The Korean Journal of Microbiology (2011) Vol. 47, No. 1, pp. 38-49
Copyright ⓒ 2011, The Microbiological Society of Korea

하수처리시설에서 배양 가능한 공기중 미생물의 분포 및 특성

박교남 · 고지윤 · 정춘수 · 김종설*
울산대학교 자연과학대학 생명과학부

Distribution and Characteristics of Culturable Airborne Bacteria and Fungi in Municipal Wastewater Treatment Plants

Kyo Nam Park, Ji Yun Koh, Choon Soo Jeong, and Jongseol Kim*
Department of Biological Science, University of Ulsan, Ulsan 680-749, Republic of Korea
(Received December 15, 2010 / Accepted December 31, 2010)

Bioaerosols generated from wastewater treatment plants may create health risks for plant workers and nearby residents. To determine the levels of culturable airborne bacteria and fungi in bioaerosols, samples were seasonally collected above and near the aeration tanks of one feces-urine and three sewage treatment plants in Ulsan, Korea with an impaction-type sampler. In the feces-urine treatment plant, concentrations of heterotrophic bacteria were between $1.3(\pm0.2)\times10^3$ and $2.6(\pm1.2)\times10^4$ MPN/m^3 above the aeration tank and between $1.7(\pm1.0)\times10^2$ and $7.2(\pm2.2)\times10^3$ MPN/m^3 near the aeration tank. Coliform bacteria were detected both above and near the aeration tank. In cases of sewage treatment plant, the numbers of heterotrophic bacteria ranged from $1.9(\pm1.2)\times10^1$ to $1.8(\pm1.2)\times10^4$ MPN/m^3 above the aeration tank and from $5.0(\pm2.8)\times10^0$ to $6.6(\pm2.0)\times10^3$ MPN/m^3 near the aeration tank. At reference sites, the concentrations of heterotrophs in ambient air were measured between 7.0×10^0 and 2.7×10^1 MPN/m^3. When we isolated and tentatively identified heterotrophic bacteria, *Pseudomonas luteola* was the most dominant species in bioaerosols from wastewater treatment plants, whereas the most abundant one in reference samples was *Micrococcus* sp. When we measured fungal concentrations in bioaerosols, they were rather similar regardless of sampling locations and seasons, and such genera as *Cladosporium*, *Alternaria*, and *Penicillium* were commonly identified.

Keywords: aeration tank, airborne bacteria, airborne fungi, bioaerosol, sewage treatment plant

일반적으로 사람들은 공기중 미생물을 감기, 인플루엔자, 결핵 등과 같이 주로 호흡기관을 통해 전파되는 질병과 연관 짓는다. 특히 병원성 미생물의 오염 가능성이 높은 산업 및 생활환경에서 미생물학적 공기질의 평가는 작업자 및 주민의 건강보호를 위해서 꼭 필요하다. 미생물을 포함하는 aerosol, 즉 bioaerosol이 발생하는 대표적인 환경으로는 활성슬러지를 이용하는 하수처리시설이 있다. 실외 환경에서 bioaerosol에 대한 연구도 주로 하수처리시설, 슬러지 처리 및 퇴비화 공정, 처리하수 및 슬러지의 토양 적용 등과 연관되어 있다(2-5, 7-10, 15, 20, 21).

하수처리시설은 여러 질병을 일으키는 병원성 미생물의 오염원이 될 수 있으며, 해당 시설의 작업자와 인근 지역의 주민들에게 건강상 위해의 요소가 될 수 있다(5, 6, 14, 18, 22). 하수처리시설의 작업자가 직면하는 감염의 실제적인 위해성은 개별 시설에서 정확하게 평가되어야 하지만, 이러한 시설의 작업자와 관련한 특정 증세를 보통 “sewage worker’s syndrome”으로 부르고 있다(5, 18).

하수처리시설에서 발생하는 bioaerosol에 대한 주요 연구 주제로는 bioaerosol의 주요 발생원 확인, 발생원에서의 거리에 따른 미생물의 농도 변화, 공기중 미생물의 농도 및 생존에 영향을 주는 환경조건, bioaerosol의 건강 위해성 평가 및 역학적 조사 등이 있다(3, 4, 7, 10, 15, 20, 21). 또한 bioaerosol에서 바이러스나 장내세균과 같은 특정 미생물을 검출하기 위한 방법에 대한 여러 연구도 진행되고 있다(9, 16, 17).

실외 환경에서 공기중 미생물 분석에 관한 국내의 연구는 주로 황사와 관련한 여러 논문이 발표되고 있다(11). 하지만 하수처리시설에서의 bioaerosol 발생 및 공기중 미생물의 특성에 대한 정보는 여전히 부족한 실정이다. 본 연구에서는 울산

* For correspondence. E-mail: jkim@ulsan.ac.kr; Tel: +82-52-259-2387; Fax: +82-52-259-1694

시에 위치한 분뇨 및 하수처리시설을 대상으로 bioaerosol의 농도 수준, 검출되는 공기중 미생물의 특성, 지표미생물의 분포 등을 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

Bioaerosol의 포집

울산광역시 소재의 온산하수처리장(OS-STP), 용연하수처리장(YY-STP), 회야하수처리장(HY-STP)과 분뇨처리시설인 여천위생처리장(YC-STP)에서 계절별로 bioaerosol 시료를 포집하였다. 또한 분뇨 및 하수처리시설에서의 측정값과 비교하기 위해 태화강역과 울산대학교에서도 bioaerosol 시료를 포집하였다.

봄 bioaerosol 시료 채취는 2009년 4월 20일에서 22일, 여름 시료 채취는 7월 20일에서 28일, 가을 시료 채취는 10월 16일에서 26일, 그리고 겨울 시료 채취는 2010년 1월 18일에서 20일까지 진행하였다. 위생처리장인 YC-STP은 포기조가 있는 실내(0 m)와 건물 출입구(10 m)에서, 하수처리장은 포기조(0 m)와 포기조로부터 10 m 정도 거리를 둔 지점(10 m)에서 포집하였다. Bioaerosol 시료의 채취에는 미생물용 충돌식 공기 채취기(air-IDEAL, bioMérieux, France)를 이용하였으며, 지면으로부터 1.5 m의 높이에서 30 L와 300 L의 공기시료를 흡입시켜 미생물을 포집하였다(12). 계절별 비교를 위해 사계절 모두 동일한 지점에서 포집하였고, 비가 올 경우 bioaerosol 포집은 하지 않았다.

공기중 세균과 진균의 분포

배양이 가능한 공기중 세균수와 진균수의 측정은 각각 plate count agar (agar, 15.0 g; tryptone, 5.0 g; yeast extract, 2.5 g; glucose, 1.0 g; water, 1,000 ml)와 dichloran rose bengal chloramphenicol (DRBC) agar (agar, 15.0 g; glucose, 10.0 g; peptone, 5.0 g; KH_2PO_4, 1.0 g; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, 0.5 g; rose bengal, 0.025 g; dichloran, 0.002 g; chloramphenicol, 0.1 g; water, 1,000 ml)를 사용하여 행하였다(1). 시료의 채취 후, plate count agar는 35°C에서 24시간 배양 후 생겨난 집락을 계수하였고, DRBC agar는 25°C에서 72시간 배양 후 나타난 집락을 계수하였다.

공기중 세균수와 진균수는 30 L 혹은 300 L 공기를 흡입하여 포집한 배지의 집락수를 공기 채취기 제조사의 매뉴얼에 따라 공기 1 m^3에 존재하는 최적확수치(most probable number, MPN)로 환산하여 구하였다. 여기서 MPN은 통계적으로 얻어진 값으로 단위 부피에 존재하는 미생물의 수를 나타낸다.

Bioaerosol에 포함된 대장균군의 수는 eosin methylene blue (EMB) agar를 사용하여 측정하였다(1). 시료의 채취 후, 35°C에서 48시간 배양 후 생겨난 집락을 계수하였고, 300 L 공기를 흡입하여 포집한 배지의 집락수를 공기 채취기 제조사의 매뉴얼에 따라 공기 1 m^3에 존재하는 MPN값으로 환산하여 구하였다.

공기중 세균의 순수배양 및 동정

세균수의 측정에 사용한 plate count agar에 생겨난 집락을 대상으로 순수배양 및 표현형에 기초한 동정 실험을 행하였다. 계절 및 조사지점별로 세균수 측정시 접종한 plate 중 임의의 1개 plate를 선정하고, 여기서 생겨난 집락 중 임의의 10개 집락을 plate count agar에 접종하여 최초 분리하였다. 동일 배지에 계대 배양하여 순수분리한 후, 그람염색과 현미경 관찰을 통해 세균의 형태적 특징을 조사하였다(13). 분리한 세균은 API Staph kit, API 20NE kit (bioMérieux)을 사용하여 잠정적으로 동정하였으며, 동정확률(% id)이 90% 이상인 균종을 선택하여 동정된 것으로 간주하였다.

