

유기성 폐기물 자원화 시설에서 발생하는 부유 세균의 분포 특성

김기연 · 고훈종* · 김대근**†

부산가톨릭대학교 산업보건학과, *제주도청 축산정책과, **서울과학기술대학교 환경공학과

Distribution Characteristics of Airborne Bacteria in Organic-Waste Resource Facilities

Ki Youn Kim, Han Jong Ko*, and Daekeun Kim**†

Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan, Pusan, Korea

*Division of Livestock Policy, Jeju Special Self-Governing Province, Jeju, Korea

**Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul, Korea

ABSTRACT

Objectives: Bioaerosols released by treating organic-waste resources cause a variety of environmental and hygiene problems. The objective of this study was to investigate the distribution characteristics of the airborne bacteria emitted from a pig manure composting plant, a principal site for organic-waste resource facilities.

Methods: Three types of pig manure composting plant were selected based on fermentation mode: screw type, rotary type and natural-dry type. Each site was visited and investigated on a monthly basis between September 2009 and August 2010. A total of 36 air samplings were obtained from the pig manure composting plants. The air sampling equipment was a six-stage cascade impactor. Quantification and qualification of airborne bacteria in the air samples was performed by agar culture method and identification technique, respectively.

Results: The mean concentrations of airborne bacteria in pig manure composting plant were 7,032 ($\pm 1,496$) CFU m⁻³ for screw type, 3,309 ($\pm 1,320$) CFU m⁻³ for rotary type, and 5,580 ($\pm 1,106$) CFU m⁻³ for natural dry type. The screw type pig manure composting plant showed the highest concentration of airborne bacteria, followed by the natural dry type and the rotary type. The ratio of respirable to total airborne bacteria was approximately 40-60%. The predominant genera of airborne bacteria identified were *Micrococcus* spp., *Staphylococcus* spp. and *Escherichia* spp.

Conclusion: Monthly levels of airborne bacteria were highest in August and lowest in November regardless of fermentation mode. There was no significant correlation relationship between airborne bacteria and environmental factors such as temperature, relative humidity and particulate matters in pig manure composting plants.

Keywords: airborne bacteria, bioaerosols, composting, pig manure

I. 서 론

정부 차원에서 녹색기술과 청정에너지를 통한 저탄소 녹색성장(Low Carbon Green Growth)을 새로

운 국가비전으로 제시하고 있는 상황에서 유기성 폐기물의 퇴비화 및 에너지화 시설이 계속해서 확대되고 있다.¹⁾ 환경부에서는 2008년 10월에 “가축분뇨 에너지화”를 폐자원 에너지화 대책에 포함하였고, 농

†Corresponding author: Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 139-743, Korea, Tel: +82-2-970-6606, Fax: +82-2-971-5776, E-mail: kimd@snut.ac.kr

Received: 19 August 2011, Revised: 6 September 2012, Accepted: 2 April 2012

림수산식품부 또한 같은 시기에 “가축분뇨 에너지화, 공동자원화시설”을 통한 저탄소 녹색성장 기반 조성 대책을 수립하였다. 기획재정부는 2009년 2월에 “가축분뇨 에너지화 및 공동자원화 사업”을 녹색 New-Deal 사업에 포함시키면서 기후변화협약 대응 및 화석연료 대체 청정에너지 개발 및 보급을 위한 신·재생에너지 이용을 촉진하는 방안을 설정하기에 이르렀다.

그러나 본 시설이 가동하게 되면 유기성 폐기물이 고온 분해되면서 매우 높은 농도의 공기오염물질들이 다량 발생되며, 특히 부유 세균, 진균 등의 바이오에어로졸은 상대적으로 더 높게 배출되는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 생물학적 유해인자, 즉 부유성 미생물군(일명, 바이오에어로졸, bioaerosol)은 호흡을 통해 체내로 유입될 경우 감염성 질환이나 천식, 비염, 기관지염 등의 알레르기성 호흡기계 질환을 유발할 수 있어^{3,4)} 이러한 바이오에어로졸의 발생량 증가는 환경성 질환 발병률을 동시 증가될 개연성을 함축하고 있다. 또한 바이오에어로졸의 악영향은 인간의 건강 뿐 아니라 조류독감이나 구제역 바이러스 등 가축들의 건강에도 위협을 주는 한 요인이기 때문에 안전한 축산물 생산의 저해 인자로 작용함과 동시에 인간의 안전한 식단 또한 보장 받지 못하게 하는 원인일 수도 있다.

