Journal of Environmental Science International
34(10); 587~598; October 2025

pISSN: 1225-4517 eISSN: 2287-3503
https://doi.org/10.5322/JESI.2025.34.10.587

ORIGINAL ARTICLE

울산 지역 어린이집 실내공기 중 부유세균의 종 분포 특성

이광원 · 최정학[1)*]
울산광역시 보건환경연구원, [1)]부산가톨릭대학교 환경공학과

Distribution Characteristics of Indoor Airborne Bacteria at Child-care Facilities in Ulsan

Kwang-Won Lee, Jeong-Hak Choi[1)*]
Ulsan Institute of Health & Environment, Ulsan 44642, Korea
[1)]Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea

Abstract

This study investigated the species distribution characteristics of airborne bacteria in the indoor air across 14 childcare facilities in Ulsan, considering facility and regional characteristics. Gram-positive bacteria were the most commonly found, with human-origin bacteria outnumbering those from soil or other external sources. *Micrococcus luteus* was the most prevalent species, followed by *Staphylococcus*, *Moraxella,* and *Bacillus*. While most bacteria are harmless to humans, the presence of opportunistic pathogens underscore the need for careful environmental management in spaces occupied by children with vulnerable immunity Correlation analysis revealed that temperature and humidity were positively associated with the abundance of *Micrococcus* and *Staphylococcus* species, while *Moraxella* correlated with humidity. Higher child occupancy increased *Staphylococcus* and *Moraxella* levels, though the relationship with area per person was inverse and ambiguous. The Shannon-Wiener diversity index, showed low overall bacterial diversity due to air's inhospitable nature, but diversity rose with temperature and humidity, potentially increasing pathogenic risks. These findings highlight the importance of hygiene management with respect to temperature and humidity in childcare facilities.

Key words : Indoor air, Airborne, Bacteria, Child-care facilities, MALDI-TOF

1. 서 론

현대인의 생활은 실내 활동이 하루 중 80~90%를 차지하고 있으며, 에너지 절감을 위해 건축물이 점점 밀폐화됨에 따라 실내공기질 관리의 중요성이 날로 커지고 있다. 세계보건기구(WHO)는 매년 실내공기질로 인한 사망자가 전 세계적으로 320만 명에 이르고, 이 중 5세 이하 어린이는 23만 7천 명으로 추산하고 있다(WHO, 2024). 실내 공간 중 다수의 사람이 모여서 생활하는 다중이용시설의 실내공기 내 미생물 환경은 이용자의 건강에 매우 중요한 요소로 작용한다. 실내공기 중 부유하는 세균은 미세먼지와 같은 입자상 물질에 흡착되어 호흡을 통한 감염으로 각종 질병을 유발할 수 있다. 대부분의 부유세균은 비병원성이지만, 일부 병원성 기회감염균은 폐, 기관지, 비강 등의 기관에서 전염성 질병 및 알레르기 질환을 유발하고, 심할 경우 사망에 이르게 할 수도 있다. 선행 연구에 따르면, 다중이용시설 중 백화점, 지하상가, 도서관, 지하철 역사 등 불특정 다수가 이

Received 27 August, 2025; **Revised** 19 September, 2025;
Accepted 22 September, 2025
***Corresponding author** : Jeong-Hak Choi, Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Busan 46252, Korea
Phone : +82-51-510-0637
E-mail : jhchoi@cup.ac.kr

용하는 실내 공간보다 일정한 인원이 상주하는 어린이집의 부유세균 농도가 더 높은 것으로 알려져 있으며(Park et al., 2006), 일반 성인에 비해 질병에 대한 면역력이 약한 만 5세 이하의 어린이들에게 미생물의 노출 증가는 천식이나 알레르기 비염, 기관지염 등 호흡기 질환의 발현 빈도와 밀접한 관련이 있어 어린이들이 많은 시간을 보내면서 활동하는 어린이집의 실내공기질 관리는 매우 중요하다(Fakunle et al., 2021).

우리나라 실내공기질 관리법에서는 어린이집을 포함하여 면역 취약계층이 이용하는 시설에 대한 실내공기 중 부유세균의 유지 기준을 800 CFU/m^3으로 규정하여 관리하고 있으며, 각 지자체에서는 매년 전체 시설의 15% 내외를 점검하고 있다. 반면, 코로나 팬데믹 이후 시민들의 실내공기질에 대한 관심은 더욱 커졌음에도 불구하고 기존 어린이집에 대한 미생물 노출 연구는 대부분 부유세균의 개체 수만 조사하였을 뿐, 세균의 종 분포 특성이나 발생 원인 등에 관한 연구는 드문 실정이다. 특히 계절적인 특성이나 온도, 습도와 같은 외부 요인에 의한 부유세균의 개체 수 변화만을 연구하다 보니, 부유세균의 종 분포 특성에 대한 실질적인 자료가 부족해 어린이집 실내공기 중 부유세균 관리를 위한 원인 규명과 대처방안 마련이 전무하다.

최근 들어 다중이용시설에서의 부유세균 종류에 관한 연구가 일부 수행되었는데, Cho et al.(2020)의 취약계층 이용 시설 내 부유세균 종 분포 특성 연구 결과에 따르면 어린이집 실내외의 부유 미생물 분포가 유사한 것으로 나타났으며, 이는 어린이들의 야외 활동으로 인한 토양이나 식물에서 유래한 균들로 조사되었다. 하지만 분류학적으로 강(Class-level) 정도의 분류만 확인하였을 뿐, 구체적인 종은 파악하지 못하였다. 또한, Hwang et al.(2016)에 의해 실내 부유세균 중 병원성인 황색포도상구균과 같은 특정 종만을 위한 조사가 일부 이루어진 바가 있지만, 이 역시 다양한 종에 대한 분석은 이루어지지 않았다.

한편, 국가나 지역, 문화에 따라 생활양식이 달라지면 실내공기에서 검출되는 미생물의 양상이 다르게 나타난다. 가족 구성원의 수, 실내에서의 신발 착용 여부, 애완동물의 유무, 음식의 조리 빈도, 화장실의 구조, 카펫 등 바닥재의 재질 및 마당의 유무 등에 따라 실내공기 중에 존재하는 부유세균의 종류와 구성이 달라지며, 해당 지역의 평균기온, 습도, 지형 등에 따라서도 부유세균의 양상이 차이를 보인다(Madsen et al., 2018). 실외 부유세균의 실내 부유세균 종 분포에 미치는 영향이 작은 것으로 보고되고는 있으나, 같은 실내 시설군이라 하더라도 지역적인 특성은 여전히 보여지고 있다. 국내에서도 지역에 따라 미생물의 분포가 다르게 나타나는 것으로 보고되었는데, 부산, 광주 등 남부 지역에서의 *Staphylococcus* 속이 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 검출 빈도를 보였다(Park et al., 2022). 이렇듯 실내공기 중 미생물의 분포는 해당 지역 및 이용 시설에 따라 특징적인 양상을 나타내므로, 지역별 다양한 종류의 이용 시설에 대한 실내공기 중 부유세균의 분포 양상과 특성을 규명하는 것은 중요하다. 아울러 존재하는 부유세균의 종류별 발생원을 파악하고, 세균 분포 양상에 영향을 주는 인자를 알아내는 것은 실내공기질 관리와 이용자의 건강 증진 측면에서 매우 중요한 의미가 있다.

