

축분 퇴비화 과정 중 퇴비 부숙도를 고려한 암모니아 발생량 산정

김기연* · 최홍림** · 고한중*** · 김치년****

신시내티 대학교 환경보건학과*, 서울대학교 농생명공학부**, 한국방송통신대학교***, 연세대학교 의과대학 산업보건연구소****

Estimation of Ammonia Emission During Composting livestock Manure Based on the Degree of Compost Maturity

K. Y. Kim*, H. L. Choi**, H. J. Ko*** and C. N. Kim****

Department of Environmental Health, University of Cincinnati*, School of Agricultural Biotechnology, Seoul National University**, Korea National Open University***, Institute for Occupational Health, College of medicine, Yonsei University****

ABSTRACT

Principal aim of this study is to suggest the statistical equation model which can predict an amount of ammonia emission according to the degree of compost maturity during composting livestock manure. Composting process was classified with intial, midterm and final phase based on germination index of compost samples. Total Kjeldahl nitrogen(TKN) and organic matter(OM) were selected as the independent variables available to contribute to ammonia emission from composting pile. Ammonia concentration measured in the samples taken at the intial phase was about 10ppm, sharply increased to 50ppm at the midterm phase, and gradually decreased to about 10ppm. The contents of Total Kjeldahl nitrogen and organic matter through whole composting period were ranged from 0.6 to 1.2% and from 30 to 40%, respectively, were reduced slightly at the midterm phase, but generally showed no constant fluctuation pattern. In estimating ammonia emission with application of the statistical equation model, the coefficients of independent variables at the midterm phase when an average concentration of ammonia was highest showed a relatively high values whereas those at the initial phase when an that of ammonia was lowest indicated a relatively low values. However, no statistical significance was found in the coefficients of independent variables and the equation model. Additionally, the further research, which can include the considerable analysis data with more samples taken than this study, is needed in order to suggest the statistically significant equation model available to predict ammonia emission during composting process.

(Key words : Statistical equation model, Compost maturity, Composting process, Ammonia)

I. 서 론

퇴비화 방법을 통한 가축분뇨의 처리는 액비화 방법 다음으로 가장 경제적이고 상대적으로 어려운 운용 기술 적용이 요구되지 않기 때문

에 오랜 기간 동안 대부분의 축산 농가에서 널리 이용되어 왔다. 그러나 가축분뇨 퇴비화 과정 중 발생하는 대량의 악취는 인근 주민들의 환경 민원을 유발하여 축산업 관련 환경오염의 주요 발생원으로 지목받고 있을 뿐 아니라(강

Corresponding author : Ki Y. Kim, Department of Environmental Health, University of Cincinnati, OH 45267-0056, USA.

E-mail address & Telephone : kkysnu5@hanmail.net & 1-513-558-0507

등, 2001; 홍, 2003), 축분 퇴비화 공장에 종사하는 작업자에 노출시 눈과 목의 따가움과 같은 심미적 고통을 야기하는 원인이기도 하다(김 등, 2002). 특히 축분 퇴비화시 배출되는 악취 원인 물질 중 암모니아(NH_3)는 H_2O , CO_2 와 더불어 가축분뇨내 유기물이 미생물에 의해 분해되어 생성되는 대표적 부산물로(Haug, 1986) 퇴비화의 원료, 운용 조건 및 진행 상태에 따라 농도 차이가 있지만 일반적으로 현장에서 200~400ppm이 대기 중으로 방출되는 것으로 보고되고 있어(Miller 등, 1991; 김 및 최, 2001) 암모니아의 최소감지농도인 5ppm(Devos 등, 1990)과 작업자 노출기준인 25ppm(노동부, 1998)을 훨씬 초과하는 것으로 알려져 있다.

