

일부 학교 내 총부유세균 및 미세먼지의 상관성 비교

서혜경* · 안하림

신한대학교 대학원 보건기술융합학과

Comparison of Correlation between Total Airborne Bacteria and Particulate Matter in University Spaces

Hyekyung Seo* · Harim An

Department of Health Technology Convergence, Graduate School of Shinhan University

ABSTRACT

Objectives: The aim of this study is to assess indoor air quality within and around buildings and evaluate the health risks associated with exposure to indoor air pollution. The study compares IAQ standards established by the World Health Organization with those set by South Korea's Ministry of Environment and Ministry of Education.

Methods: The study utilized an Anderson Sampler and DustTrak™ II to collect samples of total airborne bacteria and PM in indoor and outdoor environments. Collected samples were analyzed using biological and biochemical methods. Statistical analysis was conducted using SPSS to examine the correlation between airborne bacteria and PM.

Results: The study revealed that the concentration of total airborne bacteria in indoor air generally remained below the Ministry of Environment's standard of 800 CFU/m³, although it surpassed this threshold in certain instances. PM concentrations did not exceed the standards. Indoor fine dust concentration was higher when there were people ($P<0.05$). There was no difference in total floating bacterial concentrations between indoor and outdoor environments ($P=0.184$). Finally, there was a correlation between fine dust and airborne bacteria concentrations.

Conclusion: The study evaluated the concentrations of total airborne bacteria and PM in indoor air, emphasizing the importance of managing IAQ. Further research in various environments is essential to ensure a healthy indoor environment. The findings underscore the need for ongoing research and management to enhance IAQ and create safer and healthier living environments.


Key words: Anderson sampler, indoor air quality, PM2.5, PM10, total airborne bacteria


I. 조사개요

실내공기질(Indoor air quality, IAQ)은 건축물 내부 및 주변의 공기질로 정의한다. 일반적으로 건강과 실내 환경에서 중요한 영향을 미치며 실내 공기 오염 노출로 인한 건강 위험은 실외 오염과 관련된 위험보다 클 수 있다. 대부분의 사람은 집, 학교, 직장, 운송

건물 등과 같은 개인 및 공공 실내 환경에서 약 90%의 시간을 보낸다(Cincinelli & Martellini., 2017). 이런 이유로 현재 많은 관심을 받고 있을뿐만 아니라 이에 대한 기준도 정해져 있다. 세계보건기구(World Health Organization, WHO)는 1987년 생물학적 인자에 대한 “Air quality guidelines for Europe”에서 일반대기와 실내공기질에 모두 적용되는 가이드라인을 제시한

*Corresponding author: Hyekyung Seo, Tel: 010-3955-5229 E-mail: seohk65@hanmail.net
Department of Health Technology Convergence, Graduate Schools of Shinhan University, 95 Hoam-ro, Uijeongbu-city, Gyeonggi-do 11644, Republic of Korea
Received: June 7, 2024, Revised: June 17, 2024, Accepted: June 29, 2024

 Hyekyung Seo <https://orcid.org/0000-0002-5615-8523>

 Harim An <https://orcid.org/0000-0001-5872-3234>

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

바 있다. 제시된 물질은 미세먼지(particulate matter, PM), 벤젠(benzene), 일산화탄소(carbon monoxide), 나프탈렌(naphthalene), 포름알데히드(formaldehyde), 트리클로로에틸렌(trichloroethylene, TCE), 다환 방향족 탄화수소(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs), 이산화질소(nitrogen dioxide), 테트라클로로에틸렌(tetrachloroethylene, PCE) 등이다(WHO, 2000).

생물학적 인자로 인한 질병의 중요성을 인식한 우리나라 환경부(Ministry of Environment, MOE)는 2023년 “실내공기질 관리법(2016)”을 개정하였고, 교육부(Ministry of Education, MOE)도 “학교보건법(2021)”을 통해 건강한 학교 내 생활을 위하여 실내공기질을 기준으로 정하고 있다. 기준 항목은 미세먼지, 일산화탄소, 포름알데히드, 이산화질소, 이산화탄소(carbon dioxide), 휘발성 유기화합물(volatil organic compounds, VOC), 라돈(radon), 부유곰팡이(airborne molds), 총 부유세균(total airborne bacteria) 등이다.

그중 미세먼지는 공기 중 존재하는 산(acids), 유기화합물(organic chemicals), 금속(metals), 토양(soil), 먼지(dust particles) 등을 포함하는 매우 작은 입자로 이루어져 있어 장기간 노출시 사망률이 상당히 높다(Anderson et al., 2012). 또한 이들은 호흡기계에 대한 직접 노출 외에도 내피를 통과하여 순환기계로 들어가 여러 장기에 축적될 수 있으며(Pryor et al., 2022), 노화 진행 및 연령 관련 질병에도 연관된다고 보고하였다(Bang & Choi, 2024).

세계보건기구에서는 PM₁₀을 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24시간 이하), PM_{2.5}를 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24시간 이하) 기준으로 관리하며(WHO, 2000), 환경부(Ministry of Environment, 2016)는 지하역사, 박물관, 도서관, 영화관, 학원 등에서 PM₁₀을 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}를 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관리하고, 의료기관, 어린이집, 노인요양시설, 산후조리원 등에서는 PM₁₀을 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 기준을 정하였다. 학교보건법(Ministry of Education, 2021)은 PM₁₀을 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5}는 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 기준으로 한다.

