

# 시스템 분석에 의한 활성슬러지공정 최적화

## 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



안 세 영

(주)수엔지니어링&컨설팅 대표이사

## 최적화란

최적화란 주어진 목적에 가장 적당하거나 적합하게 하는 것이다. 활성슬러지공정의 목적은 미생물을 이용하여 방류수 수질기준 이내로 하·폐수속의 오염물 제거하는 것인데 최적화는 곧 미생물이 오염물을 제거하기에 가장 적합한 환경을 제공하는 것이다. 따라서 엔지니어는 미생물 처리에 적합한 환경을 조성하기 위하여 편익적인 측면과 비용적인 측면을 동시에 고려하여 운영할 수 있는 활성슬러지공정을 설계하여야 한다. 저렴한 비용으로 편리하고 안정적인 운영관리가 가능한 활성슬러지공정을 설계하기 위하여 엔지니어는 처리공정을 완전히 이해해야 하는데, 여기서 말하는 공정의 이해는 단순히 교과서적인 지식을 말하는 것이 아니다.

대상 처리공정이 운영인자 혹은 환경요인의 변동에 따라 처리성능이 어떻게 변화하는지 예측하고, 문제가 나타날 경우에는 왜 그러한 문제가 발생하는지 또 대처할 수 있는 해결책이 무엇인지를 찾기 위하여 분석하고 해석하면서 얻어지는 공정의 이해를 말한다. 활성슬러지공정의 최적화를 위하여 목적에 맞는 시나리오 구상, 데이터 수집, 수집된 데이터 분석, 결과의 해석 그리고 의사결정이 엔지니어링 관점에서 수행되어야 한다.

## 시스템 이해

하폐수처리장의 2차처리에 사용되는 활성슬러지공정은 미생물에 의한 생화학적 반응과 물리적 반응이 복합적으로 작용하여 오염물을 제거하고 고형물을 분리해내는 아주 복잡한 처리 방법인데, 활성슬러지공정의 처리성능과

상태를 예측하기 위한 방법으로 파일럿 플랜트 실험이 행해져 왔다. 이러한 파일럿 플랜트 실험의 한계점은 많은 비용과 긴 시간이 소요되므로 공정에 관한 다양하고 심도 있는 분석이 불가능하다는데 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서는 처리 프로세스를 수학적으로 표현한 모델을 사용하는 것이 유일한 방법이다. 활성슬러지공정의 수학적 모델은 많은 변수와 계수를 포함하고 있는데, 이러한 변수와 계수를 이용하여 steady-state 조건 또는 dynamic 조건에서 오염물의 물질수지(mass balance)를 계산하여 공정의 처리성능을 예측하고 분석할 수 있다.

Steady-state 조건 뿐만 아니라 dynamic 조건에서 물질수지 계산을 수계산으로 수행하기는 매우 어려우나, 수학 모델을 컴퓨터 프로그래밍하여 계산하면 편리할 뿐만 아니라 시뮬레이션이 가능하기 때문에 활성슬러지공정에 관여하는 운전인자와 오염요소들의 변화를 수학적으로 추적하면 공정이 어떻게 작동하고 있는지 예측할 수 있다. 따라서 이와 같은 작업 즉 시뮬레이션을 수행함으로써 어떻게 하면 대상 처리시스템을 최적으로 설계하고 운영관리할 수 있는지 이해할 수 있게 된다.

활성슬러지공정의 최적화를 위해서는 매우 다양한 조건을 조사하여야 하나, 본기사에서는 처리공정이 필요로하는 송풍량과 산기관 산소 전달율( $\alpha$ SOTE)을 분석하였고, 유입부하량의 증감시 운전인자의 변화에 따른 공정의 성능을 예측하여 최적의 운영관리 전략을 수립하는 방법을 소개하였다.