퇴비더미내 혐기적 조건하에서 생성되는 여타 악취 원인 물질과는 달리 암모니아는 호기적 조건하에서 주로 생성되며(홍, 2003), pH와 온도가 암모니아 발생 양상에 영향을 미치는 주요 인자로 많은 연구자들에 의해 제시되었고(Sommer 등, 1991; Olesen 및 Sommer, 1993; Dewes, 1995; Elzing 및 Monteny, 1997), 퇴비 원료내 질소 함량, 함수율 및 교반 횟수와 같은 그 밖의 여러 인자들에 의해서도 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 축분 퇴비화 과정에서 발생하는 암모니아를 적정 수준으로 저감시키는 동시에 퇴비의 부숙도를 촉진시키기 위해 퇴비 더미내의 이화학적 변수들을 적정 수준으로 유지하는 것은 현실적으로 어려운 일이다. 따라서 퇴비화시 배출되는 암모니아를 바이오필터와 같은 환경공학적인 처리 방법에 의해 탈취하여 대기 중으로 배출시키는 것이 현재로서는 대기오염을 최소화하고 악취 민원을 진정시킬 수 있는 가장 효율적 대안이라 할 수 있으며 이러한 방법으로 암모니아 처리 능력을 효과적으로 극대화하기 위해서는 우선 퇴비 부숙 단계에 따른 암모니아 발생량을 예측하여 필터 운용 조건을 과학적으로 설계할 필요가 있다. 그러나 실제 현장에서는 일률적이고 과도한 공기 주입율과 임의적 판단에 의한 교반 횟수의 적용으로 암모니아 발생량을 예측할 수 없을 뿐 아니라, 객관적 기준 없는 처리 방법에 의해 필터의 처리 기능을 저하시켜 수명을 단축

시키는 경제적 불이익도 초래할 수 있다. 따라서 본 연구는 축분 퇴비화시 대기 중으로 배출되는 암모니아 발생량을 퇴비 부숙 단계에 따라 예측할 수 있는 통계적 모델을 제안하는 데 있다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 설계

본 연구가 수행된 축분퇴비장은 서울대학교 농업생명과학대학 부속실험목장에 위치한 상부가 개방된 3m(W)×2m(L)×2m(H) 규격의 콘크리트 pilot 반응조를 대상으로 실시하였다. 하부에는 산기관을 설치하여 500ℓ/min 용량의 공기가 퇴비더미내로 강제 주입되도록 제작, 부숙 기간 동안 교반을 하지 않는 적층식 퇴비화(aerated static pile) 시스템 형태로 운영하였다. 2002년 9월에서 11월 사이에 실험이 진행되었으며, 실험기간은 60일로 2일마다 1회 시료를 채취하여 총 30개의 시료를 수집하여 분석하였다. 시료는 퇴비더미 상층부로부터 약 30cm 깊이에서 임의로 5곳을 선정하여 약 1kg의 퇴비시료를 polyethylene bag에 담아 보관하였다(농과원, 1997). 퇴비 재료에 사용된 원재료는 부피 기준으로 축분과 톱밥이 9:1의 비율(V/V)로 혼합된 6m³ 용량이 초기에 투입되었으며, 축분은 우분(80%)과 돈분(20%)으로 조성되었다. 혼합물의 초기 수분함량은 64.8%로 부숙이 진행되는 동안 감소하여 실험 종료일인 60일 후에는 45.3%였으며, 온도는 초기 32℃에서 시작하여 부숙 과정 중 최대 70℃까지 증가한 후 후기에 27℃까지 감소하는 추세를 나타내었다.

2. 암모니아 발생량 산정 방법

퇴비화시 암모니아(NH_3)의 발생원은 퇴비내 유기물 속에 포함된 질소(N) 성분이라는 점에 착안, 암모니아 발생에 영향을 주는 이화학적 인자로 총 질소(TKN)와 유기물 함량(OM)을 설정하였다. 이 두 가지 요인을 독립변수로 하여 시료에서 분석된 암모니아 발생량(ℓ/min · g)을

종속변수로 하는 다중회귀분석(multiple-linear regression) 모형 방정식을 고안하였으며(식 1), SAS package(1999)를 이용하여 통계처리 하였다.