진균의 순수배양 및 동정

봄과 여름에 포집한 bioaerosol에서 검출된 진균을 대상으로 순수배양 및 동정 실험을 진행하였다. 조사지점별로 진균수의 측정에 사용한 DRBC agar에 생겨난 집락을 대상으로 임의의 10개 집락을 DRBC agar에 일차 접종한 후, 생겨난 집락을 동일배지에 계대 배양하여 순수배양을 얻었다. 진균 분리 균주는, 집락의 색과 모양 등 형태적 특징과 lactophenicol cotton blue로 염색 후 현미경으로 관찰한 포자낭의 형태적 특징에 기초하여 속 수준까지 잠정적으로 동정하였다(19, 24).

결과

시료 채취 지점의 온도와 습도

시료 채취 지점의 온도와 상대습도를 Table 1에 정리하였다. YC-STP의 경우 포기조가 실내에 있어 포기조(0 m)에서의 온도는 19-37°C로 포기조 근처(10 m)의 16-30°C에 비해 더 높았고, 상대습도는 포기조(0 m)에서 70-93%, 포기조 근처(10 m)에서 73-90%이었다(Table 1). 포기조가 실외에 있는 OS-, YY-, HY-STP에서 포기조(0 m)와 포기조 근처(10 m)의 온도는 봄 21-25°C, 여름 23-26°C, 가을 15-26°C, 겨울 3-15°C이었고, 상대습도는 봄 37-52%, 여름 75-85%, 가을 39-81%, 겨울 53-85%로, 상대습도는 여름이 다른 계절에 비해 높게 측정되었다(Table 1). 같은 하수처리시설에서 0 m와 10 m 지점에서의 온도 차이는 주로 그늘의 여부에 의한 것으로, 같은 시료 채취 일에 시설별로 나타나는 온도의 편차는 주로 포집한 시간대와 관련이 있는 것으로 추측된다.

공기중 세균의 분포

Plate count agar의 세균 집락수에 기초하여 구한 공기중 세균 농도를 Fig. 1에 나타내었다. 분뇨 및 하수처리시설의 포기조(0 m)에서 봄철 공기중 세균 농도는 YC-STP에서 $2.6(\pm0.0) \times 10^4$ MPN/m^3로 가장 높았고, 다음으로 OS-STP의 $1.8(\pm1.2) \times 10^4$ MPN/m^3, YY-STP의 $4.4(\pm0.8) \times 10^2$ MPN/m^3, HY-STP $1.9(\pm1.2) \times 10^1$ MPN/m^3의 순서였다(Fig. 1A). 포기조 근처(10 m)에서의 세균 농도는 YC-STP에서 $4.1(\pm4.2) \times 10^3$ MPN/m^3, OS-STP에서 $5.3(\pm1.6) \times 10^2$ MPN/m^3, YY-STP에서 2.2(±0.5)

Table 1. Temperature and relative humidity at sampling locations

Sampling location	Temperature (°C)				Relative humidity (%)			
	Spring	Summer	Fall	Winter	Spring	Summer	Fall	Winter
YC (0 m)	35	37	33	19	93	70	93	91
YC (10 m)	16	30	29	18	90	79	86	73
OS (0 m)	21	23	26	15	52	84	39	53
OS (10 m)	24	24	22	13	50	77	68	60
YY (0 m)	22	24	23	14	46	77	54	61
YY (10 m)	25	26	22	15	38	75	46	54
HY (0 m)	25	25	17	3	38	77	72	85
HY (10 m)	24	24	15	3	37	85	81	85
Taewha Station	21	23	8	11	37	84	41	58
Univ. Ulsan	-	23	24	12	-	84	43	40

$\times 10^2$ MPN/m^3, HY-STP에서 7.3(±0.5)$\times 10^1$ MPN/m^{3}으로 측정되었다. 대조군 지점의 공기중 세균 농도는 태화강역에서 1.2(±0.7)$\times 10^1$ MPN/m^3, 울산대학교에서 1.7(±2.3)$\times 10^1$ MPN/m^{3}로 측정되었다(Fig. 1A).

여름 포기조(0 m)에서 측정한 공기중 세균 농도는 YC-STP에서 2.6(±1.2)$\times 10^4$ MPN/m^{3}로 가장 높았고, 다음으로 OS-

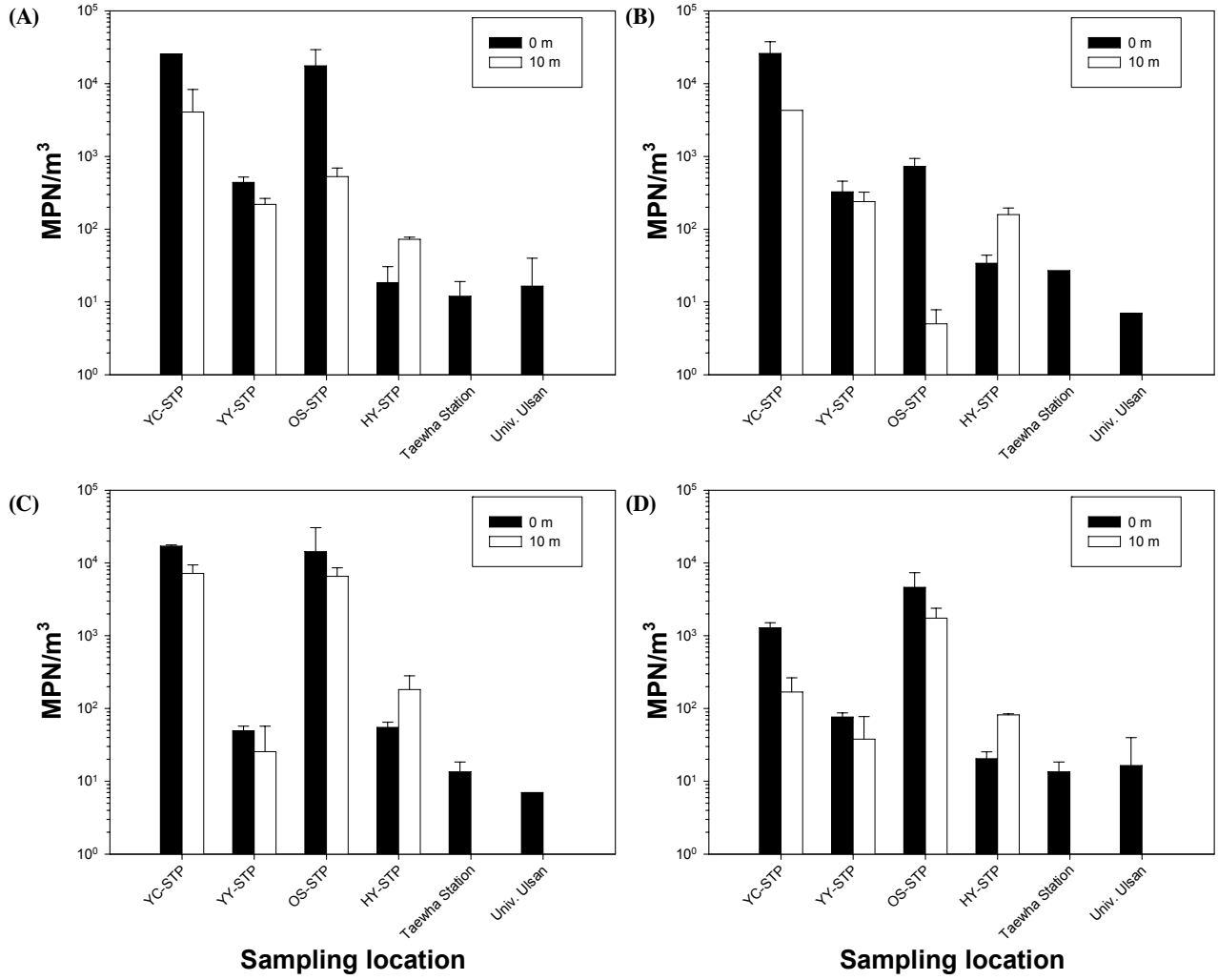

Fig. 1. Distribution of heterotrophic bacteria in bioaerosol samples collected at different locations: (A) spring, (B) summer, (C) fall, and (D) winter.

