

## 실험실 규모 하수슬러지 퇴비화공정에서 기계적 교반이 배출가스 내 부유세균과 내독소의 발생특성에 미치는 영향

### Effect of Mechanical Agitation on Generation of Airborne Bacteria and Endotoxin in Exhaust Gases from Lab-Scale Composting of Sewage Sludge

김익현 · 김기연\* · 배재근 · 김대근<sup>†</sup>

Ik hyeon Kim · Ki youn Kim\* · Chae gun Phae · Daekeun Kim<sup>†</sup>

서울과학기술대학교 환경공학과 · \*부산가톨릭대학교 산업보건학과

Department of Environmental Engineering, Seoul National University Science and Technology

\*Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan

(2012년 1월 4일 접수, 2012년 2월 29일 채택)

**Abstract :** This study was performed to investigate the concentration variation of airborne bacteria and endotoxin by the temperature in the compost pile in order to identify the generation characteristics of biological factors in the exhaust gases generated from lab-scale sludge composting reactors (0.06 m<sup>3</sup> of total reactor volume). Airborne bacteria showed the highest concentration of generation (1.03 × 10<sup>5</sup> CFU/m<sup>3</sup>) in the composting reactor without mechanical agitation, and similar change tendency to temperature variation of composting, but somewhat lower statistical significance (p > 0.05). In the compost reactor with mechanical agitation, endotoxin showed similar generation characteristic to temperature variation of composting (statistical significance; p < 0.05) and the highest generation concentration to 1,415 EU/m<sup>3</sup>. Mechanical agitation of the composting process affected activity of microorganism and positive generation of endotoxin in exhaust gases. Endotoxin and airborne bacteria showed similar tendency of generation, especially the highest statistical correlation was observed in the compost reactor without mechanical agitation (statistical significance; p < 0.01).

**Key Words :** Waste Sludge, Composting, Agitation, Airborne Bacteria, Endotoxin

**요약 :** 본 연구는 퇴비화 공정에서 발생하는 배출가스 내 생물학적 인자의 발생 특성을 파악하기 위하여 퇴비단 온도변화에 따른 부유세균과 내독소의 발생농도를 관찰하였다. 실험은 도시하수슬러지를 대상으로 실험실 규모의 기계적 교반이 가능한 퇴비화 장치(반응기 부피 0.06 m<sup>3</sup>)에서 실시되었다. 부유세균은 미교반 퇴비화 공정에서 퇴비단 온도변화와 유사한 발생경향을 보였지만 통계적 유의성이 다소 낮았고(p > 0.05), 최고 발생농도는 1.03 × 10<sup>5</sup> CFU/m<sup>3</sup>이었다. 내독소는 기계교반 퇴비화 공정에서 퇴비단의 온도변화와 유사한 발생경향을 보였으며(통계적 유의성: p < 0.05), 최고 발생농도는 1,415 EU/m<sup>3</sup>이었다. 퇴비화 공정의 기계적 교반이 퇴비단 미생물의 활성과 이에 따른 배출가스 중 내독소 발생 증가에 영향을 미친 것으로 보인다. 내독소의 발생농도와 부유세균의 발생농도는 유사한 발생 경향을 보였으며, 특히 미교반 퇴비화공정에서 높은 통계적 상관성이 나타났다(통계적 유의성: p < 0.01).

**주제어 :** 하수슬러지, 퇴비화, 교반, 부유세균, 내독소

## 1. 서론

국내 하수슬러지의 발생량은 2001년 190만톤에서 2009년 303만톤으로 약 110만톤 이상 증가하였으며,<sup>1)</sup> 경제발전 및 생활수준이 향상됨에 따라 하수슬러지의 발생량이 증가하고 있다. 현재 하수슬러지의 처리정책은 자원화를 통한 매립의 최소화 방향으로 시행되고 있다. 하수슬러지 자원화시설에는 소각시설 및 건조시설, 탄화시설, 퇴비화시설 등이 있다. 이 중 하수슬러지 퇴비화시설은 2009년 기준으로 34개소이며, 하수슬러지 전체 재이용량의 14%에 해당하는 연간 10.9만 톤을 처리하고 있다.<sup>2)</sup>

퇴비화시설에서 대기 중으로 배출될 수 있는 유해인자에 는 악취, 휘발성유기화합물, 바이오에어로졸(Bioaerosol) 등이 있다.<sup>3-5)</sup> 이 중 생물학적 유해인자에 속하는 바이오에어

