

광합성 박테리아 및 담체를 이용한 하천의 저농도 질소, 인 처리 시스템 개발

김선정 · 이상섭*

경기대학교 일반대학원 생명공학과

The Development of Treatment System for Removing the Low Concentrated Nitrogen and Phosphorus Using Phototrophic Bacteria and Media

Sun-Jung Kim and Sang-Seob Lee*

Department of Bioengineering, Graduate School of Kyonggi University, Suwon 433-760, Republic of Korea

(Received December 8, 2009/Accepted January 4, 2010)

We used phototrophic bacteria to remove low concentrated organic materials (COD_{Cr}), nitrogen and phosphorus. We applied COD_{Cr} 37.3 mg/L, NH₃-N 4.0 mg/L, and PO₄³⁻-P 1.0 mg/L (C:N:P=100:10:1) in the batch test, and the removal efficiencies were shown as follow: COD_{Cr} 87.4%, NH₃-N 46.3%, PO₄³⁻-P 79.7%. The aerobic process with mixed phototrophic bacteria, ceramic media, and media KSP01 showed the removal efficiencies of COD_{Cr}, NH₃-N, and PO₄³⁻-P, each as 72.7% and 79.2%, respectively in the lab-scale reactor. The maximum PO₄³⁻-P removal efficiency reached 92.6% by adjusting pH. There were three conditions used to remove NH₃-N. The highest removal efficiency was 98.5% with 10.2 L/min of aeration in 1-2 reactors, and the result of applying river-water showed the high removal efficiency of NH₃-N (82.8%). Therefore, this purification system may be useful to control nitrogen and phosphorus at low concentration in field.

Keywords: nitrogen removal, phosphorus removal, phototrophic bacteria

생활하수 및 하수처리장에서 방류되는 과도한 질소, 인 등 영양염류의 하천 유입은 수생태계의 부영양화를 촉진시켜 수중 내 조류의 과다 증식을 유발하여 녹조현상을 일으킨다. 녹조현상은 이취미 발생과 몇몇 조류 종의 우점으로 인해 종 다양성이 깨어지고 수생태계를 파괴한다. 또한 *Microcystis*, *Anabaena* 등의 조류가 독성물질을 분비하여 수중 내 다른 생물에도 영향을 미치고 있다(9).

하천의 수질개선이 하수도 정비를 중심으로 이루어져 왔으나, 실질적인 개선에는 큰 영향을 미치지 못하였다. 이런 문제를 해결하기 위하여 산업화를 일찍 겪은 유럽과 일본을 중심으로 1960년대부터 다양한 하천 정화 처리 기법이 연구되어 왔다(11). 하천정화기법은 물리적(침전, 여과·흡착 작용 등)·생물학적(호기성 미생물에 의한 유기물 산화, 수생생물에 의한 영양염류 흡수 및 고정화 등) 정화 원리를 조합시킴으로써 자연하천의 정화능력을 촉진시켜 본래 상태로 회복시키는 것이

다(17). 일본의 경우에는 건설성 토목연구소를 중심으로 광범위하게 연구되고 있는데, 일반적으로 고수부지 내에 적용되는 자갈접촉산화법, 토양침투여과법, 토양표면유해법, 산화지법, 복류수법 등에 관한 연구가 있으며 하도 내에는 부유식물이용법, 응집침전법, 하천폭기법, 박충류법, 인(摺)이용법 등에 관한 실험적 연구가 활발하게 진행되고 있다. 그 중 자갈 접촉산화법의 사용빈도가 약 30% 정도이며 처리효율과 처리단가도 비교적 높은 편으로 평가되었다. 이 방법은 자갈 표면에 형성된 생물막이 하천수의 유기물을 흡착시키고, 부착된 다양한 미생물의 공생작용 등으로 유기물이 산화 분해 작용에 의해 정화되어 인공적으로 자정작용을 유도하는 것이다. 그 효과로 접촉침전효과, 생물 흡착효과, 생물 산화의 분해효과, 슬러지의 분해감량효과를 가지며, 특히 폭기식 자갈 접촉산화법의 경우 용존 유기물의 산화분해와 암모니아의 산화(질화작용)를 촉진시킬 수 있다고 알려졌다(4, 8, 11, 13, 20).

하천정화에 이용되는 자갈은 단위 부피당 기공률이 작아 많은 미생물을 부착시키기에 어려움이 있었다. 반면 세라믹 담체의 경우 단위 부피당 기공률이 크며, 내구성, 내화확성을 보인

* For correspondence. E-mail: sslee@kyonggi.ac.kr; Tel: +82-31-249-9642; Fax: +82-31-245-8868

다는 특성과 환경친화적이라는 장점을 가지고 있다. 자갈을 대신하여 세라믹 담체를 자갈 접촉산화법에 적용함으로써 다량의 미생물을 고정할 수 있으며, 각종 유기물의 흡착을 유도할 수 있다(2, 3, 12, 18, 21).

