

專業養畜農家를 위한 축분뇨처리시스템개발 - 모형실험 -

최홍림*, 김현태*, 정영륜**

(* 경상대학교 농공학과, ** 경상대학교 미생물학과)

A Model Study on Development of Animal Wastes Treatment System for a Full-time Farm Household Raising Livestock

Choi Hong-Lim*, Kim Hyun-Tae*, Chung Young-Ryun**

*Dept. of Agric. Engr. **Dept. of Microbiology, Gyeongsang National University, Chinju 660-701

Abstract

A sundry system is one of popular systems for composting livestock manure, of which main benefit is to utilize unlimited, clean, and free solar radiation if available. A sundry system with a composter of two horizontal screw-type concrete ducts at different height, was constructed and operated for four days for each test in May, 1993, to evaluate its composting performance.

Four treatments of the mixture ratio of swine manure and saw dust (manure:sawdust=1:1.25, 1:1, 1:0.7, 1:0.5) were implemented to evaluate the effect of the mixture ratio on degradation of the composting materials of a sundry system with a screw-type composter. Maximum temperature of the composting materials was over 50°C at D1 or D2 (one or two days after operation starts) for composting materials was over 50°C at D1 or D2 (one or two days after operation starts) for each test. Mean C/N ratio and water contents of the materials were reduced by more than 15 and 20%, respectively. Microbial density of each test showed a typical variation with the lapse of the composting time. Mesophilic microorganism seemed to play more important role on degradation of the materials than thermophilic.

A sundry system with a screw-type composter can be considered as a feasible system on basis of maturity data. The conclusion was completely reverse from that of Choi et al.⁷⁾, although both adopted a sundry system. A further study is recommended to pursue the cause of better performance of the screw-type composter, whether it was due to affirmative weather or more efficient composter.

키워드 : 비료화, 添空劑, 부숙물, C/N비, 축분뇨

Key words : composting, bulking agents, composting materials, C/N ratio, animal wastes

I. 서론

1. 연구의 배경

Table 1은 1992년 12월 현재 사육두수를 기준으로 우리 나라에서 하루 발생하는 축종별 BOD기준 오염물질량을 나타낸 것이다. Table 1에서 보듯이 오염물질의 발생량은 京畿道, 慶北, 忠南, 慶南 순으로 많은 것으로 나

타났으며, 단위면적당 발생량도 경기도가 가장 높으나 그 외 지역은 총발생량과 일치하지는 않는다. 이는 養畜이 특정지역에 집단으로 이루어지고 있기 때문에 道別 단위 면적당 BOD발생율을 오염의 심각성도와 연관지어 해석하는 것은 바람직하지 않다. 축분뇨의 오염물질발생

량을 축종별로 살펴보면 소 43%, 돼지 40%, 닭 17%의 순으로 나타나고 있으며, 분뇨별로 살펴보면 全 BOD의 95%를 糞成分이, 5%가 尿成分이 차지한다. 그러나 尿는 處理容積이 糞보다 크고, 액체이므로 실제 현장에서는 糞보다 尿를 管理하는데 어려움이 많다.

Table 1. Effective BOD effluent by province¹⁾

Unit : ton/day

| Livestock \ Province | Dairy & Beef Cows | Swine | Poultry | Total | Por-portion (%) | U. P. R ²⁾ (kg/km ² .d) |
|----------------------|-------------------|---------|---------|---------|-----------------|---|
| Gyeonggi | 329.5 | 239.1 | 151.2 | 712.6 | 28.0 | 61.0 |
| Gangwon | 83.4 | 39.2 | 17.0 | 139.6 | 5.5 | 7.5 |
| Choongbuk | 67.9 | 41.0 | 18.2 | 127.1 | 5.0 | 7.9 |
| Choongnam | 110.5 | 184.6 | 55.2 | 350.3 | 13.8 | 17.1 |
| Jeonbuk | 82.0 | 76.9 | 45.8 | 204.7 | 8.1 | 25.4 |
| Jeonnam | 148.8 | 82.6 | 22.9 | 254.3 | 10.0 | 25.7 |
| Gyeongbuk | 190.9 | 125.7 | 72.9 | 389.5 | 15.3 | 19.6 |
| Gyeongnam | 149.3 | 118.5 | 42.0 | 309.8 | 12.2 | 25.2 |
| Cheju | 21.1 | 26.4 | 5.0 | 52.5 | 2.1 | 28.8 |
| Total | 1,085.8 | 1,024.4 | 430.2 | 2,540.4 | 100.0 | |

주) 1) Effective BOD effluent : 실제 BOD 부하량으로 수질에 직접 영향을 주는 오염물질의 양으로 축분뇨처리 시설을 한 경우 처리효율을 100%로 가정하여 처리량을 발생소량에서 뺀 BOD량을 말한다.

2) U. P. R.(단위면적당 발생량) = 총 BOD발생량/도별 면적

환경처 통계¹⁾에 의하면 소(乳牛, 韓牛, 肉牛 등)에 의한 총오염물질 발생량의 약 33%가 미처리되며, 돼지의 경우 약 28%가 미처리된다고 보고하였다. 이를 BOD량으로 환산하면 하루 약 644톤이 아무런 처리없이 湖沼에 유입 또는 농지에 환원됨을 뜻한다. 소의 경우 법정대상 농가 (「오수·분뇨 및 축산폐수의 처리에 관한 법률」에 의한 신고대상규모 이상)에서 발생하는 총BOD량이 發生소량의 약 5%, 돼지의 경우 약 52% 정도 밖에 되지 않을 정도로 양축농가가 영세하다. 畜牛農家の 약 95%, 養豚農家の 약 48%가 법적규제대상이 아니며, 법규제대상 농가의 축산폐수시설이 설치만 되어 있으면 처리효율을 100%로 가정하였기 때문에 약 640여톤의 미처리 BOD량은 과소평가한 값으로 실제 미처리량은 이보다 훨씬 많을 것으로 판단된다.

농촌진흥청²⁾에 의하면, 우리나라 토양의 유기물함량

은, 논외의 경우 1964~1968년에는 2.6%이었으나 1980~1988년에는 2.3%로 약 10% 정도 감소하였으며, 밭의 경우는 미국과 일본의 4.0~5.0%의 절반 이하에 머무르고 있다. 이러한 유기물의 감소는 작물재배 때 값싸고 施肥에 편리한 화학비료를 장기적으로 과다하게 사용하여, 퇴비 등과 같은 유기질비료의 사용량 감소에서 비롯된 것으로 판단된다. 토양중의 유기물함량의 저하는 토양의 單粒化와 酸性化를 가속시켜 장기적으로 토양의 생산효율을 저하시키는 결과를 초래한다. 또한 장기적으로 과다하게 사용된 화학비료는, 灌溉水나 토양중으로 유출되어 과잉질소, 인산원의 형태로 湖沼에 유입되어 富營養化(eutrophication) 현상을 일으켜 수질을 악화시킨다.

