

# EBPR 공정내 저장 미생물을 이용한 유입수 분율 분석능 평가

## Evaluation of the COD Fractionation Capability Using Storage Microorganism from EBPR Process

김연권\* · 서인석\*\* · 김홍석\*\*\* · 김지연\*\*\*\*

Kim, Youn-Kwon · Seo, In-Seok · Kim, Hong-Suck · Kim, Ji-Yeon

### Abstract

In conventional activated sludge process, COD fractions in wastewater are important parameters, significantly. Depending on characteristics of influent COD fractionation, activated sludge process requires a major change of a process operation to ensure meeting a stricter standards. In order to validate and evaluate the accuracy of the traditional COD fractionation methodologies, readily and slowly biodegradable COD was mixed using glucose and peptone as a sole carbon source in a synthetic wastewater, respectively. In this research, prediction of the COD fraction was made using the OUR(Oxygen Utilization Rate) and the NUR(Nitrate Utilization Rate) experiments. The result showed that COD fractions calculated by OUR experiment were similar to the composition of synthetic wastewater. On the other hand, it was found that an error was generated during the NUR experiment. This error was due to the intracellular storage period for storage microorganisms such as PAOs, and the error in COD fraction was observed about 8-14 % in terms of Total COD.

**Keywords** : COD fractionation, OUR(Oxygen Utilization Rate), NUR(Nitrate Utilization Rate), Storage microorganisms

### 요 지

일반 활성슬러지 공정에서 유입수의 COD 분율은 매우 중요한 인자이다. 강화된 수질기준의 준수를 위해서는 유입수내 COD 분율화에 기초한 활성슬러지 공정의 주요 운영조건 변화가 요구된다. 본 연구에서는 이분해성 COD와 천천히 분해되는 COD의 대표 구성물질로써 글루코스와 펩톤을 이용하여 기지농도의 합성폐수를 조제하였으며, 산소이용율(OUR)과 질산성질소 이용율(NUR)을 이용하여 기지의 농도로 제조된 합성폐수에 대해 기존 COD 분율화 방법활용시 결과예측의 정확성 검증과 평가에 관한 실험을 수행하였다. OUR 실험의 경우, 기지의 농도로 제조된 합성폐수와 일치되는 결과를 얻을 수 있었으나 NUR 실험의 경우, 유입수 분율화에 오차가 발생하는 것으로 나타났다. 이와 같은 오차는 인축적 미생물(PAOs)와 같은 저장 미생물의 내부저장기작에 의한 결과로써 유입수 분율화에 최대 8-14 %의 오차를 유발하는 것으로 나타났다.

**주요어** : COD 분율화, 산소이용율(OUR), 질산성질소 이용율(NUR), 저장 미생물

\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

\*\* 비회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원

\*\*\* 비회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원

\*\*\*\* 비회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 연구원

## 1. 서론

일반 활성슬러지(Conventional Activated Sludge: CAS) 공정에서 외부기질을 이용한 미생물의 성장과 호흡은 전적으로 유입폐수의 분율 특성에 지배를 받는 것으로 알려져 있다. 이와 같은 개념에 기초하여 미생물의 호흡을 변화를 이용한 대상 유입폐수의 분율 특성 및 정상분석에 대해 많은 연구가 이루어져 왔다(Ekama et al., 1986; Gujer, 1991; 김, 2001; Kim, 2003). 기존의 유입수 분율화 특성분석에 대한 연구들은 유입수내 물질수지를 기질과 미생물군, 그리고 전자수용체 사이의 전자평형개념에 기초한 화학적 산소요구량(COD)으로 정량화함으로써 가능해졌다. 이후 미생물의 증식모델과 연계한 전통적 유입수 분율화 방법으로 활용되어 왔으며 최근에는 컴퓨터 모델링과 연계한 프로세스 디자인 및 공정진단의 방법으로 활용되고 있다. 유입수 분율화의 핵심이 되는 미생물의 호흡을 측정법은 전자수용체의 종류와 대상 폐수의 특성에 따라 달라지게 되는데, 특히 호흡을 변화의 경우 해당 폐수에 대한 미생물의 기질 친화도와 분해속도의 차이에서 기인하게 된다.

