

— 기술정보 —

폐수처리에 있어서 산화구와 조류 바이오매스 반응기의 생흡착 공정

— Technical Information —

Biosorption Process in Oxidation Ditch and Algal Biomass Reactor on Wastewater Treatment

공 석 기*

Surk-Key Kong*

중부대학교 이공대학 환경보건학과

1. 서 언

폐수처리 방법이 ① 긴급적 수질오염 척결을 위한 것으로 주변 생태계 보전에 기여하되 처리 효율이 좋을 것. ② 경제적이되 특히, 소요 에너지가 절약될 것. ③ 위생적으로 안전할 것.

특히, 주변 거주인들에게 보다 덜 유해(harmful)할 것의 원칙에서 개발되어 왔다. 그리고 이러한 사항들에 충실하기 위해서는 무엇보다도 생태계의 항상성을 견지할 수 있는 생물학적 처리 기술의 확보가 무엇보다도 중요하였다. 특히, 어디까지나 주변에 풍부한 것으로 수집이 수월한 바이오매스를 이용하는 폐수처리 기술이 각광받아 왔다. 그 결과로 도시 하수처리에 있어서는 활성 슬러지를 주요 바이오매스로 하는 산화구(oxidation ditch)가 그리고 산업 폐수처리에 있어서는 조류(algae)를 주요 바이오매스로 하는 반응기 시스템이 위의 조건들에 대체로 잘 부합되는 공법으로 확인되어 왔다.

2. 활성슬러지 변법과 산화구

2.1. 친환경 하수처리 시스템의 고안

우리나라에서 활성슬러지 공법이 대도시 하수처리장의 주요 핵심 공법이 되어 왔다. 이 활성슬러지 공법이 보통 현탁증식 공정으로서 재래식 활성슬러지공법으로부터의 변법으로 불리우고 있다. 사실, 그동안 폐수처리 기술사회에서는 산화구를 이 활성슬러지 변법과 비교검토 함에 썩 익숙하지 아니한 것이 사실이다. 이는 그만큼 이 활성슬러지 변법이 사회에서 높은 점유율을 차지하고 있었기 때문인데 청계천이 복원되고 전국 대도시 하천이 점차로 수변공원화 되어가고 있는 현실에서 자연 환경과 조화롭고(harmonious) 경제적인 이른바 친환경 하수처리 시스템의 고안 또한 매우 중요한 것이다. 그러나 이 고안은 어디까지나 환경공학의 전통적 수처리 시스템에서 찾아야 할 것이다.

2.2. 산화구 개발역사

폐수처리 기술사회에서 산화구로 불리우는 폐수처리가 지난 1954년 네델란드 공중보건 공학연구소

*Corresponding author Tel: +82-41-750-6760, FAX: +82-41-750-6760, E-mail: skkong@joongbu.ac.kr (Kong, S.K.)

(Research Institute for Public Health Engineering, TNO)에서 고안한 연속식 루프 반응기(continuous loop reactor, CLR)이다. 이 반응기가 자국 Voorshopen 지역에 처음 설치되어 운전되어 온 이후 최근까지 다음 Table 3의 반응기들이 개발되고 설치되어 운전되고 있고 이 반응기들은 모두 소유권이 보존되고 있는 것들이기도 하다. 이렇게 하여 개발된 산화구들은 보통 다음과 같은 설계인자들을 확보하고 있다.

수리학적 체류시간 (hydraulic retention time, HRT): 15~40시간

폭기조내의 활성슬러지 체류시간(solids retention time, SRT): 15일 이상

혼합액상현탁부유물(mixed liquor suspended solids, MLSS) 농도: 2000~6000mg/L

기질/미생물 비율(food/microorganism ratio, F/M): 0.05~0.02

반송슬러지 비율(% of influent flow): 100

BOD 제거효율: 94~98+%

TSS 제거효율: 90~95+%

산화구 개발과 관련하여 지난 1978년 미국 환경보호청(EPA)에서는 이 반응기 시스템이 ① 최소 경비로 높은 농도 수준의 BOD, TSS 제거를 꾸준히 이루며 ② 다른 생물학적 처리 시스템과 비교하여 불 경우 특히, 0.1~10MGD(mega gallon per day)의 도시하수 유량범위에서 경제적 이익이 있고 특히, 1.5MGD 유량의 하수처리에 효과적임을 보고하였다.

