

## 혐기성 선택조가 결합된 순산소 활성슬러지 공정의 고지재생 폐수처리 및 슬러지 침전 특성

김동진<sup>†</sup> · 이수철

한림대학교 환경학과  
(2000년 2월 29일 접수, 2000년 5월 12일 채택)

### Paper Regeneration Wastewater Treatment and Sludge Settling Characteristics of Anaerobic Selector Coupled Pure Oxygen Activated Sludge Process

Dong-Jin Kim<sup>†</sup> and Soo-Choul Lee

Department of Environmental Science, Hallym University  
(Received 29 February 2000; accepted 12 May 2000)

#### 요 약

기존 활성슬러지 폐수처리시설의 유기물 부하나 수리학적 부하가 증가될 경우 이를 적절하게 처리하기 위해 기존 처리 시설을 증설하거나 개조할 필요가 있다. 경제적인 개선 방법의 하나로 혐기성 선택조가 결합된 순산소 활성슬러지법(AS-POAS)을 개발하여 고지재생 폐수처리에 적용하였다. 순산소 반응기는 유기물 처리를 위해, 선택조는 침전조에서의 슬러지 침전성을 향상시키기 위하여 각각 도입되었다. 이러한 AS-POAS는 COD 부하  $0.4\text{--}3.4\text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$  범위에서 평균 74%의 제거율을 보였다. 선택조에서는 평균  $5.9\text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 COD를 제거하여 단위부피당 COD 제거속도가 순산소 반응기에 비해 약 4.5배 높았다. 선택조에서 유기물/미생물비(F/M비)가 높게 유지되면서 플러킹성 미생물이 우점종이 될 수 있는 조건을 만들어 주었으며 이로 인해 슬러지 침전성이 높게 유지되었다. 슬러지 침전성은 pH가 6 이상으로 유지될 경우 SVI 값이 100 이하로 유지되어 매우 우수한 슬러지 침전성을 나타내었다.

**Abstract** – When organic and hydraulic loads exceed the treatment capacity, the existing activated sludge wastewater treatment plants are need to be expanded or retrofitted to meet the regulation. Laboratory scale anaerobic selector coupled pure oxygen activated sludge(AS-POAS) was developed to treat paper regeneration wastewater economically as one of the alternatives of the plant modification. Pure oxygen bioreactor and anaerobic selector were introduced to improve the treatability of organic load and sludge settling property, respectively. The AS-POAS showed 74% average COD removal ratio at the range of  $0.4\text{--}3.4\text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ . In the selector COD removal rate was  $5.9\text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ , which is about 4.5 times of pure oxygen bioreactor. The selector provided the floc forming bacteria as the dominant microorganisms and accelerate sludge settling characteristics. SVI value was kept less than 100 and showed high sludge settling properties when pH was controlled higher than 6.

**Key words:** Activated Sludge, Anaerobic Selector, Paper Wastewater, Pure Oxygen, Sludge Settling

#### 1. 서 론

최근 수자원의 효율적 활용과 향후 용수부족 문제를 해결하기 위해 폐수의 재활용을 정부 차원에서 권장하고 있다. 폐수의 재활용률이 높아질 경우 농축효과에 의하여 배출수의 농도는 높아지게 된다. 이렇게 폐수의 농도가 높아지거나 유량이 증가할 경우 기존 처리시설의 설계 기준을 초과하는 경우가 발생할 수 있다. 이에 따라 폐수배출 업체에서는 생산량 증가에 따른 폐수발생량 외에도 재활용률이 증가하면서 폐수의 농도 증가로 인하여 수리학적 및 유기물 부하가 증가되어 폐수 처리 시설의 증설을 고려하여야 한다. 폐수처리 시설을 증설할 경우에

는 기존 시설을 확장하여 추가적으로 설치하는 방법(expansion)과 기존 시설을 개조, 보수하여 처리용량을 늘리는 방법(revamping)이 있다. 물론 투자비 측면에서 볼 때 후자가 훨씬 저렴하고 부지조건의 제한도 덜 받게 된다.

일반적으로 폐수처리는 활성슬러지법을 기초로 한 생물학적 폐수처리 공법이 많이 사용되고 있다. 이러한 활성슬러지 공정은 폐수 수질이나 처리수의 수질 조건에 따라 다양한 공정의 변형이 가능하다. 고전적인 활성슬러지법은 오니반송량 조절과 슬러지 팽화(bulking) 제어 등으로 유지관리에 세심한 주의가 필요하고 넓은 부지면적을 필요로 하며, 고 농도 폐수처리에 부적합하고 잉여슬러지 발생량이 비교적 많은 것이 단점으로 지적되고 있다. 현재 이러한 문제를 해결하기 위한 변형공정으로 처리효율을 높이고 운전비용을 감소하기 위한 다양한 기술이 연

<sup>†</sup>E-mail: dongjin@sun.hallym.ac.kr

구 개발되고 있다.

폐수의 유기물 부하 증가 때문에 기존 시설을 개조하는 경우 혐기성 처리로 바꾸거나[1-2] 기존의 폭기조를 고정상[3-4] 또는 유동상 생물막 반응기로 개조하는 경우가 있다[5]. 또한 반응기의 미생물 농도를 높게 유지하고 이때 필요한 산소를 충분히 공급하여 전달효율을 높이기 위한 방법이 많이 시도되고 있다[6]. 폐수의 유기물 농도가 충분히 높지 않은 경우 혐기성 처리하는 것은 경제적이지 못한 경우가 많다. 기존의 활성슬러지 공정을 그대로 이용하여 최소한의 개조만을 통해 고농도 폐수를 처리하는 방법중의 하나가 순산소 활성슬러지 공정이다. 순산소 활성슬러지 공정의 경우는 공기 대신에 고순도 산소를 이용, 산소의 분압이 공기에 비해 약 5배로 용해도가 높아져 산소 전달 속도가 빠르다[6-8]. 이로 인해 폭기조 내의 미생물 농도와 반응속도를 증가시켜 유기물 부하가 높은 폐수 처리에 적합하다. 이 방법의 장점은 일반 활성슬러지법에 비해 반응기 부피당 폐수처리 속도가 빨라 장치가 compact 해지므로 부지면적을 축소하고, 잉여슬러지의 발생량이 공기를 사용하는 경우에 비하여 적고 난분해성 물질의 산화분해를 촉진시킬 수 있다.

예를 들어 순산소 활성슬러지법을 표준 활성슬러지법과 단위부피당 COD 제거성능( $\text{kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ )을 기준으로 비교하면, COD 제거속도는 표준 활성오니법이 0.3에서  $0.8 \text{ kg COD/m}^3 \cdot \text{day}$ 인데 비해 순산소 활성슬러지는  $2.4 \text{ kgCOD/m}^3 \cdot \text{day}$  내외로 제거속도가 빠르다고 알려져 있다. 즉 같은 반응기 부피 기준에서 COD를 몇 배 이상 제거할 수 있는 것이다[9].

