

막결합형 생물반응조에서 슬러지 전처리가 잉여슬러지 발생량에 미치는 영향

Effects of Sludge Pre-Treatment on the Excess Sludge Production in a Membrane-Coupled Bioreactor

이강훈 · 김주현 · Nguyen Hai · 염익태 *

Lee, Kang Hoon · Kim, Ju Hyun · Nguyen, Hai · Yeom, Ick Tae *

성균관대학교 건설환경시스템공학과

(2011년 7월 12일 접수 ; 2011년 8월 3일 수정 , 2011년 8월 8일 채택)

Abstract

The effects of chemical pretreatments on the excess sludge production in the membrane-coupled bioreactor were investigated. In addition, their effects on membrane fouling were also evaluated. Two membrane bioreactors were operated. In one reactor, a part of the mixed liquor was treated with NaOH and ozone gas consecutively and was returned to the reactor. The flowrate of the chemical pretreatment stream was 1.5% of the influent flowrate. During the 200days of operation, the MLSS level in the bioreactor with mixed liquor pretreatment was maintained relatively constant at the range of 8,000 ~ 10,000mg/ℓ while it increased steadily up to 26,000 mg/ℓ in the absence of the pretreatment. Each reactor was equipped with two laboratory membrane modules where the flux for each module was 20, and 30 ℓ/m²·h, respectively. With pretreatment, almost constant transmembrane pressure(TMP) was observed throughout the operation at the flux of 20 ℓ/m²·h. Without pretreatment the membrane module at the same flux could also be operated at relatively stable condition. However, as the MLSS increases up to 25,000 mg/ℓ, a fast TMP increase was observed. In conclusion, a complete control of excess sludge production in the membrane-coupled bioreactor was possible without significant deterioration of the treated water quality. In addition, it was shown that stable operation in terms of TMP is possible with sludge pretreatment and recirculation.

Key words : excess sludge reduction, membrane bioreactor(MBR), sludge pretreatment, fouling

주제어 : 잉여슬러지 발생량, 막분리 생물반응조(MBR), 슬러지 전처리, 막폐색

1. 서론

최근들어 다양한 형태의 슬러지 전처리를 이용한 슬러지 감량화 기술들에 대한 관심이 증대되고 있다. 슬러지 감량화 기술들에 대한 연구는 주로 유럽, 일본 등 슬러지 처리규제가 엄격한 나라들을 중심으로 연구가 진행되어 왔으나 최

근 들어 국내에서도 슬러지 매립금지 등 슬러지 처리관련 법적 규제 강화와 함께 슬러지의 원천적인 감량화에 대한 관심이 높아지고 있다. 지난 2001년 슬러지 매립기준의 강화에 이어 2003년 7월 이후 일정규모 이상의 슬러지 배출 시설에 대해서 슬러지 직매립을 금지시키도록 되어 있으며 해양투기에 대한 단계적인 규제도 예상되고 있다. 국내에서

* Corresponding author Tel:+82-31-299-6681, Fax:+82-31-299-6693, E-mail: yeom@skku.edu.(Yeom, I.T.)

의 이러한 규제강화의 궁극적인 목표는 매립과 해양투기의 전면금지이며 이러한 정책방향에 맞는 새로운 슬러지 처리 대안기술이 적극적으로 요구된다고 할 수 있다.

슬러지 전처리는 미생물 구성물질들을 감싸고 있는 세포벽을 파괴시킴으로써 세포구성물질들의 가수분해를 촉진시키고 결과적으로 슬러지의 생분해성을 높이는 것으로 알려져 있다(Muller et al., 2000). 구체적인 전처리 방법으로는 물리적(초음파, 열, 불빛처리)·화학적(오존, 알칼리처리)·생물학적(박테리아, 효소처리)·혼합방법 등 여러 가지가 제시되고 있다. 각각의 전처리 공정들의 효율성과 경제성에 대한 비교 분석은 Muller(2001)가 보고한 논문에서 상세하게 분석되어 있다. 특히, 오존처리 (Weemas et al., 2000; Yasui and Shibata, 1994; Kamiya and Hirotsuji, 1998; Kwon et al., 2001) 및 알칼리 전처리 (Jih-Gaw Lin et al. 1998; Lin et al. 1999; Hsiau and Lo, 2001)는 슬러지의 호기적, 혐기적 분해공정과 결합되어 슬러지 감량화 공정으로 제시되고 있다. 예를 들어 오존처리된 슬러지를 생물반응조내로 반송하여 운전할 경우 기존 활성슬러지 공정에서의 잉여슬러지 발생을 대폭적으로 저감시킬 수 있다는 연구결과들이 발표되었다 (Yasui and Shibata, 1994; Yasui et al., 1996). 알칼리 전처리의 경우 Rajan et al., (1989)의 보고에 의하면 NaOH 주입에 의한 활성슬러지의 알칼리 처리가 가용화 정도를 46% 증가 시키는 것으로 보고 되고 있다.