국내에서 가동중인 A하수종말처리장을 대상으로 조사해 보자. A하수종말처리장은 유기물을 처리하는 표준활성슬러지공정으로 운영되고

있으며 아직 질소와 인을 처리할 수 있는 시설이 도입되지 않고있다. A하수종말처리장의 시스템 분석대상은 활성슬러지공정의 주요부분인 폭기조와 침전조로 설정하였고 분석을 위한 도구는 모델링 프로그램인 GPS-X(Hydromantis)가 사용되었다. 폭기조의 수학적 모델에는 활성슬러지모델(ASM No.1, IAWPRC 1986)을 적용하였고, 동역학계수와 화학양론계수는 IAWPRC Task Group이 ASM No.1에서 제시한 계수값을 이용하였다. 최종침전조의 물리적 고액분리를 조사하기 위하여 SVI(sludge volume index)를 150ml/g으로 설정하여 고형물 침강성과 농축성을 분석하였다. 표1은 A하수종말처리장의 폭기조와 최종침전지의 설계인자를 나타내고 있는데, 이 설계수치를 이용하여 활성슬러지공정운영의 주요 부분인 공기공급량과 활성슬러지 발생량을 분석하여 보았다.

표 1. A하수종말처리장 폭기조 및 최종침전조 설계기준

구 분	설 계 기 준	비 고
유입하수량	30,000 m <sup>3</sup> /day	
폭기조 유입 BOD <sub>5</sub>	140 mg/L	처리수질 20 mg/L
폭기조 유입 SS	130 mg/L	처리수질 30 mg/L
폭기조 유입 TKN	40 mg/L	NH <sub>3</sub> -N/TKN=0.65
폭기조 용적	7,760 m <sup>3</sup>	장방형 8지
HRT	6.2 hours	
MLSS	1,500~2,000 mg/L	
BOD 용적부하	0.3~0.8 kg-BOD/m <sup>3</sup> -day	
F/M 비	0.2~0.4	
송풍량	최대 403,200 m <sup>3</sup> /day	운영 288,000 m <sup>3</sup> /day
최종침전지 수면적	1,231 m <sup>2</sup>	원형 방사류식
깊이	3 m	
체류시간	2.95 hours	
수면적 부하	24.4 m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -day	
잉여슬러지량	375 m <sup>3</sup> /day	
잉여슬러지농도	8000 mg/L	
반송률	25%	

## 폭기조 송풍량 분석

유기물 산화(carbon oxidation)와 질산화(nitrification)과정에서 미생물이 요구하는 산소량을 공급하기 위하여 하수에 녹아들어가는 산소량을 계산하려면 여러가지 변수와 계수가 고려되어야 하는데 그 중에서 산기관의 산소전달율( $\alpha$ SOTE)에 따른 공기공급량을 조사해 보기로 하였다. 산기관은 그 종류에 따라 산소전달율( $\alpha$ SOTE)이 각기 다른데 산소전달율 5%~20%를 분석 범위로 하였다. 송풍기의 송풍량은 288,000 m<sup>3</sup>/day이며, 장방형 폭기조 용존산소(이하 DO라고 함)농도를 2.0 mg/L로 균일하게 유지하기 위하여 폭기조 유입부분의 공기공급량을 증가시켰고 유출부로 갈수록 공기공급량을 감소시켰다.

활성슬러지공정에서 유기물 산화(carbon oxidation)에 필요한 공기량을 조사해 보자.

산기관 산소전달율( $\alpha$ SOTE)이 변화함에 따라 폭기조 DO 농도는 그림 1과 같이 변하는데 폭기조 DO 농도를 2.0 mg/L로 유지하기 위해서는 산기관 산소전달율( $\alpha$ SOTE)이 6.5% 이상되는 산기관을 사용해야 하는 것을 알 수 있다. 그런데 여기서 한가지 고려해야 할 사항은 폭

기조 미생물에 의하여 유기물 산화(carbon oxidation) 반응 뿐만 아니라 질산화(nitrification)가 동시에 일어나기 때문에 설계 엔지니어는 질산화반응도 함께 고려해 송풍량을 예측해야 한다.