총부유세균은 눈에 보이지 않지만 샘플 또는 환경 중에 존재하는 병원균 및 일반세균을 포함한 것으로 사람과 동물에게 질병을 일으킬 수 있는 해로운 것이므로 환경 모니터링, 식품안전, 의료진단 등 분야에서 중요하게 취급된다. 이들은 공기 중에 떠다니며 인체에 무해

하게 작용하기도 하지만 기회주의적으로 병원성을 야기하기도 한다. 그러므로 공기 중에 존재하는 모든 종의 세균을 개별적으로 분리하여 동정하거나 각각의 개체수를 측정하는 것이 어렵기 때문에 대신 총량 개념으로 관리한다. 학교 등 다중시설은 실내 공기 중 부유하는 배양 가능한 세균이 800 CFU/ m^3 이하여야 한다(MOE, 2016).

그러나 국외에는 국내와 달리 총부유세균에 대한 기준이 없으며(Jabeen et al., 2023), 세계보건기구는 실내 부유곰팡이에 대한 기준만 있다(WHO, 2000). 선행 연구에 의하면 지하철, 버스, 병원 등 다중시설의 실내 공기 중 총부유세균 농도는 환경부 기준보다 낮았지만(Jeon & Hwang, 2015), Hamilton 등(2018)은 작동 중인 초음파 가슴기 에어로졸에서 결핵 등을 유발하는 미코박테륨(*Mycobacterium spp.*)이 검출되었다고 보고하여 경각심을 유발한 바 있다. 또한 인도의 한 연구(Jabeen et al., 2023)에서도 대학 내 총부유세균이 실외보다 높았다고 하였다.

따라서 본 조사는 대학 내 일부 환경에서 실내 공기 중 총부유세균 농도가 기준을 초과하지 않는지 확인하고, 사람이 있는 환경이 그렇지 않은 것에 비해 농도가 얼마나 높은지 비교하고자 하였다. 또한 실외 미세먼지 농도와 실내 총부유세균 농도의 상관성을 파악하고자 하였다. 이와 같이 측정된 총부유세균 농도를 통해 일부 대학 내 환경의 실내 오염도를 평가하고 유해한 생물학적 인자로부터 피해를 최소화하기 위한 방법을 모색하고자 한다.

II. 조사방법

1. 총부유세균 측정 장비 및 시료 채취

국립환경과학원(IER, 2023a; 2023b) 시험법 규격인 Anderson Sampler(TE-10-890, TISCH Environmental, Ohio, Cleves, USA)를 사용하여 시료를 채취하였다. 이는 385 개의 구멍을 가지고 있으며, 충돌법 방식으로 작동한다. 장비를 1.2~1.5 m 높이로 설치하고 유량은 28.3 L/min으로 15분간 연속으로 시료를 채취한다. 3회 채취하는 사이 20분 이상 간격을 둔다. 이때 실내 공기 중 총부유세균 측정법을 참고하여 시료를 채취하며(NIER, 2023a), 세균의 성장 등에 영향을 줄 수 있는 온도와 습도를 함께 측정한다(Figure 1). Anderson Sampler의 정상 작동을 위하여 10분간 미리 가동하고



Figure 1. Anderson sampling (a) outdoor (b) indoor (c) indoor without people

내부를 소독한다. 이후 현장 온도에 대해 평형화시킨 TSA(Tryptic Soy Ager, 아산제약㈜, Seoul, Korea) 배지 3개를 준비하여 페트리 접시 뚜껑에 장소, 회차, 시간을 기록한다. Anderson Sampler는 거치대에 고정하여 수평을 맞추고 진공펌프와 시료 채취기를 튜브로 연결한다. 이후 TSA 배지를 시료채취기 내에 삽입하고 진공펌프를 15분간 작동하면 총부유세균이 포집된다. 15분 후 진공펌프 작동을 정지한 후 Anderson Sampler 내부에서 TSA 배지를 꺼내고 미생물 배양기에 넣는다. Anderson Sampler는 알콜 솜으로 내부 소독 후 20분 간격을 두고 위와 같은 방법으로 총 3회 시료를 채취한다. 이때 출입문의 개폐를 통한 사람 이동을 최소화하여 실험하고, 실외에서 측정할 경우 매번 일정한 장소에서 일정한 시간 측정이 이루어지도록 한다.

재실자가 상주하는 동일한 강의실에서 오전, 오후 각 3회씩 시료를 채취하였다. 또한 재실자가 없는 동일한 강의실과 같은 층 배란다에서 오전, 오후 각 3회씩 동일하게 시료를 채취하였다.

2. 시료 배양 및 집락수 계수

3회 연속 측정된 TSA 배지는 미생물 배양기(CS-IND1, Labmadang, Seoul, Korea)에서 배양한다. 부유세균 배양 조건은 $35 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 24~48시간 배양한다. 이때 배지의 오염 등으로 인한 오차를 보정하기 위

해 깨끗한 TSA 배지를 Blank로 같이 배양한다. 24시간 이후 TSA 배지에 자란 집락수(colony forming unit, CFU)를 계수한다. 모든 실험은 안정상자(1300 Series A2 1378, Thermo Fisher Scientific, USA, Biosafety cabinet)에서 실시한다.

