

실내공기질 모델을 이용한 신축공동주택의 VOCs 및 HCHO 배출량 추정

심 상 호¹⁾ · 김 윤 신²⁾ · 양 원 호³⁾

¹⁾한양대학교병원 산업의학과, ²⁾한양대학교 환경및산업의학연구소, 대구가톨릭대학교 산업보건학과
(2006년 8월 22일 접수; 2006년 10월 23일 채택)

Estimation of Source Emission Rate on Volatile Organic Compounds and Formaldehyde Using Indoor Air Quality Modeling in New Apartment

Sang-Hyo Sim¹⁾, Yoon-Shin Kim²⁾ and Won-Ho Yang³⁾

¹⁾Hanyang University Medical Center, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

²⁾Institute of Environmental & Industrial Medicine, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

³⁾Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Kyongbuk 712-702, Korea

(Manuscript received 22 August, 2006; accepted 23 October, 2006)

Indoor air quality is the dominant contributor to total personal exposure because most people spend a majority of their time indoors. Especially when indoor environments have sources of contaminants, exposure to indoor air can potentially pose a greater threat than exposure to ambient air. In this study, estimations of volatile organic compounds and formaldehyde emission rate in indoor environments of new apartments were carried out using mass balance model in indoor environment, because indoor air quality can be affected by source generation, outdoor air level, ventilation, decay by reaction, temperature, humidity, mixing condition and so on. Considering the estimated emission rate of volatile organic compounds and formaldehyde, it is suggested that new apartment should be designed and constructed in the aspect of using construction materials to emit low hazardous air pollutants.

Key Words : Emission rate, Indoor air quality, VOCs, HCHO, Ventilation

1. 서 론

실외 대기오염은 바람 등에 의한 자연적인 희석률이 크고 사회적 인식 확대 및 각종 환경규제 등으로 억제되고 있으나, 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기가 계속적으로 순환되면서 오염농도가 인체에 유해한 영향을 미칠 수 있을 정도로 증가될 수 있기 때문에 실내환경에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다¹⁾. 인간은 일반적으로 대략 하루에 1.5 kg의 음식물을 섭취하고 2 kg 정도의 물을 마시며, 공기는 이보다 거의 10배에 달하는 약 13 kg 정도를 마셔야 살 수 있고 단 몇 분만

호흡을 멈추더라도 곧 사망하게 될 만큼 중요하다. 인간은 하루 24시간 중 90%이상을 실내(주택, 일반사무실, 실내작업장, 공공건물, 지하시설물, 상가, 음식점, 자동차, 지하철 등)에서 생활하는 것으로 조사보고 되고 있다²⁾. 특히, 실내환경 중에서도 주택은 가장 많이 시간을 보내는 공간으로 대략 하루 중 50% 이상 체류한다.

실내공기질(Indoor Air Quality, IAQ)에 대한 문제의 발생 배경은 각종 산업 분야에서 에너지 절약 및 효율을 높이기 위한 노력으로 건물의 단열을 위한 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 공기의 질이 악화되는 것이다. 실제로 에너지 절약형 건물은 외부로부터의 공기 침투(infiltration)를 막는 것에 초점을 맞추어 건축되었고, 에너지 절약형의 산업용 건물에서는 건물의 유지 관리비를 줄이기 위해 의도적으로 환기량을 감

Corresponding Author : Won-Ho Yang, Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Kyongbuk 712-702, Korea
Phone: +82-53-850-3739
E-mail: whyang@cu.ac.kr