대부분의 순산소 활성슬러지 공정은 밀폐형 반응기를 이용하고 있기 때문에 반응기에 투입되는 산소의 이용효율을 90% 수준까지 높일 수 있으며, 또한 공기 공급을 위한 blower가 필요 없어 소음이 적고 VOC나 악취의 확산을 막을 수 있어 2차오염이 없는 장점이 있다[6-7].

따라서 기존 폐수 처리에 이용되는 활성슬러지 공정을 밀폐형 순산소 활성슬러지 공정으로 대체할 경우 폐수의 농도 증가 부담을 고순도의 산소를 이용하여 절감할 수 있고 용존산소 결핍에 의한 슬러지 팽화의 제어 및 슬러지 침전성의 개선으로 침전조의 부담을 줄일 수 있다. 이에 반해 산소 생산비용이 비교적 고가이며, 폐수에 미생물의 활동을 저해하는 물질이 유입될 경우 사상성 세균이 과잉 번식하여 팽화를 유발하거나 MLSS농도를 높게 유지하는 경우 슬러지 침전성이 나빠질 수 있는 단점이 있다[10-11].

수리학적 부하, 즉 폐수 유량이 증가하는 경우에는 생물반응기만으로 해결할 수는 없다. 수리학적 부하에 가장 민감하게 반응하는 곳이 침전조, 특히 슬러지 침전조이다. 침전조에서 슬러지가 제대로 침전되지 않는 경우 슬러지가 유출되어 처리수질이 악화되기 때문이다. 이러한 수리학적 부하의 증가에 침전조 용량을 증설하지 않고 대응할 수 있는 방법은 슬러지의 침전성을 향상시키는 것이다.

또한 가폭 발생되는 슬러지 팽화는 사상성 세균의 과잉증상에 의해서 나타나는 현상으로 침전조에서 슬러지 침전을 방해하며 유출수의 수질 저하를 유발한다. 이는 활성슬러지 공정에서 운전상의 중요한 문제로 작용하는데, 이러한 슬러지 팽화를 일으키는 요소로는 폐수의 성분, 기질의 농도, 슬러지부하와 슬러지 체류시간, pH, 용존산소의 농도, 황화합물의 농도, 영양물질의 결핍 등이 보고되었다[10]. 생물학적 선택조는 사상성 세균보다 플럭 형성 미생물의 생장이 잘 일어나도록 하여 팽화방지를 돕는 대체공정으로 선택조에서의 F/M 비, 전자수용체와 같은 변수로 원치 않는 사상성 세균의 과다생장을 억제하는 구획이다. 유입수와 반응되는 활성슬러지는 폭기조에 유입되기 전에 요구되는 조건에 따라 선택조에서 혼합되는데 선택조는 aerobic, anoxic, anaerobic 선택조 등으로 구분할 수 있다[12-16].

Monod식에 근거한 'kinetic selection theory'에서 상대적으로 높은 기질농도( $S > K_s$ )에서 미생장률은  $\mu_{max}$ 에 의해 조절되나 낮은 기질농도

( $S < K_s$ )에서 미생장률은  $K_s$ 값에 의해 주로 조절된다. 따라서 낮은  $K_s$ 값을 가지는 사상성 세균은 낮은 기질농도에서 우세하며 반대로 플럭 형성 미생물은 높은 기질농도에서 우세하다. 또한 완전혼합 시스템에서 증가하는 슬러지 부하는 SVI를 감소시켜 사상성 세균의 감소를 가져오며 낮은 슬러지 일령에서 사상성 세균은 씻겨 나가게 되어 처리수의 질을 나쁘게 한다. 따라서 혼합시스템에서 최적의 슬러지 부하는 약  $0.3 \text{ g BOD}_5/\text{g VSS} \cdot \text{day}$ 로 제안되고 있다[12].

본 연구의 목적은 혐기성 선택조(anaerobic selector)를 순산소 활성슬러지에 결합하여 높은 유기물 부하 및 수리학적 부하에서 처리효율을 향상시키고 선택조의 효율을 극대화시켜 사상성 세균의 과잉 번식을 억제, 슬러지 침전성을 향상시켜 우수한 처리수질을 얻는데 있으며 제지폐수를 대상으로 하여 순산소 활성슬러지 공정의 폐수처리 특성을 연구하였다. 제지산업은 제지 제품 1톤당 수십톤의 물을 필요로 하는 전형적인 용수 다소비형 산업으로 제지폐수 방류량은 국내 산업폐수 방류량의 상당량을 차지하고 있다. 국내의 종이 수요량은 지속적으로 증가해 왔으며 앞으로도 증가할 것으로 예상되고 있다. 또한 국내 제지산업은 제지의 원료가 되는 펄프를 거의 수입에 의존하고 있으며 이로 인한 원가부담이 큰 편이다. 원료인 펄프 수입비용을 낮추기 위해 고지를 재생한 재생지 생산량을 지속적으로 늘리고 있으며 정부에서도 정책적으로 고지의 재활용률을 높이고자 이를 권장하고 있다. 그러나 고지 재생은 고지의 탈목, 표백 공정에서 고농도의 유기물과 더불어 난분해성 물질도 상당량 배출되고 있어 환경적으로 많은 부담이 되고 있다. 따라서 기존 생산시설의 증설이나 고지 이용률이 증가하게 되므로 폐수처리시설로 유입되는 부하가 증가하면 이에 효율적으로 대처하기 위한 폐수처리 시설의 개선이 필요하다.

본 연구에서는 이러한 고지재생 폐수처리를 효과적이고 경제적으로 처리하기 위하여 기존 처리시설의 개선 및 개조 방법으로서 혐기성 선택조가 결합된 순산소 활성슬러지 공정의 적용 가능성을 조사하고자 한다. 이를 위하여 순산소 활성슬러지로의 유기물부하, 슬러지 체류시간(SRT), pH, 용존산소농도가 이 공정의 유기물 처리능력 및 슬러지 침전성에 미치는 영향을 검토하고 이를 바탕으로 실제 규모의 설계에 필요한 기본 data를 도출하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2-1. 순산소 활성슬러지 실험장치 및 운전

본 연구에서 사용한 순산소 활성슬러지 장치는 크게 혐기성 선택조, 순산소 반응기, 침전조의 3부분으로 나누어진다. 혐기성 선택조는 부피가 390 mL이고 short-circuiting을 막기 위해 내부에 baffle을 설치하였고 magnetic stirrer를 이용하여 교반하였다. 순산소 반응기는 밀폐형으로 총 부피 4 L, 유효 부피는 3.4 L이고 impeller에 의해 120 rpm으로 교반되었다. 폭기조의 pH 제어를 위해 pH controller를 설치하여 1N NaOH 용액으로 pH를 평균 7.3으로 조절하여 운전하였다. 또한 산소는 99% 이상의 고순도 산소를 이용하였고 mass flow meter로 폭기조에 유입되는 산소량을 측정하였다. 순산소 생물반응기의 접종은 C제지업체의 활성슬러지를 이용하였다. 각 장치의 개요는 Table 1에 표시하였고