로졸은 부유세균(Airborne bacteria), 부유곰팡이(Airborne fungi), 부유바이러스(Airborne virus) 등의 부유미생물군과 그람 음성세균의 외부 세포막에 존재하는 세포내독소(Endotoxin)와 곰팡이독(Mycotoxin) 등을 포함한다.<sup>6)</sup> 바이오에어로졸은 입자상 물질에 흡착되거나 그 자체로 호흡을 통해 인체와 가축의 폐포에 도달하여 폐렴, 천식, 기관지염, 비염 등과 같은 호흡기 계통의 질병을 유발하는 것으로 보고되고 있다.<sup>6,7)</sup> 특히 내독소는 면역체계의 활성에 영향을 미치며, 포유류에게 1 ng/mL의 낮은 주입량만으로도 발열 반응과 쇼크를 유발시킨다.<sup>8)</sup> 그러나 국내·외적으로 공기 중 생물학적 유해인자에 대한 관리기준은 매우 미흡한 실정이며, 또한 적절한 관리기준 마련을 위한 배출시설에 대한 현장 분석 자료는 전무한 실정이다.

일반적으로 퇴비화 공정은 퇴비단식과 기계식 공정으로 나

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: kimd@snut.ac.kr Tel: 02-970-6606 Fax: 02-971-5776

낼 수 있으며, 공정의 주요 영향인자에는 원료 입자크기, 수분함량, 온도, 산소, pH, C/N비, 교반(agitation) 등이 있다.<sup>9)</sup> 기계식 교반 공정은 퇴비단식 공정에 비해 초기 투자비와 건설비용이 많이 소요되지만, 부지소요면적이 적고 퇴비화영향인자를 인위적으로 제어할 수 있어 악취 등 공정 운전상 발생하는 문제점을 상대적으로 쉽게 해결할 수 있다.<sup>10)</sup> 따라서 대부분 퇴비화시설은 기계적 교반공정을 적용하여 설치·운영되고 있다.

본 연구는 하수슬러지 퇴비화공정에서 배출되는 공기 중 생물학적 유해인자의 발생특성을 파악하고자 실시되었다. 본 실험은 실험실 규모의 퇴비화장치를 이용하여 퇴비화 진행 시간에 따른 퇴비단 온도변화를 관찰하고, 배출가스 중 생물학적 유해인자인 부유세균과 내독소의 발생농도를 분석하였다. 또한 퇴비화 공정에서 기계적 교반의 실시여부가 부유세균과 내독소의 발생에 미치는 영향을 파악하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1. 연구대상시료

본 연구에서 사용된 퇴비원료는 경기도 소재 공공하수처리시설에서 발생된 탈수슬러지이다. 탈수 처리된 하수슬러지의 수분 함유율은 80.6%이었으며, 톱밥(수분 함유율 12.1%, 입자크기 10 mm, 겉보기 밀도 66.7 kg/m<sup>3</sup>)을 공극개량제로 혼합하여 퇴비화를 위한 초기 수분 함유율을 50%로 조절하였다. 퇴비화 반응기에 충전된 퇴비원료의 총 부피는 0.04 m<sup>3</sup>(부피기준: 하수슬러지 60%, 공극개량제: 40%)이었다.

### 2.2. 실험장치 및 운전

실험에서 사용된 호기성 퇴비화장치는 Fig. 1에 제시된 바와 같다. 반응기는 지름 0.35 m, 높이 0.85 m, 전체부피 0.06

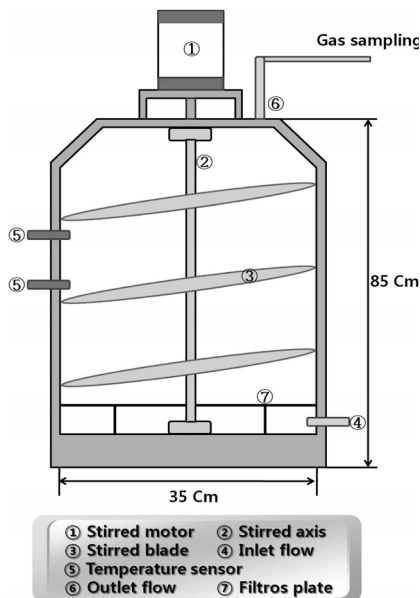


Fig. 1. Schematic diagram of a lab-scale composting reactor.

m<sup>3</sup>의 스테인리스 재질로 만들어진 원통형이며, 총 2기가 제작되었다. 반응기는 보온이 가능하고 외부로부터 퇴비화 과정에 미칠 수 있는 영향을 최소화하기 위하여 완전 밀폐가 가능한 구조로 제작되었다.