가축분뇨, 하수슬러지, 음식물 쓰레기 등 유기성 폐기물은 미생물의 성장 영양원으로서의 역할을 하는 원료이기 때문에 퇴비는 수많은 종류의 미생물들이 서식할 수 있는 좋은 환경 조건을 조성한다.⁵⁾ 퇴비화 기간 중 공기를 유입하는 부숙 단계에서는 유기물의 호기성 분해를 급속히 유도하여 퇴비더미가 60°C 이상의 고온 조건을 유지하게 되어 대부분의 미생물이 사멸되나, *Aspergillus fumigatus* 등의 몇몇 호열성 미생물들은 생존하게 된다. 이 시기의 미생물은 대부분 고병원성이며, 퇴비더미 교반 중에 공기 중으로 방출되어 사람들에게 노출시에는 심각한 호흡기계 질환을 유발하는 것으로 알려져 있다.⁶⁾ 시설 주변 인근 주민들의 바이오에어로졸 노출은 공기 전파가 주요 경로이기 때문에 대기 확산에 의한 이동 경로를 파악한 연구도 국외에서는 이미 수행된 바 있다.⁷⁻⁹⁾

하지만 국내의 경우 유기성 폐기물 자원화 시설에서 발생하는 바이오에어로졸 관련 연구는 거의 전무

한 실정이기 때문에 이에 대한 기초 환경 영향 평가가 요구되는 바이다. 또한 국내에서 발생하는 유기성 폐기물은 국외의 것과 구별되는 정상특성을 가지고 있어서 국내 유기성 폐기물 처리시설에서 발생하는 바이오에어로졸에 대한 독자적인 데이터베이스가 필요하다. 따라서 본 연구는 국내 유기성 폐기물 자원화시설에서 발생하는 부유 세균 배출 특성을 현장 조사하여 건강 예방을 위한 기초자료로서 활용하기 위해 수행하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구대상

외부환경요인(산업시설 등의 외부 공기오염 유입 등)을 최소화시킬 수 있는 청정지역인 제주지역을 대상 지역으로 하였으며, 제주지역에 소재한 유기성 폐기물 자원화 시설 중 가축분뇨 퇴비화시설 3개소를 선정하였다. 퇴비화시설은 반응기형태 및 교반방식에 따라 횡형 스크류(Screw) 교반방식의 퇴비화시설 1개소, 횡형 로터리(Rotary) 교반방식의 퇴비화시설 1개소, 퇴적형 자연건조화(Natural Dry) 방식의 퇴비화시설 1개소가 각각 연구대상으로 하였다. Table 1은 연구대상 가축분뇨 퇴비화 시설의 주요 특징을 요약한 것이다.

2. 연구방법

본 연구는 2009년 9월부터 2010년 8월까지 1년 동안 매월 1회 현장시설을 방문하여 조사를 실시하였다. 현장 측정은 맑은 날을 기준으로 오후 시간대(13:00 pm~17:00 pm)에 수행하였다. 측정 지점은 중앙 지면으로부터 상부 1 m되는 위치로 하였고, 각 측정시마다 3회 반복으로 시료를 채취하여 평균값을 대표값으로 하였다.

Table 1. Profile of organic-waste resource facility investigated in this study

Site	Reactor type	Turning mode	Treatment capacity	Location
1	Cross	Screw	10(7.5)* ton/day	
2	Cross	Rotary	5(1) ton/day	Jeju
3	Pile	Natural dry	3(1.5) ton/day	

* () : Practical treatment capacity

부유 세균 채취를 위한 장비는 분당 28.3 l의 유량으로 설정된 six-stage viable particulate cascade impactor(Model 10-800, Andersen Inc., USA)를 사용하였으며, 각 단계별 공기역학적 직경 범위는 stage 1(>7.0 µm), stage 2(4.7-7.0 µm), stage 3(3.3-4.7 µm), stage 4(2.1-3.3 µm), stage 5(1.1-2.1 µm), stage 6(0.65-1.1 µm)이다. 5분 동안 공기를 포집하였으며, 측정 위치는 상부 1~1.5 m 지점으로 동일 지점에서 3번 반복 측정하였다. 시료 채취 전에 70% alcohol로 포집기 내부를 소독 처리한 후 각 stage별로 배지를 장착하였다. 배지는 진균 성장을 억제하기 위해 cycloheximide 500 mg/l이 첨가된 세균용 배지 Trypticase Soy Agar(TSA) (Lot 3087230, Becton Dickinson and Company, USA)를 이용하였다. 시료 채취가 완료된 배지는 미생물 분석실로 즉시 운반하여 30~37°C 조건하의 배양기에서 24~48시간 동안 배양하였다. 농도 산출을 통한 정량 평가는 배양 후 배지에 형성된 집락(colony)을 계수한 값에 포집 공기량(m³)을 나누는 방법으로 부유 세균의 농도(CFU/m³)를 산출하였고, positive hole correction 방법 적용에 따른 보정을 통해 최종적으로 농도값을 제시하였다. 동정을 통한 정성 평가는 배양을 통해 집락을 형성한 부유세균 중 우점종을 선택하여 Bergey's manual 분류법에 따라 균종을 1차 동정하였고, Gram 염색 후 자동화 시스템인 VITEK(Model VITEK 32 system, bioMerieux Inc, France)을 통해 2차 동정하는 방식으로 수행하였다.

