제 2 차 년 도
최 종보 고 서

소규모 또는 겸업양축농가를 위한 재택형 간이축산폐수처리 시스템 개발

Development of A Practical On-site Livestock Waste Treatment System for Small-scale or Part-time Livestock Production Farms

1997. 2. 28.

서울대학교 농업생명과학대학

농 림 부

주 의

1. 이 보고서는 농림수산부에서 시행한 농림수산특정연구사업의 연구보고서입니다.

2. 이 보고서의 내용을 발표할 때에는 반드시 농림수산부에서 시행한 농림수산특정연구사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.

3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니됩니다.

소규모 또는겸업양축농가를 위한 재택형간이축산폐수처리시스템개발

농림부

제　　출　　문

농림부 장관 귀하

본 보고서를 "소규모 또는 겸업양축농가를 위한 재택형 간이축산폐수처리 시스템 개발" 과제의 최종보고서로 제출합니다.

1997년 2월 28 일

주관연구기관명 : 서울대학교

총괄연구책임자 : 최 홍 림

연　구　원 : 김　현

연　구　원 : 손 철 모

연　구　원 : 송 준 익

요 약 문

Ⅰ. 제 목

소규모 또는 겸업양축농가를 위한 재택형 간이축산폐수처리시스템 개발

Ⅱ. 연구개발의 목적 및 중요성

가축분뇨오수의 부적절한 처리는 지표수, 지하수 뿐만 아니라 토양의 오염을 가속시키며, 악취발생에 따른 대기오염의 문제도 최근에는 심각한 사회문제로 대두되고 있는 실정이다. 물론 최근 축산농가의 규모가 점차 기업화하는 경향이 강하지만 동시에 법규제규모 이하의 한우농가는 가구별 기준으로 약 98%, 유우농가는 66%, 양돈농가는 72%에 이르러 우리 나라 축산경영의 형태가 기업규모와 영세규모가 병존하는 복잡한 양상을 띄고 있다. 특히 우리 나라 대부분을 차지하는 소규모 또는 겸업 양축농가에서 高價의 가축분뇨오수 처리시설을 갖추기에는 경제적으로 어려움이 많기 때문에 주위에 가축분뇨오수 처리공장이 있는 경우를 제외하고는 대부분의 법규제규모 이하의 축산농가는 가축분뇨오수를 무단방류하므로써 주위의 生住환경을 오염시키는 경우가 많다. 따라서 영세양축농가에서 경제적으로 수용가능한 무방류형태 가축분뇨오수 처리시설 개발이 절실히 요구되며, 나아가 전업양축농가에서도 적용가능한 처리시스템의 개발은 1997년 7월 1일부터 축산물의 수입이 완전 자유화되는 시점에서 우리 나라 축산의 대외경쟁력을 높이기 위한 필수적 요건이라 할 수 있다.

그러므로 본 연구의 목적은 소규모 또는 겸업양축농가에서 수용가능한 생력화된 에너지절약형 무방류형태의 간이가축분뇨수처리 시스템의 개발에 있

으며, 동시에 이를 변형할 경우 양축규모가 증대되고 있는 추세에 능동적으로 대처할 수 있는 전업농가형 가축분뇨수 처리시스템 개발에 있다.

III. 연구개발 내용 및 범위

1) 가축분뇨수의 퇴비화처리에 있어서 부숙물의 함수율 저하기술의 정립
2) 재택형 간이 돈슬러리의 종형 밀폐퇴비화시스템의 설계기준정립
3) 생력화된 에너지기술의 적용가능성 검토
4) 재택형 간이 돈슬러리 종형 밀폐 퇴비화시스템 제작을 위한 설계 (CAD작업)
5) 재택형 간이 돈슬러리 종형 밀폐 퇴비화시스템의 제작
6) 재택형 간이 돈슬러리 종형 밀폐 퇴비화시스템 구동, 기능보완 및 제기능실험(hardware 측면)
7) 재택형 간이 돈슬러리 종형 밀폐 퇴비화시스템 실증실험, 기능보완 및 재실증 실험 (software 측면)
8) 재택형 간이 돈슬러리 종형 밀폐 퇴비화 시스템의 표준화작업

IV. 연구개발결과 및 활용에 대한 건의

본 연구에서는 소규모 또는 겸업양축농가에서 수용가능한 가축분뇨오수 처리시스템의 개발하였으며, 이를 선형적 규모확대로 전업양축농가에서도 적용할 수 있는 연구가 지원되어야 할 것으로 판단된다.

SUMMARY
(영문요약문)

Composting has gained rapid acceptance as a method of recycling relatively dry organic materials such as leaves and brush and, when alternative disposal costs are high, even moist materials such as grass clippings and dewatered sewage sludges. However, as moisture contents rise above 60%, the need for a dry bulking amendment increases the costs of composting, both by direct purchases of amendment and though increased reactor capacity and materials handling requirements. High moisture materials also present increased risks of anaerobic odor formation through reduced oxygen transport. These costs and operational challenges often constrain the opportunities to compost high moisture materials such as agricultural manures.

During the last several decades economies of scale in livestock production have been increasing livestock densities and creating manure management challenges throughout the world. This issue is particularly pressing in Korea, where livestock farms typically manage little or no cropland, and the nutrients and biochemical oxygen demand in manure pose a serious threat to water quality. Composting has recently become popular as a means of recycling manure into products for sale off the farm, but bulking amendments (usually sawdust) are expensive and availability is limited. This research project pursues to develop a pilot scale system designed to minimize bulking agent requirements by using the energy liberated by decomposition and the thermal energy with convective air flow. In this context the composting reactor as a biological dryer under developmnt allows the repeated use of bulking amendment with several batches of manure.

Drying has been long recognized as part of the composting process,but it is usually viewed as a secondary effect where the primary focus is waste stabilization. Among those who have developed systems to use the energy of aerobic oxidation specifically for high rate drying of wet organic wastes are Badder et al.(1975) and Jewell et al.(1984). Recycling pelletized product through their bioreactor and achieving autoheated temperatures of over 74oC, Badder et al. dried times of 5 and 12 hours respectively. Jewell et al. examined a range of operational parameters for drying dairy manure, finding maximum degradation rates at 60oC and 40% moisture, and maximum moisture removal rates at 46oC and 14 liters air per gram water added. Jewell et al. called their process "Biodrying", which is the term we utilize this report.

An enclosed bioreactor with two vertical, cylindrical chambers was designed, manufactured, and experimented to implement a new concept of the pig slurry treatment system for small-scale or part-time livestock producers. The bioreactor of 3.0m3 was modified several times to remove functional problems of its composite elements from the software and software standpoints. Two cylindrical chambers, the upper of inner diameter of 1,140 mm and height of 1400 mm and the lower, 1,350 mm, 1,200 mm, respectively., were vertically placed in one above the other, connected with a recycle bucket. Each chamber includes a ∧ type stirrers rotating at 8 rpm, which provides materials mixing. Aeration and heating were made through perforated holes in the cylindrical pipes placed underneath ∧-type stirrer, which was connected to main shaft. The biodryer was enclosed with a steel sheet housing with insulation material of 50 mm. The bioreactor was operated with 3 4 different operational strategies to determine the best opeartional practice.

Treatment of 5 levels of initial moisture contents of the mixture of sawdust and pig slurry (Test 1 5) on mass basis were implemented to evaluate the drying effectiveness (reduction rate of water content of the mixture materials) of a biological dryer allowing the repeated use of bulking amendament with several batches of manure. In addition to the moisture content, the variation of spatial temperature, C/N ratio, T-P, T-K were observed with the lapse of composting days to explore the impact of the treatment of manure on these factors and test the stability of the end-product as a fertilizer.

The major results obtained are summarized as follows:

1) Initial water content of mixture clearly showed its influence to the water reduction rate significantly throughout experiments so that the optimizing initial moisture should be carefully studied. Initial water content 70% of the mixture is analyzed to be optimum for the maximum biodrying rate, condisdering each experimant's water content variation in relation to energy input

2) Best operational practice (BOP) for the bioreactor should be determined on the integration of feeding frequency and duration of slurry, energy input for that period, and initial moisture content of the mixture.

3) Aeration is pointed to be a single most important factor for moisture removal, which decelerate the temperature of the mixture to reach thermopilic condition due to convective heat loss. Mesopilic microbes seemed to play a major role for biogradation of the mixture.

CONTENT
(영문목차)

목　　　　차

제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성

가. 연구의 배경

가축분뇨오수의 부적절한 처리는 지표수, 지하수 뿐만 아니라 토양의 오염을 가속시키며, 악취발생에 따른 대기오염의 문제도 최근에는 심각한 사회문제로 대두되고 있는 실정이다. 물론 최근 축산농가의 규모가 점차 기업화하는 경향이 강하지만 동시에 법규제규모 이하의 한우농가는 가구별 기준으로 약 98%, 유우농가는 66%, 양돈농가는 72%에 이르러 우리 나라 축산경영의 형태가 기업규모와 영세규모가 병존하는 복잡한 양상을 띄고 있다. 특히 우리 나라 대부분을 차지하는 소규모 또는 겸업 양축농가에서 고가의 가축분뇨오수 처리시설을 갖추기에는 경제적으로 어려움이 많기 때문에 주위에 가축분뇨오수 처리공장이 있는 경우를 제외하고는 대부분의 법규제규모 이하의 축산농가는 가축분뇨오수를 무단방류하므로써 주위의 生住환경을 오염시키는 경우가 많다. 따라서 영세양축농가에서 경제적으로 수용가능한 무방류형태 가축분뇨오수 처리시설 개발이 절실히 요구되며, 나아가 전업양축농가에서도 적용가능한 처리시스템의 개발은 1997년 7월 1일부터 축산물의 수입이 완전 자유화되는 시점에서 우리 나라 축산의 대외경쟁력을 높이기 위한 필수적 요건이라 할 수 있다.

그러므로 앞에서 서술한 우리 나라 영세축산농가를 위한 처리시스템 개발을 위한 연구배경을 요약하면:

① 축산농가의 가축분뇨처리는 사회적 현안이나,

② 우리 나라 축산은 영세규모/기업규모가 공존하고 있으며,

③ 우리 나라 축산의 영세성은 현실이며, 농업의 대체작목이 없는 상황

에서 영세규모 축산은 어떤 형태로든 상당기간 유지될 것으로 판단된다. 동시에 국제경쟁력 약화 및 축산폐수규제에 강화에 대한 우려 등으로 우리 나라 축산이 크게 위축됨에 따라 축산농가의 절대수가 급격히 감소할 것으로 전망됨에 따라 축산의 규모화, 밀사화, 자동화 경향이 매우 강하게 나타나고 있다. 그러므로 영세농 및 기업농을 위한 규모별 처리시설개발의 필요성이 점증되고 있으며,

④ 중소 규모 축산농가들이 마을에 散布 또는 混在되어 있으므로 이들 농가주위에 공동관리시설이 있으면 위탁관리가 가능하나, 인근에 이러한 공동관리시설이 없는 경우, 재택관리를 할 수 밖에 없으므로 재택형 처리시스템가 개발이 필요하며,

⑤ 인근에 위탁처리할 수 있는 공동 처리시설있다하더라도 퇴비의 판매부진으로 판매가가 생산원가에도 미치지 못하는 등 연간 적자폭이 1억 이상 누적됨에 따라 향후 채산성 개선이라는 긍정적인 목표하에서도 현실적으로 지속적 가동자체도 불투명한 상태이므로 공동위탁처리라는 방법을 재고해야 할 시점에 있으며,

⑥ 이러한 공동처리시설은 대부분 sun-dry퇴비화 시스템이므로 매일 투입해야 할 다량의 수분조절재(톱밥)를 안정적 확보 및 과다한 구입비 등이 이러한 공동처리시설의 현안으로 등장하였다. 이러한 공동시설이 아니라하더라도 퇴비화시설의 경우, 수분조절재(톱밥) 사용이 불가피하며, 이를 확보하는 문제가 현재 현장에서는 심각하므로 이의 사용의 최소화 또는 대체재 개발에 관한 연구가 무엇보다도 우선되어야 하며,

⑦ 특히 최근에 한층 강화된 방류수 수질기준은 오히려 선진 여러 나라 기준보다도 엄격하여, 단지형이든 허가, 신고 등이든간에 규정된 방류수기준을 정화처리시설 하나만으로 만족시키는 것은 현실적으로 불가능하기 때문에, 농림수산부의 이에 대한 기본시각은 정화처리에 대한 지원을 줄이고, 주로 가축분뇨수의 자원화에 지원을 늘려나가겠다는 의지의 표현이다. 그러므

로 특히 가축분뇨의 퇴비화, 액비화, 에너지화에 대한 구체적인 대안(시스템 설계도) 등이 연구를 통한 가시화가 필요하며,

⑧ 액비의 토양환원에 대한 기준을 마련하기 위하여 집중적인 연구를 통하여 환원면적의 현실화를 할 필요가 있으며, 따라서 환경부에서 제시한 자가처리 규정도 바뀌어야 한다.

⑨ 간이정화시설 규모, 축우시설의 경우 10두 이하, 양돈의 경우 50두 이하 사육농가,는 법적규제를 받지 않았으나 향후 의무적으로 간이정화시설(수처리 개념)을 하도록 입법화할 예정이므로 이를 만족시킬 수 있는 효율적인 시설과 방류수의 수질을 현장에서 판단할 수 있는 간이측정기기 개발 등의 연구의 필요성이 대두되었다.

나. 처리시스템의 선택

이를 극복하기 위하여 ① 가축분뇨의 고액혼합처리로 분리에 따른 경제적 손실(노동력 또는 분리기의 구입)을 절감할 수 있으며, ② 농장 규모별 발생량에 능동적으로 대응할 수 있도록 시스템용량이 가변적이어야 하며, ③ 투입자본, 토지 및 투입노동력, 운영비의 제한성 등이 고려되어야 하며, ④ 이들 농가들이 대부분 마을에 혼재되어 있어, 가능한한 악취를 包集할 수 있어야 하며, ⑤ 混在 또는 散布마을에서는 공동관리보다는 在宅관리가 효율적이며, ⑥ 방류수의 수질기준을 만족시킬 수 있어야 하며, ⑦ 무엇보다도 시스템은 기술적으로 안정적(시스템 목적에 부합하는 고효율)이어야 한다. 즉, 액비화의 경우; 전술하였지만, 환원경지의 확보, 에너지화의 경우; 기술의 안정성문제, 퇴비화의 경우; 수분조절재 문제, 등으로 각 처리방식마다 장단점이 있으나 가장 중요한 기준이 되어야 할 것으로 판단되는 처리방식의 시스템효율에 관한 퇴비화기술이 가장

안정적이다. 그러므로 ① ⑦의 기준을 만족시키는 시스템으로는 현실적으로 밀폐형 퇴비화시스템으로 인식되고 있다. 고액혼합처리용 퇴비화시스템의 경우 수분조절재가 필요하며, 수분조절재로서 톱밥이 가장 효과가 탁월한 것으로 보고되어 있다. 그러나 톱밥의 안정적 공급이 현실적으로 어려워, 톱밥대체재료에 대한 연구도 병행해야 하며, 동시에 톱밥 低投入 밀폐 퇴비화시스템의 개발도 무엇보다도 우선되어야 할 과제이다.

2. 연구의 목적

본 연구는 톱밥 低投入 full-scale시스템을 제작하여 밀폐 퇴비화시스템의 현장적용성 검증 및 이의 효율성제고에 관한 연구를 수행하였다. 이는 궁극적으로는 겸업축산농가나 중소규모 전업농가 뿐만 아니라 중대규모의 전업농가의 가축분뇨관리를 위한 종형 톱밥 저투입 밀폐 퇴비화시스템을 개발하고자 하였으며, 구체적인 세부목적은 다음과 같다.

① 合目的的 (① ⑦을 만족하는 설계개념) 종형 퇴비화 full-scale 시스템 제작

② 수분조절재인 톱밥의 사용을 최소화하기 위하여 부숙물 재순환시스템 제작 및 기능 실증실험

③ 재순환 부숙물의 수분조절재로서의 역할을 평가하기 위하여, 經時別 함수율 등 이화학적 환경변수 분석 및 적정부숙 조건 도출

제 2 장 문헌연구

1. 퇴비화의 역사

퇴비화(composting)는 미생물에 의해서 유기물을 생분해하여 부식질(humus)과 같은 물질을 생성하는 생화학적 과정을 말한다. 이 기술은 지난 수 천년 동안 인류가 농경생활을 시작하면서 자연스럽게 이루어져 왔기 때문에 새로운 기술은 아니다 다만, 최근 필요에 의하여 이 기술을 학문적으로 다시 조명하게 된 것 뿐이다. 우리 나라도 가축분뇨나 인분뇨를 농업부산물과 함께 파일(pile)로 쌓아 두었다가 완전히 부숙되면 이듬 해 봄에 경작지에 기비로 사용하기도 하였다. 이를 전통적인 농법에서 '두엄'이라는 이름으로 사용되어 왔다.