Table 1. Configuration of laboratory scale anaerobic selector coupled pure oxygen activated sludge system

| Configuration  | Size                 |                      |                      |
|----------------|----------------------|----------------------|----------------------|
|                | Anaerobic selector   | Bioreactor           | Settling basin       |
| Area           | 19.6 cm <sup>2</sup> | 78.5 cm <sup>2</sup> | 25.0 cm <sup>2</sup> |
| Height         | 20 cm                | 50 cm                | 100 cm               |
| Working volume | 390 mL               | 3.4 L                | 2.25 L               |
| Total volume   | 390 mL               | 4 L                  | 2.5 L                |

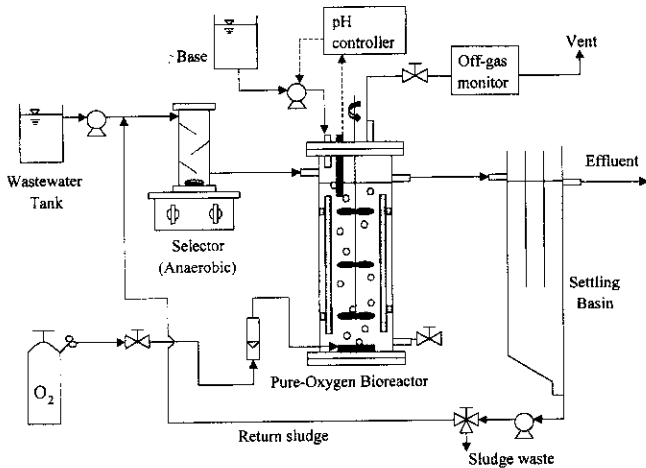


Fig. 1. Schematic diagram of laboratory scale anaerobic selector coupled pure oxygen activated sludge process.

실험장치의 개략도는 Fig. 1과 같다.

유입 폐수의 유량은 100-610 mL/hr 범위에서 운전하였고, 반송슬러지는 peristaltic pump를 이용하여 정량적으로 혐기성 선택조로 주입하였으며 반송슬러지의 반송비는 통상적 운전값인 0.7로 유지하였다. 순산소 반응기와 혐기성 선택조의 성능을 평가하기 위해서 COD 부하의 변화, 평균 수리학적 체류시간(HRT) 및 고형물 체류시간(SRT), 용존산소농도(DO), pH 등의 최적 운전조건을 평가하였으며 그 운전조건 및 범위를 Table 2에 나타냈다. 실험장치는 약 5개월간 SRT를 3.4, 10, 17, 34 day로 변화하며 운전하였다. 전체 기간중 평균 COD 부하는  $1.4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ 이고 DO 농도는 0.1-20 mg/L의 범위에서 운전하였다. 순산소 반응기의 수온변화는 최저 21 °C에서 최고 26 °C의 범위에서 운전되었고 원폐수의 pH는 6.5-7.5 범위에서 공급되었으나 pH 제어 여부에 따라 순산소 반응기의 pH는 3.1-9.3의 범위에서 운전되었다.

## 2-2. 폐수 및 시료 분석방법

본 실험에서 사용한 폐수는 고지재생 폐수로 C 제지업체의 부상분리조(DAF)에서 배출되는 것을 이용하였다. 이 업체는 폐 골판지를 이용하여 kraft지를 주로 생산하고 있다. 폐수는 COD 135-1,100 mg/L, SS 50-250 mg/L의 범위로 원료(재생되는 폐지)의 성분 및 제품의 종류에 따른 운전조건에 따라 큰 농도 차이를 보였다. 폐수중에 질소나 인 성분이 부족하여 질소원으로는  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 을 주입하여 50 mg-N/L, 인 성분으로는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 를 주입하여 10 mg-P/L 정도로 유지하여 폐수를 조절하였다. 실험에 사용된 폐수의 pH는 5.4-6.5 정도를 보였으며 이를 반응기에 유입시키기 전에 1N NaOH 용액을 이용하여 pH를 6.5-7.5로 높여 공급하였다.

본 실험에서 시료의 분석은 Standard Method에 준하여 측정하였다[17].  $\text{BOD}_5$ 는 azide modification method를 이용하였다. 용해성 COD(sCOD)는  $0.45 \mu\text{m}$  GF/C 필터로 여과하여 측정하였다. 선택조에는 부유미생물이

많이 포함되어 있기 때문에 시료를 채취하여 매스 실린더에 10분간 정지시켜 MLSS를 가라앉히고 그 상등액으로 COD를 측정하였다. COD는 크롬법으로서 closed reflux, colorimetric method를 이용하여 spectrophotometer(Shimadzu 1600)로 600 nm에서 측정하였다. SS 및 MLSS는 부유물을  $0.45 \mu\text{m}$  GF/C 필터로 여과하여 105 °C에서 건조하여 그 건조중량으로 측정하였다. 슬러지의 침전성을 표시하는 sludge volume index(SVI)는 폭기조 혼합액 1 L를 이용하여 측정해야하나 시료의 제한으로 본 실험에서는 혼합액 100 mL를 100 mL 매스 실린더에서 30분간 침전시킨 후 슬러지층의 부피와 슬러지 농도를 측정하여 SVI를 계산하였다. 주기적으로 1 L의 SVI와 100 mL의 SVI 값을 비교하였으나 큰 차이가 없었다. 그 밖에 pH(Istek 730), 온도, DO(YSI 55) 등은 수시로 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3-1. 유기물 제거 특성

본 순산소 활성슬러지 공정에서의 선택조와 순산소 반응기에서의 유기물 제거 특성을 실험하기 위하여  $0.4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$  정도의 낮은 COD 부하로 운전을 시작하였다. 운전 초기에는 집중한 미생물이 본 반응기에 적응할 수 있도록 하기 위해 수리학적 체류시간을 길게, 유기물 부하를 낮게 유지하였으며, 점차 수리학적 부하와 유기물 부하를 증가시키면서 운전하였다. 실험기간 중 주기적으로 원폐수의  $\text{BOD}_5$ 와 COD를 측정한 결과  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  비율이 평균 0.48로 난분해성 물질이 상당히 많음을 확인할 수 있었다. 용해성 COD는 전체 COD의 75-80%로 나타나 일부 유기물은 부유물질 상태로 존재하고 있음을 확인할 수 있다.

