

## 퇴비화를 이용한 하수슬러지 처리에 있어서 적정 수분함량과 C/N비에 관한 연구

손현석 · 양원호 · 정문식  
서울대학교 保健大學院 環境保健學科

### A Study on Optimum Moisture Content and C/N ratio of Sewage Sludge Treatment Using Composting

Hyun-Suck Son, Won-Ho Yang and Moon-Shik Zong

Department of Environmental Health, School of Public Health, Seoul National University

#### ABSTRACT

When sewage sludge is treated by composting, higher moisture content and lower C/N ratio on sewage sludge is problems. This paper project to desolve two problems. The almost trends in run 3 of MC 70% are similar to these in run 1 and 4 of MC 65%. A retention time of the highest temperature (>50°C) and increase rate of temperature in run 3 are an affinity to these in run 4. Particularly, decrease rate of temperature in run 3 is slower than others and this data shows the more activity of thermal microbial in run 3 than that in others. C/N ratio trends in run 3 shows slow reaction in initial stage but, after 9 days, is similar to that in run 1 and 4. Carbon trends in each run are a similarity to C/N ratio trends. Temperature, MC, carbon and C/N ratio trends in run5, whose C/N ratio is 15, show less microbial activity than that in run 6, whose C/N ratio is 20. But temperature increase of the beginning stage and pH of the final stage in run 5 are greater than that in run 6. Final MC and carbon content in run 5 and 6 have a similar values. That is, final MC in run 5 and 6 is 49.39% and 48.97% and final carbon content in each run is 25.15% and 22.20%. Expecially, a temperature increase and C/N ratio decrease rate of the beginning stage in run 5 are greater than these in run 6. This shows the shorter lag time in run 5 than lag time in run 6.

**Keywords :** Composter, Moisture content, C/N ratio, Lag time, Carbon content.

## I. 서 론

생활정도의 향상으로 물의 요구량은 점차로 증가하고 있는 상태이다. 이러한 면은 단지 물의 소비량을 충족시키기 위한 공급량의 증가뿐만 아니라 증가되는 물의 처리에 대한 문제가 크게 부각되고 있다. 특히 하천 오염 등의 대부분의 수질오염의 주원이 생활하수라는 사실은 이러한 물의 처리가 얼마나 중요한 것인가를 지적하고 있다. 실제로 현재 우리의 물 소비량은 과거 20여년동안 급격한 신장세를 보이고 있기는 하지만 아직도 세계적으로 중간정도의 수준으로 물의 소비는 계속 증가될 것으로 전망된다. 이에 따라 수처리장의 증가 또한 당연히 전망되는 사실이다. 이러한 수처리장의 증가는 그 처리 과

정에서 발생하는 폐기물의 증가라는 문제를 일으킨다. 즉, 수처리 과정에서 배출되는 폐기물인 슬러지의 발생이 계속적으로 증가함으로써 이들의 처분에 관한 또 다른 측면의 문제가 부각되고 있는 것이다.

슬러지의 처분에는 여러가지 방법이 연구 검토되고 있지만 가장 일반적인 방법으로 매립이 이용되고 있다. 실제 우리나라의 경우 1992년도 말 전국적으로 약 77만 톤의 하수슬러지가 발생하였고 94년 3월 기준으로 34개의 하수처리장에서 하루평균 2148 m<sup>3</sup>가 발생하고 있으며 그 대부분을 매립에 의존하고 있다.<sup>1)</sup> 그러나 이러한 처분은 매립지의 부지문제와 대부분의 매립지가 단순매립으로 구성되어 있는 우리의 실정에 최적의 처분방식으로서의 많은 문제점을 내포하고 있다. 특히 함수율이 높은 슬러

지의 단순매립은 상당량의 침출수로 인한 악취나 주변 토양의 심각한 오염을 일으킬 위험을 항상 내포하고 있다. 특히 협소한 국토를 지니고 있는 우리나라의 경우 매립외의 다른 방법들의 연구와 개발이 시급한 실정이다.<sup>2,3)</sup>

이러한 처리 방식으로 세계적으로 활발히 연구되고 있는 방식중의 하나가 퇴비화의 기술로서 이 기술은 폐기물을 최종 처리하여 환경과 격리시키는 일반적인 처리가 아니라 재순환시켜 환경과 융화될 수 있는 물질로 폐기물을 전환시키기 위한 기술이다.<sup>4,5)</sup> 즉, 퇴비화는 유기성 폐기물의 자원화의 대표적인 방법으로 유기물질을 생물학적으로 분해하여 안정화시켜 토양의 비료로 이용할 수 있는 최종산물을 생성하는 과정을 말하는 것으로서 비교적 여러 조건들이 우리나라의 경우와 같은 여러국가에서 활발히 연구되고 있다.<sup>7,8)</sup> 실제로 일본의 경우는 1983년 모든 슬러지의 1.7%를 19개의 퇴비화 시설에서 처리하고 있으며 계속적으로 증가시키고 있는 실정이다.<sup>9,11)</sup> 이 기술의 대상으로서는 가축분뇨, 음식물 쓰레기, 하수슬러지 등의 유기성 폐기물이 속한다. 이 기술의 도입이 늦은 감이 없지 않은 우리의 경우, 가축분 그리고 음식물 쓰레기 등의 연구와 실행이 수행되고 있으나 하수슬러지에 대한 퇴비화의 적용은 대단히 미약한 상태이다.<sup>9)</sup> 특히 높은 수분함량과 낮은 C/N비를 가지고 있는 슬러지의 경우 퇴비화의 기술에 적용이 다른 물질에 비해 어렵기 때문에 이러한 현상은 아직도 지속되고 있지만 높은 수분함량과 유기물로 인해 발생하는 매립의 문제와 소각처리의 부적합성을 고려한다면 퇴비화에 의한 슬러지의 처리는 다른 방식에 의한 것보다 더욱 적합한 방법이 될 수 있을 것이다.

본 논문에서 다루고자 하는 주제도 슬러지 퇴비화에 있어서 슬러지 자체의 함수율과 C/N비와 비슷한 범위에서의 최적 조건을 찾고 이러한 결과가 슬러지 퇴비화가 보편화 되기 위한 자료로서 활용되도록 하기 위함이다.

## II. 실험재료 및 방법

### 1. 실험 재료 및 장치

#### (1) 실험재료

사용된 슬러지의 source는 성남시 분당구에서 분류식 관거에 의해 배출되는 하수로서 생활하수 이외의 이물질이 거의 배제된 하수에서 배출되는 슬러지이다. 그리고 본 논문에서 사용되는 슬러지는 혐기

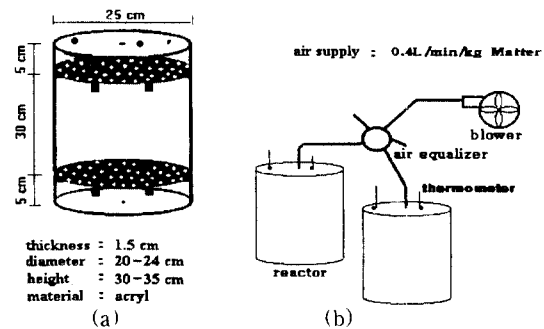
**Table 1.** Characteristic of the dewatered sludge

Component	Moisture Content(%)	C(%)	N(%)	C/N ratio
Contents	82.6	30.6	3.9	7.8

**Table 2.** Heavy metal contents of the dewatered sludge

Component	Standard (mg/L)	Contents (mg/L)
Pb	3	0.0873
Cu	3	0.072
As	1.5	Non
Hg	0.005	Non
Cd	0.3	Non
Cr <sup>6+</sup>	1.5	Non
CN	1	Non
Org-P	1	Non
Tetrachloroethylene	0.1	Non
Trichloroethylene	0.3	Non

Source : The Institute of Health and Environment of Kyonggi-do.



**Fig. 1.** The experimental setup of composting reactor. (a) the structure of composting set, and (b) the structure of reactor and aeration set.

성 소화처리에 의한 것으로서 탈수된 슬러지이다.<sup>12,13)</sup> 식종(Seed)과 개량제(Amendment)는 각각 학교내의 부식토와 공업용 Glucose를 사용하였다. 그리고 충전제(Bulking Agent)로 음료용 빨대(Straw)를 약 1 cm의 크기로 하여 사용하였다.<sup>8,14)</sup> 실험재료로 사용된 슬러지의 성분과 금속함유량은 각각 Table 1과 Table 2와 같다.

