

## 고온호기발효공법을 이용한 유기성폐수의 처리

유순주·류재근·서운수\*·稻森 悠平\*\*

국립환경연구원 수질연구부, \*환경관리공단 \*\*일본 국립환경연구소

## The Treatment of Organic Wastewater using Thermophilic Oxidic Process

Soon Ju Yu·Jae Keun Ryu·Yoo Su Suh\* Y. Inamori\*\*

*National Institute of Environment Research,*

*\*Environmental Management Corporation,*

*\*\*National Institute of Environment Studies, Japan*

### Abstract

Most of small-scale livestock facility have difficulties to treat organic wastewater by activated sludge process as distinguished feces and urine. The organic wastewater discharged have characteristics of slurry, high concentration of BOD, SS etc. This study was performed to estimate suitable condition for the application of packing materials, air flow, pollutant load and so on as important parameter to treat organic wastewater by thermophilic oxidic process.

As a result obtained at this experiment, the most suitable condition for BOD load, air flow indicatied  $3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\text{ day}^{-1}$ ,  $50\sim 100\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\text{ m}^{-3}$ , respectively, and we knew that it was necessary to add waste contained high calories to degrade about 80% of pollutant among wastewater. It showed that plastic material can be used as packing media because it can be provided as inhabitation for microorganism owing to intensity of material and characteristic of keeping moisture.

## I. 서 론

우리나라는 소규모 양돈농가에서 미처리 방류되고 있는 축산폐수에 의해 하천, 호소 등의 수질오염이 심각한 문제가 되고 있다. 축산폐수중 분뇨를 용이하게 분리하는 것이 가능하다면 고형물로 분은 퇴비화하여 자원이용화하고 액상의 뇨는 활성오니법으로 처리하는 것이 자연수역에서 오염부하의 삭감이 가능할 것으로 생각된다. 그러나 실제 축사의 대부분은 구조상 분뇨의 분리가 곤란하고 폐수의 성상은 고농도 유기성폐수로서 BOD 및 SS의 농도가 높고 슬러리상태이다. 이를 위해 일반적인 활성오니법으로 효과적인 처리를 기대하기 어렵다.

한편, 퇴비화를 하여도 발효에서 숙성하기까지 수개월이 필요하다는 점, 통상 첨가되는 왕겨, 톱밥 등의 부자재는 분과 같은 고형물을 퇴비화하는 경우의 수습배의 양이 필요하기 때문에 폐수를 연속적으로 퇴비화하기 위해서는 부자재를 상시 대량으로 확보하여야 하는 등의 문제점이 있다. 여기서 소규모 양돈농가에 적용할 수 있는 새로운 처리법으로서 고온호기발효법을 적용하였다. 본 법은 유기물을 60°C 전후의 높은 온도에서 고온호기미생물의 분해작용에 의해 호기적으로 분해하는 것을 원리로서 종래의 퇴비화와 같으나 고온호기미생물에 의해 유기물을 CO<sub>2</sub>로 완전분해시키고 분해과정에서 발생된 열에 의해 수분을 증발시켜 처리수가 나오지 않는 프로세스이다. 또한, 본 프로세스에서 사용된 톱밥 등의 담체는 퇴비화의 부자재로서 뿐만 아니라 분해반응을 촉진시키기 위한 통기성, 수분조정, 미생물의 서식처로서의 역할도 지닌다. 이상에서 서술한

고온호기발효법은 누적형 즉, 한번 충전한 담체는 빼내지 않는 특징이 있다.

본 연구에서는 이같은 특징을 갖는 고온호기발효법에 의하여 양돈폐수를 완전처리를 하기 위하여 중요한 변수가 되는 담체의 선정, 통기량, 유기물 부하량 등의 적정조건을 밝히 고자 하였다.

## II. 연구내용 및 방법

### 1. 실험장치

본 연구에서 이용한 실험장치는 Fig. 1와 같다. 사양은 내경 200mm, 높이 220mm의 원통형으로 유효용적은 4L이다. 시료주입후 반응조 내를 혼합하는데 기계식 교반기를 설치하였다. 또한 실험개시전에 열손실을 막기 위하여 반응조전체를 40mm 두께의 스티로폴로 보온하였다.

