

침지형 MBR 공정에서 응집제가 여과성능에 미치는 영향

김 관 엽[†] · 김 지 훈 · 김 영 훈 · 김 형 수

성균관대학교 건설환경시스템공학과
(2006년 7월 3일 접수, 2006년 8월 10일 채택)

The Effect of Coagulant on Filtration Performance in Submerged MBR System

Kwan-Yeop Kim[†], Ji-Hoon Kim, Young-Hoon Kim, and Hyung-Soo Kim

Department of Civil, Architectural and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University
(Received July 3, 2006, Accepted August 10, 2006)

요 약: 본 연구에서는 침지형 MBR 공정에서 인제거를 위해 주입되는 응집제가 분리막의 여과성능에 미치는 영향을 알아보려고 하였고, 침지형 MBR에서 분리막 표면의 오염을 방지하기 위해 연속적으로 행하는 폭기가 응집 플록에 미치는 영향을 조사하고자 하였다. 이를 위해 MBR 공정의 폭기조 슬러지를 채취하여 jar-test를 실시한 결과와 비교하였다. 실험 결과는 플록 크기와 슬러지 탈수성의 지표로서 비여과저항(SRF, Specific Resistance of Filtration)을 측정하여 비교하였다. 응집제 주입량이 증가할수록 10 μm 이하의 플록의 비율이 저감되었으며 탈수성이 증가하였다. 그러나 jar-test 결과와 비교하였을 때, 폭기의 전단력에 의해 그 효과가 저감된 것을 알 수 있었다. 응집제를 주입한 경우 주입하지 않은 경우보다 운전지속시간이 연장되었다. 운전지속시간이 응집제 주입량에 비례하여 증가하지는 않았는데, 이는 연속적인 폭기의 전단력으로 인해 10 μm 이하의 입자가 충분히 저감되지 않았기 때문인 것으로 생각된다. 또한 응집제 주입량이 과도하면 오히려 여과저항을 증가시키는 결과를 초래하는 것을 알 수 있었다.

Abstract: The purpose of this study was to investigate effect of coagulation on filtration performance of membrane in submerged MBR system and influence of continuous aeration to reduce fouling of membrane surface on coagulated floc. For this purpose, aeration tank sludge of MBR system was compared with jar-test sludge. The experimental results were analysed in terms of floc size and SRF (Specific resistance of Filtration). The more alum was added, the more content of floc below 10 μm reduced and SRF decreased. But compared with jar-test results, it was found that effect of coagulation on MBR floc was reduced. Operation time of membrane in alum added MBR was longer than that in control MBR. But operation time was not proportional to alum dose. It was thought that the result was reason that floc below 10 μm was not reduced sufficiently by shear force of continuous aeration. Moreover it was founded that if alum is added more than proper dose, it brings filtration resistance to increase.

Keywords: MBR, coagulation, continuous aeration, floc size, SRF

1. 서 론

막결합형 생물반응기(MBR, Membrane Bioreactor) 공정은 최종 침전조를 분리막으로 대체함으로써 최종 단계에서의 완벽한 고액분리(solid/liquid separation)가 가능하고, 콤팩트 하며 생물학적 상태와 관계없이 처리수의 수질이 매우 양호하다[1]. 또한, SRT를 길게 유지하여 호기조 내에 미생물의 농도를 높게 유지할 수 있

는 장점이 있으나 슬러지 발생량이 적어 잉여슬러지 배출시 함께 제거되는 무기 영양물질인 인의 제거율이 낮다[2]. 따라서 근래에는 생물반응조에 응집제를 주입하여 미생물 대사산물과 수중에 용해된 인 성분을 불용성 고형물로 유도하여 이들 성분을 효과적으로 제어하는 방식이 적용되고 있다. 일반적인 활성슬러지 공정과 비교하여 막결합형 생물반응기 공정의 평균 슬러지 플록의 크기는 작은 것으로 보고되었다[3]. 가압식 MBR의 경우, 여과수의 10~20배 정도의 농축수 순환이 요구되