부유 세균과의 통계적 상관성을 알아보기 위해 현장에서 동시에 측정된 퇴비화 시설 내부의 환경인자는 온도, 상대습도, 분진(TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, PM₁), 악취로 선정하였다. 온습도의 경우 Digital Thermohygrometer(608-H1, Testco, Germany), 분진의 경우 Portable Dust Monitor (Dustmate, TurnKey Instruments Ltd, USA), 악취의 경우 Hand-Held Odor(OMX-SR, Shinyei, Japan)의 직독식 장비를 이용하여 모니터링 하였다.

측정된 현장 데이터의 자료 분석을 위해 SAS package (SAS/Stat 9.1, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)를 이용하였다. 우선 Shapiro-Wilk test를 통해 측정 데이터가 정규분포를 이루고 있는 것이 판명되어 측정 수치를 산술 평균과 표준편차로 제시하였다. 각 퇴비화 시설 유형에 따른 내부 부유 세균의

농도 차이 및 교반 시점별 부유 세균의 발생량 비교는 ANOVA 및 Duncan의 다중 비교 분석 방법, 부유 세균과 시설 내부 환경인자들간의 상관관계는 Pearson's correlation test 방법을 적용하여 통계적 유의성을 검증하였다.

III. 결 과

1. 유기성 폐기물 자원화 시설 유형에 따른 부유 세균의 월별 농도 분포

Fig. 1은 가축분뇨를 퇴비화하는 유기성 폐기물 자원화 시설의 운용 방식에 따른 월별 부유세균의 전체 농도 분포를 보여주고 있다. Screw 방식으로 교반이 적용되는 퇴비화 공장의 경우 전체 평균이 7,032(±1,496)CFU m⁻³였고, 월별 최대 농도는 8월에 12,261(±1,449)CFU m⁻³, 월별 최소 농도는 11월에 1,737(±660)CFU m⁻³인 것으로 조사되었다. Rotary 방식으로 교반이 적용되는 퇴비화 시설의 경우 전체 평균이 3,309(±1,320)CFU m⁻³였고, 월별 최대 농도와 최소 농도는 Screw 방식의 경우와 동일하게 8월과 11월에 각각 8,622(±2,399)CFU m⁻³와 1,195(±385)CFU m⁻³인 것으로 나타났다. Dry(자연 건조화) 방식으로 교반이 적용되는 퇴비화 시설의 경우 전체 평균이 5,580(±1,106)CFU m⁻³였고, 위 두 운용 방식의 경우와 마찬가지로 최대 농도는 8월에 12,756(±2,168)CFU m⁻³, 최소 농도는 11월에 2,142(±437)CFU m⁻³인 것으로 조사되었다. 운용 방식에 따른 가축분뇨 퇴비화 시설의 부유세균 농도는 전체 농도 기준시 Screw > Dry > Rotary 순서로 발생하는 것으로 분석되었다(p < 0.05). 조사대상 3곳 모두 월별에 관계없이 다중이용시설 실내공기법 항목인 총부유세

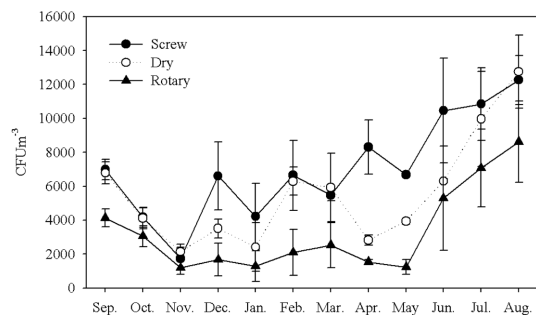


Fig. 1. Monthly mean concentration of airborne bacteria in organic-waste resource facility.

