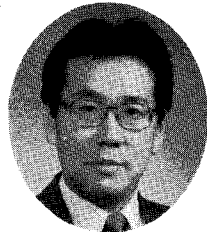


폐하수의 고도처리

〈1〉



이상은

〈한국건설기술연구원 부원장〉

목 차

1. 서언
2. 폐수처리와 신기술
 - 1) Biotechnology의 이용
생물막법, 포괄고정화법, 자기조립법
 - 2) 분리막의 이용
3. 생물학적 인·질소 제거
 - 1) 생물학적 질소 제거
 - 가. 세포합성에 의한 질소의 제거
 - 나. 질산화
 - 다. 탈질
 - 라. 생물학적 질소제거 공정
 - 2) 생물학적 인 제거
 - 가. 기본원리
 - 나. 생물학적 인 제거 공정
4. 폐수의 고도처리방법의 예
 - 1) Carousel Process
 - 2) TF / SC Process
 - 3) SBR
 - 4) BAF Process
 - 5) PACT Process
 - 6) MARS Process
 - 7) 초심층 폭기법

1. 서언

해마다 년례행사처럼 겪는 수돗물 오염사고는 환경 보전의 중요성을 강조시켰고 환경을 지키기 위한 의식 수준의 향상에도 어느정도 기여했다고 본다. 산업화가 진행되고 인구가 증가하여 여러가지의 환경문제가 어느것 하나 심각하게 생각하지 않아도 될 것이 없으나 최근 UNEP의 조사결과에 의하면 아직도 수질오염을 가장 심각하게 느끼고 있다.

수돗물의 오염사고가 계속되는 것은 원수의 수질이 악화되고 있어 기존의 공정으로는 양질의 수돗물을 생산하기가 어렵다는 것을 의미하며 따라서 정수공정을 개선하여 필요한 지역에는 고도정수시설의 도입을 신중하게 고려하는 것이 최근의 흐름이다. 그러나 정수공정의 개선으로 양질의 물을 생산하는 것은 오염원에 대한 조치를 하기에 앞서 수요자와 가장 가까운 최단 말에서 수질을 개선하겠다는 시도여서 효율적인 수질 개선방향이라고 볼 수 없으며 원수의 수질을 개선하는데에 더 많은 노력을 기울여야 한다.

원수의 수질개선을 위해서는 원수로 유입되는 오염물질을 저감시키는 것이 필요하며 여기에는 공정내에서 오염물질의 발생을 줄이는 즉 사전오염예방기술 또는 청정기술의 도입을 서둘러야 하나 발생된 오염물질을 효과적으로 제거하는 사후처리가 꾸준히 시도되어야 한다.

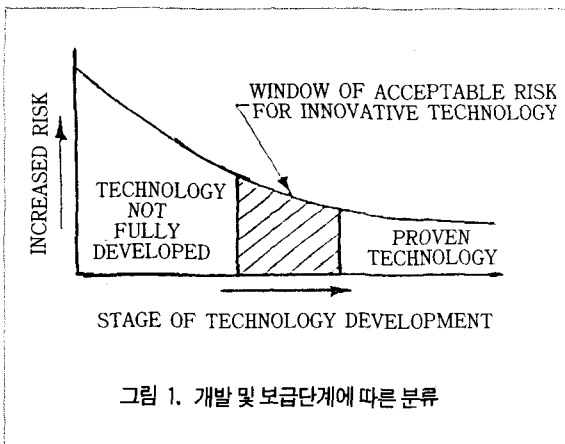
그러나 산업이 발달되면서 발생하는 오염물질도 다양해지고 또한 발생량이 증가하기 때문에 재래식의 처리방법만으로는 방류수역의 수질을 원하는 수준으로 유지하기가 어려운 경우가 많으며 따라서 보다 많은 양의 다양한 오염물질들을 효율적으로 처리하여 원수의 수질개선에 기여하기 위해 새로운 처리기술들이 개발되고 있다.

또한 환경보전의 중요성을 인식하면서도 수질오염 방지시설을 대부분 혐오시설로 간주하기 때문에 효과적인 오염물질제거 뿐아니라 부지를 적게 소요하면서 2차 오염이 적은 처리기술의 적용이 확대되고 있어 결국 적은 부지에서 보다 높은 처리효율을 경제적으로 얻을 수 있도록 하는 것이 신기술 개발의 방향이라고 할 수 있다.