소시킴기도 하여 공기의 유입과 환기가 감소되어 자연히 실내공기가 오염되고 있다³⁾. 실내공기오염의 주요 원인은 인구의 밀집화, 현대사회의 실내생활화, 실내공간의 밀폐화 등으로 도시의 집중화가 증가될수록 심화되고 있다. 실내공기오염은 각종 실내공간에서 공기오염, 생활쓰레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다양한 형태로 발생될 수 있으며, 건물병 증후군(Sick Building Syndrome, SBS), 복합화학물질 과민증(Multi-Chemical Sensitivity, MCS), 새집 증후군(Sick House Syndrome, SHS) 등을 유발시켜 인간에게 정신적 고통을 주거나 위해요소로 작용할 수 있다. 그 뿐만 아니라, 개인 및 국가에 의료비용 증가라는 경제적 부담을 안긴다는 점에서 그 심각성을 무시하기 어렵다⁴⁾. 즉, 실내에서의 공기오염물질 노출이 실외 대기노출 보다 실제적 영향 즉 건강장해를 야기할 수 있음을 알 수 있다. 더욱 중요한 것은 실내 공기오염물질의 농도가 낮더라도 노약자, 유아, 환자들은 실내환경에서 장기간 생활하기 때문에 매우 큰 건강영향을 미치는 것으로 알려져 있다.

실내공기질에 따른 건강위해성을 고려할 때, 실내환경의 연소기구, 가구류, 내장재 등에서 발생하는 공기오염물질의 발생량 또는 실내공기 농도 측정만으로는 지금까지 알려진 오염물질의 종류 및 노출로 인한 건강영향을 명확하게 규명할 수는 없다. 이것은 실내공기질이 공기오염물질 발생량뿐만 아니라 실외공기, 환기량, 실내공간에서 오염물질의 표면반응에 의한 감소, 온도, 습도, 기타 미확인 요인 등에 영향을 받기 때문이다⁵⁾.

건축물에 사용되는 건축자재 및 내장재는 매우 많은 종류가 있으며, 신축공동주택은 많은 자재들이 석유화학계 제품을 사용하고 있어 실내에서 휘발성 유기화합물(VOCs) 및 포름알데히드(HCHO) 발생의 주된 원인이 되고 있다. 최근 건축자재, 내장재, 생활용품, 연소기구별 오염물질을 인위적으로 조절된 챔버(chamber) 실험을 통해 유해 공기오염물질의 발생량을 측정 평가하는 연구가 수행되고 있으나, 실제 현장에서 발생량을 평가한 연구는 없는 실정이다. 본 연구는 현재 신축공동주택(아파트) 실내환경에서 발생하는 유해 공기오염물질 중 새집증후군의 원인인 VOCs와 HCHO의 배출량을 실내공기질 모델에 적용하여 추정하였다.

2. 연구내용 및 방법

2.1. 신축공동주택의 VOCs 및 HCHO

본 연구는 서울시 K구에 위치한 입주 전 신축공동주택(신축아파트)을 대상으로 실내공기 오염도를 평가하였다. 대상 신축공동주택에서 44평형 27가구

를 저층부(최하층으로부터 3층 이내, 9가구), 중층부(중간층 7~9층, 9가구), 고층부(최상부 3층 이내, 9가구)를 선정하여 2004년 12월부터 2005년 3월까지 실내공기질을 측정하였다. 대상 신축공동주택은 2004년 8월에 완공하였고 기타 설비 등의 설치 후 12월부터 입주자들의 입주가 시작된 시점이었으며, 공기질 측정은 입주 전이었다. 신축공동주택의 VOCs 및 HCHO의 농도는 고도별 저층 9가구, 중층 9가구, 고층 9가구로 구분하여 거실과 침실에서 30분 환기 후 모든 문을 닫은 조건에서 5시간 후 측정하였으며, 목적 실내 오염물질은 VOCs 중 Benzene, Toluene, Styrene, Xylene, Ethylbenzene 그리고 HCHO이었다.

2.1.1. 시료채취방법

VOCs 및 HCHO의 시료채취는 환경부의 실내공기질 공정시험방법에 준하여 수행하였다⁶⁾. Fig. 1과 같이 실내출입문, 창문 등을 개방하고 이 상태를 30분 이상 지속한 후, 외부공기와 면하는 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)를 5시간 이상 모두 닫아 실내의 공기의 이동을 방지한 후 포집하였다.

