

유동상 생물막법을 적용한 BNR공법에서의 인제거 영향인자

Factors affecting Phosphorus removal in BNR process applied Moving Bed Biofilm

박 운 지* 김 동 옥** 이 찬 기***
Park, Woon-Ji Kim, Dong-Oog Lee, Chan-Ki

Abstract

In this study, the use of MBBR(moving bed biofilm reactor) process for Phosphorus Removal efficiency depending on seasons and the factors affecting phosphorus removal efficiency in the process is evaluated.

As a result of experiment, T-P removal efficiency has its highest value in winter, (80.8%), and T-P removal efficiency has its lowest value in autumn, (49%).

Optimum SRT for Phosphorus Removal revealed is about 8.8 days and process performs more efficiently as the temperature decreases.

It is accepted that nitrate to anaerobic zone is affecting the Phosphorus removal process. With increasing the organic loading rate, Phosphorus removal efficiency also increases.

Also, an experiment has been conducted to find out the highest efficiency according to Media existence and it has revealed that Media addition provides better phosphate removal.

키워드 : 유동상 생물막 공정, 인 제거효율, 미디어

Keywords : MBBR process, phosphorus remove efficiency, Media

1. 서론

최근 하수처리장 방류수 수질기준이 점차 강화됨에 따라 하수의 고도처리 필요성이 부각되고 있다. 특히, 미처리된 질소와 인의 수계로의 유입은 호소의 부영양화는 물론 해역에서의 적조발생을 유발시키는 중요한 인자로 작용하게 되어 질소와 인의 제거가 절실한 실정이다[1,2].

그러나 질소의 경우 질소고정 박테리아에 의해 공기 중의 질소가 수계로 유입되는 경우도 있어 부영양화를 방지하는 데에는 질소보다 인을 처리

하는 것이 더욱 효과적이라고 알려져 있으며, 따라서 인의 제거와 관련한 영향인자에 대한 연구가 매우 필요하다[3].

이러한 영양염류를 제거하는 BNR(Biological Nutrient Removal) 공정으로는 A/O, A₂/O, Bardenpho, SBR, Phostrip 등의 공법들이 있으며 [4,5], 각 공법의 장·단점을 보완한 신공법들이 국내에서도 속속 개발되고 있다. 특히, 국내에서 개발된 BNR 공법들 중 대부분이 A₂/O 계열이며, 최근에는 처리수의 수질을 보다 향상시키고, 안정적인 수질을 확보할 수 있는 처리기술 중의 하나로써 BNR 공법에 Media를 결합한 유동상 생물막공법(MBBR: moving bed biofilm reactor)에 대한 연구가 여러 가지 장점으로 인해 활발하게 진행되고 있다.

* 강원대학교 대학원 환경공학과 박사과정

** 강원대학교 대학원 환경공학과 석사과정

*** 강원대학교 환경공학과 교수, 공학박사

유동상 생물막 공법은 Media에 고농도의 미생물을 부착하여 오염물질을 처리하므로 일반적인 부유성장 공법에 비해 처리효율이 높을 뿐 아니라, 유동상 Media를 공기를 이용하여 유동시키므로 산소전달이 유리한 장점이 있다[6,7].

따라서, 본 연구에서는 유동상 생물막공정을 Pilot Plant 규모로 운전하여 계절에 따른 인 제거 특성과 제거효율을 살펴보고 인 제거에 영향을 미치는 인자를 알아보고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에 사용된 실험장치는 유동성 페다이어 Media를 호기조 내에 15% 충전한 Pilot Plant 규모의 MBBR(moving bed biofilm reactor)공정으로 혐기조, 무산소조, 호기조, 내부순환수로 구성되어 있으며, Fig. 1과 같다.

혐기조, 무산소조, 호기조의 용량은 각각 13.95 m³, 18.6m³, 27.0m³로 저류조와 침전조를 제외한 반응조의 총 용량은 59.55m³이며 Table 1과 같다.

호기조내에는 DO공급과 Media 유동을 위해 blower와 diffuser를 설치하였으며, 원통형 baffle을 설치하여 Media의 유출을 방지하였다.

2.2 실험방법

실험은 2003년 8월 26일부터 2004년 9월 2일까지 실시하였으며, 계절변화에 따라 가을, 겨울, 봄, 여름으로 나누어 분석하였다.

유입유량은 230m³/day(HRT: 6.22hr)로, 내부반송율과 슬러지 반송율은 각각 200%, 50%로 운전하였으며, 실험기간동안의 운전조건은 Table 2와 같다.

