

토양미생물을 이용한 축산폐수 처리의 공정별 제거효율 및 동력학적 상수

박완철¹⁾ · 신남철²⁾

한국과학기술연구원 수질환경연구센터¹⁾ · 동아대학교 부설 환경문제연구소²⁾

Swine wastewater treatment with soil microbes and its efficiency and dynamic parameters

Wan-Cheol Park¹⁾, Nam-Cheol Shin²⁾ (¹⁾Water Envi. Res. Cent., KIST, Seoul 136-791, Korea, ²⁾Environmental problems Research Institute, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea, Tel:051-200-6479 Fax:051-200-6984, e-mail: shinnc51@hanmail.net)

ABSTRACT : Removal rate of swine wastewater containing organic matter was 99 percent in case of high loading rate. The studies of swine wastewater treatment aim to development of process using soil microorganism. Microorganism was devoted to improve the treatment efficiency of the process. Biochemical oxygen demand (BOD) concentration of treated swine wastewater was under 150 mg/L in anaerobic reactor. Also, value of k_m and Y were 0.73 hr^{-1} and $0.433 \text{ g/VSS/g BOD}_{\text{dm}}/\text{d}$ at microorganism of post aeration tank in anaerobic reactor.

Key words : BOD_{dm}, k_m , K_d , K_e

서 론

1995년 말 국내 축산폐수 공동처리장의 처리시설 용량은 $9,050 \text{ m}^3/\text{d}$ 로 집계되었으나 실제 수용 가능한 처리능력은 25-50% 수준밖에 되지 않는 것으로 알려져 있다. 이는 처리공정의 선정에 우선하는 문제로 기존의 처리공정으로 실제 유입 부하를 수용하기 위해서는 회석 전처리를 하거나 낮은 수리학적 부하상태로 운전할 수밖에 없다. 회석할 경우 부하조절은 가능하나 수자원 보전이라는 측면에서 볼 때 비효율적인 발상이라고 생각된다. 따라서 본 연구에서는 축산폐수를 경제적으로 처리할 수 있는 공정을 검토하고 아울러 처리효율을 증가시키기 위하여 미생물 균체를 배양하여 실험에 사용하였다. 이 연구에서는 공정별 제거효율, 유기물 제거에 미치는 공정의 영향, 부하가 처리에 미치는 영향, 및 동력학적 상수 도출 등의 내용을 검토하였다.

실 험

장 치

실험 장치의 구성은 저류조, 혐기조, 미생물x 조, 혼합조, 폭기조, 호기조 및 침전조로 구성하였다. 실험장치의 기본적인 구성을 Fig. 1에 도시하였다.

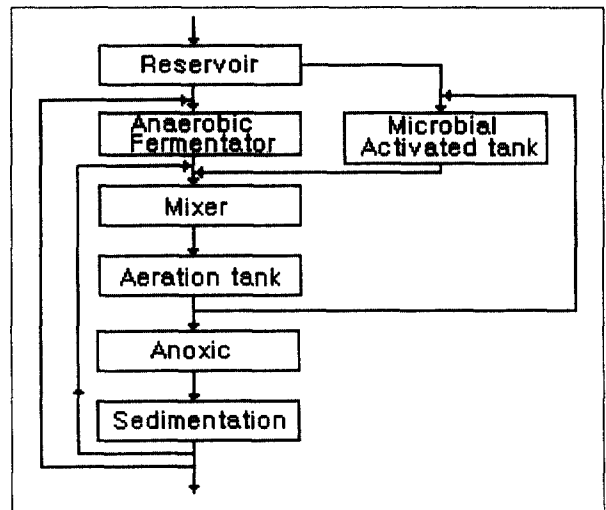


Fig. 1. Flow sheet of swine wastewater treatment process.

시 료

축산폐수 시료는 스크래퍼식 양돈 시범단지에서 채수하여 조 절후 사용하였다. 처리공정으로 유입되는 조절폐수의 농도를 Table 1 에 제시하였다.

