

장기폭기식 마을배수처리에서 간헐폭기 및 DO제어에 의한 질소제거 및 에너지 절약

Energy Saving and Nitrogen Removal by DO Control and Intermittent Aeration Using Extended Aeration System

김형중* · 김선주(건국대) · 端憲二(일본 농업공학연구소)

Kim, Hyung Joong · Kim, Sun Joo · Hata, Kenji

Abstract

A laboratory scale extended aeration system was installed to study the effects of DO control and intermittent aeration on energy saving and nitrogen removal. The sensors of pH, DO, ORP, MLSS, and WT were installed in the aerator to monitor them and automatically control DO concentration as 2 mg/l. In the conditions showing nitrate knee on the ORP curves, nitrogen removal rates were kept over 91%. A 72.4 % of energy saving was achieved by intermittent aeration comparing with continuous aeration.

I. 서론

본 연구는 농어촌지역과 같이 소규모 오수처리시설에 적합한 장기폭기방법을 대상으로 DO 제어 및 간헐폭기방식을 도입하여 에너지 절약을 도모하면서 질소의 제거율을 높이기 위한 방법을 모색하고, 농어촌지역에 적합한 오수처리시설의 운전방식을 제시하기 위하여 일본 농업공학연구소에서 실내실험을 실시하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험장치

실험용 오수처리시설은 조절조→폭기조(반응조)→침전조로 구성되었으며, 폭기조는 72 L(길이 60 cm × 폭 30 cm × 높이 40 cm), 침전지는 9 L이다. 인공오수와 수도물을 조절조에 유입시킨 다음 교반기로 잘 혼합하여 자연낙하로 폭기조에 유입시켰다. 인공오수와 수도물의 유입량을 轉倒式유량계로 항상 모니터하였다. 폭기조에는 pH, DO, ORP, MLSS 및 수온센서를 설치하여 필요한 시간간격으로 모니터링할 수 있도록 하였다. 또한 폭기시간설정에 의한 간헐폭기가 가능하도록 하였다. 반응조에는 교반기를 설치하여 교반의 본래의 목적인 비폭기시의 활성오니의 침전을 방지하면서 오수와 활성오니의 접촉기회가 많아지도록 하였다. 침전조의 오니는 100~170 %를 폭기조에 반송시켜 MLSS를 3,000 mg/l ~ 4,000 mg/l로 유지시켰다.

2000년도 한국농공학회 학술발표회 논문집 (2000년 10월 14일)

2. 인공오수제조 및 수질분석

인공오수는 skim milk(1.4~1.7 g/l), 염화암모늄(NH_4Cl : 0.36~1.7 g/l), 탄산수소나트륨(NaHCO_3 : 0.51~0.55 g/l), 인산2수소나트륨(KH_2PO_4 : 0.3~0.333 g/l)을 수도물에 용해시켜 만들었다. 폭기조에 유입하는 유입수의 수질은 인공오수와 수도물의 유입비에 의해 조절하였다. 유입수와 처리수의 수질분석은 원칙적으로 일본하수시험방법에 준하여 실시하였다.

III. 실험결과 및 고찰

기본실험으로서 유입수량을 50 ml/min(수리학적 체류시간 : 24시간)로 하여 유입시키면서, 인공오수와 수도물의 유입비율을 조절하여 유입수질을 변화시켰다. 본 연구에서는 폭기조의 DO농도를 2 mg/l로 제어하고, 간헐폭기의 폭기시간과 비폭기시간의 비율을 변화시키면서 유입수와 처리수의 수질을 측정하였다.

실험조건으로서는 폭기시간을 연속폭기, 1일 12시간폭기(1시간폭기, 1시간정지의 사이클), 1일 8시간폭기(1시간폭기, 2시간정지), 1일 6시간폭기(1시간폭기, 3시간 정지), 1일 4시간폭기 A(30분폭기, 2시간30분정지), 1일 4시간폭기B(1시간폭기, 5시간정지)등으로 변화시키면서 수질을 측정하였다.

1. 연속폭기

폭기조의 pH는 연속폭기에 의해 너무 산화되어 pH가 5.4 이하까지 낮아져 알카리제를 첨가하여 pH를 7.0이상으로 높여도 다시 낮아져 또다시 중화하지 않으면 안 되는 현상이 반복되었다. 반대로 ORP는 최고 336 mV까지 높아졌다.

BOD의 경우 표 1과 같이 평균 97.7 %의 높은 제거율을 보였으나, 후반에는 처리수의 수질이 서서히 나빠지기 시작하여 최대 12.7 mg/l 까지 올라가는 등 처리효율이 떨어졌다.