반응기는 상부에 장착되어 있는 교반모터에 나선형으로 만들어진 교반축을 결합하여, 반응기 내 시료가 원활히 교반될 수 있도록 제작되었다. 반응기 하단에는 공기 유입구를 설치하여 호기성 반응이 유지될 수 있게 설계되었다. 퇴비단에서 발생한 가스는 반응기 상단에 위치한 가스 배출구를 통하여 배출되며, 공기시료 채취를 위해 가스 배출구는 공기시료 채취장치와 연결이 가능하도록 설치되었다. 또한 퇴비단의 온도변화를 추적하기 위하여 반응기 내부에 두 개의 온도센서를 설치하였으며, 설치된 위치는 반응기 하단으로부터 40 cm와 50 cm이었다.

본 실험의 주요 공정 운전인자는 교반이며, 기계적 교반이 수반된 퇴비화 실험과 미교반 퇴비화실험을 각각의 동일한 반응기에서 수행하였다. 실험실 퇴비화의 총 운전기간은 330 hr이었다. 실험은 초기 시료 투입 후로부터 기계적 교반 퇴비화공정에서는 1일 1회, 10 rpm으로 교반을 실시하였다. 반응기의 유입공기는 수분트랩을 통과하여 수분이 제거된 건조한 상태로 2.5 L/min의 유량으로 공급되었다. 반응기 퇴비단의 온도는 4시간 간격으로 측정되었다.

### 2.3. 시료 포집

반응기에서 배출되는 가스시료의 포집은 반응기 상단에 위치한 가스 배출구에서 실시되었으며, 퇴비화 반응기간 동안 총 8회 진행되었다. 가스포집방법은 바이오샘플러를 이용한 흡수법이다. 바이오에어로졸의 포집방법 중 흡수법에는 AGI-30 (AGI-30, Ace Glass inc. USA)과 Biosampler (Biosampler, SKC inc. USA)가 많이 이용되고 있다. Biosampler는 AGI-30보다 흡수액의 증발현상이 적으며, 배출가스가 흡수될 때 발생하는 소용돌이 효과를 줄여 흡수액 표면에 흡수되지 못하고 배출되는 입자를 최소화시킬 수 있다.<sup>11)</sup> 이러한 이유로 인하여 흡수 효율 검증 시험 및 바이오에어로졸 측정 연구에 Biosampler가 사용되고 있다.<sup>12-14)</sup> 흡수액은 0.6% NaCl이 선정되었으며, 가스포집을 위한 흡수액 부피는 50 ml이었다. 시료포집 유량 및 시간은 1 L/min, 30분이었으며, 공기흡입펌프(Airchek XR5000 air sampling pump, SKC inc. USA)를 이용하여 포집하였다. 공기 중 부유미생물 시료를 포집하는 방법 중 흡수법은 비교적 경제성 및 사용자 편의성이 우수한 것으로 알려져 있으며, 채취된 흡수액을 일정 비율로 희석한 후 평판 배지에 도말할 수 있기 때문에 다양한 농도 범위의 부유미생물을 측정할 수 있다는 장점이 있다.<sup>15,16)</sup>

### 2.4. 생물학적 인자 정량 분석

부유세균은 시료포집이 완료된 흡수액 0.2 mL를 평판배지에 도말하여 정량 분석하였다. 사용된 평판배지는 Trypticase Soy Agar (TSA)배지이다. 도말이 완료된 배지는 항온기에

서 38°C의 조건으로 4일간 배양 후, 배지에 형성된 집락(Colony unit)을 계수한 값에 채취한 공기량으로 나누는 방법으로 부유세균 농도 CFU (Colonies Forming Unit)/m<sup>3</sup>를 산출하였다(식 (1)). 모든 실험은 재현성을 확보하기 위하여 3회 반복 실시되었다.

$$CFU/m^3 = \frac{\text{Counted CFU on agarplate}}{\text{Air Volume (m}^3\text{)}} \quad (1)$$

내독소 분석을 위하여 시료포집이 완료된 흡수액은 분석실로 운반시켜 LAL (Limulus Amebocyte Lysate)분석을 실시하였다. 분석된 값은 EU (Endotoxin Unit)으로 정량화되었으며, EU를 흡입된 공기 유량으로 나누어 주어 산출하였다(식 (2)). 시료포집이 완료된 흡수액 전량은 분석 전 4°C에 냉장 보관하였다. 내독소 분석은 2회 반복 실시되었다.

$$EU/m^3 = \frac{\text{Detected Endotoxin Unit (EU)}}{\text{Air volume (m}^3\text{)}} \quad (2)$$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 부유세균 발생특성

