

혐기성 입상슬러지의 형태학적 특성

The Morphological Characteristics of Anaerobic Granular Sludge

신 항 식* · 배 병 옥** · 백 병 천***
 Shin, Hang Sik · Bae, Byung Uk · Paik, Byung Cheon

Abstract

In this paper, the microscopic results of granular sludge from the two-phase UASB reactors are presented, particularly on the acidogenic phase where the distillery waste water is directly delivered. Distillery wastewater as a feed contained SS of 3.6~10.6 g/l and COD of 17.3~30.4 g/l. A 12.5 l and a 4.7 l UASB reactors were used for acidogenic and methanogenic phases, respectively. Morphological studies on the granular sludge consortia were made with both scanning and transmission electron microscopies. It was interesting enough to find the different colored and shaped granules at the acidogenic on the 90th day and at the methanogenic phase on the 120th day. The acidogenic granular sludge mainly consisted of acidogenic bacteria, such as long chains of large rods, short plump rods, and various size of cocci. Whereas the filamentous bacteria of *Methanothrix* spp. prevail in the methanogenic granule, with diverse bacteria entrapped therein.

要 旨

본 논문에서는 주정폐액을 처리한 이상 UASB 공법에서 형성된 입상슬러지에 관한 현미경실험 결과를 제시하고자 한다. 기질로 사용한 주정폐액의 SS 및 COD 농도는 각각 3.6~10.6, 17.3~30.4g/l였으며, 12.5 l와 4.7 l의 UASB 반응조가 사용되었다. 입상슬러지의 형태학적 연구에는 SEM과 TEM을 사용하였다. 운전 90일과 120일경에 산형성조와 메탄형성조로부터 다른 색깔과 형상을 가진 두 종류의 입상슬러지가 형성되었다. 산형성조 입상슬러지는 주로 긴 고리로 연결된 큰 rod형 bacteria, 짧고 통통한 rod형 bacteria, 그리고 다양한 크기의 coccus형 bacteria로 구성되었다. 반면에 메탄조 입상슬러지는 *Methanothrix*로 구성된 network내에 다양한 종류의 bacteria가 포획되어 있는 구조를 가졌다.

*正會員 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

**正會員 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

***正會員 · 국립여수수산대 해양환경공학과 전임강사

1. 序 論

재래식 혐기성 폐수처리 공법의 제반 문제점을 극복함으로써 고농도 뿐만 아니라, 비교적 저농도 폐수를 경제적이며 효율적으로 처리할 수 있는 신공법들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이들 신공법들이 갖는 공통적인 특징은 증식속도가 느린 혐기성 미생물의 활성을 높이고, 반응조에 미생물을 고농도로 유지시켜 비교적 짧은 체류시간에 폐수를 처리하는 것이다.

1980년대 초에 화란의 Lettinga^(1, 2) 등에 의해 개발된 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 공법은 순수한 미생물만으로 구성된 고농도의 입상슬러지(granule)를 이용하여 폐수를 처리하기 때문에 여재를 사용하는 여타 고율 혐기성공법에서 발생하기 쉬운 반응조의 폐쇄(clogging)나 단회로 현상(short circuiting)의 방지가 가능하며, 장치가 간단하고 여재를 사용하지 않으므로 초기 투자비용을 절감할 수 있는 경제적인 공법이다.

그러나, UASB 공법의 핵심요소인 입상슬러지가 형성되기까지의 초기운전이 까다롭고 소요시간이 길며, 폐수의 특성에 따라서는 입상슬러지가 형성되지 않는 경우도 있다^(3, 4). 따라서 이러한 UASB 공법의 단점을 극복하고 폭넓은 적용을 위해서는 정확한 입상화 과정에 대한 연구가 전제되어야 한다.

