



폐하수처리의 최근동향

1. 서 론

최초의 생물학적 폐하수처리법은 부착성 미생물을 이용한 모래여상법으로 1875년 영국의 Franklin에서 시작되었으나 공극이 쉽게 막히는 문제가 발생하였다. 1890년 자갈을 이용한 살수여상법이 개발되어 막힘 문제를 해결하였으며 현재까지 사용되고 있다. 부유성 미생물을 이용한 활성슬러지법은 1914년 영국의 Arden과 Lockett에 의해 최초로 시도되었으며 fill-and-draw 방식이었다. 연속혼합반응조는 1919년 사용되기 시작하여 1940년 후반에 이르러 Eckenfelder와 Mckinney등에 의하여 미생물 반응론에 입각한 이론적 바탕이 완성되었다.

1960년대 부터 고정화 미생물을 이용한 생물반응기가 등장하기 시작하였으며, 재래식 폐하수처리 공정의 경제성 및 처리효율의 향상과 독성물질 및 난분해성 폐수처리를 위하여 1970년대 부터 폐하수처리 시스템에 응용되기 시작하였다. 또한 이때에 부영양화에 의한 수질오염이 심각해 짐에 따라 질소와 인과 같은 영양물질을 제거하는 공정이 개발되기 시작하였다. 최근에는 반응조의 수리학적특성을 고려



신 항 식 / 한국과학기술원 토목공학과 부교수

하여 설계된 시스템과 고정화 시스템에 대한 연구가 활발히 진행중이며, 유전자공학을 적용한 난분해성 물질의 제거에 대한 연구도 응용되고 있다.

Biotechnology를 이용한 폐하수처리의 신기술개발의 분야는 크게 세가지로 생각할 수 있다. 첫째는 활성이 우수한 미생물의 신종개발을 들 수 있고, 신종 미생물을 효과적으로 배양할 수 있는 반응기 개발분야와 끝으로 분자생물학의 환경공학적 응용기술 개발 분야등이 있다.

2. 고도처리

질소나 인과 같은 영양물질이 수중생태계에서 용존산소를 고갈시키고 부영양화를 유발시키는등 생태계를 파괴하는 결과를 초래한다는 사실이 밝혀짐에 따라 영양물질의 제거에 대한 관심이 고조되어 왔다. 최근 국내에서도 90년대 중반에 영양물질 배출을 규제할 전망이어서 이에 대한 각계의 관심이 집중되고 있다.

현재까지 고도처리시설은 일명 3차처리라고 명명한 것으로도 알 수 있듯이 활성슬러지법으로 2차처리한 유출수를 물리화학적 질소나 인을 제거하는 공정을 도입하여 왔다. 그러나 최근에는 이러한 복잡하고 비경제적인 공정을 지양하면서 기존의 활성슬러지법을 개량하거나 운전조건 및 반응공정을 최적화한 신평정들이 개발되고 있으며, 현장에 적용되어 큰 효과를 거두고 있는 것으로 보고되고 있다.

생물학적 질소와 인의 제거공정은 환경조건에 따라 미생물의 활성이 변하는 특성을 이용한 것으로, 호기성 및 혐기성 혹은 질산기나 아질산기가 존재하는 무산소(anoxic)조건을 번갈아 제공해 줌으로써 일련의 질소/인제거과정을 순차적으로 진행시키는 방법을 적용하고 있다. 현재 사용되고 있는 대표적인 질소 제거공정으로 Bardenpho process를 들 수 있는데, 이 공정은 질소제거기작인 질산화 및 탈질화를 이용한 것으로 무산소, 호기, 무산소, 호기성 반응조를 직렬로 나열하고 질산화된 일부의 혼탁액을 반송시켜 탈질시키는 방법을 사용하고 있다. 최근에는 인도 함께 제거하는 공정으로 사용되고 있는데 제1반응조에서

인 방출 및 호기조에서 인의 과잉섭취현상을 이용한다.

인을 제거하는 생물공정으로 대표적인 A/O process나 A²/O process는 혐기성/호기성 반응조를 직렬로 연결하여 인의 방출 및 과잉섭취현상을 이용하고 있다. A²/O process는 중간에 무산소 반응조를 두어 질산화된 혼탁액을 반송시켜 탈질까지 진행시키는 공법을 사용하고 있다.

Phostrip process도 인을 제거하는 공정으로 미생물에 의하여 방출된 인을 분리하여 화학적 침전법으로 인을 제거하는 방법을 적용하고 있다. 이 공법은 안정적으로 인을 제거할 수 있으나 운전이 어려워 숙련된 기술이 필요하며, 공정자체가 상당히 복잡한 단점을 지니고 있다.

