

주택 실내환경 VOCs의 발생량 및 감소량에 관한 연구

정순원·양원호·김대선^{*}·송미라^{***}·손부순[†]
순천향대학교환경보건학과, ^{*}대구가톨릭대학교 산업보건학과,
^{**}국립환경과학원 환경역학과, ^{***}동신대학교 뷰티코디네이션학과
(2006년 7월 27일 접수; 2007년 1월 7일 채택)

A Study of Development of Evaluation on Source Strength and Deposition Constant of VOCs

Soon-won Jung, Won-Ho Yang^{*}, Dae-Sun Kim^{**}, Mi-Ra song^{***} and Bu-Soon Son

Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Chungnam 336-745, Korea

^{*}Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyeongbuk 712-702, Korea

^{**}Department of Environmental Epidemiology, National Institute of Environmental Research, Incheon 404-708, Korea

^{***}Department of Beauty Design, Dong Shin University, Jeonnam 520-741, Korea

(Manuscript received 27 July, 2006; accepted 7 January, 2007)

This study was performed in 30 selected apartments in Seoul, Asan and Daegu area which were constructed within 4 years and over 4 years, to measure the concentration of VOCs(benzene, toluene, xylene) from July, 2004 to September. Mean ratios of indoor to outdoor VOCs concentrations in the construction under 4 years were higher in 1 than average, I/O ratio of over 4 years were lower in 1. This was considered that the VOCs density influences indoor pollutant. For the indoor air quality estimation, the deposition constant and the source strength factor of toluene were $1.49 \pm 2.05 \text{ hr}^{-1}$ and $36.95 \pm 52.26 \text{ ppb/h}$, respectively.

Key Words : VOCs, Deposition constant, Source strength

1. 서론

인간은 성인의 경우 일반적으로 하루에 대략 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 중요하다¹⁾. 특히, 자연적으로 희석되는 대기오염과는 달리 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기가 지속적으로 순환하면서 실내 공기 오염농도가 누적되어 실외 대기오염으로 인한 인체 영향보다 더 큰 건강영향을 유발할 수 있다고 알려져 있다²⁾. 미국 EPA의 보고에 의하면, 성인이 하루에 약 80% 이상을 실내 공간에서 생활하고 있는 것으로 조사되었고, 한국인의 경우 환경부에서 전국 성인 833명을 대상으로 1일 활동 내역과 활동장소

및 실내에서의 거주시간을 조사한 결과에서 하루 중 약 97%의 시간을 실내에서 보내고 있는 것으로 보고되고 있다³⁾. 이러한 생활 방식의 변화에 의한 최근 도시화 지역에서의 실내공기질(IAQ : Indoor Air Quality)의 문제가 새로운 환경 문제로 부각되고 있으며, 미국을 중심으로 21세기 환경문제 중 실내환경(indoor environment) 문제를 최우선으로 다루고 있다.

특히, 실내환경 중에서도 주택은 가장 많은 시간을 보내는 공간으로 대략 하루 중 50% 이상 체류하는 것으로 보고되고 있다³⁾. 실내오염은 각종 실내공간에서 공기오염, 생활쓰레기, 소음, 악취 등의 각종 환경오염에 이르기까지 다양한 형태로 발생할 수 있으며, 이 중에서도 실내공기오염은 대표적으로 인간의 건강까지 위협하고 있다⁴⁾. 그러나 대부분의 사람들은 실내공기오염(Indoor Air Pollution, IAP)이 인체에 미치는 영향은 실외 대기오염보다 더욱 중요하다는 사실을 대부분 인식하지 못하고 있다²⁾. 이와같은 실내공기 오염의 악화는 1970년대 선진 각

Corresponding Author : Bu-Soon Son, Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Chungnam 336-745, Korea
Phone: +82-41-530-1270
E-mail: sonbss@sch.ac.kr

국가의 사무실에서 일하는 직장인들에게 두통, 안질, 후두염, 알레르기성 질환, 어지러움 등을 야기시켰으며 이것을 일명 빌딩증후군(Sick Building Syndrome, SBS) 또는 빌딩관련질병(Building Related Illness, BRI)이라 부른다⁴⁾.

