

# 이상 UASB 공정을 이용한 주정폐수의 혐기성소화

## Anaerobic Digestion of Distillery Wastewater in a Two-phase UASB System

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

### Abstract

A two-phase UASB system was operated for high-rate treatment of concentrated distillery wastewater. The phase separation was obtained by adjusting pH in each reactor. When influent SS concentration was 4.1g/l, the first phase UASB reactor was effectively operated up to the loading rate of 16.5kg COD/m<sup>3</sup>. day, producing 3.9g HAc/l. day. In the methanogenic UASB reactor, loading rate up to 44kg COD/m<sup>3</sup>. day could be applied while removing 80% of influent COD with a specific gas production of 16.5 l/l. day. After the formation of granular sludge in both reactors, it was possible to maintain the appropriate pH in the first phase only by recirculating the effluent from methanogenic phase without the addition of alkaline chemicals.

### 要 旨

본 연구에서는 주정폐액의 고율처리를 위하여 이상 UASB 공정을 시험하였다. 상분리는 반응조의 pH를 조절하므로써 가능하였다. 유입폐수의 SS 농도가 4.1g/l일때 산형성조는 유기부하 16.5kg COD/m<sup>3</sup>. day까지 운전이 가능하였고, 이때 산생성율은 3.9g HAc/l. day를 나타내었다. 메탄형성조는 유기부하 44kg COD/m<sup>3</sup>. day까지 운전이 가능하였으며, 이때 COD 제거율은 80%이었고 비가스 생성율은 16.5l/l. day이었다. 두 반응조에서 입상슬러지가 형성된 이후에는 알칼리도의 주입없이 메탄조유출수의 재순환으로 산형성조의 pH를 적절하게 유지할 수 있었다.

### 1. 서 론

곡물을 원료로 하여 알콜(alcohol)을 생산하는 주정산업은 발효산업의 한 분야로 환경보호적인 측면에서 보면 매우 큰 오염부하를 배출하는 산업이

다. 일반적인 산업처럼 주정공장에서도 제조공정별로 다양한 종류의 폐수가 발생되지만, 처리에 문제가 되는 것은 증류단계에서 발생하는 증류폐액이다. 증류폐액은 발생량이 많을 뿐만 아니라 pH가 낮고 온도가 높으며 유기물 함량이 높고, 또한 사

\*정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 부교수

\*\*정회원 · 한국과학기술원 토목공학과 박사과정

\*\*\*정회원 · 국립여수수산대 해양환경공학과 전임강사

용하는 원재료와 계절에 따라서도 그 성상이 변하기 때문에 처리가 어려운 것으로 알려져 있다. 이러한 증류폐액의 처리 및 처분을 위하여 증발과 사료화 뿐만 아니라 물리-화학적 방법을 포함하는 다양한 연구가 진행되었지만, 현재까지의 연구에 의하면 혐기성 소화공법이 가장 경제적이고 실질적인 처리방법으로 알려져 있다<sup>(1,2,3)</sup>.

최근에는 재래식 혐기성소화의 단점을 극복하여 처리효율과 경제성을 향상시킬 수 있는 고율 혐기성 반응조가 개발됨에 따라 이들 반응조를 이용한 증류폐액의 처리가 많이 연구되고 있다<sup>(4,5,6)</sup>. 그러나, 용해성 폐수의 처리를 위해 개발된 고율반응조는 짧은 체류시간으로 운전되기 때문에 부유고형물이 존재하는 경우에는 고형물의 침전이나 폐쇄현상(clogging) 등으로 인하여 전체적인 반응조의 기능에 심각한 악영향을 받는 것으로 알려져 있다<sup>(7,8)</sup>. Souza<sup>(9)</sup>에 의하면 일반적으로 고율반응조에서 처리가능한 부유물질 농도는 유입폐수의 유기물 함량에 따라 변하지만, 단상의 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 반응조의 경우 약 1,000mg/l 정도의 부유고형물을 처리할 수 있다. 그러므로 증류폐액을 고율 반응조로 처리하기 위해서는 폐액내의 부유물질을 제거하기 위한 탈수공정이 전처리로 요구되는데, 탈수는 처리비용의 증가와 탈수된 고형물의 처리라는 부수적인 문제와 회수가능한 메탄가스의 감소를 초래하므로 경제적인 면에서 불리하다. 따라서, 고농도의 부유고형물을 처리할 수 있는 고율 소화공정의 개발은 이상과 같은 경제적인 측면에서 뿐만 아니라, 기존의 고율 반응조가 갖는 한계를 극복하고 적용범위를 확대한다는 기술적인 측면에서도 필요하다고 하겠다.

