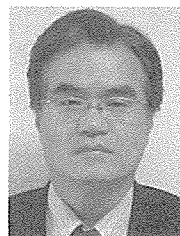


바이오·나노기술을 이용한 하·폐수 고도처리기술



안규홍 | 한국과학기술연구원(KIST) 수질환경 및
복원연구센터 책임연구원

I. 서론

상수원수의 대부분을 호소 또는 하천과 같은 지표수에 의존하고 있는 우리나라의 경우 이들 하천과 호수의 수질을 보전하는 것은 바로 먹는 물의 안전을 지키는 것과 같다. 그러나 이러한 요구를 충족시키기 위한 정부를 비롯한 각계각층의 수많은 노력들이 무색할 정도로 하천과 호소의 수질은 개선보다는 오히려 악화되고 있는 실정이며 이를 지적하는 신문과 방송보도가 연일 이어져 오고 있다. 이에 정부는 1996년부터 질소, 인에 대한 배출규제를 실시하게 되었으며 점차로 강화되어가고 있는 추세이다. 그러나 당시 국내 독자 기술의 부재로 이미 개발된 선진국 기술을 값비싼 로열티를 주고 도입한 뒤 바로 적용하는 것이 전부였다. 이에 정부, 학계, 산업계에서는 하·폐수 중의 질소 및 인을 처리할 수 있는 국내 독자 기술을 개발하고자 노력을 기울여 왔으며 현재까지 많은 결실을 맺어 오고 있다. 향후 오염물 배출 총량규제의 확대 실시로 인해 이러한 기술들에 대한 요구는 더욱 높아질 것이다.

현재까지 개발되어온 국내 고도처리 공정들은 주로 Phostrip, Badenpho, MLE(Modified Luzack-

Ettinger), A_2O , SBR(Sequencing Batch Reactor) 등의 기존 국외 공정을 변형 및 개량시켜온 것으로서 MLE, Phostrip, Badenpho 타입의 경우 질소·인 동시제거를 기대할 수 없으며, A_2O 타입의 경우 넓은 부지 요구, SBR 타입의 경우 단위처리량이 소규모라는 각각의 단점을 가지고 있다. 또한 이들 대부분의 공정들은 유기탄소원의 부족, 하절기 및 동절기에 따른 하수 성상 변동 등, 국내 하수 특성상 시스템의 생물학적 기능이 이상적인 조건하에서 작동되지 못함으로써 설계수질에 못 미치는 처리수를 생산하는 경우가 많고 운전이 까다롭다는 단점을 가지고 있다. 그러나 최근 먹는 물과 친 환경적인 하천복원에 대한 관심이 보다 높아지면서 하수중의 질소 및 인 뿐 만 아니라 잔류 유기물, 미량 입자성 물질, 병원성 미생물까지도 제거할 수 있는 초고도 처리기술이 요구되고 있다. 이러한 요구를 충족시키기 위해서는 앞서 언급한 기존 고도처리 기술만으로는 한계가 있으며 보다 새롭고 진일보된 기술 개발이 필요하다.

KIST 연구팀이 개발한 ‘하·폐수 고도처리기술’은 기존에 알려진 일반 공정과는 달리 침전과정을 거치지 않고 미세한 크기의 기공을 갖는 분리막을 이용하여 하·폐

수를 정화하는 것이 특징이다. 이 과정에서 나노 크기 수준의 입자성 오염물질을 걸러낼 수 있으며, 오염정화에 필요한 미생물의 유실을 방지하여 생물학적 처리 능력이 극대화됨으로써 일반 공정에 비해 2.5~3배정도 처리속도가 빨라지게 된다. 개발 기술은 앞서 언급한 국내 하수 특성에서 기인하는 처리효율저하라는 문제점을 극복하고 기존의 고도처리 공정들이 가지고 있는 여러 단점을 보완함으로써 질소·인에 대해 안정적이고 높은 효율을 유지할 수 있으며, 크립토포리디움, 지아르디아 등 인체에 유해한 병원성 원생동물 및 일반 대장균까지 제거함으로써 보다 안전한 처리수를 생산할 수 있는 획기적인 하·폐수 고도처리기술로 평가받고 있다. 본 고를 통하여 KIST에서 개발한 '하·폐수 고도처리기술'의 개요와 원리, 처리효과, 향후 전망 등을 살펴보자.

