

# 혐기성 소화를 이용한 생활하수 및 농업폐기물의 처리

## Anaerobic Digestion of Domestic Sewage and Agricultural Wastes

최 중 대\*  
Choi, Joong-dae

### 1. 서론

유기물의 혐기성 소화는 자연계에서 생성되고 방출되는 다양한 유기물을 무해한 물질로 분해시키는 자연정화 기능중의 하나이다. 사람들은 생활과 가축사육에서 발생하는 폐기물을 제거하거나 감소시키기 위하여 오래전부터 알게 모르게 혐기성 소화작용을 이용하여 왔다. 근대에 오면서 혐기성 소화작용의 원리가 이용되는 정화조가 많이 사용되고 있으며, 최근에는 임호프(Imhoff) 탱크와 같은 특수한 목적의 탱크도 개발되었다. 또한 혐기성 소화를 극대화하기 위한 온도 및 pH 조절기능을 가진 대형 탱크들도 건설되고 있다. 그러나 어느 시스템도 슬러지를 완전히 제거하지는 못하고 있다.

농촌지역에서 생활 및 농업폐수를 처리하는 방법으로는 활성오니법(Activated sludge), 정화조(Septic tanks), 연못저류법(Ponds and lagoons), 토양침투법(Seepage pits) 등이 주로 이용되고 있다. 어느 처리방법이든지 슬러지가 발생하고 이 슬러지를 처리하는데는 상당한 비용이 소요되고 있다. 특히 대부분의 농촌지역에서는 슬러지를 처리할 수 있는 시설이 갖추어지지 않아 슬러지의 처리에 많은 문제점을 내포하고 있는 반면에 환경규제가 심해짐에 따라 슬러지의 처리에 따른 구속력이 강화되고 있다.

농촌생활하수와 농업폐기물에서 발생하는 유기물은 최적환경조건에서 혐기성 소화에 의해서 거의 완전히 분해될 수 있다. 완전소화가 안되는 것은 소량의 리그닌 성분뿐이다. 따라서 혐기성 소화를 위한 최적의 환경조건을 만족시킬 수 있는 시설을 설치한다면 슬러지 발생율이 매우 낮은 수처리를 할 수 있다.

고급조건적소화조(Advanced Facultative Ponds, AFP)는 Oswald(1994) 등이 수십년의 연구를 통하여 개발한 수처리 시스템으로 하수 처리시 발생하는 슬러지를 분해하여 슬러지가 거의 발생하지 않는다. 다만 AFP에서는 다소의 냄새가 발생하기 때문에 도심지역에서는 사용하기가 어렵다. 그러나, AFP의 수처리 비용은 기존의 활성오니법이나 생물여과막 방법에 의한 수처리 비용과는 비교할 수 없을 정도로 작다.

본 고에서는 완전한 혐기성 소화를 이용하여 슬러지가 거의 발생되지 않는 고급조건적소화조(AFP)의 기초원리, 운영방법 및 설계요령에 대하여 간단히 소개하고자 한다. AFP는 슬러지를 소화하여 메탄가스를 생성하며, 생성된 메탄가스는 차집하여 사용할 수도 있다. AFP 처리수의 BOD, 질소, 인, pH, 중금속, 기생충 및 병원성 병원균의 농도는 상당히 낮은 것으로 나타났다.

\* 강원대학교 농공학과

## 2. 종합연못하수처리 시스템

종합연못하수처리 시스템(Advanced Integrated Wastewater Pond System, AIWPS)은 Oswald 등(1950, 1990)의 연구자가 지난 30여년 동안에 걸쳐 개발하였다. AIWPS는 고급조건적소화조(Advanced Facultative Pond, AFP), High Rate Pond(HRT), 두 개의 침전지(Settling ponds), 그리고 숙성지(Maturation pond) 등 최소한 4개의 연못 <그림-1>으로 구성된다.