STP의 7.3(±2.0)×10^2 MPN/m^3, YY-STP의 3.3(±1.3)×10^2 MPN/m^3, HY-STP 3.4(±1.0)×10^1 MPN/m^{3}의 순서였다(Fig. 1B). 포기조 근처(10 m)에서의 공기중 세균 농도는 YC-STP 4.3(±0.0)×10^3 MPN/m^3, YY-STP 2.4(±0.8)×10^2 MPN/m^3, HY-STP 1.6(±0.4)×10^2 MPN/m^3, OS-STP 5.0(±2.8)×10^0 MPN/m^{3}으로 측정되었다. 대조군 지점인 태화강역은 2.7(±0.0)×10^1 MPN/m^3, 울산대학교는 7.0(±0.0)×10^0 MPN/m^{3}이었다(Fig. 1B).

가을 포기조(0 m)에서 공기중 세균 농도는 YY-STP의 5.0(±0.8)×10^1 MPN/m^{3}에서 YC-STP의 1.7(±0.1)×10^4 MPN/m^{3}의 범위였으며, 포기조 근처(10 m)에서 공기중 세균 농도는 YY-STP의 2.6(±3.2)×10^1 MPN/m^{3}에서 YC-STP의 7.2(±2.2)×10^3 MPN/m^{3}의 범위였다(Fig. 1C). 겨울에 측정한 공기중 세균 농도도 가을과 유사한 경향을 보였다(Fig. 1D).

계절별로 측정한 공기중 세균 농도의 평균값을 비교해보면 포기조(0 m)의 경우 YC-STP에서 1.7×10^4 MPN/m^{3}로 가장 높았고, 다음으로 OS-STP의 9.3×10^3 MPN/m^3, YY-STP의 2.2×10^2 MPN/m^3, HY-STP 3.2×10^1 MPN/m^{3}의 순서였다(Fig. 1). 포기조 근처(10 m)에서 공기중 세균의 평균 농도는 YC-STP에서 3.9×10^3 MPN/m^3, OS-STP에서 2.2×10^3 MPN/m^3, YY-STP에서 1.3×10^2 MPN/m^3, HY-STP에서 1.2×10^2 MPN/m^{3}이었다. 대조군 지점의 경우 태화강역은 평균 1.7×10^1 MPN/m^3, 울산대학교는 1.2×10^1 MPN/m^{3}이었다(Fig. 1). YC-, OS-, YY-STP에서의 공기중 세균 농도는 대조군 지점에 비해 평균값 기준으로 포기조(0 m)에서는 16-1200배, 포기조 근처(10 m)에서는 9-280배 정도 더 높은 수치였으며, 포기조 근처(10 m)보다 포기조(0 m)에서 1.7-4.4배 정도 더 높았다(Fig. 1). HY-STP의 공기중 세균 농도는 포기조(0 m)보다 포기조 근처(10 m)에서 3배 정도 더 높게 측정되었다(Fig. 1).

공기중 진균의 분포

봄철 DRBC agar의 진균 집락수에 기초하여 구한 공기중 진균 농도를 Fig. 2A에 나타내었다. 포기조(0 m)에서 봄철 공기중 진균 농도는 HY-STP 5.3(±1.0)×10^2 MPN/m^3, YY-STP

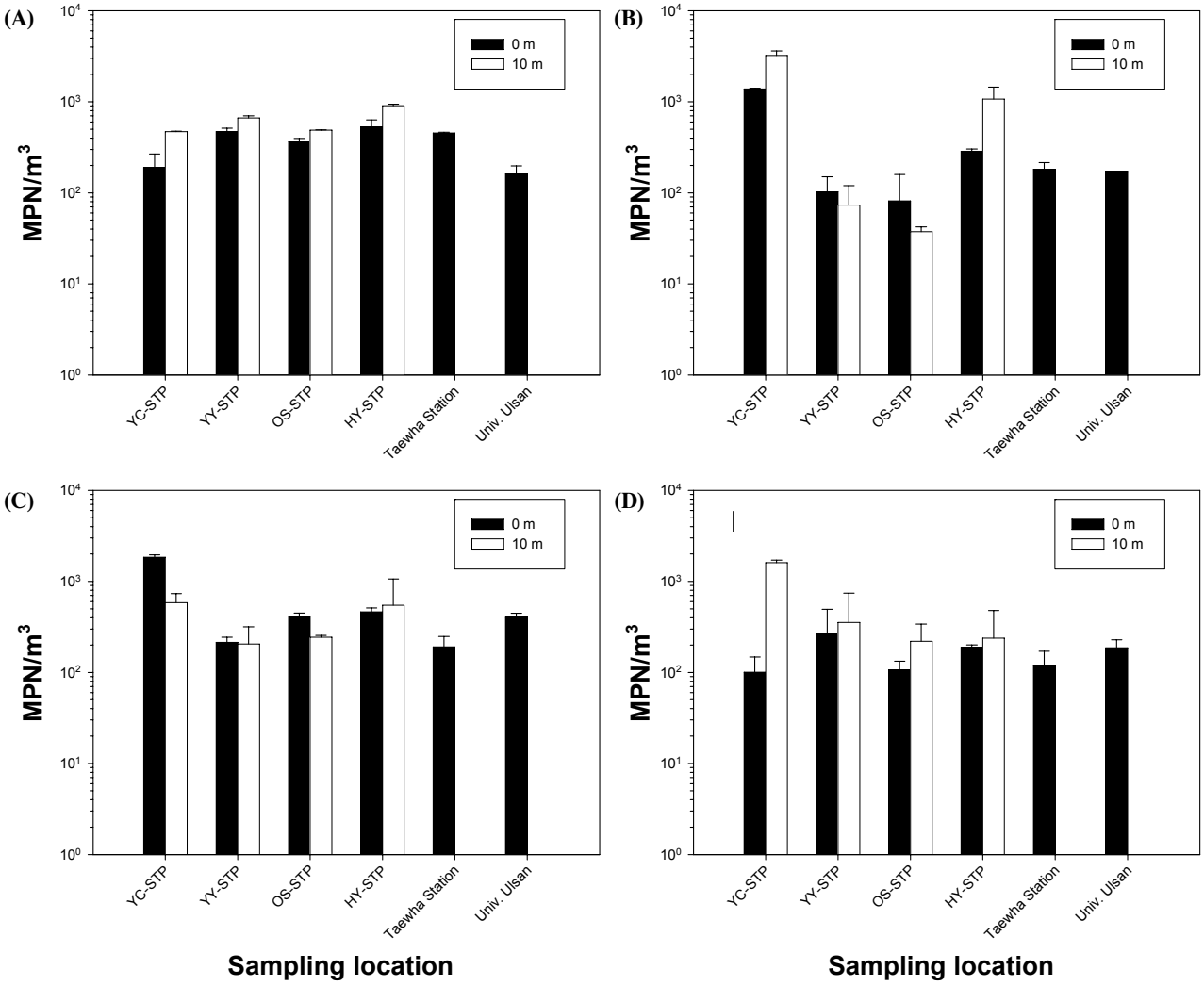

Fig. 2. Distribution of fungi in bioaerosol samples collected at different locations: (A) spring, (B) summer, (C) fall, and (D) winter.

Table 2. Tentative identification of bacterial isolates from bioaerosol samples (spring)

	Identification	No. of colonies									
		YC		OS		YY		HY		Taewha Station	Univ. Ulsan
		0	10	0	10	0	10	0	10		
G(+)	*Micrococcus* sp.	1	3	2	1	1	1	4		2	1
	Staphylococcus cohnii	4	2	2		1	4		1	1	
	S. hominis				1						
	S. lentus			1		1			1		3
	S. schleiferi	1	1								
	S. xylosus							1			
	Sum[G(+)]	6	6	5	2	3	5	5	2	3	4
G(-)	*Aeromonas hydrophilia/caviae*					1					
	A. salmonicid	1			2						
	Burkholderia cepacia					1			1		
	Chryseobacterium indologenesis					2					
	C. meningosepticum			1							
	Pseudomonas luteola		1	1	1	1	1	1	2		
	P. putida			1							
	Rhizobium radiobacter			1							
	Shewanella putrefaciens		1					1			
	Sphingomonas paucimobilis						1				1
	Stenotrophomonas maltophilia	1			1			1	1		
	Sum[G(-)]	2	2	4	4	5	2	3	4		1
Unidentified		2	2		4	2	3	1	2		
Total		10	10	9	10	10	10	9	8	3	5

4.7(±0.4)×10^2 MPN/m^3, OS-STP 3.6(±0.3)×10^2 MPN/m^3, YC-STP1.9(±0.8)×10^2 MPN/m^3의 순서였는데, 이는 대조군 지점인 태화강역의 4.6(±0.1)×10^2 MPN/m^3, 울산대학교의 1.6(±0.3)×10^2 MPN/m^3와 비슷한 수치였다(Fig. 2A). 포기조로부터 10 m 거리를 둔 지점에서 측정한 진균 농도는 HY-STP 9.0(±0.4)×10^2 MPN/m^3, YY-STP 6.7(±0.4)×10^2 MPN/m^3, OS-STP 4.9(±0.0)×10^2 MPN/m^3, YC-STP 4.7(±0.0)×10^2 MPN/m^3 등의 순서였다(Fig. 2A).