#### (2) 실험장치

Fig. 1과 같이 두께 1.5 cm의 아크릴재질로서 속빈 원통형으로 제작하였다. 지름은 약 25 cm이고 높이는 약 35 cm이다. 이 반응조 4개를 제작하였고 각

반응조는 공기 분배조를 거쳐 공기가 균일하게 유입 되도록 하였다.

## 2. 실험 및 분석방법

### (1) 실험방법

본 연구에 관한 실험은 두단계로 실시하였다. 첫 단계는 각 반응조의 수분함량을 다르게 하고 다른 조건을 균일하게 하여 실험하였다. 즉, 퇴비화 반응에서의 수분에 관한 적정범위를 알아보기 위한 실험이다. 두 번째 단계에서는 각 반응조의 C/N비를 다르게 하고 다른 조건을 균일하게 하여 실시하였다. 즉, 첫 번째 단계에서 수분에 관한 인자를 알아보았다면 두 번째 단계에서는 적정 C/N비를 알아보기 위한 목적으로 시행되는 것이다.

1차 실험은 각 수분을 함유하고 있는 슬러지의 중량 2.5 kg을 기준으로 C/N비를 맞추기 위하여 Glucose를 첨가하여 총 중량을 각각 4.43, 4.13, 4.57 그리고 4.43 kg으로 하였다. 그리고 4번 반응조에는 65% 슬러지 중량의 1/5인 500 g의 straw를 첨가하였다. 부식토는 각 반응조의 총 중량의 10%를 첨가하였다. 4번 반응조에 straw를 첨가한 이유는 충진제로서 공기의 공급을 원활하게 해주는 효과로서 기존의 퇴비화의 시행조건과 유사하게 해주기 위해서이다. 2차 실험은 2주간 시행하였다. Table 3은 실험 1의 조건이다. 실험 2는 C/N비에 관한 실험으로서 각각의 C/N비를 15, 20으로 하였다.

이 연구의 목적은 슬러지 자체의 C/N비와 비슷한 조건으로 C/N비를 낮게 함에 있으므로 적정 C/N비 범위에 속하는 20보다 낮은 상태에서의 실험이 필요할 것으로 생각되어 C/N비 15에서 실시하였다. 실험 2는 19일간의 운전기간동안 시행하였다. Table 4는 실험 2의 조건이다. 각 반응조에 들어간 재료는

실험 1과 같은 것으로 하였다.

### (2) 분석방법

1차 실험과 2차 실험은 동일한 방법으로 각 항목을 측정하였다. 온도는 하루에 3번 각각 오전 11:00, 오후 3:00 그리고 오후 10:00에 반응조의 중심과 벽면의 온도를 측정하였다. 그리고 다른 항목을 분석하기 위한 시료는 오전 11:00시에 온도 측정과 동시에 채취하였다. 수분측정은 약 100°C에서 4시간 건조 후 건조 전과 후의 무게차를 비교하여 측정하였다. 또, 회분함량과 탄소함량은 건조시킨 sample을 전기로에서 약 600°C에서 1시간 회화후 무게감량의 차이로 측정하였고 탄소함량은 회분함량 퍼센트를 이용하여 다음의 식 (1)에 적용 측정하였다.

$$\text{Org-C}(\%) = (100 - \text{ash}\%) / 1.8^{15)} \quad (1)$$

pH측정은 시료와 증류수를 1:20으로 혼합하여 교반기(Model 903 Shaker)로 약 120 RPM에서 1시간 진탕후 30분 정치하는 순서를 2회 반복후 pH meter로 측정하였다. 질소는 킬달 장치를 이용해 유기성

**Table 4.** Conditions and components of run 5 and 6

Run Contents	Run 5	Run 6
Components	Sludge+seed+ Glucose	Sludge+seed+ Glucose
C/N 비	15	20
Moisture contents(%)	65	65
Aeration rate(LPM)	0.4	0.4
Sludge(kg)	3	3
Glucose(kg)	0.516	0.876
Seed	0.352	0.387

\*Run 5 and 6 : conducted to search for proper C/N ratio at the 20 through 30°C.

**Table 3.** Conditions and components of run 1, 2, 3 and 4.

Run Contents	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Components	Sludge+Seed +Glucose	Sludge+Seed +Glucose	Sludge+Seed+ Glucose	Sludge+Seed+ Glucose+straw
C/N Ratio	20	20	20	20
Moisture contents(%)	65	55	70	65
Aeration rate(LPM)	0.4	0.4	0.4	0.4
Sludge(kg)	2.5	2.5	2.5	2.5
Glucose(kg)	1.93	1.63	2.07	1.93
Seed(kg)	0.443	0.413	0.457	0.443

\*Run 1, 2, 3 and 4 : conducted to search for proper moisture condition at the above 30°C.

질소와 암모니아성 질소로서 측정하였다. 약 7시간 정도 가열에 의해 전처리를 거친 후 킨달장치를 이용하여 분석하였다. 위에서 얻은 탄소함량과 질소함량의 비로서 본 논문의 C/N비의 지표로 하였다.<sup>16,17)</sup>

### III. 실험결과 및 고찰

본 연구는 슬러지 퇴비화에 관한 연구로서 수분함량과 C/N비의 적정조건을 탈수슬러지의 자체조건과 유사하게 함으로서 현장에서 적용하기에 용이하도록 하기 위한 목적에서 수행되었다. 퇴비화는 유기성 폐기물의 자원화 방법으로 대표적인 방법으로 유기물질을 생물학적으로 분해하여 안정화시켜 토양의 비료로 이용할 수 있는 최종산물을 생성하는 과정을 말한다.<sup>16,20)</sup>

퇴비화에는 호기성과 혐기성 퇴비화로 구분하는데 일반적으로 사용되고 있는 방법은 호기성 퇴비화로서 퇴비더미에 공기를 공급해주는 방식이다. 본 논문에서 실행한 퇴비화도 호기성 퇴비 방식을 이용하였다.<sup>18,19)</sup> 퇴비화는 미생물에 의한 반응으로 유기물의 분해와 안정화를 위한 미생물의 역할은 중요하다. 이러한 반응에 주요하게 관련되는 미생물은 박테리아, 균류 그리고 방선균 등이고 이러한 미생물은 퇴비화의 진행중에 대략 10<sup>6</sup>/g organic matter의 수준으로 증가한다고 보고하고 있다.<sup>6)</sup> 그들은 기질, 수분, 호기성 또는 혐기성 그리고 중온성 또는 고온성 등의 조건에 따라 증가 또는 감소한다. 이러한 환경적 조건외 퇴비화 기간 중에 어떠한 미생물의 주입에 의하여 미생물의 활동이 가속화될 수 있다. 퇴비화에 영향을 주는 인자들로서는 온도, pH, 입자크기, 공기공급, 교반, 수분함량, 충전제 그리고 C/N비등으로 분류 할 수 있다.<sup>40,41)</sup> 본 논문에서는 숙성단계를 제외한 모든 단계를 관찰하였으며 이 실험의 진행상황으로서 온도, pH, 수분함량, 회분 및 탄소함량 그리고 C/N비의 변화를 지표로 하였다.<sup>29,32,43)</sup>

#### 1. 1차 실험 결과

이 실험은 적정 수분 함량을 찾기 위한 실험으로서 반응조 1, 2, 3 그리고 4의 실험 결과이다.