최근에 Colleran⁽⁵⁾은 수리학적 부하와 발생가스 부하율, SRT(sludge retention time), 그리고 반응조내에 유지되는 acetic acid농도 등의 운전조건에 따라 혐기성 입상슬러지의 생산과정을 A, B, C의 세 종류로 요약하였다. 입상슬러지의 형성이 가장 빨리 진행되는 A형은 초기운전 동안에 acetic acid의 농도가 낮게 유지됨에 따라 낮은 acetic acid농도에서 활성이 뛰어난 *Methanothrix* spp.가 반응조내에 존재하는 *Methanosarcina* spp.의 덩어리(clump)중앙 빈곳에 침입하여 성장하는 경우로, 반응조가 계속 낮은 acetic acid농도로 유지됨에 따라 *Methanothrix* spp.는 계속 성장하고 외부의 *sarcina*층은 결국 유실되어 매우 치밀한 입상슬러지를 형성하게 된다.

B형은 식종슬러지나 유입폐수에 존재하는 소량의 불활성 입자, 또는 첨가한 유동매질의 표면에

미생물이 부착되어 막을 형성하면서 성장하는 입상슬러지이며, 마지막으로 C형은 *Methanosarcina*형 입상슬러지로 운전기간 동안에 높은 acetic acid를 유지할 경우에 형성된다.

현재까지 슬러지 입상화에 관한 연구는 주로 휘발성유기산을 기질로 사용하여 *Methanothrix* spp.와 *Methanosarcina* spp. 같은 acetoclastic메탄균의 역할에 국한되어 진행되어 왔다^(6, 7, 13). 그러나 당을 함유하는 폐수에서도 입상슬러지가 형성되는바, 입상화에 미치는 산형성균의 역할에 대한 연구가 필요하다. Zeeuw⁽⁷⁾은 글루코스를 함유하는 기질이 VFA만을 함유하는 기질 보다 입상슬러지의 형성에 유리하다고 하였으며, Dubourguier⁽⁸⁾과 Wiegant⁽⁹⁾는 초기 입상슬러지의 경우 acetoclastic메탄균 보다 산형성균의 활성도가 훨씬 높아 입상화 초기에는 산형성균의 역할이 중요하다고 하였다. 그러나 Guiot 등⁽¹⁰⁾은 입상슬러지의 성장은 여러 미생물군들의 복잡한 상호작용에 의존하며, 입상슬러지의 성장에 대한 기여도는 산형성균이 메탄균 보다 상대적으로 작다고 보고하였다.

본 논문에서는 부유고형물을 함유하는 주정폐액을 증온 소화로 처리한 실험실 규모의 이상(two-phase)UASB공정에서 관찰된, 각기 다른 형태학적 특성을 가진 두 종류의 입상슬러지에 대한 현미경 실험 결과를 제시하고, 산형성 및 메탄형성 입상슬러지로부터 관찰된 독특한 입상화 과정에 대하여 조사하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

본 실험에서는 그림 1과 같이 원통형의 UASB 반응조 12.5 l와 4.7 l를 각각 산형성조와 메탄형성조로 사용하였다. 유입폐수는 주로 쌀보리와 질간고구마를 원재료로 한 주정폐액을 사용하였으며, pH, COD, SS, Sulfate의 농도는 각각 3.9~5.1, 17.3~30.4 g/l, 3.6~10.6 g/l, 440~1,370mg/l의 범위였다⁽¹⁹⁾.

산형성조 유입폐수의 pH는 6N NaOH를 사용하여 최적 산형성 조건으로 보고된 6.0으로 일정하게 조절하였으며⁽¹¹⁾, 메탄조 유입폐수의 pH는 7.2~7.6 사이로 조절하여 주입하였다. 반응조의 pH, COD제거율, 산생성율, 유출수의 유기산 농도 등을 운전변수로 사용하였으며, 형성된 입상슬러지의 미생물학적 특성조사에는 SEM(scanning electron micros-