여름 분뇨 및 하수처리시설에서 공기중 진균 농도는 포기조(0 m)에서 8.2(±7.7)×10^1-1.4(±0.0)×10^3 MPN/m^3, 포기조 근처(10 m)에서 3.8(±0.5)×10^1-3.2(±0.4)×10^3 MPN/m^3의 범위였으며, 가을 공기중 진균 농도는 포기조(0 m)에서 2.1(±0.3)×10^2-1.8(±0.1)×10^3 MPN/m^3, 포기조 근처(10 m)에서 2.0(±1.1)×10^2-5.9(±1.5)×10^2 MPN/m^3의 범위였다(Figs. 2B and 2C). 겨울 공기중 진균 농도는 포기조(0 m)에서 1.0(±0.5)×10^2-2.7(±2.2)×10^2 MPN/m^3, 포기조 근처(10 m)에서 2.2(±1.2)×10^2-1.6(±0.1)×10^3 MPN/m^3의 범위였다(Fig. 2D).

계절별로 측정한 공기중 진균 농도의 평균값을 비교해보면 포기조(0 m)의 경우 YC-STP에서 8.8×10^2 MPN/m^3로 가장 높았고, 다음으로 HY-STP의 3.7×10^2 MPN/m^3, YY-STP의 2.6×10^2 MPN/m^3, OS-STP 2.4×10^2 MPN/m^3의 순서였다(Fig. 2). 포기조 근처(10 m)에서 공기중 진균의 평균 농도는 YC-STP에서 1.5×10^3 MPN/m^3, HY-STP에서 6.9×10^2 MPN/m^3, YY-STP에서 3.2×10^2 MPN/m^3, OS-STP에서 2.5×10^2 MPN/m^3이었다. 대조군 지점의 공기중 진균 농도는 태화강역에서 평균 2.4×10^2 MPN/m^3, 울산대학교에서 평균 2.3×10^2 MPN/m^3이었다(Fig. 2). 평균값 기준으로 공기중 진균 농도는 포기조(0 m)보다 그 근처(10 m)에서 더 높거나 비슷한 수준이었는데, 이는 하수처리시설의 포기조가 공기중 진균의 주요 발생원이 아님을 시사한다(Fig. 2). YC-STP의 공기중 진균 농도는 대조군 지점에 비해 평균값 기준으로 포기조(0 m)에서는 3.8배, 포기조 근처(10 m)에서는 6.3배 더 높았고, HY-STP에서는 대조군 지점에 비해 포기조(0 m) 1.6배, 포기조 근처(10 m) 2.9배 더 높았으며, YY-STP와 OS-STP에서는 대조군 지점의 1.0-1.4배 수준이었다(Fig. 2). 대조군 지점의 경우 공기중 진균의 평균 농도는 공기중 세균의 평균 농도 보다 17배 정도 더 높았다(Figs. 1 and 2).

공기중 대장균군 세균의 분포

EMB agar에서 금속성 광택을 나타내는 집락수에 기초하여 구한 공기중 대장균군 세균(추정)의 농도를 Fig. 3에 나타내었다. 봄철 공기중 대장균군이 검출된 곳은 YC-STP의 포기조(0 m)와 그 근처(10 m), YY-STP과 OS-STP의 포기조(0 m), HY-STP의 포기조 근처(10 m)였으며, 여름에 검출된 곳은 YC-STP과 OS-STP의 포기조(0 m)와 그 근처(10 m), YY-STP의 포기조(0 m), HY-STP의 포기조 근처(10 m)였다(Figs. 3A and 3B). 가을에 포집한 bioaerosol 시료에서는 공기중 대장균군이 검출되지 않았으며, 겨울에는 OS-STP의 포기조(0 m)와 그 근처(10 m)에서 검출되었다(Fig. 3C). 공기중 대장균군 세균이 검출된 지점에서의 최고 농도는 봄과 여름 YC-STP

포기조(0 m)에서의 3.4(±4.7)×10^1 MPN/m^3이었다(Fig. 3). 대조군 지점에서는 공기중 대장균군이 검출되지 않았다.

공기중 세균의 순수배양 및 동정

봄철 공기중 세균 농도를 측정한 plate count agar에 생겨난 집락으로부터 포기조(0 m)에서 38개, 포기조 근처(10 m)에서 38개, 대조군 지점에서 8개 등 84개 집락의 순수배양을 얻었다(Table 2). 이들 집락을 대상으로 그람 염색을 통해 형태적 특징을 관찰한 후 API kit를 이용하여 생리적, 생화학적 특징에 따른 동정 실험을 행하였으며, 10속 16종의 세균을 잠정적으로 확인하였다(Table 2). 포기조(0 m)에서 분리한 38개 집락의 경우 그람양성인 *Staphylococcus* 속이 11개로, 종별로는 *S. cohnii* 7개, *S. lentus* 2개, *S. schleiferi*와 *S. xylosus*가 각각 1개씩이었고, 다음으로 *Micrococcus* sp.가 8개를 차지하였다(Table 2). 그람음성 세균의 경우 *Pseudomonas* 속의 *P. luteola* 3개, *P. putida* 1개였고, *Chryseobacterium indogenes*와 *Stenotrophomonas maltophilia*가 각각 2개씩이었으며, *Aeromonas* 속의 *A. hydrophilia/caviae*와 *A. salmonicid*가 각각 1개씩이었다(Table 2). 포기조 근처(10 m)에서 분리한 38개 집락의 경우도 포기조(0 m)에서와 유사하게 *Staphylococcus* 속이 10개로 가장 많았고, *Micrococcus* sp.와 *Pseudomonas* 속이 각각 5개씩이었다(Table 2). 대조군 지점의 시료에서 분리한 8개 집락의 경우 *Staphylococcus lentus* 3개, *S. cohnii* 1개, *Micrococcus* sp. 3개, *Sphingomonas paucimobilis* 1개로 확인되었다(Table 2).

여름 시료의 경우 포기조(0 m)에서 40개, 포기조 근처(10 m)에서 33개, 대조군 지점에서 20개 등 93개 집락의 순수배양을 얻었으며, 10속 19종의 세균을 잠정적으로 확인하였다(Table 3). 포기조(0 m)에서 분리한 40개 집락의 경우 *Pseudomonas* 속의 *P. luteola*가 9개, *P. fluorescens*가 1개였고, *Staphylococcus* 속의 *S. cohnii*가 2개, *S. hominis*, *S. schleiferi*, *S. xylosus*가 각각 1개씩이었으며, 그 외 *Micro-*