실내에서 발생하는 오염물질은 비록 저농도라 하더라도 재실자가 실내에서 보내는 시간이 길기 때문에 건강측면에서도 더욱 중요한 의미를 가지게 된다⁵⁾. 일부 실내공기 오염물질은 주로 호흡기와 순환기 계통에 영향을 주며 물질에 따라 발암성을 내포하고 있다. 특히 최근 문제시되고 있는 휘발성 유기화합물(VOCs)의 경우는 호흡기와 순환기뿐만 아니라 신경계에 독성이 강하고, 말초신경계의 감각능력을 저하시키며, 발암성과 유전독성을 내포하여 실내오염물질로 관리할 필요성이 있다고 보고되고 있다⁶⁾. 벤젠의 경우, 호흡노출로 인한 백혈병 유발에 관한 역학 자료가 다수 보고되고 있다. Rinskye et al.⁷⁾의 연구에 의하면 Infante and White⁸⁾의 연구를 바탕으로 그 후 24년간 보완, 연구한 결과 백혈병 발생률이 통계학적으로 유의하게 증가되었으며(SMR=560), 특히 5년이상 근속 근로자의 백혈병으로 인한 사망률, 즉 SMR은 2100으로 추계되었다고 보고되고 있다. 툴루엔과 자일렌은 인체발암성에 관한 역학 자료는 없지만 자일렌의 경우, Maltoni⁹⁾의 연구에서는 대조군에 비해 랫트의 암컷과 수컷에 104주 동안 4~5일/주에 500 mg/kg/day의 콘오일 섭취 노출 결과 악성 종양의 발생률이 증가하였으나 생존율이나 특정 종양 형태가 알려지지 않은 것으로 보고되고 있다.

본 연구에서는 준공 4년 이전의 공동주택과 4년 이후의 공동주택의 휘발성유기화합물의 농도 분포를 파악하고 실내공기질 모델의 적용에 필요한 VOCs(benzene, toluene, xylene)의 발생강도 및 감소상수를 동시에 추정함으로써 실내공기질의 특성을 파악하는 것이다. 이 평가방법은 실내공기질의 실외농도 및 환기 등의 영향요인을 고려한 것으로 공동주택 뿐만 아니라 사무실이나 학교교실 실내공기질 관리 및 기준설정의 기초 자료로 제공하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구대상

본 연구는 2004년 7월부터 2004년 9월까지 서울, 아산, 대구 3개 지역의 공동주택을 대상으로 하여 휘발성유기화합물의 농도를 측정하였다<그림 1>. 각 지역에서 공동주택 건축완공 4년 이내 5주택 및 4년 이후 5주택을 선정하여 실내공간의 대표인 거

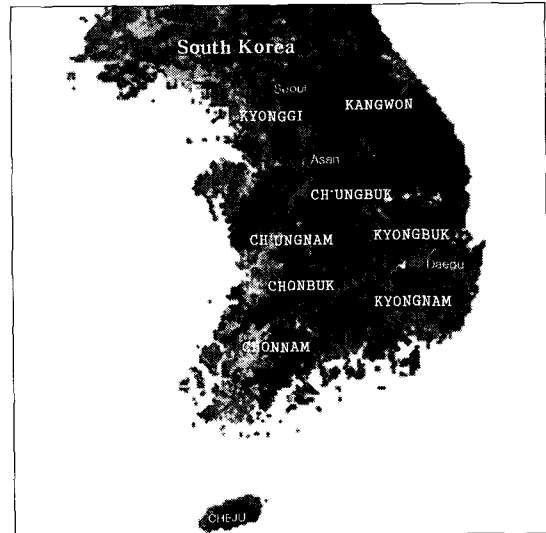


Fig. 1. The location of sampling site for study.

실 내부 1곳과 실외 1곳을 선정하여 3일 간격으로 60일동안 OVM badge를 이용하여 VOCs 농도를 측정하였다.

2.2. 측정 및 분석방법

2.2.1. 휘발성유기화합물

일반적으로 VOCs의 측정은 펌프를 이용한 활성탄관법(charcoal tube method), 패시브 sampler)과 tedlar백법 등이 있으며, 본 연구에서는 서울, 대구, 아산에서 OVM 패시브 sampler)를 이용하여 VOC 농도를 측정하였다. 농도 분석은 일반 유기용제(활성탄관법)의 분석과 마찬가지로 각 샘플을 CS₂로 탈착하여 GC/FID를 이용하여 분석하였다(3M OVM 분석가이드). 이용된 GC/FID의 분석조건, 체류시간, 탈착효율은 표 1,2,3과 같다.

