

축분액비의 고액분리에 있어서 분리막의 투과특성

황명구 · 차기철 · 이명규*

연세대학교 환경공학과

Characteristics of Membrane Permeability on the Separation of Solid in a Liquid Livestock Manure

Hwang Myoung-Goo, Cha Gi-Cheol, Lee Myung-Gyu*

Dept. of Environ. Engineering, Yonsei Univ. 234 Maeji HeungUb Wonju, KOREA 220-710

Summary

A lab-scale MF membrane reactor was installed to investigate the membrane permeability, characteristics of membrane fouling at each conditions, and quality of permeate (liquid livestock manure) in the separation of solid-matters using membrane. Experiment was divided three filtration type such as follows; continuous filtration, gravity filtration, and intermittent filtration. As a result of experiment, flux 1 LMH was maintained for 7days, and trans-membrane pressure(TMP) was increased gradually under 10cmHg, but it was increased immediately after 10cmHg, respectively. However, the flux was increased, the Tmax was decreased exponential more and more. During the pure-flux test, most of the fouling of membrane was reversible. At the gravity filtration, permeate could be obtained as 1.75 LMH for 3.5days without any other electronic pressure. As an investigation of membrane surface, this study could be decided that the reason of fouling at the lower flux (Run 1 and 2) was attached matters in membrane surface, but at the higher flux (Run 4-6) was concentration polarization.

(Key words : Concentration polarization, Flux, Fouling, Membrane, Permeate, TMP)

서 론

인구증가와 식생활의 변화에 따라 육류의 소비가 급격히 증가하였고, 축산분야에서도 대량사육을 통한 기업식의 축산형태가 자리 잡게 되었다. 이에 따라 가축의 빠르고 건실한 성장을 도모하기 위하여 비료의 소요가 증가하였고, 과도한 화학비료의 사용은 자연

뿐만 아니라 인간의 건강에도 해를 가하는 현상을 일으키며 사회문제로 대두되었다. 또한 대량사육으로 인한 분뇨의 방출은 자연의 자정작용을 넘어 환경에 악영향을 미칠 정도로 과도한 양이 자연에 방출되기에 이르렀다.

축산폐수 발생량은 경제성장과 더불어 축산물의 수요가 증가함에 따라 가축사육두수

* 상지대학교 환경공학과(Dept. of Environ. Engineering, Sangji Univ. 41 WuSandong Wonju, KOREA, 220-702)

와 함께 증가하는 추세이며, 실제 1999년말 기준 약 39만 축산농가에서 소·돼지 1,035만 마리를 사육하여 약 121천ton/day의 축산폐수를 배출하고 있다(환경부, 2000). 이러한 수준의 축산폐수 방출은 질소성분은 화학비료의 소비량에 미치지 못하지만 인산과 칼라는 현재 사용되고 있는 비료 사용량에 가까운 높은 수준이다(김원호 등, 2000). 다시말해 국내에서 발생하는 축산폐수의 적절한 재활용으로도 대체비료로서의 그 가치가 충분히 있다고 할 수 있다.

이러한 맥락에서 급속액상부숙(Thermophilic Aerobic Oxidation, TAO) 기술은 호기성 발효균을 이용, 축산분뇨(畜産糞尿)를 액비화(液肥化)하여 자연유기비료로 사용하는 동시에 축산폐수를 처리할 수 있는 친환경적이며 매우 획기적인 기술이라 할 수 있다.

그러나, 축분의 액비화에 있어서 미립자를 포함한 고형물의 존재는 그 액비의 질을 하락시킬 뿐 아니라 비료의 살포에 있어서도 노즐의 막힘이나, 기타 기기의 손상을 유발할 수 있어, 고급액비의 생산을 위해서는 막분리(Membrane separation) 기술의 도입이 필수적이라 할 수 있다. 또한 막의 공경(Pore size) 이상의 고형 유기물질들은 계(System) 외로 빠져나가지 못하고 시스템 내에 농축되므로 이러한 농축액은 부과적으로 고농도의 유기비료로서 사용이 가능하다.

