

실내·외 통합 모델링 및 인체 위해성 평가를 통한 실내 유해화학물질의 관리 전략

신용승* · 임혜숙**

Management Strategy of Indoor Hazardous Chemicals

YongSeung SHIN · HyeSook LIM

국문요약

ABSTRACT

I. 서 론

II. 실내 유해화학물질의 국내 관리현황 및 대상물질의 선정

III. IIAQ의 적용

IV. 인체 위해성 평가

V. 실내 공기 유해물질 관리전략의 도출

VI. 결 론

참고문헌

* 한국환경정책·평가연구원(shiny@kei.re.kr)

** 한국환경정책·평가연구원(hslim@kei.re.kr)

국문요약

본 연구의 목적은 실내 공기내의 유해화학물질의 농도 수준에 영향을 줄 수 있는 요소들을 통합적으로 고려하여 실내 공기질의 관리 전략을 수립하는 것이다. 이러한 목적으로 서울대에서는 실내 공기내의 유해화학물질의 농도 예측을 위한 '통합적 실내 공기질 모델(IIAQ)'을 개발한 바 있다. 본 연구에서는 IIHQ 모델을 사용하여 실내 공기내 유해화학물질의 농도를 도출하고 이 결과를 바탕으로 연구에서 제시된 시나리오에 따른 인체 위해성 평가를 수행하였다.

IIHQ 모델을 통해 예측된 톨루엔과 포름알데히드의 10년 평균 농도는 실내에서 207.3 ug/m^3 , 36.4 ug/m^3 , 실외에서의 측정값은 55.9 ug/m^3 , 8.62 ug/m^3 으로 현재 실내 공기질 기준에 이하인 것으로 나타났다. 그러나 위해성 평가 결과, 포름알데히드의 노출로 인해서 예상 가능한 발암 위해도가 성인 남성 그룹에서 최대 $1.05\text{E}-03$ 인 것으로 나타났으며, 모든 수용체 그룹에서 자연적인 암 발생률인 $1\text{E}-06$ 을 초과하는 것으로 나타났다. 반면, 톨루엔에 대한 비발암 위해도는 모든 수용체 그룹에 대해서 1보다 작은 것으로 나타나, 심각하게 우려할 만한 비 발암 위해성이 나타날 가능성은 낮은 것으로 생각된다.

한편 본 연구에서 수행된 신축 공동주택에서 신축 후 10년간의 관심 화학물질인 톨루엔 및 포름알데히드에 농도 변화에 대한 모델링 결과 실내 오염원이 실외 오염원에 비해 실내 공기 오염에 더 큰 비중을 차지하는 것으로 나타나, 유해물질 위해도를 저감하기 위해서는 우선적으로 주요 실내 공기 오염원을 감소시킬 수 있는 전략이 수립되어야 할 필요가 있는 것으로 생각된다. 그리고 위해성 평가 결과는 현재의 실내 공기오염 기준치에 준하게 노출되었을 경우에 발암 위해성이 있을 수 있으므로, 현재의 실내 공기오염 기준치는 실내·외 오염원으로부터의 모든 노출 경로에 대한 총 노출량을 감안하여 총 노출 및 위해성을 감소시킬 수 있는 적절한 기준치로 재정립 되어야 할 필요가 있는 것으로 생각된다.

■ 주제어 ■ 실내 공기질, 실내 공기질 모델, 톨루엔, 포름알데히드, 위해성 평가

Abstract

The purpose of this study is to develop indoor air quality management strategies regarding indoor air pollutants while considering various factors affecting indoor pollutants concentration. The Integrated Indoor Air Quality model (IIAQ) developed by Seoul National University is used for this study. The IIHQ model is a tool that can provide an integrated view to indoor environmental pollution by simulating suggested scenarios. The results of the modeling are used to assess health risk. The concentrations that are used for the risk characterization are weighted concentrations based on the period of time in each place and existing Indoor Air Quality (IAQ) standards.

The estimated concentration of toluene and formaldehyde for 10 years through the IIHQ model was 207.3 ug/m^3 and 36.4 ug/m^3 in indoors, and 55.9 ug/m^3 and 8.62 ug/m^3 in outdoors.

These concentrations are lower than the existing IAQ standards. The estimated carcinogenic risk of formaldehyde is up to $1.05E-03$ for the adult male group and exceeds $1E-06$ for all receptor groups. This value means that cancer could affect one person out of 1000. The estimated non-carcinogenic risk of toluene was lower than 1, which means that there was no serious non-carcinogenic risk.

The result of modeling shows that using low emitting indoor sources is the most effective strategy for both formaldehyde and toluene. This risk assessment suggests that the total exposure levels of existing IAQ standards may cause serious carcinogenic risk. In order to avoid uncontrolled risk, it is suggested that the current IAQ standards should be adjusted by taking into account the total amount of exposure from all exposure pathways from indoor and outdoor sources.

Keywords indoor air quality, indoor air quality model, toluene, formaldehyde, risk assessment

I 서론

도시화 및 산업화가 진행됨에 따라, 도시 거주민은 대부분의 시간을 (80-90%) 실내에서 생활하고 있다. 실내 체류 시간이 길어짐에 따라, 실내·외 오염원에서 방출되는 대기 유해 물질에 대한 노출평가의 중요성이 증대되고 있다(Milner et al., 2005). 그리하여, 실내에서 호흡에 의해 증가하는 “실내 환경 건강 위해성”을 최소화시키는 것이 중요하게 부각되었다. 위해성을 감소시키기 위해서 기본적으로 연구되어야 할 사항은 유해화학물질의 파악과, 그 오염원·거동·노출·위해성 평가가 될 것이다.

이와 관련하여 최근의 진행된 연구들은 그 접근방법이 단편적이어서 오염물질과 오염원, 그 거동과 실내·외 오염원으로부터 배출된 오염물질에 대한 노출과 위해성을 평가하기에 제한적이다. 예를 들어, 다수의 연구는 각개적인 오염물질에 대해서 초점을 맞추어 진행되므로 둘 이상의 오염물질의 상호작용은 무시하고 있다. 따라서 효과적인 위해성 평가를 위해서는 실내 환경 전체를 하나의 시스템으로 연구할 필요가 있을 것으로 생각된다.

본 연구의 목적은 실내 공기 오염물질 관리 전략을 개발하는데 있다. 본 연구를 위하여 통합 실내 공기질 모델(Integrated Indoor Quality Model; IIAQ)을 서울대에서 개발하였으며, 모델 시뮬레이션을 통해서 농도·제한된 실측결과를 바탕으로 외삽·종류가 다른 오염원의 상대적인 기여도·특정 상황에서의 실내대기오염에 대해서 추정하였다.(Milner et al., 2005). IIAQ 모델은 실내 환경 오염문제에 대해서 오염물질(가스상, 입자상), 오염원, 거동/이동 메커니즘을 포함한 통합적 전망을 제시한다.

