



침지형 MBR 공정의 공기 세정 최적화를 통한 효율적 막 오염 제어

Optimization of air scouring for an effective control of membrane fouling in submerged MBR

김준영·백병도·장인성*

Jun-Young Kim·Byung-Do Baek·In-Soung Chang*

호서대학교 환경공학과

Department of Environmental Engineering, Hoseo University

ABSTRACT

A membrane module including grid was designed and introduced to MBR (membrane bio-reactor) for the purpose of better control of membrane fouling. It could be anticipated that the grid enhances the shear force of fluid-air mixture into the membrane surface by even-distributing the fluid-air to the membrane module. As MLSS concentration, packing density which is expressed in the ratio of the housing and the cross-sectional area of membrane fibers (A_m/A_t) and air-flow rate were changed, membrane foulings were checked by monitoring fouling resistances. The total fouling resistance (R_c+R_f) without grid installation (i.e., control) was $2.13 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$, whereas it was reduced to $1.69 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ after the grid was installed. Regardless of the grid installation, the R_c+R_f increased as the packing density increased from 0.09 to 0.28, however, the increment of resistance for the grid installation was less than that of the control. Increase in the air flow rate did not always guarantee the reduction of fouling resistance, indicating that the higher air flow rate can partially de-flocculate the activated sludge flocs, which led to severer membrane fouling. Consequently, installation of grids inside the housing have brought a beneficial effect on membrane fouling and optimum air flow rate is important to keep the membrane lowering fouling.

Key words: coarse aeration, membrane fouling, packing density, grid, resistance

주제어: 조대폭기, 막 오염, 분리막 집적도, 저항

1. 서 론

하·폐수 처리장 유출수 수질기준은 강화되고 있으며, 처리된 2차 유출수의 재이용이 활성화되고 있는 추세이다. 이에 기술적으로 대응하기 위해서 MBR (membrane bio-reactor) 공정이 기존의 활성슬러지 공정을 대체해 나가고 있다 (Stehenson et al., 2000). 그러나 MBR 공정의 효율성을 저하하는 막 오염 (membrane

fouling) 문제를 해결하기 위해 다양한 노력이 시도되고 있으나 대부분의 막 오염 제어 방안이 막대한 에너지를 소모하는 문제점을 가지고 있어 이를 해결하는 것이 중요한 과제로 남아있다.

Meng (et. al. 2009)은 MBR의 막 오염을 감소시킬 수 있는 수리학적 환경을 정리하여 제안하였다. Gil et. al. (2010)은 이와 관련하여 MBR 공정에서 필연적으로 발생하는 막 오염을 제어하기 위해 시행되는 조대 폭기 (coarse aeration)에 소모되는 에너지를 산출한 결과, 전체 하수처리장에 소요되는 에너지의 약 30 ~

Received 1 June 2016, revised 31 July 2016, accepted 13 October 2016

*Corresponding author: In-Soung Chang (E-mail: cis@hoseo.edu)

pp. 620-634

pp. 635-643

pp. 645-652

pp. 653-662

pp. 663-671

pp. 673-682

pp. 683-690

pp. 691-698

pp. 699-705

pp. 707-714

pp. 715-723

pp. 725-736

pp. 737-744

pp. 745-753

pp. 755-764

40% 정도로 막대한 에너지가 소비되고 있음을 밝힌 바 있다. 따라서 MBR 공정에서 막 오염 제어를 위해 조대폭기에 사용되는 에너지를 줄일 수 있는 방안이 절실히 요구되고 있다.

조대폭기의 목적은 분리막 표면에서 강한 난류를 형성하여 막 표면에 전단력 (shear force)을 가함으로써 입자상물질 (particulate matters)이 분리막 표면에 빠르게 퇴적하여 발생하는 가역적 (reversible) 막 오염을 억제하기 위한 것이다 (Lee et. al., 2001). 따라서 많은 연구자들이 전단력을 강화하기 위한 방법으로 공기의 공급방법 및 기포 형태, 그리고 유동특성 등의 수리학적 인자와 막 오염의 상관관계를 실험 및 모델링을 통해 보고하고 있다 (Menniti and Morgenroth, 2010; Nywening and Zhou 2009; Liu et. al., 2010; Delgado et. al., 2008). 그러나 침지형 MBR 공정에서 분리막 표면의 효율적인 공기 전달을 해석함에 있어서 이와 밀접한 상관관계에 있는 MLSS 농도 및 분리막 모듈 집적도 (packing density)와 같은 인자들을 포함시켜 해석되어야 함에도 불구하고, 기포만을 독립된 인자로 간주하여 막 오염과의 상관관계를 도출하였기 때문에 정확한 해석에 한계를 가지고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 침지형 MBR 공정의 분리막 표면에 공급되는 공기 유동을 최적화하기 위하여 다양한 MLSS 농도를 가지는 조건에서 공급되는 공기 유량과 분리막 모듈 집적도와 같은 수리학적 환경 변화가 막 오염에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

