

침지형 분리막 생물반응기에서 미생물 농도와 슬러지 부하에 따른 미생물 활성 변화와 막오염 특성 연구

배 태 현 · 장 경 국 · 탁 태 문[†]

서울시 관악구 신림동 산 56-1 서울대학교 생물자원공학부, 151-921
(2004년 10월 20일 접수, 2004년 11월 16일 채택)

Effects of Biomass Concentration and Sludge Loading Rate on Bioactivity and Membrane Fouling in a Submerged Membrane Bioreactor System

Tae-Hyun Bae, Gyoung-Gug Jang, and Tae-Moon Tak[†]

School of Biological Resources and Materials Engineering, Seoul National University, 151-921, South Korea

(Received October 20, 2004, Accepted November 16, 2004)

요 약: 유기물과 질소를 동시에 제거하기 위하여 연속회분식으로 운전한 MBR (membrane bioreactor) 시스템에서 미생물 농도와 슬러지 부하량이 막오염과 미생물 활성에 미치는 영향을 살펴보았다. 막오염은 MLSS (mixed liquor suspended solid) 농도 증가에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보였고, 그 효과는 비포기 조건보다 포기 조건에는 좀더 두드러지게 나타났다. MLSS 농도는 막오염에 직접적인 커다란 영향을 주지는 않으나, 지나치게 높은 MLSS에서 유도되는 낮은 슬러지 부하에서는 막오염이 크게 증가하는 현상이 발견되었고, 이러한 조건에서는 포기에 의한 막 세척 효과도 크게 줄어들었다. 미생물의 개별 활성도는 슬러지 부하가 감소할수록 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 반응조 전체 활성도 또한 17,000 mg/L 이상의 높은 MLSS로부터 유도되는 낮은 슬러지 부하율에서는 높은 미생물 농도에도 불구하고 오히려 감소했는데 이는 기질 부족으로 인한 경쟁으로 활성도가 떨어지고, 용액의 점성 증가로 인해 산소 전달율이 저하되었기 때문이다.

Abstract: In this study, membranes were coupled to a sequencing batch reactor for simultaneous removal of organic matter and nitrogen, and the influences of MLSS (mixed liquor suspended solid) concentration and the sludge loading rate on membrane fouling and bioactivity were investigated. The amount of membrane fouling slightly increased with MLSS concentration at both non-aeration and aeration conditions, but effect of MLSS concentration was more significant at aeration condition. Although the effect of MLSS concentration on membrane fouling was found to be insignificant at low concentration level, extremely low sludge loading, which were generated by the maintenance of large amount of biomass in the reactor, caused severe membrane fouling, and air scouring effect decreased significantly in this condition. Specific bioactivity was constantly reduced as sludge loading rate decreased. In spite of high MLSS concentration over 17,000 mg/L, the activity of the reactor decreased at extremely low sludge loading rate presumably due to the lower oxygen transfer and the competition of biomass to deficient substrate.

Keywords: MBR (membrane bioreactor), membrane fouling, bioactivity, sludge loading rate

1. 서 론

분리막 생물반응기(MBR; membrane bioreactor)는 고·액 분리장치로서 활성슬러지 시스템의 2차 침전

지를 분리막 장치로 대체한 시스템이며 고도 폐수처리 기술로서 그 활용이 점차로 확대되고 있다. 분리막에 의해 활성슬러지 플럭을 완전히 분리해냄으로서 미생물의 침강성에 관계없이 안정적인 수질을 확보할 수 있고, 슬러지 체류시간(SRT; sludge retention time)과 수리학적 체류시간(HRT; Hydraulic retention time)의

[†]주저자(e-mail : tmtak@snu.ac.kr)

완전분리가 가능하여 운전의 유연성이 증가하며, 높은 미생물 농도 유지가 가능해 부지 면적이 감소하는 장점이 있다[1]. 그러나 분리막 운전 시 필연적으로 발생하는 막오염(membrane fouling)으로 인한 주기적인 분리막의 세척 및 교체 등의 문제로 운전비용이 증가하는 문제점을 안고 있다[1].

분리막 생물반응기에서 막오염은 분리 대상물질이 살아있는 다양한 종류의 미생물과 그 대사물질들을 주로 포함하고 있어 종래의 막분리 시스템에서보다 훨씬 더 복잡한 현상을 초래한다. 막오염에 영향을 주는 인자로는 분리막의 수리학적 조건, 즉 투과유속(flux)과 교차흐름속도(crossflow velocity)나 포기강도(aeration intensity)를 [3-6] 비롯하여 혼합액 고형 부유물 농도(MLSS; mixed liquor suspended solid)[3,7], 미생물의 생리학적 상태에 따른 미생물 대사물질과 플럭의 표면 특성[8], 분리막의 재질[2] 및 시스템 구성 등이 있다. 그러나 많은 연구자의 노력에도 불구하고 막오염 현상의 복잡성으로 인해 많은 연구들이 상충되고 있는 실정이다.

