

## 하수의 질소제거시 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 UCT(University of Cape Town)공정의 운영인자 검토

김병균 · 서인석 · 이해군 · 김창원\*

한국수자원공사 수자원연구소 · 부산대학교 환경공학과\*

### Investigation of Operating Parameters on UCT Process for the Purpose of Nitrogen Removal Using Computer Simulation

Byung-Goon Kim · In-Seok Seo · Hae-Goon Lee\* · Chang-Won Kim\*

Water Resource Research Institute(WRRI), KOWACO, Taejon, Korea, 305-390

Department of Environmental Engineering, Pusan National University, Pusan, Korea, 609-735\*

#### Abstract

The computer simulation model was used to forecast the concentrations of  $COD_{cr}$ ,  $NH_4^+-N$  and  $NO_3^-N$  in each reactors. In the biological wastewater treatment system, the computer simulation model was used to observe the behavior of pollutants especially.

In this research, effect of SRT, feeding pattern and recirculation rate on UCT(University of Cape Town) process was evaluated by computer simulation model. T-N removal was affected to the SRT. SRT for effective T-N removal was 15days or longer. Feeding pattern in UCT process was affected to the T-N removal. Feeding pattern which 100% loading to the first reactor was most effective for T-N removal. The effect of recirculation rate was clear for T-N removal. The recirculation from anoxic reactor to anaerobic reactor was not need but the recirculation from oxidic reactor to anoxic reactor was need. In aspect of nitrogen removal efficiency, A/O process was higher than UCT process.

#### I. 서 론

최근 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션은 하수 및 폐수처리장의 설계인자 도출 및 운영인자의 검토에 효과적으로 이용되고 있다<sup>1-5)</sup>. 예측모델은 프로그램 구성에 고려된 반응의 적정성이 무엇보다도 중요하며, 동력학적 인자 및 폐수의 특성분류도 많은 영향을 끼치게 된다<sup>5,6)</sup>. 1986년 LAWPRC task group<sup>2)</sup>에서는 유기물 산화, 질산화 및 탈질 산화 반응에 관련된 여러 가지 상수 및 계수를 계

계적으로 조사하여 적용함으로써 비교적 정확하게 농도를 예측할 수 있는 예측모델인 Activated Sludge Model No. 1을 발표하였고, 최근 인의 제거기작을 고려하여 구성한 모델인 Activated Sludge Model No. 2가 발표되어 환경공학 분야에서 많은 관심의 대상이 되고 있다.

본 연구에 이용한 고도하수처리 공정인 UCT공정은 남아프리카 케이프타운대학 Ekama에 의해 개발된 질소, 인 제거공정으로 혐기조-무산소조-호기조로 구성되어 있으며, 유입수는 전량 혐기조

로 주입되며, 인 제거를 위한 무산소조에서 혐기 조로의 내부순환과 질소제거를 위한 호기조에서 무산소조로의 내부순환으로 구성되어 있고, 반송 슬러지는 침전지에서 무산소조로 반송한다.

본 연구에서는 IAWPRC에서 개발한 Activated Sludge Model No. 1을 이용하여 질소, 인 동시제거 공정으로 개발된 UCT공정을 질소제거에 이용할 때, SRT, 유입수 주입방법 및 내부순환율의 변화가 질소제거 효율에 미치는 영향을 검토하였다.

## II. 재료 및 방법

### 1. 질소제거공정의 예측모델

본 연구에서는 IAWPRC(1986)에서 구성한 예측모델인 Activated Sludge Model No. 1을 사용하였다. 본 예측모델은 Peterson에 의해 제안되었던 matrix형태로 구성되었으며, 5개의 stoichiometric parameter와 14개의 kinetic parameter가 이용되었고, 유기물, 암모니아성 질소, 질산성 질소, 타가영양 미생물의 농도, 자가영양 미생물의 농도 등 13가지 항목을 예측할 수 있게 구성되었다. 또한, 본 모델에서는 각 항목의 증가 및 감소에 관련된 8가지의 반응이 고려되었으며, 기본적인 모델의 구성요소는 IAWPRC에서 제안한 것과 같다<sup>1,5)</sup>. 기

존의 IAWPRC에서 프로그램 구성시 이용한 언어 대신 Borland C++과 Spreadsheet 프로그램인 Quttro pro를 이용하여 각각의 반응조의 DO농도 및 내부순환율을 변경할 수 있도록 하였다. 입력된 자료를 이용하여 여러 가지 parameter 및 운영형태에 따라 반응조 내에서의 농도를 계산한 다음 계산된 자료는 다시 Quttro pro프로그램의 각각의 자료 파일에 입력되며, 동시에 컴퓨터 모니터에 동적화상으로 나타나기 때문에 예측결과를 손쉽게 확인할 수 있다. 모든 프로그램은 Quttro pro프로그램에서 매크로 프로그램을 구성하여 작동하였다.