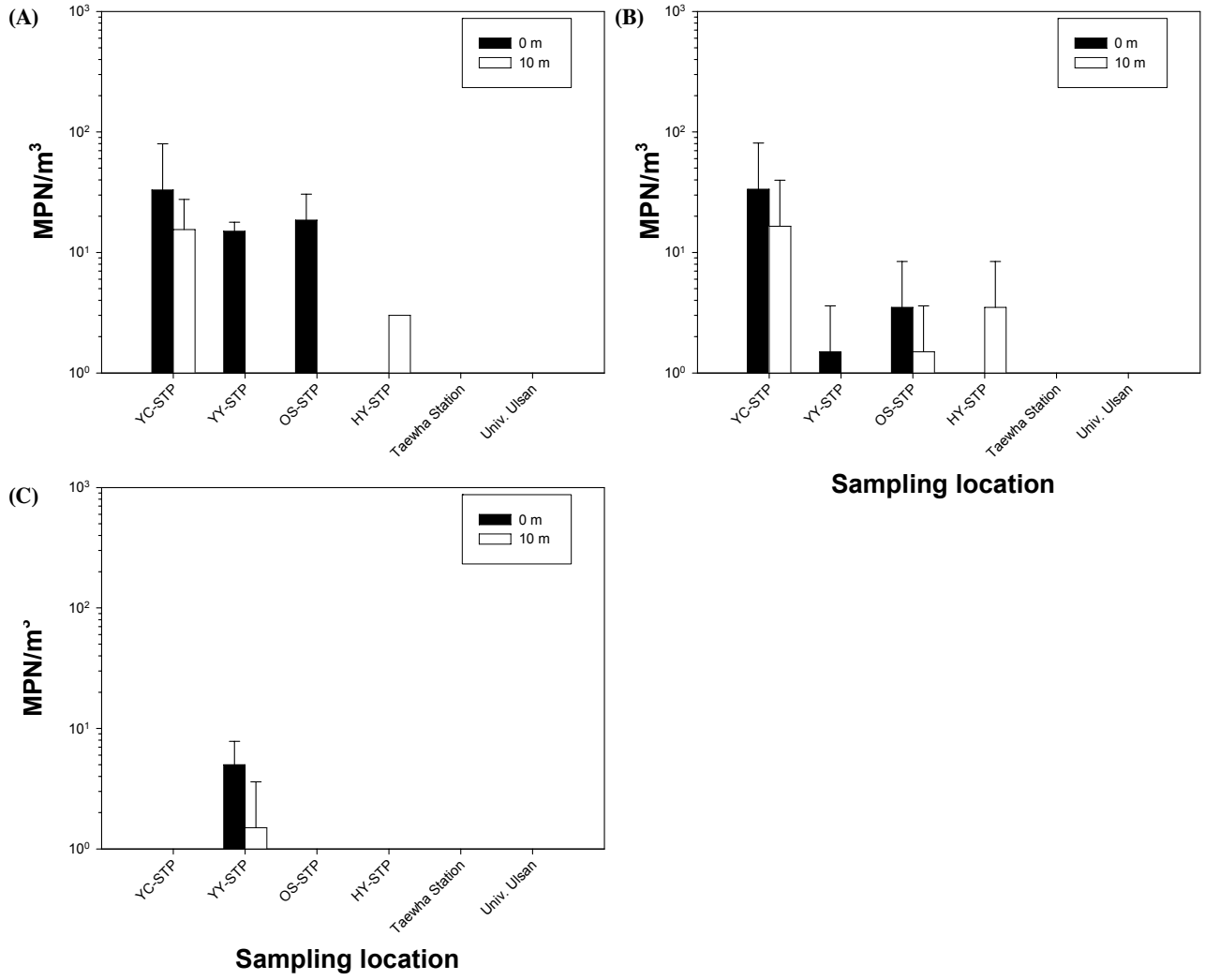

Fig. 3. Distribution of coliform bacteria in bioaerosol samples collected at different locations: (A) spring, (B) summer, and (C) winter.

Table 3. Tentative identification of bacterial isolates from bioaerosol samples (summer)

	Identification	No. of colonies, total									
		YC		OS		YY		HY		Taewha Station	Univ. Ulsan
		0	10	0	10	0	10	0	10		
	Micrococcus sp.			1				1	3	5	4
	Staphylococcus chromogenes										1
	S. cohnii							2			
	S. hominis							1			
G(+)	*S. hyicus*		1				1				
	S. lentus								1		
	S. schleiferi			1							
	S. sciuri									1	
	S. xylosus				1			1			
	Sum [G(+)]		1	2	1		1	5	4	6	5
	Acinetobacter junii/johnsonii							1			
	Aeromonas hydrophilia/caviae			2							
	Burkholderia cepacia										1
	Chryseobacterium meningosepticum									1	
	Ochrobactrum anthropi							1			
G(-)	*Photobacterium damselae*								1		
	Pseudomonas fluorescens							1			
	P. luteola	2		4	1	1	2	2	3		3
	P. oryzihabitans				1						
	P. stutzeri									1	
	Stenotrophomonas maltophilia	1	1			1	1				
	Sum [G(-)]	3	1	6	2	2	3	5	4	2	4
Unidentified		7	8	2		8	6		2	2	1
Total		10	10	10	3	10	10	10	10	10	10

coccus sp., *Aeromonas hydrophilia/caviae*, *Stenotrophomonas maltophilia*가 각각 2개, *Acinetobacter junii/johnsonii*와 *Ochrobactrum anthropi*가 각각 1개씩이었다(Table 3). 포기조 근처(10 m)에서 분리한 33개 집락의 경우 *Pseudomonas* 속의 *P. luteola*가 6개, *P. oryzihabitans*가 1개였고, *Staphylococcus* 속의 *S. hyicus* 2개, *S. lentus*와 *S. xylosus*가 각각 1개씩이었으며, 그 외 *Micrococcus* sp. 3개, *Stenotrophomonas maltophilia* 2개, *Photobacterium damselae*가 1개 검출되었다(Table 3). 대조군 시료에서 분리한 20개 집락의 경우 *Micrococcus* sp.가 9개, *Pseudomonas* 속의 *P. luteola* 3개, *P. stutzeri* 1개, *Staphylococcus* 속의 *S. chromogenes*와 *S. sciuri*, *Burkholderia cepacia*, *Chryseobacterium meningosepticum*가 각각 1개씩이었다(Table 3).

가을 시료로부터 포기조(0 m)에서 40개, 포기조 근처(10 m)에서 40개, 대조군 지점에서 20개 등 100개의 공기중 세균 집락의 순수배양을 얻었으며, 12속 17종의 세균을 확인하였다(Table 4). 포기조(0 m)에서 분리한 40개 집락의 경우 *Micrococcus* sp.가 7개였고, *Staphylococcus* 속의 *S. xylosus*가 3개, *S. cohnii*와 *S. hominis*가 각각 1개의 분포를 보였다(Table 4). 그람음성 세균은 *Pseudomonas luteola*가 8개로 가장 많았으며, 다음으로 *Aeromonas salmonicida* 5개, *Stenotrophomonas maltophilia* 4개, *Vibrio metschnikovii* 2개, *Brevundimonas vesicularis* 1개였다(Table 4). 포기조 근처(10 m)에서 분리한 40개 집락의 경우 *Micrococcus* sp.가 7개, *Staphylococcus* 속의 *S. cohnii* 2개, *S. caprae*, *S. epidermidis*, *S. lentus*가 각각 1개의 분포를 보였다(Table 4). 그람음성 세균은 *Pseudomonas* 속의 *P. luteola* 7개, *P. aeruginosa* 1개였고, 다음으로 *Stenotrophomonas maltophilia*가 5개, *Aeromonas salmonicida* 3개, *Shewanella putrefaciens* 2개, *Acinetobacter baumannii/calcoaceticus*와 *Brevundimonas vesicularis*가 각각 1개 등이었다(Table 19). 대조군 시료의 경우 *Micrococcus* sp.가 8개, *Staphylococcus lentus*와 *Pseudomonas luteola*가 각각 3개씩이었고, 그 외 *Brevundimonas vesicularis*, *Kocuria varians/rosea*, *Ochrobactrum anthropi*, *Rhizobium radiobacter*, *Stenotrophomonas maltophilia*가 각각 1개씩이었다(Table 4).

겨울 시료의 경우 포기조(0 m)와 포기조 근처(10 m)에서 각각 40개, 대조군 지점에서 13개 등 93개 집락의 순수배양을 얻었으며, 4속 13종의 세균을 잠정적으로 확인하였다(Table 5). 포기조(0 m)에서 분리한 집락의 경우 *Staphylococcus* 속의 *S. cohnii* 7개, *S. lentus* 5개, *S. capitis*와 *S. saprophyticus*가 각각 2개, *S. hominis*와 *S. schleiferi*가 각각 1개씩이었고, *Pseudomonas* 속의 *P. luteola* 9개, *P. aeruginosa* 5개, *P. fluorescens*와 *P. stutzeri*가 각각 1개씩이었으며, 그 외 *Micrococcus* sp. 6개, *Aeromonas hydrophilia/caviae* 2개였다

Table 4. Tentative identification of bacterial isolates from bioaerosol samples (fall)

	Identification	No. of colonies									
		YC		OS		YY		HY		Taewha Station	Univ. Ulsan
		0	10	0	10	0	10	0	10		
	Micrococcus sp.			4	4	2	3	1		4	4
	Staphylococcus caprae				1						
	S. cohnii	1			1				1		
G(+)	*S. epidermidis*						1				
	S. hominis			1							
	S. lentus						1			1	2
	S. xylosus					1		2	1		
	Sum [G(+)]	1		5	6	3	5	3	2	5	6
	Acinetobacter baumannii/calcoaceticus								1		
	Aeromonas salmonicida	1	1	2				2	2		
	Brevundimonas vesicularis			1	1						1
	Kocuria varians/rosea										1
	Ochrobactrum anthropi									1	
G(-)	*Pseudomonas aeruginosa*		1								
	P. luteola	4	2			2	4	2	1	1	2
	Rhizobium radiobacter									1	
	Shewanella putrefaciens		1						1		
	Stenotrophomonas maltophilia	2	4		1	1		1		1	
	Vibrio metschnikovii					2					
	Sum [G(-)]	7	9	3	2	5	4	5	5	4	4
Unidentified		2	1	2	2	2	1	2	3	1	
Total		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

(Table 5). 포기조 근처(10 m)에서 분리한 집락의 경우 *Pseudomonas* 속의 *P. luteola* 17개, *P. aeruginosa* 2개, *P. fluorescens* 1개였고, *Staphylococcus* 속의 *S. cohnii*와 *S. xylosus*가 각각 5개, *S. lentus* 4개, *S. caprae*, *S. saprophyticus*, *S. schleiferi*, *Micrococcus* sp.가 각각 1개씩이었다(Table 5). 대조군 시료의 경우 *Staphylococcus* 속의 *S. lentus* 9개, *S. schleiferi*와 *S. xylosus*가 각각 1개, 그리고 *P. luteola*가 2개였다(Table 5).

