

막분리 수처리 공정의 에너지 효율

최찬섭, 장진호, 노수훈

연세대학교 환경공학과

1. 막분리 공정의 특성

분리막을 이용한 물질의 분리는 그 원리와 공정이 비교적 간단하고 적용범위가 광범위하여 액체와 기체상의 분리 공정에 많이 이용된다. 특히, 막을 공정상에 이용하였을 경우에 에너지 소비가 적고, 용매의 필요성이 적어 경제적이며 상변화와 고온처리등이 수반되지 않는 장점이 있기 때문에, 앞으로 환경오염제어와 화학공업의 분리공정들을 대체할 수 있는 핵심적인 기술로 평가 받고 있다.

막(Membrane)분리는 막이 가진 미세공의 형태 및 크기와 막의 물리적, 화학적 특성, 막분리 대상물질의 형태 및 크기에 따라 압력, 농도 그리고 전위차 등의 추진력을 이용하여 행해질 수 있다. 수처리에 사용되는 막분리 공정은 압력차가 추진력으로 이용되는 경우가 대부분이며 이에 필요한 에너지는 주로 pump에 의해 공급된다.

막분리 수처리 공정에서는 적절한 투과수율을 얻기 위하여 적당한 운전압력을 유지하면서 유속을 높이는 것이 필요하다. 이는 분리막 표면에 형성되는 농도분극(concentration polarization) 및 오염 층이 형성되기 때문인데 이를 최소화하기 위하여 막 표면에서 용액의 흐름 상태를 난류로 촉진시키는 방법이 일반적으로 사용된다. 이렇게 막표면의 유속을 증가시키는 방식에 따라서 막분리 공정을 몇 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 고유량 가압 펌프를 사용하여 분리하고자 하는 용액을 막 표면과 십자형태로 빠르게 흐르도록 하는 십자흐름식 여과(cross flow filtration) 방식으로서 막오염 층을 감소시키는 가압형 분리막 공정(Figure 1)과, 둘째는 분리막 모듈은 분리하고자 하는 용액에 잠겨 있으며 투과수 쪽에 흡입펌프를 사용하여 투과수를 흡입하는 침지형 분리막 공정이다. 이때 분리막 표면의 막오염 층은 분리막 모듈이 잠겨져 있는 반응조의 폭기 장치에 의해 생성된 공기방울들의 흐름에 의해서 감소된다(Figure 2). 셋째는 저유량의 가압 펌프를 사용하지만 분리막 모듈을 회전

시킴으로서 고유량 펌프를 사용하는 가압형 막분리 공정에서 얻는 분리막 표면의 상대유속을 얻을 수 있는 동력학적 막분리 공정이 있다(Figure 3).