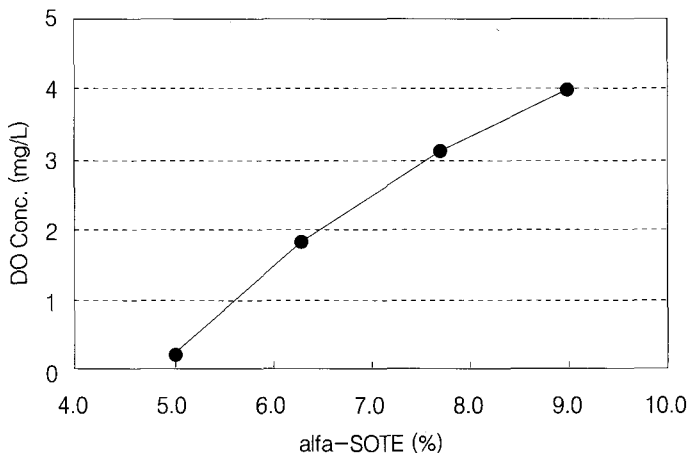
유기물산화와 함께 질산화를 고려하면 송풍량이 288,000 m<sup>3</sup>/day에서 산기관의 산소전달율( $\alpha$ SOTE)이 13% 이상 되어야 폭기조 DO 농도를 2.0 mg/L로 유지할 수 있는 것으로 계산되었다 (그림 2). 이러한 차이는 6.5%의 산소전달율을 가진 산기관 사용시 거의 두배인 567,000 m<sup>3</sup>/day의 송풍량이 필요한 것으로 계산되었다.

상대적으로 고농도의 유기물이 유입되는 A하수처리장에서 운영관리자가 폭기조 DO 농도를 2.0 mg/L로 유지하는 상태에서 질산화를 일으키지 않고 운전하는 것은 쉽지 않다. 또한 질산화를 억제하기 위하여 짧은 SRT(Sludge Retention Time)로 운전하는 경우, 긴 SRT(적정범위 3~15일)에서의 운전이 제한되기 때문에 질산화를 억제하는 활성슬러지 공정 설계는 적절하지 않다. 따라서 엔지니어는 활성슬러지공정 설계시 질산화에 필요한 송풍량을 고려해야 하며 처리장 운영매뉴얼상에 산기관 산소전달율과 송풍량의 관계를 정확히 명시해 주어야 한다. 또한 처리장 운영자는 폭기조 운영시 산소전달율이 저하되지 않도록 산기관의 유지관리에 각별히 주의해야 한다.

### 유입부하량의 변화에 따른 최적 운전 전략 수립

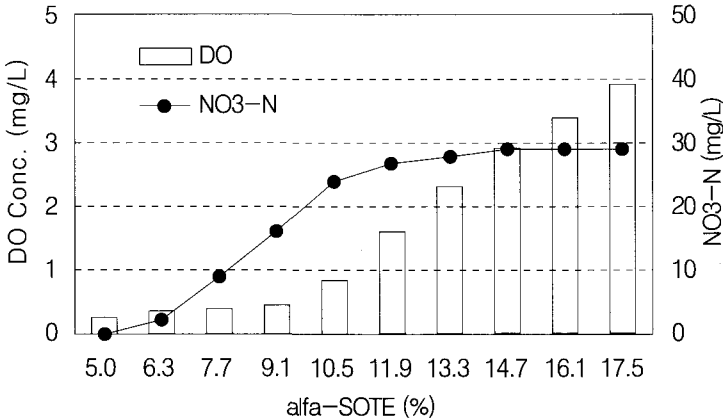
처리장의 유입수질은 환경적인 영향에 의하여 증가하거나 감소하기 때문에 운전인자의 적절한 조절에 의하여 처리시스템을 안정적으로 조절해 주어야 한다. 활성슬러지공정 운전에 중요한 인자로는 SRT이다. SRT는 최종침전지의 잉여슬러지 배출량(이하 WAS라고 함)과 슬러지 반송량(이

그림 1. 유기물산화시 산기관 산소전달율( $\alpha$ SOTE)과 DO농도의 관계 (송풍량 288,000m<sup>3</sup>/일)



A하수종말처리장의 유입부하가 증가한다면 슬러지 발생량이 증가하기 때문에 그림 3에서 보여지는 것처럼 WAS량과 RAS량을 증가시켜 활성슬러지공정의 처리성능을 유지할 수 있다. 만약 WAS등과 같은 운전인자를 조절해 주지 않으면 폭기조내의 MLSS농도와 침전지 고형물 부하가 증가하고 미생물의 생화학적 상태가 변화하여 처리시스템의 성능을 떨어뜨리는 원인이 된다. 반대로 유입부하량이 감소하면 활성슬러지공정에 적절한 슬러지농도를 유지하기 위하여 WAS량을 감소시켜 주어야 한다.

