



ORIGINAL PAPER

원저

다단 수직형 호기성반응기(ER-1)를 이용한 음식물 폐수의 생물학적 처리기술

이재기[†], 최홍복, 신응배, 박주형, 최은주, 김정래, 박영숙*

(주)에코데이, 강남대학교 도시건축공학부*

(2006년 10월 26일 접수, 2006년 12월 13일 채택)

Biological treatment process for Food wastewater Using ER-1 bioreactor

Jea-ki Lee[†], Hong-Bok Choi, Eung-Bai Shin, Ju-Hyoung Park, Eun-Ju Choi, Jung-Rae Kim, Young-Sook Park*

EcoDays CO., Ltd., Dept. of Urban and Architectural Eng. in Kangnam Univ.*

ABSTRACT

Wastewater generated through the food waste recycling process have known high concentration, BOD 20,000~150,000 mg/L, which has to treat to the proper level because of a ban on reclamation. But it is impossible to treat less than 10 days by existing water treatment plant. Ecodays Ltd. is to treat this wastewater during 2~4 days by ER-1, which can simultaneously induce the modified PFR(Plug Flow Reactor) of the oxygen transfer rate, MLVSS concentration, and influent concentration to top from bottom of reactor.

We tested the pilot test about low concentration food wastewater(BOD 16,500 mg/L) and high concentration food wastewater(64,431 mg/L) at the food waste recycling plant of H-Gun(20t/d). Hydraulic retention time(HRT) of ER-1 for low concentration food wastewater is 2.5day. In low concentration conditions, ER-1 treatment efficiency is to appear BOD 99%, COD 98%, TN 97%, and TP 96%. While ER-1 process for high concentration food wastewater treatment is composed 2 stages, which are to be HRT 2.5day for law wastewater and HRT 1.5 day for secondary treatment. In high concentration conditions, ER-1 treatment efficiency is to appear BOD 97%, COD 84%, TN 66%, and TP 95%. It is treated without temperature control about high temperature(50°C) to appear low treatment efficiency in high concentration conditions.

Keywords : low concentration food wastewater, high concentration food wastewater, biological treatment

[†]Corresponding author (lejk@unitel.co.kr)

초 록

음식물류 폐기물 자원화과정에서 발생하는 폐수는 BOD 20,000~150,000mg/L이며, 매립금지로 적정수 준까지 처리되어야 한다. 그러나 기존의 폐수처리시설에 의해서는 10일 이하로 처리하기가 불가능하다. (주)에코데이는 높은 산소전달효율, 높은 미생물(MLVSS) 유지와 유기물 농도 모두가 상항류의 PFR흐름을 갖는 ER-1 반응기를 이용하여 2~4일 이내로 처리할 수 있는 기술을 개발하였다.

하루 20톤의 음식물을 퇴비화 하는 H군 음식물 자원화시설에 Pilot plant를 설치하고, 자원화 과정에서 발생하는 고농도폐수(평균 BOD 64,431mg/L)와 저농도폐수(평균 BOD 16,500mg/L)에 대해 6개월간 실험하였다. 저농도폐수의 처리를 위해서 ER-1(HRT 2.5d)과 후단에 고도처리공정을 적용하였으며, 이때 전체공정에서 제거되는 유기물의 대부분이 ER-1을 통해 제거되었다. 저농도폐수 Pilot plant의 처리효율은 BOD 99%, COD 98%, SS 99%, T-N 97%, T-P 96%이다. 고농도 폐수 처리공정은 ER-1을 직렬로 배치하여 2단계 ER-1(1차 HRT 2.5d, 2차 HRT 1.5d) 후 고액분리를 통해 하수연계(BOD 2,000mg/L 이하)로 계획하였다. Pilot 실험결과 고농도 폐수에 대해서도 BOD 97%, COD 84%, SS 98%, T-N 66%, T-P 95%의 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다. 고농도 폐수처리시에 생물반응기의 냉각시설 없이 고온(50℃)으로 운전되었으나, 온도 조절 부분을 개선한다면 더 높은 효율을 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 고농도폐수, 저농도폐수, 생물학적처리

