

신축공동주택의 입주전후 VOCs 및 HCHO 농도

박상은* · 김현욱* · 심상효** · 이세훈* · 구정완*,***†

*가톨릭대학교 의과대학 예방의학교실, **한양대학교병원 산업의학과,

***가톨릭대학교 성모병원 산업의학센터

Concentrations of VOCs and Formaldehyde in Newly Constructed Apartment Buildings Before and After Residence

Sangeun Park* · Hyunwook Kim* · Sang Hyo Sim** · Se-Hoon Lee* · Jung-Wan Koo*,***†

*Department of Preventive Medicine, The Catholic University of Korea

**Department of Occupational and Environmental Medicine, Hanyang University Medical Center

***Industrial Medical Center, St. Mary's Hospital, The Catholic University of Korea

(Received January 24, 2007/Accepted April 18, 2007)

ABSTRACT

This study was performed to measure the changed concentrations of formaldehyde and volatile organic compounds after moving in the newly constructed apartment buildings at Seoul. From December 2004 to October 2005, we measured the concentration of formaldehyde and volatile organic compounds in newly constructed apartment buildings before and after residence. In conclusion, it showed that there was a significant relationship association between the concentration of the volatile organic compound and the formaldehyde and remodeling of the house, built in-furniture, and ventilation of the house. Therefore, it was suggested that we need preventive measures and management plans about various factors such as remodeling, and built in-furniture, ventilation to decrease the concentrations of volatile organic compounds and formaldehyde.

Keywords: formaldehyde, volatile organic compounds

I. 서 론

최근 경제성장과 더불어 산업화와 도시화가 빠르게 진행되면서 산업시설의 증가와 인구 집중화, 교통량의 증가 등은 도시의 대기오염을 더욱 악화시키고 있다.¹⁾ 또한 현대인은 하루 시간의 90%이상을 실내공간에서 생활하게 됨으로써 실내환경에 대한 인식이 새롭게 부각되었다.²⁾ 실내 공간 중 가정은 가장 기본적인 생활공간이며 휴식처이다. 그러나 생활의 발전과 에너지 비용의 절감을 위해 실내공간은 점점 밀폐화 되어 실내공기오염도는 증가되고 있는 추세이다.³⁾ 특히 실내공기는 한정된 공간속에서 오염된 공기의 지속적인 순환과 장시간 정체로 대기오염보다 오염의 정도 및 인간생활에

미치는 영향이 크다고 할 수 있다.⁴⁾

이러한 실내공기는 물리적, 화학적, 생물학적으로 다양한 오염물질이 존재하며 외부공기의 유입, 담배연기, 난방기, 오븐, 취사도구, 시멘트, 건축자재, 페인트 등과 같은 복합적인 배출원에서 기인되므로 그 배출량 역시 오염물질에 따라 상당한 편차를 나타낸다.⁵⁾ 특히 실내공기의 오염 원인은 거주자들의 실내 활동과 건축자재 및 생활용품 등에서 배출되는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 포름알데히드(HCHO), 라돈(Rn), 석면, 이산화질소, 일산화탄소, 이산화탄소, 미세먼지(PM₁₀), 담배연기, 미생물성 물질, 병원성 세균, 중금속 등이 있다.⁶⁻⁸⁾ 휘발성유기화합물(VOCs)은 건축자재, 가구, 접착제, 카펫, 흡연 및 연료의 연소 등 다양한 오염원으로부터 방출되며 집막 자극, 두통, 구역질, 현기증 등을 초래하는 잠재적인 건강유해물질이다.^{9,10)} 포름알데히드는 잠재적인 발암성 추정물질이며 새집증후군(Sick House Syndrome, SHS), 빌딩증후

†Corresponding author : Department of Preventive Medicine, The Catholic University of Korea
Tel: 82-2-3779-1402, Fax: 82-2-782-6017
E-mail : jwkoo@catholic.ac.kr

