

나노여과 회전판형 분리막을 이용한 양돈폐수 처리 공정에 관한 연구

최찬섭*, 이 영, 노수홍
(주)한국환경기술* 연세대학교 환경공학과

A Study of the process for the piggery wastewater using NF-RDM (Nanofiltration Rotary Disk Membrane)

Chan Sup Choi*, Young Lee, Soo Hong Noh

Korean Environmental Technology Co. Ltd.*
Yonsei Univ., Dept. of Environmental Engineering

1. 서론

가축분뇨처리 문제해결을 위해 지난 1992년부터 2002년까지 축산분뇨처리시설지원 사업(농림부 지원사업)에 약 1조 333억원, 축산폐수공공처리사업(환경부 지원사업)에 약 4,294억원 등 총 1조 4,627억원에 달하는 상당한 자금이 투입되었다. 그러나 상당한 정책자금 지원에도 불구하고 축산 폐수의 처리는 크게 개선되지 못하고 있는 현실이다[1].

축산폐수, 특히 양돈 폐수 처리의 어려움은 분뇨 분리의 어려움에서 시작한다. 양돈폐수는 다른 폐수와 달리 분과 뇨의 혼합이 용이하고 한번 혼합된 분뇨는 일반적인 전처리 공정으로는 분뇨 분리가 난해하고 오염 부하량이 크다[2]. 또한, 대부분의 양돈폐수 처리 공정이 생물학적 처리 공정에 의존하고 있으나, 그 효율은 낮은 수준에 있으며 안정적인 처리 수질을 확보하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 안정적인 수질을 확보할 수 있는 막분리 공정을 양돈 폐수에 적용하기 위하여 고농도 폐수의 처리에 적합한 동력학적 분리막의 일종인 회전판형 분리막을 이용하였다. 본 연구의 목적은 나노여과 회전판형 분리막을 이용한 양돈폐수 처리 공정을 구성하여 생물학적 처리 공정이 배제된 양돈 폐수 처리 공정을 제시하는 것이며 이 공정의 중요한 역할을 하는 나노여과 회전판형 분리막의 양돈폐수에 대한 여과 특성을 규명하는데 있다.

* (주)한국환경기술, (muchun2@dreamwiz.com)

2. 이론

회전판형 분리막 모듈의 투과모델은 직렬여과저항모델식 (The Resistance-In-Series model)에 기초하여 발전하였다[3]. 투과율(J)은 유효압력(ΔP_{eff})에 비례하고 저항(R)에 반비례한다. 유효압력(ΔP_{eff})은 운전압력(P_{op})에서 유체가 갖는 원심력에 의한 압력강하(P_{cf}), 막 표면과 유체와의 미끄럼(slip) 현상에 의한 압력강하 (P_{slip}), 삼투압차에 의한 압력손실($\Delta \Pi$)이 포함되어 있다. 저항(R)은 분리막 자체의 저항(R_m), 투과면의 유체의 저항(R_{pe}), 막오염에 의한 저항(R_f), 그리고 농도분극에 의한 저항(R_c)을 포함한다. 농도분극 층의 저항(R_c)은 실제 압력차(ΔP_{eff})와 벌크 농도 그리고 회전속도와와의 함수이므로 식 (1)로 표현할 수 있다.

$$R_c = f (C_B, \omega r, \Delta P_{NET}) \quad (1)$$

여기서, ω 는 각속도(angular velocity, $\omega=d\theta/dt$)이다. 투과율을 유효압력과 저항으로 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P_{eff}}{R_m + R_{pe} + \alpha (C_B)^\beta (\omega r)^\gamma (\Delta P_{eff})} \quad (2)$$

α , β , γ 의 값은 회전판형 분리막 모듈에서 농도분극 층에 여러 가지 영향을 주는 인자이다. R_m , R_f 은 분리막 자체의 성질에 직접 영향을 주므로 $R'_m=R_m+R_f$ 로 표시하였다. 식 (2)를 이용하여 양돈폐수에 대한 나노 여과 회전판형 분리막의 투과율을 예측할 수 있다.

