

서울지역 인쇄시설 밀집지역 어린이집의 실내공기질 개선방안

실내환경팀

이호찬 · 노방식 · 정석만 · 김광래 · 권승미 · 신진호 · 어수미 · 정 권

Improving Indoor air Quality in a Childcare Center in Areas Congested with Printing Facilities in Seoul City

Indoor Environments Team

**Ho-chan Lee, Bang-sik Roh, Seok-man Jung, Kwang-rae Kim,
Seung-mi Kwon, Jin-ho Shin, Soo-mi Eo and Kweon Jung**

Abstract

Most studies of TVOC removal efficiencies in indoor air have been conducted in chambers. This study investigated the removal of VOCs in a room within a child-care center located in an area with many printing facilities in Seoul City. Sensors continuously detected and monitored TVOCs, CO₂, CO, temperature, and humidity at 1 min intervals to evaluate TVOC removal efficiency. Simultaneously, VOCs were analyzed with a gas chromatograph mass selective detector(GC-MSD) the GC-MSD data were compared with TVOC photo ionization detector(PID) sensor data. Two types of filters, CD and granule, were fully packed in the air cleaner. Initially, TVOC concentrations rapidly decreased in the room while co-varying with outdoor concentrations. Individual VOC results from the GC-MSD indicated that six types of VOCs, benzene, toluene, m,p-Xylene, o-Xylene, styrene, and ethylbenzene, comprised about 99% of the TVOCs. Toluene had the highest concentration of the six types. The I/O ratios, indoor concentration divided by outdoor concentration, were used to evaluate the TVOC removal efficiency. Mean I/O ratios were 0.77 and 0.59, in the air purifier was operating, but 1.02, 1.06, and 3.4 while it was not operating. The efficiency of removal of TVOCs in the indoor air were 23% and 41%.

Key words : TVOCs, air purifier, IAP(indoor air pollutant), I/O ratio, childcare center

서론

대도시에서의 밀집된 생활환경은 인근에서 발생하는 오염물질이 어린이집 등 다중이용시설에 직접적으로 영향을 미친다. 특히 소규모 인쇄, 세탁시설 부근에 위치하고 있는 어린이집의 경우 자연환기로 인하여 오히려 실내공기질이 악화되고 있는 실정이다. 특히 서울시 J구 인쇄시설이 밀집된 어린이집의 경우 최근 2년간 총휘발성유기화합물질(TVOC)의 권고기준이 초과되어 자연환기에 의한 실내공기질 개선이 불가능한 사례가 발생하고 있다.

인쇄시설은 인쇄기계를 이용하여 판에 옮겨진 인쇄잉크를 종이 등의 피 인쇄체에 전이시키는 업종으로 오프셋인쇄, 그라비아인쇄가 대표적이며 인쇄시설에서 발생하는 휘발성유기화합물질(VOCs)은 잉크, 접착제, 세척제, 현상액 등의 사용으로 인해 발생하고 있다. 인쇄공정의 주요 원료로 톨루엔(Toluene), 크실렌(Xylene), MEK(Methyl Ethyl Ketone), MIBK(Methyl Isobutyl Ketone) 등이 사용되고 있으며 인쇄공정에 사용되는 잉크 및 유기용제 보관용기는 작업상 편의를 위해 대부분 열려있는 상태로 방치되어 작업장 내부에 악취 및 VOCs 확산의 원인이 되고 있다(1~3).

이러한 휘발성유기화합물질은 대부분의 시간을 어린이집에서 생활하는 어린이들에게 미치는 영향이 크며 오염물질의 종류에 따라 악취, 아토피, 발암성 등의 영향을 미치게 되어 이들 오염물질의 저감이 실내공기질 개선방안에 매우 중요하다.

국내외 현재까지 널리 사용되고 있는 휘발성유기화합물질 제거기술로는 직접연소법, 흡착법, 촉매산화법등이 있으며 경제적이고 환경친화적인 측면을 고려하면 촉매산화법이 가장 이상적인 방법으로 평가되고 있다. 일반적으로 소각 분해기술에는 열적산화(thermal oxidizer), 촉매산화(catalytic oxidizer) 자외선을 이용한 분리, 코로나, 그리고 플라즈마 기술등이 포함되며, 회수기술에는 냉각에 의한 응축, 활성탄을 이용한 흡착, 용제를 이용한 기술과 막분리 기술 등이 포함된다(1).

활성탄 필터의 흡착(adsorption)은 가스 또는 증기상의 휘발성유기화합물질이 고형의 흡착제(adsorbent)에 접촉하면서 흡착제 표면에 포집되

는 현상으로 가스 중 휘발성유기화합물질을 회수하거나 감소시킬 수 있는 효율적인 수단이다. 또한 낮은 농도의 휘발성유기화합물질의 경우 연소가 어렵거나 비연소성인 기체, 회수 가치가 높은 물질에 대하여 흡착법이 사용되고 있다.