### 2. J하수처리장 유입수를 이용한 UCT공정의 운전

#### 2.1 실험장치

UCT공정은 완전 탈질되지 못한 질산염이 반송 슬러지와 함께 혐기조에 유입되면 혐기조에서 탈질되면서 *Acinetobacter* spp.에 우선하여 기질을 소모하므로, 기질부족에 의한 인방출에 미치는 영향을 최소화하기 위해 반송슬러지를 무산소조로 유입시킴으로 반송슬러지와 함께 혐기조에 유입되는 질산염을 낮추는데 그 목적이 있는 질소, 인 동시제거 공정이다.

본 실험에 사용한 bench scale 실험장치는 단일

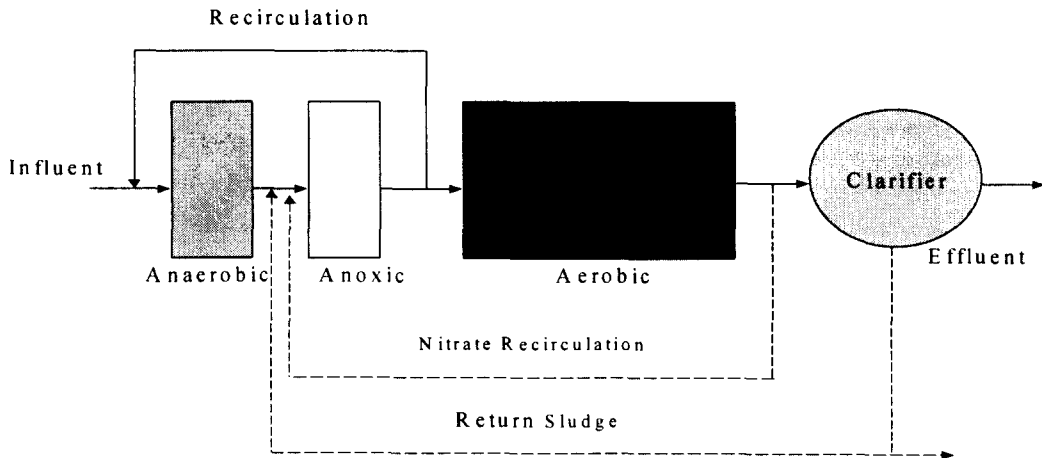


Fig. 1. Schematic diagram of UCT process.

슬러지 직렬반응기로 혐기조, 무산소조, 호기조로 구성하였으며, 침전조는 1개를 설치하여 단일슬러지를 유지하도록 아크릴로 제작하였다. 혐기조에는 paddle을 설치하여 DC motor로 교반(80rpm)을 시켜 주었고, 반응기 내의 온도를 질산화에 필요한 일정온도(20℃ 이상)로 유지하기 위하여 혐기조에 히터를 두었고, 유입 및 반송슬러지는 Masterflex제품의 정량펌프(Masterflex Model No. 7553-60)를 사용하여 유량변동을 최소화하였다. 또한 air pump(SLL-40)를 사용하여 호기조의 DO를 3.0mg/L정도로 유지하도록 diffuser를 통하여 공기를 공급하였다. 그리고 침전조에는 scraper를 설치하여 슬러지 반송이 잘 되도록 하였다. 이때 실험에 사용한 UCT공정의 bench scale 실험장치는 Fig. 1.과 같다.

## 2.2 실험장치의 운전조건 및 실험방법

본 연구에서는 부산시 J하수처리장 유입수를 사용하여 bench scale 실험장치를 운영하였다. J하수처리장 원수의 특징은 총인 농도가 0.2~3.4mg/L로 낮게 유입되고 있으며, 암모니아성 질소의 농도는 22~105 mg/L로 높게 유입되고 있다. 일반적인 유입수 성상을 Table 1.에 나타내었다.

실험장치의 운전조건은 유입수를 혐기조로 상시 전량 유입시켰으며, 반송슬러지는 침전조에서 무산소조로 유입유량과 동일한 양을 반송시켰다. 그리고, 무산소조에서 혐기조로의 내부순환율, 호기조에서 무산소조로의 내부순환율은 유입유량의

150%로 운전하였다. 각 반응기의 수리학적 체류시간은 혐기조 3.3시간, 무산소조 3.3시간, 호기조 6.7시간으로 전체 반응기의 수리학적 체류시간은 13.3시간이며, SRT는 10일로 운전하였다.

## 2.3 예측모델을 이용한 최적 운전인자 도출

Bench scale 실험장치의 운전결과를 바탕으로 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하여 kinetic parameter를 보정하였다. 이 보정한 kinetic parameter를 이용하여 SRT가 UCT공정 운영시 질소제거에 미치는 영향을 검토하기 위하여 모든 운전조건은 일정하게 고정시키고, SRT를 5, 10, 15, 20, 30일로 변화시켜 예측모델을 운영하였다.

또한, 유입수의 주입방법에 의한 영향을 검토하기 위하여 혐기조 및 무산소조로의 유입수 유입비율을 각각 100:0, 80:20, 60:40, 50:50으로 변화시켜 예측모델을 운영하였다.