농촌경제연구원³⁾에 의하면 1989년을 기준으로 가축분뇨를 비료의 가치로 환산하면 매년 약 300여만톤에 이르며, 이는 연간 850여만톤의 화학비료 생산량에 상당하는

양이라고 보고하였다. 만약, 미처리 축분노를 添孔劑 (bulk agents)와 함께 퇴비화하여 농지에 환원하면, 무단 방류로 인한 수질오염을 줄일 수 있을 뿐 아니라 화학 비료 대체효과를 가지며, 토양의 理化學的 특성을 개선하는 효과도 있다. 그러므로, 최근 養畜이 집단화, 대규모화, 고밀도화하면서 발생하는 다량의 축분노를 퇴비화하는 효과적인 처리시스템개발에 대한 연구가 활발하다.

2. 연구의 목적

본 연구는 專業 養畜農家를 위한 獨立的 축분노 처리시스템을 개발하기 위한 기초 모형실험연구로서, 선택한 screw형 부숙조, sundry 시스템의 혼합슬러지(돈분노 + 톱밥) 부숙성적을 평가하기 위해서 1993년 5월중 약 4일간씩 다음과 같은 세부항목의 실험을 수행하였다.

- 1) screw형 부숙조, sundry 시스템의 부숙성적평가
- 2) 혼합슬러지(부숙물)의 혼합비가 부숙도에 미치는 영향
- 3) 혼합슬러지의 온도와 실내온의 差가 혼합슬러지의 부숙도에 미치는 영향
- 4) 혼합슬러지의 미생물 密度의 경시적 변화분석
- 5) Dewar에 의한 부숙도 유의성 검토

II. 축분노처리시스템

1. 부숙(퇴비화)시스템

본 연구에서는 축분노처리의 한 방법으로 유기물질의 회수를 위해서 好氣性(aerobic) 미생물을 이용한 비료화 (composting)를 선택하였으며, 이의 화학반응식은 (1)과 같다. 이 반응에서 총에너지의 30~80%가량이 미생물 형성에 소모되고 나머지는 이산화탄소, 물, 열로 배출되므로 실제 에너지 회수가 불가능하다. 부숙화과정을 통하여 얻은 안정화된 유기물질을 토양에 환원하면, 경제적인 측면에서 뿐만아니라 토양의 물리성 개선 및 비료효능의 向上 측면에서도 효과적인 처리방법으로 알려져 있다. Fig. 1은 일반적인 퇴비화시스템의 공정체계를 나타낸 것이다.

부숙시스템 (composter)을 외형적으로 분류하면 크게 反應槽시스템 (reactor)과 非反應槽시스템 (non-reactor)으로 나눈다. 반응조 시스템이란 부숙물을 어떤 형태의 용기에 담는 시스템을 말하며, 그렇지 않는 시스템을 비반응조 시스템이라 한다. 대표적인 비반응조시스템으로는 교반여부에 따라 퇴비단 (windrow or agitated solids bed) 시스템, 靜的 固床시스템 (static solids bed) 등으로 분류하며, 반응조시스템으로는 반응조의 회전여부, 반응조의 기하학적 형태 및 교반방법 등에 따라 垂直流 반응조시스템 (vertical flow reactor systems)과 수평류 반응조시스템 (horizontal flow reactor systems)으로 분류한다. 시스템에 관한 보다 상세한 자료는 Haug(1980)⁵⁾을 참조할 수 있다.

톱밥발효축사는 정부(환경처, 농림수산부 등)에서 권유하고 있는 축분노처리시스템으로서 가축분뇨가 지속적으로 발생하고, 살포농지가 제한되어 있는 우리나라와 일본의 양축농가에서 특이하게 채택하고 있는 시스템이다. 1988년 12월 정부에서는 톱밥발효돈사를 축산폐수 정화시설로 인정하였으며, 1992년 7월에는 톱밥발효축사형 및 톱밥발효시설형의 표준설계도면을 제시하였다. 그러나 현장조사결과⁶⁾ 시설 후 5년을 분기점으로 채산성이 악화되며, 특히 여름철 톱밥床上에서 발생하는 부숙열로 인하여 도체기간이 在來床보다 20여일 길어져, 톱밥발효 양축농가의 민원이 잦아짐에 따라 일선 행정당국에서도 톱밥발효축사의 확대보급추진정책에서 양축농가의 자유의사에 맡기는 유보적인 태도를 취하고 있다 (Table 2 참조).

2. 시스템의 선택

Table 3의 분석과 같이, 시스템마다 장단점이 있기 때문에, 우리나라 축산환경에 맞는 최선의 선택을 하기 위해서는 몇 가지 기준을 세울 필요가 있다. 우선, 오염원의 확산공간은 가능하면 적은 범위에서, 확산시간은 가능하면 짧은 범위에서 오염원을 처리해야 한다. 둘째, 시스템규모는 가능한한 소규모이면서 작동효율은 적정수준에 이르러야 하며, 셋째, 이를 경제적(초기투자 및 운영비)으로 수용할 수 있어야 하며, 넷째, 시스템을 가능한한 밀폐하여 기초 정주권역의 환경에 부담이 되지 않아야 한다.

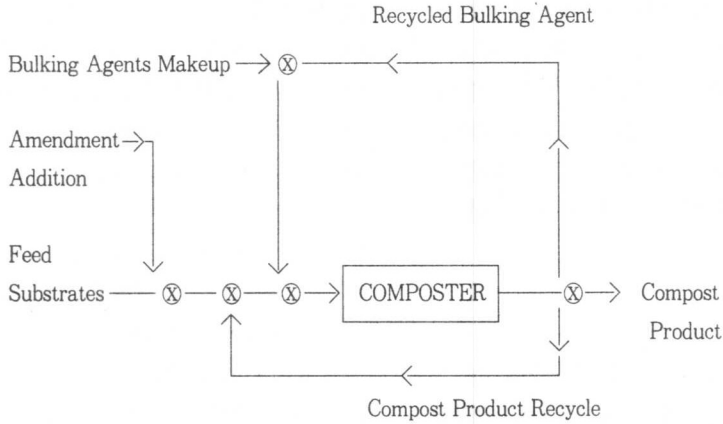
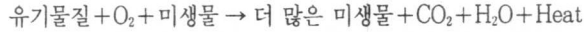


Fig. 1. Generalized diagram for composting system

Table 2. 톱밥발효돈사의 장단점 비교

| 장 점 | 단 점 |
|--------------------------------|--|
| ○ 축산폐수로 인한 수질오염예방 및 악취 제거효과 | ○ 초기투자비용(톱밥, 발효균, 축사 増改築費 過多) |
| ○ 축산폐수 처리의 노동력 절감 | ○ 경영이 미숙할 때는 재래식 돈사보다 경제성 저하 |
| ○ 肥肉일수 단축으로 생산성 향상(비육일수 150여일) | ○ 톱밥의 혼합기 구입 또는 혼합작업을 노동력투입으로 인한 추가비용 부담 |
| ○ 육질개선효과 | ○ 먼지 등으로 호흡기질환 발병 증가 |
| ○ 양질의 유기질비료 생산 | ○ 여름철 톱밥발효층에서 나는 부숙열과 태양복사열로 인한 熱害 심각 |
| ○ 발병율 감소 | ○ 외국산 톱밥의 경우 나무결이 예리해 피부질환 유발 |
| ○ 돼지가 톱밥을 먹기 때문에 상대적 사료비 절감 효과 | ○ 발바닥에 군살이 붙고, 발톱이 길어지며 관절, 뒷다리 굵는 등 신체적인 변화 |