한편, 70년대 중반에는 재래식 혐기성 소화공정의 효율과 안정성을 제고할 목적으로 산형성균과 메탄형성균의 상분리(phase separation)를 이용한 이상소화(two-phase anaerobic digestion) 공정이 개발되었으며, 산형성과 메탄형성 반응을 각각 분리된 공간에서 최적화할 수 있는 이상소화 공정은 비교적 부유물질 농도가 높은 폐수나 하수슬러지 등의 처리에 적용, 연구되었다<sup>(10,11)</sup>.

이상과 같은 배경으로부터 고형물의 처리에 효과적인 이상소화 공정에 고율반응조를 접목시킨 고율 이상소화 공정은 부유고형물을 함유한 복합 산업폐

수의 처리에 효과적일 것으로 기대되는 바, 본 연구에서는 고율혐기성 반응조로 점차 보급되고 있는 UASB 반응조를 이용한 이상 UASB 공정으로 증류폐액을 처리하여 pH조절을 이용한 상분리 가능성, 산형성조에서 처리가능한 부유물질 농도, 전체 공정의 처리효율, 그리고 슬러지 입상화(granulation) 등에 대하여 조사하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

그림 1은 본 실험에서 사용한 실험장치로 산형성조(U.I)와 메탄형성조(U.II)는 각각 12.5, 4.7 l의 UASB 반응조로 구성되었다. U(I)은 직경이 18cm인 원통형으로 침전부의 체적이 전체 반응조의 약 15%이며, U(II)는 침전부의 기능을 증대시키기 위하여 반응조상단의 직경을 하단에 비해 40% 증가시킨 형태로 침전부의 체적은 전체 반응조의 약 23%이다. 실험은 37°C의 항온조에서 진행되었으며, 발생가스 포집장치는 황산을 첨가한 포화 소금용액을 이용한 수위변위식으로 산형성단계와 메탄형성단계에서 분리 포집하였다.

각 반응조의 점종슬러지로는 주정폐수를 이상소화로 처리하는 폐수처리장에서 채취한 각 단계의 슬러지에 가능한 다양한 종류의 미생물을 이용하기 위하여 하수처리장의 소화슬러지를 약 20% 섞어서 사용하였다. 점종초기의 VS농도는 산형성조와 메탄형성조의 경우 각각 17.7, 15.0g/l이었으며, 메탄형성조의 초기 pH는 7.6이었다.

산형성조에 표 1과 같은 유입폐수를 주입하였는데 유입폐수의 성상은 원료에 따라 달랐으며, 특히 N, P, 그리고  $SO_4^{2-}$  등의 농도가 일정하지 않았다.

산형성조의 초기부하는 1.9kg COD/m<sup>3</sup>day이었으며, 산성인 유입폐수에 가성소다나 재순환된 메탄조 유출수를 혼합하여 pH 6.0으로 조정함으로써 pH에 의한 상분리를 시도하였다. 유기물 부하율은 회석배율을 변화시킴으로써 조절하였고, 유입폐수내의 부유물질 농도는 원폐액과 탈수액을 혼합하여 조절하였다. 산형성조에 대한 일련의 실험이 끝난 운전 120일 이후에는 메탄조의 원만한 운전을 위하여 산형성조 유입수의 부유물질 농도를 4.0 g/l 정도로 낮추어 운전하므로써 반응조 내부에 MLSS

R = Refrigerated Feed Tank  
 D = Separation Tank, 1.4 l  
 P = Peristaltic Pump  
 U(I) = Acidogenic UASB Reactor, 12.5 l  
 U(II) = Methanogenic UASB Reactor, 4.7 l  
 G = Gas Collector with Acid Brine Solution

