

관형 PTFE 분리막을 이용한 막 접촉기(Membrane Contactor) 시스템에서 암모니아의 제거 특성

Ammonia Removal Characteristics in Membrane Contactor System Using Tubular PTFE Membrane

안용태[†] · 황유훈* · 신항식*
Yongtae Ahn[†] · Yuhoon Hwang* · Hang-Sik Shin*

펜실바니아 주립대학교 토목환경공학과 · *한국과학기술원 건설및환경공학과
Department of Civil and Environmental Engineering, Pennsylvania State University

*Department of Civil and Environmental Engineering, KAIST

(2011년 4월 14일 접수, 2011년 5월 27일 채택)

Abstract : In this study, ammonia removal characteristics in membrane contactor system under various operating conditions were evaluated. The mass transfer coefficient was used to quantitatively compare the effect of various operation conditions on ammonia removal efficiency. Effective removal of ammonia was possible with the tubular PTFE membrane contactor system at all tested conditions. Among the various operation parameters, contact time and solution pH showed significant effect on ammonia removal mechanism. Overall ammonia removal rate was not significantly affected by influent suspended solution concentration unlike other pressure driven membrane filtration processes. Also the osmotic distillation phenomena which deteriorate the mass transfer efficiency can be minimized by preheating of strip solution. Membrane contactor system can be a possible alternative to treat high strength nitrogen wastewater by optimizing operation conditions such as stripping solution flow rate, influent wastewater temperature, and influent pH.

Key Words : Membrane Contactor, Ammonia Removal, PTFE Membrane, Osmotic Distillation

요약 : 본 연구에서는 막 접촉기에서 운전조건에 따른 암모니아 제거 특성에 대해 알아보았다. 물질 전달 계수를 이용하여 각 조건에서의 암모니아 제거효율을 정량적으로 비교하였다. PTFE 재질의 막을 이용한 본 시스템에서 빠른 시간 내에 효율적으로 암모니아 탈기가 가능하였다. 여러 가지 운전조건 항목 중에서 접촉시간과 용액의 pH가 전체 제거 효율에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 다른 가압 방식의 막 분리 공정과는 다르게 본 공정에서는 유입수의 고형물질에 의해 효율이 감소하는 현상은 발견되지 않았다. 또한, 삼투 증류(osmotic distillation)에 의해 물질 전달 효율이 감소하는 현상은 흡수 용액의 온도를 증가시키는 것으로 해결할 수 있었다. 본 연구에 사용한 막 접촉기 시스템은 유입수와 흡수용액(stripping solution)의 유속, 유입수의 pH 등을 최적화 할 경우에 고농도 암모니아 제거에 효과적으로 사용할 수 있을 것이라 예상된다.

주제어 : 막 접촉기, 암모니아 제거, PTFE 막, 삼투증류

1. 서론

질소(N)와 인(P)은 호소수의 부영양화를 일으키는 주요 영양염류로서 다양한 발생원이 존재한다. 산업폐수나 축산폐수와 같이 고농도로 암모니아를 함유하고 있는 폐수의 경우에는 수계에 방출되기 전에 충분한 처리가 필수적이다. 또한 축산폐수나 음식물 쓰레기와 같은 폐기물을 처리하기 위하여 사용되는 혐기성 소화 공정의 운전에서 암모니아로 인한 전체적인 효율저하를 가져오기 때문에, 암모니아의 선택적인 제거가 필요한 실정이다.¹⁻³⁾

수중의 암모니아성 질소를 제거하는 방법에는 탈기법, 이온교환법, 생물학적 제거방법 등이 있으나 추가적인 처리가 요구되는 2차 오염물을 발생시킨다는 문제점이 있다.⁴⁾ 예를 들어 일반적인 탈기 공정에서는 암모니아 가스가 대기 중으로 방출되며 암모니아 탈기탑 내부 및 유입관 등에 탄산칼슘 스케일이 형성되는 문제점이 있다.⁵⁾ 이온교환 방

법의 경우에는 고가의 유기 수지와 다량의 수지 재생용액이 소모되며,⁶⁾ 생물학적 제거 방법은 반응 속도가 느리며 수중의 암모니아성 질소 농도가 300 mg/L 이상일 경우에는 미생물에 저해 작용을 일으키게 된다는 단점이 있다.⁷⁾

