

건축자재 적용방안에 따른 실내공기오염물질 방출량 비교 연구

A Comparative Study on the Indoor Air Pollutant Emission according to Construction Processing of Building Materials

유형규* 박진철** 이언구***
Yu, Hyung-Kyu Park, Jin-Chul Rhee, Eon-Ku

Abstract

Indoor air quality (IAQ) problem in newly-constructed multi-family houses becomes serious social problem that threatens people health such as Sick Building Syndrome (SBS) and Sick House Syndrome (SHS). Formaldehyde and total volatile organic compounds (TVOC) from building materials have been known as main causes of IAQ problem in these houses. Because multi-family houses are built in large quantities in a similar manner, selection of inappropriate building materials and method seriously affect IAQ adversely.

In this study, building materials classified by their ingredients and usage are tested to understand formaldehyde and TVOC emission characteristics. Among these materials, with test result of emission intensity and their feature, building materials are selected and 4 types multi-layers building materials are made equally with actual construction methods, and experimented emission intensity. After that, two Mock-Up laboratory which suppose bedroom and living room or remodelling are made. In this Mock-Up laboratory, material that TVOC emission intensity is small applied to A Room and big to B Room, and are compared difference.

키워드 : 건축자재, 복합자재, 소형챔버, 폼알데하이드, 총휘발성유기화합물, 방출량

Keywords : Building Materials, Multi-layers Building Materials, Small Chamber, Formaldehyde, TVOC, Emission

1. 서 론

1.1 연구의 배경

2000년 인구주택 총 조사에 따르면, 전국의 주택은 단독주택이 36.8%, 아파트, 47.3%, 연립주택 7.4%, 다세대주택 4.1%¹⁾를 차지하며, 2004년 주택건설 실적은 아파트와 연립주택을 포함한 공동주택이 전체 주택의 92.6%²⁾로 공동주택이 주택건설에 차지하는 비중이 매우 크다.

공동주택에서의 실내공기오염은 각종 건축자재, 접착제 등에서 방출되는 폼알데하이드와 휘발성유기화합물이 가장 큰 원인으로 알려져 있으며, 각 세대는 동일한 공법과 건축자재가 사용되기 때문에, 잘못된 공법과 건축자재로 인한 피해는 일반 건물과 비교하여 매우 심각하게 나타날 수 있다.

2004년 5월 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법의 제정 이후로 건축자재에서 방출되는 실내공기오염물질들로 인한 공동주택 입주민의 피해를 줄이기 위한 연구가 건설업체를 포함한 건축자재 생산업체, 국공립 및 민간 연구기관 그리고 학교 등에서 다양하게 이루어지고 있다. 특히 건축자재에서 방출되는 실내공기오염물질 방출강도 시험이 국내 여러 연구기관들에 의해 수행되고 있는데, 이러한 연구 결과를 효과적으로 이용하기 위해서는 시험을 수행하는 연구기관들을 중심으로 건축자재를 종류별, 성분별로 분류체계를 설정하여 데이터베이스화 하고, 지속적인 시험과 관리가 필요하다. 뿐만 아니라 공동주택의 내부가 여러 건축자재들이 복합적으로 구성됨에 따라 마감조합에 따른 오염물질 방출특성의 파악이 필요하다. 이러한 데이터를 바탕으로 건축자재 생산업체에서는 건축자재에서 방출되는 인체에 유해한 물질을 줄여나가는 노력을 기울여야 하며, 오염물질이 저감된 건축자재 사용이

* 정희원, 대림산업(주) 기술연구소, 공학박사

** 정희원, 중앙대학교 건축학부 부교수, 공학박사

*** 정희원, 중앙대학교 건축학부 교수, 건축학박사

본 연구는 2004년도 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업 (주거건물의 실내공기질 향상을 위한 성능평가 및 지침 프로그램 개발, 013-041-035)에 의한 것임.

1) http://kosis.nso.go.kr/cgi-bin/sws_999.cgi?ID=DT_1JU0009&IDTYPE=3&A_LANG=1&FPUB=3&SELITEM=0.1.2.3.4.5.6.7.

2) http://kosis.nso.go.kr/cgi-bin/sws_999.cgi?ID=DT_1G22&IDTYPE=3&A_LANG=1&FPUB=3&SELITEM=0.1.2.3.4.

장려되어야 한다. 또한 건축시공 전반에 걸쳐 건축자재에 따른 시공방법 및 과정에 대한 실내공기질 관점에서의 검토와 개선이 필요하다.

1.2 연구의 내용 및 범위

본 연구에서는 실내공기오염물질 방출특성과 시공방법이 다른 건축자재를 두개의 Mock-Up 실험실에 적용하여 시공과정에서의 실내공기오염물질 방출량 변화를 살펴보았다. 첫째, 벽과 바닥마감에 사용되는 건축자재를 대상으로 소형챔버를 이용하여 실내공기오염물질 방출강도시험을 실시하였다. 둘째, 방출강도 시험을 실시한 건축자재 중에서 시공방법과 오염물질 방출량 및 특성이 다른 건축자재로 구성된 벽 복합자재 2개, 바닥 복합자재 2개의 총 4개 시편을 제작하여 건축자재 조합으로 인한 오염물질 방출특성을 파악하였다. 셋째, 신축공동주택의 단위 공간을 재현한 두개의 Mock-Up 실험실에 복합자재 실험에 사용한 건축자재를 시공방법 및 오염물질 방출량에 따라 구분·적용하여 오염물질 방출량 변화를 비교하였다. 그림 1에 본 연구의 흐름도를 나타내었다.