본 연구에서는 실험실 규모의 반응조 운전을 통하여 현재 소규모 오폐수 처리공법으로 주목받고 있는 막걸합형 활성슬러지 공정(MBR; Membrane Bioreactor)에 슬러지 전처리를 도입하는 공정의 유용성을 평가하고자 하였다. 구체적으로는 하수슬러지 전처리가 막폐색과 잉여슬러지 발생량에 미치는 영향을 알아보고 장기적으로 안정적인 운전이 가능한지를 알아보려고 하였다. 슬러지 전처리로는 오존처리와 알칼리 처리를 병합하여 처리하였으며 분리막은 침적형 평막을 이용하였다.

2. 실험재료 및 방법

본 실험에서는 수도권 인근 S대학교 하수처리장내로 유입하는 하수를 사용하였다. 유입하수는 반응조내로 들어가기 전에 2mm의 스크린을 거쳐 주입되었다. 하수의 평균적인 수질은 Table 1에 요약되어 있다. 초기 점중에 쓰인 슬러지 역시 S대학교 오수처리시설내의 잉여슬러지를 대상으로 약 10,000mg/L로 농축시킨 후 사용하였다. 실험에 사용된 전체적인 처리공정의 개략도는 Figure 1에 보였다. 본 장치는 45L의 두개의 폭기조로 이루어져 있으며 각각 2장의 분리막을 침적시켰고 각 분리막의 Flux를 달리하여 실험하였다. 반응조의 유효부피는 35L이며 수리학적 체류시간은 7시간으로 운전하였다. 생물반응조는 2개를 운전하였으며 전처리를 포함하지 않고 기존 MBR 방식으로 운전한 경우(unit 1)과 전처리를 포함하는 경우(unit 2)로 각각 운전하였다.

실험에 사용된 운전조건은 Table 2에 나타내었다. 반응조에 설치된 침적형 분리막(Kubota Co.)은 공경크기 0.22 μm의 PE재질의 막으로 실험용 모듈로 특수 제작된 막면적 0.1m²의 소형모듈 2개를 각각의 반응조에 설치하여 운전

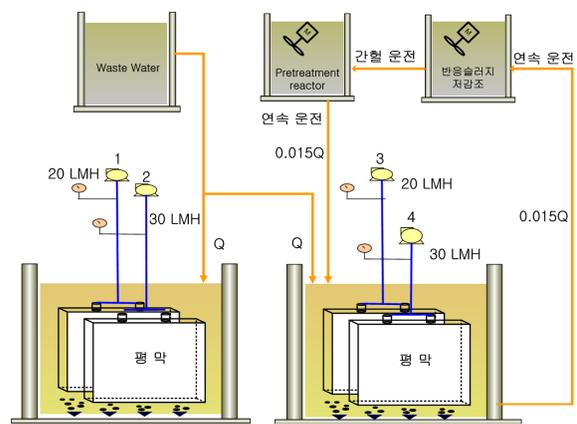


Figure 1. A schematic of MBR with and without sludge pre-treatment

Table 1. Characteristics of the feed waste water

	COD (mg/L)	TP (mg/L)	SS (mg/L)	VSS (mg/L)
Min. conc.	178	3.4	35	31
Mean conc.	340.5	7.5	181.7	169
Max. conc.	725	12.6	517	408

Table 2. Operational conditions for MBR

	Unit 1 (Control)	Unit 2
HRT (hr)	7	7
Flux (L/m ² /hr)	20/30	20/30
Suction on/off time (min)	10/2	10/2
Internal recycle ratio	No	0.015Q

Table 3. Characteristics of the membrane

구 분	Membrane
형 태	Plate Sheet
공 경	0.22 μ m
재 질	polyolefin
막면적	0.1m ² /module
순수 투과플럭스	98LMH (25 $^{\circ}$ C, 1kgf/cm ²)
구 성	24cm(L) \times 35cm(H) \times 1cm(T)

