

폐수처리 미생물

(여덟번째)



정재춘 교수
 <연세대 보건과학대학 환경과학과>

IV. 혐기성 처리공정

2. 혐기성 소화

(2) 소화의 저해물질

혐기성처리에 독성, 또는 저해작용을 보이는 물질은 많은데, 그 농도는 물질에 따라 다르다. 중금속 1mg/L, 칼륨염, 나트륨염이 100mg/L 정도의 저농도에서는 활성화를 자극시키나 농도가 증가함에 따라 생물학적 활성이 감소하고 농도가 현저히 높아지면 소화가 전혀 일어나지 않게 된다. 독성물질은 효과적으로 제거되어야 하며 경제적이여야 한다. 이러한 방법에는 폐수로 부터 독물을 제거하는 것, 유해한 농도이하로 희석하는 것, 침전이나 불용성 염을 형성시켜 제거하는 것, 또는 길항물질을 첨가시켜 중화하는 것 등이 있다.

「알카리」염 및 「알카리」토티움은 도시하수오니에는 낮은 농도로 존재하며 공장폐수중에 많아서 혐기

성 처리를 저해하는 수도 있다. <표 7>에는 이러한 양이온의 필요농도와 저해농도를 보였다(McCarty, 1964). 필요농도란 처리효율을 최고로 달성하기 위해 필요한 농도이다. 약저해농도는 순화시키면 인내 가능한 농도인데, 이러한 농도가 급격히 주어지면 수일간부터 1주간 분해를 지체시킬 수 있다. 강저해농도에서는 혐기성처리를 진행시킬 수 없다. 양「이온」이 공존하는 경우에는 독성이 증가, 또는 감소하는 것도 있다. 1개의 양이온이 저해농도가 되어도 길항「이온」이 존재하면 저해를 억제할 수 있다. 나트륨과 「카드미움」은 길항적으로 작용한다. 예를들어 「나트륨」 7,000mg/L가 함유되어 있으면 혐기성처리를 방해하는데, 칼륨을 3,000mg/L첨가하면 방해가 감소된다.

「암모니아」는 NH_3 또는 NH_4^+ 로서 존재 하는데 양자와 PH간에는 평형관계가 있다. NH_3 는 NH_4^+ 보

다 상당히 낮은 농도에서도 저해작용을 한다. 「암모니아」성 질소의 분석은 이 양자를 가산한 농도인데 이 농도가 1,500~3,000mg/L이고 PH가 7.4~7.6보다 높으면 NH_3 가 저해작용을 가진다. 「암모니아」성 질소가 3,000mg/L 이상이 되면 PH에 관계없이 저해한다.

유화물의 농도는 「탱크」내의 PH와 단위오니당 「가스」발생량에 의해 결정되며 PH가 낮고 「가스」발생량이 많을수록 발생「가스」와 함께 휘산하는 유화물량도 많게된다. 가용성 유화물은 순화가 안된 상태에서는 50~100mg/L, 순화가 되면 200mg/L까지 저해작용이 없는데, 200mg/L 이상이 되면 독성을 나타낸다.

가용성 동, 아연, 「니켈」 등은 저농도에서 혐기성처리에 독물로서 작용한다. 6가 「크롬」은 독성이 있지만 「탱크」내에서는 3가 「크롬」으로 되어 독성을 나타내지 않는다.

가용성 중금속은 유화물과 결합하여 불용성의 염을 형성하고 미생물에 대한 악영향을 보이지 않는다. 따라서 중금속이 고농도로 존재하여도 이에 대응하는 유화물이 존재하면 유해작용을 나타내지 않는다. 중금속 1mg/L가 침전물을 형성하는데 필요한 유화물의 양은 약 0.5mg/L이다. 유화물이 충분히 없는 경우는 유화「소다」 또는 혐기적 조건에서 유화물을 형성할 수 있는 황산염을 첨가하면 좋다.