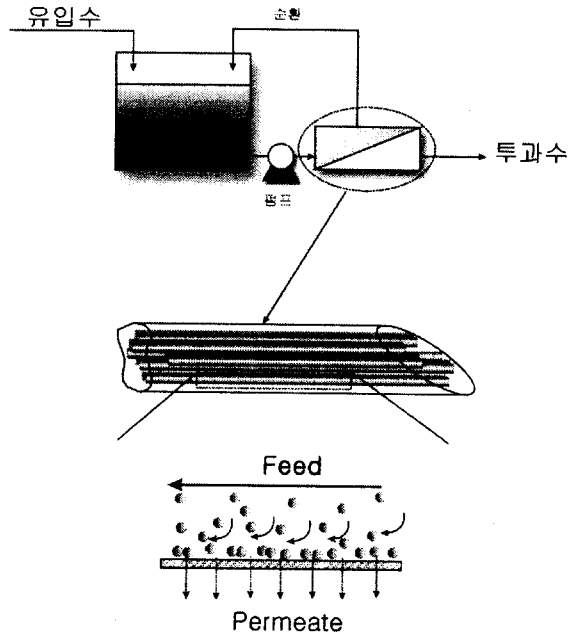
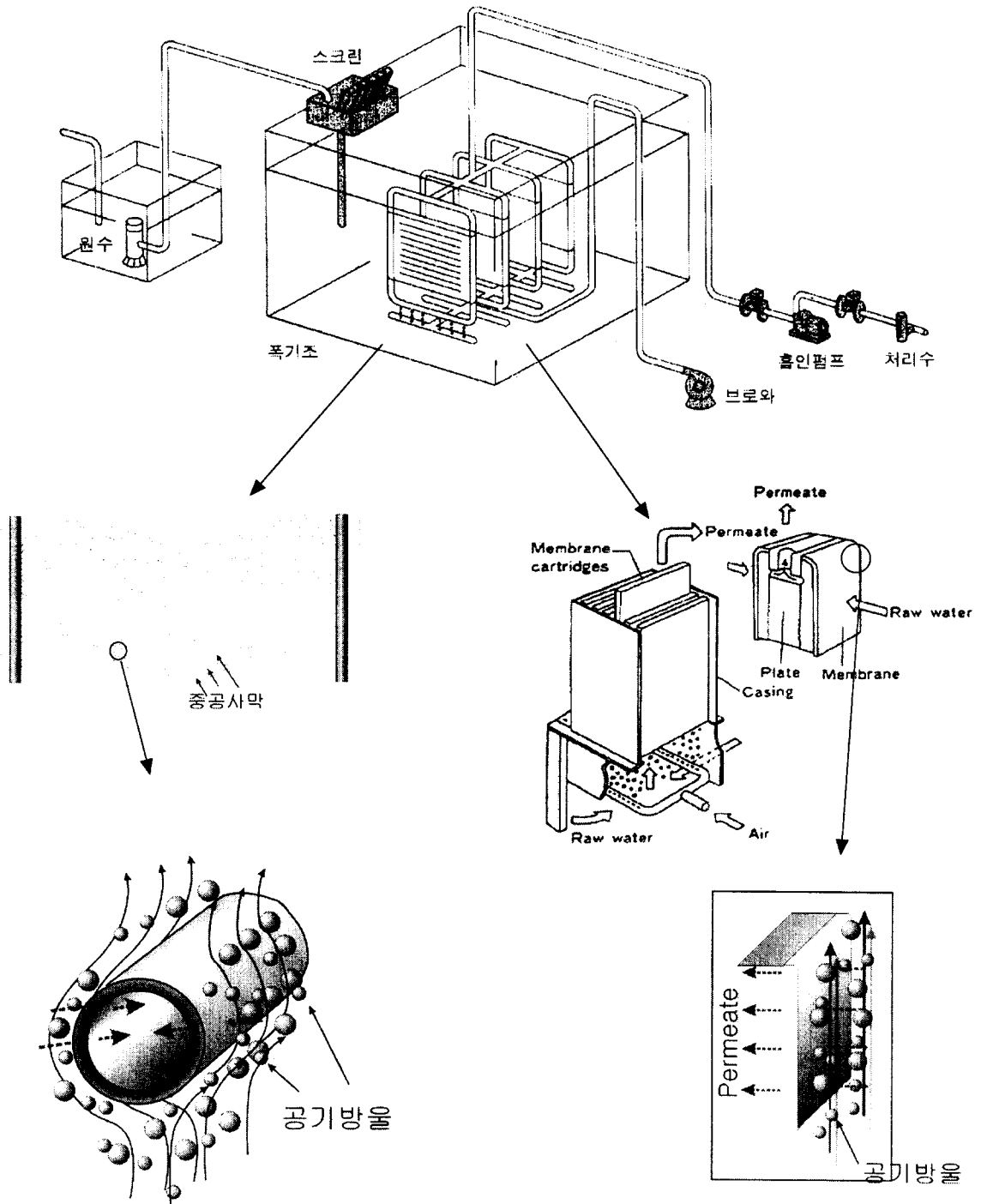


Figure 1. 가압형 막분리 공정

2. 막분리 공정의 에너지 소비

수처리에 적용되는 막분리 공정에서 추진력인 압력차를 일으키기 위하여 펌프가 사용된다. 그러나 분리막 모듈의 형태와 농도분극층을 감소시키는 방식에 따라서 다양한 용량의 펌프와 모터들이 사용된다. 따라서 각각의 공정 형태에 따라서 에너지 소비량도 달라지게 된다.