3. 부유세균 염색 및 동정

1) 생물학적 검사

알코올 램프(alcohol lamp)에 화염멸균 시킨 접종루프(inoculation loop)를 사용하여 tsa 배지내 단일집락(single colony)을 slide 위에 도말한다. 그람 염색 키트(Gram Stain kit, YD Diagnostics, Gyeonggi-do, Korea)를 사용하여 도말한 슬라이드는 고정시키고 Crystal Violet 용액(1차 염색액) 2방울을 떨어뜨려 1분 후 물로 씻어낸다. 다음으로 Lugol's Iodine 용액(매염제) 2방울을 떨어뜨려 1분간 매염한 후 물로 씻어낸다. Alcohol Decolorizer 용액(탈색제) 2방울 떨어뜨려 30초 동안 탈색 후 물로 씻어낸 후에 Safranin O 용액(대조염색) 2방울 떨어뜨려 1분 후 물로 씻어낸 다음 건조한다.

2) 생화학적 검사

염색하기 위해 도말한 동일 집락을 화염 멸균시킨 접종 루프로 떼어낸 후 catalase test를 위한 과산화수소 시약(Hydrogen peroxide 3.0%, Samcun Chemical,

Gyeonggi-do, Korea)을 3방울을 떨어뜨린다. 또한 다른 슬라이드에 동일하게 도말한 집락을 접종 루프로 떼어낸 후 혈장 1방울을 떨어뜨려 잘 혼합을 해준 후 10초 동안 부드럽게 기울이며 섞어준다. 이 catalase test는 cytochrome을 가지고 있는 대부분의 편성 혐기성, 호기성 세균들이 자기 보호를 위해 catalase 효소를 생산하는지 확인하는 것으로 유해물질인 과산화수소를 분해하는 세균을 분류하기 위한 동정법이다. 과산화수소를 접촉시킬 때 거품이 나는 것으로 양성, 음성을 판독한다.

4. 총부유세균 농도 계산

TSA 배지에서 자란 집락수를 계수하여 환경부 가이드라인 보정표(ES 02701.1e_10.1.1, 2023)에 따라 계산하고 보정된 집락수를 공기 부피로 환산하여 총부유세균 농도를 계산한다(NIER, 2023a). 포집한 부유세균은 생물학적 및 화학적 방법으로 분류하고(Kwon et al., 2022; Kwon et al., 2023), 총부유세균 농도를 산출한다(NIER, 2023a; 2023b).

5. 미세먼지 측정

환경부 미세먼지 측정방법(NIER, 2023c)을 참고하여 DustTrak™ II(Aerosol Monitor 8530, TSI Incorporated, Shoreview, Minnesota, USA)를 사용

하여 미세먼지 농도를 측정한다. 동일 모델 두 대 장비로 PM 10과 PM 2.5을 15분간 연속 3회씩 측정하고 각각의 평균을 구한다. 직접 측정한 미세먼지 농도 이외 에어코리아(Air korea) 해당지역 예보를 기입하고 비교한다. 측정된 미세먼지 농도는 총부유세균 농도와 상관성 분석에 사용한다.

6. 통계분석

통계분석은 SPSS version 20.0.0 (International Business Machines Corporation, IBM, New York, USA)을 사용하고 통계적 유의수준은 0.05 미만으로 한다. 총부유세균 평균(Mean) 및 표준오차(Standard Error, S.E)에 대하여 기술통계 및 빈도분석을 실시하고 각 환경조건에 따른 부유세균과 미세먼지 농도는 t-test 로 각각 비교하였다. 부유세균과 미세먼지 농도는 상관성 분석하였다.

Ⅲ. 조사결과

1. 총부유세균 농도

Anderson Sampler를 이용하여 15분간 3회 연속 포집한 TSA 배지내 세균 집락수는 Table 1과 같다. 포집 환경 온도는 평균 $24.5 \pm 2.1^{\circ}\text{C}$, 상대습도는 $44.8 \pm 4.7\%$ 였다. 집락수는 식(1)으로 집락수를 보정(NIER,

Table 1. Concentration of airborne bacteria

	n	Temperature(°C)	Humidity(%)	CFU*	CFU†	CFU/m³
1	Outdoor_N	3	26.8	45	2	6
	Indoor_ N	3	25.3	53	13	39
	Indoor_ H¹	3	27.1	43	17	51
	Indoor_ H²	3	24.3	49	31	93
2	Outdoor_N	3	29.4	35	12	36
	Indoor_ N	3	22.6	50	6	18
	Indoor_ H¹	3	22.6	50	241	†1102
	Indoor_ H²	3	23.0	47	53	158
3	Outdoor_N	3	24.4	46	37	116
	Indoor_ N	3	23.0	40	11	33
	Indoor_ H¹	3	22.8	45	59	191
	Indoor_ H²	3	22.0	47	31	93

n= 3 day x 4 conditions x 3 times =36

†: Calibrated colony (ES 02701.1d_10.1.1)