2. 폐수처리와 신기술

수질오염이 심화되고 각종 수질기준들이 강화되면서 이를 만족시킬 수 있는 새로운 폐수처리기술들이 계속 개발되고 있으나 신기술을 적용하는 데에는 그만큼 위험부담이 따르게 된다. 따라서 이같은 부담을 안고 과감하게 투자하여 신기술을 사용하기 보다는 이미 개발되어 있어서 충분한 운전결과들이 제시되어 있는 처리공법을 안전하게 사용하고자 하는 이분야의 특수 사정 때문에 신기술의 개발·보급이 늦어지고 있는 것이 사실이다.

폐수처리방법들을 기술개발 및 보급의 관점에서 분류하여 나타내보면 그림-1과 같다.



이 그림에서 알 수 있듯이 이미 개발되어 완전하고 충분한 적용자료들이 확보되어 있는 기술들과 아직 개발중에 있는 기술이 있고 그 사이에 어느 정도의 위험부담을 안고 적용해 볼 수 있을 정도로 개발된 기술들이 있다.

이들 중 소위 innovative technology라고 하여 어느 정도의 위험부담을 안고 사용해 볼만한 신기술들이 폐수처리에 적용되기 위해서는 다음의 조건들을 만족시켜야 한다. a) 향상된 운전신뢰도, b) 보다 나은 독성물질들의 관리, c) 환경보전 측면에서의 이점, d) 공동처리 가능성의 증가 등과 이외에도 기본적으로는 에너지 절약 및 경제성에서의 분명한 이점이 있어야만 한다. 미국 EPA에 적용하고 있는 innovative technology program에서는 약 20%의 에너지 절약의 효과가 있거나 시설비와 운전비를 합하여 약 15%의 경비절감 효과가 있어야 하는 것은 신기술의 기본요건으로 삼고 있다.

폐수처리기술의 개발은 기초이론부터 정립하는 완전한 새로운 공정의 개발이라기보다 타산업분야의 제조공정에 적용되는 개념을 응용하는 것이 대부분이나 이러한 관점에서 폐수처리공정을 분류해보면 다음과 같이 분류할 수 있으며 각 분류에 해당하는 공정들을 정리하면 표-1~표-4와 같다.

- Phase separation
- Component separation
- Chemical transformation
- Biological process

따라서 새로운 폐수처리기술들은 타 산업분야에 적용되어온 기술들이 폐수처리분야에 어느 정도 효과적으로 적용시킬 수가 있는가에 따라서 기술개발의 가능성이 결정된다고 본다.

산업화에 따라 전에는 문제가 되지 않았던 오염물질들이 다량 발생하는 등 오염물질이 다양해지면서 양도 증가하는 반면 폐수처리에 활용할 수 있는 부지는 매우 제한되기 때문에 표-1~표-4에 정리한 공정들 중 전에는 폐수처리에 적용하기에는 비경제적이라고 여겼던 처리방법들이 경제성을 갖게 되었다.

적은 부지를 차지하면서 보다 다양한 오염물질들을 처리할 수 있는 고도처리기술들은 결국 기존의 공정들을 잘 이해하고 폐수의 처리목적에 부합하도록 발전시킨 것들로서 고도처리를 위한 신기술의 도입목적은 다

음과 같이 정리할 수 있다.

- 난분해성 물질의 제거
- 질소·인 등 영양물질의 제거
- 고액분리효율 증대로 인한 깨끗한 처리수의 방류
- 고농도 미생물의 확보로 처리효율증대 및 부지절감

감

표 1. Phase Separation Processes

Process Category	Type of Waste to Which Process is Applicable			
	Settleable Slurries	Colloidal Slurries	Sludges	Any Wastes With a Volatile Liquid Phase
Common in Waste Treatment	Sedimentation Filtration	Flocculation	Filtration	Solar Evaporation
Developed but not commonly used in Waste Treatment	Centrifugation			Distillation (With solvent recovery) Evaporation
Need further development for Waste Treatment	Flotation	Ultrafiltration	Freezing	
Treatment	High Gradient Magnetic Separation			

표 2. Component Separation Process

Process Category	Function of Process			
	Removal of heavy metal and toxic anions from aqueous solutions	Removal of organics from aqueous solutions	Removal of inorganics from liquids, slurries and sludges	Solvent Recovery
Developed but not commonly used in Waste Treatment	Liquid Ion Exchange Electrodialysis Reverse Osmosis Ion Exchange	Ultrafiltration Solvent Extraction Carbon Adsorption Resin Adsorption Steam Stripping Air Stripping		Distillation steam Distillation
Needs further development for Waste Treatment			Freeze crystallization	
Needs further research	Ion Flotation		High Gradient Magnetic Separation	

이상의 목적들을 만족시킬 수 있는 고도처리 신기술들은 크게 biotechnology를 이용한 폐수처리기술과 분리막을 이용한 고액분리기술들을 들 수가 있으며 이들을 간략하게 설명하면 다음과 같고 질소·인 등 영양물질의 제거방법은 다음장에서 설명하기로 한다.