Table 1 에 제시한 유입수 성상은 채수 시기에 따라 크게 변 화되는 것으로 나타났고 특히 SS의 함량은 하절기에는 낮고 동 절기에는 높게 나타나 하절기에 폐수량 증가로 회석효과를 나타

Table 1. The character of influent wastewater in treated process.

(mg/L)

date	SS	COD	BOD	TKN	NH ₃	P	alkalinity
97.4.16	19163/14938	21853/5574	10400/3800	2076	1434	537/257	5015
97.5.30	17230/13400	18430/6650	10500/2080	1815	1293	552/274	3940
97.6.26	8000/6420	19436/10250	9000/5200	1793	1326	343/214	4930
97.7.18	6330/5067	17000/11520	10870/7200	1361	1108	240/97	4560
97.10.7	5564/4710	15720/12100	12100/5900	3070	2616	294/103	5920
98.2.18	10980/7940	21400/8740	9150/2125	1950	1300	730/190	4800
98.3.11	12100/9980	21300/9980	13000/4700	2670	840	550/90	5240
98.4.3	14970/11770	28640/11120	15500/7700	2304	1196	490/210	5415

내고 있다. 따라서 전처리 과정이나 농도의 균등화 과정 없이 생물학적 처리 공정으로 축산폐수가 유입될 경우 충격 부하로 인해 처리에 어려움을 줄 수 있을 것이다. 돈사에서 발생된 폐수의 유입수 BOD 농도 90,000 에서 15,000 mg/L, N 과 P 는 평균 2,138과 520 mg/L 이었다. 그리고 활성 슬러지 미생물만으로는 고부하 폐수를 처리하는데 어려움이 있어 활성도가 높고 고부하에 적응력이 강한 토양 미생물을 토양 시료로부터 균체를 배양하여 실험에 사용하였다. 분석은 축산폐수, 처리수, 공정 배출수, 잉여 슬러지를 대상으로 하였으며 standard method 13th.와 공해공정 시험법을 적용하였다^{1,2)}.

운 전

저류조에서 혐기조로 유입 유량의 90%, 미생물 활성조에 10%를 공급하고 운전 조건에 단위공정을 변화시켰다. 혐기조는 상온과 중온(35℃)에서 운전하였다. 슬러지 반송은 유입유량의 250%로 고정하였고 폭기조의 MLSS는 10,000-14,000 mg/L로 평균 12,500 mg/L을 유지하였고 잉여 슬러지는 주 2 회 인발하였다. 미생물 활성제로 사용한 bio - clod 는 6 개월에 1회 주입하였고 폭기는 0.3kg/cm² 의 압력을 사용하였으며 폭기장치는 미세 산기석을 사용하였다. 혐기조는 무산소조로 부터의 슬러지 반송이 없고 유입유량의 50%가 폭기조로부터 혼합조로 반송되는 것

을 의미하고 혐기조 + 무산소조의 경우 폭기조로부터 25%가 혼합조로 무산소조로부터 25%가 혐기조로 반송하였다. 처리공정의 운전조건을 Table-2 에 요약 정리하였다.

BOD VLR과 TN VLR은 전체 공정의 용적에 대한 부하율이고 F/M 비는 폭기조 유입수에 대한 폭기조 평균 MLSS에 대한 것이다.

결과 및 고찰

공정에 따른 유기물 제거량 변화

운전기간에 따른 처리수 BOD 농도변화와 제거율을 서로 관련시킨 내용을 Fig.2 에 도시하였다.

Fig. 2 를 검토하여 보면 유출수의 BOD와 SS 농도는 밀접한 관계를 나타내고 있으며 부하가 증가함에 따라 처리효율도 악화되는 것을 알 수 있다. 부하율 1.13kg/m³/d 까지는 혐기조를 상온 상태에서 운전한 것이고 0.59와 0.86kg BOD/ m³/d 는 중온 혐기조에서 얻은 자료이다. 상온 혐기조에서는 유입부하가 0.62 kg BOD/m³/d 이하의 조건에서 유출 BOD는 26~148mg/L로서 추가 시설 없이 150mg/L를 유지할 수 있다. 부하가 0.85kg BOD/ m³/d 이상인 경우 평균 유출 BOD가 164~397mg/L로 제거효율은 96.6% 이상이었으나 혐기처리 후 폭기조만의 부하는 0.87과

