

어린이활동공간에서의 바이오에어로졸 포집 전략

조정흠¹ · 박준식¹ · 김성연² · 권명희² · 김기연³ · 최정학⁴ · 서성철^{1,5*}

¹고려대학교 안암병원 환경보건센터, ²국립환경과학원 생활환경연구과,

³부산가톨릭대학교 산업보건학과, ⁴부산가톨릭대학교 환경공학과, ⁵고려대학교 의과대학 알레르기면역연구소

A Suggested Air Sampling Strategy for Bioaerosols in Daycare Center Settings

JungHeum Jo¹ · Jun-sik Park¹ · Sung-Yeon Kim² · Myung hee Kwon² ·
Ki Youn Kim³ · Jeong-Hak Choi⁴ · SungChul Seo^{1,5*}

¹The Environmental Health Center for Asthma, Korea University Medical Center, Korea

²Environmental Infrastructure Research Department, National Institute of Environmental Research, Korea

³Department of Industrial Health, Catholic University of Pusan, Korea

⁴Department of Environmental Engineering, Catholic University of Pusan, Korea

⁵Institute of Allergy and Immunology, College of Medicine, Korea University, Korea

ABSTRACT

Objectives: We aimed to compare the sampling performance of different flow-based impactor samplers for collecting fungal spores and bacteria and to explore the association of the level of bioaerosols with activity patterns of occupants in daycare center settings.

Methods: For comparison of sampling performance, two different flow-based samplers (greater than 100 L/min or not) were selected; a low flow-based sampler (one-stage Andersen sampler) and two high flow-based samplers (DUO SAS SUPER 360 sampler, BUCK bio-culture sampler). We collected airborne mold and bacteria in 30 daycare centers with various levels of contaminated air. Three repeat samplings per each sampler were performed. Mold and bacteria were grown for 96 hours at 25±1 °C and 48 hours at 35±1 °C, respectively. The Andersen and SAS samplers were used for investigating the association between the level of bioaerosols and the activity patterns of occupants in daycares. Particular matters 10(PM₁₀), temperature, and relative humidity were monitored as well. Samplings were carried out with one-hour interval from 9 to 5 O'clock. For statistical comparisons, Kruskal-Wallis test, Wilcoxon's signed rank test, and multiple regression analysis were carried out.

Results: The airborne level of molds by the low flow-based sampler were significantly higher than that of high flow-based samplers (indoor, $P=0.037$; outdoor, $P=0.041$). However, no statistical difference was observed in the airborne level of bacteria by each sampler. Also the level of bioaerosols varied by the time, particularly with different activity patterns in daycare centers. The higher level of mold and bacteria were observed in play time in indoor. Similarly, the concentrations of PM₁₀ were significantly associated with the level of bioaerosols ($P<0.05$).

Conclusions: Our findings indicate that the flow rate of sampler, rather than total air volume, could be able to affect the results of sampling. Also, the level of airborne mold and bacteria vary behavior patterns of occupants in indoor of daycare settings. Therefore, different samplers with other flow rate may be selected for mold or bacteria sampling, and activity patterns should be considered for bioaerosol sampling as well.

Key words: airborne, bacteria, bioaerosols, fungi, flow rate, Impactor, mold

*Corresponding author: SungChul Seo, Tel: 02-920-5464, E-mail: sungchul_seo@korea.ac.kr

Institute of Allergy and Immunology, College of Medicine, Korea University 76 Inchon-ro, Seongbuk-gu, Seoul 126-83

Received: August 1, 2016, Revised: September 1, 2016, Accepted: September 23, 2016

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.

I. 서 론

현대인들은 90% 이상의 시간을 실내에서 생활하고 있으며 이로 인해 실내공기질의 중요성은 점점 더 증가하고 있다. 특히, 실내공기질에 의한 일시적 또는 만성적인 건강유해 증상들이 알려지면서 실내 공기질에 대한 관심이 더욱 집중되고 있는 실정이다 (Park, 2009).

최근 들어 실내공기질 내 환경오염인자 중 생물학적 오염 즉, 미생물 오염에 대한 공중보건학적 관심이 매우 증가하고 있다(Stolwijk, 1992; Roh et al., 2007). 미생물 오염과 직접적으로 관련된 생물학적 유해인자로는 세균이나 곰팡이의 포자, 바이러스, 집먼지진드기 등이 있다. 이들은 실내에서 번식 환경이 충족될 경우, 빠른 속도로 증식하여 인체로의 노출 가능성을 높일 수 있으며, 이런 위험인자들에 지속적 으로 노출될 경우 천식, 폐렴 등과 같은 호흡기 질환 및 심혈관계 질환, 아토피피부염 등과 같은 알레르기 질환 등 다양한 질환들을 유발 시킬 수 있다(IOM, 2004; WHO, 2009).

이러한 생물학적 유해인자로 인해 발생할 수 있는 질환들에 대하여 가장 취약하다고 할 수 있는 대상 중 하나는 어린이들이다. 어린이들의 경우 성인에 비해 체중은 적지만 실내오염물질의 부하량은 동일하다. 따라서 체중 당 오염물질에 노출되는 양이 많고, 신체적으로 미성숙 된 상태이며 면역력이 약하기 때문에, 실내환경에서 발생하는 각종 유해 오염물질로 인한 건강영향은 성인보다 더욱 심각한 것으로 보고 있다(Salvi, 2007). 또한 국내에서는 지난 30년 동안 어린이 알레르기 질환이 꾸준히 증가하고 있는 추세로 나타나, 환경보건 문제에 있어 중요한 이슈 중 하나로 꼽히고 있다(KAAACI et al., 2015).

