

유가공폐수 처리를 위한 UASB 반응조 운전

배 병 옥

대전대학교 환경공학과

Operation of UASB Reactor for Treatment of Dairy Wastewaters

Byung-Uk Bae

Department of Environmental Engineering, Taejon University

Abstract

The performance and the operational problems of UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) reactor for treatment of dairy wastewaters were investigated. Synthetic milk wastewater was successfully treated up to the loading rate of 3.9kg COD/m³.day, with a specific gas production rate of 1.23 l/l.day and a COD removal efficiency of over 90%. However, the sludge rising was observed at the loading rate of 2.1kg COD/m³.day, due probably to the formation of scum layer at the surface of settling compartment. The BMP(biochemical methane potential) of raw milk wastewater and ice cream wastewater, measured by using SBT(serum bottle test), were 0.135 and 0.66ml CH₄/mg COD_{added}, respectively. The sludge activity increased more than 8 times from 0.159g COD-CH₄/g VSS.d during 90 days of operation.

Key words: UASB reactor, Dairy wastewater, Sludge rising, Biochemical methane potential, Sludge activity

요 약 문

유가공폐수 처리를 위한 UASB의 성능과 운전상의 문제점을 조사하였다. 인공 유가공폐수는 부하 3.9kg COD/m³.day까지 성공적으로 운전이 가능하였으며, 이 때 90% 이상의 COD 제거율과 단위 체적당 1.23 l/l.day의 가스가 발생하였다. 그러나, 부하 2.1kg COD/m³.day에서는 침전부 표면에 스크름층이 형성되면서 슬러지부상과 유실이 관찰되었다. 혈청병(SBT) 실험으로 측정된 우유공장 실

폐수와 아이스크림폐수의 생화학적 메탄생성능(BMP)은 각각 0.135, 0.66ml CH₄/mg COD_{added}이었다. 반응조의 슬러지 활성도는 식중 초기에 0.159g COD-CH₄/g VSS.d에서 운전 90일이 경과하는 동안에 8배 이상 증가하였다.

핵심용어 : UASB 반응조, 유가공폐수, 슬러지 부상, 생화학적 메탄생성능, 슬러지 활성화

1. 서 론

지난 20여년 동안 혐기성 미생물에 대한 이해의 증진과 공정제어 기술의 향상에 힘입어 혐기성 폐수처리공법은 호기성 폐수처리공정을 후처리로 수반하는 전처리 개념이 아닌 독자적인 폐수처리기술로 자리잡게 되었다.

혐기성 폐수처리기술의 괄목할만한 발전에 기여한 결정적인 요소는 생물막이나 입상슬러지(granular sludge) 같은 미생물의 자기고정화 기법을 슬러지 보유수단으로 이용하는 고율 메탄발효공법의 개발에 있다(Hulshoff Pol and Lettinga, 1986).

고율 메탄발효공법은 미생물 막을 이용하는 혐기성 여상(AF, anaerobic filter)과 입상슬러지를 이용하는 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 공법, 그리고 이들 공법을 결합한 변종(hybrid reactor)들로 대별되나, 1990년까지 유럽, 북미, 남미, 그리고 극동지역에서 실규모로 건설된 UASB 반응조의 수가 205기 이상인 점을 고려할 때 UASB 공법이 기술적인 측면과 경제적인 측면에서 가장 각광받고 있는 고율 메탄발효공법임이 분명하다(Lettinga and Hulshoff Pol, 1991). 우리나라에서도 현재 4기 이상의 UASB 반응조가 실규모로 건설되어 주정, 맥주, 포도당 및 제과공장 폐수를 처리하고 있다(배병욱, 1994).

한편, 우리나라의 경우 생활수준의 향상으로

유제품 소비량이 급증함에 따라 유가공폐수의 적절한 처리가 새로운 문제로 부각되고 있으나, 대부분의 유가공폐수는 에너지 소모량이 큰 호기성 폐수처리공법에 의해 처리되고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 유가공폐수의 경제적이고 안정적인 처리방안을 제시하기 위해 UASB 공법을 이용하여 그 처리도를 조사하였으며, 단백질 및 지방함량이 높은 유가공폐수를 고율 혐기성공법으로 처리할 때 발생가능한 운전상의 문제점에 대해 조사하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치

유가공폐수의 처리도실험에는 Fig. 1과 같은 유효용량 15.5L의 정사각형 반응조가 사용되었다. 반응조의 단면적은 400cm², 총 높이는 45cm, 수심은 40cm로서 반응조 측벽에 높이별로 4개의 시료채취구를 설치하였으며, 유출수분석을 위한 시료채취는 유출수면으로부터 1cm 아래에 설치된 시료채취구를 이용하였다. 반응조는 35°C 항온조에서 운전하였으며, 반응조로부터 발생되는 바이오가스는 황산을 첨가한 포화 소금용액을 이용한 수위변위식 포집장치로 정량화하였다.

