

기질 공급 방식에 의한 연속 회분 활성슬러지법의 특성에 관한 연구

박동근* · 이민규** · 안갑환 · 송승구

*동서공과대학 환경공학과

**제주대학교 화학공학과

부산대학교 화학공학과

(1992년 5월 6일 접수, 1993년 1월 25일 채택)

The Effect of Substrate Feeding Variation on the SBR Process

Dong Keun Park*, Min Gyu Lee**, Kab Hwan An and Seung Koo Song

*Dept. of Environmental Engineering, Dongseo University

**Dept. of Chemical Engineering, Cheju National University

Dept. of Chemical Engineering, Pusan National University

(Received 6 May 1992; accepted 25 January 1993)

요 약

실제의 도시하수와 유사한 조성비의 인공하수를 사용하여 기질 공급 방식을 달리하면서 간헐적 폭기에 의한 연속 회분 활성슬러지법을 실험실 규모로 운전하였다. 1 cycle을 24시간으로 하여 걸보기 수율, 질소 및 인의 제거 능력을 비교 검토하였다. SRT 13일, COD 용적부하 $0.38 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ 로 한 모든 실험조건에서 COD 제거 효율은 97% 이상으로 매우 양호하였다. 기질 공급이 종료되는 시간을 12시간, 7시간, 3시간 및 1분 이내로 하였을 때 각각에 대한 걸보기 수율은 0.44, 0.65, 그리고 0.75로 나타나, 기질 공급이 종료되는 시간을 짧게 하여 운전할수록 걸보기 수율은 증가하였다. 질소 제거 효율은 74-83%로 표준 활성슬러지법에서 기대되는 것보다 월등히 높았으며, 가능한 한 폭기가 정지된 상태에서 기질을 몇회에 나누어 분주시키는 것이 질소 제거에는 효과적이었다. 인 제거 효율은 폭기가 정지된 상태에서 기질 공급이 종료되는 시간을 가능한 한 짧게 하여 운전하는 것이 인 제거에 효과적이었다.

Abstract—A laboratory scale sequencing batch reactor with a total cycle period of 24 hours was operated to investigate its performance to artificial sewage whose composition was similar to that of actual municipal sewage. More than 97% of inlet COD was removed at a SRT of 13 days and organic loading rate of $0.38 \text{ kg COD/m}^3/\text{day}$. The observed yield was shown in the range of 0.75 to 0.44 with the change of the substrate feeding interval of 1 minute through 12 hours. With these experimental conditions, the removal efficiency of nitrogen was ranged from 74 to 83%, which was much higher than that of the ordinary activated sludge process. It was found that the nitrogen removal was well increased with intermittent substrate feeding under no aeration and the observed yield and the removal efficiency of phosphorous were also increased according to the decrease of the substrate feeding interval.

1. 서 론

도시하수 처리를 위한 연속 회분식 활성슬러지법이 주목을 받게 된 것은 1969년 Pasveer[1]의 연구 성과가 발표되고 부터이다. 그는 연속 유입식의 Oxidation Ditch법으로 처리되고 있던 네덜란드의 한 병원 폐수처리장에서 발생된 슬러지 팽화를 비연속 유입의 간헐 폭기 방식을 도입하여 90% 이상의 질소 제거와 함께 슬러지 팽화 문제도 해결하였다. 이러한 성과에 힘입어 오스트레일리아의 공공사업부(Department of Public Works)는 소규모 도시하수 처리시설로서 연속 회분식 활성슬러지법을 채택하였다[2].

미국에서도 환경보호청(EPA)의 지원을 받아 Notre Dame대학의 Irvine을 중심으로 연속 회분식 활성슬러지법의 실용화를 목표로 하여 연구하고 있다[3-12].

일본에서는 건설성 토목연구소를 중심으로 1980년부터 연속 회분식 활성슬러지법에 관한 연구가 시작되어 太幸 등[13]과 太川 등[14]의 연구성과에 의하여 연속 회분식 활성슬러지법에 관한 관심이 고조되었다. 또한 1984년 일본 하수도 사업단은 소규모 하수 처리시설을 연속 회분식 활성슬러지법으로 실용화하기 위하여 pilot plant 실험을 하여 설계, 운전관리의 지침을 마련하였다[15].