Table 5. Tentative identification of bacterial isolates from bioaerosol samples (winter)

	Identification	No. of colonies									
		YC		OS		YY		HY		Taewha Station	Univ. Ulsan
		0	10	0	10	0	10	0	10		
	Micrococcus sp.					3		3	1		
	Staphylococcus capitis	1						1			
	S. caprae				1						
	S. cohnii	2	4	2		2	1	1			
G(+)	*S. hominis*	1									
	S. lentus					4	1	1	3	2	7
	S. saprophyticus	2	1								
	S. schleiferi	1					1				1
	S. xylosus						2		3		1
	Sum[G(+)]	7	5	2	1	9	5	6	7	2	9
	Aeromonas hydrophilia/caviae				1		1				
	Pseudomonas aeruginosa			4	1			1	1		
G(-)	*P. fluorescens*			1	1						
	P. luteola	3	5	3	6	1	4	2	2	1	1
	P. stutzeri							1			
	Sum[G(-)]	3	5	8	9	1	5	4	3	1	1
Total		10	10	10	10	10	10	10	10	3	10

Table 6. Tentative identification of fungal isolates from bioaerosol samples (spring)

Identification	No. of colonies									
	YC		OS		YY		HY		Taewha Station	Univ. Ulsan
	0m	10m	0m	10m	0m	10m	0m	10m		
Acremonium		1					1			
Alternaria				3	6	5	1	1		1
Aspergillus	2		1							
Aureobacidium			1							
Cladosporium		8	4	6	3	3	7	6	8	8
Cylindrocladium			1							
Dactylaria								1		
Paecilomyces	3							2		
Penicillium	5	1	2							1
Unidentified			1	1	1	2	1		2	
Total	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10

전체적으로 포기조(0 m)에서 158개, 포기조 근처(10 m)에서 151개, 대조군 지점에서 61개 등 370개의 순수배양을 얻었다. 포기조(0 m)에서 분리한 158개 집락 중 그람양성 세균은 62개(39%)였고, 그람음성이 66개(42%)였으며, 30개(19%)는 확인하지 못하였다(Tables 2-5). 포기조 근처(10 m)에서 분리한 151개 집락의 경우 그람양성은 53개(35%), 그람음성은 64개(42%)로 관찰되었고, 34개(23%)는 확인하지 못하였다(Tables 2-5). 대조군 시료에서 분리한 61개의 공기중 세균은 그람양성이 40개(66%), 그람음성이 17개(28%)였고, 4개(7%)는 확인하지 못하였다. 그람양성 세균이 공기중 세균의 다수를 차지한 대조군 지점과는 달리, 분뇨 및 하수처리시설의 포기조(0 m)와 포기조 근처(10 m)에서는 그람음성 세균이 그람양성 세균에 비해 더 높은 빈도로 분리되었다(Tables 2-5).

공기중 진균의 순수배양 및 동정

봄철 공기중 진균수를 측정한 DRBC agar로부터 임의의 집락을 새로운 배지에 계대 배양하여 포기조(0 m)에서 40개, 포기조 근처(10 m)에서 40개, 대조군 지점 20개 등 100개 진균 집락의 순수배양을 얻었으며, 9속의 사상성 진균을 확인하였다(Table 6). 포기조(0 m)에서 분리한 40개 집락의 경우 *Cladosporium* 속이 14개(35%)로 가장 많았고, *Alternaria* 속과 *Penicillium* 속이 각각 7개(18%)였으며, 이들 3속이 70%를 차지하였다(Table 6). 그 외 *Aspergillus* 속과 *Paecilomycetes* 속이 각각 3개, *Aureobasidium* 속과 *Cylindrocladium* 속이 각각 1개씩이었고, 3개 집락은 확인하지 못하였다. 포기조 근처(10 m)에서 분리한 집락의 경우에도 *Cladosporium* 속이 23개(58%)로 가장 많았고, *Alternaria* 속이 9개(20%)였다(Table 6). 그 외 *Paecilomyces* 속 2개, *Acremonium* 속, *Dactylaria* 속, *Penicillium* 속이 각각 1개씩이었고, 3개의 집락은 확인하지 못하였다. 대조군 지점의 경우 16개(80%) 집락이 *Cladosporium* 속이었고, *Alternaria* 속과 *Penicillium* 속이 각각 1개씩이었으며, 2개 집락은 확인하지 못하였다(Table 6).

여름 시료로부터 포기조(0 m)에서 40개, 포기조 근처(10 m)에서 30개, 대조군 지점 20개 등 90개 진균 집락의 순수배양을 얻었으며, 7속의 사상성 진균을 확인하였다(Table 7). 포기조(0 m)의 경우 *Cladosporium* 속이 19개, *Penicillium* 속이 8개, *Alternaria* 속이 5개였으며, 이들 3속이 전체 집락의 80%를 차지하였다(Table 7). 그 외 *Candelabrella* 속이 2개, *Acremonium* 속이 1개였고, 4개 집락은 확인하지 못하였다(Table 7). 포기조 근처(10 m)에서 분리한 집락의 경우에도 *Cladosporium* 속 14개, *Penicillium* 속 4개, *Alternaria* 속 3

Table 7. Tentative identification of fungal isolates from bioaerosol samples (summer)

Identification	No. of colonies									
	YC		OS		YY		HY		Taewha Station	Univ. Ulsan
	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m	0 m	10 m		
Acremonium				-			1			2
Alternaria		1	1	-	1	1	3	2	1	3
Aspergillus				-		1				
Candelabrella				-			2	1		
Cladosporium	8	7	2	-	6	2	3	5	8	3
Paecilomyces		1		-						
Penicillium			5	-	3	4				1
Unidentified	2	1	2	-		2	1	2	1	1
Total	10	10	10	-	10	10	10	10	10	10

Table 8. The description of sewage treatment plant studied

Sewage treatment plant	Influent treated (m^3/day)	Treatment process	Influent quality (mg/L)				
			BOD	COD	SS	T-N	T-P
OS	89,300	Standard activated sludge process	104.3	85.2	128.9	30.8	2.0
YY	247,000	Standard activated sludge process	105.9	78.9	152.4	34.6	3.6
HY	26,400	SymBio	118.6	102.4	128.2	28.5	2.0

개로, 이들 3속이 전체 집락의 70%를 차지하였다(Table 7). 그 외 *Aspergillus* 속과 *Paecilomycetes* 속이 각각 1개씩이었고, 15개의 집락은 동정하지 못하였다(Table 7). 대조군 시료의 경우 *Cladosporium* 속 11개, *Alternaria* 속 4개, *Acremonium* 속 2개, *Penicillium* 속 1개였으며, 2개 집락은 확인하지 못하였다(Table 7).

고찰

2009년 계절별로 bioaerosol의 분포를 조사한 연구에서, 분뇨 및 하수처리시설의 공기중 세균 농도는 대조군 지점에 비해 평균값 기준으로 최대 1200배 더 높은 수치였으며, 포기조(0 m)에서 포기조 근처(10 m)보다 최대 4.4배 더 높았다. 또한 대조군 지점과는 달리 하수에 우점하는 그람 음성의 세균이 그람 양성에 비해 더 높은 빈도로 검출되었다. 이는 하수처리시설의 포기조가 공기중 세균의 주요 발생원임을 의미한다. 한편 포기조(0 m)의 공기중 진균 농도는 평균값 기준으로 포기조 근처(10 m)보다 더 낮았으나 대조군 지점에 비해서는 여전히 더 높은 농도를 보였다. 이는 하수처리시설에서 포기조 이외의 다른 공정이나 시설이 공기중 진균의 주요 발생원임을 시사한다. 본 연구의 측정값은 다른 나라에서 여러 연구자들이 비슷한 방법으로 측정하여 보고한 수치와 비교할 때 더 높은 농도를 보이지는 않았다(3, 4, 6, 7, 9, 20, 21).

