

수학적 모델로 이용한 질소·인 처리 공정 설계



안 세 영

(주)수엔지니어링&컨설팅 대표이사

목차

1. 하·폐수처리장 시스템 분석의 중요성
2. 시스템 분석에 의한 활성슬러지공정 최적화
3. 폭기조 용존산소농도 제어에 의한 전력 비용 분석
4. 시뮬레이션을 이용한 농축조 운영관리 개선 방안
5. 수학적 모델을 이용한 질소·인 처리 공정 설계

하·폐수처리시설의 설계에서 컴퓨터 모델링을 사용하는 목적은 처리공정을 최적화 하기 위함이다. 기존의 하·폐수처리장을 생물학적 질소·인 제거(이하 BNR) 시설로 개조하거나 신설 BNR 공정을 설계하려면 계획 시설에 대한 타당성 조사를 수행해야 하는데, 여러가지 처리공법을 분석하여 처리공정을 선정하고 선정된 공정의 성능과 운영방법, 그리고 시설비용 및 운영비용을 평가하기 위해 사용할 수 있는 최선의 분석 도구는 수학적 모델링과 컴퓨터 시뮬레이션이다. 이번호 환경기술보고에서는 기존 하·폐수처리장의 유기물 제거공정인 2차처리시설을 BNR 공정으로 개선하기 위해 사용되는 컴퓨터 모델링 기법에 대해 소개하기로 하겠다.

● 고려사항

기존 하·폐수처리장의 2차 처리시설을 BNR 공정으로 개조하려면 폭기조를 혐기조, 무산소조, 호기조로 각기 나누고 각 처리조의 용적과 수를 결정해야 한다. 기존 활성슬러지조와 최종 침전지의 용량이 한정되어 있기 때문에 BOD와 NH₃-N 처리효율을 향상시키기 위해 호기구역을 Plug-flow로 운영할 수 있는 다구간 처리구조를 선택하는 것이 효과적이다. 또한 N과 P의 효율적인 제거를 위해 MLSS의 내부반송량과 반송 위치, 그리고 최종 침전지로부터 반송되는 슬러지량과 같은 운전인자의 적정 수치를 산출해야 한다. 하·폐수처리장에 유기물이 저부하로 유입될 경우에는 탈질화 반응과 인 방출 반응에 필요한

탄소원의 인위적 주입도 고려하여야 한다. 처리조에 외부 탄소원이 유입되거나 슬러지체류시간(SRT)이 길어짐에 따라 처리조에서 나타나는 MLSS 농도 상승이 최종침전지의 슬러지 침강에 어떠한 영향을 미치는지 검토해보는 것도 중요하다.

● 분석 Tool

BNR 시스템 개선에 대한 모델링은 시뮬레이션 프로그램인 GPS-X(Hydromnatis, Inc.)에 의해 실행되었고, N과 P의 제거 공정을 분석하기 위하여 general activated sludge model (Dold P. L.)이 적용되었다.

● 대상 처리시설

표 1에서 볼 수 있는 바와 같이 A 하수처리장의 폭기조에 유입되는 BOD₅의 평균농도는 140mg/L이며, TKN 평균농도는 40mg/L, ortho-phosphate 평균농도는 6mg/L이다. A 하수처리장의 폭기조는 장방형으로 4개의 구간으로 나뉘어져 있으며 각 구간의 용적은 전체 폭기조 용적의 25%를 차지한다. 기존의 폭기조를 개조하여 N과 P를 제거할 수 있는 대상공정으로 A2/O, 5stage Bardenpho,

구 분	설 계 기 준	BNR 공정 목표처리수질
유입하수량	30,000 m ³ /day	
폭기조 유입 BOD ₅	140 mg/L	
폭기조 유입 SS	130 mg/L	
폭기조 유입 TKN	40 mg/L	10 mg/L
폭기조 유입 ortho-P	6 mg/L	1 mg/L
폭기조 용적	7,760 m ³	
최종침전지 수면적	1,231 m ²	
깊이	3 m	

표 1. A 하수종말처리장의 표준활성슬러지 공정 설계 기준

Modified UCT process를 선정하였고, BNR 공정의 처리목표수질을 T-N과 T-P 각각 10.0mg/L, T-P 1.0mg/L로 설정하였다.

