

# UASB 공법에 있어서 반응조의 형상변화에 따른 입상슬러지의 특성에 관한 연구

## The Characteristics of Biopellet Produced Upon Reactor Configuration in UASB System

민경석\* · 안영호\*\*

Min, Kyung Sok · Ahn, Young Ho

### Abstract

Physicochemical and morphological characteristics of biopellets produced in "control" and modified UASB reactor were investigated to compare the reactor performance with regard to the hydrogen partial pressure. The characteristics of biopellet produced in modified UASB reactor operated with high hydrogen partial pressure were better than those of "control" reactor operated with relatively lower hydrogen partial pressure, therefore the hydrogen partial pressure effected greatly on the formation and stability of the biopellet. Furthermore, pellets from the UASB system with modified settler showed a better settleability and biomass holding capacity. The chemical composition of biopellet was distinctively different from that of common bacterial formula,  $C_5H_7O_2N$ . Biopellets was composed the large fraction of nitrogen in comparison with common anaerobic microbes. These results implicated the existence possibility of polypeptide-type extracellular polymer. The morphological characterization with SEM showed that microorganisms observed at surface of biopellet produced in modified UASB reactor operated with high  $P_{H_2}$  condition were very similar in shape and size to the *Methanobrevibacter arboriphilus*- $H_2$  utilizing methanogen. The microorganisms was distinguished from those of "control" reactor operated with low  $P_{H_2}$  condition. From these results, it could be explained the hydrogen partial pressure effects on pelletization mechanism.

### 요 지

본 연구에서는 UASB 반응조의 형상변화에 따른 입상슬러지의 물리·화학적 및 형태학적인 특성이 조사되었다. 또한 반응조내의 수소분압의 크기에 따른 반응조운전의 안정성이 조사되었다. 수소분압이 높게 유지된 수정개발된 UASB 반응조의 경우가 상대적으로 수소분압이 낮게 유지된 일반적인 UASB 반응조의 경우에 비해 입상슬러지의 침전성 및 미생물보유능이 더 우수하게 나타났다. 입상슬러지의 형성과 그 안정성에 수소분압이 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 입상슬러지의 화학적 조성식은 일반적인 UASB 반응조와 수정개발된 UASB 반응조가 각각  $C_7H_{12}O_{4.6}N$ 과  $C_5H_6O_3N$ 으로, 일반적인 미생물의 경험식인  $C_5H_7O_2N$ 과는 상이하게 나타났다. 특히 수정개발된 UASB 반응조의 경우 입상슬러

\* 정회원 · 경북대학교 공과대학 부교수

\*\* 정회원 · 경북대학교 대학원 박사과정 수료

지내에 질소성분이 일반적인 혐기성 미생물보다 높게 나타나, 입상슬러지의 발생기작으로서 polypeptide계 체외폴리머의 존재가능성을 보여주고 있다. 전자현미경을 이용한 형태학적 특성조사결과, 일반적인 반응조의 경우와는 달리 수소분압이 높게 유지된 수정개발된 UASB 반응조의 경우 입상슬러지의 표면에서는 *Methanobrevibacter arboriphilus*와 같은 크기와 형태를 한 수소이용메탄균의 성장이 다발을 이루며 관찰되었는데, 이러한 현상은 입상슬러지의 형성 메커니즘을 뒷받침해주고 있다. 우수한 입상슬러지의 형성을 위해서는 상대적인 수소분압의 크기에 따른 효과적인 상분리가 이루어져, acetogens과 수소이용메탄균들간의 공생관계가 잘 유지되도록 해주어야 할 것으로 사료된다. 수정개발된 UASB 반응조가 일반적인 UASB 반응조에 비하여 수소이용메탄균의 성장에 더욱 효과적인 환경을 제공하는 것으로 판단되며, 입상슬러지의 형성과 반응조전체의 유기물질 제거효율 뿐만 아니라, 운전의 안정성 측면에서도 더 우수한 것으로 사료된다.

## 1. 서 론

UASB(Upflow Anaerobic Sludge Bed)공법에 있어서 양호한 입상슬러지의 형성은 매우 중요한 설계 및 운전인자로 인식되고 있는데, 이러한 입상슬러지의 형성과정과 그 특성은 사용되는 기질의 특성과 반응조의 형상 및 운전조건에 따라 매우 상이하게 나타나고 있다.

입상화(pelletization/granulation)의 발생기작에 따른 많은 가설중에서도 가장 일반적이고도 공통적인 것은 체외폴리머(extracellular polymer : ECP)의 형성에 관한 것인데, 이는 수소이용메탄균( $H_2$  utilizing methanogens)인 *Methanobacterium* Strain AZ의 활동상에 따른 것으로 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 특히 이러한 수소이용 메탄균은 propionic acid를 분해하는 미생물과 함께 공생관계(syntrophic relationship)를 유지하여 상승효과를 유발하는데, 그 원인은 아직 명확히 규명되지 않고 있다.<sup>(2)</sup> Zehnder 등<sup>(3)</sup>은 이러한 수소이용메탄균이 주로 장미다발모양(rosette-type cluster)으로 성장하며, 다량의 아미노산을 배출하는 것으로 보고하였다. Dolfing<sup>(4)</sup>은 UASB반응조에서 생화학적인 응결체(biochemical conglomerates)로 형성되는 입상슬러지를 외부형상별로 나누어 크게 세 종류로 분류하였는데, 즉 느슨한 구조로 덩어리를 이루고 있는 응결물(floculants, flocs)과, floc보다 구조가 더 잘 형성된 침전성이 우수한 응결물(pellets) 그리고 과립상(granular appearance)의 구조를 가진 응결물(granules)형태들로 구분하였다. 탄수화물계의 폐수를 처리한 Lettinga 등<sup>(5)</sup>과