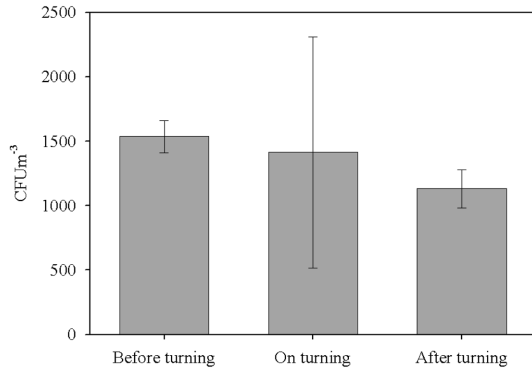


Fig. 2. Comparison of airborne bacteria emitted from organic-waste resource facility according to pile turning time.

균 800 CFU m⁻³ 기준을 모두 초과하였다.

2. 교반 가동 여부에 따른 부유 세균의 발생량 비교

Fig. 2는 가축분뇨 퇴비더미의 교반 시점(교반 전, 중, 후)에 따른 부유 세균의 발생 농도 양상을 보여 주고 있다. 평균치 측면에서 교반 전에는 1,537(±125) CFU m⁻³, 교반 중에는 1,413(±899)CFU m⁻³, 교반 후에는 1,131(±150)CFU m⁻³으로 조사되었다. 측정 결과 교반 시점에 따른 부유 세균의 농도 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 분석되어(p > 0.05) 일반적으로 교반을 통해 퇴비더미내 분포하고 있는 미생물들이 공기 중으로 대량 배출된다는 기존 연구 결과⁹⁾와는 상이한 것으로 조사되었다.

3. 유기성 폐기물 자원화 시설 유형에 따른 부유 세균의 입경별 농도 특성

Fig. 3은 유기성 폐기물 자원화 시설에서 발생하는

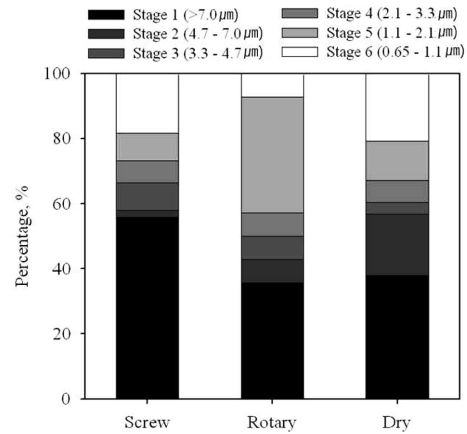


Fig. 3. Size distribution characteristics of airborne bacteria in organic-waste resource facility.

부유 세균의 입경별 분포 특성을 보여주는 것으로 가축분뇨 퇴비화 운용 방식에 따른 부유 세균의 입경별 분포 비율을 살펴보면 다음과 같다. stage 1 (>7.0 μm)에서 56%(Screw), 36%(Rotary), 38%(Dry); stage 2(4.7-7.0 μm)에서 2%(Screw), 7%(Rotary), 19%(Dry); stage 3(3.3-4.7 μm)에서 8%(Screw), 7%(Rotary), 3%(Dry); stage 4(2.1-3.3 μm)에서 7%(Screw), 7%(Rotary), 7%(Dry); stage 5(1.1-2.1 μm)에서 8%(Screw), 36%(Rotary), 12%(Dry); stage 6 (0.65-1.1 μm)에서 19%(Screw), 8%(Rotary), 21%(Dry)의 분포 특성을 나타내는 것으로 조사되었다. 측정 결과 입경 범위 중 가장 높은 빈도율을 보인 단계는 운용 방식에 상관없이 stage 1인 것으로 분석되었다. 측정 장비상 호흡성 입경 범위에 해당되는 0.65 μm 이상 4.7 μm 이하(stage 3-6)의 부유 세균이 전체 농도 대비 차지하는 비율은 Screw 방식

Table 2. Correlation relationship between airborne bacteria and indoor environmental factors

	Temp.	RH	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁	Odor	Airborne Bacteria
Temp.		-.367	.078	-.266	-.776**	-.419	.150	.219
RH			.470*	.615**	.383	.127	.043	-.157
TSP				.752**	-.303	-.302	-.017	.045
PM ₁₀					.150	-.178	.009	.201
PM _{2.5}						.722**	.069	-.008
PM ₁							.144	.060
Odor								-.132
Airborne bacteria								

의 경우 42%와 66%, Rotary 방식의 경우 57%와 47%, Dry 방식의 경우 43%와 55%인 것으로 분석되었다.