[†]주저자(e-mail : yeops@skku.edu)

고, 또한 순환펌프의 사용으로 미생물에 과다한 전단응력이 가해져 미생물 플록의 파괴를 유발하며 결과적으로 미생물 활성을 저하시킨다[4]. 그에 반해 분리막 모듈을 호기조에 직접 침지시켜 산기관을 통해 공급된 공기방울들이 미생물에 산소를 공급함과 동시에 상향류를 일으켜 분리막의 표면에 전단응력을 가함으로써 분리막의 오염을 방지하는 침지형 MBR에서는 순환펌프가 사용되지 않으므로 상대적으로 미생물 플록에 대한 전단력의 영향이 간과되고 있다. 그러나 침지형 MBR 공정에서는 막표면의 cake 형성을 방지하기 위해 분리막이 침지된 생물반응조에 연속적인 폭기를 행하는데 이로 인해 발생하는 전단력 때문에 활성슬러지의 성상이 달라질 것으로 예상된다.

탈수는 슬러지 층에 기계적인 힘을 가하여 입자와 물을 분리하는 것으로 슬러지의 탈수에 영향을 미치는 인자는 슬러지의 종류 또는 온도, 고형물 함량, 점도, 표면전하분포, 입도분포 등이 있으며 그 중에서도 입도분포와 탈수성의 관계는 많은 연구자들에 의해 검토되고 보고되었다[5]. Lawler 등은 미세입자의 감소에 따라 비저항값이 감소하여 탈수성이 개선된다고 하였다[6]. 응집제 주입을 통해 미세입자가 큰 입자로 전환되면 비저항값이 감소하여 탈수성이 증대될 것이다.

따라서, 본 연구에서는 연속적으로 폭기되는 MBR 공정에 응집제를 주입했을 때와 급속교반 및 완속교반을 실시하여 응집(coagulation) 및 플록형성(flocculation)된 슬러지의 입자크기 분포와 비여과저항을 비교하였다. 또한 연속공정으로서의 침지형 MBR 공정에 응집제를 주입하였을 때, 연속폭기가 응집 플록에 미치

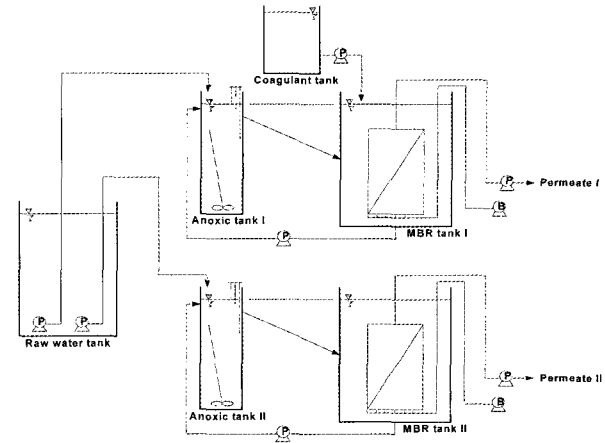


Fig. 1. Schematic diagram of MBR system.

는 영향과 응집이 분리막 여과저항에 미치는 영향을 연구하고자 하였다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

2.1. 실험 장치 및 방법

Fig. 1과 같이 Lab scale A/O (Anaerobic/Oxic) MBR 공정을 2조로 구성하여 투과플럭스 20 LMH (liters/m² · hr)로 운전하였으며 한 조에는 인 제거율의 향상을 위해 막이 침지된 호기조에 응집제를 유입원수수량 대비 11, 22, 44 ppm으로 변화시키면서 운전하였다. 다른 한 조에는 응집제를 주입하지 않은 상태에서 같은 조건으로 운전하였다. 유기물 및 질소·인 제거율이 안정되어 MBR 공정이 안정화 되었다고 판단되었을 때 각 조