이에 본 연구에서는 울산이라는 지역적 특성과 어린이집이라는 시설 공간의 특성을 고려한 실내공기 중의 미생물 종 분포 양상을 조사하고, 부유세균에 영향을 주는 인자가 무엇인지 파악함으로써 면역력이 약한 어린이들의 호흡기 질환 예방을 위한 실내공기질 관리 및 환경보건 정책 수립의 기초자료로 활용하고자 한다.

2. 연구 방법

2.1. 조사 대상 및 기간

울산지역 내 어린이집 14개소를 조사 대상 시설로 선정하였으며, 한 시설당 두 지점에서 부유세균, 온도, 습도, 미세먼지(PM-10, PM-2.5) 및 이산화탄소 농도를 측정하여 그 결과를 산술 평균하였다. 측정 기간은 2024년 11월부터 2025년 5월까지 약 7개월간이었으며, 조사 대상 시설에 대한 현황 및 원아 수 등에 관한 자료는 교육부에서 제공하는 어린이집 정보공개 포털사이트(info.childcare.go.kr)의 공시자료를 참고하였다(Table 1).

2.2. 실내공기질 및 부유세균 측정

실내공기질 측정은 환경부의 '실내공기질 공정시험기준'에 따라 실시하였다. 미세먼지(PM-10 및 PM-2.5)는 PTFE 여지를 이용하여 0.5 L/min 유량으로 24시간 채취한 후 데시게이터에서 항량하고, 분석용 전자저울(XP2U, Mettler Toledo)로 3회 반복 측정하여 농도를 산출하였다. 이산화탄소는 비분산적외선법(NDIR)을 이용한 이산화탄소 측정기(G150, Geotechnical)를 사

Table 1. Characteristics of selected child-care facilities for this study

Facility	Type	Year of open	Total area (m^2)	No. of care room	Ave. area of care room (m^2)	No. of children	Ave. area per child (m^2)
A	Public	1992	200	5	40.0	50	4.0
B	Public	1992	242	6	40.3	47	5.1
C	Public	1994	250	8	31.3	41	6.1
D	Private	2014	650	9	72.2	117	5.6
E	Private	1998	826	13	63.5	74	11.2
F	Public	2018	318	7	45.4	86	3.7
G	Private	2008	252	7	36.0	31	8.1
H	Private	2016	234	6	39.0	63	3.7
I	Public	2011	260	7	37.1	60	4.3
J	Private	1997	402	7	57.4	126	3.2
K	Public	1983	248	6	41.3	47	5.3
L	Public	2017	205	4	51.3	42	4.9
M	Private	2001	290	7	41.4	53	5.5
N	Private	2011	446	14	31.9	141	3.2

용하여 2.5분 간격으로 1시간 동안 측정하여 농도를 산출하였다. 부유세균은 충돌법으로 측정하였다. 시료 채취 장비(Microbial air sampler)는 Merck사의 MAS-100NT를 이용하였으며, 1.2~1.5 m 높이에서 2분간 100 L/min 유량으로 200 L의 공기를 포집하였다. 시료 채취 장비에 장착된 한천배지는 Trypic Soy Agar(TSA) 배지를 사용하였고, 20분 간격으로 3회 반복 측정하였다. 시료 채취가 끝나면 패트리디쉬의 뚜껑을 덮고, 파라필름으로 밀봉하여 서늘하게 유지한 채 운반하였다. 35°C에서 48시간 배양 후 집락 수를 확인하고, 채취 장비 제조사에서 제시한 집락 계수 환산표를 사용하여 보정하였으며, 채취한 유량은 표준유량으로 환산하여 총 부유세균의 농도(CFU/m^3)를 최종 산출하였다.

2.3. 세균 종 동정

배양된 세균의 종 동정은 Matrix Assisted Laser Desorption/Ionization Time of Flight(MALDI-TOF)-Mass Spectrometer (Microflex LRF, Bruker Daltonics GmbH & Co.)를 사용하였으며, 분석 library는 MALDI Biotyperreference library version 7.3. MSPs를 활용하였다. 분석 시료 준비는 배양된 세균의 활성도가 유지되도록 가능한 짧은 시간 내에 콜로니를 MTP target plate에 도포하고, matrix로 alpha-cyano-4-hydroxy-cinnamic acid (HCCA) 용액 1 μL를 첨가하여 고정화하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 실내공기질 일반항목 조사 결과

울산지역 어린이집 14곳에 대한 실내 온도, 습도 및 실내공기질에 대한 조사 결과를 Table 2에 나타내었다. 실내 온도는 14.6~24.4°C의 범위로 평균 20.8°C (표준편차 2.9°C), 습도는 24.6~64.5%로 평균 45.4% (표준편차 11.9%)의 측정값을 보였다. 어린이들이 생활하는 공간의 특성상 계절에 상관없이 비교적 일정한 실내 온도를 유지하는 것으로 나타났으며, 습도는 강우나 계절의 영향으로 다소 편차가 있었다. 미세먼지 중 PM-10은 2.7~23.4 μg/m^3로 측정되어 평균 14.3 μg/m^3 (표준편차 7.3 μg/m^3)으로 나타났고, PM-2.5는 1.3~16.3 μg/m^3로 측정되어 평균 8.7 μg/m^3 (표준편차 5.0 μg/m^3)으로 나타났다. 이는 우리나라의 실내공기질 관리법 유지 기준(민감 시설 기준 PM-10은 75 μg/m^3, PM-2.5는 35 μg/m^3)에 비해 낮은 값으로 미세먼지에 대한 관리는 잘 이루어지고 있는 것으로 확인되었다. 이산화탄소는 509~744 ppm으로 측정되었으며, 평균 596.1 ppm (표준편차 75.0 ppm)으로 유