1. 서론

음식물류 폐기물 자원화과정에서 발생하는 폐수(이하 음식물 폐수: 탈리액, 침출수, 응축액 등)의 발생량은 음식물 자원화방식에 따라 다르나, 평균적으로 처리량 대비 75.9%로 상당히 많은 편이다.¹⁾ 이렇게 발생하는 음식물 폐수는 BOD 20,000~150,000mg/L의 고농도 유기성폐수이며, 그 처리가 어려워 대부분 해양배출되고 있다. 그러나 해양오염 예방을 위한 국제협약인 '96런던 의정서가 2006년 3월 24일 발효되고 해양오염방지법이 개정됨에 따라 음식물류 폐기물의 해양배출 기준이 강화되어(함수율 95% 이상, 07년 7월 시행) 음식물 폐수처리시설의 도입이 활발히 이루어지고 있다²⁾.

음식물 폐수와 같은 고농도 유기성 폐수는 일반적인 중·저농도형 처리시설을 이용하여 완전 자체 처리할 경우 폐수처리에 소요되는 과중한 비용 부담으로 음식물 자원화시설의 운영이 현실적으로 불가능하다. 따라서 기본적으로 음식물 폐수를 효

율적으로 처리하기 위해서는 자원화시설 내에 폐수처리시설을 갖추고 적정 부하 이하로 처리하여 하수종말처리장 등으로 연계처리하는 것이 바람직 하겠다. 그러나 현 상황에서는 음식물 폐수를 일정 부하 이하로 처리할 수 있는 고농도 폐수처리 기술 마저 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 높은 산소전달효율, 높은 미생물(MLVSS) 유지와 유기물 농도 모두가 PFR흐름을 갖는 ER-1 반응기를 이용하여, 음식물 자원화시설에서 발생하는 폐수를 대상으로 Pilot Plant를 적용하여 처리시간을 최소화하고 경제성이 높은 음식물 폐수 처리기술을 확립하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 운전조건

2.1 음식물 폐수의 성상 및 조건

ER-1 반응기를 이용한 음식물 폐수처리 Pilot Plant는 호기성 퇴비화시설로 운영 중인 H군 음식물 자원화시설에서 실험하였다. H군 음식물 자원화 시설은 20톤/일의 음식물을 퇴비화하는 과정에서

희석수와 탈리액으로 인해 30톤/일의 폐수가 발생한다. 이렇게 발생하는 폐수는 응집과 탈수를 거쳐 침출수처리장으로 연계되어 처리하고 있으나(Fig. 1), 고농도 유기물을 제거하기 위한 적절한 공정이 수립되어 있지 않아 시설보안을 계획하고 있다.

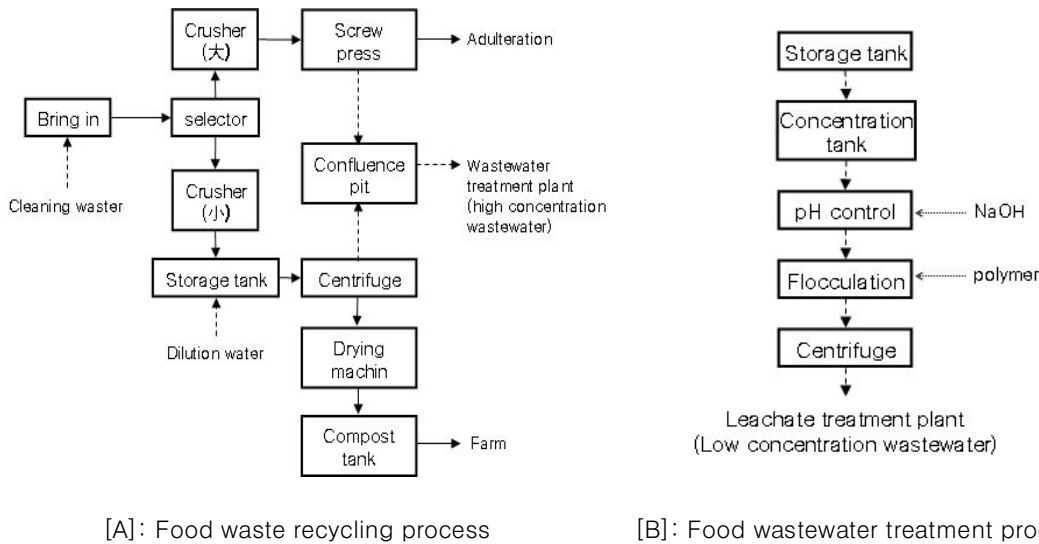
본 연구에서는 유입수 농도변화에 따른 처리효율 및 설계인자를 도출하기 위하여 음식물자원화시설에서 직접 발생하는 폐수(기존 폐수처리시설 유입 전, 이하 고농도 폐수)와 기존 폐수처리시설 처리 후 침출수처리장으로 연계되는 폐수(이하 저농도 폐수)를 대상으로 각각 실험하였으며, 이때 사용된 폐수 성상은 (Table 1)과 같다.