3. 실험

주된 처리공정은 그림 1에서와 같이 분뇨 슬러리를 원수로 하여 협잡물을 제거하기 위한 스크린, 나노여과 회전판형 분리막, 역삼투 분리막, 오존 반응 등 생물학적 공정을 배제한 물리화학적 처리 공정으로 이루어 졌으며 막 분리 공정에서 발생한 농축수 및 농축 슬러리는 퇴비화 공정으로 보내어지고, 최종 처리수는 세척수, 관개수 등으로 재이용할 수 있다.

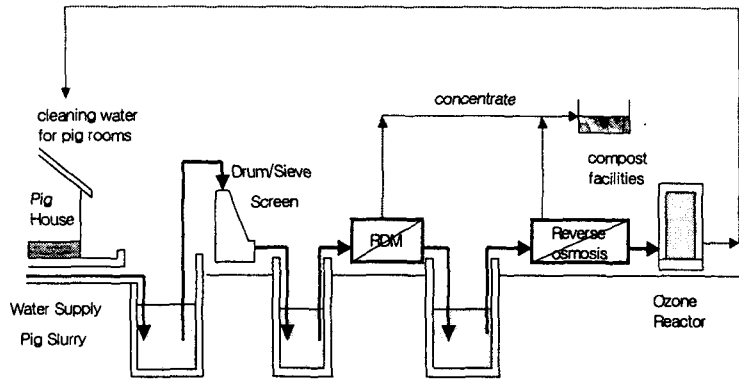


Fig. 1 Zero discharge system using NF/RO system for the piggery wastewater treatment

퇴비화 공정을 제외한 각 단위 공정에서 처리 효율, 처리 수질 등을 고찰하였으며 특히 중요한 단위 공정인 회전판형 분리막에 의한 나노 여과 실험은 그림 2와 같이 실험 장치를 구성하였다.

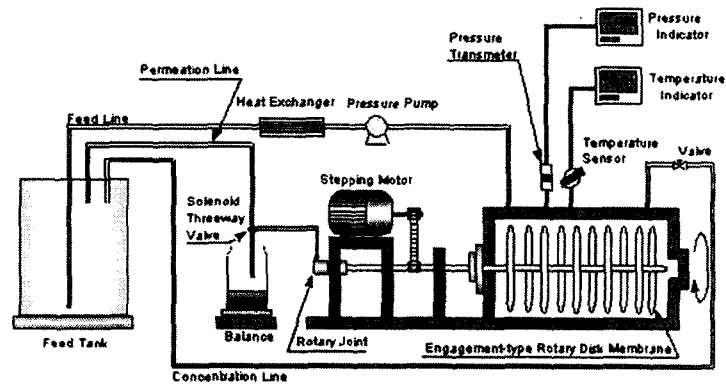


Fig. 2 A schematic diagram of two-shaft RDM process.

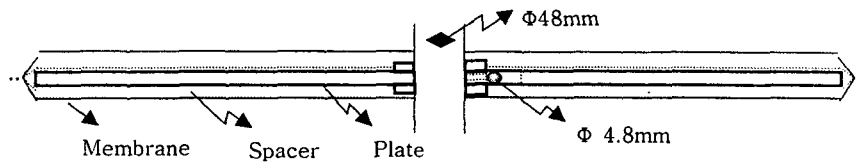


Fig. 3 A cross-section diagram of octagon rotary disc membrane

회전판형 분리막 모듈은 aromatic polyamide의 재질로 되어 있는 Trisep사의 나노여과막(Model XN-45)을 사용하였으며 8각의 모양으로 직경 500mm, 두께 6mm이며 모듈을 축에 장착하기 위하여 중앙에 직경 48mm의 구멍을 뚫은 판 형태로 Fig. 3의 형태와 같다. 분리막과 지지체인 plate 사이에는 spacer를 끼워 넣어 투과면에서 유체의 흐름을 원활히 하였다. 실험에 사용된 회전판형 분리막의 유효 막면적은 6m²이었다.

나노여과를 거친 투과수는 모여진 후 polyamide(TCF) 재질의 유효막면적 1.395m²을 보유한 RO 실험 장치(DT101, ROCHEM)를 이용하여 5.88MPa의 운전압력에서 실험하였다. RO 여과를 거친 투과수는 색도 및 냄새 제거를 위하여 오존 접촉을 시켰다. 실험에 사용된 시료는 돈노의 RO 농축 과정에서 얻은 투과수로서 시료량은 30L를 사용하였다. 오존 반응기(모델명 GL-1, Hong-In Co. Ltd.)는 315mg/L의 농도로 시간당 9.46g의 오존을 발생시키며 60분간 접촉시켰다.

