

## 혐기성 부착미생물의 초기성장에 미치는 영향인자에 관한 연구

허준무 · 박종안 · 손부순  
순천향대학교 환경보건학과

### Laboratory Study on the Factors Affecting on Initial Anaerobic Biomass Development

Joon-Moo Hur · Jong-An Park · Bu-Soon Son  
*Department of Environmental Health Science, SoonChunHyang University*

#### Abstract

Laboratory-scale investigation into initial anaerobic biofilm development was carried out by circulating mixed liquor from a steady-state anaerobic reactor through silicone tubing and then returning the mixed liquor to the reactor. The wall of the silicone tubing was the surface upon which anaerobic biofilm accumulation or development was monitored. Methanogenic bacteria accumulation was monitored by  $F_{420}$  fluorescence (picomoles  $F_{420}/\text{cm}^2$ ) of the extracted biofilm material. Biofilm accumulation was measured by the increase in COD of the extracted material ( $\mu\text{g COD}/\text{cm}^2$ ). Experiments were conducted for 25 days, and biofilm analyses were performed at 5 day intervals. The results indicated that the initial rates of methanogen and anaerobic biofilm accumulation increased with increasing organic loading rate and higher initial rates were observed for 15 day than 5 day liquid HRT or SRT. When the initial rates were plotted against the corresponding mixed liquor volatile suspended solids the difference between the results at the two HRT's became much less significant. Thus, the concentration of mixed liquor volatile suspended solids was found to be a very important parameter affecting initial anaerobic biofilm development. The ratio of methanogens to anaerobic biofilm was also investigated. The results showed that the ratio remained constant throughout the 25 days of each experiment and for high organic loading rates. Based on the results of this research, a reduction of start-up period of anaerobic fixed film reactors might be achieved by maintaining a high organic loading and a large concentration of anaerobic microorganisms in the mixed liquor during the start-up period.

#### I. 서 론

생물 확보를 통해 유기물을 효과적으로 처리하기 위하여 개발되어 왔으며, 슬러지 보유능력(biomass retention) 향상을 위한 다양한 공정의 개발과 더불어 최근의 혐기성처리에 관한 연구는 고농도의 미

어 획기적인 발전을 이루어 고농도 유기폐수를 포함한 광범위한 분야에 적용되고 있다. 고효율 혐기성 처리공정은 슬러지 보유방법에 따라 크게 슬러지 고정화(immobilization)를 이용한 공정과 고·액분리(solid-liquid separation)를 이용한 공정으로 나눌 수 있다. 이중 슬러지 고정화 방법은 미생물 부착을 위한 여재를 이용하여 슬러지미생물을 고정화하여 처리효율을 극대화시킨 공정으로 상향류식 및 하향류식 혐기성역상공정(upflow or down-flow anaerobic filter process), 혐기성팽창상공정(anaerobic expanded bed process), 혐기성 유동상공정(anaerobic fluidized bed process) 등으로 각종 여재에 부착된 고농도 미생물을 이용함으로써 고효율의 유기물처리가 가능하다. 그러나 이러한 부착성장식공법(attached growth)은 폐수성상, 운전방법 등에 따라 다소 차이가 있지만, 일반적으로 초기운전시 부착미생물의 안정적인 성장을 기대하기가 어렵거나 예측하기가 곤란한 경우가 많다. 따라서 안정적인 처리와 운전을 위해서는 상당한 기간의 초기운전기간(startup period)이 필요하다. 연구결과에 의하면 부착성장식 혐기성 처리공정에서 안정된 처리효율을 얻기전까지 최고 9개월간의 초기운전기간이 필요하다고 보고된 경우도 있으며<sup>1,2)</sup>, Henze와 Harremoës에 의하면 새로운 여재(media)를 사용하여 반응조 운전을 시작할 경우 최소 1개월내지 2개월이 필요하다고 제시하고 있다<sup>3)</sup>. 또한 Young과 McCarty는 부착성장식에서 미생물의 성장을 촉진시키기 위해서는 처리대상폐수에 미리 적용된 슬러지를 식종물질로 사용하는 것이 좋다고 보고하고 있다<sup>4)</sup>. 이와 같이 부착성장식 공정에서 초기에 미생물의 성장에 많은 노력이 필요한 이유는 무엇보다도 여재에 부착되는 혐기성미생물 특히 메탄생성균(methanogenic bacteria)의 성장이 매우 느리며, 그 부착미생물의 성장에 미치는 여러 영향인자에 관한 자세한 대사가 밝혀지지 않았기 때문이다.

호기성 부착성장식 공정의 경우 부유미생물의 농도, 미생물의 형태학적 구성, 폐수의 상향 및 하향속도, 부유미생물과의 접촉정도 등이 초기 부착미생물의 성장에 매우 중요하다고 보고되고 있으나<sup>5,6)</sup> 혐기성 미생물도 동일한 영향인자가 같은 결과를 야기시키는지에 대해서는 연구가 진행되고

있는 실정이다. 한편, 혐기성부착공정을 폐수처리에 적용하기 위한 초기운전을 용이하게 하거나 초기운전기간을 단축시킬 수 있는 방법으로 슬러지를 초기에 식종물질로 이용하거나 영양물질을 저해를 주지않을 정도로 공급해주거나 알카리도를 충분히 공급하는 등의 방법이 제시되고 있다<sup>1,3,7)</sup>.

