

돈분 퇴비화 중 부숙도에 미치는 영향인자 구명

김태일* · 송준익* · 양창범* · 김민균**

농진청 축산연구소 축산환경과*, 서울대학교 농업생명과학대학 농화학부**

Studies on a Factor Affecting Composts Maturity During Composting of Swine Manure

T. I. Kim*, J. I. Song*, C. B. Yang* and M. K. Kim**

National Livestock Research Institute, RDA, Suwon 441-350, Korea*,

Division of Applied and Chemistry, School of Agricultural Biotechnology center for Plant Molecular Genetics and Breeding Research, College of Agriculture and Life Science, Seoul National University, Seoul, 151-742,**

ABSTRACT

This study was conducted to investigate indices affecting composts maturity for swine manure compost produced in a commercial composting facility with air-forced from the bottom. The composting was made of swine manure mixed with puffing rice hull(6:4) and turned by escalating agitator twice a day. Composting samples were collected periodically during a 45-d composting cycle at that system, showing that indices of Ammonium-N to Nitrate-N ratio were sensitive indicators of composting quality. Pile temperature maintained more than 62°C and water contents decreased about 20% for 25days of composting. A great variety and high numbers of aerobic thermophilic heterotropic microbes playing critical roles in stability of composts have been examined in the final composts, showing that they were detected 10^8 to 10^{10} CFUg⁻¹ in mesophilic bacteria, $10^3 - 10^4$ in fungi and $10^6 - 10^8$ in actinomycetes, respectively.

The results of this study for determining a factor affecting compost stability evaluations based on composting steps were as follows;

1. Ammonium-N concentrations were highest at the beginning of composting, reaching approximately 421mg/kg. However Ammonium-N concentrations were lower during curing, reaching approximately 104mg/kg just after 45 day. The ratio between NH₄-N and NO₃-N was above 11 at the beginning of composting and less than 2 at the final step(45 day).

2. Seed germination Index was dependent upon the compost phytotoxicity and its nutrition. The phytotoxicity caused the GI to low during the period of active composting(till 25 days of composting time) depending on the value of the undiluted. After 25 days of composting time, the GI was dependent upon compost nutrition. The Germination index of the final step was calculated at over 80 without regard to treatments.

3. E4:E6 ratio in humic acid of composts was correlatively decreased from 8.86 to 6.76 during the period of active composting. After 25 days of composting time, the E4:E6 was consistently decreased from 6.76 to 4.67(r^2 of total composting period was 0.95).

4. Water soluble carbon had a tendency to increase from 0.54% to 0.78% during the period of active composting. After 25 days of composting time, it was consistently decreased from 0.78% to 0.42%. Water soluble nitrogen increased from 0.22% to 0.32% during the period of 15 days after initial composting while decreased from 0.32% to 0.21% after 15days of composting. In consequence, the correlation coefficient(r^2) between water soluble carbon and water soluble nitrogen was 0.12 during the period of active composting while was 0.50 after 25 days of composting time

(Key words : Water soluble C:N ratio, Compost maturity, Ammonium-N concentrations, E4:E6 ratio, Aerobic thermophilic heterotropic microbes)

Corresponding author : T. I. Kim, National Livestock Research Institute, R.D.A., Suwon 441-350, Korea. Tel : 031-290-1725, Fax : 031-290-1731, E-mail: kimti@rda.go.kr

I 서 론

과거 50년 동안 도시쓰레기 퇴비화 공정중의 퇴비와 퇴비완제품에 대한 생물학적 및 화학적 지표를 구하기 위해서 많은 연구가 이루어져 왔으나 퇴비 부숙도 판정을 위한 축분퇴비화에 관한 연구는 아직 미미하다. 게다가 도시 쓰레기와는 달리 돈분 슬러리는 수분 함량이 85 ~ 5%로 매우 높으면서 사육형태에 따라 변이가 심하고 일반적으로 질소에 비하여 탄소의 함량이 낮기 때문에 단독으로 퇴비화 하기에는 어려움이 있다. 따라서 퇴비화의 효율을 높이기 위해서는 호기성 미생물의 활동을 최적화 시켜줄 필요성이 있다 이를 위해서는 탄질비(영양분 균형), 공기(산소), 수분 등의 호기성 미생물 활동에 필요한 환경조건을 조성하여 주어야 한다 (김 등, 1996; 박 등, 1996; Haug 1997; 홍, 1988; Iannotti 등, 1993). 미생물활동을 최적화하기 위한 조성 조건은 축산분뇨의 수분 함량을 퇴비화에 알맞은 수준인 40~ 5% 정도로 낮추고(Gleuke, 1977; Sweeten, 1988; Chen과 Inbar, 1993), 탄소대 질소비를 미생물이 이용하기에 적절한 수준인 35정도로 조절하여(서, 1989) 퇴비화 함이 타당한 것으로 보고되고 있다. 수분 함량과 탄질비를 조절하기 위하여 사용되고 있는 수분조절제로서는 주로 톱밥, 왕겨, 목피 등을 사용한다. 이들은 생물학적으로 분해가 어려운 셀룰로오스, 리그닌 등의 탄소화합물을 다량 함유하고 있다. 일반적으로 퇴비화 과정중 전체 탄소함량은 감소하지만 탄소화합물의 종류에 따라 미생물에 의한 분해 정도가 다르기 때문에 이들 성분 함량 변화는 그 변이가 매우 심하다(서, 1989; Hsu와 Lo, 1999). 축분에 함유된 성분 함량의 가변성과 수분조절제로 사용되는 물질의 특성에 따라 축분퇴비화의 부숙도를 평가하는데 많은 어려움이 있다. Iannotti 등(1994)과 김 등(1996)은 축분 퇴비화시 퇴적더미의 산소 소모율을 부숙도의 지표로 활용할 수 있다고 하였으며 Goluke(1977)는 완숙퇴비의 탄질비가 20 이하여야 한다고 보고하였다. 그러나 탄질비는 축분에 혼합되는 수분 조절제의 함량에 따라 완숙퇴비의 탄질비가 8에

서 29까지 변이가 크게 나타난다고 보고하였다(Clairon 등, 1962, Chanyasak와 Kubota, 1981). 김 등(2001)은 국내 에스컬레이터식 축분교반기를 이용하여 제조되는 퇴비의 경우, 퇴비화 전후기 공정중 전기과정인데도 퇴비의 성분 함량이 부산물비료 규격에 적합하여 그대로 사용시 토양과 작물에 커다란 장애를 일으킬 수 있을 것으로 보고한 바 있다. 축분퇴비의 안정성과 부숙도에 대한 합리적인 평가가 이루어질 때 축분퇴비의 이용성이 극대화 될 수 있다.

따라서 본 시험은 돈분 퇴비화 공정 단계별 부숙도에 영향을 미치는 인자들의 특성을 구명하고자 수행하였다.

