

MESH SCREENING REACTOR와 결합된 A2O 공정의 처리효율에 관한 연구 A Study on the treatment efficiency of A2O Process coupled with Mesh Screening Reactor

황규대* · 임동민

Gye-Dae Whang* · Dong-Min Lim

경희대학교 환경응용과학과

(2008년 10월 3일 접수; 2008년 12월 12일 수정; 2008년 12월 15일 채택)

Abstract

Three Mesh Screening Reactors (MSRs) were operated in three different modes to investigate the effect of the mesh opening size and the filtrate flux on the removal of particulate matters and the production of soluble organic matters. The mesh opening size was 82 μm (Mode 1), 61 μm (Mode 2) and 38 μm (Mode 3), respectively, and each mode has three different filtrate flux; 0.47 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, 0.95 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$ and 1.42 $\text{m}^3/\text{m}^2/\text{d}$, respectively. TSS removal efficiency of mode 1, 2, and 3 fed with 191 mgTSS/L was 27%, 36%, and 60%, respectively. The SCOD concentration of 91mg/L in influent for the mode 1, 2, and 3 increased to 117 mg/L, 127 mg/L, and 155 mg/L, respectively. For the all MSRs, there was no significant effect of filtrate flux on the removal of particulate matters and the production of soluble organic matters. However, the mesh opening size greatly affected the removal of particulate matters and the production of soluble organic matters in wastewater. Three parallel A2O processes consisting of anaerobic, anoxic and aerobic reactors maintaining mixed liquor suspended solids (MLSS) of 3,000 mg/L were operated to investigate the effectiveness of MSR on the removal efficiencies of the organic matters, nitrogen, and phosphorus; MSR influent was introduced to System 1 (183 mgTSS/L, 324 mgTCOD/L, 87 mgSCOD/L, 45.2 mgTKN/L, and 6.6 mgTP/L) and MSR effluent was introduced to System 2 and 3(72 mgTSS/L, 289 mgTCOD/L, 141 mgSCOD/L, 40.2 mgTKN/L, and 4.2 mgTP/L). HRTs of the anaerobic reactors in systems 1, 2 and 3 were 1 h, 1 h and 0.6 h, respectively and anoxic reactors were 2 h in all systems. HRTs of the aerobic reactors in systems 1, 2 and 3 were 5 h, 3 h and 3 h, respectively. TSS concentration in effluent of both system 2 and 3 is about 8 mg/L and lower than that of system 1 effluent. Despite higher TCOD loading and SCOD loading, both Systems 2 and 3 had a greater TCOD and SCOD removal efficiency at 91% and 92% than System 1 was at 88% and 82%, respectively. The nitrification efficiency for system 2 was greater than observed for System 1 (99% verses 97%). The denitrification efficiency for systems 1, 2 and 3 was 78%, 88% and 87%, respectively. System 2 and 3 showed about 12% higher TN removal efficiency than system 1 (85% verses 73%). The effluent TP concentration for system 2 was less than observed for system 1 and 3.

Key words : Denitrification, Nitrification, Mesh Screening Reactors (MSRs).

주 제 어 : 탈질화, 질산화, 매쉬 스크린 반응조

1. 서론

일반적으로 일차침전단계를 거친 하수가 유입되는 생물학적 고도처리공정은 부유물질 제거로 인해 유입수의 C/N 비(carbon/nitrogen ratio)는 낮아져 반응조 내의 전체 미생물 중 질산화 미생물의 분율을 높게 유지 할 수 있어 높은 질산화율을 나타낸다. 하지만 유기물질인 부유물질의 양이 줄어들어 따라 탈질이나 인 방출에 필요한 유기성 기질이 줄어들게 되어 질소 및 인 제거 효율을 높이기 위해서는 외부 탄소원이 요구된다. 한편, 일차 침전단계가 생략된 하수처리 공정에서는 부유물질이 제거되지 않아 높은 C/N 비의 하수가 유입되어 전체 미생물 중 질산화 미생물의 분율이 낮게 되고 그 결과 질산화율이 감소하게 되며 제거되지 않은 부유물질로 인해 잉여슬러지 발생량이 증가하게 된다.

미생물의 탈질반응 및 인 방출에는 주로 생분해도가 높은 유기물이 주로 사용된다. 따라서 메탄올 등과 같은 외부 탄소원을 주입하여 탈질 반응과 인 방출에 필요한 기질을 보충해 주고 있다(Henze, 1991). Skrinde and Bhagat(1982)는 외부 탄소원으로 탄닌수지 펄프폐액(sulfite spent liquor), 메탄올(methanol), 효모(yeast), 유장(whey), 옥수수(corn)를 연속식 무산소 반응조에 주입하였을 때 각각 83%, 88%, 90%, 90%의 높은 탈질율이 나타났다고 보고하였다. 하지만 외부탄소원의 주입으로 인하여 처리비용뿐만 아니라 증가된 잉여슬러지 처분 경비 또한 증가된다. 이에 일차침전에서 수집된 입자상 유기물질을 발효조에서 가수분해 시킨 후 생물 반응조에 주입하여 입자상 유기물질을 내부 탄소원으로 사용할 수 있는 공정에 대해 많은 연구가 이루어졌다(Nicholls et al; 1985). Christensson 등(1998)은 EBPR공정에서 인 제거를 위한 기질로 일차슬러지를 발효하여 생성된 VFA를 이용하였을 때가 이용하지 않았을 때보다 유출수의 인의 농도가 0.6mg/L 이하로 유지된다고 보고하였고, 일부 하수처리장에서는 일차 침전지에서 배출되는 생슬러지 일부를 일차침전지의 유입부로 재투입하여 침전지 내에서 발효작용으로 인해 생성된 유기산을 BNR 공정의 탄소원으로 공급하여 인 제거율을 향상시켰다고 보고하였다. 그러나 발효조를 이용하여 입자상 유기물질 일부를 VFA(volatile fatty acid)

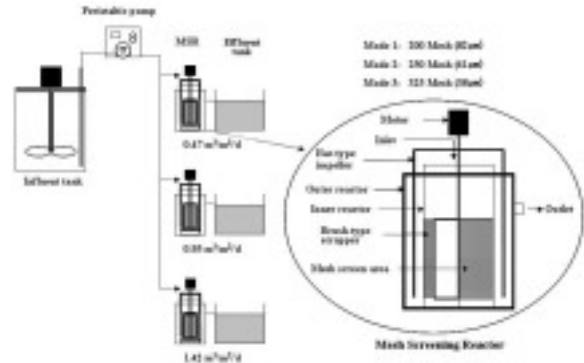


Fig. 1. Schematic diagram of the experimental.

로 전환시켜 탄소원 공급 문제는 어느 정도 해결하였으나 미생물에 의해 분해가 더디게 일어나는 유기물 부하에 의한 문제점은 해소되지 않았다.

유입 하수의 입자상 물질과 용존성 물질을 분리할 수 있는 고체/액체의 분리기능과 분리된 입자상 물질 중 분해가 더디게 일어나는 유기물질(SBCOD)을 가수분해/발효하여 분해가 쉽게 일어나는 유기물질(RBCOD)로 전환 시킬 수 있는 기능을 가진 Mesh Screening Reactor (MSR)를 생물학적 처리공정의 전처리 시설로 대체할 경우 처리 공정내로 유입되는 입자상 물질의 부하를 저감하여 질산화율을 향상 시킬 수 있겠다.