2.2 Pilot Plant

ER-1을 이용한 음식물폐수처리 Pilot Plant는 H군 자원화시설 내에 설치하였으며, 처리용량 3m³/일로 고농도폐수와 저농도폐수에 대해 (Fig. 2)와 같은 공정을 각각 적용하였다.

저농도폐수는 ER-1의 체류시간(HRT)을 2.5일로 반응기내 질소제거를 위해 으며, 미처리된 질소·인의 제거를 위해 포기조와 전·후무산소조를 구성하였다. 또한 안정적인 처리수질 확보를 위하여 응집/탈수하는 공정을 구성하였다((Fig. 2) (A)).

고농도폐수처리공정에서((Fig. 2) (B)) 1차



(Fig. 1) H-Gun Food waste recycling process and existing wastewater process.

(Table 1) Composition of Food Wastewater (unit : mg/L)

	Low concentration food wastewater	High concentration food wastewater
BOD	19,500	64,431
COD	9,539	17,668
SS	8,923	25,429
T-N	1,473	3,216
T-P	707	1,019

※ Applied to average concentration

ER-1 (HRT 2.5일)에서는 호기성유지로 유기물 제거만을 목적하였으나, 2차 ER-1 (HRT 1.5일)에서는 저농도폐수에서와 같이 120분 호기와 30분 무산소 조건으로 병행 운전하여 질소제거가 동시에 이루어질 수 있도록 운전하였다.

저농도폐수처리 공정에서 목표처리수질은 H군에서 제시한 BOD 2,547mg/L, COD 1,623mg/L, T-N 54.6mg/L로, 고농도폐수 공정에 대해서는 일정수준(BOD 2,000mg/L) 이하로 처리하여 연계처리하는 것으로 계획하였다.

Pilot Plant에 적용된 ER-1은 부식에 강한 스테인리스(STS304) 재질의 원통형 상향류식 반응기로 내부에 중간분리판과 유체이동관을 이용하여 4개의 단으로 구분되어 있으며, 반응기의 유효용량은 4.5m³(Ø1,325mm×H4,500mm, HRT1.5일), 7.5m³(Ø1,730mm×H4,500mm, HRT2.5일)의 두 개로 제작하여 각각의 처리공정의 HRT에 맞게 사용하였다. Pilot Plant의 운영은 저농도폐수를 대상으로 81일간, 고농도폐수를 대상으로 39일간으로 총 120일간 운전하였으며, 폐수의 유입과 안정된 공기의 공급은 용적식 정량펌프인 모노펌프와 루츠블로워를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