몇몇 연구자들은 낮은 잉여슬러지 생산을 목적으로 긴 슬러지 체류시간과 극도로 높은 미생물 농도, 이에 따른 낮은 슬러지 부하를 유지시킨 상태에서의 MBR 운전에 대해 보고하고 있다[9-10]. 그러나 이러한 조건에서 낮은 잉여슬러지 생산을 유도하면 슬러지 처리 비용을 절감할 수 있지만, 미생물들의 기질에 대한 경쟁 및 내생성장 유도에 따라 미생물의 활성이 급격히 줄어들어 비효율이 떨어지게 되며, 막오염을 증가시켜 운전비용 상승을 유도할 수도 있다.

일반적으로 막오염을 유발하는 물질, 즉 미생물의 농도가 증가하면 막오염이 증가하게 된다. 그러나 이러한 경향과 일치하지 않는 연구도 보고되었다. Lee 등은 미생물을 부착성장 시킨 반응조와 부유성장 시킨 반응조에서 침지형 분리막의 막오염을 비교 연구한 논문에서 MLSS가 증가할수록 막오염이 오히려 감소한다고 보고하였는데, 그 이유는 슬러지 플럭이 분리막 표면에 쌓여 형성하는 2차막이 막오염을 유발하는 작은 입자들의 막표면 접촉을 막아주기 때문에 높은 MLSS에서 막오염이 오히려 감소한다고 설명하였다[7]. 우리의 이전 연구에서도 포기에 의해 플럭들에 의한 막오염이 제어되는 상태에서는 일정수준까지는 MLSS농도가 증가하여도 막오염에 영향을 주지 않는다는 결과가 나왔다[3]. 그러나 이러한 결과들이 긴

SRT와 낮은 유기물부하, 극도로 높은 미생물 농도에 서로 그대로 적용될지는 알 수 없다.

SRT를 증가시키게 되면 단순히 미생물의 개체수만 늘어나는 것이 아니라 심각한 막오염을 유발한다고 알려져 있는 미생물 대사물질의 양과 성분을 모두 변화시키게 된다. Shin 등은 슬러지 폐기없이 미생물의 개체수를 늘려가면 용존성 대사물질이 계속하여 증가한다고 하였고[11], 다른 연구에서는 높은 SRT에서는 단백질 성분이 미생물 대사물질의 주성분을 차지하게 되며 이들의 흡착에 따라 막오염이 더욱 커진다고 보고하였다[12].

최근에 MBR공정에서는 영양염류의 제거에 관한 연구들이 보고되고 있는데, 우리는 이전 연구에서도 MBR과 연속회분식 반응조(SBR; sequencing batch reactor)를 결합하여 유기물과 함께 질소와 인을 동시에 제거하고자 하였다[6]. 본 연구에서는 유기물과 질소제거를 위한 연속회분식 침지형 MBR 공정에서 슬러지의 폐기없이 미생물농도를 지속적으로 증가시켰다. 그에 따라 유도된 낮은 슬러지 부하량과 높은 MLSS가 막오염과 미생물 활성에 미치는 영향을 침지형 막여과 실험, 산소소모율, 질산화 및 탈질화율 측정을 통해서 조사하고, 이를 바탕으로 낮은 슬러지 부하량에서 운전의 문제점을 제기하고자 한다.

2. 실험 방법

2.1. 활성슬러지 및 합성 폐수

본 연구에 사용한 활성슬러지는 경기도 용인소재의 식품회사의 폐수처리 플랜트로부터 식중하였으며, 대상으로 한 모델 합성폐수로 50일 이상 적응시킨 후 실험에 사용하였다. 실험에 사용한 모델 폐수는 Glucose, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, KH_2PO_4 를 각각 탄소, 질소, 인 원으로 하고 기타 미량의 영양분을 넣어 제조하였다. 또한 pH를 조절하기 위하여 NaHCO_3 를 첨가하였다. 자세한 폐수의 조성은 Table 1에 나타내었다.

2.2. 침지형 MBR실험장치

실험에 사용한 침지형 MBR 플랜트는 유기물과 질소를 동시에 제거하기 위하여 연속회분식 반응조 형태로 운전하였고, Fig. 1에 실험장치도와 시스템 운전 모드를 나타내었다. $0.4 \mu\text{m}$ 의 세공크기와 3 m^2 의 막면적을 갖는 polyethylene 재질의 중공사막모듈들(Mitsubishi

Table 1. Composition of Synthetic wastewater

Components	Concentration (mg/L)
Glucose	500
(NH ₄) ₂ SO ₄	250
KH ₂ PO ₄	40
MgSO ₄ ·7H ₂ O	50
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10
FeCl ₃ ·6H ₂ O	4
NaHCO ₃	200

Rayon, Japan) 반응조에 침지시키고 막오염 제어를 위해 산기관을 모듈아래 바로 설치하였다. 이 중공사막 모듈은 유출수 처리를 위해서만 사용하였으며, 막오염 특성은 SK 케미칼에서 제조한 SKMF10 중공사막 (pore seize: 0.1 μm, polysulfone)을 이용하여 측정하였다. SKMF10 중공사막을 U자 형태로 만들고 끝부분을 모아 1cm 외경의 우레탄 튜브에 넣고 우레탄 접착제를 이용하여 포팅(Potting)한 후 절단하여 막면적이 540 cm² 되도록 모듈을 만들었다. 제조된 간이 모듈은 반응조에 직접 침지하여 여과 실험하였고, 매 실험마다 새 모듈을 이용하였다.