농도계산법은 다음과 같다.

$$C = \frac{W \times B}{r \times t}$$

여기서,

C : 농도(ppm)

W : 회귀방정식을 이용해서 얻어진 농도(μ g)

B : 계산상수(OVM guide)

r : 회수율

t : 측정시간 (분)

2.3. 환기량 측정

수학적 구역모델에 적용될 발생강도(source strength) 및 감소상수(decay constant, K)의 값을

Table 1. GC/FID condition for VOCs concentration analysis

GC/FID condition	
Column	HP-FFAP 50m(length) × 0.32mm (Column ID) × 0.52μm(film thickness)
Oven	60°C(3 min) to 90°C at 5°C/min to 250°C at 50°C/min(4min)
Carrier	Helium(5ml/min)
Detector	FID, 250°C
Injector	1μl, 200°C

Table 2. Target material's retention time and mass spectrum

Material	Retention time	Qion
Benzene	5.79	78
Toluene	8.10	91
p-Xylene	10.98	91
m-Xylene	11.20	91
o-Xylene	12.84	91

Table 3. Target material's desorption efficiency

Material	Desorption efficiency
Benzene	0.97
Toluene	1.00
p-Xylene	0.97
m-Xylene	0.97
o-Xylene	0.97

구하기 위해 필요한 환기량 측정은 EPA methods. (Methods for Determination of Indoor Air Pollutants)를 이용하여 CO₂ gas로 각 주택에서 1회/2주 간격으로 측정하였다.

2.4. 발생강도 및 감소상수 동시 측정 평가기법

물질수지(mass balance)를 이용한 box model은 실내환경에서 오염물질의 생성과 제거는 물질보존의 법칙을 기본으로 하여 수학적으로 설명될 수 있다. 실내환경을 하나의 공간으로 간주하면, 물질수지 식은 다음과 같다 <그림 2>.

Rate of accumulation = ratio of [input + generation - output - sinks]

$$\frac{dC_i}{dt} = mIC_o + S - mIC_i - \frac{R}{V} \quad (1)$$

여기서, C_i= indoor concentration (ppm), C_o= outdoor concentration (ppm), I= air exchange rate

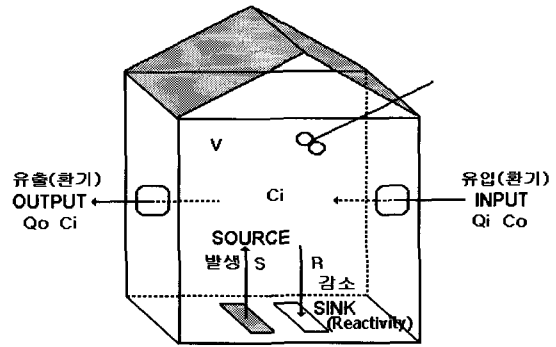


Fig. 2. Affecting factors of indoor environment.

(ACH : Air Changes per Hour, 1/hr), S= source strength (cm³/hr · m³ = ppm/hr), R= removal rate (cm³/hr), V= volume of the space (m³), t= time (hr) and m= mixing factor (0 ≤ m ≤ 1).

식 (1)에서 R은 감소상수(deposition constant, K = 1/hr)와 실내환경에서 존재하는 오염물질의 질량 (VC_i = ug)으로 나타낼 수 있다. 따라서, 식 (2)은 다음과 같다.

$$R = KVC_i \quad (2)$$

식 (2)을 식 (1)에 대입하고 대상 실내공간에서 완전혼합(completely mixed condition, m=1)을 가정하면, 식 (1)은 다음과 같이 식 (3)으로 나타낼 수 있다.

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

시간 t= 0 일 때 초기농도를 C₀라면, 식 (3)에서 시간에 따른 농도변화는 미분방정식을 이용하여 식 (4)로 나타낼 수 있다.

$$C(t) = \frac{(S + IC_o)}{I + K} [1 - e^{-(I+K)t}] + C_0 e^{-(I+K)t} \quad (4)$$

하나의 공간모델에서 실내공기오염물질의 농도가 평형상태(t=∞)에 도달할 때 시간에 따른 농도 변화는 정상상태(dC_i/dt= 0)로 가정할 수 있으며, 실내·외 실내공기오염물질의 농도에 적용하여 식(5)에 나타내었다.

$$C_{i(ss)} = \frac{IC_o}{I + K} + \frac{S}{I + K} \quad (5)$$

여기서, C_{i(ss)}= average steady-state indoor VOC concentration (ppm), S= average VOC generation

rate ($\text{cm}^3/\text{hr} \cdot \text{m}^3 = \text{ppm}/\text{hr}$) and C_o = average outdoor VOC concentration (ppm).