Table 1. Synthetic wastewater and operation condition

Synthetic wastewater			Operation condition	
	Conc. (mg/L)	note	Membrane type	Plate
Glucose	125	COD 240~260 mg/L	Operation mode	8 min suction / 2 min idle
NH ₄ Cl	191	T-N 21~24 mg/L	Pore size	0.2 μm
KH ₂ PO ₄	21.95	T-P 5~6.5	Flux	20 LMH
NaHCO ₃	75	-	HRT aeration tank	7 hr
FeCl ₃ ·6H ₂ O	0.75	-	HRT of anoxic tank	2 hr
KCl	4.4	-	Recycle ratio	2Q
MgSO ₄ ·7H ₂ O	50	-	Limiting TMP*	-30 cmHg (-0.4 kgf/cm ²)
CaCl ₂ ·2H ₂ O	10	-	Aeration rate	20 LPM

* 제조사 권장값

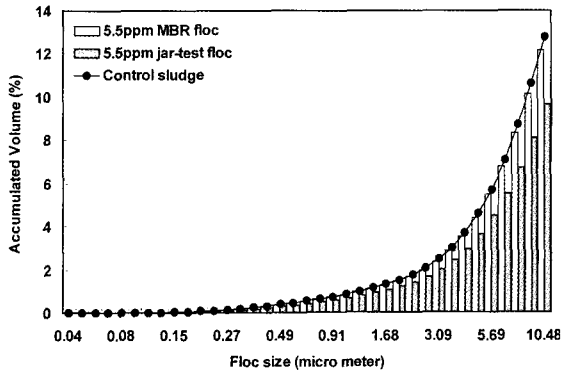


Fig. 2. Accumulated volume % of floc below 10.48 μm (alum dose 5.5 ppm).

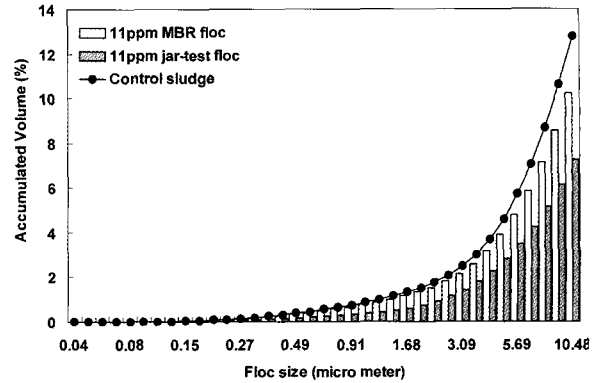


Fig. 3. Accumulated volume % of floc below 10.48 μm (alum dose 11 ppm).

의 호기조 슬러지를 채취하여 입자분포와 비여과저항을 측정하였다. 또한 응집제를 주입하지 않은 MBR 공정의 슬러지를 채취하여 jar-test를 실시하였으며 각 조건에서의 활성슬러지 입자크기 분포와 비여과저항을 측정하였다. MBR 공정의 원수는 합성원수를 조제하여 사용하였으며 사용한 분리막은 침지형 평막으로 원수 조건 및 운전조건은 Table 1과 같다.

Cho 등은 응집-정밀여과 공정에서 5 μm 이하의 입자의 감소가 분리막의 투과능을 향상시킨다고 보고하였다[7]. Judd 등도 응집-정밀여과 공정에서 2~5 μm 이하의 입자수가 감소할수록 비여과저항을 저감시킨다고 하였다[8]. 또한 슬러지의 탈수실험에서 입자의 크기가 10 μm 이하인 입자는 여과포의 기공을 막는 현상(여과포 눈막힘 현상)을 유발하여 탈수성을 저하시키는 경향이 있다고 보고되어 있다[9]. MBR 공정은 침전조를 분리막이 대체하므로 발생하는 잉여슬러지는 호기조 내 슬러지이다. 따라서 본 연구에서는 정밀여과 투과성능 뿐만 아니라 잉여슬러지의 탈수성까지 고려하여 10 μm 이하의 플록의 비율을 측정하였다.