II. 기술 개요 및 원리

활성슬러지 공정에 분리막을 결합한 MBR(Membrane Bio-Reactor)공정은 막 분리작용에 의해 생물 반응조 내부에서 직접 고액분리를 수행함으로써 슬러지의 침강성, bulking현상 등 활성슬러지 자체의 특성변화에 큰 영향을 받지 않으면서 우수한 탁도의 처리수를 안정적으로 생산해낼 수 있다. 또한 긴 SRT(Solids Retention Time)조건하에서 운전이 가능하여 일반적인 중속영양 미생물뿐만 아니라 성장 속도가 낮은 질산화 미생물과 같은 자가영양 미생물의 농도를 높게 유지할 수 있어 높은 질산화율을 유지하며, 유기물의 충격 부하에도 쉽게 대처할 수 있는 장점을 가지고 있다. KIST 연구팀은 이러한 MBR 공정의 전단에 추가적인 생물반응조를 설치하고 간헐 내부반송을 통하여 질소 및 인의 제거가 가능한 공정을 개발하였으며 SAM(Sequencing Anoxic/Aerobic MBR)으로 명명하였다.

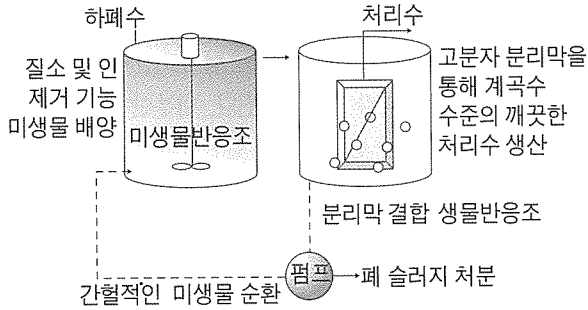
연구 개발된 SAM 공정의 모식도를 <그림 1>에 나타내었다. SAM공정은 <그림 1>과 같이 무산소 및 혐기조건을 유도하기 위한 전단 반응조와 고행물과 처리수를 물

리적으로 분리하기 위한 정밀 여과막이 설치된 후단 MBR반응조의 총 2개 반응조로 구성되어 있다. 후단 반응조의 경우 산소공급과 분리막의 오염을 방지하기 위해 연속적인 aeration이 이루어지며 이에 따라 호기조건이 형성된다. 전단 반응조내 무산소/혐기조건은 내부반송의 유무에 따라 결정되어진다. 내부반송을 위한 펌프가 작동하면 후단 반응조에서 질산화과정을 거쳐 생성되어 있는 질산성 질소가 전단 반응조로 유입되면서 무산소 조건이 형성되고, 펌프가 중단되면 반송이 중단되어 완전 혐기 조건이 형성된다(<그림 3> 참조). 이러한 원리로 인해 SAM의 경우 하나의 반응조 내에서 무산소/혐기조의 역할을 반복적으로 수행하기 때문에 기존의 A_2O , UCT, VIP 등과 같은 인·질소제거 공정보다 compact한 구조를 가질 수 있게 된다.