위의 공법들은 몇 개의 반응조를 직렬로 나열하여 혼탁액이 첫 반응조부터 마지막 반응조까지 거치면서 영양물질을 제거하는 방법을 사용하는데 반하여, 최근 다시 연구되고 있는 연속회분식반응조(SBR)는 하나의 반응조에서 시간에 따라 운전조건을 바꾸어 줌으로써 이와 동일한 효과를 얻을 수 있게 되었다. 또한 SBR은 CSTR과 PFR을 직렬로 연결한 것과 동일한 수리특성을 지니므로 각 오염물질의 제거율을 증가시킬은 물론, 반응조 부피의 감소로 소요부지도 줄일 수 있는 경제적인 공법으로 각광 받고 있다.

3. 난분해성물질 및 독성물질제거

3.1 고정화 시스템의 이용

(1) 고정화 시스템의 특성

고정화 시스템은 일반 활성슬러지공법에 비하여 다음과 같은 여러가지 장점을 가지고 있으므로, 난분해성 및 독성물질을 함유한 폐수를 처리하는데 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

고정화 시스템의 특성은 1) CSTR에서 발생할 수 있는 cell washout을 방지할 수 있고, 2) 반응조내에 고농도의 미생물을 유지하여 처리효율을 향상시키고, 3) cell/liquid 분리가 용이하며, 4) gas-liquid mass transfer가 향상되고, 5) plug-flow(packed bed reactor)로 운전이 가능하여 제거율을 향상시키고, 6) 수리학적

부하변동에 안정하며, 7) 목적에 맞는 미생물의 선택적 배양이 가능하다는 장점이 있으며, 1) 생물막이 커짐에 따라서 오염물질의 diffusional limitation 이 있고, 2) 고정화 종류에 따라 운전비용이 높고, 관리가 어렵다는 단점을 지니고 있다.

(2) 고정화 방법

고정화시스템은 미생물의 부착특성을 이용하여 매개물질에 활성이 우수한 미생물을 부착시킨 생물반응기를 의미하며 미생물의 부착방법에 따라 다음과 같이 attachment, entrapment, containment, aggregation 등으로 구분할 수 있다.

1) Attachment

부착성 미생물을 매개물질의 표면에 부착시켜 active biofilm을 형성시키는 방법이다. 이때의 생물막은 주로 monolayer로 되어 있으므로 기질의 diffusivity가 양호하다. 매개물질은 주로 세사(1mm이하)를 사용하여 전체적인 표면적을 증가시켜 물질전달율을 향상시킨다. Shear force나 마찰에 의하여 생물막이 쉽게 박리될 우려가 있으며, 생물막의 두께를 정확히 측정하기가 어려워 정량화가 어렵다는 단점이 있다.

2) Entrapment

매개물질의 작은 공극사이에 미생물을 가두어 정착시키는 방법으로 모든 종류의 미생물의 고정화가 가능하다. 매개물질은 brick, coke, ceramics, sintered glass와 같은 pore를 이용한 entrapment, stainless still wire, polyurethane form 등과 같은 cage entrapment, agar, alginates 등에 의한 gel-entrapment 방법 등이 있다. cell growth는 유체흐름에 의하여 제어하거나, 고정화된 미생물의 내부로부터 발생하는 가스에 의하여 미생물 particle이 깨어지면서 용액내로 탈리되어 제어된다.

3) Containment

반투막을 사용하여 비혼합성 액체(예 : 물과 기름)를 분리하고, 반투막내에 미생물을 배양시킨다. 영양물질, 오염물질 및 DO는 반투막을 통하여 내부로 투과되며 내부의 미생물에 의하여 분해된다. 이러한 시스템은 유기용매내의 오염물질 제거에 이용되거나 미생물이 전혀 함유되어 있지 않은 상등액을 얻기

위하여 사용하기도 한다.

4) Aggregation

매개물질을 이용하지 않고 미생물이 상호 응집하는 특성을 이용하여 고정화시키는 방법을 자기고정화라 하며, 자기고정화된 입상슬러지(granule)는 미생물의 세포의 물질인 섬유질에 의해 형성되며, 생물막의 형성으로 입상슬러지의 강도가 높아 진다. 입상슬러지의 밀도는 1.05g/m³으로 침전성이 우수하며 입상슬러지가 클 수록 침전성이 우수하다. 입상슬러지내 물질전달율은 기질의 농도가 높을 경우 입상슬러지의 크기에 영향을 받으나, 낮은 경우에는 큰 영향을 받지 않는다고 한다. 입상슬러지에 의한 자기고정화법은 혐기성(UASB)에서 시작되었으나, 최근에는 호기성 자기고정화법도 시도되고 있다.