비포기 시에 슬러지 혼합을 위해서 침지형 순환펌프를 설치하였고, 유입펌프, 흡입펌프 포기장치는 PLC (programmable logic controller, LG Industrial System)에 연결하여 운전모드에 따라 자동으로 작동하도록 제어하였다. 운전 사이클은 초기의 유입 및 혼합, 호기성 반응, 무산소 반응, 처리수 배출 순으로 구성되었다. 호기성 반응시기에는 유기물 제거와 질산화가 주로 일어나며, 포기가 멈추면 용존산소가 소모될 때까지 호기성 상태가 유지되다가 무산소 조건으로 넘어가게 된다. 이 상태에서는 질산화 되었던 질소가 탈질화반응을 거쳐 질소기체 형태로 반응조 밖으로 배출되어 질소의 제거가 완성되게 된다.

2.3. MBR 운전 조건

MBR시스템의 운전조건을 Table 2에 나타내었다. 미생물의 적응이 끝난 후에 잉여 슬러지의 폐기 없이 농도를 계속 증가시켰으며, 대략 20일씩의 기간으로 나누어 Phase-1부터 Phase-5까지의 5개의 기간으로 나누었다. 표에 나타난 MLSS와 슬러지 부하율(F/M; gCOD/gMLSS · day)은 평균 값이며, 막투과 실험과 활성도 실험은 각 기간의 중간에 수행하였다.

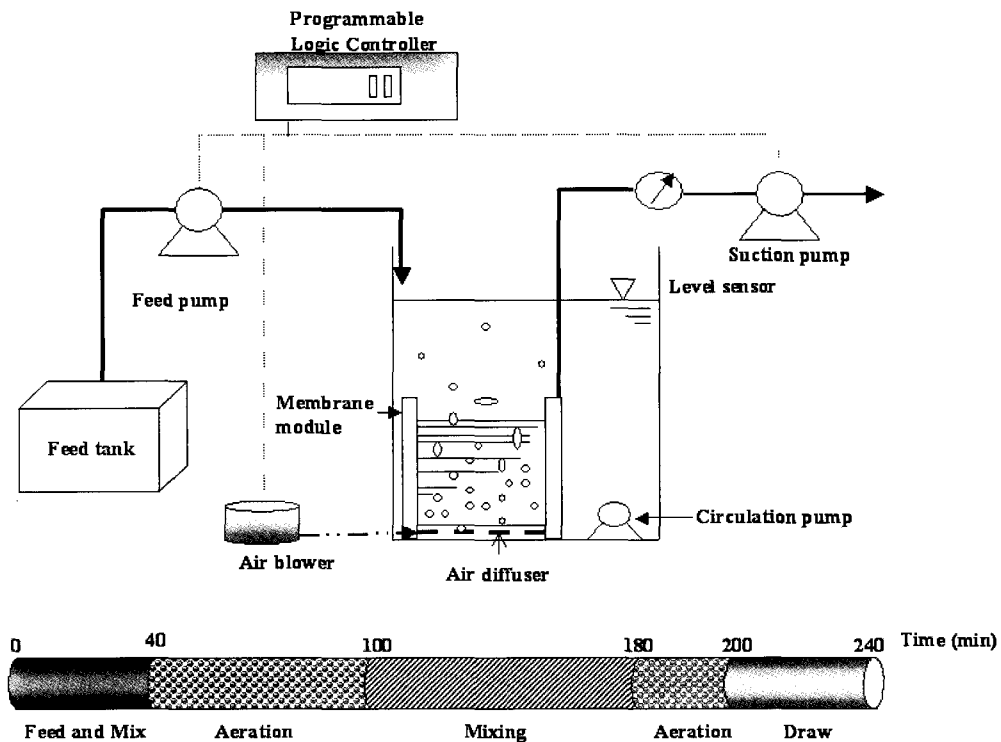


Fig. 1. Schematic diagram and operation sequence of the membrane coupled SBR system.

Table 2. Operating Conditions of the MBR System

	Phase				
	1	2	3	4	5
MLSS (mg/L)	3,800	7,100	10,500	14,200	17,800
F/M (gCOD/gMLSS d)	0.26	0.14	0.09	0.07	0.05
Aeration rate (L/min)	15	15	20	20	25
HRT (hr)	12				
DO (mg/L)	3.5~4.2				
Temperature (°C)	20±3°C				
pH	6~7				

일정한 용존산소 (DO; dissolved oxygen) 농도를 유지하기 위해 높은 미생물 농도에서는 포기량을 증가시켰으며, 온도와 pH는 미생물의 활성에 방해가 되지 않는 범위로 유지되었다. MBR 반응조는 미생물 농도와 이에 따른 슬러지 부하량을 제외하고는 모든 기간에서 동일한 조건으로 운전되었다.