군(Sick Building Syndrome, SBS), 화학물질과민증(Multiple Chemical Syndrome, MCS) 등의 주요 원인 물질로 부각되고 있다.¹¹⁻¹³⁾

환경부에서는 2003년 4월 “다중이용시설등의 실내공기질 관리법”을 공포하여 여객터미널, 도서관, 종합병원 등의 다중이용시설과 신축공동주택(아파트, 연립주택)에서의 휘발성유기화합물, 포름알데히드 등의 실내공기오염물질을 관리하고 있다.¹⁴⁾ 국외에서는 이미 오래전부터 신축공동주택을 대상으로 휘발성유기화합물 및 포름알데히드에 대한 거주자들의 노출정도 및 건강에 미치는 영향에 대한 연구¹⁵⁻¹⁹⁾가 여러 분야에서 체계적이고 지속적으로 이루어지고 있다. 국내에서도 신축공동주택을 대상으로 다양한 조사연구²⁰⁻²⁷⁾가 수행되었다. 그러나 신축공동주택을 대상으로 입주 전과 입주 후의 오염도 변화추이 및 관련인자 파악을 위한 시계열조사²⁸⁾와 같은 시간경과에 따른 연구는 제한적이며, 특히 새집증후군을 유발하는 관련요인에 대한 구체적인 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 서울시내 일부 신축공동주택을 대상으로 입주 전과 입주 후의 휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 농도 차이를 파악하고 관련요인에 대해 알아보고자 하였다.

II. 조사대상 및 방법

1. 연구대상

본 연구는 서울시 강서구에 위치한 준공 1년 미만의 일부 신축공동주택을 대상으로 실내공기질을 조사하였다. 입주 전 조사대상은 총 19세대로 2004년 12월부터 2005년 3월까지 동일 시공사의 건축면적 120.11 m²의 187세대 중 무작위로 저층부 8세대, 중층부 4세대, 고층부 7세대를 선정하였다. 입주 후 조사대상은 10세대로 2005년 8월부터 10월까지 동일 시공사의 건축면적 120.11 m²의 187세대 중 입주 전 측정세대를 중심으로 거주자의 연구 참여에 따라 저층부 4세대, 중층부 3세대, 고층부 3세대를 선정하였다.

2. 방법

1) 시료채취방법

본 연구에서 시료채취는 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”에 의한 실내공기질 공정시험방법을 준하여 실시하였다. 시료채취 단위세대는 187세대를 기본으로 저층부(1~3층), 중층부(7~9층), 고층부(13~15층)로 선정하였고, 시료채취 세대수는 입주 전 19세대, 입주 후 10세대를 대상으로 하였다. 시료채취 장소는 거실의

중앙부에서 실시하였으며, 벽으로부터 최소 1 m 이상 떨어진 위치의 바닥면으로부터 1.2~1.5 m 높이를 기본 측정점으로 하였다. 실내공기질의 표준적인 측정방법을 위해서 시료채취 세대의 외부에 면한 모든 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)를 개방하고 30분 이상 환기를 시켰다. 30분 환기 후 외부공기와 면하는 개구부(창호, 출입문, 환기구 등)를 5시간 이상 밀폐하여 공기의 이동을 차단하였고, 실내간의 이동을 위한 문과 수납가구 등의 문은 개방하였다. 시료의 채취는 30분간 동시에 각 2회를 측정하였다.¹⁴⁾

2) 휘발성유기화합물 측정 및 분석

휘발성유기화합물의 농도 측정은 질량분석계를 이용한 고체흡착열탈착법(TD-GC/MS)을 사용하였다. 흡착관은 측정 전에 열탈착 장치를 이용하여 300°C에서 2시간 이상 안정화(Conditioning) 과정을 실시하였고, Tenax-TA(60/80 mesh, Supelco, USA)가 200 mg 이상 충전된 스테인리스강으로 된 관(1/4 inch×9 cm, PerkinElmer, UK)을 이용하였다. 포집에 사용된 흡인펌프는 저용량 펌프인 Personal Air Sampler(Pocket pump, SKC, USA)를 사용하여 0.2 l/min으로 30분간 2회 포집을 하였다. 시료는 채취 후에 냉장 보관하였으며, 2주 이내 열탈착기(GERSTEL TDS, UK)로 탈착한 후 가스크로마토그래프/질량분석계(5975 Inert Mass Selective Detector, USA)를 이용하여 분석하였다.¹⁴⁾ 휘발성유기화합물의 분석조건은 Table 1과 같다.