2.2 합성폐수 및 실험폐수의 성상

연속운전 실험에 사용된 인공 유가공폐수는 시판중인 시유를 수도물에 희석하여 제조하였으

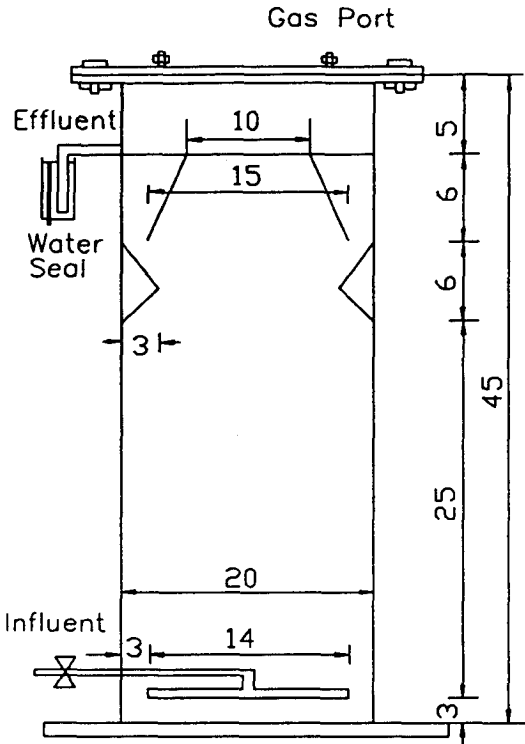


Fig. 1. Schematic diagram of rectangular UASB reactor.

며, 희석된 폐수의 COD가 1175mg/l일 때 BOD는 약 820mg/l이었고, 기타 영양염류 및 미량원소의 농도는 Table 1과 같았다.

안정적인 혐기성 소화를 위해 알카리도(2~5 g NaHCO₃/l)와 미량의 인을 유입수에 보충하였다. 한편, 인공폐수의 처리도 실험을 수행한 후, 연세우유 폐수처리장에서 채취한 실험수와 'B'사의 아이스크림 제조공장에서 채취한 아이스크림폐수를 대상으로 유가공 실험수의 처리도 실험을 수행하였다.

Table 1. Characteristics of synthetic milk wastewater(unit : mg/l) .

COD	BOD	Ortho-P	Total-P	TKN	Na	Fe	Ca	Zn	Cu
1,175	820	3.1	4.3	41.9	516	0.1	31	0.1	0.1

2. 3 식종슬러지 및 슬러지 활성도 조사

하수소화슬러지와 전분폐수에서 형성된 입상 슬러지를 9:1의 비율로 혼합하여 식종슬러지로 사용하였다. 초기 식종량은 반응조 단위 부피당 약 10g VSS/l이었으며, VSS/TSS 비는 약 0.51이었다. 식종슬러지의 초기 활성도와 운전 기간에 따른 슬러지의 활성도 변화를 정량화하기 위하여 전체 운전기간 동안 serum bottle test(SBT)를 3회 수행하였으며, SBT 실험에 사용된 기질과 장치는 각각 Table 2와 Fig. 2와 같다(Shin *et al.*, 1993). 1차 SBT 실험은 식종슬러지를 대상으로, 2차 및 3차 실험은 각각 운전 45일 과 90일이 경과한 슬러지를 대상으로 수행하였다. 125ml 용량의 serum bottle에 기질을 50ml씩 넣은 후, 질소가스로 flushing시킨 다음 반응조 베드층(높이 10cm)에서 채취한 슬러지를 10ml 식종하였다. 배양시간에 따른 가스발생량과 각 시각에서의 가스조성을 분석하여 슬러지의 활성도를 계산하였다.

Table 2의 인공 유가공폐수는 시유를 MSM (mineral salt medium)용액에 100배 희석한 것으로 알카리도의 보충을 위해 NaHCO₃를

Table 2. Experimental conditions for anaerobic serum bottle test.

