

## 연속회분식반응조 공정에서 교반/폭기비와 SRT가 영양염류제거에 미치는 영향

### Effects of mixing/aeration ratio and SRT on nutrient removal in SBR process

전석준 · 김한수\*

Seok-Jun Jeon · Han-Soo Kim\*

대한주택공사 · \*엔텍(주)

Korea National Housing Cooperation  
\* Environment Technology

#### Abstract

In this study, nutrients treatment by sequencing batch reactors(SBR) was performed. Nitrogen and phosphorus removal efficiencies were evaluated by changing SRT and mixing/aeration ratio. Not only nitrogen but also phosphorus removal patterns were investigated through track studies on 1 cycle. As SRT was fixed and mixing/aeration ratio was changed, maximum nitrogen removal efficiency was 87.6% at mixing/aeration ratio 0.67. Phosphorus removal efficiencies were more than 85.5% except no mixing condition. As mixing/aeration ratio was fixed and SRT was changed, nitrogen removal efficiencies were 70.5~79.8%, which represented slight changes, while phosphorus removal efficiencies were 49.0~97.3%, which represented sharply decreasing tendency at less than 20 day. Both phosphorus release rate  $k$  and maximum phosphorus release rate  $P_{max}/M$  were decreased as SRT was decreased, but they were not affected by mixing/aeration ratio. It was found that there is a linear relationship between ortho-phosphate uptake and maximum ortho-phosphate release.

**Keywords** : SBR, mixing/aeration ratio, SRT, Phosphorus removal, Nitrogen removal

#### 1. 서 론

호수나 저수지 혹은 유속이 느린 하천에서 다량의 영양염류가 유입될 경우 조류등의 수생식물이 이상증식하며, 이들 일차생산자의 대사와 분해의 반복과정을 통하여 수중의 용존산소가 결핍되고 악취가 발생하며 수저부에서는 부패물의 축적이 일어나 수질이 악화된다. 이러한 현상을 부영양화(Eutrophication)라한다. 부영양화의 원인물질인

질소나 인을 제거하는 방법에는 물리화학적 처리법과 생물학적 처리법등이 있는데 일반적으로 생물학적 처리법이 더 경제적이며 운전이 용이하고 처리장으로부터 2차 오염물질이 발생할 위험이 적다는 등의장점 때문에 관심의 대상이 되고 있다.

생물학적 질소제거는 질산화 및 탈질과정을 이용하고 인제거는 인방출 및 섭취현상을 이용하는 것이 효과적이라는 사실이 밝혀짐에 따라 호기와 무산소 그리고 혐기조건을 교대로 운전함으로써 혐기조건에서 인방출, 호기조건에서 인섭취 및 질

산화 그리고 무산소조건에서 탈질화를 유도하는 A/O process, Bardenpho process, 무산소성 산화구(Anoxic oxidation ditch)등이 개발 연구되고 있다.<sup>1),2),3)</sup> 또한 최근에 각종 자동제측기기 및 제어 장치의 개발로 그 동안 침체되어 있던 회분식 반응기의 일종인 SBR(Sequencing Batch Reactor)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는데, SBR은 간단한 기계조작에 의하여 쉽게 운전조건을 바꿀 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 SBR공정내에서 전 공정에 걸친 질소와 인의 거동과 함께 반응시간에 대한 교반/폭기비와 SRT의 변화가 질소 및 인의 제거효율에 미치는 영향을 비교 평가하고 실제 처리 시설의 운영과 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 실험 장치

본 연구를 위하여 실험실 규모의 반응조를 원통형의 아크릴 수지로 제작하였다. 반응조는 5대를 설치하였고, 각 반응조는 두께 5mm, 직경 20cm, 높이 35cm로서 반응기 용적으로 유입후 최대 액

량을 3L, 처리수 방류 후 액량을 2L로 하였으며 실험장치 개략도는 Fig. 1과 같다. 호기성 반응시 폭기장치는 산기관을 사용하여 약 3L/min의 공기를 공급하였으며 무산소, 혐기성 반응시에는 교반기를 이용하여 혼합하였다. 이 장치들은 시간조절장치에 연결하여 연속처리될 수 있도록 하였고, 반응조는 수조내에서 온도조절장치를 사용하여  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지되도록 하였다.

### 2.2 실험 재료 및 방법

본 연구에 사용된 유입폐수는 합성폐수와 서울소재 Y 우유제조공장에서 배출되는 폐수로서 각각의 성분과 조성은 Table 1, Table 2와 같고, 실험개시시의 식중슬러지는 서울소재의 Y우유공장 폐수처리장의 반송슬러지를 사용하였다. 반응조 운영방법은 Table 3과 같다. 모든 반응조의 운영시간은 24시간/1cycle이며 1 cycle은 교반기/폭기기 20시간, 침전배출기, 2시간, 대기기 2시간으로 구성된다. SRT를 고정시키고 교반/폭기비를 변화시킨 Mode I(Run1~Run5)과 교반/폭기비를 고정시키고 SRT를 변화시킨 Mode II로 나뉘며, Mode I에서는 우유폐수를 Mode II에서는 합성폐수를 각각 유입기질로 이용하였다.

