(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2011-0098195
(43) 공개일자 2011년09월01일

(51) Int. Cl.
*C02F 3/00* (2006.01) *G01N 33/18* (2006.01)
(21) 출원번호 10-2010-0017673
(22) 출원일자 2010년02월26일
심사청구일자 2010년02월26일

(71) 출원인
**경희대학교 산학협력단**
경기도 용인시 기흥구 서천동 1 경희대학교 국제캠퍼스내
(72) 발명자
**유창규**
경기도 용인시 기흥구 서천동 경희대학교국제캠퍼스 공과대학 471-3호
**김민한**
경기도 용인시 기흥구 서천동 경희대학교국제캠퍼스 공과대학 275호
(74) 대리인
**특허법인다나**

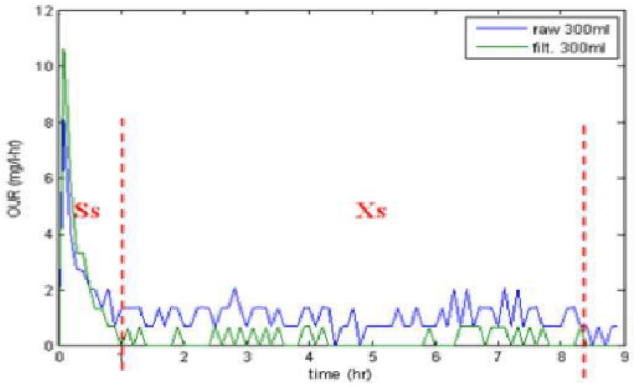
전체 청구항 수 : 총 6 항

# (54) 활성슬러지모델1의 보정방법 및 이를 이용한 하수처리공정 최적화

## (57) 요 약

본 발명은 호흡률 측정법을 이용하여 하수처리장의 유입수 성상을 파악하는 단계; 호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수를 보정하는 단계; 및 EMSEL 프로토콜을 이용하여 상기 호흡률 측정법에 의한 매개변수 이외에 주요매개변수를 선정한 후 보정하는 단계를 포함하는 활성슬러지모델1의 보정방법과 이를 이용한 하수처리공정 운전방법에 관한 것이다. 본 발명에 따른 활성슬러지모델1의 보정방법은 새로운 모델 매개변수 보정방법으로 해당 하폐수공장의 하수(폐수) 특성에 맞춰 활성슬러지모델1의 매개변수의 보정하는 방법을 제공하며, 이를 이용하여 해당 하폐수공장에 맞춤형 공정최적화를 할 수 있다.

*대 표 도* - 도1



이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 KRF-2009-0076129
부처명 교육과학기술부
연구관리전문기관
연구사업명 일반연구자 지원사업
연구과제명 환경정보학과 시스템 최적화의 원천기술을 이용한 통합관리시스템 개발
기여율
주관기관 한국연구재단
연구기간 2009년 05월 01일 ~ 2010년 04월 30일

## *특허청구의 범위*

**청구항 1**

호흡률 측정법을 이용하여 하수처리장의 유입수 성상을 파악하는 단계;

호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수를 보정하는 단계; 및

EMSEL 프로토콜을 이용하여 상기 호흡률 측정법에 의한 매개변수 이외에 주요매개변수를 선정한 후 보정하는 단계

를 포함하는 활성슬러지모델1의 보정방법.

**청구항 2**

제 1항에 있어서,

상기 유입수 성상은 활성슬러지모델1에서 고려되어지는 13가지 구성성분인 것을 특징으로 하는 활성슬러지모델1의 보정방법.

**청구항 3**

제 1항에 있어서,

상기 산소 소모와 관련이 있는 매개변수는 화학양론적 변수인 종속영양미생물 생산계수($Y_H$), 독립영양미생물 생산계수($Y_A$) 및 바이오매스 질소함량($i_{XB}$) 과 동력학적 변수인 종속영양미생물 부패율($b_H$), 최대 종속영양미생물 성장률($\mu^{\wedge}_H$) 및 반포화상수($K_S$)인 것을 특징으로 하는 활성슬러지모델1의 보정방법.

**청구항 4**

제 1항에 있어서,

상기 주요매개변수는 최대 독립영양미생물 성장률($\mu^{\wedge}_A$), 독립영양미생물 부패율($b_A$), 종속영양미생물 산소 반포화상수($K_{OH}$) 및 독립영양미생물 산소 반포화상수($K_{OA}$)인 것을 특징으로 하는 활성슬러지모델1의 보정방법.

**청구항 5**

제 1항의 활성슬러지모델1의 보정방법을 통해 분석된 유입수 성상 및 보정된 매개변수를 이용하여 하수에 포함된 피처리물 2개 이상의 동시 제거를 목적으로 하는 하수처리공정의 운전방법.

**청구항 6**

제 5항에 있어서,

상기 피처리물은 COD, 질소, 인, 대장균, 카드뮴, 비소, 수은 등으로 이루어진 군으로부터 선택된 1종인 것을 특징으로 하는 하수처리공정의 운전방법.

## *명 세 서*

### *기 술 분 야*

[0001] 본 발명은 하수처리장 설계를 위한 활성슬러지모델1의 보정방법 및 이를 이용한 하수처리공정 운전방법에 관한 것이다.

## 배 경 기 술

[0002] 하수처리장의 방류 수질기준이 강화됨에 따라 처리 효율을 높여 처리수질을 안정적으로 유지시키면서, 동시에 처리비용을 절감시키기 위해 하수처리시스템에 대한 고도처리화와 자동제어 및 최적운전의 필요성이 커지고 있다. 특히 부유물질 및 유기물 제거에 주목적을 둔 재래식 활성슬러지 공정은 질소 및 인을 제어할 수 있는 고도처리공정으로 개보수 되어야 할 필요가 있으며, 고도처리시설의 처리 효율을 높이기 위해 많은 연구가 진행되고 있다.

[0003] 하지만 유입수 유량 및 성분 농도의 변화, 기타 환경요인 등 고려해야 하는 사항이 많은 복잡한 하수처리장의 경우 현장에서의 정확한 예측 및 제어 전략을 평가하기가 쉽지 않다. 또한 기존의 하수처리장에서의 연구는 실험실 규모의 실험과 이를 바탕으로 한 파일럿 플랜트 운전을 통해서 이루어졌으나, 이와 같은 과정은 비용이나 시간적인 면에서 많은 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 대안으로 모델링 기법을 이용하여 다양한 조건에서 공정모사가 필요하다.

[0004] 1980년대 이후 기존 하수처리장의 공정 성능을 개선하거나 신설 하수처리장의 설계 자료로 활용하기 위해 모델링 기법을 사용하는 사례가 증가하였다. 특히, International Water Association(IWA) 산하 task group에서 1983년 이후 활성슬러지 공정에 대한 수학적 모델식을 정리한 활성슬러지모델들(activated sludge models, ASMs)이 개발됨으로써, 하수처리의 설계 및 공정 최적화에 널리 사용되고 있다. 활성슬러지 모델은 하수처리 공정 내에서 일어나는 미생물 반응에 대한 수학적 모델로써 이론적인 반응속도식을 바탕으로 하여 여러 운전변수에 대한 반응 결과를 제시해주며, 복잡한 실험과정을 거치지 않고도 하수처리 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 전산모사를 가능하게 한다. 처음 ASM1이 개발된 이후에 ASM1이 갖는 한계점을 극복하기 위해 ASM2, ASM2d, ASM3가 추가 개발되었고, 이를 통해 연구하고자 하는 해당 공정과 해당 오염물질에 따라 다양한 활성슬러지 모델을 선택하여 사용하는 것이 가능하다. 유기물 산화와 질산화 및 탈질 반응을 고려할 경우에는 ASM1과 ASM3을 사용할 수 있으며, 인 방출 및 인 축적 기작에 의한 인 제거 반응을 고려할 경우 ASM2, 무산소조에서 동시 인 축적 및 탈질 반응을 고려할 경우에는 ASM2d를 사용할 수 있다.

[0005] 이러한 활성슬러지 모델은 유럽 하수에서 사용되는 기본값과 모델 변수로 구성되어 있음에도 불구하고, 현재 국내 하수처리장의 모델링 및 모사에 이러한 ASM 변수들을 그대로 사용하고 있다. 국내 하수특성과 환경 조건은 유럽과 다르므로 유입수의 구성성분뿐만 아니라 미생물의 종 특성이 다를 수 있고, 그 외에 여러 매개변수를 정확한 공정 모델링을 위해 국내 실정에 맞게 수정할 필요가 있다.

[0006] 이러한 적합한 활성슬러지 모델을 기반으로 많은 연구가 진행되고 있으나, 많은 경우 모델 변수보정 및 유입하수 동특성 파악의 경우 전문가의 경험에 의존하거나 시행착오법이 사용되고 있는 실정이다. 이러한 방법들은 시간과 노력이 많이 소요되고 신뢰성에도 한계점을 드러내므로 체계적인 유입수 성상분석, 모델보정 및 공정최적화 방법론이 필요하다.

## 발명의 내용

### 해결하려는 과제

[0007] 본 발명은 상기한 바와 같이 종래기술이 가지는 문제점을 해결하기 위해 안출된 것으로, 실험실 규모의 실험을 표준화하여 실험결과의 정확도를 높이기 위해서 최적화된 매개변수 조건을 구하는 활성슬러지모델1의 보정방법을 제공하는데 그 목적이 있다.

[0008] 본 발명의 다른 목적은 본 발명에 따른 활성슬러지모델1의 보정방법을 이용하여 하수처리장을 개보수 및 건설함에 있어 최적의 설계 조건을 찾기 위한 하수처리공정 운전방법을 제공하는 것이다.

### 과제의 해결 수단

[0009] 본 발명은

[0010] 호흡률 측정법을 이용하여 하수처리장의 유입수 성상을 파악하는 단계;

[0011] 호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수를 보정하는 단계; 및

[0012] EMSEL 프로토콜을 이용하여 상기 호흡률 측정법에 의한 매개변수 이외에 주요매개변수를 선정한 후 보정하는 단계

[0013] 를 포함하는 활성슬러지모델1의 보정방법에 관한 것이다.

[0014] 본 발명은 또한

[0015] 상기의 활성슬러지모델1의 보정방법을 통해 보정된 매개변수를 이용하여 하수에 포함된 피처리물 2개 이상의 동시 제거를 목적으로 하는 하수처리공정의 운전방법에 관한 것이다.

## *발명의 효과*

[0016] 본 발명에 따른 활성슬러지모델1의 보정방법은 새로운 모델 매개변수 보정방법으로 해당 하폐수공장의 하수(폐수) 특성에 맞춰 활성슬러지모델1의 매개변수의 보정하는 방법을 제공하며, 본 발명에 따른 하수처리공정의 운전방법은 상기와 같은 활성슬러지모델1의 보정방법을 통해 분석된 유입수 성상 및 보정된 매개변수를 이용함으로써 해당 하수처리장에서 처리하고자 하는 피처리물 2개 이상의 동시 제거를 위한 최적의 운전조건을 설계할 수 있다.

## *도면의 간단한 설명*

[0017] 도 1은 단위시간당 산소섭취율을 나타내는 그래프이다.

도 2는 EMSEL 프로토콜의 순서도를 나타낸다.

도 3은 2가지 피처리물 제거를 위한 최적화 전략을 나타낸 순서도이다.