본 연구에서는 서울대에서 개발된 실내 공기질 모델의 검증, 연구에 설정되고 적용된 시나리오의 분석 및 시나리오 분석 결과로부터 실내 공기질 관리 전략을 개발하고자 한다. 대기질 모델의 검증을 위해서 실내 화학물질과 입자상 물질의 행동 패턴에 대한 기존 연구 자료를 사용하였다. 그리고 대상 실내 공기 유해물질의 행동에 영향을 미치는 주요한 요소들을 규명하기 위해 몇 가지 종류의 시나리오가 설정되었다. 본 시나리오들은 실내 공기 유해물질에의 노출 최소화를 위한 관리전략을 수립하기 위해 수행된 시뮬레이션에도 적용되었다. 시나리오의 분석은 도시 거주민들이 생활패턴을 고려하여, 대부분의 시간을 보내는 곳인 주거 빌딩으로 한정되었다.

II 실내 유해화학물질의 국내 관리현황 및 대상물질의 선정

최근 공공시설 및 신축 공동주택(아파트)에 대한 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”이 제·개정 되고 이와 관련하여 대기질 관리 정책이 제시되었다. 첫 번째로 100가구 이상의 아파트를 건설하는 회사들은 입주 전에 5가지 종류의 휘발성유기화합물질(volatile organic compounds; VOCs)과 포름알데히드(formaldehyde; HCHO)의 농도를 측정하여야 한다. 그리고 그 측정결과는 지자체 장에게 제출하여야 하는 동시에 60일간 공동주택 주민들에게 게시하도록 의무하고 있다(환경부,2006b; Kim et al. 2007). 휘발성 유기화합물질과 포름알데히드에 대한 가이드라인이 제시되었으며, 신축주택의 실내공기질관리법의 대상 오염물질의 종류와 권고치는 다음 <표 1>과 같다.

표1 실내 공기 오염물질의 여러 기준치

	(ug/m ³)				
	한국*	WHO	캘리포니아	홍콩	일본
포름알데히드	210	100	3	-	100
벤젠	30	-	60	16	-
톨루엔	1000	260	300	1092	260
에틸벤젠	360	22000	2000	1447	3800
자일렌	700	4800	700	1447	870
스티렌	300	260	900	-	200
참고문헌	환경부(2006b)	WHO (1999)	The Government of California (2005)	The Government of Hong Kong (2003)	JMHLW (2002)

* For newly-built multi-family housing

두 번째로 실내공기질관리법은 지하철역, 지하상가, 도서관, 박물관 등의 다중이용시설의 유지기준과 권고기준을 명시하였으며, 다음 <표 2> 에 정리되어 있다.

표2 우리나라 다중이용시설 등의 실내공기질관리법

오염물질 항목	다중이용시설		지하역사, 지하도상가, 여객자동차 터미널의 대합실, 철도역사의 대합실, 공항시설 중 여객터미널, 향만시설 중 대합실, 도서관·박물관 및 미술관, 장례식장, 목욕장, 대규모 점포	의료시설, 보육시설, 국공립 노인 요양시설 및 노인전문병원, 산후조리원	실내주치장
유지기준	PM10	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	≤ 150	≤ 100	≤ 200
	CO2	(ppm)	$\leq 1,000$	$\leq 1,000$	$\leq 1,000$
	포름알데히드	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	≤ 100	< 100	< 100
	총부유세균	(CFU/ m^3)	-	≤ 800	-
	CO	(ppm)	≤ 10	≤ 10	≤ 25
권고기준	NO2	(ppm)	≤ 0.05	≤ 0.05	≤ 0.30
	라돈	(pCi/l)	≤ 4.0	≤ 4.0	≤ 4.0
	TVOC*	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	≤ 500	≤ 400	$\leq 1,000$
	석면	(#/cc)	≤ 0.01	≤ 0.01	≤ 0.01
	오존	(ppm)	≤ 0.06	≤ 0.06	≤ 0.08

* 총휘발성유기화합물(total volatile organic compounds)

세 번째로 실내공기질관리법은 건축 자재 및 가구류가 실내 VOC의 주요 오염원으로 규정하여 신축 공동 주택의 건축에 유해오염물질을 다량 방출(high-emitting)할 가능성이 있는 자재-오염물질방출건축자재-의 사용을 규제하고 있다. 이런 오염물질방출건축자재는 다음 <표 3>에서 나타난 방출률 기준에 의해서 구분할 수 있다.

표3 건축자재에서 방출되는 오염물질 방출 농도 기준

	(mg/m ² /h)	
	일반자재	접착제
포름알데히드	≤ 1.25	≤ 4
TVOC	≤ 4	≤ 10

기존의 실내 공기질 연구는 주로 사무실과 공공기관에 집중되었다. 그러나 최근, 신축공동주택에 대한 실내공기질관리법이 도입됨에 따라, 공동주택의 실내의 포름알데히드와 VOC를 모니터링 하는 연구가 다수 수행되고 있는 실정이다. 이와 관련된 유해화학물질의 실측 데이터 연구에 따르면, 유해화학물질중에서 가장 높은 농도 및 실내와 실외의 농도비 (Indoor to outdoor ratio; I/O ratio)를 보이는 물질은 톨루엔인 것으로 나타났다. 그리고 크실렌(xylene)과 포름알데히드의 I/O 비율도 10보다 큰 것으로 나타났다. 이는 실내에서의 유해화학물질의 농도가 실외 농도보다 높다는 것을 의미한다.

우리나라의 실내공기질관리법은 다중이용시설의 건축시에 유해화학물질을 적게 방출하는 자재를 사용하도록 하고 있다. 그리고 실내재에 대하여 환경부에 따르면, 2005년부터 2006년까지 가구·전기제품·의류·장난감과 같은 41개의 소비재로부터의 TVOC와 6종류의 표준화합물질(standard compound)의 방출이 실험되었다(환경부, 2006). 실험결과 실험에 사용되었던 제재들의 90%가 USA의 Green Guard 의 방출 기준에 적합한 것으로 나타났다.

