



## 산림훼손토양 복원을 위한 부숙토 개발 연구

나승주, 장기운, 양희영, 전한기, 이종진  
충남대학교 농화학과

(2005년 4월 15일 접수, 2005년 5월 24일 채택)

## The Study of Solid Waste Compost Development for Reclaiming Damage Soil in Forest

Seung-Ju Na, Ki-Woon Chang, Hui-Young Yang, Han-Ki Jeon, Jong-Jin Lee

Dept. of Agricultural Chemistry Chungnam National University, Daejeon, 305-764

### ABSTRACT

To study the development of solid waste compost to use sewage sludge and paper mill sludge for reclaiming damage soil in forest, the changes of temperature, moisture, chemical properties, heavy metals and harmful compound during the aerobic decomposition were investigated, and the compost decomposition of final products investigated the round paper chromatography method and G.I(Germination index) value.

The results were summarized as follows. Temperature was changed a little during early 5days because of air temperature too low. That was rapidly increased to over 50°C at 4days after first turning and then decreased gradually fallen to 40~50°C at 15days after aerobic decomposition in A and C treatments. The second turning was conducted at 18 days after aerobic decomposition, and then the temperature was little changed.

At the compare first with terminal product, The moisture content was decreased all treatments but the change was little in A and B treatments. pH was decreased to below 1 in all treatments. EC was increased to below 5dS/m. The content of total carbon, C/N ratio,  $\text{NH}_4^+\text{-N}$  were decreased with 4~7%, below 8 and below 500mg/kg in all treatments, respectively. The content of total nitrogen,  $\text{NO}_3^-\text{-N}$ , CEC were increased with below 0.5%, below 173mg/kg and over 30 $\text{cmol}^+\text{/kg}$  in all treatments, respectively. The content of heavy metals and harmful compound were similar during aerobic decomposition and suited to standard of 가 grade in all treatments.

The result of round paper chromatography method and G.I. value, The C treatment concluded well aerobic decomposition. Especially, the G.I. value in C treatment was 64.1 and 66.2 at cabbage and grass, respectively.

Keywords : Solid Waste Compost, Sewage Sludge, Papermill Sludge, Aerobic Decomposition, Round Paper Chromatography, Germination Index(G.I.) Value

## 초 록

산림훼손토양 복원 유기성소재로 부숙토를 제조하기 위하여 하수슬러지와 제지슬러지의 혼합에 따른 부숙도 제조과정중의 온도변화는 외부온도가 낮았던 초기 5일간은 변화가 없었으나 5일차에 1차 뒤집기 이후 A, C처리구는 각각 10, 9일차에 50℃ 이상으로 온도가 증가된 후 15일 이후 감소하는 경향을 나타내었다. 부숙화 18일에 2차 뒤집기 이후 온도변화는 10℃이하로 주발효 종료시점으로 판단되었고 이후 후숙기간 동안 온도는 점차 낮아져 30일차에는 안정화되었다. 수분함량은 모든 처리구가 9일차부터 감소하는 경향을 나타내었으나 부자재의 혼합이 적은 A, B처리구는 수분감소량이 1일차와 36일차에 비슷하였다. pH 변화는 5에서 10일 사이 약 pH 1 감소를 하였으나 10일 전후를 기준으로 다시 상승하여 36일차에는 1일차와 비교하여 약 pH 0.4 내외의 감소를 보였다. 총탄소 함량은 4~7% 감소하였으며 총질소는 0.5% 이내 증가하는 결과를 보였다. C/N율은 모든 처리구에서 8 이내 감소하였다. 암모니아태 질소는 500mg/kg 이내 감소하고 질산태 질소는 173mg/kg 이내 증가하는 경향을 나타내었다. 양이온치환용량(CEC)은 모든 처리구에서 30cmol<sup>+</sup>/kg 이상 증가하는 경향을 나타내었다. 부숙도 제조과정 중 중금속의 함량은 초기와 최종에서 큰 변화는 없었으며 공정규격 가 등급에 적합하였다. 부숙도 판정에서 C처리구가 원형여지크로마토그래피에서 완숙은 아니지만 부숙이 진행된 것을 확인할 수 있었고 식물독성 실험에서도 배추와 잔디에서 각각 64, 66의 G.I값을 나타내어 처리구 중 가장 높은 부숙도를 나타내었다.

핵심용어 : 부숙도, 하수슬러지, 제지슬러지, 호기성 분해, 원형여지크로마토그래피, G.I. 값

## 1. 서론

산불은 산림파괴의 중요한 원인이다<sup>17)</sup>. 산림지역은 하층식생, 임목 등 산림 내 자연성물질이 우거지고 낙엽 층이 잘 썩지 않고 축적되어있고 '94년부터 지속된 극심한 가뭄과 지역적인 기상 이변이 심화되어 산불이 발생할 경우 다발·대형화되는 것으로 나타나고 있다. 실제로 '96년에는 강원도 고성산불(3,762ha)이 발생하였고, '00년에는 고성·동해·강릉·삼척·울진 산불이 동해안 지역을 따라 거의 동시다발적으로 발생하여 건국 이래 최대인 초대형 산불피해(23,794ha)를 주었다. 산불은 80년대에는 연평균 212건에 1,088ha 소실되었고 90년대에는 527건에 5,368ha 피해로 발생횟수가 증가하고 피해면적도 증가하는 추세이다<sup>15)</sup>. 산불은 그 규모에 따라 산림 내에 다양한 규모의 공간을 형성하며, 지상부 생물체와 유기물질