흡착의 메커니즘은 물리적 흡착(physical adsorption)과 화학적 흡착(chemical adsorption)에 의해 일어난다. 물리적 흡착은 기체분자들이 흡착제 분자와 Van der Waals 힘에 의하여 다공성 고체에 흡착제 표면이나 내부로 부착 한다. 화학적 흡착은 흡착제와 흡착대상물질이 화학적으로 서로 작용에 의해 흡착 가스층을 형성하는 것이다.(1)

활성탄에 의한 흡착은 초기에는 흡착속도가 빠르고 흡착율도 높기 때문에 휘발성유기화합물질의 대부분을 처리할 수 있지만 사용기간이 지남에 따라 흡착 물질량이 계속 흡착제에 축적되어 흡착량이 포화에 이르게 되면 전혀 흡착되지 않게 되어 입구농도와 출구농도가 같게 된다. 따라서 흡착제는 포화되기 전에 교체하거나 재생하여 다시 사용해야 한다. 흡착제의 재생은 흡착시 유체의 흐름 반대방향으로 압력을 낮추어 흡착된 물질을 탈착시킨다. 탈착공정에는 뜨거운 공기나 스팀으로 탈착하게 되는데 탈착 후, 이를 냉각시켜 회수하며, 유기물질이 물과 혼화성이 있으면 증류공정으로 분리하고, 물과 혼화성이 없으면 상분리에 의해 분리 될 수 있다.

본 연구에서는 서울시 인근의 인쇄시설 밀집지역내에 위치하는 어린이집에서 총휘발성유기화합물질(TVOC)을 저감하기 위하여 일반적으로 사용되고 있는 공기청정기에 활성탄 필터를 강화하여 저감효과를 평가하였다. 총휘발성유기화합물질의 측정방법은 센서를 이용한 자동연속모니터링방법을 이용하였고 측정값의 정확성 평가를 위해 실내 공기질공정시험기준(8)에 따른 GC/MS Tenax Tube 측정방법을 이용하여 동시에 측정하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상 및 기간

본 연구의 기간은 2016년 9월부터 2016년 10월

까지 조사하였고, 조사대상은 서울시 J구에 위치한 어린이집을 대상시설로 선정하였다. 해당 어린이집은 2006년 2월 준공하였고 상업지역에 위치한 연면적 777.41m², 영유아수 85명의 국공립어린이집으로서 자연환기에 의존하고 있다. 소규모 인쇄시설로 둘러 쌓여있어 자연환기에 의해 총휘발성유기화합물질의 저감이 현실적으로 어려우며 대상 어린이집에서의 총휘발성유기화합물질의 발생원은 주변인쇄시설에서 유입되는 외기오염원이고 환기는 창문을 통한 자연환기 방식으로 실험하였다. 실험대상공간을 어린이집의 2층에 위치한 classroom 3으로 선정하였으며 오염물질 저감을 위해 현재 일반적으로 사용하고 있는 공기청정기에 활성탄 필터를 강화하여 총휘발성유기화합물질 제거전용 공기청정기를 어린이집 내부에 설치하였고, 현장에서의 저감효과 평가를 위하여 어린이집 내부와 외부 각 1개소에 총휘발성유기화합물질의

24시간 자동연속 모니터링(WolfSense™ IAQ-610Xtra)을 실시하였다(그림 1). 활성탄 필터는 CD필터, 입상활성탄 필터 2종류를 사용하였고 시중에서 사용되고 있는 일반적인 공기청정기의 필터모듈의 상단과 하단모두에 활성탄필터를 사용하였다(그림 2). 활성탄 필터를 이용한 총휘발성유기화합물질 제거전용 공기청정기 2대, HEPA필터 및 항균필터를 이용한 공기청정기 1대를 어린이집에 설치하여 평일 개원시간(07:30~20:30) 동안 가동하였다.

2. 연구방법

1) 측정방법

측정장소는 서울시내 인쇄시설로 둘러 쌓여있는 어린이집내의 동일한 지점으로 하였고, 측정방법은 센서를 이용한 휘발성유기화합물질의 검출방식 중 가장 많이 이용되고 있는 PID(광이온화검출법,