Substrate	Concentration	pH control
Synthetic milk	100배 희석	5g NaHCO ₃ /l of MSM
연세우유 실험수	원폐수	5g NaHCO ₃ /l of MSM
아이스크림	2배 희석	5g NaHCO ₃ /l of MSM
Acid-mixture	3ml/l of MSM	6.8 with NaHCO ₃
	(HAc:HBu=2:1)	
Blank	MSM* only	7.2

* MSM : mineral salt medium(Shelton and Tiedje, 1984)

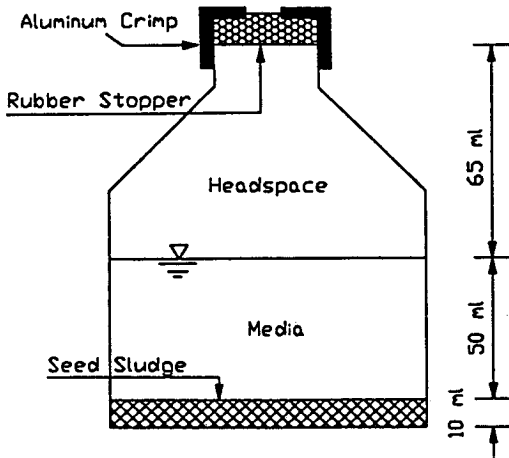


Fig. 2. Detailed diagram of serum bottle test apparatus.

5g/l 첨가하였다(Shelton and Tiedje, 1984). 산혼합액은 MSM 용액 1L에 acetic acid (HAc) 2ml와 butyric acid(HBu) 1ml를 첨가한 후 NaHCO_3 로 최종 pH를 6.8로 조절하였다. 공시체를 제외한 각 시료는 동일한 방법으로 3개씩 만들어 배양하였으며, 결과는 평균값으로 나타내었다. 한편, 실험실시험 기간 동안에 연세유유처리장에서 채취한 실험수와 아이스크림공장에서 채취한 아이스크림폐수에 대해서도 SBT 실험을 수행하였다.

2. 4 운전방법

반응조는 초기부하 1.1kg COD/m³.day로 운전되었으며, 운전 99일에는 실험실시험을 위하여 15.5L의 사각형 반응조를 해체하고, 대신에 용량 5.3L의 원형 반응조로 슬러지를 옮긴 후 약 3.9kg COD/m³.day의 부하로 10일간 운전하였다. 운전 109일 이후에는 연세유유 현장에서 채취한 실험수로 반응조를 운전하였으며, 운전 131일 이후에는 아이스크림폐수를 기질로 처리도실험을 수행하였다.

2. 5 분석

COD, pH, TSS, VSS, P(ortho, total), N(ammonia, TKN), 그리고 중금속 등은 Standard Methods에 준하여 분석하였다(AP-HA, 1987). 발생가스의 조성은 Gas Chromatography(Varian-3300, TCD, 6 ft × 2mm i.d., stainless steel column, Porapak Q, 80/100 mesh, Col. 50°C, Inj. 80°C, Det. 90°C)로 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

유가공폐수의 고율 혐기성소화 타당성을 조사하기 위하여 증온에서 처리도 실험을 수행한 바, 그 결과는 다음과 같다.

3. 1 COD 제거율 및 가스발생량

초기부하 1.1kg COD/m³.day로 운전된 반응조는 부하 2.6kg COD/m³.day까지 대체로 80% 이상의 COD제거율을 보였다(Fig. 3). 이 기간 동안에는 부하 증가에 비례하여 가스발생량이 증가하였으며, COD 제거율은 부하변동에 크게 영향을 받지 않았다. 그러나, 운전 60일 이후의 부하 2.1kg COD/m³.day에서는 반응조 침전부에 스컴(scum) 층이 형성되어 다량의 슬러지가 유실되는 현상이 발생하였다. 부하 2.1kg COD/m³.day에서 가스발생량이 약 12L인 점을 고려하면, 반응조의 표면가스 상승속도(superficial gas velocity)가 0.0125m/hr에 불과한데도 스컴형성으로 인해 슬러지가 유실되었다. 결론적으로 유입농도 1,070mg/L의 인공 유가공폐수를 처리할 때 본 실험에서 사용한 사각형 반응조로는 체류시간을 12시간 이하로 단축할 수 없었다. 그러나, 발생가스의 메탄함량은 대체로 62~65%의 범위로서 양호한 결과를 보였다.

