

대구지역 신축학교 실내공기 중 카보닐화합물의 농도 특성 평가

The Characterization of Carbonyl Compounds in the Newly-Built Schools, Daegu City

황윤정* · 박희선 · 장성일 · 노기철 · 손태정
한정욱 · 배기수 · 최임조

대구광역시보건환경연구원 대기보전과

(2006년 2월 15일 접수, 2006년 9월 20일 채택)

Yoon-Jung Hwang*, Hee-Sun Park, Seong-Il Jang, Ki-Cheul Roh,
Tae-Jung Son, Jeong-Wook Han, Gi-Soo Bae and Im-Jo Choi

Division of Air Preservation, Public Health and Environment Institute of Daegu City

(Received 15 February 2006, accepted 20 September 2006)

Abstract

The study on school indoor air quality was carried out at classrooms, computer-rooms, laboratories and playgrounds for carbonyl compounds including formaldehyde during the winter time from November to December 2004 and during the summer time from June to July 2005. The sampling was conducted under the general school condition without any artificial intervention such as the sealing, ventilating or heating at indoor environments. The concentrations of formaldehyde at all types of indoor environments were lower than air quality standard of 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for public facilities. The mean concentrations of formaldehyde at indoors were 4.5~6.1 times higher than those at outdoors. From the comparison between two year and one year old schools after construction, the concentrations of formaldehyde in two year old school were 30~38% lower than those in one year old school measured at classrooms and laboratories.

Key words : School, Indoor air quality, Carbonyl compounds, Formaldehyde

1. 서 론

국내에서는 빌딩증후군과 함께 새집증후군에 대한 국민들의 관심이 증폭되면서 지하공간 중심의 제한

된 실내공기질 관리정책에서 벗어나 지하역사, 지하상가, 대규모점포, 산후조리원, 찜질방, 의료기관, 보육시설 등의 17개 다중이용시설군과 신축공동주택까지 포함한 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법(2004)”이 제정되었다. 동 법안은 일반 대중과 보건학적 위해성에 취약한 유아, 노인, 환자를 포함하는 광범위한 계층을 대상으로 미세먼지, 일산화탄소, 이산화탄소,

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)53-760-1274, E-mail : mofsh@hanmail.net

총부유세균, 폼알데하이드에 대한 유지기준과 총휘발성유기화합물 등 5종의 오염물질에 대한 권고기준을 마련함으로써 선진적인 실내공기질 관리 정책으로 인식되고 있다.

그러나 실내공기질 관리법의 범위에 포함되지 않는 학교의 경우 60~70 m²의 일정 면적 내에 약 40여명의 학생들이 함께 생활하므로 실내공기질 측면에서는 악조건이라 할 수 있으며, 일반 성인들에 비해 어린이들은 질병에 대한 저항력이 약하므로 오염물질에 민감한 취약계층으로 분류될 수 있다. 시간적 측면에서도 백화점, 지하상가 등의 다중이용시설에 머무르는 시간에 반하여 학교의 경우에는 약 5~9시간으로 오염물질에 대한 폭로시간 또한 긴 편이다(정지원 등, 2005). 따라서 학교의 실내공기질 관리는 학생의 건강과 직결된 중요한 보건학적 인자이다.

일본에서는 폼알데하이드와 주요 휘발성유기화합물, 낙하세균, 환기회수 등에 대한 기준을 설정하여 학교 실내공기질 관리를 강화하고 있으며(관계부처합동, 2004), 미국은 에너지 비용절감, 실내공기질 향상, 경치와 디자인의 최적화, 천연자원 보존 등의 21세기 친환경학교 설립목표 아래 2000년부터 매년 Indoor Air Quality Tools for School (IAQ Tfs) 심포지엄을 개최하고 IAQ Tfs 프로그램을 운영하고 있다. 그러나 국내의 경우에는 “학교보건법”에 따라 이산화탄소와 미세먼지에 대한 항목만 관리되어져 왔으며, 최근 교육인적자원부에서 “새학교증후군” 해결을 위해 폼알데하이드, 휘발성유기화합물 등을 추가하여 총 12개 항목의 유지기준을 마련하고, 정기적으로 측정성을 의무화하는 내용을 담은 “학교보건법 시행규칙”을 개정하여 2006년 1월 1일부터 시행한다고 밝혔다.

학교를 대상으로 실시된 조사·연구를 살펴보면 대부분 미세먼지, 이산화탄소, 일산화탄소, 중금속 등 일부 항목에 국한되어져 왔으며(Poupard *et al.*, 2005; Yip *et al.*, 2004; 김윤신 등, 2003; 신은상과 김진우, 2002; Chaloulakou and Mavroidis, 2002; 조규성, 2000; 박종길 등, 1997), 근래 들어 폼알데하이드 및 휘발성유기화합물에 관한 연구 결과들이 보고되고 있으나(이성한 등, 2004; Park and Jo, 2004) 카보닐화합물에 대한 전반적인 조사·연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 대구지역에 소재한 신축학교들을 대상으로 새학교증후군 유발물질인 폼알데하

이드를 비롯한 각종 카보닐화합물에 관한 전반적인 실태를 파악함으로써 쾌적하고 건강한 학교 환경을 위한 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 조사 및 측정방법

2.1 조사 지점 및 기간

본 연구는 학교 실내공기 중의 카보닐화합물에 대한 실태조사를 위해 대구시에 소재한 신축 후 1년이 경과된 초·중학교 3개교(2004년 3월 개교, 이하 “신축1년 학교”로 표기), 신축 후 2년이 경과된 초·중학교 2개교(2003년 3월 개교, 이하 “신축2년 학교”로 표기) 및 신축학교와 대비되는 비신축 초등학교 1개교(1984년 3월 개교) 등 총 6개 학교를 선정하였다. 다양한 실내환경별 공기질 측정을 위해 일반 교실, 컴퓨터실, 과학실을 조사대상 지점으로 선정하였으며, 외부 공기질과의 비교를 위해 운동장도 포함하였다. 시료채취는 2004년 11월~12월 겨울철과 2005년 6월~7월 여름철에 2주 간격으로 각각 3회씩 실시하였으며, 오전 11시에서 오후 4시 사이에 행하였다.