을 제거시켜 비생물환경요인의 변화를 유발시킨다<sup>16)</sup>. Carballas 등<sup>10)</sup>은 산불피해지역에 유기물을 투입함으로 토양을 안정화하고 미생물을 투입할 수 있어 초기에 식생복원이 가능하다고 보고하였다. 그러므로 산불에 의한 교란을 최소화하기 위하여 유기성소재의 활용이 필요하다고 판단된다. 유기성소재는 최근 발생량이 꾸준히 증가하는 경향을 나타내고 있지만 재활용률이 11.5%(2002년 기준)로 가장 낮고 해양배출이 68.3%(2002년 기준)로 가장 높은 처리 비중을 차지하여(국립환경연구원 2004. 6) 처리상의 문제가 대두된 하수슬러지를 이용하였고, 혼합자재로 중금속의 함량이 낮고 수분이 하수슬러지 보다 낮아 혼합에 따른 수분조절이 가능하고 C/N율이 높아 자체로도 부숙이 잘되는 것으로 보고된<sup>18)</sup> 제지슬러지를 활용하여 개발하고자 하였다. 본 연구에서는 산림복원을 위한 부숙토를 제조를 위하여 하수슬러지와 제지

슬러지의 적정 혼합비율을 확인하고 부숙과정중 온도, 수분, 이화학적, 중금속 및 유해성분 등의 변화를 조사하였고 완성된 부숙토의 안정성평가를 위해 원형여지크로마토그래피와 중자발아율을 조사하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

퇴비화 처리에 사용된 하수슬러지는 C하수처리장에서 발생하는 슬러지를 이용하였고 제지슬러지는 H사에서 발생하는 슬러지를 이용하였다. 부자재로 이용된 제지슬러지 연소재는 G소각장에서 수거하여 사용하였고, 톱밥과 수피는 대전에 목공소에서 구입하여 사용하였다.

에서 구입하여 사용하였다.

실험에 사용된 하수슬러지, 제지슬러지, 톱밥, 수피, 제지슬러지 연소재의 이화학적 특성, 중금속 및 유해성분은 [Table 1], [Table 2]에 제시하였다.

### 2.2 호기성 소화 시설

본 실험은 충남대학교 농업생명과학대학 부설 농장에 설치되어있는 강제송풍 정체식 시설(Aerated static pile, ASP)을 이용하여 수행되었다.

정체식 시설의 규모는 각 처리구당 약 1.2m<sup>2</sup> (1.0m×1.2m×1.0m)이었다. Pile의 바닥은 구멍이 뚫린 PVC 파이프(Ø ; 75mm)를 설치하였고, 그 파이프 위에는 균일한 송풍을 위하여 약 10cm

[Table 1] Chemical Properties of the Materials Used in the Aerobic Decomposition

Materials	M.C* (%)	pH (1:5)	EC (dS/m)	O·M (%)	T-C (%)	T-N (%)	C/N ratio	Total-(%)				
								P	K	Ca	Mg	Na
Saw dust	33.4	5.01	1.57	99.5	57.7	0.07	779.7	0.1	0.33	0.20	0.11	0.07
Bark	33.1	6.31	3.55	62.0	36.4	0.28	130.5	0.1	0.17	0.28	0.16	0.07
P.M.S**	58.5	8.36	3.19	48.4	28.1	1.16	24.2	0.3	0.25	0.10	0.98	0.06
S.S***	84.5	6.28	7.80	76.2	44.2	6.09	7.3	0.3	0.30	0.07	0.10	0.06
P.M.S.A****	0.5	13.17	49.85	0.9	1.3	0.17	7.6	-	0.40	0.29	0.20	0.07

\* M.C : Moisture Contents

\*\* P.M.S : Paper Mill Sludge

\*\*\* S.S : Sewage Sludge

\*\*\*\* P.M.S.A : Paper Mill Sludge Ash

[Table 2] Contents of Heavy Metals and Harmful Compound of the Materials Used in the Aerobic Decomposition

Materials	Cu	Pb	Cr	Cd	Hg	As	Zn	Ni	NaCl
	(mg/kg)								(%)
Saw dust	2.7	0.9	16.6	N·D*	N·D	N·D	5.5	8.4	0.10
Bark	3.3	5.4	6.1	0.2	N·D	N·D	22.6	3.9	0.11
P.M.S	58.9	7.9	11.1	0.6	N·D	N·D	58.4	6.0	0.12
S.S	827.5	18.1	18.1	1.1	N·D	N·D	458.2	60.8	0.18
P.M.S.A	374.9	66.6	5.4	3.1	N·D	N·D	266.0	23.3	0.36
Standard of raw materials	500 below	150 below	300 below	5 below	2 below	50 below	-	-	-

\* Non-detection

두께의 자갈을 깔았다. Pilot 퇴비화 장치의 공기는 강제 송풍방식으로 10L/min/m<sup>3</sup> 내외의 풍량으로 1회씩 송풍하였으며, 1일 10분간 실시하였다. 본부속의 완료 시점은 호기성 소화의 뒤집기를 하여도 온도 변화가 더 이상 일어나지 않는 시기로 결정하였으며, 그 기간인 약 15일의 안정화기간 동안의 뒤집기 횟수는 수작업을 통해 총 2번 수행하였다. 그리고 그 이후는 정치해 놓고 후부속을 시켰다.

### 2.3 부속토 제조를 위한 원료 혼합 처리

하수슬러지와 제지슬러지를 이용하여 부속토를 제조하기 위하여 최적의 원료혼합비율을 정하기 위해 하수슬러지를 40과 50%로 구분하여 제지를 각각 40, 30%와 30, 20%로 보정을 하고 부자재를 20, 30%로 보정하였다. 부피비율로 혼합한 처리구는 원료혼합 후 수분함량을 최종적으로 60~70%수준으로 조절하였다. 제지슬러지와 하수슬러지를 이용하여 적정 비율로 혼합하여 제조하게 되어 수분조절이 쉽지 않았다. 수분함량을 낮추기 위해서 주원료의 투입량을 줄이고 수분조절제인 톱밥 및 연소재 등의 부자재를 공급하고, 통기성을 좋게 하기위하여 공극조절제로 수피를 이용하여 실험을 수행하였다.[Table 3]

### 2.4 분석방법

시료채취는 원료 혼합한 날을 1일째로 간주하여 1, 5, 7, 9, 11, 15, 25, 36일째 등 총 8회에 걸쳐 실시하였으며, 부속토 더미의 약 30~35cm 깊이

의 4지점에서 시료를 일정량씩 취하여 혼합하였다. 채취된 시료는 직사광선이 차단된 공간에서 풍건한 다음 2mm 체로 조제한 후 미생물분석 및 이화학성 분석을 위하여 사용하였고, 잔여 시료는 -4℃의 냉동실에서 보관하였다.