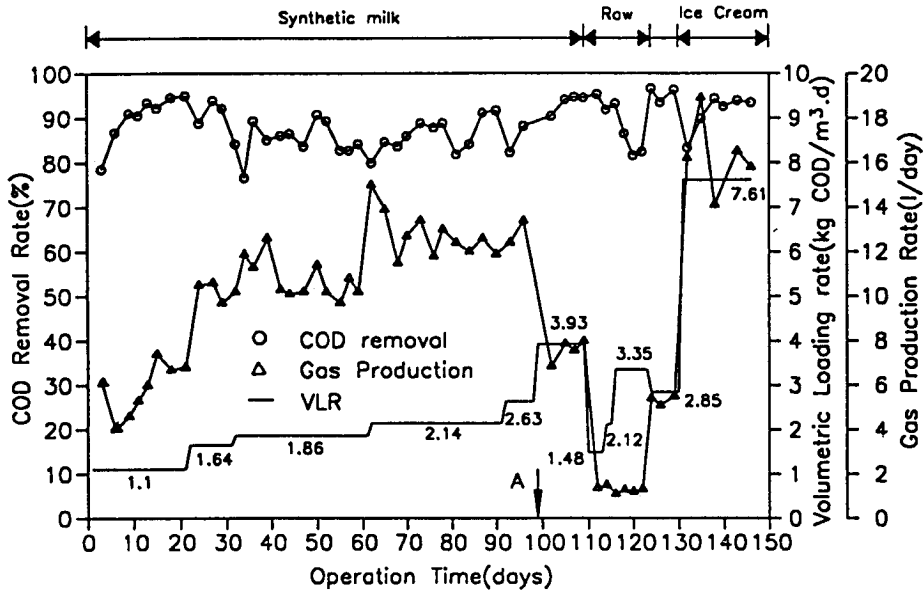


Fig. 3. Volumetric loading, COD removal, and gas production rate of UASB reactor.

스킴층은 단백질이나 지방 함량이 높은 폐수를 처리할 때 종종 발생하는 것으로 알려져 있으며, 스킴형성을 억제하기 위해서는 유입폐수와 미생물간의 접촉이 양호해야 한다(Lettinga *et al.*, 1984). 본 연구에서 사용한 반응조의 단면이 정사각형인 점을 고려하면, 원형반응조인 경우에 비해 더 많은 사영역(dead space)이 베드층에 존재하였을 것으로 추측되며, 바로 이 점이 낮은 부하에서 스킴형성을 초래한 주요한 원인으로 추측된다. 한편, 실패수 처리도실험시 소요되는 폐수량을 줄이기 위해 운전 99일에 유효용량 5.3l의 원형반응조에 사각형 반응조에서 배양된 슬러지를 옮긴 후, 부하 3.9kg COD/m³.day로 운전을 계속하였다. 그 결과 90% 이상의 COD 제거율과 단위 체적당 1.23l/day의 가스발생량을 얻을 수 있었으며, 스킴형성으로 인한 슬러지 유실도 크게 줄일 수 있었다.

운전 100일부터 123일까지 약 2주간 연세우유 폐수처리장에서 채취한 실패수를 대상으로

처리도 실험을 계속 수행하였다. 연세우유폐수는 COD가 740mg/l 정도로 낮아 체적부하를 3.35kg COD/m³.day로 운전하여도 가스발생량이 약 0.23l/day에 불과하였다. Fig. 4는 연세우유폐수의 생분해도를 SBT로 측정된 결과로서, 배양 9일 동안의 BMP(biochemical methane potential)가 0.135ml CH₄/mg COD_{added}로 매우 저조하였다. 이 기간 동안에는

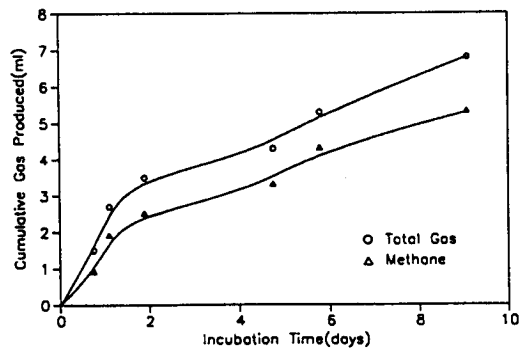


Fig. 4. Cumulative gas production from raw milk wastewater.