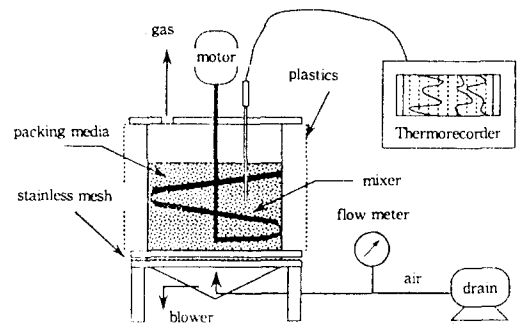


Fig. 1 Schematic diagram of thermophilic oxic process

### 2. 담체의 성상

고온호기발효에는 일반적으로 톱밥, 나무칩, 왕겨 등의 천연자재를 이용하고 있다. 본 연구에서는 톱밥과 나무칩을 선정하여 실험에 이용하였다. 또한 인공적으로 제조한 플라스틱담체의 적용에 관하여 검토하였다. 담체의 크기

는 톱밥이 입경 1~1.5mm정도, 나무칩은 5~10mm, 두께 약 0.2mm였다. 또한 플라스틱은 평균 입경 5mm로 가공된 것을 이용하였다. 사용된 플라스틱 담체는 다공질로 높은 보수성을 지니고 있다.

### 3. 실험폐수

실험은 분뇨의 분별이 곤란한 측사를 가정하여 돼지가 배출하는 분뇨의 비율이 보통 1:1이므로 실제의 양돈축사에서 채취한 분과뇨를 같은 비율로 혼합하여 슬러리상이 되도록 한 것을 사용하였다. 폐수의 성상은 Table 1에 나타난 바와 같이 BOD 29,000~50,000 mg·l<sup>-1</sup>, TOC 18,000~46,000mg·l<sup>-1</sup>, SS 109,000~149,000mg·l<sup>-1</sup>으로 유기물과 SS농도가 매우 높은 것이 특징이다.

Table 1. Characteristics of Slurry used in Experiment

parameter	value
pH	8.8
BOD(mg/l)	29,000~ 50,000
TOC(mg/l)	18,000~ 46,000
SS(mg/l)	109,000~145,000
TVS(%)	85
Moisture content(%)	80

### 4. 실험조건

실험장치는 30°C 항온실에 설치하여 실험개시 반응조의 함수율이 각 담체의 보수성을 감안하여 톱밥, 나무Chip를 충전한 계는 60%, 플라스틱계의 경우 40%가 되도록 폐수를 혼합하여 종균으로서 퇴비화된 돈분을 100g씩 첨가하였다. 이후 폐수를 1일 1회 연속주입하여 각각 30, 50, 100, 200, 300L·min<sup>-1</sup>·m<sup>-3</sup>

의 통기량과 1.0, 3.0, 5.0kg·m<sup>-3</sup>·day<sup>-1</sup>의 BOD부하량에 따라 운전을 실시하였다. 또한 주입직후에 조내의 시료를 혼합하기 위하여 30분간 교반을 하였다.

### 5. 측정항목

전체 실험계에 대하여 연속기록계를 이용하여 조내의 온도변화를 측정하였으며 가스 검지관을 이용하여 발생가스중의 CO<sub>2</sub>농도를 경시 및 매일 측정하였다.

또한 반응기조내 고온호기미생물의 서식상황을 검토하기 위하여 조내의 담체 일부를 채취하여 전자현미경 촬영과 동시에 미생물의 개체수를 측정하였다. 즉 담체의 멸균수에 현탁, 초음파처리한 후에 SOYBEAN-CASEIN DIGEST AGAR배지를 이용하여 평판 도말법(배양농도 60°C, 24시간)를 행하여 균집수로 구하였다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 고온호기발효에 의한 양돈폐수처리의 적정 조건의 검토

고온호기발효는 고농도의 유기물이 톱밥 등의 적정한 담체와 함께 호기성 상태에서 고온호기미생물의 증식에 의하여 분해된다. 분해과정에서 발생하는 열에 의해 고온호기미생물의 내성호흡이 다시 높아져 유기물 등의 분해가 비약적으로 촉진되는 것과 동시에 이 열에 의해 수분이 증발되는 처리 시스템이다.

