Journal of Korean Society of Water and Wastewater
Vol.22. No1. pp. 87-92 Feb. 2008

주기적인 약품역세를 적용한 침지형 MBR 시스템의 운전성능에 관한 연구

Operational Performance of Submerged Membrane Bioreactor Combined with Periodic Chemical Backwash

김관엽*·이의종 ·송준섭·김지훈·김형수

Kim, Kwan Yeop* · Lee, Eui Jong · Song, June Sup · Kim, Ji Hoon · Kim, Hyung Soo

성균관대학교 건설환경시스템공학과

(2007년 12월 31일 접수 ; 2008년 1월 25일 채택)

Abstract

Purposes of this study were to evaluate operational performance of submerged membrane bioreactor (MBR) combined with periodic chemical backwash. Five lab-scale submerged MBRs were performed in accordance with NaOH dose, backwash solution volume. While filtration resistance of MBR system without backwash (Control) was increased persistently from startup, those of four MBR systems (RUN 1-4) with chemical backwash were maintained at $(1.4\pm0.16)\times10^{12}$, $(8.6\pm0.90)\times10^{11}$, $(1.9\pm0.10)\times10^{12}$, $(1.4\pm0.10)\times10^{12}$ l/m, respectively. Under chemical backwash condition of 0.0230 M, 375 mL, permeability of membrane was highest at flux of 30 L/m^2/hr. According to results from experiment that changing condition of dose and volume, it was estimated that effect of chemical dose acts more greatly than backwash solution volume. Because COD removal rates of all MBR systems with chemical backwash were more than 96%, it was proved that NaOH added to backwash solution did not affect microorganism.

Key words : chemical backwash, submerged MBR, filtration performance

주 제 어 : 약품역세, 침지형 MBR, 여과성능

1. 서 론

막결합형 활성슬러지 공정은 재래식 활성슬러지 공정에서의 침전조 대신에 분리막을 사용하여 고액분리 하므로 슬러지의 침강성의 영향을 받지 않게 되어 생물반응조 내의 활성슬러지 농도를 높게 유지할 수 있다. 이에 따라 수리학적 체류시간 (HRT) 및 잉여슬러지 발생량을 감소시킬 수 있으며 높은 미생물 농도로 인해 우수한 유출수 수질을 얻을 수 있어 그 적용성이 확대되고 있다. (Judd, 2006). 지속적으로 강화되는 수질기준과 대장균 등 유해세균들에 대한 규제는 기존 처리방법들의 비용상승을 초래해 MBR 공정은 경제성 측면에서 경쟁력이 더욱 높아지고 있는 추세이다. 또한 안정되고 깨끗한 처리수질, 유해세균제거 등 많은 장점들 역시 MBR 공정을 차세대 하폐수 처리공정으로 주목받게 하

*Corresponding author Tel : +82-31-290-7542, FAX: +82-31-290-7549, E-mail: yeops@skku.edu (Kim, K.Y.)

는 요인들이다. (Atkinson, 2006).

그러나 이러한 장점에도 불구하고 여과과정으로 인한 입자성 물질, 미생물 대사산물과 같은 유기물질 등에 의한 막오염 (membrane fouling)의 발생은 막여과 공정의 성능유지 및 장기운전성을 저해하는 제한요소가 되고 있다 (Pierre 등, 2006). 임계플럭스 (critical flux) 이하로 분리막을 운전하면 이러한 막오염 문제를 해소할 수 있지만 고농도 활성슬러지를 여과하는 MBR에서는 임계플럭스가 과도하게 낮아 많은 분리막이 필요하게 되고, 이는 막여과 공정의 경제성과 직결되므로 해결책이 될 수는 없다. 따라서 막여과의 결과로 필연적으로 수반되는 지속적인 막오염 증가 문제를 해결하기 위한 주기적인 물리/화학적 세정이 반드시 필요하다.