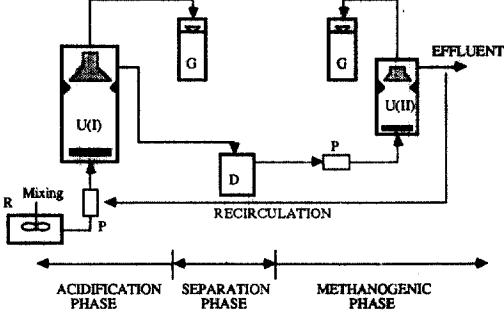


그림 1. 이상 UASB 공정의 흐름도

표 1. 산형성조에 주입된 폐수의 성상

Raw material	Tapioca (1)	쌀보리+ 절.고(2)	쌀보리+ 절.고(3)	쌀보리+ 절.고(4)
pH	3.9	5.1	4.2	4.4
SS(g/l)	4.5	3.6	4.1	10.6
TS(g/l)	16.9	15.3	24.8	30.7
VS/TS	0.85	0.77	0.79	0.79
COD(g/l)	17.3	17.6	29.5	30.4
SCOD(g/l)	12.9	14.3	23.0	21.2
Total VA (mg HAc/l)	700	1,580	885	1,080
Ammonia-N (mg/l)	10	11	19	22
Organic-N (mg/l)	-	2,200	1,010	-
Ortho-P (mg/l)	44	39	28	36
Total-P (mg/l)	-	400	200	-
Sulfate (mg/l)	440	500	1,370	980
day used	1-53	54-76	77-93	110-120

주)1: 비탈수원액을 No.60(0.425mm) 체로 거른 후 물과

1:1로 희석

2: 10% 쌀보리+90% 절간고구마, 원폐액을 belt press로 탈수시킨 여액

3: 60% 쌀보리+40% 절간고구마, 비탈수원액을 No. 40(0.85mm) 체로 거른 후 탈수액과 1:5로 혼합

4: 40% 쌀보리+60% 절간고구마, 비탈수원액을 No. 40체로 거른 후 탈수액과 1:1로 혼합

5: 운전 120일 이후에는 tapioca 주정폐액을 사용. 단, 유입폐수의 SS 농도는 표 1과 다름.

(mixed liquor suspended solids)가 과도하게 축적되는 것을 방지하였다. 한편, 산형성조 유출수를 메탄조로 주입하기 위하여 용량 1.4 L의 분리조를 설치하였으며, 산형성조로부터 유실된 MLSS와 불활성 물질로부터 메탄형성조를 보호하기 위하여 0.106mm 체로 산형성조 유출수를 거른 후 메탄형성 단계로 주입하였다.

메탄형성조의 초기부하는 1.0kg COD/m<sup>3</sup>day이었다. 초기단계에는 산형성조와 마찬가지로 희석하였지만, 운전 69일 이후에는 메탄균의 활성이 증가함에 따라 산형성조 유출수를 희석하지 않은 상태로 주입하였다. 유입수의 pH는 슬러지층 상단의 pH가 7.2-7.6 범위의 양호한 상태를 유지하도록 6.2-6.5 정도로 조절하여 주입하였으나, 운전 156일 부터는 5일간의 적응 후에 pH 5.5-5.9의 산형성조 유출수를 직접 주입하였다.

한편, 운전 170일경 부터는 알칼리성의 메탄조 유출수를 재순환시켜 산형성조 유입폐수의 pH를 6.0까지 올렸다.

pH, COD, SCOD, VA(Volatile Acids), P, N, Sulfate 및 알칼리도의 측정은 Standard Method<sup>(17)</sup>에 따랐으며, 발생가스와 VFA(Volatile Fatty Acid)의 성분은 Gas Chromatography(Varian-3300)로 분석하였다. 그리고, SEM(scanning electron microscope, Hitachi S-450)으로 두 반응조에서 생성된 입상슬러지의 형태학적 구조를 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3-1 상분리

유입폐수의 pH를 조절한 본 실험에서 상분리 현상은 정인산, 암모니아, 그리고 총 유기산의 농도변화와 생성가스의 성분 등에서 알 수 있었다. 그림 2는 정인산(PO<sub>4</sub><sup>-3</sup>)과 암모니아가 산형성단계 동안에 유기물의 가수분해로 인하여 증가하였다가, 메탄조에서 메탄균에 의해 감소하고 있음을 보여준다.