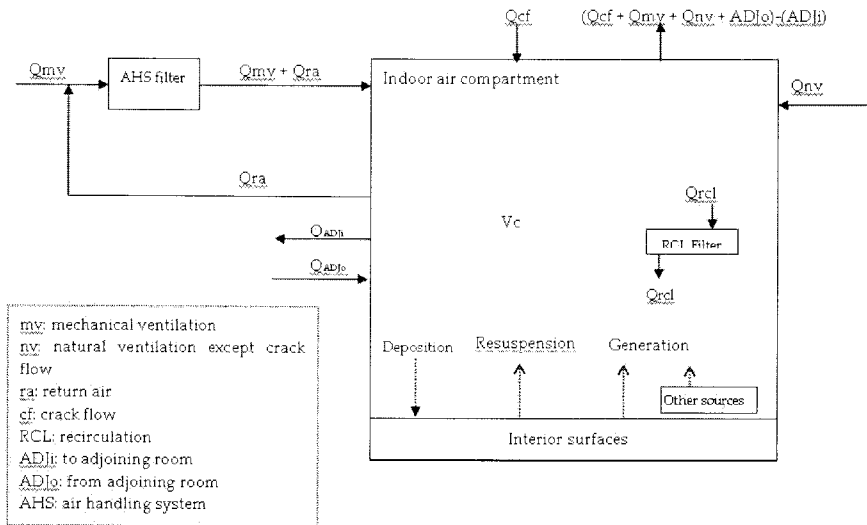
이상과 같이 국내 실내 공기질 관리 현황 및 관련 연구결과를 검토하여 본 연구의 대상물질로 톨루엔과 포름알데히드를 선정하였다. 톨루엔은 신축공동주택관리법에 포함된 BTEX 화합물을 대표할 수 있으며, 여러 연구결과에서 실내에서 가장 높은 농도를 나타내는 VOC 물질이다. 포름알데히드 역시 신축공동주택 실내공기질관리법 및 다중이용시설 등의 실내 공기질관리법상의 관리대상 물질 중의 하나이며, International Agency for Research on Cancer (IARC) 에 따르면 인체 발암위해물질(Group 1)로서 구분되어 있어 두 물질은 실내 공기에 의한 인체 위해성을 평가하는 본 연구의 목적에 잘 부합될 것으로 판단된다. 두 물질은 본 연구를 위해 개발된 IIAQ 모델을 통해 모델링 되었으며, 결과 자료는 시나리오에 적용되어 그 결과를 분석하였다.

III IIAQ의 적용

1. IIAQ 모델의 개요

IIAQ 모델은 실내의 화학물질(chemicals)과 입자상 물질(particles)의 거동특성에 영향을 줄 수 있는 기존의 연구된 메커니즘을 고려하여 만들어졌다(Thatcher and Layton, 1995; Goss and Eisenreich, 1997; Hinds, 1999; Lai and Nazaroff, 2000; Liu and Nazaroff, 2001). <그림 1> 은 IIAQ 모델의 기본 개념을 간략히 표현한 것이며, 모델 내에서 공기의 흐름을 보여준다.

그림1 IIAQ 모델의 대기흐름도



본 모델은 이번 연구를 수행하기 위하여 개발된 모델로서, 그 성능은 기존의 화학물질과 입자상 물질의 실측 및 모델링 연구 자료와 비교하여 검증하였다. 검증 결과 본 모델의 성능은 본 연구를 수행하기에 만족하는 것으로 나타났다.

2. IIAQ 모델의 적용

1) 입력 자료와 모델링 시나리오

IIAQ의 모델의 적용을 위해 현재 우리나라의 일반적인 주거형태, 건축 자재, 대기 교환율등을 조사하고 기본적인 실내 환경에 대한 입력변수로 적용하였다. 그리고 실내·외 오염원에 의한 실내 공기내의 유해물질의 농도를 가장 적절히 시뮬레이션 할 수 있도록 여러 가지 경우를 가정하여 시뮬레이션 한 후, 가장 적절한 경우를 선택하여 가정한 시나리오들을 분석하였다.

(1) 주거공간

대한민국 통계청에 따르면, 대한민국 주거형태의 대부분은 평수로 구분할 경우, 19-29 평사이의 아파트인 것으로 나타났다. 본 자료를 바탕으로 하여 본 연구에서 사용한 대한민국의 평균적인 주거형태는 85 m² (25.6평)면적의 아파트로 선정하였다. 아파트 공간내의 표면 구성은 다음 <표 4>에 나타나있다. 바닥은 길이 1,324.39 cm, 662.19 cm의 직사각형 형태로 가정되었다.

표4 평균 주거공간의 구성

	부피(m ³)*	면적 (m ²)**					
	합계	바닥	천장	벽	가구***	가구 (현관)	가구 (기타)
거실	115.46	50.20	50.20	120.00	25.89	18.65	0.83
침실 (total of 3)	70.61	30.70	83.80	30.70	138.75		
화장실	15.64	6.80	6.80	33.90			
합계	201.71	87.70	140.80	184.60	164.64	18.65	0.83

* 높이는 2.3 m로 가정되었다.

** Kim et al. (2007).

*** 가구 자료는 최정민 외. (2006)에 기반 하여 추정되었다.

(2) 실내 오염원

실내 환경의 VOCs의 주 발생원은 건축자재와 실내 가구재로 알려져 있다. 주택에 사용되는 건축자재와 실내 가구재 종류 및 톨루엔과 포름알데히드에 대한 방출 모형 계수는 다음 <표 5>와 <표 6>와 같다. 실내 환경에서 방출되는 톨루엔과 포름알데히드의 실내 농도를 적절히 추정하기 위해, 건축 자재와 실내 가구재로부터 방출되는 유해화학물질의 양에 대한 시뮬레이션을 수행하였다. 본 시뮬레이션은 exponential decay model (모델 1)과

mass-transfer based model (모델 2) 및 whole house model(모델 3)로 각각 구분되어 수행되었다. 모델 1과 모델 2의 경우는 실내 오염원을 4가지의 가구재로 한정하였으며, 모델 3은 실내 전체를 실내 오염원으로 가정하였다.

표 5 평균 주거공간내의 건축 자재와 실내 가구재 (돌루엔)

표면 종류		바닥	천장	벽	가구
대표 소재 *		바닥 (온돌)	플라스틱 (PVC)	플라스틱 (PVC)	중밀도섬유판 (MDF)
Exponential decay model for individual materials	Eo (g/s) **	3.29E-07	1.59E-07	3.35E-07	2.68E-06
	b (1/s)	1.44E-06	1.31E-06	1.31E-06	3.97E-06
Mass-transfer based model for individual materials	Thickness (cm)	1.05	1.07	1.07	2.00
	Dm (cm ² /s)	2.04E-06	5.89E-07	5.89E-07	3.39E-06
	Kma	722.6	675.8	675.8	722.6
	Co (g/cm ³) ***	1.35E-07	1.24E-07	1.24E-07	2.68E-07
Exponential decay model for a whole house	Eo (g/s)****	5.94E-05 (t > 1.52 y), 1.11E-05 (t < 1.52 y)			
	b (1/s)	3.84E-08 (t > 1.52 y), 3.49E-09 (t < 1.52 y)			