실험기간동안 본 연구에서 수행한 모든 분석은 수질오염공정시험법과 Standard Method(APHA, 1995)에 준하여 실시하였다.

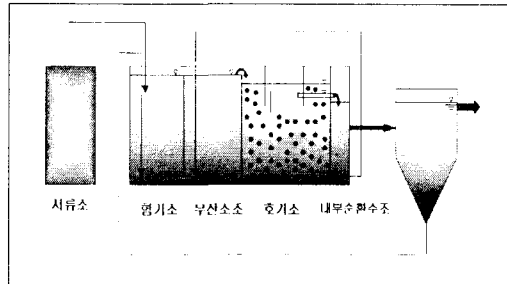


Fig. 1 Schematic diagram of the MBBR process

Table 1 Characteristic of the MBBR process

Parameter	Units	Value
Anaerobic tank	m ³	13.95
Anoxic tank	m ³	18.60
Aerobic tank	m ³	27.00
DO depletion tank	m ³	4.13

3. 결과 및 고찰

3.1 인 변화

3.1.1 T-P

실험기간동안 유입 및 유출 T-P 제거효율과 농도를 Table 3과 Fig. 2에 나타내었다.

유입농도는 가을, 겨울, 봄, 여름 각각 2.06, 2.40, 2.50, 2.10mg/L이며, 유출 농도는 각각 1.05, 0.45, 0.52, 0.92mg/L로 나타났다.

Table 2 Operation conditions of the MBBR process

Item	Spring	Summer	Autumn	Winter
F/M ratio (kg BOD/kg MLVSS day)	0.15	0.17	0.17	0.13
F/M ratio (kg COD/kg MLVSS day)	0.23	0.30	0.28	0.21
Flow rate(m ³ /day)	230			
MLSS (mg/L)	2,857	2,502	2,683	3,082
MLVSS (mg/L)	2,491	1,983	1,838	2,830
SRT (day)	13.7	14.7	11.2	12.4
Temp (°C)	13.6	21.1	17.4	10.4
Sludge Return Rate (%)	50			
Internal recycling Rate (%)	200			
HRT (hr)	Anaerobic	1.46		
	Anoxic	1.94		
	Aerobic	2.82		
	Total	6.22		

T-P제거효율은 겨울철에 80.8%로 가장 높게 나타났으며, 가을철에 49.1%의 가장 낮은 T-P제거 효율을 보였다.

온도가 약 11℃로 낮을 때 가장 높은 인 제거 효율을 나타내었는데, 이는 Ekama(1984)가 lab-scale의 반응조를 14℃와 22℃에서 운전하여 낮은 온도인 14℃에서 더 높은 인 제거 효율을 얻은 결과와, Siebrietz(1983)가 14℃와 24℃에서 연구를 하여 14℃에서 보다 좋은 EBPR 운전결과를 얻은 결과와 같은 것으로 조사되었다[8].

또한, 저온성 미생물은 20℃에서 최적 성장률을 가지는 전형적인 황성슬러지 미생물보다 낮은 온도에서 더 많이 성장된다고 보고되었으며(Randall et al., 1992), 이러한 저온성 미생물의 영향으로 인해 낮은 온도에서 더 높은 인 제거 효율을 나타낸 것으로 판단된다.

그러나 10℃ 이하에서는 인 제거 효율이 다소 감소하는 것으로 나타나 인 제거를 위한 최적 온도는 약 11℃인 것으로 조사되었다.

Table 3 Influent and effluent T-P concentration and removal efficiency during the operation period

Season	TP concentration, mg/L		Removal eff., %
	influent	effluent	
Autumn	2.06	1.05	49.1
Winter	2.40	0.45	80.8
Spring	2.50	0.52	77.0
Summer	2.10	0.92	56.2

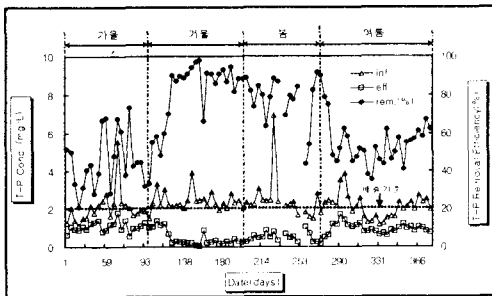


Fig. 2 Influent and effluent T-P concentration and removal efficiency during the operation period

Fig. 2에서 보듯이 유출수의 T-P농도는 유출수 배출 기준 농도인 2mg/L 이하를 충분히 만족시키는 것으로 나타났다.