II 재료 및 방법

1. 발효방법

본 시험에 이용된 돈분은 스크레파 돈사에서 수집된 것으로서 수분의 함량이 70%정도 된 것을 사용하였고 수분조절제로 팽연왕겨가 이용되었다. 돈분과 팽연왕겨를 6:4(V/V)의 비율로 혼합하여 퇴비화 하였다. 발효는 에스컬레이터식 축분 교반기로 퇴비화 동안에 1일 2회 교반으로 25일간 진행되었으며 후발효가 10여 일 동안 이루어진 후 상품화되었다.

2. 시료 채취

본 연구에 사용된 시료는 처리공정의 주발효 동안의 1일령, 5일령, 15일령, 25일령 시료와 후 발효(35일령), 최종 상품(45일령)이었다. 원료인 팽연왕겨와 돈분의 성분 함량은 Table 1에 나타내었다.

3. 시료의 분석방법

(1) 수분 및 건물 함량

시료 2 g을 63℃ 오븐에서 72시간 건조한 후 방냉하여 감량분을 측정하여 수분 함량으로 하고 건물 함량은 100에서 수분 %를 감한 수치로 하였다(AOAC, 1984).

Table 1. The composition of the raw materials used in this study

Parameters	Moisture content(%)	DM base(%)					Unit (%)		
		OM*	T-C*	T-N*	WS-C*	WS-N*	NH ₄ -N	NO ₃ -N	
Raw material	Puffing rice hull	11.04	82.81	48.03	0.31	0.19	0.06	0.21	1.67
	Pig slurry	75.41	80.37	46.82	3.05	1.00	0.18	168.25	8.88

* OM : Organic Matter, T-C : Total Carbon, T-N : Total Nitrogen, WS-C : Water Soluble Carbon, WS-N : Water Soluble Nitrogen

(2) 퇴적더미 내 온도 측정

퇴적더미의 온도를 측정하기 위해서 1m 길이의 봉 온도계를 이용하여 퇴비화 단계별 퇴적더미의 상층부에서 30 cm부위(상층), 상층부에서 50 cm부위(중층) 및 상층부에서 70 cm부위(하층)를 측정한 후 각각을 평균화하여 퇴적더미의 단계별 그 지점의 온도로 하였다.

(3) 질소화합물 분석

암모니아태 질소(NH₄-N)는 시료 2 g을 2M KCl 50ml로 추출한 시료액을 여과한 후 여과액을 취해 MgO를 1g 가한 후 증류하여 증류액을 0.05N H₂SO₄로 적정하여 함량을 조사하였다. 질산태 질소(NO₃-N)는 시료 2 g을 2M KCl 50ml로 추출한 후 여과한 여과액을 취해 Devarda alloy 0.5 g을 가한 후 증류하여 증류액 70ml을 0.005N H₂SO₄로 적정하여 함량을 조사하였다(APHA, 1992). 총질소는 시료 1g에 H₂SO₄ 10ml와 분해촉매제(K₂SO₄ : CuSO₄ = 8 : 1) 8g을 가한 후 420℃ 서 2시간 분해한 시료액을 질소 자동분석기(Kjeltec Auto 1038)를 이용하여 측정하였다.

(4) 퇴적더미내 미생물분포도 조사

퇴적더미내의 미생물의 분포도를 조사하기 위해서 채취한 시료는 5℃ 냉장고에 보관한 후 24시간 이내에 평판배양법을 이용하여 미생물 분석을 행하였다. 시료의 희석은 0.1% peptone water 9ml에 시료 1g을 넣고 vortex mixer (C-VT, jongro)로 혼탁 추출한 후 10진 희석하였다. 균수의 계수를 위해 희석액을 petri-dish에 1ml을 넣고 중층 배지를 만들어 배양한 후 각 colony 수가 30에서 300 CFU/g의 범주에 있는

균수를 계수하였다. 총 세균수는 TSA(Tryptic Soy Agar, trypton 1.5%, Soytone 0.5%, NaCl 0.5%, Agar 1.5%) 배지를 멸균한 37℃ 서 48시간 배양한 후 측정하였다. Salmonella 수는 Salmonella-shigella Agar (beef ecxtract 0.5%, proteous peptone 0.5%, lactose 1%, bile salts No3. 0.85%, Sodium citrate 0.85%, sodium thio-sulfate 0.85%, ferric citrate 0.1%, brilliant green 0.00033%, neutral red 0.0025%, agar 1.35%)에서 37℃ 서 48시간 배양한 후 H₂S 생성 colony을 계수하였다. 분성 대장균 수는 선택배지인 MacConkey agar(peptone 1.7%, proteous peptone 0.3%, lactose 1%, bile salts No.3 0.15%, NaCl 0.5%, neutral red 0.003, crystal biolet 0.0001%, agar 1.35%)를 이용하여 37℃ 서 48시간 배양시킨 후 유당 분해균을 선별하여 계수하였다. 총 fungi 수를 측정하기 위해서 PDA (Potato Dextrose Agar, potatoes 20%, glucose 2%, Agar 1.5%) 배지에 ethanol에 녹인 tetracycline (0.1g/10ml ethanol)를 혼합하여 28℃ 서 72시간 배양하여 계수하였다. 총 방선균수는 Bennet's (yeast extract 0.1%, beef extract 0.1%, N-Z amine type A 0.2%, glucose 1%, agar 1.5%)를 멸균한 후 cycloheximide(0.2g/15ml D.W)와 nalidixic acid(0.16g/15mlchloroform)를 membrane filtering 하여 무균적으로 주입하고 30℃ 서 7일간 배양한 후 계수하였다.

(5) 수용성 탄소와 수용성 질소 분석

퇴비시료와 멸균 증류수를 1 : 10으로 2시간 동안 진탕한 후 10,000rpm에서 10분간 원심분리한 상층액을 Whatman No. 42 filter paper로 여과하여 추출하였다. 이 추출액을 수용성 탄

소와 수용성 질소의 분석용 시료로 하였다. 수용성 탄소는 변형한 walkley black법(Hue와 Evans, 1986)을 사용하였다. 분석용 시료 4ml을 180°C 서 15분간 0.167M $K_2Cr_2O_7$ 2ml과 Conc. H_2SO_4 5ml로 산화시켜 ferroin을 지시약으로 사용하여 0.25M $FeSO_4$ 로 적정함으로써 수용성 탄소를 계산하였고, 수용성 질소의 분석은 분석용 시료 5ml을 취해서 가열하여 건조시켜 이를 Conc. H_2SO_4 5ml와 1g의 catalyst($K_2SO_4 : CuSO_4 \cdot H_2O : Se$ 의 비율이 100 : 10 : 1임)에 침지한 후 kjeldahl법에 따라 분석하였다. 이 방법은 10M NaOH로 처리한 증류액(A: 수용성 질소와 NH_4-N) 값과 분석용 시료 10ml에 1M NaOH로 처리한 증류액(B: 무기태 시료, NH_4-N) 값의 차로 계산하였다.

