

다공성 담체를 이용한 유동상 및 하이브리드 반응기에서의 질소제거

전 병 희[†]

충북대학교 건설기술연구소

(2005년 2월 21일 접수, 2005년 5월 20일 채택)

Nitrogen Removal in Fluidized Bed and Hybrid Reactor using Porous Media

Byong-Hee Jun[†]

Institute of Construction Technology, Chungbuk National University

ABSTRACT : A fluidized bed reactor containing porous media has been known to be effective for nitrogen and organic matters removal in wastewater. The porous media which attached microbes plays important roles in simultaneous nitrification/denitrification (SND) due to coexistence of oxic, anaerobic and anoxic zone. For SND reaction, oxygen and organic substrates should be effectively diffused from wastewater into the intra-carrier zone. However, the overgrowth heterotrophic microbes at the surface of porous media may restrict from substrates diffusion. From these viewpoints, the existence and effect of heterotrophic bacteria at surface of porous media might be the key point for nitrogen removal. A porous media-membrane hybrid process was found to have improved nitrogen removal efficiency, due to stimulated denitrification as well as nitrification. Microelectrode studies revealed that although intra-media denitrification rate in a conventional fluidized bed was limited by organic carbon, this limitation was reduced in the hybrid process, resulting in the increased denitrification rate from 0.5 to 4.2 mgNO₃-N/L/hr.

Key Words : Membrane, Nitrogen Removal, Simultaneous Nitrification and Denitrification, Microelectrode

요약 : 부착 미생물을 이용한 다공성 담체 유동상 반응기는 하폐수층의 유기물 및 질소제거에 많이 적용되어져 왔다. 특히 생물막이 형성된 담체에서는 호기, 무산소 그리고 혐기영역이 공존하여 동시적 질산화/탈질 반응에 의한 질소제거에 유리한 환경이 제공된다고 알려져 있다. 이러한 반응을 활성화시키기 위해서는 담체표면과 내부에서 산소와 유기물등의 적절한 기질확산이 이루어져야 한다. 그러나 하폐수층의 유기물농도나 생물막의 마찰조건등 운전조건에 따라서는 표면에서의 종속영양균의 과잉성장에 의해 질소 제거 반응이 저해되기도 한다. 다공성 담체 유동상 반응기에 막모듈을 결합시킨 하이브리드 반응기는 단일조내에서 활성화된 동시적 질산화/탈질 반응으로 종래의 유동상 반응기에 비해 30% 이상 질소제거 효율이 증가하였다. 미소전극 연구를 통해 담체내부의 탈질율을 조사할 수 있으며 유동상 반응기에 비하여 하이브리드 반응기내 담체내부에서는 탈질반응에 대한 유기물의 확산에 대한 제한인자가 작으며 따라서 보다 높은 탈질율을 유지할 수 있음을 보였다.

주제어 : 막, 질소제거, 동시적 질산화/탈질, 미소전극

1. 서 론

최근 미생물 담체를 이용한 유동상이나 막공정등이 하폐수처리에 폭넓게 이용되고 있다. 다공성 담체는 높은 미생물 농도를 유지할뿐만 아니라,¹⁾ 유기물과 질소를 동시에 제거하기 위한 복합적 생물반응을 위하여 이용되어져 왔다.^{2,3)} 그리고 유동상반응기에서 동시적 질산화와 탈질(Simultaneous Nitrification/Denitrification) 반응의 기질 영향에 대한 많은 연구들이 이루어져 왔다. 무기탄소원은 질산화 속도를 증가시키는 반면 유기탄소의 증가는 생물막 표면에서 빠르게 성장하는 종속영양균의 증식에 의한 용존산소(DO)의 경쟁으로 인해 질산화 반응을 저해하는 효과를 가져온다.^{4,5)}

그리고 생물막 표면에서의 종속영양균의 성장은 탈질반응에 필요한 전자공여체로서의 유기물이 담체내부 무산소 영역에까지 확산되는 것을 저해한다.^{6,7)} 따라서 다공성 담체의 질소제거기능을 이해하기 위해서는 유기물의 소모와 함께 담체내부의 기질확산현상을 규명할 필요가 있다.

막 공정은 입자상 물질들을 제거하고 성장률이 낮은 미생물을 안정적으로 유지하기 위한 목적으로 이용되어져 왔으며,⁸⁾ 생물학적 처리에서는 질산화균을 농축시키는 기능이 강조되어져 왔다.^{9,10)} 막공정은 완전 호기적 상태를 유지하기 때문에 질소제거를 위해서는 일반적으로 별도의 탈질 반응기가 설치, 운영된다.