이제까지 개발되어 온 여러 산화구들(Table 3) 중에서 가장 잘 알려져 있는 산화구 시스템이 Carrousel 시스템이다. 북미 Lichtenvoorde 프랜트의 경우를 보면 유량범위 0.5~300MGD, 수리학적 체류시간 (hydraulic retention time, HRT) 8~28시간, 슬러지 체류시간(sludge retention time, SRT) 25~30일에서

Table 1. Typical Carrousel design

Influent characteristics	Effluent characteristics	CARROUSEL characteristics
Flow = 2MGD.	BOD = 10mg/L	Basin volume = 1.6MG.
BOD = 200mg/L	NH ₃ -N = 1mg/L	Channel width = 22ft.
TKN = 25mg/L		Channel depth = 11ft.
Inerts = 0.25		Number of aerators = 2
Temp. = 10		Aerator horsepower = 50

BOD₅ 제거율 99.3% COD 제거율 95.8 Kieldhal 질소(TKN) 제거율 97.1% 그리고 질산화 수준이 93.2%에 이르고 있다. 다음은 Lichtenvoorde Carrousel 시스템의 일반적 설계 개요이다.

2.3. 기존 활성슬러지 변법에 대한 산화구의 우월성

만트와 벨(Mandt and Bell, 1982)은 산화구를 다른 경쟁적 기존 활성슬러지 공법들과 다음과 같이 비교하였다. 즉, 산화구는 ① 악취가 발생되지 아니하고 ② 건설비용이 저렴하며 ③ 프랜트에 장치되는 기계들이 적고 ④ 운전비용이 적으며 ⑤ 일상적으로 폐기되는 슬러지가 발생시키는 불쾌한 점(nuisance point)에 있어서 자유로움이 그것이다. 선스트롬 등(Sunstrom et al., 1979)은 질산화 공정을 포함하거나 포함하지 않은 상태에서 탄소 BOD를 제거하기 위한 산화구의 건설비용은 원칙적으로는 기존 활성슬러지 공법의 것과 동일한 것으로 볼 수 있다고 하였다. 그러나 질산화 공정을 포함시킬 경우에는 건설비용 차이가 거의 2배가 되고 유량이 늘어날수록 그 비용의 격차는 더욱 늘어난다고 하였다. 탈질산화 공정이 추가될 경우에는 이 격차가 더욱 늘어나서 하루 10MG를 처리할 경우 1:2.14 이상에서 1:2.5 이상으로 확대된다. 그 이유는 기존 활성슬러지 공법이나 연장 폭기 공법에는 추가적 폭기조가 필요하고 부착되는

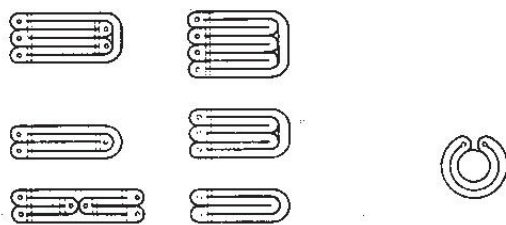


Fig. 1. Carrousel tank configuration.

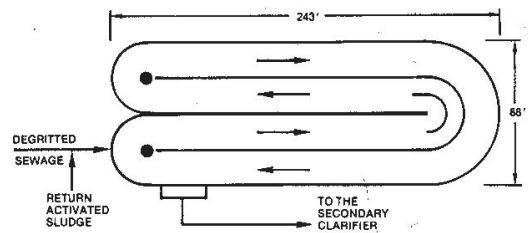


Table 2. Total annual cost, BOD removal, nitrification and denitrification (\$1000/yr)

Flow, MGD	Oxidation Ditch	Single-Stage Activated Sludge Mixed Slurry Denitrification	Single-Stage Activated Sludge Fixed Film Denitrification
1	117	305	325
5	343	795	755
10	815	1370	1040