2.1.2. 측정 및 분석

휘발성유기화합물(VOCs)의 측정은 고체흡착법으로 Tenax-TA(60/80 mesh, Supelco, USA)가 200 mg 이상 충전된 스테인레스 흡착관(1/4 inch×9 cm, Perkinelmer, UK)을 이용하여 측정하였다. 분석은 포집된 시료는 오토샘플러(Ultra TD, Markes, U.K.)가 부착된 열탈착기 (Unity Markes, U.K., 이하 TD)를 통해 탈착한 후 가스크로마토그래프/질량분석기 (6890N/ 5973 inert, Agilent, USA., 이하 GC/MSD)를 이용하여 분석하였다. 포름알데히드(HCHO) 측정은 4 cm의 폴리프로필렌 튜브에 고순도로 정제된 2,4-DNPH가 코팅되어 있는 2,4-DNPH cartridge (Supelco S10, USA)를 이용하였다. 알데히드 측정시 오존(O₃)은 2,4-DNPH 유도체를 감소시키거나 2,4-DNPH가 오존과 반응하여 인위적인 불순물을 형성하는 등 방해물질로 존재하기 때문에 측정시 이러한 오존 영향을 제거하기 위해 2,4-DNPH cartridge 전단부에 KI가 채워져 있는 오존 스크루버(Waters, USA)를 설치하

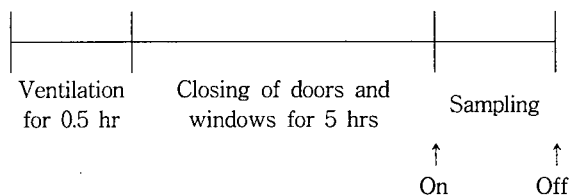


Fig. 1. Sampling process of VOCs and Formaldehyde.

였다. 측정시 사용한 펌프는 측정 전·후의 유량변화가 비교적 적은 Personal Air Sampler(Gilian, USA)를 이용하여 500 ml/min으로 30분간 총 15 l를 포집하였으며, 측정 전·후의 유량변화는 거의 모든 측정에서 5% 이내였다. 측정이 끝난 시료는 내부가 알루미늄으로 코팅되어 있는 container에 개별 포장하여 용매추출 전까지 4℃ 이하에서 냉장보관 하였다.

2.2. 환기량 측정

환기량은 추적가스(tracer gas)를 이용하여 직접 측정할 수 있다. 본 연구에서는 VOCs 및 HCHO 측정 후 즉시 SF₆ 표준가스를 이용하여 0.006~600 ppm까지 측정 가능한 Multi-gas Monitor(INNOVA Air Tech, Denmark)가 사용되었다. SF₆ 표준가스 분사 전 및 분사 중에 Fan 3대를 이용하여 완전혼합(complete mixing) 상태로 하였으며 SF₆ 농도가 약 70 ppm에 이르면 Fan은 정지시키고 약 10분 후로부터 SF₆ 농도를 측정하였고, 측정된 농도 값은 data-logger에 의해 자동으로 저장되도록 하였다. 환기량 측정은 추적가스 농도 감소법으로 회귀방법(regression method)을 이용하여 공기환기횟수(Air Change per Hour, ACH)를 계산하였다⁷⁾.

2.3. 실내공기질 모델

물질 수지에 의한 실내공기질 모델은 실내공기 오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이며, 오염물질의 확산과 이동, 오염물질 발생강도, 환기율, 제거율 등의 요인들을 기술한다. 건물전체를 단순히 잘 혼합된 하나의 방으로 가정할 수 있다⁸⁾. 실내공기의 농도변화는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$VdC_i = mQC_0dt + Sdt - mQC_i dt - Rdt \quad (1)$$

여기서, C_i= indoor concentration (ug/m³), C_o= outdoor concentration (ug/m³), Q= air exchange rate (m³/hr) S= source emission rate (ug/hr), R= removal rate (ug/h), V= volume of the space (m³), t= time (hr) and m= mixing factor (0≤m≤1).