(6) 부식물질 추출 및 이들의 Optical Density (E4/E6) 분석

퇴비중의 humic acid를 추출하기 위해서 퇴비 시료와 0.1M NaOH를 1:30으로 하여 20시간 진탕한 후 추출하여 10,000rpm에서 10분간 원심분리한 상층액은 부식물질(humic substances)이다. NaOH로 추출된 부식물질은 주로 Humic acid, fulvic acid으로 분리되어진다. 이를 다시 Conc. H_2SO_4 로 pH 1.0까지 산성화시켜 12시간 실온에서 정치한 후 10,000rpm에서 10분간 원심분리하여 생성된 상층액이 fulvic acid이고 침전된 부분이 humic acid이다. 휴믹산을 취하여 465nm(E4)와 665nm(E6)에서 흡광도를 측정하여 E4/E6을 부식물질비로 하였다.

(7) 배추의 발아지수 분석

식물의 발아지수를 구하기 위해서 배추 (*Brassica campestris*, L.)의 발아율(Germination Ratio; G.R.)과 근장비를 Zucconi 등(1981a, b)의 방법에 따라 실험하였다. 준비한 각각 단계별 시료 추출액을 5°C 서 8,000rpm으로 원심분리한 상층액을 0.45 μ m membrane(Sterile Acrodisc, Gelman Sciences)을 이용하여 여과한 후 무균상태를 유지하면서 0배, 3배, 10배, 20배로 희석하여 Whatman No.2 filter paper 2매가 깔린

petri-dish에 배추종자를 각각 10립씩 놓고 희석액을 20ml씩 첨가한 후, 27°C incubator에서 암상태를 유지하면서 5일간 배양하였다. 생육측정을 위해서 50%(v/v) 에탄올 3ml을 petri-dish에 넣어 발육을 정지시킨 후 대조구 및 시료구 모두 5 반복의 평균값으로 발아율과 뿌리길이를 구하였다. 발아지수(Germination Index; G.I.)는 뿌리길이의 성장율에 발아율을 곱한 값이었고, 뿌리길이의 성장율은 처리구의 뿌리길이를 대조구의 뿌리길이를 나누어 100을 곱한 값으로 하였다.

(8) 통계처리

본 시험에서 얻어진 결과는 SAS(1988)의 General Linear Model procedure를 이용한 Duncan's multiple range test(1995)에 의하여 평균간의 유의성을 검정하였다.

III 결과 및 고찰

1. 온도와 수분의 변화

퇴비화에 이용되는 원재료의 물리화학적 조성은 Table 1에 제시된 것과 같이 수분 함량이 75.41%인 돈분슬러리와 수분 함량이 11.04%인 팽화왕겨를 수분조절재로 하여 퇴적더미의 수분 함량을 65% 정도로 조절한 후 퇴비화를 수행하였다. Table 2에 제시된 바와 같이 퇴비화 과정중 온도와 수분의 변화 중 수분 함량의 변화는 1일령부터 25일령까지 약 20%가 줄었으며, 15일령부터 후발효단계까지 급격하게 수분이 감소하였다. 퇴비화 공정중 수분 함량의 감소는 미생물 대사열에 기인한 것으로서 수분 함량의 감소를 통해 퇴적더미의 열 손실이 발생되며 이는 결국 유기물 분해와 연관지어진다(Miller와 Finstein 1985). 15일령부터 후발효 단계까지 수분이 급격하게 감소하는 결과는 서등(1999)이 보고한 20일령부터 30일령 사이에서 급격한 수분의 감소가 이루어진다는 결과와 일치하였으며 후발효부터는 홍(2001)이 보고한 양질 퇴비 판정 기준에 부합되는 30%~40% 사

Table 2. Physicochemical properties during composting process

Item	Composting time					
	Active composting				Maturation & Products	
	1 day	5 days	15 days	25 days	Maturity	Final
Temperature(°C)	18	40	76	62	41	20
Moisture content(%)	66.73	66.66	63.24	47.53	36.70	37.89
- DM base						
Total C(%)	47.22 ± 0.40 ^{c*}	46.37 ± 0.20 ^b	46.56 ± 0.18 ^b	45.65 ± 0.04 ^c	43.69 ± 0.21 ^d	42.04 ± 0.24 ^c
Total N(%)	1.25 ± 0.32 ^b	1.23 ± 0.04 ^b	1.67 ± 0.08 ^a	1.64 ± 0.03 ^a	1.71 ± 0.04 ^a	1.87 ± 0.07 ^a
C : N ratio	39.48 ± 3.42 ^a	37.67 ± 1.48 ^a	27.90 ± 1.31 ^b	27.77 ± 0.53 ^b	25.55 ± 0.53 ^b	22.53 ± 0.80 ^b
- Fresh base						
NH ₄ -N(mg/kg)	421.87	366.99	294.80	198.88	132.16	104.89
NO ₃ -N(mg/kg)	20.98	23.08	25.18	27.27	31.47	53.92
NH ₄ -N : NO ₃ -N ratio	20.11	15.90	11.71	7.30	4.20	1.95

*^{abcd} Mean with different superscripts in same row are significantly different at P < 0.05.
Values are means ± SD.

이의 수분 함량을 유지함으로써 퇴비화가 안정화 상태에 이르고 있음을 보여주었다. 퇴적더미내 온도의 경우는 15일령에 최고 76°C 이상승한 후 25일령까지는 62°C 이상에서 온도가 유지되었다. Raymond(1975)는 퇴비화 중 정체식 퇴비화 공법에서 퇴적더미 온도가 55°C 이상이 3일 이상 유지되어야 종자의 불활성화 및 병원성 미생물의 사멸을 유도할 수 있다고 하였다. 퇴비화 기간동안 온도 증가는 퇴비화 과정 중 주로 이분해성 유기물에 대한 미생물의 대사에 기인된 것이며(Fogarty과 Tuovinen, 1991) 퇴비화 중기 이후에 온도의 급속한 감소로 판단되어지는 것은 퇴비화 미생물이 난분해성 유기물 분해단계에 접어든 것으로 사료되며 결국 완숙단계에 들어서면서 온도가 20°C 실온에 가까워짐으로서 퇴비의 안정화가 이루어지고 있음을 보여주었다.