본 프로세스에 의해 유기물 등의 분해에 관여하는 미생물은 호기균으로 일반적으로 호열균은 55°C 이상의 고온에서 생육한다. 따라서 본 법에 의해 폐수를 효과적으로 처리하기 위

해서는 발열이 진행되는 조건을 보는 것이 중요하다. 발열의 진행은 통기량, 유기물부하량에 크게 좌우되어질 수 있다는 점에서 온도변화를 검토하였다.

즉 분뇨 1 : 1 혼합물을 처리대상으로 톱밥을 담체로 하여 예비처리실험을 하였다. 실험 결과는 Table 2와 같다. 발효온도의 상승이 가장 현저한 계는 BOD부하  $3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ , 통기량  $100\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 였으며 조내의 온도는 폐수주입후의 4시간내에 최고  $57^\circ\text{C}$  정도까지 상승하였으나 기대된 온도  $65^\circ\text{C}$  정도까지는 올라가지 않았다. 이 상황은 재현적으로 매일 반복되어 반응조 저부에는 침출수가 발생되지 않은 점으로 발효열에 의해 수분을 어느 정도 증발시키는 것으로 보이며 계내의 함수율은 초기치의 60%에서 서서히 증가하는 경향을 나타내었다. 본 계에 의한 온도, 발생가스중의  $\text{CO}_2$ 농도의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 시료주입후에 반응조내의 온도는 빠르게 상승한다는 것을 알 수 있다. 한편 발생가스중의  $\text{CO}_2$ 농도는 최고온도에 달하기전에 최고를 나타내다가 급속히 감소하여 9시간내에  $\text{CO}_2$ 의 발생이 거의 완료되었다. 본 계에 의한 유기탄소수지를 발생  $\text{CO}_2$ 가스농도에서 계산한 결과, 유기물 제거율은 80% 정도였다. 다른 계의 발효온도는 거의  $45^\circ\text{C}$  정도로 유기물 제거율은 40%였으며 통기량이 적은 계에서는 침투수가 발생되었다.

반응조내의 담체의 상황을 관찰한 결과 톱밥담체의 약화가 현저하게 나타나는 시기는 실험개시부터 거의 2주간내로 폐수의 미분해물과 담체의 모양이 분별되지 않을 정도로 거의 분해되고 있었다. 이상과 같이 고온호기발효를 이용하여 양돈폐수처리를 한 경우, 통기

량 및 BOD부하량의 설정범위는  $\text{BOD } 3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ , 통기량  $100\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 로 정확하게 조정하여야 하는 것뿐만아니라 분해율이 낮고 강도가 높은 담체의 선정이 중요한 것으로 나타났다. 그러나 양돈폐수처리장에서 배출되는 축산폐수를 단독처리를 한 경우에는 온도상승의 실패로 수분의 증발이 충분히 일어나지 않았다. 이는 양돈폐수의 열량부족 및 담체의 분해소실에 의한 통기성의 악화가 원인으로 생각되어진다.

Table 2. The Result of Previous Experiment with Thermophilic Oxidic Process

air(L/min/m <sup>3</sup> )					
BOD load (kg/m <sup>3</sup> /d)	30	50	100	200	300
1.0	×	×	△	×	×
3.0	△	△	○	△	×
5.0	×	×	×	×	×

(Temp.<sub>max</sub> : ○ above  $55^\circ\text{C}$ , △  $40\sim 55^\circ\text{C}$ , ×  $30\sim 40^\circ\text{C}$ )

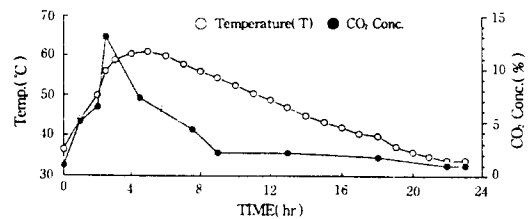


Fig. 2 Time course of temperature(T) and evolution  $\text{CO}_2$  concentration

## 2. 담체의 선택과 열원의 첨가효과

본 법에서는 톱밥 등의 천연자재를 이용하였으나, 이 경우 담체는 분해 소실하는 것이 밝혀졌다. 또한 장기간 처리를 한 경우 반응조내에 무기염류가 고농도로 축적하여 처리능저하의 문제가 될 수 있다. 따라서 담체를 정

기적으로 빠져나, 재충진할 필요가 있다.