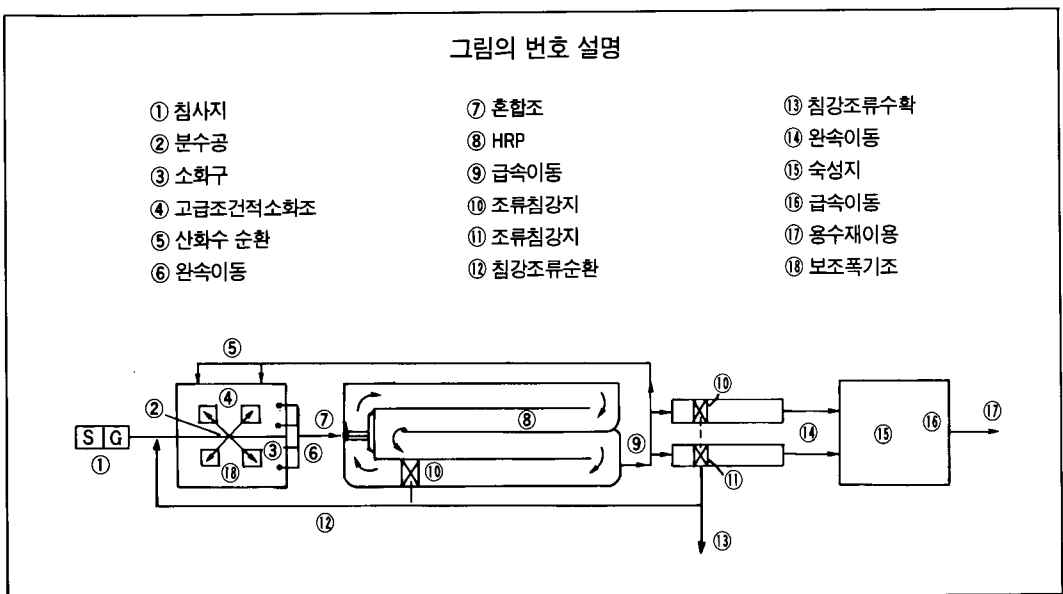
AFP는 이 시스템의 핵심 연못으로 연못의 상층부에서는 호기성 산화작용(Aerobic oxidation)이 일어나고 연못의 바닥부에서는 혐기성 소화작용(Anaerobic digestion)이 일어나도록 설계되었다. 산화작용이 일어나는 연못의 상부수심은 2m~3m이고 유입된 하수의 체류기간은 약 20일이다. 소화작용은 연못의 바닥에 설치한 소화구(Pit 또는 Fermentation pit)에서 일어난다. 연못의 크기에 따라 한 개 이상의 소화구를 설치하고 환경조건을 맞추어 소화작용을 극대화시킨다.

소화구는 <그림-2>에서와 같이 주변과 1m~2m 높이의 울타리(Berm)로 구분되며 2m~3m 깊이로 조성된다. 처리해야 할 하수가 유입되며 상층부의 부유물질이 침전되는 소화구에서는 혐기성 소화에 의한 유기물의 분해가 일어난다. 소화구에서 하수의 체류기간은 2~3일이다.

