

미생물 종균제(KMT-199)를 이용한 퇴비제조 공정의 악취제거

남이, 김국진*, 성기철*, 박기돈*, 김진만**

농협중앙회 영농자재부, *(주)인바이오넷 부설연구소, **여수대학교 생물공학과

Prevention and Control of Composting Odors Using Microbial Inocula, KMT-199

Y. Nam, G. J. Kim*, K. C. Sung*, K. D. Park*, J. M. Kim**

Farm Inputs department, National Agricultural Cooperative Federation

**Inbionet Corporation*

*** Dept of Biological Engineering, Yosu National University*

ABSTRACT

Generation of gaseous ammonia has been a major problem in composting facilities. Microbial inocula, KMT-199 (brand name: CompoBac™), was developed in INBIONET CORPORATION and tested in the field for its ammonia reducing capability. When KMT-199 was applied, a ten-fold increase of mesophilic and thermophilic microorganisms was observed during the early stage of composting process. Also, the temperature and pH of early stage compost increased at a higher rate when compared to control. KMT-199 treated compost reached highest temperature of 75°C at day 9, indicating treatment could shift the maximum composting temperature to 3 days earlier. The highest temperature also reached 3°C higher than the control. The pH of compost gradually increased during composting. KMT-199 treated compost reached a plateau of pH 9.32 at day 15 after treatment, and then slowly decreased thereafter. On the other hand, pH of the control steadily increased until day 38 of composting. 29% reduction of gaseous ammonia generation during composting was observed compared to that of the control. KMT-199

amended compost resulted in a higher germination rate of radish seeds than the control. These results indicate that application of microbial inocula facilitates degradation of organic materials, including ammonia during the composting process.

Key words : composting, gaseous ammonia, microbial inocula

요 약 문

퇴비 제조장에서 발생하는 여러 가지 악취원 중 가장 문제가 되는 암모니아가스의 발생량을 감소시키기 위하여 (주)인바이오넷에서 유용미생물을 제제화 하여 개발한 미생물종균제, KMT-199(상품명: 콤포백)를 사용하여 현장시험을 수행하였다. KMT-199를 첨가한 경우 퇴비화 초기단계에서의 중온성, 고온성 미생물밀도가 무처리구에 비하여 10배 이상 증가되었으며, 발효 초기의 퇴비 내 온도와 pH의 증가 폭이 크게 나타났다. 온도는 KMT-199가 첨가된 처리구에서 발효 9일째, 75℃로 가장 높게 측정되어 무처리구에 비하여 퇴비의 최고 발열 시간을 3일 앞당겼으며, 최고 온도는 4℃ 높았다. pH는 퇴비화가 진행되면서 지속적으로 증가되었는데, KMT-199가 첨가된 처리구에서는 발효 15일 쯤 이후에는 더 이상 증가하지 않고 감소되는 경향을 보였으나, 무처리구에서는 발효 38일 쯤 까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 교반식 퇴비화 공정에 KMT-199를 투여한 결과 암모니아 가스의 발생량을 무처리구에 비하여 29% 감소시킬 수 있었다. KMT-199를 사용하여 제조된 퇴비의 경우 대조구에 비하여 무 증자의 발아율이 증가하는 것으로 나타났다. 이것은 퇴비화 과정에서 미생물 생태를 변화시켜 줌으로서 퇴비화 과정에서 발생하는 유기물의 분해 촉진, 퇴비의 온도 상승, 화학적변화의 촉진으로 퇴비의 부숙도 증가와 암모니아 가스 발생량이 감소된다는 것을 나타낸다.