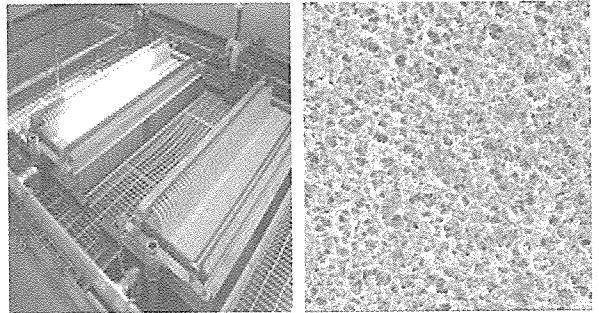
SRT 60~80 일로 운전되는 SAM 공정의 반응조 내부의 총 고행물농도는 전·후단 각각 6,000~8,000 mgMLSS/L, 8,000~10,000 mgMLSS/L 으로 유지되며, 후단 반응조의 경우 내부반송 유무에 상관없이 호기상태에서 autotrophic microorganism에 의해 지속적인 질산화가 이루어진다. 내부반송 펌프가 작동하면 후단의 질산성 질소는 슬러지와 함께 전단 반응조 반송되며, 이로 인해 전단 반응조내의 질산성질소의 농도가 증가하면 무산소 조건이 형성되어 유입된 질산성 질소는 탈질작용에 의해 N_2 가스형태로 전환되어 대기중으로 방출되어진다. 반대로, 내부 반송을위한 펌프의 작동을 중단하면 질산성 질소의 유입이 중단되고 전단 반응조는 완전한 혐기조건으로 전환되어지며, 이때 PAOs(Phosphorous Accumulate Organisms)에 의한 인 방출 및 PHB(Poly- β -hydroxybutylate)의 축적이 유도된다. 방출된 인은 후단 호기조건 반응조에서 PAOs의 체내에 Poly-P의 형태로 과잉 섭취되고 최종적으로 슬러지를 인발하여 제거함으로써 유입수중의 인을 제거할 수 있다. 반송유무에 따른 전·후 반응조의 역할을 table 1.에 정리하였다. SAM의 경우 한 반응조에서 탈질과 인 제거 기작이 이루어짐으로써 기존의 A_2O ,

UCT, VIP등과 같이 무산소 및 혐기조건을 직렬로 배치된 별도의 반응조에서 유도하는 공정에서 문제가 되고 있

는 탄소원 부족현상을 해결할 수 있다.

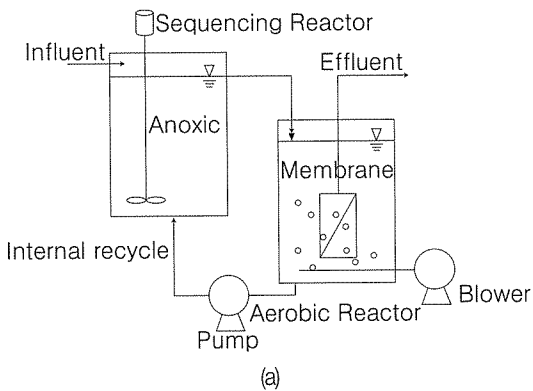


〈그림 1〉 SAM 공정의 개요도

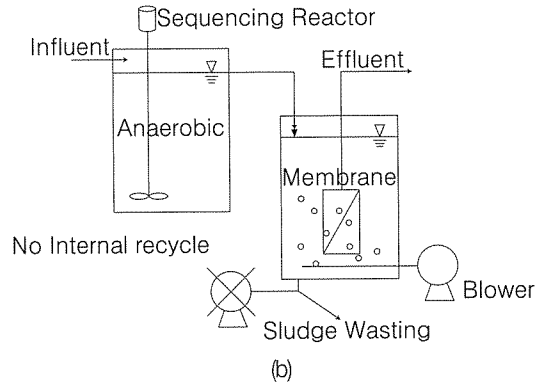


(a) (b)

〈그림 2〉 SAM 공정에 사용된 분리막(a) 및 분리막 표면의 기공을 전자주사현미경으로 촬영한 모습(b)



(a)



(b)

