

울산광역시 초등학교 실내공기오염물질의 환경적 특성에 따른 농도 분석

Analysis of Indoor Air Pollutants from Elementary School Classrooms with Different Environment in Ulsan, Korea

이치현 · 이병규* · 김양호^{1),2)} · 이지호^{1),2)} · 오인보²⁾

울산대학교 건설환경공학부, ¹⁾울산대학교 의과대학 산업환경의학교실,

²⁾울산대학교 환경보건센터

(2010년 11월 2일 접수, 2010년 11월 17일 수정, 2010년 12월 6일 채택)

Chi-Hyeon Lee, Byeong-Kyu Lee*, Yang-Ho Kim^{1),2)}, Ji-Ho Lee^{1),2)} and In-Bo Oh²⁾

Department of Civil and Environmental Engineering, University of Ulsan

¹⁾*The Occupational and Environmental Medicine, University of Ulsan College of Medicine*

²⁾*Environmental Health Center, University of Ulsan*

(Received 2 November 2010, revised 17 November 2010, accepted 6 December 2010)

Abstract

This study analyzed indoor air pollutants from elementary school with different environment. Air sampling and measurement were carried out from classrooms and hallways from three target elementary schools in the fall and winter seasons. The winter average concentrations of PM₁₀, CO₂, CO, aldehydes and ketones, and benzene were higher than the fall ones. The fall average concentrations of O₃ and NO₂ were higher than the winter ones. The concentrations of PM₁₀ and CO₂ at the schools near the heavy traffic areas and having poor ventilation were higher than those from the other elementary school. The average concentration of CO at the school having heavy traffic volume was highest. The concentrations of O₃, NO₂, aldehydes and ketones, and VOCs at the school near the shipbuilding industries were highest among the three elementary schools.

Key words : Indoor air quality, Elementary school, Classroom, Seasonal variation, Regional characteristic

1. 서 론

오늘날 도시가 발달하고 많은 대형건축물들이 건설되면서 도시시민들의 대부분의 활동이 실내에서 이루어지게 되었다. 그로인해 사람들이 실내공기질에 대

한 많은 관심을 가지게 되었으며, 실내공기오염에 대한 많은 연구도 진행되고 있다. 실내공기오염물질은 가전제품의 사용, 조리나 난방 시 연료의 사용, 세제와 화장품 사용과 같은 실내활동에 의해서 발생하고, 건물의 건축 시 사용되는 건축자재, 페인트, 접착제 등의 건물표면 자체에서도 발생한다(Lee and Cho, 2002; Samfield, 1992; Sterling, 1985). 대표적인 실내공기오염 물질에는 포름알데하이드나 아세트알데하이드와 같

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)52-259-2864, E-mail : bklee@ulsan.ac.kr

은 알데하이드류 및 아세톤이나 MEK (Methyl ethyl ketone)와 같은 케톤류가 있고(Marchand *et al.*, 2006), 벤젠이나 톨루엔과 같은 휘발성유기화합물질(Volatile Organic Compounds: VOCs)이 있다(Kostiainen, 1995). 또한 질소산화물, 오존, 미세먼지, 라돈, 석면 등과 같은 것도 대표적인 실내공기오염물질이다(NRC, 1987; Shair and Heitner, 1974; Sabersky *et al.*, 1973; Thompson *et al.*, 1973; Anderson, 1972). 최근의 고층빌딩이나 많은 실내시설들에서는 에너지 소비를 최소화하여 비용을 절약하고 싶어한다. 그래서 겨울철에는 보온을 위해 외기와 연결된 대부분의 환기장치나 창문 또는 출입문 등을 닫고 생활하는 경우가 많다. 또한 여름철에는 지구온난화 등에 의해 상승한 고온의 외기와외의 접촉을 최소화하기 위하여 충분한 환기 없이 에어컨 등의 냉방장치를 가동하는 경우가 매우 빈번하다. 그래서 추운 겨울철이나 더운 여름철에 에너지 절약과 추위나 더위에 쉽게 이기기 위하여 실내를 밀폐시키고 냉방 및 난방장치를 사용함으로써 적절한 환기를 유지하지 못하는 경우가 많이 있다(NAS, 1993). 그 결과 실내에 대기오염 발생원이 있거나 실내 거주자 수가 늘어날 경우 실내환경에서 오염물질의 농도가 증가하고 실내 거주자들의 오염물질에 대한 노출량도 쉽게 증가할 수가 있다. 실내공기오염물질의 농도가 높을 시 기침이나 두통을 일으킬 수 있고, 피부질환이나 호흡기질환 등을 유발할 수도 있다(Clarisse *et al.*, 2003; 김운신, 2000). 이중에 특히, 포름알데하이드나 아세트알데하이드, 벤젠, 라돈이나 석면과 같은 물질들은 발암유발물질군으로 분류되어 이들에 대한 실내농도가 법으로 규제되기도 한다 (IARC, 2000). 그리고 실내공기오염물질의 농도와 업무능력간의 관계를 조사한 여러 연구에서는 오염물질의 농도가 증가할수록 업무능력이 저하된다고 보고하고 있다(Wargocki *et al.*, 2004, 2000, 1999; Mendell *et al.*, 2002; Lagercrantz *et al.*, 2000; Bartlett *et al.*, 1999; Myhrvold *et al.*, 1996). 특히, 성장기에 있는 유치원생이나 초등학교 학생들은 상대적으로 면역력이 약하고 실내에서의 활동량이 많으며, 공기오염에 대한 인지능력이나 저항능력이 떨어지기 때문에 실내공기오염물질에 대한 영향을 많이 받는 것으로 알려져 있다(Yoo *et al.*, 2006; 정영숙과 이정렬, 2000; Kim and Nam, 1997). 현재 초등학교의 실내공기질은 ‘학교보건법’에 의해서 규제를 받고 있지만, 학생들의 여러가지 실내활동

과 건물의 신축이나 리모델링 등의 환경적 조건에 의해서 기준농도를 초과하는 경우도 발생할 수 있을 것이다. 이에 본 연구에서는 가을철과 겨울철 초등학교 교실의 환기정도에 따른 실내공기질을 비교하고, 저학년과 고학년의 실내활동 차이와 학교가 위치한 지역적 특성에 따른 실내공기질의 비교를 통하여 보다 효과적인 초등학교 실내공기질 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1 연구대상 초등학교 선정

연구대상 초등학교를 선정하기 위해서 먼저, 산업도시 울산의 지역 대기질 자료를 분석하였다. 대기질 자료는 울산광역시에 설치되어 있는 13곳의 실시간 대기질 측정망에서 2006, 2007 및 2008년도에 측정된 3년간 평균값을 이용하였으며, 이 값을 미국 환경청 (US EPA)에서 발표한 대기질 지수(Air Quality Index: AQI)로 나타내어 대기질을 평가하였다. 대기질 자료와 지역적 특성을 바탕으로 실시간 대기질 측정망이 위치하고 있는 13개의 지역 중에서 산업배출원 및 교통배출원과 같은 대기오염물의 배출 특성을 고려하여 3개의 연구대상지역 및 초등학교를 선정하였다(그림 1). 선정된 세 초등학교 인근의 실시간 대기질 측정망에서 얻어진 3년간의 대기질과 관련된 내용을 표 1에 나타내었다. 그림 1에는 석유화학공단, 비철금속공단 그리고 자동차 및 조선업종 등을 포함하는 주요 산업배출 대기오염원에 대한 지역적 구분도 아울러 표시하였다. 본 연구에서 선정된 학교는 그 지역의 대표적인 실시간 대기질 측정망에서 반경 1 km 이내에 속하면서, 연구에 필요한 충분한 학생 수를 가지고 있으면서 본 연구에 협조적인 환경을 지닌 총 3개의 초등학교(A, B, C)였다(그림 1). 선정된 각 학교별 특성을 보면, A 초등학교는 지역적으로 주거지역에 속하며, 비교적 좋은 대기질을 가지고 있다. 그러나 인근에는 교통량이 많은 로터리와 고속도로가 위치하고 있다. B 초등학교는 지역적으로 대규모 석유화학공단 및 자동차 공장의 풍하지역에 위치하여, 가장 좋지 못한 대기질을 가지고 있다. 또한 산업물동량 수송 및 이웃도시 경주 등과의 이동이 빈번하여 비교적 교통량이 많은 편이다. C 초등학교

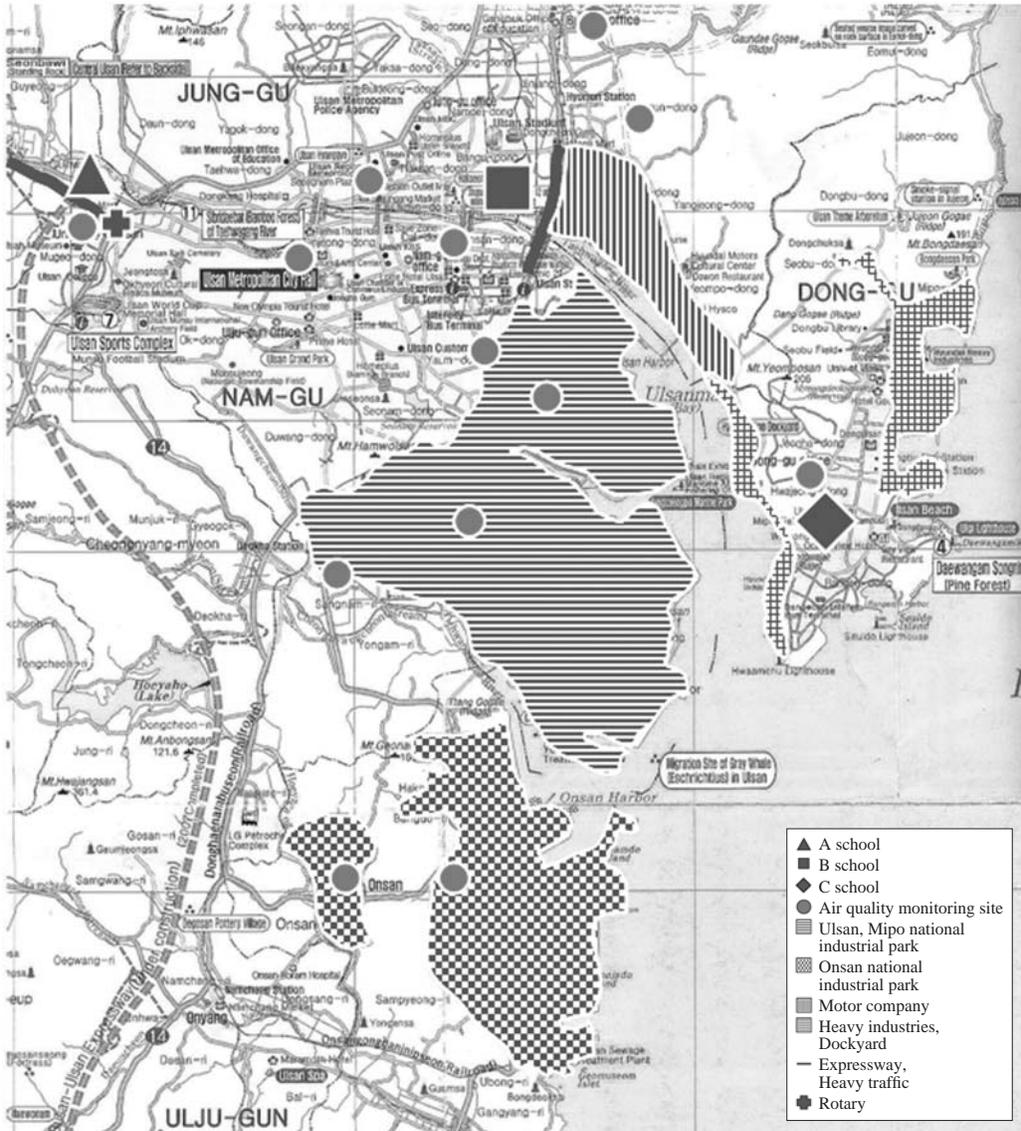


Fig. 1. Location of three target elementary schools and thirteen air quality monitoring stations in Ulsan.