Table 3. Developed reactors in activated sludge biomass process

Reactor Name/ Developers	Typical Characteristics	Remarks
CARROUSEL/Dwars, Heedrick, Verhay (Holland)) et al.	loop system - complete mix capability - channel plug flow - aerator application methods - conservation of momentum through convective mixing, resulting in the ability to suspended solids at low power densities	HRT : 8-28 hrs. SRT : 25-30 days Flow rate : 0.5-300 MGD.
JET AERATION CHANNEL/ LeCompt and Mandt(USA) et al.	loop system - horizontally discharging ejectors to oxygenate - Propulsion of aeration channel	
ORBAL PROCESS/Huisman, South African National Institutue (South Africa) et al.	multichannel oxidation ditch system - oval-shaped channels - two or more concentric aeration channels	SRT: 20-30 days MLSS: 4000-6000 mg/L Flow rate: 50,000gpd-9.6MGD
PASVEER-TYPE PLANTS	continuous loop reactor system(CLR) - employment of horizontal rotor-aerators - C-shaped and U-shaped configuration - Oxygenation and mixing capacity of rotor, which is adjusted by manipulation of adjustable weirs installed at ditch effluent	HRT: 18-24 hrs
BARRIER DITCHES	not true CLR's - barrier spanned the cross section of a channel - flow pumped from the upstream side of the barrier to the down stream - down pumping, sparged turbine and draft tube employed in Lightning's draft tube channel	
COMBINED SYSTEM	CLR's - employment of rotating diffusers or fixed diffusers with separate propulsion devices to create circulation	

기계장치들이 많으므로 건설비용이 많아지기 때문이다.

운전에 있어서 탄소 BOD만을 제거하는데 드는 비용에는 산화구의 것이 오히려 더욱 증가한다. 지난 1978년 미국 EPA에서 발표한 자료를 보면 유량 10MGD의 탄소 BOD를 제거하기위한 산화구와 기존 활성슬러지의 것의 비율은 0.63으로 나타난다. 그

러나 탄소 BOD 및 질소 BOD 제거 및 질산화, 탈질 산화 운전에 드는 비용은 오히려 역전되어 그 비율이 1.22에서 1.35가 된다. 동년 미국 EPA에서 발표한 연간 탄소 BOD 및 질소 BOD 제거 및 질산화, 탈질 산화 운전에 드는 비용차이가 다음과 같다(**Table 2** 참조).

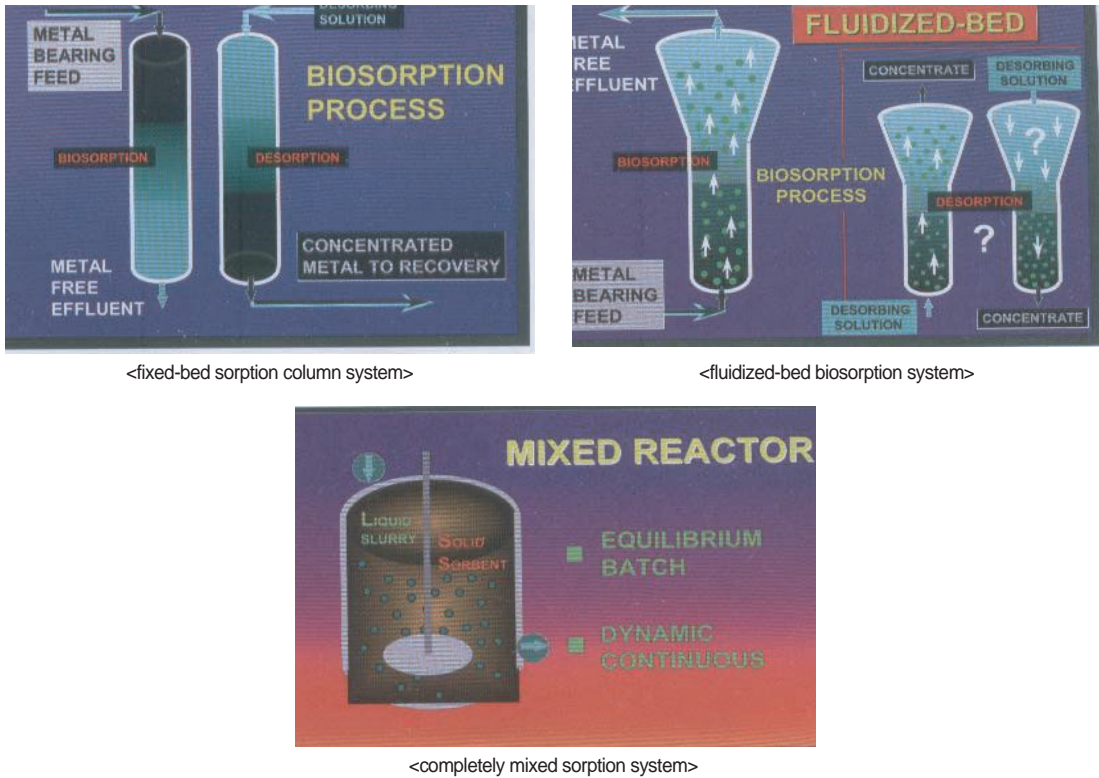


Fig. 2. Algal biomass reactor system.

