

자동 베이크 아웃 시스템을 이용한 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 저감효과

김형진[†] · 이갑수 · 조진규* · 이준범** · 노형래*** · 윤홍수****

김포대학 환경보건과, *김포대학 건설정보과, **(주)용우테크, ***(주)건정종합건축사사무소, ****원텍코리아
(2011년 3월 10일 접수, 2011년 3월 30일 채택)

Reduction Effect of VOCs and Formaldehyde Using Auto Bake-Out System

Hyung-Jin Kim[†], Kab-Soo Lee, Jin-Kyu Cho*, Jun-Bum Lee**, Heoung-Rae Roh***, and Hong-Su Yun****

Department of Environmental & Health, Kimpo College, Gyeonggi 415-761, Korea

*Department of Civil Engineering, Kimpo College, Gyeonggi 415-761, Korea

**Yongwoo Tech., Seoul 152-844, Korea

***KUNJUNG Architects & Planners, Seoul 135-868, Korea

****Wintec Korea, Seoul 138-220, Korea

(Received March 10, 2011; Accepted March 30, 2011)

초등학교의 신축된 실내체육관을 대상으로 자동 개폐장치를 이용하여 실내의 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 농도 저감효과를 평가하기 위하여 5일간 베이크 아웃을 진행하였다. 베이크 아웃을 실시한 결과 베이크 아웃 실시 전의 농도에 비해 벤젠의 경우 38.2%, 톨루엔은 64.2%, 에틸벤젠은 86.3%, 자일렌은 80.2%, 스티렌은 71.5%의 저감률을 보였으며, 환경부의 신축공동주택의 실내공기질 기준치를 만족하는 것으로 나타났다. 총휘발성유기화합물의 저감률은 67.0%이었으며 포름알데히드의 경우 24.7%의 저감률을 보여 자동 개폐장치를 이용한 베이크 아웃이 실내오염물질을 제거하는 데 유용함을 확인하였으며, 자동 베이크 아웃 시스템을 이용할 경우 효과적인 베이크 아웃이 가능함을 확인하였다.

A bake-out process using auto switchgear for five days was performed to evaluate the reduction effect of the concentration of volatile organic compounds (VOCs) and formaldehyde in a newly-built elementary school gymnasium. Reduction rates of VOCs were observed as followings: 38.2, 64.2, 86.3, 80.2, and 71.5% for benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene, respectively, which satisfies the indoor air quality standards of newly-built apartment houses in Korea. The reduction rate of total VOCs and formaldehyde were 67.0 and 24.7%, respectively. Those results proved that the bake-out process using auto switchgear was effective for reducing indoor air pollutants.

Keywords: volatile organic compounds (VOCs), formaldehyde, bake-out, auto switchgear, gymnasium

1. 서 론

최근 들어 에너지효율을 높이기 위한 노력의 일환으로 건물의 밀폐뿐만 아니라 환기가 부족하게 되고, 생활양식의 변화로 인해 다양한 건축자재와 생활용품을 사용하면서 새로운 오염물질이 방출되어 실내공기질 악화를 초래하고 있다. 특히, 휘발성 유기화합물(VOCs)이나 포름알데히드 등과 같은 유해화학물질은 건물증후군(SBS : Sick Building Syndrome)이나 복합화학물질과민증(MCS : Multiple Chemical Sensitivity)과 같은 환경성 질환의 원인이 되고 있다. 2001년도에 성인 838명을 대상으로 한 환경부 조사에 의하면 하루에 약 20.3 h을 실내에서 보내는 것으로 조사되어 현대인들이 하루 중의 대부분을 실내에서 생활하고 있는 것으로 나타났다[1]. 대부분의 현대인이 80% 이상을 실내에서 생활한다고 가정할 때 그 영향은 실내거주자들의 생명을

위협할 정도는 아니지만 장기적으로 볼 때 나쁜 영향을 미치고 있음을 틀림없는 사실이다[2]. 실내공기오염물질의 농도가 낮더라도 노약자, 유아, 환자들은 실내에서 장기간 생활하고 면역력이 떨어짐에 따라 건강에 많은 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 세계보건기구에서는 실내공기 오염에 의한 연간 사망자가 280만 명에 이르고 실내공기오염물질이 실외 오염물질보다 폐에 전달될 확률이 약 천배나 높다고 추정하고 있다[3].