그림 2. 유기물산화와 질산화 산기관 산소전달율( $\alpha$ SOTE)과 DO 농도의 관계 : (송풍량 288,000 $\text{m}^3/\text{일}$ )



하 RAS라고 함)과 직접적인 관계가 있어 SRT를 변화시키기 위하여 WAS와 RAS를 조절하는데, SRT가 폭기조의 MLSS농도 그리고 최종침전조의 슬러지 침강속도와 슬러지 농축농도에 큰 영향을 준다. A하수종말처리장의 유입부하량이 50%~150%(설계기준을 100%로함)로 변화한다면 그에 대처한 최적 운영방법은 어떠한 것인지 SRT, WAS, RAS의 수치를 변화시켜 가면서 처리시스템 성능을 분석해 보자.

### 모델링/시뮬레이션

그림 3은 유입부하량 증감시 방류수 BOD<sub>5</sub> 농도와 SS

농도를 각각 8 mg/L와 14 mg/L 이내로 유지하기 위하여 WAS량과 RAS량을 조절하였고 그에 따른 SRT 값을 나타낸 것이다. 예를 들어보면, 그림 3에서 설계기준인 유입부하량 100%일 때 WAS량은 375  $\text{m}^3/\text{day}$ , RAS량은 25%, 그로부터 계산되는 SRT는 4.4 days로 표시되었다. 유입부하량의 증감에 따른 운전인자의 조절은 폭기조와 최종침전지의 생화학적, 물리적 상태를 변화시키는데, 그림 4는 유입부하량의 증감시 적절한 방류수 수질을 유지하기 위하여 그림 3과 같이 WAS, RAS를 조절하여 주었을 때 폭기조의 MLSS농도, 최종침전지의 WAS

농도, 슬러지 계면높이를 나타낸 것이다. A하수종말처리장의 유입부하가 증가한다면 슬러지 발생량이 증가하기 때문에 그림 3에서 보여지는 것처럼 WAS량과 RAS량을 증가시켜 활성슬러지공정의 처리성능을 유지할 수 있다. 만약 WAS등과 같은 운전인자를 조절해 주지 않으면 폭기조내의 MLSS농도와 침전지 고형물 부하가 증가하고 미생물의 생화학적 상태가 변화하여 처리시스템의 성능을 떨어뜨리는 원인이 된다. 반대로 유입부하량이 감소하면 활성슬러지공정에 적절한 슬러지농도를 유지하기 위하여 WAS량을 감소시켜 주어야 한다.

그림 3. 유입부하량의 증감시 방류수 수질을 BOD<sub>5</sub> 농도 8 mg/L, SS농도 14 mg/L로 유지하기 위하여 조절된 SRT, RAS, WAS 수치값.