이러한 광범위한 사용에도 불구하고, 퇴비화에 관한 과학적인 접근은 1925년 인도에 살던 영국의 농학자인 Albert Howard경에 의하여 비로소 이루어졌다. 이 개량된 기술은 인도 정부에 의해 Indore Method라고 명명되었다. Howard(1935)에 의하면 주방쓰레기, 가축분뇨, 하수 슬러지, 밀짚, 낙엽으로 1.5m정도 높이의 층단(layered pile)을 만들어 부숙시키는 데 약 6개월이 소요되었으나, 파일을 전공정중 두 차례 뒤집어주므로써 부숙기간을 3개월로 감소시켰다고 보고하였다. 이는 혐기성 공정이 호기성화한데서 비롯된 부숙기간 단축이라 판단된다. 이후 다량의 형태의 유기성 폐기물을 퇴비화하기 위한 기술들이 유럽과 미국에서 활발히 진행되고 있다. 이들 연구의 초점은 퇴화의 원리를 과학적으로 구명하고, 이를 현장에 접목시키는 데 맞추어져 왔다. 특히 농업부산물의 처리방법으로서 퇴비화기술개발에 대한 많은 연구가 이루어져 왔다[1].

현재 우리 나라에서의 퇴비화에 관한 연구는 크게 다음의 세 가지 분야로 진행되고 있다. 우선 외국에서 실용화되고 있는 대단위 퇴비화 시설을 국내실정에 맞게 변형, 적용하는 방안에 관한 연구이고, 둘째는 독자적으로 고효율 퇴비화 시스템 개발에 관한 연구로서 발효미생물, 효소, 발효기 등의 개발이 여기에 속하며, 셋째 퇴비의 질향상에 관한 연구로 퇴비리 토양환원시 토양 및 작물에 미치는 영향에 관한 연구 등이다. 이 중에서 가장 시급한 연구과제는 기존에 개발된 기술을 국내 실정에 맞게 적용하는 방안을 연구하는 것이며, 이를 위해 퇴비화의 운전인자에 대한 확실한 이해와 이를 바탕으로 한 퇴비화 시설 설계기법의 습득이 선행되어야 한다.

2. 퇴비화 시스템

현재 이용되고 있는 퇴비화 시스템을 크게 반응조시스템과 비반응조시스템으로 나눈다. 비반응조형에 해당하는 시스템으로는 더미(pile)식과 줄더미(windrow)식이 있는데 비반응조 시스템에 관한한 본 연구에서 추구하는 방향과 다르므로 논외로 한다. 다만 언급하여야 할 시스템은 개방형 반응조 시스템(open bin composting)으로 지금 국내외에서 널리 이용되고 있으며, 형태에 따라 상자형(box bin composting), 장방형(open elongated bin composting), 타원형(open elliptical bin composting), 원형(open circular bin composting) 등이 있으며, 교반장치의 형태 및 공기공급방식에 따라 더욱 세분할 수 있다. 이 방식은 여러 가지 강제교반형의 장치들이 실용화되어 있으나, 고가이며 공간확보 및 장기간의 부숙기간, 액처리의 문제점과 더불어 과다한 수분조절재 소요 등으로 많은 문제를 안고 있다.

반응조시스템으로서는 먼저 밀폐형 종반응조 시스템(enclosed vertical reactor system)을 들 수 있다. 이 시스템은 일본에서 주로 실용화되었으며, 반

응조의 내부가 두 개의 단으로 나누어져 있는 것이 일반적이다. 기본 물질의 흐름은 유기물이 상부 반응조로 투입되면 노(paddle)모양의 교반장치에 의해 혼합이 되어, 상부에서 하부로 떨어지고, 최종적으로 하부 반응조의 바닥으로 배출이 된다. 공기의 공급 역시 교반 패들에 의해 이루어진다. 빈형(bin type)에 비해 반응조의 크기가 작으며 체류시간이 약 2일에서 7일로 짧다. 이 시스템에서는 퇴비화 기간이 짧아 충분히 숙성이 이루어졌다고 보기에 힘들므로 후숙의 기간이 필요하며, 주로 계분에 적용이 되며, 최근 돈분과 우분에 대해서도 적용을 하고 있다[2].

회전드럼형 퇴비화시스템(rotating drum composing system)은 수평의 회전드럼에 의하여 교반·공기공급·물질의 이동이 이루어진다. 거대한 기어와 베어링에 의해 작동되며, 공기는 배출쪽 끝에서 내용물의 흐름의 반대쪽으로 공급이 된다. 반응시간이 매우 짧기 때문에 후숙이 필수적이며, 주로 계분에 대하여 적용된 적이 있다[2].

이외에도 외국의 경우 다양한 형태의 도시 고형폐기물의 처리를 위한 반응조 시스템의 있으나, 대부분 대형의 시스템으로 유기성 도시 고형분처리를 위한 시스템이다[3]. 국내의 경우 가축분뇨의 퇴비화를 위한 밀폐형 장치들이 개발되어 제품화되어 있으나, 아직 하드웨어적·소프트웨어적 측면에서 모두 많은 문제를 안고 있어 기술적으로 안정적인 시스템으로 말하기는 어렵다.

3. 퇴비화 제어변수

가. 온도

온도는 핵심적인 환경요소이자 부숙의 정도를 나타내는 가장 안정된 지표변수로 알려져 있다. 온도는 퇴비더미의 구조(compost matrix), 수분함량, 산소 이용가능성, 미생물의 활동에 의해 영향을 받는다. 온도의 하락은 물질들이 수분을 필요로 한다거나 공기를 필요로 한다거나, 분해과정의 마지막 과정에 있다는 것을 의미하며, 부숙물질내에 존재하는 미생물의 종류와 미생물 활동의 정도에 영향을 준다. 부숙물의 온도가 주위온도에서 40℃사이의 범위에 있을 때 중온(mesopilic) 미생물이 우점종이며, 중온 미생물의 활동은 많은 열을 발생시킨다고 알려져 있다. 더미(pile)식에 있어 온도가 40℃ 이상으로 상승하면, 고온(thermopilic)균이 가운데에서 발생하는데 비해 중온균은 pile의 가장자리로 이동한다. 부숙물이 고온단계(60°C 70℃)까지 도달하는데 2 3일이 걸리며, 이 온도범위에서 부숙물이 안정화되며, 주위온도의 하강에 따라에 점차 냉각되어 더미가 40℃이하로 냉각되면 가장자리의 중온균은 다시 더미의 중심부로 들어가 퇴비화를 지속한다.

Golueke(1972)[4]은 퇴비화의 활력도나 효율은 주위온도가 35℃ 이상되면 퇴비화 속도는 가속된다고 보고하였다. 퇴비화과정은 35℃ 55℃사이에서 최고의 효율을 가지며, 부숙물의 온도가 55℃를 넘어서면, 효율은 갑자기 떨어지게 되고, 70℃를 넘게 되면 반응은 급격히 감소된다. 65℃ 이상이 되면, 포자생성균은 생장 활력을 잃고 포자를 생성하게 되어 매우 미미한 활동만을 하게 된다. 온도가 65℃이나 70℃에서 40℃나 그 이하로 떨어지면, 많은 중온미생물은 다시 활발한 활동을 한다고 보고하였다.

미생물에 의한 유기물의 분해속도를 온도와 함수율에서와 같이 도식적으로 수식화할 수 없지만, Arrhenius equation에 기초하여 추정할 수 있다. 퇴비화와 같은 효소촉매반응(enzyme-mediated reaction)에서의 반응속도는 정점을 기점으로 서서히 감소하는데, 이를 온도 비활성화 또는 열변성(thermal denaturation)이라고 한다. 이는 반응을 촉진하는 효소를 파괴하는 다른 종류의 미생물 생장의 임계점을 나타내는 식이 필요함을 의미한다[5]. 퇴비화 반응에 있어서 온도의 영향은 많이 관찰되었으나, 수식으로 모델화한 연구는 많지 않으며, 특히 온도에 의한 반응속도에 대한 증가뿐 아니라 최적점 이상에서의 속도의 감소를 나타낸 식은 드물다. 그러나 기질이 분해되는 동안에 발생하는 에너지를 추정할 수 있는데, 일반적으로 기질 1g당 14.2 28.5 KJ 정도의 에너지가 발생하며, 산소 소비 1g 당 14KJ정도의 에너지가 발생된다고 알려져 있다[6].

나. 함수율

온도 외 퇴비화과정에 영향을 미치는 중요한 물리적 요소중에 하나는 유기물의 함수율이다. 호기성 조건에서 더미에서 공기를 포집할 수 있는 공극을 만드는 것은 부숙물질에 있어서 중요하다. 만약 이 공간들이 물로 충진되어 있다면, 미생물들은 어떤 산소도 이용할 수 없기 때문이다.

부숙물질중 과다한 수분은 기체의 전이를 제한하여 산소의 공급을 방해한다. 산소확산계수를 보면, 기체상의 공간에서는 0.189 ㎠/sec인데 비해, 액체상의 공간에서는 2.56×10^{-5}㎠/sec으로, 거의 10,000배의 속도 차이가 난다. 겉보기 기체 확산계수(apparent gas diffusion coefficient)는 기체상 공극의 제곱에 비례하므로, 중력수의 함량은 가스확산제한에 대해 좋은 예측변수가 된다. 공극에 충진해 있는 자유수의 존재는 공극의 연속성을 저하하며, 기체확산의 정도를 평가하기 위하여 FAS(free air space)의 개념이 제안되었다. 수분의 부

족에 의해 야기되는 문제는 과다 수분보다 더 복잡하다. 건조에 의해 발생하는 수분부족은 수분잠재력(water potential system)의 개념이 제기되기도 한다. 수분 잠재력(WPS) 개념은 토양 물리학적 개념으로 혹은 물활성도(water activity)로 표현되기도 하는데 이는 실제 측정에서 많은 어려움이 있다. 퇴비화 과정에서의 일반적인 제한 수분잠재력은 -70kPa 정도로써, 그 이하가 되면 박테리아에 의한 군락형성이 크게 억제된다[7].

퇴비화의 최적의 함수율은 50 60%(습윤중량)로 알려져 있으며, 함수율이 60% 이상 일 경우, 입자간의 다공이 물로 포화되어 통기가 현실적으로 어렵게 된다. 즉 혐기성 조건을 조성하게 되어, 악취가 발생하고, 분해속도가 느리게 된다. 이를 개선하기 위해 가끔 공극개량재(bulking agent) 또는 수분조절재(water content amendments)를 사용하여 호기적 조건을 만들기도 한다. 만약 함수율이 50% 이하로 떨어지면, pile의 중심부는 적정 호기성 상태를 유지하여, 온도가 상승하며, 때때로 부숙물의 온도가 너무 높아 미생물들을 사멸시키기도 한다. 이는 분해를 감속시키므로 물을 첨가하여 함수율을 높이기도 한다[1].

다. 공기량(Aeration Rate)

호기적 조건을 유지시키는 필수적인 또다른 물리 환경적 요소는 통기량(aeration)이다. 공기의 공급은 일정기간 부숙물질의 온도를 저하시켜 부숙속도를 떨어뜨리는 원인이 되기도 하지만, 부숙물질의 온도가 너무 높을 때는 미생물이 사멸하므로 공기를 공급하여 부숙물질의 온도를 적정수준으로 제어하는 효과가 있다. Shoda and Phae[8]는 하수퇴비화를 위한 반응조의 온도가 적정온도범위(50℃~60℃)로 제어될 때, 공기공급율은 50~200 l/min/m^3이며, 유기질의 분해속도를 가속시키기 위해서는 일정한 공기공급율보다는 부

속시기별 공급율을 달리하는 것이 바람직하다고 보고하였다. 그러므로 부숙화과정중 강제로 공기를 공급할 경우 공기속도와 공급율 결정에 유의해야 한다. 또 호기성 소화조의 적정 공기 공급량은 함수율과 재료에 따라 다르나, 一般的으로 1 kg의 폐기물 乾物(dry matter)當 200-1200 ml/min 이 적당하며, 과도하게 공기가 공급될 경우에 열손실을 가져온다고 보고하였다.

라. C/N 비

고전적으로 퇴비화 과정의 속도를 제어하는 가장 중요한 환경적 요소로서 C/N 비 꼽았다. 퇴비화과정에서 미생물은 생장을 위한 에너지원으로서 탄소를 요구하고, 단백질합성을 위해 질소를 필요로 한다. 일반적으로 미생물 생존을 위한 이론적 C/N비는 30 정도, 적정비의 범위는 26 35으로 본다. 이 범위를 벗어난 C/N비에서는 만약 탄소가 박테리아 공격에 강하게 저항하는 형태로 존재한다면, 유기물의 C/N비는 부숙에 제한을 받는다. 탄소가 저항하는 형태로 많은 양이 들어 있는 물질의 예로서는 종이, 섬유, 나무, 밀짚 등을 들 수 있다. 퇴비화에 필요한 C/N비와 그에 따른 시간은 가축분뇨와 활성슬러지와 같은 다량의 질소원을 함유한 유기물을 첨가하므로써 낮출 수 있다. 한편 C/N비가 너무 낮으면, 암모니아와 같은 질소의 손실을 초래한다. 질소의 손실이 퇴비화 과정을 저해하지 않는다하더라도, 비료성분의 손실은 바람직하지 못하다.

퇴비화 과정에서 시간이 경과함에 따라 탄소는 이산화탄소 가스의 형태로 전환되어 감소되며, 상대적으로 질소는 일정하게 유지되므로 C/N비는 점차 감소한다. 일반적으로 C/N비가 10 20에 이르면 뷰숙물이 숙성(ripened)되어 안정된 것으로 생각할 수 있다. 만약 퇴비화를 끝내지 않는다면, 계속되는 세균의 활동에 의해 토양으로 돌아갈 질소를 빼앗기게 된다.

신 항식(1994)9) 등에 의하면, bulking agent로서 톱밥을 첨가하였을 때의

효과는 실질적인 C/N비의 조절효과를 가지기 힘들다고 보고하였다. 톱밥과 같은 목질계 원료의 경우 생분해가 힘들거나 시간이 많이 소요되기 때문에, 톱밥을 첨가하여 퇴비화의 효율이 좋아진 경우 C/N 비의 조절에 의한 것이 아닌, 통기성 향상과 다른 이유에서 효율성 증진이 기인하는 것으로 보았다. 따라서 톱밥으로 수분조절 및 통기개량을 할 경우 수분조절재로서의 역할에 더 중요하다고 판단된다.

마. 퇴비의 안정성 및 숙성도

최종 산물의 안정성 및 비료적 가치를 알기 위해 N, P, K 에 대한 분석과 발아시험 (Germination Test)이 필요하다. 안정성(stability)란 혐기성조건에 의해 악취, 파리 등 미울질의 발생가능성을 검정하기 위한 것으로서 주로 저장 및 이송측면에서의 유해성 여부를 평가하는 개념이며, 숙성도(maturity)는 경지로 환원되었을 때 발생할 수 있는 유해성 여부를 평가하는 개념으로 구분하는 것이 일반적이다.

안정성을 측정, 예측하기 위한 방법으로는 C/N비의 측정(최 홍림, 1993)10) , CO2 발생량의 측정, 퇴비의 호흡률-O2 소모량의 측정 (Paletski et al, 1995)11), Germination Test (정 광용, 1995)12) 등 여러 가지 방법들이 제안되고 있으나 어느 한 방법으로 퇴비의 안정성을 보장하기는 힘들다.

바. 건조

퇴비화 과정에서의 건조는 일종의 전처리(pre-treatment)공정으로 퇴비화 물질의 함수율이 적정범위보다 높을 때 수분의 조절을 위해 이루어진다. 즉, 건조에 의한 수분조절은 몇 가지 혼합물의 조절단계에서 중요성을 갖는다.