최근에 막 접촉기가 암모니아와 같은 휘발성 물질의 제거에 효과적인 대안으로 대두되고 있다.⁸⁾ 막 접촉기는 분리막이 기상과 액상의 중간에 존재하며 서로 다른 상으로는 분산되지 않는 상태에서 기상과 액상이 직접 접촉하여 두 상간의 농도 차이에 의해 오염물질이 제거되는 공정이다.⁹⁾ 전형적으로 본 공정은 수용액 상의 기체를 제거하거나 분리해 내는 데 주로 사용된다. 기상-액상 막 접촉기 공정은 기체의 흡착과 탈기 공정에 적용된 사례는 많이 보고되고 있지만,^{10,11)} 폐수 내에 존재하는 암모니아를 액상으로 분리해 내는 방식인 액상-액상의 막 접촉기 공정에 관한 연구는 부족한 실정이다.¹²⁾

일반적인 탈기법이나 암모니아 탈기법에 비해 막 접촉기

[†] Corresponding author E-mail: hangshin@kaist.ac.kr Tel: 042-350-3613 Fax: 042-350-8460

공정은 보다 넓은 접촉 면적(interfacial area)을 확보할 수 있게 되어 보다 빠른 시간 내에 효과적인 제거가 가능하며, 유속을 증가 시켜도 과부하가 걸리거나 처리 과정 내에서 거품 발생(foaming)의 우려가 없다. 또한 2차 오염물질이 발생하지 않고 직접 압력을 가하는 방식이 아닌 교차 흐름에 의해 제거가 가능하기 때문에 운전이 용이하고 전체 설치 비용이 저렴하다는 장점이 있다.¹³⁾ 특히 액상-액상의 막 접촉기를 이용할 경우에 암모니아는 염(salt)의 형태로 회수가 가능하여 유용한 질소원으로 재활용을 할 수 있게 된다.

본 연구에서는 PTFE (polytetrafluoroethylene) 재질의 막을 이용하여 액상에 존재하는 암모니아를 제거하고자 하였다. 이러한 액상-액상의 막 접촉기에서는 추진력(driving force)이 유입수와 황산 용액 내의 암모니아의 분압차이기 때문에 이론적으로 암모니아의 완벽한 제거가 가능하다.

암모니아 제거에 있어서는 비표면적이 넓고 제거효율이 우수한 중공사 형태의 막이 일반적으로 사용된다.¹⁴⁾ 그러나 높은 농도의 고형물에 의해 막 오염이 발생할 수 있다는 단점을 가지고 있다. 본 연구에서는 관형(tubular type)의 PTFE 막을 이용한 막 접촉기 시스템에서 다양한 운전 조건에 따른 암모니아 제거 특성을 알아보려고 하였다. 평가한 주요 운전조건은 용액의 pH, 초기 암모니아 농도, 황산 용액과의 농도 차이, 유입수 내 고형물 농도, 막 접촉기를 통과하는 유입수와 황산용액의 유량이다.

2. 실험방법

2.1. 막 접촉기 시스템

본 실험에는 PTFE 재질의 공칭공경이 0.4 μm인 관형의 막을 사용하였다. 막의 표면적은 205.5 cm²이었으며, 모듈의 규격은 Table 1에 요약하였다.

본 공정의 기본 구성 및 막접촉기 시스템의 모식도를 Fig 1과 2에 각각 나타내었다. 관형의 PTFE막은 폴리프로필렌 재질로 된 압력용기(pressure vessel) 내부에 장착하였다. 원수는 막의 내부로 유입되며, 10%(v/v) 황산 용액을 막의 외부로 흘려주었으며 흐름의 방향은 원수의 흐름 방향과 반대로 하였다. 실험에 사용된 PTFE 분리막은 소수성이기 때문에 공극은 양쪽의 용액이 서로 통과할 수 없으며 휘발성인 암모니아 가스만 선택적으로 이동이 가능하다. 암모니아가 용액에서 막의 경계면으로 확산되어 이동한 후에 막과의 접촉면에서 암모니아 가스로 휘발되며, 분리 막을 통

Table 1. The speciation of membrane contactor module

Material	PTFE
Nominal pore size (μm)	0.4
Length (cm)	54.5
Diameter (membrane) (cm)	1.2
Diameter (shell) (cm)	2.4
Effective surface area (cm ²)	205