스컴형성이 관찰되지 않았으며, 슬러지 유실도 거의 없었다.

운전 124일부터 130일까지 인공 유가공폐수로 반응조를 운전한 후, 운전 131일부터 아이스크림폐수를 기질로 사용하여 반응조를 운전하면서 처리도를 조사하였다. 아이스크림폐수의 COD가 6,400mg/L 이상이었기 때문에 수돗물과 1:1로 희석한 후 주입하였다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 약 2주간의 짧은 운전기간이었지만, 부하 7.6kg COD/m³.day에서도 90% 이상의 COD 제거율을 보였으며, 평균 가스발생량도 약 3.0L/L.day 정도이었다. 발생가스 내의 메탄함량은 평균 50%이었으며, 메탄회수율이 약 0.3L CH₄/g COD_{removed}로 계산되었다.

아이스크림폐수를 처리하는 동안에 다시 스컴층이 형성되면서 슬러지가 부상하는 현상이 관찰되었다. Morgan 등(1990)은 아이스크림폐수에서 배양된 입상슬러지의 표면에 기름막이 형

성되어 있다는 흥미로운 사실을 전자현미경으로 발견하였는데, 이 기름막이 발생가스의 탈기에 악영향을 미쳐 슬러지의 부상을 초래한 것으로 추측된다. 따라서, 아이스크림폐수에서 배양된 입상슬러지의 지방함량을 정량화하므로써 슬러지가 부상하는 원인을 보다 정확하게 규명할 수 있을 것으로 사료된다. Fig. 5는 아이스크림폐

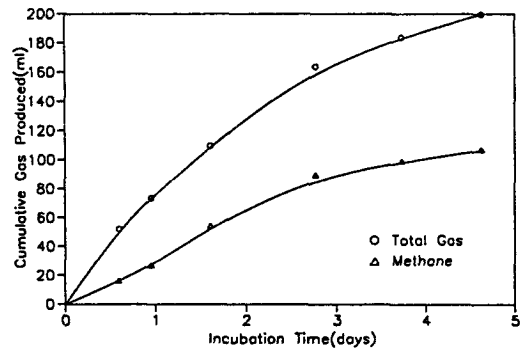


Fig. 5. Cumulative gas production from ice cream wastewater.

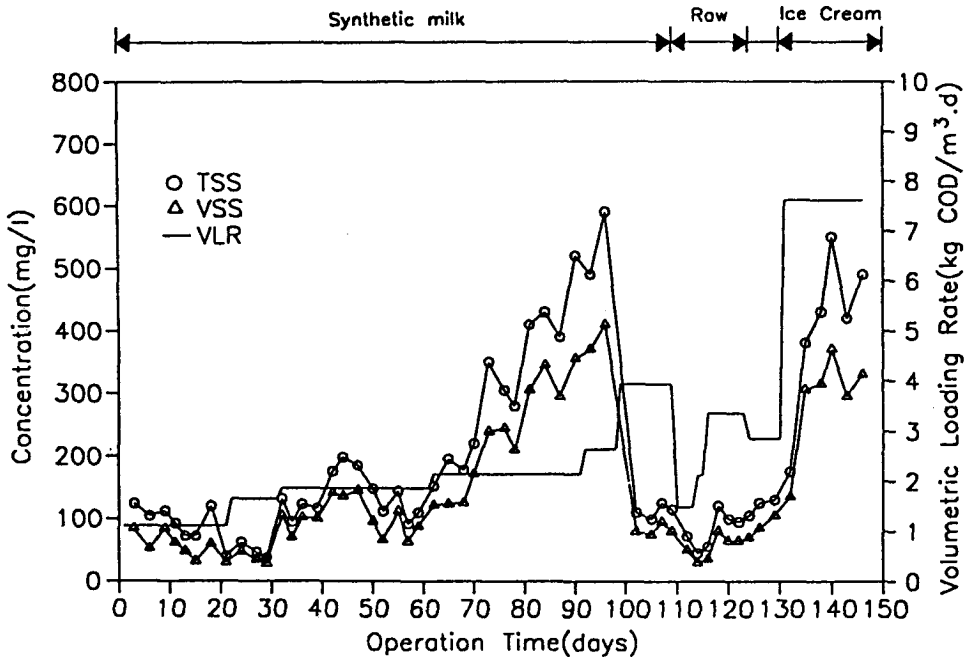


Fig. 6. Variation of sludge wash-out from UASB reactor.

