

## 혐기-호기 활성슬러지법에 의한 유량변동이 있는 폐수의 N-P 동시 제거에 관한 연구(I)

이 민 규 · 서 근 학

부산수산대학교 화학공학과  
(1995년 8월 8일 접수)

## Simultaneous N-P Removal of Wastewater with Flow Variation by Anaerobic-Aerobic Activated Sludge Process(I)

Min-Gyu Lee and Kuen-Hack Suh

*Dept. of Chemical Eng., National Fisheries University of Pusan, Pusan 608-737, Korea*  
(Manuscript received 8 August 1995)

### Abstract

The treatment performances of anaerobic-aerobic activated sludge process were investigated under various operation conditions. The treatment system proposed in this study gave a relatively stable performance against hourly change of the flow rate and showed a satisfactory removal of nitrogen and phosphorus compounds under experimental conditions. The recycle ratio of mixed liquor from aerobic to anaerobic region and peak coefficient primarily controlled the extent of nitrogen removal. The recycle ratio had the optimum values which were determined by the microbial activities of nitrification and denitrification. The behavior of the treatment unit could be simulated by using the kinetic equations and reactor models which considered the treatment units as complete mixing tanks.

Key Words : anaerobic-aerobic process, nitrogen removal, phosphorous removal, waste water, activated sludge process.

### 1. 서 론

현재 우리 나라는 물질적으로 풍족한 생활을 영위할 수 있게 됨에 따라 여러 가지 문제가 생겨나고 있다. 그 중의 하나가 공해 문제로서 이는 고도 성장기에 공업력이 상승함과 동시에 일어났다. 특히 수질 오염에 대해서는 선진국에 비해 하수도의 완비가 늦어져서 바다, 호수 및 하천에 생활

하수, 공장 폐수 등이 흘러들어 호수나 강 및 해역에서 공통적으로 질소 농도가 상승하거나, 혹은 N/P 비가 높아져 부영양화 현상이 발생하고 있다. N/P 비가 상승하는 현상은 수역 생태계를 건전하게 유지함에 있어 큰 문제가 되므로 질소 및 인의 동시 제거는 필수적이라 생각된다. 1996년부터 배출수의 배출 규제가 보다 더 엄격해짐과 동시에 N, P의 규제도 강화되므로 N, P 제거의 필요성은

더욱 증대되고 있다.

최근 McClintock *et al.*(1988) 및 Rittmann과 Langeland(1985)는 일반적인 활성슬러지공정에 nitrate respiration이 병합될 경우, 슬러지 생산량이 감소될 뿐만 아니라, 양호한 유출수 수질을 유지할 수 있다고 하였다. 이는 oxygen respiration에 비해 nitrate respiration에서는 슬러지 생산이 적게 되고, 기질 사용속도가 높다는 것을 의미하는 것으로써 이러한 점을 고려하여 혐기-호기조 사이에서 mixed liquor를 순환시킴에 의해 동일 장치 내에 단일 슬러지를 이용하는 새로운 처리시스템이 혐기-호기 활성슬러지공정이다. 연속식 혐기-호기 활성슬러지법의 기본적인 시스템은 Barnard(1973)에 의해 처음 제안되었는데, 이 공정의 장점은 폐수중의 유기탄소를 탈질화하는데 수소공여체로써 이용할 수 있을 뿐만 아니라 처리장치가 매우 간단하다는 것이다.

Kern-Jespersen과 Mogens Henzen(1993)은 생물학적인 인의 제거에 있어서 유기물질의 양이 제한되어 있으면 무산소 조건에 있어서의 인 제거에 좋지 못한 영향을 줄 수도 있다고 하였다. 탈질화 공정을 포함하고 있는 폐수처리 공정에 있어서의 생물학적인 인의 제거는 인 축적 박테리아에 의해서 포획되어지는 약간의 유기 물질이 탈질화에 사용되지 않고, 이 대신으로 산소와 반응하여 산화된다면 생물학적인 인 제거는 탈질화속도와 탈질화능력을 감소시키게 된다고 하였다(Shammas, 1986). Gerber *et al.*(1987)는 poly-P 박테리아는 이용 가능한 아세테이트가 존재하는 경우에는 무산소 조건에서 인을 방출하는 것뿐만 아니라 호기성 조건에서도 인을 방출할 수 있다는 것과 poly-P 박테리아는 최종적인 전자수용체(hydrogen donor)로써 질산염을 사용한다는 것을 밝혔다.