또한, UCT공정에서 내부순환율의 변화가 질소제거에 미치는 영향을 검토하기 위하여 무산소조에서 혐기조로의 내부순환율과 호기조에서 무산소조로의 내부순환율을 변화시켜 예측모델을 운영하였다.

# III. 결과 및 고찰

## 1. UCT 공정의 운전 및 Kinetic parameter의 도출

J하수처리장 유입수를 이용하여 UCT공정의 bench scale 실험장치를 운전한 결과를 Fig. 2.에 나타내었다. 실험기간동안의 유입COD<sub>cr</sub> 평균농도는 200mg/L이고, 50mg/L 이하의 유출수 수질을 얻었으며, 제 1반응조인 혐기조에서 거의 70%의 처리효율을 보이고 있다. 그리고 유입수의 농도와 무관하게 방류수의 수질이 일정하게 유지되는 것으로 보아 본 실험에 사용한 하수처리장의 유입수 중 일정부분은 난분해성 물질이 잔존하고 있는 것으로 판단된다.

반응기 정상운전시의 암모니아성 질소농도의 변화를 Fig. 3.에 나타내었다. 암모니아성 질소의 유입농도는 50~65mg/L의 변동을 보이며, 유출

Table 1. Characteristics of raw wastewater in J wastewater treatment plant. unit:mg/L

Item	Range	Average
TCOD <sub>cr</sub>	154 ~ 411	220
SCOD <sub>cr</sub>	135 ~ 312	180
BOD <sub>5</sub>	137 ~ 204	155
T-N	-	85
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	22 ~ 105	65.4
T-P	0.2 ~ 3.4	1.64
BOD <sub>5</sub> /T-N	-	1.8
BOD <sub>5</sub> /T-P	-	95

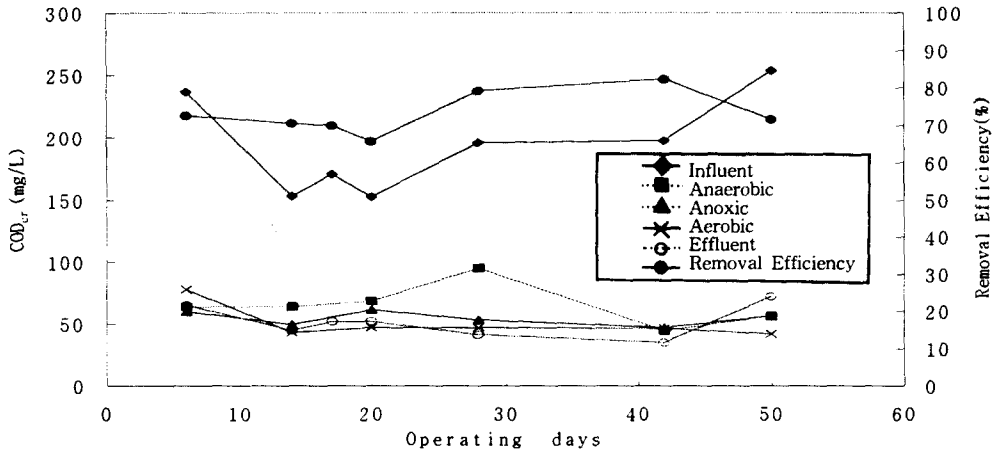


Fig. 2. COD<sub>cr</sub> concentration and removal efficiency at each reactors during operating periods.

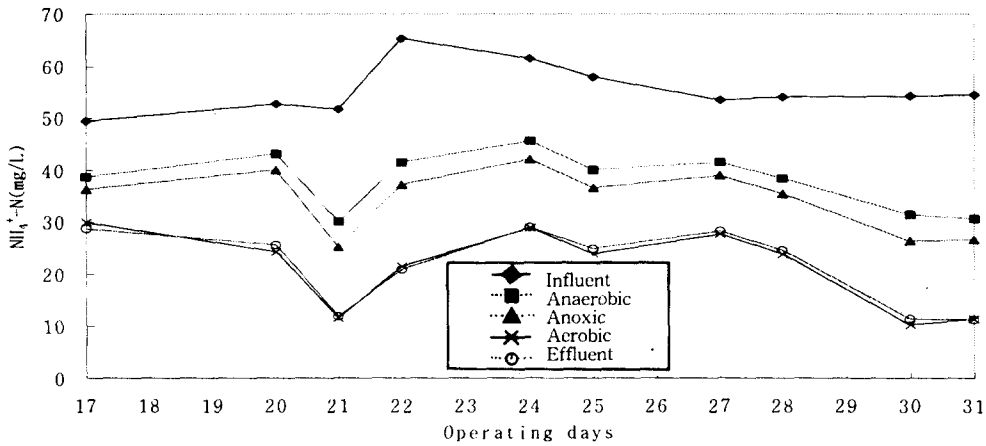


Fig. 3. NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration at each reactors during operating periods.

