

막분리 기술의 현황과 전망

서정범, 류재근*

안양대학교 환경공학과 교수, * 국립환경연구원 수질연구부장

1. 서론

활성슬러지법에 의한 폐수처리시 고액분리의 기본원리인 침전조에서의 중력침강법은 유입수의 수질과 수량 및 처리조건에 따라 슬러지의 침강성이 변하게 되고 침강성이 나빠지면 처리수중에 미생물이 부유물질로 유출되는 위험이 항상 존재한다. 활성슬러지법과 막을 조합한 처리시스템은 막을 이용한 고액분리를 통하여 안정하고 양호한 처리수질을 얻을 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다.

최근 일본 및 구미 선진국에 있어서의 막처리 기술은 막재질 등의 급속한 진보와 함께 연구개발이 진행되어 상수처리 뿐만 아니라 분뇨처리 설비에까지 이용되기에 이르렀다. 우리나라에서는 아직 막분리법에 의한 폐수처리법에 관하여 많은 연구가 실시되고 있지 않은 실정이지만 향후 경제적으로 저렴하면서도 폐수처리가 용이한 막이 개발되면 폐수 재이용 측면에서도 많은 연구가 행해질 것으로 기대된다. 활성슬러지와 막의 조합법은 고액분리를 막으로 행하기 때문에 고농도의 미생물 유지가 가능하고 양호한 처리수를 얻을 수 있으므로 소규모 처리에 적용할 수 있는 처리법이지만 막분리의 소요동력이 많이 들고 현탁질 공존계로부터 직접 막분리하기 때문에 고효율의 막 Element의 연구개발이 늦어지고 있어서 막을 이용한 처리시스템의 검토가 긴급한 과제에 당면하고 있다.

함유하는 물질의 분리법으로 매우 간편함과 동시에 콤팩트하기 때문에 다른 프로세스와 조합하기도 쉽다. 막분리 프로세스의 종류와 특징을 소개하면 표 1과 같다.

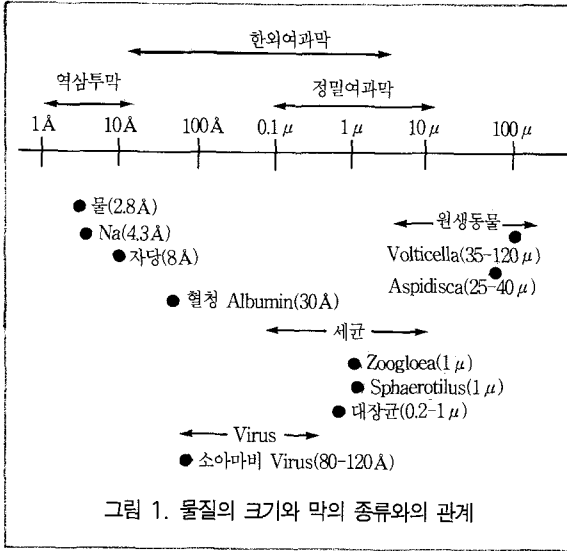
표 1. 막분리 프로세스의 종류와 특징

프로세스	막의 종류	작용 및 구동력	특징	대상물질
전기투석	이온교환막	-막의 이온선택 투과성과 전위차	-전해질의 탈염 및 농축	-무기이온
확산투석	투석막	-막의 선택 투과성과 농도차	-무기산과 염류, 고분자와 저분자의 분리	-무기산, 알칼리, 무기염
정밀여과	미세공 고분자막	-막의 공경과 용질의 분자 크기에 의한 압력차	-현탁물질, 콜로이드 입자, 박테리아의 제거	-현탁물질, 콜로이드, 초고분자
한외여과	한외여과막	-막의 공경에 의한 분자 크기의 체분리 압력차	-용질분자의 크기에 의한 분획, 분별 정제	-고분자 및 중분자(분자량: 500-300,000)
역삼투	역삼투막	-물의 선택적 투과 압력차 (20-100kg/cm ²)	-물의 투과와 용질의 농축	-저분자 및 무기이온

막분리 프로세스에는 전기투석, 확산투석, 정밀여과(Microfiltration), 한외여과(Ultrafiltration), 역삼투(Reverse osmosis) 등이 있는데, 정밀여과, 한외여과 및 역삼투는 압력차를 구동력으로 하며, 전기투석은 전위차를, 확산투석은 농도차를 구동력으로 하여 분리하는 방식이다. 제거 대상물질은 무기이온, 무기염, 콜로이드, 고분자 등으로서 막의 종류에 따라 제거 가능한 물질의 크기는 다르다. 그림 1은 물질의 크기와 막의 종류와의 관계를 나타낸 것으로서 압력차를 구동력으로 하여 막분리를 행하는 3가지 방법중 역삼투막은 공경이 가장 작아 저분자 물질도 제거가 가능하며, 대부분의 막에 의해서 대장균, 바이러스 등의 병원성 미생물도 제거가 가능하다.