가장 경제적인 질소 제거방법은 생물학적 질소 순환에서 일어나는 반응을 이용하는 것이다(Bortone *et al.*, 1994; Tom *et al.*, 1992). 암모니아화 및 질산화는 호기성 조건하에서 진행되는 반면, 탈질화는 혐기 조작 조건하에서 진행된다(Rittman과 Langeland, 1985). 따라서 질소 제거를 위한 일반적인 처리 시스템은 용존산소 농도에 따라 질산화 및 탈질화가 일어나게 되는 서로 상반

된 요구 조건을 충족시키기 위하여 2~3개의 탱크를 설치하여 사용하고 있는데, 이에 따라 장치가 커지게 될 뿐만 아니라, 탈질화를 촉진시키기 위하여 수소공여체로써 유기탄소원을 혐기조에 넣어 주어야만 한다(Barth와 Stensel, 1981; Dahab와 Lee, 1988). 이로 인해, 최근에는 BOD 뿐만 아니라 N-P를 동시 제거할 수 있는 단일 슬러지 공정(single sludge process)이 경제적인 측면과 조건의 편이성 관점에서 많은 관심을 받고 있다(Argaman과 Brenner, 1986; Barnard, 1973; Hashimoto, 1989). 특히 인구밀도가 낮은 지역에서 소규모 폐수 처리법으로서 단일 슬러지를 사용한 혐기-호기 반복조작이 유행시 되고 있는데, 이는 혐기상태에서의 탈질 및 인의 방출, 호기상태에서의 질산화 및 인의 흡수, 그리고 유기탄소화합물의 호기 분해를 조합함으로써 BOD, 질소 및 인의 제거가 단일 슬러지에 의해 이루어지게 되기 때문이다.

본 연구에서는 하수 유입량의 부하변동에 관계 없이 안정적인 처리수질을 지속적으로 확보할 수 있는 처리시스템으로써 혐기-호기 활성슬러지공법을 이용하여 N와 P를 동시에 제거하고자 하였다. 일반적으로, 가정 오수의 가장 큰 특징은 유량 및 농도부하의 변동과 낮은 오탁물 농도이므로, 실제 가정 하수와 마찬가지로 아침과 저녁 2회의 유량 peak를 가지는 유량변동에 대해 혐기-호기 활성슬러지법의 처리특성을 조사함으로써 생활 오수와 동일한 형태의 유량변동이 주어질 경우 장치의 안정성 여부를 검토하고, 장치의 모델링을 행하여 실험결과와 시뮬레이션 결과를 비교하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 혐기-호기 활성슬러지공정은 Fig. 1에 보여지는 바와 같이 비교적 간단한 처리장치로써 통상적인 활성슬러지조의 앞 절반을 칸으로 나눠서 비폭기역으로 한 것이다. 각 반응조는 아크릴로 제작하였으며, 장치의 전체 부피는 10ℓ로 하였다. 기본 실험은 1일 평균 수리학적체