하천에서 유기물, 질소, 인 농도는 평균적으로 매우 낮은 농도를 유지하고 있으며, 질소, 인 농도에 비해 유기물 농도가 현저히 낮게 나타난다. 이는 하천에 유입되는 생활하수 내 유기물 농도에 비하여 고농도의 질소, 인이 함유되어 있는 경우가 많기 때문이다. 일반적으로 질소, 인을 처리하는 미생물의 경우, 탄소:질소:인(CNP비)의 적정 비율은 100:5:1 정도이나, 실제 하수 내 유기물이 매우 낮게 나타나 일반적인 중속영양 미생물의 생존에 적합하지 않다. 따라서 낮은 유기물 농도에서도 자발적 성장이 가능한 독립영양 미생물을 이용하여 질소, 인 처리에 적용함으로써 효과적인 제거효율을 기대할 수 있다. 독립영양이 가능한 미생물 중, 광합성 박테리아는 광합성 기능을 하는 매우 다양한 박테리아 집단이며, 종에 따른 특이적인 대사 방법을 가진다. 광합성 박테리아는 혐기적 대사뿐만 아니라 미세호기, 통성혐기, 발효의 대사 과정을 다양히 가지고 있으며, 산소 농도 및 그 환경에 따라 광 독립영양, 광 중속영양, 화학 무기영양 및 화학 중속영양으로 대사과정을 전환시킬 수 있다. 특히 질소의 경우, 암모니아성 질소를 흡수하여 세포 내에서 직접 질소원으로 사용된다. 일반적으로 ammonia, denitrogen을 질소원으로 사용하며, 그 밖에 종에 따라 다양한 질소형태가 사용된다(1, 14, 15, 23, 24, 26, 27, 28, 29, 30). 또한 인의 경우 세포 내 과립과 같은 pyrophosphate (Rs. Rubrium) 혹은 Poly P의 형태로 과량의 인을 세포 내 축적하는 기작이 밝혀진 바 있다(25). 이로 보아 산소농도 및 영양조건이 다양하게 나타나는 하천에 광합성 박테리아를 직접 적용함으로써 효과적인 질소, 인 처리를 유도할 수 있을 것이라 사료된다.

하천수의 경우 용존 산소가 높은 수준을 유지하기 때문에 하·폐수 정화처리에서 사용되는 질소, 인 처리를 위한 A_2/O 공정과 같은 혐기/호기조건을 유지시키는데 어려움이 있다. 또한 우리나라 하천의 유기물 농도는 10 mg/L 내외로 유기물 농도가 매우 낮기 때문에 일반적으로 폐수처리에 사용되는 활성슬러지 기법은 적용하기 어려우며, 유기물에 비해 질소, 인의 농도는 지나치게 높아 그 처리가 잘 이루어지지 않고 있다. 또한 하천수의 경우 대단위의 오염 지역을 포함하기 때문에 처리시스템의 개발 및 적용에 대한 연구가 미비한 실정이다. 일반적인 활성슬러지에 존재하는 중속영양 미생물은 낮은 유기물 농도에서 잘 성장·생존하지 못하나, 광합성 박테리아는 저농도 유기물 존재에서 생존 가능하고 암모니아를 영양원으로 바로 이용할 수 있으며, 호기, 혐기 조건 모두에서 질소, 인을 제거할 수 있다고 알려져 있다. 최근 이러한 특징을 이용하여 하·폐수 정화처리에 광합성 박테리아를 적용하려는 시도가 있었다(10, 19). 이 등(19)에 의한 연구에서 고농도 유기물 존재 시 질소 제거를 확인하였으며, CN 비가 높을 때 암모니아성 질소의 제거가 크게 증가하고, 혐기조건 시 질산화와 탈질화가 동시에 일어난다는 보고가 있었다. 현재까지 고농도 유기물을 포함한 수 처리에 대한 연구는 활발히 진행되어 왔으나, 하천

수와 같은 저농도의 유기물 및 질소, 인 처리에 대한 연구는 미비하며, 특정 미생물을 이용한 하천수 처리 기법의 개발 또한 이루어지지 않은 실정이다.

따라서 본 연구에서는 혼합 광합성 박테리아 부착 세라믹 담체를 적용한 폭기식 접촉 산화 반응조를 이용하여 효과적인 저농도 질소, 인 제거를 유도하였으며, 반응조 내 산소공급에 따른 최적의 폭기 조건을 정립하였다.

