

연구논문

키즈카페의 폼알데하이드, 휘발성유기화합물, 미세먼지 및 총부유세균 분포 특성 연구

김태영[†] · 김미정 · 백민경 · 김수현 · 문재필 · 조진경 · 최유경 · 박종완 · 권보연

경기도보건환경연구원

A Study on the Distribution Characteristics of Formaldehyde, Volatile Organic Compounds, Particulate Matter, and Airborne Bacteria in Indoor Play Centers

Tae-young Kim[†], Mi-Jeoung Kim, Min-kyung Baek, Su-Hyun Kim, Jae-pil Moon, Jin-kyung Jo, Yu-kyung Choi, Jong-wan Park, and Bo-yeon Kweon

Indoor Air Quality Team, Gyeonggi Province Institute of Health and Environment, Gwonseon-gu, Suwon, Gyeonggi-do, Republic of Korea

Received September 13, 2022 / Revised October 25, 2022 / Accepted October 25, 2022

This study aimed to evaluate the indoor air quality differences at 19 indoor play centers of cafés and play areas in Gyeonggi-do where were 430 m² or larger. We examined concentrations of formaldehyde (HCHO), volatile organic compounds (VOC), particulate matter, and total airborne bacteria, and how their distributions varied with the number of visitors at the places. On weekdays, there were no statistically significant differences in mean indoor air pollutant concentrations between the cafés and play areas at 95% confidence intervals. However, significant differences were observed on weekends when the number of visitors increased. HCHO concentrations increased up to 159%, and VOC concentrations increased up to 210%. A higher increase rate of HCHO occurred at the cafés compared to the play areas since cooking operations were performed under natural ventilation. The PM₁₀ concentration increased by approximately 33.2%, with an increase of 49.2% in the play areas and a 18.3% increase in the cafés on weekends. PM_{2.5} concentration particularly increased during weekends in the cafés and play areas by 113% and 63.6%, respectively. During cooking operations, the concentration of gaseous and particulate pollution increased more in the air pollutant concentration of cafés, and the overall bacterial concentration increased during weekends due to higher numbers of visitors. Therefore, indoor play centers with cooking operations require adequate air quality management to mitigate the indoor pollution.

Key words: Indoor play center, IAQ, Formaldehyde, Particulate matter, Volatile Organic Compounds, Airborne bacteria

1. 서 론

영유아와 초등학교 저학년을 대상으로 하는 엔젤 산업의 시장 규모는 2002년 8조에서 2017년 40조로 급성장하였고,¹⁾ 그중 키즈카페는 대표적인 엔젤 사업으로 육아와 직장생활로 이중고를 겪고 있는 부모들을 위해 아이

들에게는 좋은 놀이시설을 제공하고 어른들에게는 휴식 공간을 주는 곳으로 꾸준히 그 수요가 증가하였다. 고용노동부 2018년 자료에 의하면 전국 키즈카페 매장 수는 2011년 1,130개, 2018년 2,300개였다.²⁾ 이렇게 2000년대 후반부터 키즈카페는 급증했지만, 실내공기질이나 시설에 대한 환경유해인자 규제와 같은 환경안전관리기준이

[†]To whom correspondence should be addressed.

미흡하여 많은 키즈카페가 일반음식점이나 기타 유원시설업 등으로 신고되었고, 유아 및 아동을 위한 별도의 기준이나 제재가 없는 상태였다. 국립환경과학원(2019)의 키즈카페 관련 보고서는 키즈카페의 폼알데하이드(HCHO)가 실내공기질 권고기준인 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 조사 대상 시설 20개소 중 10개소, 총휘발성유기화합물(VOCs)은 실내공기질 권고기준인 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 12개소가 초과했다고 보고했다.³⁾ 폼알데하이드(HCHO)는 대표적인 휘발성유기화합물(VOCs)로 국제 암 연구기구(IARC)에서 Group I 발암물질로 규정하고 있으며, 접착제, 페인트, 코팅제, 보존제, 가구, 바닥, 벽지, 마감재, 섬유류, 조리과정 등에서 뿜어져 나와 실내공기를 오염시킨다.⁴⁾ 또한 대부분의 휘발성유기화합물(VOCs)의 산화 과정에서 중간생성물로 생성된 2차 폼알데하이드(HCHO)는 O_3 과 OH라디칼을 생성(2.8 ppbv and $1.1 \times 10^7 \text{ molecule}/\text{cm}^3$ to the production of O_3 and HOx radical)한다고 알려져 있다.⁵⁾ 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)은 실내 청소나 살균에 사용되는 화학 용매, 방향제, 조리 시에 나오는 유기물, 그리고 실내 페인트에서 나오는 유기가스 등에서 방출되며 일부는 발암물질이고, 만성 또는 급성의 건강장애를 일으킨다.⁶⁾ 특히, xylene은 성장장애, 태아독성, 임신 독성 등을 나타낸다.⁶⁾ 따라서 유아동이 주로 이용하는 키즈카페 내 xylene은 더 위험적일 수 있다. 실내공기질 관리가 소홀할 경우, 키즈카페 내 가스상 오염물질 뿐만 아니라 입자상 오염물질과 생물학적 오염물질 역시 어린이들의 건강에 영향을 미칠 수 있다. 실내의 입자상 오염물질인 미세먼지(Particulate Matter, PM)는 대기 중 미세먼지가 기계식 환기 시설이나 자연환기를 통해 유입되거나 건물을 형성하고 있는 건축 구조물(envelope)에 존재하는 미세한 균열(cracks) 혹은 틈새를 통해 침투하면서 증가하며, 인간의 활동, 조리 등과 같은 실내의 오염원에 의해 더욱 상승한다.^{7,8)} 이런 미세먼지의 위해성은 호흡계 질환 및 폐암으로부터 심장병 및 심혈관계 질환까지 증가시킨다고 알려져 있으며, 최근에는 신경학 및 정신과 질환(치매, 우울증, 그리고 자폐증 등), 유산, 조산, 및 저체중아 출산 등에 대한 연구 결과도 보고되고 있다.⁹⁻¹⁶⁾ 생물학적 오염물질은 미생물(세균, 곰팡이, 바이러스) 또는 미생물 유래의 유기화합물 등에 의한 오염물질을 지칭하며, 전염성 질환, 알레르기 질환, 피부 질환, 호흡기 질환, 폐질환, 기관지 질환, 폐암을 비롯한 각종 질병을 유발하고 실내공기오염원의 5%-34%가 이에 기인한다고 한다.^{17,18)}

이런 어린이 건강피해에 대한 우려 속에 안전 사각지

대에 있던 키즈카페는 2019년 12월 31일 환경보건법 시행령¹⁹⁾이 개정되면서 어린이 활동공간이라는 법적인 테두리 안에 들어왔고, 2020년 4월 30일 430 m^2 이상의 실내어린이 놀이시설 즉 키즈카페가 실내공기질 관리 대상 시설로 지정되었다. 신규 지정된 키즈카페는 아직 실내공기질 특성에 관한 연구가 매우 미흡한 실정인 데 반해 다수의 놀이시설과 인테리어 공사로 휘발성유기화합물(VOCs)과 같은 내부 실내 오염원이 다량 존재하는 다중이용시설이다. 또한, 본 연구 수행 시 병행했던 키즈카페 이용자 37명을 대상으로 수행한 설문조사에 따르면 키즈카페는 3-5세의 어린이들이 가장 많이 이용하고 있었으며, 1회 평균 2시간을 머무르고 있는 것으로 나타났다.

본 연구는 영유아 어린이들이 자주 방문하는 키즈카페의 건강한 실내 환경을 조성하기 위한 기초연구 자료를 제공하기 위해 경기도 내 키즈카페를 공간별로 나누어 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, 폼알데하이드, 휘발성유기화합물, 총부유세균의 오염도 특성을 파악하고 이용객들이 증가하면서 이런 유해인자들이 어떻게 변화하는지를 알아보고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 공간별 오염도 특성

본 실험은 경기도 내 법정 실내공기질 검사 대상인 키즈카페 14개소를 대상으로 70개 지점에 대해 2021년 3월 31일부터 2021년 5월 17일까지 수행하였고, Table 1에 검사대상 키즈카페에 대한 시료채취일과 개업연도, 인근 도시 대기 측정소 위치 정보를 제시하였다. 측정 지점은 대조군으로 키즈카페 주변의 바탕 농도를 찾기 위해 옥상이나 건물 외부의 가든 등을 선정하였고, 실험군으로는 어린이들이 주로 이용하는 카페공간(휴게공간) 1지점과 아이들이 주로 활동하는 놀이공간 3지점, 키즈카페 1개소당 대조군 포함 총 5지점을 선정하였다. 연구방법은 환경실태조사와 오염원검사를 병행하였고, 오염원검사 항목은 PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, 폼알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합물(VOCs), 총부유세균수이다.