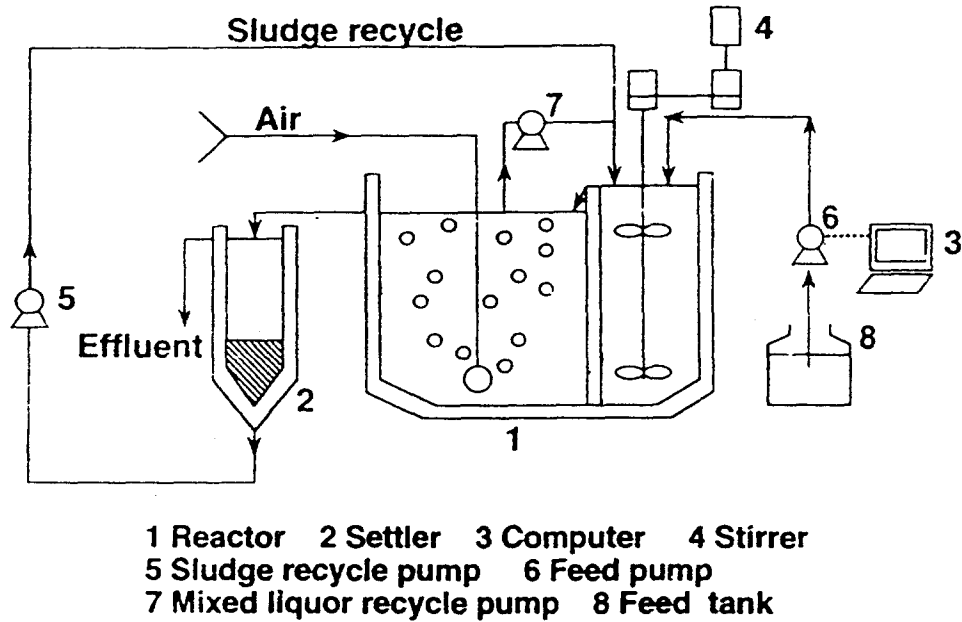


Fig. 1. Schematic of experimental apparatus.

류시간 24h, 혐기/호기조 부피비 1:2, 반송비는 3,  
 Table 1. Composition of synthetic wastewater

Components	Concentration(g/m <sup>3</sup> )
Glucose	200
Polypepton	40
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	21.7
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	6.6
NaHCO <sub>3</sub>	37.5
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	56.3
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	37.5
NaCl	37.5

Org-N : NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N = 5.4 : 4.6  
 BOD = 150g/m<sup>3</sup>  
 T-N = 10g/m<sup>3</sup>  
 T-P = 1.2g/m<sup>3</sup>  
 BOD : N : P = 75 : 5 : 1

MLSS 3,000~3,600mg/l, 슬러지 체류시간 30d, 온도 25℃의 조건하에서 실시하였다. 유입 폐수는 먼저 비폭기조로 보내고 여기서 완속 교반을 하면서 혐기적 조건하에서 일정 시간 동안 체류시킨 다음, 혐기조에서 월류한 현탁액은 폭기되고 있는

호기조로 보내고 호기조로부터는 일정 유량의 현탁액을 혐기조로 순환시켰다. 처리실험에 사용된 인공폐수는 Table 1과 같으며, 글루코오스를 유기탄소원으로 사용하였다. 또한, 유량변동에 따른 처리특성을 살펴 보기 위하여 유량 변동패턴은 실제의 생활 오수에서 보이는 유량변동에 근접시키기 위해 아침과 저녁 2회의 peak를 갖도록 계단(step)상으로 설정하였다. 2회의 변동 패턴은 동일하게 하였고, 야간~새벽 및 낮에는 유량을 0으로 설정하였다. 실험은 1일당의 부하량을 일정하게 유지한 상태에서 peak계수를 변화시키는 조건하에서 행하였다. 처리수는 호기조로부터 채취하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 1. 처리장치의 거동

