

Hybrid-RBC와 BAF의 조합공정을 이용한 고농도 도축폐수의 처리 특성

High Strength Slaughter Wastewater Treatment in a Novel Combined System of Hybrid-Rotating Biological Contactor and Biological Aerated Filter

정찬일 · 안조환 · 배우근[†] · 김승진
Chan-il Jung · Johwan Ahn · Wookeun Bae[†] · Seungiin Kim

한양대학교 건설환경공학과
Department of Civil and Environmental Engineering, Hanyang University

(2011년 1월 4일 접수, 2011년 2월 28일 채택)

Abstract : This study was conducted to develop a novel combined system of a hybrid rotating biological contactor (RBC) process that was composed of an attached- and suspended- biomass reactor, followed by a settler and a biological aerated filter (BAF) column to treat a high strength slaughter wastewater. Long term influences of organic and nitrogen loading rates were investigated to see how the combined system worked in terms of the removal efficiency. A synthetic wastewater containing a pork cutlet steak source (commercially available) and swine blood was used to feed the combined system. The hybrid RBC process showed excellent removals: about 95% for soluble COD and 85% for ammonium nitrogen. However, the unsettled solids seriously deteriorated the removal efficiency of total COD (TCOD) and total nitrogen (TN) in the RBC process. A significant fraction of the TCOD and suspended solids (SS) was further removed in the BAF column although the effluent quality was still unsatisfactory, giving TCOD 300 mg/L, SS 180 mg/L and TN 59 mg/L. An addition of polyaluminium chloride into the RBC effluent improved the performance of the settler and BAF, producing an excellent quality of final effluent; TCOD 16.5 mg/L, SS 0 mg/L, TN 55.5 mg/L, TP 1.3 mg/L. Therefore, it was confirmed that the combined system of hybrid RBC and BAF could treat a high strength slaughter wastewater excellently.

Key Words : Biological Aerated Filter, Novel Hybrid System, Rotating Biological Contactor, Slaughter Wastewater, Swine Blood

요약 : 본 연구에서는 부착/부유 미생물 혼재형 RBC (Rotating Biological Contactor)와 BAF (Biological Aerated Filter) 공정이 가지는 각각의 장점을 조합한 호기성 생물막 처리 시스템을 고안하여 고농도 도축폐수의 처리 특성을 평가하였다. 본 공정은 상당량의 부유 미생물이 함께 있는 RBC와 침전지 그리고 BAF 공정 순으로 구성되었다. 첫 번째 공정인 RBC와 침전지에서는 유기물의 산화, 질소의 질산화/탈질 및 부유물질의 제거가 이루어지며, 후속 공정인 BAF에서는 일부 제거되지 않은 유기물과 질소의 산화 및 부유물질의 여과가 이루어진다. 돈가스 소스(시판용)와 돼지피을 이용하여 모사한 고농도 도축폐수 (TCOD 5.2~40.4 g/m²·d, TN 0.44~4.17 g/m²·d)의 처리 특성을 평가한 결과, 침전지를 포함한 RBC 공정에서 Soluble COD와 NH₃-N의 평균 제거율은 각각 90%와 82% 이상으로 양호하였으나 TCOD와 TN은 Suspended Solid (SS)의 대량 유출과 돼지피에서 기인한 콜로이드 물질 생성 때문에 각각 60%와 69%의 다소 낮은 제거율을 보였다. 후속 공정인 BAF가 잔존 TCOD와 TN을 제거하는 생물 반응조의 역할과 SS를 제거하는 여과기의 역할을 충분히 수행해 약 100 mg/L의 TCOD와 약 140 mg/L의 SS 추가 제거가 가능하였으나, 처리수질은 TCOD 300 mg/L, SS 180 mg/L 그리고 TN 53 mg/L로 상당히 높았다. RBC 유출수에 Polyaluminium Chloride를 투입한 결과, 침전성이 크게 향상되어 RBC+침전지 공정 유출수의 TCOD와 TN은 각각 93.8%, 25.6%의 제거율을 보였으며, BAF 유출수 수질은 TCOD 16.5 mg/L, SS 0 mg/L, NH₃-N 12.0 mg/L, TP 1.3 mg/L로 우수하였다. 따라서 별도의 추가 처리공정 없이 본 연구에서 고안한 RBC+BAF 조합공정에 의한 처리만으로 고농도 도축폐수를 성공적으로 처리할 수 있었다.

주제어 : 도축폐수, 돼지피, 회전원판법, 호기성 생물여과법, 하이브리드 시스템

1. 서론

식품산업은 높은 유기물 및 영양염류 부하를 포함하고 있는 산업폐수 중 하나이다. 국내 식품폐수 배출업소는 약 4,300개로 이는 전체 산업폐수 배출 업소의 11%를 차지한다.¹⁾ 식품폐수 중에서도 도축 폐수 및 육류 가공 폐수는 고농도의 유기물을 함유하고 있어 생물학적 처리방법이 주로 사용되고 있지만 동물성 기름을 다량 포함하고 있어 후속 공정으로 물리·화학적 처리방법도 널리 사용되고 있다.²⁾ 그러나 생물학적 처리방법이 대부분 재래식 처리기술에 의

존하고 있어 효율적인 처리가 어렵고 많은 부지가 소요되는 관계로 생산량 증대 시 처리 능력 확대에 큰 문제점을 가지고 있다. 따라서 경제적이면서 좁은 공간에 적용이 가능하고 화학적 처리 공정을 대체할 수 있는 직접형 고효율 생물학적 처리 공정의 필요성이 크게 부각되고 있다. 이 중에서 반응조 내 고농도 미생물 보유가 가능한 회전원판법 (Rotating Biological Contactor, RBC)이 적합한 처리공정 중의 하나로 알려져 있다.³⁾ 이는 디스크 표면에 고농도의 미생물을 부착시켜 오염물질과의 접촉시간을 증가시킴으로써 제거 효율을 증진시킬 수 있기 때문인데 동일 부하에서

[†] Corresponding author E-mail: wkbae@hanyang.ac.kr Tel: 031-400-5148 Fax: 031-407-0697