교는 연안환경에 속하는 지역적 특성과 인근에는 대규모의 조선업종이 위치하고 있으며, A와 B 초등학교 중간 정도의 대기질을 가지고 있다.

2.2 연구대상 초등학교의 배경조건

연구대상 초등학교의 건물배치도를 그림 2에 나타내었다. A 초등학교는 별관이 본관과 강당 사이에 끼

어있는 구조로, 별관은 전체적으로 통풍이 좋지 않은 구조로 되어 있었다. 본관도 별관에 의해서 각 층마다 전체 7개 교실 중 3개 교실(40% 정도)이 통풍에 지장을 받는 건물구조로 배치되어 있었다. B 초등학교는 전체적으로 매우 복잡한 구조로 되어 있었으며, 특히 신관 건물은 교실이 복도를 기준으로 마주보고 있어서 원활한 통풍이 어려운 구조로 되어 있었다. C

Table 1. 3-year averages of air pollutant concentrations and air quality index (AQI) near 3 elementary schools selected for this study.

Regions		SO ₂ (ppm)	NO ₂ (ppm)	O ₃ (ppm)	PM ₁₀ (μg/m ³)	CO (ppm)
A	Average conc.	0.006	0.021	0.029	46.5	0.298
	AQI	8.8	—	22.7	43.1	3.4
	AQI _{overall}	$(8.8^{2.5} + 22.7^{2.5} + 43.1^{2.5} + 3.4^{2.5})^{1/2.5} = 46.7$				
B	Average conc.	0.006	0.024	0.032	58.4	0.330
	AQI	8.8	—	25.0	52.7	3.8
	AQI _{overall}	$(8.8^{2.5} + 25.0^{2.5} + 52.7^{2.5} + 3.8^{2.5})^{1/2.5} = 56.1$				
C	Average conc.	0.008	0.020	0.028	50.2	0.366
	AQI	11.8	—	21.9	46.5	4.2
	AQI _{overall}	$(11.8^{2.5} + 21.9^{2.5} + 46.5^{2.5} + 4.2^{2.5})^{1/2.5} = 49.8$				

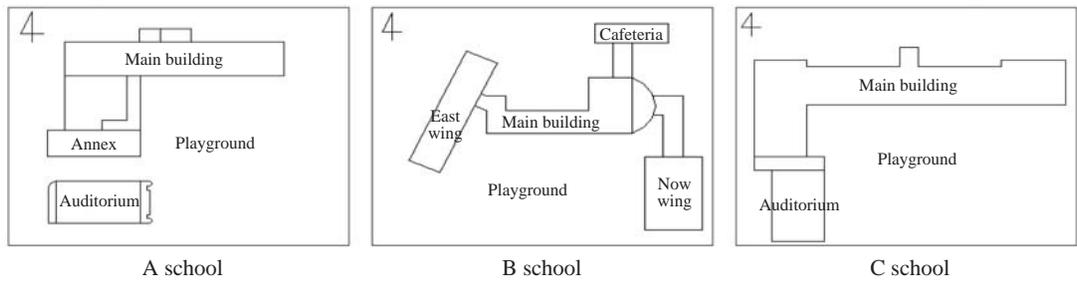


Fig. 2. Building layout of three target elementary schools.

초등학교는 본관에 영향을 주는 건물이 없어 연구대상 세 초등학교 가운데 가장 통풍이 원활한 건물배치구조로 되어 있었다.

연구대상 초등학교에서 실내공기질 측정기간 동안에 인근의 실시간 대기오염 측정망에서 관측된 풍향, 풍속 자료를 이용하여 작성한 바람장미를 그림 3에 나타내었다. A 초등학교는 가을철에 고속도로와 교동로터리의 영향을 모두 받으며, 겨울철에는 주로 로터리의 영향을 받는 것으로 나타났다. B 초등학교는 가을철과 겨울철의 주 풍향이 북북동풍과 북풍으로 남풍이나 남동풍에 의한 영향이 적어 연구기간 동안에는 예상되어졌던 것보다 산업배출오염원의 영향을 적게 받는 것으로 나타났다. C 초등학교는 가을철에 주로 조선업종의 영향을 받고 겨울철에는 조선업종 및 연안바닷바람의 영향을 많이 받는 것으로 나타났다.

연구대상 초등학교의 건축년도와 재학하고 있는 학생 수를 표 2에 나타내었다. 건축년도는 A 초등학교가 2000년으로 가장 오래 되었으며, 다음으로 B, C

초등학교 순이었다. 학생 수는 B 초등학교가 1,938명으로 가장 많았고, 다음으로 A, C 초등학교 순이었다. 또한 표 2에는 본 연구에서 공기시료 포집이 이루어진 저학년 및 고학년 교실에서 생활하는 학생들의 숫자도 나타내었다.

2.3 연구대상 초등학교 실내공기질 측정

연구대상 3개 초등학교 교실에서의 실내공기질 측정은 2009년 가을철과 겨울철에 실시되었으며, 저학년 그룹(1~3학년)과 고학년 그룹(4~6학년)으로 구분하였다. 저학년 그룹 중 2학년과 고학년 그룹 중 6학년 교실에 대해서는 각각 3학급씩 선정하여 측정하였고, 나머지 학년에서는 한 학년당 1학급씩 선정해서 측정을 하였다. 그리하여 한 계절당 각 학교에서 10개 학급의 실내공기질을 측정하였으며, 가을철과 겨울철을 합하여 총 60개 교실에서의 실내공기질을 측정, 분석하였다. 실내공기질 측정시 가을철과 겨울철의 실제적인 수업환경을 반영하기 위해, 가을철에는 모든 창문과 출입문을 개방하였으며 겨울철에

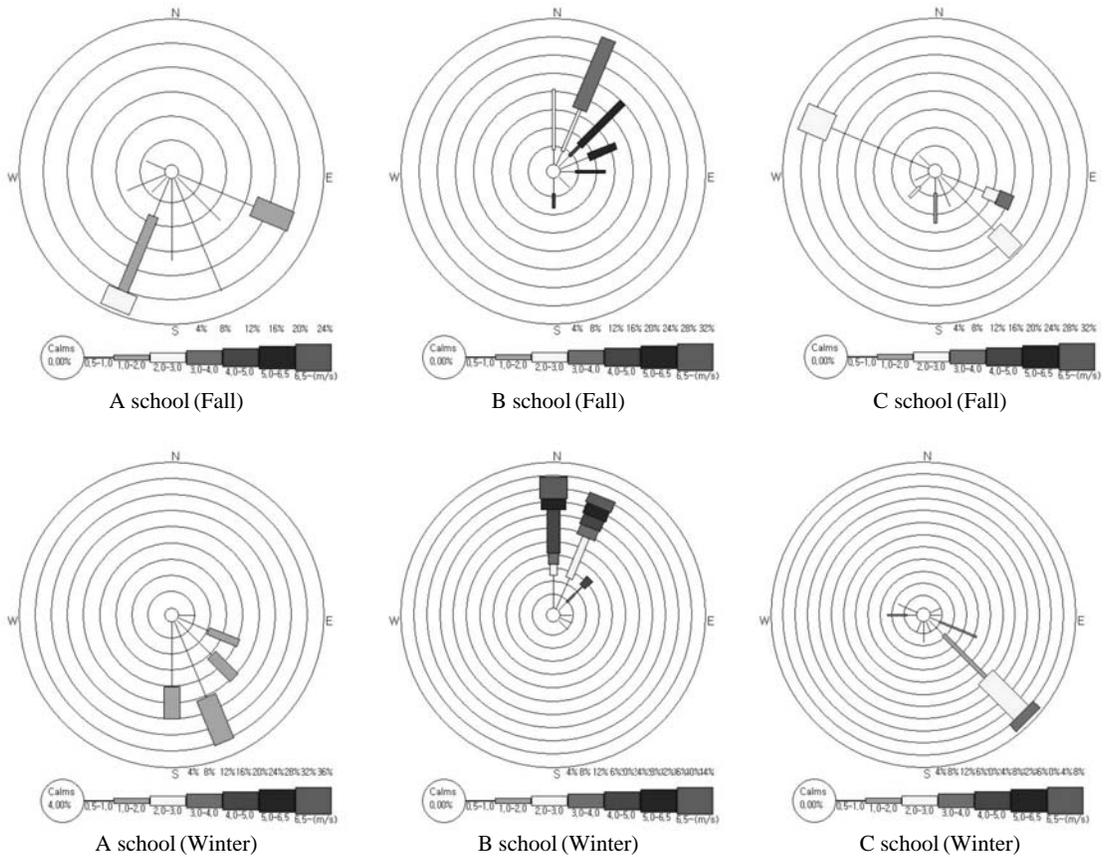


Fig. 3. Wind roses observed at the air quality monitoring sites located in the vicinity of three elementary schools during the study periods.

Table 2. Constructional year and number of students of three target elementary schools.

	A school	B school	C school
Construction year	2000	2002	2004
Total number of students	1058	1938	701
Number of lower grade students	32.2±3.0	35.4±1.7	31.0±2.5
Number of upper grade students	31.8±0.4	36.0±1.6	30.6±2.6

는 모든 창문과 출입문을 닫은상태를 유지하였다.

표 3에 나타난 바와 같이, 1교시(09:10~09:50)에는 저학년 교실에서 실내공기를 포집하였다. 수업시간에는 교실 내에서 40분 동안 연속적으로 측정을 하였고 측정 장비의 설치 장소는 교실의 한 가운데이며, 측정 높이는 학생들이 수업시간에 주로 책상에 앉아서 수업하는 것을 고려하여 바닥으로부터 약

1 m 정도로 하였다. 쉬는시간(09:50~10:10)에는 측정교실의 복도에서 20분 동안 연속적으로 측정을 하였으며, 측정 장비의 설치 장소는 학생들의 통행에 불편을 주지 않기 위하여 복도의 벽면 쪽에서 30 cm 정도 떨어진 위치에서 복도공기를 포집하였다. 이때 측정 높이는 교실에서와 마찬가지로 약 1 m 정도로 하였다. 4교시(11:40~12:20)와 쉬는시간(12:20~

12:40)에는 고학년 교실과 복도에서 저학년 교실 및 복도측정에서와 같은 방법으로 실내공기를 포집하였다.

측정하고자 하는 모든 실내공기오염물질 항목 [(1) 실내공기질: PM₁₀, CO₂, CO, O₃, NO₂; (2) 알데하이드류 및 케톤류; (3) 휘발성유기화합물질; (4) 기상조건: 온도, 습도]를 동시에 측정하였다. 측정 중 발생하는 특이사항을 자세하게 기록하였다.