도 4는 DNR 공정도를 나타낸다.

도 5는 COD 제거율에 대한 13개 매개변수값들의 민감도를 나타낸 그래프이다.

도 6은 TN(질소) 제거율에 대한 13개 매개변수값들의 민감도를 나타낸 그래프이다.

## *발명을 실시하기 위한 구체적인 내용*

[0018] 본 발명은

[0019] 호흡률 측정법을 이용하여 하수처리장의 유입수 성상을 파악하는 단계;

[0020] 호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수를 보정하는 단계; 및

[0021] EMSEL 프로토콜을 이용하여 상기 호흡률 측정법에 의한 매개변수 이외에 주요매개변수를 선정한 후 보정하는 단계

[0022] 를 포함하는 활성슬러지모델1의 보정방법을 제공한다.

[0023] 활성슬러지모델이란 IAWQ(International Association in Water Quality) 산하 task group에서 1983년 이후 활성슬러지 공정에 대한 수학적 모델식을 정리한 것으로써, 하수처리 공정 내에서 일어나는 미생물 반응에 대한 이론적인 반응속도식을 바탕으로 하여 여러 운전변수에 대한 반응 결과를 제시해주며 복잡한 실험과정을 거치지 않고도 하수처리 공정에서 발생하는 여러 상황에 대한 전산모사를 가능하게 한다.

[0024] 본 발명에서 고려되어지는 활성슬러지모델1(activated sludge model no. 1, ASM1)은 유기물 산화와 질산화 및 탈질 반응을 포함하고 있으며, 총 13개의 구성성분(표 1. 참조)과 8가지 반응(표 2. 참조)을 통해 활성슬러지공정의 생물학적 기작을 표현한다. 활성슬러지모델1에 사용된 매개변수는 5개의 화학양론 변수와 14개의 동력학적 변수로 구성되어 있다(표 3. 참조).

[0025] 활성슬러지모델1의 구성성분은 크게 용존성(S)과 입자성(X)으로 구분된다. 표 1에는 활성슬러지모델1의 13개 구성성분을 나타내었다. 유기성 물질은 기본적으로 질소성 물질을 제외한 수중의 COD를 용존성과 입자성, 생분해성 물질과 분해 불가능한 물질로 구분하여 나타내었으며, 질소성 물질의 경우 유기질소, 암모니아성 질소, 질산염으로 구분하여 다루고 있다. $S_S$는 종속영양미생물에 의해 쉽게 분해되는 간단한 구조의 용존성 유기물질이다.

종속영양미생물의 생장 및 에너지를 얻는데 직접적으로 사용되며, 천천히 분해되는 입자성 물질인 $X_S$의 가수분해를 통해 생성되기도 한다. $S_I$는 미생물에 의해 더 이상 분해되지 않는 용존성 유기물질로 하수처리장 방류수 COD에 포함된다. $X_I$는 미생물에 의해서 더 이상 분해되지 않은 입자성 물질로 와 다른 점은 방류되지 않고 반응조에 축적되며, 이로 인해 유입되는 농도보다 반응조 내부의 유기물 농도가 높게 나타나게 된다. $X_I$는 폐슬러지의 처리에 의해서만 제거되며, 반송과 같은 일련의 수리학적 영향으로는 외부로의 유출이 되지 않는 것으로 가정한다. $X_{BH}$는 종속영양미생물을 나타내는데, 종속영양미생물은 호기, 무산소 조건에서의 세포 생장과 에너지를 획득하기 위해 쉽게 분해되는 유기물질을 사용하며 혐기성 조건에서는 생장을 하지 못한다. $X_{BA}$는 독립영양미생물을 의미하며, 세포의 탄소원으로 이산화탄소를 사용하고 에너지를 얻기 위해 암모니아성 질소($S_{NH}$)를 질산성 질소($S_{NO}$)로 전환시킨다. 독립영양미생물의 경우 호기성 조건에서만 생장하며 생장을 하는 동안 세포의 합성을 위해 암모니아성 질소를 섭취한다.

[0026] <표 1.> 활성슬러지모델1의 13개의 구성성분

| | 부호 | 의미 |
|---|---|---|
| 1 | $S_I$ | 용해 비활성 유기물질(soluble inert organic matter) |
| 2 | $S_S$ | 이분해성 유기물질(readily biodegradable substrate) |
| 3 | $S_O$ | 용존산소(dissolved oxygen) |
| 4 | $S_{NO}$ | 질산염 및 아질산염(nitrate and nitrite) |
| 5 | $S_{NH}$ | 암모니아성 질소(free and ionized ammonia) |
| 6 | $S_{ND}$ | 용해 생분해성 유기 질소(soluble biodegradable organic nitrogen) |
| 7 | $S_{ALK}$ | 알칼리도(alkalinity) |
| 8 | $X_I$ | 불활성 고형물질(particulate inert organic matter) |
| 9 | $X_S$ | 천천히 분해되는 입자성 물질(slowly biodegradable substrate) |
| 10 | $X_{BH}$ | 종속영양미생물(active heterotrophic biomass) |
| 11 | $X_{BA}$ | 독립영양미생물(active autotrophic biomass) |
| 12 | $X_P$ | 바이오매스 부패로 인한 입상 유기물질(particulate products resulting from biomass decay) |
| 13 | $X_{ND}$ | 입상 생분해 유기 질소(particulate biodegradable organic nitrogen) |

[0027]

[0028] 활성슬러지공정의 반응은 표 2의 좌측 첫 번째 열에, 반응속도식은 마지막 열에 나타내었다. 이는 반응식과 구성성분 간의 관계를 쉽게 나타내는데 매트릭스의 빈칸은 구성성분과 반응이 아무런 관계가 없음을 보여주는 것이다. 총 반응은 하기 수학식 1과 같이 나타낼 수 있으며, $r_i$는 총반응으로 $v_{ij}$(화학양론계수)와 $\rho_j$(반응식)을 곱한 것의 합을 나타낸다.

*수학식 1*

[0029] $$r_i = \sum_j v_{ij} \rho_j$$

[0030] <표 2.> 활성슬러지모델1의 8가지 반응

| 반응(j)↓ | | 상태변수(i) → | | | | | | | | | | | | | 반응속도식($\rho_j$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | |
| | | $S_I$ | $S_S$ | $X_I$ | $X_S$ | $X_{BH}$ | $X_{BA}$ | $X_P$ | $S_O$ | $S_{NO}$ | $S_{NH}$ | $S_{ND}$ | $X_{ND}$ | $S_{ALK}$ | |
| 1 | 종속영양 미생물의 호기적 성장 | | $-\frac{1}{Y_H}$ | | | 1 | | | $-\frac{1-Y_H}{Y_H}$ | | $-i_{XB}$ | | | $-\frac{i_{XB}}{14}$ | $\mu_{maxH}\frac{S_S}{K_S+S_S}\frac{S_O}{K_{OH}+S_O}X_{BH}$ |
| 2 | 종속영양 미생물의 혐기적 성장 | | $-\frac{1}{Y_H}$ | | | 1 | | | | | $-i_{XB}$ | | | $\frac{1-Y_H}{14\cdot 2.86Y_H}-\frac{i_{XB}}{14}$ | $\eta_g\mu_{maxH}\frac{S_S}{K_S+S_S}\frac{S_O}{K_{OH}+S_O}\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}}X_{BH}$ |
| 3 | 독립영양 미생물의 호기적 성장 | | | | | | 1 | | $-\frac{4.57-Y_A}{Y_A}$ | $-\frac{1}{Y_A}$ | $-i_{XB}-\frac{1}{Y_A}$ | | | $\frac{2}{14Y_H}-\frac{i_{XB}}{14}$ | $\mu_{maxA}\frac{S_{NH}}{N_{NH}+S_{NH}}\frac{S_O}{K_{OH}+S_O}X_{BA}$ |
| 4 | 종속영양 미생물의 부패 | | | | $1-f_p$ | $-1$ | | $f_p$ | | | | | $i_{XB}f_n i_{XB}$ | | $b_H X_{BH}$ |
| 5 | 독립영양 미생물의 부패 | | | | $1-f_p$ | | $-1$ | $f_p$ | | | | | $i_{XB}f_n i_{XB}$ | | $b_A X_{BA}$ |
| 6 | 용해 유기질소의 암모니아화 | | | | | | | | | | 1 | $-1$ | | $\frac{1}{14}$ | $K_a S_{ND} X_{BH}$ |
| 7 | 천천히 생분해하는 입자성 물질의 가수분해 | | 1 | | $-1$ | | | | | | | | | | $K_h\frac{X_S/X_{BH}}{K_X+X_S/X_{BH}}X_{BH}\left[\frac{S_O}{K_{OH}+S_O}+\eta_h\frac{K_{OH}}{K_{OH}+S_O}\frac{S_{NO}}{K_{NO}+S_{NO}}\right]$ |
| 8 | 유기질소의 가수분해 | | | | | | | | | | | 1 | | | $\rho_7(X_{ND}/X_S)$ |

[0031]

[0032] 활성슬러지모델1은 아래 표 3에서 나타낸 바와 같이 5개의 화학양론적 계수와 14개의 동력학적 계수를 가지고 있다. 유입 하수의 구성성분뿐만 아니라 화학양론적 및 동력학적 계수들의 값은 하수의 성상에 따라 변하는 것으로 알려져 있다.

[0033] <표 3.> 활성슬러지모델1의 매개변수

| | 모델 매개변수 | 부호 | 단위 | 기준값(20℃) |
|---|---|---|---|---|
| 화학양론적 매개변수 | | | | |
| 1 | 종속영양미생물 생산계수<br>(Heterotrophic yield) | $Y_H$ | g cell COD formed / g COD oxidized | 0.67 |
| 2 | 독립영양미생물 생산계수<br>(Autotrophic yield) | $Y_A$ | g cell COD formed / g N oxidized | 0.24 |
| 3 | 입자성 분율<br>(Fraction of biomass yielding particulate products) | $f_P$ | Dimensionless | 0.08 |
| 4 | 바이오매스 질소함량<br>(Mass N / Mass COD in biomass) | $i_{XB}$ | g N / g COD in biomass | 0.086 |
| 5 | 바이오매스에 함유된 물질의 질소함량<br>(Mass N / Mass COD in products from biomass) | $i_{XP}$ | g N/ g COD in endogeneous mass | 0.06 |
| 동력학적 매개변수 | | | | |
| 6 | 최대 종속영양미생물 성장률<br>(Heterotrophic max. specific growth rate) | $\hat{\mu}_H$ | day-1 | 6.0 |
| 7 | 종속영양미생물 부패율<br>(Heterotrophic decay rate) | $b_H$ | day-1 | 0.62 |
| 8 | 반포화상수<br>(Half-saturation coefficient (HSC) for heterotrophs) | $K_S$ | g COD / m3 | 20 |
| 9 | 종속영양미생물 산소 반포화상수<br>(Oxygen HSC for heterotrophs) | $K_{OH}$ | gO2 / m3 | 0.20 |
| 10 | 종속영양미생물 질소 반포화상수<br>(Nitrate HSC for denitrifying heterotrophs) | $K_{NO}$ | gNO3-N / m3 | 0.50 |
| 11 | 최대 독립영양미생물 성장률<br>(Autotrophic max. specific growth rate) | $\hat{\mu}_A$ | day-1 | 0.80 |
| 12 | 독립영양미생물 부패율<br>(Autotrophic decay rate) | $b_A$ | day-1 | 0.20 |
| 13 | 독립영양미생물을 산소 반포화상수<br>(Oxygen HSC for autotrophs) | $K_{OA}$ | g O2 / m3 | 0.4 |
| 14 | 독립영양미생물을 위한 암모니아 반포화상수<br>(Ammonia HSC for autotrophs) | $K_{NH}$ | gNH3-N / m3 | 1.0 |
| 15 | 종속영양미생물의 무산소 성장을 위한 보정인자<br>(Correction factor for anoxic growth of heterotrophs) | $\eta_g$ | Dimensionless | 0.8 |
| 16 | 암모니화율<br>(Ammonification rate) | $K_a$ | m3 / g COD•ay | 0.08 |
| 17 | 최대 가수분해율<br>(Max. specific hydrolysis rate) | $K_h$ | gslowly biodeg.COD / g cell COD.day | 3.0 |
| 18 | 천천히 분해되는 기질의 가수분해를 위한 반포화상수<br>(HSC for hydrolysis of slowly biodegradable substrate) | $K_X$ | g slowly biodeg.COD / g cell COD | 0.03 |
| 19 | 무산소 가수분해를 위한 보정인자<br>(Correction factor for anoxic hydrolysis) | $\eta_h$ | dimensionless | 0.4 |

[0034]

[0035] 본 발명의 활성슬러지모델1의 보정방법에 있어서 첫 번째 단계는 호흡률 측정법을 이용하여 하수처리장의 유입수 성상을 파악하는 것이다.