3) 포름알데히드 측정 및 분석

포름알데히드의 농도 측정은 2, 4-DNPH 유도체화 HPLC 분석법을 사용하였다. 흡착관은 2, 4-Dinitrophenylhydrazine(2, 4-DNPH)이 코팅되어 있는

Table 1. Operating conditions of GC/MSD with TD for VOCs analysis

Thermal desorption	
Thermal desorber	GERSTEL TDS
Desorption temperature	300°C
Split ratio	solv. Vent
GC/MSD	
GC/MSD	5975 inert Mass Selective Detector
Column	DB-1(60 m * 0.25 mm * 1 um)
Column temperature (°C)	35°C(5 min)~5°C/min~220°C(1 min)~30°C/min~280°C(10 min)
Aux temperature	280°C
MS source	230°C
MS Quad	150°C
Mass range	10~700°C

Table 2. Operating conditions of HCHO for analysis

Instrument	Analysis condition
Detector	Waters 486 Tunable Absorbance Detector
Column	Symmetry C18 (3.9 * 150 mm)
Mobile phases	ACN : DW = 45 : 55
Injection volumn	10 μ m
Flow rate	1.0 ml/min

2, 4-DNPH Cartridge(Supelco S10, USA)를 이용하였다. 오존(O_3)은 DNPH 및 그 유도체와 반응하는 방해물질로 존재하기 때문에 고순도의 요오드칼륨(KI)으로 충전(充填)되어 있는 Ozone Scrubber(Waters, USA)를 2, 4-DNPH Cartridge 전단부에 직렬로 설치하였다. 포집에 사용된 흡인펌프는 대용량 펌프인 Personal Air Sampler(SKC 222 series pump, USA)를 사용하여 500 ml/min으로 30분간 2회 포집을 하였다. 시료는 채취 후에 내부가 알루미늄으로 코팅되어 있는 용기에 개별 포장하여 냉장보관 하였으며, 2주 이내에 용매추출 장치인 Vacuum Elution Rack(Supelco, USA)을 이용하여 시료를 추출한 후 고성능액체크로마토그래프(HPLC)를 이용하여 분석하였다.¹⁴⁾ 포름알데히드의 분석 조건은 Table 2와 같다.

3. 통계 처리

자료는 Statistical Analysis System for Window (Version 9.1)를 사용하여 비모수적 통계분석을 하였다. 입주 전과 입주 후, 리모델링 여부, 불박이가구 유무, 환기활동에 따른 농도 차이는 윌콕슨 순위합 검정(Wilcoxon rank sum test)을 통하여 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 입주 전후의 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 농도

Table 3과 같이 휘발성유기화합물은 입주 전보다 입

주 후의 평균농도가 전반적으로 감소하였고 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 반면 포름알데히드는 입주 전 90.8 μ g/m³에 비해 입주 후 111.5 μ g/m³로 평균농도가 증가하였지만 통계적으로 유의한 차이는 아니었다. 입주 전의 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, *m,p*-자일렌, 포름알데히드의 평균농도는 모두 신축공동주택의 실내공기질 권고기준치 이하였다. 반면 스티렌의 평균농도는 499.4 μ g/m³으로 권고기준치 300 μ g/m³를 초과하였다. 그러나 입주 후의 휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 평균농도는 모두 권고기준치 이하로 나타났다.