부속토 더미의 온도를 측정하기 위해 Digital thermometer (HY-550)를 이용하였으며, 부속토 더미의 온도는 거의 1일 간격으로 중심부(약 30cm)의 온도를 기준으로 측정된 평균값으로 측정하였다. 수분은 1, 5, 7, 9, 11, 15, 25, 36일에 조사 측정하였다.

화학적 분석은 농촌진흥청의 토양화학분석법<sup>14)</sup>에 의거하여 총 탄소는 dry-ash법, 총 질소는 Kjeldahl법, 양이온치환능력(CEC)은 1N-NH<sub>4</sub>OAc법을 이용하였고, 질산태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N), 암모니아태 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)는 2M-KCl로 침출한 후 증류법을 이용하였다. 총 탄소는 유기물함량을 이용하여 산출하였다. pH 및 EC는 1:10법을 이용하여 측정하였고, 중금속 및 무기성분(K, Ca, Mg, P)은 HClO<sub>4</sub>로 분해한 후 Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry(ICP-AES)와 Atomic Absorption Spectro-photometer(AA)로 측정하였다.

부속토의 부속도를 평가하기 위하여 원형여지크로마토그래피는 0.5% AgNO<sub>3</sub>용액으로 여과지(Whatman No. 42, Ø 11cm)를 2~3분간 충분히 적신 후, dry oven에서 건조시켜 Aluminum foil에 보관하였다. 시료에 0.1N NaOH용액 10ml를

[Table3] Mixture Ratio of Fresh Materials for the Aerobic Decomposition

Materials	Treatments (V/V)			
	A	B	C	D
S.S	40	50	40	50
P.M.S	40	30	30	20
Saw dust	10	10	15	15
Bark	5	5	10	10
P.M.S.A	5	5	5	5
Total	100	100	100	100
Calculated C/N ratio	≒ 20			

가하여 진탕하면서 실온에서 16시간 방치 후 추출한 뒤에, 원심분리(Refrigerator centrifuge : himac CR 20B2, HITA-CHI)하여 얻은 상정액 1ml를 개조식 Conway unit 안에 넣어 20~30분간 전개시켜 크로마토그램을 얻었다. 식물독성실험은 약 60℃에서 2시간 동안 증류수로 환류냉각 추출하여 얻은 용액을 여과한 후, 여과지(Whatman No. 42, Ø 9cm)가 깔린 petri dish에 여과액 5ml를 넣고 건실한 배추와 잔디의 종자를 침종하여 배양기(Growth chamber 상대습도 50%, 온도 28℃)에서 5일간 생육시켜 발아된 종자의 생육조사를 통하여 G.I (Germination Index) 값을 구하였다.

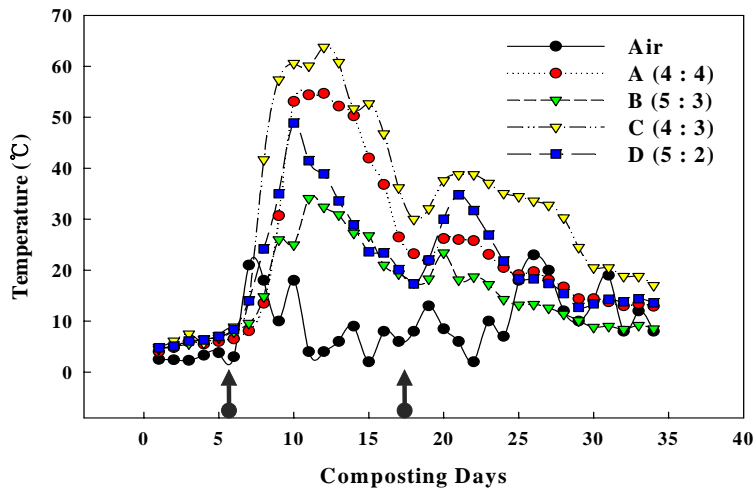
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 온도변화

호기성 소화 과정의 온도변화는 호기성 소화 반응의 진행여부라 할 미생물의 대사활동을 나타내는 지표로 볼 수 있다. 또한, 물질의 분해작용 (degradation or decomposition of organic compounds)이 지속되는 지의 여부를 판단하는

기준이 되기도 한다<sup>13)</sup>.

본 실험에서 온도변화를 살펴보면 [Fig. 1]에서 보듯이 초기 5일간은 전혀 변화가 없었다. 이는 부숙도 혼합을 할 때 영하의 외부 기온에 원재료들이 노출되어 미생물활동에 저해를 받아서 나타난 현상으로 판단된다. 1차 뒤집기를 실시하고 소량의 온수를 뿌려준 다음 날인 6일차부터 온도가 상승하여 A처리구는 10일차에 50℃ 이상으로 증가하여 지속되었고, C처리구는 9일차에 50℃ 이상으로 증가하여 지속되었다. 하지만 처리구 B와 D는 최대 온도가 50℃ 미만으로 더 이상 증가하지 못하였다. A처리구는 4일 동안, C처리구는 5일간 내부 온도 50℃ 이상을 유지하였다. 수분이 많아 다져져 통기성이 불량해서 내부온도가 감소하는 것을 방지하기 위하여 18일에 2차 뒤집기를 실시하였다. 18일 이후에 약간 온도가 상승을 하는 변화가 있었으나 최고 40℃ 미만으로 초기의 온도 변화보다 폭이 크지 않아 주 발효가 끝났다고 판단하였다. 후부숙을 진행하면서 온도는 더 낮아져 최종 36일 차에는 실내온도 18℃와 큰 차이가 없이 안정화되는 경향을 나타내었다.



↑: Pile turning.

[Fig.1] Changes of temperature during aerobic decomposition.