Fig. 2는 퇴비화 실험기간 동안에 관찰된 퇴비단의 온도 변화와 부유세균의 농도변화를 보여주고 있다. 퇴비단의 온도는 실험기간 동안 퇴비단 교반여부에 상관없이 반응 초기에 급격한 상승을 보인 후 낮아지는 경향을 보였으며, 반응 후기에는 일정한 온도를 유지하는 전형적인 퇴비화 반응을 보였다.<sup>17-19)</sup> 퇴비단의 반응온도가 최고점에 도달하는 시간은 기계적 교반 퇴비화공정에서 실험개시 후 33 hr(퇴비단 최고 온도 52°C), 미교반 퇴비화공정에서는 37 hr(퇴비단 최고 온도 55°C)이었다. 반응기내 호기성 미생물에 의한 퇴비화 반응이 완료되는 시간(퇴비단 온도가 반응기 유입공기의 온도

와 같아지는 시간)의 경우, 기계적 교반 퇴비화공정에서는 120 hr, 미교반 퇴비화공정에서는 144 hr이었다. 본 실험에서는 전형적인 퇴비화반응을 보인 두 반응기에서 배출되는 생물학적 유해인자(부유세균, 내독소)를 관찰하였다.

Fig. 2에 제시된 부유세균 농도변화를 살펴보면, 기계적 교반 퇴비화공정에서 부유세균의 발생경향은 비정형적으로 관찰되었다. 하지만 미교반 실험에서는 퇴비단 온도변화와 유사한 변화 추이를 보였으며, 실험 개시 후 24 hr에 1.46 × 10<sup>5</sup> (± 1.12 × 10<sup>5</sup>) CFU/m<sup>3</sup> 부유세균이 발생하였다. 기계적 교반을 실시한 실험에서 발생된 부유세균의 양은 미교반 실험에 비해 전반적으로 낮았다(p < 0.05). 김 등<sup>20)</sup>의 연구결과에서 실규모 축분 퇴비화 중 기계적 교반을 실시한 경우 총 부유세균의 최고 발생농도는 27,911 CFU/m<sup>3</sup>이었고, 미교반 시에는 41,123 CFU/m<sup>3</sup>이었다. 이는 본 실험결과와 유사하게 교반조건에서 부유세균의 발생농도가 낮게 나타나는 경향을 보였다. 퇴비화공정에서 유기물 분해는 반응시간 즉, 온도변화에 따라 우점하는 미생물이 변이하는 것으로 알려져 있다.<sup>21)</sup> 또한 온도상승기에는 중온성 세균(Mesophilic bacteria)이 우점하다 온도가 45°C에 도달한 이후에는 중온성 세균이 감소하고 고온성 세균(Thermophilic bacteria)이 우점하며, 이 시점에서 세균의 증식과 활성이 최고점에 도달한다.<sup>22,23)</sup> 본 연구의 미교반 실험에서 부유세균 배출농도가 가장 높게 관찰되는 시점은 퇴비단 온도가 약 45°C에 도달한 때였으며, 이 온도부근이 가장 활발한 미생물 활성이 퇴비단에서 진행된 것으로 판단할 수 있다. 기계적 교반 실험에서 부유세균의 발생 경향이 파악되지 않은 이유는 교반에 따른 퇴비단 전체의 고른 퇴비화 진행으로 미생물의 사멸효과가 원활하게 이루어졌기 때문에 부유미생물량이 전반적으로 감소한 것으로 유추된다. 또한 비교적 빠른 퇴비화 반응속도로 인하여 가스시료 채취주기가 부유세균 농도 변화 시점을 벗어났을 가능성도 있다. 하지만 진행된 모든 실험에서 퇴비화 중 발생된 부유세균이 상당량으로 확인되었다는 것은 의미하는 바가 크다고 할 수 있다. 국내 실내

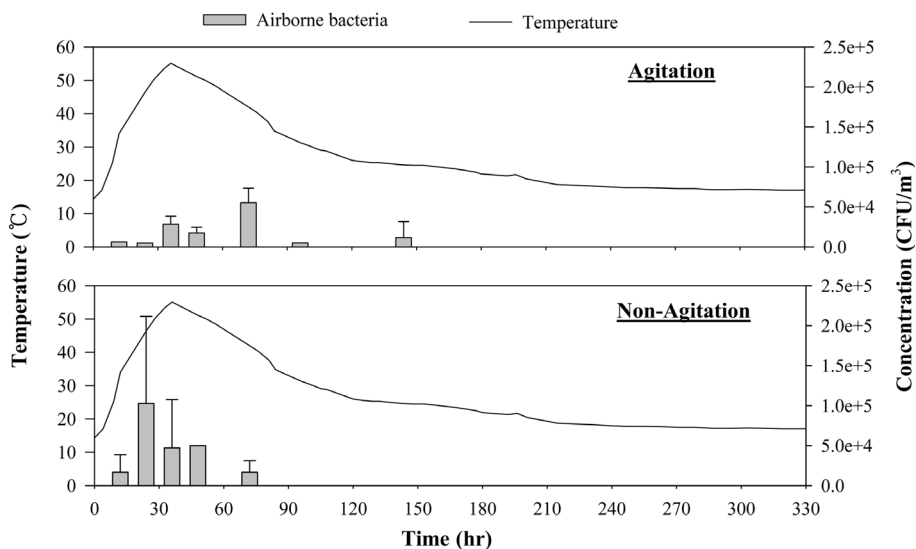


Fig. 2. Temperature variation and concentration of airborne bacteria generated from the composting reactor.