미소전극을 이용하여 생물막내 호기/무산소 영역을 측정하는 것이 가능하다.¹¹⁾ 또한 glucose측정을 위한 미소전극을 활용함으로써 산소공급 증가에 의한 종속영양적 유기물 산화와 glucose 부하량이 증가하는 연구결과를 보였다.^{12,13)} 반면 유기물의 이용도에 따라 부유상이나 생물막에서 탈질

[†] Corresponding author

E-mail: bhjun@chungbuk.ac.kr

Tel: 043-261-3464

Fax: 043-271-6503

을 저해함도 보였다.^{14,15)} 결론적으로 기질중 유기물의 증가는 생물막내 무산소 영역을 증가시킴으로써 탈질반응에 중요한 역할을 수행함을 알 수 있다. 담체를 이용한 유동상 반응기에 막 모듈을 적용시켜 반응기내 미생물 농도를 더욱 높게 유지시킬 수 있다. 본 연구에서는 이러한 구조를 가지는 반응기에서 질소의 제거특성을 관찰하여 유동상 반응기의 결과와 비교한다. 그리고 미소전극을 적용시켜 다공성 담체내 미소공간에서 용존산소와 glucose의 분포특성을 조사하여 담체내 무산소영역에서 유기물확산과 탈질능의 변화를 규명하고자 한다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1. 연속실험장치

반응기는 다공성 담체를 이용한 표준적 유동상 (Fluidized-bed Reactor, FR)과 유동상에 막모듈이 결합된 하이브리드 반응기 (Hybrid Reactor, HR)의 2가지를 이용하였다 (Fig. 1). Fig. 1(a)는 Lab-scale 유동상 (FR)을 나타낸 것으로서 10 L 용적의 아크릴 반응기에 각 변의 크기가 15 mm인 폴리우레탄 재질의 스폰지형 담체를 12.5% 포함하고 있다. Table 1에 나타낸 조성의 합성폐수를 이용해 1.25 L/hr의 주입율로 연속주입하여 수리학적 체류시간 (HRT)을 8시간으로 유지하였으며 반응기 하부에 diffuser를 이용하여 공기를 4 L/min의 주입율로 공급하였다. Fig. 1(b)는 하이브리드 반응기 (HR)의 개략도를 나타낸 것이다. 유동상 반응기에 막모듈이 결합된 형태로서 막은 공극이 0.4 μm의 polyolefin재질의 정밀여과(MF)막을 표면적이 0.1 m²이 되도록 설치하였다. 공급원수는 FR과 같으며 공급율은 0.83-2.08 L/hr로 유지되었으며 공기주입율은 25 L/min으로 하였다. 막모듈은 적절한 간격을 유지하여 공기방울과 함께 다공성 담체가 자유롭게 유동할 수 있는 구조를 유지하였고, 흡입펌프를 사용하여 여과수를 배출하였으며 그때의 차압과 유량을 측정하였다.

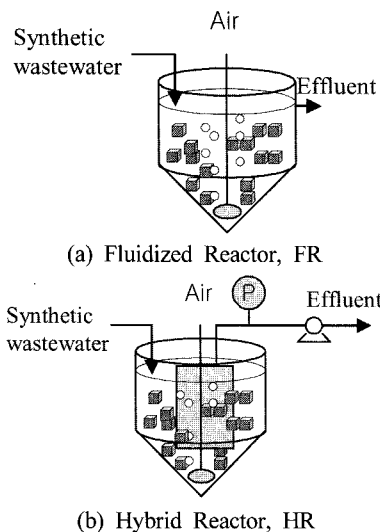


Fig. 1. Experimental apparatuses of (A) fluidized-bed reactor and (B) hybrid reactor.

Table 1. Composition of synthetic wastewater

Components	Concentration (mg/L)	
	Fluidized Reactor	Hybrid Reactor
(NH ₄) ₂ SO ₄ (mgN/L)	20-40	40-100
Glucose (mgC/L)	100-400	100-300
NaHCO ₃ (mgCaCO ₃ /L)	0-400	0-500
Inorganic salts		
KH ₂ PO ₄		12.6
MgSO ₄		9.5
CaCl ₂ ·2H ₂ O		1.2
FeCl ₃ ·6H ₂ O		0.1

2.2. 회분실험

연속 반응기의 기질제거경향이 일정하게 유지되는 상태를 유지하면 반응기내 부유상과 고정상 미생물이 가지는 질산화, 탈질 활성도를 측정하기 위하여 회분실험을 행하였다. 질산화 활성도는 부유미생물의 경우, 반응기내에서 부유상태의 미생물을 500 mL를 채취한 후 pH 7.1의 phosphate buffer solution으로 2회 세정 후, 황산암모늄과 증탄산나트륨으로 농도조절 된 500 mL의 배지에 옮겨져 1 L/min으로 공기가 주입되는 환경하에서 시간에 따른 암모니아 농도와 생성된 아질산염, 질산염변화를 측정하였다. 고정상 미생물의 질산화 활성도측정은 12.5%(V/V)의 담체를 채취하여 고정상 그대로 상기의 수순에 따라 측정하였다. 고정상 미생물의 탈질특성은 12.5%(V/V) 부피용량의 담체를 채취한 후, 연속실험에서 이용된 glucose와 농도조절된 KNO₃용액에서 측정한다. 이 때 공기와 함께 질소가스를 주입하여 용액의 용존산소농도를 조절한 다음 탈질효율을 측정하였다.

