

ASBF 생물반응기를 이용한 COD 및 질소 제거특성

최영익[†] · 정병길* · 손희종** · 성낙창*

신라대학교 환경공학과 · *동아대학교 환경공학과 · **부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

(2006년 12월 21일 접수, 2007년 8월 20일 채택)

Removal Characteristics of COD and Nitrogen by Aerated Submerged Bio-film(ASBF) Reactor

Young-Ik Choi[†] · Byung-Gil Jung* · Hee-Jong Son** · Nak-Chang Sung*

Department of Environmental Engineering, Silla University · *Department of Environmental Engineering, Dong-A University

**Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Busan

ABSTRACT : The objectives of this research are to remove dissolved organic matter and nitrogen compounds by using aerated submerged bio-film(ASBF) reactors in batch systems and improve understanding of dissolved organic matter and nitrogen compounds removal rates with dynamic relationships between heterotrophic and autotrophic bacteria in the fixed-film reactor. This research explores the possibility of enhancing the performance of shallow wastewater treatment lagoons through the addition of specially designed structures. These structures are designed to encourage the growth of a nitrifying bacterial bio-film on a submerged surface. Specially, the effects of cold temperatures on the dissolved organic matter and ammonia nitrogen performance of the ASBF pilot plant was investigated for the batch system. It is anticipated that the ASBF would be used for a design of biological treatment for removing of dissolved organic matter and nitrogen compounds in new wastewater treatment plants as well as existing wastewater treatment plants.

Key Words : ASBF(Aerated Submerged Bio-film), Bio-film, COD, Nitrification, Nitrifying Bacteria, Nutrients

요약 : 본 연구의 목적은 pilot scale ASBF(호기성 침지형 생물막) 반응기를 이용하여 용해성 유기물과 질소화합물의 제거실험을 하였으며, 고정생물막 내에서의 용해성 유기물과 질소화합물 제거를 통한 종속영양미생물 및 독립영양미생물의 동적관계를 이해하고 개선하고자 하였다. 또한, 침지형 생물막 표면에 질산화 박테리아의 성장을 촉진시키기 위해 특별하게 설계한 구조를 라군에 추가하여 폐수처리 효과의 강화 가능성을 조사하였다. 침지형 생물막에 공기 기포가 직접적으로 접촉할 수 있도록 하였으며, 특히 낮은 온도에서 ASBF 실험장치의 용해성 유기물과 암모니아성질소 제거효과를 살펴보기 위해 회분식으로 운전하였다. 본 연구의 ASBF 반응조는 향후 용해성 유기물과 질소화합물의 제거를 위해 기존 폐수처리장 뿐만 아니라 신설 폐수처리장에도 확대 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

주제어 : ASBF, 생물막, COD, 질산화, 질산화 박테리아, 영양물질

1. 서 론

폐수처리는 공학적으로 매우 중요하고 의미 있는 과제이다. 우리가 최근에 일반적으로 사용하는 설계와 공정은 50년 보다 이전에 소개되어졌다. 생물학적 폐수처리공정은 용해성 유기물질과 질소의 제거효율을 높이기 위해 널리 이용되고 있다. 생물학적 폐수처리공정의 설계와 운전방식은 강화된 방류수 규제와 물 부족 환경에서의 중수도 사용으로 인해 발전될 수밖에 없는 상황에 놓여 있다. 생물학적 폐수처리방법은 화학약품 사용하지 않고 처리하기 때문에 더 많이 선호되고 있으며, 폐수처리장에서 꼭 필요한 연계공정이다.

폐수처리방식 중의 하나인 라군은 미국에서 축산폐수와 농촌하수를 처리하기 위한 가장 일반적인 처리방법이다. 그러

나 라군에서는 질산화 박테리아의 성장을 위한 표면적과 산소공급 부족으로 질산화 박테리아의 성장을 생물막에서 촉진시키지 못하기 때문에 암모니아의 제거가 효과적이지 못하다. 암모니아는 수계에 배출되었을 때 수계생물에게 독극물로 작용을 하고, 수계 생태계의 산소를 고갈시키는 악영향을 끼치기 때문에 방류수에서 중요하게 고려되어지는 항목이다.^{1,2)}

생물학적 질소제거공정은 두 가지 중요한 연속적인 공정에 의해서 이루어지는데, 하나는 질산화이고 다른 하나는 탈질화이다. 생물학적 질소제거공정은 용해성 유기물질 제거공정보다는 덜 효과적이다. 왜냐하면 생물막에서의 공간과 산소에 의한 독립영양 박테리아와 종속영양 박테리아 사이의 경쟁 때문에 나타나는 현상으로 인해 발생된다. 부가적으로, 독립영양 박테리아의 성장률은 종속영양 박테리아에 비해서 상당히 작다. 이와 같은 이유들 때문에 효과적인 질산화를 위해서는 용해성 유기물질 제거가 우선적으로 수행되어야 한다.