Outdoor(or Indoor)_N : in conditions without people(n=18)

Indoor_H¹(or H²) : am(or pm) (n=18)

*Number of colony forming units counted on 90 mm Petri dish

†: ≥ 800 CFU/m³ (Ministry of Environment standard)

Table 2. Airborne bacteria by environmental conditions

	n	Mean±SE [†]	Min	Max	p-value [‡]
Outdoor_N	9	52.4±50.2	6.0	140.3	0.184
Indoor_N	9	28.2±14.7	9.0	56.7	
Indoor_H ¹	9	708.1±1023.2	17.9	2635.8	0.103
Indoor_H ²	9	117.1±55.3	71.6	250.7	
Total	36	226.5±566.8	6.0	2635.8	

N= 3 day x 4 conditions x 3 times

[‡]: p-value was calculated by t-testIndoor_H¹(or H²) : am(or pm)[†]Mean±S.E. : Arithmetic mean±Standard Error (CFU/m³)

Outdoor(or Indoor)_N : in conditions without people

Table 3. Concentration of airborne bacteria by occupants

	N	Mean±SE [†]	Min	Max	p-value [‡]
Indoor_H	18	412.6±765.9	17.9	2635.8	0.048
Indoor_N	9	28.2±14.7	9.0	56.7	
Total	27	251.3±608.0	9.0	2635.8	

N= 3 day x 2 conditions(or 1 condition) x 3 times

[‡]p-value was calculated by t-test[†]Mean±S.E. : Arithmetic mean±Standard Error (CFU/m³)

Indoor_H(or N) : in conditions with(or without) people

2023a)하고 총부유세균을 산출하였다. 대부분 집락수는 환경부 기준(MOE, 2016)인 800 CFU/m³보다 낮았지만, 1,102 CFU/m³로 초과된 것도 있었다.

사람이 없는 실내외 부유세균 농도는 차이가 없었으며(p=0.184), 사람이 있는 오전과 오후의 실내 부유세균 농도는 차이가 없었다(Table 2). 반면 사람이 있거나 없는 경우 실내 부유세균 농도는 유의한 차이가 있었다(Table 3).

$$C = \frac{CFU}{V_{(25^{\circ}C, 1atm)}} \dots\dots\dots (1)$$

C: 실내 공기 중 총부유세균 농도(CFU/m³)

CFU: 보정된 집락 수

V_(25°C, 1atm): 25 °C, 1기압일 때 기체 부피(m³)

2. 배양된 세균

Anderson Sampler로 포집된 세균(Table 4)은 TSA 배지에서 여러 종류의 집락처럼 보였지만 대부분 그람 양성균들이었다. 그중 포도상알균 속(*Staphylococcus* spp.), 마이크로코커스(*Micrococcus* spp.), 막대균 속(*Bacillus* spp.), 사슬막대균 속(*Streptobacillus* spp.) 이 검출되었으며 배양된 균종들들은 모든 환경 조건에서 매우 유사한 것으로 확인되었다(Figure 2).

3. 측정된 미세먼지

실내와 실외에서 측정된 PM2.5 농도는 차이가 없으며, PM10 농도도 차이가 없었다(Table 5). 또한 실외 미세먼지 농도는 환경부 기준(MOE, 2016)을 넘지 않았다. 에어코리아 예보와 실제 환경에서 측정한 농도는 PM2.5의 경우 차이가 없었으나 PM10은 상이하게 낮

Table 4. Microbial species from airborne by location

	Gram stain	Bacteria (spp.)
Outdoor_N	+	<i>Staphylococcus</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Bacillus</i>
Indoor_N	+	<i>Staphylococcus</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Streptobacillus</i>
Indoor_H ¹	+	<i>Staphylococcus</i> , <i>Micrococcus</i>
Indoor_H ²	+	<i>Staphylococcus</i> , <i>Micrococcus</i> , <i>Bacillus</i> , <i>Streptobacillus</i>

Outdoor(or Indoor)_N : in conditions without people

Indoor_H¹(or H²) : am(or pm)