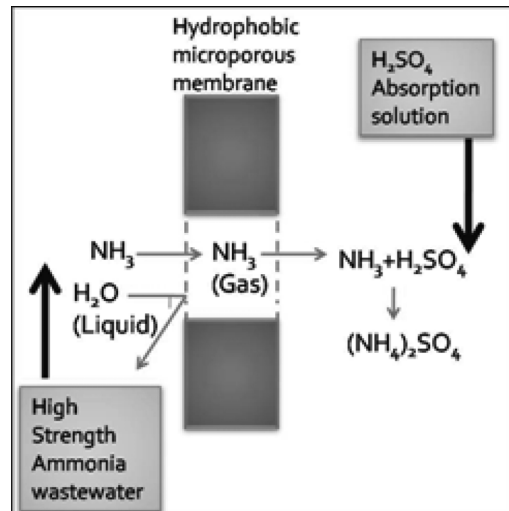


Fig. 1. Principle of ammonia removal in membrane contactor system.⁹⁾

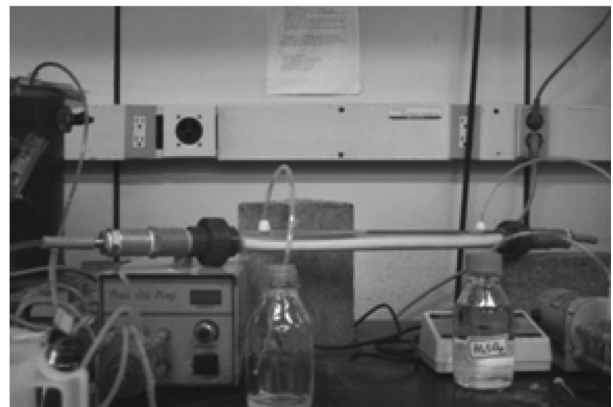


Fig. 2. Lab scale membrane contactor system for ammonia removal.

과한 후에 황산 용액과 접촉하는 순간 황산암모늄의 형태로 다시 용해된다.

2.2. 운전 조건

유입수의 pH, 암모니아 농도, 고형물 농도, 유입수와 흡수용액의 유속 및 온도차이 변화에 따른 암모니아 제거 효율을 평가하였다. Table 2에 요약한대로 총 7개의 다른 조건에서 암모니아 제거효율을 평가하였다.

Table 2. The experimental conditions

	NH _{3in}	SS	ΔT (°C)	Q _{feed} (mL/min)	Q _{strip} (mL/min)	Variable
Set 1	250	0	0	10	8	Influent NH ₃ -N
Set 2	1000	0	0	10	8	
Set 3	1000	1000	0	10	8	
Set 4	1000	3000	0	10	8	SS
Set 5	1000	0	13	10	8	Temperature
Set 6	1000	0	0	20	8	Flow condition
Set 7	1000	0	0	10	16	

2.3. 암모니아 제거 동력학

다음의 식을 이용하여 시간에 따른 암모니아 농도 변화로부터 물질전달계수(k_m)를 산출할 수 있었다.¹⁵⁾

$$\ln \frac{C_0}{C} = k_m \times \frac{A}{V_0} \times FA \times t \quad (1)$$

C_0 는 초기 암모니아 농도, A 는 막 표면적, t 는 시간, V_0 는 유입수의 부피, FA 는 자유 암모니아 형태의 분율이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. pH 변화에 따른 암모니아 제거 효율 및 동역학 평가

3.1.1. 막접촉기를 이용한 암모니아 제거의 pH 영향

암모니아가 막 접촉기를 통하여 제거되기 위해서는 이온 상태인 암모늄(NH_4^+) 형태가 아닌 휘발성 상태인 자유 암모니아(NH_3) 형태로 존재하여야 한다. 이와 같은 휘발성 암모니아의 분율을 증가시키기 위하여는 pH를 높이거나 온도를 높이는 등의 방법이 있다. 전체 암모니아 중에서 휘발성인 자유 암모니아 형태의 분율은 아래의 화학평형 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.¹⁵⁾

$$FA = \frac{10^{pH}}{e^{\frac{6244}{273.15}} + 10^{pH}} \quad (2)$$

동일한 온도 조건하에서 pH는 자유 암모니아의 분율을 변화시키는 유일한 인자로서, 전체 효율에 영향을 미치는 가장 중요한 인자 중 하나라고 할 수 있다. 식 (2)에 따르면, 높은 pH 조건 하에서 높은 암모니아 제거 효율을 기대할 수 있다. 본 연구에서는 막 접촉기에 의한 암모니아 제거의 pH 영향을 살펴보기 위하여 pH를 7에서 11까지 증가시켜 실험을 실시하였으며 그 결과를 아래 Fig. 3에 나타내었다.