##### A) 온도 변화

퇴비 물질의 온도는 퇴비 기간중의 유기물의 분해와 미생물의 활동을 반영하는 지표이다.<sup>44)</sup> 즉, 적당한 조건하에서의 퇴비화의 일반적인 온도변화는 초기단

계에 50°C이상의 고온까지 급격한 상승을 보이고 이러한 고온부에서 일정기간의 체류후에 실온으로 감소하는 추이를 보이고 있다. 이러한 온도의 증가와 감소는 퇴비화 기간 중에 중온성 또는 고온성 미생물에 의한 분해성 유기물의 분해의 결과이다.<sup>22,30)</sup>

본 논문 실험의 온도 변화는 퇴비화의 전형적인 추세를 보였다. 즉, Run(이하 반응조) 1, 2, 3 그리고 4번은 외기온도 32°C와 반응조 초기 온도 27°C에서 시작하여 계속 상승을 보였고 반응 최종부에서 감소를 보여 실온과 비슷해지는 온도까지 감소되었다. 초기의 최고 온도까지의 상승은 반응조 1이 가장 빠른 증가를 보였고 반응조 4가 가장 늦었다. 이는 충전재로 인한 초기 산소 공급이 원활하여 반응조 내의 열이 외부로의 유출이 다른 반응조에 비해 많았기 때문일 것이다.

이 실험에서 각 반응조의 최고온도는 반응조 2를 제외하고는 모두 51-52°C의 범위 안에 있는 반면에 반응조 2는 49.7°C의 최고 온도를 기록했다. 이것은 반응조 2의 수분이 시작시에 너무 적어 반응이 활발히 일어날 때 수분 함량이 급격히 저하되어 반응에 적합한 수분의 유지가 어려워 다른 반응조보다 반응의 활성이 적기 때문이다. 이러한 경향은 Fig. 2에서 관찰할 수 있는데 다른 반응조에 비해서 최고온도 범위에서의 변화가 많았는데 이것은 미생물의 활성이 지속할 수 있기 위한 수분조건이하로 저하되기 때문일 것으로 사료된다. 그리고 각 반응조의 center와 side의 온도 차이는 온도가 고온으로 상승할수록 차이가 커졌다. 반응조 4번의 반응조내의 온도차이가 다른 반응조 보다는 비교적 균일한 분포를 보여 주었는데 이것은 충전재의 혼합으로 공기의 분포가 원활하기 때문일 것이다.

최고 온도를 지난 다음에 온도의 경향은 각 반응조의 경향이 비슷함을 보였다. 이는 최고 온도를 지난 다음의 각 반응조의 수분이나 다른 조건들이 비슷해지기 때문일 것이다. Fig. 2에서 나타난 것과 같이 반응조내의 최고 온도는 외기온도가 최고값을 보일 때 나타났다. 이러한 경향은 각 반응조에서 동일하게 보였는데 이러한 관찰로서 외기온도가 퇴비화에 미치는 중요성을 알 수 있다. 수분 함량 65%와 70%의 반응의 차이는 보이지 않았다. 오히려 충전재의 영향으로 반응조 4번의 초기 반응이 약간 느린 것으로 나타났다.

##### B) pH 변화

pH의 변화도 퇴비화의 전형적인 양상을 보였다.

중성에서 시작된 시료는 반응의 초기에는 약산성으로 저하되고 반응이 진행되면서 중성으로 pH가 상승하고 최종적으로 약알칼리 성으로 반응을 종결한다. 본 실험에서 반응조 1번과 4번은 pH 8이상에서 반응을 종결한데 반해 반응조 2번과 3번은 각각

pH 7.77과 7.71로서 반응을 종결하여 아직 반응이 완전하게 종결된 상태가 아님을 시사한다. 즉, 공기 공급의 중단 2일 후 반응조 2번과 3번의 pH를 측정 한 결과 각각 pH 8.08과 8.06을 보였다.

반응조 1번이 4번보다 초기의 pH가 더 낮게 저하

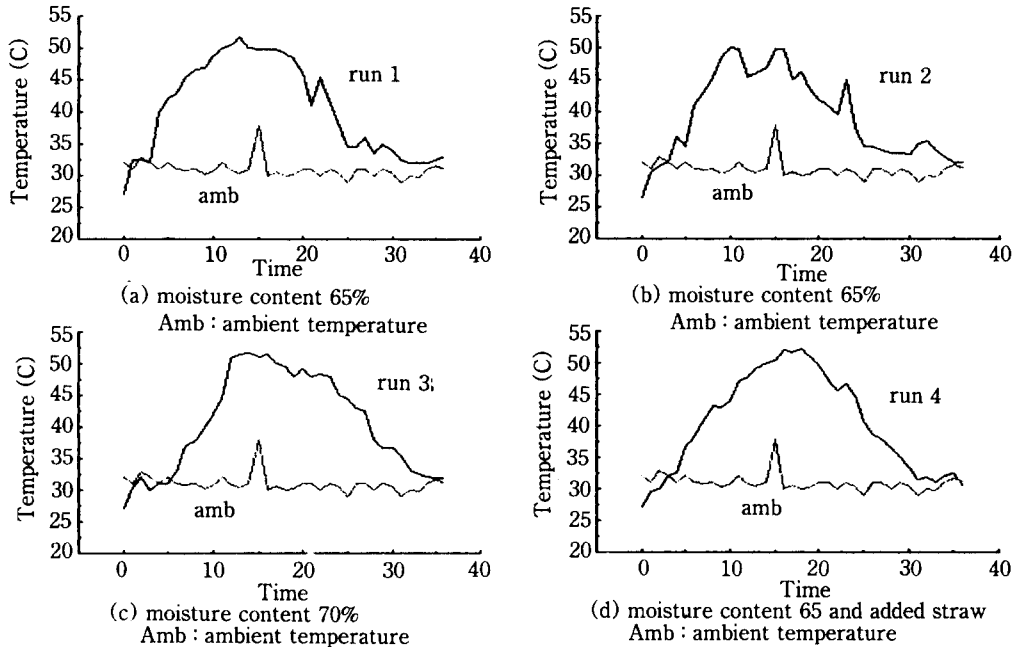


Fig. 2. Temperature trends of each composter by various moisture content.

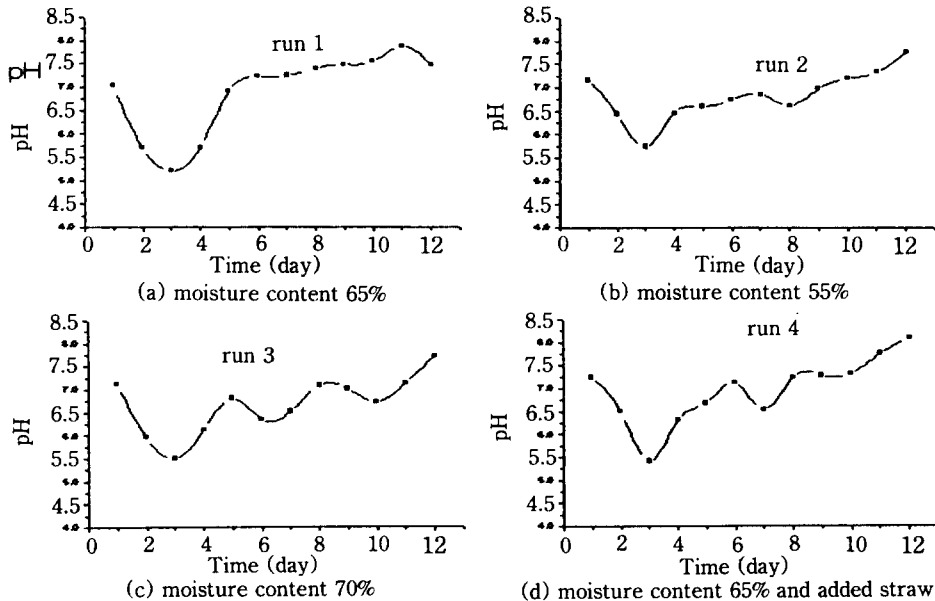


Fig. 3. pH trends of each composter by various moisture content.