어린이의 경우 대부분 실내에서 시간을 보내며 통상 자신의 집과 유치원 또는 어린이집과 같은 보육 시설(Child daycare center)이 주된 생활 공간이다. 따라서 어린이집 및 보육시설 등에서의 환경유해인자에 대한 노출 수준 평가는 어린이 건강 보호 차원에서 매우 필요한 조치이다. 보건복지부에서 발표한 보육시설 관련 통계자료를 살펴보면 2002년 22,147개 였던 보육시설은 2011년 39,842개로 실제 약 10년 사이에 약 80% 정도가 증가하는 등 여성인력의 사

회진출이 증가함에 따라 어린이 보육시설의 수요도 증가하는 것을 확인 할 수 있었다. 하지만 어린이들이 살고 있는 일반 가정집과는 달리 상대적으로 보육시설에 대한 노출평가는 많지 않았으며, 특히 면역학적 영향과 관련이 있는 생물학적 유해인자에 대한 평가는 더욱 미미한 실정이었다.

우리나라는 환경부에서 2004년 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”을 마련하여 부유 박테리아에 대한 유지기준을 제시하고 있다. 박테리아의 경우 국내에서는 표준화된 측정방법이 공정시험법 상에 명시되어 있으나, 곰팡이의 경우 그 방법에 대한 기술이 없는 실정이다. 국외의 경우 국제표준 상의 곰팡이 포집, 분석 등에 대한 내용이 기술(ISO 16000-18, 2011)되어 있지만, 포집 하려는 바이오에어로졸 크기에 따라 포집 성능이 달라지는 샘플러의 유량에 대한 명확한 기준을 제시해 주지 못하고 있다. 이는 실내 공기 중 생물학적 유해인자들의 농도가 장소와 시간에 따라 시시각각으로 변화한다는 점과, 이들의 입자가 언제, 어느 정도로 발생되는지 예측 하는 것이 매우 어렵기 때문이다(Sahakian et al., 2008; Park, 2009). 기존의 연구들 또한 위와 같은 이유로 인해 노출평가 시 많은 오류들을 야기하였으므로, 정확한 측정시간 및 횟수 등의 기준마련이 매우 필요한 시점이라 할 수 있다. 특히 곰팡이의 경우, 실내에 있는 건축자재에서도 증식하며 포자 등의 입자가 항상 일정한 양과 속도로 공기 중으로 분출되지 않기 때문에 짧은 시간 동안 채취하는 측정방법은 노출평가에 대한 기준으로 활용하는데 있어 대표성을 가지기 더욱 어려울 것으로 생각된다.

특히 부유미생물 측정 시 보다 신뢰도 있는 농도 값을 얻기 위해서는 적절한 샘플러(Sampler, 공기시료채취기)의 선택 또한 매우 중요하다. 샘플러는 보통 흡입 유량의 차이로 구분 할 수 있으며, 저유량 기반과 고유량 기반의 샘플러가 존재한다. 최근에는 긴 포집 시간을 가지는 저유량 기반 샘플러를 대신 하여 상대적으로 짧은 포집 시간과 저소음 경량형의 고유량 기반 샘플러가 많이 사용되고 있다(Marta et al., 2012). 그러나 현재까지의 연구결과에 따르면 부유 곰팡이 농도의 정확성은 측정 방법 및 샘플러의 차이에 따라 달라질 수 있으며, 국내의 경우 표준화된 방법이 없으므로 여러 가지 샘플러를 혼용하고

있었다.

따라서 본 연구에서는 생물학적 유해인자 노출 평가 시 적절한 샘플러 선정에 위한 저유량 및 고유량 기반 샘플러의 성능(Performance)을 비교하고자 하였으며, 특히 어린이의 주된 생활공간인 어린이집에서 이들의 생활 패턴에 따른 농도 변화를 파악하여, 향후 이를 토대로 국내 실정에 맞는 노출 평가 등에 활용 가능한 생물학적 유해인자의 포집 전략을 제시하고자 하였다.

II. 연구방법

2.1 연구대상

서울시 내 어린이집 30곳을 선정하였으며, 구별 최소 한곳이 포함 되도록 하였다.

2.2 연구방법

2.2.1 고유량 및 저유량 기반 샘플러(Sampler)간 포집 성능 비교

미생물 포집 샘플러는 유량(Air flow rate)이 100 L/min 이상이면 고유량(High air flow rate)기반 샘플러로, 100 L/min 이하이면 저유량(Low air flow rate)기반 샘플러로 분류하고 있다(Didier et al., 2001; Marta et al., 2012). 이에 본 연구에서도 100 L/min를 기준으로 고유량과 저유량 기반 샘플러로 구분하였으며, 기본적으로 공기 충돌방식(Impaction)의 기기를 사용하여 공정시험법을 기준으로 곰팡이와 박테리아

를 측정하였다. 고유량 기반 샘플러로는 두 개의 독립적인 헤드를 가진 DUO SAS Super 360(Surface Air System, SAS, VWR Inc., Italy)샘플러와 한 개의 헤드를 가진BUCK Bio Culture Pump(A.P. BUCK Inc., USA)샘플러를 사용하였으며, 저유량 기반의 샘플러로는 One-stage Andersen(KEMIK Corp., Korea)샘플러를 사용하였다.

곰팡이와 박테리아 모두 1회 측정 시 30분 간격으로 2회 연속 측정 하였으며 이틀간 반복 측정하였다. 데이터의 신뢰도를 높이기 위하여 실내는 Andersen 샘플러 3회, SAS 샘플러 2회, BUCK 샘플러 2회, 실외는 Andersen 샘플러 3회, SAS 샘플러 2회, BUCK 샘플러 2회씩 반복 측정하여 각각의 결과에 대한 평균값을 최종 농도 값으로 사용하였다. 또한 배지의 오염여부를 확인하기 위하여 측정에 사용한 배지와 동등한 조건의 배지를 측정 장소에서 개봉하지 않고 실험한 배지와 함께 보관한 후 분석실로 가져와 현장바탕시료(Field blank)로 사용하였다. 측정 시 바닥에서 재 비산되는 입자의 포집을 막기 위해 120-150 cm 높이로 장비를 설치하였으며, 샘플러의 뚜껑과 내부를 70% 에탄올로 소독한 후 수분을 완전히 제거 하여 측정하였다. 곰팡이 측정의 경우 국내에는 공정시험법이 마련되어 있지 않아, 환경부에서 규정하고 있는 실내공기질 공정시험법 상의 박테리아 측정법을 참고하여 실시하였다.