식 (4)는 식 (5)와 같이 실내 VOC 농도와($C_{i(ss)}$)와 실외 대기오염물질의 농도(C_o)의 관계로 재배열할 수 있다.

$$C_{i(ss)} = \left(\frac{I}{I+K}\right)C_o + \left(\frac{S}{I+K}\right) \quad (6)$$

식 (6)에서 $I/(I+K)$ 를 A로 대체하고, $S/(I+K)$ 는 B로 대체하면, 식 (6)은 수학적으로 환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인(A: penetration factor)과 실내 오염원의 발생요인(B: source strength factor)으로 정의될 수 있다. 식 (6)은 식 (7)과 같이 간단한 실내 및 실외 공기오염물질의 농도 관계인 일차방정식으로 표현할 수 있다.

$$C_{i(ss)} = AC_o + B \quad (7)$$

식 (7)에서, 투과요인(A)는 I와 K의 값이 0보다 크기 때문에 0과 1사이여야만 한다. 또한 오염원 발생요인(B)은 S가 0과 같거나 크기 때문에 0이상이어야 한다. 따라서 일정기간 동안 다중측정으로 실내 및 실외의 공기오염물질 농도를 측정한다면, 식 (7)에서 일차 선형회귀식을 이용하여 투과요인과 발생요인을 구할 수 있다. 본 연구에서 측정기간 동안 매일의 C_i 와 C_o 측정은 식 (7)에서 최소자승직선을 이용하여 기울기와 절편 값으로부터 투과요인(A)과 발생요인(B)의 값을 계산할 수 있다. 그리고, 투과요인(A)에서 측정된 환기량을 대입하여 측정기간 동안의 감소상수(K)를 계산할 수 있으며, 감소상수(K)를 발생요인(B)에 대입하여 측정기간 동안 평균 공기오염물질의 발생강도를 추정 및 계산 할 수 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 주택특성

본 연구의 대상은 서울에서 10주택, 아산 10주택, 대구 10주택 총 30주택에서 수행되었다. 그리고 각 지역에서 5주택은 4년 이내의 주택이었으며, 5주택은 4년 이후의 주택이었다. VOCs 농도측정은 총 30주택 중에서 2주택이 중도에서 불참하였고, 1주택은 측정과정 중 측정기의 보관 상태가 불량하여 주택 총 27주택에서 농도분석을 하였다. 조사된 가족의 평균수는 3.7명이었고, 단독주택 2주택, 연립주택 3주택, 아파트는 25주택 이었다. 실내벽의 주요 물질은 시멘트(30주택)였으며, 30주택 모두에서 벽면에 벽지를 하였다. 30주택 모두 취사용으로 가스레인지 사용했으며, 1주택(성냥 또는 라이타 사용) 제외

Table 4. The number of house characteristics

	Area			Total
	Seoul (n= 10)	Asan (n= 10)	Daegu (n= 10)	
Type of house				
Single house	0	1	1	2
Apartment	10	9	9	28
Attached garage	10	10	10	30
Inside smoker	0	1	3	4
Gas range	10	10	10	30
Gas water heater	10	10	10	30
Kerosene heater	0	0	0	0

하고 가스 점화장치는 가스레인지 자체의 불꽃 점화장치를 사용하였다. 난방장치는 27주택에서 가스, 2주택은 석유, 1주택은 전기를 사용한다고 응답하였다. <표 4>

3.2. 실내·실외 VOCs 농도

휘발성유기화합물 중 측정된 벤젠(benzene), 톨루엔(toluene), 자일렌(m-xylene) 농도 측정결과를 <표 5,6,7>에 나타내었다. 벤젠의 결과에 의하면 서울, 아산, 대구에서 4년 이내에 건축된 건물에서 실내/실외 농도비가 평균적으로 1이상, 건축 4년 이후의 1이하를 나타내어 발생원의 존재 가능성을 나타내었다. 벤젠의 경우 서울, 아산, 대구에서 4년 이내에 건축된 주택의 평균 실내/실외 농도비는 각각 1.33 ± 0.91 , 1.24 ± 2.06 , 2.01 ± 2.26 를 나타내었고, 건축 4년 이후의 실내/실외 농도비는 0.96 ± 0.44 , 0.98 ± 0.49 , 0.93 ± 1.90 를 나타내었다. 톨루엔과 자일렌의 경우도 비슷한 결과를 보여, 신(new)주택과 구(old)주택의 실내발생원에 의한 발생량이 차이가 있을 수 있음을 보여주고 있다.