2.3. 미소전극 제작 및 측정

다공성 담체내 산소농도의 미소분포를 측정하기 위해 Clark-type microelectrode를 직접 제작하여 실험에 이용하였다. DO microelectrode는 Platinum working electrode, Reference electrode, outer casing으로 구성된 2중관 구조를 가지고 있다. 0.1 mm의 Pt wire를 capillary tube로 코팅한 다음 끝 부분에 보다 효율적인 전기전도를 위해 5% KAu(CN)₂용액으로 금도금을 한다. 이것을 working electrode로 이용하고, Ag/AgCl전을 reference electrode로 이용한다. 이 두 전극을 끝 부분이 실리콘 처리된 outer casing에 넣고 2 M KCl 전해질로 채운후 밀봉하면 전극이 완성된다. 이에 관한 제작법은 Revsbech and Jorgensen¹⁶⁾의 연구에서 설명되었다. Revsbech and Jorgensen은 의료목적의 경우와 달리 토양이나 거친 저질(Sediment)와 같이 sensor자체에 강도가 요구되는 경우 다소 두껍거나 튼튼한 전극이 이용될 수 있다고 하였다.¹⁶⁾ 본 연구에서는 microelectrode를 담체의 polyurethane matrix내에 주입하기 위해 적절한 강도가 요구되었고 tip 부분의 직경이 200 μm 정도의 electrode를 적용해 실험에 안정성을 기하였다. 제작된 전극은 공기로 포화된

용액과 아황산나트륨 용액(10%)을 이용해 보정하였으며 90% 응답을 나타내는 시간상수(time constant)는 2.6초였다. glucose 농도측정을 위한 microelectrode는 Cronenberg and van der Heuvel¹²⁾이 제시한 방법을 이용해 제작되었다. glucose microelectrode 역시 2중관 구조를 가지고 있으며, 인장된 capillary속에 직경 0.1 mm의 Pt wire가 working electrode로서 사용된다. 노출된 Pt electrode의 끝 부분에 glucose oxidase (3%(w/v) glutaraldehyde with 10%(w/v) glucose oxidase)를 5분간 정치시킨 후, 건조기내에서 1시간 동안 건조시키는 과정을 4-5회 반복하여 glucose oxidase가 충분히 부착하도록 한다. 부착이 확인되면 Pt electrode를 bovine albumin 용액(20%(w/v) glutaraldehyde with 10% (w/v) bovine albumin)에 10분간 담근 후 다시 건조기에서 1시간 건조시키면 Pt working electrode가 완성된다. outer casing의 tip부분을 4% agar로 sealing한 후, 전해용액(0.1 M acetic buffer with 0.05 M KCl)을 채우고 Pt electrode를 삽입한 다음 epoxy resin으로 전체적으로 고정시키면 전극이 완성된다. glucose microelectrode는 투과된 glucose를 Pt electrode의 glucose oxidase를 이용하여 산화시키고 이때 발생한 전류흐름을 측정한다.

측정을 위해 반응기중의 담체를 채취해 유효부피가 200 mL인 측정용기에 고정시켰다. 측정용기에는 반응기에 공급되는 합성폐수와 같은 조성의 폐수가 연속공급되며 diffuser를 통해 공기가 공급되어 기질상태와 유동상태를 반영하여 실제 반응기내의 상태와 유사하도록 하였다. 미소전극의 위치를 제어하기 위해 3차원 micromanipulator (Model MMS-77, Shimadzu, Kyoto)를 이용하였으며 CCD카메라 (Model DXC-107A, SONY, Tokyo) 관측하에서 50 μm씩 이동시키면서 농도분포를 측정하였다.

2.4. 분석

TOC Analyzer(TOC-5000A, Shimadzu)를 이용하여 유기물 농도를 분석하고, 암모늄 이온, 아질산염 이온, 질산염 이온등 질소이온농도는 ion chromatography (SCL-10A, Shimadzu)를 이용해 분석하였다. 미생물의 질소성분함량 분석을 위해 원소분석 결과를 이용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 유동상 반응기에서 질소제거 특성