막분리 공정에서 에너지를 소비하는 구성요소는 막분리 공정의 형태에 따라서 살펴보면 다음과 같이 구분할 수 있다. 가압형 막분리공정은 Figure 1에서 보는 바와 같이 고유량 가압 펌프만 사용하여 원하는 양의 투과수를 얻기에 필요한 압력과 분리막 표면에서 난류를 일으키기에 충분한 유속을 얻을 수 있다. 그러나, 농축수의 압력이 높은 상태로 분리막 모듈을 빠져나오기 때문에 에너지의 낭비가 심하다. Figure 2의 침지형 막분리 공정에서는 낮은 압력의 흡입펌프를 사용하게 되므



(a) 중공사형 분리막 모듈

(b) 판형 분리막 모듈

Figure 2. 침지형 막분리 공정 (a) 중공사형 분리막 모듈 (b) 판형 분리막 모듈

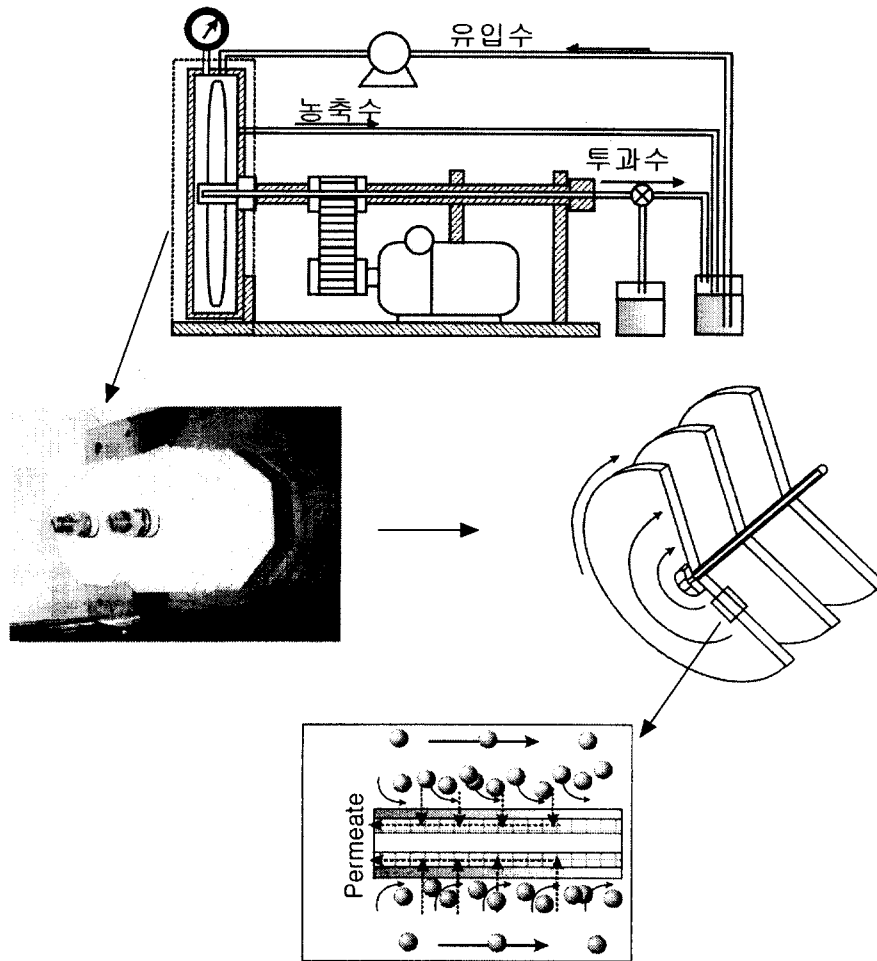


Figure 3. 동력학형 막분리 공정 (Rotary Disk membrane Module, RDM)