Table 2. Indoor air quality of facilities in this study

Facility	Temp. (°C)	Hum. (%)	CO_2 (ppm)	PM-10 ($\mu g/m^3$)	PM-2.5 ($\mu g/m^3$)	Bacteria (CFU/m^3)
A	22.6	50.0	532	7.8	3.9	126
B	23.5	50.8	744	13.8	5.1	712
C	20.8	30.5	584	4.2	2.6	190
D	20.0	43.2	538	18.4	11.6	202
E	18.3	44.8	558	9.6	5.6	146
F	17.0	24.6	578	11.3	8.4	71
G	14.6	51.7	634	2.7	1.3	118
H	19.7	27.9	509	20.8	12.7	139
I	24.4	46.6	626	22.0	11.8	475
J	22.6	50.6	538	23.0	12.0	293
K	18.0	38.7	719	23.4	15.0	449
L	22.7	48.7	523	18.8	16.3	180
M	23.5	64.5	579	18.6	12.5	494
N	23.2	63.5	684	5.7	3.4	590

지 기준인 1,000 ppm을 초과하는 곳은 없었으나, 어린이들의 활동량이 많아 비교적 높은 값을 보이는 것으로 판단된다. 실내 이산화탄소의 농도는 환기율과 밀접한 관계가 있으므로 어린이 활동량에 따른 적정 환기율을 고려해야 할 것으로 보인다. 부유세균은 71~712 CFU/m^3의 값으로 조사 대상 시설별로 큰 폭의 편차를 보였으나, 유지 기준인 800 CFU/m^3을 초과하는 시설은 없는 것으로 확인되었다.

3.2. 실내공기 중 부유세균 조사 결과

TSA 배지를 이용하여 배양되고, MALDI-TOF를 통해 동정된 부유세균의 종은 총 38종이었다. 대부분은 그람양성균이었고 9종은 그람음성균이었다. 일반적으로 세균의 생장에 있어 대기 환경은 수생태계나 토양 환경에 비해 열악한 환경이다. 따라서 대기 환경에서는 생장 방해 요소인 탈수나 화학물질 등에 대한 저항력이 월등히 높은 그람양성균이 그람음성균보다 더 우세하게 나타나는 것으로 알려져 있다(Zhu et al., 2003). 본 조사 대상 어린이집에서도 이와 유사한 양상을 보였으며, 온도와 습도가 높아지는 시기에도 여전히 그람양성균이 그람음성균보다 우세하였다.

생활방식에 따라 부유세균의 양상이 달라지는데, 실내에서도 신발을 신고 생활하는 외국의 경우 외부 요인의 실내 유입이 활발하므로 토양 기원인 *Bacillus* 속들이 비교적 우세하게 나타난다(Chen et al., 2024). 우리나라에서도 실외 일반 대기 중의 부유세균은 *Bacillus megaterium, Bacillus pumilus, Bacillus subtilis* 등과 같은 *Bacillus* 속들이 우세하게 나타나는 것으로 보고되어 있다(Kim et al., 2009). 하지만, 우리나라 실내공기 중 부유세균의 경우는 실외 요인이 실내로 유입하는 것이 상대적으로 활발하지 않으므로 *Bacillus* 속보다 사람 기원의 *Micrococcus*나 *Staphylococcus* 속 등이 더 우세하게 나타난다. 본 조사 결과에서도 이와 유사한 경향을 보였는데, Table 3에 나타낸 바와 같이 전체 검출된 세균수를 기준으로 *Micrococcus* 속이 45.9%로 가장 높은 비율을 보였으며, 다음으로 *Staphylococcus* 속(23.8%), *Moraxella* 속(11.0%), *Bacillus* 속(8.4%) 순으로 나타났다. 외국의 어린이집 실내공기질 연구 사례에서도 *Staphylococcus* 속과 *Enterobacteria* 속 부유생물의 실내공기 중 농도가 실외보다 10배가량 높은 것으로 보고되었는데, 이는 주로 사람 기원인 이들 미생물이 외부에서 실내로 유입될 가능성이 작기 때문이다(Rejc et al, 2020). 따라서 실내공기 중 부유세균의 양상은 사람의 활동에 더 큰 영향을 받으며, 연중 나타나는 부유세균의 농도 편차 역시 계절적인 요인보다는 계절에 따른 어린이들의 활동 상태 및 영역의 변화가 더 큰 요인으로 작용한다고 볼 수 있다.

Table 3. Proportion of cultured airborne bacteria of genus-level

Airborne bacteria of genus-level	Proportion (%)
Micrococcus	45.9
Staphylococcus	23.8
Moraxella	11.0
Bacillus	8.4
Pseudomonas	2.6
kocuria	2.0
etc.	6.3

한편, 우리나라의 전반적인 실내공기 중 부유세균의 검출 양상과 비교하여 본 조사에서 *Staphylococcus* 속이 다소 높은 검출 빈도를 보였는데, 이는 부산, 대전, 광주와 같은 남부 지역에서 *Staphylococcus* 속이 수도권 지역에 비해 상대적으로 높은 검출 빈도를 보인 이전 연구와 유사하였다. 특히, 울산과 지역적으로 가까운 부산의 경우 *Micrococcus* 속, *Staphylococcus* 속, *Bacillus* 속 순으로 검출 빈도가 유사한 경향을 보여 부유세균의 지역적인 특성을 확인할 수 있었다(Park et al., 2022). 다만, 환자가 많은 병원에서는 *Micrococcus* 속보다 *Staphylococcus* 속이 더 우세한 것으로 보고되었는데, 이는 병원의 경우 외부인의 출입이 잦고 환자와 의료인의 접촉이 빈번하여 세균 전파 양상이 다르기 때문이다. 따라서 시설의 특성에 따라 부유세균의 분포 양상이 다르게 나타남을 알 수 있다(Kim et al., 2006).