주제어 : 퇴비화, 암모니아가스, 미생물 종균제

1. 서 론

각종 농업활동에 수반되어 발생하는 유기성 폐기물들을 비료로 활용하기 위한 퇴비화 연구는 최근 들어 퇴비화공학(compost engineering)의 형태로 기술적 체계가 마련되어 가고 있다. 퇴비화에 관련된 연구들은 주로 퇴비화 공정을 최적화 시키고 퇴비의 질을 향상시키기 위한 미생물학¹⁾, 퇴비화 역학(composting kinetics), 공정설계, 악취제어, 식물병원성 미생물의 제어, 환경오염물질의 제거 등 다양한 분야에서 이루어지고 있다. 특히 축

산분뇨를 주원료로 이용하는 퇴비화는 폐기물 처리에 드는 비용을 절약하고 자원을 재활용한다는 측면 외에도 퇴비가 환경농업의 소재로 적절히 사용될 수 있다는 등의 여러 가지 장점을 가지고 있어서 비교적 많은 연구가 이루어지고 있는 분야이다. 1997년 통계에 의하면 국내에서는 연간 발생되는 가축분뇨 4,300만 톤 중 약 63%가 퇴비로서 자원화 되고 있는데, 최적화 되지 못한 공정에서 제조되는 퇴비의 부숙도 부족으로 인한 농작물 피해와 공정에서 발생하는 악취에 의한 인근 거주자 피해 등이 해결해야 할 문제점으로 지적되고 있다.

퇴비화 공정 중에 발생하는 악취는 일반적으로 지나치게 낮은 C/N비, 높은 수분함량, 낮은 산소공급도 등에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있다. Pohle³⁾ 등은 퇴비화 과정에 발생하는 휘발성 가스 158종을 검출, 분류하여 퇴비화 초기단계에서는 알코올, 에스테르, 카르보닐산 등이 주성분이고 고온 단계에서는 황화합물에 의한 악취가 주로 발생하며, 암모니아가스는 마지막 단계에서의 주요 악취 임을 밝혔다. Smet⁴⁾ 등은 호기적 퇴비화와 혐기적 퇴비화 과정에서 발생하는 휘발성 물질에 대한 연구에서 암모니아가스는 혐기적 퇴비화에 비하여 호기적 퇴비화에서 17배 낮게 방출된다고 보고하였다. 지금까지 대부분의 연구는 이화학적 조건에 따른 악취 발생 저감 효과이고, 생물학적 접근에 대한 연구는 많지 않은데, Varel⁵⁾에 의해 요소분해효소(urase)의 효소 작용 억제제를 이용한 암모니아 발생 억제 연구가 알려져 있다. 또한, Hennlich^{6, 7)}는 돼지의 액상 분뇨에서 지속적인 통기보다는 간헐적인 통기를 할 경우, 악취 발생이 적었으며, 악취 발생이 작은 분뇨에서는 그람음성세균(Gram negative bacteria)과 비발효성세균(non fermentative bacteria)가 주로 발견된다고 보고하였다.

오염토양이나 폐수의 생물학적 정화(bioremediation)와 악취 및 휘발성 유기물질의 생물학적 제거를 위한 바이오필터(biofilter) 등의 다양한 응용 분야에서 특수한 미생물 종균제(microbial inoculant)를 개발하여 적용하고자 하는 생물학적 정화(bioaugmentation)에 대한 연구들이 활발히 이루어지고 있는데 이러한 연구들의 목적은 오염토양이나 폐수에 내재되어 있는 유용미생물 보다 효과적인 미생물을 개발, 배양하여 접종함으로써 생물학적 공정의 효율성을 극대화 시키고자 함에 있다. 그러나 퇴비화에 있어서의 생물학적 정화에 대한 연구는 상대적으로 부족함에도 그 이유는 퇴비화 공정이 중온기, 고온기, 안정기 등 단계