한편, 산형성조에서 포집된 생성가스에는 운전

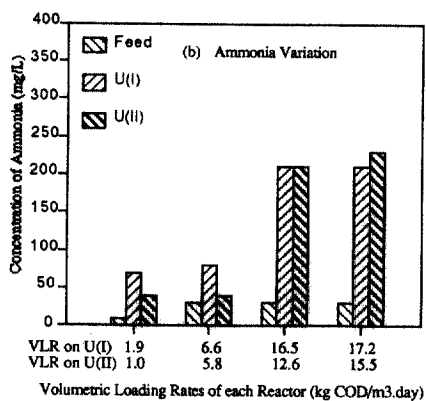
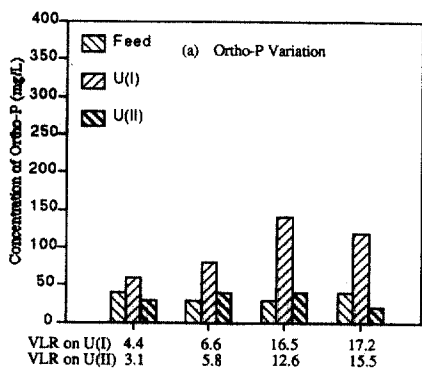


그림 2 정인산과 암모니아 농도의 변화

30일까지 메탄이 최고 10% 정도로 검출되었으며, 운전 90일 이후에는 1-2%의 수소가 검출되었으나, 대부분은 CO<sub>2</sub>이었다. 따라서 pH 조절로 상분리를 시도한 본 실험에서는 운전 초기부터 효과적인 상분리가 가능하였으며, 이러한 결과는 미생물의 성장에 영향을 미치는 환경적 요소를 제어하는 pH 조절법이 문헌<sup>(2)</sup>에 보고된 투석막법(membrane dialysis method)이나 선택적 방해법(selective inhibition method), 그리고 동력학적 제어법(kinetic control method) 보다 간단하고 효과적인 방법이라는 것을 의미한다.

### 3-2 산형성조(U.I)

그림 3은 부하증가에 따른 산형성조의 가스발생량과 산형성물에 대한 물질수지식으로부터 정의되는 단위 체적당 산형성율(acid formation rate, Ra)의 변화로서 가스발생량과 Ra가 어느 정도 비례함을 보여준다. 산형성조의 최대 허용부하는 16.5kg COD

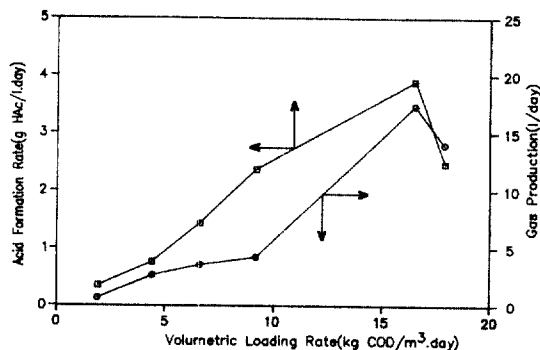


그림 3 산형성 UASB 반응조에서 부하에 따른 산형성율과 가스발생량의 변화

/m<sup>3</sup>.day로, 이때 유입폐수의 부유물질 농도는 4.1g/l이었고, 수리학적 체류시간은 18일 이었다.

그림 3의 부하 17.2kg COD/m<sup>3</sup>.day에서 가스발생량과 Ra가 급격히 감소되는 것은 운전 110일에 유입폐수내의 부유물질 농도가 2.5배로 증가됨에 따라 과도한 부유물질 부하가 반응조에 작용하게 되었기 때문인 것으로 사료된다(표 1참고). 즉, 슬러지층에 과도한 부유물질이 유입됨에 따라 채 분해되지 않은 부유물질(MLSS)이 반응조내에 축적되었고, 이로 인해 혼합이 잘 안되는 등 물리적 특성이 나빠짐에 따라 산형성균의 활성이 크게 저하되었기 때문인 것으로 사료된다. 따라서 부유고형물의 함량이 높은 폐수를 처리하는 산형성조의 운전은 산형성율을 최대화시킬 수 있는 최소 체류시간<sup>(13)</sup>으로 운전하는 것 보다 유입수내의 생분해성 고형물을 충분히 안정화시킬 수 있는 체류시간으로 운전하는 것이 바람직하다.