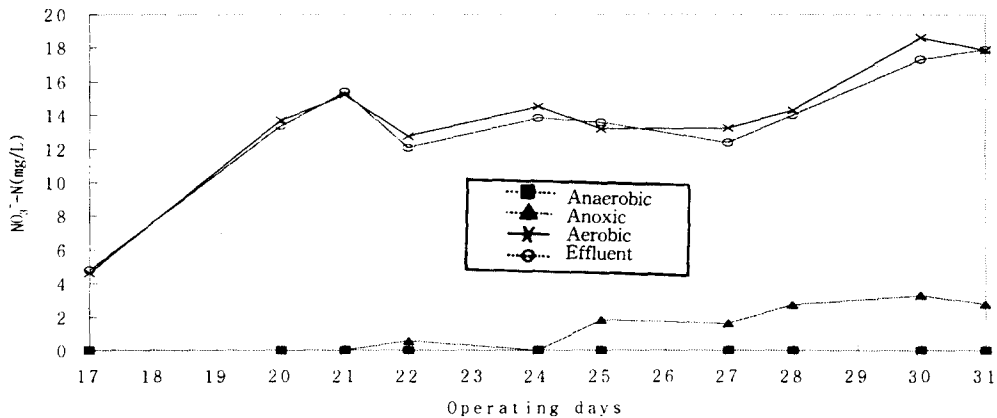


Fig. 4. NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration at each reactors during operating periods.

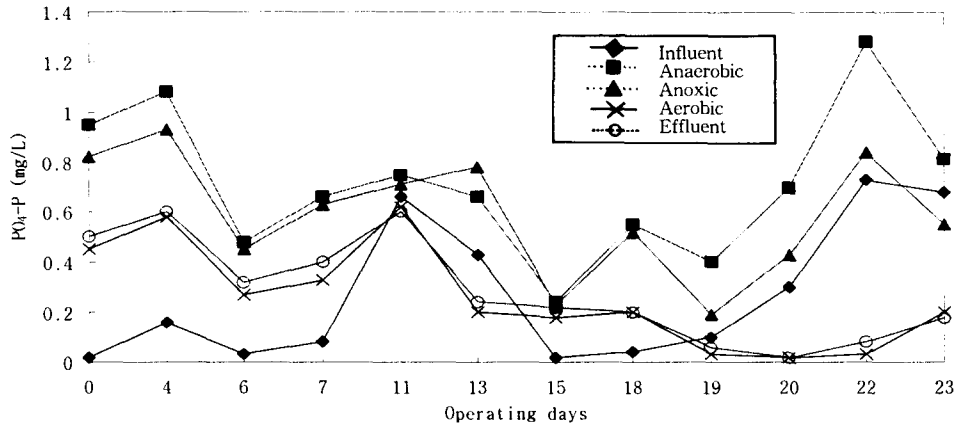


Fig. 5. PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P concentration at each reactors during operating periods.

수의 암모니아 농도는 10~30mg/L로 유출되고 있다.

21일경에 유입농도가 동일하게 유입되는데도 각 반응기의 암모니아성 질소농도가 낮아지는 경향을 보이는 것은 폭기조 내의 질산화 박테리아의 활동이 서서히 정상상태에 도달하기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4.에서는 각 반응조에서의 질산성 질소 농도변화를 나타내었다.

질산성 질소의 평균 유입농도는 거의 0mg/L이며, UCT공정은 질산염이 혐기조로 유입되지 않게 설계되어 있으므로 혐기조에서의 질산염 농도는 거의 0mg/L에 가까우며, 호기조에서는 질산화 반응의 영향으로 높은 질산성 질소농도를 보이고 있다. 무산소조에서는 반송슬러지의 영향으로 혐기조에 비해 상대적으로 높은 질산염 농도를 보이며, 시간이 경과할수록 점차 높아지는 경향을 보인다. 무산소조에서의 질산성 질소농도의 증가는 완전한 탈질산화가 이루어지지 않음을 보여준다.

탈질시 1g의 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N을 제거하기 위해서는 3.7g의 COD가 필요한데 혐기조에서 거의 70%정도가 소모되고, 남아있는 COD는 대부분 난분해성 물질로 판단되므로 탈질산화에 필요한 쉽게 분해 가능한 유기물의 부족으로 완전한 탈질산화가 이루어지지 않는 것으로 판단된다.

추가로 Fig. 5.에서는 각 반응기에서 인산염 농

도변화를 나타내었다. 유입 총인 농도는 평균 1.64mg/L, 인산염 농도는 0.8mg/L 이하의 낮은 농도로 유입되며, 혐기조에서는 인의 방출이 일어나며, 폭기조에서는 인의 과잉섭취가 일어남을 알 수 있다.