Ross<sup>(6)</sup>의 실험에서는 조그마한 과립상의 슬러지가 형성되었고, 올리브유 제조공장폐수를 처리한 Boari 등<sup>(7)</sup>의 연구에서는 일정한 형태의 부드러운 슬러지가 형성되었으며, 콩깍질처리폐수(bean blanching w/w)를 처리한 경우인 van den Berg 등<sup>(8)</sup>의 연구에서는 느슨한 구조의 응결물형태를 가진 슬러지가 관찰되었다. 입상슬러지의 물리적특성은 Dolfing 등,<sup>(4)</sup> Hulshoff Pol 등<sup>(9)</sup>과 Ross<sup>(6)</sup>에 의해 입상슬러지의 크기, 밀도, 침전속도 및 슬러지보유능(sludge holding capacity) 등의 관점에서 연구되었고, Grotenhuis 등<sup>(10)</sup>은 입상슬러지의 크기에 미치는 기질의 농도영향을 언급하였다. 입상슬러지의 화학적조성은 Dolfing<sup>(4)</sup>에 의해 연구되었는데, 특히 Coenzyme F420과 체외물질로 존재하는 탄수화물의 양등이 측정되었다. 한편 Takashi 등<sup>(11)</sup>은 열처리된 슬러지의 개량액을 처리하여 입상슬러지의 C : N : P의 비를 측정하였으며, 입상슬러지의 형태학적인 특성을 조사한 Kosaric 등<sup>(12)</sup>은 저부하에서 느슨한 구조의 내부가 비어있는 입상슬러지(hollow granule)가 형성되었다고 하였다. 또한 전자현미경의 조사에서 이러한 입상슬러지의 대부분은 *Methanotrix*종과 *Methanosarcina*종 그리고 *Methanococcus*종 등으로 구성되어 있는 것으로 알려져 있으나,<sup>(13,14)</sup> 입상슬러지의 구조내에서의 이러한 미생물들의 역할은 아직 명확하게 밝혀지지 않은 상태이다.

본 연구는 UASB 반응조의 형상변화에 따른 반응조의 안정성과 반응생성물의 생화학적 거동특성에 대한 연구<sup>(15)</sup>와 연계하여 수행되었는데, 반응조의 형상변화에 따른 입상슬러지의 특성을 크게 물리적,

화학적 및 생물학적(특히 형태학적) 측면으로 구분하여 규명하고, 각 반응조의 운전성과 입상슬러지의 안정성을 입상슬러지의 특성측면에서 비교·검토하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험재료

본 실험에서 조사된 입상슬러지는 실험실규모의 UASB 반응조, 즉 일반적인 UASB 반응조(A 반응조)와 baffle과 침전조가 크게 설치된 수정개발된 UASB 반응조(B 반응조)의 슬러지 bed 층의 활성지역(active zone)으로부터 채취되었는데, A 반응조와 B 반응조의 형상은 그림 1과 같다. 유입폐수로는 sucrose를 이용한 합성유기성폐수가 이용되었는데, 미생물의 성장을 위하여 적당량의 미량 영양소가 공급되었다.

그림 2에는 두 반응조의 운전결과가 요약되어 있는데, 여기서 유전방향에 따른 반응생성물의 농도분포곡선 평가는 약 11 Kg COD/m<sup>3</sup>/d의 부하율에서 이루어진 것이다. 유기물의 제거나 Biomass의 보유능에 대한 결과는 그림 2에 나타난 바와 같이 B 반응조에서 더 우수하게 나타나고 있으며, 보다

상세한 내용은 앞선 연구결과<sup>(15)</sup>에 나타나 있다. 목표부하율로 선정된 11 Kg COD/m<sup>3</sup>/d의 부하율에서, 일반적인 UASB 반응조와 수정개발된 UASB 반응조는 반응조의 특성에 따라서 하부슬러지 bed층의 수소분압크기가 각각 10<sup>-4.1</sup> atm 이하와 10<sup>-3.7</sup> atm 이상으로 서로 상이하게 유지되었는데,<sup>(15)</sup> 이로 인하여 두 반응조에서 형성된 입상슬러지는 그 특성이 매우 상이하게 나타났다. 본 연구에서는 보다 양호한 모양의 입상슬러지가 형성된 수정개발된 UASB 반응조에서 채취된 입상슬러지를 주 연구대상으로 선정하였다. 본 시료의 채취당시 두 반응조는 동일한 운전조건으로 유지되었는데, 유기물질 부하율은 11 Kg COD/m<sup>3</sup>/d였으며, 반송율과 유체의 상향유속은 각각 7배와 약 2.1 cm/min이었다. 또한 두 반응조에서 채취된 입상슬러지의 활성도(specific biomass activity)는 A 반응조와 B 반응조의 경우 각각 0.74~1.02와 0.94~1.26 mg CH<sub>4</sub>(as COD)/mg-VSS/d 정도의 범위로 B 반응조의 경우가 더 우수하게 나타나고 있었다.