대상 어린이집에 대한 부유세균의 종(species-level)별 분포 조사 결과(Fig. 1), 세균의 종류로는 *Bacillus* 속과 *Staphylococcus* 속 각각 8종, *Pseudomonas* 속 3종이 검출되었고, *Kocuria* 속, *Paenibacillus* 속 및 *Moraxella* 속 각각 2종이 검출되었다. 또한, *Micrococcus* 속 1종이 검출되었으며, *Arthrobacter oxydans, Curtobacterium albidum, Psychrobacillus psychrotolerans* 등 기타 세균은 주로 토양을 기원으로 하는 세균들이었다. 이 중 *Micrococcus luteus*는 본 조사 대상 어린이집 모두에서 검출되었으며, 다음으로 검출 빈도가 높은 세균은 *Moraxella osloensis, Staphylococcus epidermidis, Staphylococcus hominis*로 나타났다. *Micrococcus luteus*는 토양이나 먼지, 물에서 발견되기도 하지만, 포유류의 피부에 주로 서식하는 세균으로서 사람의 입, 점막, 상기도 등에 공생한다. 일반적으로 인체에 무해한 균이지만 면역저하자에게는 주요 대사 과정을 방해하거나 폐혈성 쇼크를 일으킬 수 있다. *Staphylococcus epidermidis* 와 *Staphylococcus hominis* 역시 피부나 점막의 상재균으로서 무해하지만 여드름 염증을 유발하거나 발냄새의 원인이 되기도 하며, 면역저하자에게 심내막염, 폐혈증을 유발할 수 있다. *Kocuria marina* 및 *Kocuria rhizophila*는 토양이나 피부 점막에 존재하면서 인체에 무해하며, 드물게 병원균으로 작용한다. *Bacillus luciferensis, Bacillus thuringiensis* 및 *Bacillus megaterium* 등은 토양에서 기원하며, 인체에는 무해하고 오히려 유익균으로 작용하기도 한다(Ministry of Food and Drug Safety of Korea, 2013). 이처럼 검출된 대부분의 부유세균은 주로 사람의 피부 상재균 혹은 토양이나 식물에서 기인한 균으로서 일반적으로 인체 건강상 해가 없으나, 면역저하자에게는 기회성 병원균으로 작용할 수 있는 종들이었다.

반면, 병원성 독소를 발생하는 *Staphylococcus aureus, Bacillus cereus, Moraxella osloensis, Branhamella catarrhalis* 등의 부유세균이 조사 대상 어린이집에서 14.3~50.0%의 검출 빈도를 보였다. *Staphylococcus aureus*는 흔히 황색포도상구균으로 알려진 식중독 유발 균이다. 이 세균도 피부의 상재균으로서 일반적으로는 무해하나, 면역저하자에게 폐렴, 수막염, 패혈증을 일으키는 병원 내 감염 5가지 원인 중 하나로 여겨진다. *Moraxella catarrhalis* (*Branhamella catarrhalis*)는 사람의 호흡기, 점막 및 생식기에 공생하면서 중추신경계나 호흡기계에 감염을 유발하고, 특히 기관지 폐감염의 주요 원인으로 작용한다. *Moraxella osloensis* 또한 탈의실 냄새나 샤워 커튼 냄새의 원인균이지만, 면역저하자에게는 수막염이나 골수염을 유발할 수 있다. *Bacillus cereus*는 인체가

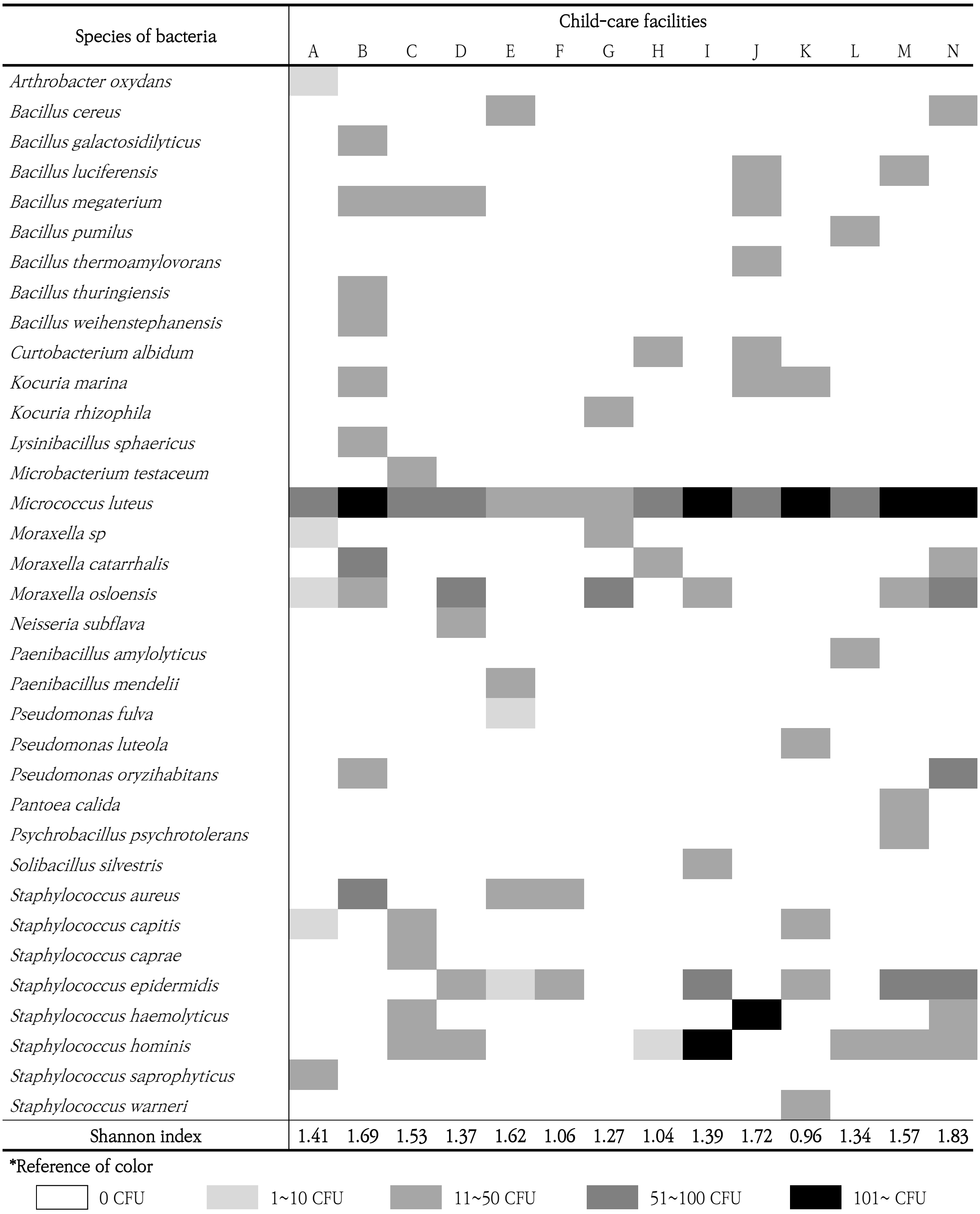

Fig. 1. Distribution of airborne bacteria species and their abundance in each facilities.