많은 유기질도 고농도가 되면 소화저해물질이 되는데 연속공급을 행하면 「탱크」내가 완전혼합이 되기 때문에 농도가 낮아지므로 충분히 처리할 수 있다. 「메타놀」은, 회분법에서는 1,000~2,000mg/L에서 저해되는데 연속공급식으로 하면 10,000mg/L에서도 성공한다. 또한 침전물을 형성하는 유기질은 상당히 고농도에서도 처리할 수 있다. 예를들어 「올레핀」산 「소다」는

500mg/L이상에서 저해작용을 하는데 염화칼륨을 첨가하면 불용성의 「칼륨」염을 형성하고 조내농도가 2,000~3,000mg/L가 되어도 방해작용을 하지 않는다. 하수오니중의 지방산은 일반적으로 불용성「칼륨」염이 되므로 악영향을 미치지 않는다. 소화세균에 대한 중금속의 독성은 용해 또는 「이온」화하고 있는 금속농도에 의존하며 전금속 농도에 의존하는 것이 아님을 Lawrence 등(1965)이 실험적으로 입증하였다. 즉, 동, 아연, 「니켈」, 철 등의 금속의 황산염과 염화물을 각각 실험소화조에 첨가하였는바, 황산염을 첨가한 쪽은 황산염을 환원시켜 불용성의 금속 유화물을 형성시켜 침전하였기 때문에 소화저해는 일어나지 않았다. 그러나 염화물을 첨가한 경우에는 10~20시간 이내에 「가스」발생이 정지하였다. 산생성균에 대하여 가장 독성이 강한 것은 「니켈」이며 철은 가장 독성이 약

하다. 「캘리포니아」 Palo Alto시에서는 도금폐수가 유입되어 종종 오히려 중금속이 500mg/L정도 축적하고 소화기능이 악화되었다. 이때 공업용 아황산소다를 투입하였더니 소화가 정상으로 회복하였다.

한편, 유화물도 농도가 높게 되면 돌연히 강한 독성을 나타낸다. Lawrence 등(1966)은 용해성 유화물이 200mg/L(「S」로서)이하인 경우에는 독성이 없는데 이 이상이 되면 독성을 나타낸다고 보고하였다. 불용성 유화물은 적어도 400mg/L(「S」로서)이하의 경우에는 독성이 없기 때문에 철을 첨가하여 유화물로 침전시켜 유화물의 독성을 감소시킬 수 있다.

음「이온」계면활성제도 오히려 축적되면 소화기능이 저하한다. 須藤 등(1963)은 ABS(경성세제), LAS(연성세제)를 소화조에 첨가시켜 소화저해의 경향을 검토하였다. ABS가 400~700mg/L(고형분 중 0.8~1.4%)정도 되면 「가스」발생량이 저하하고 유기산의 축적이 발생하였다. LAS는 ABS보다 영향이 적었다. 한편, LAS도 혐기성 소화에 있어서 ABS와 같이 제거율이 나쁘다고 하는 보고도 있다(The Surveyer, 1965). 따라서 현재에는 LAS가 보급되어 있기 때문에 합성세제의 분해는 호기성 「프로세스」로 진행시켜 합성세제가 축적된 상태에서 혐기성 처리로 들어가지 않도록 할 것이 중요하다.

(3) 부하 및 영양의 균형

소화조의 부하는 투입고형물 또는 휘발성 물질(열작감량)kg/소화조 용량m³/day, 투입 휘발성물질 kg/소화조에 존재하는 휘발성 물질 kg/day, 투입 BOD 또는 COD kg/day, 소화조에 존재하는 휘발성 부유물질(VSS) kg/day로 표현되고 있다. 일반적으로 투입 휘발성물질(VS)kg/m³/day가 부하의 기준으로서 가장 많이 이용된

〈표 6〉 각 온도에 있어서 소화오니의 분석결과

	투입오니	소 화 오 니		
		20℃	30℃	50℃
총 고 형 물 (g / l)	56.78	42.51	41.54	42.23
휘발성고형물 (g / l)	28.28	14.38	13.33	13.09
지 방 (g / l)	8.60	3.35	3.18	3.72
유 기 성 질 소 (g / l)	1.806	1.092	0.882	0.735
암모니아성질소 (g / l)	0.254	0.968	1.178	1.325
유 기 탄 소 (g / l)	16.50	8.03	7.95	7.64
무 기 탄 소 (g / l)	1.56	2.92	2.77	2.81
휘발성유기산 (mg/l)	2,000	-	-	-
pH	6.6	7.5	7.9	8.2
오니가스생성량과성분				
오 니 가 스 (ml/e 오니)		14,150	14,910	15,410
메 탄 (ml/e 오니)		11,220	11,280	11,620
CO ₂ (ml/e 오니)		2,790	3,470	2,640