최근 기존의 일반 활성슬러지 공정은 유입수내 질소, 인 제거를 위해 고도처리공정으로 전환되고 있는 추세이며, 고도처리 공정에 순응된 미생물은 외부기질을 이용한 내부저장물질의 생성과 재이용 기작을 갖게 된다. 미생물내 내부저장물질에 관한 연구는 Wenzel(1986) 등에 의해 EBPR (Enhanced Biological Phosphorus Removal) 공정에서의 인제거와 관련한 연구와 함께 많은 발전을 이뤄왔다. 그러나 기질저장이 미생물내 기작에서 어떠한 역할을 하는지에 대한 충분한 이해와 결론은 얻고있지 못하고 있다. Daigger와 Grady(1982)에 의하면 외부기질의 농도가 갑작스럽게 증·감하는 조건에서 기질저장현상이 더 크게 나타난다고 밝히고 있으며, 이와 같은 저장현상의 발현은 전통적 개념에서의 외부기질 이용과 호흡, 미생물 증식간의 정량적 해석을 더욱 복잡하게 만들게 되었다(Kim, 2003). 결국, 미생물의 저장현상은 그 정도에 따라 전통적 방법을 이용한 유입수 분율화에 오차를 유발할 수 있는 중요 영향인자가 될 수 있다.

본 연구에서는 저장능력을 갖춘 고도처리 공정의 미생물을 이용하여 유입수 분율화를 실시할 경우 미생물의 기질 저장현상이 전자수용체와 환경변화에 따라 유입수 분율화에 미치는 정량적 오차의 정도와 영향을 파악하고자 하였다. 본 연구결과는 고도처리공정의 미생물을 이용한 NUR 실험시에 발생하는 유입수 분율화의 오차를 보정하고 나

가 NUR을 이용한 유입수 분율화 결과의 Simulation 적용시 정확한 예측 값을 얻는데 기여할 것으로 기대한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험조건 및 방법

본 실험에 사용된 EBPR 반응기는 A2O 공법의 변형된 형태로서 유입부 전단에 위치한 반송슬러지 라인에 별도의 탈질조를 두어 반송슬러지내 잔존하는  $\text{NO}_3\text{-N}$ 에 의한 혐기조에서의 인방출 저하를 방지토록 설계되어 있다. 실험에 사용된 미생물은 일반 활성슬러지 공정에서 채취하여 별도의 EBPR 반응기로 옮겨진 후 Glucose와 Peptone으로 조제된 합성폐수(표 1 참조)를 기질로 사용하여 6개월 이상 순응시킨 실험실 규모의 EBPR 반응기내 미생물을 실험에 사용하였다. 실험에 사용된 EBPR 반응기는 변형된 A2O 공법으로 기존 A2O 공법에 인방출을 극대화하기 위한 전탈질조가 부착되어 있다. 운전기간 동안 EBPR 반응기내 MLVSS(Mixed Liquor Volatile Suspended Solid)의 농도는  $2,800 \pm 100 \text{ mg/L}$ 가 유지되도록 하였다. 전자 수용체에 따른 미생물의 호흡을 변화를 측정하기 위해 OUR(Oxygen Utilization Rate) 실험과 NUR(Nitrate Utilization Rate) 실험을 각각 호기조건과 무산소 조건하에서 실시하였다. OUR 실험의 경우, 그림 1에서 보는바와 같이 시료내 용존산소의 변화를 모니터링하기 위해 컴퓨터와 연결된 DO chamber에서 DO 변화를 측정하였다. NUR 실험을 위해 그림 2에서와 같이, 별도의 무산소 조건을 만든 후 head-space에 의한 영향을 줄이기 위해 질소가스를 충전한 Chamber를 이용하여 시료내  $\text{NO}_3$ 의 변화를 측정하였다. 모든 분석은 Standard Methods(1995)에 준하여 실시하였다.