* 환경부(2006a)의 실험 자료에서 발췌.
 ** 환경부 (2006a), Shin et al. (2007) (Table A-2), Eo = EFo (g/cm²/s) * 면적
 *** Shin et al. (2007)
 **** 김영희 외. (2006)

표 6 평균 주거공간내의 건축 자재와 실내 가구재 (포름알데히드)

표면 종류		바닥	천장	벽	가구
대표 소재 *		바닥 (온돌)	플라스틱 (PVC)	플라스틱 (PVC)	중밀도섬유판 (MDF)
Exponential decay model for individual materials	Eo (g/s) **	1.40E-07	1.10E-07	2.31E-07	3.05E-06
	b (1/s)	1.64E-06	1.14E-06	1.14E-06	1.11E-07
Mass-transfer based model for individual materials	Thickness (cm)	1.05	1.07	1.07	2.00
	Dm (cm ² /s)	4.09E-08	5.32E-08	5.32E-08	6.03E-10
	Kma	158.0	9.4	9.4	158.0
	Co (g/cm ³) ***	4.07E-07	3.11E-07	3.11E-07	1.37E-04
Exponential decay model for a whole house	Eo (g/s)****	1.32E-5			
	b (1/s)	2.45E-8			

* 환경부(2006a)의 실험 자료에서 발췌.
 ** 환경부 (2006a) (Table A-2), Eo = EFo (g/cm²/s) * 면적
 *** Shin et al. (2007)
 **** Shin et al. (2007) (Table A-4), Eo = EFo (g/cm³/s) * 부피

(3) 실외 오염원

실외 오염원의 기여도 모델링 되었다. 이 때, 실내와 실외 사이의 대기 교환비는 1.09/h로 일정한 것으로 가정되었으며, 이 값은 서울·아산·대구에서 측정된 대기 교환비의 평균값을 나타낸다(김영희 외, 2006). 이와 함께, 실외 대기내 유해물질의 농도는 톨루엔 55.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 포름알데히드 8.62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일정한 것으로 가정되었다.

2) 시나리오 분석

실내공기질관리법의 관리 전략을 연구하기 위해, 실내 공기내 유해화학물질의 농도에 영향을 줄 수 있는 다양한 환기·공기청정·오염원 관리를 고려하여 시나리오가 제시되었다. 제시된 시나리오에 대한 요약은 다음 <표 7>에 나타나 있다. 시나리오를 분석하여 실내 공기내 유해화학물질의 농도에 가장 큰 영향을 주는 변수를 파악하도록 하였다.

시나리오 A는 대조군으로서 추가적인 공기청정기가 없으며, 실내와 실외의 대기교환은 오로지 자연적인 환기나 여과, 혹은 그 두 가지 모두에 의해서만 이루어진다고 가정하였다. 시뮬레이션기간은 아파트 준공 후 10년 동안이며, 실내 리모델링은 없는 것으로 가정하였다. 대조군 시나리오 A에 환기량을 각각 증가 및 감소 시켜 시나리오 B와 C를 설정하였다. 시나리오 B는 건설교통부에서 권장하는 신축공동주택에 대한 최소 대기 교환율 0.7/h를 적용하였다. 시나리오 C는 대조군 보다 더 증가한 교환율로 1.4/h를 적용하였다. 시나리오 D는 고정식 필터의 설치하여 공기청정을 하는 것을 가정하였다. 시나리오 E는 이동식 공기청정기의 설치를 고려하여 설정되었다. 오염원의 조건을 변화시킨 시나리오로서는, 실내 오염원으로부터의 방출률을 30% 감소한 시나리오 F와 실외 대기내 유해물질의 농도를 30% 감소시킨 시나리오 G가 설정되었다.

표7 관리 전략 시나리오

	대기 교환			공기 청정		오염원 관리	
	Q _{nv} (1/h)	Q _{mv} (1/h)	Q _{cf} (1/h)	고정식 (%)	이동식 (CADR, m ³ /h)	방출률	외부 공기
A	1.09					E	C _{out}
B	0.7					E	C _{out}
C	1.4					E	C _{out}
D		0.99	0.1	16 (toluene) 2 (HCHO)		E	C _{out}

표7 관리 전략 시나리오(계속)

	대기 교환			공기 청정		오염원 관리	
	Qnv (1/h)	Qmv (1/h)	Qcf (1/h)	고정식 (%)	이동식 (CADR, m ³ /h)	방출률	외부 공기
E	1.09				63 (toluene) * 4 (HCHO) *	E	Cout
F	1.09					0.7E	Cout
G	1.09						0.7Cout

Qnv : 자연 대기 교환율, Qmv : 기계에 의한 대기 교환율, Qcf : infiltration rate

2) 실내 공기 농도의 예측

(1) 대조군(Reference case) : 시나리오 A

① 실내 공기 내 유해화학물질의 농도

10년간의 예측 평균 농도는 <표 8> 에 나타나 있다.

대조군 시나리오에 대한 시뮬레이션의 모델 1에서의 예상 실내 유해물질의 농도가 가장 작게 나타났다. 모델 1의 톨루엔의 10년 평균 농도는 55.9 ug/m³으로 실외 평균농도와 같게 나타났다. 톨루엔의 농도는 1일 안에 실외 수준으로 감소하는 것으로 나타났다. 모델 2도 모델 1과 비슷한 결과를 나타낸다. 반면에 모델 3의 결과는 다른 모습으로 나타나며, 실내 공기내 톨루엔의 농도는 실측치 260.77 ug/m³에 가까운 207.3 ug/m³으로 나타났으며, 톨루엔의 반감기는 약 8개월로 관찰되었다.

포름알데히드도 톨루엔과 비슷한 결과를 나타내었다. 포름알데히드의 최초 농도는 65.18 ug/m³이었으며, 1년내에 외부 농도인 8.62 ug/m³으로 감소하였다. 모델 1에서의 10년 평균 값은 10 ug/m³으로 나타났다. 이러한 결과는 모델 2에서도 비슷하게 관찰된다. 모델 2를 가정한 경우 예측 포름알데히드의 예측 실내 농도는 15.6 ug/m³으로 실측치 102.23 ug/m³ 보다 작은 것으로 나타났다. 모델 3의 경우 10년 평균 예측치는 36.4 ug/m³으로 나타났으며, 초기 몇 시간 동안의 농도는 환경부의 기준치 210 ug/m³을 넘는 것으로 나타났다. 이는 실제 방출율은 시뮬레이션에서 사용한 배출 모델보다 느리게 감소한다는 것을 시사한다. 시뮬레이션에 대한 결과를 바탕으로 하여, 실내의 4가지 주요 가구를 방출원으로 하는 것보다 실내 전체에서 유해물질이 방출된다고 가정하는 것이 더욱 실제 실내 오염원을 잘 표현한다고 결론내릴 수 있을 것이다.