실내의 공기오염은 성인보다 어린이나 노약자, 기관지가 약한 사람에게 많은 영향을 미친다. 학교는 성장기에 있는 학생들이 생활하는 밀집된 공간이기 때문에 다른 곳보다도 위생적이고 깨끗하게 유지·관리되어야 함에도 불구하고 우리나라의 경우 학교 내의 환경문제에는 많은 관심을 기울이지 못했었다. 이에 교육인적자원부는 학교 내의 환경위생을 개선하기 위해 교사 내 공기질 관리 항목 12개를 정하여 정기적인 오염도 측정을 의무화하는 등 유지·관리기준을 대폭 강화하여 2006년 1월부터 시행하고 있다. 2000년도 이후 국내에서도

† 교신저자 (e-mail: tivoli@kimpo.ac.kr)



(a)

(b)

Figure 1. Auto switchgear (a) and time programming controller (b).

다중이용시설과 신축공동주택에 대한 실내공기질 연구가 활발히 진행되고 있으며[4-6], 최근 들어 교사 내의 실내공기질 연구도 지역적으로 진행되고 있다[7-9]. 또한 2011년 1월 1일부터 실내공기질 관리 대상이 법인·직장·민간보육시설의 연면적 기준이 860 m^2 에서 430 m^2 이상으로 확대되어 전국의 모든 중·대형 보육시설에 대한 실내공기질이 관리될 방침이다.

일반적으로 건축물에서 실내의 오염물질을 효과적으로 제거하는 방법은 유해오염물질 발생량이 적은 친환경 자재를 사용하여 오염물질이 발생하지 않도록 하는 방법이며, 다른 하나는 실내에서 발생한 오염물질을 실외로 빨리 제거시키는 방법이다. 첫 번째 방법은 건설사의 입장에서는 시공원가 상승, 설계변경에 따른 시공방법 변경 등 많은 어려움이 따른다. 두 번째 방법은 흡착이나 흡수 또는 베이크 아웃 등을 이용하여 오염물질을 제거하는 방법이다. 특히 신축건물에서 오염물질을 제거하기 위한 방법으로 베이크 아웃이 많이 이용되는데 대부분의 베이크 아웃이 사람에 의해 진행되기 때문에 시설물의 도난이나 훼손뿐만 아니라 베이크 아웃을 시행하는 사람이 고농도의 오염물질에 노출될 수 있는 문제점을 안고 있다.

따라서 본 연구에서는 초등학교에 신축된 실내체육관을 대상으로 하여 자동 베이크 아웃 장치를 이용해 베이크 아웃을 실시하고 이에 따른 휘발성유기화합물과 포름알데히드의 저감효과를 평가하고, 교사 환경을 위생적이고 쾌적하게 개선할 수 있는 방안을 모색하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 및 기간

인천광역시 내에 위치한 초등학교의 신축된 실내체육관을 대상으로 하여 2011년 1월 10일부터 14일까지 5일간 베이크 아웃을 수행하였다. 연구 대상 초등학교는 제2종 일반주거지역 및 준주거지역에 위치한 학교로서 대로변에서 약 30 m 떨어진 곳에 위치하고 있다. 실내체육관의 면적은 698.5 m^2 , 높이는 10 m 이다. 체육관의 바닥은 마루로 되어 있으며, 벽은 MDF, 보드류, 수성 페인트와 세라민 페인트로 마감되어 있으며, 천정은 판넬과 텍스로 이루어져 있다. 난방은 도시 가스를 이용하여 천정에서 난방이 이루어지고 있으며 최대 설정온도는 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