(Maly 등, 1971)

〈표 7〉 「알카리」 및 「알카리」토류염의 필요농도와 저해농도 (mg/L)

양 이 온	필요농도	약조해농도	강조해농도
나 트 륨	100~200	2,500~5,500	8,000
칼 륨	200~400	2,500~4,500	12,000
칼 슘	100~200	2,500~4,500	8,000
마 그 네 슘	75~150	1,000~1,500	3,000

(McCarty, 1964)

다. 중온소화에 있어서는 경험적으로 0.6~1.6kg VS/m³/day의 유기물부하로 가동되는 것이 많다. 소화에 있어서는 「가스」화가 제한요인이 되기 위우므로 소화조의 부하는 약간 낮게 가동시키는 것이 바람직하다. 통상 1.0kg VS/m³/day 이하로 조작하면 유기산의 축적이 발생하기 어렵다.

혐기성처리도 생물처리이므로 원래, 조내에 존재하는 미생물량을 기준으로 하여 유기물부하를 결정하는 것이 중요한데, 조내 혐기성 세균의 「바이오·매스」를 측정하는 것은 매우 어렵다. Agardy등(1965)은 오니중의 DNA를 측정하여 이로부터 소화조중의 미생물량을 추정하였고 DNA를 기준으로 한 유기물 질부하의 표현방법을 검토하고 있다.

미생물량의 측정에는 세포와 그 구성성분과의 관계를 이용하는 것이 유리하다. 특히 DNA는 모든 세포의 핵에만 존재하므로 그 함량은 상대적으로 일정하기 때문에 DNA의 분석으로 미생물의 농도를 측정할 수 있다. 순수배양한 미생물의 DNA함량은 건조중량중 3.8%(2.8~4.8%)이다. 미생물의 건조중량중 92%가 유기질이므로 휘발성 물질(유기질)중의 DNA함량은 약 4.1%(3.1~4.8%)이다. 또한 DNA농도가 세포의 핵, 즉 세포수에 비례한다고하는 가정은 최근 많은 연구에 의해 입증되고 있다.

須藤(1979)는 전형적인 가정하수로 부터 발생한 오니를 처리하는 E, S, O(소화일수는 각각 31, 44, 22일)의 소화조를 선정하여 매주 2회 8주간 계속하여 소화조중의 오니를 채취하여 통상의 오니 시험과 비색법에 의한 DNA농도의 측정을 행하였다.

DNA농도는 예기한 것보다도 높았으며 휘발성 물질의 함량은 다음과 같다.

E 3.12~3.92(평균 3.61%)

S 3.22~4.42(평균 3.75%)

O 2.97~4.29(평균 3.67%)

이상의 총평균은 휘발성물질중 약 3.7%가 되며 조내 오니중에 있어서 유기물의 90%는 생물체로 보여진다(3.7/4.1×100=90%). 더우기 E 및 S에 있어서 생오니중의 DNA함량은 각각 1.95%, 1.78%로서 조내 오니의 약 $\frac{1}{2}$ 이었다.

여기서 얻어진 결과는 소화일수가 20일 이상 되는 소화조에서는 상상이상으로 미생물농도가 높은 것이든가, 아니면 「알데하이드」나 탄수화물같은 물질을 다량으로 함유하기 때문에 DNA분석을 방해했던가, 어느 한쪽이 원인일 것이다.

소화조내의 DNA농도, 투입오니량 및 그 휘발성물질농도로 부터 다음과 같이 부하계산을 할 수 있다.

$$F = \frac{\text{1일에 투입하는 기질량(kg)}}{\text{DNA(kg)}}$$

E, S, O에 있어서 DNA에 대한 부하는 각각 3.22, 3.44, 6.75kg 휘발성 물질/kg DNA/day가 되며 O는 E의 약 2배의 부하를 나타내고 있다. 그러나 소화조 용량에 대한 부하는 E, S, O 각각 1.6, 1.3, 1.8kg 휘발성물질/m³/day로 별 차이가 없고 미생물농도를 기준으로 한 부하와는 전혀 일치하지 않는다. 미생물농도의 지표로서 휘발성물질 농도를 이용하는 것은 합리적인 것 같다. 그러나 소화기능이 저하한 경우, 소화조중의 휘발성 물질은 증가해 가지만 휘발성물질에 대한 부하는 감소한다. 이러한 경우에도 DNA에 대한 부하는 증가를 나타내며 합리적으로 부하를 결정할 수 있다.