표8 대조군에 대한 시뮬레이션 결과 실내 유해화학물질의 농도

유해화학물질		톨루엔	포름알데히드
실외 대기	측정값	55.9	8.62
실내 공기	측정값	260.77	102.23
	IIAQ 모델 추정값 (empirical emission models for 4 individual materials, Model 1)	55.9 *	10.0 *
	IIAQ 모델 추정값 (mass-transfer based models for 4 individual materials, Model 2)	55.9 *	15.6 *
	IIAQ 모델 추정값 (an emission model for a whole house, Model 3)	207.3 *	36.4 *

($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

* 10년 평균

② 오염원의 상대적 기여도

실내 공기내의 톨루엔과 포름알데히드의 농도에 대해서 최초에는 실내오염원의 기여도가 우세한 것으로 나타난다(톨루엔 94%, 포름알데히드 96%). 톨루엔의 실내 오염원의 기여도는 1.52년 이후부터 느리게 감소하기 시작하며 10년 후에는 52%의 기여율을 나타낸다. 이와는 대조적으로 포름알데히드의 실내 오염원의 기여도 감소율은 톨루엔보다 큰 것으로 나타나 초기에는 실내 오염원이 우세하지만 4년 후부터는 실외 오염원이 우세한 형태를 보이며, 10년 후에는 실내 오염원의 기여도가 1% 수준으로 감소할 것으로 예측되었다.

(2) 시나리오 적용에 따른 농도 변화

<표 9> 은 대조군인 시나리오 A와 비교하여 각각의 시나리오를 적용하였을 때의 10년 동안의 유해화학물질의 농도변화를 나타낸다. 음의 값은 적용된 시나리오의 관리 전략을 통해 농도가 음의 방향으로 변화한 것을 의미하며, 이는 긍정적인 영향을 표현한다.

톨루엔의 경우, 가장 효율적인 관리전략은 실내 오염원으로부터의 방출률을 줄이는 것으로 나타났다. 그 다음으로 효과적인 관리전략은 대기 교환율을 증가시키는 것이다. 이동식 공기 청정기의 사용은 대기 교환율을 증가 시키는 것과 비슷한 결과를 보이는 것으로 나타났다. 그러나 실외 대기내 유해물질의 농도를 감소시키는 것과 고정식(in-duct) 공기 청정기는 톨루엔 관리에 그다지 효과적이라고는 할 수 없는 것으로 나타났다.

실내 오염원의 방출률 감소는 포름알데히드에서도 가장 효율적인 관리전략인 것으로 나타났다. 톨루엔과 마찬가지로 대기 교환율의 증가가 그 다음으로 가장 효율적인 것으로 나

타났다. 그러나 톨루엔과는 다르게 이동식 공기 청정기는 뚜렷한 효과를 보여주지 못하는 것으로 나타났다. 고정식 공기 청정기도 눈에 띄는 효과를 가지고 있다고 보기는 어렵다. 포름알데히드의 실외 대기농도의 감소 전략은 실내 오염원의 기여도가 낮은 경우에 효과적 인 것으로 나타났다.

표9 실내 공기내 유해물질의 농도 변화

시나리오 #		톨루엔	포름알데히드
A	(대조군)	0	0
B	(ACH : 0.7 /h)	53 ~ 29%	54 ~ 1%
C	(ACH : 1.4 /h)	-21 ~ -12%	-21 ~ 0%
D	(고정식 공기청정기, 평균 효율)	-1 ~ -7%	0 ~ -2 %
E	(이정식 공기청정기, 평균 효율)	-22 ~ -22%	-2 ~ -2%
F	(오염물질저방출건축자재 사용)	-28 ~ -16%	-29 ~ 0%
G	(실외 오염 감소)	-2 ~ -14%	-1 ~ -30%

* (C-Reference)/Reference*100,

IV 인체 위해성 평가

1. 위해성 평가 절차 및 방법

위해성 평가는 특정 사건의 발생 가능성과 일정 시간동안 안전, 건강, 생태, 사회경제적인 전 분야에 악영향의 발생할 가능성을 예측하는 과정을 의미한다(Kolluru et al., 1976). 인체 위해성 평가는 위해성 평가의 한 분야로서, 유해 물질에의 노출로 인한 인체 건강 위해성에 그 초점을 맞춘다. 인체 위해성 평가는 일반적으로 (1) 유해성 확인 (2) 노출 평가 (3) 용량-반응 평가 (4) 위해도 정량화의 네 단계로 구성된다.

유해성 확인에서는 인체에 유해 영향을 일으킬 수 있는 유해 물질을 확인하고 규명하는 단계이다.

본 연구에서는, 톨루엔과 포름알데히드가 관심 대상 화학물질로 선택되었다. 노출 평가는 관심 화학물질에 대한 노출량, 노출 빈도 및 기간, 노출 경로, 노출집단의 규모등을 정성적

혹은 정량적으로 결정하거나 추정하는 것을 의미한다. 노출 평가 단계에서 위해도 정량화에 필요한 수치인, 노출되는 기간 동안의 일일 평균 섭취량(Average Daily Dose; ADD)을 산출하게 된다. 본 연구에서 필요한 ADD는 일반적으로 다음 식(1)과 같이 구해질 수 있다.

$$\text{ADD(average daily dose)} = \frac{C \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{식 (1)}$$

where C = pollutant Concentration in the media
 CR = Contact Rate per unit time or event
 EF = Exposure Frequency
 ED = Exposure Duration
 BW = Body Weight [kg]
 AT = Average Time [days]

용량-반응 평가에서는 노출 집단에 대한 유해영향을 유발하는 화학물질에 대한 잠재적 유해성 및 그로 인해 발생할 수 있는 유해영향의 가능성 사이의 상관관계를 추정한다. 이 단계에서 위해도 정량화에 필요한 관심 화학물질의 독성 특징을 확인하게 된다. 본 연구에서는 실내에서 톨루엔과 포름알데히드의 호흡에 의해 발생할 수 있는 유해 영향을 추정하고자 하므로, 관심 화학물질이 호흡 경로를 통해 노출되었을 경우의 독성 특징을 확인하였다. 호흡에 의한 대표적인 독성 특징으로는 단위 위해도(unit risk) 와 참고농도(reference concentration; RfC)가 있다. 단위 위해도란 발암 위해도를 추정하는데 사용하며, 특정 대상 화학물질에 대하여 1 ug/m³의 농도를 일생동안 흡입하였을 경우의 발암 증가율을 뜻한다. 참고농도는 암 발생 이외의 나타날 수 있는 유해영향을 추정하는데 사용된다. US EPA에서 제시하는 톨루엔과 포름알데히드의 단위 위해도와 참고 농도는 다음 <표 10>에 제시되어 있다.