활성슬러지 반응조의 부피보다 작은 부지가 필요해 식품 폐수 처리 공정으로 적합하다. 한편, 생물여과법(Biological Aerated Filter, BAF)도 유기물과 암모니아성 질소를 동시에 제거 할 수 있을 뿐만 아니라 단일 반응기에서 부유 고형물까지 효과적으로 제거할 수 있어 다른 대안으로 알려져 있다.⁴⁾ 특히 BAF 공정은 생물학적 영양영류 제거가 가능해 생물막을 이용한 생물학적 고도처리 공정으로도 사용이 가능하다. 반응기 내부의 여재에 생물막을 형성하여 고농도의 미생물로 오염물질 제거가 가능하며, 수직형으로 집적화된 반응기 내에서 질산화와 인제거가 동시에 이루어지는 특징도 가지고 있다.⁵⁾ 본 연구에서는 RBC와 BAF가 가지고 있는 각각의 장점을 효과적으로 이용해 고농도 도축폐수를 처리할 수 있도록 두 공정과 침전지의 적절한 조합을 통해 처리 효율의 극대화를 시도하였다. 특히, RBC 반응조에 고농도의 활성 미생물을 유지시킴으로써 부유 반응조의 기능을 겸할 수 있도록 하였다. 구체적으로 두 공정이 조합된 생물막 공정의 효율을 극대화하기 위한 방법으로 모사한 도축폐수를 사용하여 RBC 유입수 기질(COD 및 N)의 부하, 유량, 원판 회전수의 영향을 알아보았고, BAF에 의한 TCOD, SS, TN 등의 제거 정도와 영향요소에 대해 고찰하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

고농도 도축폐수의 고도처리를 위한 RBC와 BAF의 조합 공정은 Fig. 1과 같다. RBC 반응기의 액상용적은 110 L로 상당히 크게 설계하였고, 회전 원판은 지름 55 cm의 망상형(2.2절 참조) 원판 4개로 구성되어 있으며, 침수면적은 약 35%이었다. 침전지는 아크릴 재질의 원통형(하부 원추) 탱크로서 직경은 37.5 cm이고 용적은 44.2 L이었다. 상부에 원주를 따라 사다리꼴 웨어를 설치하여 상징액이 균일하게 유출되도록 하였다. BAF 반응기는 직경 20 cm, 높이 2 m의 아크릴 컬럼으로 유효용적은 62.8 L이고 반응기 내부는 점토 성분의 여재를 반응기 용적의 약 75%(약 1.5 m 높이) 충전하여 상향류로 설계하였다.

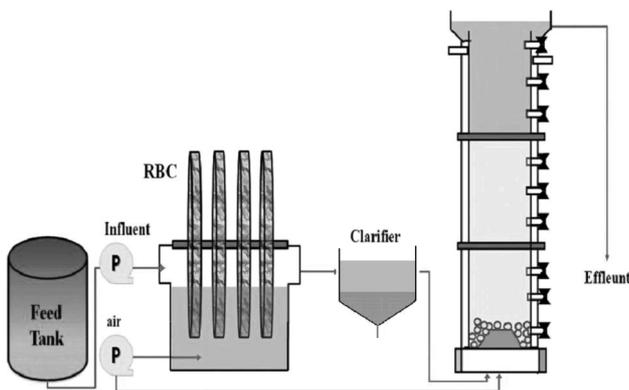


Fig. 1. Schematic of a combined system of RBC and BAF.

2.2. 접촉매체

RBC의 회전 원판은 97% 이상의 공극률을 가진 Polyvinylidene Chloride 재질의 망상체로 접촉섬유사 사이로 공기와 폐수의 유출입이 용이하도록 제작되어 있다.⁶⁾ 망상형 원판의 두께는 약 5 cm, 원판 간격은 5 cm로 제조되어 있다. 비표면적(8.1 m²)이 넓어 회전 평판형 원판보다 부착 미생물의 농도가 약 3배 정도(약 60,000~70,000 mg/L) 높아 처리 효율을 증대시키고 유량변동 및 기질 부하 변동에 강한 특징을 가지고 있다.⁶⁾ 한편, BAF의 충전 여재는 점토 성분의 파쇄형 회색 여재(Filtralite HC 2.5~5 mm, Weber, Norway)로 크기는 대략 2.5~5 mm이고 비표면적은 약 4,000 m²/m³이다.

2.3. 합성폐수의 성상

고농도 돼지 도축폐수의 특성을 모사하기 위해 돈까스 소스(시판용) 2 kg, 돼지피 4.87 L, NH₄HCO₃ 424 g, K₂HPO₄ 81.55 g을 혼합하여 800 L의 합성폐수를 만들었다. 합성폐수의 평균성상은 TCOD 1,990 mg/L, TN 190 mg/L과 TP 27 mg/L로 구성되어 있다. 사용한 돈까스 소스는 TCOD 2,032 mg/L, SCOD 1,955 mg/L TN 24 mg/L, TP 7.5 mg/L의 평균성상을 가지며, 돼지피는 TCOD 160,000 mg/L, SCOD 140,000 mg/L, TN 16,200 mg/L, NH₄⁺-N 100 mg/L, NO₃⁻-N 145 mg/L, NO₂⁻-N 53 mg/L, TP 2,540 mg/L의 평균성상을 보였으며, 대부분의 질소성분이 유기질소태로 구성된 특징이 있다. 실험은 대부분 상기 합성폐수를 써서 진행되었으나 실험초기에는 필요에 따라 조성을 조금씩 바꾸었으며, 변경 내용은 본문에 제시 되어있다.

2.4. 반응기 운전

RBC와 BAF의 조합공정에 의한 고농도 도축폐수의 처리 특성을 평가하기 위해 우선 RBC와 침전조의 구성으로 다양한 기질 부하에서 162일 동안 운전하였고 그 후 침전조 후단에 BAF를 설치하여 32일 동안 운전하였다. RBC와 BAF의 조합 공정의 운전조건을 Table 1에 나타내었다. RBC 반응기 운전 초기 생물막 형성을 위해 여천위생처리장의 침전조 건조 슬러지를 파쇄하여 Mixed Liquor Suspended Solid (MLSS) 농도가 5,000 mg/L가 되도록 식중하였다. 한편 RBC 반응조에서 성장한 부유성 슬러지는 침전에서 전량 폐기하여 고형물체류시간과 수리학적체류시간을 같게 운전하였고 Period III 부터는 고농도 유기물 부하에 능동적으로 대응하기 위해 산기석을 이용해 RBC 반응조에 산소를 공급하였다. 역세척은 공기와 처리수를 이용하여 2~3일 간격으로 실시하였다.

2.5. 미생물 특성 분석

RBC의 회전 원판에 부착된 생물막 및 반응조 내 부유 미생물의 활성도를 측정하였다. 채취한 미생물을 300 rpm에서 20분간 원심 분리 후, 인산완충용액과 Nutrient Broth,

Table 1. Operational conditions

Period	Days	Flow rate (L/day)	HRT ^a (hr)	EBCT ^b (hr)	COD ^c loading (g/m ² ·day)	TN ^c loading (g/m ² ·day)	Process
I	0~9	25	105.6	-	5.2	0.441	RBC+clarifier
II	10~29	75	35.2	-	17.8	0.784	RBC+clarifier
III	30~102	150	17.6	-	40.4	4.170	RBC+clarifier
IV	103~131	150	17.6	-	31.8	3.933	RBC+clarifier
V	132~162	125	21.1	-	18.7	1.848	RBC+clarifier
VI	163~194	125	21.1	12	18.6	2.427	RBC+clarifier+BAF

^a for RBC; ^b for BAF; ^c per total surface area of RBC

CH₃COOH, CH₃COONa 등의 기질을 이용하여 기질 비소비속도(Specific Substrate Utilization Rate, q) 추정시험을 pH 7.5, 온도 20°C에서 회분식으로 실시하였다.