앞에서 언급한 선행조건에 맞는 시스템을 검토한 결과, 비반응조 시스템은 초기 시설비는 적게 드나, 부숙효율이 낮아 장기간 부숙을 진행되며, 반응조 시스템은 부숙효율은 높으나 초기 시설비가 과다하여 전업양축농가들이 쉽게 수용할 수 없는 시스템이다. 또한 톱밥발효축사는 시설 후 5년을 分岐點으로 경제성에 대한 평가가 엇갈리기 때문에 본 연구에서는 이 시스템 채택의 가능성을 배제하였다. 그리고 책임연구원이 수행한 형 bin부숙조의 sundry시스템 퇴비화효율에 관한 연구⁷⁾ 결과, 부숙에 걸리는 기간이 길며, 양이 많지 않을 때는 부숙효율도 좋지 않아, 중소양축농가에게는 적합하지 않는 것으로 판단된

다. 그러므로 본 연구에서는 그린하우스에 screw 교반기를 가지는 콘크리트 원형 덕트부숙조를 설치하여 수동적으로 태양복사열을 이용할 수 있는 변형 sundry시스템을 본 연구의 부숙시스템으로 채택하여 이의 퇴비화 효율을 평가하였다.

III. 재료 및 방법

1. 실험장치의 설계 및 시공

본 연구의 축분노처리시스템은 비닐하우스를 보호시설

물한 bin부숙조의 sundry시스템이며, 관련연구⁷⁾에서 혼합슬러지의 부숙에 영향을 미치는 환경변수의 적정범위를 적용하였다. 이중 특히 부숙속도가 부숙물의 온도환경(부숙물의 자체온도 뿐만 아니라 주위온도)에 크게 영향을 받는다는 사실을 알았다. 그러므로 외기온이 낮은 겨울철에 보온을 위하여, 길이가 약 10m, 폭이 약 7m, 양측벽 높이가 1.2m, 지붕의 높이는 2.8m인 반원형 單棟

비닐하우스를 약 0.12mm 두께의 홀겹비닐로 피복하였다. 축분뇨의 부숙기간중 발생하는 악취의 제거나 쾌적한 작업환경을 유지하기 위해서 입구 맞은 편 벽에 두 개의 환기팬을 설치하였다. Fig. 6와 Fig. 7은 비닐하우스내 screw형 교반기가 설치되어 있는 콘크리트 원형부숙조의 평면도 및 단면도를 나타낸 것이다.

Table 3. Comparison between various composting processes when used for sludge composting⁵⁾

| Items \ System Type | Nonreactor Systems | | Reactor Systems | |
|------------------------------|--|--|--|---|
| | Windrow | Aerted Pile | FA + AG ¹⁾ | FA + No AG ²⁾ |
| Capital Cost | Low | Low/v. w. c. ³⁾ | High | High |
| Operating Cost | Low | High | Low | Low |
| Land Requirement | High | High | Low/v. w. c | Low/v. w. c |
| Control Aeration | Limited/v. w. c | Complete | Completed | Completed |
| Senstive to Waether | Senstive | Insenstive | Insenstive | Insenstive |
| Control of Odor | Bad | Bad | Good | Good |
| Potential Operating Problems | Odor/ Low Temp./ Susceptible to Weather | Mixing & Screening/ Anaerobic/ Pathogens/ | High Flexibility/ Mechanically Complex/ | Compaction or Bypassing/ Mechanically Complex/ |

- 1) FA + AG : Forced Aeration and Agitation
- 2) FA + No AG : Forced Aeration and No Agitation
- 3) v. w. c. : Variable with Condition

Fig. 2와 Fig. 3과 같이, 축분뇨를 처리하기 위한 부숙조는 지름이 25cm이며, 길이 300cm인 두 개의 원형 덕트로 구성되어 있으며, 덕트의 원형단면이 완전 폐쇄되어 있는 것이 아니라 윗면 약 15cm가 비닐하우스 실내에 노출되어 낮 동안 태양복사열을 충분히 받을 수 있도록 설계하였다. 하부 원형부숙조(덕트)의 높이는 바닥에서 약 30cm, 상부 원형부숙조(덕트)는 약 60cm로, 두 부숙조의 높이를 달리하였다. 이는 상부 원형부숙조에서 screw형 교반기에 의해서 혼합 운반되는 부숙물을 重力에 의해 자동적으로 하부 원형부숙조로 운반되도록 하기 위함이다. 기본적으로 축분뇨는 주로 中溫性(mesophilic), 高溫性(thermophilic) 미생물에 의해서 부숙이 효율적으로 진행되므로 부숙물을 적정온도로 유지하는 것이

중요하다. 본 실험에서 한 batch에 사용한 부숙물의 양은 약 0.2톤 정도로, 부숙 때 발생하는 부숙열로는 혼합슬러지 스스로 보온할 수 없으므로 기온이 높지 않은 겨울철이나 야간 또는 흐린 날의 부숙물 온도를 적절히 유지시켜 주기위하여 보조열원으로 연탄보일러를 설치하였다. 각 벽면과 바닥에는 부숙물의 열손실을 방지하기 위해서 두께 5mm의 styrofoam으로 斷熱處理 하였다. 혼합슬러지의 부숙을 가속시키기 위해서 교반을 통하여 부숙물을 공기에 많이 노출되게 하는 것은 필수적이다. Fig. 3의 screw형 교반기는 50mm강봉에 폭이 10cm, 두께가 3mm 되는 강판을 15cm 등간격으로 집착하였다. 400W의 용량을 가지는 모터에 D.C 감속모터를 부착하여 회전속도를 임의로 조절할 수 있도록 하였다.

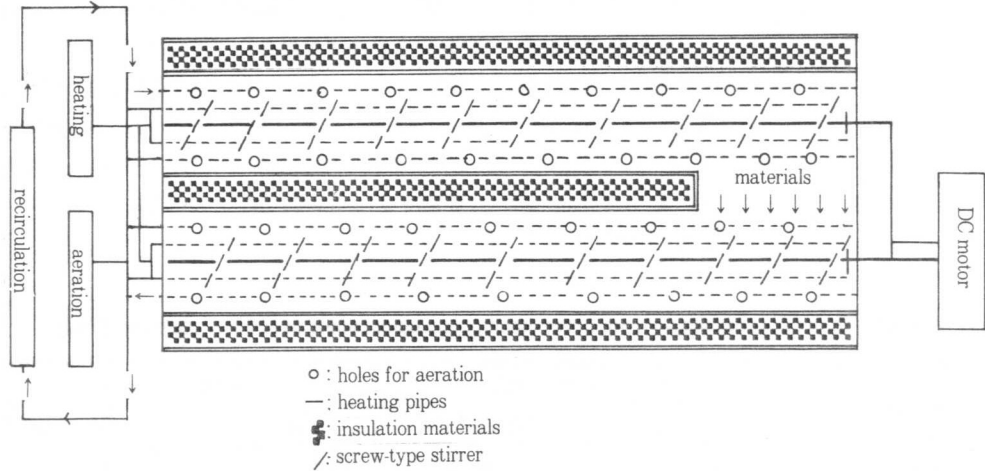


Fig. 2. Plane section of a reactor with two concrete ducts and multi-speed screw-type stirrers.