항목별 분석은 실내공기질공정시험기준²⁰⁾에 준하여 분석하였다. PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 는 teflon재질의 $2.0 \mu\text{m}$ pore size PTFE membrane filter(46.2 mm with PP support ring, GVS North America, USA)를 사용하여 유량 $5 \text{ L}/\text{min}$, $7 \text{ L}/\text{min}$ 으로 24시간 시료 채취하고 전후 여지 무게를 중량하여 측정하였다. 사용한 PM_{10} 시료채취기는 BMW-3500, Total Engineering Company Limited, Korea이고 $\text{PM}_{2.5}$ 는 BMW-3500, Total Engineering Company Limited,

Table 1. Information of sampling sites and a nearby air pollution monitoring station

Indoor play center	Sampling date	A nearby air pollution monitoring station	Open day
SNP	21/04/01	Jeongja-dong, Seongnam-si	2019
GPJ	21/04/06	Dang-dong, Gunpo-si	2017
GPC	21/04/07	Sanbon-dong, Gunpo-si	2016
AYS	21/04/13	Anyang 8-dong, Anyang-si	2018
AYC	21/04/14	Burim-dong, Anyang-si	2019
AYA	21/04/15	Burim-dong, Anyang-si	2019
AYT	21/04/20	Burim-dong, Anyang-si	2016
GMT	21/04/21	Soha-dong, Gwangmyeong-si	2015
ASC	21/04/29	Hosu-dong, Ansan-si	2019
AST	21/05/03	Hosu -dong, Ansan-si	2019
OSC	21/05/06	Osan-dong, Osan-si	2018
BCC1	21/05/11	Jung 2-dong, Bucheon-si	2001
BCK	21/05/12	Jung 2-dong, Bucheon-si	2016
BCC2	21/05/17	Sosabon-dong, Bucheon-si	2019
YIC	21/10/13, 21/10/16, 21/10/31	Suji, Younin-si	2019
SNC	21/10/14, 21/10/16	Sunae-dong, Seongnam-si	2018
ICD	21/10/19, 21/10/23	Bubal-eup, Icheon-si	2003
YJC	21/10/21, 21/10/23	Jungang-dong, Yeosu-si	2015
OSO	21/10/25, 21/10/30	Dongtan, Hwaseong-si	2018

Korea이다. 다만, 미세먼지의 대조군 자료는 Air Korea의 인근 도시 대기 측정소 자료를 이용하였다. 폼알데하이드 (HCHO)는 2,4-DNPH 카트리지(Sibata Scientific Technology Limited, Saitama, Japan) 앞단에 오존스크리버를 연결하여 시료를 1 L/min으로 30분간 2회 채취하고 High performance liquid chromatography(HPLC, Waters2695, Waters Corpotation, Milford, USA)로 분석하였으며 분석 조건은 Table 2과 같다. 휘발성유기화합물(VOCs)은 Tenax tube에 100 mL/min으로 30분간 2회 포집하여, Gas Chromatography/Mass Spectrometry-Thermal Desorption (GC/MS-TD, Scion SQ, Scion Instruments, Maryland, USA)로 n-헥산에서 n-헥사데칸 사이의 full scan 모드에서 검출되는 모든 크로마토그램 피크 면적 합을 full scan 모드의 톨루엔 감응계수를 이용하여 톨루엔 질량단위로 환산하여 정량하였다. m은 시료 중 휘발성유기화합물질량(ng)이고 a는 n-헥산에서 n-헥사데칸 사이의 피크 총면적, c는 톨루엔 검정곡선의 세로절편이며, b는 톨루엔 검

정곡선 기울기이다.

$$m = \frac{(a-c)}{b}$$

TD의 분석조건은 Tenax tube를 온도 280°C에서 유량 50 ml/min(He)으로 10분 동안 열탈착한 후, 저온 농축 트랩에서 흡착온도 -20°C로 재흡착을 유도하고 다시 300°C로 1분간 탈착하여 GC/MS로 분석했다. GC 분석조건은 주입기 온도 280°C, 운반기체 헬륨, 유량 1 ml/min, 컬럼은 길이 60 m, 안지름 0.25 mm의 High performance GC capillary columns(SC32128, Scion Instruments, Maryland, USA)을 사용하였으며, 온도 프로그램은 50°C에서 5분간 유지한 후 6°C/min로 160°C까지 올리고 다시 1분간 유지하고, 마지막으로 10°C/min으로 290°C까지 올린 다음 4분간 유지했다. 톨루엔 방법검출한계는 1.29 µg/m³, 정량한계는 4.12 µg/m³이다.

총부유세균은 총돌법(MAS-100Eco, Merk, Switzerland)을 사용하였으며, 총 공기 채취량은 50 L이고, 배지는 TSA(Tryptic Soy Agar)이다. 총부유세균의 배양온도는 35 ± 1°C이며 배양시간은 48시간이고, 배양 중 증식되는 세균의 확산으로 인해 계수가 곤란할 수 있으므로 24시간 단위로 증식 상태를 관찰하고 집락(colony)수를 세어 집락계수 환산표로 보정하여 농도 계산하였다.

Table 2. Instrumental conditions of LC for HCHO.

LC system	Waters 2695
Detector	PDA
Column	C18(3.9 mm × 150 mm)
Mobile phase	Water 40%, Acetonitrile 60%
Flow rate	1.0 mL/min
Injection volume	10 µl

2.2. 이용객 증가에 따른 유해물질 변화 비교 실험

비교실험은 이용객 증가에 따른 키즈카페 내 오염물질들의 변화를 파악하기 위한 실험으로 경기도 내 법정 실내공기질 검사 대상인 키즈카페 5개소를 대상으로 2021년 10월 13일부터 2021년 10월 31일에 평일과 주말 시설별로 2회 반복 수행하였다. 모든 비교실험은 공간별 오염도 특성 파악 실험과 중복되지 않는 5개소를 대상으로 진행하였고 Fig. 1에 공간별 오염도 측정 대상 키즈카페 14개소와 이용객 증가에 따른 유해물질 변화 비교 실험 대상 5개소 총 19개소의 위치를 표시하였다. 지점은 대조군 1지점과 카페공간 1지점, 놀이공간 1지점, 시설별로 총 3개 지점에 대해 2.1의 실험과 동일하게 수행하였다. 비교실험 시 키즈카페별 평일과 주말의 이용객 수 및 정보는 Table 3에 나타났다. 실험 기간에 실시한 설문조사 결과, COVID19 팬데믹이라는 특수한 상황과 맞물려 평일의 이용객 수는 모든 시설에서 주말보다 현저히 적었으며, 주말은 평일 대비 평균 3.7배, OSO 키즈카페는 14.6배 많았다.

주말과 평일의 오염물질 변화 특성에 대한 비교실험의 결과를 확인하기 위해 평일 가스상 오염물질 반복실험과 주말 생물학적 오염물질 반복실험을 추가로 진행하였다. 평일 가스상 오염물질 반복실험은 가스상 오염물질의 농도가 비교적 높고 기계식환기 장치만 가동되는 YIC 키즈카페를 평일에 2회 방문하여 폼알데하이드(HCHO)와

휘발성유기화합물(VOCs)의 농도를 측정하였다. 주말 생물학적 오염물질 반복실험은 평일과 주말의 이용객 차이가 가장 큰 YIC을 대상으로 주말에 2회 총부유세균을 측정하여 부유미생물의 변화를 확인하였다. 이용객 증가에 따른 미생물 군집의 변화를 알아보기 위해 총부유세균의 유전자 분석을 시행했다. 총부유세균은 플레이트에서 독립되어 보이는 집락을 대상으로 518F, 800R 프라이머를 이용하여 PCR를 시행한 후, sanger method 방식의 high throughput DNA analyzer(3730xl DNA Analyzer)로 16SrRNA 염기서열 분석하여 NCBI의 BLAST search를 통해 동정하였다.

2.3. 통계적 분석

키즈카페의 공간별 평균 차이를 비교하기 위해 각 실험군 데이터의 정규성(Shapiro-Wilk normality test)과 등분산성(Levene's Test)을 확인하였고, 카페공간과 놀이공간, 대조군(외기)의 평균 차이 검정 시 비모수 검정인 Kruskal-Wallis rank sum test를 사용하였다. 평균차이 검정 결과 $p < 0.05$ (평균이 같지 않다)일 때, 사후검정으로 Nonparametric Multiple Comparisons for relative contrast effects를 실시하였다. 외기와외의 상관분석은 70개 지점으로 중심극한정리에 의해 모집단이 어떤 분포를 가지고 있든지 간에 표본의 크기가 충분히 크다면(30개 이상) 표본평균들의 분포가 모집단의 모수를 기반으로 한 정규분포²¹⁾를 이루므로 Pearson's correlation coefficient를 산출하여 상관관계를 파악하였다. 통계적 검정은 공개 프로그램 R version 4.1.1를 사용하였고, 패키지는 readxl, dplyr, car, agricolae, exactRankTests를 이용하였으며, 95% 신뢰수준 하에서 통계적 유의성을 검정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 가스상 오염물질

공간별 오염물질의 분포를 알아보기 위해 대조군, 카페공간, 놀이공간 세 그룹에 대해 Shapiro-Wilk normality

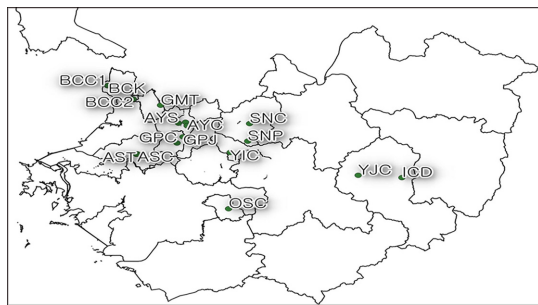


Fig. 1. Sampling sites in Gyeonggi Province.

Table 3. Indoor play centers for comparative experiments

Indoor play center	The number of visitors		Open day	Ventilation type	Cooking operations
	weekday	weekend			
ICD	5	27	2003	Natural	yes
OSO	2	20	2015	Natural	yes
SNC	3	61	2018	Mechanical& Natural	no
YIC	11	137	2019	Mechanical	no
YJC	5	20	2006	Mechanical	no

test와 Levene's Test를 하여 모든 그룹이 정규성을 따르지 않음을 확인하였고, 그에 따라 비모수검정법으로 평균 차이를 검정한 결과를 Table 4에 나타냈고, Table 5는 사후검정 결과이다. 평일 키즈카페의 폼알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합물(VOCs)은 $p < 0.05$ 로 대조군인 외기와는 평균 차이가 있으나 카페공간과 놀이공간은 95% 신뢰수준 하에서 통계적으로 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다. Fig. 2는 카페공간과 놀이공간, 외기의 오염 물질 분포를 나타낸 것으로 키즈카페 내 카페공간과 놀이공간의 폼알데하이드(HCHO)는 각각 평균 $16.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $16.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 휘발성유기화합물(VOCs)은 $329.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $367.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 외기 폼알데하이드(HCHO) $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 휘발성유기화합물(VOCs) $82.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높았다.