최근에는 자동화 장비의 지원을 받아 조작이 간편해 지자 질소나 인과 같은 영양염의 동시 제거를 위한 연구도 활발히 진행되고 있다[16-19].

이와 같이 연속 회분식 활성슬러지법은 부하 변동이 큰 소규모 하수도나 산업 폐수처리에 적합하여 운전조건에 따라서는 질소나 인의 동시 제거도 가능할 뿐만 아니라 사상성 세균의 증식 억제효과까지 있어 sludge bulking 문제까지도 해결할 수 있는 등의 많은 장점을 가지고 있으나, 하나의 반응조 내에서 유기물의 산화, 질소 화합물의 산화 환원, 인의 방출과 과잉섭취 등의 복잡한 반응과 함께 침강 분리 조작까지 행하여야 하기 때문에 기질 제거에 관한 정량적인 해석과 그에 따른 설계 및 운전의 최적화에 관한 정보는 아직도 미흡한 단계에 불과하다.

유기물과 더불어 질소, 인의 동시 제거를 목적으로 할 때에는 간헐적 폭기는 필수적이므로, 본 논문에서는 간헐적 폭기에 의한 연속 회분식 활성슬러지법에 있어서 기질 공급 방식에 따른 유기물, 질소, 인 등의 처리성적을 비교 검토하여 설계 및 운전조건의 최적화에 관한 새로운 정보를 얻는데 그 목적을 둔다.

2. 실험

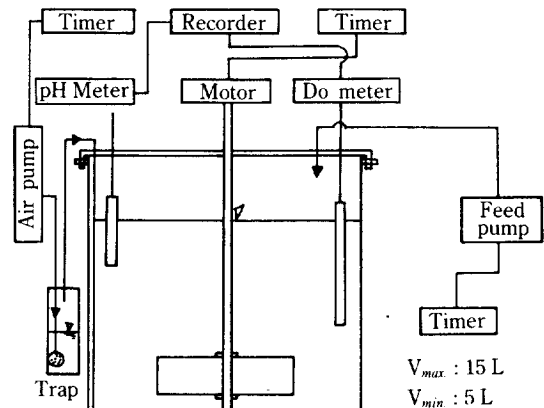


Fig. 1. Experimental apparatus.

Table 1. Composition of the synthetic wastewater(based on 10 L)

Component	Contents	Parameters(mg/l)
Soluble starch	2.7 g	COD 570
Peptone	2.7 g	TN 73.1
Meat extract	2.0 g	TP 22.0
1 N-NH ₄ HCO ₃	10 ml	Alkalinity 240
0.5 N-NaHCO ₃	50 ml	
Phosphate buffer soln.*	20 ml	
Magnesium sulfate soln.*	10 ml	
Calcium chloride soln.*	10 ml	
Ferric chloride soln.*	10 ml	

*: reagents for BOD test

2-1. 재료 및 방법

본 연구에 사용된 회분 반응조를 Fig. 1에 나타내었다. 직경 300.5 mm, 높이 290 mm(유효용적 15 L)의 원통형으로 paddle형 교반기를 반응기의 중앙에 장착하였다.

반응조 내의 상태를 연속적으로 조사하기 위하여 기록계, DO, pH 및 ORP meter 등을 부착하고 기질과 공기 공급용의 정량 pump를 timer와 연결시켜 정해진 주기(time schedule)에 따라 작동되도록 하였다.

유기물 산화, 질산화, 탈질화 및 인의 방출과 과잉섭취 등의 생화학적 반응에 pH와 DO는 매우 중요한 요소이지만 본 실험에서는 한 반응기 안에서 여러 반응이 복합적으로 일어나므로 각각의 영향을 고려하지 않고 시간에 따른 정성적인 변화만 고찰하였다. pH는 전 조작에 걸쳐 큰 변화는 없었으며, 폭기 정지시의 DO는 5 mg/l 이상으로 유지되었으나, 폭기 정지시에는 0 mg/l이었다. 그러나 폭기 정지 초기 20여분 동안은 DO가 0 mg/l로 감소되는 과정에 있었으므로 폭기 정지 시간의 명확한