3.1.2 PO₄-P

폐수내에 함유되어 있는 인은 ortho-P와 poly-P의 무기인과 유기인의 형태로 존재하며, poly-P는 수체 내에서 ortho-P의 형태로 가수분해되고 다시 미생물의 세포내로 흡수되어 poly-P의 형태로 전

환되고 축적된다.

각 계절별 PO₄-P의 농도변화를 Table 4와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 4 Seasonal concentration of PO₄-P during the operation period

Season	PO ₄ -P concentration, mg/L				
	influent	anaerobic	anoxic	acrobic	effluent
Autumn	1.02	1.88	1.66	1.27	0.89
Winter	1.53	3.97	3.02	0.80	0.21
Spring	1.57	4.01	3.21	0.39	0.11
Summer	1.60	2.96	2.63	1.01	0.67

혐기조에서는 유기물이 혐기성 상태에서 인 제거 미생물의 세포내에 흡수되며 필요에너지를 얻기 위해 인을 release하게 되므로 PO₄-P는 유입된 후 혐기조에서 증가하게 된다. 또한 호기조에서는 혐기조에서 release한 양 이상의 PO₄-P가 미생물체내에 과잉으로 uptake되므로 감소하게 된다[9].

운전기간동안의 실험결과 각 반응조에 따른 PO₄-P 농도변화는 혐기조에서 증가하고 호기조에서 감소하여 이론적인 인의 거동현상과 일치하는 것으로 나타났으며, 온도가 낮은 겨울철과 봄철에 인의 release와 uptake가 여름과 가을철에 비해 잘 이루어지는 것으로 나타났다.

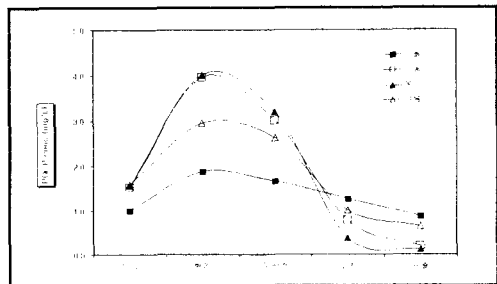


Fig. 3 Variation of PO₄-P concentration in each reactor

3.1.3 SPRR과 SPUR

인 방출율(SPRR: specific phosphorus release rate)과 인 섭취율(SPUR: specific phosphorus uptake rate)은 인 제거의 평가를 위해 중요한 역할을 하며 계산식은 식(1)과 식(2)와 같다.

$$SPRR = \frac{Q \cdot \Delta PO_4 - P}{MLVSS_{in} \cdot V_{in}} \quad (1)$$

SPRR = 인방출율, mg PO₄-P/gVSS · hr

Q = 유량, m³/d

ΔPO₄-P = 변환된 인, mg/L

$MLVSS_{an}$ = 혐기조에서의 MLVSS 농도, mg/L
 V_{an} = 혐기조 부피, m^3

$$SPUR = \frac{Q \cdot \Delta PO_4 - P}{MLVSS_{ox} \cdot V_{ox}} \quad (2)$$

SPUR = 인섭취율, mg PO_4 -P/gVSS · hr
 $MLVSS_{ox}$ = 호기조에서 MLVSS의 농도, mg/L
 ΔPO_4 -P = 변환된 인, mg/L
 V_{ox} = 호기조 부피, m^3

SPRR과 SPUR은 식(1)과 식(2)를 이용하여 계산하였으며, 결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 Seasonal SPRR and SPUR

	Autumn	Winter	Spring	Summer	
Average	0.53	0.94	0.94	0.77	SPRR (mg PO_4 -P/gVSS · hr)
Minimum	0.05	0.21	0.06	0.24	
Maximum	2.1	2.83	2.29	1.53	
Average	0.38	1.1	1.41	1.01	SPUR (mg PO_4 -P/gVSS · hr)
Minimum	0.0005	0.26	0.17	0.21	
Maximum	1.45	2.85	2.89	1.82	

실험결과 평균 SPRR은 0.53~0.94 mg PO_4 -P/gVSS · hr로 나타났으며 평균 SPUR은 0.38~1.41 mg PO_4 -P/gVSS · hr로 측정되었다.

최 등과 이(1997)가 A₂O공정을 이용하여 측정 한 SPRR값인 1.62mg PO_4 -P/gVSS · hr과 SPUR 값인 1.5~2.2mg PO_4 -P/gVSS · hr보다 낮게 측정 되었다[10].