본 연구의 측정 및 분석은 2004년 6월 환경부가 제정한 “실내공기질공정시험방법”을 준수하였다. 대상 실내공기오염물질은 “다중이용시설 등의 실내공기질 관리법”의 측정 항목 중 폼알데하이드와 TVOC로 하였으며, HPLC 및 GC/MS/TDS를 통해 정밀 분석하였다.

2. 실내공기오염

2.1 실내공기오염

실내공기오염이란 다양한 실내공간에서 공기가 오염된 상태를 말하는데, 그 원인은 내부와 외부로부터의 매우 복합적인 오염원에 의해 야기되며, 그 영향은 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아니더라도 분명히 건강에 영향을 미치고 있는 것으로 나타나고 있다. 현대인들은 하루 중 대부분의 시간을 실내에서 생활하고 있고, 실내에서 발생하는 오염물질은 인체에 많은 영향을 미치고 있다. 따라서 실내오염 물질에 의한 피해정도는 실외에 비해 매우 크다고 할 수 있다. 실내에서 방출되는 오염물질은 실외에 비해 폐에 전달될 확률이 1000배나 높아 실내 오염을 20%만 줄여도 급성 기관지 질환으로 인한 사망률을 최소한 4~8% 줄일 수 있다는 것이 세계보건기구의 권고이다.

실내오염의 발생원으로는 연소과정, 실내에서의 흡연, 오염된 외부공기의 실내유입 등이 있으며, 신축공동주택의 경우는 건축물의 기밀화와 고단열화를 위해 사용되는 내장재와 바닥의 소음 저감을 위해 사용하는 카펫 등의 건축자재로부터 수많은 유해화학물질이 발생되고 있다. 또한, 건축물의 유지와 관리 등 일련의 과정에 사용되는 방향제, 목재 보존제, 왁스 등도 실내오염의 중요한 발생원이다. 이러한 실내공기오염물질은 사람들의 호흡기와 순환기에 영향을 미치며, 특히 VOCs 중의 일부 물질은 발암성을 내포하고 있다.³⁾

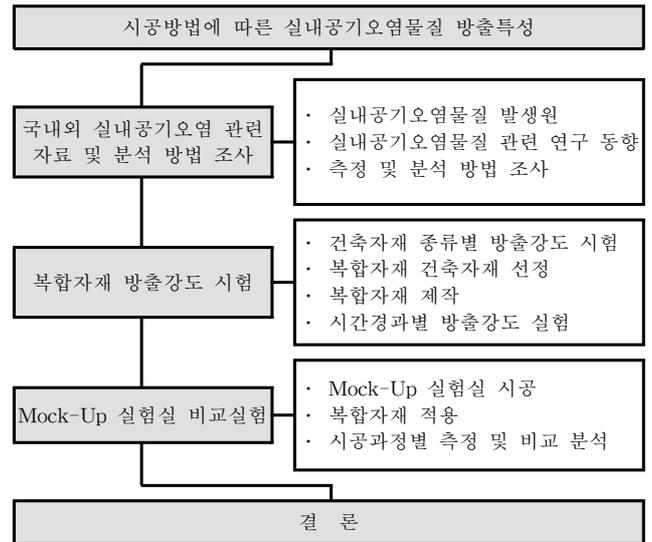


그림 1. 연구흐름도

2.2 실내공기오염물질 관련 연구동향

국내의 실내공기질(IAQ : Indoor Air Quality)에 관한 연구는 1980년대 후반부터 소수의 연구자에 의해서 진행되어 왔으나, 2004년 5월 다중이용시설 등의 실내공기질 관리법의 제정 전후로 관련 연구가 활발히 진행되고 있다. 1990년 이전의 실내공기질 연구는 주로 이산화질소(NO₂)의 측정방법과 개인용 측정기구를 이용한 주택(거실, 주방) 농도, 실외농도 및 개인 노출량을 제시하였다. 이후, 1990년대 중반까지는 대부분 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂), 총부유먼지(TSP)등 몇몇 오염물질에 관한 조사가 부분적으로 수행되어 왔고, 최근에는 미세먼지(PM10)와 중금속(Heavy Metal)을 비롯하여 다환방향족탄화수소(PAHs), 폼알데하이드(HCHO), 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOCs), 환경담배연기(ETS), 악취(Odor), 석면(Asbestos), 라돈(Rn), 세균(Microbe) 등 특수 또는 미량의 유해오염물질에 대한 조사가 보고되고 있다. 특히, 폼알데하이드와 VOCs는 발암성과 유해성을 내포하고 있어 최근 크게 문제시되고 있으며, 공동주택, 주택, 사무실, 식당, 지하상가, 지하주차장, 백화점 등과 건축자재를 대상으로 실내 VOCs에 대한 연구가 진행되고 있다.

최근 공동주택의 폼알데하이드 및 VOCs와 관련한 건축자재 연구로 유형규(2004)⁴⁾는 친환경 건축자재 시험방법에 맞는 시험장치를 제작하여, 폼알데하이드와 TVOC를 중심으로 벽지, 바닥재, 가구재 등 건축자재에서 발생하는 오염물질방출량을 측정하였고, 이홍석(2005)⁵⁾은 국내에서 생산 판매되는 건축자재에 대하여 PVC벽지 27개, Non-PVC벽지 11개, 기타벽지 7개를 대상으로, PVC바닥

3) 유형규, 신축공동주택 실내공기오염물질의 발생원인 및 방출특성에 관한 실험 연구, 중앙대학교 박사학위 논문, 2005, p.13

4) 실내건축자재 폼알데하이드 및 휘발성유기화합물 방출 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 7호, 2005. 07, pp.141-148

5) 건축자재별 오염물질 방출강도 특성 연구, 대한건축학회 창립60주년기념 학술발표대회 논문집 제25권 제1호, 2005. 10, pp.95-98