별로 다양한 종류의 미생물들에 의하여 이루어지는 복잡성을 가지고 있고, 닭 털과 같은 난분해성 유기물질을 원료로 하는 경우 등을 제외하고는 미생물 접종제를 사용하지 않고도 탄질물, 산소공급도, 수분함량 등 공정적인 요소들을 제어함으로써 충분히 효율적인 공정을 유지할 수 있기 때문이다. 미생물 종균제를 퇴비화에 적용한 대표적인 예는 Hoitink 등⁸⁾이 식물병원성 미생물에 대해 길항작용을 할 수 있는 Trichoderma 종을 퇴비 내에 고밀도로 증식 시키기 위해서 시도한 조절된 접종원(controlled inoculation)에 대한 연구이다. 최근에는 생물학적 정화와 관련하여 유용미생물 단일종에 대한 순수배양체(pure culture)나 이들의 혼합체(mixed culture)와는 달리, 2종 이상의 여러 가지 미생물들이 밀접하게 공존하면서 확실한 우점종으로서의 상승효과를 나타낼 수 있는 미생물 군락(microbial community) 또는 미생물학적 컨소시아(microbial consortia)를 생물학적 정화나 퇴비화 등 다양한 분야에 응용하고자 하는 연구들이 활발히 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 궁극적으로 특정 환경에서의 미생물의 생태를 조절함으로써 생물학적 공정의 효율을 극대화 시키기 위한 미생물 생태학적 제어(microbial ecology management)기술을 확보하는데 그 목표를 두고 있다. 본 연구에서는 국내에서 보편적으로 적용되고 있는 교반식 퇴비화 시설에서 축산분뇨를 주 원료로 사용하는 공정 중에 발생하는 악취를 효과적으로 제어하기 위해 퇴비 내의 미생물 생태에 효과적이고 유용한 변화를 줄 수 있는 미생물 종균을 개발, 적용한 결과에 대한 것이다.

2. 재료 및 방법

2.1 미생물 종균제(KMT-199)

본 연구에서 사용된 KMT-199는 (주)인바이오넷

에서 기개발된 제품으로 상품명은 콤포백™이다. KMT-199는 각종 유기물을 효과적으로 분해하는 효소를 대량으로 생산하고 유기물 분해 시 암모니아 및 황화수소의 발생이 적은 미생물이 함유되어 있다. KMT-199에 함유된 각각의 미생물은 5리터 배양기(Jar Fermentor)를 이용하여 각각 순수 배양한 다음, 원심분리하여 0.1M 인산완충용액(phosphate buffer)에 현탁하고, 현탁액을 제오라이트에 흡착하여 각각의 함유 미생물이 최종 1.0×10^8 cfu/g이 되도록 제조하였다. 실험에 사용된 KMT-199에 함유된 미생물은 *Bacillus* sp. 4 종, *Pseudomonas* sp. 1 종, *Rhodobacter* sp. 1 종, *Saccharomyces* sp. 1 종, *Cellulomonas* sp. 1 종, *Lactobacillus* sp. 1 종, *Trichoderma* sp. 1 종, *Rhizopus* sp. 1 종이였다. KMT-199는 퇴비 원료 10톤 당 1kg을 골고루 혼합하여 사용하였다.

2.2 현장 시험을 위한 퇴비 제조장

현장 시험은 경기도 이천시 모가면 소재 M퇴비 제조장에서 시험하였으며, 퇴비 제조장의 퇴비 생산 방식은 국내에서 보편적으로 사용되는 교반발효식 제조시설이었다(Fig. 1, 2). 사용되는 원료는 축산분뇨로 액상 돈분과 우분, 계분을 사용하고,

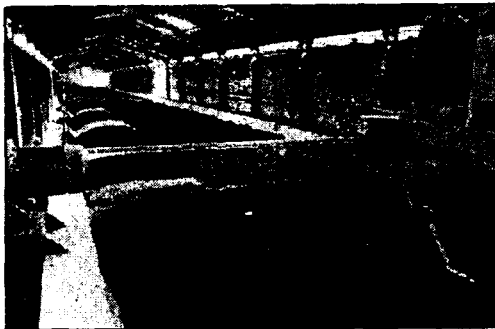


Fig. 1. Type composting facility.