되고 약산성에서 pH에서의 유지기간이 더 긴 것으로 나타났다. 이것은 반응조 4의 충전재의 첨가로 공기공급이 개선되어 반응 초기에 반응조내의 혐기화의 진행이 반응조 1보다 덜하다는 것으로 볼 수 있다. 그러나 Fig. 3에서 나타난 것과 같이 저하정도나 기간의 차이가 나타난 반면에 각 반응조가 최저의 pH를 보이는 기간은 반응후 약 3일정도로 거의 동일함을 보였다. 반응조 2의 경우 함수조건이 55%로 가장 낮기 때문에 다른 반응조에 비해 공기공급이 원활하기 때문에 pH의 약 산성화가 작지만 함수율이 반응을 활발하게 하기에는 부족하기 때문에 pH의 증가가 더뎠을 알 수 있다. 반응조 3의 경우는 반응초기에 높은 함수율로 인해 반응조내에 혐기화의 정도가 다른 반응조에 비해 심하기 때문에 약 산성으로 존재하는 기간이 길어 중성이나 알칼리성으로 회복하는데 다른 반응조에 비해 장기간이 걸림을 알 수 있다. 이것은 초기의 심하게 이루어지는 혐기화가 높은 수분함량으로 인한 것이라기 보다는 충전재의 함유 여부에 따른 공기공급 과정의 차이로 인한 것이라고 생각할 수 있다. 그리고 초기의 pH 저하는 반응조 1과 비슷한데 반해 반응 4일 후 pH의 상승은 반응조 4와 비슷한 양상을 보였다. 이러한 면은 4일 후의 수분함량이 다른 반응조와 비슷한 조건으로 감소를 보였기 때문에 미생물에 의한 분해 활동이 동일하다고 할 수 있겠다.

C) 수분함량의 변화

슬러지의 수분함량은 미생물이 생존할 수 있는 퇴비화를 위해서 중요하다. 적당한 수분함량은 퇴비화의 원료에 따라 다르지만 일반적으로 60-65%로 알려져 있다. 지나친 수분의 존재는 퇴비 물질의 기공을 막기 때문에 공기의 원활한 공급에 문제를 일으킨다. 반면에 40%이하의 수분함량하에서는 미생물의 활동이 극히 제한되고 30%이하에서는 미생물의 활동이 정지된다고 보고되고 있다.

반응조 1과 4는 거의 비슷한 양상을 보이고 있으며 반응조 3은 높은 함수율에서 시작하였는데도 불구하고 반응시작 3일 후부터 1 그리고 4와 비슷한 양상을 보였다. 그러나 반응조 2는 반응 2일만에 수분함량이 47.87%로 감소되어 미생물 활성에 수분함량이 부족한 수준까지 저하됨을 알 수 있다. Fig. 4는 수분함량의 감소를 선형회기 곡선으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 보면 반응조 1,2,3 그리고 4번의 기울기는 각각 -1.42, -1.30, -1.48 그리고 -2.06을 보이고 있다. 반응조 1과 3의 기울기가 비슷함을 보이지만 표준편차가 반응조 1이 4.02 그리고 반응조 3이 6.02로서 비교적 큰 차이를 보이고 있다. 이것은 초기 수분함량의 차이가 주요인 이다. 그러나 반응 약 6일 후부터 보이는 양상은 반응조 1과 매우 흡사하다는 것을 알 수 있다. 즉, 초기의 수분함량 감소율이 반응조 3이 1보다 크기 때문에 결국에서는

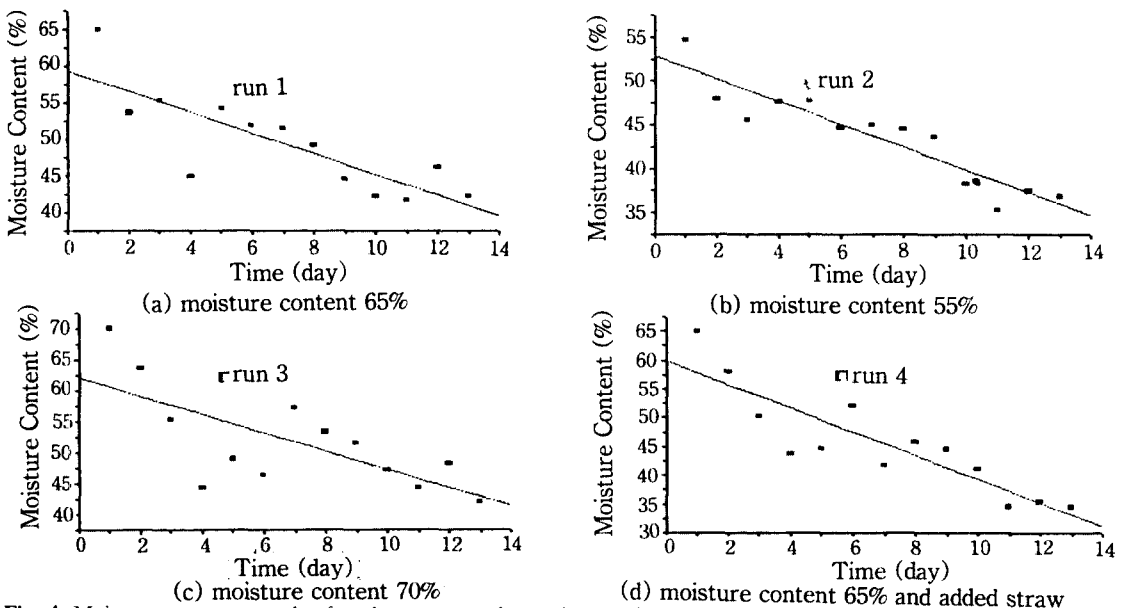


Fig. 4. Moisture content trends of each composter by various moisture content.

반응조 1의 조건 변화와 비슷하게 되고 이러한 결과는 반응의 종결부까지 지속된다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 위에서 알아본 온도의 변화에서 나타난 것과 같은 결론을 내릴 수 있다.

#### D) 회분함량과 탄소함량의 변화

회분함량과 탄소함량은 서로 역관계에 있다. 그리고 회분함량의 증가와 탄소함량의 감소는 반응중 유기물의 분해가 진행됨을 암시하고 있다. 본 실험에서 보면 반응조 1의 경우 35.53%에서 시작하여 22.27%로 탄소함량의 감소를 보였는데 반해 반응조 3과 4는 각각 35.22%와 36.11%에서 반응이 시작되어 19.37%와 18.37%로 반응을 종결하였다. 그리고 반응조 2는 36.67%에서 시작하여 25.18%로 반응을 마쳤다. 탄소함량의 감소에서 보면 반응조 1보다 반응조 3의 미생물 분해활동이 더 활발했음을 알 수 있다. 고온에서의 체류기간이 반응조 1보다 반응조 3이 더 길었으며 이는 고온성 미생물의 활성이 반응조 1보다 더 활발했다는 온도의 지표와 일치되는 사실이다.

Fig. 5를 보면 반응조 1보다 반응조 4가 반응조 3과 더 유사하다는 것을 알 수 있다. 그러나 반응조 3이 온도 상승률이 급하고 하강률이 완만한데 비해 반응조 4의 경우는 온도의 상승률과 하강률이 비교적 완만하여 중온성 미생물과 고온성 미생물의 활동이 반응조 3보다 고르게 작용한다는 것을 알 수 있다. 반면에 반응조 2의 경우는 초기의 탄소함량의 감소율이 다른 반응조와 비슷한 형태를 보이지만 반응

이 진행됨에 따라 그 속도가 완만해짐을 볼 수 있는데 이것은 반응조 2의 수분함량의 부족이 제한 요소로서 작용하였기 때문이라고 생각된다. 실제로 Fig. 5의 기울기를 살펴보면 반응조 1, 2, 3 그리고 4가 각각 -1.17, -1.02, -1.33 그리고 -1.44이다. 즉, 반응조 2의 곡선이 가장 완만하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 퇴비화에 있어서 많은 수분함수에 의한 문제보다는 부족한 수분에 의한 영향이 더 크다는 것을 나타낸다고 할 수 있겠다.