2.2. 자동 베이크 아웃

자동 베이크 아웃 장치는 Figure 1의 (a)와 같이 미닫이 창문에 장치를 공기 압착에 의해 거치하고 지정한 시간 프로그램에 의해 창문이 모터에 의해 자동으로 개폐되는 장치이다. Figure 1의 (b)는 베이크 아웃 시간을 프로그램 할 수 있는 컨트롤러이다. 실내체육관의 창문은 양쪽으로 마주보고 5개씩 있어서 총 10개의 자동 개폐기를 부착하고 외부의 공기가 실내로 최대한 유입될 수 있도록 하였다. 본 연구에서

**Figure 2. Air sampler for VOCs and formaldehyde.**

는 5 h 30 min 동안 밀폐된 상태에서 난방을 하여 오염물질을 방산시킨 후 30 min간 창문을 개방하여 환기하는 방식으로 하루에 4회씩 5일간 베이크 아웃을 실시하였다. 베이크 아웃을 실시하기 전에 목표 온도까지 도달하기 위해 미리 난방을 한 후 베이크 아웃을 수행하였다.

2.3. 시료채취 및 분석방법

시료채취 및 분석은 매일 오전 11시부터 12시사이에 환경부에서 정한 실내공기질공정시험방법에 준하여 30 min 환기 후 5 h 밀폐한 후 실내 중앙에서 바닥면으로부터 1.5 m의 높이에서 이루어졌다. VOCs는 Tenax-TA 흡착튜브(Supelco)를 이용하여 SIBATA사의 MP-Σ30 에어 샘플러를 이용하여 200 mL/min의 유량으로 30 min간 채취하였다. 포름알데히드는 DNPH 카트리지(S10L, Supelco)를 사용하여 SIBATA사의 MP-Σ300 에어 샘플러를 이용하여 1 L/min의 유량으로 30 min간 채취하였다. 이 때 오존의 유입을 방지하기 위해 오존 스크러버(Supelco)를 사용하였다. 채취한 시료는 분석 전까지 냉암소에서 보관하였다. Figure 2는 VOCs와 포름알데히드 시료채취 사진이다.

VOCs는 자동열탈착장치(Perkin Elmer, TurboMatrix ATD 650)를 이용하여 흡착튜브의 시료를 털착한 후 온라인으로 연결된 GC/MS (Agilent 6890A/5973N)로 분석하였다. 자동열탈착장치(ATD)와 GC/MS의 분석조건을 Table 1에 나타내었다. 포름알데히드 분석은 LpDNPH로 유도체화된 시료를 HPLC grade의 아세토니트릴을 이용하여 5 mL 용출시켰으며, 용출시 오염을 최소화하기 위하여 모든 초자류는 아세토니트릴로 세척한 후 건조하여 사용하였다. 시료를 포집하지 않은 DNPH 카트리지를 측정하여 바탕실험을 하였으며, 포름알데히드 농도 계산시 바탕실험값을 이용하여 농도를 보정하였다. HPLC를 이용한 포름알데히드의 분석조건을 Table 2에 나타내었으며 2회 측정하여 평균농도를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 온도 및 습도 변화

베이크 아웃이 수행되는 기간 동안 실내의 온도는 $29.4\sim31.4\text{ }^\circ\text{C}$ 로서 약 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 정도의 온도를 보였다. 이는 실내체육관의 난방 최대 설정온도가 $30\text{ }^\circ\text{C}$ 이기 때문에 그 이상으로 온도를 올리기에는 어려운 점이 있었다. 상대습도는 $15\sim20\%$ 로서 상당히 낮은 편이었다. 베이크 아웃이 수행되는 기간 동안의 실외 온도는 $-10\sim-5\text{ }^\circ\text{C}$ 이었다.