Sander등(1965)은 혐기성 분해에 미치는 탄질비의 영향을 검토하고 있다. 탄소화합물의 공급량이 증가하면 이상현상이 나타나는데 Leucine같이 질소를 함유한 화합물에서는 질소부족에 의한 소화기능의 저

하가 발생하지 않는다. 혐기성처리에 있어서도 탄질비가 적절한 것이 중요한데 C:N=1:0.06이상인 것이 바람직하다. 암모니아성 질소는 중화반응에 관여하고 일반적으로 암모니아성 질소가 감소하면 「알카리」도 감소하여 유리된 산을 형성하고 PH의 저하가 발생하여 분해가 저해된다. 이러한 것은 과부하의 경우에 나타나기 쉽다.

3. 정확도에 관여하는 미생물군

혐기성 소화는 자연계에서는 부영양호나 오염된 하천의 저부에서 볼 수 있는 현상이다. 자연계에서는 세균외에 여러 종류의 생물이 관여하는데 소화조는 주로 혐기성 세균으로 구성된 미생물 생태계이다. 혐기성 세균에는 산소가 존재하면 증식할 수 없는 세균(절대 혐기성 세균)과 산소의 유무에 관계없이 증식할 수 있는 세균(임의 혐기성 세균) 등이 있다. 유입폐수는 BOD가 높으므로 호기성 상태에서 세균이 증식한 후에는 산소가 결핍되어 각종의 혐기성 세균이 증식한다.

일반적으로 유입폐수가 악취를 발하는 것은 혐기성 세균이 증식한 결과, 유화수소, 「아민」, 「스카톨」 등이 생성되기 때문이다. 도시하수의 방류수에는 절대 혐기성 세균인 유황환원세균, *Desulfovibrio desulfuricans*가 10²~10³/ml 정도 존재한다. 도시하수의 유입수의 용존산소는 0~1.0mg/L, 최초침전지 유출수의 용존산소는 1.0~2.0mg/L가 많기 때문에 최초침전지에서 제거된 「슬러지」는 혐기성이다. 따라서 침전오니중에는 절대 및 임의 혐기성 세균이 증식한다. 최초 침전지에서 혐기성 발효가 활발하게 되면 오니의 부상이 일어난다. 활성오니에는 절대 혐기성세균은 거의 존재하지 않는데 임의 혐기성세균은 상

당히 많다. 이 때문에 산소가 부족하게 되어 이러한 세균이 혐기적 대사를 시작하면 최종 침전지에서 탈질, 「슬릿지」부상 등의 원인이 된다.

생물막은 내부가 혐기적 조건이므로 입의 및 절대 혐기성세균이 상당히 존재한다. 대변중에는 많은 혐기성 세균이 존재하며 대장균, 장구균, *Clostridium welchii* 등의 지표세균 이외의 혐기성 세균도 많다. 예를들어 *Bacteroides*는 대변 1g 중에 10^{10} 개체 존재한다. 대변은 배설되어 분뇨로서 수집·처리되기까지는 상당한 시간이 경과하므로 혐기성 발효가 상당히 진행된다고 생각된다. 「슬릿지」도 배출후 부터 농축 등의 조작을 거치기 때문에 이 사이에 혐기적 조건을 가지게 된다. 이렇게 「슬릿지」및 분뇨를 소화조에 투입할 때는 혐기성 세균이 충분히 증식하고 있는 상태이다.

오니 및 분뇨는 단백질, 지방, 다당류를 주로 함유하므로 이러한 것이 소화조에 투입되면 가수분해가 일어나며, 곧이어 휘발성 산이 생성되고 최종산물로서 메탄이 생성된다.

혐기성 소화의 단계는 보통 액화와 가스화로 구분되는데, 액화를 또한 가수분해와 휘발성 산 생성단계로 나누기도 한다.