공기질 관리기준은 총부유세균 800 CFU/m<sup>3</sup> 이하이며, 국외의 경우 미국 산업안전보건청(OSHA)에서는 미생물오염을 의심할 수 있는 기준으로 1,000 CFU/m<sup>3</sup>를 제안하고 있으며,<sup>24)</sup> 홍콩은 사무실 및 공공시설에서 부유세균 1,000 CFU/m<sup>3</sup> 이하를 실내공기의 질이 좋은 수준으로 보고 있으며,<sup>25)</sup> 영국은 작업환경 기준으로 부유세균 1,000 CFU/m<sup>3</sup>로 설정하고 있다.<sup>26)</sup> 부유세균에 관한 국내·외 관리기준은 비록 관리대상이 상이하여 절대적 비교는 어렵지만, 적절한 작업환경 유지를 위하여 표준화를 위한 지속적인 연구가 필요하다.

### 3.2. 내독소의 발생특성

Fig. 3은 퇴비화 반응기간 동안 발생하는 그람음성세균의 내독소 농도변화를 보여주고 있다. 배출가스 내 내독소 농도 변화는 퇴비단의 온도변화와 유사한 경향을 보이고 있다. 특히 내독소 발생의 최고농도는 기계적 교반 실험에서 실험개시 후 48 hr에서 1,415 EU/m<sup>3</sup>, 미교반 실험에서는 실험개시 후 24 hr에서 940 EU/m<sup>3</sup>이었다. 퇴비화 반응 전체기간 중 내독소 발생은 기계적 교반 실험에서는 146~1,415 EU/m<sup>3</sup>, 미교반 실험에서는 410~940 EU/m<sup>3</sup>의 발생농도 범위를 보였다.

기계적 교반 퇴비화 실험에서 내독소 농도변화의 경향이 퇴비단 온도변화와 유사한 이유는 내독소의 발생 특성에서 그 원인을 분석할 수 있다. 내독소는 세포의 성장 및 분할과정에 발생할 수 있으며, 세포의 사멸과정에서도 발생된다.<sup>27)</sup> 또한 퇴비화 반응에서 교반은 퇴비원료 내에 산소공급을 원활히 하며 미생물 반응에 의한 원료의 분해속도를 증가시킬 수 있다.<sup>10)</sup> 따라서 기계적 교반 퇴비화 실험에서 사멸된 미생물의 세포에서 발생하는 내독소 양이 다량 검출되었고, 퇴비단 온도변화와 유사한 발생경향을 보인 것으로 판단된다. 또한 이는 부유세균의 비정형적 발생경향(Fig. 2의 기계적 교반 퇴비화 실험)을 해석할 수 있는 중요한 원인이 될 수 있다. 부유세균 분석의 경우에는 배양 가능한 생존하는 미생물

만을 측정 대상으로 한다.

한국산업안전보건공단이 2010년 발표한 업종별 실내공기에서 측정된 내독소의 농도결과를 보면, 사료제조업은 22 (3.4~196.9) EU/m<sup>3</sup>, 금속가공용 취급업 9 (3.1~63.1) EU/m<sup>3</sup>, 목재가공업 32 (4.6~144.6) EU/m<sup>3</sup>, 음식물 자원화 시설 40 (3.4~485.7) EU/m<sup>3</sup>, 매립지 22 (3.6~97.4) EU/m<sup>3</sup>, 소각장 46 (3.7~989.2) EU/m<sup>3</sup>으로 나타났다. 드럼형 퇴비화 처리시설에서 하수슬러지는 퇴비화 중 1,104 (2.5~4,400) EU/m<sup>3</sup>의 내독소 배출이 관찰되었으며, 바이오매스(하수슬러지와 가축분뇨를 건조해 성형한)의 퇴비화 과정 중에는 539 (12~2,500) EU/m<sup>3</sup>의 내독소 발생이 확인되었다.<sup>28)</sup> 본 연구결과와는 실험 적용대상이 다소 상이하여 절대적 비교는 불가하지만, 상당량의 내독소가 하수슬러지 퇴비화 과정에서 발생할 수 있음을 본 연구결과를 통해 확인할 수 있다.

