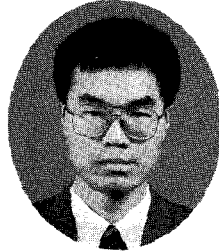


생물학적 공정에서 철의 전기분해를 이용한 오·폐수 중 질소와 인의 제거

<7>



김복현

신성전문대 환경공학과 교수

목 차

- I. 서론
- II. 연구방법
 - 1. 실험장치 및 운전조건
 - 2. 분석항목 및 방법
 - 3. 자료분석
- III. 연구결과 및 고찰
 - 1. 예비실험
 - 2. 인제거실험
 - 3. 질소제거실험
- IV. 결론
- V. 참고문헌

3.3. 질소제거실험

3.3.1. 회분식 반응조에서 산화환원 전위차(ORP) 변화에 따른 질소제거효율

본 실험은 철산화물이 혼합된 슬러지의 탈질특성을 조사하기 위한 회분식 실험으로, 탈질미생물에 이용되는 용해성 유기물과 질산성 질소의 농도 비율을 변화시켜 효과적인 탈질반응이 진행되는지의 여부, ORP 변화와 질소제거율의 상관관계를 조사하여 슬러지의 탈질특성을 조사하였다.

일반적으로, 활성슬러지를 이용하는 탈질반응조는 탈질화에 필요한 탄소원을 반응조에 유입된 기질로부터 직접 공급받기 때문에 유입수중 산화가능한 용해성 유기물의 농도와 탈질박테리아의 활성도에 따라 탈질화율이 크게 영향을 받을 수 있다. 이때, 탈질반응조에서는 유입되는 용해성 유기물이 탈질미생물의 전자공여체로서 이용되지만, 용해성 유기물과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 비가 약 3보다 적을 경우에는 메탄올과 같은 외부탄소원을 필요로 한다. 따라서 최적 탈질화 반응이 진행되기 위해서는 탄소/질소비가 약 3.0 이상 요구되며, 이 값은 주로 탈질화 처리시스템을 설계할 경우에 필요한 설계인자로 이용되고 있다(Wilson, R.W., Murphy, K.L., Sutton, P.M., Lackey, S.L., 1981).

그러므로, 외부탄소원을 첨가하지 않는 조건에서도 철산화물이 혼합된 슬러지에 의한 효과적인 탈질반응이 진행되는지의 여부, 즉 철산화물이 탈질미생물에 미치는 영향을 우선적으로 조사하기 위한 예비실험으로 용해성 유기물과 $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도 비에 따른 슬러지의 탈질실험을 실시하였다.

그림 3.17은 철산화물이 포함되어 슬러지의 탈질화 반응에 이용된 C/N비와 비탈질율(SDNR, specific denitrification rate)의 관계를 보여주고 있다. 이때 $\text{SCODMn}/\text{NO}_3\text{-N}$ 비가 3인 경우 SDNR, $\text{mgNO}_3/\text{mg-day}$ 의 값이 약 $0.06\text{mgNO}_3\text{-N}/\text{mgMLSS-day}$ 이

었으며, 이러한 SDNR의 값은 20°C 조건에서 오·폐수를 탄소원으로 사용하는 일반 활성슬러지의 탈질율과 거의 유사하게 나타나 탈질미생물이 철산화물에 의해 크게 영향을 받지 않음을 보여주었다(US, EPA, 1988).

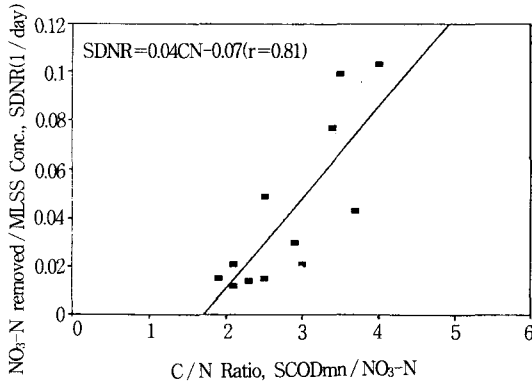


그림 3.17. The relationship between SDNR and SCODmn/NO₃-N ratio.

이러한 예비실험 결과에 의해 ORP와 질소제거율을 조사하기 위하여 반응조의 용량이 2 l인 반응조 4조를 운전하였고, 반응조의 온도는 20±2°C로 유지하였다. 또한 사용된 슬러지는 연속식 활성슬러지 공정에 투입된 철봉표면에서 전기분해시 석출된 철염이 혼합된 활성슬러지와 철산화물이 혼합되지 않은 대조반응조의 활성슬러지를 사용하여 반응조내 MLSS의 농도를 약 2,000mg/l와 3,000mg/l로 유지시켰다. 실험에 이용된 인공오수의 탄소원과 질산성 질소 및 인의 농도는 아세트레이트(CH₃COONa), 질산칼륨(KNO₃) 및 인산이 수소칼륨(KH₂PO₄) 등을 사용하여 각각 350mg/l, 50mg/l 및 25mg/l로 조절하였다.