하였다. 분리막의 특성에 대해서는 **Table 3**에 보였다. 막운전은 흡입식으로 운전하였으며 운전 플럭스는 각각 20LMH, 30LMH 즉, 평균 25LMH로 운전하였다. 한편 막 모듈 아래 산기관을 설치하여 공기방울의 상승에 의한 수류를 이용하여 분리막의 폐색을 억제하고자 하였다. 그리고 산기관은 PVC관으로 만들었으며 구멍을 아랫방향으로 뚫어서 산기관내의 슬러지가 잔류함으로써 생길 수 있는 산기관 폐색현상을 막으려 하였다. 막간차압이 20cmHg에 이르렀을 때 화학적으로 세정을 해 주었다. 세정은 인산염과 차아염소산과 EDTA를 이용하였다. 운전도중 반응조내의 슬러지 농도(MLSS & MLVSS)와 pH, DO등을 측정하였으며 처리수 수질(COD_{cr}, TP)도 측정하였다. 유입 및 유출수의 COD_{cr}, TP등은 Hach사의 기준 vial을 이용하여 측정하였다. 슬러지의 MLSS 및 MLVSS는 Standard method에 의거하여 측정하였다. 한편 전처리가 막폐색에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 두 반응조의 막내측의 흡입압력의 변화를 모니터링 하는 동시에 두 반응조내의 슬러지의 점도(Brookfield Model DV-1)와 수류의 유속을 측정하였다. 전처리 방법으로는 알칼리처리(pH 11, 3hr)후 오존전처리(0.02gO₃/g-SS)의 병합전처리를 사용하였다. 이는 알칼리 전처리 후 생물학적 공정에 적용하기 위해서는 pH를 떨어뜨려야 할 필요가 있는데 오존처리의 경우 전처리에 의해서 pH가 낮아지는 성질이 있기 때문에 알칼리 처리후 오존처리를 할 경우 pH 조절을 위한 산 투입이 필요없다는 이점이 있기 때문에 상호 시너지를 낼 수 있는 조합으로 판단되었다. 오존처리의 경우 회분식 오존반응조를 제작하여

처리하였으며 반응슬러당 오존소모량을 0.02gO₃/g-SS로 처리하였다. 슬러지에 대한 오존주입량은 발생오존가스의 초기농도(50g/m³)와 슬러지 접촉 후 배가스 농도를 측정하여 슬러지 처리시간을 조절함으로써 맞추어 주었다. 오존소모율은 처리 초기에는 100%에서 처리완료 시점에서는 80-85%로 떨어지며 평균 90-95% 수준을 유지하였다. 알칼리 처리는 NaOH를 이용하여 pH 11을 기준으로 처리하되 unit 2의 pH를 6-8사이를 유지시켜 줄 수 있는 범위 내에서 조절하였으며 알칼리 처리한지 3시간 경과 후 오존처리를 실시하였다. Unit 2의 경우 반응하는 슬러지를 따로 모아 전처리 후 일정량을 다시 반응조에 넣어주는 방식으로 하였다. Unit 1(Control)은 실험 내내 Unit 2와의 비교를 위해 반응하여 전처리하는 공정을 두지 않았다.

3. 결과 및 토의

MBR을 이용한 하수처리공정에서 약 7개월간 분석을 위한 슬러지 시료채취를 제외하고는 별도의 슬러지 인발 없이 운전하였다. 운전기간중의 MLSS의 변화 (**Figure 2**)를 보면 전처리를 하지 않는 control (unit 1)은 전체적으로 꾸준히 증가하는 양상을 보여주고 있고 전처리를 해 주는 unit 2의 경우 RUN 1에서는 초기농도 10,000mg/L에서 크게 벗어나지 않고 그대로 유지되고 있다. RUN 2의 경우 약 50일가량 동안 unit 2를 전처리 하지 않은 경우인데 이 때 급격히 MLSS가 증가하고 있으며 다시 RUN 3에서 전처리를 실시해 줌으로써 MLSS는 다시 감소하고 있음을 보여주

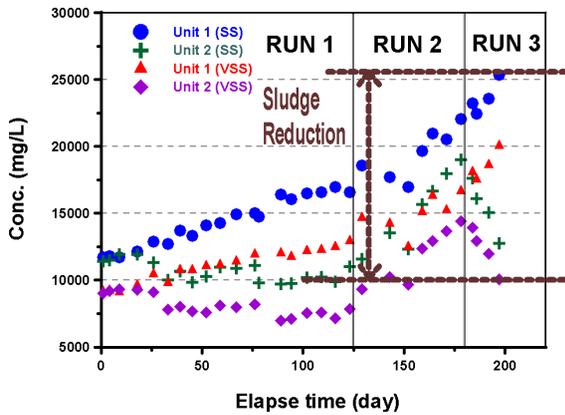


Figure 2. Variation of MLSS and MLVSS in the bioreactors during the operation (Unit 1 and 2)