막분리 기술은 1748년 Jean Nollet에 의해 알코올 수용액과 순수한 물 사이에 선택적 투과성을 가지고 있는 생체막이 위치해 있는 계에서 알코올 수용액 측에서 물이 이동하여 이루는 수두차를 삼투압(Osmosis)으로 설명하면서 꾸준히 연구가 진행되어 19세기 중엽에 이르러 실험실 규모의 막제조가 이루어졌고, 20세기 고분자 화학을 비롯한 재료공학의 발달로 기능성 고분자 재료물질이 개발됨으로 해서 상업적 개발이 이루어지기 시작했다(한국 막학회, 1998).

현재 막분리 기술은 일본 및 미국 등지에서 이미 상용화 단계에 이르렀으며, 환경분야 뿐만 아니라 해수의 담수화 및 의학, 식품학에서도 활발히 연구가 진행되고 있다. 그러나 우리나라에서는 아직까지 연구단계에 머물러 있다.

따라서 본 연구는 TAO 공정을 거친 축분 액비를 대상으로 한 lab-scale의 분리막 실험을 통하여 축산폐수의 액비화에 있어서 막분리 기술의 도입에 따른 고액분리와 막오염 특성에 대한 기초적 현상을 관찰하고, 나아가 실제에 적용시키기 위하여 고려해야 할 필수적인 영향인자를 파악하여 최적의 운전 조건을 수립하고자 한다.

재료 및 방법

1. 실험장치

본 실험에 사용된 Lab 규모의 반응조 모식도를 Fig. 1에 나타냈다. 반응조는 실험에 사용된 막의 크기에 적합하게 디자인되었으며, 재질은 내부관찰이 용이한 투명한 아크릴로 하였다. 막면에 고형물이 부착하는 것을 최소화하기 위한 전단응력(Shear stress)⁶⁾을 제공하고자 막모듈 하단부 2cm 지점에 분사기를 설치하여 처리원액을 막모듈에 8L/min으로 직접 분사시켰으며, 이에 필요한 동력은 순환펌프(Circulating pump)를 사용하였다. 잉여의 원액은 반응조 상부의 순환튜브를 통해 다시 원수저장탱크로 유입되게 설치하였다. 반응조와 원수저장탱크사이에는 순환펌프에 의해 빠르게 순환되었으므로, 초기액비에 대한 온도조절은 반응조에 온도조절계(Thermal-controller)를 설치하여 전체 반응조 시스템의 온도를 제어하였다. 투과수는 흡입펌프(Suction pump)를 사용하였으며, stroke-type으로 흡입하였다.

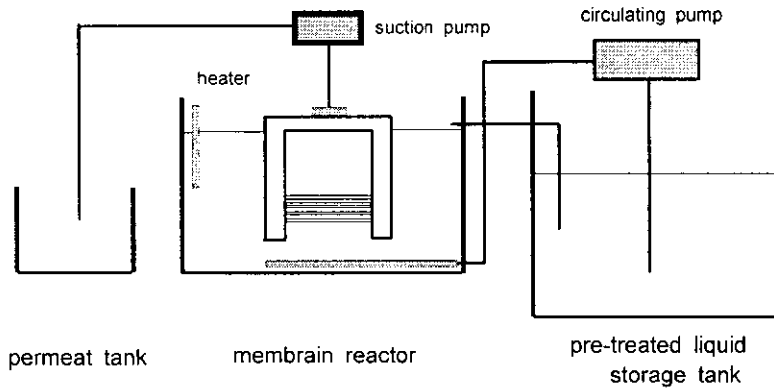


Fig. 1. Schematic diagram of reactor.

본 연구에 사용한 막은 외압식의 여과방식으로서 막표면에서의 폐수흐름의 선속도가 크고 막 Element를 housing으로부터 분리할 수 있고 다중화, 다별화가 가능하여 대규모 처리 뿐 아니라 중·소규모의 처리시설에도 유용한 중공사 형태의 막(일본, M사)을 사용하였다. 막의 평균공경은 $0.4\ \mu\text{m}$ 이고, 유효막면적 0.21m^2 , 그리고 재질은 폴리에틸렌 수지였다(Table 1).

막세정은 일차적으로 물 세정을 통해 막표면에 부착된 고형물을 제거한 후, NaOCl (0.1%, 2 Hour)을 사용하여 화학적 세정을 하였다. 에탄올(Ethanol 3%)을 사용하여 막을 재생시켰으며, 막세정은 투과압력이 상승하여 더 이상 일정한 투과유속을 기대하기 어려운 때를 기점으로 하여 실시하였다.