Table 2. Process operating conditions

Item	flow rate L/d	BOD VLR kg BOD/m ³ /d	F/M ratio kg BOD/kg MLSS/d	TN VLR g TN/m ³ /d	operating temperature
anaerobic fermentator	1.00	0.401	0.040	79.2	room temp.
	1.78	0.611	0.075	123.3	
	1.00	0.415	0.051	68.4	
	1.80	0.831	0.099	93.5	
anaerobic fermentator	2.44	1.127	0.128	285.9	mesophilic
	1.78	0.621	0.078	132.5	
anaerobic fermentator + anoxic	1.85	0.859	0.100	176.4	
anaerobic fermentator + anoxic	2.10	1.218	0.098	184.0	mesophilic

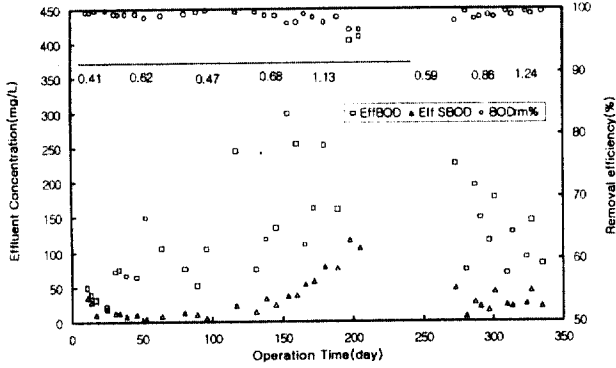


Fig. 2. Effluent BOD concentration to operating time.

1.45kg BOD/m³/d 이었다. 중온 혐기조와 중온 혐기조 + 무산소조로 구성된 공정에서 부하 증가에 따른 유출 BOD 는 큰 변화가 없었다. 이는 아마도 중온 혐기조가 상온 혐기조보다 유기물 제거효율이 증가해 고농도 폐수의 유입으로 인한 폭기조내의 미생물에 대한 영향이 크게 감소한 것이 원인인 것으로 생각된다. 즉 전공정의 유입부하는 0.59~1.24kg BOD/m³/d로 있었으나 혐기처리된 후속 폭기조의 부하는 0.73~1.39kg BOD/m³/d로 혐기조 유입부하의 변화에도 폭기조에서는 부하의 변화폭이 크게 나타나지 않았다. 중온 혐기조와 중온 혐기조 + 무산소조로 운전할 경우 유출 BOD는 145.2, 125 및 106.3mg/L로서 부하의 증가에도 유출 BOD의 농도가 감소되는데, 이것은 폭기조 후속공정의 개선으로 SS의 유출이 감소된 것이 원인인 것으로 생각된다. SS의 제거율은 93% 이상으로 유출 농도가 120에서 900mg/L로 상온 혐기조 방식에 비해 낮게 유지되었다. 운전기간에 따른 SS와 COD 유출 특성을 정리하여 Fig.3에 도시하였다.

Fig. 3을 검토하여 보면 COD 제거효율은 78.8~96.4%로 BOD 제거율에 비해 다소 낮은 결과를 나타내고 있으나 박³⁾의 경우 BOD와 COD 제거율이 각각 90과 75%인 것에 비해 COD 제거율은 크게 개량된 것으로 나타났다. 유출수의 COD는 약 654~2950mg/L로 부하에 따라 차이가 있으나 BOD보다도 부하 증가에 따른 영향을 크게 받는 것으로 나타났다. 그러므로 축산폐수 처리장 공정 설계시 방류 수질 규제 항목으로 COD를 검토하

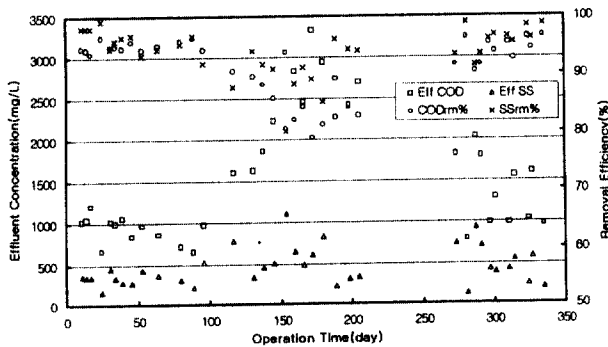


Fig. 3. Effluent COD and SS concentration to operating time.

