

생물학적 처리에 의한 돈사폐수의 인제거

신남철[†] · 박정호
동아대학교환경문제연구소

Biological Removal of Phosphorus Containing Swine Wastewater

Nam Cheol Shin[†] and Jeoung Ho Park

Environmental problems Research Institute, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea

(Received 26 August 2000 ; Accepted 25 November 2000)

ABSTRACT

The studies of swine wastewater treatment aim to development of process using soil microorganism. Removal rate of swine wastewater containing organic matter was 99 percent in case of high loading rate. Microorganism was devoted to improve the treatment efficiency of the process. According to the result obtained from biological treatment of high loading rate swine wastewater. Hydraulic retention time was 2.3 days in unit process of biological phosphorus removal. BOD_m/P_m ratio was 1122 in room temperature anaerobic process and 355.6 in mesophilic anaerobic process. And then phosphorus removal rate mesophilic anaerobic process was 3 time as much as than room temperature anaerobic process.

Keywords : Swine wastewater, Mesophilic, Phosphorus, Hydraulic retention time

I. 서 론

축산 폐수의 발생량과 성상은 급식 사료의 종류와 급식 방법, 급수량, 가축의 체중 등에 의한 직접적인 영향에 따라 변하게 되며 또한 사육 규모 및 사양 관리 방법 그리고 계절적인 변동 등 간접적인 영향에 따라 그 차이가 심하게 발생된다.¹⁾

가축 종류별 일평균 분뇨 발생량 조사²⁾에 의하면 돼지의 경우 4단계 성장기간으로 분리하여 분뇨 발생량을 구분하여 제시하였는데 자돈(30 kg 미만)은 3.3 kg/두·일, 육성돈(60 kg 미만)은 5.8 kg/두·일의 분뇨를 발생하는 것으로 조사되었으며 성돈(90 kg 미만)과 종돈(250 kg 미만)은 각각 7.7 kg/두·일과 8.8 kg/두·일의 분뇨가 발생하는 것으로 조사되어 평균 6.4 kg/두·일의 분뇨가 발생하는 것으로 나타났다. 국내의 가축 분뇨 발생 원단위에 대한 다양한 조사³⁻⁵⁾에서 나타난 자료에 의하면 BOD와 SS의 경우 125~170 g/두·일과 356 g/두·일로 범위가 유사하게 보고되고 있으나 총질

소와 총인의 경우 16.8 g/두·일~40.4 g/두·일과 14.7 g/두·일~25.0 g/두·일의 범위로 산출된 발생 원단위의 편차가 심함에 따라 축산 폐수 처리 시설의 설계 수질 및 부하량 산정과 그에 따른 반응조 용량 결정에 큰 영향이 미칠 것으로 판단된다.

현재 국내 축산 폐수 공공 처리 시설에서 채택하고 있는 처리 공법은 1차 처리로 혐기 및 호기성 공법을 채택하고 2차 처리 시설로서 활성 슬러지법과 접촉 안정법 등을 이용하여 운전하거나 액상 부식법 등과 같은 공법들을 이용하여 단독 처리하거나 하수 처리 시설과 연계하여 처리하고 있는 실정이다. 그러나 전술한 축산 폐수중 돼지의 발생 원단위에서 살펴 본 바와 같이 고농도 유기물과 총질소와 총인의 심한 불균형으로 인해 기존 생물 처리 공정으로 실제 유입 부하를 수용하기에는 상당한 문제점을 안고 있을 뿐만 아니라 2001년부터 강화되는 유기물과 총질소 및 총인의 영양소요구 수준을 만족하기 어려운 실정이므로 축산 폐수 처리에 관련한 문제를 해결하기 위해서는 운전 및 처리 효율 등과 같은 요소를 해결하기 위해서는 새로운 처리 기술 개발이 필요하다고 사료된다. 특히 공공처리 시설은 전문인력의 확보가 대체로 용이하나 개별 처리 시설의 경우 처리 시설 가동시 전문 인력의 확보 곤란

[†]Corresponding author : Environmental problems Research Institute, Dong-A University, Pusan 604-714, Korea
Tel: 051-200-6479, Fax: 051-200-6984
E-mail: envi1234@nownuri.net

과 새로운 공법들에 대한 운전방법 숙지 및 유지관리 면에서 축산 농가에 상당한 부담을 주고 있다.