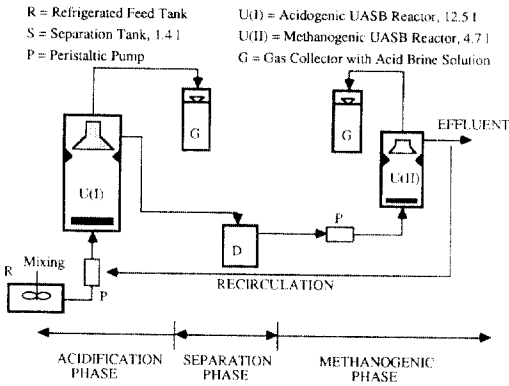


그림 1. 이상 UASB 공정의 흐름도

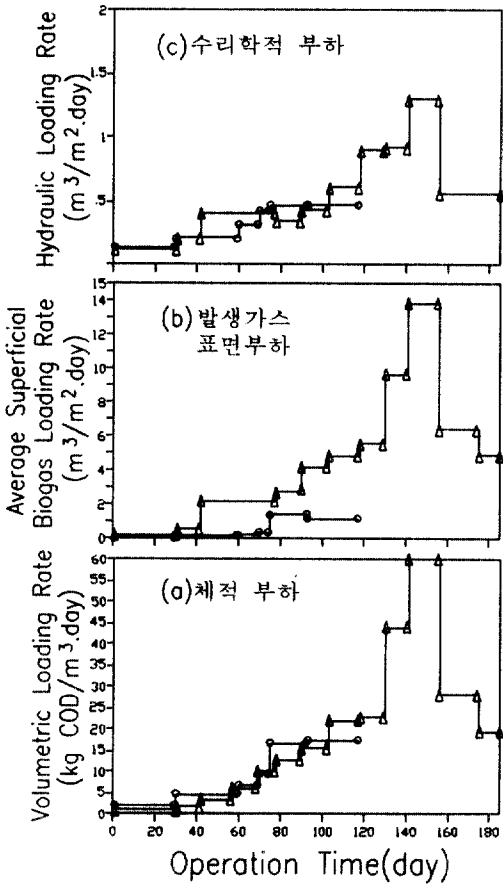


그림 2. 운전시간에 따른 부하율의 변화
 (○) Acidogenic UASB Reactor
 (△) Methanogenic UASB Reactor

py)을 사용하였다. 각 시료는 SEM과 TEM관찰을 각각 3, 2회씩 실시하였다.

SEM(Hitachi S-450)실험에서는 0.1% cacodylate bufer용액(pH=7.4)에서 1% paraformaldehyde와 1% glutaraldehyde로 2시간 동안 고정시킨 다음, 다시 2시간 동안 1.33% osmium tetroxide로 고정시켰다. 그 다음 ethanol로 탈수시킨 후 critical point drier(Hitachi HCP-2)로 건조시키고 금도금을 한 후 관찰하였다. TEM(Phillips CM-100)실험은 SEM과 같은 방법으로 고정시킨 다음 propylene oxide로 대체된 ethanol로 탈수시켰다. 그리고 propylene oxide와 epoxy resin혼합액(1:1)에 18시간 동안 담근 후 35°C, 45°C, 60°C에 각각 6, 12, 24시간 가열하였다. 50~60nm두께로 자른 시편을 uranyl acetate와 lead citrate로 이중 염색하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1 슬러지 입상화

주정폐액을 이상소화로 처리한 두 반응조에서는 색과 형태학적 구조가 다른 두 종류의 입상슬러지가 형성되었다. 그림 2는 전체 운전기간 동안에 두 반응조에 적용된 유기부하, 수리학적 부하, 그리고 발생가스 부하율을 나타낸 그림이다. 산형성조에서는 운전 90일 경에 2~3mm의 노란색 입상슬러지가 반응조의 하부에서 형성되었으며, 이때 유입폐수의 SS농도는 4.1g/l이었고, COD부하와 발생가스 부하율은 16.5kg/m³·day 및 1.4m³/m²·day이었다. 메탄형성조에서는 운전 120일이 지난 COD부하 22kg/m³·day에서 직경 1~2mm의 검은색 입상슬러지가 발견되었다. 이때 메탄형성조의 수리학적 부하와 발생가스 부하율은 각각 0.9m³/m²·day, 5.6m³/m²·day이었다.