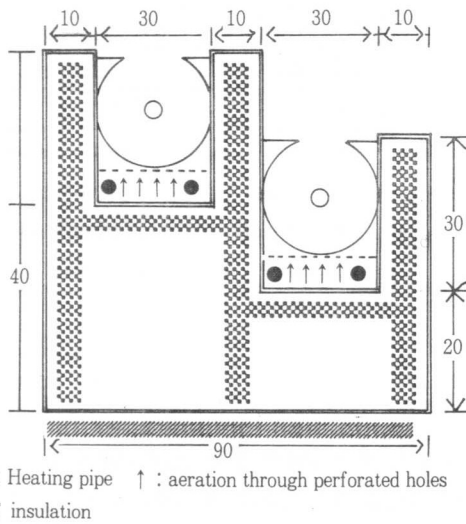


Fig. 3. Cross section of a reactor with two concrete ducts and multi-speed screw-type stirrers.

부속조의 각 원형부속조의 바닥에는 지름이 25mm의 PVC관을 각각 2개씩 매설하였으며, 각 PVC관에는 15cm마다 지름이 4mm인 천공을 뚫어 공기를 공급함으로써 혼합슬러지의 부속 때 好氣性분해가 가능하도록 하였다. 또한 screw에 의한 부속물의 이동을 원활히 하기 위해서 원형부속조의 내부를 함석으로 피복하였다.

2. 실험설계

축분뇨를 조기 유기질비료화를 위해서 제어해야 할 주요 이화학적 변수로는 부속물의 함수율(water content), 曝氣率(aeration rate), 부속물의 온도, C/N비, pH 등으로 알려져 있으며,^{9,10,11)} 이중 함수율은 혼합슬러지의 호기성 분해속도와 밀접한 관계가 있음을 관찰하였다.^{7,8)} 축분뇨와 같이 함수율이 80~95%에 이르면 호기성 미생물이 충분히 공기에 노출될 수 없기 때문에 혐기성상태로 되어, 슬러지의 유기질비료화의 목적을 달성할 수 없으므로 어떠한 형태든 축분뇨의 초기 함수율을 적정수준으로 낮추지 않으면 안된다. 현실적으로 가장 많이 쓰이는 방법은 상대적으로 함수율이 낮은 유기성 폐기물을 혼합재료로 이용하는 것이다. 혼합재료로는 톱밥, 왕겨, 벚짳 등이 있으며, 이중에서 톱밥은 왕겨나 벚짳에 비해서 수분흡수력이 강하고, SiO₂와 같은 난분해성 규산질을 포함하고 있지 않아, 축분뇨의 함수율 低下劑로서 상대적으로 우월한 것으로 판단되어 본 연구에서는 혼합재

로서 톱밥을 사용하였다. 그러나 톱밥가격 급등에 따른 톱밥사용의 경제성 문제와 藥害문제가 향후 톱밥을 수분 조절제로 사용하는데 장애요인이 될 것이다.

본 연구에서는 두 수준의 초기함수율과 두 수준의 혼합비(축분뇨 : 톱밥)의 조합실험을 Table 4와 같이 설계

하였다. 실제 측사에서 매일 배출되는 축분뇨의 양은 거의 일정하다고 가정하여, 축분뇨의 양은 150kg정도로 고정시키고, 이에 대한 톱밥의 양을 변화시켜 초기함수율을 조절하였다.

Table 4. Experimental Design

| TEST | TEST 1 | TEST 2 | TEST 3 | TEST 4 |
|-----------------------------|----------|--------|---------|---------|
| Mixture Ratio ¹⁾ | 1 : 1,25 | 1 : 1 | 1 : 0.7 | 1 : 0.5 |
| Water Content(%) | 65% | 68% | 70% | 73% |

주) 1) Mixture Ratio=mass of swine manure of 150kg : mass of saw dust

3. 실험방법

1) screw형 원형부숙조에서 혼합슬러지(부숙물)의 초기부숙을 위한 초기 함수율의 적정범위와 배합비를 결정하기 위하여 Table 4와 같이 실험설계를 하였다.

2) 실험 1은 함수율이 80%, C/N비가 약 20~30인 돈분뇨에 함수율이 20%, C/N비가 약 650~700인 톱밥을 혼합하여 함수율이 65%인 부숙물을 Fig. 2의 상부 원형덕트 위에 혼합조를 만들어 일정량을 계속해서 투입되도록 하였다. 덕트내로 투입된 부숙물은 screw를 통하여 하부 덕트로 이동되며, 덕트의 양측벽 천공을 통하여 공기를 공급하므로써 호기성 분해가 가능하도록 하였다.

3) 실험 2는 함수율이 83%, C/N비가 약 20~30인 돈분뇨를 함수율이 20%, C/N비가 약 650~700인 톱밥을 혼합하여 부숙물의 함수율이 약 68%되게 하였다. 그 밖의 조건은 실험 1과 같이 수행하였다.

4) 실험 3과 실험 4는 Table 4의 실험설계와 같이 부숙조건을 맞추었으며, 다른 조건은 실험 1과 실험 2의 조건과 동일하다.

5) 위의 실험 모두 청명일 낮에 과도한 복사열과 축분뇨에서 발생하는 악취의 집적을 제거하기 위하여 약 50m³/min 용량의 팬을 그린하우스의 양측벽에 설치하여 환기시켰다. 환기는 상대습도가 100%에 가까운 수증기 포화상태인 실내습도를 떨어뜨려 濕空氣學的으로 혼합슬러지의 함수율 저하를 가속시키는 효과도 있으므로 혼합부숙물의 온도저하에 영향을 미치지 않는 범위에서 최대

한 실시하였다. 그리고 非淸明日이나 淸明日 밤에는 약 1m³/min 정도의 최소환기율을 적용하여 혼합부숙물과 실내온도 온도저하를 최소화하였다. 또한 혼합부숙물에서식하는 호기성 미생물의 활동 및 증식을 활성화하기 위해서 연탄보일러를 이용하여 시스템 바닥면의 온도가 약 40°C정도 되게 보조열원을 공급하였다.

한편 부숙물의 운반은 screw형 교반기를 이용하여 약 6rpm 정도로 부숙물이 입구에서 출구까지 이동하는데 약 1시간 정도 되게 하여 교반하였다. 출구로 배출된 부숙물은 다시 입구에 투입하는 재순환 과정을 72시간 반복하였다. 야간에는 보호구조물에 의한 태양복사열이 없기 때문에 부숙물의 자체온도를 유지하기 위하여 상부 덕트위의 입구쪽의 저장조에 저장하였다.

6) 본 연구에서는 혼합부숙물의 온도, C/N비 및 미생물의 밀도를 부숙정도의 판별변수로 선택하였다. 경시적 혼합부숙물의 온도변화는 자동온도 계측장치를 이용하여 매시간 측정하였으며, C/N비와 함수율은 매일 시료를 약 20g씩 채취하여 측정하였다. 실제 유기물의 모든 탄소와 질소가 퇴비화에 관여하는 미생물의 질소원이나 탄소원으로 다 이용되는 것은 아니므로 부숙물중 총탄소와 총질소함량을 측정하여 C/N비를 구하는 것은 부숙도를 측정하기 위한 정확한 방법은 아니다. 그러나 현실적으로 총 탄소/총 질소함량의 비가 C/N비로 널리 통용되고 있으며, 상대적인 증감도 理化學的인 의미가 있다고 판단되어 총 질량 기준으로 측정하였다.