Fig. 3(a)는 공간별 폼알데하이드(HCHO)의 분포를 나타내는 것으로 4지점이 한 시설의 키즈카페이다. 폼알데하이드(HCHO)는 볼풀이 높다거나 정글집이 높다는 것과 같은 발생원에 따라 검출 농도가 공간별로 달라지는 특성은 없었고, 시설별로 공기 순환과 확산으로 어느 정도 농도 평형이 이루어져 있다는 것을 알 수 있었다. 선행연구에 의하면 폼알데하이드(HCHO)는 실내외의 높은 온도와 습도에서 그 방출 양이 증가하고, 실내에서 방출 수준이 반으로 감소하는데 2-4.4년이 걸리며, 신축 공동주택에서 10개월 이후부터 폼알데하이드(HCHO) 농도가 빠르게 감소한다고 한다.²²⁻²⁴⁾ 본 연구의 시험 대상 키즈

카페는 2019년 8월에 개업한 시설이 가장 최신 시설로 실험군 대부분이 폼알데하이드(HCHO) 반감기가 지났으며, 그 농도 분포는 $5.0\text{-}37.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다중이용시설 '나' 시설군 실내공기질 유지기준 $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 50%에도 못 미치는 수준이었다.

Fig. 3(b)는 공간별 휘발성 유기화합물의 분포를 나타낸 그래프이다. 휘발성유기화합물(VOCs)은 $18.4\text{-}748.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 농도 분포를 보였으며, 실내공기질 권고기준 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 넘는 지점은 26지점으로 전체 70지점의 37.1%였다. 휘발성 유기화합물은 키즈카페 내에서는 전체적으로 비슷한 농도 분포를 보였으나 일부 지점에서 같은 시설이지만 농도 편차가 있었다. 각 키즈카페별 평균과 편차가 큰 지점들은 다음과 같다. SNP 트랩펄린은 측정 지점이 SNP 키즈카페의 안쪽 모서리 부분이었으며, 농도는 $784.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 대비 18.9% 증가)로 평균 $659.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높았다. GPJ 편백룸은 벽으로 둘러싸인 다른 공간과 분리된 독립공간으로 창문 없이 입구만 트여있는 키즈카페 내 다른 지점과 농도 평형을 이루기 어려운 구조였으며, 평균 $179.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 38.7% 증가한 $249.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 측정되었다. AYC편백룸은 출입구와 가깝고 오픈되어 있는 공간으로 자연환기가 다른 지점보다 쉽게 일어날 수 있는 지점이었으며, AYC 키즈카페 평균 $245.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 낮은 $164.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 대비 33% 감소)가 검출되었다. AYC터치슬라이드는 AYC 키즈카페의 모서리 구석진 곳에 있는 시설로 앞에 설명한 SNP의 트랩펄린 위치와 전체 평면도상 비슷한 위치에 있는 지점(휘발성유기화합물 $354.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 시설 평균($195.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 79.5% 높게 검출되었다. AYA에어바운스도 'ㄷ'자 구조의 거의 말단에 위치한 시설로 한쪽 끝은 입구이고, 다른쪽 끝이 이 지점으로 기계식 환기가 똑같이 이루어졌다는 가정하에 공기 순환에 의한 농도 평형보다 발생원에 의한 축적이 되기 쉬운 지점이었으며, 평균 $407.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 38.9%

Table 4. Results of Kruskal-Wallis rank sum test

	Kruskal-Wallis chi-squared	df	p-value
PM ₁₀	26.487	2	1.77E-06
PM _{2.5}	5.1165	2	0.07744
HCHO	47.316	2	5.31E-11
VOCs	24.311	2	5.26E-06
Airborne bacteria	1.6597	2	4.36E-01

Table 5. Results of Nonparametric Multiple Comparisons for relative contrast effects

	Comparison	Estimator	Lower	Upper	Statistic	p-Value
PM ₁₀	p(cafe,play)	0.511	0.301	0.718	0.119	9.99E-01
	p(cafe,the_air)	0.900	0.714	0.970	4.040	1.29E-04
	p(play,the_air)	0.907	0.727	0.973	4.136	9.47E-05
HCHO	p(cafe,play)	0.485	0.316	0.657	-0.200	9.94E-01
	p(cafe,the_air)	0.002	0.000	0.061	-4.294	4.12E-05
	p(play,the_air)	0.004	0.000	0.051	-4.973	1.47E-06
VOCs	p(cafe,play)	0.549	0.369	0.717	0.630	8.35E-01
	p(cafe,the_air)	0.161	0.063	0.355	-3.675	6.10E-04
	p(play,the_air)	0.140	0.063	0.283	-4.813	2.95E-06

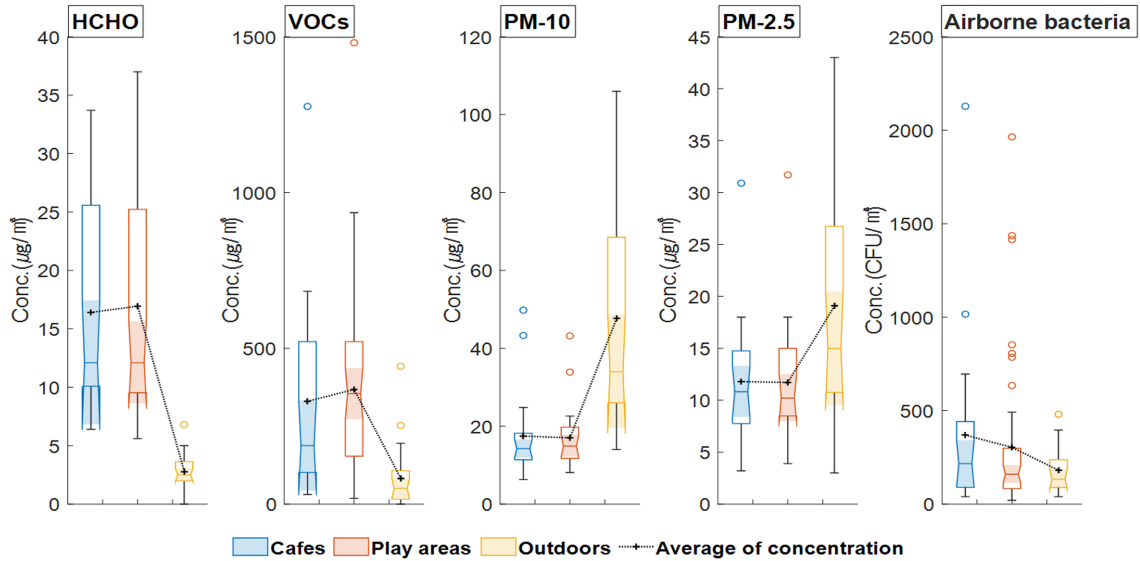


Fig. 2. Distribution of air pollutants in the cafés, play areas, and outdoors.

높은 565.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 검출되었다. GMT시네마존은 독립공간으로 휘발성유기화합물(VOCs) 농도가 평균 626 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비 17.8% 높은 737.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. BCC1편백은 오픈 공간이며, 바로 옆에 문이 설치되어 있어 외부의 공기 유입이 쉽게 이루어지는 곳으로 평균(406.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 63.4% 감소한 149.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 휘발성유기화합물(VOCs)이 측정되었다. BCK빅블럭은 벽면 외부에 실내공기를 외부로 배출하여 환기효과를 높이는 알루미늄 루바가 설치되어 있는 곳으로 시설 평균농도 396.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 10.5% 감소한 354.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 검출되었다. BCC2카페는 근처에 공기청정기가 설치되어 있고, 배기창이 설치되어 있는 지점으로 평균 529.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 현저히 낮은 167.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 대비 68.3% 감소)가 측정되었다. 이상의 지점들을 종합해보면 휘발성유기화합물(VOCs) 농도는 공간구조가 독립공간으로 이루어져 있거나 키즈카페 내 구석진 곳에서 평균 대비 17.8%-79.5% 증가하였고, 외부공기가 유입되는 곳에서 10.5%-68.3% 감소하였다.

‘x’로 표시된 부분은 주변에 공기청정기가 설치되었던 지점으로 AYA키즈카페는 이 시설 최고농도 대비 65.1%, BCC2 키즈카페는 22.5% 수준으로 휘발성유기화합물(VOCs)의 공기청정기에 의한 감소 효과가 폼알데하이드(HCHO)(시설 최고 농도를 100%로 봤을 때 폼알데하이드의 농도 AYA 87.9%, BCC2 87.8%)보다 뚜렷하게 나타났다. Park et al.,(2013)의 연구²⁵⁾에서도 24 가구(세대)를 대상으로 공기청정기 사용 전과 24주 사용 후 실내공기질을 비교하였을 때 실험군 18가구에서 입자상오염물

질 PM_{10} 은 56.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 31.54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 휘발성유기화합물(VOCs)은 1,594.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 256.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소한 반면, 폼알데하이드(HCHO)는 농도 변화가 거의 없었다는 유사한 결과를 발표했다. 일반적으로 공기청정기의 필터는 프리필터, 탈취필터, 집진필터 순으로 구성되어 있으며, 2차 필터인 탈취필터는 톨루엔, 폼알데하이드 등과 같은 가스상오염물질을 제거하기 위해 사용한다.²⁶⁾ 탈취필터의 주원료는 활성탄으로 흡착능력이 탁월하기는 하나 폼알데하이드와 같은 극성 물질의 흡착은 상대적으로 어려우며, 흡착능이 높은 비극성 물질과 극성 물질이 동시에 활성탄 흡착층에 유입될 경우 흡착능의 차이로 인해 기흡착된 극성 물질이 탈착(desorption)되기도 한다.²⁷⁾ 공기청정기에 의한 폼알데하이드 제거효율이 휘발성유기화합물 제거효율보다 낮은 원인은 키즈카페 내 비극성 휘발성유기화합물과 극성인 폼알데하이드의 화학적 특성 때문인 것으로 판단된다.