2.6. 분석방법

COD, NH₃-N, NO₂-N, NO₃-N, TN, TP는 Standard Methods, SS와 Volatile Suspended Solid (VSS)는 수질오염공정시험법⁷⁾에 따라 1주일에 2~3회 분석을 실시하였다. 모든 COD 시험은 중크롬산칼륨법으로 실시하였으며 필요에 따라 TCOD 또는 SCOD를 측정하였다. 질소 및 인 성분은 기본적으로 GF/C로 여과 후 시료에 대해 측정하였으며 다만 최초 유입수에 대해서는 부유물을 포함하는 원시료에 대해 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. RBC의 기질 제거 특성

3.1.1. 유기물 제거 효율

망상형 RBC 공정의 고농도 도축폐수 처리 성능을 다양한 유기물 부하 조건하에서 평가하고 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 운전초기(Period I), 5.2 g COD/m²·d의 유기물 부하에서 85% 이상의 TCOD 및 SCOD 제거효율을 보여 식종 미생물의 적응이 원활히 이루어진 것으로 판단된다. 식종 미생물로 사용한 건조 슬러지는 침전성이 매우 양호하여 고농도의 식종 MLSS에도 불구하고 침전지 유출수의 TCOD 농도는 낮게 유지되었다. 한편, Period II 20일간 돼지피 처리 특성을 평가하기 위해 탄소원으로 돈까스 소스를 배제하고 돼지피만 이용하여 17.8 g COD/m²·d의 유기물 부하에서 운전하였다. 그 결과, SCOD의 제거율은 약 90%로 상당히 양호하였고, 또한 안정된 유출수질을 유지하였다. 그러나 TCOD의 제거율은 약 68%에 머물렀는데, 이는 RBC 반응조에서 성장한 부유성 미생물이 충분히 침전되지 못하고 유출되었기 때문이며 돼지피의 생분해 과정에서 생성된 것으로 추정되는 약 50 mg COD/L의 콜로이드 입자가 슬러지 침전성을 더욱더 악화시킨 것으로 판단된다. 한편, 30일부터는 다시 탄소원으로 돈까스 소스와 돼지피를 이용하여 유기물 부하를 40.4 g COD/m²·d로 높여 운전한 결과

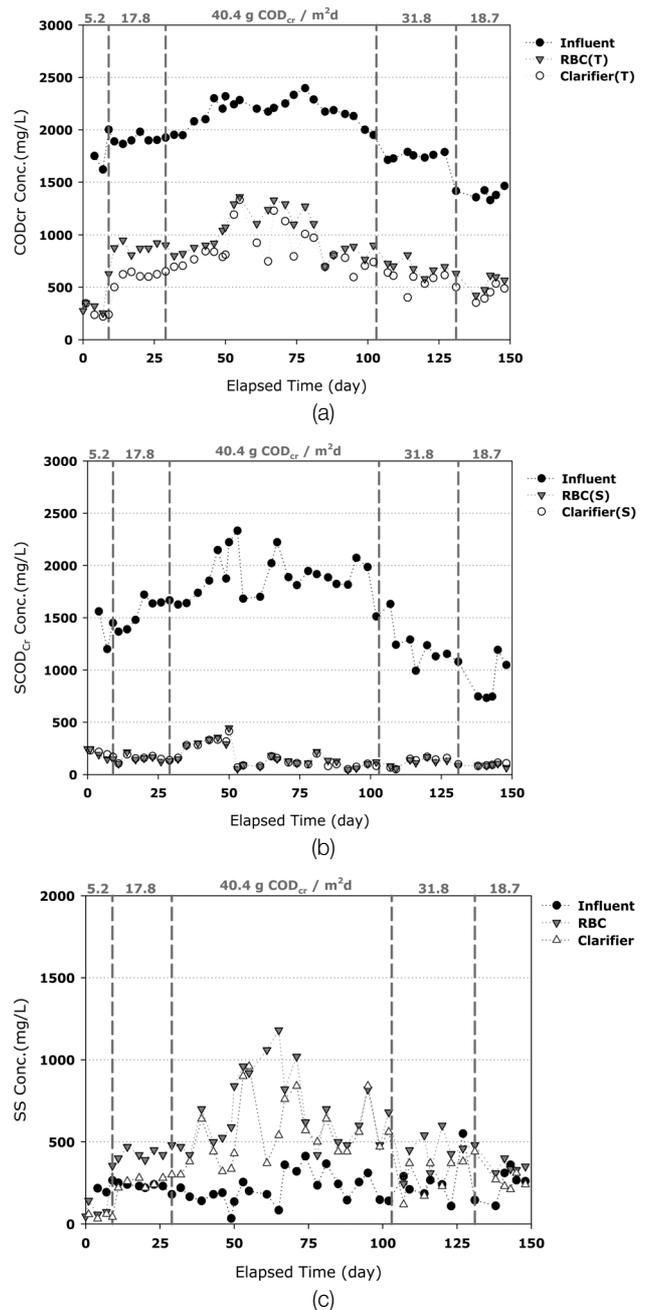


Fig. 2. Daily variation of (a) TCOD, (b) SCOD and (c) SS concentrations.

(Period III), SCOD는 90% 이상의 안정적인 제거율을 보였으나 TCOD의 제거율은 더욱 악화되었다. 이는 유기물 부하 상승에 따른 돼지피의 유입량 증가가 콜로이드 입자의 증가를 유발했기 때문으로 판단되며, 고농도 유기물에 의한 생물막의 과성장과 탈리의 주기적 반복도 TCOD의 제거 효율을 악화시킨 원인으로 판단된다. 또한 고부하 유기물에 의한 산소 요구량 증가 때문에 50일에서 80일 사이에 약 0.5 mg/L까지 감소한 RBC 반응조 내 용존산소도 낮은 TCOD 제거율의 원인으로 판단된다. 103일부터 유기물 부하를 31.8 (Period IV)과 18.7 (Period V) g COD/m²·d로 낮추어 각각 29일 및 17일 간 운전한 결과, SCOD는 90% 이상의 제거율을 유지하였으나 TCOD의 제거율은 크게 개선되지 않았다. 이는 유기물 부하의 감소에도 불구하고 침전지에서 지속적인 부유성 미생물의 유출이 TCOD 제거율을 크게 개선시키지 못한 가장 큰 원인으로 판단된다. Fig. 2(c)에 나타난 공정별 부유물질의 농도에서 알 수 있듯이 운전초기를 제외한 전 운전기간 동안 침전이 원활하지 못해 부유성 미생물의 적절한 제거가 이루어지지 못했고 더욱이 돼지피에서 기인한 콜로이드 입자의 제거도 어려웠기 때문에 TCOD 제거율의 개선이 이루어지지 못한 것으로 판단된다. 따라서 RBC 및 침전 공정에서 처리되지 못한 것으로 판단된다.