그러나, 김 등(2002)이 측정한 SPRR값인 0.45mg PO_4 -P/gVSS · hr보다 4계절 모두 높은 값을 나타내었다[11].

3.2 영향인자

3.2.1. SRT

이론적으로 인의 제거능력은 폐슬러지 양에 함 유된 인의 함유량과 상관인 깊으며 SRT는 인 release와 uptake에 매우 중요한 인자로 인제거효 율에 많은 영향을 미친다.

Fig. 4은 SRT에 따른 각 반응조에서의 PO_4 -P 농도 변화를 나타내었다.

실험결과, SRT가 8.8일에서 가장 많은 인이 release 및 uptake 된 것으로 나타났다. 본 실험의 8.8일의 최적 SRT는 chao(1999)등이 제시한 최적 SRT인 10일과 비슷한 값을 보이는 것으로 나타났 다. 하지만 5일 이하에서는 인의 release 및 uptake 가 잘 이루어지지 않는 것으로 보고되었으며[12], 따라서 최적 SRT를 잘 선택하여 반응조를 운전하

는 것은 매우 중요한 일이라 판단된다.

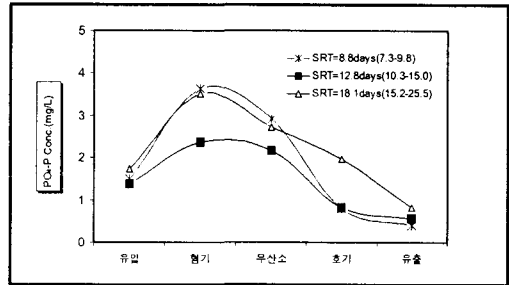


Fig. 4 SRT effect on variation of PO_4 -P concentration in each reactor

3.2.2 유기물

유기물과 인 사이에도 매우 깊은 상관관계를 가 지며 BOD/P와 COD/P비율은 BPR(Biological Phosphorus Removal)에서 기질농도의 중요성을 나타낸다.

인제거효율은 혐기성 지역에서 아세트산염과 프 로피온산과 같은 발효산물의 양을 증가시킴으로써 증가될 수 있다.

Fig. 5에 각 반응조에서의 평균 SBOD와 PO_4 -P 농도를 나타내었다.

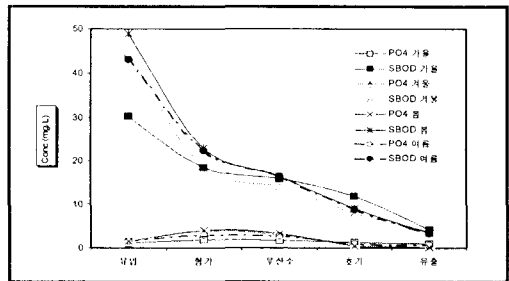


Fig. 5 Variation of SBOD and PO_4 -P in each reactor

실험결과 혐기조에서 PO_4 -P release과 동시에 많은 양의 SBOD 소모가 일어나는 것으로 나타났 다.

또한, Fig. 5에서 나타난 바와 같이 SBOD 소모 가 많은 봄철과 겨울철이 여름철과 가을철 보다 더 많은 PO_4 -P release가 일어나는 것으로 보아 SBOD 소모량과 PO_4 -P release량은 서로 비례하는 것으로 분석되었다.

BOD 부하율에 따른 T-P제거효율과 유출농도를 Fig. 6에 나타내었다.

유기물부하율이 증가함에 따라 인제거효율 또한 증가하는 것으로 나타났다.

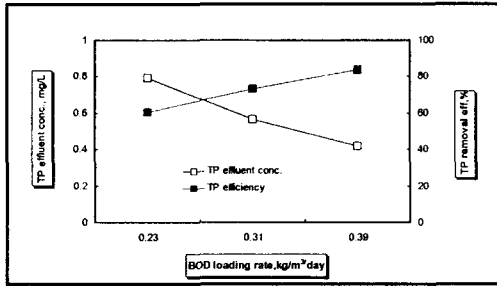


Fig. 6 Variation of T-P removal efficiency and effluent concentration according to BOD loading rate

3.2.3 NO₃-N 농도

각 반응조별 PO₄-P와 NO₃-N의 농도변화를 Fig. 7에 나타내었다.

혐기조에서의 NO₃-N유입은 인제거공정에 영향을 미친다. P. S. Baker(1996)에 의하면 혐기조에서 NO₃-N농도는 인 제거효율에 영향을 주며 NO₃-N농도가 높을수록 인제거효율은 낮아진다고 보고하였다[13].