이로 인해 분리된 입자상 유기물질이 MSR에서 가수분해되어 탈질반응과 인 방출에 필요한 RBCOD의 농도를 증가시켜 처리공정의 질소/인 제거 효율의 향상시킬 수 있으며 일차침전지의 제외에 따른 처리시설 규모를 감소할 수 있는 이점이 있을 것이다. 따라서 본 연구에서는 Mesh 개목 크기와 Mesh 면적이 각각 다르게 장착된 MSR에 하수를 주입하여 입자상 물질 제거율, 용존성 물질의 생성량, COD 분율과 입자 분포도의 변화를 관찰하여 고체/액체 분리기능 및 용존성 유기물 생성기능을 높게 나타내는 Mesh 개목크기와 여과 플럭스를 결정하였다. 또한, 결정된 조건에서 운전된 MSR의 유출수가 유입된 생물학적 고도처리공정과 MSR을 통과하지 않은 하수가 유입된 생물학적 고도처리공정에서의 유기물, 질소 및 인 제거율을 비교·분석을 하여 MSR의 효

Table 1. Operating conditions of the experimental set-up 1: mesh screening reactor

Item	Mode 1			Mode 2			Mode 3		
Temperature (°C)				22±1					
pH				7.0±0.5					
Type of mesh				Square plain mesh					
Aperture size (μm)	82			61			38		
Open area (%)	41.7			36.8			23.8		
Flux (m ³ /m ² · d)	0.47	0.95	1.42	0.47	0.95	1.42	0.47	0.95	1.42
Influent	Domestic wastewater passed through 1 mm sieve								

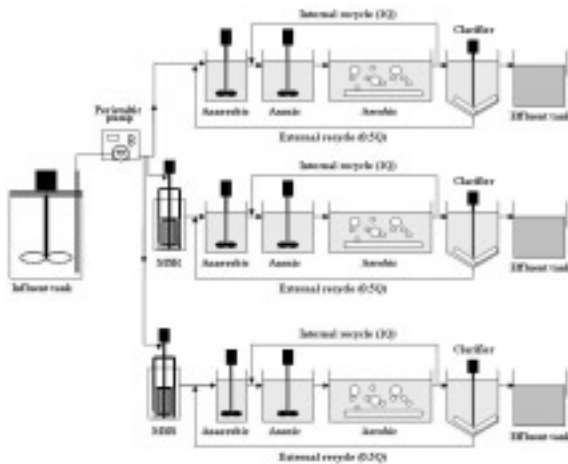


Fig. 2. Schematic diagram of A2O systems.

능을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1. Mesh Screening Reactor (MSR)

Mesh 개목크기와 여과 플럭스에 따른 부유물질의 제거량과 용존성 유기물의 생성량 변화를 조사하기 위하여, Fig. 1에 나타난 것같이 유효용량이 1.37 L인 원형통 중앙에 유효용량이 1.1 L인 내부 원통형 반응조가 설치된 3개조의 Mesh Screening Reactor (MSR)을 HRT를 1시간으로 유지하여 연속식으로 운전하였다. 내부 원통형 반응조에는 적정 부분을 잘라내어 Mesh 개목크기가 다른 Mesh 스크린이 각각 다른 면적으로 설치 되도록 하였으며, Mesh 내벽에 입자상 물질에 의한 막힘현상을 방지하도록 원형 브러쉬 2개가 회전축에 고정된 Brush-type scraper를 회전시켜 Mesh 내벽을 지속적으로 닦아 내도록 하였다. 내부 반응조와 원형통 사이에 체류하는 스크린 통과액을 교환할 수 있도록

Table 2. Characteristics of the municipal wastewater fed to MSR

Item	Range (mg/L)	Mean (mg/L)
TSS	152 ~ 278	192
VSS	140 ~ 268	182
TCOD _{Cr}	278 ~ 369	343
SCOD _{Cr}	78 ~ 106	91

Table 3. Operating conditions of experimental set-up 5: A2O Systems

Item	System 1			System 2			System 3		
	Anaer.	Anox.	Aero.	Anaer.	Anox.	Aero.	Anaer.	Anox.	Aero.
Feed	MSR influent			MSR effluent			MSR effluent		
HRT	1 h	2 h	5 h	1 h	2 h	3 h	0.6 h	2 h	3 h
MLSS	3028 mg/L			3091 mg/L			3087 mg/L		
Temperature	20±1℃			20±1℃			20±1℃		
pH	7.0±0.5			7.0±0.5			7.0±0.5		

회전축에 Bar-type impeller를 부착하였다. 각 반응조의 여과 플럭스가 0.47 m³/m²/d, 0.95 m³/m²/d, 1.42 m³/m²/d로 유지되도록 Mesh 스크린의 면적을 다르게 설치하였다. MSR의 여과 플럭스는 예비실험을 통하여 막힘 현상이 나타나지 않는 플럭스 범위를 결정한 후, 최종적으로 0.47 m³/m²/d, 0.95 m³/m²/d, 1.42 m³/m²/d로 설정하여 실험을 실시하였다. Mesh 스크린 단위 면적당 여과 플럭스를 변화시키기 위해서는 MSR 반응조를 작게 제작하거나 많은 양의 하수를 공급하여야 하는 어려움이 있어 동일한 체적의 내부 반응조에 동일한 유량을 주입하고 Mesh 스크린의 면적을 변화하여 여과 플럭스를 변화시켰다. Mesh 스크린의 개목크기의 영향을 조사하기 위해 개목크기가 82 μm인 Mesh 스크린을 3개의 반응조에 각각 다른 면적으로 설치하고 운전한 후 이후 Mesh 개 목크기가 61 μm 및 38 μm 스크린으로 교체 설치하여 운전하였다. 본 실험에 사용된 MSR의 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

Mesh 개목크기가 같고 Mesh 스크린 크기가 각각 다르게 설치된 3개의 MSR을 운전하기 위해 100 L 용량의 유입수 저류조 1개와 30 L 용량의 유출수 저류조 3개를 설치하였으며, 유입수는 유량 조절이 가능한 정량 펌프(peristaltic pump)를 이용하여 유입되었다. 각 반응조의 유입수로는 도시하수를 채취하여 1 mm 체에 통과 시킨 하수를 이용하였으며, 유입하수의 성상을 Table 2에 나타내었다. MSR 유출수의 부유물질 및 용존성 유기물질의 변화를 관찰하기 위하여 TSS, VSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}를 Standards methods (APHA, 2005)에 따라 측정하였으며, COD fraction은 Aerobic respirometer(Challenge Environmental System, Inc., USA)를 이용하여 측정하였다.