측정에 사용된 배지는 곰팡이의 경우 항생제 (Streptomycin sulphate 40 mg/L, Sigma-Aldrich, St.

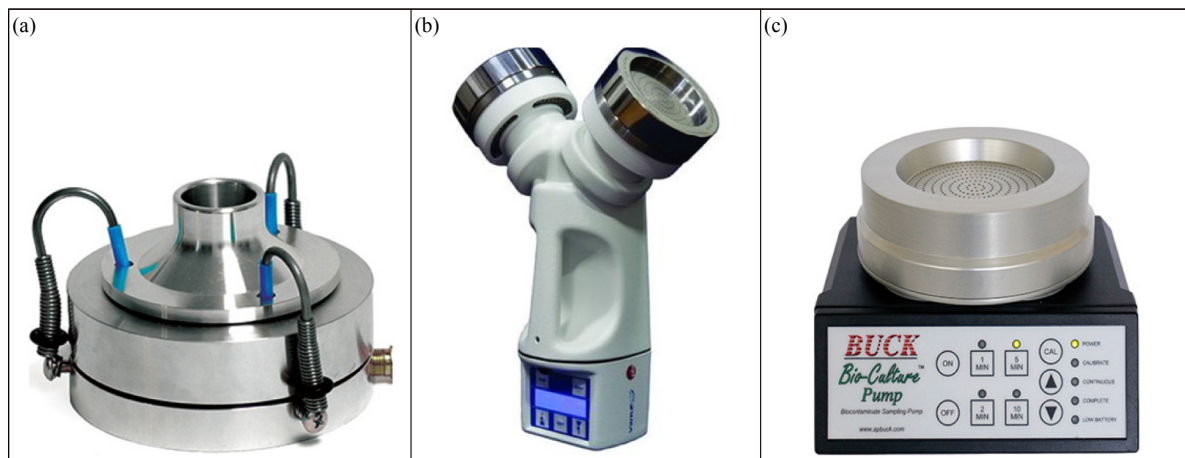


Figure 1. Impactor samplers; (a) low air flow rate-Andersen; (b) high air flow rate1-SAS; (c) high air flow rate2-BUCK

Louis, MO, USA)를 넣어 제조한 MEA(malt extract agar)를 사용하였으며, 박테리아의 경우 항진균제(Cycloheximide 0.5 g/L, Difco Laboratories, Detroit, Mich.)가 포함된 TSA(Tryptic soy agar)를 사용하였다. 샘플링이 끝난 후, 외부공기로부터의 오염을 차단하기 위해 파라핀 필름(PARAFILM, American National Can, Chicago, IL)으로 밀봉하였으며 배지는 아이스박스에 보관하여 이동하였다. 측정된 곰팡이 및 박테리아는 교차오염을 방지하기 위해 각각의 배양기에 배양되었으며 곰팡이의 경우 25±1℃에서 96시간, 박테리아의 경우 35±1℃에서 48시간 동안 배양하였다. 배양 중 증식되는 곰팡이 혹은 박테리아의 확산으로 인해 계수가 곤란할 수 있으므로 24시간 단위로 증식상태를 관찰하고 집락(Colony)수를 세어 놓았다. 배지에 증식된 집락 수는 곰팡이 또는 박테리아 집락이 형성된 시료채취장치 뚜껑의 구멍(Positive hole)수를 이용하여 세었으며, 하나의 지점에서 사용한 배지가 여러 개 일 경우에는 각 배지의 집락 수를 센 후 평균을 구하여 측정 대상 공간의 곰팡이 및 박테리아 수로 하였다. 계수한 곰팡이 및 박테리아는 샘플러 별로 각각의 집락 계수 환산표(Positive hole conversion table)를 사용하여 집락 수를 보정하였으며, 보정된 집락 수를 이용하여 공기 중 농도(Colony Forming Unit, CFU/m³)를 계산하였다

2.2.2 시간대 별 측정 농도 결과 비교

시간대 별 농도변화를 관찰하기 위해 하루 중 9시, 10시, 11시, 13시, 15시, 16시, 17시를 기준으로 하여 총 7회 측정하였다. 샘플러는 저유량 기반의 Andersen 샘플러와 고유량 기반의 SAS 샘플러를 사용하여 두 샘플러 간의 농도차이를 함께 비교하였다. 구체적인 측정방법 및 분석은 앞서 2.2.1에 설명한 방법과 동일하게 진행하였다. 아울러 생물학적 유해인자 농도에 영향을 미치는 변수에 대한 평가를 위하여 미세먼지, 온도, 상대습도를 측정하였다. 미세먼지의 경우 Dust Monitor(model 1.109, Grimm)를 사용하였으며, 온도 및 상대습도는 IAQ Monitor(model IQ-610Xtra, Graywolf)를 사용하였다. 미세먼지 및 온·습도 측정장비는 1분 간격으로 실시간 데이터를 저장하였으며, 1회 측정 시 6분 측정하였고, 6회 평균값을 사용하였다. 또한 어린이집의 운영시간 동안 측정자가

Table 1. Time activity at the child day-care center in koura

Time	Activity
09:00-10:00	Attendance and Snack time
10:00-11:30	Study and frolic
11:30-12:00	Outdoor activities
12:00-13:00	Lunch time
13:00-14:30	Nap time and outdoor activities
14:30-15:00	Snack time
15:00-16:30	Study and frolic
16:30-18:00	Back to home

상주하여 어린이의 활동특성 등을 기록한 표를 Table 1에 나타내었다. 이는 활동특성이 비교적 뚜렷한 유아반을 대상으로 조사된 결과이며, 각 어린이집들은 요일별로 활동종류(음악, 미술, 만들기, 발표시간 등)의 차이는 있었으나 보통 낮잠, 점심, 실내활동, 실외활동 시간 등 본 연구에서 제시한 큰틀에서의 활동시간에는 요일별 차이를 보이지 않았다. 또한 각 어린이집마다 점심시간은 거의 동일하였으며, 공통적으로 하루 중 교육 및 놀이 활동과 실외 활동시간이 오전과 오후에 각각 1회씩 포함되어 있는 것으로 조사되었다.