폐수처리에서 암모니아성 질소의 생물학적 제거는 두 가지 종류의 박테리아에 의해서 이루어진다. 두 종류의 박테리아는

[†] Corresponding author

E-mail: coolyoungik@silla.ac.kr

Tel: 051-999-6248

Fax: 051-304-3200

질산화 박테리아와 탈질화 박테리아이다. 질산화 박테리아는 무기물질의 산화작용으로부터 에너지를 얻기 때문에 독립 영양박테리아로 분류된다. 대조적으로 종속영양 박테리아는 유기물질의 산화작용으로부터 에너지를 얻는다.³⁾ 질산화 박테리아는 생물 막의 호기성상태에서 가장 효과적이다. 대부분의 탈질화 박테리아는 혐기성 박테리아로 생물 막에서 번성한다.⁴⁾ 그러나 일반적인 라군의 처리에서는 박테리아가 성장할 수 있는 생물 막의 어떠한 표면적도 제공하지 않는다. 질산화 박테리아는 암모니아에서 질산염으로 전환시키는데 높은 산소가 요구되어 지는데 일반적으로 암모니아성 질소의 1 mg/L에 대하여 3.9 mg/L에서 4.6 mg/L의 산소를 필요로 하게 된다.⁴⁾ 일반적으로 라군의 처리방식에서는 질산화 박테리아가 요구하는 산소를 충분히 제공하지 못한다.

고정생물막 반응조는 운전방법과 고행매디아의 형태에 따라 살수여상법, 회전원판법(RBCs), 유동층 생물막 반응조, 고정층 생물막 반응조, ASBF 반응조 등 여러 가지 형태로 분류될 수 있다.⁵⁾

ASBF 공정은 10년 전에 최초로 소개되었으며, 질소와 인의 생물학적 제거를 위해 5개가 한 세트로 구성되어진 수중 생물막을 이용하여 수행하였다. 또한 폐수를 생물막에 공급하고 여과 사이클 동안에 혐기성 기간을 포함하여 바이오필터를 연속적으로 주입하는 ASBF 공정이 다른 연구자들에 의해 연구되어졌다.⁶⁾ 최근 두 가지 연구들은 플라스틱 간격 사이의 다공성 포말형의 수중 모체를 이용하여 폐수를 처리하였으며, 폐수중의 암모니아 화합물의 질산화에 분명히 효과적인 것으로 보여졌다.^{7,8)} 이 방식의 가장 중요한 장점은 다공성 매체안의 큰 표면적이다. 비록 반응조안의 매디아가 불완전한 상태로 되어있지만, 처리효과는 전형적인 살수여상과 RBC와 동등함을 보여주었다.

Okey와 Albertson⁹⁾에 따르면, 살수여상은 암모니아성 질소의 산화가 진행되는 동안에 1차, 0.5차, 0차의 세 개의 반응차수가 있지만, 간단하게는 0차와 1차로 쉽게 정의된다. 질산화는 산소가 충분할 경우와 암모니아성 질소의 농도가 높을 경우에 있어서는 0차와 0.5차 반응으로 생물막의 호기성 부분에서 일어난다. 그리고 암모니아성 질소의 농도가 낮을 경우에는 1차 반응이 일어나게 된다. 살수여상에서도 일반적으로 운전을 할 경우 최소한 두 가지의 반응차수가 있으며, 살수여상의 최상부는 0차 반응이 일어난다. 따라서, 본 연구에서는 호기성 침지형 생물막 반응기를 이용하여 용해성 유기물과 질소화합물의 제거효율실험을 하였으며, 고정생물막 내에서의 용해성 유기물과 질소화합물 제거를 통한 종속영양미생물 및 독립영양미생물의 동적관계를 이해하고 개선하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