공기 중에서 내독소에 대한 기준은 아직 설정되어 있지 않으나, 10,000 EU/m<sup>3</sup> 정도의 내독소에 사람들이 노출되면 독감과 같은 증상이 나타나고 1,000 EU/m<sup>3</sup> 정도에서는 호흡이 가빠지는 것으로 알려져 있다. 또한 45~400 EU/m<sup>3</sup> 정도의 노출에서는 기침과 열이 나며 급성호흡장애 및 호흡기 점막 자극증상이 나타나고, 200 EU/m<sup>3</sup> 정도의 노출은 코 점막 자극을 초래할 수 있다.<sup>29)</sup> 따라서 하수슬러지를 포함한 유기성폐기물 퇴비화공정의 공기 중 생물인자에 대한 유해성을 주지할 필요가 있으며, 시설의 공정 밀폐화와 배출가스의 적정처리를 통하여 공기 중 생물학적 인자 노출을 최소화하고, 공정 작업환경의 안정성을 확보해야 한다.

### 3.3. 상관성 분석

Fig. 4(a)와 (b)는 하수슬러지의 퇴비화 과정 중에 발생하는 부유세균과 내독소의 발생농도와 퇴비단 온도의 상관관계를 보여주고 있다. 내독소의 발생농도와 퇴비단 온도의 상관관계는 통계적 유의성(p < 0.05)이 있었으나(교반 r<sup>2</sup> = 0.68; 미교반 r<sup>2</sup> = 0.57), 부유세균과 온도와의 통계적 상관성 및 유

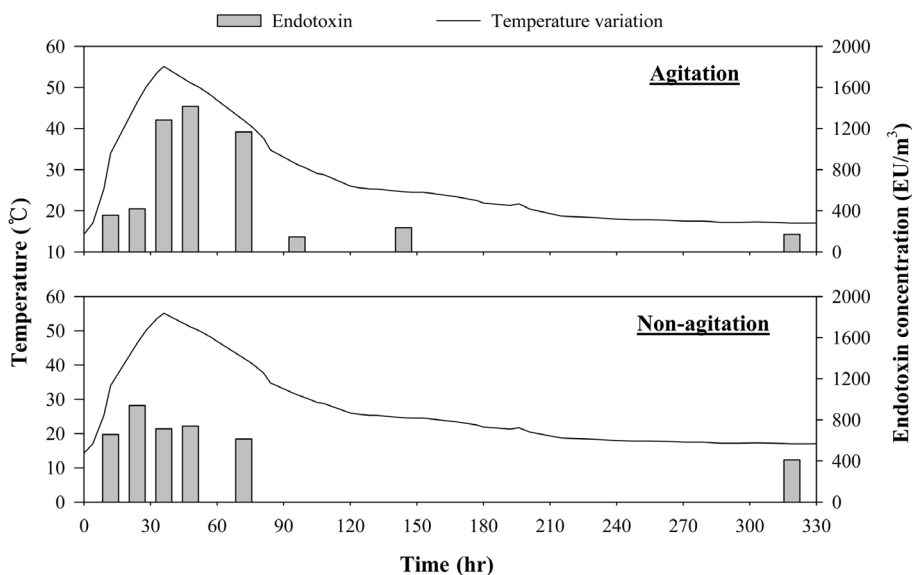


Fig. 3. Endotoxin concentration generated from the composting reactor.