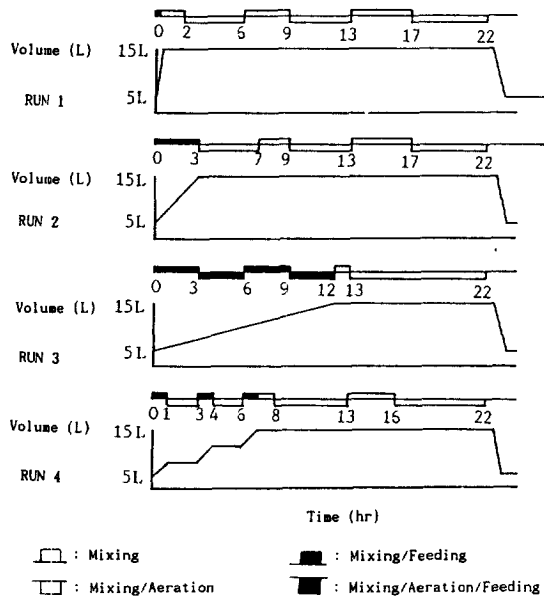


Fig. 2. Substrate feeding and aeration patterns.

구분에는 해석의 여지가 남아 있다고 생각되었다.

각 실험의 공급 기질인 인공하수의 조성은 Table 1과 같으며, C : N : P의 비율이 일반 가정하수와 유사하도록 하였기 때문에 탄소원에 비하여 질소와 인이 과잉으로 함유되어 있으며, 질소화합물의 산화, 환원반응에 따른 알칼리도의 감소, 즉 pH 하강에 의한 나쁜 영향을 줄이기 위해 알칼리 물질의 공급도 충분하도록 되어 있다.

각 실험에 있어서 기질 공급 및 폭기 양식은 Fig. 2와 같다. 실험에 사용한 슬러지는 식품 가공공장 폐수처리장의 반송 슬러지를 soluble starch, peptone, meat extract를 주성분으로 한 인공하수에 의해 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 의 항온조 내에서 Run 1과 같은 조건에서 1년 이상 장기간 순환된 것이다. 모든 실험의 1 cycle은 24시간으로 설정하였으며 1 cycle 중의 마지막 2시간은 침강분리에 필요한 시간으로 배정하였다. 또 1 cycle 중의 최대 반응액량은 15 L, 최소 반응액량은 5 L로 설정하였다. 즉, 매 cycle마다 10 L의 새로운 기질을 공급하고 반응 종료액은 10 L 배출하였다.

폭기시간과 폭기 간격을 모든 실험에 대하여 동일하게 설정하여 폭기에 의한 영향을 가능한 한 줄일려고 하였으나, 기질 공급시에는 폭기하지 않는다는 것, 폭기하지 않는 시간을 너무 길게 할 수 없다는 것 등의 조건을 만족시키기 위하여 부득이 폭기시간과 간격을 약간 달리하였다. Run 1과 2에서 폭기시간은 13시간, Run 3과 4에서 폭기시간은 15시간으로 설정하고, 반응조에 수돗물 15 L를 채우고 폭기하였을 때의 총괄 산소이동 용

량계수, K_La 는 15/hr였다.

모든 실험에 대하여 기질의 공급은 가능한 한 폭기 정지시에 행하여 질소와 인의 제거 효율을 높일 수 있도록 고려하였으나 Run 3에서와 같이 장시간에 걸쳐 기질을 공급할 경우에는 부득이 폭기 중에도 기질을 공급하였다. Run 1의 기질 공급은 회분 반응초기에 순간적으로 행하였으며, Run 2의 기질 공급은 회분반응의 시작과 더불어 3시간에 걸쳐 행하였으며, Run 3의 기질 공급은 12시간에 걸쳐 행하였다. Run 4의 기질 공급은 폭기 정지시에 맞추어 간헐적으로 1시간씩 3회에 걸쳐 행하였다.

각 실험에 대하여 1 cycle의 실질적인 반응이 종료되는 22시간째(반응액량 15 L)에 균일한 반응액 1.1-1.2 L를 따로 취하여 각종 분석시료로 사용하고 폐기하였다. 결과적으로 SRT는 약 13일로 조정되었다.

