

한강리포트

경제적인 폐수처리

IV. MARS(Membrane Anaerobic Reactor System) Process

지난 5년 동안 일본에서는 산업계, 학계 및 연구기관이 공동으로 분뇨의 고도처리를 위해 막분리공업을 사용하기 위한 연구가 수행되었다. 막분리공법 중 한외여과(Ultrafiltration)장치는 고가의 시설이지만 제한된 부지에서 고도처리를 하는 조건을 고려하면 경제성도 있는 것으로 나타났다.

이 연구과정에서는 한외여과장치의 재질과 막의 분리기능을 저해하는 요인을 제거하는 연구를 포함하고 있어 연구가 성공적으로 완료될 경우 분뇨뿐만 아니라 고농도 산업폐수의 처리에 많은 기여를 할 것으로 판단된다.



이 상 은 / 한국건설기술연구원 연구위원

고농도 산업폐수의 경제적인 처리방법으로 혐기성 생물학적처리방법이 널리 사용되고 있는데 반응조내에 높은 미생물농도를 유지할 수 있으나 호기성처리의 슬러지에 비해 혐기성처리 슬러지의 침전성이 나빠 고액분리가 잘 안되는 문제점이 있어 고액분리를 효과적으로 수행하는 막분리를 사용할 수 있다.

이번에 소개하는 처리방법은 Ultrafiltration을 사용함으로써 완전한 고액분리를 하여 반응조안에 높은 미생물농도를 유지하는 방법의 한가지로서 여기에 사용하는 한외여과막은 입자의 크기가 1mm에서 1 μ m까지의 물질을 걸러게 된다.

이 방법은 원하는대로 높은 미생물농도를 유지하여 높은 유기물 제거효율을 얻을수 있을뿐만 아니라 부수적으로 다음과 같은 효과를 기대할 수 있다.

첫째, Seed material들이 계속 System안에 있음으로서 Start-up에 소요되는 시간을 줄일 수 있으며 둘째, 유입수의 고형물질들이 막에 의해 분리되어 반응조내에 장시간 체류하게 되어 분해가 된다. 이밖에 셋째로 처리수의 고형물질농도를 아주 낮게 유지할 수가 있다.

MARS process는 미국의 한 회사에서 개발하여 특

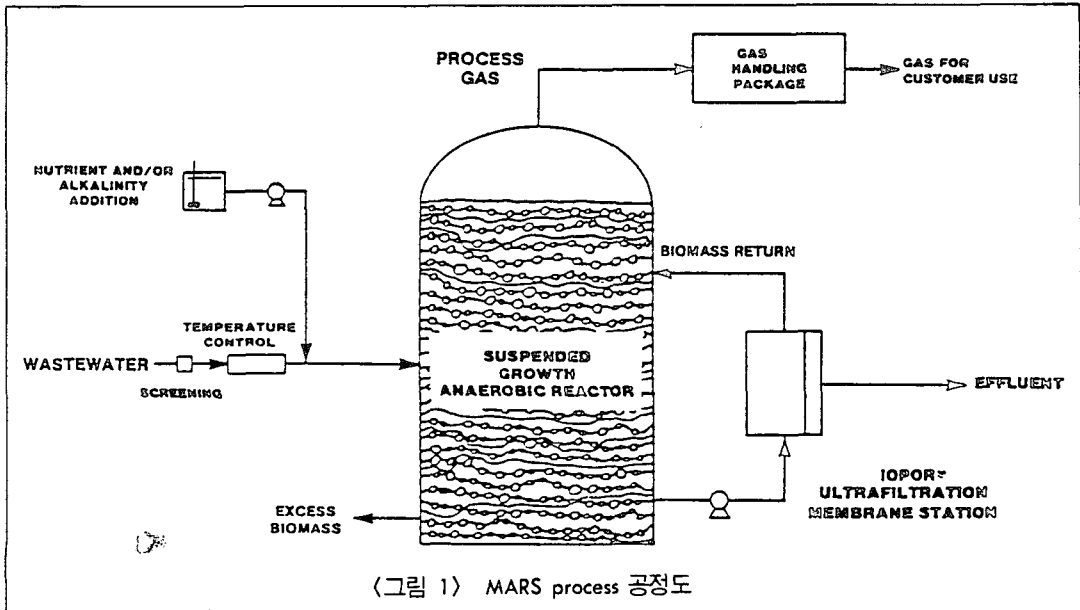
허를 얻은 처리방법으로서 부유상태의 혐기성 반응조와 한외여과막에 의한 고액분리시설로 구성되어 있다.

〈그림 1〉은 이 process의 간단한 공정도이며 반응조의 혼합미생물액(MLSS)은 계속 한외여과막을 갖춘 고액분리시설로 보내어져 biomass는 반응조로 반송되고 permeate는 처리수가 된다.