재 19개, 마루재 18개, 기타 바닥재 2개를 대상으로 방출강도 및 시간간격에 따른 방출강도 특성을 파악하였다. 복합자재와 관련한 연구로 박준석(2005)⁶⁾은 복합자재에서의 VOCs 방출량 예측을 위하여 공동주택의 벽과 바닥을 대상으로 기존 연구를 통해 얻어진 건축자재의 VOCs 확산계수와 Fick의 확산법칙을 이용하여 VOCs 방출량을 예측하였고, 유형규(2005)⁷⁾는 건축공간에서 실내에 면하는 비율이 높은 벽과 바닥 등을 실제 시공과 동일한 조합으로 복합자재를 제작하여 방출강도와 특성을 분석하여 건축자재 중 실내공기에 큰 영향을 미치는 주요 건축자재를 파악하고, 시간 경과에 따른 방출강도 변화를 분석하여 예측함수를 작성하였다. Mock-Up 실험과 관련한 연구로 최정민(2005)⁸⁾은 동계 시공시 공동주택 침실 및 거실에 대하여 복합공정별 시공완료시점 및 자재재질에 따라 폼알데하이드와 휘발성유기화합물을 측정하고 방출량을 분석하여, 시간경과에 따른 오염물질 농도변화를 분석하였고, 방승기(2005)⁹⁾는 실제 주택에 마루와 가구를 설치하고 시간경과에 따른 마루 및 가구에서 발생하는 실내 휘발성유기화합물의 농도를 측정 후, 개별 VOCs 농도 및 BTEX 농도 예측식을 제안하였다. 유형규(2006)¹⁰⁾는 건축자재 방출강도 시험과 함께 Mock-Up 실험실과 실물 원룸주거를 건설하여, 시공과정 중의 실내공기오염물질 방출량 변화를 분석함으로써, 실내공기오염의 원인이 되는 건축자재 및 시공방법을 파악하였다.

기존 연구를 살펴본 결과 공동주택 실내공기질과 관련한 연구는 크게 건축자재 방출강도 연구, 복합자재 특성에 관한 연구, Mock-Up 실험 및 현장 측정에 관한 연구, 방출량 예측에 관한 연구로 분류 할 수 있다. 그러나 각각의 개별적인 연구는 다음과 같은 한계를 가진다. 건축자재 방출강도 시험은 건축자재의 양이 건축자재 성상에 따라 동일하고 용도에 관계없이 표면이 노출된 상태로 시험하기 때문에, 건축자재마다 사용량과 노출 표면적이 다른 실제 공동주택의 실내공기질의 원인이 되는 건축자재를 판별하기 어렵고, 복합자재 연구는 건축마감미 주로 건축자재의 층으로 이루어지므로 가려진 노출면이 가려진 건축재료의 영향을 파악하기 어려우며, 온도, 습도, 기류, 환기 등의 조건이 정확히 제어되는 실험실 조건이므로 실제 건축공간에서의 상황과는 다른 결과가 나타날 수 있다. 또한 Mock-Up 실험실 및 현장 측정 연구는 여러 건축자재들이 복합적으로 시공됨에 따라 각각의 건축

자재들이 미치는 영향 정도를 파악하기 어렵다. 따라서 건축자재, 복합자재, Mock-Up 실험 및 현장 측정을 일련의 계획에 따른 종합적인 연구가 필요하다.

3. 복합자재 실내공기오염물질 방출강도 실험

3.1. 복합자재 방출강도 실험 개요

건축자재에서 방출되는 실내공기오염물질은 공동주택의 공간을 이루는 벽, 바닥, 천장 등의 건축부위와 실내에서 사용하는 각종 가구와 집기들에서 방출되어 복합적인 형태로 나타난다. 특히, 공동주택의 벽과 같은 건축마감부위는 콘크리트, 도배플, 도배지 그리고 필요한 경우 석고보드와 초배벽지가 순서에 따라 구성된다. 따라서 실내로 노출되어 있는 도배지의 콘크리트, 석고보드, 도배플 등에서 방출되는 오염물질은 상대적으로 그 영향력이 크지 않을 수 있다. 따라서 개별 건축자재와 이들의 마감조합에 따른 오염물질 방출특성의 파악이 필요하다.

본 연구에서는 복합자재와 Mock-Up 실험실에 적용할 건축자재 선정에 위하여 한국공기청정협회에서 제정한 소형챔버법에 따라 건축자재 오염물질 방출강도 시험을 실시하였다. 시험한 건축자재는 벽지(종이벽지 12종, PVC벽지 26종, 초배벽지 5종), 바닥재(온돌마루재 5종, 립바닥재 3종), 접착제(도배용 5종, 바닥마루재용 5종, 립접착제 2종, 기타 13종)를 대상으로 실시하였으며, 이 중에서 시공방법과 TVOC 방출강도¹¹⁾가 서로 구별되는 건축자재를 선정하여 총 4개의 복합자재 시편을 제작하였다. 표 1에 복합자재를 구성하는 각 건축자재의 목록과 방출강도 시험결과를 표시하였다.