COD, SS는 각각 평균 88.7 %, 80.7 %의 제거율을 보였으나, 후반에는 처리수의 수질이 서서히 나빠지기 시작하여 각각 최대 20.2 mg/l, 28.0 mg/l 까지 상승하였다. 또한 TOC도 후반에는 처리수의 수질이 서서히 나빠져 최고 14.8 mg/l 까지 높아졌다. 이상과 같이 후반에 처리효율이 나빠진 것은 SS가 처리방류수 수질기준인 20.0 mg/l를 상회하는 28.0 mg/l를 나타낸 것을 보면 알 수 있는 바와 같이 연속폭기의 경우는 과잉 폭기되어 오히려 파괴되어 침강성이 나빠졌기 때문에 오니가 침전조에 침전되지 않고 유출된 것이 원인이라고 생각된다.

질소의 경우 항상 호기성 상태가 유지되었기 때문에 충분히 산화되어 처리수의 평균 $\text{NH}_4\text{-N}$ 농도는 거의 0 mg/l를 유지하였으나, 脫窒에 꼭 필요한 무산소상태가 확보되지 않아 $\text{NO}_x\text{-N}$ 가 탈질되지 못해 처리수의 $\text{NO}_x\text{-N}$ 농도가 45.7 mg/l 까지 높아졌다. 이에 따라 유입수의 T-N농도는 35.4 mg/l이었으나, 전에 남아있던 질소성분과 합쳐져 서서히 상승하여 초기에는 15.0 mg/l이던 처리수의 T-N농도가 후반에는 최고 52.4 mg/l로서 원수보다 높아지는 현상까지 발생하였다.

T-P의 경우도 인산을 과잉섭취하기 위한 호기성상태는 확보되었으나, 인산의 방출에 필요한 혐기성상태가 확보되지 않아 인산의 과잉섭취가 불가능했기 때문에 처리수의 T-P농도도 서서히 나빠졌다.

이상과 같이 연속폭기조건에서는 과잉폭기되어 오히려 파괴되어 처리수의 수질이 서서히 나빠지는 경향을 보였다. 그 대책으로서는 설정 DO농도를 낮추든가, 간헐폭기로 하든가

하는 것을 생각할 수 있는데, 폭기시의 호기성 상태에서의 $\text{NH}_4\text{-N}$ 의 완전한 질산화 및 인산의 과잉섭취, 비폭기시의 무산소상태에서의 탈질 및 혐기성상태에서의 인산의 방출등을 확실하게 일으키기 위해서는 간헐폭기로 하는 것이 좋을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구에서는 폭기조의 DO농도를 2 mg/l 로 설정하고, 간헐폭기의 폭기시간과 비폭기시간을 변화시키면서 처리효율을 비교검토하였다.

2. 간헐폭기와 오수처리 성능

BOD는 Table 1과 같이 1일 4시간폭기 B의 경우가 평균 99.0%로서 가장 높은 제거율을 보였다. 그 외 1일 12시간폭기로부터 4시간까지 줄여도 제거율은 평균 96% 이상을 유지하였고, 모두 방류수수질기준을 충분히 만족하였다.

COD는 1일 8시간 폭기의 경우가 평균 93.4%로서 가장 높은 제거율을 나타냈다. 그 외의 경우에도 90.0% 이상의 제거율을 보였다.

TOC의 경우도 1일 4시간폭기의 경우에도 평균 90%의 제거율을 나타내는 등 87.8~94.4%의 제거율을 보였다.

T-P의 제거율은 전반적으로 낮았다. 본 연구의 대상인 장기폭기법은 잉여오니 발생량이 적기 때문에 잉여오니로서 처리계 밖으로 뽑아내는 양이 적은 것이 특징이므로 인을 충분히 제거하기 위해서는 부하조건, 조작조건 등을 조절하여 잉여오니를 발생시켜 이를 배제하든가 또는 응집제 첨가법 등의 대책이 필요할 것이다.