2.2.3 통계분석

Shapiro-Wilk test를 이용하여 고유량 및 저유량 기반 샘플러로 측정된 곰팡이, 박테리아 농도의 정규분포 검사(normality test)를 실시하였다. 검사 결과, 농도 값이 오른쪽으로 치우친 비정규 분포로 나타남에 따라, 최종 결과 값은 기하평균(Geometric mean)과 기하표준편차(Geometric standard deviation)를 이용하여 제시하였다. 비정규 분포로 나타난 3가지 샘플러 간 평균 농도 값의 비교를 위하여 Kruskal-Wallis test를 실시하였다. 어린이집 측정 시간대에 따른 샘플러 간 평균 농도 값의 비교는 비모수적 방법의 Wilcoxon's signed rank test를 실시하였다. 어린이집 곰팡이 및 박테리아 농도에 영향을 미치는 요인들을 알아보기 위하여 다중선형회귀분석(Multiple regression analysis)을 실시하였다. 본 연구의 모든 통계분석은 SPSS (version 18.0, SPSS Inc, Chicago, IL, USA)를 이용하여 분석하였으며, 유의확률이 0.05미만일 경우 통계적으로 유의한 것으로 정의하였다.

III. 연구결과

3.1 고유량 및 저유량 기반 샘플러(Sampler)간 포집 성능 비교결과

흡입 유량이 각기 다른 총 3가지의 샘플러를 사용하여 측정된 농도 결과를 Figure 2에 나타내었다. 부유 곰팡이의 실내 농도는 Andersen 샘플러 317.7 ± 2.8 CFU/m³, SAS 샘플러 223.8 ± 2.5 CFU/m³, BUCK 샘플러 212.9 ± 2.1 CFU/m³이었으며, 실외 농도 또한 이와 유사하게 Andersen 샘플러 391.1 ± 2.5 CFU/m³, SAS 샘플러 294.8 ± 2.3 CFU/m³, BUCK 샘플러 300.4 ± 2.3 CFU/m³로 나타나 실내와 실외의 결과 모두 저유량 기반의 샘플러를 사용했을 경우에 가장 높은 농도를 보였다. 이러한 차이는 저유량(Andersen)과 고유량(SAS,

BUCK)기반의 샘플러 간 비교에서도 통계적으로 유의한 차이를 보였다(실내, $P=0.037$; 실외, $P=0.041$).

반면, 박테리아의 농도 결과는 곰팡이와 다른 양상을 보였다. 부유 박테리아의 실내 농도는 Andersen 샘플러 372.6 ± 2.3 CFU/m³, SAS 샘플러 364.8 ± 3.3 CFU/m³, BUCK 샘플러 362.7 ± 2.4 CFU/m³이었으며 실외 농도는 Andersen 샘플러 321.9 ± 2.9 CFU/m³, SAS 샘플러 329.7 ± 2.5 CFU/m³, BUCK 샘플러 312.6 ± 2.3 CFU/m³로 나타났다. 이는 위에서 나타난 부유 곰팡이 농도와는 다르게 고유량 및 저유량 기반의 샘플러 모두에서 유사한 농도 수준을 보인 결과였다. 따라서 부유 박테리아는 측정 시 흡입 유량의 변화가 농도 결과에 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 통계적으로도 유의한 차이를 보이지 않았다($P>0.05$).

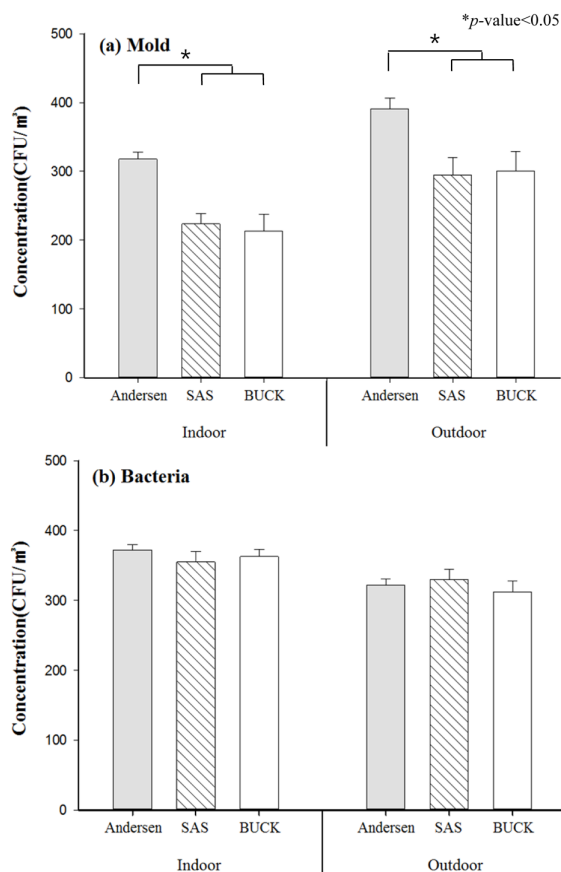


Figure 2. Mean airborne concentration of mold and bacteria simultaneously obtained with DUO SAS SUPER 360, one-stage Andersen sampler, BUCK sampler.