반응조의 슬러지층 상단에서 측정된 pH는 5.5-5.9의 범위였으며, 유출수의 알칼리도는 운전초기의 2,500mg/l에서 100일 후에는 약 5,000mg/l로 증가하였다.

산형성반응의 주 생성물에 관한 연구에 의하면 글루코스나 sucrose를 기질로 사용한 경우에는 acetic acid와 butyric acid가 주 생성물이나, 복합 폐수를 기질로 사용하면 propionic acid의 생성이 증가한다고 하였다<sup>(13)</sup>. 곡물이 주 원료인 증류폐액

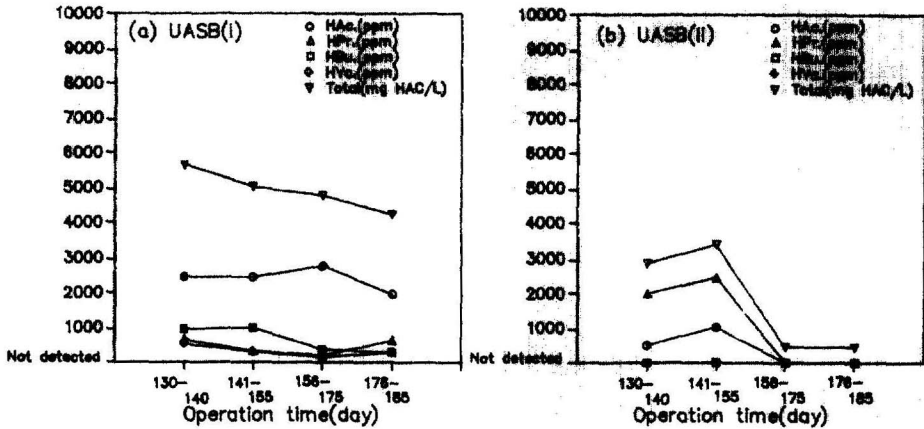


그림 4. 총 유기산과 각 유기산의 변화

을 처리한 본 실험의 주 생성물은 그림 4(a)의 휘발산 분포로부터 부하변동에 관계없이 acetic acid와 butyric acid임을 알 수 있으며, Cohen<sup>(14)</sup>이 분류한 산형성반응의 종류에 따르면 증류폐액의 산형성반응은 butyric acid형이라는 것을 알 수 있다.

한편, Lettinga<sup>(15)</sup> 등은 sugar-beet sap 용액 처리를 위한 이상소화의 산형성조에서 1-3mm 크기의 입상슬러지(granule)를 발견하였으며, Cohen<sup>(16)</sup>은 글루코스를 기질로 사용한 실험에서 메탄형성조 뿐만 아니라 산형성조에서도 직경 5mm의 입상슬러지가 생성되었다고 보고하였는데, 부유고형물 농도가 높은 주정폐액을 처리한 본 실험의 산형성조에서는 운전 90일 이후에 약 2-3mm의 노란색 입상슬러지가 관찰되었다(사진 1.a).