2.2. MSR과 A2O 공정이 결합된 처리시스템

MSR을 이용한 하수의 전처리와 고도처리 공정에 미치는 영향을 조사하기 위하여 Fig. 2와 같이 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성된 총 3개의 A2O 시스템을 운전하였다. MSR이 전단에 설치되지 않은 시스템 1의 혐기조, 무산소조, 호기조의 용량은 각각 1.37 L, 2.75 L, 6.87 L이고 HRT는 각각 1 h, 2 h, 5 h로 유지되었다. MSR의 운전결과를 토대로 Mesh 개목크기가 38 μm인 Mesh 스크린이 설치되고, 여과 플럭스가 1.42 m³/m²/d로 운전된 MSR이 시스템 전

단에 설치된 시스템 2와 시스템 3의 HRT는 각각 1 h, 2 h, 3 h와 0.6 h, 2 h, 3 h로 유지되었다. 시스템 2와 3의 유입수는 MSR에 의해 고형물농도가 줄어들고 가수분해 작용으로 RBCOD의 농도가 상대적으로 증가되어 시스템 2와 3의 유기물 제거효율과 질산화율이 시스템 1 보다 높을 것으로 예상되어 시스템 2와 3의 호기조 체류시간을 감소시켜 호기조 체류시간이 유기물 제거 효율 및 질산화율에 미치는 영향을 비교하였으며, 시스템 2와 3의 혐기조 HRT를 변화시켜 혐기조 HRT가 인 제거 효율에 미치는 영향을 비교하였다. 각 A2O 시스템의 운전조건을 Table 3에 나타내었다. 유입수를 반응조에 공급하기 위하여 100 L 용량의 유입수 저류조와 각 시스템의 유출수를 저장하기 위한 30 L 용량의 유출수 저류조를 3개 사용하였다. 각 시스템의 유입수 공급과 외부반송 및 내부반송을 위하여 정량펌프(peristaltic pump)를 이용하였다. 내부반송은 호기조에서 무산소조로 유입유량대비 1Q로 이루어졌으며 외부반송은 침전조에서 혐기조로 유입유량대비 0.5Q로 이루어졌다.

일일 처리용량이 35,000 m³, BNR공정이 적용된 G 하수처리시설의 포기조에서 채취한 슬러지를 각 시스템의 중오니로 사용하였으며, 실험기간동안 각 시스템의 MLSS 농도가 약 3,000 mg/L로 일정하게 유지되도록 잉여슬러지를 각 시스템의 포기조에서 매일 적당량 폐기하였다. 실험기간동안 각 시스템의 SRT는 각각 8일, 9.1일, 9.2일로 산출되었다. 각 시스템의 유입수와 유출수의 성상변화를 조사하기 위하여 TSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr}, TKN, NH₄⁺-N, TP를 Standards methods (APHA, 2005)에 따라 측정 하였으며, 각 시스템으로 주입된 하수의 성상을 Table 4에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. MSR의 입자상 물질의 분리(separation) 및 가용화(Solubilization) 효율

3.1.1. 입자상물질 제거효율과 용존성 유기물의 생성량 비교 Mesh 개목크기가 82 μm, 61 μm, 38 μm인 각각의 MSR에

여과 플럭스를 0.47 m³/m² · d, 0.95 m³/m² · d, 1.42 m³/m² · d로 변화시켜 운전하여 MSR로 주입된 하수(MSR 유입수)와 MSR로 부터 유출된 하수(MSR 유출수)의 TSS, VSS, TCOD, SCOD를 조사하였다. 각 Mode에서 여과 플럭스에 따른 고형물질 유입 유출 농도 및 제거효율과 고형물질 제거에 따른 생성된 용존성 유기물 농도를 Table 5에 나타냈다. MSR 유입수의 TSS 농도는 152~278 mg/L의 범위로 평균 192 mg/L로 나타났으며, VSS 농도는 140~268 mg/L 범위로 평균 182 mg/L로 나타났다. 한편 MSR 유출수 TSS 평균농도는 Mode 1(Mesh 개목크기=82 μm, 여과 플럭스=0.47~1.42 m³/m² · d)의 경우 여과 플럭스에 따라 큰 차이 없이 평균 140 mg/L이고, VSS 농도는 평균 112 mg/L로 나타났다 Mode 2(Mesh 개목크기=61 μm, 여과 플럭스=0.47~1.42 m³/m² · d), Mode 3(Mesh 개목크기=38 μm, 여과 플럭스=0.47~1.42 m³/m² · d)의 유출 TSS 평균 농도는 123 mg/L와 78 mg/L로 각 Mode의 여과플럭스 변화에 따른 농도차이가 거의 없었으며 VSS 평균농도는 각각 99 mg/L와 55 mg/L로 나타났다.

고형물 제거율을 조사한 결과, 여과 플럭스 변화와 관계 없이 각각 비슷한 값을 나타내었고 Mesh 개목크기가 클수록 MSR 유출수의 고형물 제거효율은 감소하는 것으로 나타났는데 개목크기가 클수록 더 많은 양의 고형물이 통과하기 때문이다. MSR의 내부 반응조에 scrapper를 설치하지 않고 입자상 물질이 포함된 하수를 주입한다면, 여과 플럭스가 낮게 주입된 MSR에서는 Mesh 스크린을 통과하는 입자의 전단력(shear force)이 작아 Mesh 스크린 표면에 입자상 물질이 집적(accumulation)되고 이로 인해 케이크 여과(cake filtration) 현상이 일어나며, 그 결과 MSR 유출수의 고형물질 농도는 낮아지게 될 것이다. 그러나 여과 플럭스가 큰 MSR에서는 입자상 물질의 전단력(shear force)은 커져 Mesh 스크린 표면에 입자상 물질의 집적이 적어지게 되고, 입자상 물질이 MSR로부터 유출되어 유출수의 고형물 농도는 높아지게 될 것이다. 하지만 본 연구에서와 같이 Scrapper를 설치하여 Mesh 스크린의 표면을 지속적으로 닦아 케이크 여과를 배제 시킨 경우 입자상 물질의 제거효율

Table 4. Characteristics of the municipal wastewater fed to A2O systems

Item	MSR influent		MSR influent	
	Range (mg/L)	Mean (mg/L)	Range (mg/L)	Mean (mg/L)
TSS	128 - 280	183	51 - 92	92
TCOD _{Cr}	206 - 416	324	143 - 307	289
SCOD _{Cr}	52 - 120	87	78 - 157	141
TN	37.0 - 63.7	45.3	35.3 - 44.6	40.3
TKN	36.9 - 63.0	45.2	35.2 - 44.6	40.2
NH ₄ ⁺ -N	26.6 - 50.4	35.3	31.9 - 42.3	38.1
TP	4.08 - 8.56	6.64	3.82 - 4.64	4.19

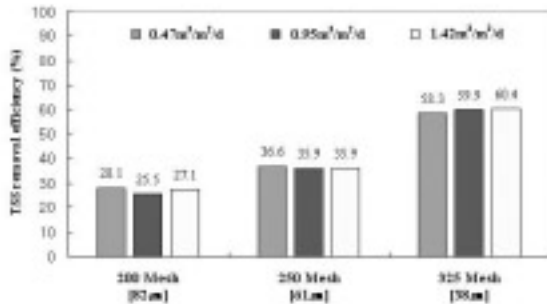


Fig. 3. Effect of filtrate flux on TSS removal of MSRs with varied mesh opening size.