Table 1. Operating conditions of the SBR

Parameters	Unit	Values
F/M ratio	kgCOD/kgMLSS	0.15 - 0.28
HRT (hydraulic Retention Time)	day	2
SRT (sludge Retention Time)	day	16
Working volume	L	8
Air flow rate	L/min	1.5
Temperature	°C	20 ± 5

Table 2. Specification of the used membrane

Parameters	Unit	Characteristics
module type		Hollow fiber
material		PVDF, Polyvinylidene fluoride (hydrophilic)
pore size	µm	0.1
outer diameter	mm	2
filtration-mode		Out-in

2. 재료 및 실험방법

2.1 활성슬러지 배양

본 연구에 사용된 활성슬러지는 C시 환경 사업소의 포기조 혼합액을 채취한 후 실험실에서 연속회분식반응조 (Sequencing Batch Reactor)를 이용하여 정상상태에 도달할 때까지 합성폐수로 순응시킨 후 사용하였으며, 운전 조건을 Table 1에 나타내었다. MBR의 운영 MLSS은 비교적 높은 농도 (< 5 g/L)로 운영되지만 본 연구에서는 비교적 다양한 MLSS 농도 (3, 6 & 10g/L)를 얻기 위하여 순차적으로 F/M 비를 조절하여 각각의 반응조에 합성폐수를 공급하였다.

2.2 침지형 MBR의 특성 및 운전조건

막 여과 실험에 사용된 분리막은 중공사 (hollow fiber) 형태이며, 공칭공경 0.1 µm를 가지는 정밀여과막 (MF) 막으로 특성 및 사양을 Table 2에 나타내었다. 침지된 분리막 모듈 주변에 장방형 관이 도입된 MBR의 플럭스를 30 L/m²·h로 유지하면서, MLSS 농도 및 분리막 면적, 그리고 공기유량에 따른 각각의 막 오염 정도를 비교하기 위하여 총 3개의 MBR이 운전되었으며, 그 운전 조건을 Table 3에 나타내었다.

MBR 반응조에 공급되는 공기는 장방형 하우징의 내·외부로 분리되어 공급되었다. 즉, 하우징 하단의 노즐을 통해 내부로 공급되는 공기는 분리막 표면으로의 전단력 전달 목적과 활성슬러지의 원활한 유동을



Table 3. Operating condition of the submerged MBRs

Parameters	Unit	Characteristics
membrane area	m ²	0.034 / 0.068 / 0.1
MLSS concentration	mg/L	3 / 6 / 10
air flow rate inside the housing	L/min	1.5 / 2.7 / 4.5
air flow rate outside the housing	L/min	1.0
flux	L/m ² ·h	30

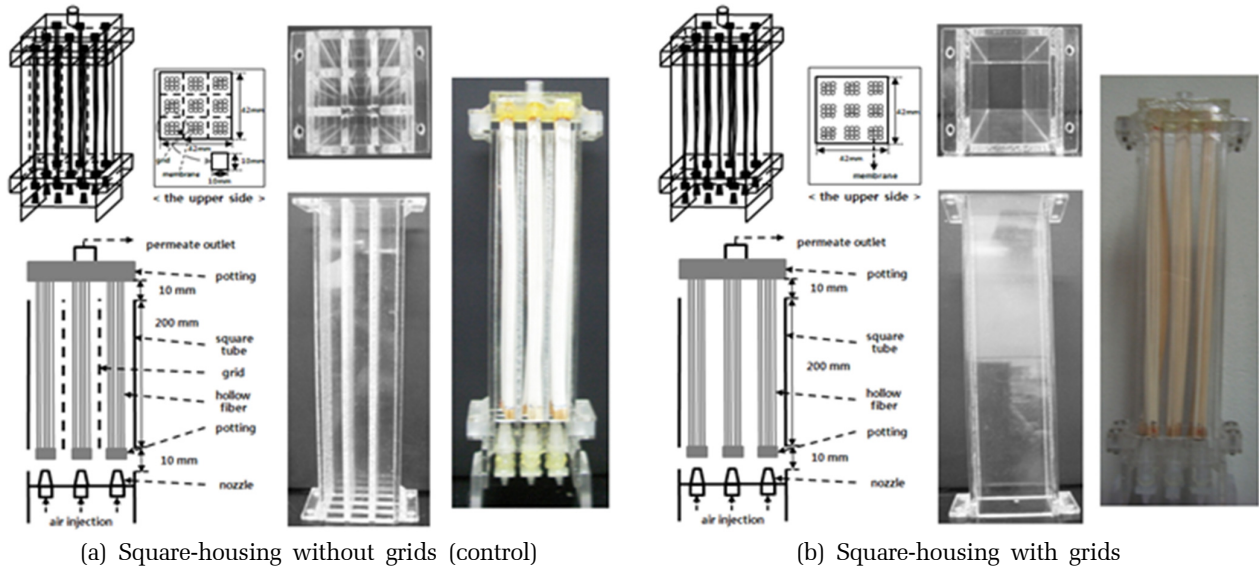


Fig. 1. Specification of the square-housing installed in the submerged MBR

위한 것이며, 하우스 외부로 공급되는 공기는 반응기 하단에 설치된 튜브형 산기관을 통해 활성슬러지에 산소 전달 및 혼합을 목적으로 하였다.

