

PFR공정의 ASBF구조에 의한 유기물제거와 질산화의 영향에 대한 연구

최 영 익

신라대학교 환경공학과

(2007년 8월 5일 접수; 2008년 8월 29일 수정; 2008년 9월 8일 채택)

A Study on the Removal Characteristics of Dissolved Organic and Ammonia Compounds in PFR of Aerated Submerged Bio-film (ASBF) Reactor

Young-Ik Choi

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

(Manuscript received 5 August, 2008; revised 29 August, 2008; accepted 8 September, 2008)

Abstract

Aerated submerged bio-film (ASBF) pilot plant has been developed. The presented studies optimized an inexpensive method of enhanced wastewater treatment. The objectives of this research were to describe pilot scale experiments for efficient removal of dissolved organic and nitrogen compounds by using ASBF reactor in plug-flow reactor (PFR) and improve understanding of dissolved organic matter and nitrogen compounds removal rates with dynamic relationships between heterotrophs and autotrophs 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. This direct gas-phase contact should increase the oxygen transfer rate into the bio-film, as well as increase the micro-climate mixing of water, nutrients, and waste products into and out of the bio-film. This research also investigated the efficiency of dissolved organic matter and ammonia nitrogen removals in the ASBF. As it was anticipated, nitrification activity was highest during periods when the flow rate was lower, but it seemed to decline during times when the flow rate was highest. And ammonia nitrogen removal rates were more sensitive than dissolved organic matter removal rates when flow rates exceeded 2.2 L/min.

Key Words : ASBF, Bio-film, COD, DO, Nitrification, Nitrifying bacteria, Biological nutrients removal, Plug-flow

1. 서 론

하수처리를 위한 라군시스템은 생물학적 산소요

구량(BOD)과 총 부유고형물(TSS)의 제거에 효과적이다. 그러나 이 라군시스템은 폐수의 경향에 따라서 암모니아성 질소의 제거에 효과적이지 않다. 그리고 암모니아성 질소가 환경에 배출되었을 때 수생에서는 산소감소와 유독성으로 인해 방류수 오염이 심각해져 환경을 보호하는 차원에서 중요한 관

Corresponding Author : Young-Ik Choi, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

Phone: +82-51-999-6248

E-mail: coolyoungik@silla.ac.kr

심사로 대두되고 있다¹⁾. 질소와 인은 조류의 성장을 위한 영양분으로 수계에 과잉으로 유입시 조류의 과잉 성장으로 인해 총 부유 고형물의 증가를 가져오게 된다. 이런 점이 라군시스템의 처리 과정의 주요 단점에 속하게 된다.

하수처리에서의 암모니아성 질소 제거는 물리적, 화학적 및 생물학적 처리방법으로 계속적으로 발전되어왔다. 질소제거의 방법들의 예로는 파과점 염소소독, 이온교환, 막 여과, 침전, 생물막 접촉기(RBC), 살수여상, 활성슬러지법이 있다²⁾. 이들 처리방법의 절대적인 단점은 설치비 및 유지비가 많이 든다는 것이다³⁻⁵⁾. 그리고, 생물학적 질소제거공정은 두 가지 중요한 연속적인 공정에 의해서 이루어지는데, 하나는 질산화이고 다른 하나는 탈질화이다. 생물학적 질소제거공정은 용해성 유기물질 제거공정보다는 덜 효과적인데 이는 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 질산화 박테리아와 탈질화 박테리아이다. 질산화 박테리아는 무기물질의 산화작용으로부터 에너지를 얻기 때문에 독립영양박테리아로 분류된다. 대조적으로 종속영양 박테리아는 유기물질의 산화작용으로부터 에너지를 얻는다^{4,6)}. 질산화 박테리아는 생물 막의 호기성상태에서 가장 효과적이다. 대부분의 탈질화 박테리아는 혐기성 박테리아로 생물막에서 번성한다²⁾. 그러나 일반적인 라군 처리에서는 박테리아가 성장할 수 있는 생물 막의 어떠한 표면적도 제공하지 않는다.