교반기의 회전수는 조 내의 반응액을 공간적으로 균일하게 유지하면서도 표면으로부터의 산소전달 영향이 어느 정도 무시될 수 있도록 50 rpm(속도 구배 G값으로서 56/sec)으로 설정하였으며, 매 회분반응 시작에서부터 22시간째 까지 연속적으로 가동시켰다. 교반만이 행하여질 때의 K_La 는 0.48/hr였다.

2-2. 분석방법

COD, NH_4^+-N , K_2N 는 일본의 하수시험 방법[20]에 따라 전처리 한 후 TECHINCON-AUTOANALYZER II로, $\text{PO}_4^{3-}-\text{P}$, NO_3^--N 는 DIONEX-IONCHROMATO 2000i로 정량하였다. DO는 YSI OXYGEN METER (MODEL 57), pH는 HORIBA pH METER(H-17 SD), 그리고 ORP는 IONIX DIGITAL ORP CONTROLLER (PC-800D)로 정량하였다.

슬러지 내의 탄수화물(CH_6)은 수증기 증류 후 30% KOH로 분해 및 분획하여 ANTHRONE법으로 발색시키고, 610 nm(SHIMADZU UV-200S)에서 흡광된 값으로 정량하였다. 또 슬러지 내의 전 인(P_i)은 슬러지를 여과 세척 후 질산-황산 분해법으로 분해시킨 다음 ascorbic acid 환원법으로 발색시키고 710 nm에서 흡광된 값으로 정량하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 개요 및 겉보기 수율계수(Y_{obs})

SRT 13일, COD 용적부하 $0.38 \text{ kg/m}^3/\text{day}$ 로 하여 정상 상태에서 장기간 운전하였던 바, Run 1과 2는 운전 초기부터 정상 상태를 유지하였다. 그러나 Run 3과 4는 각각의 운전조건과 사용된 슬러지의 배양조건과의 사이에 많은 상이점이 있었기 때문에, 약 50 cycle 이상

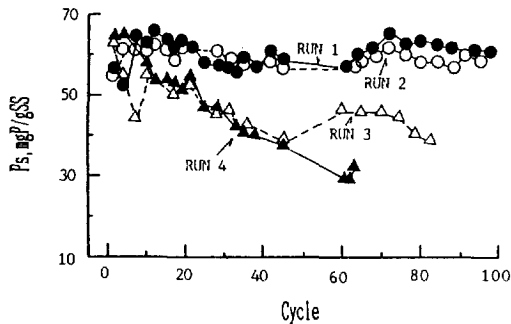


Fig. 3. Phosphorous contents in activated sludge.

반복된 후에야 완전한 정상 상태에 도달하였다. 각 실험 모두 COD 제거 효율은 운전초기부터 97% 이상으로 매우 양호하고 안정되어 있었다.

SRT와 COD 용적부하를 일정하게 하여 운전하여도 정상 상태에서 유지되는 MLSS(반응액량이 15 L로 최대일 때의 값)는 기질 공급 방식에 따라 2300-4100 mg/l로 서로 상당한 차이를 보였으며, 결보기 수율계수 (Y_{obs})도 0.44-0.75로 상당한 차이를 보였다.

기질 공급이 종료될 때까지의 시간이 순간적으로 이루어진 Run 1과 3시간에 걸쳐 이루어진 Run 2에서는 MLSS 4100 mg/l, Y_{obs} 0.75로 다른 조건에 비하여 높게 나타난 반면 12시간에 걸쳐서 기질 공급이 이루어진 Run 3과 같은 경우에는 MLSS 2300 mg/l, Y_{obs} 0.44로 가장 낮은 결과를 보였다.