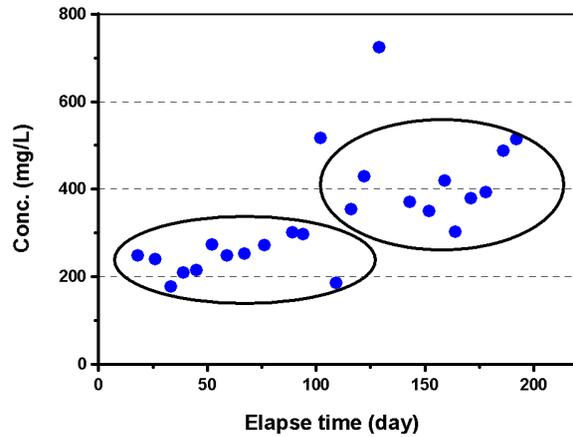


Figure 3. Variation of the influent COD during the experiments

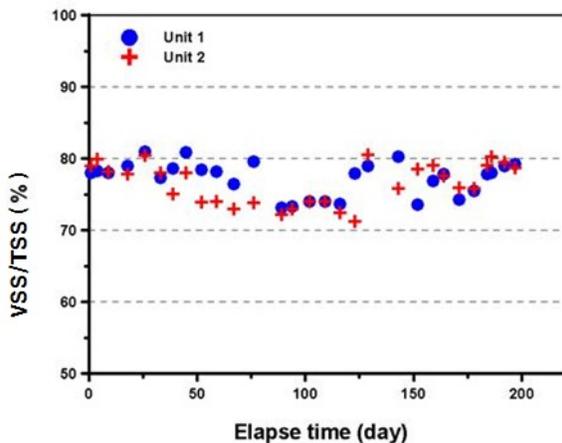


Figure 4. Variation of VSS/TSS in the bioreactors during the experiments

고 있다. 이는 전처리에 의한 슬러지의 생분해도 향상을 통해 잉여슬러지의 양이 상당량 감소되었음을 말해준다.

RUN 1에서의 MLSS 증가 기울기보다 RUN 2에서의 기울기가 더 급한 것은 Figure 3에서 알 수 있듯이 RUN 2 이후 유입 하수의 COD가 RUN 1때의 그것보다 더 큰 것으로 설명이 될 수 있다. 선형회귀분석을 통해 얻어진 평균적인 슬러지감량은 Unit 1에서 70mg/L·day였다. 한편 Figure 4에서 알 수 있듯이 실험기간동안 내내 VSS/SS 비율이 75-80%를 유지하고 있음을 보여준다. 이는 반응조 내에 계속 무기물이 축적되지 않고 이온성 물질로 막을 통과하여 처리수와 함께 빠져 나간 것으로 판단된다.

전처리를 통한 슬러지 감량화 공정에 있어서 무기물의 축

적과 관련하여 MLSS 3,000 - 4,000 mg/L 수준에서 운전한 Yasui의(1996)의 연구에서는 의미있는 수준의 무기물 축적을 보고하고 있다. 무기물의 축적여부는 슬러지 감량화 비율에 직접적으로 영향을 미치며 또한 슬러지의 생물학적 활성도 및 막의 폐색, 산소전달효율 등에 영향을 줄 수 있기 때문에 매우 중요한 측면으로 볼 수 있다. MBR 공정과 슬러지 전처리를 결합한 슬러지 무배출 공정에서 무기물의 축적여부 및 정도는 원수의 성상에 따라 달라질 것으로 판단되며 본 결과만을 가지고 무기물이 축적되지 않는다는 일반적인 결론을 도출하기는 어렵다. 다만 원수중에 포함되어 있는 무기물 중 상당부분이 처리수와 함께 제거된다는 점은 명확하게 확인 할 수 있었다. 좀 더 구체적으로 어떠한 원소나 물질들이 축적되는지 또는 처리수와 함께 제거되는지 등에 대해서는 추가적인 원소분석을 통하여 확인되어야 할 것이다.

한편 Figure 5은 운전기간동안의 두 반응조의 처리수 수질(COD)를 나타낸 것이다. 처리수 수질은 운전 초기 안정화 과정을 거치면서 대략 10-20mg/L 이내의 수준으로 안정적으로 유지가 되었다. 일반적인 활성슬러지 공정에서 전처리를 하여 슬러지의 자산을 유도할 경우 처리수의 수질이 나빠지는 것으로 알려져 있으나 MBR 공정을 대상으로 한 본 연구에서는 처리수의 수질차이가 거의 없는 것으로 나타났다. 이러한 현상은 Unit 1과 Unit 2의 경우를 비교할 경우뿐만이 아니라 Unit 2에서 Run 1, 3과 전처리를 중단했던 Run 2를 비교할 경우에도 확인 될 수 있었다. 한편 원수농도의 변화경향(초기에 낮고 후기에 높음)도 전처리 여부와 관련없이 처리수질에 거의 영향을 주지 않았음을 알 수 있다.