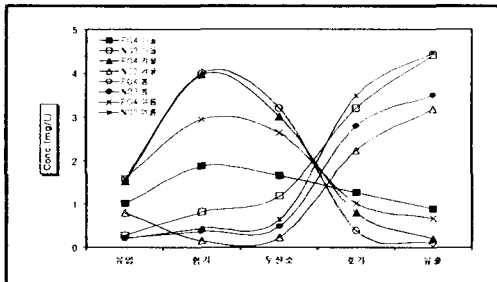


Fig. 7 Variation of PO₄-P and NO₃-N concentration in each reactor

이 등(2002)은 다양한 NO₃-N농도에서 Acinetobacter의 성장을 실험하였으며, 실험결과 NO₃-N는 성장을 억제시키며 또한 인 uptake를 억제시키는 것으로 나타났다[14].

본 연구에서도 낮은 PO₄-P의 release는 높은 농도의 NO₃-N이 원인인 것으로 분석되었으며 낮은 NO₃-N의 농도를 나타낸 겨울철이 높은 PO₄-P의 release가 일어나는 것으로 나타나 NO₃-N농도가 미치는 영향은 큰 것으로 조사되었다.

3.3 Batch test

3.3.1 실험방법

Batch test는 본 실험에 사용된 Pilot-Plant와 비슷한 조건으로 수행하였으며, 시간에 따른 인의 release와 uptake를 측정하였다.

실험에 필요한 슬러지는 Pilot-Plant로부터 채취

하여 사용하였으며, batch test를 위하여 원통형 형태의 5L 반응조를 이용하였다.

혐기성 조건에서의 실험은 PO₄-P 농도가 각각 10, 5, 2.5mg/L로 다를 때 PO₄-P release 변화를 3시간에 걸쳐 측정하였으며, 호기성 조건에서의 실험 역시 PO₄-P의 uptake 변화를 3시간에 걸쳐 측정하였다.

실험은 반응조내 유기물이 약 200mg COD/L 일 때 수행되었으며, 인의 uptake 변화율에 따른 호기조 내의 Media의 효과를 알아보기 위해 두 개의 반응조를 이용하여 Media의 유·무에 따른 인의 uptake 변화율을 살펴보았다. Media는 반응조의 15%에 해당하는 양을 주입하여 실험하였다. 시료 채취는 15분마다 일정하게 채취하였으며, 온도가 인에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 15°C와 25°C에서 혐기성 그리고 호기성 조건의 반응조를 이용하여 인의 release와 uptake를 측정하여 분석하였다. 반응조 내의 산소는 blower와 diffuser를 설치하여 공급하였다.

3.3.2 혐기조 batch 실험

15°C와 25°C일 때의 시간에 따른 인 release를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었다.

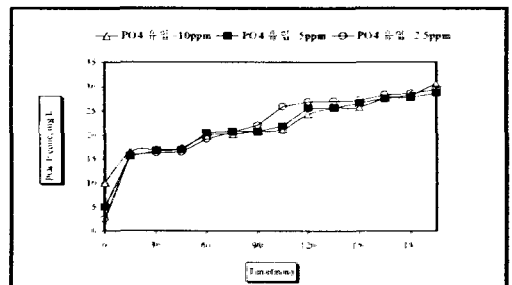


Fig. 8 Variation of PO₄-P concentration according to time in anaerobic reactor (T=15°C)

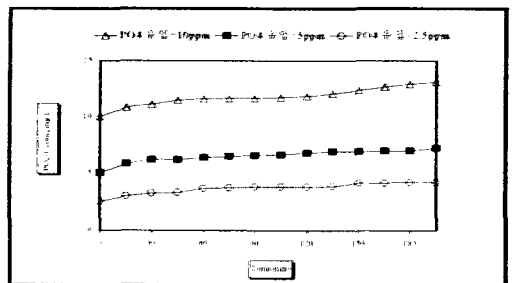


Fig. 9 Variation of PO₄-P concentration according to time in anaerobic reactor (T=25°C)

온도가 15°C로 낮은 조건에서는 초기 PO₄-P 농도는 다르지만, 3시간 이후의 PO₄-P는 모두 약

30mg/L의 높은 농도까지 release 되는 것으로 나타났으며, 약 20mg/L 이상의 높은 변화율을 나타내었다. 그러나 온도가 25℃로 높은 경우에는 초기 PO₄-P 농도가 10mg/L일 때 약 3mg/L 정도 증가 하였으며, 2.5mg/L와 5mg/L에서는 거의 release가 안 되는 것으로 나타나 인의 release는 온도의 영향을 많이 받는 것으로 조사되었다. 이 결과는 Pilot Plant에서 실험한 온도가 낮은 겨울철이 온도가 높은 여름철보다 PO₄-P가 많이 release된 결과 값과 일치하는 것으로 나타났다.