한편 실질적인 기질 공급 시간은 3시간이지만 간헐적인 공급에 의해 기질 공급이 종료되는 시간이 7시간째에 완료된 Run 4는 MLSS 3500 mg/l, Y_{obs} 0.65로 기질 공급 및 종료시간이 3시간인 Run 2와는 전혀 다른 결과를 보였다. 따라서 Y_{obs} 는 기질 공급 시간보다 기질 공급 방법에 따른 반응기 내의 기질농도에 영향을 받는 것으로 사료되었다. 이는 미생물의 기질 저장능력 및 저장량은 기질의 농도구배가 큰 조건 하에서 증대된다는 기존의 연구결과들[21-24]과 맥을 같이하고 있다. 폭기 정지하에서 단시간 내에 기질 공급을 종료하게 하면 반응조 내에 큰 농도구배가 형성되어 미생물 내에 많은 기질이 저장되고, 또 기질을 저장할 수 있는 능력이 큰 미생물 종이 우점종으로 형성되기 때문에 Y_{obs} 도 증대되는 것으로 판단되었다.

매 회분반응 종료시의 슬러지 내의 인 함유량과 탄수화물 함유량을 Fig. 3과 4에 나타내었다. 운전개시시에 사용된 슬러지의 배양조건과 같거나 유사한 Run 1과 2에서 슬러지 내의 인 함유율 및 탄수화물 함유율은 각각 약 60 mg P/g SS, 90-70 mg CH₂/g SS로 운전초기부터 정상 상태를 유지하였다. 그러나 운전개시시에 사용한

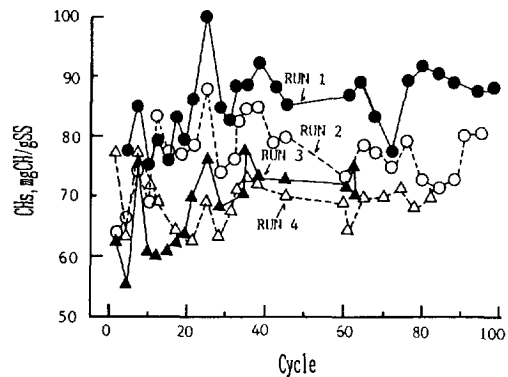


Fig. 4. Carbohydrate contents in activated sludge.

슬러지의 배양조건과 상이한 Run 3과 4에서는 회분반응을 약 50회 반복할 때까지 슬러지 내의 인 함유율이 서서히 감소하였다. 그 후 인 함유율이 40-30 mg P/g SS로 유지되면서 정상 상태에 도달하였다. 또 Run 3과 4에서 회분반응을 약 20회 반복할 때까지 슬러지 내의 탄수화물 함유율은 매우 불규칙하지만 대체적으로 감소하는 경향을 보였다. 그 후 탄수화물 함유율이 약 70 mg CH₂/g SS로 유지되면서 정상 상태에 도달하였다. 즉, 슬러지 내의 인 함유율이 운전조건 변화로 인한 새로운 정상상태로 회복되는데는 슬러지 내의 저장 유기물이 그렇게 되는데 걸리는 시간보다 더 긴 시간이 필요하였다. 이는 유기물에 관련하는 저장 및 산화 분해반응이 인의 방출 및 과잉섭취에 관련하는 반응보다 더 빠르게 일어나고 있었기 때문이라고 추측된다. 기질 공급이 3시간에 걸쳐 이루어진 Run 2는 기질 공급이 종료되는데 걸린 시간이 매우 짧은 Run 1과 비슷한 결과를 보였다. 그러나 기질 공급 시간은 3시간으로 Run 2와 같지만 기질 공급이 종료된 시간이 7시간인 Run 4는 기질 공급이 종료된 시간이 12시간인 Run 3과 유사한 결과를 보였다. 따라서 기질 공급이 종료되는 시간이 기질 공급 시간보다 기질 공급 특성을 더 잘 나타내었다.

3-2. 질소 제거 효율

Fig. 5는 각 실험에 대한 질소의 유입 및 유출 농도를 나타낸 것이다. 유입수 중의 전 질소농도는 평균 73.1 mg/l로 주로 유기물과 결합된 상태의 질소였으며, 처리수 중의 전 질소농도는 Run 1에서 16.6 mg/l, Run 2에서 17.0 mg/l, Run 3에서 18.7 mg/l, 그리고 Run 4에서 12.1 mg/l로 대부분 NO_3^- -N에 의한 것이었으며, 이 중 K_2N 은 각 Run 모두 2-3 mg/l였다.

