

음식물 침출수 청정화를 위한 파일럿 규모의 생물-분리막 복합공정의 성능 평가 연구

¹이 명 구 · †²박 철 환 · ¹이 도 훈 · ³김 탁 현 · ⁴이 병 환 · ⁵이 진 원 · †¹김 상 용
¹한국생산기술연구원 청정공정팀, ²광운대학교 화학공학과, ³한국원자력연구원 방사선과학연구소,
⁴계명대학교 화학시스템공학과, ⁵서강대학교 화공생명공학부
(접수 : 2007. 7. 19., 게재승인 : 2007. 12. 31.)

Performance Evaluation of Bio-Membrane Hybrid Process for Treatment of Food Waste Leachate

Myunggu Lee¹, Chulhwan Park^{2†}, Dohoon Lee¹, Tak-Hyun Kim³, Byunghwan Lee⁴, Jinwon Lee⁵, and Sangyong Kim^{1†}
¹Green Engineering Team, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), ChonAn 330-825, Korea
²Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea
³Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI), Jeongeup 580-185, Korea
⁴Department of Chemical System Engineering, Keimyung University, Daegu 704-701, Korea
⁵Department of Chemical and Biomolecular Engineering, Interdisciplinary Program of Integrated Biotechnology,
Sogang University, Seoul 121-742, Korea
(Received : 2007. 7. 19., Accepted : 2008. 12. 31.)

In this study, a combined process of sequential anaerobic-aerobic digestion (SAAD), fluidized-bed bioreactor (FBBR), and ultrafiltration (UF) for the treatment of small scale food waste leachate was developed and evaluated. The SAAD process was tested for performance and stability by subjecting leachate from food waste to a two-phase anaerobic digestion. The main process used FBBR composed of aerators for oxygen supply and fluidization, three 5 ton reaction chambers containing an aerobic mesophilic microorganism immobilized in PE (polyethylene), and a sedimentation chamber. The HRTs (hydraulic retention time) of the combined SAAD-FBBR-UF process were 30, 7, and 1 day, and the operation temperature was set to the optimal one for microbial growth. The pilot process maintained its performance even when the COD_{Cr} of input leachate fluctuated largely. During the operation, average COD_{Cr}, TKN, TP, and salt of the effluent were 1,207 mg/L, 100 mg/L, 50 mg/L, and 0.01%, which corresponded to the removal efficiencies of 99.4%, 98.6%, 89.6%, and 98.5%, respectively. These results show that the developed process is able to manage high concentration leachate from food waste and remove COD_{Cr}, TKN, TP, and salt effectively.

Key Words : anaerobic-aerobic digestion sequence process, fluidized bed bioreactor, UF membrane, two-phase anaerobic digestion, food waste leachate

서 론

오늘날 경제성장과 인구증가로 음식산업의 경제규모가

† Corresponding Author : Department of Chemical Engineering, Kwangwoon University, Seoul 139-701, Korea / Green Engineering Team, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH), ChonAn 330-825, Korea

Tel : +82-2-940-5173, Fax : +82-2-912-5173

Tel : +82-41-589-8356, Fax : +82-41-589-8580

E-mail : chpark@kw.ac.kr(C. Park), sykim@kitech.re.kr(S. Kim)

확대되고, 소비의 다양한 욕구 등으로 인해 폐기물의 발생은 양적으로 늘어나고 다양한 물질을 포함하고 있다. 우리나라의 음식물 쓰레기 발생량은 전체 발생하는 쓰레기 중에 40%를 차지하고 있다(1). 정부의 음식물 쓰레기의 감량화 홍보와 자원화 정책에 의해 1996년 이후 줄어들고 있지만 감소폭이 미비하여 2000년 하루에 11,434톤이 발생되고 있다. 그러나 이의 처리에 있어서는 직매립과 소각 등 2차 오염물을 생성하는 공정이 주류를 이루고 있고, 음식물 쓰레기를 자원화하기에 어려운 방부제 등 각종 조미료가 함유된 인스턴트 음식의 대중화로 인해 음식물 쓰레기의 처리가 국가적인