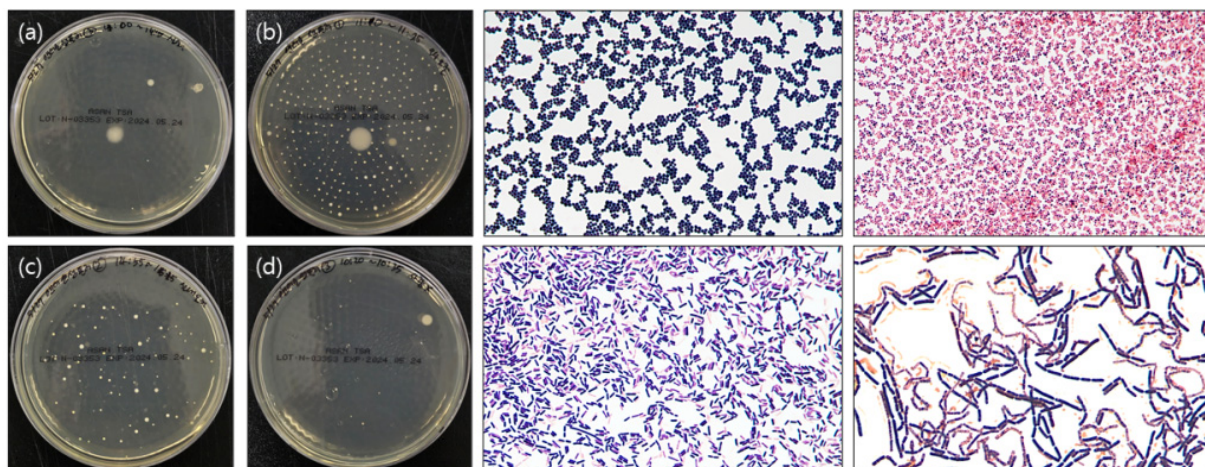


Figure 2. Cultured airborne bacteria media & Gram positive bacteria (a) outdoor (b) indoors with people (am) (c) indoor with people (pm) (d) indoor without people

Table 5. PM concentration indoors and outdoors

		N	Mean±SE [†]	Min	Max	p-value [†]
PM 2.5	Indoor	18	9.6±6.1	2.0	18.0	0.681
	Outdoor	6	11.0±7.5	3.0	20.0	
PM 10	Indoor	18	0.2±0.4	0.0	1.0	0.783
	Outdoor	6	0.2±0.4	0.0	1.0	

N= 3 day x 2 conditions(or 1 condition) x 3 times

[†] p-value was calculated by t-test

[†]Mean±S.E. : Arithmetic mean±Standard Error ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

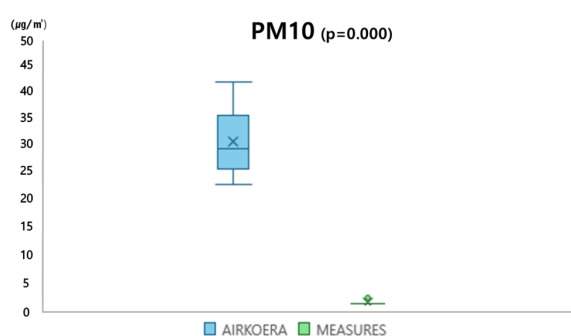
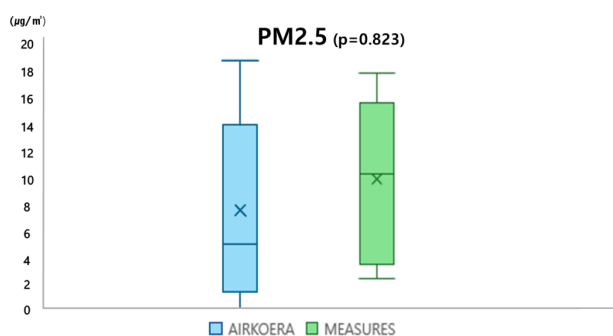


Figure 3. Comparison of actual PM with AirKorea

게 측정되었다($p=0.000$)(Figure 3).

4. 실내 총부유세균과 실외 미세먼지 농도와의 상관성

실내에 부유된 총부유세균 농도와 실외에서 측정된 미세먼지 농도의 상관계수는 Table 6과 같다. 총부유세균 농도와 PM2.5 농도는 어느 정도 상관성(coefficient of correlation=0.37)이 있는 것으로 보였으나, PM10 경우 총부유세균 농도와의 상관성은 낮은 것으로 분석되었다. 하지만 실외에서 동시 측정된

PM2.5와 PM10 농도는 서로간 높은 상관성을 보였다(62%).

Table 6. Correlation between airborne bacteria and PM

Classification	CFU/m ³	PM 2.5	PM 10
CFU/m ³	1		
PM 2.5	0.367	1	
PM 10	0.133	0.620*	1

IV. 고 찰

본 사례 조사는 일부 대학 내 실내 공기 중 총부유세균 농도가 대부분 경우 기준을 초과하지 않았다는 것을 확인하였다. 하지만 사람이 있는 환경은 그렇지 않은 것에 비해 총부유세균 농도가 유의하게 높았다. 실내 공기질은 건물구조, 환기실태 및 인간활동과 오염된 대기의 유입 등에 따라 달라질 수 있다. 복잡하고 밀폐된 실내공간 내 호흡에 의한 이산화탄소, 대화나 기침 등에 의한 세균, 옷이나 신발에 묻어 있는 먼지 등은 사람의 다양한 활동으로 부터 발생되며 이것들이 실내 공기를 오염시킨다. 그밖에 자동차 배기 가스나 비산 먼지 등이 실내로 유입될 경우 실내 공기질 오염은 가중될 수 있으므로 대기와 실내 공기질은 매우 밀접한 관계에 있다고 할 수 있다. 따라서 우리는 실내 총부유세균 농도가 실외 미세먼지 농도와 상관성이 있는지 파악하고자 하였으며 PM2.5 경우 약한 상관성을 보인 것으로 조사되었다.