또한, 반응조내 산화환원물질의 변화를 정량적으로 비교할 수 없기 때문에 무산소조의 탈질화 반응이 효과적으로 진행되는지의 여부를 표시하는데 이용되는 산화환원 전위차(ORP)의 변화를 측정하여 질소제거율과의 상관관계를 파악함으로써 슬러지의 탈질, 인방출 및 유기물질의 특성을 조사하였다. 일반적으로 ORP의 변화는 용존산소가 높은 반응조에서는 정(+)값으로 나타나고 혐기성 반응조에서는 산화물이 환원되므로 부(-)값으로 나타난다.

ORP를 측정하여 슬러지의 탈질특성을 조사한 회분식 실험의 결과는 표 3.8과 그림 3.18에 나타내었으며,

표 3.8. Test results of denitrification related to time and MLSS concentration

Time (hr)	Test No.1(with iron oxide)								Test No.2(Control)							
	3,000mg/MLSS				2,000mg/MLSS				3,000mg/MLSS				2,000mg/MLSS			
	ORP	COD	P	NO ₃	ORP	COD	P	NO ₃	ORP	COD	P	NO ₃	ORP	COD	P	NO ₃
0	100	350	25	30	100	350	25	30	100	350	25	30	100	350	25	30
1	49	333	23	47	57	340	24	47	62	345	23	46	68	345	23	46
2	41	325	23	37	54	330	23	43	53	342	23	39	56	345	23	43
3	4	300	23	30	13	317	23	40	17	313	22	33	23	323	22	41
4	-16	296	24	28	7	308	21	32	-4	299	25	29	-4	309	24	37
5	22	280	25	17	-3	301	23	21	-23	290	27	16	-24	284	27	22
6	-31	255	26	5	-16	298	24	8	-32	249	28	22	-45	276	29	28
7	43	243	27	3	-18	286	25	4	45	228	33	18	-54	251	32	22
8	30	221	28	2	-30	278	27	2	-75	209	34	8	-39	228	33	10

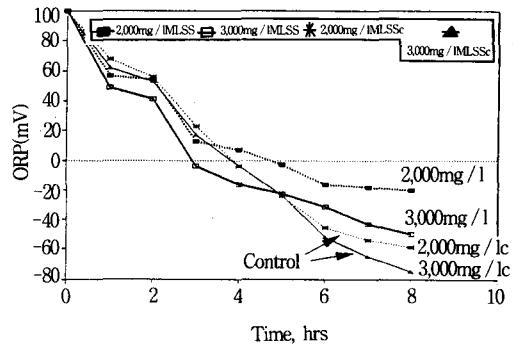


그림 3.18. Variations of ORP with time and MLSS concentration

적용된 실험조건에서 시간이 경과됨에 따라 ORP 값은 감소되기 시작하여 철산화물이 포함된 슬러지의 농도를 3,000mg/l로 유지한 반응조에서는 실험시작후 3시간부터 부(-)값을 보여주기 시작하였고, 5시간 이후에는 슬러지 농도를 2,000mg/l로 유지한 반응조에서도 부(-)값을 보여주었다. 반면에, 슬러지 농도를 2,000~3,000mg/l로 유지한 대조 반응조에서는 실험시작후 4시간이 경과한후 ORP 값이 부(-)값을 보여주기 시작하였고, 5시간 이후에는 철산화물이 포함된 반응조보다 더 낮은 부(-)의 ORP값을 보여주었다. 실험초기에는 철산화물이 함유된 슬러지들의 ORP 값이 대조반응조의 슬러지보다 낮았는데 이는 슬러지중 철산화물의 영향으로 MLVSS 농도가 낮았기 때문인 것으로 판단된다.

ORP가 부(-)의 값으로 진행될수록 반응조에 유입된 용해성 유기물은 탈질박테리아의 전자공여체로 이용될 수 있기 때문에 반응조에 머무르는 슬러지의 수리

학적 체류시간 증가와 슬러지의 농도가 높을수록 질산성 질소를 효율적으로 제거할 수 있다는 것을 보여준다 (Christensen, M.H., Harremoes, P., 1977).

회분식 반응조에 유입된 슬러지와 반응하여 제거되는 용해성 유기물 및 질산성 질소의 감소율은 운전개시 후 4시간까지는 슬러지 성장과 MLSS 농도 변화에 따라 큰 차이 없이 제거된 양이 거의 일정하였으나, 그 이후에는 철산화물과 혼합된 슬러지가 용해성 유기물과 질산성 질소의 제거량이 높게 나타났다. 이는 철산화물이 질산성 질소의 제거율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타난 예비실험과 일치하였다.

탈질미생물의 전자공여체로 이용된 용해성 유기물당 제거된 질산성 질소의 양은 시간경과에 따라 철산화물이 함유된 반응조와 대조반응조에서 서로 다르게 나타

무산소조의 HRT 변화에 따른 총질소 제거효율의 차이는 무산소조의 HRT가 증가할수록 MLSS 혼합액중 질산염과 용존산소 등의 산화물이 함유된 슬러지의 반송량이 HRT가 짧은 반응조 보다 상대적으로 적게 유입되어 탈질 미생물에 의한 질산염의 제거효율이 양호하게 유지되었기 때문이다.