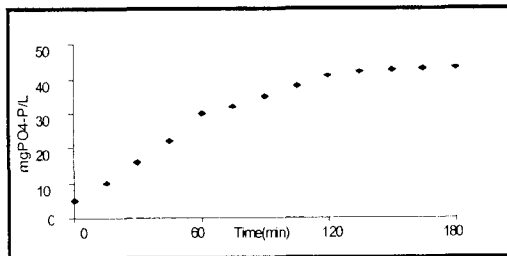


Fig. 10 Phosphorus release according to time (T=15°C)

또한, Fig. 10에서 보는 바와 같이, 15℃ 온도에서 인 release은 E. Tykesson, H. Aspegren, M. Henze, P.H. Nielsen와. la C. Jansen(2002)의 문헌과 유사한 것으로 나타났다[15].

3.3.3 호기조 batch 실험

호기조내에서의 PO₄-P uptake변화를 15℃, 25℃일 때로 나누어 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다.

온도가 15℃와 25℃일 때의 초기 PO₄-P농도는 각각 1.5mg/L, 3.5mg/L로 온도가 낮을 때 높은 uptake율을 나타내는 것으로 나타났다. 그러나 온도가 15℃일 때는 Media에 상관없이 비슷한 uptake율을 나타내었으나, 25℃일 때는 Media를 투입한 반응조에서의 PO₄-P uptake가 더 잘 이루어지는 것으로 보아 Media가 있는 경우에 더 높은 인 제거효율을 나타내는 것으로 분석되었다.

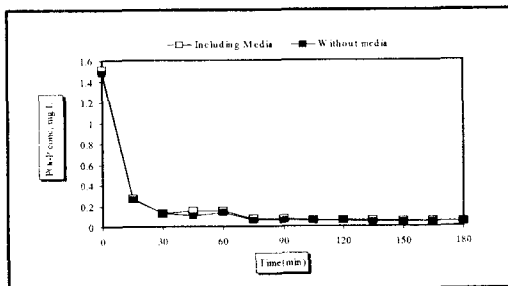


Fig. 11 Variation of PO₄-P concentration according to time in aerobic reactor (T=15°C, 1.5ppm)

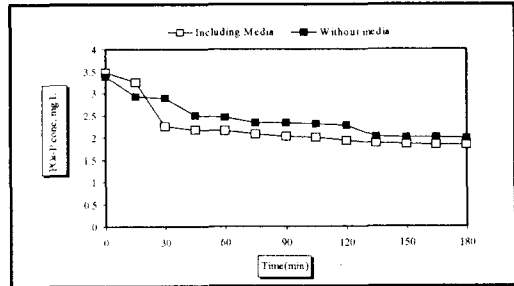


Fig. 12 Variation of PO₄-P concentration according to time in aerobic reactor (T=25°C, 3.5ppm)

호기조에서 시간에 따른 PO₄-P 농도 변화는 Fig. 13과 Fig. 14에 나타내었다.

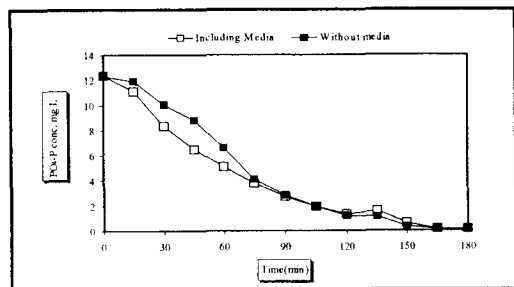


Fig. 13 Variation of PO₄-P concentration according to time in aerobic reactor (T=15°C, 12.5ppm)

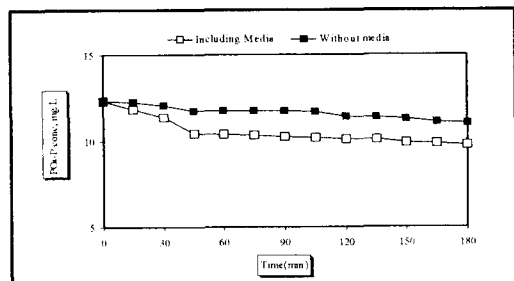


Fig. 14 Variation of PO₄-P concentration according to time in aerobic reactor (T=25°C, 12.5ppm)

온도가 낮은 15℃의 경우, 25℃보다 인 uptake가 잘 이루어져 유출농도가 1mg/L 이하로 나타났다.