2.2. Jar-test

응집제를 주입하는 MBR 공정의 호기조 슬러지를 채취하여 1 L의 비이커에 슬러지를 500 mL씩 채운 뒤, 각각 응집제를 5.5, 11, 22, 44 ppm 주입하여 250 rpm에서 급속교반 30초, 45 rpm에서 완속교반 1분으로 응집 및 플록형성을 시행하였다.

2.3. 응집제

응집제는 하수처리 공정에서 일반적으로 이용되는 11% 황산알루미늄(Alum, Aluminium sulfate 14~18H₂O)

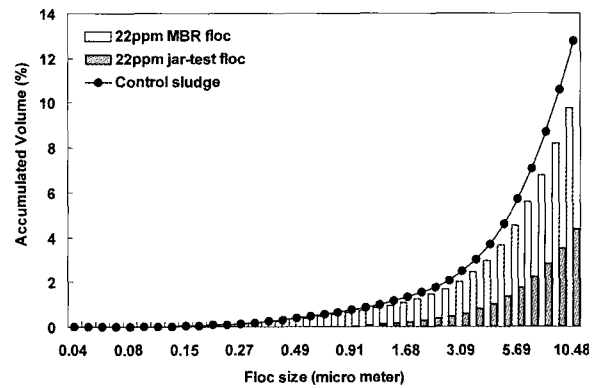


Fig. 4. Accumulated volume % of floc below 10.48 μm (alum dose 22 ppm).

을 사용하였다.

2.4. 측정장치 및 방법

활성슬러지 플록의 크기 분포는 Malvern Inc.의 MAM5020 Particle size analyzer를 이용하여 측정하였고, 측정 범위는 0.01~880 μm이다. 비여과저항은 Büchner funnel test 장치를 이용하였는데, 눈금이 표시된 실린더와 Büchner funnel 및 진공펌프로 구성되어 있다. 탈수시의 진공펌프의 압력은 약 26 inHg (0.9 kg/cm²)이었으며 사용된 여과지는 TOYO 2 (직경 70 mm), 탈수실험에 사용된 시료의 양은 50 mL로 하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. 플록크기 분포 및 탈수성

Fig. 2, 3, 4, 5는 각각 유입 원수 유량 기준으로 5.5, 11, 22, 44 ppm이 되도록 alum을 주입하였을 때, 10

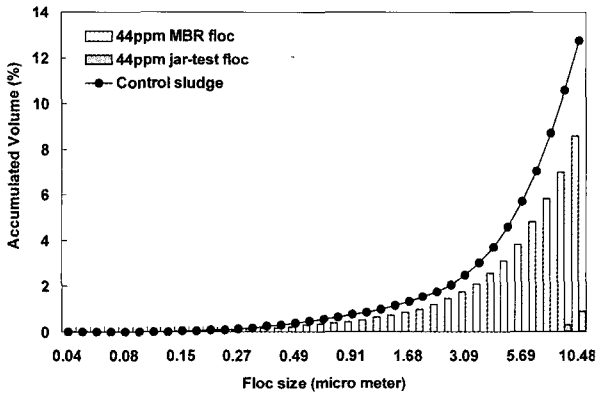


Fig. 5. Accumulated volume % of floc below 10.48 μm (alum dose 44 ppm).

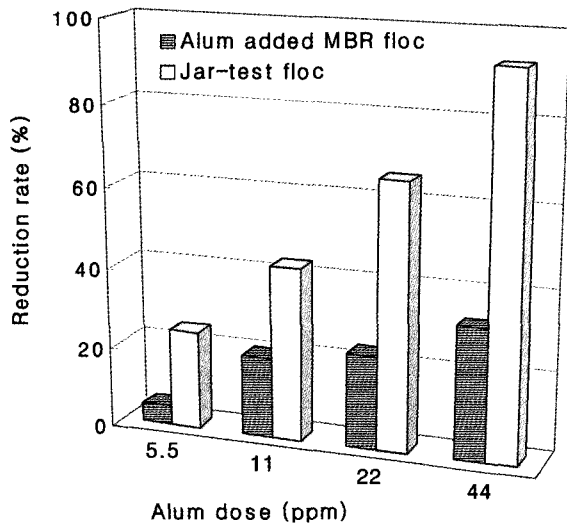


Fig. 6. Reduction rate of floc below 10 μm under various condition.