났다. 이는 MLSS / MLVSS의 비와 반응조에 유지된 탈질박테리아의 활성도에 따라 차이가 나타난 것으로 사료된다.

회분식 반응조에서 탈질미생물의 전자공여체로 이용된 용해성 유기물당 제거된 질산성 질소의 양은 그림 3.19에 나타낸 바와 같이, 철산화물이 함유된 반응조와 대조반응조에서 슬러지 농도에 거의 관계없이 ORP가 부(-)의 값으로 진행될 때 질산성 질소가 크게 감소되는 경향을 보여주었다.

오·폐수를 이용한 무산소조 처리공정에서 탈질반응이 진행될 때 측정되는 ORP값은 대개 -50mV 이하에서 탈질화 반응이 진행되지만 철함유 슬러지의 탈질실험에서는 -30mV에서도 효과적으로 탈질화반응이 진

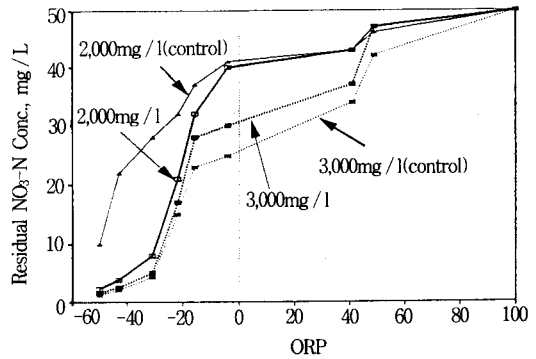


그림 3.19. The relationship between residual $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration and ORP

행될 수 있음을 보여주었다.

이때, 철산화물이 함유된 반응조에서 용해성 유기물당 제거된 질산성 질소의 양은 운전개시부터 4시간 경과할때 까지 $0.41 \sim 0.43 \text{mgNO}_3\text{-N} / \text{mgSCOD-hr}$ 이었고, 4시간 이후부터 8시간까지는 $0.35 \sim 1.0 \text{mgNO}_3\text{-N} / \text{mgSCOD-hr}$ 로 나타났다. 반면에, 대조 반응조에서는 운전개시부터 4시간 경과할 때까지 $0.32 \sim 0.41 \text{mgNO}_3\text{-N} / \text{mgSCOD}$ 였고, 4시간 이후부터는 $0.23 \sim 0.38 \text{mg} / \text{NO}_3\text{-N} / \text{mgSCOD-hr}$ 로 나타났다.

회분식 반응조에서 탈질화 반응에 이용된 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 및 용해성 유기물(SCOD)의 농도에 대한 시간별 변화는 그림 3.20과 그림 3.21에 나타내었으며, 이러한 농도는 반응조 체류시간의 증가와 MLSS 농도가 증가할수록 빠르게 낮아져 ORP가 감소하는 경향과 유사하였다.

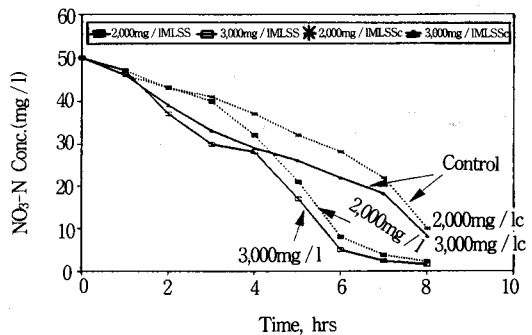


그림 3.20. Variations of $\text{NO}_3\text{-N}$ concentration with time

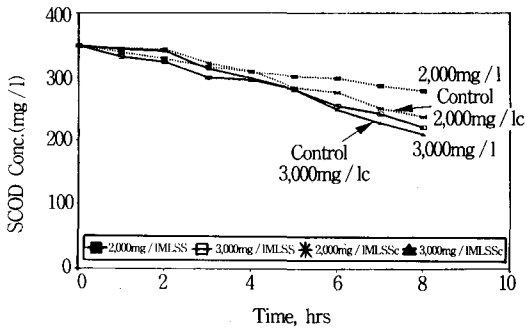


그림 3.21. Variations of SCOD concentration with time

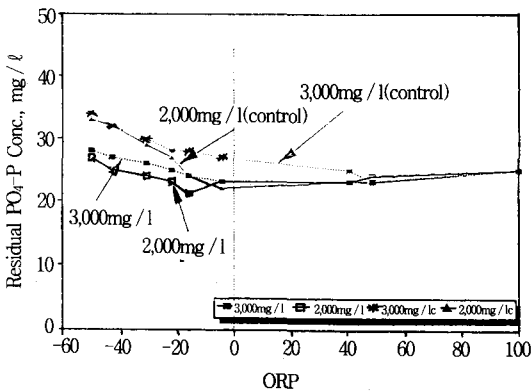


그림 3.22. The relationship between residual $PO_4\text{-P}$ concentration and ORP

반면에, 철산화물이 혼합되지 않은 대조 반응조에서는 탈질화 반응에 이용된 질산성 질소($NO_3\text{-N}$) 및 용해성 유기물(SCOD)의 농도가 느리게 감소되는 경향을 보여주었으나 전체적으로 제거효율의 차이는 없으므로 나타났다.