문제로 대두되고 있다(2). 특히, 환경오염방지를 위한 음식물 쓰레기 매립 방법이 폐기물 관리법에 의해 2005년부터 금지됨에 따라, 음식물 쓰레기의 처리를 위해 정부 차원의 공공 처리시설과 함께 민간 업체의 소규모 자원화 시설을 지원하여 환경적 오염을 줄이고자 노력하고 있다. 그러나 민간 업체의 소규모 자원화 시설은 전문 인력의 부족 및 음식물 침출수와 같은 음식물 쓰레기 처리시 부가적으로 발생하는 문제에 대하여 제대로 대응하지 못하고 있는 실정이다. 따라서 음식물 쓰레기의 자원화 처리시 부가적으로 발생하는 음식물 침출수의 처리를 위해 운전의 용이성, 저렴한 유지관리비 및 향후 환경을 고려한 무배출 청정처리 기술 도입이 요구되고 있는 실정이다. 침출수의 처리를 위한 친환경적 처리방법인 생물학적 처리 방법 (호기성 공정(3-5) 및 혐기성 공정(6-8))에 관한 연구는 국제적으로 활발히 수행되고 있는 실정이며, 더 나아가 통합공정을 적용한 이상 혐기소화 및 호기/혐기 회분식 공정 후 산소 폭기를 통한 처리효율 향상에 대한 연구들이 진행되고 있다(9-11).

본 연구에서는 CODcr의 평균값이 204,166 mg/L인 고농도 난분해성 유기물질을 다량 함유한 음식물 침출수의 처리를 위한 혐기/호기 연속회분반응 (SAAD, sequential anaerobic-aerobic digestion), 유동층 생물반응 (FBBR, fluidized-bed bioreactor) 및 막분리 (UF, ultrafiltration) 결합공정을 개발하고 이의 성능평가를 수행하고자 하였다. SAAD내 단상 혐기소화조 (SAAD1)는 초기 고농도 오염 부하량을 처리하기에 적합한 공정으로 대체 에너지인 메탄가스를 이용할 수 있는 장점이 있으며, 이와 함께 결합된 동일용량의 SAAD내 호기소화조 (SAAD2)는 짧은 처리시간을 가지며 후속공정인 FBBR에 유입되는 처리수의 오염부하를 낮추어 효율적인 운전을 할 수 있도록 도와주며, FBBR은 공기 폭기조를 적용하여 처리효율을 높여 주고, 마지막 공정으로 UF 공정을 적용하여 최종적으로 염분함량 및 부유성 물질을 분리시켜 음식물 침출수를 재이용을 할 수 있도록 설계하였다. 특히, 본 공정은 생물학적 처리와 순산소 처리 및 UF 처리를 소규모 처리장치에 적합하도록 적용하여 처리용량 0.5 ton/day 규모의 소규모 파일럿 플랜트에서 오염 부하변동이 큰 고농도 음식물 침출수 처리 개발 공정의 성능 및 안정성을 평가하였다.

재료 및 방법

실험재료 및 장치

본 연구에서 개발된 생물-분리막 복합 공정은 Fig. 1과 같이 SAAD1, SAAD2, FBBR 그리고 UF조로 구성되어 있으며 자세한 각 단위 공정의 설계 제한 및 운전 인자는 Table 1에 정리하였다.

SAAD1조는 UASB (upflow anaerobic sludge blanket)반응조를 채택하였다. 유입수는 고압 진공 펌프를 통해 반응조로 투입되며, 유입수는 상향류로 슬러지층을 통과시켜 탈질, 인 흡착, 부유물질 흡착 및 침전반응이 일어나도록 하였다(12). 반응조 (SAAD1)는 0.5 ton/day을 처리할 수 있는

며, 전체 체류시간은 20일, 온도는 35-56 °C를 유지하였으며, 음식물 침출수의 낮은 pH에 의한 활성 슬러지내의 미생물 충격을 막기 위해 가성소다를 첨가하여 pH 운전조건을 6-7로 유지하였다.

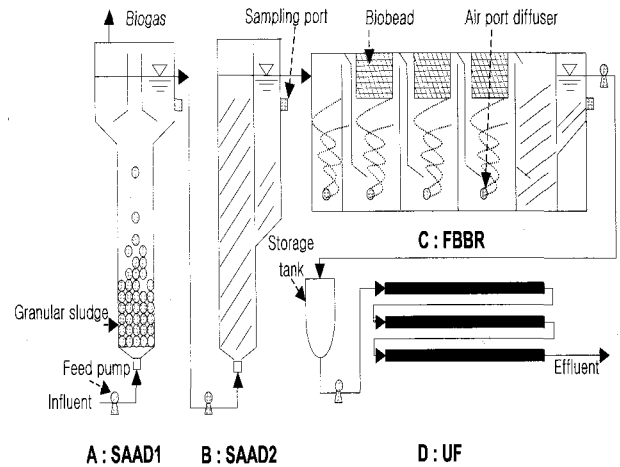


Figure 1. Flow diagram of the pilot-scale combined process for food waste leachate treatment.