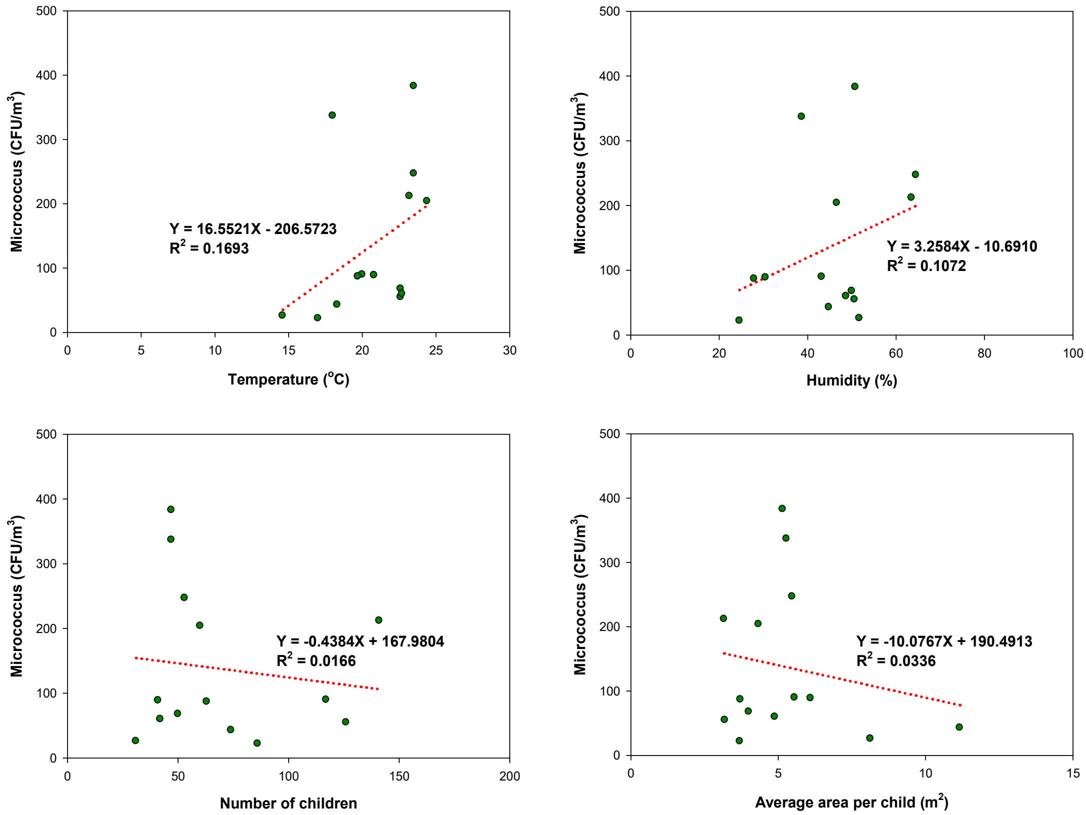

Fig. 2. Correlations between indoor condition parameters of child-care facilities and *Micrococcus luteus*.

아닌 토양이나 오염된 식품에 존재하는 세균으로 식중독 원인균의 하나이며, 복통과 설사와 같은 장관감염증을 유발한다(Ministry of Food and Drug Safety of Korea, 2013). 이들 병원성 세균의 검출 빈도를 볼 때, 면역력이 상대적으로 약한 어린이가 생활하는 공간에 대한 철저한 위생 관리가 필요할 것으로 사료된다.

군집 내 생물 풍부도와 균등도, 즉 각각의 어린이집이라는 닫힌계에서 부유세균의 종 다양성을 알아보기 위해서 섀넌-위너 지수(Shannon-Wiener diversity index)를 산정하였다. 섀넌-위너 지수는 흔히 사용되는 종 다양성의 척도로서 가중 기하평균 하에서 각각 종간의 비례적 풍부함을 나타낸다. 섀넌-위너 지수는 아래의 식 (1)로 계산된다.

$$H' = -\sum_{i=1}^{s} p_i \log_e p_i \quad \cdots\cdots (1)$$

여기서, H'은 섀넌-위너 종 다양성 지숫값, p_i는 i 번째 종의 비율, $\log_e p_i$는 p_i의 자연로그, 그리고 s는 군집의 종 수를 의미한다. 대상 어린이집 실내공기 내 부유세균의 섀넌-위너 지수는 0.96~1.83 범위로 산정되어 최솟값과 최댓값이 2배 정도의 편차를 보이고 있으나 일반적인 생태계에서 나타나는 다양성 지수에 비해 낮은 값을 보였으며, 이는 종 다양성이 그다지 높지 않음을 의미한다. 즉, 대기라는 극한의 환경 속에서 생존해야 하는 부유세균의 특성상 종의 풍부도는 낮을 수밖에 없으며, 실외 부유세균의 유입 가능성이 낮은 상태에서 실내에서 발생할 수 있는 부유세균의 기원이 주로 사람에 한정되는 것이 원인으로 보인다(Sohn et al., 2014; Jeon and Hwang, 2015).

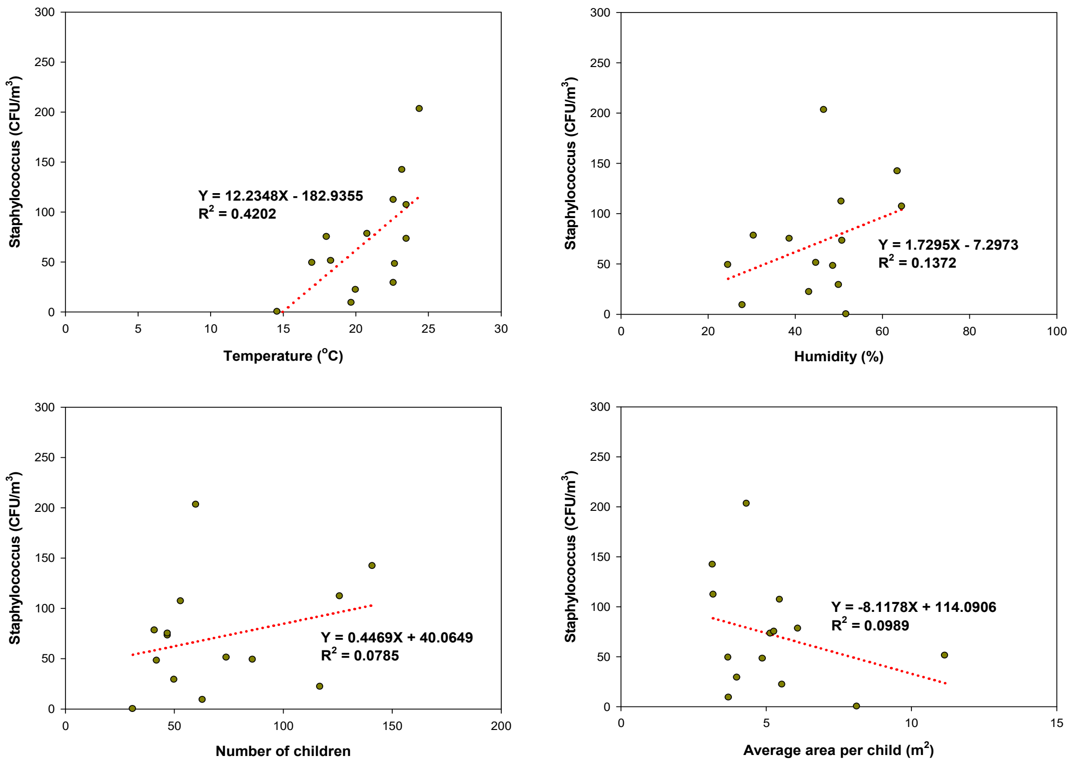

Fig. 3. Correlations between indoor condition parameters of child-care facilities and *Staphylococcus* species.