재료 및 방법

사용균주 및 배양방법

기존의 고효율 질소 분해 균주로 밝혀진 5종의 광합성 박테리아(*Rhodobacter blasticus*, *Rhodobacter capsulatus*, *Rhodocyclus tenuis*, *Rhodomicrobium vannielii*, *Rubrivivax gelatinosus*; 16, 19)를 환경미생물은행(KEMB, Korea National Environmental Microorganisms Bank)에서 분양 받았다. 이 광합성 박테리아는 그람음성균으로 acetate, fumarate, lactate, malate, pyruvate, valelic acid 등의 유기물과 CO_2 를 탄소원으로 이용할 수 있고, 다양한 환경조건(명처/암처, 호기/혐기) 모두에서 질소 제거효율을 가진다고 보고되었다(19). 광합성 박테리아는 27M 배지(*Rhodospirillum* medium, ATCC medium 1308, 22)에 1% (v/v) 접종하여 $29 \pm 1^\circ C$, 2000 lux 광 조건에서 4일간 정치 배양하였다. 계대 배양도 동일한 조건으로 실시하였다.

담체 및 반응기

세라믹 담체는 균일한 물성을 위하여 분쇄와 혼합과정을 거친 청자토를 사용하였으며, 높은 기공률 형성을 위해 발포제가 첨가되어 만들어졌다. 담체는 약 20-30 mm 크기의 정육면체 형태이며, 부피비중은 약 1.1, 겉보기 기공률은 약 53.6%, 흡수율은 53.1%를 나타내었다. 담체 표면과 내부는 수십-수백 μm 크기의 기공들로 이루어져 있어 균의 부착이 용이하다. 저농도 인 제거를 위하여 담체 KSP01을 사용하여 화학적 방법으로 처리하였다.

질소, 인 처리를 위한 반응기는 220 cm (L)×18 cm (W)×30 cm (H), 두께 1 cm의 아크릴 소재로 제작하였다. 정화시스템은 저수조, 반응조, 폭기 장치, 유출부로 구성되었으며, 약 1 m^3 의 저수조에 합성폐수 조성 후 정량펌프를 사용하여 단위 시간당 유입량을 조절하였다. 반응조 내에는 10단계로 격판을 설치하여 다양한 폭기 조건을 적용하였다(Fig. 1).

저농도 무기영양염류 제거 회분식 실험

2 L 유리 배양병에 저농도 질소, 인을 다양하게 조성한 합성배지(CNP 비; A, 100:5:1; B, 100:10:1; C, 150:15:1)를 1 L 씩 준비하였다. 유기물은 glucose와 fructose, 암모니아성 질소는 NH_4Cl , 질산성 질소는 KNO_3 , 인산염 인은 KH_2PO_4 를 이용하여 농도를 맞추었다. 광합성 박테리아는 위의 조건과 동일하게 배양하였으며, 균체 적용 시 6,000 rpm, 20 min 원심 분리 후, 각 농도별 합성배지로 27M 배지 성분을 없앤 후, 다시 원심 분리하여 균체를 수집하였다. 수집한 균체를 혼합하여 초기

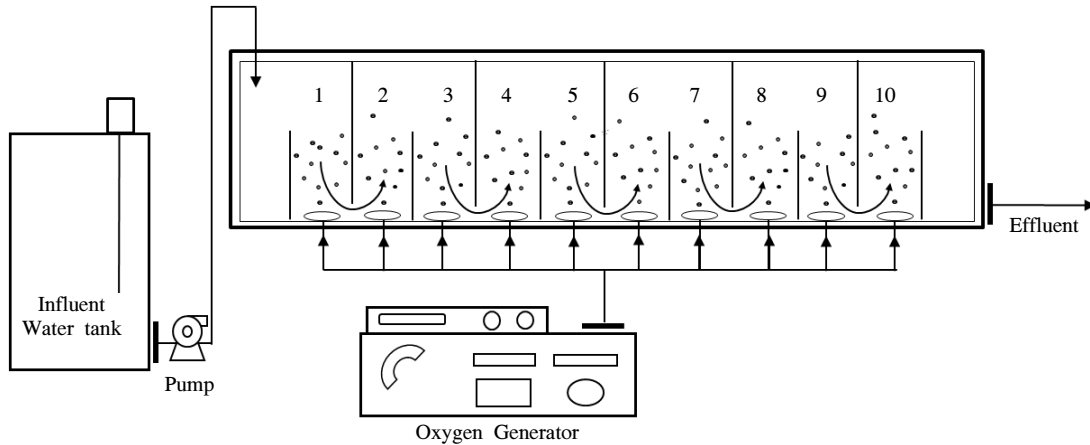


Fig. 1. Schematic diagram of a bioreactor.

농도 0.1 g/L (w/v)로 합성배지에 접종하여 회분식 실험을 실시하였다. 균주를 교반시키며 배양하고, 12시간, 24시간, 48시간 후 배양액 100 ml를 샘플링하여 0.2 μm cellulose ester membrane filter로 균체 제거 후 암모니아성 질소(NH₃-N), 인산염 인(PO₄³⁻-P), COD_{Cr}의 농도 변화를 측정하였다.