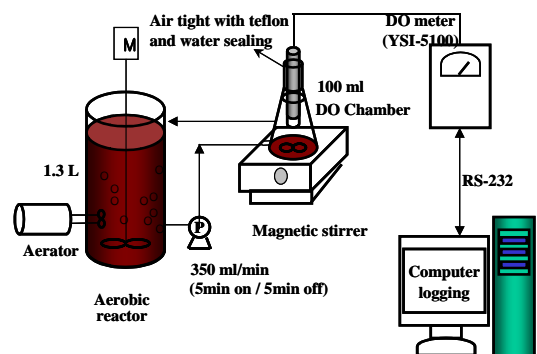


그림 1. Schematic diagram of OUR monitoring system

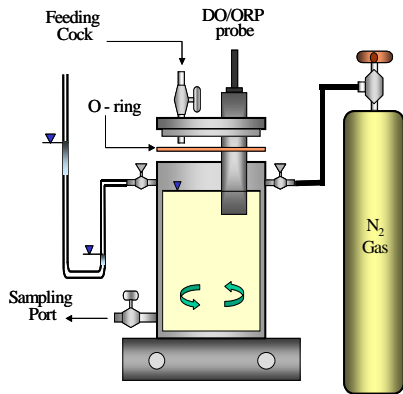


그림 2. Schematic diagram of NUR Batch

표 1. Composition of the synthetic wastewater

| Components                                      | Concentration (mg/4L) | Parameters  |
|---|-----------------------|---|
| Bacto-pepton                                    | 29.4                  | COD : 320±10 mg/L<br>TN : 30 mg/L<br>TP : 7 mg/L<br>SS : 0 mg/L<br>pH : 7.1 ± 0.1 |
| Glucose   | 25.7                  |   |
| MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O            | 10.0                  |   |
| MnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O            | 1.0                   |   |
| FeSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O            | 0.1                   |   |
| KCl   | 1.4                   |   |
| (NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> | 19.7                  |   |
| K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>                 | 7.9                   |   |
| NaHCO <sub>3</sub>                              | 120                   |   |
| CaCl <sub>2</sub>                               | 0.75                  |   |

EBPR 공정에서 채취한 미생물은 잔존 유기물질의 영향을 배제하기 위해 24시간 동안 포기과 3회 이상의 세척과정을 거친 후 실험에 사용되었다. OUR과 NUR 실험에 사용된 합성폐수는 RBCOD(Readily Biodegradable COD; S<sub>s</sub>)와 SBCOD(Slowly Biodegradable COD; X<sub>s</sub>)로 각각 glucose와 peptone을 사용하여 조제하였으며, Endogenous 상태를 모니터링하기 위해 Reference test를 실시하였다. 실험에 사용된 각 Mode별 RBCOD와 SBCOD의 COD 농도분율은 표 2와 같다.

표 2. COD composition of the synthetic wastewater

Unit : COD Concentration(%)

| Substrate             | Mode 1 | Mode 2 |
|-----------------------|--------|--------|
| Reference Test(Blank) | 0      | 0      |
| Glucose               | 90     | 10     |
| Peptone               | 10     | 90     |

OUR 실험의 경우, 반응조내 기질부족과 급속한 산소소모를 방지하기 위해 F/M 비를 0.5가 되도록 유지하였으며, 총 2 L에 15 mL의 미생물을 주입하여 실험하였다. 각각의 시료에는 질산화를 방지하기 위해 반응 억제제로 ATU (1-Allyl-2-thiourea, Aldrich Chemical Company, Inc.)를 사용하여 반응조내 20 mg/L가 유지되도록 하였다.

## 2.2 유입수 분율화(COD fractionation)

유입수 분율화란 미생물과 기질간의 친화도와 분해속도의 차를 이용하여 유입수내 RBCOD와 SBCOD를 구분하는 방법으로서, Wentzel(1995)의 경우 RBCOD와 SBCOD에 의한 중속영양미생물의 성장은 독립적이란 가정을 사용하여 유입수 분율화를 개념화하였다. 외부기질의 주입으로 인한 일반적인 OUR 변화추이는 그림 3에서 보는 바와 같이 실험초반 RBCOD 사용으로 인한 높은 OUR 구간(Phase I)과 RBCOD 고갈 이후 SBCOD의 사용으로 인한 낮은 OUR 구간(Phase II), 그리고 미생물의 내생 호흡에 의한 OUR 구간(Phase III)로 나눌 수 있다(김, 2001).