일반적으로 생활오수는 우리들의 생활양식에 따라 배출량 및 농도가 변하기 때문에 유량변동은 오수의 중요한 특성중의 하나로서 유량변동이 있

는 경우의 처리특성은 정상상태 조작경우의 처리특성과는 달라지며, 질소 및 인의 제거효율에 영향을 미치게 된다. 따라서 유량변동이 주어질 경우 혐기-호기 활성슬러지 공정의 처리특성을 살펴 보기 위하여 유입폐수의 농도는 일정하게 하고 유입유량을 변화시켰을 경우 처리장치 거동의 한 예를 Fig. 2와 3에 나타내었다. 이때 유량 부하변동 패턴은 실제의 생활 오수에서 보이는 유량변동에 근접시키기 위해 Table 1의 합성폐수의 유입유량을 Fig. 2와 3의 상단부에 나타낸 것 처럼 아침과 저녁 2회의 peak를 갖도록 계단(step)상으로 변화시켰다. 2회의 변동 패턴은 동일하게 하였고, 야간~새벽 및 낮에는 유량을 0으로 설정하였다. 실험 데이터는 매일 동일한 형태의 유량변화를 가한 후 10일 이후의 결과이며, 혐기조 및 호기조에서의  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  및  $\text{NO}_3^--\text{N}$  농도변화는 Fig. 3에서 보여주는 바와 같이 서로 대조적인 특성을 보였다. 혐기조의 경우 유량증가에 따라  $\text{NH}_4^+-\text{N}$  농도는 증가하였으나  $\text{NO}_3^--\text{N}$  농도는 감소하는 경향을 보였다. 그러나 혐기 및 호기 각 조에서의 org-N의 농도는 큰 차이를 보이지 않았다.

질소 및 인의 경우는 Fig. 2에서 보여지는 바와 같이 peak 계수 3의 유량변동에 대해 혐기조의 경우 유량의 peak점에서는 상대적으로 높은 농도를 보였지만 출구 측, 호기조에서의 질소농도는 거의 일정하게 유지되고 활성슬러지의 활성은 매우 높게 유지되었다. 이는 반응조가 2개 연결되어 있으므로 해서 유량변동의 영향이 완화되었기 때문으로 생각되었다. 인의 경우도 peak점에서는 상대적으로 약간 높은 농도 경향을 보이기는 하나 출구에서의 농도는 거의 0으로 유지되었다. 인 제거에 있어서 Hano *et al.*(1992)는 유량변동을 동반하지 않는 정상조작의 경우에는 인 제거능이 서서히 감소되다가 나중에는 전혀 제거되지 않았으며, 인의 제거는 미생물이 인을 축적할 수 있는 능력에 의하여 영향을 받게 되므로 인을 축적시킬 수 있는 많은 양의 biomass를 가질 필요가 있다고 하였다. 그러나 유량변동이 주어진 비정상 조작과 슬러지를 순환시키는 경우에는 인의 제거능이 높게 유지되는 양호한 결과가 얻어 졌는데, 이는 주간 및

야간에 폐수 유입이 정지됨에 따라 회분조작으로 됨에 따른 결과로 생각되었다.

Fig. 2와 3에서 보여지는 바와 같이 연속식 혐기-호기 활성슬러지법에서는 유량변동에도 불구하고 처리수(호기조)의 수질이 비교적 안정되어 있으며, 반응조를 2개 사용함으로써 유량변동에 충분히 대응할 수 있음을 알 수 있었다.

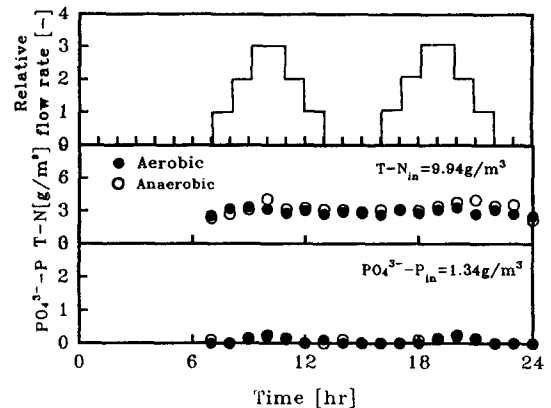


Fig. 2. Time course of treatment performance on flow rate variation at peak coefficient of 3.0.

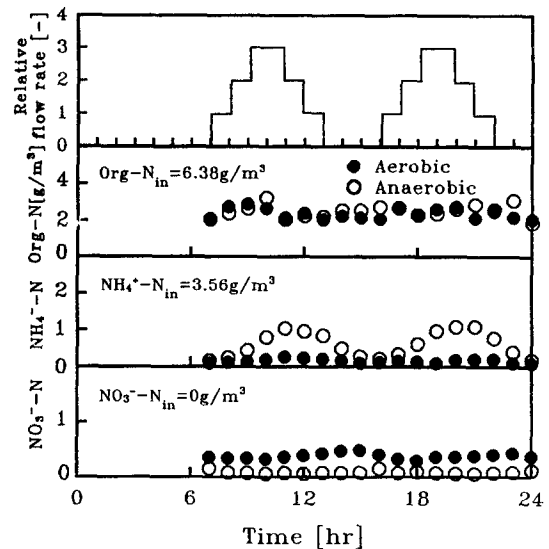


Fig. 3. Time course of treatment performance on flow rate variation at peak coefficient of 3.0.