그렇지만 이들 모두가 어떤 상황에서 어느 정도의 효과를 발휘하는지에 대해 정도를 파악하기란 매우 어려운 것이 사실이다. 따라서 혐기성 부착미생물의 성장에 미치는 영향인자를 고찰하기 위한 실험적인 연구가 필요하며, 가능한 정량화시키는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 혐기성 부착성장식공정을 모형화한 간단한 실험장치를 이용하여 유기물부하율, 수리학적 체류시간 및 부유미생물농도가 혐기성 부착미생물의 초기 성장에 미치는 영향을 고찰하고자 한다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 실험장치 및 기질

혐기성 부착미생물의 초기 성장에 관한 여러 가지 인자들의 영향을 알아보기 위하여 본 연구에서는 간단한 실험장치를 Fig. 1.과 같이 구성하였다. 장치의 구성은 1L용적의 혐기성반응조, 3개의 헤드가 부착된 용적형 펌프, 부착미생물의 성장을 관찰하기 위한 실리콘 튜브들과 반응조와 실리콘 튜브를 연결하기 위한 타이곤(tygon) 튜브로 구성되어 있으며, 전체 장치는  $35 \pm 2^\circ\text{C}$ 로 유지되는 항온조에서 위치시켰다. 반응조혼합액(mixed liquor suspended solids)는 반응조 상부의 연결관을 통하여 용적형 펌프로 흡입되어 각각의 실리콘 튜브로 공급되고 장치를 연결하였고, 흡입된 반응조혼합액은 내경 7.95mm, 외경 11.16mm, 높이 60cm의 실리콘 튜브를 수직으로 통과하면서 실리콘 표면에 부착미생물이 성장할 수 있도록 하였다. 수직으로 연결된 실리콘 튜브는 시간에 따른 부착미생물의 성장률을 측정할 수 있도록 20cm씩 3부분으로 나누어 연결관으로 연결하여 사용하였고, 각각의 세라인이 다시 반응조로 유입시에는 동일한 상태에서 미생물의 부착율을 실험하기 위하여 한 라인으로 통합하여 유입시켰다.

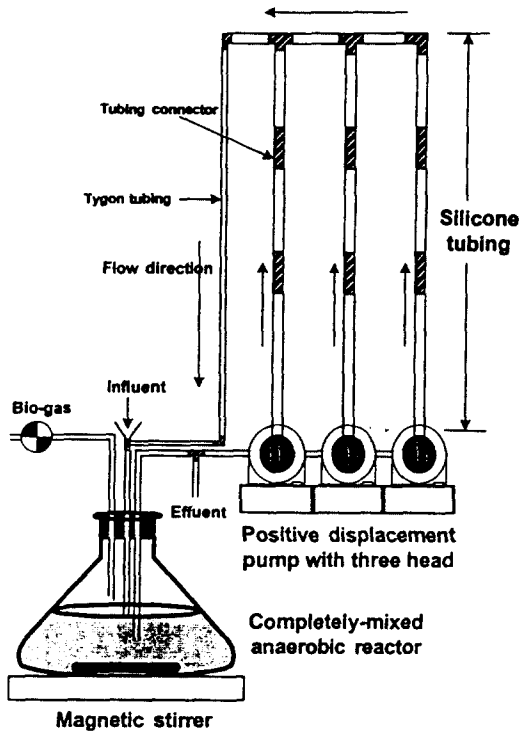


Fig. 1. Experimental set-up for anaerobic biomass development.

혐기성 반응조는 반연속식 형태(semi-continuous)로 완전 혼합-일일 주입형으로 운전하였고 반응조 혼합은 마그네틱 바를 이용하였다. 펌프에 의한 순환 유속은 상향 유속의 영향 실험을 제외한 전 수리학적 체류 시간(hydraulic retention time: 이하 HRT) 및 부하율 실험에서 3.3cm/sec로 유지하였으며 반응조 혼합액이 순환도중 건조상태로 되지 않도록 운전하였다. 네가지의 인공 기질이 각각의 HRT에서 사용되었는데 인공 기질 제조는 Krockner<sup>8)</sup>과 Pause와 Switzenbaum<sup>9)</sup>의 제조법에 따라 주된 탄소성 유기 성분은 sucrose이며, 알칼리도를 보충용 sodium bicarbonate와 기타 미량 원소들로 구성되어 있으며, 알칼리도는 유입 COD의 농도에 따라 가변적으로 보충하였다. 그리고 반응조 내 pH를 일정하게 유지하기 위하여 인공 기질의 pH를 수시로 조절하여 유입시켰고, 반응조 혼합액이 계속적으로 순환함에 따라 이산화탄소와 황화수소가 스트리핑되어 pH가 증가할 경우에는 반응조에 0.1N의 황

산 용액을 가하여 반응조의 pH가 6.8-7.2로 일반적으로 제시되는<sup>10)</sup> 혐기성 처리 조건에 맞도록 유지하였다.

## 2. 실험 방법 및 분석 방법

혐기성 반응조의 식용 물질로는 실험에 사용하기 위한 인공 기질(synthetic feed)에 미리 적용된 슬러지를 반응조 유효 용적의 30% 식중하였고 하루 한 번 유입 기질을 유입 시키고 동시에 유출수의 pH, 반응조에서의 가스 발생량 등을 확인하여 일별 변화량이  $\pm 20\%$  정도의 변화를 나타낼 때 정상 상태(steady-state)라고 판단하였다. 본 실험은 펌프의 가동과 더불어 반응조 혼합액을 실리콘 튜브에 순환시키면서 시작하였고 5일마다 실리콘 튜브를 제거하여 부착 미생물량을 측정하였으며 기간을 25일 동안 운전하였다. HRT가 미치는 영향을 판단하기 위하여 5일과 15일의 두가지의 체류 시간을 선택하였다. 5일은 혐기성 미생물이 성장보다 wash-out될 수 있으며, 15일은 혐기성 미생물 중 메탄 생성균의 성장에 충분하다고 보고되기 때문에 선정하였다<sup>11,12)</sup>. 혐기성 미생물의 초기 성장에 미치는 유기물 부하의 영향을 알아보기 위하여 반응조의 유기물 부하율은 HRT 5일과 15일에서 각각 0.2~4.4kgCOD/m<sup>3</sup>/d, 0.07~1.5kgCOD/m<sup>3</sup>/d을 적용하였다. 한편, 상향 유속이 미치는 영향을 알아보기 위하여 HRT 5일, 유기물 부하율 2.6kgCOD/m<sup>3</sup>/d의 동일 조건에서 상향 유속을 0.5~7.4cm/sec로 증가시켰다.