본 연구에서는 일반적으로 처리 방법과 과정이 보편화되어 있는 혐기성 소화법과 활성 슬러지 및 무산소조로 구성된 반응조를 상온 혐기조, 중온 혐기조, 중온 혐기조 + 무산조 등으로 3부분으로 분류하여 영양염류 중 인제거에 미치는 처리공정의 영향, 단위공정별 제거 효율 및 인제거 동력학에 대한 내용을 검토하여 기존 공정을 이용한 유기물 및 영양염류제거 가능성을 고찰하였다.

II. 실험

1. 장치

실험에 사용된 장치의 구성은 Fig. 1에 제시한 바와 같이 저류조, 혐기조, 미생물 활성화조, 혼합조, 폭기조, Anoxic, 침전지

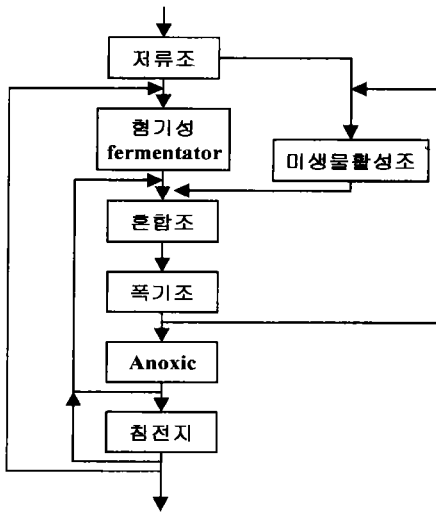


Fig. 1. Flow sheet of swine wastewater treatment process.

조, 무산소조 및 침전조로 구성하였다. 주처리 장치들과 저류조, mixer, 반송라인 및 반송라인 펌프와 Blower가 연결되어 있다. 유량조절은 펌프에 의해 저류조에서 혐기조로 유입유량의 90%를 미생물활성조에 10%를 공급하였다. 무산소조는 탈질효율 개선과 생물학적 인제거에 미치는 NO_x-N의 거동에 대한 영향을 고찰하기 위해서 설치하였다.

2. 시 료

본 연구에 사용한 폐수는 경기도 안성군에 소재한 10,000두 규모의 스크래퍼식 양돈 시범단지에서 채수하여 BOD 기준으로 희석 조절하여 사용하였다. 대상 축사의 경우 고액 분리 후 액상 분뇨를 가온 건조시켜 퇴비화를 수행하고 있는 시설로서 액상 폐수의 경우 고형물 회수율이 좋지 않아 BOD가 30,000 mg/l 이상으로 높게 측정되었다. Table 1에 본 연구 과정에서 처리 공정으로 유입되는 조절 폐수의 농도를 나타내었다.

본 실험은 부하율과 처리 system 기준으로 8단계로 350여일 동안 수행하였는데 유입수 성상은 채수 시기에 따라 크게 변화되는 것으로 나타났고 특히 SS의 함량은 하절기에는 낮고 동절기에는 높게 나타나 하절기에 폐수량 증가로 인한 희석 효과를 반영하고 있다. 분석 항목은 원폐수, 처리수, 공정 배출수, 잉여 슬러지를 대상으로 하였고 분석은 standard method 13 th⁹과 수질오염 공정 시험법¹⁰을 적용하였다.

3. 운 전

저류조에서 혐기조로 유입되는 유량의 90%를 공급하고 나머지 10%는 미생물 활성화조에 유입하면서 운전조건에 따라 단위공정을 변화시켰다. 장치의 구성은 운전조건에 따라 변화시켰는데 크게 혐기성 fermenter를 상온에서 운전하는 경우(Case1)와 중온에서 운전하는 경우(Case2)로 분리하였다. 본 연구에서 Case1은 system-

Table 1. characteristics of Influent swine wastewater

Stage	SS(mg/l)	COD(mg/l)		BOD(mg/l)		T-P(mg/l)	S-P(mg/l)	Alkalinity (mg/l as CaCO ₃)
		TCOD	SCOD	TBOD	SBOD			
1	19160~14980	21850	5574	10400	3800	537	257	5015
2	17230~13400	18430	6650	10500	2080	552	274	3940
3	8000~6420	19436	10250	9000	5200	343	214	4930
4	6330~5060	17000	11520	10870	7200	240	97	4560
5	5564~4710	15720	12100	12100	5900	294	103	5920
6	10980~7940	21400	8740	9150	2125	730	190	4800
7	12100~9980	21300	9980	13000	4700	550	90	5240
8	14970~11770	28640	11120	15500	7700	490	210	5415