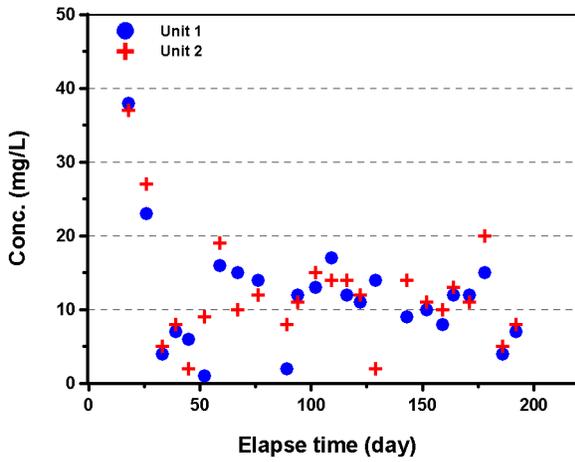


Figure 5. Variation of the effluent COD during the experiments

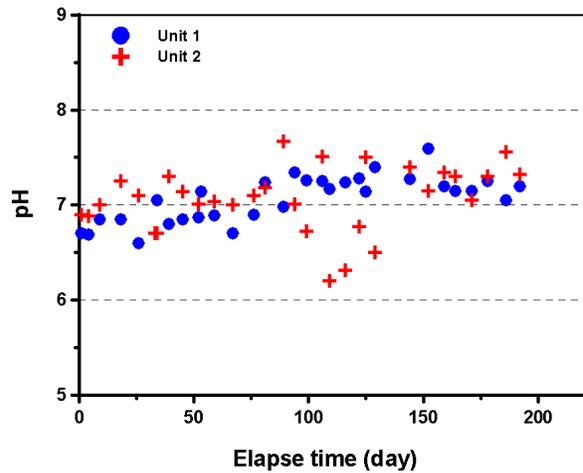


Figure 6. Variation of pH in the bioreactors during the experiments

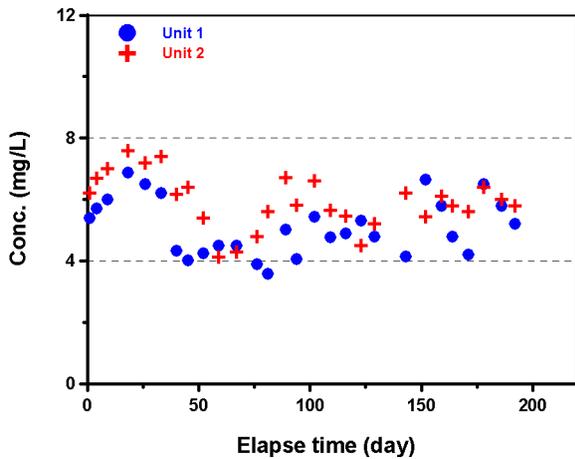


Figure 7. Variation of DO in the bioreactors during the experiments

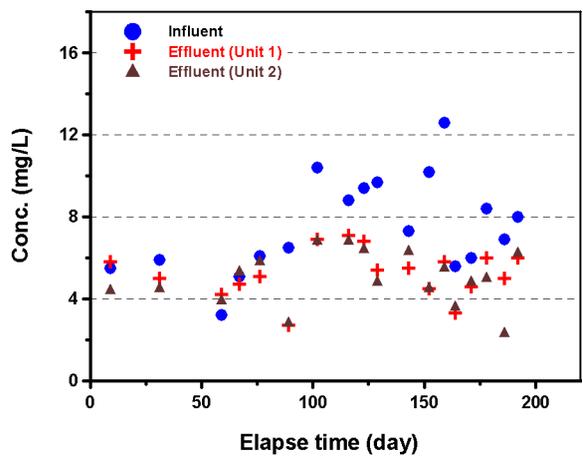


Figure 8. Variation of TP in the influent and the effluent during the experiments

Figure 6과 Figure 7은 실험기간도중 반응조내의 pH와 DO의 변화를 나타낸 것이다. 일반적으로 MBR 공정에서는 질산화로 인한 pH의 저하현상이 예상되었기 때문에 Unit 1의 운전에 있어서 NaOH를 첨가하여 인위적으로 pH를 6-8사이에서 유지하였으며 첨가한 알칼리 양은 평균 약 5meq/L정도로서 Unit 2에서의 알칼리 전처리시 투여량의 약 25% 수준이 주입되었다. Unit 2의 경우는 운전기간 내 전처리과정을 제외한 별도의 알칼리 주입없이 6-8 범위의 안정된 pH를 유지할 수 있었다. 이는 알칼리 전처리 (pH 11)를 한 후 오존처리 과정에서 pH가 약 8.5-9로 떨어지고 이 상태로 반응조로 반응되었기 때문에 질산화로 인한 pH저하가 상쇄된 것으로 판단된다. 이러한 결과는 슬러지

의 알칼리 처리시 소요되는 알칼리 약품 중 일부는 전처리 없이 운전할 경우에도 기본적으로 소요되는 양이기 때문에 전처리에 따른 추가적인 비용요인이 되지 않는다는 점에서 알칼리 전처리의 경제성 측면에 도움이 될 것으로 판단된다.

Figure 8은 운전기간 중 유입하수와 처리수의 총인의 변화를 보여주고 있다. 두 반응조 모두 분석을 위한 시료채취 이외에 슬러지의 인발이 없었기 때문에 유입수와 처리수의 인농도의 차이는 기본적으로 반응조내의 축적으로 설명이 될 수 밖에 없다. Unit 1의 경우 반응조내의 MLSS가 지속적으로 증가하기 때문에 MLSS의 축적에 따른 어느정도의 인제거가 예상되었으나 Unit 2의 경우 운전시작과 종료시

점에서의 MLSS의 변화가 거의 없었기 때문에 단위 MLSS 당 인농도가 높아진 것으로 판단된다. 하지만 이러한 현상이 반응조내 미생물의 인함량이 높아진 것인지 아니면 무기석출물의 축적에 의한 것인지는 명확하지 않다.