각 반응조에서 용해성 인의 농도변화는 그림 3.22에 나타낸 바와같이 초기 운전시간인 4시간까지는 유입된 $NO_3\text{-N}$ 농도의 영향으로 인의 방출이 없었으나, 반응조내 탈질율이 증가된 4시간 이후 인의 방출이 서서히 증가되는 경향을 보였다. $NO_3\text{-N}$ 의 농도가 거의 제거된 8시간 이후에 용해성 인의 농도가 증가되는 경향을 보여주었다.

이러한 원인은 반응조에 유입된 질산염과 용존산소의 영향으로 초기 운전시간 동안은 인의 방출이 없었으나, 점차 질산염의 농도와 ORP가 감소되어 혐기성화됨

에 따라 인이 방출되었기 때문이다(U.S., EPA, 1987).

철산화물이 혼합된 슬러지에서 운전 4시간 이전에는 철함유 슬러지에서 인의 방출이 진행되지 않았으나, 5시간이 경과시 탈인반응은 ORP가 -20mV 이하로 떨어지면서 철산화물이 함유된 슬러지보다 대조반응조의 슬러지에서 MLSS 농도가 높을수록 인의 방출이 더 활발하게 진행되었다. 이것은 철산화물이 혼합된 슬러지가 대조반응조에 비해서 철염과 물리적 흡착된 인을 재방출시키지 않았기 때문이다.

그러므로, 철산화물을 혼합한 반응조에서 ORP의 변화에 따라 입자상 철산화물과 흡착반응된 용해성 인의 방출율은 철산화물을 혼합하지 않은 대조반응조 보다 낮게 산정되었다. 이것은 철염과 흡착제거된 용해성인이 무산소조에서 방출된 농도가 적게 나타났기 때문에 연속식 무산소/호기 공정에서의 철의 전기분해를 이용할 경우에 처리수중 인농도의 증가가 크게 우려되지 않음을 알 수 있었다.

철산화물이 혼합된 반응조와 철산화물이 혼합되지 않은 대조 반응조를 이용한 회분식 슬러지 반응조의 운전 결과, 철산화물이 혼합된 반응조가 대조 반응조보다 탈질반응이 효과적으로 일어났으며 주어진 유입 유기물질 농도에서 반응조의 슬러지 체류시간이 4시간 이전에는 철염과 흡착제거된 용해성 인이 재방출되지 않아 처리수중 용해성 인농도의 증가가 우려되지 않았다. 효과적인 탈질반응을 위해 연속식 무산소/호기공정의 운전시 무산소 반응조의 수리학적 체류시간(HRT)을 약 4시간으로 유지할 수 있음을 알 수 있었다.

3.3.2. 연속식 무산소/호기 공정에서 single sludge의 질소제거 특성

3.3.2.1. 무산소조의 수리학적 체류시간(HRT) 변화에 따른 질소·인 제거 특성

본 실험에서는 철산화물이 함유된 슬러지의 질소제거 효율에 미치는 반응율, 유기물 부하량과 같은 인자들의 영향을 조사하고, 인과 질소제거의 최적 운전조건을 도출하기 위하여 실험을 진행하였다.

실험에 이용된 공정은 폭기조의 질산화 과정에 의해 생성된 질산염을 효과적으로 제거하기 위하여 폭기조 앞에 무산소조를 설치하여 무산소/호기공정을 사용하였고, 이때, 폭기조내의 MLSS 혼합액을 무산소조(탈질조)로 보내는 반응율을 변화시켜 무산소조의 HRT

철산화물이 혼합된 반응조와 철산화물이 혼합되지 않은 대조 반응조를 이용한 회분식 슬러지 반응조의 운전 결과, 철산화물이 혼합된 반응조가 대조 반응조보다 탈질반응이 효과적으로 일어났으며 주어진 유입 유기물질 농도에서 반응조의 슬러지 체류시간이 4시간 이전에는 철염과 흡착제거된 용해성 인이 재방출되지 않아 처리수중 용해성 인농도의 증가가 우려되지 않았다.

변화에 따른 총질소, 유기물질 및 인의 제거효율을 조사하였다. 반응조의 수리학적 체류시간(HRT)의 선정은 철산화물을 함유한 single sludge의 탈질시간이 약 4시간에서 양호하게 나타난 회분식 반응조의 실험결과를 기준으로 하였으며, 다른 운전조건은 가능한 한 활성슬러지 공정의 실험에서 도출된 최적 조건들을 선택하였다.