학생들이 실제로 생활하고 호흡하는 조건하에서의 공기질을 측정하기 위해 인위적인 밀폐 또는 환기과정 없이 자연스런 조건하에서 시료를 채취하였다. 따라서 겨울철에는 계절 특성상 대부분의 창문과 교실 문은 밀폐되어 있었으며, 여름철에는 창문이 개폐된 상태에서 선풍기가 가동 중에 있었다. 에어컨이 설치되어 있는 학교에서도 가동은 하지 않고 있었다.

각 조사대상지점의 특성 및 환경조건은 표 1에 나타내었다. 바닥의 경우 교실은 마루, 컴퓨터실과 과학실은 terrazzo로 시공되어져 있었으며, 벽면은 교실, 컴퓨터실, 과학실 모두 페인트칠되어져 있었다. 또한 과학실의 경우에는 환풍기가 설치되어 있었으나 일부 학교에서만 가동 중에 있었으며, 교실과 컴퓨터실은 모두 창문을 통한 자연환기에 의존하고 있었다.

2.2 조사항목 및 방법

본 연구에서는 대기환경 중 검출빈도가 높은 Formaldehyde와 Acetaldehyde를 비롯한 총 7종의 카보닐화합물을 측정대상 항목으로 선정하였으며, 온도, 상대습도도 함께 조사하였다. 카보닐화합물의 정

Table 1. The characteristics of sampling sites.

| Site | School | The opening year | Floor | Size (m ²) | Material of flat | Ventilation | Heating type | Indoor facilities |
|---------------|----------------|------------------|-------|------------------------|------------------|-----------------------------------|------------------------|--|
| Classroom | Elementary (A) | 2004 | 1 | 68 | wood | natural | individual heater | wood & steal desk (41) |
| | Middle (B) | 2004 | 2 | 68 | wood | natural | individual heater | wood & steal desk (36) |
| | Elementary (C) | 2004 | 1 | 68 | wood | natural | individual heater | wood & steal desk (32), wood bookshelf (1) |
| | Elementary (D) | 2003 | 3 | 68 | wood | natural | central heating system | wood & steal desk (41) |
| | Middle (E) | 2003 | 1 | 68 | wood | natural | central heating system | wood & steal desk (45), wood bookshelf (1) |
| | Elementary (F) | 1984 | 2 | 68 | wood | natural | individual heater | wood & steal desk (37) |
| Computer-room | Elementary (A) | 2004 | 3 | 176 | terrazzo | natural | individual heater | computer (42), wood computer table (42), white board (1) |
| | Middle (B) | 2004 | 3 | 115 | terrazzo | natural | individual heater | computer (37), wood computer table (37), white board (1) |
| | Elementary (C) | 2004 | 3 | 176 | terrazzo | natural | individual heater | computer (40), wood computer table (40), white board (1) |
| | Elementary (D) | 2003 | 3 | 203 | terrazzo | natural | central heating system | computer (40), wood computer table (40), white board (1) |
| | Middle (E) | 2003 | 2 | 176 | terrazzo | natural | central heating system | computer (37), wood computer table (37), white board (1) |
| | Elementary (F) | 1984 | 3 | 100 | wood | natural | individual heater | computer (36), wood computer table (36) |
| Laboratory | Elementary (A) | 2004 | 2 | 252 | terrazzo | natural | individual heater | wall shelf (1), wood lab table (10) |
| | Middle (B) | 2004 | 2 | 115 | terrazzo | natural & ventilating fan 3 (off) | individual heater | wall shelf (1), wood lab table (11), white board (1) |
| | Elementary (C) | 2004 | 3 | 258 | terrazzo | natural & ventilating fan 1 (off) | individual heater | wall shelf (1), steel & plastic lab table (8) |
| | Elementary (D) | 2003 | 1 | 304 | terrazzo | natural & ventilating fan 3 (off) | central heating system | wood lab table (7) |
| | Middle (E) | 2003 | 1 | 240 | terrazzo | natural | central heating system | wood lab table (6) |
| | Elementary (F) | 1984 | 3 | 124 | terrazzo | natural & ventilating fan 1 (on) | individual heater | wood lab table (7) |

성·정량을 위해 Supelco사의 Carbonyl-DNPH Mixture와 2-Butanone (Methyl Ethyl Ketone)-DNPH 개별 표준물질을 사용하였다.

시료포집은 “실내공기질공정시험방법” (환경부, 2004)에 준하여 실시하였으며, 오존스크러버 (Supelco Inc., LpDNPH Ozone Scrubber, USA)와 Supelco사의 DNPH-카트리지 (Supelco Inc., LpDNPH S10L, USA)를 사용하여 바닥면으로부터 약 1.5 m의 높이에서 적산유량이 표시되는 정량펌프 (SIBATA MPΣ-100H, Japan)를 사용하여 1.0 L/min의 유량으로 30분간 포집하였다.

포집된 시료는 빛을 차단시킨 후 실험실로 이동하여 HPLC-grade 아세토니트릴 5 mL로 용출하였으며, 용출시 오염을 최소화하기 위하여 모든 유리기구는 아세토니트릴로 세척한 후 약 60°C에서 건조하여 사용하였다.

2. 3 분석방법

용출된 DNPH 유도체는 HPLC (Hewlett Packard 1090)를 이용하여 분석하였다. 고정상으로는 C₁₈ 칼럼 (Supelcos, SUPELCOS IL™ LC-18, 25 cm × 4.6 mm, 5 μm, USA)을 사용하였으며, 이동상으로는 분당 1.2 mL의 유량으로 물과 테트라하이드로퓨란 혼합액 (80 : 20, 용매A)과 아세토니트릴 (용매B)을 사용하였다. 기타 분석조건에 관한 세부사항은 표 2에 나타내었다.