4. 부유 세균과 시설 내부 환경 인자들간의 상관성 분석

Table 2는 가축분뇨 퇴비화 시설에서 측정된 부유 세균과 공기오염물질 및 환경 인자들의 통계적 상관관계를 나타낸 것이다. 통계적으로 유의한 상관관계를 보인 변수들은 온도/PM_{2.5}(r = -0.776), 상대습도/PM₁₀(r = 0.615), TSP/PM₁₀(r = 0.752), PM_{2.5}/PM₁₀(r = 0.722)이었고, 그 외 나머지 변수들간에는 유의한 상관관계가 나타나지 않았다.

5. 유기성 폐기물 자원화 시설 유형에 따른 부유 세균의 정성 분석

Table 3은 가축분뇨 퇴비화 시설 운용 방식에 따른 부유 세균의 동정 결과를 보여주고 있다. 전체 대비 10% 이상 검출 빈도율(detection rate)을 보인 부유 세균을 중심으로 살펴보면 Rotary 방식의 경우 *Micrococcus* 속(24.1%), *Staphylococcus* 속(12.8.1%), *Escherichia* 속(13.4%), *Enterococcus* 속(11.3%)인 것으로 나타났다. Screw 방식의 경우 *Micrococcus* 속(23.3%), *Staphylococcus* 속(19.3%), *Escherichia* 속

(10.6%)인 것으로 나타났다. Dry 방식의 경우 *Escherichia* 속(20.1%), *Micrococcus* 속(18.9%), *Staphylococcus* 속(11.7%), *Enterococcus* 속(10.5%)인 것으로 조사되었다.

IV. 고 찰

측정 결과 부유 세균의 월별 농도 분포는 가축분뇨 퇴비화 운용 방식에 관계없이 일정한 변화 추이가 관찰되지 않았다. 대체로 기온이 높은 춘/하절기에 농도가 증가했음을 알 수 있었고, 측정 당시의 시설 내부 환경 조건(온도, 습도, 기류 등)의 변이에 따라 부유 세균의 농도가 상당한 영향을 받았을 것이라 추정된다. 기온이 온화한 5월에 측정된 부유 세균의 농도가 다른 달에 비해 상대적으로 감소된 이유도 이러한 원인들에 기인한다고 판단된다.

선행 연구들을 살펴보면 국내에서는 가축분뇨와 같은 유기성 폐기물을 퇴비화하는 시설을 대상으로 부유 세균의 발생량을 조사한 사례가 현재까지 보고된 바 없다. 국외의 경우 Hryhorczuk 등⁷⁾은 평균 농도로 3,204 CFU m⁻³ 수준인 것으로, Sanchez-Monedero와 Stentiford¹⁰⁾는 10³-10⁵ CFU m⁻³, Fracchia 등²⁾은 261-18,700 CFU m⁻³의 농도 범위를 보이는 것으로 보고하였다. Fischer 등⁶⁾은 퇴비더미를 교반하는 과정 중에 고온성 세균들이 최대 2.4 × 10⁶ CFU m⁻³까지 공기 중으로 배출된다고 하였고, 가장 최근에 발표된 연구 결과에 의하면 중온성 부유 세균과 저온성 부유 세균이 각각 평균 308 CFU m⁻³와 328 CFU m⁻³ 수준으로 발생된다고 보고되고 있다.¹¹⁾ 선행 국외 연구 결과들을 고찰해 보면 부유 세균의 농도 수치가 연구자들간의 상당한 차이가 있는 것을 알 수 있고, 본 연구 결과와 비교시에도 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 퇴비화 원료가 서로 다른 점이 주요 원인이라 할 수 있는데, 본 연구의 경우 가축분뇨를 주원료로 한 퇴비화 시설을 조사대상으로 한 반면, 국외 연구들의 경우 도시 고형 폐기물 및 음식물 쓰레기 등의 일반 폐기물을 퇴비화하는 시설을 대상으로 선정하였기 때문이라 사료된다. 또한 퇴비화 공정 중 부유 세균 생성에 영향을 주는 온도, 습도, 풍속, 계절 등의 기상학적 요인들이 측정 당시에 서로 상이했던 점도 하나의 원인이라 할 수 있을 것이다.¹²⁻¹⁴⁾