표10 톨루엔과 포름알데히드의 독성 특징

	단위 위해도	참고농도
톨루엔	not assessed	5.00 mg/m ³ *
포름알데히드	0.000013 m ³ /ug *	not available

* 출처 : US EPA Integrated Risk Information System (2007)

노출량과 독성 특성을 통해서 위해도를 정량화 할 수 있게 된다. 암 발생에 대한 위해도 정량화는 다음 식(2)을 통해 구할 수 있다. 그리고 발암 위해도를 제외한 다른 유해영향에 대해서는 다음 식(3)을 통해 구할 수 있다.

$$\text{Carcinogenic risk} = \text{unit risk} \times C \quad \text{식 (2)}$$

$$\text{HQ (hazard quotient)} = C / \text{RfC} \quad \text{식 (3)}$$

where C = (pollutant concentration in the media)

본 연구에서 인체 위해성 평가는 각 수용체 집단에서 톨루엔과 포름알데히드의 호흡에 의한 총 노출량(총 ADD)에 대해서 수행되었다. 적절한 노출 시나리오에 따른 수용체 집단이 설정되었으며, 노출 평가에서 사용된 톨루엔과 포름알데히드의 농도는 IIAQ 모델을 통하여 예측된 추정 농도값을 사용하였다. 총 ADD는 시나리오에 따라 각각의 체류 공간에서 노출되는 ADD_i의 합계로서 구해졌다. ADD_i는 시나리오 상에서 체류 시간에 따라 가중치(W_i)를 산정하여 가중평균(C_i × W_i) 되었다. 가중평균 ADD를 구하는데 사용된 식(4)는 다음과 같다.

$$\text{Total ADD} = \sum_i \text{ADD}_i$$

$$\text{ADD}_i = \frac{(C_i \times W_i) \times CR \times EF \times ED}{BW \times AT} \quad \text{식 (4)}$$

2. 노출 시나리오 및 매개변수

위해성을 평가하기 위해서 수용체 그룹을 세 그룹-회사원인 성인 남자, 전업주부인 성인 여자, 학생(6세 - 18세)-으로 구분하였다. 각각의 그룹은 우리나라 인구의 일반적인 생활 패턴 중 각 그룹이 생활하는 실내가 명확히 대비될 수 있는 특징을 가지고 있다. 회사원인 성인 남자의 그룹은 일반적인 사무실, 전업주부인 성인 여자 집단은 주거 공간, 학생의 경우는 학교 교실로서 그 실내 체류 공간이 구분된다고 할 수 있을 것이다. 각각의 그룹은 실내 및 실외의 각각의 공간에서 체류하는 시간에 따른 생활 패턴 및 관련 기존 연구 자료

를 고려하여 노출 시나리오를 설정하였다.

Son et al. (1996) 의 연구에 따르면, 사무직 종사자의 경우, 각 생활공간에서의 일일 평균 체제 시간은 주택 내 13.6~13.8 시간, 직장 내 6.2~6.5 시간, 택시 및 버스 등의 이동 시간이 1.6~1.8 시간인 것으로 나타났다. 그 외에 레스토랑 및 커피숍에서의 일일 평균 체제 시간은 1.2 시간으로 나타났다. Housewives group의 경우에는 주택 내 체제 시간이 20.1~21.5 시간인 것으로 나타났다. 주택을 제외한 외부 시설에서 보낸 시간 (백화점, 레스토랑 등)은 0.3~0.5 시간, 이동 등을 고려한 외부 대기 노출된 시간은 0.8~1.5 시간으로 나타났다. 일일 평균 체제 시간에 계절 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

체류 공간 및 대중교통을 이용한 이동시간은 Son et al. (1996)연구 자료를 바탕으로 설정하였으며, 연구 자료가 없는 한국인의 생활 패턴은 전문가의 자문을 수렴하여 적절한 생활환경을 가정하였다. 다음 <표 11>는 시나리오에 따른 수용체 그룹의 체류 공간 및 체류 시간을 나타내고 있다.

표 11 노출 시나리오

	실내				실외
	집	사무실/학교	대중교통수단	기타	
성인 남성(회사원)	13.7h	6.4h	1.7h	1.2h	1h
성인 여성(전업주부)	20.8h	-	0.4h	1.2h	1.6h
학생 (6-18)	8h	12h	2h	-	2h

각각의 공간에서의 유해화학물질의 농도는 IIAQ 모델의 10년간 예측 평균값을 적용하였으며, 실외 대기내 농도는 기존 연구 발표된 측정 자료를 사용하였다. 관련 자료가 없는 경우에는 실내공기질관리법 상의 기준치를 적용하였다. 사무실과 교실에서는 산업안전보건법 상의 사무실 공기관리 지침과 학교보건법상의 학교내 교사안 공기질 기준이 존재하나, 본 기준은 톨루엔 단독 유해화학물질에 대한 기준값이 아니라 총휘발성유기화합물질에 대한 기준으로서 본 연구에 사용되기에는 무리가 있어, 일반적 실내공간에서 포름알데히드와 톨루엔과의 비율을 사용하여 톨루엔의 농도를 추정하였다.

각각의 수용체 그룹에 대한 가중 평균값은 <표 12> 에 제시되어 있다. 두 가지 오염물질에 대하여, 성인 남성의 경우가 노출되는 화학물질의 농도가 가장 높은 것으로 나타나 있으며, 가장 낮은 농도는 주부 그룹에서 나타났다.

표12 수용체 그룹별 가중 평균 농도

	(ug/m ³)	
	포름알데히드	톨루엔
성인 남성(회사원)	80.7	297.1
성인 여성(전업주부)	43.2	235.6
학생 (6-18)	65.3	209.0

ADD의 산출에 필요한 매개 변수로서 회사원인 성인 남성의 체중은 66.11 kg, 전업 주부인 성인 여성은 54.22 kg, 학생(6세-18세)의 평균은 42.11 kg로 대한민국 통계청의 자료를 인용하였다. 그 외의 필요 매개 변수들 중 우리나라 국민에 대한 자료로서 사용가능한 자료가 제시되지 않은 다른 매개변수들은 US EPA에서 발간된 지침서 내의 자료를 사용하였다. US EPA의 인용자료는 각 수용체 그룹의 호흡률로서 성인 남성 22.8 m³/day, 성인 여성 21.1 m³/day, 학생 11.6 m³/day 로 적용되었다. 그 외의 공통 매개 변수로서 노출 빈도는 365 days/year, 노출 기간은 1년으로 가정되었다.

3. 개별 노출원의 기여도

위의 자료들을 바탕으로 유해화학물질에 대한 총 노출량을 산정하였으며, 계산된 총 노출량 및 각각의 체류 공간에 대한 노출량은 다음 <표 13>과 <표 14> 에 제시되었다.