3.2 시간대 별 측정 농도 결과

시간대 별로 측정된 곰팡이와 박테리아의 농도 결과를 Figure 3에 나타내었다. 부유 곰팡이의 경우 최소값은 260.5 CFU/m³, 최대값은 528.1 CFU/m³로 확인되었으며, 곰팡이 측정에 사용한 샘플러 모두 각 시간대 별로 유사한 농도 패턴을 보였다. 샘플러 간 농도 비교에서는 약간의 차이를 보였는데, 저유량 기반의 Andersen 샘플러가 평균 410.4 CFU/m³, 고유량 기반의 SAS 샘플러가 평균 377.5 CFU/m³로 저유량 기반의 샘플러가 고유량 기반의 샘플러 보다 모든 측정 시간대에서 다소 높은 농도를 나타냈다. 아울러 모든 시간대의 샘플러 간 농도 자료 전체를 비교한 결과 통계적으로 유의한 것으로 확인되었으며 ($P=0.048$), 시간대 별 샘플러 간 차이를 살펴보면 9시 (Andersen 기하평균 농도 값, 310.4 CFU/m³; SAS 기하평균 농도 값, 260.5 CFU/m³; $P=0.036$), 10시 (Andersen, 528.1 CFU/m³; SAS, 491.4 CFU/m³; $P=0.029$), 11시 (Andersen, 476.7 CFU/m³; SAS, 434.1 CFU/m³; $P=0.022$), 3시 (Andersen, 445.1 CFU/m³; SAS, 401.9 CFU/m³; $P=0.025$), 4시 (Andersen, 494.1 CFU/m³; SAS, 462.3 CFU/m³; $P=0.031$)대의 결과가 통계적 유의성을 갖는 것으로 분석 되었다(Figure 3).

부유 박테리아의 경우 최소값은 393.6 CFU/m³, 최대값은 887.1 CFU/m³로 나타났으며 각 샘플러의 전체 농도 평균은 Andersen 샘플러가 658.4 CFU/m³,

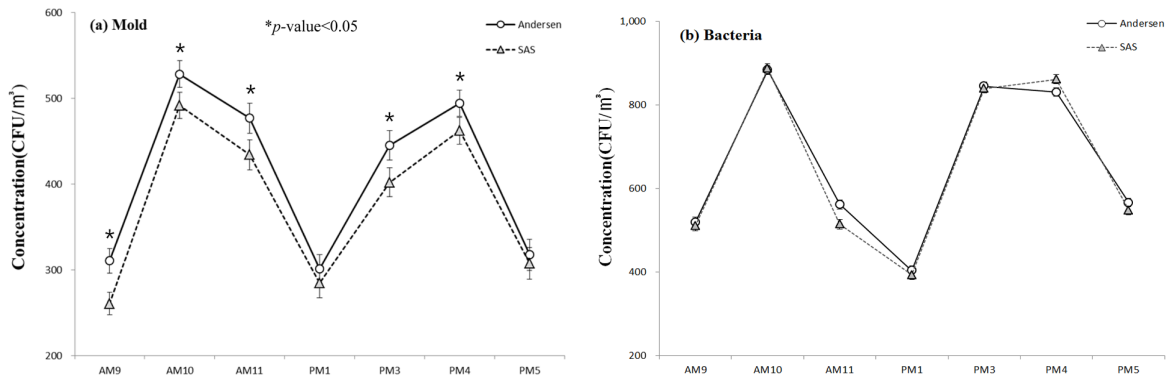


Figure 3. The variation of mold and bacteria levels by time in child daycare centers.

SAS 샘플러가 650.6 CFU/m³로 곰팡이의 농도 결과와는 다르게 큰 차이를 보이지 않았다. 측정 시간대별 농도 차이 역시 오후 4시의 경우에만 고유량과 저유량 기반의 샘플러 간 농도가 근소한 차이를 보였으나($P=0.047$), 이를 제외한 모든 측정 시간대에서는 유사한 농도 결과를 보였으며, 이는 통계적으로

유의한 차이를 보이지 않았다($P>0.05$). 아울러 시간별 활동 특성에 따른 농도 분포를 보면, 어린이들이 실내에서 가장 활발히 보내는 시간인 실내 놀이활동 시간에 포함되는 오전 10시와 오후 4시경에 곰팡이와 박테리아 모두 가장 높은 농도를 보인 반면, 실내 활동이 거의 없는 낮잠 시간 및 실외 활동 시간인 오

Table 2. Results of multiple regression analysis between mold concentration and environmental factors

Sampler	Independent variables	β Coefficient	SE*	p-value†
Andersen	(Constant)	1.845	0.337	<0.001
	PM ₁₀	0.014	0.002	<0.001
	Temperature(°C)	0.159	0.014	<0.001
	Relative humidity(%)	-0.008	0.003	0.010
SAS	(Constant)	1.834	0.347	<0.001
	PM ₁₀	0.014	0.002	<0.001
	Temperature(°C)	0.156	0.014	<0.001
	Relative humidity(%)	-0.008	0.003	0.012

* SE: standard error † p-value for differences by multiple logistic regression

Table 3. Results of multiple regression analysis between bacteria concentration and environmental factors

Sampler	Independent variables	β Coefficient	SE*	p-value†
Andersen	(Constant)	5.597	0.403	<0.001
	PM ₁₀	0.007	0.003	0.005
	Temperature(°C)	0.019	0.016	0.255
	Relative humidity(%)	0.003	0.003	0.418
SAS	(Constant)	5.129	0.491	<0.001
	PM ₁₀	0.010	0.003	0.002
	Temperature(°C)	0.030	0.020	0.141
	Relative humidity(%)	0.004	0.004	0.313

* SE: standard error † p-value for differences by multiple logistic regression

후 1시경과 어린이집의 등원 및 하원 시간인 오전 9시와 오후 5시경에는 곰팡이와 박테리아 모두 상대적으로 낮은 농도를 보였다.