세라믹 담체를 이용한 저농도 무기영양염류 제거

반응조에 세라믹 담체를 약 20 cm 높이로 채우고 합성폐수를 통과시켜 1일 간격으로 유입수와 유출수의 COD_{Cr}, 암모니아성 질소, 아질산성 질소(NO₂⁻-N), 질산성 질소(NO₃⁻-N), 인산염 인을 측정하였다. 합성폐수 조성은 COD 20 mg/L, 암모니아성 질소 20 mg/L, 질산성 질소 5 mg/L, 인산염 인 5 mg/L이 되도록 하였으며, 2시간 체류, 공급유량 0.312 L/min (저류 깊이, 0.2 m; 지체시간, 120 min; 공극률, 0.52; 저류량 37.44 L), 10개 반응조에 6.1 L/min로 공기를 주입시키며 반응기를 운행하였다.

혼합 광합성 박테리아, 세라믹 담체, 담체 KSP01을 이용한 저농도 무기영양염류 제거

혼합 광합성 박테리아를 세라믹 담체에 7일 동안 활착시킨 후 반응기에 충전하였다. 세라믹 담체의 충전 높이는 약 20 cm, 합성폐수는 COD_{Cr} 8 mg/L, 암모니아성 질소 4 mg/L, 질산성 질소 1 mg/L, 인산염 인 1 mg/L로 조성하고, 지체시간은 4시간으로 하였다. 호기 조건에 따른 질소, 인 제거를 확인하기 위하여 3가지 폭기 조건(I, 1-10 반응조 6.1 L/min 공기주입; II, 1-2 반응조 10.2 L/min 공기주입; III, 8-9 반응조 10.2 L/min 공기주입)으로 실험을 실시하였다. 저농도 인을 제거하기 위하여 추가적으로 담체 KSP01을 사용하여 실험을 실시하였다. 10 반응조에 담체 KSP01을 충전시키고, 공기를 8-9 반응조에 10.2 L/min로 주입하여 폭기시키며, 그 외 조건은 동일하게 유지시켰다. 유입수와 유출수의 COD_{Cr}, 암모니아성 질소, 아질산성 질소, 질산성 질소, 인산염 인 농도를 1일 간격으로 측정하였다.

혼합 광합성 박테리아, 세라믹 담체, 담체 KSP01을 이용한 하천수의 저농도 무기영양염류 제거

광합성 박테리아 부착 담체를 이용한 실질적인 처리 효율을 검증하기 위하여 반응기 내 하천수를 직접 적용하였다. 하천수는 질소, 인 농도 증가에 가장 영향을 미치는 하수종말처리장의 방류수와 하천 합류 부분에서 채수하였다. 3회에 걸쳐 하천수를 채수하였고, 채수량은 1회 약 1 m³로 하였다. 반응기는 채수량을 고려하여 6개 반응조를 사용하였으며, 크기는 140 cm (L)×18 cm (W)×30 cm (H)로 설정하였다. 혼합 광합성 박테리아를 고정된 세라믹 담체는 1-5 반응조에, 담체 KSP01은 6 반응조에 약 20 cm로 충전시켰다. 채수된 하천수가 반응기를 4시간 동안 통과하도록 설정하였으며, 수중펌프를 가동하여 저수조 내 교반을 시켰다. 호기조건을 위해 반응조에 10.2 L/min로 공기를 주입하여 폭기시켰다.

분석방법

무기영양염류의 성분 분석에 있어 암모니아성 질소(NH₃-N), 아질산성 질소(NO₂⁻-N), 질산성 질소(NO₃⁻-N), 인산염 인(PO₄³⁻-P), COD_{Cr}의 분석은 commercial kit (HACH, USA)를 이용하여 분석하였으며, 분광광도계(DR2010, DR4000, HACH)로 흡광도를 측정하였다. pH는 pH meter (PHM92 LAB pH meter, METERLABTM, Denmark)를 보정한 후 측정하였다.

결과 및 고찰

저농도 무기영양염류 제거 회분식 실험

하천 조건과 같은 호기조건으로 유기물, 암모니아성 질소, 인산염 인의 비와 농도를 다양하게 조성한 합성배지(A, B, C)에 혼합 광합성 박테리아를 적용하여 질소, 인 제거를 확인하였다. 실험 결과 조건 B에서 초기값 COD_{Cr} 37.3 mg/L, NH₃-N 4.0 mg/L, PO₄³⁻-P 1.0 mg/L (C:N:P=100:10:1) 일때 각각 87.4%, 46.3%, 79.7%로 높은 제거효율을 보였다. 또한 50 mg/L 이하의 저농도 유기물을 합성배지에 조성하였을 경우(A, B 조건), 100 mg/L 이상으로 조성하였을 때(C 조건)보다 유기물, 암모니아성 질소, 인산염 인의 제거효율이 더 높은 것을 확

Table 1. Removal efficiencies of COD_{Cr}, NH₃-N and PO₄³⁻-P by mixed phototrophic bacteria at low concentrated nitrogen and phosphorus (CNP ratio; A, 100:5:1; B, 100:10:1; C, 150:15:1) (Unit: mg/L)

	A		B		C	
	Initial	Final	Initial	Final	Initial	Final
COD _{Cr}	18.8	10.5	37.3	4.7	110.3	81.6
		44.2%		87.4%		26.0%
Ammonia (NH ₃ -N)	1.0	0.6	4.0	2.1	9.6	8.9
		39.5%		46.3%		7.5%
Phosphorus (PO ₄ ³⁻ -P)	0.6	0.4	1.0	0.2	2.0	1.7
		33.3%		79.7%		13.0%

인할 수 있었다(Table 1).