여기서는 강도가 높은 다공질의 인공담체인 플라스틱재질을 사용하여 담체로서의 적용가능에 관하여 천연재질의 나무칩과 비교 검토함과 동시에 처리효율을 높이기 위하여 열량원 첨가의 효과에 관하여 검토하였다.

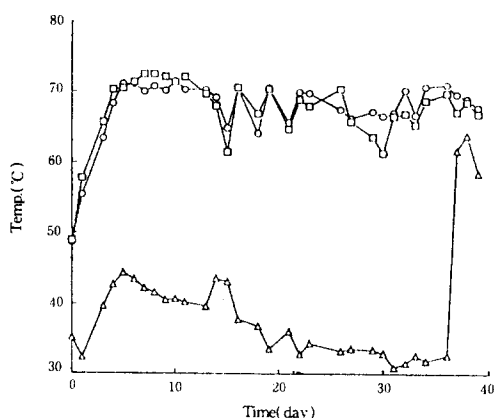


Fig. 3 Time course of maximum temperature of reactor

실험조건은 분뇨 1 : 1혼합물의 처리조건중 가장 높은 발효온도를 나타낸 BOD  $3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ , 통기량  $50\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 에서 장기간 실험을 하였다. 또한 열원으로서 식품산업에서 배출되고 있는 폐기물로서 식품폐유(주방에서 사용한 후의 폐유) 및 식품가공폐액(옥수수의 전분추출후의 폐액)을 선정하여 첨가량은 이전에 한 실험결과를 기초로 식품폐유는 20g을 식품가공폐액은 200g 계량하여 각각을 양돈폐수와 혼합하였다. 즉 전자는 처리대상폐수의 10%, 후자는 50%가 되도록 하였다.

본 실험계에서 열원으로서 유기물을 첨가하고 있으므로 오수중의 유기물분해의 정도는 반응조의 중량과 함수율에서 계산한 증발잔류물의 축적량으로 검토하였다. 열원 무첨가계 및 폐유첨가계의 최고온도의 변화와 반응조내

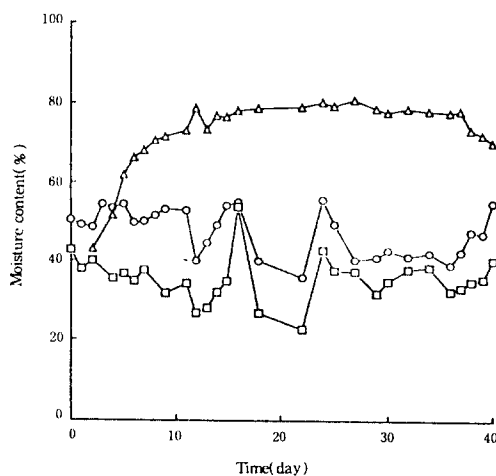


Fig. 4 Time course of moisture content in reactor

의 함수율은 Fig. 3, 4와 같다.

열원 무첨가계는 실험개시후 5일간은 온도가 점차 상승하는 경향을 나타냈으나, 6일 이후 떨어지기 시작하면서 최종적으로 실온으로 결국 고온호기발효는 일어나지 않았다. 그러나 함수율은 급격히 상승하여 75%전후로 침출수의 방출은 일어나지 않았으나 실온의 공기로 일부 수분은 증발되는 것으로 보이며 Fig. 5에 나타난 바와 같이 반응조의 중량은 확실히 증가하였다. 반응조내의 상황은 점토상으로 통기성이 소실되었다. 이 상태에서 32일째에 식품폐유를 20g 첨가하여 교반을 하였으나 온도의 상승은 일어나지 않았다. 그러나 36일째에 나무칩을 초기 충전량(180g)의 78%(140g)을 재첨가하여 통기성을 보완시키고 식품폐유를 20g 첨가하여 4시간이내에 반응조의 온도와  $60^{\circ}\text{C}$ 까지 급격한 상승을 보였다. 이는 고온호기발효에 의해 양돈폐수처리를 하기 위해서는 통기성의 확보 및 열원 첨가가 필요하다는 것을 나타낸다.