입상슬러지의 형성에 영향을 주는 인자는 너무나 다양해서 입상화 과정을 정확히 정량화하기가 어렵지만, 입상화에 대한 수리학적 부하와 발생가스 부하율의 영향은 비교적 많은 연구되었다⁽⁷⁾. 표 1은 입상슬러지가 관찰되기 시작할 때의 운전조건으로 폐수의 종류에 따라 차이가 있지만⁽¹²⁾, 본 실험의 메탄형성조에서 관찰된 발생가스 부하율 결과와는 유사하다. 그러나, 산형성조의 수리학적 부하와 발생가스 부하율은 표 1의 값보다 훨씬 작는데, 이는

copy)과 TEM(transmission electron microscop-

표 1. 입상슬러지 출현시기의 반응조 운전조건[12]

유입기질	식종 슬러지	COD부하율	수리학적 부하(m/d)	발생가스 부하(m/d)	입상슬러지 형성기간(d)	참고문헌
VFA	DSS	4.0kg/m ³ ·d	1.0	-	55	[6]
Glucose	DSS	0.3kg/kg VSS.d	6~10.3	3.6~7.2	-	[20]
VFA	DSS*	0.25~0.3kg/m ³ ·d	-	1.6~3.9	84	[17]
VFA+Glucose	FCM*	12.0kg/m ³ ·d	0.54	10	28	[9]

주) *Thermophilic condition

VFA(Volatile Fatty Acid), DSS(Digested Sewage Sludge), FCM(Fresh Cow manure)

산형성 반응의 최종산물이 가스상이 아니고 약간의 CO₂와 H₂ 이외는 대부분 유기산으로 구성된 액상이기 때문이다

산형성 입상슬러지는 외형상 메탄조 입상슬러지보다 약간 컸지만, 침강속도와 강도는 더 작았다. 그리고, 산형성 입상슬러지는 황 환원반응과 유기산 등으로 인하여 심한 악취를 띠었다.

3-2 산형성조 입상슬러지의 미생물학적 특성

사진 1과 2는 약 190일간의 실험이 끝난 후 10개월 동안 냉장고에 보관한 산형성 및 메탄형성 입상슬러지를 전자현미경으로 관찰한 결과이다. 사진 1(a)와 2(a)에서 보는 바와 같이 두 종류의 입상슬러지는 형상이 일정하지 않고 표면이 거칠어 보이며, 가스와 기질의 전달경로로 추측되는 기공이 산재해 있음을 알 수 있다. 이러한 기공은 SEM 관찰을 위한 시료준비 과정에서 생길 수 있으나, 메탄조 입상슬러지의 표면에 더 많은 기공이 존재하는 점과 두 반응조에서 입상슬러지가 관찰될 때 발생가스 표면부하율이 크게 차이가 났던 점을 고려하면 기공의 상대적인 면적은 발생가스 표면부하율, 즉 발생가스의 양에 무관하지 않은 것을 알 수 있다.

산형성 입상슬러지의 표면을 확대한 사진 1(b)와 (c)로부터 산형성 입상슬러지는 긴 고리로 연결된(long filamentous) 큰 rod형과 짧고 통통한(short plump) rod형 bacteria, 그리고 다양한 크기의 coccus형 bacteria로 구성되어 있음을 알 수 있다. 사진 1(d)는 산형성 입상슬러지의 표면에 매달려 있는 미생물 덩어리로, 주로 coccus형과 rod형 bacteria로 구성되어 있다. 그리고, 지역적으로는 vibrio형과 coccus형 bacteria가 pili모양의 부속

기관과 서로 엉켜있는 모습이 발견되었다(사진 1(e)). 그러나, 어떤 미생물이 이러한 pili모양의 부속기관을 가지고 있는지는 분명하지 않다. 한편, 작은 고형물이 산형성 입상슬러지에 포획되어 있는 모습이 사진 1(b)의 좌측 상단과 사진 1(f)에 확대되어 있다. 유입폐수내에 존재하던 부유물질인 것으로 추측되는 이 고형물의 표면에는 rod형과 coccus형 bacteria가 부착되어 있고 pili형 부속기관이 발달되어 있으며, 고형물의 표면이 찢겨진 것으로 보아 분해가 진행되고 있는 과정으로 사료된다. 따라서 이러한 pili형 부속기관은 bacteria와 bacteria뿐만 아니라, bacteria와 고형물간의 부착을 촉진시켜 슬러지의 입상화에 기여하는 것으로 추측된다. 산형성 입상슬러지의 단면을 보여주는 TEM사진은 다양한 형태를 갖는 미생물이 무질서하게 분포되어 있음을 보여준다(사진 1(g)). 사진 1(h)는 산형성 입상슬러지에서 관찰되는 대표적인 rod형 bacteria를 확대한 것으로 우측 미생물은 거의 완전한 세포벽과 원형질을 갖는 반면에 좌측 미생물의 세포벽은 부서져 있고 원형질도 우측 미생물과 다른 상태임을 보여준다.