막여과 공정 중의 역세척은 분리막 공경과 유사한 크기의 입자가 분리막의 세공을 막아서 발생되는 저항을 제거할 수 있다. 처리수를 이용한 역세척은 세공을 막고 있는 오염물질의 소위 "가역적" 성분을 제거함으로써 이러한 막오염 문제를 저감 시킬 수 있다. 그러나 미생물의 대사물질 (EPS) 등과 같은 용존유기물이 세공에 흡착되어 발생되는 여과저항까지 제거하는 것은 불가능하다. 따라서 막여과 공정에 있어서 주기적인 역세를 적용하더라도 물리적 세정의 비가역적인 여과저항은 여전히 존재하게 되어 전체적인 여과저항은 지속적으로 증가하게 된다. (Smith 등, 2006).

한 편, 화학세정에 관한 연구에서 Chang 등 (2002)은 완전히 막오염이 진행되어 한계차압 (또는 한계여과저항)에 도달한 분리막보다 부분적으로 오염이 진행된 분리막이 세정의 효율이나 경제성 면에서 유리하다고 하였다. 즉, 역세수에 약품을 첨가하여 운전단계 중 주기적으로 역세를 실시하면, 더욱 효율적으로 막오염 성분을 제어할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 가역적인 막오염 성분을 제어하기 위한 수역세와 비가역적인 성분을 제거할 수 있는 화학세정을 조합하여 이를 주기적인 역세 형태로 적용함으로써 MBR 시스템의 막오염 제어능을 평가하였다. 이를 위해 역세를 적용하지 않은 MBR 시스템과 가성소다를 첨가하여 약품역세를 실시한 시스템의 여과성능을 비교하였으며 고플럭스 운전성 및 역세시 주입되는 약품에 의한 미생물에 대한 영향을 검토함으로써 MBR 공정에서 주기적인 약품역세의 효율성을 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

실험에 사용한 분리막은 공칭공경 0.1 ㎛의 침지방식의 중공사형 정밀여과막으로 내화학성이 우수한 PVDF 재질의 분리막을 사용하였다. 본 실험의 원수는 합성폐수를 제조하여 사용하였으며 구성성분 및 수질은 Table 1과 같다.

Table 1. Synthetic wastewater

Component	Conc. (mg/L)	note
Glucose	350	250~350 mgCOD/L
$NH_4$2Cl	100	25~30mgN/L
$KHPO_4$	22	5~6.5 mgP/L
$NaHCO_3$	75	-
$FeCl_3-6H_2O$	0.75	-
KCl	4.4	-
$MgSO_4-7H_2O$	5.0	-
$CaCl_2-2H_2O$	10	-

Lab scale MBR 시스템의 개략도는 Fig. 1과 같다. MBR 공정은 유효용적 9 L의 무산소조와 유효용적 15 L로 분리막이 침지된 호기조를 기본으로 구성하였다. 무산소조에 설치된 수위센서와 연동펌프 (Peristaltic pump, Cole-Parmer, USA)를 연결하여 여과 진행에 의한 수위변동에 따라 주기적으로 원수가 공급되도록 하였다. 호기조에 침지된 분리막의 여과는 흡입펌프 (Peristaltic pump, Cole-Parmer, USA)를 타이머가 부착된 제어반에 연결하여 일정시간 여과와 휴지를 반복하였다. 블로어를 이용하여 휴지시간 없이 연속적으로 폭기하여 분리막 표면의 케익층 부착을 제어하였다. 폭기는 분리막 여과저항 제어와 호기조 내 활성슬러지 순환 및 교반의 2 종류로 구분하여 라인을 구성하였다. 생물학적 질소제거를 위해 호기조에서 무산소조로 반송하였다. 약품조를 설치하여 역세시 사용되는 가성소다를 저장하였으며 분리막 역세척은 흡입펌프의 회전방향을 반대로 전환시켜 역세 약품을 주입하였다.