Fig. 2에 유동상 반응기에서 각 Carbon/Nitrogen 농도비에 대한 연속실험의 결과를 나타내었다. 각 원수조건에서 최소 30일 이상 연속운전을 하고, 운전 20일 이후 반응기내 미생물의 상태와 유출수질이 안정적으로 유지되었을 때의 농도들의 평균값을 구하여 각 조건에서의 질소제거특성을 파악하였다. 각 결과에서 Loading은 유입 질소 부하량을 나타내며 'Not removed'는 미처리된 부분을 나타낸다. 제거된 질소는 질산화/탈질반응을 거쳐 제거된 부분과 미생물 흡수에 의해 제거된 부분으로 구분될 수 있다. 미생물 흡수에 의해

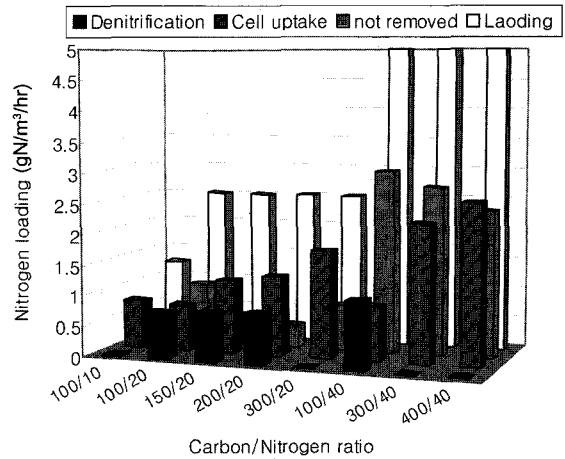


Fig. 2. Effects of Carbon/Nitrogen ratio on nitrogen removal in FR.

제거된 부분은 반응기 유출수중 MLSS농도를 측정하고, MLSS 중의 질소의 함량을 원소분석을 통해 분석한 다음 유출된 MLSS농도에 곱하여 결정되었다. MLSS 중의 질소 함량은 9% 내외로 유지되었으며, 유출수중의 MLSS농도는 대략적으로 100-200 mg/L로서 일반적인 활성슬러지 공정에 비해 매우 낮은 범위를 유지한 반면 담체에 부착된 미생물 농도는 20,000 mg/L 이상 유지되었다. 유출수의 MLSS농도는 TOC의 증가에 따라 증가하며 이 경우 미생물 흡수에 의한 제거농도는 9-20 mgN/L로서 대부분의 질소제거가 미생물 흡수에 의해 일어남을 알 수 있다. 그러나 이러한 질소제거는 배출 슬러지량을 증가를 동반한 것으로서 슬러지 처분등을 고려할 때 바람직 하지 않은 처리특성이라 판단되며 또한 이런 제거기작은 제거량에 있어서도 한계점을 보이고 있다. 결과에서의 Denitrification은 질산화/탈질 과정을 거쳐 제거된 질소의 부하를 나타낸 것으로서 유기물 증가에 따라 오히려 제한되고 있음을 보여준다.

Fig. 3은 원수 중 질소농도가 20 mgN/L일 때 유입 유기물 부하에 따른 유출수질의 변화를 나타내었다. 이 결과 역시 연속실험을 통해 안정기에 접어든 대표수질의 평균값을 구한 것이다. 유기물 부하가 낮은 조건에서는 주로 질

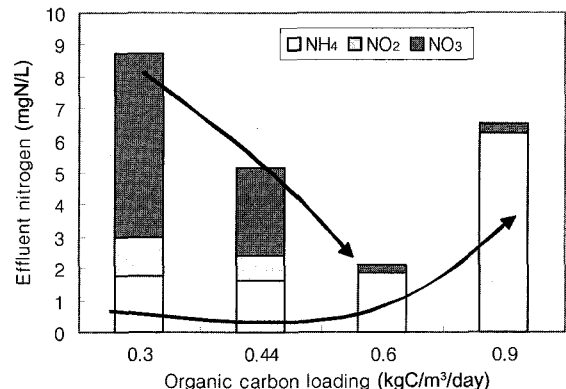


Fig. 3. Effects of organic carbon loading on nitrogen concentrations in effluent of FR.

산염이 배출된 반면 유기물 부하가 증가하면서 암모니아 산화가 저해되어 유출수 중에 암모니아가 높게 포함되어 있음을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 다공성 담체를 이용한 단일반응기에서 질소제거는 유기물 농도에 크게 영향을 받으며 유기물 농도가 증가하면 비교적 향상된 탈질 효율을 얻을 수 있지만 고농도 유기물은 질산화 반응을 저해하여 전체 질소제거효율을 크게 감소시킴을 알 수 있다.