Media를 포함하고 있는 15℃의 경우, 인 uptake가 약간 높게 나타났으나 그 차이는 미비하였다. 그러나 온도가 높은 25℃의 경우, Media의 유·무에 따른 uptake 차이가 크게 나타나 Media가 인 제거에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

이러한 Batch test결과 온도는 BPR(Biological Phosphorus Removal)반응율에 영향을 많이 미치는 것으로 나타났으며, Media를 투입할 경우 보다

나은 인제거를 기대할 수 있으므로 인 제거효율이 낮을 경우 Media를 투입하는 것은 또 하나의 좋은 방안으로 사료된다.

3.4 인의 Mass balance

실험기간 동안 인의 물질수지를 Fig. 15~Fig. 19에 나타내었으며 모든 데이터는 물질수지식을 사용하여 계산하였다.

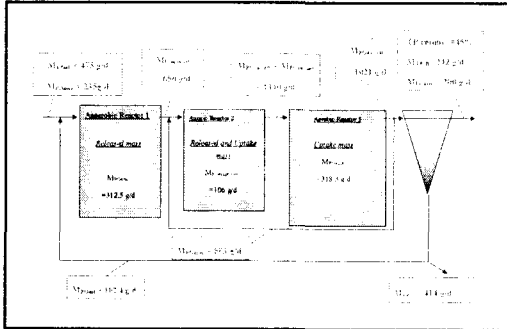


Fig. 15 Schematic diagram for Phosphorus mass balance in each reactor (Autumn)

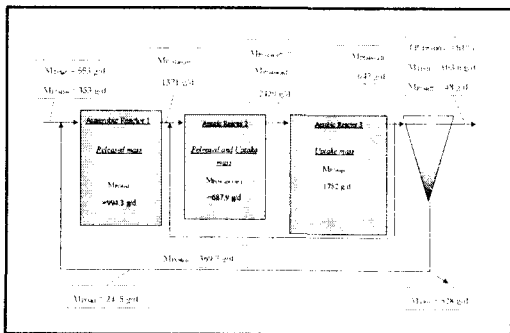


Fig. 16 Schematic diagram for Phosphorus mass balance in each reactor (Winter)

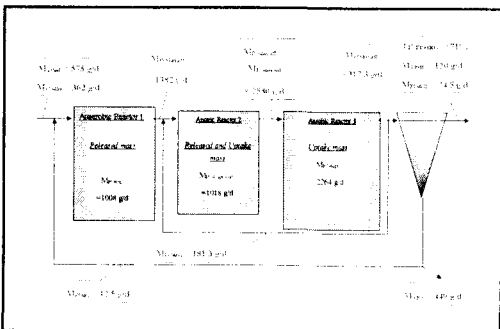


Fig. 17 Schematic diagram for Phosphorus mass balance in each reactor (Spring)

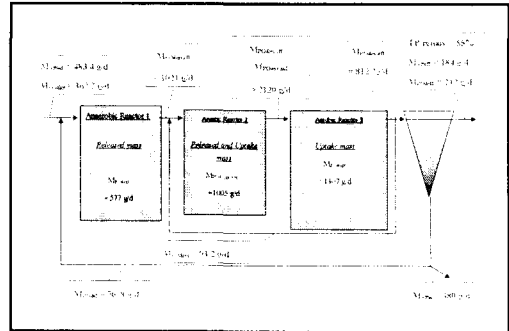


Fig. 18 Schematic diagram for Phosphorus mass balance in each reactor (Summer)

물질수지 결과 온도가 낮은 겨울철과 봄철에 인 제거효율인 81%, 71%로 가장 높게 나타났다.

혐기조에서의 인 release량은 가을, 겨울, 봄, 여름철에 각각 312.5g/d, 994.3g/d, 1008g/d, 577g/d로 계산되었으며 온도가 낮은 겨울철과 봄철이 여름, 가을철에 비해 약 2배 정도 높은 것으로 나타났다.