우선 건조에 대해 살펴보면, 건조(drying)와 탈수(dehydration)라는 용어는

물질에서 수분을 제거하는 과정을 서술할 때 상호 교환적으로 사용되며, 물질의 표면과 주위에 존재하는 압력차이에 의해 수분이 제거되는 기작을 의미한다. 이 압력에너지 차이는 부분 증기압, 온도, 절대습도라는 용어로서 설명될 수 있다. 건조는 주위공기와 물질의 표면사이의 차이에 의해 가열되거나 혹은 가열되지 않은 공기에 의해 이루어진다. 가축분뇨의 건조에 대한 많은 연구보고가 있었지만, 건조의 보편적 원리를 도출한 연구는 전무하다.

가축분뇨오수의 건조방식으로는 노천건조와 밀폐형 건조가 있다. 노천건조의 경우, 기상에 따라 매우 민감하게 반응하여 환경의 습도가 부숙물의 습도보다 높은 다습일이 많을 경우 건조는커녕 오히려 수분을 흡수하는 결과가 되며, 공간의 확보, 악취, 이물질 (파리, 모기 등)발생 등이 문제를 일으킬 수 있다. 반면, 밀폐형 시스템의 경우에도 노천건조의 단점을 보완할 수 있다. 그러나 에너지비용, 초기시설비 등이 경영 부담이 될 수 있다.

제 3 장 재료 및 방법

1. 실험장치의 설계 및 제원

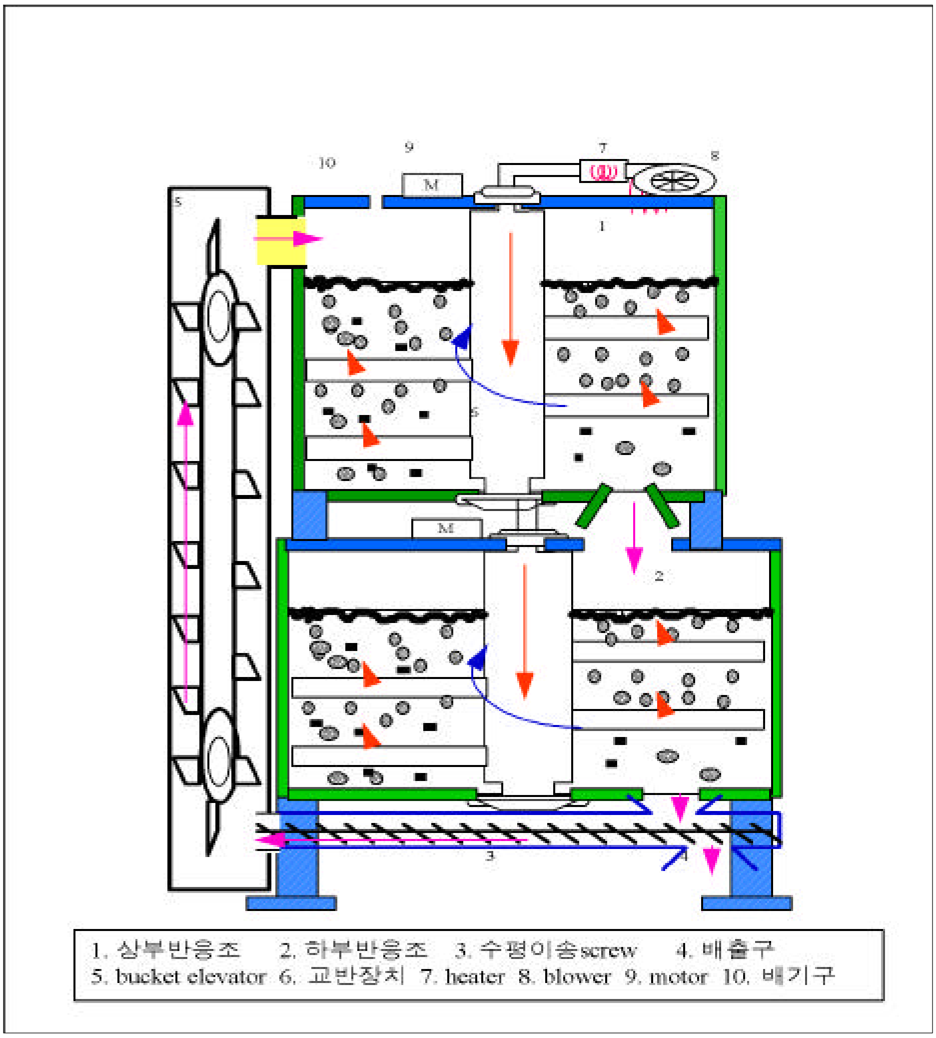
본 연구의 가축분뇨오수 처리시스템은 톱밥 저투입 밀폐 종형 퇴비화시스템으로 원형(full-scale)부숙조를 제작 및 부숙조의 운영전략를 적용시켰다. 부숙속도 및 수분감소는 부숙조의 온도와 교반속도, 공기유속, 통기량, 공기유입방식, 초기 함수율, 공극율, nutrients 등에 의해 영향을 받는다. 본 연구의 原形시스템은 부숙조를 밀폐형으로 처리하여 자연적인 환경요인들을 제어하므로써, 부숙에 적당한 조건을 일정하게 유지하여, 처리효율을 높이고 균일한 처리산물을 얻을 수 있게 하였다. 또한 초기 분뇨자체에 존재하거나, 발효과정중에 생성되는 악취의 원인물질이 주변으로 확산되어, 주위의 대기를 2차적으로 오염시키는 것을 방지할 수 있도록 하였다.

원형 종형퇴비화 시스템은 상단과 하단 부숙조를 상승순환통로로 연결하여 하단의 부숙물이 상단으로 올라와 상단의 부숙물과 재혼합, 순환시키므로써 초기 수분감소가 빠르게 일어나며 투입된 부숙물의 수분감량이 일정 수준까지 달성되면 재투입되는 가축분뇨의 수분조절재의 역할을 하게 된다. 퇴비화시스템에 있어서 최초 수분함량은 퇴비화 과정의 효율성을 결정하는 주요 변수로서, 적정 함수율을 맞추기 위해 최초에는 수분조절재로 톱밥을 이용하고, 이후에는 처리 부숙물을 이용하여 수분을 조절하게 된다. 부숙조는 상·하부 2단의 원통으로 구성되어 있어며, 부숙조, 상승순환통로, 배출구의 Screw Conveyor의 동력원으로 각각 D.C. Motor를 부착하였다(<표 3.1>참조).

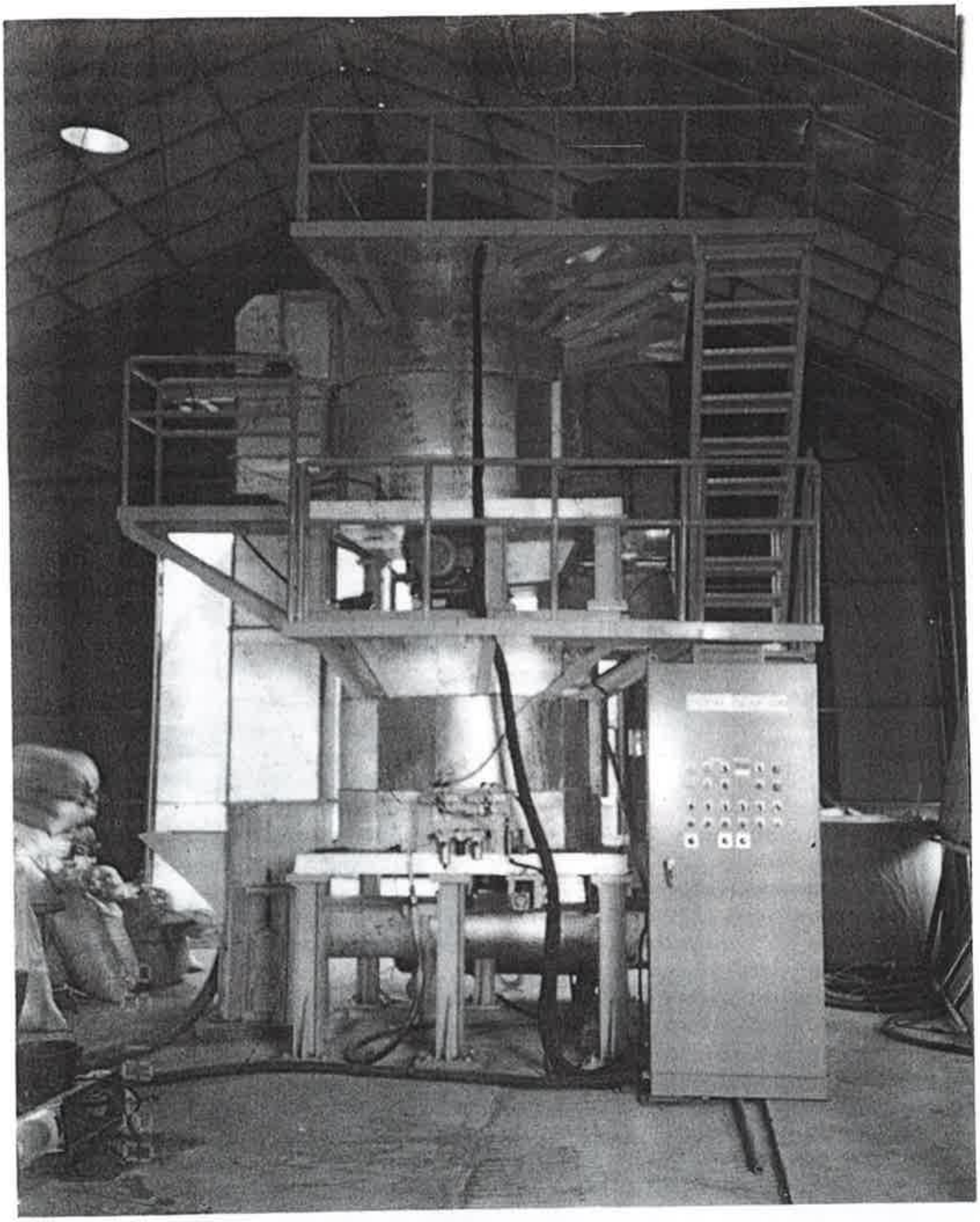
<그림 3.1>과 <그림 3.2>는 밀폐 종형 퇴비화시스템을 나타낸 것이다.

<표 3.1> **시스템의 사양**

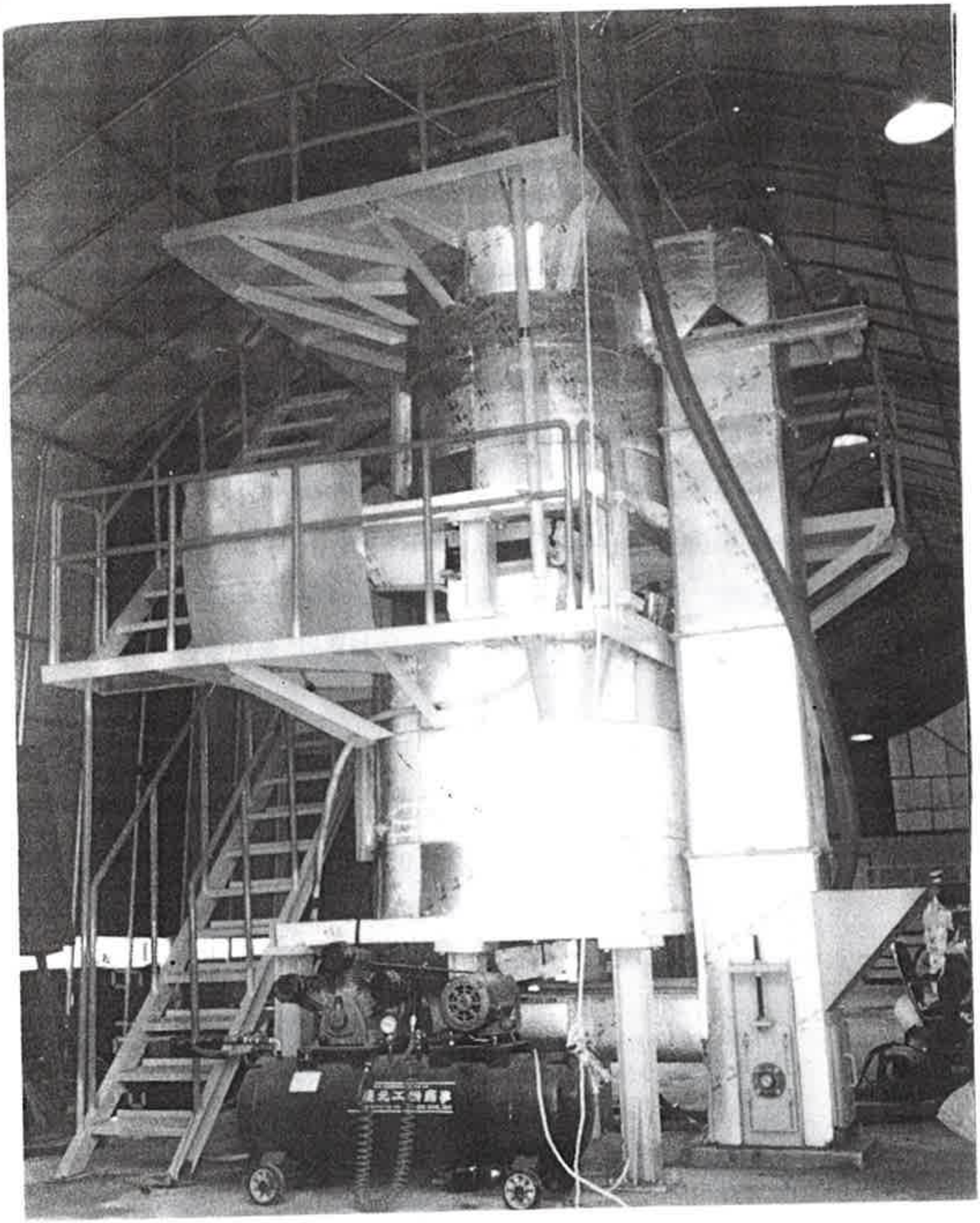
항 목		사 양 (SPEC)
외 부 제 원		(상단) 1.2m(D) × 1.4(H)
		(하단) 1.4m(D) × 1.2m(H)
MOTOR	主驅動	(상, 하단)각각 5HP
	BUCKET형 재순환 (수직이송)	2HP
	재순환 (수평이송)	1HP
heat pump (heating,응결)		3HP compressor
air compressor		5HP
단 열		Compacted Polystryrofoam(50mm) (R=10.C m2/W)
반 응 조	재 료	IRON
	실 용 량	3.43m3
재순환 bucket	재 료	belt type, bucket : plastic



<그림 3.1> **밀폐 종형 퇴비화시스템의 공정도**



<그림 3.2> 밀폐화(종형) 가축분뇨수 퇴비화시스템 설계 전면도



<그림 3.3> 밀폐화(종형) 가축분뇨수 퇴비화시스템의 실상도

2. 실험설계

가. 투입량의 결정(feeding condition)

원형시스템의 내부 용적은 약 3.4m3 정도이나, 축 등의 점유용적을 除하면 실용적은 약 3 m3 정도이다. 시스템의 운영은 초기 분뇨와 톱밥의 혼합물의 함수율을 75% 조절하고, 작동중 함수율이 50% 이하로 떨어지면 재투입한다고 설정하였다. 예비 실험결과, 혼합물의 함수율이 50%일 때 분뇨혼합물의 비체적은 0.377m3/ton이며, 분뇨의 함수율은 95%, 톱밥의 함수율은 50%이다. 따라서 혼합물의 함수율 50%일 때 분뇨와 톱밥의 혼합물은 1.131 ton이며, 함수율이 80%일 때는 2.26ton이다. 목표 함수율을 50%로 설정하면, 분뇨와 톱밥의 혼합비를 결정하기 위해 다음과 같은 질량보전 방정식을 기초로 수식화하였다.

$$
\begin{aligned}
Wm \quad X + \quad Sm \quad Y &= 0.8 \\
Vs \quad X + \quad Ss \quad Y &= 0.2 \qquad (1) \\
Wm + Sm &= 1.0 \\
W s + Ss &= 1.0
\end{aligned}
$$

여기서, Wm : 톱밥의 함수율
Ws : 분뇨의 함수율
Sm : 톱밥의 고형물 함량
Ss : 분뇨의 고형물 함량
X : 톱밥의 투입량
Y : 분뇨의 투입량

식(1)을 이용하여 설정함수율에 따른 초기 분뇨수의 양, 톱밥의 양, 재투입 분뇨수의 양 및 톱밥량을 결정할 수 있다. 재순환의 운영의 몇 가지 방법이 있을 수 있다. 첫째는 1 batch의 작동시간을 정해 놓고 정해진 시간에 도

달하는 재순환 내용물의 함수율에 따라 투입량을 결정하는 방법과, 둘째는 투입되는 분뇨의 양을 정해놓고, 1 batch의 작동시간을 재순환물이 목표 함수율에 도달할 때까지 유동적으로 운영하는 방법과, 셋째로는 투입분뇨의 양과 1 batch의 시간을 모두 결정하고, 정해진 시간내에 목표 함수율에 도달하지 못한 경우 수분조절재를 더해 주는 방법 등을 고려해볼 수 있다. 본 실험에서는 시스템의 batch별 건조성적을 관찰하고자 하였으므로 첫 번째 운영논리를 채택하였다.