Table 1. Description of membrane

Type	Hollow fiber
Material	Polyethylene
Avg. pore size(μm)	0.4
Effective area(m^2)	0.21
Strands	1248
Diameter (mm)	0.29in. / 0.41ex.

2. 실험방법

본 실험에 사용된 Sample은 TAO기술로 처리된 축분을 진동스크린을 통해 1차 처리한 것으로써 실험은 Table 2와 같이 크게 연속여과(Continuous filtration)와 높이차를 이용한 중력여과(Gravity filtration), 그리고 간헐여과(Intermittent filtration)의 세 단계로 나누어 진행되었다.

연속여과 실험에서는 초기액비에 대한 분리막의 순수한 여과능력(Filtration capability)을 측정하기 위한 실험으로 막면적당 투과유속(Flux)을 1LMH에서 10LMH로 증가시키면서 투과유속의 증가에 따른 막오염(Membrane fouling)과 운전특성에 대해 관찰하였고, 두 번째 중력여과 실험에서는 막면 투과압력(Trans Membrane Pressure, TMP)을 기계적인 흡입펌프(Suction pump)에 의존하지 않고, 반응조내 수면의 높이와 유출구의 높이차를 이용한 중력투과에 의한 여과특성을 관찰하였다. 세 번째 간헐여과 실험은 간헐방식을 채택하여 흡입과 정지를 교차 반복시켰을 때의 여과특성과 막오염 과정을 관찰하기 위한 실험으로 투과유속을 4LMH로 고정된 상태에서 8분 2분 흡입/정지, 4분 1분, 그리고 2분 1분의 흡입/정지 시간을 부여하여 각

Table 2. General condition for experiment

	Run1	Run2	Run3	Run4	Run5	Run6	Run7*	Run8	Run9	Run10
Flux (l/m ² /hr, LMH)	1	2	3	5	7	10	1.75	4	4	4
Circulation rate (l/min)	8									
Reactor volume (L)	15									
Temperature (°C)	30									
Filtration type (min)	continuous							intermittent (on/off)		
								8/2	4/1	2/1

* Gravity Filtration test.

각의 변화에 따른 여과특성을 관찰하고자 하였다.

반응조의 온도는 30°C로 유지하였으며, 반응조 하단부에 직경 5mm의 원형 원액분사구 4기를 설치하여 약 8 LPM (L/min)으로 막모들 하단부에서 막표면으로 직접 분사하였다. 반응조의 유효용적은 15L로 하였으며, 간헐여과 실험에서는 흡입펌프에 타이머를 부착하여 흡입펌프의 전원을 통제함으로써 일정 시간의 간격을 두고 간헐여과를 유지하도록 하였다.

분석항목은 막 오염현상을 파악하기 위하여 막 투과압력(TMP)과 투과유속(flux)을 측정하였으며, 순수투과 실험(Pure-flux test)을 통해 막의 여과저항을 측정하였다. 그리고, 원액과 투과수의 성상변화를 파악하기 위하여 pH, Electronic conductivity, TS, VS, COD, TKN, NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N, Acetic acid, Propionic acid, Iso-butyle acid, n-butyle acid 등을 측정하였다. 분석은 Ion chromatography, Gas chromatography, Conductimeter, pH-meter 등의 기기를 사용하였으며, 그 외의 항목은 공정시험법(Standard method)¹⁾에 따라 진행되었다.

결과 및 고찰

1. 연속여과 실험

Fig. 2에 각각의 Flux 1~10LMH 변화에 대한 여과압력의 변화에 대해 나타냈다. Run1 (1LMH)의 경우 운전경과 6일까지 비교적 저압이라 할 수 있는 10cmHg 이하에서 안정되게 운전되었다. 압력변화는 0.1cmHg에서 10cmHg까지 상승하는데 약 6일이 소요된 반면, 10cmHg에서 20cmHg까지 상승하는데 소요된 시간은 약 0.7일로 여과압력이 10cmHg 이상부터는 급격히 상승하는 것을 확인할 수 있었다. Run 2와 Run 3의 경우는 각각 약 0.7일과 0.5일의 운전기간을 나타냈다. 투과유속이 5 이상에서는 약 1.5시간 정도의 단시간이 진행된 후 막오염이 일어났다.