2. 4 측정 정도관리

본 연구에서 사용한 분석방법의 재현성은 표 3에 나타난 바와 같이 보유시간과 피크면적의 측면에서 검토하였으며, 실제 환경시료와 비슷한 농도수준의 표준혼합용액 (0.5 μg/mL)을 사용하였다. 총 6회의 반복

Table 3. Repeatability of HPLC analysis.

| Compounds | Repeatability* (%) | |
|---------------------|--------------------|-----------|
| | Retention time | Peak area |
| Formaldehyde | 1.18 | 1.42 |
| Acetaldehyde | 0.82 | 1.70 |
| Acetone | 0.50 | 3.61 |
| Acrolein | 0.61 | 3.70 |
| Propionaldehyde | 0.63 | 3.50 |
| Methyl Ethyl Ketone | 0.93 | 2.34 |
| Butyraldehyde | 1.12 | 2.66 |

*Repeatability was expressed as relative standard deviation (%).

실험을 실시하였으며, 상대표준편차 (RSD)로 평가하였다. 그 결과 보유시간에 대한 재현성은 1.18% 이하, 피크면적에 대한 재현성은 3.70% 이하로 나타나 비교적 우수한 재현성을 나타내었다.

직선성 평가를 위해서는 표준혼합용액을 3단계 (0.1, 0.5, 2.0 μg/mL)로 희석하여 평가하였으며, 그 결과 검량선의 R²은 분석대상물질 모두 0.999 이상으로 나타났다.

시료 포집효율은 2개의 카트리지를 직렬로 연결하여 시료를 채취한 후 각각의 카트리지에서 검출된 총량 중 앞부분 카트리지에서 검출된 양 (%)을 계산하여 추정하였으며, 그 결과 포집효율은 99% 이상으로 나타나 breakthrough로 인한 시료의 손실은 무시할 만한 수준으로 평가되었다.

용출과정 중에서도 시료의 손실이 일어날 수 있으므로 DNPH-카트리지에 일정량의 표준혼합용액을 주입한 후 용출액을 분석하여 회수율을 평가하였으며, 그 결과 모든 항목이 98% 이상으로 나타났다.

3. 결과 및 고찰

3. 1 지점별 농도 분포

표 4에 나타난 바와 같이 카보닐화합물은 항목에 따라 다양한 농도 분포를 나타내었으며, 전반적으로 Formaldehyde, Acetone, Methyl Ethyl Ketone, Acetaldehyde 순으로 높게 나타났다. 또한 Acrolein과 Butyraldehyde는 모두 검출한계 이하로 나타났다.

새집증후군의 원인물질 중 하나인 Formaldehyde의 실내 배출원은 널리 알려진 바와 같이 각종 합판, 보드 등의 목재제품, 건축자재, 단열재, 접착제, 장식

Table 2. Analytical conditions of HPLC.

| | |
|------------------|---|
| System | Hewlett Packard 1090 |
| Detector | UV-VIS absorbance detector (at 360 nm) |
| Column | SUPELCOS IL™ LC-18, 25 cm × 4.6 mm, 5 μm |
| Mobile phase | A: Water/Tetrahydrofuran 80/20 (v) B: Acetonitrile 100 (v) |
| Flow rate | 1.2 mL/min |
| Injection volume | 20 μL |
| Gradient | 0 → 25 min B 20 → 70%, 25 → 27 min, B 20% hold |

Table 4. Summary statistics of air quality.

| Site | Compounds | Mean | S.D. | Median | Min | Max | I/O ratio |
|----------------------|-----------------------|-------|-------|--------|-------|--------|-----------|
| Classroom (n=36) | Formaldehyde | 52.56 | 23.25 | 51.40 | 18.70 | 108.60 | 6.1* |
| | Acetaldehyde | 9.88 | 3.43 | 8.47 | 6.60 | 22.19 | 1.2 |
| | Acetone | 24.36 | 10.88 | 23.70 | 10.80 | 55.90 | 1.9* |
| | Propionaldehyde | 2.08 | 1.21 | 2.06 | 0.20 | 4.22 | 1.6* |
| | Methyl Ethyl Ketone | 15.81 | 7.59 | 13.55 | 5.27 | 30.20 | 1.5* |
| | Temperature (°C) | 22.5 | 6.2 | 20.1 | 14.2 | 32.3 | - |
| | Relative humidity (%) | 38.3 | 12.7 | 36.0 | 14.7 | 59.2 | - |
| Computer-room (n=36) | Formaldehyde | 47.24 | 14.15 | 45.23 | 19.43 | 81.68 | 5.5* |
| | Acetaldehyde | 10.88 | 4.35 | 9.50 | 5.10 | 21.29 | 1.3 |
| | Acetone | 29.79 | 16.83 | 27.70 | 8.85 | 79.10 | 2.3* |
| | Propionaldehyde | 2.39 | 1.24 | 2.75 | N.D. | 4.60 | 1.8* |
| | Methyl Ethyl Ketone | 13.92 | 7.30 | 12.40 | 3.65 | 36.00 | 1.3 |
| | Temperature (°C) | 22.9 | 6.3 | 21.3 | 13.3 | 31.8 | - |
| | Relative humidity (%) | 36.2 | 10.4 | 34.6 | 18.1 | 55.6 | - |
| Laboratory (n=36) | Formaldehyde | 38.53 | 15.48 | 34.36 | 16.90 | 76.02 | 4.5* |
| | Acetaldehyde | 12.63 | 5.68 | 10.50 | 4.60 | 24.70 | 1.5* |
| | Acetone | 41.82 | 25.43 | 31.17 | 13.20 | 103.44 | 3.2* |
| | Propionaldehyde | 2.13 | 1.28 | 1.94 | N.D. | 4.60 | 1.6* |
| | Methyl Ethyl Ketone | 18.96 | 16.38 | 15.65 | 3.52 | 84.10 | 1.8* |
| | Temperature (°C) | 21.2 | 7.7 | 18.4 | 13.0 | 32.3 | - |
| | Relative humidity (%) | 40.6 | 12.2 | 37.2 | 19.4 | 62.1 | - |
| Playground (n=36) | Formaldehyde | 8.63 | 5.26 | 7.60 | 3.00 | 22.12 | - |
| | Acetaldehyde | 8.57 | 3.65 | 7.75 | 3.03 | 15.57 | - |
| | Acetone | 13.12 | 4.99 | 12.75 | 7.01 | 23.28 | - |
| | Propionaldehyde | 1.30 | 1.07 | 1.23 | N.D. | 3.60 | - |
| | Methyl Ethyl Ketone | 10.74 | 6.06 | 9.50 | N.D. | 21.00 | - |
| | Temperature (°C) | 21.8 | 9.9 | 19.7 | 6.0 | 36.0 | - |
| | Relative humidity (%) | 32.4 | 10.4 | 31.1 | 15.9 | 60.8 | - |