Fig. 2. Curing process of composting.

수분조절제(bulking agent)로는 톱밥과 팽연 왕겨를 사용하였다. 축산분뇨와 수분조절제는 무게비로 3:7의 비율로 혼합하여 3~4일간 쌓아 두고, 통풍이 되는 교반발효조로 이송하여 10~15일간 매일 1회 교반하였다. 그 이후에는 윈드로(windrow)방식의 발효 방식으로 1주일에 1회씩 뒤집기를 하였다.

2.3 퇴비의 이화학적 특성

퇴비의 pH는 퇴비 부피 10배의 증류수에 희석한 후 측정하였으며, 퇴비더미의 온도는 퇴비 온도계(OMEGA)를 이용하여 표면에서 1m깊이 이상의 온도를 측정하였다. 퇴비에서 발생하는 암모니아의 농도를 측정하기 위해서는 100g의 퇴비 시료로부터 발생한 가스를 암모니아 측정계(GASTEC No.3 La)을 이용하여 측정하였다.

2.4 퇴비의 무찌 발아율 측정

농촌진흥청의 퇴비 간이 부숙도 판정법을 이용하여 무 증자에 대한 발아율을 측정하였다¹²⁾.

2.5 미생물밀도 조사

채취한 퇴비를 그늘진 곳에서 풍건한 다음, 막자 사발로 곱게 마쇄한 시료 5g을 멸균증류수에 희석하여 상온에서 30분간 진탕한 후 희석한천평판법으로 영양한천배지(BBL)에 도말하였다. 고온성미생물은 45℃, 중온성미생물은 28℃항온배양기에서 3일간 배양하여 나타난 집락의 수로 그 밀도를 정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경과시간에 따른 온도 변화

퇴비가 진행되면서 퇴비의 구성 성분인 유기물은 산화 분해 되면서 열이 발생되어 퇴비의 온도가 증가하기 시작하는데, 본 시험에서는 KMT-199가 첨가되었을 때에 온도 상승 기울기가 크게 나타났다(Fig. 3B, Fig. 4B). KMT-199가 첨가

된 퇴비구에서는 발효 9일째, 퇴비더미의 온도가 75℃에 도달하였으나, 무처리구에서는 발효 12일째, 71℃에 도달하였다. 본 시험은 1999년 6월부터 7월까지 수행되었으므로 외기 온도는 25℃~32℃를 유지하였다. 고온 단계를 거치면서 퇴비의 온도는 서서히 낮아지며, KMT-199를 첨가하지 않았을 때가 온도 감소 폭이 큰 것으로 나타났다. 퇴비에 접종된 KMT-199에 함유된 미생물(exogenous microbes)은 퇴비원료에 존재하는 미생물(indigenous microbes)에 비하여 유기물 분해력이 높아 퇴비에 함유된 유기물의 분해를 촉진함으로써 퇴비의 발열 기간을 줄이고, 발열 온도를 높여 주었다.