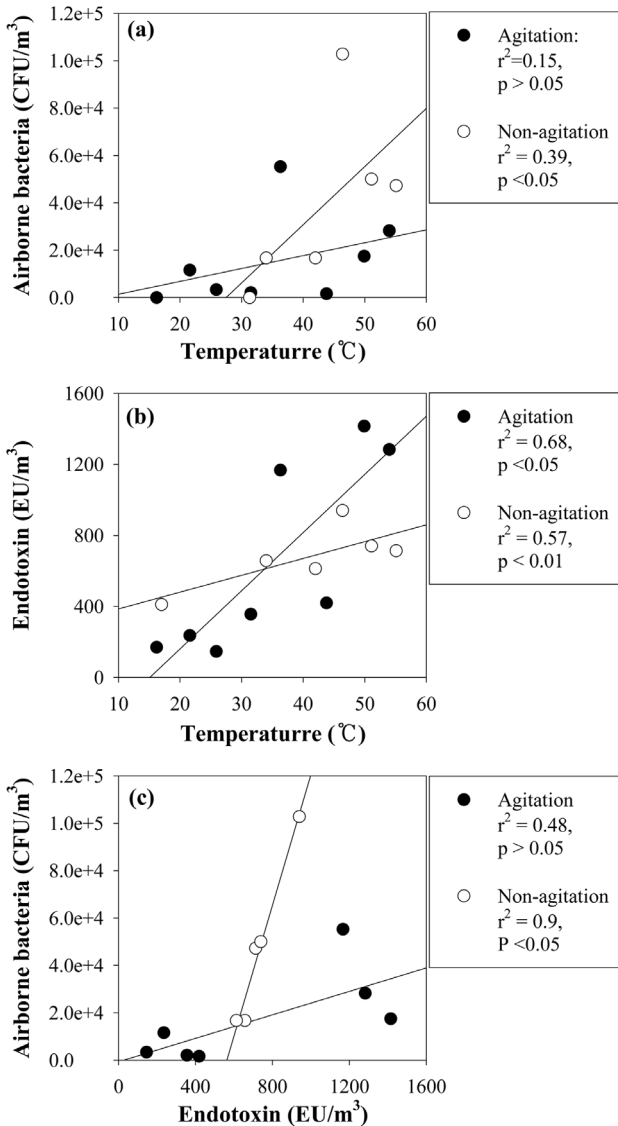


Fig. 4. Correlation relationship between airborne biological factors and temperature of the compost pile.

의성( $p > 0.05$ )은 다소 낮은 것으로 분석되었다(교반  $r^2 = 0.15$ ; 미교반  $r^2 = 0.39$ ). 이 결과는 3.2절에서 논의한 바와 같이 퇴비단 온도증가에 따른 퇴비단 미생물 사멸이 공기 중 내독소 증가와 연관성이 있는 것으로 판단된다.

Fig. 4(c)는 내독소의 발생농도와 부유세균의 발생농도의 상관성을 보여주고 있다. 미교반 실험에서는 통계적 상관성이 높았으며(교반  $r^2 = 0.48$ ; 미교반  $r^2 = 0.97$ ), 통계적 유의성이 있는 것으로 분석되었다( $p < 0.01$ ). 교반 실험에서 부유세균과 내독소의 낮은 상관성은 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 부유세균의 비정형적 발생특성과 Fig. 3의 내독소 발생특성에서 그 이유를 찾아볼 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구는 하수슬러지의 호기성 퇴비공정에서 교반여부에

따라 배출가스 중으로 발생하는 부유세균 및 내독소의 발생 특성을 파악하였다.

부유세균은 미교반 퇴비화 공정에서 뚜렷한 발생경향을 보였으며, 퇴비단 온도변화와 유사한 발생추이를 나타냈다. 미교반 퇴비화공정에서 부유세균의 최고 발생농도는 약  $1.03 \times 10^5$  CFU/m<sup>3</sup>이었다.

그람음성세균의 외세포벽 구성물질인 내독소는 기계적 교반 퇴비화 공정에서 뚜렷한 발생경향을 보였으며, 퇴비단 온도변화와 유사한 발생추이를 나타냈다. 교반 실시 퇴비화 공정에서 내독소의 최고 발생농도는 1,415 EU/m<sup>3</sup>이었다.

퇴비화 공정의 기계적 교반이 부유세균의 발생량 저감에는 효과적으로 나타났지만, 퇴비단 미생물 사멸에 따른 배출가스 중 내독소 발생량을 증가시켰다. 따라서 퇴비화 시설의 작업환경의 생물학적 인자 노출영향을 최소화하기 위해서는 발생가스의 적정처리가 반드시 필요하겠다.

#### 사사

이 논문은 2009년도 교육과학기술부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2009-0088397)이며, 2011년도 환경부의 재원으로 실시된 폐기물에너지화 특성화대학원사업의 일부 지원을 받아 수행되었음.

KSEE

#### 참고문헌

1. 환경부, “2009년 하수슬러지 통계,” (2010).
2. 환경부, “’09년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과,” (2010).
3. Fischer, G., Albrecht, A., Jackel, U. and Kampfer, P., “Analysis of airborne microorganisms, MVOC and odour in the surrounding of composting facilities and implications for future investigations,” *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **211**(1-2), 132~142(2008).
4. Pastuszka, J. S., Kyaw Tha Paw, U., Lis, D. O., Wlazlo, A. and Ulfig, K., “Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland,” *Atmos. Environ.*, **34**(22), 3833~3842(2000).
5. 홍길환, 차재두, 고영환, 이정훈, 임은주, 김경섭, “음식물 쓰레기 퇴비화시설의 악취 배출 성상 조사,” *한국냄새환경학회지*, **5**(3), 194~201(2006).
6. Burge, H. A., *Bioaerosols*, CRC Press, Boca Raton, Florida, (1995).
7. Olson, D. K. and Bark, S. M., “Health hazards affecting the animal confinement farm worker,” *Am. Assoc. Occup. Health Nurse J.*, **44**(4), 198~204(1996).
8. Fiske, M. J., Fredenburg, R. A., VanDerMeid, K. R., McMichael, J. C. and Arumugham, R., “Method for reducing endotoxin in *Moraxella catarrhalis* UspA2 protein preparations,” *J. Chromatogr. B.*, **753**(2), 269~278(2001).