키즈카페별로 가스상 유해물질의 농도가 다른 원인을 규명하기 위해 같은 프랜차이즈 업체의 키즈카페만을 추출하여 키즈카페의 면적과 비교하였고 Fig. 4에 도시하였다. 동일 프랜차이즈의 키즈카페를 선택한 이유는 비슷한 유형과 재질의 놀이시설이 설치되어 오염물질의 다양성보다는 발생량의 차이를 볼 수 있을 것으로 판단했기 때문이고, 놀이시설 수로 관련성을 찾기보다 면적으로 발생량을 비교하는 것은 놀이시설의 수는 하나인데 키즈카페 면적이 커짐에 따라 그 크기가 커져 오염물질 발생량이 증가하는 경우를 보완하기 위함이다. 선택된 프랜차이즈

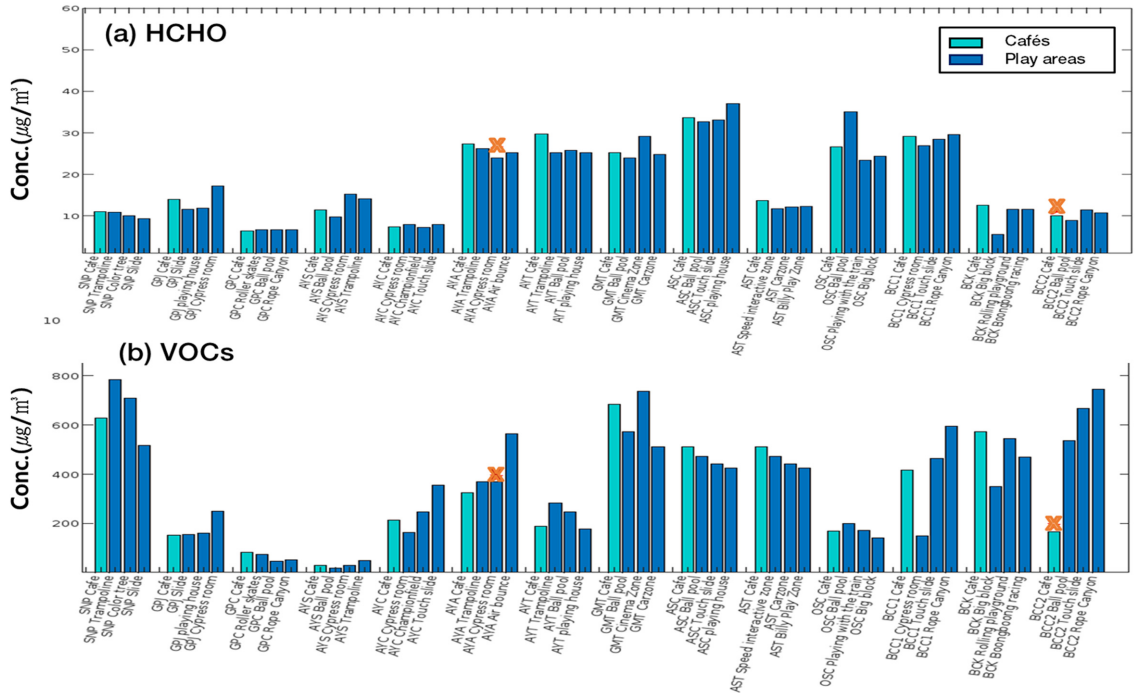


Fig. 3. Gaseous pollutant concentrations in indoor play centers on weekdays: X indicates locations with an air purifier.

업체의 키즈카페는 카페공간과 놀이공간이 개방되어 있고 놀이공간의 놀이시설들이 한 공간에 놓여있는 벽이 없는 구조를 하고 있다.

Fig. 4(a)에서 보는 것과 같이 면적이 커지면 폼알데하이드(HCHO)의 농도가 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 즉, 발생이 많은 시설이 적은 시설보다 평균 농도가 높게 나타났다. 반면 휘발성유기화합물(VOCs)은 폼알데하이드(HCHO)보다 경향성이 떨어졌으며, 발생량보다는 다른 요인들 환기나 공기청정기 사용 등에 영향을 많이 받는 것으로 추정된다(Fig. 4(b)). 가스상 유해 물질은 내부 발생원에 의해 실내 오염도가 영향을 받음을 알 수 있었고, 향후 키즈카페 실내공기 중 휘발성유기화합물(VOCs)에 의한 2차 폼알데하이드(HCHO)의 생성 기여율을 평가해 볼 필요성이 있다.

키즈카페 내 이용객 증가에 따른 평일과 주말 폼알데하이드(HCHO) 비교실험 결과는 Fig. 5(a)와 같다. 평일 폼알데하이드(HCHO)는 8.1-12.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위였고, 주말은 8.5-27.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 키즈카페별로 살펴보면 ICD, OSO, YJC 키즈카페는 주말에 폼알데하이드(HCHO) 농도가 눈에 띄게 증가했지만 SNC, YIC는 감소하였다.

차량 통행량이 많은 도로변에 위치한 ICD 키즈카페는 2층은 놀이공간, 3층은 33 m^2 의 조리시설을 갖춘 카페공

간과 놀이 공간이 혼재된 시설로, 기계식 환기 시설은 없고 창문을 통한 자연환기만 가능한 곳이다. ICD의 주말 카페공간 폼알데하이드(HCHO) 농도는 평일보다 15.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가한 27.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 놀이공간은 4.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가한 12.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 외기도 주말 통행량 증가로 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하였으나 바탕 값으로 주말 측정값을 보정하더라도 주말 측정값은 카페공간 13.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평일 대비 112.6%), 놀이공간 2.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평일 대비 29.6%) 증가하였다. 선행연구²⁸⁻³⁰에 의하면 조리 시 연소과정과 조리과정에서 폼알데하이드(HCHO)가 발생하며, 조리기기별로는 오븐에서 쿡탑버너나 브로일러보다 폼알데하이드 농도가 높게 나타나고, 튀기기와 같은 조리방법에서 발생하는 요리 연기(cooking fume)중 휘발성유기화합물(VOCs)로 알데하이드류, 알코올류, 케톤류 등을 언급하고 있다. 이상의 선행연구와 ICD 키즈카페의 데이터를 종합해 볼 때 3층 카페공간의 주말 폼알데하이드(HCHO) 증가는 조리 음식 판매 증가에 따른 조리 과정 중 발생하는 1차 폼알데하이드(HCHO)가 주원인으로 판단되며, 2층의 폼알데하이드(HCHO) 증가요인은 창문이나 계단을 통해 3층의 폼알데하이드(HCHO)가 유입된 것으로 판단된다. OSO는 외부에 바베큐시설이 갖추어진 시설로 창문과 공기청정기가 없으며, 출입문에 의한 자연환기만 있는 시설로 입

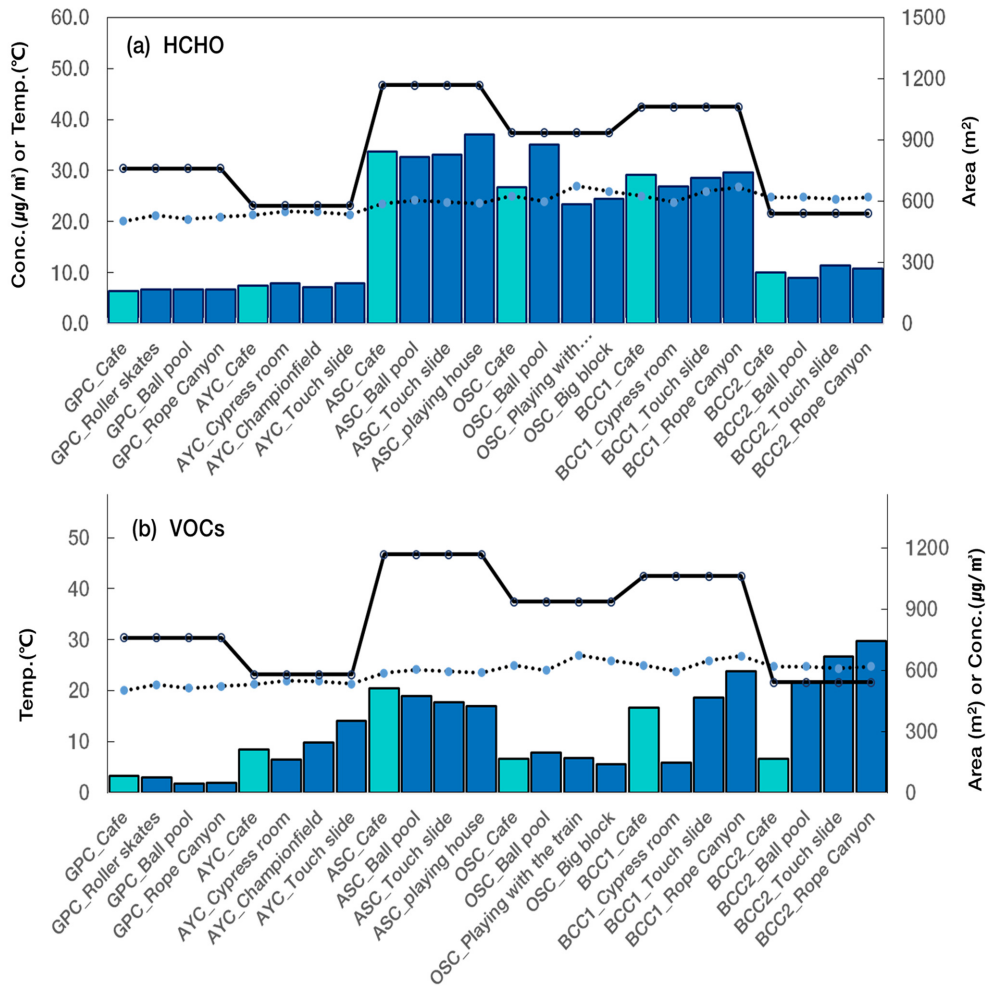


Fig. 4. Relationship of square area and gaseous pollutant concentrations in indoor play centers on weekdays.