ASBF(호기성 침지형 생물막)공정은 10년 전부터 소개되었으며, 처음에는 질소와 인의 생물학적 제거로 새로운 공법으로 사용되어진 5개가 한 세트 구성되었던 침지형 생물막을 이용하여 수행하였다. 그리고 다른 연구자의 공정방법은 폐수를 생물막으로 흐르게하고 여과 사이클 동안에 혐기성 공

정을 포함하여 바이오필터를 연속적으로 주입하는 것을 연구하였다^{7,8)}.

이 논문의 ASBF에 의한 질산화 연구는 C중양유역하수처리장 내에 실험장치 설치하여 실험하였다. 이 연구의 주제는 두 가지로 요약할 수 있다. 한 가지는 고정된 필름 반응기 안에서의 용해성 유기물질과 암모니아성 질소의 제거율을 통한 자가 영양생물과 종속 영양생물사이의 동적관계를 이해하고 개선하는 것이고, 다른 한 가지는 PFR 공정에서의 ASBF 반응기가 낮은 온도에서도 용해성 유기물질과 암모니아성 질소의 제거가 일어날 수 있다는 것을 증명하는 것이다.

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 호기성부분에서 일어난다. 그리고 암모니아성 질소의 농도가 낮을 경우에는 1차 반응이 일어나게 된다. 살수여상에서도 일반적으로 운전할 경우 최소한 두 가지의 반응차수가 있으며, 살수여상의 최상부에서는 0차 반응이 일어난다. 따라서, 본 연구에서는 호기성 침지형 생물막 반응기를 이용하여 PFR 공정에서 ASBF 반응기를 대상으로 낮은 온도에서 용해성 유기물질과 암모니아성 질소의 제거효율실험을 하였으며, 고정 생물막 내에서의 용해성 유기물질과 질소화합물 제거를 통한 종속영양박테리아 및 독립영양박테리아의 동적관계를 이해하고 개선하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험장치

ASBF에 의한 질산화 연구를 위해 실험장치를 중앙유역수질개선시설(CVWRF)의 1차침전조와 살수여상 사이의 산화지 옆에 설치·운영하였다. 실험장치의 용적은 2.4 m × 6.7 m × 0.9 m이다. 반응기 안에 24개의 ASBF 모듈이 있으며, 이 모듈은 1차 침전지 유출수의 0.6 m 수중에 위치하고 있다. 또한, 각각의 모듈은 12개의 판넬로 구성되어 있으며, 판넬의 하부에 산소공급관을 설치하였다. 기포는 각

각의 판넬 양쪽 표면을 직접적으로 접촉하면서 올라가도록 설계하였다. 고정된 바이오 필름의 총 면적은 302 m^2 이었으며, 장치의 모듈 정상까지 폐수가 가득 채울 경우 6,058 L를 담을 수 있다. 모듈의 총 공기 공급율은 227 L/min 이며, 공기는 가스조절장치가 장착된 콤프레셔로 공급하였다. 배출관의 압력은 대략 17.2 kpa 이며, 장치의 최상부는 햇빛 차단과 외부 오염물질의 유입방지를 목적으로 덮개를 설치하였다. Fig. 1은 장치의 상층 부분으로 컨테이너 내 24개의 모듈을 나타내었다. 그리고 각각의 모듈에 실험의 편리성을 위하여 숫자를 붙여서 나타내었다. 유량은 ASBF의 유입탱크에서 모듈 #1을 통하여 모듈 #24로 흘러나와 유출탱크로 흘러나가는 방식이다. 본 실험장치는 물 속에 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 Figs. 2 및 3은 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 바이오필름을 갖는 경사면에 산소를 직접 공급하는 시스템으로서 경사면의 하단에 기포를 방출시키도록 구성되어 있다. 또한 경사면을 따라 기포가 상승하게 함으로써 바이오 필름에 호기성 조건을 형성하고 폐수를 경

사면을 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 사료된다¹⁰⁾.