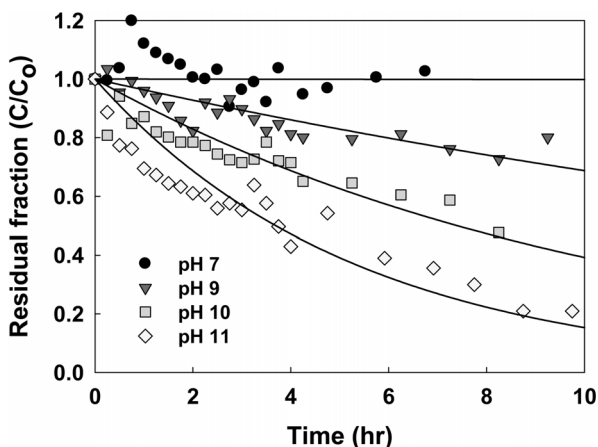


Fig. 3. Ammonia removal time profile at various solution pH conditions.

Table 3. Free ammonia fraction and mass transfer coefficient under various pH conditions

pH	Free ammonia fraction	Mass transfer coefficient (k_m) ($\times 10^{-3}$ m/h)
7	1.18×10^{-3}	0.62
9	1.06×10^{-1}	1.66
10	5.42×10^{-1}	4.92
11	9.22×10^{-1}	7.25

Fig. 3에서 볼 수 있듯이, 유입수의 pH를 높게 유지하여 운전하였을 경우에 더욱 효과적으로 암모니아가 제거되는 것을 확인할 수 있었다.

앞서 언급한 자유 암모니아의 분율 및 물질 전달 계수를 계산하여 Table 3에 나타내었다. pH 증가에 따라 자유 암모니아의 분율이 상승하였으며, 물질 전달계수도 이에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이는 pH 상승에 따라 막 접촉기 운전을 통하여 제거될 수 있는 이론적 양을 나타내는 자유 암모니아의 분율이 커지기 때문이다. 이를 통하여 막 접촉기의 효과적인 운전을 위하여 높은 pH 조건 하에서 운전하는 것이 필수적이라는 것을 확인할 수 있었으며, 이후 모든 실험은 유입수의 pH를 11로 운전하였다.

3.1.2. 유입수 농도에 따른 물질 전달 계수에의 영향

일반적으로 암모니아 및 기타 오염물질 제거를 위하여 생물학적 처리 공정이 널리 적용되고 있으나 높은 농도의 암모니아는 생물학적 처리 공정에 지해를 가져온다고 알려져 있다. 물리화학적 처리 공정의 하나인 막 접촉기를 이용하면 용존성 오염물질을 선택적으로 제거할 수 있어 높은 농도의 암모니아를 포함한 폐수 처리에 유용하게 사용되어 왔다. 또한 앞서 실험방법에서 제시한 바와 같이 암모니아 제거 동역학은 농도에 따른 함수가 아닌 분율에 따른 함수로서 유입수 농도와 관계없이 높은 제거 효율을 보일 것으로 예측할 수 있다. 이와 같은 유입수 농도의 영향을 살펴보기 위하여 유입수의 암모니아 농도를 250 mg/L와 1,000 mg/L로 각각 조절하여 실험을 실시하였다.

Fig. 4(a)에서와 같이 유입수의 암모니아의 농도가 높을수록 더 많은 양의 암모니아가 제거됨을 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 4(b)와 같이 물질 전달 계수로 나타낼 경우 그 차이가 크지 않음을 알 수 있다. 물질 전달 계수(k_m)는 암모니아의 농도가 250 mg/L에서 1,000 mg/L로 증가함에 따라 7.3×10^{-3} m/h에서 7.0×10^{-3} m/h로 4.3% 가량 감소하였는데, 통계적으로 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이 결과는 막 접촉기에 의한 암모니아의 제거가 유입수와 흡수 용액간의 농도 구배에 의한 것임을 보여주며, 이에 따라 높은 농도의 암모니아 제거를 위하여 적절한 공정임을 확인할 수 있었다.