수의 생분해도를 SBT로 측정된 결과이다. 약 5 일간의 배양기간 동안에 측정된 BMP 값이 0.66ml CH₄/mg COD_{added}로 연세우유폐수에 비해 4.9배 정도의 높은 값을 보였다.

3. 2 슬러지 유실과 운전상의 문제점

Fig. 6은 중온에서 운전된 UASB 반응조의 슬러지 유실량을 적용된 체적부하에 대비하여 나타낸 것이다. 운전 30일까지는 운전기간의 증가에 따라 슬러지 유실량이 점진적으로 감소하는 경향을 보였으나, 운전 60일 이후에는 반응조 침전부에 스컴층이 형성되면서 슬러지 유실량이 증가하였다.

원형반응조로 교체한 운전 99일부터 연세우유폐수를 처리한 기간 동안에는 슬러지 유실량이 크게 줄어들었으나, 아이스크림폐수를 처리하는 동안에 다시 증가하였다.

본 연구에서는 대규모(약 100톤 이상) UASB 반응조가 대부분 제작과 module-화가 용

이한 사각형 단면으로 제작되고 있는 점을 고려하여 사각형 반응조를 사용하여 유가공폐수를 처리하였으나, 스컴형성과 슬러지부상 이 선결해야 할 중요한 문제임을 확인하였다. 따라서, 사영역의 존재가능성이 높은 사각형 반응조의 경우에는 보다 세련된 형태의 유입수 분배장치가 설치되어야 할 것으로 판단된다. 특히, 단백질과 지방 함량이 높은 유가공폐수의 고울 혐기성처리를 위해서는 스컴형성으로 인한 슬러지입자의 부상을 억제할 수 있는 특별한 내부장치의 개발이 필요하다.

3. 3 슬러지 활성도 변화

슬러지의 활성도 변화를 조사한 SBT 실험 결과를 Fig. 7에 비활성도(SMA, specific methanogenic activity) 값으로 나타내었다. 초기 식종슬러지의 활성도는 0.159g COD-CH₄/g VSS.d로 일반적인 혐기성 소화슬러지보다 높았다. 이는 식종슬러지에 전분폐수에서

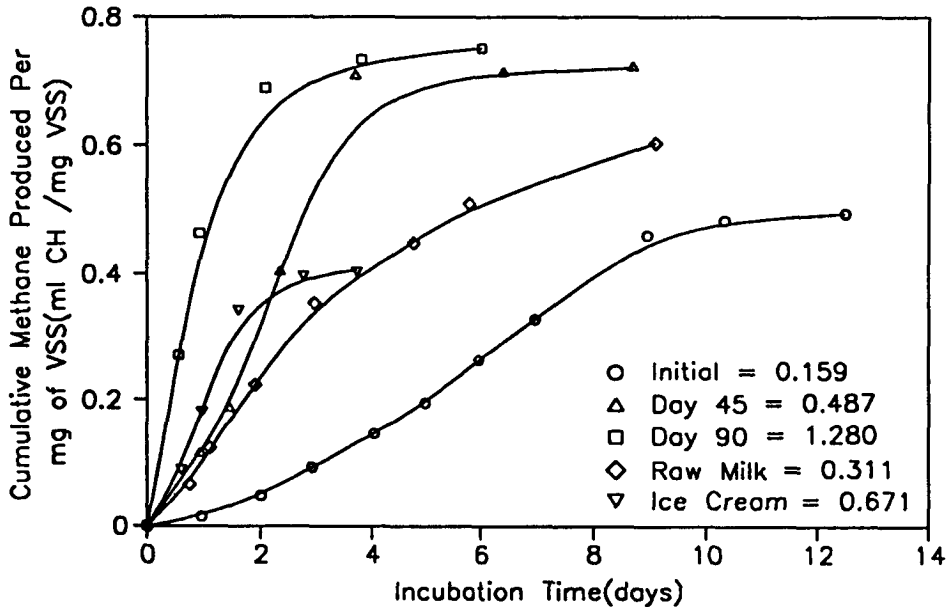


Fig. 7. Variation of specific methanogenic activity during 150 days of operation.