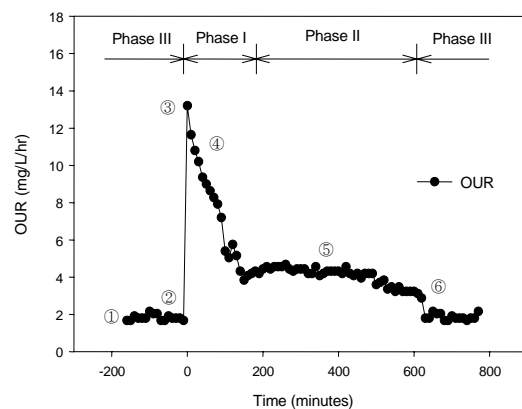


그림 3. Characteristics of a typical OUR in batch experiment

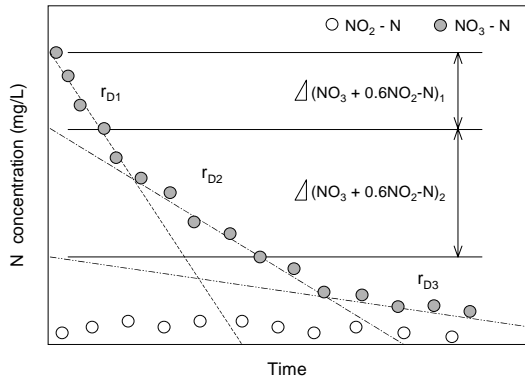


그림 4. Characteristics of a typical NUR in batch experiment

무산소 조건에서의 NUR 실험결과 역시 그림 4에서 보는 바와 같이 세 개의 각기 다른 기울기를 갖는 구간으로 나타나게 된다. 실험초반에 나타나는 급격한 기울기의 구간은 RBCOD를 기질로 이용하는 구간으로서 이때의 탈질율을  $r_{D1}$ 으로 표시하고 이 후 기울기가 상이한 두 개의 구간인 SBCOD와 내생호흡(Endogenous Respiration)상태의 기울기 구간이 나타나며 각각  $r_{D2}$ 와  $r_{D3}$ 로 표시하게 된다. 이와 같이 나타난 구간별 기울기, 즉 전자수용체의 농도변화를 통해 무산소 조건에서의 유입수 분율화를 실시하게 된다.

호기 및 무산소 조건에서의 호흡을 측정을 통한 유입수의 분율화를 위해서는 미생물의 성장과 기질소모(산소소모)와의 증식모델을 단순화시킬 필요가 있다. 이에 본 연구에서는 IWA에서 제안한 전통적 미생물 증식모델과 동력학적 계수 값을 이용하여 결과를 해석하였으며 증식모델을 단순화하기 위해 아래와 같은 가정을 사용하였다.

- ① 미생물 증식으로 인한 2차 생성물(product) 무시
- ② 생흡착과 물리적 흡착에 의한 기질제거 현상 무시
- ③ 미생물의 동력학적 계수 값은 겉보기 값을 적용

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 OUR을 이용한 유입수 분율화 결과

이상의 가정과 식 (1), (2)를 이용하여 기질로 사용한 합성폐수에 대해 COD fractionation을 실시하였다. IWA에서 제안하는 Activated sludge model 2에서는  $Y_H$ 의 값으로 0.63을 제안하고 있으나 본 연구에서는 해당 미생물을 이용한 실측값인 0.55-0.59를 사용하여 유입수

내 RBCOD와 SBCOD에 대한 분율을 계산하였다.

$$S_s = \frac{1}{1 - Y_H} \int_0^{t_{S_s}} OUR_{S_s} dt \quad (\text{mg COD/L}) \quad (1)$$

$$X_s = \frac{1}{1 - Y_H} \int_{t_{S_s}}^{t_i} OUR_{X_s} dt \quad (\text{mg COD/L}) \quad (2)$$

여기서,  $Y_H$  : 호기성 미생물 증식계수(mg COD/mg COD)

$S_s$  : Readily Biodegradable COD (RBCOD mg/L)

$X_s$  : Slowly Biodegradable COD (SBCOD mg/L)