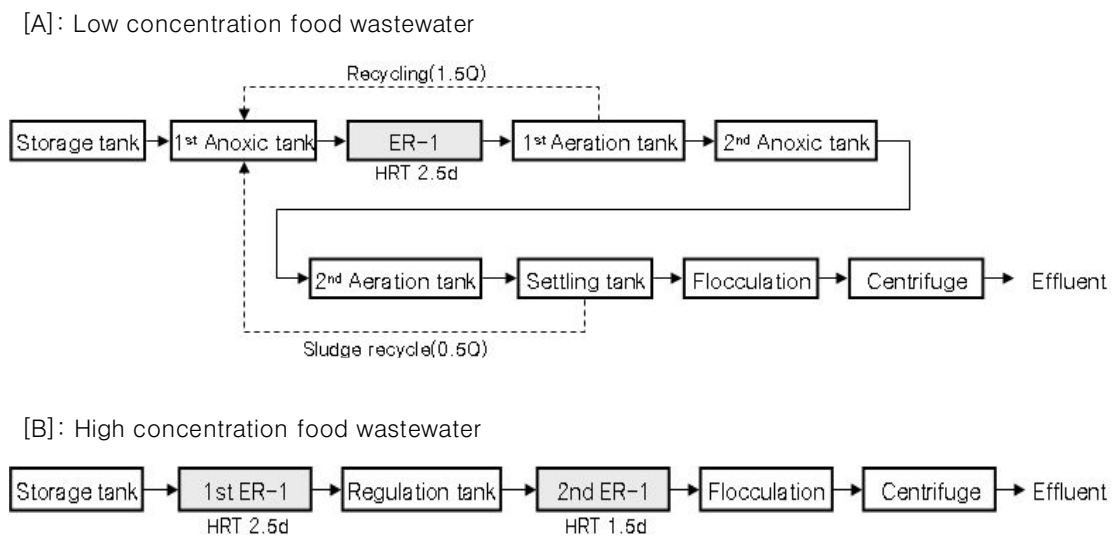
3.1 ER-1 반응기

본 연구에 사용된 ER-1 반응기는 CSTR의 유체 흐름이 상향류식으로 조합된 원통형 CSTRs in series 형태로 각단 상부의 유체이동관을 통해 직접적인 혼합 없이 PFR에 가까운 흐름을 갖는다. 정상상태의 조건에서 1차반응($r_A = -kC$)에 의한 CSTR과 PFR에 대해 각각 유도된 식을 HRT (θ)로 정리해보면 다음과 같다^{5, 6)}.

$$CSTR: \theta_{CSTR} = \frac{1}{k} \left(\frac{C_{in}}{C_{out}} - 1 \right)$$

$$PFR: \theta_{PFR} = - \frac{1}{k} \ln \frac{C_{in}}{C_{out}}$$

CSTR의 경우 처리시간에 따라서 유입수(C_{in})와 처리수(C_{out})가 단순한 1차 함수관계로 표현되나, PFR의 경우 지수함수로 표현되므로 체류시간의 증가에 따라 처리효율도 급격히 증가하게 된다. 상기식을 이용하여 반응기 처리효율에 따른 HRT의 비($\theta_{CSTR}/\theta_{PFR}$)는 [Fig. 3]과 같이 표현된다. 예를 들어 BOD 70,000mg/L의 음식물폐수를 하수연계하기 위하여 2,000mg/L 이하로 처리한다고 할 경우 제거효율 97% ($C_{out}/C_{in}=0.03$)을



(Fig. 2) Food wastewater process of Pilot plant.

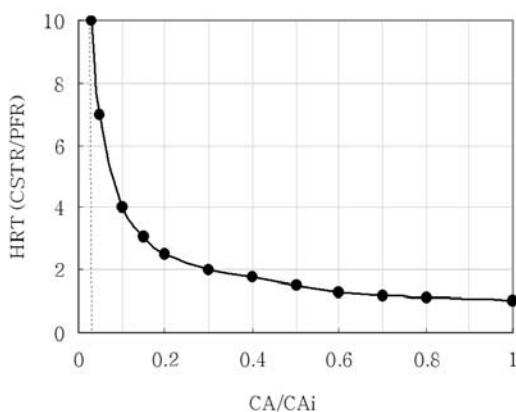
요구하므로, CSTR은 PFR 형태의 반응조에 비해 10배 이상의 HRT(유효용적)를 요구하게 된다. 따라서 처리대상 폐수의 농도가 높을수록 PFR 반응기의 구성은 필수적이라 할 수 있다. 그러나 이상적인 PFR의 경우 유체의 이동 과정에서 혼합을 배제하고 다만 분자 확산에 의한 물질반응만을 고려하였으므로 실질적으로 이러한 흐름을 구현해내기 어렵고, 유입부의 과도한 유입부하에 견딜 수 있도록 용존산소, 유기물, 미생물 등이 전체적으로 PFR 구조로 이루어져야 할 것이다.