## 2. 유량변동 peak계수의 영향

1일 총폐수유입량과 순환비를 일정하게 유지하고 peak계수를 변화시키기에 따라 처리수의 N 및 P의 제거율에 미치는 영향을 살펴본 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Peak계수가 증가함에 따라 혐기조에서의 농도는 다소 상승하지만 호기조에서는 완화됨으로써, 1일 평균 제거율은 거의 일정한 값을 보였다. 그림에서 보여지는 바와 같이 유량 peak계수의 큰 변화에 대해서도 N 및 P의 제거율은 거의 일정한 값을 유지하였다. 이는 유입폐수가 혐기조에 도입되면 빠르게 분산되고 각 반응기에서 충분히 혼합되어 혐기조로 부터 호기조로 흐르는 동안 유량변동 peak의 영향이 완화되기 때문으로 생각되었다. 이러한 현상으로 부터 본 처리장치는 유입 유량의 큰 변화에 관계없이 일정한 수질을 유지됨을 알 수 있었다.

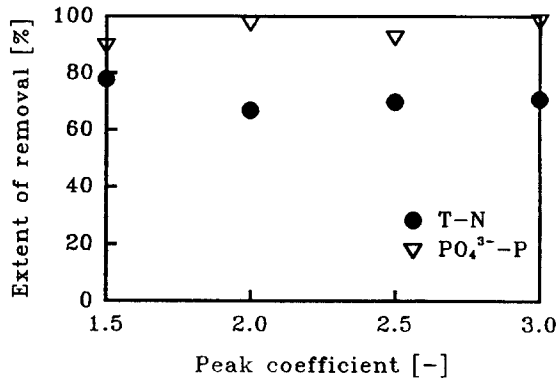


Fig. 4. Effect of peak coefficient on the extent of removal.

## 3. 현탁액 순환비의 영향

혐기-호기 활성슬러지공정에서 현탁액의 순환비의 영향은 중요한 변수중의 하나이다. 혐기-호기 활성슬러지법에서는 호기조에서 혐기조로 순환시키는 현탁액 유량에 따라 계내의 혐기/호기 조건이 변화된다. 호기조에서 나온 슬러지 현탁액은 혐기조로 재 순환함으로써 장치 내의 슬러지는 각

종 미생물 군으로 이루어진 단일슬러지로서 일정 시간마다 반복적으로 호기-혐기 조건 하에 놓이게 되며, 질소 및 인의 제거는 다 같이 혐기 및 호기 과정이 조합되어 이루어지기 때문에 순환비의 영향은 크게 된다. 유량변동을 동반하는 혐기-호기 활성슬러지법에서의 순환비의 영향을 검토한 결과 Fig. 5과 같은 결과를 얻었다. 제거율은 시간에 따라 변화하므로 1일 평균제거율로 나타내었다. 유량변동의 경우 정상조작에 비해 순환비의 영향은 작은 것으로 생각되었다. T-N의 제거율은 순환비가 증가함에 따라 증가하다가 최대점을 통과한 다음에는 감소하였는데, 이는 질화반응 및 탈질 반응의 미생물활성에 따라 결정되는 최적순환비가 존재함을 알 수 있었다. 이러한 특성은 순환비의 증가에 따라 혐기조내의 DO(용존산소) 농도가 상승됨으로써 탈질 반응이 억제되기 때문으로 생각된다. 인은 순환비의 영향에 관계없이 거의 제거되었다.