### 3.2 수분함량변화

퇴적물의 수분함량은 호기성 분해과정 중 부숙의 효율과 미생물의 활성에 영향을 미치는 주요 인자로 알려져 있다. 호기성 소화 과정 중 수분함량이 40% 이하로 떨어질 경우에는 미생물의 활동이 저하되며, 이로 인하여 부숙도의 분해발효과정이 진행되지 않을 수 있다<sup>11)</sup>. 또한, 수분함량이 75~85%와 같이 수분함량이 높을 경우에는 통기성이 좋지 않아 혐기상태로 변하여 악취가 발생되며 식물독성 물질이 생성하는 등의 원인이 된다. Golueke<sup>3)</sup>는 55~65%가 호기성 소화과정 중 최적 수분함량 범위라고 하였다. 따라서 수분함량은 60%를 전후하여 50~70%로 조절하는 것이 적절할 것으로 보인다.

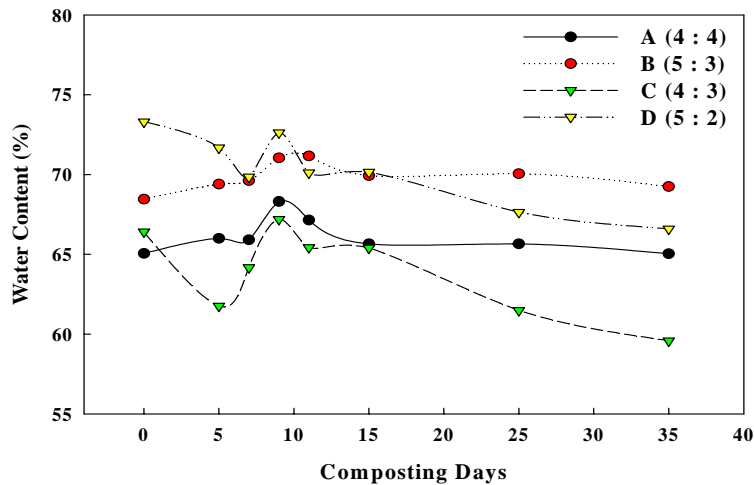
본 실험의 정체식 호기성 소화 과정 중 수분함량의 변화는 [Fig. 2]와 같다. 부숙토 원료혼합 후 초기 수분함량은 대부분의 처리구는 70%이하였으며, 호기성 소화를 위한 적정 범위에 속하였으나 처리구 D의 경우 73%로 호기성 소화의 적정범위보다 약간 높았다. 호기성 소화 과정 중 5일째에 뒤집기를 하면서 500ml 온수를 공급하여 다소 증가되다 온도가 상승되어진 9일에 최고 수분함량을 나타내고 점차 감소하는 경향을 나타내었다. 하지만 공극개선제 처리량이 적은 A, B 처리구의 경우 공극이 충분하지 않아 강제 송풍에 의한 내부 수분

의 증발량이 적어 지속적으로 일정한 수분함량을 보인 것으로 판단된다.

### 3.3 pH변화

호기성 소화과정 중 pH는 미생물의 활성에 직접적인 영향을 미치기 때문에 매우 중요한 항목 중 하나이다. 특히 높은 pH 조건에서는 미생물에 대한 저해보다는 필수원소의 침전에 따른 불용화로 미생물 생육에 요구되는 영양분의 공급 부족현상이 나타날 우려가 있으므로, 미생물이 자라는 데는 중성범위를 유지하여 주는 것이 중요하다. Inbar 등<sup>5)</sup>은 호기성 소화과정 중의 적정 pH가 5.5~8.0이라 하였고, 특히 pH 7.5~8.5에서 고온성 소화과정이 활발히 진행된다고 Jeris<sup>7)</sup>는 보고하였다.

본 호기성 소화과정 중의 pH 경향은 [Fig. 3]에 나타난 바와 같다. pH는 호기성 소화과정이 진행된 약 11일 동안 모든 처리구는 초기 8.4~8.6 범위에서 최저 7.6으로 감소하는 결과로 나타났다. 이는 초기 고온성미생물들에 의해 유기물질들이 분해되는 과정에서 유기산 생성 및 축적이라 추정된다. 그러나 이후에 다시 pH가 증가하는 경향을 보였는데, 이때에는 암모니아 발생량 증가의 원인으로 판단된다. 일반적으로 호기성 소화과정이 안정되면서 pH는 감소하는데 B와 D처리구는 하수슬러지를 혼합한 비율이 높아서 통기성이 불량하여



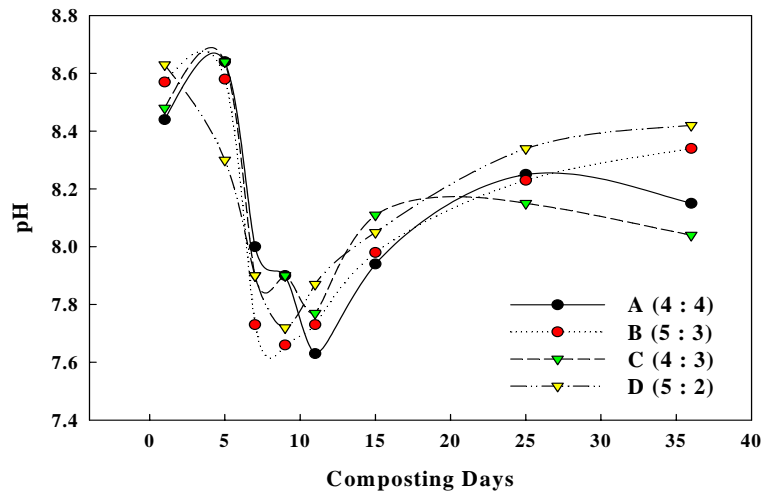
[Fig.2] Changes of water content during aerobic decomposition.

pH가 증가하는 경향을 나타낸 것으로 판단된다.