동시에 장방형 하우스 내부에 격자 (grid)의 설치 유/무를 통해 분리막 모듈 집적도에 따른 막 오염을 관찰하였다 (Fig. 1). 가로 및 세로 길이가 각각 42 mm, 높이는 200 mm로 제작된 장방형 하우스를 설치하였고, 그 내부에 수직으로 침지된 중공사형 분리막 모듈을 침지하였다 (Fig. 1a). 또한 가로 및 세로의 길이가 각각 10 mm인 총 9개의 격자를 하우스 내부에 설치하였다 (Fig. 1b). 각각의 격자 안에 중공사형 분리막을 수직으로 고정시켰다. 또한 분리막 모듈의 집적도에 따른 막 오염 정도를 비교 관찰하기 위하여 분리막 면적을 0.034, 0.068, 0.1 m²으로 각각 다르게 설치하였다.

2.3. 막 오염 정량화

장방형 하우스 내 격자 설치 유/무에 따른 MLSS 농도 및 공기 공급량 변화, 그리고 분리막 모듈 집적도에

따른 막 오염 정도를 정량화하기 위하여 TMP 변화를 측정할 수 있도록 하였다 (Fig. 2). 즉, 연동펌프를 이용하여 투과수를 생산할 때 발생하는 압력을 여과시간에 따라 디지털 압력게이지 (ZSE40F, SMC, Co., Japan)로 측정한 후, TMP 측정 프로그램이 내장되어 있는 컴퓨터로 전송하여 막 오염을 정량화하기 위한 데이터로 사용하였다.

측정된 TMP 자료는 다음과 같은 직렬여과저항모델 (Resistance-in-series model) 식에 대입하여 각각의 저항값 (resistance)을 계산하여 막 오염 정도를 정량화하였다.

$$J = \frac{TMP}{\mu(R_m + R_c + R_f)} \quad (1)$$

J = Flux, μ = viscosity of permeate, R_m = intrinsic membrane resistance, R_c = cake layer resistance, R_f = internal pore fouling resistance

막 자체 저항 (R_m)값은 활성슬러지를 여과하기 전에 순수를 여과하면서 측정된 TMP 값을 이용하여 계산

pp. 623-634
pp. 635-643
pp. 645-652
pp. 653-662
pp. 663-671
pp. 673-682
pp. 683-690
pp. 691-698
pp. 699-705
pp. 707-714
pp. 715-723
pp. 725-736
pp. 737-744
pp. 745-753
pp. 755-764

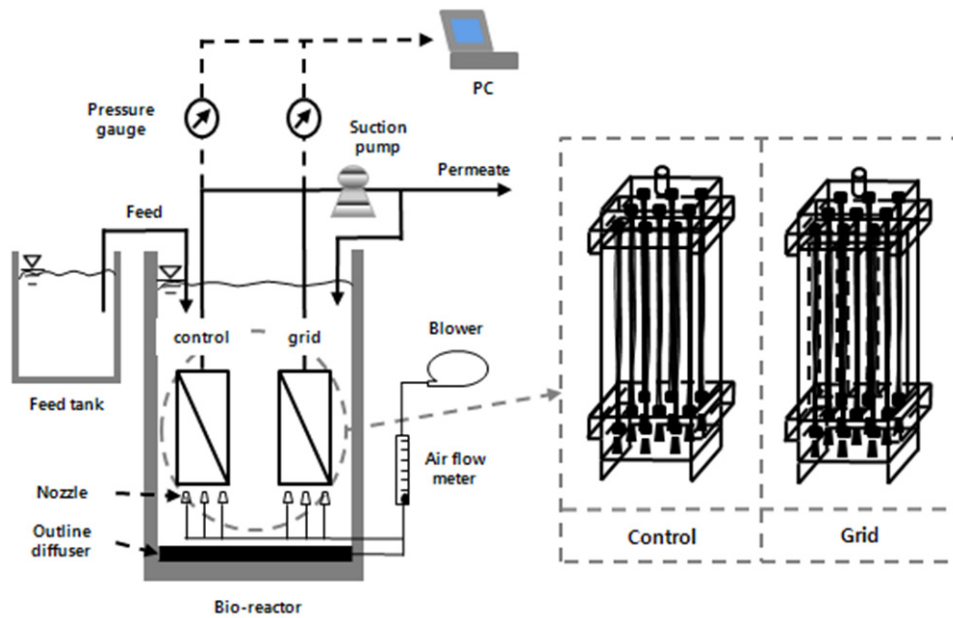


Fig. 2. Schematic of experimental setup of the submerged MBR equipped with rectangular membrane module housing with and without grids