그리고 이 구조의 표면 부분은 폐수에 의한 부식에 견딜 수 있는 재질(콘크리트)로 되어 있으며, 생물막 및 물 표면에 조류의 성장을 억제하기 위해서 태양 빛을 차단하는 지붕을 설치하였으며, 높은 표면적을 가지도록 한 반면에, 매디아의 막힘은 최소화 하기위하여 각 판넬들의 간격을 띄워서 만들어졌다.

2.2. 실험방법

폐수 중의 pH, 온도, DO, 탁도, 전기전도도는 수질 다항목 측정기(Model Horiba U-10, Japan)를 이용하여 측정하였다. 추가로 시료는 실험장치의 세 지점에서 채취하였으며, 통계적인 목적을 위해 각 지점별로 채취를 3번($n=3$)하였다.

폐수의 화학적 산소요구량(COD_{Cr}), 암모니아성 질소($\text{NH}_3\text{-N}$), 아질산성 질소($\text{NO}_2\text{-N}$), 질산성 질소($\text{NO}_3\text{-N}$) 및 알칼리도의 측정은 Standard methods¹¹⁾에 준하여 분석하였다. 또한, TKN 측정은 HACH회사에서 제공하는 Digesdahl 소화방법으로 분석하였다. 그리고 본 연구에 사용된 폐수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

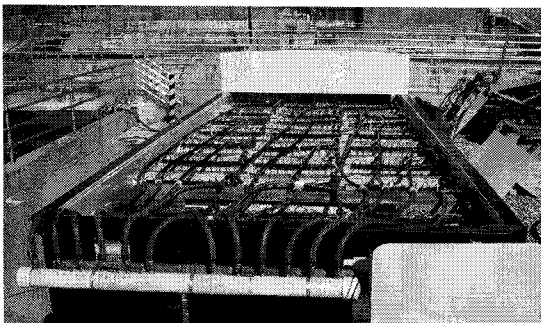


Fig. 1. Top view of pilot plant.

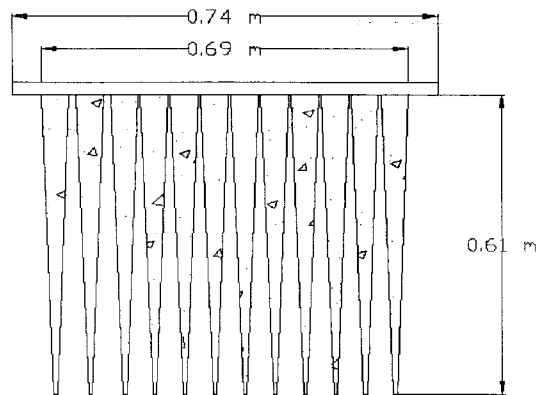


Fig. 2. An end view of a module (12 wedge shaped panels) connected to the top support.

Table 1. Characteristics of municipal wastewater used in this study

Observation Periods	PFR A	PFR B	PFR C	PFR D	PFR E	PFR F	PFR G	PFR H	PFR I	PFR J
Flow Rate (L/min)	4.4	4.2	4.2	3.9	4.1	4.2	4.1	2.1	2.2	2.1
Retention Time (Hours)	22.9	24.0	24.0	25.9	24.6	24.0	24.6	48.1	45.9	48.1
Influent CODcr (mg/L)	194	214	182	166	224	234	220	225	281	238
Influent NH ₄ ⁺ (mg/L)	17.6	28.8	22.2	19.4	20.9	20.7	15.9	30.5	16.3	31.3
Influent pH	7.63	7.60	7.80	7.70	7.62	7.49	7.60	7.71	7.61	7.53
Influent Conductivity (ms/cm)	1.54	1.64	1.79	1.63	1.74	1.78	1.81	1.76	1.78	1.79
Influent Turbidity (NTU)	84	90	89	88	97	93	78	73	71	72
Influent Salinity (%)	0.07	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08	0.08
Influent Temperature (°C)	16.4	16.8	16.5	16.7	16.5	16.4	16.4	16.2	15.8	15.9
Effluent Temperature (°C)	5.1	6.5	9.9	9.5	8.2	9.9	10.6	6.6	7.1	4.9
Influent DO (mg/L)	3.62	3.78	3.56	3.66	3.57	3.54	2.20	3.67	2.91	1.20