나. 송풍량의 결정

질량보전의 법칙에서 미생물에 의한 VS의 분해에 의한 질량의 감소를 고려하지 않는다면, 시스템에서의 질량변화는 수분변화에 의해서만 이루어진다. 여기서 외기온을 10℃, 상대습도(R.H.) 60%라 가정하면, Psychrometrics에 의한 제거수분량을 배출온도에 따라 산정하면 <표 3.2>와 같은 결과를 얻을 수 있다.

<표 3.2> 온도에 따른 총필요 공기량과 H_2O의 변화

Exhaust Temp. (cC)	ΔH_2O (kg H_2O/kg dry air)	Total Quantity of Air (m^3)
35	0.0320	34638.806
40	0.0443	25902.946
45	0.0605	19750.313
50	0.0818	15298.819
55	0.1100	12009.329
60	0.1479	9536.335
65	0.1996	7650.142
70	0.2721	6193.538

다. 에너지 투입량의 결정

열평형 방정식에서 미생물에 의한 VS의 분해에 의한 발열를 고려하지 않는다면, System에서의 에너지의 변화는 외부에서 투입되는 에너지 변화에 의해서만 이루어진다. 위의 송풍량 계산과 연계하여, Psychrometrics에 의하여 온도에 따른 에너지 요구량을 산정하면 <표 3.3>과 같은 결과를 얻을 수 있다.

<표 3.3> 온도에 따른 총투입에너지와 Enthalpy의 변화

배출공기의 온도 (℃)	에너지차 (KJ/ kg dry air)	에너지 요구량 (KJ)
30	129.002	3711902.52
35	166.032	3722467.08
40	213.234	3742849.78
45	274.007	3786074.46
50	353.213	3862493.57
55	458.085	3983214.53
60	599.911	4163074.03
65	797.419	4424650.01
70	1084.218	4805456.39

3. 실험분석방법

가. 시료의 준비

내용물이 충분히 전체를 대표할 수 있도록 시료를 약 2 3 kg 채취한 후, 이를 잘 혼합하여 500g정도를 사분법으로 채취하여, 60℃ Drying oven에서 1 2일간 건조시킨 후, 분쇄하여 분석에 이용하였다. 단, 함수율, VS test의 분석은 Fresh(wet) basis에서 수행하였다.

나. 물리적 변수

1) 함수율 (moisture content) : 시료에 대한 수분분석은 105℃ 건조법을 이용하여 80℃에서 24시간 건조하여 무게를 측정하여 계산하였다.

2) VS (volitile solid) : 550°C에서의 작열감량을 측정

3) temperature : 온도의 측정은 환경변수에 대한 측정(외기온)과 시스템의 분석을 위한 내용물의 온도 및 시스템 각 부분의 온도를 감응하였다. 측정용 센서는 열전현상 (feebeck effect)을 이용한 열전쌍 검출기 (thermocouple ; T-type)를 다점온도 기록장치인 Hybrid Recorder (Sanei 8H , JAPAN)를 이용하여 연속 측정하였다. 또한 휴대용 환경측정장치(Solomat 510e. UK)를 이용한 열저항식 검출기(Pt 100)와 열팽창식 유리 온도계로 측정하여 그 값을 보정하였다.

다. 이화학적 변수

1) Total-Carbon : elementary analyzer(PE 2400 Series Ⅱ CHNS/O Analyzer, PERKIN ELMER, USA)를 이용하여 측정하였다.

2) Total-Nitrogen : elementary analyzer(PE 2400 Series Ⅱ CHNS/O Analyzer, PERKIN ELMER, USA)를 이용하여 측정하였다.

3) Total-Phosphate : T-P의 측정은 최종 생성물의 비료적 가치를 측정하기 위해 분석이 필요한 변수이다. T-P의 분석은 습식분해법으로 분해하여 비색법으로 측정하였다.

4) COD (Chemical Oxygen Demand) : COD는 수질오염 공정시험법중 중크롬산칼리법에 의해 분석하였다. 이는 시료에 일정 양의 중크롬산칼륨과 황산을 가하여 환류시키면서 2시간 끓여 시료중의 피산화성물질을 산화시킨 후, 황산제일철암모늄 용액으로 적정하여 산소소비량을 구하는 방법을 선택하였다.

제 4 장 결과 및 고찰

1. 실험장치의 개요

본 연구는 기본적으로 소규모 양축농가를 위한 재택형 돈슬러리처리시스템의 개발에 있으므로 현실적으로 농가에서 수용가능한 원형처리시스템을 설계 제작하였다. 처리시스템은 밀폐형 종형 2단 반응조, 수평 이송장치 및 수직이송장치로 크게 세 구성요소로 나눌 수 있다. 먼저 종형 2단 반응조는 3.43㎥정도의 실용량을 가진 원통형 반응조이며 이는 돼지를 기준으로 300 500두 규모의 처리용량으로 실제농가에서 적용가능할 수 있도록 용량을 결정하였다. 반응조 외부는 계절별 처리효율의 편차를 최소화하기 위해서 Compacted Polystryrofoam(R=10℃㎥/W)를 50mm두께로 단열하였다.

가축분뇨수의 기계적 이송은 다른 물류이송장치를 그대로 적용하기에는 여러 가지 문제점을 안고 있다. 돈슬러리는 점성 및 염류 등으로 높으므로 완벽한 기계적 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 기존의 물류이송 screw를 기본으로 pitch의 간격과 입사각을 조절하였으며, 압출속도 즉 회전수를 조절하여 내용물의 이송을 원활하게 설계하였다.

돈슬러리 처리에 있어서 최근 널리 이용되는 퇴비화처리방법의 가장 큰 문제점중에 하나는 수분조절재의 수급문제이다. 따라서 본 연구에서는 수분조절재의 사용량을 최소화하고, 최종산물의 퇴비적 효능을 높이기 위해서 반응조내의 부숙물을 재순환하여 수분조절재로서 다시 이용한다는 기본적인 개념에서 출발하였다. 이를 위해서 기계적으로 수직이송장치가 필요하였으며, 본 연구에서는 belt type bucket을 이용하였다. 수직이송장치는 내용물의 물류

특성을 고려하여 bucket의 크기,간격 및 회전 선속도를 고려하여 설계하였다.

2. 실험장치의 機能실험

우리 나라 축산환경의 현황을 반영한 고유한 돈슬러리 처리시스템을 개발하기 위하여 시스템개발을 위한 새로운 개념을 정립하고 이를 설계에 반영, 원형제작하여 실험하였다. 이러한 시스템을 설계하기 위해서는 축산 및 가축생리에 관한 지식은 물론이고 이화학적, 생물학적(미생물 포함) 지식도 요구된다. 우선 제작된 시스템의 구성요소들이 Hardware적, software적으로 제 기능을 수행하고 있는지를 검정하기 위하여 6차례의 예비실험을 수행하였다.

가. 실험 1

실험 1에서는 임의의 초기함수율을 가진 내용물의 이용하여 함수율변화 및 온도변화 그리고 기계적 구동의 문제점을 관찰하고자 1996년 10월 19일에서 1996년 10월 20일까지 약 24시간 서울대학교 부속실험목장에서 시스템을 가동하였다. 최초 투입내용물은 함수율 31.8%의 톱밥 64kg과 함수율 95%인 돈슬러리 145kg을 혼합하여 76%의 함수율을 가진 혼합물 209kg을 초기부숙물로 실험하였다. <표 4.1>, <그림 4.1>은 시스템 내외부의 온도변화를 나타낸 것이다.

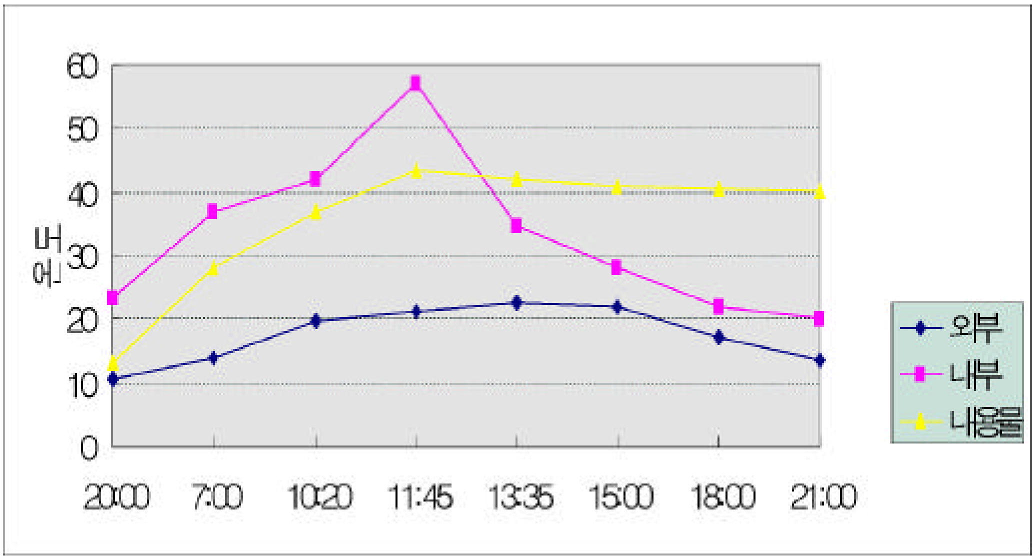
돈슬러리처리에 있어서 퇴비화시스템은 기술적으로 안정되어 있으며, 퇴비로서 재이용할 수 있다는 점 때문에 최근 양축가들의 호응 뿐 아니라 농림부에서도 아예 가축분뇨자원화 입법을 추진하고 있다. 퇴비는 궁극적으로 농지에 환원되므로 가축분뇨오수의 퇴비화 처리방법은 처리 부숙물의 안정화, 즉 부숙도에 많은 역점을 두고 있으며, 일반적으로 부숙물의 부숙정도를 판별할 수 있는 판별변수로는 부숙물의 온도, C/N비, CO2 발생율, 발아실험, SEM에 의한 부숙물의 표면상태 분석 등 많은 연구원들에 의해 다양한 변수

들을 제안하였으나 제시된 어느 단일변수로도 부숙의 정도를 판별하는 것은 어려움이 있다. 그러나 많은 연구원들은 굳이 단일변수를 부숙도의 판별변수로 들라면, 부숙물의 온도를 드는데 주저하지 않을 정도로, 유일변수로 널리 인식되고 있다. 따라서 실험 1에서는 hardware적 기능적인 면에서 시스템의 문제를 해결하고자 실험을 수행하였으며, 실험과정중에 경시적 온도변화는 전체적인 시스템의 software적 기능, 즉 부숙효율을 나타낸다. 온도측정은 시스템 내부의 6지점, 외기온 측정을 위한 한 지점, 다섯지점을 20분 간격으로 동시에 자동계측하였다.

<표 4.1> 실험 1의 부숙경시별 온도변화

위치 \ 시간	19일 (20:00)	20일 (7:00)	10:20	11:45	13:35	15:00	18:00	21:00
외부(℃)	10.7	14	19.8	21.3	22.7	22	17.3	13.5
내부(℃)	23.4	37	42	57	34.8	28	21.9	20
내용물(℃)	13	28	37	43.7	42	41	40.5	40.2

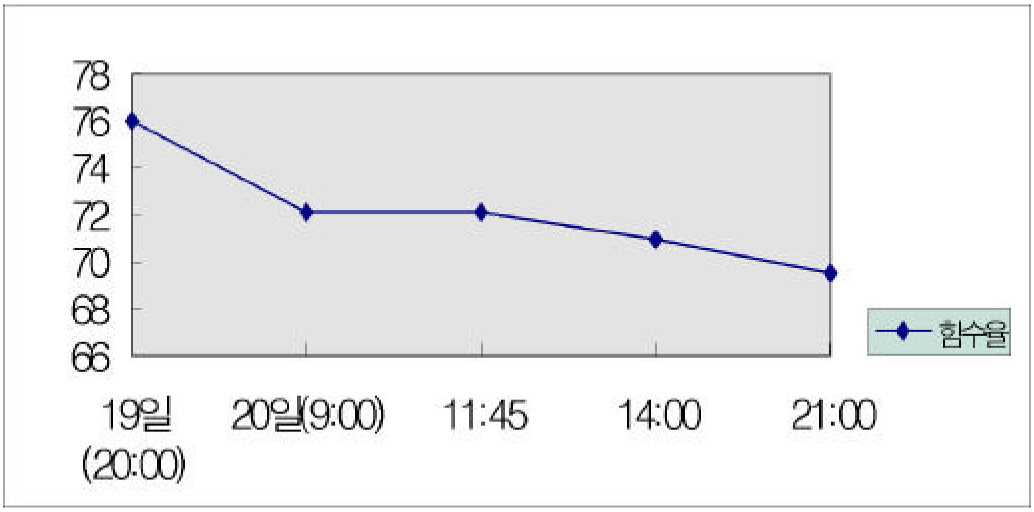
내용물의 온도변화는 초기 투입시 13℃로 외기온과 거의 비슷하였으나 투입 15시간 이후부터는 외기온과 약 20℃이상의 차이를 유지하였다. 이는 외부의 열원과 내용물의 부숙에 의한 온도의 상승이 복합되어 나타나기 시작한 것으로 판단되며, 그 이후에 외부열원의 공급을 차단한 이후에 내부공간의 온도가 외기수준으로 낮아진 반면 내용물의 온도는 40℃이상을 유지하고 있는 것을 관찰 할 수 있다. 따라서 이때부터의 온도상승은 유기물의 분해에 따른 온도상승으로 판단된다. 또한 전체적인 열환경과 외기온과의 변화를 분석해보면, 내용물의 온도변화에서 정점온도 이후의 온도변화는 비교적 완만한 경사를 보이고 있는 것을 알 수 있다. 이는 단열수준이 양호하여 비교적 벽면 전도열손실 적었던 것으로 판단되며, 외부공기 유입 및 열부력에 의한 대류열손실에 의한 온도감소는 거의 일어나지 않은 것으로 판단된다.



<그림 4.1> 실험 1의 부숙경시별 온도변화

본 연구에서는 돈슬러리의 처리에 있어서 수분조절재의 사용량을 줄이기 위해서 재순환방식을 선택하였으며, 재순환된 부숙물은 수분조절재로서의 역할을 하기 위해 가능한한 함수율을 최소화하여야 한다.

실험1에서는 초기함수율이 76%에서 약 6%의 감소율을 보이고 있으나, 제투입을 위한 절대수분감량으로 나타내면 42kg 정도로 수분조절재로서 재이용가능한 수준의 30% 정도에 머물렀다. 이는 열공급방식의 효율저하 및 초기 함수율이 높아 통기효율 저하에 기인한 듯하다. 일반적으로 돈슬러리의 기공급방식을 수정하여 외부에서 유입되는 공기와 내용물과의 접촉시간과 면적을 최대로 하고, 초기 함수율도 내용물이 수용할 수 있는 범위내에서 부숙물자체의 FAS(Free Air Space)를 높이는 것이 바람직할 것으로 분석되었다.