하였다. 또한 케이크층에 의한 저항 (R_c)과 내부오염 저항 (R_f)을 별도로 정량하지 않는 대신에 총오염저항 (R_c+R_f)을 계산하였다. 총오염저항은 여과시간 경과에 따른 TMP 자료를 이용하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 MLSS 농도에 따른 막 오염

장방형 하우징 내 격자 설치 유·무에 따른 막 오염 정도를 비교하기 위해 서로 다른 농도를 가지는 활성슬러지 혼합액을 여과하였을 때 측정된 TMP 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 각 여과에 사용된 분리막의 면적은 0.1 m^2 로 동일하였으며, 장방형 하우징의 내·외부에 공급되는 공기 유량은 각각 4.5와 1.0 L/min로 동일하였다. 격자 설치 유·무와 관계없이 활성슬러지 농도, MLSS가 증가함에 따라 TMP가 증가하는 것으로 나타났지만, 격자가 설치된 경우에는 상대적으로 증가분이 낮은 것으로 관찰되었다. 이는 장방형 하우징 내부에 설치된 격자에 의해 공기 유동이 보다 효율적으로 분배됨으로써 분리막 표면에 공급되는 전단력이 증가한 것으로 판단된다(Nagaoka et. al., 2006). Table 4에 계산된 각각의 저항 값을 비교하였다.

막 자체 저항 (R_m)은 MLSS 농도나 그리드 설치 유무와 관계없이 일정한 범위의 저항값 ($1.42\text{--}1.57 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$)을 보이고 있어서 사용한 분리막간 저항의 편차는 크지 않음을 알 수 있다. MLSS 농도가 3 g/L인 경우 격자가 설치되지 않은 경우, 총오염저항 (R_c+R_f)은 $2.13 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 인 반면에, 격자가 설치된 경우에는 $1.69 \times 10^{12} \text{ m}^{-1}$ 로 격자설치가 막 오염 저감 효과가 있음을 시사하고 있다. 이러한 경향은 MLSS 농도가 6 g/L와 10 g/L로 증가한 경우에도 동일하게 관찰되었다. 다만 MLSS 농도가 증가할수록 격자를 설치하여 얻는 저항의 감소 효과가 적은 것으로 나타났다.

격자 설치가 막 오염 제어에 효과적인 이유는 하우징 내 불규칙적으로 확산되는 공기의 유동을 격자에 의해 분리막 표면으로 균일하게 향하게 함으로써 강한 전단력을 발생시켜 막 오염이 감소했기 때문인 것으로 판단된다. 다만 활성슬러지 농도가 높은 조건 하에서는 격자 설치에 의한 저항감소 효과가 상대적으로 적은 이유는 주어진 공기유량 조건 하에서 활성슬러지액을 충분히 유동시키기에 부족하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 장방형 하우징 내부에서 활성슬러지의 원활한 유동을 위한 공기유량 및 모듈 집적도와 막오염 저감 효과가 밀접한 상관관계가 있을 것으로 생각되어서 이를 실험하였으며 이후 논의될 것이다.

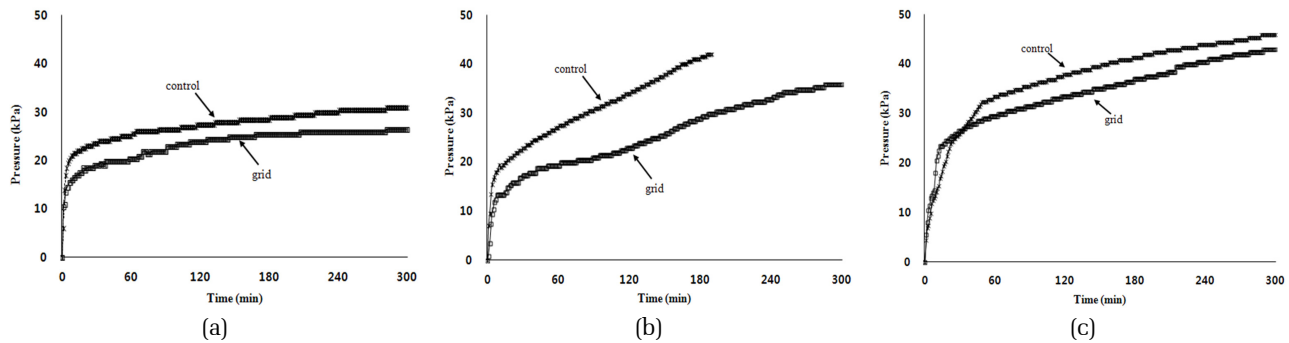


Fig. 3. TMP variation as a function of time under different MLSS concentration: (a) 3g/L (b) 6g/L (c) 10g/L