### 2.2 실험 및 분석방법

본 연구에서는 입상슬러지의 특성을 물리적, 화학적 및 형태학적 특성으로 구분하여 조사하였는

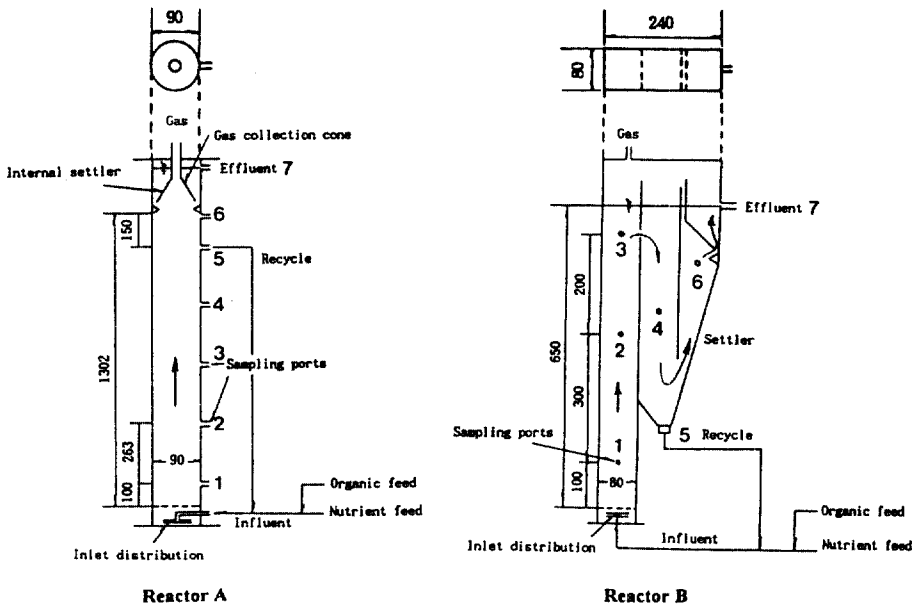


그림 1. Lab scale UASB 반응조의 형상(단위 : mm).

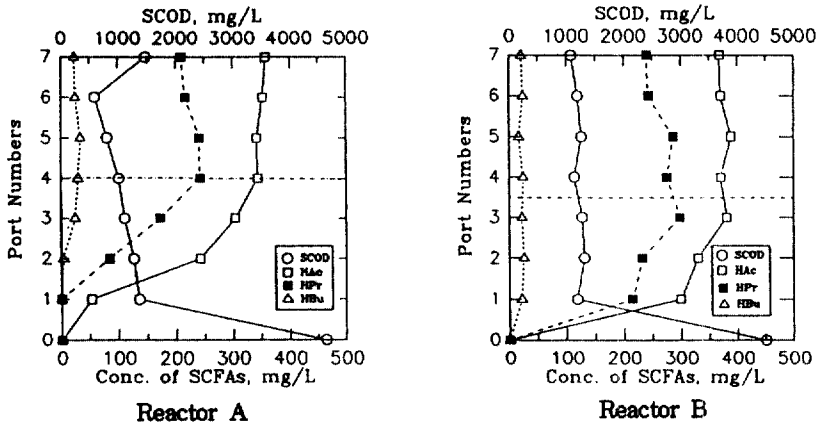
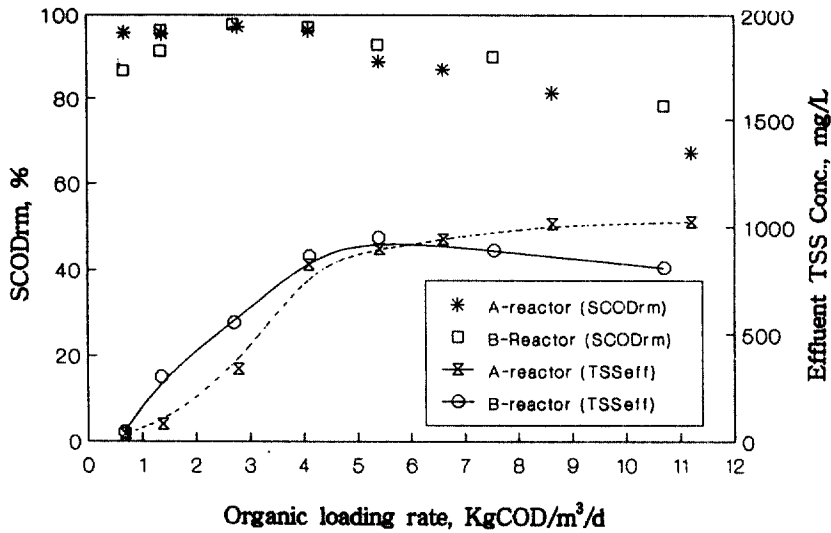


그림 2. Lab scale UASB 반응조의 운전결과.

(a) 유기물질 부하율에 따른 SCOD 제거효율과 유출수의 TSS 농도.

(b) 반응조의 유선방향에 따른 반응생성물의 농도분포(COD<sub>inf</sub>=4,500 mg/l, Q<sub>inf</sub>=20 l/d)

데, 물리적 특성조사에 있어서는 입상슬러지의 SVI, 미생물보유능(biomass holding capacity), 입경, 비중 및 침전속도 등이 측정되었다. 본 조사에서는 0.5 mm 이하의 부드럽고, 가벼우며, 작은 응결물들은 제외되었는데, 입경은 슬러지의 bed층에서 약 10 ml 정도의 시료를 채취하여, 현탁액을 제외한 입상슬러지를 정밀자가 부착된 격자형판과 10~40배의 배율을 가진 광학현미경(Olympus Model CHS, U.S. A)을 이용하여 측정되었다. 또한 비중은 비중계를 이용하여 측정하였으며, 침전속도는 약 50 ml의 입상슬러지를 채취하여 약 1 m 높이의 water co-

lumn에 독립침전시켜 측정하였다. 이렇게 측정된 침전속도는 Stokes의 법칙과 Hulshoff Pol 등<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 침전속도식과 비교되었다.

화학적 특성조사를 위한 모든 분석은 기본적으로 Standard Methods<sup>(16)</sup>에 준하였는데, 탄수화물과 단백질은 각각 Herbert 등<sup>(17)</sup>과 Lowry 등<sup>(18)</sup>의 방법으로 측정되었으며, 원소분석기(Elemental Analyzer, MOD. 1106, Carlo Erba Strumentazione)에 의해 입상슬러지의 건조중량당 탄소, 수소, 질소 및 산소함량이 측정되었다. 생물학적 특성조사는 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM, Mo-

del : AKASHI, SS-130, JAPAN)에 의하여 입상슬러지의 형태학적 특성이 조사되었으며, 입상슬러지의 외부와 내부에서 성장하는 미생물의 외형상의 구조가 관측되었다.