는 것이 바람직 할 것으로 생각된다. COD는 상온 혐기조에 비해 큰 폭으로 향상되어 유출농도가 250~2030 mg/L 이고 처리효율은 90.5~96.6%로 BOD 제거효율과 비슷한 처리특성을 나타내고 있다. 폭기조 유입부하가 가장 높은 중온 혐기조 + 무산소조 방식으로 운전하는 경우 유출 BOD는 약 106.3, COD는 1197 및 SS는 343mg/L로 유사한 부하조건에 비해 아주 좋은 처리특성을 나타내고 있어 유기물 제거를 위한 공정으로 적합할 것으로 생각된다.

부하의 영향

Fig. 4는 용적부하와 포기조의 용적부하에 따른 유출 BOD 농도를 제시하였다.

Fig.4를 검토하여 보면 상온 혐기조(case 1)와 중온 혐기조(case 2)에서 상온 혐기조의 경우 부하가 증가함에 따라 TBOD와 SBOD는 증가하며 특히 0.7kg BOD/m³/d 이상의 부하에서 유출수의 TBOD가 급격히 악화되었다. 그 이하의 부하조건에서는 TBOD의 유출농도가 100mg/L 이하로 유지되었다. 그러나 중온 혐기조의 경우 SBOD는 부하에 비례하여 유출농도가 증가되나 TBOD의 경우는 약간 감소하였다. 이러한 유출 특성을 나타내는 원인은 아마도 슬러지의 부상현상으로 인한 SS의 유출이 처리수내의 BOD 변화를 유발하게 되는 것과 관련하여 설명될 수 있을 것으로 생각된다. Fig.5는 BOD 부하량이 유출 COD와 SS 농도와의 상호관계를 도시하였다.

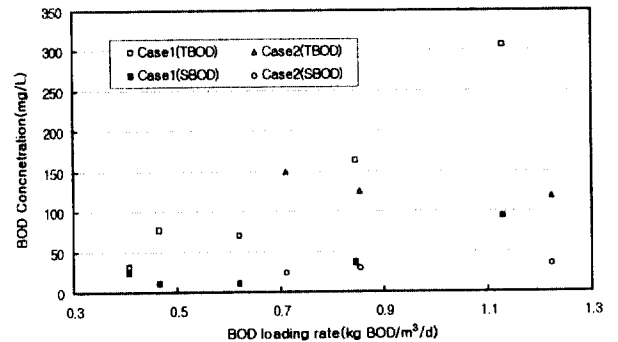


Fig. 4. Effluent BOD concentration to BOD volumetric loading rate.

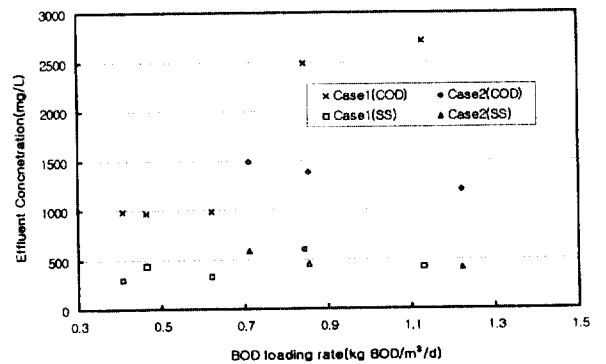


Fig. 5. Effluent COD and SS concentration to BOD volumetric loading rate.

Fig.5 는 혐기조를 거친 후 포기조의 유입부하에 따른 COD와 SS 유출특성을 나타낸 것으로 BOD 농도 변화와 유사하게 증은 혐기조에 의한 처리가 BOD와 유사하게 상온 혐기조 방식보다 양호한 처리수질을 얻을 수 있었다.