Table 4. Calculated resistances under different MLSS concentration

MLSS concentration	Resistance ($10^{12} \times m^{-1}$)					
	control (without grids)			grids		
	R_m	$R_c + R_f$	RS	R_m	$R_c + R_f$	R_t
3 g/L	1.52	2.13	3.65	1.42	1.69	3.11
6 g/L	1.53	3.41	4.94	1.44	2.09	3.53
10 g/L	1.51	3.91	5.42	1.57	3.49	5.06

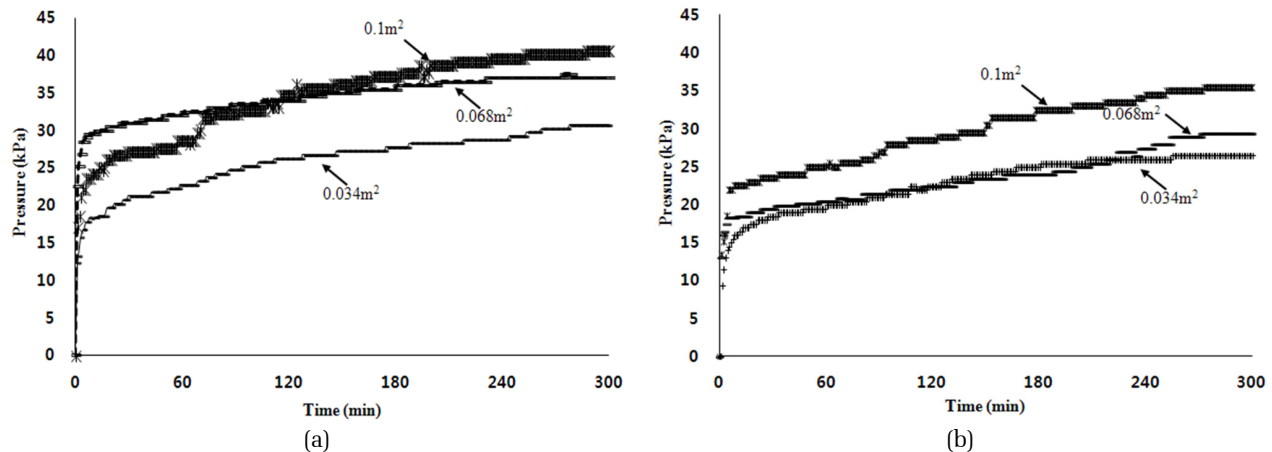


Fig. 4. TMP variation over filtration time as a function of packing density: (a) without grid (control), (b) with grid

3.2 분리막 모듈 집적도가 막 오염에 미치는 영향

장방형 하우징의 격자 내부에 침지된 분리막의 집적도 (packing density)는 공급되는 공기 유동에 의해 발생하는 전단력과 밀접한 상관관계가 있는 인자이다. 본 연구에서는 분리막 모듈의 집적도를 관 내부에 침지된 막의 단면적 (A_m)과 장방형 하우징의 단면적 (A_t)의 비율 (A_m/A_t)로 표현하였다. 즉 0.034, 0.068, 그리고 0.1 m^2 의 면적을 가지는 각각의 중공사형 분리막 모듈을 하우징 내부에 침지시켰으며, 이는 각각 0.09, 0.19, 그리고 0.28의 A_m/A_t 비로 계산되었다. 이 때 실

험조건은 MLSS 농도는 8 g/L, 공기유량은 4.5 L/min 이었으며 플럭스는 30 $L/m^2 \cdot h$ 이었다. Fig. 4는 여과시간에 따른 TMP 변화를 나타낸 것이다.

이전 결과와 마찬가지로 격자가 설치되지 않은 장방형 하우징 (control)에서의 TMP 증가가 격자가 설치된 것보다 높은 경향을 나타내었다. 또한 격자 설치 유·무에 관계없이 분리막 집적도 (A_m/A_t)가 증가함에 따라 TMP는 증가하였다. 이상의 TMP 자료를 이용하여 계산되어진 저항 값들을 Table 5에 정리하여 나타내었다.

pp. 623-634
pp. 635-643
pp. 645-652
pp. 653-662
pp. 663-671
pp. 673-682
pp. 683-690
pp. 691-698
pp. 699-705
pp. 707-714
pp. 715-723
pp. 725-736
pp. 737-744
pp. 745-753
pp. 755-764

Table 5. Comparison of resistance values under different packing density (A_m/A_t)

packing density (A_m/A_t)	Resistance value ($10^{12} \times m^{-1}$)					
	control			grid		
	R_m	R_c+R_f	R_t	R_m	R_c+R_f	R_t
0.09	1.49	2.12	3.61	1.45	1.67	3.12
0.19	1.56	2.79	4.35	1.50	1.97	3.47
0.28	1.86	2.93	4.79	1.67	2.51	4.18

Table 6. Comparison of resistances calculated under different MLSS and air flow rate.