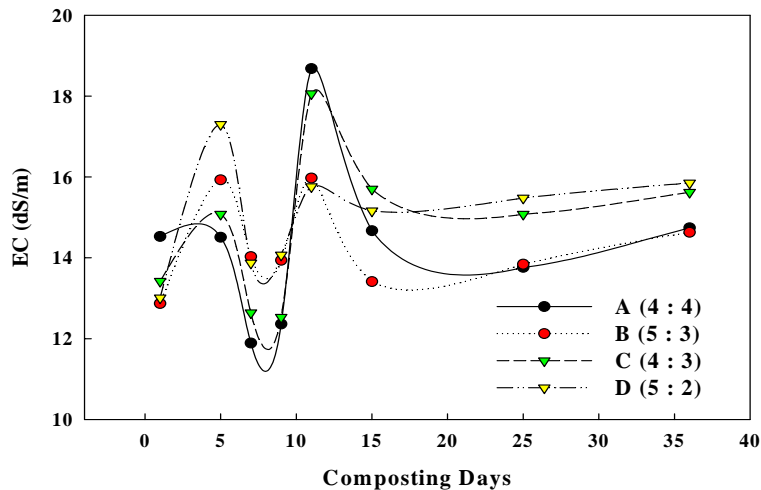
### 3.4 EC변화

일반적으로 호기성 소화과정이 진행됨에 따라 EC는 증가하는 경향을 보인다. 이는 호기성 소화를 거쳐 유기물질의 분해되어 EC의 증가에 기여하기 때문이다<sup>3)</sup>. 호기성 소화과정에서 EC에 영향을 미치는 물질들로는  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  및

인산분획물 등이 있다<sup>5)</sup>. 본 실험 결과에서는 초기에 12~14dS/m 범위의 EC가 증가하다 뒤집기를 실시한 5일차 18일차에 EC가 급격히 떨어져 다시 증가하는 것으로 확인이 가능하다. 특히 호기성 소화과정이 활발히 일어난 5일부터 18일 사이에는 모든 처리구에서 최고 6dS/m까지 단기간에 급격히 증가하는 것을 설명 할 수 있다.[Fig. 4]



[Fig.3] Changes of pH during aerobic decomposition.

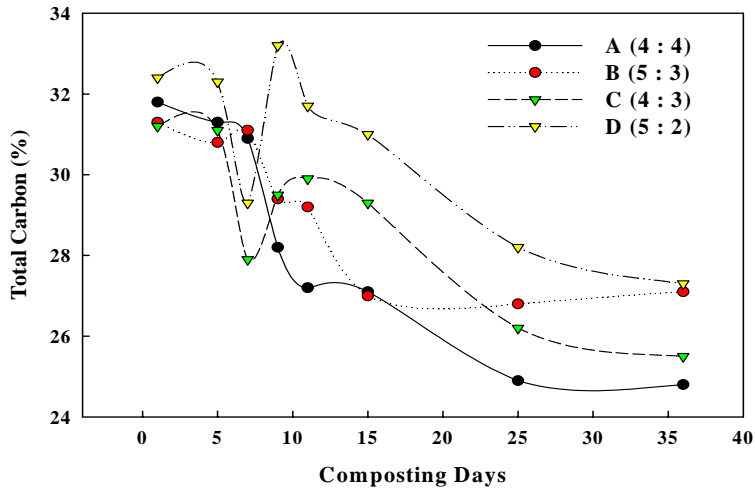


[Fig.4] Changes of EC during aerobic decomposition.

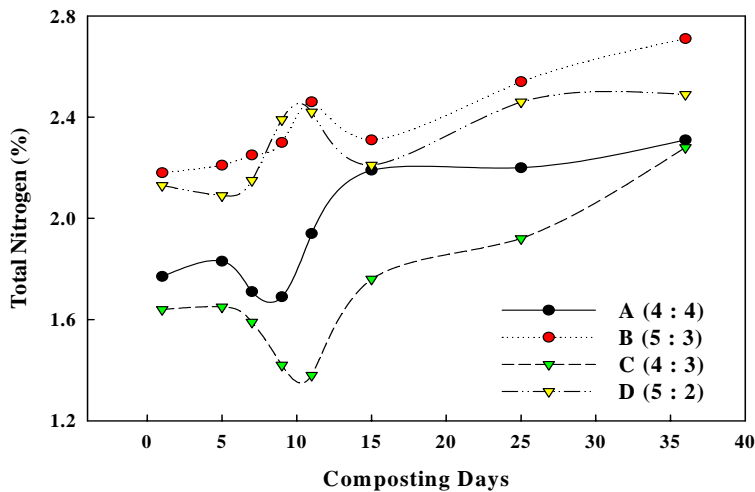
### 3.5 T-C, T-N 및 C/N을 변화

부숙토의 공정규격을 보면 안정화 기준으로 탄소와 질소함량의 비율인 탄질율(C/N ratio)을 손꼽고 있다. 호기성 소화과정 중 미생물은 유기물질의 분해에 필요한 에너지원으로서 탄소를 이용하며, 영양원으로서 질소를 이용한다. 일반적으로 퇴비화에 있어 미생물의 분해과정 중 유기물질인 탄소는 에너지원으로 사용되어 CO<sub>2</sub>로 휘산되며, 나머

지는 미생물의 세포막과 세포벽 및 원형질로 전환되거나 잔여물로 남게 되어 탄소는 감소한다<sup>2)</sup>. 그러나 질소는 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 호기성 소화과정 중 유기물의 무기화와 휘발성 물질의 감소 때문이다<sup>1)</sup>. 본 실험에서도 T-C는 감소하고 T-N은 증가하는 경향을 나타내었다(Fig. 5), [Fig. 6]. 많은 연구자들에 의한 호기성 소화 연구에서 탄질율의 최적범위는 25~30 정도라고



[Fig.5] Changes of T-C during aerobic decomposition.



[Fig.6] Changes of T-N during aerobic decomposition.