### 3. 결과 및 분석

#### 3.1 물리적 특성

두 반응조의 슬러지 bed층에서 채취된 입상슬러지로부터 조사된 물리적 특성결과가 표 1에 나타나 있는데, 외형적인 입상슬러지의 모양으로 볼 때 A 반응조는 다소 손상된 형태를 하고 있었으나, B 반응조의 경우는 아주 조밀한 모양을 하고 있었다. SVI값과 VSS기준으로 표시된 미생물보유능(biomass holding capacity)을 보면, B 반응조의 경우가 각각 11.8~30.1 ml/gSS와 29~73 KgVSS/m<sup>3</sup> 정도로, A 반응조에 비해 약 40% 정도 높게 나타나고 있다. A 반응조에서 생성된 입상슬러지는 그 형상이 좋지 않아 크거나 침전속도의 측정이 어려웠으나, B 반응조의 경우는 형상이 조밀하여 측정되었는데, 침전속도가 최대 3.2 cm/min 정도였다. 동일한 크기를 가진 입상슬러지라도 침전속도는 다양한 크기로 나타났는데, 이는 같은 크기의 입상슬러지라도 그 밀도는 상당한 차이가 있기 때문인 것으로 사

료된다. 이러한 점은 Hulshoff Pol. 등<sup>(9)</sup>에 의해 언급되었듯이 입상슬러지의 생성과 사멸단계와도 관계가 있을 것으로 사료된다.

양호한 형태의 입상슬러지가 형성된 수정개발된 B 반응조의 경우에 한하여, Stokes의 법칙과 Hulshoff Pol. 등<sup>(9)</sup>에 의해 제안된 침전식을 이용하여 실측된 침전속도와 비중에 따른 입상슬러지의 등가 입경과 입경크기별 등가비중치를 산정하였는데, 그 결과가 표 1과 그림 3의 (a)와 (b)에 나타나 있다. B 반응조에서 생성된 입상슬러지의 입경측정치는 0.7~4.8 mm 정도인데, Stokes의 법칙과 Hulshoff Pol. 등<sup>(9)</sup>에 의한 계산치는 2.4~4.7 mm와 2.3~7.8 mm 정도의 범위를 보여, Stokes의 법칙에 의한 계산치가 실측치와 더 근접하는 것으로 나타났다.

입상슬러지의 전체 평균 비중은 수정개발된 B

표 1. 입상슬러지의 물리적 특성

Reactor	A	B
Visual Appearance	Fractured	Densed
SVI, mL/gSS	19.7~50.2	11.8~30.1
BHC*, KgVSS/m <sup>3</sup>	18.5~43.8	29.0~73.0
Settling Velocity, cm/min	N/A	0.8~3.2
Measured Diameter, mm	N/A	0.7~4.8
Equivalent Diameter, mm		
by Stokes' law	N/A	2.4~4.7
by Hulshoff Pol. et al.'s Eqn <sup>(9)</sup>	N/A	2.3~7.8
Specific Gravity		
by measurement	1.02	1.038
by Stokes' law	N/A	1.082
by Hulshoff Pol. et al.'s Eqn <sup>(9)</sup>	N/A	1.105

Note) \*: BHC, Biomass Holding Capacity  
N/A: Not Available

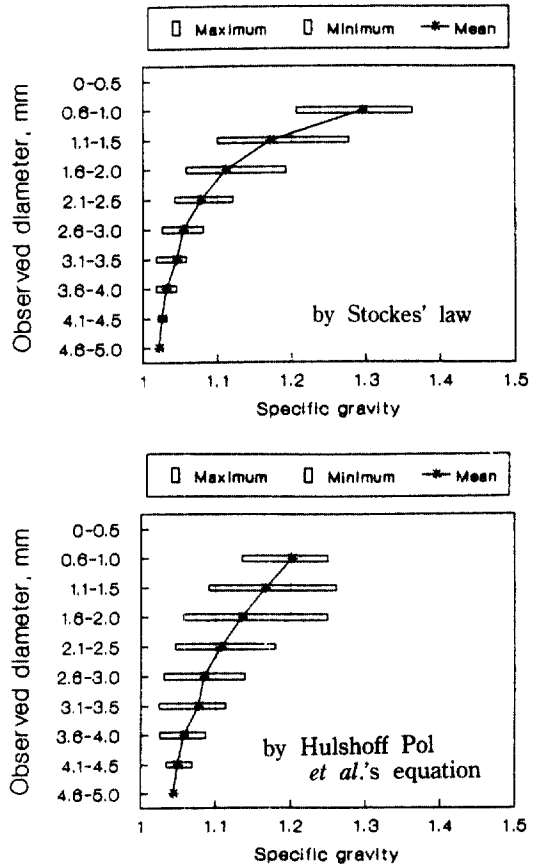


그림 3. 입상슬러지의 실측입경범위별 비중산정치(B 반응조).

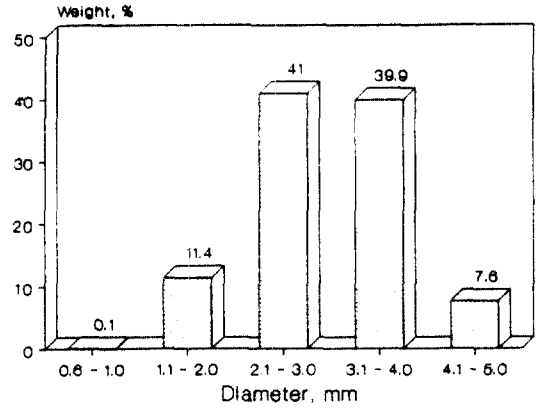
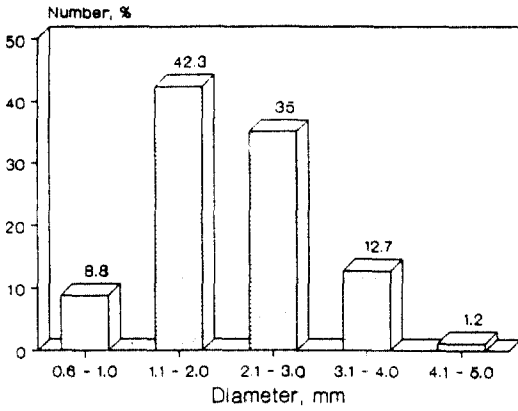


그림 4. 입상슬러지의 입경별 수량 및 중량백분율(B 반응조).