Fig. 2에서는 실험 기간 동안의 운전조건과 유입 및 처리 폐수의 COD 농도를 표시하고 있다. 실험에 적용한 폐수의 수리학적 부하는 선택조 및 순산소 반응기를 포함한 총 반응기 기준으로  $0.63 \text{ day}^{-1}$ 에서  $3.85 \text{ day}^{-1}$

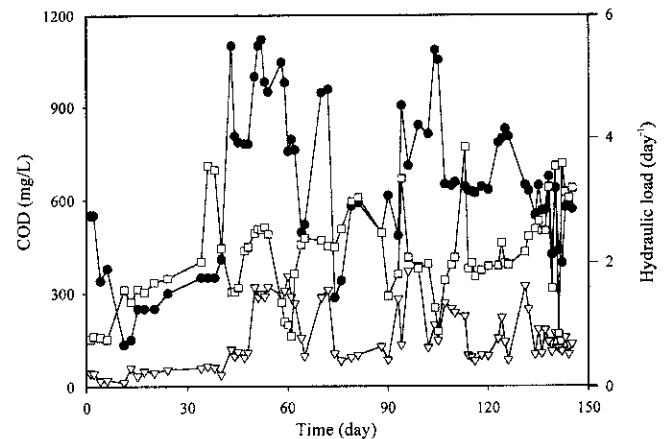


Fig. 2. Time courses of COD, SRT, and hydraulic load of anaerobic selector coupled pure oxygen activated sludge system.

(●: Influent COD concentration; ▽: Effluent COD concentration; □: Hydraulic load)

Table 2. Experimental conditions of the anaerobic selector coupled pure oxygen activated sludge system

|  | SRT 3.4 day     | SRT 10 day      | SRT 17 day      | SRT 34 day      |
|--|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Operating period                             | 8 day           | 43 day          | 60 day          | 35 day          |
| COD load( $\text{kg/m}^3 \cdot \text{day}$ ) | 1.25(0.22-3.09) | 1.15(0.21-3.38) | 1.75(0.72-3.15) | 1.10(0.22-1.86) |
| DO*(mg/L)                                    | 4.2             | 4.6             | 4.1             | 8.5             |
| Temperature*(°C)                             | 23.6            | 24.8            | 26.4            | 21.0            |
| pH*  | 7.1             | 7.0             | 6.8             | 6.2             |

\*average value

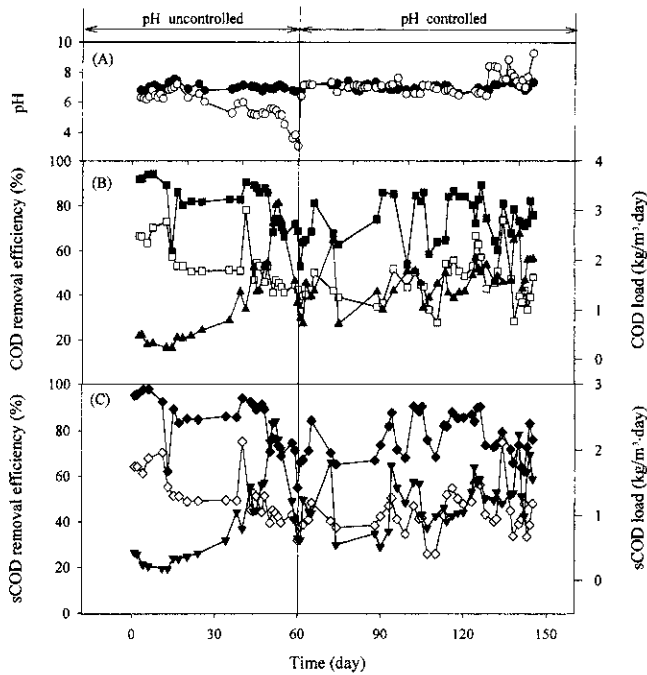


Fig. 3. Time courses of pH, applied loads and removal efficiencies of COD and soluble COD in anaerobic selector and pure oxygen activated sludge system.

(A); ●: Influent pH; ○: Effluent pH, (B); ■: Total COD removal efficiency; □: COD removal efficiency in selector; ▲: COD load, (C); ◆: Total sCOD removal efficiency; ◇: sCOD removal efficiency in selector; ▼: sCOD load)

이다. 운전기간 중 COD 농도는 최저 135 mg/L에서 최고 1,100 mg/L의 범위에서 큰 폭의 변화를 보이고 있다. 이는 제지공장에서 배출되는 폐수의 성상이 변화했기 때문이다. 이때 처리수의 COD는 350 mg/L 이하의 범위에서 변화하였고 대부분의 경우 100 mg/L 이하로 유지되었다. 순산소 반응기의 sludge retention time(SRT)는 과잉 슬러지의 인출을 통해서 조절하였는데 3.4 day에서 34 day 범위에서 운전하였다.

Fig. 3은 시간에 따른 pH의 변화(A)와 선택조와 순산소 반응기에서의 COD(B) 및 sCOD(C)의 부하와 제거율을 나타낸 그림이다. 평균 sCOD 부하는 1.3(0.3-2.8) kg/m³·day로써 전체 COD 부하 1.7(0.4-3.4) kg/m³·day에 비해 약 75-80% 범위였고, 선택조에서의 COD 부하는 14.3(3.6-29.2) kg/m³·day, sCOD 부하는 11.1(2.4-23.9) kg/m³·day이었다. 이 기간 중 유입되는 원수의 pH는 일정하게 공급되었지만 유기물 부하의 증가에 따라 순산소 반응기에서의 pH는 낮아졌다. 그러나 60일 이후부터 pH controller를 이용하여 순산소 폭기조에서 pH를 7.0 이상으로 유지하였다. 운전기간 50일에서 60일 사이에 pH가 5 이하로 낮게 유지되었는데 Fig. 2에서 보면 이 기간에 유출수의 COD가 매우 높게 유지된 것을 확인할 수 있다. 그 이후 pH가 7 이상으로 유지되면서 유출수의 COD가 안정적인 상태를 유지하였다[9-10].

COD와 sCOD는 거의 같은 경향으로 제거되고 있음을 Fig. 3(B), (C)에서 확인할 수 있다. 선택조에서의 COD, sCOD 제거율은 전체 시스템의 제거율과 비슷한 경향을 보이면서 전체 제거율에 비해 약 40%의 제거율을 보이고 있다.