기질 중의 질소원은 유기질소가 대부분으로 70 mg/l 이상이었다. 따라서 1 mg의 유기질소가 NO_3^- -N로 분해

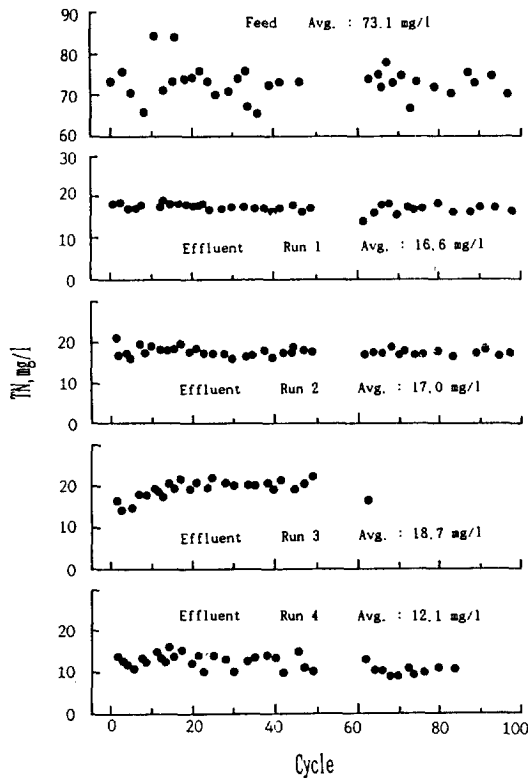


Fig. 5. Total nitrogen concentrations of feed and effluent.

산화되는데 3.57 mg의 알칼리도가 감소한다. 그러나 이러한 질산화반응은 한꺼번에 일어나는 것이 아니고 전 cycle에 걸쳐 몇 회에 나누어 일어날 뿐만 아니라 그 사이에는 탈질반응이 일어나 알칼리도가 증가하기 때문에 알칼리도의 급격한 감소현상은 일어나지 않았으며 따라서 각종 반응에 영향을 미칠만한 pH의 변화는 없었다.

본 연구에서 사용된 인공하수와 같은 조성의 폐수를 표준 활성슬러지법으로 처리하게 될 경우에 있어서 질소 제거량은 주로 슬러지 폐기량에만 의존하므로 질소 제거율은 겨우 10% 전후에 불과한 것으로 계산되지만 간헐적 폭기를 기본으로 한 본 연구에서는 4종의 모든 실험조건에서 탁월한 질소 제거능력을 보여 질소 제거율은 74-83%에 달하였다. 특히 폭기가 정지된 상태에서 1시간씩 3회에 나누어 간헐적으로 기질을 공급한 Run 4에서의 질소 제거율은 83%로 4종의 실험조건 중 가장 좋았으며, 유입 유기물 중의 일부가 먼저 호기적으로 산화될 수 있는 조건을 제공한 Run 3에서의 질소 제거율은 74%로 본 실험조건 중에서는 가장 낮게 나타났다.

이러한 결과는 별도의 수소공여체를 공급하지 않는 본 실험과 같은 조건에서는 보통 유기질소와 유기탄소를

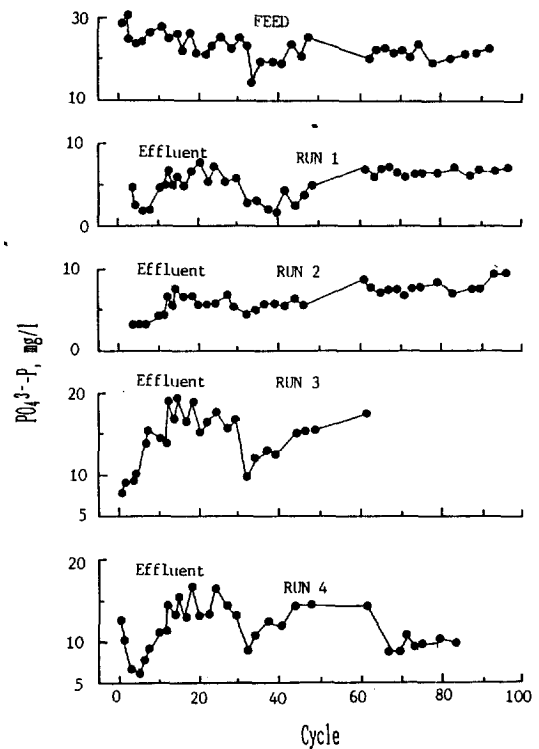


Fig. 6. Phosphate-P concentration of feed and effluent.