2. 4. 생흡착이 핵심 단위조작인 활성슬러지 공법 산화구나 기존 활성슬러지 변법들 모두 세균, 원생동물, 후생동물, 해감 등으로 이루어지는 혼합미생물 바이오매스인 활성슬러지를 분산매체(혹은 생흡착제)로 하는데 폭기조내에서의 이 활성슬러지 흡착을 핵심으로 한다. 이는 살아있는 미생물 바이오매스의 생흡착에 의한 유기물 제거를 말한다. 그리고 세균 *Ramigra* 종의 활약이 동 공정의 성패를 좌우한다. 즉, 생장이 내호흡기(endogenous respiration phase)에 들어선 활성슬러지의 우점 미생물종 세균 *Ramigra* 종의 세포적 생흡착이 얼마나 원활하느냐에 따라 프랜트의 가동효율이 결정된다. 특히, 이 세균 바이오매스 세포벽 성분인 다당류 세포벽 고분자물질(ECP, extra cellular polymer)이 일으키는 가교현상(bridging effect)이 중요한데 이 가교현상을 통하여 동 반응조내의 유기물이 빠른 시간내에 흡착(rapid adsorption)되는 것이다.

3. 조류 바이오매스 반응기

3. 1. 조류 바이오매스 반응기 개발역사

조류 바이오매스 반응기가 안정화지(waste stabilization pond, WSP) 시스템에서 비롯된다. 이 안정화지 시스템은 조류가 수 생태계에서 1차적 생산을 담당하고 빛을 이용하여 탄소동화작용을 하는 기능을 이용하는 것으로서 성장하는 조류를 이용하여 N, P 같은 영양염류를 제거하려는 공학적 의도에서 비롯된 것이다. 이러한 의도는 이미 오래전부터, 라군(lagoon) 등의 공법에서 이용되어 온 것이기도 하다. 요즘은 이른바 BIG THREE로서 수은, 카드뮴, 납과 같은 중금속(heavy metal)의 제거 및 회수, 금 등의 희귀금속(precious metal) 및 우라늄 같은 전략 금속(strategic metal)의 제거 및 회수에 효과적으로 이용되고 있다. Volesky는 동(同) 금속들을 회수하는 공정을 금속 섭취(uptake/sequestering) 사이클과 금속 탈착(desorption/elution) 사이클을 포함하는 고-액 접촉

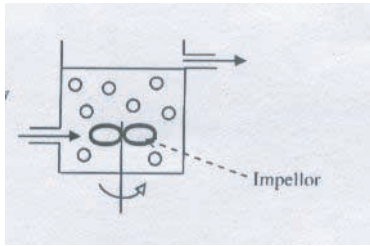


Fig. 3. CFSTR.

공정에 불과하다고 설명하면서 이를 연속흐름 반응기 (continulus-flow reactor) 혹은 연속흐름 접촉 시스템 (contactor system)으로 소개하였다. 이 반응기 시스템은 다시 고정 흡수층 시스템 (fixed-bed column sorption system)과 유동 흡수층 시스템 (fluidized bed column sorption system), 완전 혼합 흡수 시스템 (completely mixed sorption system)으로 나뉘는데 그 개요가 다음과 같다.

최근에는 금속의 생흡착과 관련하여 고정 (immobilization) 기술의 개발이 반응기 시스템 채택에 매우 큰 영향을 미친다. 고정 기술과 관련한 반응기 시스템이 연속흐름 교반조 반응기 (CFSTR, continious-flow stirred-tank reactor)와 충전층 반응기 (PBR, packed-bed reactor)이다.

이러한 반응기와 관련하여 최근에 이루어진 조류 바이오매스 반응기 개발내역이 다음 Table 4와 같다.

4. 조류 바이오매스 반응기와 고율안정화지, 이온교환수지 공법비교

질소와 인 등의 유기물을 제거하고 중금속 등의 무기물을 제거, 회수하기 위한 고도처리 기술 운용관점에서 현재 사회에서 널리 사용되고 있는 공법이 조류 바이오매스 반응기와 고율안정화지 (HRP, high rate pond)와 이온교환수지 (ion exchange resin)이다. 이 공법들의 핵심기작을 비교하여 보면 다음과 같다.