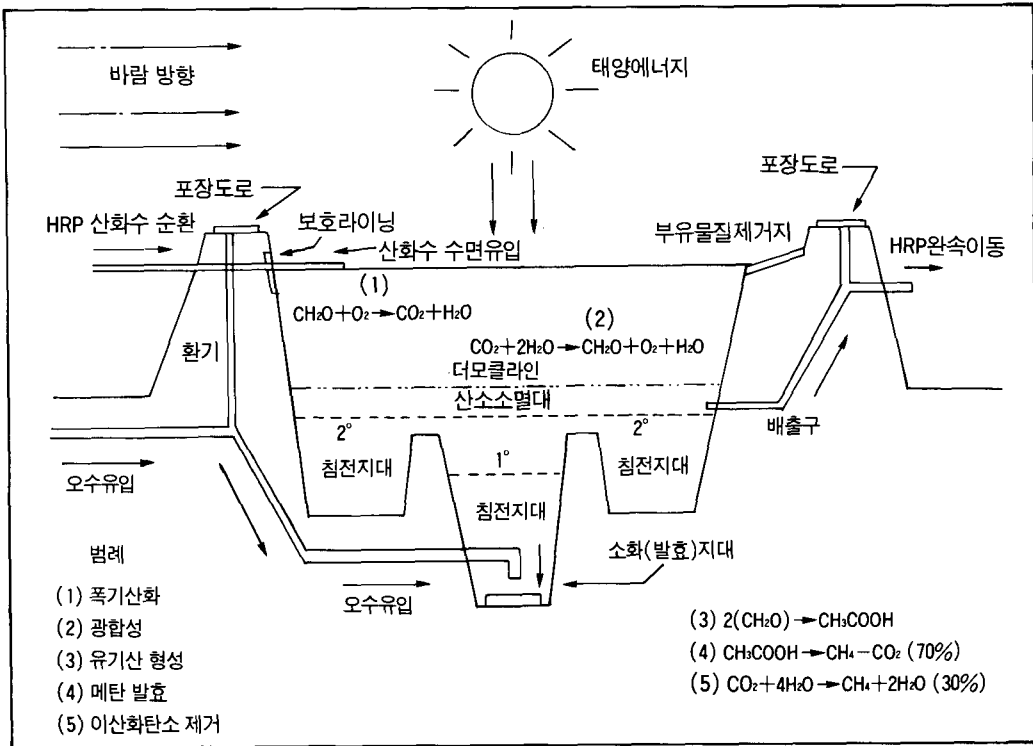
최소한 2개의 소화지를 서로 인접하게 조성하여 필요한 경우 청소 및 보수를 할 수 있어야 한다.

소화구 다음에는 깊이 0.5m, 체류기간 3~4일인 High Rate Pond(HRP)가 설치된다.

HRP에서는 태양빛을 받아 녹조(Green algae)가 빠른 속도로 번식하게 되며, 수중에 산소를 공급하여 연못의 산소농도를 높인다. 이 연못(HRP)의 물은 청소용수(Wash water)나 혹은 생분(Fresh manure)을 희석하는데 사용된다. HRP의 물은 녹조들이 간신히 떠있을 정도로 아주 천천히 순환시키면서 녹조의 번식을 극대화시킨다. 왕성하게 번식하는 녹조들의 광합성에 의하여 산소농도가 높은 HRP의 물은 소화지(AFP) 상층부에서의 호기성 산화작용을 증진시키기 위하여 소화지로 순환시키기도 한다.



<그림-1> 종합연못하수처리 시스템 개요도



<그림-2> 고급조건적소화조 개요도

HRP 다음에는 깊이가 3m이며 하수의 체류기간이 1~2일인 두 개의 침전지(Settling pond)를 설치한다. HRP에서 번식한 깨끗한 녹조류가 이곳에서 침전하여 수거된다. 수거된 녹조류는 높은 열량(6cal /dry gm)을 가지고 있고 단백질의 함량이 건조무게의 40%에 달하여 돼지, 닭, 혹은 송아지의 사료로 사용된다 (Hintz et al. , 1966). 네번째의 연못은 숙성지 (Maturation /Holding pond)이다. 앞의 연못에서 처리되어 정화된 하수는 이곳에서 저류되며 추가로 자연정화작용을 받으며 관개용수나 축분의 희석수로 이용된다.

연못을 이용하는 기존의 수처리 시스템에서도 첫번째 연못이 혐기성 소화지인 경우가 있을 수 있다. 그러나 많은 경우 이들 연못처리 시스템은 수심이 너무 낮아 연못의 상층부와 바닥부 사이의 수온차이에 따른 밀도류가 일어나거나 바람 등 외부인자들에 의한 교란에 의하여

상층부의 물과 바닥부분의 물이 반전(Turn-over)되거나 서로 혼합되어 연못의 바닥까지 용존산소가 공급되게 된다. 바닥으로 산소가 유입되면 혐기성 지역에서 유기물을 분해하며 메탄가스를 발생시키는 박테리아들이 죽게되어 혐기성 소화작용이 중단되며, 그 결과로서 감자 썩는 냄새를 풍기는 황화수소(H<sub>2</sub>S)와 비린내를 풍기는 인화수소(PH<sub>3</sub>)가 생성되어 대기중으로 방출된다. AFP는 이와 같은 현상을 극복하고 지속적으로 소화작용을 유지하기 위하여 개발된 것이다. 소화지의 크기에 따라 바닥에는 한 개 이상 여러 개의 소화지(Pit)를 파고 주변을 1m~2m 높이의 울타리를 만들어 상층부로 부터의 용존산소유입을 차단하고 적정 pH의 혐기성 지역을 유지하여 소화에 의한 메탄가스 생성작용을 극대화시켰다.