ER-1 반응기는 내부에 중간분리판과 유체이동관을 통해 여러개의 단으로 구분하고 유입된 폐수와 공기가 상향류로 이동하게 함으로써, 각단에서는 CSTR 흐름을 갖고 반응기 전체로는 PFR 흐름을 갖는 CSTRs in series의 특징을 갖는다. 이러한 ER-1의 유체 흐름 특성을 추적자 test를 통해 확인하였다. 반응기내의 이론적인 체류시간을 60분에 맞추어 수돗물을 연속 주입하였으며 1N NaOH를 1회 주입 후 시간에 따른 유출부의 전기전도도 변화를 살펴보았다. CSTR([Fig-4]B)의 경우 NaOH주입 후 공기 주입 후 반응조 전체에서의 혼합반응으로 인해 전기전도도 최고치가 짧은 시간 안에 나타났다가 서서히 감소하는 경향을 보이고 있으나, ER-1 반응기([Fig. 4] (A))의 경우 전기전도도 최고치가 체류시간 60분에 도달하지는 못했으나 반응기 하부에서 유입되는 기질을

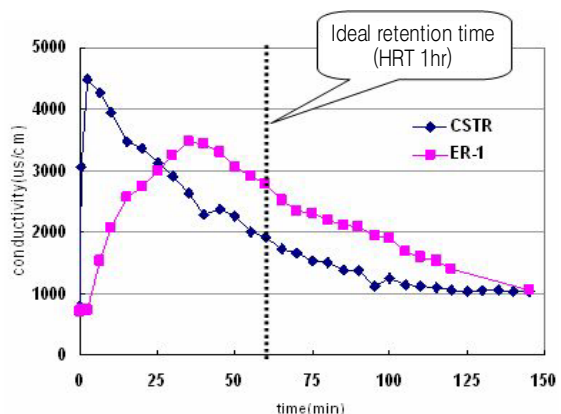
순차적으로 이동시킬 수 있는 PFR 흐름을 70% 정도 확보한 것으로 나타났다.

(Fig. 5)를 보면 고농도 폐수에 있어서 반응조의 형태가 얼마나 큰 영향을 미치는지 알 수 있다. (Fig. 5) (A)는 MLSS가 3,000mg/L ($k=0.24d^{-1}$)일 때 일차반응식을 이용한 PFR과 CSTR의 HRT(θ)에 따른 제거효율(C_{out}/C_{in})을 나타낸 것으로, 90% 제거효율에서 CSTR은 PFR과 ER-1에 비해 처리시간(또는 반응조용적)이 각각 3.8배와 2.7배를 더 요구하게 된다. MLSS가 20,000mg/L ($k=1.6d^{-1}$)로 유지된다면([Fig. 5] (B)), CSTR은 PFR과 ER-1과 유사하게 접근하는 것으로 보이지만, 처리시간이 각각 4배와 2배를 더 요구하게 된다. 게다가 CSTR에서는 고농도 폐수에서 MLSS 20,000mg/L 이상으로 유지하기 어려울 뿐만 아니라, 유입되는 폐수가 고농도 일수록 유출수의 농도를 일정 수준 이하로 확보하기 어렵다. 따라서 음식물 폐수와 같은 고농도 폐수일수록 ER-1과 같이 PFR 흐름에 접근하고 그 특성을 최대한 활용할 수 있는 기술이 적합하다고 할 수 있겠다.

ER-1 반응기는 PFR 흐름뿐만 아니라, 반응기 내부 각단 상부에 공기가 일정 시간동안 체류할 수 있는 공간(air holdup space)을 형성하여 기/액 접촉면과 난류가 증가로 인한 고효율 산소전달효율로, 고농도 폐수의 호기성 처리에서의 문제점인 용존산소의 충분한 공급을 가능하게 한다. 또한 별도



(Fig. 3) In the 1st order reaction, ratio of HRT according to treatment efficiency (C_{out}/C_{in}).



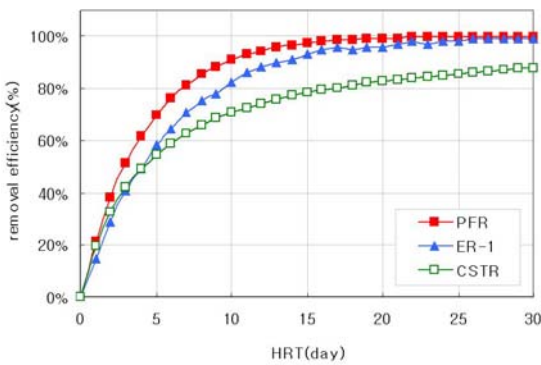
(Fig. 4) Tracer test for characteristic of fluid flow (A: CSTRs in series type's ER-1, B: CSTR).