식 (1)에서 실내공간의 완전혼합(completely mixed condition, m=1)을 가정하고 재배열 시키면 식 (2) 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_0 + \frac{S}{V} - IC_i - \frac{R}{V} \quad (2)$$

여기서, I= air exchange per hour (hr⁻¹).

식(2)을 식(1)에 대입하고 대상 실내공간에서 완

전혼합(completely mixed condition, m=1)과 반응에 의한 제거가 없다(R=0)고 가정하면, 식(2)은 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dC_i}{dt} = IC_0 + \frac{S}{V} - IC_i \quad (3)$$

오염물질의 농도가 평행상태(t=∞)에 도달할 때 시간에 따른 농도 변화는 정상상태(dC_i/dt=0)로 가정하면, 목적 공기오염물질의 발생량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = I \times (C_i - C_o) \times V \quad (4)$$

3. 연구결과 및 고찰

대상 27주택에서 불박이장이 설치되었으며, 바닥은 마루, 벽면에 벽지를 사용하였다. 측정당시 실내 온도는 2~7℃, 습도 34~42%로 난방을 하지 않는 상태에서 측정을 실시하였다. 본 연구에서는 주택 실내의 체적은 바닥면적이 120.11m², 천정고 2.3m로 실제적은 276.25m³이었다

3.1. VOCs 및 HCHO 측정농도

층별 실내오염물질 농도 비교 결과 Benzene은 중층-고층-저층, Toluene은 저층-중층-고층, Ethylbenzene은 고층-중층-저층, Xylene은 고층-중층-저층, Styrene은 중층-고층-저층, HCHO는 중층-저층-고층의 순으로 높은 평균농도 값을 나타내었다(Table 1). 중층의 HCHO의 평균 농도는 152.94 μg/m³를 나타내어 환경부 다중이용시설등의 실내공기질관리법 기준(120 μg/m³)을 초과하였다. 이 결과는 동일시기에 건축된 아파트의 경우 각각 주택이 같은 전자재 및 마감재를 사용하였지만 실내공기질은 차이가 있음을 보여주고 있다. HCHO의 경우 중층이 저층과 고층에 비해 통계적으로 유의하게 높았으며(p=0.001), VOCs 중 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Styrene의 층별 농도는 유의한 차이를 보이지 않았다.

3.2. 환기량

추적가스(SF₆)를 이용한 농도 감소법(decay method)을 회귀방법에 적용하였을 때 결정계수(R²) 값은 평균 0.97±0.03이었다(Table 2). 환기횟수 측정결과는 저층, 중층 및 고층이 각각 0.21 ACH, 0.21 ACH, 0.48 ACH이었으며, 고층이 저층과 중층에 비해 통계적으로 유의하게 높았다 (p=0.00). 따라서 고층에서 가장 공기환기율이 높은 것으로 조사되었으며, 실외 대기의 농도가 공동주택보다 낮은 농도고 실내 공기오염물질 발생량이 같다면, 상대적으로 고층의 실내공기질이 저층과 중층에 비해 양호할 수 있음을 나타낸다.

Table 1. Concentration($\mu\text{g}/\text{m}^3$) of indoor air pollutants classified by conditions of ventilation floor level in newly constructed apartments

Height of building	Compound	N	Mean \pm S.D	Max	Min
Low floor	Benzene	18	2.34 \pm 1.33	5.58	0.57
	Toluene	18	83.88 \pm 68.94	294.27	12.27
	Ethybenzene	18	13.25 \pm 13.84	59.32	1.28
	Xylene	18	42.67 \pm 45.56	188.20	4.2
	Stylene	18	7.80 \pm 5.93	18.85	0.66
	HCHO	18	108.97 \pm 45.29	165.27	49.40
Middle floor	Benzene	18	2.67 \pm 2.28	7.69	0.47
	Toluene	18	83.78 \pm 63.49	267.01	28.86
	Ethybenzene	18	14.59 \pm 15.88	70.88	2.72
	Xylene	18	56.09 \pm 70.99	10.76	6.72
	Stylene	18	9.80 \pm 7.96	28.18	2.16
	HCHO	18	152.94 \pm 56.43	207.60	67.0
High floor	Benzene	18	2.39 \pm 1.87	5.66	0.28
	Toluene	18	72.03 \pm 103.89	260.93	4.61
	Ethybenzene	18	20.63 \pm 44.04	51.31	2.46
	Xylene	18	56.63 \pm 114.62	175.57	3.20
	Stylene	18	8.29 \pm 12.61	37.75	1.03
	HCHO	18	69.24 \pm 35.56	113.73	16.60