[0036] 본 발명에서 고려되어지는 호흡률 측정법은 최근 국내외적으로 공정의 설계 및 운전에 많이 활용되고 있는 활성슬러지 모델에서 구현된 생분해 특성을 반영할 수 있어 수질 성분 및 미생물의 동력학적 계수 추정에 많이 이용되고 있다.

[0037] 호흡률 측정법은 미생물의 대사활동을 산소소비량으로 측정하고 해석하는 것으로써, 호흡률은 호기조 내의 미생물의 대사활동을 직접 측정하는 상태변수이고, 미생물의 증가 및 기질 제거와 직접연관이 있으므로 활성슬러지 공정의 운전과 모델링에 유용한 기술이다. 호흡률은 유입하수 처리에 사용되는 산소소비량에 대하여 기상 또는 액상의 산소 또는 이산화탄소 농도를 측정함으로써 실시간으로 구해질 수 있다.

[0038] 호흡률 측정법은 일반적으로 슬러지에 하수를 주입한 후 미생물이 산소를 소비하는 속도인 호흡률을 측정한다. 반면에 하수에 슬러지를 식종하지 않고 하수 자체만을 폭기하여 본래 하수에 존재하는 미생물의 성장을 유도함으로써 하수의 활성 미생물 및 동력학 계수를 추정하는 방법도 있으며, 이 방법은 하수에 순응된 별도의 슬러지가 필요하지 않고 동시에 많은 정보를 추정할 수 있는 장점을 가지고 있다.

[0039] 활성슬러지 모델에서는 하수 내의 유기물을 몇 가지 요소로 나누며 미생물에 의해 분해되는 용존성 및 입자성 기질의 차이로 정의된다. 두 기질에 용존성 및 입자성으로 구분되는 물리적 특징을 항상 갖는 것은 아니므로 하수의 특징은 실험적으로 규명될 수 있다. 특히 본 발명에서 적용된 활성슬러지모델1에서는 미생물의 호흡률을 바탕으로 주입한 하수의 유기물 성상을 이분해성 유기물질(readily biodegradable substrate, $S_S$), 천천히 분해되는 입자성 물질(slowly biodegradable substrate, $X_S$), 용해 비활성 유기물질(soluble inert organic matter, $S_I$), 불활성 고형물질(particulate inert organic matter, $X_I$)로 구분한다.

[0040] 호흡률은 보통 실험 초기에 높은 값을 나타내며 이후 급격히 감소하여 지수 함수형태로 감소하는 경향을 볼 수 있다. 호흡률은 주입한 하수의 생분해도에 의한 것으로 높은 호흡률은 하수 중 쉽게 분해되는 유기물에 의한 호흡에 기인한 것이고, 낮은 호흡률은 천천히 분해되는 유기물에 의한 호흡에 의한 것이다.

[0041] 일반적으로 호흡률 측정 결과는 도 1과 같이 단위시간당 산소섭취율로 나타낸다. 초반에 급격히 산소가 소비되는 구간을 $S_S$의 분해에 따른 미생물의 호흡률로, 이후 호흡률이 0으로 떨어지기 이전까지는 구간을 천천히 생분해되는 유기물질인 $X_S$의 분해에 따른 미생물의 호흡률로 구분하였으며, 그 이후는 내생호흡에 따른 호흡률로 간주한다.

[0042] 도1을 통해 구분되어진 $S_S$와 $X_S$는 [수학식 2]와 [수학식 3]에 의해 계산된다.

*수학식 2*

[0043] $$S_S = \frac{OC_1}{1 - Y_H}$$

*수학식 3*

[0044] $$X_S = \frac{OC_2}{1 - Y_H}$$

[0045] 여기서, $OC_1$은 $S_S$의 분해에 해당하는 구간의 면적을 나타내며, $OC_2$는 $X_S$의 분해에 해당하는 구간면적을 나타내고, $Y_H$는 종속영양미생물의 생산계수 값으로써, 일반적으로 기본 값인 0.67g cell COD formed/1g COD oxidized값을 사용한다.

[0046] 미생물에 의해 분해되지 않는 유기물질은 용존성인 $S_I$와 입자성인 $X_I$로 구분된다. $S_I$는 일반적으로 폭기 후 내생호흡 상태에서의 COD를 측정함으로써 구할 수 있다. 또한 $X_I$의 측정방법에 대해서는 정형화된 것이 없으며, 일반적으로 앞에서 추정한 $S_S$, $X_S$, $S_I$의 결과에 기초하여 [수학식 4]에 의해 추정할 수 있다.

*수학식 4*

[0047] $$X_I = COD_{tot} - S_S - X_S - S_I$$

[0048] 상기에서 $COD_{tot}$는 총COD 값을 의미한다.

[0049] 일반적으로 종속영양미생물을 나타내는 $X_{BH}$, 독립영양미생물인 $X_{BA}$, 미생물 사멸로 발생되는 물질인 $X_P$는 다음의 [수학식 5], [수학식 6], [수학식 7]로 표현된다.

*수학식 5*

[0050]
$$X_{BH} = Y_H \cdot \frac{\theta_X}{\theta_H} \cdot \frac{COD^{deg}}{1 + b_H \theta_X}$$

*수학식 6*

[0051]
$$X_{BA} = Y_A \cdot \frac{\theta_X}{\theta_H} \cdot \frac{f^{aerobic} \cdot N^{nitrified}}{1 + b_A \theta_X}$$

*수학식 7*

[0052]
$$X_P = \frac{\theta_X}{\theta_H} \cdot X_I + f_p b_H X_H \theta_X$$

[0053] 여기서, $\Theta_X$는 슬러지 나이, $\Theta_H$는 수리학적 체류시간, $COD^{deg}$는 제거된 COD의 총량, $N^{nitrified}$는 제거된 질소 총량, $f^{aerobic}$은 반응조의 호기성 부분을 나타내고, $Y_H$, $b_H$, $Y_A$, $b_A$, $f_p$는 각각 종속영양미생물의 생산계수와 부패율, 독립영양미생물의 생산계수와 부패율, 입자성 분율을 나타내며, 각각 기존 문헌에서의 기본값인 0.67gCOD/gCOD, 0.62$day^{-1}$, 0.24gCOD/gCOD, 0.2$day^{-1}$, 0.08을 사용하였다(표 3. 참조).

[0054] 마지막으로 활성슬러지모델1에서의 질소 성분은 [수학식 8]과 같이 구성되며, 각각의 질소성분은 실제 측정을 통해서 구할 수 있다.

*수학식 8*

[0055]
$$N_{tot} = S_{NO} + S_{NH} + S_{ND} + X_{ND}$$

[0056] 상기와 같이 유입수 성상을 활성슬러지모델1의 13개의 구성성분으로 분석한 후, 호흡률 측정법에 기반한 방법과 EMSEL 프로토콜에 기반한 방법으로 활성슬러지모델1의 매개변수에 대하여 보정을 할 수 있다.

[0057] 본 발명의 활성슬러지모델1의 보정방법에 있어서 두 번째 단계는 호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수로 화학양론적 변수인 종속영양미생물 생산계수($Y_H$), 독립영양미생물 생산계수($Y_A$) 및 바이오매스 질소함량($i_{XB}$) 과 동력학적 변수인 종속영양미생물 부패율($b_H$), 최대 종속영양미생물 성장률( $\mu$^$_H$) 및 반포화상수($K_S$)를 보정하는 것이다.

[0058] 주요한 종속영양미생물 생산계수인 $Y_H$는 슬러지 생산과 산소 요구의 평가에 영향을 미칠 뿐만 아니라 다른 변수들의 값에도 영향을 미친다. $Y_H$는 [수학식 9]에 의해 추정할 수 있다.

수학식 9

$$Y_H = \frac{COD_{degradable} - \int_0^t r_{O,ex}(t)dt}{COD_{degradable}}$$

[0059]

[0060] 여기서, $COD_{degradable}$은 분해 가능한 COD양을 나타내고, $\int r_{o,ex}(t)dt$는 유기물 분해에 사용된 산소 소비량을 나타낸다.

[0061] 독립영양미생물 생산계수인 $Y_A$는 [수학식 10]에 의해서 추정할 수 있다.

수학식 10

$$Y_A = \frac{4.57 \cdot S_{NH}(0) - \int_0^t r_{nit}(t)dt}{S_{NH}(0)}$$

[0062]

[0063] 앞에서 구한 $S_{NH}$는 암모니아성 질소를, $\int r_{nit}(t)dt$는 질소 제거에 사용된 산소 소비량을 나타낸다. 또한 바이오매스의 질소함량을 나타내는 $i_{XB}$는 [수학식 11]에 의해 계산된다.

수학식 11

$$i_{xb} = \frac{Y_H}{4.57 - Y_A} \cdot \frac{COD_{degradable}}{\Delta \int r_{nit}(t)dt}$$

[0064]

[0065] 호흡률 측정을 통해 알 수 있는 동력학적 매개변수들은 기본적으로 호기성 상태에서의 성장과 사멸, 질산화와 관련이 있다. 먼저, 종속영양미생물의 부패 계수를 나타내는 $b_H$를 구하는 데에 있어 [수학식 12]를 가장 많이 사용하고 있다.

수학식 12

$$b_H = \frac{b'_H}{1 - Y_H \cdot (1 - f_P)}$$

[0066]

수학식 13

$$r_{O,ex} = (1 - f'_P) \cdot b'_H \cdot X_{BH}$$

[0067]

[0068] $b_H$를 구하기 위해서는 $Y_H$와 $f_P$의 화학양론 변수값과 $b'_H$값이 필요하다. $b'_H$값은 내생호흡률의 대수값의 시간함수에 대한 직선기울기를 나타내며 [수학식 13]에 의해서 구할 수 있으며, $f'_P$는 비활성 생물학적 부분을 나타내며, 일반적으로 0.2를 사용한다.