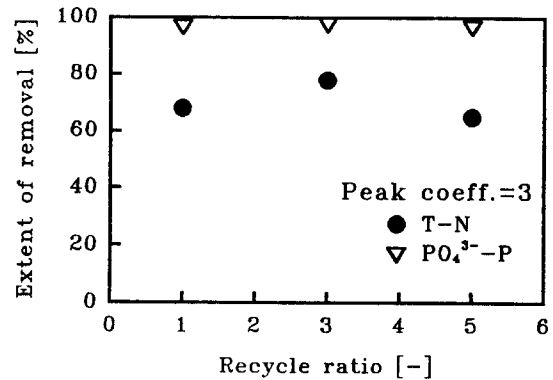


Fig. 5. Effect of recycle ratio on the extent of removal.

## 4. 처리장치의 모델링

생물학적 질소제거 반응은 Fig. 6에서 보여지는 바와 같이 크게 암모니아의 질산화단계와 질산(또는 아질산)으로 부터의 탈질 단계로 구분된다. 암모니아의 질산화단계는 호기 조건하에서 아질산화와 아질산의 질산화 반응이 있으며, 그것에 관계

되는 세균으로는 아질산균(*Nitrosomonas*, *Nitrosococcus*), 질산균(*Nitrobacter*)이 있다. 또한 혐기 조건하에서 일어나는 질산(또는 아질산)의 질소로의 환원(탈질)에 관계되는 세균은 *Pseudomonas*, *Achromobacter*이다. 또한, 탈질에는 수소공여체(일반적으로 메탄올)가 필요한데, 본 연구에서는 폐수 중의 유기물(BOD)을 이용함으로써 따로 부가할 필요가 없었다.

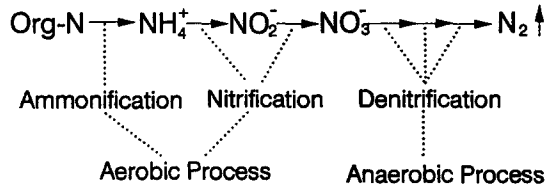


Fig. 6. Biological nitrogen removal.

연속 질산화-탈질반응 장치의 모델링을 시도하기 위하여 다음과 같이 가정하였으며, 반응 장치 모델의 개요도는 Fig. 7과 같다.

1. 각 반응조는 완전 혼합 반응기이다.
2. 혐기 반응조에서는 탈질 반응이 진행된다.
3. 호기 반응조에서는 암모니아화 및 질산화 반응이 연속적으로 일어난다.
4. 각 반응단계는 1차반응이다.
5. 조작중의 MLSS는 일정하다.

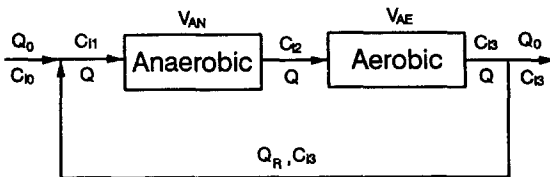
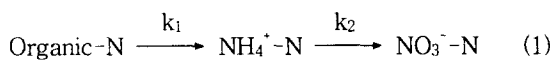


Fig. 7. Modelling of treatment unit.

호기 반응조에서는 다음과 같은 연속 반응이 진행되는 경우



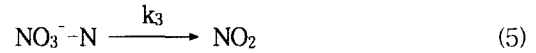
각 성분에 대한 물질수지식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Org-N} : \frac{dC_{A3}}{dt} = \frac{Q(C_{A2}-C_{A3})}{V_{AE}} - k_1 C_{A3} \quad (2)$$

$$\text{NH}_4^+\text{-N} : \frac{dC_{B3}}{dt} = \frac{Q(C_{B2}-C_{B3})}{V_{AE}} + k_1 C_{A3} - k_2 C_{B3} \quad (3)$$

$$\text{NO}_3^-\text{-N} : \frac{dC_{C3}}{dt} = \frac{Q(C_{C2}-C_{C3})}{V_{AE}} + k_2 C_{B3} \quad (4)$$

혐기 반응조에서는 다음과 같이 탈질 반응이 진행될 경우



각 성분에 대한 물질수지식은 다음과 같이 된다.

$$\text{Org-N} : \frac{dC_{A2}}{dt} = \frac{Q(C_{A1}-C_{A2})}{V_{AN}} \quad (6)$$

$$\text{NH}_4^+\text{-N} : \frac{dC_{B2}}{dt} = \frac{Q(C_{B1}-C_{B2})}{V_{AN}} \quad (7)$$

$$\text{NO}_3^-\text{-N} : \frac{dC_{C2}}{dt} = \frac{C_{i0}Q_0 + C_{i3}Q_R}{V_{AN}} - k_3 C_{C2} \quad (8)$$

여기서,  $C_{i1} = \frac{C_{i0}Q_0 + C_{i3}Q_R}{Q_0 + Q_R}$  이다.