종합연못하수처리 시스템(AIWPS)은 여러 곳에 설치되어 수년 이상 가동되는 곳이 많으며

수처리 능력이 매우 양호한 것으로 입증되고 있다. 미국 캘리포니아주에 있는 세인트 헬레나시의 AIWPS 하수처리장은 27년째 가동중이나 슬러지를 수거하여 처리한 적은 한번도 없다.

세계의 여러 곳에 설치한 AIWPS 하수처리장에서도 비슷한 결과를 보이고 있다. 각각의 AIWPS 하수처리장의 건설과 운영비용은 기존의 활성오니법을 사용하는 하수처리장 건설비와 운영비에 비하여 비교할 수 없을 정도로 아주 저렴한 것으로 나타났다. 또한 기존의 Lagoon을 이용한 혐기성 소화방법보다 처리장의 부지 면적이 작게 소요된다.

### 3. 고급조건적소화조(AFP)

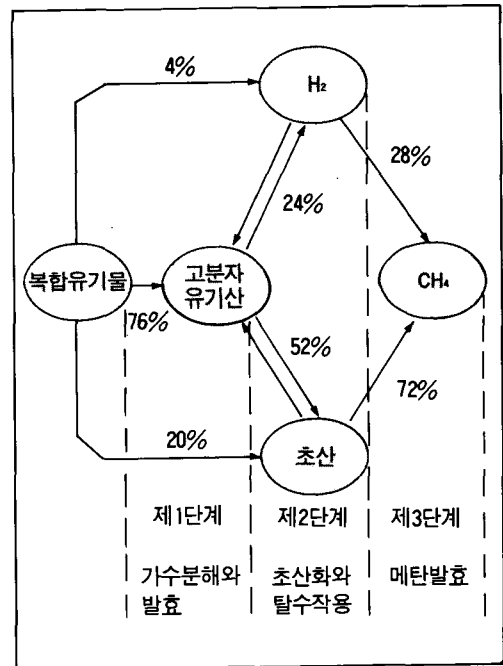
〈그림-2〉는 고급조건적소화조의 단면을 보여주고 있다. AFP의 상층부는 항상 용존산소가 존재하는 호기성 지역이고, AFP의 바닥부분은 한 개 이상의 용존산소가 전혀 없는 혐기성 소화구로 구성된다. 소화구 주위에 설치하는 울타리는 바람 등의 외부 교란이나 연못 상층부와 하층부의 수온차로 발생하는 밀도류 때문에 발생하는 물의 반전(Turnover) 때문에 상층부의 차갑고 용존산소가 녹아있는 물이 소화구로 유입하는 것을 차단하여 주는 역할을 한다. 침사지나 혹은 기타 시설에서 토사나 큰 덩어리의 이물질이 제거된 하수는 소화구의 바닥부분으로 〈그림-2〉에서와 같이 수직으로 유입된다. 수직으로 유입되는 하수의 유속에 의하여 이미 소화구 바닥에 퇴적되어 있던 슬러지를 교란시키고 또한 새로운 하수와 소화구에 존재하는 메탄가스 발생균이 잘 혼합되게 만들어 빠르게 소화작용이 일어나도록 유도한다.

하수는 AFP의 바닥부분에서 도입되어 상층부에서 배수되기 때문에 소화구에서 상향류가 발생한다. 이 상향류의 유속은 상층부에서 유하하는 기생충의 알 등이 침강하는 유속보다 작게 되도록 소화구의 단면을 크게 만들어야 한다. 침강된 기생충의 알이나 기타 부유물질은 궁극

적으로 소화구에서 모두 소화되어 없어진다. 소화지에는 바람이 불어오는 맞은 편에 〈그림-2〉에서와 같이 부유물질을 쉽게 수거하고 인위적으로 제거할 수 있도록 경사가 작고 콘크리트 라이닝을 설치한 호안을 만든다. 따라서 AFP에서 발생하는 스크(Scum)이나 기타 부유물질은 바람에 의하여 이곳으로 밀려오고 인위적으로 쉽게 제거할 수 있다. 수거된 부유물질은 다시 AFP의 바닥으로 보내져 소화되도록 한다.