Figure 9은 Unit 2에서 슬러지 전처리시 슬러지의 가용화정도를 나타낸 것이다. 전처리를 했을때의 Unit 2의 슬러지 농도는 약 10,000mg/L를 거의 유지했으며 TCOD 중 SCOD의 비율을 가용화 기준으로 볼 때 알칼리 전처리만을 했을 경우에는 약 13-14%의 가용화 정도를 나타내고 있고 이후 오존 전처리를 통하여 약 21% 수준으로 증가하는 결과를 보여주고 있다.

Figure 10은 운전도중 각 반응조에 침적된 분리막에 걸리는 압력을 모니터링 한 결과를 나타낸 것이다. 실험결과 전처리를 해주지 않은 Unit 1에 경우 Flux에 상관없이 미생물 농도가 약 20000mg/L가 될 때까지 160일 가량 무리없이

운전할 수 있었으나 알칼리 후 오존 전처리(병합처리)를 실시해 다시 반응하는 Unit 2의 경우 운전 시작 후 30일과 90일 경에 압이 20cmHg까지 상승해서 세정을 해주어야 했다. 하지만 Unit 1의 슬러지 농도가 20,000mg/L를 넘어 서면서부터는 20, 30LMH 두 경우 모두 급속도로 그 압력이 상승하고 있다. 본 실험에서 전처리가 막폐색에 미치는 영향에 대해 설명하기 위해서는 단순히 슬러지의 농도만으로는 설명할 수 없었다. 따라서 장기간 운전하는 동안 각 반응조의 슬러지를 채취해 점도를 측정하였는데 이것은 Figure 11에 나와 있다. 하지만 점도증가가 막폐색에 불리하다는 관점에서 볼 때 점도 측면에서도 전처리 했을 경우가 상당히 낮아서 본 실험의 결과는 설명될 수 없었다. 그래서 산기관에 의한 폭기로 인한 수류의 Flow rate 분포와 막폐색에 미치는 영향에 대해 더욱 살펴볼 필요가 있었다.