4. 1. 조류 바이오매스 반응기와 고율안정화지

조류 바이오매스 반응기 운용의 핵심이 죽은 조류 바이오매스 세포체 (dead algae- biomass cell)의 흡착 효과에 의존한다. 즉, 크기, 형태, 공극, 기계적 강도, 밀도 및 용액내에서의 팽창 여부 조건으로 준비된 과

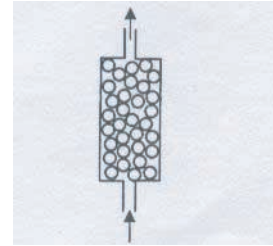


Fig. 4. PBR.

립형 조류사체 바이오매스 흡착체가 금속 등의 무기물들의 제거 및 회수를 이룸에 있어서 조류사체 바이오매스의 흡착 기작에 의존하는 것이다.

HRP 운용의 핵심이 살아있는 두 조류세포체와 세균세포체와의 상리공생 (mutualism) 작용을 통해서 BOD 제거와 질산화 작용을 이루고 살아있는 조류 바이오매스 세포체 (living algae-biomass cell)의 급속한 성장을 통해서 질소와 인 같은 영양염류의 흡수 및 흡착, 수중 용존산소 (DO) 농도의 증가를 이루도록 함에 있다. 요즈음은 단순히 질소와 인 같은 영양염류 및 BOD 제거개념에 국한되었던 것으로부터 이제는 제거범위가 점차 페놀 (phenol)과 같은 휘발성 유기화합물 (VOC, volatile organic compound)의 제거, 여러가지 중금속 (heavy metal)의 제거에까지 확장되고 있다.

그러므로 두 반응기 모두 조류 바이오매스가 죽은 것이나 살아있는 것이나 차이뿐이지 사실 죽은 것이나 살아있는 것이나 모두 유기물인 생화학적 흡착체로서 생흡착을 이룬다는 점에서는 동일하다.

4. 2. 조류 바이오매스 반응기와 이온교환수지 반응기

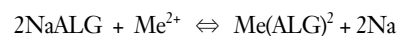
조류바이오매스 반응기와 이온교환수지 반응기가 모두 중금속 (heavy metal)의 제거 및 회수, 금 등의 희귀금속 (precious metal) 및 우라늄 같은 전략 금속 (strategic metal)의 제거 및 회수에 이용된다. 이 두 반응기의 핵심 단위공정 (unit process)이 각각 생흡착과 이온교환으로서 생물학적 처리와 화학고도처리로 이해할 수 있다. 그러나 조류바이오매스 반응기의 폐수처리결과가 Michelis-Menten의 생화학적 반응식에 잘 부합됨에도 불구하고 기술사회에서 널리 사용되어 온 동 반응기 시스템의 폐수처리 결과가 화학적 이온

Table 4. Developed reactors in activated sludge biomass process

Algal Taxa	Waste Treated	Immobilization Technique	Type of Culture or Reactor	Developer
AlgaSORB	metals	silica gel	PBR	Darnall DW. et al.(1991)
<i>Anabaena</i> CH ₃	N	alginate	batch and semi-continuous	Lee CM. et al.(1995)
<i>Anabaena doliolum</i> and <i>Chlorella vulgaris</i>	N, P and metals	agar, alginate carrageenan and chitosan	batch and semi-continuous	Mallick N. et al.(1993)
<i>Aphanocapsa pulchra</i>	metals	alginate	PBR	Subramanian VV. et al.(1994)
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	NO ₃ , NO ₂	alginate	batch and PBR	Vilchez C. et al.(1994)
<i>Chlorella emersonni</i>	P	alginate	batch and PBR	Robinson PK. et al.(1994)
<i>Chloralla emersonni</i>	Hg	alginate, agar and agarose	batch and PBR	Wilkinson SC. et al.(1992)
<i>Chloralla homosphaera</i>	Cd, Zn, Au	alginate	batch	da Costa ACA etc.(1991)
<i>Chlorella regularis</i>	U	polyacrylamide	batch and PBR	Nakajima A. et al.(1982)
<i>Chlorella vulgaris</i>	metals	polyacrylamide	PBR	Darnall DW. et al.(1986)
<i>Chlorella vulgaris</i>	N, P	alginate	batch	Tam NFY. et al.(1994)
<i>Chlorella vulgaris</i>	cattle manure	alginate carrageenan	PBR, FBR	Travscio L. et al.(1992)
<i>Chlorella kessler</i> and <i>Scenedesmus quadricauda</i>		polystyrene polyurethane		
<i>Chlorella vulgaris</i> and <i>Scenedesmus bijugatus</i>	N, P	alginate	PBR	Megharaj M. et al.(1992)
Cyanobacteria	Zn, Mn	mixed biofilm on glass wool	PBRs	Bender J. et al.(1994)
<i>Nostoc calcicola</i>	Cu	alginate	batch	Singh SP. et al(1992)
<i>Nostoc calcicola</i>	methyl-Hg	alginate	batch	Pant A. et al.(1992)
<i>Pharmidium</i> sp.	urban effluent	chitosan	batch and semi-continuous	Proulx D. et al.(1988)
<i>Pharmidium laminosum</i>	P	polyvinyl foam	batch, PBR, FBR	Garbisu C. et al.(1993)
<i>Pharmidium laminosum</i>	NO ₂ , NO ₃	polyvinyl and polyurethane foam	batch, PBR	Garbisu C. et al.(1992)
<i>Prototheca zoptii</i>	kepone	agar	PBR	Pore RS. et al.(1981)
<i>Sargassum fuitans</i>	heavy metals	synthetic polymers	PBRs	Ramelow US. et al.(1996)
<i>Scenedesmus acuta</i> and <i>S. obliquus</i>	N, P	carrageenan	batch	Chevalier P. et al.(1985)
<i>Scenedesmus bicellularis</i>	N, P	alginate and chitosan	repeated batch	Kaya VM. et al.(1995)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	NO ₃	ipolyurethane polyvinyl	batch and PBR	Kaya VM. et al.(1996)
<i>Spirulina maxima</i>	swine waste	carrageenan	FBR	Urrutia I. et al.(1995)
<i>Scenedesmus quadricauda</i>	N, P	carrageenan	batch	Chevalier P. et al.(1985)