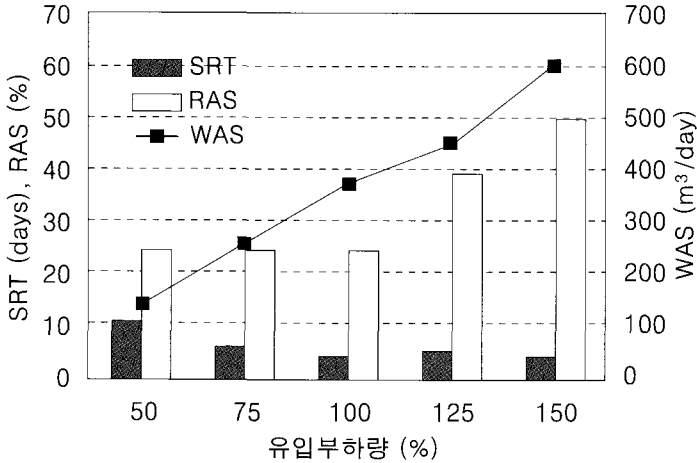
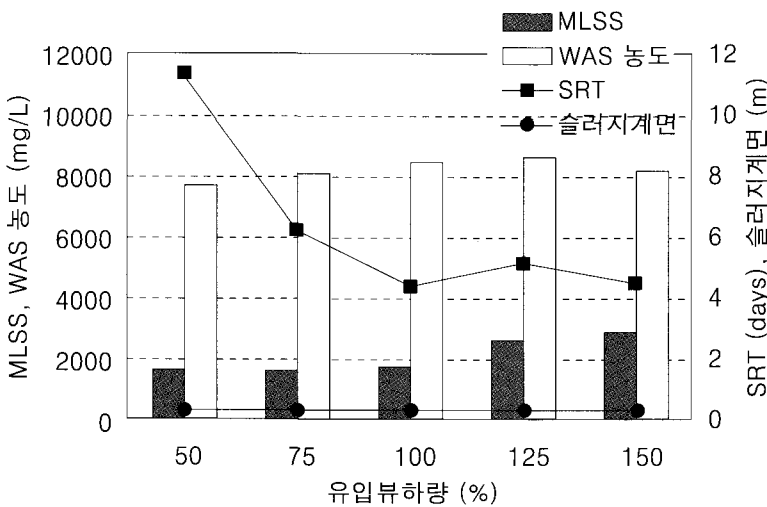


그림 4. 유입부하량의 변화에 따라 WAS와 RAS를 그림3과 같이 조절하여 주었을 때 MLSS, WAS 농도, 최종침전지 슬러지 계면 높이.



### 고부하유입시 결과분석

A하수종말처리장의 유입부하량이 설계기준에 비해 150

% 증가하였을 때 하수를 방류수질 이내로 처리하기 위해서 WAS량을 600 m<sup>3</sup>/day로 증가시켰고, RAS를 50%로 조절하였는데, 이때 MLSS농도와 WAS농도는 각각 2,800 mg/L, 8,100 mg/L였고, SRT는 4.5 days, F/M은 0.29 day<sup>-1</sup>, 최종침전지의 슬러지 계면 높이는 바닥에서 30cm로 계산되었다. 또한 폭기조의 DO농도를 2.0mg/L로 유지해 주기 위해 382,000 m<sup>3</sup>/day의 송풍량<sup>8</sup>이 소요되는 것으로 계산되었다. 최종침전지의 WAS량을 조절하면 유입부하량이 설계기준치보다 150%증가하여도 A하수종말처리장의 수질관리가 가능하다는 것을 말해주고 있다.

그러나 여기서 주목해야 할 것은 WAS량, 송풍량, RAS량 등인데, 처리장 운영자가 이러한 변화에 대응하여 WAS, RAS, 송풍량등을 원활하게 조작할 수 있도록 시설, 유체이송 배관크기 및 배치, 밸브의 종류와 위치등의 설계와 펌프와 송풍기의 용량 산정과 이송 용량 조절 가능성이 신중히 고려되어야 한다. 실제로 처리장 운영자가 부하량 변화등과 같은 환경 변화에 대처하여 적절하게 운전인자를 조절할 수 있게 시설되어 있지 않다는 것이 하수처리장들의 문제점중 하나이다. 또한가지 고려해야 할 사항

은 유입 부하량의 증가시 WAS량을 증가시켜야 하는 것인데, WAS량의 증가는 슬러지처리 후단시설인 중력식 농축조에 많은 영향을 미친다.

따라서 엔지니어는 슬러지 농축시설 및 소화조 설계시 인

여슬러지량의 증감을 신중히 고려하여 설계하여야 한다.