*indicates that indoor and outdoor groups are significantly different at a level of 0.05 by Mann-Whitney U test.

재, 직물, 담배연기, 화장품 등으로 다양하며, 농도는 온도, 습도, 건축물의 수명, 실내 환기율에 따라 크게 좌우되는 것으로 알려져 있다(한국실내공기·산소 연구회, 2004).

Formaldehyde의 평균농도는 교실(52.56 µg/m³), 컴퓨터실(47.24 µg/m³), 과학실(38.53 µg/m³) 순으로 높게 나타났으며, 이들 지점에 대한 최고 농도는 각각 108.60, 81.68, 76.02 µg/m³으로 나타나 다중이용시설의 실내공기질 유지기준인 120 µg/m³을 모두 만족하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 서울시 교육청 조사결과(21~66 ppb)와는 유사한 수준이며(관계부처 합동, 2004), Lee *et al.* (2002)의 연구결과(홍콩, Air-Conditioned Classroom에서의 평균 농도 약 20 µg/m³) 보다는 다소 높게 나타난 것이다. 그러나 손중렬 등(2005)에 의한 연구(110~160 ppb) 및 이성

한 등(2004)에 의한 연구(170~1,000 ppb)와는 차이를 보였는데, 이는 시료채취시의 상이한 조건(이성한 등의 연구는 밀폐된 환경에서 난방기 가동으로 방출율을 높은 상태에서 측정)에 따른 것으로 판단된다.

교실과 컴퓨터실에서의 Formaldehyde 농도는 과학실에 비해 약 1.2~1.4배 정도 높게 나타났으며, 이는 바닥재의 차이 이외에도 실내배출원인 목재 책·결상 등의 기자재가 과학실에 비해 더 많이 비치되어 있기 때문으로 추정된다.

표 4에는 각 항목에 대한 실내/실외(운동장) 평균 농도 비(I/O Ratio)도 함께 명시하였으며, Formaldehyde에 대한 실내/외 농도비는 교실 6.1, 컴퓨터실 5.5, 과학실 4.5로 매우 높게 나타났다. 또한 각 분석대상물질의 농도가 실내·외 지점에서 통계적으로 유의적인 차이가 있는지를 검증하기 위해 Mann-

Whitney U Test를 실시하였으며, 그 결과 표 4에 첨자로 나타낸 바와 같이 Formaldehyde는 유의수준 5%에서 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다.

이와 같이 실외에 비해 실내에서 Formaldehyde 농도가 매우 높게 검출된 것은 바닥재, 책·결상 및 책장, 장식재와 같은 실내 배출원의 영향에 따른 것으로 추정되며, 여름철 온도 상승에 따른 오염물질의 방출을 증가 및 겨울철 난방을 위한 환기를 저하로 인해 실내·외 농도차가 더욱 가중된 것으로 판단된다.

락카용 용제, 가구 광택제, 세정제, 각종 용매 등에서 발생하는 Acetone의 경우에는 평균농도가 과학실(41.82 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 컴퓨터실(29.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 교실(24.36 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타났으며, 과학실의 경우 실외에 비해 실내에서 3.2배 정도 높게 검출되었다.

또한 락카용 용제, 인쇄용 잉크 세정제, 각종 합성 수지용제 등에서 배출되는 Methyl Ethyl Ketone의 경우에도 타 지점에 비해 과학실에서 조금 높게 검출되었다.

Acetone의 경우에는 겨울철 D초등학교 과학실에서, Methyl Ethyl Ketone의 경우에는 겨울철 A초등학교의 과학실에서 일부 측정치가 고농도를 나타내었기 때문에 이들 화합물이 과학실에서 항상 높게 나타난다고 판단하기에는 무리가 있으나 과학실의 경우에는 과학수업을 위한 각종 실험기구 및 시약 사용의 빈도가 높기 때문에 타 실내환경에 비해 이들 화합물들이 검출될 확률이 높을 것으로 추정된다.

약취유발물질인 Acetaldehyde와 Propionaldehyde의 경우에는 실외에 비해 실내에서 약 1.2~1.8배 정도 높게 나타났다.