구의 앞쪽이 카페공간, 뒤쪽이 놀이공간이다. 주말에 폼알데하이드(HCHO)는 카페공간 158.5%(21.2 µg/m³), 놀이공간 124.0%(21.5 µg/m³) 증가하였다. 주말 바비큐시설의 사용이 폼알데하이드(HCHO)의 증가 원인으로 보인다. YJC 키즈카페는 도심 외곽에 있는 아울렛 내 푸드코트 위층에 자리 잡고 있으며, 측정 시간대는 점심시간대로 조리음식 판매 증가에 따른 폼알데하이드(HCHO) 배출이 외기의 상승을 가져온 것으로 보인다. 외기의 값을 바탕으로 보정할 경우 YJC 폼알데하이드(HCHO)는 증가로 판단하기 어렵다(카페공간 1.0 µg/m³ 감소, 놀이공간 1.5 µg/m³ 증가). SNC와 YIC의 폼알데하이드(HCHO) 감소는 주말 외기의 농도가 평일보다 SNC는 3.4 µg/m³, YIC 5.3 µg/m³ 낮았고, SNC 카페공간과 놀이공간에서 각각 2.4 µg/m³, 0.7 µg/m³, YIC는 1. µg/m³, 1.4 µg/m³로

외기의 농도 차이보다도 적게 낮아진 것을 고려하면 인 구밀집도 증가에 따른 감소로 보기 어렵고 오히려 약간 상승이나 보합으로 판단함이 적합할 것이다.

Park et al.,(2013)의 연구³¹⁾는 키즈카페 2개소를 대상으로 평일과 주말의 폼알데하이드(HCHO)의 농도 변화를 간이 가스 측정기를 이용하여 비교하면서 이용고객이 많아질수록 놀이기구를 사용하는 빈도가 높아지고 그 과정에서 외부 압력으로 인해 시설물에 내재되어 있던 유해물질이 추가적으로 방출될 수 있음을 보여 주었으나, 본 비교실험에서는 주말에 놀이공간보다 카페공간의 폼알데하이드(HCHO) 증가세가 더 뚜렷하게 나타나고, 조리과정과 연관이 적은 시설에서는 그 농도가 감소하거나 약간 상승한 것으로 나타나 외압에 의한 내재된 폼알데하이드(HCHO) 방출보다 조리과정에서 방출되는 양이 실

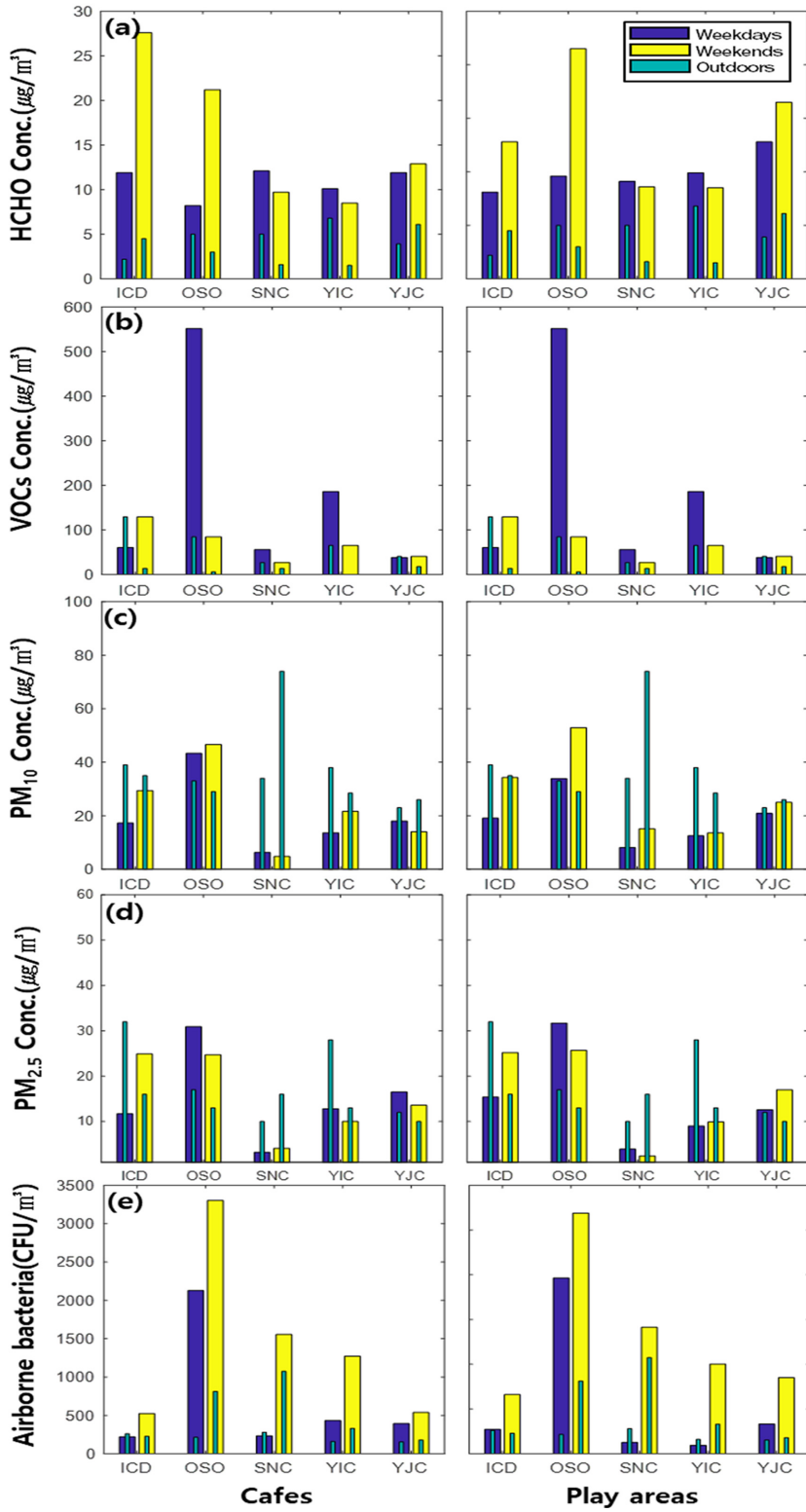


Fig. 5. Comparison of contaminant concentrations on weekdays and weekends: (a) Formaldehyde, (b) Volatile Organic Compounds, (c) PM₁₀, (d) PM_{2.5}, (e) Airborne bacteria.

내공기질에 더 큰 영향을 주고 있음을 보여줬다.

Fig. 5(b)는 휘발성유기화합물(VOCs)의 주말과 평일의 비교실험 결과이다. 평일에 OSO의 고농도 휘발성유기화합물(VOCs) 검출이 관찰되었으며, 이용객 증가에 따른 뚜렷한 휘발성유기화합물(VOCs) 농도변화는 관찰되지 않았다. 평일 OSO의 휘발성유기화합물(VOCs) 농도는 카페공간 $551.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 놀이공간 $935.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 출입구에서 30 m 정도 떨어진 외기에서 $195.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 개별 휘발성유기화합물질로 정량 했을 때는 xylene $240.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethylbenzene $48.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene $14.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (놀이공간)이 검출되었고, 시료채취 시점이 키즈카페 출입구 바로 옆에서 방수 페인트칠을 마친 직후임을 고려해 봤을 때 외부 유입에 의한 농도 상승으로 판단된다. 자연환기만 이루어지는 ICD는 주말에 카페공간만 휘발성유기화합물(VOCs)농도가 평일의 2.1배($129.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 높게 측정되었다. 이는 폼알데하이드(HCHO)와 같이 주말의 조리음식 판매 증가에 따른 연소과정 중 휘발성유기화합물(VOCs) 방출이 증가 요인으로 사료된다. 그러나 휘발성유기화합물(VOCs)은 폼알데하이드(HCHO)와 달리 주말의 상승세가 다른 키즈카페에서는 관찰되지 않았다. 이상의 결과들로 볼 때, 휘발성유기화합물(VOCs)은 기계식 환기 장치에 의한 감소가 폼알데하이드(HCHO)보다 더 클 것으로 추정된다. 이를 확인하기 위해 기계식 환기 장치만 작동하며 평일에 가동률이 주말보다 낮은 YIC의 폼알데하이드(HCHO)와 휘발성유기화합물(VOCs) 농도를 평일 2회 방문하여 반복 측정하고 농도변화를 비교하였다(Fig. 6). 폼알데하이드(HCHO)는 그 농도 차이가 약 2배, 휘발성유기화합물(VOCs)은 약 7배 났다. 측정 시점의 외부 가스상오염물질의 농도는 1차 실험(폼알데하이드 $6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 휘발성유기화합물 $106.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 2차 실험(폼알데하이드 $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 휘발성유기화합물(VOCs) $59.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 더 낮았고, 키즈카페 내 환경조건은 1차 때 온도 21.8°C , 습도 41%, 2차 때는 22.2°C , 58%였다. 신축 공동 주택에서 60%와 80%의 습도 차이와 폼알데하이드(HCHO) 방출량과의 상관관계를 연구한 논문²³⁾에 의하면 실내의 20% 습도 차이는 폼알데하이드(HCHO) 방출량에 영향을 주지 않는다고 했다. 또한, 이번 반복실험 결과는 기존의 실내주차장에서 이루어진 환기시설 작동 유무에 따른 휘발성유기화합물(VOCs) 저감효과를 측정된 결과 미가동 시 평균 $1401.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 작동 4시간 후 $290.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다는 연구결과와 일치했으며, 국립환경과학원 2019년 보고서에서도 이번 반복 실험과 유사한 데이터를-폼알데하이드(HCHO)와 휘발성유기화합물(VOCs) 농도가 높은 5개 키

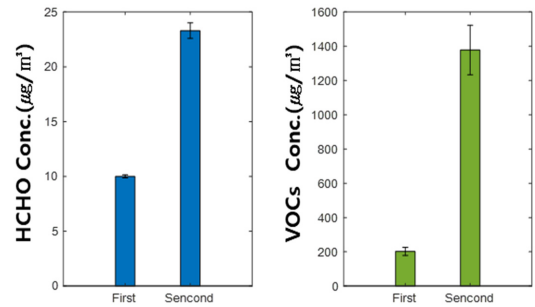


Fig. 6. Concentration of HCHO and VOCs measured repeatedly in YIC indoor play center on weekdays.