준공 1년 이내 신축아파트를 대상으로 휘발성유기화합물 및 포름알데히드에 대한 실태조사³¹⁾를 실시한 연구에서 벤젠 2.4 μ g/m³, 톨루엔 127.3 μ g/m³, 에틸벤젠 30.0 μ g/m³, 크실렌 59.6 μ g/m³, 포름알데히드 150.4 μ g/m³로 조사되었고 본 연구의 측정결과와 비교적 유사하였다. 반면 최근 1시간 밀폐 후 실내공기오염도를 조사한 연구²⁸⁾에서는 벤젠 3.1 μ g/m³, 톨루엔 272.8 μ g/m³, 에틸벤젠 98.9 μ g/m³, *m,p*-자일렌 98.9 μ g/m³, 스티렌 10.9 μ g/m³, 포름알데히드 71.7 μ g/m³로 조사되었다. 1시간 밀폐 후 측정된 농도와 5시간 밀폐 후 측정된 농도의 비는 오염물질에 따라 약 1.9배로 조사되었고 본 연구의 측정결과와 비교하여 차이가 있었다. 또한 캐니스터로 채취 및 분석한 연구³²⁾에서는 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌의 평균 농도가 본 연구보다 높게 조사되었다. 이러한 측정결과와의 차이는 건축면적, 건축자재 등 신축공동주택의 특성, 밀폐시간, 시료측정 및 분석방법 등에 따라 실내공기오염물질 농도의 차이가 있는 것으로 사료된다.

2. 리모델링별 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 농도

Table 4와 같이 거실, 다용도실에 리모델링을 시공한 세대에서 *m,p*-자일렌, 스티렌의 평균농도는 리모델링을 시공하지 않은 세대보다 증가하였지만 유의한 차이는 아니었다. 반면 벤젠의 평균농도는 리모델링을 시공한

Table 3. Concentration of indoor air pollutants according to residence condition in newly constructed apartment buildings unit : (μ g/m³)

Compound	Before residence		After residence		P-value
	N	Mean \pm SD	N	Mean \pm SD	
Benzene	19	12.56 \pm 7.92	10	0.09 \pm 0.04	<0.001
Toluene	19	168.23 \pm 76.77	10	76.10 \pm 40.01	0.003
Ethylbenzene	19	30.65 \pm 20.17	10	5.12 \pm 7.27	0.001
<i>m,p</i> -Xylene	19	34.90 \pm 23.79	10	14.99 \pm 11.33	0.008
Styrene	19	499.38 \pm 354.74	10	6.16 \pm 4.76	<0.001
Formaldehyde	19	90.82 \pm 45.81	10	111.48 \pm 106.05	0.930

Table 4. Concentration of indoor air pollutants by remodeling in newly constructed apartment buildings

Compound	Remodeling		No remodeling		P-value
	N	Mean ± SD	N	Mean ± SD	
Benzene	4	0.14 ± 0.03	6	0.06 ± 0.03	0.019
Toluene	4	71.53 ± 50.07	6	79.16 ± 36.74	0.749
Ethylbenzene	4	3.43 ± 3.88	6	6.26 ± 9.08	0.749
<i>m,p</i> -Xylene	4	17.72 ± 15.20	6	13.19 ± 9.11	0.915
Styrene	4	6.70 ± 5.91	6	5.81 ± 4.41	0.791
Formaldehyde	4	110.60 ± 121.60	6	112.01 ± 110.85	0.987

세대에서 0.14 µg/m³로 리모델링 하지 않은 세대 0.06 µg/m³ 보다 약 2배 이상 유의하게 증가하였다 (p<0.019).

최근 실내공기오염도 변화추이를 조사한 연구²⁸⁾에서 실내개조를 한 세대가 오염물질의 농도가 약 1.2~2.1배 높게 나타났으며 유의한 차이를 보였다(p<0.05). 또한 기존 공동주택을 대상으로 실태조사를 한 연구³³⁾에서 발코니 확장을 한 세대가 확장을 하지 않은 세대보다 총휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 농도가 높게 조사되었다. 입주 후의 실내공기오염물질의 오염도 증가는 실내 개조 및 확장시 건축자재, 마감자재, 접착제 등에서 휘발성유기화합물 및 포름알데히드가 배출되기 때문인 것으로 사료된다.