반응조의 경우 Stockes의 법칙과 Hulshoff Pol. 등<sup>(9)</sup>의 제안식을 적용시에 각각 약 1.082와 1.105 정도로 나타나고 있다. 이러한 계산치는 실측치인 1.038에 비해 높게 나타나고 있는데, 그 원인은 입상슬러지의 비중실측시에 입상슬러지의 내부에 존재하는 가스 성분에 의한 영향인 것으로 사료된다. B 반응조의 비중은 A 반응조의 경우와 비교할 때 다소 높게 나타나고 있다.

입경범위별 평균 비중은 그림 3에서와 같이 각각의 입경범위에 따라서 큰 폭으로 변화하고 있는데, 0.6~1.0 mm의 입경범위에서는 약 1.2~1.3 정도로 최대치를 보이고 있다. 대부분의 입상슬러지는 표면이 밝은 회색빛을 띄고 있는 반면에 이러한 입경범위를 가진 입상슬러지는 주로 검은색을 띄고 있었는데, 이러한 입상슬러지는 주로 작고도 고밀도인 입상슬러지의 핵(core)부분에서 관측되었다. 이러한 영향은 반응조내의 유체흐름의 전단력에 의한 물리적인 영향을 포함하여 입상슬러지의 생성 및 사멸단계와도 매우 관계가 있을 것으로 사료된다.

수정개발된 B 반응조의 슬러지 bed층 활성지역에서 채취된 입상슬러지의 중량백분율과 수량백분율이 결정되었는데, 그 결과가 그림 4에 나타나 있다. 수량백분율상으로는 1.1~2.0 mm 와 2.1~3.0 mm의 입경을 가진 입상슬러지가 각각 42.3% 및 35%로 대부분을 차지하였으나, 중량백분율로는 2.1~3.0 mm와 3.1~4.0 mm의 입경을 가진 입상슬러지가 각각 41.0%와 39.9%로 대부분을 차지하였으며, 4.1~5.0 mm 정도 크기의 입상슬러지는 약 8% 정도로

표 2. 입상슬러지의 화학적 특성

Reactor	A	B
mg COD/mgVSS	1.19~1.40 (1.31)	1.20~1.31 (1.25)
mg N/mg COD	0.061~0.085 (0.072)	0.082~0.095 (0.088)
Soluble (Protein/Carbohydrate) ratio	1.35~1.57	1.82~1.84
C:N:P	100:16.7:N/A	100:23.3:3.5
% Ashes(FSS/TSS)	7.1~13.7 (10.8)	10.5~14.8 (11.3)

Note) ( ): Mean Value  
N/A: Not Available

나타났다.

### 3.2 화학적 특성

각 반응조 하부활성지역의 입상슬러지를 채취하여 수행된 원소분석결과에 따르면 화학적 조성비는 A 반응조의 경우가  $C_7H_{12}O_{4.6}N$ , 수정개발된 B 반응조의 경우가  $C_5H_9O_3N$ 으로 나타나, 일반적인 미생물의 경험적인 화학식인  $C_5H_7O_2N$ 과는 다소의 차이를 보였으나, B 반응조의 경우가 더 근접함을 보였다. 이러한 미생물의 조성식을 이용하여 계산된 산소당량은 A 반응조와 B 반응조의 경우가 각각 1.21 mg-COD/mgVSS와 1.22 mgCOD/mgVSS으로, 표 2에 나타난 각 반응조 슬러지층의 평균실협값인 1.31과 1.25 mgCOD/mgVSS와 거의 유사하였다. 이는 일반

적인 미생물의 산소당량비<sup>(19)</sup>인 약 1.1~1.42 mg-COD/mgVSS의 범위내에 있으며, Sam-Soon 등<sup>(1)</sup>의 결과인 1.23 mgCOD/mgVSS와도 거의 유사한 결과를 보이고 있다.

입상슬러지의 평균 N/COD비는 A 반응조와 B 반응조가 각각 0.072와 0.088 mgN/mgCOD 정도로 나타났는데, A 반응조와는 달리 B 반응조의 경우에는 일반적인 미생물<sup>(19,20)</sup>값인 0.086 mgN/mgCOD 보다 다소 높게 나타났다. 이는 B 반응조에서 생성된 입상슬러지가 Sam-Soon 등<sup>(1)</sup>의 가설에서 이미 언급된 바와 같이 polypeptide계통의 체외폴리머를 다량 보유하고 있을 것으로 사료된다. 입상슬러지의 용존성 체외폴리머(soluble ECP)는 polypeptide 형태 이외에도 polysaccharide의 형태로도 존재가 가능하다. 입상슬러지내에 존재하는 탄수화물의 농도 모두가 유입기질중에서 분해되지 않은 부분이 아니라 입상슬러지에 의해 생성된 체외폴리머라고 가정할 경우, polypeptide계통과 polysaccharide의 형태의 용존성 체외폴리머의 비율은 용존성 단백질과 탄수화물의 비로 표시가 가능할 것이다. A 반응조와 B 반응조의 경우 용존성 단백질과 탄수화물의 비는 각각 1.35~1.57과 1.82~1.84 정도로, 이러한 결과 역시 입상슬러지내에 다량의 polypeptide계 체외폴리머의 존재가능성을 높여 주고 있다.

