm) | 1998 | 10(10) | - (-) | |
| 天津膜天社 (중국) | | RAPAH TECH | - | PVDF (0.1~0.4 μm) | 2002 | 10(10) | - (-) | |
| 유야사 (일본) | PLATE MEMBRANE | (주)제닉스 ENG & 진우 ENV. | NIX-MBR | Polyolefin (0.4 μm) | 1999 | 68(67) | 4,000(900) | |
| 퓨어엔비텍 (한국) | | (주)퓨어엔비텍 | - | CPVC, hydrophilic (0.25 μm) | 2002 | 20(2) | 350(250) | |
| 엠프라텍 (남아프리카공화국) | TUBULAR MEMBRANE | (주)아쿠아텍 | BIOSUF | PES (40,000Da) | 1995 | 50(50) | 2,000(2,000) | 십자흐름형 (Crossflow filtration) |
| 러시아 | | (주)제닉스 ENG | NIX-MBR | PSF (30,000Da) | 1996 | 13(13) | 200(-) | |
| 합계 | | | | | | | | |

표 4) Membrane Bioreactor for Wastewater Treatment in Korea

는 유기물, 무기물, 미생물/대사물질 등에 의해서 야기된다. 따라서 현재 막오염 제어기술 확보를 위한 연구가 전 세계적으로 활발히 진행되고 있으며 이 연구의 성과가 21세기 각국의 막분리 기술력을 좌우하게 될 것이다.

8.1 전처리(Pre-treatment) 공정에 대한 연구

전처리 공정은 분리막의 오염을 줄이는데 매우 중요한 역할을 한다. 대부분의 MBR 공정에서는 약 1.0mm 정도의 간단한 스크린의 설치로 이와같은 전처리를 수행하는 경우가 많다. 그러나, 분리막의 종류에 따라 스크린 한단계 처리만으로는 부적합하다는 것이 밝혀졌다. 일반적으로 MBR 공정에 적용되는 스크린은 표준화된 규격은 없는 실정이다. 대부분 경험적으로 스크린을 선정하여 적용한다. 오/폐수 처리에 사용되는 MBR 공정의 전처리 공정에 대한 심도있는 연구가 부족한 실정이다.

8.2 MBR의 분리막 오염에 관한 연구

현재까지의 막오염 현상에 대한 연구 및 막오염 제어에 대한 연구는 그림 5)에서와 같이 주로 생물반응조 내의 용존산소 농도(DO), SRT(Sludge Retention Time), 펌프에 의한 유체의 전단력(Pumping Shear)등의 MBR 공정의 운전인자의 변화에 따른 미생물적 특성(Microbial Properties)을 파악하는데 주안점을 둔 연구가 주종을 이루어 왔다. 미생물적 특성에는 생물반응조 내의 입도 크기, 케이크의 비저항 및 압축성, 미생물의 체외고분자 물질(Extracellular Polymeric Substance)의 종류와 농도, 모폴로

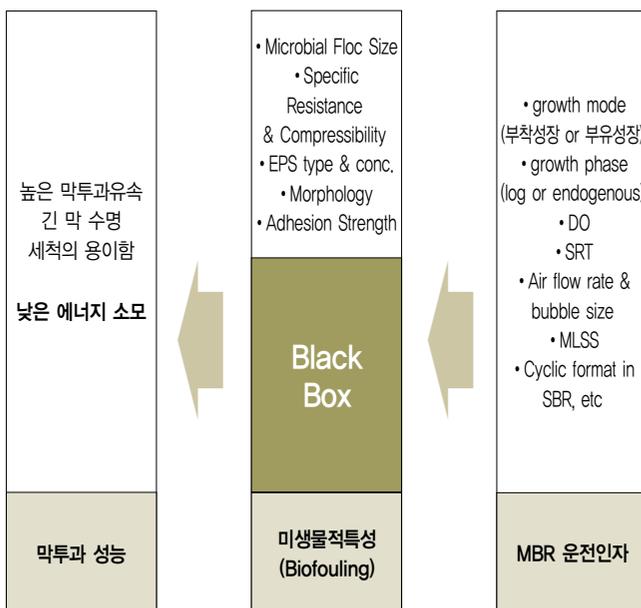
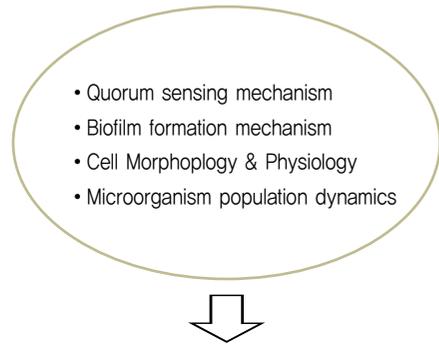


그림 5) Research on MBR in the past



Innovative MBR in Process

그림 6) Research on MBR in 21C

지(Morphology), 미생물과 분리막, 미생물 플록과 미생물 플록의 점착성(Adhesion Strength) 등으로 나타낼 수 있으며, 미생물반응조의 운전인자의 변화에 의해서 이와 같은 미생물적 특성이 변화하며, 이렇게 변화된 미생물적 특성 즉 물리 화학적인 특성이 분리막의 여과특성과 분리막 오염에 영향을 미친다.

하지만 이러한 MBR 운전 인자의 변화는 필연적으로 미생물의 생리적/구조적 변화를 초래하며, 뿐만 아니라 미생물 종의 분포까지도 변화시킨다. 따라서, 이와 같은 미생물의 종의 분포 즉 미생물 군집(Community)의 변화와 이에 따른 변화된 미생물의 생리(Physiology) 상태가 결국은 미생물적 특성을 변화시키는 것으로 생각할 수 있다. 하지만, 최근까지의 MBR에서의 분리막 오염에 대한 연구는 이와 같은 미생물의 군집(Community)의 변화를 감안하지 않고 미생물 반응조 내의 미생물 혼합액의 특징(Bulk Property)에 국한되어 연구되어 온 것이 사실이다. 즉 반응조 내의 미생물 군집 구조나 개개의 군집의 생리학적 특성의 변화를 하나의 'Black Box'로 간주한 후 그 이외의 물리, 화학적 인자들의 변화만을 연구해왔다.

1990년대 중반이후 분자 미생물학의 눈부신 발달로 인해 이제는 미생물 혼합용액인 MBR 반응조에서 이러한 미생물의 군집구조를 밝히는 것이 가능하게 되었고, 군집구조에서 개개의 군집의 생리적인 상태도 추적할 수 있게 되었다.

또한 각각의 군집 혹은 미생물 종에 대한 선택적인 관찰도 가능하게 되어 분리막 표면에 형성된 생물막(Biofilm)의 형태학적 구조도 관찰할 수 있게 되었다. 따라서, 앞으로 21세기의 MBR 공정의 막오염 억제에 대한 연구는 위의 그림 6)에서와 같이 분자생물학적 기법을 활용한 연구가 필요하다고 판단되며, 이같은 분자생물학적 기법의 활용이 MBR의 오염을 제어하는데 적절한 해결책을 제시하여 차세대 MBR 공정을 탄생시키게 되는 시발점이 될 것으로 예측된다. ㉠