이로 보아 일반적인 균주가 100:5:1의 높은 CNP 비에서 효율적이라고 알려졌으나, 광합성 박테리아를 이용했을 때 100:10:1의 낮은 CNP 비에서도 효율적인 제거능을 보이는 것을 확인하였다. 또한 매우 낮은 유기물 농도에서도 질소, 인 제거효율을 보여 하천수 질소, 인 처리시 광합성 박테리아를 이용한 현장 적용 가능성을 보여주었다.

본 연구에서는 저농도 질소, 인에서 유기물 농도를 일정하게 유지시키며 실험을 진행하였으나, 추후 유기물 농도를 실제 하천수와 유사하게 설정하고, 질소와 인의 비를 다양하게 조성하여 높은 제거를 도출하는 실험이 더 필요하겠다.

세라믹 담체를 이용한 저농도 무기영양염류 제거

하천정화기법은 하천의 정화능력을 물리적·생물학적 방법을 이용하여 보완함으로써 단위 시간당 물질 전환속도를 촉진시키는 기법이다. 물리적 방법은 하천의 수리적 특성에 따른 침전, 분리, 대기접촉 등을 이용하는 방법이며, 생물학적 방법은 수중의 미생물을 집적시켜 유기물 분해·산화시키고, 수생생물에 의한 영양염류 흡수 및 고정화 등을 이용하는 방법이다. 이 중 폭기식 자갈 접촉산화법은 물리적·생물학적 원리를 이용한 것으로 자갈에 의한 유기물 침전과 생물막에 의한 유기물 흡착 및 산화 분해를 일으키며, 폭기로 인해 유기물과 암모니아의 산화를 촉진시킬 수 있다(7).

자갈은 많은 미생물이 서식할 수 없으므로 이러한 점을 보완할 수 있는 기공률이 크고 미생물을 많이 부착할 수 있는 세라믹 담체를 사용하였다. 세라믹 담체는 기공률, 기공크기, 표면 거칠기 및 비표면적 등에 의해 평가된다. 기공률은 담체 내 포함된 공극의 양으로 클수록 많은 미생물이 서식하고, 기공크기는 미생물 크기의 10배 이상 되어야 미생물 서식처로 이용 가능하며, 비표면적이거나 표면 거칠기 등은 미생물막 형성에 영향을 미친다고 알려져 있다. 이 중 기공률에 의한 영향이 다른 인자에 의한 영향보다 크다고 보고되었다(5, 6).

본 연구에서는 1일 간격으로 유입수와 유출수의 유기물, 질소, 인 농도를 측정된 결과, COD_{Cr} (유입수 33.1 mg/L, 유출수 26.7 mg/L), 암모니아성 질소(유입수 18.6 mg/L, 유출수 18.5 mg/L), 아질산성 질소(유입수 0.007 mg/L, 유출수 0.0018

mg/L), 질산성 질소(유입수 5.8 mg/L, 유출수 5.6 mg/L), 인산염 인(유입수 5.4 mg/L, 유출수 5.2 mg/L)의 변화가 거의 없었다. 이는 합성 폐수 내 용존된 유기물질의 함량은 높으나, 고형의 유기물질이 적어 물리적 침전이 일어나지 않아 그 제거효율이 나타나지 않았으며, 세라믹 담체 내 생물막이 형성되지 않음에 따라 질소 및 인의 제거가 나타나지 않았다. 이로 보아 세라믹 담체 자체에 의해서 질소, 인이 화학적 및 물리적 처리가 되지 않는 것을 확인하였다.

혼합 광합성 박테리아, 세라믹 담체, 담체 KSP01을 이용한 저농도 무기영양염류 제거

세라믹 담체에 혼합 광합성 박테리아를 적용함으로써 효과적인 질소, 인 제거를 유도하였다. 사용된 세라믹 담체는 박테리아가 쉽게 부착 성장할 수 있는 넓은 비표면적과 다공성을 가지고 있으며, 반응기 적용을 위하여 물리적·화학적·생물학적 변화에 대해 안정성이 높고, 기계적 저항성과 내구성을 가지고 있어 균주 부착 담체 접촉 산화법에 적절한 특징을 가지고 있다.