Table 5. Summary statistics of air quality by season.

| Site | Compounds | Summer | | Winter | | S/W ratio |
|----------------------|-----------------------|--------|-------|--------|-------|-----------|
| | | Mean | S.D. | Mean | S.D. | |
| Classroom (n=18) | Formaldehyde | 57.21 | 17.16 | 49.65 | 26.48 | 1.2 |
| | Acetaldehyde | 9.42 | 1.82 | 10.18 | 4.17 | 0.9 |
| | Acetone | 18.20 | 7.98 | 28.21 | 10.85 | 0.6* |
| | Propionaldehyde | 2.37 | 0.99 | 1.90 | 1.33 | 1.2 |
| | Methyl Ethyl Ketone | 11.42 | 6.31 | 18.56 | 7.15 | 0.6* |
| | Temperature (°C) | 29.8 | 1.7 | 18.0 | 2.5 | - |
| | Relative humidity (%) | 49.8 | 6.5 | 31.1 | 10.0 | - |
| Computer-room (n=18) | Formaldehyde | 49.73 | 15.92 | 45.68 | 13.22 | 1.1 |
| | Acetaldehyde | 10.91 | 2.99 | 10.86 | 5.12 | 1.0 |
| | Acetone | 23.08 | 15.14 | 33.99 | 16.90 | 0.7 |
| | Propionaldehyde | 2.48 | 1.00 | 2.34 | 1.40 | 1.1 |
| | Methyl Ethyl Ketone | 8.39 | 3.50 | 17.38 | 6.95 | 0.5* |
| | Temperature (°C) | 30.1 | 1.9 | 18.4 | 2.7 | - |
| | Relative humidity (%) | 45.4 | 5.2 | 30.4 | 8.6 | - |
| Laboratory (n=18) | Formaldehyde | 41.45 | 10.65 | 36.70 | 17.95 | 1.1 |
| | Acetaldehyde | 11.02 | 4.26 | 13.64 | 6.33 | 0.8 |
| | Acetone | 23.54 | 7.57 | 53.24 | 26.10 | 0.4* |
| | Propionaldehyde | 2.13 | 0.67 | 2.13 | 1.57 | 1.0 |
| | Methyl Ethyl Ketone | 8.13 | 4.10 | 25.73 | 17.61 | 0.3* |
| | Temperature (°C) | 30.0 | 1.7 | 15.7 | 3.5 | - |
| | Relative humidity (%) | 50.2 | 8.7 | 34.6 | 10.2 | - |
| Playground (n=18) | Formaldehyde | 12.52 | 6.06 | 6.21 | 2.77 | 2.0* |
| | Acetaldehyde | 9.04 | 4.47 | 8.28 | 3.16 | 1.1 |
| | Acetone | 12.32 | 6.38 | 13.61 | 4.05 | 0.9 |
| | Propionaldehyde | 1.13 | 0.81 | 1.41 | 1.21 | 0.8 |
| | Methyl Ethyl Ketone | 5.98 | 3.47 | 13.72 | 5.43 | 0.4* |
| | Temperature (°C) | 32.7 | 3.4 | 15.0 | 5.1 | - |
| | Relative humidity (%) | 38.1 | 7.0 | 28.9 | 10.8 | - |

*indicates that summer and winter groups are significantly different at a level of 0.05 by Mann-Whitney U test.

Table 6. Ratios between indoor and outdoor concentrations of carbonyl compounds.

| Items | Classroom | | Laboratory | | Computer room | |
|---------------------|-----------|--------|------------|--------|---------------|--------|
| | Summer | Winter | Summer | Winter | Summer | Winter |
| Formaldehyde | 4.6* | 8.0* | 3.3* | 5.9* | 4.0* | 7.4* |
| Acetaldehyde | 1.0 | 1.2 | 1.2 | 1.6* | 1.2 | 1.3 |
| Acetone | 1.5 | 2.1* | 1.9* | 3.9* | 1.9* | 2.5* |
| Propionaldehyde | 2.1* | 1.3 | 1.9* | 1.5 | 2.2* | 1.7 |
| Methyl Ethyl Ketone | 1.9* | 1.4 | 1.4 | 1.9* | 1.4 | 1.3 |

*indicates that indoor and outdoor groups are significantly different at a level of 0.05 by Mann-Whitney U test.

3. 2 계절에 따른 농도 분포

각 분석대상물질에 대한 계절별 농도 분포 및 여름/겨울철 농도비는 표 5에 나타내었다.

각각의 실내·외 환경에서의 평균온도는 여름철 29.8~32.7°C, 겨울철 15.0~18.4°C였으며, 상대습도는 여름철 38.1~50.2%, 겨울철 28.9~34.6%였다.

Formaldehyde의 경우 여름, 겨울철 모두 교실, 컴퓨터실, 과학실 순으로 높게 나타났으며, 각 지점별 평균농도는 여름철 41.45~57.21 µg/m³, 겨울철 36.70~49.65 µg/m³으로 나타나 여름철이 약 1.1~1.2배 정도 높게 나타났으나 큰 차이를 보이지 않았다. Propionaldehyde의 경우에도 실내환경의 각 지점별 여름/겨울철 농도비가 1.0~1.2로 나타나 여름철에 약간 더 고농도로 검출되었다.

이와 같이 지하상가, 백화점 등의 다중이용시설에서의 Formaldehyde 농도가 여름철에 월등히 높게 나타난 것(백성욱 등, 1999)과는 달리 학교의 경우 Formaldehyde가 계절에 따라 큰 차이를 보이지 않은 것은 다중이용시설의 경우에는 여름철 냉방기 가동으로 인해 환기가 제한되는 반면에, 학교는 여름철에 대부분 창문을 열고 생활하기 때문에 고온으로 인해 각 화합물들에 대한 방출율이 증가되었다 하더라도 자유로운 환기의 영향으로 실내환경 내 농도가 많이 희석되기 때문으로 생각된다. 최근 학교를 대상으로 한 연구결과가 다수 발표되고 있으나(손종렬 등, 2005; 이성환 등, 2004) 각 연구들마다 시료포집 조건이 상이하기 때문에 Formaldehyde 농도가 큰 차이를 나타내고 있다. 따라서 학교의 경우 다중이용시설과는 환경 및 조건이 다소 상이하므로 정확한 농도 측정 및 비교를 위해서는 시료포집 조건 등을 명확히 명시할 필요가 있을 것으로 사료된다.