표 1. 복합자재에 사용된 건축자재 및 방출강도

복합자재	적용 건축자재	HCHO (mg/m ³ ·h)	TVOC (mg/m ³ ·h)
복합-A (벽)	레미탈	0.002	0.005
	석고보드	0.005	0.173
	도배플	0.011	0.008
	숏초배벽지	0.007	0.001
	종이벽지	0.003	0.102
복합-B (벽)	레미탈	0.002	0.005
	석고보드	0.005	0.173
	바인더	0.029	1.050
	도배플	0.011	0.008
	일반초배벽지	0.002	0.004
복합-C (바닥)	PVC벽지	0.002	4.726
	레미탈	0.002	0.005
	온돌마루접착제	0.006	0.063
복합-D (바닥)	온돌마루	0.007	0.096
	레미탈	0.002	0.005
	접착제	0.043	12.746
	립바닥재	0.004	0.270

11) 건축자재 시험결과, 벽지의 폼알데하이드 방출강도는 모두 낮게

6) 복합자재에서의 VOCs 방출량 예측에 관한 연구, 대한설비공학회 2005동계학술발표대회 논문집 pp. 9-14

7) 건축자재 마감구성에 따른 실내공기오염물질 방출특성에 관한 연구, 대한설비공학회 2005동계학술발표대회 논문집 pp. 3-8

8) 신축공동주택 동계시공 마감공정에 따른 실내공기질 측정에 관한 연구, 대한건축학회 창립60주년기념 학술발표대회 논문집 제25권 제1호, 2005. 10, pp.47-50

9) 온돌용 마루와 가구에서 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs) 농도 감소 예측에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 6호, 2005. 06, pp.125-132

10) 실물 주거 시공을 통한 실내공기질에 영향을 미치는 주요 건축자재 및 시공방법에 관한 연구, 설비공학논문집 제18권 제 3호, 2006. 03, pp.262-269

3.2. 복합자재 방출강도 시편제작

복합-A는 TVOC 방출강도가 대체로 낮게 나타난 종이벽지 중 하나로 시공하였으며, 초배벽지는 친환경 소재로 알려진 참숯을 바른 초배벽지를 적용하였다. 종이벽지의 시공은 일반적으로 온통바름¹²⁾으로 한다. 실제 벽과 동일하게 구성하기 위하여 도배풀, 석고보드, 레미탈(콘크리트 벽체)를 적용하였다. 복합-B는 TVOC 방출강도가 대체로 높게 나타난 PVC벽지 중 하나로 제작하였으며, 초배벽지는 일반 초배벽지를 적용하였다. PVC벽지는 일반적으로 봉투바름¹³⁾으로 시공하기 때문에 벽지와 석고보드 벽면의 부착을 강하게 하는 바인더를 시공하였다. 도배풀, 석고보드, 레미탈 등은 복합-A와 동일한 제품을 적용하였다. 복합-C는 온돌마루바닥재 중 폼알데하이드와 TVOC 방출강도가 낮게 나타난 제품으로 제작하였으며, 온돌마루접착제는 TVOC 방출강도가 낮은 Epoxy를 주성분으로 하는 제품을 선정하였다. 시공은 콘크리트 위에 접착제 도포 후, 마루판을 한 장씩 고무망치로 두드려 붙인다. 복합-D는 TVOC 방출강도는 높지 않으나, 시공시 PIB(PolyIsoButylene; 합성고무)를 주성분으로 하는 접착제를 사용하고 고급거실과 사무실에 적용되는 주재료가 천연재료인 립바닥재를 적용하였다. 시공은 콘크리트 바닥면과 립바닥재면에 접착제를 바르고 일정시간 건조시킨 다음 접착제가 말라진 면끼리 눌러 접착시킨다.

각 복합자재 노출면은 시험법의 판, 판넬, 보드 형태와, 롤형태의 시료부하율인 2.0으로 맞추었다. 이를 위하여 165 × 165 × 50 mm 크기의 콘크리트를 제작하여 건축자재를 양면에 시공하였다. 완성된 시편은 그림 2와 같이 스테인리스로 제작한 시료고정틀에 고정된 후 소형챔버에 설치하여 시간간격을 두고 20일 동안 측정하였다. 그림 3에 완성된 복합자재를 나타내었다

3.3. 복합자재 방출강도 실험결과 및 분석

표 2는 각 복합자재의 1일에서 20일까지 시간간격에 따른 폼알데하이드와 TVOC 방출강도 결과이다. 측정 결과, 7일차에서 폼알데하이드는 복합자재 4개 모두 친환경 건축자재 단체품질 인증등급 중 최우수로 나타났고 방출강도가 변화가 크게 나타나지 않아 측정을 중지하였다.

각 복합자재의 폼알데하이드 방출량은 개별 건축자재 시험결과와 큰 차이가 나타나지 않았다. 개별 건축자재 시험일인 7일을 기준으로 복합-C(온돌마루, 0.011mg/m³·h) > 복합-A(종이벽지, 0.006mg/m³·h) > 복합-D(립바닥재, 0.004mg/m³·h) > 복합-B(PVC벽지, 0.002mg/m³·h) 순으로 방출강도가 낮게 나타났다.

TVOC 방출강도는 복합자재를 구성하는 개별 건축자재에 따라 뚜렷한 차이가 나타났으며, 20일을 기준으로 복합-D(립바닥재, 2.193mg/m³·h) > 복합-B(PVC벽지, 0.467mg/m³·h) > 복합-C(온돌마루, 0.049mg/m³·h) > 복합-A(종이벽지, 0.020mg/m³·h) 순으로 방출강도가 낮게

표 2. 복합자재 실내공기오염물질 방출강도 실험결과

구분	시간경과	HCHO(mg/m ³ ·h)	TVOC(mg/m ³ ·h)
복합-A (종이벽지)	1일차	0.009	0.219
	3일차	0.004	0.113
	5일차	0.004	0.085
	7일차	0.006	0.069
	10일차		0.048
	15일차		0.026
복합-B (PVC벽지)	1일차	0.003	11.331
	3일차	0.001	5.485
	5일차	0.004	3.581
	7일차	0.002	2.464
	10일차		1.485
	15일차		0.724
복합-C (온돌마루)	1일차	0.015	0.183
	3일차	0.024	0.127
	5일차	0.011	0.099
	7일차	0.011	0.088
	10일차		0.082
	15일차		0.050
복합-D (립바닥재)	1일차	0.002	3.829
	3일차	0.005	3.366
	5일차	0.004	2.886
	7일차	0.004	3.088
	10일차		2.541
	15일차		2.335
20일차		2.193	