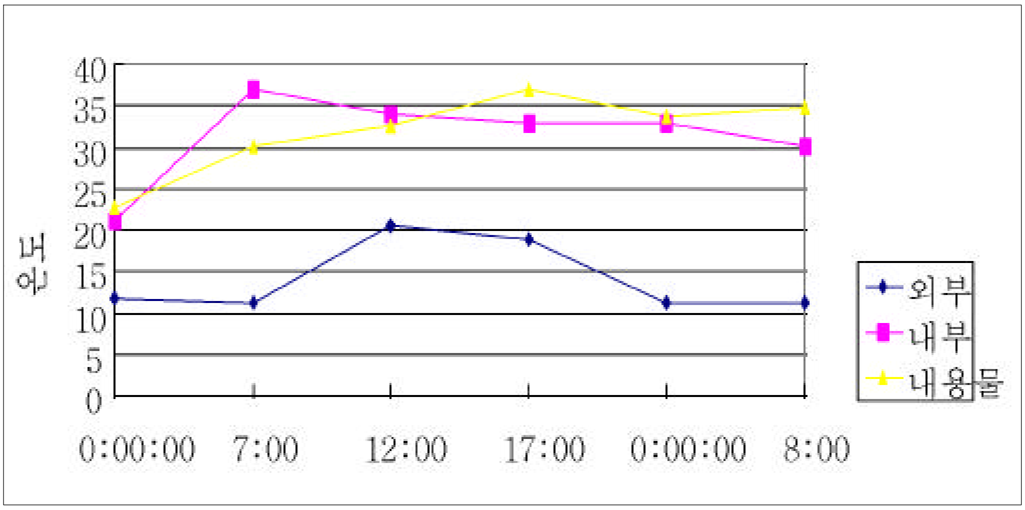
<그림 4.2> 실험 1의 부숙경시별 함수율변화

나. 실험 2

실험 2에서는 실험 1과 같은 조건으로 초기함수율을 78%정도의 내용물의 이용하여 함수율변화 및 온도변화 그리고 기계적 구동의 문제점을 관찰하고자 1996년 10월 21일에서 1996년 10월 22일까지 약 30시간 종형 퇴비화시스템을 가동하였다. 함수율 31.8%의 톱밥 64kg과 함수율 95%인 돈슬러리 150kg을 혼합하여 78%의 함수율을 가진 혼합물 211kg을 초기 재료로 실험하였으며, 실험 2에서는 구동방식을 5분 on/10분 off 의 형태로 24시간 연속가동하였다. <표 4.2>과 <그림 4.3>은 경시별 온도변화를 나타낸 것이다.

<표 4.2> 실험 2의 부숙경시별 온도변화

시간 / 위치	21일 (00:00)	7:00	12:00	17:00	22일 (00:00)	8:00
외부	11.7	11.2	20.5	18.8	11.3	11.1
내부	21.2	37	34	33	33	30.1
내용물	22.7	30.2	32.7	37	33.6	34.7



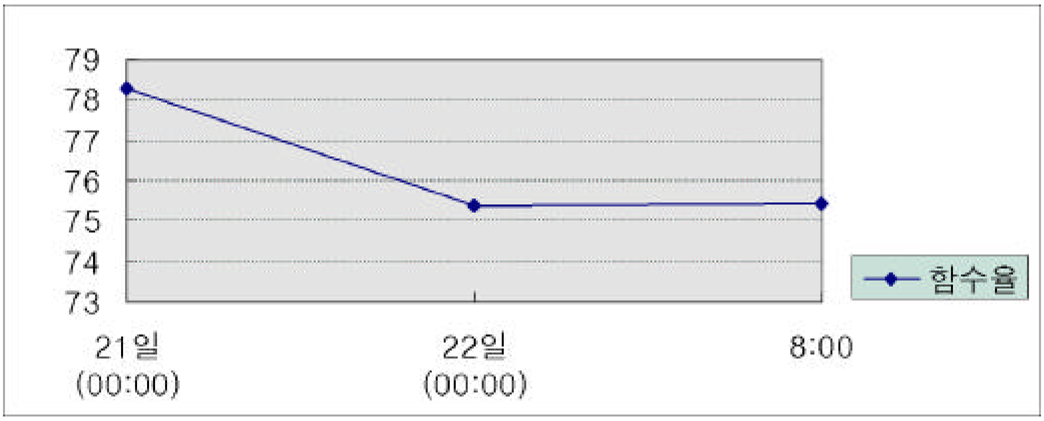
<그림 4.3> 실험 2의 부숙경시별 온도변화

실험2에서도 실험1에서와 마찬가지로 초기투입 후 15시간 후에 최고온도인 37℃ 정도로 상승한 것을 볼 수 있다. 그러나 실험 1에 비해서 정점온도를 비롯하여 전반적인 온도변화가 약 5℃정도 낮게 나타났다. 이는 처리시스템의 외부열원 투입과 운전시간과 관계가 깊은 것으로 판단되며, 일반적으로 돈슬러리의 퇴비화시 내용물의 온도를 얻기 위해서는 열량의 공급을 높이는 방법을 고려할 필요가 있다.

부숙물의 온도변화와 외부온도를 살펴보면 부숙물의 퇴비화과정에서 나타나는 전형적인 온도변화형태를 보이고 있으며, 외부의 기온은 10℃에서 20℃정도로 낮시간이 밤시간보다 높게 나타나는 가을철 기온의 전형적인 변화를 보이고 있다. 이는 내용물과 외부의 온도변화가 서로 독립적으로 일어나고 있는 것을 알 수 있으며, 실험 1에서도 언급하였듯이 내외부 기온과의 차이로 발생하는 열손실은 거의 없다고 판단되며, 단열수준이 비교적 양호한 것으로 판단된다. 또한 내부공간의 온도와 내용물과의 온도를 살펴보면 비슷

한 형태의 온도분포를 보이고 있다. 이는 외부로부터의 열공급이 내용물의 온도상승에 직접적으로 영향을 주었으며, 실험1과는 다르게 실험2에서는 비구동기간에서 발생하는 부숙열과 구동기간에서의 공급 열에너지를 내용물이 충분히 이용하고 있다는 것을 보여준다. 그러나 전반적인 온도상승의 수준이 실험1에 비해서 낮은 것은 앞에서 언급하였듯이 구동조건의 문제라고 판단된다.

실험2에서도 실험1과 마찬가지로 부숙내용물을 수분조절재로 재이용할 필요가 있으므로 함수율의 변화는 처리시스템의 처리효율과 밀접한 관계를 가진다. <그림 4.4>은 실험 2의 경시별 함수율변화를 나타낸 것이다.



<그림 4.4> 실험 2의 부숙경시별 함수율변화

돈슬러리의 퇴비화처리시 수분은 대부분 공급 열에너지 및 부숙열에 의해 증발되는 것이 일반적이다. 따라서 실험2에서 3%/일 정도의 수분감소율을 보이는 것은 열에너지 공급이 충분하지 않은 것으로 생각되며, 이를 위해서 효과적인 열에너지 공급방식과 수분증발에 필요한 열에너지량을 고려한 운영조건 및 시스템의 설계가 필요할 것으로 판단된다. 또한 실험2는 실험1에 비해서 초기 함수율이 높아 이에 따른 함수율 감소도 고려한다면, 실험 1

에서도 언급하였듯이 내용물의 초기 함수율도 수분감소를 위한 하나의 중요한 요인이 될 수 있으며, 처리시스템의 software적 측면에서 매우 중요할 것으로 판단된다.

다. 실험 3

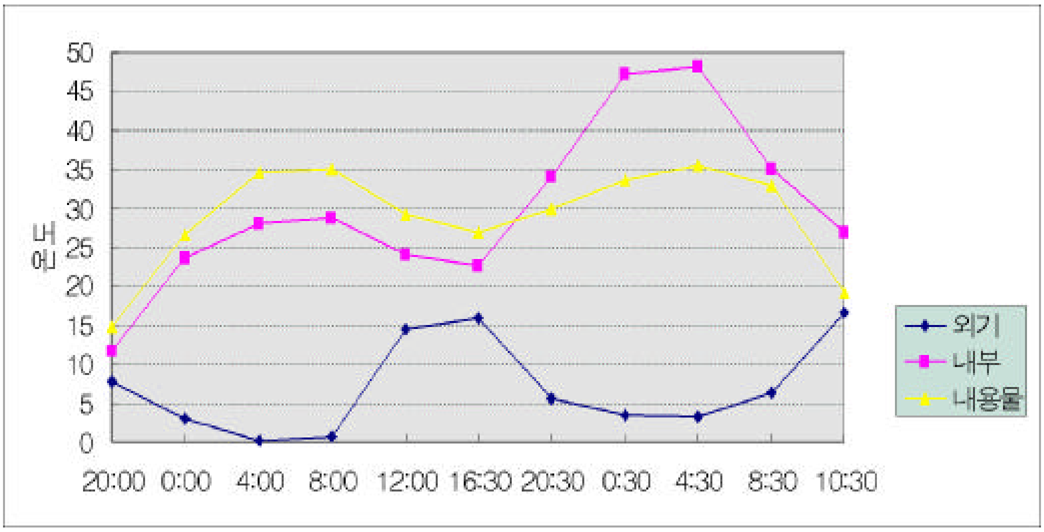
실험 3에서는 처리시스템의 열에너지 공급의 효율을 높이기 위한 방법의 하나로 공기공급방식을 수정하여 1996년 11월 26일에서 1996년 11월 28일까지 약 2일간 종형시스템을 가동하였다. 최초 함수율 97.1%의 돈슬러리 217.6kg과 함수율 31.8%인 톱밥 86kg을 혼합하여 78%의 함수율을 가진 혼합물 303.6kg을 10분on/5분off의 구동조건을 맞추어 26일 20시부터 27일 8시까지 그리고 27일 20시부터 28일 8시까지 운전하였다. 시스템내외부의 온도변화는 <표 4.3>과 <그림 4.5>과 같다.

<표 4.3> 실험 3의 부숙경시별 온도변화

시 간 / 위치	26일 (20:00)	27일 (0:00)	4:00	8:00	12:00	16:30	20:30	28일 (0:30)	4:30	8:30	10:30
외기(℃)	7.6	3.1	0.2	0.8	14.5	16	5.7	3.4	3.2	6.3	16.5
내부	11.7	23.7	28	28.8	24.1	22.6	34	47.2	48.2	35.1	26.8
내용물	14.8	26.7	34.5	35.1	29.3	26.9	30	33.7	35.5	32.9	19.2

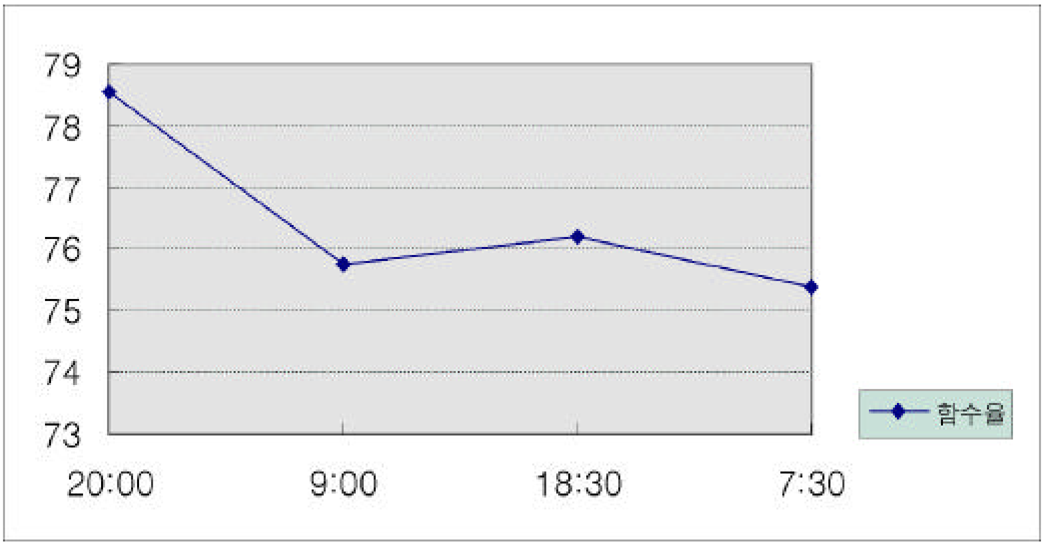
실험3에서는 내용물의 온도수준 과 변화형태는 실험 1, 2와 비슷한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 실험3에서 외기온이 실험1, 2와 비교적 낮아, 내용물과의 최대온도차도 30℃ 이상 나타났다. 이는 공기공급방식의 변화에 따른 열에너지 공급이 개선된 것으로 판단되며, 특히 투입후 24시간이 지난 후에는 내용물의 온도수준과 내부공간과의 온도수준이 변화하는 점을 볼 수 있다. 이는 공기공급방식의 개선에 따른 함수율의 변화로 내용물자체의 비열이 낮아진 것에서 원인있다고 생각된다. 실험 3의 공기공급방식 개선에 따른 온도변화는 일반적인 유기물의 분해시 나타나는 고온현상을 보이고 있지

않다. 이는 공기공급방식의 개선에 따라 유속증가에 따른 대류손실이 로 판단되며, 역으로 함수율감소에 영향을 주었을 것으로 판단된다.



<그림 4.5> 실험 3의 부숙경시별 온도변화

실험3에서도 마찬가지로 함수율변화는 퇴비화시스템의 처리용량과 관련하여 매우 중요하다. <그림 4.6>는 실험 3의 함수율변화를 나타낸 것이다.



<그림 4.6> 실험 3의 부숙경시별 함수율변화

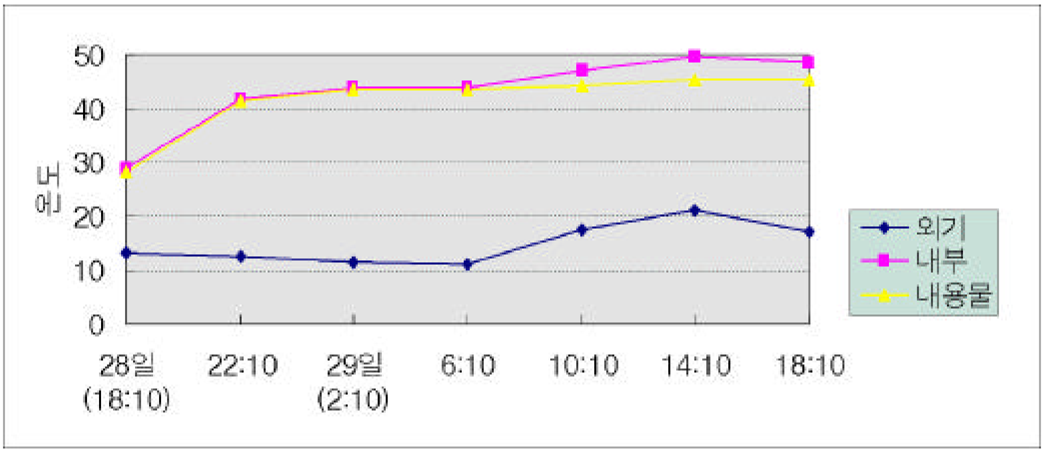
실험3에서는 초기 가동기간에서는 6%/일 정도의 함수율감소를 보이고 있으며, 실험1에서의 감소율 6%와 비교하며 절대함수량 측면에서 약 60%이상, 실험2에 비해서도 약 50% 이상의 의 절대감소율을 보였다. 그러나 본 시스템의 적정처리효율 수준에는 못미치는 단계이며, 실험2에서와 마찬가지로 초기함수율 78% 이상의 내용물 증발은 공급열에너지에 의한 대류증발방식으로는 에너지소비량이 많을 것으로 판단된다. 따라서 초기 함수율의 감소 및 톱밥을 대체할 수 있는 다공성 물질의 부분혼합도 필요할 것으로 판단된다. 위의 그림에서 살펴보면 시스템의 비구동구간을 지난 후의 내용물의 함수율이 증가한 것을 볼 수 있다. 이는 외부로부터의 열에너지 공급이 없는 상태에서 자체 부숙열로 인한 고온의 포화습공기가 내부공간의 온도감소에 따른 응결에 의한 영향으로 판단된다. 따라서 처리시스템 운영조건 등의 software적 구성에 있어서 이헌 현상도 충분히 고려하여 구동/비구동시간을 정할 필요가 있을 것으로 생각된다.

라. 실험 4

실험4에서는 앞의 실험1 3의 분석결과를 기초로 돈슬러리의 처리효율을 높이고자 함수율 98%인 돈슬러리 165.5kg과 함수율 25%인 톱밥 86kg을 혼합하여 실험 1,2,3에비해서 상대적으로 낮은 초기함수율 73%인 혼합물 251.5kg을 투입하였다. 처리시스템의 운영조건은 실험3과 같이하여 96년 10월 28일 18시부터 24시간동안 운전하였다. 부숙내용물의 온도변화 및 내외부의 온도변화는 <표 4.4>와 <그림 4.7>과 같다.