7) 온도와 C/N비 변화에 의한 부숙정도를 또 다른 변

수로 확인하기 위하여 토양희석 한천평판법을 이용하여 혼합부숙물내에 서식하는 미생물의 밀도를 조사하였다. 이는 온도에 따른 미생물의 밀도 변화를 알아 보기 위해서 토양희석액을 섞은 배지에 중온성 세균은 28°C, 고온성 세균은 48°C에서 각각 일정시간 배양한 후, 생기는 미생물의 균총수를 측정하였다. 중온성 세균밀도는 희석 배수를 10⁷으로 하였고, 고온성 세균밀도는 10⁶으로 하여, 배지는 10%의 Tryptic Soy Agar(TSA)를 사용하여 각 온도에서 48시간 배양한 후 생성된 균총수를 측정하였다.

8) 혼합슬러지의 부숙정도를 판단할 수 있는 또 다른 하나의 시도로서 Fig. 4와 같은 Dewar(독일회사 제품 模寫)장치를 제작하였다.¹²⁾ 이 장치의 기본개념은 완숙 부숙물의 경시적 온도변화는 거의 없을 것이라는 가설에 근거한다. 실험별로 최종(72시간후) 부숙물을 함수율 600~900g을 채취하여, 함수율을 40% 정도로 조절한 뒤, 용기내에 채워 경시적 온도변화를 측정하여 Table 5의 판정기준을 적용하였다.

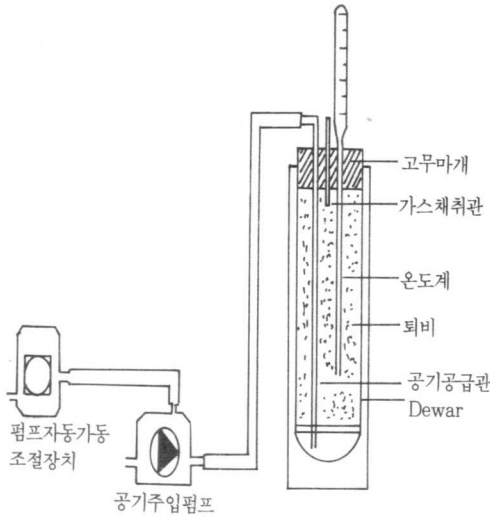


Fig. 4. Dewar 실험장치

IV. 결과 및 고찰

1. 부숙도에 영향을 미치는 변수의 분석

가. 실험별 부숙물의 온도 변화
일반적으로 부숙과정중 혼합슬러지의 온도가 높으면,

발열상태가 유지되어 부숙도가 높은 것으로 알려져 있어, 혼합슬러지의 온도는 호기성 미생물에 의한 유기물의 분해정도를 간접적으로 알 수 있는 주요 변수중의 하나이다. 본 실험에 사용된 bin형 부숙조는 상부가 약 15cm 개방되어 있기 때문에 부숙조내 혼합슬러지의 온도는 가변적인 태양복사열 크기의 직접적인 영향을 받으므로 실험별 온도자료의 절대 비교는 불가능하였다.

Table 5. Dewar에 의한 부숙정도의 판별기준

| 최대온도 | 부 숙 도 |
|---------|----------------------------|
| 70°C 이상 | 0(부숙원료물질) |
| 60~70°C | 1(부숙 초기단계) |
| 45~60°C | 2(부숙 중간단계) |
| 30~45°C | 3(부숙 종료단계) |
| 30°C 이하 | 4(부숙이 좀 더 진행될 수 있으나, 끝난단계) |

Fig. 5는 실험별 부숙물의 경시적 온도변화를 나타낸 것이다. 실험 1의 부숙물의 온도와 비닐하우스 실내온의 상대적인 온도차(이후 ΔT로 표현함)를 비교해보면, D0(실험시작일)에는 부숙물의 온도가 실내온보다 7°C 낮았지만(ΔT = -7°C), 하루만에(D1) 頂点온도인 50°C에 이르렀으며, 상대적 온도차는 +9°C(ΔT = +9°C)이었다. D3에는 다시 부숙물의 온도가 실내온보다 -5°C 낮았다(ΔT = -5°C). 실험 1의 경우, 부숙물의 經時的 온도변화가 전형적으로 나타나 부숙환경이 상대적으로 양호하였음을 알 수 있다.

실험 2의 경우, D0에서 30°C인 부숙물의 온도는 D2에서 54°C로 정점온도에 이르렀다가 D3에는 39°C로 감소하였다. 상대적 온도차를 살펴보면, D0에는 ΔT가 -14°C 이었으나, D1에는 +6°C, D2에는 +17°C로 가장 편차가 컸으며, D3에도 ΔT가 +15°C로 상대편차가 커, 부숙이 진행중임을 간접적으로 알 수 있다. 이는 실험 1에 비해, 정점온도지연(phase lag)이 발생한 것도 활발한 부숙진행 사실을 뒷받침하고 있다.

실험 3의 경우, D0에서의 부숙물온도는 26°C로써 비닐하우스의 실내온보다 9°C 낮았다. 그러나 D1에는 52°C로 단 하루만에 정점온도에 이르렀다. 상대적인 온

도차를 비교해 보면, D0에서 ΔT 가 -9°C 에서 D1에는 ΔT 가 $+20^{\circ}\text{C}$ 로 부숙물의 온도기울기는 $26^{\circ}\text{C}/\text{日}$ 로 실험중에서 가장 컸다. 실내 열환경이 실험 1, 2보다 좋지 않았음에도 실험 1, 2의 D0~D1의 온도기울기 $16^{\circ}\text{C}/\text{일}$ 보다 1.6배나. 큰 것은 적절한 혼합비(돈분뇨:톱밥 = 1:0.7)의 영향으로 판단된다. 즉, 돈분뇨에 포함되어 있는 다량의 중온성, 고온성미생물($10^7 \sim 10^8/\text{g}$)이 활발하게 활동할 수 있는 적정환경이 제공되었다고 볼 수 있다.

태양복사열이 부숙에 미치는 영향을 관찰하기 위하여, 비청명일(흐린 날)에 실험 4를 수행하였다. D0의 부숙물의 온도는 다른 실험들과는 달리 ΔT 가 $+11^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으나, D1, 2, 3에는 전형적으로 청명한 초여름날씨(실내온 $40^{\circ}\text{C} \sim 42^{\circ}\text{C}$)를 보임에 따라 흐린 날이 계속될 경우 가시화될 수 있었던 현상들이 잠복된 것 같다. 그러나 정점온도지연과 ΔT 가 쉰부숙기간 동안 크게 나타나지 않았던 것은 D0의 기상조건과 높은 함수율의 영향이 아닌가 생각된다. 만약 함수율의 영향이 상대적으로 적다고 가정하면, 이러한 현상은 태양복사열의 크기에 기인하며, 이는 태양복사열이 부숙물의 온도에 직접적인 영향을 미침을 의미한다. 그러므로 sundry 시스템을 채택할 경우, 실내 열환경이 부숙에 적절하지 못할 때 이런 보완할 수 있는 보조열원장치가 필요하다.