표13 총 노출에 대한 각 공간에서의 노출량 (포름알데히드)

	실내				실외	총ADD (ug/kg/day)
	집	사무실/학교	대중교통수단	기타		
성인 남성(회사원)	7.17	16.21	0.71	3.62	0.12	27.83
성인 여성(전업주부)	12.28	0.00	0.19	4.09	0.27	16.82
학생 (6-18)	3.34	13.77	0.67	0.00	0.20	17.98

표14 총 노출에 대한 각 공간에서의 노출량 (톨루엔)

	실내				실외	총ADD (ug/kg/day)
	집	사무실/학교	대중교통수단	기타		
성인 남성(회사원)	40.81	41.35	2.25	17.24	0.80	102.45
성인 여성(전업주부)	69.91	0.00	0.60	19.46	1.72	91.69
학생 (6-18)	19.03	35.13	2.11	0.00	1.28	57.56

분석 결과, 총 노출량에 대해서 실내 오염원에 대한 노출량이 실외 오염원에 의한 노출량보다 큰 것으로 나타났다. 모든 수용체 그룹에서 볼 수 있는 경향으로서, 가장 긴 시간동안 체류하는 공간에서의 기여도가 가장 큰 것으로 나타났다.

4. 위해도 정량화

각각의 수용체 그룹에 대한 노출 시나리오, 노출 농도 및 필요 매개 변수를 이용하여 위해도 정량화에 필요한 총 ADD가 계산되었다. 다음 <표 15> 는 계산된 ADD 값을 보여준다.

표15 수용체 그룹별 관심 유해화학물질의 일일섭취량

수용체 그룹	총 ADD (ug/kg/day)	
	포름알데히드	톨루엔
성인 남성(회사원)	27.83	102.45
성인 여성(전업주부)	16.82	91.69
학생 (6-18)	17.98	57.56

두 오염물질에 대한, 총 ADD는 회사원인 성인 남성 그룹에서 가장 큰 것으로 나타났다. 이러한 결과는 노출량 (총 ADD)은 노출 농도와 호흡률과 크게 연관되어 있는 것으로 생각된다. 회사원인 성인 남성 그룹의 가중 평균 농도와 호흡률은 수용체 그룹에서 가장 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 결과를 바탕으로, 수용체 그룹에 노출되는 평균 농도와 각각 수용체의 생활 패턴이 노출 수준 및 위해성을 결정짓는 가장 큰 요소인 것으로 생각된다. 각 관심 유해화학물질에의 노출량이 큰 순서는 다음과 같다. 포름알데히드의 총 ADD는 성인 남성(회사원) > 학생 > 성인 여성(전업주부)의 순으로 나타났으며, 톨루엔은 성인 남성(회사원) > 성인 여성(전업주부) > 학생의 순으로 나타났다. 포름알데히드의 경우, 이러한 순서는 수용체 그룹간의 가중 평균 농도의 순서와 일치하는 것으로 나타났다. 계산된 ADD 및 각 물질의 독성 특징을 이용하여 발암 및 비발암 위해성의 정량화한 결과 값은 다음 <표 16>에 나타나 있다.

표16 위해도 정량화

	비발암 위해도(HQ)		발암 위해도	
	포름알데히드	톨루엔	포름알데히드	톨루엔
성인 남성(회사원)	NA	0.07	1.05E-03	NA
성인 여성(전업주부)	NA	0.05	5.62E-04	NA
학생 (6-18)	NA	0.06	8.49E-04	NA

NA : not available

위해도 정량화 결과, 톨루엔의 비발암 위해도는 1보다 낮은 것으로 나타났다. 이는 톨루엔에 의해서는 심각한 비발암 위해성은 나타나지 않을 것으로 기대된다고 해석할 수 있을 것이다. 포름알데히드에 의한 발암위해성은 모든 수용체 그룹에서 1E-06보다 큰 것으로 나타났다. 1E-06의 위해도란, 특정한 유해물질에의 노출이 없는 자연적인 상태에서의 사망률을 의미한다. 본 연구 결과는, 포름알데히드에 대해서 회사원인 성인 남성 그룹의 경우 1000명당 1.05명, 전업주부인 성인 여성의 경우는 10000명당 5.62명, 학생의 경우에는 10000명당 8.49명의 인체 발암이 일어날 가능성이 있음을 보여준다. 이는 계산에 적용된 농도 값의 일부분이 실제 존재하는 기준치로 적용되었기 때문에 본 위해도가 실제보다 극대화되었기 때문에 크게 나타난 것으로 추측된다.

V 실내 공기 유해물질 관리전략의 도출

IIAQ 모델을 통한 시뮬레이션 결과에 따르면, 실내 유해물질의 농도는 시간이 지남에 따라 실내 오염원의 기여도가 감소하고 실외 오염원의 기여도가 증가하는 것으로 나타났다. 두 가지 유해화학물질에 대해서 실내 오염원의 기여도가 뚜렷하게 우세한 기간은 준공 후 초기 4년 동안이다. 그러므로 효과적인 실내 공기 유해화학물질의 위해도 관리를 위해서는 초기 4년 동안에는 실내 오염원의 배출량을 줄이는 것이 필요하며, 이후에는 실외 오염 배출원의 영향을 줄이는 관리전략에 초점을 맞춰야 할 것으로 생각된다.

한편, 총 노출에 대한 상대적 기여도 평가 결과를 검토하면, 실내 오염원이 실내 공기오염의 주 원인인 것으로 나타난다. 따라서 실내 공기 유해물질로 인한 위해도를 감소시키기

위해서는 유해물질 배출량이 적은 친환경 건축자재의 사용을 의무화 하는 등의 방안이 필요할 것으로 생각된다.

또한 IIAQ 모델을 사용한 시뮬레이션 결과, 0.7/h 환기조건하에서의 톨루엔과 포름알데히드의 농도가 시뮬레이션 초기(5-8개월)에는 실내공기질관리법의 규제치를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 실내공기질관리법 준수를 위해서는 실내 공기 환기율이 0.7/h 이상을 항상 유지할 것이 필요하다는 결론이다.

VI 결 론

본 연구에서는 실내·외 오염원의 상호 작용을 고려한 실내의 유해화학물질의 농도를 예측하기 위하여 서울대에서 개발된 IIAQ 모델을 적용하였다. 본 모델은 기존 연구에서 검증된 모델의 결과와 IIAQ 모델을 통한 예측치를 비교하여 그 성능을 검증하였다. 검증 결과, IIAQ 모델은 오염원들의 상호 작용을 성공적으로 시뮬레이션 하였으며, 모델을 통하여 예측된 농도는 기존 연구에서 제시된 실측치와 좋은 연관성을 보이는 것으로 나타났다.