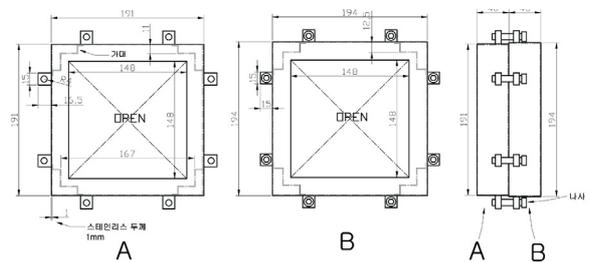


그림 2. 복합자재 시료고정틀



그림 3. 복합-C 시료 및 고정

나타나 선정 기준은 TVOC 방출강도만을 대상으로 하였다.

12) 도배지 바름시 종이에 온통 풀칠하여 바르는 것.
13) 도배지 바름시 종이 주위에 풀칠하여 바르는 것.

표 3. 개별 건축자재와 복합자재의 방출강도 비교

복합자재	TVOC 多방출 건축자재	개별 건축자재 (mg/m ³ ·h)		복합자재 (mg/m ³ ·h)	
		3일차	7일차	3일차	7일차
복합-A	종이벽지	-	0.102	-	0.069
복합-B	PVC벽지	-	4.726	-	2.464
복합-C	온돌마루접착제	0.063	-	0.127	0.088
	온돌마루	-	0.096		
복합-D	접착제	12.746	-	3.366	3.088
	툼바닥재	-	0.270		

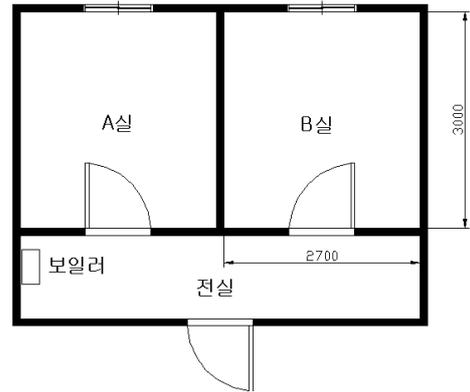


그림 4. Mock-Up 실험실 평면도

나타났다. 또한 20일을 기준으로 PVC벽지는 종이벽지의 23.35배, 툼바닥재는 온돌마루의 44.76배 크게 나타나 건축자재 종류 및 시공방법에 따라 큰 차이가 나타났다.

각 복합자재와 이를 구성하는 건축자재의 크로마토그램을 분석한 결과, TVOC 방출에 가장 큰 영향을 미치는 건축자재는 복합-A는 종이벽지, 복합-B는 PVC벽지, 복합-C는 온돌마루와 접착제 일부, 복합-D는 접착제와 툼바닥재가 실내공기에 영향을 주고 있는 것으로 나타났다. 복합-A와 복합-B의 경우 최종으로 마감된 벽지 이외 초배벽지, 바인더, 도배풀, 석고보드, 콘크리트의 영향은 나타나지 않았다. 이는 벽지 이외 건축자재의 TVOC 방출강도가 약하기 때문에 오염물질이 최종 복합된 벽지 표면을 뚫고 나오지 못한 것으로 판단된다. 복합-C인 온돌마루의 경우 온돌마루 틈 사이로, 복합-D인 툼바닥재의 경우 툼바닥재 이음새 틈으로 각 접착제의 오염물질이 방출되어 최종마감재와 함께 검출된 것으로 판단된다.

표 3은 각 복합자재 TVOC 방출에 큰 영향을 준 개별 건축자재와 복합자재 방출강도를 비교한 것으로 개별 건축자재 방출강도보다 복합자재의 방출강도가 낮게 나타났다. 이는 복합-A와 복합-B의 경우 시공과정 중에 도배풀 등의 사용으로 벽지 내 수분이 증가하여 재료 내 분자 활동이 활성화되었고, 건조되는 과정에서 수분의 증발과 동시에 오염물질을 조기에 방출한 것으로 추정된다. 복합-C의 3일차는 온돌마루에서 방출되는 오염물질이 영향으로 온돌마루접착제보다 방출강도가 높았으나 7일차에서는 개별 건축자재보다도 낮은 방출강도를 나타내었다. 복합-D는 방출강도가 매우 강한 접착제를 사용하였음에도 접착제 표면이 툼바닥재에 가리워져 방출강도가 현저히 낮게 나타난 것으로 판단된다.

오염물질이 다량으로 검출된 복합-B는 주 오염원인 PVC벽지 표면이 공기 중에 노출되어 조기에 다량의 오염물질을 배출되기 때문에 장기적인 관점에서 실내공기에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 예상된다. 그러나 복합-D는 다른 복합자재와 비교하여 방출강도 감소폭이 작아 주 오염원인 접착제가 툼바닥재에 가리워져 지속적으로 오염물질을 방출시킬 위험이 있을 것으로 판단된다.