교환식에 적용될 수 있음이 점차로 강조되고 있다. 볼레스키(Volesky, 2004)는 생흡착 기술의 성패가 ① 바이오매스 형태 ② 원수에 용해되어 있는 혼합물 ③ 본 운전을 앞두고 준비되는 바이오매스 전처리 ④ 구체화되는 물리-화학 공정에 의존한다고 하면서 조류 알긴산(alginic acid) 등에 금속이온이 흡착되는 현상은 엄밀히 말해서 생흡착제 표면위에서 일어나는 이온교환에 의한 흡착에 불과하다고 하였다. 데이비스(Davis, 2003)에 의하면 알긴산은 자연적 다당류(natural polysaccharides)는 이온교환 성질(properties)을 지니고 있고 다음의 쌍평형 금속이온 교환식(bivalent metal ions exchange eq.)으로 설명된다고 하

였다.



여기에서, Me: 금속원소

이러한 관점에서 학계에서는 조류바이오매스 반응기와 이온교환수지 반응기 운용을 소요되는 비용의 경제성으로 비교하는 것에 익숙하여 왔다. 특히, 볼레스키(Volesky, 2004)는 산업 유출 금속 제거기술 경제성 비교를 다음과 같이 설명하였다. 즉, 북미에서는 산업체로부터 유출되는 금속을 제거하는 고도처

리 기술이 크게 ① 이온교환(ion exchange) ② 역삼투(reverse osmosis)로 구분되는 데 현재 북미에서 통용되는 기술단가로 살펴볼 경우 역삼투는 매우 높은 고가(very expensive)의 비용이 소용되고 이온교환은 2003년 현재 수지(resin)가격이 1kg에 캐나다 달러로 30~50\$에 이르고 있으므로 이것 역시 매우 고가라고 하면서 생흡착 기술에 대해서 다음과 같이 강조하였다. 즉, 생흡착 기술은 생흡착제(biosorbent)가격이 최고가격으로 보아서도 4~7CA\$/kg에 불과하기 때문에 매우 저렴하며 북미에서는 한해 동안 이온수지 판매(sales)에 20억 US\$를 계상하고 있고 이 금액의 약 15%인 3억\$/년이 중금속제거에 지출되는데 이온교환수지를 생흡착제로 바꿀 경우 지출비용은 이 3억\$의 10%인 3천만\$/year에 불과하며 더군다나 금속 회수를 통하여서는 추가적으로 비용이 더욱 절약된다고 하였다. 2003년 현재 북미시장의 금속가격이 15\$/kg 이상이다.

5. 토 의

흡착은 흡착분자가 흡착제 고체 표면에 붙는 과정이다. 그리고 이 과정은 어디까지나 정전기력에 근거하는 binding 현상이지 가역적인 기계적 binding 현상을 의미하지 않는다. 흡착은 흡착제(sorbent)를 사용하여 목적성분을 분리하는 조작의 하나이며 이온교환(ion exchange)도 흡착의 한 분야로 정전기적 흡착을 말한다.