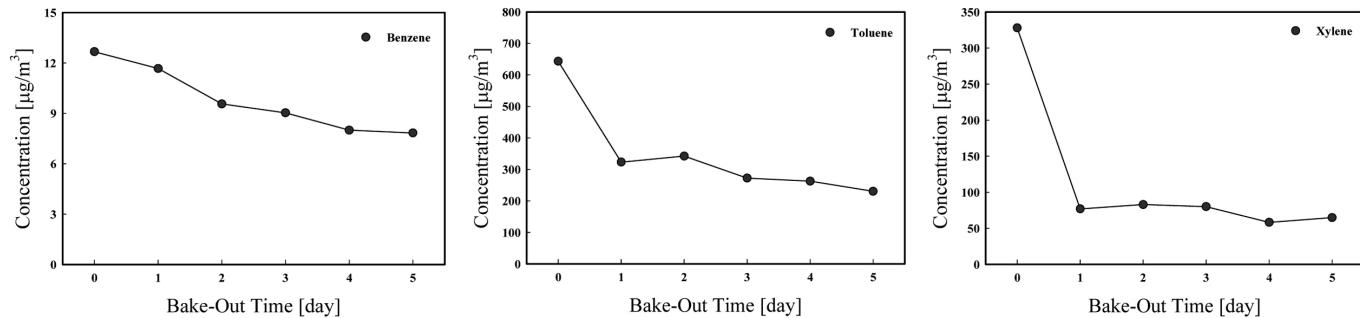


Figure 3. Decrease of BTX concentration with bake-out time.

Table 1. Analytical Condition of ATD and GC/MS

Parameter	Operating conditions
ATD	
Model	Perkin Elmer, TurboMatrix ATD 650
Column Head Pressure	10.0 psi
Transfer Temperature	230 °C
Valve Temperature	200 °C (purge 1 min)
Desorb	295 °C, 10 min, 45 mL/min
Trap Temperature	-30~325 °C, 40 °C/s (Trap Hold 5 min)
Tube Temperature	300 °C
Split	Outlet split (10 : 1)
GC/MS	
Model	Agilent 6890 A/5973 N
Column	Capillary HP-1 (60 m × 320 µm × 1.00 µm)
Carrier Gas and Flow rate	He (99.99%), 1.5 mL/min
Initial Temperature (Oven)	40 °C (5 min)
Temperature Program (Oven)	5 °C/min 170 °C (23 min)
Final Temperature (Oven)	280 °C (0 min)
Injection volume	2 µL
EI Condition	70 eV
Source	230 °C
Quadrupole	150 °C
Mass range	TIC (scan), 35~350 amu

Table 2. Analytical Condition of HPLC

Parameter	Operating conditions
Model	Shimadzu LC-10AD
Column type	ACE 5C18
Detector	UV-Vis. absorbance detector (at 360 nm)
Mobile phase	Acetonitrile : Water = 60 : 40 (v/v)
Flow rate	1.0 mL/min
Injection volume	20 µL

3.2. VOCs 농도 변화

5일간 베이크 아웃을 실시한 후 벤젠, 툴루엔, 자일렌(BTX)의 농도 변화를 Figure 3에 나타내었다. 신축 실내체육관에 대한 실내공기질 기준치가 없는 관계로 환경부의 신축공동주택 기준치와 비교하면 벤젠의 경우 환경부의 신축공동주택 기준치인 30 µg/m³보다 낮게 나왔으며, 베이크 아웃 실시 5일 후 베이크 아웃을 실시하기 전 농도에 비해 약 38.2%의 농도 감소를 보였다. 이는 H. Cho 등의 연구 결과와 비교할 경우 저감률이 86.24%인 테 비해 낮은 결과이지만 베이크 아웃 방법 및 측정 기간이 다르고 대상시설이 공동주택이기 때문에 다른 결과를 보인 것으로 판단된다[10]. 툴루엔의 경우 환경부의 신축