#### E) C/N 비의 변화

반응 시작의 C/N 비는 반응조 1부터 각각 20.20, 20.15, 20.13 그리고 20.06이었다. 이 비는 반응이 진행됨에 따라 거의 같은 수준으로 감소되는 현상을 보였는데 반응조 2의 경우 반응의 중반까지 다른 반응조와 같은 양상을 보였지만 반응의 후반에 C/N 비의 감소율이 다른 것의 반정도의 수준으로 감소되어 다른 반응조가 종결되는 C/N 비가 10정도인데 반해 반응조 2의 C/N 비는 12.57을 기록하여 반응 후반에 미생물의 활동의 감소율이 다른 조건의 반응보다 급격히 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 온도변화와 비교될 수 있는데 반응조 2번의 최고온도가 다른 반응조에 비해 4-3°C정도 낮고 그 온도에서의 유지 시간이 다른 반응조에 비해서 짧다는 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 반응조 2에 포함되어 있는 수분의 함량이 반응 2일 후부터 급격히 감소하여 반응 9일 후에는 40%이하로 수분함량이 감소되어

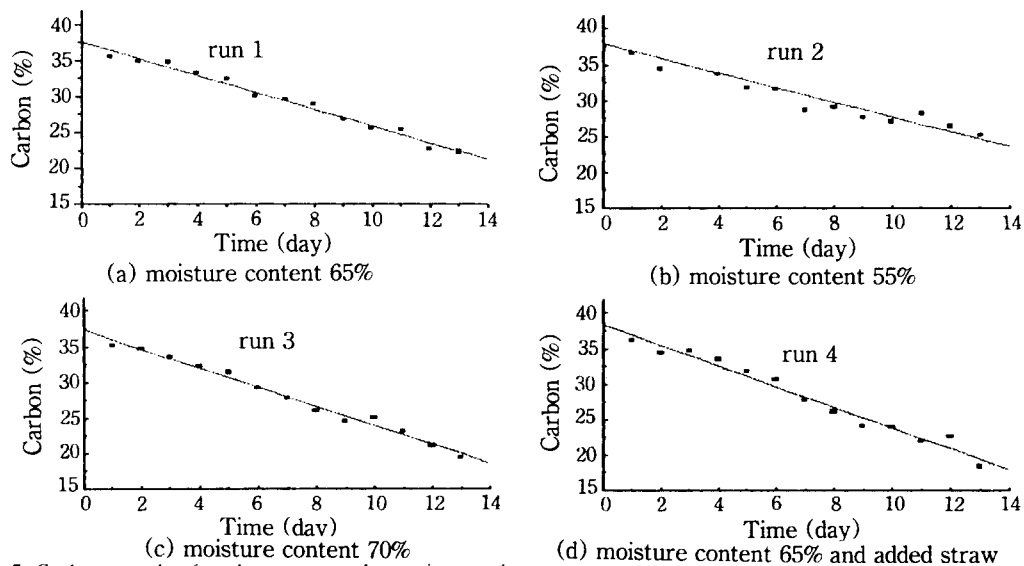


Fig. 5. Carbon trends of each composter by various moisture content.

**Table 5.** C/N Ratio trends of each composter by various moisture content (unit : %)

Run		Time (day)			
		1	5	9	14
Run 1	C	33.53	32.50	26.80	22.27
	N	1.66	1.85	1.88	2.06
	C/N	20.20	17.54	14.23	10.84
Run 2	C	36.67	31.78	27.68	19.37
	N	1.82	1.79	1.98	1.54
	C/N	20.15	17.78	14.00	12.57
Run 3	C	35.22	31.40	24.60	25.85
	N	1.75	1.75	1.45	2.39
	C/N	20.13	18.00	16.92	10.83
Run 4	C	36.11	31.85	24.09	18.37
	N	1.81	1.83	1.75	1.74
	C/N	20.06	17.44	13.79	10.58

\*Moisture content in run 1, 2, 3 and 4 is each 65,55,70 and 65%. And run4 has straws.

미생물 활동에 수분이 제한인자로 작용되며 특히 유기물의 활발한 분해를 담당하는 고온성 미생물의 활동이 감소된 결과로 생각할 수 있다.

그에 반해 반응조 3은 Run 1과 4의 결과와 거의 같음을 보여주고 있다. 그리고 이들은 고온부를 지난 다음의 C/N비 감소가 급격히 일어남을 알 수 있는데 이러한 변화는 퇴비화에서 일어나는 미생물에 의한 분해활동은 온도가 고온 영역에서 감소하는 기간동안에 주로 일어난다는 기존의 보고와 같다는 것을 알 수 있다. 특히 반응조 4번의 경우는 반응의 후반부에서 C/N비의 급격한 감소를 보였는데 이러한 변화는 초기의 수분함량이 많은 상태로 시작하였기 때문에 미생물에게 적합한 수분의 유지가 다른 반응조에 비하여 오래 유지됨으로서 반응 최종부에서의 미생물 활성이 반응조 1과 4번에 비해 크다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 변화 경향은 탄소함량의 감소 등의 다른 지표의 변화 경향과 동일하다.

Table 5에 나타난 것처럼 반응초기의 반응은 반응조 1, 2 그리고 4가 빠른 진행을 보였다. 반면에 반응조 3은 느린 진행을 보였다. 그러나 반응의 후반부에서는 반응조 3이 급격한 진행을 보인 것을 알 수 있다. 이러한 경향은 초기의 큰 수분함량은 활발한 반응을 위해서는 65%의 수분함량을 가진 반응조에 비해서 긴 준비기간을 요하는데 반해 초기의 수분함량이 적은 반응조 2는 후반부로 갈수록 수분함량의 감소로 미생물의 활성이 감소되기 때문일 것이다.

결과적으로 각 반응조의 C/N비의 감소율은 반응

조 1이 46.20%, 반응조 2가 37.62%, 반응조 3이 46.20% 그리고 반응조 4가 47.26%로 나타났다. 이러한 감소율로 판단해보면 반응조 1과 3 그리고 4번의 반응의 정도가 비슷하다는 것을 알 수 있다. 이러한 결론은 위의 모든 결과와 동일하다.

## 2. 2차 실험 결과

이 실험은 적정 C/N 비를 찾기 위한 실험으로서 반응조 5와 6의 실험결과이다.

### A) 온도 변화

실험 2는 실험 1과는 달리 외기온도가 낮은 상태에서 진행되었다. 그러므로 반응조 내의 온도가 실험 1과 비교하여 평균적으로 7°C정도의 차이를 보이고 있다. 그리고 반응조내의 온도 상승이 실험 1에 비해 12시간정도의 늦고 최고온도가 실험 1의 그것과 비교하여 낮다는 것을 관찰할 수 있다. 이러한 점으로 외기온도가 반응조 내의 미생물의 Lag time 등 반응 전반에 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 실험 1과 뚜렷한 차이를 보인 것은 실험 2에서 온도의 증가 양상이 두 번 나타났다는 것이다. 이러한 경향을 보이는 것은 외기 온도가 낮기 때문에 반응조 내의 미생물 활동하기에 적합한 온도까지의 적응 기간이 길어지기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 6와 같이 반응조 5의 경우 초기에 약간 상승 후 감소한 후 다시 최고 온도까지의 상승이 관측된 것에 반해 반응조 6의 경우는 최고 온도까지의 상승 후에 온도가 감소하다가 다시 약간 증가하는 양상이



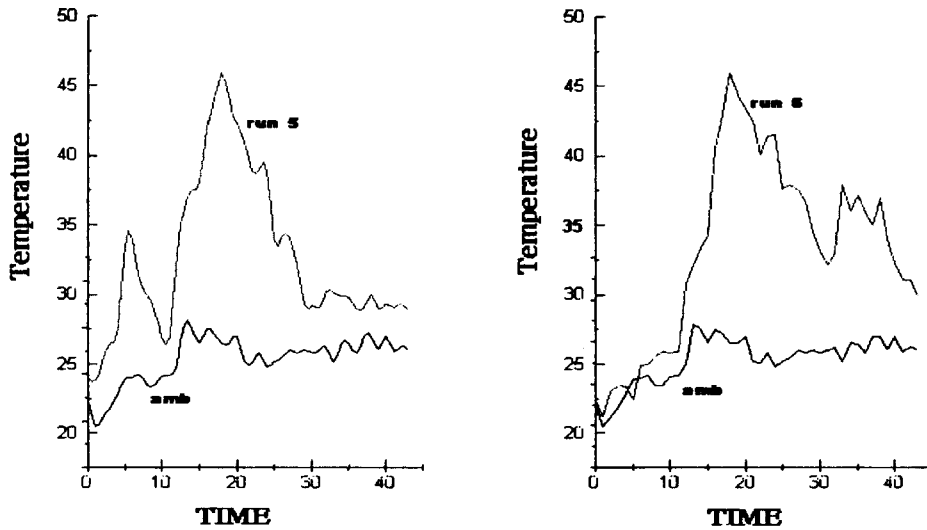


Fig. 6. Temperature trends of each composter by various C/N ratio.