Table 1. Operation conditions of the pilot plant

Process	SAAD1	SAAD2	FBBR		UF
			Nitrification zone	Clarification zone	
Dimension (m)	2D×5H	2D×5H	4.5W×1.2L×2.4H		0.3D×1H×3ca
Volume (m ³)	10	10	2	8	-
HRT (day)	20	10	7	7	1
Temp. (°C)	35-56	35-37	35-37	35-37	Ambient temp.

SAAD2는 SAAD1과 동일 규모의 처리용량을 가지고 있으며, 고압 진공펌프를 이용하여 혐기소화조 처리액을 공급하였으며, 이의 구조는 침전조와 유사하게 제작하여 침강부에서 통성 혐기성균에 의한 난분해성 유기물을 처리함과 동시에 상층부에서 호기성 미생물에 의한 유기물질 산화 및 암모니아성 질소를 질산성 질소로 전환시키고자 하였다. 전체 체류시간은 10일이었으며, 온도는 35-37°C로 유지하였다.

FBBR은 탈질실, 세 개의 담체 충전층 및 침전실로 구성하였다. FBBR내에 강력한 공기 폭기장치를 설치하고 상시/간헐 포기하여 질산화하였고 반응기내의 유동성 및 담체를 적용한 반응조의 활성을 향상시켰다. 본 연구에서 사용한 담체는 D사에서 다공성 PE (polyethylene) 수지에 호기성 미생물을 고정화한 것을 사용하였다. 반응기의 전체 체류시간은 7일이었으며, 온도는 35-37 °C로 유지하였다. UF조는 0.3 m (D) × 1 m (H)의 분리막관 3개를 직렬로 연결하여 잔존 부유물질 및 염분을 제거하기 위해 설계하였다. 반응은 상온의 조건에서, 전체 체류시간은 1일로 운전하였다.

실험방법

본 연구에 사용된 음식물 침출수는 서울시에서 발생하는 음식물 쓰레기를 재자원화하는 민간업체 G사에서 공급받

았으며, 성상은 pH가 4.15인 산성 액으로 오염부하(CODcr)가 평균 $204,166 \pm 60,867$ mg/L인 고농도 슬러지이며, 총질소, 총인의 함량이 높아 방류시 심각한 환경오염을 일으킬 수 있는 물질임과 동시에 유용한 영양원이 함유된 배출물임을 확인하였다(Table 2). 각 단위반응조의 시료 채취구에서 공정 중 간헐적으로 시료를 채취하여 냉장실에 보관 후 일주일 간격으로 실험실로 배송하여 분석하였다.

본 공정의 처리 효율은 각 공정별 오염부하 (CODcr, TKN, TP, Salt)의 안정적인 처리능 및 pH등을 측정하여 파악하였다. 이에 대한 분석을 위하여 CODcr는 HACH사의 CODcr kit를 사용하였고, 총질소 (TKN) 및 총인 (TP)은 수질오염 공정시험법(13)에 의하여 자외선 흡광도법과 아스코르빈산 환원법을 이용하여 측정하였으며, salt의 농도는 salt analyzer (SAT-2100, TKK·TOA Co., Japan), pH값의 측정은 digital pH-meter (Model 4star, Orion Co., USA)를 사용하여 측정하였다.

Table 2. Characteristics of influent swage

Property	Range	Average
pH	3.8 - 4.5	4.15
CODcr ^a (mg/L)	166000 - 330,000	204,166
T K N ^b (mg/L)	6,000 - 9,000	7,500
T P ^c (mg/L)	330 - 750	540
Salt (%)	0.6 - 0.7	0.65

^aChemical Oxygen Demand.

^bTotal Kjldahl Nitrogen.

^cTotal Phosphate.