표 3. Chemical Transformation Processes

Process Category	Treatable Components and Waste Streams					
	Cyanides, Phenolics, Sulfides, Sulfates, and Organics in Aqueous Solution	Nitrates, Carbonates, Sulfates, and Hydroxides, Tars and Solids	Heavy Metals in Aqueous Solution	Organic Liquids, Sludges, Slurries, Tars and Solids	Acids and Bases	Organic Liquids
Common in Waste Treatment			Precipitation		Neutralization	
Developed but not commonly used in Waste Treatment	Oxidation Ozonation UV / Ozonolysis UV / Chlorination	Calcination	Reduction			
Requires further development for waste treatment			Electrolysis	Hydrolysis		Chlorinolysis
Needs further research	Photolysis Catalysis		Precipitate Flotation	Catalysis		Microwave

표 4. Biological Treatment Methods

Process Category	Functions of Process	
	Decomposition of soluble organics in dilute aqueous	Decomposition of hydrocarbons (non-chlorinated)
Common in Waste Treatment	Activated sludge Aerated Lagoon Tricking Filter Waste Stabilization Pond	
Developed but not commonly used in Waste Treatment		Composting Anaerobic Digestion
Needs further research	Enzyme Treatment	

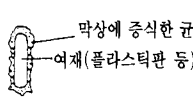
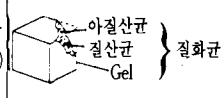
1) Biotechnology의 이용

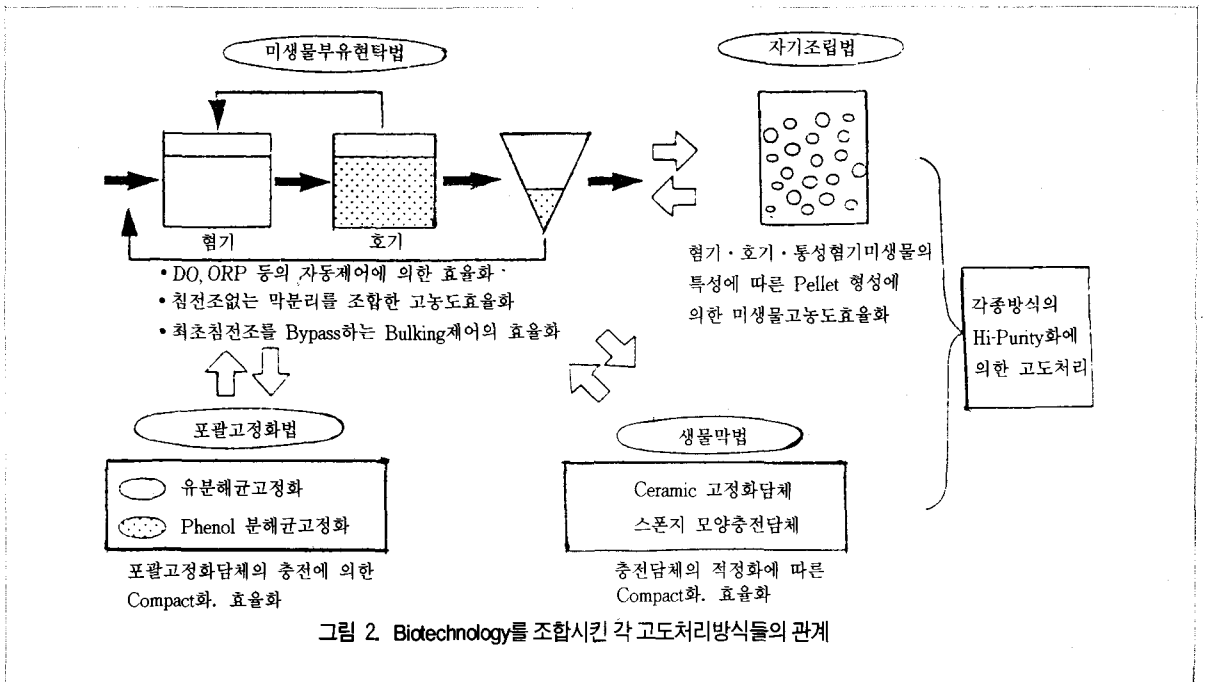
Biotechnology의 이용에 의해 얻을 수 있는 효과는 난분해성 물질을 제거하는 것과 고농도 미생물을 확보하여 처리효율을 높이고 내성을 증대시키는 것이다. 본 고에서는 고농도 미생물에 의한 처리효율을 증대시키면서 난분해성 물질의 제거도 어느정도 가능한 관점에서 고찰해 보고자 한다.