본 연구에서 사용한 혐기-호기 각 반응조를 완전혼합반응기로 가정하고, Fig. 7과 같이 모델링하여 각 반응조에서 각 성분에 대한 비정상 상태 물질수지를 취하여 얻은 식을 이용하여 컴퓨터에 의해 시뮬레이션을 행하였다. 계산 결과에서 얻은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N의 농도는 Fig. 8의 제일 아래 그림 상에 점선으로 표시된 바와 같이 실험결과와 크게 벗어났는데 이는 호기조내의 플록 내부에서 탈질이 일어나기 때문으로 생각되었다. 따라서 大平 외(1992)의 결과에서 약 10% 정도의 탈질이 일어나는 것으로 나타나 이를 고려하였을 경우에는 Fig. 8의 실선에서 보여지는 바와 같이 계산 결과

와 실험결과는 잘 일치함으로써 제시한 모델은 혐기-호기 활성슬러지 공정의 거동을 잘 설명할 수 있었다. 그러나, 보다 정확한 해석을 위해서는 플록내에서의 용존산소 및 각 성분농도의 확산을 고려한 모델식이 있어야 할 것으로 사료된다.

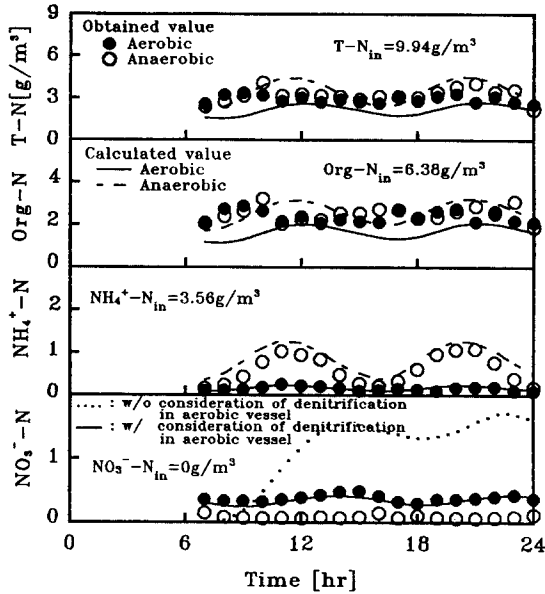


Fig. 8. Comparison of observed and calculated concentration of nitrogen components.

#### 4. 결론

생활 오수의 배출양식과 같은 유량변동이 동반되는 폐수를 혐기-호기 활성슬러지법으로 처리할 경우 공정의 처리특성을 검토하였다. 유량변동에 대해 혐기조에서의 질소농도는 유량의 peak점에서 상대적으로 높은 농도를 나타내었지만 출구 즉, 호기조에서는 거의 일정한 하게 유지되었으며, 유량 peak 계수의 큰 변화에 대해서도 N 및 P의 제거율은 거의 일정한 높은 값을 유지하였다. 순환비가 증가함에 따라서는 T-N의 제거율은 증가하다가 최대점을 통과한 다음에는 감소하여 질산화 반응 및 탈질 반응의 미생물활성에 따라 결정되는 최적순환비가 존재함을 알 수 있었다. P는 순환비

의 영향에 관계없이 거의 제거되었으며, 특히 생활 오수의 유출 패턴에 따라 유량을 변동시키는 비정상 조작에서 높은 탈인 활성이 얻어졌다. 따라서 혐기-호기 활성슬러지공정은 소규모 폐수처리 특유의 유량변동에 대해서 반응조를 2개를 조합함으로써 유량변동의 영향이 완화되어 유량변동에 충분히 대응할 수 있음을 알 수 있었으며, 처리수(호기조)의 수질도 만족할 수 있는 수준 범위로 얻을 수 있었다. 또한, 혐기-호기 각 반응조를 완전혼합반응기로 가정하고서 유도한 모델식으로 혐기-호기 활성슬러지 공정의 거동을 잘 설명할 수 있었다.