혐기성 미생물 중 메탄 생성균을 정량하기 위한 방법으로는 ATP 측정, 항체 측정, Phosphatase 측정법 등이 보고 있으며<sup>13,14)</sup>, 그중의 한 방법으로 메탄 생성균에만 포함되어 있다고 알려진 coenzyme인 F<sub>420</sub>을 측정하는 방법이 있으며<sup>15,16,17)</sup> 본 실험에서는 부착 미생물 중 메탄 생성균을 알아보기 위하여 De Zeeuw 등이 제시하는 방법에 따라 실시하였으며<sup>18)</sup>, 이 방법의 단점을 살아있는 메탄 생성균과 사멸한 메탄 생성균은 구분할 수 없다는 것이다. 메탄 생성균의 측정 방법은 5cm의 실리콘 튜브를 시험관에 넣은 후 여기에 glycine-EDTA 완충액을 넣은 다음 100°C로 유지되는 수욕조에 넣어 14분간 끓인다. 그 다음 튜브를 투입한 EDTA 용액으로 세척하면서

제거한 후 남은 용액내 coenzyme인 F<sub>420</sub>를 측정하였다. 혐기성미생물량의 측정은 5일에 한 번씩 제거한 실리콘튜브를 시험관에 넣은 후 여기에 1N 황산을 20mL가한 후 끓는 물에 14분간 끓인다. 다음에 실은까지 시험관을 식힌 후 실리콘튜브를 제거한 후 남은 용액의 COD(chemical oxygen demand)를 미국 공중보건협회의 표준시험법<sup>19)</sup>에 따라 측정 한 후 미리 측정한 실리콘튜브의 표면적으로 나누어 표현하였다. 공시험은 동일한 방법으로 미생물의 부착되지 않은 실리콘튜브를 이용하여 실시한 결과 평균 24 μg/cm<sup>2</sup>이었다. 한편, 반응조혼합액(mixed liquor suspended solids:MLSS, mixed liquor volatile suspended solids:MLVSS) 및 COD는 모두 미국 표준시험법에 따라 실시하였으며, 반응조에서 발생하는 가스량 및 조성은 본 실험의 목적에 부합하지 않기 때문에 측정하지 않았다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 유기물 부하 및 HRT의 영향

혐기성 부착미생물의 성장에 사용되는 매체로는 입상활성탄, 쇄석, 자갈, 세라믹 및 인공플라스틱 등 여러 가지가 사용되고 있으며, 여재의 재질 및 화학적 특성에 따라 미생물의 부착량이 달라진다는 많은 연구결과가 있지만, 본 연구에서는 혐기성미생물의 초기 성장에 미치는 영향인자중 유기물부하와 HRT의 영향을 우선적으로 알아보았다. 여재로 실리콘튜브의 표면을 이용하여 정상상태에 도달한 혐기성 반응조혼합액을 이용하여 HRT 5일과 HRT 15일에서 25일간 순환시키면서 초기 혐기성미생물의 성장율을 측정 한 결과는 각각 Fig. 2.와 Fig. 3.과 같다. HRT에 따라 다소 차이는 있지만 정상상태 도달 후 부착성장식온전이 시작된 이후 약 10일에서 20일까지 거의 급격하면서도 직선적인 혐기성 부착미생물 및 메탄생성균 성장이 관측되고 있다. HRT5일의 경우 유기물부하 4.4kgCOD/m<sup>3</sup>/d에서 가장 많은 부착미생물량(biofilm accumulation)과 메탄생성균(methanogenic accumulation)의 성장이 관측되었으며 이러한 현상은 HRT 15일에서도 동일하여 유기물부하가 클수록 혐기성미생물의 성장을

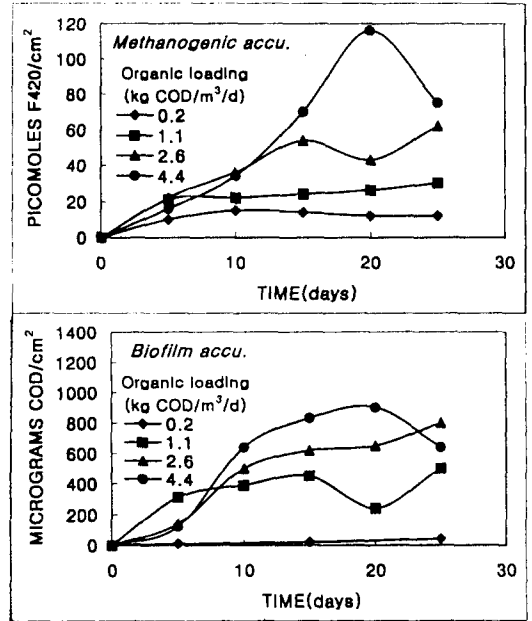


Fig. 2. Methanogenic and anaerobic biofilm accumulation at the HRT of 5days with four organic loading rates for 25days.