생물학적 폐수처리는 19세기부터 사용되기 시작하여 생물막법인 살수여상이 먼저 보급 되었으나 점차 강화되는 처리수 기준을 만족시킬 수가 없어 1912년 최초로 소개된 부유현탁 미생물법인 활성슬러지법을 가장 널리 사용하게 되었다. 그러나 최근 부유상태의 미생물을 이용하는 호기성처리방식인 활성슬러지 공정이나 혐기성 처리공정에 media를 투입하여 생물막을 형성하므로써 보다 좋은 미생물 농도를 유지하고 처리효율을 높이도록 하고 있다.

Biotechnology의 이용은 최근에 본격화되어 생물막법외에 미생물을 고정화시키는 포괄고정화법 등이 개발되어 고도처리를 시도하고 있는데 biotechnology를 조합시킨 각 처리방법들의 관계를 나타내면 그림-2와 같다. 또한 표-5는 기존의 생물막법과 포괄미생물 고정화법을 비교한 것으로 미생물의 고정화가 성공될

표 5. 포괄고정화법과 생물막법의 비교

항 목	Process	생물막법	포괄고정화법
미생물의 존재상태	여재의 표면에 균을 막상으로 증식  NH ₄ →NO ₂ →NO ₃	Gel의 내부에 균을 가두어 넣어 이용  NH ₄ →NO ₂ →NO ₃	
미생물의 기원	etc.(자연발생적)	인위적(Nitrosomonas sp., Nitrobacter sp., 등)	
질화균의 양	10 ⁸ ~10 ⁹ cells / cm ³	10 ¹⁰ cells / cm ³	
미생물의 증식능력	증식하여 한계면에 박리함 탄소량의 30~40%가 잉여 슬러지가 되어 박리 질화세균 등이 박리되므로 균수의 안정유지가 어려움	pellet내에서 대폭적으로 증가함 균은 새어나가기 어려움 · 복수의 균이 공존하면 다당류를 생성하여 균이 서로 binding하여 새어나가기 어려움. · 증식한 균은 새어나가기 어려우며 내부에서 자기분해함. · 균체 (CNHO) _n →CO ₂ ↑+N ₂ ↑+H ₂ O · 질화세균등이 pellet내에 고정화되므로 균수의 안정유지가 용이.	



경우 얻을 수 있는 효과가 매우 큰 것을 알 수 있다.

■ 미생물 고정화법

(1) 생물막법

생물막법은 접촉재에 부착형성된 생물막에 의해 오염물질을 처리하는 기능생물처리법이며 정화에 기여하는 각종 미생물을 접촉재상에 높은 농도로 유지될 수 있기 때문에 침전조에 의한 고액분리나 슬러지의 반송등이 불필요한 경우가 많으며 질산화균 등과 같은 비증식 속도가 낮은 유용미생물이 정착이 되기 쉬운 특성을 가지고 있다. 또한, 활성슬러지법과 달리 팽화(Bulking)가 발생되지 않기 때문에 운전관리가 용이하고 잉여슬러지의 발생량도 적어 저농도의 유기성 배수에도 적용가능한 이점을 가지고 있다. 그러나 통상적으로 부착생물막이 너무 비대해지면 처리능력이 떨어지기 때문에 생물막의 제어를 자동관리에 의해 할 수 있는 것이 바람직하다.

최근에는 생물막법에서 Ceramic 담체 등을 활용함으로써 미생물을 고농도로 유지시켜 처리효율을 현저하게 높일 수 있는 생물여과법 실용화가 급속하게 확대되고 있다.