3.2. 담체와 막을 이용한 하이브리드 공정에서 질소제거 특성

다공성 담체와 막을 결합한 하이브리드 공정을 420일간 운전한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 운전기간 중 각기 다른 원수조건을 적용시켜 처리특성을 조사하였다 (Table 2). 막 여과 flux는 운전초기에 0.4 m³/m²/day로 시작하였으나 여과가 진행되는 동안 막표면의 여과저항 증가로 0.2 m³/m²/day로 감소하였으나, 운전 160일째에 차아염소산 나트륨으로 화학세정을 하여 운전기간중 수리학적 체류시간 8 hr를 유지하였다. 막 표면에서의 차압은 150일을 정점으로 -50 kPa까지 증가하였으나 담체유동에 의한 지속적인 막세정등의 효과로 -30~-40 kPa의 범위에서 압력이 유지되었다. HR의 경우 부유상 미생물농도는 FR보다 10배 이상으로 유지된 반면 부착미생물농도는 FR보다 다소 낮은 12,000-23,000 mg/L의 범위를 보였다. 또한 담체표면에서의 미생물 부착상태도 덜 조밀한 상태로 관찰되어 FR과 비교할 때 매우 다른 생물막 환경이 조성되어 있음이 예상되었다.

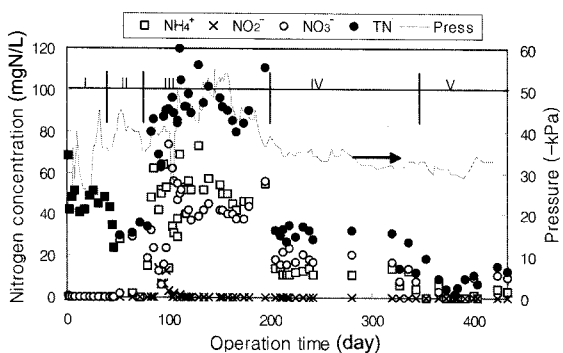


Fig. 4. Time course of membrane pressure and nitrogen concentrations in effluent of HR.

Table 2. Water quality in HR of media and membrane system

Operation number	Influent Conc. (mg/L)			Removal Eff.(%)		Microbial Conc. (mg/L)	
	TOC	T-N	Alk.	TOC	T-N	Suspended	Attached
I	100	50	0	92	3	3190	12000
II	100	50	250	95	21	3680	17300
III	100	100	500	96	9	3410	13900
IV	100	40	200	95	40	7130	15500
V	300	40	200	97	69	8120	22900

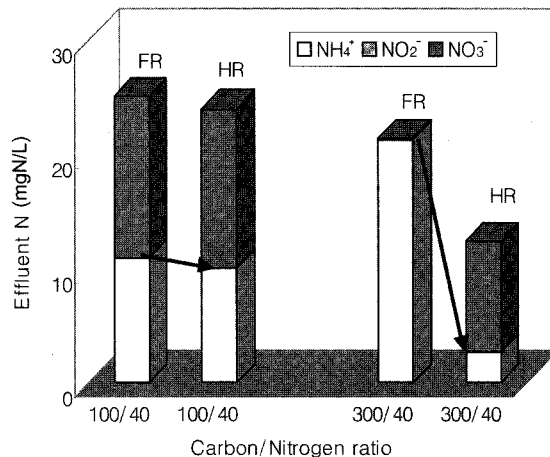


Fig. 5. Comparison of nitrogen composition between FR and HR.

Fig. 5에 동일 기질조건하에서 FR과 HR에서의 질소제거 특성을 나타내었다. 유입 유기탄소농도가 100 mgC/L일때, 두 반응기에서 질소제거는 비슷한 경향을 보이지만 유입 유기탄소농도가 300 mgC/L로 증가할 때 FR에서는 종속영양균의 산소경쟁에 의한 질산화 저해현상으로 암모니아 농도가 높게 유출된 반면 HR에서는 질산화 저해가 크게 감소하고 전체 질소제거율도 증가하였다. 다만 HR에서 산화된 질산염이 완전 탈질되지 못하고 부분적으로 유출되고 있음을 알 수 있다. 이러한 제거경향을 질소제거율로서 나타낸 것이 Fig. 6의 결과이다. FR에서는 유기탄소원이 증가했음에도 불구하고 질소제거율은 크게 증가하지 않은 반면 HR에서는 동시적 질산화/탈질 반응이 향상됨에 따라 제거율이 30% 정도 증가하였다.

이러한 제거율의 변화에 대한 부유상 미생물과 담체고정 미생물의 기질제거특성을 파악하기 위하여 회분실험을 행하였으며 그 결과를 Fig. 7-8에 나타내었다. Fig. 7 HR에서는 부유 미생물(A)과 담체 고정 미생물(B)의 질산화 특성을 나타낸 것으로서 고정상뿐만 아니라 부유 미생물도 높은 질산화 활성을 가지고 있음을 보여준다. 반면 FR에서 부유 미생물은 질산화 반응이 일어나지 않음이 확인되었다 (Data not shown). 부유 미생물에 의한 질산화 반응 발생여

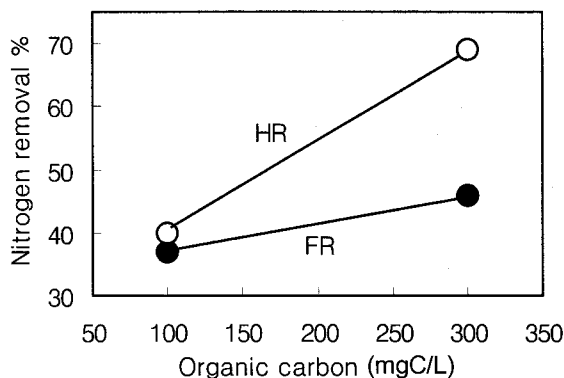


Fig. 6. Comparison of nitrogen removal efficiency.