반응조내의 pH가 6.0이하로 유지되었던 본 실험의 산형성조에서 형성된 노란색 입상슬러지의 미생물학적 구조는 Brummeler등⁽¹³⁾이 VFA를 기질로 pH6에서 배양한 입상슬러지 사진과는 형태학적 특성이 판이하게 다르다. 오히려 사탕수수 제조공장의 당밀폐수를 AFB(Anaerobic Fluidized Bed)반응조로 처리한 Denac 등⁽¹⁴⁾의 실험에서 여재표면에 형성된 미생물막의 표면과, 미생물의 자기고정화에 대해 연구한 Harada⁽¹⁵⁾의 실험 가운데 전분과 슈크로스(sucrose)에서 배양된 입상슬러지의

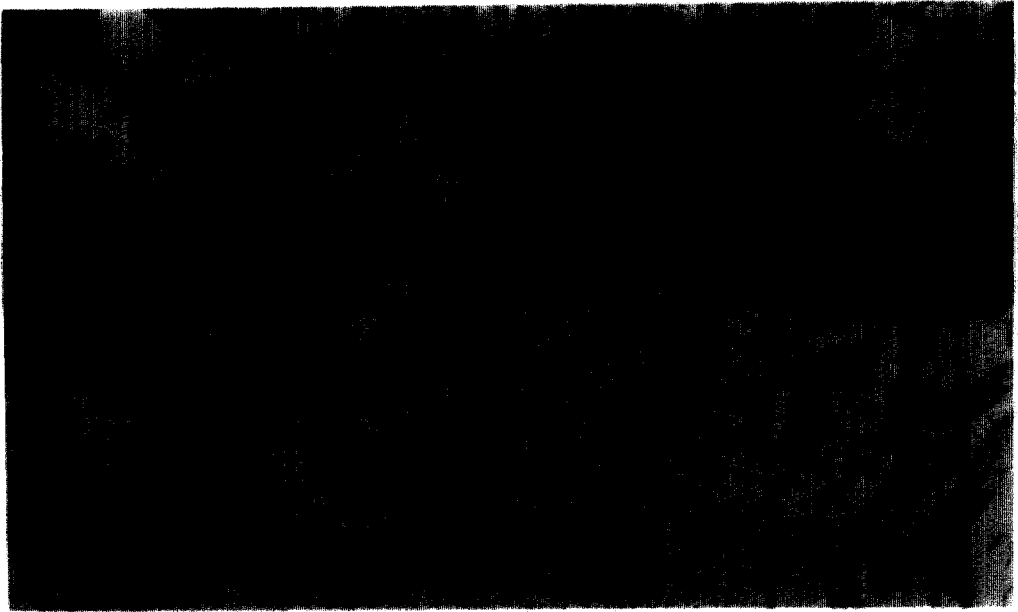


사진 1. 산형성 입상슬러지의 형태학적 구조, (a) - (f) : SEM. (g) - (h) : TEM

표면에서는 본 실험의 산형성조 입상슬러지에서 주종을 이루는 미생물과 비슷한 rod형 미생물과 pili-형 부착기관을 관찰할 수 있다. 따라서, 사진 1에서 살펴본 결과와 산형성조의 운전결과로부터 산형성 입상슬러지는 기존의 문헌에서 보고된 대표적인 입상화 기작, 즉 filamentous형 메탄균의 network형성에 중점을 둔 *Methanothrix* spp.형이나 sarcina형 메탄균의 덩어리 형상에 중점을 둔 *Methanosarcina* spp.형 입상슬러지와는 전혀 다른 자기고정화 기작으로 입상화되었음을 짐작할 수 있다.