모든 biomass가 결국 반응조안에 있게되어 정확한 SRT조절을 위해 반응조안의 미생물농도를 알지 않고서도 일정양의 MLSS를 제거함으로써 SPT의 조절이 가능하다. MARS process에서 사용되는 한외여과막시설은 교환이 가능한 Cartridge로 구성되어 있는데 하나의 Cartridge에는 약 20장의 막이 들어 있으며 파손된 막을 쉽게 발견하고 교환할 수 있도록 구성되어 있다.

혐기성반응조안의 반응은 일반적인 생물학적처리방법에서 지금까지 알려진 해석을 그대로 적용될 수 있기 때문에 여기에서는 자세한 검토를 생략하고 한외여과막에 의한 고액분리에 대해서만 고찰해 보고자 한다.

MARS에서 한외여과막 공정의 설계는 폐수를 효과적으로 처리하기 위한 막의 면적을 구하는 것인데 우선 membrane flux(J)을 구해야 하며 이에 따른



〈그림 1〉 MARS process 공정도

소요면적(A)은 다음 식-1에 의해 계산될 수 있다.

$$A = (Q - W) / J \quad (1)$$

단, A: 소요총면적

Q: 유입유량

W: 제거슬러지유량

J: membrane flux, 즉 membrane 단위면적당 유량

Membrane flux는 막의 종류, Cross-flow 속도, trans membrane압력과 농도의 polarization정도등의 여러조건에 따라 변한다. 용액이 막을 통과하면서 막과 용액사이에 농도에 농도의 gradient가 생기며 이에 따른 농도의 polarization은 막의 표면에 용질이 아주 농축되어 있는 층을 형성되도록 한다.

이 층의 한외여과의 흐름을 느리게 하고 결국 한외여과의 속도는 용질의 축적이 더 이상 되지 않도록 되는 상태까지 줄어들게 된다. 이같은 효과를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$J = \alpha \frac{(V)^2 (D)^2}{(\mu)^2} \log(C_g/C_s) \quad (2)$$

또는

$$J = K_m \log(C_g/C_s) \quad (3)$$

단 J: membrane flux(길이/시간)

V: 막을 통과하는 속도

D: Diffusivity

μ : Kinematic Viscosity

K_m : Overall mass transfer coefficient (길이/시간)

C_g : 층의 apparent 고형물농도

C_s : 반응조의 고형물 농도

식-3에서 반응조의 고형물농도(C_s)가 높아질수록 flux가 줄어들지만 단위유량당 소요되는 막의 면적은 늘어나는 것을 알 수 있다. 그러나 높은 고형물 농도는 반응조의 크기를 적게 유지할 수 있으므로 MARS 반응조의 최적 biomass 농도는 반응조의 크기와 막의 비용이 적절히 조화되도록 선정되어야 하여 설계에 필요한 여러상수들이 미리 선정되어야 함은 물론이다.

표-1은 5종류의 고농도 산업폐수의 처리에 MARS process를 적용 운전한 결과를 나타낸다. 5종류의 산업폐수 모두가 우유가공업에서 발생된 폐수

로서 다른 종류의 폐수로 일반화 시키기는 무리가 있을 것이다. MARS process가 고농도 폐수에 얼마나 효과적으로 사용될 수 있는가를 알 수 있다.

〈표 1〉 MARS process의 운전결과

항 목	유 가 공 업 폐 수				
	1	2	3	4	5
유입수(mg/ℓ)					
COD	58,500	29,000	62,000	55,000	35,000
BOD ₅	34,000	16,000	31,000	24,000	15,000
TSS	5,200	2,000	2,000	100	13,000
처리수(mg/ℓ)					
COD	720	1,400	1,500	450	270
BOD ₅	360	960	1,000	<27	74
TSS	<10	<10	<10	<10	<10
처리효율(%)					
COD	99	95	97	99	99
BOD ₅	99	94	97	>99	>99
TSS	>99	>99	>99	>90	>99

반응조내의 온도는 35℃로 증온 혐기성처리였고 pH는 모두 6.8~7.1로 운전되었다.

표-2는 이 처리시설들의 운전조건들을 종합한 것으로서 반응조내의 biomass 농도가 20,000mg/ℓ 이상으로 유지되고 있어 한외여과막에 의한 고액분리가 잘되어 반응조에 수용되고 있음과 SRT가 잘 조정된 것을 보여 준다.