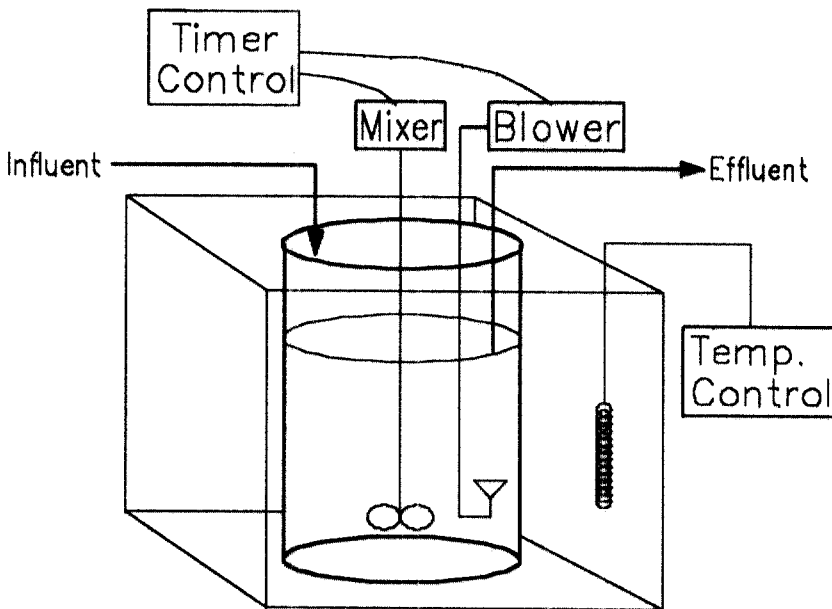


Fig. 1 Schematic diagram of SBR

### 2.3 분석방법

처리수의 분석은 반응조의 상태를 알기위한 실험을 계속하여 반응조내의 상태가 정상상태에 도달할때까지 유입수, 유출수, 폭기액에 대하여 3일에 1회씩 측정하는 것을 원칙으로 하였으며, 정상상태에 도달했을 경우 1 cycle내의 수질변화를 파악하기 위하여 2~4시간에 1회씩 반응조내에서 채취한 시료의 여액에 대해 분석을 실시하였다. 모든 분석은 Standard Method<sup>4)</sup>에 의하여 실시하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 1주기공정(1cycle)내의 수질변화

SBR내의 유기물, 질소 및 인의 거동을 살펴보기 위하여 Run1과 Run3에 대하여 1 Cycle동안 반응조내에서 채취한 여액의 COD, NH<sub>4</sub>-N, NO<sub>x</sub>-N (NO<sub>3</sub>-N+NO<sub>2</sub>-N) 및 T-P의 시간적 변화를 각각 Fig. 2, Fig. 3에 나타내었다. Fig. 2에서 산화질소는 탈질이 원활히 이루어지지 않은 이유로 Fig. 3보다 다량 잔존하였다. Fig. 3에서 암모니아성질소

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Item	Concentration(mg/L)
Glucose	1,000
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	500
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	130
MgSO <sub>4</sub> · 7H <sub>2</sub> O	100
CaCl <sub>2</sub>	150
NaCl	100
FeCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	5
MnSO <sub>4</sub> · H <sub>2</sub> O	10
NaHCO <sub>3</sub>	750

Table 2. Characteristics of milky wastewater

Item	Concentration(mg/L)
pH	7.0~ 7.5
COD	1,000~1,200
TKN	60~80
NH <sub>3</sub> -N	5~10
NO <sub>3</sub> -N	0
NO <sub>2</sub> -N	0
T-P	25~35
Alkalinity(as CaCO <sub>3</sub> )	560~650
SS	400~600

Table 3. Experimental strategies and operating conditions

Operational condition		SRT(day)	Time(hr)			
			Mixing	Aeration	Settlement/ decant	Idle
Mode I	Run1	30	0	20		
	Run2	30	4	16		
	Run3	30	8	12	2	2
	Run4	30	12	8		
	Run5	30	16	4		
ModeII	Run6	5	8	12		
	Run7	7.5	8	12		
	Run8	10	8	12	2	2
	Run9	20	8	12		
	Run10	30	8	12		