나. 실험별 C/N비의 변화

C/N비는 혼합슬러지의 온도와 함께 부숙정도를 나타내는 대표적인 변수로 널리 쓰이며, 유기물이 분해되는 과정중에는 일반적으로 C/N비는 감소한다. Table 7과 Fig. 6은 각 실험별 C/N비의 경시적 변화를 나타낸 것이다. 실험 3을 제외하고는 C/N비의 절대감소가 약 13~14 정도로 비슷하였으며, 평균감소율도 실험 1은 $-4.1/\text{일}$, 실험 2는 $-4.5/\text{일}$, 실험 4는 $-4.4/\text{일}$ 로 거의 같았다. 실험 4의 D1의 C/N비는 44.2로, D0의 42.9보다 오히려 컸으나 이것은 표본 채취의 일관성 결여에서 오는 오차인 것 같다. 그러나 실험 3의 경우, C/N비의 절대감소가 21.3정도로 평균감소율은 $-7.1/\text{일}$ 로 다른 세 실험보다 상당한 큰 편차를 보였다. 가項의 부숙물의 온도에서 논의하였듯이 혼합비의 영향인 것 같다.

실험 2의 경우, D1~D2의 C/N비 감소율은 $-7/\text{日}$ 로써 평균감소율 $-4.5/\text{일}$ 보다 월등히 크다. 이는 해당

Table 6. Temperature variations of composting material with the lapse of composting time for tests

unit : $^{\circ}\text{C}$

| Days Tests | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---------------|--------|--------|--------|--------|
| Test 1 | 34(-7) | 50(9) | 28(5) | 27(-5) |
| Test 2 | 30(-6) | 46(6) | 54(17) | 39(15) |
| Test 3 | 26(-9) | 52(20) | 46(3) | 43(0) |
| Test 4 | 35(11) | 45(5) | 52(10) | 47(5) |

주) (ΔT) : temperature difference between the composting material and indoor temperature

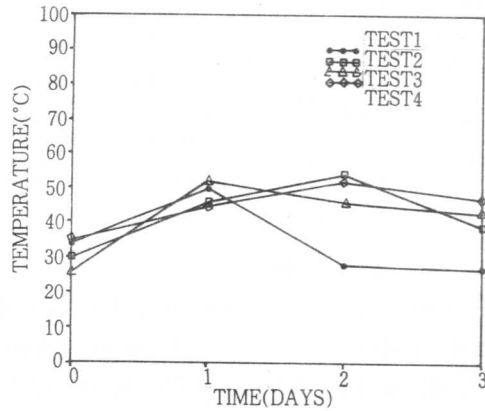


Fig. 5 Temperature variations of composting materials with the lapse of composting time for tests

부숙기간(D1~D2)의 실내온도 40°C 내외로 부숙열환경이 양호하였으며, 이로 인한 해당기간의 함수율감소도 $-14\%/\text{일}$ 로써 평균감소율 $-7.7\%/\text{일}$ 보다 전부숙기간 중 가장 크게 나타났다. 이는 실내온-부숙물의 온도-부숙물의 C/N비-함수율 등의 理化學的 변수가 서로 연관되어 있음을 알 수 있다.

실험 3에서 전부숙기간중 혼합부숙물의 C/N비 절대감소는 약 21정도이나 이중 약 85%인 18정도가 D0~D1에서 일어났다. 해당기간 동안(D0~D1) 비닐하우스의 실내온은 $32 \sim 35^{\circ}\text{C}$ 로 오히려 실험 1이나 실험 2보다 열환경이 양호하지 못하였음에도 불구하고, C/N비의 감소

는 매우 컸다. 이는 첫 24시간 동안(D0~D1) 함수비(미생물의 활동정도)와 초기함수율(70%)의 영향인 것 같다.

실험 4의 경우, D2~D3에서 C/N의 절대감소율은 -10.6/일로서 평균감소율 -4.4/일보다 훨씬 크다. 이는 D1~D3에 지속된 양호한 열환경에 기인하는 것 같으며, 이러한 양호한 열환경이 부숙물의 함수율에도 영향을 미쳐, 해당부숙기간 동안(D2~D3)에 절대감소율이 무려 12%/일이나 되어 평균 감소율 7.7%/일보다 훨씬 컸다.

Table 7. Variation of C/N ratio with the lapse of composting time for tests

| Days Tests | 0 | 1 | 2 | 3 |
|---------------|------|------|------|------|
| Test1 | 39.9 | 35.2 | 31.3 | 27.5 |
| Test2 | 45.1 | 41.1 | 34.1 | 31.5 |
| Test3 | 52.9 | 34.1 | 32.3 | 31.6 |
| Test4 | 42.9 | 44.2 | 40.3 | 29.7 |

다. 실험별 함수율의 변화

Table 8과 Fig. 7은 각 실험별 부숙물의 함수율의 경시적 변화를 나타낸 것이다. 실험 1과 실험 3은 절대함수율 감소량은 20%로, 평균감소율 6.7%이었으며, 실험 2와 실험 4는 절대감소량 23%로 평균감소율은 7.7%로, 순실험(실험 1~실험 4)의 절대함수율 감소량이나 평균 감소율 모두 비슷하였다. 그러나 실험간 함수율에 영향을 미치는 변수의 도출은 일관된 이화학적 변수의 변화가 관찰되지 못하여 힘들었지만, 특정실험에서 경시적 함수율 변화는 비닐하우스의 실내온과 밀접한 관계가 있는 듯하다. 실험 1의 경우, D0~D1에 발생한 절대 함수율 감소량은 전부숙기간중 발생한 함수율감소량중 45%를 차지하여, 실내 고온에 의하여 많은 양의 수분이 증발하였음을 알 수 있다. 실험 2의 경우, D1~D2의 함수율의 감소율이 14%/日로서 약 전체 감소량의 약 61%를 차지하며, 이는 해당 부숙기간중 열환경이 양호하였기 때문으로 판단되며, C/N비도 전체 감소량의 약 51%의 차지하여 부숙이 활발히 진행되었음을 알 수 있다.