4. 결과 및 토론

실험에 사용된 양돈폐수의 성상은 표1과 같으며 총부유물질(TS)의 농도가 20,000 - 91,000 mg/L 로서 유입되는 오염 물질의 성상 변화가 심하여 유량 조정조에서 균일화하여 3mm sieve에 의해 전처리 후 실험에 사용하였다.

Table 1 Characteristics of the piggery wastewater

Characteristic	Slurry
pH	7.5-7.8
Total Solids (mg/L)	20,000-91,000
Total Dissolved Solids (mg/L)	27,000-41,400
Total Suspended Solids (mg/L)	26,000-40,000
Conductivity (mS/cm)	20.9-38
Soluble Total Organic Carbons (mg/L)	6,803-7,223
Chemical Oxygen Demand, CODcr (mg/L)	21,000-106,800
Total Nitrogen (mg/L)	4,000-5,000
Total Phosphate (mg/L)	1,310-1,960

나노 여과 회전판형 분리막에 의한 슬러리의 농축과정은 그림 4와 같은 투

과율비(J_0/J)를 나타내었으며 그림 5와 같은 전기전도도 변화를 나타내었다. 운전 압력은 490kPa, 회전선속도 2.78 m/s의 조건에서 운전되었다. 농축 초기 14 LMH에서 약 4배의 농축 과정까지는 지속적인 투과율의 감소가 일어나 약 5.8 LMH를 유지하였으며 이후 평균 5.6 ± 0.3 LMH의 투과율을 보임으로서 농축에 따른 투과율의 변화가 적었다. 그러나, 약 8배 농축도 이후에서는 투과율의 감소가 일어나 약 3.6 LMH로 감소하였다. 이는 TS 증가에 따른 농축수의 성상 변화가 투과율 감소에 영향을 준다고 생각되며 그림 6과 같이 TS 증가에 따른 급격한 점도의 상승을 통하여 알 수 있다.