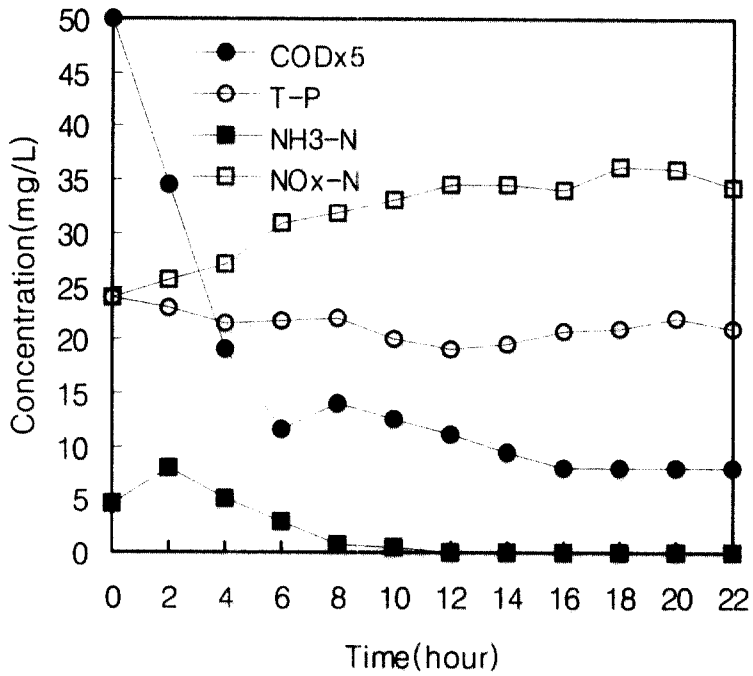


Fig. 2 Results of track study on 1 cycle in Run 1

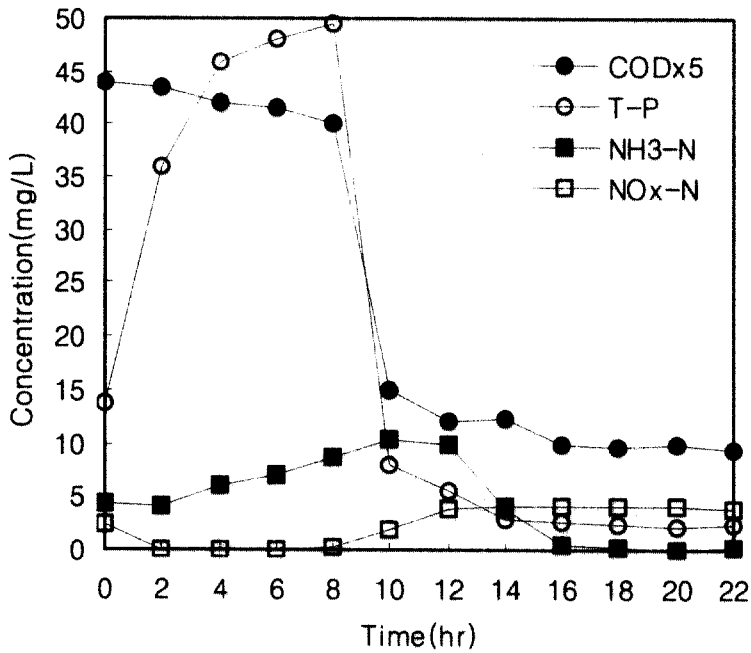


Fig. 3 Results of track study on 1 cycle in Run 2

는 폐수 유입직후서부터 교반기를 거쳐 폭기시간 중에도 계속 증가하다가 감소하는 경향을 나타내는데 이는 유입수의 총질소 중 90% 이상이 유기질소로서 아미노기 이탈반응에 의하여 단백질로부터 암모니아성질소로 전환되었기 때문이다.<sup>5)</sup> 한편 1cycle 초기의 반응조에 잔존하는 산화질소는 교반 초기에 급속히 감소하기 시작하여 2시간내에 거의 탈질되었다. 이같은 현상은 유입수 중의 유기물이 수소공여체로, 용존산소가 소실된 상태에서 산화질소만이 전자수용체로서 작용하여 생물학적 탈질이 진행되었음을 의미한다. COD는 폐수 유입직후 급감하게 되는데 그 원인의 일부는 미생물의 분해작용과 더불어 대부분이 미생물의 흡착에 의한 것이다.<sup>6,7)</sup> 유기물은 대부분 교반기 무산소, 혐기성상태에서 탈질과 인방출에 필요한 외부기질로 이용되어 비교적 완만한 감소경향을 보이지만 폭기개시 후 호기상태에서 미생물분해에 의하여 급속히 감소하였다.