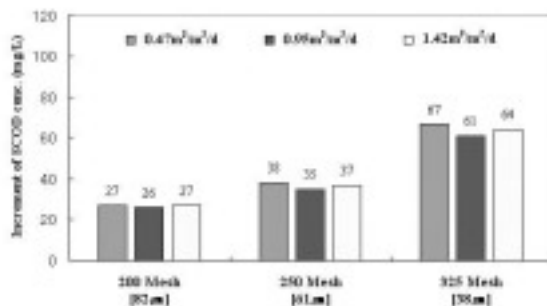


Fig. 4. Effect of filtrate flux on increment of SCOD concentration of MSRs with varied mesh opening size.

은 Mesh 개목크기에만 따라 다를 것으로 예상된다. 물론 Mesh 스크린 표면의 세척 효과와 세척효과에 상응하는 여과 플럭스도 MSR의 입상상 물질 제거 효율에 영향을 미칠 것으로 예상되지만 본 연구에 적용된 여과 플럭스 범위에서 Mesh 스크린의 표면 세척은 효과적으로 이루어진 것으로 판단된다. 따라서 동일한 Mesh 개목크기의 Mesh가 장착된 MSR에서 유출수의 TSS 농도는 여과 플럭스에 상관없이 비슷하게 나타난 것으로 사료되고 고형물 제거율은 Mesh 개목크기에 가장 큰 영향을 받는다고 할 수 있다. TSS 농도가 192 mg/L인 하수가 주입된 MSR에서는 Mesh 개목크기가 82 μm에서 38 μm로 작아짐에 따라 여과 플럭스에 크게 상관

없이 유출수의 평균 TSS 농도가 140 mg/L에서 78 mg/L로 낮아지는 것으로 나타났으며 제거율은 각각 27%, 36%, 60%로 나타났다. 한편 운전기간 동안 MSR내 슬러지는 인위적으로 제거되지는 않았지만 내부반응조 평균 TSS 농도는 MODE 1,2,3에서 각각 3,585mg/L, 5,310mg/L, 8,042 mg/L로 일정하게 유지되었으며 평균 VSS 농도는 2,951 mg/L, 4,231 mg/L, 5,722 mg/L로 나타났으며 VSS/TSS의 비는 각각 0.82, 0.80, 0.71로 나타났다.

MSR로 유입되는 TCOCr는 278~369 mg/L의 범위로 평균 343 mg/L로 나타났고 SCODcr는 78~106 mg/L의 범위로 평균 91 mg/L로 나타났다. 또한 MSR 유출수의 SCODcr 농도는 Mode 1의 경우 여과플럭스 변화에 큰 차이 없이 평균 118 mg/L로 MSR 유입평균농도에 비해 27 mg/L 정도 증가되는 것으로 나타났고 Mode 2와 Mode 3의 MSR 유출수 SCODcr 평균 농도는 128 mg/L와 155 mg/L로 유입수 농도에 비해 평균 37 mg/L와 64 mg/L가 증가되는 것으로 나타났다. 고형물 제거효율과 마찬가지로 용존성 유기물 생성량 또한 여과 플럭스 변화와 관계없이 비슷한 것으로 나타났다. SCOD 농도는 Mesh 개목크기가 82 μm에서 61 μm, 38 μm로 작아짐에 따라 유출수의 평균 용존성 유기물의 농도는 각각 27mg SCODcr/L, 37mg SCODcr/L, 64mg SCODcr/L 만큼 증가하는 것으로 나타났다. MSR 내의 슬러지는 인위적으로 제거되지 않아 일반적으로 정의된 SRT는 산정할 수 없었으나 MSR에 의해 제거되어 SCOD로 전환된 TSS량과 MSR 내의 MLSS량을 이용하여 MSR의 고형물 체류시간을 산정한 결과 각각 2.8일, 3.1일, 3.0일로 나타났다. 각 모드의 MSR 유출수의 SCOD 농도변화는 계산된 MSR의 고형물 체류시간과 관계없이 MSR의 고형물량 증가에 따라 가수분해 및 발효량도 증가되어 용존성 유기물량 또한 증가되는 것으로 나타났다.

McCue 등(2003)은 HRT가 2.2시간, SRT가 4일로 유지된 전발효조에 TCODcr의 농도가 428 mg/L, TSS의 농도

Table 5. Experimental variations of organic compounds in influent and effluent

Items	Mode 1			Mode 2			Mode 3		
Opening size (μm)	82			61			38		
Filtrate flux(m³/m²/d)	0.47	0.95	1.42	0.47	0.95	1.42	0.47	0.95	1.42
TSS Conc. Influent (mg/L)	192								
TSS Conc. Effluent (mg/L)	138	143	140	122	123	123	80	77	76
Removal Efficiency(%)	28.1	25.5	27.1	36.5	36.0	36.0	58.3	59.9	60.4
VSS Conc. Influent (mg/L)	182								
VSS Conc. Effluent (mg/L)	112	113	112	94	106	98	54	57	54
Removal Efficiency(%)	38.5	37.7	38.5	48.4	41.8	46.1	70.3	68.7	70.3
SCODcr Influent Conc.(mg/L)	91								
SCODcr Effluent (mg/L)	118	117	118	129	126	128	158	152	155
SCODcr produced/VSS removed(mgSCOD/mgVSS)	0.39	0.38	0.39	0.43	0.46	0.44	0.52	0.48	0.50

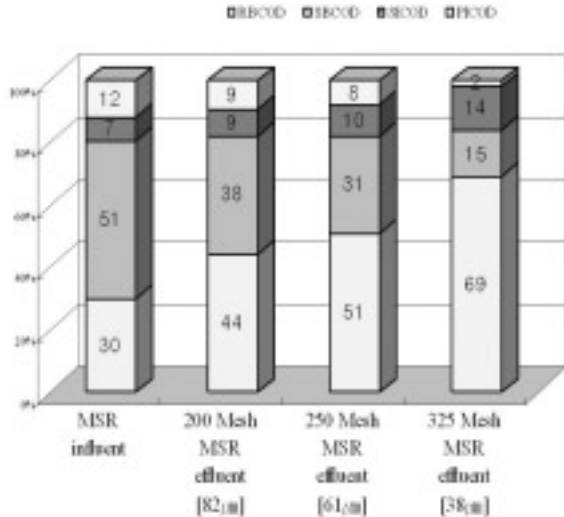


Fig. 5. COD fractions of MSR influent and MSR effluent.

가 121 mg/L, VSS/TSS의 비가 0.92, VFA의 농도가 46 mg/L인 유입수를 주입하여 운전한 결과 VFA 농도가 75 mg/L로 증가하였고, 이때 제거된 1 mg의 VSS당 0.21 mgVFA가 생성되었다고 보고하였다. Ahn and speeces 등 (2006)은 일차 슬러지를 반 연속식(Semi-continuous) 발효조에 유입시키고 온도를 55°C, HRT를 5일로 유지시켜 운전한 결과 1 mg VSS당 0.18 mg VFA를 생성시킬 수 있다고 보고하였었다. Wentzel 등(1995)은 VSS 농도가 40,000 mg/L인 생활슬러지를 SRT가 19 일인 회분식으로 운전된 발효조로 주입하여 운전한 결과 1 mg VSS당 0.125 mgVFA가 생성되었다고 보고하였다. 한편, Bryers(1985)은 입자상 물질의 가수분해/발효에 대한 모델링에 관한 문헌조사를 통하여 하수 내 포함된 입자상 물질의 성분은 각각 다르나 평균적으로 입자상 유기물질의 발효로 생성된 1 mgSCOD는 0.35 mgVFA에 상응한다고 보고하였다. 본 실험 결과, Mode 1, 2, 3에서 가수분해 및 발효로 인한 VSS 감소량은 각각 69.7 mg/L, 82.7 mg/L, 127 mg/L로 나타났고 생성된 SCOD량은 26.7 mg/L, 36.7 mg/L, 64 mg/L로 나타났다.