3.3. VOCs 및 HCHO 배출량

신축공동주택의 오염물질별 발생량(emission rate)은 식 (4)에 의해 추정되었으며, 결과는 Table 3에 나타내었다. 식 (4)에서 실외 대기의 농도는 측정 기간 동안 신축공동주택 외부에서 측정된 농도를 이용하였다. 실외 대기에서 5회 측정된 농도는 Benzene $0.50\pm 2.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene $13.55\pm 4.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethybenzene $4.14\pm 1.32 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Xylene $3.64\pm 1.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Stylene $0.10\pm 0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$, HCHO $0.01\pm 0.01 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. 모델(model)을 이용한 각 물질의 발생량 추정은 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Stylene의 경우 고층에서 각각 $221.62 \mu\text{g}/\text{hr}$, $7356.33 \mu\text{g}/\text{hr}$, $2223.58 \mu\text{g}/\text{hr}$, $6847.26 \mu\text{g}/\text{hr}$,

$1068.50 \mu\text{g}/\text{hr}$ 로 가장 높았으며, HCHO는 중층이 가장 높은 배출률($8779.82 \mu\text{g}/\text{hr}$)를 나타내었다. 결과 3.1과 3.2에 나타내었듯이 VOCs 및 HCHO의 실내공기 농도와 발생량이 상이한 결과를 보여주

Table 3. An estimation of VOCs emission rates ($\mu\text{g}/\text{hr}$) in newly constructed apartments by using indoor air quality box model

Height of building	Compound	Mean \pm S.D
Low floor	Benzene	100.91 \pm 50.96
	Toluene	4168.92 \pm 4029.06
	Ethybenzene	534.61 \pm 803.58
	Xylene	2278.88 \pm 2662.35
	Stylene	445.62 \pm 320.03
	HCHO	5846.47 \pm 2281.47
Middle floor	Benzene	115.69 \pm 103.09
	Toluene	4170.88 \pm 3377.08
	Ethybenzene	595.27 \pm 737.32
	Xylene	2710.30 \pm 3371.63
	Stylene	538.71 \pm 341.66
	HCHO	8779.82 \pm 3123.56
High floor	Benzene	221.62 \pm 183.59
	Toluene	7356.33 \pm 11498.70
	Ethybenzene	2223.48 \pm 4609.35
	Xylene	6947.26 \pm 12085.62
	Stylene	1068.50 \pm 1460.62
	HCHO	8754.10 \pm 3665.97

Table 2. Air exchange per hour (ACH) of each floor (low, middle, high) in newly constructed apartments

	Air exchange per hour (ACH)		R ² (Mean \pm S.D)
	Mean \pm S.D	Range	
Low Floor (n=9)	0.21 \pm 0.10	0.12~0.45	0.98 \pm 0.01
Middle Floor (n=9)	0.21 \pm 0.07	0.13~0.36	0.97 \pm 0.04
High Floor (n=9)	0.48 \pm 0.19	0.25~0.79	0.98 \pm 0.01
Total	0.30 \pm 0.18	0.12~0.79	0.97 \pm 0.03

고 있으며, 이것은 아파트의 경우 저, 중, 고층의 환기량이 차이가 있기 때문이다. 즉, 고층에서는 상대적으로 중, 저층에 비해 VOCs의 발생량이 많지만 높은 환기량으로 저, 중, 고층의 실내공기 농도는 유의한 차이를 보이지 않았으며, HCHO의 경우는 중층이 고층에 비해 발생량이 비슷하지만 실내공기질 농도는 중층이 고층에 비해 약 2.2배 높았다.