Table 1. Water qualities of influent and effluent according to aeration period

Aeration period (hours/day)	Classification	BOD (mg/l)	COD (mg/l)	SS (mg/l)	T-N (mg/l)	T-P (mg/l)	TOC (mg/l)	Average temperature in aeration tank (°C)
Continuous aeration	Influent	200.2	79.5	35.3	35.4	4.4	67.5	20.5
	Effluent	4.6	9.0	6.8	37.5	4.6	6.8	
12 (1hour aeration, 1hour non-aeration)	Influent	180.9	56.9	39.2	31.8	3.6	40.8	28.1
	Effluent	2.9	5.5	7.4	15.3	3.7	5.0	
8 (1hour aeration, 2hours non-aeration)	Influent	198.3	67.4	57.2	39.6	5.9	62.5	23.8
	Effluent	3.3	4.5	4.0	6.1	3.9	4.0	
6* (1hour aeration, 3hours non-aeration)	Influent	204.8	80.1	45.3	36.8	4.5	78.4	20.4
	Effluent	2.4	6.0	3.7	2.9	3.2	3.4	
4A (0.5hours aeration, 2.5hours non-aeration)	Influent	195.7	98.7	45.4	30.8	4.9	62.1	17.2
	Effluent	7.4	7.4	7.6	5.3	3.1	6.4	
4B* (1hour aeration, 5hours non-aeration)	Influent	208.4	86.6	30.5	31.2	3.6	60.9	19.4
	Effluent	2.1	6.0	2.8	2.7	2.6	3.9	

* Appearance of Nitrate knee on ORP curve

3. 폭기시간과 질소제거 성능

질소를 제거하기 위해서는 질산화를 위한 호기상태와 탈질을 위한 무산소 상태가 필요하다. 본 실험에서는 대부분의 경우 질산화는 충분히 이루어졌다. 그러나 ORP 곡선상에 nitrate knee가 출현하지 않은 1일 12시간 폭기, 8시간 폭기, 4시간 폭기 A 조건에서는 무산소상태나

호기상태가 충분히 확보되지 않아 85% 이하의 T-N 제거율을 나타냈다. 즉, 이는 1일 12시간 폭기와 8시간 폭기 조건에서는 폭기시간은 충분히 질산화는 되었지만 비폭기시간이 짧아 충분히 탈질되지 않은 것, 또한 1일 4시간 폭기 A 조건에서는 반대로 비폭기 시간은 확보되었으나 폭기시간이 짧아 질산화가 불충분했던 것이 원인이라고 생각된다.

반면, 1일 6시간 폭기 조건에서는 비폭기시간이 충분히 확보되어 그림 1과 같이 무산소상태에서 혐기성상태로 바뀔 때 즉 脫窒이 완료될 때에 ORP곡선상에 나타나는 변곡점 소위 Nitrate knee가 검출되었다. 이 경우에는 유입수의 부하변동에 관계없이 비슷한 형태의 ORP곡선이 얻어졌다. 질소의 경우 폭기시간에 질산화가 충분히 진행되어 ORP 268 mV~238 mV(평균 272 mV) 사이에서 질산화가 완료되어 처리수의 NH₄-N농도가 평균 0.9 mg/l 까지 낮아졌다. 또한 ORP값 88 mV~127 mV(평균 107 mV)에서 곡선중에 Nitrate knee가 검출될 정도로 무산소상태가 충분히 확보되었기 때문에 탈질이 잘 진행되어 NO_x-N농도가 평균 1.1 mg/l 까지 낮아졌다. 따라서 T-N도 표 1과 같이 유입수는 평균 36.8 mg/l 이었으나, 처리수는 2.9 mg/l 까지 낮아져 92.1 %의 제거율을 보였다. T-N의 경우 유입수 농도의 표준편차가 2.02 ~ 17.93이었으나, 처리수는 0.17~0.57로서 안정된 처리효과를 보였다.

1일 4시간 폭기 B (1시간폭기, 5시간 정지) 조건에서는 질소의 경우 ORP 263 mV~278 mV(평균267 mV) 사이에서 질산화가 완료되어 그 이후에는 ORP값에 거의 변화가 없었기 때문에 처리수의 NH₄-N농도가 0.9 mg/l 까지 낮아졌다. 또한 탈질시간이 확보되어 NO_x-N농도도 0.5 mg/l 까지 낮아졌기 때문에 T-N농도는 평균 31.2 mg/l 에서 2.7 mg/l 까지 낮아져 제거율은 91.3%를 나타냈다. 그러나 T-P농도는 평균 3.6 mg/l 에서 2.6 mg/l 로 낮아져 제거율은 27.8 %로 낮았다.

한편, 1일의 폭기시간이 같은 4시간이라고 하더라도 1사이클당의 폭기시간 및 비폭기시간의 비율에 따라서 처리효율이 달랐다. 특히 1시간폭기 5시간정지의 경우(1일 4시간 폭기 B) BOD, COD, SS, T-N, TOC의 제거율이 각각 99.0 %, 93.1 %, 90.9 %, 91.2 %, 93.7 %로서 같은 1일 4시간폭기의 30분폭기 5시간반 정지(1일 4시간 폭기 A)의 경우에 비해 높은 처리효율을 보였다. 이것은 유기물의 산화 및 질산화에 필요한 호기시간과 탈질에 필요한 무산소상태가 모두 충분히 확보되었기 때문으로 생각된다.