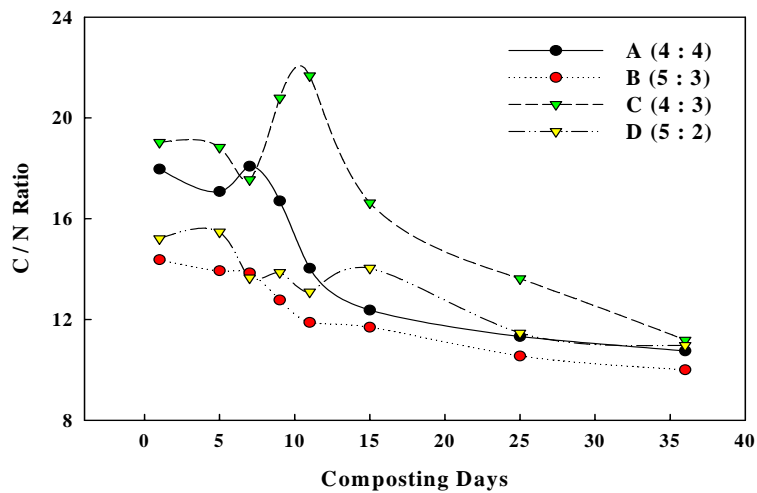


보고하였으나 원료의 과량 수분으로 혼합 과정상의 오차와 부자재의 사용량을 제한에 의해 실제 측정되어진 초기 C/N율은 A와 C처리구는 18 이상이었으며 하수슬러지를 과량 투입한 B와 D 처리구는 약 14와 16을 나타내었다(Fig. 7).

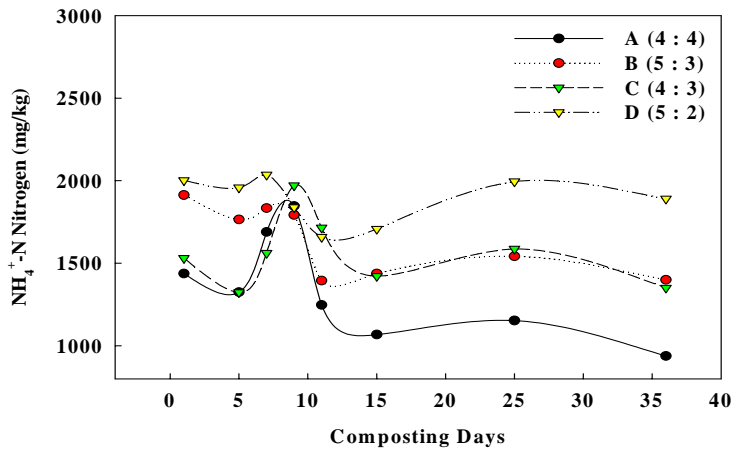
### 3.6 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 및 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 변화

호기성 소화과정 중 암모니아태 질소(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)와 질산태 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)는 부숙토의 부숙도 평

가를 위한 하나의 지표항목이다. 유기물의 분해과정을 통해서 부숙토내 질소의 변화는 암모니아성 작용(ammonification)에 의해 유리되는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 산소의 원활한 통기조건으로 질산화작용(nitrification)에 의해 NO<sub>2</sub><sup>-</sup>-N 혹은 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N으로 산화되거나 암모니아 가스로 휘산된다. 그러므로 퇴비화 과정 중 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N은 점점 감소한다<sup>9)</sup>. 본 연구에서도 [Fig. 8]과 같이 암모니아태 질소 함량은 점점 감소하나 Fig. 9와 같이 질산태 질소 함



[Fig.7] Changes of C/N ratio during aerobic decomposition.



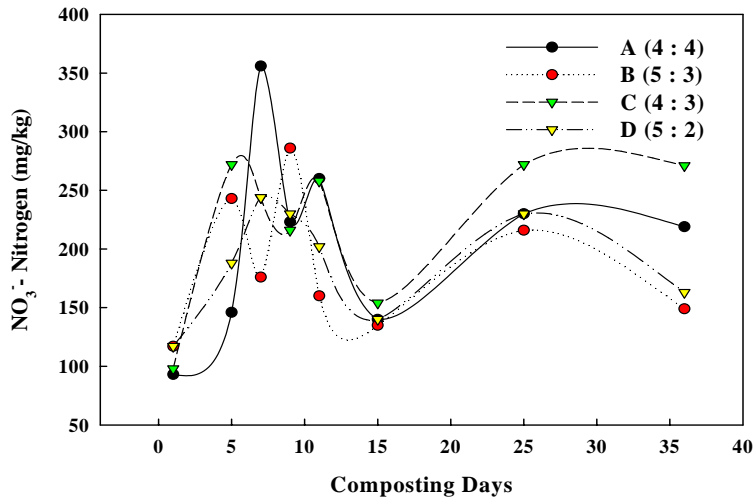
[Fig.8] Changes of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N content during aerobic decomposition.

량은 점점 증가하였다. 특히 A와 C처리구의 경우 질산태 질소의 발생량이 120mg/kg 이상 증가하여 산소공급이 원활하였음을 확인하였다. 하지만 다량의 하수슬러지를 혼합한 B와 D의 경우 질산태 질소의 발생이 적어 원활한 산소 공급이 어려웠음을 판단할 수 있다.[Fig. 8], [Fig. 9]

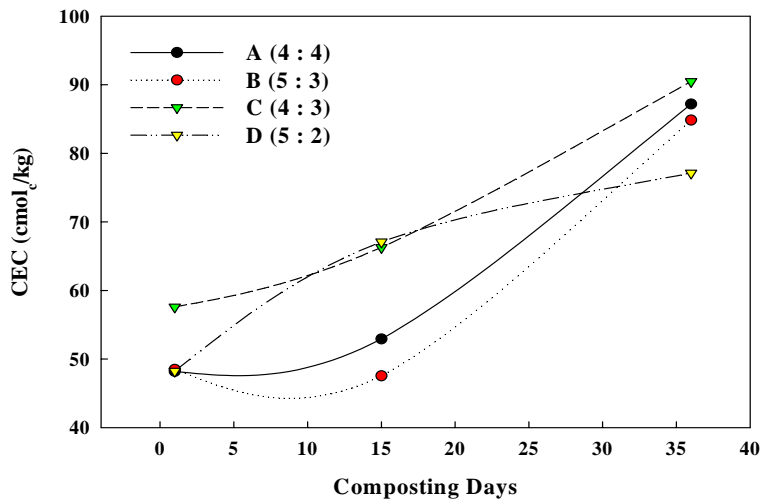
3.7 CEC (Cation Exchange Capacity)

변화

CEC는 교질물의 표면에 흡착되거나 잔존할 수 있는 무기 또는 유기입자들의 능력을 의미하는 것으로 높은 CEC는 식물의 영양원인 양이온들을 흡착할 수 있어 식물의 생육에 도움을 준다. 호기성 소화과정에서 CEC는 유기물 분해를 통한 작용기들의 증가로 인해 점차 증가하는 경향을 보인다<sup>4)</sup>. 본 실험에서도 초기에 45~60 cmol<sup>+</sup>/kg이었으나 실



[Fig.9] Changes of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N content during aerobic decomposition.