무산소조 체류시간은 철봉을 투입한 반응조 No.1, No.2 및 No.3에서 각각 4시간, 2.7시간, 2시간으로 운전하기 위하여 반응조내 슬러지의 반송비를 유입유량에 대하여 각각 100%, 200%, 300% 등으로 변화시켜 유지하였다. 이때, 철봉을 투입하지 않은 대조반응조 No.4의 HRT는 슬러지의 반송비를 100%로 운전하여 4시간으로 유지하였다. 이때 무산소조와 폭기조의 총수리학적 체류시간(HRT)은 철봉을 투입한 반응조 No.1, No.2 및 No.3에서 반송율을 고려하여 각각 9시간, 6시간, 4.5시간으로, 철봉을 투입하지 않은 대조반응조 No.4는 9시간으로 운전하였고, Group No.5의 모든 반응조의 고형물 체류시간(SRT)은 9day로 유지하였다.

운전기간동안 실험에 이용된 유입수중 TCOD와 TKN 및 TP의 평균농도는 각각 376mgTCOD/l, 46mgTKN/l, 및 26mgP/l였다. 유입 오·폐수중 TCOD/TKN 비는 약 8이었고, 무산소조에 유입되는 TKN의 용적부하량은 0.14kgTKN/m³-day 이었다. 이때, 실험에 이용된 유입원수에 대한 평균 TCOD : TKN : TP 비는 약 100 : 12 : 8이었다.

Group No.5 반응조의 실험결과는 표 3.9에 나타내었

다. 반응조에 투입된 철봉의 유효 표면적은 15cm²였으며 석출된 철의 농도는 반응조 No.1, No.2 및 No.3에서 각각 36mgFe/l, 28mgFe/l, 25mgFe/l였다. 이러한 철농도의 영향으로 반응조내 평균 MLSS 혼합액의 농도는 철봉을 투입하여 전기분해시킨 폭기조와 무산소조의 전체시스템에서 평균 약 2,300~2,600mgMLSS/l로 유지되어 MLVSS/MLSS 비가 약 0.69였다.

반면에, 철봉을 투입하지 않은 대조반응조 No.4에서 철산화물과 같은 무기물의 증가요인이 없었기 때문에

표 3.9. Test results of N removal efficiency with the various HRT in an anoxic/oxic activated sludge reactor.

Parameters		Group No.5			
		No.1	No.2	No.3	No.4
COD _{Cr} (mg/l)	Influent	376	376	376	376
	TCOD				
	Influent	174	174	174	174
	SCOD				
Effluent	SCOD	33.5	35.8	27.0	39.0
	TCOD				
R.E.(%)		91	90	90	90
PO ₄ -P (mg/l)	Influent	26	26	26	26
	TP				
	Effluent	5.9	7.3	8.4	17.3
R.E.(%)		77	72	68	33
Effluent NO ₃ -N, mg/l		6.4	8.2	10.5	63
TKN (mg/l)	Influent	46.2	46.2	46.2	13.3
	Effluent	2.2	2.4	2.7	3.8
T-N R.E.(%)		81	77	72	46.2
TSS (mg/l)	Influent	208	208	208	208
	Effluent	10	9	11	15
	TSS				
R.E.(%)		95	96	95	93
Total Fe(mg/l)		36	28	25	-
MLSS: (mg/l)	Anoxic	2,345	2,551	2,421	1,600
	Oxic	2,382	2,359	2,294	1,605
MLVSS: (mg/l)	Anoxic	1,653	1,675	1,587	1,235
	Oxic	1,645	1,736	1,619	1,198
Return sludge flow, %Q		100	200	300	100
HRT, hr	Anoxic	4.0	2.7	2.0	4.0
	Oxic	5.0	3.3	2.5	5.0
	Total	9.0	6.0	4.5	9.0
SRT, day		9	9	9	9
Flow rate, L/day		12	12	12	12

MLVSS/MLSS 비가 일반적인 활성 슬러지와 유사한 약 0.78로 유지되었고 이때의 평균 MLSS 농도는 약 1,600mg/l 였다.

그림 3.23은 반응조 운전기간동안 무산소조의 체류 시간 변화에 따른 총질소의 제거효율을 나타내었으며, 이때 총질소의 농도는 TKN, NO₃-N 및 NO₂-N의 총합으로 산출하였다.

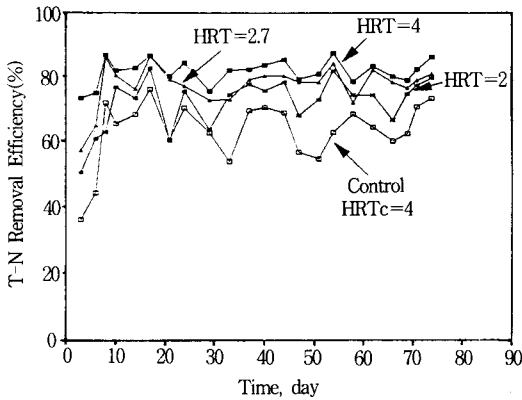


그림 3.23. Variations of T-N removal efficiency with time and HRT.