[0069] 최대 종속영양미생물의 성장률을 나타내는 $\mu_H$는 [수학식 14]를 통해 쉽게 구할 수 있다.

*수학식 14*

$$\mu_H = \frac{r_{O,ex} \cdot Y_H}{(1-Y_H) \cdot X_{BH}}$$

[0070]

[0071] 또한 반포화상수인 $K_S$는 [수학식 15]에 의해 추정되고, [수학식 15]를 $K_S$에 대하여 정리하면, [수학식 16]과 같다.

*수학식 15*

$$r_{O,ex} = (1-Y_H) \cdot \frac{\mu_H \cdot X_{BH}}{Y_H} \cdot \frac{S_S}{K_S + S_S}$$

[0072]

*수학식 16*

$$K_S = (1-Y_H) \cdot \frac{\mu_H \cdot X_{BH}}{Y_H} \cdot \frac{S_S}{r_{O,ex}} - S_S$$

[0073]

[0074] 본 발명의 활성슬러지모델1의 보정방법에 있어서 세 번째 단계에서는 상기와 같이 호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수 6개를 보정한 후, EMSEL 프로토콜을 이용하여 상기 호흡률 측정법에 의한 6개의 매개변수 이외에 주요매개변수에 대하여 보정하는 것이다.

[0075] 본 발명에서 있어서 'EMSEL 프로토콜'이란 활성슬러지모델에 있어서 실제값과 모델값의 에러를 최소화하는 새로운 모델보정방법으로 대한환경공학회 2008 추계학술연구발표회 논문집(임정진, 김민한, 유창규에 의해 발표된 '실규모 하수처리장에서의 활성슬러지모델의 매개변수 최적화 연구')에 의해 제시된 environmental management and systems engineering lab protocol을 의미하며, 도 2와 같은 과정을 통해 모델 보정작업을 수행한다.

[0076] 이를 자세히 살펴보면 (1) 모델 보정의 목표를 설정하고, 대상 공정에서의 실제 데이터 수집 및 필터링을 실시하는 단계; (2) 공정의 구조 및 제어, 운전조건 등을 정량화하여 공정을 구성하고 시뮬레이션을 실시하는 단계; (3) 민감도 분석을 통하여 주요매개변수를 선정하는 단계; (4) 선별된 주요매개변수를 바탕으로 반응표면분석법을 실시하여 실제 데이터와의 가장 근접한 값을 갖도록 에러 최소화법을 통해 최적의 주요매개변수를 도출하는 단계; 및 (5) 마지막으로 도출된 최적의 주요매개변수 보정값에 대하여 검증을 수행하는 단계로 이루어진다.

[0077] 본 발명에서 '주요매개변수'란 활성슬러지모델1의 19개의 매개변수 중에서 산소 소모와 관련이 있는 매개변수인 종속영양미생물 생산계수($Y_H$), 독립영양미생물 생산계수($Y_A$), 바이오매스 질소함량($i_{XB}$), 종속영양미생물 부패율($b_H$), 최대 종속영양미생물 성장률($\mu^_H$) 및 반포화상수($K_S$)를 제외한 13개의 매개변수 중 공정모델 결과에 미치는 영향이 큰 변수들을 의미한다. 본 발명의 실시예에서는 13개의 매개변수 중에서 유기물(COD) 및 질소(TN)제거에 미치는 영향이 큰 변수들을 주요매개변수로 보았다.

[0078] 본 발명의 EMSEL 프로토콜 (1)단계는 모델 보정의 목표를 설정하고, 대상 공정에서의 실제 데이터 수집 및 필터링을 실시하는 단계이다. 데이터 필터링은 실제 데이터의 오차나 이상치를 검증하기 위하여 3 시그마법을 사용하여 범위 외의 데이터는 삭제하는 방법을 사용할 수 있다.

[0079] 본 발명의 EMSEL 프로토콜 (2)단계는 공정의 구조 및 제어, 운전조건 등을 정량화하여 공정을 구성하고 시뮬레이션을 실시하는 단계이다. 이는 하폐수처리공정 모사 프로그램을 사용하여 각 해당 하폐수처리장의 실정에 맞게 공정을 구성할 수 있다. 본 발명의 실시예에서는 하폐수처리의 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPX-X ver. 5.0(general purposes simulator for expert, Hydrosoft) 프로그램을 사용하여 공정도를 그리고, 운전 조건을 입력하고, 활성슬러지모델1을 선택하여 DNR공정(Daewoo nutrient removal process)을 설정한 후, 시뮬레이션을 통해 하수처리장의 거동을 모사할 수 있었다.

[0080] 본 발명의 EMSEL 프로토콜 (3)단계에서는 민감도분석을 통해 주요매개변수를 선정하는데, 여기에서 민감도 분석은 활성슬러지모델의 매개변수 중에서 공정모델의 결과에 미치는 영향이 큰 매개변수를 알아내어 주요매개변수 선정을 목적으로 한다. 민감도, 즉 매개변수가 공정모델의 결과에 어느 정도의 영향을 미치는지를 알기 위해서는 시뮬레이션 프로그램을 이용하여 먼저 결과를 도출한다. 하나의 매개변수에 대한 민감도를 파악하기 위해서는 다른 매개변수들을 고정값으로 취하고 하나의 매개변수 값만 변화시켰을 때, 상기 매개변수의 변화량에 따라 공정모델의 결과 변화량을 분석하여 공정모델의 결과에 많은 영향을 미치는 변수를 주요 매개변수로 선정할 수 있다.

[0081] 상기 매개변수를 변화시키는 방법으로는 단일 매개변수의 단계 변화 방법 또는 다중 매개변수의 무작위 변화 방법을 사용할 수 있다.

[0082] 『단일 매개변수의 단계 변화 방법』은 기준 시뮬레이션에서 사용된 매개변수를 하나씩 기본값의 50 내지 150%의 범위 내에서 10%씩 단계적으로 변화시키는 방법으로서, 값을 변화시키는 매개변수 외에 다른 매개변수들은 기준 시뮬레이션에서 사용된 매개변수 값을 사용하여 고정하여 상기 값을 변화시키는 매개변수의 변화량에 따른 공정모델의 결과를 확인하는 것이다.

[0083] 또한, 『다중 매개변수의 무작위 변화 방법』은 난수발생기법을 사용하여 기준 시뮬레이션에서 사용된 매개변수 기본 값의 60 내지 140%의 범위 내에서 모든 매개변수들의 값을 무작위로 생성하는 방법이다 [Kim, J.R., Model optimization and model based supervisory local control for activated sludge process, Ph. D.thesis, Pusanuniv.2006].

[0084] 상기와 같은 매개변수의 변화 방법에 따라 측정된 변수의 민감도 함수를 분석함으로써 가장 예민한 매개변수들을 주요매개변수로 선정할 수 있다.

[0085] 상기한 바와 같이, 주요매개변수를 선정하게 되면 주요매개변수에 대하여 실제 해당 하수처리장에 적합한 매개변수 값을 추정하게 된다. 따라서 EMSEL 프로토콜 (4) 단계에서는 선별된 주요매개변수를 바탕으로 반응표면분석법을 실시하여 실제 데이터와의 가장 근접한 값을 갖도록 에러 최소화법을 통해 최적의 주요매개변수를 도출한다.

[0086] 일반적으로 반응표면분석법은 어떤 하나의 반응변수를 최적화하기 위해 독립변수 혹은 운전변수를 구하는 것이고, 최소한의 실험을 통하여 최적의 해를 찾는 데에 목적이 있다. 또한, 종속변수에 영향을 주는 여러 개의 독립변수 또는 인자가 복합적으로 작용함으로써 종속변수의 변화가 이루어지는 반응표면에 대한 통계적인 분석방법이다.

[0087] 반응표면분석법을 시행하기 위해서는 먼저 민감도 분석을 통해 선정된 주요매개변수들을 정규화할 필요가 있다.

[0088] 민감도 분석을 통해 선정된 주요매개변수들은 각각 다른 단위로써 표현되고 변화량이나 중요도 면에서 각각 다른 한계를 가질 수 있기 때문에 상기 주요매개변수들을 동일한 조건에서 비교하기 위하여 정규화시켜야한다.(예를 들어 A 매개변수의 기본값이 1000 이고, B 매개변수의 기본값이 10 이라할 때, 60% 내지 140%의 범위는 A의 경우 600 - 1400 이 되고, B의 경우 6 - 14 가 된다. 이러할 때, A 가 1 변화하는 것과 B 가 1 변화하는 것이 결코 같은 영향을 준다고 판단할 수 없기 때문에, A 와 B 의 범위를 -1 부터 1까지로 동일하게 정규화하는 것이다.)

[0089] 통계적으로, 주요매개변수 Xi는 하기 수학식 17에 의해서 xi로 정규화된다.

*수학식 17*

[0090] $$X_i = \frac{X_i - X_0}{\delta X}$$

[0091] 여기서, Xi는 i번째 주요매개변수(독립변수)의 정규화되지 않은 변수이며, 는 조사 범위에서 중심점에서의 변수값(일반적으로 평균값), δX는 표준편차이다.

[0092] 본 발명에서 반응표면분석법은 중심합성계획(central composite design, CCD)에 따른 독립변수의 수가 K인 2차 회귀모형으로 할 수 있다.

[0093] 나아가 대부분의 실제 공정에서는 동시에 여러 개의 반응변수를 최적화할 필요성이 있는바, 다중반응표면분석법을 이용할 수 있다.

[0094] 다중반응표면분석법에 접근하는 방법 중 널리 알려진 것으로 차원을 줄임으로써 여러 개의 반응변수를 하나의 척도로 변환하고 이를 최적화하는 것이다. 이러한 방법에는 호감도 함수를 이용한 방법들과 손실함수를 이용한 방법들이 있다.

[0095] 본 발명의 실시예에서는 하폐수처리공정 모사 프로그램인 GPX-X ver. 5.0(general purposes simulator for expert, Hydrosoft) 프로그램을 해당 하수처리장에 레이아웃하고, 실제 운전조건을 입력한 후 정규화된 주요매개변수를 이용하여 중심합성계획법에 의해 실험을 설계하였다. 그리고 실험 설계에 맞춰 31번의 실험을 수행하였으며(시뮬레이션), 시뮬레이션 결과를 바탕으로 MINITAB14 통계 프로그램을 이용하여 다중반응표면분석법을 실시하여 최적의 매개변수 값을 추정하였다.

[0096] 마지막으로 EMSEL 프로토콜 (5) 단계는 추정된 최적의 주요매개변수 보정값에 대하여 검증을 수행하는 단계이다. 시뮬레이션에 사용되는 모델의 매개변수의 기본값을 사용했을 때와, 보정된 매개변수(추정된 최적의 주요매개변수) 값을 사용했을 때의 유출수 농도가 실제 유출수 농도와 차이가 얼마나 나는지를 확인후, 보정 결과가 미치는 영향을 파악하도록 한다.

[0097] 본 발명은 또한

[0098] 상기의 활성슬러지모델1의 보정방법을 통해 분석된 유입수 성상 및 보정된 매개변수를 이용하여 하수에 포함된 피처리물 2개 이상의 동시 제거를 목적으로 하는 하수처리공정의 운전방법을 제공한다.

[0099] 호흡률 측정법과 EMSEL 프로토콜을 이용하여 하수의 유입수 성상 분석과 활성슬러지모델1의 매개변수 보정을 마친 후, 도 3과 같은 방법론을 바탕으로 공정 최적화를 수행할 수 있다.