### 3-3 메탄형성조(U.II)

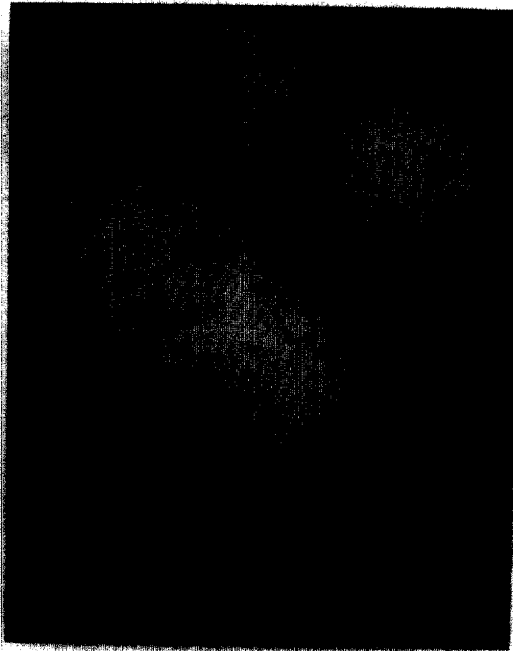
그림 5와 같이 유기부하를 단계적으로 증가시키면서 운전한 메탄형성조에서는 운전 70일 후에 약 10kg COD/m<sup>3</sup>day까지 부하를 증가시킬 수 있었고, 120일이 경과한 후의 부하 22kg COD/m<sup>3</sup>day에서는 약 2mm의 검은색 입상슬러지가 관찰되었다(사진 1. b). 그리고, 재순환 실험을 제외한 모든 운전 조건에서 메탄형성조의 단위 COD 제거당 메탄가스 생성량은 0.30-0.32 l CH<sub>4</sub>/g COD로 이른치 0.35에 가까운 값을 나타내었다. 또한, 입상슬러지가 형성된 후에는 44kg COD/m<sup>3</sup>day(HRT=0.65일)의 부하에서도 약 80%의 COD 제거율과 16.5 l/day의 비

가스 생성율을 보였다.

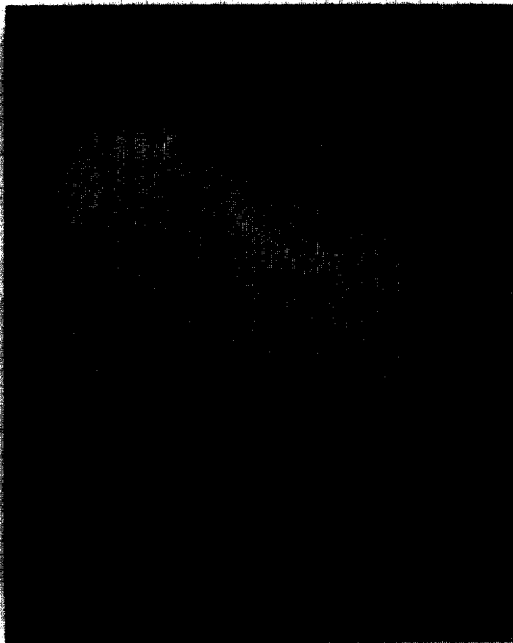
그림 4(b)는 운전 130일 이후의 유출수의 휘발산 농도에 대한 결과로서 부하 44kg COD/m<sup>3</sup>day 이상에서는 acetic acid가 완전히 제거되지 않았으며, propionic acid가 그림 4(a)의 유입수에 비해 현저히 증가하였음을 보여준다. 따라서 메탄형성조가 고부하로 운전될 때는 propionic acid의 축적이 우려되며, 이 propionic acid의 분해가 메탄형성 반응의 제한단계임을 알 수 있다. 한편, 부하를 낮춘 운전 156일 이후에는 알칼리도를 보충하지 않았음에도 불구하고 개개 휘발산이 검출되지 않았으므로 메탄형성조의 최대 허용부하는 30kg COD/m<sup>3</sup>day 정도인 것으로 추측된다.

### 3-4 재순환에 의한 알카리도의 변화

메탄형성도 유출수를 재순환시켜 산형성조 유입액수의 pH를 6.0로 증가시키는데 필요한 재순환율은 약 0.35정도였으며, 이때 유입액수의 평균 부유물질 농도는 약 2.7g/l이었다. 유출수 재순환실험 전후에 메탄형성조 유출수의 알카리도는 그림 6과 같이 변하며, 그림 4(b)의 메탄조 유출수의 총 휘발산 농도와 비교할 때 총 휘발산과 알카리도의 비가 대략 0.1-0.2의 범위로 충분한 완충능력을 가짐을 알 수 있다. 따라서, 이상소화 공정에서는 적절한 재순환을 사용하여 증류폐액의 중화에 필요한 중화제의 양을 줄일 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 산형성 UASB 반응조