Figure 12는 두 반응조의 Flow rate변화를 나타낸 그림

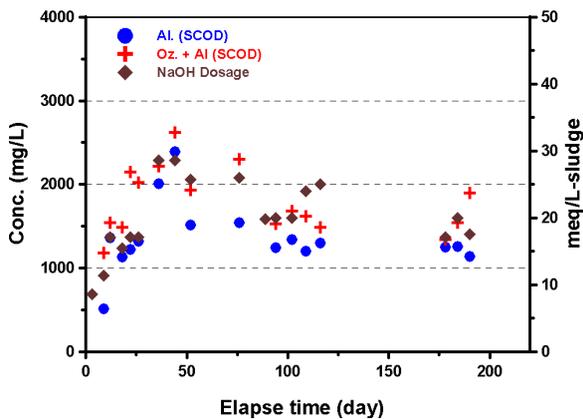


Figure 9. Variation of solubilization and NaOH dosage for alkali pre-treatment

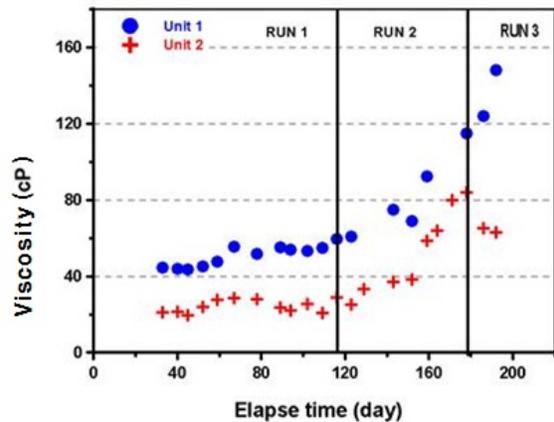


Figure 11. Variation of viscosity in the bioreactors during the experiments

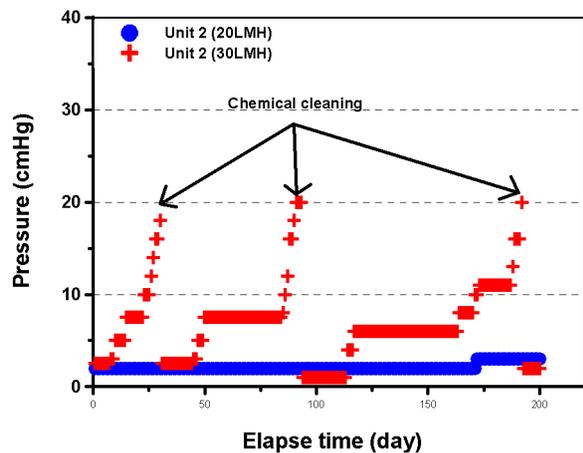
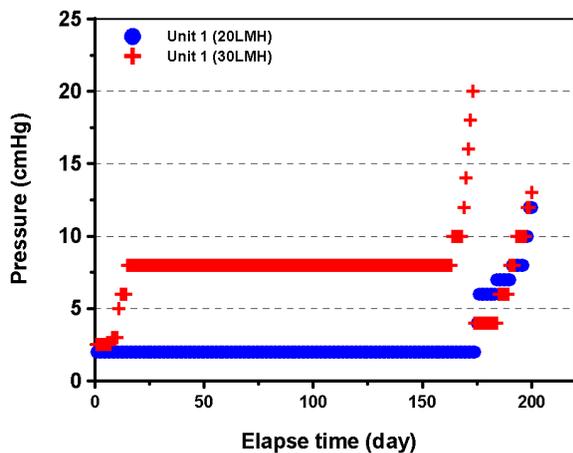


Figure 10. Variation of pressure during the experiments (a) Unit 1 (b) Unit 2

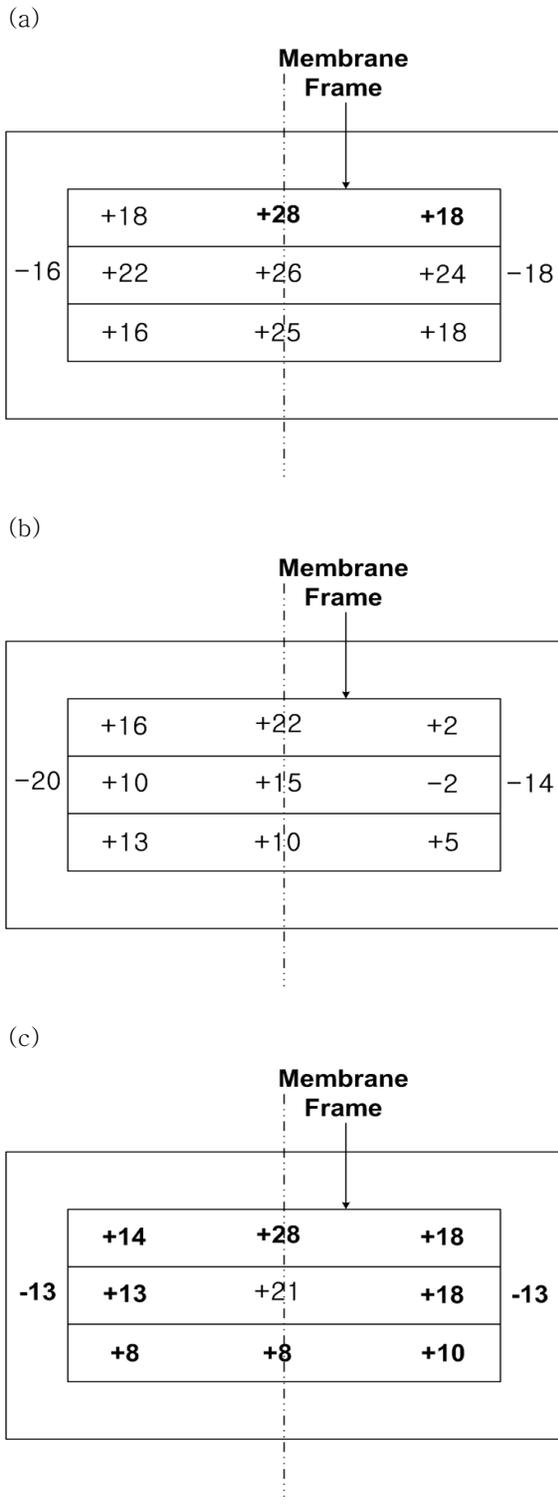


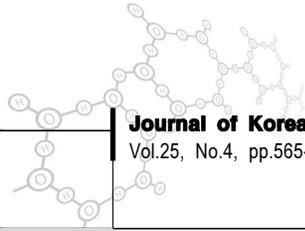
Figure 12. Flow rate in the reactor (a) Unit 1 (b) Unit 2 (c) Unit 2 after adjustment

이다. 그림에서 (+)값은 상승류를 의미하고 (-)값은 하향류를 나타낸다. 그런데 Unit 1의 경우에는 분리막 사이에 상당히 강한 상승기류가 좌우로 고르게 분포하고 막 바깥에서는 하향류가 대칭으로 생기면서 이상적인 흐름 분포를 이루고 있는 반면 Unit 2의 경우 분리막 사이에 상승류가 한 쪽으로 편향되어 있는 것을 알 수 있다. 이것은 수류에 의한 막표면 전단력 유기가 제대로 되지 못한 것을 의미하는데 이로 인해 슬러지의 세공막힘 현상이 가속화 되었을 수 있다고 사료된다. 막폐색에 영향을 끼치는 인자들이 많이 있지만 본실험의 경우 반응조내의 고르지 못한 수류형성 (Flow rate)이 다른 경우보다 지배적이었기 때문이라 생각된다. 수류 교정후 막폐색 진행이 앞의 두 번의 경우보다 좀 더 안정적인은 이러한 추론을 뒷받침해 주고 있다.