예측모델의 운영에 이용한 stoichiometric 및 kinetic parameter는 IAWPRC에서 제안한 값을 주로 이용하였으며, 시스템의 운영형태, 폐수의 특성 등에 크게 영향을 받는 parameter인  $\mu_{h-max}$  (maximum specific growth rate for heterotrophic biomass),  $\mu_{a-max}$ (maximum specific growth rate for autotrophic biomass),  $Y_h$ (Yield for heterotrophic biomass),  $Y_a$ (Yield for autotrophic biomass)는 bench scale UCT공정의 운전결과를 바탕으로 시행착오법에 의해 구하였다. 이때  $\mu_{h-max}$ ,  $\mu_{a-max}$ ,  $Y_h$ ,  $Y_a$ 는 각각  $6day^{-1}$ ,  $0.42day^{-1}$ ,  $0.67g\ cell\ COD\ yield/g\ COD\ utilized$ ,  $0.24cell\ COD\ yield/g\ COD\ utilized$ 이었다.

Fig. 6.에서는 위에서 도출한 parameter를 이용하여 시뮬레이션을 수행한 결과를 그래프로, 실측치의 평균값은 수치로 나타내어 비교하였다. 암모니아성 질소농도는 시뮬레이션 결과와 실측치가 거의 비슷한 값을 보이나, 질산성 질소는 약간의 차이를 보이고 있다.

Bench scale 운전결과를 바탕으로 각 반응기에서의 생물학적으로 쉽게 분해가능한 COD(Readily

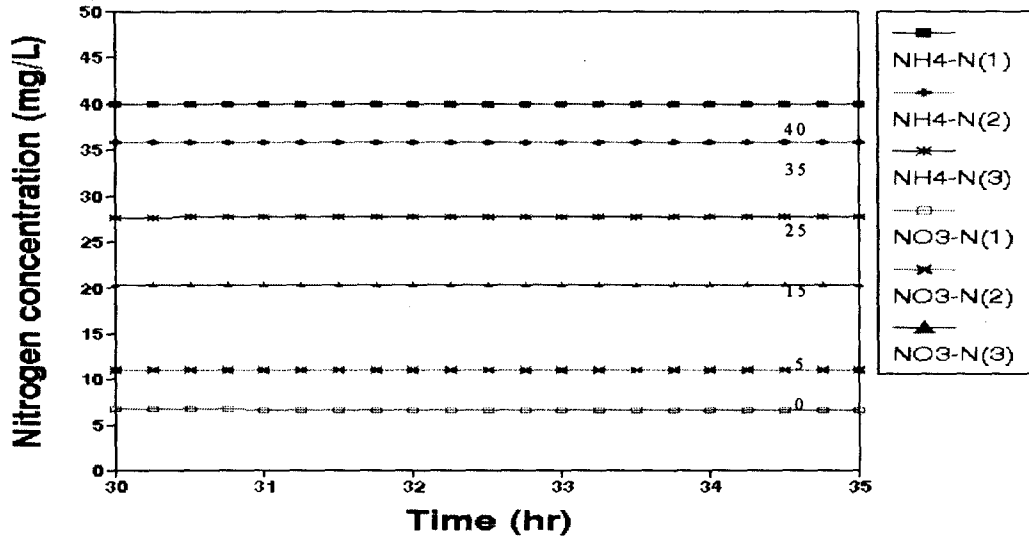


Fig. 6. Experimentally measured and theoretically predicted results at each reactors.

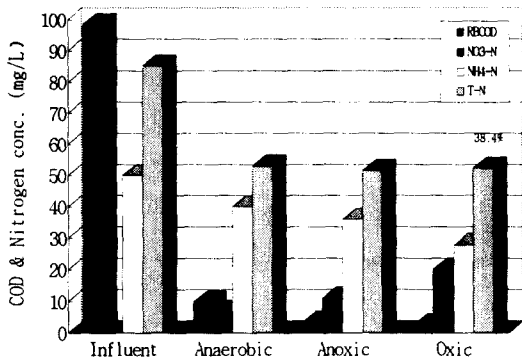


Fig. 7. Temporal variation of COD and nitrogen concentration at each reactors.

biodegradable COD), 총질소, 암모니아성 질소, 질산성 질소의 거동을 살펴보면 Fig. 7.과 같다.

생물학적으로 쉽게 분해가능한 COD는 대부분 첫 번째 반응기인 혐기조에서 소모되고, 혐기조와 무산소조에서는 암모니아성 질소는 높은 반면, 질산성 질소는 상대적으로 낮은 경향을 보이며, 폭기조에서는 반대로 질산성 질소는 높고, 암모니아성 질소는 낮은 경향을 보인다. 이때, 총질소의 제거효율은 38.4%를 나타내었다.

## 2. UCT공정에서 SRT 및 유입수 주입방법에 의한 영향

### 2.1 SRT변화에 따른 처리효율 비교

Fig. 8.에는 동일한 조건에서 SRT를 5, 10, 15, 20, 30일로 변화시키며, 예측모델을 운영한 결과를 나타내었다. BOD/T-N비가 1.8일 때는 SRT 10일 이후의 방류수 총질소 농도는 거의 비슷한 경향을 보였다.

SRT가 질소제거 효율에 미치는 영향을 정확히 파악하기 위해서 탈질시 필요한 유기물 부족을 최소화시켜야 하며, 이를 위해 유기물의 농도를 높여 BOD/T-N비를 4로 유지하며, 예측모델을 운영하였다.