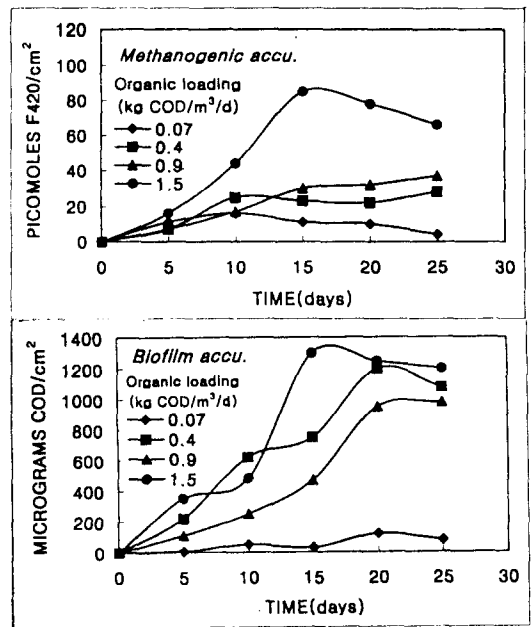


Fig. 3. Methanogenic and anaerobic biofilm accumulation at the HRT of 15days with four organic loading rates for 25days.

촉진시키는 것으로 나타났으며 특히 혐기성처리에  
 서 중요한 메탄생성균의 성장도 폐수성상 또는 운전  
 방법에 따른 차이를 감안하더라도 유기물부하에 상  
 당한 영향을 받았다. 운전기간 15일에서 20이후 혐  
 기성 부착미생물 및 메탄생성균의 감소 또는 평탄화  
 현상이 발생하고 있는데 이는 각각의 HRT에서 투  
 입된 유기물이 혐기성미생물의 성장 및 생체유지에  
 전부 사용되었기 때문에 더 이상의 미생물 증가현상  
 이 관측되지 않는 것이며 추가적인 유기물이 필요하  
 시점이라고 판단된다. 또한 이러한 감소 또는 평탄  
 화현상은 HRT에 관계없이 유기물부하가 0.07~  
 0.2kgCOD/m<sup>3</sup>/d로 낮게 유지된 경우에 더욱 두드러  
 지며, 유기물부하가 낮을 수록 이용가능한 유기물의  
 부족으로 초기성장 이후 미생물의 성장이 지속적으  
 로 유지되지 못하고 있는 현상과도 일치된다고 볼  
 수 있다. 또한 HRT 5일과 HRT15일에서 혐기성 부  
 유미생물로 간주할 수 있는 MLVSS의 농도가 유기  
 물부하 0.07과 0.2kgCOD/m<sup>3</sup>/d에서 40mg/L로 동일  
 한 HRT에서 유기물부하 4.4 및 1.5kgCOD/m<sup>3</sup>/d에  
 서의 1,900mg/L와 3,000mg/L에 비하여 매우 낮게  
 유지되었다. 이러한 결과는 혐기성 부착 성장식공  
 정에서 초기운전시 0.1kgCOD/m<sup>3</sup>/d이상으로 지속적  
 으로 부하가 유지되어야 한다고 보고한 결과와도 부  
 합된다고 할 수 있다<sup>1)</sup>. 따라서 혐기성부착성장식공  
 정에서 사용하는 여재의 종류 및 운전방법, HRT 등  
 에 따라 차이가 발생할 소지는 있지만 초기에 부  
 착 미생물 특히 메탄생성균을 지속적으로 성장 또는 반  
 응조내 필요한 양을 유지시키기 위해서는 초기성  
 장에 필요한 충분한 유기물을 공급을 통한 산생성균과  
 메탄생성균의 균형유지 및 미생물탈리 등을 적절히  
 조절해주어야 하며, 초기운전 이후 지속적인 부하가  
 공급되어야 한다고 사료된다. 한편, HRT 15일로 운  
 전한 경우가 HRT 5일에 비하여 낮은 유기물부하율  
 에서 운전했음에도 불구하고 부착미생물량면에서는  
 HRT 5일에 비하여 더 높게 나타났는데, 그 이유는  
 HRT 5일에서 상대적으로 높은 유기물부하에서 높  
 은 미생물과 성장과 더불어 부착성장식의 특징인 미  
 생물의 탈리현상(sloughing)이 증가하였기 때문으  
 로 판단된다.

Fig. 4.는 유기물부하 및 HRT가 혐기성부착미생  
 물 및 메탄생성균의 초기성장에 미치는 영향을 고찰

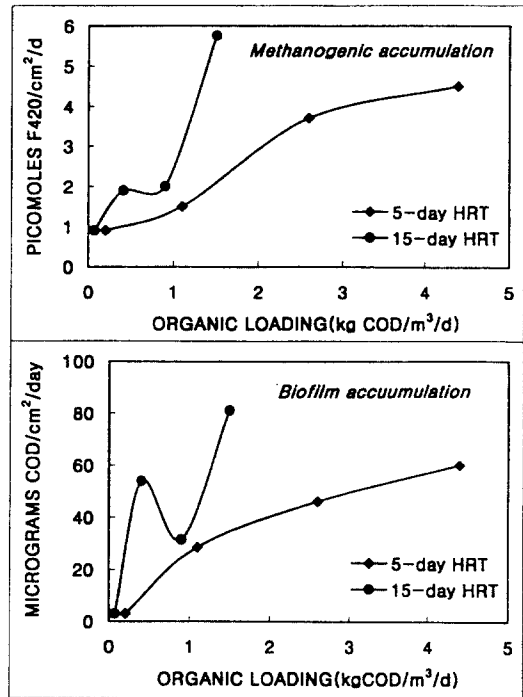


Fig. 4. Effect of organic loading rate and HRT on initial rates of methanogenic and anaerobic biofilm accumulation.