본 연구에서, YC-STP의 공기중 세균 농도는 포기조가 있는 실내에서 $1.3(\pm0.2)\times10^3$-$2.6(\pm1.1)\times10^4$ MPN/m^3, 포기조 건물의 외부 출입구에서 $1.7(\pm1.0)\times10^2$-$7.2(\pm2.2)\times10^3$ MPN/m^3로 매우 높게 측정되었다. 또한 물에서 분변오염의 지표가 되는 대장균군도 봄과 여름에 포집한 포기조와 포기조 근처의 bioaerosol 시료에서 검출되었다. YC-STP은 울산시의 분뇨 및 정화조 슬러지를 처리하기 위한 시설로, 호기성 소화 방식으로 운영하고 있다(23). 포기조 1조는 4×37.6×4.6(가로×세로×깊이, m) 크기이며, 산기관 방식으로 포기한다. 2008년의 경우 평균 368 m^3/day를 처리하였다(23).

YC-STP 이외의 하수처리시설에서 2008년 기준 하수처리량, 처리방법, 유입수의 Table 8에 정리하였다(23). 이들 시설의 공기중 세균 농도를 살펴보면, 포기조(0 m)의 경우 YY-STP $5.0(\pm0.8)\times10^1$-$4.4(\pm0.8)\times10^2$ MPN/m^3, OS-STP $7.3(\pm2.0)\times10^2$-$1.8(\pm1.1)\times10^4$ MPN/m^3, HY-STP $1.9(\pm1.2)\times10^1$-$5.5(\pm1.0)\times10^1$ MPN/m^3의 범위였다. OS-STP에서 가장 높았고, HY-STP에서 가장 낮았다. 하수처리장에 따른 이러한 차이는 지형, 기상 등의 환경적 요인과 함께 하수처리량, 유입하수의 수질, 하수처리방법, 포기방식 등 공정과 관련한 여러 요인이 복합적으로 관여할 것으로 생각된다(3, 4, 10, 15). 공정과 관련한 여러 요인을 구체적으로 살펴보면, 하수처리장의 설계 시설 용량은 YY-STP이 250,000m^3/일로 가장 많고, OS-STP이 150,000m^3/일, 그리고 HY-STP이 32,000m^3/일로 가장 적다. 실제 2008년 처리량도 YY-STP이 247,000m^3/일로 가장 많았고, OS-STP이 89,300m^3/일, 그리고 HY-STP이 26,400m^3/일로 가장 적었다(Table 8)(23). 2008년 기준으로 하수처리장 유입수의 수질을 비교해보면, COD는 YY-STP 78.9 mg/L, OS-STP 85.2 mg/L, HY-STP 102.4 mg/L로 HY-STP이 가장 높았으며, T-N은 YY-STP 34.6 mg/L, OS-STP 30.8 mg/L, HY-STP 28.5 mg/L로 YY-STP이 가장 높았다(23). 따라서 3개 하수처리시설 중 OS-STP 포기조의 공기중 세균 농도가 가장 높은 이유가 하수처리량과 유입하수의 수질만으로는 설명이 되지 않는다. 2009년 조사시점 현재 하수처리방법의 경우 YY-STP과 OS-STP은 표준 활성슬러지법으로 동일하지만 포기방식에는 차이가 있다. YY-STP은 간헐포기접촉산화 공법을 적용하여 포기와 비포기 교반이 교대로 반복되는 공정이며, 이에 반해 OS-STP은 기계식표면포기기를 사용하여 수면에서 충격에 의해 기포를 발생시킨다. HY-STP은 질산화와 탈질이 한 단계로 진행되는 심바이오(SymBio) 공법을 적용하는데, 이 공법의 경우 질산화와 탈질 세균이 동시에 활성을 나타낼 수 있도록 산소 농도를 낮은 수준으로 유지할 필요가 있어 공정에서 하부 산기방식을 통해 제한적인 포기를 한다. 하수처리장 포기조의 구조도 차이가 있는데, YY-STP은 11×59.4×11(가로×세로×깊이, m) 크기의 포기조 12개, OS-STP은 50.8×76.2×4.5(가로×세로×깊이, m) 크기의 포기조 3개, HY-STP은 1.7×68×4(가로×세로×깊이, m) 크기 포기조 4개를 운영하고 있다(23). 따라서 이들 하수처리시설의 포기조에서 공기중 세균 농도의 분포 차이는 주로 포기방식과 포기조의 구조(깊이, 외부 대기와 접하는 표면적 등)에 기인하는 것으로 판단된다. 한편 포기조가 밀폐형으로 설계된 방어진하수처리장에서의 공기중 세균 농도는 대조군 지점과 유의성 있는 차이가 없었다(자료 미제시).

하수처리시설의 포기조 근처에서 공기중 세균 농도는 YY-STP $2.6(\pm3.2)\times10^1$-$2.4(\pm0.8)\times10^2$ MPN/m^3, OS-STP $5.0(\pm2.8)\times10^0$-$6.6(\pm2.0)\times10^3$ MPN/m^3, HY-STP $7.3(\pm0.5)\times10^1$-$1.8(\pm1.0)\times10^2$ MPN/m^3의 범위였다. OS-STP의 경우 계절별 측정값에 큰 차이가 있는데, 계절적 요인보다는 시료 채취 일의 풍향에 의한 것으로 여겨진다. 현실적 제약 때문에 풍향과 상관없이 하수처리장별로 포기조 근처 1개의 동일한 지점에서 포집을 하였으며, 풍향이나 포기조로부터의 거리에 따른 세균 농도의 변화는 분석하지 못하였다. HY-STP의 경우 포기를 제

한하는 공정 운영으로 포기조에서의 공기중 세균 농도는 낮았지만 YY-STP, OS-STP와는 달리 포기조보다 그 근처에서 공기중 세균 농도가 더 높았다. HY-STP은 포기조보다 1차 침전조가 bioaerosol의 주요 발생원으로 추정되는데, 2개의 1차 침전조는 포기조와 달리 지상으로 돌출되어 있으며 유입하수의 높이가 침전조 높이와 같아서 하수의 흐름과 바람에 의해 쉽게 bioaerosol이 발생할 수 있는 구조를 하고 있다.

YY-STP의 경우 간헐포기접촉산화의 포기방식을 하고 있지만 포기조에서 공기중 세균 농도는 배경 수준보다 10배 이상 높다. 실외에서 공기중 세균의 생존은 햇빛과 습도의 영향을 받기 때문에(10), 간헐포기에서 포기를 낮에 진행하고 비포기 교반을 밤에 진행하는 포기방식을 고려할 필요가 있다. HY-STP에서는 포기조보다 1차 침전조 근처에서 공기중 세균의 농도가 더 높았다. 슬러지 처리 및 운반 과정에서도 bioaerosol 발생이 높다는 여러 보고가 있다(5, 15). 하수처리시설을 대상으로 전처리, 1차 침전조, 포기조, 2차 침전조, 슬러지 탈수, 슬러지 운반 등 처리 공정별로 bioaerosol을 포집하고 세균 농도를 분석할 필요가 있다.

분변오염의 지표가 되는 대장균군 세균은 포기조와 포기조 근처의 공기중에서 검출되었다. 본 연구에서는 선택배지를 사용한 생균수 측정법을 적용하여 대장균군 세균의 수를 측정하였다. 하지만 대장균군 세균에 비해 상대적으로 높은 농도로 존재하는 일반세균 때문에 실제 농도를 과소평가하였을 가능성은 여전히 있다. 또한 본 연구에서는 하수처리시설에서 배양에 기초한 방법으로 공기중 세균과 진균의 농도를 조사하고 동정하였다. 환경시료에 존재하는 미생물 군집의 모든 개체군을 배양할 수 없다는 방법상의 한계를 고려할 때, 본 연구의 결과가 살아있는 공기중 미생물을 과소평가하였거나 미생물 군집의 주요 개체군을 반영하지 못하였을 가능성은 여전히 있으며 동정결과는 잠정적이다. 최근에는 배양에 의존하지 않는 DNA-based microbial source tracking 방법도 개발되어 bioaerosol의 발생원 확인에 이용하고 있다(2). 이러한 방법을 적용할 경우 본 연구와 같이 높은 배경수준의 일반세균 존재하에서도 대장균군 세균을 검출하고 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

하수처리시설에서 bioaerosol의 노출과 관련된 건강상의 영향으로는 감염성 질환과 알레르기 증세 등이 대표적이다. 감염성 질환 중 현재 A형 간염이 많은 관심의 대상이 되고 있다(22). 일반적으로 bioaerosol의 노출에 의한 건강 위해성 평가는 dose-response 관계성 정립과 정량적인 노출 평가가 어렵다는 점 때문에 제약을 받고 있으며, 노출 평가에 대한 방법론의 개발이 선행될 필요가 있다(6). 본 연구는 위해성 평가를 목적으로 하거나 역학적 조사를 염두에 두고 진행하지는 않았으며, 현재의 결과로 건강상의 위해성을 예단하기는 어렵다. 하지만 분변 오염의 지표미생물인 대장균군 세균이 포기조 뿐만 아니라 포기조 근처의 공기중에서도 검출되며 endotoxin을 지니는 *Pseudomonas* 속의 세균과 병원체로 알려진 여러 종을 포함하는 *Aeromonas* 속이 높은 농도로 존재한다는 점을 고려할 때 bioaerosol 노출에 의한 건강 위해성의 평가가 필요하다고 판단된다.