Fig. 4는 순산소 생물반응기에서 COD 및 sCOD의 부하 증가에 따른 제거량을 나타내었다. 본 실험에서 전체 반응기에서의 COD 및 sCOD의 평균 제거율은 각각 74%(52-95%), 80%(62-91%)로 sCOD 제거율이 다소 높은 경향을 보였는데 이는 용존성 COD가 미생물에 의해 쉽게 이용될 수 있어 제거율이 높게 나타난 것이다[14]. COD 부하가 0.4 kg/

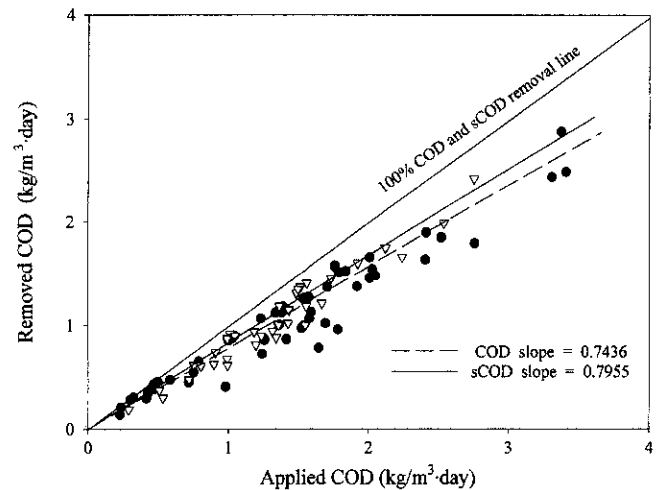


Fig. 4. Applied and removed COD and sCOD of pure oxygen activated sludge system.

(●: COD; ▽: sCOD)

m³·day에서 최대 3.4 kg/m³·day까지의 범위에서 일정한 기율기로부터 COD 제거율이 일정하게 유지되고 있음을 확인할 수 있었다. 이는 혐기성 선택조가 결합된 순산소 생물반응기가 적어도 COD 부하 3.4 kg/m³·day까지는 처리 효율이 일정하게 유지되고 있음을 보여주는 것이다. COD 평균 제거율이 74%인 것은 앞에서 설명했듯이 평균 BOD₅/COD 비율이 0.48인 것을 고려하면 상당히 높은 제거율을 보여주는 것이다[13].

sCOD도 COD와 마찬가지로 부하에 따라 2.8 kg/m³·day까지 일정한 제거율을 보여주고 있으며 평균 제거율은 기율기로부터 약 80%임을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 혐기성 선택조와 전체 순산소 반응기 시스템에서의 sCOD 부하에 따른 sCOD의 제거율을 보여주고 있다. sCOD 부하가 증가함에 따라 혐기성 선택조에서의 COD 제거율은 완만하게 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 결과는 선택조의 부피가 전체 반응기의 약 10% 정도이므로 선택조에서의 낮은 체류시간이 원인인 것으로 사료된다[8-9, 16]. 실제 선택조 기준으로 보면 수리학적 부하가 6.2-37.5 day⁻¹, sCOD 부하가 2.8-27.6 kg/m³·day로 매우 높게 유지되고 있음을 확인

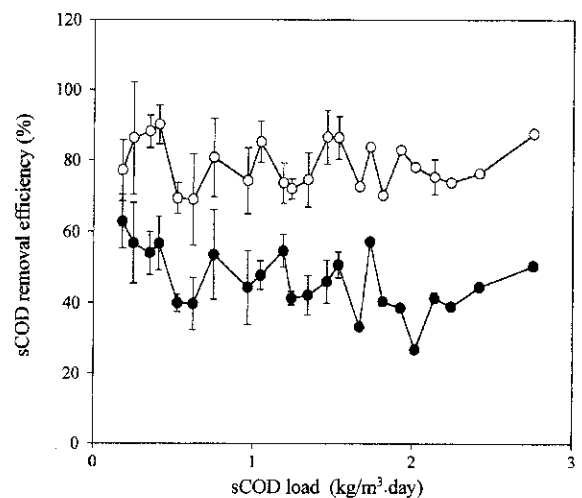


Fig. 5. Effect of sCOD load on sCOD removal efficiencies in selector and total pure oxygen system.

(●: selector; ○: total system; error bar represents standard deviations)

Table 3. COD removal efficiencies of pure oxygen activated sludge system with anaerobic selector

|                                       | COD          | sCOD         | Selector COD   | Selector sCOD  |
|---------------------------------------|--------------|--------------|----------------|----------------|
| Applied load(kg/m <sup>3</sup> · day) | 1.7(0.4-3.4) | 1.3(0.3-2.8) | 14.3(3.6-29.2) | 11.1(2.4-23.9) |
| Removed load(kg/m <sup>3</sup> · day) | 1.3(0.2-2.9) | 1.0(0.2-2.4) | 5.9(1.1-19.0)  | 4.9(0.9-16.7)  |
| Removal efficiency(%)                 | 74(52-95)    | 80(62-91)    | 42(27.5-77%)   | 44(24.8-74.8)  |

할 수 있다. 반면 전체 시스템에서의 sCOD 제거율은 sCOD 부하 0.3-2.8 kg/m<sup>3</sup> · day의 범위에서 일정하게 유지되었다. 이는 선택조에서 미처 흡수, 제거되지 못한 유기물이 순산소 반응기에서 안정적으로 제거되고 있음을 보여준다.

Table 3은 운전기간 중 전체 반응기와 선택조에 가해지는 COD 부하 및 sCOD 부하와 이에 따른 제거율을 요약한 것이다. 반응기 전체에서의 평균 COD 제거율은 74%(52-95%)이고 선택조에서의 평균 COD 제거율은 42%를 보였다. 또한 평균 sCOD 제거율은 80%(62-91%)이고 선택조에서의 평균 sCOD 제거율은 44%를 보였다. 이를 본 반응기에서 단위 부피당 유기물제거 부하량으로 환산하면 전체반응기 기준으로 평균 1.3 kg/m<sup>3</sup> · day의 유기물부하를 제거하였고 선택조에서는 평균 5.9 kg/m<sup>3</sup> · day의 유기물부하를 제거하여 선택조에서의 단위 부피당 유기물 제거량은 전체 반응기에 비해 약 4.5배 이상인 것을 확인할 수 있다.

Fig. 6은 pH에 따른 COD 제거율 및 처리수의 COD 농도에 대한 것이다. 폐수의 pH는 항상 일정하게 공급하였고 60일 이후부터는 순산소 폭기조에 pH controller를 설치하여 운전하였다. pH 제어를 하지 않은 기간에 반응기의 pH는 매우 낮아졌으며 pH가 5 이하로 될 때 처리수의 COD가 높아지며 제거율이 감소하였다. 보통 미생물의 경우는 pH가 6 이하로 낮아질 경우 활성에 저해를 받게 되어 유기물 분해속도나 제거율이 감소하게 된다. 곰팡이류는 낮은 pH에서도 활성을 유지하는 경우가 많은데 본 실험에서도 pH가 4-6에서는 사상성 세균인 곰팡이류가 번성했을 것으로 사료되며 이로 인해 pH가 낮은 범위에서는 유기물 제거뿐만 아니라 슬러지 침전성 저하에도 영향을 준다는 것을 Fig. 9에서 확인할 수 있다[10, 14-16]. 위의 결과에서 본 순산소 활성 슬러지 공정에서 pH가 6 이상이 되면 COD 제거율에는 큰 영향을 미치지 않았음을 확인할 수 있다.