(3) 고정화법을 이용한 반응조의 종류

고정화 시스템을 이용한 반응조는 고정화 방법에 따라 분류되는데, 회전날개에 미생물을 고정화시킨 Stirred Tank Reactor(STR), 반응조를 매질로 채우며 매질표면에 미생물을 부착시키는 Fixed Bed Reactor, 매개체에 고정화된 미생물을 상향류식 유체흐름으로 부상시키는 Fluidized Bed Reactor, 자기고정화법을 이용한 Upflow Anaerobic Sludge Blanket(UASB)나 Aerobic Upflow Sludge Bed(AUSB)등의 공법이 있다.

3.2 유전공학의 환경공학적 응용

유전공학의 발달과 함께 등장된 biotechnology란 말은 미생물의 유전자를 조작하여 원래 지니고 있지 않던 특성을 갖도록 하는 기술로써 환경공학에서는 난분해성 물질(xenobiotic pollutants)을 분해하거나 gene probe의 개발등의 분야에 응용되고 있다.

생물학적 난분해성 물질의 분해는 여러종의 미생물이 관여하여 진행되므로 각 분해단계를 정확히 이해하는 것이 매우 중요하다. 유전공학의 발달로 말미암아, 미생물의 생태학적 연구를 통하여 각 반응경로 및 미생물의 생태변화를 정확히 이해할 수 있게 되었다.

그러나 유전공학에 의하여 그 특성이 변화된 미생물이 주위 환경에 노출되었을 때 발생할 지 모르는

악영향에 대하여 정확히 예측할 수 없으므로 무분별한 적용은 아직까지 어려운 실정이다.

(1) Plasmid

DNA 외에 혼자 복제할 수 있는 element를 plasmid라 하고, 원형이며 double strand로 구성되어 있다. 일반적인 plasmid의 기능은 항생물질에 저항성 발현, 항생물질 제조, 방향족 물질 분해, 중금속에 대한 저항성 발현등으로 일반 독성물질에 대한 저항능력을 발현하는 것으로 알려져 있다.

(2) Recombinant DNA Technology

독성물질에 내성이 강한 세포의 유전자를 plasmid를 이용하여 다른 세포로 이전시킬 수 있다. 이러한 일련의 유전자 재조합 과정을 거쳐 생성된 유전자를 recombinant DNA라 한다. plasmid 처럼 어떤 세포에 집어 넣어 그 세포의 형질을 변화시킬 수 있는 것을 vector라 하는데, 다음과 같은 특성을 지녀야 한다. 1) 숙주세포에서 복제될 수 있을 것, 2) 원세포의 DNA 복제를 저해하지 않을 것, 3) 유전자 재조합 후 숙주세포에 첨가하기가 쉬울 것, 4) selection marker를 가지고 있을 것, 5) 제한효소에 대해 한 군데의 target site만 가지고 있을 것등이다.

3.3 독성물질 처리기술

일반적인 폐하수처리는 생물반응공정으로 되어 있으며, 폐하수내에는 극히 적은 양의 중금속이나 독성물질이 포함되어 있으므로 활성슬러지법에서 독성물질을 제거하는 방법이 연구되고 있다. 가장 일반적인 제거기작은 활성슬러지에 의한 생분해(biodegradation), 폭기에 의한 VOC 등의 탈기(stripping), 폐슬러지에 흡착시켜 제거(adsorption)등이 있다.

이 때의 운전인자는 슬러지 일령(θ_x)가 가장 중요하며, 미생물농도(X_a , X_v)나 gas flowrate 등이 관여하는데, 잉여슬러지나 배기가스등에 의한 2차오염문제가 제기될 수 있으므로 이에 대한 신중한 고려가 요구된다.

4. 결 론

급속한 산업발달과 인구의 증가는 폐수의 양적 증가와 질적 다양화를 초래하여, 고도의 폐수처리 기술개발의 필요성을 절실히 요구하고 있다. 신폐수처리 기술개발 분야는 전술한 바와 같이 미생물 종의 개발, 신공정개발 및 유전공학의 응용 등으로 종합된다.

생물공학의 발달은 최근 폐수처리 분야에서 당면한 문제 해결의 실마리를 제공해 주고 있다. 각 산업체에서 배출되는 난분해성 폐수를 처리하기 위하여 특수한 미생물종을 개발하거나, 폐수처리 공정내의 복잡한 현상들을 규명하고, 각 미생물군의 활동을 예측하는 데에 유전공학적 지식이나 기술을 이용함으로써 폐수처리 공정의 효율향상은 물론 획기적인 신공정을 개발할수 있을 것이다.

그러므로 환경공학자들은 폭 넓은 지식의 습득과 각 방면의 전문가들과 긴밀한 학술적인 관계를 유지하면서 그들과 함께 환경오염문제 해결에 동참하여 현명하게 대처해 나아가야 할 것이다.