〈그림 3〉 SAM 공정의 간헐 내부반송에 의한 무산소조건(a) 및 혐기조건(b)의 유도

III. 오염물질 제거 성능

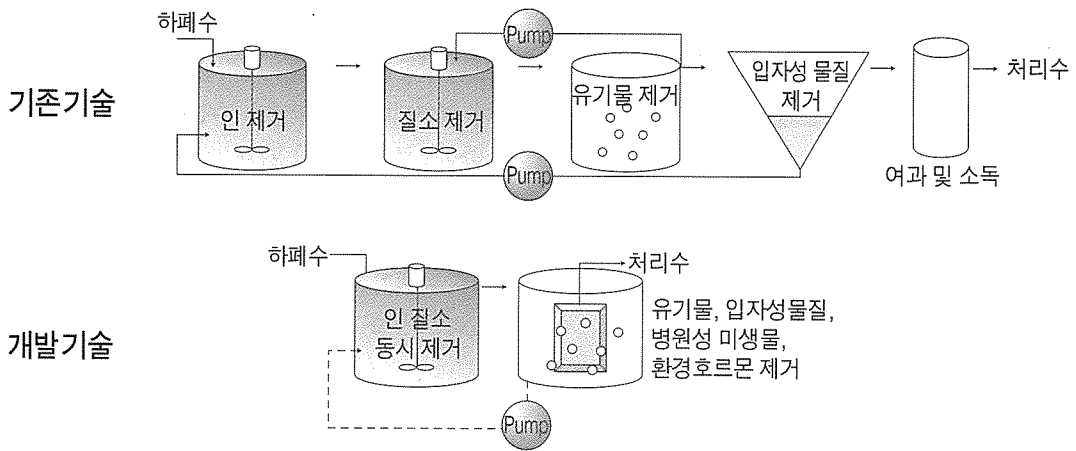
부영양화의 주요 원인물질인 질소와 인을 제거하기 위해서는 일반적으로 별도의 반응조(2~3개)가 필요했으나 이번에 개발한 신공정에서는 하나의 반응조에서 질소와 인이 동시에 제거된다(〈그림 4〉 및 〈표 1〉 참조). 이는 유입 하수중의 질소와 인의 양이 많고 적음에 따라 적절하게 자동제어가 이루어지는 시스템(간헐반송)이 새롭게 구축되었기 때문이다. 따라서 일반 공정에 비해 설비 설치면적을 절반으로 크게 줄일 수 있을 뿐만 아니라 기존 공정에서 10~15ppm 정도이던 처리수의 BOD(생

물학적 산소요구량)농도를 1ppm이하로, 20~30ppm의 COD(화학적 산소요구량)농도를 10ppm 이하로 낮출 수 있다. 또한 질소와 인을 제거하는데도 효율적이다. 20~30ppm의 질소농도를 10ppm이하로, 3~5ppm이던 인 농도를 1ppm이하로 떨어뜨려 수질을 획기적으로 개선할 수 있다. 이는 상류 계곡의 맑은 물과 같은 상태로 하천 수질기준으로 1급수에 해당하는 수질이다. 뿐만 아니라 모든 입자성 오염물질을 걸러내어 처리수 탁도를 0.1 NTU수준으로 유지하며, 인체에 유해한 병원성 원생동물 및 일반 대장균까지 제거함으로써 보다 안전하고 우수한 처리수를 생산할 수 있다. 연구팀은 하·폐수

고도처리기술의 실용화를 위해 팔당호로 유입되는 생활하수를 집중 처리하고 있는 경기도 소재 '광주하수처리장'에 하루 70톤을 처리할 수 있는 실험설비를 설치하여 3년간 실증실험을 마쳤으며, 그 결과 계절변화에 관계없이 우수한 1급수 수질이 유지됨을 확인하였다.

또한 외부공인시험기관(환경관리공단)에 의뢰하여 유출수 수질을 분석한 결과는 <표 2>와 같으며 이에 따른

각 오염물질별 제거효율을 살펴보면, BOD의 경우 99%, 입자성 물질 97%, 총 질소 78%, 총 인 86%, 암모니아성 질소 99%, 총 대장균수 100%로써 매우 우수함을 알 수 있다. 특히 대장균이나 병원성 세균에 대한 제거능력이 매우 탁월하여 SAM공정에 의해 생산된 처리수와 일반 수돗물을 비교한 결과 큰 차이가 없음을 확인하였다(<그림 5> 참조).