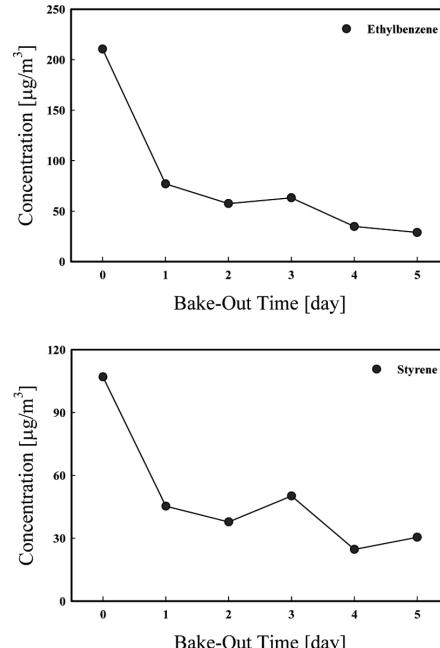


Figure 4. Decrease of ethylbenzene and styrene concentration with bake-out time.

공동주택 기준치인 1000 µg/m³보다 낮게 나왔으며 베이크 아웃 실시 첫날부터 많은 양이 저감되는 것을 확인할 수 있었다. 벤젠과 비교하면 5일간의 베이크 아웃 실시 후 약 64.2%의 농도 저감효과가 나타나 벤젠에 비해 툴루엔의 저감효과가 크게 나타난 것으로 확인되었다. 자일렌의 경우 저감률이 80.2%로써 에틸벤젠과 유사한 저감률을 보였으며 환경부의 신축공동주택 기준치인 700 µg/m³보다 낮은 농도를 유지하고 있었다.

5일간 베이크 아웃을 실시한 후 에틸벤젠과 스티렌의 농도변화를 Figure 4에 나타내었다. 에틸벤젠은 농도 저감률이 86.3%로써 다른 개별 VOC에 비해 상당히 높은 제거율을 보였는데 이는 H. Cho 등의 연구 결과와도 유사한 경향을 보임을 알 수 있었으며 환경부의 신축 공동주택 기준치인 360 µg/m³을 만족하고 있었다[10]. 스티렌의 경우는 71.5%의 저감률을 보였으며 환경부의 신축공동주택 기준치인 300 µg/m³보다 낮은 농도를 보이고 있었다.

실내체육관은 초등학생들이 사용할 공간이기 때문에 환경부의 신축공동주택 기준치를 적용하기에는 무리가 있으며 이보다는 더 엄격한 기준이 요구된다. 따라서 환경부의 다중이용시설 실내공기질 기준치를 적용하여 베이크 아웃에 따른 총휘발성유기화합물(TVOC)의 농

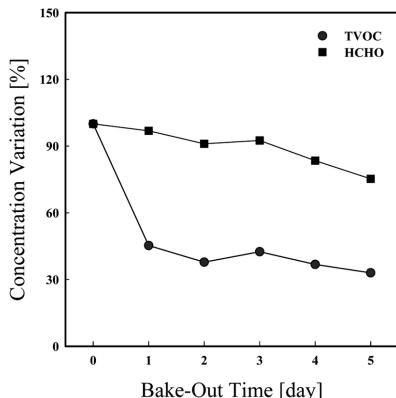


Figure 5. Decrease of TVOC and HCHO concentration with bake-out time.