μm 이하 크기의 호기조 활성슬러지 입도분포와 jar-test 실험에서의 입도분포 결과이다. 응집제를 투입하지 않고 운전한 MBR에서 호기조 활성슬러지의 10 μm 이하 크기의 플록의 비율은 12.75%였다. 각각의 응집제 투입량에 따른 10 μm 이하의 MBR 플록과 jar-test 플록의 비율을 Table 2에 정리하였다. 같은 응집제 농도에서 MBR에서의 10 μm 이하 플록의 비율은 jar-test 슬러지보다 높았다. 이러한 차이는 응집제 투입량이 증가할수록 커지는데 Fig. 5에서 44 ppm 투입하여 jar-test를 실시하였을 때는 10 μm 이하의 입자가 전체의 약 1%비율까지 감소하는 결과를 보였다. 이에 반해 연속적으로 폭기를 행한 MBR의 경우에는 44 ppm까지 투입하여도 8.57%를 차지하였다. Fig. 6에서와 같이 MBR

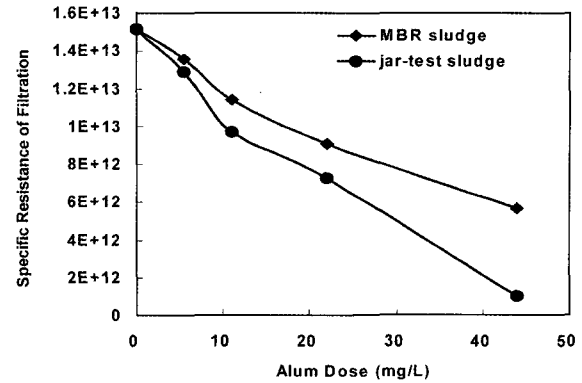


Fig. 7. Specific Resistance of sludge after batch test.

Table 2. % Content of floc below 10 μm at various conditions

alum dose [ppm]	control MBR	alum added MBR		Jar-test	
		% content	reduction rate [%]	% content	reduction rate [%]
5.5	12.75	12.14	4.8	9.65	24.3
11		10.2	20.0	7.27	43.0
22		9.78	23.3	4.37	65.7
44		8.57	32.8	0.9	92.9

공정에 응집제를 투입하였을 때, 10 μm 이하의 입자의 비율은 투입하지 않은 MBR에서보다 감소하였지만 응집과 플록형성을 통해 플록 크기가 증가한 jar-test 결과 보다는 낮은 감소율을 보였다. 이는 MBR에서는 막면의 오염 방지를 위해 연속적으로 공기를 공급하는데, 이 공기의 전단력 때문에 플록형성 조건이 형성되기 어렵기 때문인 것으로 생각된다.

Fig. 7에는 각각의 조건에서 측정된 비여과저항 값을 나타내었다. 응집제를 투입하지 않은 MBR 호기조 슬러지의 비여과저항 값은 평균 1.513×10^{13} cm/g이었다. alum을 5.5, 11, 22, 44 ppm 투입하였을 때, 연속폭기 MBR 조건에서의 비여과저항은 각각 1.358×10^{13} , 1.14×10^{13} , 9.066×10^{12} cm/g, 5.65×10^{12} cm/g이었다. jar-test 슬러지는 1.291×10^{13} , 9.674×10^{12} , 7.279×10^{12} cm/g, 1.03×10^{12} cm/g로 응집제 투입량이 증가할수록 두 조건 사이의 슬러지 탈수성의 차이가 증가하는 결과가 나타났다. 즉 입도 분포 결과에 기인하여 10 μm 이하의 입자 비율이 감소할수록 탈수성도 증가하는 것이 확인되었다.