하기 위하여 Fig. 2와 Fig. 3의 결과중 초기운전기  
 간 0~15일사이를 회귀분석을 통하여 직선화시켜  
 초기성장율을 표현한 것이다. 혐기성부착미생물 및  
 메탄생성균은 유기물부하가 증가할수록 증가하며,  
 HRT가 15일로 운전할 경우가 HRT 5일로 운전한  
 것보다 초기성장율이 크게 나타났다. 이러한 현상은  
 Kennedy와 Droste의 연구결과와 혐기성부착미생물량  
 및 혐기성부착미생물의 성장속도는 메탄생성균의  
 활성도의 저하없이 상대적으로 저부하의 폐수처리  
 시 높게 유지되며, pH가 6.8~7.6정도 총휘발산의  
 농도가 200~1,500mgHAc/L로 운전될 경우에 높은  
 성장율이 관찰된다는 연구결과와 일치한다. 또한 그  
 들은 유입COD농도 5,000mg/L이상으로 증가되면서  
 반응조내 다소 높은 총휘발산농도가 유지될 경우 메  
 탄생성균의 성장을 자극(stimulation)하여 초기성  
 장 이후 지속적인 성장에는 메탄생성균의 성장제한 부  
 하내에서는 유기물부하가 높을수록 유리하다고 발  
 표하였다<sup>20)</sup>. 또한 초기운전을 용이하게 하기 위하여

운전초기에는 인공적으로 제조된 휘발산을 주입한다고 미생물의 성장이 시작되어 안정화되면 복합기질을 투입하여 산생성균을 성장시켜 반응조내 미생물의 균형을 유지시키는 것이 초기운전을 용이하게 한다고 보고한 Canovas-Diaz과 Howell의 결과와도 부합하는 것이다<sup>21)</sup>. 한편, 미생물의 경우 환경요인에 따라 population dynamics가 달라질 수 있어서 본 연구에서도 동일한 기질을 사용하였지만 HRT에 따라 반응조내 미생물의 우점종 및 구성미생물의 종류가 다르기 다소 다르게 유지된 것도 한 요인으로 작용하였을 것으로 판단된다. 그러나 초기미생물의 성장율은 HRT15일이 높지만 15일 이후를 기준으로 한 총미생물면에서는 HRT5일이 우수하였으므로, 본 연구결과로 미루어 볼 때 혐기성 부착성장식공정을 이용하여 폐수처리시에는 운전시작과 동시에 저부하로 시작하여 미생물의 부착이 확인되면 부하를 일정수준 이상으로 높여줌으로써 혐기성부착미생물 및 메탄생성균을 반응조내 안정적으로 확보할 수 있다는 것을 간접적으로 보여주는 결과라고 판단된다.

한편, 초기운전시 부하가 증가하면 혐기성부착미생물 및 메탄생성균의 성장을 촉진하여 전체 혐기성부착미생물량이 증가한다는 결과는 Figure 5의 유기물부하율 및 HRT에 따른 평균 COD제거효율을 보면 알 수 있다. 유기물부하가 증가할수록 총 COD제거효율은 감소하고 있으며, HRT 5일에서 유기물부하가 4.4kgCOD/m<sup>3</sup>/d로 운전할 경우 평균 COD제거효율이 55%로 낮아졌다. 이는 COD부하율이 증가하면서 산생성균의 성장이 활발해짐과 동시에 휘발산의 증가현상이 일어났기 때문이다.

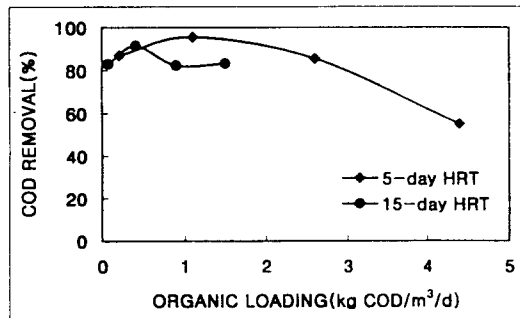


Fig. 5. Effect of organic loading rate on COD removal at different operating HRT.

또한 유기물부하의 증가와 동시에 증가된 휘발산이 COD로 발현되었음을 간접적으로 증명하는 것이며, 이러한 결과는 결국 유기물부하에 따른 전체미생물량을 나타내는 Fig. 3에서 Fig. 5의 결과와 잘 일치하고 있다.

## 2. 반응조혼합액(MLVSS)의 영향

Fig. 6.은 반응조내 혼합액중 MLVSS농도가 혐기성부착미생물량 및 메탄생성균에 미치는 영향을 알아보기 위하여 각각의 HRT에서 MLVSS농도와 미생물과의 관계를 나타낸 것이다. MLVSS농도가 증가할수록 혐기성부착미생물 및 메탄생성균양도 증가 하였으며, 이러한 현상은 MLVSS농도와 부유미생물의 F<sub>420</sub>을 측정할 결과인 Fig. 7.과도 같은 경향을 나타낸다. 따라서 부착성장식 공정에서 초기운전을 용이하게 하기 위해서 반응조용적의 10%이상의 슬러지미생물을 식종하여야 하며, 초기운전기간을 획기적으로 줄이기 위해서는 반응조용적의 30~50%까지 식종하여 미생물과 여재와의 접촉기회를 높여 주어야 한다고 한 연구결과와 일치한다<sup>23)</sup>. 또한 Fig. 4.에서 유기물부하의 증가에 따라 HRT 15일의 운전결과에서 초기성장이 다소 감소하는 경향도 결국의 반응조내 MLVSS농도가 유기물부하 증가에 따라 비례적으로 증가하지 않았기 때문으로 MLVSS농도가 미생물의 초기성장 (initial growth rate)에 상당한 영향을 미쳤기 때문이다. 또한 Stronach 등에 의하면 혐기성부착미생물의 성장을 촉진하기 위해서는 도시하수 혐기성소화슬러지나 처리대상폐수에 적용된 슬러지미생물을 식종하는 것이 유리하며, 초기에 반응조를 회분식으로 운전함과 동시에 유출수내 SS물질을 계속적으로 재순환시키는 것이 바람직한 초기운전 방법으로 제시하는 것보다도 잘 부합한다<sup>1)</sup>.