3.1.2. 질소 제거 효율

다양한 질소 부하 조건하에서 RBC 공정의 질소 제거 특성을 평가하였고 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Period I 10일간 질소원으로 NH₄HCO₃과 돼지피의 혼합물이 공급되었을 때, TN 제거율(유입수 TN과 부유성 미생물과 함께 유출된 RBC 유출수의 TN과의 차이를 유입수 TN으로 나눔)은 약 52%, NH₃-N의 제거율은 약 77%로 다소 낮은 것으로 나타났다. 이는 운전 초기 질산화 미생물의 성장속도가 느려 생물막 형성 기간 동안 고농도의 질소를 충분히 산화시킬 만큼의 개체수가 생물막 내에 존재하지 못했기 때문으로 판단된다. 한편, NH₄HCO₃와 돈가스 소스를 배제하고 돼지피만 기질로 공급하여 운전한 10~29일(Period II) 동안은 TN 부하가 약 2배 증가하였음에도 불구하고 제거율이 약 65%로 상당히 향상된 것으로 나타났다. 이는 SCOD/TN (C/N) 비가 약 22.6으로 운전초기에 비해 2배 증가했기 때문에 미생물 합성 및 질산화/탈질이 TN 제거에 기여한 것으로 판단된다. NH₃-N의 경우는, 유입기질에서의 농도보다 RBC 유출수의 농도가 오히려 증가하였는데, 이는 돼지피 중의 질소성분이 주로 유기질소태로 되어있으며 이것이 분해되는 과정에 암모니아가 생성되었기 때문이다. 뿐만 아니라 약 15 mg/L 정도의 질산성 질소가 검출되었으므로 생

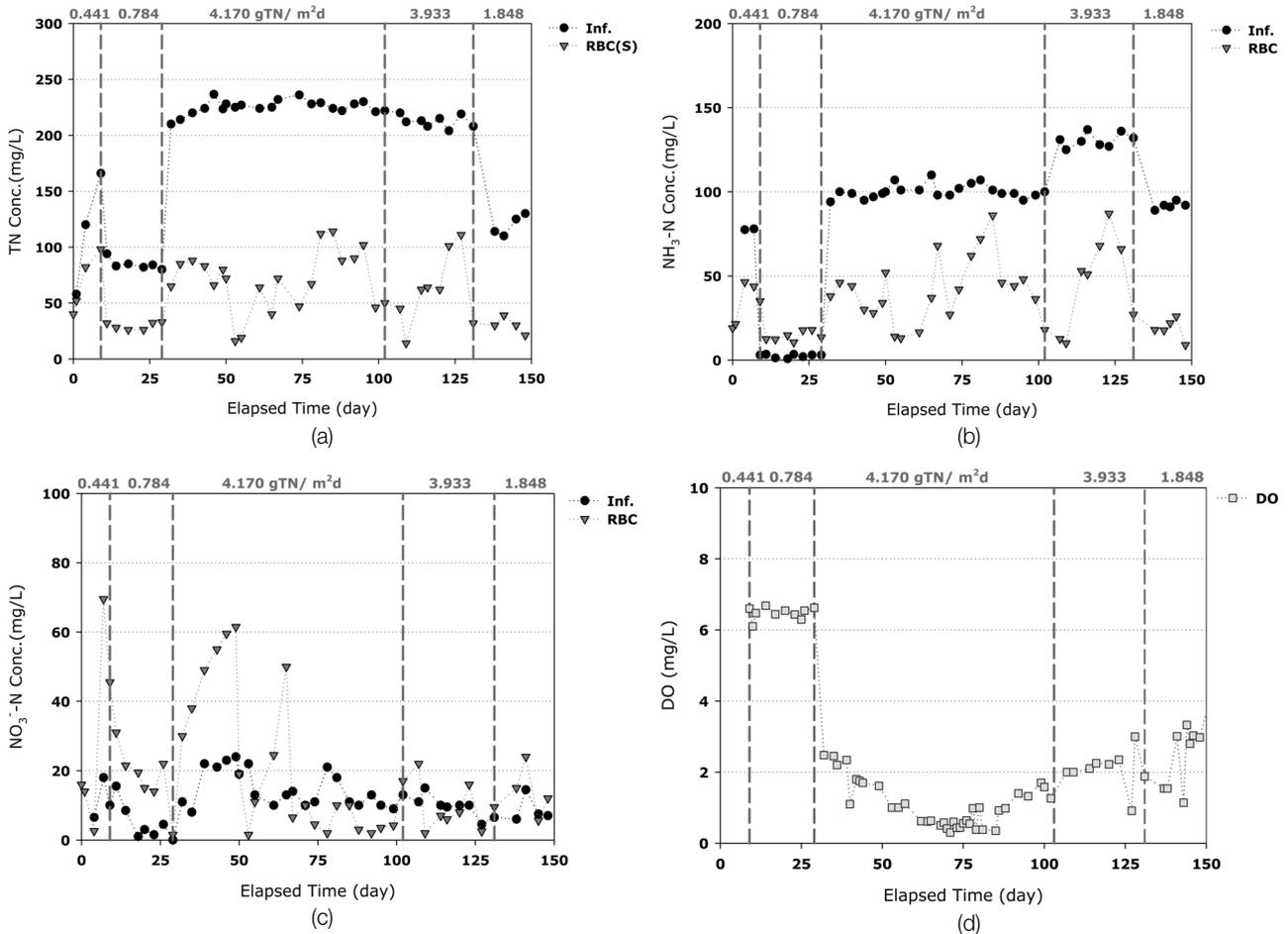


Fig. 3. Daily variation of (a) TN, (b) NH₃-N, (c) NO₃⁻-N and (d) DO concentrations.