1사이클당의 폭기시간에 따른 처리효율을 살펴보면, 1사이클당 30분폭기는 인공오수를 충분히 산화 및 질산화시키지 못하여 표 1과 같이 전체적으로 1사이클당 1시간 폭기시보다 처리수의 수질이 나쁜 경향을 보였다. 또한 BOD 및 NH₄-N의 표준편차가 각각 0.57~2.30, 0.25~2.41을 나타내는 등 처리수의 수질이 다소 불안정하여 1사이클당 1시간 폭기시에 비해 전반적으로 처리수의 안정도가 낮았다. 그러나 1사이클당 1시간 폭기의 경우는 오수가 완전히 질산화된 뒤에도 1시간이 될 때까지는 낭비적인 폭기가 계속되는 경우가 많았다. 따라서 에너지 절약 면에서도 처리효율 면에서도 보다 세밀한 제어가 이루어지는 것이 바람직할 것으로 생각된다.

4. 폭기시간별 송풍량

1일당 송풍량은 그림 2와 같이 24시간 연속폭기의 경우는 2,622 L/day이었으나, 12시간폭기의 경우는 1,674 L/day였다. 8시간폭기의 경우는 999 L/day였고, 6시간폭기의 경우는 1,154 L/day로서 거의 비슷한 값을 보였다. 4시간폭기의 경우는 송풍량이 964 L/day와 724 L/day로 낮아졌다. 따라서 연속폭기에 비해 각각 36.2 %, 61.9 %, 56.0 %, 63.2 %, 72.4 %의 송풍량이

감소되어 그만큼 소비전력량이 절약된 것을 의미한다. 이것은 어디까지나 비교적 분해되기 쉬운 인공오수를 대상으로한 실험결과로서 실제의 오수의 경우에는 차이가 있을 것으로 생각된다. 그러나 노력여하에 따라서는 일정한 처리효율을 유지하면서 어느 정도 소비전력량을 줄일 수 있다는 것을 보여주는 결과라고 할 수 있겠다.

또한 1일의 폭기시간이 같은 4시간의 경우에도 폭기시간 및 정지시간의 비율에 따라서 폭기량이 달랐다. 즉, 같은 1일 4시간폭기의 조건에서도 30분폭기, 2시간 30분정지의 경우는 송풍량이 964 L/day이었으나, 1시간폭기, 5시간정지의 경우는 724 L/day로서 약 25 %절약 되었다. 이것은 유기물의 산화 및 질산화가 완료되기 까지는 미생물이 활발하게 활동하므로 폭기펌프도 최대의 출력으로 움직이지만, 그후에는 산화 및 질산화가 거의 완료되어 미생물의 활동이 둔화되기 때문에 필요산소량이 감소하여 폭기펌프의 출력도 감소하기 때문으로 생각된다. 즉, 30분폭기 2시간 30분정지의 경우는 30분간 최대의 출력으로 움직이며, 1일의 사이클수도 8회로 많았으나, 1시간폭기 5시간정지의 경우는 1시간폭기중 질산화가 종료된 지점이후에는 송풍량이 급격히 줄어들기 때문에 폭기시간 동안의 폭기량은 30분 폭기와 큰 차이가 없으며, 1일당 사이클 수도 4회로 적기 때문으로 생각된다. 따라서 폭기시간과 비폭기시간의 비율을 조절함으로써 어느 정도 폭기경비를 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