실험 3과 실험 4의 경우, 비닐하우스내 실내온도는 전

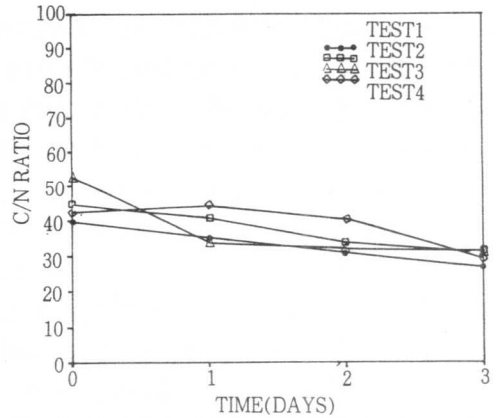


Fig. 6. Variation of C/N ratio with the lapse of the composting time for tests

부숙기간 동안 37~38°C로 거의 비슷하였으나, 절대 C/N감소량은 각각 21.3, 13.2로 차이는 상당히 큰 편이었다. 이러한 부숙도(C/N비)의 편차는 혼합비(돈분뇨: 톱밥)의 차이 때문인 것 같다. 즉, 중온성 및 고온성미생물의 최대밀도의 중첩여부(Fig. 6와 Fig. 7 참조)와 초기 함수율 및 함수율 변화형태의 차이를 관찰할 수 있다. 실험 3의 경우 70%의 혼합부숙물의 초기함수율은 약간 높은 듯하지만, 부숙기간중 함수율이 평균감소율인 6.7%/일 정도로 일정하게 감소하나, 실험 4의 경우 D0~D1~D2의 함수율변화가 5~6%로 평균 감소율 7.7%에 못미치며, D2~D3의 감소율은 12%/일이나 되어 감소율자체의 큰 편차를 관찰하였다. 만약, 상대적으로 실험 3과 실험 4의 미생물밀도의 편차를 무시할 수 있다면, C/N의 변화는 함수율차이에 민감하게 반응함을 알 수 있다. 그러므로 screw형 부숙조, sundry 시스템은 함수율 70%에서 부숙이 가장 잘 진행되며, 이 수준의 함수율에서는 1, 2%의 함수율 편차에도 부숙은 매우 민감하게 반응한다는 사실이다. 또, 부숙물의 온도가 50°C 이상의 고온일 때 C/N비 감소율은 그렇지 않은 온도조건보다 훨씬 큼을 관찰할 수 있었다.

2. 실험별 미생물 밀도변화

Fig. 8~Fig. 11은 실험별 혼합슬러지의 부숙과정중 중온성 및 고온성 세균밀도의 경시적변화를 나타낸 것이다. 순실험의 고온성세균의 밀도는 중온성세균의 밀도의

약 1/10 정도이며, 전부숙기간중(3일간) 실험 3(Fig. 10)을 제외하고는 중온성 미생물의 밀도변화는 부숙물의 온도변화와 비슷한 경향을 보였다. 실험 3의 중온성 세균 밀도의 경시적 變動은 連續體(continuum)이므로, D1의 불연속점은 실험오차에 기인하는 것 같다.

Table 8. Variation of water content with the lapse of composting time for tests

| Days \ Tests | 0 | 1 | 2 | 3 |
|--------------|----|----|----|----|
| Test1 | 65 | 56 | 51 | 45 |
| Test2 | 68 | 62 | 48 | 45 |
| Test3 | 70 | 63 | 55 | 50 |
| Test4 | 73 | 67 | 62 | 50 |

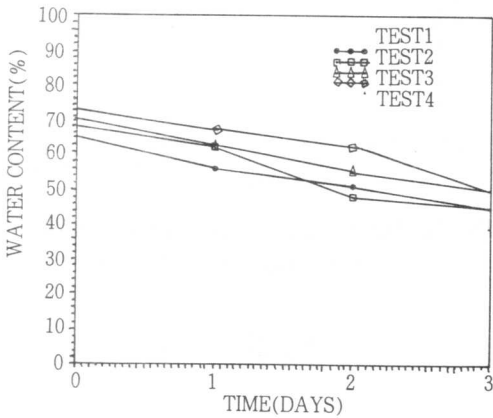


Fig. 7. Variation of water content with the lapse of composting time for tests

실험 1과 실험 2의 경우(Fig. 8, Fig. 9 참조), 고온성 세균의 밀도변화도 부숙물의 온도변화와 비슷한 경향이 있으나, 실험 3의 경우, 전 부숙기간중 지속적으로 증가하는 경향을 보이며, D3 이후에도 미생물의 증식이 일정 기간 지속될 것으로 예측된다. 이는 양호한 실내 열환경이 부숙물의 온도를 고온으로 유지하는데 도움을 된 것 같다. 실험 4의 경우, 고온성 세균의 최대밀도는 D2에서 관찰되었으며, 부숙물의 정점온도도 D2에서 관찰되어 온도상승과 고온성 세균의 밀도증가가 밀접한 관계가 있음을 관찰되었다. 실험 4의 경우, 상대적으로 높은 함수율

과 낮은 실내온 때문에 부숙이 서서히 일어나기 시작하여, D1~D3에 40°C 이상의 실내 고온으로 부숙물의 고온성 환경이 조성된 것 같다. 4회의 실험결과, C/N비는 3일 동안에 12.4~21.3정도가 감소하여, 최종 C/N비가 30 정도에 이르는데, 안정화된 상태의 유기물의 C/N비가 15~20으로 볼 때, 아직 분해가 더 진행될 것으로 생각된다.

Fig. 8~Fig. 11의 실험별 중온성, 고온성 세균의 경시적 밀도는 서서히 증가하기 시작하여, 정점에 이르고, 점차 감소하는 전형적인 성장형태를 나타내었다. 이는 밀폐부숙조에서 관찰한 세균의 밀도변화와 비슷하였다.⁸⁾ screw형 부숙조, sundry시스템의 세균밀도조사 결과(실험 1~실험 4), 중온성 세균이 주로 혼합슬러지의 부숙에 관여하였으며, 열환경이 양호한 경우, 고온성 세균의 부숙관여도가 점차 높아지는 경향이 있었다. 그러므로 혼합슬러지의 부숙정도(숙성도)를 판단하는데 있어 세균의 밀도변화도 유용한 판별변수로 사용될 수 있을 것으로 생각된다. 그러나 부숙에 관여하고 있는 다양한 종류의 중온성, 고온성 미생물들을 구체적으로 동정은 하지 않았다.

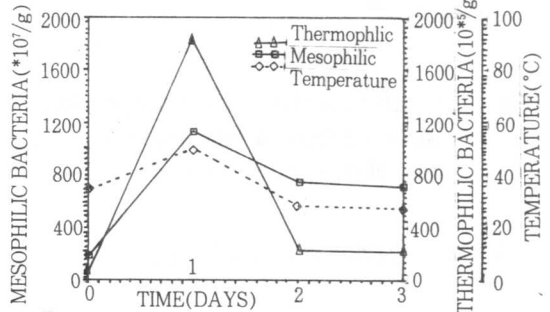


Fig. 8. Variations of thermophilic and mesophilic bacteria density for Test1 with the lapse of composting time

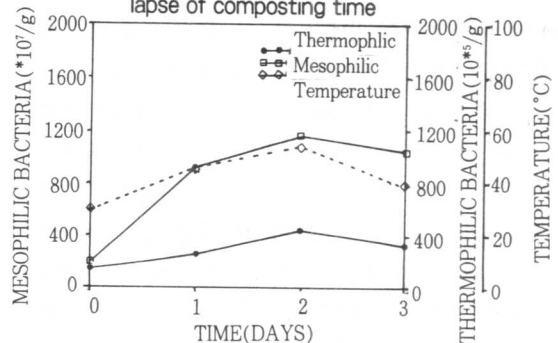


Fig. 9. Variations of thermophilic and mesophilic bacteria density for Test2 with the lapse of composting time