Fig. 3에 Run 1~6까지의 연속여과 실험에 대한 T_{max}의 변화²⁾를 나타냈다. T_{max}는 각각의 투과유속에 대하여 투과압력이 상승하여 일정한 투과유속을 기대하기 어려울 때까지의 운전기간을 나타낸 것으로 액비를 고액 분리하는 본 실험에서 투과유속이 증가할수록 지수함수 형태로 T_{max}가 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 4는 특정유량을 처리하고자 할 때의 필요 막면적을 나타냈다. 투과유속이 낮아질수록 그리고 처리용량이 커질수록 필요한 막면적은 지수함수 형태로 증가하는 것을 알 수 있으며, 실제 일 5ton/day을 처리할 경우 1LMH에서는 208m²가 필요한 반면 10LMH로 운전할 경우 20m²가 소요된다. 이 경우 초기 막에 의한 공정에 소요되는 비용이 10배 증

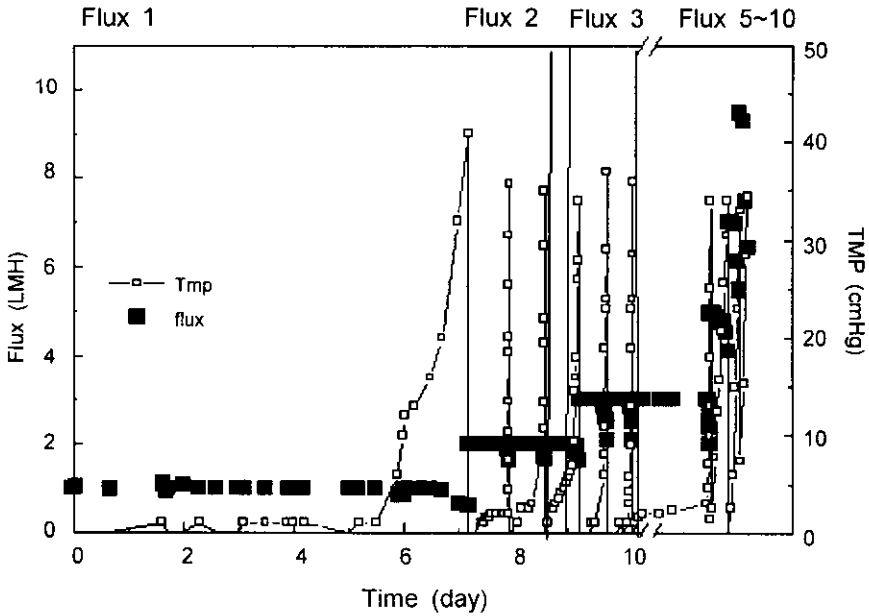


Fig. 2. Variation of flux and TMP.

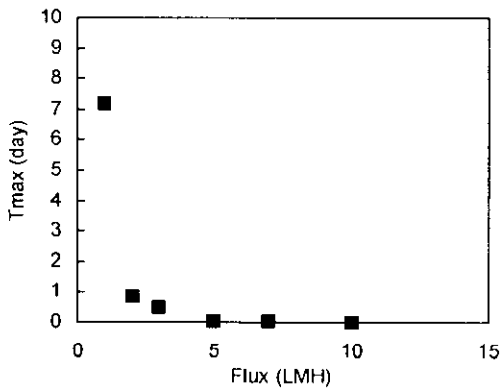


Fig. 3. Influence of flux on the T_{max} .

가하게 되는 것을 의미하며, 막분리 시스템을 도입할 경우 이러한 처리용량과 투과유속의 선택에 있어서 최적의 조건을 찾는 데 중요한 요소로 T_{max} 와 투과유속의 선택이 주요한 관건이 될 것이라 사료된다.

Run 2와 Run 3의 실험에서 원수의 TS변화에 따른 운전특성을 관찰하고자 동일조건에서 3회에 걸쳐 반복 운전하였다(Fig. 5). 실험 결과 TS가 flux 2와 3에서 각각 46,900mg/L

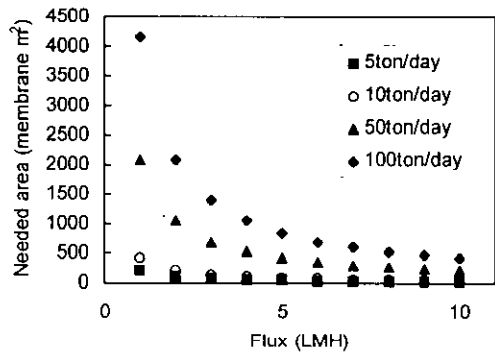


Fig. 4. Needed membrane area for treatment of the critical flow rate.