총질소(T-N) 평균 제거율은 철분을 투입한 반응조에서 HRT를 2시간, 2.7시간, 4시간 등으로 증가시킬수록 각각 71%, 75%, 80% 등의 제거효율을 보여주었고, 이때 처리수의 평균 질산성 질소(NO₃-N) 농도는 각각 10.5mg/l, 8.2mg/l 및 6.4mg/l 로 나타났다.

반면에, 철분을 투입하지 않은 대조 반응조 No.4에서의 TN 제거율은 63%을 보여주었고, 이때 처리수의 질산성 질소(NO₃-N) 평균농도는 13.3mg/l 였다(F=26.43; df=3,84; P<0.01).

이것은 철을 투입한 반응조가 동일한 HRT로 운전된 대조 반응조에 비하여 총질소 제거효율이 높다는 통계적 유의성을 보여주므로 철산화물이 석출된 반응조에서 탈질박테리아의 성장조건이 양호하게 유지됨을 알 수 있었다. 무산소조의 HRT 변화에 따른 총질소 제거효율의 차이는 무산소조의 HRT가 증가할수록 MLSS 혼합액중 질산염과 용존산소 등의 산화물이 함유된 슬러지의 반송량이 HRT가 짧은 반응조 보다 상대적으로 적게 유입되어 탈질 미생물에 의한 질산염의 제거효율

이 양호하게 유지되었기 때문이다(Mitsum, I., Kouji, H., Yuhei, I., 1991).

이러한 결과는 무산소조의 총질소 제거효율이 반응조에 유입되는 탄소원과 질산염의 영향에 의해 탈질박테리아의 활성상태가 크게 저하될 수 있음을 보여주었고, 이때 유입된 질산성 질소 1mg당 탈질박테리아에 의해 소모된 용해성 유기물의 산화량 차이로 총질소의 제거율도 다르게 나타난 것으로 사료된다.

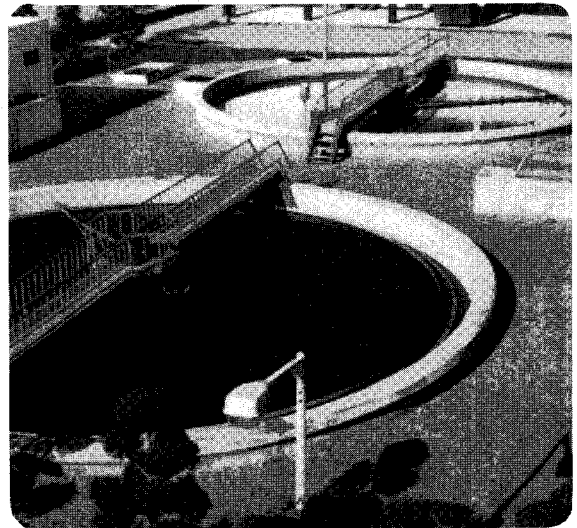
일반적으로, 이론적인 무산소조의 총질소(T-N) 제거율, E_N(%)은 등식 (3.11)에 의해 반송율이 100%, 200% 및 300%로 증가됨에 따라 각각 50%, 67% 및 75%로 산출되지만, 반응조에 유입된 총질소의 약 20~30%가 슬러지 생산량과 함께 제거되기 때문에 실제 반응조에서 탈질화 미생물에 의해 제거되는 순수한 T-N 제거율은 반송율이 증가됨에 따라 각각 38%, 50% 및 56% 정도에 불과하다(US, EPA, 1975).

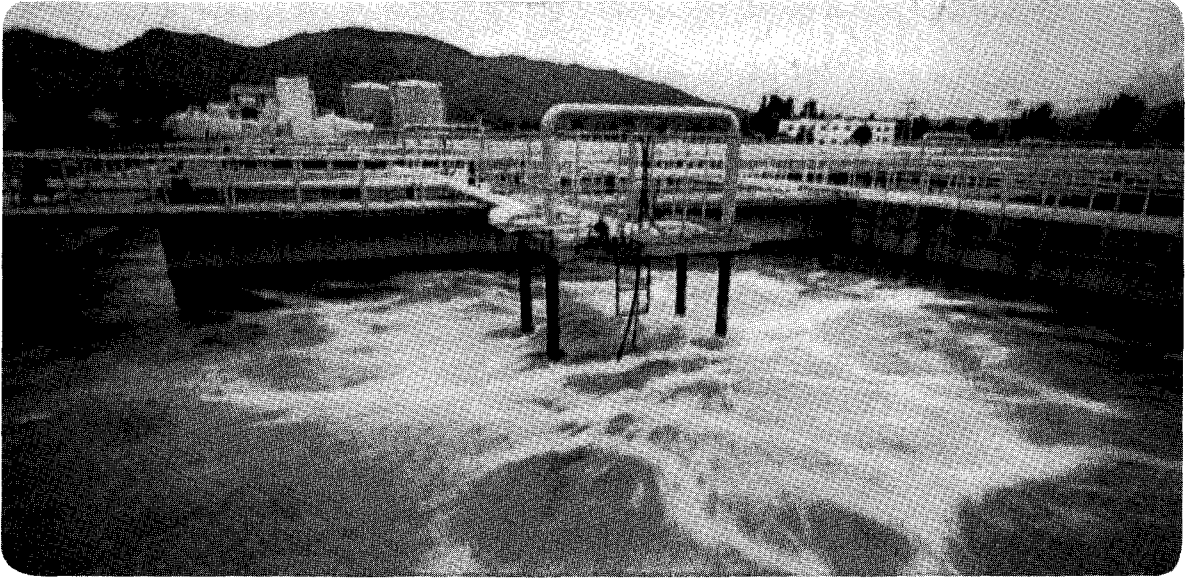
$$E_N(\%) = (Q_r / Q) / [1 + (Q_r / Q)] * 100 \quad (\text{식 3.11})$$