2. 퇴비화 과정중 미생물상의 변화

퇴비화 과정중 퇴적더미의 물리화학적 특성 변화는 퇴적더미에 상존하는 미생물 상과 밀접

한 관계가 있으며 본 실험에서 퇴비화 단계별로 조사한 미생물 상은 Table 3에 제시되었다. 퇴비내에는 다양한 미생물이 상존하며 이를 토양에 시용시 토양내 미생물 수 증가 및 토양내 효소활성 증가 등을 통해 토양내 병원성 균과의 영양원에 대한 상호 경쟁과 더불어 미생물 대사산물에 의한 작물의 생육촉진이 유도되는 등 토양과 작물에 유익하게 작용한다(EPA, 1998). 본 연구의 축분퇴비 완제품의 경우 퇴비 1 g 중 살모넬라와 대장균은 각각 3.5×10^1 CFUg⁻¹과 6.7×10^3 CFUg⁻¹이 검출되었다. 유기질비료의 위생관리 측면에서 Strauch(1987)는 대장균 수가 5×10^2 CFUg⁻¹ 이하가 되어야 한다고 지적한 결과보다는 높게 검출되었다. 이는 퇴비화 단계 25일령 이후에 대장균의 2차오염 또는 재 성장이 원인인 것으로 사료되었다. 그러나 본 시험에 이용된 퇴비화 처리시스템은 Table 2의 퇴비화 단계별 온도의 변화에서 볼 수 있듯이 퇴비내 병원성 미생물의 사멸을 위해서 축분퇴비화 공정 중 51°C 또는 그 이상의 온도에서 최소 3일간 유지되어야 한다는 EPA (1989)의 퇴비화 공정 규격에는 적합하였다.

Table 3. Changes in Microbial counts of swine manure composting steps

(Unit : CFU/g)

Parameters	<i>Salmonella</i>	<i>E. Coli</i>	<i>Actinomyces</i>	Fungi	Mesophillic microbes	Thermophillic microbes
1 day	2.2×10^3	2.65×10^7	8.76×10^6	9.36×10^6	1.01×10^9	8.6×10^8
5 day	2.0×10^2	5.5×10^5	2.77×10^6	4.73×10^5	1.2×10^8	6.63×10^8
15 day	1.8×10^1	2.3×10^3	4.61×10^6	8.5×10^3	5.0×10^7	9.65×10^8
25 day	0.3×10^1	1.2×10^2	7.35×10^5	4.47×10^4	5.5×10^7	4.5×10^{10}
Maturity	7.8×10^2	3.5×10^4	1.19×10^7	1.95×10^6	1.52×10^{10}	1.07×10^9
Final	3.5×10^1	6.7×10^3	3.33×10^7	5.67×10^3	5.7×10^9	1.9×10^9

Vicki(1999)는 완숙퇴비의 미생물을 호기성 세균, 혐기성 세균, 사상균, 방선균, 슈도모나스과, 질소 고정균 등 6가지 기능적인 미생물 군으로 분류하였을 때 통상적으로 중온성 세균은 $10^8 - 10^{10}$ CFUg⁻¹ 정도이며 사상균은 $10^3 - 10^4$, 방선균은 적어도 $10^6 - 10^8$ 이상이어야 한다고 하였다. 본 실험과 비교해 볼 때 방선균과 사상균, 중온성 세균에 있어서 Vicki(1999)가 제시한 범위내에서 검출되었다. 퇴비화에 있어서 방선균의 역할은 매우 중요하다. 방선균의 경우 퇴비화 마지막 단계인 후숙과 완제품에서 우세하게 검출되었다. 이와 같은 결과는 Baker 등(1999)과 동일한 결과를 얻었다. 방선균은 chitin, cellulose와 난분해물질 분해 즉 복잡한 화학물질의 분해와 토양 구조 개량, 식물병원균의 감소 등 많은 기능을 담당한다(Baker 등 1999; Vicki 1999). 본 실험에서 중온성세균은 퇴비부숙 전단계에서 높은 밀도로 존재하였고 부숙후기로 갈수록 방선균과 사상균의 밀도가 증가하는 경향을 보였다. 고온성 세균은 퇴비화 15일령 이후에 급격히 밀도가 높아져 이는 퇴적내 미생물의 온도에 적응성을 가진 후 나타난 것으로 관찰되어 퇴적온도와 밀접한 관계가 있는 것으로 사료되었다.

3. 암모니아태 질소와 질산태 질소의 변화

암모니아태 질소와 질산태 질소의 함량 변화는 Table 2에 나타내었다. 암모니아태 질소 함량은 퇴비화되면서 서서히 증가하여 1일령에 최고치인 421.87mg/kg에서 점차 감소하여 완숙에는 104.89mg/kg으로 낮아졌다. 반면 질산태

질소의 경우 함량이 후발효 단계까지 거의 변화하지 않으나, 후발효를 거쳐 완숙퇴비 단계에서 함량이 53.92mg/kg로 급격히 증가하였다. Riffaldi 등(1986)은 축분 퇴비화 과정 중 퇴비화가 잘되고 있다는 징후는 퇴비화 단계별 암모니아태 질소의 감소와 질산태 질소의 증가로 알 수 있다고 하였다. 본 연구에서도 이러한 경향은 서(1988)과 김(1997) 등이 보고한 퇴비화 단계별 암모니아태 질소와 질산태 질소 변화는 전반적으로 비슷하였으나 그 함량 정도에 대해서 김(1997) 등이 보고한 돈분의 퇴비화 과정별 암모니아태 질소 수준은 596.33 ~ 111.66mg/kg 이고 질산태 질소의 수준은 224 ~ 488mg/kg의 보고와는 큰 차이를 보여 주었다. 본 연구에서 검출되는 수준이 낮은 이유는 분뇨분리 수거에 따른 돈분뇨 슬러리에 함유된 노 함량이 낮았기 때문인 것으로 사료되었다. 암모니아태 질소와 질산태 질소의 비율은 Table 2에서 볼 수 있듯이 퇴비화가 진행됨에 따라 감소하였다. 비율 감소의 주된 원인은 암모니아태 질소의 감소로 받아들여지며 퇴비화 초기에는 11 이상이었으며 퇴비화 45일령(완제품 단계)에서는 2 이하로 감소되었다. 암모니아태 질소와 질산태 질소의 비율은 1 이하가 되었을 때 완숙퇴비로 간주되어진다(Bernal 등 1998; Lamey 2000; Paré 등 1998). 본 실험에서는 완제품 단계에 있는 퇴비가 1.95로 나타나 이는 암모니아태 질소가 높게 검출되었기 때문인 것으로 사료된다.