또한, 호기조에서의 인 uptake량은 318.3g/d, 178.2g/d, 2264g/d, 1307g/d로 계산되었으며 봄철에 가장 많은 양의 PO₄-P가 uptake된 것으로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 유동상 생물막공정을 이용하여 계절별에 따른 인 제거효율과 영향인자들을 알아보고자 하였으며 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. T-P 제거효율은 겨울철에 80.8%로 가장 높은 제거효율을 보였으며, 가을철에 49% 정도로 가장 낮은 제거효율이 나타났다. 그리고 SPRR과 SPUR은 각각 0.53~0.94mg PO₄-P/gVSS·hr, 0.38~1.41mg PO₄-P/gVSS·hr로 측정되었다.
2. 운전기간 동안 인제거를 위한 최적 SRT는 약 8.8일인 것으로 나타났다.
3. 인제거를 위한 최적 온도는 약 11℃인 것으로 나타났다으며, 10℃이하에서는 인제거효율이 다소 감소하는 것으로 조사되었다.
4. 혐기조에서 NO₃-N은 인 침취를 억제시키는 인자로 제거공정에 많은 영향을 미치며, 유기물부하율이 증가함에 따라 인제거효율 또한 증가하는 것으로 나타났다.
5. Media 유·무에 따른 영향을 알아보기 위해

batch test를 수행한 결과, Media를 사용한 경우 인제거에 있어 더욱 효과적인 것으로 조사되었으며, 반응조에 Media 충전시 높은 MLSS와 부속미생물의 확보로 인해 온도가 낮은 겨울철에도 비교적 높은 제거효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

6. 인 Mass Balance는 95%의 정확성으로 공정에서의 인 형태의 반응기작을 살펴보는 데 효과적인 것으로 보이며, 모니터링과 시뮬레이션 프로그램에 적용하여 사용하는데 큰 무리가 없을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] Lee, K. H., "Effects of internal recycle ratio & Media packing ratio on nitrification in a submerged fixed-film reactor", *J. of KSEE*, Vol. 19 No. 4, pp. 471~480, 1997.
- [2] Kang, H. J., "The Removal of nitrogen by two phase biofilm in single reactor system", MS Thesis, Dept. of Environ. Eng., Kyungshung University, Korea, 1996.
- [3] 박종문, 박상규, "생물학적 인제거연구의 현황 및 발전방향", *Dicer Techno*. Vol.4, No.1, pp.53~64. 2005.
- [4] Siebritz, I. P., et al., "Parametric model for biological excess phosphorus removal", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 15 No. 3/4, pp. 127~152, 1983.
- [5] Krichen, D. J., et al., "Design & start-up of several full-scale A/O plants", *Proceeding of an IAWPRC Specialized Conference*, pp. 273~283, 1987.
- [6] Rusten, B., Hem, L. J., & Odegaard, H., "Nitrification of municipal wastewater in movingbed biofilm reactors", *Wat. Environ. Res.*, Vol. 67, pp. 75~86. 1995.
- [7] Kim, Y. H., et al., "Nitrification of municipal wastewater with biofilm Media", *J. of KSEE*, Vol. 19 No. 3, pp. 415~424, 1997.
- [8] Ekama, G.A., Siebritz, I.P., Marais v., G. R., "Considerations in the process design of nutrient removal activated sludge processes", *Water Science and Technology*, Vol. 15, No. 3-4, pp. 283-318, 1983.
- [9] Bruce E. Rittmann, Perry L. McCarty. *Environmental Biotechnology*, "Principles and Applications", 2001.
- [10] Euso Choi, Hosik Lee, Chil Lim Park, Chul Hwo Park, "Performance Characteristics of BNR Systems for Low Strength Municipal Wastewater", 1997.
- [11] 김광수, 서태규, 이경호, "생물학적 질소 및 인의 동시제거를 위한 A²/O 공정의 설계인자에 관한 연구", *대한환경공학회지*, Vol. 24, No. 4, pp. 735~741, 2002.
- [12] Chaio-Fuei Ouyang, Shun-Hsin Chuang, and Lau-Land Su., "Nitrogen and Phosphorus Removal in a Combined Activated Sludge-RBC Process", *Proc. Natl. Sci. Counc*. Vol. 23, No. 2, 1999.
- [13] P.S. Barker and P.L. Dold., "Denitrification behavior in biological excess phosphorus removal activated sludge systems", *Wat. Res.*, Vol. 30, No. 4, pp. 769-780, 1996.
- [14] Chan Won Lee, Seung-Yeon Weon, "Nitrite inhibition of aerobic growth of acinetobacter sp.", *Water Research.*, Vol. 36, No. 18, pp. 4471-4476 2002.
- [15] Tykesson, E., Aspegren, H., Henze, M., Nielsen, P.H., Jansen, J. La. C., "Use of phosphorus release batch tests for modelling an EBPR pilot plant", *Water Science and Technology*, Vol. 45, No. 6, pp. 99-106, 2002.