세계보건기구(WHO, 2000)는 실내 공기질을 주로 미세먼지(PM10, PM2.5), 벤젠, 일산화탄소, 포름알데히드, 나프탈렌, 다환 방향족 탄화수소 등에 대해 다루는 반면, 국내 실내공기질 가이드라인(MOE, 2023)은 곰팡이, 총부유세균 등을 포함하고 있다. 실내 공기 중 떠다니는 부유세균은 인체에 해로울 수 있으며 기회주의 감염을 일으키기도 한다. 또한 특정 유형의 세균은 심각한 감염을 일으킬 수 있는데, 건축물 근처에 설치된 냉각탑이나 실내 수영장 등에서 발견되는 레지오넬라균은 폐렴을 일으키거나 레지오넬라병을 유발할 수도 있다. 부유세균의 크기와 모양은 세균의 생존, 성장, 숙주 유기체와의 상호작용에 따라 복잡한 세균 군집인 바이오필름을 형성할 수도 있다. 따라서 부유세균의 크기와 모양 등을 확인하는 미생물학적 관점의 연구가 필요하며, 이외 다양한 환경적 조건을 가정한 연구가 병행되어야 한다.

Hamilton 등(2018)과 Jabeen 등(2023)연구에서 다중이용시설내 총부유세균 농도가 실외보다 실내에서 더 높게 측정되었으며, 다양한 질병을 일으키는 화농성 세균인 *Staphylococcus aureus*가 높은 빈도로 검출되었다고 보고하였다(Jeon & Hwang, 2015). 본 조사에서도 유사한 세균이 주로 검출되었으나 사람이 없는 경우에는 실내보다 오히려 실외 부유세균 농도가 더 높게 나타났다. Kim 등(2022)은 사람이 많이 방문한 주

말 키즈카페의 총부유세균 농도는 밀집도가 높은 경우 1.4~11.2 배 증가하였다고 하며 외기보다 실내 부유세균이 높았는데 실내외 농도 간 상관성은 Pearson's correlation coefficient 0.58로 높았다.

이와 같이 실내공기질에 대한 국내 연구는 다양한 관점에서 이루어지고 있으며(Choi et al., 2022; Kim et al., 2021; Kim et al., 2022; Lee et al., 2022; Park et al., 2022; Bang & Choi, 2023; Ryu, 2024) 이외 대장균이나 살모넬라균 등 식중독을 유발하는 세균이 실내오염에 영향을 미친다는 연구도 있다(Kwon et al., 2022; Kwon et al., 2023).

실내의 미세먼지는 대기 중 미세먼지의 실내 유입과 실내에 존재하는 오염원으로서 미생물 그리고 실내 거주자의 행동에서 영향을 받을 수 있으며 사람 자체도 중요한 실내 오염원이다. 이들은 공기중에 떠다니는 고체 또는 액체 상태 입자로 PM10보다 크기가 더 작은 PM2.5는 호흡기 깊은 곳까지 침투할 수 있어 인체에 더 큰 위험을 초래할 수 있다. 특히 호흡기, 심혈관, 뇌혈관 질환 및 인체 감염을 일으킬 수 있는데(Anderson et al., 2012), 중국 진안 지역의 실내외 PM 2.5 농도는 세계보건기구 기준치를 초과하며(Gao et al., 2020), 요리, 청소, 흡연 등으로부터 발생한다고 하였다(Tran et al., 2020).

일반적으로 모든 사람은 2~4주 이내에 피부 최외각 세포가 벗겨지고 새로 재생되는데 분당 20만에서 60만 개 피부 조각(skin scales or skin flakes)이 벗겨져 공기 중으로 배출된다(Pham et al., 2015). 이런 피부조각은 주로 입자 크기가 비교적 큰 PM10으로 사람 피부에 서식하는 세포수의 10배 미생물을 포함한다. 그러므로 사람의 활동에 의해 의류 등에 묻어 있다 떨어져 나온 미세먼지와 공기 중으로 배출된 인간의 피부조각들은 PM10 농도를 증가시킬 수 있는 원인으로 판단된다. Kim 등(2022)은 실내 카페 공기 중 PM10 농도가 총부유세균의 미생물로부터 유래하였음을 미생물 동정으로 확인하였다고 한다. 하지만 우리 조사에서는 총부유세균 농도와 상관성이 PM10 보다 PM2.5에서 유의하게 높았던 것으로 조사되었다.

Kim 등(2022)은 총부유세균 농도와 미세먼지 농도는 외기의 영향과 인구 밀집도의 영향을 동시에 받다고 하였는데 대체로 주말 외기의 총부유세균수가 평일보다 높았으며 주말 이용객 증가에 따른 주말 총부유세균수 증가의 주요인임을 확인할 수 있었다고 하였다. 이

연구에서 동정한 부유세균은 평일에는 *Micrococcus*와 *Staphylococcus*속 세균들이 주로 발견되었고, 주말에는 *Corynebacterium*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Staphylococcus*속 세균들이 다양하게 발견되었다. 특히, *Corynebacterium*, *Staphylococcus*는 사람과 관련된 세균으로 총부유세균의 증가 원인으로 파악할 수 있다.