3. 결과 및 고찰

이 연구에서 최우선으로 필요한 것은 질산화 박테리아를 장치에 투입하여 성장을 촉진시키는 것이었다. 회분식 운전이 PFR 공법보다 처음과 끝의 기질 농도의 파악과 분석이 쉬울 것으로 판단되어 PFR 공법을 연속식으로 하기에 앞서 회분식 연속운전 실험하였다. 그 결과 성숙한 질산화 박테리아의 성장으로 실험이 용이하였다. 다양한 유량에 따른 PFR 공법의 운전 결과는 Fig 3 및 Fig 4에 제시하였다.

채취한 유입수 시료와 유출수 시료를 한 쌍으로 하여 체류시간을 산정한 후 유출수 시료를 채취하였다. 경우에 따라 밤에 시료를 채취하는 어려움을 없애기 위해 유출수의 시료채취를 자동시료 채취기



Fig. 3. An bottom view of twelve wedge shaped concrete panels.

로 수행 하였다.

PFR공법의 A운전 유량은 4.4 L/min, 반응기의 물의 부피는 6,058 L, 체류시간은 22.8 시간으로 하여 시작하였다. 유입시료는 오전 9시에 유입수 탱크에서 채취하였으며, 유출시료는 22.8시간 뒤인 오전 8시 10분에 채취하였다. 유입수와 유출수의 온도는 각각 16.4°C와 5.1°C로 측정되었으며, 이것은 낮은 대기의 온도로 인해 수온이 떨어졌을 것으로 판단되어진다. 전도도는 상대적으로 변하지 않았으며, 탁도는 84 NTU에서 2 NTU로 떨어졌다. 또한, DO는 3.6 mg/L에서 5.2 mg/L로 증가하였다. 이는 일정하게 공급되는 DO가 미생물의 산화후 점차적으로 축적된 것으로 사료되어진다. 그리고 염소이온 농도는 변하지 않았고 암모니아성 질소와 COD 제거율은 각각 36%와 85%로 나타났다.

PFR 공법 B운전의 유출시료의 채취는 유입시료

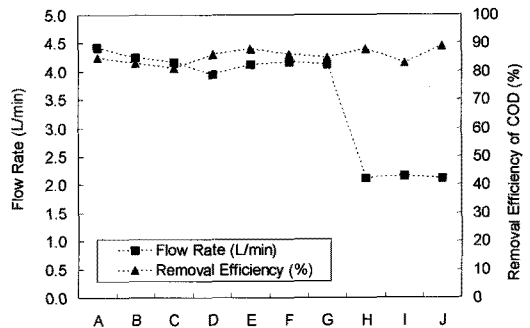


Fig. 4. Variations of COD removal efficiency to the changes of influent flow rates.

의 채취 24시간 뒤에 행하였다. 이때의 유량은 4.2 L/min이고, 체류시간은 23.8, 유입수의 온도는 16.8°C, 유출수의 온도는 6.5°C였다. 전기전도도는 경미하게 감소하였는데, 그것은 양이온의 제거(NH_4^+ 와 그의 성분)로 인한 것으로 나타났다. 탁도는 90 NTU에서 3 NTU로 감소하였고, DO는 3.87 mg/L에서 5.27 mg/L로 증가하였다. 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 38.9%와 83%로 나타났다. C운전의 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 36%와 81%로 나타났고, D운전의 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 43%와 86%로 나타났으며, 이때의 유량은 3.9 L/min, 유출수의 온도는 9.5°C였다.