[Fig.10] Changes of CEC content during aerobic decomposition.

힘이 끝난 후에는 D처리구만 제외하고 80~90 cmol<sup>+</sup>/kg으로 30 cmol<sup>+</sup>/kg 이상 증가하였다.

이상 호기성 소화과정 중 부숙토의 이화학적 특성 변화를 살펴보았다. 자세한 내용은 [Table 4]에 나타내었다.

### 3.8 중금속 및 유해성분 변화

하수슬러지를 활용하는데 가장 문제점은 원료내에 함유되어진 중금속 및 유해성분의 함량이다. 이를 저감하기 위하여 본 연구에서는 제지슬러지를 부자재로 활용하였고 부숙토 제조 과정 중 중금속

및 유해성분의 변화를 [Table 5]에 나타내었다.

주원료 혼합 후 1일차에 모든 처리구는 중금속 및 유해성분이 공정규격 가 등급에 적합하였으며 부숙토 제조과정 중에 큰 변화는 없었으나 초기와 최종사이 약간의 감소를 나타내었으나 변화 폭은 크지 않았다. 이 중 Cu의 함량이 기준에 2/3인 300mg/kg 내외의 수준으로 조사되어 사용에 있어 가장 고려되어야 할 것으로 판단된다.

### 3.9 원형여지크로마토그래피

호기성 소화과정 중 Inoko<sup>(6)</sup> 등이 고안한 원형여

[Table4] Changes of Heavy Metals and NaCl During Aerobic Decomposition

		Cu	Pb	Cr	Cd	Hg	As	Zn	Ni	NaCl
		(mg/kg)								
1Day	A	320	19.5	15.4	1.07	N·D	N·D	221	24.6	0.17
	B	334	19.5	16.6	1.15	N·D	N·D	222	26.3	0.16
	C	295	21.2	14.8	1.15	N·D	N·D	203	24.2	0.17
	D	363	20.0	24.7	1.07	N·D	N·D	229	31.4	0.17
15Day	A	264	15.0	20.5	0.75	N·D	N·D	182	23.9	0.16
	B	359	17.2	15.3	1.23	N·D	N·D	237	28.6	0.18
	C	278	15.5	14.4	1.15	N·D	N·D	191	23.0	0.17
	D	299	13.5	15.7	0.61	N·D	N·D	204	25.4	0.17
36Day	A	256	36.4	20.6	0.92	N·D	N·D	180	26.2	0.17
	B	334	16.6	21.2	0.92	N·D	N·D	218	29.8	0.17
	C	285	16.1	16.5	1.07	N·D	N·D	195	23.6	0.17
	D	322	16.9	17.2	1.00	N·D	N·D	223	28.1	0.17
A grade Standard		500 below	150 below	300 below	5 below	2 below	50 below	-	-	1 below

[Table5] G.I. Value of Final Product

Treatment	Germination(%)		Root length(mm)		Germination index	
	Cabbage	Grass	Cabbage	Grass	Cabbage	Grass
A	90	83	83	68	44	44
B	87	90	41	51	21	36
C	97	87	112	98	64	66
D	83	80	55	48	27	30
Control	100	87	169	148	100	100

지크로마토그래피법을 이용하였을 때, 미부숙 퇴비는 백색-분홍색을 띄고, 외곽은 원형을 이루며, 원주는 갈색을 띤다. 반면 부숙퇴비의 중위부는 붉은색-제비꽃색을 띄고, 외곽은 불규칙한 형태를 보이고, 원주는 뾰족한 형태의 테두리를 갖으면서 선이 명확하게 나타난다.

[Fig. 11]은 제조된 부숙도의 최종 일자인 36일째 원형여지크로마토그래피를 나타낸 것으로 부숙도의 부숙도를 판단할 수 있다. 모든 처리구가 부숙이 완료된 형태는 아니지만 A와 C 처리구의 경우 중앙 부위가 약간의 붉은 빛을 띄고 있고 외각이 불규칙하였지만 원주가 톱니 형태를 형성하지 않아 아직 부숙이 진행 중인 것으로 판단된다.

### 3.10 제조된 부숙도의 식물독성실험

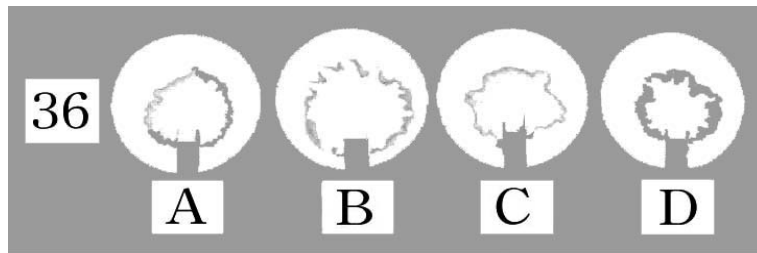
부숙도의 안정성을 최종단계에서 종합적으로 평가할 수 있는 유용한 방법으로 부숙도 추출물에 식물의 종자를 파종해 발아율과 뿌리의 생육상태와 길이를 통해 식물독성 여부를 판단하는 것으로 배추와 잔디의 종자를 이용하여 수행하였다.