결과 및 고찰

음식물 침출수의 SAAD와 이상 혐기소화의 초기 처리능 비교

실험 기간 중 일별 유입 음식물 침출수의 오염부하 (CODcr)는 변동 폭이 크며, 고농도임을 알 수 있었다(Fig. 2). 본 연구에서 적용된 음식물 침출수의 평균 CODcr는 $204,166 \pm 60,867$ mg/L였고, 콜로이드성 액체인 고농도 침출수 처리에 혐기소화 공정의 적용의 효율성 침출수와 관련한 오염물질 제거 메커니즘도 발표되어 있다(6-8, 14). 먼저, 초기 공정으로 이상 혐기소화조와 SAAD1을 비교 시험하였다. 본 연구에 적용된 음식물 침출수는 이상 혐기소화조에서는 오염부하 제거효율이 높지 않았으며, 현장에서 산생성조와 메탄생성조의 운전 조건을 유지하기에 적합하지 않았다. 이에 따른 부적합 요인을 보완하기 위하여 동일한 수리학적 체류시간의 SAAD1과 유기물 분해능이 높은 동일 처리용량의 SAAD2를 결합하여 혐기/호기 연속회분식 반응 공정을 채택하였다. 이상 혐기소화조는 SAAD1과 비교하여 처리효율면에서 50.9%의 높은 성능을 보였으나, 전체적인 유기물 오염부하 제거능이 16.3%로 낮았으며, 현장조건에서의 운전 및 관리가 상대적으로 복잡하였다(Table 3). 그러나 SAAD1은 이상 혐기소화조에 비해 낮은 처리효율을 보였지만 운전이 간단하고, 관리가 쉽다는 장점을 가지며 SAAD2와의 연속회분식 반응에서 유기물 오염부하 제거능이 52.3%로 SAAD공정이 초기 공정

으로써 적합함을 확인하였다(15).

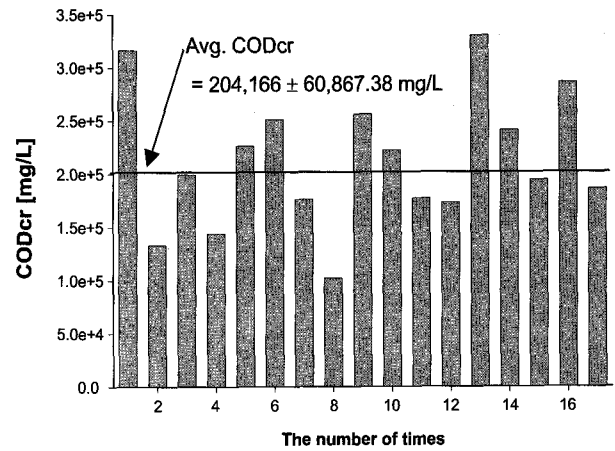


Figure 2. Fluctuation of influent CODcr.

Table 3. Comparison of CODcr removal in SAAD and two phase anaerobic digestion process (TPAD) from food waste leachate

	Raw	HRT (day)	Stage I	Stage II
			SAAD1	SAAD2
SAAD	204,166 ^a	30 (20/10)	187,194 ^a (8.3 ^b) (8.3 ^c)	97,433 (48.0)
			Hydrolysis and acidogenesis	Methane genesis
TPAD	308,600	20 (10/10)	288,600 (6.5)	258,280 (10.5)

^aCODcr value (mg/L).

^bCumulative removal efficiency of overall process (%).

^cRemoval efficiency of unit process (%).

공정의 오염부하 제거 및 성능평가

전체 공정의 pH 변화는 Fig. 3에 나타내었으며, 유기물 (CODcr), 총질소 (TKN), 총인 (TP) 및 염분 (salt) 제거 경향을 Table 4에서 보여주고 있다. 수질평가 항목에 속하는 pH는 미생물의 성장 및 대사작용에도 큰 영향을 주는 환경인자로서 미생물이 생존하기 위해 pH 4.0-9.5의 범위를 유지하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에 사용된 혐기성 미생물 및 호기성 미생물의 최적 pH는 각각 4.0-6.0과 6.0-7.5로 알려져 있다.