1로 명칭을 붙였고 Case2는 anoxic조의 유무에 따라 System-2와 System-3로 구분하였다. 슬러지 반응은 유입 유량의 250%로 고정하였고 폭기조의 MLSS는 10,000-14,000 mg/l로 평균 12,500 mg/l을 유지하였다. 또한 유입되는 폐수가 고농도를 유지하기 때문에 포기조에서의 충격부하를 줄일 목적으로 폭기조에서 유기물 산화와 질산화에 관여하는 우점종 미생물군을 본 연구에서 자체 배양하여 조제한 미생물 활성제인 Bio-clod를 6개월에 1회 주입하였고 폭기장치는 미세 산기석을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유기물 제거효과

축산 폐수의 발생 특성상 유입 수질의 변화가 크고 고형물 함량의 편차 범위가 넓어 적용 부하 기준을 유기물로 하는 경우 질소와 인 부하가 변화되어 생물처리 수질에는 다소 영향이 있을 것으로 사료된다. Fig. 2는 운전 기간 동안의 유입 BOD, COD 및 SS의 농도 변화를 나타낸 것으로 운전 기간 동안의 부하율 변화와 그에 따른 System별 처리 효율을 고찰하기 위하여 반응조 유입 농도를 BOD 기준으로 변화시켰다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이 350여일 동안 가동한 본 연구 기간 동안의 BOD와 COD 및 SS의 유입수 성상은 채수 시기에 따라 크게 변화되는 것으로 나타났고 특히 SS의 함량은 하절기에는 낮고 동절기에는 높게 나타나 하절기에 폐수량 증가로 인한 희석 효과를 반영하고 있다. 따라서 전처리 과정이나 농도의 균등화 과정 없이 생물학적 처리 공정으로 축산 폐수가 직접 유입되는 경우 급격한 부하 변동으로 인해 비정상적인 운전 상황을 발생시킬 수 있을 것으로 사료된다. 이와 같이 급격한 부하 변동으로 인해 활성슬러지 미생물만으로는 고부하 폐수를 처리하는데 어려움이 있으므로

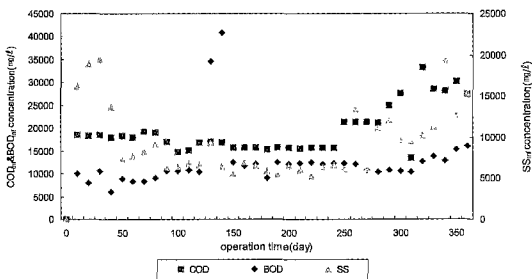


Fig. 2. Influent BOD, COD and SS concentration variation versus operation times.

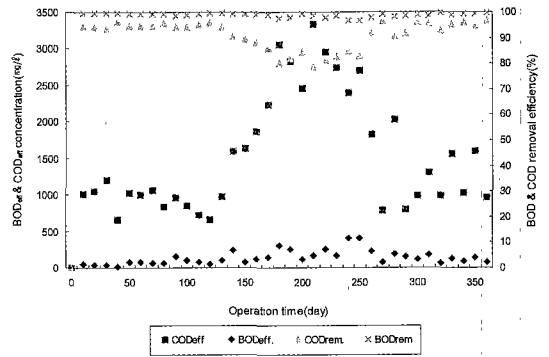


Fig. 3. Effluent COD, BOD and SS concentration and removal efficiency versus operation times.

본 연구에서는 고농도 폐수 처리에 적용 가능한 미생물종을 전국 축산 지역의 토양과 산림의 부엽토 및 호소내의 저질내의 미생물을 채취하여 활성도가 높고 고부하에 적응력이 강한 토양 미생물을 자체 배양하여 유기물 산화와 질산화에 관여하는 taphylococcus, Actinomycets, Bacillus sp., Desulfovibrio desulfuricans, Micrococcus lutes, Caryophamon bacterium, Sphaerotilus natans, Pseudomonas sp. 등이 우점종으로 구성된 미생물군을 주기적으로 혼합조에 주입하여 유입수의 충격부하에 따른 처리효율을 개선하였다.