$$Z = \alpha + \beta X + \gamma Y \dots\dots\dots (식 1)$$

여기서,

α, β, γ : 상수

Z : 시료내 암모니아 발생량($\ell / \text{min} \cdot \text{g}$)

X : 시료내 총 질소 함량(TKN, %)

Y : 시료내 유기물 함량(OM, %)

통계적 기법을 활용한上記의 모형 방정식은 퇴비 부숙 정도에 따라 다시 세 단계(초기, 중기, 후기)로 나누어 적용하였으며, 구분 기준은 시료에서 분석된 발아지수(germination index)를 이용하였다. 이 모형 방정식을 적용하기에 앞서 시료내 암모니아의 발생량은 (식 2)를 통해 산출하였다.

$$\begin{aligned} & \text{암모니아 발생량} (\ell / \text{min} \cdot \text{g}) \\ & = \text{암모니아 농도} (\text{ml} / \text{m}^3) \times \text{펌프 유량} (\ell / \text{min}) \times \\ & \frac{1}{\text{시료채취량} (g)} \times \frac{1}{10^6} \dots\dots\dots (식 2) \end{aligned}$$

위 식 (2)를 통해 산출된 부숙 단계별 암모니아 발생량에 퇴비원료 총 투입량을 곱하면 총 암모니아 발생량이 추정된다.

3. 분석 방법

(1) 암모니아(NH₃)

암모니아 흡수액(5% 황산용액) 10 ml를 담은 임핀저(impinger)와 실리카겔(Silicagel) 200 g을 담은 moisture trap을 흡입펌프(air sampler, Gilian, No. 800519)에 polyethylene 재질로 제작된 흡입관을 통해 서로 연결한 후, 흡입관 입구 부분을 시료가 담겨진 polyethylene bag에 넣어 고무줄로 밀폐시킨 후 공기 시료를 채취하였다. 흡입펌프의 유량은 1.8~2.0 ℓ / min 으로 설정하였으며, 시료 채취는 10~20분 동안 진행하였다. 시료 채취 후 임핀저를 실험실로 운반하여 흡수액 내 형성된 암모늄(NH₄⁺) 이온을 Ion Chromatography(761 Compact IC, Metrohm, Switzerland)

에 의해 분석한 다음 암모늄 이온 농도를 암모니아 농도로 환산하는 방법으로 측정하였다.

(2) pH, 총 질소(TKN) 및 유기물 함량(OM)

수집된 시료들은 40℃의 순환식 열풍건조기에서 72시간 이상 충분히 건조시킨 후 1mm 스크린이 부착된 Wiley Mill(GmbH & Co Dietz 2001, Germany)로 2회 분쇄하여 2중 마개 플라스크 보관병에 넣어 시료보관실에 보관하며 이화학적 분석에 사용하였다. 분석 방법은 토양 화학분석법 (농과원, 1988)과 비료의 품질검사 방법 및 시료채취기준(농과원, 1997)에 의해 분석을 실시하였으며, 각각의 성분별 분석값은 3반복 분석치의 평균값을 취하였다. pH는 조제 시료와 증류수를 1:10(w/v)으로 하여 pH meter로 측정하였으며, 총질소 함량은 Kjeldahl 법으로, 유기물 함량은 회화로(500~550℃)에서 2시간 가열 후 잔열손실량으로 정량하였다.

(3) 발아지수(GI)

퇴비 추출액의 식물독성(phytotoxicity)을 평가하기 위해 조제시료와 증류수를 1:10의 비율로 항온수조에서 진탕시킨 후 그 추출액을 Petri-dish의 여과지에 10 ml씩 가하고 무종자(*Raphanus sativus* L.) 50개를 골고루 정착시킨 후 25℃ Incubator에서 5일간 암조건하에서 배양시켰다. 또한 순수 증류수만을 사용한 처리구를 대조구로 두어 발아율과 뿌리 생장율을 측정하였으며, 각 처리구마다 공히 3반복의 평균값을 사용하였다. 발아율, 뿌리 생장율 및 발아지수의 계산은 다음과 같다(Tiquia 및 Tam, 1998).