아산에서 건축 4년 이내 공동주택에서 측정된 톨루엔의 농도(실내: 89.71 ± 56.14 , 실외: 83.95 ± 62.96)는 서울(실내: 30.50 ± 31.48 , 실외: 30.47 ± 33.50)과 대구(실내: 11.36 ± 4.11 , 실외: 10.67 ± 4.65)에 비해 상대적으로 실내 및 실외 농도가 높았고, 중소 도시로 분류될 수 있는 아산에서 실내 및 실외의 톨루엔 농도값이 서울과 대구에 비해 상대적으로 높은 이유는 참여 대상자의 주택이 천안에 거주하는 사람도 있었고, 특히 도로변 근접지역에 위치하는 주택과 서울과 대구에 비해 3주택이 건축 1년 이내였기 때문으로 해석된다. 이것은 실내공기질의 영향 요인 중 발생원뿐만 아니라 실외공기 유입에 의한 환기가 실내 공기질의 주요영향요인으로 미칠 수 있다는 중요성을 보여주는 것이다.

자일렌도 아산에서 측정된 값이 실내(44.84 ± 33.89)

주택 실내환경 VOCs의 발생량 및 감소량에 관한 연구

Table 5. Measured VOCs concentrations of indoor and outdoor for 60 days in Seoul

		Benzene(ppb)			Toluene(ppb)			xylene(ppb)			
		Average ±S.D	GM	Range	Average ±S.D	GM	Range	Average ±S.D	GM	Range	
Seoul (n= 9)	Under 4 year	Indoor	4.08±3.78	3.22	0.58~ 22.05	30.50± 31.48	23.31	8.39~ 191.39	9.09± 10.55	6.14	2.01~ 38.91
		Outdoor	3.51±2.04	2.94	0.64~ 10.05	30.47± 33.50	23.13	7.56~ 207.62	10.70± 10.75	6.93	1.90~ 36.58
		Indoor/outdoor	1.33±0.91	N.A.	0.22~ 4.04	1.33± 1.05	N.A.	0.14~ 5.14	1.44± 1.56	N.A.	0.11~ 5.42
	Over 4 year	Indoor	3.96±2.14	3.22	0.12~ 8.51	23.96± 10.54	21.57	3.86~ 50.71	3.24± 0.42	3.22	2.77~ 3.77
		Outdoor	4.69±2.75	3.97	1.08~ 14.11	29.51± 19.14	24.36	3.31~ 109.10	3.36± 0.34	3.35	3.02~ 3.83
		Indoor/outdoor	0.96±0.44	N.A.	0.04~ 1.98	0.98± 0.40	N.A.	0.22~ 1.93	0.96± 0.08	N.A.	0.83~ 1.03

Table 6. Measured VOCs concentrations of indoor and outdoor for 60 days in Asan

		Benzene(ppb)			Toluene(ppb)			xylene(ppb)			
		Average ±S.D	GM	Range	Average ±S.D	GM	Range	Average ±S.D	GM	Range	
Asan (n= 9)	Under 4 year	Indoor	4.37±5.46	2.71	0.15~ 31.24	89.71± 56.14	67.93	9.18~ 13.18	44.84± 33.89	31.06	3.07~ 197.22
		Outdoor	6.04±4.94	4.12	0.16~ 28.93	83.95± 62.96	60.34	5.73~ 38.37	41.32± 38.07	28.40	2.89~ 266.98
		Indoor/outdoor	1.24±2.06	N.A.	0.07~ 11.19	1.34± 1.09	N.A.	0.16~ 8.08	1.48± 1.55	N.A.	0.18~ 10.19
	Over 4 year	Indoor	2.42±2.67	1.68	0.18~ 13.64	21.20± 21.95	16.17	2.64~ 152.14	10.98± 7.01	8.54	2.22~ 31.83
		Outdoor	2.33±1.60	1.98	0.84~ 8.42	31.07± 25.12	24.34	7.73~ 141.95	20.82± 31.68	12.74	3.06~ 161.84
		Indoor/outdoor	0.98±0.49	N.A.	0.21~ 1.86	0.79± 0.46	N.A.	0.10~ 2.12	0.83± 0.54	N.A.	0.09~ 2.70