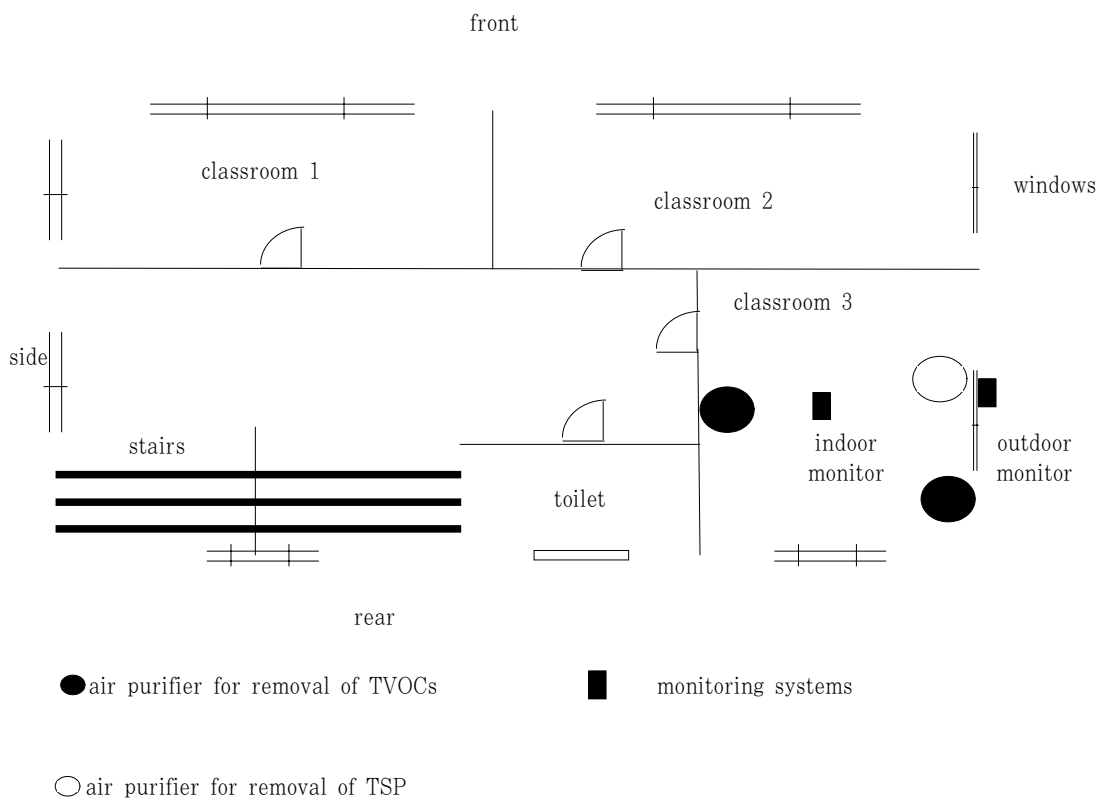


Fig. 1. Research designs of monitoring TVOCs removal efficiency in indoor air of Childcare-center.

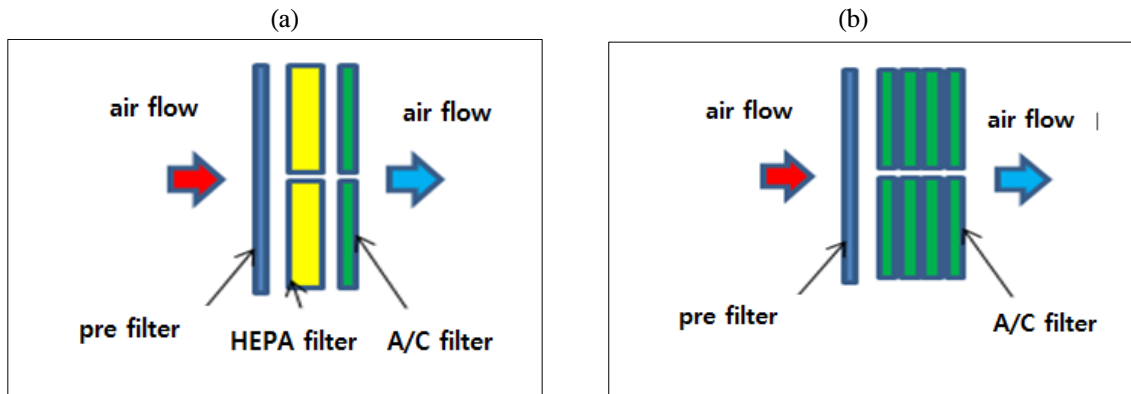


Fig. 2. Schematics illustration of A/C filters in air purifier general type(a) and TVOC exclusive use type(b).

Photo Ionization Detector)법과 실내공기질공정 시험기준상의 실내 총휘발성유기화합물질 측정방법인 고체흡착관 GC-MS법을 이용하였다. 센서방식의 경우 총휘발성유기화합물질의 24시간 자동연속 모니터링(WolfSense™ IAQ-610Xtra)을 실시하였다.



Fig. 3. TVOCs monitoring system using PID sensor.

2) 총휘발성유기화합물질의 제거방법

본 연구에서는 어린이집 주변의 인쇄시설에서 발생하여 유입되는 총휘발성유기화합물질의 제거를 위하여 생활주변에서 용이하게 사용하고 있는 공기청정기의 활성탄 필터를 사용하였다. 시중에서 탈취용으로 활성탄필터 일명 카본필터가 많이 이용되고 있으며 벌집모양의 부직포에 활성탄을 입힌 CD필터와 pellet모양의 담체에 활성탄을 입힌 granule type의 필터를 사용하였다(그림 4).