표 4에는 이번 연구에서 측정, 분석된 실내공기질 항목 및 기상 측정항목에 대한 시료포집 장비 및 정보, 그리고 그러한 측정항목에 대한 분석장비 정보 등을 요약하여 나타내었다. CO₂, O₃, NO₂, CO, 온도 및 습도는 10초마다 실내공기질 측정장비 (IQ-610Xtra)를 이용하여 연속적인 측정을 실시하여 분석하였다. 10초마다 얻어지는 포름알데하이드 측정기기 (Z-300XP) 값은 참고용으로 사용하였다. 포름알데하이드나 아세트알데하이드를 포함한 알데하이드류 및 케톤류는 오존의 영향을 배제시키기 위한 오존스크러버를 장착한 2,4-DNPH (2,4-Dinitrophenylhydrazine) 카트리지를 이용하여 실내공기시료를 포집하고, 2,4-DNPH와 반응하여 생성된 각각의 알데하이드류 및 케톤류

의 하이dra존 유도체를 아세트나이트릴을 이용하여 이들을 추출하여 고성능액체크로마토그래피 (HPLC-UVD)를 이용하여 알데하이드 및 케톤류의 성분을 확인하고 정량적 농도를 분석하였다. PM₁₀은 광산란법에 의하여 입자의 수를 측정하고 이를 질량농도로 환산하는 GT-331 (Sibata)을 이용하였다. 휘발성유기화합물질 (VOCs)은 테낙스로 충전된 스테인레스 튜브에 실내공기시료를 포집하여 가스크로마토그래피 (GC-MSD)를 이용하여 성분의 확인과 정량적 농도를 분석하였다. 그리고 학교보건법 시행규칙에 의한 '교사 안에서의 공기의 질에 대한 유지 관리 기준'은 표 5에 나타내었고, 본 연구에서 얻어진 농도값에 대한 비교 기준으로 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가을과 겨울의 실내공기질 비교

연구대상인 3개 초등학교 교실과 복도에서 연구기간 동안 얻어진 가을철과 겨울철의 실내공기오염물질의 평균농도 결과를 표 7과 8에 나타내었다. 우선,

Table 3. Sampling time at the measurement places.

Grade	Floor	Period	In class (Classroom)	Break (Hallway)
Lower (1 ~ 3)	1F ~ 2F	Period I	09:10 ~ 09:50 (40 min)	09:50 ~ 10:10 (20 min)
Upper (4 ~ 6)	3F ~ 4F	Period IV	11:40 ~ 12:20 (40 min)	12:20 ~ 12:40 (20 min)

Table 4. Sampling equipments and terms (intervals) for each pollutant.

Items	Instruments	Sampling
CO ₂ , O ₃ , NO ₂ , CO, Temperature, Humidity	Indoor air quality probe (IQ-610Xtra, Graywolf sensing solutions)	Continuous (60 min, 10 sec Interval)
HCHO	Formaldehyde meter (Z-300XP, Environmental sensors)	Continuous (60 min, 10 sec Interval)
PM ₁₀	Particle mass monitor (GT-331, Sibata)	Continuous (60 min, 5 min Interval)
VOCs	Tenax-TA stainless steel tube (Markes), Mini pump (MP-Σ100, Sibata), Thermal desorber (Unity, Markes), GC-MSD (CP-3800, Varian)	Continuous (20 min)
Aldehydes and Ketones	DNPH-cartridge (TS-300, Top trading eng), Ozone-scrubber (OS-200, Top trading eng), Mini pump (MP-Σ300, Sibata), HPLC (1200 series, Agilent)	Continuous (60 min)

PM₁₀, CO₂, CO의 경우를 보면, 교실과 복도에서 공통적으로 3가지 오염물질 모두 겨울철의 농도가 가을철보다 유의하게 ($p < 0.01$; CO 제외, PM₁₀ B 초등학교 제외) 높은 것으로 나타났다.

교실에서의 가을철 PM₁₀과 CO₂의 평균농도는 ‘학교보건법 기준농도’ (이하 ‘기준농도’; PM₁₀: 100 µg/m³, CO₂: 1,000 ppm)를 만족하였지만, 겨울철에는 C 초등학교의 PM₁₀을 제외하고 모두 기준농도를 초과하는 것으로 나타났다. 특히, A 초등학교는 PM₁₀의 평균농도가 270.3 µg/m³로 기준농도를 3배 정도나 초과하였다.

본 연구에서 사용한 PM₁₀ 측정기(GT-331)에 의한 측정농도는 실내공기를 여과지(Filter)에 포집하여 중량측정법(Gravimetry)으로 분석한 PM₁₀ 농도와는 다소 차이가 나겠지만, A 초등학교에서 나타난 농도는 기준농도에 비하여 매우 높은 값이라고 할 수 있다.

본 연구에서는 여과지 포집에 의한 PM₁₀ 측정기가 사용되지 않았는데, 이는 PM₁₀ 측정기의 높은 소음으로 인한 수업방해를 주지 않기 위해서였다.

복도에서의 가을철 PM₁₀의 평균농도는 쉬는시간에 측정된 특성상 학생들의 활동량이 많으므로 A와 B 초등학교에서는 기준을 약간 초과하였으며, 겨울철에는 모두 기준을 초과하는 것으로 나타났다. 특히, A 초등학교는 복도에서도 PM₁₀의 평균농도가 224.8 µg/m³로 기준농도를 2배 이상 초과하였다. 가을철의 CO₂ 평균농도는 모두 기준을 만족하였으며, 겨울철에는 C 초등학교를 제외하고 모두 기준을 약간 초과하였다. CO는 교실과 복도에서 공통적으로 가을철과 겨울철 모두 기준농도(10 ppm)를 만족하였다.

O₃과 NO₂는 3개 초등학교 교실과 복도에서 공통적으로 모두 가을철의 평균농도가 겨울철보다 높게

Table 5. Maintenance standards of indoor air quality in classroom.

Pollutants	Standards	Application facilities	Notes
PM ₁₀ (µg/m ³)	100	All classrooms	Compulsion ventilation (1,500)
CO ₂ (ppm)	1,000		
HCHO (µg/m ³)	100		
Total suspended bacteria (CFU/m ³)	800		
Air-borne bacteria (CFU/room)	10	Infirmary, Cafeteria	
CO (ppm)	10	Individual heating, Near from the road	Heating by direct combustion
NO ₂ (ppm)	0.05		
Rn (cPi/L)	4.0	Basement	
TVOC (µg/m ³)	400	within 3 years since the construction	Including extension and remodeling
Asbestos (unit/cc)	0.01	Buildings used the asbestos	
O ₃ (ppm)	0.06	Teacher's room, Administration room	Having the ozone generating office machine such as photocopiers
Mite (head/m ²)	100	Infirmary	

Table 6. The meteorological condition during the sampling period.

Season	1st Meas.		2nd Meas.		3rd Meas.		4th Meas.		5th Meas.		Avg ± SD		
	Cloud	Sunshine	Cloud	Sunshine									
A	Fall	8.5	0.0	2.5	10.5	2.3	8.5	2.9	8.3	1.3	10.9	3.5 ± 2.9	7.6 ± 4.4
	Winter	0.0	9.5	0.9	6.8	0.6	6.9	2.0	8.2	4.6	5.1	1.6 ± 1.8	7.3 ± 1.7
B	Fall	9.4	0.0	7.6	5.5	7.5	1.4	4.8	7.6	9.1	0.7	7.7 ± 1.8	3.0 ± 3.3
	Winter	8.5	0.2	0.4	8.3	2.8	6.8	3.6	7.0	2.5	8.9	3.6 ± 3.0	6.2 ± 3.5
C	Fall	5.4	3.7	8.4	0.0	6.8	4.8	4.3	7.8	5.3	4.6	6.0 ± 1.6	4.2 ± 2.8
	Winter	0.0	9.4	3.5	7.5	10.0	0.0	6.3	6.0	3.0	8.7	4.6 ± 3.8	6.3 ± 3.8

*Cloud: an average fraction covered by cloud (x out of 10, e.g., 8.5 means 85% covered by cloud). Sunshine: a sunshine duration time (h). Meas.: a measurement day

나타났다(A 초등학교: $p < 0.01$). 교실에서의 O_3 은 3개 초등학교에서 가을철과 겨울철 모두 기준농도(0.06 ppm)를 만족하였다. NO_2 에 대한 가을철 농도는 기준농도(0.05 ppm)에 거의 접근한 B 초등학교(0.047 ppm)를 제외하고 모두 기준농도(0.05 ppm)를 초과하였고, 겨울철에는 모두 기준을 만족하였다(표 7 및 그림 4). 복도에서의 가을철 O_3 과 NO_2 는 B 초등학교(O_3 : 0.041 ppm, NO_2 : 0.048 ppm)를 제외하고 모두 기준을 초과하였으며, 겨울철에는 C 초등학교 NO_2 (0.060 ppm)를 제외하고 모두 기준을 만족하였다(표 8 및 그림 5). 이렇게 가을철에 개방된 실내공간(교실과 복도)에서의 높은 O_3 과 NO_2 농도는 외기의 영향이다. 즉, 측정기간의 일조시간이 평균 5시간 정도(표 6)로 광화학 반응에 의한 O_3 및 NO_2 의 생성이 가능함을 나타낸다. 특히, C 초등학교 실내공간에서의 O_3 과 NO_2 의 높은 농도는 인근 조선업종의 용접과정에서 발생된 O_3 과 NO_2 의 영향을 받아 실내공간으로 더 많이 이동되었기 때문으로 설명된다. 또한 C 초등학교에서 겨울철 외기의 NO_2 농도가 A 및 B 초등학교의 외기 농도보다 각각 79% 및 19% 높았다. 그래서 외기에서 높은 농도의 NO_2 가 교실내로 유입(Infiltration)되어 C 초등학교 교실내의 NO_2 농도를 증가시킨 것으로 설명된다. 알데하이드류 및 케톤류는 교실과 복도에서 60분

동안 연속적으로 샘플링된 시료를 분석한 농도를 사용하였으며, 모든 측정장소에서 검출된 5가지 성분(Formaldehyde, Acetaldehyde, Acetone, Propionaldehyde, Butyraldehyde)을 중심으로 비교한 결과를 표 9와 그림 6에 나타내었다. 알데하이드류 및 케톤류는 3개 초등학교에서 5가지 성분 모두 겨울철 농도가 가을철보다 높게 나타났다. Formaldehyde는 가을철 및 겨울철 모두 연구대상 모든 장소에서 기준농도($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 낮은 값을 나타내었다.