Table 3. Identification of airborne bacteria in organic-waste resource facility

	(Unit : %)		
	Rotary type	Screw type	Dry type
<i>Aeromonas</i> spp.	0.4*	0.2	0.6
<i>Bacillus</i> spp.	3.8	7.5	7.3
<i>Corynebacterium</i> spp.	5.4	4.1	5.2
<i>Enterobacteriaceae</i> spp.	9.2	7.8	8.2
<i>Enterococcus</i> spp.	11.3	8.9	10.5
<i>Escherichia(E-Coli)</i> spp.	13.4	10.6	20.1
<i>Micrococcus</i> spp.	24.1	23.3	18.9
<i>Nocardia</i> spp.	5.4	3.8	3.1
<i>Pseudomonas</i> spp.	1.5	2.8	4.8
<i>Staphylococcus</i> spp.	12.8	19.3	11.7
<i>Streptococcus</i> spp.	8.4	3.5	2.3
Unknown	4.3	8.2	7.3
Total	100.0	100.0	100.0

* : Detection rate

현재 다중이용시설 실내공기질 관련 국내 규제 항목 중 총부유세균 기준치인 800 CFU m^{-3} 와 비교시 운용 방식에 관계없이 측정된 전체 월별 농도 모두 기준을 초과하는 것으로 조사되었다. 다른 종류의 실내공간에 분포하는 부유 세균을 현장 조사한 기존 국내 연구 사례들, 지하철,^{15,16)} 병원, 유치원, 노인복지시설, 산후조리원 등의 다중이용시설,¹⁷⁾ 사무실,¹⁸⁾ 사료제조공장¹⁹⁾ 내 측정 수치와 비교시 가축분뇨 퇴비화 시설내 부유 세균의 농도 수준은 상대적으로 매우 높은 것으로 분석되었다. 하지만 가축분뇨 퇴비화 시설의 경우와 같이 부유 세균의 발생원이 되는 유기물들이 내부에 상재한 돈사시설²⁰⁾의 노출 농도와는 유사한 수준인 것으로 조사되었다.

가축분뇨 퇴비화 시설을 대상으로 부유 세균의 입경별 분포 특성을 연구한 국내의 선행 자료로는 실험적 조건하에서 chamber test를 통해 특정 미생물의 공기 중 입경 분포 특성을 보고한 하나의 연구 사례가 있으나,²¹⁾ 현장 조사 결과인 본 연구와의 비교는 비합리적이라 할 수 있다. 대신 실내공간을 대상으로 부유 세균의 입경별 분포 특성을 보고한 선행 연구 결과들을 살펴보면 다음과 같다. 현재 총부유세균 항목으로 규제적용을 받고 있는 병원, 유치원, 노인복지시설, 산후조리원의 다중이용시설에 대해 이 등²²⁾은 1단과 5단에서 부유세균이 가장 높은 비율을 나타낸다 하였고, Kim과 Kim¹⁷⁾과 Kim 등²³⁾은 5단에서 가장 높은 비율을 보이고 호흡성 입경 비율은 30~40%를 나타낸다고 보고하였다. 사료제조공장 작업환경 내 부유 세균의 입경 분포 특성을 보고한 Kim 등¹⁹⁾은 가장 높은 비율은 5단, 가장 낮은 비율은 3단에서 보였고 호흡성 입경 비율은 70%인 것으로 보고하였다. 본 측정 결과와 비교시 입경별 분포 특성은 전반적으로 유사한 것으로 나타났으나, 호흡성 입경 비율은 상대적으로 높게 나타난 것으로 분석되었다.

통계적 분석 결과 유기성 폐기물 자원화 시설에서 발생된 부유 세균과 유의한 상관성을 보이는 내부 환경요인들은 없는 것으로 조사되었다. 하지만 온도와 상대습도가 부유 세균의 발생에 어떠한 영향을 주는 지에 대한 국외 선행 연구 결과들을 살펴보면 연구자들 간의 의견이 서로 상이하고,²⁴⁻²⁷⁾ 상대적으로 적은 측정 시료 결과들을 근거로 통계 분석을 하였기 때문에 본 연구 결과에 대한 객관적 신뢰도는

높은 수준이라 할 수 없다. 따라서 이에 대한 명확한 과학적 결론을 내리기 위해서는 향후 추가 연구들이 계속해서 수행되어야 할 것이라 사료된다. 입자상 물질들은 표면에 가스상 물질이나 부유 미생물들을 흡착하여 공기 중에 이동하는 것으로 보고되고 있어²⁸⁾ 양의 상관성이 나타나는 것이 일반적 현상이라 추정할 수 있다. 그러나, 본 연구 결과에서는 입자상 물질과 가스상 물질인 악취간 양의 상관관계를 보였을 뿐($p < 0.01$) 부유 미생물을 포함함 생물학상 유해인자들 간에는 유의한 양의 상관관계가 분석되지 않은 것이($p > 0.05$) 특이할만한 사항이다.