3.3. 상관관계 분석

일반적으로 온도와 습도는 미생물의 생장에 많은 영향을 미치고, 미생물의 농도와 구성은 사람의 존재 여부에 따라 크게 좌우된다. 특히, 실내공기 내 부유세균의 경우 해당 시설의 면적당 사람 수에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Moon et al.,2014). 이에 조사 대상 어린이집 시설의 실내 온도와 습도, 거주 인원수 및 면적과 주요 부유세균 농도와의 상관관계를 알아보았다.

Fig. 2에 나타낸 바와 같이, 대상 어린이집 시설에서 검출된 *Micrococcus luteus*는 실내 온도 및 습도와 양의 상관관계를 보였다. *Micrococcus luteus*의 최적 생장 온도가 30℃이므로 온도가 증가할수록 세균은 증가하게 된다. 또한, 수생태계나 토양과 달리 상대적으로 건조한 대기 중에서 생존해야 하는 부유세균에게 높은 습도는 생존에 유리하게 작용한 것으로 보인다. *Micrococcus luteus*는 사람을 기원으로 하므로 일반적으로 실내 공간 내 단위 면적당 사람 수가 많아지면 증가하는 경향이 있다. 본 조사 대상 시설의 경우, 생활하는 어린이 수 및 1인당 시설면적이 세균 수와 음의 상관관계를 보이는 듯하나 뚜렷한 상관관계는 찾을 수 없었다. 우리나라 어린이집은 1개의 교실에서 생활하는 인원이 법적으로 정해져 있으며, 부유세균 중 가장 높은 검출률을 보이는 *Micrococcus luteus*와의 상관관계로만 봤을 때 적정 수준인 것으로 판단된다.

Staphylococcus 종과의 상관관계를 Fig. 3에 나타내었다. *Staphylococcus* 종 역시 온도 및 습도에 따른 양의 상관관계를 보였으며, 어린이 수와 1인당 시설면적에 대하여 *Micrococcus lueus*보다 비교적 높은 상관관계를 보였다. 어린이집의 경우 다른 시설에 비해 한정된 공간에서 활동량이 많으므로 더 높은 확률로 미생물에 노출될 수 있다. Hwang et al.(2016)의 연구에 따르면, *Staphylococcus aureus*는 부유세균으로 존재하면서도 항생제 내성이 있어 식품 오염과 함께 인체 직접 감염성도 있는 것으로 보고하였다. 또한, 건조한 대

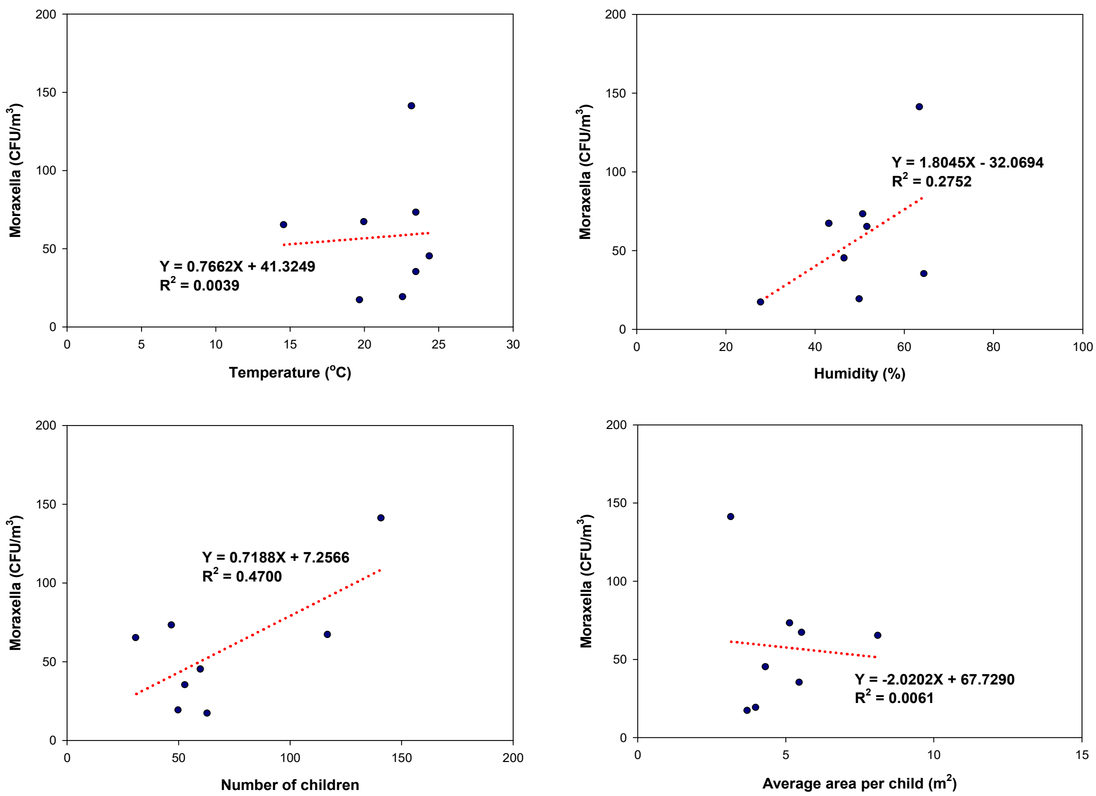

Fig. 4. Correlations between indoor condition parameters of child-care facilities and *Moraxella* species.

기 환경에서도 비교적 높은 생존율을 보임으로써 미세먼지가 재비산될 경우 미세먼지에 흡착된 상태로 인체에 유입되어 질병 노출의 위험성을 더욱 증가시킨다. 통상 환기율과 부유세균의 농도는 반비례하지만, 세균의 활동성이 강한 여름철에는 환기만으로는 농도 감소 효과가 크지 않을 뿐만 아니라 냉방기 가동으로 인해 환기 횟수도 감소하므로 실내 부유세균은 성인보다 면역력이 약한 어린이의 건강에 위협이 될 수 있다(Madsen et al., 2023).