2.2 운전조건

본 공정의 운전인자와 운전조건을 Table 2에 정리하였다. 본 실험에서는 약품역세를 적용하지 않은 기존의 방식으로 운전한 MBR 시스템을 대조군 (Control)으로 하였으며 약품역세의 조건에 따라 RUN 1~4로 구분하여 30~40 L/㎡

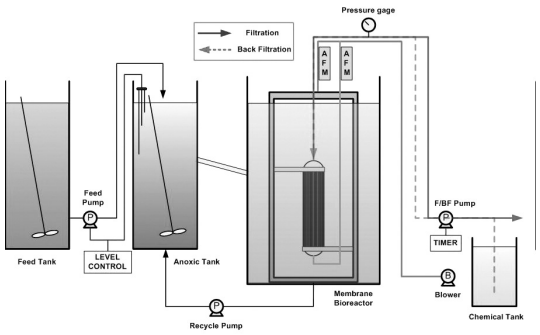

Fig. 1. Schematic diagram of lab scale submerged MBR system.

상하수도학회지, 논문
22권 1호, pp. 87-92, 2월. 2008

Table 2. Operational parameters and condition of the lab scale MBR

Parameter	Unit	Control	RUN 1, 2	RUN 3, 4
$Flux_{ave.}$	L/㎡/hr	30	30	40
$Flux_{rapid}$	L/㎡/hr	37.5	37.5	50
Operation mode	-	8 min suction / 2 min idle		
HRT_{oxic}	hr	3	3	2.25
HRT_{anoxic}	hr	5	5	3.75
Recycle ratio	-	2Q		
Aeration rate	L/min	15 for membrane / 5 for mixing		
DO	mg/L	2.0~3.5		
pH	-	6.4~7.2	6.6~8.0	6.3~8.4
Temperature	℃	25.9~29.1	23.2~30.1	16.3~25.8
Volumetric loading rate	gCOD/L/day	0.9	0.9	1.2

Table 3. Backwash condition

Parameter	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
Mode	2~3 min backwash + 60 min fixation			
Frequency	1 time / day			
Chemical	Sodium Hydroxide (NaOH)			
Molarity	0.0115 M	0.0230 M	0.0230 M	0.0460 M
Volume	750 mL	375 mL	375 mL	375 mL

/hr의 고플럭스에서 안정적인 운전가능성을 판단하였다. RUN 1은 운전시작 후 3일간은 대조군과 같이 약품역세를 적용하지 않다가 4일째부터 약품역세를 적용하였다.

Table 3은 고플럭스 유지를 위한 주기적인 역세 조건을 각 실험단계별로 정리한 것이다. RUN 1과 RUN 2에서는 같은 운전조건 하에서 가성소다의 주입총량은 0.345 g으로 동일하게 하고, 역세수의 가성소다 농도와 역세수량을 변화시키면서 분리막의 막오염 회복성능을 비교하였다. RUN 3, 4에서는 RUN 1, 2와 역세 주기는 동일하게 유지한 상태에서 투과플럭스를 40 L/㎡/hr로 증가시키고, 가성소다의 농도를 변화시킨 상태에서 여과성능의 안정성을 파악하였다.

모든 실험에서 역세는 약 23시간 운전 후, 2~3분에 걸쳐 역세용액을 여과 반대방향으로 주입하여 물리적으로 분리막을 세정한 후, 약 1시간 동안 화학적으로 세정하는 것을 기본적인 운전주기로 설정하였다. 실험이 시작된 이후 추가적인 미생물의 접종은 없었으며 MLSS 측정을 위한 시료채취 이외에 슬러지의 인발은 없었다. 분석을 위한 시료량도 하루에 10 mL로 전체 생물반응조 용량의 0.04% 정도의 미미한 수준으로 슬러지 완전체류 조건을 유지하였다.

2.3 분석방법

MLSS 및 MLVSS 농도는 주기적으로 공정시험법에 따라 측정하였고, 반응조 내의 DO 및 pH는 HORIBA社 의 D-25 pH/DO Meter를 사용하여 주 1회 정도 측정하였다. 유입수 및 처리수의 COD, T-N, T-P는 HACH社 Vial을 사용하여 주 1~2회 정도 측정하였으며 각 운전조건에서의 처리수 COD를 주기적으로 측정하여 약품역세 적용시 약품에 의한 미생물의 영향 여부를 파악하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 여과성능

Lab scale MBR 실험장치는 용적부하율 (Volumetric loading rate) 0.9 gCOD/L/day (Control, RUN 1, RUN 2), 1.2 gCOD/L/day (RUN 3, RUN 4)에서 약 80일간 운전되었다. 평균유량은 Control, RUN 1, RUN 2에서 3 L/hr (30 L/㎡/hr), RUN 3, RUN 4에서 4 L/hr (40 L/㎡/hr)로 설정하였다. Fig. 2는 30 L/㎡/hr의 동일한 투과플럭스에서 역세를 적용하지 않은 Control 시스템과 1일 1회의 주기적인 약품역세를 적용한 RUN 1와 RUN 2의 여과저항 변화를 보인 것이다.