로 펌프의 에너지 소비는 적지만, 전여과 방식(Dead-end filtration)으로 투과수를 얻기 때문 분리막 표면에 막 오염 층이 쉽게 형성될 수 있다. 이를 방지하기 위하여 침지된 분리막 모듈 아래에 폭기 장치를 하여 작은 공기 방울과 이들의 흐름에 의해 분리막 표면의 농도분극 층 및 막 오염 층을 최소화 할 수 있다. 따라서 이들 공정에서의 주된 에너지 소비는 폭기 장치가 차지하게 된다. 특히 Figure 2 (a)와 같이 중공사막을 이용한 모듈은 Figure 2 (b)의 판형막 모듈과 달리 공기 방울의 흐름에 따라 중공사막들이 함께 움직이면서 막 오염 층의 형성을 최소화하기 때문에 폭기량이 적어도 된다. 따라서 상대적으로 적은 에너지를 소비하게 된다. Figure 3의 동력학형 막분리 공정에서는 분리막의 종류에 따라서 저압 또는 고압의 가압 펌프를 사용하지만 분리막 모듈 자체를 회전시켜서 막 오염 층의 제거에 필요한 유

속을 얻을 수 있기 때문에 가압펌프의 유량은 작아도 상관없다. 따라서 낮은 유량의 펌프와 분리막 모듈의 회전을 일으키는데 사용되는 모터가 에너지를 소비하게 된다.

Table 1에는 막분리 공정을 분리막 표면의 막 오염 층을 제거하는 방식에 따라서 분류하고 각 공정에서 에너지를 소비하는 구성요소들을 정리하여 놓았다.

Table 1 막분리 공정 상에서 에너지를 소비하는 구성요소

막분리 공정 형태	에너지 소비 구성 요소	적용분야
가압형	가압펌프	RO,NF,UF,MF
침지형	흡입펌프, 폭기장치	UF, MF
동력학형	가압펌프, 회전모터	NF, UF

앞에서 언급한 막분리 공정 중에서 가압형 이외의 공정들은 농축수의 수압이 크게 높지 않다. 그러나, 가압형 막분리 공정은 특히 RO 분리막을 사용할 경우에는 Figure 4에서 보듯이 농축수도 높은 압력을 가진 채 분리막 모듈을 빠져나오게 된다. 이렇게 낭비되는 에너지를 회수하기 위하여 에너지 회수 시스템을 적용할 경우 일반적으로 약 60% 이상의 에너지를 절약할 수 있으며 Figure 5에 이러한 에너지 절약효과를 보이고 있다[2].

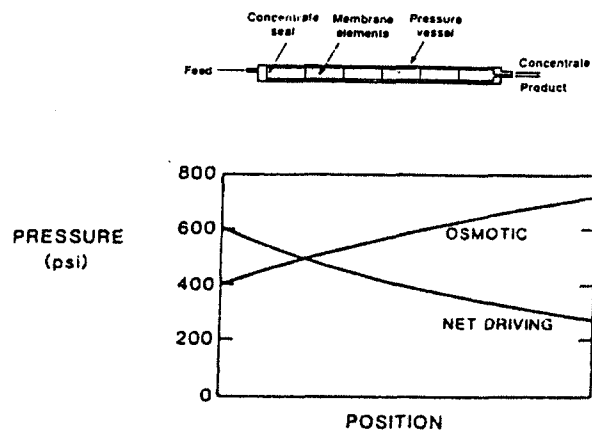


Figure 4 Effect of water recovery on the seawater feed osmotic pressure and net driving pressure

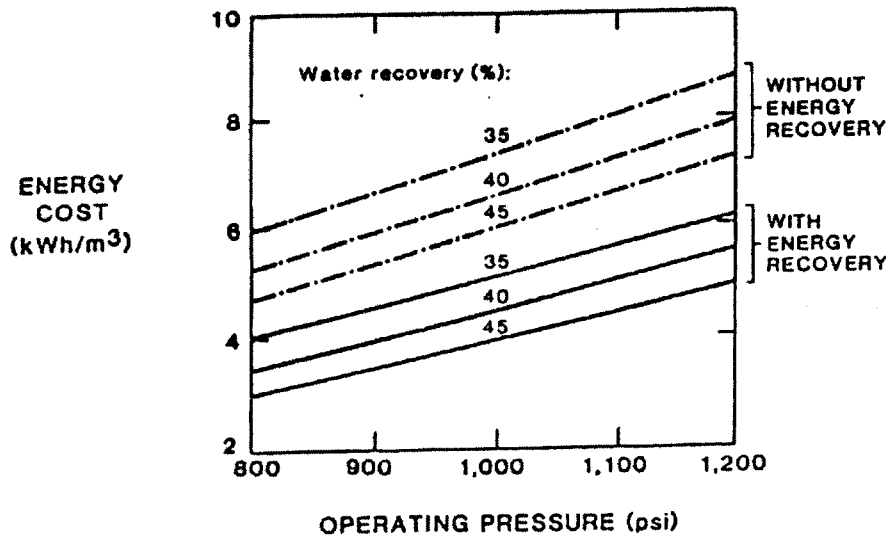


Figure 5. Energy cost vs. operating pressure for seawater desalination systems employing energy recovery devices