그러나 호기성 부착성장식공정에서 SRT(solids retention time)가 낮아질수록 미생물의 성장율이 증가한다고 보고한 결과와<sup>5,6)</sup>와는 완전히 다른 결과로 호기성 및 혐기성미생물간의 근본적인 대사경로의 차이에 기인하는 현상으로 사료되며, Shapiro와 Switzenbaum은 혐기성미생물내에는 polar lipid가 존재하여 부착율이 타 미생물에 비

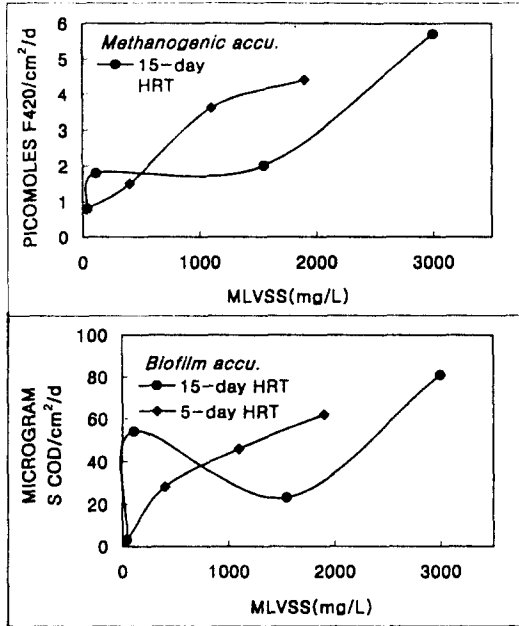


Fig. 6. Effect of MLVSS on initial rates of methanogenic and anaerobic biofilm accumulation.

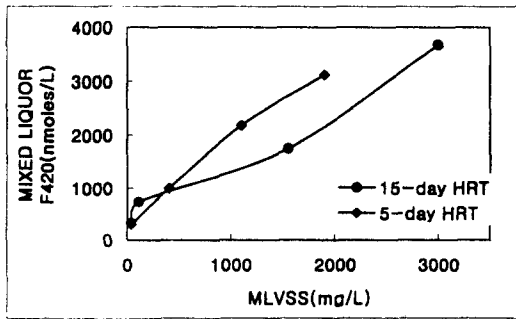


Fig. 7. Effect of MLVSS on mixed liquor F<sub>420</sub> concentration.

하여 높다고 보고한 결과와 일치하나<sup>22)</sup>, 현재까지 호기성과 혐기성부착미생물의 근본적인 차이에 대해서는 보고된 바 없다.

### 3. 혐기성미생물에 대한 메탄생성균의 비

혐기성 부착미생물량에 대한 메탄생성균의 비는 Fig. 8과 같으며, 유기물부하나 HRT변화에 따라서 메탄생성균의 비율에는 커다란 영향이 없으므로 나타났다. 따라서 메탄생성균이 유기물부하

가증가함에도 불구하고 정상적인 성장을 보여 전체 부착미생물중 일정한 비율을 계속적으로 유지할 수 있다는 측면에서 매우 중요한 결과이며, 부하의 증가가 부착미생물중 산생성균만의 성장을 의미하고 있지 않다는 것을 증명하는 것이다.

또한 혐기성부착미생물의 성장이 곧 메탄생성균의 증가를 의미하는 것이다. 메탄생성균의 비가 다소 감소하는 부분은 산생성균에 의해 생성된 유기산이 일시적으로 메탄생성균의 대사를 저해했기 때문이다. 그러나 전체 메탄생성균대사에 심각한 영향을 줄 정도는 아닌 것으로 판단되며, 이는 혐기성 부착미생물이 다양한 종류의 미생물 종류들로 구성되어 있으므로 일시적인 감소는 전체 메탄생성균량의 감소가 아니며 25일간의 운전기간동안 메탄생성균의 미소변동이 이를 반증하는 결과다. 그리고 메탄생성균의 변동이 심하지 않은 또 하나의 원인은 반응조혼합액의 pH가 혐기성반응에 적합한 6.8~7.6사이로 유지되도록 중탄산염 형태의 알카리도가 보충되었기 때문이다.

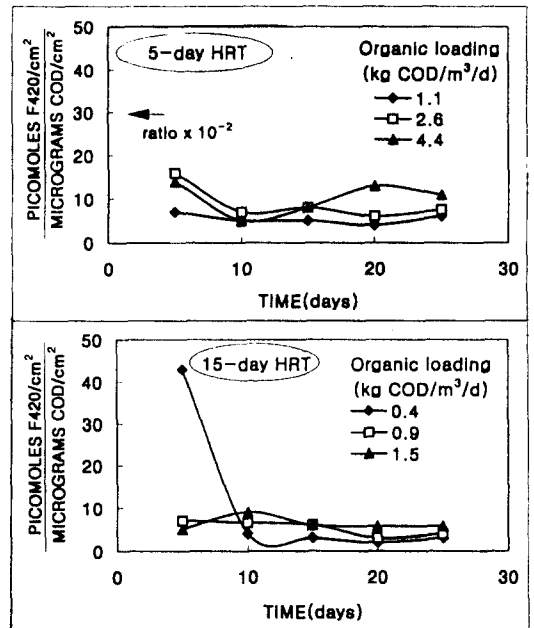


Fig. 8. Ratio of attached methanogens to anaerobic biofilm at HRT of 5days and 15days with three different organic loading rates.

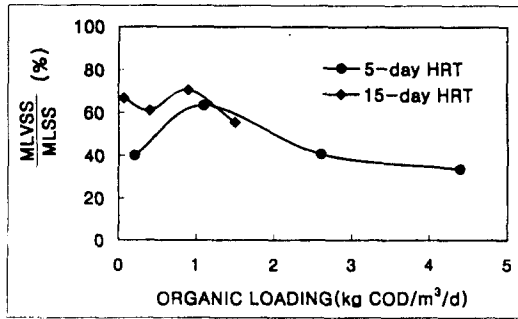


Fig. 9. Ratio of MLVSS to MLSS at HRT of 5days and 15days with different organic loading rates.