2.4. 수질 분석

일반적인 수질 분석 방법은 Standard Methods를 따랐다[13]. MLSS 농도는 시료 10 mL를 유리섬유 여과지(GF/C)에 여과한 후 105°C에서 1시간 동안 건조시킨 후 질량을 측정하여 조사하였다. COD는 흡광도법을 사용하여 AL282 (AQUA LYTIC, Germany)로 측정하였다. 질산성 질소 (Nitrate; NO₃-N) 와 아질산성 질소 (Nitrite; NO₂-N) 측정은 이온크로마토그래피(Shimadzu, Japan)를 이용하였고, 총 질소는 Kjeldahl 질소는 Kjeltec Auto 2300 analyzer (Tecator, Sweden)로 분석하였으며 총 질소는 이 두 가지 질소의 합으로 계산하였다. 용존산소 농도는 전극을 이용하여 측정하였다 (AQUA LYTIC, Germany).

2.5. 막오염 분석

막오염 정도를 정량적으로 측정하기 위하여 여과 저항 모델을 사용하였다[2,14]. 전체여과 저항은 분리막 고유의 저항과 막오염에 의한 저항으로 나누어 볼 수 있으며 아래와 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$J = \frac{\Delta P_T}{\eta \cdot R_t} = \frac{\Delta P_T}{\eta \cdot (R_m + R_f)} \quad (1)$$

J : 투과유속(Flux, m/s), ΔP_T : 투과압력(TMP; trans-membrane pressure, Pa), η : 투과액 점도(pa·s), R_t : 전체여과저항(m⁻¹), R_m : 분리막 저항(m⁻¹), R_f : 막오염저항

(m⁻¹)

분리막에 의한 저항은 순수투과유속을 통해서 구할 수 있으며 그 계산식은 다음과 같다.

$$J_w = \frac{\Delta P_T}{\eta \cdot R_m} \quad (2)$$

2.6. 미생물 활성 측정

미생물의 활성을 평가하기 위해서 산소소모율, 질산화율, 탈질율을 반응조에서 직접 관찰하면서 측정하였다. 산소소모율은 반응조에 전극을 장치하고, 반응 싸이클이 시작되어 폐수가 유입되는 순간에 용존산소의 시간별 감소율을 관찰하여 측정하였다. 시간별 농도변화를 직선으로 플롯하여 기울기를 통해 산소소모율 (OUR; oxygen uptake rate)을 계산하였고, 이를 MLSS 농도로 나누어 비산소소모율 (SOUR; specific oxygen uptake rate)을 계산하였다. 질산화율 (VNR; volumetric nitrification rate)은 초기 유입기간이 끝나고 포기가 시작된 후부터 10분 간격으로 혼합액 샘플을 추출하고 산화된 질소(질산성 질소와 아질산성 질소의 합; NO_x-N)를 측정하여 계산하였고, 비질산화율은 (SNR; specific nitrification rate)은 질산화율을 MLSS로 나누어 계산했다. 탈질율(VDNR; volumetric denitrification rate)과 비탈질율 (SDNR; specific denitrification rate)은 무산소 혼합기에 샘플을 추출하여 산화된 질소의 농도를 측정하여 같은 방법으로 계산하였다.

3. 결과 및 토의

3.1. 막오염 특성

3.1.1. 비포기 조건에서 MLSS에 따른 막오염 특성

Fig. 2에는 포기를 하지 않고, 슬러지 혼합 상태를

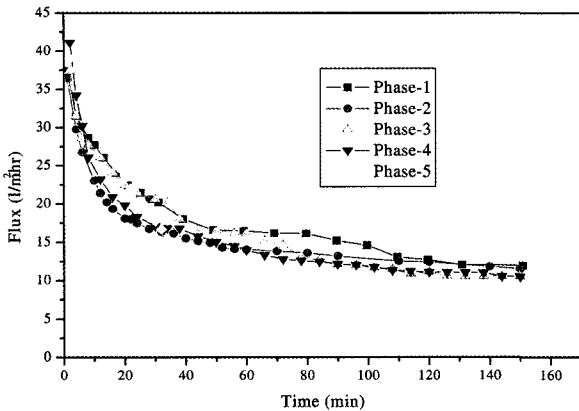


Fig. 2. Influence of MLSS concentration on flux decline behavior of submerged membrane at non-aeration condition. (TMP: 20 Kpa)

유지하며 20 Kpa의 압력에서 투과 실험을 수행한 결과를 나타내었다. 모든 MLSS에서 초기부터 급격한 투과유속의 감소 현상이 발생했는데, 이는 막표면에서의 전단응력을 부여하지 않았고, 혼합액의 농도가 높았기 때문이다. 대략 4,000~14,000 mg/L의 농도범위에서는 대체로 MLSS가 높을수록 투과유속의 감소가 증가하는 경향을 보였으나, 그 차이는 그다지 크지 않았다. 포기를 하지 않아 낮은 역전달력(back transport)을 갖는 조건에서는 4,000 mg/L의 농도도 막표면에 빠른 속도로 케이크 층을 형성시키기에 충분하며, 비포기 조건에서 이미 케이크층 성장이 일정한 수준에 이르는 한계 농도에 근접하였기 때문에 그 이상의 MLSS의 농도 증가는 크게 막오염에 영향을 주지 않는 것으로 사료된다.

그러나 F/M비가 가장 낮고, 슬러지 일령이 가장 길어진 Phase-5에서는 막오염이 조금 더 심하게 발생했는데, 이는 단순히 MLSS의 증가의 영향보다는 슬러지 구성 성분의 특성에 의한 것으로 해석해 볼 수 있다. 자세한 내용은 여과 저항과 함께 3.1.3절에서 논의할 것이다.