OUR을 이용한 유입수 분율화 결과, Mode 1과 Mode 2 모두 조제된 합성폐수의 COD 농도 분율과 유사한 결과를 얻을 수 있었다(표 3 참조). 이는 저장 미생물을 이용한 호기성 조건에서의 유입수 분율화 방법 적용시 저장현상으로 인한 결과해석의 오차 유발 가능성이 낮음을 보여주는 결과로 사료된다. 다만, 정확한 의미에서의 유입수 분율특성을 위해서는 Gujer(1991)와 Kim(2003) 등 최근 많은 연구자들에 의해 보고되고 있는 호기성 조건에서의 미생물 동력학적 계수 값의 변화와 기질저장능력에 대한 영향평가 연구가 뒤따라야 할 것으로 판단된다.

표 3. COD fraction calculation by OUR

Unit : COD Concentration (%)

| Items | Mode 1 | Mode 2 |
|-------|--------|--------|
| $S_s$ | 89     | 14     |
| $X_s$ | 11     | 86     |

#### 3.2 NUR을 이용한 유입수 분율화 결과

본 연구에서는 Kujawa(1999)의 실험에 기초하여 각 구간에서의 탈질속도와 식 (3)을 이용한 비탈질 계수 및 식 (4), (5)를 이용하여 Mode별 합성폐수의 유입수 분율화를 실시하였다.

$$k_D = \frac{v_D}{X_v} (\text{mg} - \text{N/g MLVSS/hr}) \quad (3)$$

여기서,  $r_D$  : 각 구간별 기질 이용율(mg COD/L·hr)  
 $X_V$  : Volatile biomass fraction의 농도  
 (g MLVSS/L)

이때 사용한 MLVSS의 농도는 900±10 mg/L이었으며, 식 (3)에 의한 비탈질계수( $k_D$ )는 Mode 1의 경우 RBCOD와 SBCOD 구간에 대해  $k_D S_s$ 와  $k_D X_s$ 는 각각 3.68, 0.46으로 나타났다. Mode 2에서는 Mode 1과 달리 RBCOD 사용에 의한 기질기 구간( $r_{D1}$ )이 나타나지 않고 SBCOD 사용구간만이 나타났으며, 이때의  $k_D X_s$ 는 1.62였다. 이와는 별도로 내생탈질실험의  $k_{D,endo}$ 는 0.26이었다.

$$S_s = \frac{2.86(NO_3 - N)_1 - 1.72(NO_2 - N)_1}{(1 - Y_{HD})} \times \frac{1}{f_{ww}} \quad (4)$$

$$X_s = \frac{2.86(NO_3 - N)_2 - 1.72(NO_2 - N)_2}{(1 - Y_{HD})} \times \frac{1}{f_{ww}} \quad (5)$$

여기서,  $Y_{HD}$  : 무산소상태에서의 미생물 증식계수  
 (mg COD/mg COD)  
 2.86 : 산화/환원작용에서 NO<sub>3</sub>-N의 Oxygen equivalent(mg COD/mg NO<sub>3</sub>-N)  
 $f_{ww}$  : Activated sludge mixed liquor의 총 부피에서 wastewater부피의 분율

본 연구에서는  $Y_{HD}$  값으로 해당 미생물을 이용한 실험값인 0.35-0.4를 사용하였으며, 식 (4), (5)에 대입하여 NUR에 의한 유입수 분율화를 실시하였다(표 4 참조).

표 4. COD fraction calculation by NUR  
 Unit : COD Concentration (%)

| Items       | Mode 1 | Mode 2 |
|-------------|--------|--------|
| $S_s$       | 81     | -      |
| $X_s$       | 5      | 86     |
| Unknown COD | 14     | 14     |

NUR 실험결과 Mode 1과 Mode 2에서 공통적으로 실험초기 약 20분 동안 탈질반응이 일어나지 않는 것이 관찰되었으며 이와 같은 상황에서도 외부주입 기질의 농도가