4. 축분퇴비의 생물학적 검증

식물의 발아지수는 식물에 대한 퇴비의 독성

유무를 검사하기에 매우 유용하다(Chanyasak, 1981; Devleeschauwer 등, 1981). 본 실험에서는 배추종자를 이용하여 종자 발아율과 근장비를 통해 발아지수를 나타냈으며 그 결과는 Fig. 1과 같다. 퇴비가 진행될수록 35일령 이후 배추의 발아지수는 희석 처리구 모두 80%에서 100%를 나타내었다. 35일령의 3배 희석처리구에서 완제품을 10배로 희석하였을 경우 발아율과 발아지수는 100%을 나타냈으며, 이와 같은 결과는 도시하수 슬러지를 이용한 퇴비의 발아지수가 164일에서 겨우 60%을 나타내었다는 Iannotti 등(1994)의 보고와는 큰 차이를 보였다. 완제품의 경우 20배 처리구에서 발아율은 100%을 보였으나 근장의 상태가 양호하지 못한 관계로 발아지수는 86.34%에 그쳤다. 발아지수가 86.34%로 나타난 원인은 식물의 영양균형의 문제로 사료된다. 희석하지 않은 처리구(0배)에서는 퇴비화 이후부터 25일령까지 발아지수가 최소 0%와 최대 26.27%로 나타났다. 0배 처리구에서 최대 26.27%까지 밖에 나타나지 않은 이유는 Still 등(1976)과 Solbraa 등(1983)이 보고한 유기산에 의한 장애의 결과와 유사한 결과를 얻었다. 발아지수가 25일령과 후발효 단계 사이에서 큰 폭의 증가를 보이는 것으로 미루어 보아 이 기간에 성장장애 요인들이 제거되고 있는 단계로 사료된다. 또한 후발효 단계와 완제품에서 90% 이상의 발아지수를 나타내 는 등 후발효 단계에서 발아율이 92% 이상을

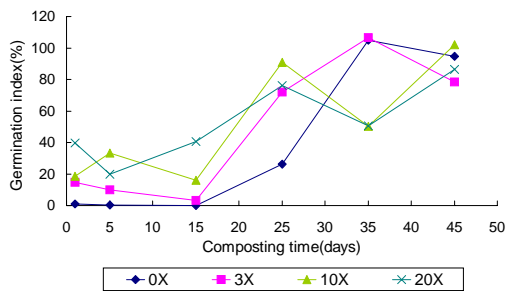


Fig. 1. *Brassica campestris* L. germination index with a composting time. Seeds were incubated for 5days at 25°C in three dilutions of pig slurry compost water extract.

보인 결과는 황 등(1999)이 보고한 발아검정시험과 유사한 결과를 보임으로서 후발효 단계부터는 작물에 대한 유기산 등에 의한 장애가 없어진 것으로 사료된다. 축분퇴비에서 발아지수 값이 80이상이면 작물에 대한 장애가 사라진 것으로 본다는 Zucconi 등(1981b)과 Tiquia 등(1996)의 결과를 토대로 볼 때 본 연구에서 퇴비화 단계의 후발효 단계인 35일령부터 작물에 대한 장애는 관찰되지 않았다.

5. 퇴비화 과정 중 부식물질 추출 및 이들의 Optical Density(E4 / E6) 분석

유기질비료의 부숙도 지표로서 부식물질 지수를 활용하는 경우가 있는데 이는 퇴적토미내의 이분해성 물질의 한계치를 구명하는 것으로서 퇴비화 시간과 매우 밀접한 관계를 지닌다(Jimenez와 Garcia, 1992; Chefetz 등, 1996). 유기질 비료내 부식물질은 비료로 사용시 금속 친화물질로서, 수소이온농도의 완충제로서, 식물의 영양원으로 활용되기 때문에 유기물 함량 중에서도 중요한 역할을 하고 있다. Chen 등(1977)은 토양 중 NaOH 용해성 부식물질의 E4(465nm), E6(885nm)의 흡광비로 토양의 부식 정도를 구명하였으며 계분을 이용한 완숙퇴비에서 Humic acid의 E4 : E6가 8.0 이하가 되어야 한다고 하였다. 본 연구에서의 Humic acid의 E4 : E6는 Fig. 2에 제시된 바와 같이 퇴비화 기간의 25일 이전에는 E4 : E6 ratio가 8.86에서 6.76 범위에서 감소하는 경향을 나타내었으며 25일 이후 완제품까지는 6.76에서 4.67의 범위

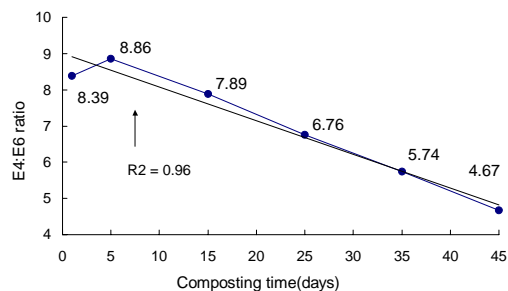


Fig. 2. E4:E6 ratio during composting of pig slurry mixed with puffing rice hull.

에서 감소하였으며 이때의 퇴비화 전기간의 r^2 값은 0.96이었다.

6. 퇴비화 과정 중 탄질비의 변화

퇴비의 정상적인 부숙이 되기 위해서는 미생물의 증식과 분열에 필요한 단백질 구성성분인 질소와 미생물의 에너지원으로 이용되는 탄소의 비율이 적합해야 하는데(김 등 1997) 통상적으로 퇴비 부숙 초기에 적합한 C/N율은 25 ~ 35 수준이며 높은 C/N율은 퇴비화 속도를 지연시키고 과도한 질소 손실과 악취를 발생시킨다고 하여(Baker 등 1999) 초기 C/N율을 적절히 맞추는 것이 수분조절과 함께 퇴비화의 중요한 인자로 인식되어 왔다. 본 실험에서는 수분 함량을 65%로 조절하여 배합한 결과 퇴비화 1일령에 탄질비가 39.48이었으며 15일령에는 27.90이었고 최종제품의 경우 22.53으로 나타났다. 이와 같은 결과는 퇴비화 15일 이후의 탄질비 변화폭이 5.24인 반면 퇴비화 초기인 15일 이전에 탄질비의 변화 폭이 11.58로 나타나 전체 퇴비화 공정 중 퇴비화 초기에 탄질비가 크게 변함을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 퇴비화의 공정이 순조롭게 이루어지고 있는가를 판단하는 주요한 지표로서 활용할 수는 있으나 수분 함량 조절에 이용되는 부재료의 종류 및 첨가량에 의해 탄질비의 절대치가 달라질 수 있으므로 후숙기간 중의 퇴비 부숙도의 지표로서는 적합하지 않은 것으로 사료된다. 따라서 Kahman(1981)도 총 탄질비의 경우 퇴비화에 있어서 수분조절재 영향을 많이 받기 때문에 부숙도를 결정하는 완벽한 기준으로 보기가 어렵다고 하였다. 그 결과 본 실험에서는 총 탄질비의 난점을 보완할 수 있는 수용성 탄질비의 변화 추이를 분석하였다. 그 결과는 Fig. 3에 나타났다. 수용성 탄소의 증가는 0.54%에서 퇴비화 25일령까지 0.78%로 증가한 이후 25일과 35일 사이에 급격하게 감소하여 경향을 보여 주었다. 이 시기는 후숙이 진행되는 시기로서 퇴비내 미생물상의 변화가 급격하게 이루어지는 시기이다. 이와 같은 결과는 Hue와 Liu