본 연구 기간 동안 적용된 각 System별 COD와 BOD의 유출수 농도와 제거율을 Fig. 3에 제시하였다.

부하율 0.41~1.13 kgBOD/m³/d까지는 system-1 상태로서 혐기조를 가운하지 않고 상온 상태로 운전한 것이며, 0.59와 0.86 kg BOD/m³/d의 경우는 system-2 방식으로 혐기조를 35°C로 가운 운전한 상태이며, 마지막 부하조건인 1.24 kgBOD/m³/d의 경우는 system-3 방식으로 탈인 효과를 개선하고 SS의 유출을 억제하기 위해 폭기조의 슬러지를 anoxic 상태를 거쳐서 침전 처리한 결과이다.

System-1 방식의 경우 전체 공정에 대한 유입부하가 0.62 kg BOD/m³/d 이하의 조건에서 유출 BOD는 26~148 mg/l로서 추가 시설없이 150 mg/l를 달성할 수 있으나 실제 공동 축산 폐수 처리시설로 운전하기 위해서는 안정적인 수질 확보를 위해 후속의 추가 시설이 요구되는 것으로 나타났다. 이 때 혐기처리 후 폭기조만의 적용부하는 약 0.48~0.78 kg BOD/m³/d의 범위였다. 전체 system부하가 1.13 kg BOD/m³/d의 조건에서는 평균 유출 BOD가 164~397 mg/l로 제거효율은 96.6% 이상으로 나타났는데, 이 경우 혐기처리 후 폭기조만의 부하는 0.87과 1.45 kg BOD/m³/d였다.

최종 응집처리 과정에서 SBOD의 제거효율을 0으로 가정하는 경우 최종 TBOD가 30 mg/l 이하를 유지하기 위해서는 유출수의 SS값은 297.5~595 mg/l로서 BOD와 모든 부하 조건에서 큰 차이를 보여주고 있는데, 이는 폭기조의 후속 침전조에서 고액분리과정중 발생하는 탈질 현상으로 인해 슬러지가 浮上 유출하는 영향으로 판단되었다. 또한 COD제거효율은 78.8~96.4%로 BOD제거율에 비해 다소 낮은 결과를 나타내고 있으나, 일반적인 축산폐수의 생물처리시 BOD와 COD의 제거율이 각각 90과 75%인 것에 비해 COD 제거율은 크게 개량된 것으로 나타났다. 유출수의 COD는 약 654~2950 mg/l로 부하에 따라 편차가 크게 발생되었는데, BOD보다도 부하 증가에 따른 영향을 크게 받는 것으로 나타나 처리장의 공정 설계시 분뇨 및 축산폐수처리장의 방류수질 규제에 COD항목이 추가되는 것을 반드시 고려하여 수행하여야 할 것으로 나타났다.

한편 system-2와 3의 조건에서 부하증가에 따른 유출 BOD수준에서는 큰 변화가 나타나지 않았는데, 이는 혐기조의 가온으로 인해 system-1에서 보다 혐기조의 유기물 제거효율이 증가해 고평도 폐수의 유입으로 인한 폭기조내의 미생물에 대한 영향이 크게 감소된데 원인이 있는 것으로 판단된다. 즉 전공정의 유입부하는 0.59~1.24 kg BOD/m³/d로 변화되었으나, 혐기처리된 폭기조만의 부하는 0.73~1.39 kg BOD/m³/d로 혐기조 유입부하의 변화에도 폭기조에서는 부하의 변화폭이 크게 나타나지 않았다. System-2와 system-3의 운전 방식에서 평균유출 BOD는 145.2, 125 및 106.3 mg/l로서 부하의 증가에도 유출 BOD의 농도가 감소되는 경향을 나타내었다. COD는 system-1에 비해 급격히 개선되어 유출농도가 250~2030 mg/l로 처리효율은 90.5~96.6%로 거의 BOD 제거효율과 유사한 좋은 처리특성을 나타내고 있다. 특히 폭기조 유입부하가 가장 높은 system-3방식으로 운전하는 경우 유출 BOD는 약 106.3, COD는 1197 mg/l로 유사한 부하조건에 비해 아주 좋은 처리특성을 나타내고 있어 유기물 제거와 관련하여 가장 가능성이 높은 것으로 조사되었다.