3.2. 응집제 첨가 MBR 공정의 운전 성능

MBR 공정에서 응집제 투입 유무 및 투입농도에 따

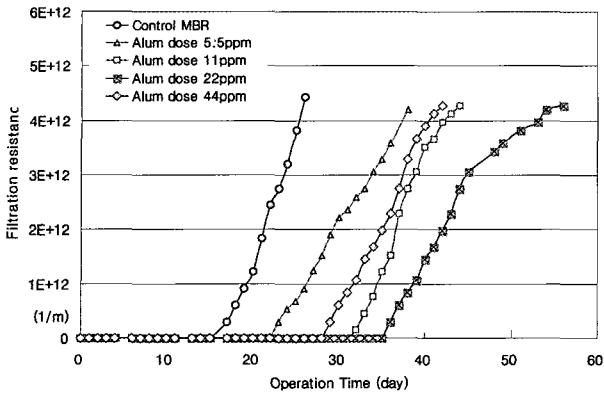


Fig. 8. Filtration resistance according to various alum dose.

른 운전성능을 알아보았다. Fig. 8은 응집제 주입 유무에 따른 여과저항의 변화이다. 응집제를 주입하지 않은 MBR에서는 17일째에 여과저항이 나타나기 시작하여 26일째에 한계저항에 도달하였다. 응집제 주입 MBR에서는 alum 농도 5.5, 11, 22 ppm에서 한계저항에 도달하는 운전기간은 각각 38, 44, 56일이었다. alum의 주입으로 운전지속시간이 각각 1.5, 1.7, 2.2배 연장됨을 알 수 있었다. 응집제의 주입으로 인해 MBR 공정의 운전지속시간이 연장되었지만 주입되는 응집제의 농도만큼 여과저항이 큰 감소를 보이지 않는 것은 분리막의 오염 방지를 위해 연속적으로 공급되는 공기의 전단력으로 인해 투과능에 영향을 미치는 플록(10 μm 이하)의 감소율이 크지 않았기 때문인 것으로 생각된다. alum을 44 ppm 주입한 MBR의 경우, 10 μm 입자의 비율이 11 및 22 ppm 주입시보다 저감되었음에도 불구하고, 여과저항이 빨리 나타나고 운전지속시간이 42일로 짧아진 것은 적정 수준 이상의 과도한 주입으로 alum 자체가 여과저항을 일으키는 막오염 물질로서 작용한 것으로 생각된다.

4. 결 론

응집제를 주입하는 침지형 MBR 공정에서 응집제 주입이 운전성능에 미치는 영향을 평가한 실험의 결론은 다음과 같다.

1) MBR 공정에서 5.5, 11, 22, 44 ppm의 alum을 주입한 경우, 막오염 및 슬러지 탈수성에 영향을 미치는 10 μm 이하의 입자 비율이 응집제를 주입하지 않은 경우에 비해 각각 4.8, 20, 23.3, 32.8% 감소하였다.

2) 침지형 MBR 공정에 응집제를 주입한 경우와 급속교반과 완속교반을 실시하여 입자크기를 증가시키는 jar-test의 플록 크기 분포를 비교하였을 때, 두 경우 모두 응집제 주입량이 증가할수록 10 μm 이하의 플록의 비율이 감소하였다. 그러나 침지형 MBR에서는 연속적인 폭기의 전단력으로 인해 jar-test를 행한 경우보다 3~5배 정도 감소율이 낮았다.

3) 응집에 의해 10 μm 이하의 플록 비율이 감소하는 경향과 유사하게 슬러지의 탈수성이 증가하는 경향을 보였다. 즉 10 μm 이하의 플록 비율이 감소할수록 시스템에서 배출되는 잉여슬러지의 탈수성이 향상되는 것을 확인하였다.