VOCs 성분 비교를 위해서는 교실에서 20분 동안 샘플링된 시료를 분석한 농도를 사용하였으며, 가을철 및 겨울철의 6가지 VOCs 성분(Benzene, Toluene, Ethylbenzene, m,p-Xylene, Styrene, o-Xylene)에 대한 농도분석결과를 표 10과 그림 7에 나타내었다. 가을철과 겨울철에 유사한 농도범위를 나타낸 A 초등학교의 Toluene 농도를 제외하고 측정분석된 모든 실내환경에서 Benzene과 Toluene은 모두 겨울철의 농도가 가을철보다 높게 나타났다. C 초등학교의 경우 겨울철에 1급 발암성 물질로 알려진 Benzene 농도가 일부교실에서는 $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (0.8 ppb)가 될 정도로 높게 나타났다. 그러나 Ethylbenzene, m,p-Xylene, o-Xylene은 A와 B 초등학교에서는 가을철 농도가 겨울철보다 높게 나타났고, C 초등학교에서는 겨울철 농도가 가

Table 7. Seasonal comparison of concentrations of main indoor air pollutants from the classrooms between fall and winter seasons. (n=10)

Items	Conc.	A school		B school		C school	
		Fall	Winter	Fall	Winter	Fall	Winter
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	67.0 \pm 24.6*	270.3 \pm 58.8**	73.7 \pm 44.3	118.2 \pm 56.7*	47.0 \pm 20.6*	91.5 \pm 48.6
	Min, Max	37.4, 105.2*	197.9, 343.3**	34.1, 155.1	44.6, 203.1*	29.0, 79.4*	39.7, 193.7
	p value	0.000		0.072		0.021	
CO ₂ (ppm)	Avg \pm SD	616 \pm 99*	1823 \pm 334	626 \pm 90	2026 \pm 471	670 \pm 294	1821 \pm 501
	Min, Max	466, 790*	1277, 2460	482, 761	1459, 2944	429, 1307	1262, 2843
	p value	0.000		0.000		0.000	
CO (ppm)	Avg \pm SD	1.3 \pm 0.4*	1.5 \pm 0.2*	1.5 \pm 1.0	2.6 \pm 1.9	1.2 \pm 0.3	1.5 \pm 0.3
	Min, Max	0.9, 2.0*	1.1, 1.7*	0.6, 3.6	1.1, 5.9	0.9, 1.9	0.9, 2.0
	p value	0.078		0.116		0.131	
O ₃ (ppm)	Avg \pm SD	0.055 \pm 0.019*	0.021 \pm 0.011	0.040 \pm 0.015	0.030 \pm 0.013*	0.052 \pm 0.026	0.038 \pm 0.016
	Min, Max	0.035, 0.088*	0.007, 0.039	0.023, 0.067	0.017, 0.053*	0.017, 0.104	0.010, 0.059
	p value	0.000		0.159		0.171	
NO ₂ (ppm)	Avg \pm SD	0.066 \pm 0.025*	0.024 \pm 0.013	0.047 \pm 0.020	0.036 \pm 0.015*	0.062 \pm 0.034	0.043 \pm 0.020
	Min, Max	0.039, 0.108*	0.006, 0.049	0.025, 0.083	0.021, 0.063*	0.019, 0.132	0.010, 0.071
	p value	0.000		0.186		0.156	

*n=9, **n=8

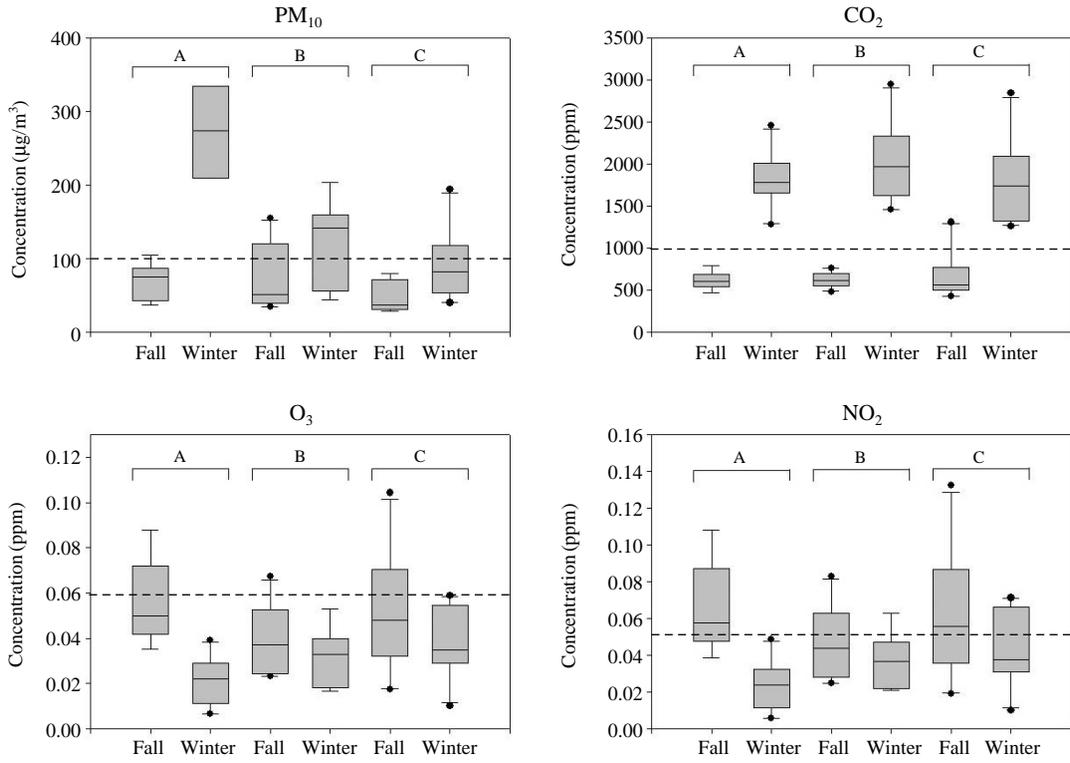


Fig. 4. Concentration distributions of main indoor air pollutants from classrooms between fall and winter seasons (Solid lines indicate standard).

Table 8. Seasonal comparison of concentrations of main indoor air pollutants from the hallways between fall and winter seasons. (n=10)

Items	Conc.	A school		B school		C school	
		Fall	Winter	Fall	Winter	Fall	Winter
PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	116.7 \pm 60.7	224.8 \pm 87.5**	106.4 \pm 63.8	117.9 \pm 65.3*	40.7 \pm 10.1*	86.2 \pm 21.0
	Min, Max	30.4, 204.1	54.6, 322.2**	39.6, 217.0	29.5, 257.3*	26.2, 56.2*	56.9, 113.8
	p value	0.007		0.702		0.000	
CO_2 (ppm)	Avg \pm SD	611 \pm 102*	1058 \pm 316	589 \pm 106	1094 \pm 414	491 \pm 41	912 \pm 191
	Min, Max	483, 763*	651, 1541	415, 788	438, 1731	422, 567	652, 1271
	p value	0.001		0.004		0.000	
CO (ppm)	Avg \pm SD	1.2 \pm 0.3*	1.3 \pm 0.2*	1.0 \pm 0.5*	2.0 \pm 1.6	0.9 \pm 0.2*	1.2 \pm 0.4
	Min, Max	0.8, 1.7*	1.0, 1.4*	0.4, 2.1*	0.5, 5.4	0.6, 1.1*	0.6, 1.8
	p value	0.555		0.079		0.019	
O_3 (ppm)	Avg \pm SD	0.062 \pm 0.025*	0.024 \pm 0.006*	0.041 \pm 0.009*	0.032 \pm 0.012*	0.066 \pm 0.022	0.051 \pm 0.015
	Min, Max	0.034, 0.117*	0.012, 0.033*	0.025, 0.053*	0.021, 0.056*	0.034, 0.105	0.020, 0.066
	p value	0.002		0.108		0.078	
NO_2 (ppm)	Avg \pm SD	0.075 \pm 0.034*	0.030 \pm 0.013	0.048 \pm 0.011*	0.038 \pm 0.017*	0.081 \pm 0.030	0.060 \pm 0.020
	Min, Max	0.036, 0.149*	0.012, 0.063	0.027, 0.062*	0.023, 0.071*	0.039, 0.134	0.020, 0.080
	p value	0.001		0.159		0.083	

*n=9, **n=8

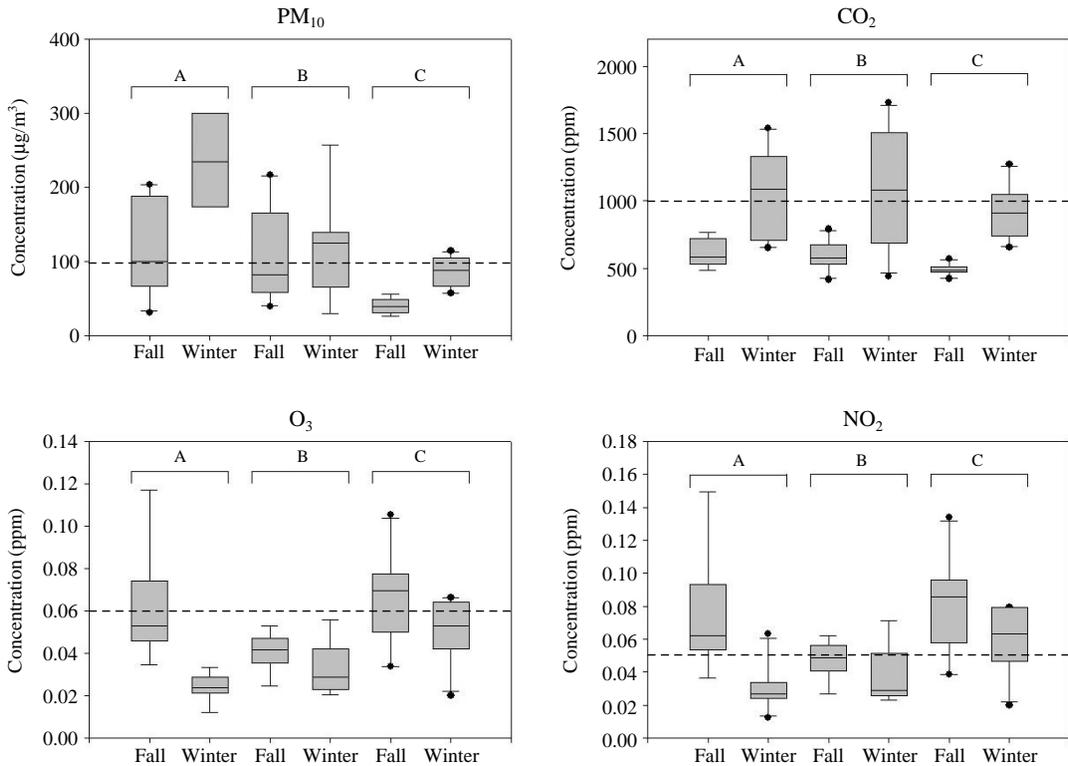


Fig. 5. Concentration distributions of main indoor air pollutants from hallways between fall and winter seasons (Solid lines indicate standard).

을철보다 높게 나타났다. Styrene은 A와 C 초등학교에서는 겨울철 농도가 가을철보다 높게 나타났고, B 초등학교에서는 검출이 되지 않았다.