Fig. 2에서와 같이 약품역세를 적용하지 않은 Control 시스템에서는 운전시작 초기부터 여과저항이 지속적으로 증가하기 시작하여 운전 23일째에는 4.45×10^{12} 1/m이 이르렀다. 이후 화학세정을 통해 초기 상태로 회복시킨 후 운전을 재개하였을 때에는 약 21일 만에 5.07×10^{12} 1/m까지 증가하였다. 이에 반해 0.0115 M 농도의 가성소다 용액 750 mL로 1일 1회 역세를 실시한 RUN 1의 경우에는 운전 초기 6일째까지는 여과저항이 점진적으로 증가하였지만 이후 안정되어 22일째까지 $(1.4\pm0.16)\times10^{12}$ 1/m 정도의 값으로 유지되었다. RUN 1 운전 종료 후 역세조건을 변경하여 가성소다 0.0223 M, 375 mL의 역세조건으로 운전한 RUN 2에

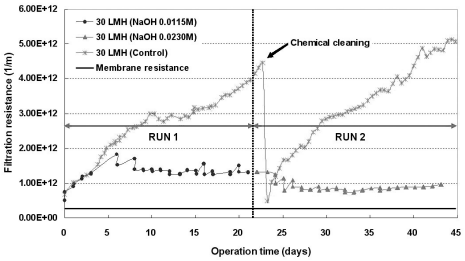

Fig. 2. Filtration resistance variations during experimental periods of Control, RUN1, RUN 2.

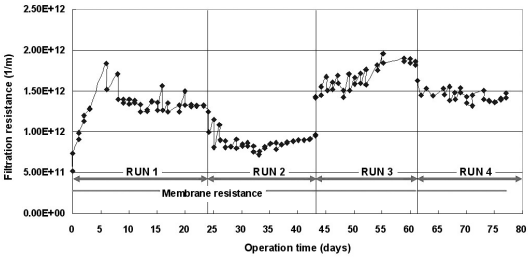

Fig. 3. Filtration resistance during each experimental periods of RUN 1-4.

서는 여과저항이 감소하여 $(8.6\pm0.90)\times10^{11}$ 1/m에서 안정적으로 운전되는 것을 확인하였다. 약품역세를 적용함으로써 MBR 공정에서 분리막의 여과저항을 효과적으로 제어할 수 있으며 본 실험의 운전기간 중 각 운전조건 종료 시점에서의 여과저항을 비교하였을 때, Control 시스템에 비해 RUN 1은 약 3.2배, RUN 2는 약 5.2배 낮은 여과저항에서 운전할 수 있는 것으로 나타났다.

Fig. 3은 역세조건을 변경하면서 MBR 시스템을 운전하였을 때, 시간에 따른 여과저항의 변화를 보인 결과이다. 앞선 결과에서와 같이 RUN 1과 RUN 2는 각각 $(1.4\pm0.16)\times10^{12}$, $(8.6\pm0.90)\times10^{11}$ 1/m에서 안정되었는데, 가성소다의 주입 총량이 동일하였을 때, 역세 수량은 적지만 가성소다 농도를 높여서 운전한 RUN 2의 경우의 여과저항이 약 1.6배 정도 낮은 것을 확인 할 수 있었다. RUN 3과 RUN 4는 평균플럭스를 40 L/㎡/hr로 운전한 경우로, RUN 4의 경우 역세주기에는 변동 없이 가성소다의 농도를 RUN 3보다 2배 높게 역세 하여 운전하였으며 이 때 역세수량은 동일하게 하였다. RUN 3은 투과플럭스 상승에 따라 여과저항이 증가하였으며 $(1.9\pm0.10)\times10^{12}$ 1/m의 여과저항을 나타내었다. RUN 4에서는 역세용액 농도의 증가에 따라 여과저항이 감소하여 $(1.4\pm0.10)\times10^{12}$ 1/m에서 안정적으로 운전되는 것을 확인하였다. 이 경우도 RUN 1, RUN 2의 결과와 유사하게 가성소다의 농도가 높은 RUN 4에서의 여과저항이 1.3배가량 낮았다. 즉, 가성소다를 이용한 주기적인 역세에서는 역세 수량보다는 가성소다의 농도가 분리막 성능의 유지 면에서 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다.