의 산기장치 없이 단순배관을 통한 공기의 주입으로 통기저항이 낮고 산기관 교체 등의 문제가 없어 유지 관리비가 적게 소요되며, 고농도 유입부하와 동시에 고농도의 미생물(MLVSS) 유지, 높은 산소 전달효율에 의한 용존산소를 확보함으로써 하수슬러지, 음식물 폐수, 축산폐수와 같은 고농도 폐수처리에 적용하여 우수한 처리결과 얻을 수 있었다.

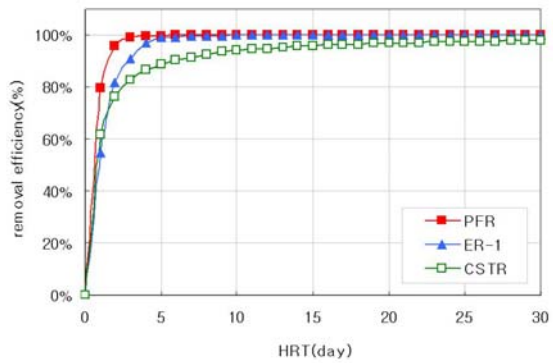
3.2 저농도 폐수처리 Pilot test

H군 음식물 자원화시설에서 발생하는 폐수는 (Fig. 1) (B)에서와 같이 응집/탈수되어 침출수처리장으로 연계처리되고 있다. 이때 침출수처리장으로 연계되어지는 폐수의 농도는 BOD 15,000~

26,500mg/L로 평균 19,500mg/L이며, 이를 Pilot Plant로 유입하여 (Fig. 2) [A]의 공정으로 처리하였다. (Fig. 6)은 공정별 BOD 부하(kgBOD/d)를 나타낸 그래프로 실험기간중 평균수질을 적용하였다. 전체공정에서 제거되는 BOD의 95.2%가 ER-1에서 제거되며, 유기물 제거와 함께 미생물의 세포합성에 의해 ER-1에서 제거되는 T-N의 량도 1.82kg/d(69.1%)로 이론적으로 알려진 BOD/N 20과 거의 유사한 값으로 제거되었다. 이처럼 고농도 유기성폐수에 있어서의 ER-1 반응기의 장점은 고농도 유기물 유입을 가능하게 함으로써, 급격한 유기물 제거와 동시에 질소의 제거가 가능하다는 것이다. 최종처리수는 H군에서 제시한

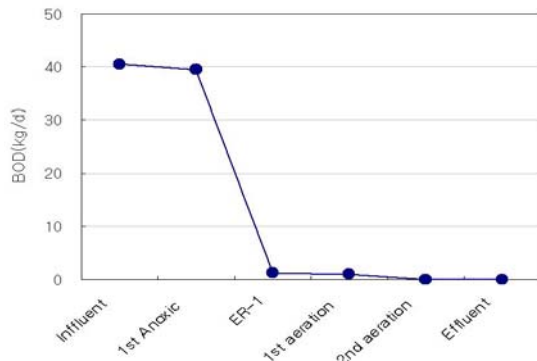


[A]: MLSS 3,000mg/L

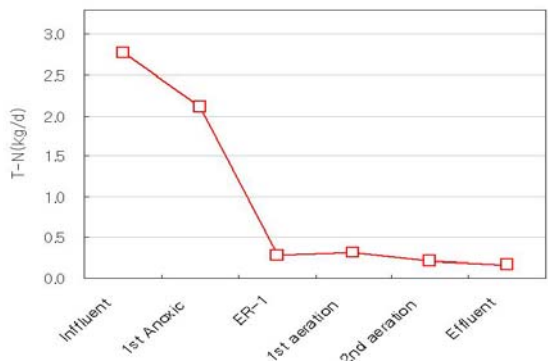


[B]: MLSS 20,000mg/L

(Fig. 5) Removal efficiency according to MLSS and HRT. (■: PFR, ▲: ER-1, □: CSTR)



[A]: BOD



[B]: T-N

(Fig. 6) Variation of BOD and T-N concentration at unit process.