일반적으로 생물처리로서 폐수중의 인을 제거하기 위해서는 Randall⁸⁾과 EPA⁹⁾등에 의하면 유입수의 정상중 BOD/TP의 비가 최소 20는 되어야 처리수의 인농도를 1 mg/l 이하로 유지할 수 있는 것으로 보고하고 있는데 이는 BOD/TP의 비가 높을수록 생물학적 인제거 효율이 증가되는 것을 의미한다. Fig. 4는 본 연구 기간 동안 유입·유출수의 T-P농도와 COD/P 및 BOD/P의 비율을 나타낸 것으로 Fig. 1에 제시한 유입수 BOD와의

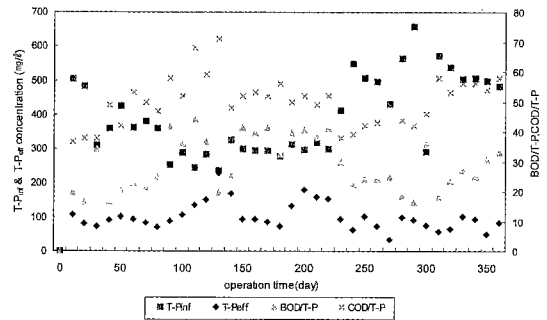


Fig. 4. T-P concentration variation and BOD/T-P, COD/T-P versus operation times.

관계에서 본 대상시료의 경우 연간 평균 BOD/T-P는 27.4로서 생물학적 인제거 공정의 적용에 유리한 조건을 갖추고 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4는 유입수의 유기물과 T-P 농도 비율과 각 system의 운전 조건에 따른 전체공정의 인 제거효율을 나타낸 것으로 증온 혐기조와 증온 혐기조 + 무산소조에서 80% 이상의 높은 제거효율을 나타내고 있는데 잔류 인 농도는 평균 75 mg/l로 상온 혐기조 운전조건인 System-1의 평균 제거율 67%에 비해 개량된 제거 특성을 보여주고 있다. 생물처리에 의해 인을 제거할 때 적정 BOD/T-P의 비는 Randal,⁴⁾ EPA⁵⁾ 및 Sedlak⁶⁾ 등이 20 이상이 적절하다고 주장하였는데 본 연구의 대상시료의 경우 system-1(상온 혐기조)으로 운전할 때 17~44이었으며 System-2(증온 혐기조)와 System-3(증온 혐기조 + 무산소조)에서는 12~38 생물학적인 처리를 위한 유기물원은 양호한 것으로 조사되었다. 유입 BOD/TP 비는 Sedlak은 하수에서는 유입 BOD/P의 비가 20-30이면 유출 용해성 인 1.0 mg/l 이하로 유지할 수 있다고 주장하였는데 이러한 관점에서는 상온 혐기조가 생물학적인 제거에 보다 유리한 것으로 나타났으나 실험결과는 다른 양상을 보이고 있다. 이는 상온 혐기조 공정에서는 처리수중의 NO_x-N 함량이 높은 만큼 혐기성 전처리의 반송 슬러지에도 다량의 NO_x-N이 존재해 탈인 미생물의 활성을 제한하는 것과 상온 혐기반응의 경우보다 증온 혐기 반응이 유기산 등과 같은 분해산물의 생성 효율이 크고 이로 인해 폭기조에서의 미생물 활성이 효율적인 관계로 인의 흡수에 의한 제거효율이 증가하는 것으로 판단된다. 따라서 탈인 공정을 구성하기 위해서는 적정부하 뿐 아니라 내부 순환수에 함유된 NO_x-N 제어와 혐기반응조에서 유기산과 같은 분해산물의 효율적인 생성이 중요할 것으로 판단된다.

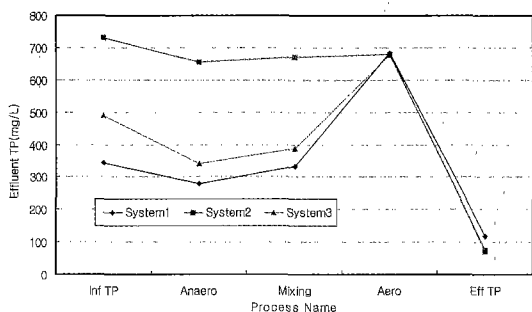


Fig. 5. Changes of total phosphorus concentration in various unit process.