3.2. 암모니아 제거를 위한 관형 막 접촉기의 적용

높은 농도의 암모니아를 포함하고 있는 실패수를 처리함

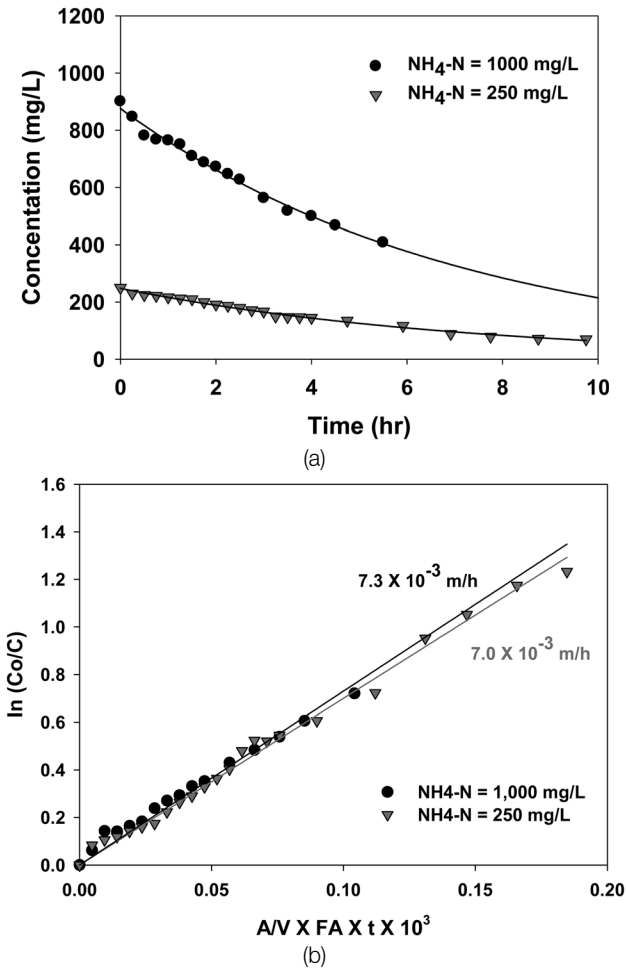


Fig. 4. Effect of initial concentration on ammonia removal in the membrane contactor (a) concentration, (b) residual fraction.

에 있어, 높은 농도의 부유물질에 의한 영향을 반드시 고려하여야 한다. 부유물질의 경우 막 여과 공정에서 막오염을 일으키는 주된 원인으로, 막결합 생물반응조와 같은 막 여과 공정의 운영에 부정적인 영향을 미친다. 하지만 막 접촉기의 경우 압력에 의한 여과 공정이 아니라 농도의 구배에 따른 증기의 이동 형태이기 때문에 그 영향은 작을 것으로 예측할 수 있다. 또한 본 연구에서는 일반적으로 사용되는 중공사막 형태의 막 접촉기가 아닌 직경이 1.2 cm에 이르는 관형 막 접촉기를 적용함으로써 부유물질에 따른 폐색 및 막오염 현상을 최소화 하였다. 부유물질이 암모니아 제거에 미치는 영향을 살펴보기 위하여, 하수처리장에서 채취한 활성슬러지를 유입수에 혼합하여 실험을 실시하였다.

Fig. 5에 부유물질의 주입에 따른 암모니아 제거 효율의 변화를 도시하였다. 부유물질을 주입하였을 경우에 주입하지 않은 경우에 비하여 효율이 일정부분 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 물질 전달 계수(k_m)는 부유물질 농도가 1,000 mg/L, 3000 mg/L일 때 각각 5.8×10^{-3} m/h, 5.4×10^{-3} m/h으로써 17.1~22.8% 가량 감소하였다. 하지만 부유물질 주입에 따른 영향은 pH에 의한 효율 향상 효과와 비교할

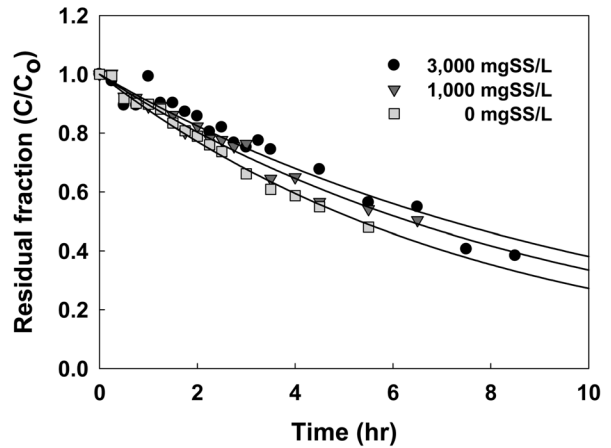


Fig. 5. Effect of suspended solid concentration on ammonia removal in the membrane contactor.