### 4. 혐기성 소화작용 (Anaerobic Digestion)

현재까지 사용되고 있는 보통의 혐기성 소화연못에서 소화작용이 잘 이루어지지 않는 이유는 다양한 종류의 박테리아가 존재하기 때문이다. 이들 서로 다른 박테리아들은 혐기성 소화과정에서 서로 다른 역할로 상충하며 원활한 소화작용을 방해한다. 〈그림-3〉은 3단계의 혐기성 소화과정을 보여주고 있다. 제1단계와 제2단계



〈그림-3〉 메탄발효와 에너지이동의 3단계

는 유기물질을 단순한 알콜이나 초산(Acetic acid), 프로피온산(Propionic acid), 그리고 낙산(Butyric acid)과 같은 유기산으로 변환시키는 단계이다. 제3단계에서는 초산을 메탄개스와 탄산개스로 변화시킨다(Richard and Bowman, 1991).

처음 1,2단계에서는 용존산소의 존재 유무에 관계없이 성장하는 조건적(Facultative) 박테리아가 작용한다. 조건적 박테리아는 상당히 넓은 범위의 pH에서도 잘 적응하는 박테리아이다. 제3단계에서는 메탄(Methanogenic) 박테리아가 작용한다. 메탄 박테리아는 용존산소가 전혀 없는 혐기성 상태에서, pH가 6.7~7.3에서만 생존할 수 있는 박테리아이다. 제1단계 및 제2단계에서 작용하는 조건적 박테리아는 메탄 박테리아가 살 수 있는 조건에서도 잘 성장하므로 소화구의 조건을 메탄 박테리아가 살 수 있는 환경으로 유지하여 주는 것이 가장 중요하다.

처음 1,2단계에서 작용하는 조건적 박테리아에 의해 생성된 유기산은 대단히 불안정하며 메탄 박테리아에 의해 메탄개스와 탄산개스로 빨리 분해되지 않는 한 고약한 냄새를 발하는 황화수소와 다른 개스로 분해되어 AFP 주변을 오염시킨다. 이와 같은 문제를 미연에 방지하기 위하여 AFP의 바닥에 소화구를 설치하여 연못의 상층부로부터 산소의 유입과 외부의 영향에 의한 pH의 변화를 철저히 방지하여야 한다.

## 5. 축산폐수의 처리

축산폐수는 유기물의 농도가 매우 높고 일반적으로 많은 양의 섬유질과 리그닌을 함유하고 있어 가정의 생활하수와는 차이점이 있다. 축산폐수의 유기물 농도가 높은 것은 사람의 경우와는 달리 많은 물로 희석되지 않기 때문이다. 축산폐수처리 전문가들은 축분을 물로 희석하지 않고 처리하는 것이 희석한 후 처리하는 방법보다 용이하므로 물로 희석하여 처리하는 데는 반대한다. 통상적인 축분의 처리시에는 파리 등

유해곤충이 발생하고, 영농기, 추운 겨울철, 혹은 장마철 등에는 농경지에 사용할 수 없으므로 일정한 장소에 쌓아 놓아야 하는 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 강우시 축분보관장소나 축산폐수를 살포한 농경지로부터의 유출은 주변의 수계에 심각한 수질오염을 야기할 수 있다. 이와 같은 문제점 때문에 일부 전문가들은 축산폐수도 많은 물로 희석하여 생활하수의 처리와 같은 방법으로 처리할 수 있도록 하는 방법을 고려하고 있다. 그러나 생활하수 처리방법으로 축산폐수를 처리하는데는 축분에 포함되어 있는 리그닌과 같은 많은 양의 섬유질이 문제가 되고 있다. 만약에 희석된 축분으로부터 섬유질을 쉽게 제거할 수 있다면 축분도 희석하여 AIWPS에서 생활하수 처리방법과 유사한 방법으로 처리할 수 있을 것이다. 사람생활에서 발생하는 100g의 고형물은 약 190ℓ~300ℓ의 많은 물에 희석되어 하수로 배출되기 때문에 소화구에서 쉽게 침전되고 분해된다. 소화구에서는 왕성한 분해가 일어나기 때문에 퇴적되는 고형물의 양이 매우 적다. 생활하수에서 발생하는 분해되기 어려운 유기물과 무기물, 혹은 재와 같은 물질이 산화구 바닥에 쌓여 제거가 필요하게 되려면 25년 이상의 장기간이 소요될 것으로 예측하고 있다.