가수분해에 관여하는 세균은 산 생성에도 관여하는 것이 많다. 액화와 「가스」화를 각각 메탄 비생성 과정과 메탄 생성과정이라고도 부른다. 혐기성 세균, 특히 절대 혐기성 세균은 배양방법 및 순수배양이 어렵기 때문에 소화조에서 분해에 관여하는 세균에 대해서는 충분한 지식이 축적되어 있지 않다. Crowther 등(1975)은 소화조에 출현하는 세균과 그 역할을 요약·정리하고 있는데, 이하에 이것을 중심으로 소개한다.

가. 혐기성 가수분해세균

〈그림 7〉에는 소화과정을 가수분해, 휘발성 산생성, 메탄생성의 3 단계로 나눠 그 개요를 보인 것이다. 오니의 주성분은 지방, 단백질, 다당류인데, 가수분해균에 의해 지방은 단백질과 긴사슬형 지방산, 단백질은 아미노산, 다당류는 단당류와 2당류로 각각 분해된다.

단백질의 가수분해에는 세포의 효소인 「프로테아제」의 작용이 중요한데 폴리펩타이드, 「올리고·펩타이드」, 「아미노」산으로 변화시킨다. Siebert 등(1969)은 혐기성오니로부터 65×10^6 개/ml의 단백질분해균을 계수하였다. 이 중, 65%는 7종의 *Clostridium*을 포함하는 포자형성 세균이었다. 21%는 구균이었으며 나머지는 포자를 형성하지 않는 간균이었다. 또한, Hobson 등(1971)은 단백질분해세균으로서 *Clostridium*과 *Bacteroides*를 동정하였다.

소화조에 식물유가 투입되면 「가스」발생이 현저하게 증가하는 것이 일찍부터 알려져있다. 이것은 소화조중에서 식물유의 분해활성이 높은 것을 의미한다. 「에테르」가용성 물질이 고형분중 19.7%가 되는 투입오니는 소화오니에서는 고형분

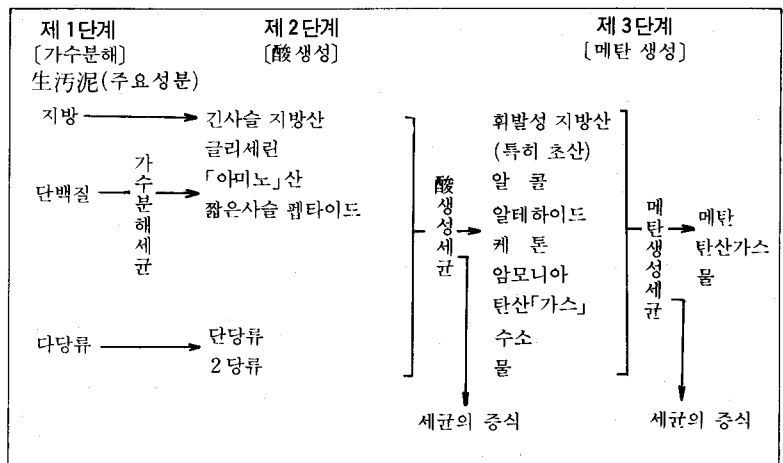
중 4.6%로 감소되고 있고, 오니의 안정화에는 지방분해세균이 얼마나 중요한가를 알 수 있다. 그러나 지방 분해세균에 관한 정보는 적다. 식물유를 함유하는 오니의 소화액 중에는 *Vibrio*가 검경에 의해 다수 출현하고 있으므로 이러한 세균이 지방의 분해에 관여하고 있다고 생각된다.

하수의 소화오니로부터 「셀룰로스」분해균이 분리되고 있다. 그러나 투입오니에는 「셀룰로스」분해세균의 농도는 연구자에 따라 달라지는데, Hobson 등(1971)은 $10^4 \sim 10^5$ /ml의 범위라고 보고 하였다.

그가 분리에 성공한 세균은 「그람」양성, 만곡형 간균(*curved rods*)인데, 주로 「프로피온」산을 생성하며 소량의 개미산, 젖산, 초산을 생성하였다.

Hobson 등(1971)은 「헤미셀룰로스」를 가수분해하는 세균을 4×10^4 개/ml 계수하였다. 그가 분리한 10개의 분리세균중 9개의 세균은 *Bacteroides rumenicola*였다. 분리된 세균은 모두 전분의 가수분해능이 있었다.

〈다음호에 계속〉



〈그림 7〉 오니소화의 3단계 (Crowther 등, 1975)