$$\text{발아율} = (\text{퇴비 추출액의 발아 종자 수} / \text{대조구의 발아 종자 수}) \times 100$$

$$\text{뿌리 생장율} = (\text{퇴비 추출액에서 뿌리 길이 평균} / \text{대조구에서 뿌리 길이 평균}) \times 100$$

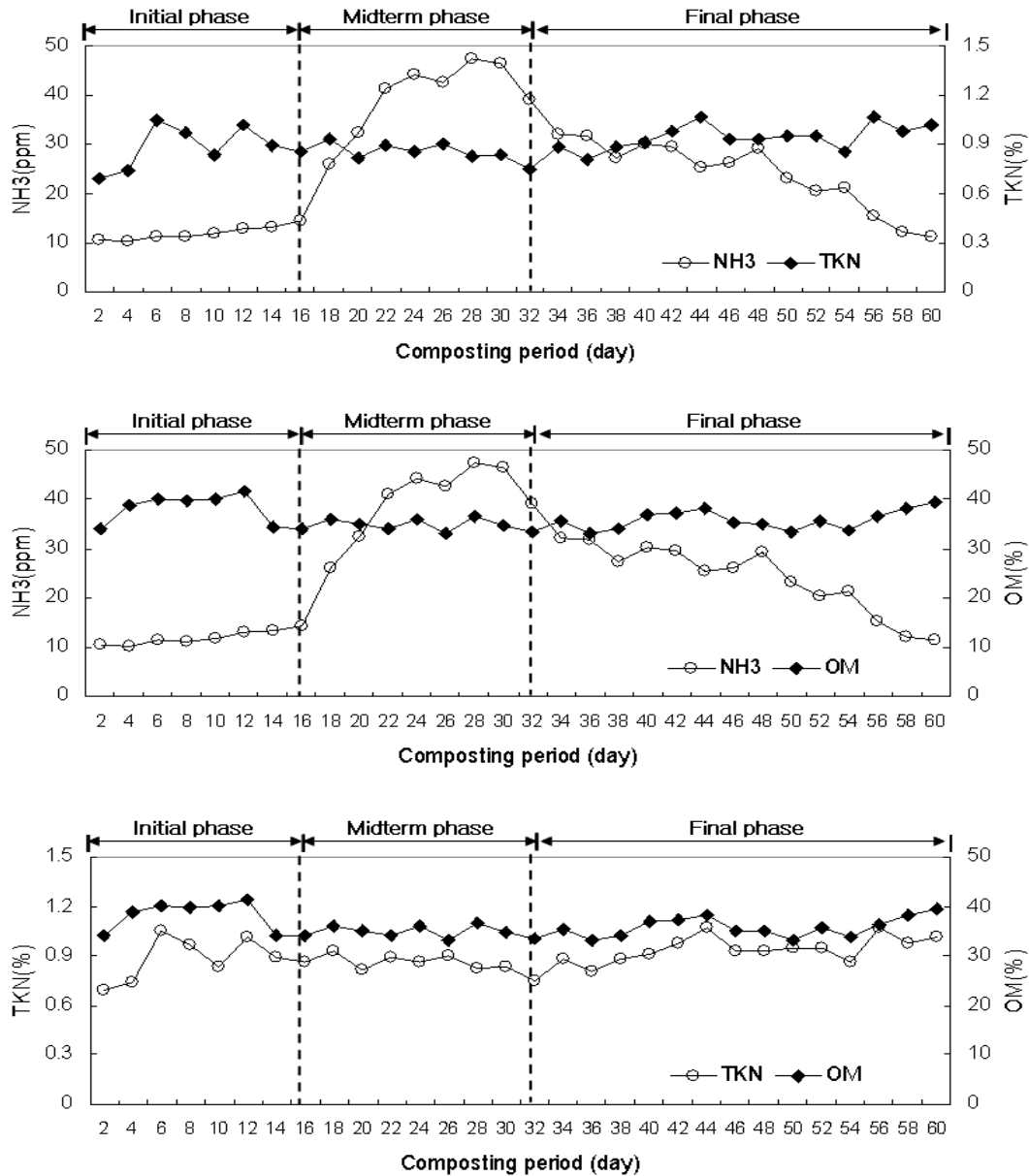
$$\text{발아지수} = (\text{발아율} \times \text{뿌리 생장율}) / 100$$