7일간 광합성 박테리아를 활착한 담체를 적용한 반응기 실험 결과 45일 동안 평균 암모니아성 질소 79.2%, 유기물 72.7%의 제거가 보였으나, 아질산성 질소, 질산성 질소, 인산염 인의 제거는 거의 보이지 않았다. 또한 하천정화를 유도하기 위하여 3가지 다른 폭기 조건(I, 1-10 반응조 6.1 L/min 공기주입; II, 1-2 반응조 10.2 L/min 공기주입; III, 8-9 반응조 10.2 L/min 공기주입)으로 실험을 실시하였다. 그 결과 암모니아성 질소의 변화량이 Fig. 2와 같은 양상을 나타내는 것을 확인하였으며, 평균적으로 암모니아성 질소는 조건 I, II, III에서 각각 44.0%, 98.5%, 89.5% 제거되었다. 조건 I에서 초기 9일 동안 광합성 박테리아의 안정화가 되지 않아 암모니아성 질소 제거가 낮았으나, 9일 이후 거의 제거되는 것을 확인할 수 있었으며, 다른 조건에서도 암모니아성 질소가 거의 제거되는 것을 확인하였다. 이는 광합성 박테리아가 암모니아성 질소를 흡수하여 직접 질소원으로 사용하여 암모니아성 질소 제거가 높게 나타난 것으로 보이며, 다른 형태의 질소를 제거하기 위하여 추후 다양한 조건에서의 실험이 진행되어야 할 것으로 보인다.

반응조를 통과한 유출수의 암모니아성 질소 제거는 높았으

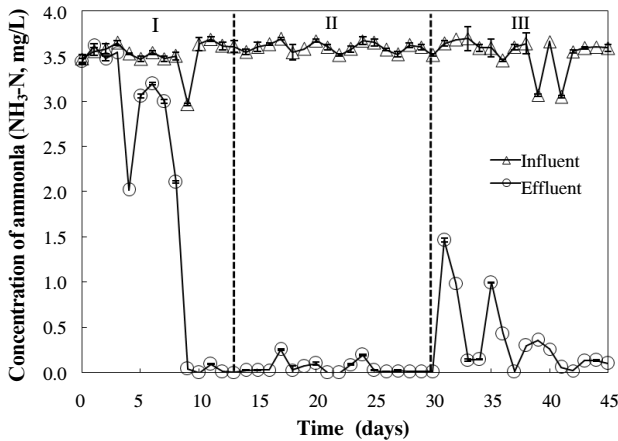


Fig. 2. Variation of $\text{NH}_3\text{-N}$ by mixed phototrophic bacteria, ceramic media and media KSP01 with different aeration condition. I, 1-10 reactor 6.1 L/min; II, 1-2 reactor 10.2 L/min; III, 8-9 reactor 10.2 L/min aeration. (Δ), Influent; (\circ) Effluent.

나, 저농도 인산염 인 제거는 거의 나타나지 않아 담체 KSP01을 추가적으로 이용하여 실험을 실시하였다. 담체 KSP01 성분과 PO_4^{3-} 의 결합을 촉진시키기 위하여 pH에 변화를 주며 인산염 인의 제거를 확인하였다. 실험 결과 pH 7.5, 8.0, 8.4, 9.2, 10.3에서 각각 37.7(± 0.55)%, 92.6(± 0.80)%, 69.5(± 0.14)%, 69.2(± 0.27)%, 69.9(± 0.14)%로 나타났다(Fig. 3). pH 8.0에서 가장 높은 인산염 인의 제거를 확인할 수 있었다.

질소, 인 제거를 위한 미생물 담체 접촉 산화 처리 시스템은 환경조건 및 농도 변화가 다양한 하천수 적용시, 유동적인 구조를 가지고 있어 화학적·물리적 처리 시스템과의 연계성이 뛰어난 장점을 가지고 있다. 본 연구 결과를 토대로 혼합 광합성 박테리아가 부착된 세라믹 담체와 담체 KSP01을 동시에 적용하였을 때 암모니아성 질소와 인산염 인의 높은 제거를 확인하였으며, 실제 현장 적용시 저농도 암모니아성 질소와 인산염 인 제거에 효과적일 것이라 사료된다.

혼합 광합성 박테리아, 세라믹 담체, 담체 KSP01을 이용한 하천수의 저농도 무기영양염류 제거

하수종말처리장의 방류수와 하천 합류 부분에서 1 m³씩 3회에 걸쳐 채수한 하천수를 혼합 광합성 박테리아를 고정된 세라믹 담체와 담체 KSP01에 통과시켜 질소, 인의 제거를 확인하였다. 실험 결과 암모니아성 질소는 82.8%로 높은 제거를 보여주었으며, 인산염 인과 유기물의 제거도 확인할 수 있었다(Table 2). 암모니아성 질소의 제거는 광합성 박테리아가 바로

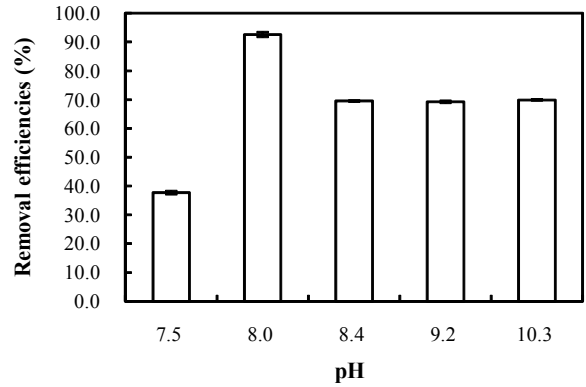


Fig. 3. Removal efficiency of $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ by media KSP01 at various pH.