Table 7. Measured VOCs concentrations of indoor and outdoor for 60 days in Daegu

		Benzene(ppb)			Toluene(ppb)			xylene(ppb)			
		Average ±S.D	GM	Range	Average ±S.D	GM	Range	Average ±S.D	GM	Range	
Daegu (n= 9)	Under 4 year	Indoor	2.02±1.04	1.81	0.53~ 5.72	11.36± 4.11	10.58	3.29~ 23.05	9.94± 4.69	9.06	3.07~ 22.70
		Outdoor	1.34±0.52	1.20	0.18~ 2.29	10.67± 4.65	9.60	1.75~ 24.43	3.83± 1.48	3.60	2.11~ 7.13
		Indoor/outdoor	2.01±2.26	N.A.	0.35~ 13.53	1.24± 0.82	N.A.	0.21~ 6.62	2.95± 1.73	N.A.	0.88~ 7.13
	Over 4 year	Indoor	1.36±0.63	1.10	0.05~ 2.38	14.42± 9.48	11.58	1.99~ 42.79	5.32± 2.99	4.80	2.93~ 8.67
		Outdoor	1.78±0.83	1.52	0.07~ 4.42	11.11± 5.80	9.65	1.72~ 31.34	10.40± 0.81	10.38	9.64~ 11.25
		Indoor/outdoor	0.93±1.90	N.A.	0.02~ 8.47	1.36± 0.79	N.A.	0.39~ 4.49	0.50± 0.24	N.A.	0.30~ 0.77

Table 8. Calculated penetration factor and source strength factor of toluene by equation (7)

	Penetration factor (Slope)		Source strength factor (intercept)		Correlation coefficient (R ²)	
	M±S.D.	Range	M±S.D.	Range	M±S.D.	Range
Seoul (n= 8)	0.17±0.09	0.11~0.32	19.22±3.95	13.20~22.25	0.17±0.16	0.03~0.33
Asan (n= 10)	0.80±0.25	0.03~0.64	11.05±28.39	4.99~79.22	0.71±0.23	0.01~0.57
Daegu (n= 8)	0.54±0.33	0.09~0.99	14.96±5.00	1.36~15.17	0.35±0.29	0.01~0.70
Total	0.50±0.30	0.03~0.99	15.62±21.84	1.36~79.22	0.40±0.25	0.01~0.70

와 실외(41.32±38.07)에서 모두 높았으며, 벤젠 및 톨루엔과 마찬가지로 4년 이내에 건축된 주택이 1.44±1.56으로 건축 4년 이후의 주택 0.96±0.08보다 높은 실내/실외 농도비를 보였다. 이 결과는 4년 이내 건축된 주택은 지속적으로 휘발성유기화합물이 발생되고 있음을 암시하며 환기를 통한 실외 공기가 실내공기질의 중요한 요인으로 작용하고 있음을 나타내는 것이다. 이 결과는 미국 NIOSH(National Institute for Occupational Safety and Health) 보고서에서 실내공기질에 영향을 주는 요인 중 환기가 제일 높다고(50%) 발표한 것과 비슷한 경향인 것으로 해석할 수 있다¹⁰⁾. 또한, 실내공기오염의 중요한 점은 중소도시며 실외공기가 비교적 깨끗할 것으로 고려되는 지역에서도 신축건물이며 도로변 인접 지역의 주택은 대도시인 서울보다 실내공기질이 더욱 악화될 수 있음을 나타내고 있다.

3.3. 투과요인 및 발생요인

환기를 통해 실외 오염물질이 실내로 유입되는 투과요인(기울기)과 실내 오염원의 발생요인(y 절편)을 계산하기 위해서, 실내 및 실외 VOCs (benzene, toluene, m-xylene) 농도사이의 선형회귀식을 이용하였다. 서울, 아산, 대구에서 분석된 아산의 1주택을 제외한 모든 VOCs 측정값은 투과요인은 0과 1사이였으며, 발생요인은 0이상이었다. 본 연구에서 물질수지식과 선형회귀식을 이용한 투과요인(투과요인(A)은 0<A<1)과 발생요인(발생요인(B)은 0≤B)의 추정은 검증 평가방법에 적합한 것으로 볼 수 있다. 본 연구에서는 총 26주택에서 투과요인과 발생요인을 계산하였다 <표 8>. 벤젠, 톨루엔, 자일렌 측정값에서 선형회귀의 예를 <그림 3, 4, 5>에 나타내었다. <그림 3, 4, 5>에서 실내 및 실외에서 측정된 VOCs 농도의 선형회귀식을 구하면 투과요인과 발생요인을 계산할 수 있다. 휘발성유기화합물 중 목적 물질에서 벤젠과 자일렌은 전체 26주택에서 약 1/3이 검출한계(Limit of Detection, LOD) 이하로 투과요인과 발생요인, 그리고 감소상수 및 발생강도 계산에서 제외하였다.