3.3 부유 곰팡이, 부유 박테리아 농도와 환경요인과의 상관성 분석

부유 곰팡이, 부유 박테리아 농도와 환경적 요인 간에 다중회귀분석을 실시한 결과를 Table 2와 Table 3에 나타내었다. 각 샘플러 별로 나누어 곰팡이와 박테리아의 농도를 종속변수로, 이에 영향을 줄 수 있는 PM_{10} 및 온·습도를 독립변수로 선택하여 다중회귀분석을 수행하였다. 결과를 살펴보면 샘플러와 관계없이 PM_{10} , 온·습도 등이 부유 곰팡이 농도에 영향을 미치는 요인으로 나타났으며($P<0.05$)(Table 2), 부유 박테리아의 경우 PM_{10} 만이 영향을 미치는 것으로 나타났다($P<0.05$)(Table 3).

IV. 고 찰

바이오에어로졸을 포집하여 각 샘플러 간 농도를 비교한 결과를 보면 부유 곰팡이의 경우 실내·외 모두 저유량 기반의 샘플러(Andersen)가 고유량 기반의 샘플러(SAS, BUCK)보다 높은 평균 농도를 보인 반면($P<0.05$), 부유 박테리아의 경우 저유량 및 고유량 등의 샘플러 흡입 유량에 관계없이 유사한 평균 농도를 보였으며 통계적으로도 유의한 차이를 보이지 않았다($P>0.05$). Marta et al.(2012)은 세가지 샘플러(DUO SAS SUPER 360, SAMPL'AIR, SPIN AIR)를 가지고 각 샘플러의 분당 흡입 유량을 다르게 하여(SAS 샘플러 180 L/min, SAMPL'AIR 샘플러 100 L/min, SPIN AIR 샘플러 100 L/min) 부유 박테리아 농도에 대한 비교 연구를 진행 하였다. 공기의 총 부피는 550 L로 각 샘플러 당 9회씩 측정된 농도의 평균값을 가지고 총 2회 실험하여 비교 하였으며 그 결과를 살펴보면, 첫번째 실험에서는 SAS 샘플러 사용 시 107.2 ± 48.9 CFU/m³, SPIN AIR 샘플러 사용 시 134.7 ± 12.3 CFU/m³의 농도를 보였으며, 두번째 실험에서는 SAS 샘플러 사용 시 55.4 ± 24.2 CFU/m³, SAMPL'AIR 샘플러 사용 시 54.5 ± 16.1 CFU/m³의 농도 분포를 보여, 첫번째 실험과 두번째 실험 모두 각각의 샘플러를 사용한 농도 결과에서 큰 차이를 보

이지 않았다. 이는 본 연구에서 실시한 고유량 및 저유량 기반의 샘플러(Andersen, SAS, BUCK)간 농도 비교 결과를 뒷받침 할 수 있는 근거로, 부유 박테리아는 유량이 다른 샘플러를 사용하여 측정 하였을 경우에도 이들 간의 농도 차이가 크지 않음을 확인할 수 있는 결과였다. 따라서 부유 박테리아 농도 측정 시, 고유량 또는 저유량 기반의 샘플러 사용이 농도 수준에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 보이며, 이는 샘플러의 선택에 있어 흡입 유량을 크게 고려하지 않아도 될 것으로 사료된다.

하지만 앞서 설명한 바와 같이 본 연구에서는 부유 곰팡이 농도의 경우 박테리아와는 다르게 샘플러의 흡입 유량에 따른 농도 차이가 큰 것으로 나타났다(Figure 2). 이는 농도 측정 시 대상지점 주위의 기류, 유속 등의 영향과 각 샘플러 간 분당 흡입 유량의 차이 및 곰팡이, 박테리아의 공기 역학적 직경(Aerodynamic diameter)에 따른 차이 등 다양한 요인들에 의해 발생된 차이라고 생각된다. 선행연구를 살펴보면 통상 박테리아의 크기는 0.3-10 μ m이지만 실내에서의 공기 역학적 크기는 1-2 μ m이며, 곰팡이의 크기는 0.5-30 μ m이지만 실내에서의 공기역학적 크기는 2-4 μ m로 실제 크기와 공기 역학적 크기는 다르다고 보고하고 있는데(Hinds, 1998), 이러한 미생물의 공기 중 농도 측정 시 샘플러의 유속이 주위 기류에 의해 영향을 받을 경우, 공기 역학적 크기가 3-4 μ m 이상인 큰 입자는 관성력 등의 영향으로 과소하거나 과다하게 포집되어 측정값에 오차가 생길 수 있다고 보았다(James, 1989).

또한 본 연구에서 사용한 저유량 기반의 샘플러인 Andersen 샘플러의 경우 부유 곰팡이 농도가 다른 고유량 기반의 샘플러들 보다 높게 측정 되었는데, Griffiths et al.(1994)의 선행연구에 따르면 Andersen 샘플러는 2.5 μ m 미만의 공기 역학적 직경을 갖는 입자를 주위 유속에 영향을 받지 않고 90% 이상을 포집 할 수 있으며, 더욱이 1 m/s 이하의 주위 유속 하에서는 20 μ m보다 큰 입자 또한 거의 100% 효율로 포집 된다고 밝혀진 바 있다. 따라서 이러한 농도 차이는 위에서 설명한 관성력의 영향에 의한 차이와 더불어 Andersen 샘플러의 포집 효율에 따른 차이로 추정 해볼 수 있다. 다만, Kideso et al. (2003)에서는 교실 내에서 자라난 곰팡이들의 표면에 공기의 난류

등으로 인해 0.3 m/s 정도의 유속(바람)이 가해질 경우 공기 중 곰팡이 포자 수가 증가 할 수 있으므로, 주변 환경으로 인한 주위 유속의 급격한 증가 등이 포집 효율에 영향을 미칠 가능성이 있어 측정 시 선풍기 및 에어컨 등과 같은 인공적인 공기의 난류에 대한 주의가 필요할 것으로 생각된다. 따라서 공기 충돌식(Impact)기반의 샘플러로 부유 곰팡이 농도 측정 시 다른 미생물 등의 측정에 비해 대상 지점의 유속 및 기류 등이 농도 값에 상대적으로 더 많은 영향을 미칠 것으로 예상되며, 특히 본 연구의 Figure 2에서 나타난 결과와 같이 부유 곰팡이 측정 시 고유량 기반의 샘플러를 사용할 경우에는 농도 값이 저 평가될 가능성이 있을 것으로 추정된다. 따라서 부유 곰팡이 농도 측정 시에는 특히 샘플러의 선정에 있어 부유 박테리아 측정에 비해 상대적으로 신중하게 접근해야 할 것으로 사료된다.