감소된 단위 VSS 농도당 생성된 SCOD 농도는 각각 0.38 mgSCOD/mgVSS, 0.44 mgSCOD/mgVSS, 0.5 mgSCOD/mgVSS로 산출되었다. Bryers(1985)의 전환인자(0.35 mgVFA/mgSCOD)를 사용하여 생성된 SCOD의 VFS로 전환된 양을 개략적으로 산출한 결과 9.35 mg/L, 12.85 mg/L, 22.4 mg/L로 나타나 제거된 VSS 1 mg당 약 0.13~0.18 mg의 VFA가 생성되었음을 예측할 수 있었다. 결과적으로 Mesh 개목크기가 38 μm이고 여과 플럭스가 0.47 ~ 1.42 m³/m² · d이 장착된 MSR 반응조가 고형물 제거효율 및 용존성 생성율이 가장 높은 것으로 나타났으며 고도처리시설 전단에 설치되는 것으로 결정하였다.

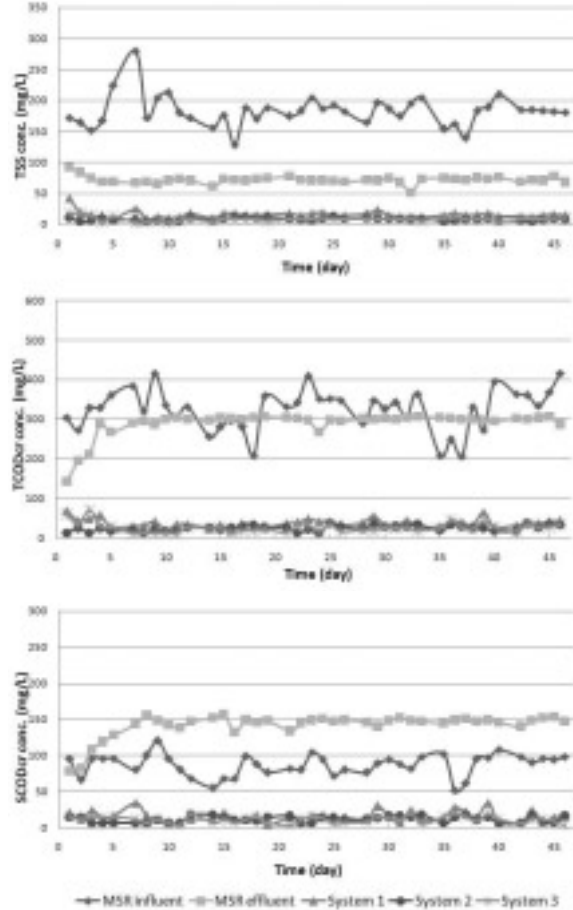


Fig. 6. Variation of concentration for organic matters in influent and effluent of each system.

3.1.2. MSR에 따른 COD fraction의 변화

MSR 유출수의 COD 분율을 조사한 결과 Fig. 5와 같이 MSR의 Mesh 개목크기가 82 μm에서 38 μm로 작아질수록 RBCOD (readily biodegradable COD)의 분율과 SICOD (soluble inert COD)의 분율은 44%에서 69%와 9%에서 14%로 증가하는 경향을 나타내는 반면에 SBCOD (slowly biodegradable COD) 분율과 PICOD (particulate inert COD) 분율은 38%에서 15%와 9%에서 2%로 감소하는 경향을 나타내었다. Orhon 등(1998)과 Henze(1989)은 하수내의 유기물질의 가수분해/발효 시 SMPs (soluble microbial products)도 생성되며 하수내의 SCOD의 증가량의 한부분이 될 수 있다고 연구결과를 발표하였으며 이러한 연구결과로 미루어 볼때 MSR을 거친 하수 중 상대적으로 많은 양의 SCOD가 생성된 Mesh 개목크기가 38 μm인 MSR에서 더 많은 SMP가 생성되어 SICOD의 분율이 가장 높게 나타난 것으로 판단된다. 하지만 Mesh 개목크기가 가장 작은 MSR에서는 입자상으로 존재하는 PICOD의 포획량이 크기 때문에 유출수의 PICOD 양은 감소되어 상대적으로 낮은 PICOD

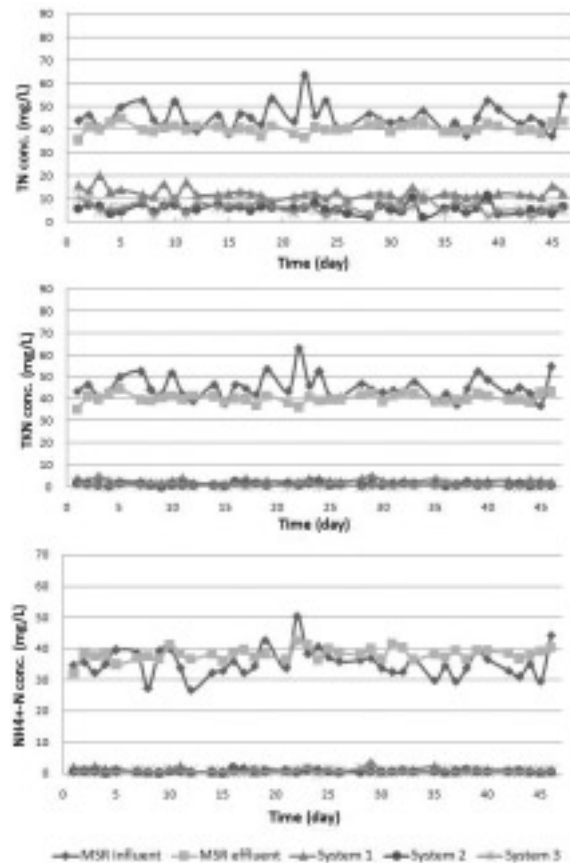


Fig. 7. Variation of concentration for nitrogen in influent and effluent of each system.

분율을 나타낸 것으로 사료된다. MSR의 유입수의 RBCOD, SBCOD, SICOD, PICOD의 분율은 각각 30%, 51%, 7%, 12%로 나타나, MSR 유출수에 비해 Biodegradable COD 분율은 약 80%로 비슷하지만 Biodegradable COD 중 RBCOD 분율은 더 낮게 나타났다.