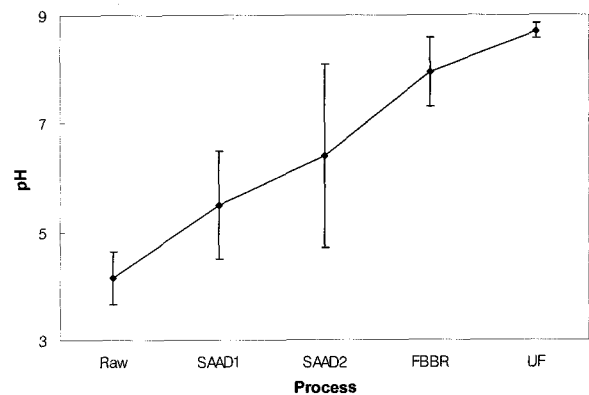


Figure 3. pH variation in overall combined process.

Fig. 3은 각 공정별 pH의 변화를 나타낸 것으로 공정별 pH값은 SAAD1에서 5.50, SAAD2에서는 6.40, FBBR에서는 7.95, 마지막 공정인 UF조에서는 8.70을 보였다. 초기 원수의 pH 값이 3.80-4.50의 범위로 낮은 산성이었으며, 최종 처리수의 pH범위는 8.60-8.80을 나타내었다. 각 공정별 pH의 변동 폭을 보인 이유는 혐기소화 공정의 경우 산생성 및 메탄생성 반응과 호기 소화조에서는 질산화 반응시 발생하는 부산물에 의한 pH의 변화인 것으로 보이며, 각각의 공정을 거치면서 pH값이 상승하는 요인은 미생물대사에서 질산염을 질소가스로 전환시 알칼리도가 생성되어 pH값이 상승되는 것으로 사료된다(16).

SAAD1에서 초기 음식물 침출수의 8.3%, 다음 공정으로 SAAD2에서는 전체 52.3%, FBBR조에서는 전체 94.8%, 마지막 공정인 UF공정에서는 전체 오염부하 대비 99.4%의 오염부하 감소율을 보여, 오염부하 (CODcr)의 제거가 단계적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다. 유기물 제거에 대한 각 공정별 효율은 SAAD1에서 약 8.3%, SAAD2에서는 약 48.0%, FBBR에서는 약 89.0%, 최종 공정인 UF조에서 약 88.7% 제거율을 보였다. 각 단계별 TKN 농도는 유입수 6,750 mg/L, SAAD1에서 8,000 mg/L로 증가하였다가 다음 공정인 SAAD2에서는 1,100 mg/L로 전체 83.7%의 오염부하 감소율을 보였다. 다음 공정인 FBBR조에서는 300 mg/L로 전체 95.6%의 오염부하 감소율을 보였으며, 마지막 공정인 UF공정에서는 전체 오염부하 대비 98.6%의 오염부하 감소율을 보였다. TKN의 제거율에 대한 각 공정별 효율의 경우, SAAD2에서는 약 86.3% 제거율을 보였고, FBBR에서는 약 72.7% 제거율을 보였으며, UF조에서 약 66.7% 제거율을 보였다. 본 연구에서 총질소 함량 (TKN)의 제거는 호기성 상태에서 질산화 과정에 의해 아질산성 질소와 질산성 질소로 전환 후, FBBR공정에서 공기 폭기부에서 부분적인 순산소 질소처리 효과를 확인할 수 있었으며(9), 이와 더불어 처리조내의 DO 수치를 높여, 산소섭취를 둘러싸고 nitrifier와 heterotrophs간의 경쟁에서 발생하는 질산화 미생물의 충격을 감소시킴으로써 제거효율 상승효과를 얻을 수 있었다(17). 각 단계별 TP 농도는 유입수 480 mg/L, SAAD1에서 450 mg/L로 전체 6.3%의 오염부하 감소율을 나타내었다가, 다음 공정인 SAAD2에서는 210 mg/L로 전체 56.3%의 오염부하 감소율을 보였고, FBBR에서는 100 mg/L로 전체 77.1%의 오염부하 감소율을 나타내었으며, 마지막 공정인 UF공정에서는 전체 오염부하대비 89.6%의 오염부하 감소율을 보였다. TKN 제거율에 대한 각 공정별 효율은 SAAD1에서 제거효율은 6.3%, SAAD2에서는 약 53.3%, FBBR에서는 약 47.6%, 마지막 공정인 UF조에서 약 54.5% 제거율을 보였다. 총인 (TP) 함량의 경우에도 총질소 (TKN) 함량의 처리경향과 동일하였으나, 처리효율면에서 총질소 (TKN) 처리경향에 비해 효율이 낮았다. 이는 각각의 공정별 수리학적 체류시간이 유기물 (CODcr) 제거에 맞추어 설계되어 혐기/호기 소화를 통한 인 제거 기작에서 혐기 조건에서 인산염 (PO₄³⁻)이 과잉 방출되고, 호기 조건에서 인산염을 충분히 흡수하는데 필요한 시간이 부족하여 나타난 현상으로 보인다(18). 또한, 음식물 쓰레기의 퇴비화시 염분의 농도가 주요한 요소임에 착안하여, 본 공정을 통한