실험장치는 중앙유역수질개선시설(CVWRF)의 1차침전조와 살수여상 사이의 산화지 옆에 설치·운영하였다. 회전식 반

응기로 폐수처리 후, 반응기안의 폐수는 산화지로 배출하였다. 실험장치의 용적은 2.4 m × 6.7 m × 0.9 m이다. 반응기안에 24개의 ASBF모듈이 있으며, 이 모듈은 1차 침전지 유출수의 0.6 m 수중에 위치하고 있다. 또한, 각각의 모듈은 12개의 판넬로 구성되어 있으며, 판넬의 하부에 산소공급관을 설치하였다. 기포는 각각의 판넬 양쪽 표면을 직접적으로 접촉하면서 올라가도록 설계하였다. 고정된 바이오 필름의 총면적은 302 m²이었으며, 장치의 모듈 정상까지 폐수로 가득 채울 경우 6,058 L를 담을 수 있다. 모듈의 총 공기 공급률은 1분에 227 L이며, 공기는 가스조절장치가 장착된 콤프레셔로 공급하였다. 배출관의 압력은 대략 17.2 kpa이며, 장치의 최상부는 햇빛 차단과 외부 오염물질의 유입방지를 목적으로 덮개를 설치하였다. Fig. 1은 장치의 상층 부분으로 컨테이너 내 24개의 모듈이 있다. 본 실험장치는 물속에 위치하는 종속영양 미생물 및 독립영양 미생물의 바이오 필름에 기포를 발생시켜 바이오 필름의 표면에 호기성 조건을 형성하여 물과 접촉하는 박테리아로 하여금 유기물 및 질소화합물을 제거하도록 하는 목적으로 만들어졌다. 장치의 하단 부분을 보여주는 Fig. 2는 12개의 V자형태의 판넬이 상층부분을 지탱하고 있으며, 판넬은 실제로 반응조 내에 연속적으로 침지되어 있는 경사진 표면으로서, 그 표면의 거의 전체가 일정하게 경사진 방향으로 존재하여 경사면 전체 길이에 대하여 연속적인 기포의 상호작용을 제공하게 된다. 일광으로부터 차단되도록 하였으며, 그 표면에 박테리아의 바이오 필름을 갖는 경사면에 산소를 직접 공급하는 시스템으로서 경사면의 하단에 기포를 방출시키도록 구성되어 있다. 또한 경사면을 따라 기포가 상승하게 함으로써 바이오 필름에 호기성 조건을 형성하고 폐수를 경사면을 따라 순환시키는 산소 공급 시스템을 가지도록 구성하였다. 처리효율을 높이기 위해서 필요량 이상의 공기를 공급하여 에너지를 낭비하지 않도록 박테리아의 생화학적 질산화과정에 대한 산소 요구량에 충분한 만큼만 공기를 공급하는 것이 바람직하다고 사료되어진다.

그리고 이 구조의 표면 부분은 폐수에 의한 부식에 견딜 수 있는 재질로 되어 있으며, 생물막 및 물 표면에 조류의 성장을 억제하기 위해서 태양 빛을 차단하는 지붕을 설치하였으며, 높은 표면적을 가지도록 한 반면에, 매디아의 막힘은 피하고자 하였다.

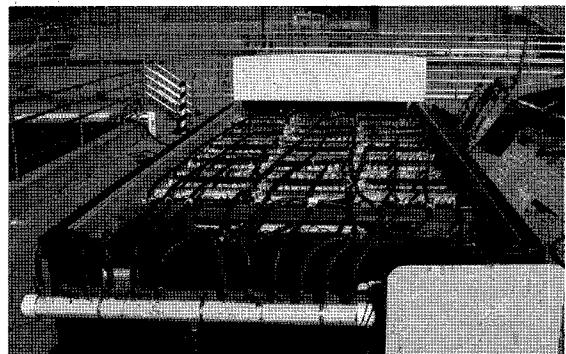


Fig. 1. Top view of pilot plant.

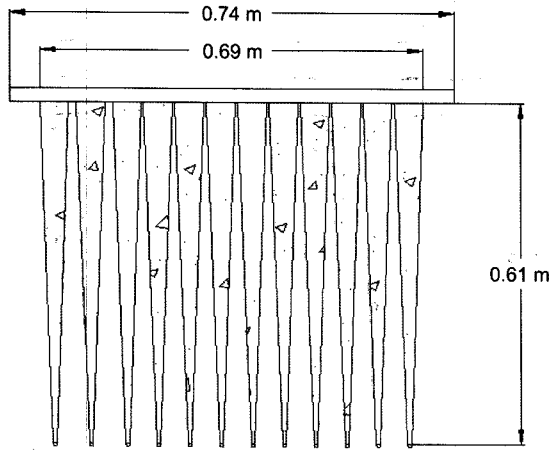


Fig. 2. An end view of a module(12 wedge shaped panels) connected to the top support.

2.2. 실험방법

폐수 중의 pH, 온도, DO, 탁도, 전기전도도는 수질다항목 측정기(Model Horiba U-10)를 이용하여 측정하였다. 추가로 시료는 실험장치의 세 지점에서 채취하였으며, 통계적인 목적을 위해 각 지점별로 채취를 3번(n=3)하였다. 표준편차는 결과의 신뢰성을 평가하기 위해 산출하였다.

폐수의 화학적 산소요구량(COD_{Cr}), 암모니아성 질소(NH₃-N), 아질산성 질소(NO₂-N), 질산성 질소(NO₃-N) 및 알칼리도의 측정은 Standard methods¹⁰⁾에 준하여 분석하였다. 또한, TKN 측정은 Digesdahl소화방법으로 분석하였다. 그리고 본 연구에 사용된 폐수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분식 Start-up