MLSS (g/L)		Total fouling resistances (R_c+R_f), $10^{12} m^{-1}$		
		air flow rate (L/min)		
		1.50	2.70	4.50
3	no grid	2.42	2.00	2.13
	grid	1.91	1.85	1.69
6	no grid	4.27	2.51	3.41
	grid	3.45	2.48	2.80
10	no grid	4.70	2.79	3.91
	grid	3.85	2.57	3.49

격자 설치 유·무에 관계없이 집적도가 0.09에서 0.28로 증가할수록 총오염저항, (R_c+R_f) 값은 증가함을 알 수 있다. 또한 격자가 설치된 경우의 총오염저항이 격자가 설치하지 않은 경우보다 적음을 알 수 있다. 즉, 분리막 집적도의 증가는 분리막 모듈간의 혹은 격자와의 좁은 공간으로 인해 심각한 슬러지 퇴적 현상을 유발함으로써 막 오염이 증가한 것 (Shin et. al., 2008)으로 판단된다.

3.3 하우징 내 공기 유량에 따른 막 오염에 미치는 영향

서로 다른 MLSS 농도 (3, 6, & 10 g/L)를 갖는 반응조에 분리막 모듈을 침지시킨 후, 공기유량을 각각 1.5와 2.7, 4.5 L/min으로 증가시키면서 막 오염 정도를 관찰하였다. 이 때 플럭스는 $30 L/m^2 \cdot h$ 로 운전하였으며, 침지된 분리막 모듈 집적도는 0.28로 고정하였다. 각각의 MLSS 농도와 공기유량 하에서 계산된 총오염저항 (R_c+R_f) 값을 Table 6에 정리하였다.

공기유량이 증가하면 총오염저항 (R_c+R_f)값은 감소할 것으로 예상되었으나, 공기유량 2.7 L/min 이상이 되면 오히려 총오염저항 (R_c+R_f)값이 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 MBR 공정에서 공기유량의 증가가 활성슬러지 플록의 해체 (floc breakage) 현상을 유도하여 활성슬러지 플록의 입자 크기가 작아진 것에 기인하는 것으로 판단된다. 고전적인 여과이론에서 입자

크기가 작아지면 여과 저항이 증가하는 것은 잘 알려져 있는 사실이다. 또한 플록 해체에 의해 플록 내부의 세포와 고분자 물질 (EPSs, Extra-Cellular Polymeric Substances)가 유출되어 막 오염이 증가되었을 가능성 (Ji and Zhou, 2006)도 배제할 수 없다. 한편 격자가 설치된 조건에서는 그렇지 않은 조건보다 플록 해체에 의한 총오염저항 증가폭이 크지 않았다. 앞에서 논의한 바와 마찬가지로, MLSS 농도 증가는 총오염저항 값의 증가를 유도하였다.

Fig. 5는 서로 다른 공기 유량 조건에서 분리막 자체의 저항 (R_m)에 의한 영향을 배제하기 위하여 각각의 반응조에서 측정된 데이터를 바탕으로 R/R_m , 즉, (R_c+R_f)/ R_m 비로 변환하여 나타낸 것이다. 격자가 설치되지 않은 경우 (a) 2.7 L/min의 공기 유량 조건에서 MLSS 농도가 크게 증가하였음에도 불구하고 저항비 (R_f/R_m)의 차이가 크지 않았다. 4.5 L/min의 공기 유량 조건에서 저항비 (R_f/R_m)가 감소되어야 하지만, 앞에서 설명한대로 플록 해체 현상에 의한 막 오염 증가로 인해 오히려 증가하였다. 따라서 과도한 공기공급은 불필요한 에너지 소비일 뿐 아니라 오히려 막 오염 감소에 부정적인 영향을 미치고 있음을 시사하고 있다. 이는 막 오염 감소를 위한 최적 공기 유량비가 존재함을 의미한다. 앞 절에서 설명한 바와 마찬가지로, 격자가 설치된 경우 (b)에는 설치하지 않은 경우에 비하여 상대적으로 낮은 저항비 (R_t/R_m)를 나타내었다.