[0100] 본 발명에 있어서 '피처리물'은 각종 하폐수에 포함되어 있는 물질로서, 하폐수공정을 통하여 제거될 수 있는 모든 물질을 포함하는 개념이다.

[0101] 상기 피처리물의 종류에는 유기물, 무기물, 중금속류 등과 같은 다양한 유해성 물질이 포함될 수 있으며, 보다 구체적으로는 COD, 질소, 인, 대장균, 카드뮴, 비소, 수은 등으로 이루어진 군으로부터 선택된 하나 이상일 수 있으나, 이에 제한되는 것은 아니다. 본 발명에 실시예에서는 제거되어야할 피처리물로 COD 및 질소를 선정하였다.

[0102] 공정을 운전하기 위해서는 반응조의 부피, MLSS, DO 설정치, 내부반송슬러지량, 외부반송슬러지량, 폐슬러지량 등 고려해야할 변수들이 다양하게 존재한다. 이러한 다양한 운전변수들 중 주요 운전변수를 선택하기 위해 민감도 분석을 실시한다.

[0103] 민감도 분석을 통해 주요 운전변수들을 선택하고, 선택된 주요운전변수들에 대하여 정규화한다. 정규화된 주요운전변수를 바탕으로 반응표면분석법을 실시하여 최적의 운전변수 값을 도출할 수 있으며, 이를 통해 해당 하폐수처리공장의 공정 최적화를 수행할 수 있다.

[0104] 본 발명의 실시예에서는 하폐수처리공정 모사 프로그램인 GPX-X ver. 5.0(general purposes simulator for expert, Hydrosoft) 프로그램을 해당 하수처리장에 레이아웃하고, 본원 발명인 활성슬러지모델1의 보정방법을

통하여 분석된 유입수 성상값과 보정된 활성슬러지모델1의 매개변수 값을 입력한 후 정규화된 주요운전변수를 이용하여 중심합성계획법에 의해 실험을 설계하였다. 그리고 실험 설계에 맞춰 31번의 실험을 수행하였으며(시뮬레이션), 시뮬레이션 결과를 바탕으로 MINITAB14 통계 프로그램을 이용하여 다중반응표면분석법을 실시하여 최적의 운전변수 값을 추정할 수 있었다. 이렇게 추정된 최적의 운전변수값으로 해당 하수공정을 운전(설계)하였을 때 COD 및 TN(질소)의 동시 제거 효율이 향상되는 것을 알 수 있었다.

[0105] 이하 본 발명의 내용을 실시예를 통해 구체적으로 설명하고자 하나, 본 발명의 권리범위가 이들 실시예에 의해 한정되는 것은 아니다.

[0106] <실시예>

[0107] 1. 유입수의 성상 파악

[0108] 본 실시예에서는 상기한 방법을 사용하여 경기도 Y시의 G 하수처리장을 대상으로 G 하수처리장 실정에 맞는 활성슬러지모델1의 매개변수보정 및 공정 설계 최적화를 수행하였다.

[0109] G 하수처리장은 DNR공정(Daewoo nutrient removal process)으로 운전되고 있으며, DNR공정은 표준활성슬러지법을 근간으로 하여 포기조에 혐기조와 무산소조를 추가함으로써 미생물의 생물학적 고도처리의 대표적인 공정인 $A^2O$ 공정시스템을 이용하였다. 이 시스템은 혐기조, 무산소조, 호기조, 최종 침전지로 구성되며, 질산성 질소를 제거하기 위한 내부 반송과 침전지의 슬러지에서의 외부 슬러지 반송으로 구성되어 있다(도 4. 참조). 혐기조에서는 혐기 조건에서의 인을 방출시켜 호기조의 미생물이 과잉 섭취할 수 있도록 하며, 무산소조는 호기조의 내부 반송수의 질산염을 탈질함으로써 질소를 제거한다. 유입 조건은 유량 1000$m^3$/d, TSS 185g/$m^3$, BOD5 157.1g$O_2$/$m^3$, COD 398gCOD/$m^3$, T_N 12.5gN/$m^3$, T_P 30g/$m^3$이었다. 유출 조건은 현재 유출수질 방류 기준을 따르도록 하였으며, 기본적인 운전 조건은 표 4와 같이 하였다.

[0110] <표 4.> 운전 조건

| | | |
|---|---|---|
| 슬러지 탈질조 | 부피 | 680 $m^3$ |
| 혐기조 | 부피 | 1530 $m^3$ |
| 무산소조 | 부피 | 2530 $m^3$ |
| 호기조 | 부피 | 8530 $m^3$ |
| | DO 설정치 | 2 |
| | 내부 슬러지 반송량 | 4000 $m^3$/d |
| 침전조 | 크기 | 1548 $m^2$ x 4.45 m |
| | 외부 슬러지 반송량 | 13000 $m^3$ |
| | 폐슬러지량 | 20 $m^3$/d |

[0111]

[0112] 본 실시예에서는 가장 기본적인 활성슬러지 모델인 활성슬러지모델1(ASM1)을 사용하였고, 유기물 제거, 질산화, 탈질 기작을 나타내었다.

[0113] 먼저 13개의 구성성분 중 유기물 즉, COD 성분을 정확히 파악하기 위해 호흡률 측정법을 사용하였다.

[0114] 호흡률 측정법은 일반적으로 슬러지에 유입수를 주입한 후 미생물의 산소 소비율을 측정하지만, 유입수와 슬러지의 혼합비율이 정량화된 것이 없고, 슬러지를 혼합하였을 경우, 산소 섭취 속도가 너무 빨라 유기물 성분을 추정하는데 어려움이 있어 유입수 자체만을 폭기하여 추정하였다.

[0115] 유입원수 300ml와 GF/C 여지로 여과한 유입수 300ml를 사용했을 때의 호흡률 변화는 도 1과 같이 나타났다. 유입원수의 경우, 초반에 급격히 산소가 소비되는 구간을 $S_S$의 분해에 따른 미생물의 호흡률이며, 이후 호흡률이 0으로 떨어지기 이전까지의 구간을 천천히 생분해되는 유기물질인 $X_S$의 분해에 따른 미생물의 호흡률로 분석되었으며, 그 이후는 내생호흡에 따른 호흡률로 간주하였다. 여과한 유입수를 사용한 경우, $S_S$만을 파악할 수

있으며, 유입원수를 사용했을 때와 마찬가지로 호흡률이 초반에 급격히 증가했다가 감소하는 구간을 $S_S$의 분해에 따른 미생물의 호흡률이고, 그 이후는 내생 호흡에 따른 호흡률로 분석되었다.

[0116] 그래프를 통해 $S_S$와 $X_S$는 각 구간에서의 면적인 $OC_1$과 $OC_2$를 구하고 [수학식 2], [수학식 3]을 이용해 아래와 같이 계산하였다. 그 결과 $S_S$ 는 95.27mg/l를, $X_S$는 236.56mg/l로 추정되었다.

$$S_S = \frac{OC_1}{1 - Y_H} = \frac{31.44}{1 - 0.67} = 95.27$$

[0117]

$$X_S = \frac{OC_2}{1 - Y_H} = \frac{78.06}{1 - 0.67} = 236.56$$

[0118]

[0119] 미생물에 의해 분해되지 않는 용존성 유기물질인 $S_I$는 일반적으로 폭기 후 내생호흡 상태에서의 COD를 측정함으로써 구할 수 있다. 도 1에서 알 수 있듯이, 여과한 유입수의 경우, 1시간 이후에는 내생호흡상태로 간주하였기 때문에 그때의 $S_I$를 측정한 결과 16.34mg/l 로 측정되었다.

[0120] 또한 $X_I$의 측정 방법에 대해서는 정형화된 것이 없으며, 일반적으로 앞에서 추정한 $S_S$, $X_S$, $S_I$의 결과에 기초하여 [수학식 4]에 의해 추정할 수 있다. 실제 측정한 총COD 값이 379.33mg/l였기 때문에, $X_I$는 16.12mg/l로 $S_I$와 비슷한 수치를 보였다.

$$X_I = COD_{tot} - S_S - X_S - S_I = 379.33 - 95 - 27 - 236.56 - 16.34 = 16.12$$

[0121]

[0122] 종속영양미생물을 나타내는 $X_{BH}$, 독립영양미생물인$X_{BA}$ 및 미생물 사멸로 발생되는 물질인 $X_P$는 다음의 [수학식 5],[수학식 6],[수학식 7]에 따라 계산되었다.

$$X_{BH} = Y_H \cdot \frac{\theta_X}{\theta_H} \cdot \frac{COD^{deg}}{1 + b_H \theta_X} = 0.67 \cdot \frac{6.47}{5.48} \cdot \frac{95.27}{1 + 0.62 \cdot 6.47} = 15.04$$

[0123]

$$X_{BA} = Y_H \cdot \frac{\theta_X}{\theta_H} \cdot \frac{f^{aerobic} \cdot N^{nitrified}}{1 + b_H \theta_X} = 0.24 \cdot \frac{6.47}{5.48} \cdot \frac{0.2 \cdot 27.7}{1 + 0.2 \cdot 6.47} = 0.68$$

[0124]

$$X_P = \frac{\theta_X}{\theta_H} \cdot X_I + f_P b_H X_H \theta_X = \frac{6.47}{5.48} \cdot 16.12 + (0.08 \cdot 0.62 \cdot 15.04 \cdot 5.48) = 23.12$$

[0125]

[0126] 여기서, $\Theta_X$는 슬러지 나이, $\Theta_H$는 수리학적 체류시간, $COD^{deg}$는 제거된 COD의 총량, $N^{nitrified}$는 제거된 질소 총량, $f^{aerobic}$은 반응조의 호기성 부분을 나타내고, $Y_H$, $b_H$, $Y_A$, $b_A$, $f_p$는 각각 종송영양미생물의 생산계수와 사멸계수, 독립영양미생물의 생산계수와 사멸계수, 입자성 분율을 나타내며, 각각 기존 문헌에서의 기본값인 0.67gCOD/gCOD, 0.62$day^{-1}$, 0.24gCOD/gCOD, 0.2$day^{-1}$, 0.08을 사용하였다(표 3. 참조).

[0127] 활성슬러지모델1에서의 질소 성분은 실제 측정을 통해 구하였다. 그 결과 $S_{NH}$, $S_{NO}$, $S_{ND}$, $X_{ND}$의 값은 각각 33.2 mg/l, 1.44 mg/l, 1.0 mg/l, 1.99 mg/l 로 측정되었다. 아래 표 5에서는 유입수 성상 분석 결과를 정리하였을 뿐만 아니라 기존 연구에서의 유럽의 하수 성상 결과와 비교하였다.