Table 1. Characteristics of municipal wastewater used in this study

Parameter	Batch #1	Batch #2	Batch #3	Batch #4	Batch #5	Batch #6	Batch #7	Batch #8	Batch #9	Batch #10	Batch #11
pH	7.22	7.73	8.12	7.86	7.70	7.81	7.86	7.79	7.84	7.81	7.82
DO(mg/L)	0.75	0.35	1.07	0.22	0.38	0.51	0.58	0.55	0.48	0.46	0.41
Temp.(°C)	21.9	19.0	16.1	14.5	15.7	10.0	9.7	7.4	5.9	5.9	7.8
Turb.(NTU)	60	62	67	83	93	91	82	95	89	81	93
CODCr(mg/L)	159	137	195	224	227	175	187	215	168	165	197
NH ₄ ⁺ -N(mg/L)	23.9	19.6	25.4	24.1	25.6	27.4	23.9	23.4	24.0	19.5	22.8

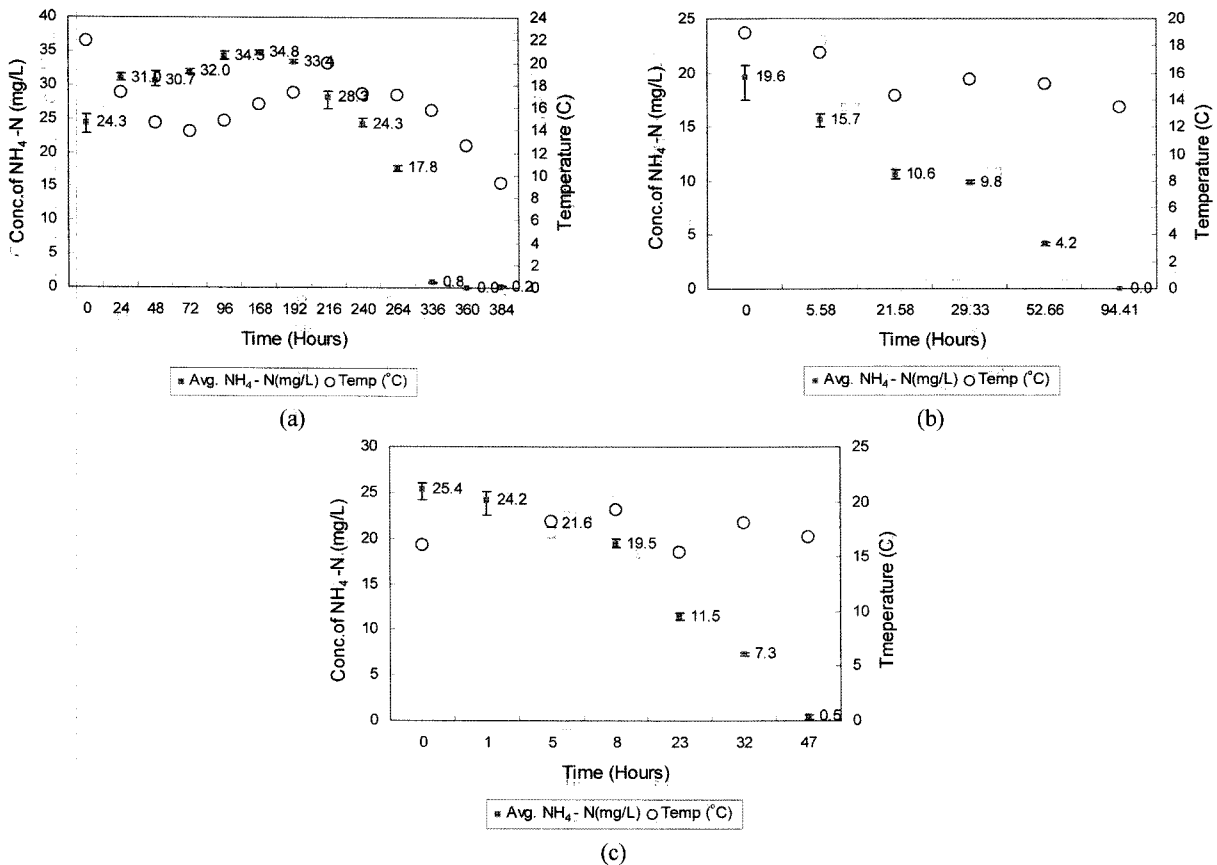


Fig. 3. Ammonia nitrogen removal in ASBF batch run #1(a), #2(b) and #3(c) average water temperatures 16.0°C, 15.8°C and 17.3°C respectively.