3) 자료처리

센서를 이용한 자동연속측정은 TVOC, CO₂, CO, 온도, 습도의 5개 항목에 대하여 1분단위로 2개월간(9~10)의 측정 자료를 두 가지의 활성탄 필터에 대하여 효과를 평가하였고 총휘발성유기화합물질은 30분간 측정한 GC-MS측정값과 센서측정값과 비교하였다. 각각의 항목별 농도 및 시간대별 특성을 파악하기 위해 Excell과 SPSS 11.0을 이용하였다.

Table 1. Characteristics and sampling methods of PID sensor and GC/MS for TVOCs

	Method	Sample
Sensor type	PID(photo ionization detector)	
	Ionization potential < 10.6eV,	1 min
	Reference gas(Isobutylene, I-C4H8)	
GC/MS	Tenax tube, GC-MS	30 min

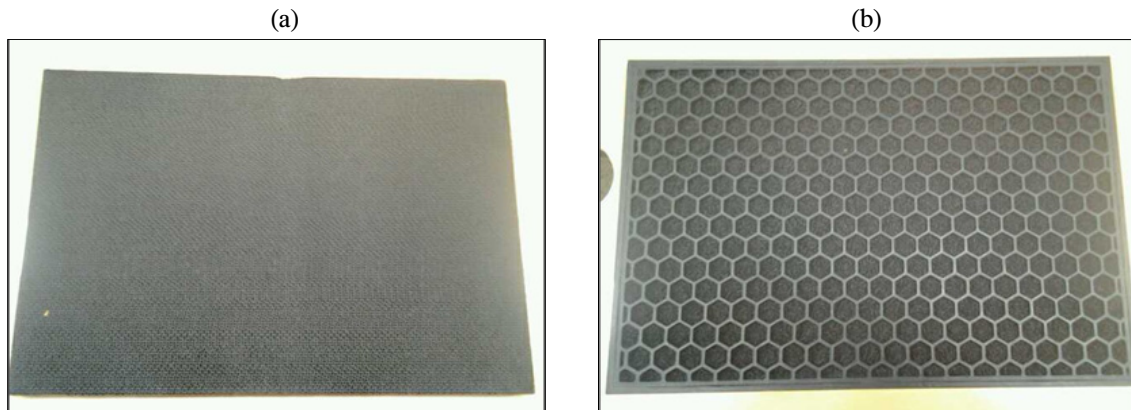


Fig. 4. Types of A/C filter CD(a) and granule (b).

결과 및 고찰

1. 총휘발성유기화합물질의 제거특성 평가

어린이집은 창문의 개폐를 통한 자연환기 방식이며 평일 개원시간은 07:30분에서 20:30분으로 개원시간동안만 청정기를 가동하였다. 실내와 실외에서 연속 측정된 TVOCs의 분단위 측정결과를 공기청정기 가동시(07:30~20:30)간대와 비가동 시간대(20:30~07:30)로 나누어 평일 공기청정기 가동시의 결과를 그림 5에 평일 공기청정기 비가동시의 결과를 그림 7에 각각 나타내었다. 또한 실내와 실외에서 총휘발성유기화합물질농도의 비(indoor concentration/outdoor concentration, I/O)를 공기청정기 가동여부에 따라 [1]~[5]의 다섯구간으로 구분하여 그림 6과 그림 8에 나타내었다.

그림 5에서와 같이 공기청정기 가동시간대의 경우 환기시 외기의 총휘발성유기화합물질 농도가 높을 경우 급격하게 증가하고 환기를 중단할 경우 공기청정기의 활성탄필터에 의한 흡착으로 급격히 감소하는 현상을 보이고 있으며 이후 안정적인 저농도를 유지하고 있다. 반면 공기청정기 비가동시 실내의 총휘발성유기화합물질농도는 실외의 총휘발성유기화합물질농도 증감의 영향을 크게 받지 않는데 이는 폐원에 따라 외부출입문과 창문을 닫아 발생하는 현상으로 판단된다. 또한 일단 유입된 오염물질은 실외로 빠져나가지 못하고 축적되어 고농도를 유지하는 현상을 보이고 있다. 특히

평일 공기청정기 비가동시의 그래프 그림 7에서와 같이 개원시간대에 축적된 오염물의 폐원에 따라 출입문과 창문을 닫아 그대로 고농도를 유지하는 현상을 보이고 있다.

한편 청정기의 총휘발성유기화합물질 저감효과를 평가하기 위해 I/O비를 사용하였는데 I/O비는 1보다 클 경우($I/O > 1$) 실내공기의 오염도가 외기보다 높고 1보다 작을 경우($I/O < 1$) 실내공기의 오염도가 외기보다 낮음을 나타낸다. 그림 6과 그림 7에서 I/O비가 개원시보다 폐원시에 보다 높은 것을 확인할 수 있는데 이는 폐원 이후 청정기의 가동이 중지되어 실내의 축적된 오염물질이 고농도로 그대로 남아있고 반면 외기의 오염농도는 인근 인쇄시설의 가동이 중단되어 저농도를 나타남에 따른 현상으로 판단된다.