Q_r: MLSS 혼합액의 반송유량, l/day

Q: 1일 반응조에 유입되는 유량, l/day

이러한 운전조건에서 반응조의 비탈질속도(SDNR)는 등식 (3.12)에 나타난 바와 같이, 무산소조의 F/M 비가 높을수록 유기물과 질산성 질소(NO₃-N)의 제거율이 상대적으로 높아지고, 폭기조내 활성슬러지를 탈질조로 보내는 반송율은 각각 100%, 200%, 300%로 증





가시킴에 따라 무산소조에 유입되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 증가되기 때문에 비탈질율(SDNR)이 상대적으로 낮아지는 경향을 보여준다.

$$\text{SDNR} = \frac{\text{NO}_3 \cdot Q_r}{(\text{VOL} \cdot \text{MLVSS})} = 0.03(\text{F} / \text{M}) + 0.029 \quad (\text{식 3.12})$$

NO_3 : 탈질화 될 수 있는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도, mg / ℓ
(즉, 반송되는 슬러지중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도-처리수중 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도)

Q_r : 유입된 반송슬러지량, ℓ / day

V_a : 무산소조 용량, ℓ

MLVSS : MLVSS 농도, mg / ℓ

F / M : 유기물 부하량, $\text{mgCOD} / \text{mgMLVSS-day}$.

표 3.9에 나타난 실험결과를 식 (3.12)에 적용하여 무산소조의 수리학적 체류시간(HRT) 변화에 따른 비탈질화율(SDNR)을 계산한 결과 HRT가 4시간, 2.7시간, 2시간에 따라 비탈질율이 각각 0.049, 0.041, 0.033 $\text{mgN} / \text{mgMLVSS-day}$ 등으로 감소된 값을 얻을 수 있었고, 철분을 투입하지 않은 반응조에서는 HRT 4시간에서 0.060 $\text{mgN} / \text{mgMLVSS-day}$ 로 산출되었다.

대조 반응조 No.4의 비탈질율(SDNR) 값은 폭기조에 철분을 투입하여 무산소조의 HRT를 4시간으로 운전한 반응조 No.1에 비해 약간 높게 나타났다. 이러한 원인은 반응조내 MLSS 혼합액중 휘발성 부유물질

(VSS)이 차지하는 비율이 대조반응조에서 낮게 유지되었기 때문에 탈질율이 상대적으로 증가된 것으로 사료된다.

무산소조의 이론적 설계용적은 등식 3.12 에 3.13 을 대입하여 나타낸 등식 3.14 을 이용하여 산출할 수 있다.

$$\text{F} / \text{M} = (\text{Q} \cdot \text{SCOD}) / (V_a \cdot \text{MLVSS}) \quad (\text{식 3.13})$$

$$V_a = \text{Q} \cdot [\text{NO}_3 - 0.03 \cdot \text{SCOD}] / (\text{MLVSS} \cdot 0.029)$$

(식 3.14)

SCOD : 무산소조에 유입되는 용해성 유기물 농도, mg / ℓ

Q : 무산소조에 유입량, ℓ / day

그러므로, 반응조 No.1의 운전조건을 이용하여 탈질화에 요구되는 이론적 무산소조의 설계용적은 다음과 같다. 폭기조내 MLSS 혼합액의 유입유량이 12 ℓ / day 이고, 유입수 SCOD 농도가 174 mg / ℓ , 무산소조에 유입되는 $\text{NO}_3\text{-N}$ 농도가 17.6 mg / ℓ 인 무산소조의 최적 용량은 $12 \cdot [17.6 - 0.03 \cdot 174] / (1,653 \cdot 0.029) = 3\text{L}$ 로 산출된다.

총유기물(TCOD)의 제거율은 무산소조의 HRT 변화에 거의 관계없이 철분을 투입하지 않은 반응조와 철분을 투입한 반응조에서 거의 일정한 90% 정도의 효율을 보여주어 철분을 투입한 반응조에서 석출된 철산화

물의 작용에 의해 유기물의 제거율이 전혀 영향을 받지 않았음을 보여주었다($F=1.50$; $df=3,84$; $p>0.05$).