축분을 AIWPS로 처리하려면 우선 축분을 물로 희석하여 묽은 용액으로 만들고 이 용액으로부터 고형분을 분리한 후 AIWPS로 처리하는 것이 가장 좋을 것이다. Dugan et al. (1972)은 양계분에서 고형분을 분리하고자 하는 실험을 하였다. 이들은 양계분을 희석하여 고형분을 분리하기 위하여는 물의 양이 97%, 그리고 침전가능한 고형분의 양이 3%가 될 때까지 희석하여야 한다는 것을 밝혔다. 이와 같이 축분으로부터 고형분을 분리하기 위하여는 상당한 양의 희석수가 필요하고 따라서 처리하여야 할 하수의 양이 많아지기 때문에 AIWPS의 규모도 그 만큼 크게 설치해야 한다. 축산폐수로부터 고형분을 분리할 수 있을 정도의 희석을 한 경우에는 축분의 섬유질 성분을 따로 분

리하여 혐기성 소화시키거나, 혹은 세척하고 거른 후 말려서 야생조류나 애완동물의 등지를 만드는데, 부숙(Composting) 시의 혼합재료로서, 혹은 농경지의 멀치와 같은 재료로 사용하는데 이용될 수 있다. 고품분과 섬유질 성분이 제거된 축분회석수는 다소간의 고품분이나 섬유질이 포함되어 있기는 하여도 AIWPS를 사용하여 농도가 짙은 생활하수를 처리하는 방법으로 처리할 수 있다.

축분에 포함되어 있는 모든 유기물은 AIWPS에서 처리될 수 있다. 그러나 축분의 섬유성분 중 리그닌은 분해속도가 아주 느리기 때문에 젖소 한 마리의 축분을 처리하기 위한 소화구의 체적이 약 5.7m<sup>3</sup> 정도로 대단히 커야 한다. 반면에 축분에서 섬유성분이 제거된다면 소화구의 크기는 약 2.8m<sup>3</sup> 정도로 작아도 된다. 그러나 1인당 0.28m<sup>3</sup>~0.56m<sup>3</sup> 정도면 충분한 사람과 비교하면 젖소의 경우는 대단히 큰 소화구와 AIWPS가 필요하다. 일반적으로 수유기의 젖소의 분뇨배출량은 약 18명 정도의 사람이 배출하는 분뇨의 양과 같으며, 비수유기에는 약 10~12명의 사람이 배출하는 양과 비슷한 분뇨를 배출하고 있기 때문에 AIWPS도 이에 비례하여 크게 설비되어야 한다. 고품분의 비율이 3%가 되도록 충분히 회석되었을 때의 BOD는 약 1,000mg/ℓ 정도로 된다. 따라서 AIWPS는 이 정도의 BOD 농도까지도 무난히 처리할 수 있는 능력을 가지고 있다.

## 6. 고급조건적소화조(AFP)의 설계 요령

AIWPS에서 가장 중요한 역할을 담당하는 AFP의 기능을 적절하게 유지하기 위하여는 다음의 사항을 고려하여 설계하여야 한다.

1. 소화구의 주위에는 반드시 울타리를 설치하고 소화구는 충분히 깊게 만들어야 한다. 소화구가 깊을 때만 외부의 영향이나 밀도류로 인하여 연못의 물이 순환될 때도 용존산소의 유입

을 차단할 수 있고 pH의 변화를 최소화 할 수 있다. AFP의 깊이는 최소 2m~3m 이상되어야 하며 소화구(Pit)의 깊이는 소화지의 바닥에서 다시 최소 2m~3m 이상 깊게 설치하여야 한다.