2. 막분리 공정의 종류와 특징

막분리 공정은 상변화를 동반하기 때문에 저온에서의 조작도 가능하며, 무기물, 고분자 유기물, 미생물 등을



최근 막분리 기술의 한단계 발전한 형태는 생물학적 처리와의 조합법이다. 수처리 시스템에서는 대부분의 경우 생물학적 처리와 막분리 기술을 조합함으로써 폐수 재이용시스템으로 이용할 수 있는데, 장치의 소형화에 의하여 부지를 작게 차지하므로써 고층건물내에서 매우 유용한 처리 시스템이다.

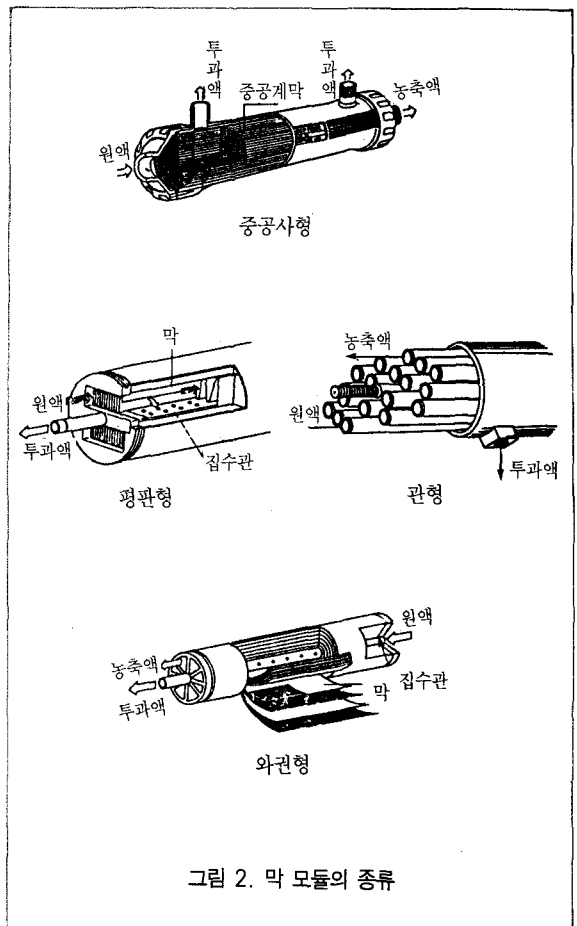
활성슬러지법에 의한 폐수처리시 고액분리의 기본 원리인 침전조에서의 중력침강법은 유입수의 수질과 수량 및 처리조건에 따라 슬러지의 침강성이 변하게 되

표 2. 활성슬러지·UF막 처리공법의 특징

장 점	단 점
-고액분리의 효과가 우수하다.	-막의 내구성에 문제가 있다.
-대장균, 비루스 등의 병원성 미생물의 제거가 가능하다.	-막면에 미생물 및 용질의 부착층이 형성되기 때문에 막투과율(여과유속)이 현저하게 낮아지는 경향이 있다.
-고액분리된 고형물이 폭기조에 농축되므로 폭기조에서의 미생물 농도를 높게 유지할 수 있어서 설비의 소형화가 가능하다.	-운전 종료후의 막세척에 많은 노력, 에너지, 시간을 필요로 한다.
-자산화율이 높아 폐기되는 잉여슬러지의 양이 적다.	-막의 국내생산이 되지 않고 있으며, 고가이다.
-고분자 유기물도 막에 의해 재처리되므로 처리효율이 향상된다.	
-MLSS의 침전특성은 처리수의 수질이나 투과속도에 영향을 주지 않는다.	
-호기성 및 혐기성 처리공정에 모두 적용 가능하다.	
-처리수질이 양호하므로 모래여과, 활성탄 흡착 등의 부가설비가 필요없다.	

고, 침강성이 나빠지면 처리수중의 미생물이 부유물질로 유출되는 위험이 항상 존재한다. 활성슬러지법과 막을 조합한 처리 시스템은 막을 이용한 고액분리를 통하여 안정하고 양호한 처리수질을 얻을 수 있다는 점에서 매우 중요한 의미를 갖는다. 표 2는 활성슬러지·UF막 처리공법의 특징을 나타낸 것이다. 활성슬러지와 UF막을 조합함으로써 표 2에서와 같은 여러가지 장점이 있는 반면, 막의 내구성, 투과 유속의 저하, 막의 세척 등 해결해야할 몇가지 문제점을 안고 있다.