표 3에 평일 청정기의 가동과 비가동 시간대에 따른 평균 I/O비를 나타내었다. 청정기를 가동한 개원시간대(1, 3)의 경우 I/O비가 각각 0.77, 0.59로 실내공기의 오염도가 청정기의 가동으로 외기보다 낮음을 나타내고 있다. 반면 청정기를 가동하지 않은 개원, 폐원시간대(2, 4, 5)의 경우 각각 1.02, 1.06, 3.4로 나타내는데 이는 청정기가 가동되지 않아 외부의 총휘발성유기화합물질 오염물질과 내부의 오염물질의 농도가 거의 같거나 오히려 실내의 오염물질 농도가 외기의 오염물질 농도보다 높게 나타나고 있다. 특히 공기청정기를 가동하지 않은 평일의 폐원시간대(5)의 I/O비가 3.4로 가장 높은 수치를 나타내고 있는데 이는 개원

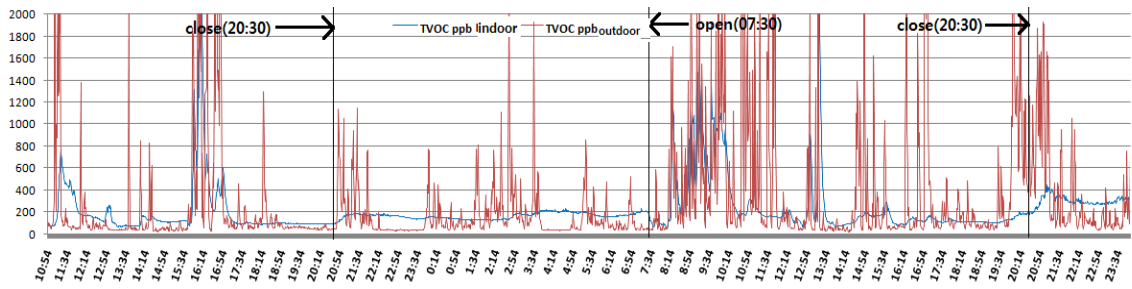


Fig. 5. Minutely concentration variation plots of TVOCs during the operation(07:30~20:30) of the air purifier in the indoor and outdoor on weekday.

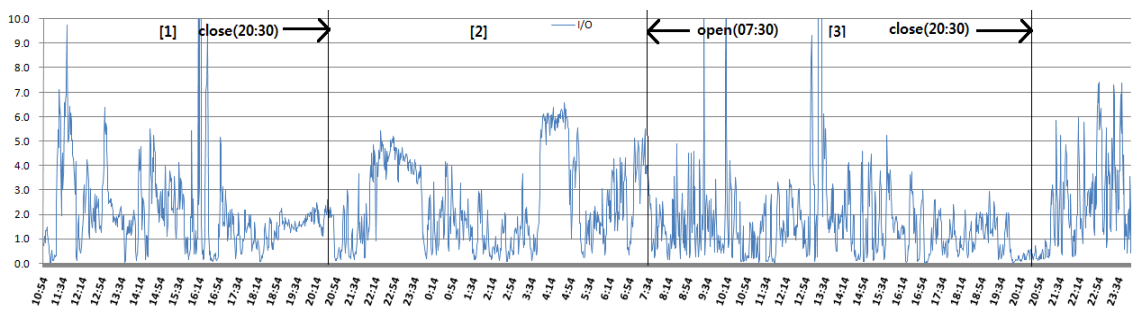


Fig. 6. TVOCs concentration ratio plots of indoor to outdoor during the operation(07:30~20:30) of the air purifier on weekday.

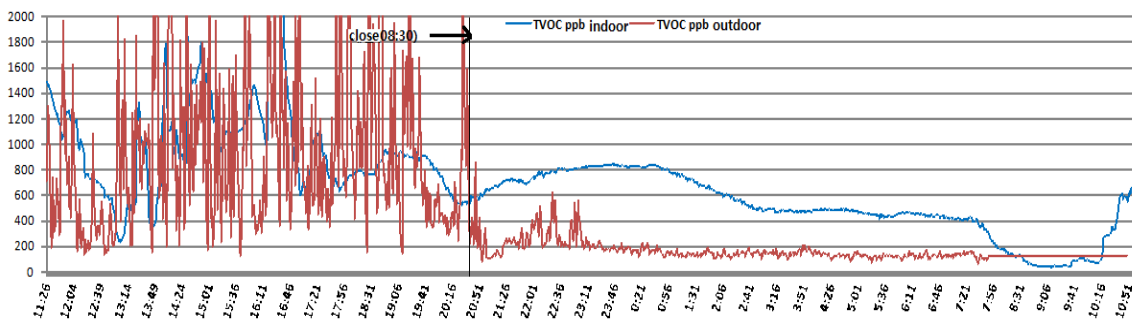


Fig. 7. Minutely concentration variation plots of TVOCs during the non-operation(20:30~07:30) of the air purifier in the indoor and outdoor on weekday.