아울러 Figure 3에 나타난 어린이집 시간대 별 농도 비교결과를 살펴보면, Andersen 샘플러를 기준으로 가장 높은 농도를 보인 활동 특성 시간인 오전 10시경의 부유 곰팡이의 농도는 528.1 CFU/m³, 부유 박테리아의 농도는 883.2 CFU/m³이었으며, 가장 낮은 농도를 보인 활동 특성 시간인 오후 1시경의 부유 곰팡이 농도는 301 CFU/m³, 부유 박테리아농도는 403.4 CFU/m³으로 나타났다. 어린이집의 경우 Table 1의 활동 특성표와 같이 재실자의 활동변화가 큰 편이므로 실내에서의 주 활동시간에는 농도가 높으며, 야외 활동 및 낮잠 시간에는 농도가 낮은 경향을 보이는 등 측정 시간대 별 농도에 뚜렷한 차이를 보였다. 또한 앞서 설명한 샘플러 간 비교 결과와 동일하게 부유 박테리아의 경우 흡입 유량에 관계없이 유사한 평균 농도를 보였지만, 부유 곰팡이의 경우 저유량 기반의 샘플러가 고유량 기반의 샘플러 보다 높은 평균 농도를 보였으며, 통계적으로도 유의한 차이가 있는 것으로 확인되었다($P<0.05$). 이는 선행연구에서도 유사한 양상을 보였는데, Park & Kim (2007)의 연구에 의하면 초등학교를 대상으로 바이오에어로졸과 PM농도를 조사한 결과, 시간대 별 농도 패턴이 본 연구에서 조사된 어린이집과 완벽히 일치하지는 않았지만 실외의 미세먼지 및 기타 오염물질들을 실내로 가지고 들어올 가능성이 있는 체육시간 직후나 교실 청소직후에는 바이오에어로졸과 미세먼지의 양이 급격히 늘어 나는

것을 확인 하였다. 따라서 바이오에어로졸의 농도는 사람들이 이동하면서 옷이나 머리카락에 있던 미생물들이 먼지와 함께 공기 중으로 부유하여 발생하는 인위적인 영향도 있는 것으로 나타났다(Boudia et al., 2006). 또한 Cho et al.(2009)의 연구에서는 대중교통의 승객 수가 증가 할수록 부유 곰팡이의 농도 또한 함께 증가 하였으며, 승객 수와 농도 변화는 통계적으로 유의한 상관관계($R=0.86$, $P<0.01$)를 보였다. 이러한 여러 선행연구들의 결과는 본 연구결과를 뒷받침 할 수 있는 중요한 자료이며, 실내 바이오에어로졸 농도의 증가는 재실자의 규모 및 생활 패턴에 따른 환경 요인의 변화(미세먼지 농도 및 온·습도 변화 등)가 한 요인으로 작용 할 수 있다는 것을 보여주는 결과라고 생각된다. 그러므로 바이오에어로졸 농도는 측정공간의 재실자를 대상으로 그들의 생활 패턴 및 규모에 따라 농도 변화를 짐작 할 수 있을 것으로 사료된다.

종합해보면, 바이오에어로졸 측정 시 부유 박테리아 보다는 부유 곰팡이 측정에 있어 샘플러의 유량 선택에 더욱 신중해야 할 것으로 보이며, 특히 어린이집을 대상으로 바이오에어로졸 측정 시 어린이들의 생활 패턴 및 행동 특성에 따라 농도 값이 변화 할 수 있으므로 적절한 측정 시간대를 고려해야 할 것으로 생각된다. 다만, 현재에는 부유 곰팡이 측정 방법에 대한 국내 기준은 존재하지 않으며, 실내공기질 공정시험법상의 부유 박테리아에 대한 측정기준만이 표준화 되어 있을 뿐이다. 보통 바이오에어로졸에 대한 농도 평가는 짧은 시간 동안 공기 시료를 채취해서 분석하므로, 이러한 단기간의 농도 평가는 수시로 변화하는 미생물의 농도를 파악하는데 어려움이 있다. 또한 신뢰도 있는 바이오에어로졸 측정을 위해서는 24시간 측정 및 실시간 모니터링 등으로 농도 수준을 파악 하여야 하나, 이는 기술적 한계 및 시료 수 증가에 따른 비용 상승 등의 현실적인 문제들로 인해 실행에 옮기기 어려운 실정이다. 따라서 정확도 높은 측정을 위해서는 최적의 측정시간 및 측정 횟수 선정 등이 대표성 있는 농도 수준 파악에 있어 가장 중요한 요인이 될 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구 결과에 따르면 부유 곰팡이의 경우 고유