실내공기오염물질의 가을철과 겨울철의 농도 비교에서 PM₁₀, CO₂, CO 그리고 알테하이드류 및 케톤류의 농도가 모두 겨울철에 높게 나타난 이유는 겨울철에 실내공기오염을 측정할 때 모든 창문과 출입문을 닫은 것과 관련이 깊다. 겨울철 측정기간 동안 실내에서 발생한 오염물질이 외부로 배출되거나 확산되지 못하고 실내에서 머물러 있기 때문에 실내오염 농도를 높게 만든 주요 요인이다. 그리고 A 초등학교의 PM₁₀농도가 겨울철에 교실(270.3 µg/m³)과 복도(224.8 µg/m³)에서 매우 높은 농도를 나타낸(표 7 및 8; 그림 4 및 5) 이유는 측정이 이루어진 일부교실 또는 복도의 바닥재가 나무로 되어있어서 학생들의 활동시 바닥에 가라앉은 먼지의 재비산량이 가장 많을 것으로 추정되고, B와 C 초등학교에 비하여 건물의

구조상 좋은 통풍에 지장을 받는 측정대상교실이 많았기 때문에 판단된다. 참고로 Lee 등이 실시한 초등학교 교실에서 측정된 PM₁₀의 농도도 학생들의 활동에 따라서 최고 800 µg/m³을 초과하기도 하였다(Lee *et al.*, 2006). O₃와 NO₂의 농도가 겨울철보다 모두 가을철에 높게 나타난 이유는 비교적 태양광의 세기가 강한 가을철에 대기중의 높은 VOCs와 NO₂가 광화학 산화반응으로 O₃을 생성하고, 광반응으로 산화된 VOCs(RO₂, R: radical)와 NO와의 반응에서 NO₂를 생성하는 Cycle 과정의 일환으로 설명된다(표 11).

VOCs 분석에서 C 초등학교에서는 모든 성분의 농도가 겨울철에 높았으며, A와 B 초등학교에서는 가을철과 겨울철의 농도 차이를 설명하기 어려웠다. 이러한 이유는 그림 2를 통해 설명한 바와 같이 A와 B 초등학교는 건물의 구조상 창문과 출입문을 개방한 상태에서도 통풍이 제대로 이루어지지 않기 때문

Table 9. Seasonal comparison of concentrations of aldehydes and ketones from three elementary schools between fall and winter seasons. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=10)

Items	Conc.	A school		B school		C school	
		Fall	Winter	Fall	Winter	Fall	Winter
Formaldehyde	Avg \pm SD	27.23 \pm 6.84	33.48 \pm 4.48	15.83 \pm 6.20	33.13 \pm 8.10	25.64 \pm 6.60*	35.55 \pm 7.65
	Min, Max	16.91, 37.32	23.11, 38.22	6.05, 25.10	18.08, 44.47	15.85, 33.90*	28.61, 49.48
	p value	0.026		0.000		0.008	
Acetaldehyde	Avg \pm SD	8.13 \pm 4.77	15.15 \pm 6.27	6.92 \pm 2.88	12.80 \pm 3.40	13.75 \pm 2.51*	15.98 \pm 6.51
	Min, Max	2.93, 16.55	7.69, 28.76	3.64, 11.85	7.22, 19.27	9.64, 17.00*	8.70, 30.47
	p value	0.011		0.001		0.349	
Acetone	Avg \pm SD	9.12 \pm 6.40	25.69 \pm 9.31	4.17 \pm 3.02	25.45 \pm 9.61	14.67 \pm 7.02*	23.39 \pm 10.03**
	Min, Max	1.76, 24.07	10.44, 41.36	0.00, 10.85	13.36, 39.98	6.77, 27.07*	9.81, 39.67**
	p value	0.000		0.000		0.053	
Propionaldehyde	Avg \pm SD	1.27 \pm 1.60	1.58 \pm 1.77	0.17 \pm 0.17*	0.57 \pm 0.31**	2.08 \pm 2.55*	1.09 \pm 0.85**
	Min, Max	0.00, 4.73	0.08, 4.53	0.02, 0.54*	0.18, 0.95**	0.16, 6.90*	0.27, 2.75**
	p value	0.686		0.009		0.299	
Butyraldehyde	Avg \pm SD	0.00 \pm 0.00	3.30 \pm 2.94*	0.00 \pm 0.00***	2.44 \pm 1.56	1.63 \pm 2.57*	5.64 \pm 1.88
	Min, Max	0.00, 0.00	0.00, 10.00*	0.00, 0.00***	0.00, 4.37	0.00, 7.67*	2.65, 8.58
	p value	0.010		0.001		0.001	

* n=9, ** n=8, *** n=7

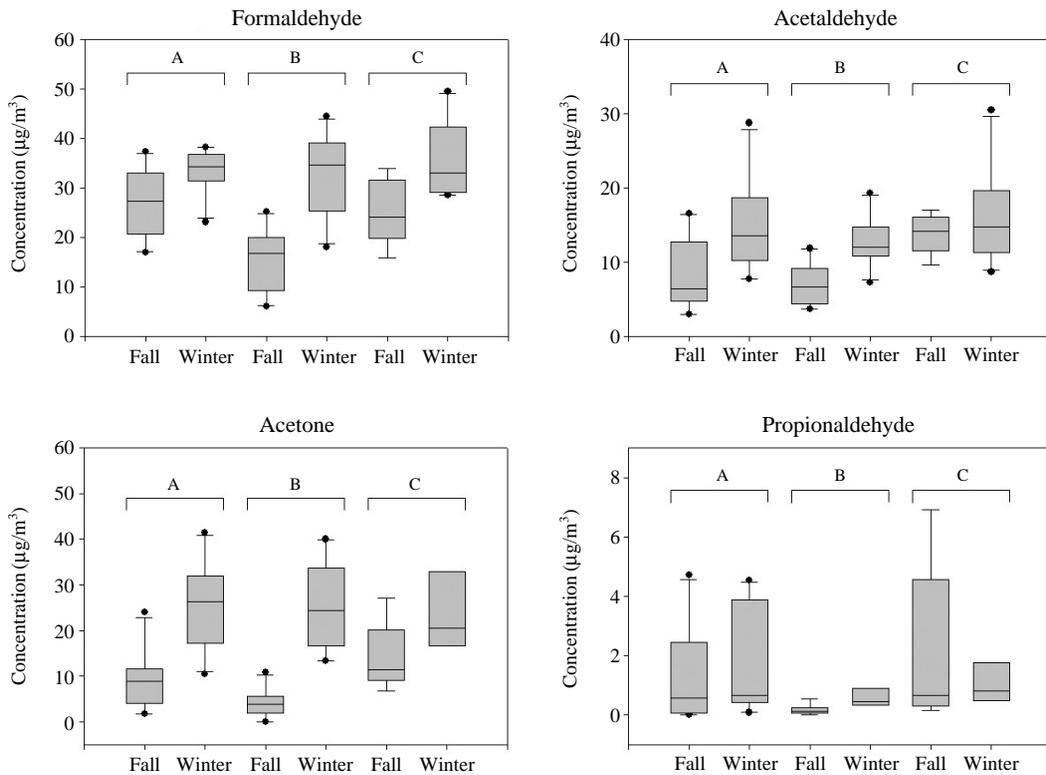


Fig. 6. Concentration distributions of aldehydes and ketones from three elementary schools between fall and winter seasons.

Table 10. Seasonal comparison of concentrations of VOCs from three elementary schools between fall and winter seasons.
($\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=10)

Items	Conc.	A school		B school		C school	
		Fall	Winter	Fall	Winter	Fall	Winter
Benzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	0.636 \pm 0.225	0.877 \pm 0.133	0.620 \pm 0.397	0.895 \pm 0.421	0.595 \pm 0.236**	1.342 \pm 0.644
	Min, Max	0.306, 0.993	0.666, 1.002	0.166, 1.323	0.327, 1.488	0.303, 0.986**	0.650, 2.669
	p value	0.009		0.151		0.005	
Toluene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	10.310 \pm 4.706	8.609 \pm 2.899	5.984 \pm 2.642	9.887 \pm 5.480	7.555 \pm 4.595***	19.332 \pm 6.576*
	Min, Max	4.136, 15.896	4.996, 14.932	2.878, 10.435	3.943, 20.272	3.410, 16.252***	9.115, 26.611*
	p value	0.346		0.058		0.001	
Ethylbenzene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	2.543 \pm 1.690	1.917 \pm 0.607	0.903 \pm 0.687	0.626 \pm 0.315*	2.680 \pm 2.404***	7.699 \pm 3.859
	Min, Max	0.000, 5.494	0.999, 2.922	0.000, 1.962	0.168, 1.077*	0.162, 5.907***	2.438, 13.593
	p value	0.285		0.275		0.008	
m,p-Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	6.439 \pm 2.731	3.570 \pm 1.299	4.320 \pm 2.095	2.665 \pm 1.424	10.326 \pm 9.425***	23.108 \pm 8.471
	Min, Max	1.991, 10.802	1.831, 5.633	1.681, 8.597	0.671, 5.458	2.428, 25.631***	11.231, 34.616
	p value	0.008		0.054		0.010	
Styrene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	0.321 \pm 0.518	0.643 \pm 0.609	0.000 \pm 0.000	0.000 \pm 0.000	0.000 \pm 0.000**	0.828 \pm 0.883
	Min, Max	0.000, 1.137	0.162, 1.785	0.000, 0.000	0.000, 0.000	0.000, 0.000**	0.000, 2.329
	p value	0.219		-		0.016	
o-Xylene ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Avg \pm SD	1.767 \pm 0.840	1.058 \pm 0.353	1.055 \pm 0.573	0.861 \pm 0.563	3.272 \pm 3.276***	8.769 \pm 3.537
	Min, Max	0.460, 3.225	0.666, 1.623	0.336, 2.076	0.168, 1.784	0.607, 8.544***	3.744, 13.107
	p value	0.030		0.456		0.005	

* n=9, ** n=8, *** n=7

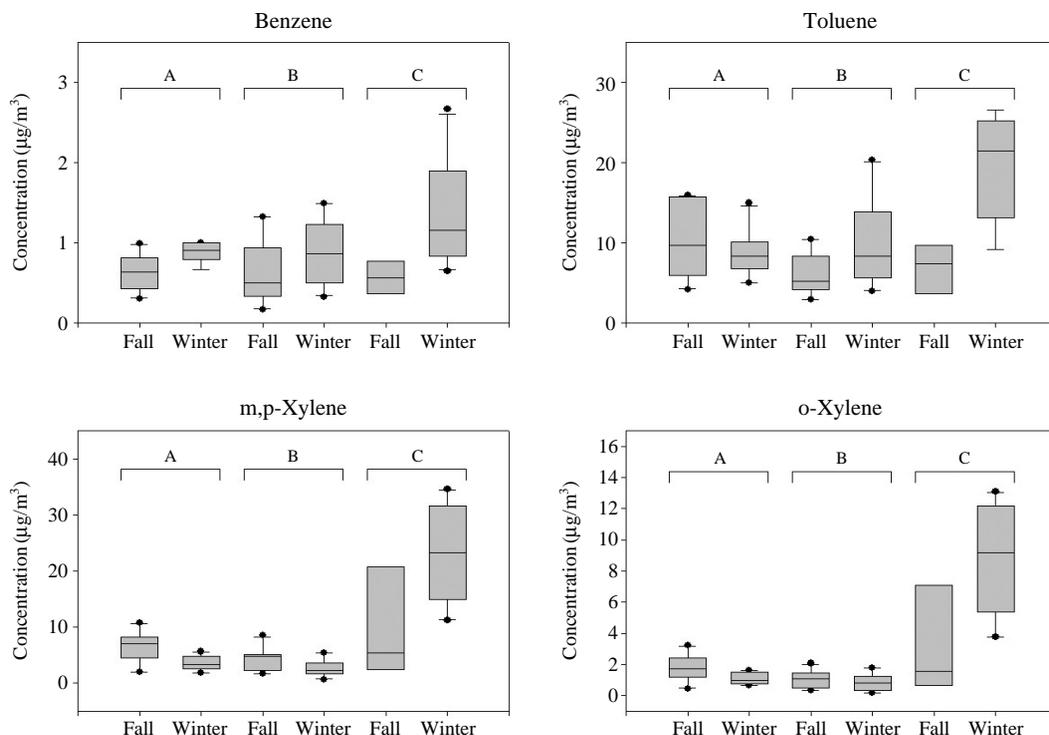


Fig. 7. Concentration distributions of VOCs from three elementary schools between fall and winter seasons.