[0128] <표 5.> 유입수 성상 분석 결과

| 성분 | 농도 (mg/l) | G 하수처리장(%) | 유럽 기본값(%) |
|---|---|---|---|
| $S_I$ | 16.34 | 4.05 / $COD_{tot}$ | 7.87 / $COD_{tot}$ |
| $S_S$ | 95.27 | 23.63 /$COD_{tot}$ | 18.23 / $COD_{tot}$ |
| $X_I$ | 16.12 | 4.00 / $COD_{tot}$ | 13.43 / $COD_{tot}$ |
| $X_S$ | 236.56 | 58.68 /$COD_{tot}$ | 53.08 / $COD_{tot}$ |
| $X_{BH}$ | 15.04 | 3.73 / $COD_{tot}$ | 7.39 / $COD_{tot}$ |
| $X_{BA}$ | 0.68 | 0.17 / $COD_{tot}$ | 0 / $COD_{tot}$ |
| $X_P$ | 23.12 | 5.73 / $COD_{tot}$ | 0 / $COD_{tot}$ |
| $S_O$ | 0 | - | - |
| $S_{NO}$ | 1.44 | 3.83 / $N_{tot}$ | 0 / $N_{tot}$ |
| $S_{NH}$ | 33.2 | 88.23 / $N_{tot}$ | 64.28 / $N_{tot}$ |
| $S_{ND}$ | 1.0 | 2.66 / $N_{tot}$ | 14.15 / $N_{tot}$ |
| $X_{ND}$ | 1.99 | 5.29 / $N_{tot}$ | 21.57 / $N_{tot}$ |
| $S_{ALK}$ | 7.0 | - | - |

[0129]

[0130] 2. 호흡률 측정법에 기반한 활성슬러지모델1의 매개변수 보정

[0131] 호흡률 측정법을 이용하여 산소 소모와 관련이 있는 매개변수로 화학양론적 변수인 종속영양미생물 생산계수($Y_H$), 독립영양미생물 생산계수($Y_A$) 및 바이오매스 질소함량($i_{XB}$) 과 동력학적 변수인 종속영양미생물 부패율($b_H$), 최대 종속영양미생물 성장률( $\mu$^$_H$) 및 반포화상수($K_S$)를 보정하였다.

[0132] 종속영양미생물 생산계수인 $Y_H$는 [수학식 9]에 따라 계산하였다. 분해가능한 COD량을 의미하는 $COD_{degradable}$은 제거된 COD의 총량으로써, 실제 하수처리장의 유출수 농도에서 유입수 농도를 뺀 결과 160.7 값을 얻었으며, 유기물 분해에 사용되는 산소 소비량을 나타내는 $\int r_{o,ex}(t)dt$는 문헌에 나오는 값인 53.03을 대입하여 계산하였다. 그 결과 $Y_H$ 값은 0.669로 추정되었다.

$$Y_H = \frac{COD_{degradable} - \int_0^t r_{Oex}(t)dt}{COD_{degradable}} = \frac{160.7 - 53.03}{160.7} = 0.669$$

[0133]

[0134] 독립영양미생물 생산계수인 $Y_A$는 [수학식 10]에 따라 계산하였다. 암모니아성 질소인 $S_{NH}$는 33.2, 질소 제거에 사용된 산소소비량을 나타내는 $\int r_{nit}(t)dt$는 문헌에 나오는 값인 143.0을 사용하여 이를 대입하여 계산하였다. 그 결과 $Y_A$ 값은 0.263으로 추정되었다.

$$Y_A = \frac{4.57 \cdot S_{NH}(0) - \int_0^t r_{nit}(t)dt}{S_{NH(0)}} = \frac{(4.57 \cdot 33.2) - 143.0}{33.2} = 0.263$$

[0135]

[0136] 바이오매스 질소함량인 는 [수학식 11]에 따라 계산하였다.

$$i_{XB} = \frac{Y_H}{4.57 - Y_A} \cdot \frac{COD_{degradable}}{\Delta \int r_{nit}(t)dt} = \frac{0.669}{4.57 - 0.715} \cdot \frac{160.7}{143.0} = 0.195$$

[0137]

[0138] 종속영양미생물 부패율인 $b_H$는 [수학식 12]에 따라 계산하였다. 이를 구하기 위해서는 종속영양미생물 생산계수인 $Y_H$와 입자성 분율인 $f_P$ 값과 $b'_H$값이 필요하다. $b'_H$값은 내생호흡률의 대수값의 시간함수에 대한 직선기울기를 나타내며 [수학식 13]에 의해 0.083으로 계산되었다. 또한 비활성 생물학적 부분을 나타내는 $f'_P$는 일반적으로 사용하는 값인 0.2를 사용하였다.

$$1 = (1 - 0.2) \cdot b'_H \cdot 15.04$$

[0139]

$$b_H = \frac{b'_H}{1 - Y_H \cdot (1 - f_P)} = \frac{0.083}{1 - 0.669 \cdot (1 - 0.2)} = 0.179$$

[0140]

[0141] 최대 종속영양미생물 성장률인 $\mu^{\wedge}_H$는 [수학식 14]에 따라 계산하였다. 최대 산소소비량인 $r_{o,ex}$는 호흡률 측정 그래프 상에서 가장 높은 값인 73.58을 대입하여 계산한 결과, $\mu^{\wedge}_H$ 값은 9.89로 추정되었다.

$$\mu_H = \frac{r_{O,ex} \cdot Y_H}{(1 - Y_H) \cdot X_{BH}} = \frac{73.58 \cdot 0.669}{(1 - 0.669) \cdot 15.04} = 9.89$$

[0142]

[0143] 반포화상수인 $K_S$는 [수학식 16]에 의해 계산하였다. 그 결과값은 12.83으로 추정되었다.

$$K_S = (1 - Y_H) \cdot \frac{\mu_H \cdot X_{BH}}{Y_H} \cdot \frac{S_S}{r_{O,ex}} - S_S = (1 - 0.669) \cdot \frac{11.22 \cdot 15.04}{0.669} \cdot \frac{95.27}{73.58} - 95.27 = 12.83$$

[0144]

[0145] 이와 같이 호흡률 측정을 통한 6개의 매개변수 추정 결과는 표 6에 정리하였다. 일반적으로 20℃에서의 기준값을 많이 사용하고, 기존 문헌들에서 사용되는 매개변수들의 범위를 나타내었다. 본 발명에서 추정된 매개변수들의 값은 기준값과 유럽에서의 변수 값과는 일부 차이가 있지만 기존 연구에서의 범위 내에서 크게 벗어나지 않음을 알 수 있었다.

[0146] <표 6.> 호흡률 측정을 통한 매개변수 보정 결과

[0147]

| 매개변수 | 기본값(20℃) | 기존문헌에서의 범위 | 보정값 | 유럽에서의 기본값 |
|---|---|---|---|---|
| $Y_H$ | 0.67 | 0.38-0.75 | 0.669 | 0.67 |
| $Y_A$ | 0.24 | 0.07-0.28 | 0.263 | 0.24 |
| $i_{XB}$ | 0.086 | - | 0.195 | 0.08 |
| $\hat{\mu}_H$ | 6.0 | 0.6-13.2 | 9.89 | 4.0 |
| $b_H$ | 0.62 | 0.05-1.6 | 0.179 | 0.3 |
| $K_S$ | 20 | 5-225 | 12.83 | 10.0 |

[0148] 3. EMSEL프로토콜에 기반한 활성슬러지모델1의 매개변수 보정

[0149] 앞에서 언급한 바와 같이, 활성슬러지모델1에 적용되는 화학양론 및 동력학적 매개변수는 총 19개이고, 그 중 6

개의 매개변수를 호흡률 측정 결과를 바탕으로 추정(보정)하였다. 그 외 13개의 매개변수에 대하여 EMSEL프로토콜에 의해 유기물 및 질소 제거에 큰 영향을 주는 주요매개변수를 민감도 분석을 통해 4개 선정한 후, 이들에 대한 보정을 수행하였다.

[0150] (1) 데이터 수집 및 공정설계

[0151] G 하수처리장의 공정설계를 위해 DNR공정(Daewoo nutrient removal process)을 사용하였다. 또한 하폐수처리공정의 운전을 시뮬레이션하기 위하여 하폐수처리의 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPX-X ver. 5.0(general purposes simulator for expert, Hydrosoft) 프로그램을 사용하였다. 따라서 GPX-X 프로그램을 통해 G 하수처리장을 레이아웃하고, 모델은 활성슬러지모델1로 설정하였다. 공정에서의 유입 조건은 유량 1000$m^3$/d, TSS 185g/$m^3$, BOD5 157.1g$O_2$/$m^3$, COD 398gCOD/$m^3$, T_N 12.5gN/$m^3$, T_P 30g/$m^3$이며, 유출조건은 현재 유출수질 방류기준을 따르도록 하였다. 공정의 운전조건은 상기 표 4와 같이 하였다.

[0152] (2) 다중 매개변수의 무작위 변화 방법을 통한 매개변수의 민감도 분석

[0153] 활성슬러지모델1은 5개의 화학양론적 매개변수와 14개의 동력학적 매개변수에 의해 모델이 완성된다. 표 3에는 활성슬러지모델1의 매개변수 19개를 나타내었다.

[0154] 19개의 매개변수 중에서 6개의 매개변수(종속영양미생물 생산계수($Y_H$), 독립영양미생물 생산계수($Y_A$), 바이오매스 질소함량($i_{XB}$), 종속영양미생물 부패율($b_H$), 최대 종속영양미생물 성장률($\mu\hat{}_H$) 및 반포화상수($K_S$))는 상기에서 호흡률 측정법을 통해 보정하였으므로, 이 외에 13개의 매개변수 중에서 유기물 및 질소 제거에 큰 영향을 매개변수를 선정하기 위하여 민감도 분석을 시행하였다.

[0155] 표 3의 매개변수 값을 기본값으로 하고, 기본값을 100%라고 했을 때, 50% 내지 150%범위 내에서 10%씩 변화시켜가면서 시뮬레이션을 통해 매개변수의 민감도를 파악할 수 있었다. 즉 민감도가 높은 매개변수를 주요매개변수로 선정하기 위하여 모델에서 제시된 단일 매개변수의 값을 1로 할 때 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1, 1.1, 1.2, 1.3, 1.4의 배수의 형태로 단계적인 변화를 시켜 활성슬러지모델1을 범용 모사기 프로그램인 GPX-X 프로그램에 시뮬레이션 하고, 매개변수 값에 대한 평균점들의 기울기를 계산하여 매개변수의 민감도를 정량화하였다. 민감도가 작은 매개변수의 경우, 매개변수의 변화가 모델링 결과에 미치는 영향이 크지 않기 때문에 모든 수직 구간에서 기울기가 거의 평행하게 나타났고, 반면에 민감도가 큰 매개변수의 경우 매개변수의 변화가 모델링 결과에 미치는 영향이 크기 때문에 기울기가 크게 나타났다.

[0156] ΔCOD 및 ΔTN의 기울기를 민감도 지수로 사용하였다. 도 5 및 도 6 각각은 13개 매개변수 변화에 따른 COD 및 TN(질소)의 변화량을 나타낸 것이다.

[0157] 도 5를 살펴보면 종속영양미생물 산소 반포화상수인 $K_{OH}$와 최대 독립영양미생물의 성장률인 $\mu\hat{}_A$가 COD의 변화에 많은 영향을 주는 것으로 나타났고, 도 6을 살펴보면 독립영양미생물 부패율 $b_A$ 및 독립영양미생물 산소 반포화상수 $K_{OA}$가 민감한 것으로 나타났다.

[0158] 따라서 모델링 결과에 많은 영향을 미치는 주요매개변수로 최대 독립영양미생물 성장률($\mu\hat{}_A$), 독립영양미생물 부패율($b_A$), 종속영양미생물 산소 반포화상수($K_{OH}$) 및 독립영양미생물 산소 반포화상수($K_{OA}$)를 선정하였다.