관찰되었다. 그리고 반응조 5는 40°C이상의 온도가 48시간인데 반해 반응조 6의 경우는 72시간 정도로 반응조 5에 비해 1일정도가 더 유지되었다. 이것은 반응조 5의 C/N 비가 반응조 6에 비해 낮기 때문에 미생물의 분해활동이 반응조 6에 비해 활발하지 못하기 때문일 것이다. 그러나 이러한 결과가 낮은 C/N 비에 의한 미생물의 활성이 일어나지 않았다는 의미는 아니다. 이러한 추론이 가능한 것은 일반적으로 낮은 C/N 비에서는 암모니아의 생성과 pH의 상승으로 암모니아 가스가 발생하여 악취의 문제를 일으키는데 반응조 5에서의 이러한 문제는 발생하지 않았기 때문이다.<sup>35,36)</sup> 즉, 낮은 외기온도에서 비롯되는 미생물의 낮은 활성 특히 고온성 미생물의 낮은 활동과 미생물의 성장에 약간 부족한 탄소원의 영양이 결합되어 나타난 현상으로 생각 할 수 있겠다. 결론적으로 C/N비 15가 미생물의 성장에 제한 요소가 될 정도로 낮은 상태는 아니라고 할 수 있겠다. 반응조 내의 중심과 벽면의 온도차이를 비교해보면 두 반응조 모두 균일한 공기공급이 이루어졌음을 알 수 있다.

#### B) pH 변화

Fig. 7과 같이 반응조 6은 pH가 약산성으로 유지되는 기간이 4일인데 반해 반응조 5는 1일을 보였다. 보통 약산성의 기간은 미생물의 적응기간인 Lag time중에 나타나는 것이 일반적이다. 이러한 결과는 반응조 6에 비해 상대적으로 낮은 C/N비를 가

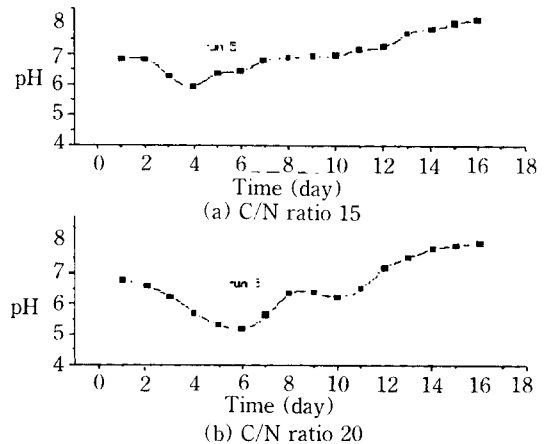


Fig. 7. pH trends of each composter by various C/N ratio.

지고 있는 반응조 5의 반응이 빠르다는 것을 암시한다. C/N비가 20-25 보다 높은 경우 반응의 저하를 가지고 온다는 보고가 있다. 이것은 미생물에 의한 분해가 질소 유기물보다 탄소유기물의 속도가 더디기 때문이다. 그러나 본 논문에서 반응조 6의 C/N비는 20으로 과량의 탄소가 있을 가능성은 전혀 없는 상황에서 반응조 6의 반응속도를 표준으로 사용할 수 있다. 그러므로 반응조 5의 반응이 정상 C/N비에서의 속도보다 빠르다고 할 수 있다.

반응조 5의 경우는 초기의 pH 6.82에서 시작하여

pH 8.13으로 반응이 종료된 것에 반해 반응조 2는 pH 6.77에서 시작하여 pH 8.01에서 반응이 종료되었다. 그리고 반응조 6은 반응조 5에 비해서 약산성에서 중성 이상의 pH로의 회복에 더 오랜 시간이 걸렸는데 이것은 미생물의 활동 시작이 반응조 5에서 빠르다는 것을 알 수 있다. 이러한 결론은 약산성 기간에 대한 위에서의 설명과 일치한다고 할 수 있다. pH의 자료로서 판단하면 반응 초기의 5번 반응조의 반응의 우세는 반응의 후반부까지 지속되고 있다.

### C) 수분함량의 변화

수분함량의 변화는 비교적 온도의 변화와 같은 양상을 보여주고 있다. 그러나 초기의 수분함량의 자료를 보면 온도의 변화와 약간 다른 양상을 보이고 있다. 초기의 온도 상승은 반응조 5에서의 급격한 상승을 보이는데 반해 6번은 5번에 비해 약 36시간 정도 늦은 출발을 보였는데 수분함량의 자료는 그와 반대의 현상을 보이고 있다. 즉 초기의 수분함량의 감소는 6번의 반응조에서 크게 나타났다. 이러한 결과는 40°C 이하에서는 중온성 미생물에 의한 활동에 의해 열을 생성하고 이산화탄소와 물을 생산한다.<sup>23,24)</sup> 그러므로 수분함량의 자료로서 초기의 반응은 반응조 6번 보다 5번 반응조 내에 더 활발한 반응을 일으켜 더 많은 열과 물을 생성했다고 추론할 수 있겠다. 즉 C/N비 15상태에서의 퇴비화 반응이 미생물의 적응기간인 Lag Time이 짧다는 것을 알 수 있다. 이것은 질소보다 분해속도가 늦은 탄소의 양이 반응조 6번보다 상대적으로 적어 반응조 5의 초기 미생물의 대사작용 등의 시작이 빠르다고 할 수 있다. 반면에 반응 중반부의 고온성 미생물의 활동영역과 반응 후반부에서의 미생물의 활동은 반응조 6이 지속적으로 일어나고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 C/N비 15가 퇴비화를 위한 미생물의 성장 또는 활동을 만

족시키는 조건으로는 약간 부족한 면이 있다는 것을 말하고 있다.

이러한 점은 Fig. 8을 보면 정확히 알 수 있다. 반응조 5와 6의 기울기는 각각 -1.11 그리고 -0.94로서 반응조 5의 기울기 더 크다는 것을 알 수 있다. 그러나 반응에 의한 수분함량의 감소를 보면 반응조 5가 24.90% 그리고 반응조 6이 25.15%로서 반응조 6의 분해활동이 더 큰 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 낮은 C/N비에 의한 미생물의 활동의 지속성이 감소된다고 할 수 있겠다. 위의 미생물 활동의 지속성은 난분해성 물질의 대다수의 분해가 이루어지는 영역은 고온부를 지나 다시 감온단계가 되는 지점에서 가장 활발히 일어난다는 보고에 의하면 초기의 반응 진행의 신속함보다 미생물의 활동의 지속기간이 더 중요하다고 할 수 있다. 그러나 본 실험에서 다른 퇴비화 재료는 소화된 슬러지로서 생슬러지에 포함되어 있는 난 분해성물질의 양보다 극히 적을 것이다. 이러한 재료의 퇴비화에서 낮은 C/N비로서의 운전은 반응조 5와 6을 비교할 때 타당하다고 볼 수 있다.

### D) 회분 함량 및 탄소함량의 변화

반응조 5번과 6번은 반응 3일 후 회분 함량의 감소 그리고 탄소 함량의 증가 모두가 두드러진 변화를 보였다. 이 기간은 pH가 약산성이 시작되는 구간이고 온도의 증가속도가 두드러지기 시작하는 구간이다. 물론 반응조 5가 반응조 6보다 빠른 결과를 보이고 있다. 이것은 위의 모든 자료에서 보여준 것과 같다. Fig. 9를 보면 반응조 5와 6의 기울기가 각각 -0.52 그리고 -0.55로서 거의 차이가 없다. 그러나 각 반응조의 탄소함량 감소율을 보면 반응조 5가 24.99% 그리고 반응조 6이 36.25%로서 반응조 6의 분해 활동이 더 활발했다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 수분함량의 감소와 같은 결론을 추론할 수 있다.

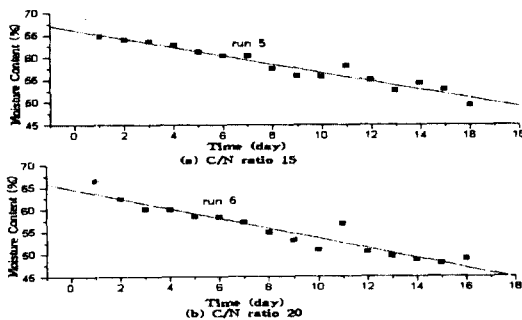


Fig 8. Moisture content trends of each composter by various C/N ratio.