III. 결과 및 고찰

1. 퇴비 부숙 단계에 따른 암모니아 가스와의 화학적 인자(총질소와 유기물 함량)의 변동 추이

퇴비화 과정에 따른 암모니아 발생량을 산정하기 위해 퇴비의 부숙 상태를 기준으로 구분하였다. 퇴비의 부숙도를 평가하는 방법으로 C/N비(Chanyasak 등, 1983; Morel 등, 1985), 유

기물 함량(Keller, 1961; Zhang 등, 1992), 부식화(Roletto 등, 1985), 질산태질소법(Spohn, 1978) 등 많은 화학적 지표가 제시되고 있으나, 본 연구에서는 생물학적 평가방법인 발아지수(Ger-



- * Initial phase : (germination index) < 70
- * Midterm phase : 70 < (germination index) < 100
- * Final phase : 100 < (germination index)

Fig. 1. Fluctuation pattern of ammonia emission and chemical indexes(TKN & OM) according to composting process.

mination Index, GI)를 기준으로 가축분뇨 퇴비화의 부숙 정도를 초기, 중기 및 말기로 분류하였다. Zucconi 등(1981)은 발아지수 값이 50 이상이면 퇴비로서 사용이 가능하며 80 이상일 때는 완숙퇴비라고 하였으나, Bernal 등(1998)은 발아지수가 50 이상이면 식물독성(phytotoxicity)이 없는 퇴비라고 하였으며, 장 및 임(1994)은 80 이상일 때를 완숙퇴비로 간주하여 기존의 연구자들에 따라서도 차이가 있으며 일률적인 기준을 적용하기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 전술한 연구내용을 참고하여 발아율 뿐만 아니라 상대적 뿌리 생장율도 고려하여 부숙 정도를 구별하였는데, 발아지수 70 이하를 부숙 초기, 100 이하를 부숙 중기, 그 이후를 부숙 완료된 퇴비로 분류하였다(<Fig. 1> 참조).

퇴비화 초기는 퇴비원료 투입 후 16일 경과 후(8번째 시료)로서 이 시기에 암모니아의 발생 농도는 10~15 ppm 수준이었고, 총 질소와 유기물 함량은 각각 0.6~1.2%와 30~40%의 범위를 나타내었다. 퇴비화 진행에 따른 각 시료의 암모니아 농도와 유기물 함량의 변화 양상은 큰 차이가 없었으나, 암모니아 발생에 직접적인 영향을 주는 총 질소 함량은 일정한 증감의 경향없이 변이가 상대적으로 높았다. 한편, 축분의 초기 pH는 약 8.2 였다가 이 기간 동안 pH가 계속 감소되어 약 5.2까지 저하되는 현상이 관찰되었는데, 이는 퇴비더미내 혐기조건으로 인한 유기산 생성에 의한 것으로(Inbar 등, 1990; Epstein, 1997) pH의 저하와 불충분한 산소 공급은 질소를 포함한 유기물 분해 촉진 미생물군의 활성 능력을 억제시키는 요인으로 작용한 것으로 생각된다. 따라서 퇴비화 초기에는 암모니아 발생 근원인 총 질소와 유기물 함량 보다는 pH 저하가 암모니아의 대기 중 방출을 중기나 후기보다 상대적으로 저감시킨 주요 인자라 판단된다.