3.1.2. 포기조건에서 MLSS에 따른 막오염 특성

Fig. 3은 20 L/min의 포기유량에서 위와 동일한 조건으로 투과 실험을 수행한 결과이다. 모든 MLSS의 농도에서 비포기 조건보다 높은 투과유속을 유지하여, 포기에 의한 막세척 효과를 확인할 수 있었다. MLSS 농도 변화에 따른 결과를 살펴보면 MLSS가 막오염에 미치는 영향이 좀더 두드러지게 나타남을 확인할 수

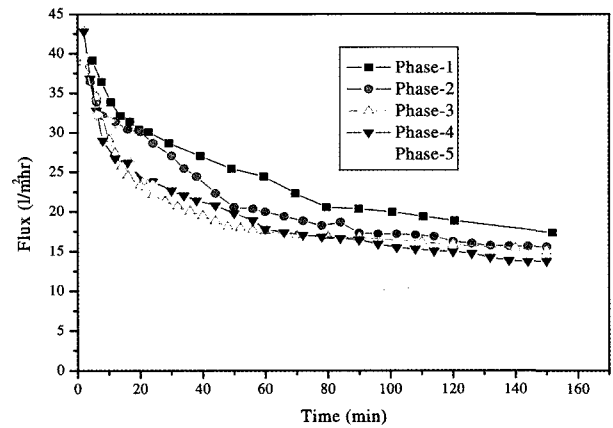


Fig. 3. Influence of MLSS concentration on flux decline behavior of submerged membrane at aeration condition. (TMP:20 Kpa, Aeration intensity: 20 L/min)

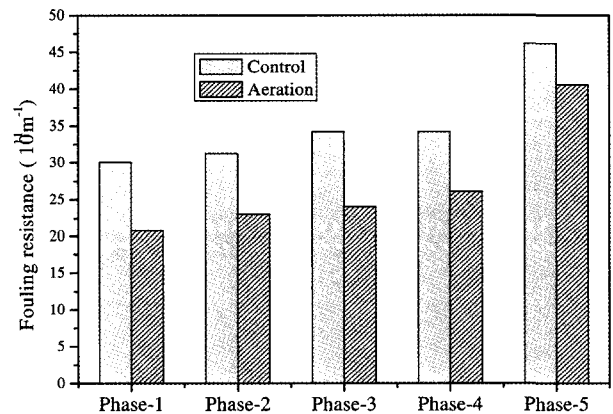


Fig. 4. Fouling resistances of the membrane at both non-aeration and aeration conditions.

있었다. 이는 MLSS 농도가 적을 때는 포기에 의해 발생하는 유체의 흐름이 막표면에 부착하는 오염물질들을 효율적으로 제거하지만, MLSS가 높을 때에는 막오염 저감효과가 떨어지게 됨을 의미한다. 이러한 현상이 발생하는 이유는 MLSS 증가할수록 막표면에 쌓이는 입자들의 수가 많아져서 막표면에서의 공기와 액체의 흐름에 의해 입자를 제어하는 것이 어려워지고, 높은 MLSS에 따른 혼합액의 점도 증가에 의해서 같은 포기량에서 유체의 속도도 떨어지기 때문이다.

3.1.3. 여과 저항 계산과 포기 효과 분석

MLSS에 따른 막오염 저항 값의 변동을 포기와 비포기 조건에서 계산하였고, 그 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 사용된 분리막은 순수투과도가 높은 정밀여과막

이기 때문에 분리막 저항은 전체 저항에서 1% 미만을 차지하는 아주 낮은 수치를 보였고, 막오염 저항이 대부분을 차지했다. 실험에 사용된 분리막을 수세한 후 순수투과유속을 분석한 결과 초기의 투과유속을 대부분 회복하여 비가역적인 오염에 의한 저항은 거의 발생하지 않았고, 대부분이 막표면에 형성되는 케이크층에 의한 저항임을 확인할 수 있었다. 이는 짧은 기간에 투과유속의 감소 경향을 관찰하기 위해 높은 투과유속에서 빠르게 막오염을 유도하였기 때문이다.

포기와 비포기 경우 모두 Phase-4까지는 MLSS의 증가에 따라 막오염이 조금씩 증가하는 경향을 보인다. 이는 MLSS의 증가에 따라 막오염 유발 물질의 양이 늘어나기는 하지만, MLSS 4,000 mg/L MBR의 활성슬러지 혼합액도 이미 심한 막오염을 유발하기에 충분한 양의 오염물질이 갖추어진 것이기 때문에 그 이상의 농도증가가 막오염 저항에 커다란 영향을 주지 않는 것이라 할 수 있다. 그러나 마지막 운전 기간인 Phase-5에서는 포기와 비포기 모두 급격한 여과 저항의 증가가 발생하는데, 이는 포기에 의해서도 잘 제어되지 않는 물질들의 침착을 의미한다. 따라서 낮은 F/M나 길어진 슬러지 일령이 미생물의 생리상태에 영향을 주어 활성슬러지 구성성분의 변화를 유도하였다고 사료된다. 이러한 특성은 다른 연구자들에 의해 이미 보고되었는데, 그들은 긴 슬러지 체류시간, 낮은 유기물 부하량, 미생물의 내생성장 상태 등에서는 미생물들에 의해 EPS (Extracellular polymeric substance) 등의 대사물질들을 많이 분비되고, 그 주성분도 탄수화물에서 단백질로 변화되어 보다 심각한 막오염을 유발한다고 하였다[8,11,12].