음식물 침출수 처리액의 재사용을 위해 퇴비화 공정시 사용되는 용수로써 활용도를 검토하고자, 전 공정별 염분 제거 경향을 확인하였다. 시험 결과, 원액 염분농도는 0.6%에서 0.7%로 상당히 높은 값을 보였으며, SAAD1에서의 처리수 염분농도는 0.5%로 전 공정 대비 23.1%의 염분 제거능을 보였고, SAAD2에서의 처리수 염분농도는 0.3%로 53.8%의 염분 제거능을 보였다. 다음 공정인 FBBR에서의 처리수 염분농도는 0.16%로 75.4%의 염분 제거능을 보였고, 마지막 공정인 UF에서의 처리수 염분농도는 0.01%로 98.5%의 염분 제거능을 나타내었다. 염분에 대한 각각의 개별 공정별 제거 효율은 SAAD1에 23.1%, SAAD2에서 40.0% 제거율을 보였고, FBBR에서는 46.7%, 마지막 공정인 UF조에서 93.7%였다(Table 4).

Table 4. Efficiency of CODcr, TKN, TP and salt removal in overall combined process

Parameter	CODcr		TKN		TP		Salt		
	Unit	Conc. (mg/L)	Removal (%)	Conc. (mg/L)	Removal (%)	Conc. (mg/L)	Removal (%)	Conc. (%)	Removal (%)
Raw		204,166 ^a	-	6,750	-	480	-	0.65	-
SAAD1		187,194	8.3 ^b (8.3 ^c)	8,000	- (-)	450	6.3 (6.3)	0.50	23.1 (23.1)
SAAD2		97,433	52.3 (48.0)	1,100	83.7 (86.3)	210	56.3 (53.3)	0.30	53.8 (40.0)
FBBR		10,705	94.8 (89.0)	300	95.6 (72.7)	110	77.1 (47.6)	0.16	75.4 (46.7)
UF		1,207	99.4 (88.7)	100	98.6 (66.7)	50	89.6 (54.5)	0.01	98.5 (93.7)

^aCODcr value (mg/L).

^bCumulative removal efficiency of overall process (%).

^cRemoval efficiency of unit process (%).

최종적으로 본 공정의 성능을 평가하기 위해 3개월 동안 총 5회의 운전을 실시하였다. Fig. 4는 SAAD1에서 처리수 유기물 (CODcr) 제거범위는 166,000-205,000 mg/L였고, 평균값은 197,600 mg/L, 표준편차는 32,753 mg/L였다. 다음 공정인 SAAD2는 101,400-115,600 mg/L 범위를 보였으며, 평균값은 109,100 mg/L, 표준편차는 6,068 mg/L였다. 또한, FBBR은 10,700-13,600 mg/L 범위를 보였고, 이때 평균값은 11,520 mg/L, 표준편차는 1,234 mg/L이며, 마지막 공정인 UF조에서는 1,740-2,140 mg/L 범위를 나타내었고, 평균값은 1,928 mg/L, 표준편차는 160 mg/L을 보였다. 각 단위 공정별 처리효율은 SAAD1-SAAD2-FBBR-UF조에서 각각 평균값을 기준으로 표준편차의 오차범위를 나타내면, 16.5%, 5.6%, 10.7% 그리고 8.3%였다. 이는 SAAD1의 경우 유입수의 변동 폭이 커서 미생물의 미적용으로 인한 처리효율의 변동 폭이 나머지 공정에 비하여 높게 나타난 것을 제외하고는 안정된 처리 효율 (변동폭 10% 이내)로 운전이 가능함을 확인하였고, 전체적으로 각각의 개별공정 및 복합공정 모두 우수한 안정성을 보였다.