한편, pH 6이하의 운전조건, 최대 3.9g HAc/1. day의 산형성율, 그리고 낮은 가스생성율을 고려하면 본 실험의 산형성조 입상슬러지는 글루코스나 전분을 단상(single-phase)으로 처리한 UASB 반응조로부터 형성된 입상슬러지에 대하여 설명이 가능했던 미생물군의 공간적 분포론-입상슬러지의 표면에는 산형성균이, 내부에는 메탄형성균이 공존한다는 이론¹⁵⁾으로는 설명이 불가능하다. 그러므로 본 실험에서 관찰된 산형성 입상슬러지는 영양물질 요구도와 물질대사 특성이 유사한 산형성균만으로 구성되었음을 알 수 있다.

3-3 메탄형성 입상슬러지의 미생물학적 특성

산형성조 유출수를 처리한 메탄형성조에서 배양된 입상슬러지의 형태학적 특성은 전분공장⁸⁾과 설탕공장¹⁶⁾폐수를 처리한 UASB 반응조에서 관찰된 입상슬러지와 유사한 결과를 보여준다. 사진 2(b)에서 보는 바와 같이, 메탄조 입상슬러지에는 형태학적으로 *Methanothrix* spp.와 동일한 filamentous bacteria가 주종을 이루고 있으며, 이러한 *Methanothrix* spp.로 구성된 거미줄 모양의 network내에 rod형과 coccus형을 포함하는 다양한 종류의 bacteria들이 포획되어 있음을 알 수 있다. 한편, 지역적으로는 짧은 *Methanothrix*형 bacteria로만 구성된 microcolony가 발달되어 있었다(사진 2(c)). 사진 2(d)와 (e)는 각각 지경 0.5um 정도의 cocci와 *Methanothrix* spp.의 전형적인 특징을 보여주며¹⁷⁾, 사진 2(f)는 메탄형성 입상슬러지가 주로 *Methanothrix* spp.로 이루어져 있음을 보여주는 TEM사진이다. 사진 2(g)와 (h)는 각각 *Methanothrix* spp.의 단면과 *Methanosarcina* spp.로 구성된 작은 덩어리의 단면을 보여준다.

한편, 본 실험의 메탄형성조에서는 표 1에서 보는 바와 같이 합성 VFA를 기질로 사용한 경우보다 상당히 늦게 입상슬러지가 형성되었는데, 이는

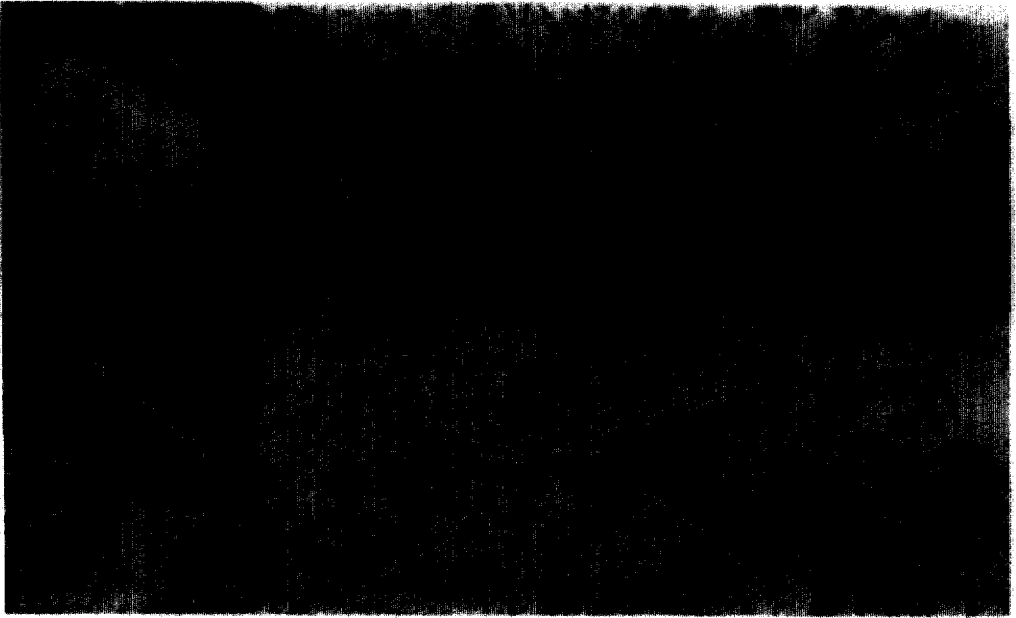


사진 2 메탄형성 입상슬러지의 형태학적 구조, (a)–(e) : SEM, (f)–(h) : TEM

실제폐수의 특이성으로 인해 미생물이 적응하는데 시간이 많이 걸렸기 때문인 것으로 추측된다.