입상슬러지의 C : N : P 비율은 수정개발된 B 반응조의 경우 약 100 : 23.3 : 3.5 정도로 나타나, 일반적인 미생물의 경우<sup>(19)</sup>와 유사한 값을 보이고 있다. 일반적인 혐기성 소화슬러지의 경우<sup>(11)</sup>는 C : N : P의 비율이 약 100 : 9.0 : 6.4 정도로 알려지고 있는데, 이에 비해 본 반응조의 경우는 약 2배 이상의 질소를 보유하고 있는 것으로 나타났다. 인의 함량의 경우는 일반적인 혐기성 소화슬러지의 경우에 비해 약 1/2 정도인데, 이는 일반적인 혐기성 소화슬러지내에는 무기염상태로 존재하는 인(phosphates)의 함량이 높기 때문으로 생각된다.

재의 함량은 각 반응조의 슬러지 bed 층내에서는 크게 변동이 없는 것으로 나타나고 있다. A 반응조의 경우는 재의 함량이 약 7.1~13.7%(평균 10.8%) 정도였으며, B 반응조의 경우는 10.5~14.8%(평균 11.3%) 정도를 보여, 수정된 반응조의 경우가 비교적 높게 나타나고 있는데, 이는 민 등<sup>(15)</sup>의 실험결과에서와 같이 UASB 반응조에 baffle과 침전지를 설치

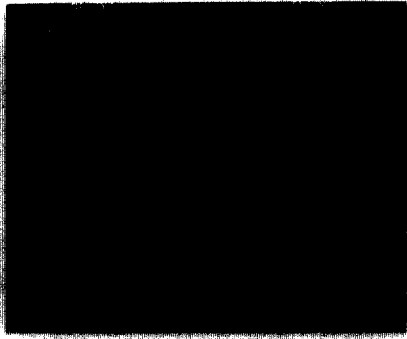
함으로 인하여 반응조내의 고형물보유시간이 길어졌기 때문으로 판단된다. 이러한 재의 함량은 일반적인 미생물의 건조중량당 무기물질 함량<sup>(20)</sup>인 10%에 매우 근접하게 나타나고 있다.

### 3.3 생물학적 특성

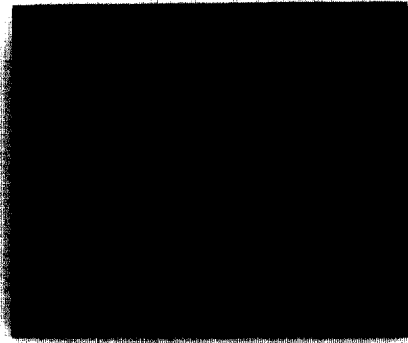
입상슬러지의 생물학적 특성중에서 특히 형태학적인 구조특성을 조사하기 위하여, 두 반응조의 활성지역에서 입상슬러지를 채취하였다. 이를 전자현미경(scanning electronic microscope)을 이용하여 입상슬러지의 외부 및 내부층의 표면을 관측하였는데, 그 결과가 그림 5에 나타나 있다. 전처리과정을 거친 입상슬러지의 단면은 각각 백색, 회색 및 검정색으로 색깔이 다른 2~3개의 층으로 이루어져 있음이 관측되었다.

사진 A-1은 상대적으로 수소분압이 높은 B 반응조의 상부활성지역에서 채취된 입상슬러지의 외형적인 형태가 나타나 있는데, 그 크기가 최소 3 mm 및 최대 5 mm 정도로 나타나고 있으며, 그 표면은 A-2에서 보는 바와 같다. 특히 주목할만한 것은 rod 및 filaments 형태의 *Methanothrix*와 수소이용메탄균( $H_2$  utilizing methanogens)의 군락으로 판단되는 큰 덩어리가 나타나고 있는데, 이러한 모양의 수소이용메탄균(*Methanobacterium* Strain AZ-공식적인 명칭은 *Methanobrevibacter arboriphilus*)을 Zehnder 등<sup>(21)</sup>은 장미덩쿨모양(rosette-type cluster)라고 명명하였다. 사진 A-3는 이러한 군락중의 한 송이를 초점으로 하여 촬영한 것인데, 사진에서 보는 바와 같이 크기가 약 3~5  $\mu m$  정도로 매우 밀집되어 있는 모습을 볼 수 있다.

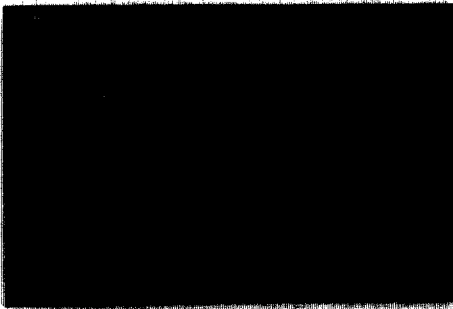
입상슬러지의 핵(core)부분인 사진 B-1은 약 1 mm 정도의 직경을 보이고 있다. 이러한 핵부분은 B 반응조에서 채취된 입상슬러지의 껍질층을 물리적인 전단력을 가하여 제거한 것으로, 반응조내에서 자연적으로 형성된 동일한 크기인 검은색 입상슬러지와 비교하였을 때 별 차이가 없는 외형을 띄고 있었다. 따라서 반응조내에서 존재하는 직경 약 1 mm 내외의 검은색을 띤 고밀도의 입상슬러지는 반응조내에서 인의 물리화학적 작용이나 다른 생화화학적 작용에 의해 생성된 것으로 판단될 수 있다. 또한 이렇게 탈리된 입상슬러지는 다른 입상슬러지에 비해 비중이 높아서 반응조내의 슬러지