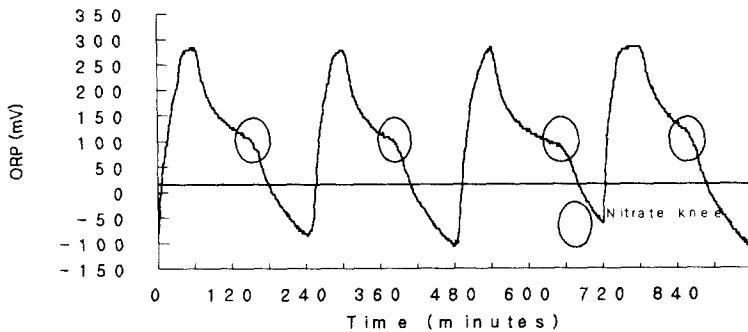


Fig. 1. Changes of ORP curve in the aeration tank

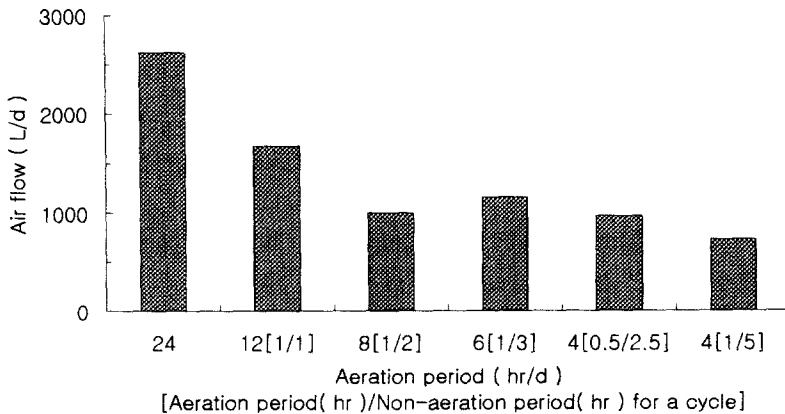


Fig. 2. Variations of air flow according to aeration period

IV. 결론

장기폭기방법을 대상으로 DO제어와 간헐폭기에 의한 에너지 절약 및 질소제거에 대한 실내실험을 실시하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 연속폭기조건에서는 과잉폭기되어 오니플록이 파괴되기 때문에 처리수의 수질이 서서히 악화되는 경향을 보였다. 따라서 호기상태, 무산소상태, 혐기상태 등을 확실하게 발생시키기 위해서는 간헐폭기로 하는 것이 좋을 것으로 판단된다.

2. 간헐폭기의 경우 BOD, SS는 처리방류수수질기준을 만족하면서 처리수의 수질이 안정되고, 질소·인도 제거되는 등 연속폭기에 비해 에너지 절약면에서도 처리율면에서도 효과적이었다. 또한 1일의 폭기시간이 같은 경우에도 1사이클당의 폭기시간과 비폭기시간의 비율에 따라 처리효과가 달랐다.

3. 간헐폭기에 의해 송풍량을 1일 최대 72.4 %까지 절약할 수 있었다. 또한 1일의 폭기시간이 같은 경우에도 1사이클당의 폭기시간과 비폭기시간의 비율을 조절하여 송풍량을 25 %정도 절약할 수 있었다.

4. 탈질이 종료되는 지점에서 ORP곡선상에 출현하는 굴곡점(Nitrate knee)이 검출된 조건에서는 T-N의 제거율이 91 %이상까지 높아졌다. 그러나 굴곡점이 출현하는 ORP값은 조건에 따라 달랐다.

5. 1사이클당 30분폭기의 경우 인공오수가 충분히 산화 및 질산화되지 않았고, 또한 1시간폭기의 경우는 오수가 완전히 질산화된 뒤에도 1시간이 될 때까지는 낭비적인 폭기를 계속하므로 에너지 절약효과를 높이고 질소·인의 처리효율을 높이기 위해서는 좀더 정밀한 폭기제어에 대한 연구가 이루어져야 할 것으로 생각된다.

參 考 文 獻

1. 弘文館法研會, 1997, 환경관계법규-수질편-, 홍문관, 서울, pp.198.
2. 井出哲夫, 1993, 水處理工學-理論と應用 <第二版>, 技報堂, pp.242-260.
3. 遠山啓, 1981, 送風コストの比較手法に關する研究, 下水道協會誌, 18(208), pp.50-60.
4. 古屋昇, 後藤啓介, 高橋寛, 富士元英二, 1978, エアレーションタンクの溶存酸素濃度一定制御に關する研究-2, 下水道協會誌, 15(175), pp. 2-10.
5. 古屋昇, 秋田徹, 今村武夏, 富士元英二, 1978, エアレーションタンクの溶存酸素濃度一定制御に關する研究-1, 下水道協會誌, 15(174), pp. 94-101.
6. 柚山義人, 大西亮一, 丹治肇, 米川公一, 1989, 美浦實驗プラントの概要と水理特性-一回分式活性汚泥法による集落排水の高度處理に關する研究 (I) -, 農業工學研究技報 第181號, 農業工學研究所, つくば, pp.28-29.
7. Joseph F. Roesler, 1974, Plant Performance Using Dissolved Oxygen Control, *ASCE J. Environmental Engineering Division*, 100(10), pp. 1069-1076.