〈표 2〉 MARS process의 운전조건

운 전 인 자	유 가 공 업 폐 수				
	1	2	3	4	5
유기물용적부하 Kg COD/m ³ ·일					
범위	7.4-8.8	13.9-16.3	7.5-10.7	9.3-9.7	8.0-8.4
평균	8.0	14.6	8.5	9.6	8.2
SRT, 일	25	25	50	27	30
HRT, 일	7.1	1.9	7.4	5.7	4.4
F/M비 1/일	0.33	0.55	0.35	0.30	0.37
MLSS, g/ℓ	27.2	35.3	32.4	36.5	24.1
MLDSS, g/ℓ	24.2	26.5	24.3	32.4	22.4

표-1과 표-2로부터 COD용적부하가 14.6kg/m³·일 인 경우는 95%, 그리고 8kg/m³·일 인 경우는

99%까지의 COD제거효율을 얻을 수 있는 것을 보여주고 있다. 또한 높은 SS 제거효율을 나타내고 있는데 유입수의 SS 농도가 13,300mg/l인 경우에도 처리수의 SS농도는 10mg/l 이하로 유지될 수 있다.

MARS Process를 아주 긴 SRT로 운전할 수 있다는 것은 슬러지 발생량을 극소화 시킬 수 있다는 장점을 나타낸다. 실제로 이 시설들의 운전결과로부터 산정된 Yield coefficient는 0.059에서 0.122kg/kg CODrem 정도까지로 산정되어 호기성처리의 경우가 값이 대개 0.5정도인 점과 비교할 때 슬러지 발생량이 훨씬 적은 것을 알 수 있다.

혐기성처리를 사용하는 경우 얻을 수 있는 메탄 가스는 이론적인 발생량이 0.53m³/kg COD인데 MARS process의 경우 1kg의 COD 제거량당 0.28m³에서 0.34m³의 메탄가스가 발생된 것으로 나타나 이론적인 값과 비슷하여 반응조내에서의 완전혼합에 의해 메탄발생효율이 매우 높은 것을 알 수 있다.

MARS process는 적은 부지에서 운전이 가능할 뿐만 아니라 아주 Compact하게 시설을 구성할 수가 있어 trailer에 장치하여 일시적인 과부하를 해결하는 방법으로도 사용될 수 있으며 또한 장소를 옮겨 가면서 기존처리시설의 처리효율을 높히는데도 효과적으로 사용될 수 있다.

본 처리방법 자체에 대한 경제성분석자료는 아직 정리되어 있지 못하나 같은 한외여과막을 사용하여 분뇨처리를 하는데 있어서 탈질효과를 얻기 위해 사용될 수 있는 기존 처리방법과를 비교한 결과는 표-3과 같다.

〈표 3〉 막분리 공법의 경제성 분석(탈질반응포함)
(100kl/인 기준)

항 목	막분리공법 고분하탈질	고 부 하 탈 질 방 법	표 준 탈 질 방 법
건 설 비 (천원/kl)	31,800	31,100	32,500
유지관리비 (엔/kl)	2,530	2,590	2,740
인원소요 (인)	6	7	7

이 비교는 하루 100kl의 분뇨를 처리하는 시설들을 대상으로 시행된 것을 종합한 결과로서 한외여과막을 사용하기 때문에 많은 건설비와 유지관리비가 소요될 것이라는 우려와는 달리 기존의 처리방법과 비슷한 것으로 나타났으며 유지관리는 오히려 적은 인력을 활용해도 되는 것으로 분석되었다.

그러나 보다 높은 처리효율을 얻을 수 있으며 부지면적이 훨씬 절약되고 필요한 용수량이 절감되는 것을 감안하면 본 처리방법의 경제성이 높은 것을 알 수 있다.

지금까지 한외여과막을 사용하는 첨단기술을 적용한 고농도 산업폐수 처리방법의 하나인 Membrane Anaerobic Reactor System(MARS)에 대해 간략하게 원리와 실제 적용결과를 살펴 보았다.

좁은 면적에서 많은 산업체에서 폐수를 발생시키고 또 이들을 효율적으로 처리해야 하는 우리나라의 실정을 고려하면 한외여과막에 의해 완전한 고액분리를 하여 반응조내에 높은 미생물농도를 유지함으로써 높은 처리효율을 얻는다는 점에서 우리나라에서의 적용을 연구해 볼만한 처리방법이라고 생각한다.

작은 반응조에서 높은 처리효율을 얻으며 고액분리가 완전히 되어 process의 조절을 용이하게 할 수 있기 때문에 기존의 anaerobic contact process의 단점을 크게 보완했다고 하겠다. 앞으로의 과학기술의 발전은 환경분야에서 이끌어 갈 수 있다고 보며 막분리를 이용한 폐수처리는 사용하는 막의 재질, 막에 의한 여과를 저해하는 물질 그리고 유지관리를 용이하게 하는 등 여러가지 문제점들을 해결해야 할 것이다. 이와같은 기술적인 문제점들이 충분히 검토되면 한정된 부지에서 고농도 폐수를 효율적으로 처리하기 위해 사용될 수 있도록 권장할만한 처리 방법이다.