열원으로서 식품가공폐액 첨가계에서는 약

8시간후에 발효온도는 63°C까지 급격한 상승을 나타내어 온도상승은 시료주입후, 재현적으로 반복되어 유기물분해가 완료된 후 함수율은 50~60% 전후로 일정하게 고온호기미생물의 생식에 양호한 상태를 유지하였다. 그러나, 반응조에 충전된 담체의 용적은 약 1주간내에 25% 정도 팽창하여 반응조의 중량은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 분뇨 1:1혼합물만의 처리와 같이 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 주입된 오수와 함께 첨가열원이 충분히 분해되지 않고 수분 증발후의 잔류물이 서서히 축적되는 것으로 생각된다.

한편 식품폐유첨가계에서는 나무칩 및 플라스틱과 함께 4일째에서 37일간 거의 정상적으로 최고온도는 60~70°C에 달하여 유기물분해과정에서 초기함수율의 60% 정도에서 평균적으로 30~40%의 함수율까지 수분을 증발시킬 수 있었다.

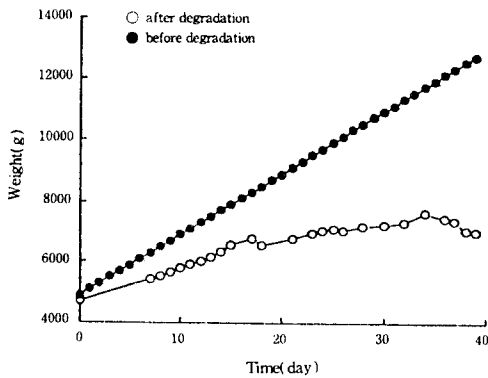


Fig. 5 Variation of reactor weight using wood chip

나무칩 및 플라스틱담체의 식품폐유첨가계에 의한 반응조의 중량변화를 Fig. 6, 7에 나타내었다. 모두 반응조의 중량은 13일째까지 서서히 증가하는 것을 나타내었으나 그 후, 증가하는 경향은 보이지 않고 함수율도 일정한

점에서 수분의 증발 및 유기물의 분해가 효율적으로 동시 진행되고 있는 것으로 사료된다. 각 실험에 의한 반응조내의 증발 잔류물(105°C에 의한 잔류물)의 경일 변화를 Fig. 8, 9, 10에서 나타내었다. 열원 무첨가계에 의한 반응조내의 증발잔류물의 평균증가속도는 19.5 g·day<sup>-1</sup>로 제거율은 51% 정도인 것에 대하여 열원을 무첨가한 나무칩 및 플라스틱계는 13일이후의 증발잔류물의 증가는 거의 보이지 않았으며 평균 증가속도는 각각 1.0 g·day<sup>-1</sup> 및 0.2 g·day<sup>-1</sup>의 제거율이었다. 이것은 주입된 유기물은 거의 완전히 분해하고 있음을 알 수 있다.