경우에는 그 정도가 미미하다고 할 수 있다. pH가 9에서 10, 그리고 11로 증가함에 따라, 물질전달계수는 각각 196.4%, 47.4%씩 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 약 20% 내외의 효율 저하는 높은 pH에서 운전함에 따라 상쇄할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 부유 물질 농도를 4배 증가시켰음에도 그 처리 효율 감소가 5% 정도에 그침으로써 실제 고농도 폐수 처리에 적용이 가능함을 확인할 수 있었다.

3.3.1. 삼투증류(Osmotic distillation) 현상 저해를 통한 효율 상승

삼투압에 의한 증류 현상(Osmotic distillation; OD)는 막 접촉기를 이용한 암모니아 흡수-제거 공정에서 동시에 일어나는 현상으로써 전체적인 효율 저하를 일으킨다고 알려져 있다.¹⁶⁾ 막 접촉기에서는 원칙적으로 막의 공극 내부는 기체상태로 유지되며 물은 투과 할 수 없도록 되어 있지만, 유입수와 흡수 용액 간의 증기압 차이에 의하여 물 분자가 원수에서 흡수 용액 상으로 기화되어 이동하게 된다. 따라서 흡수 용액의 부피는 물 분자의 이동에 따라 점차 증가하게 되며, 흡수 용액 내의 암모니아는 높은 농도로 유지되지 못함으로써 전체적인 막 접촉기의 효율을 저하하게 된다.

따라서 효과적인 막 접촉기의 운영을 위해서는 삼투증류 현상을 저해시켜야 한다. 본 연구에서는 삼투증류 현상의 저해를 위하여 흡수 용액의 온도를 증가시켰으며, 이를 통하여 흡수 용액에서의 물의 증기압을 상승시켜 유입수 내의 물 분자의 이동을 억제하였다. 흡수 용액의 온도를 35℃로 유지시켜 유입수의 온도인 22℃와 약 13℃의 온도 구배를 형성한 후 암모니아 제거 실험을 실시하였다.

온도의 변화 후 실험 결과를 Fig. 6에 도시하였다. 온도 차이를 설정함에 따라 암모니아 제거 시 물질 전달 계수(k_m)가 7.3×10^{-3} m/h으로써 약 4.4% 증가하는 것으로 나타났다. 이 결과에 따라 삼투증류 현상이 암모니아 제거에 미치는 영향이 크지 않음을 확인할 수 있었다.

실제 삼투증류 현상이 일어나는지 확인하기 위하여 실험 전후의 흡수 용액의 부피를 측정하였으며 그 결과를 Table

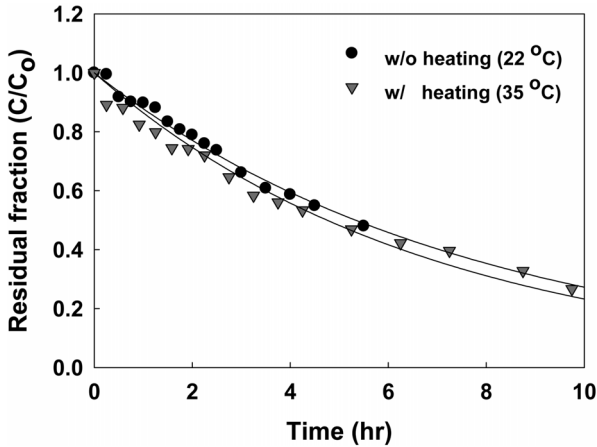


Fig. 6. Effect of operating temperature on ammonia removal in the membrane contactor.

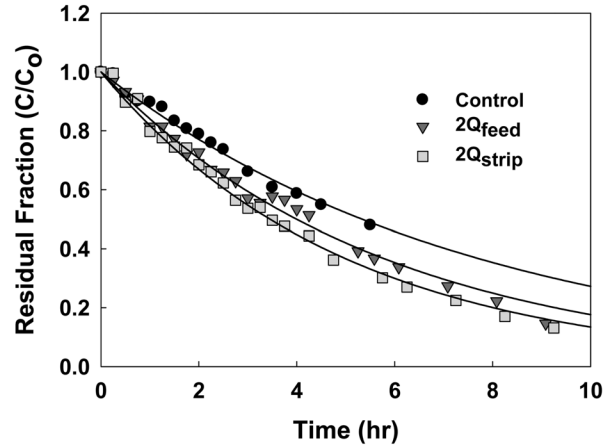


Fig. 7. Effects of feed and stripping solution flow rate on ammonia removal in the membrane contactor.