Table 2. Amount of total nitrogen used beside cell synthesis

Period	Day	SCOD/TN ratio	SCOD removed (g/d)	Fate of TN (g/d)		
				Removed in RBC	Used for cell synthesis*	Removed by other pathways
I	0~9	11.8	36.95	1.88	1.18	0.70
II	10~29	22.6	133.58	4.13	4.27	-0.14
III	30~102	9.7	308.70	24.30	9.88	14.42
IV	103~131	8.6	251.55	24.89	8.05	16.84
V	132~148	11.7	163.88	11.23	5.24	5.99

* Cell yield coefficient (Y) is assumed as 0.4 g VSS/g COD⁸⁾; cell composition is assumed as C_{7.1}H_{11.7}O_{3.7}NP_{0.2}; thus, Y_N=0.032 g N in VSS/g COD

성된 암모니아의 일부가 산화되었음을 알 수 있다. 한편 30일부터 질소원으로 NH₄HCO₃를 돼지피와 함께 다시 주입하여 질소 부하를 4.17 g N/m²·d로 높여 73일 동안 운전 (Period III)한 후, 순차적으로 3.93 (Period IV)과 1.85 (Period V) g N/m²·d로 낮추어 각각 29일과 19일 동안 운전하였다. 그 결과, 모든 질소 부하 조건에서 TN 제거율은 70% 이상으로 나타났다. 한편, TN 제거량은 제거된 COD량이 많을수록 증가했는데 세포 합성에 필요한 양 보다 더 많은 양의 질소가 제거된 것으로 나타났다. 아래 3.1.4의 미생물 원소분석 결과를 이용하여 세포 합성에 사용된 TN의 양을 추정된 결과를 Table 2에 나타내었다. Period I~II (0~29일)에 제거된 대부분의 질소는 세포합성에 사용된 것으로 나타났으나 그 이후는 상당량이 세포 합성 외의 질소제거 기작을 통해 제거된 것으로 나타났으며, 그 기작은 질산화/ 탈질로 추정된다. 높은 유기물 부하에도 불구하고 질산화가 어느 정도 가능하였던 이유는 RBC 생물막 내부에 위치하고 있었을 질산화미생물이 대기 중 높은 산소 분압에 의해 용존산소를 공급 받을 수 있었기 때문일 것으로 판단된다. 탈질의 경우, 제거된 질소의 양이 C/N비가 가장 낮은 3.93 g N/m²·d의 질소 부하 조건(C/N=8.6)에서 세포합성에 사용된 질소 이외에 추가적으로 제거된 질소의 양이 가장 많은 것으로 나타나 종속영양탈질 이외에 독립영양탈질의 가능성도 제기되었다. 한편, 질소원으로 돼지피만 공급된 Period II의 질소 제거량은 세포합성에 필요한 질소의 양보다 낮은 것으로 나타났는데 이는 유입수의 구성 특징에 따라 주요 세포 구성 원소의 비율이 크게 달라지거나 생물막을 구성하는 우점종이 변했기 때문으로 판단된다.

3.1.3. 부착 미생물과 부유 미생물의 기질소비속도

RBC는 일반적으로 부착 미생물에 의해 기질이 제거되는 것으로 간주되나 본 실험에서는 RBC 반응조의 부유 미생물량이 상당히 많아 (MLSS 500~1,000 mg/L) 이의 역할이 무시되기 어렵다. 부유 미생물과 부착 미생물의 유기물 제거능을 평가하기 위해 다양한 유기물(Nutrient Broth) 농도에서 비소비 속도를 측정하고 Monod Equation으로 반응계수를 추정된 결과, 부착 미생물과 부유 미생물의 최대 비소비속도는 각각 13.2와 10.3 g COD/g VSS·d로 나타났다.⁹⁾ 부유 미생물 중에는 상당량의 유입 부유물이 혼재되어 있

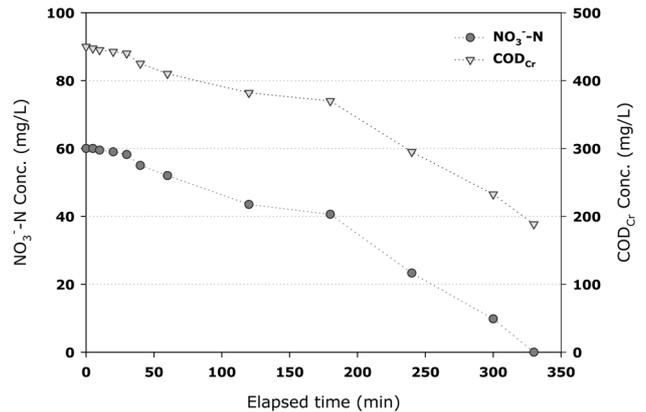


Fig. 4. Denitrification by attached microorganisms.

음을 감안하면 거의 대등한 유기물 제거능인 것으로 평가된다. 한편 초기농도 약 40 mg N/L에서 초기 4시간 동안의 암모니아 산화속도를 조사한 결과, 부착 미생물과 부유 미생물의 비질산화 속도는 각각 약 3.5와 1.5 g N/g VSS·d로 나타났다.⁹⁾ 따라서 본 실험에서는 부착 미생물에 의한 질산화가 큰 비중을 차지하는 것으로 생각된다.

회전 원판의 생물막 미생물의 탈질능을 알아보기 위해 질소원으로 NaNO₃, 탄소원으로 CH₃COOH를 이용하여 탈질 실험을 수행한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 초기 약 3시간 동안 느린 탈질속도를 보인 후 잔여 NO₃⁻가 신속히 탈질되었다. 초기의 반응속도가 느린 원인은 미생물이 탄소원으로 쓴 초산에 미처 적응하지 못하였거나 실험과정에서 탈질 미생물이 호기성 환경에 노출되어 일시적으로 기능에 손상을 입은 것으로 추정된다. 3시간 이후의 탈질 비속도는 약 0.11 g N/g VSS·d로 질산화 속도보다 낮았다. 또한 Chung과 Bae¹⁰⁾의 탈질속도(0.37 g N/g VSS·d)보다는 상당히 낮았는데 이 결과는 본 실험조건에서 탈질 미생물의 성장이 원활하지 못하였기 때문이 아닌가 추측되며, 이에 대해서는 정¹¹⁾ 등의 논문에서 보다 정량적인 검토가 이루어졌다.

3.1.4. 미생물 원소분석

다양한 유기물 및 질소 부하 조건에서 기질 제거 특성을 측정 한 결과, 세포 합성에 의해 제거되는 질소량 이외에 상당량의 질소가 제거되는 것으로 나타났다. 따라서 세포 합성에 필요한 정확한 질소의 정량화를 통해 추가적으로 제거된 질소 제거량과 그 기작을 검토하기 위해 원소 분석기

를 이용하여 RBC 원판 미생물의 CHON(P) 구성을 분석하였다. RBC 원판 부착 미생물의 원소 분석 결과 $C_{7.1}H_{11.7}O_{3.7}NP_{0.2}$ 의 세포 식을 얻을 수 있었고, 이는 호기성 조건에서 탄소원으로 아세트산과 질소원으로 암모니아를 써서 배양한 혼합 균주의 경험식인 $C_7H_{12}O_4N^{12)}$ 과 유사한 구성요소를 가지고 있는 것으로 나타났다. 그러나 널리 사용되는 일반적인 박테리아 경험식 $C_5H_7O_2N$ (호기성 조건에서 카세인으로 배양한 복합 균주)과 비교할 때 질소 함유량이 낮은 것으로 나타났다.