퇴비화 중기는 퇴비원료 투입 후 16일 이후부터 32일(16번째 시료) 되는 날까지로서 이 시기에 암모니아는 최대 50 ppm에 가까운 농도를 보였고, 총 질소와 유기물 함량은 각각 0.7~1.0%와 33~38%의 범위를 나타내었다. 암모니아 농도의 경우 시간 경과에 따라 계속 증가하

는 현상이 관찰된 반면, 총 질소와 유기물의 함량의 변이차는 크지 않았으나 초기의 함량 비율에 비해 낮아진 것으로 분석되었다. 퇴비내 유기물이 함유하고 있는 질소는 펩티드 결합으로 이루어진 아미노산의 구성 성분으로 탈아미노화(deamination) 반응에 의해 분해되어(Zhu 등, 1998) 퇴비 부숙이 가장 활발히 진행되는 이 시기에 토착 미생물의 영양원으로 이용된다. 그러나 퇴비내 총 질소 감소율에 비해 암모니아의 급격한 증가는 질소 성분이 미생물의 동화작용 보다는 이화작용에 의해 이용되었을 것이라 사료된다.

퇴비화 후기는 32일 이후부터 실험 마지막 날인 60일까지로서 이 시기에 암모니아의 농도는 경시적으로 감소하는 추세를 나타낸 반면, 총 질소와 유기물 함량은 일정한 증감 변화 양상을 보이지 않는 것으로 관찰되었다. 하지만 탄질율(C/N ratio)은 부숙이 진행될수록 감소되어 Kissel 및 Henry(1992)가 보고한 퇴비화시 암모니아 방출량의 감소가 탄질율(C/N ratio) 증가에 기인한다는 결과는 퇴비화 초기에만 해당되는 것으로 판단된다.

한편 pH의 경우 퇴비화 중기부터 후기까지의 기간 내에서는 7.3~7.8 범위내에서 증감의 변화없이 일정하게 유지되어 퇴비화 초기의 pH 저하 현상이 관찰되지 않아 이 시기에는 암모니아 방출량에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.

2. 통계적 기법을 적용한 퇴비 부숙 단계별 암모니아 발생량 산정

퇴비 부숙 단계와 퇴비의 이화학적 인자에 따른 암모니아 발생량 산정은 <Table 1>에 제시한 바와 같다. 우선上記의 통계 모형 방정식을 적용하기 위해 시료에서 채취한 암모니아 농도를 식 (2)를 이용하여 원단위 발생량($\ell / \text{min} \cdot \text{g}$)으로 전환하였다. 통계 분석 결과, 암모니아 발생량이 가장 높았던 퇴비화 중기시 총 질소와 유기물 함량의 계수 값이 가장 높았으며, 다음으로 후기, 초기 순이었다. 퇴비화 초기보다 후기에 계수 값이 높게 나타난 이유는

Table 1. Statistical estimation of ammonia emission according to composting phase

Composting phase	Statistical equation model : $Z^1 = \alpha + \beta X^2 + \gamma Y^3$			
	Coefficient			
	α	β	γ	p-value
Initial	0.007*	0.219	0.081	0.086
Midterm	0.035	2.246	1.485*	0.143
Final	0.004*	1.354**	0.461*	0.032

1 : Z – Ammonia emission in sample ($\ell / \text{min} \cdot \text{g}$)

2 : X – Total Kjeldahl Nitrogen in sample (TKN, %)

3 : Y – Organic matter in sample (OM, %)

* : $p < 0.05$, ** : $p < 0.01$.