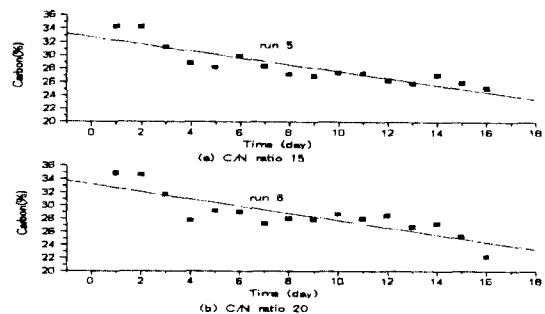


Fig 9. Carbon trends of each composter by various C/N ratio.

**Table 6.** C/N Ratio trends of each composter by various C/N ratio (unit : %)

Run		Time (day)						
		1	5	9	12	16	17	18
Run 5	C	34.29	28.23	27.18	27.36	27.05	25.89	25.15
	N	2.15	2.14	2.24	2.26	2.39	2.18	2.34
	C/N	15.95	13.22	12.15	12.11	11.34	11.87	10.75
Run 6	C	33.83	29.14	27.92	27.98	27.21	25.31	22.20
	N	1.68	1.59	1.84	1.99	2.48	2.51	2.20
	C/N	20.15	18.27	15.21	14.03	11.03	10.09	10.10

\*C/N ratio in run 5 and 6 is each 15 and 20

### E) C/N비의 변화

퇴비화의 실험에서 C/N비의 변화는 진행정도를 알 수 있는 결정적인 요인 중의 하나로서 일반적으로 C/N비가 약 10정도가 되면 퇴비화의 진행이 완료된 것으로 보고되고 있다. 이러한 경향은 Table 6에서 보는 것과 같이 본 실험에서도 같게 나타난다. Table 6에서 보는 바와 같이 반응조 5번의 경우는 15.95에서 시작하여 10.75로 반응이 종결되었고 반응 초반부에 급격한 C/N비 감소를 보였는데 이것은 질소성 유기물의 감소에 의한 대기보다는 탄소성 유기물에 의한 감소에 의한 영향을 알 수 있다.

이에 비해 초기 C/N비 20.15에서 시작되어 10.10으로 종결된 반응조 6의 경우는 C/N비의 급격한 감소가 반응의 중반부까지 지속되었는데 이것은 미생물의 활동이 반응조 5번의 경우 보다 지속되었다는 수분함량과 탄소함량의 감소에 대한 추론을 더욱 확고하게 해주는 것이다. 특히 온도의 변화에서 보는 것과 같이 반응조 5의 경우 고온성보다는 초기의 중온성 미생물의 강세를 보였고 반응조 6의 경우 비교적 중온성보다는 고온성과 그 이후의 감온단계에서의 미생물들이 강세를 보인 자료와 같은 변화를 보인다.

이것은 미생물의 에너지원이 반응조 5보다는 6이 많으므로 미생물의 적응기간이 반응조 5의 경우가 신속하게 이루어지는 반면에 미생물의 활동이 활발히 지속되는 기간은 반응조 6번의 경우가 길다는 것을 알 수 있다.

이러한 결과는 Table 6에서 나타난 C/N비의 감소율에서 더욱 명확하게 나타난다. 반응조 5의 감소율은 32.60%이고 반응조 6의 감소율은 49.86%로서 두 반응조의 차이가 17.26%로서 큰 격차를 보인다. 그러나 반응 시작 4일 후의 감소율을 보면 반응조 5가 17.12%로 반응조 6의 감소율보다 약 8%정도 큰 것으로 나타났다. 이것은 반응조 5의 반응이 반응

조 6보다 신속하게 진행되고 있다는 것을 암시한다. 이러한 경향은 반응의 중반부인 고온의 온도를 보일 때부터 역전되기 시작한다. 이러한 결론은 낮은 C/N비에 의한 미생물의 낮은 활성에 기인한다는 위의 결론과 동일한 점을 보인다.<sup>25,26,31)</sup>

### 3. 슬러지 퇴비의 안전성

퇴비화 과정은 적당한 조절 하에서 생물학적 도움으로 폐기물질을 높은 품질의 유기성 비료로 전환하는 과정이다. 이러한 퇴비의 특성은 영양물질, 중금속의 함유여부 그리고 phytotoxic물질의 측면에서 다루어진다. 퇴비화의 목적은 raw waste에서의 부패성 유기물을 안정화시키고 weed seed와 병원성 유기물을 사멸시켜 균일하고 안전한 퇴비로 만드는 데 있다.<sup>27)</sup>

슬러지 퇴비화의 품질에 주요한 관심은 중금속의 포함 여부이다. 슬러지 퇴비화의 중금속은 슬러지 자체내에 농축되어 있는 중금속의 양에 의해 판단된다. 한 연구에 의하면 20일간 실시된 퇴비화에 의해 Cu가 10%정도 감소되는데 반해 Cd와 Zn은 퇴비화의 전과 후의 농도가 비슷하다고 보고하고 있다.

심혁성 등의 연구에 의하면 하수슬러지내의 중금속함유는 거의 검출이 안되고 본 연구에 사용된 슬러지내의 중금속도 거의 검출되지 않고 있다.<sup>4)</sup> 그리고 분류관으로 전환되고 있는 상태에서 슬러지내의 중금속의 문제는 회석될 수 있다고 할 수 있다. 본 논문의 재료로 사용된 슬러지의 중금속 함유정도는 Table 2에 나타난 것처럼 Pb와 Cu를 제외한 나머지의 농도가 검출되지 않고 있다. 그리고 이 두항목의 농도도 기준이하로서 이러한 성분의 슬러지를 이용한 퇴비화에서의 중금속 분해는 유발되지 않는다고 볼 수 있다.

#### IV. 요약 및 결론

1. 반응조 1, 2, 3 그리고 4는 적정수준의 수분함량을 찾기 위한 실험으로서 각각 수분조건을 65%, 55%, 70% 그리고 65%로 실험을 시행하였다.

2. 온도의 경향은 최고온도에서의 체류시간과 초기 온도의 증가에서 반응조 4와 유사한 진행을 보였으며 특히 반응 시작후 6일부터 반응이 종결되는 14일까지의 경향은 다른 반응조에 비해서 온도의 감소 속도가 둔화되어 반응 중반부 이후의 미생물에 의한 분해활동이 다른 반응조에 비해 활발함을 알 수 있다.

3. 위의 온도의 경향은 C/N비의 감소에서도 보인다. 반응 시작후 9일 까지의 반응조 3의 C/N비 감소가 다른 반응조에 비해 절반 정도인데 그 이후의 반응에 의해 C/N비 감소는 반응조 1과 4와 같은 수준을 보이고 있다.

4. 수분함량과 탄소함량의 감소율을 나타내는 기울기도 반응조 1보다 크고 4보다는 작은 경향을 보여 수분함량 70%의 퇴비화에서 많은 수분함량의 문제가 부각되지 않고 있다.

5. 반응조 5와 6은 하수 슬러지의 특징 중의 하나인 낮은 C/N비의 문제를 해결하기 위한 실험이다. 즉, 반응조 5를 C/N비 15 그리고 반응조 6을 C/N비 20에서 실시하였다.

6. 반응조 5와 6의 온도 경향을 관찰하면 반응조 5는 고온부를 지나는 기간부터 생물 활동이 반응조 6에 비하여 감소됨을 보이고 있다. 또한 반응조 5의 초기 온도 증가율과 C/N비의 감소율이 반응조 6보다 큰 것으로 나타나 미생물의 lag time이 반응조 6에 비해 작은 것으로 나타났다.

7. 반응조 5와 6의 최종 pH값은 오히려 반응조 5가 8.13으로 높았다.

8. 반응조 5와 6의 최종적인 수분함량은 각각 49.39%와 48.97%로서 별 차이를 보이지 않았다. 그러나 반응조 5와 6의 수분함량의 기울기는 각각 -1.11과 -0.94로서 오히려 반응조 5가 더 큰 감소율을 나타내고 있다.