<표 4.4> 실험 4의 부숙경시별 온도변화

시간 / 위치	28일 (18:10)	22:10	29일 (2:10)	6:10	10:10	14:10	18:10
외기(℃)	13.2	12.5	11.3	11.1	17.5	21.2	17.3
내부 (℃)	28.8	41.8	43.8	43.8	47.3	49.5	48.6
내용물(℃)	28.3	41.6	43.4	43.6	44.3	45.2	45.2



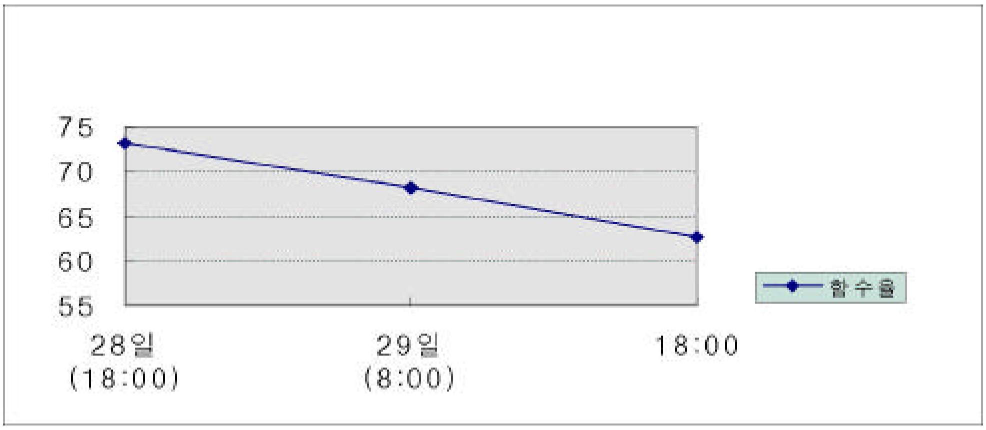
<그림 4.7> 실험 4의 부숙경시별 온도변화

실험4의 온도변화를 살펴보면 내용물 온도와 내부 공간온도가 거의 같으며, 온도의 변화형태도 비슷한 것을 알 수 있다. 따라서 실험3과 마찬가지로 공기공급방식은 많이 개선되었으며, 내용물 온도와 내부공간과의 온도변화가 투입 후 12시간까지는 거의 일정하게 유지되었다. 그러나 그 이후에는 내부 공간의 온도가 높게 나타났다. 이는 실험3에서도 언급하였듯이 함수율 감소에 따른 내용물의 비열차에 의한 것으로 판단되며, 그 결과 부숙경시별 공급 열에너지의 크기의 가변 가능성에 대해서도 고려해볼 필요가 있다.

실험4에서는 앞의 실험과는 달리 초기 함수율을 낮게 하여 운전한 결과 내용물의 온도가 투입4시간 후부터는 40℃ 이상을 유지하는 것을 관찰 할 수 있다. 이는 초기함수율 감소에 따른 부숙내용물 사이의 FAS가 앞의 실험에

비해서 양호해져 부숙내용물 입자와 열에너지를 가진 공기와의 접촉면적이 넓어져 열교환이 많이 일어난 것으로 판단된다.

실험4는 앞의 실험1, 2, 3에 비해서 비교적 양호한 온도변화를 관찰 할 수 있었다. 이러한 온도변화의 결과와 비교해서 함수율의 변화를 살펴보면 <그림 4.8>와 같다.



<그림 4.8> 실험4의 부숙경시별 함수율변화

실험4의 함수율 감소는 10.5%/일 정도를 나타내었으며, 온도변화의 분석과 마찬가지로 초기 함수율의 감소에 따른 혼합부숙물 내부의 통기성이 개선되므로써 유입공기와 수분과의 접촉면이 많아진 효과로 판단되며, 또한 미생물에 의한 분해에 필요한 수분환경에도 앞의 실험과 비교해서 개선되었다고 생각된다.

함수율 변화는 24시간 동안 거의 비슷한 경향을 보이고 있는 반면, 온도변화는 투입 12시간 후에는 내부공간의 온도가 내용물의 온도보다 높았다. 즉, 12시간 지난 후 공급 열에너지량이 함수율 감소와 미생물분해에 필요한 에너지량 보다 큼을 알 수 있다. 따라서 이러한 여유 열에너지 공급을 줄이기 위하여 에너지 공급의 가변을 고려해봄 직하다.

실험4는 앞 절의 실험에 비해서 비교적 양호한 결과를 얻었으나 본 연구의 기본적인 목적인 부숙내용물를 수분조절재로서의 재이용하고 적정규모의 처리량을 가지기에는 수분 감소효율을 더 제고시켜야 한다. 실험4의 분석결과 초기 함수율 조절 및 실험3의 분석결과에서 통기성 개선을 위한 다공성 수분조절재의 부분혼합도 고려해볼 수도 있다.

마. 실험 5

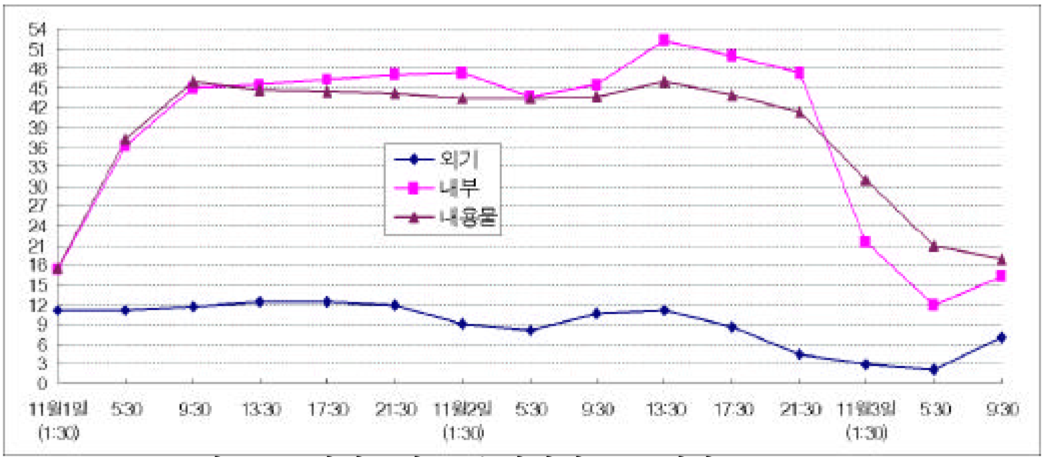
실험 5에서는 혼합부숙물의 통기성 문제를 보완하고자 톱밥 이외의 또 다른 첨가재를 투입하여 운전하였다. 초기투입물은 함수율 95%인 돈슬러리 221.5kg과 함수율 25%인 톱밥 70kg을 혼합하여 초기함수율 74.2%인 혼합물 308.8kg을 투입하였다. 여기에 첨가재로서 함수율 13.5%인 CFD 8.75kg, 함수율 13.6%인 wood chip 8.75kg을 투입하였다. 첨가재의 투입량의 톱밥과 건물기준 1:8의 비율로 첨가하였다. 처리시스템의 운영조건은 실험 3, 4와 같이 하여 96년 11월 1일 1시부터 48시간동안 운전하였다. 내용물의 온도변화 및 내외부의 온도변화는 <표 4.5>와 <그림 4.9>와 같다.

<표 4.5> 실험 5의 부숙경시별 온도변화(℃)

일시/위치	11월 1일						11월 2일						11월 3일		
	1:30	5:30	9:30	13:30	17:30	21:30	1:30	5:30	9:30	13:30	17:30	21:30	1:30	5:30	9:30
외기	11.1	11.1	11.6	12.3	12.4	11.8	9.1	7.9	10.6	11.1	8.5	4.5	2.9	2	7
내부	17.2	36.3	45	45.6	46.3	47.1	47.2	43.7	45.6	52.2	49.8	47.2	21.4	12	16.3
내용물	17.6	37.2	46.1	44.8	44.4	44.2	43.5	43.4	43.7	46	44	41.4	30.9	20.8	18.8

실험5에서 온도변화는 내용물의 온도가 투입 4시간 후부터 40℃ 이상을 유지하며 전체적으로 실험4와 비슷한 온도변화를 보였다. 이는 添孔材의 혼

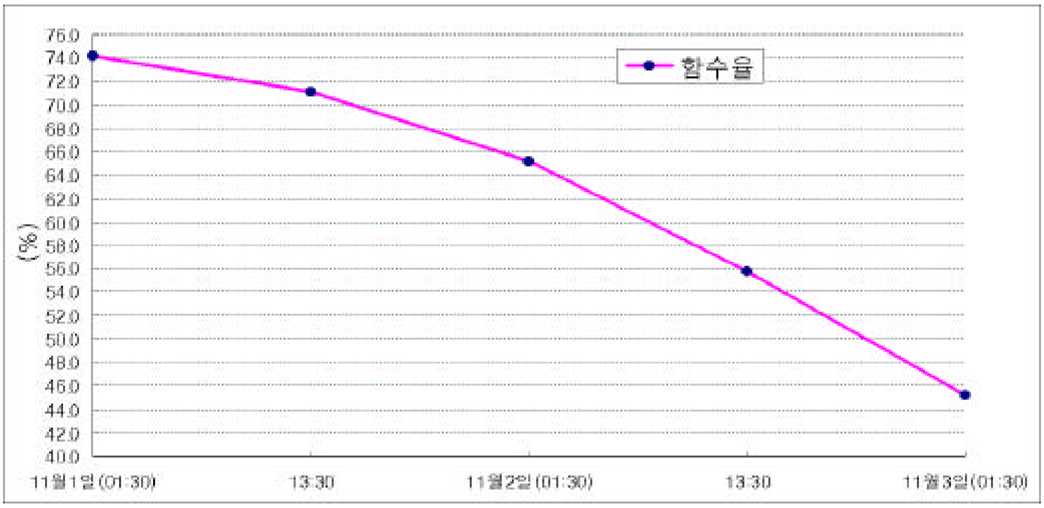
합이 온도변화에 큰 영향을 주지 못했음을 의미한다. 이는 톱밥정도의 粒度면 wood chip을 대신할 정도로 호기조건을 조성할 수 있는지, 아니면 다른 변수의 역할이 있는지는 좀 더 심도있는 연구가 필요하다. 실험5에서는 계속 40℃ 이상으로 고온상태가 유지되어 부숙이 계속 진행되고 있었음을 알 수 있다. 또한 혼합부숙물의 온도와 내부공간과의 온도변화를 살펴보면 실험4에 비해서 일정시간 이후의 온도차가 크지 않다. 이는 첨공재로서 사용한 CFD, wood chip이 톱밥과 비열의 차이에 기인한 듯하며, 앞에서 언급한 에너지 투입의 가변화 고려시 첨가재의 투입에 따른 변수도 충분히 고려할 필요가 있다고 판단된다.



<그림 4.9> 실험 5의 부숙경시별 온도변화

실험 5에서는 앞의 실험 4와는 달리 초기함수율을 약간 높게하여 운전한 결과 내용물의 온도가 투입4시간 후부터는 40℃이상을 유지하는 것을 관찰할 수 있었다. 또한 전체적으로 2 3℃ 정도 온도가 높게 나타난 것을 알 수 있다. 이는 초기함수율에 따른 공극율의 차이를 첨공재를 투입하므로써 부숙내용물 사이의 FAS가 양호해져 부숙내용물 입자와 열에너지를 가진 공기와의 접촉면적이 넓어져 열교환이 많이 일어난 것으로 판단된다.

실험5는 실험4에 비해 첨공재 투입이라는 실험조건 차이에서 나타나는 경시별 함수율 변화는 <그림 4.10>과 같다.



<그림 4.10> 실험 5의 부숙경시별 함수율변화

실험5의 함수율 변화는 약 9%/일 정도의 감소율을 보이고 있다. 이는 앞의 실험4와 비교하면 상대적으로는 낮지만 초기함수율의 차이에 따른 절대수분감량으로는 약 15% 정도로 큰 감소를 보이고 있다. 이는 첨공재의 투입으로 인한 FAS가 증가하여 혼합물 내부의 통기성이 개선되어 유입공기와 수분과의 접촉면이 많아진 때문으로 판단된다. 실험5의 함수율 변화를 살펴보면 감소율 즉 경사도가 점차 커지는 것을 알 수 있다. 이는 절대수분 감소량은 비슷하지만, 투입에너지 측면에서 가능한 효율을 최대화할 필요가 있으므로 초기 함수율의 최적화는 시스템 효율제고에 주요 변수의 하나로 고려되어야 한다.

앞의 실험1 5 까지의 결과에서 온도 및 함수율 변화를 살펴보면 유기물

의 부숙에 적당한 온도 뿐만 아니라 혼합부숙물의 수분조절재로서의 재이용하기 위한 함수율의 감소도 일정 수준에 미치지 못하였다. 처리효율이 기대에 미치지 못한 이유는 하드웨어적으로 발생할 수 있는 문제와 소프트웨어적으로 발생할 수 있는 문제로 나누어 생각해 볼 수 있다. 하드웨어적인 문제는 첫째, aeration방식의 효율의 문제와 둘째, 혼합을 위한 주구동의 회전수 등의 문제를 들 수 있으며, 소프트웨어적인 문제는 주로 초기 함수율에 의한 통기성의 문제, 돈슬러리의 저장기간에 따른 영양원(Nutrient) 농도 및 내용물의 투입방법 등이 주된 문제의 원인으로 생각이 된다.

3. 실험장치의 현장적용 실험

앞 절의 실험1 5는 현장적용을 위한 예비실험적 성격을 가지고 있으며, 이를 통해서 처리시스템의 구성요소들이 Hardware적으로 제기능을 수행할 수 있는지를 검정하였으며, 돈슬러리의 건조 및 부숙의 가능성도 구명하기 위해서 경시별 함수율 저하효율 및 온도변화를 관찰하므로써 처리시스템의 효율을 검정하였다.

연구의 궁극적인 목표인 종형 퇴비화 시스템의 수분조절재의 사용량을 최소화하기 위한 전략으로서 batch 시스템과는 달리 혼합부숙물을 수분조절재로 재이용하는 것이다. 따라서 1996년 11월 17일부터 29일 까지 13일간 1 2일 간격으로 9차례 돈슬러리를 투입하여, 경시별 온도 및 함수율, C/N비의 변화를 관찰하였다. ① 초기 혼합물은 함수율 93.5%인 돈슬러리 468kg, 함수율 20%인 톱밥 80kg, 함수율 10.5%인 CFD 13kg 및 14%의 함수율을 가진 wood chip 46kg을 투입하여 초기함수율 76%인 내용물을 투입하였으며, 상부반응조에서 2일간의 운전한 후 내용물을 하부반응조로 이송시켜 다시 2차부숙을 유도하였다. ② 상부 반응조에는 함수율 93%인 돈슬러리 473.7kg, 함수

율 29.5%인 톱밥 80.3kg, 함수율 10.5%인 CFD 13.5kg 및 12.5%의 함수율을 가진 wood chip 39.6kg을 혼합하여 함수율 77%인 혼합물을 2차 투입하였다. 이를 2일간의 운전한 후 상부내용물을 하부반응조로 이송시키고 하부반응조의 혼합부숙물을 상부로 순환시켜 수분조절재로 사용하였다. ③ 상부반응조에 함수율 93%인 돈슬러리 192kg, 함수율 17%인 톱밥 38.5kg을 함수율 68.5%인 하부내용물 264.3kg과 혼합하여 3차 투입하였다. 상부반응조에는 함수율 74%인 혼합물 494.8kg을 투입하여 24시간 운전하였다. ④ 24시간 후에는 상부내용물을 하부반응조로 이송하고 67%의 하부내용물 380kg을 상부반응조로 이송하여 93%인 돈슬러리 140kg을 4차 투입하였다. 상부반응조는 74%의 함수율을 가진 혼합부숙물 520kg을 내용물로 운전하였다. ⑤ 24시간 후 상부반응조의 내용물을 하부로 이송시키고 하부반응조의 함수율 64.5%인 내용물 344.6kg을 상부로 재투입하고 함수율 93%인 돈슬러리 195kg, 함수율 27%인 톱밥 40kg을 투입하여 함수율 71.5%인 혼합부숙물 579.6kg을 상부반응조에서 운전하였다.