3.2 경과시간에 따른 pH변화

정¹⁾ 은 퇴비가 진행되면서 일어나는 가장 주

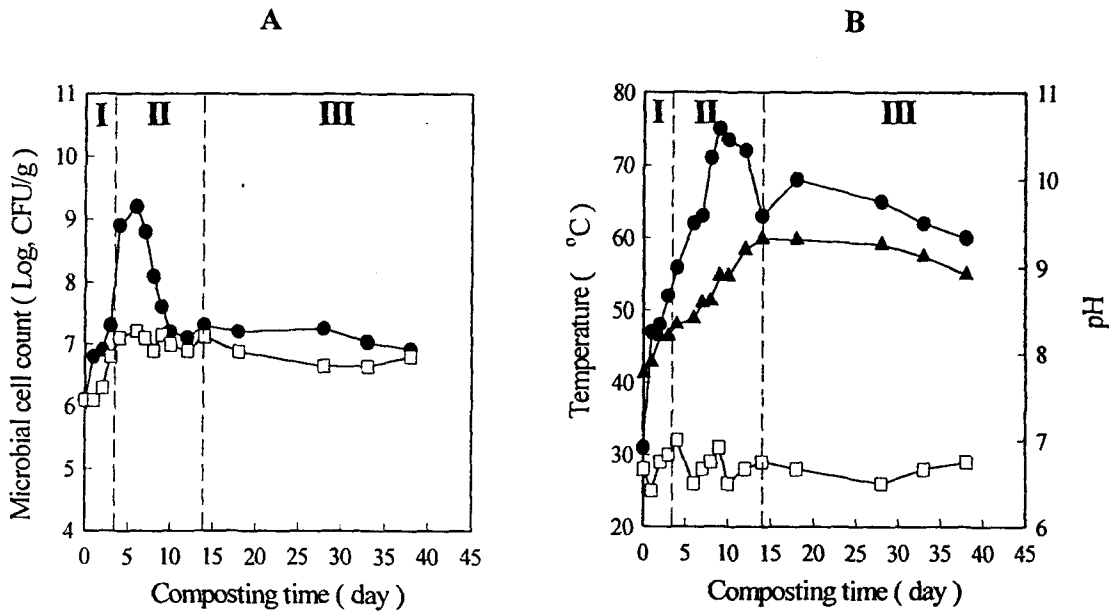


Fig. 3. Time courses of composting addition of microbial inoculum. A; Microbial cell count of mesophilic(●) and thermophilic(□) microorganism. B ; time courses of atmosphere temperature(●), compost temperature(□), and pH(▲). I ; precomposting phase, II; turning/aerated phase. III ; aerated phase.

된 화학적 변화는 탄소원이 부식으로 변화하는 것이며, 미생물에 의하여 퇴비 내 분해되기 쉬운 당류와 단백질 등이 분해되면서 산(acid)이 생성되어 퇴비의 pH는 산성화 되었다가 퇴비 내에 암모니아가 형성되면서 다시 pH가 높아진다고 보고한 바 있다. 그러나 본 실험에서는 pH가 낮아지는 경향은 나타나지 않았으며, 퇴비화가 진행되면서 바로 pH는 상승하였고, KMT-199를 첨가한 퇴비구에서는 pH 9.32까지 증가하였다가 감소하였다 (Fig. 3B, Fig. 4B). 교반 발효조를 빠져 나오는 15일 쯤 부터는 pH증가 폭이 완만해지면서 서서히 안정화 단계로 전환된다는 것을 알 수 있었다. 그러나 무처리구에서는 퇴비의 가장 높은 pH는 9.23으로 퇴비화 기간 동안 지속적으로 pH는 상승되었다.

3.3 퇴비의 미생물학적 생태 변화

퇴비의 미생물 밀도는 교반 발효조를 거치면서 가장 높은 미생물 밀도를 나타냈으며, KMT-199를 첨가한 경우가 그렇지 않은 경우에 비하여 미생물밀도의 증가 폭이 크며, 이러한 경향은 중온성 미생물과 고온성 미생물의 밀도에서 동일하게 나타났다. 한편, 고온기가 유지되는 10일 이후에는 중온성 미생물과 고온성 미생물의 밀도에서도 안정화되는 양상을 나타내지만 KMT-199를 첨가한 경우에서 약 10배 높은 미생물 밀도를 나타내었다 (Fig. 3A, Fig. 4A). 이러한 결과는 미생물 종균체가 첨가되지 않은 퇴비의 경우, 퇴비화가 진행되면서 자연적으로 미생물의 천이가 천천히 이루어지면서 세균, 방선균, 곰팡이 등 다양한 미생물이 우점을 차지하게 되는데, 인위적으로 미생물을 접종하게 되면, 이러한 기준이 느린 미생물 천이 과