목표처리수질 이내로 만족한 결과를 얻었으며, 저농도 처리공정에서의 처리효율은 [Fig. 7]에서와 같이 BOD 99%, COD 98%, SS 99%, T-N 97%, T-P 96%로 매우 높게 나타났다.

실험기간 중 ER-1 반응기의 MLSS는 평균 15,800mg/L, F/M 1.14 kgBOD/kgMLSS·d, BOD 용적부하 7.8 kgBOD/m³·d이며, 반응기내 유지되는 DO의 농도는 1.5~2.0mg/L로 고농도 유기물과 고농도 미생물 농도에도 불구하고 반응기 특성에 의해 충분한 산소가 공급된 것으로 확인되었다. 이때 ER-1 반응기의 산소전달효율은 25%로 계산되었다.

3.3 고농도 폐수처리 Pilot test

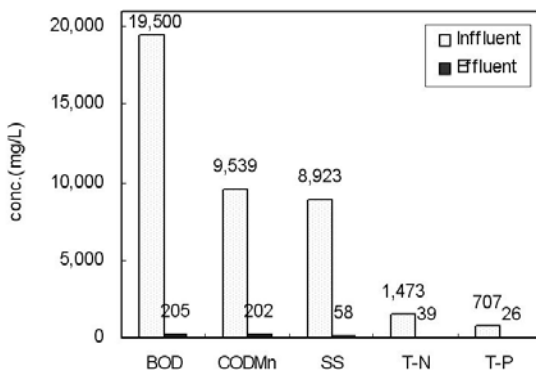
고농도 발생폐수는 음식물자원화시설에서 발생하는 청소수와 희석수가 포함된 탈리액으로 폐수의 농도는 BOD 51,000~85,400mg/L(평균 64,431mg/L), T-N 2,460~4,680mg/L(평균 3,216mg/L)로 C/N는 20이다. Pilot plant 처리용량은 3m³/d로 고농도 폐수에 대한 Pilot plant 공정은 [Fig. 2] (B)와 같고, 주처리 과정인 ER-1에서의 체류시간은 1차 2.5일, 2차 1.5일로 설계되었다. 생물학적 처리 후 원심탈수를 위해 사용된 응집제의 양은 Jar test를 통해 700mg/L로 결정되었으며, 이때의 처리효율은 [Fig. 8]에서와 같이 BOD 97%, COD 84%, SS 98%, T-N 66%, T-P 95%이다.

고농도폐수처리에서 1차 ER-1의 F/M 비는 3.55kgBOD/kgMLVSS·d, BOD 용적부하는 25.8kgBOD/m³·d, 2차 ER-1의 F/M 비는 1.16kg BOD/kg MLVSS·d, BOD 용적부하는 8.2kg BOD/m³·d로 일반적인 포기조(완전혼합 반응조) 형태의 생물학적처리공정의 F/M 0.05~0.5kgBOD/kgMLVSS·d, 용적부하 0.05~0.12kgBOD/m³·d에 비해 매우 높게 유지할 수 있었다.

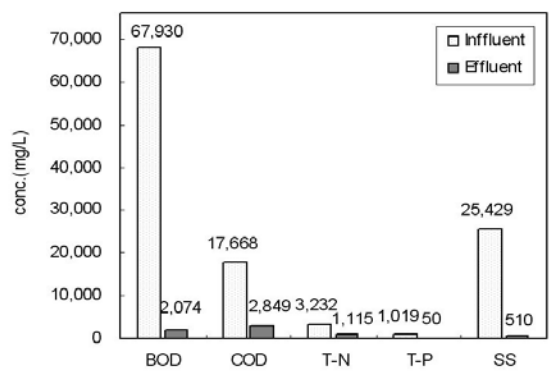
이처럼 우수한 처리효율에 의해 ER-1 공정은 4일이내의 처리시간으로 기존공정(20~30일)에 비해 적은 부지면적(낮은 부지매입비용), 시설비 및 운영비 절감 등 경제성이 높은 것으로 판단된다.