Fig. 4에서 살펴보면 포기에 의한 막오염 저감 효과가 확연히 나타남을 확인할 수 있다. 그러나 그 저감 효과는 MLSS가 높아질수록 상대적으로 적어지고, 17,000 mg/L 이상의 높은 MLSS 농도와 그에 따른 낮은 F/M비에서는 그 효과가 상당히 적어 Phase-5에서는 포기와 비포기 시에 유지되는 최종 투과유속에 커다란 차이가 나타나지 않게 되었다(Fig. 2, Fig. 3 비교). 이는 위에서 언급한대로 낮은 F/M비에서 분비되는 많은 양의 대사물질 때문에 유도되는 대사물질에 의한 직접적인 막오염 증가와 슬러지 혼합액의 점성증가에 따라 포기에 의한 세척효과가 감소되는 간접적인 영향 때문이다.

따라서 극도로 높은 MLSS와 이에 따른 낮은 F/M비

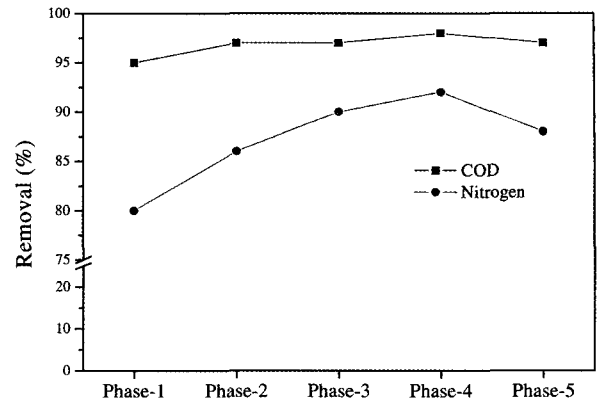


Fig. 5. COD and nitrogen removal rates of the membrane coupled SBR system.

는 분리막의 성능을 저해시키고 막오염 제어도 어렵게 하는 문제점을 발생시켜 MBR전체의 운전 효율을 감소시키는 원인이 될 수 있다.

3.2. MLSS에 따른 수처리 효율

연속회분식으로 운전한 MBR에서 MLSS 증가에 따른 COD와 질소의 제거 효율을 Fig. 5에 요약해서 나타내었다. F/M비가 낮아짐에 따라 COD제거효율이 조금씩 증가하였지만, 모든 운전조건에서 이미 95% 이상의 높은 제거율을 나타내고 있다. 대략 4,000 mg/L 농도의 MLSS에서도 F/M비가 0.26으로 유지되고 있는데, 이 수치는 종래의 활성슬러지 시스템에서도 안정적인 유기물 제거가 가능한 수치에 해당된다. 따라서 Phase-2부터는 조금씩 기질이 부족한 상태에 접어들게 되는데, 유입수의 탄소원인 glucose는 쉽게 분해되어 제거되고 미생물 대사물질들이 혼합액속에 남아 잔류 COD성분을 차지하게 된다. 이러한 대사물질의 잔류 때문에 제거율은 더 이상 크게 증가되지 않으며, 미생물 대사물질이 더욱 증가되는 내생성장기는 오히려 제거율이 떨어질 수도 있다(Phase-5). 그러나 MBR시스템에서는 분리막에 의해 대사물질의 분리도 이루어지기 때문에 어떠한 슬러지 부하량에서도 안정적인 제거율을 얻게 된다.

COD와는 다르게 질소의 제거율은 MLSS가 증가하고 슬러지 일령이 길어짐에 따라 80%에서 92%까지 제거율이 상승했다(Phase-1부터 Phase-4까지). 이는 성장률이 낮은 질산화박테리아가 길어진 슬러지 일령에 의해 보다 많이 반응조 내에 체류하기 때문이다. 질산화 박테리아의 성장에 의해 Phase-4까지 지속적인 질

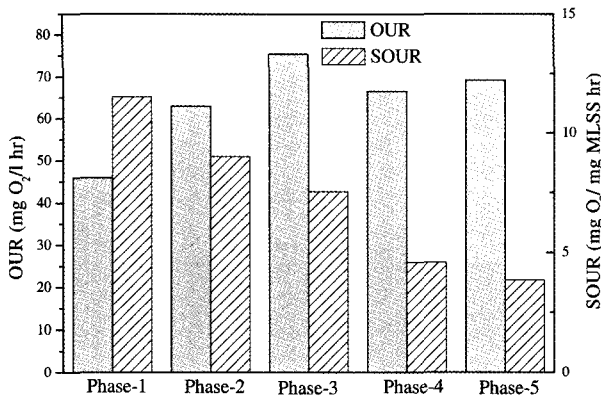


Fig. 6. The OUR and SOUR of the biomass according to the sludge loading rate.