<표 4.6> 실험기간동안 상부반응조에 시기별 투입된 내용물

혼합 원료 / 투입 시기	돈슬러리		톱밥		CFD		wood chip		하부내용물		혼합부숙물	
	중량 (kg)	함수율(%)	중량 (kg)	함수율(%)	중량 (kg)	함수율(%)	중량 (kg)	함수율(%)	중량 (kg)	함수율(%)	중량 (kg)	함수율(%)
1차 17일10시	468	93.5	80	20	13	10.5	46	14			607	76
2차 20일20시	473.7	93	80.3	29.5	13.5	10.5	39.6	12.5			607	77.5
3차 22일00시	192	93	38.5	17					264.3	68.5	494.8	74
4차 23일00시	140	93							380	67	520	74
5차 24일01시	195	93	40	27					344.6	64.5	579.6	71.5
6차 25일03시	200	93	80	27					250	56.5	530	67.5
7차 26일14시	200	93	80	27					250	61.5	530	71.3
8차 27일22시	200	93							380	61.5	580	71.5
9차 29일19시	200	93							500	61.5	700	71.5

⑥ 같은 방법으로 24시간 운전 후 상부반응조의 내용물을 하부반응조로 이송한 후 하부반응조의 56.5%의 함수율을 가진 내용물250kg을 상부반응조로 재순환한 후 함수율 27%인 톱밥 80kg과 93%인 돈슬러리 200kg을 여섯 번째 투입하였다. 상부 반응조에는 67.5%의 함수율을 가진 혼합부숙물 530kg가 투입된 상태가 되며, ⑦ 35시간 후 일곱 번째 투입은 여섯 번째 투입방법과 같은 방법으로 하였으며, 일곱 번째 투입후의 상부반응조에는 함수율 71.5%인 혼합부숙물 530kg을 투입하였다. ⑧ 32시간 운전한 후 상부 내용물을 하부로 이송하고 함수율 61.5%인 하부내용물을 380kg 상부반응조로 재순환시켜 함수율 93%의 돈슬러리 200kg을 8차 투입하여 함수율 71.5%인 혼합부숙물 580kg을 상부반응조에서 운전하였다. ⑨ 40시간 후 상부반응조의 내용물을 하부로 이송시키고, 61.5%인 하부반응조의 내용물 500kg을 상부반응조로 재손환

하여 함수율 93%인 돈슬러리 200kg을 9차 투입하였다. 위와 같은 재투입은 언제나 상부반응조에서 일어나며 상부반응조에 투입되는 혼합물의 투입량과 함수율 및 투입시기를 <표 4.6>에 나타내었다.

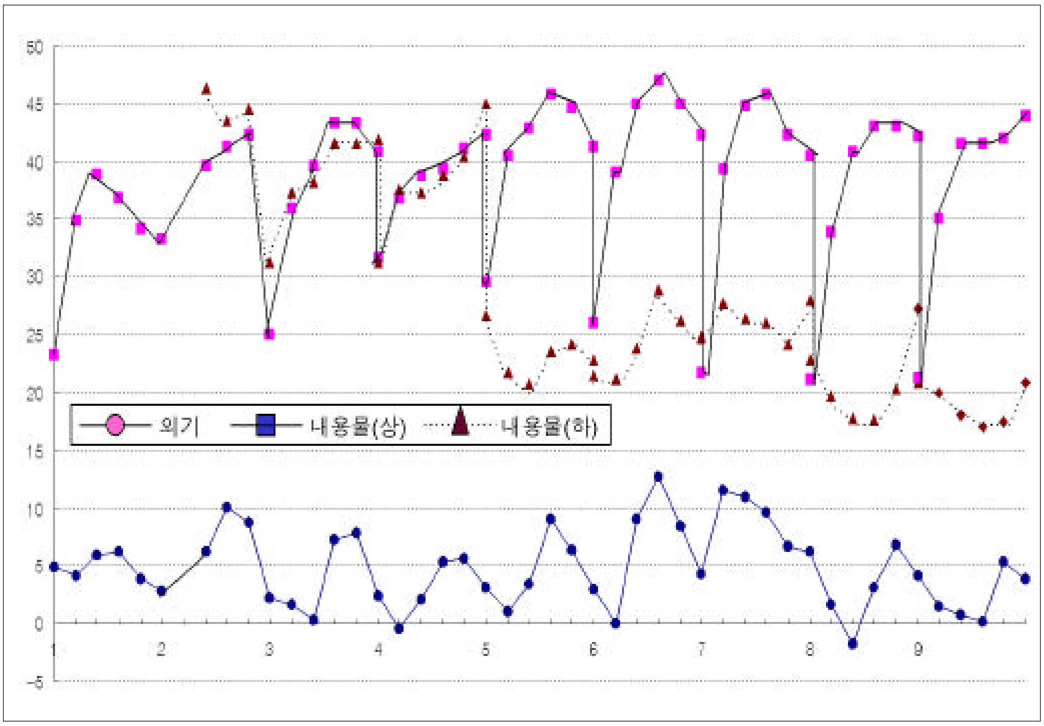
이와 같이 상부 반응조의 수분조절재로 재순환 혼합물을 사용하여 batch형 퇴비화시스템에 비해서 50% 이상 톱밥을 절약할 수 있었지만 목표처리량에는 미치지 못하였다. 이의 원인을 구명하기 위해서 부숙경시별 내용물의 물리화학적 변수들의 변화를 분석하였다.

가. 온도

<그림 4.11>은 부숙기간 중의 상하반응조내 내용물과 외부의 온도를 나타낸 것이다. 돈슬러리의 재투입후 상부반응조의 정점온도는 40 50℃로 나타났으며, 재투입 횟수가 증가하면서 정점온도도 증가하는 경향을 보였다. 외부로부터 일정한 열원 공급상태에서 정점온도가 높아지는 것은 돈슬러리내 영양원이 재투입과정에서 증가되면서 부숙에 의한 생분해열 때문으로 판단된다. 정점온도가 나타나는 시기는 돈슬러리의 투입후 12 16시간 후에 일어났으며, 이는 외부열에너지의 공급에 의한 부숙내용물의 열전달과정이라 생각되며, 또한 열에너지 공급에 따른 혼합물의 부숙에 도움이 되는 것으로 판단된다.

돈슬러리의 5차 투입시까지 상부반응조와 하부반응조의 온도변화는 비슷한 경향을 보이고 있으며, 5차투입 이후 하부반응조의 온도는 낮게 관찰되었다. 이는 하부반응조에서는 기본적으로 부숙을 유도하기 위한 곳으로서 높은 열에너지 공급은 운영측면에 부적절하다고 판단하여 외부 열에너지공급을 중단하였다. 그러나 하부반응조에서 5차투입 이후의 온도가 20 30℃ 정도로 부숙을 유도하기에는 너무 낮아 하부 반응조에서도 내용물의 온도유지

를 위해서 최소한의 열공급이 있어야 될 것으로 판단된다.



<그림 4.11> 부숙경시별 혼합물의 온도변화

또한 외기온은 0 15℃의 범위로 유지되고 있었으며, 부숙물의 온도는 30 50℃를 유지하였다. 이는 일반적인 퇴비화과정에서 볼 수 있는 중온상태를 유지하였다. 고온을 유지하지 못한 이유는 부숙에 필요한 최소 통기량 이상의 공기가 공급되므로써 대류 열손실이 크게 일어난 것으로 판단된다. 함수율-온도-통기량은 서로 역상관 관계를 가지므로 적정점을 찾는 것은 무엇보다도 중요하다. 따라서 돈슬러리의 밀폐시스템에 의한 퇴비화에는 건조와 부숙을 위한 적정 송풍량을 결정하는 것은 매우 중요하다.

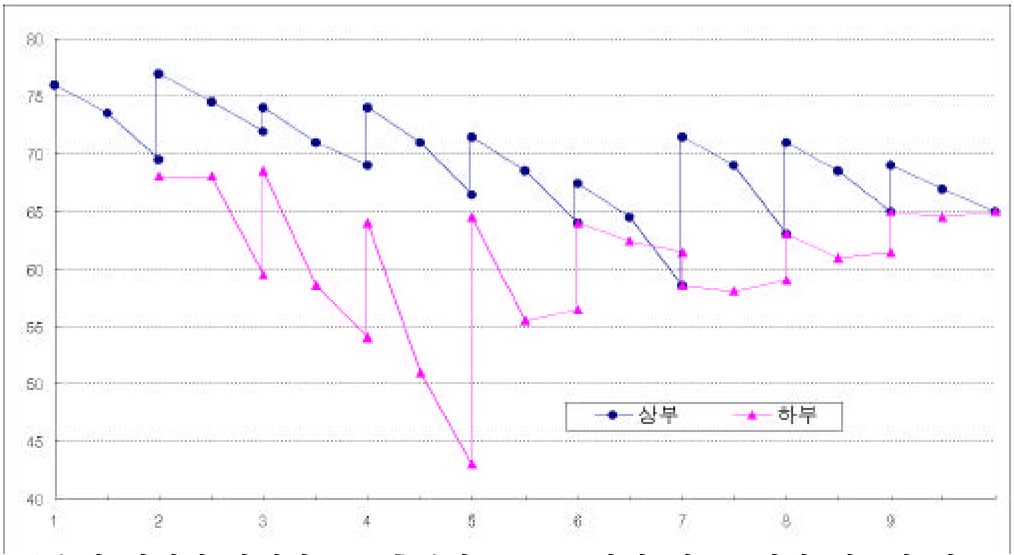
나. 함수율

<그림 4.12>는 반응조내부의 부숙내용물의 함수율을 경시적으로 나타낸 것이다. 상부반응조내 혼합부숙물의 함수율변화를 전체적으로 살펴 보면 반복되는 돈슬러리의 재투입에 따른 비슷한 감소율을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 외부로부터의 열에너지의 공급이 일정하고 부숙열에 의한 함수율감소는 미비하기 때문인 것으로 생각된다. 또한 재투입 후의 함수율이 점차 낮아지는 것을 알 수 있다. 이는 재투입되어야할 돈슬러리의 량에 비해서 함수율 감소가 적게 일어나 돈슬러리의 투입량을 조절하였기 때문이다.

초기 또는 돈슬러리의 재투입후 초기함수율이 상부반응조의 수분감소율에 미치는 영향은 우선 70% 내외에서는 10%/일 정도, 75% 내외의 경우에는 5%/일, 70% 이하에서는 5-10%/일 정도의 감소가 관찰되었다. 따라서 본 연구에서 개발한 시스템의 운영전략 중에 하나는 초기함수율을 70% 이내로 조절하는 것이 적절한 것으로 판단된다. 또한 앞 절의 온도변화에서 정점온도와 비교해서 재투입후의 함수율을 살펴보면 초기함수율 76%에서는 정점온도가 약 40℃, 초기함수율이 74%에서는 43℃, 71%에서는 45.5℃의 정점온도를 보이고 있다. 이는 초기함수율이 수분감소율 뿐만 아니라 부숙에도 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 따라서 초기함수율은 70% 이하로 줄이는 방법도 고려해 볼 수 있지만, 이에 따른 수분조절재량이 많아지므로 처리량의 증가를 초래할 수도 있다. 따라서 최적 초기함수율의 결정은 밀폐 종형퇴비화시스템의 처리효율에 가장 큰 영향을 미치는 변수일 수 있다.

<그림 4. 12> 부숙경시별 혼합물의 함수율변화

하부반응조의 함수율변호를 살펴보며 5차 투입 이전의 수분감소율은 매우 높은 것을 알 수 있다. 특히 4차투입 후에는 20%/일 정도의 높은 감소율을 보이고 있다. 이는 하부반응조내의 내용물이 상부반응조에서 24시간이상



의 부숙이 진행된 상태이므로 충분한 공극을 가진 내용물이기 때문인 것으로 판단되며, 비교적 충분한 혼합에 따른 열에너지공급의 효율이 높았기 때문으로 판단된다. 그리고 5차투입 이후의 함수율 변화는 매우 적은 것을 알 수 있다. 이는 앞 절에서 언급하였듯이 부숙을 유도하기 위한 열에너지공급의 중단 때문이며, 약간씩의 수분감소율은 부숙에 의한 효과로 판단된다. 그러나 매우 적은 양이므로 최소한의 열에너지공급은 필요할 것으로 판단된다.

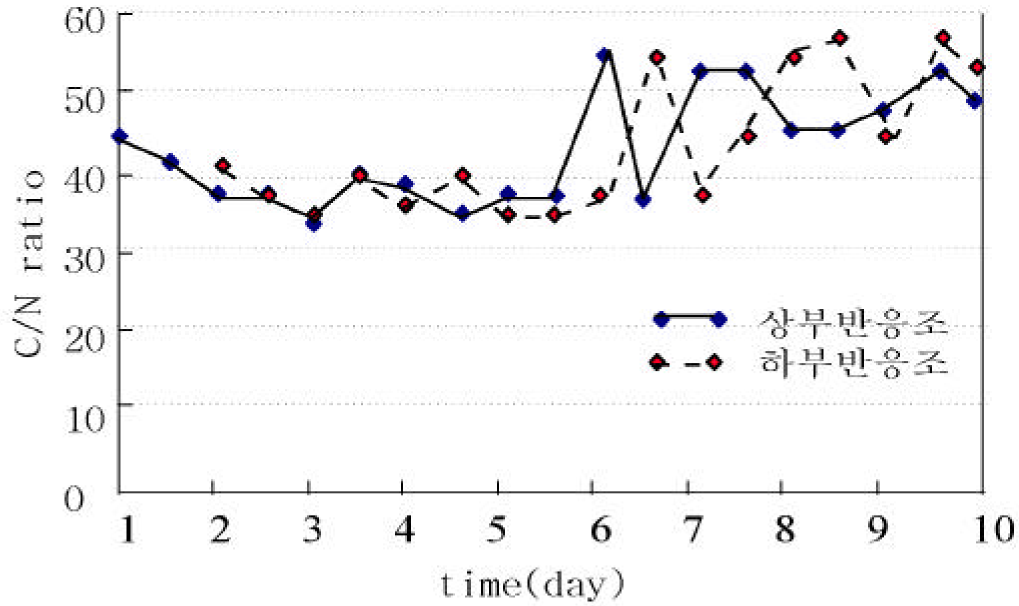
여기에서 함수율의 경시적 변화를 전 실험기간 동안 관찰해보면, 우선 함수율의 감소율은 재투입 전후에 구동과 약간 상관이 있지만, 큰 편차없이 약 5-10%/일의 감소를 보이고 있다. 이는 부숙물의 함수율을 초기에 감소시켜 수분조절재로써 재이용 할 수 있도록 유도하였으나, 기대한 것만큼의 효율이 높지 않았다. 이는 여러 가지 변수가 있을 수 있지만, 가장 큰 원인으로 공기공급에 의한 열에너지공급, 초기함수율, 돈슬러리의 재투입방법 및 운영전략 등이 복합적으로 처리효율에 영향을 미쳤다고 판단된다.

다. C/N비의 변화

퇴비화는 미생물에 의해서 유기물질이 분해되는 과정을 의미한다. 이러

한 과정중에 미생물의 성장을 위한 에너지원으로서 탄소를 이용하며, 질소는 단백질 합성을 위해 필요하다. 따라서 퇴비화과정중에 C/N비의 변화는 유기물질의 분해 즉 부숙의 정도를 나타내는 중요한 변수중에 하나이다. 어떤 부숙물질내의 C/N비가 너무 낮으면, 즉 N이 많으면 부숙과정에서 외부로 질소가 유실되고, C/N가 너무 높으면, 즉 질소함량이 적으면 부숙이 잘 진행되지 않는다. 일반적으로 C/N비가 35 이상이면 질소부족으로 미생물의 자체증식이 일어나지 않고 단순히 생명유지를 위한 에너지원으로서의 탄소를 소비하게 되므로 퇴비속도가 완만하게 되고, 이보다 낮으면 미생물자체의 증식과 유기물분해는 왕성해지는 반면 질소과잉으로 퇴비화기간 중 질소손실이 크다. 일반적으로 C/N비가 20 40이 퇴비화에 적절한 것으로 알려져 있다. 본 연구의 궁극적인 목표중에 하나인 양질의 유기질비료 생산이라는 측면에서 뿐만 아니라 돈슬러리의 안정화 측면에서도 C/N비는 매우 중요한 의미를 지니고 있다. <그림 4.13>은 부숙경시별 상하반응조내 혼합부숙물의 C/N비의 변화를 나타낸 것이다.