즈카페의 반복측정 시 폼알데하이드(HCHO)는 2.1 -5.8 배, 휘발성유기화합물(VOCs)은 3.7-10.5배 편차가 있음 확인할 수 있었다.^{3,32)} 즉, 기계식 환기설비가 가동되면 외기가 유입되면서 실내의 가스상오염물질은 희석이 일어나며, 외기의 농도와 실내의 농도차이가 폼알데하이드(HCHO)보다 큰 휘발성 유기화합물(VOCs)이 환기설비가 가동 후 희석배율이 높아져 농도변화가 더 크게 나타남을 유추해 볼 수 있다. 또한 박진철(2004)의 연구에 의하면 폼알데하이드(HCHO)는 목재 가구가 주 발생원이며, 페인트는 휘발성유기화합물(VOCs) 방출량이 높은 반면 폼알데하이드(HCHO)의 방출량은 낮은 것으로 나타났고, 리노름 바닥재에는 톨루엔이, 고무바닥재에는 스틸렌이 다량 방출된다고 했다.³³⁾ 키즈카페는 특성상 목재가구의 사용량이 적으며, 놀이시설의 인테리어와 안전 문제로 인해 페인트의 사용량과 탄성있는 바닥재를 많이 사용한다. 이런 이유에서 키즈카페 내 휘발성유기화합물(VOCs)의 농도는 폼알데하이드(HCHO)보다 높게 검출될 수 밖에 없다.

위의 확인 실험과 선행연구로부터 환기시설의 가동률 차이에 의한 휘발성유기화합물(VOCs) 농도 변화는 폼알데하이드(HCHO)보다 크며, 발생원에 의한 농도 변화보다도 크다는 것을 알 수 있었다.

3.2. 입자상 오염물질

2.1 실험 결과 키즈카페의 입자상 오염 물질은 평균 PM_{10} $16.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ $10.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대조군(외기) PM_{10} $55.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ $20.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 22.9%, 51.8% 수준으로 외기보다 낮은 수준이었다. 각 키즈카페의 입자상 오염물질 I/O비를 구하여 평균하였을 때 PM_{10} 은 0.4로 실내오염원이 없을 때 실내의 먼지농도가 대기 중의 농도와 평형상태에 이르렀을 때 평형상태의 I/O비 평균값 범위 약 0.15-0.50 안에 있었으나, $\text{PM}_{2.5}$ 는 0.9로 I/O비 평균값 범

위 0.35-0.85보다 높아 실내에 오염원이 존재할 가능성을 시사했다.³⁴⁾ 입자상 오염물질의 평일의 공간별 차이를 비교하기 위한 평균차이검정(Kruskal-Wallis rank sum test)과 사후 검정 결과, 카페공간과 놀이공간의 입자상 오염물질의 농도는 $p > 0.05$ 로 통계적으로 유의미한 차이가 없었다(Fig. 2, Table 4, Table 5).

2.2의 주말과 평일의 비교실험결과, 입자상 오염 물질은 이용객 증가에 따른 영향을 받는 것으로 나타났다. Fig. 5(c)은 평일과 주말에 PM_{10} 의 농도 변화를 공간별로 나타낸 것으로 실험 대상 모든 키즈카페에서 주말 PM_{10} 농도($25.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 평일 PM_{10} 농도($19.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 대비 약 33.2% 상승했다. 특히, PM_{10} 증가는 어른들이 주로 이용하는 카페공간($23.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 18.3% 상승, 아이들이 활동하는 놀이 공간($28.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 49.2% 상승으로 놀이공간에서 두드러졌다. 실내의 미세먼지는 대기 중의 미세먼지의 실내 유입과 실내에 존재하는 오염원으로서 실내 조리, 연소, 실내의 미생물 오염 그리고 실내 거주자의 행동(진공 청소, 흡연 등)에 영향을 받을 수 있고, 사람 자체도 중요한 실내 오염원이다.^{16,35)} 일반적으로 모든 사람은 2-4주 이내에 피부 최외각의 모든 세포가 벗겨지고 새로 재생되고 분당 20만에서 60만 개의 피부 조각(skin scales or skin flakes)이 벗겨져 공기 중으로 배출된다고 한다.^{36,37)} 이런 피부조각은 주로 입자의 크기가 비교적 큰 PM_{10} ¹⁶⁾으로 사람 피부에 서식하는 세포수의 10배의 미생물을 포함한다. 카페공간은 어른들이 주로 정적으로 머무르는 곳이고, 놀이공간은 아이들이 움직이는 공간으로 아이들의 활동에 의해 의류 등에 묻어 있다 떨어져 나온 미세먼지와 공기 중으로 배출된 인간의 피부조각들이 카페공간보다 훨씬 많았을 것으로 보이며, 놀이공간의 PM_{10} 농도가 카페공간의 PM_{10} 농도보다 높은 증가 원인으로 판단된다. 피부조각에 의한 PM_{10} 의 증가는 총부유세균의 미생물 동정으로 확인할 수 있었다.

Fig. 5(d)은 이용객 증가에 따른 $PM_{2.5}$ 의 농도변화를 도시한 것이다. 비교실험 키즈카페 중 조리시설이 유일하게 내부에 있는 ICD는 주말에 카페공간의 $PM_{2.5}$ 농도가 $24.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일의 $PM_{2.5}$ 농도보다 $13.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (113% 상승) 높았고, 놀이공간의 $PM_{2.5}$ 도 $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일 농도보다 $9.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (63.6% 상승) 높았다. 카페공간의 $PM_{2.5}$ 가 놀이공간보다 높게 상승한 것은 주말에 카페공간의 휘발성유기화합물(VOCs)이 $129.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일의 2.1배가 높았지만, 놀이공간은 $23.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일보다 $15.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 낮고, 공간이 2층, 3층으로 분리된 것으로 봤을 때, 이용객 증가에 따른 직접적인 영향과 조리과정에서 발생한 휘

발성유기화합물(VOCs) 의한 2차 유기먼지의 영향을 동시에 받은 것으로 판단된다. 입자상 오염 물질은 일차먼지와 이차먼지로 나눌 수 있는데, 이차먼지는 가스상 물질이 광화학반응을 거쳐 ‘먼지’로 변화되는 과정을 거쳐 생성된 먼지를 말한다.¹⁶⁾ 이런 이차 먼지가 생성되기 위해서는 전구물질(precursor), 산화제(oxidant), 그리고 에너지라는 세 가지 조건이 갖춰져야 한다. 실내에는 휘발성유기화합물(VOCs)이라는 전구물질이 존재하고, 화학 용매 혹은 살균제를 사용한 청소 후에 발생하는 유기 과산화물이나 질산염, 2차 폼알데하이드(HCHO)에 의한 OH 라디칼(radical), 혹은 오존 등과 같은 산화제가 있으며, 직간접적으로 들어오는 햇볕이라는 에너지원이 있다.^{38,39)} 휘발성유기화합물(VOCs)과 같은 전구물질은 산화제를 만나 에너지를 얻으면 극성이 있는 분자 critical nuclei가 형성되고 이 critical nuclei를 중심으로 응축과 응집이 거의 자동으로 일어나 실내의 가스상 유해물질은 주로 $PM_{2.5}$ 로 변화하게 된다.^{36,40)} 선행연구 결과에 따르면, 유기화합물이 풍부한 실내에서 $PM_{2.5}$ 가 새롭게 분비되거나 생성되고, 대기에서 실내로 유입된 $PM_{2.5}$ 도 실내에서 여러 화학 반응을 거쳐 실내 $PM_{2.5}$ 에 유기물질의 질량이 대기 $PM_{2.5}$ 보다 1.5-2배 가까이 높아진다고 한다.¹⁶⁾ 추후 키즈카페뿐만 아니라 다중이용시설의 시설군별 PM의 성분을 분석하여 비교해볼 필요성이 있다.

OSO는 평일 $PM_{2.5}$ 가 카페공간 $30.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 놀이공간 $31.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주말 카페공간 $PM_{2.5}$ $24.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 놀이공간 $PM_{2.5}$ $25.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 각각 $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았고, 평일 휘발성유기화합물(VOCs) 농도도 카페공간 $551.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 놀이공간 휘발성유기화합물(VOCs) $935.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주말보다 각각 6.5배, 9.9배 높았던 반면, 폼알데하이드(HCHO)는 주말에 평일보다 카페공간 $13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 놀이공간 $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가한 사실로부터 최소한 주말 대비 평일 $PM_{2.5}$ 의 증가분 카페공간 $6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 놀이공간 $6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 2차 유기 먼지에 의한 증가임을 유추해 볼 수 있다. 이상의 상반된 결과는 평일 측정 당시 방수포인트칠을 막마친 상태로 시료 채취 시간이 가스상오염물질은 1시간이며, $PM_{2.5}$ 는 24시간으로 휘발성유기화합물(VOCs)에 의해 생성된 폼알데하이드(HCHO)는 1시간 동안의 발생량이 반영된 것이고, 2차 유기 먼지는 24시간 동안 발생한 양이 정량된 것이기 때문으로 판단된다. YIC는 외기의 $PM_{2.5}$ (평일 $28.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 주말 $13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 평일에 높고, 주말과 평일의 이용객 차이는 실험군 중 가장 컸던 곳으로, 어른들이 머무르는 카페공간의 $PM_{2.5}$ 는 외기처럼 평일의 $PM_{2.5}$ 가 $12.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주말의 $PM_{2.5}$ 보다 20% 높아

이용객 증가에 따른 실내오염원 증가보다 외기의 영향을 더 받았고, 아이들이 뛰어노는 놀이공간의 $PM_{2.5}$ 는 주말에 $9.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일 $PM_{2.5}$ 보다 10% 더 높아 이용객 증가에 따른 실내오염원의 증가가 외기의 영향보다 더 컸다. YJC의 주말과 평일의 외기 $PM_{2.5}$ 농도는 각각 $10.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $12.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일 $PM_{2.5}$ 가 다소 높았으나 비슷한 수준이었으며, 도심 외곽의 아울렛에 위치한 키즈카페로 주로 아이들이 놀이공간을 이용하고 카페공간을 이용하는 어른들은 적은 곳이었다. 카페공간은 평일 $PM_{2.5}$ 농도가 $16.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 주말 $PM_{2.5}$ 보다 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았으며, 놀이공간은 주말 $PM_{2.5}$ 가 $17.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평일 $PM_{2.5}$ 보다 $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (34.9% 상승) 높아 놀이공간이 이용객 증가에 따른 영향을 카페공간보다 더 받았다. Fig. 5(c)과 Fig. 5(d)의 앞 두 키즈카페 ICD와 OSO는 영업시간 동안 창문을 통해 자연 환기만 하는 곳이고, 뒷부분의 YIC, YJC는 기계식 환기시설만 가동되는 키즈카페다. 가운데 SNC는 기계식 환기시설과 자연환기가 동시에 이루어지는 곳으로 실험군 중 PM의 농도가 가장 낮았다. 또한, 기계식 환기가 이루어지는 키즈카페가 자연식 환기에만 의존하는 키즈카페보다 PM 농도가 낮았다.