E운전은 유량은 4.1 L/min이었지만 암모니아성 질소와 COD의 제거율이 각각 26%와 88%로 다른 공정에 비해 낮게 나타났다. 이것은 pH와 DO의 농도 변화에 의해 발생한 것으로 판단된다. pH의 경우 그 증가가 나타나지 않았으며 오히려 7.62에서 7.59로 감소되었다. 유출수 시료의 DO 농도는 3.7mg/L로 낮게 나타났다. 이 PFR 공법의 실험을 통해 COD 제거율은 pH 변화에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

F운전의 경우 유출수의 pH는 7.49에서 8.23으로 증가하였고, 이유는 질산화율보다 탈질화가 훨씬 활발히 일어나고 있다고 사료되어진다. DO는 정상 수준으로 돌아왔으며 유량은 4.2 L/min이었다. 이때의 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 53%와 86%로 나타났다. 이것으로 pH가 증가하고 DO의 농도가 충분하며, 유량이 4.2 L/min일 때 질산화 및 탈질화가 활발히 일어나는 것을 알 수 있었다. G운전의 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 45%와 85%로 나타났으며, 유량은 4.1 L/min로 온도는 10.6°C이다. 유량은 대략 3.8 L/min에서 2 L/min정도 변화하였다. H운전의 유량을 2.1 L/min으로 고정하였다. 체류시간은 47.7시간으로 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 90%와 88%로 나타났다. 유량을 절반으로 감소시킨 결과 암모니아성 질소의 제거율은 증가하였지만, COD의 제거율은 거의 차이가 없이 높은 제거율로 나타났다. 이유는 중속영양 미생물이 COD를 산화시키는 데 필요한 산소를 다 사용하고 난 후에 독립영양 미생물이

질산화과정을 갖기 때문인 것으로 사료되어진다.

PFR의 I운전의 유량은 2.2 L/min이고, 유입시료의 채취는 유입탱크에서 임의로 채취하였으며, 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 90%와 83%였고, 알칼리도의 제거율은 51%로 나타났다. J운전의 유량은 2.1 L/min이고 암모니아성 질소와 COD의 제거율은 각각 92%와 89%로 나타났으며, I와 J운전의 알칼리도 변화는 대체로 300 mg/L에서 130 mg/L로 떨어지는 것을 알 수 있다. 이 감소하는 현상은 생물학적 질산화의 메커니즘으로 나타난 것이다.

유량에 따른 COD와 암모니아성 질소의 제거 효율을 Fig. 4과 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 알 수 있듯이 유량은 COD 제거율에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. 그러나 유량이 높을 때는 질산화가 감소하지만 낮을 때는 질산화가 활발히 진행되는 것을 Fig. 5를 통해 알 수 있었다. 실험 기간 중에 암모니아성 질소제거율이 최대로 낮았을 때에는 유량이 높았으며 용존산소의 감소가 두드러지게 나타났다. 이것으로 유량은 암모니아성 질소 제거에 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

Fig. 6는 COD의 유입농도에 따른 COD의 제거효과를 나타낸 것이다. COD의 제거율은 COD의 유입농도에 영향을 받지 않는 것을 알 수 있다. 암모니아성 질소의 유입농도에 따른 암모니아성 질소의 제거율의 관계를 Fig. 7에 나타내었다. 암모니아성 질소의 유입농도가 낮을 때 제거효율 또한 높은 것을 알 수 있다. 또한 공정 E와 F운전의 실험 중에 두 공정의 암모니아성 질소의 유입농도는 같았지만, 제거효율은 E운전이 나쁘게 나타났다. 이때 COD의