그림 5. A실 온돌마루 시공



그림 6. B실 툼바닥 시공

4. 건축자재 적용에 따른 실내공기오염물질 방출량변화

4.1. Mock-Up 실험실 개요

본 연구에서는 단위주거공간에 건축자재 적용시 종류와 시공방법에 따른 실내공기오염물질 방출량 변화를 실험을 통해 관찰하였다. 이를 위하여 공동주택의 단위 공간인 침실과 거실 또는 리모델링으로 가정된 Mock-Up 실험실을 제작하였다. 실험실은 A실, B실과 전실로 구성되어 있고, 보일러와 환기시스템이 설치되어 있다. Mock-Up 실험실의 평면도는 그림 4와 같다. 실험실에 공통으로 사용된 자재는 도배풀, 석고보드, 석고퍼터, 레미탈로 복합자재 시험에서 사용한 건축자재와 동일하다. 도배시공전의 실험실 벽은 석고보드를 시공하고 석고보드 이음부는 퍼터로 마무리 하였다, 바닥은 기존의 레미탈 바닥면이 거칠게 시공되어 있어 바닥재 시공을 용이하게 하기 위하여 레벨콘(14)을 사용하여 바닥면을 평탄하게 하였다.

14) 시멘트의 일종으로 골재, 결합재, 첨가제가 혼합되어 있는 바닥용 미장재로서 물과 혼합시 자체 유동성이 뛰어나 복합 혼손 작업을 하지 않고도 표면 평활성이 발현되는 제품 ; 방출강도시험 미실시

실험실 마감에 적용한 건축자재는 복합자재 실험에 사용된 건축자재와 동일한 것을 사용하였다. A실에는 실내 공기오염물질 방출강도가 낮게 나타난 건축자재인 종이벽지(복합-A)와 온돌마루(복합-C)를 시공하였고, B실에는 실내공기오염물질 방출강도가 높게 나타난 건축자재인 PVC벽지(복합-B), 립바닥재(복합-D)를 적용하였다. 그림 5는 A실에 온돌마루, 그림 6은 B실에 립바닥재를 시공하는 모습이다.

A실과 B실의 마감공사에 소요된 시공비는 도배시공의 경우 B실이 재료비 약 2배, 시공비 약 3배가 소요되었으며, 바닥시공의 경우는 재료비 약 1.5배, 시공비는 동일하게 소요되어 전체적으로 A실의 약 2배 이상의 비용이 소요되었다.

실험은 건축자재 시공과정 및 건물 사용단계를 고려하여 7차례에 걸쳐 실시하였다. 실험 및 각 단계별 시공 후에는 자연환기 및 환기시스템을 이용하여 실내가 최대한 환기되도록 유지하였다. 환기시스템의 용량은 250CMH로 시스템을 최대 가동하였을 경우 Mock-Up 실험실의 환기 횟수는 약 6.7회가 된다. 측정 당시 실내의 온도조건은 각 시공과정에서는 자연실은 상태에서 측정하였으며, 시공이 완료된 후에는 난방을 실시하여 실내온도를 측정조건에 맞게 유지하였다.

4.2 Mock-Up 실험실 측정 결과

실험과정 중에 측정한 외기의 폼알데하이드 및 TVOC 방출량은 각각 $6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $101.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 비교적 공기상태가 깨끗한 것을 확인하였다. 표 4는 A실과 B실의 시공과정별 폼알데하이드 및 TVOC 방출량 변화를 나타낸 것이다.

Mock-Up 실험실의 폼알데하이드 방출량은 벽체 및 바닥시공에서부터 도배시공까지 방출량이 크게 나타났다. 특히, 1차 실험인 벽체 및 바닥시공 후에는 A실과 B실이 각각 $247.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $373.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 개정된 건축 공동주택의 실내공기질 폼알데하이드 권고기준 $210\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 넘는 것으로 나타났다. 외기와 건축자재 방출강도 그리고 복합자재 실험결과에서 폼알데하이드 방출량이 매우 낮게 나타나

결과를 바탕으로 1차 실험에서 폼알데하이드 발생원은 레벨콘으로 추정된다. 레벨콘 시공 후에 환기시스템을 가동하여 지속적인 환기를 실시했음에도 Mock-Up 실험실 내부는 수증기로 가득 차있었고, 눈이 따가워 뜰 수 없을 정도였으며 숨을 쉬기 어려웠다. 이는 인체가 폼알데하이드에 노출되었을 때, 나타나는 반응으로, 레벨콘의 양생과정 중에 매우 많은 양의 폼알데하이드가 발생한 것으로 판단된다. 이후 3차 실험인 바닥재 시공까지 방출량이 계속 감소하였다. 이는 레벨콘에서 발생하는 폼알데하이드 방출량이 시간이 경과함에 따라 감소함과 동시에, 바닥재에 의해 레벨콘 노출면이 가려지게 되어 실내공기로의 방출이 억제되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 A실은 4차 실험인 바닥시공 3일 후, B실은 난방실시 후에 방출량이 다소 증가하였다. A실의 폼알데하이드 방출량 증가 원인은 목재를 원료로 한 온돌마루의 영향으로 판단되며, 난방실시 후에 A실과 B실 모두 방출량이 증가한 것으로 미루어보아 실내 온도의 상승으로 인하여 건축자재 내부의 폼알데하이드가 활성화되어 방출된 것으로 판단된다. 난방실시 이후 지속적으로 온도를 유지하였음에도 6차와 7차 실험에서 폼알데하이드는 증가하지 않았다. 최종 7일차에서는 온돌마루를 사용한 A실이 B실보다 다소 높은 방출량을 나타내었다.