전체적으로 비교실험의 평일 PM_{10} I/O비는 0.37, $PM_{2.5}$ I/O비는 0.62였고, 주말 PM_{10} I/O비는 0.70, $PM_{2.5}$ I/O비는 1.39로 이용객 증가에 따른 키즈카페 내의 오염원의 변화가 PM을 생성하고 있음을 알 수 있었다.

3.3. 생물학적 오염물질

총부유세균의 공간별 분포를 분석한 결과, 평일 카페공간과 놀이공간의 총부유세균수는 $p > 0.05$ 로 평균 차이가 없는 것으로 나타났으나 외기보다는 실내가 총부유세균이 많았고, 그 수는 외기 총부유세균수와 Pearson's correlation coefficient가 0.58로 서로 상관관계가 있다고 나타났다. 카페공간의 총부유세균수는 평균 $369 \text{CFU}/\text{m}^3$, 놀이공간은 $304 \text{CFU}/\text{m}^3$, 외기는 $181 \text{CFU}/\text{m}^3$ 이었다 (Fig. 2, Table2, Table3).

주말과 평일 비교실험 결과 총부유세균은 Fig. 5(e)와 같이 모든 지점에서 인구밀집도가 높은 주말에 1.4-11.2 배 증가하였고, 놀이공간이 카페공간보다 총부유세균수 증가율이 더 높았다. OSO는 키즈카페 안쪽에 동물사육장이 있는 곳으로 외기의 총부유세균수($214 \text{CFU}/\text{m}^3$)가 다른 키즈카페와 비슷했던 평일에도 $2,128 \text{CFU}/\text{m}^3$ 로 타 키즈카페보다 월등히 높았다. 공간별 분포 특성에 관한 실험에서도 애완동물의 동반입장이 가능한 대형쇼핑몰 안에 위치한 BCC2 키즈카페에서 평균 총부유세균수가 552

CFU/m^3 로 공간별 분포 특성 실험군 중 가장 높았다. 키즈카페 내 총부유세균수는 동물의 영향을 많이 받고 있음이 드러났다. SNC는 평일의 평균 총부유세균수가 $180 \text{CFU}/\text{m}^3$ 로 실험군 중 가장 낮았으나 주말 총부유세균수는 카페공간 6.7배, 놀이공간 11.2배로 실험군 중 가장 많이 증가했다. SNC의 주말 외기의 총부유세균수가 가장 높았고 증가율은 최고였으나 총부유세균 수는 가장 높지 않았던 것을 고려해 볼 때 총부유세균은 외기의 영향과 인구밀집도의 영향을 동시에 받고 있음을 알 수 있었다. 비교실험은 대체로 주말 외기의 총부유세균수가 평일보다 높았다. 그래서 주말 총부유세균수의 증가가 이용객 증가에 따른 영향인지 외기의 영향인지를 좀 더 확인하기 위해 주말과 평일의 이용객 차이가 가장 컸던 YIC를 대상으로 주말 총부유세균수를 재측정하였다. 재측정 결과 대조군(외기), 카페공간, 놀이공간의 총부유세균수가 각각 $20 \text{CFU}/\text{m}^3$, $946 \text{CFU}/\text{m}^3$, $982 \text{CFU}/\text{m}^3$ 이었으며, 평일 총부유세균수는 $159 \text{CFU}/\text{m}^3$, $432 \text{CFU}/\text{m}^3$, $93 \text{CFU}/\text{m}^3$ 였다. 이상의 결과로부터 이용객의 증가가 주말 총부유세균수 증가의 주요인임을 확인할 수 있었다(Fig. 7).

YIC 키즈카페의 평일과 주말 부유세균 동정 결과, 평일에는 *Micrococcus*과 *Staphylococcus*속 세균들이 주로 발견되었고, 주말에는 *Brachybacterium*, *Chryseobacterium*, *Corynebacterium*, *Dermacoccus*, *Gordonia*, *Janibacter*, *Massilia*, *Microbacterium*, *Micrococcus*, *Rhodobacterales*, *Roseomonas*, *Roseovarius*, *Staphylococcus*속 세균들이 다양하게 발견되었다. 특히, *Corynebacterium*, *Staphylococcus*는 사람과 관련된 세균⁴¹⁾으로 주말 총부유세균의 증가 원인을 설명해준다.

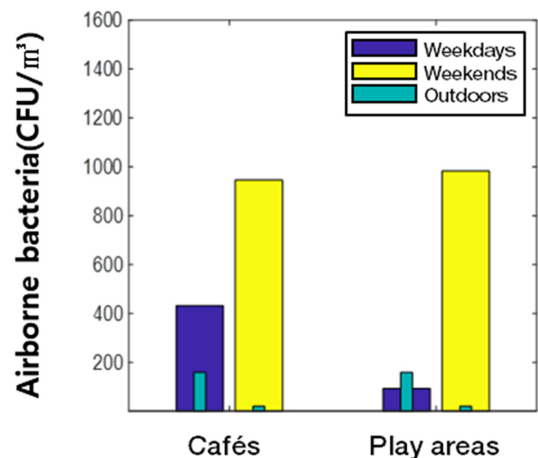


Fig. 7. Comparison of airborne bacteria concentrations in YIC indoor play centers on weekdays and weekends.

실내에서 부유세균의 발생은 사람 피부와 동물에 서식하는 미생물의 공기 중 배출, 세균 확산을 촉진하는 일상적 활동, 세균의 영양원 역할을 하는 음식물, 이불, 옷 등과 같은 유기성 재료들의 취급에 의한 것과 공기 흐름에 의해 유입되는 실외 세균에 의한 것으로 알려져 있다.¹⁸⁾ 본 총부유세균 비교실험은 이런 내용들을 종합적으로 보여주는 데이터로, 키즈카페 내 총부유세균수는 외기의 농도가 높을 때 높은 경향이 있었고, 이용객이 증가하면서 증가하였으며, 동물이 주변에 있을 때 높았다. 또한, 어린이들의 활동이 많은 놀이공간의 총부유세균수 증가율이 카페공간보다 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 키즈카페를 공간별로 나누어 오염물질의 분포 특성을 파악하고 이용객 증가가 오염물질에 미치는 영향을 알아보았다.

평일 카페공간과 놀이공간의 오염물질 분포는 통계학적 평균차이검정결과, 카페공간과 놀이공간의 폼알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합물(VOCs), PM₁₀, PM_{2.5}, 총부유세균수는 $p > 0.05$ 로 95% 신뢰수준 하에서 통계적으로 유의미한 차이가 없는 것으로 나타났다.

가스상 오염물질은 외기보다 키즈카페 내 오염도가 높았으며, 폼알데하이드(HCHO)는 5.0-37.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 휘발성유기화합물(VOCs)은 18.4-748.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에 있었다. 가스상 오염물질은 실내 공간의 구조적 차이에 의해 독립공간이거나 구석진 지점에서는 17.8%-79.5% 증가하였고, 외부공기의 유입되는 지점에서는 10.5%-68.4% 감소하였다. 또한, 조리시설을 갖춘 키즈카페는 이용객이 많을 때 조리음식 판매 증가에 따라 폼알데하이드(HCHO)는 158%, 휘발성유기화합물(VOCs)은 210%까지 상승했다.

입자상 오염물질은 키즈카페 19개소 평균 PM₁₀ 17.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM_{2.5} 11.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 외기의 35.0%, 62.1% 수준이었으며, 평일 PM₁₀ I/O비는 0.37, PM_{2.5} 0.62였고, 주말 PM₁₀ 0.70, PM_{2.5} 1.39로 이용객 증가에 따른 키즈카페 내의 오염원의 변화가 PM을 생성하고 있음을 알 수 있었다. PM₁₀은 이용객이 증가하면서 평균 33.2% 상승하였고 카페공간(18.3% 상승)보다 놀이공간(49.2% 상승)에서 증가세가 더 뚜렷하게 나타났다. PM_{2.5}는 기계식 환기시설이 없고 휘발성유기화합물 농도가 높은 키즈카페에서 2차 유기먼지가 형성되어 카페공간 113%, 놀이공간 63.6% 상승했으며, 카페공간에서 증가세가 더 뚜렷하게

나타났고, 휘발성유기화합물(VOCs) 농도가 낮은 시설에서는 놀이공간에서만 10%-34.9% 상승하였다.

총부유세균은 사람과 동물, 인간의 활동, 외기의 영향을 받았으며, 카페공간의 총부유세균수는 평균 369 CFU/m³, 놀이공간은 304 CFU/m³, 외기는 181 CFU/m³이었고, 이용객이 증가하면서 그 수가 40%-1120% 증가할 뿐만 아니라 균집도 다양해졌으며, 사람과 관련 있는 *Corynebacterium*, *Staphylococcus* 속 세균들이 나타났다.