인은 Fig. 2에서와 같이 교반을 수행하지 않은 경우 인의 거동은 유입직후 폭기종료시까지 약간의 감소경향이 있을뿐 거의 일정한 값을 유지하는

반면 나머지 교반기를 첨가한 반응조들에서는 대개 교반 후 혐기성상태에서 슬러지 내로부터 인의 방출이 시작되어 2~4 시간까지 급속히 증가하다 4시간 이후 완만한 증가추세를 나타내며 폭기 개시후 호기성상태에서 슬러지에 의한 인의 과잉섭취현상에 따라 폭기공정 초기에 급격한 감소를 나타내었다.

Run3과 Run10의 반응조내에서 용존산소와 pH의 시간경과에 따른 변화를 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. 용존산소는 유입직후 교반기 초기 수분내에 약 0.1mg/L 이하로 감소하여 폭기개시 직전까지 거의 0mg/L를 유지하다가 폭기직후 1시간 안에 4mg/L로 급증하고 폭기말기까지 5~6mg/L의 용존산소가 일정하게 존재하였다.

용존산소의 변화가 두 그림에서 비슷한 양상을 보인 반면 pH의 경우 유입후 무산소상태에서 탈질에 의하여 약간의 증가경향을 띄며 폭기 직후 탄산가스의 방출로 인하여 약간 증가한 후 암모니아성질소의 질산화에 의하여 바로 pH가 저하하는 경향을 보이지만 특히 Fig. 5의 경우 폭기 후 pH가 약 8.2까지 급속히 증가하였으며, 그 원인으로