Table 4는 각 운전조건에서 시스템의 운전이 안정적으로 유지될 때의 투과능 (Permeability, L/㎡/hr/bar)의 최대, 최소, 평균값을 정리한 것이다. 평균 투과능으로 비교하였을 때, RUN 1과 RUN 2는 역세시 사용되는 가성소다는 0.345 g로 동일하였지만, 역세 수량을 감소시키는 대신 농도를 높게 함으로써 약 1.6배의 여과성능 향상 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났다. 또한, RUN 4와 RUN 3을 비교하였을 때, 역세수량은 375 mL로 동일한 상태에서 가성소다의 농도는 2배로 증가시켜 가성소다의 사용량을 0.690 g로 증가시켰지만 투과능에 있어서는 약 1.2배 정도만 향상되었다. RUN 1, RUN 2의 결과에 비해 여과성능 향상률이 낮은데, 이는 투과플럭스의 차이에 기인하는 것으로 RUN 2와 RUN 3을 비교하였을 때도 유사한 결과를 보였다. RUN 2와 RUN 3은 역세 조건은 동일한 상태에서 투과플럭스를 다르게 운전한 경우이다. RUN 3이 RUN 2에 비해 플럭스는 30에서 40 L/㎡/hr로 1.3배 증가하였지만 같은 역세 조건 하에서 투과능은 1.6배 낮은 결과를 보였다. 결국 적용된 역세 조건이 40 L/㎡/hr에서는 그 효과가 충분히 발현되지 못했기 때문인 것으로 판단된다. RUN 3에서 가성소다 용액 농도를 2배로 증가시켜 운전한 RUN 4의 경우에는 평균 투과능의 증가는 1.2배에 불과하였다. 따라서 40 L/㎡/hr로 운전하는 경우에는 더 적절한 가성소다 농도 및 역세 수량 조건을 도출할 필요가 있을 것으로 생각된다.

결과적으로 RUN 2의 경우가 투과능 면에서 가장 높은 값을 보였으므로 본 실험에 적용된 조건에서는 RUN 2의 경우가 분리막 운전성능 면에서 가장 효율이 높은 것으로 판단된다.

Table 4. Max., min. and average permeability during experimental periods of RUN 1-4.

		RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
NaOH dose (g/day)		0.345	0.345	0.345	0.690
Solution volume (mL)		750	375	375	375
Molarity (M)		0.0115	0.0230	0.0230	0.0460
Permeability (LMH/bar)	Min.	255	413	272	343
	Max.	320	552	285	402
	Average	298	468	302	371

상하수도학회지, 논문
22권 1호, pp. 87-92, 2월. 2008

3.2 역세약품의 미생물에 대한 영향

분리막을 이용한 막여과 공정에서는 분리막의 여과성능 향상 또는 유지를 위해 처리수를 이용하여 주기적인 역세를 적용한다. 그러나 미생물을 이용하여 생물학적으로 유기물, 질소, 인 등을 제거하는 MBR 공정에서는 화학약품 주입시 미생물에 대한 영향이 우려되어 그 적용이 제한적인 것으로 생각된다. 본 연구에 적용된 약품역세의 경우 약품세정에 의해 분리막의 여과저항 향상 효과를 얻을 수 있는 것으로 나타났지만 미생물에 대해 악 영향을 미치게 되면 처리수질의 악화가 발생할 수 있으므로 본 실험에서는 이에 대해 유기물 제거능으로 그 여부를 파악하였다.