2. 소화구의 크기는 소화구가 수용해야 할 슬러지의 양과 소화구로부터의 상향류 유속에 의하여 결정된다. 처리해야 할 하수는 소화구로 유입되어 서서히 소화지의 상층부로 이동하기 때문에 상향류가 반드시 발생한다. 이때 상향류의 유속이 상층부에서 침강하는 기생충 알의 침강속도 보다 크면 알이 침강하지 못하기 때문에 기생충을 죽이지 못하고 방류하게 된다. 일반적으로 소화구는 유입된 하수가 2일 이상 체류할 수 있고 상향류의 유속이 2.5 m/day를 넘지 않도록 크게 설계되어야 한다.

3. AFP의 상층부는 유입된 하수가 20일간 체류할 수 있는 용량을 갖도록 설계한다.

4. AFP 배출파이프는 수면으로부터 1m 이하에 설치하여 수면에서 생성되는 부유물질이 배출되지 않도록 하여야 한다.

5. 바람이 불어오는 맞은 편에 부유물질을 수거할 수 있는 경사가 작으며 콘크리트 라이닝을 설치한 호안을 만든다.

6. AFP의 수위부근에는 파랑에 의한 제방의 토양유실을 방지하기 위하여 콘크리트를 이용하여 라이닝을 하여야 한다.

## 7. 결 론

1. 고급조건적소화조는 유기물질을 거의 완벽하게 소화하여 폐기처리해야 할 슬러지가 거의 발생하지 않는다.

2. 고급조건적소화조는 BOD를 80%까지, 그리고 질소를 60%까지 제거할 수 있다.

3. 고급조건적소화조의 설계, 건설, 운전 및 유지관리 비용은 기존의 통상적인 수처리 시스템의 극히 일부분에 지나지 않을 정도로 매우 작다.

4. 고급조건적소화조의 소화구에서 발생하는

메탄개스는 필요하다면 채집하여 사용할 수 있다.

5. 축산분뇨도 충분히 희석하면 고급조건적 소화조에서 처리할 수 있다. 축산분뇨에서 섬유질 성분을 제거하고 처리하는 경우의 소화구의 크기는 섬유질을 제거함이 없이 모든 축산분뇨를 처리하는데 필요한 소화구 크기의 1/2~1/3 정도 된다.

**참고문헌**

1. Albertson, M. and W. J. Oswald, 1994. Anaerobic digestion of solid domestic and agricultural wastes, Proc. 7th International Sym. on Individual and Small Community Sewage Systems "On Site Wastewater Treatment", ASAE Pub. No.18~94, pp. 542~550.
2. Dugan, G. L., C. G. Golueke and W. J. Oswald, 1972. Recycling system for poultry wastes, J. Water Pollution Control Fed., 44 (3), pp.432~440.
3. Hintz, H. F., H. Heitman, W. C. Weir, Jr., D. T. Torrell and J. H. Myers, 1966. Nutritive value of algae grown on sewage, J. Animal Sci., 25, pp.675~681.
4. Oswald, W. J. and Gotaas, 1957. Photosynthesis in sewage treatment, Trans. Am. Soc. Civil Eng., 122, pp.73~94.

5. Oswald, W. J., 1990. Advanced integrated wastewater pond systems: supplying water and saving the environment for 6 billion people, Proc. for 1990. ASCE Convention, EE Div., San Fransisco, CA, pp.73~81.
6. Oswald, W. J., 1994. Syllabus on advanced integrated pond systems, ASAE Short Course, New York, NY., pp.350.
7. Richard, M. and D. Bowman, 1991. Trouble shooting the aerobic and facultative waste treatment lagoon, EPA workshop on constructed wetlands treatment systems, Denver, CO., September, pp.20.

**약 력**

최 중 대



1979. 강원대학교 농과대학 농공학과 졸업  
 1982. 강원대학교 대학원 농학석사  
 1992. 미국 메릴랜드 주립대학교 공학박사  
 현재 강원대학교 농공학과 조교수  
 KCID 편집·학술분과위원  
 농촌환경연구회 이사