우리는 실내외 환경에서 미세먼지와 총부유세균을 채취하고, 실내 총부유세균 농도와 미세먼지의 상관성을 비교하였다. 생물학적 및 생화학적 검사를 통해 포집된 부유세균을 분류하였고, 총부유세균 농도가 국내 기준을 초과하는지 확인하였다. 또한 실내외 미세먼지 농도를 측정하고 국내 학교보건법 기준 PM10 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM2.5 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는지 확인하였다(MOE, 2021). 부유세균 시료 중 1개는 1,102 CFU/ m^3 으로 환경부 기준을 초과했지만, 전체 평균값은 226.5 ± 94.5 CFU/ m^3 로 환경부 기준치를 초과하지 않았다. 또한 실외보다 실내가 총부유세균 농도가 높은 것으로 나타났는데 선행 연구(Kim et al., 2022; Ryu, 2024)에 의하면 세균의 증식과 관련 있는 온도, 재실자의 밀집도 그리고 활동성이 영향을 줄 것으로 사료된다. 우리 조사는 오전이 오후보다 더 높은 부유세균 농도를 나타내었는데 이는 실내 온도와 습도가 오전에 조금 더 높았던 것이 영향을 미쳤을 것으로 확인되지만 기타 미세한 환경에 대해 더 고찰해 볼 필요가 있다. 생물학적 및 생화학적 검사 결과와 Gram Stain을 통해 실내 공기 중에 *Staphylococcus spp.*, *Tetracoccus spp.*, *Bacillus spp.*, *Streptobacillus spp.* 등을 확인하였는데 특히, *Staphylococcus spp.*와 *Bacillus spp.*는 병원성 세균을 포함할 수 있어 건강에 잠재적인 위험을 안고 있다. 실내 환경에 존재하는 세균의 위험성을 간과해서는 안 되므로 추가 연구를 통해 자동화 미생물 동정 장비를 활용하고 병원성 세균을 확인해 볼 것이다. 이 연구에서 사용한 Catalase Test는 Coagulase Test와 함께 *Staphylococcus spp.* 등 특정 세균을 분류하는 데 유용하지만, 다양한 세균 종을 분류하는 데에는 한계를 지닌다. 그러므로 이 조사를 바탕으로 지속적인 실내 부유세균과 미세먼지 상관성을 연구할 것이다.

PM2.5와 PM10 농도는 환경부 기준을 초과하지 않았으며, PM2.5는 실내외 차이가 거의 없었지만 PM10은 실내외 차이가 있었다. 미세먼지에 대한 현장 측정

치는 Airkorea 예보와 크게 상이하지 않아야 하므로 대조군으로서 확인하고자 하였다. 하지만 PM10 측정 결과가 Airkorea 예보와 많은 차이를 보이므로 그 요인을 추가적으로 파악할 필요가 있었다.

결론적으로 본 사례조사는 실내 공기질을 오염시키는 총부유세균과 미세먼지 농도가 환경부 기준치를 상회하지 않았음을 파악하였고 사람이 있는 경우에서 더 높은 부유세균 농도를 나타낸다고 확인하였다. 또한 미세먼지와 총 부유세균 농도는 어느 정도 상관성이 있다는 결과를 얻었으며 특히 입자 크기가 작은 PM2.5와 부유세균 농도와의 상관성을 확인하였다. 하지만 아직 총부유세균과 미세먼지 입자가 같은 발생 원인과 경로로부터 유래한다고 입증하지 못하였으므로 이번 결과만을 바탕으로 실내 공기질 관리에 대한 조치 등을 제안하기에는 다소 제한적일 수 있다. 따라서 동일한 오염원일 지라도 여러 크기의 미세먼지를 생성할 수 있으므로 물리, 화학 또는 생물학적 기반이 수반된 비교를 정확히 할 수 있도록 보완이 필요하다. 다만 이 사례를 통해 사람이 있는 경우 총부유세균 농도가 더 높아졌음을 확인하였으므로 미세먼지 농도와 어느정도 상관성이 있음을 확인한 의미있는 조사였다.

V. 결 론

실내 공기 중 총부유세균과 미세먼지 농도를 평가하여 상관성을 확인하고자 하였다. 또한 사람의 존재 유무는 실내 공기질에 영향을 준다고 분석되었으므로 이를 통해 실내공기질 관리의 중요성을 인지하고, 주기적인 모니터링과 적절한 공기질 개선 조치의 필요성을 제안할 수 있다. 그러나 본 사례는 한정된 시간과 장소에서 수행되었으므로, 다양한 환경에서의 추가 연구가 필요하다. 또한, 세균의 분류와 동정 방법의 개선이 요구되며, 이를 통해 보다 정확한 결과를 얻어야 할 것이다.

결론적으로, 실내공기질 관리를 위해 총부유세균과 미세먼지 농도의 주기적인 모니터링이 필요하며, 공기질 개선을 위한 적절한 조치가 이루어져야 한다. 실내 환경의 특성에 따라 세균 농도와 미세먼지 농도가 달라질 수 있으므로, 다양한 환경에서의 추가 연구도 필요하다. 이를 통해 실내공기질 개선을 위한 효과적인 방안을 마련하고, 건강한 실내 환경을 조성할 수 있을 것이다.

따라서 우리는 실내공기질 관리의 중요성을 재확인할 수 있었으며, 실내 환경의 건강 위험 요소를 줄이기 위한 다양한 방법을 모색할 필요성을 강조하였다. 지속적인 연구와 관리가 이루어진다면, 실내공기질 개선을 통해 보다 안전하고 건강한 생활환경을 제공할 수 있을 것이다.