Mock-Up 실험실의 TVOC 방출량은 1차 실험인 벽체 및 바닥시공 후에는 A실과 B실이 각각 $275.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 $290.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반 대기 수준의 매우 적은 방출량을 나타내었다. 그러나 2차 실험인 도배시공 후에는 두 실 모두 급격하게 상승하였는데, 이는 두 실 모두 시공 초기 도배 풀 등으로 인한 수분 증가로 건조와 동시에 많은 양의 오염물질을 일시에 방출되었기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 두실의 방출량 차이는 현저하게 나타났다. 2차 실험 B실의 크로마토그램 분석결과 복합자재 실험의 복합-B와 같이 PVC벽지에서 방출되는 VOCs가 대부분을 차지하고 있었다. 이후 3차에서 4차 실험까지 큰 폭의 일정한 방출량 차이를 두고 큰 변화를 나타내지 않았으나, 난방을 실시한 5차 실험에서 A실은 방출량이 다소 증가하였고, B실은 다소 낮아졌다. 5차 실험 크로마토그램 분석

표 4. Mock-Up 실험실 시공과정별 HCHO 방출량 변화

실험 횟수	시공과정	측정일	A실		B실		온도 (°C)	습도 (%)
			HCHO 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TVOC방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TVOC 방출량 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)		
1차	벽체,바닥시공후	3. 15	247.6	275.7	373.8	291.0	20.8	52.0
2차	도배시공 후	3. 26	166.9	938.3	177.9	16403.3	12.7	64.0
3차	바닥시공 1일후	3. 30	44.5	767.7	58.8	5953.8	14.7	32.0
4차	바닥시공 3일후	4. 01	70.7	857.8	27.4	6410.1	15.7	31.0
5차	난방실시	4. 10	175.7	1438.6	89.8	6379.2	27.2	35.0
6차	난방(7일경과)	4. 17	64.0	454.9	26.7	1615.5	27.2	15.0
7차	난방(14일경과)	4. 24	76.0	528.4	22.1	2004.9	29.3	15.0

결과 A실은 종이벽지와 온돌마루에서 방출되는 VOCs의 양이 크게 증가한 것으로 나타났고, B실은 립바닥재에서 방출되는 오염물질은 크게 증가한 반면, PVC벽지에서 방출되는 오염물질이 크게 감소한 것으로 나타났다. 이는 표 2에서 나타났듯이 다른 건축자재와 비교하여 PVC벽지의 VOCs 감소폭이 크기 때문인 것으로 판단된다. 난방을 실시한 후 7일이 경과한 6차 실험에서 A실과 B실의 방출량이 다시 큰 폭으로 떨어졌다. 이는 실내온도 상승에 따라 재료 내의 분자 활동이 활성화되어 건축자재 내의 많은 오염물질이 배출되었기 때문인 것으로 추정된다.

A실은 시공 시작 약 40일 경과 후인 7차 실험에서 $528.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났으며, B실은 $2004.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 A실의 3.8배 이상으로 나타났다. 이는 약 20일간의 실험기간 차이를 감안한다고 하더라도 복합자재 실험에서 TVOC 방출강도가 벽지 23.35배, 바닥재 44.76배로 나타난 것과 비교하여 그 차이가 매우 크다. 이는 두 실험 조건에서 특히, 환기량의 차이(소형챔버 0.5회/h, Mock-Up : 6.7회/h)가 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

각 실험 단계별 크로마토그램을 분석한 결과, A실의 경우 3차 실험에서 톨루엔 이외 기타 VOCs가 소량 검출된 것을 확인할 수 있었으며, 최종 7차 실험에서는 톨루엔은 다소 증가하였고, 기타 VOCs들이 더욱 감소하였다. B실의 경우 3차 실험에서 톨루엔이 다량 검출되었는데, 이는 립바닥재 시공시 사용된 PIB를 주원료로 하는 접착제로 인한 것이다. 또한 PVC벽지에서 방출되는 다량의 오염물질이 동시에 검출된 것을 확인하였다. 최종 7차 실험에서는 접착제에서 방출되는 톨루엔 및 기타 VOCs는 큰 변화가 없었으나, PVC벽지에서 방출되는 VOCs는 매우 빠르게 방출되어 거의 사라진 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형챔버를 이용하여 공동주택의 벽과 바닥을 구성하는 건축자재 오염물질 방출강도 시험을 실시한 후, 시험결과를 바탕으로 시공방법과 TVOC 방출강도가 서로 구별되는 건축자재를 선정하여 총 4개의 복합자재 시편을 제작하여 실험하였다. 이를 통해 건축자재의 조합으로 인한 오염물질 방출특성을 파악하였으며, 이후 신축공동주택의 단위 공간을 재현한 두개의 Mock-Up 실험실에 각각의 복합자재를 적용하여 오염물질 방출량 변화를 비교하였다. 연구의 결과는 다음과 같다.

- 1) 실험에 사용된 4개 복합자재의 폼알데하이드 방출강도는 개별 건축자재와 비슷한 수준으로 매우 낮게 나타났으며, TVOC 방출강도는 시공 과정 중의 수분의 증가와 건조과정, 그리고 건축자재의 실내 노출 상태의 차이로 인하여 개별 건축자재보다 다소 낮은 방출강도를 나타냈다. 따라서 공동주택 내에 건축자재가 복합적으로 시공될 경우에는 초기에 빠른 속도로 오염물질이 방출될 것으로 예상된다.
- 2) 복합자재 실험 결과, 폼알데하이드 방출강도는 7일을

기준으로 복합-C(온돌마루, $0.011\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) > 복합-A(종이벽지, $0.006\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) > 복합-D(립바닥재, $0.004\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) > 복합-B(PVC벽지, $0.002\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) 순으로 방출강도가 낮게 나타났다. TVOC 방출강도는 20일을 기준으로 복합-D(립바닥재, $2.193\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) > 복합-B(PVC벽지, $0.467\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) > 복합-C(온돌마루, $0.049\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) > 복합-A(종이벽지, $0.020\text{mg}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$) 순으로 방출강도가 낮게 나타났다. 또한 20일을 기준으로 TVOC 방출강도는 PVC벽지가 종이벽지의 23.35배, 립바닥재가 온돌마루의 44.76배로 나타나 건축자재 종류 및 시공방법에 따라 큰 차이를 나타내었다.