● A2/O 공정으로 개선

A 하수처리장의 활성슬러지조는 그림 1에서 보는 바와 같이 구간 1을 혐기조, 구간 2를 무산소조, 구간 3과 4를 호기조로 각각 나누었고, 유입수와 최종침전지로부터 반송되는 슬러지는 기존 처리시설에서와 같이 구간 1로 유입시켰으며, 호기조에서 질산화 반응으로 생성된 NO₃-N를 N₂ 가스로 탈질화시키기 위하여 구간 4의 MLSS를 구간 2로 반송시키는 A2/O공정으로 모델링 하였다.



그림 1. A 하수처리장의 폭기조를 A2/O 공정으로 개조

처리조의 각 구간(혐기1, 무산소1, 호기1, 호기2)별 용적은 기존 처리조에서와 같이 총 폭기조 용적의 25%로 설정하였고, 유기물, 질소, 인의 제거에 필요한 미생물의 농도를 유지시키기 위하여 잉여슬러지(WAS) 배출량과 반송슬러지(RAS)량을 조절하여 시뮬레이션 하였다. 그림 1의 A2/O 공정을 시뮬레이션하여 산출된 각 구간별 NH₃-N, NO₃-N, ortho-P 농도를 그림 2에 나타내었다. 질산화 반응은 구간 3과 4에서 양호하게 일어난 것을 알 수 있으나, 구간 2에서 NO₃-N의 탈질화는 일어나지 않고 있으며, 구간 1에서 인이 방출되지 않고 있는 것을 알 수 있다. 시뮬레이션 결과 최종침전지 유출부의 T-N농도와 T-P농도는 각각 20mg/L,

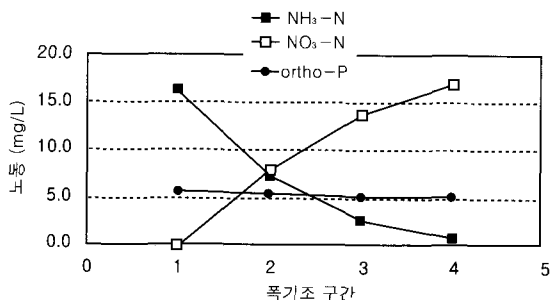


그림 2. 처리조 4개 구간에서 질소와 인의 농도 변화 (A2/O)

5.1mg/L로 산출되어 목표처리수질에 훨씬 못미치고 있는 것으로 나타났다.

그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 유입 BOD 농도가 상대적으로 낮아 탈질화 반응과 인 제거에 필요한 유기물 공급이 부족하면 N·P 제거 효율이 떨어지므로 외부탄소원인 acetate를 그림 1의 구간 1에 하루 5m³의 량으로 연속 주입하여 N·P 처리효율의 변화를 조사해 보았다. 그림 3을 보면 혐기조인 구간 1에서 외부탄소원의 주입에 의한 인축적박테리아의 인 방출현상을 볼 수 있으며 이로 인하여 구간 3과 4의 호기구간에서는 인의 과흡수가 일어나는 것을 알 수 있다. 그림 2와 그림 3을 비교해 보면 NO₃-N의 곡선

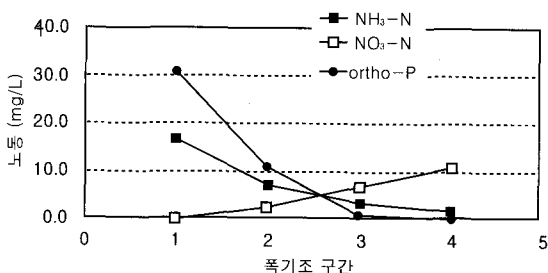


그림 3. 외부탄소원 주입시 처리조 4개 구간 질소와 인의 농도변화 (A2/O)

모양이 다른 것을 볼 수 있는데, 그 이유는 외부탄소원의 주입시 무산소조인 구간 2에서 탈질화가 일어나기 때문이다 (그림 3). 외부탄소원 주입시 최종침전지의 유출수 T-N의 농도는 14.8mg/L로 계산되었으며, T-P의 농도는 1.8mg/L로 산출되어 N·P의 제거효율이 증가됨을 알 수 있었다.

그러나 4구간으로 나누어진 A2/O공정에 외부탄소원을 주입하여도 목표처리수질인 T-N 10.0mg/L와 T-P 1.0mg/L를 얻을 수 없었기 때문에 그림 4와 같이 미생물 처리조의 구간을 다시 10개로 나누어 분석하였다. 각 구간의 용적은 전체 처리조 용적의 10%이며, 구간 1은 혐기조, 구간 2, 3, 4는 무산소조, 구간 5~10은 호기조로 설계하였고, 구간 10에서 구간 2로 MLSS를 내부 반송시켰으며 최종침전지에서 반송되는 슬러지는 유입수와 같이 구간 1로 유입시켰다. 탈질화 반응과 인 제거에 필요한 탄소원을 공급하기 위하여 구간 1에 acetate를 5m³/day 주입하였다.