실험 장치는 여름에 설치하였고, 회분식으로의 운전은 9월~12월까지 수행하였다. 실험결과는 연속적인 11개의 회분식 운전으로 도출하였으며, 겨울 날씨로 인해 대기와 수질의 온도는 급격히 떨어졌다. 회분식 운전에서의 의미있는 결과는 3.3°C 이하의 온도에서 질산화가 빠르게 일어났다는 것이다. 회분식 운전 #1의 반응조 내 용량을 가득 채우고, 공기공급을 초기화하여 초기조건을 기록하였다. 질산화 박테리아를 정착시키기 위한 노력으로, 실험 시작 첫 주에 몇 번 살수여상 처리장치의 유출수를 생물막 모듈에 흐르도록 하였다. 그리하여, 8일 후에 생물막에서 질산화가 확실히 나타나기 시작하였다. 회분식 반응조에서의 초기 암모니아 농도는 35 mg/L로, 시간이 지남에 따라 꾸준히 낮아지기 시작했다. 운전 14일에 암모니아 농도는 1 mg/L보다 낮아졌으며, 15일에 암모니아 농도는 0 mg/L가 되었다. 회분식 운전 #1, #2, #3은 ASBF반응조의 start-up이고, 25일 동안 진행되어졌다. 회분식 운전 #2, #3, #4 반응조에서 암모니아의 농도가 1 mg/L 이하에 도달하는 시간은 95시간에서 40시간으로 짧아졌으며, 이것은 ASBF 모듈의 생물막에서 질산화 효율이 증가했기 때문으로 판단된다. Fig. 3은 회분식 운전 #1, #2 및 #3의 start-up을 나타내고 있다. 회분식 운전을 하는 동안 판별 표면위의 생물막에서는 옅고 불그스름한 색깔이 관측되었는데, 이 색깔은 질산화박테리아의 문헌 조사 연구와 일치하였다.⁸⁾

3.2. 질산화

회분식 운전 #4의 반응조 내 물의 수온은 10°C 이하였다. 회분식 운전 #7과 #8의 평균 수온은 각각 8.6°C, 6.0°C이었으며, 이 수온에서도 암모니아의 제거에는 영향을 끼치지 않았다(Fig. 4). 이 연구에서 중요한 것은 많은 다른 연구^{8,11)}에서 지적한 것을 확인한 것인데, 질산화 박테리아의 성장이 중지되는 온도는 10°C라고 하지만 고정막에서는 온도가 3.3°C에 도달 하여도 질산화 박테리아가 계속해서 증식하였다. 회분식 운전 #8에서도 약 40시간동안 폐수온도는 3.3°C이었다. 하지만, 암모니아성 질소 농도는 8시간 동안에 2.9 mg/L에서 0.1 mg/L까지 떨어진 것을 알 수 있었다. 따라서, 수온 3.3°C에서 암모니아성 질소가 제거되는 것은 ASBF 반응조 내 생물막 질산화 박테리아의 반응이 Wijffels¹²⁾에 의해 연구된 생물막 방법과 유사한 경향을 보이는 것을 확인하였다.

그리고 수중의 표면을 통해 자연적으로 용해된 산소의 작용력을 평가하기 위해 회분식 운전 #9에서는 생물막에 산소를 공급하지 않았으며, 이로 인해 공기주입은 큰 차이를 보였다(Fig. 5). 운전 40시간 동안 회분식 운전 #4, #5, #6, #7, #8, #10, #11에서 암모니아의 제거효율은 각각 100%, 98%, 95%, 98%, 88%, 100%, 81%를 보였으나, 회분식 운전 #9의 제거효율은 25.7%로 나타났다.

회분식 운전 #10에서는 공기를 주입하기 시작 하였다. 또 다시 운전 40시간 이내에서 암모니아는 제거되기 시작하였으며, 평균 수온 5.1°C로 가장 낮은 수치를 보였다. 낮은 수온에도 불구하고 암모니아 농도는 운전 48시간에서 22.8 mg/L에서 0.4 mg/L까지 감소하였다. 고농도의 암모니아성 질소 조건에서 암모니아성 질소와 관련이 되는 반응차수는 0차 혹은

0.5차와 관련이 있는 것으로 나타난 반면에, 저농도 암모니아성 질소의 조건에서는 1차 반응차수를 나타내었다. 따라서, 저농도 암모니아성 질소에서는 0.5~1차 반응을, 고농도 암모니아성 질소에서는 0차 반응으로 끝나는 단계적인 변화의 추세를 나타내었다. Fig. 6은 암모니아성 질소 농도의 질산화를 로그-로그 그래프를 이용하여 그린 것이다. 암모니아성 질소 제거효율은 암모니아성 질소 농도 4 mg/L 이하에서는 1차 반응으로, 농도 5~10 mg/L에서는 0.5차 반응, 농도 11mg/L 이상에서는 0차 반응으로 나타났다.