4) alum의 주입으로 5.5, 11, 22 ppm에서 운전지속시간이 각각 1.5, 1.7, 2.2배 연장되었다. 응집제 인 제거율의 증가를 위해 MBR 공정에 주입되는 응집제가 분리막의 여과저항을 감소시켜 운전지속시간을 연장시키는 것을 알 수 있었다. 그러나 응집제 농도에 비례하여 운전지속시간이 연장되지 않는 것은 10 μm 이하 입자의 감소율 또한 응집제 농도에 비례하지 않았기 때문인 것으로 사료된다.

5) alum 주입농도 44 ppm의 경우, 11 ppm보다 오히려 운전지속시간이 짧았는데, 이는 적정농도 이상으로 alum이 주입되었을 때 alum 자체가 분리막의 여과저항을 일으키는 막오염 물질로 작용하였기 때문인 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 환경부 “차세대핵심환경기술개발사업”의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. H. Buisson, P. Cote, M. Praderic, and H. Paillard, “The use of immersed membranes for upgrading wastewater treatment plants”, *Wat. Sci. Tech.*, **37**, 89 (1998).
2. W. Ghyyoot and W. Verstraete, “Reduced sludge production in a two-stage membrane-assisted bio-reactor”, *Wat. Res.*, **34**, 205 (1999).
3. B. Zhang, K. Yamamoto, S. Ohgaki, and N. Kamiko, “Floc size distribution and bacterial activities in

- membrane separation activated sludge process for small-scale wastewater treatment/reclamation”, *Wat. Sci. Tech.*, **35**, 37 (1997).
4. K. H. Choo and C. H. Lee, “Membrane fouling mechanisms in the membrane-coupled anaerobic bioreactor”, *Wat. Res.*, **30**, 1771 (1996).
 5. C. H. Lee and J. C. Liu, “Enhanced sludge dewatering by dual polyelectrolytes conditioning”, *Water Research*, **34**, 4430 (2000).
 6. D. F. Lawler, J. C. Yoon, S. J. Jwang, and B. A. Hull, “Anaerobic digestion effects on particle size and dewaterability”, *J. Water Pollution Control Federation*, **58**, 1107 (1986).
 7. M. H. Cho, C. H. Lee, and S. H. Lee, “Effect of flocculation conditions on membrane permeability in coagulation-microfiltration”, *Desalination*, **191**, 386 (2006).
 8. S. H. Judd and P. Hillis, “Optimisation of combined coagulation and microfiltration for water treatment”, *Wat. Res.*, **35**, 2896 (2001).
 9. 이정언, “정수슬러지의 특성이 탈수성능에 미치는 영향”, *대한환경공학회지*, **25**, 1063 (2003).
 10. Y. Shimizu, K. Matsushita, and A. Watanabe, “Influence of shear breakage of microbial cells on cross-flow microfiltration flux”, *J. Ferment. Bioeng.*, **78**, 170 (1994).
 11. 김규진, 윤성훈, “Membrane Bioreactor (MBR)를 이용한 오·폐수 처리”, *한국공업화학회지*, **12**, 239 (2001).
 12. 김남천, 이성재, “비저항계수를 이용한 혐기·호기 소화 및 침적생물막 슬러지의 탈수특성에 관한 비교·연구”, *한국폐기물학회지*, **15**, 729 (1998).
 13. 김재석, 이정학, “막결합형 활성슬러지 시스템에서 막오염 특성의 분석”, *멤브레인지*, **8**, 131 (1998).
 14. 서정원, 송태준, 박진원, 이태희, 이승무, “고분자 응집제 첨가에 따른 슬러지의 탈수성 및 점도 특성”, *대한환경공학회지*, **18**, 1609 (1996).
 15. 유태중, 안균환, 박상준, 현미, “정수 슬러지의 탈수성 개선을 위한 고분자 응집제 조합주입 고찰”, *상하수도학회지*, **18**, 608 (2004).
 16. 최송휴, 조남운, 한명수, “응집제를 활용한 간헐포기 MBR 공정에서 순간플럭스 증가가 분리막에 미치는 영향 평가”, *멤브레인지*, **15**, 70 (2005).