A-1: Pellet taken from the high  $P_{H_2}$  zone (bar=1 mm)



B-1: Acetoclastic core part of the pellet shown in picture A-1 (bar=1 mm)



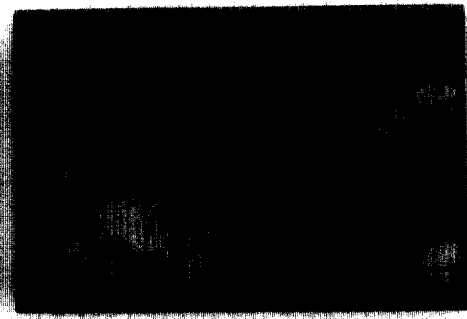
A-2: Outer surface of the pellet (bar=10  $\mu\text{m}$ )



B-2: Enlarged picture of B-1 (bar=10  $\mu\text{m}$ )



A-3: Enlarged picture of A-2 (bar=1  $\mu\text{m}$ )



C: Outer surface of pellet taken from the low  $P_{H_2}$  zone (bar=1  $\mu\text{m}$ )

그림 5. 입상슬러지의 SEM 사진.

Bed 층으로 쌓이게 되는데, 이러한 입상슬러지는 침전성은 양호하지만 재응결(reconglomerate)은 그리 쉽지 않은 것으로 관측되었다. 수소이용메탄균의 덩쿨모양은 입상슬러지 내부표면으로 들어갈수록 그 빈도가 점점 낮아져 사진 B-2에서 보는 바와 같이 핵(core)부분의 표면에는 rod 및 filaments 형태의

*Methanotrix*과 같은 종류와 함께 얽혀있는 모습을 볼 수 있다. 입상슬러지의 내부 핵의 표면에서보다 외부표면으로 나올수록 이러한 수소이용메탄균이 크게 밀집되어 있는 것은 외부로 나올수록 기질로부터 분해된 수소의 분압이 상대적으로 높게 유지된 때문인 것으로 사료된다. 결국 입상슬러지내의 미



생물학적 구성은 입상슬러지내의 상대적인 수소분압의 크기와 매우 깊게 관련되는 것으로 판단된다.

사진 C는 상대적으로 수소분압이 낮게 유지된 A 반응조의 하부활성지역에서 채취된 형상이 불규칙한 입상슬러지를 확대한 사진인데, 주로 구균(cocci)형태와 short rods 형태의 미생물들이 보이고 있으며, 또한 화살표에 나타난 것과 같이 체외포리머(ECP)로 판단되는 것에 의해 서로 엮여 있는 것을 볼 수 있으나, 수소분압의 크기가 상대적으로 높게 유지된 B 반응조의 경우인 A-3와 같은 군락은 관측되지 않았다. 이는 입상슬러지의 형성에 있어 수소분압의 크기가 중요한 역할을 하고 있음을 의미하는 것이다. 혐기성 반응에 관여하는 미생물중에서, 문헌상<sup>(13,14)</sup>에 나타나는 입상슬러지의 미생물학적 구성을 보면, 대체로 구형의 수소이용메탄균인 *Methanosarcina* 종, *Methanococcales* 종 등과 rod 및 filaments 형태의 acetogen인 *Methanothrix* 종들이다. 그러나 이러한 종류들의 성장은 대부분 수소분압의 크기와는 관련성이 낮은데, 본 연구결과에서는 *Methanobrevibacter* 종과 유사한, 특히 수소분압이 높은 상태에서 성장하는 미생물의 성장이 두드러지게 나타나며, 또한 이들의 성장으로 인하여 peptide계 체외폴리머의 발생이 관측되고 있다.<sup>(15)</sup> 그리고 이러한 미생물과 함께 내부핵 부분에서의 *Methanothrix* 종들의 성장이 입상슬러지의 깊이별로 각각 구별하여 나타난 점은 주목할 만하다.

상기의 특성을 종합하면, 보다 우수한 입상슬러지의 형성을 위해서는 상대적인 수소분압의 크기에 따른 효과적인 상분리가 이루어져 acetogens 와 수소이용메탄균들간의 공생관계가 잘 유지되도록 해주어야 할 것으로 사료되며, 또한 입상슬러지의 특성분석으로부터 조사된 UASB 반응조의 안정성 연구결과, 일반적인 UASB 반응조인 A 반응조보다 수정개발된 B 반응조가 수소이용메탄균의 성장에 더욱 효과적인 환경을 제공하는 것으로 나타났다. 따라서 수정개발된 B 반응조의 경우가 입상슬러지의 형성과 반응조전체의 유기물 제거효율 뿐만 아니라, 운전의 안정성의 측면에서도 더 우수한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

(1) 수소분압이 높게 유지된 수정개발된 UASB

반응조의 경우가 수소분압이 상대적으로 낮게 유지된 일반적인 UASB 반응조의 경우에 비해 입상슬러지의 침전성 및 미생물보유능이 더 우수하게 나타나, 입상슬러지의 형성과 그 안정성에 수소분압의 크기가 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다.

(2) 입상슬러지의 화학적 조성식은 일반적인 UASB 반응조와 수정개발된 UASB 반응조가 각각  $C_7H_{12}O_{4.6}N$ 과  $C_5H_9O_3N$ 으로, 일반적인 미생물의 경험식인  $C_5H_7O_2N$ 과는 상이하게 나타났다. 특히 수정개발된 UASB 반응조의 경우, 입상슬러지내에 질소성분이 일반적인 혐기성 미생물보다 높게 나타나, 입상슬러지의 발생기작으로서 polypeptide계 체외폴리머의 존재가능성을 보여주고 있다.