(1995)의 숙성중인 퇴비와 안정화된 퇴비사이의 수용성 탄소는 큰 차이를 보인다는 보고와 유사하였다. 수용성 질소의 변화도 퇴비화 기간에 따라서 수용성 탄소와 비슷한 양상을 보였으나 15일령 이후에는 점차적으로 감소하는 경향을 보였다. 수용성 질소의 최고 함유량은 퇴비화 15일령의 0.32%와 완제품에서의 0.21%로 나타났다. Fig. 4에서 볼 수 있듯이 수용성 탄질비의 경우, 퇴비화 25일령 이전에는 변화의 폭이 매우 심하였으나($r^2 = 0.12$) 퇴비화 25일

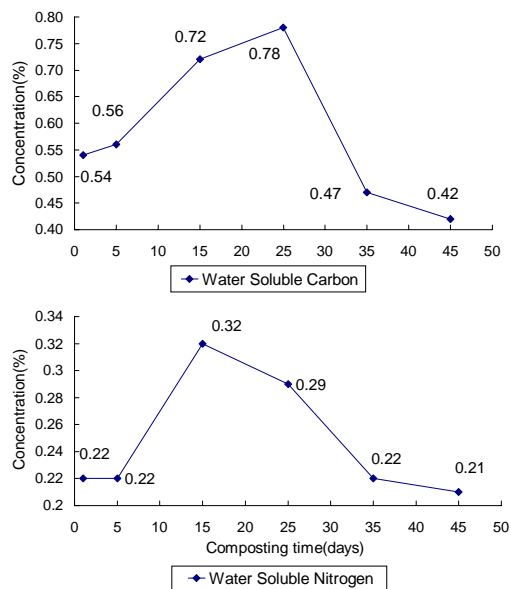


Fig. 3. Change of water soluble carbon and nitrogen during composting of pig slurry.

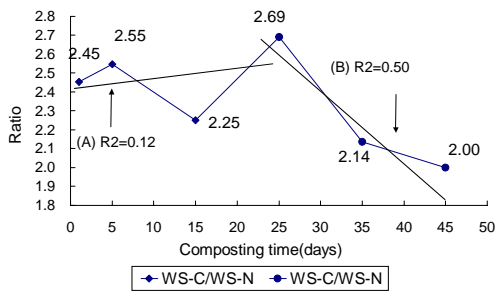


Fig. 4. WS-C/WS-N ratio during composting of pig slurry.
 ◆, (A) : from day 1 to day 25 ● (B) : From day 25 to finished products.

령 이후는 꾸준히 감소함을 보여 주고 있다($r^2 = 0.50$). 이는 결국 탄질비의 감소가 탄소 성분의 감소에 의한 주된 요인으로 결정되고 있음을 알 수 있다. Hue와 Lui(1995)는 부숙이 완료된 계분퇴비 및 하수슬러지 등의 퇴비의 경우 수용성 탄소의 함량이 최소 1% 이하여야 한다고 제안하였지만 본 실험에서의 돈분의 경우 후숙기간을 거친 후 수용성 탄소의 함량이 0.5% 이하가 되어야 완숙되었다고 볼 수가 있을 것으로 사료된다.

7. 퇴비화 인자들의 상관관계

퇴비화의 최종단계인 시료에서 부숙도의 지표가 될 수 있는 인자들의 상관관계를 Table 4에 제시하였다. 퇴비의 부숙도를 평가할 수 있는 요인으로 알려진 인자간의 상관관계 중 OM과 총 탄소의 상관계수가 1.00으로서 0.87인 서(1988)의 보고와는 차이를 보였다. 상관관계의 결과에서 상관계수가 0.80 이상으로 상당히 높은 것들은 총 탄소, 총 탄소대 질소비, 유기물대 총 질소비, E4(465nm) / E6(665nm) 등으로 다수 존재하지만 상관계수가 0.9 이상인 요인들은 수용성 탄질비와 부식물질비, 유기물 함량과 부식물질비로 나타났다. 수용성 탄질비의 경우 유기물 함량과 총 탄소와의 상관계수가

0.7 이상으로 나타났으나 총 탄질비와는 0.34를 나타내 상관관계가 낮은 것으로 판명되었다. 유기물 함량의 경우 총 탄소가 차지하는 비중이 매우 높으므로(Eng, 1951) 수분조절제의 함량에 의해 좌우됨으로 이의 난점을 보완할 수 있는 수용성 탄질비가 부숙도의 중요한 지표로 이용할 수 있을 것으로 사료되었다.

가축분뇨의 재활용 차원에서의 축분의 퇴비화는 매우 합리적인 방법이나 이의 바람직한 사용을 위해선 퇴비의 시용전 안정성과 부숙도 평가에 대한 요인발굴은 지속적인 관심의 대상으로 떠오르고 있다.

상기의 요인들을 근거로 볼 때 퇴비 부숙도 평가를 위한 요인으로 수용성 탄질비, 부식물질비, 암모니아태 질소 대 질산태 질소비가 평가요인으로 가능성을 보여 주었다. 이들의 요인의 타당성을 구명하기 위해서는 퇴비화의 전후기 중 퇴비화 전기가 지난 시점에서 이루어져야 한다는 점이다. 퇴비화 전기에는 요인들마다 가변성이 너무나 크기 때문에 일률적으로 접목하기가 쉽지 않다. 퇴비화 과정 중 퇴비화 전기에는 미생물의 대사열에 의한 고온의 형성이 지나고 나면 미생물상이 새롭게 바뀌게 되고 이분해성 물질이 소진되어진 시점으로서 병원성미생물의 사멸, 종자의 불활성화 등으로 퇴비로서 사용 가능한 안정한 상태의 퇴비가

Table 4. Correlation coefficient among the factors affecting compost maturity in finished product

Item	OM	T-C	T-N	WS-C	WS-N	OM/T-N	T-C/T-N	WS-C/T-N	WS-C/WS-N	NH ₄ -N	NO ₃ -N
T-C	1.00										
T-N	-0.78	-0.78									
WS-C	0.48	0.47	-0.40								
WS-N	0.11	0.10	-0.33	0.84							
OM/T-N	0.80	0.80	-0.99	0.34	0.25						
T-C/T-N	0.80	0.80	-0.99	0.34	0.24	1.00					
WS-C/T-N	0.70	0.74	-0.84	0.82	0.73	0.80	0.80				
WS-C/WS-N	0.79	0.78	-0.32	0.62	0.09	0.34	0.34	0.49			
NH ₄ -N	0.62	0.62	-0.59	0.58	0.59	0.54	0.53	0.70	0.31		
NO ₃ -N	-0.80	-0.80	0.58	-0.38	-0.04	-0.55	-0.55	-0.52	-0.72	0.15	
E4/E6	0.91	0.91	-0.46	0.38	-0.12	0.51	0.51	0.44	0.91	0.40	-0.73