한편, MLSS농도에 대한 MLVSS농도의 HRT 및 유기물부하에 따른 변화는 Fig. 9.와 같다. 부착미생물의 경우는 유기물부하율에 따라 거의 일정한 메탄생성균의 분율을 나타내는 반면에 반응조혼합액중 혐기성미생물이라고 볼 수 있는 MLVSS의 농도는 유기물부하의 증가와 함께 감소하고 있다. MLVSS농도가 반드시 혐기성미생물 특히 메탄생성균만을 의미하지는 않지만, 하향류식 혐기성여상공정에서 HRT가 낮아지면서 유기물부하가 증가할수록 혐기성부착미생물중 메탄생성균의 분율 및 활성도는 커지지만 부유미생물중 메탄생성균의 분율 및 활성도는 낮아진다고 보고한 결과와 잘 부합한다<sup>20)</sup>. 또한 유입기질이 복합기질이면서 많은 SS물질을 함유하고 있는 폐수의 경우 유입수SS가 반응조혼합액에 포함되어 유입수SS에 의한 미생물체류시간은 증가시키나 메탄생성균의 분율은 오히려 낮추다는 Stronach의 결과와도 상응하는 것이다.

#### 4. 상향유속의 영향

HRT 5일 유기물부하율 2.6kgCOD/m<sup>3</sup>/d에서 상향유속을 0.5~7.4cm/sec로 변화시키면서 혐기성미생물 부착량 및 메탄생성균의 성장율을 측정 한 결과는 Fig. 10.과 같다. 상향유속을 0.5cm/sec로 유지할 경우는 혐기성미생물 및 메탄생성균의 성장이 높았으나, 상향유속을 2.4에서 5.4cm/sec로 변화시켜 운전하였을 경우에는 오히려 낮은 성장율을 보이고 있으며, 상향유속의 증가에도 불구하고 뚜렷한 변화양상을 파악하기가 어렵다. 따라서 이전의 유기물부하 및 HRT의 영향실험에서의

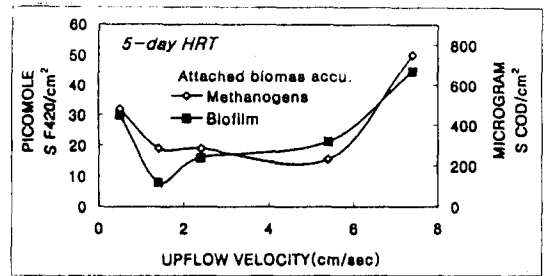


Fig. 10. Effect of upflow velocity on methanogen and anaerobic biofilm accumulation at HRT of 5days with organic loading rate of 2.6kgCOD/m<sup>3</sup>/d.

상향유속 3.3cm/sec로 유지 되었으므로 이전실험에서 약간의 상향유속을 증가시키거나 감소시켰어도 전체결과에는 거의 영향이 없었을 것이다. 그리고 상향유속을 0.5cm/sec에서 1.4cm/sec로 약간 증가시킬 경우에 미생물의 성장이 낮아진 이유는 초기 미생물의 성장을 관측하기 위하여 상향유속을 5일 간격으로 급격히 변화시켜 유체에 의한 수리특성의 변화와 급작스런 화학적 환경조건의 변화로 혐기성미생물이 여재에 부착할 기회가 상실되었거나 반대로 부착미생물의 탈리현상이 증가하였기 때문으로 판단된다. 한편, 상향유속을 7.4cm/sec로 증가시킬 경우에 관찰되는 혐기성부착미생물 및 메탄생성균의 성장현상은 혐기성부착미생물의 성장이 크게 유기물부하와 난류현상(turbulence)에 의해 야기되며<sup>1,20)</sup>, 그중 난류는 환경조건을 변화시켜 미생물의 물질대사에 영향을 미침과 동시에 여러미생물 가운데 부착성이 큰 미생물을 선택적으로 수용할 수 있게 할 수 있다는 것으로 설명할 수 있다. 따라서 혐기성부착미생물의 성장은 물리, 화학적인 특성으로 여재의 표면, 물질전달특성 등을 포함하여 유기물부하, 부유미생물농도 및 상향유속에도 상당한 영향을 받는 것으로 나타났다.

## IV. 결 론

정상상태의 혐기성반응조 혼합액을 순환시켜 가면서 실리콘튜브의 표면을 여재표면으로 하여 HRT 5일과 15일에서 유기물부하율 증가에 따른 혐기성부착미생물 및 메탄생성균의 초기 성장에 미치는 영



향을 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 메탄생성균을 포함한 혐기성미생물의 초기성장은 유기물부하율이 증가할수록 증가하였으며, HRT15일로 운전하는 것이 HRT 5일로 운전한 것에 비하여 초기성장율이 높았다. 그러나 전체 25일간의 운전에서는 HRT 5일로 운전하는 것이 미생물량면에서는 우수한 것으로 나타나 혐기성 부착성장식공정을 이용하여 폐수처리시에는 운전시작과 동시에 저부하로 시작하여 미생물의 부착이 확인되면 부하를 일정수준 이상으로 높여줌으로써 혐기성부착미생물 및 메탄생성균을 반응조내 안정적으로 확보할 수 있을 것으로 기대된다.
2. 반응조내 혼합액농도와 혐기성미생물의 초기성장율과의 관계에서 MLVSS농도가 클수록 혐기성미생물과 여재와의 접촉기회의 증가로 미생물의 초기성장은 증가하였으며 이러한 현상은 부유미생물의 경우도 동일하였다. 따라서 혐기성부착성장식 공정의 경우 초기성장을 촉진함과 동시에 안정적인 운전을 위해서는 많은 양의 식종물질과 처리대상폐수에 적용된 슬러지미생물의 식종이 필요하다.
3. 상향유속의 0.5~7.4cm/sec로 변화시킬 결과 5.4cm/sec까지는 상향유속변화에 따른 커다란 영향은 없었으며 7.4cm/sec로 증가시킨 경우에 혐기성미생물의 초기성장이 증가하였으며, 상향유속증가에 따른 난류의 확산으로 혐기성미생물의 환경조건변화와 미생물의 물질대사의 전환으로 부착성미생물의 선택성이 증가하였기 때문에 사료된다.
4. 혐기성 부착미생물량에 대한 메탄생성균의 비는 유기물부하나 HRT변화에 따라서 커다란 영향을 받지 않았서 유기물부하가 증가함에도 불구하고 정상적인 성장율을 보여 전체 부착미생물중 일정한 분율을 유지할 수 있었다. 따라서 혐기성부착미생물의 성장은 메탄생성균의 성장과 일치한다고 볼 수 있다.