감소되는 현상이 나타났다. 이는 호흡에 의한 기질소모 없이 수용액상의 외부기질을 소모하는 별도 기질이 존재한다는 증거이며 무산소 조건에서의 저장현상으로 추정 가능성이 있다. 표 4에서 볼 수 있듯이, 총 주입 COD의 약 8-14 % 정도가 NUR 실험방법에 의한 유입수 분율화로 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 특히, RBCOD의 분율이 낮은 Mode 2의 경우 실험 초반에 나타나는 급속한 기질기 구간이 전혀 나타나지 않았는데, 이는 초기 기질주입 후 탈질반응 초기단계에서 기질저장능력을 지닌 미생물에 의해 RBCOD 성분이 세포내부로 저장하였기 때문으로 사료되었다. 이와 같은 무산소 조건에서의 저장현상은 Dionisi (2001)에 의해 수행된 연구결과에서도 확인된 바 있으며 이때 주입된 COD가 탈질반응에만 관여하는 것이 아니라 저장 미생물에 의한 세포 내 합성물질로 전환되는 것으로 보고된 바 있다. 또한, 박(2002)의 연구결과에서도 NUR 실험초기에 발생하는 기질 저장현상으로 주입 COD 중 RBCOD의 약 10 % 정도가 유입수 분율화에 나타나지 않는 것으로 보고되었다.

### 3.3 Simulation에 의한 COD fractionation 오차 영향

유입수내 RBCOD의 존재량에 따른 인 제거공정의 인 제거 효율 평가와 유입수 분율화의 오차로 인한 영향정도를 추정하기 위해 ASM 2 모델을 기초로 제작된 PASS2 (Periodic Activated Sludge Simulator 2)를 이용하여 A2O 공정에 대한 모사를 실시하였다. 유입수 분율변화에 따른 혐기조에서의 인 거동에 대한 모사를 위해 인자 값으로는 ASM 2에서 제안하는 계수 값을 사용하였으며(Henze, 2000), 유입수의 TCOD는 100 mg/L으로 고정하였고, 이때의 각 Mode 별 유입수 COD 농도 분율은 표 5와 같다. 이 외에 유입수내 영양염류의 농도는 NH<sub>4</sub>-N과 PO<sub>4</sub>-P에 대해 각각 16 mg/L과 2 mg/L로 맞추었다.

표 5. COD composition of PASS2 simulation  
 Unit : COD Concentration (%)

| Substrate | Items | Mode |    |    |    |
|-----------|-------|------|----|----|----|
|           |       | A    | B  | C  | D  |
| RBCOD     | SA    | 20   | 20 | 20 | 10 |
|           | SF    | 70   | 40 | 10 | 0  |
| SBCOD     | XS    | 10   | 40 | 70 | 90 |

주) SA : Fermentation products as acetate  
 SF : Fermentable products

200일 동안 운전되어 안정화된 A2O 공정에서의 혐기조 내 인 거동특성 모사결과는 표 6과 같다. RBCOD가 충분히 공급되는 Mode A와 Mode B의 경우, 혐기조에서의 인 방출현상이 원활히 일어나는 것을 확인할 수 있었으나 상대적으로 RBCOD 성분이 부족한 Mode C와 Mode D의 경우, 혐기조에서의 인 방출현상과 방류수내 인 제거능력이 현저히 저하됨을 확인할 수 있었다. 이와 같이 유입수내 RBCOD원의 존재 여부와 그 양에 따라 인 제거공정의 안정적인 운전가능 여부가 결정됨을 알 수 있으며, 이는 공정개량(Process retrofitting) 또는 공정개선(Process renovation)시 대상 지역의 유입수에 대한 분율화 특성분석 결과에 따라 적용대상 공법이 선정되어야만 함을 의미한다. 특히, 국내의 유입수 특성과 같이 유입 COD가 상대적으로 낮은 경우에서의 RBCOD에 대한 정량적 평가는 매우 중요한 인자로 정확한 정량화를 위한 개념적 이해와 적절한 방법의 선택은 매우 중요하다 할 수 있다.