Fig. 4는 약품역세를 적용한 각 실험 조건에서의 원수, 처리수 내 유기물 농도의 변화를 나타낸 것이며 Table 5에는 각 실험 조건에서의 유기물 제거율의 최대, 최소, 평균 값을 정리하였다.

가성소다를 주입하여 약품역세를 실시한 각 운전조건에서 평균 유기물 제거율은 각각 97.7%, 97.3%, 97.2%, 96.6%로 높은 유기물 제거율을 나타냈으며 이를 통해 유기물 산화 미생물이 역세시 주입되는 가성소다에 의해 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

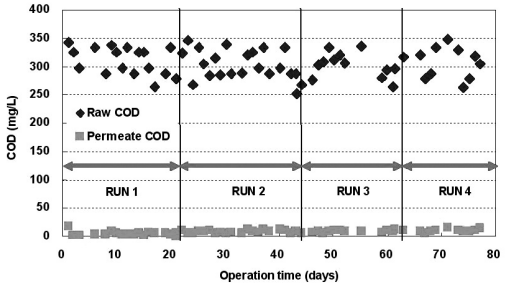

Fig. 4. Raw and permeate COD during experimental periods of RUN 1-4.

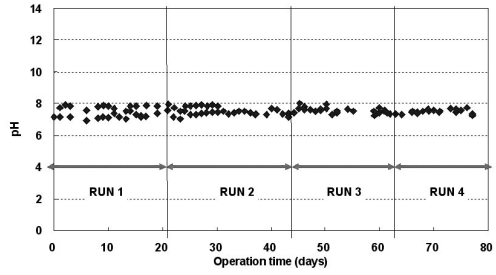

Fig. 5. pH variations in oxic tank during experimental periods of RUN 1-4.

Fig. 5는 각 실험 조건에서의 호기조 pH 변화를 나타낸 것으로서 약품역세 조건에 따른 차이를 보이지 않았으며 평균 7.5 정도를 유지하였다. pH 변화에서도 역세약품에 의한 영향은 없었던 것으로 나타났다.

4. 결 론

하 · 폐수 처리를 위한 Lab scale의 A/O MBR 공정을 구성하고 역세시 가성소다를 첨가하여 주기적으로 분리막을 역세하는 약품역세를 적용하여 분리막의 여과성능 및 역세약품의 미생물에 대한 영향으로 침지형 MBR 시스템의 운전성능을 평가하고자 한 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

운전기간 중 각 운전조건 종료 시점에서의 여과저항을 비교하였을 때, 30 L/m²/hr의 투과플럭스에서 수역세만을 적용한 MBR 시스템에 비해 0.345 g/day의 가성소다를 첨가하여 역세한 MBR 시스템이 3.2배 이상 여과저항이 제어될 수 있는 것으로 나타났다. 또한, Control 시스템의 여과저항은 지속적으로 증가하는데 반해 약품역세를 한 시스템은 여과저항이 일정하게 유지되는 것으로 보아 약품역세를 적용함으로써 분리막의 여과성능을 현저히 향상시킬 수 있을 것으로 생각된다.

역세수량 및 농도를 조건을 변경하면서 여과저항 제어의 효율성을 평가한 결과 역세용액의 용량보다는 농도의 효과가 더 크게 작용하는 것을 알 수 있었다. 또한, 각 역세조건 하에서의 평균 투과능을 비교한 결과 0.0230 M, 375 mL의 역세조건에서 투과플럭스 30 L/m²/hr로 운전한 시스템의 투과능이 가장 우수한 것으로 나타났으며 이를 통해 본 연구의 실험조건 중에서 가장 효율적인 역세조건인 것으로 판단된다.

역세시 가성소다를 주입하였지만 모든 역세조건에서 유기물 제거능이 안정적으로 높은 것으로 보아 본 연구에서 적용된 역세조건 하에서는 가성소다가 미생물에 악영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

주기적인 약품역세를 통해 침지형 MBR 공정을 30~40 L/m²/hr의 고플럭스에서 미생물에 악영향 없이 안정적이고 우수한 여과성능으로 운전할 수 있음을 알 수 있었으며 이를 바탕으로 향후 약품역세 조건의 최적화에 대한 연구가 진행

Table 5. pH variations in oxic tank during experimental periods of RUN 1-4.