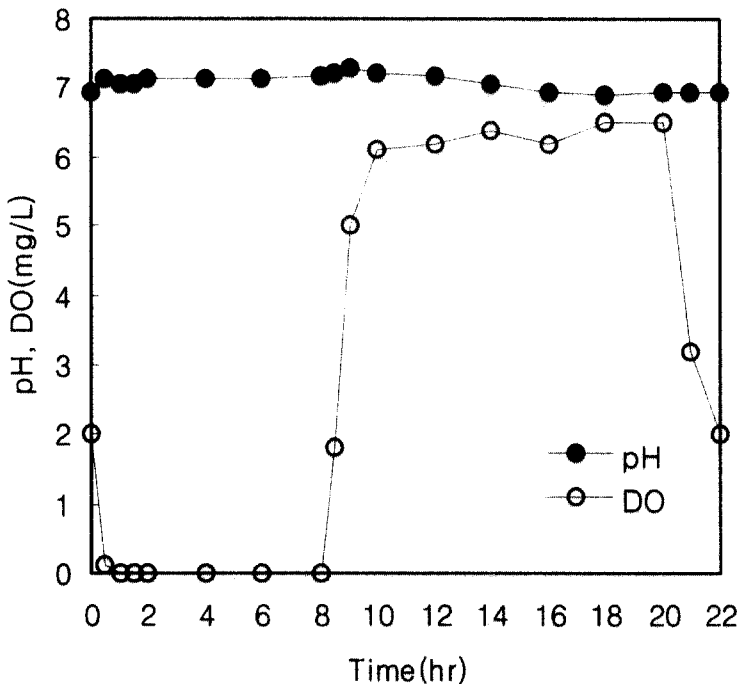


Fig. 4 Variation of pH, DO during 24hours in Run 3

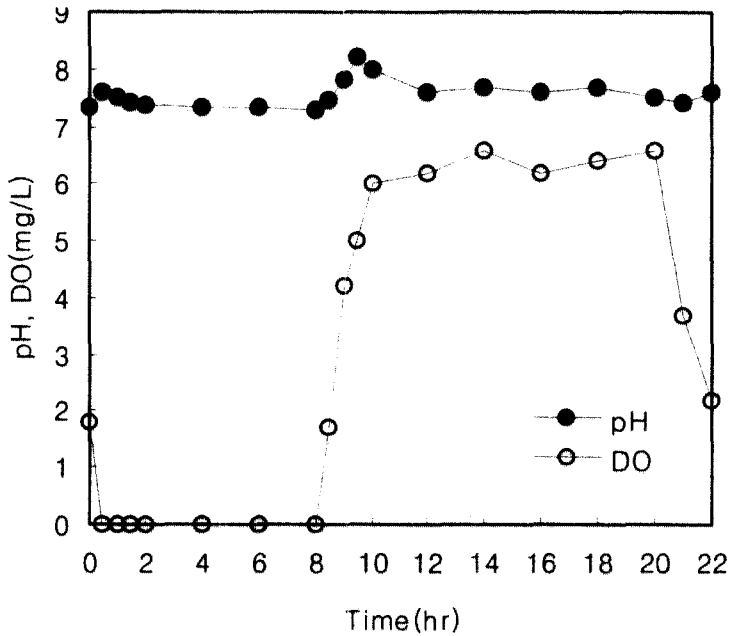


Fig. 5 Variation of pH, DO during 24hours in Run 10

는 탄산가스의 방출과 더불어 폭기직전까지 잔류한 단백질의 분해에 의한 것이다.<sup>9)</sup>

3.2 질소의 제거효율

교반비에 따른 TKN 및 총질소제거효율을 Fig. 6에 나타내었다. 유출수의 TKN은 운영조건에 따라 83.6~97.1%의 제거효율을 보이고 폭기반응만으로 운영한 반응조에서 최대제거효율을 나타내었지만 암모니아성질소의 산화로 생성된 산화질소가 충분한 탈질을 이루기 힘들기 때문에 총질소 제거효율은 50%에 못미치게 된다. 반대로 교반비가 4.0일 때 78.1%의 제거율만을 나타내는 원인은 교반비가 증가할수록 유출수의 산화질소량은 적어지지만 유기질소의 분해가 충분치 못하고 질산화물 수행하는 질산화 미생물들이 다른 운영조건보다 짧은 호기성 조건에서 적절히 활동할 수 없기 때문이다. 따라서 교반비가 0.67일 경우 최대 질소제거율을 나타내었다.

Fig. 7은 각각 SRT에 따른 TKN 및 총질소의 제거율과의 관계를 나타낸 것으로 TKN과 총질소의 제거율은 각각 94.2~99.8%, 70.5~79.8%이다. SRT가 감소할수록 충분한 질산화가 이루어지지 못함에 따라 암모니아성질소의 제거효율이 낮아지게

된다. 따라서 SRT 30일 때 TKN 및 총질소 제거효율이 최대를 나타내었다.

3.3 인의 제거효율

Fig. 8은 교반비에 따른 인의 제거율을 나타낸 것이다. 인은 교반을 수행하지 않은 조건에서 제거율이 30%로 저조하지만 교반기를 첨가한 나머지 반응조건에서는 85.5~99.5%의 제거효율을 나타내었다. 이와 같이 인의 제거효율이 현격한 원인은 폐수 유입 직후 혐기성 교반기를 첨가함으로써 인의 방출과 섭취에 관여하는 미생물들이 슬러지내에서 충분히 축적될 수 있는 조건이 형성되었기 때문이다.<sup>9)</sup>

Fig. 9는 SRT에 따른 변화를 나타낸 것으로서 최소제거효율은 SRT가 5일일때 49%이고 SRT가 10,20,30일로 증가함에 따라 인제거효율이 각각 71.7, 93.9, 97.3%로 증가하였다. Okada<sup>10)</sup>에 의하면 SRT가 감소함에 따라 인제거율이 감소하는 주 원인으로서는 슬러지 폐기량이 증가함에 따라 인제거에 관여하는 미생물들이 유실되기 때문이다. 따라서 이같은 미생물을 충분히 축적시키는데 필요한 SRT로는 20일 이상이 요구된다.