Acetaldehyde 및 Acetone의 경우에는 여름, 겨울철

모두 과학실, 컴퓨터실, 교실 순으로 높게 나타났으며, Methyl Ethyl Ketone은 여름철에는 교실에서, 겨울철에는 과학실에서 가장 높게 나타났다. 이들 화합물에 대한 계절별 평균농도는 Formaldehyde와는 달리 여름철 보다 겨울철에 더 높게 나타났으며, 과학실에서의 Acetone 농도는 겨울철에 2.3배 정도 높게 나타났다. 또한 과학실과 컴퓨터실에서의 Methyl Ethyl Ketone 역시 겨울철에 각각 3.2배, 2.1배 정도 높게 나타났으며, 유의성 검증 결과에서도 계절에 따라 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다.

실외환경인 운동장에서의 Formaldehyde 평균농도는 여름철 12.52 µg/m³, 겨울철 6.21 µg/m³으로 여름철에 약 2배 정도 높게 나타났으며, 자동차 배기가스에서도 배출되는 Methyl Ethyl Ketone의 경우에는 여름철 5.98 µg/m³, 겨울철 13.72 µg/m³으로 검출되어 겨울철에 더 고농도를 나타내었다.

표 6은 실내·외 농도비를 계절별로 구분하여 나타낸 것이다. Acetaldehyde, Propionaldehyde, Methyl Ethyl Ketone의 경우에는 실외에 비해 실내환경에서 1.0~2.2배 정도 높게 나타났으나 Acetone은 1.5~3.9배 정도 높게 나타났다. 이에 반해 Formaldehyde의 실내/외 농도비는 여름철 3.3~4.6, 겨울철 5.9~8.0으로 나타나 타 항목에 비해 실내·외 농도차가 매우 높게 나타났다. 또한 겨울철에는 환기가 거의 이루어지지 않기 때문에 여름철에 비해 실내/외 농도비가 훨씬 높게 나타나며, 이로써 쾌적한 환경과 보건상의 안전을 위해 겨울철 잦은 환기가 매우 중요함을 알 수 있다.

3. 3 신축 후 경과년도에 따른 농도 비교

그림 1은 각 지점에서의 신축 후 경과년도에 따른 카보닐화합물의 평균 농도 및 표준편차를 나타낸 것

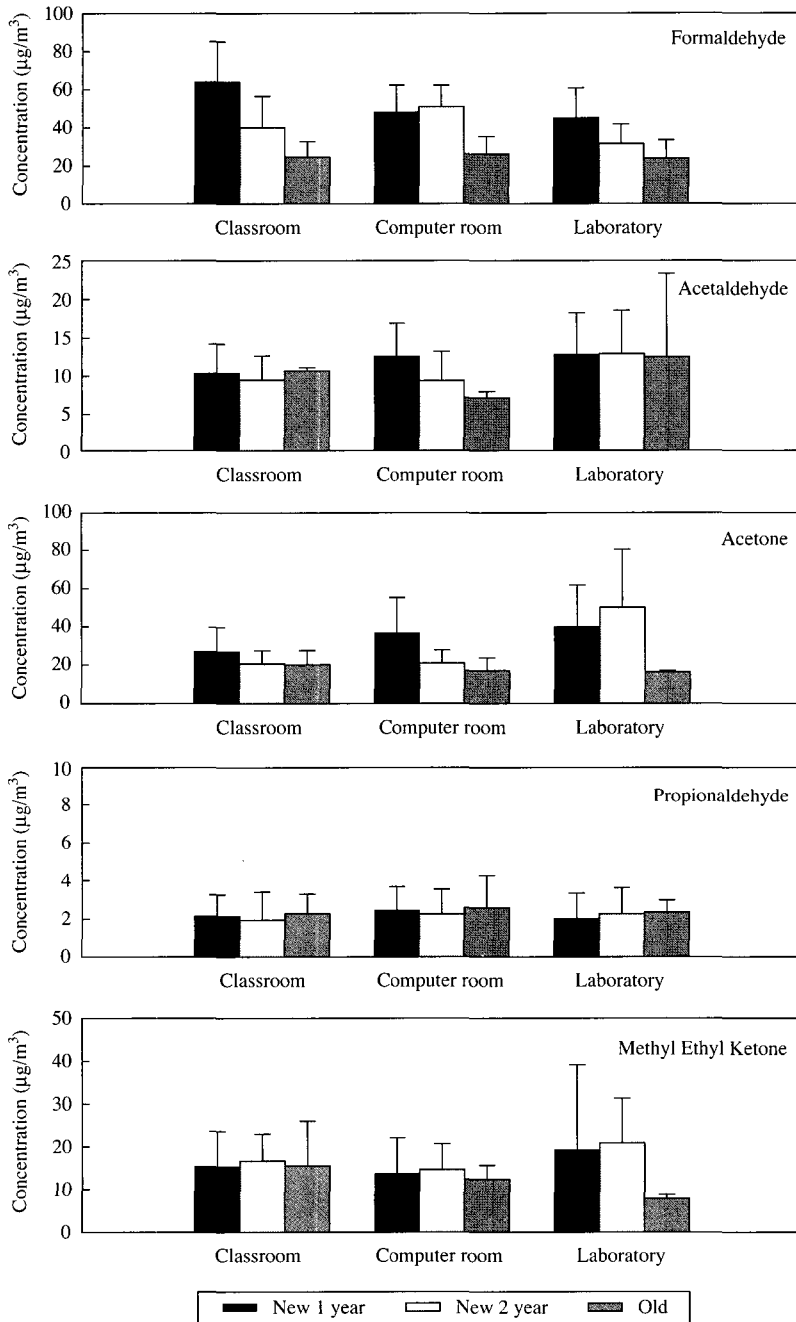


Fig. 1. Concentrations of carbonyl compounds by site and construction year.

이며, 표 7은 신축 후 경과년도에 따른 감소율(%)을 나타낸 것이다.