그림에서와 같이 SRT 15일 이상에서는 방류수의 총질소 농도가 거의 동일하게 나타났으며, 위의 결과를 토대로 생물학적 질소제거 공정에서는 SRT를 15일 이상으로 운전하여야 최적의 질소제거 효율을 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.2 유입수 주입방법에 따른 처리효율 비교

Fig. 9.에서는 유입수를 어떤 반응조에 얼마만큼의 비율로 주입해야 최적의 질소제거 효율을 얻

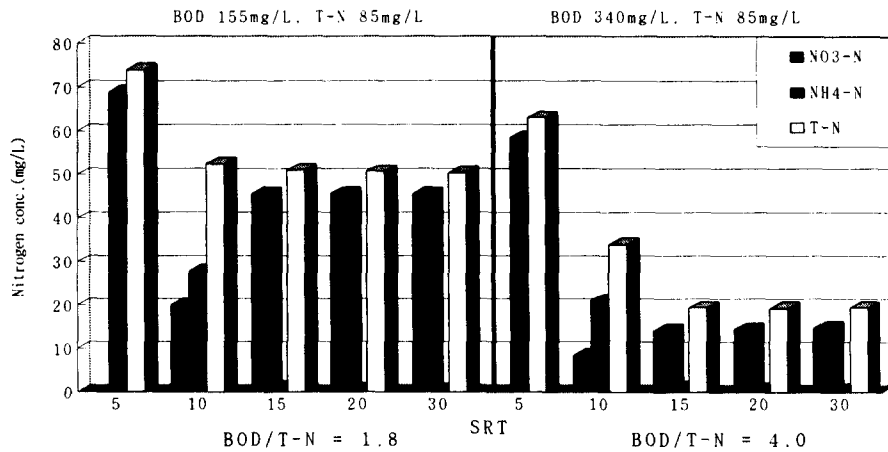


Fig. 8. Variation of nitrogen concentration in effluent according to SRT.

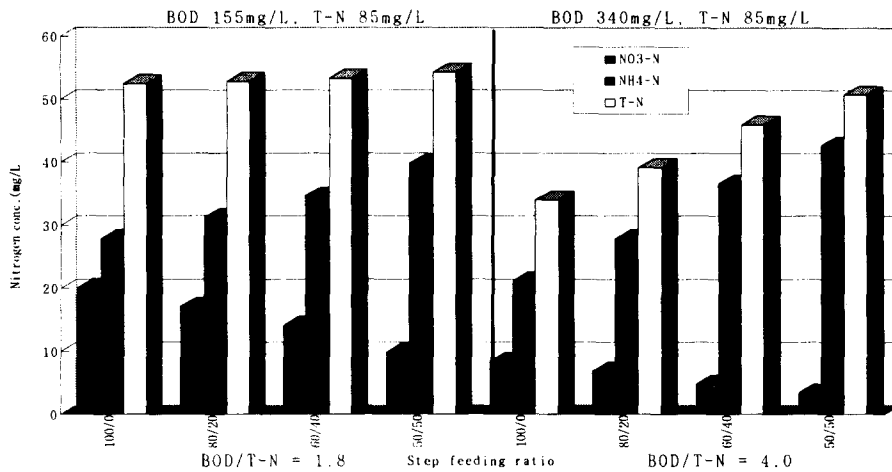


Fig. 9. Variation of nitrogen concentration in effluent according to step feeding ratio.

을 수 있는가를 판단하기 위해 제 1반응조(혐기조)와 제 2반응조(무산소조)로의 유입비율을 각각 변화시키면서 방류수의 질소농도를 예측하였다.

BOD/T-N비가 1.8일 때 유입수를 100% 전단에 유입하는 것이 질소제거 측면에서 타 유입방법보다 약간은 나은 방류수 수질을 보이나, 유입수 주입방법에 따른 처리효율을 명확히 파악하기 위해서 BOD/T-N비를 4로 높여서 예측모델을 운영하면 그 차이는 확연하게 드러난다. Fig. 9.에서와 같이 유입수를 전량 제 1반응조인 혐기조에 주입하는 것이 질소제거 측면에서 가장 효율적인 것으

로 판단된다.