(b) 메탄형성 UASB 반응조

사진 1. UASB 반응조에서 생성된 입상슬러지

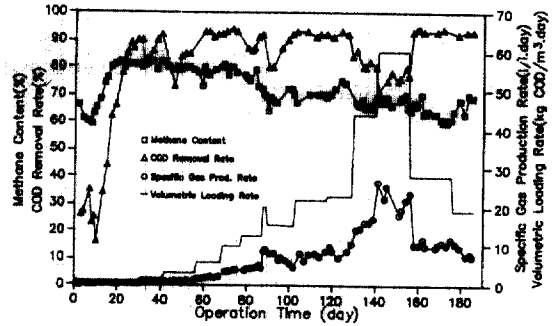


그림 5. 메탄형성 UASB 반응조의 운전 결과

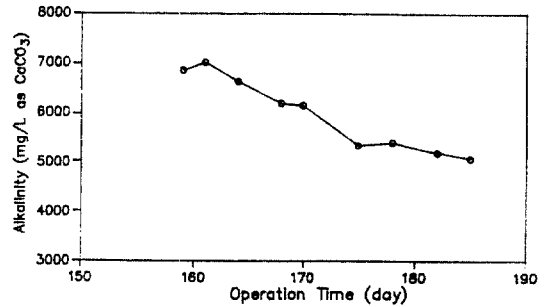


그림 6. 재순환에 의한 알칼리도의 변화

### 3-5 황산염 농도의 변화

상분리를 이용하여 유기물을 분해하는 이상소화 공정의 산형성단계는 과부하, 억제제와 독성물질, 그리고 환경변화로부터 메탄형성단계를 보호하는 완충역할을 하는 것으로 알려져 왔으며, 증류폐액 내에 존재하는 다량의 황산염 농도는 혐기성소화를 방해하는 저해요인으로 인식되어 왔다. 따라서 본 실험에서는 각각의 단계에서 황산염 농도를 측정하여 산형성조가 갖는 완충능력 정도를 조사하였다.

그림 7은 부하에 따른 각 단계의 황산염 농도를 나타낸 그림으로서 모든 산형성 단계에서 황환원 (sulfate reduction) 반응이 일어났음을 알 수 있으며, 산형성균의 활성이 크게 저하되었던 부하 17.2kg COD/m<sup>3</sup>·day를 제외하면 약 35-70%의 황산염 농도가 산형성조에서 환원되었음을 보여준다. 이러한 결과는 황산염 농도가 높은 산업폐수를 처리하

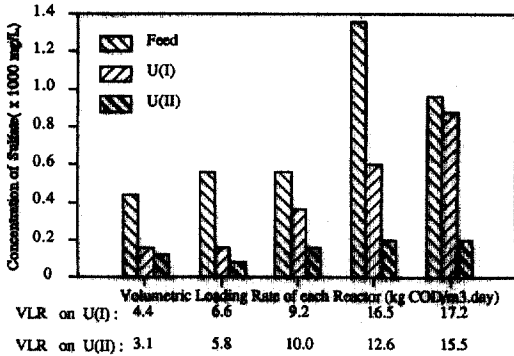


그림 7. 삼분리에 의한 황산염 농도의 변화

는 경우에 이상소화 공정이 단상보다 더 안전하다는 것을 의미하며, 아울러 메탄형성반응에 비해 상대적으로 연구가 빈약한 산형성반응에 대한 체계적인 연구는 혐기성 처리의 적용영역을 확대시킬 수 있는 새로운 계기를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

이상과 같은 실험실 규모의 이상 UASB 공정으로 종류폐액을 처리한 본 실험에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 유입폐수의 pH를 조절하여 산형성균과 메탄형성균의 효과적인 삼분리를 얻을 수 있었다.
- 2) 4.1g/1의 부유물질을 함유하는 주정폐수를 수리학적 체류시간 18일과 유기부하 16.5kg COD/m<sup>3</sup>.day에서 처리하였을 때 단위 체적당 산생성율은 3.9g HAc/1.day로 최대값을 보였으며, 정상적인 운전조건에서는 유입폐수내의 황산염 농도의 35-70%가 산형성 단계에서 환원되었다.
- 3) 메탄형성조의 경우 44kg COD/m<sup>3</sup>.day의 부하에서 약 80%의 COD 제거율과 18.5 l/day의 비가스 생성율을 보였으며, 재순환 실험을 제외한 정상적인 운전조건에서 메탄형성조의 단위 COD 제거당 메탄가스 생성량은 0.30-0.32 l CH<sub>4</sub>/g COD로 이론치에 가까운 값을 보였다.
- 4) 산형성조에서는 운전 90일경 부터 직경 2-3mm의 노란색 입상슬러지가 관찰되었고, 메탄형성조에서는 운전 120일이 지난 22kg COD/m<sup>3</sup>.day의 부

하에서 2mm의 검은색 입상슬러지가 형성되었다.