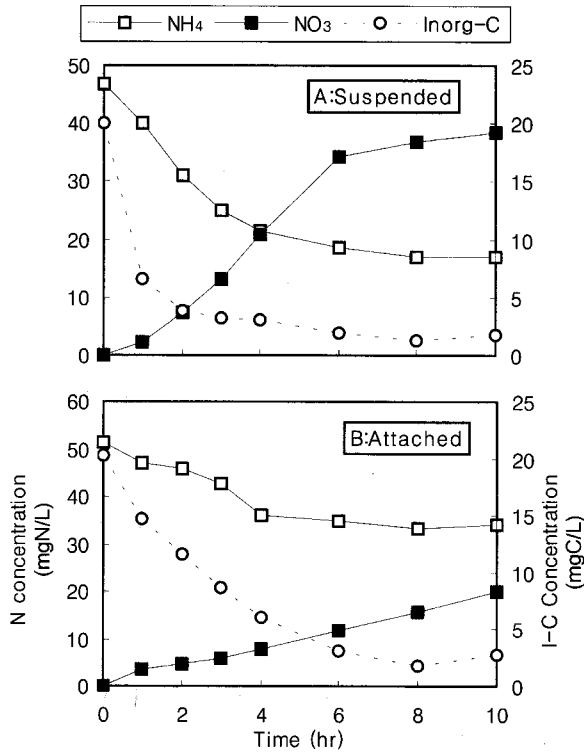


Fig. 7. Nitrification activity of suspended (A) and attached (B) microbes in HR.

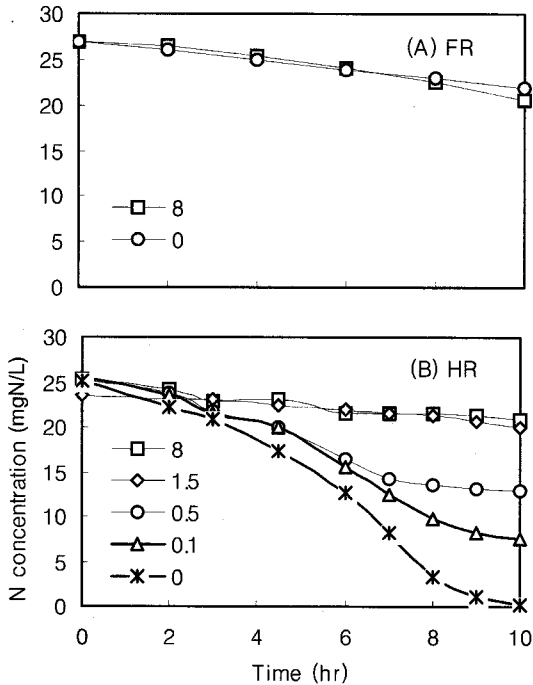


Fig. 8. Denitrification activity of attached microbes in FR (A) and HR (B).

부는 담체내의 탈질균 활성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되었다. Fig. 8은 FR(A), HR(B)에서 고정상 담체를 질산염과 glucose가 포함된 탈질환경에서 회분배양한 결과를 나타내었다. FR(A)에서는 회분배양조건 중 DO농도를 8또

는 0로 조절해도 동일한 경향을 보여 담체내 탈질균이 존재하지 않거나 활성이 극히 제한된 상태로 존재함을 알 수 있다. 이것은 FR에서는 질산화 반응은 부유상에서는 발생하지 않고 담체표면에서만 일어나며, 유기물 농도가 높은 경우 표면이 종속영양균에 의해 점유되면서 질산화가 저해되며 따라서 질산염을 기질로 하는 탈질균의 활성도 매우 저하된 상태임을 나타낸다. 반면 HR(B)에서는 회분 배양중의 DO농도에 따라 낮은 DO농도에서는 뚜렷한 탈질거동을 보이고 있다. 즉 담체내에 탈질균이 충분한 활성을 가지고 존재함을 나타낸다. 이것을 담체표면에서만 질산화가 진행된 FR과는 달리 부유상에서도 질산화가 진행되어 bulk에서 생물막 표면으로 질산염이 공급되는 조건에서 막표면에서의 비교적 덜 발달된 종속영양균에 의해 유기물을 이용한 질산염의 탈질반응이 활성화 된 결과라고 판단되었다.