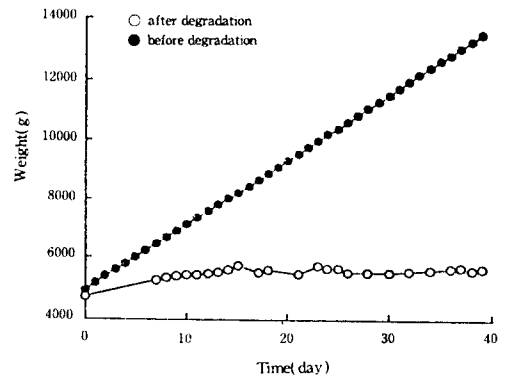


Fig. 6 Variation of reactor weight using wood chip and waste oil

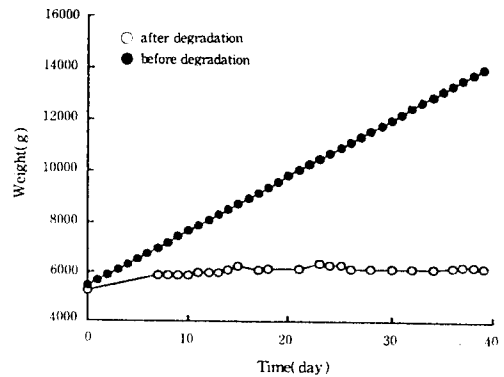


Fig. 7 Variation of reactor weight using plastics and waste oil

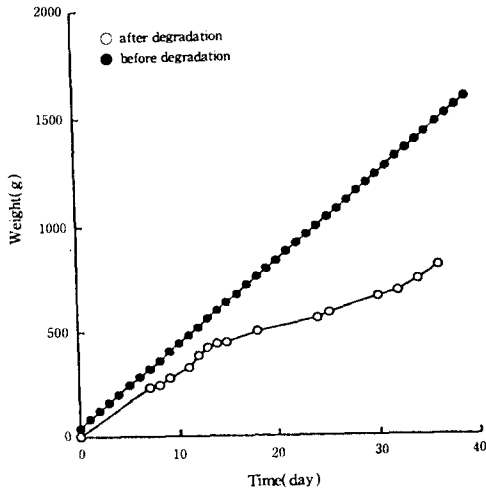


Fig. 8 Residual weight after evaporating using wood chip

이상으로 부터 고온호기발효에 의한 양돈폐수처리에 의하여 나무칩과 인공담체인 플라스틱재질이 사용가능하고 효과적인 처리를 하는데는 나무칩과 플라스틱의 통기성의 확보 및 열원의 첨가가 필수로 적정운전조건은 오수의 BOD  $3.0\text{kg} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{day}^{-1}$ , 통기량  $50 \sim 100\text{L}$ .

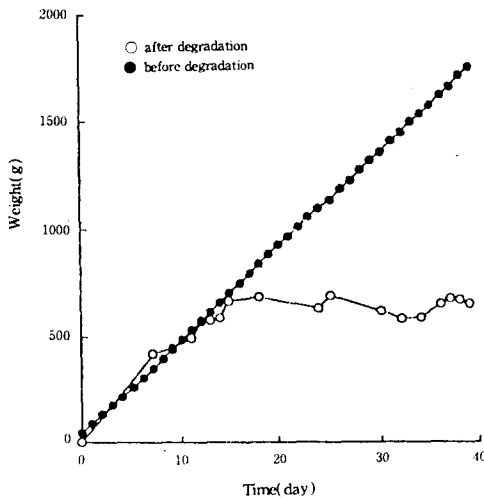


Fig. 9 Residual weight after evaporating using wood chip and waste oil

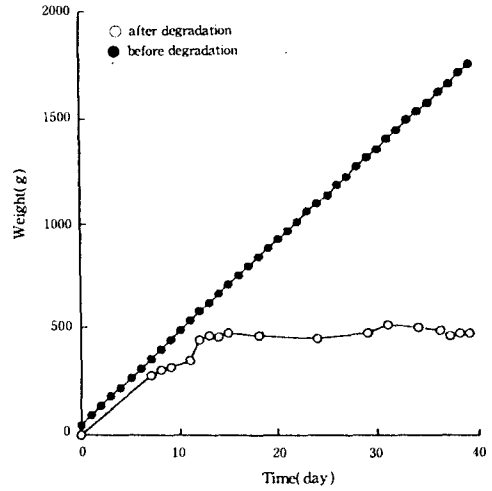


Fig. 10 Residual weight after evaporating using plastics and waste oil

$\text{min}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$ 임을 알 수 있었다. 또한 첨가열원을 선정하는 경우, 열원이 높고 분해가 쉬운 식품폐유가 적정하다고 사료된다.

### 3. 담체에서 고온호기균의 분포

본 프로세스에 의한 유기물의 분해는 모두 고온호기미생물의 활동에 있다. 플라스틱재질담체의 경우 발효온도는  $60^\circ\text{C}$ 를 넘고 유기물은 대부분 분해 제거되어 고온호기미생물이 증식하여 유기물의 분해에 공헌한다고 생각된다. 여기서 반응조내에 의하여 고온호기미생물이 어느 정도 서식하고 있는가를 밝히기 위하여 미생물수의 측정과 전자현미경에 의한 담체표면을 관찰하였다.