3. 불박이가구별 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 농도

Table 5와 같이 거실에 불박이가구가 있는 세대에서 벤젠, 톨루엔, *m,p*-자일렌, 스티렌의 평균농도는 불박이 가구가 없는 세대보다 증가하였지만 유의한 차이는 아니었다. 반면 포름알데히드의 평균농도는 불박이가구가 있는 세대에서 270.0 µg/m³로 불박이가구가 없는 세대 58.6 µg/m³ 보다 약 4.5배 이상 유의하게 증가하였다.

최근 연구²⁸⁾에서 가구류 등의 신규 생활용품의 구입으로 인한 실내공기오염물질의 농도는 평균 1.1~1.9배

높게 조사되었고 벤젠을 제외하고 통계적으로 유의하였다. 이는 새로 구입한 불박이가구, 소파 등의 생활가구 등이 실내공기오염물질 농도에 영향을 주는 것으로 사료된다.

4. 환기활동별 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 농도

Table 6과 같이 하루에 3~4회 환기활동을 하는 세대에서 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, *m,p*-자일렌, 스티렌, 포름알데히드의 평균농도는 1~2회 환기활동을 하는 세대보다 감소하였지만 유의한 차이는 아니었다. 반면 스티렌의 평균농도는 하루 3~4회 환기활동을 하는 세대에서 2.7 µg/m³로 1~2회 환기활동을 하는 세대 7.7 µg/m³ 보다 약 2.5배 이상 유의하게 감소하였다. 기존의 연구³⁴⁾에서는 고층아파트를 대상으로 환기를 한 세대에서 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌의 농도가 감소하는 것으로 조사되었다. 환기는 실내공기오염물질을 저감시키는 주요한 활동으로 자연환기에 의해서도 실내공기오염물질 저감효과를 얻을 수 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 입주 전과 입주 후의 실내공기오염물질의 농도 차이에 대한 충분한 관련성을 증명하기에 표본 수가 적은 한계점이 있다. 또한 입주 후 실내공기오염물질에 대한 측정에 있어 거주자의 승인 여부에 의해 현장 조사가 이루어져서 입주 전과 동일한 세대를

Table 5. Concentration of indoor air pollutants by fixed furniture in newly constructed apartment buildings

Compound	Furniture		No furniture		P-value
	N	Mean ± SD	N	Mean ± SD	
Benzene	3	0.11 ± 0.08	7	0.09 ± 0.03	0.516
Toluene	3	92.56 ± 39.27	7	69.05 ± 41.16	0.254
Ethylbenzene	3	3.34 ± 4.91	7	5.89 ± 8.31	0.494
<i>m,p</i> -Xylene	3	17.97 ± 18.14	7	13.72 ± 8.77	0.616
Styrene	3	9.44 ± 4.03	7	4.77 ± 4.57	0.171
Formaldehyde	3	270.03 ± 32.96	7	58.63 ± 46.07	0.001

Table 6. Concentration of indoor air pollutants by ventilation in newly constructed apartment buildingsunit : ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Ventilation Compound	1-2 times/day		3-4 times/day		P-value
	N	Mean \pm SD	N	Mean \pm SD	
Benzene	7	0.10 \pm 0.06	3	0.08 \pm 0.02	0.698
Toluene	7	80.03 \pm 35.59	3	66.95 \pm 56.78	0.648
Ethylbenzene	7	6.12 \pm 8.59	3	2.82 \pm 2.26	0.542
<i>m,p</i> -Xylene	7	18.33 \pm 12.18	3	7.22 \pm 1.98	0.254
Styrene	7	7.65 \pm 5.03	3	2.71 \pm 0.68	0.041
Formaldehyde	7	129.61 \pm 132.89	3	81.27 \pm 43.05	0.573

측정하는데 한계점이 있었다. 따라서 향후 신축공동주택을 대상으로 장기적이고 지속적인 데이터 축적이 필요하며 실내공기오염물질과 새집증후군의 관련성, 거주자의 자각증상 등의 건강영향 평가에 대한 추후 연구가 보강되어야 할 것이다.