#### 사용기호

- $C_{ij}$  : concentration of i-component at j position [g/m<sup>3</sup>]
- P : peak coefficient [-]
- $k_1$  : first-order reaction rate constant of ammonification [1/h]
- $k_2$  : first-order reaction rate constant of nitrification [1/h]
- $k_3$  : first-order reaction rate constant of denitrification [1/h]
- Q : volumetric flow rate entering reactor [m<sup>3</sup>/h]
- $Q_0$  : volumetric flow rate of feed flow [m<sup>3</sup>/h]
- $Q_R$  : volumetric flow rate of recycle flow [m<sup>3</sup>/h]
- t : time [h]
- $V_{AE}$  : volume of aerobic region [m<sup>3</sup>]
- $V_{AN}$  : volume of anaerobic region [m<sup>3</sup>]
- Y : recycle ratio of mixed liquor [-]

#### Subscripts

- A : organic nitrogen(org-N)
- B : NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N
- C : NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N
- 0 : fresh feed
- 1 : input in anaerobic region
- 2 : input in aerobic region
- 3 : output in aerobic region

## 참고문헌

- Argaman, Y. and A. Brenner, 1986, Single-sludge nitrogen removal modeling and experimental results, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 58, 853~860.
- Barnard, J. L., 1973, Biological denitrification, *J. Water Pollut. Control*, 72, 705~719.
- Barth, E. F. and H. D. Stensel, 1981, International nutrient control technology for municipal effluents, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 53, 1691~1701.
- Bortone, G., F. Malaspina, L. Stante, and A. Tilche, 1994, Biological nirtogen and phosphorus removal in anaerobic/anoxic SBR with separated biofilm nitrification, *LAWQ 17th Biennial International Conference 24-29 July, Book 1*, 187~196.
- Dahab, M. F. and Y. W. Lee, 1988, Nitrate removal from water supplies using biological denitrification, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 60, 1670~1674.
- 大平勇一, 山際和明, 大川 輝, 1992, 二槽式濾過型液ジェジェットバイオリアクター-の窒素除去に及ぼす循環比の影響, *化學工學第25回講演要旨集(第3分冊)*, 225.
- Gerber, A., R. H. de Villiers, E. S. Mostert. and C. J. J. Riet Van, 1987, The phenomenon of simulataneous phosphate uptake and release, and its importance in biological nutrient removal, biological phosphate removal from wastewaters, Rome, Pergamon Press, Oxford.
- Hano, T., M. Matsumoto and K. Kuribayashi, 1992, Kinetics of nitrogen and BOD removal in biofilm processes, "Biochemical Engineering for zool", 819-821.
- Hashimoto, S, 1989, New activated sludge processes, Gihoudou Pub.
- Jens Peter Kern-Jespersen and Mogens Henzen, 1993, Biological phosphorus uptake anoxic and aerobic conditions, *Prog. Water Res.* 27, 4, 617~624.
- McClimtock, S. A., J. H. Sherrard, J. T. Novak and C. W. Randall, 1988, Nitrate versus oxygen respiration in the activated sludge process, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 60, 342~350.
- Nazih Kh. Shammas, 1986, Interactions of temperature, pH, and biomass on the nitrification process." *Prog. J. Water Pollut. Control Fed.*, 58, 52~59.
- Rittmann, B. E. and W. E. Langeland, 1985, Simultaneous denitrification with nitrification in single channel oxidation ditches, *J. Water Pollut. Control Fed.*, 57, 300~308.
- Tom, N. F. Y., Y. S. Wong and G. Leung, 1992, Significance of external carbon sources on simultaneous removal of nutrients from wasterwater, *Water Science Technology*, 26, 1047~1055.