산화구나 기존 활성슬러지 변법들 모두 세균, 원생동물, 후생동물, 해감 등으로 이루어지는 혼합미생물 바이오매스인 활성슬러지를 분산매체(혹은 생흡착제)로 하는데 폭기조내에서의 이 활성슬러지 흡착을 핵심으로 한다. 이는 살아있는 미생물 바이오매스의 생흡착에 의한 유기물 제거를 말한다.

조류 바이오매스에 의한 금속원소 흡착의 경우 물리적 흡착(physical adsorption)과 화학적 흡착(chemical adsorption) 두 가지로 나뉘어 진행된다. 물리적 흡착 다음에 화학적 흡착으로 이어지고 중성원소 주위에 다른 이온이나 분자가 입체적으로 결합하여 원자집단화하는 착물화(complexation)가 일어나는데 이 착물화는 배위결합(coordination)으로서 생흡착제와 금속 이온 간의 전기음성도 차에 따라 공유결합

성이 큰 것에서 이온결합성이 큰 것으로 다양하게 나타난다. 특히, 전이금속착물의 배위결합 성질은 복잡한 것으로 알려져 있다. 그리고 이러한 배위결합 특성은 금속착물을 비롯한 비금속무기화합물과 유기화합물 등 많은 화합물들에게서 나타난다. 이 배위결합은 두 가지 이상의 리간드(ligand)로서 킬레이트화(chelation) 됨을 의미하는데 반응기 내 피흡착제 성분 금속의 용해도가 한계에 이르면 미세 부분의 금속 침전현상(microprecipitation)이 일어난다.

특히 *Chlorophyta* 문의 조류 세포벽은 주로 탄수화물과 단백질로 구성되어 있고 탄수화물은 다당류 물질로서 무정형의 기질(amorphous embedding matrix)인 섬유성 골격(fibrillar skeleton) 형태로 되어 있는데 이 셀룰로스 물질이 점차로 황산화하면서 점액(mucilage) 성질을 띄게 된다. 이 점액 성분이 uronic acid(glucuronic, manuronic, glucuronic)와 황산화된 다당류 물질인 바 이들의 carboxyl 기(COOH)와 sulfonate 기(SO₃H)가 금속 리간드를 형성한다. 단백질 또한 아미노산의 carboxyl, sulfonate, sulfhydryl(SH), hydroxyl(OH), phosphonate(P(O)(OH)₂), thioether(=S), secondary amine(=NH), imine(=NH) 등의 유기그룹이 리간드를 형성하는데 금속원소의 전기음성도 차이에 따라 공유결합성이 큰 것에서 이온결합성이 큰 것까지 다양하게 입체적으로 결합한다. 특히 수용액에서 물 분자의 복위(replacement)에 의하여 금속 킬레이트가 형성되기도 한다. 즉, 수용액에서 킬레이트화하는 금속 음이온들은 양성자(proton, 수소이온)의 수용체이며 양성자는 음이온을 얻기 위하여 금속이온과 경쟁한다. 이를 다음의 포괄적 평형식으로 표현할 수 있다.



HL: protonated ligand

조류 바이오매스에 의한 질소와 인 이온 생흡착의 경우 일반적으로 세포체 밖으로 분비하는 효소 촉매 ECP(extra cellular polymer)의 역할이 크게 작용한다. 이 ECP에 의하여 킬레이트화된 영양분들이 조류 세포벽을 통과하고 세포로 합성된다. 그리고 이 이온들의 흡착은 조류 세포체 흡수에 의한 결과이다. 그러

Table 5. Fundamentals of sorption methods

PARAMETERS	PHYSICAL ADSORPTION	CHEMISORPTION
Temp. Range	Lower	Higher
Heat of adsorption	Lower	Higher
Order of H	Condensation	Reaction
Rate	Fast	Non-activated
Activation Energy	Low E.	Low E.
Coverage	Multilayer possible	Monolayer
Reversibility	High	Often irreversible

므로 이들 생흡착의 동력 상수(kinetic constant)가 Michaelis-Menten 모델식으로부터 잘 구하여 진다. 그리고 조류 바이오매스 표면위에서 일어나는 질소와 인 이온의 생흡착 또한 이온교환수지에서 발생하는 이온교환에 의한 정전기적 흡착현상과 동일한 것으로 확인되고 있다. 그러므로 조류 바이오매스 표면위에서 일어나는 흡착은 본질적으로는 이온교환수지에서 발생하는 이온교환에 의한 정전기적 흡착현상과 동일한 것으로 볼 수 있다. 그러므로 Langmuir 모델식이 성립되는데 내용이 다음과 같다.