3.1.5. 원판 회전속도가 기질 제거에 미치는 영향

RBC 반응조의 미생물 부착과 기질 제거 효율은 원판 회전 속도에 큰 영향을 받으므로 적정 회전속도의 결정이 중요하다.¹³⁾ 특히 본 실험에 사용된 망상의 회전원판은 다량의 미생물이 거대공극 내의 섬유사 표면에 부착되어 있어 전단응력의 작용이 상당히 다르게 나타날 것으로 생각되었다. 따라서 Period V에서 유기물 부하 변동 영향 조사가 끝난 후 유기물 부하 $19 \text{ g COD/m}^2 \cdot \text{d}$ 및 질소 부하 $1.9 \text{ g N/m}^2 \cdot \text{d}$ 에서 원판 회전속도(rpm)를 4(기존 속도)에서 3, 6, 8로 변화시키면서(각각 약 10~20일간 운전) 유기물 및 질소 제거 특성을 평가 하였다. Fig. 5에 보인 바와 같이 동일 유기물 부하에서 원판 회전 속도가 증가할수록 COD 제거율이 점진적으로 약간 상승한 반면 암모니아 제거율은 크게 감소하였다. TN 제거율은 4 rpm에서 71.6%로 정점을 보인 후 감소하여 8 rpm에서는 54.3%로 가장 낮은 효율을 보였다. 시험 기간 동안 조 내 DO는 약 $4 \pm 0.5 \text{ mg/L}$ 로 유지되었다. MLSS 농도는 3~4 rpm에서는 약 400 mg/L 이었으나 그 후 점점 증가하여 8 rpm에서는 약 800 mg/L 로 증가하였다. 한편 조 내 NO_x 농도는 3~6 rpm에서 5~10 mg/L 증가하는데 그친 반면 8 rpm에서는 약 15 mg N/L 까지 증가하였으며, 특히 추가적인 증가의 원인이 $\text{NO}_2^- \text{-N}$ 의 과도한 생성(약 13 mg N/L) 때문으로 나타났다.⁹⁾ 이상의 관찰 결과를 종합할 때, 회전속도의 증가는 부착 미생물의 탈리를 초래하여 MLSS 농도를 증가시키고, 그 결과가 COD 제거에는 다소 유리하게 작용하나 암모니아 산화에는 불리하게 작용하는 것으로 요약된다. 상대적으로 높은 회전속도에서 암모니아 산화효율이 낮아지고 NO_2^- 가 생성되는 이유를 만족스럽게 설명할 수 가 없으나, 산소공급이 원활치 않을 때 NO_2^- 축적이 일어나는 점¹⁴⁾으로 미루어 회전속도 증가가 회전원판 망상섬유다발 내부에 liquid hold-up을 증가시키고 그 결과 부착 질산화 미생물에 대한 용존산소 공급에 악영향을 미친 것이 아닌가 추측된다. 이러한 추측은 RBC에서 회전속도가 증가하면 산소이전효율이 증가한다는 일반적인 경험¹²⁾과 반대되므로 이에 대해서는 향후 추가 연구가 필요하다. 본 실험에서 찾은 최적 회전속도는 4 rpm이며 이때의 원주속도(Tip Velocity)는 6.9 m/min 이다. 이 원주속도는 표준속도 18 m/min 보다는 훨씬 낮으므로 scale-up시에는 별도의 최적화 실험이 요구된다.

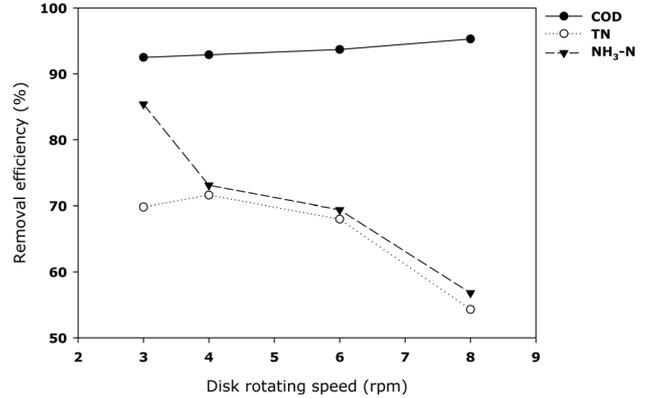


Fig. 5. Removal efficiency of COD, TN and NH₃-N at various RBC rotating speeds.

3.2. BAF의 기질 제거 특성

3.2.1. COD, SS 및 N의 제거

RBC와 침전조에서 제거하지 못한 기질과 SS를 제거하기 위해 163일부터 침전조 후단에 BAF를 설치하여 RBC와 BAF의 조합공정을 운전하였고 190일에 BAF의 COD, SS

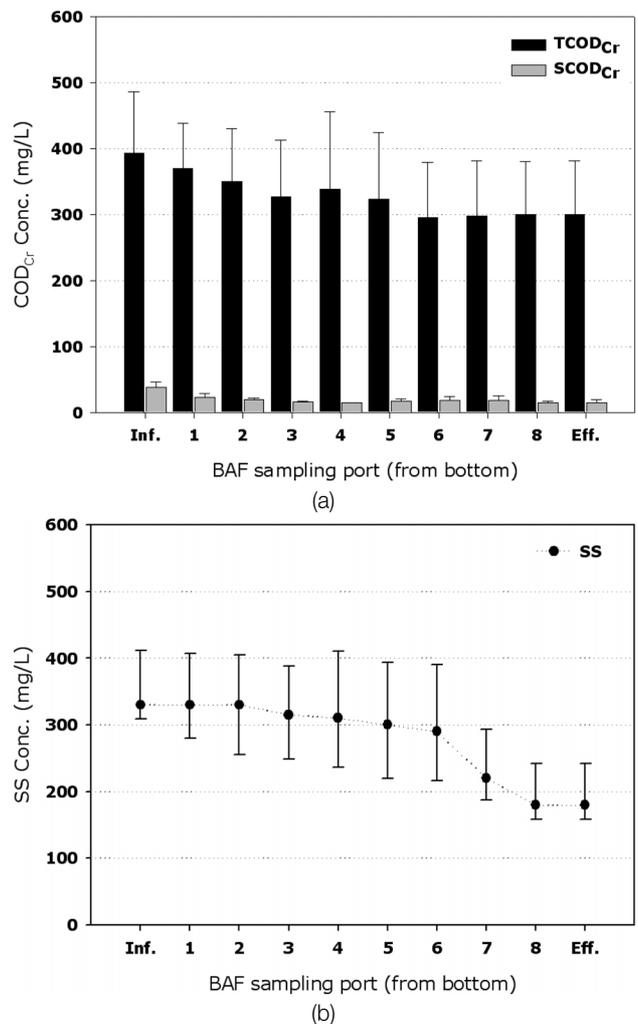


Fig. 6. Variation of (a) COD and (b) SS concentrations with change in the height of the BAF column.