3. 기존 공정과의 비교

1) 탈염(desalination)

염수에서 음용수를 얻는데 전통적으로 사용되어 온 증류(Distillation)법과 역삼투(Reverse Osmosis, RO), 전기투석(Electrodialysis, ED), 이온교환(Ion Exchange, IX)등의 기술들이 사용된다. 이 중에서 가장 적합한 방법을 선택하는 것은 물의 분석, 처리수의 수질 정도, 필요한 전처리 공정, 에너지의 유용성, 그리고 폐수의 처리 등을 고려해야 한다. Table 2는 원수의 특성에 따라서 적용할 수 있는 다양한 방법들을 제시하고 있다. 이온 교환과 전기 투석은 일반적으로 염의 농도가 매우 낮은 원수에 적합한 반면에 증류는 염의 농도가 매우 높을 경우에 적합하다. 역삼투법은 원수의 염농도가 3,000 - 10,000 ppm일 때 가장 적합한 기술이지만 원수의 염의 농도가 3,000 ppm이하로 더 묽거나 35,000ppm 정도의 해수에서도 폭넓게 사용될 수 있다.

Table 2 Method of Desalination

Technique	Typical Application			
	Brackish Water		Seawater	Higher Salinity Brines
	3,000 ppm	3,000-10,000 ppm	35,000 ppm	
Distillation	t	s	P	P
Electrodialysis	P	s	t	
Reverse osmosis	P	P	P	t
Ion exchange	P			

Key: P=Preferred application
s=Secondary application
t=Technically possible, but not economical
Source: Office of Technology Assessment, 1987.

지난 30여년 동안 탈염 비용은 크게 감소해 왔음에도 불구하고 염수를 처리함에 있어서 어떠한 탈염 기술을 선택하느냐에 있어서 비용 문제는 여전히 일차적으로 고려해야할 사항이다. Figure 6은 탈염 장치의 규모에 따른 탈염 운전비용을 비교한 것으로서 하루에 음용수를 1-5백만 갤론을 생산하는 장치에 관한 건설비와 운영비가 포함된 비용이다. 비용에는 건설비(20년 이상 상환), 전처리, 탈염, 농축된 염수 처리와 유지비를 포함한 것이다. Figure 6에서 보듯이 해수의 담수화에서 장치의 규모가 증가함에 따라서 비용은 크게 감소함을 알 수 있다. 그러나, 보통의 염수에서는 장치 규모가 커져도 처리비용의 감소는 적음을 알 수 있다.

Table 3은 여러 탈염 공정들에서 필요로 하는 에너지량을 보여주고 있다. 이들 에너지 비용은 유입용액의 염 농도와 관계가 있으며, RO에서는 염수(brackish water)의 농도가 3,500 - 8,000 mg/L의 범위에서 400 psi 의 높은 압력을 사용하고 더 낮은 농도에서는 200 psi의 압력이 사용되었다[2].

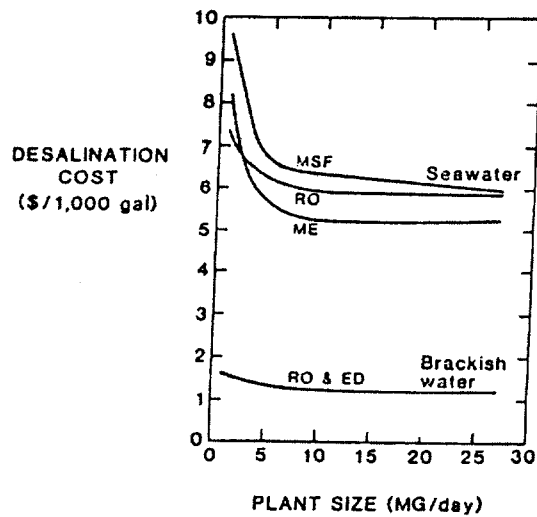


Figure 6 Comparison of estimated desalination operation costs based on plant size (MSF: multistage flash, RO: reverse osmosis, ME: multiple-effect evaporation, ED: electrodialysis).