IV. 결 론

본 연구는 서울시에 위치한 일부 신축공동주택을 대상으로 입주 전과 입주 후의 휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 농도 차이를 파악하고 관련요인에 대해 알아보고자 하였다. 입주 전 조사는 2004년 12월부터 2005년 3월까지 실내공기오염물질을 측정하였고, 입주 후 조사는 2005년 8월부터 10월까지 실내공기오염물질 측정하였으며, 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 입주 전과 입주 후의 휘발성유기화합물의 평균농도는 입주 후에 전반적으로 유의하게 감소하였다 ($p < 0.019$). 반면 포름알데히드의 평균농도는 입주 후 증가하였지만 유의하지는 않았다.

2. 거실, 다용도실 등에 리모델링을 시공한 세대에서 리모델링을 시공하지 않은 세대보다 벤젠의 평균농도가 유의하게 증가하였다.

3. 불박이가구가 있는 세대에서 불박이가구가 없는 세대보다 포름알데히드의 농도가 유의하게 증가하였다 ($p < 0.001$).

4. 하루 중 3~4회 환기활동을 하는 세대에서 하루 1~2회 환기활동을 하는 세대보다 스티렌의 평균농도가 유의하게 감소하였다 ($p < 0.041$).

이상의 결과를 통해 입주 후의 휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 농도는 리모델링 시공, 불박이가구, 환기활동 등에 영향을 받는 것으로 알 수 있었다. 그러므로 휘발성유기화합물 및 포름알데히드의 농도를 저감시키기 위해서는 환기, 실내 확장 및 개조, 불박이가구 등 다양한 요인에 대한 예방대책 및 관리방안이 필

요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 가톨릭대학교 성의장학 학술연구비 지원으로 이루어진 결과이며, 이에 감사를 드립니다.

참고문헌

- Tobin, R. S., Bourgeau, M., Otson, R. and Wood, G. C. : Residential indoor air quality guidelines. *Indoor Environmental*, **2**, 267-275, 1992.
- Molhave, L. and Krzyzanowski, M. : The right to healthy indoor air: status by 2002. *Indoor Air*, **13** Suppl 6, 50-53, 2003.
- Jitendra, J. S. and Hanwant, B. S. : Distribution of volatile organic chemicals in outdoor and indoor air. *Environmental Science Technol*, **22**, 1381-1388, 1988.
- Woods, J. E. : An engineering approach to controlling indoor air quality. *Environmental Health Perspectives*, **95**, 15-21, 1991.
- Afshari, A., Lundgren, B. and Ekberg, L. E. : Comparison of three small chamber test methods for the measurement of VOC emission rates from paint. *Indoor Air*, **13**, 156-165, 2003.
- Tichenor, B. A., Sparks, L. A., Wihite, J. B. and Jackson, M. D. : Evaluating sources of indoor air pollution. *Journal of the Air and Waste Management Association*, **40**, 487-492, 1990.
- Hodgson, A. T., Rodd, A. F., Beal, D. and Chandra, S. : Volatile organic compound concentration and emission rates in new manufactured and site-built houses. *Indoor Air*, **10**, 178-192, 2000.
- 김윤신, 이철민, 문정숙, 김상욱 : 서울경기지역 초중고등학교 교실의 실내공기오염에 관한 연구. *한국학교보건학회지*, **16**(1), 81-90, 2003.
- Martin, A., Cohen, P., Barry, R. and Yukio, Y. : The validation of a passive sampler for indoor and outdoor concentration of volatile organic compounds. *Air and Waste Management Association*, **40**, 993-997, 1990.