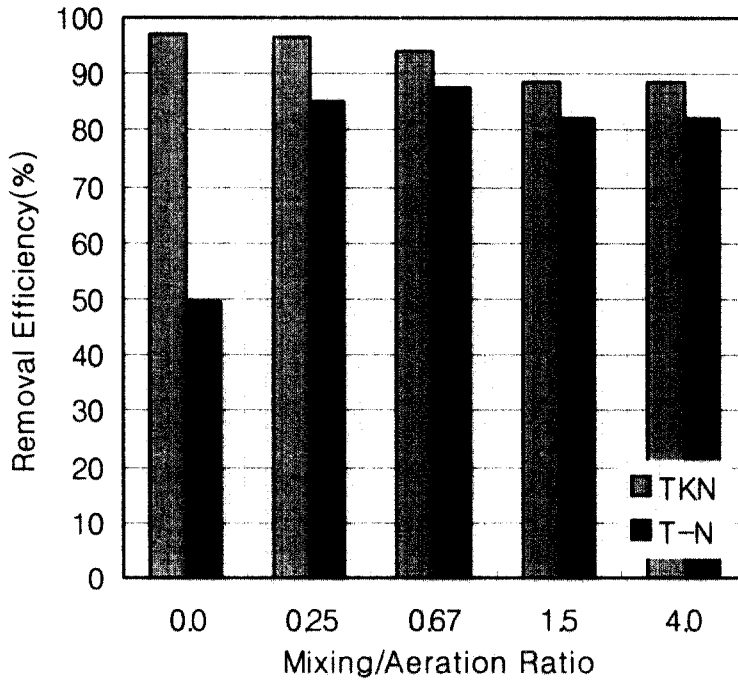


Fig. 6 Influence of mixing ratio on TKN, T-N removal efficiency

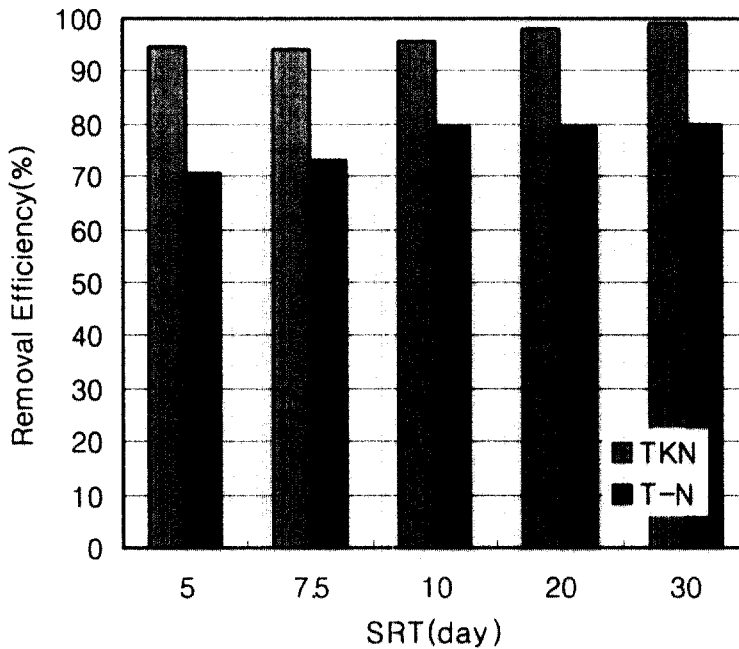


Fig. 7 Influence of SRT on TKN, T-N removal efficiency

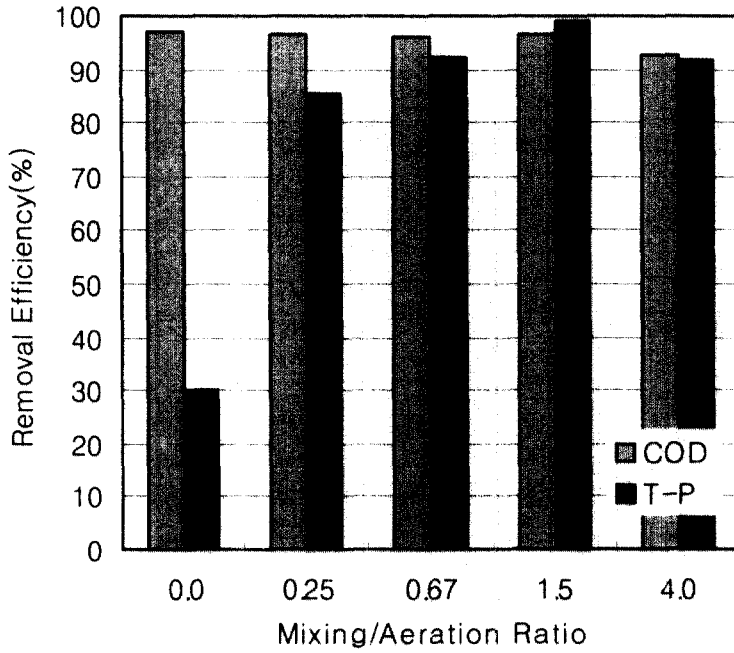


Fig. 8 Influence of mixing ratio on COD, Phosphorus removal efficiency

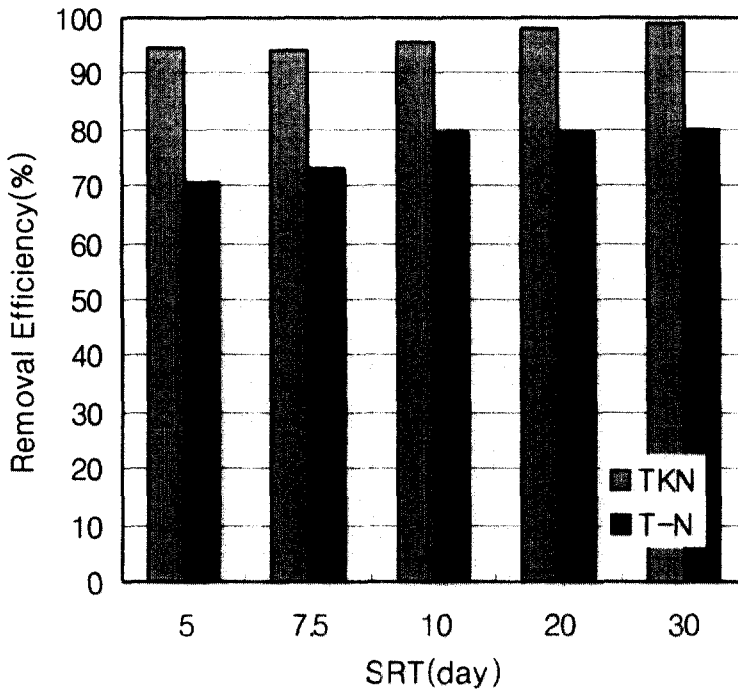


Fig. 9 Influence of SRT on COD, Phosphorus removal efficiency



혐기성상태에서 인방출속도는 외부기질이 충분히 존재한다는 가정하에 다음과 같이 나타낼 수 있다.<sup>3)</sup>

$$\frac{dP}{dt} = k \left( \frac{P_{st}}{M} - \frac{P}{M} \right) M$$

- 여기서, P : 액상으로 방출된 인농도(mg/L)
- dP/dt: 인방출속도(mg/L · h<sup>-1</sup>)
- P<sub>st</sub>/M : 최대인방출량(mg P/mg · MLSS)
- M : 미생물량 MLSS (mg/L)
- k : 속도상수 (h<sup>-1</sup>)

또한 (P<sub>st</sub>/M-P/M)는 세포내 인저장량이고 혐기성 조건하에서 M이 일정하다고 가정하면 다음식울 얻을 수 있고 P<sub>st</sub>/M은 Thomas Method<sup>11)</sup>에 적용하여 구할 수 있다.

$$\frac{P}{M} = \frac{P_{st}}{M} (1 - \exp(-kt))$$

혐기성 상태에서의 인의 방출성향을 알아보기 위하여 위 식들을 이용하여 각 운영조건에 따른 인방출 속도상수 k와 최대 인방출량 P<sub>max</sub>/M을 계산하였으며, 결과값을 Table 4에 나타내었다. Table 4로부터 k와 P<sub>max</sub>/M은 SRT가 짧아짐에 따

라 감소하는 경향을 나타내며 교반/폭기비에는 큰 영향을 받지 않는다.