IIAQ 모델은 준공 후 10년 동안의 톨루엔과 포름알데히드의 실내 농도를 구하는데 사용되었다. 실내 공기내의 유해화학물질의 농도 변화를 보기 위해 대기 환기, 공기 청정 및 오염원 관리와 같은 여러 가지 관리 전략이 설정되어 IIAQ 모델에 적용되었으며, 그 결과를 분석하였다. 분석 결과, 포름알데히드와 톨루엔 두 물질의 노출 및 실내 농도를 감소시키기 위해서는 저유해물질 방출율(low emitting) 건축 자재의 사용이 가장 효과적인 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 대기교환율을 증가시키는 것으로 나타났다. 실외 대기내의 유해물질의 농도를 낮추는 것은 실내 공기 오염원의 기여도가 감소한 이후부터 효과적인 전략으로 나타났다.

위해성 평가에서 유해화학물질에 대한 총 노출과 비발암 위해성 및 발암 위해성이 정량화 되었다. 세 종류의 수용체 그룹이 설정되었으며, 그에 따른 적절한 노출 시나리오가 작성되었고, 필요한 매개 변수는 기존의 연구 자료와 통계자료를 통해 수집되었다. 각 수용체 집단에 대한 총 노출량은 가중 평균 농도 및 호흡률에 크게 연관된다는 결과를 얻을 수 있었다. 위해성 평가 결과, 회사원인 성인 남성 그룹이 유해 화학물질에 가장 많이 노출되는 것으로 나타났으며 이는 이 그룹이 다른 그룹에 비해 높은 호흡률을 가지고 있으며, 주 거

주 공간의 한 곳인 사무실이 실내 공기내의 유해화학물질의 농도가 다른 공간에 비해 높기 때문인 것으로 판단된다.

가중 평균을 이용하여, 발암 및 비발암 위해도를 정량화 하였다. 톨루엔에 의한 비발암 위해도는 1보다 작은 것으로 나타나 톨루엔의 노출에 의한 심각한 비발암 위해 영향을 없는 것으로 판단되나, 포름알데히드에 의한 발암 위해도는 모든 수용체 그룹에서 $1E-06$ 보다 큰 것으로 나타나 수용체 그룹에 향후 포름알데히드의 노출에 의한 암이 발생할 가능성이 있는 것으로 생각된다. 그리하여, 이러한 위해성을 줄이기 위해서는 현재의 실내공기질 관리법 상의 규제치가 모든 실내·외 노출 경로를 고려하여 좀더 적절하게 조정되어야 할 필요성이 있는 것으로 생각된다.

실내 및 실외 오염원의 상대적 기여도는 실내 오염원이 실외 오염원에 비해 우세한 것으로 나타났으며, 실내 오염원에 의한 위해도 및 노출을 줄이기 위해서는 실내 오염원으로부터 방출되는 오염물질을 관리하는 것이 더 효율적일 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김영희, 손부순, 양원호. 2006. "신축 주택의 톨루엔 발생량 모델을 이용한 건강위해성 평가", 「한국환경보건학회지」 32(5): 398-403.
- 손부순 외. 1996. "아산지역에 있어서의 NO₂ 개인 피폭량에 미치는 각종 생활행동 패턴의 영향", 「대한위생학회지」 11(3): 47-52.
- 최정민 외. 2005. "건축 마감재와 가구재의 VOCs, HCHO 유해물질에 따른 공동주택 적정 환기량 산정에 관한 연구", 「한국주거학회논문집」 16: 101-108.
- 통계청. 2007. 인구총조사, <http://www.kosis.kr/> (2007)
- _____. 2007. 주택총조사, <http://www.kosis.kr/> (2007)
- _____. 2007. 한국인인체치수조사보급, <http://www.kosis.kr/> (2007)
- 환경부. 2006a. 「실내유기공기오염물질 HAPs 관리방안을 위한 발생원 규명 및 발생량 추정에 관한 연구 (013-051-037)」
- _____. 2006b. 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」
- _____. 2006. 「지하철 등 대중운송수단의 실내공기질 실태조사 및 관리방안」
- _____. 2006. 「생활용품의 오염물질 방출량 평가 결과」
- Goss, K.U., and Eisenreich, S.J. 1997. "Sorption of volatile organic compounds to particles from a combustion source at different temperatures and relative humidities", *Atmospheric Environment* 31: 2827-2834.
- Hinds, W.C. 1999. *Aerosol technology : properties, behavior, and measurement of airborne particles*. New York: Wiley.
- International Agency for Research on Cancer. 2004. "IARC Press Release: IARC classifies formaldehyde as carcinogenic to humans" http://www.iarc.fr/ENG/Press_Releases/archives/pr153a.html
- Japan Ministry of Health, L.a.W. 2002. *Guideline values of individual Volatile Organic Compounds (VOCs)*
- Kim, S.-S., Kang, D.-H., Choi, D.-H., Yeo, M.-S., and Kim, K.-W. 2007. "Comparison of strategies to improve indoor air quality at the pre-occupancy stage in new apartment buildings", *Building and Environment* 49(3): 320-328.
- Lai, A.C.K., and Nazaroff, W.W. 2000. "Modeling indoor particle deposition from turbulent flow onto smooth surfaces", *Journal of Aerosol Science* 31: 463-476.
- Lee, D.-S., and Won, D. 2007. *Development of integrated indoor air quality model (IIAQ)*. Seoul National University

- Lim, H.S. 2004, "Heavy Metal Contamination and Human Risk Assessment in the Vicinity of the Abandoned Songcheon Au-Ag Mine", Master thesis, Seoul National University.
- Liu, D.L., and Nazaroff, W.W. 2001. "Modeling pollutant penetration across building envelopes", *Atmospheric Environment* 35: 44451-44462.
- Milner, J.T., Dimitroulopoulou, C., and ApSimon, H.M. 2005. *Indoor concentrations in buildings from sources outdoors*. Report to Atmospheric Dispersion Modeling Liaison Committee
- Shin, Y.S., Lee, D.S., Won, D.S., and Lim, H.S. 2007, *Risk management of Hazardous Chemicals Considering Interaction between Indoor and Outdoor*. KEI.
- Thatcher, T.L., and Layton, D.W. 1995. "Deposition, resuspension, and penetration of particles within a residence," *Atmospheric Environment* 29: 1487-1497.
- The Government of the Hong Kong Special Administrative Region. 2003. *A guide on indoor air quality certification scheme for offices and public places*
- U.S. EPA. 2002. *Child-specific exposure factors handbook*
- _____. 2007. "Toxicological Review of toluene". <http://www.epa.gov/iris/>
- _____. "IRIS summary - formaldehyde". <http://www.epa.gov/iris/> (2007)WHO,1999. WHO guidelines for air quality