Table 3 Estimated Energy Requirements for Desalination Process

Process Type	Energy Requirements	
	kWh/m ³	kWh/1,000 gal
Distillation	15	56
Electrodialysis		
Seawater	> 50*	> 100*
Brackish Water	4	15
Reverse Osmosis		
Seawater	7	26
Brackish Water (400 net psi)	2	7.6
(200 net psi)	0.8-1.5	3.0-5.7

* Electrodialysis is not economical for seawater desalination. Energy consumption is approximately 5 kWh for each 1000 mg/L salt reduction per each 1,000 gal of purified water

2) 생활오수

생활오수를 처리하는데 사용되는 일반적인 활성슬러지 공법을 Figure 7에 나타내었다. 그리고 이러한 공정으로 운전할 경우에 소비되는 에너지를 Tabel 4에 정리하였다. 이 계산에 사용된 공정의 연간 평균 유입량은 4800m³/일이고, 유입

BOD₅는 225 mg/L, 부유물질은 250 mg/L 이다. 건설비를 포함한 모든 운전비 및 유지비를 고려하였을 때 단위 처리수당(m³) 0.85 kWh의 에너지를 소비하는 것으로 계산되었다[3].

Table 4 Primary energy consumption for activated sludge

Item	Energy parameter	Conversion factor	Primary energy consumption	Average annual energy consumption, 10 ⁵ kWh/yr
Construction	\$1,050,000	$\frac{900.96}{2100}$ (5.719kWh/\$)	25.76×10^3 kWh	0.86
Operations electricity	2671kWh/d	1.00	2671kWh/d	9.75
Operations propane	639.76kWh/d	1.208	773kWh/d	2.82
Operations chlorine	42.3kg/d	5.39kWh/kg	249kWh/d	0.83
Maintenance labor parts and supplies	\$27,100/yr	$\frac{900.96}{2100}$ (5.08kWh/\$)	0.59×10^3 kWh/yr	0.59
Total				14.83 =0.85(kWh/m ³)

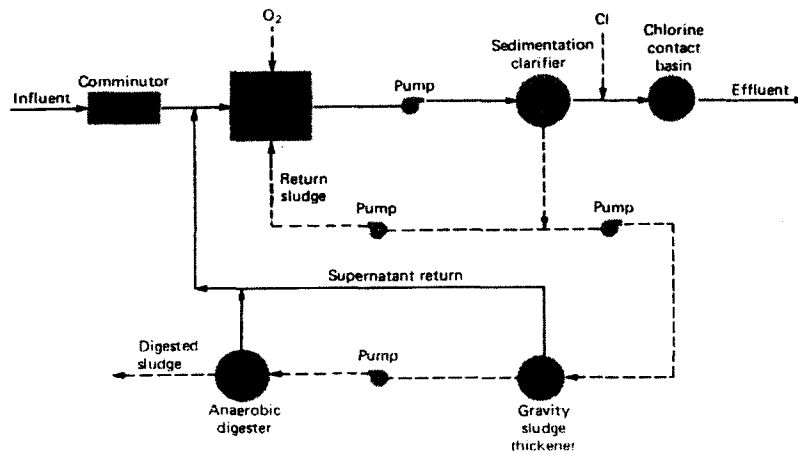


Figure 7 Activated sludge flowsheet used for evaluation of energy requirements as reported in Table 4.

Ueda 등은 생활오수를 막생물반응기로 처리한 실험에서 중공사막을 이용한 침지형 막분리 공정의 평균 에너지 소비량을 1m³당 2.0 kWh로 계산하였고[4], Aya의 연구에서 일반적인 십자흐름식 여과방식의 생물반응기를 이용한 가압형 막분리

공정에서 필요한 에너지(약 3-4kWh/m³) 보다는 적지만, 기존의 활성슬러지 공정들에 필요한 에너지(약 0.2-0.3 kWh/m³)보다는 높은 에너지를 필요로 한다고 기술하였다[4]. Table 5에는 생활오수를 처리하는데 소비되는 에너지를 앞에서 분류한 막분리 공정의 형태에 따라서 비교하였다.