막은 표 3 및 그림 2에서와 같이 모듈의 형태에 따라서 관형, 중공사형 와권형 및 평판형의 4가지로 구분되는데, 설계 및 운전 특성에 있어서 차이가 있으므로 사용자는 각 모듈의 특성을 파악하고 특정 용도에 적합한 모듈을 선정해서 경제적이고 효율적인 폐수처리를 하여야 한다.



막분리 방식을 생물학적처리와 병행하게 되면 처리수로 유실되는 부유물질이 전혀 없으며, 생물반응조에서 높은 농도의 미생물을 유지할 수 있으므로 부지면적이 작은 지역에서도 설치가 가능하다. 막분리 방식에서는 처리수질이 양호한 반면 운전기간이 길어짐에 따라 막의 막힘현상으로 인하여 Flux가 감소하는 경향이 있으므로 현재 Flux를 개선하기 위한 여러가지 연구가 진행되고 있다.

표 3. 막 모듈의 형태별 주요 특성

구분	평막형	관형	중공사형	외관형
폐수특성에 따른 적용성	모든 폐수의 처리가 가능	모든 폐수의 처리가 가능	고농도 SS 함유 폐수처리에는 부적합	고농도 SS 함유 폐수처리에는 부적합
세척방법	약품세척	약품세척과 스펀지볼 세척을 병행	역세척 및 약품 세척	대개 한번 쓰고 버림
설치면적	비교적 콤팩트	비교적 큰 설치 면적	콤팩트	콤팩트
적용분야	양이온 전착도료 회수	○	△	○
	식품공업	○	○	×
	하수처리	○	○	×
	정수처리	△	△	○

3. 막분리 기술의 현황

막분리 기술 중 역삼투법의 실용화 가능 여부는 용질을 투과시키지 않는 성능을 지닌 반투막의 존재 여부에 달려있다. 1959년 Florida 대학의 Reid에 의하여 미국의 염수국에서 역삼투법이 해수의 담수화 방법의 하나로 제안되므로써 역삼투법의 기초적 연구가 시작되어 크게 발전한 동기가 되었다. 이 중에서 초산셀룰로스막이 식염을 96% 이상 분리할 수 있는 능력을 지닌 것으로 알려졌으나 투과유속이 실용화하는 거리가 멀어서 10MPa에서 $3 \times 10^{-5} \text{cm} / \text{sec}$ 정도로 상당히 작았다. 역삼투막의 성능을 실용화 수준으로 높인 것은 1960년에 Loeb와 Sourirajan로서 이들은 비대칭성 반투막을 개

발하였다. 이 막은 막 두께로 두껍고 강도도 강하며 10MPa로 식염의 분리를 98.6%, 투과유속 $0.3 \times 10^{-3} \text{cm} / \text{sec}$ 로 실용화가 가능하였다. 이 막의 개발에 의하여 역삼투법의 실용화 개발 노력이 시작되어 1964년에는 Gulf General Atomic사가 공업용 외관형 역삼투 모듈을 개발하였다. 이것을 이용하여 1971년 일본에서 처음으로 세계 최대 규모의 염분폐수의 탈염장치가 실용화되어 막의 개발은 활발해지고 해수의 담수화용 막의 개발을 시작으로 실용화가 급속히 진행되었다.

초기의 막 성능은 염의 분리성이 아직 96-97% 정도로 낮았기 때문에 해수의 담수화에는 사용되지 않고 염의 농도가 낮은 염분폐수의 탈염으로 부터 실용화가 시작되었으며, 그후 막 성능이 향상되어 현재에는 해수로부터 1단계 탈염으로 담수가 얻어지는 수준까지 막 성능이 양호하게 되었다. 최근 일본 및 구미 선진국에 있어서의 막처리 기술은 막재질 등의 급속한 진보와 함께 연구개발이 진행되어 상수처리뿐만 아니라 분뇨처리 설비에 까지 이용되기에 이르렀다. 표 4와 표 5는 지금까지 개발된 여러 재질의 막 제조회사를 나타내고 있다. 표 5에서 분획분자량이란 독자적으로 정한 조작성에서 막을 투과시켜 용질이 90% 이상 제거될 때 그 용질의 분자량을 말한다. 우리나라는 일부 회사에서 막을 제조하고 있으나 아직 막 재질의 개발이 미비하여 연구에 이용하고 있는 막의 대부분을 수입에 의존하고 있으며, 막분리 기술에 대한 연구는 국립환경연구원, 한국과학기술연구원 등에서 실시하고 있는데, 아직 실용화는 되지 않은 상태이다. 일본의 경우 1967년에 처음으로 막분리 기술을 활성슬러지 프로세스에 응용한 이후 실용화 연구가 활발히 진행되어 1981년에는 빌딩의 중수도 시설에 막분리 장치를 조합한 시설이 가능하게 되었으며, 분뇨처리 분야에 있어서도 무회석 처리가 가능하게 되어 침전조 대신 막분리 장치를 조합한 시설이 보급되기 시작하였다.