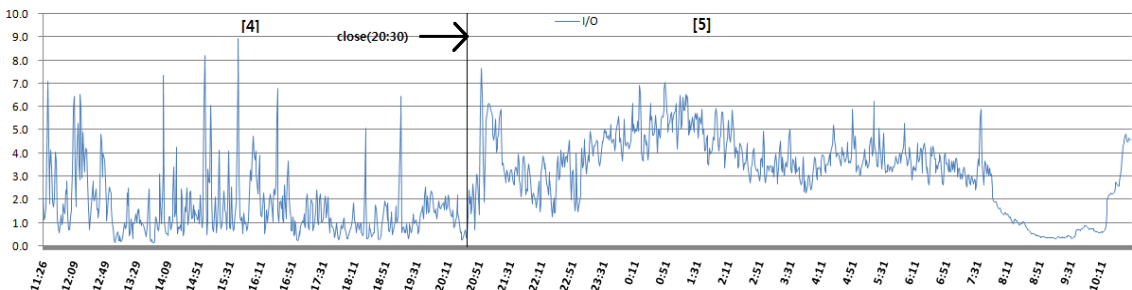


Fig. 8. TVOCs concentration ratio plots of indoor to outdoor during the non-operation(20:30~07:30) of the air purifier on weekday.

시간대 공기청정기를 가동하지 않아 실내에 축적된 고농도의 실내오염물질이 반영된 결과로 해석된다. 필드에서의 청정기 총휘발성유기화합물질 제거효율(removal efficiency)은 측정일의 필터의 사용기간, 외기오염도, 기상조건, 실내에서의 다양한 활동에 의해 영향을 받았기 때문에 제거효율이 다르게 나타날 수 있다. 이러한 변수들의 영향을 최소화 하기위해 표 2에서와 같이 가동시간 전체의 평균값을 이용하여 제거효율을 구하였다. 청정기 가동시간대 평균 총휘발성유기화합물질 제거효율은 각각 23%(1)와 41%(3)로 상당한 저감효과를 나타내고 있다.

2. PID센서를 이용한 휘발성유기화합물질의 농도 특성

센서방식과 GC/MS방식의 측정결과를 아래 표 4에 나타내었다. GC-MS의 측정결과는 휘발성유기화합물질의 대부분(99%)이 6종으로 나타났고 6종에서 Toluene이 가장 높은 농도로 인쇄시설에서 배출하는 VOC 중 대부분의 농도를 차지하였다. 비교결과 Benzene을 제외한 Toluene, m,p-Xylene, o-Xylene, Styrene, Ethylbenzene은 PID센서방식의 TVOC값과 약 0.5(R)에 근사한 양의 상관성(그림 9)을 나타내고 있는데 이는 PID센서방식의 Reference gas인 Isobutylene

Table 2. Mean Concentrations of TVOC during the operation and non-operation of the air purifier on weekday (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
Time period	open (10:54~20:30)	close (20:30~07:30)	open (07:30~20:30)	open (11:26~20:30)	close (20:30~07:30)
Air purifier	operation	non-operation	operation	non-operation	non-operation
Indoor	211	166	260	988	622
Outdoor	273	163	443	924	183

Table 3. Mean I/O ratios and removal efficiency of TVOC during the operation and non-operation of the air purifier on weekday

	[1]	[2]	[3]	[4]	[5]
I/O	0.77	1.02	0.59	1.06	3.4
Removal efficiency	23%		41%		

Table 4. Distribution characteristics and correlations of TVOC concentrations for PID sensor and GC/MS (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	PID	GC-MS						
	TVOC	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Styrene	m,p-Xylene	o-Xylene	sum
Mean	507.38	2.47	611.03	16.68	80.94	22.63	103.57	837.32
Max	1996.00	3.43	804.50	50.27	296.59	82.65	379.25	
Min	71.00	1.16	432.49	5.21	27.80	7.66	35.55	
SD	526.76	0.65	90.32	11.98	69.03	19.35	88.36	
r	1.00	0.093	0.501	0.467	0.494	0.502	0.496	