9. 배재근, 신편 폐기물처리공학, 구미서관, 서울, pp. 470~497 (2005).
10. 황선숙, 황의영, 남궁원, “교반강도가 퇴비화에 미치는 영향,” 유기성폐기물자원화학회, **3**(2), 47~57(1995).
11. Willeke, K., Lin, X. and Grinshpun, S. A., “Improved aerosol collection by combined impaction and centrifugal motion,” *Aero. Sci. Technol.*, **28**(5), 439~456(1998).
12. Angenent, L. T., Kelley, S. T., Amand, A. St., Pace, N. R., and Hernandez, M. T., “Molecular identification of potential pathogens in water and air of a hospital therapy pool,” *Proc. Natl. Acad. Sci.*, **102**(13), 4860~4865(2005).
13. Chen, P. and Li, C., “Quantification of airborne mycobacterium tuberculosis in health care setting using real-time qPCR coupled to an air-sampling filter method,” *Aero. Sci. Technol.*, **39**(4), 371~376(2005).
14. Nehme, B., Gilbert, Y., Le'tourneau, V., Forster, R. J., Veillette, M. and Villemur, R., “Culture-independent characterization of archaeal biodiversity in swine confinement building bioaerosols,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **75**(17), 5445~5450 (2009).
15. Lembke, L. L., Kniseley, R. N., Van Nostrand, R. C. and Hale, M. D., “Precision of the all-glass impinger and the Andersen microbial impactor for air sampling in solid waste handling facilities,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **42**(2), 222~225 (1981).
16. Terzieva, S., Donnelly, J., Ulevicius, V., Grinshpun, S. A., Willeke, K., Stelma, G. N. and Brenner, K. P., “Comparison of methods for detection and enumeration of airborne microorganisms collected by liquid impingement,” *Appl. Environ. Microbiol.*, **62**(7), 2264~2272(1996).
17. Hamelers, H. V. M., “A theoretical model of composting kinetics,” Science and Engineering of composting, Hoitink, H. A. J., and Keener, H. M.(Eds.), Renaissance Publications, Worthington, pp. 36~58(1993).
18. Miller, F. C. and Macauley, B. L., “Materials balance in the composting of sewage sludge as affected by process control strategy,” *J. Water Pollut. Control Fed.*, **57**(2), 122~127(1985).
19. Harper, E. R., Miller, F. C. and Macauley, B. J., “Physical management and interpretation of an environmentally controlled composting ecosystem,” *Aust. J. Exp. Agric.*, **32**(5), 657~667(1992).
20. 김기연, 최홍림, 고한중, 김치년, “축분 퇴비화시스템 운용 방식에 따른 실내 대기오염 평가,” 동물자원지, **46**(2), 283~294(2004).
21. Miller, F. C., Macgregor, S. T., Finestein, M. S. and Cirello, J., “Biological drying of sewage sludge-a new composting process,” in Proceedings of ASCE Environmental Engineering Division Specialty Conference, New York, pp. 40~49 (1980).
22. Bagstam, G., “Population changes in microorganisms during composting of spruce-bark. II. Mesophilic and thermophilic microorganisms during controlled composting,” *Eur. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **6**(3), 279~288(1979).
23. 정재춘, 박형숙, 김중기, 박용남, 김경숙, 원효정, “퇴비화 공정에 출현하는 미생물의 종류 및 생태학적 기능,” 폐기물 자원화, **7**(2), 1~23(1999).
24. U.S.A. Occupational Safety and Health Administration, OSHA Technical manual section III: Chapter 2 Indoor air quality investigation, <http://www.osha.gov>(1999).
25. H. K. Special Administrative Region, Guidance notes for the management of indoor air quality in offices and public places, <http://www.laq.gov.hk>(2003).
26. Pankhurst, L. J., Deacon, L. J., Liu, J., Drew, G. H., Hayes, E. T., Jackson, S., Longhurst, P. J., Pollard, J. W. S. and Tyrrel, S. F., “Spatial variations in airborne microorganism and endotoxin concentrations at green waste composting facilities,” *Int. J. Hyg. Environ. Health*, **214**(5), 376~383 (2011).
27. Petsch, D. and Anspach, F. B., “Endotoxin removal from protein solutions,” *J. Biotechnol.*, **76**(2-3), 97~119(2000).
28. 한국산업안전보건공단, “생물학적 인자 측정 및 평가방법 연구(II),” (2010).
29. 박동욱, “생물학적 유해인자에 의한 건강장애와 노출 평가법,” 산업보건, No. 4(2004).