열원첨가의 유무에 의한 고온호기미생물의 개체수의 변화를 Fig. 11에 나타내었다. 발효온도가  $60^\circ\text{C}$  이상으로 상승한 열원첨가계의 나무칩 및 플라스틱재질담체 1g 당 고온호기미생물수는 양자  $10^{10} \sim 10^{11} \text{N} \cdot \text{g}^{-1}$  정도로 존재하고 있었다. 한편, 온도상승이 일어나지 않은

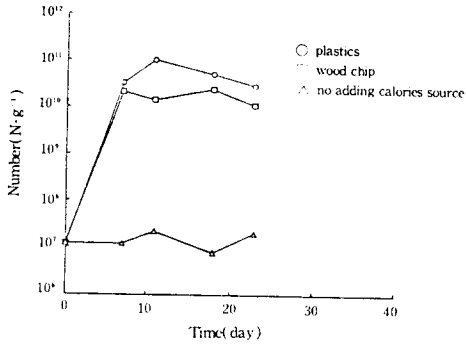
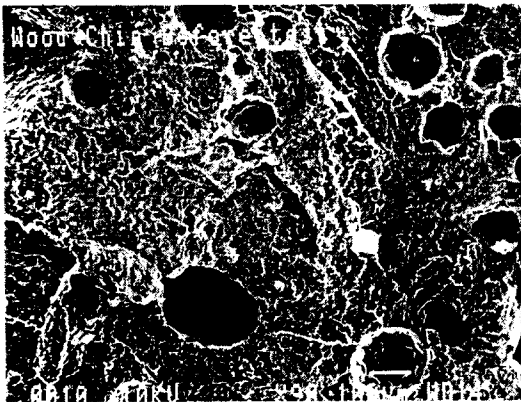


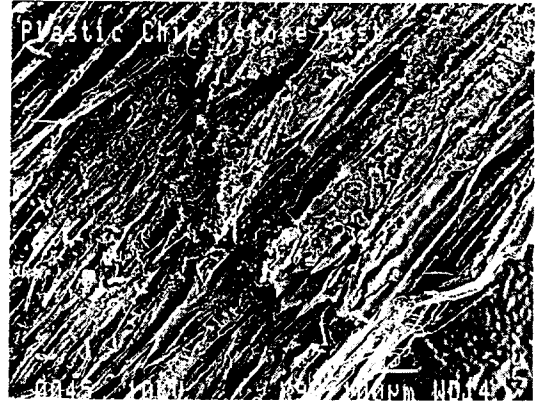
Fig. 11 Number variation of thermophilic microorganism in each reactor

열원무첨가계에 의한 미생물의 존재는 전자와 비교하면 매우 작고 10<sup>2</sup>N · g<sup>-1</sup> 정도였다.

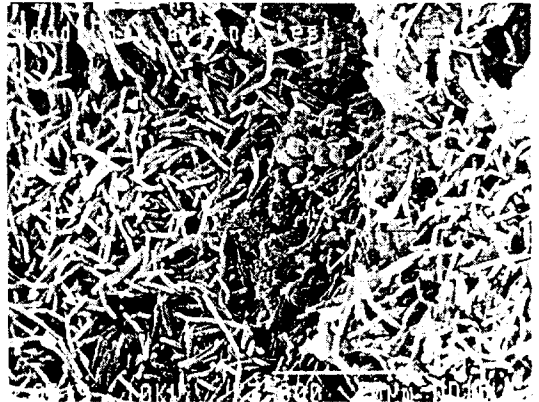
다음으로 18일간 처리를 한 각 담체자체의 전자현미경사진은 사진 4에서 보는 바와 같다. 나무칩자체의 표면은 비교적 부드러운데 비하여 플라스틱재질담체의 울퉁불퉁한 표면은 미세한 구멍이 무수히 존재하고 있다. 이와 같은 형상을 갖는 담체의 발효온도가 60°C 이상으로 상승하는 열원첨가계의 양자의 담체포면에는 특정의 간균이 우점화하여 부착되고 있는 상황이 확인되었고 이 간균이 유기물의 효과적인 분해에 큰 공헌을 하고 있다고 추정된다.