에서 49,000mg/L까지, 46,300에서 65,540mg/L까지 반응조 내에 농축되었고, 각각의 TS 농도에 따른 T_{max} 변화를 살펴본 결과 Fig. 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 다시말해 반응조내 고형물 성분이 농축될수록 막의 투과성능을 저하시키고, 결국에는 막운전기간에 지대한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

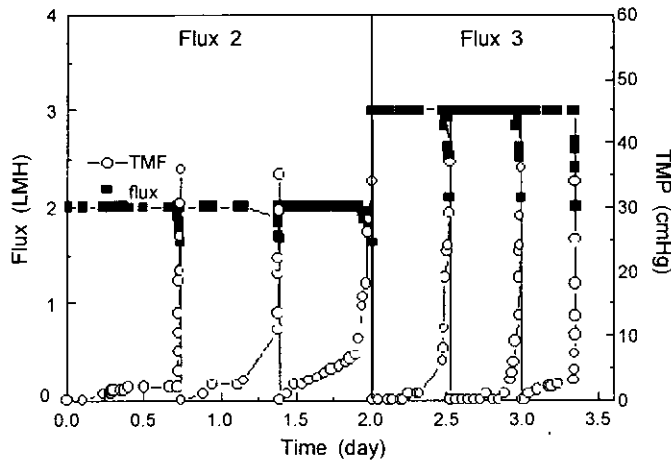


Fig. 5. Variation of flux and TMP at Run 2, 3.

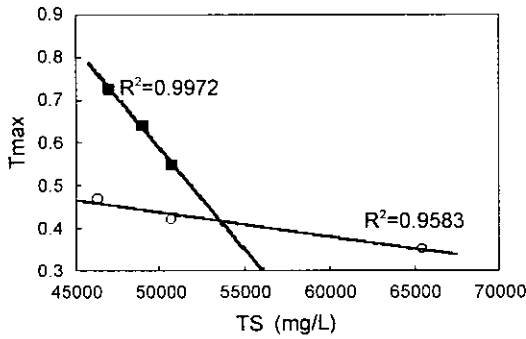


Fig. 6. Relationship between TS and T_{max} .

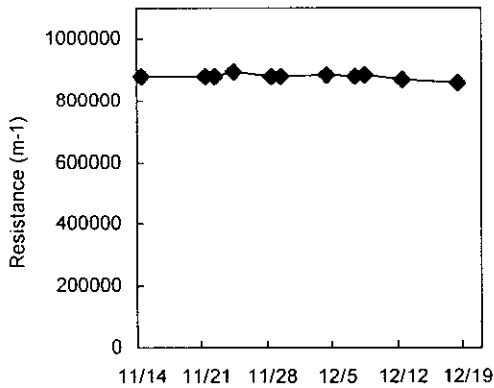


Fig. 7. Variation of filtration resistance at pure-flux test.

2. 막의 순수투과 특성 (Pure-flux test)

Fig. 7에 막 세정후 순수투과실험을 통한 막의 순수여과저항을 나타냈다. 여과저항 (Filtration resistance)^{7,9)}은 다음의 식(1)과 같이 표현되며, 본 실험에서는 막 세정후의 비가역적인 막오염을 측정할 수 있는 방법으로 운전경과에 따른 막공경 폐색 등 분리막의 비가역적 오염의 정도와 가역적 오염에 대한 재생능력의 정도를 확인할 수 있다. 실험 결과 막의 순수여과저항은 막의 오염과 세정을 반복하면서도 거의 일정하게 유지되고 있어, 원수에 의한 막의 비가역적인 오염현상은 크지 않은 것으로 사료되며, 막 오염의 주된 물질들이 대부분 물세정과 화학적 세정을 통해 제거될 수 있는 물질임을 확인할 수 있었다.

$$R = \frac{\Delta P}{\mu \cdot J} \quad (1)$$

여기서 R : 막의 투과저항 (m^{-1}), P : TMP (Pa), μ : 투과수의 점도 (c.P), J : 투과유속 ($m^3/m^2/day$)

3. 막면 부착특성 (Continuous filtration)