량 기반의 샘플러(SAS, BUCK)보다 저유량 기반의 샘플러(Andersen)에서 실내·외 평균 농도가 높게 나타났다으며, 부유 박테리아의 경우 고유량 기반 샘플러(SAS, BUCK)와 저유량 기반 샘플러(Andersen)간의 유량 차이에 관계없이 실내·외 평균 농도가 유사한 경향을 보였다. 이는 공기 중 곰팡이 및 박테리아 등의 입경이 다른 미생물 입자의 포집 시 나타나는 차이로 해석 해볼 수 있다. 또한 부유 곰팡이 농도의 경우, 측정 시간대 및 재실자의 활동 특성, 환경 요인 등에 따른 농도 차이에도 불구하고 저유량 기반의 샘플러로 측정된 농도 값이 고유량 기반의 샘플러로 측정된 농도 값 보다 높은 농도를 보였다. 이것으로 보아 바이오에어로졸 농도에 영향을 미치는 요인으로 측정 시간대 및 재실자의 활동특성, 환경요인 등도 중요하지만, 포집 하고자 하는 미생물에 대한 선택적 샘플러 선정이 노출 수준 평가에 있어서 매우 중요한 요인으로 생각되며, 특히 부유 곰팡이의 농도를 측정할 경우 본 연구 결과와 같이 저유량 기반의 샘플러 보다 고유량 기반의 샘플러를 사용하였을 때 농도 값이 저 평가 될 가능성이 있어, 샘플러 선정 시 박테리아 등의 다른 공기 중 미생물 보다 상대적으로 신중하게 접근해야 할 것으로 사료된다. 아울러 어린이집을 대상으로 바이오에어로졸을 측정할 결과 어린이들의 생활 패턴 및 행동 특성에 따라 농도 값이 크게 변화하는 것을 확인하였다. 따라서 보다 정확하고 효율적인 결과를 얻기 위해서는 대상 어린이집의 시간표를 고려하여 활동 특성(생활패턴)에 맞는 측정 시간대의 선정이 필요할 것으로 판단된다.

본 연구 결과를 바탕으로 정리 해보면 바이오에어로졸 측정을 위한 샘플러 선정에 있어 공기 역학적 크기가 $2\ \mu\text{m}$ 이상인 곰팡이와 같은 부유 미생물 포집 시에는 저유량 기반의 샘플러를 사용할 것을 권장하며, 공기 역학적 크기가 $2\ \mu\text{m}$ 이하인 박테리아와 같은 부유 미생물 포집 시에는 고유량 기반의 샘플러를 사용하는 것이 적절한 것으로 사료된다. 특히 어린이집의 바이오에어로졸 농도 평가의 경우에는 어린이들의 활동특성을 신중히 고려하여 최적의 측정 시간대 선정이 필요할 것으로 생각된다. 아울러 미세먼지와 바이오에어로졸 농도 간의 높은 상관성을 고려할 때, PM_{10} 등의 미세먼지 농도를 같이 모니터링

한다면 향후 바이오에어로졸의 노출 수준 평가에 있어 효율적이고 정확도 높은 연구가 가능할 것으로 여겨진다.

감사의 글

이 논문은 환경부 지정 고려대학교 안암병원 천식 환경보건센터의 예산지원을 받아 작성 되었습니다. 아울러 한국연구재단 일반연구자과제(NRF-2015R1D1A1A09059364)의 지원을 받아 작성되었습니다. 이에 거듭 감사드립니다.

References

- Boudia N, Halley R, Kennedy G, Lambert J, Gareau L, et al. Manganese concentrations in the air of the Montreal(Canada) subway in relation to surface automobile traffic density. *Science of The Total Environment* 2006;366(1):143-147
- Cho JH, Paik NW. Assessment of airborne fungi concentrations in subway stations in Seoul. *Korea Journal of Environmental Health Sciences* 2009;35(6): 487-494
- Didier N, Jacques L, Adel B, Muriel B, Jacques C, et al. Comparative performance of impactor air samplers for quantification of fungal contamination. *Journal of Hospital Infection* 2001;47:149-155
- Griffiths WD, DeCosemo GAL. The assessment of bioaerosols: A critical review. *Aerosol Science and Technology* 1994;25(8):1425-1458
- Hinds WC. *Aerosol technology: properties, behavior, and measurement of airborne particles*, 2nd ed. New York: John Wiley and Sons Inc.; 1998. p. 394-396
- Institute of Medicine(IOM). *Damp Indoor Spaces and Health*. Washington, D.C.: National Academies Press.; 2004. p. 189-201
- International Organization for Standardization(ISO). *ISO 16000-18:Indoor air-Detection and enumeration of moulds-Sampling by impaction*; 2011. p. 1-20
- James P, Lodge JR. *Methods of Air Sampling and Analysis*. Lewis Publishers, New York.; 1989. p. 28-29
- Kideso J, Wrtz H, Nielsen KF, Kruse P, Wilkins K, et al. Determination of fungal spore release from wet building materials. *Journal of Indoor Air* 2003;13:148-155
- Korean Academy of Asthma, Allergy and Clinical Immunology (KAAACI), Korean Academy of Pediatric Allergy and

- Respiratory Diseases (KAPARD), National Strategic Coordinating Center of Clinical Research (NSCR), Korean Guideline for Asthma.; 2015. p. 11-14
- Marta SM, Maria MV, Guillermo C, Raquel P, Ricardo A, et al. Comparison of three high-flow single-stage impaction-based air samplers for bacteria quantification: DUO SAS SUPER 360, SAMPL' AIR and SPIN AIR. Journal of Anal Methods 2012;4:399-405
- Park JY, Kim SY. Study of Correlation between Bioaerosol and Indoor Environmental Factors in Elementary School Classroom. Journal of the Korean Society of Architectural Institute Conference 2007;27(1):829-832
- Park JH. Exposure assessment of biological agents in indoor environments. Korean Journal of Environmental Health Sciences 2009;35(4):239-248
- Roh YM, Kim JC, Lee CM, Kim YS, Ha MN, et al. A Survey of Distribution for Indoor Air Pollutants in Classrooms of Some Elementary Schools, Journal of Odor and Indoor Environment 2007;4(4):204-213
- Sahakian NM, qkrehd JH, Cox-Ganser JM. Dampness and mold in the indoor environment: implications for asthma. Immunology and Allergy Clinics of North America 2008;28:485-505
- Salvi S. Health effects of ambient air pollution in children. Pediatric Respiratory Reviews 2007; 8(4):275-280
- Stolwijk JA. Risk assessment of acute health and comfort effects of indoor air pollution. Annals of the New York Academy of Sciences 1992;641:56-62
- World Health Organization (WHO), Guidelines for indoor air quality: Dampness and mould. WHO Regional Office for Europe, Copenhagen Denmark.; 2009. p. 65-75