소제거의 상승이 나타나지만, Phase-5에서는 오히려 제거율이 감소하는 경향이 나타났다. 이는 낮은 F/M비에 의해 미생물의 성장이 거의 나타나지 않아 세포합성에 의해서 발생하는 질소제거를 기대하기 어렵고, 극심한 기질 부족상태로 인해 미생물간 경쟁이 발생하고 이를 통해 미생물 활성이 저하되기 때문에 사료된다.

3.3. 슬러지 부하에 따른 미생물 활성 변화

3.3.1. 산소 소모율

산소소모율은 호기성 상태에서 미생물의 유기물 분해능을 나타내는 간접적인 지표로서 많이 이용되는 수치이다. Fig. 6에는 슬러지 부하에 따른 미생물의 산소소모율(OUR)과 비산소소모율(SOUR)의 값들이 나타나 있다. 미생물 증가에 따라 F/M비가 0.26에서 0.09로 낮아질 때 까지 전체 산소소모율은 증가하는 경향을 보인다. 그러나 미생물들의 개별 활성을 나타내는 비산소소모율은 F/M비가 낮아지면서 계속 감소하고 있는데, 이는 기질을 두고 경쟁 상태가 유발되기 때문이다. 이러한 경쟁상태가 심화되면 Phase-4와 5에서처럼 전체 산소소모율도 조금 감소하는 경향을 보이게 된다. 또한 높은 MLSS에서는 슬러지 점도가 증가하여 산소의 전달효율도 감소하게 되어 산소 소모율을 감소시키는 원인이 될 수 있다[15].

3.3.2. 질산화율

질산화 반응은 생물학적으로 질소를 제거하는 공정에서 중요시 되는 반응으로서, 성장 동력이 낮은 질산화 박테리아로부터 이루어지기 때문에 높은 슬러지 체

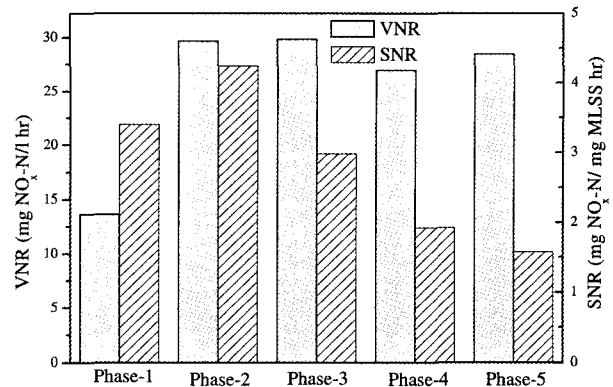


Fig. 7. The VNR and SNR of the biomass according to the sludge loading rate.

류시간에서 배양이 잘 이루어지고 질산화율도 좋아진다고 알려져있다[16]. Fig. 7에는 MBR시스템의 질산화율이 기간별로 나타나 있다. Phase-2는 Phase-1에 비하여 슬러지 체류시간이 길어져 좋은 질산화율을 보였는데, 그 이후로는 더 이상 증가율이 좋아지지 않았고, 이에 따라 비질산화율(SNR)은 계속해서 감소하는 경향을 보였다. 이는 질산화 박테리아의 배양을 위해서 충분히 긴 슬러지 체류시간은 필요로 하지만, 체류시간이 지나치게 길어질 경우 내생 상태와 기질 부족으로 인한 경쟁으로 인해 더 이상의 질산화 박테리아의 성장은 기대하기 어렵게 된다는 것을 의미한다. 따라서 좋은 질산화율을 얻기 위해서는 일정한 슬러지 부하를 유지하는 것이 필수적이라 할 수 있다.

3.3.3. 탈질화율

생물학적 질소제거를 시도한 MBR 연구에서는 탈질 반응이 질소제거율을 결정하는 중요한 단계라고 보고되고 있다[17]. 그 이유는 MBR 시스템에서는 보통 막오염 제어를 위해서 과다한 포기가 이루어지고 있어 무산소 조건에서 용존산소가 소모되는데 많이 시간이 소모되며, 높은 미생물 농도에 의해 탈질에 필요한 유입수의 유기물이 대부분 호기성 조건에서 분해되어 탄소원이 부족해지기 때문이다.

Fig. 8에는 무산소 조건에서의 탈질율(VDNR)과 비탈질율(SDNR)이 나타나 있다. MLSS가 높아질수록 탈질화 박테리아가 증가하여 탈질화 속도가 증가하는 경향을 보인다. 그러나 다른 활성도와 마찬가지로 0.05 gCOD/gMLSS · day의 낮은 슬러지 부하에서는 경쟁에 의한 활성도 저하에 의해 탈질화율이 저하되는 현상이

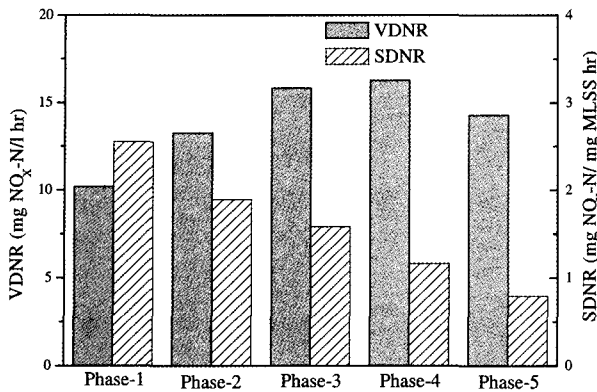


Fig. 8. The VDNr and SDNr of the biomass according to the sludge loading rate.