9. 반응조 5와 6의 최종적인 탄소함량도 25.15%와 22.20%로 수분함량의 변화와 유사함을 보였다. 또한 탄소함량 감소율의 기울기는 반응조 5가 -0.52이고 반응조 6이 -0.55로서 반응조 5가 약간 작지만 서로 유사한 기울기를 보이고 있다.

반응조 1, 2, 3 그리고 4번 실험의 결과로서 하수

처리장에서 생산되는 탈수슬러지 함수조건과 가까운 수분함량 조건에서의 퇴비화의 가능성을 보여주었다. 즉 수분함량 70%에서의 퇴비화는 기존의 적정 함수율인 65%에서의 퇴비화와 유사한 경향을 보였다. 이 결과에 의해 70%의 수분함량이 슬러지 퇴비화에서 적정수준이라는 결론을 내릴 수 있다. 반응조 5와 6번 실험의 결과는 고온성 미생물의 활성이 반응조 5 즉, 낮은 C/N비에서 작은 것으로 나타났다. 이것은 헤미셀룰로오스나 리그닌 등의 분해가 어려운 물질의 분해를 담당하는 고온성 미생물의 활성이 약해지기 때문에 문제로서 제기될 수 있는 부분이다. 그러나 현재 하수 처리장에서의 슬러지는 대부분이 소화과정을 거친 다음에 배출되기 때문에 다른 폐기물에 함유되어 있는 난 분해성 물질의 함유가 상당히 적을 것으로 추정된다. 그러므로 낮은 C/N비에서의 슬러지 퇴비화의 시행이 기존에 알려진 적정 범위내의 C/N비에서 시행된 퇴비화와 유사함을 보였다. 이상의 실험으로 하수 슬러지 자체의 수분과 C/N비와 가까운 조건에서의 퇴비화가 충분히 가능하다는 결론을 내릴 수 있다.

#### 참고문헌

- 1) 환경부 : 환경백서, 220-470, 1995.
- 2) 최외소 : 폐기물처리와 자원화, 청문각, 465-480, 1996.
- 3) 박영대 : Utilization of organic Wastes As a Fertilizer in Korea, 유기질비료 사용에 관한 세미나, RDA and FFTC/ASPAC., Chapter 2, 1990.
- 4) L.F.Diaz, G.M.Savage, L.L.Eggerth, and C.G. Golueke : Composting and Recycling Municipal Solid Waste, Lewis Publishers all Rights Reserved, 121-219, 1993.
- 5) J.S.Jeris, W.R.Regan : Controlling Environmental Parameters for Optimum Composting ; Moisture, Free Air Space and Recycle, Compost Sci., 14(2), 8-15, 1973.
- 6) L.F.Diaz, G.M.Savage, L.L.Eggerth, and C.G. Golueke : Composting and Recycling Municipal Solid Waste, Lewis Publishers all Rights Reserved, 121-219, 1993.
- 7) S.H.Atchley, J.B.Clark : Variability of Temperature, pH, and Moisture in an Aerobic Composting Process, 38(1), 57-61, 1979
- 8) 황응주 : 주방폐기물 퇴비화에서 Bulking Agent의 효과연구, 한국과학기술원 석사학위 논문, 1993.
- 9) 한국과학기술원 토목공학과 : 유기성 폐기물의 자원화 기술, 1992.
- 10) G. Tchobanoglous, H.Theisen, S.Vigil : In-

- egrated Solid Waste Management Engineering Principles and Management Issues, McGraw Hill, New York, 302-697, 1993.
- 11) Roger T. Haug : The Practical Handbook of Compost Engineering, Lewis Publishers, 205-381, 1993.
  - 12) Willibald Lutz : The Ruthner Sludge Composting System, Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal and Industrial Sludges, Washington, 124-127, 1982.
  - 13) H. Benedict, E. Epstein, J. Alpert : Composting Municipal Sludge a Technology Evaluation, Noyes Data Cooperation, U. S. A., 52-101, 1988.
  - 14) A. J. Higgins, M.E. Singley, N. Parisio : Composting Aeration Requirement Based on Mass and Heat Transfer, Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal and Industrial Sludges, Washington, 59-65, 1982.
  - 15) Roger T. Haug : Modeling of Composting Process Dynamics, Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal and Industrial Sludges, Washington, 49-58, 1982.
  - 16) Kakezawa : A Two-Step Composting Process for Woody Resources, Journal of Fermentation and Bioengineering, 70(3), 173-176, 1990.
  - 17) H. Benedict, E. Epstein, N. English : Municipal Sludge Composting Technology Evaluation, Journal WPCF., 58(4), 279-289, 1986.
  - 18) G. Balmer, L. Thompson : Sludge composting in Montgomery County--The Dickerson Experience, Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal and Industrial Sludges, Washington, 88-96, 1982.
  - 19) F. Noland, B. Walkenshaw : Aerated Static Pile Operation in Winter, Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal and Industrial Sludges, Washington, 115-119, 1982.
  - 20) Nakasaki, Shoda, Kubota : Effect of Temperature on Composting of Sewage Sludge, Applied and Environmental Microbiology, 50(6), 156-1530, 1985.
  - 21) A. Kuter, J. Hoitink, A. Rossman : Effects of Aeration and Temperature on Composting of Municipal Sludge in a Full-scale Vessel System, Journal WPCF., 57(4), 309-315, 1985.
  - 22) Nakasaki, Sasaki : Effect of Seeding during Thermophilic Composting of Sewage Sludge, Applied and Environmental Microbiology, 49(3), 724-726, 1985.
  - 23) L. Vicky : Physical and Chemical Correlates of Microbial Activity and Biomass in Composting Municipal Sewage Sludge, Applied and Environmental Microbiology, dec., 1395-1403, 1985.
  - 24) C. L. Hing, D. R. Zenz, R. Kuchenrither : Municipal Sewage Sludge Management ; Processing, Utilization and Disposal, 4(2), 335-346, 1986.
  - 25) L. McKinley, R. Vestal : Biokinetic Analyses of Adaptation and Succession ; Microbial Activity in Composting Municipal Sewage Sludge, Applied and Environmental Microbiology, 47(5), 933-941, 1984.
  - 26) T. MacGregor, C. Miller, M. Psarianos, S. Finstein : Composting Process Control Based on Microbiology, 41(6), 1321-1330, 1981.
  - 27) C. Miller, S. Finstein : Materials Balance in the Composting of Wastewater Sludge as Affected by Process Control Strategy, Journal WPCF., 57(2), 122-127, 1985.
  - 28) Kiyonori Haga : Production of the Composts from Organic Wastes and Their Quality, 유기질비료 사용에 관한 세미나, RDA and FFTC/ASPAC., Chapter 13, 1990.
  - 29) Gary N. Kelecka : Biodegradation, Environmental Exposure From Chemicals Volume I. CRC Press, 109-155, 1985.
  - 30) M. deBertol, Franco Zucchini : Composting of Organic Residues, Bioenvironmental Systems Volume III, CRC Press, 95-142, 1987.
  - 31) 심혁성, 배재근 외 : 하수슬러지의 퇴비화 가능성 검토, 1996년 춘계 학술연구발표회 요약집, 한국폐기물학회, 171-174, 1996.
  - 32) Nakasaki, Sakaki : Effect of C/N Ratio on Thermophilic Composting of Garbage, Journal of Fermentation and Bioengineering, 73(1), 43-45, 1992.
  - 33) Nakasaki, Morisaki : Effect of Oxygen Concentration on Composting of garbage, Journal of Fermentation and Bioengineering, 70(6), 431-433, 1990.
  - 34) Nakasaki, Morisaki : Nitrogen Transformation during Thermophilic Composting, Journal of Fermentation and Bioengineering, 67(1), 57-61, 1989.
  - 35) V. Chanyasak, H. Kubota : Carbon/Organic Nitrogen Ratio in Water Extract as Measure of Composting Degradation, Journal Ferment Technology, 59(3), 215-219, 1981.
  - 36) V. L. McKinley, J. R. Vestal, G. D. Bruner, C. L. Barnhart : The Effect of Abiotic Parameters on The Microbial Ecology of the Compost Process, Proceedings of the National Conference on Composting of Municipal and Industrial Sludges, Washington, 73-76, 1982.