공정별 제거효율

Fig. 6 과 7은 상온 혐기조, 증은 혐기조 및 증은 혐기조 + 무산소조 처리방식에 따른 단위공정의 TCOD 와 SCOD의 유출 특성을 나타낸 것이다.

Fig. 6에서 SS나 BOD의 경우 유입수의 정상 변화가 너무 커서 객관적인 비교가 곤란하므로 COD를 검토 항목으로 하였다. COD는 질소 및 인 제거 공정과 관련하여 Randall²⁾ 등은 COD/N 비와 COD/P 비가 제거효율을 결정하는 가장 주요 인자로 제시하는 등 전체공정에서 폭기조로 유입되는 COD 값은 영양소제거를 위해 반드시 평가되어야 할 요소이다. TCOD의 경우 반송수에 포함된 슬러지로 인해 유발된 COD의 영향으로 혼합조와 폭기조의 유출농도가 전단계의 혐기 유출 COD 에 비해 높게 나타났다. TCOD의 경우 초기유입 농도는 큰 편차가 있으나 혐기조를 거친 후 제거효율은 각 처리 방식에 따라 27, 30 및 35% 이었으며 혼합 공정에서도 유사하였다. TCOD의 제거효율은 유입수와 혐기조 및 최종 유출수에서 비교할 수 있으며 최종 제거효율은 각 처리 방식에서 각각 94.9, 93.5 및 93.3%로 상온 혐기조가 제거율이 가장 높았다. 상온 혐기조의 경우 폭기조와 처리수 간의 제거효율이 93.9% 이었다. 이는 EPA⁴⁾와 Randall⁵⁾의 주장과 같이 침전지에서 중속 미생물의 활동으로 증은 혐기조나 증은 혐기조 + 무산소조에 비해 COD 제거효율이 증가하는 것으로 생각된다.

Fig. 7 에 나타난 SCOD의 유출 특성은 TCOD와 다소 다른 양상을 보여주고 있는데 이는 반송 슬러지의 영향으로 각 단위공정의 유출농도가 유입수의 농도에 영향을 미치는 것으로 생각된다. SCOD는 혐기조를 거치면서 약 50% 이상이 제거되었으나 증은 혐기조 + 무산소조 방식인 경우에는 혐기조에서 SCOD 감소

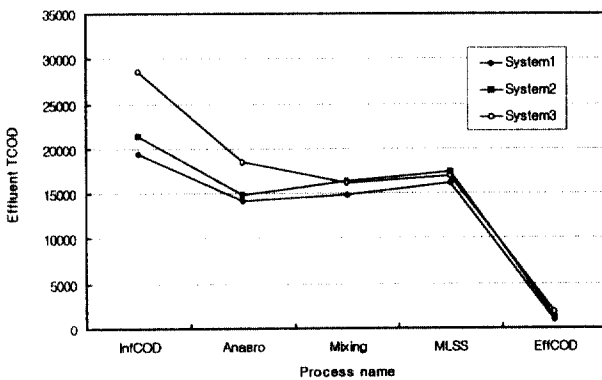


Fig. 6. Effluent TCOD concentration in unit process

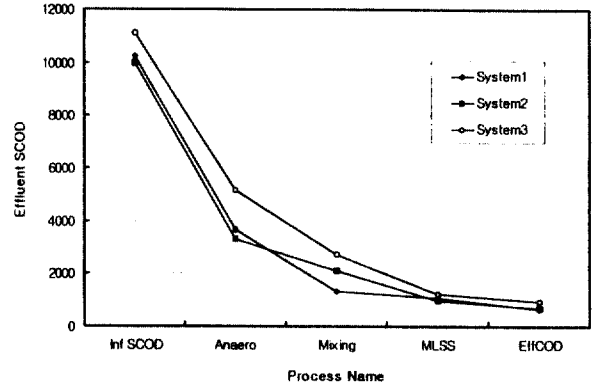


Fig. 7. Effluent SCOD concentration in unit process

Table 3. Removal rate of COD concentration in unit process.