### 저부하유입시 결과분석

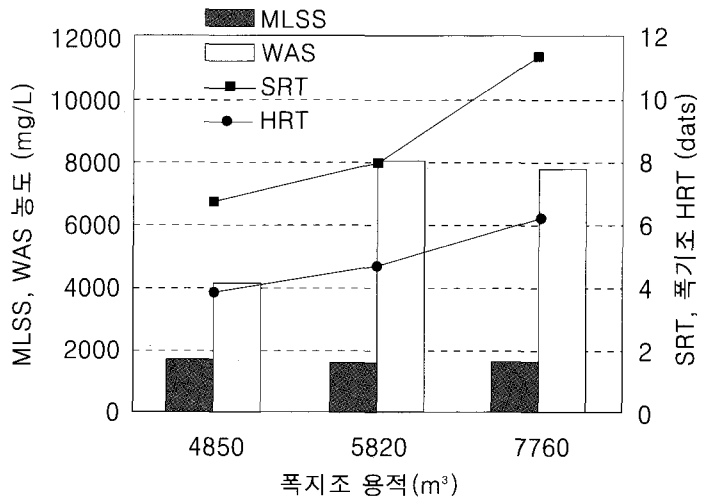
우리나라 대부분의 하수종말처리장의 문제점이 저유입부하인데, A하수종말처리장의 유입부하량이 감소할 때 활성슬러지공정이 어떻게 반응하는지 분석해 보자. 유입부하량 감소시 처리조의 슬러지 농도를 유지하기 위하여 WAS량을 줄여 시뮬레이션 하였다 (그림 3). 유입부하량이 설계치에 비해 50 % 감소했을 때 WAS량을 140 m<sup>3</sup>/day로 조절하면 폭기조의 MLSS농도와 침전조의 농축슬러지 농도가 각각 1,600 mg/L, 7,500 mg/L로 유지되는 것을 볼 수 있고 (그림 4), 이때 폭기조의 DO 농도를 2.0 mg/L로 유지하기 위하여 156,000 m<sup>3</sup>/day의 송풍량이 요구되는 것으로 계산되었다.

여기에서 유의해야 할 점은 F/M 수치가 유입부하량 100 %시 계산되는 0.3 day<sup>-1</sup>에서 0.17 day<sup>-1</sup>로 감소하였고 용적부하량도 0.27day<sup>-1</sup>로 적정범위보다 낮은 수치를 보여 주고 있다. 일시적으로 유입부하량이 감소할 때에는 운영인자를 조절함에 의해서 처리성능을 유지할 수 있으나, 오랜기간동안 저부하로 유입될 때는 운영인자의 조절만으로는 대처하는 것은 비 경제적이기 때문에 엔지니어는 저유입부하시 폭기조의 용적을 줄여서 운영할 수 있는 시설로 설계하여야 한다.

폭기조를 8계열로 나누어 설치하였다고 가정하면 저부하 유입시 몇 개계열의 폭기조 운영을 중단한 상태에서 활성슬러지시스템을 운전할 수 있다. 그림 5는 폭기조 5개 계열, 6개 계열, 그리고 폭기조 전부를 운영하였을 때의 시스템 처리상태를 나타내고 있다. 최종침전지의 WAS량을 150 m<sup>3</sup>/day으로 조절하여 5개 계열만 운전하였을 때

MLSS농도와 WAS 농도는 각각 1,700 mg/L, 8,400 mg/L로 계산되었고 이때의 SRT는 6.7 days로 나타났다. 폭기조 DO 농도를 2.0 mg/L로 유지하기 위해 요구되는 송풍량은 144,300 m<sup>3</sup>/day로 계산되었고 이때의 유출수질은 BOD<sub>5</sub>, SS 각각 7 mg/L, 14 mg/L로 예측되었다. 따라서 저부하 유입이 오랜기간 지속될 때에는 폭기조의 계열을 몇 개 줄여서 시스템을 운영하는 것이 경제적이며, 또한 몇 개 계열을 줄였을 때가 폭기조 계열을 100 % 운영하는 것 보다 SRT의 조절 범위가 넓어 유연한 운영을 할 수 있는 것으로 나타났다.

그림 5. 저부하 유입시 폭기조 계열을 각각 100% (7,760 m<sup>3</sup>), 75 % (5,820 m<sup>3</sup>), 63% (4,850 m<sup>3</sup>)으로 운영하였을 때의 폭기조 상태 변화: 유출수질은 BOD<sub>5</sub> 7mg/L, SS 14mg/L.