Table 5. 생활오수 처리시 막분리 공정에 따른 에너지 소비량

막분리 공정	에너지 소비량 (kWh/m ³)
가압형 (Tubular type)	3 - 4
침지형	
중공사막모듈	2
판형 막모듈	1.9 ^b
동력학형 (RDM ^a)	1.5 - 2 ^c

^a Rotary Disk membrane Module

^b 참고문헌 [5]

^c 참고문헌 [6]

그러나, 국내의 한 오수처리시설업체에 의하면 하루 250m³ 정도의 생활오수를 처리하는 시설에서는 침지형 막분리 공법이 장기 폭기 후 모래여과, 활성탄 여과를 거쳐 오존처리 등의 2, 3차 처리를 하는 공법에 비하여 에너지 소비 면에서 훨씬 경제적이라는 결과를 보여주고 있다. Table 6은 BOD와 SS가 약 200 ppm인 생활오수를 각각 5 ppm이하로 처리할 수 있는 오수처리시설의 건설비와 유지 관리비를 비교한 것이다. 이 시설들의 처리용량은 각각 250m³이고, 침지형 막분리 공법에서는 중공사막 모듈을 사용하였다. 이들 시설의 처리 공정도를 Figure 8과 Figure 9에 나타내었다.

Table 6에서 보듯이 침지형 막분리 공법이 전체적인 유지관리비에서 약 2배 이상 적게 들며, 전력비 또한 약 2.5배이상 적게 들어 같은 처리 수질을 얻지만 훨씬 에너지를 적게 소비하는 공법임을 확인 할 수 있다. Table7은 이들 시설이 소비하는 전력을 세부적으로 비교한 것으로서 침지형 막분리 공법이 에너지를 소비하는 장치가 적으며 에너지 소비량이 1m³당 1.7 kWh로서 장기폭기법의 4.3 kWh/m³에 비하여 경제적이다.