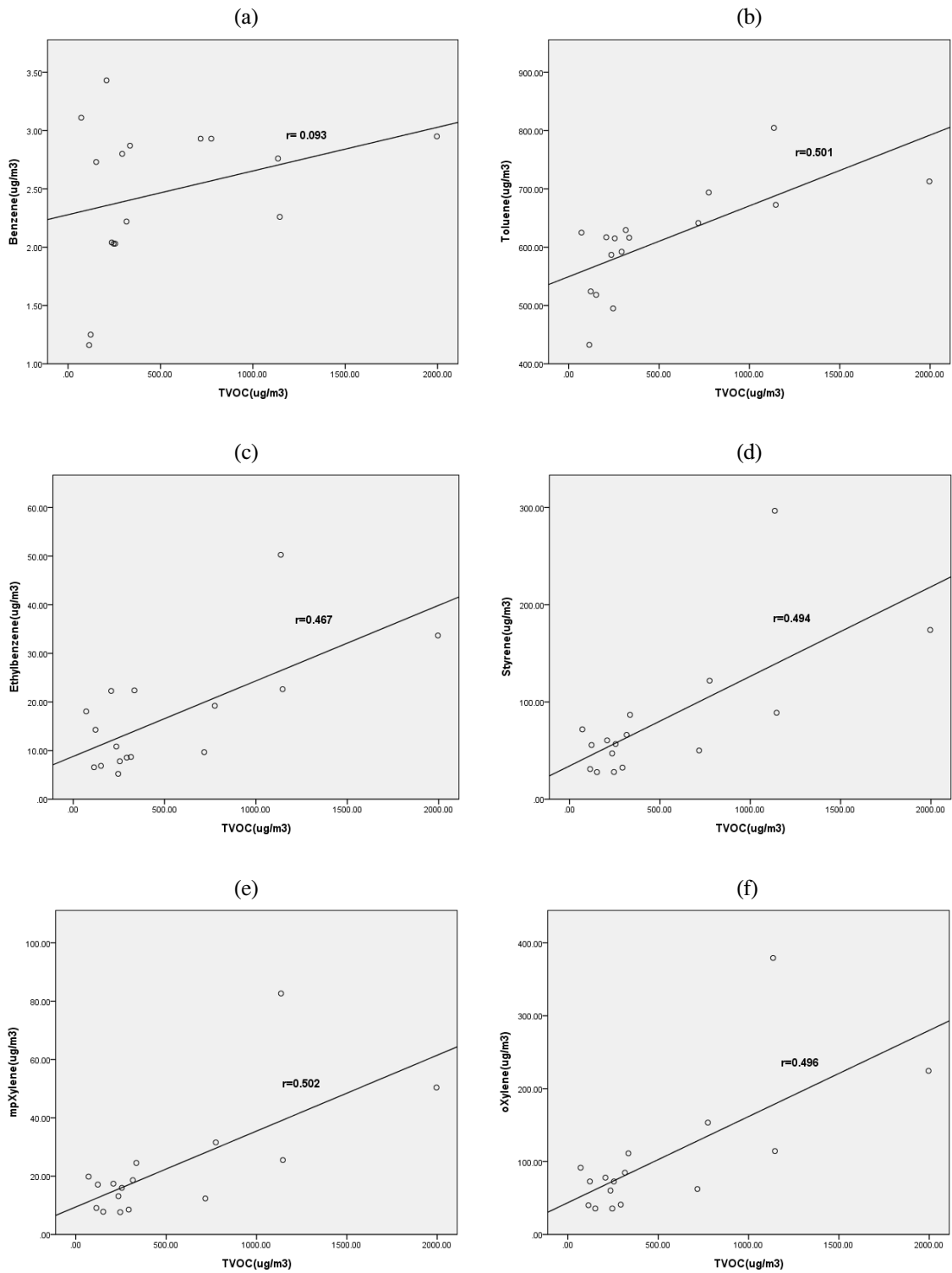


Fig. 9. Correlations between TVOCs of monitoring system using PID sensor and GC/MS of Benzene(a), Toluene(b), Ethylbenzene(c), Styrene(d), mp-Xylene(e), o-Xylene(f).

(i-C4H8)의 Ionization potential과 연관성이 있는 것으로 판단된다.

PID센서방식의 총휘발성유기화합물질값과 GC-MS의 측정결과의 평균값은 각각 507.38, 837.32로 GC-MS의 측정값이 PID센서방식의 값보다 약 39% 더 많게 나타나고 있다.

결론

본 연구에서는 시중에서 사용하고 있는 공기청정기의 활성탄 필터를 이용하여 주변지역의 휘발성유기화합물질 오염이 심하여 자연환기가 어려운 어린이집에서의 휘발성유기화합물질을 저감하고자 하였고 또한 필드에서의 제거효율 평가 및 총휘발성유기화합물질 자동측정장비를 통한 무인연속관리방식과 GC-MSD 정밀측정값과의 관계를 구하고자 하였다.