한편 최대인방출량과 인의 제거량과의 관계를 규명하기 위하여 Fig.10에 P<sub>max</sub>/M과 호기성 상태에서 단위미생물당 섭취되는 인의 양과의 관계를 표시하였다. 이 그림으로부터 인의 방출량과 섭취량간에는 선형적인 관계가 있음을 알 수 있다.

### 3.4 MLSS와 SVI변화

Table 5는 교반/폭기비와 SRT변화에 따른 MLSS와 SVI의 변화를 나타낸 것으로, 교반비/폭기비가 증가할수록 MLSS 농도가 증가하는 경향을 보이는데 무산소 교반반응시 미생물에 증가된 세포저장물질이 폭기기간이 짧아짐에 따라 분해가 완전하지 못하기 때문이다. 한편, SRT 30일과 5일의 MLSS 비는 약 2.3으로 SRT가 감소할수록 하루 일정하게 폐기되는 미생물이 늘어나므로 MLSS농도간에는 큰 차이가 나타난다. 그러나 SVI는 교반/폭기비, SRT 및 MLSS와 관계없이 약 40~100 범위로 침강성이 양호하다. 이는 무산소 교반기에서 폭기반응으로 전환시 반응조내에는 기질농도의 급격한 변화, 즉 순간 침가에 가까운 환경을 만들어 급격한 변화에 의하여 침강성에 저해인자인 사상성 미생물의 생육을 억제하기 때문이다.<sup>6),12)</sup>

Table 4 Summary of P<sub>max</sub>/M for all Runs

SRT(day)	Mixing/Aeration Ratio	Calculated Eq.	R Squared	k(day <sup>-1</sup> )	P <sub>st</sub> /M (mgP/mg · MLSS <sup>-1</sup> )
30	0.25	y=0.457X+0.0165	0.998	0.260	0.0128
30	0.67	y=0.388X+0.0277	0.981	0.431	0.0113
30	1.5	y=0.382X+0.0242	0.993	0.380	0.0124
30	4.0	y=0.409X+0.0227	0.997	0.334	0.0116
5	0.67	y=0.805X+0.0364	0.977	0.272	0.0043
7.5	0.67	y=0.702X+0.0237	0.994	0.203	0.0066
10	0.67	y=0.577X+0.0210	0.973	0.219	0.0094
20	0.67	y=0.426X+0.0273	0.988	0.385	0.0103
30	0.67	y=0.404X+0.0232	0.973	0.345	0.0116