특히 생물여과법에서는 5mm 정도의 담체충전조를 정기적으로 역세척함으로써 과잉의 생물막을 일정한 두께로 제어가 가능하기 때문에 BOD 용적부하를 $2\text{KgBOD}/\text{m}^3 \cdot \text{일}$ 에도 높은 수질을 얻을 수 있으며 또한 혐기성조와 조합하여 순환하므로 유입총질소 $50\text{mg}/\text{L}$ 를 $10\text{mg}/\text{L}$ 이하로 낮추는 것이 가능하다. 또한 미생물 부유현탁법의 System에 스폰지와 같은 다공질담체를 충전하기도 하고 또한 간헐포기에 의한 혐기·호기성의 처리 Process와 같은 고도처리법이 실용화되어 있다.

(2) 포괄고정화법

최근 포괄고정화법에 의한 미생물의 고정화는 미생물공학의 발전과 함께 급속하게 진보되어 왔다. 고정화제로서 배수처리에 실용적인 것은 폴리아크릴 아미드, 폴리비닐알콜, 폴리에틸렌글리콜 등이며 이들은 미생물 분해로는 얻기 어렵다.

고정화제를 사용한 방법을 생물학적 폐수처리로서 활용을 시도하게 된 것은 부유미생물을 고정화할 경우 온도, pH 등에 대하여 내성 범위가 넓어지고 동시에 미생물과 효소활성이 높아지는 것을 입증하게 된 이후

이다.

또한 고정화법은 비증식 속도가 극히 적은 질산화균이나 난분해성 물질 분해균을 반응조내에 직접하려는 경우 일반적인 부유미생물법에서는 씻겨 나가기 쉽지만 고정화법에서는 고정화되어 있으므로 씻겨 나가는 일은 없다.

또한 고정화에 의해 다른 미생물과의 상호작용을 받지 않고 담체안에서 증식하여 물질분해 및 대사에 크게 공헌할 수 있는 이점을 가지고 있다. 고정화 담체의 충전율은 운전방법에 따라 다르지만 20~50% 정도이고 유동화가 배려되어 있다.

포괄고정화법은 비증식 속도나 낮은 질산화균과 같은 미생물을 집적시킬 수 있기 때문에 질산화·탈질반응을 이루어지도록 할 경우 기존시설을 개조해 포괄고정화 질산화조를 넣으므로써 고도처리시설로서 활용할 수 있다.

그러나 포괄고정화 담체내에서의 구성 미생물의 분포와 정화기능을 이해하여 더욱더 효율적인 System으로 발전시키는 것이 필요하다. 또한 기름분해균, 폐물 분해균 등의 유용미생물을 포괄고정화한 System도 효율적인 방법으로서 앞으로 크게 발전할 것이라고 생각된다.

(3) 자기조립법

혐기성조건, 혐기·호기성 조건 및 호기성 조건에 있어서 상향류의 수리학적 교반강도 조건을 주는 것으로 미생물이 형성하는 granule를 사용해서 처리하는 방법이 자기조립법이다.

이 방법은 ① 균체를 Pellet화 하여 고농도의 유지가 가능하다. ② 고부하운전이 가능하다. ③ Pellet의 활성이 극히 높은 특성을 가진 가장 새로운 처리방식의 하나는 완전혐기자기조립법으로서 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor), 호기자기조립법으로서의 AUSB(Aerobic Upflow Sludge Blanket Reactor), 통성혐기 탈질자기조립법으로서의 USB(Upflow Sludge Blanket Reactor), 유기물 제거를 위한 호기자기조립법으로서의 MRB(Multi Stage Reversing Flow Bioreactor)법 등의 자기조립법이 유기성 폐수의 고도 처리법으로 인정받고 있다.

당초 granule화는 UASB등의 혐기성처리만의 특징으로 생각했지만, USB, AUSB, MRB법과 같이 호기성조건에도 형성되는 것이 되어 있어 고도 및 효율

처리 Process로서 중요성이 높아지고 있다. 그러나 이 방법을 더욱더 발전시키기 위해서는 호기성, 혐기성, 통성혐기성의 어떤 조건에도 조립되지만 시작이 늦은 점이나 저농도 폐수처리에는 적용가능 하지만 인의 제거는 기대할 수 없는 등 몇가지의 문제점을 해결해가 는 것이 필수적이다.

2) 분리막의 이용

분리막을 이용한 고도 수처리가 이용되기 시작한 역사는 짧지만 그 응용범위는 광범위하게 확대되어 가고 있다.