본 밀폐형 순산소 활성슬러지의 가장 큰 특징은 산소 전달 속도가 빠르며 폭기조내의 미생물 농도와 반응속도를 증가시켜 유기물 부하가 높은 폐수 처리에 적합하다는 것이다. 이러한 순산소의 장점에도 불구하고 산소 생산비용이 비싸기 때문에 불필요한 산소의 손실을 막아 산

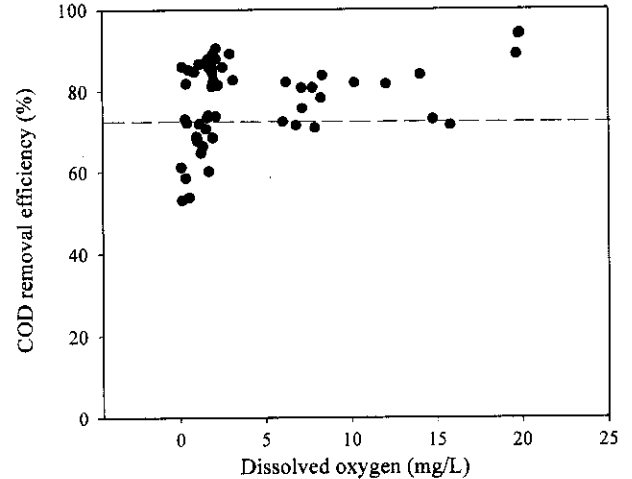


Fig. 7. Effect of dissolved oxygen on COD removal efficiency.

소의 이용율을 높이는 것이 필요하다[7]. Fig. 7은 순산소 반응기의 용존산소농도에 따른 COD 제거효율을 나타낸 것이다. 밀폐형 순산소 반응기에서 2 mg/L 이상의 용존산소에서는 제거율 70% 이상을 유지하였으며 그 이하에서는 52-90%의 불규칙한 제거율을 보였다. 이 결과로 볼 때 순산소 반응기의 DO 농도를 2 mg/L 이상으로 유지하면 COD 제거효율에는 크게 영향을 미치지 않는다고 판단된다. 용존산소농도가 낮을 경우에는 미생물의 활성이 저하되어 유기물 분해속도가 낮아진다. 반면에 용존산소농도가 필요 이상으로 높아지면 앞에서 지적한 산소의 낭비 측면 외에도 슬러지 해체 현상이 발생할 가능성이 있기 때문에 너무 높게 유지하는 것은 불필요하다[6-7, 10-12].

### 3-2. 슬러지 침전특성

폭기조에서 과다 성장한 사상성 세균은 플록을 팽창시키며 슬러지 팽화를 유발한다. 이는 슬러지의 침전성을 저하시켜 유출수의 수질을 악화시키는 결과를 가져온다[9-10]. 본 실험에서는 이러한 슬러지의 침전 특성을 결정하기 위해서 pH, 용존산소농도, sludge retention time 등이 슬러지 침전성에 미치는 영향을 검토하였다.

Fig. 8은 실험기간 동안의 MLSS 그리고 SVI 값을 보여주고 있다. 초기에 낮은 수리학적 부하와 낮은 유기물 부하에서 MLSS 농도는 낮게 유지되었다. 앞의 Fig. 3에서 본 바와 같이 이 기간동안 유입수의 pH와 순산소 폭기조에서의 pH는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 30일 이후부터 점차 유기물 부하가 증가하였으며 이에 따라 빠르게 MLSS 농도도 증가하는 경향을 보였다. 유입수의 평균 pH는 7.3으로 유지된 반면 순산소 반응기에서의 pH는 유기물 부하의 증가와 더불어 6 이하로 낮아졌다. 일반적으로 pH는 활성슬러지 공정에서 슬러지 침전성을 결정하는 중요한 요인으로, 낮은 pH 범위에서는 과다 번성한 사상성 세균의 비율이 높아지고 이에 따라 슬러지의 침전성이 낮아진다[10-13]. 이는 Fig. 8에서 그 특성을 명확히 확인할 수 있다. 순산소 반응기의 pH가 낮아져 6 이하로 운전된 기간에서는 MLSS 농도의 증가와 더불어 SVI가 급격히 증가하는 모습을 보였다. 이때의 평균 SVI는 200 이상으로 전체 실험기간에 걸쳐 가장 높은 SVI 값을 나타내었다. 그러나

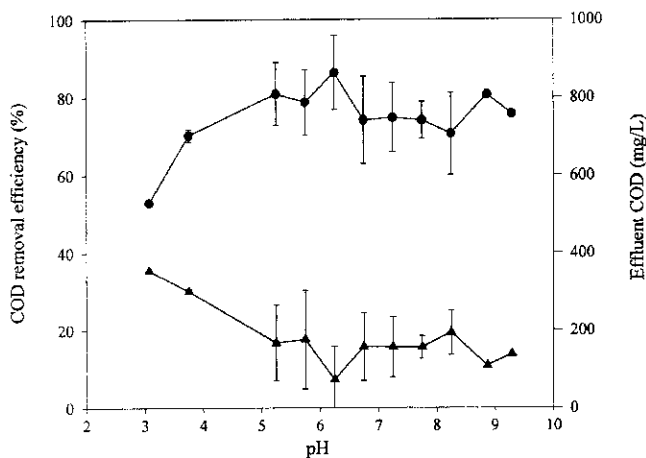


Fig. 6. Effect of pH on COD removal efficiency.

(●: COD removal efficiency; ▲: effluent COD concentration; error bar represents standard deviations)

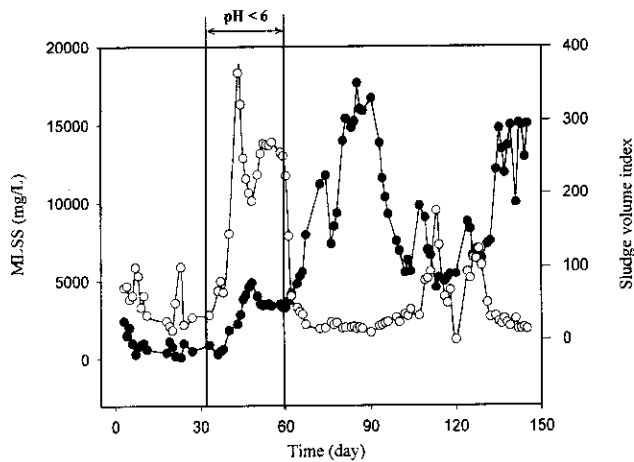


Fig. 8. Time courses of SVI and MLSS concentration in pure oxygen activated sludge system.  
(●: MLSS (mg/L); ○: sludge volume index)