이용하여 높게 나타난 것으로 보여지며, 담체 KSP01의 적용으로 인산염 인이 감소된 것으로 보인다.

본 연구에서는 다양한 유기물, 질소, 인 농도와 균 농도에 따른 회분식 실험을 실시하여 초기값 COD_{Cr} 37.3 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 4.0 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 1.0 mg/L (C:N:P=100:10:1) 일 때 가장 효과적인 암모니아성 질소 및 인산염 인의 제거가 나타나는 것을 확인하였다. 또한 혼합 광합성 박테리아와 세라믹 담체를 이용한 접촉산화법을 통하여 저농도의 유기물, 질소, 인의 제거를 확인하였다. 그 결과 암모니아성 질소의 높은 제거효율을 확인하였으며, 화학적 방법을 이용한 담체 KSP01의 적용으로 인산염 인의 제거 기능성도 확인하였다. 실제 하천수를 채수하여 반응기에 적용한 결과 혼합 광합성 박테리아, 세라믹 담체 및 담체 KSP01이 저농도 암모니아성 질소와 인산염 인의 제거에 효과적임을 확인할 수 있었다. 본 연구 결과를 통하여 혼합 광합성 박테리아를 부착한 세라믹 담체와 담체 KSP01의 현장 적용 가능성을 확인 할 수 있었다.

적요

저농도 유기물, 질소, 인 제거를 위하여 독립영양 미생물인 광합성 박테리아를 이용한 회분식 실험 결과 초기값 COD_{Cr} 37.3 mg/L, $\text{NH}_3\text{-N}$ 4.0 mg/L, $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$ 1.0 mg/L (C:N:P=100:10:1) 일 때 각각 87.4%, 46.3%, 79.7% 제거효율을 보였다. 혼합 광합성 박테리아, 세라믹 담체 및 담체 KSP01을 적용한 폭기식 반응기 실험 결과, 평균 유기물 72.7%, 암모니아성 질소 79.2%를 제거하였으며, pH 조절로 인산염 인을 최대 92.6%까지 제거할 수 있었다. 반응기 내 다양한 폭기 조건에서 암모니아성 질소 제거를 확인한 결과, 1, 2 반응조에 10.2 L/min로 공기를

Table 2. Removal efficiencies of the low concentrated nitrogen, phosphorus, and COD_{Cr} when using river-water by mixed phototrophic bacteria, ceramic media, and media KSP01 (Unit: mg/L)

	Ammonia ($\text{NH}_3\text{-N}$)	Nitrite ($\text{NO}_2\text{-N}$)	Nitrate ($\text{NO}_3\text{-N}$)	Phosphorus ($\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$)	COD_{Cr}
Influent	2.41(± 1.04)	1.138(± 0.426)	2.11(± 0.78)	0.54(± 0.27)	8.85(± 3.39)
Effluent	0.41(± 0.28)	0.057(± 0.017)	2.14(± 0.56)	0.28(± 0.11)	6.01(± 3.35)
Removal efficiencies (%)	82.8	95.0	-	49.0	32.1

주입하였을 때 98.5%로 높은 제거효율을 보여주었다. 또한 하천수 적용시 암모니아성 질소 82.8%의 높은 제거효율을 확인하였다. 본 연구를 통하여 개발된 정화 시스템의 현장 적용시 저농도 질소, 인의 높은 제거를 보일 것으로 사료된다.