상수중의 유기물질 제거와 폐수중의 유기물을 회수 하는 자원의 재활용 측면이나 수자원의 부족현상을 해결하기 위한 폐수의 재사용면에서 효과적이고 선택적으로 분리, 농축, 정제가 가능한 기술로 Process의 자

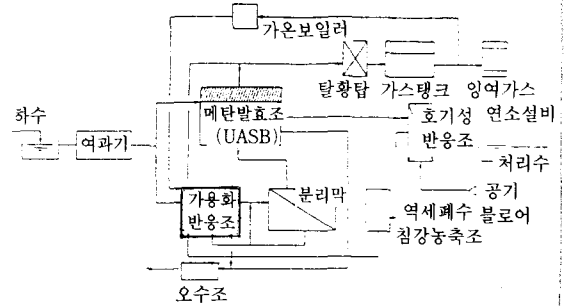


그림 3. Bioreactor분리막 처리공정

표 6. 각종 분리막의 특성

분리방법	막 형태	구동력	분리형태	적용분야
정밀여과	대칭형 다공성막 (Pore size 0.1~10 μm)	정수압 차 (0.1~1 Bar)	Pore size 및 흡착현상에 기인한 체결림	전자공업의 초순수 제조, 무균수 제조, 식품의 무균여과
한여과	비대칭형 다공성막 Pore size Skin층 10 ² ~10 ¹ μm Support층 1~10 μm	정수압 차 (0.5~1 Bar)	체 결림 (Sieving)	전자공업의 초순수제조, 유수 혼합물분리, 도로폐인트 회수, 호소농축, 혈장단백질 분리, 섬유호제 회수, 섬유·제지공업의 폐수처리
역삼투	비대칭성 Skin형막 Skin층: 균일막 Pore size: A	정수압 차 (20~100 Bar)	용해, 확산	해수, 공업용수의 탈염, 액체 식품의 탈수, 전기도금공업의 탈이온수, 농축, 폐수처리제 이용, 화학, 약품공업의 무균, 탈이온수
투석	비대칭성 다공성막(균일 팽윤막, Pore size: 0.1~10 μm)	농도 차	대류가 없는 층에서의 확산	인공신장 및 의료공업, 화학, 식품, 약품공업에서의 고분자와 저분자의 분리
기체분리	균일, 다공성 막	정수압 차 농도 차	용해, 확산 확산	공업용, 의료용 산소분리, 메탄-이산화탄소분리, 천연가스에서 수소회수, 공기중의 질소 농축, 핵공업의 희소가스회수
투과증발	균일계 막	농도 차	용해, 확산	에탄올의 탈수, 공비혼합물의 탈수
전기투석	양이온, 음이온 교환막	전위 차	입자의 전하, 크기	염수의 탈염, 알칼리제조, 공업용수의 연화, 도금공업의 중금속 회수, 약품, 제당공업의 탈이온화, 폐수처리

원절약 및 환경보전에 크게 기여하고 있다.

분리막(Membrane)은 고분자 재료의 물질 선택투과 성질을 이용한 분리기술의 하나로 1960년대에 미국에서 공업용수의 탈염공정에 적용하기 위하여 개발된 기술로 세계적으로 해수의 담수화 등의 수처리에 일산 1,300만톤 규모의 Plant가 가동중에 있다.

초기의 분리막은 역삼투막(Reverse Osmosis Membrane, RO)을 중심으로 개발되었으나 최근에는 한외여과막(Ultrafiltration, UF), 정밀여과막(Microfiltration, MF)을 비롯한 수처리 뿐만아니라 투석, 기체분리 및 투과증발막에 이르기까지 광범위하게 개발되고 있다. 표-6에 각종 분리막의 특징을 정리하였다.

분리막을 폐수처리에 적용하는 한가지 방법은 생물학적 처리공정 중 미생물 반응조에서의 미생물농도를 높게 유지하기 위해 2차 침전조 대신 분리막에 의해 고액분리를 하여 미생물을 반응조로 반송시키는 방법으로 그 한 예가 그림-3에 나타나있다. 그림-3의 경우와 같이 UASB에 의한 메탄발효를 실시하고 분리막을 사용할 경우 SS농도가 20,000~25,000mg/L까지의 고농도에서도 투과수에 의한 역세척 및 가스를 사용한 세정에 의해 막의 성능을 유지할 수 있다.

그림-3과 유사한 공정이 최근 분뇨처리나 고농도 유기성 폐수의 처리에 성공적으로 적용된 예가 늘고 있다.

(다음호에 계속)