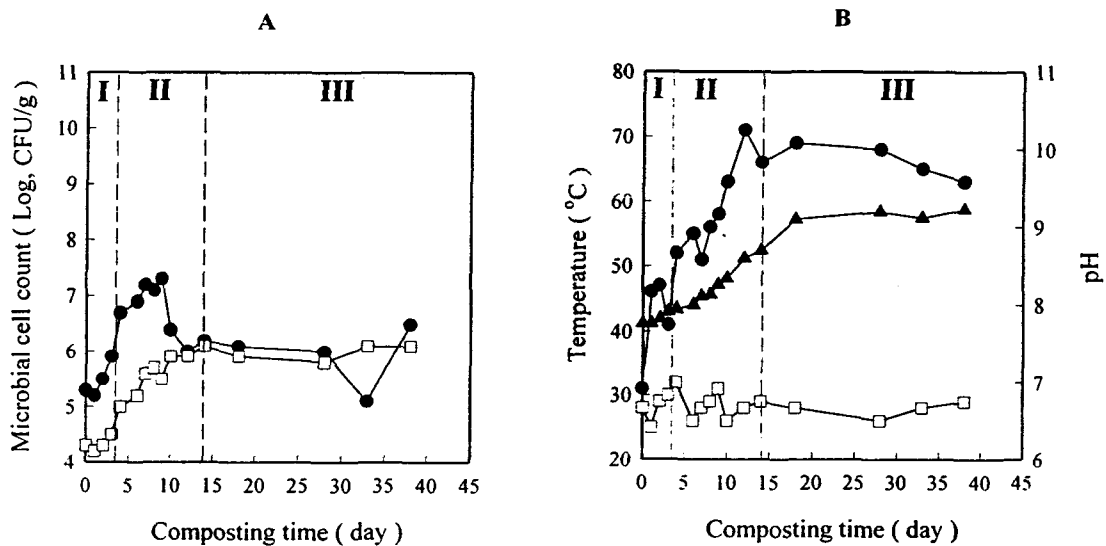


Fig. 4. Time courses of composting non-addition of microbial inoculum. A; Microbial cell count of mesophilic (●) and thermophilic (□) microorganism. B; time courses of atmosphere temperature (□), compost temperature (●), and pH (▲). I; precomposting phase, II; turning/aerated phase, III; aerated phase.

정을 거치지 않고, 접종된 미생물의 콘소시아가 퇴비 내에 빠르게 우점화 되는 것으로 생각된다.

3.4 퇴비에서 발생하는 암모니아가스 발생량

외기로 방출되는 암모니아가스의 농도는 교반 발효조에 투입된 이후에도 계속 증가되는 양상으로 나타나지만 교반 발효조에서 KMT-199가 투입된 경우에는 30ppm/100g(퇴비)이하의 농도로 발생되고 무처리구에서는 60ppm/100g(퇴비)이상의 발생량을 나타내었다. 교반 발효조를 통과한 퇴비에서는 KMT-199를 투여한 경우와 그렇지 않은 경우에서 모두 50 ~100ppm/100g(퇴비)의 암모니아가스가 발생되었다. 시험 기간 동안 퇴비에서 발생한 암모니아의 농도를 Fig. 5에 나타난 암모니아 농도의 면적을 상대적으로 비교할 경우, KMT-199가 첨가된 처리구가 무처리구에 비하여 29%

낮게 발생하였다. KMT-199를 처리하지 않은 경우에는 암모니아 가스 발생량은 지속적으로 증가하였으나 KMT-199를 첨가한 경우에는 암모니아 발생량은 더 이상 증가하지 않고 안정화 되었다(Fig. 5). 이러한 결과는 퇴비 원료에 함유된 질소원이 퇴비 내에 내재되어 있는 암모니아 생산 미생물들에 의하여 암모니아로 변화하지 않고, 인위적으로 접종된 미생물의 consortia에 의하여 미생물의 영양원으로 이용되거나, 다른 질소화합물 형태로 퇴비 내에 존재하게 되는 것으로 생각된다.