### 3. 내부순환율이 질소제거에 미치는 영향

무산소조에서 혐기조로의 내부순환율과 호기조에서 무산소조로의 내부순환율이 질소제거효율에 미치는 영향을 검토하여 Fig. 10에 나타내었다. 유입BOD농도 155mg/L(BOD/T-N비가 1.8)일 때, 무산소조에서 혐기조로의 내부순환율과 호기조에서 무산소조로의 내부순환율을 각각 0:0, 100:100, 150:150, 200:200, 300:300, 400:400으로 운전시 예측결과이나, 내부순환율 변화에 따른 처리효율은

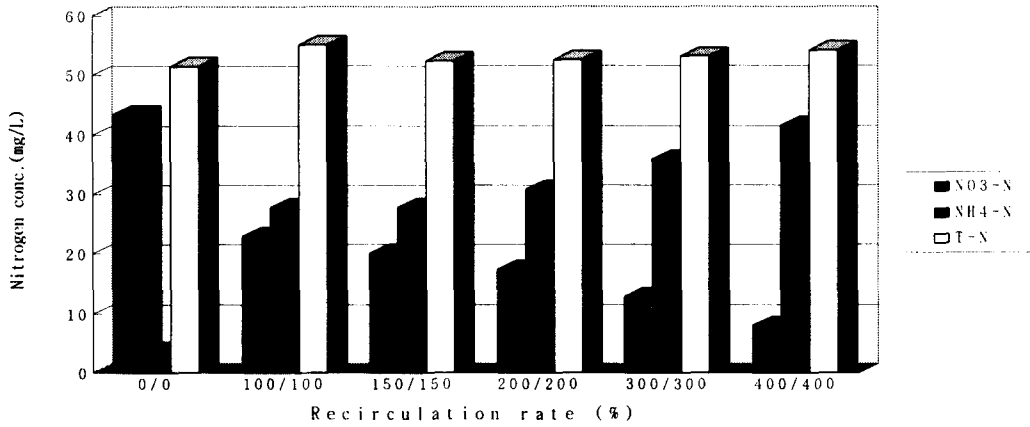


Fig. 10. Relationship between nitrogen concentration and recirculation rate in the UCT process. (BOD/T-N ratio is 1.8)

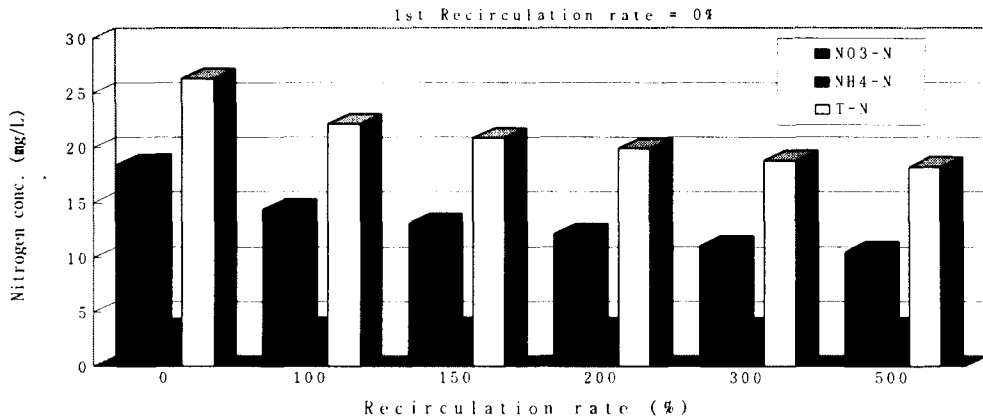


Fig. 11. Relationship between nitrogen concentration and recirculation rate at first recirculation rate is 0%. (Influent flow rate basis and BOD/T-N ratio is 4.0)

뚜렷한 차이를 나타내지 못하고 있다.  
 내부순환을 변화에 따른 질소제거의 변화를 더욱 명확히 보여주기 위하여 유기물 부족으로 인한 탈질감소를 방지하기 위하여 유입 BOD농도 340 mg/L(BOD/T-N비=4.0)에서 무산소조에서 혐기조로의 내부순환율을 0%로 두고, 호기조에서 무산소조의 내부순환율을 각각 0, 100, 150, 200, 300, 500%로 하여 예측 프로그램을 운영하여 Fig. 11.에 나타내었다.  
 Fig. 11.에서 내부순환율을 점차 증가시킬수록 암모니아성 질소의 농도는 거의 일정한 값을 유지하며, 질산성 질소의 농도는 서서히 감소한다. 총

질소의 농도는 호기조에서 무산소조의 내부순환율을 500%에서 최저 방류수 농도를 나타내고 있다.  
 반면, Fig. 12.에서는 유기물 부족으로 인한 탈질산화의 방해를 방지하기 위하여 유입 BOD농도 340mg/L에서 호기조에서 무산소조의 내부순환율을 0%로 두고, 무산소조에서 혐기조로의 내부순환율을 각각 0, 100, 150, 200, 300, 500%로 하여 예측 프로그램을 운영하였다.  
 무산소조에서 혐기조로의 내부순환율이 커질수록 방류수에서 질산성 질소의 농도는 감소하나, 상대적으로 암모니아성 질소의 농도가 증가하여, 총질소 농도는 증가하는 경향을 보이고 있다.