적요

하수처리시설에서 발생하는 공기중 미생물은 작업자 및 주민에게 건강상 위해의 요인이 될 수 있다. 이들 시설에서 공기중 세균과 진균의 농도 수준을 파악하기 위해 울산시에 위치한 위생처리장 1곳(YC-STP)과 하수처리장 3곳(YY-, OS-, HY-STP)의 포기조와 포기조 근처 지점에서 계절별로 공기중 미생물을 포집하였다. YC-STP의 공기중 세균 농도는 포기조에서 $1.3(\pm0.2)\times10^3$-$2.6(\pm1.1)\times10^4$ MPN/m^3, 포기조 근처에서 $1.7\ (\pm1.0)\times10^2$-$7.2(\pm2.2)\times10^3$ MPN/m^3로 매우 높았으며, 대장균군도 검출되었다. YY-, OS-, HY-STP의 공기중 세균 농도는 포기조에서 $1.9(\pm1.2)\times10^1$-$1.8(\pm1.2)\times10^4$ MPN/m^3, 포기조 근처에서 $5.0(\pm2.8)\times10^0$-$6.6(\pm2.0)\times10^3$ MPN/m^3의 범위였다. YC-, OS-, YY-STP에서의 공기중 세균 농도는 대조군 지점에 비해 평균값 기준으로 포기조에서는 16-1,200배, 포기조 근처에서는 9-280배 정도 더 높은 수치였으며, 포기조 근처(10 m)보다 포기조(0 m)에서 1.7-4.4배 정도 더 높았다. 공기중 세균을 분리하여 동정한 결과 하수처리시설에서는 *Pseudomonas luteola*, 대조군 지점에서는 *Micrococcus* sp.가 우점하였다. 공기중 진균의 농도는 포기조 보다 포기조 근처에서 더 높았으며 포기조 외에 다른 주요 발생원이 존재함을 시사한다. *Cladosporium*, *Alternaria*, *Penicillium*의 3속이 주로 검출되었다.

감사의 말

본 연구는 2009년 울산지역환경기술개발센터의 연구비 지원에 의해 수행되었음. 시료 채취에 도움을 주신 여러분께 감사의 말을 전합니다.

참고문헌

1. Atlas, R.M. and L.C. Parks. 1996. Handbook of microbiological media. CRC press, Boca Raton, Florida, USA.
2. Baertsch, C., T. Paez-Rubio, E. Viau, and J. Peccia. 2007. Source tracking aerosols released from land-applied class B biosolids during high-wind events. *Appl. Environ. Microbiol.* 73, 4522-4531.
3. Bauer, H., M. Fuerhacker, F. Zibuschka, H. Schmid, and H. Puxbaum. 2002. Bacteria and fungi in aerosols generated by two different types of wastewater treatment plants. *Water Res.* 36, 3965-3970.
4. Brandi, G., M. Sisti, and G. Amagliani. 2000. Evaluation of the environmental impact of microbial aerosols generated by wastewater treatment plants utilizing different aeration systems. *J. Appl. Microbiol*. 88, 845-852.
5. Carducci, A., E. Tozzi, E. Rubulotta, B. Casani, L. Cantiani, E. Rovini, M. Muscillo, and R. Pacini. 2000. Assessing airborne biological hazard from urban wastewater treatment. *Water Res*. 34, 1173-1178.
6. Douwes, J., P. Thorne, N. Pearce, and D. Heederik. 2003.

Bioaerosol health effects and exposure assessment: Progress and prospects. *Ann. Occup. Hyg*. 47, 187-200.
7. Fannin, K.F., S.C. Vana, and W. Jakubowski. 1985. Effect of an activated sludge wastewater treatment plant on ambient air densities of aerosols containing bacteria and viruses. *Appl. Environ. Microbiol.* 49, 1191-1196.
8. Grisoli, P., M. Rodolfi, S. Villani, E. Grignani, D. Cottica, A. Berri, A.M. Picco, and C. Dacarro. 2009. Assessment of airborne microorganism contamination in an industrial area characterized by an open composting facility and a wastewater treatment plant. *Environ. Res*. 109, 135-142.
9. Heinonen-Tanski, H., T. Reponen, and J. Koivunen. 2009. Airborne enteric coliphages and bacteria in sewage treatment plants. *Water Res*. 43, 2558-2566.
10. Karra, S. and E. Katsivela. 2007. Microorganisms in bioaerosol emissions from wastewater treatment plants during summer at a Mediterranean site. *Water Res*. 41, 1355-1365.
11. Lee, S., B. Choi, S.-M. Yi, and G. Ko. 2009. Characterization of microbial community during Asian dust events in Korea. *Sci. Total Environ*. 407, 5308-5314.
12. Lee, A.M., N.Y. Kim, S.Y. Kim, and J. Kim. 2005. Distribution and characteristics of airborne microorganisms in indoor environment of schools. *Kor. J. Microbiol*. 41, 188-194.
13. Murray, R.G.E., R.N. Doetsch, and C.F. Robinow. 1994. Determinative and cytological light microscopy, pp. 21-41. *In* P. Gerhardt, R.G.E. Murray, W.A. Wood, and N.R. Krieg (eds.), Methods for general and molecular bacteriology. American Society for Microbiology, Washington, D.C., USA.
14. Orsini, M., P. Laurenti, F. Boniniti, D. Arzani, A. Ianni, and V. Romano-Spica. 2002. A molecular typing approach for evaluating bioaerosol exposure in wastewater treatment plant workers. *Water Res*. 36, 1375-1378.
15. Pascual, L., S. Pérez-Luz, M.A. Yáñez, A. Santamaría, K. Gibert, M. Salgot, D. Apraiz, and V. Catalán. 2003. Bioaerosol emission from wastewater treatment plants. *Aerobiologia* 19, 261-270.
16. Patentalakis, N., A. Pantidou, and N. Kalogerakis. 2008. Determination of enterobacteria in air and wastewater samples from a wastewater treatment plant by epi-fluorescence Microscopy. *Water Air Soil Pollut.: Focus* 8, 107-115.
17. Ranalli, G., P. Principi, and C. Sorlini. 2000. Bacterial aerosol emission from wastewater treatment plants: Culture methods and bio-molecular tools. *Aerobiologia* 16, 39-46.
18. Rylander, R., K. Andersson, L. Belin, G. Berglund, R. Bergström, L.A. Hanson, M. Lundholm, and I. Mattsby. 1976. Sewage worker's syndrome. *Lancet* 308, 478-479.
19. Samson, R.A., E.S. Hoekstra, J.C. Frisvad, and O. Filtenborg. 2002. Introduction to food- and airborne fungi, 6th ed. Centraalbureau voor Schimmelcultures, Utrecht, Netherlands.
20. Sánchez-Monedero, M.A., M.I. Aguilar, R. Fenoll, and A. Roig. 2008. Effect of the aeration system on the levels of airborne microorganisms generated at wastewater treatment plants. *Water Res*. 42, 3739-3744.
21. Sawyer, B., G. Elenbogen, K.C. Rao, P. O'Brien, D.R. Zenz, and C. Lue-Hing. 1993. Bacterial aerosol emission rates from municipal wastewater aeration tanks. *Appl. Environ. Microbiol.* 59, 3183-3186.
22. Thorn, J. and E. Kerekes. 2001. Health effects among employees in sewage treatment plants: a literature survey. *Am. J. Ind. Med.* 40, 170-179.
23. Ulsan Metropolitan City. 2009. An environment white paper 2009.
24. Watanabe, T. 1994. Pictorial atlas of soil and seed fungi-morphology of cultured fungi and key to species. CRC press, Boca Raton, Florida, USA.