경시적으로 암모니아의 발생량 감소가 후기에 관찰되었으나, 큰 변동없이 낮은 농도로서 암모니아가 발생했던 초기보다 평균적으로 높았기 때문이라 판단된다. 각 단계별 암모니아 산정 모형 방정식에 대한 통계적 유의성은 퇴비화 후기에는 입증되었으나($p < 0.05$), 초기와 중기의 경우에는 유의하지 않은 것으로 분석되었다($p > 0.05$). 또한 독립 변수에 대한 계수와 상수의 통계적 유의성도 퇴비화 후기에는 관찰되었으나($p < 0.05$), 초기와 중기에는 유의성이 없는 것으로 입증되었다($p > 0.05$). 이는 시료 수의 차이에 기인한 것으로 발아지수를 근거로 퇴비화 초기와 중기의 경우 2일에 한 번씩 채취하여 총 8회의 시료를 가지고 측정할 반면, 후기는 총 14회의 시료를 대상으로 실험 분석하였다. 따라서 향후 연구에서는 암모니아 산정 모형에 대한 통계적 유의성을 높이기 위해서 시료 채취 간격을 줄이거나 반복수를 늘이는 방법으로 통계 추측의 개연성을 확보해야 할 것이라 사료된다. 통계적 모형 방정식을 통해 산출된 암모니아 발생량은 원단위 개념으로 초기에 투입되는 퇴비 원료의 양을 곱하면 퇴비화 시스템에서 발생하는 총 암모니아 발생량을 추정할 수 있으며, 암모니아 제거를 위해 적용되는 전체 환기율을 퇴비화 단계에 맞추어 경제적으로 설정할 수 있는 장점을 기대할 수 있다. 본 연구는 밀폐형 적층식 축분 퇴비화 시스템을 대상으로 하였으나, 다른 유형의 축분 퇴비화 시스템에서도 그것에 적합한 시료의 채취 및 분석 방법이 객관적으로 제안된다면 충

분히 활용될 수 있을 것이라 판단된다.

IV. 요약

본 연구는 축분 퇴비화시 대기 중으로 배출되는 암모니아 발생량을 퇴비 부숙 단계에 따라 예측할 수 있는 통계적 모델을 제안하는 데 있다. 퇴비의 발아지수를 근거로 퇴비화 단계를 초기, 중기 및 후기로 구분하였으며, 퇴비화시 암모니아 발생에 기여하는 독립변수로 총 질소와 유기물 함량을 선정하였다. 암모니아 농도는 퇴비화 초기에 10 ppm 정도의 낮은 농도를 보이다가 중기에 50 ppm까지 증가한 후 후기에는 경시적으로 감소하여 다시 10 ppm 정도로 저감되는 경향을 보였다. 총 질소와 유기물의 함량은 퇴비화 전체 기간 동안 각각 0.6~1.2%, 30~40%의 범위를 보였으며, 퇴비화 중기에 약간 저감되는 현상이 관찰되었으나 전반적으로 일정한 증감 변화 양상은 나타나지 않았다. 통계적 기법을 적용한 퇴비 부숙 단계별 암모니아 발생량 산정에 있어 암모니아 농도가 가장 높게 나타난 퇴비화 중기에 독립변수에 대한 계수가 가장 높은 값을 나타내었고 가장 낮았던 퇴비화 초기에 가장 낮은 값을 보였으나, 통계적 유의성은 없었다. 퇴비화시 암모니아 발생량 예측 모델을 통계적으로 유의한 수준으로 제안하기 위해서는 많은 수의 시료 채취 및 분석 자료 연구가 향후 수행되어야 할 것이다.