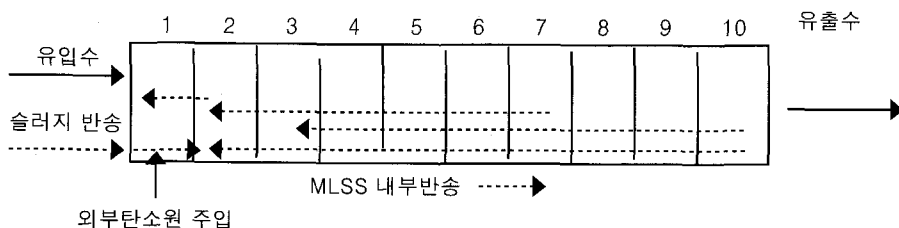


그림 4. 미생물 반응조를 10개 구간으로 분리

기존하수처리장의 폭기조를 10개 구간으로 나누어 A2/O공정으로 운영한 결과 그림 5에서 보는 바와 같이 호기구역인 구간 5~10에서 NH₃-N의 농도 증가로 질산화 효율이 매우 높게 나타나고 있는 동시에 구간 2, 3, 4에서는 NO₃-N의 농도가 감소하여 탈질화 반응이 양호하게 일어나는 것으로 나타났다. 혐기조인 구간 1과 4에서 orpho-P의 농도 증가로 인의 방출이 일어나고 있는 것을 볼 수 있으며, 호기구역인 5~10에서 인의 과흡수가 일어나 ortho-P의 농도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 최종침

전지의 유출구에서 T-N의 농도는 10.7mg/L, T-P의 농도는 0.6mg/L로 산출되어 T-N의 처리수질 만이 목표수질을 약간 상회하는 것으로 나타났다.

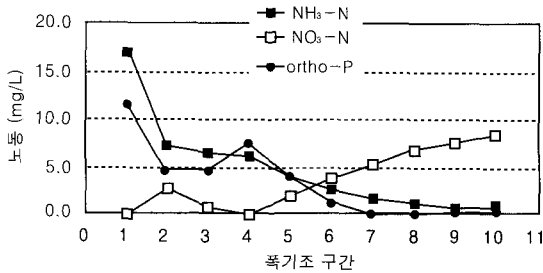


그림 5. 처리조 10개 구간에서 질소, 인 농도 변화 (A2/O)

5 stage Bardenpho 공정으로 개선

A2/O 공정과 마찬가지로 A 하수처리장의 폭기조를 10개 구간으로 나누어 5 stage Bardenpho 공정 운영 방식을 사용하여 N과 P의 처리성능을 조사해 보았다. 그림 4에서 구간 1은 혐기조, 구간 2~3은 무산소조, 구간 4~7은 호기조, 구간 8~9는 무산소조, 구간 10은 호기조의 5 stage로 설정하였고, 유입수와 최종침전지의 반송슬러지는 구간 1로 유입시켰으며, 구간 7에서 구간 2로 MLSS의 내부반송이 이루어지도록 모델링 하였다. 그림 6은 5 stage Bardenpho 공정으로 개선했을 때 예측되

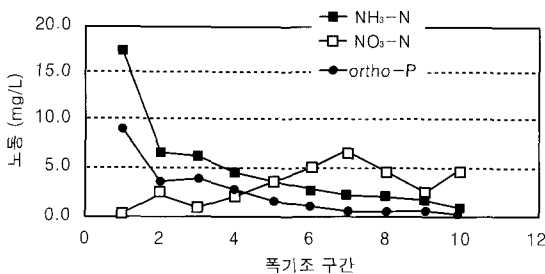


그림 6. Bardenpho 공정에서 구간별 질소와 인의 농도 변화

는 각 구간별 수질을 나타내고 있는데, 구간 2~3과 구간 7~9의 두 구역에서 NO₃-N이 감소하는 탈질화 반응이 일어나는 것을 알 수 있다. 구간 1에서 ortho-P의 농도 증가로 인의 방출 현상이 나타나는 것을 알 수 있으며, 호기 구간에서 인의 과 흡수가 일어나 ortho-P의 농도가 떨어지는 것을 볼 수 있다. 최종침전지의 방류수 수질은 T-N의 농도가 6.9mg/L, T-P 농도는 0.8mg/L로 산출되어 5 stage Bardenpho가 질소와 인을 목표수질 이내로 처리할 수 있는 공정임을 말해 주고 있다.