3.4 결론

본 연구의 목적은 음식물 자원화시설에서 발생하는 폐수의 처리시간을 최소화하고 경제성이 높은 음식물 폐수 처리기술을 확립하는 것이다. 경제성을 높일 수 있는 방법의 검토결과 ①PFR 반응기를 구성하는 것이 가장 합리적인 것으로 알려져 있으나 이것은 이론적으로만 가능하고 현실적으로는 불가능한 것으로 알려져 있으며, ②CSTR 반응조를 구성하면서 MLSS를 20,000mg/L 이상 높게 유지하는 방법이 있으나 충분한 용존산소 공급의 부족으로 불가능하다. 따라서 ③PFR의 기능은 부족(70%)하나 MLSS를 높여 고농도 폐수에 적합한 ER-1 반응기를 개발하였다.



[Fig. 7] Result of low concentration food wastewater.



[Fig. 8] Result of high concentration food wastewater.

본 연구에 사용된 ER-1 반응기는 내부에 중간 분리판과 유체이동판을 통해 여러개의 단으로 구분하고 유입된 폐수와 공기가 상향류로 이동하게 함으로써, 각단에서는 CSTR 흐름을 갖고 반응기 전체로는 PFR 흐름을 갖는 CSTRs in series의 특징을 갖으며, Tracer test를 이용한 유체특성 실험에서 PFR 흐름에 70% 접근함을 확인할 수 있었다. 또한 반응기 내부 각단 상부에 공기가 일정 시간동안 체류할 수 있는 공간(air holdup space)을 형성하여 기/액 접촉면과 난류가 증가로 인한 고효율 산소전달효율로, 고농도 폐수의 호기성 처리에서의 문제점인 용존산소의 충분한 공급을 가능하게 한다.

이러한 ER-1 반응기를 이용하여 음식물류폐기물을 퇴비화하는 H군 음식물 자원화시설에 Pilot plant를 설치하고, 저농도폐수(평균 BOD 16,500mg/L)와 고농도폐수(평균 BOD 64,431mg/L)에 대해 6개월간 실험하였다. 저농도 폐수의 처리를 위해서는 ER-1(HRT 2.5d)과 후단에 고도처리공정을 적용하여, BOD 99%, COD 98%, SS 99%, T-N 97%, T-P 96%로 우수한 처리효율을 얻을 수 있었다. 고농도폐수 처리 공정은 ER-1 반응기를 직렬로 배치하여 2단계 ER-1(1차 HRT 2.5d, 2차 HRT 1.5d) 후 고액분리를 통해 연계 처리하는 것으로 계획하였으며, BOD 97%, COD 84%, SS 98%, T-N 66%, T-P 95%의 안정적인 처리효율을 얻을 수 있었다. 고형물의 함유가 많은 고농도 폐수처리의 경우에도 유입수중의 SS 성분을 제외하고 용존성 물질을 최대한 보존된 상태에서 유입된다면, 유기물 제거와 동시에 용존성 질소인이 미생물 세포합성에 의해 충분히 제거될 수 있을 것으로 본다. 따라서

유입수 전처리 단계에서 고효율 고액분리장치로 약액주입 없이 고형물을 최대한 제거하거나, 혐기성 소화과정이 요구된다.

사사

본 연구는 2006년도 환경부 차세대핵심환경기술개발 실증화사업에 의하여 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 환경부 생활폐기물과, 05년 4/4분기 음식물 자원화시설 현황 (2006).
2. 관계부처합동(환경부의 9), 음식문화개선 및 음식물류폐기물 종합대책(2006~2010) 과제별 세부추진 계획(안), pp. 45~57 (2006).
3. 수도권매립지관리공사 외, 음식물류 폐기물 통계시스템 개발을 위한 연구, pp. 233~251 (2005).
4. 국립환경과학원, 음식물류폐기물 자원화시설 적정관리방안 연구(음식물류폐기물 처리시설 세부검사방법 개선방안을 중심으로), pp. 39~70 (2005).
5. Metcalf and Eddy, Wastewater engineering treatment and reuse, 4th edition, Mcgraw-Hill, pp. 221~236 (2004).
6. Reynolds and Richards, Unit operations and processes in environmental engineering, 2nd edition, PWS publishing company, pp. 38~57. 