도 변화를 살펴보았다. 여기서 총휘발성유기화합물이란 틀루엔 표준 시료의 검량선으로부터 크로마토그램상의 n-헥산에서 n-헥사데카지의 휘발성유기화합물의 중량을 식 (1)에 의해 틀루엔으로 환산하여 계산한 값이다.

$$A_s = \frac{\text{휘발성유기화합물의 퍼크면적의 합} - \text{톨루엔 검량선의 } y\text{-절편}}{\text{톨루엔 검량선의 기울기}} \quad (1)$$

Figure 5에서 보는 바와 같이 베이크 아웃이 실시되기 전의 농도를 100이라고 하고 5일 동안 베이크 아웃이 실시된 후의 농도 저감률을 보면 약 67%의 제거율을 보이는 것으로 나왔다. 실내체육관을 대상으로 베이크 아웃을 연구한 기준 논문이 없어 신축 공동주택의 베이크 아웃 연구결과와 비교해 보면 C. Chun 등의 연구에서는 3~10일간 베이크 아웃을 실시했을 때 휘발성유기화합물의 제거율이 베이크 아웃의 방법에 따라 차이가 있기 때문에 20~80%의 제거효과가 있는 것으로 나타났으며[11], E. Park 등의 연구에서는 베이크 아웃을 1주 일 실시했을 때는 11%, 2주일 실시했을 때는 69%의 제거효과가 있는 것으로 나타나 베이크 아웃 대상시설, 난방 온도 및 베이크 아웃 방법, 베이크 아웃 당시 실내로 유입되는 외기의 양, 실내에 존재하는 오염물질의 초기 농도 등에 따라 베이크 아웃에 의한 오염물질의 제거효과는 상당히 다르게 나타날 수 있다는 것을 확인하였다[12]. 총휘발성유기화합물의 경우 5일간의 베이크 아웃을 실시한 후에도 학교보건법에서 정한 기준치인 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높게 나와 장기간의 베이크 아웃과 환기가 요구됨을 확인하였다. 본 연구에서는 베이크 아웃의 기간에 따른 제거효과를 확인하기 위해 10일 이상의 연구를 진행하기로 하였으나 현장의 여건상 5일 밖에 베이크 아웃을 수행할 수 없었다.

3.3. 포름알데히드 농도 변화

포름알데히드의 경우 5일간 베이크 아웃을 실시했을 때 Figure 5에서 보는 바와 같이 약 24.7%의 저감률을 보여 휘발성유기화합물보다는 제거율이 낮게 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 H. Cho 등의 연구결과에서는 47.48%, C. Chun 등의 연구에서는 10~80%, E. Park 등의 연구에서는 10~48%의 저감률을 보여 낮은 제거효과를 보였지만 M. Kim 등의 연구결과인 23%와 비교하면 비슷한 제거율을 보임을 알 수 있다[10-13]. 특히 포름알데히드의 경우에는 물에 잘 녹기 때문에 실내의 습도에 따라서 방산되는 양이 달라질 수 있는데 본 연구를 수행하는 기간 중에는 상대습도가 15~20%로 상당히 낮았기 때문에 포름

알데히드의 제거율이 휘발성유기화합물의 제거율보다는 낮게 나온 것으로 사료된다. 포름알데히드의 경우 베이크 아웃이 진행됨에 따라 지속적인 농도 감소를 보이기보다는 증가와 감소를 반복하면서 장기간에 걸쳐 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타나며[10] 단기간의 베이크 아웃에서는 포름알데히드보다는 휘발성유기화합물의 제거에 좀 더 효과적일 것으로 사료된다. 또한 겨울철 보다는 상대적으로 습도가 높은 여름철에 베이크 아웃을 진행할 경우 포름알데히드 제거에 있어서 좀 더 효과적일 것으로 판단된다.

일반적으로 베이크 아웃 이후에도 오염물질의 지속적인 재방산에 의해 실내의 오염물질의 농도 증가가 보고되고 있기 때문에 쾌적한 실내공기질을 유지하기 위해서는 장기간에 걸친 베이크 아웃과 더불어 주기적인 환기 및 강제환기가 요구되어진다[14]. 특히, 베이크 아웃 중 창문을 개방하여 자연환기에 의해 실내에서 발생된 오염물질을 실외로 방출하기 위한 환기량을 지속적으로 확보하기 어렵기 때문에 강제환기를 병행하여 베이크 아웃을 실시한다면 좀 더 효과적으로 실내의 오염물질을 제거할 수 있으리라 판단된다.