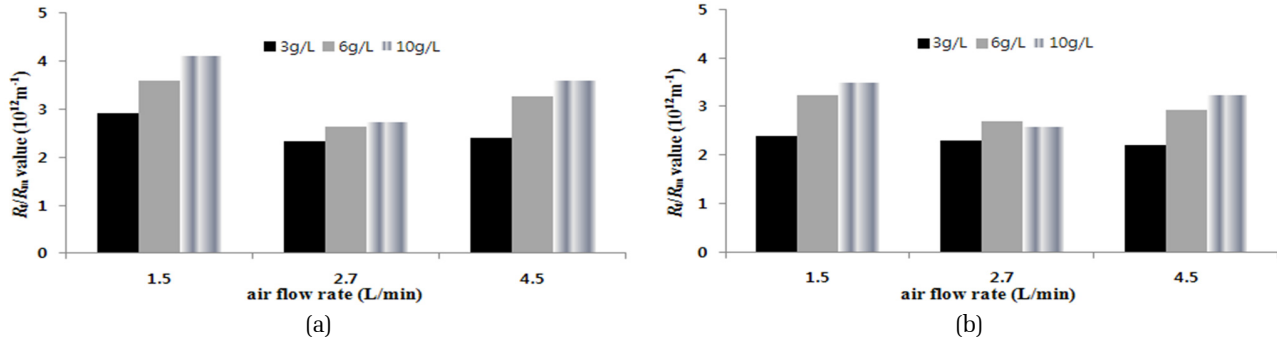


Fig. 5. Comparison of R_f/R_m ratio under different air flow rate: (a) without grid (control), (b) with grid

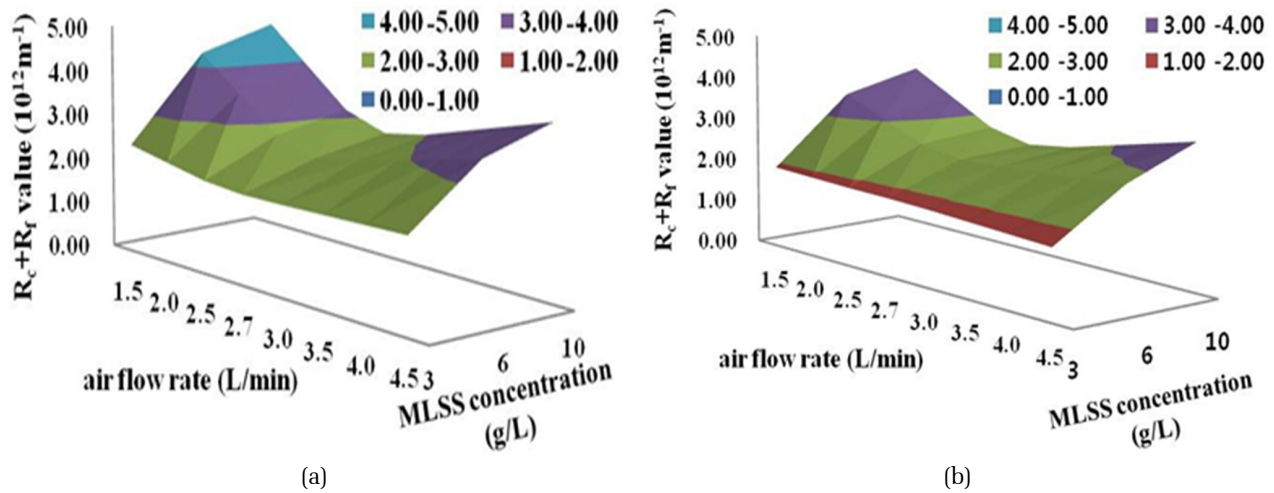


Fig. 6. Comparison of R_c+R_f under different MLSS concentration and air flow rate: (a) without grid (control), (b) with grid

또한 격자가 설치된 경우에서도 2.7 L/min의 공기 유량 조건에서 가장 낮은 저항비 (R_f/R_m)를 보이고 있다.

이상의 실험 결과를 요약하여 총여과저항값에 직접적인 영향을 미치는 중요한 두 가지 인자인 MLSS 농도와 공기유량과의 관계를 Fig. 6에 제시하였다. 즉 침지형 MBR 공정의 운전에서 막 오염 제어를 위해 공급하는 공기의 유량과 MLSS 농도가 총 오염 저항에 미치는 총괄적인 영향을 보여주고 있다.

장방형 하우징 및 격자의 설치로 인해 막 표면으로 이동하는 기포의 형태가 slug (또는 plug) 흐름을 형성함으로써 막 표면의 오염물질을 효과적으로 제거하여 막 저항이 최소화될 수 있는 수리학적 환경이 형성되었음을 유추할 수 있다 (Shin et. al., 2008). 이러한 slug 흐름의 유지는 평판형 및 관형 분리막 모듈에서 발생하는 막 오염을 방지하는데 매우 효과적인 것으로 보고되고 있다 (Lu et.al., 2008; Cui et. al., 2003). 따

라서 본 연구에서 시도된 장방형 하우징이 이런 흐름을 유도하는데 효과적으로 설계 제작되었음을 시사하고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 침지형 MBR 공정의 분리막 표면의 전단력을 강화하기 위해 분리막 모듈 주변에 장방형 하우징 및 그리드를 설치하여 막 오염 제어 효과를 관찰하였다. 동시에 막 오염에 영향을 미치는 인자인 MLSS 농도, 하우징 및 그리드 내 분리막 집적도 및 공기 유량을 변화시켜가며 이들의 상관관계를 비교 평가하여 다음과 같이 요약하였다.