실내환경 중 건축자재, 붙박이장, 벽지 등에서 배출되는 VOCs 및 HCHO의 발생량을 신축공동주택 등에서 직접 측정하는 것은 불가능하므로 실내공기질 모델은 오염물질 농도와 관련 변수들 사이의 관계를 나타낼 수 있는 유용한 방법이 될 수 있다⁹⁾. 또한 단순히 실내환경 농도 측정으로만 실내공기질을 평가할 수 없음을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구는 입주 전 신축공동주택에서 건축자재 및 마감재 등에서 배출되는 유해공기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs) 중 VOCs와 HCHO를 대상으로 실내공기질 모델을 이용하여 발생량을 추정하였다. 목적 물질의 발생량 추정은 Benzene, Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Styrene의 경우 고층에서 각각 221.62 $\mu\text{g/hr}$, 7356.33 $\mu\text{g/hr}$, 2223.58 $\mu\text{g/hr}$, 6847.26 $\mu\text{g/hr}$, 1068.50 $\mu\text{g/hr}$ 로 가장 높았으며, HCHO는 중층이 가장 높은 배출률(8779.82 $\mu\text{g/hr}$)를 나타내었다. 고층에서는 상대적으로 중, 저층에 비해 VOCs의 발생량이 많지만 높은 환기량으로 저, 중, 고층의 실내공기 농도는 유의한 차이를 보이지 않았으며, HCHO의 경우는 중층이 고층에 비해 발생량이 비슷하지만 실내공기질 농도는 중층이 고층에 비해 약 2.2배 높았다. 이 연구는 각종 건축자재 및 다양한 생활용품에서 발생하는 오염물질 발생량 예측에 있어, 경제적 및 시간적 손실을 최소화하기 위한 일환으로 실내공기중 건축자재로부터 방출되는 오염물질별 발생강도를 예측하기 위한 방법론을 정립하기 위해 수행

된 연구로, 향후 실내공기질 예측 연구에 있어 예비연구의 일환으로 적극적 활용이 기대된다.

참 고 문 헌

- 1) Hoddinott, K. B. and A. P. Lee, 2000, The use of environmental risk assessment methodologies for an indoor air quality investigation, *Chemosphere*, 41, 77-84.
- 2) 통계청, 1999, 생활시간조사보고서, 생활시간량 편, 통계청, 1, 29-50.
- 3) Skillas, G., C. H. Huglin and H. C. Siegmann, 1999, Determination of air exchange rates of rooms and deposition factors for fine particles by means of photoelectric aerosol sensors, *Indoor Built Environment*, 8, 246-254.
- 4) Jones, A. P., 1999, Indoor air quality and health, *Atmospheric Environment*, 33, 4536-4564.
- 5) Cyrus, J., J. Heinrich, K. Richter, G. Wolke and H. E. Wichmann, 2000, Sources and concentrations of indoor nitrogen dioxide in Hamburg and Erfurt, *The Science of the Total Environment*, 250, 51-62.
- 6) 환경부, 2004, 실내공기질공정시험방법, 환경부, 34-51.
- 7) 양원호, 배현주, 이기영, 정문호, 2000, 측정시간에 따른 거주지역 환기량 계산 오류에 관한 연구, *한국환경위생학회지*, 26(3), 50-54.
- 8) Yang, W., K. Lee and M. Chung, 2004, Characterization of Indoor Air Quality Using Multiple Measurements of Nitrogen Dioxide, *Indoor Air*, 14, 105-111.
- 9) Kraenzmer, M., 1999, Modeling and continuous monitoring of indoor air pollutants for identification of sources and sinks, *Environment International*, 25(5), 541-551.