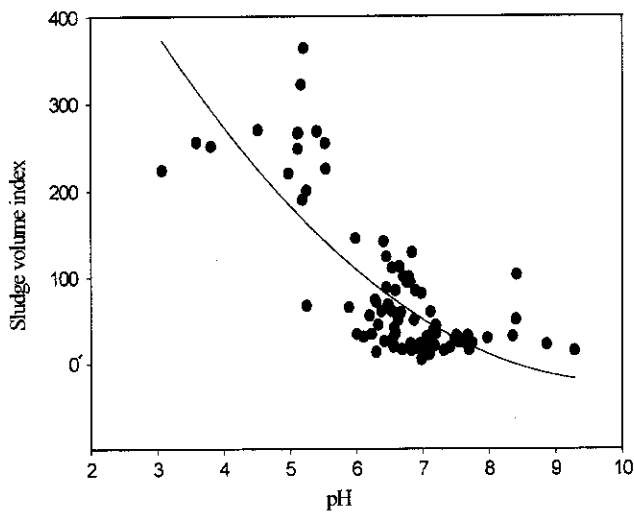


Fig. 9. Effect of pH on sludge volume index.

pH controller를 사용하여 순산소 폭기조의 pH를 평균 7.3으로 일정하게 운전한 결과 Fig. 8에서의 같이 MLSS 농도가 10,000에서 18,000 mg/L의 범위로 증가함에도 불구하고 SVI는 급격히 낮아져 100 이하로 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이로부터 본 순산소 활성슬러지 공정에서 pH를 6 이상으로 운전할 경우 순산소 생물반응기의 MLSS 농도는 5,000에서 18,000 mg/L의 범위에서 조절할 수 있었다.

Fig. 9는 순산소 생물반응기의 pH에 따른 SVI를 나타내었다. 슬러지 침전성을 나타내는 SVI는 pH에 따라 크게 영향을 받는데 본 실험에서 SVI는 pH의 감소에 따라 증가하는 반비례적인 관계를 보이고 있다. 대체적으로 pH 6 이하에서 SVI는 200 이상으로 나타났고 pH 6 이상에서는 SVI 값은 150 이하로 양호한 슬러지 침전성을 나타냈다. 일반적으로 활성슬러지 공정에서 낮은 pH 범위로 폭기조를 운전할 경우 주로 곰팡이류에 의해서 슬러지 팽화가 발생될 수 있다고 알려져 있다[10]. 그래서 본 순산소 활성슬러지 공정에서는 반응기의 pH를 6 이상으로 유지하고 혐기성 선택조에서 플록형성 미생물의 성장속도를 사상성 세균의 성장속도보다 높게 유지해줌으로써 사상성 세균에 의한 팽화 문제를 제어할 수 있고, 슬러지의 침전성을 향상시킬 수 있었다[10-13].

pH 외에 용존산소 농도가 사상성 세균의 제어에 이용될 수 있다. 일반적인 활성슬러지공정에서 폭기조의 용존산소를 낮게 유지할 경우 type

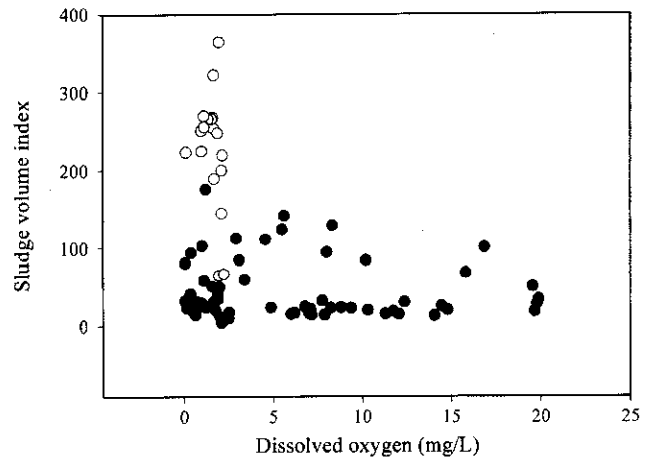


Fig. 10. Effect of dissolved oxygen concentration on sludge volume index.  
(●: pH>6; ○: pH<6)

1701, *S. natans*, *H. hydrophila* 등의 사상성 세균에 의해 슬러지 팽화 문제가 발생한다고 알려져 있다[10]. 본 실험에서는 순산소의 높은 산소 용해 특성을 이용 용존산소를 0.1-20 mg/L까지 다양하게 운전하였다. Fig. 10에서는 용존산소농도에 따른 슬러지 침전성을 SVI로 표시하여 관찰하였다. 용존산소농도가 2 mg/L 이상에서는 SVI가 대체로 150 이하로 유지되어 슬러지의 침전성이 양호함을 확인할 수 있다. 그러나 용존산소농도가 2 mg/L 이하의 범위에서는 SVI 값이 매우 큰 폭으로 변화함을 알 수 있다. 즉 낮은 용존산소농도는 슬러지의 침전성에 직접 영향을 주지 않고 다른 요소가 침전성에 영향을 주고 있는 것으로 판단된다. 슬러지의 침전성에 영향을 주는 인자는 pH나 유해화학물질의 유입 등이 있는데[8, 11], 본 실험에서는 폐수의 생물학적 분해도를 볼 때 유해화학물질이 유입된 증거는 찾을 수 없었고 pH의 영향을 검토하였다. Fig. 10에서 data를 pH 6 이상인 것과 이하인 것으로 나누어 보면 pH가 6 이하인 경우 SVI가 대체로 200 이상으로 유지되었다. 반면에 pH가 6 이상인 것은 낮은 용존산소농도에도 불구하고 낮은 SVI(높은 슬러지 침전성)를 유지하고 있다. 이렇게 낮은 pH 범위에서 SVI가 높게 유지되는 것은 용존산소에 의한 것이라기 보다는 낮은 pH 영향에 의한 것이라고 판단된다. 이 결과로부터 고순도의 산소를 이용하는 순산소 활성슬러지법은 용존산소를 비교적 낮게 유지하여도 적절한 pH를 유지할 경우 슬러지 침전에는 크게 영향을 미치지 않는 것을 알 수 있다. 그 이유는 일반 활성슬러지에서는 낮은 용존산소 농도에서 사상성 세균이 플록 형성 미생물과의 경쟁에서 유리할 수 있지만 본 연구에서 이용한 선택조가 설치된 생물반응기 시스템에서는 미생물 선택력(selection pressure)이 용존산소 외에 선택조에서 유기물 농도에 따른 성장속도의 차이라는 요소가 미생물군의 선택에 더 큰 영향을 주고 있기 때문으로 판단된다[9-12].