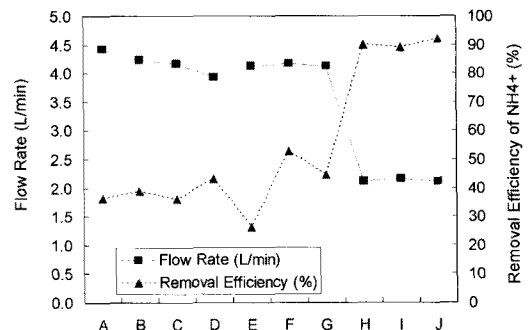


Fig. 5. Variations of ammonia nitrogen removal efficiency to the changes of influent flow rates.

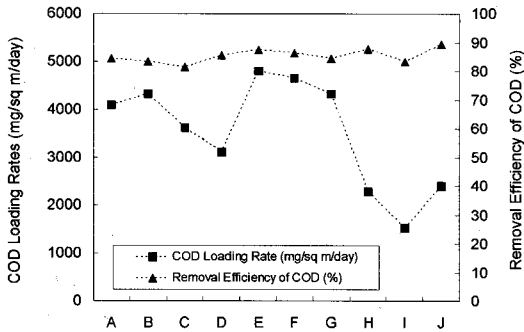


Fig. 6. Removal efficiency of COD with COD loading rates.

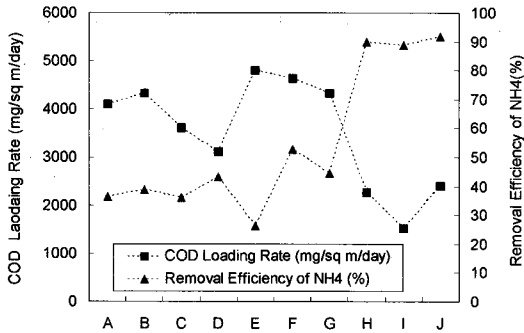


Fig. 7. Removal efficiency of ammonia nitrogen with COD loading rates.

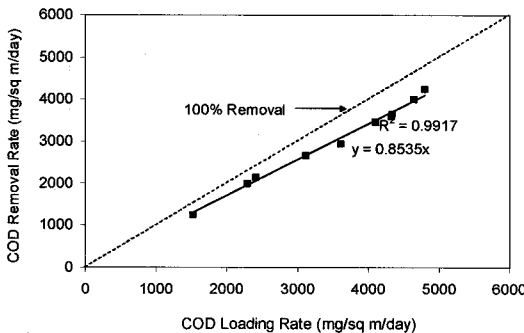


Fig. 8. COD loading on the reactor is plotted against the observed rate of COD removal.

유입농도가 E운전이 높은 것으로 나타나, 암모니아성 질소의 제거율은 COD의 유입농도에 의존한다는 것으로 판단되어 진다. 이것은 질산화율이 COD의 농도에 상당히 의존되어져 있다고 해석할 수 있다.

Fig. 8은 반응기에 유입되는 COD 농도를 제거율

과 같이 나타낸 것으로, COD의 초기농도가 달라도 제거율은 90% 이상으로 일어나는 것을 알 수 있다.

4. 결론

ASBF 반응기는 수중의 바이오 필름 구조를 추가 함으로써 독립영양 박테리아와 종속영양박테리아의 성장을 촉진시켜 폐수처리 가능성을 입증하였다. 게다가, 수중의 생물막 표면에 공기 기포의 직접 접촉으로 생물막 안의 박테리아의 산소 전달율을 강화하고, 폐수에서 암모니아 화합물을 제거하기 위한 질산화의 문제를 해결하고자 하였다. 따라서 암모니아성 질소의 제거효율은 COD의 유입농도에 의존하는 것으로 판단된다.