Fig. 8은 막 세정후의 막 사진과 각각의 실험 종료후 오염된 막을 촬영한 사진을 나타냈다. 사진의 비교에서 볼 수 있듯, 투과유속 2LMH일 때는 막면에 고형물의 부착이 두드러졌으며, 이는 막면에 고형물이 부착되어 막의 여과저항을 상승시켜 결국에는 여과압력의 상승을 야기하고 이로 인해 투과유속이 감소했다고 사료된다(Fig. 8(b)). 반면, 투과유속 5LMH 부터는 투과유속 2와 같은 고형물 부착이 관찰되지 않았고, 막이 오염된 상태에서의 막 표면을 관찰하였을 때 Fig. 8(c)와 같이 비교적 깨끗한 형상을 유지하고 있었다. 이는 막면 고형물 부착에 의한 막 오염보다는 농도분극 현상에 기인하는 역 투과 현상이 투과유속 감소의 주된 원인으로 작용되었기 때문이라 사료된다. 본 실험에서는 투과유속 5LMH에서 막면에 급작스런 압력이 형성되어 고농도의 원액중에 포함되어 있는 용매가 막면 부근에 층을 형성하여 투과압력이 급격히 상승하였다고 사료된다.

4. 중력여과 특성 (Gravity filtration)

높이차를 통해 생성되는 위치에너지를 이용하여 별도의 압력을 가하지 않은 상태에서

의 막 투과성능을 관찰하기 위한 실험으로 투과유속 5LMH에서 막이 오염된 후 흡입펌프의 전원을 차단하여 수행하였다. 실험결과, 막이 오염되었음에도 불구하고 약 3.5일까지 중력에 의한 투과는 투과유속 약 1.75LMH에서 일정하게 유지되었으며(Fig. 9), 이에 반해 TMP는 0 cmHg로 일정하고 안정되게 유지되었다. 운전경과 3.5일에는 막의 공경이 점점 폐색되면서 투과유속이 급격히 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 운전경과 4.2일경에는 투과유속이 약 0.6LMH까지 감소하였다.

5. 간헐여과 특성(Intermittent filtration)과 액비 성상변화

Fig. 10은 막 투과유속을 4LMH로 고정시킨 상태에서 투과수의 흡입과 정지를 각각 8분/2분, 4분/1분, 2분, 1분의 간헐식으로 운전하였을 때의 막 운전 특성을 나타냈다. 실험결과 8분/2분 사이클로 운전된 경우가 운전기간이 가장 길게 나타났으며, 2분/1분의 사이클이 가장 짧게 나타났다. 이는 적당한 정지기간 동안에 막면에 형성된 농도분극이 해소되는 동시에 막 표면에 형성된 부착층이

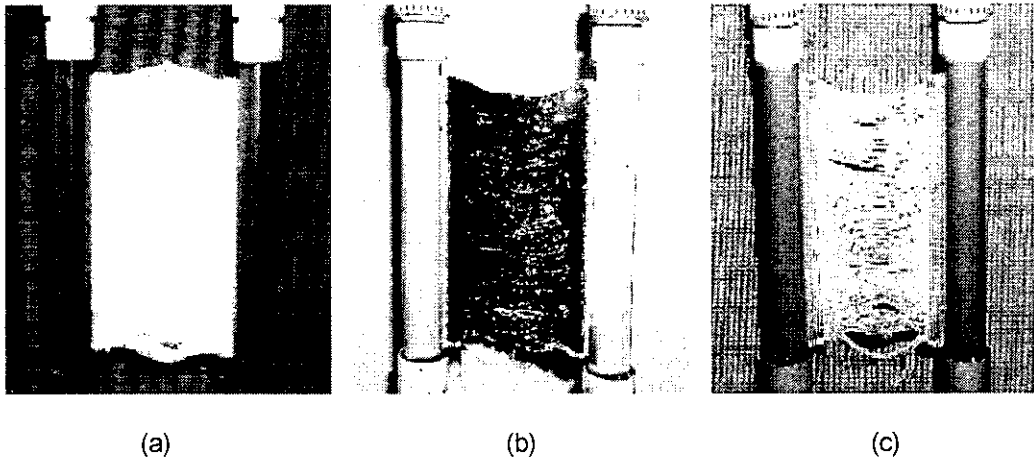


Fig. 8. Picture of membrane surface (a) after chemical cleaning, (b) end of Run 2, (c) end of Run 4.