3.5 퇴비의 부숙도

퇴비의 부숙도는 퇴비의 원료와 퇴비화 조건에 따라 다르다. 퇴비화 종료 여부를 측정하는 것은 퇴비의 생산 및 사용적 측면에서 매우 중요하지만, 퇴비의 부숙도는 특정한 물리화학적 요인으로 결정

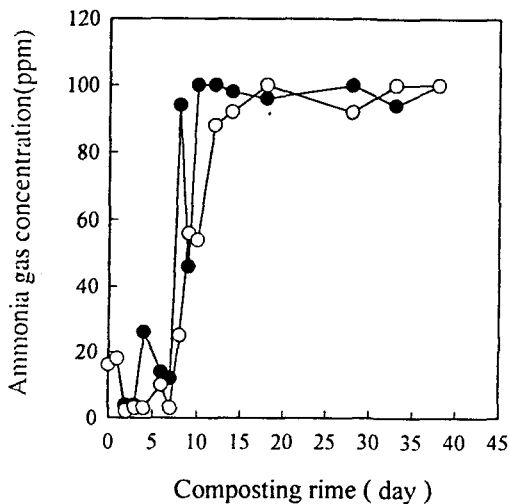


Fig. 5. Emission of ammonia gas during composting. addition of microbial inoculum(●), non-addition of microbial inoculum(○).

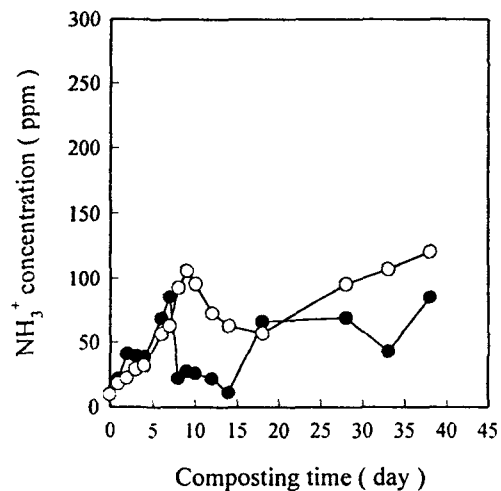


Fig. 6. Radishes germination rate of compost during composting period. addition of microbial inoculum(●), non-addition of microbial inoculum(○).

될 수 없으며, 대부분 온도, 탄산가스 발생량, 탄질비, 산화환원전위(Redox potential), 식물생육 억제 정도를 종합적으로 감안하여 퇴비화 정도를 추적하고 있다. 본 연구에서는 퇴비의 최종 적용처인 식물체에 직접 적용하는 식물의 발아 억제 정도를 판정함으로써 퇴비의 부숙도를 측정하였다. 무종자를 이용한 퇴비 추출액을 이용한 발아율을 조사한 결과, KMT-199를 처리한 경우에서는 10일 이상 경과된 퇴비에서 무 발아 억제 작용을 나타내지 않았으나, 무처리구에서는 14일 이상이 경과된 퇴비에서만 발아를 억제하지 않았다(Fig. 6). 이러한 결과는 퇴비화 초기 단계에서 KMT-199가 퇴비화를 촉진하여 퇴비의 무 발아 억제기간을 4일 단축하였음을 나타내며 이러한 결과는 농촌진흥청의 연구결과와도 일치하였다^{10 11)}.

4. 결 론

다양한 유기물 분해 효소를 다량으로 생산하고 유기물 분해 시 암모니아 가스의 발생이 적은 미생물을 자연계로부터 분리하여 유산균과 토양유래 진균 등과 함께 퇴비의 종균제로 사용하여 퇴비화에 미치는 영향을 조사하였다.