담체내부에서의 DO와 glucose농도의 미소분포를 측정함으로써 이러한 현상을 설명할 수 있다. Fig. 9는 미소전극을 이용하여 기질의 농도분포를 측정된 결과를 나타내었다. 횡축은 담체내의 깊이를 나타내며 0지점은 생물막이 형성되어 있는 담체표면을 나타낸다. 종축은 50 μM 간격으로 측정된 DO와 glucose의 농도분포를 나타낸다. 먼저 산소의 투과 깊이는 FR가 0.6 mm, HR가 0.8 mm로서 FR에서 투과깊이가 얇은 것은 표면에서의 기질전달 조건에 의한 차이로서 예상되었다. 호기영역에서의 glucose감소는 산소를 이용한 산화로서, 산소농도가 0가 되는 영역에서부터의 glucose 감소는 탈질반응에 전자공여체로서 소모된 유기탄소의 결과로서 해석된다. glucose가 투과하는 영역에서 무산소 구역에 해당하는 부분은 FR에서 0.4 mm, HR에서 0.8mm로서 담체내 미생물의 활성공간 자체가 다를 수 있다. Fig. 8에서 보인 FR에서의 낮은 탈질활성은 glucose의 투과깊이의 차이로서 이해될 수 있다. 총괄 탈질을 산소는 전부 소모되면서 glucose는 존재하는 영역의 깊이에 비례한다면 HR의 담체내부탈질율은 FR보다 2배 이상 빠르다고 판단되었다. 무산소 영역에서 glucose의 투과 flux는 Fick의 법칙에 의해 단위면적에 대한 확산계수와 농도구배에 비례하는 식으로 표현될 수 있다. Bailey 등은 산소에 대한 전형적인 확산계수로서 수중(20°C)에서 $2.25 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$, biofilm에서 $0.04 \sim 1.5 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 라고 보고하였다.¹⁷⁾ Microelectrode 분석을 통해 얻어진 glucose농도 분포 결과와의 2차회귀분석에서 확산계수 D를 결정한 후 두 반응기내 담체내부 무산소영역에서의 glucose확산계수를 이용하여 결정된 glucose flux는 FR에서는 $1.3 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$, HR에서는 $5.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2/\text{sec}$ 로서 이러한 glucose flux의 차이는 담체표면 미생물의 부착상태와 활성도의 차이에 의한 것으로서 탈질반응이 영향을 받음을 알 수 있다. Fig. 9에 보인 것과 같이 FR에서는 glucose 대부분이 호기적 산화로 소모되어 탈질반응에 필요한 전자공여체로서의 역할을 충분히 수행하지 못하고 있다. 반면 HR에서는 비교적 높은 잔여 glucose로 인해 높은 탈질율을 유지할 수 있었다.

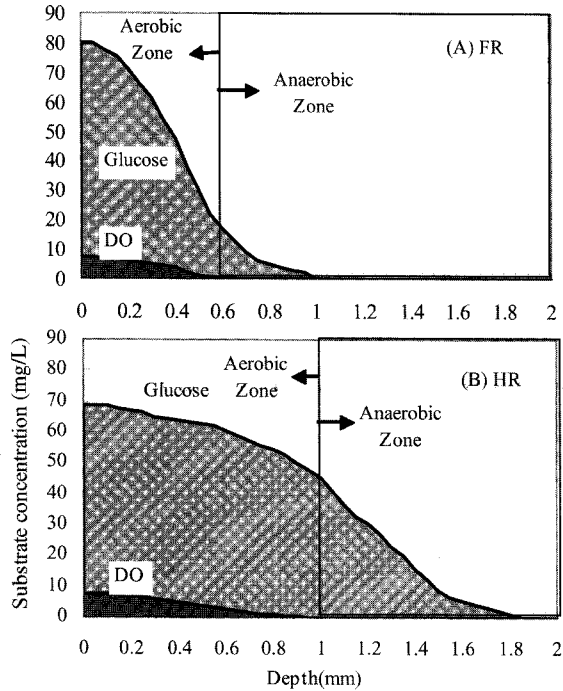


Fig. 9. Intra-media distribution of DO and glucose in FR (A) and HR (B).

표준적 유동상 반응기와 담체와 막이 이용된 하이브리드 시스템에서의 유기물 및 질소제거 특성을 살펴본 결과 하이브리드 시스템에서 유기물 및 질소의 동시제거가 가능한 기작이 발생되고 있음을 보였으며 이런 특성을 비교적 유기물 농도가 높은 하폐수처리에 적용할 경우 단일반응기로 동시 질산화/탈질 기작에 의한 영양염제거가 가능함을 알 수 있었다.