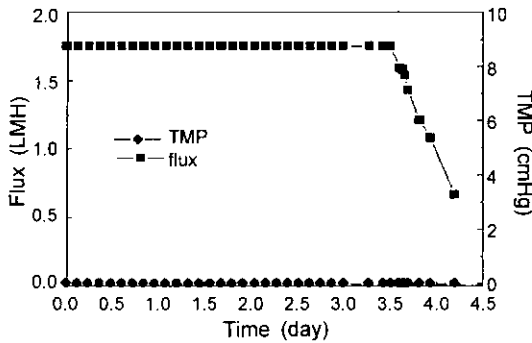


Fig. 9. Characteristics of flux and TMP at the gravity filtration.

떨어져 나갔기 때문이라 사료된다(황명구 등, 2000).

Table 3에 실험 전반에 걸친 분석항목간의 특성변화를 나타냈다. 원수 평균 TCOD는 약 34,000mg/L이었으며, 용해성, 혹은 콜로이드성 물질에 의한 SCOD는 약 28,500mg/L로 스크린을 통과한 원액의 대부분이 용해성·콜로이드성 미세입자로 형성된 것으로 사료된다. 이는 막 운전시 막의 오염에 직접적인 원인으로 작용되는 것으로 S-COD의 감소가 막 운전의 중요한 관건이 될 것이라 사료된다. 또한 투과수의 COD 또한 약 10,000mg/L 정도로 매우 높게 나왔으며, 이는 원액중에 0.4 μm이하의 용해성 물질이 상당부분 차지하고 있다는 것을 나타낸다. 또한 운전이 진행됨에 따라 Table 3에 나타낸 것처럼 82,600 mg/L까지 농축되는 것을 관찰 할 수 있었다. TS의 경우 초기 원수의 평균 농도는 약 42,000mg/L 정도이었으며, 반응조내 농축이 일어나면서 66,080mg/L까지 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 또한 VS를 관찰해본 결과 원수의 경우 약 50% 정도가 휘발성으로 구성되어 있는 것을 알 수 있었고, 투과수의 경우 약 66% 정도가 휘발성으로 구성되어 있어 막을 통과한 용해성 물질이 반응조내 존재하는 TS보다 더 많은 휘발성 물질의 분율을 포함하고 있는 것으로 사료된다.

NH₄⁺-N, NO₂⁻-N, NO₃⁻-N와 같은 이온성

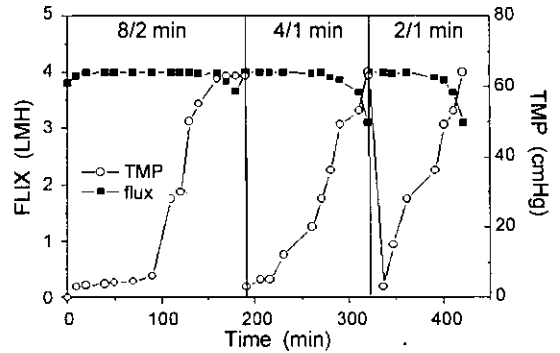


Fig. 10. Effect of intermittent filtration on the permeability.

Table 3. Overall variation of concentration

		Raw	Permeate
	TCOD _{cr}	34,260	9,848
	SCOD _{cr}	28,500	
	TS	42,160	14,700
	VS	20,480	9,750
	pH	8.72	8.68
	EC (mS)	21.4	20.4
	N · P	T-N	6,200
NH ₄ ⁺ -N		1,281	1,254
NO ₂ ⁻ -N		19	20
NO ₃ ⁻ -N		27	26
T-P		967	106
PO ₄		527	67
Heavy metal		As	1.27
	Cd	0.02	0.00
	Cd	0.16	0.05
	Cr	0.40	0.15
	Cu	23	0.17
	Ni	0.72	0.22
	Pb	0.62	0.28
Zn	65	0.80	
Salt	F	42	N · T
	SO ₄ ²⁻	460	N · T
	Cl	1,497	N · T
	Mg	58	1.74
	Ca	470	35
	Na	600	537
	K	2,755	2,636

을 포함하고 있는 것으로 사료된다.