및 N의 제거 특성을 Fig. 6에 나타내었다. BAF 반응기 높이 별 유기물 및 질소 제거 특성을 파악하기 위해 반응기 하단부 부터 30 cm 간격으로 설치된 8개의 샘플링 포트에서 유기물 및 질소의 기질 제거 능력을 측정하였다. BAF 반응기는 8개의 포트 중 반응기 하단부에서 부터 6번째 샘플링 포트까지 충전되었다. 따라서 7, 8번째 샘플링 포트에서는 반응기 내에 처리수가 저장되는 형태로 체류한 후 유출부로 유출되었다. TCOD는 약 400 mg/L에서 약 300 mg/L 정도 까지 낮아졌고 SS는 약 320 mg/L에서 약 180 mg/L까지 낮아져 각각 25%와 44%의 제거율에 불과하였다. BAF의 SS 제거효율이 미흡한 원인은 RBC와 침전조를 거쳐 BAF로 유입되는 SS의 농도가 약 320 mg/L로 처리 가능한 한계 농도로 알려진 150~200 mg/L¹⁵⁾을 약 2배 정도 초과하였기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 침전지의 기능이 충실히 이루어져 RBC 공정을 거친 유출수의 부유물질 농도가 약 150 mg/L 이하로 유지되면 BAF 공정의 처리수 수질이 상당히 개선될 것으로 판단된다.

한편, 질소 제거 특성을 Fig. 7에 나타내었다. BAF 반응기에 유입되는 질소는 암모니아성 질소가 약 29 mg/L, 아질산성 질소가 약 8 mg/L 그리고 질산성 질소가 약 24 mg/L

로 구성되어 있다. 이 유입수가 BAF 반응기를 통해 암모니아성 질소가 약 11 mg/L, 아질산성 질소가 제로까지 감소하지만 질산성 질소는 약 48 mg/L까지 증가하여 전체적으로 약 2 mg/L의 질소가 제거된 것으로 나타났다. 그러나 BAF 공정에서 제거된 약 100 mg/L의 COD를 고려하면 제거된 2 mg/L는 세포 합성 시 필요한 이론적 질소 요구량(약 3.2 mg/L) 보다 적은 양으로 반응기 내 다른 질소원(예, 미생물의 산화과정에서 방출되는 질소)으로 부터 공급이 이루어졌기 때문으로 추정된다. 따라서 BAF에 제거된 SS가 분해되면서 방출된 질소 성분이 세포 합성과 질산화/탈질과정을 거쳐 제거되었기 때문에 낮은 걸보기 질소 제거율이 관찰된 것으로 판단된다.

3.2.2. 응집제의 효과

본 연구에서 개발한 RBC-BAF 조합공정을 고농도 도축폐수 처리에 적용한 결과, 부유물질의 침전성 저하로 침전지의 유출수 수질이 최대 유기물 부하 조건인 40.4 g COD/m².d에서 TCOD의 경우 약 1,300 mg/L, SS의 경우 약 900 mg/L까지 악화되어 BAF 공정의 처리한계를 크게 초과한 것으로 나타났다. 따라서 RBC-BAF 조합공정의 처리효율

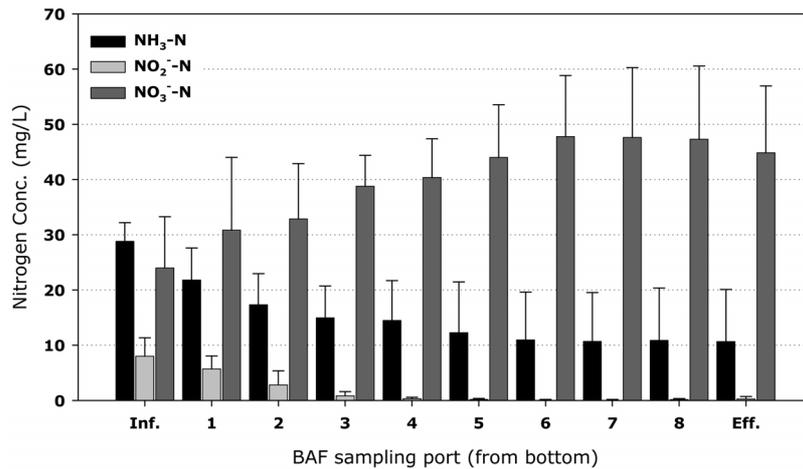


Fig. 7. Variation of nitrogen concentrations with change in the height of the BAF column.

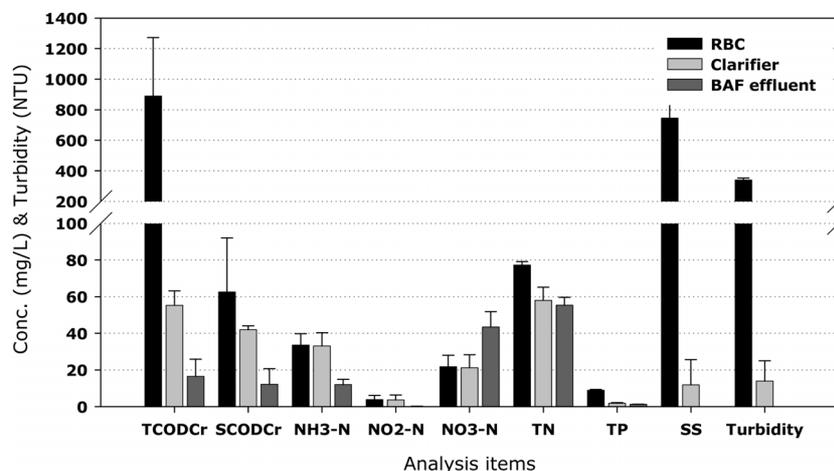


Fig. 8. RBC effluent treatment by coagulation.