교실내 Formaldehyde의 평균농도는 신축1년, 신축 2년, 비신축 학교에서 각각 63.88, 39.94, 24.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Table 7. Removal percentages (%) of concentrations between new and old school.

| Site | Compounds | 1 year & 2 year | 1 year & old |
|----------------|---------------------|-----------------|--------------|
| Classroom | Formaldehyde | ▼37.5 | ▼61.7 |
| | Acetaldehyde | ▼ 8.6 | △ 3.3 |
| | Acetone | ▼23.0 | ▼24.9 |
| | Propionaldehyde | ▼ 8.5 | △ 7.0 |
| | Methyl Ethyl Ketone | △ 8.9 | △ 1.4 |
| Laboratory | Formaldehyde | ▼30.1 | ▼47.1 |
| | Acetaldehyde | △ 1.0 | ▼ 2.2 |
| | Acetone | △26.2 | ▼59.2 |
| | Propionaldehyde | △12.4 | △16.3 |
| | Methyl Ethyl Ketone | △ 8.9 | ▼58.9 |
| Computer -room | Formaldehyde | △ 6.1 | ▼45.8 |
| | Acetaldehyde | ▼25.9 | ▼43.9 |
| | Acetone | ▼42.7 | ▼53.2 |
| | Propionaldehyde | ▼ 7.4 | △ 6.1 |
| | Methyl Ethyl Ketone | △ 7.4 | ▼ 9.6 |

으로 나타났다. 신축1년 된 학교와 신축2년 된 학교 비교시 약 37.5% 정도 감소된 것으로 나타났으며, 이성환 등(2004)의 연구 결과(50% 정도 감소)에 비해 다소 낮은 감소율을 보였다. 신축1년 된 학교와 비신축 학교 사이에는 총 61.7% 정도의 감소율을 나타내었으며, 유의성 검증 결과에서도 신축경과 년도에 따라 5% 유의수준에서 유의적인 차이가 있는 것으로 나타났다.

과학실의 경우에는 신축1년, 신축2년, 비신축 학교에서의 평균농도가 각각 44.82, 31.33, 23.70 µg/m³으로 나타나 신축1년 된 학교와 신축2년 된 학교 비교시 약 30.1%, 비신축 학교와의 비교시에는 47.1% 정도의 감소율을 나타내어 교실과 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 교실과 과학실의 경우에는 건물 신축 후 시간이 경과함에 따라 Formaldehyde 농도가 상당 수준 저감되는 것으로 평가되었다.

그러나 컴퓨터실의 경우에는 신축1년, 신축2년, 비신축 학교에서의 평균농도가 각각 47.91, 50.84, 25.96 µg/m³으로 나타나 신축1년 된 학교에 비해 신축2년 된 학교에서 약간 더 높게 나타나 신축 후 1, 2년 사이에는 큰 감소율이 없는 것으로 나타났다. 그러나 신축1년 된 학교와 비신축 학교와의 비교에서는 45.8% 정도의 감소율을 나타내었다.

실내온도의 경우 여름철에는 각 지점별로 유사한 수준으로 측정되었으나 겨울철에는 컴퓨터실이 교실

Table 8. Correlation coefficients between carbonyl compounds and meteorological parameters.

| Items | Temperature | | Relative humidity | |
|---------------------|----------------|----------------|-------------------|----------------|
| | Indoor (n=108) | Outdoor (n=36) | Indoor (n=108) | Outdoor (n=36) |
| Formaldehyde | 0.178 | 0.607** | 0.449* | 0.451* |
| Acetaldehyde | -0.166 | 0.199 | 0.180 | 0.182 |
| Acetone | -0.414** | 0.022 | -0.158 | -0.070 |
| Propionaldehyde | -0.067 | -0.289 | -0.122 | -0.206 |
| Methyl Ethyl Ketone | -0.466** | -0.526** | -0.122 | -0.288 |

**Correlation is significant at the 0.01 level

*Correlation is significant at the 0.05 level.

과 과학실에 비해 약간 높게 나타났으며, 특히 컴퓨터실의 경우 신축2년 된 학교에서의 평균 실내온도가 19.8°C로 신축1년 된 학교(17.6°C)와 비신축 학교(17.5°C)에 비해 다소 높게 나타나 실내온도 상승이 오염물질의 방출율에 영향을 미치는 것으로 추정되었다.

Formaldehyde와는 달리 학교 실내환경 내에서 간헐적으로 사용되고 배출되는 Acetone, Methyl Ethyl Ketone 등의 화합물들은 신축 후 경과시간에 따른 일관성 있는 결과를 나타내지 않아 이들 화합물에 대한 농도 변화 추이를 예측하기는 어려운 것으로 평가되었다.

3. 4 카보닐화합물과 기상인자와의 상관관계

표 8은 각각의 카보닐화합물 농도와 온도, 상대습도 등의 기상인자와의 상관관계를 평가한 것으로 실내·외 지점으로 구분하여 통계처리 하였으며, Pearson Correlation을 사용하였다.

실내온도는 최소 13.0°C에서 최대 32.3°C, 실외온도는 최소 6.0°C에서 최대 36.0°C의 분포를 나타내었으며, 실내환경에서의 평균 상대습도는 36.2~40.6%, 실외환경에서는 32.4%로 측정되었다.

온도와의 상관관계를 살펴보면 실내환경에서 Formaldehyde는 양의 상관관계를 나타내었으나 Acetaldehyde를 비롯한 나머지 항목들은 모두 음의 상관관계를 나타내었다. 실외환경에서는 Formaldehyde, Acetaldehyde, Acetone은 양의 상관관계, Propionaldehyde, Methyl Ethyl Ketone은 음의 상관관계를 나타내었다. 특히 Formaldehyde는 상관계수가 0.607로 매우 높게 나타나 광화학 반응을 통한 2차

생성물질임을 명확히 알 수 있다. 이와 같이 실내 · 외 지점에서 각 화합물에 따라 다른 양상을 나타낸 것은 배출원의 영향 이외에도 환기 등의 여러 가지 인자가 중요한 변수로 작용했기 때문으로 판단된다.