에 VOCs 성분의 가을철과 겨울철의 농도 차이가 확실하지 않았다. 그러나 C 초등학교의 가을철에는 창문을 개방한 상태에서 통풍이 원활히 이루어지기 때문에 실내에서 발생한 오염물질의 외기로의 확산이 양호하여 가을철의 농도가 겨울철보다 낮은 것으로 판단된다.

3. 2 지역적 실내공기질 비교

측정 대상 초등학교의 지역적 특성과 대기질의 차이에 따른 실내공기질을 비교하기 위하여 3개 초등학교 교실과 복도에서의 가을철과 겨울철 실내오염물질의 평균농도를 이용하였다(표 13 및 14). 먼저, 교실과 복도에서의 PM₁₀은 A 초등학교가 가장 농도가 높았고, 다음으로 B 초등학교, C 초등학교 순이었

다. 여기서 A와 B 초등학교에서 C 초등학교보다 농도가 높았던 것은 A와 B 초등학교 인근은 교통량이 상대적으로 많고, 건물구조상 통풍이 잘되지 않는 교실이 많았기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 인근의 교통량이 가장 많고 일부 측정대상 교실 또는 복도의 바닥재가 나무로 되어 있었던 A 초등학교는 교실(162.6 µg/m³)과 복도(164.8 µg/m³)에서 모두 기준농도(100 µg/m³)를 초과하였으며, 복도에서는 B 초등학교(111.8 µg/m³)도 기준농도를 초과하였다.

CO₂는 A, B, C 초등학교 교실에서의 평균농도가 각각 1,252 ppm, 1,326 ppm, 1,246 ppm으로 모두 기준농도(1,000 ppm)를 초과하였지만, 복도에서는 평균농도가 각각 846 ppm, 841 ppm, 701 ppm로 모두 기준농도를 만족하였다. CO₂ 역시 상대적으로 통풍이 잘되지

Table 11. Concentrations of O₃ and NO₂ at the playground during the sampling period.

Items	Conc.	A school		B school		C school	
		Fall	Winter	Fall	Winter	Fall	Winter
O ₃ (ppm)	Avg±SD (Playground)	0.096±0.039	0.037±0.012	0.083±0.029	0.075±0.059	0.136±0.005	0.087±0.022
	Avg±SD (Classroom)	0.055±0.019	0.021±0.011	0.040±0.015	0.030±0.013	0.052±0.026	0.038±0.016
	P/C	1.75	1.76	2.08	2.50	2.62	2.29
	p value	0.027	0.026	0.002	0.046	0.000	0.000
NO ₂ (ppm)	Avg±SD (Playground)	0.112±0.040	0.042±0.016	0.104±0.038	0.095±0.078	0.175±0.006	0.109±0.029
	Avg±SD (Classroom)	0.066±0.025	0.024±0.013	0.047±0.020	0.036±0.015	0.062±0.034	0.043±0.020
	P/C	1.70	1.75	2.21	2.64	2.82	2.53
	p value	0.027	0.032	0.002	0.042	0.000	0.000

Table 12. Concentrations of VOCs at the playground during the sampling period.

Compounds	Concentrations	A school	B school	C school
Benzene	Avg±SD	0.578±0.207	0.857±0.528	0.720±0.343
	Min, Max	0.336, 0.816	0.311, 1.328	0.368, 1.131
Toluene	Avg±SD	2.289±0.969	5.568±3.724	14.517±14.007
	Min, Max	2.121, 4.371	1.398, 9.147	4.256, 35.218
Ethylbenzene	Avg±SD	1.160±0.623	1.578±0.070	4.897±3.784
	Min, Max	0.494, 1.996	1.498, 1.623	1.717, 9.370
m,p-Xylene	Avg±SD	2.118±1.368	4.035±0.934	17.474±14.721
	Min, Max	0.824, 3.992	2.796, 4.827	6.253, 37.480
Styrene	Avg±SD	0.000±0.000	0.000±0.000	0.000±0.000
	Min, Max	0.000, 0.000	0.000, 0.000	0.000, 0.000
o-Xylene	Avg±SD	0.457±0.253	1.263±0.350	6.547±5.919
	Min, Max	0.165, 0.673	0.777, 1.614	1.839, 14.540

Table 13. A concentration comparison of main indoor air pollutants from three elementary school classrooms. (n=20)

Items	Concentrations	A school	B school	C school
PM ₁₀ (µg/m ³)	Avg ± SD	162.6 ± 112.9**	94.8 ± 54.1*	70.4 ± 43.5*
	Min, Max	37.4, 343.3**	34.1, 203.1*	29.0, 193.7*
CO ₂ (ppm)	Avg ± SD	1252 ± 666*	1326 ± 790	1246 ± 713
	Min, Max	466, 2460*	482, 2944	429, 2843
CO (ppm)	Avg ± SD	1.4 ± 0.3*	2.0 ± 1.6	1.3 ± 0.3
	Min, Max	0.9, 2.0*	0.6, 5.9	0.9, 2.0
O ₃ (ppm)	Avg ± SD	0.037 ± 0.023*	0.035 ± 0.014*	0.045 ± 0.022
	Min, Max	0.007, 0.088*	0.017, 0.067*	0.010, 0.104
NO ₂ (ppm)	Avg ± SD	0.043 ± 0.029*	0.042 ± 0.018*	0.053 ± 0.029
	Min, Max	0.006, 0.108*	0.021, 0.083*	0.010, 0.132

*n=19, **n=17

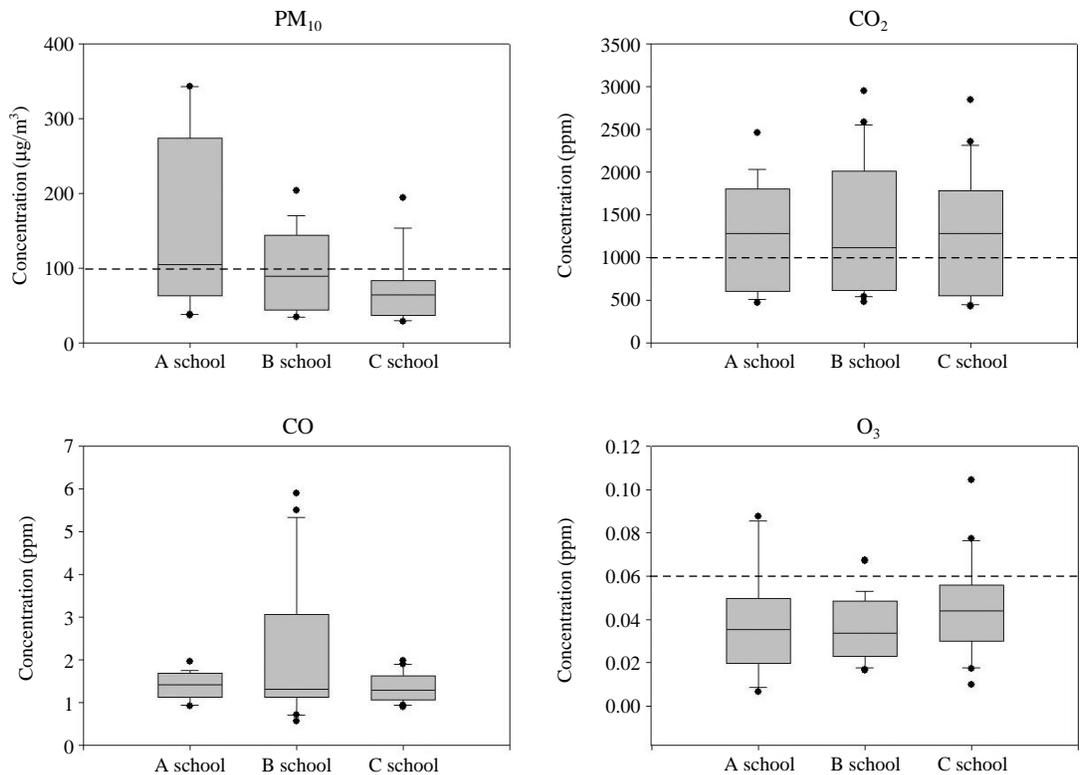


Fig. 8. Concentration distributions of main indoor air pollutants from three elementary school classrooms (Solid lines indicate standard).

않는 A와 B 초등학교가 C 초등학교보다 농도가 높은 것으로 확인되었다. 자동차 배기가스가 주요배출원(약 90%)인 CO의 경우, A와 B 초등학교의 겨울철에는 매우 높은 피크가 발생했으므로 세 학교를

median 값으로 평가하면, 교실과 복도에서 모두 인근의 교통량이 가장 많은 A 초등학교(교실: 1.41 ppm, 복도: 1.28 ppm)가 가장 농도가 높았고 다음으로 B 초등학교(교실: 1.32 ppm, 복도: 1.25 ppm), C 초등학교(교실:

Table 14. A concentration comparison of main indoor air pollutants from three elementary school hallways. (n=20)

Items	Concentrations	A school	B school	C school
PM ₁₀ (µg/m ³)	Avg ± SD	164.8 ± 90.3**	111.8 ± 63.0*	64.7 ± 28.4*
	Min, Max	30.4, 322.2**	29.5, 257.3*	26.2, 113.8*
CO ₂ (ppm)	Avg ± SD	846 ± 327*	841 ± 392	701 ± 254
	Min, Max	483, 1541*	415, 1731	422, 1271
CO (ppm)	Avg ± SD	1.2 ± 0.3**	1.5 ± 1.3*	1.0 ± 0.3*
	Min, Max	0.8, 1.7**	0.4, 5.4*	0.6, 1.8*
O ₃ (ppm)	Avg ± SD	0.043 ± 0.026**	0.037 ± 0.011**	0.059 ± 0.020
	Min, Max	0.012, 0.117**	0.021, 0.056**	0.020, 0.105
NO ₂ (ppm)	Avg ± SD	0.051 ± 0.033*	0.043 ± 0.015**	0.071 ± 0.027
	Min, Max	0.012, 0.149*	0.023, 0.071**	0.020, 0.134