1. 시판되는 공기청정기의 활성탄필터는 휘발성유기화합물질제거에 한계가 있어 활성탄필터의 휘발성유기화합물질 제거성능을 증대시키기 위해 청정기의 상하단 필터모듈에 활성탄필터를 모두 적용하여 성능평가를 실시한 결과 필드에서 청정기의 총휘발성유기화합물질 제거효율 (removal efficiency)은 가동시간 전체의 평균값을 이용하여 각각 23%와 41%로 상당한 저감효과를 나타내고 있다.
2. 환기시 주변의 오염물질 발생시설에 의해 총휘발성유기화합물질 농도가 높을 때 자연환기에 의해 실내의 총휘발성유기화합물질농도가 급격하게 증가하고 환기를 중단할 경우 공기청정기의 활성탄필터에 의한 흡착으로 급격히 감소하는 현상을 보이고 있으며 이후 안정적인 저농도를 유지하고 있다. 반면 공기청정기 비가동시 실내의 총휘발성유기화합물질 농도는 실외의 총휘발성유기화합물질 농도증감의 영향을 크게 받지 않는데 이는 폐원에 따라 외부출입문과 창문을 닫아 발생하는 현상으로 판단된다. 또한 일단 유입된 오염물질은 실외로 빠져

나가지 못하고 축적되어 고농도를 유지하는 현상을 보이고 있다.

3. 공기청정기의 총휘발성유기화합물질 저감효과를 평가하기 위해 I/O비를 사용하였는데 공기청정기를 가동한 개원시간대의 경우 I/O비가 각각 0.77, 0.59로 실내의 오염도가 청정기의 가동으로 외기보다 낮음을 나타내고 있으며 반면 공기청정기를 가동하지 않은 시간대의 경우 각각 1.02, 1.06, 3.4로 나타나는데 이는 청정기가 가동되지 않아 외부의 총휘발성유기화합물질 오염물질과 내부의 오염물질의 농도가 거의 같거나 오히려 실내의 오염물질 농도가 외기의 오염물질 농도보다 높게 나타나고 있다.
4. 센서방식과 GC/MS방식의 측정결과 휘발성유기화합물질의 99% 이상이 Benzene, Toluene, m,p-Xylene, o-Xylene, Styrene, Ethylbenzene의 6종으로 나타났고 이중 Toluene이 가장 높은 농도로 인쇄시설에서 배출하는 총휘발성유기화합물질 중 대부분의 농도를 차지하였다. 상기 6종과 PID센서값과의 상관관계를 구한 결과 Benzene을 제외한 Toluene, m,p-Xylene, o-Xylene, Styrene, Ethylbenzene은 PID센서방식의 TVOC값과 약 0.5(R²)에 근사한 양의 상관성을 나타내고 있는데 이는 PID센서방식의 Reference gas인 Isobutylene(i-C4H8)의 Ionization potential과 연관성이 있는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 도심내 소규모 인쇄시설에서 발생하는 고농도의 휘발성유기화합물질에 노출되어 자연환기에 의한 실내공기질 개선이 어려운 어린이집에서 시중에서 사용되고 있는 공기청정기를 이용한 총휘발성유기화합물질의 저감효과를 확인하였다. 농도가 매우 높아 자연환기가 어려운 시설의 경우 실내 및 실외 공기와 연계된 센서를 이용한 총휘발성유기화합물질농도에 따른 적절한 환기시스템을 적용할 경우 총휘발성유기화합물질 제거를 위한 활성탄 필터의 보다 효율적인 활용이

가능 할 것으로 기대된다.

참고문헌

1. 환경부 : VOC 배출억제·방지시설의 저감효율 및 농도기준 설정 등에 관한 연구. 한양대학교 환경 및 산업의학 연구소, p.4~87, 2001.
2. 환경부 : 페인트 및 잉크 중 VOC 함량 기준 설정 등에 대한 연구. 한국냄새환경학회, p 188~216, 2002.
3. 이태형. 김윤신. 홍승철. 이철민. 김종철. 전형진. 김중호: 공기청정기 일부 실내공기 제거효율에 관한 연구. 한국환경과학회지, 제14권, p.491~497, 2005.
4. 김운수 : 서울시 다중이용시설 실내공기질 실태조사 및 관리방안 연구. 서울시정개발연구원, p.94~130, 2004.
5. 이성화 : 김치유산균 응용 필터에 의한 조류독감 Virus(H5N1)의 항바이러스 특성에 관한 실험적 연구. 한국입자 에어로졸학회, p.2~3. 2006.
6. 공부주. 홍유덕. 서석준. 김영환. 한진석. 임재현. 이동원. 홍지형: 악취 센서의 신뢰성 평가에 관한 연구. 실내환경 및 냄새학회지. 14:167~174. 2015.
7. 손부순. 전용택. 양호원. 이종대. 정용택 : 서울지역 일부 보육시설 실내공기중 휘발성유기화합물(VOCs)의 농도분포 특성. 한국실내환경학회, 2:268~271, 2005.
8. 환경부 : 실내공기질공정시험기준. 국립환경과학원, 환경부장관 고시 제 2010-24호.
9. Yun, Z, Bin, C, Yanli, G, Feifei, P and Jinling, Z : Indoor air environment of residential building in Dalian, China. Energy and Building. 36:235~239, 2004.