V. 인 용 문 헌

1. Bernal, M. P., Paredes, C., Sanchez-Monedero, M. A. and Cegarra, J. 1998. Maturity and stability parameters of composts prepared with a wide range of organic wastes. *Bio-resource Technology*. 63:91-99.
2. Chanyasak, V., Katayama, A., Hirai, M. F., Mori, S. and Kubota, H. 1983. Effects of compost maturity on growth of komatsuna in Neubauer's pot. *Soil Science Plant Nutrition*. 29(3):251-259.
3. Devos, M., Patte, F., Rouault, J., Laffort, P. and Gemert, L. J. 1990. Standardized human olfactory thresholds. Oxford University Press, New York.
4. Dewes, T. 1995. Nitrogen losses from manure heaps: Nitrogen leaching in ecological agriculture. A B Academic Publishers, Great Britain, 309-317.
5. Elzing, A. and Monteny, G. J. 1997. Modeling and experimental determination of ammonia emission rates from a scale model dairy-cow house. *Transactions of the ASAE*. 40:721-726.
6. Epstein, E. 1997. The science of composting. Technomic publishing Inc., PA. USA.
7. Haug, R. T. 1986. Composting process design criteria: part III-aeration. *Biocycle*. 27(9):53-57.
8. Inbar, Y., Chen, Y. and Hadar, Y. 1990. Humic substances formed during the composting of organic matter. *Soil Science and Society American Journal*. 54:1316-1323.
9. Keller, P. 1961. Methods to evaluate maturity of compost. *Compost Science*. 2(7):20-26.
10. Kissel, J. C. and Henry, C. L. 1992. Emissions of volatile and odorous organic compounds from municipal waste composting facilities: A Literature Review. The National Composting Council, Alexandria, VA.
11. Miller, F. C., Macauley, B. J. and Harper, E. R. 1991. Investigation of various gases, pH and redox potential in mushroom composting phase stacks. *Australian Journal of Experimental Agriculture*. 31:415-425.
12. Morel, J. L., Colin, F., Germon, J. C., Godin, P. and Juste, C. 1985. Methods for the evaluation of the maturity of municipal refuse compost, pp. 56-72. In J. K. R., Glasser (ed). *Composting of Agricultural and Wastes*. Elsevier Applied Science Publisher., New York.
13. Olesen, J. E. and Sommer, S. G. 1993. Modeling effects of wind speed and surface cover on ammonia volatilization from stored pig slurry. *Atmospheric Environment*. 27:2567-2574.
14. Roletto, E., Barberis, R., Consiglio, M. and Jodice, R. 1985. Chemical parameters for evaluating compost maturity. *Biocycle*. 26(2):46-47.
15. SAS. 1999. User's Guide: Statistics, version 6.0 Editions, SAS Inst., Inc., Cary, NC. USA.
16. Sommer, S. G., Olesen, J. E. and Christensen, B. T. 1991. Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. *Journal of Agricultural Science*. 117:91-100.
17. Spohn, E. 1978. Determination of compost maturity. *Compost Sci/Land Util*. 19(3):26-27.
18. Tiquia, S. M. and Tam, N. F. Y. 1998. Elimination of phytotoxicity during co-composting of spent pig-manure sawdust litter and pig sludge. *Bioresource Technology*. 65:43-49.
19. Zhang, L., Chuang, F. and Cole, M. A. 1992. A simple chemical assay for estimating compost maturity. Poster presented in ASA Annual Meeting. Minneapolis. MN.
20. Zhu, J., Riskowski, G. L. and Torremorell, M. 1998. Volatile fatty acids as odor indicators in swine manure – A Critical Review. *Transactions of the ASAE*. 42(1):175-182.
21. Zucconi, F., Pera, A., Forte, M. and de Bertoldi, M. 1981. Evaluation toxicity of immature compost. *Biocycle*. 22:54-57.
22. 강항원, 박향미, 고지연, 이재생, 김민태, 강위금, 이동창, 문현팔. 2001. 계분톱밥 퇴비화시 악취발생의 최소화를 위한 적정 공기주입율 구명. *한국환경농학회지*. 20(4):225-231.
23. 김기연, 최홍림, 김치년. 2002. 한강유역 축분퇴비공장 근로자의 작업환경 만족도 평가. 44(2):

- 261-270.
24. 김기연, 최홍림. 2001. 한강유역내 축분퇴비공장 악취발생에 대한 현장평가. 동물자원과학회지. 43(6):1005-1018.
25. 노동부. 1998. 화학물질 및 물리적인자의 노출기준(고시 제1997-65호).
26. 농업과학기술원. 1997. 비료의 품질검사 방법 및 시료채취기준. 농촌진흥청. pp. 3-78.
27. 농업과학기술원. 1988. 토양화학분석법. 농촌진흥청.
28. 장기운, 임재신. 1994. 유기성 폐자원을 이용한 퇴비제품화 요건. 유기성폐기물자원화. 2(1):121-134.
29. 홍지형. 2003. 가축분뇨 퇴비 품질기준 및 퇴비화 악취 저감기법. 축산시설환경학회지. 9(1):57-60. (접수일자 : 2005. 3. 4. / 채택일자 : 2006. 1. 4.)