총부유물질(TSS) 제거율은 유입수 농도가 208mg/l 일 경우 철분을 투입한 반응조에서 처리수의 농도가 9mg/l 를 보여 95% 효율을 보여주었고, 철분을 투입하지 않은 반응조에서는 처리수의 농도가 15mg/l 를 보여 93% 효율을 보여주었다. 이때, 철분을 투입하지 않은 대조반응조의 총부유물질(TSS) 제거율이 낮은 원인은 유입수중 유기물 부하량과 부유물질이 높은 상태에서 슬러지벌킹(sludge bulking)이 간혹 발생하여 처리수중 총부유물질(TSS) 농도가 일시적으로 높아진 반면에 철분을 투입한 반응조에서는 슬러지 용적지수가 약 70ml/g 이하로 석출된 철이 부유물질의 침전과 정에서 함께 흡착되어 슬러지의 침강성을 양호하게 유지시켰기 때문에 처리수중 총부유물질(TSS)의 농도가 상대적으로 낮아진 것으로 나타났다.

무산소조의 체류시간이 길수록 인 제거율이 높은 원인은 적용된 운전조건에서 철분표면의 특성과 반응조의 용존산소 및 수용액과 작용하는 전위차 등의 차이로 반응조 No.1, No.2 및 No.3에서 석출된 철의 농도가 각각 36mg/l, 28mg/l 및 25mg/l 등으로 나타나 각 반응조에서 철 1mg 당 제거된 평균 용해성 인의 양이 각각 0.56mgP, 0.67mgP, 0.70mgP 등의 차이를 보여주었기 때문이다.

불용성 인과 흡착반응하여 크게 제거될 수 있다는 통계적 유의성과 잘 일치하였다($F=200.17$; $df=3,84$; $P<0.01$).

이때, 철산화물이 혼합된 슬러지를 무산소조로 반송시켜 슬러지 체류시간을 2~4시간의 범위로 유지한 실험조건에서는 철염과 흡착제거된 용해성 인의 재방출이 대조반응조에 비해 크게 증가되지 않았기 때문에 처리수중 용해성 인 농도를 양호하게 유지할 수 있었다.

무산소조의 체류시간이 길수록 인 제거율이 높은 원인은 적용된 운전조건에서 철분표면의 특성과 반응조의 용존산소 및 수용액과 작용하는 전위차 등의 차이로 반응조 No.1, No.2 및 No.3에서 석출된 철의 농도가 각각 36mg/l, 28mg/l 및 25mg/l 등으로 나타나 각 반응조에서 철 1mg 당 제거된 평균 용해성 인의 양이 각각 0.56mgP, 0.67mgP, 0.70mgP 등의 차이를 보여주었기 때문이다.

무산소조의 체류시간 변화에 관한 실험결과, 최적 탈질조건은 무산소조 HRT가 증가할수록 양호한 질소제거를 보여주었고 이때 총질소(T-N)의 평균 제거율은 HRT가 4시간이고, 반송율이 100%인 조건에서 81%로 나타났다.

반면에 용해성 인(PO_4-P)의 제거율은 무산소조의 체류시간에 관계없이 석출된 철의 농도에 따라 인의 제거에 차이를 보여 주었고 무산소조의 HRT 증가에 따라 철산화물과 흡착 제거된 인이 재방출되지 않았다. 이때 반응조에 석출된 철의 평균 농도가 36mgFe/l 인 반응조에서 용해성 인의 제거효율은 77%로 나타났다.

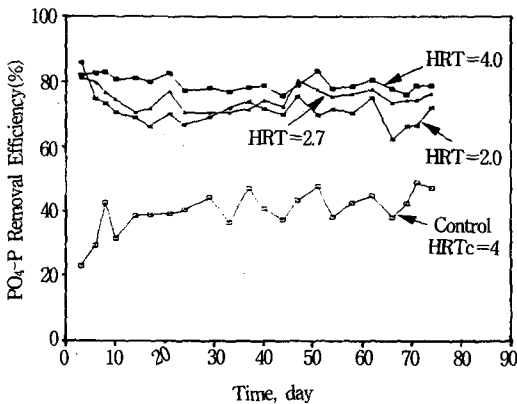


그림 3.24. Variations of P removal efficiency with time and HRT.

무산소조의 체류시간 변화에 따른 인 제거율은 그림 3.24에서와 같이 유입수의 농도가 26mg/l 일 경우 철분을 투입한 반응조의 HRT 4시간인 반응조에서 처리수 인 농도가 5.9mg/l 을 보여주어 80% 효율을 나타내었고, HRT 2시간인 반응조에서는 처리수 인 농도가 8.4mg/l 를 보여주어 72% 효율을 나타내었다. 반면에 철분을 투입하지 않은 대조반응조의 인 제거율은 처리수 인 농도가 17.3mg/l 를 보여 33% 효율로 보여주어 철분을 전기분해시켜 석출된 철염이 반응조에 유입된