Table 4. The effect of osmotic distillation in membrane contactor operation

	Initial volume (mL)	Final volume (mL)	Volume change (mL)
Control	940	965	+25
Heating	940	930	-10

4에 나타내었다. 온도 구배를 두지 않았던 실험의 경우 흡수 용액의 부피가 940 mL에서 965 mL 로써 약 25 mL 이 증가하여 실제로 삼투증류 현상이 일어남을 확인할 수 있었다. 반면 온도 구배를 설정하였던 경우에는 오히려 흡수 용액의 부피가 10 mL 감소하여, 물이 오히려 유입수 쪽으로 이동한 것으로 확인되었다. 본 실험을 통하여 삼투증류 현상이 일어남을 확인할 수 있었으며, 이를 적절한 온도 구배를 통하여 성공적으로 제어할 수 있었다.

3.3.2. 유량 증가에 따른 처리 효율

유량 증가에 따른 암모니아 제거 효율을 평가하기 위하여 원수와 흡수 용액의 유량을 각각 2배로 증가시켜 실험을 실시하였으며, 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 볼 수 있듯이, 유량을 증가시키기에 따라 처리 효율이 상승하는 것을 확인할 수 있으며, 특히 흡수 용액으로 사용한 황산 용액의 유량을 증가시키는 것이 더 높은 효율 향상을 보였다.

이는 낮은 유량 조건에서 황산 용액이 암모니아로 포화 상태가 됨에 따라 농도 구배가 낮아졌던 현상을 높은 유량으로써 극복할 수 있었기 때문이라고 판단된다. 따라서 막 접촉기의 효과적인 운전을 위해서는 높은 유속 및 지속적인 황산 용액의 교체를 통하여 농도 구배를 최대화 하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

다양한 운전 조건 하에서의 물질 전달 계수를 앞서 제시한 식을 통하여 계산하였고 이를 Table 5에 나타내었다. 물질 전달 계수는 낮은 암모니아 농도 및 부유 물질 농도 하에서 증가하였으며, 온도 조절을 통하여 삼투 증류 현상을 억제함에 따라 증가하였다. 또한 원수와 흡수 용액의 유량을 증가시키기에 따라 물질 전달 계수가 증가하였다. 다양한 운전 조건 중 물질 전달 계수에 가장 큰 영향을 미쳤던 인자는 유량의 변화로써, 이는 효율적인 암모니아 제거를 위해서 암모니아와 흡수 용액과의 접촉 시간을 최대화 하는 것이 중요하다는 것을 보여준다. 접촉시간 및 면적을 증가시키기 위하여 막 면적을 증가시키는 것이 가장 효과적인 방법이라 할 수 있으나 본 연구에서는 부유물질에 의한 폐색 현상을 방지하기 위하여 관형 막 접촉기를 사용하였기 때문에 막 면적의 증가는 사실상 어렵다고 할 수 있다. 따라서 높은 유속으로 운전하는 것이 효과적인 암모니아 제거를 위한 대안으로써 사용될 수 있을 것이다.

본 연구에서 유입수 내의 부유물질 농도는 암모니아 제거 효율을 크게 저하하지 않는 것으로 나타났다. 특히 부유

Table 5. Summary of mass transfer coefficient under various operating conditions

	NH _{3in}	SS	ΔT (°C)	Q _{feed} (mL/min)	Q _{strip} (mL/min)	Mass transfer coefficient (k _m) (× 10 ⁻³ m/h)
Influent NH ₃ -N	250	0	0	10	8	7.3
	1000	0	0	10	8	7.0
SS	1000	1000	0	10	8	5.8
	1000	3000	0	10	8	5.4
Temperature	1000	0	13	10	8	7.3
Flow condition	1000	0	0	20	8	9.7
	1000	0	0	10	16	11.0

물질 농도를 1,000 mg/L에서 3,000 mg/L 로 증가시켰음에도 효율은 크게 감소하지 않아 실제 폐수의 적용이 가능할 것으로 판단되었다. 또한 높은 pH 조건 하에서 자유 암모니아 분율이 상승함에 따라 제거 효율이 크게 상승함을 확인할 수 있었다. 따라서 암모니아 제거 효율의 최대화를 위하여 다양한 운전 조건의 영향을 파악하고 이를 최적화 하는 것이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구를 통하여 암모니아 제거를 위한 관형 막 접촉기의 적용성을 평가하였다. PTFE 관형 막 접촉기를 이용하여 암모니아를 효과적으로 제거할 수 있었으며 다양한 운전 인자를 평가하였다.