item \ system	anaerobic	mesophilic anaerobic	mesophilic anaerobic+anoxic
inf. con. mg/L	19436/10250	21400/9980	28640/11120
anaerobic tank %	27.1/64.2	30.8/66.8	35.3/53.6
mixer %	-4.6/63.4	-10.5/36.0	12.9/47.4
aeration tank %	-8.9/21.6	-8.2/53.6	-4.8/54.5
sedimentation %	93.9/37.6	92.0/31.1	88.7/24.2

율이 가장 적게 나타났다. 최종 처리수의 용해성 COD는 모든 처리방식에서 90% 이상이었다. 특히 증은 혐기조와 증은혐기조 + 무산소조의 경우 상온 혐기조에 비해 SCOD의 분해가 폭기조에서 크게 나타났다. 이는 정⁶⁾에 의해 제시된 축산폐수의 TCOD와 SCOD의 난분해성 함량이 각각 65.4%와 54.7%라고 제시한 것과는 상당한 차이를 나타내고 있는데 이유는 정⁶⁾이 사용한 축산폐수의 농도가 낮게 고액 분리되기 위해 긴 체류시간동안 생분해성 물질이 제거되어 난분해 성분의 함량이 상대적으로 증가된 것으로 생각된다. 그러므로 본 공정과 같이 고농도의 축산폐수를 처리하는 경우 고액분리에 요구되는 시간이 감소되어 분해가능 성분의 함량이 증가되면서 유기물뿐만 아니라 영양물질 제거에도 유용할 것으로 판단된다. 각 처리 방식별 단위 공정별 COD 제거효율을 Table 3에 제시하였다.

동력학적 상수 도출

본 연구에 적용된 폭기조는 플라그 흐름형 활성슬러지 공법으로 완전혼합형과는 다소 차이가 있으나 폭기조의 단위공정은 완전 혼합형이므로 분해 속도상수는 McKinney와 Monod 공식을 이용하여 검토하였다.

k_m 의 산출

k_m 은 분해되는 기질에 대한 미생물의 물질대사 계수로서 주로 온도 및 기질농도에 의해 영향받는 값이다. k_m 의 산정을 위해

McKinney의 공식중 유출수의 탄소성 BOD 값을 구하는데 사용한 식 1)을 변형하면 $(F_i - F)/t = k_m \cdot F$ 로 나타낼 수 있다.

$$F = \frac{F_i}{(K_m t + 1)} \dots \dots \dots \textcircled{1}$$

- 여기서, F = 유출수의 용해성 BOD(mg/L)
- F_i = 유입수의 BOD(mg/L)
- K_m = 물질대사 계수 (15hr, 20℃)
- t = 원폐수의 포기시간 (hr)

이 식을 실험 결과를 적용하여 얻은 결과를 Fig. 8에 도시하였다.

Fig. 8 을 보면 그래프 물질대사 상수값 k_m 값은 상온 혐기조의 경우 0.64~3hr⁻¹로 평균 0.734hr⁻¹이 있으나 유입수질에 따른 편차가 크게 발생하였다. 중온 혐기조에서 k_m 값은 1.27~1.57hr⁻¹로 평균 1.45hr⁻¹ 이었다. 이것은 중온 혐기조에 의한 처리방식이 상온 혐기조에 의한 처리보다 두배 이상 높은 값을 나타내었다. 이는 중온 혐기조에서 폭기조 전단의 혐기조를 35℃의 중온으로 운전함으로써 유입수내의 난분해성 물질이 가수분해되어 폭기조내의 호기성 미생물에 의해 분해되기 쉬운 물질구조로 변화되었기 때문인 것으로 추측된다. 이러한 결과는 기존의 박³⁾이 0.48~1.09hr⁻¹에 비해 다소 높은 값으로 이는 유입수의 성상이 보다 신선한 상태로 분해성분의 함량이 높은 것이 원인인 것으로 생각된다.