1) 하우징 내부의 격자 설치 여부와 관계없이 MLSS 농도가 증가함에 따라 TMP가 증가하는 것으로 나타났다. 그러나 격자가 설치된 경우에는 상대적으

pp. 623-634
pp. 635-643
pp. 645-652
pp. 653-662
pp. 663-671
pp. 673-682
pp. 683-690
pp. 691-698
pp. 699-705
pp. 707-714
pp. 715-723
pp. 725-736
pp. 737-744
pp. 745-753
pp. 755-764

로 TMP가 적게 증가하였다. 이는 하우징 내부에 설치된 격자에 의해 공기 유동이 효율적으로 분배되어서 분리막 표면에 공급되는 전단력이 증가한 것으로 판단된다.

2) 하우징 내 격자의 설치 여부와 관계없이 집적도 (A_m/A_i)가 0.09에서 0.28로 증가할수록 총오염저항 (R_c+R_f) 값은 증가하였다. 그러나 격자가 설치된 경우의 총오염저항값이 격자가 설치되지 않은 경우보다 적었으며 이는 분리막과 격자와의 좁은 공간으로 인해 슬러지 퇴적 현상이 발생되었기 때문인 것으로 판단된다.

3) 공기유량이 증가하면 총오염저항 (R_c+R_f) 값은 감소할 것으로 예상되었으나, 공기유량 2.7 L/min 이상이 되면 오히려 증가하는 경향이 관찰되었다. 이는 MBR 공정에서 공기유량의 증가로 인해 활성슬러지 플록 해체 현상이 유도되어 입자크기가 작아진 것에 기인하는 것으로 추정된다.

4) 이상의 결과를 종합하면 막 오염 감소를 위해 수행하는 조대폭기에는 최적의 공급 유량이 존재하며, 과도한 공기 공급에 의해 불필요한 에너지 소비를 줄일 수 있는 여지가 있음을 시사하고 있다.

사 사

본 연구는 교육부의 재원으로 한국연구재단 기본연구(NRF-2010-0012295) 지원을 받아 수행된 연구결과임.

References

Cui, Z.F., Chang, S., Fane, A.G. (2003). The use of gas bubbling to enhance membrane process, *J. Membr. Sci.*, 221, 1-35.
 Delgado, S., Villarroel, R., Gonzalez, E. (2008). Effect of the shear intensity on fouling in submerged *membrane bioreactor for wastewater treatment*, *J. Membr. Sci.*, 311, 173-181.

Fangang, M., Chea, S. R., Drews, A., Kraume, M., Shin, H. S., Fenglin Y. (2009). Recent advances in membrane bioreactors (MBRs): Membrane fouling and membrane material, *Wat. Res.*, 43, 1489-1512.
 Gil, J.A., Tua, L., Rueda, A., Montano, B., Rodriguez, M., Prats, D. (2010). Monitoring and analysis of the energy cost of an MBR, *Desal.*, 250, 997-1001.
 Ji, L., Zhou, J. (2006). Influence of aeration on microbial polymers and membrane fouling in submerged membrane bioreactors, *J. Membr. Sci.*, 276, 168-177.
 Lee, J., Ahn, W.Y., Lee, C.H. (2001). Comparison of the filtration characteristics between attached and suspended growth microorganisms in submerged membrane bioreactor, *Wat. Res.*, 35, 2435-2445.
 Liu, L., Lu, Z. D., Ma, R. (2010). Modeling the bubbling enhanced microfiltration for submerged hollow fiber membrane module, *Desal.*, 256, 77-83.
 Lu, Y., Ding, Z., Liu, L., Wang, Z., Runyu Ma, R. (2008). The influence of bubble characteristics on the performance of submerged hollow fiber membrane module used in microfiltration, *Sep. & Puri. technol.*, 61, 89-95.
 Menniti, A., Morgenroth, E. (2010). The influence of aeration intensity on predation and EPS production in membrane bioreactors, *Wat. Res.*, 44, 2541-2553.
 Nagaoka, H., Kurosaka, M., Shibata, N., Kobayashi, M. (2006). Effect of bubble flow velocity on drag-force and shear stress working on submerged hollow fibre membrane. *Wat. Sci. Technol.* 54 (10), 185-192.
 Nywening, J.P., Zhou, H. (2009). Influence of filtration conditions on membrane fouling and scouring aeration effectiveness in submerged membrane bioreactors to treat municipal wastewater, *Wat. Res.*, 43, 3548-3558.
 Shin, D.H., Baek, B.D., and Chang, I.S. (2008). Control of Membrane Fouling in Submerged Membrane Bioreactor (MBR) using Air Scouring, *Kor. Soc. Environ. Eng.*, 30(9), 948-954.
 Stephenson, T., Judd, S., Jefferson. B., Brindle, K. (2000). *Membrane bioreactor for wastewater treatment*, Lightning Source Inc, IWA Publishing, London. pp.150.