되었을 때 부속도를 결정지을 수 있는 요인의 접목이 가능하리라 사료된다. 퇴비내의 정상변화 중 미생물의 변화와 발아지수는 퇴비 부속도에 영향을 미치는 것보다는 퇴비의 안정성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 사료된다. 축분 퇴비의 부속도 평가를 위한 요인 중 특히 암모니아태 질소와 질산태 질소의 비의 경우는 축분퇴비의 안정성과 부속도를 동시에 판단할 수 있는 요인으로 생각되었다. 축분퇴비의 부속도를 수치화 할 수 있는 가능성이 있는 요인으로서는 부식물질비(E4/E6), 수용성 탄질비, 수용성 탄소의 함량 등이 돈분에서의 부속도를 결정할 수 있는 것으로 판정되었으나 모든 축분퇴비화에 본 요인을 적용하기 위해서는 축분별 완숙 퇴비의 조사가 선행되어야 할 것으로 사료되었다.

IV 요약

본 연구는 돈분과 팽연왕겨를 6:4로 혼합하여 수분 함량을 65% 정도로 조절한 후 에스컬레이트식 축분교반기로 교반하면서 바닥에서 강제 송풍이 이루어진 대단위 퇴비화 시설에서 수행하였으며 본 시설을 이용한 축분 퇴비화 중 퇴적더미의 온도는 15일령에 가장 높은 76℃까지 상승한 후 25일령까지는 62℃ 이상에서 온도가 유지되었으며 그 후 온도가 서서히 감소하여 완숙퇴비 단계에는 20℃ 이하로 떨어졌다. 수분 함량의 변화는 1일령부터 25일령까지 약 20%가 줄었으며 15일령부터 후발효 단계까지 급격하게 수분의 감소가 있었고 후발효 이후 수분 함량은 30%~40% 사이로 유지되었다. 완숙퇴비의 안정성에 주된 인자로 알려진 퇴적더미내의 미생물상의 조사 결과 중온성 세균은 $10^8 - 10^{10}$ CFUg⁻¹, 사상균은 $10^3 - 10^4$, 방선균은 $10^6 - 10^8$ 의 범위에 상존하는 것으로 밝혀져 퇴비화 최종단계(퇴비화 45일령)에서는 축분퇴비의 안정성이 있는 것으로 사료되었으며 공정단계별 부속도에 영향을 미치는 요인의 특성 변화를 구명하고자 실시한 결과는 다음과 같다.

1) 암모니아태 질소 함량은 퇴비화되면서 퇴비화 초기인 1일령에 최고치인 421.87mg/kg에서 점차 감소하여 완숙에는 104.89mg/kg으로 낮아졌다. 암모니아태 질소와 질산태 질소의 비율은 퇴비화 초기에는 11 이상이었으며 퇴비화 45일령(완제품 단계)에서는 2 이하로 감소되었다.

2) 종자 발아지수는 퇴비내 독성물질과 영양소에 크게 좌우되었으며 퇴비화 전반기에는 무희석처리구의 수치로 볼 때 독성물질에 의한 저해로 간주가 되며 25일 이후 작물의 양적 영양소에 따라 발아지수가 달라졌다. 45일의 발효완료 단계에서의 발아지수는 80 이상을 나타내었다.

3) Humic acid의 E4:E6는 퇴비화 기간 중 25일 이전에는 E4:E6 ratio가 8.86에서 6.76 범위에서 감소하는 경향을 나타내었으며 25일 이후 완제품까지는 6.76에서 4.67의 범위에서 감소하였으며 이때의 퇴비화 전기간의 r^2 값은 0.96이었다.

4) 수용성 탄소는 퇴비화 전반기에 0.54%에서 0.78%로 증가하였으며 그 이후는 0.42%까지 감소하는 경향을 나타냈다. 수용성 질소의 경우는 퇴비화 15일령까지 0.22%에서 0.32%로 증가하다가 퇴비화 15일령 이후는 지속적으로 감소하는 경향을 나타냈다. 결과적으로 수용성 탄소와 수용성 질소간의 상관계수는 퇴비화 25일령까지인 전반기에 0.12인 반면 퇴비화 25일령 이후에는 0.5로 나타났다.

V 인용 문헌

1. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation. 1992. Standard methods for the examination of water and wastewater. 18th ed. APHA, Washington, D.C.
2. AOAC. 1984. Official Methods of Analysis. 14th ed. Association of Official Analytical Chemists. Washington D.C.
3. Baker, M., Knoop, B., Quiring, S., Beard, A., Lesikar, B., Sweeten, J. and Burns, R. 1999. Composting Guide Index. Prepared by the Texas Agricultural Extension Service Solid and Hazardous