Modified UCT 공정으로 개선

MUCT 공정은 MLSS를 두 구역에서 내부 반송 시키는 공정으로 반송슬러지를 그림 4의 구간 2로 투입시켜 슬러지에 포함되어 있는 NO₃-N을 탈질시킨 후 구간 1의 혐기조에서 인 방출을 극대화 시키는 것이 특징이다. 활성슬러지조를 MUCT로 개조하기 위하여 구간 1~5에는 공기를 주입하지 않은 혐기구역과 무산소구역으로 설정하였고, 구간 6~10을 호기구역으로 모델링 하였다. 유입수와 외부탄소원을 구간 1로 유입시켰고 최종침전지의 반송슬러지를 구간 2로 투입시켰으며 구간 2에서 구간 1로 MLSS를 반송하였고, 탈질화 반응을 일으키기 위해 구간 10에서 구간 3으로 MLSS를 반송시켰다. 그림 7은 MUCT로 운전하였을 때 각 구간별 질소와 인의 농도 변

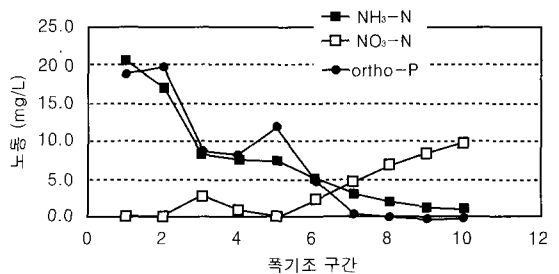


그림 7. MUCT 공정에서 구간별 질소와 인의 농도 변화

화를 나타낸 것으로 질산화된 NO₃-N 농도는 구간 6~10에서 증가되는 것을 볼 수 있다. 구간 1의 Ortho-P 농도가 A2/O와 Bardenpho 공정의 구간 1에서 보다 높아 MUCT의 인 방출 효과가 매우 큰 것으로 나타나고 있으며, NO₃-N의 농도가 낮은 구간 5에서도 인 방출이 일어나는 것을 알 수 있다. 탈질화 반응은 NO₃-N의 농도가 떨어지는 구간 3~5에서 일어나는 것을 볼 수 있다. 컴퓨터 시뮬레이션 결과 최종침전지로부터 방출되는 유출수의 T-N 농도는 12.6mg/L이며, T-P 농도는 0.9mg/L로 MUCT 공정에서 T-P의 목표 수질은 얻을 수 있었으나, T-N의 처리수질은 목표수질을 상회하는 것으로 나타났다.

● 결론

기존 하·폐수처리장의 2차 처리시설을 BNR 공정으로

개조하기 위한 분석 방법을 알아보았으며, 수학적 모델링과 컴퓨터 시뮬레이션으로 3개의 BNR공정을 비교하여 공정의 선정과 설계에 필요한 기본 자료를 도출해 보았다. 표 2에서 보는 바와 같이 T-P 제거 효율은 A2/O(10구간)에서 가장 높았으며, T-N 제거 효율은 5 stage Bardenpho공정이 가장 높은 것으로 나타났다. 처리수질 목표인 T-N 10.0mg/L와 T-P 1.0mg/L를 모두 만족시키는 BNR 공정은 5 stage Bardenpho였고, T-N 제거효율이 다른 2개의 공정보다 월등히 높게 나타났다.

A 하수처리장의 2차처리시설을 용적의 증가없이 BNR 공정으로 개조하려면 A2/O와 MUCT 보다는 5 stage Bardenpho 공정이 더 효과적이었으며, T-N과 T-P를 목표수질 이내로 처리하기 위하여 외부탄소원을 필히 투입해 주어야 하는 것으로 나타났다.

표 2. BNR 분석에 이용된 공정 비교

조사 대상 BNR 공정	Configuration* (1,2,...,10)	유입구역 (구간 번호)				처리수질 (mg/L)	
		유입수	반송슬러지	내부반송	외부탄소원	T-N	T-P
A2/O (4구간)	NXAA	1	1	4→2	1	14.8	1.8
A2/O (10구간)	NXXXAAAAAA	1	1	10→2	1	10.7	0.6
Bardenpho (10구간)	NXXAAAAXXA	1	1	7→2	1	6.9	0.8
MUCT (10 구간)	NXXXXAAAAA	1	2	10→3	1	12.6	0.9

* : A 호기조, N 혐기조, X 무산소조