결론적으로, ASBF의 모듈은 값싸게 라군의 공정을 향상시킬 수 있으며, 오염물과 냄새의 처리에 더 효과적이다. 이 연구의 결과는 주목할 만하고 실용적이다. 질산화 박테리아는 독립 영양박테리아이고, 그들의 성장률은 종속영양 박테리아와 비교하였을 때 매우 작다. 이러한 사실로 인해 유량율이 2.2 L/min을 초과하면 낮은 질산화율이 나타났다.

PFR 공정을 이용한 ASBF의 운전조건에 따라 유기물질과 질소 제거효율에 미치는 영향을 평가한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다. 그리고 본 연구의 결과에서 나타났던 결론은 수질의 성상이 같지 않으면 다른 결과도 도출될 수 있는 가능성을 배제하기는 어렵다고 사료되고 성상이 다른 수질에서의 연구도 계속되어야 할 것으로 판단된다.

1. 수온이 높으면 용해성 유기물과 암모니아성 질소의 제거가 더 효율적이며, 용존 산소의 농도는 유입탱크에서부터 모듈 #7까지 에서는 떨어지고, 모듈 #8을 통과한 후에는 부터는 증가하는 추세이다.
2. 암모니아성 질소의 제거율은 유량율이 2.2 L/min을 초과하면 용해성 유기물의 제거율보다 제거율이 하락하였다.
3. 이 연구에서는 유량이 2.2 L/min을 초과할 때 낮은 질산화율로 인해 종속영양 박테리아는 독립영양 박테리아보다 더 우세하다는 것을 알 수 있었다.
5. Fig 6에서 알 수 있듯이 COD의 유입농도는 COD의 제거효율에 영향을 미치지 않았고, COD의 유입농도가 낮으면, COD의 제거효율이 더 효과적

인 것을 알 수 있었다.

6. 암모니아성 질소의 제거효율은 COD의 유입농도에 많은 영향을 받고, 높은 COD의 농도가 유입될 때 반응기의 상단부분에 많은 중속영양 박테리아가 존재하고 독립 영양박테리아는 반응기의 하단 부분에 존재하는 것으로 사료되어진다.

참고 문헌

- 1) Barnes D., Bliss P. J., 1983, Biological control of nitrogen in wastewater treatment, E. & F. N. Spon Ltd., 25pp.
- 2) Halling-Sorensen B., Jorgensen S. E., 1993, The removal of nitrogen compounds from wastewater, Elsevier Science Publishers., 13pp.
- 3) Rolf F., Grabowski F., Burde M., 1998, Low cost procedure for nutrient removal in small rural wastewater treatment plants, Wat. Sci. Tech., 38(3), 179-185.
- 4) Fontenot Q., Bonvillain C., Kilgen M., Boopathy R., 2007, Effects of temperature, salinity, and carbon: nitrogen ratio on sequencing batch reactor treating shrimp aquaculture wastewater, Bioresource Technology, 98(9), 1700-1703.
- 5) Zhang L., Scholz S., Mustafa A., Harrington R., 2008, Assessment of the nutrient removal performance in integrated constructed wetlands with the self-organizing map, Wat. Res., 42(13), 3519-3527.
- 6) U.S. Environmental Protection Agency., 1993, Nitrogen Control, Washington, D.C., 8pp.
- 7) Hamoda M. F., Abd-el-Bary M. F., 1987, Operating characteristics of the aerated submerged fixed-film (ASFF) bioreactor, Wat. Sci. Tech., 21(8), 939-947.
- 8) Hamoda M. F., Al-Sharekh H. A., 1999, Sugar wastewater treatment with aerated fixed-fill biological systems, Wat. Sci. Tech., 40(1), 313-321.
- 9) Okey R. W., Albertson O. E., 1989, Evidence for oxygen-limiting conditions during tertiary fixed-film nitrification, Water Pollution Control Federation, 61(4), 510-519.
- 10) Johnson K., Reaveley L. D., Choi Y., 2006, Submerged Ammonia Removal System and Method, US patent 7,008,539.
- 11) APHA, AWWA and WPCF, 1998, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th ed., APHA, Washington D.C..