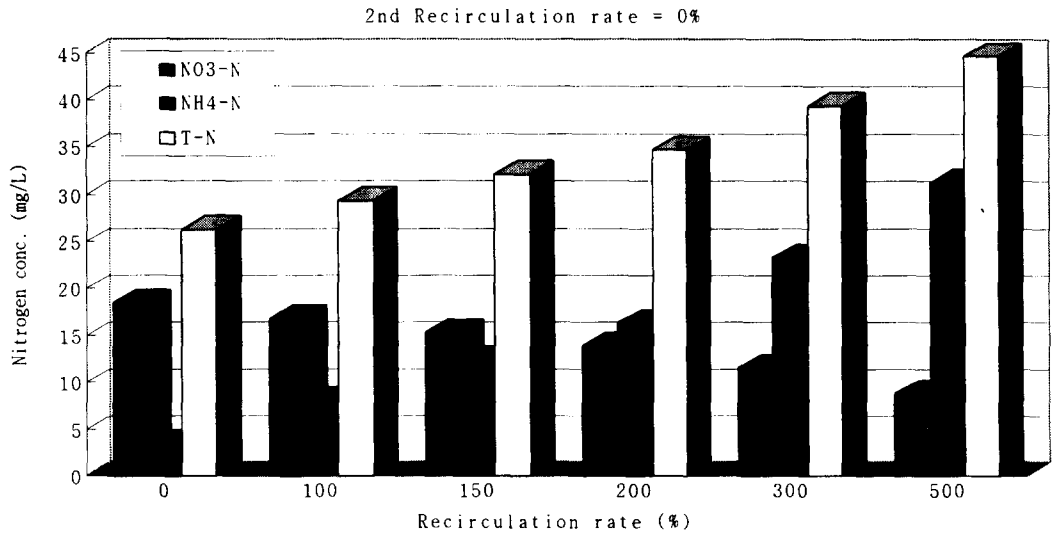


Fig. 12. Relationship between nitrogen concentration and recirculation rate at second recirculation rate is 0%. (Influent flow rate basis and BOD/T-N ratio is 4.0)

이런 경향은 무산소조에서 혐기조로의 내부 순환이 커지므로 혐기조가 혐기성 상태를 유지하기 보다는 무산소 상태를 유지하게 되어, 무산소 상태가 시간적으로 2배 증가되는 상황이 발생한다.

무산소 상태에서는 질산성 질소가 감소하는 반응과 암모니아성 질소의 생성반응이 수반되므로 방류수에서 질산성 질소농도는 감소하고, 암모니아성 질소농도는 증가하는 것으로 생각된다.

UCT공정은 질소 및 인을 동시에 제거할 목적으로 설계된 공정이므로, 질소제거 측면만을 평가하기는 문제의 소지를 내포하고 있으나, 운전상태를 변화시켜 여러 형태의 생물학적 영양염류 제거공정으로의 변형이 가능하여 본 실험에 사용하였다.

위와 같은 결과를 바탕으로 UCT 공정에서 최적의 질소제거 효율을 나타낼 수 있는 운전상태를 파악하면 무산소조에서 혐기조로의 내부순환은 시키지 말고, 호기조에서 무산소조로의 내부순환을 증가시킬수록 질소제거 효율은 증가하는 것으로 나타났다.

즉, 질소제거 측면에서는 UCT공정보다는 A/O (Anoxic-Oxic process)공정으로 운전하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

#### IV. 결 론

UCT공정에서 컴퓨터 예측모델을 적용하여 운영인자 및 설계인자를 검토한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 효율적인 질소제거를 위해서는 SRT를 15일 이상 유지해주는 것이 바람직하다.
2. 유입수 주입방법에 따른 처리효율을 비교해보면, 유입수를 전량 제 1반응조인 혐기조에 주입하는 것이 효율적이다.
3. 질소제거 효율을 높이기 위해서는 무산소조에서 혐기조로의 내부순환은 시키지 말고, 호기조에서 무산소조로의 내부순환을 증가시키는 것이 효율을 증가시키는 것으로 나타났다.
4. 질소제거 측면에서는 UCT공정보다는 A/O공정으로 운전하는 것이 효율적인 것으로 판단된다.

#### 참 고 문 헌

1. Dold, P. L., Ekama and G. v. R. Marais, A

- general model for the activated sludge process, Prog Wat Tech, 12, 47-77, 1980.
2. Dold, P. L. and G. v. R. Marais, Evaluation of the general activated sludge model proposed by the IAWPRC task group, Wat. Sci. Tech. Vol. 18, Copenhagen, pp. 63-89, 1986.
  3. Rittmann, B. E., Wayne E. Langeland, Simultaneous denitrification with nitrification in single channel oxidation ditch, WPCP, 57, No. 4, pp 300-308, 1985.
  4. Henze, M., C. P. L. Grady, W. Gujer, G. v. R. Marais and T. Matuea, Activated sludge model No. 1, IAWPRC Scientific and Technical report No. 1. London, IAWPRC, 1987a.
  5. Henze, M., C. P. L. Grady, W. Gujer, G. v. R. Marais and T. Matuea, A general model for single sludge wastewater systems, Water Research, 21, 505-515, 1987b.
  6. Koopman, B., G. Lyberatos, S. A. Sovoronos, P. Antoniou, J. Hamilton, R. Jain, Mathematical modeling and experimental verification for the predenitrification process, University of Florida, 1989.