	RUN 1	RUN 2	RUN 3	RUN 4
Max.	95.6%	95.6%	96.4%	95.4%
Min.	99.4%	98.3%	98.1%	97.8%
Average	97.7%	97.3%	97.2%	96.6%

되면 40 L/㎡/hr 이상의 고플럭스에서도 침지형 MBR의 안정적인 운전이 가능할 것으로 생각된다.

KSWW

참고문헌

1. 박철휘, 윤재곤 (2004) 침지형 분리막을 이용한 오수고도처리 공정의 막오염 원인물질 및 제어에 관한 연구, ***상하수도학회지***, **18**(5), pp.619-627.
2. 오현석, 홍석환, 장인성, 이우녕, 이정학 (2006) MBR공정에서 호기-무산소 조건에 따른 생물막 구조의 변화, ***대한상하수도학회-한국물환경학회 공동추계학술발표회 논문집***, pp.54-58.
3. Chaize, S., and Huyard, A., (1991) Membrane Bioreactor on Domestic Wastewater Treatment: Sludge Production and Modeling Approach, ***Water Sci. Technol.***, **23**, pp.1591-1600.
4. Chang, Y., Kramer, A.J. and Lubben, D.R. (2002) Effective Membrane Fouling Control: A New Membrane Cleaning Concept, ***Proceedings of Water Quality Technology Conference***, Seattle, WA.
5. Cheyan, M. and Mehala, M.A. (1986) ***Membrane Bioreactors***. p.676, Chemtech,.
6. Ishida, H., Yamada, Y., Tsuboi, M. and Matsumura, S. (1993) Submerged Membrane Activated Sludge Process (KSMASP) - Its Application into Activated Sludge Process with High Concentration of MLSS, ***Proceedings of the 2nd International Conference on Advances in Water and Effluent Treatment***, pp.321-330.
7. Judd, S. (2006) ***The MBR book: Principles and Applications*** *of Membrane Bioreactors in Water and Wastewater Treatment*, Elsevier.
8. Krauth, K. H. and Staab, K.F. (1994) Pressurized Biomembrane Reactor for Wastewater Treatment, ***Hydrotop***, **94**, pp.555-562.
9. Laera, G., Pollice, A., Saturno, D., Giordano, C. and Lopez, A. (2005) Zero net growth in a membrane bioreactor with complete sludge retention, ***Wat. Res.***, **39**, pp.5241-5249.
10. Liu, R., Huang, X., Xi, J., and Qian, Y. (2005) Microbial behaviour in a membrane bioreactor with complete sludge retention, ***Process Biochemistry***, **40**, pp.3165-3170.
11. Rosenberger, S., Kruger, U., Witzig, R., Manz, W., Szewzyk, U. and Kraume, M. (2002) Performance of a bioreactor with submerged membranes for aerobic treatment of municipal waste water, ***Wat. Res.***, **36**, pp.413-420.
12. Smith, P.J., Vigneswaran, S. and Huu, H.N. (2006) A new approach to backwash initiation in membrane systems, ***J. Membr. Sci.***, **278**, pp.381-389.
13. Visvanathan, C., Ben, A.R. and Parameshwaran, K. (2000) Membrane Separation Bioreactors for Wastewater Treatment, ***Environ. Sci. and Techol.***, **30**(1), pp.1-48.
14. Yang, W., Cicek, N. and Ilg, J. (2006) State-of-the-art of membrane bioreactors: worldwide research and commercial applications in North America, ***J. Membr. Sci.***, **270**(1-2), pp.201-211.
15. Yasui, H. and Shibata, M. (1994) An innovative approach to reduce excess sludge production in the activated sludge process., ***Wat. Sci. Techol.***, **30**(9), pp.11-20.
16. Yoon, S.H., Kim, H.S., and Hwang, S.J., (2001) Zero Sludge Discharge Using MBR-Ultrasound System, ***Journal of Korean Society of Environmental Engineers***, **23**(9), pp.1423-1429.