표 6. Result of PASS2 simulation  
Unit : PO4-P Concentration (mg/L)

| Items           | Mode |     |     |     |
|-----------------|------|-----|-----|-----|
|                 | A    | B   | C   | D   |
| Influent        | 2    | 2   | 2   | 2   |
| Anaerobic phase | 4.8  | 4.6 | 2.1 | 2.2 |
| Effluent        | 1.2  | 2.1 | 2.3 | 2.4 |

#### 4. 결론

저장능력을 갖고 있는 실험실 규모의 EBPR 공정 미생물을 이용하여 COD 분율을 다르게 조성한 합성폐수에 대해 OUR, NUR 유입수 분율화 실험을 실시한 결과는 다음과 같다.

- (1) 호기성 조건에서 OUR을 이용한 유입수 분율화 결과는 저장미생물의 호기성 저장현상으로 인한 유입수 분율화의 오차를 크게 유발하지 않은 것으로 나타났다.
- (2) 반면, 무산소 조건에서 NUR을 이용한 유입수 분율화 결과는 탈질화 반응초기에 발생하는 기질저장현상으로 인해 외부주입 COD 성분의 약 8-14 %가 저장현상에 관여함으로써 유입수 분율화에 오차를 유발하는 것으로 나타났다.
- (3) 무산소 조건에서 NUR을 이용한 유입수 분율화의 측정오차는 저장 미생물의 존재여부와 저장능력의 차이, 반응초기내 RBCOD의 존재여부와 반응시간 등에 따라 달라질 것으로 판단된다.
- (4) PASS2를 이용한 모사결과 유입수 분율화의 정량적 오차는 경우에 따라 인 제거를 목적으로 하는 공정의 설계와 운영에 매우 중요한 인자가 될 수 있을 것으로 판단되었다.
- (5) 이와 같이, 저장 미생물을 사용한 유입수 분율화시 결과의 오차를 줄이기 위해서는 기질저장 현상을 포함하는 새로운 개념의 동력학적 계수 값의 적용과 유입수 분율화 모델의 재구성이 필요할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 2004년 10월 7일)

#### 참 고 문 헌

1. 김 철(2001), 호흡도 기법을 이용한 폐수내 COD 분율 예측, 한양대학교 석사학위논문.
2. 박주형(2002), 미생물 내부저장 물질의 특성과 활용방안, 한양대학교 석사학위논문.
3. APHA(1995), AWWA, and WEF, Standard Methods of the Examination of Water and Wastewater, 19th Eds., Washington D. C.
4. Daigger, G. T. and Grady, C. P. L. Jr.(1982), The dynamics of microbial growth on soluble substrates. A unifying theory., Wat. Res., Vol. 16, pp. 365~382.
5. Dionisi, D., Majone, M., Ramadori, R. and Beccari, M.(2001), The storage of acetate under anoxic conditions. Wat. Res., Vol. 35, No. 11, pp. 2661~2668.
6. Ekama, G. A., Dold, P. L. and Marais, G. v. R.(1986), Procedures for determining influent COD fraction and the maximum specific growth rate of heterotrophs in activated sludge systems, Wat. Sci. Tech. Vol. 18, pp. 91~114.

7. Gujer W. and Henze M.(1991), Activated sludge modelling and simulation. Wat. Sci. Tech., Vol. 23, pp. 1011~1023.
8. Henze M., Gujer W., Mino T. and van Loosdrecht M. C. M.(2000), Activated sludge models ASM 1, ASM 2, ASM 2d. and ASM 3. IWA Scientific and Technical Report No. 9.
9. Kim, Y. K.(2003), Respirometric monitoring of microbial behavioral characteristics change through the retrofitting process, Hanyang Univ., Ph. D. thesis.
10. Kujawa, K. and Klapwijk, B.(1999), A method to estimate denitrification potential for predenitrification systems using NUR batch test, Wat. Res. Vol. 33, No. 10, pp. 2291~2300.
11. Wenzel, M. C., Lotter, L., Loewenthal, R. E. and Marais, G.V.R.(1986), Metabolic behaviour of Acinetobacter spp. in enhanced biological phosphorus removal-a biochemical model, Water S.A., Vol. 12, pp. 209~224.
12. Wenzel, M. C., Mbewe, A. and Ekama G.A.(1995), Batch test for measurement of readily biodegradable COD and activated organism concentrations in municipal wastewater, Water S.A., Vol. 21, No. 2, pp. 117~124.