공급하여 폭기하면 산화속도가 빠른 유기탄소가 산화 분해된 후 비로소 질소성분이 산화된다. 따라서 산화된 질소를 다시 환원시켜 질소를 수중으로부터 효과적으로 제거하려고 하면, 질소 환원반응에 필요한 메탄올과 같은 유기탄소의 수소공여체를 따로 공급하는 것이 일반적인 방법이다[25]. 그러나 본 실험에서와 같이 유입기질 중의 유기탄소를 질소의 환원에 사용하고자 할 경우에는 유기탄소가 우선 질소의 환원에 효과적으로 사용되고 난 후 호기적으로 산화 분해되도록 운전조건을 설정하는 것이 질소 제거 효율을 향상시킬 것으로 사료되었다. Run 4에서는 폭기가 정지된 상태에서 기질을 공급하여 기질 공급 직전까지 산화되어 있던 질소산화물을 환원시키는 조작을 1 cycle 내에서 3회 반복함으로써 보다 효과적으로 질소를 제거할 수 있는 것으로 사료되었다.

3-3. 인 제거 효율

각 실험조건에 대한 인의 처리 성적을 Fig. 6에 나타내었다.

유입수 중의 인 농도는 $PO_4^{3-}-P$ 로서 14-30 mg/l(평균 22 mg/l)였으며, soluble starch, pepton 그리고 meat extract로 구성된 유입 COD에 대한 인의 비율은 약 3.9 %였다. 처리수 중의 $PO_4^{3-}-P$ 는 Run 1에서 1.5-7.6 mg/l,

Run 2에서 2.9-9.6 mg/l, Run 3에서 7.8-19 mg/l, 그리고 Run 4에서 6.5-17 mg/l로 나타났다으며, 인 제거 효율은 Run 1, 2, 4, 3의 순으로 나타났다.

활성슬러지에 의한 인 제거는, 우선 혐기적인 환경에서 슬러지 내의 인을 충분히 방출시킨 다음, 계속되는 호기적 또는 무산소적 환경하에서 방출된 인보다 많은 양의 인을 슬러지 내에 섭취시켜서, 인을 과잉 섭취하는 슬러지를 수계에서 배출시킴으로 이루어진다[26-28].

즉, 인 제거량은 슬러지 폐기량과 슬러지 내의 인 함유율과의 곱으로 표현한 식이기 때문에 효과적인 인 제거를 위해서는 Y_{obs} 와 슬러지 내의 인 함유율이 높은 운전조건을 필요로 한다.

따라서 폭기가 정지된 상태에서 빠른 시간 내에 1 cycle에 필요한 기질 공급을 종료시켜 반응조 내의 유기물 농도구배를 크게 한 Run 1과 2에서는 MLSS농도가 Run 3에 비하여 높지만, MLSS농도가 거의 비슷한 Run 4에 비하면 Y_{obs} 와 슬러지 내의 인 함유율을 높은 상태로 유지시키는 것이 제거 효율에 영향을 주는 것으로 사료되었다.

4. 결 론

도시하수와 유사한 조성의 인공하수를 1 cycle이 24시간인 실험실 규모의 연속 회분식 활성슬러지법으로 처리하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 반응조 내의 시간에 대한 농도구배를 크게 하여 운전할수록 슬러지 내의 인 함유율과 탄수화물 함유율이 증가하여 걸보기 수율도 증가하였다.

(2) 폭기가 정지된 상태에서 기질을 몇 회 나누어 분주시키는 것이 질소 제거에 효과적이었다.

(3) 폭기가 정지된 상태에서 기질 공급이 종료되는 시간을 짧게 하여 운전하는 것이 인 제거에 효과적이었다.