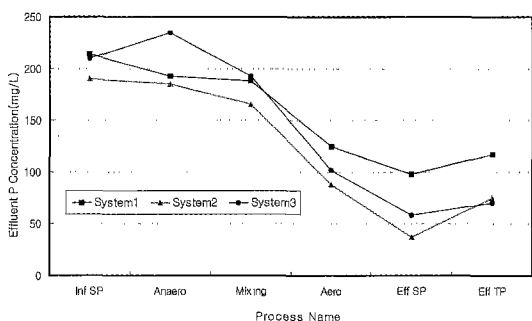


Fig. 6. Changes of effluent soluble phosphorus concentration in various unit process.

2. 단위공정에서의 인 제거 효율

단위공정에서 총 인의 유출농도 변화를 Fig. 5에 도시하였다.

Fig. 5는 단위공정의 총인 유출농도를 나타내고 있는데 포기조에서는 슬러지 농도가 커서 유입수 보다 높게 나타나며 중온 혐기조 + 무산소조는 상온 혐기조에 비해 2배 이상의 낮은 농도를 유지하고 있음을 알 수 있었다. 생물학적 인 제거를 위한 기본 메커니즘은 혐기조건에서 인 섭취 미생물의 인 방출과 호기 조건에서 인 흡수의 과정을 반복하면서 인 섭취 능력을 개량하는데 있다. 따라서 단위공정에서 혐기조에서는 인 방출이 증가되고 호기 공정에서는 인의 섭취량이 증가하였다. Fig. 6은 용해성 인 유출농도 변화를 표시하였다.

혐기조에서 예상되었던 인 방출 효과는 중온 + 무산소조에서 가장 크고 상온 혐기조에서는 오히려 약간 감소된 것으로 나타났으나 중온 혐기조에서는 잔류 NO_x-N의 탈질시 발생된 슬러지 부상으로 인해 최종 유출 총 인은 중온 혐기조 + 무산소조에 비해 높은 농도를 나타내었다. 이러한 단위 공정에서 얻은 인 제거 효과를 정리하면 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

Table 2. Removal rate of phosphorus in unit process

item	process anaerobic process (room temp.)	mesophilic anaerobic process	mesophilic anaerobic + anoxic process
inf. con. mg/l	343/214	730/190	360/145
anaerobic tank %	18.7/9.8	10.3/2.6	30.6/-11.9
mixer %	-19/2.6	-2.4/10.8	-3.8/17.9
aeration tank %	-106/33.5	-1.3/46.7	-75.2/47.2
sedimentation %	82.9/21.7	89/57.5	86.6/42.7
final effect rate %*	65.9/54.3	89.8/80.3	85.6/72.2

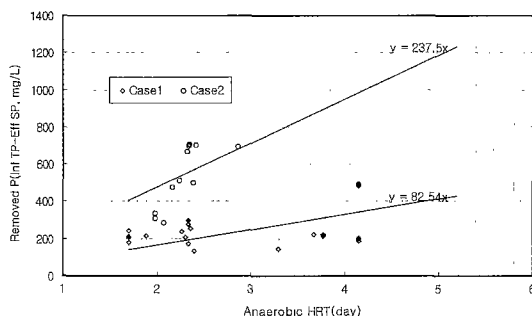


Fig. 7. Removed phosphorus concentration to hydraulic retention time in anaerobic reactor.

3. 인 제거 동력학

생물학적 인 제거 공정은 단지 미생물에 의한 흡수 뿐만 아니라 침전분리로 슬러지를 인발하는 과정에서 수행되므로, 영양요소는 미생물의 성장률과 미생물의 양 및 분해가 쉬운 VFA 량의 함수로 평가할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 혐기조 가온과 비가온의 두 공정에서 체류시간에 따른 인 제거 효율관계와 미생물의 BOD 섭취 능력과 성장률을 포함하고 있는 SRT를 기준 요소로 인 제거 속도를 평가하였다. Fig. 7은 혐기조 체류시간과 인 제거량을 도시하였다.