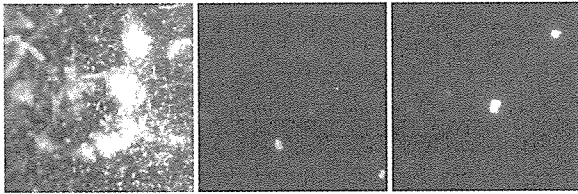
<그림 4> 대표적인 기존의 고도처리기술(A₂O공정)과의 공정구성 비교

<표 1> 대표적인 기존의 고도처리기술(A₂O공정)과의 설계조건 및 성능 비교

구 분		기존기술 A ₂ O Process	개발기술 SAM Process	비교
설 계 조 건	미생물량	1,500~3,500mg/l	8,000~10,000mg/l	3~4배 높은 미생물량
	처리시간	12~15시간	4~8시간	3~4배 빠른 처리시간
	폐 슬러지	6~15일 마다 처분	80~120일 마다 처분	폐기물량 1/10
	소요 설비	총 반응조 5기(후속처리용 여과포함)	총 반응조 2기	소요설비 1/3
성 능	처리대상	유기물, 질소, 인, 입자성물질	유기물, 질소, 인, 입자성물질, 병원성 미생물, 환경호르몬	계곡수 수준 처리수
	제거효율	- 유기물 : 85%이상 - 질소 : ~70% - 인 : ~65% - SS : 90%이상	- 유기물 : 95%이상 - 질소 : ~80% - 인 : ~80% - SS : 98% 이상 - 병원성 미생물 : 검출한계이하 - 환경호르몬 : 95% 이상	보다 높은 제거효율 및 병원성미생물, 환경호르몬까지 제거

〈표 2〉 외부공인시험기관의 SAM 유출수 수질 분석결과
단위 mg/L

	BOD	COD	입자성물질	T-N	T-P	NH ₄ ⁺
유입수	63.0	39.9	35.0	40.6	3.5	19.3
유출수	0.8	4.9	1.2	9.2	0.5	0.17
배출기준	10.0	40.0	10.0	20.0	2.0	-



(a) 유입 하폐수 (b) 수돗물 (c) SAM 처리수

〈그림 5〉 수돗물과 SAM공정 처리수 내 총 일반 세균을 현미경으로 관측한 모습

III. 기술의 파급효과 및 전망

KIST는 이러한 실증실험 결과를 바탕으로 2004년 12월 (주)진우환경기술에 관련기술을 이전하였으며, 기술을 이전받은 업체에서는 고속도로 휴게소 7곳에 하·폐수 고도처리장치를 설치하여 가동 중이다. 연구팀은 본 기술개발과 관련하여 국제학술지 10여 편에 연구성과를 게재하고 검증받았으며 2건의 국내 특허를 등록하고 1건의 해외특허를 출원 중이다. 본 개발 기술을 적용함으로써 생활하수를 아주 짧은 시간 안에 1급수 수준으로 처리할 수 있어 만약 팔당호로 유입되는 생활하수를 이 기술을 적용하여 처리할 경우 상수원 수질개선에도 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 우수한 수질의 처리수를 하천에 방류함으로써 하천수질의 안정성에 크게 기여하고 나아가 수영 등 레저활동에 적합한 친수공간으로써의 환경조성이 가능할 것이다. 향후 국내 상수원 보전 및 오염 하천의 수질개선에 국내 개발기술을 적용함으로써 수입대체 효과만도 매년 약 천억 원 이상에 이를 것이다. 뿐만 아니라 올림픽을 앞두고 환경시설투자에 적극적으로 나서고 있는 중국을 발판으로 동남아시아 및 동구권으로

까지 기술 수출을 바라보고 있다. 이러한 성과는 단순히 경제효과 뿐 아니라, 환경오염, 수자원 확보, 오염된 물로 인한 각종 사회적 불신감 해결, 공중보건 문제, 환경기술의 수출 등에서 큰 역할이 기대되며, 고도처리에 관련된 요소기술을 확보함으로써 반도체제조를 위한 초순수 생산, 정수산업분야 등 타 산업분야에도 그 응용성이 매우 크다고 하겠다.

본 연구 성과는 KIST에서 지난 2000년부터 자체적으로 수행하고 있는 ‘금수강산21 연구사업’의 연구 결과로써 그동안 정부 및 각계각층의 노력에도 불구하고 해마다 악화되어가는 팔당호 수질을 개선하기위해 KIST를 중심으로 국내·외 21개 대학과 국내 환경관련 연구기관이 대거 참여한 대형 프로젝트이다. 이 연구사업에서는 하천으로 유입되는 오염원뿐 아니라 이미 오염된 하천까지도 자연친화적인 방법으로 정화함으로써 먹는 물 수준으로 개선할 수 있는 기술을 일궈내는데 목표를 두고 있다.

금수강산21 연구사업은 공공성이 강한 환경기술의 특성상 실용화될 수 있는 기술개발이 어려움에도 불구하고 이에 성공한 대표적인 사례로 손꼽을 수 있으며, 국내 하천수질개선 뿐 아니라 올림픽을 앞두고 환경시설투자에 적극적으로 나서고 있는 중국을 발판으로 동남아시아 및 동구권으로까지 기술 수출을 바라봄으로써 환경기술 선진국으로서의 국제적 입지를 다지는 기회가 될 수 있을 것으로 기대된다.