4. 결 론

자동 베이크 아웃 시스템을 이용하여 실내 체육관을 대상으로 5일간 베이크 아웃을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 베이크 아웃에 의한 각각의 휘발성유기화합물의 농도 저감률은 벤젠의 경우 38.2%, 틀루엔 64.2%, 에틸벤젠 86.3%, 자일렌 80.2%, 스티렌 71.5%의 저감률을 보였으며 환경부의 신축공동주택 실내공기질 기준치를 만족하는 것으로 나타났다.

2) 베이크 아웃에 의한 총휘발성유기화합물의 저감률은 67.0%이었으나 환경부의 다중이용시설 등의 실내공기질 기준치나 교육과학기술부의 학교보건법에서 정한 기준치보다는 높게 나와 장기간의 베이크 아웃과 환기가 요구됨을 알 수 있었다.

3) 포름알데히드의 경우 24.7%의 저감률을 보였는데 이는 휘발성유기화합물에 비하면 상당히 낮은 제거율로서 베이크 아웃 실시 당시 실내의 상대습도가 낮아 포름알데히드의 방산량이 상대적으로 휘발성유기화합물에 비해 낮았기 때문인 것으로 사료된다.

4) 본 연구에서는 베이크 아웃 기간이 현장 여건으로 인해 5일 밖에 되지 않아 장기간에 걸친 베이크 아웃에 의한 실내 오염물질 제거효과에 대한 지속적인 연구 수행이 요구되며, 적절한 베이크 아웃의 온도 및 방법에 대한 추가적인 연구를 통해 자동 개폐장치를 이용한 효과적인 베이크 아웃 시스템을 도출할 수 있을 것으로 사료된다.

감 사

본 연구는 2011년도 김포대학의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Ministry of Environment, Exposure Assessment Guide (2001).
- S. C. Lee and L. Y. Chang, *Chemosphere*, **40**, 109 (2000).
- Ministry of Education, Science, and Technology, Management Manual for Sanitation and Food Hygiene in School Building (2006).
- Y. Kim, Y. Roh, S. Hong, C. Lee, H. Jun, J. Kim, and J. Cho, *J. of Korean Soc. for Indoor Env.*, **1**, 144 (2005).

5. S. Jang, S. Lee, S. Yoo, K. Jung, and J. Ryu, *J. of Korean Soc. for Indoor Env.*, **1**, 12 (2004).
6. B. Seo, M. Jeong, J. Jeon, and H. Shin, *J. of Korean Soc. for Indoor Env.*, **3**, 158 (2006).
7. H. Shin, C. Yeo, A. Byun, Y. Ahn, J. Lee, H. Park, B. Kim, K. Lee, and T. Kang, *J. of Korean Soc. for Indoor Env.*, **1**, 221 (2005).
8. J. Sohn, S. Yoon, Y. Kim, Y. Roh, C. Lee, B. Son, W. Yang, Y. Lee, H. Choi, and J. Lee, *J. of Korean Soc. for Indoor Env.*, **3**, 54 (2006).
9. S. An, M. Kim, O. Kim, Y. Lee, C. Na, C. Lee, and J. Park, *J. of Korean Soc. for Indoor Env.*, **3**, 367 (2006).
10. H. Cho, Y. Park, B. Yoo, and C. Hong, *Proceedings of the Korean Housing Association*, **15**, 319 (2004).
11. C. Chun, S. Kim, J. Sim, and W. Jo, Summer Proceedings of SAREK, 1001 (2005).
12. E. Park, D. Kang, D. Choi, M. Sung, M. Yeo, and K. Kim, Winter Proceedings of SAREK, 138 (2006).
13. M. Kim, C. Lee, and S. Jee, Summer Proceedings of SAREK, 710 (2007).
14. K. Noda, *J. Archit. Plan. Environ. Eng.*, **552**, 56 (2002).