서울, 아산, 대구에서 톨루엔의 평균 투과요인은 0.50±0.30, 발생요인은 15.62±21.84를 나타내었다. 아

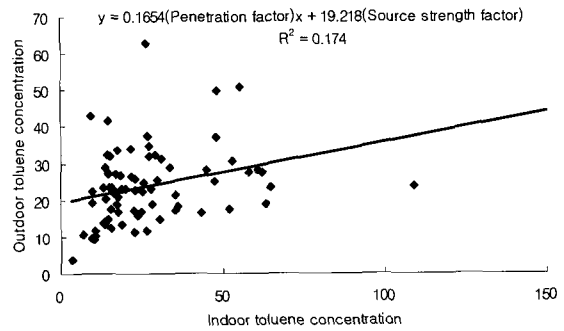


Fig. 3. Calculated penetration factor and source strength factor of toluene in Seoul.

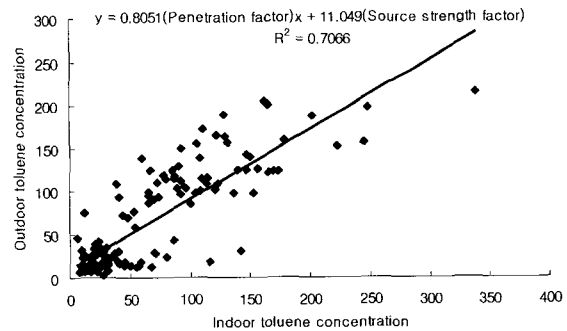


Fig. 4. Calculated penetration factor and source strength factor of toluene in Asan.

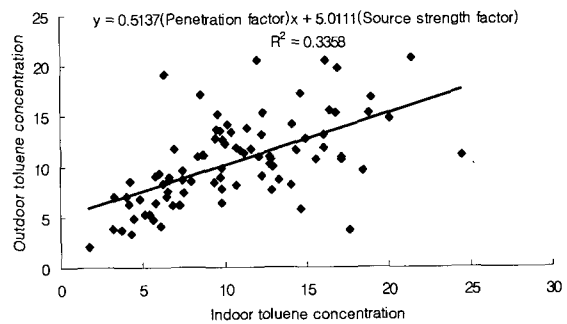


Fig. 5. Calculated penetration factor and source strength factor of toluene in Daegu.

Table 9. Measured ventilation rate in this study

	ACH (1/hr, M±S.D.)	Range
Seoul (n= 8)	1.52±0.92	0.71~3.68
Asan (n= 8)	0.98±0.62	0.28~1.35
Daegu (n= 9)	0.71±0.50	0.43~1.52
Total	1.09±0.75	0.28~3.68

산에서는 투과요인이 0.80±0.25 로 대구 0.54±0.33 와 서울 0.17±0.09 에 비해 높았으며, 발생요인은 서울이 19.22±3.95 로 대구 14.96±5.00 와 아산 11.05±28.39 보다 상대적으로 높았다.

본 연구에서는 일정기간 동안 3일 간격으로 실내 및 실외의 톨루엔 농도 사이의 관련성은 실내 톨루엔 발생원이 높은 주택과 낮은 주택은 차이가 있을 것으로 생각하여, 발생요인(기울기) 값이 0과 1사이를 벗어난 1주택을 제외한 26주택에서 실내 및 실외 톨루엔 농도 사이의 관계를 결정계수(R²)를 계산하였다. 그 결과 발생요인이 높은 서울의 결정계수는 평균 0.17±0.16를 나타내었으며, 발생요인이 낮은 아산은 0.71±0.23를 나타내었다.

3.4. 환기량 측정

주택의 환기량 측정은 방문시 주택의 현 상태에서 측정 계산되었다. 측정된 환기량은 총 8회 수행되었으며 그 결과를 살펴보면, 평균 환기량(ACH)은 서울 1.51±0.92 ACH(1/hr), 아산 0.98±0.62 ACH(1/hr), 대구 0.71±0.50 ACH(1/hr) 나타내었다 <표 9>.