### 결론

A하수종말처리장 폭기조 미생물이 필요로 하는 송풍량을 조사해 보았고, 또한 유입부하량이 증감할 때 처리장 운영자가 유연하게 대처할 수 있는 운영방법을 분석해 보았다. 설계시 송풍량을 결정할 때 유기물 산화(carbon

oxidation) 뿐만 아니라 질산화(nitrification)를 고려해야 처리시스템의 유연한 운전이 가능하다. 또한 산기관의 산소전달율( $\alpha$ SOTE)은 폭기조의 미생물이 요구하는 산소량과 송풍기의 공기발생량 사이에 절대적인 영향을 미치기 때문에 운영관리 매뉴얼에 명확히 명시되어야 한다. 따라서 엔지니어는 유기물산화(carbon oxidation), 질산화(nitrification), 산기관 산소전달율( $\alpha$ SOTE), 유입부하량의 상승에 따른 미생물 산소요구량의 증가를 복합적으로 계산하여 송풍기 용량을 산정하여야 하며, 송풍량을 적절하게 조절할 수 있는 공기공급 시설을 고려하여 설계해야 처리장 운영자가 처리상황에 가장 적합하게 운영할 수 있다.

유입부하량이 설계기준에 비하여 150% 증가시에도 기존의 폭기조와 최종침전조의 용적을 그대로 사용하여 방류수 수질기준 이내로 처리할 수 있는 것으로 분석되었다. 그러나 유입하수량 증가시 폭기조 미생물의 산소 소모량이 증가되었으며 최종침전지의 WAS량을 증가시켜야 하기 때문에 송풍량과 WAS량을 원활히 조절하여 줄 수 있는 조절시스템(control system)이 제공되어야 한다. 유입부하량 증가시 또한가지 중요한 사항은 최종침전지에서 발생하는 WAS량을 적절히 처리할 수 있는 후단 슬러지 처리시설인 중력식 농축조와 소화조의 용량이 고려되어야 한다. 반대로 저부하의 하수가 오랜기간 지속될 때는 폭기조의 일부 계열을 사용하지 않는 것이 효율적인 운전에도움을 주는 것으로 나타났다. A하수종말처리장의 경우 유입 부하량이 설계기준 대비 50%감소하였을 때 전체 폭기

조의 5/8에 해당하는 용적만을 사용하여도 방류수 수질기준을 유지할 수 있는 것으로 조사되었다.

수학적 모델링과 시뮬레이션은 설계 엔지니어와 운영관리자에게 활성슬러지 공정의 성능과 상태를 명확한 수치로 보여줄 수 있다. 따라서 이러한 결과수치를 분석하면 활성슬러지공정의 최적설계가 가능해 지는데, 설계 엔지니어가 하수처리장에서 일어날 모든 상황을 고려하여 설계할 수는 없기 때문에 적절한 범위를 제시해 주어야 한다. 처리장 운영관리자는 자신이 관리하는 하수처리시설을 적절히 운영하기 위하여 모델링 분석을 지속적으로 수행하여 각각의 상황에 맞도록 운영인자를 조절하여 가장 적절하게 유지관리 될 수 있도록 노력하여야 한다. 엔지니어는 처리장 관리자가 운영인자를 편리하고 유연하게 조절하여 줄 수 있도록 처리시스템을 설계하여 주는 것이 무엇보다도 중요하다고 하겠다.

## 주석

- a: 유입부하량의 증감은 BOD<sub>5</sub> 농도 SS 농도, TKN 농도가 같은 비율로 변화 것을 의미한다.
- b: 송풍량은 산기관 산소전달율 13 % 기준으로 계산하였다.
- c: 폭기조 용적 부하량 설계 범위: 0.32~0.64 kgBOD<sub>5</sub>/m<sup>3</sup>-day
- d: 장방형 폭기조 8계열로 설치: 각 계열의 용적은 970 m<sup>3</sup>

다음호에 계속...

「환경기술인」을 읽으면 환경보전이 빨라집니다.