김(2006)은 도시하수를 이용한 COD Fractionation 실험에서 TCOD_{Cr}의 농도가 392mg/L, SCOD_{Cr}의 농도가 148 mg/L인 일차침전지를 거치지 않은 하수의 COD를 Fractionation한 결과 RBCOD 31% SBCOD는 51%,

SICOD와 PICOD는 각각 6%와 12%로 나타나, 본 연구의 MSR 유입수의 RBCOD, SBCOD, SICOD, PICOD의 분율인 30%, 51%, 7%, 12%와 비교하여 비슷한 것으로 나타났다. 또한 TCOD_{Cr}의 농도가 256 mg/L, SCOD_{Cr}의 농도가 148 mg/L인 일차침전지를 거친 하수의 COD를 분류한 결과 RBCOD 48%, SBCOD는 35%, SICOD와 PICOD는 각각 10%와 7%로 나타나, TSS를 약 60% 제거할 수 있는 Mesh 개목크기가 38 μm인 MSR의 유출수 RBCOD, SBCOD, SICOD, PICOD의 분율인 69%, 15%, 14%, 2%와 비교하여 Biodegradable COD 분율은 비슷하나 Biodegradable COD 중 RBCOD의 분율은 일차침전지를 거친 하수 보다는 높게 나타났다. 따라서 일차침전지와 비슷한 TSS 제거율을 나타내고 입자상 물질의 가수분해/발효를 통한 용존성 유기물질을 생성시킬 수 있는 Mesh 개목크기가 38 μm인 MSR을 생물학적 고도처리공정 전단에 설치할 경우 생물반응조로 유입되는 고형물의 부하를 줄여 질산화 효율을 증대시킬 수 있으며 탈질 미생물과 인 방출 미생물에 의해 쉽게 사용되는 유기물질을 공급할 수 있는 이점이 있을 것으로 판단된다.

3.2. MSR과 결합된 고도처리공정에서의 처리 효율 3.2.1. 유기물 제거효율

시스템 1로 주입된 하수(MSR 유입수)의 TSS 농도는 128~280 mg/L의 범위로 평균 183 mg/L로 나타났고 TCOD_{Cr} 농도는 206~416 mg/L의 범위로 평균 324 mg/L로 나타났다. 시스템 1의 호기조 기준 평균 TCOD_{Cr} 부하량과 평균 TSS 부하량은 각각 1.57 kgTCOD_{Cr}/m³·d, 0.88 kgTSS/m³·d로 나타났으며, SCOD_{Cr}의 농도는 52~120 mg/L로 평균 87 mg/L로 나타났다. 시스템 2와 시스템 3으로 주입된 하수(MSR 유출수)의 TSS 농도는 51~92 mg/L의 범위로 평균 72 mg/L로 나타났고 TCOD_{Cr} 농도는 143~307 mg/L의 범위로 평균 289 mg/L로 나타나 호기조의 체적이 동일한 시스템 2와 시스템 3의 호기조 기준 평균 TCOD_{Cr} 부하량과 평균 TSS 부하량은 호기조 HRT가 감소되어 시스템 1보다 높게 각각 2.32 kgTCOD_{Cr}/m³·d, 0.58

Table 6. Experimental results of TSS, TCOD_{Cr}, and SCOD_{Cr} removal efficiency for each system

Items	Feeds	TSS loading (kgTSS/m ³ /day)	TCOD _{Cr} loading (kgTCOD _{Cr} /m ³ /day)	TSS (mg/L)		TCOD _{Cr} (mg/L)		SCOD _{Cr} (mg/L)		TSS Removal Efficiency (%)	TCOD _{Cr} Removal Efficiency (%)	SCOD _{Cr} Removal Efficiency (%)
				influent	effluent	influent	effluent	influent	effluent			
System 1	MSR influent	0.88	1.57	183	15	324	38	87	15	91.5	88.3	82.3
System 2	MSR effluent	0.58	2.32	72	8	289	25	141	11	89.0	91.4	92.0
System 3	MSR effluent	0.58	2.32	72	9	289	27	141	11	87.9	92.0	92.3

kgTSS/m³·d로 나타났으며 SCOD의 농도는 78~157 mg/L로 평균 141 mg/L로 나타났다. 유출수의 평균 TSS농도는 시스템 1, 시스템 2, 시스템 3에서 각각 15 mg/L, 8 mg/L, 9 mg/L로 평균 91.5%, 89.0%, 87.9%의 TSS 제거 효율을 나타내었다. 각 시스템의 유출수 평균 TCOD_{Cr}의 농도는 시스템 1, 시스템 2, 시스템 3에서 각각 38 mg/L, 25 mg/L, 27 mg/L로 평균 88.3%, 91.4%, 90.8%의 TCOD_{Cr} 제거효율을 나타내었다. 또한 각 시스템의 유출수 평균 SCOD_{Cr} 농도는 시스템 번호에 따라 각각 15 mg/L, 11 mg/L, 11 mg/L로 평균 82.3%, 92.0%, 92.3%의 제거 효율을 나타내었다. 호기조의 HRT가 3시간인 시스템 2와 시스템 3의 호기조 기준 평균 TCOD_{Cr} 부하량과 SCOD_{Cr} 부하량은 호기조의 HRT가 5시간인 시스템 1보다 각각 약 1.5배와 2.6배 높았으나, TCOD_{Cr}과 SCOD_{Cr}의 제거효율은 모두 높게 나타났는데 이는 시스템 2와 시스템 3으로 주입된 하수는 MSR에 의해 가수분해가 이루어져 RBCOD 농도가 증가되었기 때문에 미생물에 의해 쉽게 사용되어 처리 효율이 높게 나타난 것으로 사료된다.

시스템 2와 시스템 3의 유출수 TSS 농도가 시스템 1의 농도보다 낮게 나타났는데도 불구하고 TSS 제거효율이 시스템 1 보다 낮게 나타난 이유는 시스템 1로 유입되는 MSR 유입수의 TSS 농도가 시스템 2와 시스템 3으로 유입되는 MSR 유출수의 TSS 농도보다 높았기 때문이다. 한편 MSR 유출수의 SCOD_{Cr} 농도는 MSR 유입수의 SCOD_{Cr} 농도보다 높아 시스템 2와 시스템 3의 SCOD_{Cr}의 제거효율이 상대적으로 높게 나타났다. Table 6에는 운전기간 동안 TSS, TCOD_{Cr}, SCOD_{Cr} 농도 및 제거효율을 나타냈으며, 유입수와 유출수의 고형물 및 유기물질의 농도변화를 Fig. 6에 나타내었다.

3.2.2. 질소 제거효율

운전기간 중 시스템 1로 주입된 하수(MSR 유입수)의 TKN 농도는 36.9~63.0 mg/L의 범위로 평균 45.2 mg/L로 나타나 시스템 1의 호기조 기준 평균 TKN 부하량은 각각 0.191 kgTKN/m³·d 나타났으며, NH₄⁺-N 농도는 26.6~50.4 mg/L의 범위로 평균 35.3 mg/L로 나타났다.