상대습도와외의 상관관계에서는 Formaldehyde, Acetaldehyde는 양의 상관관계, Acetone, Propionaldehyde, Methyl Ethyl Ketone은 음의 상관관계를 나타내어 실내 · 외 환경에서 유사한 결과를 나타내었다. 특히 Formaldehyde는 실내 · 외 환경에서의 상관계수가 각각 0.449, 0.451로 높게 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 신축학교에서의 카보닐화합물에 대한 전반적인 실태조사 및 특성평가를 위해 대구광역시 소재한 2003년, 2004년에 개교한 신축학교 및 1984년에 개교한 비신축 학교 등 총 6개교를 선정하였다. 교실, 과학실, 컴퓨터실, 운동장 등의 다양한 환경을 대상으로 2004년 11~12월 사이의 겨울철과 2005년 6~7월의 여름철에 카보닐화합물을 측정하였으며, 결과는 다음과 같다.

1. 각각의 실내환경에서 Formaldehyde는 최소 16.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 최대 108.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 검출되어, “다중이용시설등의실내공기질관리법”에 의한 유지기준(120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 모두 만족하는 것으로 나타났다.

2. 각각의 카보닐화합물은 항목에 따라 다양한 농도 분포를 나타내었으며, 전반적으로 Formaldehyde (16.90~108.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Acetone (8.85~103.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Methyl Ethyl Ketone (3.52~84.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Acetaldehyde (4.60~24.70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), Propionaldehyde (N.D.~4.60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 검출되었다.

3. 실내환경 내 Formaldehyde의 여름/겨울철 농도비는 1.1~1.2 정도로 나타나 지하상가, 백화점 등의 다중이용시설에서 Formaldehyde가 여름철에 월등히 높게 나타난 것과는 달리 학교의 경우에는 계절에 따라 큰 차이를 보이지 않았다.

4. Formaldehyde에 대한 신축 후 경과년도에 따른 농도 비교시 교실과 과학실의 경우에는 신축 후 2년이 경과된 학교가 신축 후 1년이 경과된 학교에 비해 약 30~38% 정도 낮게 검출되었으며, 신축 후 1년이 경과된 학교와 비신축 학교와의 비교시에는 약

47~62% 정도의 감소율을 나타내었다. 그러나 컴퓨터실의 경우에는 신축 후 2년이 경과된 학교가 신축 후 1년 경과된 학교에 비해 더 높게 나타났으며, 신축 후 1년 경과된 학교와 비신축 학교 비교시에는 교실, 과학실과 유사하게 약 46% 정도의 감소율을 나타내었다.

참 고 문 헌

관계부처 합동(2004) 실내공기질 관리 기본계획.
 김윤신, 이철민, 문정숙, 김상욱(2003) 서울 · 경기지역 초 · 중 · 고등학교 교실의 실내공기오염에 관한 연구, 한국교육보건학회지, 16(1), 81-90.
 박종길, 장난심, 박홍재, 박문기, 황용식, 정지영(1997) 실내 대기환경과 중금속 농도의 분포 특성에 관한 연구-학교 환경의 중금속 농도-, 한국환경과학회지, 6(5), 451-459.
 백성욱, 황윤정, 김영민, 황승만, 박상근, 송희봉(1999) 대구 지역 공중이용 시설의 실내 공기질 특성에 관한 연구, 대한환경공학회지, 21(5), 869-885.
 손종렬, 김종혁, 이용식, 최한영, 이윤규, 노영만, 손부순, 양원호, 이진성(2005) 국내 학교별 교사내 실내공기질 평가, 2005년도 한국실내환경학회 연차 학술대회 논문집 제2권, 133-137.
 손종렬, 윤승욱, 김종혁, 이용식, 최한영, 김영성, 손부순, 양원호, 김민희(2005) 전국 일부 학교 건축물 내의 실내 공기 및 인식도 조사, 대한위생학회지, 20(3), 1-9.
 신은상, 김진우(2002) 수원지역 초 · 중 · 고등학교 교실의 실내 공기오염도에 관한 연구, 대한위생학회지, 17(1), 20-27.
 이성환, 김상희, 이정재(2004) 부산의 신축학교 실내공기질 측정 및 분석, 대한건축학회 부산경남지회 학술발표논문집, 11(1), 449-457.
 정지원, 송지한, 이희광, 김신도(2005) 초등학교 교실에서의 실내공기질 관리 지침, 한국대기환경학회 2005 추계학술대회 논문집, 324-325.
 조규성(2000) 전주 시내 중·고등학교 실내 · 외 환경의 중금속 오염에 대한 연구, 한국환경과학회지, 9(6), 495-503.
 한국실내공기 · 산소연구회(2004) 실내공기와 건강, 초판, 신광문화사.
 환경부(2004) 실내공기질공정시험방법, 80-87.
 Chaloulakou, A. and I. Mavroidis (2002) Comparison of indoor and outdoor concentrations of CO at a public school: evaluation of an indoor air quality model,

- Atmospheric Environment, 36(11), 1769-1781.
- Lee, S.C., H. Guo, W.M. Li, and L.Y. Chan (2002) Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong-Kong, Atmospheric Environment, 36(12), 1929-1940.
- Park, K.H. and W.K. Jo (2004) Personal volatile organic compound (VOC) exposure of children attending elementary schools adjacent to industrial complex, Atmospheric Environment, 38(9), 1303-1312.
- Poupard, O., P. Blondeau, V. Iordache, and F. Allard (2005) Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools, Atmospheric Environment, 39(11), 2071-2080.
- Yip, F.Y., G.J. Keeler, J.T. Dvonch, T.G. Robins, E.A. Parker, B.A. Israel, and W.B. Caldwell (2004) Personal exposures to particulate matter among children with asthma in Detroit, Michigan, Atmospheric Environment, 38(31), 5227-5236.