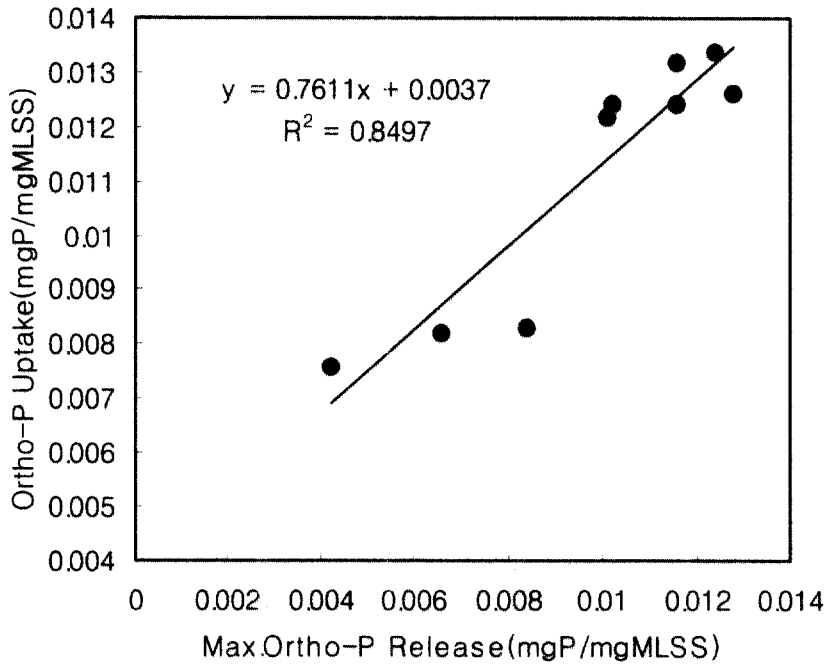


Fig.10 Relationship between Max. ortho-P release and ortho-P uptake

Table 6 Summary of sludge settleability results

Mode		Mixing/Aeration Ratio	SRT(day)	MLSS(mg/L)	SVI
I	Run1	0	30	2780	85
	Run2	0.25		3220	74
	Run3	0.67		3540	78
	Run4	1.5		3780	90
	Run5	4.0		4010	98
II	Run6	0.67	5	1650	40
	Run7		7.5	2180	48
	Run8		10	2540	52
	Run9		20	3250	45
	Run10		30	3780	48

#### 4. 결 론

폐수내에 존재하는 유기물, 질소 및 인의 생물학적 처리방법으로 SBR을 이용하여 SRT와 교반/폭기비를 변화시켜 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 교반비를 조정인자로 운영한 조건에서 총질소 제거율은 교반/폭기비가 0.67일 때 87.6%로서 최대의 효율을 나타낸 반면 인 제거율은 교반기를 도입하지 않은 조건에서는 30%에 불과하였으나 그밖의 경우에는 85.5~99.0%의 높은 제거율을 나타내었다.

2. SRT 5일에서 30일까지 증가함에 따라 총질소의 제거율은 약 70.5-79.8%로 효율변화가 뚜렷하지 않은 반면 인의 경우 47.0%~97.3%로서 SRT가 증가할수록 제거율이 향상되었다.

3. 인방출속도  $k$ 와 최대인방출량  $P_{max}/M$ 은 SRT가 짧아짐에 따라 감소하는 경향이 있고 교반비에는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났으며, 인방출량과 섭취량 간에는 비례관계를 이룬다.

4. SVI는 40~98사이로 교반기간과 SRT변화에 관계없이 침강성이 우수하다.

#### 참고문헌

1. EPA., *Process Design Manual for Nitrogen Control*, Ohio (1975).
2. 풍림산업주식회사, *생물학적 인·질소 동시제거장치 및 공법* (1998).
3. Somiya, I., Tsuno, H. and Matsumoto, M., *Phosphorus Release-Storage Reaction and*

*Organic Substrate Behavior in Biological Phosphorus Removal*, *Water res.*, Vol.22, No.1, 49-58 (1988).

4. APHA., *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 18th edition*, American Public Health Association, Washington, D.C. (1992).
5. 유명진, *환경화학*, 동화기술, 157-161 (1987).
6. Dajai, Development of Batch Activated Sludge Process for Bulking Prevention, *J.Japan water and wastewater*, Vol.29, No.4, 17-25 (1982).
7. Hirosh Deguchi and Mamoru Kashiwaya, Lab. Test of Anaerobic-Anoxic-Oxic Process by Storage Tank Equipped SBR with Fluidized Media, *J.Japan Water Pollution Research*, Vol.10, No.9, 562-571 (1987).
8. Alleman, J. E. and Irvine, R. L., Nitrification in the Sequencing Batch Biological Reactor, *J.WPCF*, Vol.52, 2747-2754 (1980).
9. Burdick, C. R., et al., Advanced Biological Treatment to achieve Nutrient Removal, *J.WPCF.*, Vol. 54, No. 1, 1078-1087 (1982).
10. M. Okada, Simultaneous Removal of Phosphorus, Nitrogen Organic Substances by Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process, *J.Japan Water Pollution Research*, Vol. 8, No. 11, 729-736 (1985).
11. 정연규 외 6인, *환경공학*, 동화기술, 107-111 (1987).
12. 김갑수, *新活性슬러지법*, 동화기술, 122-124 (1989).