동정 결과 Rotary, Screw, Dry 방식으로 퇴비화를 운영하고 있는 공장에 분포하는 부유 세균의 속별 분포 특성은 전반적으로 유사한 것으로 분석되었다. 이는 3공장 모두 공통적으로 가축분뇨를 퇴비화의 주원료로 사용하고 있어 부유 세균의 발생원 역시 동일하기 때문에 나타난 결과라 판단된다. 일반 실내공기 중에 우점하는 부유 세균들을 살펴보면 *Micrococcus* 속과 *Staphylococcus* 속인 것으로 보고되고 있어^{17,23,29-32)} 본 연구에서 조사된 가축분뇨 퇴비화 공장 내 부유 세균의 속별 분포 특성과 전반적으로 유사한 것으로 분석되었다. 다만 선행 연구 결과와 비교시 특이할만한 사항은 장내세균의 일종인 *Enterobacteriaceae* 속, *Enterococcus* 속, *Escherichia (E-Coli)* 속이 운용 방식에 관계없이 전체 약 30%를 차지하고 있는 점인데, 이는 부유 세균의 주요 발생원인 분뇨가 가축의 대장에서 축적되고 배설되기 때문이라 추정된다.

V. 결 론

조사대상 유기성 폐기물 자원화 시설에서 발생되는 부유 세균의 평균 농도는 Screw 방식은 $7,032 (\pm 1,496) \text{ CFU m}^{-3}$, Rotary 방식은 $3,309 (\pm 1,320) \text{ CFU m}^{-3}$, Dry 방식은 $5,580 (\pm 1,106) \text{ CFU m}^{-3}$ 으로 나타나 전체 농도 기준시 Screw > Dry > Rotary 순서로 발생되는 것으로 분석되었다($p < 0.05$). 교반 시점에 따른 부유 세균의 농도 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것으로 조사되었다($p > 0.05$). 입경 범위 중 가장 높은 빈도율을 보인 단계는 퇴비화 운용 방식에 상관없이 stage 1인 것으로 나타났고, 호흡성 입경 비율은 전체 농도 대비 40~60%를 차지하였다. 본

측정 결과에 근거를 둔다면 유기성 폐기물 자원화 시설 내부의 부유 세균 농도는 국내 실내공기질 기준인 800 CFU m⁻³를 초과하기 때문에 본 사업장에서 근무하는 작업자 및 주변 정주민들의 건강관리를 위해 부유 세균 노출에 대한 법률적 조치 또는 예방 차원에서 개인보호장구(PPE, Personal protective equipment) 사용이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초사업임(No. 2009-0088397).