표 4. 역삼투막의 재료 및 주요 제조회사

회사명	국명	막 재질	모듈의 형상
듀폰	미국	Linear Fully Aromatic Polyamide	중공사형
		Linear Fully Aromatic Polyamide	비대칭막 외관형
		Cellulose Acetate Blend	비대칭막 외관형
		Aryl-Alkyl Polyamide/Polyurea	복합막 외관형
Dow / Filmtech	미국	Crosslinked Fully Aromatic Polyamide	복합막 외관형

회사명	국명	막재질	모듈의형상
		Polypiperazineamide	복합막 외권형
Fluid system UOP	미국	Aryl-Alkyl Polyetherurea	복합막 외권형
		Fully Aromatic Polyamide	복합막 외권형
		Cellulose Acetate Blend	비대칭막 외권형
일동전공 Hydronotechs	일본/ 미국	Aryl-Alkyl Polyetherurea	복합막 외권형
		Aryl-Alkyl Polyamide / Polyurea	복합막 외권형
		Cellulose Acetate Blend	비대칭막 외권형
		Polyvinylalcohol / Polypiperazineamide	복합막 외권형
		Sulfonated Polyethersulfone	복합막 외권형
Desalination Systems	미국	Crosslinked Fully Aromatic Polyamide	복합막 외권형
		Cellulose Acetate Blend	비대칭막 외권형
		Sulfonated Polysulfone	복합막 외권형
Millipore	미국	Sulfonated Polysulfone	복합막 외권형
Osmonics	미국	Cellulose Acetate Blend	비대칭막 외권형
동락	일본	Crosslinked Fully Aromatic Polyamide	복합막 외권형
		Polypiperazineamide	복합막 외권형
		Cellulose Acetate Blend	비대칭막 외권형
		Crosslinked Polyether	복합막 외권형
동양방	일본	Cellulose Triacetate	중공사형

표 5. UF막의 재료 및 주요 제조회사

막재료		제조회사	분획분자량
분류	재료		
Cellulose계	초산 Cellulous	Abcor, DDS, Osmonics, PCI	1,000- 50,000
	Polysaccharide	Amicon	500-100,000
Vinyl계	Polyorepine	일동전공	20,000-100,000
	Polyacrylonitrile	옥화성, 다이셀, 삼릉레이온, Amicon, Rohn-Poulanc	5,000- 30,000
		Abcor, DDS, Osmonics	1,000- 50,000
방향족 Polymer	Polysulfone	옥화성, 일동전공, 삼릉레이온, Abcor, DDS, Desalination, Dow, Osmonics	1,000-260,000
	Polyethylsulfone	다이셀	5,000- 40,000
	Polyamide	Abcor	8,000
	Polyimide	일동전공	8,000- 20,000
	무기질	Alumina 질루코니아	TDK SFEC

4. 막분리 기술의 전망

산업의 발달, 인구의 증가 및 생활수준의 향상으로 용수의 수요가 급격히 증가하고 있어서 이에 대처하기 위한 수단으로 인공 댐을 건설하는 등 수자원의 확보에

노력하고 있으나 오염물질의 배출량이 증가하여 수질 오염이 심화되므로써 용수로서의 가치가 상실된 곳도 있어서 향후 용수 부족현상이 우려되고 있다. 따라서 생활오수나 산업폐수를 처리하여 청소수, 세척수, 소방용수 및 수경재배수로 이용할 수 있는 중수도 개발이 시급히 요구되고 있는 실정이다. 처리수를 재이용하기 위한 중수도 시스템으로는 활성슬러지법 등의 생물학적 처리와 병행하여 활성탄 흡착법, UF막 혹은 RO막 처리법 등을 이용할 수 있다. 그림 3은 대표적인 재이용을 위한 처리 프로세스를 나타내고 있다. 이들중 활성탄 흡착법이 현재 처리수를 재이용하기 위한 처리 프로세스에서 많이 이용되고 있으나 활성탄의 구입비용이 비싸고 일정기간 사용후 재생하여야 하며, 재생에 많은 비용이 소요되는 단점을 지니고 있다.