References

- Anderson JO, Thundiyil JG, Stolbach A. Clearing the Air: A Review of the Effects of Particulate Matter Air Pollution on Human Health. *J Med Toxicol.* 2012; 8(2): 166–175
- Bang EJ, Choi YH. Recent Understanding in Particular Matter-Mediated Aging and Age-Related Diseases. *J Life Sci.* 2024; 34(1): 68–77
- Choi YH, Kim SY, Park JI, Son HK, Ryu JY. A Survey on Indoor Air Quality of Medical Facilities and Childcare Facilities in Gyeongnam. *J Korean Soc Environ Technol.* 2022; 23(2): 125–132
- Cincinelli A, Martellini T. Indoor air quality and health. *Int J Environ Res Public Health.* 2017; 14: 1–5
- Gao X, Gao W, Sun X, Jiang W, Wang Z et al. Measurements of Indoor and Outdoor Fine Particulate Matter during the Heating Period in Jinan, in North China. *Atmos Environ.* 2022; 235: 118305
- Hamilton LA, Joseph O, Falkinham III. Aerosolization of *Mycobacterium avium* and *Mycobacterium abscessus* from a household ultrasonic humidifier. *J Med Microbiol.* 2018; 67: 1491–1495
- Heo KJ, Lim CE, Kim HB, Lee BU. Effects of human activities on concentrations of culturable bioaerosols in indoor air environments. *J Aerosol Sci.* 2017; 104: 58–65
- Jabeen R, Kizhisseri MI, Mayanaik SN, Mohamed MM. Bioaerosol assessment in indoor and outdoor environments: a case study from India. *Sci Rep.* 2023; 13(1): 1–12
- Jeon BH, Hwang IY. Concentrations of total culturable microorganisms and Its Identification in Public Facilities. *J Korean Acad-Ind Coop Soc.* 2015; 16(1): 868–876
- Kim KJ, Jeoung HK, Choi HC. Indoor Air Pollution, Related Human Diseases, and Recent Trends in the Control and Improvement of Indoor Air Quality. *Int J Environ Res Public Health.* 2020; 17: 2927
- Kim SY, Lee MJ, Park SH. Investigation of Airborne Bacteria in Unsterilized Archives of National Archives. *J Environ Health Sci.* 2022; 28(4): 341–349
- Kim TY, Kim MJ, Baek MK, Kim SH, Moon JP et al. A Study on the Distribution Characteristics of Formaldehyde, Volatile Organic Compounds, Particulate Matter, and Airborne Bacteria in Indoor Play Centers. *J Environ Anal Health Toxicol.* 2022; 25(4): 117–131
- Kwon PS, Kim SH et al. *Clinical Microbiology.* Korea Medical Book Publishing Company. 2022; p. 674
- Kwon PS, Kim SH et al. *Laboratory of Clinical Microbiology.* Korea Medical Book Publishing Company. 2023; p. 364
- Lee BU, Hong IG, Lee DH, Chong ES, Jung JH et al. Bacterial Bioaerosol Concentrations in Public Restroom Environments. *Aerosol and Air Quality Research.* 2012; 12: 251–255
- Lee SY, Kim CS, Kwak EM, Im JE, Jeon JH et al. A Study on How to Kill Airborne Bacteria and Viruses in Elementary Schools. *J Society Disaster Information.* 2022; 18(3): 566–573
- Li Y, Wang X, Cao G, Wang Y, Miao Q et al. An Assessment of Airborne Bacteria and Fungi in the Female Dormitory Environment: Level, Impact Factors and Dose Rate. *Int J Environ Res Public Health.* 2013; 10, 541–555
- Ministry of Education KOR. School Health Act. 2021; p. 14
- Ministry of Environment KOR. Indoor air quality control act. 2016; p. 15
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Health risks of indoor exposure to particulate matter”, 2016, Workshop summary, 7–58
- National Institute of Environmental Research KOR. Determination of particulate matter in indoor by the gravimetric method. 2023; p. 16
- National Institute of Environmental Research KOR. Determination of total airborne bacteria in indoor. 2023; p. 17
- National Institute of Environmental Research KOR. Determination of total concentration of airborne molds in indoor by the impaction method. 2023; p. 17
- Park YS, Kwon SH, Lee JH, Lee HS, Park SY et al. Analysis of the national status and characteristics of indoor airborne bacteria. *J Korean Soc Indoor Environ.* 2022; 21(3): 191–197
- Pham D. M., B. Boussouira, D. Moyal, and Q. L. Nguyen, “Oxidization of squalene, a human skin lipid: A new and reliable marker of environmental pollution studies”, *International journal of cosmetic science*, 2015, 37(4), 357–365

- Pryor JT, Cowley LO, Simonds SE. The Physiological Effects of Air Pollution: Particulate Matter, Physiology and Disease. *Front Public Health*. 2022; 10: 1–13
- Ryu JY. A Comparative Study on Indoor Air Quality Concentration in Elementary, Middle, and High Schools in K City, Gyeongsangnam-do. *J Korean Soc Environ Technol*. 2024; 25(2): 117–125

World Health Organization (WHO). Air quality guidelines for Europe. World Health Organization. 2000; p. 273

<저자정보>

서혜경(교수), 안하림(석사과정)