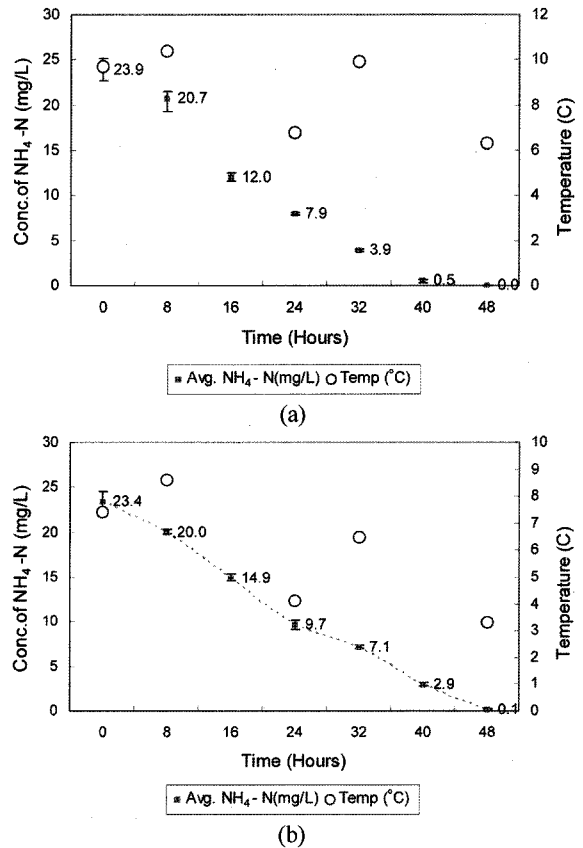


Fig. 4. Ammonia nitrogen removal in ASBF batch run #7(a) and #8(b) average water temperatures 8.6°C and 6.0°C respectively.

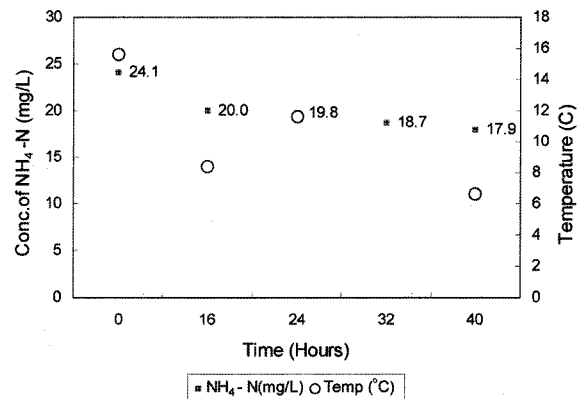


Fig. 5. Ammonia nitrogen removal in ASBF batch run #9 average water temperature 6.0°C (NO AIR).

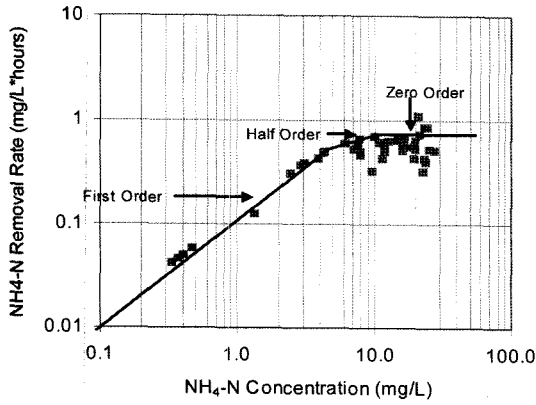


Fig. 6. Nitrification rate vs. ammonia nitrogen concentration.

3.3. 용해성 유기물질의 제거특성

회분식 운전 #7과 #8의 COD_{Cr} 농도 측정 결과를 Fig. 7에 나타내었다. COD_{Cr} 농도는 일반적인 회분식 운전의 첫 8시간 동안 급격히 떨어졌다. 8시간 후의 제거는 천천히 일어났다. 대조적으로 처음 8시간의 암모니아성 질소 제거율이 COD_{Cr} 제거율보다 낮게 나타났는데, 그 이유는 종속영양 박테리아가 독립영양 박테리아보다 용존산소를 이용하는데 중요한 이점을 가지고 있기 때문으로 판단된다.

BOD/NH₄⁺-N가 높은 폐수는 높은 종속영양 박테리아와 낮

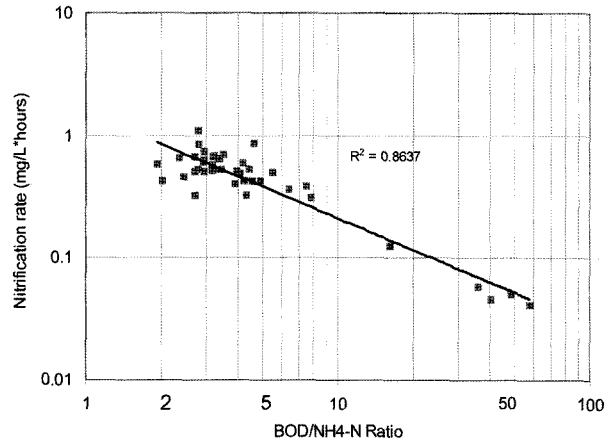


Fig. 8. Ammonia nitrogen removal rate vs. BOD/NH₄⁺-N.

은 독립영양 박테리아가 존재한다. 회분식 운전에서 BOD/NH₄⁺-N은 1.9에서 57.5으로 나타났다. Fig. 8은 BOD/NH₄⁺-N을 암모니아성 질소의 제거율에 관한 로그-로그 그래프형태로 나타내었다. BOD/NH₄⁺-N 비율이 증가하면 암모니아성 질소의 제거율은 감소하는 경향을 나타냈다. 이결과로 높은 BOD/NH₄⁺-N 비율은 종속영양 박테리아의 성장을 촉진하는 것으로 확인되었고, 그것은 낮은 암모니아성 질소의 제거의 원인으로 나타났다.