Y, k_d 값 산출

Y 값은 세포 증식계수(g VSS/g BOD_{dm}/d)로 기질제거 당량에 대한 세포의 증가량을 나타내는 값이며 k_d는 내호흡계수(day⁻¹)로서 Monod 식을 변형한 식 2)를 이용하여 산출한 결과를 Fig. 9에 제시하였다.

$$\frac{1}{SRT} = Y(h/M_v) - K_d \dots \dots \dots \textcircled{2}$$

- 여기서, K_s : 반포화 상수의 농도
- M : 기질농도
- Y : 세포증식율
- SRT : Sludge Retention Time

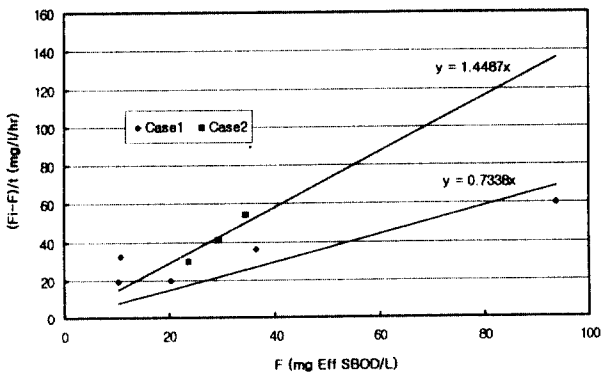


Fig. 8. Calculation of constant of metabolism of substrates , Km(1/hr)

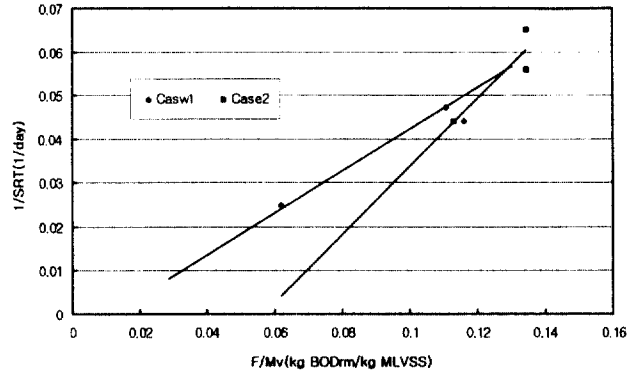


Fig. 9. Calculation of Y and k_d.

Fig.9를 검토하여 보면 Y 값은 기질 제거량에 비례하므로 폐수의 성상에 영향을 받게 되며 k_d 값은 일반적으로 온도의 함수로서 SRT가 길면 커지고 짧으면 내생분해에 적용할 기간이 없어 감소하게 된다. 상온 혐기조에서는 0.433 g VSS/g BOD_{dm}/d와 0.0048 day⁻¹ 이었고 중온 혐기조에서는 0.776g VSS/g BOD_{dm}/d와 0.044day⁻¹로 중온 혐기조의 경우 성장계수나 k_d 값 모두 크게 나타났다. 이는 아마도 물질대사 계수가 크므로 많은 먹이를 섭취할 수 있어 세포 증식율이 크게 되는 것과 나타내는 값이다. 장⁷⁾의 투입기질 농도에 따른 Y 값과 k_d 값의 연구결과에 의하면 두 요소 모두 감소하는 것으로 나타나 있으나 본 연구결과는 오히려 폭기조 부하가 상대적으로 높은 중온 혐기조에서 Y 값은 크고 k_d 값은 증가되어 다소 다른 특성을 보이고 있다.

k_e 값의 산출

k_e 값은 내호흡계수(hr⁻¹)로서 McKinney의 공식중 활성상태의 미생물량을 산정하는 Ma(포기조내의 살아 있는 미생물의 농도)와 Me(내생호흡 상태의 미생물 농도)의 합은 활성 미생물량으로 나타낼 수 있으나 측정 가능한 MLVSS는 Ma+Me+Mi의 값으로 표현된다. 따라서 이들의 표현식을 k_e에 관해 정리하면, k_e는 다음과 같이 표현된다.

$$k_e = [Mv \times t - Y \times (F_i - F) \times ts - Mi \times ts] / [0.2Y \times (F_i - F) \times ts^2 + Mi \times ts - Mv \times ts \times t] \dots \dots \dots \textcircled{3}$$

이 식에서 계산된 Y, F, ts (=SRT), t (=HRT)와 실측된 MLVSS 값을 이용하고 Mi를 유입 VSS의 40%로 가정하는 경우 반응기의 미생물에 대한 내호흡계수를 산정할 수 있다. 이러한 과정을 통해 산정된 k_e값은 0.001 hr⁻¹이하의 낮은 값으로 계산되었다.