4. 결 론

현재까지의 입상슬러지에 관한 연구는 주로 메탄형성균에 국한되어 왔기 때문에 산형균에 대해 알려진 바가 거의 없다. 따라서, 본 연구의 산형성 입상슬러지의 형태학적 연구에서 제시한 개개 산형성균의 명명이 쉽지 않다. 하지만, 기존의 문헌에 많이 보고된 메탄형성균과 비교해 보면, 산형성균은 외형과 TEM촬영시 염색된 원형질의 특성이 메탄균과 매우 다르다는 것을 알 수 있다. 그리고, 산형성 및 메탄형성 입상슬러지의 단면을 비교하면, 메탄형성 입상슬러지의 단면에서 미생물과 FeS 등의 금속으로 추정되는 검은색 침전물이 더 많이 발견되었는데, 이러한 결과가 앞서 언급한 두 입상슬러지의 강도와 침강속도 차이를 초래한 것으로 사료된다. 한편, 두 입상슬러지에서는 세포벽과 원형질이 확실히 구별되는 완전한 미생물 이외에 죽은 미생물로 추정되는 빈 세포가 관찰되었는데, 이는 장기간 보존으로 인한 분해나 비루스(virus)등의 침입⁸⁾에 의한 것으로 추측된다.

주정폐액을 이상 UASB공법으로 처리한 본 실험에서 형성된 산형성 및 메탄형성조 입상슬러지를 SEM과 TEM 으로 관찰하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 4.1g/l의 부유물질을 함유하는 주정폐액을 처리한 산형성조에서는 운전 90일경에 2~3mm의 노란색 입상슬러지가 형성되었으며, 이때 반응조의 COD부하와 발생가스 부하율은 각 16.5kg/m³day와 1.4m³/m²day이었다.

2. 메탄형성조에서는 운전 120일이 경과한 COD 부하 22kg/m³day, 수리학적 부하 0.9m³/m²day, 그리고 발생가스 부하율 5.6m³/m²day에서 1~2mm의 검은색 입상슬러지가 형성되었다.

3. 산형성조 입상슬러지는 주로 긴 고리로 연결된(long filamentous)큰 rod형 bacteria, 짧고 통통한(short plump) rod형 bacteria, 그리고 다양한 크기의 coccus형 bacteria로 구성되었으며, vibrio형 bacteria와 pili형 부착기관도 발견되었다. 반면에, 메탄형성조 입상슬러지는 *Methanotrix* spp.의 network내에 coccus형과 rod형을 포함하는 다양한 bacteria가 포획되어 있었으며 *Methanosarcina* spp.로 구성된 작은 덩어리도 발견

되었다.

4. 혐미경관찰 결과와 산형성조의 운전결과로부터 산형성조 입상슬러지는 기존의 문헌에서 보고된 *Methanothrix* spp.형이나 *Methanosarcina* spp.형 입상슬러지와는 다른 자기고정화 기작으로 입상화 되었을 뿐만 아니라, 영양물질 요구도와 물질대사 특성이 유사한 산형성균만으로 구성된 것으로 사료된다. 이러한 결과는 기존의 혐기성 폐수처리의 적용영역을 확대시킬 수 있는 새로운 계기를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