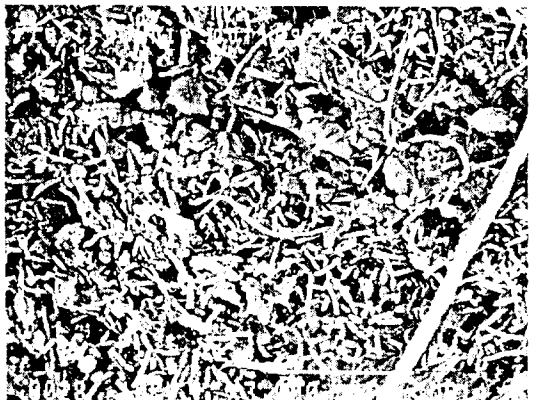
Picture. 1 Surface of wood chip by SEM



Picture. 2 Surface of plastics by SEM



Picture. 3 Surface of wood chip by SEM(adding waste oil)



Picture. 4 Surface of plastics after reaction by SEM(adding waste oil)



이와 같이 미생물수 및 생물상에서 나타난 바와 같이 다공질의 플라스틱재질은 고온호기 미생물의 서식처로서 역할을 충분히 가지고 있다는 것을 알 수 있다. 이것은 다공질의 강도, 보수성이 뛰어나다면 고온호기발효프로세스의 담체로서 사용가능하다는 것을 시사하고 있다.

#### IV. 결 론

1. 고온호기발효를 이용하여 양돈폐수를 단독으로 처리하는 경우 통기량 및 BOD부하량의 설정범위가 좁아 BOD  $3.0\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{day}^{-1}$ , 통기량  $50\sim 100\text{L}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{m}^{-3}$ 으로 유기물 제거율이 80% 정도 완전분해하기 위해서는 열량을 가할 필요가 있으며, 그 열원으로서 식품폐유와 같은 높은 열량은 갖는 폐기물이 적정하다는 것을 알 수 있었다.

2. 다공질의 강도, 보수성에 뛰어난 플라스틱담체는 고온호기미생물의 서식처로서의 역할도 충분히 가지고 있다는 점에서 고온호기 발효공법에 사용가능하다는 것으로 판정되었다.

3. 고온호기발효공법으로 양돈폐수를 장기간 처리한 경우 담체자체의 분해와 무기염류의 축적으로 정기적인 교체를 하여야 하나 플라스틱재질의 담체를 적용할 경우에는 교체가 필요없는 효과적인 재료가 될 것으로 기대된다.

#### 참 고 문 헌

1. 順藤降一 編：環境浄化のための微生物學, 154-155, 1983.
2. 森忠洋 論說：下水汚泥綠農地利用の新たな展開のために, 1983.
3. 順藤降一 編：微生物生態學, 172-174, 1986.
4. 藤田賢二 著：コンポスト化技術 廢棄物有效利用のテクノロジー, 技報堂出版.
5. 押田 敏雄：家畜ふん尿の高水分發熱醱酵處理に関する研究, 用水・廢水ハンドブック(3), 862-875.
6. 大野 茂：家畜ふん尿の排出量・質および負荷量, 用水・廢水ハンドブック, 422-433.
7. Suler, D. J. and M. S. Finstein : Effect of Temperature, Aeration, and Moisture on CO<sub>2</sub> Formation in Bench-Scale, Continuously Thermophilic Composting of Solid Waste, Applied Environmental Microbiology, Vol. 33, No. 2, 345-350, 1977.
8. Jeris, J. S. and R. W. Regan : Controlling Parameters for Optimum Composting, Compost Science, Vol. 14, No. 2, 10-15, 1973.
9. Kuter, G. A., et al : Effects of aeration and temperature on composting of municipal sludge in a full-scale vessel system, J. of WPCF, Vol. 57, No. 4, 309-314, 1985.
10. Masoud K. and George T. : Computation of C/N Ratios for Various Organic Fractions, Biocycle, May, 58-60, 1992.
11. Beaudet R., et al : Microbiological Aspects of Aerobic Thermophilic Treatment of Swine Waste, Applied Environ-

- mental Microbiology, Vol. 56, No. 4, 971-976, 1990.
12. William, J. J. and Randolph, M. K. : Autoheated Aerobic Thermophilic Digestion with Aeration, Journal WPCF, Vol. 52, No. 3, 512-523, 1980.
13. Nakasaki, K., et al : Change in Microbial Numbers during Thermophilic Composting of Sewage Sludge with Reference to CO<sub>2</sub> Evolution Rate, Applied and Environmental Microbiology, Vol. 49, No. 1, 37-41, 1985.