기질활용 속도의 산출

폭기조에서의 기질활용 상수를 결정하기 위해 Monod 공식을 변형하여 그래프 해석법을 활용하였다. 변형된 식은 S/v = ks/v_{max} + S/v_{max} 형태로 표현될 수 있으며 S/v와 S관계를 작성하여 나타낸 것이 Fig. 10에 도시하였다.

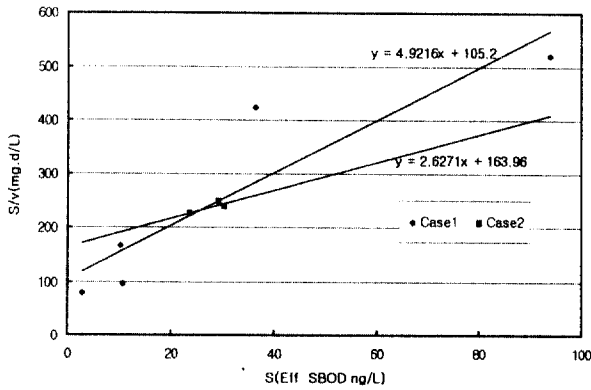


Fig. 10. Calculation of ν_{max} and k_s .

그래프의 기울기의 역수는 ν_{max} 값에 해당되고 절편을 기울기로 나눈 값은 포화정수 k_s 를 나타낸다. 해석결과 혐기조를 상온에서 운전한 Case 1의 경우 비기질 활용율 ν_{max} 와 포화정수 k_s 값은 각각 0.203 mg/mg/d와 21.4mg/L, 혐기조를 중온으로 유지한 Case 2의 경우 0.381 mg/mg/d와 62.4mg/L로 나타나 유입기질의 농도가 증가함에 따라 동역학적 계수 값들이 증가하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 장⁷⁾의 연구결과와 잘 일치하는 것으로 조사되었다.

요 약

토양 미생물을 이용한 고농도 축산폐수의 과부하 처리를 위한 공정개발 연구결과 유기물 제거율은 99%이었다. 상온 혐기조에서

0.7kg BOD/m³/d 이하에서 처리수의 BOD 농도는 150mg/L 이하를 이었다. 상온 혐기조를 운전한 실험에서 후속 폭기조의 물질 대사계수(k_m)는 0.73hr⁻¹, 세포중식계수(Y)는 0.433 g/VSS/g BOD_{rm}/d 였으며 중온으로 운전한 경우 후속 폭기조에서 각각 1.45hr⁻¹과 0.776 g VSS/g BOD_{rm}/d 로 반응계수 값이 두 배에 가깝게 개선되었다.

참 고 문 헌

1. Senold S. Clesceri Arnold E.Greenberg R. Rhodes Trussell, "Standard Methods for the examination of water and wastewater", 17th, edton(1989)
2. 환경부, "환경오염공정시험법"(1991)
3. 박완철 외 "Development of Wastewater Treatment Facilities for Small Live Stock Farms" 한국과학기술연구원, (1993)
4. EPA. "Manual Nitrogen Control", EPA, 626, R-93, 010, (1993)
5. Randall,C.W.et al, "Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal", Vol. 5, *Water Quality Management Library*. (1992)
6. 정팔진 외 "A Study On Behavior of Nutrient and Characteristics of Microbial in Swine Wastewater Treatment", *한국과학재단*, pp.33-43, (1998)
7. 장조은 외 2인, "Effect of retention time and feed substrate concentration on methanogenesis in anaerobic digestion", *토목학회논문보고집*, Vol. 320, (1983)