10. Alfred, T., Hodgson, Joan M, Daisey : Sources and source strengths of volatile organic compounds in a new office building. *Air and Waste Management Association*, **41**, 1461-1468, 1991.
11. Tepper, J. S., Moser, V. C., Costa, D. L. and Mason, M. A. : Toxicological and chemical evaluation of emission from carpet samples. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **56**(2), 158-170, 1995.
12. World Health Organization(WHO) : Air quality guidelines-2nd edition. WHO Regional Office for Europe, 2001.
13. 하권철 : 경남지역 지하생활공간 중 미량 유해물질인 포름알데히드의 농도 분포 특성. *한국환경보건학회지*, **30**(5), 353-375, 2004.
14. 환경부 : 다중이용시설등의 실내공기질 관리법, 2004.
15. Wolkoff, P., Clausen, P. A., Nielsen, P. A. and Molhave, L. : The danish twin apartment study; part I: formaldehyde and long-term VOC measurements. *Indoor Air*, **4**, 478-490, 1991.
16. Ten Brinke, J., Selvin, S., Hodgson, A. T. *et al.* : Development of new volatile organic compound (VOC) exposure metrics and their relationship to "sick building syndrome" symptoms. *Indoor Air*, **8**, 140-152, 1998.
17. Rehwagen, M., Schlink, U. and Herbarth, O. : Seasonal cycle of VOCs in apartments. *Indoor Air*, **13**, 283-291, 2003.
18. Wolkoff, P. : Trends in Europe to reduce the indoor air pollution of VOCs. *Indoor Air*, **13**(Suppl. 6), 5-11, 2003.
19. Park, J. S. and Ikeda, K. : Variations of formaldehyde and VOC levels during 3 years in new and older homes. *Indoor Air*, **16**, 129-135, 2006.
20. 서병량, 김신도, 박성규 : 온습도에 따른 건축 내장재
 별 휘발성유기화합물의 방출특성. *한국환경보건학회지*, **32**(4), 292-303, 2006.
21. 방정현, 박진철, 이연구 : 실내 마감 페인트에서의 휘발성유기용제 및 포름알데히드의 발생농도 측정연구. *대한건축학회 학술발표대회 논문집*, **18**(1), 551-558, 1998.
22. 이용식 : 신축 아파트내 실내공기오염에 관한 연구. *고려대학교 대학원 석사학위논문*, 2004.
23. 강동화 : 바다난방 공간의 베이크 아웃에 의한 VOCs 방출에 관한 연구. *서울대학교 대학원 석사학위논문*, 2005.
24. 장지혜 : 새집증후군에 대한 아파트 거주자의 자각증상 및 반응 연구. *연세대학교 대학원 석사학위논문*, 2005.
25. 정유신 : 공동주택의 실내공기환경에 대한 재실자들의 주관적 반응조사에 관한 연구. *동의대학교 대학원 석사학위논문*, 2005.
26. 심상효, 김윤신 : 신축공동주택의 실내공기질 특성 및 평가 -휘발성 유기화합물 및 포름알데히드 중심으로-. *한국환경보건학회지*, **32**(4), 275-281, 2006.
27. 국립환경과학원 : 공동주택 오염도 변화추이 파악을 위한 시계열조사 연구(I). 2006.
28. 국립환경과학원 : 전국 신축공동주택 실내공기질 실태조사. 2004.
29. 조장제, 구민호, 장정욱, 송승연, 김태오 : 신축아파트에서의 휘발성유기화합물 농도 조사. *한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집*, 2004.
30. 이윤규, 김창남 : 기존 공동주택의 실내공기질 실태에 관한 측정 연구. *대한건축학회 논문집*, **20**(11), 327-334, 2004.
31. 손장열, 백용규, 방승기, 이철구, 조 현 : 고층 아파트에서 환기 조건에 따른 실내 VOCs 농도변화에 관한 연구. *대한건축학회 학술발표논문집*, **22**(1), 533-537, 2002.