Fig. 11은 평균 MLSS 농도와 평균 SVI에 대한 슬러지 체류시간의 영향을 보여준다. 본 밀폐형 순산소 활성슬러지공정에서의 슬러지 체류시간에 대한 슬러지 침전성의 영향을 알아보기 위해 슬러지 체류시간을 3, 4, 10, 17, 34일로 운전하여 이에 따른 MLSS 농도와 SVI를 평가하였다. 일반적으로 낮은 SRT에서는 MLSS 농도가 낮아지므로 상대적으로 F/M비가 높아진다. 이는 슬러지 팽화를 유발하게 되는 원인이기도 하다. 또한 높은 SRT에서는 system안에 너무 많은 슬러지가 존재하게 되고 이는 플록을 형성하거나 슬러지 해체 현상이 일어나 처리수에 고형물이 많이 함유된 채로 배출되게 된다. 따라서 SRT를 지나치게 높게 유지하는 것은 바람직하지 않고 US EPA에서도 일반적인 생활하수 처리시 순산소 공정에서의 슬러지 체류시간은 3-10일로 운전하도록 제안하고 있다[6, 9-10]. 본 실험기간 중 SVI는 전체적으로 SRT를 10

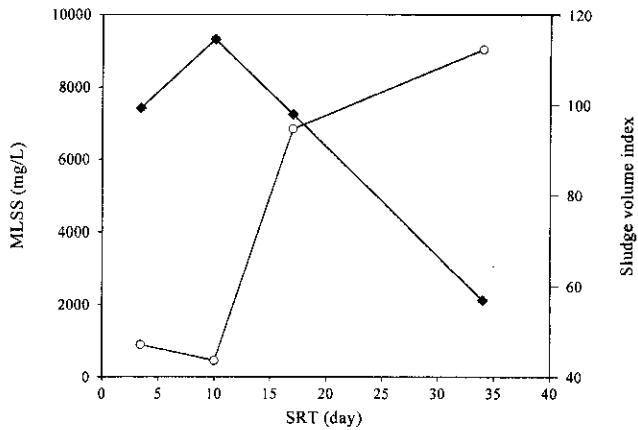


Fig. 11. Effects of sludge retention time on MLSS and sludge volume index.

(◆ : MLSS concentration(mg/L); ○ : sludge volume index)

일로 운전한 기간에서 가장 낮게 나타났으며 10일을 기준으로 SRT가 짧아질 때 SVI는 큰 변화를 보이지 않았다. 하지만 SRT를 10일 이상으로 운전하면서 SVI는 급격히 높아지는 경향을 보였다. 이는 결국 MLSS의 유출을 유발하게 된다. 반응기 내의 MLSS 농도는 SRT가 증가함에 따라 증가하여 10일일 때 가장 높아 9,000 mg/L 이상을 유지하였고, SRT가 더 증가하면서는 앞에서 설명한대로 SVI가 증가하면서 MLSS 농도가 낮아짐을 확인할 수 있다. 이 결과 본 혐기성 선택조가 결합된 순산소 생물반응기에서의 최적 SRT는 3-10일 범위였고 이 범위에서 최적의 MLSS 농도와 높은 슬러지 침전성을 얻을 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 실험에서 고지재생폐수를 대상으로 선택조가 결합된 밀폐형 순산소 활성슬러지 장치를 운전하여 높은 처리 효율을 얻었다. 또한 선택조가 결합된 순산소 활성슬러지에서의 유기물 제거특성과 슬러지 침전 특성에 영향을 미치는 요소들에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) COD 부하  $0.4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ 에서 최대  $3.4 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ 까지의 다양한 범위에서 COD 제거율은 일정하게 유지되었으며 평균 제거율은 74%이었다. 본 실험에 사용된 폐수의  $\text{BOD}_5/\text{COD}$  비가 0.48로 난분해성 물질이 많이 포함된 것을 감안할 때 상당히 높은 처리효율을 보였다.

(2) 전체 반응기 부피기준으로 COD 제거속도는 평균  $1.3 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ 이고 선택조에서는 평균  $5.9 \text{ kg/m}^3 \cdot \text{day}$ 의 COD를 제거하여 단위부피당 COD 제거속도가 선택조에서 약 4.5배 높았다. 선택조에서 유기물/미생물비(F/M비)가 높게 유지되면서 플러컬형성 미생물이 우점종이 될 수 있는 조건을 만들어 주었으며 이로 인해 슬러지 침전성이 높게 유

지되었다.

(3) 슬러지의 침전성에는 pH가 가장 큰 영향을 미치며 높은 슬러지 침전성을 유지하기 위해서는 반응기의 pH를 6 이상으로 유지해야 한다.

(4) 선택조가 결합된 순산소 활성오니 시스템에서 용존산소농도는 슬러지의 침전성에 직접적인 영향을 미치지 않았는데 이는 선택조가 플러컬형성 미생물의 성장을 촉진하여 침전성을 높인 때문으로 판단된다.

#### 감 사

이 논문은 2000년도 한림대학교 학술연구조성비에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- Kim, D. J., Seon, Y. H. and Hwang, K. Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 533(1994).
- Kim, D. J., Seon, Y. H. and Hwang, K. Y.: *HWAHAK KONGHAK*, **32**, 541(1994).
- Yoo, I. K., Kim, K. H. and Kim, D. J.: *HWAHAK KONGHAK*, **36**, 945(1998).
- Kim, D. J., Kim, K. H., Cha, G. C., Lee, K. H., Lee, Y. T. and Lee, T. J.: *Chem. Ind. & Tech.*, **14**, 40(1996).
- Kim, D. S., Ahn, K. H., Seo, M. K., Park, T. J. and Song, S. K.: *HWAHAK KONGHAK*, **29**, 448(1991).
- Tzeng, C. J.: Ph. D. Dissertation, UC Los Angeles(1992).
- Linden, Ron K. S.: Ph. D. Dissertation, UC Davis(1982).
- Kim, M. Y. and Kim, I. S.: *J. of Kor. Soc. of Environ. Eng.*, **21**, 119 (1999).
- Metcalf and Eddy: "Wastewater Engineering, Treatment, Disposal, Reuse," 3rd ed., McGraw-Hill, New York, NY(1991).
- EPA, "The Causes and Control of Activated Sludge Bulking and Foaming," EPA/625/8-87/012(1987).
- Chudoba, J.: *Water Res.*, **19**, 101(1985).
- Chudoba, J., Grau, P. and Ottavá, V.: *Water Res.*, **7**, 1389(1973).
- Daigger, G. T., Robbins, M. R. and Marshall, B. R.: Proceedings of 56th Annual Water Pollution Control Federation Conference, Atlanta (1983).
- Kjær, A. and Per, H. N.: *Appl. Environ. Microbiol.*, **63**, 3662(1997).
- Prendl, L. and Kroi, H.: *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 19(1998).
- Clauss, F., Helaine, D., Balavoine, C. and Bidault, A.: *Wat. Sci. Tech.*, **38**, 35(1998).
- APHA, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th ed., Washington DC(1992).