5) 운전 170일 이후에는 알카리도의 주입없이 메탄조 유출수의 재순환만으로도 전체 시스템의 운전이 가능하였다.

6) 부유물질 농도가 4.0g/1인 주정폐수를 본 실험과 같은 이상 UASB 공정으로 처리할 경우 산형성조와 메탄형성조의 체적비를 25:1로 하고, 각각 10kg COD/m<sup>3</sup>.day, 25kg COD/m<sup>3</sup>.day의 부하로 운전한다면 효과적인 처리가 가능할 것으로 기대된다.

#### 감사의 글

본 연구는 동자부 대체에너지 연구의 일환으로 수행되었으며, 연구가 가능하도록 지원해주신 동자부에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Maiorella, B. L., Blanch, H. W. and Wilke, C. R. "Distillery effluent treatment and by-product recovery." *Process Biochemistry*, August, 5-13, 1983.
2. Sheehan, G. J. and Greenfield, P. F. "Utilization, treatment and disposal of distillery wastewater." *Water Research*, 14, 257-277, 1979.
3. Neerow, Nelson L. "Industrial water pollution—origins, characteristics, and treatment." Addison-Wesley Publishing Company, Inc. 1978.
4. Pipin, P. and Verstrate, W. "A pilot scale anaerobic upflow reactor treating distillery wastewater." *Biotechnology Letters*, 1, 495-500, 1979.
5. Braun, R. and Huss, S. "Anaerobic digestion of distillery effluents." *Process Biochemistry*, July/August, 25-27, 1982.
6. Silverio, C. M. and Angro, P. G. "Anaerobic treatment of distillery slops using an upflow anaerobic filter reactor." *Process Biochemistry*, December, 192-195, 1986.
7. Vigreswarm, 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.
8. Hulshoff Pol, L. and Lettinga, G. "New technologies for anaerobic wastewater treatment." *Water Science and Technology*, Vol. 18, No. 12, 41-53, 1986.
  9. Souza, M. E. "Criteria for the utilization, design and operation of UASB reactors." *Water Science and Technology*, Vol. 18, No. 12, 55-69, 1986.
  10. Ghosh, S., Sajjad, A. and Henry, M. P. "Two-stage upflow anaerobic digestion of concentrated sludge." *Bio-technology and Bioengineering Symposium*, 13, 351-370, 1983.
  11. Cho, Y. K. "Performance of a two-stage methane digester for alcohol stillage derived from sugarcane molasses." *Biotechnology Letters*, Vol. 5, No. 8, 555-560, 1983.
  12. Ghosh, S., Conrad, J. R. and Klass, D. L. "Anaerobic acidogenesis of wastewater sludge." *J. Water Pollut. Control Fed.*, Vol. 47, No. 1, 30-44, 1975
  13. 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.
  14. Cohen, A, Germert, J. M., Zeotemeyer, R. J. and Breure, A. M. "Main characteristics and stoichiometric aspects of acidogenesis of soluble carbohydrate containing wastewater." *Process Biochemistry*, 19, 228-232, 1984.
  15. Lettinga G. and van Velsen, A. M. F., Hobma, S. W., de Zeeuw, W., and Klapwijk, A. "Use of the Upflow Sludge Blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment." *Biotechnology and Bioengineering*, 22, 699-734, 1980.
  16. Cohen, A. and Zoetemeyer, R. J. "Anaerobic digestion of glucose with separated acid production and methane formation." *Water Research*, 13, 571-580, 1979.
  17. APHA, "Standard methods for the examination of water and wastewater." 16th edition, American Public Health Association, N. Y., 1985.

(接受 : 1990. 9. 20)