그람음성균인 *Moraxella* 종에 대한 상관관계 분석 결과(Fig. 4), 온도보다는 습도에 뚜렷한 상관관계를 보였다. 비교적 폭넓은 온도 범위에서 생존할 수 있는 환경 저항성을 가지고 있는 *Moraxella* 종의 생장 특성상 온도는 큰 변수가 되지 않고, 수분에 민감한 그람음성균임에 따라 습도에 대한 양의 상관관계를 나타내었다. 사람을 기원으로 하는 *Moraxella* 종이므로 어린이 수와는 뚜렷한 양의 상관관계를 보인 반면, 1인당 시설면적과는 뚜렷한 상관관계를 보이지 않았다.

전체 부유세균에 대한 각 실내 환경조건과의 관계를 알아보기 위하여 상관분석을 수행하여 그 결과를 Table 4에 나타내었다. 실내공기질 항목 및 시설특성과 부유세균 간의 상관관계를 살펴보면 실내 온도 및 습도와 관련이 있는 것으로 나타났다. Hwang et al.(2003)의 연구에서는 부유세균의 농도가 실외 온도 및 실외 상대 습도와는 상관관계가 없는 것으로 보고하였는데, 어린이집의 특성상 일정한 온도와 습도를 유지하기 위하여 냉난방기기를 가동하기 때문에 어린이들이 활동하는 실내 공간은 계절에 따른 실외 환경의 영향을 상대적으로 덜 받는다. 따라서 부유세균의 농도 변화는 계절적 영향보다 실내환경, 즉 실내 온도와 습도에 더 큰 영향을 받게 된다. 이로 인하여 실내 부유세균의 농도가 실외 부유세균 농도보다 높게 나타나며, 그 기원

Table 4. Result of correlation analysis between indoor air quality, facility characteristics and airborne bacteria

	Temp. (℃)	Hum. (%)	CO_2 (ppm)	PM-10 (㎍/㎥)	PM-2.5 (㎍/㎥)	Bacteria (CFU/m^3)	Total area (m^2)	Ave. area per child (m^2)	Ave. area of care room (m^2)	Shannon index
Temp.	1									
Hum.	0.483111	1								
CO_2	0.014022	0.251309	1							
PM-10	0.317663	-0.0688	-0.12043	1						
PM-2.5	0.216246	-0.11074	-0.25463	0.925851**	1					
Bacteria	0.59158*	0.5545*	0.75691**	0.23292	0.055346	1				
Total area	-0.18347	0.081433	-0.1782	-0.07955	-0.10101	-0.13078	1			
Ave. area per child	-0.48741	0.02232	0.008666	-0.3569	-0.31346	-0.25135	0.541253*	1		
Ave. area of care room	-0.1171	-0.04328	-0.44885	0.349716	0.365898	-0.30562	0.726546*	0.301259	1	
Shannon index	0.57778*	0.66786**	0.125591	-0.28092	-0.40295	0.45714	0.34288	0.073544	0.054417	1

* The correlation coefficient is significant at the 0.05 level (two-tailed)
** The correlation coefficient is significant at the 0.01 level (two-tailed)

이 상이하여 검출되는 부유세균의 양상도 다르게 나타난다(Kim et al., 2007).

실내 미세먼지(PM-10 및 PM-2.5)는 부유세균의 농도와 유의미한 관계가 없는 것으로 보인다. 이는 미세먼지의 농도가 낮기 때문으로 판단되며, 어린이들의 건강을 위해 청결이 매우 중요한 어린이집의 특성상 미세먼지의 농도가 타 시설군보다 매우 양호한 수준으로 관리되고 있었다. 또한, 냉난방으로 외부 미세먼지의 유입 가능성이 작고, 식사 준비를 위한 조리실이 어린이들의 활동공간과 분리된 경우가 많은 등 미세먼지의 발생원과 차단되어 있어 낮은 농도를 보였다. 어린이집 보육실 당 어린이 수, 보육실 전체 면적 및 어린이 1인당 평균 시설면적은 부유세균의 농도와 음의 상관관계를 보이는 듯하나 유의한 수준은 아니었다. 우리나라는 보건복지부 법령에 따라 어린이집 보육실별 정원을 일정 수준으로 규정하고 있는데, 부유세균의 농도 측면에서 볼 때 적정 수준인 것으로 판단된다.

상관관계 분석 결과, 실내 부유세균의 검출농도와 가장 밀접한 관련이 있는 항목은 실내공기 중 이산화탄소의 농도로 나타났다. 실내 이산화탄소의 농도는 어린이들의 활동량에 비례하고, 환기율에 반비례한다. 따라서 세균 증식 및 농도 증가에 영향을 미칠 수 있으며, 어린이집의 환기율은 어린이의 건강 보호에 중요한 요인으로 작용한다. 그러나 환기만으로 부유세균으로 인한 위험성을 낮추기에는 부족할 수 있는데, 특히 하절기에는 환기 효율이 떨어지고 온도와 습도가 높아지는 등의 변수가 작용하기 때문이다. 분석 결과에서 군집 내 종 다양성을 나타내는 섀넌-위너 지수와 부유세균 농도와의 상관관계는 높게 나타나지 않았으나, 온도와 습도가 높을수록 섀넌-위너 지수가 증가하였다. 즉, 부유세균의 농도보다 실내 온도 및 습도가 부유세균의 다양성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 세균의 농도가 높을수록 인체 감염성은 높아진다. 하지만 실내 공기 중 부유세균은 비병원성 세균이 우세균으로 존재하는 가운데, 세균의 다양성이 커지게 되면 병원성 세균의 발생 가능성이 커지므로 면역성이 약한 어린이들에 대한 인체 위험성이 커질 수 있다. 특히, 본 조사에서 병원성 독소를 유발하는 *Bacillus cereus*가 검출된 어린이집에서의 섀넌-위너 지수가 1.69~1.83으로 다른 어린이집보다 높게 나타난 결과(Fig. 1)를 볼 때, 어린이집 실내 부유세균 관리에 있어 실내 온도 및 습도의 관리가 매우 중요한 요인임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 울산지역 14개 어린이집을 대상으로 지역 및 시설특성에 따른 실내공기 중 부유세균의 종 분포 특성을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

검출된 부유세균은 그람양성균이 우세균이었으며, 사람 기원 세균이 토양이나 기타 외부 요인 기원 세균보다 우세하였다. 가장 높은 검출률을 보인 부유세균은 *Micrococcus luteus*로서 조사 대상 모든 어린이집에서 검출되었다. 다음으로 *Staphylococcus* 종들이 높은 검출률을 보였고, *Moraxella* 종과 *Bacillus* 종들이 그 뒤를 이었다. 대부분 인체에 무해한 균이었으나, 면역저하자에게 심각한 질병을 유발할 수 있는 기회성 병원균도 일부 검출되었다. 따라서 면역력이 상대적으로 약한 어린이들이 생활하는 공간에 대한 철저한 실내공기질 관리가 요구된다.