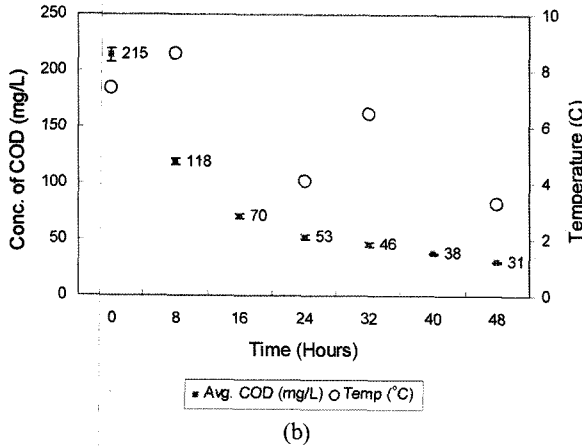
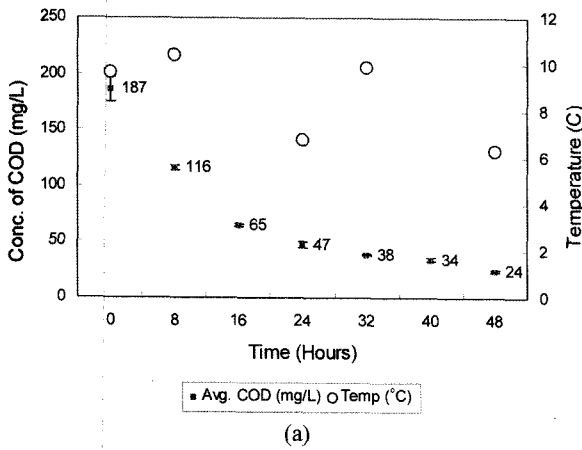


Fig. 7. COD removal in ASBF batch run #7(a) and #8(b) average water temperatures 8.6°C and 6.0°C respectively.

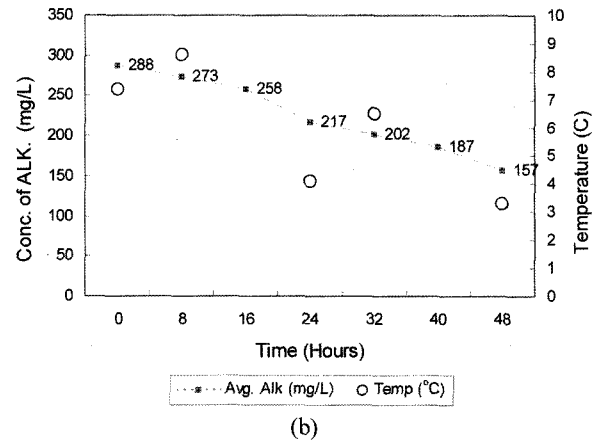
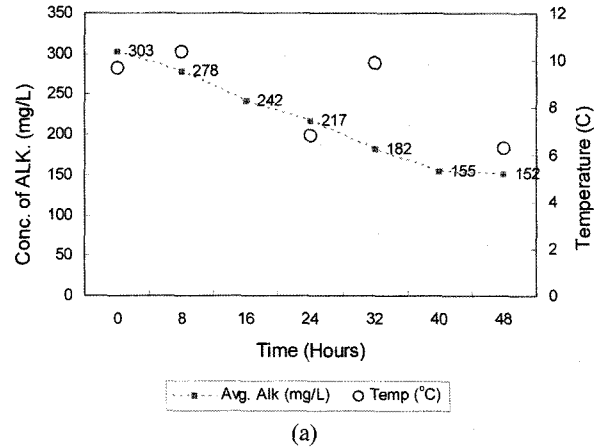
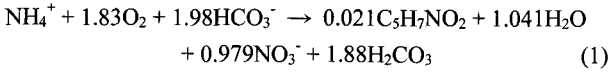


Fig. 9. Alkalinity removal in ASBF batch run #7(a) and #8(b).

3.4. 알칼리도의 제거특성

질산화 박테리아는 세포의 구성성분을 위하여 질소를 이용하는 것뿐만 아니라 무기화합물의 산화 작용으로부터 얻어진 에너지를 이용하게 된다. 식 (1)은 이 반응에서의 전형적인 질산화의 형태를 보여준다.¹⁾