먼저 초기 투입 돈슬러리의 총탄소가 32.29%, 총질소가 2.63%로 C/N비는 14.25이며, 초기 투입톱밥의 총탄소는 60%, 총질소는 0.0455%로 구성되어 C/N비는 1318 이었다. 또한 CFD의 경우 52%의 탄소함량과 0.889%의 질소함량을 가지고 있으며, C/N비는 58정도였고, wood chip의 경우에는 64%의 탄소, 0.098%의 질소를 함유하여 C/N비가 654정도로 나타났다. 이러한 성상을 가진 돈슬러리, 톱밥, CFD, wood chip를 일정비율로 혼합한 혼합물의 초기 C/N비가 약 47정도를 유지하였다. 돈슬러리의 총탄소량, 질소량은 다소 낮은 경향을 보이는데, 이는 분뇨가 저장조에서 상당한 기간 동안 저류되면서, 생분해(bio-degradable)가 쉬운 유기물이 분해가 되었으며, 상당 양의 질소가 암모니아의 형태로 휘산되었기 때문으로 생각된다.



<그림 4.13> 경시별 C/N ratio의 변화

부숙경시별 C/N비의 변화를 살펴보면, 다른 화학적변수와 마찬가지로 초기투입 후 약 5일간은 감소하다가, 6일 이후에는 증가하는 경향을 보인다. 이는 돈슬러리의 재투입에 따른 질소성분의 충분한 집적이 이루어지지 않았거나, wood chip과 같은 고탄소물질이 초기에는 시료채취에 포함되지 않았지만 점차 분해되면서 시료에 영향을 줄 수도 있었을 것으로 판단된다. 하부반응조의 변화경향은 상부반응조와 비슷한 경향을 보이고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 전체적인 C/N비의 편차가 20 이하인 것을 알 수 있다. 이는 시료채취에서 오는 실험오차일 수도 있다. 이러한 결과에 비추어 볼 때 반응조내의 C/N비 측면에서의 부숙정도를 판별하기에는 어려움이 있으며, 또 다른 측면에서는 wood chip 등의 혼합에 의한 부숙진행이 미흡하다고 볼 수도 있다. 또한 탄소와 질소의 변화를 살펴보면 전 부숙기간중에 질소의 변화량은 거의 변화지 않는 데 비하여 탄소의 변화가 C/N비 변화에 주된 영향을 미침을 알 수 있다. 이는 퇴비화 과정에서 미생물에 의한 유기물의 분해가

일어나면서 탄소가 우선적으로 이산화탄소로 전환되어 휘산되는데 비해 상대적으로 질소는 남게 되기 때문이다. 위의 결과를 기초로 C/N비의 변화 또는 절대값으로 시스템의 효율을 논하기는 다소 무리가 있지만, 재투입횟수가 늘어나고, 시스템 내부에서 좀 더 많은 시간 동안 부숙이 진행된다면 어떤 인정 수준까지 C/N비의 변화를 유도할 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 전 부숙기간 동안에 혼합물의 건조에 중점을 두었기 때문에 혼합물의 재투입에 따른 C/N비의 감소가 느린 점을 감안하면, 적정 수준의 C/N비에 도달하기 위해서는 충분한 운전시간이 필요할 수도 있다.

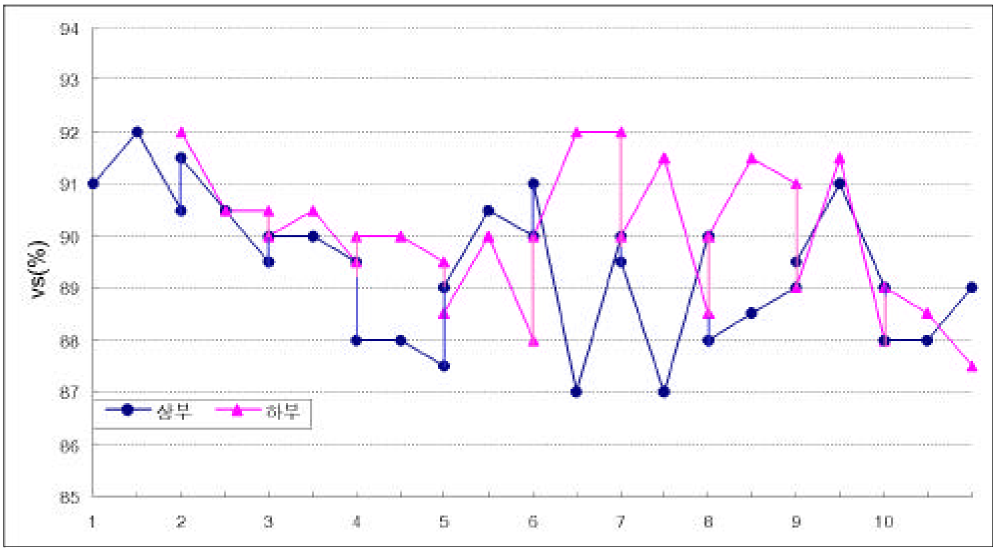
라. VS의 변화

퇴비화 과정에서의 VS는 T-C, C/N 비와 마찬가지로 유기물의 변화를 추적함으로써 부숙의 정도를 판별하며, 또한 혼합부숙물의 퇴비로서 안정성정도에 관한 변수로 이용되고 있다. <그림 4.14>는 VS의 부숙경시별로 변화를 나타낸 것이다.

본 실험에 이용된 돈슬러리(수분조절재와 혼합하기 이전 가축분뇨오수)는 VS가 73.63% 정도이며, 수분조절재로 이용한 톱밥은 VS가 98.77% 정도이었다. 시료의 VS수준이 일반적인 경우에 비해서 상당히 낮은 수준으로 나타났다. 이는 가축분뇨수가 저류조내에서 장기간 저장되어지는 동안에 이미 상당 양의 질소성분이 대기중으로 휘산되어 나타난 현상으로 생각되며, 또한 톱밥의 VS수준은 상당히 높은 수준이다. 톱밥의 경우 VS가 약 99%로 대부분이 유기질로 이루어져 있다. 그러나 이러한 유기물질이 퇴비화 과정에

<그림 4.14> 상하부반응조내 혼합부숙물의 부숙경시별 VS의 변화

서 빠른 시간내에 분해되지 못한다. 이는 톱밥을 구성하고 있는 리그닌이나 헤미셀룰로우즈 등이 상당한 난분해성 물질이므로 미생물에 의한 분해가 쉽



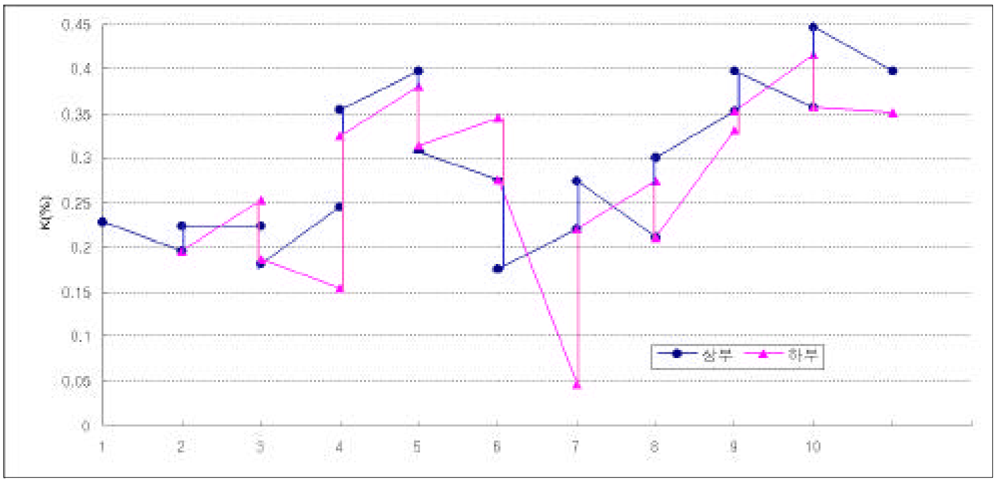
지 않기 때문이다. 그러나 퇴비화 시스템의 운영의 면에서는 오히려 장점이 될 수도 있다. 톱밥(혹은 수분조절재)이 가지는 역할은 분해되고 안정화되어야할 유기물로서가 아니라, 수분조절재로서 연속적인 투입되어 수분을 조절하여야 하고, 또한 첨공재(bulking agent)로서 전체 퇴비더미의 구조(matrix)를 유지하는 역할을 하여야 하기 때문이다.

VS의 경시별 부숙경향을 살펴보면 투입 후 4일간은 비교적 감소하는 경향을 보였으나 5일부터의 변화는 어떤 경향을 찾기가 쉽지 않다. 이는 상하부 반응조간 내용물의 순환 및 톱밥, 돈슬러리의 재투입에 따른 반응조내의 부숙혼합물과 새로 투입된 내용물간의 적정혼합비에 관한 검증이 어렵기 때문인 것으로 판단된다. 물론 이에 따르는 혼합의 정도에서 발생되는 균일한 시료채취의 어려움에서 오는 오차일 수도 있다. 그러나 전체적으로 5 10%의 감소를 보였으며, 이는 부숙이 진행되고 있음을 의미한다.

마. T-P・T-K의 변화

P와 K는 퇴비화시스템의 처리효율를 판별하는 직접변수는 아니다. 그러나 N과 함께 비료의 3요소로서 혼합물이 토양환원 또는 유기질비료로서 식

물에 이용하기 위한 간접적인 판별변수로서 분석하였다. 그리고 본 연구의 목적이 양질의 퇴비를 생산하기 위한 연구보다는 돈슬러리를 일차적으로 처리하는데 우선적인 목표가 있으므로 퇴비가 가지는 비료적가치는 다른 측면에서 의미가 있다. 혼합물의 부숙경시별 P, K의 변화는 <그림 4. 15>, <그림 4.16>와 같다.

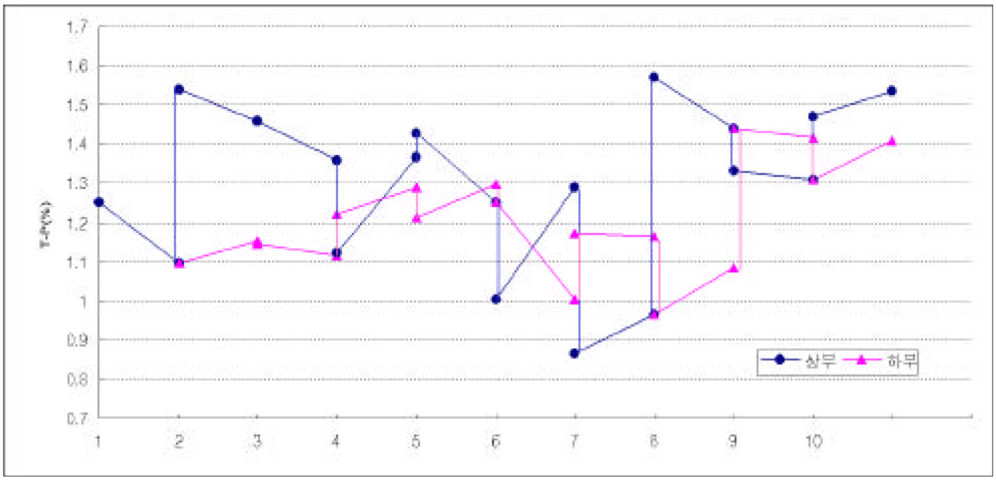


<그림 4.15> 부숙경시별 혼합물의 T-P 변화

초기 투입한 혼합물의 T-P는 1.25%, T-K는 0.23%로 나타났다. 그리고 부숙경시별 변화를 살펴보면 점차적으로 상승하는 것을 관찰 할 수 있다. 그러나 부숙물내의 T-P, T-K농도의 변화량을 정형화시키기에는 여러 가지 어려움이 있다. 특히 증가 또는 감소의 시점이 일정하지 않기 때문에 정확한 판단이 쉽지 않다. 이러한 문제는 1차적으로 정확한 시료의 채취의 어려움과 변화량이 매우 적은 값이라는 데 있다. 따라서 부숙기간을 충분히 길게

<그림 4.16> 부숙경시별 혼합물의 T-K변화

하므로써 성분의 증가를 유도하는 방법을 고려해볼 수는 있겠지만 획기적인 성분의 변화를 기대하기에는 어려움이 있다. 따라서 본 연구의 2차적 목적인 양질의 유기질비료의 생산을 위해서는 새로운 수분조절재의 개발 또는 비



료성분의 증가를 위한 첨가제의 개발도 고려해볼 필요가 있다. 유기질비료로서의 측면에서, 퇴비는 N 1.2%**이상**, P 0.5%**이상**, K 0.3% **이상을 요구하고 있으며, 본 시스템에서 생산된 부숙물의 경우 기준내에 포함되는 것을 알 수 있다.**

제 5 장 결 론

우리 나라 돈슬러리 처리의 기본 방향은 자원화 방법이며, 퇴비화는 자원화중 대표적인 방법중 하나로 본 연구에서는 밀폐 종형퇴비화시스템을 설계, 제작하여 돈슬러리의 퇴비화를 위한 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

① 혼합물의 최초 또는 재투입시 함수율은 수분조절재의 초기사용량, 수분감소율의 변화 정도 등을 고려하여 70% 내외가 적당할 것으로 판단된다.

② 투입열원과 함수율과의 관계를 보다 정확하게 구명하여 에너지효율을 극대화함은 물론이고, 투입초기 또는 가축분뇨수의 재투입 등의 경계구간 등을 기준으로 건조, 부숙 등의 운영전략을 결정하는 것이 바람직하다.

③ 가축분뇨수의 토양환원에 있어서 부숙의 정도는 토양과 식물에 여러 가지 영향을 줄 수 있다. 따라서 이러한 부숙도를 평가하기 위하여 온도, C/N ratio, VS 등을 분석하였다. 그 결과 외부에서의 열원공급은 충분하였으며, 부숙에 의한 온도변화도 있었다고 생각된다. 송풍에 따른 대류 열손실로 인하여 반응조내 온도가 고온단계 까지는 이르지 못하였지만, 중온은 지속적으로 유지되어 특히 중온성 미생물의 활동이 상당히 있었다고 판단된다.

인 용 문 헌

1) Merkel. J. A., 1981. Managing Livestock Wastes. AVI Publishing Company.
2) Harada Y., 1995. Practical Aspect of Animal Waste Composting. Int'l Training Course on Microbial Fertilizer & Composting. May 23-30,1995, Suwon.
3) Haug, R. T. 1993. The Practical Handbook of Compost engineering. Lewis Publishers
4) Golueke, C.G., 1972. Composting: a study of the process and its principles. Rodale Press, Emmaus, Pa.
5) Shuler M. L. and F. Kargi. 1992. Bioprocess engineering - Basic Concept. Prentice-Hall Inc.
6) Finstein, M. S., F. C. Miller and P. F. Strom. 1985. Waste treatment composting as a controlled system. pp. 363-398. In: Biotechnology: a comprehensive treaties in 8 vol. (H.-J. Rehm and G. Reed, Eds., Vol. 8. Microbial degradations, W. Schönborn, vol. Ed.). VCH, Weinheim.
7) Miller, F. C. 1991. Biodegradation of solid wastes by composting. In: Biological Degradation of Wastes. A. M. Martin (ed.) Elsevier Applied Science, London. pp. 1-30.
8) Shoda M. & C. G. Phae., 1988. Composting of Sewage Sludges: Its Trend and Controlling Factors. 동아대학교 환경문제연구소. 연구보고 11(2):327-333.
9) 신 항식, 황 응주, 정 연구. 1994. 음식쓰레기 퇴비화시 bulking agent의 적정첨가량 결정에 관한 연구. 유기성폐기물자원화, 한국유기성폐기물자원화협의회. 제2권 제1호, 75-86, 1994.
10) 최 홍림, 김 현태, 정 영륜. 1993. 전업양축농가의 축분뇨처리시스템 개발을 위한 모형실험. 한국생물생산시설환경학회 제 2권 제1호.
11) Paletski W. T. and Young J. C. Stability measurement of biosolids compost by aerobic respirometry. J of Compost science & utilization vol 3, No 2.
12) 정 광용. 1995. 유기질 및 부산물 비료 활용상의 실제, 유기성 폐기물 비료화의 문제점과 대책 심포지엄. 한국토양비료학회.