- Waste Management Initiative Team.
4. Bernal, M. P., Navarro, A. F., Sanchez-Monedero, M. A., Roig, A. and Cegarra, J. 1998. Influence of sewage sludge compost stability and maturity on carbon and nitrogen mineralization in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 30:305-313.
 5. Chanyasak, V. and Garcia, P. 1981. Carbon/nitrogen ratio in water extract as measure of composting degradation. *J. Ferment. Technol.* 59:215-219.
 6. Chefetz, B., Hatcher, P. G., Hadar, Y. and Chen, Y. 1996. Chemical and biological characterization of organic matter during composting of municipal solid waste. *Journal of Environmental Quality* 25: 776-785.
 7. Chen, Y. and Inbar, Y. 1993. Chemical and spectroscopical analyses of organic matter transformations during composting in relation to compost maturity. p. 551-600. In: H. Hottel and H. Keener (eds.) *Science and engineering of composting*. Renaissance Publications, Washington, Ohio.
 8. Chen, Y., Senesi, N. and Schnitzer, M. 1977. Information provided on humic substances by E4 : E6 ratios. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 41:352-358.
 9. Clairon M., Zinsou, C. and Nagou, D. 1962. Etude des possibilites d'utilisation agronomique des compost d'ordures menageres en milieu tropical. *I. Agronomie*. 2(30):298-300.
 10. DeVleeschauwer, D., Verdonck, O. and VanAssche, P. 1981. Phytotoxicity of refuse compost. *BioCycle* 22:44-46.
 11. Duncan, D. B. 1995. Multiple range and multiple F test. *Biometrics*. 11:142.
 12. Eng, N. Z. 1951. Second Interim Report of the Interdepartmental Committee on Utilization of Organic Wastes. 61-12: November-December.
 13. EPA(United States Environmental Protection Agency). 1998. *An Analysis of Composting As an Environmental Remediation Technology*. EPA530-R-98-008. Washington, DC.
 14. EPA(United States Environmental Protection Agency). 1989. *Control of pathogens in municipal wastewater sludge*. Center for Environmental Research Information. Summary Report EAP/625/8-89/016 Cincinnati, Ohio, USA.
 15. Forgy, A. M. and Tuovinen, O. H. 1991. Microbiological degradation of pesticides in yard waste composting. *Microbiol. Rev.*, 55:225-233.
 16. Gleuke, G. C. 1977. Biological processing; Composting hydrolysis. In : *Hand book of solid waste management*. D. G. Wilson(ed)NY Van Nostrand Reinhold. pp. 197-225.
 17. Golueke, C. G. 1977. *Biological reclamation of solid wastes*. Redale Press, Emmaus, Pennsylvania.
 18. Haug, R. T. 1997. *The Practical Handbook of Compost Engineering*, Lewis Publishers, Inc., Boca Raton, Florida. U.S.A.
 19. Hsu, J. H. and Lo, S. L. 1999. Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformation during composting of pig manure. *Environmental Pollution*. 104:189-196.
 20. Hue, N. V. and Evans, C. E. 1986. Procedures used for soil and plant analysis by the Auburn University Soil testing laboratory. Dept series No. 106. Alabama Agric. Exp., Auburn Univ. Alabama.
 21. Hue, N. V. and Liu, J. 1995. Predicting compost stability. *Compost science and utilization*. 3(2):8-15.
 22. Iannotti, D. A., Grebus, M. E., Toth, B. L., Madden, L. V. and Hottel, H. A. J. 1994. Oxygen respirometry to assess stability and maturity of composted municipal solid waste. *J. Environ. Qual.* 23:1177-1183.
 23. Iannotti, D. A., Pang, T., Toth, B. L., Elwell, D. L., Keener, H. M. and Hottel, H. A. J., 1993. A quantitative respirometric method for monitoring compost stability. *Compost Science & Utilization*. 1(3):52-65.
 24. Jimenez, E. I. and Garcia, V. P. 1992. Determination of maturity indices for city refuse composts. *Agriculture Ecosystems & Environment* 38:331-343.
 25. Kahman, L. 1981. Kompostqualitätskriterien und Schwermetall, Müll und Abfall 7/81. pp. 188-194.
 26. Larney, F. J. 2000. Composting of cattle feedlot manure in southern Alberta. In: 2000 Annual Meeting Abstracts. American Soc. Agron. Madison, Wisconsin. p. 47.
 27. Miller, F. C. and Finstein, M. S. 1985. Materials balance in the composting of wastewater sludge as affected by process control. *J. Wat. Pollut. Contr. Fed.* 57:122-127.
 28. Paré, T., Dinel, H., Schnitzer, M. and Dumont, S. 1998. Transformations of carbon and nitrogen during composting of animal manure and shredded paper. *Biol. Fertil. Soils*, 26:173-178.
 29. Raymond P. Poincelot. 1975. *The biochemistry and methodology of composting*. The Connecticut Agricultural Experiment Station. 9p.
 30. Riffaldi, R., Levi-Minzi, R., Pera, A. and Bertoldi, M. de. 1986. Evaluation of composting maturity by means of chemical and microbial analyses. *Waste Manage. Res.* 4:387-396.
 31. SAS. 1988. *SAS/STAT. User's Guide*(Release 6.03). SAS Inst. Inc., Cary, NC.
 32. Solbraa, K., Sant, M. D., Selmer-Olson, A. R. and Gislserod, H. R. 1983. Composting soft and hardwood bark. *BioCycle*. 24(4):44-48.
 33. Strauch, D. 1987. Microbiological specifications of disinfected compost. In: De Bertoldi, M., M. P. Ferranti, P. L. L'Hermite and F. Zucconi, F. (eds.).

- Compost: Production, Quality and Use. Elsevier Science, London, pp. 210-229.
34. Still, S. M., Dirr, M. A. and Gartner, J. B. 1976. Phytotoxic effects of several bark extracts on mung bean and cucumber groth. J. Am. Soc. Horitic. Sci. 101:34-37.
 35. Sweeten, J. M. 1988. Composting manure and sludge. p. 38-44. In proceedings of the national poultry waste management symposium. Ohio State University, Columbus, Ohio. 18-19 Apr.
 36. Tiquia, S. M., Tam, N. F. Y. and Hodgkiss, I. J. 1996. Effects of composting on phytotoxicity of spent pig-manure sawdust litter. Environ. pollut. 93(3):249-256.
 37. Vicki, B. 1999. Evaluating microbiology of compost. Biocycle May:40(5)62-64.
 38. Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. and Bertoldi, M. de. 1981a. Evaluating toxicity of immature compost. BioCycle. 22:54-57.
 39. Zucconi, F., Forte, M., Monaco, A. and Bertoldi, M. de. 1981b. Biological evaluation of compost maturity. BioCycle. 22:27-29.
 40. 김태일, 정광화, 광정훈, 전병수, 박치호, 김형호, 한정대. 1996. 돈분퇴비 발효과정 중 산소 소모율이 퇴비부숙도에 미치는 영향. 농업과학논문집 38(2):632-636.
 41. 김태일, 한영근, 전병수, 유용희, 박주희, 권두중, 김형호, 김경남. 2001. 돈분 퇴비화의 단계별 물질수지 변화를 통한 퇴비 규격화 연구. 한국동물자원과학회지 43(6):997-1004.
 42. 김태일, 정광화, 최기춘, 류병희, 광정훈, 전병수, 박치호, 김형호, 한정대. 1997. 돈분의 호기성 퇴비화 단계별 물리·화학적 특성변화. 축산시설환경학회지 3(1):13-18.
 43. 박경규, 서상룡, 김상헌, 김현옥, 심삼경, 장동일, 최홍립, 홍지형. 1996. 축산기계 및 시설. 문운당.
 44. 서명철, 소규호, 박원목. 1999. 가축분 퇴비화 과정에서 부숙도 및 퇴비의 항균활성 검정. 한국토양비료학회지 32(3):285-294.
 45. 서정윤. 1988. 폐기물의 퇴비화 과정중 물질 변화. 한국환경농학회지 7(2):136-145.
 46. 서정윤. 1989. 폐기물의 퇴비화 과정중 물질 변화. 한국환경농학회지 8(1):55-59.
 47. 홍지형. 1988. 호기성 발효퇴비화에 의한 농축산기타 유기성폐기물의 녹농지 환원 이용. 한국농업기계학회지 13(3):81-90.
 48. 홍지형. 2001. 농축산 폐기물 퇴비화. 한국농업기계학회지 26(1):67-73.
 49. 황선현, 신창호, 신부영, 조무환. 1999. 온도를 공기량으로 제어한 음식물 쓰레기 호기성 퇴비화에 관한 연구. 한국생물공학회지 14(5):621-627.
- (접수일자 : 2004. 1. 7. / 채택일자 : 2004. 2. 12.)