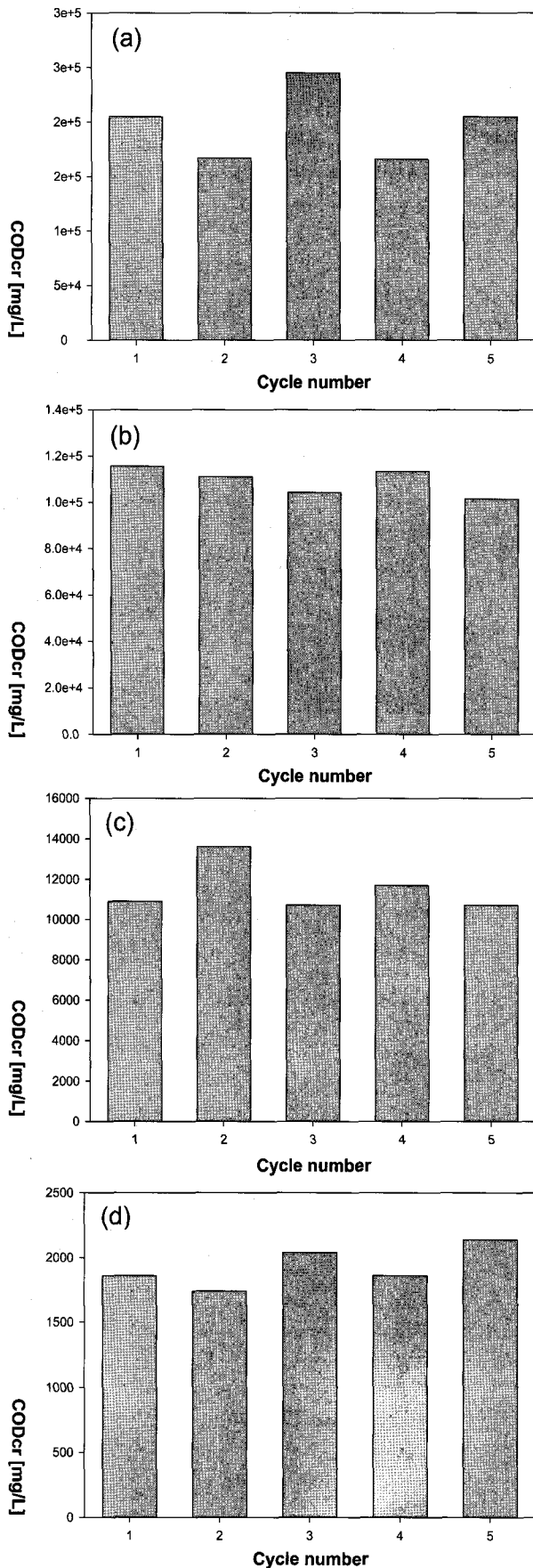


Figure 4. Stability and reproducibility of the combined process. (a) SAAD1, (b) SAAD2, (c) FBBR and (d) UF.

요 약

본 연구에서는 오염부하량이 높고, 유입수별 변동 폭이 큰 음식물 침출수를 현장조건에서 처리하기 위한 혐기/호기 연속회분반응 (SAAD), 유동층 생물반응 (FBBR) 및 막분리 (UF) 결합공정을 개발하고 이의 성능을 평가하였다. 공정 설계시 고려된 사항은 초기 고농도 오염부하의 처리에 적합한 초기 공정의 검토를 위한 이상혐기소화조와 상향류식 혐기성 슬러지 블랑킷트 (UASB)을 비교하여 현장조건에 적용 가능한 단상혐기소화조 (SAAD1)와, 높은 유기물 처리효율을 가진 호기소화조 (SAAD2)를 결합한 혐기/호기 연속회분공정을 선정하였다. 또한, 총질소 (TKN), 총인 (TP)의 제거효율을 극대화하기 위한 공기폭기조를 적용한 FBBR을 도입하였으며, salt 오염원을 완전히 제거하기 위한 UF조를 도입하였다. 본 공정의 처리 결과는 유입 음식물 침출수의 화학적 산소요구량 (CODcr)의 변동 폭이 크에도 불구하고, 파일럿 공정은 안정된 처리능을 보였다. 본 연구에 사용된 유입수의 CODcr, TKN, TP, salt의 평균 값은 204,166 mg/L, 7,500 mg/L, 540 mg/L, 0.65%였으며, 처리수는 1,207 mg/L, 100 mg/L, 50 mg/L, 0.01%로 각각의 최종 제거효율은 99.4%, 98.6%, 89.6%, 98.5%의 결과를 나타내었으며, pH는 다소 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 더불어, 본 공정의 처리수는 염분 및 독성물질이 미함유된 고영양 처리수로써 액상 비료나 재자원화 공정 (퇴비화) 중 필요한 용수로 사용이 가능한 것으로 조사되었다. 최종적으로 파일럿 규모의 생물-분리막 복합공정은 오염부하가 심하고 유입 부하량 변동 폭이 큰 현장조건에서 우수한 처리성능 및 시스템의 안정성을 나타내었으며, 부가적으로 발생하는 메탄가스와 처리수의 재자원화의 장점을 가지며, 현장조건에서 음식물 침출수의 무배출-청정처리가 가능함을 확인하였다.