(3) 전자현미경을 이용한 형태학적 특성조사결과, 일반적인 반응조의 경우와는 달리 수소분압이 높게 유지된 수정개발된 UASB 반응조의 경우 입상슬러지의 표면에서는 *Methanobrevibacter arboriphilus*와 같은 수소이용메탄균의 크기와 형태를 가진 미생물의 성장이 다발을 이루며 관찰되었다. 이러한 현상은 입상슬러지의 형성 메커니즘을 뒷받침해주고 있다.

(4) 우수한 입상슬러지의 형성을 위해서는 상대적인 수소분압의 크기에 따른 효과적인 상분리가 이루어져, acetogens 과 수소이용메탄균들간의 공생관계가 잘 유지되도록 해주어야 할 것으로 사료된다. 수정개발된 UASB 반응조가 일반적인 UASB 반응조에 비하여 수소이용메탄균의 성장에 더욱 효과적인 환경을 제공하는 것으로 판단되며, 입상슬러지의 형성과 반응조전체의 유기물질 제거효율 뿐만 아니라, 운전의 안정성 측면에서도 더 우수한 것으로 사료된다.

#### 감사의 말

본 연구는 1993년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해 수행되었음.

#### 참고문헌

1. Sam-Soon, P.A.L.N.S., Loewenthal, R.E., Dold, P. L., and Marais, GvR., *Pelletization in the upflow anaerobic sludge bed (UASB) reactor*, Research Report, W72, Univ. of Cape Town, South Africa, 1989.

2. Thiele, J.H., Chartrain, M. and Gregory Zeikus, J., "Control of interspecies electron flow during anaerobic digestion: Role of floc formation in syntrophic methanogenesis", *Appl. Environ. Microbiol.*, Vol. 54, No. 1, 1988, pp. 10-19.
3. Zehnder, A.J.B. and Wuhrman, K., "Physiology of a *Methanobacterium* Strain AZ", *Arch. Microbiol.*, Vol. 111, 1977, pp. 199-205.
4. Dolfing, J., *Microbiological aspects of granular methanogenic sludge*, Ph. D Thesis, Agricultural University of Wageningen, Holland, 1987.
5. Lettinga, G., van Velsen, A.F.M., De Zeeuw, S.W. and Klapwijk, A., "Use of Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment-especially for anaerobic treatment", *Biotech. and Bioeng.*, Vol. 22, 1980, pp. 699-734.
6. Ross, W.R., "The phenomenon of sludge pelletisation in the anaerobic treatment of a maize processing waste", *Water SA*, Vol. 10, No. 4, 1984, pp. 197-204.
7. Boari, G., Brunetti, A., Passino, R. and Rozzi, A., "Anaerobic digestion of olive oil mill wastewaters", *Agricultural Wastes*, Vol. 10, 1984, pp. 161-175.
8. van den Berg, L. and Hamada, M. F., "Effect of settling on performance of the UASB reactors", *Water Res.*, No.12, 1984, pp. 1561.
9. Hulshoff Pol, L.W., van de Worp, J.J.M., Lettinga, G. and Beverloo, W.A., "Physical characterization of anaerobic granular sludge", In *Proc. of the NVA-EWPCA Conf. on Water Treatment: Anaerobic Treatment, a grown-up technology Aquatech '86*, 15-19, Sep., Amsterdam, The Netherlands, Industrial Presentations(Europe) B. V., Schiedam, The Netherlands, 1986, pp. 89-101.
10. Grotenhuis, J.T.C., Kissel, J.C., Plugge, C.M., Stams, A.J.M. and Zehnder, A.J.B., "Role of substrate concentration in particle size distribution of methanogenic granular sludge in UASB reactors", *Water Res.*, Vol. 25, No. 1, 1991, pp. 21-27.
11. Takashi, K., Minorn, T., Kazuhiro, T., Kazuhiro, S. and Kou, S., "Anaerobic treatment of thermal sludge conditioning liquor and characteristics of granular sludge produced", *Wat. Sci. Tech.*, Vol. 23, 1991, pp. 1219-1228.
12. Kosaric, N., Blaszczyk, R., Orphan, O. and Valladares, J., "The characteristics of granules from upflow anaerobic sludge blanket reactors", *Water Res.*, Vol. 24, No. 12, 1990, pp. 1473-1477.
13. Grotenhuis, J.T.C., Smit, M., Plugge, C.M., Yuan-sheng, X.U., van Lammeren, A.A.M., Stams, A.J. M., Zehnder, A.J.B., "Bacteriological composition and structure of granular sludge adapted to different substrates", *Appl. Environ. Microbiol.*, 1991, pp. 1942-1949.
14. Guiot, S.R., Pauss, A. and Costerton, J.W., "A structure model of the anaerobic granule consortium", *6th International Symposium on anaerobic digestion*, Sao Paulo, Brazil, May, 1991.
15. 민경석, 안영호, "UASB 반응조에 있어서 반응조의 형상과 수소분압에 따른 입상화연구 I - 반응조의 형상에 따른 반응조의 안정성 및 반응생성물의 생화학적 거동-", *대한환경공학회지* 게재예정, 1994.
16. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater 17th edition*, APHA, AWWA and WPCF, Washington D.C., 1989.
17. Herbert, D., Phipps, P.J. and Strange, R.E., "Determination of total carbohydrate", In: *Methods in Microbiology*, 5B, J.R. Norris and D.W. Robbins, eds, Academic Press, New York, 1971.
18. Lowery, O.H., Rosebrough, N.J., Farr, A.L. and Randall, R.J., "Protein measurement with the Folin-phenol reagent", *J. Biol. Chem.*, 193, 1951, pp. 265-275.
19. McKinney, R.E., *Biological principles of environmental systems*, Lecture Note, Kansas Univ., 1990.
20. McCarty, P. L., "Energetics of organic matter degradation", In: *Water Pollution Microbiology*, Mitchell(Ed), Wiley Interscience, New York, 1972.

(接受 : 1994. 2. 17)