시스템 2와 시스템 3으로 주입된 하수(MSR 유출수)의 TKN 농도는 35.2~44.6 mg/L의 범위로 평균 40.1 mg/L로 나타나 시스템 2와 시스템 3의 호기조 기준 평균 TKN 부하량은 0.283 kgTKN/m³·d 나타났으며, NH₄⁺-N 농도는 31.9~42.3 mg/L의 범위로 평균 38.1 mg/L로 나타났다. 모든 시스템으로 주입된 하수의 평균 NO₃⁻-N과 NO₂⁻-N의 농도는 모두 0.1 mg/L 이하로 나타났다. 한편, 시스템 1로 주입된 하수와 시스템 2와 시스템 3으로 주입된 하수의 TCOD_{Cr}/TKN 비는 각각 7.1과 7.2로 계산되어, MSR 유입수와 MSR 유출수의 TCOD_{Cr}/TKN 비는 비슷하였으며, 일반적인 국내 하수의 TCOD_{Cr}/TKN 비인 4 보다 높은 것으로 나타났다.

각 시스템의 유출수 평균 TKN농도는 시스템 1, 시스템 2, 시스템 3에서 각각 2.8 mg/L, 1.1 mg/L, 1.1 mg/L로 나타나 93.8%, 97.4, 97.2%의 TKN 제거율을 나타내었다. 또한 유출수의 평균 NH₄⁺-N의 농도는 시스템 1, 시스템 2, 시스템 3에서 각각 1.2 mg/L, 0.6 mg/L, 0.8 mg/L로 나타나 96.7%, 98.4%, 98.0%의 NH₄⁺-N 제거율을 나타내었다.

유입수 TKN 농도와 유출수 NH₄⁺-N 농도를 이용해 질산화율을 계산한 결과 MSR 유입수가 주입된 시스템 1의 질산화율은 97.4%로 나타났으며, MSR 유출수가 주입된 시스템 2와 3의 질산화율은 각각 98.5%, 98.1%로 나타났다. 또한 문헌고찰 결과 세포합성에 사용되는 질소량은 미생물량의 12%로 나타났고 이를 바탕으로 세포증식으로 제거되는 질소량을 포함한 질산화율을 계산해 본 결과 각각의 시스템에서 64%, 76%, 74%로 나타났다. 시스템 2와 3이 시스템 1보다 포기조 HRT가 2시간이 짧음에도 질산화율이 높게 나타난 이유는 MSR에 의해 고형물 농도가 감소되어 시스템 2, 3으로 유입되는 TSS 농도가 낮아져서 질산화 미생물 분율이 증가되었기 때문이고 또한 MSR의 가수분해 작용으로 인해 상대적으로 증가된 RBCOD가 혐기조와 무산소조에서 쉽게 사용되어져서 포기조로 유입되는 유기물질이 상대적으로 감소되어 질산화율이 높게 나타났다고 사료된다.

김(2006)은 일차침전지를 거친 하수와 거치지 않은 하수를 HRT가 4시간과 5시간으로 운전된 활성슬러지 공정에 각각 주입하여 운전한 결과 질산화율은 동일하게 98%로 보

Table 7. Experimental results of TKN, NH₄⁺-N, and TN removal efficiency for each system

Items	Feeds	TKN loading (kgTKN/m ³ /day)	TN (mg/L)		TKN (mg/L)		NH ₄ ⁺ -N (mg/L)		Nitrification rate (%)	Denitrification rate (%)
			influent	effluent	influent	effluent	influent	effluent		
System 1	MSR influent	0.191	45.3	12.3	45.2	2.8	35.3	1.2	97.4	78.0
System 2	MSR effluent	0.282	40.2	5.6	40.1	1.1	38.1	0.6	98.5	88.4
System 3	MSR effluent	0.282	40.2	6.2	40.1	1.1	38.1	0.8	98.1	87.0

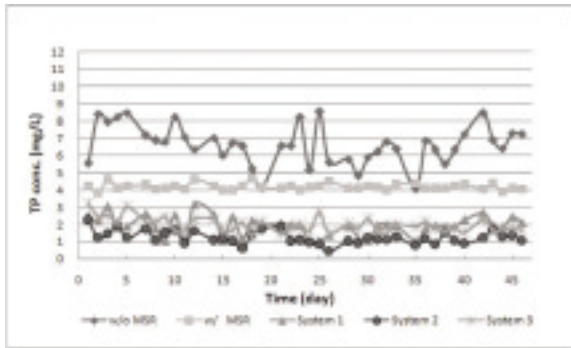


Fig. 8. Variation of concentration for phosphate in influent and effluent of each system.

고하였다. 일차침전지를 거친 하수가 유입된 반응조의 HRT가 1시간이나 짧았음에도 불구하고 질산화율이 동등하게 나타난 이유는 일차침전지를 거친 하수의 입자상 유기물 농도가 감소하여 반응조 내 질산화 미생물의 분율이 증가되었기 때문이라 하였다. 본 연구에서 MSR 유출수를 주입한 시스템 2와 시스템 3의 혐기조 HRT는 3시간으로 김(2006)이 운전한 반응조 HRT보다 2시간이나 짧았지만 비슷한 질산화 효율을 나타내었는데, 이는 MSR에 의해 유입수 SS 농도가 감소되었고 질산화 미생물 분율이 증가되고 또한 MSR에서 가수분해에 의해 생성된 용존성 유기물이 혐기조, 무산소조에서 쉽게 소비되어 포기조에 유입되는 유기물량이 상대적으로 감소되어 질산화율이 높게 나타난 것으로 판단된다.

MSR 유입수의 RBCOD 농도는 97.2 mg/L, SBCOD 농도는 165.2 mg/L로, 총 Biodegradable COD의 농도는 262.4 mg/L이었으며, MSR 유출수의 RBCOD 농도는 199.4 mg/L, SBCOD 농도는 43.4 mg/L로 총 Biodegradable COD는 242.8 mg/L로 나타났다. MSR 유입수가 주입된 시스템 1의 RBCOD의 농도 보다 MSR 유출수가 주입된 시스템 2와 시스템 3의 RBCOD의 농도가 102.2 mg/L 더 높은 것으로 나타났다. 미생물 세포합성에 소비된 질소의 양을 무시하고 유입수와 유출수의 총 질소 농도를 이용하여 탈질율을 계산한 결과 각 시스템의 탈질율은 78.0%, 88.4%, 87.0%로 나타나 MSR 유출수가 주입된 시스템 2와 시스템 3의 탈질율이 MSR 유입수가 주입된 시스템 1의 탈질율 보다 약 9~11% 높았다. 이는 시스템 2와 3으로 주입된 하수 (MSR 유출수)의 RBCOD가 높아 탈질반응에 탈질율도 증가한 것으로 사료된다. 세포증식으로 제거되는 질소량을 포함한 탈질화율을 계산해 본 결과 각각의 시스템에서 43%, 68%, 67%로 나타났다. MSR 유입수가 주입된 시스템 1과 MSR 유출수가 주입된 시스템 2와 시스템 3의 유출수 TN 농도는 각각 12.3 mg/L와 5.6 mg/L, 6.2 mg/L로 73%와 86%, 85%의 TN 제거율을 나타내었다. Fig. 7에는 운전 기간 동안 각 시스템의 유입수와 유출수의 질소 농

도를 나타내었으며, Table 7에는 질산화율과 탈질을 및 질소 제거율을 나타내었다.