식물독성시험은 부숙도의 부숙도와 식물에 대한 안정성을 최종적으로 동시에 평가할 수 있는 적절한 부숙도 평가법이다. 일반적으로 G.I값이 50이상이면 유기물 원으로 사용이 가능하며, Zucconi<sup>12)</sup> 등은 G.I.값이 80 이상일 때에는 완전히 안정화된 것으로 인정하였다. 실험결과 처리구 중에서 C처리구만이 배추와 잔디에서 각각 64, 66의 지수를 나타내어 식물의 생육에 대해 안정화되었음을 확인할 수 있었다.

## 4. 결론

본 연구는 산림훼손토양에 유기성소재의 살포를 통해 조기 복원기술 개발의 일환으로 현행 처리상 문제되는 하수슬러지를 이용하여 유기성소재 개발을 목적으로 제지슬러지와외의 혼합비율에 따른 온도, 수분, 이화학적 특성 변화를 조사하고 완성된 부숙도의 안정성조사를 위하여 원형여지크로마토그래피와 식물독성실험을 실시하였다. 본 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 부피비율로 하수슬러지 40%, 제지슬러지 40%, 기타(톱밥, 수피, 연소제) 20%인 A처리구와 하수슬러지 40%, 제지슬러지 30%, 기타(톱밥, 수피, 연소제) 30%로 혼합된 C처리구가 공정규격(환경부고시 제2000-78호, 2000. 7)에 적합하게 3일 이상 부숙도의 내부온도를 50℃이상 유지되었고 30일 전후하여 실내 온도에 비슷하게 내부온도가 감소하여 안정화 되는 경향을 나타내었다.
- (2) 부숙도 제조과정 중 pH 변화는 초기에는 전처리구에서 큰 감소를 하였으나 10일 전후를 기준으로 다시 상승하는 경향을 보였으며 25일을 기점으로 A와 C처리구는 감소하는 경향을 나타내었으나 B와 D처리구는 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
- (3) 부숙도 제조과정 중 총탄소 함량은 감소하였으며 부피의 감소에 따른 용적밀도를 기준으로 계산되어진 총질소는 증가하는 결과를 보였다. 처리구들로는 A와 C처리구의 C/N율이 각각 7, 8정도 감소하였다. 암모니아태 질소는



[Fig. 11] Evaluation of the compost decomposition using the round paper chromatography method (36Day).

감소하고 질산태 질소는 C처리구에서 초기 98mg/kg에서 최종 271mg/kg으로 증가하는 것으로 나타났다. 유기물이 부숙되며 나타나는 변화로 양이온치환용량(CEC)이 모든 처리구에서 증가하는 경향을 나타내었다.

- (4) 부숙토 제조과정 중 중금속의 함량은 초기와 최종 모든 처리구에서 공정규격 가 등급에 적합하였으나 구리의 성분이 300mg/kg 내외로 조사되어 사용상에 가장 고려되어야 할 성분으로 판된다.
- (5) 부숙토의 부숙도 판정에서 C처리구가 원형여지크로마토그래피에서도 완숙은 아니지만 부숙이 진행된 것을 확인할 수 있었다. 식물독성 실험에서도 배추와 잔디에서 각각 64, 66의 G.I값을 나타내어 다른 처리구 중 가장 높은 수치를 나타내었다.

#### 감사의 글

이 논문은 2004년도 환경부 차세대과제 연구비에 의해 수행되었음.

#### 참고문헌

1. De Bertoldi, M., G. Vallini, A. Pera, and F., Zucconi. Comparison of three windrow compost system, *BioCycle*, 23(2), pp 45~50 (1982).
2. Garcia, C., T. hernandez, and F. Costa, Comparison of humic acids derived from city refuse with more developed humic acids, *Soil Sci. Plant Nutr*, 38, pp 339~346 (1992).
3. Golueke, G. C., *Composting. A study of the process and its principles*, Rodale press, Emmaus, USA (1972).
4. Harada, Y., Inoko, A., Tadaki, M. & Izawa, T., Maturing process of city refuse compost during piling, *Soil Sci. Plant Nutr.*, 27(3), pp 357~364 (1981).
5. Inbar, Y., Habar, Y., and Chen, Y.,

*Recycling of Cattle Manure : The Composting process and Characterization of Maturity*, *J. Environ. Qual*, 22, pp 857~863 (1993).

6. Inoko, A., A rapid test for the check of maturity of city refuse compost using a paper chromatographic method, *J. Sci. Soil Manure*, 50, pp 127~132 (1979).
7. Jeris, J. S., *Treatment of Organic Wastes by Biological Decomposition. Composting-Possibilities and Experience* (1995).
8. Maniol, V. L., H. L. Syminis, Town refuse compost of Heraklio. *BioCycle*, 29(6), pp 44~47 (1988).
9. Nodar, R. M., J. Acea, T. Carballas, Microbial composition of poultry excreta, *Biological Wastes*, 33, pp 95~105 (1990).
10. T. Carballas, M. C. Villar, S. J. Gonzalez-Prieto, Evaluation of three organic wastes for reclaiming burnt soils : Improvement in the recovery of vegetation cover and soil fertility in pot experiments, *Biol Fertil Soils*, 26, pp 122~129 (1998).
11. The Composting Council,. *Composting facility operating guide*, The Composting Council, Alexandria, Virginia, pp 160~165 (1993).
12. Zucconi, F., Pera, A., Forte, M., De Bertoldi, M., Evaluating toxicity of immature compost, *Biocycle*, 22, pp 54~57 (1981).
13. 김두환, 양돈분뇨 자원화를 위한 석탄회 활용에 관한 연구, *대산논총*, 6집, pp 215~221 (1998).
14. 농촌진흥청, 토양화학분석법 (1998).
15. 동해안산불피해지 공동조사단 동해안 산불 지역 정밀조사 보고서 (2000).

16. 문정태, 정연숙, 강원도 고성지역에서 산불이 소나무림 토양의 영양염류에 미치는 영향 Korean J. Ecol, 19(5), pp 375~383 (1996).
17. 이현호, 전재홍, 산지 물순환과정에 있어서 산도, 전기전도도 및 용존산소량의 변화 한국임학회지, 85(4), pp. 638~640 (1996).
18. 한솔기술원 제지슬러지 퇴비화 연구 (1996).