4. 결론

다공성 담체를 이용한 유동상 반응기에 막모듈을 설치하여 단일 반응기내 영양염 제거율과 미생물의 활성변화에 대해 조사하였다. 연속실험 결과 막을 이용한 하이브리드 시스템에서 질소제거 효율이 30% 이상 증가하였으며, 특히 동시적 질산화/탈질을 통해 질소제거특성이 향상됨을 알 수 있었다. 미생물이 부착된 담체내에서의 무산소영역에서의 glucose flux는 하이브리드 시스템이 담체 유동상에 비해 3배 정도 높아 담체내의 탈질반응이 높게 유지될 수 있도록 함을 알 수 있었다. 이런 특성을 가진 담체와 막을 이용한 단일 반응기는 유기물 및 질소제거에 효율적으로 이용될 수 있으며 소규모 하폐수처리에 적용될 수 있다고 판단되었다.

사 사

본 연구는 학술진흥재단의 지원에 의해 수행되었으며 (KRF-2003-050-D00010), 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Shin, H. S. and Park, H. S., "Enhanced nutrient removal in porous biomass carrier sequencing batch reactor (PBCSBR)," *Water Sci. Technol.*, **23**, 719~728 (1991).
2. Xing, X. H., Inoue, T., Tanji, Y., and Unno, H., "Enhanced microbial adaptation to p-nitrophenol using activated sludge retained in porous carrier particles and simultaneous removal of nitrite released from degradation of p-nitrophenol," *J. Biosci. Bioeng.*, **87**, 372~377(1999).
3. Sakairi, M. A. C., Yasuda, K., and Matsumura, M., "Nitrogen removal in seawater using nitrifying and denitrifying bacteria immobilized in porous cellulose carrier," *Water Sci. Technol.*, **34**, 267~274(1996).
4. Matsumura, M., Yamamoto, T., Wang, P. C., Shinabe, K., and Yasuda, K., "Rapid nitrification with immobilized cell using macro-porous cellulose carrier," *Water Res.*, **31**, 1027~1034(1997).
5. Furukawa, K., Ike, A., Ryu, S. L., and Fujita, M., "Nitrification of NH₄-N polluted sea water by immobilized acclimated marine nitrifying sludge (AMNS)," *J. Ferment. Bioeng.*, **76**, 515~520(1993).
6. Xing, X. H., Shiragami, N., and Unno, H., "Simultaneous removal of carbonaceous and nitrogenous substrates in wastewater by a continuous flow fluidized-bed reactor," *J. Chem. Eng. Jpn.*, **28**, 525~530(1995).
7. Hem, L. J., Rusten, B., and Odegaard, H., "Nitrification in a moving bed biofilm reactor," *Water Res.*, **28**, 1425~1433(1994).
8. Cicek, N., Franco, J. P., Suidan, M. T., and Urbain, V., "Using a membrane bioreactor to reclaim wastewater," *J.- Am. Water Works Assoc.*, **90**, 105~113 (1998).
9. Muller, E. B., Stouthamer, A. H., van Verseveld, H. W., and Eikelboom, D. H., "Aerobic domestic waste water treatment in a pilot plant with complete sludge retention by cross-flow filtration," *Water Res.*, **29**, 1179~1189(1995).
10. Yamagiwa, K., Yoshida, M., and Ito, A., "A new oxygen supply method for simultaneous organic removal and nitrification by a one-stage biofilm process," *Water Sci. Technol.*, **37**, 117~124(1998).
11. Horn, H. and Hempel, D. C., "Substrate utilization and mass transfer in an autotrophic biofilm system: experimental results and numerical simulation," *Biotechnol. Bioeng.*, **53**, 363~371(1997).
12. Cronenberg, C. C. and van den Heuvel, J. C., "Deter-

- mination of glucose diffusion coefficients in biofilms with micro-electrodes," *Biosens. Bioelectron.*, **6**, 255~262(1991).
13. Zhang, T. C., Fu, Y. C., and Bishop, P. L., "Competition in biofilms," *Water Sci. Technol.*, **29**, 263~270(1994).
 14. Dalsgaard, T. and Revsbech, N. P., "Regulating factors of denitrification in trickling filter biofilms as measured with the oxygen/nitrous oxide microsensors," *FEMS Microbiol. Ecol.*, **101**, 151~164(1992).
 15. Chevron, F., Defives, C., and Dubourguier, H. C., "Denitrification of high nitrate and ammonia waters using fixed-biofilms reactors on natural supports," *Environ. Technol.*, **18**, 171~178(1997).
 16. Revsbech, N. P. and Jorgensen, B. B., "Microelectrodes: their use in microbial ecology," *Adv. Microbiol. Ecol.*, **9**, 293~352(1986).
 17. Bailey, T. E. and Ollis, R. L., *Biochemical Engineering Fundamentals*, 2nd Edition, McGraw-Hill(1986).