앞으로 기질 공급과 폭기 방식 등 비양론적 특성을 수량화하여 정량적으로 해석하는 문제와 폐수의 배출 양상과 계획된 폐수 공급방식과의 편차를 좁힐 수 있는 방법 등에 관한 연구가 필요한 것으로 사료되었다.

감 사

본 연구는 1990년도 농원 문화재단 학술연구조성비에 의하여 수행되었기에 감사드립니다.

사용기호

SRT : sludge retention time [day]

COD : chemical oxygen demand [mg/l]

DO : dissolved oxygen [mg/l]

MLSS : mixed liquor suspended solid [mg/l]

K_j-N : kjeldahl nitrogen [mg/l]

CH_s : carbohydrate content in sludge solid [mg/g]

P_s : phosphorous content in sludge solid [mg/g]

Y_{obs} : observed yield coefficient [-]

SS : suspended solid [mg/l]

TP : total phosphorous [mg/l]

TN : total nitrogen [mg/l]

참고문헌

1. Pasveer, A.: *J. WPCF.*, **41**, 340(1969).
2. Goronszy, M. C.: *J. WPCF.*, **51**, 274(1979).
3. Irvine, R. L.: *J. WPCF.*, **51**, 235(1979).
4. Irvine, R. L.: *J. WPCF.*, **51**, 245(1979).
5. Dennis, R. W. and Irvine, R. L.: *J. WPCF.*, **51**, 255(1979).
6. Ketchum, L. H., Irvine, R. L. and Liao, P. C.: *J. WPCF.*, **51**, 288(1979).
7. Alleman, J. E. and Irvine, R. L.: *Water Research*, **14**, 1483(1980).
8. Irvine, R. L., Ketchum, L. H., Breyfogle, R. and Barth, E. F.: *J. WPCF.*, **55**, 484(1983).
9. Palis, J. C. and Irvine, R. L.: *J. WPCF.*, **57**, 82(1985).
10. Manning, J. F. and Irvine, R. L.: *J. WPCF.*, **57**, 87(1985).
11. Irvine, R. L., Ketchum, L. H., Arora, M. L. and Barth, E. F.: *J. WPCF.*, **55**, 847(1983).
12. Irvine, R. L., Murthy, D. V. S., Arora, M. L., Copeman, J. L. and Heidman, J. A.: *J. WPCF.*, **59**, 132(1983).
13. 太宰宙朗, 風淺則夫, 高原義昌: 下水道協會誌, **19**, 17(1982).
14. 早川登, 絨見茂, 楠梅明, 迂讓治, 兵本祥一: 用水と廢水, **24**, 28(1982).
15. 中尺均, 田中和博, 大森信慈: 衛生工學研究論文集, **23**(1987).
16. Silverstein, J. and Schroer, E. D.: *J. WPCF.*, **55**, 377(1983).
17. 太宰宙朗, 風淺則夫, 福岡誠一: 下水道協會誌, **22**, 60(1982).
18. 岡田光正, 村上昭彦, 寺園克博, 須約槐一: 水質汚濁研究, **10**, 741(1987).
19. Melcer, H., Bedford, W. K., Topnik, B. H. and Schmidtke, N. W.: *J. WPCF.*, **59**, 79(1987).
20. 社團法人日本下水道協會編(1984).
21. Chudoba, J., Ottova, V. and Madera, V.: *Water Re-*

- search*, **7**, 1163(1973).
22. Chudoba, J., Grau, P. and Ottova, V.: *Water Research*, **7**, 1389(1973).
23. 安田正志, 熊登勇二: 下水道協會誌, **18**, 208, 41(1982).
24. 安田正志: 水質汚濁研究, **10**, 351(1987).
25. 井出哲夫: 水處理工學, 技報堂, 282-286(1980).
26. 松尾吉高, 官晶子: 第23回 衛生工學研究會講演集, 287(1978).
27. Comeau, Y., Oldham, W. K. and Hall, K. J.: *IAW-PRC*, 39(1987).
28. Somiya, I., Tsumo and Matusonoto, M.: *Water Research*, **22**(1), 49(1980).