*n=19, **n=18

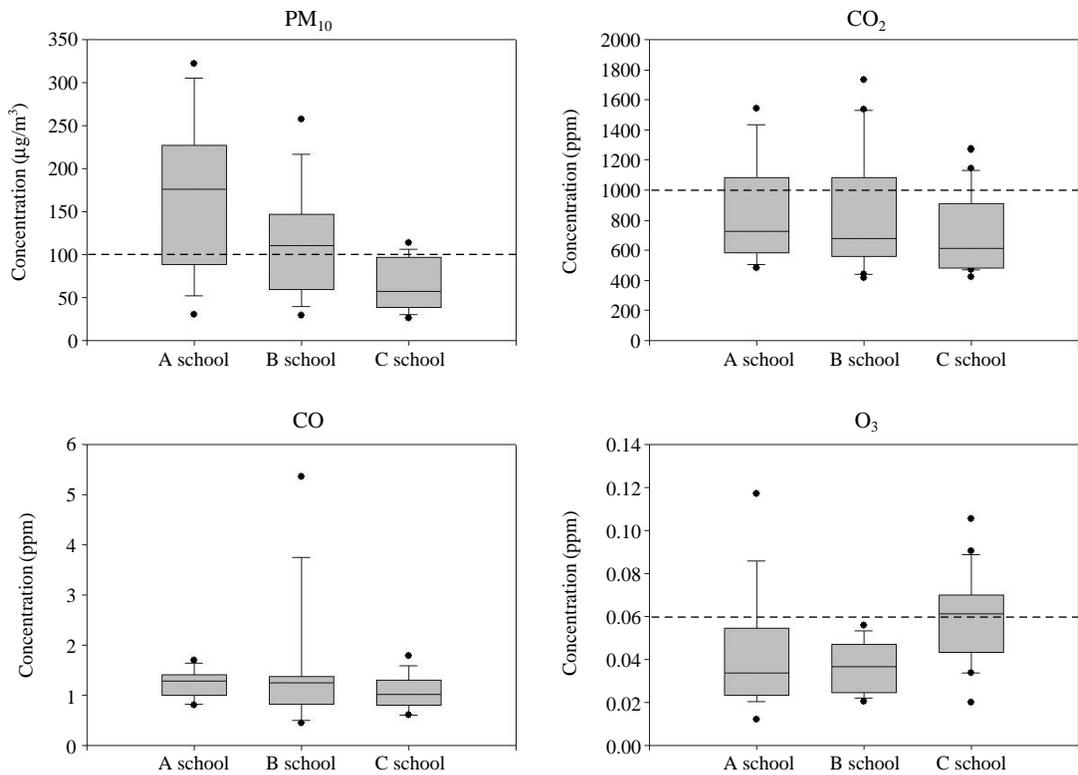


Fig. 9. Concentration distributions of main indoor air pollutants from three elementary hallways (Solid lines indicate standard).

1.28 ppm, 복도: 1.02 ppm) 순이었다. CO 농도는 모든 초등학교에서 기준농도(10 ppm)보다 훨씬 낮은 수준이었다.

O₃ 농도의 분석에서는 교실과 복도에서 모두 C 초

등학교의 (교실: 0.045 ppm, 복도: 0.059 ppm) 농도가 가장 높았고, 다음으로 A 초등학교(교실: 0.037 ppm, 복도: 0.043 ppm), B 초등학교(교실: 0.035 ppm, 복도: 0.037 ppm) 순으로 모두 기준농도(0.06 ppm)를 만족

Table 15. A concentration comparison of aldehydes and ketones from three elementary schools. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=20)

Compounds	Concentrations	A school	B school	C school
Formaldehyde	Avg \pm SD	30.35 \pm 6.47	24.48 \pm 11.32	30.85 \pm 8.63*
	Min, Max	16.91, 38.22	6.05, 44.47	15.85, 49.48*
Acetaldehyde	Avg \pm SD	11.64 \pm 6.51	9.86 \pm 4.30	14.92 \pm 5.03*
	Min, Max	2.93, 28.76	3.64, 19.27	8.70, 30.47*
Acetone	Avg \pm SD	17.40 \pm 11.52	14.81 \pm 12.93	18.78 \pm 9.42**
	Min, Max	1.76, 41.36	0.00, 39.98	6.77, 39.67**
Propionaldehyde	Avg \pm SD	1.43 \pm 1.65	0.36 \pm 0.31	1.61 \pm 1.96*
	Min, Max	0.00, 4.73	0.02, 0.95	0.16, 6.90*
Butyraldehyde	Avg \pm SD	1.56 \pm 2.59	1.47 \pm 1.67	3.74 \pm 2.99*
	Min, Max	0.00, 10.00	0.00, 4.37	0.00, 8.58*

*n=19, **n=17

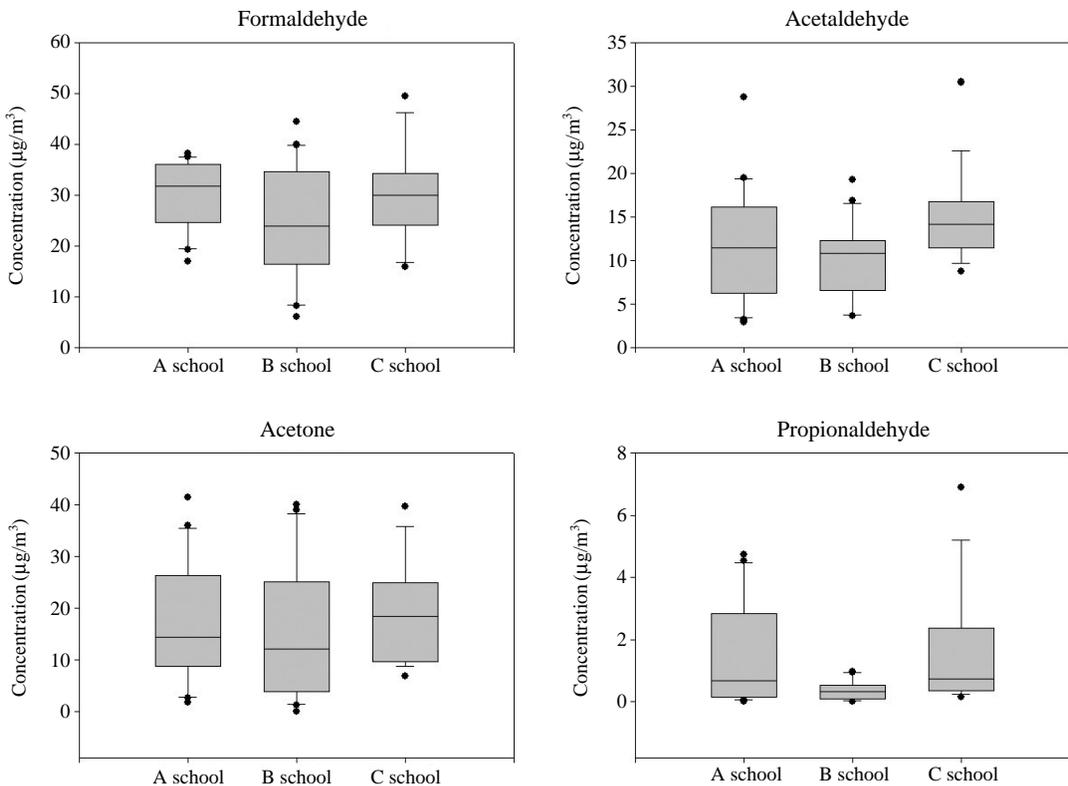


Fig. 10. Concentration distributions of aldehydes and ketones from three elementary schools.

하였다. NO₂의 경우에도 C 초등학교(교실: 0.053 ppm, 복도: 0.071 ppm)가 가장 농도가 높았고, 다음으로 A 초등학교(교실: 0.043 ppm, 복도: 0.051 ppm), B 초등학교(교실: 0.042 ppm, 복도: 0.043 ppm) 순으로 C 초

등학교는 교실과 복도에서 모두 기준농도(0.05 ppm)를 초과하였으며, A 초등학교도 복도에서 기준농도를 초과하였다. C 초등학교에서 검출된 O₃과 NO₂ 평균농도는 A와 B 초등학교의 평균농도보다 훨씬 높

Table 16. A concentration comparison of VOCs from three elementary schools. ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, n=20)

Compounds	Concentrations	A school	B school	C school
Benzene	Avg \pm SD	0.757 \pm 0.218	0.758 \pm 0.422	1.010 \pm 0.623*
	Min, Max	0.306, 1.002	0.166, 1.488	0.303, 2.669*
Toluene	Avg \pm SD	9.460 \pm 3.903	7.936 \pm 4.641	14.179 \pm 8.241***
	Min, Max	4.136, 15.896	2.878, 20.272	3.410, 26.611***
Ethylbenzene	Avg \pm SD	2.230 \pm 1.277	0.780 \pm 0.558*	5.632 \pm 4.126**
	Min, Max	0.000, 5.494	0.000, 1.962*	0.162, 13.593**
m,p-Xylene	Avg \pm SD	5.004 \pm 2.549	3.492 \pm 1.939	17.845 \pm 10.757**
	Min, Max	1.831, 10.802	0.671, 8.597	2.428, 34.616**
Styrene	Avg \pm SD	0.482 \pm 0.575	0.000 \pm 0.000	0.460 \pm 0.769*
	Min, Max	0.000, 1.785	0.000, 0.000	0.000, 2.329*
o-Xylene	Avg \pm SD	1.413 \pm 0.725	0.958 \pm 0.916	6.505 \pm 4.340**
	Min, Max	0.460, 3.225	0.168, 2.076	0.607, 13.107**

* n=18, ** n=17, *** n=16

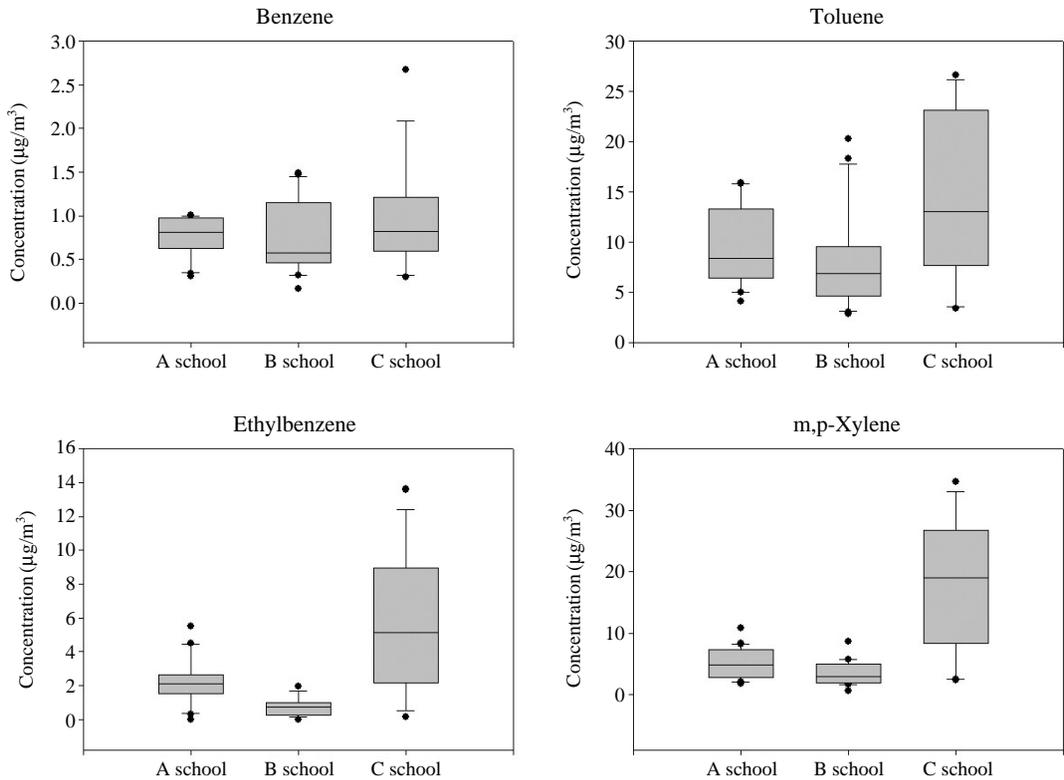


Fig. 11. Concentration distributions of VOCs from three elementary schools.