실내공기질, 실내환경 및 어린이 수 등의 조건과 부유세균 간의 상관관계를 살펴본 결과, *Micrococcus* 종과 *Staphylococcus* 종은 온도 및 습도와 양의 상관관계를 보였고, *Moraxella* 종은 습도와 양의 상관관계를 나타내었다. *Staphylococcus* 종과 *Moraxella* 종은 어린이 수와 양의 상관관계를 보였으며, 1인당 시설면적과는 반비례 관계를 나타내었으나 뚜렷한 상관관계를 보이지는 않았다. 검출된 전체 부유세균에 대하여 종 다양성을 나타내는 섀넌-위너 지수와 부유세균 농도 간의 상관관계는 높게 나타나지 않았으나, 실내 온도와 습도가 높을수록 섀넌-위너 지수가 증가하였다. 부유세균의 생장에 있어 대기는 극한 환경이므로 전체적인 섀넌-위너 지수가 낮게 나타났으나, 온도와 습도가 높아지면 종 다양성이 증가하여 병원성 미생물이 증가할 가능성이 커지므로 어린이집 시설의 경우 온도 및 습도와 관련된 실내 위생 관리가 매우 중요할 것으로 판단된다. 또한, 현행 국내 실내공기질 관리법에서는 전체 부유세균의 수만을 규제하여 관리하고 있는 실정인데, 향후 건강에 영향을 미치는 다양한 부유세균의 종 분포 및 특성 조사 결과를 기반으로 한 법/제도적 관리의 보완이 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(NIER-2025-01-03-002)을 받아 수행하였습니다.

REFERENCES

Chen, Y., Liang, Z., Li, G., An, T., 2024, Indoor/outdoor airborne microbiome characteristics in residential areas across four seasons and its indoor purification, Environ. Int., 190, 108857.

Cho, E. M., Lee, J. S., Cho, Y. M., Lee, C. M., 2020, Distribution characteristics of indoor airborne bacteria by the outdoor environment in facilities for susceptible populations, J. Odor Indoor Environ., 19, 341-352.

Fakunle, A. G., Jafta, N., Naidoo, R. N., Smit, L. A. M., 2021, Association of indoor microbial aerosols with respiratory symptoms among under-five children: a systematic review and meta-analysis, Environ. Health, 20, 77.

Hwang, K. H., Yoon, T. H., Kim, J. A., Choi, S. S., Kim, K. R., Shin, J. H., Kim, K. Y., Shin, G. Y., 2016, Genetic characteristics of Staphylococcus aureus isolated from indoor air in public facilities, Report of SIHE, 52, 171-178.

Hwang, K., Lee, A., Shin, H., Kim, J., 2003, Seasonal monitoring of airborne microbial concentrations in kindergartens, Korean J. Microbiol., 39, 253-259.

Jeon, B. H., Hwang, I. Y., 2015, Concentrations of total culturable microorganisms and its identification in public facilities, J. Korea Acad.-Ind. Cooper. Soc., 16, 868-876.

Kim, K. Y., Kim, Y. S., Lee, C. M., Cho, M. S., Byeon, S. H., 2009, Atmospheric distribution characteristics of airborne bacteria in part of Seoul area, J. Korean Soc. Atmos. Environ., 25, 493-502.

Kim, K. Y., Lee, C. R., Kim, C. N., Won, J. U., Roh, J., 2006, Size-based characteristics of airborne bacteria and fungi distributed in the general hospital, J. Korean Soc. Occup. Environ. Hyg., 16, 101-109.

Kim, N. Y., Kim, Y. R., Kim, M. K., Cho, D. W., Kim, J., 2007, Isolation and characterization of airborne bacteria and fungi in indoor environment of elementary schools, Korean J. Microbiol., 43, 193-200.

Madsen, A. M., Moslehi-Jenabian, S., Frankel, M., White, J. K., Frederiksen, M. W., 2023, Airborne bacterial species in indoor air and association with physical factors, UCL Open Environ., 5, e056.

Madsen, A. M., Moslehi-Jenabian, S., Islam, M. Z., Frankel, M., Spilak, M., Frederiksen, M. W., 2018, Concentrations of Staphylococcus species in indoor air as associated with other bacteria, season, relative humidity, air change rate, and S. aureus-positive occupants, Environ. Res., 160, 282-291.

Ministry of Food and Drug Safety of Korea, 2013, Pathogenic microbiological illustrated guide book.

Moon, K. W., Huh, E. H., Jeong, H. C., 2014, Seasonal evaluation of bioaerosols from indoor air of residential apartments within the metropolitan area in South Korea, Environ. Monit. Assess., 186, 2111-2120.

Park, K. S., Choi, S. G., Hong, J. K., 2006, The study on distribution of indoor concentration of microorganism in commercial building, Korean J. Air-Cond. Refrig. Eng., 18, 620-626.

Park, Y., Kwon, S., Lee, J., Lee, H. S., Park, S. Y., Kee, S. H., Yoon, W., 2022, Analysis of the national status and characteristics of indoor airborne bacteria, J. Odor Indoor Environ., 21, 191-197.

Rejc, T., Kukec, A., Bizjak, M., GodičTorkar, K., 2020, Microbiological and chemical quality of indoor air in kindergartens in Slovenia, Int. J. Environ. Health Res., 30, 49-62.

Sohn, J. R., Kim, J., Oh, H. J., Nam, I. S., Yang, J., Lee, D., Lee, B. Y., 2014, Assessment of particles and bioaerosol concentrations at daycare centers in Seoul, J. Odor Indoor Environ., 13, 40-48.

World Health Organization, Household air pollution, 2024, https://www.who.int/news-room/ fact-sheets/ detail/household-air-pollution-and-health.

Zhu, H., Phelan, P. E., Duan, T., Raupp, G. B., Fernando, H. J. S., Che, F., 2003, Experimental study of indoor and outdoor airborne bacterial concentrations in Tempe, Arizona, USA, Aerobiologia, 19, 201-211.

• Senior Researcher. Kwang-Won Lee
Ulsan Institute of Health & Environment
frangko@korea.kr
• Professor. Jeong-Hak Choi
Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan
jhchoi@cup.ac.kr