1) 높은 pH 조건에서 free ammonia 분율 상승에 따른 높은 암모니아 제거 효율을 보였으며, 제시된 동역학 식에 따라 모사할 수 있었다. 유입수의 농도에 따라서 물질 전달 계수의 큰 차이는 없었으며 따라서 농도의 비에 따른 제거 기작임을 확인하였다.

2) 실패수의 적용성을 알아보기 위하여 부유물질 농도를 3,000 mg/L까지 증가시켜 운전한 결과, 그 효율이 일부 감소하나 부유물질 농도에 따른 효율 감소가 크지 않아 실패수의 적용 가능성을 확인하였다.

3) 처리효율을 증대시키기 위하여 온도 및 유속을 변화시켜 보았으며, 그 결과 흡수 용액인 황산용액의 유속을 증가시키는 것이 가장 높은 처리 효율 향상을 보였다.

4) 관형 막 접촉기를 통하여 높은 농도의 암모니아를 포함하고 있는 실패수의 처리가 가능할 것으로 판단되며, 높은 유속 하에서의 운영을 통하여 그 효율을 극대화 할 수 있을 것으로 사료된다.

KSEE

참고문헌

- Noike, T., Goo, I. S., Matsumoto, H. and Miyahara, T., "Development of a new type of anaerobic digestion process equipped with the function of nitrogen removal," *Water Sci. Technol.*, **49**, 173~179(2004).
- Rousseau, P., Steyer, J. P., Volcke, E. I. P., Bernet, N. and Beline, F., "Combined anaerobic digestion and biological nitrogen removal for piggery wastewater treatment: a modelling approach," *Water Sci. Technol.*, **58**, 133~141(2008).
- Hafner, S. D. and Bisogni, J. J., "Modeling of ammonia speciation in anaerobic digesters," *Water Res.*, **43**, 4105~4114 (2009).
- Sarioglu, M., "Removal of ammonium from municipal wastewater using natural Turkish (Dogantepe) zeolite," *Sep. Purif. Technol.*, **41**, 1~11(2005).
- Lei, X. and Maekawa, T., "Electrochemical treatment of anaerobic digestion effluent using a Ti/Pt-IrO₂ electrode," *Bioresour. Technol.*, **98**, 3521~3525(2006).
- Ashrafizadeh, S. N., Khorasani, Z. and Gorjiara, M., "Ammonia removal from aqueous solution by Iranian natural zeolite," *Sep. Sci. Technol.*, **43**, 960~974(2008).
- Belhatche, D. H., "Choose appropriate wastewater treatment technologies," *Chem. Eng. Prog.*, **8**, 32~38(1995).
- Baker, R. W., *Membrane Technology and Application*, 2nd ed., John Wiley, New York(2004).
- Park, H. H., Deshwal, B. R., Jo, H. D., Choi, W. K., Kim, I. W. and Lee, H. K., "Absorption of nitrogen dioxide by PVDF hollow fiber membranes in a G-L contactor," *Desalination*, **243**, 52~64(2009).
- Bottino, A., Capannelli, G., Comite, A., Felice, R. D. and Firpo, R., "CO₂ removal from a gas stream by membrane contactor," *Sep. Sci. Technol.*, **59**, 85~90(2008).
- Mansourizadeh, A. and Ismail, A. F., "Hollow fiber gas-liquid membrane contactors for acid gas capture: a review," *J. Hazard. Mater.*, **171**, 38~53(2009).
- Mandowara, A. and Bhattacharya, P. K., "Simulation studies of ammonia removal from water in a membrane contactor under liquid-liquid extraction mode," *J. Environ. Man.*, **92**, 121~130(2011).
- Drioli, E., Criscuoli, A. and Curcio E., *Membrane contactors: Fundamentals, applications and potentialities*. Amsterdam. In: *Membrane Science and Technology Series*, Vol. 11(2006).
- Hasanoglu, A., Romero, J., Perez, B. and Plaza, A., "Ammonia removal from wastewater streams through membrane contactors: Experimental and theoretical analysis of operation parameters and configuration," *Chem. Eng. J.*, **160**, 530~537(2010).
- Preez, J. D., Norddahl, B. L. and Christensen, K., "The BIOREK concept: a hybrid membrane bioreactor concept for very strong wastewater," *Desalination*, **183**, 407~415(2005).
- Wang, G., and Shi, H., "Influence of osmotic distillation on membrane absorption in treating high strength ammonia wastewater," *IWA International Specialty Symposium on Strong Nitrogenous and Agro-Wastewater*, Seoul, pp. 953~959(2003).