$\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_2\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$ 와 같은 이온성 (Ionic) 물질들은 막의 여과특성상 투과수와 원수가 큰 차이를 보이지 않았으며, 다만 TKN의 경우 막을 통과하지 못한 물질들이 반응조내에 축적되면서 투과수와 원수사이의 농도차이를 확인할 수 있었다. 총질소(T-N)을 측정해 본 결과, 원수의 평균농도는 약 6,200mg/L정도를 나타냈으며, 투과수는 3,950 mg/L를 나타내어 막에 의한 총질소 배제율이 약 36.3%에 이르는 것을 확인할 수 있었다. 또한, Acetic acid와 같은 휘발성 지방산 (VFA) 성분은 원수 및 투과수에서 관찰되지 않았다.

적 요

Lab-scale의 실험을 통하여 축산폐수의 액비화에 있어서 막 분리 기술의 도입에 따른 막 오염 특성과 투과특성에 대해 살펴본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. System의 안정적 운전을 위해서는 낮은 투과유속에서의 운전이 효과적이라 사료되며, Tmax가 지수 함수적으로 투과유속에 대해 감소하였다. 이를 통하여 예측식을 수립하여 운전에 있어서의 막 세정 시기를 결정할 수 있을 것으로 사료된다.

2. 전반적인 막 자체에 대한 순수투과저항을 관찰해본 결과 막 오염은 비가역적 영역보다는 가역적 영역에 의해 이루어진다고 사료된다.

3. 투과유속이 낮을 경우 막면 부착물에 의한 여과저항의 상승이 막 오염의 주된 원인이 되는 반면, 투과유속이 증가할수록 농도분극현상이 막 오염의 주된 원인이 된다고 사료된다. 따라서 높은 투과유속에서의 운전을 위해서는 이러한 농도 분극현상을 최소화하기 위하여 높은 전단응력을 제공하거나 막 표면에 물리적 충격을 주어 농도 분극현상을

제어하는 방법이 추가되어야 할 것이라 사료된다.

4. 중력여과 및 간헐여과를 통한 막 분리 특성을 살펴본 결과 중력여과의 경우 별도의 흡입압력을 부여하지 않고 단지 수위차에 의해 생성되는 위치에너지에 의한 여과에서도 1.75LMH에서 약 3.5일간 안정되게 유지된 것을 확인할 수 있었으며, 간헐여과를 통해 농도 분극현상을 감소시킴으로 해서 연속여과보다 안정된 운전이 이루어졌다.

종합적으로 고찰해 봤을 때, 축산폐수의 액비화에 있어서 막 분리 기술의 도입은 그 유출수의 성상에 있어서 원수의 성상에 상관 없이 일정한 질을 보이고 있음을 확인할 수 있었고, 공정의 안정적 유지를 위해서는 낮은 투과유속과 흡입과 정지의 간격이 비교적 긴 간헐여과 방식이 적합하다고 사료되며, 높이차를 이용한 중력여과 또한 추가적인 연구가 진행된다면 동력의 소모면에서 이점이 있을 것이라 사료된다.

인 용 문 헌

1. 환경부, 환경백서, 2000. 378-381.
2. 김원호, 신동은, 최기준, 정의수, 김영진, 2000, 혼파초지에서 우분액비 사용수준이 유거수 및 토양특성에 미치는 영향. 축산시설환경, 6(1), 53-57.
3. 한국 막학회, 1998, 막분리 기초, 1-28.
4. 환경부, 1996, 공정시험법 (수질오염·폐기물·토양오염 편).
5. 황명구, 차기철, 정태영, 2000, 막 분리 활성슬러지 공정에서 호기 - 무산소 조건 변화에 따른 유기물 분해 특성 및 용해성 생물대사산물이 막 투과유속에 미치는 영향. 한국막학회 추계 학술발표회, 127- 130.
6. Nagaoka, H. 1999, Nitrogen removal by

- 107-114.
7. Nagaoka, H., S. Ueda and A. Miya, 1996, Influence of bacterial extracellular polymers on the membrane separation activated sludge process, *Wat. Sci. Tech.*, 34(9), 165-172.
 8. Nagaoka, H., S. Yamanishi and A. Miya, 1998, Modeling of biofouling by extracellular polymers in a membrane separation activated sludge system, *Wat. Sci. Tech.* 38(4-5), 497-504.
 9. Yasutoshi Shimizu, Katsushi Uryu, Yu-ichi Okuno, Atsuo Watanabe, 1996, Cross-flow microfiltration of activated sludge using submerged membrane with air bubbling, *Journal of fermentation & bioengineering.*, 81(1), 1/01/96.