1. 퇴비에서 발생하는 온도는 KMT-199가 첨가된 처리구에서 발효 9일째, 75℃로 가장 높게 측정되어 무처리구에 비하여 퇴비의 최고 발열 시간을 3일 앞당겼으며, 최고 온도는 4℃ 높았다. 퇴비의 pH는 퇴비화가 진행되면서 지속적으로 증가되었는데, KMT-199가 첨가된 처리구에서는 발효 15일째 이후에는 더 이상 증가하지 않고 감소되는 경향을 보였으나, 무처리구에서는 발효 38일째 까지 지속적으로 증가하는 경향을 나타내었다.
2. 발효기간 동안 퇴비의 고온성미생물과 중온성미생물의 밀도는 KMT-199가 첨가된 처리구에서 약 10배 높은 밀도로 측정되었다.

3. 전체 발효기간동안 발생한 암모니아 발생량은 무처리구에 비하여 29% 감소하였다.
4. 현장의 퇴비를 채취하여 실내 검정을 통하여 퇴비의 발효 시간에 따른 무 종자 발아시험에서는 발효 초기의 무 성장억제가 감소되었으나, 무처리구의 퇴비에서도 발효 14일 이후의 퇴비는 무종자의 발아를 억제하지 않았다. 이러한 결과는 유기물 분해력이 높고, 유기물 분해 시 악취 발생이 적은 미생물을 퇴비화 초기에 접종하여 퇴비 내에 우점화 되게 함으로서 퇴비의 부숙을 촉진하고, 악취발생을 감소시켜 준다는 것을 보여 주었다.

5. 참 고 문 헌

1. Herrmann, R. F., and J. F. Shann, "Microbial Community Changes During the Composting of Municipal Solid Waste" *Microbial Ecology*, 33, pp. 78-85(1997)
2. Hoitink, H. A., and M. J. Boehm, "Mechanisms of Suppression of Soilborne Plant Pathogens in Compost-Amended Substrates. In *Science and Engineering of Composting*, The Ohio State University, pp.601-621(1993)
3. Pohle, H., and R. Kliche, "Emission of odors from composting of biological waste" *Zentralbl Hyg Umweltmed*, 199(1), pp. 38-50(1996)
4. Smet, E., H. V. Langenhove, and I. D. Bo, "The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting of biowaste" *Atmospheric Environment* 33, pp. 1295-1303(1999)
5. Varel, V. H., "Managing manure nitrogen to curb odors" *Agricultural research magazine* 46(10), (1998)
6. Hennlich, W., "Microflora in swine slurry as a

- parameter in determining the efficiency of deodorizing treatment. I. Continuous and discontinuous aeration treatment" *Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. [B]* 181(1-2), pp. 37~51(1985)
7. Hennlich, W., "Microflora in swine slurry as a parameter in determining the efficiency of deodorizing treatment. II. Treatment with ammonium peroxydisulfate" *Zentralbl. Bakteriol. Mikrobiol. Hyg. [B]* 181(1-2), pp. 52~63(1985)
8. Sanchez, G., E. J. Olguin. and G. Mercado, "Accelerated coffee pulp composting. Biodegradation" 10(1), pp. 35~41(1999)
9. Tiquia, S. M., N. F. Y. Tam, and I. J. Hodgkiss, "Effect of Turning on Composting of Spent Pig-Manure Sawdust Litter" *Bioresource Technology*, 62, pp. 37~42(1997)
10. 윤세영, "유기농업에 관한 보고서" 농촌진흥청(1992)
11. 황광남, "우리나라 유기농업의 현황" 유기농업기술, 충청북도 농촌진흥원(1996)
12. 농촌진흥청, "퇴비의 간이 부숙도 판정법" 농촌진흥청(1995)
13. 정영륜, "유기성 폐기물 퇴비화의 미생물 생태학적 분석" *미생물과 산업*, 18(3), pp. 10~22(1992)