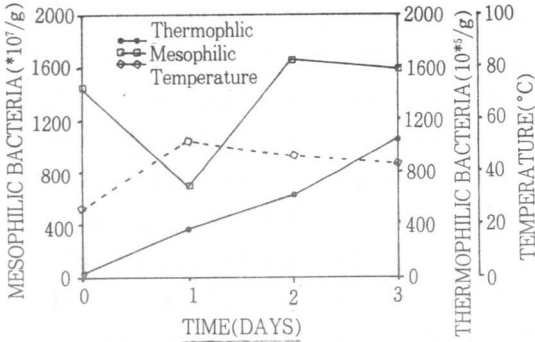


Fig. 10. Variations of thermophilic and mesophilic bacteria density for Test3 with the lapse of composting time

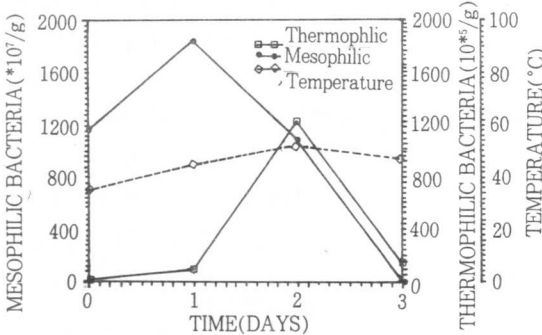


Fig. 11. Variations of thermophilic and mesophilic bacteria density for tests with the lapse of composting time

3. Dewar 장치에 의한 부숙도 판별

Fig. 12은 기본적으로 완숙부숙물의 餘熱은 크지 않을 것이라는 가설에 따라 Dewar장치의 용기내 온도(in-vessel temperature)를 앞에서 언급한 실험방법에 따라 매 4시간마다 3일간 측정하였으나, 24시간 이후 용기내 온도가 실내온도와 거의 차이가 없어 24시간 동안의 자료만 그래프화하였으며, Table 10은 이의 실험별 정점온도를 나타낸 것이다. Dewar장치는 실험이 진행중일 때 제작단계에 있었기 때문에, 실험별 최종부숙물을 Dewar용기에 투입하지 못하고 약 일주일간 냉장고에 보관하였다가, 상온상태에서 약 4시간 豫熱한 뒤 Dewar장치의 용기에 투입하였다. 실험 1의 경우 정점온도는 8시간만, 실험 2, 3, 4의 경우 20시간, 24시간만에 일어났으며, 정점온도는 모두 30°C 이하로써 Table 5의 부숙정도 판별기

준에 의하면, 부숙이 거의 끝난 상태로 분류된다. 그러나肉眼으로 톱밥의 부숙단계가 완숙에는 이르지 못한 것같이 원인검정이 필요한 것으로 판단된다.

Table 10 Dewar장치에 의한 부숙도

| Tests | Test 1 | Test 2 | Test 3 | Test 4 |
|-------|--------|--------|--------|--------|
| 최고온도 | 22.2°C | 22.9°C | 24.8°C | 24.1°C |
| 부숙도 | 4 | 4 | 4 | 4 |

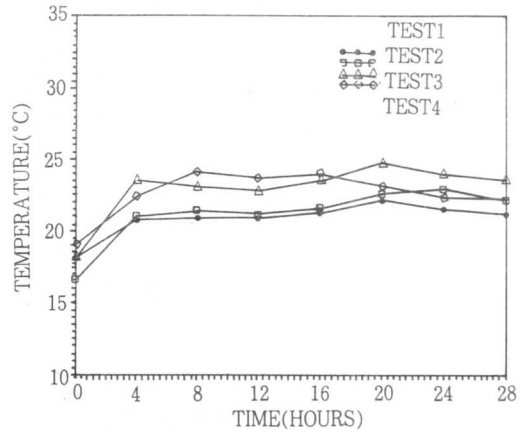


Fig. 12. Variations of in-vessel temperature for tests with the lapse of composting time

V. 결 론

본 연구는 專業 양축농가를 위한 축산분뇨처리시스템 개발의 기초연구로서 선택시스템인 screw형 부숙조, sundry 시스템의 부숙성적을 평가하기 위하여 理化學的 변수의 경시적 변화를 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) screw형 부숙조, sundry 시스템에 의한 혼합부숙물(돈분뇨+톱밥)의 온도, C/N비, 고온성 및 중온성 세균의 경시적 변화를 분석한 결과, 부숙성적이 양호한 것으로 나타나, 이 시스템은 축분뇨처리를 위한 적용가능 시스템의 하나로 고려될 수 있다. 그러나 소실험을 호의적 열환경에서 수행하였으므로, 비호의적 열환경에서도 실험을 수행하여 시스템의 부숙성적을 종합적으로 평가해야 할 것이다.

2) C/N비 기준으로, 혼합비(돈분뇨 : 축분뇨) 1 : 0.7,

즉 함수율 70%인 혼합슬러지의 부숙성적이 가장 양호한 것으로 나타났다. 비호의적인 열환경에도 불구하고 전체 C/N 감소량 21의 약 90%인 18정도 첫 24시간에 일어났다. 이는 부숙에 관여하는 미생물의 밀도와 적정 초기 함수율이 서로 상승작용을 일으킨 것 같다. 그러므로 screw형 부숙조, sundry시스템을 위한 계절별 적정 함수율을 결정하여, 전부숙기간 동안 유지시켜 주는 것이 부숙을 가속시킬 것으로 판단된다.

3) 고온성, 중온성 미생물 밀도의 경시적 변화는 유기물의 부숙과정중에 나타나는 전형적인 성장형태를 보여 부숙이 양호하게 진행되었다. 그러므로 screw형 부숙조, sundry시스템은 축분뇨 처리를 위한 가능시스템의 하나로 제시될 수 있다.

인용 문헌

- 1) 환경처. 1992. 오수·분뇨 및 축산폐수의 처리실적과 계획.
- 2) 서종혁. 1992. 한국농업에서의 환경문제와 정책과제. 환경보전과 농업발전 심포지움 중 제 1주제. 한국농촌경제연구원.
- 3) 농촌경제연구원. 1990. 가축분뇨 및 축산폐수 처리 대책에 관한 연구. 보고서 C90-10.
- 4) Parr J. F. and G. B. Willson. 1980. Recycling organic waste to improve soil productivity. HortScience 15(2) : 162~166.
- 5) Haug R. T. 「Compost Engineering : Principles and Practice」. Ann Arbor Science.
- 6) 경상대학교 농공학과 농업환경제어실험실 내부자료.
- 7) 최홍립, 김현태, 정영륜. 1992. 축분뇨처리를 위한 소규모 자동제어 퇴비화 시스템에 개발에 관한 연구. 한국학술진흥재단보고서.
- 8) 최홍립, 김현태, 하호성, 정영륜, 남상일, 서형덕, 장원준. 1992. 理化學的 환경변수가 제지슬러지 케이크의 조기부숙에 미치는 영향. 한국농공학회지. 34(3) : 75~84.
- 9) Chongrak P. 1991. 「Oraganic Waste Recycling」 (draft copy).
- 10) Shoda and Phae. 1988. Composting of sewage sludge : Its trend and controlling factors. 동아대학교 환경문제연구소 연구보고 11(2) ; 327~333.
- 11) Nakasaki, K., M. Shoda and H. Kubota. 1986. Effects of a bulking agent on the reaction rate of thermophillic sewage sludge composting. J. Fermentation Technology. 64(6) : 539~544.
- 12) 서정운. 1993. 창원대학교 환경공학과. 개인접촉.