4. 결 론

침지형 분리막을 이용한 하수처리에 있어서 슬러지의 오존 및 알칼리 전처리가 잉여슬러지 발생량에 미치는 영향과 전처리에 따른 막폐색 영향을 조사하였다. 0.03Q의 슬러지를 병합전처리(알칼리: pH 11, 3hr; 오존: 0.02g-O₃/g-SS)를 하였을 경우가 전처리를 하지 않았을 경우에 비교하여 불때 실험 초기 때와 비슷한 농도(MLSS)를 유지하였다. 즉, 잉여슬러지 발생량의 저감을 확인할 수 있었다. 하지만 전처리를 한 경우가 전처리 하지 않은 경우보다 막폐색에 불리한 것으로 나타났다. 하지만 이 결과는 이전의 실험결과에 반대되는 내용으로 막폐색이 단순히 슬러지의 농도에 따른 것이 아니라는 것을 알 수 있었다. 슬러지 점도측면에 있어서도 전처리를 했을 경우가 막폐색에 유리한 것으로 측정되었으나 막폐색에 상당히 중요한 영향을 미치는 수류형성에 문제가 있는 것으로 판명되었다. 실험 초기 당시의 폭기에 의한 반응조의 수류흐름에 있어서 Unit 2(전처리)의 경우 좌우 균형을 이루지 못하고 적절한 상승기류에 의해 막표면 전단력이 고르게 유지되지 못해서 실험 경과 30일,92일,192일에 각각 막폐색이 일어났다. 하지만 이중 앞의 두 번의 막폐색은 수류흐름에 의한 결과라고 본다면 전처리가 막폐색에 미치는 영향은 긍정적이라고 볼 수 있겠다.

결론적으로, 알칼리와 오존의 병합전처리가 잉여슬러지의 발생을 효과적으로 저감시킬 수 있으며 막폐색에 있어서도 효과적인 방법으로 판단된다. 향후 경제적인 전처리를 위해서 알칼리 단독 처리를 통한 반응조내의 농도변화를 살펴봐야 할 것이다. 또한 슬러지 전처리를 통한 EPS 물질거동과 그것으로 인한 막폐색 영향을 추가로 알아볼 필요가 있을 것으로 판단된다.



5. 참고문헌

- H. Yasui, K. Nakamura, Sakuma, M. Iwasaki and Y. Sakai (1996) A full scale operation of a novel activated sludge process without excess sludge production, *Wat. Sci. Tech.*, **34**(3-4), 395-404
- Hsiau P. C. and Lo S. L. (2001) Characteristics of four alkaline biosolids produced from sewage sludge. *Conferece of Sludge Management*, 119-124, Taipei, Taiwan
- Jih-Gaw Lin, Ying-Shih Ma and Chun-Chih Huang (1998) Alkaline Hydrolysis of the Sludge Generated from a High-strength, Nitrogenous-Wastewater Biological Treatment Process. *Bioresource Technology.*, **65**, 35-42
- Kamiya T. and Hirotsuji J. (1998) New combined system of biological process and intermittent ozonation for advanced wastewater treatment., *Wat. Sci. Tech.*, **39**(8-9), 145-153
- Kwon, J. H., Ryu, S. H., Park, K. Y., Yeom, I. T., and Ahn, K. H. (2001) Enhancement of Sludge Dewaterability by Ozone Treatment, *Proceeding of the IWA Specialist Conference of Sludge Management*, 119-124, Taipei Taiwan
- Lin J. G., Ma Y. S., Chao A. C. and Huang C. L. (1999) BMP test on chemically pretreated sludge. *Bioresource Technology.*, **68**, 187-192
- Muller J. (2000) Disintegration as a key-step in sewage sludge treatment. *Wat. Sci. Tech.*, **41**(8), 123-130
- Muller, J. A., (2001) Prospects and Problems of Sludge Pre-Treatment Process, *Proceedings of the IWA Specialist Conference of Sludge Management*, p 111-118, Taipei, Taiwan
- Rajan, R. V., Lin, J.-G. & Ray, B. T. (1989) Low-level chemical pretreatment for enhanced sludge solubilization, *Research Journal WPCF*, **61**, 1678-1683
- Weemas M., Grootaerd H., Simoens F. and Verstraete W. (2000) Anaerobic digestion of ozonized biosolids., *Wat. Res.*, **34**(8), 2330-2336
- Yasui H. and Shibata M. (1994) An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process., *Wat. Sci. Tech.*, **30**(9), 11-20