키즈카페는 이용객이 증가하면 실내 오염물질의 공간별 분포가 달라지므로 이에 맞는 실내공기질 오염도 검사와 관리가 필요할 것이다. 실내공기질 오염도 검사를 할 때는 측정값이 왜곡되지 않게 시료 채취 지점을 선정하는 것이 중요하다. 예를 들면 미세먼지 측정 시 이용객이 많을 때 놀이공간만 두 지점을 선택한다면 해당 시설은 그 시설의 원래 대푯값보다 높게 측정될 것이기 때문이다. 그래서 키즈카페의 실내공기질 오염도 검사 시 카페공간 1지점과 놀이공간 1지점을 시료 채취 지점으로 선정할 것을 추천한다. 실내공기질 관리 측면에서, 키즈카페 내 입자상 오염물질의 농도는 낮은 수준으로 잘 관리되고 있었으나 이용객이 증가하면서 놀이공간의 미세먼지 농도 상승세가 커지므로, 이용객이 많을 때 공기청정기와 기계식 환기장치의 놀이 공간 가동률을 높여야 할 것이다. 특히, 이용객이 많은 주말에 조리시설을 갖춘 키즈카페는 입자상 오염물질뿐만 아니라 생물학적 오염물질, 가스상 오염물질도 동시에 증가하므로 각별한 지도와 관리가 필요하다. 또한, 키즈카페는 가스상 오염물질의 농도가 타 다중이용시설보다 높으므로 이들 물질의 관리를 위해 환기에 집중해야 할 뿐만 아니라 공간을 독립적으로 구분하는 인테리어는 지양해야 한다. 더불어 건축자재의 오염물질 방출기준은 7개 종류의 건축자재에 대해 3개 항목을 규제하고 있으나 현 기준⁴²⁾이 적용된 키즈카페 내 총휘발성유기화합물의 실내공기질 권고기준 초과율이 높으므로 건축자재에 대한 기준의 세분화와 기준 강화와 같은 규제 개선을 검토해봐야 할 것이다.

참고문헌

1. 한국산업단지공단, <https://m.blog.naver.com/kicox1964/221747893744>, 2022년 1월.
2. Thebell, <https://thebell.co.kr/free/Content/ArticleView.asp?key=201909110100019770001228>, 2022년 1월
3. 국립환경과학원, “어린이활동공간 환경유해인자 노출 실태조사(II)”, 2019, 13-16.
4. K. L. Chan, Z. Wang, A. Ding, K.-P. Heue, Y. Shen, J.

- Wang, F. Zhang, Y. Shi, N. Hao, and M. Wenig, "MAX-DOAS measurements of tropospheric NO₂ and HCHO in Nanjing and a comparison to ozone monitoring instrument observations", *Atmospheric Chemistry Physics*, **2019**, 19, 10051-10071.
5. Z. H. Ling, J. Zhao, S. J. Fan, X. M. Wang, "Sources of formaldehyde and their contributions to photochemical O₃ formation at an urban site in the Pearl River Delta, southern China", *Chemosphere*, **2017**, 168, 1293-1301.
 6. 강종훈, "도시지역의 대기중 휘발성 유기오염물질(VOCs)의 농도 분포 연구", 연세대학교 보건학석사 학위논문, **2003**.
 7. D.-L. Liu, and W. W. Nazaroff, "Modeling pollutant penetration across building envelopes", *Atmospheric Environment*, **2001**, 35, 4451-4462.
 8. W. W. Nazaroff, "Indoor bioaerosol dynamics", *Indoor Air*, **2016**, 26, 61-78.
 9. M.-A. Kioumourtoglou, J. D. Schwartz, M. G. Weiskopf, S. J. Melly, Y. Wang, F. Dominici, and A. Zanobetti, "Long-term pm2.5 exposure and neurological hospital admissions in the northeastern united states", *Environmental Health Perspectives*, **2016**, 124, 23-29.
 10. M. C. Power, M. G. Weiskopf, S. E. Alexeeff, B. A. Coull, A. Spiro III, and J. Schwartz, "Traffic-related air pollution and cognitive function in a cohort of older men", *Environmental Health Perspectives*, **2011**, 119, 682-687.
 11. R. Raz, A. L. Roberts, K. Lyall, J. E. Hart, A. C. Just, F. Laden, and M. G. Weiskopf, "Autism spectrum disorder and particulate matter air pollution before, during, and after pregnancy: A nested case-control analysis within the nurses' health study ii cohort", *Environmental Health Perspectives*, **2015**, 123, 264-270.
 12. D. Q. Rich, K. Liu, J. Zhang, S. W. Thurston, T. P. Stevens, Y. Pan, C. Kane, B. Weinberger, P. Ohman-Strickland, T. J. Woodruff, X. Duan, V. Assibey-Mensah, and J. Zhang, "Differences in birth weight associated with the 2008 beijing olympics air pollution reduction: Results from a natural experiment", *Environmental Health Perspectives*, **2015**, 123, 880-887.
 13. X. Wang, H. Ding, L. Ryan, and X. Xu, "Association between air pollution and low birth weight: A community-based study", *Environmental Health Perspectives*, **1997**, 105, 514-520.
 14. M. G. Weiskopf, M.-A. Kioumourtoglou, and A. L. Roberts, "Air pollution and autism spectrum disorders: Causal or confounded?", *Current Environmental Health Reports*, **2015**, 2, 430-439.
 15. X. P. Xu, H. Ding, and X. Wang, "Acute effects of total suspended particles and sulfur dioxides on preterm delivery: A communitybased cohort study", *Archives of Environmental Health*, **1995**, 50, 407-415.
 16. 박주형, "살내 공기 중의 먼지", *공업화학전망*, **2018**, 21(2), 1-8.
 17. P. Srikanth, S. Sudharsanam, R. Steinberg, "Bio-aerosols in indoor environment: Composition, health effects and analysis.", *Indian Journal of Medical Microbiology*, **2008**, 26, 302-312.
 18. 전병학, 황인영, "다중이용시설의 실내공기 중 총부유세균 농도와 종류", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, **2015**, 16(1), 868-876.
 19. 대통령, "환경보전법 시행령", **2019**, 제30295호, 제1조.
 20. 국립환경과학원, "실내공기질공정시험기준", **2021**, 94호.
 21. 손방용, 민만식, "공학 자연계 교육을 위한 확률과 통계학", **2011**, 174-175, 한티미디어, 대한민국.
 22. Cho, H., Choi, J. M., Kim, W. J., "Assessment of indoor volatile organic compounds(VOCs) and emission characteristics by humidity variation in new apartments", *Journal of Korean Living Environment System*, **2006**, 13(4), 283-289.
 23. 황갑수, "신축 아파트에서 실내 HCHO 농도의 연중 변화 및 특성", *한국환경기술학회지*, **2018**, 19(1), 10-17.
 24. 이윤규, 한길원, "A study on the analysis of characteristic of formaldehyde concentration in apartment house", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, **2003**, 19(10), 153-160.
 25. 박현철, 김영훈, 김정은, 고주연, 남궁선주, 이철민, 김윤신, 노영석, "공기청정기의 실내공기 질 및 아토피피부염에 대한 영향", *Allergy Asthma Respir Dis*, **2013**, 1(3), 248-256.
 26. 박평화, "공기청정기용 에어필터 동향", *Air Cleaning Technology*, **2020**, 33(1), 31-37.
 27. 신승규, 강정희, 송지현, "나노 은입자가 침착된 활성탄의 포름알데히드 제거특성", *대한환경공학회지*, **2010**, 32(10), 938-941.
 28. J. Felton, "Food mutagens: the cooking makes a difference", *Science and Technology Review*, **1995**, 7, 18-25.
 29. B. C. Singer, "Natural Gas Variability in California: Environmental Impacts and Device Performance: Experimental Evaluation of Pollutant Emissions From Residential Appliances", **2009**, Report CEC-500-2009-099-APC, Ernest Orlando Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.
 30. 김상철, "주방에서의 조리 시 발생하는 유해물질", *Air Cleaning Technology*, **2016**, 29(1), 12-18
 31. 박영훈, 김선웅, 양희훈, 정옥영, 이상진, "키즈카페의 가구류 및 설치시설에 따른 실내공기질 비교 분석", *한국가구학회지*, **2013**, 24(1), 70-78.
 32. 박정호, "실내주차장의 실내공기질 농도 특성 및 환기에 의한 저감효과", *한국산업위생학회지*, **2010**, 20(4),

- 241-247.
33. 박진철, “신축공동주택에서의 폼알데하이드 및 휘발성 유기화합물 측정연구”, 중앙대학교 건축학과 건축계획 및 환경 석사 학위논문, **2004**
 34. C. Chen and B. Zhao, “Review of relationship between indoor and outdoor particles: I/o ratio, infiltration factor and penetration factor”, *Atmospheric Environment*, **2011**, 45, 275-288.
 35. M. O. Fadeyi, C. J. Weschler, K. W. Tham, W. Y. Wu, and Z. M. Sultan, “Impact of human presence on secondary organic aerosols derived from ozone-initiated chemistry in a simulated office environment”, *Environmental Science & Technology*, **2013**, 47, 3933-3941.
 36. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine, “Health risks of indoor exposure to particulate matter”, **2016**, Workshop summary, 7-58.
 37. D. M. Pham, 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.
 38. N. Carslaw, T. Mota, M. E. Jenkin, M. H. Barley, and G. McFiggans, “A significant role for nitrate and peroxide groups on indoor secondary organic aerosol”, *Environmental science & technology*, **2012**, 46, 9290-9298.
 39. G. Sarwar and R. Corsi, “The effects of ozone/limonene reactions on indoor secondary organic aerosols”, *Atmospheric Environment*, **2007**, 41, 959-973.
 40. R. Zhang, “Getting to the critical nucleus of aerosol formation”, *Science*, **2010**, 328, 1366-1367.
 41. J. F. Meadow, A. E. Altrichter, S. W. Kembel, G. Mhuireach, M. Moriyama, D. Northcutt, T. K. O’Connor, A. M. Womack, G. Z. Brown, J. L. Green, and B. J. M. Bohannon, “Indoor airborne bacterial communities are influenced by ventilation, occupancy, and outdoor air source”, *Indoor Air*, **2014**, 24, 41-48.
 42. 환경부, “실내공기질 관리법 시행규칙”, **2021**, 제918호, 제10조.