발견되었다(Phase-5). 비탈질율은 슬러지 부하량이 감소함에 따라 지속적으로 감소하여 미생물의 개별 활성은 슬러지 부하량에 반비례함을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 연속회분식으로 운전한 MBR시스템에서 MLSS 농도와 슬러지 부하량이 막오염과 미생물 활성에 미치는 영향을 살펴보았다. MBR시스템에서 막오염은 MLSS농도 증가에 의해 조금씩 심하게 발생하는 경향을 보였으나, 그 차이는 비포기 시에는 크지 않았고, 포기 시에는 차이가 좀 더 심하게 발생하였다. MLSS 농도의 증가가 막오염에 직접 커다란 영향을 주지는 않으나, 지나치게 높은 MLSS에서 유도되는 낮은 F/M비에 의해서 혼합액의 조성 변화나 점성도 등의 특징이 변화되어 막오염이 크게 증가하는 현상이 발견되었고, 이러한 조건에서는 포기에 의한 막세척 효과도 크게 감소되었다.

미생물의 개별 활성도(SOUR, VNR, SDNR)는 슬러지 부하가 감소할수록 지속적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 반응조 전체 활성도(OUR, VNR, VDNr)도 역시 17,000 mg/L 이상의 높은 MLSS로부터 유도되는 0.05 gCOD/gMLSS · day의 낮은 F/M비에서는 높은 미생물 농도에도 불구하고 오히려 감소하였다. 이는 기질 부족으로 인해 미생물간 경쟁이 심화되어 비활성이 저하되고 용액의 점성 증가로 인한 산소와 같은 전자수용체의 전달율이 저하되었기 때문이다.

본 연구를 통해서 효율적인 막오염 제어와 미생물의 활성을 유지하기 위해서는 적절한 수준의 MLSS와

F/M비를 유지하는 것이 반드시 필요하다는 것을 확인할 수 있었다.

감사

본 연구는 서울대학교 발전기금의 일반학술연구비를 지원받아 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. J. Manem and R. Sanderson, Water Treatment Membrane Process, Chapter 17, AWWA Research Foundation, McGraw-Hill (1996).
2. J. G. Choi, T. H. Bae, J. H. K, T. M Tak, and A. A. Randall, The behavior of membrane fouling initiation on the crossflow membrane bioreactor system *J. Membr. Sci.*, **203**, 103-113 (2002).
3. S. P. Hong, T. H. Bae, T. M. Tak, S. Hong, and A. Randall, Fouling control in activated sludge submerged hollow fiber membrane bioreactor, *Desalination*, **143**, 219-228 (2002).
4. E. Tardieu, A. Grasmick, V. Geaugey, and J. Manem, Influence of hydrodynamics on fouling velocity in a recirculated MBR for wastewater treatment, *J. Membr. Sci.*, **156**, 131-14 (1999).
5. T. Ueda, K. Hata and Y. Kikuoka, Effects of aeration on suction pressure in a submerged membrane bioreactor, *Water Res.*, **31**, 489-494 (1997).
6. T. H Bae, S. S. Han, and T. M Tak, Membrane sequencing batch reactor system for treatment of dairy industry wastewater, *Process Biochemistry*, **39**, 221-231 (2003)
7. J. M Lee, W. Y Ahn, and C. H Lee, Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganism in submerged membrane bioreactor, *Water Res.*, **35**, 2435-2445 (2001)
8. I. S. Chang and C. H. Lee, Membrane filtration characteristics in membrane-coupled activated sludge system the effect of physiological states of activated sludge on membrane fouling, *Desalination*, **120**, 221-233 (1998).

9. R. Witzig, W. Manz, S. Rosenberger, U. Krüger, M. Kraume, and U. Szewzyk, Microbiological aspects of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal wastewater, *Water Res.*, **36**, 394-402 (2002).
10. S. Rosenberger, U. Krüger, R. Witzig, W. Manz, U. Szewzyk, and M. Kraume, Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water, *Water Res.*, **36**, 413-420 (2002).
11. H. S. Shin and S. T. Kang, Characteristics and fates of soluble microbial products in ceramic membrane bioreactor at various sludge retention time, *Water Res.*, **37**, 121-127 (2003).
12. W. T Lee, S. T. Kang, and H. S. Shin, Sludge characteristics and their contribution to micro-filtration in submerged membrane bioreactors, *J. Membr. Sci.*, **216**, 217-227 (2003).
13. American Public Health Association, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th Ed., Washing D.C. (1998).
14. M. Mulder, Basic principles of membrane technology, Kluwer Academic Publishers, London (1996)
15. E. B. Muller, A. H. Stouthamer, H. W. van Verseveld, and D. H. Eikelboom, Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration, *Water Res.* **29**, 1179-1189 (1995).
16. C. W. Randall, J. L. Barnard, and H. D. Stensel, Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal, Technomic Publishing, Lancaster, Pennsylvania (1992).
17. T. Ueda, K. Hata, and Y. Kikuoka, Treatment of domestic sewage from rural settlements by a membrane bioreactor, *Water Sci. Technol.*, **34**, 189-19 (1996).