3.5. 감소상수 및 발생강도 추정

실내·실외에서 측정된 VOCs와 투과요인 및 발생요인, 환기량 측정결과를 총괄하여 식 (7)을 이용하면, 투과요인(A)에서 주택내 톨루엔 의 감소상수(K, hr⁻¹)를 계산하고, 발생요인(B)에서 톨루엔의 발생강도(S, ppb/h)를 추정할 수 있다. 본 연구에서 투과요인이 0과 1사이를 벗어난 1주택을 제외한 각 26 주택에서 식 (6)과 식 (7)을 이용하여 추정한 감소상수(K)와 발생강도(S) <표 10>에 나타내었다. 본 연구에서 한국의 주택 실내에서 톨루엔의 감소상수는 1.49±2.05 hr⁻¹, 발생강도는 36.95±52.26 ppb/h로 추정 계산되었다. 세계적으로 주택 실내환경에서 VOCs의 감소상수를 측정 또는 추정된 보고가 없어 직접적으로 비교할 수는 없었지만 본 연구에서 최초로 toluene의 발생강도 및 감소상수를 측정하고 추정한 것에 대단히 큰 의의가 있다고 생각한다.

4. 결 론

본 연구는 서울, 아산, 및 대구지역에서 준공 4년 이내와 4년 이후의 공동주택 총 30주택을 선정하여

Table 10. Estimated deposition constant(K) and source strength(S) of toluene using multiple measurements

	Deposition constant (K, hr ⁻¹)		Source strength (S, ppb/h)	
	M±S.D.	Range	M±S.D.	Range
Seoul (n= 9)	3.53±1.62	1.95~5.66	72.92±25.67	51.50~98.97
Asan (n= 8)	0.19±0.20	0.02~0.61	8.51±5.46	2.27~15.44
Daegu (n= 9)	1.37±2.06	0.01~4.44	17.70±23.82	0.41~55.39
Total	1.49±2.05	0.01~5.71	36.95±52.26	0.41~207.58

VOCs(benzene, toluene, xylene)에 대한 실내·실외 농도를 2004년 7월부터 9월까지 측정하여 실내공기질 모델에 적용하여 VOCs의 발생강도와 감소상수를 평가하였다.

실내공기질 모델에 적용한 한국의 주택 실내에서 톨루엔의 감소상수는 1.49±2.05 hr⁻¹, 발생강도는 36.95±52.26 ppb/h로 추정 계산되었다. 세계적으로 주택 실내환경에서 VOCs의 감소상수를 측정 또는 추정된 보고가 없어 직접적으로 비교할 수는 없었지만 본 연구에서 최초로 toluene의 발생강도 및 감소상수를 측정하고 추정한 것에 대단히 큰 의의가 있다고 생각한다.

참 고 문 헌

- 1) 양원호, 이선화, 백도명, 2001, 시간가중치 평균 모델을 이용한 이산화질소 노출평가 및 예측, 한국대기환경학회지, 17(3), 251-258.
- 2) Jones A. P., 1999, Indoor air quality and health, Atmospheric Environment, 33, 4535-4564.
- 3) 환경부, 2001, 환경오염물질의 위해성 통합평가를 위한 다경로 노출평가 별책보고서, 노출계수 핸드북, 170-176.
- 4) Hoddinott K. B., Lee A. P., 2000, The use of environmental risk assessment methodologies for an indoor air quality investigation, Chemosphere, 41, 77-84.
- 5) 조장제, 구민호, 장정욱, 손승연, 김태오, 2004, 신축 아파트에서의 휘발성유기화합물 농도조사, 한국대기환경학회, 춘계학술대회 논문집, 37, 201-202.
- 6) 환경부, 2002, 실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방안 연구, 4-7.

- 7) Rinsky R. A., 1981, Leukemia in benzene workers. *Am. J. Ind. Med.*, 2, 217-245.
- 8) Infante P. F., White M. C., 1985, Projections of leukemia risk associated with occupational exposure to benzene, *Am. J. Ind. Med.*, 7, 403-413.
- 9) Maltoni C., 1985, Experimental studies on benzene carcinogenicity at the bologna institute of toxicology, current results and on-going research, *Am. J. Ind. Med.*, 7, 415-446.
- 10) Ott W., Switzer P., Robinson J., 1996, Particle concentrations inside a tavern before and after prohibition of smoking: evaluating the performance of an indoor air quality model, *J. Air & Waste Manage, Assoc.*, 46, 1120-1134.