회귀분석을 적용한 결과 혐기조를 상온으로 운전한 상온 혐기조 경우 82.54 mg P/L/d로 나타났고 중온으로 운전한 경우 약 237.7 mg P/L/d로 이었다. 이러한 제거속도의 기본 요소는 MLSS와 BOD를 10,000 mg/l 정도로 운전한 경우에 적용 가능한 것으로 생각되며 제거율의 차이는 혐기조를 가온한 경우와 비가온 반응조의 차이 및 반응 슬러지내의 NO_x-N을 제거하는 공정의 유·무에 영향받으며 혐기성전처리조의 가온과 무산소조의 운전은 가장 효율적인 인 제거 가능한 공정으로 판단된다. Fig. 8에 BOD_{rem}/P_{rem} 값과 1/SRT의 관계를 도시하였다.

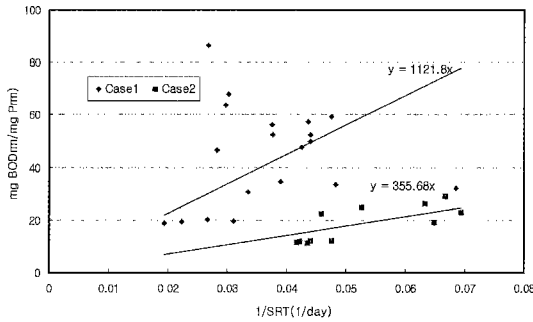


Fig. 8. Relationship between mg BOD/mg P_m and $1/SRT$.

상온 혐기조(case 1)의 경우 다소 편차가 있으나 중온 혐기조(case 2) 경우는 좋은 상관관계를 나타내고 있다. 상온 혐기조의 경우 먹이섭취 관계를 고려하면 1121.8이며 중온 혐기조의 경우 약 355.68 mg BOD · d/mg P로 일정량의 유기물 섭취시 동화되는 인의 양이 중온 혐기조의 경우가 약 3배가 되는 것을 알 수 있다.

IV. 결 론

기존 축산폐수 생물처리 공정중 혐기성 소화조를 상온 및 중온으로 구분하여 돈사폐수에 함유된 유기물 및 인 제거 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

COD의 경우 상온으로 운전한 혐기성 소화조의 경우 0.62 kg COD/m³/d에서 94.1%의 제거효율을 나타내었으며 무산소조와 연결된 중온 혐기성 반응조의 경우

1.24 kg COD/m³/d의 부하율에서 95.7%의 높은 제거율을 나타내었다. 인제거 효율은 상온 혐기조의 경우 66% 정도로 나타났으나 중온 혐기조의 경우 87%이상의 제거효율을 나타내었다. 축산폐수처리 공정 개발 연구 과정에서 인 제거효율 개선을 위한 최적 혐기조의 HRT는 약 2.3일이었으며 BOD_m/P_m 비가 상온 혐기조 공정에서는 1122, 중온 혐기조 공정에서는 355.6으로 나타나 중온 혐기조가 인 섭취율이 약 3배 가량 높게 나타났다.

참고문헌

- 1) 축산 폐수 관리의 효율성 및 경제성 향상 방안 연구, 환경관리공단, 1991.
- 2) 전국 축산 분뇨 적정관리대책 연구, 한국과학 기술연구원, 1990.
- 3) 한강상류의 수질에측과 관리대책, 한강연구소, 1991.
- 4) 영양염류 원단위 산정에 관한 연구, 한국환경 과학연구 협의회, 1991.
- 5) 새로운 가축분뇨 처리기술, 축산기술연구소, 1997.
- 6) Senold S. Clesceri Arnold E. Greenberg R. Rhodes Trussell: Standard Methods for the examination of water and wastewater, 17th, edition, 1989.
- 7) 환경부 : 환경오염공정시험법, 1991.
- 8) Randall, C. W. *et al.*: Design and Retrofit of Wastewater Treatment Plants for Biological Nutrient Removal, 5, Water Quality Management Library, 1992.
- 9) EPA.: "Manual Nitrogen Control", EPA, 626, R-93, 010, 1993.
- 10) Sedlak, R. I.: Phosphorus and nitrogen removal from municipal waste water, Principles and practice, Second ed., LEWIS PUBLISHERS, 1991.