■ SAM 경제성 분석

1. 경제성

기존기술대비 시설투자비 비교

(처리용량 2,000톤/일 기준)

구분	개발 기술(SAM)	A ₂ O	SBR	BCS
총시설비(백만원)	2,371	15,206	3,313	10,860
처리량(m ³ /d)	2,000	3,000	1,900	1,500
톤당설치비(원/m ³)	1,185,500	5,068,666	1,743,684	7,240,000
처리단가(원/m ³)	388	713	702	622

- 근거자료 : 환경부 상하수도국 생활하수와 자료집
- 분리막 설치 및 유지관리비를 고려하더라도 총 시설비면에서 소요예산절감 (소요부지면적 및 설치 설비절감)으로 전체적으로는 타 공정과 비교하여 중간정도 수준 가능
- 사용 분리막의 평균수명 : 5 ~ 6년

2. 안전성

2.1 시설 및 설비의 안전

- (1) 분리막 세정시 사용되는 차아염소산 용액 취급에 주의. 피부 접촉시 깨끗한 물로 충분히 세척할 것. 일반의복에 접촉 시 변색, 탈색, 섬유 손상의 가능성이 있음.
- (2) 정전 시 처리시설 및 설비 운전엔 특별한 조치 필요 없음. 복전시 모든시설 및 설비 운전은 자동복원 됨
- (3) 원수 공급의 중단시 레벨센서에 의해 분리막의 작동이 자동 중지되므로 단수에 대한 특별한 조치 필요 없음.

2.2 작업 환경 안전

- (1) 특별한 위험한 요소는 없으나 각 반응조의 유효수심이 2.0m 이상으로 깊으므로 모든 작업시 실족 등에 의한 입수에 유의
- (2) 고농도 미생물에 의한 생물학적 정화작용이므로 인체에 유해한 먼지, 가스, 진동, 악취 등의 발생은 없으나 본 공정이 실내에 설치되는 경우 환풍기 등 환기 시설을 갖추는 것을 원칙으로 함.

3. 편의성

3.1 기동 및 정지의 편의성

본 공정의 기동은 자동으로 제어되며 유입수 성상에 따라 최적처리효율을 얻기 위하여 내부반송 펌프의 유량, 반송주기를 가변적으로 조절할 수 있으므로 효율적인 운전이 가능

3.2 운전제어 및 유지관리

운전인자	자동제어여부	운전 내용
유입수 공급	자동제어	레벨센서와 연동하여 급수 및 단수
처리수 생산 (흡입펌프 운전)	자동제어	레벨센서와 연동하여 가동 및 중지
공기공급 (송풍기 운전)	수동제어	호기조 내 DO, 분리막 오염정도와 연동하여 공급량조절
내부반송량	수동제어	반송밸브 개폐조작에 의해 반송량 조절
내부반송주기	자동제어	타이머에 의해 반송펌프 작동 및 중지

3.3 운전 요원의 숙련 필요성

설비 운전 및 유지보수에 있어서 특별한 숙련을 요하지 않음.

3.4 작업의 편의성 등

- (1) 작업 및 유지보수를 위한 동선과 공간이 충분함.
- (2) 분리막 모듈의 장착 및 탈착 시 하우징 천장에 부착된 크레인을 이용하므로 작업이 매우 편리함.

4. 내구성

4.1 주요 설비의 재질

특별한 요구 사항 없음.

4.2 설비 재질 및 운전 후 상태 등

- (1) 분리막 모듈은 수중에서 작동되므로 부식에 강한 재질로 제작
- (2) 분리막 제조 및 공급업체가 제시하는 내구연한 한도 내에서 재질 및 상태의 특별한 변화 없음.
- (3) 기타 공정 구성 설비 및 반응조의 재질 및 상태에 특별한 변화는 없음.
- (4) 분리막 약품세정 후 반응조, 각종 배관, 흡입 펌프 등의 재질 및 상태에 특별한 변화 없음.

• 문의: 안규홍 연구원 khahn@kist.re.kr

TEL: 02-958-5832 / FAX: 02-958-6854