배양된 입상슬러지를 약 10% 첨가하였기 때문인 것으로 추측된다. 운전 90일이 경과하는 동안에 슬러지의 비활성도는 8배 이상 증가하였으며, 이 시기에는 반응조로부터 슬러지를 채취할 때 반응조 내의 슬러지가 대부분 입상화되었음을 육안으로 확인할 수 있었다.

그러나, 연세우유폐수를 처리한 시기에 측정된 활성도는 0.311g COD-CH₄/g VSS.d에 불과하였는데, 이는 유입폐수의 COD가 낮아 슬러지의 활성도가 저하된 것으로 추측된다. 한편, 아이스크림폐수를 처리하는 동안에 측정된 활성도는 0.671g COD-CH₄/g VSS.d 정도로, 운전 90일경의 최대 비활성도에 비해 50% 이상의 활성도를 유지하였다.

4. 결 론

유가공폐수를 대상으로 UASB 공법의 성능을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 초기부하 1.1kg COD/m³.day로 운전된 사각형 반응조는 부하 2.6kg COD/m³.day까지 대체로 80% 이상의 COD 제거율을 보였으나, 운전 60일 이후의 부하 2.1kg COD/m³.day에서는 반응조 침전부에 스크럼이 형성되어 다량의 슬러지가 유실되는 현상이 발생하였다.
2. 유입폐수와 미생물간의 접촉을 향상시켜 스크럼 형성을 억제하기 위해 유효용량 5.3L의 원형 반응조를 사용하여 부하 3.9kg COD/m³.day로 운전한 결과, 90% 이상의 COD 제거율과 단위 체적당 1.23L/L.day의 가스발생량을 얻을 수 있었으며 슬러지 유실도 크게 줄일 수 있었다.
3. COD 740mg/L 정도의 연세우유폐수를 수리학적 체류시간 5.3시간(체적부하 3.35kg

COD/m³.day)으로 운전하여도 가스발생량이 약 0.23L/L.day에 불과하였으며, 이 폐수의 9일 동안의 BMP(biochemical methane potential)는 0.135ml CH₄/mg COD_{added}로 매우 낮았다.

4. 아이스크림폐수를 대상으로 약 2주간 처리도를 조사한 결과, 부하 7.6kg COD/m³.day에서 90% 이상의 COD 제거율과 약 3.0L/L.day 정도의 가스가 발생하였으며, 메탄회수율은 약 0.3L CH₄/g COD_{removed}이었다.
5. 반응조의 슬러지 활성도는 식종 초기에 0.159g COD-CH₄/g VSS.d이었으나, 운전 90일이 경과하는 동안에 8배 이상 증가하였고, 90일간 운전하는 동안에 반응조 내의 슬러지는 대부분 입상화되었다.

5. 감사의 글

본 연구는 상공자원부 대체에너지 개발사업의 일환으로 수행되었으며, 연구비를 지원해 준 상공자원부와 (주)대우에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 배병욱. 1994. 혐기성입상슬러지의 특성 및 Pilot-scale UASB 반응조 운전에 관한 연구. 한국과학기술원 박사학위논문.
- 2) American Public Health Association. 1987. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 16th ed., N.Y.
- 3) Hulshoff Pol, L. and Lettinga, G. 1986. New Technologies for Anaerobic Wastewater Treatment. Wat. Sci. Tech., 18, 41-53.

- 4) Lettinga, G., Hulshoff Pol, L., and Koster, I.W. 1984. High-rate Anaerobic Wastewater Treatment Using the UASB Reactor Under a Wide Range of Temperature Conditions. *Biotechnology and Genetic Engineering Review*, 2, 253-283.
- 5) Lettinga, G. and Hulshoff Pol, L. 1991. UASB Process Design for Various Types of Wastewaters. *Wat. Sci. Tech.*, 24, 87-107.
- 6) Morgan, J.W., Goodwin, J.A.S., Wase, D.A.J., and Forster, C.F. 1990. The Effect of Using Various Types of Carbonaceous Substrate on UASB Granules and Reactor Performance. *Biological Wastes*, 34, 55-71.
- 7) Shelton, D.R. and Tiedje, J.M. 1984. General Method for Determining Anaerobic Biodegradation Potential. *Appl. Environ. Microbiol.*, 850-857.
- 8) Shin, H.S., Bae, B.U., and Oh, S.E. 1993. Preservation Characteristics of Anaerobic Granular Sludges. *Biotechnology Letters*, 15, 537-542.