[0159] (3) 다중반응표면분석을 이용한 활성슬러지모델1의 최적 매개변수의 조건 추정

[0160] 최적의 반응을 나타내는 매개변수의 조건을 알아내고자 다중반응표면분석을 실시하였으며, 중심합성법을 이용하여 실험 설계를 하였다. 민감도를 분석하여 선정된 4개의 주요매개변수에 대하여 60%, 100% 및 140%로 변화시켜 범용 동력학적 모델링 소프트웨어인 GPX-X 프로그램(general purposes simulator for expert, Hydrosoft)을 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. G 하수처리장에 적합한 활성슬러지모델1의 주요매개변수를 추정하는 것이 목적이므로, 목적변수는 모델의 유출수 값과 실제 유출수 값의 차를 나타내는 에러값으로 설정하였다.

[0161] 민감도 분석을 통해 선정된 4개의 주요매개변수들은 각각 다른 단위로써 표현되고 변화량이나 중요도 면에서 각

각 다른 한계를 가질 수 있기 때문에 주요매개변수들을 동일한 조건에서 비교하기 위하여 정규화시켰다. 그 결과 하기 표 7과 같이 3개의 레벨[-1, 0, 1]로 정규화되었다.

[0162] <표 7.> 주요매개변수의 범위 및 수준

| 주요매개변수(독립변수) | -1 | 0 | 1 |
|---|---|---|---|
| $\widehat{\mu_A}$ ($X_1$) | 0.48 | 0.8 | 1.12 |
| $b_A$($X_2$) | 0.12 | 0.2 | 0.28 |
| $K_{OH}$($X_3$) | 0.12 | 0.2 | 0.28 |
| $K_{OA}$($X_4$) | 0.24 | 0.4 | 0.56 |

[0163]

[0164] 상기와 같이 4개의 주요매개변수(독립변수)의 범위 및 수준을 지정하고, 중심합성계획법에 의해서 실험을 설계하였다. GPX-X 프로그램(general purposes simulator for expert, Hydrosoft)을 사용하여 31번 반복 실험을 거쳐 모델의 유출수 값과 실제 유출수 값의 차를 나타내는 COD와 TN(질소)의 에러값을 구하였다. 하기 표 8은 시뮬레이션 결과를 나타낸다.

[0165] <표 8.> 주요매개변수 보정을 위한 실험 설계 조건 및 실뮬레이션 결과(에러)

| 운전 | $\widehat{\mu_A}$ | $b_A$ | $K_{OH}$ | $K_{OA}$ | COD에러값 | TN에러값 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | -1.95 | 0.72 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | -1 | -3.23 | 1.42 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | -1 | -0.4 | 0.24 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | -1.18 | 0.98 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | -1 | -5.54 | -1.6 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | -1.95 | 0.72 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | -1 | -2.29 | 1.82 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | -1 | -3.35 | 0.14 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | 1 | -1.95 | 0.72 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 | -1.95 | 0.72 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 1 | -1.95 | 0.72 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 1 | -2.33 | 1.78 |
| 13 | -1 | -1 | 1 | 1 | -2.73 | 0.45 |
| 14 | 1 | -1 | 1 | 1 | -1.96 | 0.72 |
| 15 | -1 | 1 | 1 | 1 | -1.83 | -0.18 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | -1.51 | 2.07 |
| 17 | -1 | 0 | 0 | 0 | -2 | -0.34 |
| 18 | 1 | 0 | 0 | 0 | -1.38 | 0.92 |
| 19 | 0 | -1 | 0 | 0 | -2.28 | 1.84 |
| 20 | 0 | 1 | 0 | 0 | -1.88 | -0.23 |
| 21 | 0 | 0 | -1 | 0 | -1.51 | 2.07 |
| 22 | 0 | 0 | 1 | 0 | -2 | -0.34 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | -1 | -2.73 | 0.45 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 1 | -0.4 | 0.24 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1.18 | 0.98 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | -0.4 | 0.24 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2.33 | 1.78 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | -2.73 | 0.45 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1.96 | 0.72 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1.95 | 0.72 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | -1.38 | 0.92 |

[0166]

[0167] 시뮬레이션 결과를 바탕으로 MINITAB14 통계 프로그램을 이용하여 다중반응표면 최적화법을 실시하여 최적의 매개변수값을 추정하였다. 본 발명에서는 유출수의 COD 와 TN(질소) 값이 시뮬레이션 결과와 가장 근접한, 즉, error 값이 0 이 되는 것을 목적으로 하기 때문에, 호감도 함수에서의 반응변수의 목적값은 0으로 설정하였다. 그 결과 COD와 TN(질소)의 에러를 최소로 하는 최적의 매개변수 값들이 $\mu\hat{}_A$ 0.69; $b_A$ 0.15; $K_{OH}$ 0.28; $K_{OA}$ 0.30 과 같이 도출되었다.

[0168] (4) 최적의 주요매개변수값 검증

[0169] 또한, 보정된 주요매개변수값을 검증하기 위해, 도출된 최적의 매개변수값을 사용하여 다시 시뮬레이션을 수행

하였다. 표 9에서 나타낸 바와 같이 보정되기 전의 매개변수값인 기본값을 사용하였을 때의 COD 및 TN 에러값을 비교한 결과 보정된 매개변수값을 사용했을 때의 에러값이 적은 것으로 실제 공정에 더 가까이 접근했다는 것을 확인할 수 있었으며, 이를 통해 보정 과정이 성공적으로 수행되었음을 알 수 있었다.

[0170] <표 9.> 보정된 주요매개변수값의 검증 결과

[0171]

| | 기본값을 사용한 경우 | 보정된값을 사용한 경우 |
|---|---|---|
| COD 에러값 | 0.213 | -0.096 |
| TN 에러값 | 0.427 | 0.351 |

[0172] 4. 하수에 포함된 2가지 이상의 피처리물을 동시 최대 제거율을 얻는 운전조건 결정

[0173] 지금까지 G 하수처리장에 적합한 유입수 성상 분석과, 활성슬러지모델1의 보정을 통한 화학양론 및 동력학적 매개변수 추정(보정)을 수행하였다. 유입수 성상과 보정된 활성스러지모델1의 매개변수에 바탕을 두고 COD와 TN(질소)의 동시 제거를 위한 공정 최적화를 수행하였다.

[0174] GPX-X 프로그램(general purposes simulator for expert, Hydrosoft)을 이용하여 G 하수처리장에 대한 레이아웃을 완성하고, 이전 단계에서 수행한 유입수 성상 분석 결과와 보정된 활성슬러지모델1의 매개변수 값들을 입력 후에 시뮬레이션을 실시하였다.

[0175] G 하수처리장의 주요 운전변수로써 호기조의 DO 설정치, 슬러지 내부 반송량, 슬러지 반송량, 폐슬러지량을 민감도 분석을 통해 선정한 후 공정 최적화를 수행하였다. 공정 최적화 과정은 동시에 제거될 피처리물로 COD 및 TN(질소)를 선정하였다. 따라서 COD 및 TN(질소)의 제거 효율을 최대로 높이는 것이 공정 최적화의 목적이기 때문에, 목적 변수로는 COD와 TN(질소)의 제거 효율로 설정하였고, 목적값은 최대값 형태로 하였다.

[0176] 민감도 분석을 통해 선정된 4개의 주요운전변수들은 각각 다른 단위로써 표현되고 변화량이나 중요도 면에서 각각 다른 한계를 가질 수 있기 때문에 주요운전변수들을 동일한 조건에서 비교하기 위하여 정규화시켰다. 그 결과 하기 표 10과 같이 3개의 레벨[-1, 0, 1]로 정규화되었다.

[0177] <표 10.> 주요 운전변수의 범위 및 수준

[0178]

| 주요운전변수(독립변수) | -1 | 0 | 1 |
|---|---|---|---|
| DO 설정치($X_1$) | 1.2 | 2.0 | 2.8 |
| 슬러지 내부 반송량($X_2$) | 19440 | 32440 | 45360 |
| 슬러지 외부 반송량($X_3$) | 7800 | 13000 | 18200 |
| 폐슬러지량($X_4$) | 240 | 400 | 560 |

[0179] 상기와 같이 4개의 주요 운전변수(독립변수)의 범위 및 수준을 지정하고, 중심합성계획법에 의해서 실험을 설계하였다. GPX-X 프로그램(general purposes simulator for expert, Hydrosoft)을 사용하여 31번 반복 실험을 거쳐 COD와 TN(질소)의 동시 제거의 최대값을 구하였다. 하기 표 11은 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

[0180] <표 11.> 공정 최적화를 위한 실험 설계 조건 및 시뮬레이션 결과(최대값)

| 운전 | X1 | X2 | X3 | X4 | COD 제거율 (%) | TN 제거율 (%) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -1 | -1 | -1 | -1 | 82.3 | 89.3 |
| 2 | 1 | -1 | -1 | -1 | 81.7 | 89.9 |
| 3 | -1 | 1 | -1 | -1 | 83.8 | 91.0 |
| 4 | 1 | 1 | -1 | -1 | 84.9 | 90.8 |
| 5 | -1 | -1 | 1 | -1 | 80.4 | 89.8 |
| 6 | 1 | -1 | 1 | -1 | 79.8 | 89.6 |
| 7 | -1 | 1 | 1 | -1 | 79.9 | 90.1 |
| 8 | 1 | 1 | 1 | -1 | 81.3 | 91.2 |
| 9 | -1 | -1 | -1 | 1 | 82.2 | 90.2 |
| 10 | 1 | -1 | -1 | 1 | 81.6 | 88.1 |
| 11 | -1 | 1 | -1 | 1 | 83.3 | 89.8 |
| 12 | 1 | 1 | -1 | 1 | 81.7 | 88.7 |
| 13 | -1 | -1 | 1 | 1 | 85.1 | 91.2 |
| 14 | 1 | -1 | 1 | 1 | 81.9 | 88.6 |
| 15 | -1 | 1 | 1 | 1 | 82.5 | 88.1 |
| 16 | 1 | 1 | 1 | 1 | 82.2 | 88.3 |
| 17 | -1 | 0 | 0 | 0 | 84.4 | 89.3 |
| 18 | 1 | 0 | 0 | 0 | 83.3 | 90.0 |
| 19 | 0 | -1 | 0 | 0 | 79.8 | 90.8 |
| 20 | 0 | 1 | 0 | 0 | 81.0 | 89.5 |
| 21 | 0 | 0 | -1 | 0 | 80.9 | 90.8 |
| 22 | 0 | 0 | 1 | 0 | 83.8 | 89.7 |
| 23 | 0 | 0 | 0 | -1 | 79.9 | 88.9 |
| 24 | 0 | 0 | 0 | 1 | 82.6 | 89.6 |
| 25 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81.8 | 89.9 |
| 26 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81.8 | 89.3 |
| 27 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81.3 | 89.6 |
| 28 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82.0 | 89.4 |
| 29 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81.6 | 90.3 |
| 30 | 0 | 0 | 0 | 0 | 81.9 | 90.2 |
| 31 | 0 | 0 | 0 | 0 | 82.1 | 89.5 |

[0181]

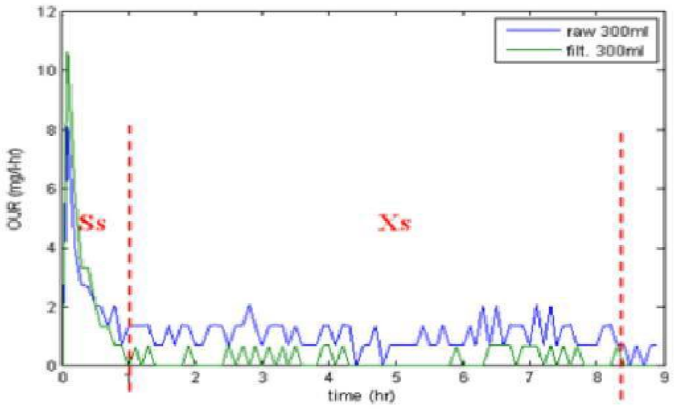
[0182] 시뮬레이션 결과를 바탕으로 MINITAB14 통계 프로그램을 이용하여 다중반응표면 최적화법을 실시하여 COD와 TN (질소)의 동시 제거에 최대값을 보이는 최적의 운전조건을 추정하였다. 그 결과 DO 설정치 1.3 , 슬러지 내부 반송량 41,520 g/$m^3$, 슬러지 외부 반송량 15,87 g/$m^3$, 폐슬러지량 355 g/$m^3$일 때의 COD 제거율이 85.4 %, 질소 제거율이 91.4 %인 것으로 나타났다. 이것으로 실제 공정에서의 82.0 %와 89.2 %의 제거율보다 성능이 향상된 것을 알 수 있었다.