감사의 말

경기대학교 생물자원특성화 사업단과 국가지정 환경미생물은행(KEMB, Korea National Environmental Microorganisms Bank)의 연구지원에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 강봉조, 이동현, 오덕철. 1997. 광합성세균 *Rhodospirillum rubrum*의 무기질소원의 이용. 제주대학교 기초과학연구 10, 105-116.
2. 김수룡, 김용국, 이종국, 황인욱. 2006. 유용미생물 고정용 세라믹 담체의 제조 및 부착능. 조선대 생산기술연구 28, 55-61.
3. 김준규, 신현철, 심재황, 조원승, 오재희. 2001. 고성능 다공성 세라믹 담체의 개발. 세라미스트 4, 47-55.
4. 김태철, 이규승, 오범룡, 민진우. 1998. 접착산화수로공법에 의한 수질개선연구. 충남대학교 환경연구 16, 1-10.
5. 박영식, 안갑환. 2001. 세라믹 담체의 제조와 성능 고찰. 대한환경공학회지 23, 507-516.
6. 박재구, 이태경, 정영. 2000. 폐수처리용 세라믹 담체. 세라미스트 3, 11-20.
7. 박재로, 김광배, 임현만, 권은영. 2003. 하천정화공법에서 폭기방식이 미치는 영향. 대한상하수도학회·한국물환경학회 2003 공동 추계학술발표회 논문집, 151-154.
8. 박재로, 임현만, 우효섭. 2001. 하천정화를 위한 상향류식 접촉산화공법의 운전특성에 관한 연구. 한국물환경학회지 17, 557-564.
9. 박혜경. 2007. 수자원 관리를 위한 조류 분석법. 대한환경공학회지 29, 593-609.
10. 오광근, 이철우, 전영중, 이재홍. 1996. 광합성 세균에 의한 미생물막의 형성. *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* 24, 733-737.
11. 오종민, 최이승, 이태관. 1996. 접촉산화법의 여재종류에 따른 처리효율의 비교. 수처리기술연구회 4, 17-24.
12. 옥삼복, 정승원. 2002. 세라믹 고정상 담체를 이용한 염색폐수처리. 한국환경분석학회지 5, 236-241.
13. 유용규, 윤세의, 이상섭. 2002. 자갈접촉산화법을 이용한 상류하천수 처리에 관한 연구. 대한환경공학회 2002 춘계학술연구발표회 논문집, 239-241.
14. 이상섭. 2004. 광합성 균주를 이용한 오수고도처리기술. *News & Information for Chemical Engineers* 22, 20-22.
15. 이상섭, 이시진, 유호식. 1996. 광합성 미생물을 이용한 이산화탄소 제거에 관한 연구. 대한환경공학회지 18, 149-157.
16. 이상섭, 주현중, 이석찬, 장만, 이택건, 심호재, 신응배. 2002. 광합성 균주를 이용한 폐수의 고도처리시스템개발. *Kor. J. Microbiol. Biotechnol.* 30, 189-197.
17. 이수원, 민경희, 잔짓, 이재성. 2005. 자연형 하천정화사업의 대상 하천 선정기준 분석에 관한 연구. 한국환경분석학회지 8, 225-231.
18. 이용석, 유주순, 정수열, 박준수, 최용락. 2003. 암모니아 및 아질산성 질소 산화세균의 분리 및 특성. *J. Kor. Soc. Agric. Chem. Biotechnol.* 46, 1-6.
19. 이진용, 김진수, 공성호, 심호재, 이상섭. 2003. 하·폐수 고도처리를 위한 다기능의 질소원 분해능 균주의 분리. *Kor. J. Microbiol.* 39, 21-26.
20. 임연택, 윤조희, 서정범, 유주순, 류덕희, 홍정선, 서윤수. 1992. 자갈층 접촉산화법을 이용한 오염하천수의 정화. 수질보전 한국물환경학회지 8, 173-180.
21. 정용철, 이정열, 민경석. 2008. 저농도 하수 유입 membrane-BNR 공정내 고정상담체 호기조에서의 SND. 수질보전 한국물환경학회지 24, 328-332.
22. Atlas, R.M. 2004. Handbook of microbiological media, 3rd ed., p. 1500. CRC press, Boca Raton, Fla, USA.
23. Candela, M., E. Zaccherini, and D. Zannoni. 2001. Respiratory electron transport and light-induced energy transduction in membranes from the aerobic photosynthetic bacterium *Roseobacter denitrificans*. *Arch. Microbiol.* 175, 168-177.
24. Casciotti, K.L. and B.B. Ward. 2001. Dissimilatory nitrite reductase genes from autotrophic ammonia-oxidizing bacteria. *Appl. Environ. Microbiol.* 67, 2213-2221.
25. Kulaev, I.S., A. Shadi, and S.E. Mansurova. 1974. Polyphosphates of phototrophic bacteria *Rhodospirillum rubrum* under different cultivation conditions. *Biochimia* 36, 656.
26. Madigan, M., S.S. Cox, and R.A. Stegeman. 1984. Nitrogen fixation and nitrogenase activities in members of the family *Rhodospirillaceae*. *J. Bacteriol.* 157, 73-78.
27. Madigan, M.T. and H. Gest. 1979. Growth of the photosynthetic bacterium *Rhodospseudomonas capsulata* chemoautotrophically in darkness with H₂ as the energy source. *J. Bacteriol.* 137, 524-530.
28. Masters, R. and M. Madigan. 1983. Nitrogen metabolism in the phototrophic bacteria *Rhodocycclus purpureus* and *Rhodospirillum tenue*. *J. Bacteriol.* 155, 222-227.
29. Siefert, E. and N. Pfennig. 1980. Diazotrophic growth of *Rhodospseudomonas acidophila* and *Rhodospseudomonas capsulata* under microaerobic conditions in the dark. *Arch. Microbiol.* 125, 73-77.
30. Sudo, H., A. Yamada, K. Kokatsu, N. Nakamura, and T. Matsunaga. 1997. Development of a phosphate-removal system using a marine photosynthetic bacterium *Chromatium* sp. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 47, 78-82.