막분리 방식을 생물학적처리와 병행하게 되면 처리수로 유실되는 부유물질이 전혀 없으며, 생물반응조에서 높은 농도의 미생물을 유지할 수 있으므로 부지면적이 작은 지역에서도 설치가 가능하다. 막분리 방식에서는 처리수질이 양호한 반면 운전기간이 길어짐에 따라 막의 막힘현상으로 인하여 Flux가 감소하는 경향이 있으므로 현재 Flux를 개선하기 위한 여러가지 연구가 진행되고 있다.

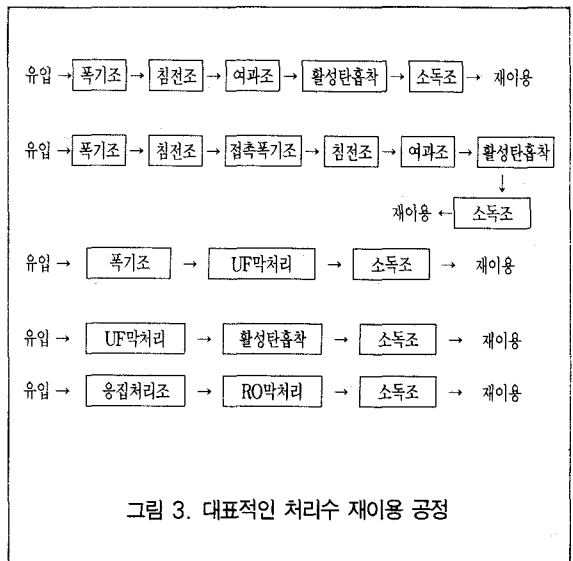


그림 3. 대표적인 처리수 재이용 공정

우리나라는 아직 막 제조 기술에 있어서 구미 선진국의 기술 수준까지는 이르지 못하고 있으나 일부 회사에



서 우수한 막 생산을 위하여 노력하고 있는 것으로 알고 있다. 내구성이 강하면서 Flux가 양호한 막이 생산되고 또한 운전 측면에서 Flux를 개선할 수 있는 연구가 지속된다면 우리나라에서도 향후 수년내에 중수도 시스템으로서 막분리 기술은 많은 각광을 받을 것으로 전망된다.

5. 결 론

우리나라에서는 아직 막분리법에 의한 폐수처리법에 관하여 많은 연구가 실시되고 있지 않은 실정이지만 최근 일본 및 구미 선진국에 있어서의 막분리 기술은 막재질 등의 급속한 진보와 함께 연구개발이 진행되어 상수처리 뿐만 아니라 분뇨처리 설비에 까지 이용되기에 이르렀다.

막분리 방식에 의한 폐수처리는 처리수질이 양호하고 생물학적 처리와 병행할 경우 생물반응조내의 미생물 농도를 높게 유지할 수 있어서 시설이 콤팩트하고 운전조작이 간편하므로 앞으로 많이 보급될 것으로 예상된다. 또한 막제조 기술이 발달하게 되면 막의 가격도 저렴해질 것으로 사료된다. 그러나 막 이용 기술에 관한 체계적인 이론이 아직 성립되어 있지 않아 이 분야에 대한 많은 기초 연구가 진전되어야겠다.

참고문헌

1. Hart, O.O. & C.A. Buckley, Membrane Technology in Wastewater Management, Proceedings of the International Specialised Conference held in Cape Town, South Africa(1992)
2. 서정범 등, 활성슬러지와 UF막의 조합공법에 의한 폐수처리, 한국수질보전학회지, 제10권 제2호(1994)
3. 한국과학기술원, 폐수처리를 위한 막형 생물반응조의 개발, 한국환경과학연구협의회(1992)
4. Y. Magara, K. Nishimura, M. Itoh, M. Tanaka, Wat. Sci. Tech., 25(1992)
5. C.A. Bukley, Wat. Sci. Tech., 25(1992)
6. 山本和夫, “高濃度活性汚泥膜分離プロセスによる高度處理”, 用水と廢水, Vol. 34, No. 11, pp. 911-917(1992)
7. 송본간치, 관원정효, 김산언희, 진병태기, 취방옥일, “막여과기술 이용 생물학적 배수처리”, 수질오염연구, Vol. 13, No. 2(1990)
8. 北尾高嶺 等, “膜を利用したし尿高度處理シラムについて”, 水質汚濁研究, Vol. 13, No. 10(1990)
9. 日笠勝, “限外ろ過膜を組み入れた高濃度活性汚泥法による排水處理”, 用水と廢水, Vol. 27, No. 10(1985)