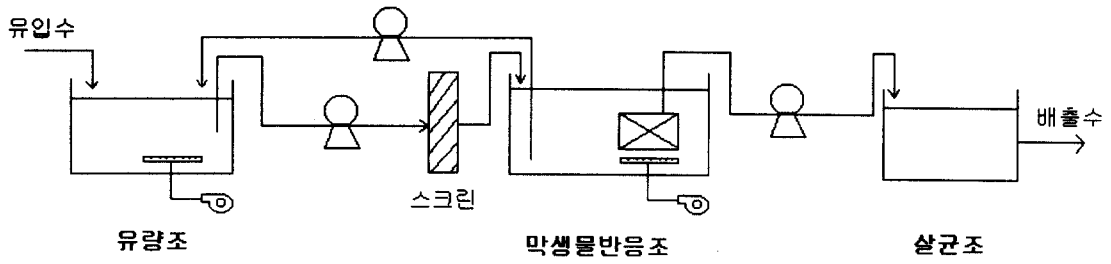


Figure 8 침지형 분리막 공법을 이용한 생활오수처리 공정도

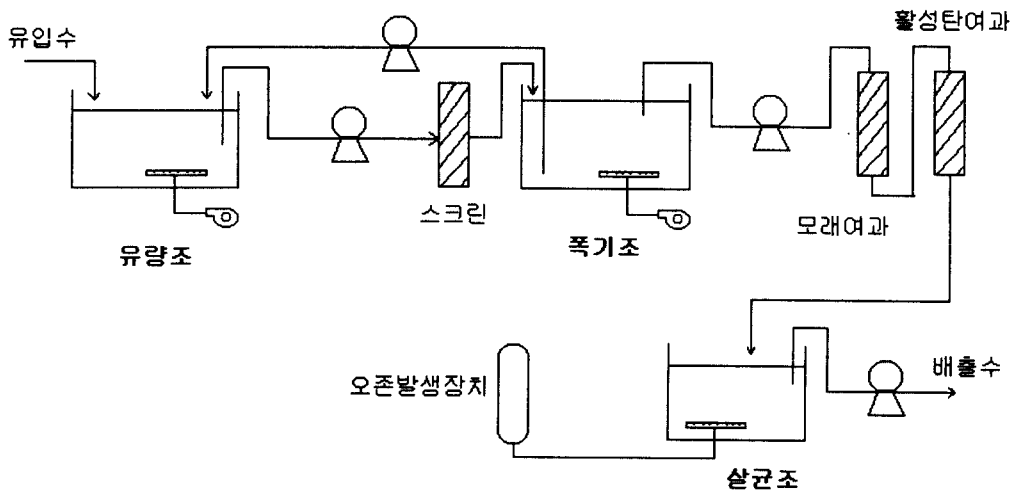


Figure 9 장기폭기법과 2,3차 처리공법을 이용한 생활오수처리 공정도

Table 6. 생활오수처리시설의 건설비와 유지관리비

	침지형 막분리공법	장기폭기방법 + 2, 3차 처리공법
건설비 (천원)	500,000	570,000
유지 관리비 (천원/년)	28,700	67,100
전력비	9,900	25,000
기타 유지비	18,800	43,100

Table 7. 침지형 막분리공법과 장기폭기방법+2,3차 처리공법의 전력사용량 비교

에너지 소비 장치	(단위 ; kWh/일)	
	침지형 막분리 공법	장기폭기방법 + 2, 3차 처리공법
원수펌프	9	9
폭기 브로와	132	125
유량 브로와	135	99
감속기	-	36
반송 펌프	13.5	13.5
소포 펌프	-	39.6
가압 펌프	-	66
급기 fan	39.6	99
배기 fan	67.5	135
배수 펌프	22	26.4
자동 스크린	4.8	4.8
시브 스크린	4.8	4.8
오존 발생 장치	-	420
계	428.2	1,088.1

오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률에 의하여 2002년부터 전국적으로 모든 건물에 오수처리시설의 설치가 의무화되었다. 이에 오수처리시설을 설치해야 하는 가구수가 5인 가구를 기준으로 약 200만 가구 이상으로 추정되고 있다. 이들 오수처리시설은 폭기장치와 펌프에서 에너지를 소비하게 되는데, 소비되는 에너지가 가구당 하루에 약 2kWh라면 한가구가 1년에 소비하는 에너지는 730 kWh/가구/년이고 전국적으로는 연간 약 1.5×10^9 kWh의 에너지를 소비하며 이를 비용으로 환산하면 약 750억원이 된다(1kWh=50원). 그러나, 오수처리시설이 소비하는 에너지가 하루에 1kWh 이라면 연간 에너지 비용은 약 375억으로서 에너지비용을 절반으로 절감할 수 있다. 따라서, 에너지 소비가 적고 효율적인 오수처리시설이 요구되고 있다.

4. 참고문헌

- [1] "막분리 응용", 한국막학회편, 자유아카데미, 1996
- [2] "Membrane Separation System-Recent Developments and Future Directions", R.W. Baker et al., Noyes Data Corporation, 1991
- [3] "Wastewater Engineering-Treatment/Disposal/Reuse", Metcalf & Eddy, Inc., 1979

- [4] "Treatment of Domestic Sewage from Rural Settlements by a Membrane Bioreactor", T. Ueda et al., Wat. Sci. Tech. Vol. 34, No 9, pp. 189-196, 1996
- [5] "膜分離方式について", 中村恭士, 集落排水 No. 43, pp. 112-121
- [6] "Performance of Rotary disk Modules in a Collected Human Excreta Treatment Plant", N. Ohkuma et al., Water Quality International '94, 1994
- [7] "The Application of Membrane Biological Reactor for the Treatment of Wastewaters", K. Brindle and T. Stephenson, Biotechnology and Bioengineering, Vol. 49, pp. 601-610, 1996
- [8] "Membrane bioreactors for wastewater treatment-operating experiences with the Kubota submerged membrane activated sludge process", Steve Churchouse, Membrane Technology No. 83
- [9] "Waste water recycling technology using a rotary disk module", N. Ohkuma et al., Proceedings of the IDA and WRPC world conference on desalination and water treatment vol. II pp. 251-258, 1993