3.2.3. 인 제거효율

운전기간 동안 Fig. 8에 나타난 바와 같이 시스템 1로 주입된 하수(MSR 유입수)의 TP 농도는 4.1~8.6 mg/L의 범위로 평균 6.6 mg/L로 나타났으며, 시스템 2와 시스템 3으로 주입된 하수(MSR 유출수)의 TP 농도는 3.8~4.6 mg/L의 범위로 평균 4.2 mg/L로 나타났다. 유출수의 평균 TP 농도는 시스템 1, 시스템 2, 시스템 3에서 각각 1.9 mg/L, 1.2 mg/L, 2.0 mg/L로 나타나 71.2%, 70.4%, 52.7%의 TP 제거율을 나타내었다. MSR 유출수가 주입된 시스템 2와 3의 TP 제거율이 MSR 유입수가 주입된 시스템 1의 TP 제거율 보다 낮게 나타났는데, 이는 시스템 2와 3의 유출수 TP 농도가 비슷하거나 낮게 나타났음에도 불구하고 MSR 유출수의 TP 농도가 MSR 유입수 보다 상대적으로 낮아 TP 제거율은 낮게 계산되었기 때문이다. 시스템 2와 시스템 3의 TP 제거율을 MSR 유입수 TP 농도기준으로 TP 제거율을 계산한 결과, 시스템 2와 시스템 3에서 각각 81.4%와 70.3%로 나타나 시스템 2의 TP 제거율이 가장 높게 나타났다. 혐기조의 HRT가 1시간으로 동일한 시스템 1과 시스템 2의 유출수 TP 농도는 시스템 2에서 더 낮게 나타났는데, 시스템 2로 주입된 하수(MSR 유출수)의 RBCOD 농도가 시스템 1로 주입된 하수(MSR 유입수)의 RBCOD 농도 보다 높아 인 제거 미생물의 P-release에 있어 효과적으로 사용되었기 때문으로 사료된다. 혐기조 HRT가 0.6시간인 시스템 3의 유출수 TP 농도는 혐기조 HRT가 1시간인 시스템 2보다 높은 농도인 2mg/L를 나타낸 것으로 미루어 혐기조 HRT가 0.6시간은 유기물 흡수와 인방출 반응에 충분하지 못한 것으로 판단되었다.

4. 결론

브러쉬 스크래퍼가 장착되어 스크린 기능으로 입자상 물질을 제거하는 Mesh가 장착된 MSR의 Mesh 개목크기와 여과 플럭스에 따른 입자상 물질제거 효율과 가수분해/발효 기능을 평가하고, 결정된 Mesh 개목크기와 여과 플럭스로 운전된 MSR과 A2O 공정이 결합된 시스템의 유기물, 질소 및 인 제거율을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. Mesh 개목크기와 여과 플럭스가 각각 다른 MSR을 운전한 결과 여과 플럭스는 입자상 물질 제거와 용존성 유기물 생성에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으나 Mesh 개목크기가 82 μ m에서 61 μ m, 38 μ m로 감소할수록 입자상 물질 제거율과 용존성 유기물 생성량은 각각 27.0% 36.2%, 59.5% 및 27 mgSCOD_{Cr}/L, 37

mgSCOD_{Cr}/L, 64 mgSCOD_{Cr}/L로 증가되는 것으로 나타났다. COD 분율을 조사한 결과 MSR 유입수와 MSR 유출수의 Biodegradable COD 분율은 약 80%로 MSR 유입수와 비슷하지만 Biodegradable COD 중 RBCOD 분율은 MSR 유출수가 MSR 유입수에 비해 최고 39% 더 높게 나타났다.

2. MSR과 결합되어 입자상 물질이 감소되고 용존성 유기 물질이 증가된 하수가 유입되고 호기조 HRT가 3시간으로 유기물 부하가 높게 유지된 A2O 공정의 시스템 2와 시스템 3의 TCOD 제거효율은 각각 91.4%, 90.8%로 MSR이 결합되지 않은 HRT가 5시간인 시스템 1의 88.3%보다 높은 효율을 나타내었다. 시스템 2와 시스템 3의 질산화율은 99.0%로 시스템 1의 질산화율 97%보다 HRT가 2시간 단축되었음에도 높게 나타났다. MSR을 통한 효과적인 RBCOD의 생성으로 시스템 2, 시스템 3은 88.4%와 87.0%의 탈질효율을 나타내었으나 시스템 1은 78%의 탈질효율을 나타내었다. 시스템 2와 시스템 3의 TN 제거율은 86%와 85%로 시스템 1의 TN 제거율인 73%보다 높은 제거율을 나타내었다. 혐기조의 HRT가 시스템 1과 동일하게 1시간인 시스템 2의 유출수 TP 농도는 0.98 mg/L로 나타나 시스템 1의 유출수 TP 농도인 1.75 mg/L에 비해 낮게 나타났다. 이는 MSR을 통해 생성된 RBCOD가 P-release에 효과적으로 사용되었기 때문으로 사료된다.



참고문헌

1. 김태경(2006) 생물학적 질소·인 제거 공정에서 일차 침전지의 영향에 관한 연구, 경희대학교.
2. Ahn, Y. H., Speece, R. E. (2006) Elutriated acid fermentation of municipal primary sludge, *Water Research*, 40(11), pp. 2210-2220.
3. APHA, AWWA, and WEF. (2005) *Standard methods*, Washington D.C.
4. Bryers, J. D. (1985) Structured modeling of the anaerobic digestion of biomass particulates, *Biotechnology and Bioengineering*, 27, pp. 638-649.
5. Christensson, M., Lie, E., Jonsson, K., Johansson, P., and Welander, T. (1998) Increasing substrate for polyphosphate-accumulating bacteria in municipal wastewater through hydrolysis and fermentation of sludge in primary clarifiers, *Water Environ. Res.*, 70(2), pp. 138-145.
6. Henze, M. (1989) The influence of raw wastewater biomass on activated sludge oxygen respiration rates and denitrification rates, *Water Sci. Technol.*, 21, pp. 603-607.
7. Henze, M. (1991) Capabilities of biological nitrogen removal processes from wastewater, *Water Sci. Technol.*, 23, pp. 669-670.
8. McCue, T., Shah, R., Vassiliev, I., Liu, Y. H., Eremektar, F. G., Chen, Y., and Randall, A. A. (2003) Evaluation of influent prefermentation as a unit process upon biological nutrient removal, *Water Sci. Technol.*, 47(11), pp. 9-15.
9. Nicholls, H. A., Pitman, A. R. and Osborn, D. W. (1985) The readily biodegradable fraction of sewage: Its influence on phosphorus removal and measurement, *Water Sci. Technol.*, 17, pp. 73.
10. Orhon, D., Cokgor, E. U., and Sozen, S. (1998) Dual hydrolysis model of the slowly biodegradable substrate in activated sludge systems, *Biotechnol. Technol.*, 12(10), pp. 737-741.
11. Skrinde, J. R. and Bhagat, S. K. (1982) Industrial wastes as carbon sources in biological denitrification, *Jour. Water Poll. Control Fed.*, 54(4), pp. 370-377.
12. Wentzel, M. C., Mbewe, A., and Ekama, G. A. (1995) Batch test for measurement of readily biodegradable COD and active organism concentrations in municipal wastewaters, *Water SA.*, 21(2), pp. 117-124.