## 참 고 문 헌

1. Stronach, S. M., Rudd, T., and Lester, J. N. : Anaerobic digestion processes in industrial wastewater treatment: Start-up of anaerobic bioreactor. Stronach, S.M., Rudd, T., and Lester, J. N. (Eds), Springer-Verlag, Berlin, Germany, 1986.
2. Switzenbaum, M. S., and Jewell, J. W. : Anaerobic attached-fixed film expanded-bed reactor treatment. Journal of Water Pollution Control Federation. Vol. 52, 1953-1965, 1980.
3. Henze, M., and Harremoës, P. : Treatment of wastewater in fixed-film reactors. Water Science & Technology. Vol. 15, 1-90, 1983.
4. Young, J. C., and McCarty, P. L. : The anaerobic filter for waste treatment. Journal of Water Pollution Control Federation. Vol. 41, R160, 1969.
5. Molin, G., Nilson, I., and Stenson-Holst, L. : Biofilm build-up of pseudomonas putida in a chemostat at different dilution rates. European Journal of Applied Microbiology and Biotechnology. Vol. 15, 218-222, 1982.
6. Bryer, J., and Chracklis, W. : Early fouling biofilm formation in a turbulent flow system: Overall kinetics. Water Research. Vol. 15, 483-491, 1981.
7. Young, J. C., and Young, H. W. : Full-scale treatment of chemical process wastes using anaerobic filters. Journal of Water Pollution Control Federation. Vol. 63, 153-159, 1991.
8. Krocker, E. J., Schlute, D. D., Sparling, A. B., and Lapp, H. M. : Anaerobic treatment process stability. Journal of Water Pollution Control Federation. Vol. 51, 718-727, 1979.
9. Pause, S. M., and Switzenbaum, M. S. : An investigation of the use of fluorescence to monitor activity in anaerobic treatment systems. Biotechnology Letters. Vol. 6,

- 77-82, 1984.
10. Malina, J. F., and Pohland, F. G. : Design of anaerobic process for the treatment of industrial and municipal wastes. Technomic Publishing Company Inc., Lancaster, Pennsylvania, U. S. A. 1992.
  11. Lawrence, A. W., and McCarty, P. L. : Kinetics of fermentation in anaerobic treatment. Journal of Water Pollution Control Federation. Vol. 41. R1-R17, 1969.
  12. Palvoatathis, S. G., and Giraldo-Gomez, E. : Kinetics of anaerobic treatment. Water Science & Technology. Vol. 24, 35-59, 1991.
  13. Chung, Y. C., and Neethling, J. B. : Microbial activity measurements for anaerobic sludge digestion. Journal of Water Pollution Control Federation. Vol. 61. 343-349, 1989.
  14. Kemp, H. A., Archer, D. B., and Morgan, M. R. A. : Enzyme-linked immunosorbent assays for the specific and sensitive quantification of *Methanosarcina mazei* and *Methanosarcina bryantii*. Applied Environmental Microbiology. Vol. 54, 1003-1008, 1988.
  15. Peck, M. W. : Changes in concentration of coenzyme F<sub>420</sub> analog during batch growth of *Methanosarcina barkeri* and *Methanosarcina mazei*. Applied Environmental Microbiology. Vol. 55, 940-945, 1989.
  16. Cheeseman, P., Toms-Wood, A., and Wolfe, R. S. : Isolation and properties of a fluorescent compound factor 420 from *Methanosarcina* strains M. O. H. Journal of Bacteriology. Vol. 112, 527-531, 1972.
  17. Sawyer, C. N., and McCarty, P. L. : Chemistry for environmental engineering. McGraw-Hill Book Inc., 1992.
  18. De Zeeuw, W., Lapsirakul, W., and Ho, C. : Use of F420 analysis in anaerobic digestion In: Anaerobic Digestion 1981. Huges, D. E.(Eds), Travemunde, Germany, Elsevier Biomedical Press, Amsterdam, 1982.
  19. American Public Health Association : American Water Works Association, Water Pollution Control Federation. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 18th ed. APHA, 1992.
  20. Kennedy, K. J., and Droste, R. L. : Start-up of anaerobic downflow stationary fixed-film (DSFF) reactors. Biotechnology and Bioengineering. Vol. 27, 1152-1165, 1985.
  21. Canvanos-Diaz, M., and Howell, J. A. : Stratified ecology techniques in the start up of an anaerobic downflow fixed-film percolating reactor. Biotechnology and Bioengineering. Vol. 30, 289-296, 1987.
  22. Shapiro, M., and Switzenbaum, M. S. : Initial anaerobic biofilm development. Biotechnology Letters. Vol. 6, 729-734.
  23. Salokinoja-Salonen, M. S., Nyns, E. J., Sutton, P. M., Van den Berg, L., and Wheatly, A. D. : Starting-up of an anaerobic fixed-film reactor. Water Science & Technology. Vol. 15, 305-308, 1983.