참고문헌

1. Lee SH, Ahn SW. Analysis of the available potential volumes of waste resources energy and the policy direction in Korea. *J KSWM*. 2011; 28(3): 249-259.
2. Fracchia L, Pietronave S, Rinaldi M, Martinotti MG. The assessment of airborne bacterial contamination in three composting plants revealed site-related biological hazard and seasonal variations. *J Appl Microbiol*. 2006; 100: 973-984.
3. Bruce JM, Sommer M. Environmental aspects of respiratory disease in intensive pig and poultry houses, Including the implications for human health. Proceedings EC Meeting Aberdeen, EC Commission Publications, Brussels, 1987; 10: 29-30.
4. Olson DK, Bark SM. Health hazards affecting the animal confinement farm worker. *Am Assoc Occup Health Nurse J*. 1996; 44: 198-204.
5. Seidl HP. Mikrobiologie des Abfalls. In: Keimbelastung in der Abfallwirtschaft: Tagung, 26/4/1995 ed. Mu"cke W, Seidl HP, Rakoski AH, Eckrich C, Emmerling G, Pipke R, Wimmer M. 1995. p.5-30.
6. Fischer G, Muller T, Ostrowski R, Dott W. Mycotoxins of *Aspergillus Fumigatus* in pure culture and in native bioaerosols from compost facilities. *Chemosphere*. 1999; 38: 1745-1755.
7. Hryhorczuk D, Curtis L, Schleff P, Chung J, Rizzo M, Lewis, C, et al. Bioaerosols emission from a suburban yard waste composting facility. *Ann Agric Environ Med*. 2001; 8: 177-185.
8. Jager E, Ruden H, Zeschmar-Lahl B. Composting facilities. 2. Aerogenic microorganism content at different working areas of composting facilities. *Zentralbl Hyg Umweltmed*. 1994; 196: 367-379.
9. Reinthaler FF, Marth E, Eibel U, Enayat U, Feenstra O, Kock M, et al. The assessment of airborne microorganisms in large-scale composting facilities and their immediate surroundings. *Aerobiologia*. 1997; 13: 167-175.
10. Sacherz-Monedero MA, Stentiford EI. Generation and dispersion of airborne microorganisms from composting facilities. *Process Saf Environ*. 2003; 81: 166-170.
11. Grisoli P, Rodolfi M, Villani S, Grignani E, Cottica D, Berri A, et al. Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and wastewater treatment. *Environ Res*. 2009; 109: 135-142.
12. Jones AM, Harrison RM. The effects of meteorological factors on atmospheric bioaerosol concentrations-a review. *Sci Total Environ*. 2004; 326: 151-180.
13. Folmsbee M, Strevett K. Bioaerosol concentration at an outdoor composting center. *J Air Waste Manage Assoc*. 1999; 49: 554-561.
14. Tong Y, Lighthart B. Solar radiation has a lethal effect on natural populations of culturable outdoor atmospheric bacteria. *Atmos Environ*. 1997; 31: 897-900.
15. Kim KY, Park JB, Kim CN, Lee KJ. Distribution of airborne fungi, particulate matter and carbon dioxide in Seoul Metropolitan Subway stations. *J Prev Med Public Health*. 2006a; 39: 325-330.
16. Kim KY, Park JB, Kim CN, Lee KJ. Assessment of airborne bacteria and particulate matters distributed in Seoul Metropolitan Subway stations. *Kor J Environ Health*. 2006b; 32: 254-261.
17. Kim KY, Kim CN. Airborne microbiological characteristics in the public buildings of Korea. *Building Environ*. 2007; 42: 2188-2196.
18. Kim KY, Roh YM, Kim YS, Lee CM, Sim IS. Profile of airborne microorganisms distributed in general offices. *J Kor Soc Occup Environ Hyg*. 2008; 18: 11-19.
19. Kim KY, Kim HT, Kim D, Nakajima J, Takashi H. Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the feedstuff-manufacturing factories. *J Hazard Mat*. 2009; 169: 1054-1060.
20. Kim KY, Ko HJ, Kim HT, Kim CN, Kim YS. Assessment of airborne bacteria and fungi in pig buildings in Korea. *Biosys Eng*. 2008; 99: 565-572.
21. Byeon JH, Park CW, Yoon KY, Park JH, Hwang J.

- Size distributions of total airborne particles and bioaerosols in a municipal composting facility. *Biore-sour Technol.* 2008; 99: 5150-5154.
22. Lee CM, Kim YS, Lee TH, Park WS, Hong SC. Characterization of airborne bioaerosol concentration in public facilities. *Kor J Environ Sci.* 2004; 13: 215-222.
 23. Kim KY, Kim YS, Kim D. Distribution characteristics of airborne bacteria and fungi in the general hospitals of Korea. *Ind Health.* 2010; 48: 236-243.
 24. Marthi B, Lighthart B. Effects of betaine on the enumeration of airborne bacteria. *Appl Environ Microbiol.* 1990; 56: 1286-1289.
 25. Walter MV, Marthi B, Fieland VP, Ganio LM. Effect of aerosolization on subsequent bacterial survival. *Appl Environ Microbiol.* 1990; 56: 3468-3472.
 26. Macher JM, Huang FY, Flores M. A two-year study of microbiological indoor air quality in a new apartment. *Arch Environ Health.* 1991; 46: 25-29.
 27. Li CS, Hsu LY. Home dampness and childhood respiratory symptoms in a subtropical climate. *Arch Environ Health.* 1996; 51: 42-46.
 28. Kim KY, Ko HJ, Lee KJ, Park JB, Kim CN. Temporal and spatial distribution of aerial contaminants in an enclosed pig building in winter. *Environ Res.* 2005; 99: 150-157.
 29. DeKoster JA, Thorne PS. Bioaerosol concentrations in noncomplaint, complaint and intervention homes in the Midwest. *Am Ind Hyg Assoc J.* 1995; 56: 576-580.
 30. Gorny RL, Dutkiewicz J, Krysinska-Traczyk E. Size distribution of bacterial and fungal bioaerosols in indoor air. *Ann Agric Environ Med.* 1999; 6: 105-113.
 31. Pastuszka JS, Paw UKT, Lis DO, Wlazlo A, Ulfig K. Bacterial and fungal aerosol in indoor environment in Upper Silesia, Poland. *Atmos Environ.* 2000; 34: 3833-3842.
 32. Gorny RL, Dutkiewicz J, Krysinska-Traczyk E. Size distribution of bacterial and fungal bioaerosols in indoor air. *Ann Agric Environ Med.* 1999; 6: 105-113.