$$K = \frac{[BM]}{[B][M]} \quad (1)$$

여기에서, K: equilibrium constant
B: free binding sites
M: sorbate in solution

질량보전의 법칙에 의하여

$$[Bt] = [B] + [BM] \quad (2)$$

여기에서, Bt: total binding capacity

식이 성립하고 ①식과 ②식을 결합하여 피흡착제 섭취량(sorbate uptake), q를 얻을 수 있다.

$$[BM] = q = \frac{[Bt]K[M]}{1+K[M]} \quad (3)$$

조류 바이오매스에 의한 영양염류 이온의 생흡착에 있어서 이온교환 선택성 계수(selectivity

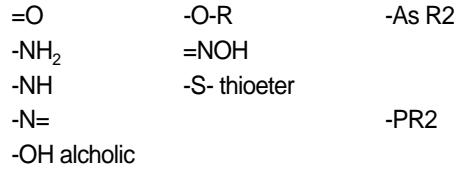


Fig. 5. Some coordination group.

coefficient)가 다음과 같이 표시될 수 있다(Volesky, 2004).

$$K_d = \frac{(\text{이온농도}/\text{흡착제단위중량})}{\text{이온농도}/\text{용액mL}} \quad (4)$$

6. 결 어

폐수처리에 있어서 산화구와 조류 바이오매스 반응기의 생흡착 공정을 살펴 본 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 기존에 개발되어 사회에서 널리 사용되고 있는 공법으로서 도시 하수처리에 있어서는 산화구(oxidation ditch)가 산업 폐수처리에 있어서는 조류(algae)를 바이오매스로 하는 반응기 시스템이 자연 친화적이고 경제적인 것으로 자리잡는다
2. 산화구나 조류 바이오매스 반응기 모두 생흡착이 핵심 기작이다
3. 흡착은 정전기력에 근거하는 바인딩(binding) 현상으로서 기계적 바인딩(binding) 현상이 아니다.
4. 활성슬러지와 조류 바이오매스 표면위에서 일어나는 흡착현상은 본질적으로 이온교환수지에서 발생하는 이온교환에 의한 정전기적 흡착현상과 동일하다.

참고문헌

1. Barrs, J.K. (1962) *The use of Oxidation Ditches for the Treatment of Sewage from Small Communities*, Bulletin, WHO.
2. Davis, T.A., Leckle, J.O. Volesky, B., Diaz-Puido, G. McCiik, L. and Mucci, A. (2003) A H-NMR Study of Na-Alginates extracted from Sargassum spp. in relation to metal biosorption, *Appl. Biotechnol. Biochem.*, **110(2)**, pp. 75-90.
3. Ettlich, W.F. (1978) *A Comparison of Oxidation Ditch Plants to Competing Processes for Secondary and Advanced Treatment of*

- Municipal Wastes*, U.S. EPA, 600/2-78-051.
4. Kout, A.C.J., and Keper, J. (1972) Carrousel, a New Type of Aeration System with Low Organic Load, *Water. Res.*, **6**, pp. 401-402.
 5. Mandt, Mikkel G. and Bell, Bruce A. (1982) *Oxidation Ditches in Wastewater Treatment*, Ann Arbor Science, Michigan.
 6. Pasveer, A. (1960) New Development in the Application of Kessenger Brushes (Aeration Rotors) in the Activated Sludge Treatment of Trade Wastewaters, *Proceedings of the Second Symposium on the Treatment of Wastewater*.
 7. Reed, Sherwood C. and Crites, Ronald W. and Middlebrooks, E. Joe (1995) *Natural Systems for Waste Management and Treatment*, McGraw-Hill, Inc., Montreal.
 8. Sunstrom, D.W. and Klei, H.E. (1979) *Wastewater Treatment*, Englewood Cliffs, Prentice-Hall, New Jersey.
 9. Robinson, Peter K. (1997) *Immobilized Algal Technology for Wastewater Treatment Purposes in book of Wastewater Treatment with Algae*, Springer-Verlag and Landes Bioscience, New York.
 10. Volesky, B. (2004) *Sorption and Biosorption*, BV Sorbex, Inc., Montreal.
 11. Wong, Yuk-Shan and Tam, Nora F.Y. (1997) *Wastewater Treatment with Algae*, Springer-Verlag and Landes Bioscience, New York.