- 3) 온돌마루와 립바닥재와 같이 재료사이의 틈이 많은 건축자재의 경우, 접착제 성분이 밖으로 새어 나오는 것으로 나타나 건축자재의 시공방법과 숙련도에 따라 방출량의 차이가 나타날 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 시공시 틈이 발생하는 건축자재의 경우 내부에 시공되는 건축자재의 선정과 시공에 신중을 기해야 한다.
- 4) Mock-Up 실험실 바닥에 시공한 레벨콘은 양생과정에서 다량의 폼알데하이드가 발생하는 것으로 나타났으며, 바닥재 시공 후 급격하게 감소하였다. 그러나 다른 실험을 위해 바닥재를 철거한 후에 다량의 폼알데하이드가 다시 방출되는 것을 확인하였다. 따라서 레벨콘을 사용한 실내의 바닥면이 회손될 경우 다량의 폼알데하이드가 방출될 위험이 있으므로 사용시 신중을 기해야 할 것으로 판단된다.
- 5) Mock-Up 실험실 시공 40일 경과한 후, 폼알데하이드 방출량은 A실이 $76.0\mu\text{g}/\text{m}^3$, B실이 $22.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다소 차이가 나타났다. 이는 건축자재 및 복합자재 방출강도 실험에서 온돌마루의 폼알데하이드가 다소 많았기 때문인 것으로 판단된다. 그러나, 개정된 신축 공동주택의 실내공기질 폼알데하이드 권고기준 $210\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하지 않았다.
- 6) Mock-Up 실험과정 중에 소형챔버보다도 많은 환기(소형챔버 0.5회/h, Mock-Up : 6.7회/h)를 실시하여 시공 40일 경과한 후 TVOC 방출량은 A실은 $528.4\mu\text{g}/\text{m}^3$, B실은 $2004.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 이는 약 20일간의 실험기간 차이를 감안한다고 하더라도 복합자재 실험에서 TVOC 방출강도가 벽지 23.35배, 바닥재 44.76배로 나타난 것과 비교하여 그 차이가 매우 크다. 따라서 환기는 실내공기오염물질의 효과적인 제거 방법 중의 하나인 것으로 판단된다.
- 7) Mock-Up 실험실 B실의 바닥재는 천연재료를 사용하였음에도 TVOC 방출량은 A실의 약 3.8배 높은 것으로 나타났다. 특히 이는 바닥재 자체는 천연재료이나 시공방법에서 오염물질이 다량 방출되는 접착제를 사용한 것이 원인으로 건축자재 자체뿐만 아니라 그에

따른 시공방법까지 고려하여 선정하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. http://kosis.nso.go.kr/cgi-bin/sws_999.cgi
2. 유형규, 신축공동주택 실내공기오염물질의 발생원인 및 방출 특성에 관한 실험 연구, 중앙대학교 박사학위 논문, 2005
3. 유형규, 박진철, 이연구, 실내건축자재 폼알데하이드 및 휘발성유기화합물 방출 특성에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 7호, 2005. 07
4. 이홍석, 박진철, 건축자재별 오염물질 방출강도 특성 연구, 대한건축학회 창립60주년기념 학술발표대회 논문집 제25권 제1호, 2005. 10
5. 박준석, 윤창현, 권경우, 복합자재에서의 VOCs 방출량 예측에 관한 연구, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, 2005, 11
6. 유형규, 박진철, 이연구, 건축자재 마감구성에 따른 실내공기 오염물질 방출특성에 관한 연구, 대한설비공학회 동계학술발표대회 논문집, 2005, 11
7. 최정민, 신축공동주택 동계시공 마감공정에 따른 실내공기질 측정에 관한 연구, 대한건축학회 창립60주년기념 학술발표대회 논문집 제25권 제1호, 2005. 10
8. 방승기, 손장열, 박병윤, 온돌용 마루와 가구에서 발생하는 휘발성유기화합물(VOCs) 농도 감소 예측에 관한 연구, 대한건축학회논문집 계획계 21권 6호, 2005. 06
9. 유형규, 박진철, 이연구, 실물 주거 시공을 통한 실내공기질에 영향을 미치는 주요 건축자재 및 시공방법에 관한 연구, 설비공학논문집 제 18권 제 3호, 2006. 03
10. 유형규, 박진철, 이연구, 신축공동주택에서의 실내공기오염물질방출 저감 프로세스에 관한 연구, 설비공학 논문집, 제 17 권 제 5 호, 2005. 05
11. 박진철, 유형규, 박진철, 이연구, 공동주택에서의 폼알데하이드 및 휘발성 유기화합물 측정연구, 대한건축학회 춘계학술발표대회 논문집(계획계), 제 24 권 제 1 호, 2004. 04
12. 김신도 외, 실내공간의 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs) 특성과약 및 제어방안에 대한 기초조사, 환경부 보고서, 2000. 12
13. 일본규격협회, 소형챔버법[JIS A 1901], 2003
14. M ISO 16000-3 Determination of formaldehyde and other carbonyl compounds - Active sampling method
15. Compendium Method TO-17, Determination of Volatile Organic Compounds in Ambient Air Using Active Sampling Onto Sorbent Tubes.
16. Compendium Method TO-14, Determination Of Volatile Organic Compounds (VOCs) In Ambient Air Using Specially Prepared Canisters With Subsequent Analysis By Gas Chromatography.

(接受: 2005. 11. 3)