게 나타났다. 이렇게 C 초등학교에서 O_3 과 NO_2 농도가 다른 초등학교에 비하여 훨씬 높은 이유는 인근에 대규모 조선업종이 위치해 있어서 선박의 도장

작업시 VOCs가 많이 배출되기 때문이다(Celebi and Vardar, 2008; Malherbe and Mandin, 2007). 또한 다른 초등학교에 비하여 선박건조 및 수리시 용접작업

등의 불꽃방전에서 다른 초등학교에 비하여 추가적인 NO₂가 배출되므로 (Hansen and Thernøe, 2005) 증가된 VOCs와 NO₂가 광화학 반응에 의하여 O₃ 농도를 증가시킨 것으로 설명된다(표 11 및 12).

알데하이드류 및 케톤류의 지역적 비교를 위해서도 가을철과 겨울철에 측정, 분석된 평균농도를 이용하였으며, 농도 분석 결과 모든 성분이 C 초등학교에서 가장 높았으며, 다음으로 A 초등학교, B 초등학교 순이었다. 검출된 모든 알데하이드류 및 케톤류의 성분들이 C 초등학교에서 농도가 가장 높은 것을 볼 수 있는데, 이것은 C 초등학교의 인근에 위치해 있는 조선업종에서 다량으로 배출되는 VOCs가 산화되면서 알데하이드류 및 케톤류가 발생하였기 때문이다. 그 다음으로 A 초등학교에서 상대적으로 높은 농도를 보이는 것은 인근의 많은 교통량과 관련이 있을 것으로 판단된다. B 초등학교는 인근에 비교적 교통량이 많고 대규모 산업단지의 풍하지역에 위치하지만 측정기간 동안 주 풍향을 조사해 본 결과 인근의 교통과 산업지역의 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타나서 가장 낮은 농도 분포를 보인 것으로 판단된다.

VOCs의 지역적 비교를 위해서 가을철과 겨울철에 측정, 분석된 평균농도를 이용하였으며, 농도 분석 결과 Styrene을 제외한 모든 성분이 C 초등학교에서 농도가 가장 높았으며, 다음으로 A 초등학교, B 초등학교 순이었다. 이러한 결과 역시 알데하이드류 및 케톤류와 마찬가지로 C 초등학교는 인근의 조선업종에서 선박건조과정에서의 표면코팅이나 페인팅 과정에서 주로 배출되는 VOCs에 의해서 가장 높은 농도를 보였다. A 초등학교에서의 농도가 B 초등학교보다 높은 것은 A 초등학교 인근의 증가된 교통량과 밀접한 관련이 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구는 울산지역 초등학교의 실내공기오염 실태를 파악하고 계절(가을과 겨울)과 지역(A: 주거 및 교통밀집지역, B: 산업 및 교통배출 오염물 풍하지역, C: 조선업종 인근 주거지역)과 같은 환경의 변화에 따른 실내공기오염의 특성을 비교하여 초등학교의 실내공기질 관리에 필요한 기초자료를 제공하기 위해서 이루어졌다.

실내공기오염물질의 가을철과 겨울철의 농도 비교에서 교실과 복도에서 모두 PM₁₀, CO₂, CO, 알데하이드류 및 케톤류 그리고 VOCs와 같이 실내에서 주로 발생하는 오염물질은 창문과 출입문을 모두 닫은 상태에서 측정이 이루어진 겨울철에 농도가 높았다. 그러나 Ethylbenzene, m,p-Xylene 그리고 o-Xylene과 같은 일부 VOCs의 경우 A와 B 초등학교와 같이 통풍이 원활히 이루어지지 않는 조건에서는 창문과 출입문을 개방한 상태와 닫은 상태에서의 농도차이가 뚜렷하지 않았다. 한편, O₃과 NO₂와 같이 실외에서 주로 발생하는 오염물질들은 창문과 출입문을 개방한 상태에서는 실외에서 발생한 오염물질의 영향을 받기 때문에 교실과 복도에서 모두 가을철의 농도가 겨울철보다 높게 나타났다.

실내공기오염물질의 지역적 차이에 따른 농도 비교에서 PM₁₀은 인근의 교통량이 많고 통풍이 좋지 않은 A 및 B 초등학교에서의 농도가 C 초등학교의 농도보다 높게 나타났다 특히, 일부 측정대상 교실 또는 복도의 바닥재가 나무로 되어있었던 A 초등학교에서는 교실과 복도에서의 농도가 '교사안에서의 공기의질에 대한 유지관리 기준' 농도를 훨씬 초과하였다. 그리고 CO₂는 연구대상 초등학교 모두 기준농도를 초과하였는데, 이는 실내에서의 CO₂ 농도가 학생들의 실내활동 및 호흡과 관련이 높고 적절한 환기가 필요함을 알 수 있다. 교통의 영향을 많이 받는 초등학교에서의 CO 농도도 다른 학교에 비하여 높게 나타났다. O₃과 NO₂의 농도는 조선업종의 영향을 받는 초등학교에서 농도가 높게 나타났는데, 이것은 선박건조과정에서 용접작업과 표면 코팅작업시 NO₂와 VOCs가 많이 배출되고 NO₂와 VOCs가 태양광에 의한 광화학 반응으로 O₃을 생성하기 때문이다. 알데하이드류 및 케톤류, 그리고 대부분의 VOCs 농도도 조선업종 인근 초등학교에서 가장 높은 농도를 나타냈는데, 이것은 선박의 코팅작업시 VOCs가 많이 발생하고 다량으로 발생한 VOCs가 산화되어 알데하이드류 및 케톤류로 전환되기 때문으로 설명된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 환경보건센터의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 김윤신 (2000) 한국의 실내공기질 현황과 문제점, 한국보건교육건강증진학회 제25회 보건학종합학술대회, 3-18.
- 정영숙, 이정렬 (2000) 학교보건, 현문사, pp. 23-28.
- Anderson, I. (1972) Relationships between outdoor and indoor air pollution, *Atmos. Environ.*, 6, 275-279.
- Bartlett, K.H., S.M. Kennedy, M. Brauer, B. Dill, and C. van Netten (1999) Predictors of exposure to indoor CO₂ and bioaerosols in elementary school classrooms, *Indoor Air*, 1, 252-257.
- Celebi, U.B. and N. Vardar (2008) Investigation of VOC emissions from indoor and outdoor painting processes in shipyards, *Atmos. Environ.*, 42(22), 5685-5695.
- Clarisse, B., A.M. Laurent, N. Seta, Y. Le Moullec, A. El Hanaoui, and I. Momas (2003) Indoor aldehyde: measurement of contamination levels and identification of their determinants in Paris dwellings, *Environ. Res.*, 92, 245-253.
- Hansen, E.B. and J. Thernøe (2005) Oxides of nitrogen in welding, cutting and oxy-acetylene heating processes; A review of emission rates, exposure levels and control measures, International conference health and safety in welding and applied processes, <http://www0.force.dk/hs wap/web-dat a/PDF/Proceedings.pdf>, 131-146.
- IARC (2000) IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risk to humans, World Health Organization, International Agency for Research on Cancer.
- Kim, S.W. and C.H. Nam (1997) A study on knowledge and attitude of the middle and high school students relating to environmental health, *Korean Journal of Environmental Health Society*, 23(3), 7-26.
- Kostiainen, R. (1995) Volatile organic compounds in the indoor air of normal and sick houses, *Atmos. Environ.*, 29, 693-702.
- Lagercrantz, L., M. Wistrand, U. Willen, P. Wargocki, T. Witterseh, and J. Sundell (2000) Negative impact of air pollution on productivity: previous Danish findings repeated in new Swedish test room, *Proceedings of Healthy Buildings*, 1, 653-658.
- Lee, B.K., A. Kim, T.T.T. Duong, and H. Kim (2006) A study of analysis and reduction of particulate concentration in the classroom of an elementary school, *Proceedings of BUEE 2006; The 8th International Symposium*, 98-103.
- Lee, B.K. and J.B. Cho (2002) Risk analysis of volatile organic compounds through daily life cycle in the industrial city in Korea, *Water Air Soil Pollut.: Focus* 2, 155-171.
- Malherbe, L. and C. Mandin (2007) VOC emissions during outdoor ship painting and health-risk assessment, *Atmos. Environ.*, 41(30), 6322-6330.
- Marchand, C., B. Bulliot, S. Le Calvé, and Ph. Mirabel (2006) Aldehyde measurements in indoor environments in Strasbourg(France), *Atmos. Environ.*, 40(7), 1336-1345.
- Mendell, M.J., W.J. Fisk, M.R. Petersen, C.J. Hines, M. Dong, D. Faulkner, J.A. Deddens, A.M. Ruder, D. Sullivan, and M.F. Boeniger (2002) Indoor particles and symptoms among office workers: results from a double-blind cross-over study, *Epidemiology*, 13(3), 296-304.
- Myhrvold, A.N., E. Olsen, and O. Lauridsen (1996) Indoor environment in schools-pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations, *Indoor Air*, 4, 369-374.
- National Academy of Sciences (NAS) (1993) Human exposure assessment for airborne pollutants, Washington D.C.
- National Research Council (1987) Policies and procedures for control of indoor air quality, Washington D.C.: National Academy Press.
- Sabersky, R.H., D.A. Sinema, and F.H. Shair (1973) Concentrations, decay rates and removal of ozone and their relation to establishing clean indoor air, *Environ. Sci. Technol.*, 7(4), 347-353.
- Samfield, M.M. (1992) Indoor air quality data base for organic compounds, EPA-600/13.
- Shair, F.H. and K.L. Heitner (1974) Theoretical model for relating indoor pollutant concentrations to those outside, *Environ. Sci. Technol.*, 8, 444.
- Sterling, D.A. (1985) Volatile organic compounds in indoor air: An overview of sources, concentrations, and health effects, *Indoor Air and Human Healths*, 387.
- Thompson, D., T.D. Brown, and J.M. Beér (1973) Formation of NO in a methane-air flame, *Original research article Symposium (International) on Combustion*, 14(1), 787-799.
- Wargocki, P., D.P. Wyon, and P.O. Fanger (2004) The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates, *Indoor Air*, 14, 7-16.
- Wargocki, P., D.P. Wyon, J. Sundell, G. Clausen, and P.O. Fanger (2000) The effects of outdoor air supply rate

- in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity, *Indoor Air*, 10(4), 222-236.
- Wargocki, P., D.P. Wyon, Y.K. Baik, G. Clausen, and P.O. Fanger (1999) Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads, *Indoor Air*, 9(3), 165-179.
- Yoo, J.H., E.H. Kang, Y.H. Son, S.Y. Ha, and J.M. Choi (2006) A Study on the Field Evaluation about the Indoor Air Quality of Schools Newly Built in Changwon, *The Society of Air-conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, 51-56.