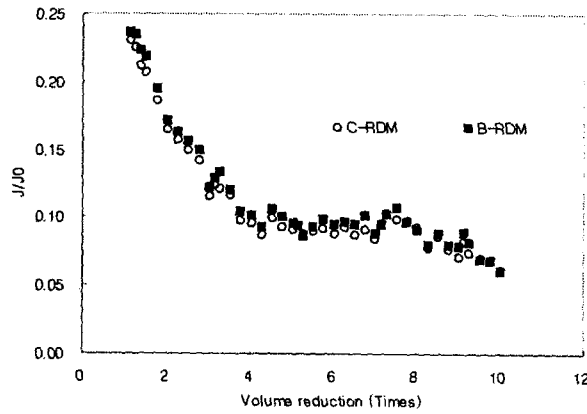


Fig. 4 J/J_0 variation with volume reduction

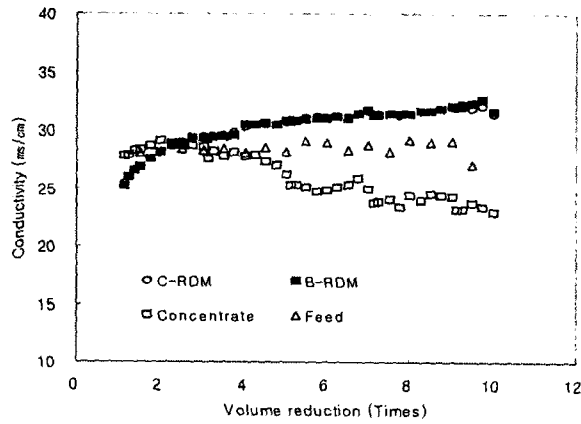


Fig. 5 Conductivity variation with volume reduction

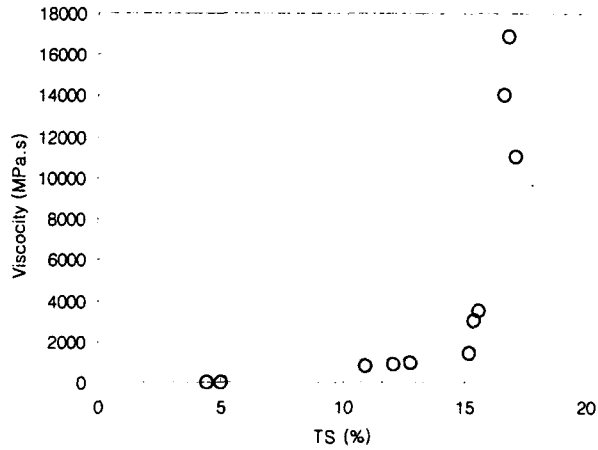


Fig. 6 Relationship between TS and viscosity of swine slurry

또한, 농축과정에서 다가 이온들의 결정화가 진행되는 것을 확인할 수 있었다. 그림 7은 중요 양이온인 Ca, Mg, Na, K의 농축에 따른 결정화의 진행 경향을 비교할 수 있다. Ca와 Mg는 농축에 따른 결정화 비가 증가하여 결정이 진행됨을 알 수 있지만 Na, K는 결정화가 진행되지 않음을 알 수 있다. 특히 Ca는 농축 초기부터 결정으로 존재하는 양이 더 많으며 농축이 진행됨에 따라 가속되고 있음을 알 수 있다. 농축 초기부터 다가 이온들의 결정화가 시작되는 것은 충분한 양의 농도와 핵으로 작용하는 미세 부유물질이 많이 포함되어 있기 때문이다[4].

양돈폐수의 농도에 대한 투과율의 예측은 다음과 같이 나타내었다.

$$J = \frac{\Delta P_{eff}}{7.8108 + 8.0686 \times 10^{-6} (C_B)^{1.1956} (\omega r)^{-1.1224} (\Delta P_{eff})} \quad (3)$$

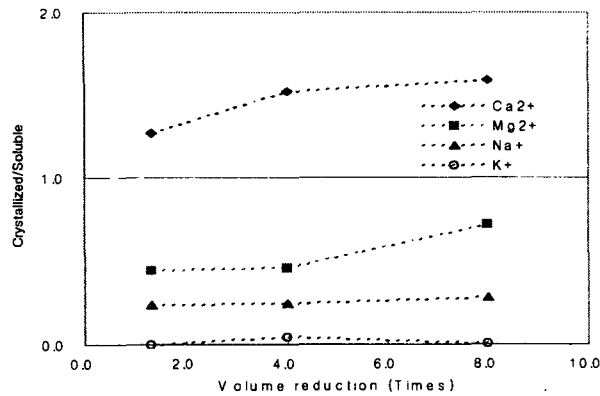


Fig. 7 The ratio of crystallized cations to soluble ones

역삼투 분리막의 농축은 2.6×10^{-2} LMH/kPa의 공정수 투과율과 5.88 MPa에서 97.3%의 NaCl 배제율을 갖는 DT(disk Tube) 모듈로 나노 여과수를 10배 농축하는 과정에서 35.2 ~ 15.9 LMH의 투과율, 96.3% ~ 90.7%의 전기전도도 배제율, 64.2% ~ 73.7%의 TOC 배제율, 92% ~ 96%의 COD_{cr} 배제율 변화를 나타내었다.

돈노폐수의 RO 여과수에 대한 오존 반응 결과는 다음과 같다. TOC는 162.2mg/L로 약 7% 제거 되고, COD_{cr}은 371 mg/L로 약 26%의 제거율을 보였으며, 색도는 초기 87.5도에서 반응 10분 후 218.7도로 진한 갈색으로 변화하였으나 30분 후부터 무색에 근접하여 반응 완료 후 98.7도로서 34%의 제거율을 보여 세척수 등으로 재활용하기 충분하였다.

5. 참고문헌

- [1] 김제우, "회전판 막모듈을 이용한 Oil emulsion의 분리특성 연구", 연세대학교 석사학위논문, (1995)
- [2] 박성균, "슬러리 양돈분뇨의 효율적 처리 방안", 아주대 박사논문, 2000
- [3] 장진호, "2축 회전판형 막모듈의 오일에멀전 투과모델에 관한 연구", 연세대학교 석사학위논문, (1997)
- [4] 최찬섭, "양돈폐수 처리를 위한 나노여과 회전판형 분리막 모듈의 특성 연구", 연세대 박사논문, (2003)
- [5] Tavare N. S., "Batch crysrallizer : A review", Chem. eng. comm., vol 61, pp 259 ~ 318, (1987)