개선방안으로 응집제 사용을 검토하였다. RBC 공정 유출수의 응집제 처리효과와 BAF 공정에 미치는 영향을 Fig. 8에 나타내었다. Polyaluminium Chloride (PAC)의 농도를 Jar Test를 통해 얻은 적정 주입농도인 25 mg Al₂O₃/l가 되도록 RBC 유출수에 주입한 결과, RBC+침전지 공정의 제거율은 TCOD 93.8%, SCOD 33.0%, SS 98.4%, 탁도 95.9%, TN 25.6% 그리고 TP 79.8%로 우수하였다. 응집제 처리 후, 이온성 무기 질소(NH₃-N와 NO₂⁻-N)의 농도 변화는 관찰되지 않았으나 SS 감소에 따른 TCOD 감소와 BAF에서도 잘 제거되지 않았던 콜로이드 성분 침강성 개선이 TCOD, SS, 탁도 및 TP 제거효율을 크게 개선시킨 것으로 나타났다. 따라서 BAF 공정으로 유입되는 기질 및 SS 부하를 상당히 저감시킬 수 있어 좋은 수질의 처리수를 얻을 수 있었는데 BAF 공정에서 TCOD 70.1%, SCOD 70.9%, SS 100%, 탁도 100%, NO₂⁻-N 97.7% 그리고 TP 27.8%의 추가 제거 효율이 관찰되었으며, 최종 유출수 수질은 TCOD 16.5 mg/L, SS 0 mg/L, TN 55.5 mg/L, TP 1.3 mg/L이었다. PAC 사용에 의한 알카리의 소모가 BAF 공정에서 NH₃-N의 질산화에 나쁜 영향을 끼쳐 질산화율이 한 때 약 64%로 낮았지만 알카리의 보충에 의해 거의 100%의 질산화를 얻을 수 있었다. 한편 BAF 공정에서 NO₃⁻-N의 제거는 거의 이루지지 않아 BAF 처리수를 RBC 공정으로 반송시켜 탈질을 유도하는 것이 필요할 것으로 판단되며, 이에 대해서는 후속 논문에서 상세히 다루고 있다.¹⁰⁾ 결과적으로 RBC와 BAF 조합공정에 응집공정의 추가는 고농도 도축폐수의 처리에 있어서 최상의 처리수질을 제공하므로 RBC와 BAF 조합공정의 개량에 적극적으로 도입할만한 공정으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 고농도 도축폐수의 고도처리를 위해 RBC와 BAF 공정이 가지고 있는 각각의 장점을 조합한 호기성 생물막 처리 공정을 개발하고 처리효율의 극대화를 위해 기질 제거 특성을 평가하였다. 돈까스 소스와 돼지피로 모사한 도축폐수를 사용하여 RBC의 기질 제거 특성을 평가한 결과, 침전지를 포함한 RBC 공정에서 Soluble COD과 NH₃-N의 평균 제거율은 각각 90%와 82% 이상으로 양호하였으나 TCOD와 TN은 SS의 대량 유출과 돼지피에서 기인한 콜로이드 물질 생성 때문에 각각 60%와 69%의 다소 낮은 제거율을 보였다. 후속 공정인 BAF가 잔존 TCOD와 TN을 제거하는 생물 반응조의 역할과 SS를 제거하는 여과기의 역할을 충분히 수행해 약 100 mg/L의 TCOD와 약 140 mg/L의 SS 추가 제거가 가능하였으나 처리수질은 TCOD 300 mg/L, SS 180 mg/L 그리고 TN 53 mg/L로 상당히 높았다. 한편, RBC 유출수에 PAC를 투입한 결과, 침전성이 크게 향상되어 BAF 유출수 수질이 TCOD 16.5 mg/L, SS 0 mg/L, NH₃-N 12.0 mg/L, TP 1.3 mg/L로 우수하였다. 따라서 본 연구에서 개발한 RBC와 BAF의 조합공정은 RBC 공정에서

고농도 유기물 및 질소 처리가 가능하고 후속 공정인 BAF에서 RBC와 침전에서 제거되지 못한 유기물 및 부유물질 제거가 가능해 RBC와 BAF 공정 각각의 장점만을 이용한 새로운 공정으로 평가되며, 적량의 응집제를 병용할 경우 고농도 산업폐수에서도 양질의 유출수를 생산할 수 있다.

사 사

본 연구는 환경부 Eco-STAR Project 수행기관인 수처리 선진화사업단(과제번호: I²WATERTECH 04-7)의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

KSEE

참고문헌

1. 환경부, 환경통감연감(2007).
2. 서울시, 통합 도축장 입지 및 환경관리 방안(1994).
3. Antonie, R. L., "Fixed biological surfaces-wastewater treatment: The rotating biological contactor," Cleveland, CRC(1976).
4. Montgomery, J. M., "Technology Assessment of Biological; Aerated Filter, U.S. E.P.A 600/S290/015," Cincinnati, Water Engineering Res. Lab.(1990).
5. Benson, D., "An emerging technology: the biological aerated filter, a promising biological process U.S. E.P.A. 832/R831/02," Cincinnati, Water Engineering Res. Lab.,(1983).
6. 환경부, 고농도 식품 산업폐수 고효율 집적형 처리기술개발 및 고농도 식품 산업폐수의 집적형 고도처리기술 개발 실용화(2007).
7. 환경부, 수질오염공정시험법(2002).
8. Metcalf and Eddy, "Wastewater engineering, treatment and reuse," 4th edition, Singapore, MacGraw-Hill(2004).
9. 정찬일, "RBC와 호기성 생물여과(BAF) 조합 공정의 폐수 처리 특성," 석사학위논문, 한양대학교(2008).
10. Chung, J. and Bae, W., "Nitrite reduction by a mixed culture under conditions relevant to shortcut biological nitrogen removal," *Biodegradation*, **13**, 163~170(2002).
11. 정철중, "RBC를 탈질조로 이용한 RBC-BAF 조합공정의 도축폐수 처리 특성," 석사학위논문, 한양대학교(2010).
12. Rittmann, B. E. and McCarty, P. L., "Environmental biotechnology: Principles and applications," Singapore, McGraw-Hill (2001).
13. Grady, C. P., Daigger, G. T. and Lim, H. C., "Biological wastewater treatment," 2nd edition, New York, Marcel Dekker(1999).
14. Park, S., Bae, W. and Rittmann, B. E., "Operational boundaries for nitrite accumulation in nitrification based on minimum/maximum substrate concentrations that include effects of oxygen limitation, pH and free ammonia and free nitrous acid inhibition," *Environ. Sci. Technol.*, **44**(1), 335~342(2010).
15. Osorio, F. and Hontoria, E., "Wastewater treatment with a double-layer submerged biological aerated filter, using waste materials as biofilm using support," *J. Environ. Manage.*, **65**, 79~84(2002).