5. 산형성조 및 메탄조 입상슬러지는 냉장상태에서 10개월 이상 보존이 가능하였다. 따라서 이들 냉장상태로 보존된 입상슬러지가 충분한 활성을 가질 수 있다면 UASB공법은 농산물 가공공장 같이 계절적으로 가동되는 산업체에서 효과적으로 이용될 가능성이 있는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 동력자원부 대체에너지연구의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 준 동력자원부에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Lettinga G., Velsen A. F. M. et al. "Use of the Upflow Sludge Blanket(USB) Reactor Concept for Biological Wastewater Treatment, Especially for Anaerobic Treatment" *Biotechnology and Bioengineering*, 22, 699~734, 1980.
2. Lettinga, G. and Vinken, J. N. "Feasibility of the Upflow Anaerobic Sludge Blanket(UASB) Process for the Treatment of Low-Strength Waste" *Proceeding of the 35th Purdue Industrial Wastewater Conference*. 635~634, 1980.
3. Wilkie, A. and Colleran, E. "Microbiological Aspects of Anaerobic Digestion" *Proceeding of the 2nd Anaerobic Treatment of Industrial Wastewater, Chicago, Illinois*, 37~50., 1986.
4. Vigneswaram, S., Balasuriya, B. L. N and Viraraghavan, T. "Anaerobic wastewater treatment-attached growth and sludge blanket process." *Environmental Sanitation Information Center, Bangkok, Thailand, August*, 1986.

5. Colleran, E. "Report on the Technological Aspects of Granulation" *Proceeding of the GASMAT Workshop, Lunteren, Netherlands*, 237~240, 1988.
6. Hulshoff Pol, L. W., de Zeeuw, W. J., Velzeboer, C. T. M and Lettinga, "G. Granulation in UASB-Reactors" *Water Science and Technology*, 291~304, 1983.
7. de Zeeuw, W. J. and Lettinga, G. "Acclimation of Anaerobic Sludge for UASB Reactor Start-up" *Ph.D. Thesis, Agriculture University of Netherlands*, 1984.
8. Dubourguier, H. C., Prensier, G., Samain, E. and Albagnac, G. "Granular Methanogenic Sludge" *Energy from Biomass (Elsevier Applied Science Publishers)*, 542~546, 1985
9. Wiegant, W. M. and Lettinga, G. "Thermophilic Anaerobic Digestion of Sugars in Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors" *Biotechnology and Bioengineering*, 27, 1603~1607, 1985.
10. Guiot, S. R., Gorur, S.S. Bourgue, D. and Samson, R. "Metal Effect on Microbial Aggregation During Upflow Anaerobic Sludge Bed-Filter(UBF) Reactor Start-up" *Proceeding of the GASMAT Workshop, Lunteren, Netherlands*, 187~194, 1987.
11. Dinopoulou, G., Rudd, T., and Lester, J. N. "Anaerobic acidogenesis of a complex wastewater : I. The influence of operational parameter on reactor performance." *Biotechnology and Bioengineering*, 31, 958~968, 1988.
12. 신항식, 백병천, 배병욱 등 "혐기성 입상슬러지 최적화 연구" (주)대우기술연구소 최종보고서, 125p. 1990.
13. Brummeler, E. T. et al. "Methanogenesis in an Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor at pH 6 on an Acetate-Propionate Mixture" *Applied and Environmental Microbiology*, 49, 1471~1477, 1985.
14. Denac, M. and Dunn, I. J. "Packed-and Fluidized-Bed Biofilm Reactor Performance for Anaerobic Wastewater Treatment" *Biotechnol-*

- ogy and Bioengineering, 32, 159~173. 1988.
15. Harada, H. "Self-immobilization Mechanism of Methanogenic Sludge Consortia in UASB Reactor" IAWPRC's Asian Workshop on Anaerobic Treatment. New Process(7), Bangkok, Thailand, 1989.
 17. Wiegant, W. M. and de Man, A. W. A. "Granulation of Biomass in Thermophilic Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactors Treating Acidified Wastewaters" Biotechnology and Bioengineering, 28, 718~727, 1986.
 18. Prensier, G., Roustan, T. L., Dubourguier, H. C. and Albagnac, G. "Presence of viruses and other potential bacterial predators in granular methanogenic sludges" Proceeding of the GASMAT-workshop, Lunteren, Netherland, 96~101, 1988.
 19. 신항식, 배병옥, 백병천, "이상 UASB공정을 이용한 주정폐수의 혐기성소화" 대한토목학회 논문집, 제 10권 4호, 185~192, 1990.
 20. Wu, W. M., Hu, J. C. and Gu X. S. "Properties of Granular Sludge in Upflow Anaerobic Sludge Blanket(UASB) Reactors and Its Formation" In : Anaerobic Digestion 1985, 339~350, Guangzhou, China, 1985.

(接受 : 1991. 2. 4)