감 사

본 연구는 2007년 광운대학교 교내 학술연구비 및 한국생산기술연구원 생산기술연구사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Rogoshewski, P., H. Bryson, and K. Waner (1983), Technology for waste disposal sites. Noyes data corporation park ridge, NJ.
2. Kim, P. J., K. W. Chang, and K. H. Min (1995), Evaluation of the stability of compost made from food wastes by the fermenting tank, *J. KOWREC.* 3, 35-42.
3. Boyle, W. C. and R. K. Ham (1974), Biological treatability of landfill leachate, *J. Water Pol. Cont. Fed.* 48, 860-872.
4. Robinson, H. D. and G. Grantham (1988), The treatment of landfill leachates in on-site aerated lagoon plants; experience in Britain and Ireland, *Wat. Res.* 22, 733-747.
5. Robinson, H. D. and P. J. Maris (1983), The treatment of leachates from domestic wastes in landfills_I: Aerobic biological treatment of a medium-strength leachate, *Wat. Res.* 17, 1537-1548.

6. Berrueta, J. and L. Castrillin (1992), Anaerobic treatment of leachates in USAB reactors, *J. Chem. Technol. Biotech.* **54**, 33-37.
7. Christensen, T. H., R. Cossu, and R. Stegmann (1992), Anaerobic USAB reactor: laboratory experiments, in landfilling of waste: leachate, p245-263, Elsevier science publisher LTD, London.
8. Kennedy, K. J., M. F. Hamoda, and S. G. Guiot (1988), Anaerobic treatment of leachate using fixed film and sludge bed systems, *J. Water Pol. Cont. Fed.* **60**, 1675-1683.
9. Kim, M. Y. and I. S. Kim (1999), The effects of organic compounds in Pure-Oxygen Biofilm (POB) process, *Environ. Eng. Res.* **21**, 119-130.
10. Knudson, M. F., K. J. Williamson, and P. O. Nelson (1982), Influence of dissolved oxygen on substrate utilization kinetics of activated sludge, *J. Water Pol. Cont. Fed.* **54**, 52-59.
11. Karrer, N. J., G. Ryhiner, and E. Heinzl (1977), Applicability test for combined biological-chemical treatment of wastewaters containing biorefractory compounds, *Wat. Res.* **31**, 1013-1020.
12. Kwon, J. C., H. S. Park, J. Y. An, K. B. Shin, Y. H. Kim, and H. S. Shin (2005), Biological nutrient removal in simple dual sludge system with an UMBR (upflow mutly-layer bioreactor) and aerobic biofilm reactor, *Wat. Sci. Tech.* **52**, 443-451.
13. Ministry of Environment (2002), Korean standard methods for the examination of water and wastewater, p.691, Dong hwa technology publishing Co., Seoul.
14. Gu, X. S. (1993), Mathematic models for wastewater bio-treatment[M], 2nd ed., Tsinghua university press, Beijing.
15. Zitomer, D. H. and R. E. Speece (1993), Sequential environments for enhanced bio-transformation of aqueous contaminants, *Environ. Sci. Tech.* **27**(2), 27-38.
16. Wett, B. and W. Rauch (2003), The role of inorganic carbon limitation in biological nitrogen removal of extremely ammonia concentrated wastewater, *Wat. Res.* **37**, 1100-1110.
17. Wild, H. E., C. N. Sawyer, and T. C. McMhan (1971), Factors affecting nitrification kinetics, *JWPCF.* **43**, 1845-1854.
18. Randall, C. W., J. L. Barnard, and H. D Stensel (1992), Water quality management library, In Design and retrofit of wastewater treatment plants for biological nutrient removal **5**, Technomic publisher, Pennsylvania.