이 반응에서 생물학적 질산화는 NH_4^+ , O_2 , HCO_3^- 를 함께 소비한다. 이 반응의 HCO_3^- 는 알칼리도의 주요한 구성 요소이다. 생물학적 질산화는 알칼리도 감소의 결과로 나타났다. 알칼리도의 제거는 회분식 운전 #7과 #8에서 확인할 수 있었으며, 이 두 운전에서 알칼리도는 약 300 mg/L에서 150 mg/L까지 떨어졌으며, 그리고 질산화도 함께 나타났다. Fig. 9는 ASBF의 회분식 운전 #7 및 #8에서 알칼리도의 제거를 보여준다. 산소요구량은 각각의 실험에서 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 수중 생물막에서의 종속영양 박테리아와 독립영양 박테리아의 성장을 촉진하는 특별하고 특수한 구조를 가진 ASBF 반응기를 이용하여 폐수 처리효율을 향상시키는 가능성을 입증하였다. 게다가, 수중의 생물막 표면에 공기 기포의 직접 접촉으로 생물막 안의 박테리아의 산소 전달을 강화하고, 폐수에서 암모니아 화합물을 제거하기 위한 질산화의 문제를 해결하고자 하였다. 따라서 암모니아성 질소의 제거효율은 COD의 유입농도에 의존하는 것으로 판단된다.

ASBF 공정의 몇 가지 방법은 라군에서의 축산폐수의 처리에 유리하다. 냄새나는 암모니아 화합물은 질산염으로 전환되어 제거되며, 폐수에서 요구되는 산소는 감소하게 된다. 라군의 유출수를 농업에 사용한다면 질소화합물은 작물에 이익이 될 것이다. 결론적으로, ASBF의 모듈은 값싸게 라군 및 폐수처리의 공정을 향상시킬 수 있으며, 오염물과 냄새의 처리에 더 효과적이다.

회분식 ASBF 반응기로 운전한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) ASBF 공정에서 종속영양 박테리아는 독립영양 박테리아보다 용존산소를 이용하는데 상당한 이점을 가지고 있음을 알 수 있었으며, 독립영양 박테리아의 lag 현상은 약 16시간 정도로 관찰되었다.

2) 용해성 유기물은 8시간에서 16시간 동안 빠른 제거가 일어나지만, 그 이후에는 제거가 천천히 일어난다.

3) 암모니아성 질소의 제거는 독립영양 박테리아의 성장이 지연되어 더 천천히 일어난다. 특히 암모니아성 질소가 낮은 농도에서(5 mg/L 이하) 암모니아성 질소 제거율은 1차 반응을 따르고, 암모니아성 질소의 농도가 약 5~10 mg/L 일 때 0.5차 반응을 따른다. 그리고 높은 농도(10 mg/L)에서

의 제거율은 0차 반응으로 나타났다.

4) BOD/ $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 의 비율의 증가하면 암모니아성 질소 제거율은 감소하는 경향을 나타냈다. ASBF 반응기에서 부족한 산소는 용해성 유기물과 암모니아성 질소의 제거가 불완전한 결과를 나타냈다. 또한, ASBF 반응기에서 암모니아성 질소와 용해성 유기물의 제거는 3.3°C 아래의 온도에서도 일어난다.

참고문헌

- Barnes, D. and Bliss, P. J., "Biological control of nitrogen in wastewater treatment," E. & F. N. Spon Ltd., (1983).
- Johnson, K., Reaveley, L.D., and Choi, Y., "Submerged Ammonia Removal System and Method," United States Patent, US# 7,008,539(2006).
- U.S. Environmental Protection Agency., "Nitrogen Control," Washington, D.C.(1993).
- Halling-Sorensen, B. and Jorgensen, S.E., "The removal of nitrogen compounds from wastewater," Elsevier Science Publishers(1993).
- Wang, B., Li, D., Yang, Q., and Liu, R., "Nitrogen removal by a submerged bio-film process with fibrous carriers," *Water Sci. Technol.*, **26**(9-11), 2039~2042 (1992).
- Goncalves, R.F., Grand, L.L., and Rogalla, F., "Biological phosphorus uptake in submerged biofilters with nitrogen removal," *Water Sci. Technol.*, **29**(10-11), 135~143(1994).
- Tsuno, H., Somiya, I., Matsumoto, N., and Sasai, S., "Attached growth reactor for BOD removal and nitrification with polyurethane foam medium," *Water Sci. Technol.*, **26**(9-11), 2035~2038(1992).
- Lewandowski, G. A. and DeFilippi, L. J., "Biological treatment of hazardous wastes," John Wiley & Sons, Inc. (1998).
- Okey, R.W. and Albertson, O.E., "Evidence for oxygen-limiting conditions during tertiary fixed-film nitrification," *Water Pollution Control Federation*, **61**(4), 510~519(1989).
- APHA, AWWA and WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th. ed., APHA, Washington D.C.(1998).
- Bear, J. and Corapcioglu, M.Y., "Transport Processes in Porous Media," Kluwer Academic Publishers(1991).
- Wijffels, R.H., Englund, G., Hunik, J. H., Leenen, E.J. T.M., Bakketun, A., Tramper, J., Gunther, A., and Obon de Castro, J.M., "Effects of diffusion limitation on immobilized nitrifying microorganisms at low temperatures," *Biotechnol. Bioeng.*, **45**, 1~9(1995).