## *부호의 설명*

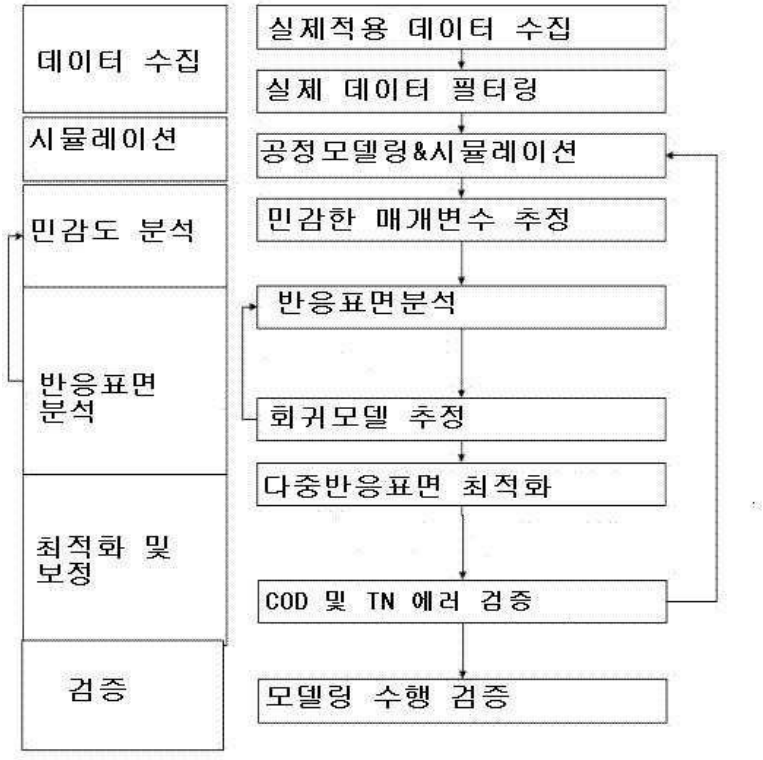
[0183] 없음

## 도면

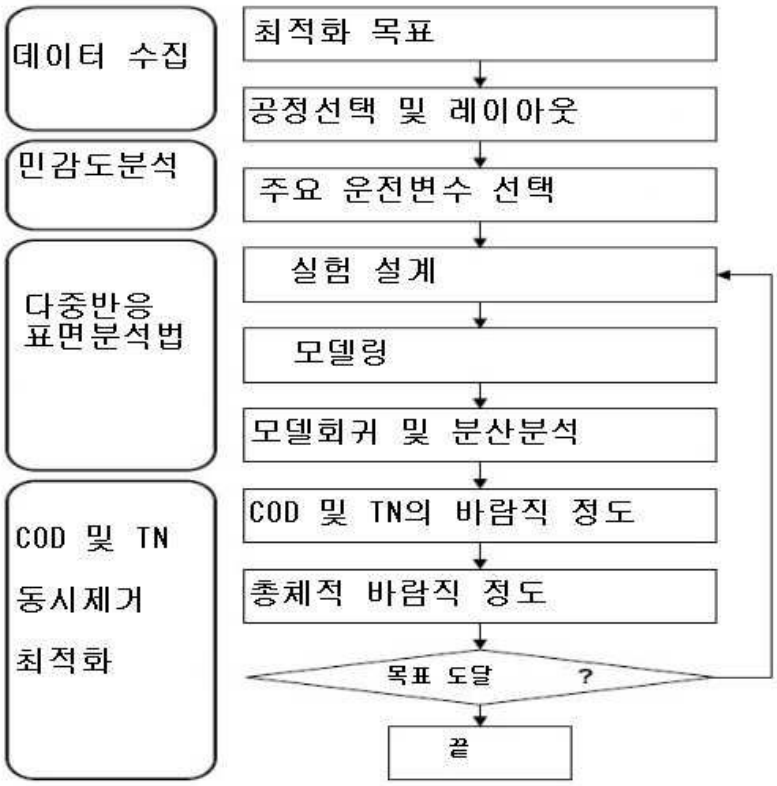
### 도면1


raw 300ml
filt. 300ml
OUR (mg/l/hr)
Ss
Xs
time (hr)

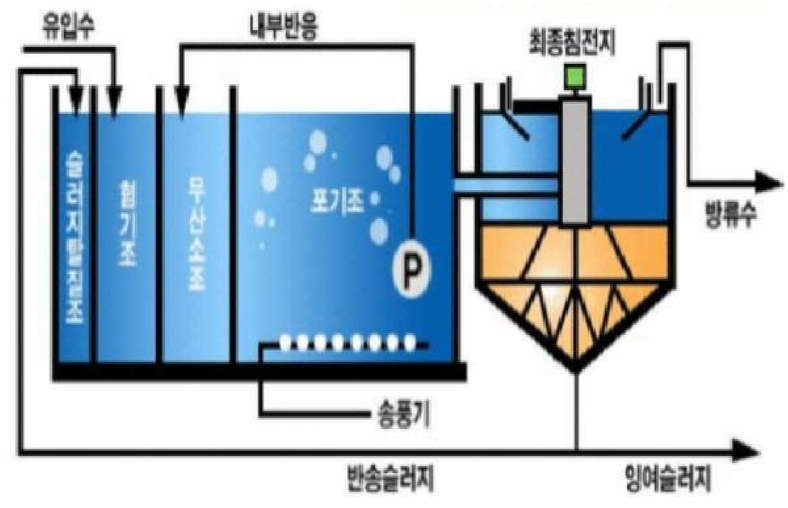
### 도면2


데이터 수집
시뮬레이션
민감도 분석
반응표면 분석
최적화 및 보정
검증
실제적용 데이터 수집
실제 데이터 필터링
공정모델링&시뮬레이션
민감한 매개변수 추정
반응표면분석
회귀모델 추정
다중반응표면 최적화
COD 및 TN 에러 검증
모델링 수행 검증

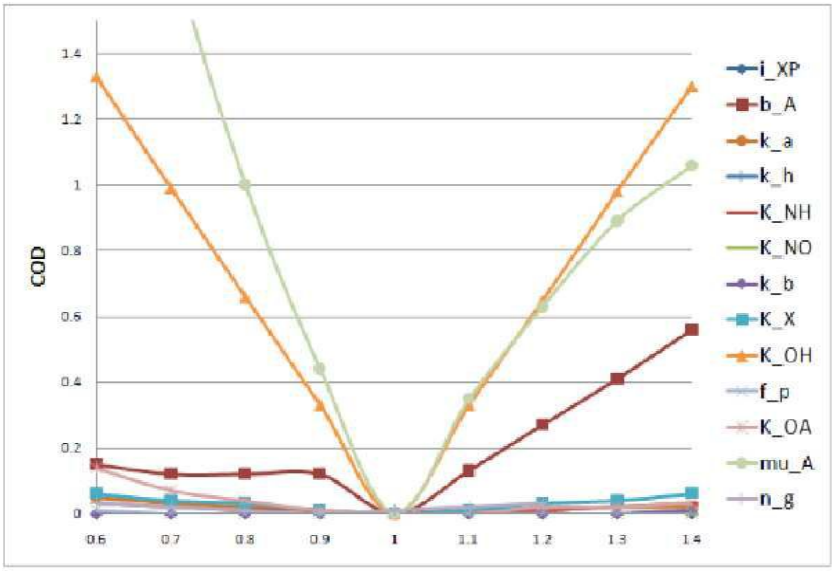
도면3


데이터 수집
민감도분석
다중반응 표면분석법
COD 및 TN 동시제거 최적화
최적화 목표
공정선택 및 레이아웃
주요 운전변수 선택
실험 설계
모델링
모델회귀 및 분산분석
COD 및 TN의 바람직 정도
총체적 바람직 정도
목표 도달 ?
끝

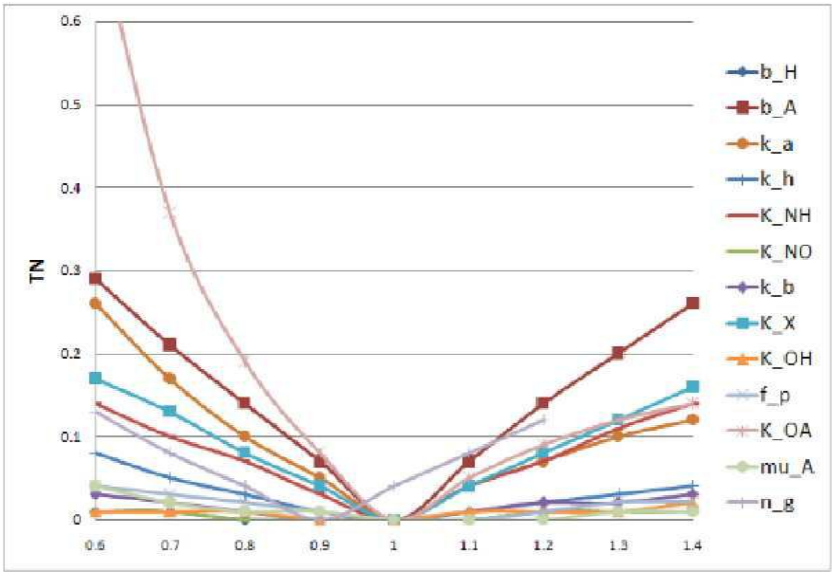
도면4


유입수
내부반응
최종침전지
혐기조
무산소조
포기조
P
방류수
송풍기
반송슬러지
잉여슬러지

도면5


COD
1.4
1.2
1
0.8
0.6
0.4
0.2
0
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
i_XP
b_A
k_a
k_h
K_NH
K_NO
k_b
K_X
K_OH
f_p
K_OA
mu_A
n_g

도면6


TN
0.6
0.5
0.4
0.3
0.2
0.1
0
0.6
0.7
0.8
0.9
1
1.1
1.2
1.3
1.4
b_H
b_A
k_a
k_h
K_NH
K_NO
k_b
K_X
K_OH
f_p
K_OA
mu_A
n_g